

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	2S by designを取り入れた浮体式洋上原子力発電所の堅牢性の強化
Title(English)	
著者(和文)	原大輔
Author(English)	Daisuke Hara
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第12909号, 授与年月日:2024年9月20日, 学位の種別:課程博士, 審査員:相樂 洋,小原 徹,林崎 規託,池上 雅子,木倉 宏成
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第12909号, Conferred date:2024/9/20, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

2024 年度 博士課程学位論文

2S by design を取り入れた
浮体式洋上原子力発電所の堅牢性の強化

東京工業大学

環境・社会理工学院 融合理工学系

原子核工学コース

原 大輔

指導教員 相楽 洋 教授

要旨

原子力安全の向上や原子力平和利用の推進に向けた浮体式洋上原子力発電所（OFNP）の研究が世界的に進められているが、原子力安全性を中心としたプラント概念の技術的成立性に焦点が当てられており、洋上といったこれまでにない設置環境における社会実装に必須となる新たな核セキュリティ・核不拡散面での検討は十分ではない。本論文では、洋上特有の核セキュリティ・核不拡散性（2S）上の新たな脅威に対する応答性を定量評価可能な手法を開発し、2S by design を取り入れた OFNP の堅牢性強化の可能性を明らかにし、堅牢な OFNP 概念を提示した。

本論文は、以下に示す 5 章から構成されている。

第 1 章では、日本のエネルギー社会を取り巻く現状と世界で進められている OFNP の研究開発を概観し、社会実装によるエネルギー社会への貢献が期待できる一方で、洋上特有の 2S 上の課題を指摘した。OFNP の 2S 上の脅威に対する応答性を定量評価可能な手法を開発すること、及び原子力システム設計の初期段階から 2S の観点を統合し効率的かつ効果的に強化する 2S by design を取り入れることにより、OFNP の堅牢性強化の可能性を明らかにし、堅牢な OFNP 概念を提示することを目的として、本研究の位置づけ、意義を述べた。

第 2 章では、非核兵器保有国による OFNP の核拡散リスクを定量化し、洋上特有の輸送や保管を含む核燃料管理や、取り扱う核燃料タイプによるリスク低減効果を明らかにした。第四世代原子力システムの核拡散抵抗性及び核物質防護（GIF/PRPP）評価手法に基づき、輸送及び移送に伴う核拡散リスク、混合酸化物（MOX）燃料や、5%超 20%未満低濃縮ウラン（HALEU）燃料といった高燃焼度燃料の特性を解析可能な評価指標を開発し、陸上原子力発電所（NPP）と比較しながら核拡散抵抗性を定量的に評価した。結果として、核拡散リスク低減のために燃料管理方法は、MOX 新燃料の 10 年から 15 年程度の頻度での一括輸送及び検認することが最も有効であることを明らかにし、高燃焼度化、運転サイクル期間の延長、及び乾式キャスクの使用等による一括輸送も有効であることを示している。これらの燃料管理を行った OFNP と陸上 NPP を比較すると、OFNP の核拡散抵抗性は、検知確率、核分裂性物質タイプ、拡散機会の点で高いことを明らかにした。最後に、核物質転用の経路解析を行い、Safeguards by design による堅牢な OFNP の保障措置システム設計を提示した。

第 3 章では、洋上特有の核セキュリティ上の新たな脅威に対する応答性を定量評価可能な手法を開発し、Security by design による堅牢な OFNP の核物質防護システム設計を提示した。新たな脅威として、遠隔攻撃手段の魚雷を想定し船殻への構造健全性解析を行った。また、脅威への対抗能力として、米国における既往研究と異なり警備要員が致死性武器と先制攻撃権を持たない国家を想定し、船舶移乗による核物質の盗取や妨害破壊行為に対する核セキュリティ性を定量的に評価した。船舶移乗による妨害破壊行為として、核燃料への爆破などにより直接的に燃料損傷させて放射性物質飛散を狙った直接的妨害破壊と、OFNP の安全機能喪失により間接的に燃料損傷させて放射性物質飛散を狙った間接的妨害破壊を評価した。結果として、OFNP 外殻の健全性が担保されるまで魚雷から発出されるジェットを減速するために最低必要な水の侵入深さは 4 m であり、不確かさを考慮した上で OFNP 周囲から 5 m 離れた場所へ水中ネット等を設置する手段が有効であることを明らかにした。次に枢要区域として、陸上 NPP と同様に使用済燃料または MOX 新燃料が貯蔵された使用済燃料プール室や、補機冷却の取水口や代替中央制御室を設定し防護措置を取ることでさらに堅牢性を強化させられることを明らかにした。また、OFNP 特有の縦長構造（高さ 100 m 超）により、外部侵入には水平移動のみならず垂直移動が多分に要求され、防護区域へのアクセス遅延のためには警備員詰所における乗降エレベータ等の経路管理が有効であることを明らかにした。また、洋上特有の監視の容易さを利用し、OFNP の半径 1 km に渡る広範囲を周辺監視区域として新たに設定し、不審船等が監視された場合に治安部隊の準備を進めることにより到着時間を大幅に短縮し、阻止確率を向上させられることを明らかにした。これらの設計を行うことで、陸上 NPP と比較して堅牢性は強化可能であることを明らかにした。治安部隊について、OFNP 内での常駐または巡視艇による近隣待機といった即応体制構築が必要であることを指摘した。

第 4 章では、第 2 章と第 3 章の結果を受け、2S by design を取り入れて原子力安全性・核セキュリティ性・核不拡散性（3S）シナジー効果を最大化し効率的かつ効果的に設計された、堅牢な OFNP 概念を提示した。また、安全上の重要機器を水面下に配置させた縦長構造や洋上特有の監視の容易さを活用し、堅牢性強化が可能であることを言及した。また、開発した評価手法は多様な炉型と設置方式に対し適用可能であること、得られた結果のうち高燃焼度化、運転サイクル延長及び枢要区域化は、BWR 型を搭載する洋上・陸上 NPP に対し堅牢性強化が可能であることを指摘した。さらに、原子力プラントのみならず船舶安全性も含めた想定を上回る事象（Beyond DBT）に対して、日本を想定した OFNP の影響緩和設計と洋上防衛について考察し、沈没対策を施した設計及び特定重大事故等対処施設の合理化、洋上防衛における法令及び実績に基づいた実効性と課題を論述した。最後に、今後の展望を言及した。

第 5 章では、各章によって得られた結果を総括し、本論文の結論とした。本論文は、洋上特有の 2S 上の新たな脅威に対する多様な炉型の応答性を定量評価可能な手法を開発し、2S by design を取り入れた OFNP の堅牢性強化及び合理化の可能性を明らかにし、洋上の原子力平和利用に必須となる 2S を強化した堅牢な OFNP 概念を提示した。

目次

要旨.....	I
目次.....	IV
図一覧.....	VII
表一覧.....	IX
略語一覧.....	XI
第1章 序論.....	2
1.1 研究背景.....	2
1.1.1 日本のエネルギー社会を取り巻く現状.....	2
1.1.2 OFNP 社会実装によるエネルギー社会への貢献.....	6
1.1.3 原子力システム設計段階における 3S 特性の研究意義.....	8
1.1.4 洋上における原子力平和利用の歴史.....	11
1.1.5 OFNP の既往研究.....	14
1.2 本論文の目的.....	16
1.3 本論文の構成.....	18
参考文献.....	20
第2章 核不拡散性評価.....	26
2.1 はじめに.....	26
2.2 評価対象の定義.....	28
2.2.1 核燃料タイプ.....	28
2.2.2 核燃料管理シナリオ.....	31
2.2.3 核燃料管理シナリオの成立性評価.....	34
2.3 核拡散抵抗性評価.....	43
2.3.1 評価手法.....	43
2.3.2 脅威の定義.....	44
2.3.3 システム要素とターゲットの特定.....	45
2.3.4 拡散経路の特定.....	48
2.3.5 評価指標の開発と特定.....	54
2.4 核拡散抵抗性評価の結果.....	63
2.4.1 核分裂性物質タイプの結果.....	63
2.4.2 拡散機会の結果.....	65
2.4.3 核燃料管理シナリオの結果.....	67
2.5 Safeguards by design による堅牢な保障措置システムの設計.....	70
2.6 本章のまとめ.....	74
参考文献.....	75

第3章	核セキュリティ性評価	80
3.1	はじめに	80
3.2	研究対象とする DBT の選定	82
3.3	魚雷脅威に対する防護	85
3.3.1	背景	85
3.3.2	超高速ジェットの生成・飛翔過程	88
3.3.3	超高速ジェットの衝突過程	98
3.3.4	魚雷脅威に対する物理的防護の設計	104
3.4	船舶移乗脅威に対する防護	106
3.4.1	背景	106
3.4.2	枢要区域選定(VAI)	107
3.4.3	堅牢性評価	126
3.5	Security by design による堅牢な核物質防護システムの設計	152
3.6	本章のまとめ	158
	参考文献	159
第4章	堅牢な OFNP のための 2S by design 総合評価	166
4.1	はじめに	166
4.2	2S by design を取り入れた堅牢な OFNP 概念	166
4.2.1	3S シナジー効果を最大化する Safeguards by design	166
4.2.2	3S シナジー効果を最大化する Security by design	169
4.3	Beyond DBT に対する影響緩和設計の考察	181
4.3.1	沈没の影響緩和設計	181
4.3.2	特定重大事故等対処施設の合理化設計	186
4.4	Beyond DBT に対する洋上防衛の考察	190
4.5	今後の展望	197
4.6	本章のまとめ	198
	参考文献	199
第5章	結論	206
	謝辞	208
Appendix A	私訳：K. Vincent, et al., “Overview of security plan for offshore floating nuclear plant”, (2016).	A-1
Appendix B	私訳：J. Conway, et al., “Physical security analysis and simulation of the multi-layer security system for the offshore nuclear plant (ONP)”, (2019).	B-1
Appendix C	私訳：G. Genzman, et al., “Ship collision security for an offshore nuclear platform”, (2017).	C-1
Appendix D	軽水炉燃料に関するベンチマーク問題との比較結果	D-1

Appendix E 水中における超高速ジェット挙動の既往研究ベンチマーク結果	E-1
Appendix F 船舶移乗脅威に対するタイムライン評価の詳細	F-1
Appendix G 日本における実用炉の核セキュリティに関する規制要求.....	G-1
Appendix H 原子力発電所等への戦争未満の軍事攻撃に関するシナリオプランニングを用いた危機対応の検討（2024 年度 東京工業大学 技術経営専門職学位課程 プロジェクトレポート）.....	H-1

図一覧

Figure 1-1 OFNP の構造概念図.....	7
Figure 1-2 OFNP の設置概念図.....	7
Figure 1-3 浮体式洋上原子力発電所のコンセプトー既存技術の融合ー	8
Figure 1-4 3S 特性の概念図	9
Figure 1-5 設計初期段階における 2S by design の導入.....	10
Figure 1-6 本論文の構成	19
Figure 2-1 原子力システムにおける核不拡散対策についての基本的な考え方	27
Figure 2-2 MOX 燃料の仕様	29
Figure 2-3 UO_2 燃料の仕様	30
Figure 2-4 評価対象とする核燃料シナリオ	33
Figure 2-5 保管期間に応じた MOX 燃料の各サイクルにおける無限増倍率(G_d 有り)	36
Figure 2-6 保管期間に応じた MOX 燃料の各サイクルにおける無限増倍率(G_d 無し)	36
Figure 2-7 保管期間に応じた MOX 新燃料中の核種割合	37
Figure 2-8 ある保管期間と 0 年保管の MOX 新燃料を比較した時の無限増倍率の変化率	37
Figure 2-9 OFNP と使用済燃料プールの寸法	38
Figure 2-10 使用済燃料プールと使用済燃料の寸法	39
Figure 2-11 GIF/PRPP 評価手法の枠組み	43
Figure 2-12 評価対象とする核燃料シナリオ [再掲]	46
Figure 2-13 保障措置システム(シナリオ A)	46
Figure 2-14 保障措置システム(シナリオ B)	47
Figure 2-15 保障措置システム (シナリオ C)	47
Figure 2-16 保障措置システム (シナリオ Ref.)	47
Figure 2-17 核燃料サイクルの流れと拡散経路の概念図の例示 (シナリオ A)	48
Figure 2-18 輸送/移送頻度の例示 (シナリオ A)	57
Figure 2-19 Safeguards by design による堅牢な保障措置システム	72
Figure 3-1 IAEA が推奨する核物質防護システムの設計プロセス	81
Figure 3-2 OFNP の魚雷対策の概念図	87
Figure 3-3 ジェット生成・飛翔過程のシミュレーションモデル	89
Figure 3-4 ジェット生成・飛翔過程のシミュレーションモデルの概念図	89
Figure 3-5 既往研究における成形炸薬の形状	89
Figure 3-6 ジェット生成・飛翔過程の媒質中の解析結果(速度)	93
Figure 3-7 ジェット生成・飛翔過程の媒質中の解析結果(圧力)	93
Figure 3-8 ジェット生成・飛翔過程の水中の挙動(物質位置)	94
Figure 3-9 ジェット先端平均速度定義の例示	95

Figure 3-10 水中侵入深さとジェット先端平均速度の変化率.....	97
Figure 3-11 ジェット衝突過程のシミュレーションモデル	99
Figure 3-12 ジェット衝突過程のシミュレーションモデルの概念図.....	99
Figure 3-13 ジェット衝突過程の解析結果(物質位置)	101
Figure 3-14 ジェット衝突過程の解析結果(圧力)	102
Figure 3-15 ジェット衝突過程の解析結果(物質状態)	103
Figure 3-16 魚雷脅威に対する物理的防護の概念図	105
Figure 3-17 OFNP 特有の核セキュリティを考慮したレイアウト	106
Figure 3-18 枢要区域選定のプロセス	108
Figure 3-19 OFNP の DB 安全系統(4 区分; 動的).....	109
Figure 3-20 原子炉建屋オペレーティングフロア俯瞰図	115
Figure 3-21 原子炉建屋オペフロ断面図と燃料取出手順.....	115
Figure 3-22 TQUV 事故シーケンスにおける共通要因故障のフォルトツリー	121
Figure 3-23 枢要区域候補ロジックモデル (枢要区域候補など無し)	124
Figure 3-24 枢要区域候補ロジックモデル (枢要区域候補など有り)	124
Figure 3-25 OFNP の核物質防護システム候補	130
Figure 3-26 OFNP と仮想の陸上プラントの核物質防護システム候補.....	131
Figure 3-27 タイムライン評価結果: TQUV (a)OFNP-枢要区域など無し.....	135
Figure 3-28 タイムライン評価結果: TQUV (b)OFNP-枢要区域有り	136
Figure 3-29 タイムライン評価結果: TQUV (c)OFNP-乗降エレベータ経路管理有り	137
Figure 3-30 タイムライン評価結果: TQUV (d)OFNP-周辺監視区域有り	138
Figure 3-31 タイムライン評価結果: TQUV (e)OFNP-枢要区域など有り	139
Figure 3-32 タイムライン評価結果: TQUV (ref.a)陸上 NPP-枢要区域無し	140
Figure 3-33 タイムライン評価結果: TQUV (ref.b)陸上 NPP-枢要区域有り	141
Figure 3-34 OFNP 核物質防護システムの堅牢性に関する総合的な評価結果.....	147
Figure 3-35 Security by design による堅牢な核物質防護システムの概念図	154
Figure 4-1 2S by design を取り入れた堅牢な OFNP 概念図 (Safeguards)	174
Figure 4-2 2S by design を取り入れた堅牢な OFNP 概念図 (Security)	174
Figure 4-3 圧力平衡弁の機構	182
Figure 4-4 沈没影響緩和設計を反映した OFNP 概念図 (Safeguards).....	185
Figure 4-5 沈没影響緩和設計を反映した OFNP 概念図 (Security)	185
Figure 4-6 既設炉の特重施設の例.....	186
Figure 4-7 特定重大事項等対処施設の合理化の概念図	189
Figure 4-8 原発特別警備部隊	191
Figure 4-9 法的事態の区分	192
Figure 4-10 周辺海空域の警戒監視活動のイメージ	196

表一覧

Table 1-1 日本のエネルギー社会を取り巻く出来事.....	3
Table 1-2 新「3E+S」	5
Table 1-3 洋上における原子力平和利用の開発の歴史	12
Table 1-4 原子炉を動力源とする世界の船舶などの統計(2018 年時点).....	12
Table 1-5 原子力を発電源とする洋上原子力発電の開発状況	13
Table 1-6 本研究の OFNP 及び参考とした原子力発電の仕様.....	17
Table 2-1 評価対象とする核燃料タイプ	29
Table 2-2 BWR 燃料用キャスクの種類について	32
Table 2-3 SFP の物理的許容量と生成される SF の累計体数	39
Table 2-4 使用済燃料プールの熱的許容量評価に関連する要素.....	41
Table 2-5 使用済燃料プールの熱的許容量評価の結果	41
Table 2-6 評価対象とする脅威の定義.....	44
Table 2-7 拡散経路の特定 (シナリオ A)	50
Table 2-8 拡散経路の特定 (シナリオ B)	51
Table 2-9 拡散経路の特定 (シナリオ C)	52
Table 2-10 拡散経路の特定 (シナリオ Ref.)	53
Table 2-11 核拡散抵抗性の評価指標	54
Table 2-12 核分裂性物質タイプの評価結果	63
Table 2-13 拡散機会の評価結果.....	66
Table 2-14 核拡散抵抗性の評価結果 (シナリオ A)	68
Table 2-15 核拡散抵抗性の評価結果 (シナリオ B)	68
Table 2-16 核拡散抵抗性の評価結果 (シナリオ C)	69
Table 2-17 核拡散抵抗性の評価結果 (シナリオ Ref.)	69
Table 2-18 Safeguards by design による堅牢な保障措置システムの設計仕様.....	73
Table 3-1 既往研究における DBT の手段	83
Table 3-2 研究対象とする DBT の能力と仕様	84
Table 3-3 ジェットの生成・飛翔過程におけるゾーン部分の媒質	90
Table 3-4 ジェットの生成・飛翔過程における物質の方程式など	90
Table 3-5 媒質の衝撃インピーダンス・密度・衝撃波速度.....	92
Table 3-6 水中侵入深さと予測されるジェット先端平均速度	97
Table 3-7 衝突過程の物質の方程式など	100
Table 3-8 研究対象とする DBT 能力と仕様 [再掲]	111
Table 3-9 D 値による核セキュリティレベル区分	113
Table 3-10 直接的妨害破壊対象となる燃料集合体の A/D 合計値.....	114

Table 3-11 炉心損傷の事故シーケンス毎の妨害破壊回数.....	121
Table 3-12 枢要区域候補などの詳細シナリオと効果.....	125
Table 3-13 技術障壁の遅延時間.....	131
Table 3-14 検知/遅延機器の検知確率と遅延時間.....	132
Table 3-15 盗取/妨害破壊行為の遅延時間	132
Table 3-16 Security by design による堅牢な核物質防護システムの設計仕様.....	155
Table 3-17 堅牢な核物質防護システムを構成する検知・遅延機器の仕様	157
Table 4-1 2S by design と 3S シナジー効果 (Safeguards).....	175
Table 4-2 2S by design と 3S シナジー効果 (Security)	177
Table 4-3 多様なプラントへの研究手法/結果の適用範囲 (Safeguards/Security).....	180
Table 4-4 沈没の影響緩和設計.....	184
Table 4-5 特重施設の規制要求と対応する OFNP 設備.....	189
Table 4-6 脅威主体別の主な対応主体.....	191
Table 4-7 自衛隊の主な行動類型	195

略語一覧

略語	意味
ABWR	改良型沸騰水型軽水炉 (Advanced Boiling Water Reactor)
ADS	自動減圧系 (Automatic Depressurization System)
APC	航空機衝突 (Air Plane Crash)
ARIS	革新炉情報システム (Advanced Reactor Information System)
ASD	敵対者シーケンス図 (Adversary sequence diagram)
BCM	裸の臨界質量 (Bare Critical Mass)
Beyond DBT	設計基礎脅威を超える脅威
B-SUS ラック	ボロン添加ステンレス鋼製使用済燃料貯蔵ラック
BWR	沸騰水型軽水炉 (Boiling Water Reactor)
CDF	炉心損傷頻度 (Core Damage Frequency)
CFF	格納容器機能喪失頻度 (Containment Failure Frequency)
COCN	産業競争力懇談会 (Council on Competitiveness-Nippon)
COP	国連気候変動枠組条約締約国会議 (Conference of the Parties)
CR	制御棒 (Control Rod)
DBA	設計基準事故 (Design Basis Accident)
DB-Pu	高燃焼度プルトニウム (Deep Burn Plutonium)
DBT	設計基礎脅威 (Design Basis Threat)
DG	非常用ディーゼル発電機 (Diesel Generator)
DIV	設計情報検認 (Design Information Verification)
D 値 (D-Values)	制御されない場合、被ばくした個人の死亡、またはその人の生活の質を低下させる永久的な傷害を引き起こす可能性がある放射性物質の量 (Dangerous Quantities of Radioactive Material)
EASI モデル	Estimation of Adversary Sequence Interruption
FCVS	フィルターベントシステム (Filtered Containment Vent System)
FDW	給復水系 (Feeding Water System)
FF	新燃料 (Fresh Fuel)
GDCS	重力落下式注水系 (Gravity Driven Cooling System)
GIF/PRPP	第四世代原子力システムの核拡散抵抗性及び核物質防護
GX	グリーントランスフォーメーション
HALEU	5%超 20%未満低濃縮ウラン (High-Assay, Low Enriched Uranium)
HEU	高濃縮ウラン (High Enriched Uranium)
HEL	ユグニオ弾性限界 (Hugoniot Elastic Limit)

略語	意味
HPCF	高圧炉心注水系 (High Pressure Core Flooder system)
HRC	高放射線影響 (High Radiological Consequences)
IAEA	国際原子力機関 (International Atomic Energy Agency)
ICS	非常用復水器 (Isolation Condenser System)
IIV	中間在庫検認 (Interim Inventory Verification)
IPCC	気候変動に関する政府間パネル (Intergovernmental Panel on Climate Change)
ISLOCA	インターフェイスシステム LOCA
IVR	圧力容器内溶融物保持 (In Vessel Retention)
k_{inf}	無限増倍率
LEU	低濃縮度ウラン (Low Enriched Uranium)
LOCA	冷却材喪失事故時注水機能停止
MBA	物質収支区域 (Material Balance Area)
MIT	マサチューセッツ工科大学
MOX 燃料	混合酸化物燃料
MOX-FF	混合酸化物新燃料
MOX-SF	混合酸化物使用済燃料
NED	核爆発装置 (Nuclear Explosive Device)
NDC	国が決定する貢献 (Nationally Determined Contributions)
NMAC	保障措置上の核物質の計量及び管理システム (Nuclear Material Accounting and Control)
NPP	原子力発電所 (Nuclear Power Plant)
OFNP	浮体式洋上原子力発電所 (Offshore Floating Nuclear Power Plant)
PCCS	格納容器静的冷却系 (Passive Containment Cooling System)
PCV	原子炉格納容器 (Primary Containment Vessel)
PDI	査察業務量。査察人・日 (Person-Day of Inspection)
PIV	実在庫検認 (Physical Inventory Verification)
PSA	確率論的安全性評価 (Probabilistic Safety Assessment)
PUREX 法	ピューレックス法 (Plutonium Uranium Redox Extraction)
Put	全プルトニウム
Puf	核分裂性プルトニウム
PWR	加圧水型軽水炉 (Pressurized Water Reactor)
RCIC	原子炉隔離時注水系 (Reactor Core Isolation Cooling system)
RG-Pu	原子炉級プルトニウム (Reactor Grade Plutonium)

略語	意味
RHR	残留熱除去系 (Residual Heat Removal system)
SA	シビアアクシデント/重大事故等 (Severe Accident)
Safeguards	保障措置/核不拡散性
Safeguards by design	原子力システム設計の初期段階から、核不拡散性の観点を統合した効率的かつ効果的な原子力システムの設計
Safety	原子力安全性
Security	核セキュリティ性
Security by design	原子力システム設計の初期段階から、核セキュリティ性の観点を統合した効率的かつ効果的な原子力システムの設計
SF	使用済燃料 (Spent Fuel)
SFN	自発中性子発生率 (Spontaneous Fission Neutron emission rate)
SFP	使用済燃料プール (Spent Fuel Pool)
Shaped Charge	成形炸薬
SRV	主蒸気逃し安全弁 (Safety Relief Valve)
SSC	構造物、系統及び機器 (Structure, System and Component)
TBD	全交流動力電源喪失(直流電源喪失)
TBP	全交流動力電源喪失(SRV 再閉失敗)
TBU	全交流動力電源喪失(RCIC 機能喪失)
TC	原子炉停止機能喪失
TQUV	高圧・低圧注水機能喪失
TQUX	高圧注水・減圧機能喪失
TW	崩壊熱除去機能喪失
UO ₂ 燃料	ウラン燃料
UO ₂ -FF	ウラン新燃料
UO ₂ -SF	ウラン使用済燃料
VAI	枢要区域選定 (Vital Area Identification)
VLCC	超大型タンカー (Very Large Crude oil Carrier)
WG-Pu	兵器級プルトニウム (Weapons Grade Plutonium)
1F 事故	福島第一原子力発電所事故
長期 TB	全交流動力電源喪失
2S	核セキュリティ性・核不拡散性
2S by design	原子力システム設計の初期段階から、核セキュリティ性・核不拡散性の観点を統合し、3S シナジー効果を最大化した、効率的かつ効果的な原子力システムの設計
3S	原子力安全性・核セキュリティ性・核不拡散性

第 1 章

序論

第1章 序論

1.1 研究背景

1.1.1 日本のエネルギー社会を取り巻く現状

日本のエネルギー社会を取り巻く状況を一変させた 1F 事故から 10 年以上経過した今、日本のエネルギー社会は、「(1)気候変動問題」と「(2)エネルギー安定供給/安全保障」の 2 つのテーマを抱えている。なお、2020 年以降の主な出来事の概要は **Table 1-1** に示している。

(1) 気候変動問題

気候変動問題は、全世界共通で不可避な喫緊の課題である。世界的にも平均気温の上昇、雪氷の融解、海面水位の上昇などが観測され、日本においても平均気温の上昇、自然災害の被害、農作物や生態系への影響などが観測されている¹。気候変動問題を議論する際には、科学的知見の集約が必要不可欠であることから、世界気象機関及び国連環境計画により 1988 年に気候変動に関する政府間パネル(IPCC; Intergovernmental Panel on Climate Change)が設立されており、2023 年度までに第 6 次報告書が公開されている。同報告書中で、IPCC は人間活動が及ぼす温暖化への影響について評価を盛り込んでおり、1990 年の第 1 次報告書では「気温上昇を生じさせるだろう」という表現であった。しかし、「影響が全地球の気候に表れている」(1995 年の第 2 次報告書)、「可能性が高い(66%以上)」(2001 年の第 3 次報告書)、「可能性が非常に高い(90%以上)」(2007 年の第 4 次報告書)、「可能性が極めて高い(95%以上)」(2013 年の第 5 次報告書)と更新されている。2021 年の第 6 次報告書では、人間活動が及ぼす温暖化への影響は、「疑う余地がない(unequivocal)」と非常に強い表現がされている²。つまり、人間活動が気候変動問題に影響を及ぼすことは明らかであり、これを解決するためには、人間活動を見直す必要がある。

気候変動問題の解決に向けた全世界規模の流れを説明する。まず、2015 年にパリ協定が採択され、世界共通の長期目標として、「世界的な平均気温上昇を工業化以前に比べて 2°C より十分低く保つとともに、1.5°C に抑える努力を追求すること」や、「今世紀後半に温室効果ガスの人為的な発生源による排出量と吸収源による除去量との間の均衡を達成すること」などが合意されている¹。その後、2021 年の国連気候変動枠組条約締約国会議(COP; Conference of the Parties)の第 26 回会議である COP26 に引き続き、約 100 名の首脳が参加した 2022 年の COP27 においても、パリ協定の 1.5°C 目標に基づく取り組みを実施していくことの重要性が再確認されている³。

日本では、2020 年 10 月、菅総理大臣は、所信表明演説において「2050 年までに温室効果ガス排出を全体としてゼロにする、すなわちカーボンニュートラルの実現を目指す」こ

とを宣言している⁴。加えて 2021 年 4 月、菅総理大臣は、地球温暖化対策推進本部及び米
国主催の気候サミットにおいて、「2050 年目標と整合的で、野心的な目標として、2030 年
度に、温室効果ガスを 2013 年度から 46%削減することを目指す。さらに、50%の高みに
向けて挑戦を続けていく」ことを表明している⁵。また、これらの温室効果ガス削減目標を
踏まえて、2021 年 10 月、日本は、「国が決定する貢献(NDC; Nationally Determined
Contributions)」を COP 事務局提出しており、気候変動問題の解決に向けて温室効果ガス
削減に取り組んでいくことを宣言している⁶。つまり、気候変動問題の解決に向けた取り組
みは、全世界規模で進められており、日本もその義務を果たすことが求められている。

Table 1-1 日本のエネルギー社会を取り巻く出来事

時期	出来事
2020 年 10 月	「2050 年カーボンニュートラル」を日本が宣言
2021 年 4 月	「2030 年度に温室効果ガスを 2013 年度から 46%削減、さらに 50%の高みに向 けた挑戦」を日本が表明
2021 年 10 月	「第 6 次エネルギー基本計画」が閣議決定
2021 年 11 月	国連気候変動枠組条約第 26 回締約国会議(COP26)の開催
2022 年 2 月	ロシアがウクライナに侵攻
2022 年 7 月	GX 実行会議が開始
2022 年 11 月	COP27 の開催
2023 年 2 月	「GX 実現に向けた基本方針～今後 10 年を見据えたロードマップ～」が閣議決定
2023 年 5 月	GX 推進法の成立
2023 年 6 月	GX 脱炭素電源法の成立

(2) エネルギー安定供給/安全保障

日本では、地震による火力発電所の停止、真冬並みの厳しい寒さ、悪天候による太陽光
発電の出力大幅減などの要因により、2022 年 3 月に関東地域で電力需要ひっ迫警報が発出
されている⁷。また、同年 6 月にも電力ひっ迫注意報が発出するなど、エネルギー安定供給
の課題が生じており、同年 7 月には岸田総理大臣により再稼働済の原発の稼働確保や火力
発電所の追加的確保が指示された。加えて、2022 年 2 月に発生したロシアによるウクライ
ナ侵攻により顕在化したエネルギー安全保障の問題は、日本のみならず国際社会の抱える
極めて大きな課題となった。これらのエネルギーの安定供給/安全保障上の課題や、その影
響も受けた電気料金の上昇は、日本の産業の国際競争力低下や雇用機会喪失など、国民生
活及び経済活動に多大な影響を及ぼしている⁸。

上記、「(1)気候変動問題」と「(2)エネルギー安定供給/安全保障」の課題克服に向けた
国策としてエネルギー政策の道筋を示すため、2021 年 10 月、第 6 次エネルギー基本計画

が閣議決定されている。その中で、2030 年度ミックス(野心的な見通し)として、電源構成に占める原子力発電の割合は 20~22%と見通されている⁹。

ただし、2011 年の福島第一原子力発電所事故(1F 事故)の影響により停止が続いた日本の原子力発電について、未申請 9 基、廃炉 24 基を含めた全 60 基中で、2021 年度までに再稼働したのは 10 基に留まっている。これは、同年度における電源構成としては 6.9%である(2024 年度末までに 12 基が再稼働済み)³。仮に、2030 年においても 2021 年度から日本の電力消費の増加が無く、原子炉の運転期間の上限到達による停止も無く、未申請 9 基と廃炉 24 基を除く全 27 基が再稼働を果たすと仮定すると、2030 年の電源構成に占める原子力発電の割合は 18.6%となり、目標値 20~22%を下回る。加えて、未申請 9 基を含む全 36 基の再稼働を果たすと仮定すると、原子力発電の割合は 24.8%となり目標値 20~22%を達成可能となる。目標値が達成可能な同仮定は、その名の通り「野心的な見通し」であり、実現のためには、(1F 事故の教訓を踏まえた原子力安全向上を大前提として)既設炉/未申請炉の再稼働や運転期間の延長が必須であり、それを促すための法や枠組みの整備が不可欠である。

一方で、カーボンニュートラル目標を表明する国や地域が GDP ベースで 9 割以上増加している中、「温室効果ガス排出削減」(気候変動問題への対応)と「経済成長」の両立を実現する「グリーントランスフォーメーション(GX)」が世界的に注目を浴びている。特に、ロシアのウクライナ侵攻を契機として、西側諸国において、GX に向けた長期的かつ大規模な投資競争が激化しており、GX に向けた脱炭素投資の成否が、国家・企業の競争力に直結する時代に突入している¹⁰。

欧州連合(EU)において、2020 年 7 月、「経済活動が環境的に持続可能かどうかを判断する基準」(EU タクソノミー)の確立を目的とした「持続可能な投資の枠組みに関する規則 2020/852」が発行されている。同規則は、2022 年 8 月、「委員会委任規則 2022/1214」として改正され、原子力も「トランジショナルな活動」として具体的なスクリーニング基準が定義されている¹¹。日本においても、金融機関のトランジション・ファイナンス(移行金融)として、EU タクソノミーの影響を受ける蓋然性が大きいものと推測されている^{12,13}。つまり、日本における GX 実現に向けて、原子力の果たす役割は今後ますます大きくなっていくであろう。

日本では、GX 実現に必要な施策を検討するために、2022 年 7 月より「GX 実行会議」が開催されている。同年 8 月に開催された「第 2 回 GX 実行会議」では、岸田総理大臣より、「原子力についても、再稼働に向けた関係者の総力の結集、安全性の確保を大前提とした運転期間の延長など、既設原発の最大限の活用、新たな安全メカニズムを組み込んだ

次世代革新炉の開発・建設など、今後の政治判断を必要とする項目が示されました。これらの中には、実現に時間を要するものも含まれますが、再エネや原子力はGXを進める上で不可欠な脱炭素エネルギー」旨の発言がなされており、今後の原子力政策に注目を集まっている¹⁴。GX 実行会議の議論を踏まえて、2023 年 2 月、「GX 実現に向けた基本方針」が閣議決定され、「エネルギー安定供給の確保を大前提とした GX に向けた脱炭素の取組」の基本的考え方として、「化石エネルギーへの過度な依存からの脱却を目指し、需要サイドにおける徹底した省エネルギー、製造業の燃料転換などを進めるとともに、供給サイドにおいては、足元の危機を乗り越えるためにも再生可能エネルギー、原子力などエネルギー安全保障に寄与し、脱炭素効果の高い電源を最大限活用する」旨が示されている¹⁰。また、原子力の活用については、「CO₂を排出せず、出力が安定的であり自律性が高いという特徴を有する原子力は、安定供給とカーボンニュートラルの実現の両立に向け、エネルギー基本計画に定められている 2030 年度電源構成に占める原子力比率 20～22%の確実な達成に向けて、いかなる事情より安全性を優先し、原子力規制委員会による安全審査に合格し、かつ、地元の理解を得た原子炉の再稼働を進める」と示されている。

さらに、日本の法制度面では、2023 年 5 月、GX 投資を推し進めるため、「脱炭素成長型経済構造への円滑な移行の推進に関する法律(GX 推進法)」が成立している¹⁵。また、同年 6 月、GX 実現のための安全確保を大前提とした原子力の活用などを目的として、関連する複数の法律を改正する「脱炭素社会の実現に向けた電気供給体制の確立を図るための電気事業法等の一部を改正する法律(GX 脱炭素電源法)」が成立している¹⁶。

つまり、日本の原子力を取り巻く環境は、2024 年現在でまさに転換期を迎えており、「気候変動問題」(Environment)や「エネルギー安定供給/安全保障」(Energy security)への対応の両立のみならず、「経済成長」(Economy)や 1F 事故の教訓を踏まえた「原子力安全向上」(Safety)も含めた全く新しい「3E+S」が必要となる。そして、「3E+S」を並走して実現させるために、原子力が今後のエネルギー社会において果たすべき役割や義務は、過去に類を見ないほど重要となっている(Table 1-2)。

Table 1-2 新「3E+S」

3E+S	内容
Environment	気候変動問題
Energy security	エネルギー安定供給/安全保障
Economy	経済成長
Safety	原子力安全向上

1.1.2 OFNP 社会実装によるエネルギー社会への貢献

浮体式洋上原子力発電所(OFNP; Offshore Floating Nuclear Power Plant)は、米国マサチューセッツ工科大学(MIT)の研究チームによって2016年に提唱されている(**Figure 1-1**)¹⁷。日本では2020年度から2022年度にかけて、産業競争力懇談会(COCN; Council on Competitiveness-Nippon)にて、原子力業界及び造船業界の産学連携でOFNPの社会実装の検討が進められている(**Figure 1-2**)^{18,19,20}。

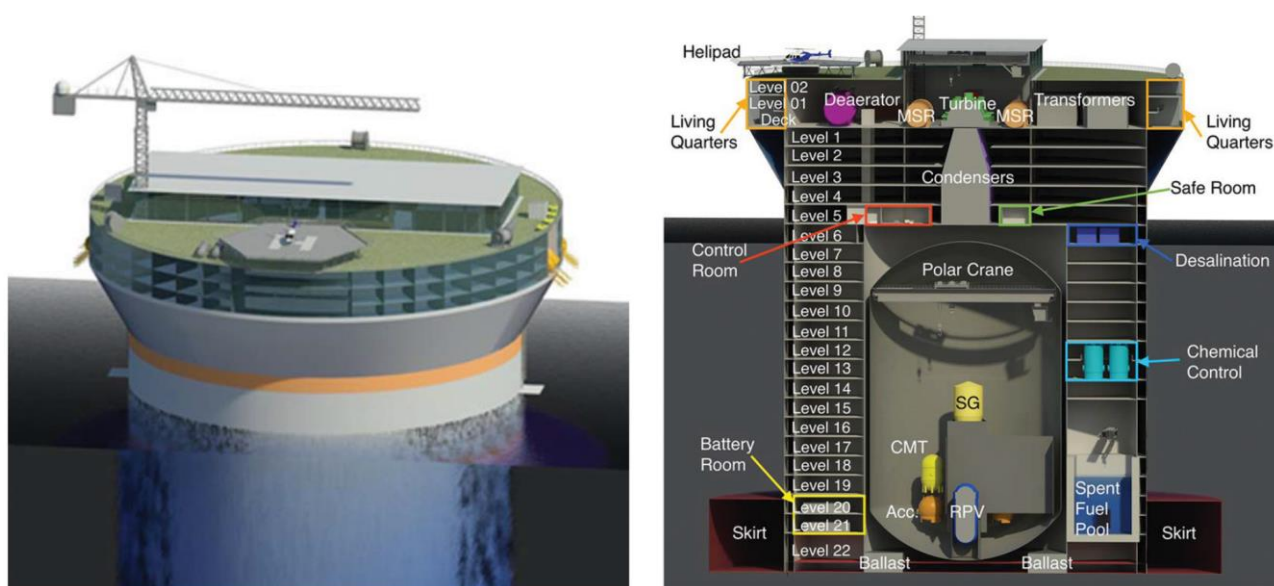
OFNPは、1F事故の教訓を踏まえた原子力安全向上への貢献が期待されている。加えて、国土内の新規設置地点の開発が困難な日本において、従前の陸上のみならず洋上への設置、及び搭載する原子炉の型を選ばない、という全く新しい形で原子力平和利用の促進が期待されている。また、OFNPは、「既存技術の融合」という設計コンセプトのもと、石油産業の円筒形状の浮体構造物に、原子力産業の原子炉を搭載されている(**Figure 1-3**)。COCNの概算評価では、建造費は陸上原子力発電所と同等以下、かつ技術検討や規制整備に時間を要する初号機においても課題検討開始から運転開始までの期間が14.5年と評価されており、高い実現性可能性に期待が寄せられている¹⁹。

OFNPの主な特徴を以下に示す。なお、各特徴の括弧内にて、前述の新「3E+S」との関係性を付記する。新「3E+S」の実現に向けて、OFNPの社会実装は、日本のエネルギー社会にとって有力な選択肢の一つとなるであろう。

- ・ 沖合約30 km 設置による、地震や津波の影響緩和 (→Safety)
- ・ 沖合約30 km 設置による、放射性物質拡散と大規模避難リスクの排除 (→Safety)
- ・ 洋上設置に伴う周囲にある無限の海水による、冷却・除熱機能の向上 (→Safety)
- ・ 様々なタイプの原子炉が搭載可能かつ洋上への立地地点の拡大による、原子力平和利用の促進 (→Environment、Energy security)
- ・ 「既存技術の融合」による、高い実現可能性と速やかな社会実装 (→Economy)
- ・ 洋上設置に伴う設置地点の変換性による、活断層発見などの新知見のバックフィットに関する予期せぬ廃炉リスクの回避 (→Economy)
- ・ 造船所などの建造拠点における一括した生産と輸送による、経済競争力の向上と海外輸出の期待 (→Economy)

そもそも、多様な洋上設置の原子力発電所のうち、OFNPを研究対象に選定した理由は、OFNPの浮体構造物が「円筒型」(モノコラム型)となっているためである。「船舶型」と比較すると、縦長(全長100 m 超)で喫水が深く、下部にスカートを設けて重心を下げた設計となっている。そのため、設備保護を目的として浮体構造物の揺動低減が可能であり、炉心冷却の最終手段として動的機器を使用せず周囲の海水を重力などで静的に注水も可能で

ある²⁰。また、OFNP は、沖合 30 km の設置が検討されており、陸上や油田開発プラントなどの電気需要地点への横付け設置が想定されている船舶型とは設置環境が大きく異なる。なお、陸上から沖合への海底電源ケーブルの技術については、欧州において、2017 年から 2023 年までに、4 カ所の商用規模の浮体式洋上風力発電が沖合 20~300 km で運転開始していることから、実用化可能な技術である²¹。また、炉型として ABWR 型を選定した理由は、発電実績が豊富で速やかな社会実装が可能な軽水炉のうち、PWR 型と比較すると格納容器の容積が小さく、浮体構造物のコンパクト化を見込めるためである。



出典: J. Buongiorno, et al.(2016)

Figure 1-1 OFNP の構造概念図

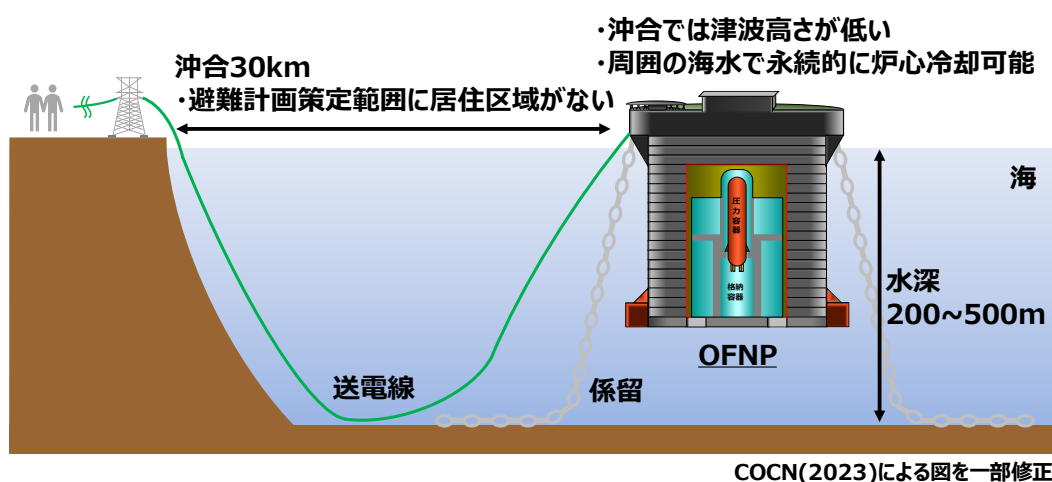


Figure 1-2 OFNP の設置概念図

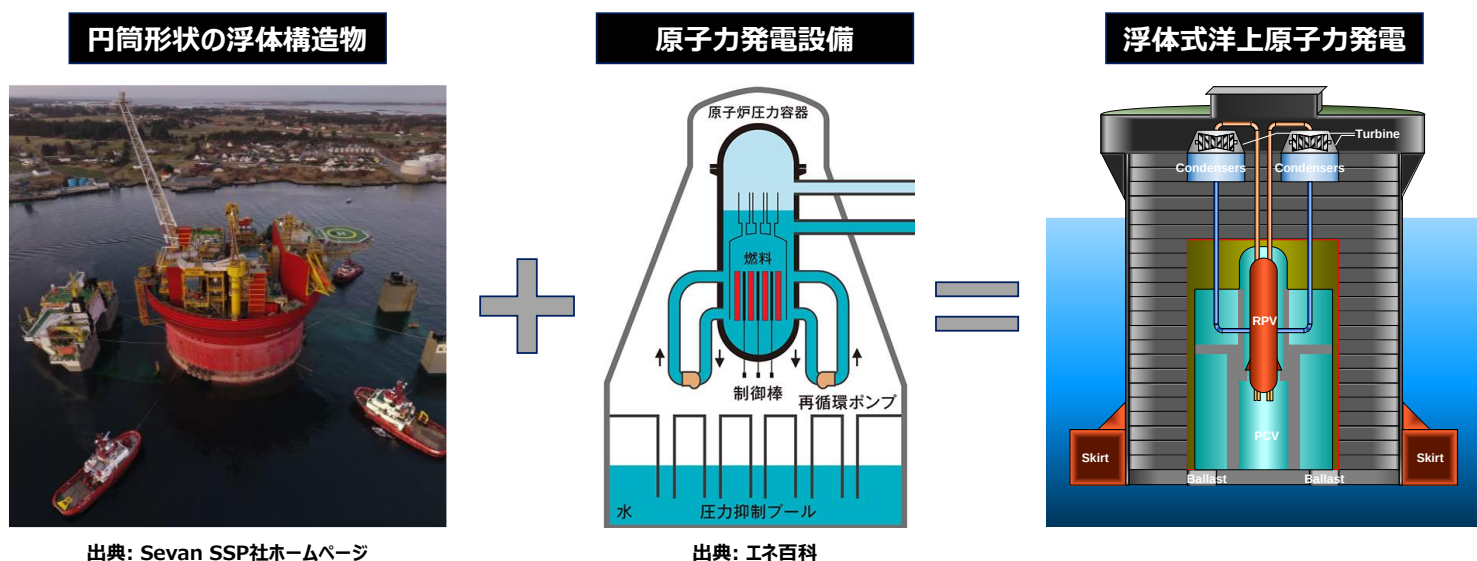


Figure 1-3 浮体式洋上原子力発電所のコンセプトー既存技術の融合ー

1.1.3 原子力システム設計段階における 3S 特性の研究意義

「3S」とは、「原子力安全性(Safety)」、「核セキュリティ性(Security)」、「保障措置/核不拡散性(Safeguards)」を指す。3S の個々の特性及び重要性は、原子力開発の歴史の当初から世界で認知されている。国際原子力機関(IAEA)の発行文書の中でも、個々の概念が原子力を基盤とした各国のインフラストラクチャー開発において重要な概念であると言及されており²²、各国の原子力法令への反映のためのガイダンスも示されている²³。

2008 年に開催された G8 北海道洞爺湖サミットでは、「3S」の 3 つの個別の特性を一体的に捉え、3S を基盤とした原子力インフラストラクチャーの構築に向けた行動、及び国際的協力の必要性が共有されている²⁴。2022 年に開催された IAEA 技術会議においては、多くの小型モジュール炉や革新炉が設計段階にある中、新型炉の設計に 3S 特性を包括的に統合する絶好の機会である旨が強調されている²⁵。また、新型炉の初期設計段階から 3S のインターフェイスに対処するとともに、3S のシナジー効果を生み出すことの便益が共有されている(Figure 1-4)。

ここで、「Security by design」は、「原子力システム設計の初期段階から、核セキュリティ性の観点を統合した効率的かつ効果的な原子力システムの設計」という考え方である²⁶。また、「Safeguards by design」は、「原子力システム設計の初期段階から、核不拡散性の観点を統合した効率的かつ効果的な原子力システムの設計」という考え方である^{27,28}。原子力システム設計において、Safety を根底とした設計は従前から行われているが、Security・Safeguards(2S)を設計の初期段階から考慮した設計は、IAEA や核物質管理コミュニティから各国に導入を呼び掛けているものの、Safety と比較すると日本では浸透していない²⁹。本

研究では、両概念を統合して「2S by design」と呼称し、「原子力システム設計の初期段階から、核セキュリティ性・核不拡散性の観点を統合し、3S シナジー効果を最大化した、効率的かつ効果的な原子力システムの設計」と定義する。

2S by design 概念の導入によって、Safety と同様に、個別の 2S に関する機器設計やシステムの合理化、より実態に則した無理のない運用などが期待されている (Figure 1-5)^{29,30}。また、原子力システム設計の完了後に、潜在的な核拡散リスクが特定された場合、2S に関する追加の対応が求められることとなる。具体的には、後付けの機器設置によるコストの増大、運用上の影響、最悪の場合は設計自体の見直しが要求されるおそれもある。一方で、設計の初期段階から 2S by design 概念を導入することにより、大幅な設計変更が可能であるため、個別の 3S 特性のみならず、一体的に捉えた 3S 特性のシナジー効果をも最大化する。特に、OFNP のような新しく設計中の原子力システムでは、その柔軟性を活かして根本的な設計提示が可能であるため、2S by design の導入効果を大幅に強化する。

OFNP の社会実装には、Safety のみならず、洋上といったこれまでにない設置環境における 2S 上の新たな脅威を考慮したシステム設計は必須となる。OFNP の設計初期段階から 2S by design 概念を取り入れることで、シナジー効果を最大化し、効率的かつ効果的な設計を施すとともに、今後の新型炉設計における 2S by design 導入のモデルケースとなるであろう。

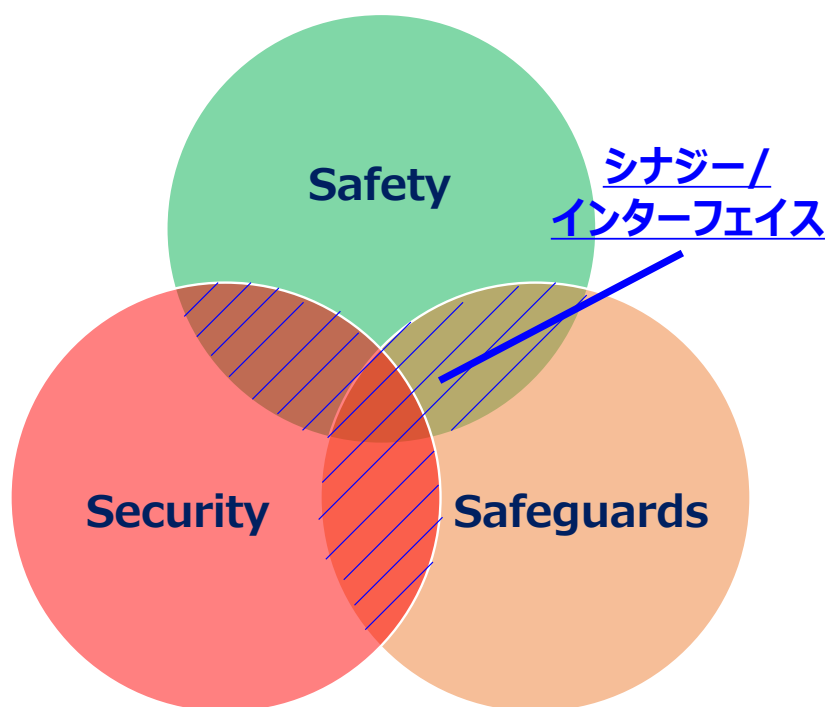


Figure 1-4 3S 特性の概念図

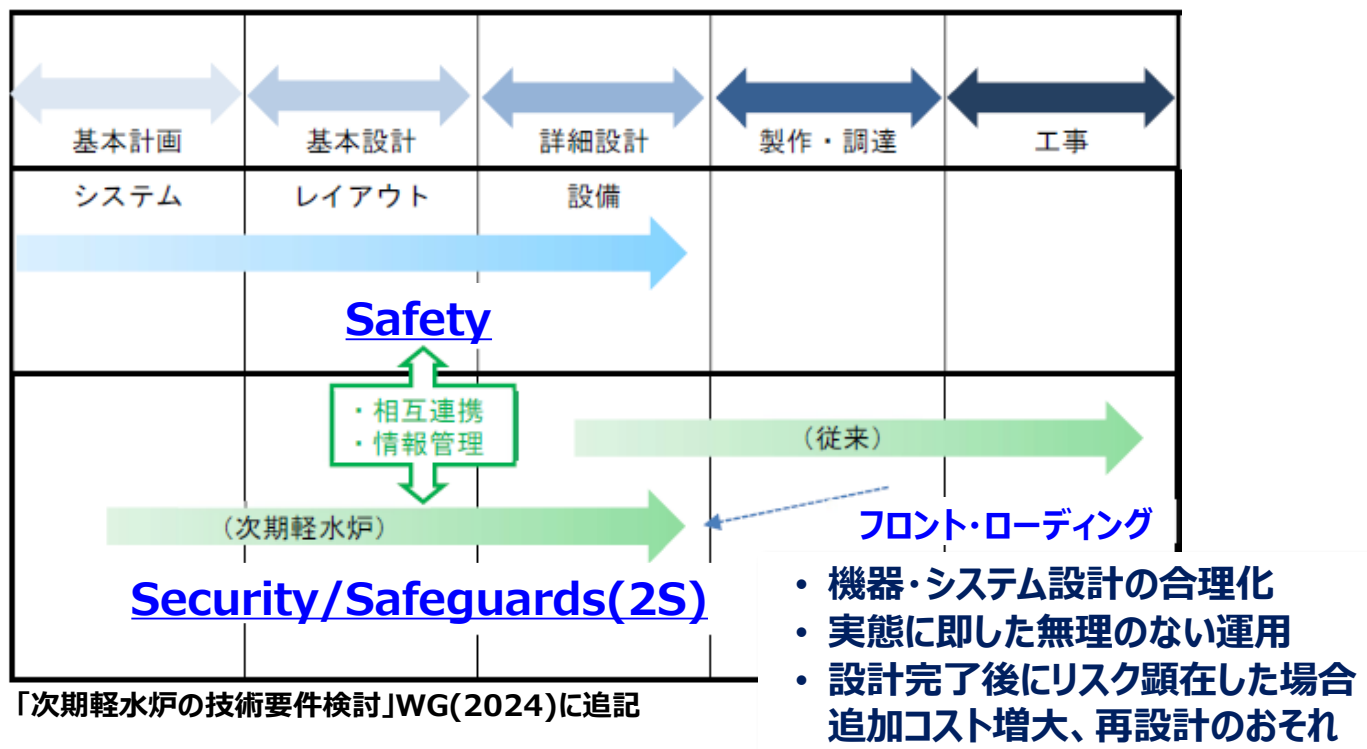


Figure 1-5 設計初期段階における 2S by design の導入

1.1.4 洋上における原子力平和利用の歴史

洋上における原子力平和利用の検討は、**Table 1-3** に示す通り、古くは 1950 年代から日本や米国を含む世界各国で始められている¹⁹。1960 年代には、米国で原子力貨物船サヴァンナ、ロシアで原子力砕氷船レーニン、ドイツで原子力鉱石運搬船オットーハーンが竣工している。1970 年代には、日本でも原子力船「むつ」が初臨界に達成しており、洋上では、原子力を「発電源」として利用するよりも、「動力源」として利用する船舶の社会実装が先行している。2018 年においては、原子力を動力源として利用する世界の船舶は 175 隻存在すると見込まれている(**Table 1-4**)^{31,32}。そのうち、170 隻ものの大多数は核兵器保有国家の潜水艦や水上戦艦といった「軍事利用」となっているが、「民間利用」されている船舶はロシアの氷砕船 5 隻のみであり、日本の原子力船「むつ」以降で新造がない状況となっている。

一方で、洋上で原子力を「発電源」として利用する原子力発電の検討は、**Table 1-5** の通りである^{17,33,34,35,36,37,38,39,40,41,42,43}。その設置方式は「浮体式」と「着底式」の大分類に始まり、海面との関係による小分類が「浮揚式」「潜水式」と「海底式」「埋立式」「杭式」と多岐にわたる⁴⁴。これらの検討は、1970 年代には米国の Offshore Power System(OPS)社、1980 年代には日本の電力中央研究所と東芝、日立製作所、三菱重工業の共同によって「浮揚式」の研究が行われている。これは、長方形型のバージを浮体構造物として、その上に 1100 MWe 級の軽水炉を搭載され、周囲を防波堤に囲まれた海面に係留装置により係留・設置される形式である。その後、2010 年代以降、韓国、中国、イギリス、デンマークなどで、小型モジュール炉を搭載する「船舶型」の浮体式原子力発電所が検討されている。ただし、2023 年度までに社会実装に至ったのは、氷砕船の小型原子炉をベースに KLT-40S を開発し、2020 年 5 月より商用運転を開始したロシアのアカデミック・ノモノソフのみとなっている。

以上より、洋上利用における原子力平和利用の歴史は、約 70 年以上と長いものの、原子力の民間利用、特に発電源として社会実装した事例は非常に限定的である。よって、洋上における原子力システムの大多数は、未だに設計段階であり、3S 上の Safey を中心とした検討に留まり、2S の検討は十分ではない。

Table 1-3 洋上における原子力平和利用の開発の歴史

年代	出来事
1950	・米国の GE 社が 59.7 MW の BWR を搭載する原子力輸送船の試設計を発表 ・米国のウェスティングハウス社が 70 MW の PWR を搭載する原子力輸送船の試設計を発表 ・日本では、原子力船調査会及び日本原子力船研究協会が設立され、原子力船について検討
1960	・米国で原子力貨客船サヴァンナが竣工 ・ロシアで原子力砕氷船レーニンが竣工 ・ドイツで原子力鉱石運搬船オットーハーンが竣工
1970	・原子力船「むつ」で初臨界が達成 ・米国 OPS 社が浮揚式原子力発電所を検討
1980	・日本原子力研究所がニュークリア・フローティング・アイランド構想を原子力委員会に報告 ・電力中央研究所において、浮揚式原子力発電所を検討
2010	・韓国、中国において、PWR の浮体式原子力発電所を開発(BANDAI-60, ACP100S, ACPR50S) ・カナダの Prodigy Clean Energy 社が PWR の浮体式原子力発電所を開発 ・インドネシアの ThorCon 社が熔融塩炉の浮体式原子力発電所を開発 ・デンマークの Seaborg 社が熔融塩炉の浮体式原子力発電所を開発
2020	・ロシアのアカデミック・ロモノソフが発電開始 ・三菱重工業が船舶搭載用小型軽水炉を開発 ・イギリスの CorePower 社が熔融塩炉の浮体式原子力発電所を開発

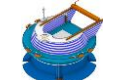
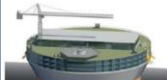
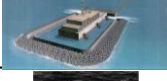
出典：COCN(2022)

Table 1-4 原子炉を動力源とする世界の船舶などの統計(2018 年時点)

国家	潜水艦	水上戦艦	民間船	合計
ロシア	46	1	5 (氷砕船)	42
中国	20	0	0	20
フランス	10	1	0	11
イギリス	10	0	0	10
インド	3	0	0	3
アメリカ	68	11	0	79
日本	0	0	0	0
合計	157	13	5	175

P. Lobner(2018)による表を一部修正

Table 1-5 原子力を発電源とする洋上原子力発電の開発状況

国家	名称	炉型	電気出力 (MWe)	提案者/ 発表年	設置方式	浮体 構造物	概念図
ロシア	アカデミック・ロモノソフ(KLT-40S) ※実装済み	PWR	70 (35x2基)	ROSATOM (商業運転 2020)	浮体式	船舶型	 (1.)
	OFPU (RITM-200M)	PWR	100 (50x2基)	ROSATOM (2021)			 (1.)
中国	ACP100S	PWR	125	CNNC(2017)			 (2.)
	ACPR50S	PWR	60	CGN(2016)			 (3.)
韓国	BANDI-60	PWR	60	KEPCO E&C (2016)			 (4.)
デンマーク	CMSR	溶融塩 炉	200~800 (100x2~8基)	Seaborg Technologies (2020)			 (5.)
フランス	Flexblue	PWR	160	AREVA,CEA, EDF(2008)	海底式	—	 (6.)
イギリス	未定(浮体式原子力発電)	溶融塩 炉	—	CORE POWER (2022)	浮体式	円筒型など	 (7.)
アメリカ	AGS	PWR	1150 (x2)	OPS(1970)		長方形型	 (8.)
	OFNP	PWR	300, 1100	MIT(2016)	浮体式	円筒型	 (9.)
日本	OFNP	BWR/ PWR	600	COCN(2021)			 (9.)
	浮揚式 原子力発電所	BWR/ PWR	1100	電力中央研究 所など(1985)	浮体式	長方形型	 (8.)
	ニュークリア・フロー ティング・アイランド	PWR	1200	日本原子力研究 所など(1979)		半潜水型	 (10.)
	未定(船舶搭載 用小型軽水炉)	PWR	30以下	三菱重工業 (2020)	浮体式 (電源/動力)	船舶型	 (11.)
日本 (動力源)	むつ ※実装済み	PWR	(36MW _t)	JAEA (進水1969)	浮体式 (動力源)	船舶型	 (12.)

出典:

1. N. Salnikova(2021)、2. P. Lobner(2021)、3. P. Lobner(2021)、4. B.J.Lee(2021)、5. M. Pater(2022)、6. J. J. Ingremau(2015)、
7. CORE POWER(2022)、8. 藪内典明(2001)、9. J. Buongiorno(2016)、10. 村田 浩(1981)、11. 三菱重工業、12. JAEA

1.1.5 OFNP の既往研究

(1) 原子力船「むつ」

原子力船「むつ」の研究については、COCN²⁰でも再検証がされており、その数は100本以上の文献にも及ぶ。それらは、洋上の特性を踏まえた原子炉設計、放射線防護設計、船舶設計の3つに大別される。つまり、3Sの観点では、大半が「Safety」に関連するものである。また、一部の衝突防護・座礁防護の関する文献が「Security」に関連するものとなっており、二重船殻、二重底、耐浸水、耐沈没構造としてOFNPの設計に反映済みとなっている⁴⁵。「Safeguards」については、新燃料(FF; Fresh Fuel)とSFの貯蔵庫は船内ではなく陸上施設にあり、2~3年に1回の頻度で陸に着岸させて炉心を一斉取替する方式となっている。ただし、OFNPは陸上から沖合への曳航に時間を要することから(往復で半日以上)²⁰、洋上のOFNP内で燃料取換、FFとSFの一部貯蔵を行うため、保障措置システムの設計は全く異なる。

(2) 浮揚式原子力発電所

電力中央研究所が検討した浮揚式原子力発電所の研究については、特徴的な設備である係留施設やバージ(長方形の浮体構造物)などの技術的成立性や⁴⁶、波浪による動揺や地震応答などが研究されている^{47,48}。つまり、3Sの観点では、「Safety」に関連するものに限定されている⁴⁹。

(3) アカデミック・ロモノソフ

洋上原子力発電として唯一社会実装されているロシアのアカデミック・ロモノソフの研究については、開示情報が少ない。IAEAの革新炉情報システム(ARIS; Advanced Reactor Information System)のデータベース上でも、原子炉設計、原子力安全設計などの「Safety」に関連するものに限定されている⁵⁰。

また、ロシアで開発中のOFPU(Optimized Floating Power Unit)については、基本仕様に加えて、「Safeguards」が議論されている。しかし、OFPUは、核兵器保有国家であるロシアから他国へ輸送された後に発電源として供与されることが想定されている。最大で10年間隔となる燃料交換の際には、OFPUはロシアへ送り返された後、燃料交換が行われる循環型システムとして設計されている。沖合での燃料交換が想定されているOFNPとは核不拡散性に関する設計が全く異なる^{51,52}。

(4) OFNP (米国 MIT 研究チーム)

米国MIT研究チームによるOFNP研究については、2016年の概念提唱から25本以上の文献にも及ぶ。OFNPの特徴的な円筒型の浮体構造物やレイアウトの技術的成立性^{53,54}や、原子力安全設計^{55,56}などの「Safety」に関連する研究が中心的に行われている。また、

「Security」に関連する研究も複数行われており、核セキュリティ性の文献を分類すると、以下3点となる(私訳は **Appendix A, Appendix B, Appendix C** を参照のこと)。

- ・ 設計基礎脅威(DBT)を定義した上での核物質防護システムの全体像⁵⁷
- ・ 船舶移乗脅威への対応^{58,59}
- ・ 船舶衝突脅威への対応^{60,61}

ただし、上記の知見は、核兵器保有国家である米国特有の規制や防護基準^{62,63}に基づいており、日本を含む大多数の国家では条件が全く異なる。

(5) OFNP (日本 COCN)

日本の COCN による OFNP 研究については、2020 年度から 2022 年度に渡り、手弁当の精神に基づき、筆者を含めたプロジェクトメンバーにより無償で行われている。概算評価や簡易実験を中心として、主に「Safety」の強化策が確認されるとともに、社会実装のために必要な検討事項が整理され、各検討事項の妥当性が確認されている¹⁸。また、「Security」については、前述した原子力船「むつ」及び米国 MIT 研究チームの既往研究レビューが行われており¹⁹、対衝突構造として二重船殻や二重底といった設計が反映されている。一方で、局所的なシステム設計の提示や、テロ行為の方法やその対策が例示されるに留まり²⁰、包括的な核物質防護システムの設計までには至っていない。

以上より、OFNP の既往研究としては、「Safety」を中心としたプラント概念の技術的成立性に関する研究が大半であり、OFNP の社会実装に向けて必要な「Security」は一部の議論に留まり、「Safeguards」に至ってはほとんど議論がなされていない。よって、既往研究において、核兵器保有国家である米国の規制や防護基準に基づいて研究がなされ、日本を含む大多数の国家では条件が全く異なる「Security」、及び議論が不足している「Safeguards」について、研究することは大変意義深い。また、OFNP の 2S を研究する上では、洋上というこれまでにない設置環境を考慮し、洋上特有の新たな脅威に対して、研究手法を含めたアプローチの開発が必要である。

1.2 本論文の目的

原子力安全の向上や原子力平和利用の推進に向けた OFNP の研究が世界的に進められているが、原子力安全性を中心としたプラント概念の技術的成立性に焦点が当てられており、洋上というこれまでにない設置環境における社会実装に必須となる新たな 2S での検討は十分ではない。本論文の目的は、洋上特有の 2S 上の新たな脅威に対する応答性を定量評価可能な手法を開発し、2S by design を取り入れた OFNP の堅牢性強化の可能性を明らかにし、堅牢な OFNP 概念を提示することである。

なお、本論文の OFNP 及び参考とした原子力発電の仕様は、以下 **Table 1-6** のとおりである。

Table 1-6 本研究の OFNP 及び参考とした原子力発電の仕様

要求事項	本研究	COCN	ABWR	MIT
定格出力	135 万 kWe 級	60 万 kWe 級	135 万 kWe 級	30 万 kWe 級, 110 万 kWe 級
炉型	BWR (ABWR フル MOX 炉心)	BWR/PWR	BWR (ABWR)	PWR
燃料タイプ	MOX 燃料を主として ウラン燃料も使用	—	MOX 燃料、 ウラン燃料	—
燃焼度	72 GWd/ton	—	45 GWd/ton	—
運転サイクル	24 ヶ月運転	18 ヶ月運転も可能	13 ヶ月運転	—
設備利用率	90%	同左	70%	—
プラント設計寿命	60 年	60~80 年以上	40 年+運転延長	—
運転開始までの期間	14.5 年	同左	—	—
建設費用	陸上原子力発電と同程度	同左	—	—
安全系統(DB)	4 区分(動的)	同左	3 区分	—
安全系統(SA)	2 区分(静的)など	同左	1 区分	—
使用済燃料の貯蔵	・浮体内の使用済燃料プールに保管 ・冷却後、キャスクによる浮体外搬出	同左	建屋内の使用済燃料プール内に保管	建屋内の使用済燃料プール内に保管
建屋・配置	・沖合 30 km(領海)設置 ・二重船殻(二重底)構造 ・浸水耐性 ・航空機衝突耐性	同左	—	—
沈没対策	・サルベージ可能な水深 200~500 m に設置 ・格納容器破損防止のため圧力平衡弁を設置	同左	—	—
船体直径	75 m	—	—	75 m
船底～喫水線の高さ	68 m	—	—	68 m
喫水線～甲板の高さ	34 m	—	—	34 m
合計高さ	108 m	—	—	108 m
排水量	~376,400 ton	—	—	~376,400 ton

1.3 本論文の構成

本論文の構成を **Figure 1-6** に示す通り、5 章の構成とする。

第 1 章「序論」では、日本のエネルギー社会を取り巻く現状と世界で進められている OFNP の研究開発を概観し、社会実装によるエネルギー社会への貢献が期待できる一方で、洋上特有の 2S 上の課題を指摘する。OFNP の 2S 上の脅威に対する応答性を定量評価可能な手法を開発すること、及び 2S by design を取り入れることにより OFNP の堅牢性強化の可能性を明らかにし、堅牢な OFNP 概念を提示することを目的として、本研究の位置づけ、意義を述べる。

第 2 章「核不拡散性評価」では、非核兵器保有国による OFNP の核拡散リスクを定量化し、洋上特有の輸送や保管を含む核燃料管理や、取り扱う核燃料タイプによるリスク低減効果を明らかにする。第四世代原子力システムの核拡散抵抗性及び核物質防護 (GIF/PRPP) 評価手法に基づき、輸送及び移送に伴う核拡散リスク、混合酸化物(MOX)や、5%超 20%未満低濃縮ウラン(HALEU)燃料といった高燃焼度燃料の特性を解析可能な評価指標を開発し、陸上 NPP と比較しながら核拡散抵抗性を定量的に評価する。最後に、核物質転用の経路解析を行い、Safeguards by design による堅牢な OFNP の保障措置システム設計を提示する。

第 3 章「核セキュリティ性評価」では、洋上特有の核セキュリティ上の新たな脅威に対する応答性を定量評価可能な手法を開発し、Security by design による堅牢な OFNP の核物質防護システム設計を提示する。新たな脅威として、遠隔攻撃手段の魚雷を想定し船殻への構造健全性解析を行う。また、脅威への対抗能力として、米国における既往研究と異なり警備要員が致死性武器と先制攻撃権を持たない国家を想定し、船舶移乗による核物質の盗取や妨害破壊行為に対する核セキュリティ性を定量的に評価する。船舶移乗による妨害破壊行為として、核燃料への爆破などにより直接的に燃料損傷させて放射性物質飛散を狙った直接的妨害破壊と、OFNP の安全機能喪失により間接的に燃料損傷させて放射性物質飛散を狙った間接的妨害破壊を評価する。

第 4 章「堅牢な OFNP のための 2S by design 総合評価」では、第 2 章と第 3 章の結果を受け、2S by design を取り入れて 3S シナジー効果を最大化する堅牢な OFNP 概念を提示する。また、OFNP 特有の堅牢性や、本研究で開発した手法と得られた結果の適用範囲を明らかにする。さらに、原子力プラントのみならず船舶安全性も含めた想定を上回る事象 (Beyond DBT) に対して、日本を想定した OFNP の影響緩和設計と洋上防衛について考察し、沈没対策を施した設計、及び特定重大事故等対処施設の合理化、洋上防衛における法令及び実績に基づいた実効性と課題を論述する。

第5章「結論」では、各章によって得られた結果を総括し、本論文の結論とする。



Figure 1-6 本論文の構成

参考文献

- ¹ 環境省, “令和 5 年版 環境白書・循環型社会白書・生物多様性白書”, P2, (2023),
<https://www.env.go.jp/policy/hakusyo/r05/index.html>
- ² 環境省, “令和 3 年版 環境白書・循環型社会白書・生物多様性白書”, P18, (2021),
<https://www.env.go.jp/policy/hakusyo/r03/index.html>
- ³ 資源エネルギー庁, “令和 4 年度エネルギーに関する年次報告(エネルギー白書 2023)” 令和 5 年 6 月 6 日閣議決定・国会報告, P50, (2023),
<https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2023/pdf/>
- ⁴ 首相官邸, “第二百三回国会における菅内閣総理大臣所信表明演説(令和 2 年 10 月 26 日)”, (2020), https://www.kantei.go.jp/jp/99_suga/statement/2020/1026shoshinhyomei.html
- ⁵ 外務省, “菅総理大臣の米国主催気候サミットへの出席について(結果概要)”. (2021),
https://www.mofa.go.jp/mofaj/ic/ch/page6_000548.html
- ⁶ 環境省, “日本の NDC(国が決定する貢献)”, 令和 3 年 10 月 22 日地球温暖化対策推進本部決定, (2021), <https://www.env.go.jp/earth/earth/ondanka/ndc.html>
- ⁷ 原子力委員会, “令和 3 年度版原子力白書”, 令和 4 年 7 月原子力委員会決定, P28, (2022),
<https://www.aec.go.jp/jicst/NC/about/hakusho/index2022.htm>
- ⁸ 原子力委員会, “原子力利用に関する基本的考え方”, 令和 5 年 2 月原子力委員会決定, P5, (2023), <https://www.aec.go.jp/jicst/NC/sitemap/bunya22.htm>
- ⁹ 経済産業省, “第 6 次エネルギー基本計画”, 令和 3 年 10 月 22 日閣議決定, P106, (2021),
<https://www.meti.go.jp/press/2021/10/20211022005/20211022005.html>
- ¹⁰ 経済産業省, “GX 実現に向けた基本方針～今後 10 年を見据えたロードマップ～” 令和 5 年 2 月 10 日, P1,3,7, (2023),
<https://www.meti.go.jp/press/2022/02/20230210002/20230210002.html>
- ¹¹ 堀尾健太, 富田基史, “EU タクソノミーにおける天然ガスと原子力―「トランジショナルな活動」に位置づけられた経緯とスクリーニング基準の分析―”, P1, (2023),
<https://criepi.denken.or.jp/hokokusho/pb/reportDetail?reportNoUkCode=SE22003>
- ¹² M. Morishita, N. Shimizu, T. Katori, et al., “Japan EU Comparative Analysis on Sustainable Finance Policy”, Institute for Global Environmental Strategies (IGES) Policy Report, P38, (2020),
https://www.iges.or.jp/en/publication_documents/pub/policyreport/en/10941/Japan+EU+SusFin+Policy+Report+FINAL.pdf
- ¹³ 森下麻衣子, 清水規子, 香取剛, et al., “EU と日本におけるサステナブルファイナンス政策に関する比較分析”, 地球環境戦略研究機関(IGES)レポート, P39, (2020),
https://www.iges.or.jp/jp/publication_documents/pub/policyreport/jp/11043/Japan+EU+SusFin+Policy+Report+FINAL+JPN.pdf

-
- ¹⁴ 内閣官房, “第 2 回 GX 実行会議 議事録・議事要旨”, 令和 4 年 8 月 24 日開催, P18, (2022), https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/gx_jikkou_kaigi/dai2/gijiyousi.pdf
- ¹⁵ 経済産業省, “脱炭素成長型経済構造への円滑な移行の推進に関する法律案” 2023 年 2 月 10 日閣議決定, (2023), <https://www.meti.go.jp/press/2022/02/20230210004/20230210004.html>
- ¹⁶ 経済産業省, “脱炭素社会の実現に向けた電気供給体制の確立を図るための電気事業法等の一部を改正する法律案”, 2023 年 2 月 28 日閣議決定, (2023), <https://www.meti.go.jp/press/2022/02/20230228005/20230228005.html>
- ¹⁷ J. Buongiorno, J. Jurewicz, M. Golay, N. Todreas, “The offshore floating nuclear plant concept”, Nuclear Technology. Vol. 194, 1-14, (2016), <http://dx.doi.org/10.13182/NT15-49>
- ¹⁸ 産業競争力懇談会(COCN), “産業競争力懇談会 2020 年度 研究会 最終報告 浮体式原子力発電研究会”, (2021), <http://www.cocn.jp/report/2020>
- ¹⁹ 産業競争力懇談会(COCN), “産業競争力懇談会 2021 年度 プロジェクト 最終報告 浮体式原子力発電”, (2022), <http://www.cocn.jp/report/2021>
- ²⁰ 産業競争力懇談会(COCN), “産業競争力懇談会 2022 年度 プロジェクト 最終報告 浮体式原子力発電”, (2023), <http://www.cocn.jp/report/2022>
- ²¹ 安芸稔夫, “欧州の浮体式洋上風力開発について～浮体式洋上風力開発の現状と拡大に向けた課題～”, 海外電力 2024.1, P82~83, (2024).
- ²² 国際原子力機関(IAEA), “Milestones in the Development of a National Infrastructure for Nuclear Power (NG-G-3.1) rev1”, P14~17, P28~30, P52~54, (2015), https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1704_web.pdf
- ²³ 国際原子力機関(IAEA), “Handbook on Nuclear Law: Implementing Legislation”, STI/PUB/1456, P59~78, P113~128, P129=143, (2010), https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1456_web.pdf
- ²⁴ 青木健, “効率的な Pu 燃焼特性を有する高温ガス炉システムの 3S 特性とシナジー効果”, P2, (2018), https://t2r2.star.titech.ac.jp/cgi-bin/publicationinfo.cgi?q_publication_content_number=CTT100759871
- ²⁵ 国際原子力機関(IAEA), “Time to Act: Integrating Safety, Security and Safeguards in the Design of Innovative Reactors”, (2022), <https://www.iaea.org/newscenter/news/time-to-act-integrating-safety-security-and-safeguards-in-the-design-of-innovative-reactors>
- ²⁶ M. K. Snell, C. D. Jaeger, S. E. Jordan, et al., “Security-by-Design Handbook”, SAND2013-0038, January 2013, (2013), <https://doi.org/10.2172/1088049>
- ²⁷ R. A. Bari, S. J. Johnson, J. Hockert, et al., “Overview of the Facility Safeguardability Analysis (FSA) Process”, PNNL-21698, August 2012, (2012), <https://www.osti.gov/biblio/1055408>

-
- ²⁸ T. Bjornard, R. Bean, S. DeMuth, et al., “Safeguards-by-Design: Early Integration of Physical Protection and Safeguardability into Design of Nuclear Facilities”, Global 2009, INL/CON-09-16762, September 2009, (2009),
<https://inldigitallibrary.inl.gov/sites/sti/sti/4384039.pdf>
- ²⁹ 大泉昭人, “加速器駆動システムを用いた TRU 燃料サイクルの核不拡散性に関する研究”, (2022), https://t2r2.star.titech.ac.jp/cgi-bin/publicationinfo.cgi?q_publication_content_number=CTT100881275
- ³⁰ 日本原子力学会 原子力発電部会 「次期軽水炉の技術要件検討」 ワーキンググループ (フェーズ 2), “次期軽水炉の技術要件と実現のための取り組み 「次期軽水炉の技術要件検討」 ワーキンググループ (フェーズ 2) 報告書”, 2024 年 3 月, P32,77, (2024),
http://www.aesj.or.jp/~hatsuden/katsudou/04_jikiroWG/jikiroWG_index.html
- ³¹ 黒田雄二, “海上原子炉とマイクロ炉(北米・ロシア・中国) ～急ピッチで開発が進む「移動する」 SMR の現状と課題～”, 海外電力 2021.12, P53, (2021).
- ³² P. Lobner, “Marine Nuclear Power: 1939-2018”, (2018), <https://lynceans.org/all-posts/marine-nuclear-power-1939-2018>
- ³³ N. Salnikova, “SMR Based Floating Solutions: Design and Specific Features of Legal Regulation”, (2021).
- ³⁴ P. Lobner, “China’s CNNC ACP100S and ACP25S Floating Nuclear Power Plant (FNPP) Concepts”, (2021), <https://lynceans.org/wp-content/uploads/2021/05/China-CNNC-ACP100S-FNPP-converted.pdf>
- ³⁵ P. Lobner, “China’s CGN ACPR50S Floating Nuclear Power Plant (FNPP) Concept”, (2021), <https://lynceans.org/wp-content/uploads/2021/05/China-CGN-ACPR50S-FNPP-converted.pdf>
- ³⁶ B. J. Lee, “BANDI-60: Technology Features and Deployment Pathway”, (2021)
- ³⁷ M. Pater, “Molten salt revisited: the CMSR”, (2022),
<https://www.neimagazine.com/features/featuremolten-salt-revisited-the-cmsr-9423379>
- ³⁸ J. J. Ingremeau and M. Cordiez, “Flexblue® core design: optimisation of fuel poisoning for a soluble boron free core with full or half core refuelling”, EPJ Nuclear Science Technology, Volume 1, (2015), <https://doi.org/10.1051/epjn/e2015-50025-3>
- ³⁹ Core Power, “Japan’s Onomichi Dockyard leads \$80m investment in CORE POWER”, (2022), <https://corepower.energy/news/japan-s-onomichi-dockyard-leads-usd80m-investment-in-core-power>
- ⁴⁰ 藪内典明, 高橋政男, 中澤利雄, et al., “原子力施設の浮体式海上立地に関する検討(1)－浮体式原子力発電施設の概念検討－(受託研究)”, JAERI-Research 2000-63, (2001),
<https://doi.org/10.11484/jaeri-research-2000-063>

-
- ⁴¹ 村田浩, 武谷清昭, 両角実, 片山正敏, “ニュークリア・フローティング・アイランド構想に関する検討評価”, 日本原子力学会誌, 1981 年 23 巻 2 号 P116-124 (1981),
<https://doi.org/10.3327/jaesj.23.116>
- ⁴² 三菱重工業, “三菱革新炉開発の取組み”, 原子力小委員会 第 1 回革新炉 WG, 資料 8, (2022),
https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/genshiryoku/kakushinro_wg/pdf/001_08_00.pdf
- ⁴³ 日本原子力研究開発機構 (JAEA), “原子力船「むつ」”,
<https://www.jaea.go.jp/04/aomori/nuclear-power-ship/index.html>
- ⁴⁴ 松井家孝, 鹿島遼一, 日比野敏, “今後の展望と課題－原子力発電所の新立地－”, P53~58, (1989), https://www.jstage.jst.go.jp/article/coj1975/27/4/27_48/_pdf/-char/ja
- ⁴⁵ 石川播磨重工業, “原子力第一船”むつ” 船体部計画・建造の記憶”, 石川播磨技法・1970 年記念号, (1970).
- ⁴⁶ 中村秀治, 鹿島遼一, 萩原豊, et al., “大型浮体係留施設の設計に関する調査”, 電力中央研究所報告 調査報告 385020, (1985),
<https://www.denken.or.jp/hokokusho/pb/reportDetail?reportNoUkCode=385020>
- ⁴⁷ 池野正明, 平口博丸, 鹿島遼一, “浮揚式発電所の不規則波浪による動揺と保留の安定性評価－防舷材反力の履歴を考慮した 2 次元解析法の開発－” 電力中央研究所報告 調査報告: U90039, (1990),
<https://criepi.denken.or.jp/hokokusho/pb/reportDetail?reportNoUkCode=U90039>
- ⁴⁸ 萩原豊, 増子芳夫, 中村秀治, et al., “浮揚式原子力発電所浮体構造物の地震応答特性(その 1)”, 電力中央研究所報告 調査報告 385028, (1986),
<https://www.denken.or.jp/hokokusho/pb/reportDetail?reportNoUkCode=385028>
- ⁴⁹ 榊山勉, 萩原豊, 池野正明, et al., “浮揚式原子力発電所の動揺特性とプラント成立性評価”, 電力中央研究所報告 総合報告: U44, (2002),
<https://www.denken.or.jp/hokokusho/pb/reportDetail?reportNoUkCode=U44>
- ⁵⁰ IAEA, “KLT-40S overview”, IAEA ARIS database, (2013),
<https://aris.iaea.org/PDF/KLT-40S.pdf>
- ⁵¹ T. A. TAGIROVA, P.A. GORBUNOV, S.A. DUSHEV, et al., “Features of applying safeguards to Optimized Floating Power Unit spent nuclear fuel handling”, Symposium on International Safeguards 2022, (2022).
- ⁵² I. SHMELEV, V. GALITSKIKH, N. SALNIKOVA, V. MALEV, “ANALYSIS OF APPLICATION OF THE IAEA SAFEGUARDS TO FLOATING NUCLEAR POWER UNITS”, Symposium on International Safeguards 2022, (2022).
- ⁵³ Jacob M. Jurewicz, “Design and Construction of an Offshore Floating Nuclear Power Plant”, (2015).
- ⁵⁴ Matthew Brian Strother, “Hydrodynamic Analysis of the Offshore Floating Nuclear Power Plant”, (2015).

-
- ⁵⁵ J. Zhang, J. Buongiorno*, M. Golay, N. Todreas, “Ocean-based Passive Decay Heat Removal in the Offshore Floating Nuclear Plant (OFNP)”, (2015).
- ⁵⁶ Y. Zhang, J. Buongiorno, M. Golay, N. Todreas, “Safety Analysis of a 300-MW (electric) Offshore Floating Nuclear Power Plant in Marine Environment”, *Nuclear Technology*, (2018), <https://doi.org/10.1080/00295450.2018.1433935>
- ⁵⁷ K. Vincent, N. Todreas, J. Buongiorno, M. Golay, A. Birch, T. Isdanavich, R. Thomas, H. Stevens, “Overview of security plan for offshore floating nuclear plant”, *Proc. ICONE24*, Charlotte, North Carolina, June 26-30, 2016, (2016), <http://dx.doi.org/10.1115/ICONE24-61029>
- ⁵⁸ J. Conway, N. Todreas, J. Halsema, C. Guryan, A. Birch, T. Isdanavich, J. Florek, J. Buongiorno, M. Golay, “Physical security analysis and simulation of the multi-layer security system for the offshore nuclear plant (ONP)”, *Nuclear Engineering and Design*, 352, (2019), <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2019.110160>
- ⁵⁹ J. Conway, “Security and the Offshore Nuclear Plant (ONP): Security Simulation Testing and Analysis of the Multi-Layer Security System”, (2019).
- ⁶⁰ G. Genzman, K. Shirvan, N. Todreas, J. Buongiorno, M. Golay, “Ship collision security for an offshore nuclear platform”, *Proc. ICAPP 2017*, Fukui and Kyoto, Japan, April 24-28, 2017, (2017).
- ⁶¹ G. Genzman, “Ship Collision and the Offshore Floating Nuclear Plant (OFNP) Analysis of Possible Threats and Security Measures”, (2016), <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/104144>
- ⁶² 83rdth United States Congress, “ATOMIC ENERGY ACT OF 1954, SEC. 161A. USE OF FIREARMS BY SECURITY PERSONNEL”.
- ⁶³ United States Nuclear Regulatory Commission (U.S.NRC), “10 CFR Part 73. 15 Authorization for use of enhanced weapons and preemption of firearms laws”, <https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/cfr/part073/index.html>

第 2 章

核不拡散性評価

第2章 核不拡散性評価

2.1 はじめに

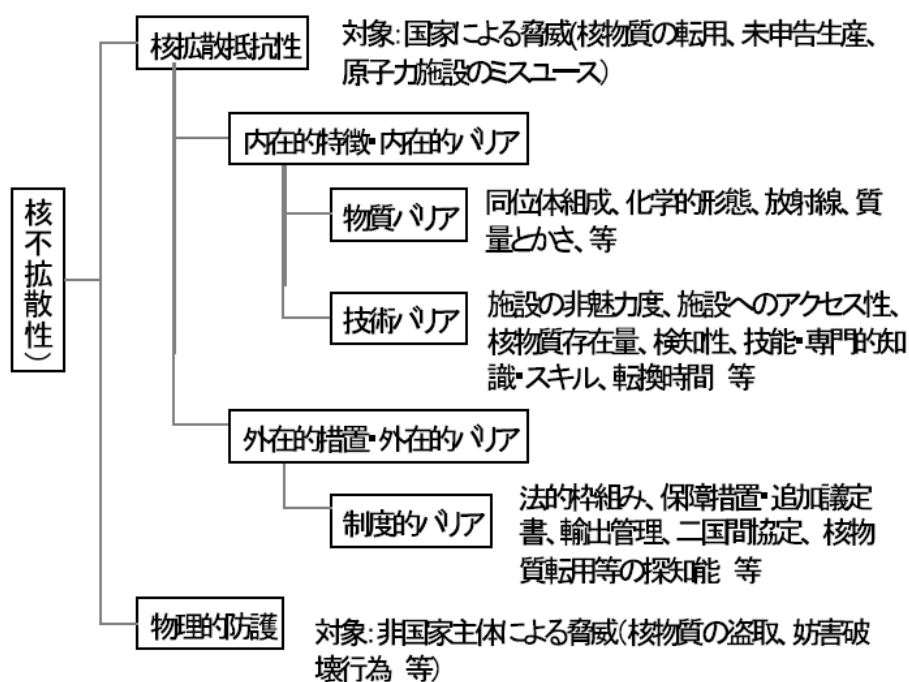
第1章で説明した通り、原子力安全の向上や原子力平和利用の推進に向けた浮体式洋上原子力発電所(OFNP)の研究が世界的に進められている。一方で、原子力安全性を中心としたプラント概念の技術的成立性に焦点が当てられており、洋上といったこれまでにない設置環境における社会実装に必須となる新たな核不拡散性の検討は十分ではない。そこで、洋上設置の特性に着目し、非核兵器保有国による OFNP の核拡散リスクを定量化し、Safeguards by design によってリスク低減を図ることが重要である^{1,2,3}。本研究では、洋上における核燃料の輸送や保管を考慮するとともに、輸送/移送の頻度を核拡散リスクとして捉え、リスク低減のために高燃焼度化された燃料を用いる。

また、非核兵器保有国家の日本において原子力平和利用を推進していくためには、エネルギー安定供給/安全保障(Energy security)、及び利用目的のないプルトニウムを持たないといった観点から、プルトニウム利用を前提とした核燃料サイクルが必要となってくる⁴。プルサーマルはそのための有力な選択肢となるため、OFNP のような新しい原子力システムを設計する上では、混合酸化物(MOX)燃料の使用を前提とした設計がなされるべきである。一方で、MOX 燃料の取り扱いについては、ホスト国による核拡散リスクを低減することが国際社会から強く求められる。

ここで、原子力システムの核拡散リスク低減を議論する上で欠かせない概念として、核拡散抵抗性(Proliferation Resistance)が挙げられる。核拡散抵抗性は、「国家が核兵器や他の核爆発装置を獲得することを目的とした核物質の転用や未申告生産、技術の不正使用を防ぐための特性」の定義で国際的な同意を得ており^{5,6}、**Figure 2-1** に示す通り、「内在的障壁(特性)」と「外在的措置(特性)」によって構成される⁷。外在的特性は、国際的条約などによる外交活動や保障措置などの制度的な抵抗性を指し、強力かつ信頼性が高いものとして知られている。ただし、これらは国際的信頼性に基づくものであり、ホスト国の将来的な政治的情勢の変化によってはその効力が弱まるおそれが指摘されている。内在的特性は、燃料の高燃焼度化で核爆発装置(NED)開発に適さない同位体組成にする⁸、または核物質の取得や接近が困難な施設を設計する、などの物質的または技術的な抵抗性を指す。上記指摘のケースに対しても将来にわたって効果的であるとされているが、原子力システムの核不拡散性のみならず原子力安全性や核セキュリティ性などにも影響を与えるおそれがあるため、十分な議論が必要である。核拡散抵抗性を議論する上で重要な点は、両特性を併せて適用して多重に防護することで、堅牢な原子力システムが構築可能ということである。

また、核拡散抵抗性評価においては、第4世代原子力システムの核拡散抵抗性及び核物質防護(GIF/PRPP)評価手法が国際的に知られている。同手法は、原子力システムを内在的特性と外在的特性による最適設計へと導くことを目的とし、脅威に応じたシステム応答を経路解析し、定量的な核拡散抵抗性評価を可能としている^{9,10}。GIF/PRPP 手法により、洋上特有の拡散経路の特定及び評価は可能となる。一方で、GIF/PRPP の提示する評価指標では、高燃焼度燃料の特性や、輸送/移送の頻度に関する核拡散リスクは評価不可能である。

以上より、本章では、非核兵器保有国による OFNP の核拡散リスクを定量化し、洋上特有の輸送や保管を含む核燃料管理シナリオや、取り扱う核燃料タイプによるリスク低減効果を明らかにする。GIF/PRPP 評価手法に基づき、輸送/移送に伴う核拡散リスク及び MOX 燃料や 5%超 20%未満低濃縮ウラン(HALEU)燃料といった高燃焼度燃料の特性を解析可能な評価指標を開発し、陸上の原子力発電所(NPP)と比較しながら核拡散抵抗性を定量的に評価する。最後に、核物質転用の経路解析を行い、Safeguards by design による堅牢な OFNP の保障措置システム設計を提示する。



出典: 久野ら(2009)

Figure 2-1 原子力システムにおける核不拡散対策についての基本的な考え方

2.2 評価対象の定義

2.2.1 核燃料タイプ

輸送/移送頻度を減らすことによる核拡散リスクの低減や、使用済燃料(SF; Spent Fuel)発生量の低減の観点から、高燃焼度化を狙った MOX 燃料と HALEU 燃料について、異なる運転サイクルにより核燃料タイプを定義する(**Table 2-1**)。

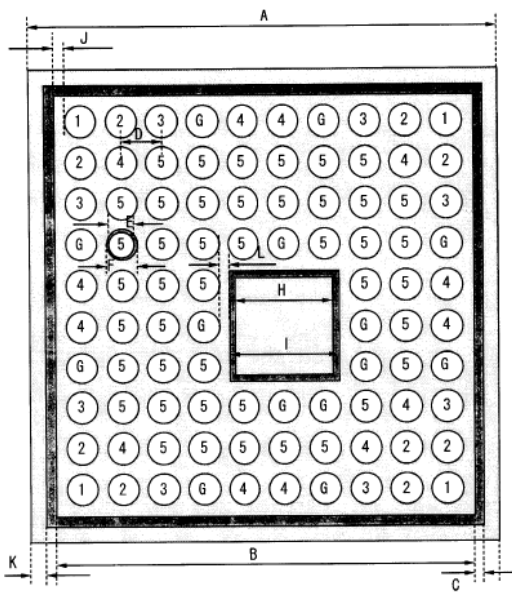
本研究では、日本原子力研究所が提案したベンチマーク問題に基づき、高燃焼度(72.0 GWd/ton)の燃料を選択する¹¹。MOX 燃料については、**Figure 2-2** に示す通り、10×10 燃料(角菅ウォーターチャンネル)であり、劣化ウランにプルトニウムを加えた MOX 燃料棒(77 本、富化度種類 5)と、濃縮ウランにガドリニアを加えた Gd 燃料棒(14 本)を使用する。また、集合体平均 Pu 富化度は 10.9 wt%Put、7.0 wt%Puf とする。HALEU 燃料(UO₂ 燃料)については、**Figure 2-3** に示す通り、STEP3 型の 9×9 燃料集合体であり、4 種類の UO₂ 燃料と 1 種類の UO₂-Gd₂O₃ 燃料を使用し、集合体平均ウラン濃縮度は 5.5 wt%とする。これらの燃料は、1 サイクル中において、3 ヶ月間の燃料取替と 24 ヶ月(4 バッチ)または 12 ヶ月(8 バッチ)燃焼とする。なお、原子炉内の燃料取替において、全集合体数/新燃料取替体数をバッチ数と呼び、例えば 4 バッチでは、新燃料取替体数は全集合体数の 1/4 となる。原子炉はプラント設計寿命 60 年を想定した ABWR のフル MOX 炉心であり、出力密度は 25 W/gU(52.3 W/cm³)とする。また、典型的な陸上の BWR プラントと比較評価するための参照ケースとして、前述と同様の燃料組成・原子炉にて、燃焼度 45 GWd/ton で、1 サイクルあたり 12 ヶ月(5 バッチ)燃焼の MOX 及び UO₂ 燃料を用意する。MOX 及び UO₂ 燃料集合体 1 体あたりのウランとプルトニウムの総重量は 173 kg とする。

燃焼計算には、SCALE 6.2.4/TRITON の二次元輸送・燃焼計算モジュールを使用し¹²、核データライブラリとして、ENDF/B-VII.1 に基づき 252 群で準備されたものを使用する¹³。また、二次元計算のため、ボイド率は炉心全体の平均的な値として 40%を想定し、平衡サイクルとする。なお、前述した日本原子力研究所が提案したベンチマーク問題との無限増倍率 k_{inf} の比較結果は **Appendix D** に示す。

本研究の想定する基本的な仕様としては、MOX 燃料を主としながら UO₂ 燃料も場合によって使用し、燃焼度 72 GWd/ton で 24 ヶ月運転(4 バッチ)の ABWR 炉心とする(**Table 2-1** 中の No.1)と No.3))。

Table 2-1 評価対象とする核燃料タイプ

No.	核燃料タイプ	運転サイクル			燃焼度	原子炉
1)	MOX 燃料	24 ヶ月運転	3 ヶ月燃料取替	4 バッチ	72 GWd/ton	ABWR フル MOX 炉心 集合体 872 体 60 年寿命 (25W/gU)
2)	(7.0%Pu _F ;10x10)	12 ヶ月運転	3 ヶ月燃料取替	8 バッチ		
3)	UO ₂ 燃料	24 ヶ月運転	3 ヶ月燃料取替	4 バッチ		
4)	(5.5%U _F ;9x9)	12 ヶ月運転	3 ヶ月燃料取替	8 バッチ		
Ref. 1	MOX 燃料	12 ヶ月運転	3 ヶ月燃料取替	5 バッチ	45 GWd/ton	
Ref. 2	UO ₂ 燃料					



記号 (図 3.4.2-1)	内容	寸法 (cm)
A	集合体ピッチ	15.24
B	C/B 内幅	13.40
C	C/B 厚	0.250
D	燃料棒ピッチ	1.295
E	ペレット直径	0.884
F	燃料被覆管外径	1.005
H	W/C 内幅	3.355
I	W/C 外幅	3.500
J	C/B-燃料被覆管間距離	0.370
K	水ギャップ幅 (片側)	0.670
L	W/C-燃料被覆管距離	0.3375

メモ:

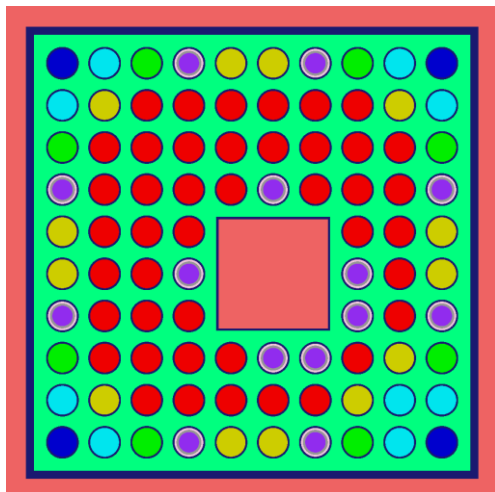
C/B: チャンネルボックス、 W/C: ウォータチャンネル

燃料被覆管肉厚: 0.0605 cm

ペレット-被覆管ギャップ=0.0 (ペレットの密度を小さくし、被覆管内面まで体積膨張させている)

W/C 厚: 0.0725 cm、水ギャップは制御棒側、反制御棒側共通

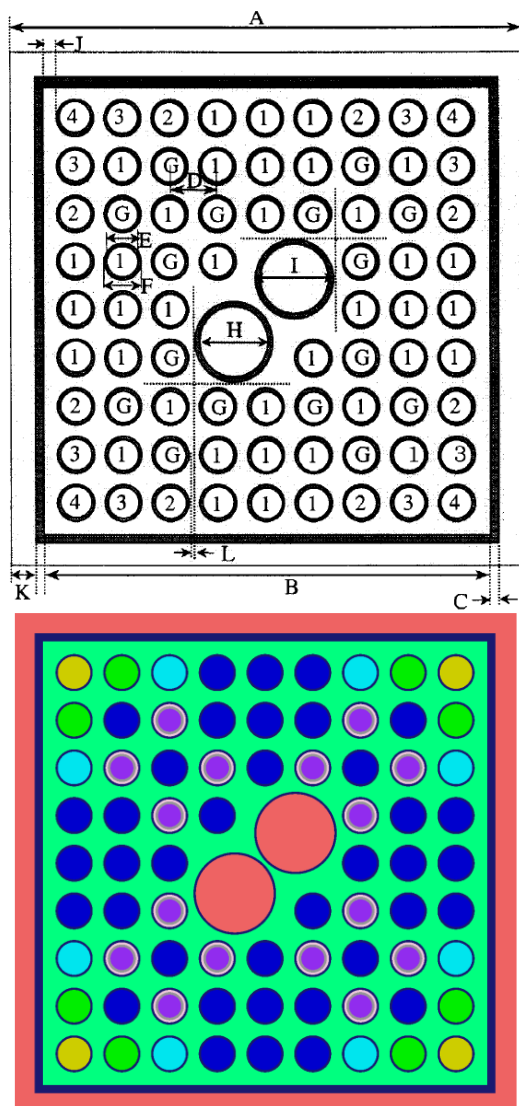
C/B コーナーおよび W/C コーナーの半径は 0



	タイプ1	タイプ2	タイプ3	タイプ4	タイプ5	タイプG	
本数	4	9	8	13	43	項目	数値
密度	10.0g/cc	10.0g/cc	10.0g/cc	10.0g/cc	10.0g/cc	本数	14
U235 濃縮度	0.2wt%	0.2wt%	0.2wt%	0.2wt%	0.2wt%	密度	9.8g/cc
Pu _F 富化度	4.0wt%	6.0wt%	10.0wt%	12.0wt%	16.0wt%	U235 濃縮度	4.0wt%
Pu _F 富化度	2.552wt%	3.828wt%	6.380wt%	7.656wt%	10.208wt%	Gd ₂ O ₃ 濃度	3.5wt%
原子数密度 [# /barn/cm]						原子数密度 [# /barn/cm]	
U235	4.3208E-05	4.2347E-05	4.0621E-05	3.9755E-05	3.8019E-05	U235	8.5735E-04
U238	2.1288E-02	2.0864E-02	2.0014E-02	1.9587E-02	1.8732E-02	U238	2.0316E-02
Pu238	1.8680E-05	2.8046E-05	4.6831E-05	5.6249E-05	7.5139E-05	Gd154	2.4930E-05
Pu239	4.8276E-04	7.2482E-04	1.2103E-03	1.4537E-03	1.9419E-03	Gd155	1.6925E-04
Pu240	2.2053E-04	3.3110E-04	5.5286E-04	6.6405E-04	8.8705E-04	Gd156	2.3409E-04
Pu241	8.1694E-05	1.2266E-04	2.0481E-04	2.4600E-04	3.2861E-04	Gd157	1.7897E-04
Pu242	5.5987E-05	8.4059E-05	1.4036E-04	1.6859E-04	2.2520E-04	Gd158	2.8407E-04
Am241	2.3718E-05	3.5610E-05	5.9460E-05	7.1419E-05	9.5403E-05	Gd160	2.5228E-04
O16	4.4430E-02	4.4466E-02	4.4538E-02	4.4574E-02	4.4646E-02	O16	4.4063E-02

出典: 日本原子力研究所(2001)

Figure 2-2 MOX 燃料の仕様



記号 (図 3.4.1-1)	内容	寸法 (cm)
A	集合体ピッチ	15.24
B	C/B 内幅	13.40
C	C/B 厚	0.250
D	燃料棒ピッチ	1.440
E	ペレット直径	0.980
F	燃料被覆管外径	1.120
H	W/R 内径	2.350
I	W/R 外径	2.490
J	C/B-燃料被覆管間距離	0.380
K	水ギャップ幅 (片側)	0.670
L	W/R-燃料被覆管距離	0.160

メモ：
C/B；チャンネルボックス、 W/R；ウォータロッド、
燃料被覆管肉厚：0.070 cm、 ペレット-被覆管ギャップ=0.0 (ペレットの密度を小さくし、被覆管内面まで体積膨張させている)
W/R 厚：0.070 cm、水ギャップは制御棒側、反制御棒側共通
C/B コーナー半径は 0

	タイプ1	タイプ2	タイプ3	タイプ4	タイプG	
本数	38	8	8	4	項目	数値
UO ₂ 密度	10.1 g/cc	10.1 g/cc	10.1 g/cc	10.1 g/cc	本数	16
U235 濃縮度	6.3wt%	5.0wt%	4.0wt%	3.0wt%	密度	9.8g/cc
原子数密度 [#/barn/cm]	[#/barn/cm]	[#/barn/cm]	[#/barn/cm]	[#/barn/cm]	U235 濃縮度	5.0wt%
U235	1.4322E-03	1.1367E-03	9.0936E-04	6.8203E-04	Gd ₂ O ₃ 濃度	6.0wt%
U238	2.1032E-02	2.1324E-02	2.1549E-02	2.1774E-02	原子数密度 [#/barn/cm]	
O16	4.4928E-02	4.4921E-02	4.4916E-02	4.4912E-02	U235	1.0389E-03
					U238	1.9490E-02
					Gd154	4.1864E-05
					Gd155	2.8739E-04
					Gd156	3.9950E-04
					Gd157	3.0602E-04
					Gd158	4.8536E-04
					Gd160	4.3093E-04
					O16	4.3985E-02

出典: 日本原子力研究所(2001)

Figure 2-3 UO₂ 燃料の仕様

2.2.2 核燃料管理シナリオ

洋上特有の核燃料の輸送や保管の違いによる核拡散リスクの低減効果を評価するため、**Figure 2-4** に示す通り、OFNP の SF の保管場所の違いに応じて核燃料管理シナリオ(シナリオ A~C)を定義する。また、比較評価の参照ケースとして、典型的な陸上 NPP のシナリオ(シナリオ Ref.)も定義する。

シナリオ A~C とシナリオ Ref.の大きな違いとしては、NPP への新燃料(FF)の輸送と NPP から陸上保管施設への SF の輸送の方法が、シナリオ A~C では一括輸送であるが、シナリオ Ref.では燃料取替のタイミングに合わせて都度輸送である点が挙げられる。すなわち、一度に輸送される燃料集合体数の想定は、以下の通りとする。

- ・ UO₂-FF(シナリオ A~C)－400 体
ウラン輸送容器 1 基あたり集合体 2 体装荷可能であり、かつウラン輸送車が 200 基のウラン輸送容器を積載可能なため。
- ・ MOX-FF(シナリオ A~C)－1380 体
輸送用の乾式キャスク 1 基あたり集合体 69 体装荷可能であり¹⁴、かつキャスク輸送船が 20 基のキャスクを積載可能なため¹⁵。
- ・ SF(シナリオ A の乾式キャスク貯蔵)－1380 体
同上
- ・ SF(シナリオ B の湿式キャスク貯蔵)－440 体
輸送用の湿式キャスク 1 基あたり集合体 22 体装荷可能であり¹⁶、かつキャスク輸送船が 20 基のキャスクを積載可能なため。
- ・ UO₂-FF、MOX-FF、SF(シナリオ Ref.)－174 体
炉心中の燃料集合体が 872 体、かつ 5 バッチ運転であり、燃料取替のタイミングに合わせて都度燃料輸送するため。

上記を踏まえて、核燃料管理シナリオは以下の通りとする(**Figure 2-4**)。

- ・ シナリオ A (本研究の想定する基本的なシナリオ)
 - (1) MOX-FF 1380 体(または UO₂-FF 400 体)は、OFNP へ一括輸送される
 - (2) 燃焼後に炉心から取り出された SF は、OFNP 内の使用済燃料プール(SFP)で 18 年間冷却される
 - (3) SF1380 体は、乾式キャスクによって、OFNP から陸上キャスク保管庫施設へ一括輸送され、乾式キャスクに装荷されたまま、陸上キャスク保管施設内で長期保管される

- ・ シナリオ B
 - (1) MOX-FF 1380 体(または UO_2 -FF 400 体)は、OFNP へ一括輸送される
 - (2) 燃焼後に炉心から取り出された SF は、OFNP 内の SFP で 3 年間冷却される
 - (3) SF440 体は、湿式キャスクによって、OFNP から陸上 SFP 施設へ一括輸送され、湿式キャスクから取り出されて、陸上 SFP 施設内の SFP で長期保管される
- ・ シナリオ C
 - (1) MOX-FF 1380 体(または UO_2 -FF 400 体)は、OFNP へ一括輸送される
 - (2) 燃焼後に炉心から取り出された SF は、OFNP 内の SFP で長期保管される
- ・ シナリオ Ref.
 - (1) MOX-FF 174 体(または UO_2 -FF 174 体)は、陸上 NPP へ都度輸送される
 - (2) 燃焼後に炉心から取り出された SF は、陸上 NPP 内の SFP で 18 年間冷却される
 - (3) SF174 体は、乾式キャスクによって、陸上 NPP から陸上 SFP 施設へ都度輸送され、乾式キャスクに装荷されたまま、陸上キャスク保管施設内で長期保管される

なお、本研究では、既往文献から BWR 燃料用のキャスクを抽出しており^{14,16,17,18}、湿式キャスク(輸送用)として NFT-22B、乾式キャスク(輸送/貯蔵兼用)として HDP-69B を想定している(**Table 2-2**)。また、収容体数と冷却期間をそれぞれ 22 体/69 体、3 年/18 年と一律に定義している。詳細な評価においては、輸送側と貯蔵側の両方で、除熱機能、遮蔽機能、密封機能、臨界防止機能の機能等について、要求事項を満足することが必要である。また、MOX 燃料はウラン燃料に比べて発熱量などが大きいため、注意が必要である。

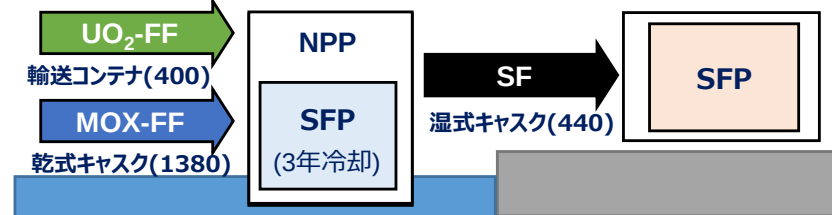
Table 2-2 BWR 燃料用キャスクの種類について

	キャスク種類	収容体数	発熱量	放射能強度	冷却期間	出典
湿式 (輸送用)	NFT-12B	12 体	—	—	—	東京電力
	NFT-22B	22 体	25 kW	$2.04 \times 10^{17} \text{ Bq}$	2.4 年	東京電力
	NFT-32B	32 体	22 kW	—	—	原燃輸送
乾式 (貯蔵用)	中型 ※仮称	37 体	10.8 kW	—	13 年	東京電力
	大型 ※仮称	52 体	15.2 kW	—	13 年	東京電力
乾式 (輸送貯蔵 兼用)	A ※仮称	69 体	—	—	18 年	東京電力
	B ※仮称	69 体	15.3 kW	—	18 年	東京電力
	HDP-69B	69 体	13.8 kW	—	18 年	日立 GE

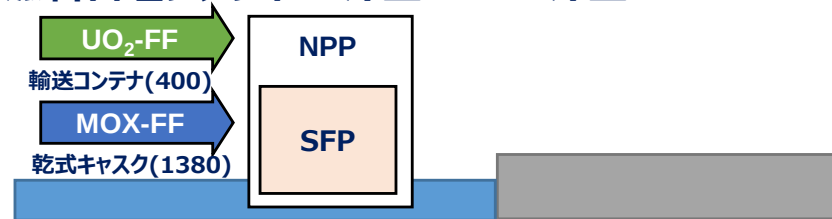
燃料管理シナリオA: 洋上NPP+陸上キャスク保管庫



燃料管理シナリオB: 洋上NPP+陸上SFP



燃料管理シナリオC: 洋上NPP+洋上SFP



燃料管理シナリオRef: 陸上NPP+陸上キャスク保管庫

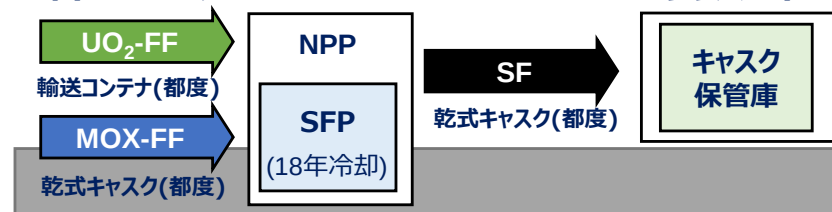


Figure 2-4 評価対象とする核燃料シナリオ

2.2.3 核燃料管理シナリオの成立性評価

2.2.3.1 MOX 新燃料の一括輸送に伴う長期保管時の核燃料品質劣化

MOX 燃料を扱う上では、MOX-FF の製造から燃焼まで期間が長期にわたる場合は、 ^{241}Am 蓄積による燃焼時の反応度低下に注意が必要である。本研究では、多数の MOX-FF を一括輸送するシナリオを想定しているため、燃焼開始までの長期保管による無限増倍率 k_{inf} への影響を評価する。

まず、一括輸送が可能な最大数(1380 体)から、最適な輸送の頻度を評価した。核燃料タイプの基本的な仕様としては、前述の **Table 2-1** 中の No.1)に示す通り、MOX-FF の 24 ヶ月運転と 3 ヶ月燃料取替を 1 サイクルとした 4 バッチの運転を想定しているため、27 ヶ月あたり 218 体(全炉心 872 体の 1/4)の MOX-FF が必要である。MOX-FF の必要数は、5 サイクル(約 11 年)で 1090 体、6 サイクル(約 13 年)で 1308 体、7 サイクル(約 15 年)で 1526 体となる。よって、一括輸送は 10 年~15 年程度の頻度で行うことが望ましい。

次に、異なる保管期間の MOX-FF に対する、各サイクルの燃焼前後の無限増倍率 k_{inf} を評価した。燃焼計算には、SCALE 6.2.4/TRITON の二次元輸送・燃焼計算モジュールを使用し¹²、核データライブラリとして、ENDF/B-VII.1 に基づき 252 群で準備されたものを使用する¹³。評価対象とした MOX-FF は、製造後、0 年保管、5 年保管、10 年保管、15 年保管、60 年保管した後、それぞれ 4 サイクル燃焼した(燃焼度: 18, 36, 54, 72 GWd/ton)。評価結果として、**Figure 2-5** は、保管期間に応じた燃料取替時の MOX-FF の無限増倍率 k_{inf} を示す(縦軸は k_{inf} 、横軸は燃焼度)。**Figure 2-6** は、同様の指標について、MOX-FF へ Gd 添加が無いケースを示す(Gd 原子数密度を 0 近似したもの)。また、**Figure 2-7** は、MOX-FF の保管期間(横軸)に応じた核種割合(縦軸)を示す。

Figure 2-5 より、保管期間に関わらず全ての MOX-FF において、燃焼度が 0 GWd/ton から 18 GWd/ton へ増加したところで最大の k_{inf} を示し、その後燃焼度が増加するにつれて k_{inf} が低下した。これは、燃焼初期において、可燃性毒物である Gd が燃焼されたことが主な原因である。また、**Figure 2-6** より、MOX-FF へ Gd 添加が無い場合には、燃焼度 0 GWd/ton における k_{inf} は、いずれのケースでも 0.15~0.16 と大幅に増加しており、燃焼初期における Gd の可燃性毒物としての効果を裏付けている。

Figure 2-5 より、保管期間が長くなるほど、各燃焼度における k_{inf} は低下した。これは、保管期間の中で、 ^{241}Pu が ^{241}Am に核種崩壊し、核分裂性物質の割合が減少したこと、及び中性子吸収が増加したことが原因である。また、**Figure 2-7** より、MOX-FF の保管期間の長くなるほど ^{241}Pu の割合が低下し、 ^{241}Am が増加したことを裏付けている。

ここで、ある保管期間と 0 年保管の MOX-FF を比較した時の無限増倍率の変化率「 $\Delta k/k_0(\%)$ 」を **Eq.2.1** の通り定義する。**Figure 2-8** は、ある保管期間(横軸)と 0 年保管の MOX 新燃料を比較した時の無限増倍率の変化率 $\Delta k/k_0(\%)$ (横軸)を表す。なお、サイクル初期平均は燃焼度 0, 18, 36, 54 GWd/ton の平均値、サイクル末期平均は燃焼度 18, 36, 54, 72 GWd/ton の平均値を表す。MOX-FF15 年保管においては、 $\Delta k/k_0(\%)$ はサイクル初期平均で 4.3%、サイクル末期平均で 2.8%低下している。また、ABWR のような大型の熱中性子炉の場合、中性子の漏れ出てくる割合は一般的に 3%程度となる¹⁹。よって、一度に輸送可能な最大量を考慮し、MOX-FF の一括輸送を 10 年~15 年程度の頻度で行う場合は、上述の保管期間に応じた無限増倍率の低下や、中性子の漏れ分を考慮し、核燃料タイプやサイクルごとの炉心燃料配置を設計する必要がある。

$$\frac{\Delta k}{k_0}(\%) = \frac{k_t - k_0}{k_0} \cdot 100 \quad (\text{Eq.2.1})$$

$\Delta k/k_0(\%)$: ある保管期間と 0 年保管の MOX-FF を比較した時の無限増倍率の変化率

k_0 ; MOX-FF 0 年保管の無限増倍率

k_t ; MOX-FF t 年保管の無限増倍率

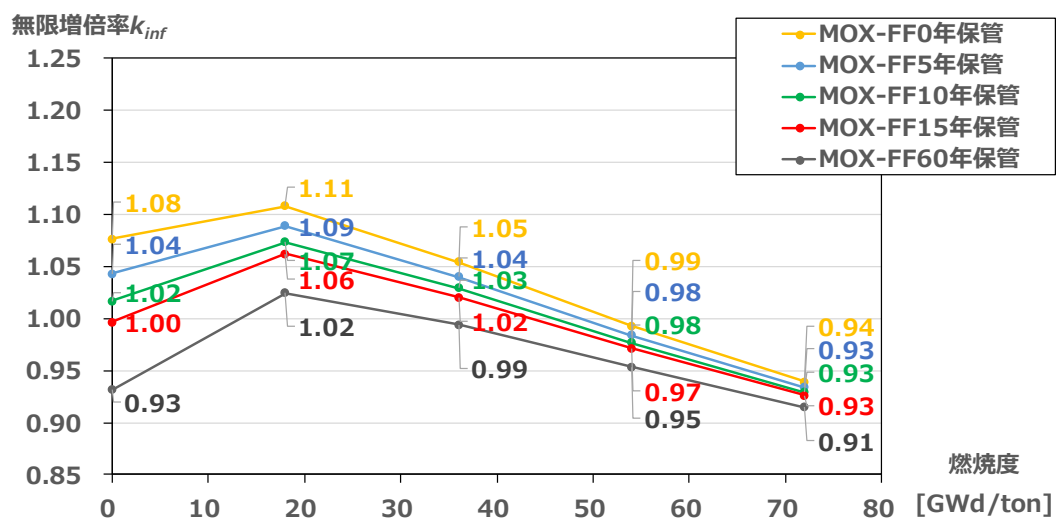


Figure 2-5 保管期間に応じた MOX 燃料の各サイクルにおける無限増倍率(Gd 有り)

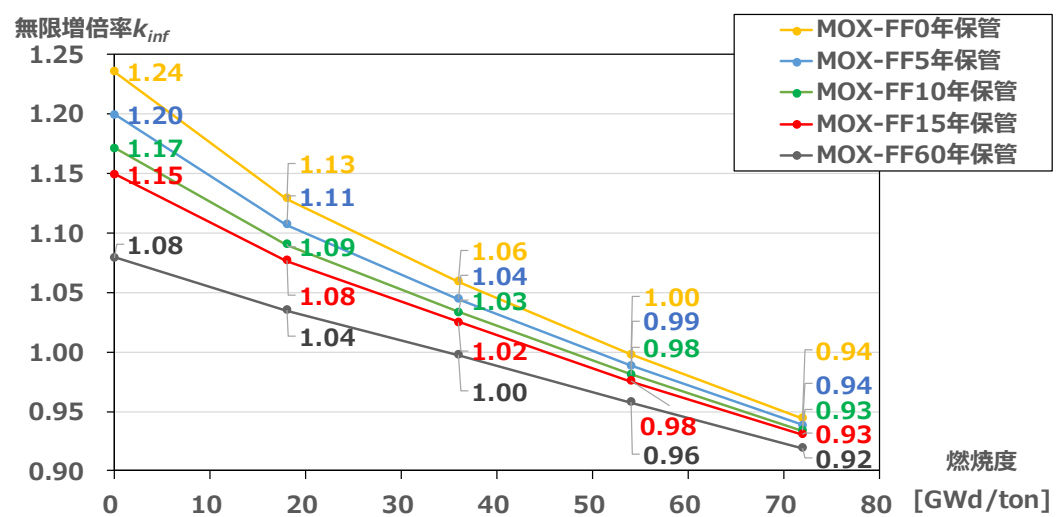


Figure 2-6 保管期間に応じた MOX 燃料の各サイクルにおける無限増倍率(Gd 無し)

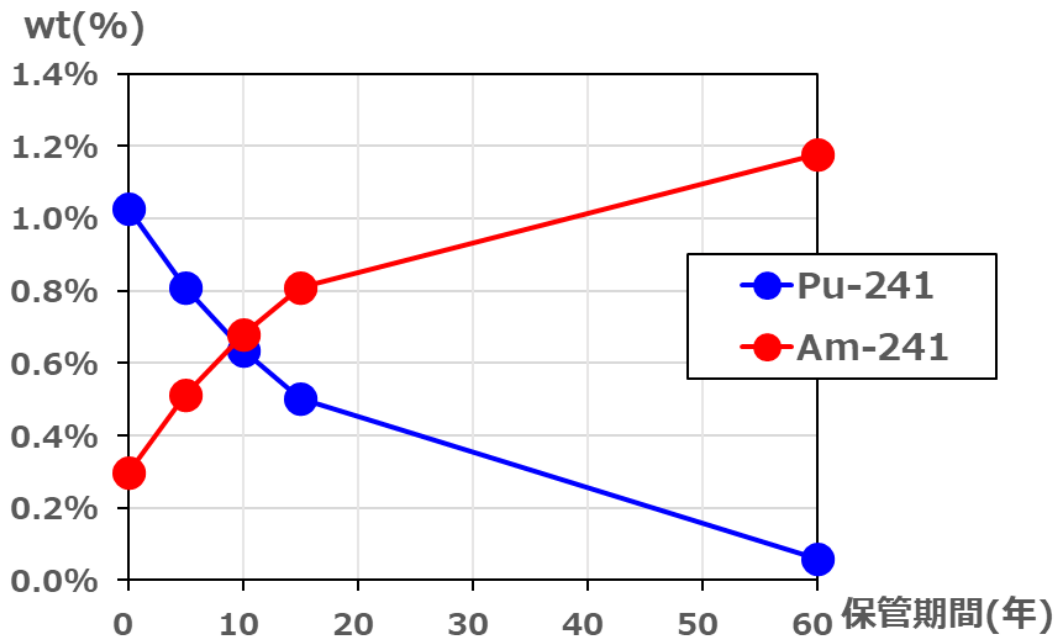


Figure 2-7 保管期間に応じた MOX 新燃料中の核種割合

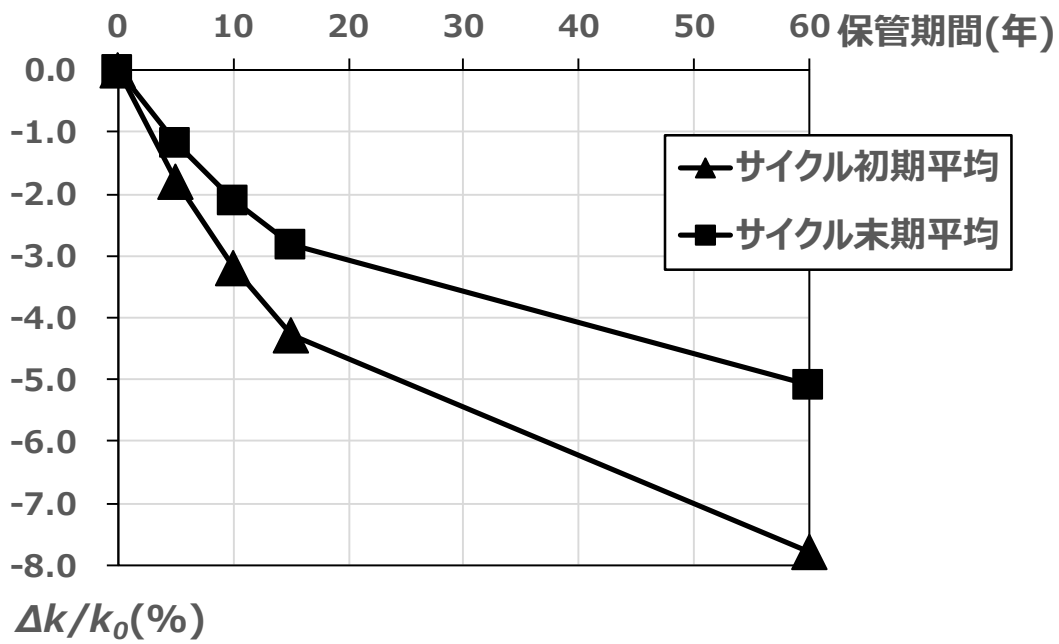


Figure 2-8 ある保管期間と 0 年保管の MOX 新燃料を比較した時の無限増倍率の変化率

2.2.3.2 OFNP 内の使用済燃料プールにおける使用済燃料の許容保管量

炉心で燃焼後に発生した SF について、全て OFNP 内の SFP で長期保管する場合(**Figure 2-4** 中の核燃料シナリオ C)は、SFP の許容保管量について、成立性を評価する必要がある。本研究では、SFP の「(1)物理的許容量」「(2)冷却機能停止時の熱的許容量」「(3)未臨界性」の 3 点を評価する。

(1) SFP の物理的許容量

SFP の寸法としては、**Figure 2-9** と **Figure 2-10** に示す通り、既設の ABWR プラントを参考としつつ²⁰、OFNP の寸法も考慮し²¹、縦 16 m、横 16 m、高さ 11 m とする（制御棒 (CR)の置き場を除く）。また、SF 集合体の寸法としては、チャンネルボックスを縦 14 cm、横 14 cm、高さ 5 m とし、燃料ピッチを 16 cm する¹¹。評価の結果は、**Table 2-3** に示す通りであり、SFP の物理的な SF 許容量 10000 体に対して、プラント寿命 60 年で発生する SF の累計体数は、24 ヶ月運転で 4 バッチの場合で 5886 体であった(12 ヶ月運転で 8 バッチの場合は 5232 体)。

よって、SFP の物理的許容量の観点では、SF だけではなく一括輸送した MOX-FF の SFP 内保管を考慮しても、プラント寿命 60 年間で発生する SF を全て許容可能であることを明らかにした。

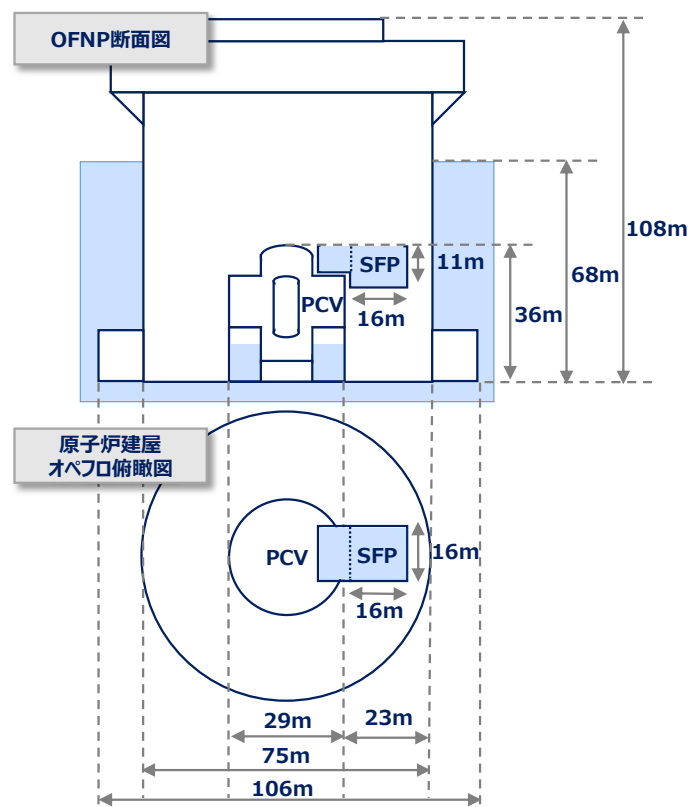


Figure 2-9 OFNP と使用済燃料プールの寸法

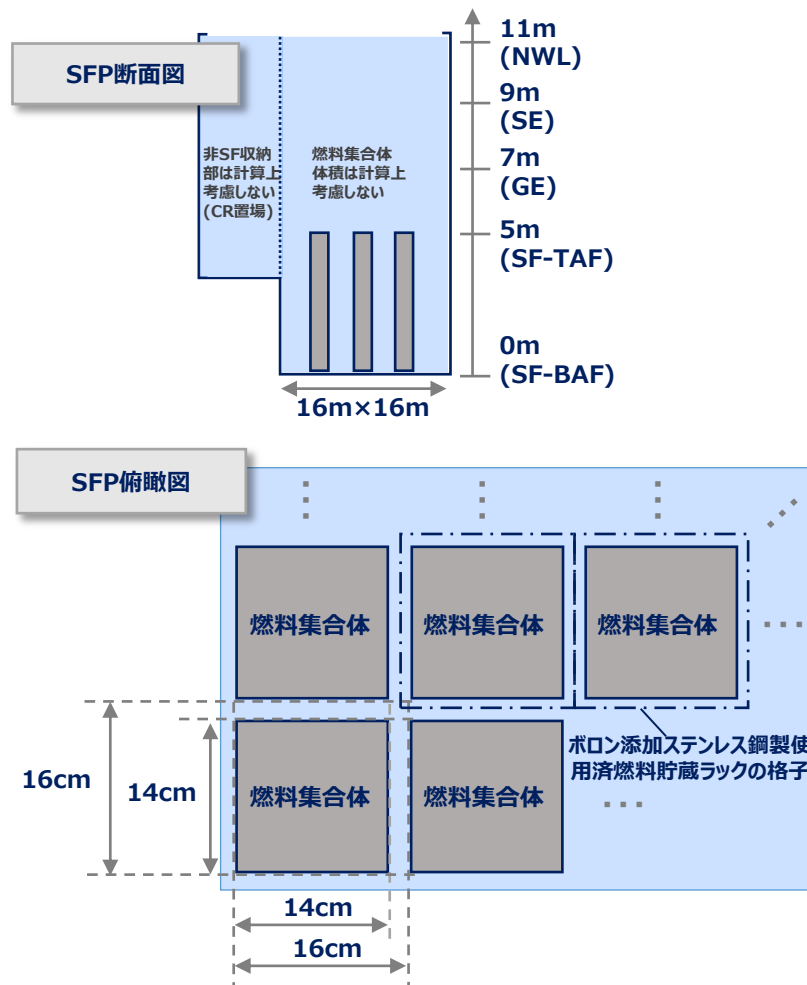


Figure 2-10 使用済燃料プールと使用済燃料の寸法

Table 2-3 SFP の物理的許容量と生成される SF の累計体数

	SF 集合体数	説明
SFP の物理的許容量	10000	$\frac{16[\text{m}] \cdot 16[\text{m}] \cdot 100^2[\text{cm}^2/\text{m}^2]}{16[\text{cm}] \cdot 16[\text{cm}]} = 10000[\text{体}]$
60 年間で発生する SF の累計体数 (24 ヶ月運転、4 バッチ：27 サイクル)	5886	$872[\text{体}]/4[\text{バッチ}] \cdot 27[\text{サイクル}] = 5886[\text{体}]$
参考: 60 年間で発生する SF の累計体数 (12 ヶ月運転、8 バッチ：48 サイクル)	5232	$872[\text{体}]/8[\text{バッチ}] \cdot 48[\text{サイクル}] = 5232[\text{体}]$

(2) SFP の冷却機能停止時の熱的許容量

本研究では、SFP の冷却機能停止から、プール水の温度が上昇して沸騰後、プール水位が低下して SF の有効燃料頂部(TAF)到達までの累計の所要時間(h_1+h_2)を評価する。つまり、 h_1 は「冷却機能停止からプール水沸騰開始までの時間(Eq.2.2)」、 h_2 は「プール水沸騰開始から SF の有効燃料頂部(TAF)水位到達までの時間(Eq.2.3)」と定義する。

$$h_1 = \frac{(100 - \text{プール水の温度}) \cdot \text{プール水の比熱} \cdot \text{プール水の密度} \cdot \text{プール水の全水量}}{\text{SF の累計崩壊熱} \cdot 3600 \cdot 10^3} \quad (\text{Eq.2.2})$$

$$h_2 = \frac{\text{蒸発潜熱} \cdot \text{プール水の密度} \cdot (\text{通常水位から TAF 水位までのプール水の水量})}{\text{SF の累計崩壊熱} \cdot 3600 \cdot 10^3} \quad (\text{Eq.2.3})$$

h_1 (時間); 冷却機能停止からプール水沸騰開始までの時間

h_2 (時間); プール水沸騰開始から SF の有効燃料頂部(TAF)水位到達までの時間

なお、この想定は、法令要求である SFP における燃料損傷防止対策の有効性評価に係る想定事故 1 と同様である²²。また、所要時間の判断基準は、陸上の支援施設からの支援により機能復旧可能な時間として 24 時間とする。SF の累計崩壊熱は、60 年運転した後、原子炉停止から 10 日後の取出し燃料を含めた、SFP 内の全ての SF の崩壊熱の累計とする。SF 崩壊熱の評価には、SCALE 6.2.4/TRITON の二次元輸送・燃焼計算モジュールを使用し求めた燃料中の核種組成を基に評価する^{12,23}。核データライブラリとして、ENDF/B-VII.1 に基づき 252 群で準備されたものを使用する¹³。なお、評価に関係する要素とその数値は、Table 2-4 に示す通りである。

評価の結果は、Table 2-5 に示す通りであり、MOX 燃料を使用した場合の所要時間は 75.9 時間(UO₂燃料の場合は 85.7 時間)であり、評価基準である 24 時間を大きく下回った。よって、冷却機能停止時の SFP の熱的許容量の観点では、プラント寿命 60 年間で発生する SF を全て許容可能であることを明らかにした。

Table 2-4 使用済燃料プールの熱的許容量評価に関連する要素

要素		数値	説明
プール水の温度 [°C]		65	運転上の制限(LCO)設定値
プール水の比熱 [KJ/kg/°C]		4.2	65°Cの最小値 Value (MIN) ²⁴
蒸発潜熱 [KJ/kg]		2256.5	100°Cの最小値 Value(MIN) ²⁴
プール水の密度 [kg/m ³]		958	100°Cの最小値 Value (MIN) ²⁴
プール水の全水量 [m ³]		1836	16・16・11-0.14・0.14・5・10000=1836
通常水位から TAF 水位までのプール水の水量 [m ³]		1536	16・16・6=1536
SF の累計崩壊熱[MW]	MOX 燃料	13.1	原子炉停止から 10 日後の取出し燃料を含む SFP 内の SF の合計崩壊熱(60 年運転)
	(参考)UO ₂ 燃料	11.6	

Table 2-5 使用済燃料プールの熱的許容量評価の結果

結果		h_1+h_2	h_1	h_2
所要時間 [時間]	MOX 燃料	75.9	5.5	70.4
	UO ₂ 燃料	85.7	6.2	79.5

(3) SFP の未臨界性

SFP 内で使用を想定する BWR 燃料用のボロン添加ステンレス鋼製使用済燃料貯蔵ラック(B-SUS ラック)によって、燃料集合体 1 体ずつを格子で囲み、各燃料集合体の間隔を保持することにより未臨界性を維持する設計となっている。既往文献では、B-SUS ラック内の燃料集合体の無限増倍率を 1.30 と仮定しても、想定される厳しい状態において、実効増倍係数を 0.95 以下となり、未臨界を維持することが示されている^{25,26,27}。なお、PWR では、未臨界性維持のため、BWR と同種の SUS ラックに加えて、ホウ酸水で SFP を満水にしている²⁸。

よって、前述の **Figure 2-5** と **Figure 2-6** の通り、本研究で使用する MOX-FF や SF の無限増倍率は全て 1.30 以下であるため、(SFP の許容保管量とは関係無く)未臨界性は維持されることを明らかにした。

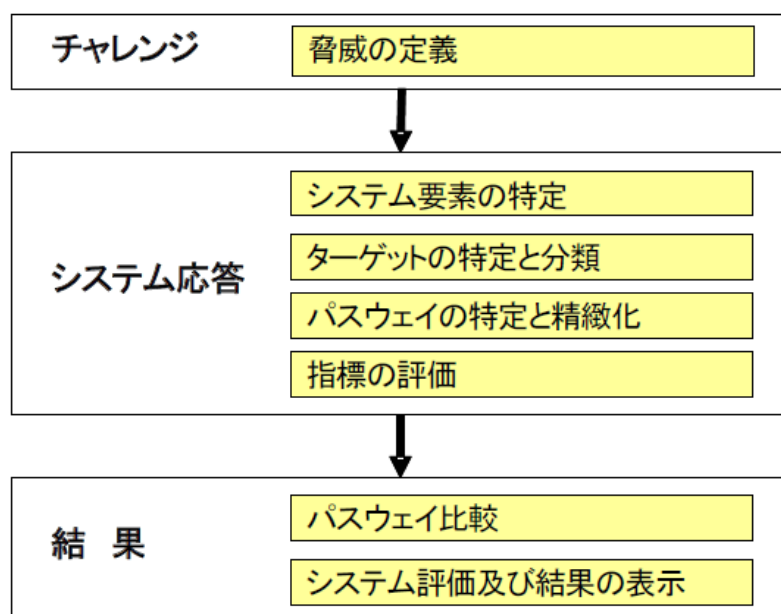
以上より、OFNP 内の SFP における SF の許容保管量について、SFP の「物理的許容量」「冷却機能停止時の熱的許容量」「未臨界性」の 3 点から評価を行った。プラント寿命 60 年間で発生する SF を全て許容可能であり、SF を全て OFNP 内の SFP で長期保管するケース(**Figure 2-4** 中の核燃料シナリオ C)が成立することを明らかにした。

2.3 核拡散抵抗性評価

2.3.1 評価手法

本研究では、非核兵器保有国による OFNP の核拡散抵抗性を定量的に評価するため、GIF/PRPP 評価手法を基準とする^{9,10}。同手法を基準とする理由は、NPP の設置位置(洋上/陸上)、洋上特有の輸送や保管を含む核燃料管理シナリオ、及び取り扱う核燃料タイプの違いによって拡散経路が異なるため、それぞれの経路に応じた核拡散抵抗性を明らかにするためである。

GIF/PRPP 評価手法の枠組みは、**Figure 2-11** に示す通りである。チャレンジ、すなわち評価上の脅威の定義から始まり、チャレンジに対する原子力システム応答をパスウェイ(拡散経路)解析により評価し、拡散経路を比較することで結果を導出する流れになっている。システム応答については、システム要素やターゲットを特定した結果に基づき、拡散経路を特定する。そして、各拡散経路は、予め定義された5段階の評価指標(6種類の指標)に基づき、定量評価されることとなる。ただし、従来の GIF/PRPP 手法の評価指標では、輸送/移送に伴う核拡散リスク及び高燃焼度燃料の特性を解析不可能であるため、本研究では評価指標の新たな開発を行う。



出典: GIF/PRPP(2011)、川久保(2011)

Figure 2-11 GIF/PRPP 評価手法の枠組み

2.3.2 脅威の定義

本研究で想定する核不拡散性上の脅威について、GIF/PRPP による仮想的ナトリウム冷却高速炉システムのケーススタディ^{29,30}を参考とし、**Table 2-6** に示す通り定義する。脅威の主体としては、非核兵器保有国家で、高い科学技術レベルの先進工業国を想定する。また、国際原子力機関(IAEA)に申告し、統合保障措置が適用されている複数の発電用原子炉を保有しているが、濃縮・再処置施設は保有していないものと仮定する。また、脅威の種類としては、主に以下の 4 パターンが想定されるが、本研究では、再処理施設などのバルク施設ではなく発電用軽水炉からの秘密裏の核拡散を想定するため、「申告施設からの秘密裏の核物質の転用」と仮定する。

- ・ 申告施設からの秘密裏の核物質の転用
- ・ 申告施設からの秘密裏の施設不正使用
- ・ 秘密施設における核物質の秘密裏生産
- ・ ブレイクアウトした上での公然の転用・不正使用

Table 2-6 評価対象とする脅威の定義

特性		本研究	GIF /PRPP (2009)
脅威の主体		非核兵器保有国家	同左
脅威の種類		申告施設からの秘密裏の核物質の転用	—
能力	技術的スキル	高度であり、すべての関連科学技術分野に強力なノウハウを有する	同左
	リソース	全く制限がないほど十分に豊富	同左
	ウラン及びトリウム資源	存在しない	同左
	産業能力	先進工業国	同左
	原子力技術	複数の発電用原子炉を保有しているが、濃縮施設や再処理施設は保有していない	ナトリウム冷却高速炉により電力を生産しており、バックエンド技術を有する
	IAEA 保障措置	包括的保障措置(INFCIRC/153)と追加議定書(INFCIRC/540)を批准しており、統合保障措置が適用	—
目標	核兵器装置の数	1	同左
	収率及び達成度	任意の収率。信頼性>50%	同左
	備蓄能力	短期備蓄(約 10 年)に十分	同左
	供給可能性	最新の多機能ジェット戦闘機に相当	同左
	生産速度	該当せず。1 個の装置だけを計画	同左

2.3.3 システム要素とターゲットの特定

本研究における「システム要素」と「ターゲット」は、以下の通り定義される。

システム要素

- ・ 搬出入エリア
- ・ 新燃料貯蔵庫
- ・ SFP
- ・ キャスク仮置エリア
- ・ 原子炉
- ・ 搬出入エリア 2
- ・ SFP2
- ・ キャスク仮置エリア 2
- ・ キャスク保管庫 2

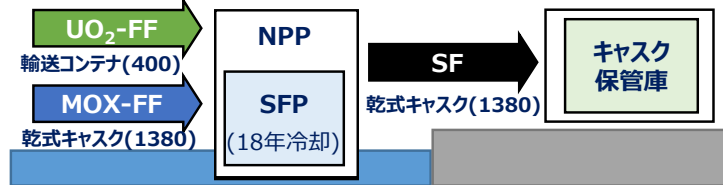
ターゲット

- ・ UO_2 -FF
- ・ MOX-FF
- ・ SF

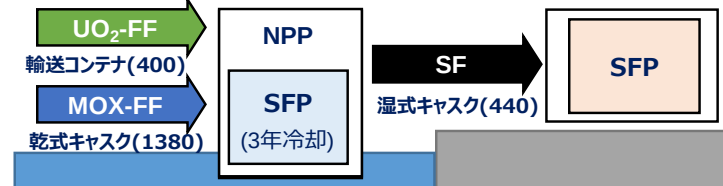
なお、システム要素のうち、末尾の「2」は、陸上の保管施設の要素であることを表している。また、ターゲットのうち、MOX-FF と SF は、キャスクに装荷されている状態と、装荷されていない状態があることに注意されたい。

以上より、本研究で評価対象とする保障措置システムについて、**Figure 2-13**、**Figure 2-14**、**Figure 2-15**、**Figure 2-16** として定義する(**Figure 2-12** は核燃料シナリオの再掲)。MBA を NPP と陸上保管施設の単位でそれぞれ設定しており、対応する形で、流れの主要測定点(FKMP)を搬出入エリアや原子炉に設定し、在庫の主要測定点(IKMP)を核燃料が滞在するエリアに設定する。封印は、原子炉の上部蓋及びキャスク保管庫でSFを保管するキャスクに行い、IAEA 所管の監視カメラは IKMP に設置する。今回評価対象とする原子力システムはいずれもバルク施設ではなく、アイテム施設であるため、実在庫検認は密封されたまとまりである集合体単位の体数と刻印確認で行われ、また、ランダムに選択された集合体に対して非破壊測定も行われる。

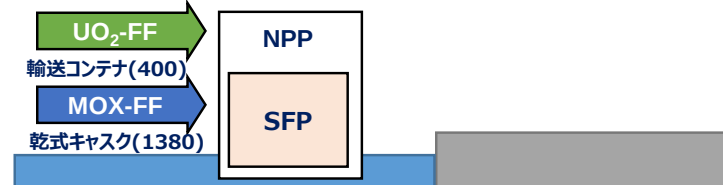
燃料管理シナリオA: 洋上NPP+陸上キャスク保管庫



燃料管理シナリオB: 洋上NPP+陸上SFP



燃料管理シナリオC: 洋上NPP+洋上SFP



燃料管理シナリオRef: 陸上NPP+陸上キャスク保管庫

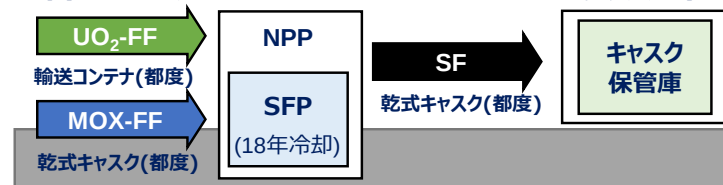


Figure 2-12 評価対象とする核燃料シナリオ [再掲]

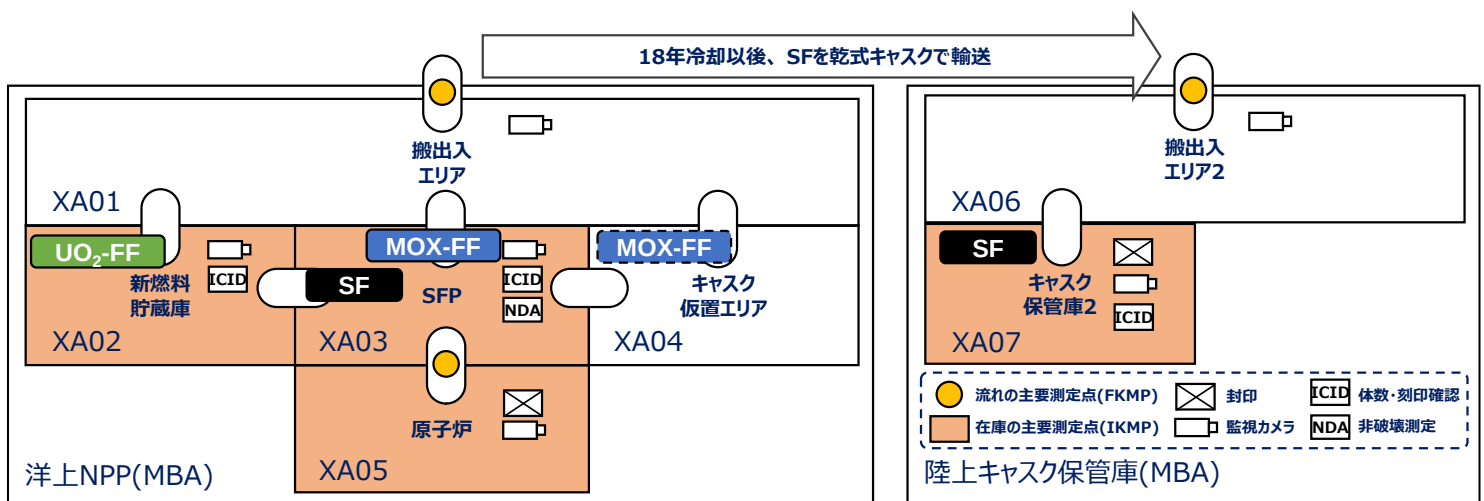


Figure 2-13 保障措置システム(シナリオ A)

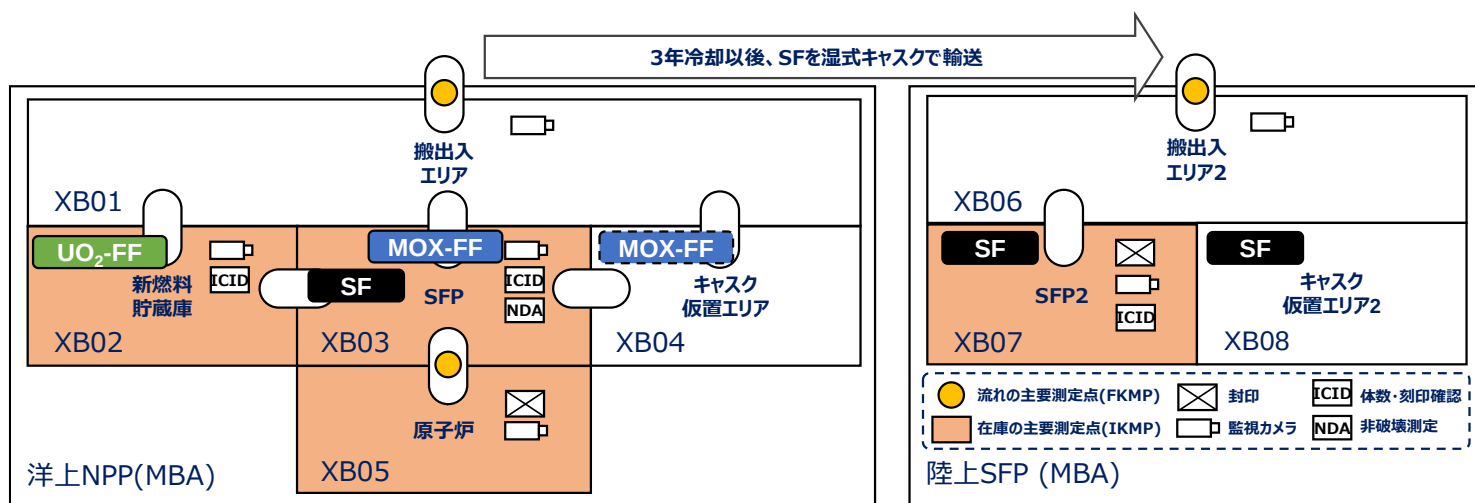


Figure 2-14 保障措置システム(シナリオ B)

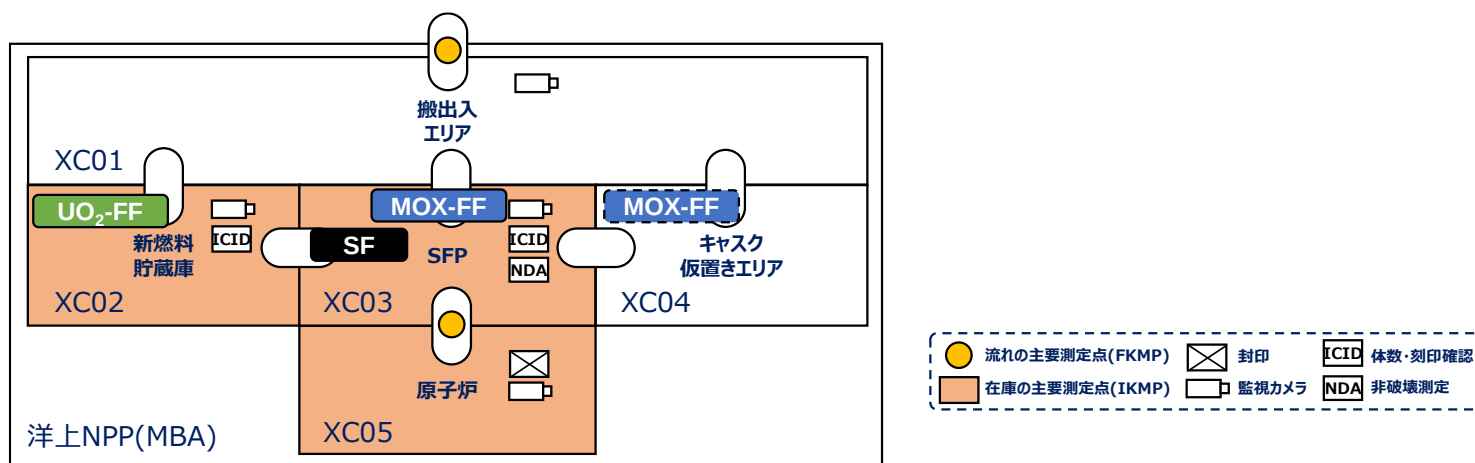


Figure 2-15 保障措置システム (シナリオ C)

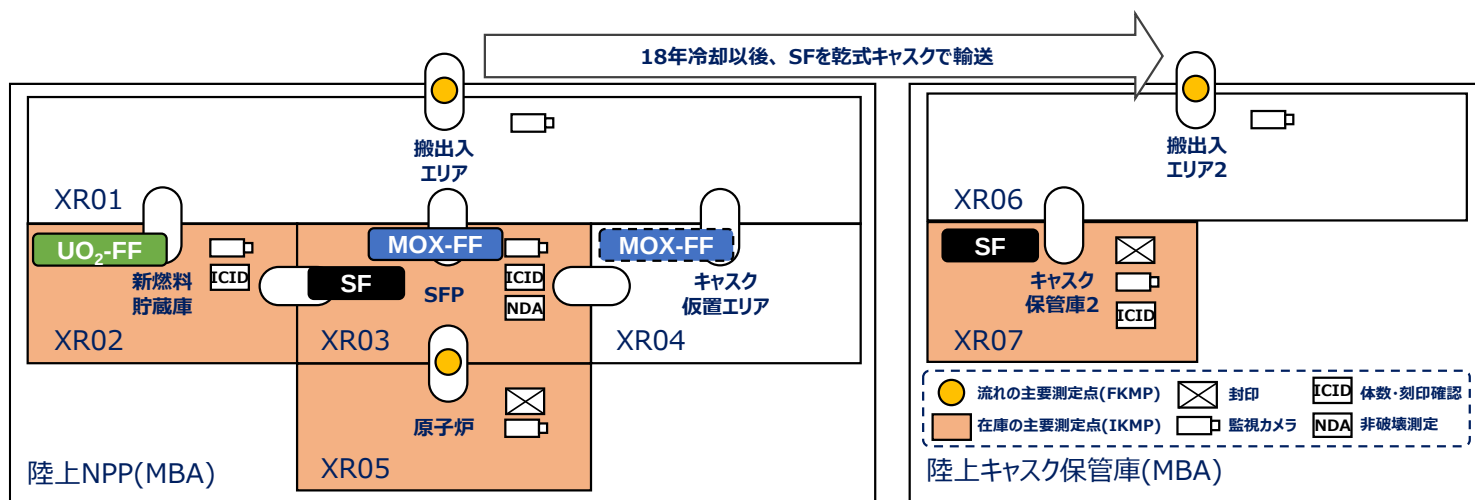


Figure 2-16 保障措置システム (シナリオ Ref.)

2.3.4 拡散経路の特定

ホスト国(非核兵器保有国家)による拡散経路を特定するため、ターゲットの「搬出戦略」を以下の通り 3 種類に分類する。

- [1] ターゲットをキャスクに入れず別手段で搬出
- [2] ターゲットをキャスクに入れて搬出。空と偽装・返却
- [3] ターゲットをキャスクに残したまま搬出。空と偽装・返却

ここで、本研究における原子力システム内の「核燃料サイクル」の流れと「拡散経路」の概念図について、核燃料シナリオ A の例を **Figure 2-17** に示す。なお、青い太線は、拡散経路を表している。

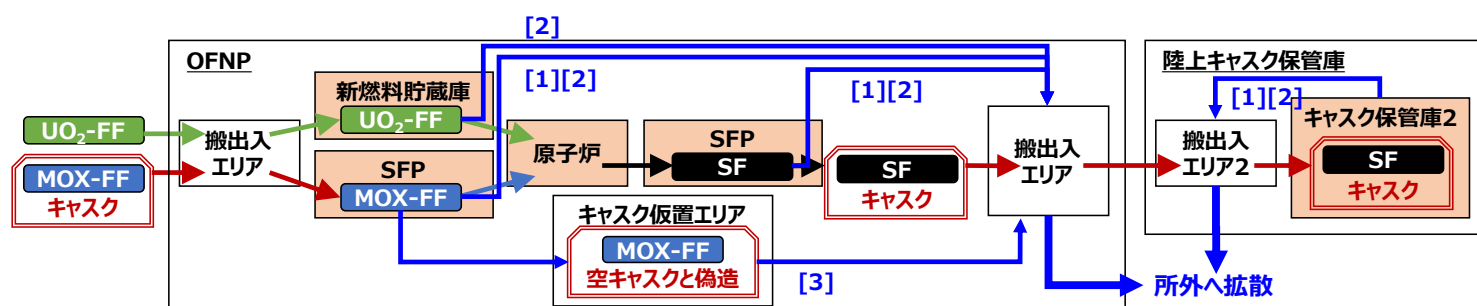


Figure 2-17 核燃料サイクルの流れと拡散経路の概念図の例示 (シナリオ A)

「核燃料サイクル」の流れを以下に示す。

1. UO₂-FF と MOX-FF(キャスク装荷)は、搬出入エリアを通過して OFNP 内に搬入される
2. UO₂-FF は、新燃料貯蔵庫で保管される。MOX-FF は、キャスクから取り出され、SFP 内で保管される。なお、MOX-FF が装荷されていた乾式キャスクは、MOX-FF がすべて取り出された後、キャスク仮置エリアで保管される
3. UO₂-FF と MOX-FF は、原子炉で燃焼される
4. 燃焼後に原子炉から取り出された SF は、SFP で一定期間(18 年以上)冷却される
5. 冷却を終えた SF は、乾式キャスクに装荷され、OFNP の搬出入エリアを通過して、陸上キャスク保管庫へ輸送される
6. SF(キャスク装荷)は、陸上キャスク保管庫へ輸送され、搬出入エリア 2 を通過して、キャスク保管庫 2 で長期間保管される(SF は乾式キャスクに装荷されたまま)

「拡散経路」の例を以下に示す。

- ・ SFP 中の MOX-FF をターゲットとして、「搬出戦略(1)：ターゲットをキャスクに入れず別手段で搬出」を選択した場合は、MOX-FF を一般的な容器に入れて搬出し、搬出入エリアを通過して所外へ拡散する
- ・ キャスク保管庫 2 中の SF をターゲットとして、「搬出戦略(2)：ターゲットをキャスクに入れて搬出。空と偽装・返却」を選択した場合は、キャスクに装荷されている SF をそのまま搬出し、搬出入エリア 2 を通過して、所外へ拡散する
- ・ 燃料装荷前の MOX-FF をターゲットとして、「搬出戦略(3)：ターゲットをキャスクに残したまま搬出。空と偽装・返却」を選択した場合は、OFNP に搬入された MOX-FF の一部を搬入用のキャスクから取り出さず、秘密裏にキャスク中に残したまま、キャスク仮置エリアで一時保管し、キャスクを空と偽造して搬出し、搬出入エリアを通過して所外へ拡散する。MOX-FF に対する搬出戦略(3)は、検知が技術的に困難であり、脆弱な経路となるため、検知確率は「非常に低い(VL)」となる

以上より、本研究における拡散経路の特定の結果を、**Table 2-7**、**Table 2-8**、**Table 2-9**、**Table 2-10** に示す。

Table 2-7 拡散経路の特定（シナリオ A）

シナリオ	搬出戦略	ターゲット		転用地点		経路ID	詳細
A	[1]	T1	UO ₂ -FF	XA02	新燃料貯蔵庫	T1-XA02	ターゲットとなる UO ₂ -FF は核燃料貯蔵庫にある。 [1]UO ₂ -FF を一般的な容器に入れて搬出する。 計量管理を不正。監視カメラを不正操作。査察時の検認を隠蔽。搬出した特殊な容器を秘密で新設の濃縮施設に運搬。
		T2	MOX-FF	XA03	SFP	T2-XA03a	ターゲットとなる MOX-FF は SFP にある。 [1]MOX-FF を一般的な容器に入れて搬出する。 計量管理を不正。監視カメラを不正操作。査察時の検認を隠蔽。搬出した特殊な容器を公然で既設の分離施設に運搬。
		T3	SF	XA03	SFP	T3-XA03a	ターゲットとなる SF は SFP にある。 [1]SF の一部を特殊な容器に装荷して搬出。 計量管理を不正。監視カメラの不正操作。査察時の検認を隠蔽。搬出した特殊な容器を秘密で新設の再処理施設に運搬。
		T3	SF	XA07	キャスク保管庫 2	T3-XA07a	ターゲットとなる SF はキャスク保管庫 2 にある。 [1]SF の一部をキャスクより取り出し、特殊な容器に装荷して搬出。 計量管理を不正。監視カメラの不正操作。査察時の検認を隠蔽。搬出した特殊な容器を秘密で新設の再処理施設に運搬。
	[2]	T2	MOX-FF	XA03	SFP	T2-XA03b	ターゲットとなる MOX-FF は SFP にある。 [2]MOX-FF の一部をキャスクに装荷して搬出。キャスクを空と偽造し返却。 計量管理を不正。監視カメラの不正操作。査察時の検認を隠蔽。搬出したキャスクを公然で既設の分離施設に運搬。
		T3	SF	XA03	SFP	T3-XA03b	ターゲットとなる SF は SFP にある。 [2]SF の一部をキャスクに装荷して搬出。キャスクを空と偽造し返却。 計量管理を不正。監視カメラの不正操作。査察時の検認を隠蔽。搬出したキャスクを秘密で新設の再処理施設に運搬。
		T3	SF	XA07	キャスク保管庫 2	T3-XA07b	ターゲットとなる SF はキャスク保管庫 2 にある。 [2]SF の一部をキャスクに装荷して搬出。キャスクを空と偽造し返却。 計量管理を不正。監視カメラの不正操作。査察時の検認を隠蔽。搬出したキャスクを秘密で新設の再処理施設に運搬。
	[3]	T2	MOX-FF	XA04	キャスク仮置エリア	T2-XA04a	ターゲットとなる MOX-FF はキャスク仮置エリアにある。 [3]MOX-FF の一部を取り出さず残されたままのキャスクを搬出。キャスクを空と偽造し返却。 計量管理を不正。監視カメラの不正操作は不要かもしれない。査察時の検認を隠蔽。搬出したキャスクを公然で既設の分離施設に運搬。

Table 2-8 拡散経路の特定（シナリオ B）

シナリオ	搬出戦略	ターゲット		転用地点		経路ID	詳細
B	[1]	T1	UO ₂ -FF	XB02	新燃料貯蔵庫	T1-XB02	ターゲットとなるウラン新燃料は核燃料貯蔵庫にある。 [1]UO ₂ -FF を一般的な容器に入れて搬出する。 計量管理を不正。監視カメラを不正操作。査察時の検認を隠蔽。搬出した特殊な容器を秘密で新設の濃縮施設に運搬。
		T2	MOX-FF	XB03	SFP	T2-XB03a	ターゲットとなる MOX-FF は SFP にある。 [1]MOX-FF を一般的な容器に入れて搬出する。 計量管理を不正。監視カメラを不正操作。査察時の検認を隠蔽。搬出した特殊な容器を公然で既設の分離施設に運搬。
		T3	SFP	XB03	SFP	T3-XB03a	ターゲットとなる SFP は SFP にある。 [1]SFP の一部を特殊な容器に装荷して搬出。 計量管理を不正。監視カメラの不正操作。査察時の検認を隠蔽。搬出した特殊な容器を秘密で新設の再処理施設に運搬。
		T3	SFP	XB07	SFP2	T3-XB07a	ターゲットとなる SFP は SFP2 にある。 [1]SFP の一部を特殊な容器に装荷して搬出。 計量管理を不正。監視カメラの不正操作。査察時の検認を隠蔽。搬出した特殊な容器を秘密で新設の再処理施設に運搬。
	[2]	T2	MOX-FF	XB03	SFP	T2-XB03b	ターゲットとなる MOX-FF は SFP にある。 [2]MOX-FF の一部をキャスクに装荷して搬出。キャスクを空と偽造し返却。計量管理を不正。監視カメラの不正操作。査察時の検認を隠蔽。搬出したキャスクを公然で既設の分離施設に運搬。
		T3	SFP	XB03	SFP	T3-XB03b	ターゲットとなる SFP は SFP にある。 [2]SFP の一部をキャスクに装荷して搬出。キャスクを空と偽造し返却。計量管理を不正。監視カメラの不正操作。査察時の検認を隠蔽。搬出したキャスクを秘密で新設の再処理施設に運搬。
		T3	SFP	XB07	SFP2	T3-XB07b	ターゲットとなる SFP は SFP2 にある。 [2]SFP の一部をキャスクに装荷して搬出。キャスクを空と偽造し返却。計量管理を不正。監視カメラの不正操作。査察時の検認を隠蔽。搬出したキャスクを秘密で新設の再処理施設に運搬。
	[3]	T2	MOX-FF	XB04	キャスク仮置エリア	T2-XB04a	ターゲットとなる MOX-FF はキャスク仮置エリアにある。 [3]MOX-FF の一部を取り出さず残されたままのキャスクを搬出。キャスクを空と偽造し返却。計量管理を不正。監視カメラの不正操作は不要かもしれない。査察時の検認を隠蔽。搬出したキャスクを公然で既設の分離施設に運搬。
		T3	SFP	XB08	キャスク仮置エリア 2	T3-XB08a	ターゲットとなる SFP はキャスク仮置エリア 2 にある。 [3]SFP の一部を取り出さず残されたままのキャスクを搬出。キャスクを空と偽造し返却。計量管理を不正。監視カメラの不正操作は不要かもしれない。査察時の検認を隠蔽。搬出したキャスクを秘密で新設の再処理施設に運搬。

Table 2-9 拡散経路の特定 (シナリオ C)

シナリオ	搬出戦略	ターゲット		転用地点		経路ID	詳細
C	[1]	T1	UO ₂ -FF	XC02	新燃料貯蔵庫	T1-XC02	ターゲットとなるウラン新燃料は核燃料貯蔵庫にある。 [1]UO ₂ -FF を一般的な容器に入れて搬出する。 計量管理を不正。監視カメラを不正操作。査察時の検認を隠蔽。搬出した特殊な容器を秘密で新設の濃縮施設に運搬。
		T2	MOX-FF	XC03	SFP	T2-XC03a	ターゲットとなる MOX-FF は SFP にある。 [1]MOX-FF を一般的な容器に入れて搬出する。 計量管理を不正。監視カメラを不正操作。査察時の検認を隠蔽。搬出した特殊な容器を公然で既設の分離施設に運搬。
		T3	SF	XC03	SFP	T3-XC03a	ターゲットとなる SFP は SFP にある。 [1]SFP の一部を特殊な容器に装荷して搬出。 計量管理を不正。監視カメラの不正操作。査察時の検認を隠蔽。搬出した特殊な容器を秘密で新設の再処理施設に運搬。
	[2]	T2	MOX-FF	XC03	SFP	T2-XC03b	ターゲットとなる MOX-FF は SFP にある。 [2]MOX-FF の一部をキャスクに装荷して搬出。キャスクを空と偽造し返却。 計量管理を不正。監視カメラの不正操作。査察時の検認を隠蔽。搬出したキャスクを公然で既設の分離施設に運搬。
		T3	SF	XC03	SFP	T3-XC03b	ターゲットとなる SFP は SFP にある。 [2]SFP の一部をキャスクに装荷して搬出。キャスクを空と偽造し返却。計量管理を不正。監視カメラの不正操作。査察時の検認を隠蔽。搬出したキャスクを秘密で新設の再処理施設に運搬。
	[3]	T2	MOX-FF	XC04	キャスク仮置エリア	T2-XC04a	ターゲットとなる MOX-FF はキャスク仮置エリアにある。 [3]MOX-FF の一部を取り出さず残されたままのキャスクを搬出。キャスクを空と偽造し返却。 計量管理を不正。監視カメラの不正操作は不要かもしれない。査察時の検認を隠蔽。搬出したキャスクを公然で既設の分離施設に運搬。

Table 2-10 拡散経路の特定（シナリオ Ref.）

シナリオ	搬出戦略	ターゲット		転用地点		経路ID	詳細
Ref.	[1]	T1	UO ₂ -FF	XR02	新燃料貯蔵庫	T1-XR02	ターゲットとなる UO ₂ -FF は核燃料貯蔵庫にある。 [1]UO ₂ -FF を一般的な容器に入れて搬出する。 計量管理を不正。監視カメラを不正操作。査察時の検認を隠蔽。搬出した特殊な容器を秘密で新設の濃縮施設に運搬。
		T2	MOX-FF	XR03	SFP	T2-XR03a	ターゲットとなる MOX-FF は SFP にある。 [1]MOX-FF を一般的な容器に入れて搬出する。 計量管理を不正。監視カメラを不正操作。査察時の検認を隠蔽。搬出した特殊な容器を公然で既設の分離施設に運搬。
		T3	SF	XR03	SFP	T3-XR03a	ターゲットとなる SF は SFP にある。 [1]SF の一部を特殊な容器に装荷して搬出。 計量管理を不正。監視カメラの不正操作。査察時の検認を隠蔽。搬出した特殊な容器を秘密で新設の再処理施設に運搬。
		T3	SF	XR07	キャスク保管庫 2	T3-XR07a	ターゲットとなる SF はキャスク保管庫 2 にある。 [1]SF の一部をキャスクより取り出し、特殊な容器に装荷して搬出。 計量管理を不正。監視カメラの不正操作。査察時の検認を隠蔽。搬出した特殊な容器を秘密で新設の再処理施設に運搬。
	[2]	T2	MOX-FF	XR03	SFP	T2-XR03b	ターゲットとなる MOX-FF は SFP にある。 [2]MOX-FF の一部をキャスクに装荷して搬出。キャスクを空と偽造し返却。 計量管理を不正。監視カメラの不正操作。査察時の検認を隠蔽。搬出したキャスクを公然で既設の分離施設に運搬。
		T3	SF	XR03	SFP	T3-XR03b	ターゲットとなる SF は SFP にある。 [2]SF の一部をキャスクに装荷して搬出。キャスクを空と偽造し返却。 計量管理を不正。監視カメラの不正操作。査察時の検認を隠蔽。搬出したキャスクを秘密で新設の再処理施設に運搬。
		T3	SF	XR07	キャスク保管庫 2	T3-XR07b	ターゲットとなる SF はキャスク保管庫 2 にある。 [2]SF の一部をキャスクに装荷して搬出。キャスクを空と偽造し返却。 計量管理を不正。監視カメラの不正操作。査察時の検認を隠蔽。搬出したキャスクを秘密で新設の再処理施設に運搬。
	[3]	T2	MOX-FF	XR04	キャスク仮置エリア	T2-XR04a	ターゲットとなる MOX-FF はキャスク仮置エリアにある。 [3]MOX-FF の一部を取り出さず残されたままのキャスクを搬出。キャスクを空と偽造し返却。 計量管理を不正。監視カメラの不正操作は不要かもしれない。査察時の検認を隠蔽。搬出したキャスクを公然で既設の分離施設に運搬。

2.3.5 評価指標の開発と特定

GIF/PRPP 評価手法では、Table 2-11 に示す通り、6 つの評価指標について、それぞれ 5 段階の「非常に低い(VL)、低い(L)、中程度(M)、高い(H)、非常に高い(VH)」として評価をする⁹⁾。一方で、本研究では、核燃料の輸送/移送に伴う核拡散リスク及び MOX 燃料や HALEU 燃料といった高燃焼度化された多様な核燃料の特性を評価するため、「核分裂性物質タイプ」と「拡散機会」の 2 つの評価指標を新たに開発する。

Table 2-11 核拡散抵抗性の評価指標

評価指標	説明	非常に低い (VL)	低い (L)	中程度 (M)	高い (H)	非常に高い (VH)
技術的困難性	技術的困難から核拡散が失敗する経路の確率	0~5%	5~25%	25~75%	75~95%	95~100%
拡散コスト	拡散国の軍事費用に占める核拡散のための費用割合	0~5%	5~25%	25~75%	75~100%	>100%
拡散時間	拡散経路を完成するために要する時間	0~3 ヶ月	3 ヶ月~1 年	1~10 年	10~30 年	>30 年
検知リソース効率	年間の査察業務量あたりの発電量	0.00~0.01 GWy/PDI	0.01~0.04 GWy/PDI	0.04~0.10 GWy/PDI	0.10~0.30 GWy/PDI	>0.30 GWy/PDI
検知確率	保障措置によりある期間内に核拡散が検知される確率	0~5%	5~25%	25~75%	75~95%	95~100%
核分裂性物質タイプ	裸の臨界質量 (BCM) [kg-BCM]	—	<80 (²³⁵ U-70%)	80~800 (²³⁵ U-70/20%)	800~4000 (²³⁵ U-20/10%)	>4000 (²³⁵ U-10%)
	発熱量 [W-BCM]	—	<450 (²³⁸ Pu-8%)	450~4500 (²³⁸ Pu-8/80%)	>4500 (²³⁸ Pu-80%)	—
拡散機会	核物質の輸送/移送頻度 [回/年]	>12 (<1 ヶ月/回)	4~12 (1~3 ヶ月/回)	1~4 (3~12 ヶ月/回)	0.1~1 (1~10 年/回)	<0.1 (>10 年/回)
(参考)核分裂性物質タイプ(GIF)	兵器製造用金属の特性(核分裂性同位体比)	HEU (95%U _f)	WG-Pu (94%Pu _f)	RG-Pu (70%Pu _f)	DB-Pu (43%Pu _f)	LEU (5%U _f)

(注)HEU; 高濃縮ウラン、WG-Pu; 兵器級 Pu、RG-Pu; 原子炉級 Pu、DB-Pu; 高燃焼度 Pu、LEU; 低濃縮ウラン
GIF/PRPP(2011)による図表に追記したもの

本研究における各評価指標について、以下に説明する。なお、核分裂性物質タイプ、拡散機会、技術的困難性、拡散コスト、拡散時間は内在的特性によって決定される指標であり、検知リソース効率、検知確率は内在的特性と外在的特性によって決定される指標である。

2.3.5.1 核分裂性物質タイプ

ウランまたはプルトニウムの核分裂性同位体比を閾値とする GIF/PRPP の核分裂性物質タイプでは、OFNP で使用する高燃焼度の MOX 燃料や HALEU 燃料といった多様な核燃料の特性を評価不可能である。本研究では、核分裂性物質タイプを新たに開発する。

そもそも、GIF/PRPP 評価手法における核分裂性物質タイプは、「兵器製造用金属の特性」として定義され、評価のための考慮されるべき代表的な属性としては、裸の臨界質量 (BCM; Bare Critical Mass)、ガンマ線量、熱発生率、自発中性子発生率 (SFN; Spontaneous Fission Neutron emission rate)、化学的状态が挙げられる⁹。GIF/PRPP 評価手法における核拡散抵抗性の具体的な閾値の例を以下に示す。

- ・ 非常に低い (VL) – 高濃縮ウラン (HEU); 95% ²³⁵U
- ・ 低い (L) – 兵器級プルトニウム (WG-Pu); 84% 核分裂性 Pu 同位体
- ・ 中程度 (M) – 原子炉級プルトニウム (RG-Pu); 70% 核分裂性 Pu 同位体
- ・ 高い (H) – 高燃焼度プルトニウム (DB-Pu); 43% 核分裂性 Pu 同位体
- ・ 非常に高い (VH) – 低濃縮ウラン (LEU); 5% ²³⁵U

ここで、青木らは、Bathke らが考案した物質固有の有用性を示す指標である不正利用価値 (Material Attractiveness) について、非国家主体向けから国家主体向けに改良している^{31,32}。Bathke らは、非国家主体による核爆発装置 (NED) 開発を 3 つのフェーズに分割し、取得フェーズでは「正味重量」「取得時間」「放射線量」、処理フェーズでは「処理時間と複雑さ」、使用フェーズでは「BCM」「発熱量」の合計 6 つの評価指標に分類している。また、青木らは、処理フェーズの「転換時間」、使用フェーズの「BCM」「発熱量」「SFN」の合計 4 つの評価指標に分類している。また、Bathke ら、青木らは、閾値に応じて各指標を区分分けしており、物質が兵器利用として、望ましい (Preferred)、潜在的に可能だが望ましくない (Potentially usable, but not preferred)、現実的ではないが不可能ではない (Impractical, but not impossible)、不可能 (Impossible) の 4 区分としている。

本研究では、青木らが提案した国家主体向けの不正利用価値を示す 4 つの評価指標のうち、「転換時間」は後述する GIF/PRPP の拡散時間指標に内包されるため不要とし、「SFN」は脅威と想定する国家主体が高い NED 製造技術を有するため不要とし、核分裂

性物質タイプ指標を「BCM」と「発熱量」で新たに定義する。「BCM」は、 α 相の再処理金属の BCM を示しており、その閾値は、Bathke らと同様、ウラン濃縮度 70/20/10% に基づき、80/800/4000 (kg-BCM)と定義された。「発熱量」は、再処理金属の BCM あたりの崩壊熱を示しており、その閾値は、Bathke らと同様、 ^{238}Pu 含有量 8/80% に基づき、450/4500 (W-BCM)と定義された。また、「BCM」と「発熱量」の両要素は、独立して NED 開発の困難さに直結するため、核分裂性物質タイプの評価結果としては、両要素のうち核拡散抵抗性が高い方が代表値として扱われる。

「BCM」の評価には、MCNP6.2 コードと核データライブラリ JENDL4.0 に基づく fxsj40 を用いた³³。「発熱量」の評価には、SCALE 6.2.4/TRITON の二次元輸送・燃焼計算モジュールを使用し燃料中の核種組成を求め、再処理によって分離・精製した金属 Pu または金属 U の崩壊熱量から求める^{12,23}。核データライブラリとして、ENDF/B-VII.1 に基づき 252 群で準備されたものを使用する¹³。

なお、参考までに、本研究では使用しないが、NED 製造技術レベルが低い国家主体を評価対象とする場合は、「SFN」が指標として追加される。再処理金属中の ^{240}Pu 含有率の 7/30%に相当する $6.77\text{E}+5/3.51\text{E}+6$ (n/s-BCM)が閾値として採用されるであろう³¹。

以上より、本指標を新たに開発することで、GIF/PRPP 手法で提示されている核分裂性同位体比ではなく、BCM と発熱量という核兵器製造用金属の特性として重要な要素を評価指標へ反映する。当該の新たな評価指標により、OFNP で使用する高燃焼度の MOX 燃料や HALEU 燃料といった多様な核燃料の特性を評価可能な手法とするであろう。

2.3.5.2 拡散機会

本研究では、核燃料の輸送/移送に関する頻度を非核兵器保有国家による核拡散リスクに関連する指標と捉えて、核拡散抵抗性の評価指標として新たに拡散機会を開発する。拡散機会の指標は、「原子力システムで取り扱う核燃料の外部輸送と内部移送を累計した年間平均頻度」として定義される。具体的には、IAEA の適時性探知目標である 1 ヶ月/3 ヶ月/1 年を基準とし、さらに 10 年を非常に高い基準として採用する^{34,35}。その結果、拡散機会の閾値は、12/4/1/0.1(回数/年)となる。

拡散機会(回/年)について、NPP の外部輸送であるフロントエンド輸送頻度(=X)及びバックエンド輸送頻度(=Z)、並びに NPP の内部移送頻度(=Y)の累計で定義する。ここで、輸送/移送頻度の累計から拡散機会を評価する方法について、**Figure 2-18** で例示する。例えば、 UO_2 -FF であれば、フロントエンド輸送(=X)によって OFNP 内の新燃料貯蔵庫に搬入された後、内部移送(=Y)によって原子炉に運ばれ燃焼されるため、拡散機会は累計で「X+Y」となる。また、SFP 中の SF は、内部移送(=Y)によって原子炉で燃焼後に SFP に運ばれて冷却された後、バックエンド輸送(=Z)によって陸上キャスク保管庫に運ばれ長期保管されるため、拡散機会は累計で「Y+Z」となる。一方で、キャスク保管庫 2 中の SF は、バックエンド輸送(=Z)によって運ばれて長期保管された後は、さらなる輸送や移送が発生しないため、拡散機会は「Z」となる。また、24 ヶ月運転 MOX 燃料の場合、内部移送頻度(=Y)は、「12 ヶ月/(24 ヶ月燃焼+3 ヶ月燃料取替)=0.44(回/年)」となる。なお、輸送頻度(=X, Z)には、一括輸送や都度輸送の違いも考慮している。

以上より、本指標を新たに開発することで、核燃料の輸送/移送に伴う核拡散リスクを評価可能な手法とする。

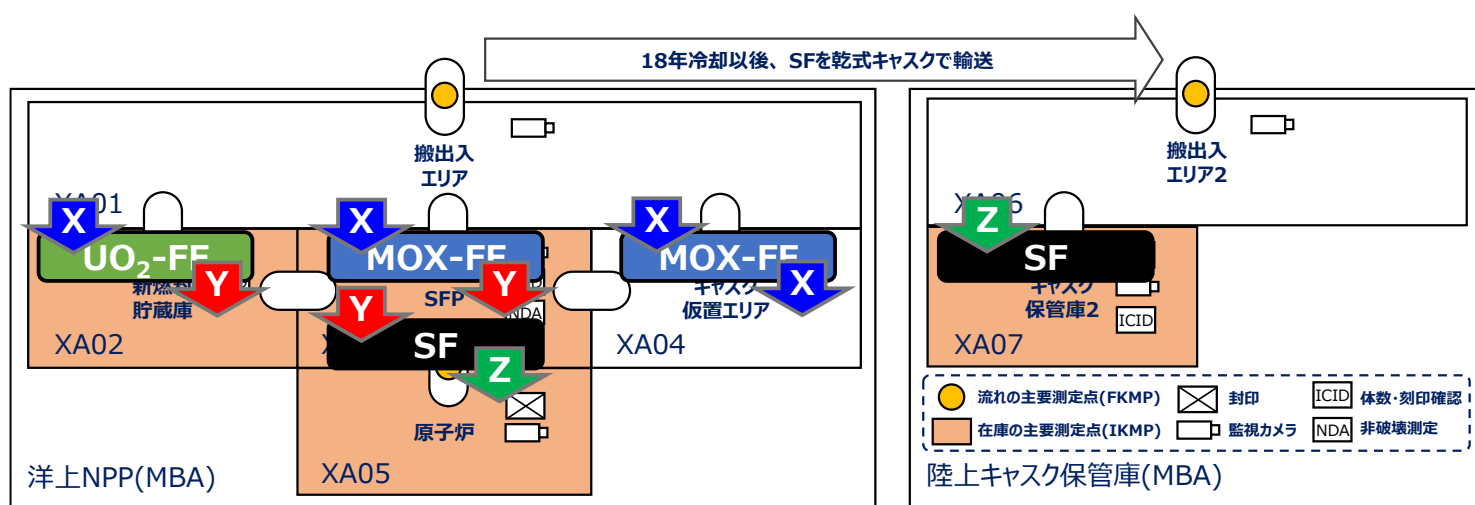


Figure 2-18 輸送/移送頻度の例示 (シナリオ A)

2.3.5.3 技術的困難性

技術的困難性は、「拡散国の能力を考慮し技術的困難から核拡散が失敗する経路の確率」として定義される。ターゲットとなる核燃料の技術的困難性を以下に示す。

(UO_2 -FF: ウラン新燃料、MOX-FF: MOX 新燃料、SF: 使用済燃料)

- ・ UO_2 -FF－中程度(M)

取得フェーズにおいて UO_2 -FF を収納する特殊な容器は不要であるが、処理フェーズにおいて新設の再処理施設が必要となる。

- ・ MOX-FF－非常に低い(VL)

取得フェーズにおいて MOX-FF を収納する特殊な容器は不要であり、処理フェーズにおいて再処理施設は不要であり、既設の分離施設で Pu 分離が可能である。

- ・ SF－高い(H)

取得フェーズにおいて SF を装荷するキャスクなどの特殊な収納容器が必要であり、処理フェーズにおいて新設の再処理施設が必要となる。

- ・ SF(キャスク装荷)－中程度(M)

取得フェーズにおいて SF はキャスクに装荷されているため特殊な収納容器は不要であるが、処理フェーズにおいて新設の再処理施設が必要となる。

2.3.5.4 拡散コスト

拡散コストは、「拡散国の軍事費用に占める核拡散のための費用割合」として定義される。具体的には、核燃料から NED を製造するために必要な施設の建設費と運用費の累計費用を核拡散国の軍事費用で除すことで評価する。評価の前提を以下に示す。

- ・ 拡散国の軍事費用：56.6 兆ドル/年³⁶
- ・ 濃縮施設の建設費：130 億ドル/年³⁷
- ・ 濃縮施設の運用費：13 億ドル/年³⁷
- ・ 再処理施設の建設費：28 億ドル/年³⁷
- ・ 再処理施設の運用費：3 億ドル/年³⁷
- ・ 分離施設の運用費：3 億ドル/年

よって、ターゲットとなる核燃料の拡散コストを以下に示す。

- ・ UO₂-FF－非常に低い(VL)
秘密で新規の濃縮施設が必要であるため、評価結果は、「(濃縮施設の建設費+濃縮施設の運用費)／拡散国の軍事費用=0.2%」となる。(＜5%)
- ・ MOX-FF－非常に低い(VL)
公然で既設の分離施設が存在しているため、評価結果は、「分離施設の運用費／拡散国の軍事費用≒0.0%」となる。(＜5%)
- ・ SF－非常に低い(VL)
秘密で新規の再処理施設が必要であるため、評価結果は、「(再処理施設の建設費+再処理施設の運用費)／拡散国の軍事費用=0.1%」となる。(＜5%)

2.3.5.5 拡散時間

拡散時間は、「拡散経路を完成するために要する時間」として定義される。具体的には、核燃料から NED を製造するために必要な施設の建設時間と転換時間を累計して評価する。なお、転換時間には、IAEA の適時性探知目標を用いた。評価の前提を以下に示す。

- ・ 濃縮施設の建設時間：年オーダー
- ・ 濃縮工程の転換時間：1 年 ^{34,35}
- ・ 再処理施設の建設時間：年オーダー
- ・ 再処理工程の転換時間：3 ヶ月 ^{34,35}
- ・ 分離工程の転換時間：1 ヶ月 ^{34,35}

よって、ターゲットとなる核燃料の拡散時間を以下に示す。

- ・ UO₂-FF－中程度(M)
秘密で新規の濃縮施設が必要であるため、評価結果は、「濃縮施設の建設時間+濃縮工程の転換時間＝年オーダー」となる。(1~10 年)
- ・ MOX-FF－非常に低い(VL)
公然で既設の分離施設が存在しているため、評価結果は、「分離工程の転換時間＝1 ヶ月」となる。(<3 ヶ月)
- ・ SF－中程度(M)
秘密で新規の再処理施設が必要であるため、評価結果は、「再処理施設の建設時間+再処設工程の転換時間＝年オーダー」となる。(1~10 年)

2.3.5.6 検知確率

検知確率は、「保障措置によりある期間内に核拡散が検知される確率」として定義される。具体的には、IAEA の適時性探知目標と比較する形で評価する^{10,34,35}。よって、ターゲットとなる核燃料の検知確率を以下に示す。

- ・ UO₂-FF－低い(L)
- ・ MOX-FF－高い(H)
- ・ SF－中程度(M)

一方で、後述する通り、核燃料が IAEA の計量管理や封じ込め/監視の保障措置下に無い場合は、上記の結果とならず、「非常に低い(VL)」評価となる。

2.3.5.7 検知リソース効率

検知リソース効率は、「年間の査察業務量あたりの実効発電量」として定義される。査察業務量は、査察人・日(PDI)により表現される。評価の前提を以下に示す。

(PIV：実在庫検認、DIV：設計情報検認、IIV：中間在庫検認)

- ・ 実効年間発電量：1.08GWy³⁸
- ・ Pre-PIV+Post-PIV：2.0PDI/年 (2 回/年)³⁹
- ・ DIV：0.2PDI/年 (1 回/年[20%確率])³⁹
- ・ IIV：0.3PDI/年 (1 回/年[30%確率])³⁹
- ・ PIV+MOX 査察：5.0PDI/年 (5 回/年)³⁹

よって、査察業務量について、1 つの物質収支区域(MBA; Material Balance Area)あたりでは、以下の通りとなる。

- ・ MOX-FF 保有施設：5.5PDI/年 (PIV+MOX 査察+ DIV+IIV)
- ・ MOX-FF 非保有施設：2.5PDI/年 (Pre-PIV+Post-PIV+DIV+IIV)

よって、**Figure 2-4** で提示する核燃料管理シナリオの検知リソース効率を以下に示す。

- ・ シナリオ A－高い(H)
評価結果は、「実行年間発電量／(MOX-FF 保有施設の査察業務量+MOX-FF 非保有施設の査察業務量)=0.14」となる。(0.10~0.30)
- ・ シナリオ B－高い(H)
評価結果は、「実行年間発電量／(MOX-FF 保有施設の査察業務量+MOX-FF 非保有施設の査察業務量)=0.14」となる。(0.10~0.30)
- ・ シナリオ C－高い(H)
評価結果は、「実行年間発電量／(MOX-FF 保有施設の査察業務量=0.20」となる。(0.10~0.30)
- ・ シナリオ Ref.－高い(H)
評価結果は、「実行年間発電量／(MOX-FF 保有施設の査察業務量+MOX-FF 非保有施設の査察業務量)=0.14」となる。(0.10~0.30)

2.4 核拡散抵抗性評価の結果

2.4.1 核分裂性物質タイプの結果

核分裂性物質タイプの評価結果を、**Table 2-12** に示す。核燃料タイプに応じた BCM、発熱量を示している。また、GIF/PRPP 指標による評価結果を参考として示すとともに、抽出後の Pu 金属中の核種の質量比を示している。なお、MOX-FF はフッ化物揮発法、SF は PUREX 法(Plutonium Uranium Redox Extraction)により再処理されることを想定している

40。

Table 2-12 核分裂性物質タイプの評価結果

核燃料タイプ	BCM [kg-BCM]	発熱量 [W-BCM]	核分裂性物質タイプ	核分裂性物質タイプ (GIF/PRPP)	²³⁸ Pu [%]	²³⁹ Pu [%]	²⁴⁰ Pu [%]	²⁴¹ Pu [%]	²⁴² Pu [%]	²⁴¹ Am [%]
MOX-FF	13.9	254	L	M	2.1	54.5	25	9.3	6.4	2.7
UO ₂ -FF	(未臨界)	-	VH	VH	-	-	-	-	-	-
MOX-SF (72 GWd/ton)	16.2	545	M	H	5.3	34.5	33.3	14.1	12.8	0.0
UO ₂ -SF (72 GWd/ton)	15.0	508	M	M~H	5.4	41.7	27.2	14.1	11.6	0.0
Ref: MOX-SF (45 GWd/ton)	15.3	390	L	M~H	3.9	41.8	31.6	13	9.8	0.0
Ref: UO ₂ -SF (45 GWd/ton)	13.3	217	L	M	2.3	54.9	24.1	13.4	5.3	0.0

核燃料タイプの評価結果を、以下に示す。

- ・ UO₂-FF－非常に高い(VH)
- ・ MOX-FF－低い(L)
- ・ SF(72 GWd/ton)－中程度(M)
- ・ Ref. SF(45 GWd/ton)－低い(L)

SF の燃焼度の違い(72 GWd/ton、45 GWd/ton)によって「低い(L)」から「中程度(M)」に向上した理由は、燃料を高燃焼度化したことで、再処理された Pu 金属中の ^{238}Pu 含有率が増加し、崩壊熱が増加したことが原因である。 ^{238}Pu は、高い崩壊熱(560 W/kg)を有することで知られており、崩壊熱は NED 製造の障壁となりえる。例えば、 ^{238}Pu 含有率 80% 以上の Pu は、IAEA の保障措置の対象から免除されている⁴¹。また、MOX-FF と SF(72 GWd/ton)で「低い(L)」と「中程度(M)」と差が出た理由は、MOX-FF の方が Pu 金属中の ^{238}Pu 含有率が低いことに伴い発熱量が低くなったためである。既往の GIF/PRPP 評価指標では、核分裂性 Pu 同位体比率のみで評価が行われているため、SF の崩壊熱に応じて評価結果に違いが表されていないが、本研究で開発した核分裂性物質タイプ指標では、崩壊熱の影響を評価することに成功した。なお、 UO_2 -FF が「非常に高い(VH)」となった理由は、再処理後の裸の金属が臨界に到達しなかったためである。

以上より、HALEU 及び MOX 燃料の「高燃焼度化」によって、SF 中の ^{238}Pu の割合が増えて Pu 中の崩壊熱が増すため、核分裂性物質タイプが「低い(L)」から「中程度(M)」まで向上することを明らかにした。

本評価指標の導入によって、GIF/PRPP 評価手法について、高燃焼度燃料などの多様な核燃料タイプの特性を解析可能な手法へと発展させることに成功した。これは、本研究で定義した ABWR 搭載の OFNP のみならず、多様な炉型を搭載する洋上・陸上 NPP に対し、適用可能な評価手法である(4.2 節で言及)。

2.4.2 拡散機会の結果

拡散機会の評価結果を、**Table 2-13** に示す。これは、本研究で提示する核燃料シナリオや核燃料タイプに応じた、各ターゲットの評価結果である。

NPP 内のターゲットについて、シナリオ A、B、C では一部を除き、「高い(H)」を示した。一方で、シナリオ Ref.では、「中程度(M)」を示した。これは、核燃料の輸送方法の違いが原因であり、シナリオ A、B、C では輸送可能な最大量で一括輸送していたが、シナリオ Ref.では燃料取替のタイミングに合わせてより少ない量で都度輸送していたため、結果としてシナリオ A、B、C の方が輸送/移送頻度を低減した。すなわち、一括輸送によって、フロントエンド輸送/バックエンド輸送の頻度を最大で 0.80(回/年)から 0.06(回/年)まで減少可能なことを明らかにした。

一方で、NPP 内のターゲットのうち、12 ヶ月運転の $\text{UO}_2\text{-FF}$ は一段階低い「中程度(M)」を示した。これは、1 サイクルあたり燃焼期間の短さが原因である。すなわち、運転サイクル期間を 12 ヶ月運転から 24 ヶ月運転に延長することで、内部移送の頻度を 0.80 から 0.44(回/年)まで減少可能なことを明らかにした。

シナリオ A の場合、陸上キャスク保管庫 2 内の SF は、「VH(非常に高い)」を示した。この原因は、乾式キャスクの方が湿式キャスクと比べて、一度に多くの燃料を輸送可能なためである。すなわち、燃料輸送に乾式キャスクを使用することで、フロントエンド輸送/バックエンド輸送の頻度を最大で 0.22 から 0.06(回/年)まで減少可能であることを明らかにした。

以上より、「燃料の一括輸送」や「運転サイクル期間の延長」によって拡散機会が減少し、中程度(M)から高い(H)まで向上し、特に SF を多く輸送可能な「乾式キャスク」の大きな効果を明らかにした。

本評価指標の導入によって、GIF/PRPP 評価手法について、核燃料の輸送/移送に伴う核拡散リスクを解析可能な手法へと発展させることに成功した。これは、本研究で定義した ABWR 搭載の OFNP のみならず、多様な炉型を搭載する洋上・陸上 NPP に対し、適用可能な評価手法である (4.2 節で言及)。

Table 2-13 拡散機会の評価結果

シ ナ リ オ	核燃料タイプ		運転サイクル		拡散機会 [回/年]							輸送/移送頻度 [回/年]			
			燃 焼 [月]	バ ッ チ 数	UO ₂ -FF	MOX-FF		SF				フロン トエン ド輸送	内部 移送	バック エンド 輸送	
					NPP					陸上保管施設					
					新燃料貯蔵庫	SFP	キャスク仮置	SFP	SFP2	キャスク仮置2	キャスク保管庫2				
					(X+Y)	(X+Y)	(2X)	(Y+Z)	(Z)	(2Z)	(Z)				(=X)
A	1)	MOX	24	4		0.51	0.14	0.51			0.07	0.07	0.44	0.07	
	2)	燃料	12	8		0.86	0.13	0.86			0.06	0.06	0.80	0.06	
	3)	UO ₂	24	4	0.69			0.51			0.07	0.24	0.44	0.07	
	4)	燃料	12	8	1.02			0.86			0.06	0.22	0.80	0.06	
B	1)	MOX	24	4		0.51	0.14	0.66	0.22	0.44		0.07	0.44	0.22	
	2)	燃料	12	8		0.86	0.13	1.00	0.20	0.40		0.06	0.80	0.20	
	3)	UO ₂	24	4	0.69			0.66	0.22	0.44		0.24	0.44	0.22	
	4)	燃料	12	8	1.02			1.00	0.20	0.40		0.22	0.80	0.20	
C	1)	MOX	24	4		0.51	0.14	0.44				0.07	0.44		
	2)	燃料	12	8		0.86	0.13	0.80				0.06	0.80		
	3)	UO ₂	24	4	0.69			0.44				0.24	0.44		
	4)	燃料	12	8	1.02			0.80				0.22	0.80		
Ref	ref.1	MOX	12	5		1.60	1.60	1.60			0.80	0.80	0.80	0.80	
	ref.2	UO ₂	12	5	1.60			1.60			0.80	0.80	0.80	0.80	

注) 青ハッチングは「非常に高い」 緑ハッチングは「高い」 黄色ハッチングは「中程度」 の意

2.4.3 核燃料管理シナリオの結果

核燃料管理シナリオに応じた評価結果を、Table 2-14、Table 2-15、Table 2-16、Table 2-17 に示す。MOX-FF は、技術的困難性、拡散コスト、拡散時間といった複数の内在的特性の指標が「非常に低い(VL)」評価になった。UO₂-FF と比較すると、技術的困難性、拡散時間、核分裂性物質タイプの指標は、より低い抵抗性を示した。つまり、MOX-FF は、核兵器転用の魅力的なターゲットであることを明らかにした。加えて、MOX-FF の拡散経路として、「搬出戦略(3)：ターゲットをキャスクに残したまま搬出。空と偽装・返却」は、検知確率の指標が「非常に低い(VL)」評価になった。つまり、MOX-FF の拡散経路として、MOX-FF 搬入用キャスクを偽装して MOX-FF を搬出する戦略は、検知が技術的に困難なため、脆弱な経路であることを明らかにした。

よって、魅力的なターゲットである MOX-FF の核拡散リスクを低減させるためには、MOX-FF 搬入時の査察官による体数確認、及び空のキャスク搬出時のキャスク内の確認などの措置が重要であることを明らかにした。この際、査察業務量の増加が懸念されるが、一括輸送により燃料の輸送頻度を 10 年から 15 年程度に低減することで、²⁴¹Am 蓄積による核燃料品質劣化を抑えながら、査察業務量も抑制しつつ、核拡散リスクを低減可能となる。なお、本対策によって、検知確率の指標は、「非常に低い(VL)」から「高い(H)」程度まで上昇し、より堅牢な保障措置システムとなる。

これらの燃料管理を行った OFNP(シナリオ A、B、C)と、参照となる陸上 NPP(シナリオ Ref.)を比較すると、OFNP の核拡散抵抗性は、以下の通り、検知確率、核分裂性物質タイプ、拡散機会の点で高いことを明らかにした。

- ・ 検知確率
搬出戦略[3]の MOX-FF が「非常に低い(VL)」から「高い(H)」まで向上。
- ・ 核分裂性物質タイプ
SF が「低い(L)」から「中程度(M)」まで向上。
- ・ 拡散機会
NPP 内のターゲットが「中程度(M)」から「高い(H)」まで向上。陸上保管施設内のターゲットが「高い(H)」から「非常に高い(VH)」まで向上。

Table 2-14 核拡散抵抗性の評価結果（シナリオ A）

シナリオ A	経路 ID	T1- XA02	T2- XA03a	T2- XA03b	T2- XA04a	T3- XA03a	T3- XA03b	T3- XA07a	T3- XA07b
	ターゲット	UO ₂ -FF	MOX-FF			SF			
	転用地点	NPP						陸上保管施設	
		新燃料 貯蔵庫	SFP	SFP	キャス ク仮置 エリア	SFP	SFP	キャス ク保管 庫 2	キャス ク保管 庫 2
	搬出戦略	[1]	[1]	[2]	[3]	[1]	[2]	[1]	[2]
技術的困難性		M	VL	VL	VL	H	M	H	M
拡散コスト		VL	VL			VL			
拡散時間		M	VL			M			
検知リソース効率		H							
検知確率		L	H	H	VL	M	M	M	M
核分裂性物質タイプ		VH	L			M			
拡散機会		H	H	H	H	H	H	VH	VH

Table 2-15 核拡散抵抗性の評価結果（シナリオ B）

シナリオ B	経路 ID	T1- XB02	T2- XB03a	T2- XB03b	T2- XB04a	T3- XB03a	T3- XB03b	T3- XB07a	T3- XB07b	T3- XB08a
	ターゲット	UO ₂ -FF	MOX-FF			SF				
	転用地点	NPP						陸上保管施設		
		新燃料 貯蔵庫	SFP	SFP	キャス ク仮置 エリア	SFP	SFP	SFP2	SFP2	キャス ク仮置 エリア 2
	搬出戦略	[1]	[1]	[2]	[3]	[1]	[2]	[1]	[2]	[3]
技術的困難性		M	VL	VL	VL	H	M	H	M	M
拡散コスト		VL	VL			VL				
拡散時間		M	VL			M				
検知リソース効率		H								
検知確率		L	H	H	VL	M	M	M	M	M
核分裂性物質タイプ		VH	L			M				
拡散機会		H	H	H	H	H	H	H	H	H

Table 2-16 核拡散抵抗性の評価結果（シナリオ C）

シ ナ リ オ C	経路 ID	T1- XC02	T2- XC03a	T2- XC03b	T2- XC04a	T3- XC03a	T3- XC03b
	ターゲット	UO ₂ -FF	MOX-FF			SF	
	転用地点	NPP					
		新燃料 貯蔵庫	SFP	SFP	キャス ク仮置 エリア	SFP	SFP
		搬出戦略	[1]	[1]	[2]	[3]	[1]
技術的困難性		M	VL	VL	VL	H	M
拡散コスト		VL	VL			VL	
拡散時間		M	VL			M	
検知リソース効率		H					
検知確率		L	H	H	VL	M	M
核分裂性物質タイプ		VH	L			M	
拡散機会		H	H	H	H	H	H

Table 2-17 核拡散抵抗性の評価結果（シナリオ Ref.）

シナリオ オ Ref.	経路 ID	T1- XR02	T2- XR03a	T2- XR03b	T2- XR04a	T3- XR03a	T3- XR03b	T3- XR07a	T3- XR07b
	ターゲット	UO ₂ -FF	MOX-FF			SF			
	転用地点	NPP						陸上保管施設	
		新燃料 貯蔵庫	SFP	SFP	キャス ク仮置 エリア	SFP	SFP	キャスク 保管庫 2	キャス ク保管 庫 2
	搬出戦略	[1]	[1]	[2]	[3]	[1]	[2]	[1]	[2]
技術的困難性		M	VL	VL	VL	H	M	H	M
拡散コスト		VL	VL			VL			
拡散時間		M	VL			M			
検知リソース効率		H							
検知確率		L	H	H	VL	M	M	M	M
核分裂性物質タイプ		VH	L			L			
拡散機会		M	M	M	M	M	M	H	H

2.5 Safeguards by design による堅牢な保障措置システムの設計

今までの研究結果を踏まえ、本研究は提示する Safeguards by design による堅牢な OFNP 保障措置システム設計を以下に示す¹。Figure 2-19 は、概念図を示す。Table 2-18 は、設計仕様を示す。

1. 10~15 年頻度の燃料一括輸送

MOX-FF について、一括輸送により輸送頻度を 10 年から 15 年程度に低減することで、²⁴¹Am 蓄積による核燃料品質劣化を抑えながら、燃料輸送に伴う核拡散リスクを低減する(拡散機会が向上)。10 年から 15 年の期間選定は、同期間内の MOX-FF 必要体数が一括輸送の最大量 1380 体を超えない範囲で選定された。また、MOX-FF 以外の UO₂-FF や SF の輸送方法についても、燃料取替時などの機会に合わせた都度輸送ではなく、一括輸送とする。なお、キャスクや輸送船の仕様によっては、一度に輸送可能な燃料集合体数に違いを生じ、適切な輸送頻度に変更となる可能性がある。

注意点としては、一括輸送によって燃料の技術開発を適宜反映できないおそれや、燃料製造工場の容量が不足するおそれが懸念として挙げられる。設計段階から核不拡散性のみならず、原子力安全性や経済性とも調和して効率的かつ効果的な設計を施す必要がある。

その他の注意点としては、OFNP で使用する MOX 燃料は、UO₂ 燃料よりも核拡散リスクが大きく、より厳しい保障措置が必要となることが挙げられる。OFNP には、型式認証などによる複数基の設置が期待されるが、初号機の社会実装が重要である。そのため、過渡期である運転初期は UO₂ 燃料を使用し、安定期に入ってから MOX 燃料を使用するといった運用が現実的であろう。ただし、システム設計においては、要求レベルの低い方で設計・運用開始した後に、要求レベルの高い方に切り替える場合、設計見直しに多大なる費用を要する。この設計完了後の後戻りによる多大な経済悪化を防ぐことが、まさに Safeguards by design を導入する利点である。よって、保障措置の厳しい側の MOX 燃料使用を前提とした設計を行い、運転初期は UO₂ 燃料を使用し、その後 MOX 燃料使用に切り替えることを提案する。

合わせて、MOX 燃料の核拡散リスクを踏まえ、OFNP の洋上移動をしていないことの証明も必要である。本研究の想定する OFNP は、基本的に移動を想定しておらず、独力で移動不可な設計に加えて、曳航した場合でも陸上との往復に半日以上を要する⁴²。そのため、原子力の動力源利用が可能な船舶型と状況は異なるが、非核兵器保有国家による洋上における NPP 実装の前例が今まで無いことから、その考慮は必須となるであろう。OFNP の洋上移動していないことの監視方法としては、GPS や衛星写真や、常設の

(海底)電源ケーブルを介した電源機能の監視によって可能であり、OFNP にアクセスせずとも監視可能である。

2. MOX-FF 受入時の体数確認

MOX-FF 受入時に搬入用キャスク内を確認するなど MOX-FF の体数確認を厳格に行うことで、MOX-FF 搬入用キャスクを偽装して MOX-FF を搬出する脆弱な核拡散経路を抑止し、核拡散リスクを低減する(検知確率が向上)。なお、査察業務量の増加が懸念されるが、前述の燃料一括輸送と併用することによって、査察業務量を抑制しつつ、核拡散リスクを低減可能である。

3. 空キャスク搬出時の内部確認

空のキャスク搬出時にキャスクの内部確認を行うことで、MOX-FF 搬入用キャスクを偽装して MOX-FF を搬出する脆弱な核拡散経路を抑止し、核拡散リスクを低減する(検知確率が向上)。なお、本設計による査察業務量の増加が懸念されるが、前述の燃料一括輸送と併用することによって、査察業務量を抑制しつつ、核拡散リスクを低減可能である(前述の通り)。

4. 高燃焼度化

燃焼度を 45 GWd/ton から 72 GWd/ton まで高めた核燃料を使用することで、再処理後の Pu 中の ^{238}Pu の割合が増えて NED 製造の障壁となる崩壊熱が増すため、核拡散リスクを低減する(核分裂性物質タイプが向上)。

5. 運転サイクル延長

運転サイクル中の燃焼期間を 12 ヶ月から 24 ヶ月運転まで延長することで、燃料取替の頻度が減り、核拡散リスクを低減する(拡散機会が向上)。

6. 乾式キャスクの使用

燃料の輸送キャスクとして湿式ではなく乾式キャスクを使用することで、一度により多くの燃料を輸送可能なため、燃料輸送の頻度が減り核拡散リスクを低減する(核拡散機会が向上)。また、地上のキャスク保管施設へ輸送後は、SF を乾式キャスクに装荷したまま長期保管する。なお、本研究では既往文献を基にキャスクの仕様を定義しているが(**Table 2-2**)、詳細設計では、輸送側と貯蔵側の両方で、除熱機能、遮蔽機能、密封機能、臨界防止機能の機能等について要求事項を満足することが必要である。

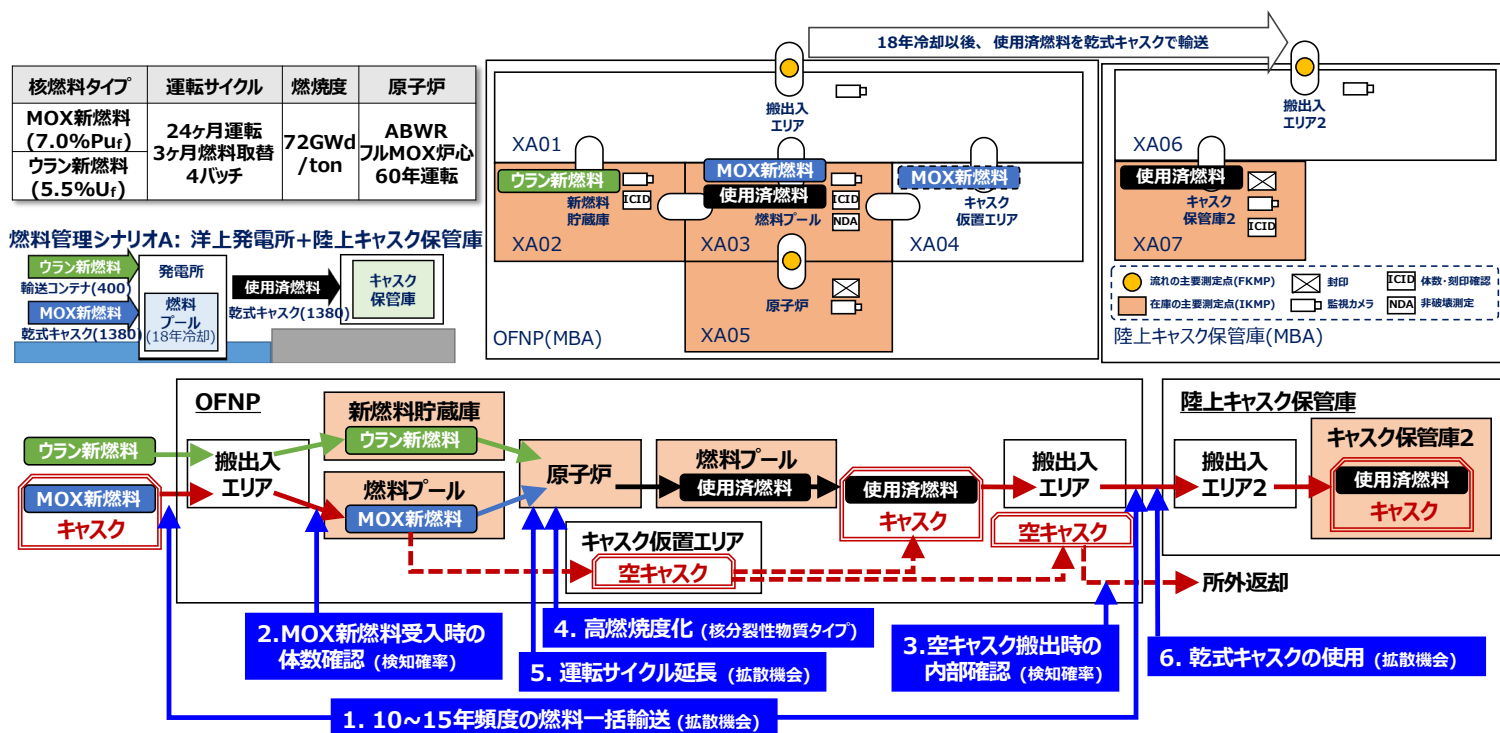


Figure 2-19 Safeguards by design による堅牢な保障措置システム

Table 2-18 Safeguards by design による堅牢な保障措置システムの設計仕様

設計	設計仕様	Safeguards 上の効果
1. 10~15 年頻度の燃料一括輸送	・ MOX-FF について、10 年から 15 年程度を目安に OFNP へ一括輸送する ・ MOX-FF 以外にも UO_2-FF や SF についても、燃料取替時などの都度輸送ではなく、一括した燃料輸送とする	・ 燃料輸送を燃料取替の都度から一括輸送に変更し、輸送頻度を減らすことで、燃料輸送に伴う核拡散の機会が減る
2. MOX-FF 受入時の体数確認	・ MOX-FF 搬入用のキャスクを空と偽装して MOX-FF を搬出する核拡散経路の脆弱性を抑止するため、MOX-FF 受入時に搬入用キャスク内を確認するなど、厳格な MOX-FF の体数確認を行う	・ MOX-FF の脆弱な核拡散経路に対して、核拡散リスクが減る
3. 空キャスク搬出時の内部確認	・ MOX-FF 搬入用のキャスクを空と偽装して MOX-FF を搬出する核拡散経路の脆弱性を抑止するため、空のキャスク搬出時にキャスクの内部確認を行う	・ MOX-FF の脆弱な核拡散経路に対して、核拡散リスクが減る
4. 高燃焼度化	・ 燃料を高燃焼度化する (72 GWd/ton)	・ 再処理後の Pu 中の ^{238}Pu の割合が増えて崩壊熱が増すため、NED 製造の障壁となる
5. 運転サイクル延長	・ 運転サイクルを延長する (1 サイクルあたり 24 ヶ月運転)	・ 燃料取替の頻度が減ること で、燃料移送に伴う核拡散の機会が減る
6. 乾式キャスクの使用	・ 輸送キャスクとして湿式ではなく乾式キャスクを使用する ・ 地上のキャスク保管施設へ輸送後は、SF を乾式キャスクに装荷したまま長期保管する	・ 湿式キャスクに比べて一度に多くの燃料を輸送可能なため、燃料輸送の頻度が減り、燃料輸送に伴う核拡散の機会が減る

2.6 本章のまとめ

本章では、非核兵器保有国による OFNP の核拡散リスクを定量化し、洋上特有の輸送や保管を含む核燃料管理や、取り扱う核燃料タイプによるリスク低減効果を明らかにした。GIF/PRPP 評価手法に基づき、輸送/移送に伴う核拡散リスク及び MOX 燃料や HALEU 燃料といった高燃焼度燃料の特性を解析可能な評価指標を開発し、陸上 NPP と比較しながら核拡散抵抗性を定量的に評価した。開発した評価手法は、ABWR 搭載の OFNP のみならず、多様な炉型を搭載する洋上・陸上 NPP に対し、適用可能な評価手法である。結果として、核拡散リスク低減のために燃料管理方法は、MOX-FF の 10 年から 15 年程度の頻度での一括輸送と検認の効果が最も高く、高燃焼度化、運転サイクル期間の延長、及び乾式キャスクの使用などによる一括輸送も有効であることを指摘した。これらの燃料管理を行った OFNP と陸上 NPP を比較すると、OFNP の核拡散抵抗性は、検知確率、核分裂性物質タイプ、拡散機会の点で高いことを明らかにした。ONFP のみならず船舶型や陸上設置といった多様な炉型に対し、開発した評価手法を適用可能、かつ高燃焼度化や運転サイクル延長による堅牢性強化の可能性を指摘した。最後に、核物質転用の経路解析を行い、Safeguards by design による堅牢な OFNP の保障措置システム設計を提示した¹。

参考文献

- ¹ D. Hara, H. Sagara, “Proliferation Resistance Analysis of Offshore Floating Nuclear Power Plant”, Energy Report, International Symposium on Zero-Carbon Energy Systems (IZES), Tokyo Institute of Technology, 10–12 January 2023, Tokyo, Japan, (Provisionally Accepted).
- ² R. A. Bari, S. J. Johnson, J. Hockert, et al., “Overview of the Facility Safeguardability Analysis (FSA) Process”, PNNL-21698, August 2012, (2012), <https://www.osti.gov/biblio/1055408>
- ³ T. Bjornard, R. Bean, S. DeMuth, et al., “Safeguards-by-Design: Early Integration of Physical Protection and Safeguardability into Design of Nuclear Facilities”, Global 2009, INL/CON-09-16762, September 2009, (2009), <https://inldigitallibrary.inl.gov/sites/sti/sti/4384039.pdf>
- ⁴ 原子力委員会, “我が国におけるプルトニウム利用の基本的な考え方(平成 30 年 7 月 31 日原子力委員会決定)”, (2018), https://www.aec.go.jp/kettei/kettei/20180731_2.pdf
- ⁵ 千崎雅生, 久野祐輔, 井上尚子, 勝村聡一郎, “次世代原子力システムの核拡散抵抗性”, 日本原子力学会誌, Vol. 50, No. 6, P27,28, (2008), https://doi.org/10.3327/jaesjb.50.6_368
- ⁶ 国際原子力機関(IAEA), “Proliferation Resistance Fundamentals for Future Nuclear Energy Systems”, IAEA-STR-332, (2002).
- ⁷ 久野祐輔, J. S. Choi, “核拡散抵抗性と保障措置 次世代核燃料サイクル設計における核不拡散対策の基本的考え方”, 日本原子力学会誌, Vol. 51, No.2, P23,24, (2009), https://doi.org/10.3327/jaesjb.51.2_94
- ⁸ 日本原子力産業協会 原子力システム研究懇話会, “原子力平和利用と核不拡散・核セキュリティ”, NSA コメンタリーシリーズ NO. 25, P124-131, (2020), <http://syskon.jp/NSAcomNo25.pdf>
- ⁹ The Proliferation Resistance and Physical Protection Evaluation Methodology Working Group of the Generation IV International Forum, “Evaluation Methodology for Proliferation Resistance and Physical Protection of Generation IV Nuclear Energy Systems Revision 6,” GIF/PRPPWG/2011/003, (2011), https://www.gen-4.org/gif/upload/docs/application/pdf/2013-09/gif_prppem_rev6_final.pdf
- ¹⁰ 川久保陽子, 井上尚子, 千崎雅生, “「GEN IV 原子力システムの核拡散抵抗性及び核物質防護評価手法 Rev.5」－GIF PRPP ワーキンググループ報告書－(仮訳)”, JAEA-Review 2011-024, (2011), <https://doi.org/10.11484/jaea-review-2011-024>
- ¹¹ 日本原子力研究所 炉物理研究委員会, “軽水炉次世代燃料の炉物理に関するベンチマーク問題の提案及び解析結果”, JAERI-Research 2001-046, P70-159, (2001), <https://doi.org/10.11484/jaeri-research-2001-046>

-
- ¹² W. A. Wieselquist, R. A. Lefebvre, M. A. Jessee, Eds., “SCALE Code System”, ORNL/TM-2005/39, Version 6.2.4, Oak Ridge National Laboratory (ORNL), P3-3~P3-116, (2020).
- ¹³ M.B. Chadwick, M. Herman, P. Obložinský, et al., “ENDF/B-VII.1 Nuclear Data for Science and Technology: Cross Sections, Covariances, Fission Product Yields and Decay Data, Nuclear Data Sheets, Vol.112, 12, Dec. 2011, P2887-2996, (2011), <https://doi.org/10.1016/j.nds.2011.11.002>
- ¹⁴ 輸送物技術顧問会, “使用済燃料中間貯蔵に係る貯蔵後輸送の安全性確保方策について”, P3~8, (2010), https://www.mlit.go.jp/appli/pubcom/kaiji08_pc_000019.html
- ¹⁵ Pacific Nuclear Transport Ltd(PNTL), “Pacific Heron and Pacific Egret”, (2012), <https://www.pntl.co.uk/2021/08/pntl-factsheet-heron-and-egret-2021/>
- ¹⁶ 東京電力, “福島第一原子力発電所 特定原子力施設に係る実施計画”, II-2-11-添付 2-1-1-2, II-2-11-添付 2-1-3-2, II-2-13-6, II-2-13-7, II-2-13-添付 4-4, II-2-13-添付 4-20 (2024), <https://www.tepco.co.jp/decommission/information/implementation>
- ¹⁷ 日立 GE ニュークリア・エナジー, “HDP-69B(B)型 型式指定申請対象キャスクの概要”, Doc No. FRO-TA-0045/REV. 0, 令和元年 6 月 25 日, P6, (2019).
- ¹⁸ 原燃輸送, “容器承認書(NFT-32B 型核燃料輸送物)”, 原規規発第 1804176 号, 平成 30 年 4 月 17 日, (2018), <https://www.da.nra.go.jp/detail/NRA078004631>
- ¹⁹ 成田正邦, 藤田文行, 共訳, “原子炉の理論と解析(上), James Johnson Duderstadt, Louis James Hamilt”, 現代工学社, P82, (1991).
- ²⁰ 東京電力, “柏崎刈羽原子力発電所 6 号及び 7 号炉 重大事故等対策の有効性評価について”, 資料 1-3-1, 平成 27 年 3 月, 添付 4.1.1, (2017), https://www.tepco.co.jp/about/power_station/disaster_prevention/pdf/nuclear_power_150317_02.pdf
- ²¹ Jacob M. Jurewicz, “Design and Construction of an Offshore Floating Nuclear Power Plant”, P44, (2015), <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/103707>
- ²² 原子力規制委員, “実用発電用原子炉に係る使用済燃料貯蔵槽における燃料損傷防止対策の有効性評価に関する審査ガイド”, 平成 25 年 6 月, (2013), <https://www.nra.go.jp/data/000069137.pdf>
- ²³ 日本アイソトープ協会, “アイソトープ手帳”, (1995)
- ²⁴ 日本機械学会(JSME), “1999 蒸気表”, (1999).
- ²⁵ 東芝, “沸騰水型原子力発電所ボロン添加ステンレス鋼製使用済燃料貯蔵ラックの未臨界性評価について”, TLR-051 改訂 2, (1998).
- ²⁶ 日立製作所, “沸騰水型原子力発電所ボロン添加ステンレス鋼製使用済燃料貯蔵ラックの未臨界性評価について”, HLR-046 改訂 1, (1998).
- ²⁷ 日本原子力研究所, “臨界安全ハンドブック第 2 版”, JAERI 1340, 1999 年 3 月, P16~18, (1999), <https://doi.org/10.11484/jaeri-1340>

²⁸ 原子力安全研究協会, “軽水炉発電所のあらまし 改訂第3版(平成20年9月)”, 実務テキストシリーズ No.1, P133, (2008).

²⁹ Proliferation Resistance and Physical Protection Evaluation Methodology Working Group, “PR&PP Evaluation: ESFR Full System Case Study Final Report,” GIF/PRPPWG/2009/002, P22, (2009), https://gif.jaea.go.jp/methodology/prppwg/prpp_csreport_and_appendices_2009_10-29.pdf

³⁰ 相楽洋, 川久保陽子, 井上尚子, “核拡散抵抗性及び核物質防護評価; 仮想的ナトリウム冷却高速炉システム全体のケーススタディ最終報告書(仮訳)”, JAEA-Review 2013-011, P23, (2014), <https://doi.org/10.11484/jaea-review-2013-011>

³¹ T. Aoki, H. Sagara, C. Y. Han, “Material attractiveness evaluation of inert matrix fuel for nuclear security and non-proliferation”, Annual Nuclear Energy, Volume 126, April 2019, pages 427-433, (2019), <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2018.10.063>

³² C. G. Bathke, N. Inoue, Y. Kuno, et al., “Summary of a Joint US-Japan Study of Potential Approaches to Reduce the Attractiveness of Various Nuclear Materials for Use in a Nuclear Explosive Device by a Terrorist Group”, Global 2013, Salt Lake City, Utah, September 29-October 3, 2013, (2013).

³³ Christopher J. Werner (Ed.), “MCNP USER’S MANUAL Code Version 6.2 Manual Rev.0”, (2017), https://mcnp.lanl.gov/pdf_files/TechReport_2017_LANL_LA-UR-17-29981_WernerArmstrongEtAl.pdf

³⁴ 国際原子力機関(IAEA), “IAEA SAFEGUARDS GLOSSARY 2001 Edition INTERNATIONAL NUCLEAR VERIFICATION SERIES No. 3”, IAEA/NVS/3/CD, P20,21, (2002), https://www-pub.iaea.org/mtcd/publications/pdf/nvs-3-cd/pdf/nvs3_scr.pdf

³⁵ 核物質管理センター, “IAEA 保障措置用語集 2001 年版 対訳”, P47, (2005).

³⁶ STOCKHOLM INTERNATIONAL PEACE RESEARCH INSTITUTE(SIPRI), “Trends in World Military Expenditure, 2023,” P2, (2024), <https://doi.org/10.55163/BQGA2180>

³⁷ United Nations, “QUESTION OF GENERAL AND COMPLETE DISARMAMENT,” A/6858, 10 October 1967, Annex IV, (1967).

³⁸ 永富悠, 松尾雄司, 村上朋子, “原子力発電所の設備利用率及び原因別停止時間の各国比較”, IEEJ, 2011 年 5 月, <https://eneken.ieej.or.jp/data/3836.pdf>

³⁹ 原子力規制委員会 (NRA), “統合保障措置の適用拡大.” <https://www.nra.go.jp/activity/hoshousochi/iaea/iaea4.html>

⁴⁰ M. Benedict, T. H. Pigford, H. W. Levi (清瀬量平訳), “原子力化学工学 第IV分冊 燃料再処理と放射性廃棄物管理の化学工学,” P16~22, (1983).

⁴¹ 国際原子力機関(IAEA), “The Structure and Content of Agreements Between the Agency and States Required in Connection with the Treaty on the Non-Proliferation of Nuclear

Weapons”, INFCIRC/153(Corrected), P11, (1972),
<https://www.iaea.org/publications/documents/infcircs/structure-and-content-agreements-between-agency-and-states-required-connection-treaty-non-proliferation-nuclear-weapons>
⁴² 産業競争力懇談会(COCN), “産業競争力懇談会 2022 年度 プロジェクト 最終報告 浮体式原子力発電”, 付録 P81,82, (2023), <http://www.cocn.jp/report/2022>

第 3 章

核セキュリティ性評価

第3章 核セキュリティ性評価

3.1 はじめに

第 1 章で説明した通り、原子力安全の向上や原子力平和利用の推進に向けた浮体式洋上原子力発電所(OFNP)の研究が世界的に進められている。一方で、原子力安全性を中心としたプラント概念の技術的成立性に焦点が当てられており、洋上といったこれまでにない設置環境における社会実装に必須となる新たな核セキュリティ性の検討は十分ではない。また、OFNP のような新しい原子力システムを設計する上では、Security by design の概念を反映させ、堅牢なシステム設計を施すことが重要である^{1,2,3}。

そもそも、核物質防護システムの設計については、**Figure 3-1** に示す通り、国際原子力機関(IAEA)が標準的なプロセスを推奨しており、国家が定義する設計基礎脅威(DBT)に対して、事業者は検知・遅延・対応機能から構成される核物質防護システムを設計し、タイムライン評価などによってシステムの応答性を評価し、許認可を得ることが推奨されている^{4,5,6,7}。一方で、DBT は核セキュリティ上の機密性から情報開示されていないため、一定の仮定のもとで研究が行われる。

OFNP は、今までの陸上の原子力発電所(NPP)とは異なる設置環境のため、洋上特有の魚雷などの脅威も検討の候補になりえる⁸。また、OFNP の核セキュリティに関する既往研究の多くは^{9,10,11,12}、米国に特有の規制や防護基準に基づいており^{13,14}、日本を含む大多数の国家では条件が全く異なるため、洋上特有の新たな脅威に対する研究手法を含めた新しいアプローチ開発が必要とされる。

以上より、本章では、洋上特有の核セキュリティ上の新たな脅威に対する応答性を定量評価可能な手法を開発し、Security by design による堅牢な OFNP の核物質防護システム設計を提示する。新たな脅威として、遠隔攻撃手段の魚雷を想定し船殻への構造健全性解析を行う。また、脅威への対抗能力として、船舶移乗による核物質の盗取や妨害破壊行為に対する核セキュリティ性を定量的に評価する。

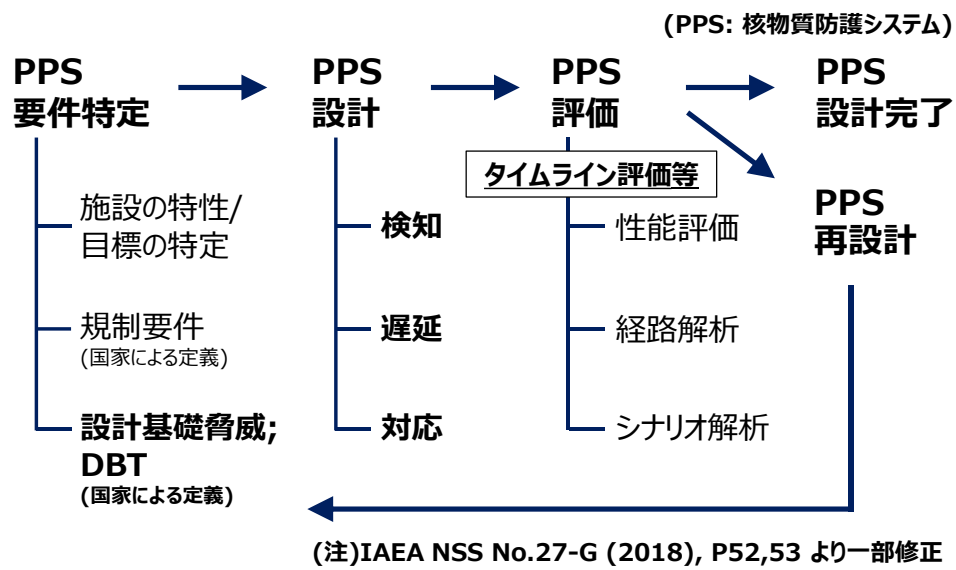


Figure 3-1 IAEA が推奨する核物質防護システムの設計プロセス

3.2 研究対象とする DBT の選定

米国 MIT 研究チームは、OFNP の核物質防護システムの概念を提案しているが^{9,10,11,12}、米国に特有の規制や防護基準を前提としている^{13,14}。そのため、本研究の扱う警備要員による致死性武器や積極的攻撃の権限を持たない日本のような国家では、全く異なる核物質防護システム設計が求められる。そこで、本研究では、Vincent らが提案した DBT の手段 (Table 3-1) に基づき、今までの陸上 NPP には無かった洋上特有の新たな脅威に着目し、研究対象とする DBT を選定する⁸。また、GIF/PRPP によるケーススタディの例示から、具体的な DBT の能力や仕様も想定する (Table 3-2)^{15,16}。

Vincent らが提案した DBT の手段 (Table 3-1) について、グループ分け(1)～(5)に対応する形で、研究対象の適否を以下に論述する¹。

(1) インフラへの攻撃(地上からの脅威・水上の脅威・水中の脅威)、直接的攻撃(地上からの脅威)、スタンドオフ攻撃(水上の脅威)

この種の DBT は陸上 NPP で十分に検討されており、OFNP は陸から十分隔離距離があり、また OFNP の安全上重要な機器は喫水面よりも下部に配備される設計思想のため¹⁷、本研究の対象外とする。

(2) 船舶衝突(水上の脅威)

使用済燃料輸送船^{18,19,20}や通常船舶²¹の国際規則には対衝突構造の要求が無い中で、使用済燃料輸送船の国内規則である海査第 520 号には T2 タンカー(排水量 23400 DWT)との対衝突構造の要求がある²²。ただし、使用済燃料輸送船は、10 倍以上の容量がある VLCC (Very Large Crude oil Carrier; 排水量 290000 DWT) との衝突でも、船倉部が健全というシミュレーション結果が存在するため²³、本研究の対象外とする。なお、経験則に基づくミノルスキーの式は、衝突船/被衝突船の衝突吸収エネルギーを両者の構造部材の体積、船速、排水量の 3 要素で定義され、原子力船のサバンナ号、オットーハーン号、むつの設計にも使用されている。

(3) 自殺爆撃(水上の脅威・水中の脅威)

Genzman らは、アンホ爆薬 (ANFO; Anmonium Nitrate Fuel Oil explosive) を積載最大量 70,000 ton 搭載する大型船舶を想定し、近似式により水上の影響距離を 450 m または 600 m と予測している^{11,12}。また Conway は、トラックサイズの爆薬量を搭載する 2 隻のボートを想定し、LS-DYNA コードを用いたシミュレーション解析により、水中も含めた影響距離を最大 250 m と評価している¹⁰。本研究で想定する DBT には、離隔された船体に影響を及ぼすような大容量の爆薬の所持は想定されていないため、船舶やダイバーによる自殺爆撃を本研究の対象外とする。また、航空

機衝突に対しては、核セキュリティ性のみならず原子力安全性の強化にも繋がることから、航空機衝突耐性を持つ建屋設計とする(詳細は後述)²⁴。

(4) 魚雷(水中の脅威)

OFNP への魚雷脅威に関する既往研究は無い。OFNP では、安全上の重要機器は喫水面より下部(水面下)に配備されており、空中及び水上からの脅威に対して堅牢性が強化されているため、水中からの脅威に対する防護がより一層重要となる。想定する DBT の技術レベルを超えている可能性はあるが、小型の短魚雷であればテロリストなどによる使用は否定できないため、本研究の対象とする²⁵。

(5) 船舶移乗(水上の脅威)、ダイバー(水中の脅威)

船舶移乗脅威として Conway らが研究していたものの^{9,10}、米国特有の警備要員による致死性武器や積極的攻撃の権限を持つことを前提としており^{13,14}、日本を含む多数の国家では条件として全く異なるため、本研究の対象とする。

以上より、本研究で対象とする DBT として、「(4)魚雷」と「(5)船舶移乗」を選定する。

Table 3-1 既往研究における DBT の手段

Terrorist and Non-State Actors		
Land-based (地上からの脅威)	Moored on Surface (水上の脅威)	Underwater (水中の脅威)
1)Direct Attacks (1) (a)Ground Assault (b)Suicide Bomber 1.Truck Bomb 2.Airplane/Drone (c)Standoff Attack	1)Direct Attacks <u>(a)Boarding (5)</u> (b)Intentional Collision (2) (c)Suicide Bomber (3) 1.Fast Boat 2.Diver 3.Airplane/Drone (d)Standoff Attack (1) 1.Small Boat 2.Shore Based	1)Direct Attacks <u>(a)Diver (5)</u> <u>(b)Torpedo (4)</u> 1.Air-Launched 2.Sub-launched (c)Suicide Bomber (3)
2)Attacks on Infrastructure (1) (a)Cyber Attack (b)Nuclear Material (c)Supply Lines (d)Siting-Specific Secondary Threats	2)Attacks on Infrastructure (1) (a)Cyber Attack (b)Nuclear Material (c)Supply Lines (d)Mines	2)Attacks on Infrastructure (1) (a)Cyber Attack (b)Nuclear Material (c)Supply Lines

Adapted from K. Vincent et al.(2016)

Table 3-2 研究対象とする DBT の能力と仕様

項目		本研究	GIF/PRPP(2009)
タイプ		軍事訓練を受けた攻撃部隊	同左
能力	知識	施設の配置や物理的防護システムの基本知識、 実行機会を把握するのに十分なプラント・プロセスの知識	同左
	スキル	障壁を突破する攻撃装置の設計能力、攻撃兵器の使用訓練	同左
	装備	致死性武器、爆発物(5 kg)、船舶(高速)	致死性武器、爆発物、武装車両
	人数	外部脅威 12 人+内部脅威 1 人	同左
	献身	軍事目標優先	同左
目標	妨害破壊	24 時間以内の HRC を超える放射性物質の環境放出	—
	盗取	MOX-FF 集合体 1 体の施設からの盗取	1 有意量の核兵器物質取得に十分量の目標物を施設から盗取
戦略	妨害破壊	物質への直接的妨害破壊または安全系統への間接的妨害破壊	—
	盗取	核物質が貯蔵されている区域を目指した施設に対する急襲攻撃	同左

3.3 魚雷脅威に対する防護

3.3.1 背景

Vincent らの既往研究の中では、魚雷は DBT として考えられているものの、OFNP の魚雷防護について研究された事例はない⁸。そもそも、魚雷は短魚雷と長魚雷の大きく 2 種類に分類される。両者の知見や研究対象の適否について、以下に説明する。

- ・ 短魚雷^{25,26}

弾頭部に少量の爆薬を装填されており、局所範囲に対して高い侵徹性をもつため、洋上では主に潜水艦の破壊を目的として使用される。メカニズムとしては、以下の通りとなる。

1. すり鉢状に成形された少量の爆薬に対して、その先端に薄い金属ライナーが付けられている (Shaped Charge; 成形炸薬)
2. 爆発時のモンロー/ノイマン効果により、金属ライナーは加速され、指向性の超高速ジェットが生成される (速度 km/s オーダー)
3. 超高速ジェットにより、衝突物は超高圧によりユグニオ弾性限界 (HEL; Hugoniot Elastic Limit) を超えて塑性変形が引き起こされ、液状のような挙動で、衝突物の機械的強度を無視して侵徹される

地上のスタンドオフ攻撃として知られているロケットランチャーなどと同様のメカニズムである。また、弾頭部の成形炸薬から生成される超高速ジェットの速度が水中で有意に減速するという知見がある²⁷。

原子力システムでは、広い範囲だけではなく局所範囲でも防護を必要とする「枢要区域」が存在することに加え、OFNP の安全上重要な機器は喫水面より下部に配備されている。短魚雷については、少量の爆薬でターゲットへの妨害破壊行為を可能とし、DBT による所有を否定できないため、本研究の対象とした。

- ・ 長魚雷^{28,29}

弾頭部に大量の爆薬を装填されており、水中爆発効果によって広範囲に影響を及ぼすため、洋上では主に水上戦艦の破壊を目的として使用される。メカニズムとしては、以下通りである。

1. 水中爆発の初期衝撃波によりバブルは膨張する
2. バブル傍聴により海面は上昇し、船体は上反り状態になる
3. その後、急速にバブルは縮小して海面は負圧となり、船体は下反り状態となる

4. バブル縮小時に高速のバブルジェットを生じ、船体上下動とともに底面に垂直上方向の力を加える。この一連の現象によって船体を瞬時に割く

長魚雷は、爆発地点から一定の離隔距離を取ることで影響緩和可能であり、TNT300 kg 級では約 60 m の離隔を必要とする³⁰。本研究で想定する DBT には、長魚雷として使用可能なほどの大量の爆薬の所有は想定されていないため、本研究の対象外とした。

OFNP の衝突対策の一つである「二重船殻構造」は、船体部の鋼板で構成される側壁や船底を二重化した構造であり、外側の船殻が破損した場合でも、二重船殻の一部の区画のみ浸水するだけで、船内への海水の浸水を防護可能である。一方で、魚雷脅威によって二重船殻構造の内側の船殻も破損した場合には、船体内部の枢要区域または安全上の重要な機器に影響を与えるおそれもある。そこで、本研究では、OFNP 衝突前で水中ネットにより短魚雷を早期爆発させ、OFNP 衝突時に影響緩和することを防護策として考案した (Figure 3-2)。二重船殻のうち、保守的に外側の船殻が破損しないことを設計要件とする。

なお、水中ネットは、1876 年から 1916 年までの間、魚雷防衛網として艦艇に実装されており、金属製の直径 64 mm~203 mm のリングを隙間なく密接に絡み合わせた形状をしていた³¹。魚雷防御網が使用されなくなった理由は、移動速度を制限すること、展開/収納に時間を要すること、接触信管ではなく近接信管を持つ長魚雷が主流になってきたことが挙げられる。一方で、OFNP は運転中の移動を想定しておらず、脅威としては接触信管式の短魚雷を想定しているため、水中ネットの常設を想定した設計を行う。

以上より、本研究では、DBT として選定した遠隔攻撃手段である短魚雷脅威に対し、OFNP 衝突前で水中ネットにより早期爆発させ、OFNP 衝突時の影響緩和することを防護策として考案した。そのため、生成される超高速ジェットの生成・飛翔過程における水中挙動解明、及び OFNP 二重船殻の外殻への衝突過程における健全性評価のため、シミュレーション解析を行う¹。

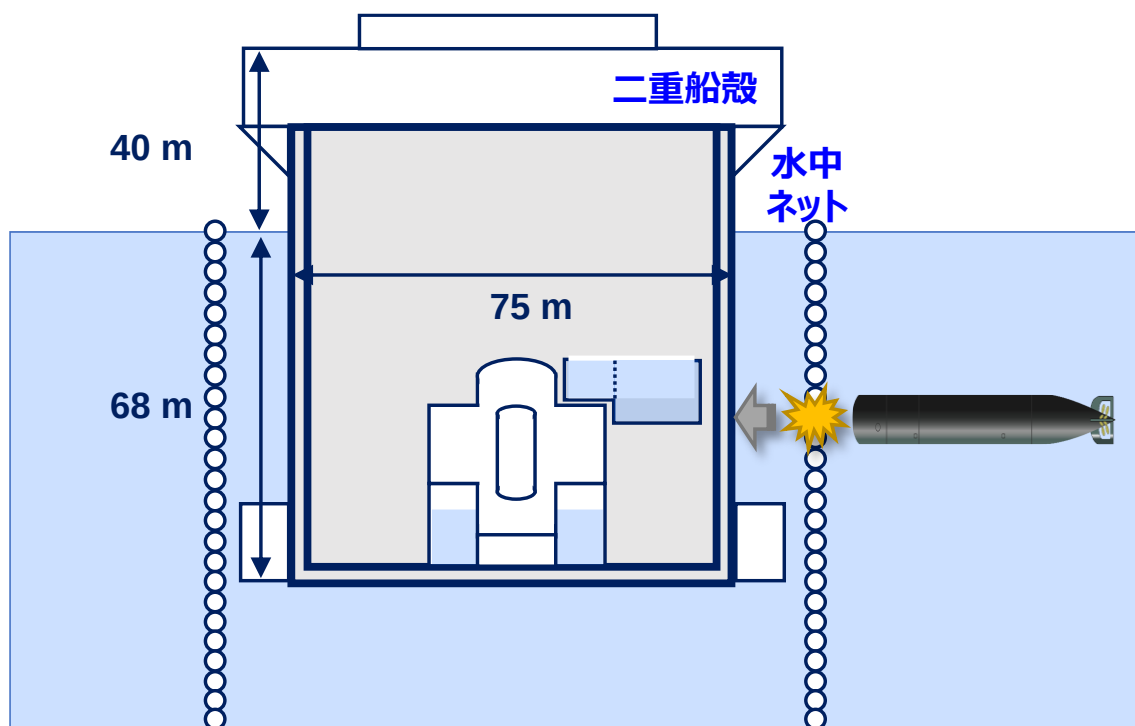


Figure 3-2 OFNP の魚雷対策の概念図

3.3.2 超高速ジェットの生成・飛翔過程

3.3.2.1 解析手法

生成される超高速ジェットの生成・飛翔過程における水中挙動について、陽解法による爆発・衝撃解析コードである Ansys-Autodyn(2021-R2)を用いたシミュレーション解析を行う³²。解析モデルは、**Figure 3-3** に示す通りであり、水平方向への軸対称モデルを使用する。モデルの左側には爆発物(Comp B)と銅(Copper)から構成されるすり鉢状の成形炸薬を空気(Air)中に配置し、モデル右側のゾーン部分(水平方向 0 mm 以上の領域)には、ジェットの挙動解明のために水以外にも異なる 3 パターンの媒質(**Table 3-3**)について解析する。本解析の意図としては、**Figure 3-4** に示す通りである。魚雷が水中ネットに衝突した際に、爆発によって生成される銅の超高速ジェットは、右側に向かって空气中(魚雷中の空洞部; 水平方向-200 から 0 mm までの領域)を飛翔し、その後、ゾーン部分(魚雷の外部; 水平方向 0 mm 以上の領域)の各媒質中を飛翔するモデルである。

成形炸薬の形状については、Saroja らの既往研究と同様のモデルで作成しており、**Figure 3-5** に示す通りである²⁷。成形炸薬の薬径は 100 mm、ライナーの角度は 42° と設定する。また、成形炸薬の周囲を空気で覆い、水平方向の空気の距離は 200 mm と設定する。各物質の解析上の方程式などは **Table 3-4** に示す通りであり、解析コードに組み込まれているライブラリの標準設定を用いる。メッシュのサイズについて、水平方向では-200 mm 未満では 1.0 mesh/mm、-200 mm 以上では 0.5 mesh/mm であり、円周方向では、1.0 mesh/mm と設定する。

最後に、Saroja らの既往研究は、水中におけるジェット先端速度を実験により確認しているため、同結果を基にベンチマーク比較評価を行っている(詳細は **Appendix E** 参照)²⁷。水中侵入深さ 0~650 mm におけるジェット先端平均速度の低下率の誤差は、最大でも 3.3% 未満と極めて近い結果であることを確認している。一方で、水中への侵入直前のジェット先端平均速度(初速度 V_0)について、既往研究の実験値では 7.43 km/s、本研究では 5.40 km/s と乖離している。これは、シミュレーション解析上のメッシュサイズを細かくすると、ジェット速度が上がったことから、メッシュサイズが主な原因である。解析の都合上、メッシュサイズをさらに細かくすることは望ましくないため、本研究の解析結果については、ジェット先端部の初速度に安全裕度を見込んだ設計を施す必要がある。

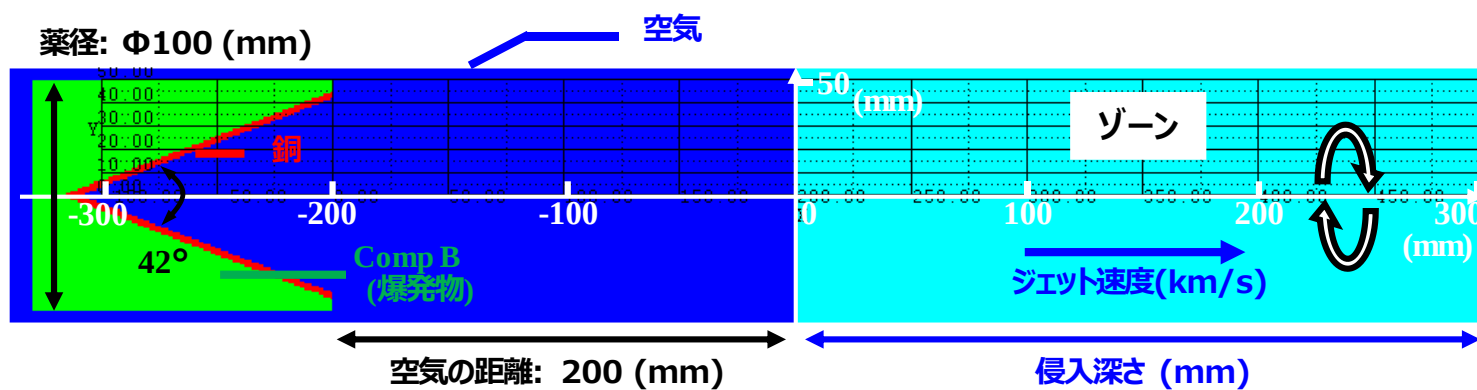


Figure 3-3 ジェット生成・飛翔過程のシミュレーションモデル

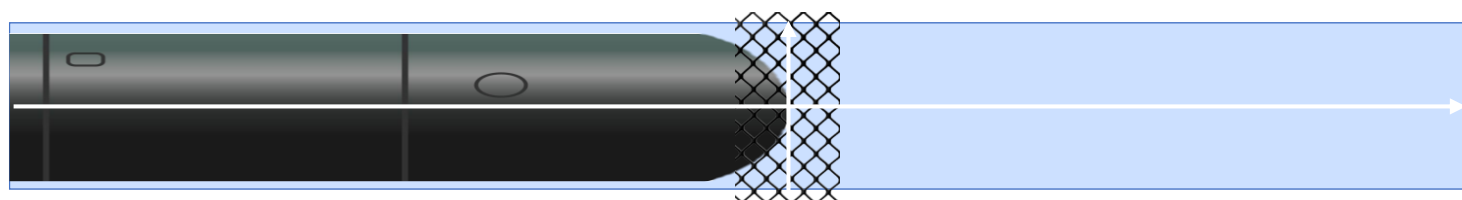
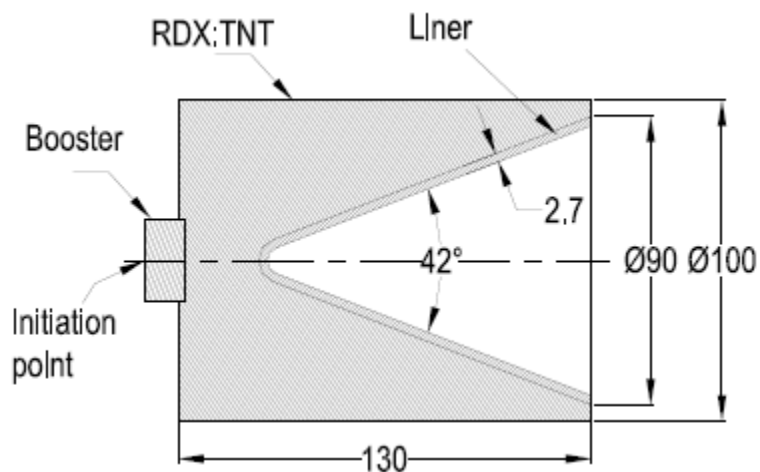


Figure 3-4 ジェット生成・飛翔過程のシミュレーションモデルの概念図



出典: D. R. Saroha⁵(2011)

Figure 3-5 既往研究における成形炸薬の形状

Table 3-3 ジェットの生成・飛翔過程におけるゾーン部分の媒質

ゾーン	
I	空気
II	水
III	鋼

Table 3-4 ジェットの生成・飛翔過程における物質の方程式など

Material	Equation of state	Strength model	Failure model	Mesh
Air	Ideal gas	None	None	Euler
Comp B	JWL	None	None	Euler
Water	Shock	None	None	Euler
Copper	Shock	Piecewise johnson cook	None	Euler
Steel 1006	Shock	Johnson cook	None	Euler

3.3.2.2 解析結果

(1) 異なる媒質中における挙動解析結果

超高速ジェットの飛翔過程について、ゾーン部分(水平方向 0 mm 以上)の挙動解析結果を以下に示す。**Figure 3-6** と **Figure 3-7** は、水平方向の侵入深さ 25 mm、50 mm、100 mm 地点におけるジェットの速度と媒質の圧力を示している。

進行方向へのジェット先端部の最高速度について、侵入深さ 0 mm 地点で約 5 km/s オーダーだったものが、100 mm 侵入深さ地点において、空気中では約 5 km/s オーダー、水中では約 4 km/s オーダー、鋼中では約 3 km/s オーダーに減少した(水中の詳細については後述)。また、媒質の圧力が 1.2 GPa を超える部分については、空気中では発生せず、水中と鋼中ではジェットの進行方向に発生しており、鋼はより広範囲に及んだ。ジェット先端部の速度減少と媒質の圧力増加の相関は、エネルギー保存により、ジェットの運動エネルギーが衝突によって媒質の圧力エネルギーに変換されたことで生じたものと推定した。

上述の通り、水や鋼は、ジェットによって急激な圧力を受けた結果、ジェット進行方向で衝撃波を発生させた。水中では、衝撃波はジェット先端部に並走して進行方向を進んだ。しかし、鋼中では、衝撃波はジェットよりも進行方向を先に進んだ。これは、ジェット速度(先端部初期速度で約 5 km/s オーダー)に比べて、**Table 3-5** に示す通り、水の衝撃波速度 U_s は 1.5 km/s と遅く、鋼の衝撃波速度 U_s は 4.5 km/s と同等のためである³³。

媒質によって発生する圧力に違いを生じる理由は、**Table 3-5** に示す通り、媒質固有の衝撃インピーダンス Z_0 と密度 ρ によるものである。衝突時のジェット初速度 u_{imp} と衝撃波圧力 P_{imp} との関係は **Eq.3.1** の通り比例関係にある。

$$P_{imp} = \rho \cdot U_s \cdot u_{imp} \quad (\text{Eq.3.1})$$

P_{imp} ; 衝突時に被衝突物質(媒質)の衝突面で発生する圧力

ρ ; ジェット(連続体)の密度

U_s ; 衝撃波の速度

u_{imp} ; 衝突時のジェット(連続体)の初速度

本解析のように等しいジェット初速度 u_{imp} においては、衝突時の衝撃波圧力 P_{imp} は、媒質の衝撃インピーダンス Z_0 に比例し、高い方から鋼、水、空気の順となり、解析結果と整合する³⁴。その後、媒質中に発生した衝撃波は、媒質固有の衝撃波速度 U_s で伝播するため、その進行速度は、高い方から鋼、水、空気の順となり、解析結果と整合する。

また、鋼中を 100 mm 進行した場合は、50 mm 地点の円周方向の端部に-1.2 GPa を超える負圧を生じた。これは、解析モデルの都合上、円周方向は 55 mm で制限しており、周の端部で衝撃波の反射が発生したためと推定した。つまり、超高速ジェットの影響過程においては、高圧によって HEL を超えて機械的強度を無視して侵徹するジェット自体の貫通破壊のみならず、ジェットによって生じる被衝突物質中を伝播する衝撃波と反射波の正負の重畳によりもたらされるスポール破壊の 2 つ破壊モードを考慮する必要がある³⁵。

Table 3-5 媒質の衝撃インピーダンス・密度・衝撃波速度

ゾーン	$Z_0 = \rho U_s$ 衝撃インピーダンス	ρ 密度 (kg/m ³)	U_s 衝撃波速度 (m/s)
I. 空気	4.1×10^2	1.2	3.4×10^2
II. 水	1.5×10^6	1.0×10^3	1.5×10^3
III. 鋼	3.6×10^7	7.9×10^3	4.5×10^3

出典：Stanley P. Marsh (Ed.), (2016)

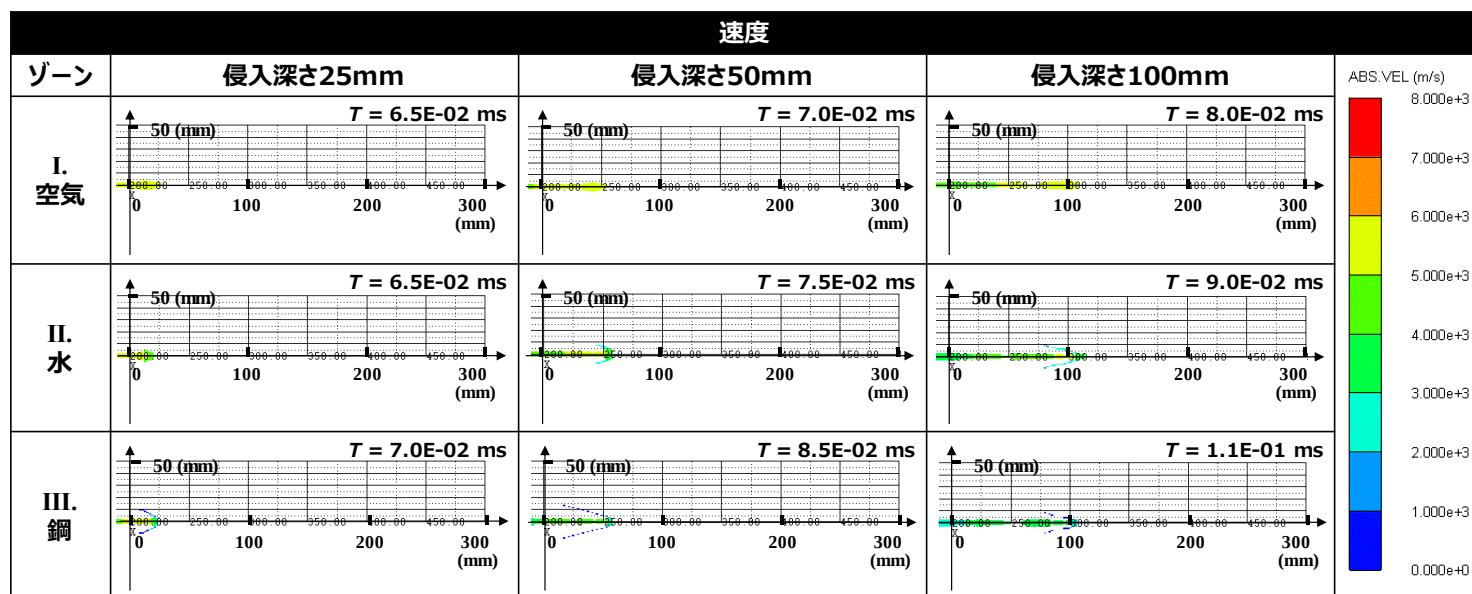


Figure 3-6 ジェット生成・飛翔過程の媒質中の解析結果(速度)

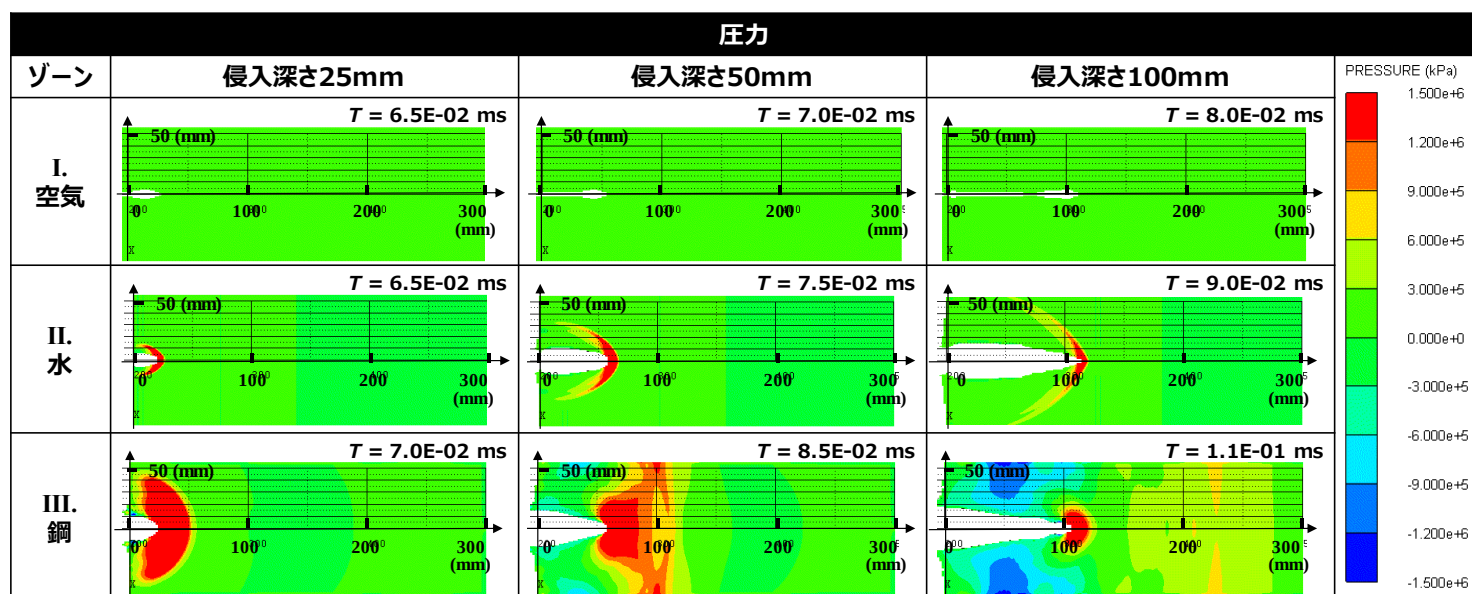


Figure 3-7 ジェット生成・飛翔過程の媒質中の解析結果(圧力)

(2) 水中における挙動解析結果

水中における超高速ジェットの高時的な挙動を、**Figure 3-8** に示す。ここでは、超高速ジェットの水中に侵入した地点(水中侵入深さ)0 mm から水平方向に約 300 mm 進んだ地点までのジェットの物質位置を複数点で示す。各地点の特徴は、以下の通りであった。

T_a 地点：ジェットは進行方向に向かって連続的であった

T_b 地点：ジェットは水中を進むと、先端部は傘状に変化し、分散し始めた

T_c 地点：ジェット先端部は先行する Jet-A と後続の Jet-B に分離し、それぞれ不連続に進行した

T_d 地点：Jet-B は空気中を進行し、水中で次第に分散した Jet-A にほぼ追いついた。その後、Jet-B の後方では、Jet-C が分離した

T_e 地点：Jet-A と Jet-B は合体し、Jet-AB を形成した

T_f 地点：Jet-C は空中を進行し、Jet-AB にほぼ追いついた。Jet-AB は水中で分散し続けた

T_g 地点：Jet-AB と Jet-C が合流し、Jet-ABC を形成した

以上より、水中を進行方向に向かって先行するジェット先端部は分散し続けて速度を落とし、その間に分離した後続のジェットは空気中を移動し、先行するジェットに追いつき合体する一連のサイクルを観察した。その結果として、ジェットの先端形状は不均一となり、またジェットの先端速度も不連続に変化することを明らかにした。

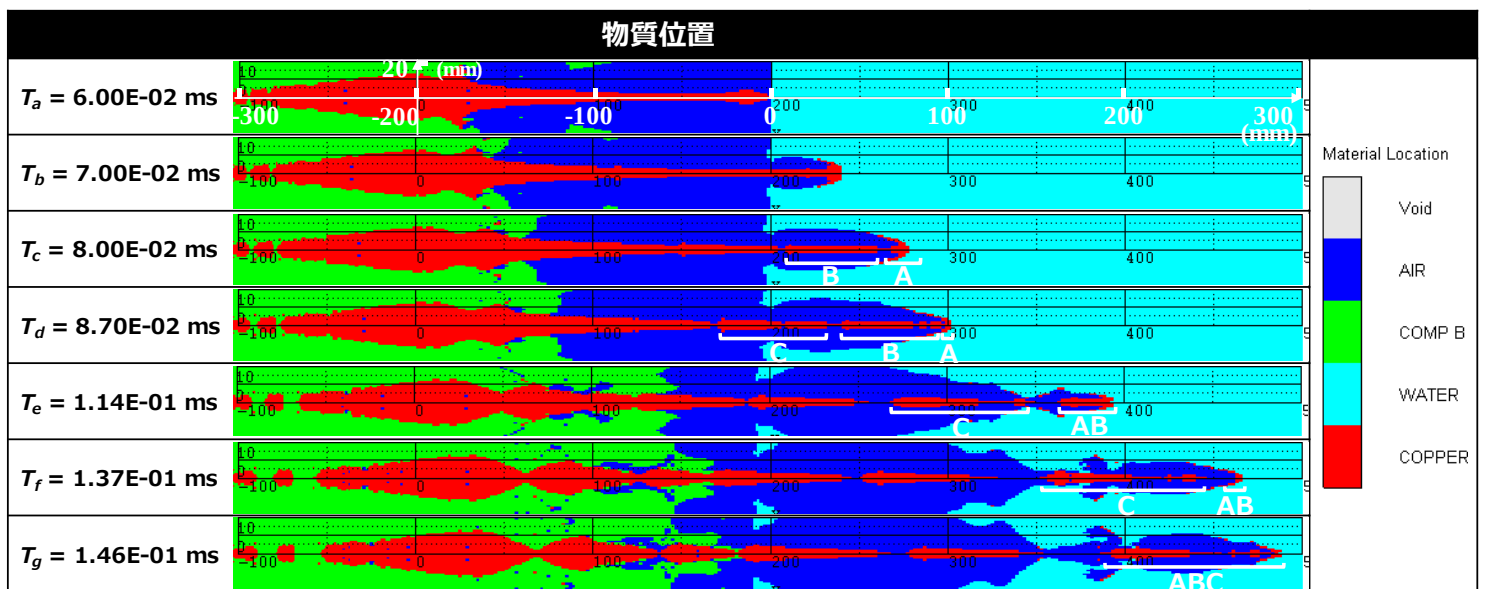


Figure 3-8 ジェット生成・飛翔過程の水中の挙動(物質位置)

ジェット先端速度を定量的に示すために、「ジェット先端平均速度」を以下の仮定に基づき定義する。

ジェット先端平均速度：

- ・ 評価対象は、進行方向の軸上に位置する銅に限定される
- ・ 評価範囲は、ジェットの最先端部を評価の起点とし、そこから進行の反対方向へ 50 mm の間に限定される。当該のジェットの最先端部における水中侵入深さを評価地点とする
- ・ ジェット先端平均速度は、上記条件に基づき、ジェット先端の最大速度と最小速度の平均値として計算される

上述の定義について、以下に **Figure 3-9** として例示する。水中侵入深さ 60 mm 地点において、ジェット先端の最大速度と最小速度はそれぞれ 5.35 km/s と 4.15 km/s であるため、その平均より、ジェット先端平均速度は 4.75 km/s となる。

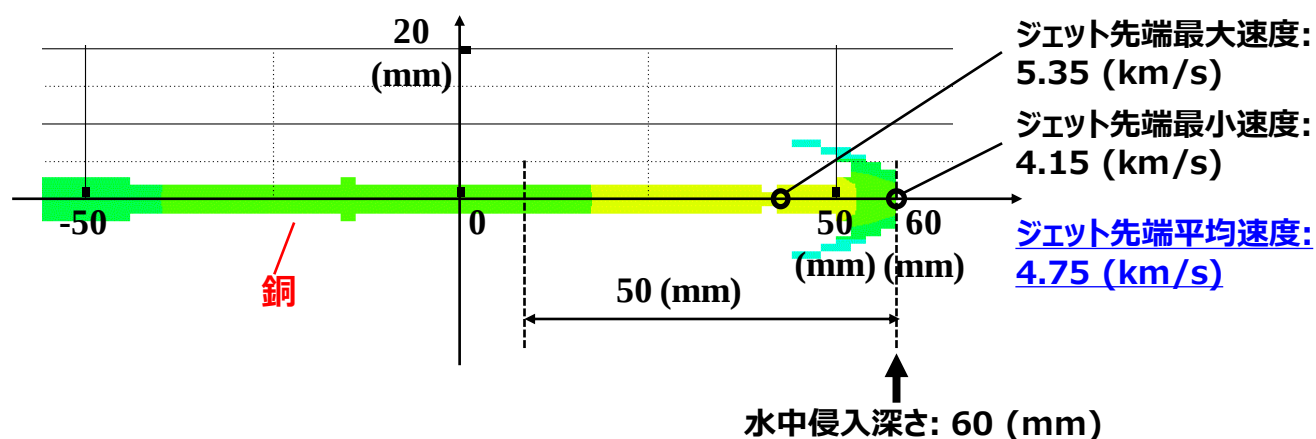


Figure 3-9 ジェット先端平均速度定義の例示

(3) 水中におけるジェット先端平均速度の予測モデル

解析結果から、ジェット先端平均速度は水中侵入深さに対し、指数関数的な減少傾向を示した。一方で、解析モデルの都合上で、解析可能な水中侵入深さは 700 mm までの範囲に限定された。本研究では、700 mm 以遠の水中侵入深さにおけるジェット先端速度を予測すべく、ジェット先端平均速度の変化率の予測モデル(Eq.3.2)を導出した。

$$\frac{\Delta V}{V_0}(\%) = -100 \cdot \left(1 - \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{\text{水中侵入深さ(mm)}}{500}} \right) \quad (\text{Eq.3.2})$$

水中侵入深さ：ジェット先端部が侵入した水中の深さ (mm)

V_0 ：水中侵入深さ 0 mm 地点におけるジェット先端平均速度 (km/s)

ΔV ：ある水中侵入深さにおけるジェット先端平均速度と V_0 の差分 (km/s)

水中侵入深さとジェット先端平均速度について、**Figure 3-10** に示す通り、本研究による解析結果、Saroja らによる既往の実験結果²⁷、及び予測モデル(Eq.3.2)による予測結果を示す。横軸は水中侵入深さ(mm)、縦軸はジェット先端平均速度の変化率(%)を表す。

本研究の解析結果は、水中侵入深さ 0~700 mm において、予測モデルを概ね支持した。また、Saroja らによる既往の実験結果は、水中侵入深さ 0、325、650、1000 mm において、予測モデルを概ね支持した。よって、本研究が開発した予測モデル(Eq.3.2)は、水中侵入深さ 700 mm を超えても、ある侵入深さまでは支持されるものと結論づけた。ただし、ある水中侵入深さを超えると、ジェットの貫通能力は完全に失われると想定され、予測モデルは支持不可となることに注意されたい。

予測モデル(Eq.3.2)をもとにジェット先端平均速度を予測すると、**Table 3-6** の通りになる。つまり、水の侵入深さ 500 mm 毎にジェット先端平均速度は 1/2 倍となるため、水の侵入深さ 2 m においてジェット速度は 1/16 倍となる。

よって、薬径 100 mm 及び空気の距離 200 mm の成形炸薬をモデルとした本解析結果により、水の侵入深さ 0 mm 地点でジェット先端平均速度 5.40 km/s を示すジェットは、水の水中侵入深さ 2 m 地点でジェット先端平均速度が 0.34 km/s まで減少することを明らかにした。

以上より、本項では、超高速ジェットの生成・飛翔過程における水中挙動を解明した。DBT として選定した遠隔攻撃手段である短魚雷脅威に対し、OFNP 衝突前で水中ネットに

より早期爆発させることで、OFNP 特有の周囲の水による防護でジェット先端速度を有意に減少可能であることを明らかにし、OFNP 衝突時の影響緩和の可能性を示した。

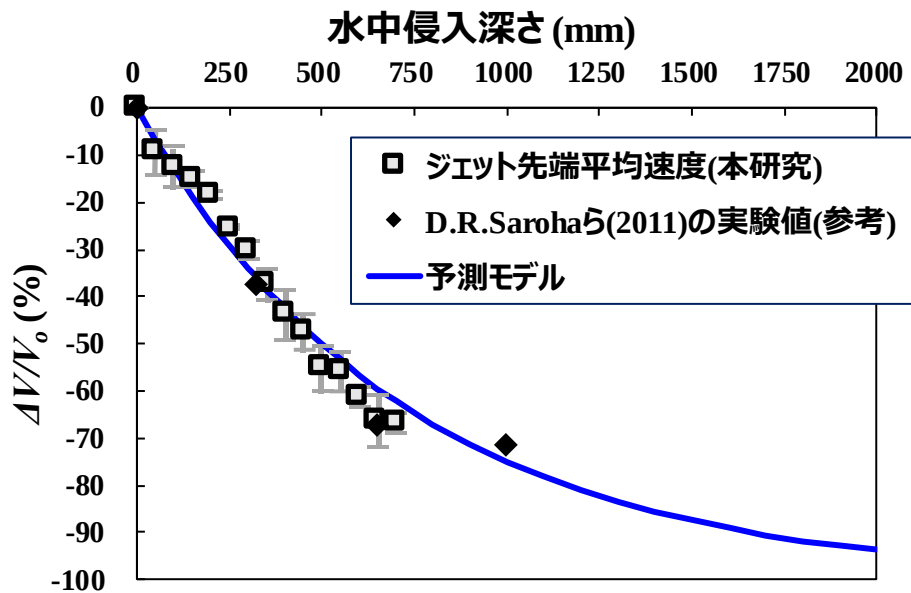


Figure 3-10 水中侵入深さとジェット先端平均速度の変化率

Table 3-6 水中侵入深さと予測されるジェット先端平均速度

	水中侵入深さ (mm)	ジェット先端平均速度 V の予測値 (km/s)
0	0	5.40 (解析結果より)
1	500	2.70
2	1000	1.35
3	1500	0.68
4	2000	0.34

3.3.3 超高速ジェットの影響過程

3.3.3.1 解析手法

水中で減速した超高速ジェットと、OFNP 二重船殻の外殻(厚さ 25 mm の鋼板)の衝突過程における健全性評価を行う。陽解法による爆発・衝撃解析コードである Ansys-Autodyn(2021-R2)を用いたシミュレーション解析である。

解析のモデルは、**Figure 3-11** の通りであり、水平方向の軸対称モデルを使用する。モデルの左側には、ジェット先端を模擬した長さ 100 mm、直径 10 mm の鋼を設定する。これは、前述の生成・飛翔過程におけるジェット先端の最大規模の寸法であり、解析上の安全余裕を持たせている。当該のジェット先端平均速度については、前述の **Table 3-6** に基づき、水中侵入深さ 0.0、0.5、1.0、1.5、2.0 (m)の地点において、それぞれ 5.40、2.70、1.35、0.68、0.34 (km/s)と定義する。また、モデルの中央には、OFNP 船体部の二重船殻構造の外殻を模擬するため、25 mm 厚さの鋼板(Steel 1006)を設定する。G. Genzman らによる既往研究では、OFNP の二重船殻の厚さは、外殻 50 mm と内殻 30 mm で評価がされている¹¹。場所によっては、二重船殻の厚さが異なる可能性もあるため、安全裕度を持たせて、半分の 25 mm を外殻の厚さとして設定する。なお、本解析は **Figure 3-12** に示す通り、水中で減速したジェット先端が OFNP 外殻へ衝突することを模擬したモデルである。

各物質の解析上の方程式などは、**Table 3-7** に示す通りであり、基本的に解析コードの組み込まれているライブラリの標準設定を用いるが、スプール破壊の影響を考慮するため、既往文献をもとに Steel 1006 の Failure model のみ、Hydro(Pmin): -1.50E+06 kPa と修正している³⁶。メッシュのサイズについて、水平及び円周方向で 1.0 mesh/mm に設定する。

本解析では安全要件として、当該の鋼板が破損しないことを設定する。これは、仮に短魚雷によって外殻が破損した場合でも、内殻が破損しない限りは二重船殻の一部の区画が浸水するに留まり、船内への直接的な影響は無いことから保守的な要件である。最後に、安全要件となる鋼板の破損については、以下 3 点のうちいずれか 1 つ以上該当する状態と定義する。

- ・ 鋼板の物質位置が「切断」されること
- ・ 鋼板の圧力が「1.2 GPa」を超えること

これは、衝突するジェットによって鋼のユグニオ弾性限界 1.2 GPa を超えると、鋼は塑性変形を起こし、機械的強度を無視した侵徹を受けるので、貫通破壊によって外殻としての機能を維持できないおそれがあるためである

- ・ 鋼板の物質状態が「バルク破壊」を示すこと

これは、ジェットによって生じた正負の衝撃波と反射の重畳によってスプール破壊が発生し、外殻としての機能を維持できないおそれがあるためである。

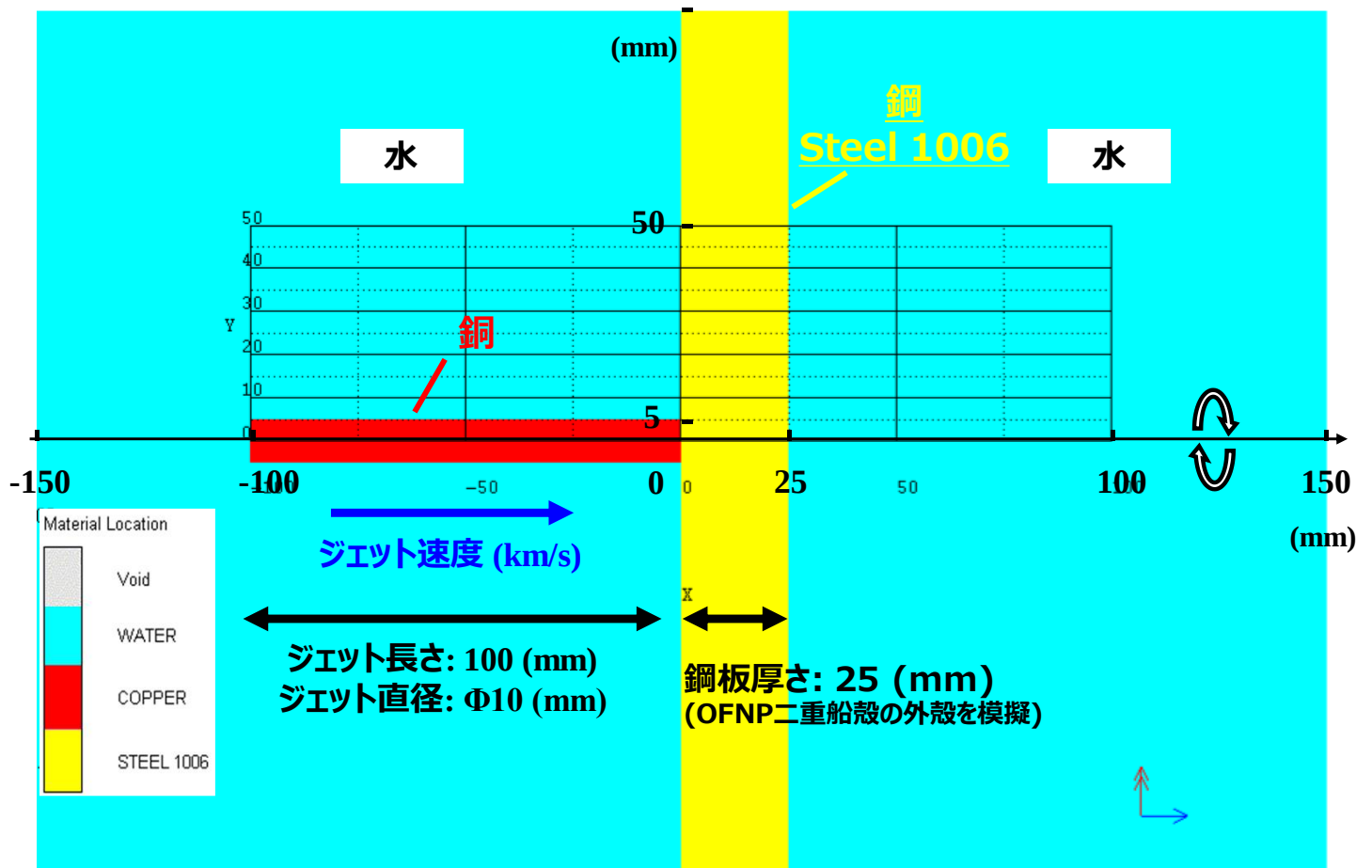


Figure 3-11 ジェット衝突過程のシミュレーションモデル

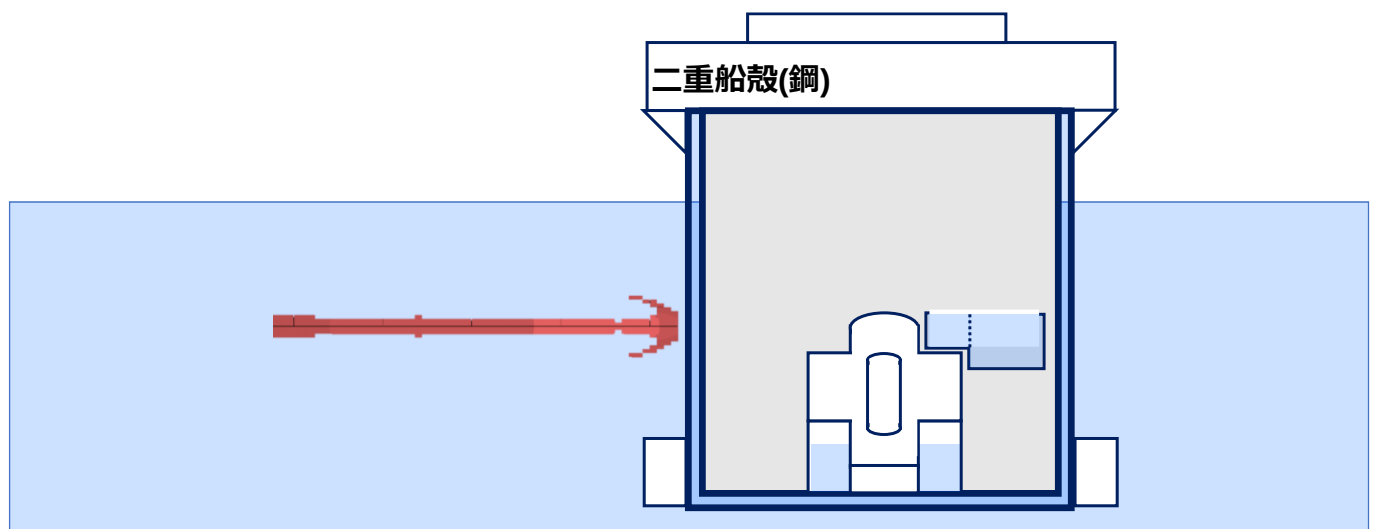


Figure 3-12 ジェット衝突過程のシミュレーションモデルの概念図

Table 3-7 衝突過程の物質の方程式など

Material	Equation of state	Strength model	Failure model	Mesh
Water	Shock	None	None	Euler
Copper	Tillotson	None	None	Euler
Steel 1006	Shock	Johnson cook	Hydro (Pmin)	Euler

3.3.3.2 解析結果と考察

Figure 3-13、Figure 3-14、Figure 3-15 はそれぞれ、物質位置、圧力、物質状態の解析結果を示す。それらの横列は、ジェットの水中侵入深さ 0.0、0.5、1.0、1.5、2.0 (m)の地点における経時的な衝突結果を示している。なお、前述の Table 3-6 に基づき、衝突時のジェット先端速度 V_0 をそれぞれ、5.40、2.70、1.35、0.68、0.34 (km/s)としている。それらの縦列は、衝突がなければ経時的な進行距離が等しくなる地点における衝突結果を示している。

全てのケースにおいて、鋼板の物質状は、バルク破壊を示さなかった。これは、鋼板の厚さが 25 mm と薄かったため、スポール破壊を生じなかったためと推察した。

衝突時のジェット先端平均速度 V_0 が 5.40、2.70、1.35 (km/s)のケースでは、鋼板の物質位置が切断された。よって、本ケースでは、鋼板は破損したものと結論付けた。

衝突時のジェット先端平均速度 V_0 が 0.68 (km/s)のケースでは、鋼板の物質位置は形状を変えて厚さは一部薄くなったものの連続を保っていた。一方で、圧力は鋼のユグニオ弾性限界 1.2 GPa を超えていた。よって、本ケースでは、鋼板は破損したものと結論付けた。

衝突時のジェット先端平均速度 V_0 が 0.34 (km/s)のケースでは、鋼板の物質位置は形状がほとんど変わらず連続を保っており、また、圧力も 1.2 GPa を下回った。よって、本ケースでは、ジェットを 2.0 m 水中で進ませて速度を減少させることで、厚さ 25 mm の鋼板は衝突を受けても破損しない、と結論付けた。

以上より、本項では、超高速ジェットの衝突過程における鋼板の健全性解析を行った。その結果として、厚さ 2.0 m の水の防護によってジェット先端速度を 0.34 km/s まで減少させることで、OFNP 船殻の構造健全性が維持可能であることを明らかにした¹。

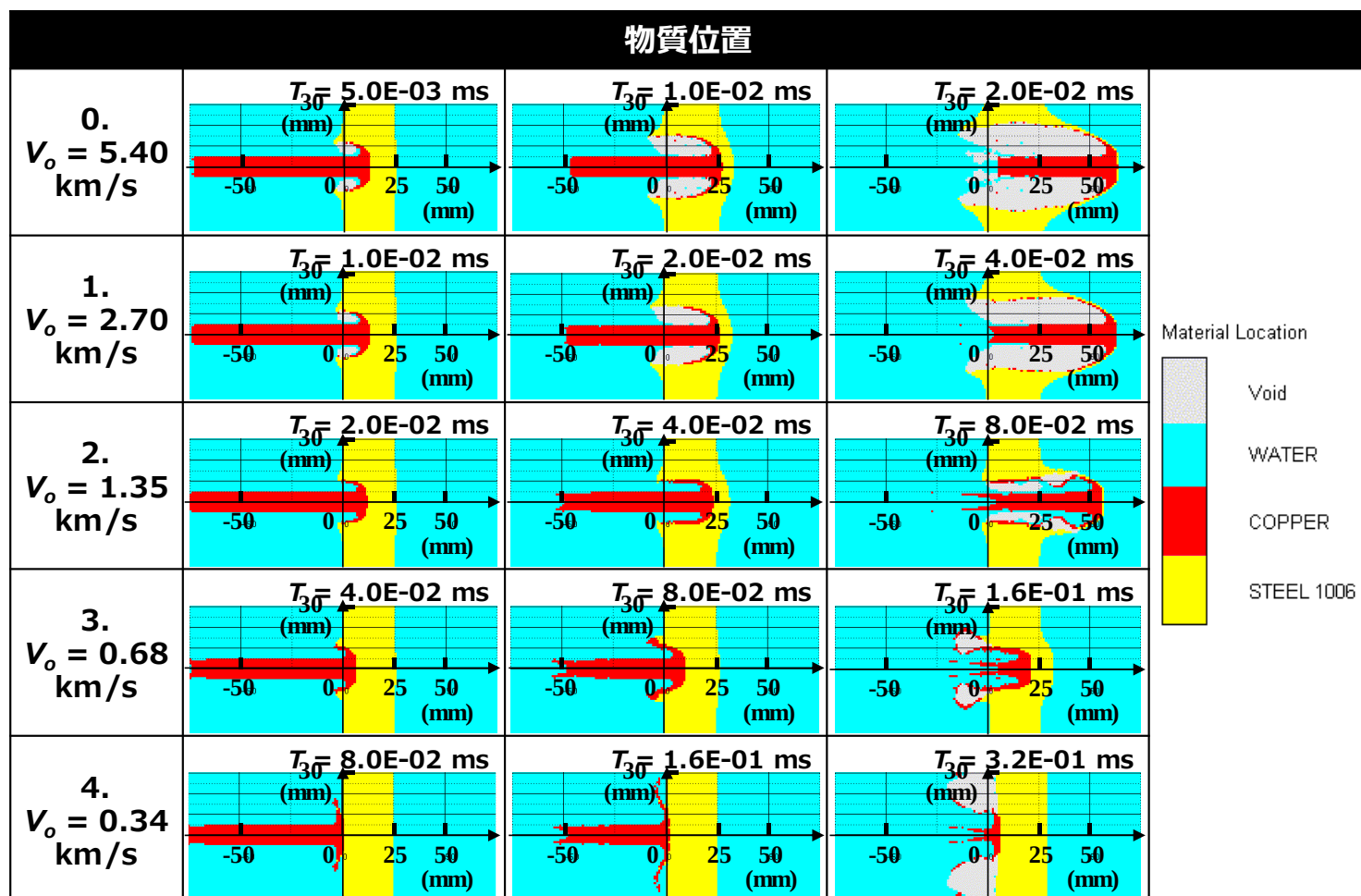


Figure 3-13 ジェット衝突過程の解析結果(物質位置)

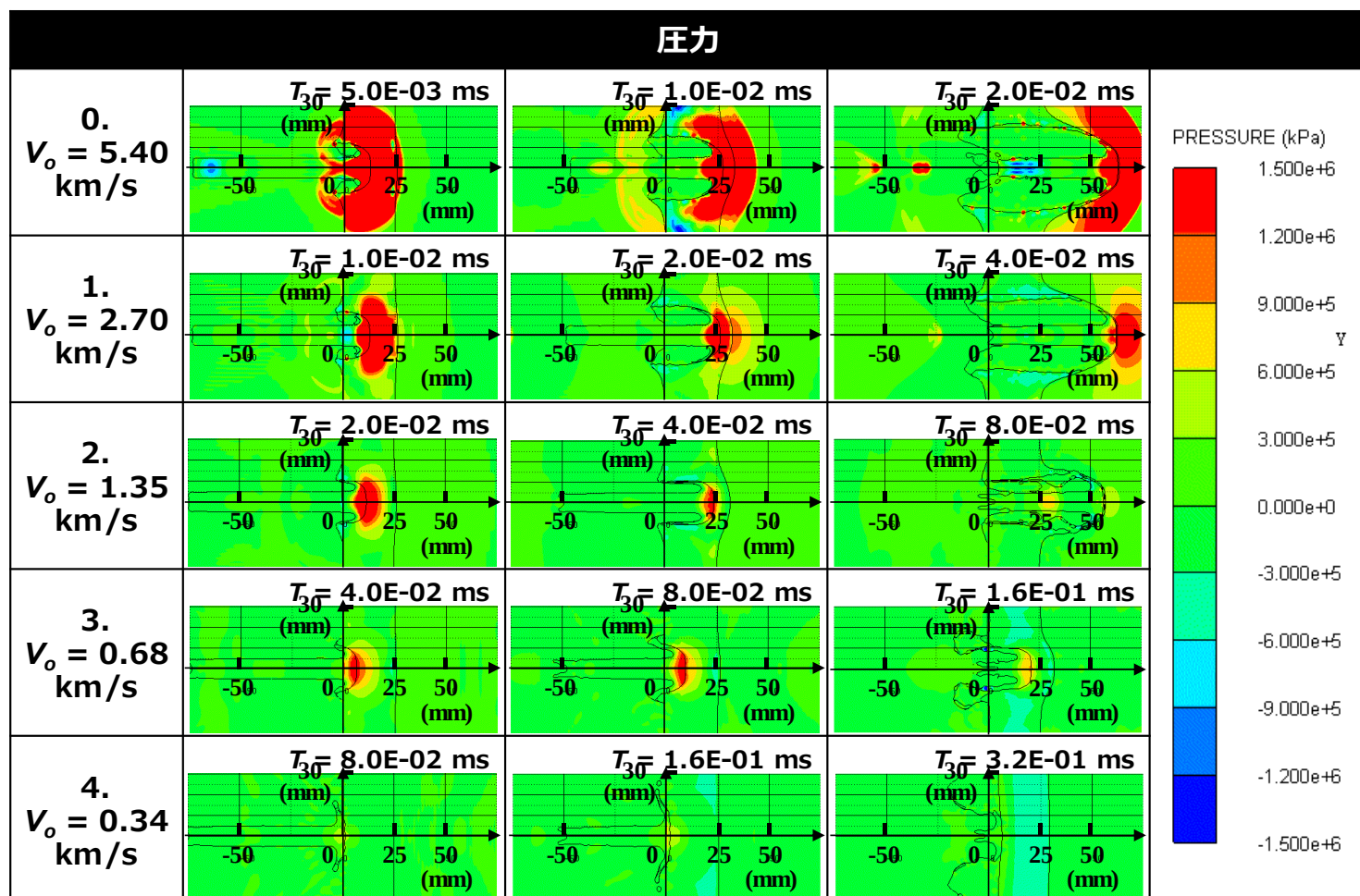


Figure 3-14 ジェット衝突過程の解析結果(圧力)

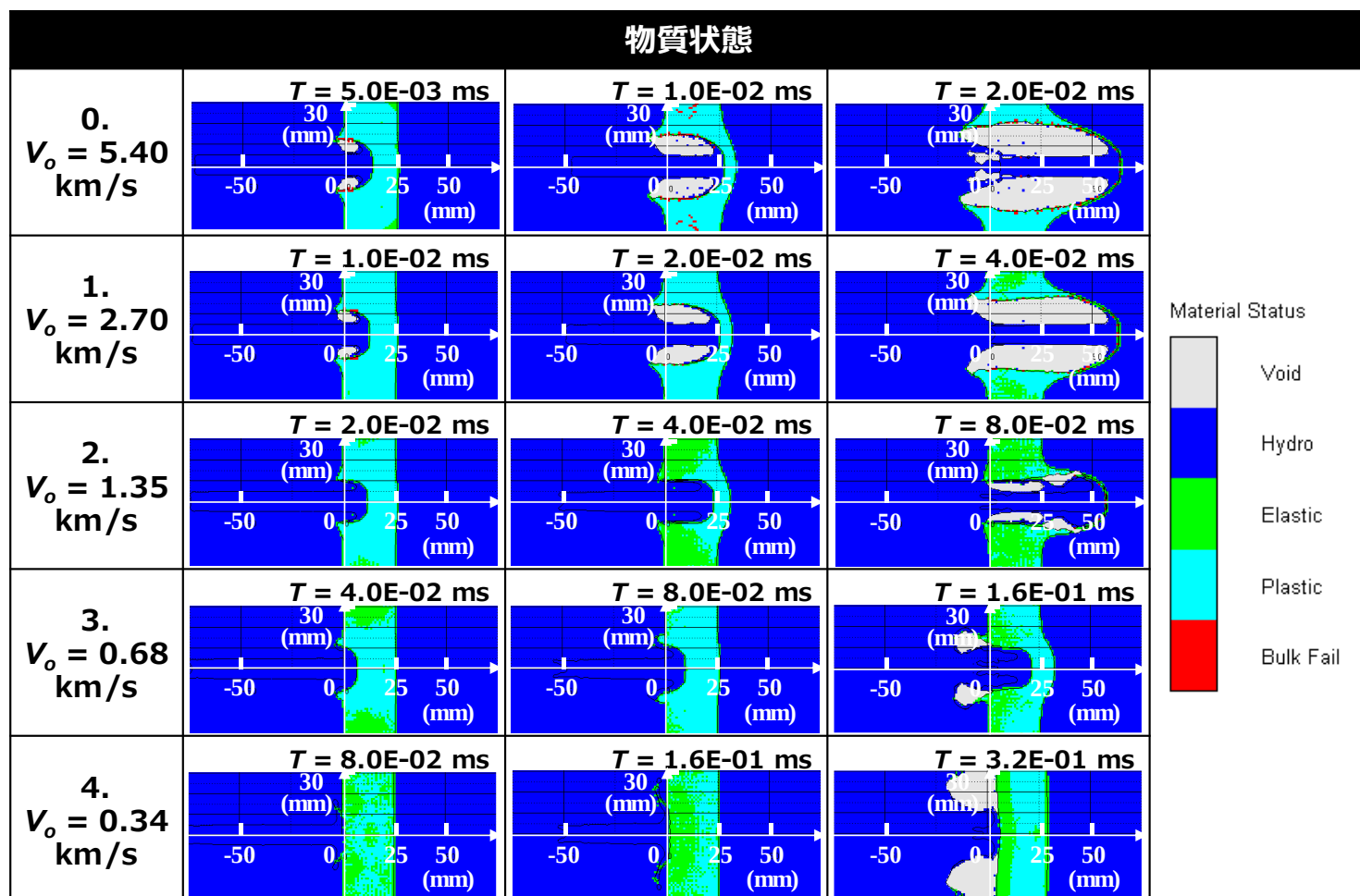


Figure 3-15 ジェット衝突過程の解析結果(物質状態)

3.3.4 魚雷脅威に対する物理的防護の設計

前述までの解析結果より、ジェット先端部の初速度 V_0 が 5.40 km/s の場合は、予測モデル(Eq.3.2)に従い、水中侵入深さ 2.0 m 地点でジェット先端速度を 0.34 km/s まで減少させることで、25 mm 厚さの鋼板は健全であることを示した。ただし、前述のとおり、解析上のメッシュサイズが荒くなるほど、ジェット先端部の初速度 V_0 が低い値を示すため、安全余裕を持たせた設計が必要となる。また、成形炸薬の知見により、生成される超高速ジェットの先端速度は 9.00 km/s オーダーになるケースも確認されている^{25,26}。そこで、保守的な設計として、ジェット先端速度を解析上の初速度 V_0 5.40 km/s の倍速(10.80 km/s)として想定する。よって、0.34 km/s まで減速させるためには、予測モデルに従うと、水中侵入深さは 4.0 m 必要となる。短魚雷脅威を DBT とし、OFNP 特有の周囲の水によって OFNP の船殻を防護するための水の厚さ、すなわち最低必要水中侵入深さは 4.0 m である(Eq.3.3)。

$$\text{最低必要水中侵入深さ} \geq 4.0 \text{ m} \quad (\text{Eq.3.3})$$

ここで、水上戦艦などの一般的な魚雷対抗手段としては、魚雷衝突時の影響緩和を目的とした二重船殻や水中ネットに加えて、近年では重要区画の特殊装甲による耐衝撃や防振設計、音響的に欺瞞する音響ジャマーや音響デコイ、物理的に魚雷を破壊する誘引破壊型デコイや対魚雷用魚雷が知られている^{28,29}。一方で、核セキュリティ上の国際原子力機関(IAEA)の推奨や日本の規制要求では^{4,37}、周辺防護区域などの技術障壁の周囲には、物理的障壁の設置が求められている(日本の実用炉への各セキュリティ上の規制要求については **Appendix G** を参照されたい)。よって、本研究では、核セキュリティ上の技術障壁の周囲の物理的障壁として、水中ネット(及び二重船殻)を選定した。

以上より、本研究では、OFNP の魚雷脅威に対する物理的防護設計として、最低必要水中侵入深さ 4.0 m よりさらに 1.0 m の安全余裕を持たせて、OFNP の周囲「5.0 m」に水中ネットを設置する設計を提示する(**Figure 3-16**)。この安全余裕によって、ジェット先端部の初速度 V_0 は約 43 km/s まで許容可能となり、解析上のメッシュサイズによるジェット初速度の不確かさを補うことが可能である。よって、洋上特有の遠隔攻撃手段である短魚雷脅威に対して、水中ネットによって早期爆発させ、生成される超高速ジェットを水で減速させて OFNP を防護する設計は、堅牢性強化に有効であることを明らかにした¹。

なお、水中ネットには、前述の船舶実装例に基づき、金属製の半径 100 mm オーダーのリングが隙間なく密接に絡み合わせたメッシュ形状を想定した³¹。また、ジェットの侵徹は局所的であり(侵徹孔の径は成形炸薬の薬径と比較して非常に小さい)、水中ネットに大孔が開くようなものではない。よって、複数発の短魚雷を想定しても、水中ネットの早期爆発させる機能は健全であり、OFNP 船殻への衝突影響は極めて限定的である。

本研究では、超高速ジェット生成・飛翔過程における水中挙動解明、及び OFNP 二重船殻の外殻への衝突過程における健全性評価を行っている。本解析手法は、ABWR 搭載の OFNP のみならず、多様な炉型を搭載する洋上 NPP に対し、適用可能である(4.2 節で言及)。なお、水中ネットの隔離距離 5 m については、想定する魚雷脅威の大きさや、OFNP の厚みなどの仕様によって変更される可能性があることに注意されたい。

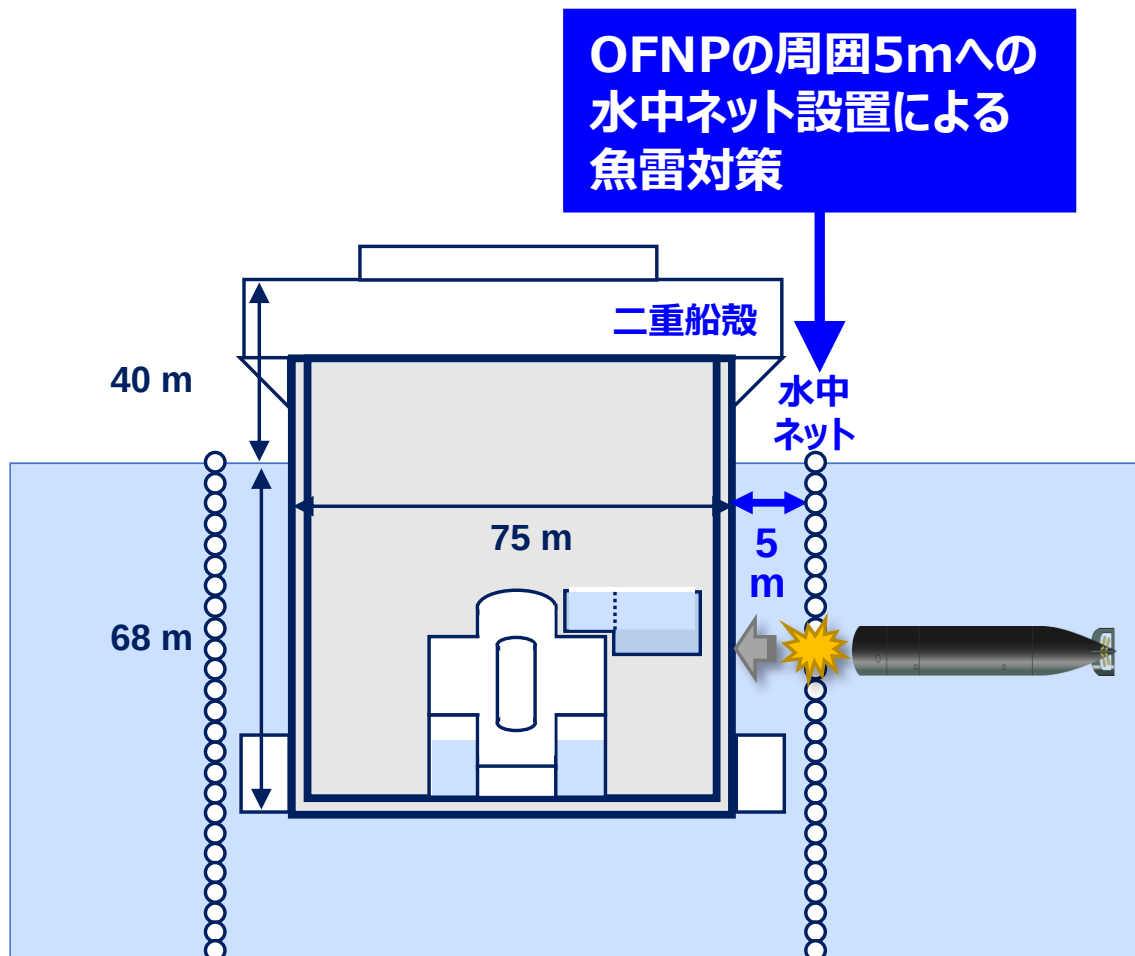


Figure 3-16 魚雷脅威に対する物理的防護の概念図

3.4 船舶移乗脅威に対する防護

3.4.1 背景

Conway らは、外部から OFNP への船舶移乗脅威に対する研究を行っているが^{9,10}、米国の規制や防護基準に基づくものであり^{13,14}、NPP の警備要員が致死性武器を用いた先制攻撃権を持つ、という特殊な前提に基づく研究である。また、OFNP のレイアウトは、特有の縦長構造(甲板デッキの喫水面からの高さが 40 m 超)を有し、外部からのアクセスルートに乗降エレベータに制限してあるため、外部からの脅威者をそもそも OFNP に移乗させない独特の防護設計がなされている(**Figure 3-17**)。船舶移乗脅威に対し、OFNP デッキ甲板や防御陣営などの有利な位置から外部の船舶などへ遠隔攻撃をすることで、陸上の治安部隊による対応時間が 30 分要する前提においても高い阻止確率を示す。一方で、日本を含む大多数の国家では全く条件は異なるため、上記の防護設計の直接的な適用は不可能である。

以上より、本研究では、NPP の警備要員が致死性武器や先制攻撃権を持たない国家を想定し、船舶移乗による核物質の盗取や妨害破壊行為に対する核セキュリティ性を定量的に評価する。具体的には、核燃料への爆破などにより直接的に燃料損傷させて放射性物質飛散を狙った直接的妨害破壊と、OFNP の安全機能喪失により間接的に燃料損傷させて放射性物質飛散を狙った間接的妨害破壊を評価する。評価結果により、枢要区域(Vital Area)を選定し、OFNP の核物質防護システムを設計する³⁸。その後、タイムライン評価によって、仮想の陸上 NPP と比較しつつ定量的評価を行い、Security by design による堅牢な OFNP の核物質防護システム設計を提示する²。

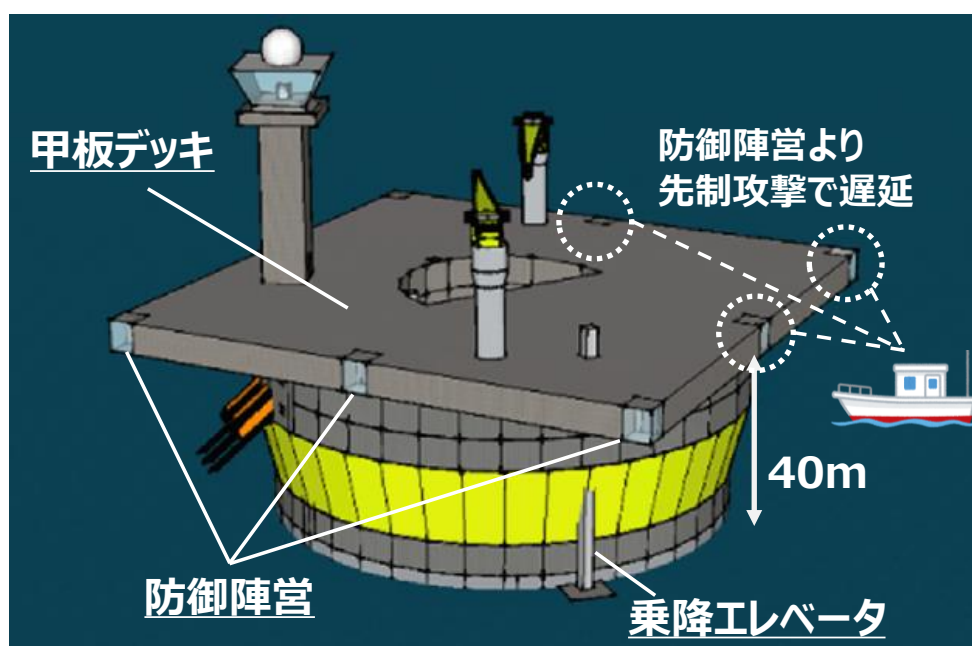


Figure 3-17 OFNP 特有の核セキュリティを考慮したレイアウト

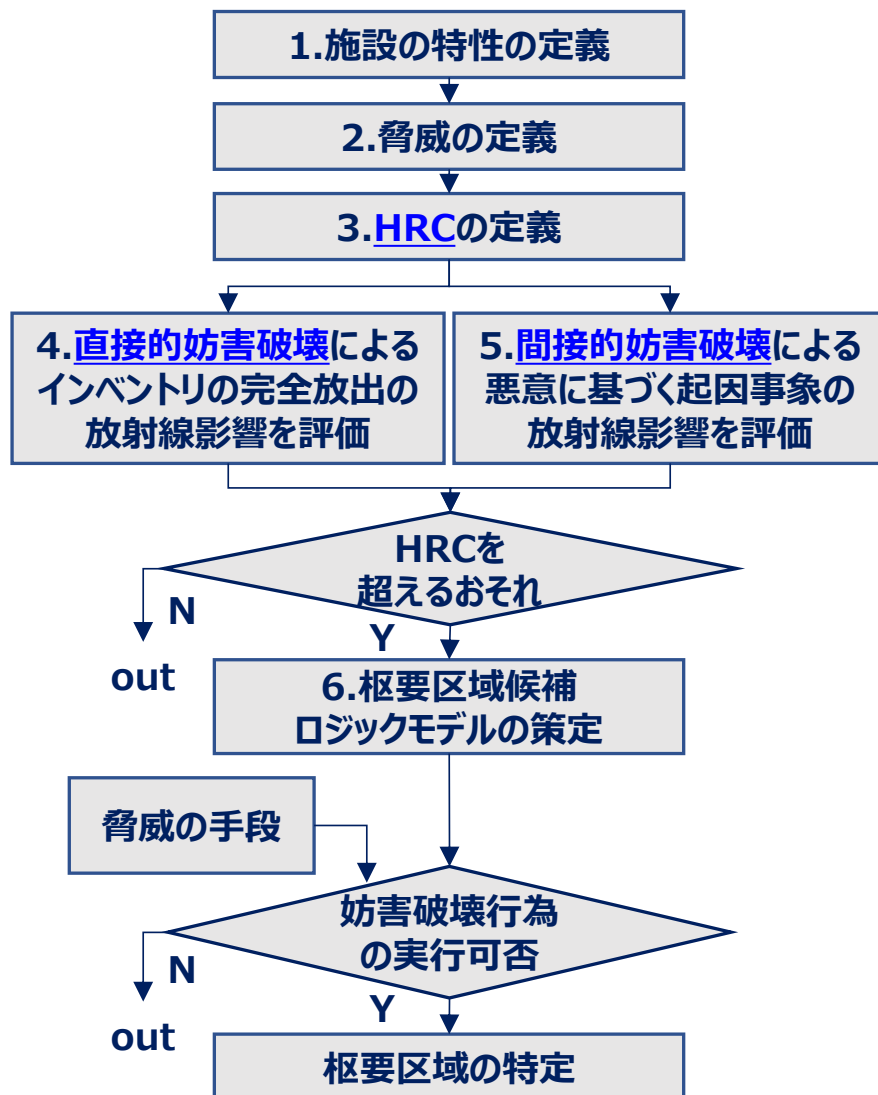
3.4.2 枢要区域選定(VAI)

3.4.2.1 評価手法

枢要区域は、「防護区域の内側にあつて、それへの妨害破壊行為が直接又は間接に深刻な影響に繋がる機器、システム又は装置、もしくは核物質を収容している区域」と定義される⁵。そして、脅威者による妨害破壊行為からその対象を防護するために原子力システムに設定される区域である。

枢要区域選定(VAI; Vital Area Identification)の推奨プロセスは、国際原子力機関核セキュリティシリーズ No.16(IAEA NSS-No.16)によって **Figure 3-18** の通り示されている³⁸。VAI の大まかな流れとしては、まず、HRC(High Radiological Consequences)による放射線影響を定義する。そして、脅威による直接的妨害破壊または間接的妨害破壊によって HRC を超過させないために枢要区域候補を選ぶ。その後、提案された核物質防護システムについて脅威に対する応答性を評価する。最終的に、枢要区域候補から枢要区域を選定するものである。ただし、VAI に関する具体的な選定基準や評価結果は一般に公開されておらず、国家や事業者によって枢要区域は異なっている。

本研究では、IAEA が推奨する VAI プロセスを基準とし、非開示とされている HRC の定義方法を考案するとともに、OFNP の VAI を行う(**Figure 3-18**)。



IAEA NSS No.16 (2012)を参考に作成

Figure 3-18 枢要区域選定のプロセス

3.4.2.2 施設の特性の定義

OFNP の設計基準事故(DB; Design Based accident)ベースの安全系統について、**Figure 3-19** の通り、動的システムを中心とした 4 区分の系統として定義した³⁹。なお、重大事故等(SA)ベースの安全系統については、VAI で考慮しない。

つまり、OFNP の DB 安全系統は、原子炉高压注水として、蒸気駆動の原子炉隔離時注水系(RCIC; Reactor Core Isolation Cooling system)は 2 区分、電動駆動の高压炉心注水系(HPCF; High Pressure Core Flooder system)は 2 区分存在する。また、原子炉低压注水として、電動駆動の残留熱除去系(RHR; Residual Heat Removal system)は 4 区分存在する。また、非常用電源として非常用ディーゼル発電機(DG; Diesel Generator)、原子炉減圧として自動減圧系(ADS; Automatic Depressurization System)は、それぞれ 4 区分存在する。

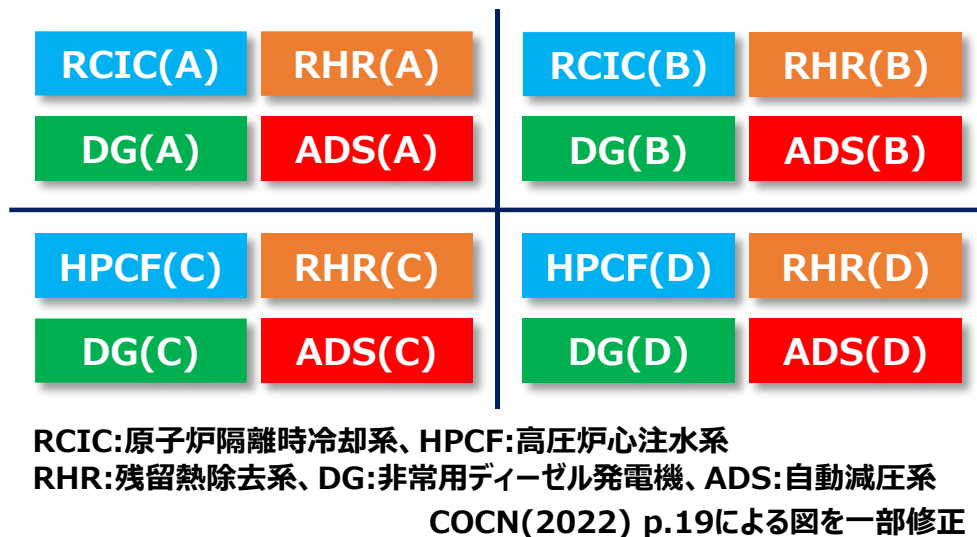


Figure 3-19 OFNP の DB 安全系統(4 区分; 動的)

3.4.2.3 脅威の定義

脅威について、GIF/PRPP によるケーススタディを基準とし、**Table 3-8** の通り定義した^{15,16}。十分なプラント知識や攻撃スキルの訓練を積んだ非国家主体のテロリストについて、致死性武器、爆発物(5 kg)、船舶(高速)を装備した外部脅威者 12 名と内部脅威者 1 名による船舶移乗脅威を想定した。

妨害破壊行為シナリオに関する目標としては、「24 時間以内の HRC 相当の放射性物質の環境放出」と定義した。これは、「HRC に繋がる核物質及び HRC を防止するためのシステムは防護区域内の枢要区域の中に配置する」という NPP に対する IAEA の推奨事項 (INFCIRC/225/Revision5, 5.20.項)をもとに定義するものである⁴。また、制限時間を定めた理由は、計画された妨害破壊行為を達成されたとしても、おおよそ 24 時間(1 日)もあれば、対応組織によって敵対者は無力化されるとともに、陸上からの外部支援によって安全システムの復旧が十分見込めると想定したためである。

盗取シナリオに関する目標としては、既往研究を参考としつつ、「MOX-FF(新燃料)集合体 1 体の施設からの盗取」と定義したため、以下にその理由を説明する。有意量(SQ; Significant Quantity)とは、「1 個の核爆発装置が製造される可能性を排除できない核物質のおおよその量」として定義されており、Pu では 8 kg、20%未満の ²³⁵U では 75 kg とされている^{40,41}。本研究では、2.2.1 項で述べた通り、MOX-FF の集合体平均 Pu 富化度を 10.9 wt%Pu_t (7.0 wt%Pu_f)、UO₂-FF の集合体平均ウラン濃縮度を 5.5 wt%、MOX 及び UO₂ 燃料集合体 1 体あたりのウランとプルトニウムの総重量を 173 kg と想定した⁴²。よって、MOX-FF 集合体 1 体中の Pu は 18.9 kg、UO₂-FF 集合体 1 体中の ²³⁵U は 9.5 kg となり、有意量を盗取するためには、MOX-FF では集合体 1 体で満足するのに対し、UO₂-FF では集合体 8 体必要となる。燃料集合体の重量は 1 体あたり約 300 kg となり、8 体を一度に盗取することは不可能であるため、UO₂-FF は盗取対象から除外した。また、SF(使用済燃料)集合体についても、未格納のまま盗取するには高線量かつ高温であり、重いキャスク(約 100 ton)などへの格納を要することから、盗取対象から除外した。以上より、本研究の盗取シナリオの対象としては、MOX-FF 集合体 1 体を想定した。なお、本章の議論において、タイムライン評価上では、目標達成まで往復で時間を要する盗取に対して、往路のみで目標達成可能な妨害破壊行為の方が評価上厳しくなるため、盗取ではなく妨害破壊行為中心の議論となることに注意されたい。

Table 3-8 研究対象とする DBT 能力と仕様 [再掲]

項目		本研究	GIF/PRPP(2009)
タイプ		軍事訓練を受けた攻撃部隊	同左
能力	知識	施設の配置や物理的防護システムの基本知識、 実行機会を把握するのに十分なプラント・プロセスの知識	同左
	スキル	障壁を突破する攻撃装置の設計能力、攻撃兵器の使用訓練	同左
	装備	致死性武器、爆発物(5 kg)、船舶(高速)	致死性武器、爆発物、武装車両
	人数	外部脅威 12 人+内部脅威 1 人	同左
	献身	軍事目標優先	同左
目標	妨害破壊	24 時間以内の HRC 相当の放射性物質の環境放出	—
	盗取	MOX-FF 集合体 1 体の施設からの盗取	1 有意量の核兵器物質取得に十分量の目標物を施設から盗取
戦略	妨害破壊	物質への直接的妨害破壊または安全システムへの間接的妨害破壊	—
	盗取	核物質が貯蔵されている区域を目指した施設に対する急襲攻撃	同左

3.4.2.4 HRC の定義

VAI における判断基準である HRC について、本研究では D 値(D-Values; Dangerous Quantities of Radioactive Material)の概念の適用を仮定することにより定義した。

前述の通り、HRC の具体的な定義や定義方法は非開示となっており、国や事業者により異なる³⁸。例えば、原子炉立地審査指針などの判断の目安になっている発電所周辺の一般公衆の年間被ばく線量(mSv/y)は、HRC の候補として挙げられる⁴³。ただし、沖合 30 km 設置を想定している OFNP においては、原子力従事者を除くと基本的には周辺に一般公衆は生活していない。また、陸上に生活する一般公衆への直接的かつ重大な放射線影響を与えるリスクも陸上 NPP と比べると低いであろう⁴⁴。その一方で、事故時の OFNP 内の原子力従事者への直接的な放射線影響や、海水や海洋生物を通じた一般公衆への間接的な放射線影響のリスクは存在する。ここで、D 値は、「制御されない場合、被ばくした個人の死亡、またはその人の生活の質を低下させる永久的な傷害を引き起こす可能性がある放射性物質の量」として定義されており⁴⁵、むき出しとなった放射性物質に接触した人に対する評価指標となっている。そのため、発電所周辺の一般公衆に対する放射線影響とは異なり、離隔距離や飛散経路などの条件に依存せず、放射性物質の直接的な危険度を表す概念である⁴⁶。よって、本研究では、OFNP の放射線影響の評価対象となる人や条件が多様であることを考慮し、放射性物質の直接的な危険度を表す D 値の概念を適用することで HRC を定義する。

D 値は、Table 3-9 に示す通り⁴⁷、放射性物質をカテゴリ分けし、カテゴリに応じたグレーデッドアプローチにより放射性物質の防護システムを構築するためにも用いられる概念である⁴⁸。同カテゴリ分けは、複数の放射性核種が存在する場合は、核種毎の A/D の合計値に対して評価が行われる(Eq.3.4)。

$$Aggregate \frac{A}{D} = \sum_n \frac{\sum_i A_{i,n}}{D_n} \quad (\text{Eq.3.4})$$

$A_{i,n}$:放射性核種 n の個別物質 i の放射能

D_n :放射性核種 n に関する D 値

ここで、D 値は、密封線源の D_1 と非密封線源の D_2 の 2 種類が核種毎にそれぞれ示されており、2 種類のうちでより低い値(つまり、より人体への放射線影響の大きい)がカテゴリ分けの D 値として用いられている。

以上より、本研究では、**Table 3-9** に示す通り、A/D 合計値が 1000 以上となるカテゴリ 1(核セキュリティレベル A)相当の燃料集合体 1 体に対する妨害破壊行為を HRC と定義した。評価対象を燃料集合体とする理由は、OFNP 関連の原子力従事者への直接的かつ重大な放射線影響を脅威者の主な目的として定義しており、敵対者は放射性物質の「気中」への飛散を狙っているためである。例えば、「原子炉水」については、そもそも気中への有意な飛散のリスクは低く、また OFNP は二重船殻構造を有しており海洋拡散のリスクも低いため、評価対象外とした。また、評価対象とする燃料集合体の単位は、本研究の DBT(**Table 3-8**)の装備や人数から、集合体 1 体とした。評価対象とする放射性核種は、IAEA の Code of Conduct に記載されている ^{238}Pu 、 ^{239}Pu などの 25 核種に加えて、 $\text{UO}_2\text{-FF}$ 中で支配的な ^{234}U 、 ^{235}U 、 ^{238}U の 3 種類を追加した合計 28 核種とした⁴⁶。

Table 3-9 D 値による核セキュリティレベル区分

Category	Aggregate A/D	Practice/equipment	Security Level
1 ($\equiv$ HRC)	$A/D \geq 1000$	Radioisotope thermoelectric generators, Irradiators, Teletherapy, Fixed multibeam teletherapy	A
2	$1000 > A/D \geq 10$	Industrial gamma radiography, High/medium dose rate brachytherapy	B
3	$10 > A/D \geq 1$	Fixed industrial gauges that incorporate high activity sources, Well logging gauges	C

Based on IAEA, No. RS-G-1.9 (2016)

3.4.2.5 直接的妨害破壊による放射線影響評価

直接的妨害破壊とは、核燃料への爆破などにより直接的に燃料損傷させて放射性物質飛散を狙う妨害破壊行為である。本研究では、直接的妨害破壊について、インベントリの完全放出時の放射線影響を評価し、枢要区域候補を選定した。評価には、OFNP で取り扱う MOX と UO_2 燃料の FF と SF の集合体 1 体に対して、SCALE 6.2.4/TRITON の二次元輸送・燃焼計算モジュールを使用し核種組成を求めることで評価する⁴⁹。また、核データライブラリとして、ENDF/B-VII.1 に基づき 252 群で準備されたものを使用する⁵⁰。なお、燃料集合体の保管場所としては、新燃料貯蔵庫や原子炉建屋オペレーティングフロア(オペフロ)内の SFP 以外では「原子炉」が挙げられるが、原子炉压力容器の上蓋が閉止されているときは爆発物による集合体への直接的妨害破壊は不可能である。上蓋開放されているときは基本的に原子炉压力容器の上部(原子炉ウェル)は水張り状態であり、原子炉建屋オペフロ内で SFP と繋がっている。そのため、シナリオとしては SFP 内の SF に対する直接的妨害破壊に包絡可能であるため、集合体の保管場所として原子炉は考慮しない。

評価結果は、Table 3-10 に示す通りである。① UO_2 -FF は HRC を大きく下回った(A/D 合計値<1000)。そこで、「新燃料貯蔵庫エリア」は枢要区域候補として選定しない。② UO_2 -SF、③MOX-FF、④MOX-SF は、HRC を大きく上回った(A/D 合計値>1000)。ただし、それらを保管する SFP は、原子炉ウェルや DSP(ドライヤー・セパレーター・ピット)なども含む原子炉建屋オペフロ内の一面に位置する。そのため、燃料交換時には常設の燃料取替機によって原子炉内から SF を移送されるため、SFP 自体の枢要区域設定は現実的ではない。そこで、「原子炉建屋オペフロ」を枢要区域候補として選定した。なお、前述の補足のために、原子炉建屋オペフロの俯瞰図を Figure 3-20 に示し、断面図と燃料取出手順を Figure 3-21 に示す⁵¹。

Table 3-10 直接的妨害破壊対象となる燃料集合体の A/D 合計値

燃料集合体(1 体)	保管場所	A/D 合計値
① UO_2 -FF (5.5% U_f)	新燃料貯蔵庫	9
② UO_2 -SF (5.5% U_f)	SFP (原子炉建屋オペフロ)	31995
③MOX-FF (7.0% Pu_f)	SFP (原子炉建屋オペフロ)	5717
④MOX-SF (7.0% Pu_f)	SFP (原子炉建屋オペフロ)	56127

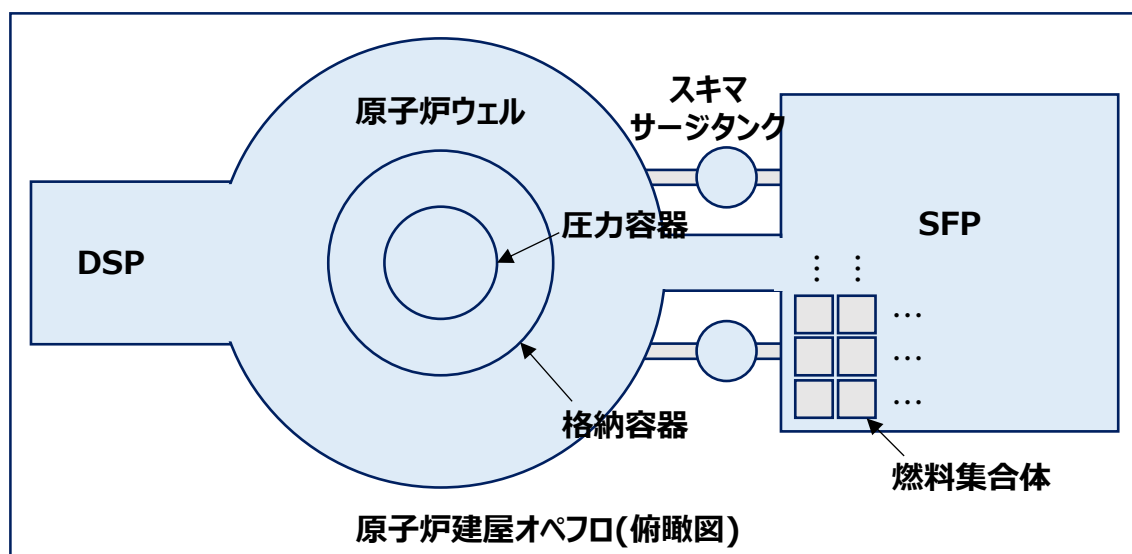
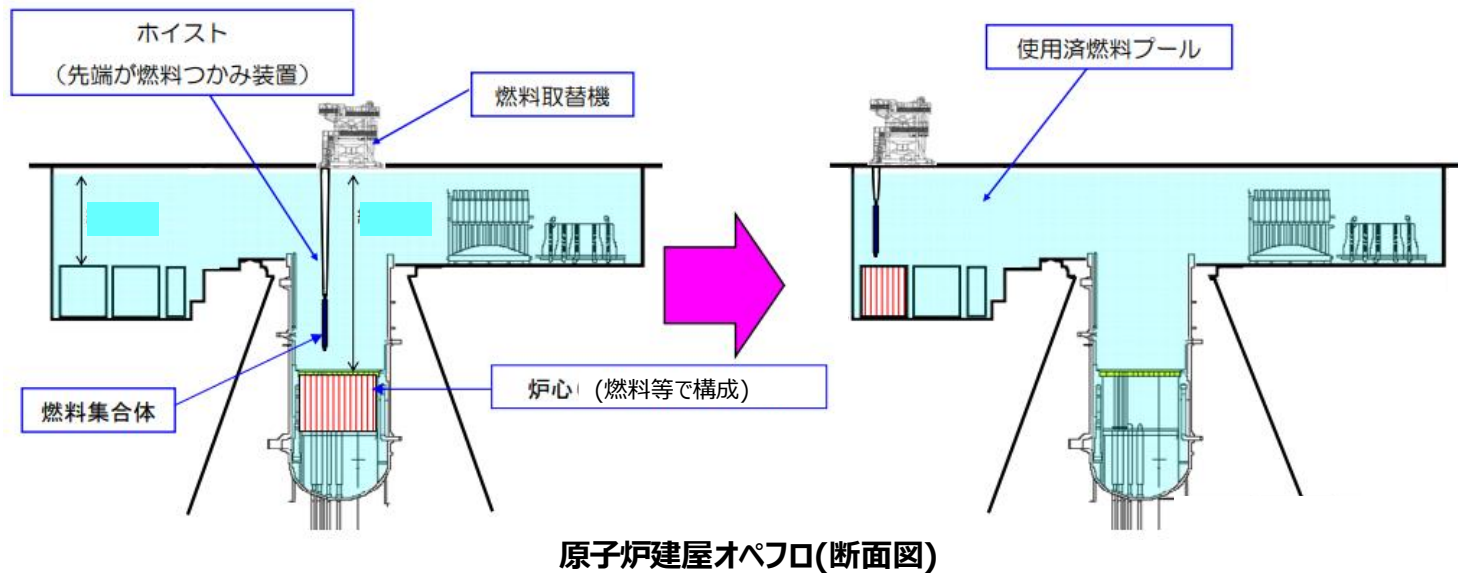


Figure 3-20 原子炉建屋オペレーティングフロア俯瞰図

- ① 燃料取替機に装着された燃料つかみ装置を原子炉圧力容器・炉心内燃料集合体位置へ降下する。
- ② 燃料つかみ装置によって、燃料集合体を吊り上げる。

- ③ 吊り上げた燃料集合体を、使用済燃料プール(SFP)へ移送し、使用済燃料貯蔵ラック内へ吊り降ろす。



(出典) 東京電力 福島第一原子力発電所(2013), P11

Figure 3-21 原子炉建屋オペフロ断面図と燃料取出手順

3.4.2.6 間接的妨害破壊による放射線影響評価

間接的妨害破壊とは、OFNP の安全機能喪失により間接的に燃料損傷させて放射性物質飛散を狙う妨害破壊行為である。間接的妨害破壊について、既存 ABWR プラントの重大事故等対策の有効性評価に基づき⁵²、運転中の原子炉における炉心損傷に至るおそれがある事故シーケンスのうち研究対象とすべきシーケンスを選定する。その中で、妨害破壊行為の「共通要因故障」による複数の系統や区分の安全機能喪失を考慮した上で、枢要区域候補を選定する。重大事故等が発生する場合は、前述の直接的妨害破壊の放射線影響の結果より、HRC 相当の事故になるものと想定する。同有効性評価を基準とする理由は、IAEA NSS-No.16 において、Security 上の決定論的手法だけでなく、Safety 上の確率論的安全性評価(PSA; Probabilistic Safety Assessment)などを活用が推奨されているためである。同有効性評価は、PSA 結果も含めた網羅的かつ体系的な事故シーケンスを想定した安全評価となっているため、IAEA 推奨の趣旨に合致する³⁸。また、共通要因故障による安全機能喪失を考慮した理由は、IAEA NSS-No.16 において、空間的・物理的な観点で共通要因故障の考慮が推奨されているためである(例：1 つの爆発物によって集合して配置してある複数の系統・区分の配管を一度に破損させ、複数の系統を機能喪失させる)。本評価上において、DB 安全系統のみ考慮し、SA 安全系統は考慮しない。なお、同有効性評価は、運転中の原子炉だけではなく⁵³、SFP の燃料損傷防止対策に対しても評価が行われている⁵⁴。一方で、2.2.3 項で示した通り、SFP の冷却機能停止時でもプール水位が SF の有効燃料頂部まで到達するまでの裕度は 3 日以上ある。また、前述の直接的妨害破壊の結果に包絡されるため、SFP の燃料損傷防止対策は、本研究の間接的妨害破壊のシーケンスとして扱わない。

本研究の対象とする事故シーケンスの選定基準について、前述で想定した DBT と HRC の定義より、以下 2 点の AND 条件として定義した。

1. 24 時間以内の炉心損傷達成のおそれ

DBT の妨害破壊行為の目標は「24 時間以内の HRC 相当の放射性物質の環境放出」であり、炉心損傷により HRC 相当の放射性物質放出のおそれがあるため。

2. 爆発物による事故シーケンス達成のおそれ

DBT の妨害破壊行為は、OFNP 内の SSC(Structure, System and Component)に対して、主に「爆発物」を用いて損傷を与えるため。ここで、原子炉運転中は、格納容器内は窒素ガス封入されており人の侵入は不可能であり、格納容器は厚いコンクリートで覆われている。そのため、爆発物による格納容器内の SSC に対する妨害破壊行為は不可能である。

評価の結果は、**Table 3-11** に示す通りであり、研究対象とする事故シーケンスとして「TQUV(高圧・低圧注水機能喪失)」「TQUX(高圧注水・減圧機能喪失)」「TBU(全交流動力電源喪失(RCIC 機能喪失))」を選定した。

「条件 1.24 時間以内の炉心損傷達成のおそれ」の観点で、評価の対象外とした事故シーケンスと理由について、以下の通り解説する。

- ・ TW(崩壊熱除去機能喪失)、長期 TB(全交流動力電源喪失)、TBP(全交流動力電源喪失(SRV 再閉失敗))、TBD(全交流動力電源喪失(直流電源喪失))

原子炉注水は、蒸気を駆動源として交流電源を必要としない RCIC(原子炉隔離時冷却系)で行う。その水源は、隔離弁によって外部と隔離された格納容器内にあるサプレッションプールであり、原子炉冷却材は原子炉とサプレッションプールを循環するであろう。そのため、24 時間以内であれば炉心は冠水状態を維持可能であり、炉心損傷に至ることはない。なお、RCIC 機能喪失を事故シーケンスに追加する場合は、TBU に包絡される。

なお、原子炉内の核燃料から生じる崩壊熱は運転中を 100%とすると、スクラム直後で 6%、1 分後で 4%、1 時間後に 2%、1 日後に 0.7%程度まで急減することで知られている⁵⁵。一般的な ABWR の運転中(100%相当)の給水流量/主蒸気流量は約 7640 t/h であるため、原子炉水位を保ち炉心損傷を防止するためには、スクラム 1 時間後では約 150 t/h(崩壊熱 2%相当)の注水流量が必要となる。OFNP の DB 安全系統のうち、注水流量の最も少ない系統である RCIC(182 t/h)を用いたとしても、少なくともスクラム 1 時間以降では原子炉水位は上昇するであろう。また、スクラム後 1 時間以内の原子炉水位の一次的な低下を見越しても炉心損傷しないように、DB 安全系統は設計されている⁵⁶。

- ・ ISLOCA(インターフェイスシステム LOCA)

ISLOCA とは、原子炉冷却材が格納容器外に漏えいする格納容器バイパス LOCA の事故である。ISLOCA により原子炉から格納容器外に冷却材は流出するが、高圧または低圧の炉心冷却系によって、流出量を上回る冷却材を原子炉に注水可能である。そのため、24 時間以内に炉心損傷に至ることはない。

「条件 2. 爆発物による事故シーケンス達成のおそれ」の観点で、評価の対象外とした事故シーケンスと理由について、以下の通り解説する。

- ・ TC(原子炉停止機能喪失)

原子炉停止機能に関連する SSC は、フェイルセーフ(障害が発生したときに、自動的に安全側に移行させる概念)で設計されている。原子炉停止機能に関する SSC に対して爆発物などによって妨害破壊行為を行ったところで、充填されている水圧が自動で開放され制御棒が炉心に挿入される(自動スクラム)。そのため、爆発物によって妨害破壊行為が達成されることはない。

- ・ LOCA(冷却材喪失事故時注水機能停止)

LOCA は、格納容器内の原子炉とつながる配管の破損などによって、原子炉内の冷却材が喪失する事故である。よって、前述の通り、格納容器内の SSC に対する爆発物による妨害破壊行為は不可能である。

- ・ TBP(全交流動力電源喪失(SRV 再閉失敗))

SRV(主蒸気逃がし安全弁)は、格納容器内で主蒸気管に設置されている弁であり、前述の通り、格納容器内の SSC に対する妨害破壊行為は不可能である。

研究対象とする 3 つの事故シーケンスについて、妨害破壊行為の空間的・物理的な「共通要因故障」による複数の系統や区分の機能喪失を議論する。そのため、共通要因故障を「(1)考慮しない場合」と「(2)考慮する場合」における、評価結果と考察を以下の通り論述する。

(1) 妨害破壊行為による共通要因故障を考慮しない場合

本ケースでは、1 回の妨害破壊行為に対して、その対象となる安全系統が 1 区分喪失する想定である。例えば、RCIC の機能喪失を達成するためには、RCIC の(A)系と(B)系の全 2 区分を損傷させる必要があり、そのための妨害破壊行為は 2 回必要である。

つまり、共通要因故障を考慮しない場合の、事故シーケンス達成までに必要な妨害破壊回数は以下の通りである(**Table 3-11**)。

- ・ TQUV-9 回：過渡事象(1 回)+高圧炉心冷却失敗(4 回)+低圧炉心冷却失敗(4 回)
- ・ TQUX-9 回：過渡事象(1 回)+高圧炉心冷却失敗(4 回)+原子炉減圧失敗(4 回)
- ・ TBU-7 回：外部電源喪失(1 回)+交流電源喪失(4 回)+RCIC 機能喪失(2 回)

(2) 妨害破壊行為による共通要因故障を考慮する場合

安全系統を機能させるためには、ポンプや配管などの事故時の基本的な安全機能を果たすフロントライン系に加えて、それらをサポートする非常用電源や補機冷却などのサポート系が必要となる。例えば、駆動源を電気とする HPCF(高圧炉心注水系)の場合は、ポンプ、配管、水源に加えて、ポンプを駆動させるための非常用電源や、ポンプを冷却するための補機冷却が無ければ、機能喪失に陥ることとなる。

ここで、外部からの影響による NPP 内の共通要因故障の実例として、福島第一原子力発電所事故(1F 事故)の教訓である津波による共通要因故障が挙げられる。1F 事故では、津波によって、安全系統のフロントライン系のみならず、非常用電源盤や補機冷却ポンプなどのサポート系にも損傷があった。そのため、多数の安全系統は間接的に機能喪失し、最終的には多大な放射線影響を及ぼした。よって、本研究では、「非常用電源」と「補機冷却」への妨害破壊行為による共通要因故障モードについて、妨害破壊回数への影響を以下の通り評価した。

「非常用電源」については、4 区分で系統分離してあるため、1 回の妨害破壊行為によって共通要因故障で複数の系統・区分が機能喪失に至るおそれはない。仮に 4 回妨害破壊行為を行い、全 4 区分の非常用電源を機能喪失させたとしても、その影響は長期 TB などの事故シーケンスに包絡されるため評価対象外とした。なお、補機冷却が機能喪失した場合

は、冷却を要する非常用ディーゼル発電機も使用不可となり、結果として非常用電源は機能喪失に陥る。その逆として、非常用電源が機能喪失した場合は、電源を要する補機冷却ポンプなども使用不可となり、結果として補機冷却は機能喪失に陥ることとなる。

「補機冷却」については、4 区分で系統分離してあるものの、重大事故等対策の有効性評価上の事故シーケンスにもある通り、「取水機能」の喪失によって、安全系統の共通要因故障が発生するおそれがある⁵⁷。つまり、4 区分で分離された補機冷却の共通部分となる「補機冷却の取水口」を対象とすることで、1 回の妨害破壊行為によって共通要因故障で複数の系統・区分の機能喪失に至るおそれがある。

よって、妨害破壊行為によって「補機冷却の取水口」を損傷させ、取水機能を喪失させた際の影響について、例として、TQUV 事故シーケンスにおけるフォルトツリー分析結果を **Figure 3-22** の通り示す。その結果、1 回の補機冷却の取水口に対する妨害破壊行為によって、補機冷却によるポンプなどの冷却を要する常用給水、HPCF(C)(D)、RHR(A)(B)(C)(D)の3系統・7区分が機能喪失した。一方で、蒸気を駆動源として一定期間の補機冷却を要さない RCIC(A)(B)のみが機能維持した。

すなわち、補機冷却の取水口への妨害破壊行為による共通要因故障を考慮する場合の、事故シーケンス達成までに必要な妨害破壊行為の対象と回数は、以下の通りである (**Table 3-11**)。

- ・ TQUV-3 回：補機冷却の取水口(1 回)+RCIC(2 回)
- ・ TQUX-7 回：補機冷却の取水口(1 回)+RCIC(2 回)+ADS(4 回)
- ・ TBU-4 回：補機冷却の取水口(1 回)+外部電源(1 回)+RCIC(2 回)

以上より、補機冷却の取水口への妨害破壊行為による共通要因故障を考慮することによって、事故シーケンス達成までに必要な妨害破壊行為の回数が、TQUV で 6 回、TQUX で 2 回、TBU で 3 回と減少し、OFNP の核セキュリティ上の重大なリスクを明らかにした。よって、本研究では、OFNP の枢要区域候補として「補機冷却の取水口」を選定した。

Table 3-11 炉心損傷の事故シーケンス毎の妨害破壊回数

炉心損傷の事故シーケンス		1. 24 時間 以内の炉心 損傷達成	2. 爆発物に よるシーケ ンス達成	妨害破壊回数	
				共通要 因故障 無し	共通要 因故障 有り
TQUV	過渡事象+高圧炉心冷却失敗+低圧炉心冷却失敗	○	○	9	3
TQUX	過渡事象+高圧炉心冷却失敗+原子炉減圧失敗	○	○	9	7
TW	過渡事象+崩壊熱除去失敗	×	○	-	-
TC	過渡事象+原子炉停止失敗	○	×	-	-
LOCA	中破断 LOCA+高圧炉心冷却失敗+低圧炉心冷却失敗	○	×	-	-
長期 TB	外部電源喪失+交流電源喪失	×	○	-	-
TBU	外部電源喪失+交流電源喪失+RCIC 機能喪失	○	○	7	4
TBP	外部電源喪失+交流電源喪失+SRV 再閉失敗	×	×	-	-
TBD	外部電源喪失+直流電源喪失	×	○	-	-
ISLOCA	ISLOCA	×	○	-	-

TQUV; 高圧・低圧注水機能喪失、TQUX; 高圧注水・減圧機能喪失、TW; 崩壊熱除去機能喪失、TC; 原子炉停止機能喪失、LOCA; 冷却材喪失事故時注水機能停止、長期 TB; 全交流動力電源喪失、TBU; 全交流動力電源喪失(RCIC 機能喪失)、TBP; 全交流動力電源喪失(SRV 再閉失敗)、TBD; 全交流動力電源喪失(直流電源喪失)、ISLOCA; インターフェイスシステム LOCA

炉心損傷の事故シーケンスは、東京電力 柏崎刈羽原子力発電所(2017)を参考に作成

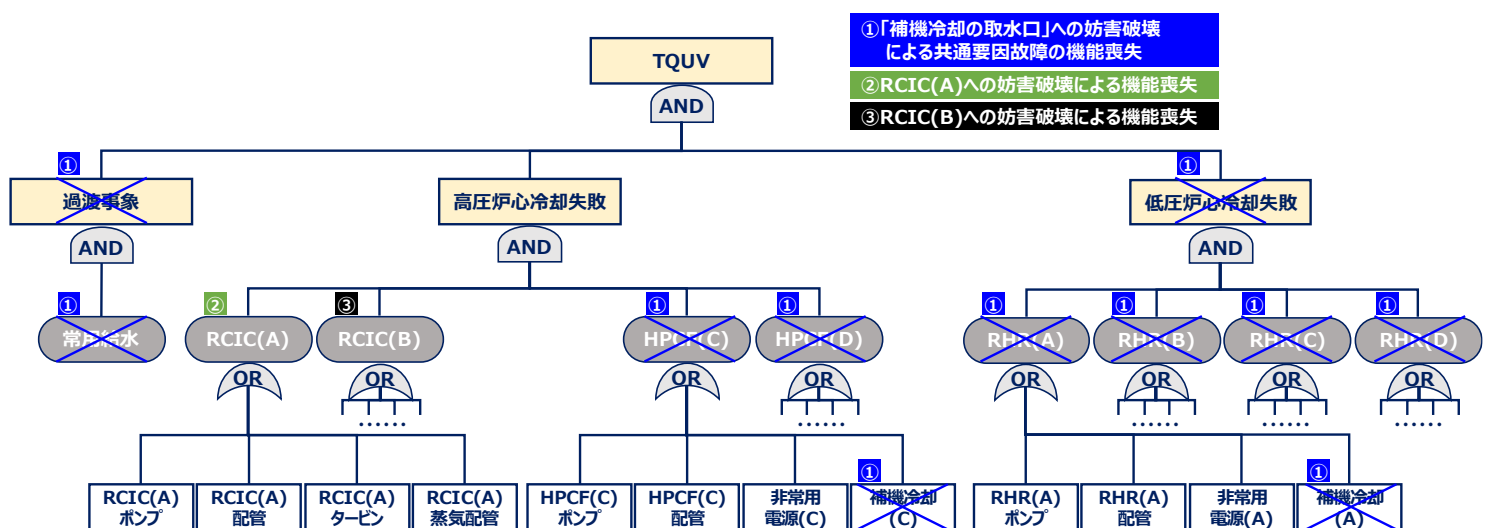


Figure 3-22 TQUV 事故シーケンスにおける共通要因故障のフォルトツリー

3.4.2.7 枢要区域候補ロジックモデルの策定

前述までの VAI の結果に基づき、シナリオ A,B に対応する枢要区域候補を以下の通り選定した。また、シナリオ C については、中央制御室等占拠で NPP に対して人為的に非安全側の操作が行われた場合、HRC 相当の事故が発生するおそれを否定できない。そのため、もともと枢要区域として設定されている中央制御室に加えて、代替中央制御室も枢要区域候補に選定したものである^{58,59}。

- A. 直接的妨害破壊：原子炉建屋オペフロ
- B. 間接的妨害破壊：補機冷却の取水口
- C. 中央制御室占拠：代替中央制御室

ここで、前述の通り(**Figure 3-17**)、OFNP の核セキュリティ上の特徴としては、以下が挙げられる^{8,9}。

- ・ OFNP 特有の縦長構造(高さ 100 m 超)を有しており、喫水面から甲板デッキまでは高さ 40 m あること
- ・ 外部からのアクセスルートを乗降エレベータに限定してあること
- ・ OFNP 内の安全上重要な機器は、喫水面より下部(防護区域内)に設置してあること

本研究では、脅威が外部侵入によって安全上重要な機器に到達するまでのアクセスルートを以下 1.~5.の順に限定し、遅延効果を目的とし、水平移動のみならず垂直移動が多分に要求される設計とした。

1. 洋上(高さ 0 m)
2. 乗降エレベータ
3. 甲板デッキ(喫水面から上部 40 m)
4. 防護ゲート
5. 安全上重要な機器(喫水面から下部)

また、アクセスの要である「乗降エレベータ」^{8,44}について、脅威者による使用を抑止し、その遅延効果を最大限に発揮するため、「警備員詰所」によって乗降エレベータの経路管理をする設計とした。なお、警備員詰所は OFNP の防護区域内、代替警備員詰所は陸上の支援施設に設置されており、ともに枢要区域である。

よって、DBT の目標とする妨害破壊行為に通じるシナリオ A,B,C と、関連する区域において、フォルトツリー上に枢要区域候補ロジックモデルとして示す。「枢要区域候補」や「乗降エレベータ経路管理」が無いモデルを **Figure 3-23** に示す。その逆に、それらが有るモデルを **Figure 3-24** に示す。

また、本研究で想定した「枢要区域候補」と「乗降エレベータ経路管理」について、設計/運用上のシナリオ詳細、及び核セキュリティ上の主な効果を **Table 3-12** に示す。

- ・ 枢要区域－原子炉建屋オペフロ

MOX-FF、SF が保管された SFP が配置される原子炉建屋オペフロを枢要区域とする。同エリアを囲う物理的防護壁の厚みなどを強化する。上記設計により、直接的妨害破壊シナリオにおける遅延効果を強化する。

- ・ 枢要区域－補機冷却の取水口

4 区分分離の補機冷却系の共通部分となる補機冷却の取水口を枢要区域とする。脅威者が近傍へアクセス不可となるように、同エリアを設計する。上記設計により、補機冷却の取水口の妨害破壊による共通要因故障を不可とする。

- ・ 枢要区域－代替中央制御室

代替中央制御室を枢要区域とする。脅威者が場所等の情報を入手不可となるように、同エリアを秘密情報とする。また、信頼性確認プログラムで内部脅威者を排除する。上記設計により、中央制御室等占拠シナリオは達成不可とする。

- ・ 乗降エレベータ経路管理－警備員詰所

外部からの唯一のアクセスポイントである乗降エレベータは、警備員詰所でのみ操作可能な設計として、脅威者の経路管理を行う。OFNP 内の防護区域内部に警備員詰所を設置し、外部脅威者をアクセス不可とする。また、警備員詰所へのアクセスには、2 人ルールが機械的に必須となるように設計し、内部脅威者をアクセス不可とする。上記設計により、特定のシナリオに限定せず、遅延効果を強化する。

以上より、本研究では、「D 値」の概念を新たに取り入れることで HRC を定義し、直接的妨害破壊による放射線影響評価を行った。また、既存の ABWR 安全評価を基とし、「共通要因故障」の概念を新たに導入することで、間接的妨害破壊の影響評価を行い、枢要機器候補を選定した。本研究で新たに開発した上記の枢要区域選定の手法は、ABWR 搭載の OFNP のみならず、多様な炉型を搭載する洋上・陸上 NPP に対し、適用可能な評価手法である(4.2 節で言及)。

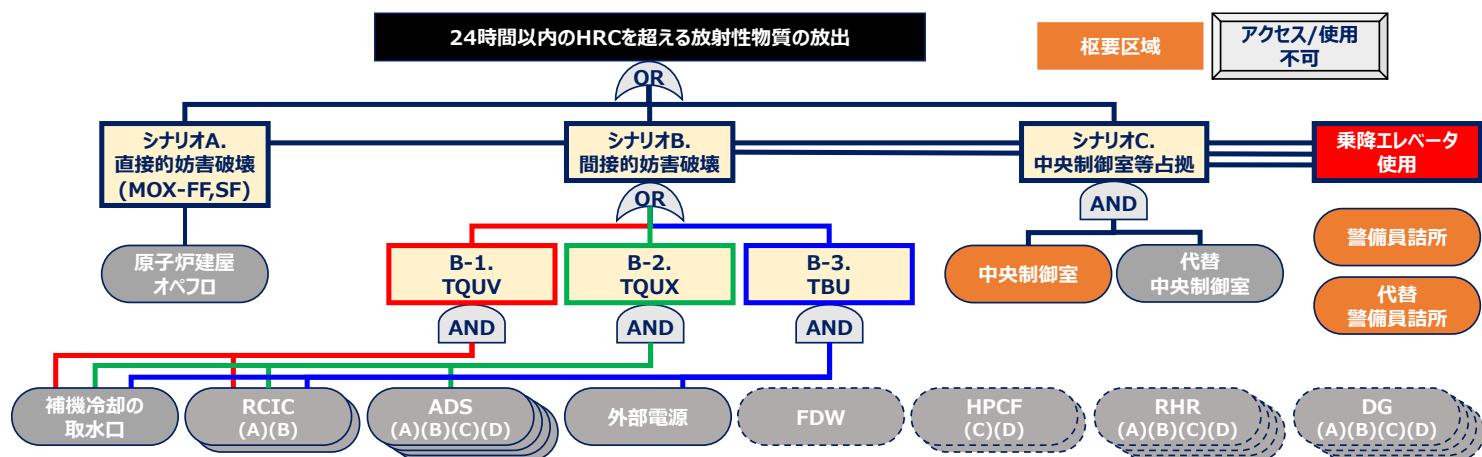


Figure 3-23 重要区域候補ロジックモデル (重要区域候補など無し)

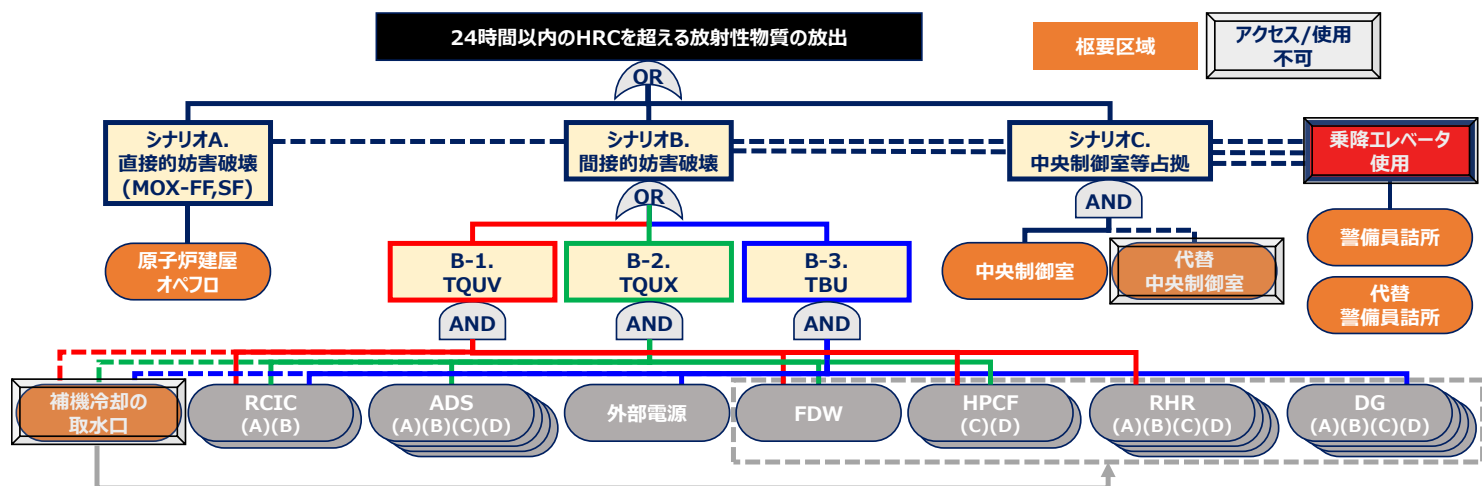


Figure 3-24 重要区域候補ロジックモデル (重要区域候補など有り)

Table 3-12 枢要区域候補などの詳細シナリオと効果

設計/運用上の詳細シナリオ		効果
枢要区域： 原子炉建屋オペフロ	MOX-FF、SF が保管された SFP が配置されている原子炉建屋オペフロの遅延機能強化のため、同エリアを囲う物理的防護壁の厚み等を強化する	脅威者は原子炉建屋オペフロへのアクセス・妨害破壊可能だが、扉や壁の強化で侵入遅延する
枢要区域： 補機冷却の取水口	脅威者が近傍へアクセス不可となるように、同エリアを設計する。なお、4 区分分離の補機冷却の共通部分に限る	脅威者は補機冷却の取水口へのアクセス・妨害破壊不可
枢要区域： 代替中央制御室	脅威者が場所等の情報を入手不可となるように、同エリアを秘密情報とする。信頼性確認プログラムで内部脅威者を排除する	脅威者は代替中央制御室へのアクセス・妨害破壊不可
乗降エレベータ経路 管理：警備員詰所	乗降エレベータは警備員詰所でのみ操作可能な設計とする。OFNP 内の防護区域内部に警備員詰所を設置し、外部脅威者をアクセス不可とする。また、警備員詰所へのアクセスには、2 人ルールが機械的に必須となるように設計し、内部脅威者をアクセス不可とする	脅威者は乗降エレベータを使用不可となり、侵入遅延する

3.4.3 堅牢性評価

3.4.3.1 評価手法

船舶移乗脅威に対する OFNP の核物質防護システムの堅牢性の定量評価のため、敵対者シーケンス図(ASD; Adversary sequence diagram)に基づき、EASI(Estimation of Adversary Sequence Interruption)モデルを用いて、経路解析によるタイムライン評価を行う⁶⁰。

本研究におけるタイムライン評価では、敵対者が核物質防護システムによる遅延を受けつつ目標達成するまでの「累計遅延時間」と、敵対者を検知してから治安部隊が到着するまでの「対応時間」を比較する経路解析である。そして、脆弱な経路に対する「阻止確率 P_I 」と「累計遅延時間 T_L 」を評価する。以下、評価手法の考え方について説明する。

そもそも、核物質防護システムの堅牢性を定量評価する指標として、核セキュリティにおけるリスクが挙げられ、**Eq.3.5** の通り定義される。

$$R = P_A \times (1 - P_E) \times C \quad (\text{Eq.3.5})$$

R : 核セキュリティにおけるリスク

P_A : 敵対者が攻撃してくる確率

P_E : 核物質防護システムが有効に働き、敵対者を無効化する確率(有効確率)

C : 結果影響の重大性

P_A や C を定量的に評価することは重要ではあるが、敵対者や防護対象者の政治的な情勢などの影響を多分に受けるため、一般的には定量化が困難と言われている⁶¹。また、 P_A や C は、核物質防護システムの技術的な堅牢性との関係は薄い。一方で、 P_E については、核物質防護システムの技術的な堅牢性が多分に影響する指標となっており、**Eq.3.6** の通り定義される。

$$P_E = P_I \times P_N \quad (\text{Eq.3.6})$$

P_E : 核物質防護システムが有効に働き、敵対者を無効化する確率(有効確率)

P_I : 治安部隊が敵対者の作戦行動に介入して阻止可能な確率(阻止確率)

P_N : 治安部隊が敵対者を無力化する確率

P_N は、敵対者と治安部隊の能力が影響する指標であり、核物質防護システムの堅牢性には依存しない。一方で、阻止確率 P_I は、核物質防護システムの堅牢性にのみ依存する指標であり、核物質防護システムを構成する 3 つの機能により定まる。すなわち、センサーな

ど検知機器による検知機能(検知確率)、扉や壁などの物理的障壁による遅延機能(遅延時間)、治安部隊が検知して敵対者へ到達するまでの対応機能である(対応時間)。

よって、本研究では、核物質防護システムの堅牢性を定量評価する指標として、最も脆弱な経路に対する「阻止確率 P_I 」と、 P_I の評価に用いる「累計遅延時間 T_t 」を定義する。

「累計遅延時間 T_t 」を、**Eq.3.7** の通り定義する。敵対者の核物質防護システム内に侵入してから目標を達成するまでの累計時間である。具体的には、敵対者の立入制限区域などの技術障壁内の侵入/撤退の移動に要する遅延時間 T_A 、扉や壁などの遅延機器の突破に要する遅延時間 T_B 、及び目標地点で盗取/妨害破壊行為の完了に要する遅延時間 T_C の累計時間である。

$$T_t = T_A + T_B + T_C \quad (\text{Eq.3.7})$$

T_t : 累計遅延時間(秒) (Total Delay Time)

T_A : 技術障壁内の移動(侵入/撤退)に要する遅延時間 (Delay Time for Area)

T_B : 扉や壁などの遅延機器の突破に要する遅延時間 (Delay Time for Barrier)

T_C : 目標地点で盗取/妨害破壊行為の完了に要する所要時間 (Delay Time for Conduct)

「阻止確率 P_I 」を、**Eq.3.8** の通り定義する。具体的には、治安部隊の到着時間を初めて上回る地点である重要検知点(CDP; Critical Detection Point)を基にして、CDP より前のセンサーなどの検知機器の数と検知確率によって定まるものである。なお、前述の P_N は100%と仮定したため、治安部隊は、目標達成までに敵対者へ到達した場合は、必ず敵対者を無力化可能とする($P_I=100\%$)。

$$P_I = 1 - \prod_{i=1}^m (1 - P_i) \quad (\text{Eq.3.8})$$

P_I : 治安部隊が敵対者の作戦行動に介入して阻止可能な確率(阻止確率)

m : 重要検知地点(CDP; Critical Detection Point)の前にある検知機器の数

P_i : i 番目の検知機器の検知確率

本研究で適用したタイムライン評価手法は、魚雷などの遠隔攻撃手段を除き、脅威者が内部侵入して核物質の盗取や妨害破壊行為を行う脅威全般に対して、原子力システムの堅牢性評価が可能である。つまり、本研究で定義したABWRを搭載するOFNPのみならず、多様な炉型を搭載する洋上・陸上 NPP に対し、適用可能な評価手法である(4.2 節で言及)。

3.4.3.2 評価対象

本研究で提案するとともに、堅牢性評価の対象となる OFNP の核物質防護システム設計の候補について、**Figure 3-25** の通り示す。枢要区域や乗降エレベータ経路管理は、3.4.2 項の VAI 結果に基づき設定する。また、技術障壁に関しては、以下の通り設定する。

- ・ 防護区域

OFNP の二重船殻構造の内側船殻(半径 40 m)、甲板デッキ上の防護ゲートとそこから続く壁の内側を防護区域として設定する。甲板デッキから防護区域内へ至る内部への唯一のアクセスポイントとして防護ゲートを設置し、防護区域への人や物品の入退域管理を行う。

- ・ 立入制限区域、周辺防護区域

OFNP 周囲に物理的障壁である水中ネットを半径 45 m、50 m の 2 点で設置し (OFNP からの離隔距離は 5 m、10 m)、DBT として想定した水中からの魚雷の対策とする。その内側を断立入制限区域、周辺防護区域として設定する。また、水中ネットの喫水面上に船舶ゲートを 1 箇所ずつ設置し、そこで船舶の出入管理を行う。なお、本研究の評価上では、水中ネットやゲートによる船舶の遅延効果をほとんど期待していないが、研究や技術開発によって、十分な遅延効果が明らかになる可能性もあることに注意されたい。

- ・ 周辺監視区域

今までの原子力施設にはない、物理的障壁を設置せず監視に特化した新しい技術障壁として、半径 1 km に周辺監視区域を設定する。洋上特有の監視の容易さを活かし、ソナー・カメラやレンズにより、水中・水上を広範囲に複数方式かつ自動で監視する。監視によって本来予定にない船舶などが OFNP に接近した場合は、治安部隊が予め敵対者を阻止する準備をすることで、対応時間を減らすことが可能である。本研究における評価上は、OFNP へ接近する敵対者(船舶)に対して、半径 500 m の地点で必ず検知し、その時点から治安部隊が対応の準備を始める想定とする。なお、本区域は、OFNP の核セキュリティ上の特徴である 360 度死角なく見渡せる甲板デッキや、洋上特有の検知機器を活かすものである^{8,9}。

また、比較評価の対象とするために、同型の ABWR を搭載する仮想の陸上 NPP について、その核物質防護システム設計を **Figure 3-26** の通り示す。

OFNP 及び仮想の陸上 NPP の陸上核物質防護システムを構成する検知確率・遅延時間などの仕様について、陸上原子力施設の文献値⁶²及び洋上検知機器の文献値^{63,64,65}を参照とし、以下の通り策定している。なお、仮想の陸上 NPP については、OFNP と共通の仕様は記載を割愛しており、仮想の陸上 NPP 固有の仕様は「Ref.」として示す。

- ・ 技術障壁の仕様(Table 3-13)

船舶の移動速度は、法令上の限界速力 22 km/h(12 ノット)を参考とし、周辺監視区域では 2 倍の 44 km/h、立入制限区域及び周辺防護区域では等倍の 22 km/h と仮定する⁶⁶。OFNP 内で敵対者が走る速度は 10 km/h とし、仮想の陸上 NPP でトラックの速度を 60 km/h と仮定する。なお、盗取シナリオにおいては、敵対者は OFNP に侵入後、撤退する必要がある、撤退時は MOX-FF 集合体を持って移動するため、遅延時間は侵入時の 4 倍要すると仮定する(例: 侵入 54 秒、撤退 216 秒)。

周辺監視区域による治安部隊の対応時間の減少効果については、手法の限界上、敵対者の累計遅延時間 T_t から減ずることで評価する。すなわち、周辺監視区域の中間位置で必ず監視が成功し、即座に対応準備を開始するものと仮定する。

- ・ 検知/遅延機器の仕様(Table 3-14)

壁・扉などの名称末尾の数字(例: 扉 4)は、対応する技術障壁などの境界面を表す。「1」は立入制限区域、「2」は周辺防護区域、「3」は防護区域、「4」は管理区域、「5」は枢要区域、「6」は防護区域内の一般的な障壁を示している。

乗降エレベータは、前述の通り、洋上と甲板デッキをつなぐ OFNP への唯一のアクセスポイントである(遅延時間 60 秒)。緊急時には、ラダーを甲板デッキから洋上に落として乗降可能な設計である(遅延時間 600 秒)^{8,9}。乗降エレベータは、警備員詰所で経路管理される場合は、外部脅威者は使用不可となる。

- ・ 盗取/妨害破壊行為の仕様(Table 3-15)

代替中央制御室は、枢要区域として設定される場合は、前述の通り、場所なども含めて秘密情報扱いとなり、妨害破壊不可となる。

最後に、治安部隊の待機方法と対応時間について、GIF/PRPP の既往研究(対応時間 5 分)^{15,16}、Conwayらの既往研究(対応時間30分)⁹をもとに⁹、以下の3ケースを想定する。
 なお、OFNP 内の警備員について、致死性武器を用いた先制攻撃権を有さない国家の規制下を想定しているため、防戦等による遅延効果や、検知効果を期待していない。

- ① OFNP 内で待機 : 対応時間 5 分(300 秒)
- ② 近傍の巡視艇内で待機 : 対応時間 10 分(600 秒)
- ③ 陸上の支援施設で待機 : 対応時間 30 分(1800 秒)

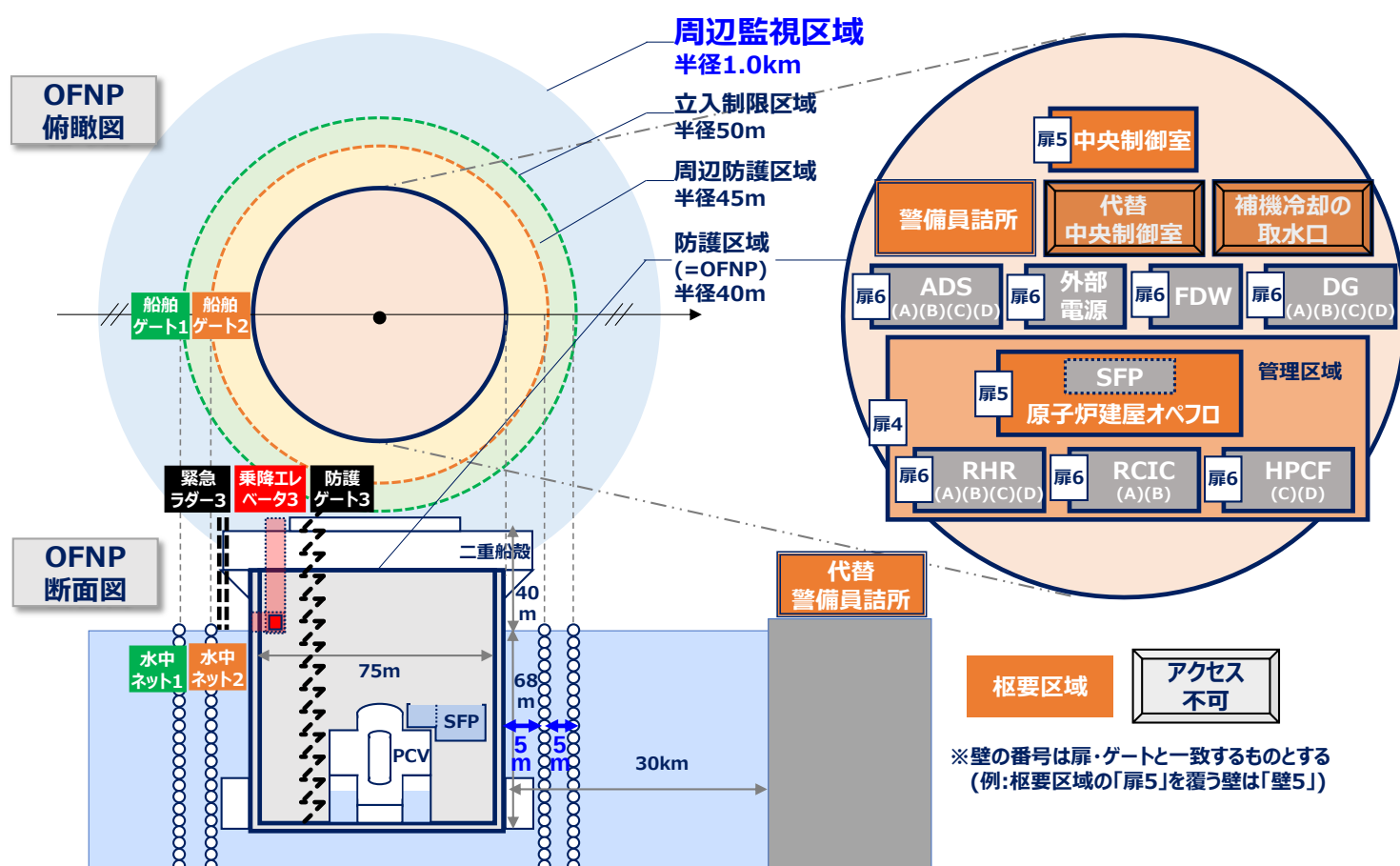


Figure 3-25 OFNP の核物質防護システム候補

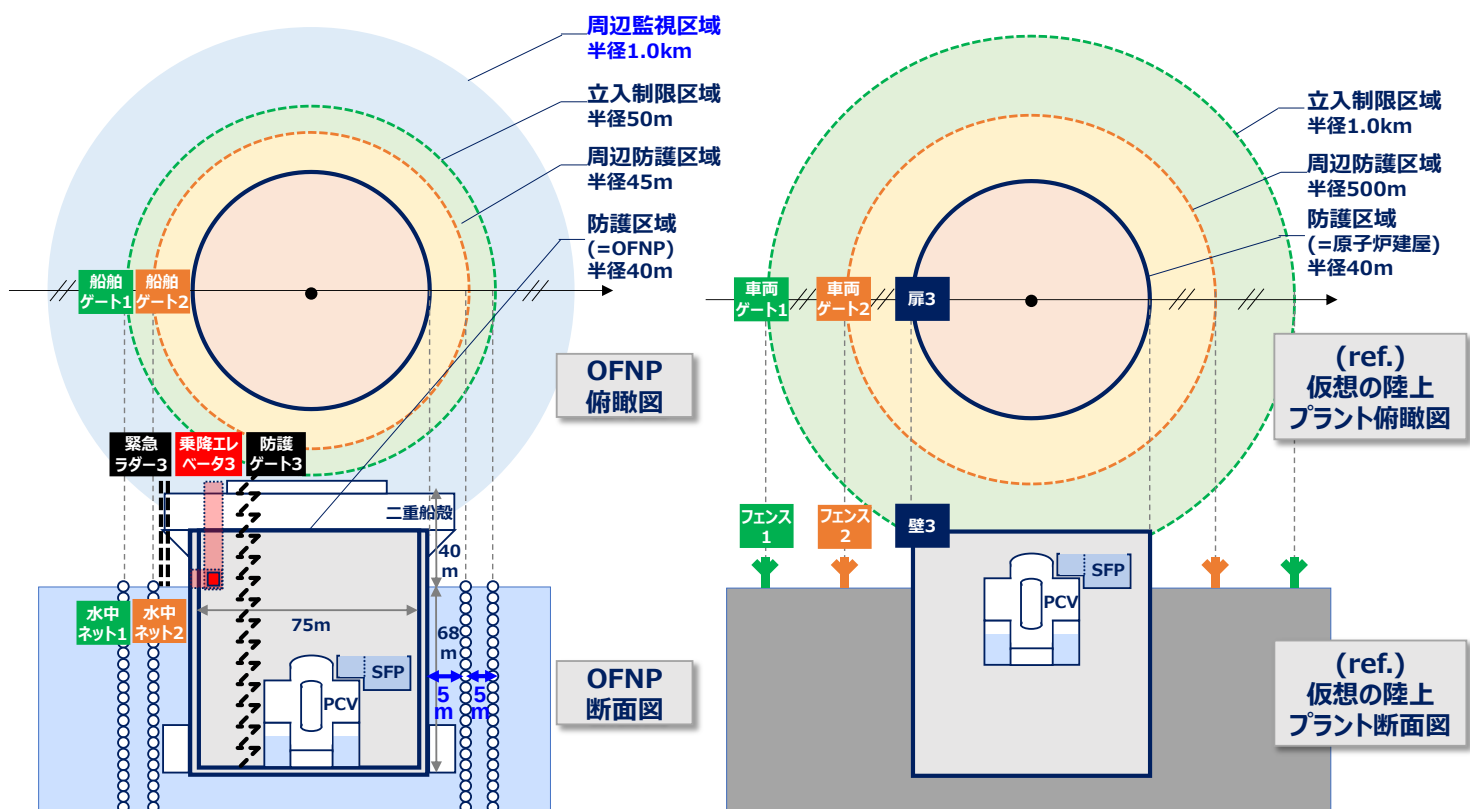


Figure 3-26 OFNP と仮想の陸上プラントの核物質防護システム候補

Table 3-13 技術障壁の遅延時間

区域	移動手段	距離 (m)	遅延時間 T_A (秒)		
			侵入	撤退	対応
周辺監視区域	船舶	950	—	—	-39
立入制限区域	船舶	5	1	1	—
周辺防護区域	船舶	5	1	1	—
防護区域	走り	150	54	216	—
管理区域	走り	100	36	144	—
(ref.) 立入制限区域	トラック	500	30	30	—
(ref.) 周辺防護区域	トラック	460	28	28	—

Table 3-14 検知/遅延機器の検知確率と遅延時間

名称	詳細	センサー	対象	敵対者装備	検知 確率 P	遅延時間 T_B (秒)
レンズ	レンズ：光学	レンズ	水上	船舶	0.5	0
ソナー/カメラ	ソナー：音響、カメラ：光学/赤外線	同左	水上/水中	船舶	0.8	0
船舶ゲート 1	立入制限区域の船舶用ゲート	目視	水上	船舶	0.5	10
水中ネット 1	魚雷ネット	目視	水上/水中	船舶	0.0	6
船舶ゲート 2	立入制限区域の船舶用ゲート	目視	水上	船舶	0.5	10
水中ネット 2	魚雷ネット	目視	水上/水中	船舶	0.0	6
乗降エレベータ 3	OFNP への乗降エレベータ (40 m 高さ)	目視	水上	なし	0.5	60
緊急ラダー 3	OFNP への可搬式梯子 (40 m 高さ)	目視	水上	なし	0.5	600
防護ゲート 3	防護区域の歩行者ゲート	目視	OFNP 内	大ハンマー	0.5	60
防護壁 3	防護区域のコンクリート壁 (15cm 厚さ)	警報	OFNP 内	爆発物 (5kg)	0.5	150
扉 4	管理区域の二重ドア	目視	OFNP 内	なし	0.1	60
壁 4	管理区域のコンクリート壁 (15cm 厚さ)	警報	OFNP 内	爆発物 (5kg)	0.5	150
扉 5	枢要区域の金属製防護ドア (5 cm)	センサー	OFNP 内	爆発物 (2kg)	0.9	60
壁 5	枢要区域のコンクリート壁 (30cm 厚さ)	センサー	OFNP 内	爆発物 (5kg)	0.9	195
扉 6	水密扉	目視	OFNP 内	なし	0.1	30
壁 6	コンクリート壁 (15 cm 厚さ)	警報	OFNP 内	爆発物 (5kg)	0.5	150
(ref.) 車両ゲート 1	立入制限区域の車両ゲート金網	目視	陸上	トラック	0.5	6
(ref.) フェンス 1	立入制限区域の張出付金網 (2.5 m 高さ)	センサー	陸上	はしご	0.8	12
(ref.) 車両ゲート 2	周辺防護区域の車両ゲート金網	目視	陸上	トラック	0.5	6
(ref.) フェンス 2	周辺防護区域の張出付金網 (2.5 m 高さ)	センサー	陸上	はしご	0.8	12
(ref.) 扉 3	防護区域の歩行者ゲート	目視	陸上	大ハンマー	0.5	60
(ref.) 壁 3	防護区域のコンクリート壁 (15cm 厚さ)	警報	陸上	爆発物 (5kg)	0.5	150

Table 3-15 盗取/妨害破壊行為の遅延時間

シナリオ	目標	エリア	盗取		妨害破壊	
			遅延時間 T_c (秒)	詳細	遅延時間 T_c (秒)	詳細
盗取	MOX-FF 盗取	原子炉建屋オペフロ	600	クレーン操作	—	—
妨害破壊	MOX-FF, SF 損傷	原子炉建屋オペフロ	—	—	60	爆発
	中央制御室等占拠	中央制御室/代替中央制御室	—	—	120	爆発+制圧
	安全系統機能喪失	その他	—	—	60	爆発

3.4.3.3 評価結果と考察

枢要区域、乗降エレベータ経路管理、周辺監視区域の有無でケースを分け、本研究で提案した核物質防護策の感度分析を中心として、評価結果と考察を論述する。また、仮想の陸上NPPとの比較評価結果にも触れる。なお、タイムライン評価について、全シナリオの評価結果は、**Appendix F**に示している。

評価結果のケースは、以下の7通りである。

- (a) OFNP：枢要区域、乗降エレベータ経路管理、周辺監視区域の設定無し
- (b) OFNP：枢要区域の設定有り
- (c) OFNP：乗降エレベータ経路管理の設定有り
- (d) OFNP：周辺監視区域の設定有り
- (e) OFNP：枢要区域、乗降エレベータ経路管理、周辺監視区域の設定有り
- (ref.a) 仮想の陸上NPP：枢要区域の設定無し
- (ref.b) 仮想の陸上NPP：枢要区域の設定有り

(1) タイムライン評価結果の例示 (TQUV)

OFNP の核物質防護システム設計の候補に対する、ASD を用いたタイムライン評価結果の一例として、以下の通り、「TQUV」シナリオを例示する。OFNP の各ケース(a)~(e)は、それぞれ、**Figure 3-27**、**Figure 3-28**、**Figure 3-29**、**Figure 3-30**、**Figure 3-31** に示す。また、仮想の陸上 NPP の各ケース(ref.a)~(ref.b)は、それぞれ **Figure 3-32**、**Figure 3-33** に示す。

「ケース(a)(b)」について、枢要区域として補機冷却の取水口を設定することで、共通要因故障を防止し、必要な妨害破壊行為の回数は 3 回から 9 回に増加し、敵対者の目標達成が大幅に遅延した。その結果、累計遅延時間 T_t は 554 秒から 1094 秒へ、約 2 倍に増加した。

「ケース(a)(c)」について、乗降エレベータ経路管理を警備員詰所で行うことで、敵対者が乗降エレベータを使用不可、緊急ラダーを使用することとなり、敵対者の防護区域内への侵入は大幅に遅延した。その結果、累計遅延時間 T_t は 554 秒から 1094 秒へ、約 2 倍に増加した。

「ケース(a)(d)」について、新たな技術障壁として周辺監視区域を設定することで、治安部隊の予備的な対応準備が可能となり、対応時間を 39 秒短縮した。その結果、治安部隊の“①OFNP 内で待機”の想定において、阻止確率 P_t は 94%から 99%へ増加した。

仮想の陸上 NPP と比較すると、「ケース(a)(ref.a)」については、両者枢要区域などを設定しない場合であり、累計遅延時間 T_t は同等であった(OFNP554 秒、陸上 NPP550 秒)。また、「ケース(b)(ref.b)」については、両者枢要区域のみ設定する場合であり、前述の通り、共通要因故障の防止による必要な妨害破壊回数の増加効果は同様のため、累計遅延時間 T_t も同等であった(OFNP1094 秒、陸上 NPP1090 秒)。その一方で、「ケース(e)(ref.b)」については、OFNP では枢要区域だけではなく、乗降エレベータ経路管理と周辺監視区域を設定している。それらの遅延効果と対応時間の短縮効果によって、累計遅延時間 T_t に有意な差が出ており(OFNP 1574 秒、陸上 NPP1090 秒)、阻止確率 P_t にも一部に差が出た(治安部隊の“②巡視艇で待機”の想定；OFNP99%、陸上 NPP92%)。

以上より、TQUV シーケンスにおいて、補機冷却の取水口の枢要区域化、乗降エレベータ経路管理、周辺監視区域の設定によって、OFNP 核物質防護システムの堅牢性が強化されることを明らかにした。また、仮想の陸上 NPP と比較しても、堅牢性が強化されていることを明らかにした。

間接的妨害破壊：TQUV				(a)			
枢要区域：無し							
乗降エレベータ経路管理：無し							
周辺監視区域：無し							
周辺海域							
水中ネット1	T= 6 P= 0.00	船舶ゲート1	T= 10 P= 0.50			累計遅延時間	← ②対応時間(秒) 600 阻止確率 0
立入制限区域				船舶	T= 1	$T_i = 554$	
レンズ	T= 0 P= 0.50	カメラ/ソナー	T= 0 P= 0.80			$T_i = 548$	
水中ネット2	T= 6 P= 0.00	船舶ゲート2	T= 10 P= 0.50			$T_i = 547$	
周辺防護区域				船舶	T= 1	$T_i = 547$	
レンズ	T= 0 P= 0.50	カメラ/ソナー	T= 0 P= 0.80			$T_i = 541$	
乗降エレベータ3	T= 60 P= 0.50	緊急ラダー3	T= 600 P= 0.50			$T_i = 540$	
防護ゲート3	T= 60 P= 0.50	防護扉3	T= 150 P= 0.50			$T_i = 540$	
防護区域				走り	T= 54	$T_i = 480$	
扉6	T= 30 P= 0.1	壁6	T= 150 P= 0.5			$T_i = 420$	
妨害破壊：補機冷却の取水口					T= 60	$T_i = 366$	
扉4	T= 60 P= 0.1	壁4	T= 150 P= 0.5			$T_i = 336$	← ①対応時間(秒) 300 阻止確率 P_I (%) 94
管理区域				走り	T= 36	$T_i = 276$	
扉6	T= 30 P= 0.1	壁6	T= 150 P= 0.5			$T_i = 216$	
妨害破壊：RCIC(A)					T= 60	$T_i = 180$	
扉6	T= 30 P= 0.1	壁6	T= 150 P= 0.5			$T_i = 150$	
妨害破壊：RCIC(B)					T= 60	$T_i = 90$	
						$T_i = 60$	

Figure 3-27 タイムライン評価結果: TQUV (a) OFNP-枢要区域など無し

間接的妨害破壊：TQUV				(b)	累計遅延時間	← ③対応時間(秒) 阻止確率	1800 0
枢要区域：補機冷却の取水口							
乗降エレベータ経路管理：無し							
周辺監視区域：無し							
	周辺海域						
水中ネット1	$T=6$ $P=0.00$	船舶ゲート1	$T=10$ $P=0.50$		$T_t=1094$		
立入制限区域			船舶	$T=1$	$T_t=1088$		
レンズ	$T=0$ $P=0.50$	カメラ/ソナー	$T=0$ $P=0.80$		$T_t=1087$		
水中ネット2	$T=6$ $P=0.00$	船舶ゲート2	$T=10$ $P=0.50$		$T_t=1087$		
周辺防護区域			船舶	$T=1$	$T_t=1081$		
レンズ	$T=0$ $P=0.50$	カメラ/ソナー	$T=0$ $P=0.80$		$T_t=1080$		
乗降エレベータ3	$T=60$ $P=0.50$	緊急ラダー3	$T=600$ $P=0.50$		$T_t=1080$		
防護ゲート3	$T=60$ $P=0.50$	防護扉3	$T=150$ $P=0.50$		$T_t=1020$		
防護区域			走り	$T=54$	$T_t=960$		
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$		$T_t=906$		
妨害破壊：常用給水				$T=60$	$T_t=876$		
扉4	$T=60$ $P=0.1$	壁4	$T=150$ $P=0.5$		$T_t=816$		
管理区域			走り	$T=36$	$T_t=756$		
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$		$T_t=720$		
妨害破壊：RCIC(A)				$T=60$	$T_t=690$		
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$		$T_t=630$		
妨害破壊：RCIC(B)				$T=60$	$T_t=600$	← ②対応時間(秒) 阻止確率 $P_I(\%)$	600 96
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$		$T_t=540$		
妨害破壊：HPCF(C)				$T=60$	$T_t=510$		
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$		$T_t=450$		
妨害破壊：HPCF(D)				$T=60$	$T_t=420$		
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$		$T_t=360$		
妨害破壊：RHR(A)				$T=60$	$T_t=330$	← ①対応時間(秒) 阻止確率 $P_I(\%)$	300 97
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$		$T_t=270$		
妨害破壊：RHR(B)				$T=60$	$T_t=240$		
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$		$T_t=180$		
妨害破壊：RHR(C)				$T=60$	$T_t=150$		
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$		$T_t=90$		
妨害破壊：RHR(D)				$T=60$	$T_t=60$		

Figure 3-28 タイムライン評価結果: TQUV (b)OFNP-枢要区域有り

間接的妨害破壊：TQUV				(d)			
枢要区域：無し							
乗降エレベータ経路管理：無し							
周辺監視区域：周辺監視区域							
周辺海域							
水中ネット1	$T=6$ $P=0.00$	船舶ゲート1	$T=10$ $P=0.50$			累計遅延時間	← ②対応時間(秒) 561 阻止確率 0
立入制限区域				船舶	$T=1$	$T_t=554$	
レンズ	$T=0$ $P=0.50$	カメラ/ソナー	$T=0$ $P=0.80$			$T_t=548$	
水中ネット2	$T=6$ $P=0.00$	船舶ゲート2	$T=10$ $P=0.50$			$T_t=547$	
周辺防護区域				船舶	$T=1$	$T_t=547$	
レンズ	$T=0$ $P=0.50$	カメラ/ソナー	$T=0$ $P=0.80$			$T_t=541$	
乗降エレベータ3	$T=60$ $P=0.50$	緊急ラダー3	$T=600$ $P=0.50$			$T_t=540$	
防護ゲート3	$T=60$ $P=0.50$	防護扉3	$T=150$ $P=0.50$			$T_t=540$	
防護区域				走り	$T=54$	$T_t=480$	
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$			$T_t=420$	
妨害破壊：補機冷却の取水口						$T_t=366$	
扉4	$T=60$ $P=0.1$	壁4	$T=150$ $P=0.5$			$T_t=336$	
管理区域				走り	$T=36$	← ①対応時間(秒) 261 阻止確率 $P_T(\%)$ 99	
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$			$T_t=276$	
妨害破壊：RCIC(A)						$T_t=216$	
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$			$T_t=180$	
妨害破壊：RCIC(B)						$T_t=150$	
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$			$T_t=90$	
妨害破壊：RCIC(B)						$T_t=60$	周辺監視区域による到着短縮(秒) 39

Figure 3-30 タイムライン評価結果: TQUV (d) OFNP-周辺監視区域有り

間接的妨害破壊：TQUV				(e)		
枢要区域：補機冷却の取水口						
乗降エレベータ経路管理：警備員詰所						
周辺監視区域：周辺監視区域						
周辺海域				累計遅延時間	← ③対応時間(秒)	1761
水中ネット1	$T=6$ $P=0.00$	船舶ゲート1	$T=10$ $P=0.50$	$T_t=1574$	阻止確率	0
立入制限区域			船舶	$T=1$	$T_t=1568$	
レンズ	$T=0$ $P=0.50$	カメラ/ソナー	$T=0$ $P=0.80$	$T_t=1567$		
水中ネット2	$T=6$ $P=0.00$	船舶ゲート2	$T=10$ $P=0.50$	$T_t=1567$		
周辺防護区域			船舶	$T=1$	$T_t=1561$	
レンズ	$T=0$ $P=0.50$	カメラ/ソナー	$T=0$ $P=0.80$	$T_t=1560$		
乗降エレベータ	$T=60$ $P=0.50$	緊急ラダー3	$T=600$ $P=0.50$	$T_t=1560$		
防護ゲート3	$T=60$ $P=0.50$	防護扉3	$T=150$ $P=0.50$	$T_t=1110$		
防護区域			走り	$T=54$	$T_t=960$	
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$	$T_t=906$		
妨害破壊：常用給水			$T=60$	$T_t=876$		
扉4	$T=60$ $P=0.1$	壁4	$T=150$ $P=0.5$	$T_t=816$		
管理区域			走り	$T=36$	$T_t=756$	
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$	$T_t=720$		
妨害破壊：RCIC(A)			$T=60$	$T_t=690$		
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$	$T_t=630$		
妨害破壊：RCIC(B)			$T=60$	$T_t=600$	← ②対応時間(秒)	561
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$	$T_t=540$	阻止確率 $P_I(\%)$	99
妨害破壊：HPCF(C)			$T=60$	$T_t=510$		
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$	$T_t=450$		
妨害破壊：HPCF(D)			$T=60$	$T_t=420$		
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$	$T_t=360$		
妨害破壊：RHR(A)			$T=60$	$T_t=330$		
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$	$T_t=270$	← ①対応時間(秒)	261
妨害破壊：RHR(B)			$T=60$	$T_t=240$	阻止確率 $P_I(\%)$	100
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$	$T_t=180$		
妨害破壊：RHR(C)			$T=60$	$T_t=150$		
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$	$T_t=90$		
妨害破壊：RHR(D)			$T=60$	$T_t=60$	周辺監視区域による到着短縮(秒)	39

Figure 3-31 タイムライン評価結果: TQUV (e)OFNP-枢要区域など有り

間接的妨害破壊：TQUV				(ref.a)		← ③対応時間(秒) 1800	
枢要区域：無し						← ②対応時間(秒) 600	
周辺地域				累計遅延時間		阻止確率PI(%) 0	
車両ゲート1	T= 6 P= 0.50	フェンス1	T= 12 P= 0.80	T _t = 550			
立入制限区域				トラック T= 30		T _t = 544	
車両ゲート2	T= 6 P= 0.50	フェンス2	T= 12 P= 0.80	T _t = 514			
周辺防護区域				トラック T= 28		T _t = 508	
扉3	T= 60 P= 0.50	壁3	T= 150 P= 0.50	T _t = 480			
防護区域				走り T= 54		T _t = 420	
扉6	T= 30 P= 0.1	壁6	T= 150 P= 0.5	T _t = 366			
妨害破壊：補機冷却の取水口				T= 60		← ①対応時間(秒) 300	
扉4	T= 60 P= 0.1	壁4	T= 150 P= 0.5	T _t = 276		阻止確率P _I (%) 89	
管理区域				走り T= 36		T _t = 216	
扉6	T= 30 P= 0.1	壁6	T= 150 P= 0.5	T _t = 180			
妨害破壊：RCIC(A)				T= 60		T _t = 150	
扉6	T= 30 P= 0.1	壁6	T= 150 P= 0.5	T _t = 90			
妨害破壊：RCIC(B)				T= 60		T _t = 60	

Figure 3-32 タイムライン評価結果: TQUV (ref.a)陸上 NPP-枢要区域無し

間接的妨害破壊 : TQUV				(ref.b)	
枢要区域 : 補機冷却の取水口					
	周辺地域			累計遅延時間	←③対応時間(秒) 1800 阻止確率 P_I (%) 0
車両ゲート1	$T=6$ $P=0.50$	フェンス1	$T=12$ $P=0.80$	$T_t=1090$	
	立入制限区域			トラック	$T=30$
車両ゲート2	$T=6$ $P=0.50$	フェンス2	$T=12$ $P=0.80$	$T_t=1084$	
	周辺防護区域			トラック	$T=28$
扉3	$T=60$ $P=0.50$	壁3	$T=150$ $P=0.50$	$T_t=1054$	
	防護区域			走り	$T=54$
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$	$T_t=1048$	
	妨害破壊 : 常用給水			$T=60$	$T_t=1020$
扉4	$T=60$ $P=0.1$	壁4	$T=150$ $P=0.5$	$T_t=960$	
	管理区域			走り	$T=36$
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$	$T_t=906$	
	妨害破壊 : RCIC(A)			$T=60$	$T_t=876$
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$	$T_t=816$	
	妨害破壊 : RCIC(B)			$T=60$	$T_t=756$
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$	$T_t=720$	
	妨害破壊 : HPCF(C)			$T=60$	$T_t=690$
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$	$T_t=630$	
	妨害破壊 : HPCF(D)			$T=60$	$T_t=600$
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$	$T_t=540$	← ②対応時間(秒) 600 阻止確率 P_I (%) 92
	妨害破壊 : RHR(A)			$T=60$	$T_t=510$
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$	$T_t=450$	
	妨害破壊 : RHR(B)			$T=60$	$T_t=420$
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$	$T_t=360$	
	妨害破壊 : RHR(C)			$T=60$	$T_t=330$
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$	$T_t=270$	← ①対応時間(秒) 300 阻止確率 P_I (%) 94
	妨害破壊 : RHR(D)			$T=60$	$T_t=240$
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$	$T_t=180$	
	妨害破壊 : RHR(C)			$T=60$	$T_t=150$
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$	$T_t=90$	
	妨害破壊 : RHR(D)			$T=60$	$T_t=60$

Figure 3-33 タイムライン評価結果: TQUV (ref.b)陸上 NPP-枢要区域有り

(2) 総合的な評価結果

OFNP の核物質防護システム設計の候補に対する、ASD を用いたタイムライン評価の総合結果について、**Figure 3-34** に示す。なお、盗取シナリオは参考結果とし、以下の議論からは除外している。前述の通り、船舶移乗脅威では、目標達成まで往復で時間を要する盗取に対して、往路のみで目標達成する妨害破壊行為の方が評価上厳しくなり、また、盗取シナリオは同一の対象物を目指す直接的妨害破壊行為の評価結果に包絡されるためである。

各ケースの評価結果を以下の通り示す。具体的には、本研究で提案した核物質防護策の感度分析結果を中心に論述する。つまり、ケース(a)との比較結果が主な観点である。なお、最も厳しいシナリオは「A.直接的妨害破壊」であり、その結果は各冒頭で言及する。

(a) OFNP：枢要区域、乗降エレベータ経路管理、周辺監視区域の設定無し

「A.直接的妨害破壊」シナリオでは、累計遅延時間 T_t は 374 秒となった。阻止確率 P_f は、治安部隊の“①OFNP 内で待機”の想定で 88%、“②巡視艇で待機”と“③陸上施設で待機”の想定では 0% 近くとなった。

治安部隊の“①OFNP 内で待機”の想定では、阻止確率 P_f は、全てのシナリオで高い結果となった(88~96%)。治安部隊の“②巡視艇で待機”と“③陸上施設で待機”の想定では、阻止確率 P_f は、「B-2.TQUX」を除き(95%)、全てのシナリオで極めて低い結果となった(0%近く)。

仮定の陸上 NPP と比較すると、枢要区域等の設定ケース(ref.a)については、累計遅延時間 T_t 及び阻止確率 P_f に顕著な差異は見られなかった。

(b) OFNP：枢要区域の設定有り

「A.直接的妨害破壊」シナリオでは、ケース(a)と比較すると、累計遅延時間 T_t は 374 秒から 404 秒へ増加した。これは、原子炉建屋オペフロが枢要区域となり、強化された壁や扉によって遅延時間が 30 秒増加したためである。その一方で、阻止確率 P_f には効果が無かった。

「B-1.TQUV」シナリオでは、ケース(a)と比較すると、累計遅延時間 T_t は 554 秒から 1094 秒へ約 2 倍にも及び大幅に増加した。これは、補機冷却の取水口が枢要区域となり、共通要因故障を防止し、必要な妨害破壊行為の回数が 3 回から 9 回に増加し、敵対者の目標達成が大幅に遅延したためである。それに伴って、阻止確率 P_f は、治安部隊の“②巡視艇で待機”の想定において、0%近くから 96%へ極めて大きく増加した。

「B-2.TQUX」と「B-3.TBU」シナリオでは、ケース(a)と比べると、累計遅延時間 T_t や阻止確率 P_f は増加しているが、「B-1.TQUV」シナリオほど顕著な差異は見られなかった。これは、補機冷却の取水口が枢要区域となり、共通要因故障を防止したが、必要な妨害破壊行為の回数に対する影響は、「B-1.TQUV」シナリオが一番大きかったためである。

「C.中央制御室等占拠」シナリオでは、代替中央制御室が枢要区域となり、場所なども含めて秘密情報扱いとなり、敵対者による妨害破壊不可となる。そのため、そもそもシナリオが成立せず、治安部隊の“①②③”全ての想定において、阻止確率 P_f は 100%となった。

仮想の陸上 NPP と比較すると、枢要区域のみ設定するケース(ref.b)については、累計遅延時間 T_t 及び阻止確率 P_f に顕著な差異は見られなかった。

(c) OFNP：乗降エレベータ経路管理の設定有り

「A.直接的妨害破壊」シナリオでは、ケース(a)と比較すると、累計遅延時間 T_t は 374 秒から 914 秒へ約 2.5 倍にも及び大幅に増加した。これは、乗降エレベータ経路管理を警備員詰所で行うことで、敵対者は乗降エレベータが使用不可となり、OFNP 侵入に緊急ラダーの使用が必須となることで、敵対者の防護区域内への侵入は大幅に遅延したためである。それに伴って、阻止確率 P_l は、治安部隊の“②巡視艇で待機”の想定において、0%近くから 75%へ極めて大きく増加した。

すべてのシナリオで、累計遅延時間 T_t は 540 秒と大幅に増加した。これは、上述の通り、洋上と甲板デッキをつなぐ OFNP への唯一のアクセスポイントである乗降エレベータを経路管理した便益である。その結果として、「B-1.TQUV」「B-2.TQUX」「B-3.TBU」「C.中央制御室等占拠」のシナリオにおいて、累計遅延時間 T_t は約 1.5~2 倍にも及び大幅に増加した。それに伴って、「B-1.TQUV」「C.中央制御室等占拠」シナリオにおいて、阻止確率 P_l は、治安部隊の“②巡視艇で待機”の想定において、0%近くから 75%へ極めて大きく増加した。

(d) OFNP：周辺監視区域の設定有り

「A.直接的妨害破壊」シナリオでは、ケース(a)と比較すると、累計遅延時間 T_t は 374 秒から変化しなかった。一方で、阻止確率 P_l は、治安部隊の“①OFNP 内で待機”の想定において、88%から 98%へ増加した。これは、周辺監視区域を新たな技術障壁として設定することで、治安部隊の予備的な対応準備が可能となり、対応時間を 39 秒短縮したためである。

すべてのシナリオで、累計遅延時間 T_t が変化しなかった。一方で、阻止確率 P_l は全てのシナリオで増加しており、特に「B-3.TBU」シナリオでは、治安部隊の“②巡視艇で待機”の想定において、75%から 98%へ大幅に増加した。これは、上述の通り、新たに設定した周辺監視区域は、遅延効果はないが、治安部隊の対応時間を短縮するためである。

(e) OFNP：枢要区域、乗降エレベータ経路管理、周辺監視区域の設定有り

「A.直接的妨害破壊」シナリオでは、ケース(a)と比較すると、累計遅延時間 T_t は 374 秒から 944 秒へ約 2.5 倍にも及び大幅に増加した。また、阻止確率 P_f は、治安部隊の“②巡視艇で待機”の想定において、0%近くから 96%へ極めて大きく増加した。これは、上述の感度分析で示す通り、乗降エレベータ経路管理と周辺監視区域の設定が大きく貢献したためである。その一方で、枢要区域として設定した原子炉建屋オペフロは、阻止確率 P_f に対する効果は無かった。

「B-1.TQUV」「B-2.TQUX」「B-3.TBU」シナリオでは、ケース(a)と比較すると、それぞれの累計遅延時間 T_t は、554 秒から 1574 秒、914 秒から 1634 秒、644 秒から 1394 秒と約 1.8 倍~3 倍にも及び大幅に増加した。また、阻止確率 P_f は、治安部隊の“②巡視艇で待機”の想定において、98%以上と極めて高い結果となっている。特に、「B-1.TQUV」シナリオでは、0%近くから 99%へ極めて大きく増加した。これは、上述の感度分析で示す通り、補機冷却の取水口の枢要区域化、乗降エレベータ経路管理、周辺監視区域の設定が大きく貢献したためである。

「C.中央制御室等占拠」シナリオでは、上述の通り、代替中央制御室の枢要区域化によって、場所なども含めて秘密情報扱いとなり、敵対者による妨害破壊不可となるため。そのため、治安部隊の“①②③”全ての想定において、阻止確率 P_f が 100%となった。

仮定の陸上 NPP と比較すると、枢要区域のみ設定するケース(ref.b)については、「C.中央制御室等占拠」シナリオでは差異が出なかったものの、その他のシナリオでは顕著な差異が見られた。「A.直接的妨害破壊」シナリオでは、累計遅延時間 T_t は、400 秒から 944 秒へと約 2.4 倍にも及び大幅に増加した。また、阻止確率 P_f は治安部隊の“②巡視艇で待機”の想定において、0%近くから 96%へ極めて大きく増加した。

「B-1.TQUV」「B-2.TQUX」「B-3.TBU」シナリオでは、累計遅延時間 T_t は、910 秒~1090 秒から 1394 秒~1634 秒へと約 1.5 倍にも及び大幅に増加した。また、阻止確率 P_f は、治安部隊の“②巡視艇で待機”の想定において 90~92%から 99%以上へと増加した。これは、上述の感度分析で示す通り、OFNP 特有となる乗降エレベータ経路管理と周辺監視区域の設定が大きく貢献したためである。

全てのシナリオにおいて、治安部隊の“①OFNP 内で待機(対応時間 300 秒)”、または“②巡視艇で待機(対応時間 600 秒)”の想定では、阻止確率 P_I は 96%以上と極めて高い結果となった。一方で、“③陸上施設で待機(対応時間 1800 秒)”の想定では、阻止確率 P_I は 0%となった。これは、警備要員が致死性武器を用いた先制攻撃権を持つ特殊な前提下で、治安部隊の対応時間 30 分を見込んでも高い阻止確率 P_I を示していた既往研究^{9,10}とは、全く異なる結果である。

以上より、OFNP の核物質防護システムの堅牢性の評価結果として、補機冷却の取水口と代替中央制御室の枢要区域化、乗降エレベータ経路管理、周辺監視区域の設定によって、OFNP 核物質防護システムの堅牢性が強化されることを明らかにした。また、仮想の陸上NPPと比較しても、堅牢性が強化されていることを明らかにした。一方で、直接的妨害破壊に対する原子炉建屋オペフロの枢要区域化については、検討の余地があることを言及した。最後に、治安部隊については、既往研究の対応時間 30 分想定とは異なり、OFNP 内で待機または巡視艇で待機といった即応体制構築が必要であることを指摘した。

シナリオ		盗取 (参考)			A.直接的妨害 破壊			B-1.間接的妨害 破壊 TQUV			B-2.間接的妨害 破壊 TQUX			B-3.間接的妨害 破壊 TBU			C.中央制御室 等占拠		
治安部隊の対応時間 (秒)		①	②	③	①	②	③	①	②	③	①	②	③	①	②	③	①	②	③
(a)	枢要区域等	無し																	
累計遅延時間 Tt (秒)		1,335			374			554			914			644			488		
阻止確率 P_I (%)		95	95	0	88	0	0	94	0	0	96	95	0	95	75	0	94	0	0
(b)	枢要区域	原子炉建屋オペフロ						補機冷却の取水口									代替中央制御室		
累計遅延時間 Tt (秒)		1,365			404			1,094			1,094			914			—		
阻止確率 P_I (%)		99	99	0	88	0	0	97	96	0	97	96	0	96	95	0	— (100)		
(c)	乗降エレベータ	警備員詰所																	
累計遅延時間 Tt (秒)		2,415			914			1,094			1,454			1,184			1,028		
阻止確率 P_I (%)		95	95	88	88	75	0	94	75	0	96	95	0	95	75	0	94	75	0
(d)	周辺監視区域	周辺監視区域																	
累計遅延時間 Tt (秒)		1,335			374			554			914			584			488		
阻止確率 P_I (%)		99	99	0	98	0	0	99	0	0	99	99	0	99	98	0	99	0	0
(e)	枢要区域	原子炉建屋オペフロ						補機冷却の取水口									代替中央制御室		
	乗降エレベータ	警備員詰所																	
	周辺監視区域	周辺監視区域																	
累計遅延時間 Tt (秒)		2,445			944			1,574			1,634			1,394			—		
阻止確率 P_I (%)		100	100	99	99	96	0	100	99	0	100	99	0	99	99	0	— (100)		
(ref.a)	枢要区域等	無し																	
累計遅延時間 Tt (秒)		1,327			370			550			910			640			484		
阻止確率 P_I (%)		90	90	0	75	0	0	89	0	0	93	90	0	90	50	0	88	0	0
(ref.b)	枢要区域	原子炉建屋オペフロ						補機冷却の取水口									代替中央制御室		
累計遅延時間 Tt (秒)		1,357			400			1,090			1,090			910			—		
阻止確率 P_I (%)		99	99	0	75	0	0	94	92	0	94	92	0	93	90	0	— (100)		
治安部隊の待機方法		①OFNP内で待機			②巡視艇で待機			③陸上施設で待機											
対応時間(秒)		300			600			1800											
阻止確率 P_I (%)		0~40			40~70			70~90			90~100								

Figure 3-34 OFNP 核物質防護システムの堅牢性に関する総合的な評価結果

(3) 考察

- ・ 枢要区域：原子炉建屋オペフロ

本研究において、MOX-FF と SF への直接的妨害破壊は、船舶移乗脅威における最も脆弱なシナリオと評価された。また、MOX-FF と SF は、盗取と直接的妨害破壊の主要なターゲットである。それらが一括して貯蔵してある SFP や、SFP が設置されている原子炉建屋オペフロを防護することで、大幅に堅牢性を強化可能である。

一方で、燃料交換時には、原子炉建屋オペフロ内に常設してある燃料取替機によって、原子炉内から SFP へ SF を移送させる必要がある。本研究では、SFP 自体を枢要区域化して障壁で囲うといった防護策は現実的でないと考え、より広範囲の原子炉建屋オペフロを枢要区域候補として設定した。同想定の中では、枢要区域化された原子炉建屋オペフロの扉や壁は遅延効果が強化されていたものの、評価結果としては、阻止確率 P_T への貢献は少なかった。

そこで、本研究では、新たに 2 点の防護策を提案する。

1 点目として、「防爆ネット」を SFP のプール開口部に敷設する。これは、直接的妨害破壊の手段である爆発物に対して、同妨害破壊行為のリスク自体を排除する。

2 点目として、SFP を原子炉建屋オペフロの外に分離し、区画された「SFP 室」内に SFP を設置し、当該の SFP 室を枢要区域として選定する。SFP 室の分離と区画については、現行の BWR プラントでは実装されていないが、PWR などでは既に実装されている設計である。なお、COCON の既往研究においても、同様に、原子炉と燃料プールの間に隔壁を設け、事故への耐性を高めることは原子力安全上有用と指摘がされている⁶⁷。

よって、本研究では、SFP を原子炉建屋オペフロ外に区画された SFP 室内に設置し、SFP 室を枢要区域として選定し、SFP のプール開口部に防爆ネットを敷設する設計とする。これによって、爆発物による SFP 内の MOX-FF や SF への直接的妨害破壊のリスクを排除するとともに、核セキュリティ性・原子力安全性のシナジー効果が期待される。

- ・ 枢要区域：補機冷却の取水口

評価結果として、間接的妨害破壊における共通要因故障の防止によって、堅牢性が大幅に強化されることが明らかになった。よって、本研究では、「補機冷却の取水口」を枢要区域に選定する。

OFNP 設計時の留意点としては、OFNP 外からの魚雷脅威や OFNP 内からの爆発物などを想定し、補機冷却の取水口を区分分離し、空間的・物理的離隔を施すことが挙げられる。また、敵対者が同エリアにアクセス不可能な設計し、鍵などのアクセス管理を行う。

原子力安全性の観点では、仮に補機冷却を喪失した場合、炉心冷却に必要な電動駆動の安全系統や非常用ディーゼル発電機のフロントライン系が健全でも、それらが冷却できず使用不可となる。そのため、補機冷却の多重性・多様性・独立性を図ることは重要であり、1F 事故の教訓の一つでもある。本設計によって、核セキュリティ性・原子力安全性のシナジー効果が期待される。一方で、仮に補機冷却が喪失した場合でも、既設の蒸気駆動の安全系統(RCIC など)に加えて、OFNP 特有である周囲の海水を利用した静的な SA 安全系統も有効な手段となるであろう。本評価では DB 安全系統に限り、SA 安全系統は評価上期待していなかったが、SA 安全系統を設計する上では、原子力安全性と核セキュリティ性の両観点で設計することが重要である。

- ・ 枢要区域：代替中央制御室

評価結果として、代替中央制御室等占拠に対し、代替中央制御室の場所などを秘密情報とすることで、占拠自体が達成不可となり、堅牢性が大幅に強化されることが明らかになった。よって、本研究では、「代替中央制御室」を枢要区域として選定する。

OFNP 設計時の留意点としては、設計段階より秘密情報として厳格に情報管理し、信頼性確認プログラムで内部脅威者を排除することが挙げられる。また、非常時には代替中央制御室における操作によって^{58,59}、中央制御室からプラント制御権を完全移行し、中央制御室が占拠されたとしても、単独でプラントを冷温停止まで制御可能な設計とする。

第 4 章の考察で後述する通り、「特定重大事故等対処施設」について、陸上の NPP では地下などに追加設置するケースもある。そこで、核セキュリティ性・原子力安全性の強化だけではなく、経済性とも調和したシステム設計を施すことが重要である。代替中央制御室によるプラント制御機能に加えて、原子炉建屋の航空機衝突耐性やその他テロ耐性などの要件を満足させることで設計の合理化が期待される。

- ・ 乗降エレベータ経路管理：警備員詰所

評価結果として、敵対者が乗降エレベータ^{8,44}を使用不可能な設計とすることで、堅牢性が大幅に強化されることが明らかになった。よって、本研究では、「乗降エレベータの経路管理」を警備員詰所で行う設計とする。

OFNP 設計時の留意点としては、乗降エレベータは「警備員詰所でのみ操作可能な設計」とすることが挙げられる。また、OFNP 内の防護区域内部に警備員詰所を設置し、外部脅威者はアクセス不可な設計とする。さらに、内部脅威者対策として、2 人ルールが機械的に必須となる設計とする。なお、代替警備員詰所は地上の OFNP 支援施設内に枢要区域として設置し、船舶による資材等の輸出入も管理する設計とする。

本研究の評価上では、防護区域に侵入してから先の移動距離に応じた遅延時間は考慮していない。一方で、本来、甲板デッキ上に位置する防護ゲート(喫水面から上部 40 m)から、安全上重要な機器(喫水面から下部)まで到達するためには、防護区域内で少なくとも 40 m の上下移動が必要となる。そのため、大幅なアクセス遅延が期待可能である。すなわち、OFNP 縦長構造(高さ 100 m 超)によって^{8,44}、外部侵入には水平移動のみならず垂直移動が多分に要求される。よって、垂直移動の遅延効果は、乗降エレベータだけではなく、防護区域内の防護措置でも期待される。

- ・ 技術障壁：周辺監視区域

評価結果として、周辺監視区域を新たに設定し、監視によって本来予定にない不審船が OFNP に接近した場合は、治安部隊が準備を進めることで、到着時間を大幅に短縮し、堅牢性が大幅に強化されることが明らかになった。周辺監視区域は、洋上特有の監視の容易さを利用し、OFNP の半径 1 km にもわたる広範囲を監視するための区域である。よって、本研究では、技術障壁として「周辺監視区域」を含めた設計とする。

OFNP 設計時の留意点としては、各機器を個別システムではなく統合的システムとして機能するように、運用面も含めて設計することが挙げられる。カメラやソナーといった洋上の監視機器は、冗長性に富んだ監視方法(音響・光学・赤外線)や、敵対者の高度な自動判定機能といった高度な技術開発が行われている^{63,64,65}。一方で、本研究では、誤検知の影響を考慮していない。実運用にあたっては、検知機器単体の検知感度を高めたことで誤警報が多発し、現場確認のため警備要員のリソースが割かれ、核物質防護システム全体の堅牢性を損ねるおそれがある⁶⁸。各機器を個別システムではなく、統合的システムとすることで、誤検知と検知感度の高度な調和を目指すことが重要である。

- ・ 治安部隊

評価結果として、治安部隊は対応時間 10 分以内を目途として、OFNP 内で待機または巡視艇で待機しておく必要性が明らかになった。よって、本研究では、「治安部隊の即応体制」の構築を含めた設計とする。

3.5 Security by design による堅牢な核物質防護システムの設計

今までの研究結果を踏まえ、本研究は提示する Security by design による堅牢な OFNP 核物質防護システム設計を以下に示す²。Figure 3-35 は、概念図を示す。Table 3-16 は、設計仕様を示す。Table 3-17 は、構成する検知・遅延機器の仕様を示す。なお、日本における実用炉の核セキュリティに関する規制要求は Appendix G を参照されたい。

1. OFNP の周囲 5 m へ水中ネット設置

OFNP 特有の周囲の水の防護を活用し、水中ネットを OFNP の周囲 5 m 及び 10 m に二重で設置することで、遠隔攻撃手段である短魚雷に対して耐性を持たせる。水中ネットは、周辺防護区域・立入制限区域の境界とし、それぞれに船舶ゲートを 1 箇所ずつ設置して船舶の入退場検査を行う関所とする。短魚雷が OFNP に向けて発射された場合、水中ネットに接触することで OFNP 衝突前に早期爆発する。成形炸薬によって生成される超高速ジェットは、OFNP 周囲の水によって減速してその貫通力を失い、OFNP 船殻(二重船殻構造の外殻)の健全性は維持されるであろう¹。

2. 補機冷却の取水口の枢要区域化

補機冷却の取水口を枢要区域とし、区分分離したうえで空間的・物理的隔離を施す。また、敵対者がアクセス不可能にレイアウト設計し、鍵などによるアクセス管理も行う。上述の防護策によって、補機冷却の取水口が妨害破壊不可となり、補機冷却を要するフロントライン系の共通要因故障が防止され、敵対者の目標達成を大幅に遅延させる。

3. 代替中央制御室の枢要区域化

代替中央制御室を枢要区域とし、同エリアの場所などを秘密情報として厳格に情報管理し、信頼性確認プログラムで内部脅威者による情報流出を防ぐことで、代替中央制御室への敵対者のアクセスを防止する。また、代替中央制御室の操作によって^{58,59}、中央制御室からプラント制御権を完全に移行し、単独でプラントを冷温停止まで制御可能な設計とする。上述の防護策によって、中央制御室が占拠され、非安全側のプラント操作によって間接的妨害破壊が企てられた場合でも、代替中央制御室に待避した運転員によって占拠された中央制御室のプラント制御権を奪い、間接的妨害破壊を抑止する。

4. SFP 室の分離・枢要区域化

核セキュリティ上重要なターゲットである MOX-FF と SF が一括貯蔵してある SFP について、SFP が内部に含まれていた原子炉建屋オペフロから分離し、新たな SFP 室内部に SFP を設置する。また、SFP 室を枢要区域とし、SFP 開口部に防爆ネットを設置することで、SFP 内の MOX-FF や SF に対する爆発物などを用いた直接的妨害破壊を抑止す

る。また、SFP 室を強化された壁と扉で区画し、SFP へのアクセスを遅延させる。なお、SFP の躯体は十分な厚みがあり、爆発物によって破壊されない構造を想定している。

5. 警備員詰所による乗降エレベータ・防護ゲートなどの経路管理

OFNP 特有の縦長構造^{8,44}により、外部脅威者は水平移動のみならず垂直移動も多分に要求される特性を活用し、警備員詰所における乗降エレベータ^{8,44}・防護ゲートなどの経路管理によって、防護区域内部へのアクセスを大幅に遅延させる。乗降エレベータは洋上から甲板デッキへ、防護ゲートは甲板デッキから防護区域内へと繋がる唯一のアクセスポイントとし、縦長構造による垂直移動の要求を強化する。乗降エレベータは、警備員詰所でのみ操作可能な設計とし、使用許可は船舶ゲートの出入り管理と連携する。防護ゲートは、生体認証などによって機械的な出入り管理を行い、原子炉建屋の外壁とともに防護区域の境界面とする。警備員詰所を防護区域内に設置し、入域時の 2 人ルールが機械的に必須となる設計とすることで、外部・内部脅威者をアクセス不可とする。なお、代替警備員詰所は、地上の OFNP 支援施設内に枢要区域として設置し、船舶による陸から OFNP への資材や人などの輸出入を管理する。

6. 周辺監視区域の設定

洋上特有の監視の容易さにより、OFNP の半径 1 km に渡る広範囲を周辺監視区域として新たに設定し、不審船等が監視された場合に治安部隊の準備を進めることにより到着時間を大幅に短縮する(対応機能の強化)。周辺監視区域内は、ソナーやカメラによって多重の方法(音響・光学・赤外線)で監視され^{63,64,65}、半径 500 m 以内に申請なく接近する船舶に対し、治安部隊が対応の準備を始める。

7. 治安部隊の即応体制

治安部隊は検知後 10 分以内を目安として敵対者に到着するため、OFNP 内で待機、または近傍の巡視艇で待機といった即応体制を構築する(対応機能の強化)。

8. OFNP レイアウト⁴⁴

安全上の重要機器は喫水面より下部(水面下)に配備されており、空中及び水中からの脅威に対して堅牢性が強化されている。加えて、OFNP 特有の縦長構造(高さ 10 0m 超)により、外部侵入には水平移動のみならず垂直移動が多分に要求され、敵対者のアクセスを大幅に遅延する。また、甲板デッキは喫水面から高さ 40 m 上部にあり、死角なく 360 度水上を見渡せるとなっており、検知性が非常に高い。

9. 二重船殻構造⁴⁴

OFNP 船体部を二重船殻構造(二重船底含む)とすることで、船舶衝突脅威に対して耐性を持たせる。なお、経験則に基づくミノルスキーの式は、衝突船/被衝突船の衝突吸収エネルギーを、両者の構造部材の体積、船速、排水量の 3 要素で定義する。そのため、二重船殻部の構造部材の本数・厚みを増やし、構造部材の体積を増やすことで堅牢性を強化する可能性がある。

10. APC(航空機衝突)耐性建屋

APC 耐性を持つ建屋とする。OFNP 特有の縦長構造を活用して、安全上の重要機器は喫水面より下部(水中)に配備しているため⁴⁴、原理上水平移動のみが可能な大型航空機による衝突の影響を緩和している。一方で、大型航空機内の燃料による衝突後の火災影響も考える必要があり、また、小型航空機は垂直移動によって重要な機器に影響を与えるおそれもあるため^{69,70}、建屋に APC 耐性を持たせる。なお、APC 耐性建屋、代替中央制御室、SA 設備を組み合わせることで特定重大事故等対処施設の合理化を図ることも可能であるため、第 4 章にて考察する。

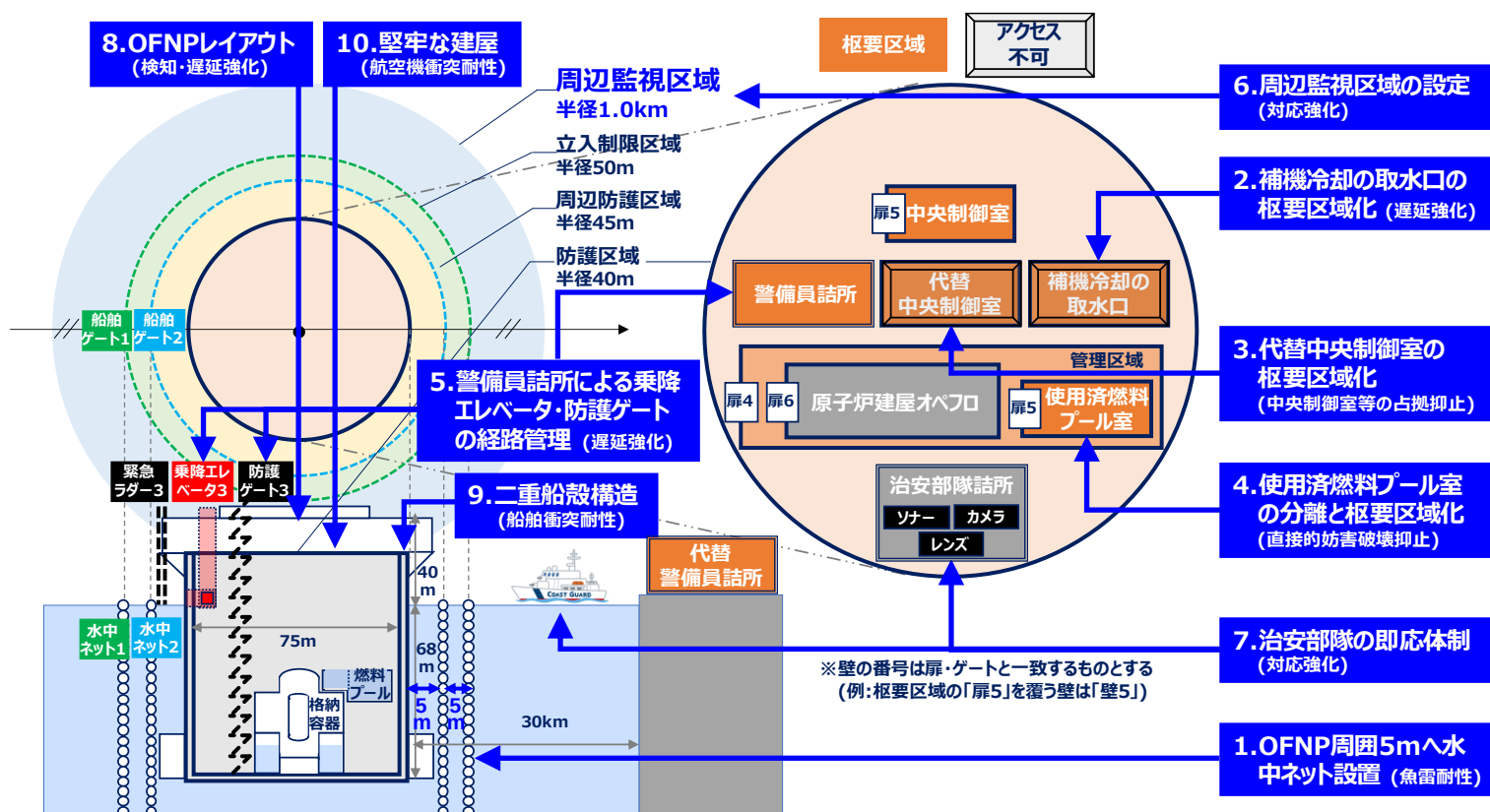


Figure 3-35 Security by design による堅牢な核物質防護システムの概念図

Table 3-16 Security by design による堅牢な核物質防護システムの設計仕様

設計	設計仕様	Security 上の効果
1. OFNP の周囲 5 m へ水中ネット設置	・短魚雷対策として、水中ネットを OFNP の周囲 5 m 及び 10 m に設置する ・それぞれ周辺防護区域、立入制限区域の境界とする ・それぞれ船舶ゲートを 1 箇所ずつ設置され、船舶の入退場検査を行う	・魚雷耐性を持つ
2. 補機冷却の取水口の枢要区域化	・補機冷却の取水口を枢要区域として設定する ・爆発物などによる共通要因故障を防止するため、区分分離したうえで空間的・物理的隔離を施す ・敵対者がアクセス不可能に設計。鍵などによるアクセス管理も行う	・補機冷却の取水口が妨害破壊不可となり、補機冷却を要する安全系統の共通要因故障が防止され、敵対者の目標達成が遅延する
3. 代替中央制御室の枢要区域化	・代替中央制御室(及び中央制御室)を枢要区域として設定する ・敵対者が場所などの情報を入手不可となるように、同エリアを秘密情報として扱い、信頼性確認プログラムで内部敵対者を排除する ・非常時には代替中央制御室の操作によって、中央制御室からプラント制御権を完全移行、単独でプラントを冷温停止まで制御可能な設計とする。	・敵対者の中央制御室等占拠による間接的妨害破壊を抑止する
4. SFP 室の分離と枢要区域化	・核セキュリティ上の主要なターゲットである MOX-FF と SF を一括保管する SFP について、原子炉建屋オペフロ外に分離し、新たな SFP 室内に SFP を設置する ・SFP 室を枢要区域として設定し、強化された障壁で防護し、SFP 開口部には防爆ネットを設置する ・SFP の躯体は十分な厚みがあり、爆発物によって破壊されない構造とする	・防爆ネットによって SFP 内の MOX-FF や SF に対する爆発物などを用いた直接的妨害破壊を抑止する ・SFP 室の強化された壁などによって敵対者の突破が遅延する

設計	設計仕様	Security 上の効果
5. 警備員詰所による乗降エレベータ、防護ゲートなどの経路管理	・乗降エレベータと防護ゲートは、それぞれ、洋上から甲板デッキ、甲板デッキから防護区域内に繋がる唯一のアクセスポイントとする ・乗降エレベータは、警備員詰所でのみ操作可能な設計とする。使用許可は船舶ゲートの出入り管理と連携する ・防護ゲートは、生体認証などによって機械的な出入り管理を行う。原子炉建屋の外壁を防護区域の境界面とする ・防護区域内に警備員詰所を設置し、外部脅威をアクセス不可とする。また、内部脅威対策として、アクセス時の2人ルールが機械的に必須となる設計とする ・代替警備員詰所は地上の OFNP 支援施設内に枢要区域として設置し、船舶による資材等の輸出入も管理する	・ OFNP 特有の縦長構造により、外部侵入には水平移動のみならず垂直移動が多分に要求され、警備員詰所における乗降エレベータなどの経路管理によって、防護区域内部へのアクセスを遅延する
6. 周辺監視区域の設定	・ OFNP の半径 1 km を周辺監視区域として設定する ・ ソナーやカメラによって、脅威の監視に特化した区域とする（物理的障壁は無し） ・ 半径 500 m 以内に申請なく接近する船舶に対し、治安部隊が対応の準備を始める	・ 遠方の脅威候補に対して治安部隊が予め対応の準備を始め、有事の際の対応時間を短縮する
7. 治安部隊の即応体制	・ 治安部隊は検知後 10 分以内を目安として敵対者に到着するため、常時、治安部隊は OFNP 内で待機、または近傍の巡視艇で待機などの即応体制を構築する	・ 対応時間を遵守することによって、敵対者の阻止を確実にする
8. OFNP レイアウト (J.Buongiorno(2016))	・ OFNP 特有の縦長構造(高さ 100 m 超) ・ 喫水面から高さ 40 m 上部にあり、死角なく 360 度水上を見渡せる甲板デッキとする ・ 安全上の重要機器は喫水面より下部(水中)に配備する	・ OFNP 特有の縦長構造により、外部侵入には水平移動のみならず垂直移動が多分に要求され、敵対者のアクセスを遅延する ・ 検知性が向上する
9. 二重船殻構造 (J.Buongiorno(2016))	・ 船舶衝突対策として OFNP 船体部を二重船殻構造とする(二重船底含む)	・ 船舶衝突耐性を持つ
10. APC 耐性建屋	・ 航空機衝突耐性を持つ建屋とする	・ 航空機衝突耐性を持つ

Table 3-17 堅牢な核物質防護システムを構成する検知・遅延機器の仕様

名称	詳細	センサー	対象	敵対者装備	検知確率	侵入時間(秒)
レンズ	レンズ：光学	レンズ	水上	船舶	0.5	0
ソナー/カメラ	ソナー：音響、カメラ：光学/赤外線	同左	水上/水中	船舶	0.8	0
船舶ゲート 1	立入制限区域の船舶用ゲート	目視	水上	船舶	0.5	10
水中ネット 1	魚雷ネット	目視	水上/水中	船舶	0.0	6
船舶ゲート 2	立入制限区域の船舶用ゲート	目視	水上	船舶	0.5	10
水中ネット 2	魚雷ネット	目視	水上/水中	船舶	0.0	6
乗降エレベータ 3	OFNP への乗降エレベータ(40 m 高さ)	目視	水上	なし	0.5	60
緊急ラダー3	OFNP への可搬式梯子(40 m 高さ)	目視	水上	なし	0.5	600
防護ゲート 3	防護区域の歩行者ゲート	目視	OFNP 内	大ハンマー	0.5	60
防護壁 3	防護区域のコンクリート壁(15cm 厚さ)	警報	OFNP 内	爆発物(5kg)	0.5	150
扉 4	管理区域の二重ドア	目視	OFNP 内	なし	0.1	60
壁 4	管理区域のコンクリート壁(15cm 厚さ)	警報	OFNP 内	爆発物(5kg)	0.5	150
扉 5	枢要区域の金属製防護ドア(5 cm)	センサー	OFNP 内	爆発物(2kg)	0.9	60
壁 5	枢要区域のコンクリート壁(30cm 厚さ)	センサー	OFNP 内	爆発物(5kg)	0.9	195
扉 6	水密扉	目視	OFNP 内	なし	0.1	30
壁 6	コンクリート壁(15 cm 厚さ)	警報	OFNP 内	爆発物(5kg)	0.5	150

3.6 本章のまとめ

本章では、洋上特有の核セキュリティ上の新たな脅威に対する応答性を定量評価可能な手法を開発し、Security by design による堅牢な OFNP の核物質防護システム設計を提示した^{1,2}。新たな脅威として、遠隔攻撃手段の魚雷を想定し船殻への構造健全性解析を行った。また、脅威への対抗能力として、米国における既往研究と異なり警備要員が致死性武器と先制攻撃権を持たない国家を想定し、船舶移乗による核物質の盗取や妨害破壊行為に対する核セキュリティ性を定量的に評価した。船舶移乗による妨害破壊行為として、核燃料への爆破などにより直接的に燃料損傷させて放射性物質飛散を狙った直接的妨害破壊と、OFNP の安全機能喪失により間接的に燃料損傷させて放射性物質飛散を狙った間接的妨害破壊を評価した。開発した評価手法は、多様な炉型に対し適用可能な評価手法である。結果として、OFNP 外殻の健全性が担保されるまで魚雷から発出されるジェットを減速するために最低必要な水の侵入深さは 4 m であり、不確かさを考慮した上で OFNP 周囲から 5 m 離れた場所へ水中ネット等を設置する手段が有効であることを明らかにした¹。次に枢要区域として、陸上 NPP と同様に SF または MOX-FF が貯蔵された SFP 室や、補機冷却の取水口や代替中央制御室を設定し、防護措置を取ることでさらに堅牢性を強化させられることを明らかにした。また、OFNP 特有の縦長構造(高さ 100 m 超)により、外部侵入には水平移動のみならず垂直移動が多分に要求され、防護区域へのアクセス遅延のためには警備員詰所における乗降エレベータ等の経路管理が有効であることを明らかにした。また、洋上特有の監視の容易さを利用し、OFNP の半径 1 km に渡る広範囲を周辺監視区域として新たに設定し、不審船等が監視された場合に治安部隊の準備を進めることにより到着時間を大幅に短縮し、阻止確率を向上させられることを明らかにした。これらの設計を行うことで、仮想の陸上 NPP と比較して堅牢性は強化可能であることを明らかにした。治安部隊について、OFNP 内での常駐または巡視艇による近隣待機といった即応体制構築が必要であることを指摘した²。

参考文献

- ¹ D. Hara, H. Sagara, “Physical protection design of offshore floating nuclear power plant against light torpedo threats: a simulation study of hypervelocity jet underwater”, (Under review).
- ² D. Hara, H. Sagara, “Design of Robust Physical Protection Systems based on Vital Area Identification and Path Analysis for Offshore Floating Nuclear Power Plant”, Journal of Nuclear Materials Management; (To be submitted).
- ³ M. K. Snell, C. D. Jaeger, S. E. Jordan, et al., “Security-by-Design Handbook”, SAND2013-0038, January 2013, (2013), <https://doi.org/10.2172/1088049>
- ⁴ 国際原子力機関(IAEA), “Nuclear Security Recommendations on Physical Protection of Nuclear Material and Nuclear Facilities (INFCIRC/225/Revision 5)”, IAEA Nuclear Security Series No. 13, (2011), <https://www.iaea.org/publications/8629/nuclear-security-recommendations-on-physical-protection-of-nuclear-material-and-nuclear-facilities-infcirc225revision-5>
- ⁵ 内閣府 政策統括官(科学技術政策・イノベーション担当) 原子力政策担当室, “【仮訳】核物質及び原子力施設の物理的防護に関する核セキュリティ勧告(INFCIRC/225/rev5)”, (2012), https://www.nra.go.jp/activity/kokusai/honyaku_02.html
- ⁶ 国際原子力機関(IAEA), “Physical Protection of Nuclear Material and Nuclear Facilities (Implementation of INFCIRC/225/Revision 5)”, IAEA Nuclear Security Series No. 27-G, P51~66, (2018), https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/PUB1760_web.pdf
- ⁷ 稲村智昌, 田邊朋行, “米国における性能基準型物理的防護システムの構築手法と日本への含意－Sandia 国立研究所の手法の検討を通じて－”, 報告書番号：Y11030, P5~20, (2012), <https://criepi.denken.or.jp/hokokusho/pb/reportDetail?reportNoUkCode=Y11030>
- ⁸ K. Vincent, N. Todreas, J. Buongiorno, M. Golay, A. Birch, T. Isdanavich, R. Thomas, H. Stevens, “Overview of security plan for offshore floating nuclear plant”, Proc. ICONE24, Charlotte, North Carolina, June 26-30, 2016, P5, (2016), <http://dx.doi.org/10.1115/ICONE24-61029>
- ⁹ J. Conway, N. Todreas, J. Halsema, C. Guryan, A. Birch, T. Isdanavich, J. Florek, J. Buongiorno, M. Golay, “Physical security analysis and simulation of the multi-layer security system for the offshore nuclear plant (ONP)”, Nuclear Engineering and Design, 352, P105~113 ほか, (2019), <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2019.110160>
- ¹⁰ J. Conway, “Security and the Offshore Nuclear Plant (ONP): Security Simulation Testing and Analysis of the Multi-Layer Security System”, (2019).
- ¹¹ G. Genzman, K. Shirvan, N. Todreas, J. Buongiorno, M. Golay, “Ship collision security for an offshore nuclear platform”, Proc. ICAPP 2017, Fukui and Kyoto, Japan, April 24-28, P1568,1569 ほか, (2017).

-
- ¹² G. Genzman, “Ship Collision and the Offshore Floating Nuclear Plant (OFNP) Analysis of Possible Threats and Security Measures”, P143~148 ほか, (2016),
<https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/104144>
- ¹³ 83rdth United States Congress, “ATOMIC ENERGY ACT OF 1954, SEC. 161A. USE OF FIREARMS BY SECURITY PERSONNEL”.
- ¹⁴ United States Nuclear Regulatory Commission (U.S.NRC), “10 CFR Part 73. 15 Authorization for use of enhanced weapons and preemption of firearms laws”,
<https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/cfr/part073/index.html>
- ¹⁵ Proliferation Resistance and Physical Protection Evaluation Methodology Working Group, “PR&PP Evaluation: ESFR Full System Case Study Final Report,”
GIF/PRPPWG/2009/002, P22,23, (2009),
https://gif.jaea.go.jp/methodology/prppwg/prpp_csreport_and_appendices_2009_10-29.pdf
- ¹⁶ 相樂洋, 川久保陽子, 井上尚子, “核拡散抵抗性及び核物質防護評価; 仮想的ナトリウム冷却高速炉システム全体のケーススタディ最終報告書(仮訳)”, JAEA-Review 2013-011, P23, (2014), <https://doi.org/10.11484/jaea-review-2013-011>
- ¹⁷ J. Buongiorno, J. Jurewicz, M. Golay, N. Todreas, “The offshore floating nuclear plant concept”, Nuclear Technology. Vol. 194, 1-14, (2016), <http://dx.doi.org/10.13182/NT15-49>
- ¹⁸ 国際原子力機関(IAEA), “Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material 2018 Edition”, IAEA Safety Standards Series No. SSR-6 (Rev.1), (2018),
<https://www.iaea.org/publications/12288/regulations-for-the-safe-transport-of-radioactive-material>
- ¹⁹ 原子力規制庁(NRA), “個別安全要件 SSR-6(Rev.1) 放射性物質安全輸送規則 2018 年版」日本語翻訳版”, (2021), https://www.nra.go.jp/activity/kokusai/honyaku_01.html
- ²⁰ International Maritime Organization (IMO), “International Code for the Safe Carriage of Packaged Irradiated Nuclear Fuel, Plutonium and High-Level Radioactive Wastes on board Ships (INF Code)”, <https://www.imo.org/en/OurWork/Safety/Pages/INF-Code.aspx>
- ²¹ International Maritime Organization (IMO), “International Ship and Port Facility Security (ISPS) Code”.
- ²² 国土交通省海事局長 “海査第 520 号 照射済核燃料等運搬船の取扱いについて”, (2011).
- ²³ T. Nagukara, Y. Maki, N. Tanaka, “Safety evaluation on transport of fuel at sea and test program on full scale cask in Japan”, Proc. of PATRAM'78, New Orleans, LA, USA, (1978).
- ²⁴ 日本原子力学会 原子力発電部会 「次期軽水炉の技術要件検討」 ワーキンググループ (フェーズ 2), “次期軽水炉の技術要件と実現のための取り組み 「次期軽水炉の技術要件検討」 ワーキンググループ (フェーズ 2) 報告書”, 2024 年 3 月, P33, (2024),
http://www.aesj.or.jp/~hatsuden/katsudou/04_jikiroWG/jikiroWG_index.html

-
- ²⁵ 弾道学研究会 編, 一般財団法人防衛技術協会, “火器弾薬技術ハンドブック(2022 年改訂版)”, P302~315, P495~500, P504~507, P1069-1081, (2022).
- ²⁶ 防衛技術ジャーナル編集部編 防衛技術協会, “防衛技術選書 兵器と防衛技術シリーズ 6 火器弾薬技術のすべて”, P109~125, (2008).
- ²⁷ D. R. Saroha, Davinder Kumar, Y. Singh, “Penetration Behaviour Simulation of Shaped Charge Jets in Water”, 26th International Symposium on Ballistics, (2011), <http://proceedings.ndia.org/1210/11910.pdf>
- ²⁸ 防衛技術ジャーナル編集部 編, 防衛技術協会, “防衛技術選書 兵器と防衛技術シリーズ 4 海上防衛技術のすべて”, P28~30, P54~60 (2007).
- ²⁹ 防衛技術ジャーナル編集部 編, 防衛技術協会, “防衛技術選書 新・兵器と防衛技術シリーズ 4 艦艇装備&先進装備の最新技術”, P26~29, P38~43, (2018).
- ³⁰ B. Szturomski, “The effect of an underwater explosion on a ship”, (2015), https://www.researchgate.net/publication/282584057_The_effect_of_an_underwater_explosion_on_a_ship
- ³¹ Russell Phil, “Anti-Torpedo Nets”, The World War I Document Archive, (2002), <http://www.gwpda.org/naval/nets.htm>
- ³² 伊藤忠テクノソリューションズ, “ANSYS AUTODYN ファーストステップ・チュートリアル 第 5 版”, 2011 年 8 月, (2011).
- ³³ S. P. Marsh (Ed.), “LASL shock hughoniot data”. University of California Press, (1980), P212, P573, <https://sgp.fas.org/othergov/doe/lanl/docs1/shd.pdf>
- ³⁴ 片山雅英, “固体中の衝撃波の科学入門”, レーザ加工学会誌, Vol. 17, No.1, 2, P45,46, (2010), https://www.engineering-eye.com/rpt/r095_iswi/pdf/201005_1.pdf
- ³⁵ 片山雅英, “流体と固体の衝撃シミュレーション”, 高圧力の科学と技術, 1998 年 8 巻 4 号, p.251-259, (1998), <https://doi.org/10.4131/jshpreview.8.251>
- ³⁶ M. Katayama, S. Kibe, S. Toda, “A numerical simulation method and its validation for debris impact against the whipple bumper shield”, International Journal of Impact Engineering, Volume 17, Issues 4–6, 1995, P465-476, (1995), [https://doi.org/10.1016/0734-743X\(95\)99871-N](https://doi.org/10.1016/0734-743X(95)99871-N)
- ³⁷ 原子力規制委員会(NRA), “実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則(昭和五十三年通商産業省令第七十七号)”, 第 91 条(防護措置), <https://elaws.e-gov.go.jp/document?lawid=353M50000400077>
- ³⁸ 国際原子力機関(IAEA), “Identification of vital areas at nuclear facilities”, IAEA Nuclear Security Series No. 16, (2012), <https://www.iaea.org/publications/8592/identification-of-vital-areas-at-nuclear-facilities>
- ³⁹ 産業競争力懇談会(COCN), “産業競争力懇談会 2022 年度 プロジェクト 最終報告 浮体式原子力発電”, (2023), <http://www.cocn.jp/report/2022>

-
- ⁴⁰ 国際原子力機関(IAEA), “IAEA SAFEGUARDS GLOSSARY 2001 Edition INTERNATIONAL NUCLEAR VERIFICATION SERIES No. 3”, IAEA/NVS/3/CD, P19, (2002), https://www-pub.iaea.org/mtcd/publications/pdf/nvs-3-cd/pdf/nvs3_scr.pdf
- ⁴¹ 核物質管理センター, “IAEA 保障措置用語集 2001 年版 対訳”, P43,45, (2005).
- ⁴² 日本原子力研究所 炉物理研究委員会, “軽水炉次世代燃料の炉物理に関するベンチマーク問題の提案及び解析結果”, JAERI-Research 2001-046, P70-159, (2001), <https://doi.org/10.11484/jaeri-research-2001-046>
- ⁴³ 原子力安全委員会, “原子炉立地審査指針及びその適用に関する判断のめやすについて 一部改正 平成元年 3 月 27 日 原子力安全委員会”, (1989), <https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/9483636/www.nsr.go.jp/archive/nsc/shinsashishin/anzen.htm>
- ⁴⁴ J. Buongiorno, J. Jurewicz, M. Golay, N. Todreas, “The offshore floating nuclear plant concept”, Nuclear Technology. Vol. 194, 1-14, (2016), <http://dx.doi.org/10.13182/NT15-49>
- ⁴⁵ 国際原子力機関(IAEA), “Dangerous quantities of radioactive material (D-values)”, P3, (2006), <https://www.iaea.org/publications/7568/dangerous-quantities-of-radioactive-material-d-values>
- ⁴⁶ 国際原子力機関(IAEA), “Code of Conduct on the Safety and Security of Radioactive Sources, P15,16, (2004), <https://www.iaea.org/publications/6956/code-of-conduct-on-the-safety-and-security-of-radioactive-sources>
- ⁴⁷ 国際原子力機関(IAEA), “Categorization of Radioactive Sources”, IAEA Safety Standards Series No. RS-G-1.9, P6 など, (2005), <https://www.iaea.org/publications/7237/categorization-of-radioactive-sources>
- ⁴⁸ 国際原子力機関(IAEA), “Security of Radioactive Material in Use and Storage and of Associated Facilities”, IAEA Nuclear Security Series No. 11-G (Rev. 1), (2019), <https://www.iaea.org/publications/12360/security-of-radioactive-material-in-use-and-storage-and-of-associated-facilities>
- ⁴⁹ W. A. Wieselquist, R. A. Lefebvre, M. A. Jessee, Eds., “SCALE Code System”, ORNL/TM-2005/39, Version 6.2.4, Oak Ridge National Laboratory (ORNL), P3-3~P3-116, (2020).
- ⁵⁰ M.B. Chadwick, M. Herman, P. Obložinský, et al., “ENDF/B-VII.1 Nuclear Data for Science and Technology: Cross Sections, Covariances, Fission Product Yields and Decay Data, Nuclear Data Sheets, Vol.112, 12, Dec. 2011, P2887-2996, (2011), <https://doi.org/10.1016/j.nds.2011.11.002>
- ⁵¹ 東京電力 福島第一原子力発電所, “福島県原子力発電所の廃炉に関する安全監視協議会 現地調査 (6 号機 原子炉開放および燃料移動)”, P11, (2013), <https://www.tepco.co.jp/news/2013/images/131022a.pdf>

-
- ⁵² 東京電力, “柏崎刈羽原子力発電所 6 号及び 7 号炉 重大事故等対策の有効性評価について 平成 29 年 12 月”, KK67-0034 改 55, 資料 2-1, (2017),
[https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/12348280/www2.nra.go.jp/disclosure/committee/](https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/12348280/www2.nra.go.jp/disclosure/committee/yuushikisya/tekigousei/power_plants/kk67/meeting/h29_12.html)
[yuushikisya/tekigousei/power_plants/kk67/meeting/h29_12.html](https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/12348280/www2.nra.go.jp/disclosure/committee/yuushikisya/tekigousei/power_plants/kk67/meeting/h29_12.html)
- ⁵³ 原子力規制委員会(NRA), “実用発電用原子炉に係る炉心損傷防止対策及び格納容器破損防止対策の有効性評価に関する審査ガイド”, (2017),
<https://www.nra.go.jp/data/000213306.pdf>
- ⁵⁴ 原子力規制委員会(NRA), “実用発電用原子炉に係る使用済燃料貯蔵槽における燃料損傷防止対策の有効性評価に関する審査ガイド”, (2013),
<https://www.nra.go.jp/data/000069137.pdf>
- ⁵⁵ 原子力産業協会, “停止後、崩壊熱の除去が重要 1 日後には 0.7%”, 原子力産業新聞, 2011 年 3 月 17 日 第 2566 号, (2011), https://www.jaif.or.jp/news_db/data/2011/0317-1-3.html
- ⁵⁶ 原子力安全委員会, “発電用軽水型原子炉施設の安全評価に関する審査指針”, (2001),
<https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/9483636/www.nsr.go.jp/archive/nsc/shinsashishin/anzen.htm>
- ⁵⁷ 東京電力, “柏崎刈羽原子力発電所 6 号及び 7 号炉 事故シーケンスグループ及び重要事故シーケンス等の選定について 平成 26 年 10 月”, KK67-0033 改 01, (2014),
https://www.tepco.co.jp/about/power_station/disaster_prevention/pdf/nuclear_power_141002_01.pdf
- ⁵⁸ 原子力安全委員会, “発電用軽水型原子炉施設に関する安全設計審査指針 (平成 13 年 3 月 29 日改訂)”, 指針 42. 制御室外からの原子炉停止機能, (2001),
<https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/9483636/www.nsr.go.jp/archive/nsc/shinsashishin/anzen.htm>
- ⁵⁹ 原子力規制委員会(NRA), “実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則 (令和 6 年 3 月 13 日改正)”, 第 26 条 原子炉制御室等, (2024),
https://www.nra.go.jp/law_kijyun/law/jitsuyou_kisoku.html
- ⁶⁰ M. L. Garcia, “Design and Evaluation of Physical Protection Systems Second Edition”, 978-0-7506-8352-4, (2008).
- ⁶¹ 青木健, “効率的な Pu 燃焼特性を有する高温ガス炉システムの 3S 特性とシナジー効果”, P119,120, (2018), [https://t2r2.star.titech.ac.jp/cgi-](https://t2r2.star.titech.ac.jp/cgi-bin/publicationinfo.cgi?q_publication_content_number=CTT100759871)
[bin/publicationinfo.cgi?q_publication_content_number=CTT100759871](https://t2r2.star.titech.ac.jp/cgi-bin/publicationinfo.cgi?q_publication_content_number=CTT100759871)
- ⁶² M. L. Garcia, “Vulnerability Assessment of Physical Protection Systems, Butterworth-Heinemann”, 978-0-7506-7788-4, (2010).
- ⁶³ 東陽テクニカ, “水中セキュリティ/特機 総合カタログ”, P6, 23,
https://www.toyo.co.jp/kaiyo/catalog/list/?contents_type=2383&c1=1613&l=2
- ⁶⁴ 東陽テクニカ, “水中侵入者探知ソーナー Sentinel IDS”,
https://www.toyo.co.jp/kaiyo/catalog/list/?contents_type=2383&c1=1613&l=2

-
- ⁶⁵ 東陽テクニカ, “船舶・港湾統合監視システム NiDAR”,
https://www.toyo.co.jp/kaiyo/catalog/list/?contents_type=2383&c1=1613&l=2
- ⁶⁶ 国土交通省, “海上交通安全法施行規則(昭和 48 年運輸省令第 9 号) 第 4 条(速力の制限)”, (2023), <https://elaws.e-gov.go.jp/document?lawid=348M50000800009>
- ⁶⁷ 産業競争力懇談会(COCN), “産業競争力懇談会 2021 年度 プロジェクト 最終報告 浮体式原子力発電”, (2022), <http://www.cocn.jp/report/2021>
- ⁶⁸ 核セキュリティ専門家評価委員会, “東京電力における核セキュリティに関する評価報告書(第 3 回報告) 2023 年 8 月 7 日”, P19~20, (2023),
https://www.tepco.co.jp/press/news/2023/1665943_8975.html
- ⁶⁹ 原子力規制委員会(NRA), “実用発電用原子炉に係る航空機衝突影響評価に関する審査ガイド(平成 26 年 9 月)”, (2014),
https://www.nra.go.jp/disclosure/committee/kettei/02/kisei_naiki.html
- ⁷⁰ Nuclear Energy Institute(NEI), “Methodology for Performing Aircraft Impact Assessments for New Plant Designs REV. 07 Public Version” NEI 07-13 Revision 7 May 2009, <https://www.nrc.gov/docs/ML0914/ML091490723.pdf>

第 4 章

堅牢な OFNP のための

2S by design 総合評価

第4章 堅牢な OFNP のための 2S by design 総合評価

4.1 はじめに

本章では、第 2 章「核不拡散性」と第 3 章「核セキュリティ性」の結果を受け、核セキュリティ性・核不拡散性(2S) by design を取り入れて 3S シナジー効果を最大化する堅牢な OFNP 概念を提示する^{1,2,3,4,5,6}。また、OFNP 特有の堅牢性や、本研究で開発した手法と得られた結果の適用範囲を明らかにする。さらに、原子力プラントのみならず船舶安全性も含めた設計基礎脅威を超えた状態(Beyond DBT)に対して、日本を想定した OFNP の影響緩和設計と洋上防衛について考察する。

4.2 2S by design を取り入れた堅牢な OFNP 概念

4.2.1 3S シナジー効果を最大化する Safeguards by design

第 2 章「核不拡散性」の結果を受け、Safeguards by design を取り入れた OFNP 設計を改めて提示する(**Figure 4-1**)¹。また、各設計の 3S 上のシナジー効果や、そのための追加措置についても言及する(**Table 4-1**)。また、本研究で定義する ABWR 搭載の OFNP のみならず、多様な炉型や設置方式(洋上・陸上)の NPP に対し、本研究結果(設計)の適用範囲を示す(**Table 4-3**)。なお、第 2 章で言及した通り、本研究で開発した核拡散抵抗性評価手法は、多様な炉型を搭載する洋上・陸上 NPP に対して適用可能な手法である。

1. 10~15 年頻度の燃料一括輸送

MOX-FF について、一括輸送により輸送頻度を 10 年から 15 年程度に低減することで、²⁴¹Am 蓄積による核燃料品質劣化を抑えながら、燃料輸送に伴う核拡散リスクを低減する(拡散機会が向上)。10 年から 15 年の期間選定は、同期間内の MOX-FF 必要体数が一括輸送の最大量 1380 体を超えない範囲で選定された。また、MOX-FF 以外の UO₂-FF や SF の輸送方法についても、燃料取替時などの機会に合わせた都度輸送ではなく、一括輸送とする。

本設計は、キャスクや輸送船の仕様により、一度に輸送可能な燃料集合体数に違いを生じ、適切な輸送頻度が変更となる可能性がある。

2. MOX-FF 受入時の体数確認

MOX-FF 受入時に搬入用キャスク内を確認するなど MOX-FF の体数確認を厳格に行うことで、MOX-FF 搬入用キャスクを偽装して MOX-FF を搬出する脆弱な核拡散経路を抑止し、核拡散リスクを低減する(検知確率が向上)。なお、査察業務量の増加が懸念されるが、前述の燃料一括輸送と併用することによって、査察業務量を抑制しつつ、核拡散リスクを低減可能である。

3. 空キャスク搬出時の内部確認

空のキャスク搬出時にキャスクの内部確認を行うことで、MOX-FF 搬入用キャスクを偽装して MOX-FF を搬出する脆弱な核拡散経路を抑止し、核拡散リスクを低減する(検知確率が向上)。なお、本設計による査察業務量の増加が懸念されるが、前述の燃料一括輸送と併用することによって、査察業務量を抑制しつつ、核拡散リスクを低減可能である(前述の通り)。

4. 高燃焼度化

燃焼度を 45 GWd/ton から 72 GWd/ton まで高めた核燃料を使用することで、再処理後の Pu 中の ^{238}Pu の割合が増えて NED 製造の障壁となる崩壊熱が増すため、核拡散リスクを低減する(核分裂性物質タイプが向上)。

本設計は、本研究で定義した ABWR 搭載の OFNP のみならず、BWR 型を搭載する洋上・陸上 NPP に対しても、堅牢性を強化可能である。

5. 運転サイクル延長

運転サイクル中の燃焼期間を 12 ヶ月から 24 ヶ月運転まで延長することで、燃料取替の頻度が減り、核拡散リスクを低減する(拡散機会が向上)。

3S の観点では、原子炉上部蓋開放の累計期間が減ることで、原子炉内部への爆発物などを用いた直接的妨害破壊の期間が減るため、停止時固有の核セキュリティ上のリスクを低減する。また、燃料取替作業に伴う入構者が減るため、内部脅威者による核セキュリティ事案発生機会が減る。よって、本設計は核不拡散性のみならず、核セキュリティ性の堅牢性も強化するシナジー効果を有する。

本設計は、本研究で定義した ABWR 搭載の OFNP のみならず、BWR 型を搭載する洋上・陸上 NPP に対しても、堅牢性を強化可能である。

6. 乾式キャスクの使用

燃料の輸送キャスクとして湿式ではなく乾式キャスクを使用することで、一度により多くの燃料を輸送可能なため、燃料輸送の頻度が減り核拡散リスクを低減する(核拡散機会が向上)。また、地上のキャスク保管施設へ輸送後は、SF を乾式キャスクに装荷したまま長期保管する。

3S の観点では、SF の長期保管方式を SFP から乾式キャスクへ変更することで、プール水漏えいなどの SFP 固有の事故リスクが排除される。よって、本設計は核不拡散性のみならず、核セキュリティ・原子力安全性の堅牢性も強化するシナジー効果を有する。

本設計は、キャスクの仕様や、輸送側と貯蔵側の安全機能等の評価により、使用するキャスクを乾式ではなく湿式に変更する可能性がある。また、MOX 燃料はウラン燃料に比べて発熱量などが大きいため、注意が必要である。

4.2.2 3S シナジー効果を最大化する Security by design

第3章「核セキュリティ性」の結果を受け、Security by design を取り入れた OFNP 設計を改めて提示する(**Figure 4-2**)^{2,3}。また、各設計の 3S 上のシナジー効果や、そのための追加措置についても言及する(**Table 4-2**)。また、本研究で定義する ABWR 搭載の OFNP のみならず、多様な炉型や設置方式(洋上・陸上)の NPP に対し、本研究結果(設計)の適用範囲を示す(**Table 4-3**)。なお、第3章で言及した通り、本研究で開発した堅牢性評価手法のうち、魚雷脅威に対する超高速ジェット解析は、多様な炉型を搭載する洋上 NPP に対して適用可能な評価手法である。また、船舶移乗脅威に対する枢要区域選定とタイムライン評価は、多様な炉型を搭載する洋上・陸上 NPP に対して適用可能な評価手法である。

1. OFNP の周囲 5 m へ水中ネット設置

OFNP 特有の周囲の水の防護を活用し、水中ネットを OFNP の周囲 5 m 及び 10 m に二重で設置することで、遠隔攻撃手段である短魚雷に対して耐性を持たせる。水中ネットは、周辺防護区域・立入制限区域の境界とし、それぞれに船舶ゲートを 1 箇所ずつ設置して船舶の入退場検査を行う関所とする。短魚雷が OFNP に向けて発射された場合、水中ネットに接触することで OFNP 衝突前に早期爆発する。成形炸薬によって生成される超高速ジェットは OFNP 周囲の水によって減速してその貫通力を失い、OFNP 船殻(二重船殻構造の外殻)の健全性は維持されるであろう²。

本設計は、本研究で定義した ABWR 搭載の OFNP のみならず、多様な炉型を搭載する洋上 NPP に対しても、堅牢性を強化可能である。ただし、隔離距離 5 m については、想定する魚雷脅威の大きさや、OFNP の厚みなどの仕様により変更となる可能性がある。

2. 補機冷却の取水口の枢要区域化

補機冷却の取水口を枢要区域とし、区分分離したうえで空間的・物理的離隔を施す。また、敵対者がアクセス不可能にレイアウト設計し、鍵などによるアクセス管理も行う。上述の防護策によって、補機冷却の取水口が妨害破壊不可となり、補機冷却を要する安全系統の共通要因故障が防止され、敵対者の目標達成を大幅に遅延させる。

3S の観点では、補機冷却の取水口を区分分離して空間的・物理的離隔することで、自然災害などの共通要因による補機冷却の機能喪失を防止する。よって、本設計は核セキュリティ性のみならず、原子力安全性の堅牢性も強化するシナジー効果を有する。

本設計は、既存の ABWR 安全評価を基とし^{7,8}、「共通要因故障」の概念を新たに導入することで、間接的妨害破壊の影響評価を行った結果であり、想定する炉型の安全系統設計によって設計変更となる可能性がある。

3. 代替中央制御室の枢要区域化

代替中央制御室を枢要区域とし、同エリアの場所などを秘密情報として厳格に情報管理し、信頼性確認プログラムで内部脅威者による情報流出を防ぐことで、代替中央制御室への敵対者のアクセスを防止する。また、代替中央制御室の操作によって^{9,10}、中央制御室からプラント制御権を完全に移行し、単独でプラントを冷温停止まで制御可能な設計とする。上述の防護策によって、中央制御室が占拠され、非安全側のプラント操作によって間接的妨害破壊が企てられた場合でも、代替中央制御室に待避した運転員によって占拠された中央制御室のプラント制御権を奪い、間接的妨害破壊を抑止する。

3S の観点では、追加措置として代替中央制御室に運転員を常時配置することで、脅威検知前に中央制御室が占拠され、運転員が代替中央制御室に待避不可となることを防止する。また、自然災害などの共通要因による中央制御室と代替中央制御室の同時機能喪失を防止する。よって、本設計は核セキュリティ性のみならず、原子力安全性の堅牢性も強化するシナジー効果を有する。

本設計は、本研究で定義した ABWR 搭載の OFNP のみならず、BWR 型を搭載する洋上・陸上 NPP に対しても、堅牢性を強化可能である。

4. SFP 室の分離・枢要区域化

核セキュリティ上重要なターゲットである MOX-FF と SF が一括貯蔵してある SFP について、SFP が内部に含まれていた原子炉建屋オペフロから分離し、新たな SFP 室内部に SFP を設置する。また、SFP 室を枢要区域とし、SFP 開口部に防爆ネットを設置することで、SFP 内の MOX-FF や SF に対する爆発物などを用いた直接的妨害破壊を抑止する。また、SFP 室を強化された壁と扉で区画し、SFP へのアクセスを遅延させる。なお、SFP の躯体は十分な厚みがあり、爆発物によって破壊されない構造とする。

3S の観点では、SFP のカメラ監視に加えて、追加措置として SFP 室の扉と搬入口に光ファイバーなどで封印を施し、封じ込め/監視することを提案する。OFNP 内の主要なターゲットである MOX-FF、SF の国家主体による核拡散リスクを減らすとともに、査察業務量を低減する可能性もある。また、非国家主体、特に内部脅威者による盗取の防止にも貢献可能である。封印解除は、燃料取替などの時期に限定する、または解除期間を記録する封印を施すこととする¹¹。これは、保障措置上の核物質の計量及び管理システム(NMAC)を核セキュリティ上の防護措置に活用する好事例である^{12,13}。また、原子炉ウェルと SFP を分離することで、いずれかの現場環境が悪化した場合でも、他方の現場復旧作業への波及的影響を防止可能である。これは、1F 事故の原子力安全に係る教

訓の一つでもある。よって、本設計は核セキュリティ性のみならず、核不拡散・原子力安全性の堅牢性も強化するシナジー効果を有する。

本設計は、本研究で定義した ABWR 搭載の OFNP のみならず、BWR 型を搭載する洋上・陸上 NPP に対しても、堅牢性を強化可能である。

5. 警備員詰所による乗降エレベータ・防護ゲートなどの経路管理

OFNP 特有の縦長構造により^{14,15}、外部脅威者は水平移動のみならず垂直移動も多分に要求される特性を活用し、警備員詰所における乗降エレベータ¹⁵、防護ゲートなどの経路管理によって、防護区域内部へのアクセスを大幅に遅延させる。乗降エレベータは洋上から甲板デッキへ、防護ゲートは甲板デッキから防護区域内へと繋がる唯一のアクセスポイントとし、縦長構造による垂直移動の要求を強化する。乗降エレベータは、警備員詰所でのみ操作可能な設計とし、使用許可は船舶ゲートの出入り管理と連携する。防護ゲートは、生体認証などによって機械的な出入り管理を行い、原子炉建屋の外壁とともに防護区域の境界面とする。警備員詰所を防護区域内に設置し、入域時の 2 人ルールが機械的に必須となる設計とすることで、外部・内部脅威者をアクセス不可とする。なお、代替警備員詰所は地上の OFNP 支援施設内に枢要区域として設置し、船舶による陸から OFNP への資材や人などの輸出入を管理する。

3S の観点では、追加措置として乗降エレベータや防護ゲートなどの核燃料輸送の唯一の経路に対し、監視カメラや放射線検出器などの常時監視可能な機器を設置することを提案する。これにより、国家主体による核拡散を即時的に検知し、核拡散リスクを減らすとともに、非国家主体による盗取を即時的に検知可能とする。これにより、査察業務量を低減する可能性がある。本件は、保障措置上の NMAC を核セキュリティ上の防護措置に活用する好事例であろう^{12,13}。よって、本設計は核セキュリティ性のみならず、核不拡散性の堅牢性も強化するシナジー効果を有する。

本設計は、OFNP 特有の「縦長構造」を活用したものであり、ABWR 搭載の OFNP のみならず、多様な炉型を搭載する OFNP に対しても、堅牢性を強化可能である。なお、船舶型は横長構造のため適用不可だが、縦長から正方形に近い原子炉建屋の陸上 NPP であれば¹⁶、アクセスポイントを絞った上で経路管理することで、堅牢性を強化する可能性がある。

6. 周辺監視区域の設定

洋上特有の監視の容易さにより、OFNP の半径 1 km に渡る広範囲を周辺監視区域として新たに設定し、不審船等が監視された場合に治安部隊の準備を進めることにより到着時間を大幅に短縮する(対応機能の強化)。周辺監視区域内は、ソナーやカメラによって多重の方法(音響・光学・赤外線)で監視され^{17,18,19}、半径 500 m 以内に申請なく接近する船舶に対し、治安部隊が対応の準備を始める。

本設計は、洋上特有の「監視の容易さ」を活用したものであり、ABWR 搭載の OFNP のみならず、多様な炉型を搭載する洋上 NPP に対しても、堅牢性を強化可能である。ただし、周辺監視区域の距離 1 km については、検知機器などの仕様によって変更となる可能性がある。なお、周囲に障害物がなく視認性の良い砂漠や溪谷などに設置される陸上 NPP に対しても、堅牢性を強化する可能性がある。

7. 治安部隊の即応体制

治安部隊は検知後 10 分以内を目安として敵対者に到着するため、OFNP 内での常駐または巡視艇による近隣待機といった即応体制を構築する(対応機能の強化)。

本設計は、想定する核物質防護システムの検知や遅延機能によって変更となる可能性がある。

8. OFNP レイアウト¹⁵

安全上の重要機器は喫水面より下部(水面下)に配備されており、空中及び水中からの脅威に対して堅牢性が強化されている。加えて、OFNP 特有の縦長構造(高さ 100 m 超)により、外部侵入には水平移動のみならず垂直移動が多分に要求され、敵対者のアクセスを大幅に遅延する。また、甲板デッキは喫水面から高さ 40 m 上部にあり、死角なく 360 度水上を見渡せるとなっており、検知性が非常に高い。

本設計のうち、安全上の重要機器の水面下配置は、OFNP 特有の「縦長構造」を活用したものであり、ABWR 搭載の OFNP のみならず、多様な炉型を搭載する OFNP に対しても、堅牢性を強化可能である。なお、船舶型は横長構造であるため適用不可だが、縦長から正方形に近い原子炉建屋の陸上 NPP であれば¹⁶、安全上の重要機器を地表面下に配置することで、堅牢性を強化する可能性がある。

9. 二重船殻構造¹⁵

OFNP 船体部を二重船殻構造(二重船底含む)とすることで、船舶衝突脅威に対して耐性を持たせる。なお、経験則に基づくミノルスキーの式は、衝突船/被衝突船の衝突吸収エネルギーを、両者の構造部材の体積、船速、排水量の 3 要素で定義する。そのため、二重船殻部の構造部材の本数・厚みを増やし、構造部材の体積を増やすことで堅牢性を強化する可能性がある。

3S の観点では、多重防護の障壁が増えるため、仮に放射性物質が漏えいした場合でも、その放射線影響は低減される。よって、本設計は、核セキュリティ性のみならず、原子力安全性の堅牢性も強化するシナジー効果を有する。

本設計は、ABWR 搭載の OFNP のみならず、多様な炉型を搭載する洋上 NPP に対しても、堅牢性を強化可能である。ただし、二重船殻の構造材などの仕様については、想定する脅威に応じた詳細評価が必要となる。

10. APC(航空機衝突)耐性建屋

APC 耐性を持つ建屋とする。OFNP 特有の縦長構造を活用して、安全上の重要機器は喫水面より下部(水中)に配備しているため¹⁵、原理上水平移動のみが可能な大型航空機による衝突の影響を緩和している。一方で、大型航空機内の燃料による衝突後の火災影響も考える必要があり^{20,21}、また、小型航空機は垂直移動によって重要な機器に影響を与えるおそれもあるため、建屋に APC 耐性を持たせる。

本設計は、ABWR 搭載の OFNP のみならず、多様な炉型を搭載する洋上・陸上 NPP に対しても、堅牢性を強化可能である。ただし、建屋の材質や厚さなどの仕様については、想定する脅威に応じた詳細評価が必要となる。

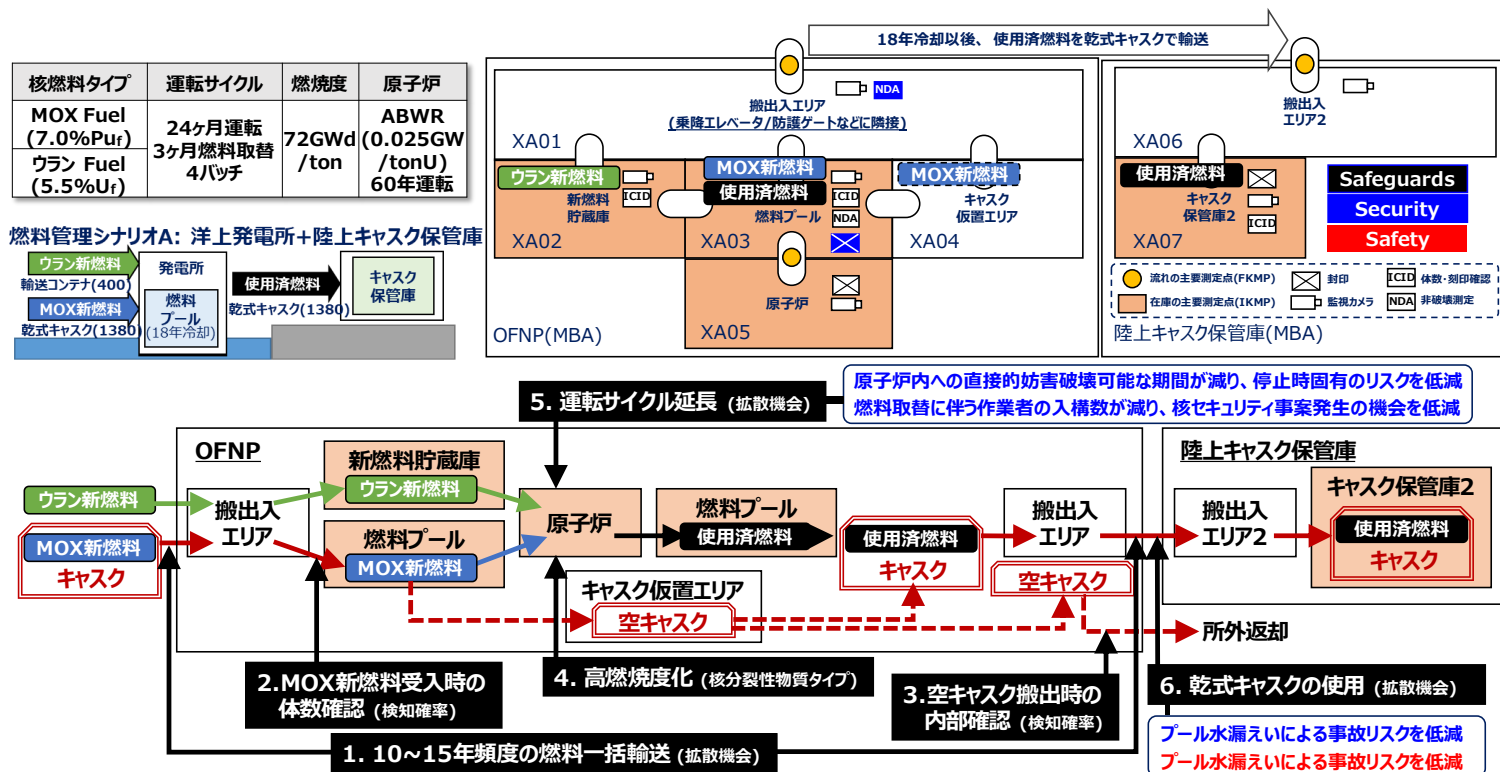


Figure 4-1 2S by design を取り入れた堅牢な OFNP 概念図 (Safeguards)

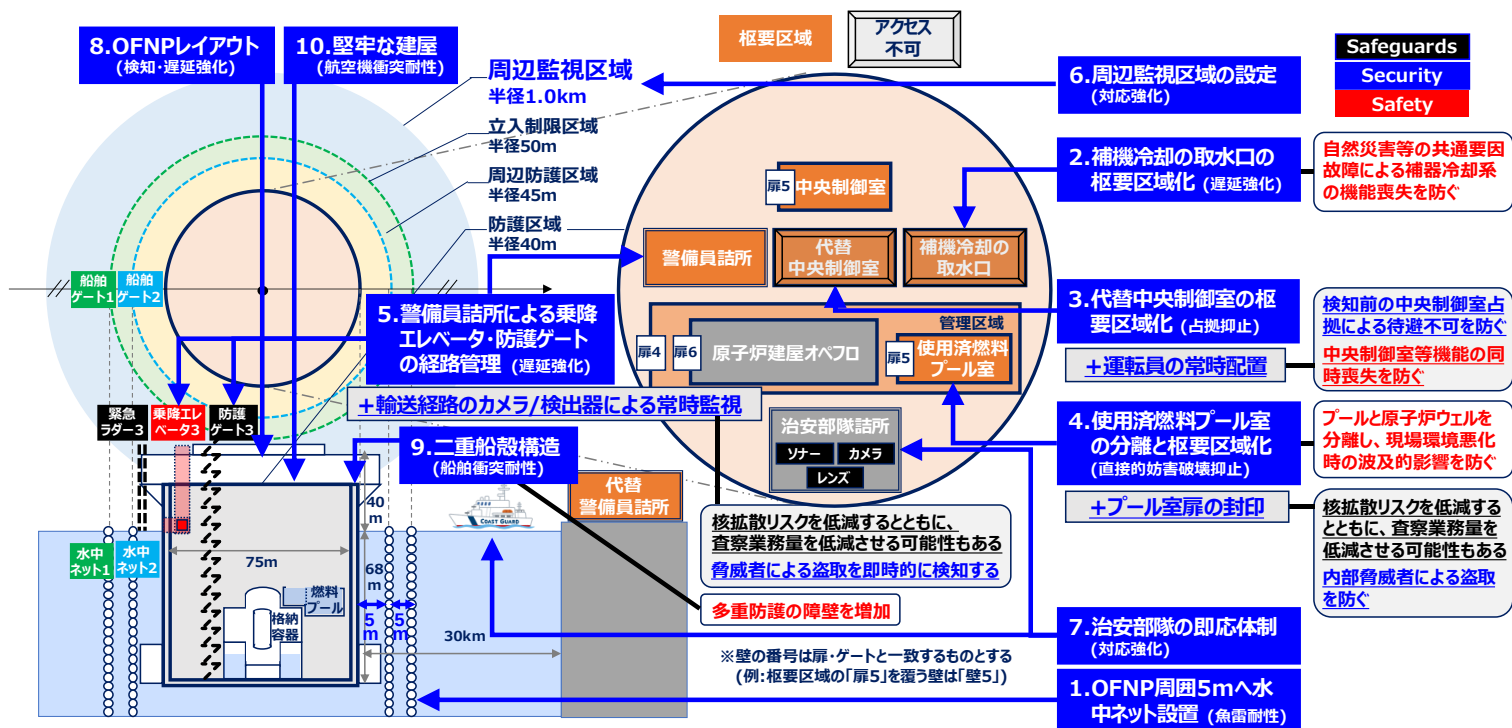


Figure 4-2 2S by design を取り入れた堅牢な OFNP 概念図 (Security)

Table 4-1 2S by design と 3S シナジー効果 (Safeguards)

設計	設計仕様	Safeguards	Security	Safety
1. 10~15 年頻度の燃料一括輸送	・ MOX-FF について、10 年から 15 程度を目安に OFNP へ一括輸送する。この際、一括輸送の最大量と、MOX-FF の長期保管時の核燃料品質劣化に注意する ・ MOX-FF 以外にも UO_2-FF や SF についても、燃料取替時などの都度輸送ではなく、一括した燃料輸送とする	・ 燃料輸送を燃料取替の都度から一括輸送に変更し、輸送頻度を減らすことで、燃料輸送に伴う核拡散の機会が減る	—	—
2. MOX-FF 受入時の体数確認	・ MOX-FF 搬入用のキャスクを空と偽装して MOX-FF を搬出する核拡散経路の脆弱性を抑止するため、MOX-FF 受入時に搬入用キャスク内を確認するなど、厳格な MOX-FF の体数確認を行う	・ MOX-FF の脆弱な核拡散経路に対して、核拡散リスクが減る	—	—
3. 空キャスク搬出時の内部確認	・ MOX-FF 搬入用のキャスクを空と偽装して MOX-FF を搬出する核拡散経路の脆弱性を抑止するため、空のキャスク搬出時にキャスクの内部確認を行う	・ MOX-FF の脆弱な核拡散経路に対して、核拡散リスクが減る	—	—
4. 高燃焼度化	・ 燃料を高燃焼度化する (72 GWd/ton)	・ SF 中の ^{238}Pu の割合が増えて、Pu 中の崩壊熱が増すため、NED 製造の障壁となる	—	—

設計	設計仕様	Safeguards	Security	Safety
5. 運転サイクル延長	・運転サイクルを延長する(1 サイクルあたり 24 ヶ月運転)	・燃料取替の頻度が減ることで、燃料移送に伴う核拡散の機会が減る	・上部蓋開放の累計期間が減ることで原子炉内部への直接的妨害破壊を抑止するなど停止時固有のリスクを低減する ・燃料取替作業に伴う入構者が減るため、核セキュリティ事案発生が減る	—
6. 乾式キャスクの使用	・輸送キャスクとして湿式ではなく乾式キャスクを使用する ・地上のキャスク保管施設へ輸送後は、SF を乾式キャスクに装荷したまま長期保管する	・湿式キャスクに比べて一度に多くの燃料を輸送可能なため、燃料輸送の頻度が減り、燃料輸送に伴う核拡散の機会が減る	・SFP 固有のプール水漏えいなどによる事故リスクを排除する	同左

※青色下線部は、追加措置とその効果を表す

※青色ハッチング箇所は 3S 上の効果を表す

Table 4-2 2S by design と 3S シナジー効果 (Security)

設計	設計仕様	Safeguards	Security	Safety
1. OFNP の周囲 5 m へ水中ネット設置	・短魚雷対策として、魚雷ネットを OFNP の周囲 5 m 及び 10 m に設置する ・それぞれ周辺防護区域、立入制限区域の境界とする ・それぞれ船舶ゲートを 1 箇所ずつ設置され、船舶の入退場検査を行う	—	・魚雷耐性を持つ	—
2. 補機冷却の取水口の枢要区域化	・補機冷却の取水口を枢要区域として設定する ・爆発物などによる共通要因故障を防止するため、区分分離したうえで空間的・物理的離隔を施す ・敵対者がアクセス不可能に設計。鍵などによるアクセス管理も行う	—	・補機冷却の取水口が妨害破壊不可となり、補機冷却を要する安全系統の共通要因故障が防止され、敵対者の目標達成が遅延する	・自然災害などの共通要因による補機冷却の機能喪失を防止する
3. 代替中央制御室の枢要区域化	・代替中央制御室(及び中央制御室)を枢要区域として設定する ・敵対者が場所などの情報を入手不可となるように、同エリアを秘密情報として扱い、信頼性確認プログラムで内部敵対者を排除する ・非常時には代替中央制御室の操作によって、中央制御室からプラント制御権を完全移行、単独でプラントを冷温停止まで制御可能な設計とする。 ・<u>代替中央制御室に運転員を常時配置する</u>	—	・敵対者の中央制御室等占拠による間接的妨害破壊を抑止する ・<u>脅威検知前に中央制御室が占拠され、運転員が代替中央制御室に待避不可となることを防止する</u>	・<u>自然災害などの共通要因による中央制御室代替中央制御室の機能喪失を防止する</u>

設計	設計仕様	Safeguards	Security	Safety
4. SFP 室の分離・枢要区域化	・核セキュリティ上の主要なターゲットである MOX-FF と SF を一括保管する SFP について、原子炉建屋オペフロ外に分離し、新たな SFP 室内に SFP を設置する ・SFP 室を枢要区域として設定し、強化された障壁で防護し、SFP 開口部には防爆ネットを設置する ・SFP の躯体は十分な厚みがあり、爆発物によって破壊されない構造とする ・<u>SFP 室の扉と搬入口に光ファイバーなどで封印を施し、SFP をカメラ監視することで、封じ込め/監視する。封印解除は燃料取替などの時期に限定する、または解除期間を記録する封印を施す</u>	・<u>封じ込め/監視によって、OFNP 内の主要なターゲットである SFP 内の MOX-FF、SF の核拡散リスクを減らす。また、査察業務量を低減させる可能性がある</u>	・SFP の防爆ネットによって爆発物などを用いた直接的妨害破壊を抑止する ・SFP 室の強化された壁などによって敵対者の突破が遅延する ・<u>封じ込め/監視によって、内部脅威者による盗取を防止する</u>	・原子炉ウェルと SFP を分離することで、いずれかの現場環境が悪化した場合でも、他方の現場復旧作業への波及的影響を防止する
5. 警備員詰所による乗降エレベータ・防護ゲートなどの経路管理	・乗降エレベータと防護ゲートは、それぞれ、洋上から甲板デッキ、甲板デッキから防護区域内に繋がる唯一のアクセスポイントとする ・乗降エレベータは、警備員詰所でのみ操作可能な設計とする。使用許可は船舶ゲートの出入り管理と連携する ・防護ゲートは、生体認証などによって機械的な出入り管理を行う。原子炉建屋の外壁を防護区域の境界面とする ・防護区域内に警備員詰所を設置し、外部脅威をアクセス不可とする。また、内部脅威対策として、アクセス時の 2 人ルールが機械的に必須となる設計とする ・代替警備員詰所は地上の OFNP 支援施設内に枢要区域として設置し、船舶による資材等の輸出入も管理する ・<u>乗降エレベータや防護ゲートなどの核燃料輸送の唯一の経路に対し、監視カメラや放射線検出器などを設置し、常時監視する。機器は 3S 上の共用を検討する</u>	・<u>核燃料輸送上の唯一の経路を常時監視することで、核拡散を即時的に検知し、核拡散リスクを減らす。また、査察業務量低減させる可能性がある</u>	・OFNP 特有の縦長構造により、外部侵入には水平移動のみならず垂直移動が多分に要求され、警備員詰所における乗降エレベータなどの経路管理によって、防護区域内部へのアクセスを遅延する ・<u>核燃料輸送上の唯一の経路を常時監視することで、脅威者による盗取を即時的に検知可能である</u>	—

設計	設計仕様	Safeguards	Security	Safety
6. 周辺監視区域の設定	・ OFNP の半径 1 km を周辺監視区域として設定する ・ ソナーやカメラによって、脅威の監視に特化した区域とする（物理的障壁は無し） ・ 半径 500 m 以内に申請なく接近する船舶に対し、治安部隊が対応の準備を始める	—	・ 遠方の脅威候補に対して治安部隊が予め対応の準備を始め、有事の際の対応時間を短縮する	—
7. 治安部隊の即応体制	・ 治安部隊は検知後 10 分以内を目安として敵対者に到着するため、常時、治安部隊は OFNP 内で待機、または近傍の巡視艇で待機などの即応体制を構築する	—	・ 対応時間を遵守することによって、敵対者の阻止を確実にする	—
8. OFNP レイアウト (J.Buongiorno ら(2016))	・ OFNP 特有の縦長構造(高さ 100 m 超) ・ 喫水面から高さ 40 m 上部にあり、死角なく 360 度水上を見渡せる甲板デッキとする ・ 安全上の重要機器は喫水面より下部(水中)に配備する	—	・ OFNP 特有の縦長構造により、外部侵入には水平移動のみならず垂直移動が多分に要求され、敵対者のアクセスを遅延する ・ 検知性が向上する	—
9. 二重船殻構造 (J.Buongiorno ら(2016))	・ 船舶衝突対策として OFNP 船体部を二重船殻構造とする(二重船底含む)	—	・ 船舶衝突耐性を持つ	・ 多重防護の障壁が増加
10. APC 耐性建屋	・ 航空機衝突耐性を持つ建屋とする	—	・ 航空機衝突耐性を持つ	—

※青色下線部は、追加措置とその効果を表す

※青色ハッチング箇所は 3S 上の効果を表す

Table 4-3 多様なプラントへの研究手法/結果の適用範囲 (Safeguards/Security)

章	手法/結果	内容	多様な炉型		BWR 型	
			洋上設置	陸上設置	洋上設置	陸上設置
2 章 Safeguards	手法	核拡散抵抗性評価	○		○	
	結果 (設計)	1.2.3. 10~15 年頻度の燃料一括輸送と MOX 新燃料受入/空キャスク搬出時の検認	●		●	
		4. 高燃焼度化	●		○	
		5. 運転サイクル延長	●		○	
		6. 乾式キャスクの使用	●		●	
3 章 Security	手法	魚雷脅威への超高速ジェット解析	○	—	○	—
		枢要区域選定	○		○	
		船舶移乗脅威への堅牢性評価	○		○	
	結果 (設計)	1. OFNP 周囲 5 m へ水中ネット設置	●	—	●	—
		2. 補機冷却の取水口の枢要区域化	●		●	
		3. 代替中央制御室の枢要区域化	●		○	
		4. 使用済燃料プール室の分離と枢要区域化	●		○	
		5. 乗降エレベータなどの経路管理	○ (OFNP 限定)	—	○ (OFNP 限定)	—
		6. 周辺監視区域 1 km の設定	●	—	●	—
		7. 治安部隊の即応体制	●		●	
		8. OFNP レイアウト(安全機器の水面下配置)	○ (OFNP 限定)	—	○ (OFNP 限定)	—
		9. 二重船殻構造	●	—	●	—
		10. 堅牢な建屋	●		●	

(凡例)

○：普遍的に適用可能

●：限定的に適用可能。評価対象や前提条件により効果が大きく変化

—：適用不可

4.3 Beyond DBT に対する影響緩和設計の考察

4.3.1 沈没の影響緩和設計

Beyond DBT に対する OFNP の影響緩和設計として、「沈没」を想定した設計について考察する。なお、既往文献では、SF 専用運搬船の日本近海における沈没確率は 7.6×10^{-7} /年と評価されている²²。NPP 安全設計の目安となる炉心損傷頻度(CDF) 10^{-4} /年程度や、格納容器機能喪失頻度(CFF) 10^{-5} /年程度と比較しても²³、OFNP 沈没の発生確率は十分に低いと見做され、沈没事象は、DBT(または DBA)ではなく、Beyond DBT として考えることが適切である。

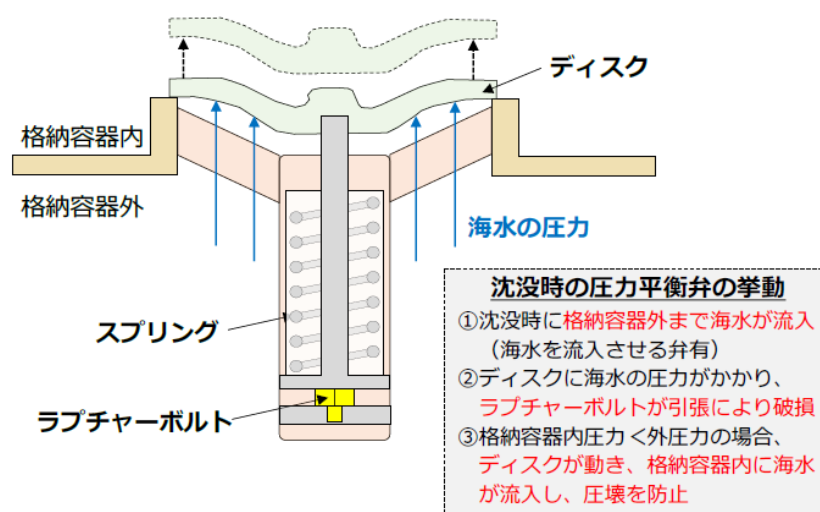
Beyond DBT の影響緩和策によって、核セキュリティのみならず原子力安全の堅牢性も強化するシナジー効果が期待可能である。核セキュリティ(妨害破壊行為)は「原子力システムの外側の意図的な脅威が起因となる決定論的事象」を、原子力安全は「原子力システムの内側の偶発的なエラーが起因となる確率論的事象」を設計上の主な想定事象としている点に違いがある。一方で、「放射性物質の放出抑止」という最終目標では等しい。ここで、2001 年の米国同時多発テロを受け 2002 年に米国 NPP に発出された米国原子力規制委員会(NRC)命令 B.5.b 項は、NPP への航空機衝突という B-DBT 状態における影響緩和措置を要求するものである²⁴。「B.5.b 項を日本に適切に水平展開して福島第一原子力発電所事故(1F 事故)時に活用すべきであった」というシナジー効果に関する指摘もある^{25,26}。なお、B.5.b 項の具体的な要求事項は、「航空機衝突によって爆発あるいは火災によってプラントの大規模な機能喪失が発生した状況においても、炉心冷却、格納容器の機能及び使用済燃料プールの冷却能力を維持・回復するためのガイダンス及び戦略を実施し発展させなければならない」というものである。

今までにない洋上固有の沈没のリスクに対処することで、OFNP の社会実装に向けた社会的受容性にも応えることが可能である²⁷。そこで、OFNP の沈没事象は、産業競争力懇談会(COCN)の検討においても、Beyond DBT 発生時の考慮事項として挙げられている²⁸。具体的には、原子力船「むつ」の知見である圧力平衡弁の設置^{29,30}や(**Figure 4-3**)、サルベージ可能な設計(水深 200~500 m 設置)²⁷について言及されている。

また、核燃料安全専門審査会は、燃料集合体を貯蔵したキャスク沈没時の放射線影響について、以下の通り報告をしている²²。

- ・ 技術的に可能なキャスクのサルベージの水深は 200 m 程度
- ・ キャスクの変形は水深約 2300 m から顕著となるが、約 3000 m までは燃料体に影響を及ぼすキャスクの変形はなく、直ちに放射性物質の漏洩は起こらない
- ・ 水圧による燃料体の変形について、燃料体は約 5000 m の水深に耐える

- ・ キャスクの蓋と本体の密封性保持のためのパッキングと蓋面及び本体フランジ面との間に部分腐食(隙間腐食)が生じ、20 年超で密封性が失われるおそれがある
- ・ よって、放射性物質の漏えいモードは以下の分類となる
 - (i) 水深 0 m～200 m：キャスクの変形による放射性物質の漏洩はなく、キャスクの部分腐食による放射性物質の漏洩が始まる前にサルベージが可能
 - (ii) 水深 200 m～2300 m：キャスクの変形による放射性物質の漏洩はなく、キャスクの部分腐食によりキャスクの密封性が破れて放射性物質の漏洩は徐々に進行する
 - (iii) 水深 2300 m～：上記(ii)と同様であるが、キャスクの変形は、(ii)よりも著しい
- ・ 上記漏えいモードを踏まえ、水深 200 m にウラン量 3.2ton のキャスク 4 基が沈没したケースの評価結果では、近傍沿岸部の一般公衆の内部被ばくと外部被ばくを累積した全身被ばく線量は 0.12 mSv/y を示した。評価の前提として、腐食により密封性が破れて放射性物質の漏洩が起こるが、保守的評価として、燃料破覆管・キャスクによる放射性物質の閉じ込めの効果を見逃し、全燃料ペレットから滲出を想定している
(筆者注釈: 上記前提の評価は、キャスクに貯蔵されていない燃料集合体の沈没時の評価に活用可能である。また、ウラン量 173 kg の燃料集合体を想定すると 74 体分の評価結果となる)



出典：COCN(2023)

Figure 4-3 圧力平衡弁の機構

以上より、本研究では、沈没時の OFNP における主要な放射線影響のリスク源である原炉内燃料含む SF に対して、「A. 貯めない・B. 閉じ込める・C. 回収する」の 3 つの基本方針を考案した。基本方針に則り、沈没の影響緩和設計を以下の通り提示する (Table 4-4、Figure 4-4、Figure 4-5)。

A. 沈没時、公衆の被ばく線量を 5 mSv/y 以下に抑える (基本方針: A. 貯めない)

仮に OFNP が沈没した場合でも、近傍の沿岸部の一般公衆に対し、外部被ばくと内部被ばくを累積した全身被ばく線量が 5 mSv/y を下回る設計とする。

線量限度を 5 mSv/y とした理由は、国際放射線防護委員会(ICRP)では 2007 年勧告において、公衆被ばくの見込みとして緊急時では 20~100 mSv/y、復旧時には 1~20 mSv/y を示しており^{31,32}、復旧時の範囲の中で設定したものである。OFNP が沖合 30 km に設置を想定している水深は 200 m~500 m であり²⁷、その中でも沿岸部の一般公衆の被ばく線量が最も大きくなる水深 200 m を評価上想定する。

沈没時に放射線影響を及ぼす主なリスク源としては、MOX-FF、 UO_2 -FF、SF の 3 つの核燃料が挙げられる。ただし、未照射燃料は被覆管の障壁が健全であり、水深 200 m では放射性物質の漏えいが始まる前にサルベージ可能なため、MOX-FF、 UO_2 -FF は評価対象外とした。また、キャスクに貯蔵してある SF については、キャスクによる障壁があり、水深 200 m では放射性物質の漏えいが始まる前にサルベージ可能なため、評価対象外とした。よって、評価対象は、キャスク内に保管されていない SF とした。ただし、SFP 内の SF のみならず、炉心内の核燃料も全て SF として仮定する。

既往文献では、燃料被覆管の閉じ込め効果を見逃すと、燃料集合体 74 体あたりで公衆は 0.12 mSv/y の全身被ばくを受けている。よって、被ばく線量を 5 mSv/y 以下とするためには、OFNP 内の SF 総量を 3083 体以下にする必要があり、炉心内の燃料全 872 体を差し引くと、SFP 内の SF を 2211 体以下にすることで満足する。本研究では、24 ヶ月運転、3 ヶ月燃料取替、バッチ数 4 の核燃料タイプを想定しており、その年間平均移送集合体数は 97 体/年であるため、SFP 内の SF が 2211 体となるのは、約 22.8 年である。つまり、SF を炉内取出後 22.8 年以内に OFNP 外に輸送することで、沈没時の公衆の全身被ばく線量が 5 mSv/y を下回る設計となる。本研究では、SF は炉心取出後 18 年の冷却期間を見込んでいるため、OFNP 内の SF は炉内取出後 18~22 年で、陸上のキャスク保管施設へ乾式キャスクに装荷されて一括輸送される設計を提示する。

B. 沈没時、格納容器の負圧破損を防止する（基本方針: B. 閉じ込める）

沈没時の水圧による格納容器の負圧破損に伴う格納容器内の放射性物質の漏えいを防止するため、原子力船「むつ」と同様、圧力平衡弁を格納容器に設置する設計とする^{27,30}。格納容器の設計内圧は高いが（ABWR では最高使用圧力 310 kPa[gage]、限界圧力 620 kPa[gage]³³）、設計外圧は内圧の約 20 分の 1 と低いため³⁴、圧力平衡弁によって負圧状態を解消することは有効であろう。

C. 沈没時、サルベージ可能な水深に OFNP を設置する（基本方針: C. 回収する）

沈没後にサルベージで回収可能とするため、COCN と同様、水深 200～500 m に OFNP を設置する²⁷。サルベージは、SF 単体ではなく OFNP ごと引き上げる方法も有効である。ただし、水深 200 m 以上の水深では、環境圧の有人潜水は困難であり、潜水深度相当の水圧を受けないで人が潜水する大気圧潜水法や無人の遠隔操縦潜水艇の活用が必須である³⁵。また、OFNP の排水量は 37.6 万 ton と巨大であり、同程度以上の沈没船をサルベージした事例は無い。そこで、クレーンによる引き上げだけではなく、バルーンによる引き上げも併せて技術検討する必要がある。

以上より、沈没の影響緩和策として、OFNP 内の炉内燃料含む SF を「貯めない・閉じ込める・回収する」の 3 つの基本方針に沿った設計について考察した。「B. 閉じ込める」設計は実績があったが³⁰、「A. 貯めない」設計は既往文献をもとにした概算評価であり²²、「C. 回収する」設計は事例が無く、技術的成立性についてさらなる研究が必要である。

Table 4-4 沈没の影響緩和設計

基本方針	設計要求	設計仕様
A. 使用済燃料を貯めない	・ 沈没時、公衆の被ばく線量を 5 mSv/y 以下に抑える	・ OFNP 内の SF は、炉内取出後「18～22 年」冷却で、陸上のキャスク保管施設へ一括輸送
B. 炉内放射性物質を閉じ込める	・ 沈没時、格納容器の負圧破損を防止する	・ 「圧力平衡弁」を格納容器に設置
C. 船体を回収する	・ 沈没時、サルベージ可能な水深に OFNP を設置する	・ 水深「200～500 m」に OFNP を設置

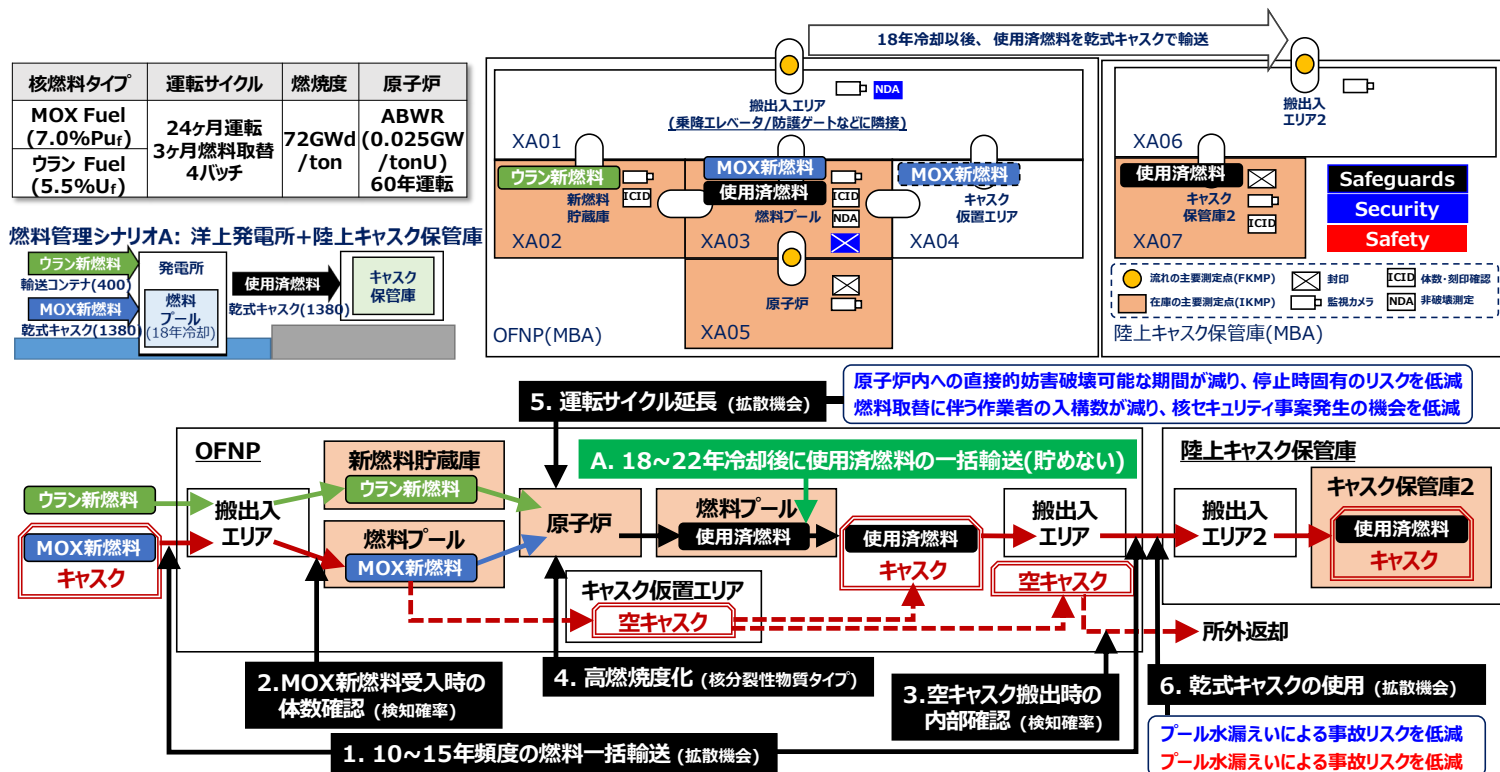


Figure 4-4 沈没影響緩和設計を反映した OFNP 概念図 (Safeguards)

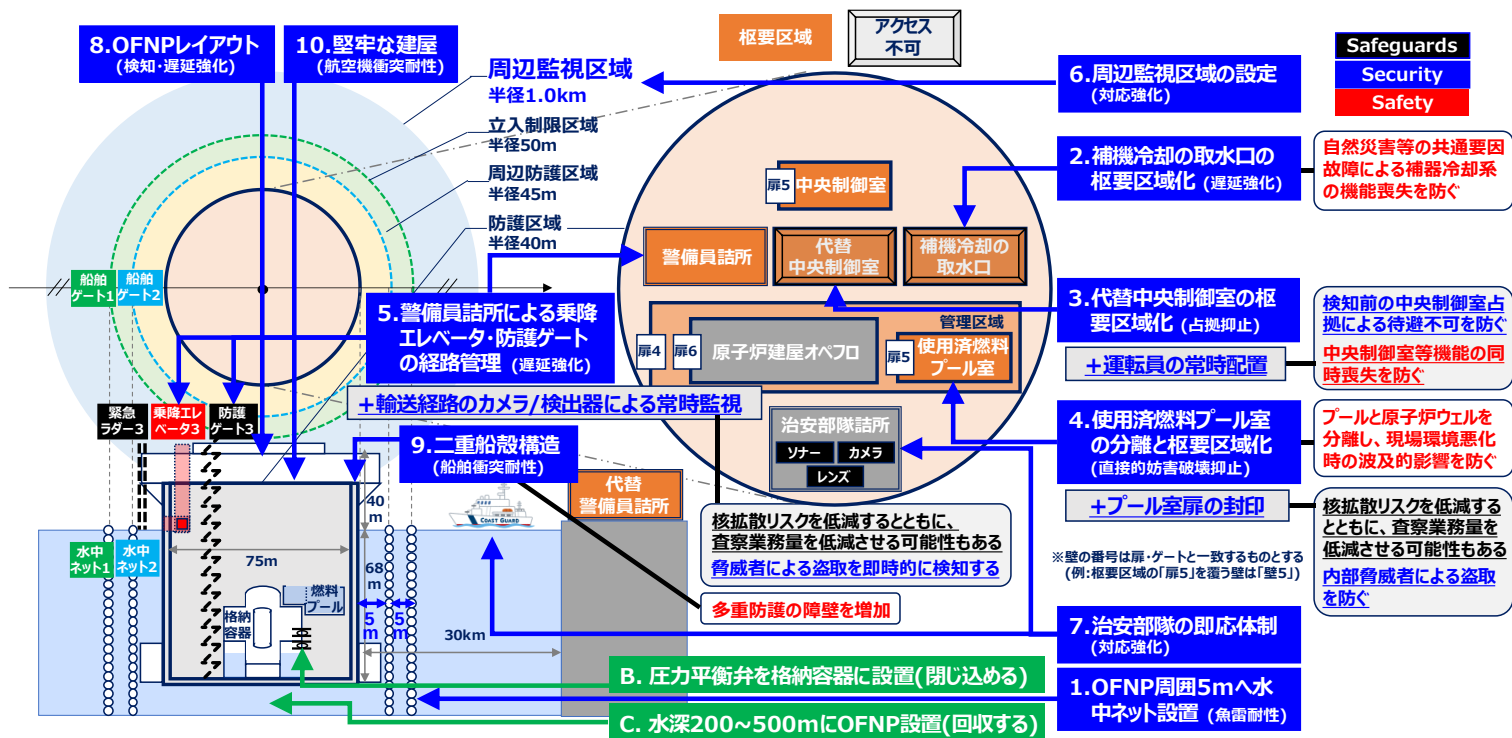
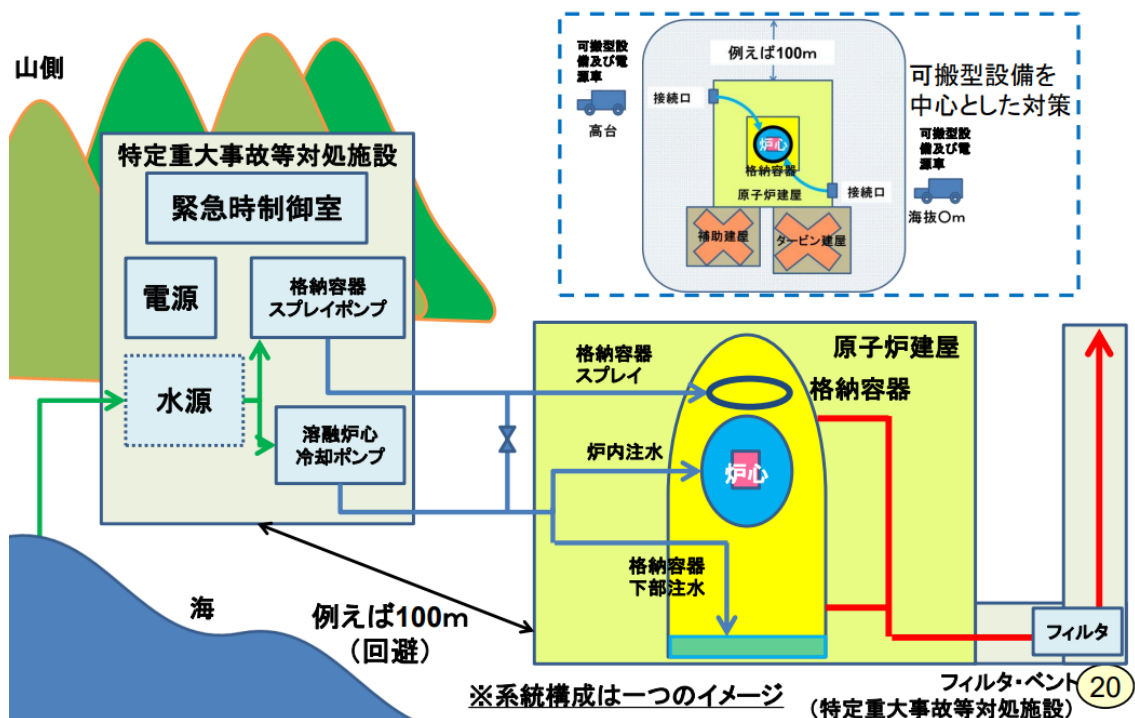


Figure 4-5 沈没影響緩和設計を反映した OFNP 概念図 (Security)

4.3.2 特定重大事故等対処施設の合理化設計

Beyond DBT に対する日本を想定した OFNP の影響緩和設計として、「特定重大事故等対処施設(特重施設)」の合理化設計について考察する。

特重施設は、故意による航空機衝突やその他のテロリズムにより、炉心の著しい損傷が発生するおそれがある、または発生した場合に、原子炉格納容器の破損による放射性物質の放出を抑制するための施設であり(Figure 4-6)³⁶、1F 事故の教訓を踏まえ 2013 年に制定された実用発電用原子炉に係る新規制基準によって設置が義務付けられている。一方で、新規制基準適合に向けた既設 NPP の本体設備の工事計画認可から 5 年以内の設置が求められており、設置期限内の工事が間に合わなかった複数の国内 NPP では運転停止が余儀なくされている。また、特重施設を含めた 1F 事故後の追加安全対策工事費用は、2022 年 1 月時点で 15 基の NPP において 5.7 兆円以上にものぼるといふ指摘もある(1 基あたり 3800 億円)³⁷。追加安全対策費用を含まない NPP 建設費用が 1 基あたり約 5000 億円であることを考えると³⁸、新規制基準によって安全性が向上した一方で、既設 NPP の経済性や事業予見性は大幅に低下している。そのような状況下において、今後の原子力平和利用を促進するためには、特重施設に関する安全性と経済性を調和させた設計初期段階での合理化設計が有用である。



出典：原子力規制委員会, “実用発電用原子炉に係る新規制基準について－概要－”, (2016)

Figure 4-6 既設炉の特重施設の例

日本原子力学会の次期軽水炉の技術要件検討ワーキングにおいて、「次期軽水炉では設計段階から APC その他テロ対策を織り込むことで、新規制基準で要求される項目についてより安全で合理的な対応が図られることが可能」と言及されており³⁹、その合理的な設計については、以下の通り示されている⁴⁰。

- ・ APC その他テロ対策については、建屋頑健化、または区画分離の徹底により、DBA(設計基準事故)/SA(重大事故等)設備の防護性能と信頼性を向上させ、格納容器破損防止機能に対し、合理的に APC その他テロに対する耐性を確保し、そのうえで同一機能を持つ SA 設備(格納容器破損防止)と特重施設を統合した設備構成とする。さらに、DBA 設備のトレン間、DBA 設備と SA 設備間の独立性の強化により、同時に全ての炉心損傷防止機能を喪失することを回避する。

つまり、APC 耐性建屋、DB 設備/SA 設備の区分分離の徹底と独立性の強化によって、SA 設備と特重施設を統合した合理的な設備構成が可能である旨が指摘されている。

そもそも、新規制基準における特重施設に対する規制要求は、設置許可基準(及びその解釈)に記載されており、主には以下の通りとなっている⁴¹。

- ・ 地震耐性、津波耐性、火災耐性を有する(第 39 条～第 41 条)
- ・ APC その他テロ耐性を有する。具体的には、以下 3 つのうち 1 つ以上(第 42 条)
 - (1) 特重施設は R/B との離隔距離を確保する(例えば 100 m 以上)
 - (2) 特重施設は APC に対して頑強な建屋に収納される
 - (3) 上記と同等以上の効果を有する
- ・ 格納容器破損防止に必要な設備を有する。(第 42 条)
 - (1) 原子炉冷却材圧力バウンダリの減圧操作機能
 - (2) 炉内の溶融炉心の冷却機能
 - (3) 原子炉格納容器下部に落下した溶融炉心の冷却機能
 - (4) 格納容器内の冷却・減圧・放射性物質低減機能
 - (5) 原子炉格納容器の過圧破損防止機能
 - (6) 上記機能を制御する緊急時制御室

本研究で想定する SA 設備設計について、COCN の設計を基準とし²⁹、以下の通りとなっている(**Figure 4-7**)。特徴としては、周囲に無限にある海水を利用して冷却可能であり、また、交流電源・補機冷却(サポート系)が不要であるため、仮に電源や補機冷却が喪失した場合でも、炉心・格納容器が冷却可能な静的安全設計となっていることが挙げられる。

- ・ ICS(非常用復水器)－2 系統

圧力容器の蒸気を熱交換器で凝縮し、凝縮水を重力で圧力容器へ戻すことにより炉心を冷却する。熱交換器は、1 次系と 2 次系の熱交換器と中間ループを介して、海水と間接的に熱交換を行う。

- ・ GDCS(重力落下式注水系)－2 系統

重力によりプール水または海水を圧力容器へ注入することにより炉心を冷却する。交流電源や補機冷却などのサポート系は不要である。交流電源・補機冷却(サポート系)及びポンプが不要である。

- ・ PCCS(格納容器静的冷却系)－2 系統

格納容器の蒸気を熱交換器で凝縮し、凝縮水を重力で格納容器へ戻すことにより格納容器の圧力を下げる。熱交換器は、1 次系と 2 次系の熱交換器と中間ループを介して、海水と間接的に熱交換を行う。交流電源や補機冷却などのサポート系は不要である。交流電源・補機冷却(サポート系)及びポンプが不要である。

- ・ FCVS(フィルターベントシステム)－2 系統

格納容器の過圧破損を防ぐために格納容器内のガスを大気に放出し(ベント)、ベントガスに含まれる放射性物質をフィルタで除去し大幅に低減する。

- ・ IVR(圧力容器内容融物保持)－1 系統

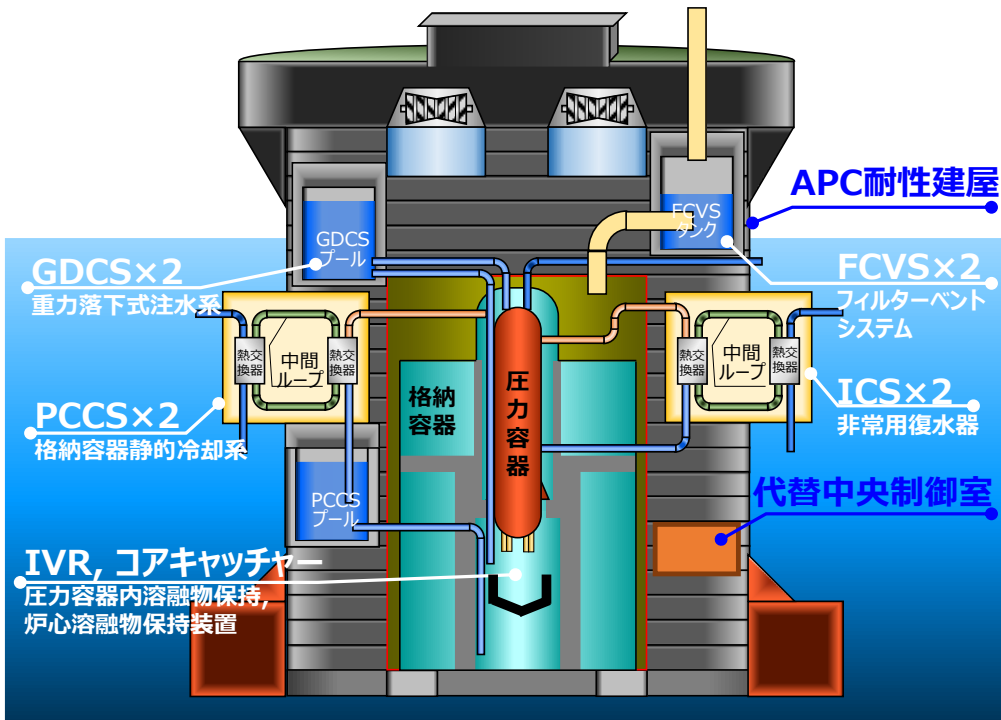
圧力容器を冠水冷却して溶融炉心を RPV 内に保持する。

- ・ コアキャッチャー(炉心溶融物保持装置)－1 系統

炉心溶融が生じた際に炉心溶融物をキャッチし、閉じ込めて冷却し、原子炉格納容器から流出しないようにする。

以上より、本研究では、OFNP の SA 設備、APC 耐性建屋、代替中央制御室の 3 点を組み合わせることによって、特重施設と SA 設備を統合した合理的設計が可能であると考察した。特重施設に対する要求事項と対応する設備の整理は、**Table 4-5** の通りである。

ただし、代替中央制御室には、DB 設備による冷温停止のみならず、SA 設備による格納容器破損防止のための制御権を追加する必要がある。また、大前提として、前述の通り、DB 設備/SA 設備の区分分離の徹底と独立性の強化によって、格納容器破損防止機能に対し、合理的に APC その他テロに対する耐性を確保する必要があることに注意されたい。



COCN(2022)を参考に作者作成

Figure 4-7 特定重大事項等対処施設の合理化の概念図

Table 4-5 特重施設の規制要求と対応する OFNP 設備

要求事項 (設置許可基準第 42 条)		OFNP 設備
APC その他テロ耐性。右記 1 つ以上	(1)特重施設は R/B との離隔距離を確保する (100 m 以上など)	APC 耐性建屋
	(2)特重施設は APC に対して頑強な建屋に収納される	
	(3)上記と同等以上の効果を有する	
格納容器破損防止に必要な設備	(1)原子炉冷却材圧力バウンダリの減圧操作機能	ICS
	(2)炉内の溶融炉心の冷却機能	ICS、GDCS
	(3)原子炉格納容器下部に落下した溶融炉心の冷却機能	IVR、コアキャッチャー
	(4)格納容器内の冷却・減圧・放射性物質低減機能	PCCS、FCVS
	(5)原子炉格納容器の過圧破損防止機能	PCCS、FCVS
	(6)上記機能を制御する緊急時制御室	代替中央制御室

4.4 Beyond DBT に対する洋上防衛の考察

Beyond DBT に対する日本を想定した OFNP の洋上防衛について考察する。なお、本節の内容は、筆者が作成した 2024 年度東京工業大学技術経営専門職学位課程プロジェクトレポート「原子力発電所等への戦争未満の軍事攻撃に関するシナリオプランニングを用いた危機対応の検討」(Appendix H)の研究内容に基づいている^{42,43}。

NPP の防護に対する主な対応主体については、Table 4-6 に示す通りある。原子力事業者は、(国家が定義する)テロリストなどの非国家主体を想定した DBT に対し、監視カメラなどの検知機能や壁などの遅延機能を組み合わせて堅牢な核物質防護システムを構築することが要求されている^{44,45}。また、有事の際には、警察や海上保安庁などの治安組織と連携して敵対者を対応(無力化)することが要求されている⁴⁶。一方で、テロ対策レベルを超える国家主体による軍事攻撃に対する NPP の防衛については、敵対者の量・質が警察や海上保安庁を超える場合は、主に自衛隊が対応することになっている⁴⁷。なお、第 3 章でも示した通り、日本では NPP の警備要員に致死性武器所有は許可されておらず、警察については、サブマシンガンを持った原発特別警備隊が 24 時間体制で警備している(Figure 4-8)⁴⁸。

NPP への武力攻撃に対する防衛の強化については、2022 年に発生したロシアのウクライナ侵攻を踏まえ、学会^{49,50,51}だけではなく国会⁵²や全国知事会⁵³などでも議論となっている。また、岸田首相が 2022 年 4 月の第 208 回国会・衆議院本会議⁵⁴において、以下の通り答弁している。

- ・ 原子力発電所の安全については、原子炉等規制法に基づく発電所の設備上の対応や事業者の対応によって確保しており、意図的な航空機衝突等のテロリズムへの備えまで事業者に要求をしています。その上で、原発へのミサイルによる武力攻撃に対しては、海上配備型の迎撃ミサイル(SM3)や地上配備型の対空誘導弾(PAC3)により対応するほか、事態対処法や国民保護法等の枠組みの下で、原子力施設の使用停止命令、住民避難等の措置を準備しています。

一方で、自衛隊への命令は、国会承認などのプロセスに伴うため、防衛行動自体よりもむしろ行動承認のための「証拠集め」に注力するのではないかと、といった有事における防衛の実効性については疑問が呈されている^{55,56,57}。OFNP の社会実装に向けては、今までの陸上 NPP とは全く異なる洋上設置であり、陸上と比較して洋上の方が警察力も手薄となるおそれもある⁵⁸。よって、OFNP への国家主体による軍事攻撃に対する防衛について、設計段階で考察することは大変重要である。

Table 4-6 脅威主体別の主な対応主体

	脅威主体	設計の内外	主な対応主体	
核セキュリティ性	非国家主体による テロ攻撃	DBT	(検知/遅延) 原子力事業者	(対応) 警察/海上保安庁
	国家主体による 軍事攻撃	Beyond DBT	—	(対応) 自衛隊
(参考) 原子力安全性	システムエラー、 人為的ミス、 自然災害、 など	DBA	(冷やす/止める/閉じ込める) 原子力事業者	
		Beyond DBA	(冷やす/止める/閉じ込める) 原子力事業者	



(出典) 令和4年警察白書

Figure 4-8 原発特別警備部隊

そもそも、日本国または日本に関連する第三国への軍事攻撃など際の態勢整備や事態認定については、事態対処法や重要影響事態法などの法律によって定められており^{59,60}、もって我が国の平和及び安全の確保に資することとなっている。主な「法的事態」は以下の通りである(Figure 4-9)。

- ・ 武力攻撃事態：
敵対国から日本への武力攻撃が発生した事態、または明白な危険が切迫する事態。
- ・ 存立危機事態：
敵対国から日本と密接な関係にある他国への武力攻撃が発生し、日本の存立が脅かされるなどの危険がある事態。
- ・ 緊急処理事態：
非国家主体から日本への武力攻撃に準ずるテロなどが発生した事態。
- ・ 重要影響事態：
敵対国と日本と密接な関係にある他国が緊迫した状況にあり、のそのまま放置すれば日本への武力攻撃に至るおそれのある事態。

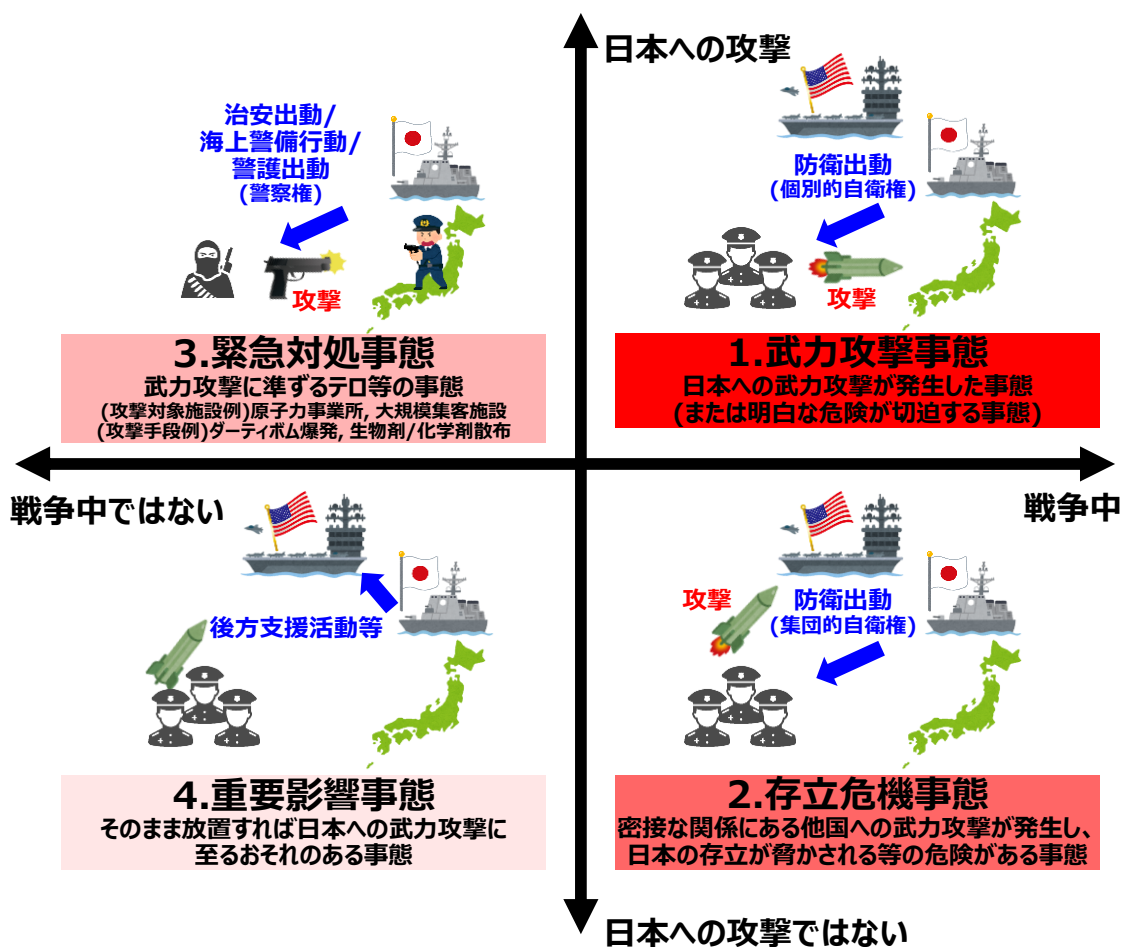


Figure 4-9 法的事態の区分

Beyond DBT となる有事の際は、上記の法的事態のもとで自衛隊は行動することとなる。ここで、自衛隊の行動については、行動類型毎の承認方法や武器の使用などが自衛隊法⁶¹によって、リスト形式で定められている⁶²。自衛隊は、状況に応じて該当する行動が国から命令され、対応にあたることとなる。言い方を変えると、自衛隊は自衛隊法で定められていない行動をとることは不可能である⁵⁶。

自衛隊法で定められた行動類型は、状況やその烈度によって様々だが、主なものは **Table 4-7** の示す通りである。この中で、OFNP と陸上の NPP に関連する主な行動類型について、烈度が低い順に並べると以下の通りとなる⁶³。

- ・ OFNP : 海上警備行動、治安出動、防衛出動
- ・ 陸上 NPP : 治安出動、防衛出動

「治安出動」と「防衛出動」は、今までに発出された事例は無く、防衛出動は武力攻撃が発生した事態、治安出動はその一歩手前の間接侵略その他の緊急事態における行動である。そのため、それらの烈度が高く緊迫した状況に至る前までに、緊迫状態を緩和することが NPP 防衛を考える上で重要となってくる。そこで、戦略3文書の改定で決定した敵の発射基地などを叩く反撃能力の保有や⁶⁴、日米安全保障条約などの他国との同盟体制による集団的自衛による「抑止力」、及び「外交努力」が有用である⁶⁵。また、治安出動は閣議決定と国会による事後承認、防衛出動は閣議決定と原則事前となる国会承認が必要となることから、これら二つの行動が国内外に与える影響は大きく、慎重な意思決定を要することが伺える。

一方で、「海上警備行動」は、海上保安庁のみでは対応が不可能または困難な事態ではあるが、治安出動のような間接侵略その他の緊急事態に至らない場合において下令可能である。海上警備行動は、治安出動に比べて緩和された下令要件、簡易な手続きによって、治安維持機能を効率的に運用するための行動である⁶⁶。海上警備行動は能登半島沖不審船事件(1999年)、漢級原子力潜水艦領海侵犯事件(2004年)、ソマリア沖の海賊対策(2009年)と3回の発令実績がある^{63,67}。具体的には、2014~2015年の平和安全法制等の整備時⁶⁸、閣議決定によって一部の状況下における海上警備行動の発出手続きが迅速化されている⁶⁹。そのため、「我が国の領海及び内水で国際法上の無害通航に該当しない航行を行う外国軍艦への対処について」決定に基づき⁷⁰、領海内に設置する OFNP であれば、電話などにより各国務大臣より了承を得られるように閣議決定手続きが迅速化可能であろう。

海上警備行動未満の平時においても、行動下令に至らない範囲で自衛隊による「警戒監視活動」が可能である。警戒監視活動では、海上自衛隊の哨戒機や航空自衛隊のレーダー

サイトや早期警戒管制機等による 24 時間体制の海上保安庁などのサポートも検討可能である (Figure 4-10)⁴⁷。そのため、敵対者への「抑止力」として期待可能である。

ここで、海上警備行動の「危害許容要件」(武器の使用によって人に危害を加えることが許される条件)は、「職務上警護する人などが暴行・侵害を受ける危険」「一定の要件を満たした外国船舶を停船させるため(船体射撃)」である。治安出動は、それらに加えて「正当防衛、緊急避難、兇悪犯による公務執行に対する抵抗の抑制」があり、条件が緩和されている。よって、海上警備行動や警戒監視活動は、治安出動に比べると危害許容要件が厳しいため、それ自体に敵対者に対する無力化能力はそこまで高くないことに注意されたい。ただし、自衛隊は、警察や海上保安庁と比較すると、潜在的武力の量・質が異なることから、より強力な「抑止力」として期待可能であろう。

なお、警察活動と防衛の切れ目ない対応やリソースの有効活用の観点から、警察や海上保安庁ではなく、自衛隊単独で OFNP の警察活動と防衛を行う案もありえる。一方で、「自衛隊を使うことによってミリタリーレベルに事態を悪化させた」と他国に口実を与えるおそれも指摘されている⁷¹。また、自衛隊がすべての警察権を有しておらず、その整理も必要となる⁶⁶。よって、同案については、さらなる検討が必要であることに注意されたい。

以上より、国家主体による NPP への軍事攻撃に対する防衛について、自衛隊の許可される行動は、法令によって列度に応じたリスト形式に定義されていることを確認した。一方で、防衛出動や治安出動といった烈度が高い状況における国内外への影響の大きい自衛隊の行動は、国会承認などのプロセスを伴う。そのため、有事の際は、防衛行動よりもむしろ行動承認のための「証拠集め」に注力するのではないかと、という防衛の実効性(即応性)に関する課題がある点を言及した。なお、防衛出動や治安出動の下令実績は一度も無く、本課題は NPP への軍事攻撃に限ったものではなく、国内防衛全般の懸念事項である。

そのうえで、洋上の方が陸上に比べて警察力が手薄になるおそれに対して、OFNP は洋上特有の自衛隊の「海上警備行動」により、緩和された下令要件、簡易な手続きで治安維持機能を効率的に運用可能であることを言及した。なお、海上警備行動は、過去の下令実績が 3 回有る。さらに、行動下令に至らない平時の「警戒監視活動」を活用することで、敵対者への抑止力として機能可能であることを言及した。また、海上警備行動や警戒監視活動は、治安出動に比べると危害許容要件が厳しいため、それ自体に敵対者に対する無力化能力はそこまで高くないものの、「抑止力」としては大いに期待可能であることを言及した。

Table 4-7 自衛隊の主な行動類型

行動類型	発動条件	閣議決定	国会承認	烈度
防衛出動 (個別的自衛権)	日本への武力攻撃が発生した事態又は明白な危険が切迫する事態	必要	原則事前	高
防衛出動 (集団的自衛権)	密接な関係にある他国への武力攻撃が発生し、日本の存立が脅かされる等の危険がある事態	必要	原則事前	
防衛出動待機	事態が緊迫し、防衛出動命令が発せられることが予測される場合	必要	—	
治安出動	間接侵略その他の緊急事態に際して、一般の警察力をもっては、治安を維持することができないと認められる場合	必要	事後承認	中
海上警備行動 (注2)	海上における人命若しくは財産の保護又は治安の維持のため特別の必要がある場合 (注1)	必要	—	低
自衛隊施設等の警 護出動	自衛隊又は在日米軍施設・区域において、大規模なテロ攻撃が行われるおそれがあり、必要かつ、被害防止の必要があると認める場合	必要	—	
後方支援活動等	我が国の平和及び安全に重要な影響を与える事態	必要	原則事前	
弾道ミサイル等に対 する破壊措置(注3)	弾道ミサイル等が日本に飛来するおそれがあり、被害防止の必要があると認めるとき	必要	事後報告	

(注1) 一部の状況で、閣議決定手続きを迅速化(2015年)

- ① 離島などへの武装集団による不法上陸
- ② 領海及び内水上の外国軍艦の無害ではない通航
- ③ 公海上の民間船舶へ侵害行為を行う外国船舶

(注2) 海上警備行動の実績は3回

- ① 能登半島沖不審船事件(1999年)
- ② 漢級原子力潜水艦領海侵犯事件(2004年)
- ③ ソマリア沖の海賊対策(2009年)

(注3) 破壊措置の複数回の実績あり



(出典) 令和5年版防衛白書 (2023) 273頁

Figure 4-10 周辺海空域の警戒監視活動のイメージ

4.5 今後の展望

- ・ SFP 室の分離、SFP 室扉の封印

本研究では、BWR の SFP について、PWR の設計を基とし、原子炉建屋オペフロから分離し、区画された SFP 室として枢要区域化した。また、SFP 室の扉に対し、保障措置上の封印を施す設計を提示した。SFP 室扉の封印は前例のない設計であり、実運用上の検証が必須となるが、設計初期段階における 2S by design 導入し、3S シナジー効果を最大化し効率的かつ効果的に設計した好事例である。Safety の観点では、原子炉ウェルと SFP を物理的に分離することで、いずれかの現場環境が悪化した場合でも、他方の現場復旧作業への波及的影響を防止可能である。また、Safeguards の観点では、軽水炉の主なリスク箇所は、核燃料が保管されている原子炉と SFP の 2 箇所であるため、プラント運転状態を問わずアクセス可能な SFP に対し、物理的にアクセス不可とするリスク低減効果は大きい。また、SFP のカメラ監視と SFP 室扉の封印による二重の封じ込め/監視で、MOX 燃料使用による Safeguards 上の査察頻度増加の抑制や、Security 上の内部脅威者対策として期待可能である。なお、仮に緊急で扉の封印を解く必要がある場合は、解除期間を記録する封印を施しておくことによって¹¹、IAEA 査察官の到着を待つことなく解除可能かもしれない。

今後、キャスクの経済性やキャスク落下の原子力安全性などを踏まえ、燃料保管シナリオがプールからキャスク貯蔵に円滑に進まない未来も考慮すると、本設計の果たす社会的意義は大きい。また、OFNP のみならず、多様な炉型や洋上・陸上の原子力システムでも広く活用可能な概念であるため、さらなる研究開発を期待する。なお、本論文の 2.2.3 項において、物理的許容量、冷却機能停止時の熱的許容量、未臨界性の 3 つの観点より、ABWR プラント寿命 60 年分の SF を SFP に貯蔵する成立性評価も行っているので参考にされたい。

- ・ 洋上 NPP 沈没時の影響緩和設計

本研究では、想定を超える OFNP 沈没時の影響緩和設計として、SF を「貯めない・閉じ込める・回収する」の 3 つの基本方針を考案し、概算評価によってその成立性を示した。本設計は、設計初期段階における抜本的な設計変更により、社会的受容性の向上のみならず、Security/Safety 両面の堅牢性をも強化する設計の一例である。

本設計により、沈没時の影響緩和に加えて、レジリエンス機能の強化も期待可能である。また、OFNP のみならず、多様な炉型を搭載する船舶型も含めた洋上 NPP に対して活用可能な概念であるため、さらなる研究開発を期待する。

4.6 本章のまとめ

本章では、第 2 章「核不拡散性評価」と第 3 章「核セキュリティ性評価」の結果を受け、2S by design を取り入れて 3S シナジー効果を最大化し効率的かつ効果的に設計された、堅牢な OFNP 概念を提示した^{1,2,3}。また、安全上の重要機器を水面下に配置させた縦長構造や洋上特有の監視の容易さを活用し、堅牢性強化が可能であることを言及した。また、開発した評価手法は多様な炉型と設置方式に対し適用可能であること、得られた結果のうち高燃焼度化、運転サイクル延長及び枢要区域化は、BWR 型を搭載する洋上・陸上 NPP に対し堅牢性強化が可能であることを指摘した。さらに、原子力プラントのみならず船舶安全性も含めた想定を上回る事象(Beyond DBT)に対して、日本を想定した OFNP の影響緩和設計と洋上防衛について考察し、沈没対策を施した設計、及び特定重大事故等対処施設の合理化、洋上防衛における法令及び実績に基づいた実効性と課題を述べた³。最後に、今後の展望を言及した。

参考文献

- ¹ D. Hara, H. Sagara, “Proliferation Resistance Analysis of Offshore Floating Nuclear Power Plant”, Energy Report, International Symposium on Zero-Carbon Energy Systems (IZES), Tokyo Institute of Technology, 10–12 January 2023, Tokyo, Japan, (Provisionally Accepted).
- ² D. Hara, H. Sagara, “Physical protection design of offshore floating nuclear power plant against light torpedo threats: a simulation study of hypervelocity jet underwater”, (Under review).
- ³ D. Hara, H. Sagara, “Design of Robust Physical Protection Systems based on Vital Area Identification and Path Analysis for Offshore Floating Nuclear Power Plant”, Journal of Nuclear Materials Management; (To be submitted).
- ⁴ M. K. Snell, C. D. Jaeger, S. E. Jordan, et al., “Security-by-Design Handbook”, SAND2013-0038, January 2013, (2013), <https://doi.org/10.2172/1088049>
- ⁵ R. A. Bari, S. J. Johnson, J. Hockert, et al., “Overview of the Facility Safeguardability Analysis (FSA) Process”, PNNL-21698, August 2012, (2012), <https://www.osti.gov/biblio/1055408>
- ⁶ T. Bjornard, R. Bean, S. DeMuth, et al., “Safeguards-by-Design: Early Integration of Physical Protection and Safeguardability into Design of Nuclear Facilities”, Global 2009, INL/CON-09-16762, September 2009, (2009), <https://inldigitallibrary.inl.gov/sites/sti/sti/4384039.pdf>
- ⁷ 東京電力, “柏崎刈羽原子力発電所 6 号及び 7 号炉 重大事故等対策の有効性評価について 平成 29 年 12 月”, KK67-0034 改 55, 資料 2-1, (2017), https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/12348280/www2.nra.go.jp/disclosure/committee/yuushikisya/tekigousei/power_plants/kk67/meeting/h29_12.html
- ⁸ 原子力規制委員会(NRA), “実用発電用原子炉に係る炉心損傷防止対策及び格納容器破損防止対策の有効性評価に関する審査ガイド”, (2017), <https://www.nra.go.jp/data/000213306.pdf>
- ⁹ 原子力安全委員会, “発電用軽水型原子炉施設に関する安全設計審査指針 (平成 13 年 3 月 29 日改訂)”, 指針 42. 制御室外からの原子炉停止機能, (2001), <https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/9483636/www.nsr.go.jp/archive/nsc/shinsashishin/anzen.htm>
- ¹⁰ 原子力規制委員会(NRA), “実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則 (令和 6 年 3 月 13 日改正)”, 第 26 条 原子炉制御室等, (2024), https://www.nra.go.jp/law_kijyun/law/jitsuyou_kisoku.html
- ¹¹ 株木俊英, “保障措置実施に係る事業者連絡会 3.保障措置活動の実施における要注意事項例 (2023 年 3 月 9 日)”, P3~9, (2023), <https://www.nra.go.jp/data/000422684.pdf>

-
- ¹² 国際原子力機関(IAEA), “Use of Nuclear Material Accounting and Control for Nuclear Security Purposes at Facilities”, IAEA Nuclear Security Series No. 25-G, (2015), <https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1685web-43244937.pdf>
- ¹³ “施設におけるセキュリティを目的とした使用中の核燃料物質の計量と管理 (NSS No.25-G)(抜粋)”, 核セキュリティを目的とした核燃料物質の計量管理に係る検討状況説明会, 令和5年7月7日, 参考4, <https://www.da.nra.go.jp/view/NRA009000288?contents=NRA009000288-002-001#pdf=NRA009000288-002-007>
- ¹⁴ K. Vincent, N. Todreas, J. Buongiorno, M. Golay, A. Birch, T. Isdanavich, R. Thomas, H. Stevens, “Overview of security plan for offshore floating nuclear plant”, Proc. ICONE24, Charlotte, North Carolina, June 26-30, 2016, (2016), <http://dx.doi.org/10.1115/ICONE24-61029>
- ¹⁵ J. Buongiorno, J. Jurewicz, M. Golay, N. Todreas, “The offshore floating nuclear plant concept”, Nuclear Technology. Vol. 194, 1-14, (2016), <http://dx.doi.org/10.13182/NT15-49>
- ¹⁶ 原子力安全研究協会, “軽水炉発電所のあらまし 改訂第3版(平成20年9月)”, 実務テキストシリーズ No.1, P121,131, (2008).
- ¹⁷ 東陽テクニカ, “水中セキュリティ/特機 総合カタログ”, P6, P23, https://www.toyo.co.jp/kaiyo/catalog/list/?contents_type=2383&c1=1613&l=2
- ¹⁸ 東陽テクニカ, “水中侵入者探知ソーナール Sentinel IDS”, https://www.toyo.co.jp/kaiyo/catalog/list/?contents_type=2383&c1=1613&l=2
- ¹⁹ 東陽テクニカ, “船舶・港湾統合監視システム NiDAR”, https://www.toyo.co.jp/kaiyo/catalog/list/?contents_type=2383&c1=1613&l=2
- ²⁰ 原子力規制委員会(NRA), “実用発電用原子炉に係る航空機衝突影響評価に関する審査ガイド(平成26年9月)”, (2014), https://www.nra.go.jp/disclosure/committee/kettei/02/kisei_naiki.html.
- ²¹ Nuclear Energy Institute(NEI), “Methodology for Performing Aircraft Impact Assessments for New Plant Designs REV. 07 Public Version” NEI 07-13 Revision 7 May 2009, <https://www.nrc.gov/docs/ML0914/ML091490723.pdf>
- ²² 核燃料安全専門審査会, “我が国における使用済燃料の海上輸送に係る安全性について(報告)”, 原子力委員会, 昭和53年9月21日, (1978), <https://www.aec.go.jp/jicst/NC/about/ugoki/geppou/V23/N09/197809V23N09.html>
※電力中央研究所, “使用済核燃料輸送物の安全評価に関する研究”, (1977).と題した報告書がもとになっているが非公開である。(青木成文, “放射性物質輸送のすべて 第2版”より)
- ²³ 原子力安全委員会 安全目標専門部会, “発電用軽水型原子炉施設の性能目標について—安全目標案に対応する性能目標について—”, 平成18年3月28日, P5, (2006), http://www.inaco.co.jp/isaac/shiryo/genpatsu/NSR/20130227_0031_08-2.pdf

-
- ²⁴ Nuclear Energy Institute(NEI), “B.5.b Phase 2 & 3 Submittal Guideline Revision 3”, NEI 06-12 Revision 3 September 2009, (2009),
<https://www.nrc.gov/docs/ML0928/ML092890400.pdf>
- ²⁵ 福島原発事故独立検証委員会, “福島原発事故独立検証委員会 調査・検証報告書”, P340, (2012).
- ²⁶ 笹川平和財団, “福島原発事故と危機管理 一日米同盟協力の視点から－ 2012 年 9 月”, P81, (2012), <https://www.spf.org/publications/8271.html>
- ²⁷ 産業競争力懇談会(COCN), “産業競争力懇談会 2022 年度 プロジェクト 最終報告 浮体式原子力発電”, (2023), <http://www.cocn.jp/report/2022>
- ²⁸ 産業競争力懇談会(COCN), “産業競争力懇談会 2020 年度 研究会 最終報告 浮体式原子力発電研究会”, (2021), <http://www.cocn.jp/report/2020>
- ²⁹ 産業競争力懇談会(COCN), “産業競争力懇談会 2021 年度 プロジェクト 最終報告 浮体式原子力発電”, (2022), <http://www.cocn.jp/report/2021>
- ³⁰ 石川播磨重工業, “原子力第一船”むつ” 船体部計画・建造の記憶”, 石川播磨技法・1970 年記念号, (1970).
- ³¹ International Commission on Radiological Protection(ICRP), “The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection”, ICRP Publication 103, (2007), <https://www.icrp.org/publication.asp?id=ICRP+Publication+103>
- ³² 日本アイソトープ協会, “国際放射線防護委員会の 2007 年勧告”, ICRP Publication 103, (2009), https://www.icrp.org/docs/P103_Japanese.pdf
- ³³ 東京電力, “柏崎刈羽原子力発電所 6 号及び 7 号炉 重大事故等対策の有効性評価について (平成 29 年 12 月)”, (2017),
[https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/12348280/www2.nra.go.jp/disclosure/committee/](https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/12348280/www2.nra.go.jp/disclosure/committee/yuushikisya/tekigousei/power_plants/kk67/meeting/h29_12.html)
[yuushikisya/tekigousei/power_plants/kk67/meeting/h29_12.html](https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/12348280/www2.nra.go.jp/disclosure/committee/kuushikisya/tekigousei/power_plants/kk67/meeting/h29_12.html)
- ³⁴ 和田孝直, 好永俊昭, 根本洋一, “日本原子力発電株式会社東海大に発電所納め 1,100MWe 原子炉格納容器の建設”, 日立評論 VOL.58, No.9, 1976-9, P39, (1976),
https://www.hitachihyoron.com/jp/pdf/1976/09/1976_09_07.pdf
- ³⁵ 日本造船研究協会, “第 198 研究部会 放射性物質等の海上輸送における事故処理技術に関する調査研究報告書 (昭和 61 年 3 月)”, 研究資料 No.387,
<https://www.jstra.jp/html/PDF/SR198-6103.pdf>
- ³⁶ 原子力規制委員会(NRA), “実用発電用原子炉に係る新規規制基準について－概要－”. (2016), <https://www.nra.go.jp/data/000070101.pdf>
- ³⁷ <https://www.sankei.com/article/20220220-HF7CX36AHFIKDOSPO3FYQ4ECO4>
- ³⁸ 発電コスト検証ワーキンググループ, “令和 3 年 9 月 報告書 資料 2 各電源の諸元一覧”, 14 原子力, P24, (2021),
https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/mitoshi/cost_wg/pdf/cost_wg_20210908_02.pdf

-
- ³⁹ 日本原子力学会 原子力発電部会 「次期軽水炉の技術要件検討」ワーキンググループ, “次期軽水炉の技術要件について 「次期軽水炉の技術要件検討」ワーキンググループ報告書”, 2020 年 6 月, P36, (2020),
http://www.aesj.or.jp/~hatsuden/katsudou/04_jikiroWG/jikiroWG_index.html
- ⁴⁰ 日本原子力学会 原子力発電部会 「次期軽水炉の技術要件検討」ワーキンググループ (フェーズ 2), “次期軽水炉の技術要件と実現のための取り組み 「次期軽水炉の技術要件検討」ワーキンググループ (フェーズ 2) 報告書”, 2024 年 3 月, P26, P89, (2024),
http://www.aesj.or.jp/~hatsuden/katsudou/04_jikiroWG/jikiroWG_index.html
- ⁴¹ 原子力規制委員会(NRA), “実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則 (令和 6 年 3 月 13 日改正)”, 第 39 条 地震による損傷の防止, 第 40 条 津波による損傷の防止, 第 41 条 火災による損傷の防止, 第 42 条 特定重大事故等対処施設, (2024), https://www.nra.go.jp/law_kijyun/law/jitsuyou_kisoku.html
- ⁴² 原大輔, 池上雅子, “原子力発電所等への戦争未満の軍事攻撃に関するシナリオプランニングを用いた危機対応の検討”, 2024 年度 東京工業大学 技術経営専門職学位課程 プロジェクトレポート, (2024).
- ⁴³ D. Hara, M. Ikegami “Study of crisis response using scenario planning regarding military attacks less than war on nuclear power plants”, Alva Myrdal Centre for Nuclear Disarmament(AMC) Annual Conference 2024, Uppsala University, (2024).
- ⁴⁴ 国際原子力機関(IAEA), “Nuclear Security Recommendations on Physical Protection of Nuclear Material and Nuclear Facilities (INFCIRC/225/Revision 5)”, IAEA Nuclear Security Series No. 13, (2011), <https://www.iaea.org/publications/8629/nuclear-security-recommendations-on-physical-protection-of-nuclear-material-and-nuclear-facilities-infcirc225revision-5>
- ⁴⁵ 原子力規制委員会, “実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則”, 第 91 条(防護措置), (2024), <https://elaws.e-gov.go.jp/document?lawid=353M50000400077>
- ⁴⁶ 国際組織犯罪等・国際テロ対策推進本部, “原子力発電所等に対するテロの未然防止対策の強化について”, 平成 23 年 11 月 14 日決定, (2011),
<https://www.kantei.go.jp/jp/singi/sosikihanzai/111114honbun.pdf>
- ⁴⁷ 防衛省, “令和 5 年度版 防衛白書”, P273,303, (2023),
https://www.mod.go.jp/j/press/wp/wp2023/w2023_00.html
- ⁴⁸ 警察庁, “令和 4 年度版 警察白書”, P183, (2023),
<https://www.npa.go.jp/hakusyo/r04/index.html>
- ⁴⁹ 笹川平和財団 安全保障研究グループ 核不拡散・核セキュリティ研究会, “緊急提言 ロシアによるウクライナ侵攻 原子力民生利用の諸課題と日本の役割”, 2022 年 6 月, (2022),
<https://www.spf.org/security/publications/20220701.html>

-
- ⁵⁰ 笹川平和財団 安全保障研究グループ 核不拡散・核セキュリティ研究会, “原子力施設の保護と日本の役割_笹川財団〜ロシアによるウクライナ侵攻と原発攻撃をうけて〜”, 2023 年 2 月, (2023), <https://www.spf.org/security/publications/20230224.html>
- ⁵¹ 福井康人, “武力紛争時における原子力施設での日本の国内対応”, 第 43 回日本核物質管理学会年次大会, 2022 年 11 月 21 日~22 日, #4312, (2022).
- ⁵² 衆議院, “第 211 回国会 衆議院 質問第 6 号 原発関連施設への軍事攻撃が生じた際の我が国の防護体制に関する質問主意書” 令和 5 年 2 月 9 日, 阿部知子, (2023), https://www.shugiin.go.jp/internet/itdb_shitsumon.nsf/html/shitsumon/kaiji211_1.htm
- ⁵³ 全国知事会, “原子力発電所に対する武力攻撃に関する緊急要請”, 令和 4 年 3 月 30 日, (2022), https://www.nga.gr.jp/committee_pt/sp_committee/genshiryoku/r03/1648610075455.html
- ⁵⁴ 衆議院, “第 208 回国会 衆議院 本会議 第 19 号”, 岸田文雄, 令和 4 年 4 月 12 日, (2022), https://www.shugiin.go.jp/internet/itdb_kaigiroku.nsf/html/kaigiroku/000120820220412019.htm
- ⁵⁵ 安全保障の法的基盤の再構築に関する懇談会, “「安全保障の法的基盤の再構築に関する懇談会」報告書”, 平成 26 年 5 月 15 日, (2014), <https://worldjpn.net/documents/texts/JPSC/20140515.O1J.html>
- ⁵⁶ 笹川平和財団, “大規模災害を端緒とする台湾危機に対する日米共同対処をめぐる課題 (安全保障机上演習プロジェクト 2018 年度報告書)”, 2019 年 11 月, P11, (2019), https://www.spf.org/global-data/TTX_Report_1101.pdf
- ⁵⁷ 日本国際問題研究所, “安全保障政策のリアリティ・チェック”, 平成 29 年 3 月, (2017), https://www.jiia.or.jp/pdf/research/H28_Security_Policy/
- ⁵⁸ 田村重信, “新・防衛法制”, P153-222, P169, (2018).
- ⁵⁹ “武力攻撃事態等及び存立危機事態における我が国の平和と独立並びに国及び国民の安全の確保に関する法律”, (2021), <https://elaws.e-gov.go.jp/document?lawid=415AC0000000079>
- ⁶⁰ “重要影響事態に際して我が国の平和及び安全を確保するための措置に関する法律”, (2021), <https://elaws.e-gov.go.jp/document?lawid=411AC0000000060>
- ⁶¹ “自衛隊法”, (2024), <https://elaws.e-gov.go.jp/document?lawid=329AC0000000165>
- ⁶² 防衛省, “令和 5 年版 防衛白書 資料編 自衛隊の主な行動の要件(国会承認含む)と武器使用権限等について”, 資料 15, P110~113, (2023), <https://www.mod.go.jp/j/press/wp/wp2023/pdf/R05shiryo.pdf>
- ⁶³ 田村重信, “日本の防衛政策第 2 版”, P173~182, (2016).
- ⁶⁴ “国家安全保障戦略”, “国家防衛戦略”, “防衛力整備計画”, いずれも令和 4 年 12 月 16 日閣議決定, (2022), <https://www.mod.go.jp/j/policy/agenda/guideline/index.html>

-
- ⁶⁵ 日本国際問題研究所, “朝鮮半島のシナリオ・プランニング”, (2013),
https://www2.jiia.or.jp/pdf/resarch/H25_Korean_Peninsula/H25_Scenario_Planning_for_Korean_Peninsula.php
- ⁶⁶ 林浩一, “海上における警備行動の 2 つの側面について－治安出動及び領空侵犯に対する措置との対比から－”, NIDS コメンタリー 第 241 号, 2022 年 10 月 20 日, (2022),
<https://www.nids.mod.go.jp/publication/commentary/pdf/commentary241.pdf>
- ⁶⁷ 中曽根康弘世界平和研究所 グレーゾーン事態研究委員会, “海と空のグレーゾーン事態への対処－その問題と対策－”, 2018 年 6 月 26 日, (2018),
<https://www.npi.or.jp/research/2018/06/27092539.html>
- ⁶⁸ “国の存立を全うし、国民を守るための切れ目のない安全保障法制の整備について”, 平成 26 年 7 月 1 日, (2014), <https://www.cas.go.jp/jp/gaiyou/jimu/pdf/anpohosei.pdf>
- ⁶⁹ “離島等に対する武装集団による不法上陸等事案に対する政府の対処について”, “我が国の領海及び内水で国際法上の無害通航に該当しない航行を行う外国軍艦への対処について”, “公海上で我が国の民間船舶に対し侵害行為を行う外国船舶を自衛隊の船舶等が認知した場合における当該侵害行為への対処について”, いずれも平成 27 年 5 月 14 日閣議決定, (2015), https://www.cas.go.jp/jp/gaiyou/jimu/housei_seibi.html
- ⁷⁰ “我が国の領海及び内水で国際法上の無害通航に該当しない航行を行う外国軍艦への対処について”, 平成 27 年 5 月 14 日閣議決定, (2015),
<https://www.cas.go.jp/jp/gaiyou/jimu/pdf/gaikokugunkantaisho.pdf>
- ⁷¹ 参議院, “第 189 回国会 参議院 我が国及び国際社会の平和安全法制に関する特別委員会 第 20 号”, 平成 27 年 9 月 14 日, 069 安倍晋三, (2015),
<https://kokkai.ndl.go.jp/#/detail?minId=118913929X02020150914&current=2>

第 5 章

結論

第5章 結論

原子力安全の向上や原子力平和利用の推進に向けた浮体式洋上原子力発電所（OFNP）の研究が世界的に進められているが、原子力安全性を中心としたプラント概念の技術的成立性に焦点が当てられており、洋上といったこれまでにない設置環境における社会実装に必須となる新たな核セキュリティ・核不拡散面での検討は十分ではない。本研究では、洋上特有の核セキュリティ・核不拡散性（2S）上の新たな脅威に対する応答性を定量評価可能な手法を開発し、2S by design を取り入れた OFNP の堅牢性強化の可能性を明らかにし、堅牢な OFNP 概念を提示した。

第1章では、日本のエネルギー社会を取り巻く現状と世界で進められている OFNP の研究開発を概観し、社会実装によるエネルギー社会への貢献が期待できる一方で、洋上特有の 2S 上の課題を指摘した。OFNP の 2S 上の脅威に対する応答性を定量評価可能な手法を開発すること、及び原子力システム設計の初期段階から 2S の観点を統合し効率的かつ効果的に強化する 2S by design を取り入れることにより、OFNP の堅牢性強化の可能性を明らかにし、堅牢な OFNP 概念を提示することを目的として、本研究の位置づけ、意義を述べた。

第2章では、非核兵器保有国による OFNP の核拡散リスクを定量化し、洋上特有の輸送や保管を含む核燃料管理や、取り扱う核燃料タイプによるリスク低減効果を明らかにした。第四世代原子力システムの核拡散抵抗性及び核物質防護（GIF/PRPP）評価手法に基づき、輸送及び移送に伴う核拡散リスク、混合酸化物（MOX）燃料や、5%超 20%未満低濃縮ウラン（HALEU）燃料といった高燃焼度燃料の特性を解析可能な評価指標を開発し、陸上原子力発電所（NPP）と比較しながら核拡散抵抗性を定量的に評価した。結果として、核拡散リスク低減のために燃料管理方法は、MOX 新燃料の 10 年から 15 年程度の頻度での一括輸送及び検認することが最も有効であることを明らかにし、高燃焼度化、運転サイクル期間の延長、及び乾式キャスクの使用等による一括輸送も有効であることを示している。これらの燃料管理を行った OFNP と陸上 NPP を比較すると、OFNP の核拡散抵抗性は、検知確率、核分裂性物質タイプ、拡散機会の点で高いことを明らかにした。最後に、核物質転用の経路解析を行い、Safeguards by design による堅牢な OFNP の保障措置システム設計を提示した。

第3章では、洋上特有の核セキュリティ上の新たな脅威に対する応答性を定量評価可能な手法を開発し、Security by design による堅牢な OFNP の核物質防護システム設計を提示した。新たな脅威として、遠隔攻撃手段の魚雷を想定し船殻への構造健全性解析を行った。また、脅威への対抗能力として、米国における既往研究と異なり警備要員が致死性武器と

先制攻撃権を持たない国家を想定し、船舶移乗による核物質の盗取や妨害破壊行為に対する核セキュリティ性を定量的に評価した。船舶移乗による妨害破壊行為として、核燃料への爆破などにより直接的に燃料損傷させて放射性物質飛散を狙った直接的妨害破壊と、OFNP の安全機能喪失により間接的に燃料損傷させて放射性物質飛散を狙った間接的妨害破壊を評価した。結果として、OFNP 外殻の健全性が担保されるまで魚雷から発出されるジェットを減速するために最低必要な水の侵入深さは 4 m であり、不確かさを考慮した上で OFNP 周囲から 5 m 離れた場所へ水中ネット等を設置する手段が有効であることを明らかにした。次に枢要区域として、陸上 NPP と同様に使用済燃料または MOX 新燃料が貯蔵された使用済燃料プール室や、補機冷却の取水口や代替中央制御室を設定し、防護措置を取ることでさらに堅牢性を強化させられることを明らかにした。また、OFNP 特有の縦長構造（高さ 100 m 超）により、外部侵入には水平移動のみならず垂直移動が多分に要求され、防護区域へのアクセス遅延のためには警備員詰所における乗降エレベータ等の経路管理が有効であることを明らかにした。また、洋上特有の監視の容易さを利用し、OFNP の半径 1 km に渡る広範囲を周辺監視区域として新たに設定し、不審船等が監視された場合に治安部隊の準備を進めることにより到着時間を大幅に短縮し、阻止確率を向上させられることを明らかにした。これらの設計を行うことで、陸上 NPP と比較して堅牢性は強化可能であることを明らかにした。治安部隊について、OFNP 内での常駐または巡視艇による近隣待機といった即応体制構築が必要であることを指摘した。

第 4 章では、第 2 章と第 3 章の結果を受け、2S by design を取り入れて原子力安全性・核セキュリティ性・核不拡散性（3S）シナジー効果を最大化し効率的かつ効果的に設計された、堅牢な OFNP 概念を提示した。また、安全上の重要機器を水面下に配置させた縦長構造や洋上特有の監視の容易さを活用し、堅牢性強化が可能であることを言及した。また、開発した評価手法は多様な炉型と設置方式に対し適用可能であること、得られた結果のうち高燃焼度化、運転サイクル延長及び枢要区域化は、BWR 型を搭載する洋上・陸上 NPP に対し堅牢性強化が可能であることを指摘した。さらに、原子力プラントのみならず船舶安全性も含めた想定を上回る事象（Beyond DBT）に対して、日本を想定した OFNP の影響緩和設計と洋上防衛について考察し、沈没対策を施した設計及び特定重大事故等対処施設の合理化、洋上防衛における法令及び実績に基づいた実効性と課題を論述した。最後に、今後の展望を言及した。

第 5 章では、各章によって得られた結果を総括し、本論文の結論とした。本論文は、洋上特有の 2S 上の新たな脅威に対する多様な炉型の応答性を定量評価可能な手法を開発し、2S by design を取り入れた OFNP の堅牢性強化及び合理化の可能性を明らかにし、洋上の原子力平和利用に必須となる 2S を強化した堅牢な OFNP 概念を提示した。

謝辞

本論文の執筆にあたり、指導教員である相樂洋教授におかれましては、面識が全くないにも関わらず、入学前から研究テーマについて相談に乗っていただき、社会人学生としての入学を躊躇っていた当方を勇気づけてくださいました。博士後期課程の3年間、常にご多忙を極める中、多大な時間と労力を割いて懇切丁寧にご支援ご鞭撻いただき、心からお礼申し上げます。また、東京工業大学・技術経営専門職学位課程へのデュアルディグリー入学の挑戦にも理解し、尊重していただいたことに謝意を表します。

東京工業大学 原子核工学コースの小原徹教授、池上雅子教授、林崎規託教授、木倉宏成准教授におかれましては、博士論文審査の過程において多角的なご意見・ご助言をいただき、心から感謝しております。特に池上雅子教授には、東京工業大学・技術経営専門職学位課程における指導教員としてご指南いただきました。博士課程、専門職学位課程、社会人の並走について理解し、多大なる支援をいただき、深く感謝しております。

相楽研究室のメンバーにおかれましては、たまにしか顔を出さない社会人学生である当方を温かく迎えていただきました。研究室に行った際は、雑談してばかりで皆さんの貴重な時間をいただいていたばかりでしたが、新鮮な意見をいただき、リフレッシュして研究活動に臨むことができましたことに感謝の意を述べます。

勤務先である東京電力ホールディングス株式会社の同僚におかれましては、研究活動や学会活動などでご迷惑をおかけしましたが、いつも笑顔で送り出していただき、ありがたく存じます。また、Security と Safeguards 面で素人同然の当方に対して、懇切丁寧にご説明いただいた同僚に心よりお礼申し上げます。Safety のみならず 3S 人材、産業界のみならず産学人材として、シナジー効果も含めて 6 倍以上の超高速・超出力で恩返しする所存です。

2020 年度から 2022 年度に及んだ COCN 活動の関係者におかれましては、OFNP 及び軽水炉に関して、多大なる知見や機会をいただきましたことに感謝しております。特に、リーダーの姉川尚史さまには、寛大な心で当方の活動を見守っていただき、時にはご助言いただき、拝謝申し上げます。また、事務局かつ同期の中野宏之さまには、OFNP の知見だけではなく、多面的な学習や研究意欲向上につながる機会を多数いただきましたこと、厚くお礼申し上げます。一緒に、宇宙最強の原子力集団を作りましょう。

修士課程時代の IAEA インターン仲間である福田達弥さまにおかれましては、ご自身の経験を基に、博士後期課程や専門職学位過程への進学を紹介いただき、当方の貴重な経験とさせていただくことができました。加えて、在学中も公私ともに相談に乗っていただき、心より感謝しております。今後とも、引き続きよろしくお願いいたします。

最後に、博士後期課程や専門職学位過程への進学を強く後押し、在学期間中もやりたいことを尊重し、見守ってくれ、手厚く支援してくれた妻、3 人の娘、両親に心からの感謝を申し上げます。特に、妻・美貴子には、日々研鑽を積むことを半ば夫の責務として課していただき、幸甚の極みです。今まで疎かにしていた家事や育児についても、能動的に研鑽を積む所存ですので、今後とも末永くご指導ご鞭撻のほど、よろしくお願いいたします。

皆さまに、ご理解とご助力いただけたおかげで、本論文を無事に執筆することができました。重ねてお礼申し上げます。

Appendix

Appendix A 私訳：K. Vincent, et al., “Overview of security plan for offshore floating nuclear plant”, (2016).

タイトル		Overview of Security Plan for OFFSHORE FLOATING NUCLEAR PLANT
出典	発表者	V.Kindfuller, N.Todreas, J.Buongiorno, M.Golay, A.Birch, T.Isdanvovich, R.Thomas, H.Stevens
	文献	ICONE24-61029 (2016 年 6 月)

概要

魅力的な経済性と前例のない安全性レベルに高い可能性を持つ新たな OFNP の概念が、核セキュリティ分野で行われた概要研究とともに存在する。OFNP は最先端の軽水炉と洋上の油・ガス事業で使用されているような浮体式のプラットフォームを独創的に融合したものである。そしてその 2 つの技術は、近い将来の気候変動に対抗するための時間軸に一致して、実行可能な確立された技術である。OFNP は造船所において浮体式プラットフォームの中で建設し、立地地点にそのまま輸送が可能な発電所である。OFNP は事故の起因となり得る地震や津波を排除する。すなわち、海を基本とした受動的安全システムが最終ヒートシンク喪失事故を設計として排除する。OFNP の防衛には、地上式の発電所に比べて、新たな核セキュリティ上の長所と課題が存在する。OFNP のもつ 360°線の明白な視野と海面上の脅威を比較的特定しやすいという特徴は、さらに発電所を防衛しやすくなる。反対に、OFNP は小型の潜水艦やダイバーによる海中からの接近には本質的に弱い。我々は OFNP の核セキュリティに係るケーススタディとして、電気出力 300MWe の原子炉を持つ OFNP-300 と電気出力 1100MWe の原子炉を持つ OFNP-1100 の 2 つの選択肢について分析した。3 つの革新的な核セキュリティシステム手段が OFNP に適用可能である。1 つ目は、OFNP 近傍の離れた概観を検知するためにレーダーとソナーと無人機を融合させた包括的検知システムである。2 つ目は、OFNP から約 100m 離れた受動的な物的障壁を使用することである。これは、その障壁によって高速ボートの速度を低下または停止させることで、OFNP のセキュリティ要員が対応するための時間的余裕を生み出す。3 つ目は、OFNP の立地と毎月または隔週の要員シフトを利用し、OFNP 内で勤務時間外のセキュリティ要員を予備要員とすることで、OFNP 内と陸上の合計要員数を減少させる。これらの手段を実行すると、OFNP-300 は陸上式の類似型またはいくらか出力の大きな原子力発電所と同程度の核セキュリティ費用とすることが可能である。費用は非線形目盛であるため、OFNP-1100 の核セキュリティ費用は、類似型の地上式発電所に比べてかなり費用を削減可能である。

1 導入

2000 年代の原子力カルネサンスの期待にもかかわらず、膨らむ資本金と発注された原子力発電所の建設遅れと極端に低い天然ガスの費用によって、米国の原子力発電所の新設数は激減している。また同

様に、技術の向上・回復に係わる高コストによって既設の発電所の廃止が起こっている。OFNP の概念は、建設に必要な高額なコンクリートの低減や、海を無限の最終ヒートシンクとして使用すること、また福島第一原子力発電所事故をきっかけとした最大の訴求点となりうる地震や津波からの本質的な保護を含む、上記の課題に係わる複数の長所を持っている。加えて、洋上の立地は放射性物質放出事故時の退避の必要性を排除し、地表の汚染を最小化可能である。OFNP は Figure1 に示す石油リグ等で共通的に使用されている円筒型のプラットフォームの上に標準的な原子力発電所を配備する。2 種類の設計が並行して検討されている。OFNP-1100 は Westinghouse の AP1000 のような電気出力 1100MWe 級の原子炉を使用しており、OFNP-300 は Westinghouse の SMR のような電気出力 300MWe 級の原子炉を使用している。両方の OFNP は地上からで 10～12 マイル離れた(最短の 10 マイルは EPZ 圏内に住民がいない距離であり、最長の 12 マイルは領海圏内の距離である)水深 100m よりも深い洋上に立地される。

9/11 をきっかけとして、原子力発電所の核セキュリティに重大な規制がかけられた。それは特にテロリストによる原子力発電所の破壊や核物質の盗取に係わる懸念が注目された。OFNP が洋上に立地されることによって、既存の地上立地の発電所の核セキュリティ性と比べて複数の長所と課題が与えられる。既存の発電所の代表的なコストドライバーの 1 つは、9/11 以降に課せられたより厳しい規制基準に適合するための大規模なセキュリティ要員と脅威の影響緩和のための制限応答時間である。OFNP のプラント設計の初期段階で核セキュリティについて考慮することは、核セキュリティ費用を抑え、既存設計のプラットフォームに特別な核セキュリティ上の対策を省略することに寄与する。核セキュリティが十分なレベルであることを保証することが OFNP コンセプトの主要な設計上の目的である。本稿の核セキュリティ計画は OFNP-300 と PFNP-1100 の両方に適用され、さまざまな観点から議論される。1 つめは最も遠い距離の脅威を検知・評価可能なことである。2 つ目は、可能な限り費用を低減することである。本稿で提案する核セキュリティ計画が達成すべき要件は、国家規制から課せられるもの投資保護のために適用されるものの両方である。国家規制の観点でいうと、本稿では米国の洋上立地に必要となる米国 NRC の規制に暫定的に適合するものとし、それを洋上立地に係る主体国家から課せられる規制として扱う。本稿は決定論的に現在の米国 NRC の規制に適合し、投資保護のために選択された核セキュリティの要件を提示する。それら要件に主要な相違が生じる理由は、NRC の要件が公衆の健康や安全ヘリスクをもたらすような重大な炉心損傷や使用済み燃料の妨害行為を防ぐために必要なものに限定された法令権限に由来するが、もう一方の要件は発電所がオーナーのために確実に運転して収益をあげる要望に由来するためである。そこで本稿では、核セキュリティ手法を確立するために、OFNP のために既に選択された核セキュリティ上の特性を説明するとともに、それらの核セキュリティ要件の達成に間違いなく影響を及ぼすが、現在まで設計に対する議論が不十分であった燃料交換や保守等の重要な観点について説明する。最後に、本稿では実行的な核セキュリティに関する費用削減手法を説明し、仮定の OFNP の核セキュリティ特性に基づいて評価した最終費用について、メガワットベースで既存の地上立地式の原子力発電所と比較する。



FIGURE 1. OFNP-300 CYLINDRICAL-HULL DESIGN

2 OFNP コンセプト

MIT は様々な市場に対応可能な 2 種類の OFNP 設計を並行して開発した。電気出力によって指定された OFNP-300 と OFNP-1100 である[1]。OFNP-1100 は、既に NRC から設計を承認されており米国と中国で建設中の Westinghouse の AP1000 のような電気出力 1100MWe 級の原子炉を使用している[2]。OFNP-300 は、Westinghouse の SMR(WSMR)のような電気出力 300MWe 級の原子炉を使用している[3]。両方のケースにおいて、原子力発電所を内在させるために選定された浮体構造物は、円筒型の船の構造をしたプラットフォームであり、洋上で石油やガスを掘削する業界で使用されているプラットフォームのもつ数々の長所を共有している。円筒型船舶型の設計は、半潜水型海洋掘削装置やフローティングバージのような他の洋上プラットフォームの設計と比べて、OFNP の規模感において十分な力学的復元力を提供する[4-7]。さらに円筒型船舶型の設計は、原子炉と格納容器を水平面よりも低い高さ配置することを可能とし、そうすることで海水ヒートシンクにアクセスしやすくなるとともに、航空機や船の衝突からの物的防護を高める。OFNP の周辺機器(BOP)は、船内とプラットフォームの両方に配備された標準的なランキンサイクル、昇圧変圧器、地上の送電線に電力を送るための海底交流ケーブルを含む[8]。OFNP-300 と OFNP-1100 のプラットフォームの概略寸法は Table1 に記載されている。

OFNP の設計思想は以下の通り。

- (i) 原子力分野と浮体式プラットフォームで実証済みかつ認可済みの物質や構成物のみを使用する。そうすることで、追加検討や認可を受ける費用と工期を削減し、実現の信頼性を最大化させる。
- (ii) 発電所を既存の造船所で合理化された組み立て方式による建造するように設計する。プラットフォームの船体、原子力の構造物、プラットフォームの上甲板は独立して建造可能であり(異なる造船所でも建造可能)、その後ある造船所で組み立てられる。これは短所でなく、発電所の設計を前進させる造船所の長所である。これによって建造中の再設計の必要性を低減し、最終的には建造の工期と不明確さを低減する。
- (iii) 体系的に様々な機能を安全性とは関係のない単一のシステム、構造、構成物に統合する。これによって、共通要因故障メカニズムを安全系システムに組み込むことなく、発電所をよりコンパクトかつ効率的可能である。例えば、プラットフォーム船体の底に付けられている環状のスカートは振動吸収の機能を果たすだけでなく、プラットフォームの移動中における浮力の追加付与の機能を果

たす。

OFNP の設計に係る更なる情報は参照文献に記載されている[9]。OFNP のコンセプトは、Table2 に記載されている通り、建設、運転、安全性、廃炉に係る従来の地上式の原子力発電所では達成できなかった複数の長所と柔軟性を実現している。本稿は OFNP の設計段階における OFNP の核セキュリティの原則と実現性について着目する。

Table1. OFNP プラットフォーム特性

パラメータ	OFNP-300	OFNP-1100
船体/スカート直径(m)	45/75	75/106
喫水(m)	48.5	68
合計高さ(m)	73	108
正甲板高さ(m)	12.5	34
排水量(ton)	~115,500	~376,400
構造コンクリート(ton/MWe)	~2	~4*

*AP1000 用の 69ton/MWe と比較

Table2. 地上式原子力発電所と比較した OFNP の定性的長所

立地方式	地上式	洋上式
ライセンス方式	発電所固有(地面と地震の要件)	標準化(立地地点に依存しない設計)
建設	立地地点。必要となる大量のコンクリートが費用増加と頻繁な工程遅延を引き起こす	造船所の中で一元化。建造コンクリートは事実上排除
所有者と運営者	国内事業者が国内で訓練された要員とともに発電所の所有・運営を行う。	国外事業者が国際的な発電所の船隊を所有・運用する可能性。要員は標準訓練を受け、月 2 回のシフトで従事(船内の生活居住区)
安全性	受動的安全性(新型原子力発電所)。過酷事故時には退避が必要となる恐れ	ヒートシンク喪失がない。地震や津波のリスクがない。多重防護で優位。立地地点住民の退避不要
発電所寿命	60 年間。1 つの立地地点	60 年間。最小限の現地インフラで最も利益性のある市場に接続可能(プラグ&プレイ手法)
廃炉	立地地点で廃炉。10 年オーダーの計画	速やかに地上に移動。造船所で廃炉

3 課題の概要

いくつかの類似点はあるが、大半の面で地上式発電所と洋上式発電所の核セキュリティの状況は非常に異なる。洋上式発電所の水中特性は、大型船の衝突や水没を防止する必要があるため、OFNP を防衛する上での新たな課題を生み出す。その一方で、360°線の視野と遠方の海面上の脅威を比較的に検知・特定しやすい点は、脅威の影響緩和する上で十分な応答時間をもたらす。最も類似している洋上立地方式は石油プラットフォームであるが、原子力発電所と比べると石油プラットフォームに要求されているセキュリティはその重要度が相対的に不足していることから、全体的に有益な情報とならない。それよりも、確認すべきより有用な 2 種類の核セキュリティ計画は、港周辺のもの、港の艦艇のものである。その両方が洋上式原子力発電所に要求されている核セキュリティと異なっているが、その比較は参考となる。

港と艦艇の両方は、浮遊防材によって脆弱なエリアを取り囲み、潜在的な攻撃者とのスタンドオフ距離を生み出す。加えて、その両方は潜在的な脅威が実脅威となる前に、潜在的な脅威を特定しようとする検知手法を用いている。洋上の環境に特有な 2 種類の特定の脅威に対する港と艦艇の応答は参考となる。1 つ目の特徴的な脅威は、ダイバーや潜水艦のような水中からの攻撃である。港と艦艇はダイバーやその他の水中の脅威を検知するためにソナーを使用している。加えて、艦艇の船体自体であろうと港の制限された区域であろうと、両者はダイバーが脆弱なエリアにアクセスすることを妨げる水中ネットを使用している。港と艦艇は似ているが、2 つ目の特徴的な脅威である潜在的な船舶の衝突への応答としては、第一に近づいてくる船舶を検知・特定・交渉・警告して遠ざける。第二に妨害して止めることを試みるか、そらすまたは停止させるための手段を講じる。第三に対衝突抵抗性のある設計とする。将来的には類似の手段は OFNP のために発展し、さらに包括的な対策となるだろう。

核セキュリティの費用は既存の地上式原子力発電所の総費用のうち重要な割合を占めており、OFNP は不要な費用の低減するために核セキュリティを念頭に置いて設計すべきである。ハード面の費用は一度きりの費用であるが、保守や交換の必要性は少額の費用を繰り返し総費用に追加することになり、それらの一度きりの費用や保守費用はセキュリティ要員の維持費用に比べて相対的に小さいものである。これは、石油プラットフォームでも同様だが、プラットフォーム上の要員の人件費は地上で働く同級の要員のものよりもかなり高くなる蓋然性が高いため、洋上式原子力発電所ではさらに当てはまることである。したがって、人事上の要件は核セキュリティ費用の累計に影響が大きくなるであろう。よって、可能な限りハード面での対策を強化することは人事上の要件を減らすことに有効であり、その結果として寿命を通した総費用を低減させる。

4 核セキュリティ計画の構築

核セキュリティ計画の主な目標は、格納容器の破損と放射能放出または原子炉の制御不能を未然防止するために発電所を攻撃者から守ることである。我々は潜在的な攻撃者はその他の目標を持っているかもしれないことを認知しているが、本稿ではその目標を上記のように制限する。核セキュリティ計画の要件と応答原理を提案する上で、以下のフェーズに沿って議論を構成することが有効である。

(i) 設計基礎脅威(DBT)の定義

- (ii) ターゲットとターゲット群の特定
- (iii) 敵対者の攻撃シナリオの策定
- (iv) 未然防止戦略の策定と戦略を補助するために設計へ核セキュリティの構成物を反映
- (v) DBT から守るための戦略の有効性の最終的な明示

この構成は米国規制の思想と一致しており、我々が採用する本稿の目的にも合致する。しかし我々は将来的には特にリスクインフォームドな議論を経て改良されることを予期している。加えて、米国以外の国に立地する場合、他の規制が適用されるであろうが、NRC の規制は潜在的ホスト国の規制に対して有用な未然代替策となりうると考えている。

本稿では以下の通り 5 つのフェーズにおける未然な応答について、米国 NRC の核セキュリティ規制が OFNP に課せられたという仮定に基づき、例を示しながら説明する。

4.1 設計基礎脅威(DBT)

NRC の設計基礎脅威では、セキュリティ要員は 1 方向以上から攻撃してくる熟練の敵対者に対応可能であることが要求されている。それは、内通者の補助、軍用級兵器・装備・車両の使用、船に搭載された爆薬による攻撃も想定している。本質的に類似の要求を洋上式発電所にも適用すべきである。地上式原子力発電所で使用されている NRC の DBT の細かい仕様は定められているが、洋上式発電所も同様に定める必要があるだろう。上で引用した一般的な記載はこの未然計画には十分なものである。

DBT の定義にも敵対者の定義が含まれる。例えば、脅威の主体については、国家、準国家またはテログループ、個人の 3 つの代表的な潜在的な脅威主体の区分が存在する。各々に異なる動機、装備、知識、能力があり得るため、各々を核セキュリティの戦略で考慮する必要がある。敵対国の脅威とは、政府を組織し指示することで直接的に供給された慣習的な武装した軍事力を表す。NRC の規制によれば、原子力発電所は国家主体の敵対者による攻撃、すなわち最大規模の慣習的な軍事力による敵対国からの攻撃に対する防衛をする必要はない。しかしながら、発電所が防衛のために考慮すべき設計基礎脅威には、国家規模の特殊な軍事力のようなボートや装備を上手に使用して攻撃してくる攻撃者のケースも含まれている。準国家主体は、国家から公式に支援されずに運営しているテロリストやゲリラのグループが参考になる。彼らの装備や組織は、攻撃しない抗議者から習熟し武装した軍事力まで変わりうる。この脅威は、国家主体による攻撃よりも発生率確率が高く、個人による攻撃よりも本来のダメージが大きい。そのため、核セキュリティ計画の主要な着目点になる。個人の攻撃は、独立して行動する単一の人間による攻撃である。これは計画性がなく発電所の運営に大きな影響を与えるつもりのない単一の人間によるものに過ぎないかもしれない。しかしながら、個人の攻撃は内部から何らかの方法によって発電所にダメージを与えようとしている発電所の労働者からの攻撃である虞もある。そのような人間が、内通者として発電所に大きなダメージを与える機会と知識をもつ。

4.2 ターゲット（脅威軸）

Table3 は、異なる攻撃者が原子力発電所に攻撃を試みるための潜在的方法と、その試みが地上式、浮体式、水中式の発電所で同様に変化するかを表している。

Table3. 脅威軸

脅威の源	地上	水上	水中
敵対国家	(i) 直接的な攻撃 (a) 地上攻撃 (b) 爆撃 (c) 海軍による水面下の攻撃（川から） (ii) インフラへの攻撃 (a) サイバー攻撃 (b) 保管または移送中の核物質 (c) 立地地点固有の二次脅威(例:ダム,堤防)	(i) 直接的な攻撃 (a) 乗船 (b) 爆撃 (c) 海軍による水面上の攻撃 (d) 水面下の攻撃 i. 潜水艦/小型潜水艦 ii. ダイバー (ii) インフラへの攻撃 (a) サイバー攻撃 (b) 保管または移送中の核物質 (c) 水雷 (d) 供給ライン	(i) 直接的な攻撃 (a) 空中発射魚雷 (b) 水面下の攻撃 i. 潜水艦/小型潜水艦 ii. ダイバー (ii) インフラへの攻撃 (a) サイバー攻撃 (b) 保管または移送中の核物質 (c) 水雷 (d) 供給ライン
テロリストと非国家主体	(i) 直接的な攻撃 (a) 地上攻撃 (b) 自殺爆撃 i. トラック ii. 航空機/ドローン (c) スタンドオフ型攻撃(ロケット/迫撃砲) (ii) インフラへの攻撃 (a) サイバー攻撃 (b) 保管または移送中の核物質 (c) 供給ライン (d) 立地地点固有の二次脅威	(i) 直接的な攻撃 (a) 乗船 (b) 自殺爆撃 i. 高速ボート ii. ダイバー iii. 航空機/ドローン (c) スタンドオフ型攻撃(ロケット/迫撃砲) i. 小型ボート ii. 陸上式 (d) 意図的衝突 (ii) インフラへの攻撃 (a) サイバー攻撃 (b) 保管または移送中の核物質 (c) 供給ライン (d) 水雷	(i) 直接的な攻撃 (a) 自殺爆撃 (b) 魚雷 i. 空中発射 ii. 潜水艦発射 (c) ダイバー (ii) インフラへの攻撃 (a) サイバー攻撃 (b) 保管または移送中の核物質 (c) 供給ライン
インサイダー	(i) 直接的な攻撃 (a) 妨害行為 i. 運転の妨害 ii. 損傷 iii. 放射能放出 (b) 爆発物 i. 混乱 ii. 損傷 iii. 放射能放出 (ii) 二次/間接的な攻撃 (a) サイバー攻撃 (b) 爆発脅威 (c) 攻撃者への情報提供	(i) 直接的な攻撃 (a) 妨害行為 i. 運転の妨害 ii. 損傷 iii. 放射能放出 (b) 爆発物 i. 混乱 ii. 損傷 iii. 放射能放出 (ii) 二次/間接的な攻撃 (a) サイバー攻撃 (b) 爆発脅威 (c) 攻撃者への情報提供	(i) 直接的な攻撃 (a) 妨害行為 i. 運転の妨害 ii. 損傷 iii. 放射能放出 (b) 爆発物 i. 混乱 ii. 損傷 iii. 放射能放出 (ii) 二次/間接的な攻撃 (a) サイバー攻撃 (b) 爆発脅威 (c) 攻撃者への情報提供

4.3 攻撃シナリオ

ここで潜在的攻撃シナリオを発展させるための発電所の脆弱性を特定する。攻撃者は、ターゲットとなりうる原子炉運転施設内の複数の特定箇所に係る選択肢を持つ。攻撃者は、発電所の破壊、混乱、捕縛、原子力災害の発生といった動機によって、発電所の異なる部分をターゲットとする。Table4 は、攻撃者の目標に応じた、原子力発電所内で攻撃者のターゲットとなりうる部分の概要を示している。

発電所の破壊は、プラットフォームと構成物に複数の集中攻撃を引き起こすであろう。発電所の混乱は、運転系システムをターゲットとした攻撃によるものに起因するであろう。例えば、冷却材配管をターゲットとして、大破断冷却材喪失事故(Large-LOCA)を引き起こし、発電所の冷却機能の喪失と放射性物質の放出することを目標とする。あるいは、攻撃者は余剰な注水系統のような安全系システムまたはタービン蒸気系統のような BOP 系をターゲットとし、核物質放出のリスクなく発電所を冷温停止することを目標とする。攻撃者は発電所の制御を奪うために、捕縛や中央制御室の破壊も試みるかもしれない。これは意図的な発電所の原子力事故を引き起こすことや、過去に石油プラットフォームと貨物船の両方で発生している身代金や政治的目標のための発電所の単なる支配につながるかもしれない。最後に、攻撃者の目標は、使用中または使用済みの核燃料を保有している系統や構成物への集中攻撃も含むかもしれない。

Table4. 攻撃者の発電所対象と目標

ターゲット	破壊	混乱	捕獲	原子力事故
建屋躯体	X			
安全システム		X	X	X
運転システム		X		X
中央制御室		X	X	X
地上サイト		X	X	
格納容器構造物	X			X
使用済み燃料プール				X
出力変換機		X		
浮体能力	X			

4.4 未然防止戦略を構築するための要件

米国 NRC は、ドキュメント 10CFR Part73 の要件と、Regulatory Guide に記載されている複数の補足事項と、NUREG report series の研究結果より、主に地上式の商用原子力発電所を規制する。その一方で、NRC の核セキュリティ要件は、特に OFNP のような革新的原子炉のコンセプトへも適用可能である。その場合、既存の主要な地上式発電所の核セキュリティ要件に適合する設計を土台とする。NRC の規制要件は、OFNP の全ての部分で採用可能ではないかもしれないが、基本的な概要は

OFNP の核セキュリティへの効果的な仮の手引きとなる。我々が適用する未然防止戦略を主に決定するものは以下のとおりである。加えて、我々は投資保護要件を以下に示す。

規制要件：

- (i) 発電所は、4.1 で定義した NRC の設計基礎脅威に対して応答できなければならない。
- (ii) 発電所は、受動的または能動的に外部攻撃者を支援する発電所に関する知識を有する内通者からの内部攻撃に対応できなければならない。そのような内通者は、ある敵対グループの内在的な攻撃方法を変更不可能だが、攻撃者が発電所のレイアウトや核セキュリティの情報を知ること、または内通者による核セキュリティの混乱を頼りにすることによって、攻撃者に複雑性を与える。
- (iii) 発電所は、採用前スクリーニング、心理学的評価、ドラッグ/アルコールテスト、上司による行動観察を含む包括的な内通者の影響緩和プログラムを実行しなければならない。
- (iv) 敵対者からの攻撃に対するオンサイトの要員を補助する外部のセキュリティ要員の応答は、タイムリーで例えば 30 分以内でなければならない。
- (v) 発電所は、周辺防護区域内への人員や車両の入域を制御しなければならない。(本件は後述する制限立入区域である)

投資保護要件：

- (vi) 船舶衝突 - 内在的な船舶衝突、特に大型オイルタンカーや大型 LNG タンカーとの衝突に起因するリスクを緩和する。
- (vii) 発電所近傍の爆発物の爆発に起因するダメージやリスクを緩和する。

4.5 未然防止戦略

この戦略を発展させるための最初のステップは、核セキュリティ脅威への対応について、軍隊が効果的な応答も踏まえ、発電所のセキュリティ要員とホスト国の責任分担を定義することである。空、水上、水中で発射された脅威の責任分割は Table5 で定義する。

この戦略と核セキュリティ構成物に係る次の要素は、本稿によって提示されるであろう。

Table 5. 核セキュリティ上の責任

	ホスト国	OFNP セキュリティチーム
空中	(i) 軍用航空機 (ii) 商用航空機 (iii) ミサイル	(i) 遠距離操縦ドローン (ii) 小型航空機 (iii) ヘリコプター
水上	(i) 大型タンカー (ii) 軍用船	(i) 非軍用船
水中	(i) 大型潜水艦	(i) 小型潜水艦(魚雷) (ii) ダイバー

5 核セキュリティ計画に影響を与える特徴

OFNP-300 と OFNP-1100 は、石油プラットフォームの良好事例を引用し、円筒型船舶型の設計を有している。OFNP-300 と OFNP-1100 の寸法は 2 章の Table2 に示している。中央警報ステーション(CAS)は、船内のデッキレベルに配置され、プラットフォームへの 2 つある出入り地点の 1 つの近くである。Figure2 と Figure3 は、円筒型船舶型のプラットフォームの内部のレイアウトを図示したものである。

格納容器自体はプラットフォームの中心、かつ OFNP-300 では海水面よりも 20m 下、OFNP-1100 では海水面に配置されるであろう。格納容器は、炉心よりさらに外側の冠水エリアを有しながら、船体内部のドライエリアで囲まれるであろう。蒸気系やタービン系のような非安全系の構成物は、海水面より上部のタービン船体部に配置されるであろう。その一方で、安全系の構成物は、原子炉系の構成物の直接的な上部や周り、かつ海水面より下部に配置されるであろう。海水面より下部の階層の水密性があるため、浸水のリスクは、上部階層の構成物への攻撃(爆発物、航空機衝突、船舶衝突、その他方法による攻撃)へのリスクよりも低いと判断される。したがって、安全上重要な構成物は冗長性のためにプラットフォームの側面かつ異なる階層に多重で配置されるが、安全系の構成物は海水面より下部に配置されるであろう。この例では、中央制御室は OFNP-300 と OFNP-1100 の両方で 5 階層に配置され、またそのアクセスは上部からの階層に限定、かつ中央制御室と運転系の構成物は直接アクセス不可能である。

船体破損時の水密性確保のため、プラットドームは 6 つのセクターに区分されるだろう。そして各セクターは、1 つのセクターの浸水がプラットフォームの他の構成物に影響を与えないように、他のセクターと完全に独立している。加えて、水密扉は階段部と内部アクセスポイントに配置するとともに、3 階層より下部の全てのプラットフォームは水密性が必要であろう。重篤傷害の発生時における人的安全性の確保のため、安全な良好事例をもとに、各セクションに上部階層への 2 つのアクセスポイントを配置する。すべての水密扉は、健全性確保のため、CAS によって監視・アクセス制御されるとともに、警報機能がつけられるであろう。その機能は、水密性維持を確保するとともに、重要エリアへの無許可アクセスを未然防止することに役立つであろう。

宿舍棟は、要員への支援施設として、プラットフォームのデッキ上に配置されるであろう。定例的な人・物の輸送はプラットフォームの船体上の人員移送ステーションへの船舶による輸送で行われるが、重要な輸送のためのヘリパッドはプラットフォームの最上部に配置されるであろう。運転と保守に必要なプラットフォーム上の要員は、原子力発電所の設計がより詳細に決まった後に決定されるであろう。発電所は石油プラットフォームと同様に、3 週間働き、3 週間休暇をとるシフトをとるであろう。そして、毎週 1 回人員を輸送するであろう。

プラットフォーム自体に加えて、発電所の運営には、安全のための人員スクリーニングやプラットフォームへの輸送に係る食料や装備の積載のような、プラットフォーム上では対応不可能な機能を補助するための地上安全支援施設が必要であろう。地上安全支援施設の重要な機能としては、セキュリティ要員がスクリーニングするとともに、供給船に人・物を積載するための場所を提供することであろう。加えて、地上安全

支援施設は、プラットフォームから地上への送電ケーブルや、NRC 規制で要求される第二警報ステーション(SAS)が内在する施設でもある。

発電所は、プラットフォームより人員が乗り降りするとともに新たな物資を毎週受領する。要員への食料喫水線近くの必要物資に加えて、供給船は必要な補修物資等を輸送するであろう。現状の設計では、人員は喫水線近くのプラットフォームドッキング部を通して船体と露天甲板へのはしごの両面により船体へ輸送される。一方で、物資はクレーンによって露天甲板まで持ち上げられる。かなり大規模な補修作業については、補修期間が長期にわたるため、プラットフォームは造船所までけん引される必要があるかもしれない。

設計のさらなる反復によって、仮に実効的かつより安価であることが証明されれば、人・物は船体外のカーゴリフトで持ち上げられたり、すべてヘリコプターで輸送されたりするかもしれない。OFNP に物資を輸送する上で、禁止されている物資が積載されていないことを確認し、地上の出発点を出てからその状態を維持することが重要である。

燃料交換はもう一つの重要な考慮すべき点であり、その戦略はまだ完全ではないにしろ構築済みである。燃料交換には複数の選択肢があるが、本稿で考慮している最も簡素な方法は、発電所内で燃料交換するとともに、使用済み燃料をプラットフォーム内にあり数十年分の(発電所の寿命分まで可能な)使用済み燃料が貯蔵可能な使用済み燃料プール内に貯蔵する方式である。もう一つの主要な選択肢としては、次に使用済み燃料を炉心から引き抜いて輸送船に搭載するまでの間に、使用済み燃料を地上に輸送する方式があげられるであろう。この方式では、全寿命を通して、燃料交換の期間を超えてプラットフォーム上に使用済み燃料を貯蔵する必要がない。しかしながら、使用済み燃料を炉心から輸送船へ直接移動させる方式は、放射線量が高いため現実的ではない。どの選択肢においても、使用済み燃料の最終的な貯蔵は事業者には責任があり、もし使用済み燃料が着陸時に速やかに輸送可能な国内の使用済み燃料貯蔵施設が存在しないとしても、貯蔵サイトはプラットフォームの外に必要である。十分数の OFNP が存在すれば、ベンダーは複数のプラットフォームに必要な地上式使用済み燃料貯蔵サイトを建設可能である。

外部への燃料交換や大規模な補修作業は、プラットフォーム上で通常働くよりも非常に多い要員数に対し、輸送や異なる期間での居住を要する。洋上プラットフォームに輸送するための地上安全支援施設における入域プロセスや一連の管理に係る安全上の協定は定義される必要がある。

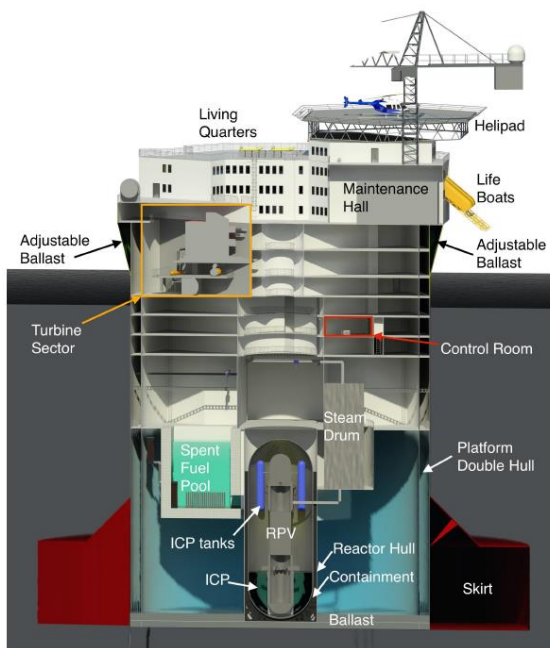


FIGURE 2. INTERNAL LAYOUT OF OFNP-300

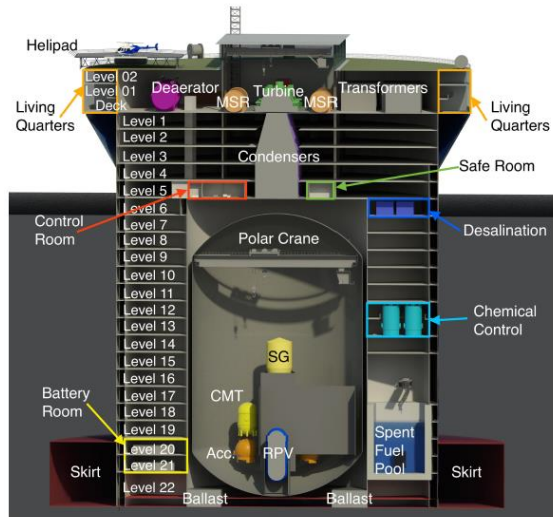


FIGURE 3. INTERNAL LAYOUT OF OFNP-1100

6 立地と核セキュリティ障壁

慎重な立地と核セキュリティ障壁の指定は、いかに記載する通り核セキュリティ計画に大きく貢献する。

6.1 立地

OFNP は、Figure4 に図示される通り、領海内に立地するであろう。この図はカリフォルニア州の船舶の制限を示しており、領海外でさえ船舶に制限を課している。発電所は港や航路から離れた地点に立地しており、発電所の周辺の船舶への制限は脅威が特定された時に効果を発揮し、脅威がプラットフォームに接近する前に対処する。

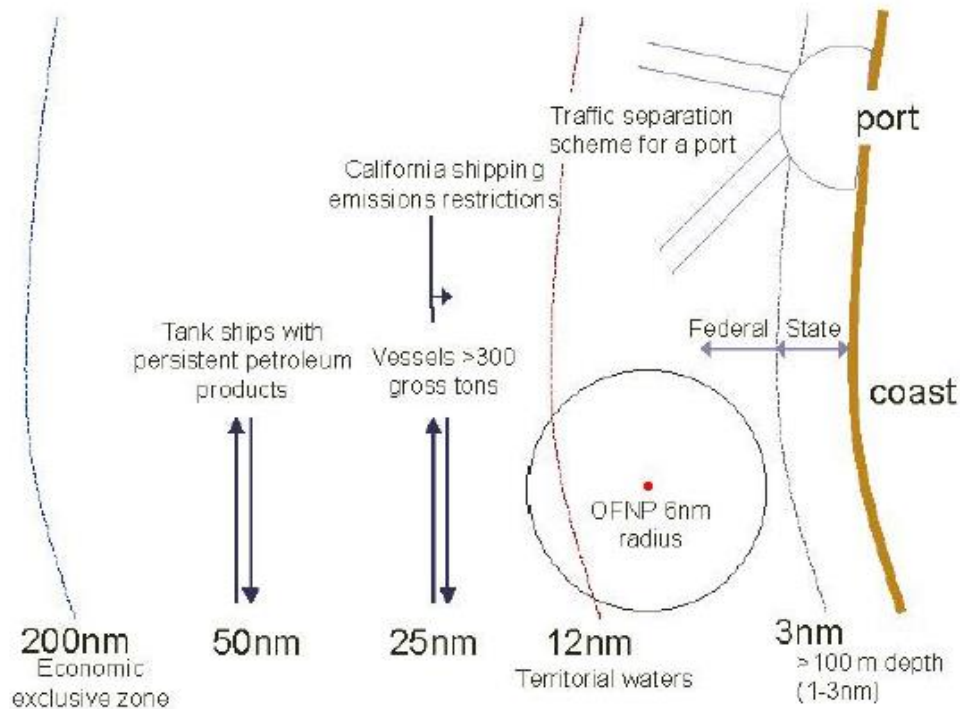


FIGURE 4. OFNP SECURITY ZONES COMPARED TO WATER RESTRICTION AND JURISDICTION ZONES WITH CALIFORNIA AS A REFERENCE CASE

6.2 核セキュリティ障壁

現時点で採用される核セキュリティ計画の物的障壁は、以下に概要を示す通りである。Table6 に示す通りに定義された障壁は、Figure5 に図示される通り割り付けられる。定量的な要求はプラント固有であり、個別の発電所を設計する中で決定されるであろう。2つの関連する時間があり、1つは障壁が実効可能となり最大限の力で攻撃者に対応する応答時間であり、もう1つは攻撃者が障壁を突破して次の原子炉防衛区域に到達するための障壁破損時間である。Table4 はそれらの両時間の定量的な評価を提供する。セキュリティ要員は可能な限り攻撃者の完全な停止を目指す、場合によっては外部応答要員が到着するまでの十分な時間について攻撃者を遅延させることが目標となる。外部応答要員の目標は、重大な炉心損傷と使用済み燃料の妨害行為の未然防止することと、既に原子炉区域自体に到達している場合は奪われた発電所の区域を奪還することである。

核セキュリティ計画の第一の障壁は、監視区域、立入規制区域、大型船禁止区域で構成される検知と評価のための障壁である。この障壁はレーダー、ソナー、CCTV、熱感知カメラ、視覚的な検知手段を含む様々な検知装置で構成されるであろう。発電所から約8海里先まで設定される監視区域を周囲の有効水域として構築するため、検知装置は数海里の有効検知範囲が必要であろう。一方で、有効監

視下に置くべき最も重要な区域は、発電所の周囲約 1,000m に 360°設定される立入規制区域であり、海運は侵入を許可されない。その区域内で検知されたすべてのものは、接触され迂回するように説得されるとともに、セキュリティ要員は注意状態に移行するであろう。

タンカーや貨物船のような大型船舶の衝突可能性の未然防止については、大型船禁止区域が設定される。この区域は、発電所から半径で少なくとも 6 海里以内は規定トン数の大型船を排除する区域であり、その根拠としては OFNP に 12 ノットで向かってくる大型タンカーが発電所に到達するまでに 30 分要するためである。この区域への大型船舶の不法侵入は、ホスト国の海岸の要員や軍事力による迅速な介入を引き起こすであろう。そのような大型船舶の区分を定義する正確なトン数はまだ決定されていないが、大型トン数船舶からの爆破や衝突からの存続可能なダメージに基づき決定されるであろう。

核セキュリティ計画の第二の障壁は、多重の物的防護を内包する周辺防護区域であろう。これらの障壁は、発電所の周囲に存在し、ブイとブイの間に浮遊するブーム(防材)や、水面下まで拡張された防潜網から構成される。この周辺防護区域の直径は、設計基礎脅威の性質とプラットフォーム設計本来の堅牢性を考慮した爆破解析によって決定されるであろう。この周辺防護区域は、唯一の許可されたアクセスポイントを持つとともに、どの攻撃者へも遅延を及ぼすであろう。この障壁は、セキュリティ要員の応答チームに応答のための追加時間を与え、攻撃者の船舶がターゲットに近づくことを遅延させるであろう。加えて、その物的障壁は、爆発物を搭載した船舶が船体からスタンドオフ距離以上離れた地点で爆発するように設計され、発電所の生存率を高める。

障壁防護による第三の障壁は、プラットフォームのレイアウト自体である。攻撃者が発電所に乗り込むことや、プラットフォーム外からの発電所へ深刻なダメージを与えることを困難にする目的をもって、プラットフォームは建築される。発電所の外部船体は、水平面から上部に 12m または 34m の乾舷(水平面からの上部甲板までの距離)を有し、周辺防護区域の外部から爆発する爆発物を積載した中型サイズのボードによる原子炉部が十分耐えられる厚さにすべきだ。発電所の船体の頂部は狙撃地点にすべきであり、セキュリティ要員が使用する発射口やカバーも存在する。

原子力発電所自体に設定される第四の障壁は、セキュリティ要員自体である。複数のセキュリティ要員は、発電所の頂上をパトロールして脅威を見張る役割に専念するだろう。残る船上の要員は、数分以内に脅威に応答可能な初期応答要員となる。彼らの目標は、可能であれば敵対者を停止することであるが、不可能であれば軍隊や警察といった外部からの応答要員が到着し攻撃者を排除するまでの間、攻撃者を遅延することである。セキュリティ要員は、小型ボートからの攻撃を防衛可能のように、小型装備やいくつかの大型装備の両方で武装するであろう。その他の要員は、特定のターゲットに対して使用する自動兵器によって制御されるレーダーを操縦する訓練を受けるだろう。

最後に、監視区域のはるか遠方にいる外部応答要員は、OFNP への脅威に応答するため、発電所から 8~10 海里離れている地上安全支援施設に駐留し、警察と軍隊からの支援を受けた応答要員で構成されるであろう。発電所のセキュリティリーダーは、攻撃を受けた際の不測事態計画を策定するため、外部応答要員と事前に連携を図るものであろう。外部応答要員は、必要とされた場合、攻撃者を排除して発電所を奪還するために十分な要員にて、30 分以内に発電所に到着可能である必要がある。

Table 6. 核セキュリティ計画の障壁

障壁	区域定義	応答時間	障壁破損時間	遅延	停止	排除
1)検知と評価	監視区域と立入規制区域 大型船禁止区域	数秒 数秒	N/A 30 分			
2)物的防護	周辺防護区域	N/A	数秒から 数分	X		
3)原子炉部レイアウト	枢要区域	N/A	数分	X		
4)セキュリティ要員(船内または地上式施設より)	N/A	数分	数分から 30 分	X	X	X
5)外部応答要員	N/A	30 分	N/A		X	X

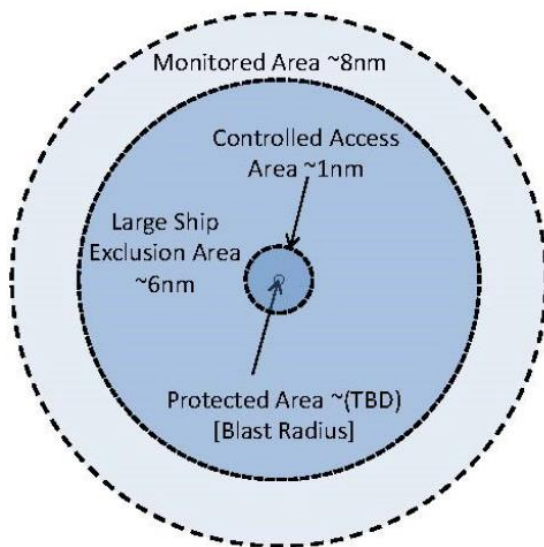


FIGURE 5. SECURITY PLAN LAYERS

7 鍵となる解決手法

発電所の設計において、原子炉圧力容器は、発電所の底部に突き出た船体内の海水面より下部に配置される格納容器の構成物として配置されるであろう。核燃料は、原子炉圧力容器、格納容器、原子炉船体部、プラットフォーム船体部から成る 4 つの鋼製の障壁の内側に存在する。水平面より上部に配置される脆弱な系統は、タービン系、タービン/復水器系、その他の運転補助系であるが、重要な運転系や安全上重要な系は海水面より下部の格納容器構成物としてすべて配置されるだろう。このことは、格納容器構成物の破壊を目論む攻撃者に対し、ダイバーや潜水艦を用いた水中からの接近や、発電

所のデッキ部から下部にある格納容器構成物に侵入する攻撃のいずれかを採用することを強制する。したがって、着目すべき点は、検知手法、物的障壁、発電所のデッキ部へのアクセスポイントの防護に係る設計である。

7.1 攻撃に対する防衛戦略

セキュリティ要員は、Table1 に定義される核セキュリティ上の脅威に対応可能でなければならない。核セキュリティ要件に適合するために、プラットフォームは、小型ボートや水中からの攻撃を撃退するために発電所の周囲に戦略的に配置された戦闘位置(FP)で武装するであろう。FP には、潜在的脅威に初期威嚇・抑制して脅威を停止させるために、致死性兵器・非致死性兵器の両方が配備されるであろう。

原子炉部の物的構築物は、爆発物に耐久性があるとともに、たくさんの即席爆発装置の同時発破に対し耐久性がある、または方向を変えることが可能なものでなければならない。原子炉部は、立入規制区域より遠方からの爆発や、立入規制区域よりかなり遠方にある爆発物を積載した中型船舶からの爆発に耐えられなければならない。原子炉部は、セキュリティ要員による爆発物を搭載した船舶の接近防止を頼りにしなければならないが、スタンドオフ距離よりさらに遠方における爆発も同様に考慮しなければならない。

原子炉部の占拠を未然防止するため、セキュリティ要員は、設計基礎脅威を遅延させて外部応答要員が到着するための時間を稼がなければならない。実際の応答時間は原子炉部の配置によって変化するものであろうが、30 分は軍隊や警察から応答要員が駆けつけるための最大許容時間であろう。防潜網や浮遊している防材のような部的障壁はいくらかの遅延を引き起こすが、原子炉部の防衛において重要な要素は、セキュリティ要員によって攻撃者が原子炉部構成物の内側を貫通することについて、外部応答要員が到着するよりも十分な時間において未然防止することである。既存の地上式発電所が大規模なセキュリティ要員を要していたことの 1 つの理由としては、攻撃に準備するために多くの一定数の人的ポストを維持する必要があったためである。最初の検知から潜在的攻撃者とプラットフォームへの乗り込み位置の評価までの時間が長いほど、OFNP の核セキュリティに必要な一定数ある人的ポストの数は下がる。発電所の半月毎に回る要員シフトは、勤務時間外のセキュリティ要員でもプラットフォーム上にいることを表している。したがって、勤務時間外のセキュリティ要員は、発電所内にいるどんな時でも、応答可能かつ勤務に移行可能な健康を維持する必要があるだろう。警戒事態が発生した時、勤務時間外であっても攻撃者への準備をすることがあるだろう。したがって、人的要件と費用を削減するための 1 つの手段としては、検知から評価と接触するまでの時間を増やすことであり、それは潜在的攻撃者を遅延させるための遅延戦略と検知範囲の向上の両方によって達成可能であろう。

7.2 セキュリティ要員の構成

セキュリティ要員は 2 つの構成物をもつ。1 つめの構成物は、主要セキュリティチームであり、デッキ上と地上サイトをパトロールする武装した要員から構成される。主要セキュリティチームは、地上施設の原子炉部と核セキュリティ上のセキュリティに責任を持つとともに、発電所と地上安全支援施設との人員輸送のプロセスに責任を持つであろう。2 つめの構成物は、技術セキュリティチームであり、中央警報ステーション

(CAS)と第二警報ステーション(SAS)において検知装置を用いて監視している。技術セキュリティチームは、ソナー、レーダー、CCTV、UAV システムを含む検知装置による監視及び補修に責任を持つ。プラットフォーム上の普遍的なセキュリティ要員の数は、勤務時間中の要員数とパトロールの頻度の 2 つの要素に依存する。

勤務時間中の主要セキュリティチームは、検知装置に加えてバックアップとなる視覚的検知手段をもち、(プラットフォーム上のセキュリティ要員以外で構成される)外部応答要員が脅威に反応して到着する前に侵入者に対して初期応答行為をすることが期待されている。したがって、プラットフォーム上の勤務時間中の主要セキュリティチームの最低数は、視覚的にカバーすることが期待されているデッキ上の領域の大きさと、要求される初期応答行為に基づくであろう。デッキ上でカバーする領域は、勤務時間中の要員数を決定するための支配因子であると予想される。

勤務時間中の技術セキュリティチームは、侵入者に最初の警告をするための検知装置によって監視することが期待されている。NRC の規制においては、CAS と SAS の両方で最低でも 2 名以上の要員が要求される。NRC のガイドラインで他国に立地される OFNP を縛る必要はないが、それらは要求される要員数について有効な説明をもたらす。最低要員数 2 名のうち 1 名は、レーダー、ソナー、その他検知手段を含む侵入検知システム(IDS)を操作することが期待される一方で、もう 1 名は立入規制区域や中枢区域へのアクセス制限等の関連業務をこなすと共に IDS に含まれない他のシステムによって監視をする。OFNP では立入規制区域や枢要区域は個別の建屋ではなく同心円状に設定されておりそれを突破する必要があるため、上記の関連業務の大半は ODNF ではかなり簡素化されるため、CAS では 1 名の要員を要求することが合理的かもしれない。

セキュリティ要員の総数における 2 つ目の要素は、必要な時に勤務時間中の要員を支援する勤務時間外の要員数である。勤務時間中の要員が一日の指定された時間帯にパトロールするだけであれば、交代が必要である。仮にセキュリティ要員を上記で議論した通りの勤務時間中の最低数のチームに分割するとすれば、十分な注意力を確保するための休憩が十分取れるため、多くのチームが勤務シフトに十分適合可能である。加えて、外部の要員についても、緊急時、医療事故時、その他特殊な事象が発生した場合十分な余裕を与えることが可能である。

発電所を支援する地上サイトの核セキュリティは、地上式発電所よりも簡潔である。第一に、一度に数週間もプラットフォーム上で生活する発電所要員の勤務シフトは、一日にセキュリティ上の区域を跨ぐ人員の移動の数が減るであろう。その代わりに、数週間ごとに大量の人員の輸送が予期されるため、その際の核セキュリティ要件は高まるであろう。第二に、地上サイトは枢要区域や他の高リスク区域を内包しないため、プラットフォームや関連する地上式施設よりも低い核セキュリティ要件レベルで運用することが可能である。第三に、地上サイトの敷地面積は、地上式発電所よりもかなり小さいため、人的要件をさらに減らす。地上サイトの核セキュリティ要件は、倉庫や防護レベルが低いサイトへの通常の物的核セキュリティを主に参考とし、侵入者を検知・抑制するために十分な要員で構成される。

OFNP-300 の核セキュリティの例でいえば、合計の要員は 40 名になるであろう。この例示となる要員では、双方で訓練された主要セキュリティ要員は、専属の技術セキュリティ要員の代わりに発電所内で CAS を操作する。合計で 30 名となる主要セキュリティチームは、2~3 週間毎に、発電所と地上施設で

交互に勤務するだろう。そのうち 20 名の要員は常時発電所内にいるだろう。残りの 10 名の要員は、地上で地上施設のセキュリティ要員として業務にあたるか、訓練するか。休暇を取るようになるだろう。10 名となった技術セキュリティ要員は、洋上の固定人員数に要する費用を削減するために地上安全支援施設を勤務場所のベースとし、SAS にてセンサーと検知装置による監視と、SAS と CAS の装置に対して予防・是正の補修を行う。

主要セキュリティチームの 2 名は、発電所の 180°周囲の領域をそれぞれがパトロールする 8 時間毎の勤務シフトとなるだろう。同時期において、別の 2 名は CAS にて 8 時間の勤務シフトに従事し、検知装置にて監視する。そうすることで洋上プラットフォーム上の必要な要員数を減らすことで費用を削減している。

発電所内のセキュリティチームの要員は発電所内に住んでおり、常時速やかな応答要員として 16 名を確保するものであろう。実行的な遠距離センサー装置を警報として使用することによって、セキュリティチームは、船内のセキュリティ要員としてタイムリーな応答へ移行可能であろう。Table7 は上記の OFNP-300 のセキュリティ要員の構成と役割の例を示したものである。

より大規模な OFNP-1100 に要する拡張されたセキュリティ要員は、OFNP-300 の要員数の約 2 倍が必要であろう。これは、2 つの発電所の周囲長さの比によって主要セキュリティ要員数を算出したものであり、 $75\text{m} \div 45\text{m} = 1.67$ を四捨五入して 2 とした。地上サイトと洋上プラットフォーム間の人・物の輸送を主に管理する地上サイトで働く主要セキュリティ要員については、発電所の電気出力の比で算出し、 $1100 \div 300 = 3.7$ を減らして 3.5 とした。したがって、上記結果より主要セキュリティ要員数の例としては、発電所で 40 名、地上施設で 35 名となる。技術セキュリティの数は変わらず 10 名であり、上記の通り OFNP-300 で試算した例を基にすると、OFNP-1100 の合計要員数の例は約 85 名となる。

Table 7. セキュリティ要員の構成と役割の例 ※OFNP-300

役割	発電所内の応答要員	地上式サイトの応答要員	合計要員数
主要セキュリティ	20 (要員 2 名のチームが 8 時間シフトでパトロール。要員 2 名のチームが 8 時間シフトで中央警報ステーション(CAS)にて業務。5 チーム)	10 (要員 2 名のチームが 8 時間シフトでパトロール。5 チーム)	30
技術セキュリティ	0	10 (要員 2 名のチームが 8 時間シフトで第二警報ステーション(SAS)にて業務。5 チーム)	10

7.3 セキュリティ装備

OFNP のセキュリティ要員によって使用される装備は 3 種類ある。1 つめは検知装置であり、潜在的敵対者を検知・特定するために発電所周囲のエリアを監視するためのものである。2 つめは物的障壁・防護であり、攻撃者の遅延と爆発物の爆発時のダメージ減少を意図したものである。最後の 3 つめは致死性・非致死性の兵器であり、第一に攻撃者の接近を遠ざけること、第二に脅威を回避または排除するためのものである。

検知システムの最低基準は、プラットフォーム内の応答要員がデッキ上にきて発電所を防衛するために十分な時間をもって、潜在的敵対者の行動を検知可能なことである。加えて、検知システムは、海軍基地や軍隊・海岸の防衛施設から応答要員への敵対者の特定にかかる時間を最小化するための十分な測定範囲を有するべきである。様々な内在的敵対者は、プラットフォームの検知システムによって検知・特定に係る様々な範囲や接近速度を持っているため、検知機器はドローンや潜水艦のような限られたケースに基づくべきである。地上式発電所はその環境のため、敵対者の検知は、発電所の周囲を監視するための CCTV や熱感知カメラやモーションセンサーのような機器を使用することで、大半のケースで発電所の敷地内でのみ発生する。反対に、洋上発電所は 360°の視野を持ち、発電所からかなり離れたエリアの監視も可能である。

検知システムの例示は以下の通り。例示となる発電所は、レーダーによって 24 海里遠方まで船舶を検知、レーダーと遠距離 CCTV と熱感知カメラシステムによって 8 海里遠方まで小型船を検知・評価、ソナー・ブイによって 3 海里遠方までダイバーを検知・評価するために搭載されるだろう。レーダーは、24 海里以内の商用船舶の事故を特定可能な自動特定システム(AIS)とともに搭載されるであろう。この 8～24 海里までの検知範囲は、検知から物的障壁(周辺防護区域境界)到着までに最大 12～36 分以内の対応を可能とし、そのことが物的障壁を破るために攻撃者が必要とする時間を遅延させる。この時間は、以下で議論する通り、18～30 分であると試算している。したがって、攻撃者が最初の検知から発電所に

到着するまでの合計時間は、船舶が 40 ノットで直接発電所に向かってきた場合は 30 分～1 時間強である。この時間において、地上施設とホスト国の軍隊・警察からなる外部応答要員は、要請された際は応答可能であろう。より数が多いと想定される中低速の船舶については、この時間はかなり増加する。

発電所は、その周囲約 1.5 海里遠方に浮体式パッシブアコースティックブイを 8 個所有するであろう。そのパッシブアコースティックブイは、約 1.5 海里内の小型潜水艦やダイバーを検知する能力を持つパッシブソナーシステムを持つであろう。パッシブソナーブイは、約 3 か月毎の保守によって数年の寿命を有する。8 個のパッシブソナーブイは、1 個のソナーブイがメンテナンス中の時でさえ、発電所の周囲 3 海里までは重複してカバーするであろう。実際、プラットフォームの機械騒音は、内部からの検知を発電所から約 0.5 海里に制限する。

アクティブソナーを用いるとすれば、4 つのアクティブソナーブイは OFNP から約 0.5 海里遠方に配置されるであろう。現時点では、ダイバーを検知するためのアクティブソナーの最大範囲は、600～1000m(0.32～0.54 海里)の間である。したがって、そのソナーブイは最低でも発電所の周囲約 0.2～0.8 海里でダイバーを検知可能であり、状況が良ければ約 0～1 海里で検知可能である。

ソナーのデータの自動解析は、発電所の中央警報ステーション(CAS)が接触者を検知するためのソナー専用の技術者を不要とすることで、人的費用をさらに低減するかもしれない。当然、CAS のセキュリティ要員は自動検知システムのバックアップとしてソナーの生データを依然として監視する必要があるが、ソナー専門の技術者は不要となるかもしれない。洋上プラットフォームの要求に適合するソナーの接触者を自動で弱体化するためのアルゴリズムは、最近非常にいいものが開発された。[11]

ソナーやレーダーのような電動の検知手法に加えて、発電所は接触者の検知・特定のための無人機も使用するであろう。しかしながら、より重要な点としては、それらは内在的脅威を特定可能で、適切な応答をより迅速に実行するであろう。それらは警報対象の接触者に近づき、その接触者への対応において致死性兵器を使用するか、非致死性兵器を使用するか、単なる警戒だけか判断可能であろう。無人機は、空中の機器かもしれないが、水中の無人機は要求される目的に有効であり、より安価かつ均一的であろう。向かってくる船舶をそのコースから外すまたは方向転換させることや、小型航空機やドローンからの空中攻撃に対して無人機を使用することは考慮されており、空中攻撃や衝突の脅威を低減することにつながるであろう。

脅威をさらに遅延させてセキュリティ要員の応答時間を確保するため、発電所周囲の物的障壁は実効的な応答のために内在的攻撃者を遅延させるであろう。それらの障壁とは、周辺防護区域の大きさと発電所自体の設計を定義することで、発電所の周りに 2 つの防材を配備することである。外側の層の防材の基準としては、爆発が発電所構造物へのダメージが無視可能なほど十分な距離をとって中型船舶を停止させることである。発電所内部へ続くはしごの設置箇所や出入口地点のような発電所の効果的なレイアウトは、攻撃者を可能な限り遅延させることに寄与するであろう。また、発電所自体は、発電所の損傷を目論む攻撃者によって爆発や衝突が行われた場合でも、発電所の健全性に影響を及ぼす格納容器の損傷・破損を防止するため、上記で述べた通り、爆発物等に対して抵抗性がなければならないであろう。発電所の設計に対する基準は、発電所への大型船舶の衝突や小型ボートからの爆発に耐えら

れることである。特別に設計された係留索や自動船位保持装置のような、衝突や爆発を回避するために発電所を移動させる装置は、将来的に検討することとする。

例示として、水面より 3m 高い位置にあり、その下にある発電所の下部の周囲を覆うネットを保持する発電所の周囲の物的浮体障壁は、小型ボード、大型ボート、大型船舶を遅延させる主目的に寄与する。その物的障壁は、攻撃者を可能な限りの最大時間遅延させることを目的としており、さらに具体的な障壁の設計仕様が確立した時、評価によって遅延時間が 18~30 分の間で確定するであろう。攻撃者の乗り物を遅延させるこの手段は、プラットフォーム上のセキュリティ要員に応答時間を与えるであろう。

最後に、OFNP は、攻撃者を能動的に抑制・攻撃して万が一の可能性を排除するシステムが必要であろう。これは、警報装置に加えて、致死性兵器・非致死性兵器の両方を含んでいる。非致死性兵器と警報装置の基準は、立入規制区域内の内在的侵略者にたどり着き、彼らがさらに接近することを妨げる能力を有することであろう。それらのシステムは、積極的な敵意からデモ活動のような非致死性の目的までを判別することを意図している。致死性兵器(現在は NRC Section 161A Authorized Weapon に挙げられており、最大級の兵器は 50 カリバースマシンガン)は、約 20 フィート(約 6.1m)までの小型船舶を排除し、大型船舶を損傷または方向転換させることが可能であろう。加えて、複数の攻撃チームに遭遇した場合の十分数の小型装備が必要である。

立入規制区域や制限空域に侵入した接近する船舶・航空機・ドローンに最初に警告するための利用可能な非致死性のシステムは複数あり、発電所プラットフォームに向かって立入規制区域や制限空域を継続侵入することをより妨害するように設置されるであろう。これらのシステムは、長距離音響発生装置(LRAD)とよばれる音響で呼びかける音響兵器、長距離(3/4 マイル:約 1.2km)レーザーとよばれる接近する船舶の乗組員の目をくらませ兵器の狙撃を不可能にする兵器、米国海軍の長距離眼遮断器(LROI)とよばれる輝く可視光線の強度を変えることで低強度では視覚上の警告や高強度では一時的な視覚上の抑制する兵器、アクティブ・ディナイアル・システム(ADS)とよばれる侵入者を 3 秒以内に熱して退避行動を高確率で誘導するミリ単位の波のビームを放つ兵器(レイセオンサイレントガーディアンが類似の技術を使用)を含む。LRAD システムは、ESCI 社の対海賊解決パッケージとして統合されたレーダー、熱感知カメラ、CCTV システム内に組み込まれる。接近する船舶の妨害に加えて、操舵や推進を無効化することは、非致死性の攻撃者を回避するとともにその実効性を低減させる魅力的な手段であるかもしれない。無人機は、操縦部やプロペラ部へのターゲット攻撃を許容され、接近する船舶への潜在的搭乗もまた選択肢となるだろう。

潜在的致死兵器のパッケージは、9mm ハンドガン、準自動アサルトライフル、短距離・長距離バレル 12 ゲージショットガン、0.30 口径ライフル、標準レーザーに制御された 0.50 口径マシンガンのような強化兵器を含む。

8 費用

核セキュリティは、9/11 事故以降で増えた要求によって、現代の原子炉に多大な費用を課している。OFNP の核セキュリティに係る 3 つの主要な費用要因は、その大きさ順に人件費、機材費、保守費である。現段階の設計においては、人件費は地上式発電所の核セキュリティと同様に、核セキュリティ費用に

最も寄与している。残念なことに、人工あたりの人件費は、洋上発電所では高価になるとであろう。それは、地上式発電所の要員と比較してプラットフォームの核セキュリティ要員の人件費が高いことが主要な原因であり、彼らとその需要品をプラットフォームへ出し入れすることに関連した輸送費用があることも部分的な原因である。これは、要員への要求事項が十分減少しない限り、人件費が核セキュリティ計画の中で最も高い費用となることを表している。

洋上プラットフォームのセキュリティ要員の年間人件費は、従来発電所のセキュリティ要員の人件費と石油プラットフォーム要員の人件費を基にして試算可能である。従来発電所のセキュリティ要員の年間人件費は、約 50,000~70,000 ドルである。反対に、石油プラットフォーム要員の年間人件費は、約 100,000 ドルである。OFNP のセキュリティ要員の年間人件費は、石油掘削操作者と同様に約 100,000 ドルとなるだろう。上記で示した例の通り、OFNP-300 では合計約 40 名のセキュリティ要員を必要とするので、セキュリティ要員の人件費は年間 4,000,000(400 万)ドルになるだろう。

機材費は、人件費よりは低いものの、同様にコストドライバーである。人件費とは異なり、OFNP-1100 の機材費は、より大型のプラットフォームと比べて莫大に増えるものではない。必要とされる小型装備は、セキュリティ要員の数に応じて増加するであろうが、発電所のサイズが増加してもソナーブイやレーダーシステムの追加購入の必要はないであろう。物的障壁により大きな要求があるだろうが、その増加は重大なものではないであろう。それぞれの試算は Table8 に示される。

機材費は、兵器や検知機器の購入(Table8 ではパッシブソナーが使用されている際は 1,685,000 ドルと算出)と、セキュリティ監視機器の購入(1,650,000 ドル)時の一度限りの費用が含まれる。この合計 3,335,000 ドルにのぼる核セキュリティ費用は、毎年発生する 4,000,000 ドルの人件費よりも低い。

最後に、保守費は試算することが難しいが、大部分がプラットフォームの保守費である。機材の主要な保守が集約されている箇所は、警報ステーションとその指示・制御機器、ソナーブイやレーダーシステムである。保守要員は技術セキュリティ要員が占めていることから、実行的で保守的な手法は、年間の機材の補修・交換予算として、購入時の機材費の 15%を使用することである。発電所の 60 年のサイクル寿命の間、費用に寄与する保証や老朽化といった要素は、この試算に含まれている。したがって、それらの機器の保守費は、年間約 530,000 ドルと試算した。よって、概算すると OFNP-300 の核セキュリティの合計費用は、1 度きりの機材費である 3,300,000(330 万)ドルと、さらに高額となる年間の人件費と保守費である 4,500,000(450 万)ドルの合計となるであろう。これは、OFNP-300 でいえば、電気出力 300MWe の原子炉を設備利用率 90%で運転させた場合、0.155 セント/キロワットアワー分の年間費用を提供する。発電所に標準化された一度限りの費用は、機器寿命を 10 年間と想定すると、約 0.013 セント/キロワットアワー分となる。比較として、2010 年にミネソタ州で Xcel Energy 社によって運転された PWR 型の 3 つの号機の年間の核セキュリティ費用は、公開資料上では 25,500,000(2,550 万)ドルであるが、費用要素の内訳を示すものではない[12]。当該の 3 つの号機は、それぞれの電気出力が 585MWe(670MWe まで引き上げられて以降)、550MWe、550MWe であり、合計電気出力が 1.7GWe となる。これは、Xcel 社の原子炉の核セキュリティに年間 0.192 セント/キロワットアワーの費用を課していることになり、OFNP-300 に対する上記の試算と近い数値となる。上記の試算を基にすると、OFNP-1100 の核セキュリティ費用は、電気出力が 3 倍以上となっている一

方で、2 個以下の要素によってのみ増加するだろう。したがって、前章で示した最低限の試算の通り、簡単に利用可能な費用データと粗いスケーリングによると、OFNP の MWe あたりの核セキュリティ費用は、類似の大きさの他発電所よりもはるかに低くなるであろう。

Table 8. セキュリティ装備の想定費用

装備	費用(1000 ドル)
武装と検知機器：	総計：1685(パッシブソナー) または 2715 (アクティブソナー)
CCTV と熱感知カメラ	35
レーダー(AIS と)	250
パッシブソナーブイと制御装置	610
アクティブソナーブイと制御装置	1640
無人機	100 想定 (4 機)
物的障壁	600
非致死性兵器(LRAD, LOI, ADS)	50
致死性兵器	40 (30 人分)
セキュリティ監視機器：	総計：1650
CAS, SAS	500
発電所内部空間	150
地上式サイト	1000

9 今後の研究

より多くの研究が OFNP の核セキュリティのさらなる詳細設計のために必要とされるであろう。第一として、水中の脅威、ドローン・無人機からの攻撃、衝突を含むあまり研究されていない分野の研究が必要である。研究は現在進行形であり、衝突回避を目的にプラットフォームを移動させるための係留索や自動船位保持装置の使用といった、考える応答や影響緩和策と衝突脅威を評価する衝突モデルソフトや産業界の知見を利用している。最初の分析は、水中の脅威に対して行われており、ネットのような物的障壁、水中の無人機、接近する脅威を排除するための魚雷の使用を含め、可能な手段を仮定のケースで研究している。しかしながら、さらに多くの研究が有効な応答とその費用を分類するために必要であろう。

第二として、核セキュリティ計画について、標準的な要員の輸送を伴う通常でない状態、燃料交換、他の主要な保守活動を含む拡張させる必要がある。それらは、燃料交換や主要な保守活動の運転上の戦略を深化させることと並行して改良されるであろう。そのような状態は、要員数の増加に主に対応するものであり、定性的ではなく定量的に通常の運転とは異なるものである。

第三として、脅威の環境と政府の支援について、様々なプラットフォームの立地候補地点で分析されるべきである。例としては、米国洋上のプラットフォームを基準とすることは、潜在的脅威、政府支援、規制環境が異なるため、シンガポール洋上を基準とすることは、異なった核セキュリティ上の要件が課されるで

あろう。現実には OFNP を運転するとき、それらの違いは考慮されるものであり、特定の状態は現状で正確に定義可能なものではないかもしれないが、異なる状態で発生しうる差異の評価は研究される必要があるであろう。最後に、研究は、設計・要件の深化に伴い正確な要員と機器の要件をより特定されるために行われるべきである。要件は、解となる追加機器の採用や、核セキュリティ状態のさらなる分析によって減少するかもしれない。

10 結論

対処すべき最も複雑な核セキュリティシナリオは、攻撃者が捕獲ではなく発電所に損傷を与えようとしているシナリオである。特に、浮体式発電所は、地上式発電所と比較すると、爆発、船舶衝突、またはその両方による沈没という特異な脆弱性を持っている。さらなる調査・分析は、自殺的爆発攻撃、遠距離制御ドローン攻撃、意図的船舶衝突による攻撃に対する最良の応答を決定するために必要である。しかし、応答の重要なコンセプトとしては、その場の捕獲、攻撃者の遅延、格納容器の防護である。

OFNP-300 が洋上発電所として 0.155 セント/キロワットアワーの核セキュリティ費用である本稿最初の試算は、公開資料として本稿で引用している 3 基の地上式 PWR 発電所の費用よりもわずかに低い。しかしながら、核セキュリティ上の懸念によって、公開で利用可能な情報は核セキュリティ上の要員数やその他の詳細な情報が含まれていない。地上式原子力発電所は、ドローンによる空中攻撃に対応しておらず、OFNP でも同様に未対応であるが、将来的に詳細に調査するかもしれない。

費用削減は、仮に本稿 7 章で確認した通り、一度きりの機材費が比較的小さいため、主に発電所に必要なセキュリティ要員の減少を成功させるための補完策が整うのであれば、達成可能である。一度きりの機材費は、セキュリティ要員の人件費の 1 年分より低く、人件費に比べて非常に小さいものである。理想的には、さらなる要員の削減がさらなる機材の実装によって達成される可能性がある。

最後に、本稿で示した核セキュリティ計画は、仮想の設計要件に対応する方法の一例にしか過ぎないことを強調する。OFNP の最終的な核セキュリティ計画の提案に限定された OFNP 申請に係る最も効果的な許認可の枠組みを構築するため、及び核セキュリティ上の脅威を十分に理解した段階に達するために、さらなる検討が必要である。この点について、研究を熟考した野心的な挑戦は、リスク情報ベースの核セキュリティ戦略を構築・実行して、本稿で示した核セキュリティ計画において設計要件の参考として仮定した決定論ベースの現行の米国 NRC 規制体系と取り替えることである。

謝辞

以下、略。

以上

Appendix B 私訳：J. Conway, et al., “Physical security analysis and simulation of the multi-layer security system for the offshore nuclear plant (ONP)”, (2019).

タイトル		Physical. Security Analysis and Simulation of the Multi-Layer Security System for the Offshore Nuclear Plant (ONP)
出典	発表者	J.Conway, N.Todreas, J.Hal.sema, C.Guryan, A.Birch, T.Isdanavich, J.Florek, J.Buongiorno, M.Golay
	文献	Nuclear Engineering and Design 352 (2019) 110160

キーワード

- ・原子力発電所の核セキュリティ (Nuclear power plant security)
- ・セキュリティ要員 (Guard force)
- ・設計基礎脅威 (Design basis threat)

概要

本研究は、発電所の設計と核セキュリティ計画を評価するために ARES Security Corporation が開発したシミュレーションソフトを使用し、ONP-300 の提案されている核セキュリティ計画の有効性を研究するものである。本稿は、既往研究である 2016 年の論文(ICONE24-61029, Charlotte, NC, Kindfuller et. al.)で提案された核セキュリティ戦略に次の重要な追加を加えたものである。追加内容は、核セキュリティの最適化のための発電所設計の修正、シミュレーションに基づくセキュリティ要員の変更、船舶の爆発のダメージを防ぐための防護障壁の設置、そして地上施設のセキュリティ要員、対応チーム、重要施設の創設である。

異なる攻撃シナリオが研究され、4 つの設計基礎脅威が産業界の専門家によるガイダンスを基に定義された。ARES ソフトを使用することで、その結果は、ONP-300 の初期のプラットフォーム設計であり、許容不可能なパフォーマンス結果を示すプラントの頂上デッキにいるセキュリティ要員にとっての視界に係る課題を示す。この現実化は、ONP-300 と核セキュリティのコンフィグレーションと構築物のレイアウトの変更を促す。追加的な感度解析は、セキュリティ要員数の減少の結論を導き、冗長性のあるレーダーシステムの重要性を強調するものとなった。

本研究の主な成果は 2 種類ある。第一に、核セキュリティを強化する特性の実装は、革新的な特徴について最良なものが特定され、費用対効果も確認されたことから、ONP 設計の非常に早期段階で達成されたこと。第二に、モンテカルロ数値計算ツールの適用することは、核セキュリティ設計の堅牢性を証明するために、広範囲の脅威シナリオに打ち勝つ設計の有効性確認に役立つことである。

1 ONP の目的とコンセプト

本稿は、ONP の核セキュリティ計画を発展させるためのアイデアを拡張・実証する。ONP は 24th ICONE で投稿した我々の論文(Kindfuller, 2016)にまとめられている。本研究の主な貢献は、核セキュリティを強化する特性の実装は、革新的な特徴について最良なものが特定され、費用対効果も確認されたことから、ONP 設計の非常に早期段階で達成されたこと。また、モンテカルロ数値計算ツールの適用することは、核セキュリティ設計の堅牢性を証明するために、広範囲の脅威シナリオに打ち勝つ設計の有効性確認に役立つことである。

ONP は、高価な構造材のコンクリートの使用を大幅に減少させることや、石油・ガス産業から費用対効果の高い海上プラットフォームの採用することによって、様々な現行の課題に対処する。原子炉の安全に関して、洋上立地は放射性物質放出事故時に、住民退避の必要性を排除し、土壌汚染を最小化する。海を使用することは、無限のヒートシンクを提供し、比較的水深が深い立地地点で発生する地震や津波から本質的に防護するものである。ONP は基準となる原子力発電所と、それを搭載する円筒形の船体プラットフォームから構成される。

MIT の原子力科学技術科は、ONP-300 と ONP-1100(Buongiorno et al. 2016)の 2 つの ONP 設計について並行して最近研究している。ONP-1100 は、Westinghouse 社が AP1000 (Westinghouse, 2017)のような 1100MWe 級の原子炉を基にしている。そして、AP1000 は既に NRC の設計承認をとっており、中国で運転中である。ONP-300 は、Westinghouse 社の Small Modular Reactor (WSMR) (Shulyak, 2014)のような 300MWe 級の原子炉を基にしている。ONP-300 のデッキは、図 1 で示す通り、四角形のデッキを設計としている。どちらのケースでも、原子力発電所を格納するために選定された浮体構造物は、洋上の石油・ガスの掘削産業で使用されている、たくさんのプラットフォームに似た円筒形の船体の形をしているプラットフォームである。

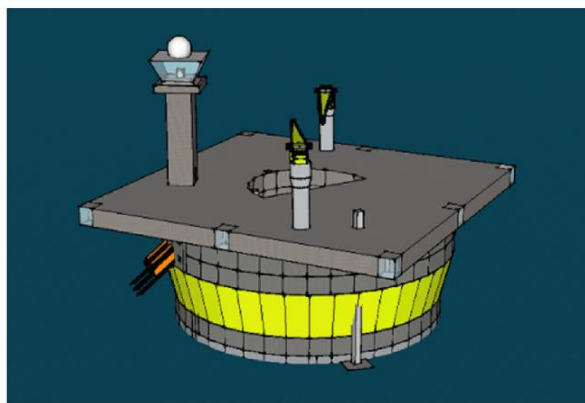


図 1. ONP-300 の正方形デッキ設計

2 核セキュリティの課題

ONP は、陸上の原子力発電所と比較して、いくつかの安全保障上の課題と利点を有している。最も大きな欠点は、発電所と機上の警備員を支える外部の対応部隊との距離である。もう一つの新たな安全保障上の課題は、水中での脅威の可能性である。これらは深刻な懸念事項であるが、ONP はいくつか

の利点を提供している。すなわち、360 度の視界、防御する領域の少なさ、敵を検出する比較的容易さである。外部の応援部隊から離れていることに関連する不利な点に対処するために、いくつかの戦略を実施することができ、第 6 章で記述されている。この戦略には、一般に、最大応答時間のための敵の遠距離での検出と、スピードの小さい侵入者に対する防護バリアの使用が含まれる。また、さまざまな脅威を阻止するために、一連の殺傷能力のある武器と殺傷能力のない武器の両方を使用する。

3 攻撃シナリオ

ONP を防護するためのセキュリティ計画を策定する際には、考えられる多くの攻撃シナリオが考慮された。小型ボートによる攻撃、意図的な大型船の衝突、水中、内部、無人機による攻撃などがある。小型ボートによる攻撃は、陸上原子力発電所に対しても起こりうる攻撃シナリオと考えられており防護が必要である(Woo 2013)。他のいくつかの攻撃シナリオは、ホスト国の再責任と見なされるため、考慮されていない。例えば、(Kindfuller 2016)で定義されているように、軍用艦艇、民間/軍用機、または大型潜水艦からの脅威に対応するのは、受入国の責任であると考えられる。

3.1 設計基礎脅威

暴力的脅威と非暴力的脅威の両方を考慮する必要がある。暴力的な脅威は核セキュリティに脅威を与えるが、非暴力的な抗議者も作戦にリスクをもたらす。以下のパラグラフでは、小型ボート攻撃の両方の脅威に対する MIT セキュリティチームのアプローチの概要を説明する。

米国商用発電所の設計基礎脅威 (DBT) を分類した。NRC の CFR §73.1 は、商用発電所が被る(米国 NRC、2015 年)脅威に対する基本的な特性を概説している。NRC の要求と ARES 社の助言を考慮して設計基礎脅威マトリックスを開発した。表 1 に、MIT セキュリティチームが開発した脅威マトリックスを示す。

AVERT は、セキュリティチームの有効性をテストするために使用されるシミュレーションソフトウェアであり、7.1 で詳しく説明する。各脅威名の横にある表 1 に示すスキルレベルは、AVERT がどのようにスキルをシミュレートするかを示している。たとえば、2 倍のスキルレベルを持つ敵は、同じ武器を使用している場合、1 倍のスキルレベルを持つ敵と同じ距離で標的を攻撃する可能性が 2 倍になる。

各脅威区分の敵は、表 1 に記載されている武器に加えて、9 mm 拳銃、3 発の爆薬、5 個の手榴弾で武装する。4 つの設計基礎脅威は、武装レベルとスキルレベルに基づいている。海賊団が持つ武器や技術は限られているとも考えられる。そのようなカルト教団の過激派グループは、強力な武器 (12.70 ミリ狙撃銃と 7.62 ミリ機関銃) を手に入れる可能性が有るがそのようなグループは戦闘経験が限られているため、技能レベルが低い可能性が高い。テロ集団は攻撃用武器を実戦配備し、より多くの戦闘経験を持つ。したがって、彼らは、カルトや海賊の DBT よりも高いスキルレベルを持っているだろう。最後に、国家が支援する攻撃は、高度に武装し熟練した特殊部隊のチームを模倣する。AVERT はテスト中にいくつかの制限があり、ドローン攻撃をシミュレートできなかった。内部者の脅威に関しては、実質的なテストが行われ、8.4 で提示されている。

非暴力の抗議グループは、攻撃シナリオを想定している。ONP 管理者は、非暴力的な敵対者のリスクを軽減するために、以下の目標を設定すべきである。第一に、極端な環境グループが抗議行動を起こすリスクを軽減するために、持続可能な未来における ONP の役割に関する明確なビジョンを確立し明確にすること。上級管理職はすべての関係者が意見や懸念を表明可能なように、抗議グループの管理職間で進行中のフォーラムや議論を確立すべきである。ONP は大量の電力供給者であり、継続的な供給を確保する必要があるため、非暴力の抗議者に対応する際には、可能なすべての選択肢を評価すべきである。最後に、抗議団体に対する反対意見が出た場合、第一に考慮すべきことは、抗議者に危害を与えないことである。

第二に、ONP 組織は、積極的なアウトリーチと情報提供、ならびに事後的な監視と対応を含む多方面のリスクコミュニケーション戦略を策定し、定期的に見直し、更新すべきである。この戦略は、現地の緊急対応センターにおいて、機関や政府を含む特定の利害関係者と協力して策定されるべきである。このコミュニケーション戦略の主な目的は、抗議行動に遭遇したいかなる状況においても、メディアのセンセーショナルさを最小限に抑えることである。

第三に、拘束された/逮捕された抗議者は、ONP の構造上のスペースが限られていることと、拘束された/逮捕された抗議者の処分後もメディアが ONP の構造に注目し続けているため、ONP ではなく、陸上施設（または市民警察の構造）にのみ拘束されるべきである。

上記の目的は、非暴力的な抗議行動から生じる可能性のある運用上の障害から発電所の所有者を保護することである。非暴力的な抗議者はまた、メディアのセンセーショナリズムにより自然を保護しながら、抗議を最小化するために一般の人々を教育する目標を持っている。

Table 1

Design Basis Threat Matrix.		
Adversary Armament and Skill Level	Low Armament	High Armament
Low Skill Level	Pirate Attack (0.9x Skill) 2 Speedboats w/50 cal. Mounted MG (5 men each) • 4 Riflemen (7.62 mm AR) • 1 Rocketeer (66 mm RPG-7 with 5 rounds, 7.62 mm AR)	Cult Attack (0.9x Skill) 2 Speedboats w/50 cal. Mounted MG (5 men each) • 3 Riflemen (7.62 mm AR) • 1 Sniper (12.70 mm SR) • 1 Machine Gunner (7.62 mm MG)
High Skill Level	Terrorist Attack (1x Skill) 2 Speedboats w/50 cal. Mounted MG (5 men each) • 2 Riflemen (7.62 mm AR) • 1 Rocketeer (66 mm RPG-7 with 5 rounds, 7.62 mm AR) • 1 Sniper (10.4 mm SR and 7.62 mm AR) • 1 Machine Gunner (7.62 mm MG)	State-Sponsored Attack (1.3x Skill) 1 Speedboats w/50 cal. Mounted MG (5 men) • 3 Riflemen (5.56 mm AR) • 1 Sniper (12.70 mm SR, 66 mm RPG-7 with 5 rounds) • 1 Machine Gunner (7.62 mm MG) 1 Underwater Delivery Vehicle (5 Men, Closed Circuit Breathers) • 4 Riflemen (5.56 AR) • 1 Machine Gunner (7.62 mm MG)

3.2 潜在的なターゲット/脆弱性のエリア

前述したように、ONP は、敵対的なグループとの衝突の際に、大きな政治的、環境的、社会的事件を引き起こす可能性がある。しかしながら、ONP 上の脆弱な構造物に優先順位をつけることが重要であり、敵対勢力がプラットフォームに乗り込み、トップデッキを支配可能な場合には、以下の部屋/区域が厳格に保護されるべきである。

中央制御室は発電所の運用の中心であるため、主要なターゲットである。その保護は、敵対的買収に伴う社会的・経済的影響だけでなく、運用上の理由からも不可欠である。使用済燃料プールは、放射性物質を盗もうとしたり、放射性物質の放出を引き起こしたりしようとするグループから保護されなければならない。使用済燃料プールと同様に、原子炉事故時の放射線放出を防止するため、格納容器も防護することが必要である。取水口と原子炉補助冷却系は、原子炉に冷却材を供給するため、これらも防護の対象となる。最後に、交流電源ケーブル、光ファイバ通信、及び非常用バックアップ電源は、陸上側との二次電源及び通信を維持するために保護されなければならない。

3.3 未然防止戦略

ONP-300 の初期設計は、不十分なセキュリティ更新結果(Jurewicz et al. 2015 年)をもたらした。甲板の非対称性のため、守備位置の視界は限られていた。デッキの背面が高くなっていたため、下部フロントデッキの警備員が後方から接近する敵を検知して係合することはできなかった。攻撃者は、シミュレーション中に警備員との接触を避け、この弱点を利用可能である。デッキの再設計を何度か繰り返した結果、図 1 に示すようにスクエアデッキの設計が進化し、オリジナルの設計に見られた視認性の問題の多くが解消された。DBT 試験、感度解析、内部脅威緩和、及び爆風解析の結果は正方形デッキ設計に基づいている。

4 立地と核セキュリティ障壁

海上プラットフォームは、沿岸から 8 から 12 マイル (NM) の領海内に設置される。船舶の衝突の危険性を最小限に抑えるため、港湾から離れた場所にサイトを設置する(Genzman et al. 2016 年)。プラントを主要な航路から遠くに配置することは、警備隊が、入ってくる船舶が重大な脅威をもたらすかどうかを判断するのに役立ち、警備隊の関与のための時間を増加させる。

プラットフォームは、海上数マイルに配置されたときに、いくつかの規制上の懸念と課題に直面する。最も重要な事項は、大型船禁止区域(LSEZ) の公海への拡張である。LSEZ は、プラットフォームから 8 NM 拡張され、国際規制の下に残る。しかしながら、国際水域の排他的水域を認める判例が過去に確立されており、参考文献(Genzman et al. 2016 年)でより詳細に議論されている。

セキュリティ計画のレイヤには、監視区域(MA)、大型船禁止区域(LSEZ)、立入規制区域(CAA)、及び周辺防護区域(PA)が含まれる。MA は 12 NM まで拡張され、警備部隊が近くの船舶を検出して識別する時間的猶予が確保可能である。レーダー技術により ONP がより遠くを監視することが推奨される。LSEZ は 8 NM に配置されている。これは、70,000DWT (Dead Weight(載貨重量トン)船に積載可能な貨物、バラスト水や燃料の総重量)を超える船舶がこの距離で ONP と衝突するのに 30 分かかるためである。これは、15 ノットで航行する約 70,000DWT の船が ONP に重大な損傷を与えると決定したシミュレーション(Genzman et al. 2016 年)に基づいている。このような脅威については、(Genzman et al. 2016 年)戦術で詳しく説明する。

脅威となる大型船舶の推進または操舵システムを不能にする、または妨害することによって、この脅威に立ち向かうことが可能である支援防衛力の到着によって、ONP の偵察部隊に時宜を得た支援を提供する。

CAA とは、民間船舶の航行が許可されない地域を指す。これを 1 つの NM に配置すると、警報ステーションのモニターが民間船舶に警告し、船舶が敵対的な意図を持っているかどうかを判断可能なようになる。PA の境界は、最大 65 フィート (約 20 メートル) の長さまでの複数のボートを止めることが可能な物理的なバリアと、ダイバーや小型潜水艦を止めるための海底ネットによって囲まれる。物理的バリアは、参考文献(Conway et al. 2018)で精緻化された爆風解析研究に基づき、ONP から 250 m の位置に設置される。

5 核セキュリティの責任と補足

陸上の核セキュリティは、プラットフォームの核セキュリティとは異なる構成と責任を負う。それぞれの責任と構成については、以下の通り。

5.1 プラットフォームのセキュリティ要員の責任

プラットフォームセキュリティチーム(PST)は、プラットフォームの物理的なセキュリティと中央警報ステーション(CAS)の監視を担当する。プラットフォームのセキュリティには、プラットフォームへの暴力的及び非暴力的な侵入を阻止するために適切な防護力を使用することが含まれる。また、CAS の監視を担当するセキュリティ要員が数名搭乗する。警報室では、船舶(水上及び水中)及び航空機が接近することをセキュリティ要員全体に警告する。甲板を警備するセキュリティ要員は、陸上プラントのように巡視することはない。セキュリティ要員は、脅威を管理するために防御的な配置で水平線をスキャンする。アクセス制御ポイントにより、許可された者だけがプラットフォームに乗り込むことを許される。

5.2 地上のセキュリティ要員の責任

陸上のセキュリティ要員は、陸上の物理的セキュリティ、二次警報室(SAS)の監視、ONP の入退域者監視、ONP 及びその周辺区域のアクセス場所の調査と承認/制御を担当する。陸上での物理的なセキュリティ監視は、設置面積が小さく、重要なターゲットがないため、陸上の原子力発電所に比べて作業量は少ない。

技術専門のチームが SAS での監視及び保護をする。SAS は、プラットフォームで使用されている検出機器から通知を受信し、プラットフォームセキュリティチームとの一貫した無線通信を維持する。通常のプラットフォームの出入管理は、大きな人の移動をあらかじめスケジュールすることによって容易になる。そのような動きは事前によく知られており、必要に応じて非番のセキュリティ要員を連れてくることによって計画可能である。

5.3 セキュリティ要員の構成

ONP-300のセキュリティ要員の全体構成は以下の表2のとおりである。各セキュリティ要員のポジションを年間(24 時間 365 日)維持するためには、勤務中の休憩、移動、訓練、休暇、病気を考慮すると、平均 5.3 人が必要であることがわかった。各ポジションを1年間運用していくことを考えると、8760 時間が必要である。各セキュリティ要員は年間約 1656 時間の配備が可能である。8760を1656で割ると、1 ポジションあたり 5.3 人の警備員が必要となる。当初、プラットフォームの警備のために 10 人のセキュリティ要員を想定した。しかし、セクション 8.1 で紹介する感度分析により、5 人で十分であることがわかった。

海洋産業では一般的なことであるが、プラットフォームでのシフトは 12 時間交代であり、プラットフォームの警備員と CAS モニターがこのシフトに従う。2 つのシフトはプラットフォーム上で生活し、残りのシフトは休暇または訓練に参加する。ONP に 2 つのシフトを乗せることで、12 時間ごとの交代及び、有事にはセキュリティ要員を増員することを可能とする。NRC は、米国の商業用発電所では常時 10 人のセキュリティ要員を維持することを要求している。MIT セキュリティチームは、10 人がプラットフォームに常駐しているため、5 人の非番のセキュリティ要員をすぐに招集することで、合計 10 人が待機可能であると考えている。

陸上のセキュリティ要員については、主に次の 4 つのグループに分けられる：二次警報監視所、入退域管理、巡視/現場監視、対応チーム。二次警報監視所は独立した建物になる。ここには 2 人が必要である。一人は SAS を監視するため、もう一人は物理的なセキュリティのためである。つまり 2 つのポジションで合計 10.6 人を必要とする。入退域管理所には 3 つのセキュリティ・レーンがあり、ここには 3 つのポジションが必要となることから合計 15.9 人が必要となる。陸上の残りの建屋については 4 人で巡視を行うことし、追加で 21.2 人が必要となる。追加対応チームとして 2 人を常に確保すると、さらに 10.6 人が追加で必要となる。これにより、陸上のセキュリティ要員の総勢は、11 のポジションに 58.3 人の警備員を配置することになる。

表2 セキュリティ要員の全体構成

セキュリティ要員		ポジション毎の必要 人数	全体要員
プラットフォームセキュリティ要員	プラットフォーム警備員	5	26.5
	CAS 監視員	2	10.6
陸上セキュリティ要員	巡視/現場監視員	4	21.2
	SAS 監視員	2	10.6
	入退域管理員	3	15.9
	対応チーム	2	10.6
合計		18	95.4

5.4 セキュリティ要員の装備

暴力的な脅威と非暴力的な脅威の両方を検知し、抑止するために多くの機器が使用される。以下にカテゴリ毎にまとめた。各機器カテゴリの詳細な説明については、参考文献(Conway, et al., 2018)を参照すること。

5.4.1 検知機器

検知装置は、あらゆる気象条件の下、プラットフォームから 12NM までの距離にある脅威を検知する能力が必要である。この距離があれば、セキュリティチームは差し迫った攻撃に対応するための十分な時間を確保可能である。また、検知範囲が広いことで、警報監視所の監視員が接近してくる船舶の性質を判断する時間も長く確保可能である。ONP 検知システムの例を以下に示す。

プラットフォームの高所に設置されたレーダーは、12NM(22km)以上の距離にいる船舶を探知可能である。レーダーには自動特定システム(AIS)が搭載され、検知範囲内の商用船舶を識別可能である。1500mm のレンズを搭載した赤外線カメラは、15km 以内の船舶を認識し、9km 以内の船内の人員を識別可能である。セキュリティ要員は、内在的脅威を特定し確認するために、携帯型 UAV(Unmanned Aerial Vehicle)を採用可能である。水中の脅威に対しては、ONP を取り囲むように防護壁の外側にアクティブソナーを配置する。アクティブソナーの検知距離は約 1,000m であり、パッシブソナーに比べてオペレーターのトレーニングが少なく済み、ダイバーの検知にも優れているため、推奨されている。アクティブソナーは商業的な用途により頻繁に使用されている。検知距離はパッシブソナーに比べて若干劣るものの、上記のような理由で推奨されている。

5.4.2 物的障壁

一次的な主要物理的障壁は、海底に固定された一連のブームとネットであり、周辺防護区域(PA)を設定する。このタイプの障壁は、ボート搭載型即席爆発装置(BBIED)を阻止するためのものである。潜水艦の網はブームの下にぶら下げ、ダイバーやミニ潜水艦を抑止するために海底に固定される。

次の防護障壁は、プラント自体のレイアウトである。プラットフォームに乗るためのはしごは、人の移動の計画時以外は、常に格納する。これにより、敵はグラブリングフックなどを使ってプラントに乗り込まなければならなくなり、疲労が蓄積し、防護の攻撃にさらされる。プラットフォームの船体は二重構造になっており、大型船の衝突や BBIED に対する防御力を高めている。プラットフォームの甲板に沿って設置されている強化扉は、敵が異なる部屋に簡単に入出入りするのを防ぐ。最後に、甲板下の部屋のレイアウト自体が防護障壁となっており、内部の人間が事前にサイトマップを提供しない限り、敵は脆弱なエリアを探すために時間を費やすことになる。

5.4.3 非致死性兵器

非暴力的な抗議者が日常業務中に侵入するのを阻止するために、さまざまな非殺傷兵器が配備されている。抗議者を負傷させることなく攻撃を阻止することが重要である。ゴム弾、ビーンバグショットガン、放水砲は、ONP エリアからの退去を求めても従わない侵入者に対する非殺傷兵器である。また、催涙スプレーやテザー銃も、従わない侵入者を鎮圧するための選択肢である。長距離音響兵器(LRAD)は接近してくる船舶を止める、もしくは敵対的と思われる船舶に対しては音波兵器として使用可能である。長距離レーザーは、約 3/4 マイルの範囲で乗組員の目をくらませ、武器の照準や進行方向を確認することが不可能なようにする。アクティブ・デニアル・システム(ADS ; 指向性エネルギー兵器)はミリ波の電磁波を照射することで誘導加熱により敵を数秒で加熱し、離脱行動を起こさせる。最後に、米国海軍が使用している LROI(Long Range Ocular Interrupter)は低強度では接近する船舶に警告を与えることが可能な明るい光線を発射し、高強度では視覚を完全に抑制可能である。これらの武器を組み合わせれば、CAA への不法侵入や物理障壁を突破しようとする非暴力の抗議者を止め、鎮圧可能である。

5.4.4 致死性兵器

暴力的な敵からの攻撃を受けた場合、PST はプラットフォームを防御しなければならない。敵がプラントをコントロールする、核燃料を破壊もしくは盗む、放射性物質の放出を引き起こすといった行動により、政治的、社会的、環境的に重大な結果を招くことになる。警備員は ONP に乗り込もうとする武装した敵を抑止するために、十分な装備が必要である。また、小型の水陸両用船を動かせないようにすることも必要である。大口径の武器は水陸両用で人に対する抑止力が大きいので、PST に推奨される。ONP に搭載されるアサルトライフル、ショットガン、ハンドガンは、敵がプラットフォームに乗り込んできたときなど、近距離での戦闘にのみ使用される。敵が ONP の傍にいて乗り込もうとする場合には、手榴弾を使用することも可能である。警備員は敵を無力化するためにプラットフォームの側面から手榴弾を投下する。プラットフォームの海面近くで交戦する際には遠隔操作可能な武器が考えられる。警報室の担当者は中央警報ステーションの安全な場所から、自分の命を危険にさらすことなく、ONP のベースに近づく敵と相対可能である。

6 防衛攻撃の戦略

接近する船舶は、乗組員が敵意を持っている場合、「暴力的」であると捉える。敵対的意図はケースバイケースで決定される必要があるが、船舶が全速力で ONP に接近している場合、通信の試みや警告に応答しない場合、または殺傷兵器を所持している場合がある。接近してくる船舶が暴力的であると判断され、無線による繰り返しの試みに協力しなかった場合には、CAA に入った直後に、PST がこれに関与する可能性がある。PST については、可能な限り早期に対処することが最も重要である。これにより、セキュリティチームは、プラットフォームに到達する前に広告を無効化する可能性が最も高くなる。また、グループが敵対的であると決定されると、海岸対応部隊が対応する。

非暴力的な抗議者は別の問題が考えられる。PST では抗議者を殺傷兵器で攻撃することは不可能である。しかし、彼らはさまざまな非殺傷兵器を利用可能であるようになる。提案した応答法は 3 つの要素

がある。最初に、経営陣は明確な目標を設定しなければならない。第二に、チームは抗議者に対して具体的な運用上の対応をしなければならない。第三に、治安要員が非暴力組織の状況に適切に対応可能なように、明確に規定された交戦規定(RoE)が必要。運用上の対応と RoE の詳細については、(Conway et al. 2018)を参照。

7. ONP 核セキュリティシステムの検証

7.1 AVERT の導入

ARES Security Corporation は、バージニア州ウィーンに本社を置く企業である。彼らは、重要インフラへの攻撃が成功する確率を計算可能なモンテカルロ・セキュリティ・シミュレーション・ソフトウェア、AVERT を開発した。これを使用するには、まず地形、立面図、マテリアル、建物などの外構的な特徴を含む 3D モデルを読み込む。モデルが確立されると、AVERT はユーザー・インターフェースを提供する。このユーザー・インターフェースを使用して、使用者は防御及び敵の能力と戦術を定義可能である。これらの選択肢は、武器や弾薬の種類から出発地点まで多くの事項が有る。AVERT は攻撃の計算にこれらの仕様を使用する。所定数のシミュレーションの後、AVERT はセキュリティ違反の可視化とセキュリティ有効性に関する統計を提供する。シミュレーションのもう一つの興味深い事項は、攻撃中の環境条件の選択である。AVERT が兵器や探知に使用する確率は、シナリオが昼か夜か、嵐等の状況によって変わる。敵の成功を計算するための以前のモデルは、プラント配置(Yoo 2009)を考慮せずに数学モデルに大きく依存していた。AVERT を使用すると、レイアウトがガードにどのように影響するかを確認可能である。

シミュレーションにおけるこれらの考察と経験の全ては、多くの現在の原子力発電所による AVERT の使用につながった。AVERT はまた、2010 年から 2012 年の間に DOE と DoD による広範な検証、認定プロセスを実施したほか、新製品のリリースごとに徹底的な内部検証を実施した。

7.2 AVERT の ONP へのモデリング

ONP モデルを AVERT に統合する際には、地形が単純化されることがあった。移動計算に使用されるナビゲーション・メッシュの生成中に AVERT 解析の時間を節約するには、次のように行う。

水深 100 m を選択した理由は、反対方向から接近する敵の最悪のシナリオを提供すると同時に、敵が ONP を迂回して火災を回避し、計算負荷を最小化可能であるからである。

AVERT で模擬可能な環境条件は、昼、夜、嵐の 3 つである。昼と夜の条件は AVERT ソフトウェアに付属していたが、嵐の条件はこの研究のために MIT セキュリティチームによって開発された。昼と夜の状況には大量の情報が含まれており、検知率や移動速度、火災の発生率、特定の距離で標的を殺傷する確率などが含まれていた。嵐の条件が作成されると、夜の条件からのすべての情報がコピーされた。しかし、レーダの検出能力は著しく低下した。その他の情報の多くは、より正確なデータがなかったため、そのまま残された。

AVERT は勝利基準を使用して、特定の攻撃の成功/失敗の結果を判断する。攻撃者は地図上の「目標」に到達し、AVERT が攻撃された判断するのに一定の時間を費やさなければならない。その後の

状況では、乗船梯子の上の方に置かれ、敵は殺されることなくそこに留まる必要があった。これは非常に保守的なケースで、実際のシナリオでは、敵はプラットフォームに乗った後、重要な領域の 1 つに到達するために多くの時間を費やす必要がある。単純化と仮定の完全なリストについては、(Conway, et al. 2018)を参照。

7.3 DBT の結果

10 ポジションのセキュリティシステムは、表 3 に示すように、4 種の DBT のうち 3 種に対して非常に有効であることが判明した。

DBT 攻撃に対する ONP PST 応答の結果は顕著である。有効確率 $P(e)$ は、AVERT がガード力の成功率を示す確率。

例えば、75%の $P(e)$ は、1000 のトレイルのうち、ガードが敵を 750 回破ったことを示す。表 3 では、 $P(e)$ は最低値で $99.5 \pm 0.4\%$ 、信頼区間は 90% であった。この結果は嵐のような海賊の攻撃の最中にもたらされた。信頼区間は β 分布を用いて得られ、100% の有効性の場合には ± 0.0 となる。しかし、すべての結果で類似した小さい信頼区間となっている。詳細については、(Conway, et al. 2018) 参照。9 つのシミュレーションのうち、信頼可能な統計を達成するためにそれぞれ 1000 の試行を行った。

上記のデータが得られた 9000 件の試験のうち、計 9 件の失敗があった。これはシステム全体の有効性 99.9% に相当する。

残念ながら、テスト時に AVERT では、国家主導の攻撃のモデリングは実行不可能であることが判明した。水中での動きや弾丸やレーダーの物理学には多くの問題があり、非現実的な結果をもたらした。水中攻撃は今後の研究でモデル化しなければならない。

Table 3
DBT Results.

	Day $P(e)$	Night $P(e)$	Stormy $P(e)$
Pirate	100.0% ± 0.0	100.0%	99.5% ± 0.4
Cult	100.0%	100.0%	100.0%
Terrorist	100.0%	100.0%	99.6% ± 0.3

8 感度分析

異常事態が発生した場合、警備部隊が防御する必要があるシナリオは多岐にわたる。攻撃者は、通常の DBT よりも多くの方法で攻撃することがある。攻撃の間、警備員の 1 人は、より小さな警備力につながる無能力状態に遭遇することがある。敵はレーダーのメンテナンス中に攻撃する可能性があり、治安部隊からの応答時間の短縮につながる。最後に、警備員は 50 口径の機関銃ではなくアサルトライフルで武装可能である。これらのすべての状況をテストし、結果を以下のセクションに示す。これらの検討は、システムの有効性におけるクリフエッジ効果を見出すことを目的として行った。結果の詳細については、(Conway, et al. 2018)を参照。

Table 4
Decreasing Guard Force Results.

	DAY P(e)	NIGHT P(e)	STORMY P(e)
2 Snipers 8 Mg's	100.0%	100.0%	99.0%
2 Snipers 7 Mg's	99.9%	100.0%	99.0%
2 Snipers 6 Mg's	99.9%	99.9%	100.0%
2 Snipers 4 Mg's	100.0%	100.0%	99.4%
1 Sniper 8 Mg's	100.0%	100.0%	99.0%
1 Sniper 7 Mg's	99.9%	99.9%	98.5%
1 Sniper 6 Mg's	99.5%	99.8%	98.9%
1 Sniper 4 MGs	99.4%	99.8%	98.2%
0 Snipers 8 MGs	100.0%	99.9%	99.4%
0 Snipers 7 Mg's	99.7%	99.8%	96.3%
0 Snipers 6 Mg's	98.9%	99.6%	98.1%
0 Snipers 4 Mg's	99.3%	99.1%	97.9%

8.1 セキュリティ要員の減員

ガード力の減少をシミュレートすることは、少ないガードでどのように安全システムが機能するかを見るのに有用であった。より少ない数のガードをシミュレートするために、1 台のマシガン、2 台のマシガン、4 台のマシガンの順で削除された。そのため、2 台のロービングデッキ・スナイパーのうちの 1 台が再移動され、両方とも撤去された。最終的な警備配置は、甲板の各隅に 4 機の機関銃を配置した。これらの試験の結果を表 4 に示す。

4 台のマシガンに至るまで、警備隊の活躍はめざましい。デッキの各コーナーでの守備位置の使用は非常に貴重なものであった。彼らは 270 度の視界を提供しており、どの方向から近づいてくる敵にも二人の警備員が発砲可能である。

表 3 に要約されている DBT のテストは 10 個のガード・ポジションで行われたが、MIT セキュリティ・チームは表 4 の結果が ONP の保護には 5 個のガード・ポジションで十分であることを示していると考えており、これらの結果の根拠となった保守的な仮定がある。これには、敵に対する非現実的な勝利シナリオ、防壁の欠如、攻撃中に対応するプラットフォーム上の 5 人の追加ガードの排除が含まれる。前提条件の完全なリストについては、リファレンス(Conway et al. 2018)を参照してください。また、レーダーがディシージング防御力に及ぼす影響を明らかにするための試験も実施した。レーダーが撤去されると有効性が著しく低下した。レーダーは警備員が敵と戦うための十分な時間を確保するもの。

8.2 攻撃者の増員

上述したように、敵対勢力が 2 隻以上のスピードボートを調達することは可能である。このようなイベントは、セキュリティチームにとって最悪のシナリオと考えられますが、このような脅威に対してチームがどの程度のパフォーマンスを発揮するかを確認することは有益である。シミュレーションは 7 隻もの船を使って敵に対して行われた。これは、最悪のシナリオを決定するためでした。

表 5 と表 6 は、10 のガード・ポジションを維持しながら敵の戦力を増強した結果を示している。赤の数字は、敵軍の規模の変化を強調している。これらの試験は、試験前に 5 つのガード位置が適切であることが明らかになったため、10 のガード位置で実施した。しかし、表 5 は、10 人の警備員が 7 隻のボートに対しても性能を大きく低下させることなく効果的に防御可能なことを示している。10 人の警備員が常に 5 つのポジションの PST を持ってプラットフォーム上にいるので、MIT セキュリティチームは、5 つのポジションが十分にプラットフォームを守ることが可能であると考えている。

しかし、レーダーがなければ、性能は著しく低下する。表 6 に示されているように、2 隻のボートの DBT レベルでさえ、性能は許容基準を著しく下回っている。敵の検知は視覚的及び聴覚的方法で行われるため、敵はプラットフォームから 100~200m 以内でのみ交戦する。これは、セキュリティチームが敵チームを排除するのに十分な時間を与えません。

Table 5
Increasing Adversary Force Results.

Number of Boats	P(e) Day	P(e) Night	P(e) Stormy
2	100.0%	100.0%	99.4%
3	100.0%	100.0%	99.3%
4	99.9%	100.0%	98.2%
5	100.0%	100.0%	98.2%
6	100.0%	100.0%	97.6%
7	100.0%	100.0%	97.9%

Table 6
Increasing Adversary Force without Radar Results.

Number of Boats	P(e) Day	P(e) Night	P(e) Stormy
2	79.1%	55.2%	63.5%
3	56.1%	56.8%	43.4%
4	28.4%	18.3%	25.9%
5	32.7%	16.5%	8.5%
6	14.2%	7.5%	2.6%
7	9.0%	4.8%	3.4%

8.3 半自動式兵器の分析

自動小銃を購入、または免許を取得することは困難で費用がかかるため、半自動小銃だけで武装した PST の有効性をテストすることに関心が寄せられた。米軍と法執行機関の間で一般的な 50 口径のライフルで武装した二人の狙撃手と 5.56 mm の突撃銃で武装した 8 人の警備員を配備することが考えられる。

すべてのシミュレーションの中で最も低いパフォーマンスは 99.5%。半自動テストは、嵐と海賊によるテロ攻撃の重畳で DBT よりも良い結果を出した。しかし、変動は互いに 90%信頼区間内に入る 0.5%以下であった。火災の発生率が 100 回/分に比べて 60 回/分と低いことを考えると、結果はいくぶん驚くべきものであったが、精度の向上によって警備員がある程度の効果を発揮可能なことが明らかになった。

8.4 内部脅威の分析

NRC は、商業用原子力発電所は内部者の脅威の可能性に対して防御できなければならないと規定している。これまで、内部者による脅威は、防護の可能性について数学的に評価されてきた (Zou,2018)。AVERT は、内部者の脅威に関連する確率変数を取得し、モンテカルロ・シミュレーションによってそれらを分析することで、ONP 上の内部者の危険性をより効果的に判断することができた。MIT セキュリティチームによって 2 つの内部者の脅威シナリオが設定され、(Zou,2018)で特定されたシナリオと類似している。第一に、内部の人間が攻撃チームと協力して発電所に侵入するのを助ける可能性が有る。第二に、内部関係者は単独で、設備を破壊したり、盗んだり、発電所を支配したり可能である。内部者が単独で活動するこのシナリオは「単独攻撃者」と呼ばれ、他方はこの論文では「協調攻撃」と呼ばれた。残念ながら、AVERT は単独の攻撃者を効果的にシミュレートすることが不可能である。目と耳での検出に使用される既存文書は非常に粗雑であり、不可能な結果をもたらした。他にも、障壁の種類の制限や防犯カメラの設置に関する知識の欠如など、MIT セキュリティには困難な状況があった。

しかし、単独の攻撃者のリスクを最小化するために、多くのアプローチが存在する。これらには、広範な経歴調査、機内持ち込みのすべての所持品の X 線検査、武器にかかわる職務へのもっとも信頼可能な人物のみの任命、アクセスのある従業員は異常行動をとっていないことを経営者が毎月確認することなどが含まれる。また、単独の攻撃者のリスクを軽減するアクセス制御を保証するために、さまざまなバリアを使用可能である。

連携した攻撃シナリオには、敵対者による外部からの攻撃中に警備員を攻撃することを決定した ONP 職員が含まれる可能性がある。そのため、一般従業員による攻撃、狙撃者による攻撃、マシンガン (MG)による攻撃の 3 つのシナリオを想定した。

MIT のセキュリティチームが警備員を 5 人に減らすことを決定する前だったので、シミュレーションは全部で 10 人の警備員で行われた。しかし、このシステムはすべての試行において例外的に良好に機能した。夜間の有効率が 99.9%の MG 攻撃シナリオを除いて、すべての試行でセキュリティチームによる有効率は 100%でした。機関銃の射撃手は全方位に完全防弾の防御態勢にあるため、内部者がこれらの警備員を排除するのは非常に難しい。狙撃手は排除しやすいが、システムのセキュリティにおいて重要な役割を果たすことはほとんどない。いったんインサイダーが他の警備員と関わり始めると、彼らがプレートに

戻ることを可能にするドアポートを持っている機関銃手は、ほとんどすべてのインサイダーを係合し、排除した。

9 結論

ONP は、経済的にも競争力のある商業用原子力発電所になる可能性を秘めている。警備員の人数を減らすことで、多額の警備員を雇うことによるコストを削減可能である。海上に設置されていることで、陸上の発電所では地理的に不可能な敵対者を検知するための大きな機会、360度の視線、要塞型の防御など、多くのセキュリティ上の利点がある。

本稿で紹介するシミュレーションにより、プラットフォーム・セキュリティ・チームがいくつかの仮想的な設計基礎脅威(DBT)から適切に防御可能なことが示された。セキュリティチーム(PST : Platform Security Team)のスペックは、すべての DBT において 99%を超えた。PST の性能は、すべての DBT トライアルにおいて 99%以上。敵対勢力に関する感度分析では、10 人のガードチームが 35 人の敵対勢力に対しても 97%以上の防御力を発揮可能なことがわかった。警備員の規模を分析した結果、警備員が 5 人しかいない DBT に対してもシステムの有効性は 98%以上であることがわかった。5 人の警備チームがローテーションにより実際には 10 人の警備員を配置していること、また敵の検知距離や乗り越えなければならない障壁の大きさを考えると、10 人の警備員全員が素早く集結して脅威に対処可能であると考えられる。半自動式の武器は、予算の限られたプロジェクトのための選択肢の一つであるが、このような武器を使用する場合には、その意味するところを十分に検証する必要がある。

最後に、内部脅威は一般的な慣習や効果的に配置された防御ポジションを利用することで軽減可能である。効果の数値は高いが、この研究の主な貢献は、セキュリティ効果の絶対値を検証することではなく、ONP のデッキを再設計し、警備隊の規模を縮小することであることに留意すべきである。ONP の計画が確定後、絶対値を確認するための追加テストを行うべきである。

しかし、水中での攻撃シナリオや、ONP のセキュリティチームへの主な依存度など、沖合に配置することで新たな課題が発生する。米海軍は、ソナー探知機や防護壁などの技術で水中の脅威を防御してきた歴史がある。これらのオプションは、配備された ONP でも実施可能である。しかし、ONP を海中に設置すると、現地の法執行機関から離れてしまう。そのため、ホスト国は、管理者が許容する時間内(約 30 分)に陸上での対応が可能のように、治安部隊と保護協定を結ぶ必要がある。これらの技術を用いることで、これらの課題を克服し、ONP の経済的潜在力を活用可能である。

10 提言

プライマリー・セキュリティ・チームは、様々な状況下で、様々な潜在的敵対集団に対して優れた防御力を発揮することが示されている。しかし、その性能は、レーダーの早期検知、甲板への防御陣地の埋め込み、高連射兵器、防御陣地の防弾など、いくつかの要素に依存している。

感度解析の結果、レーダーの重要性が明らかになった。遠距離の敵を検知することで、警備員は敵を目視確認または音を聞いた時点ではなく、武器の全範囲を使って対応・交戦するための十分な時間を確保可能である。

見通しの良い防弾仕様の防衛ポジションに警備員を配置することで、警備員の生存率を最小限に抑えながら敵を効果的に攻撃することができた。また、甲板内に防衛ポジションを設置することで、最上階の甲板にはセキュリティ機器が設置する必要がなく、作戦に有効に活用可能である。さらに、警備員は素早く標的を狙撃するために、発射速度の速い武器を使うべきである。

最後に、将来の ONP は大量のデジタル機器を採用する。レーダーから制御システムの一部まであるべてデジタル化されます。これらのシステムがあらゆるシナリオや状況下で危険にさらされないように、また、もし危険にさらされたとしても、すぐに修復可能なように、効果的なサイバーセキュリティシステムを維持することが重要である。

11 将来の研究

水中攻撃とドローン攻撃は、今後の作業でテストする必要がある重要なシミュレーションである。また、陸側基地と ONP-1100 のセキュリティシステムについても、より詳細にテストする必要がある。

ONP では、アクティブソナーや防潜網などの多くの技術を採用し、小型潜水艦やダイバーを検知・抑止する。しかし、水中の脅威に対抗するための可能な方法については、さらに調査する必要がある。水は、水面下数フィートの物体を銃弾から守ってくれます。そのため、小型のボートに爆雷を搭載し、プラットフォームのベースから離れた場所にいる水中の敵を攻撃する方法が考えられます。また、本稿で紹介したものと同様の水中攻撃のシミュレーション・テストがあれば有益である。しかし、本稿執筆時点では、AVERT はこの種の動きを効果的にシミュレーションすることが不可能である。今後のアップデートでは、これを改善する必要がある。

水中攻撃と同様に、ドローンによる攻撃も ONP にとって大きな脅威となります。小型のドローンは安価で入手しやすいため、ONP が適切な対策を講じる前に偵察や攻撃に使われる可能性がある。数キロの距離まで近づいたドローンを無力化する技術も存在するが、そのような技術は、ONP のような海上でのミッションに適用可能であるかどうかを調査する必要がある。また、内通者や機器の損失がシステムの性能に影響を与えることを防ぐために、ドローンの検知及び抑止の方法を冗長化する必要がある。AVERT が無人機をシミュレート可能なようになったら、システム性能への影響を評価する必要がある。

陸側基地は、フェンス検知センサー、電界検知器、赤外線センサー、及び 監視カメラ など、地上の原子力発電所で一般的に見られるシステムに加え、ONP と同様の多くのシステムを採用する。海側のバリアには、フェンス、コンクリートブロック、固定ボラード、油圧式ウェッジなどが使用されます。周辺の土地に加えて陸側基地のより具体的な設計が確立されたら、システムの有効性を判断するために AVERT を用いたシミュレーションを開始可能である。シミュレーションは、システムの効率を最大化し、本作業により初期のプラットフォーム設計で発見されたような盲点を制限するために、建設が始まる前に行うべきである。

最後に、ONP-1100 において追加のシミュレーション作業を行うべきである。警備員が射撃可能なエリアを示す火力マップを比較したところ、ONP-1100 は 1500m までは ONP-300 とほぼ同じであることがわかった。この問題を解決するには、若干の設計変更が必要である。ONP-1100 では大規模なシミュレーションは行われなかったが、ONP-1100 を守るためには 5 人の警備員で十分だと考えられているが、将

来的にはセキュリティシステムの有効性を確認するために実施する必要がある。デッキの面積はさほど大きくないため、5 人の警備員でもプラットフォームの周囲 360 度の視線を確保可能である。

謝辞

以下、略。

以上

Appendix C 私訳：G. Genzman, et al., “Ship collision security for an offshore nuclear platform”, (2017).

タイトル		Ship Collision Security for an Offshore Nuclear Platform
出典	発表者	G.Genzman, K.shirvan, N.Todres, M.Golay
	文献	ICAPP 2017, April 23-28, 2017 Fukui and Kyoto (Japan)

概要

我々は、2 種類の確立された技術(軽水炉と洋上プラットフォーム)を融合した浮体式洋上原子力発電所(OFNP)と呼ばれる新たな設計の原子力発電所を開発している。原子炉を搭載した浮体式プラットフォームを海上 12 マイル(例：領海の制限)まで配置することは、独特な核セキュリティ上の課題と考察を巻き起こす。この研究は、意図的な船体衝突の脅威の分析、ダメージのモデリング、潜在的な解決策の有効性を特定するための枠組みを提案する。

仮定の設計基礎脅威(DBT)と有限要素法を使用するモデリングソフトの ABAQUS を使用することで、破損評価は参考ケースと衝突条件を変化させたケースで計算される。基本となる参考ケースは、150,000DWT(Dead Weight(載貨重量トン)船に積載可能な貨物、バラスト水や燃料の総重量)の球状船首の船体が、3cm の薄い内部構築物(デッキやバルクヘッド)と 5cm の薄い壁をもつ OFNP に、中心線から 0m に相殺された状態(直に舷側)で衝突するものである。結果は、高速の船、大型の船、とがった形状の船からの衝突によって船体(OFNP)への貫通距離が増しており、特に速度ととがった形状は大きな影響があった。同様に、貫通距離は、OFNP の係留を固定式にした場合、直に舷側に衝突した場合、OFNP の内部構築物のサポートを減らした場合に応じて増加した。それらの傾向は、基本的な物理学的な予測と一致するものである。

シミュレーションから得た本結果は、様々な潜在的ダメージを緩和させる選択肢を提案するために使用される。これらは、OFNP 船体の物質と設計の変更から、衝突の相殺を促進または係留システムの操作動作システムまで多岐にわたる。加えて、許容不可能なダメージのリスクを最小限に抑えるため、航海に係る法的な解決策も提案されており、例えば、特定の船体の排除領域の策定や、OFNP 近傍の速度や他の行動の制限といった航海制限がある。特に、本結果は、70,000DWT 以上の船舶は 8 マイルに設定された排除領域への侵入を制限するべきと示している。

I. 導入

MIT の原子力科学技術科の ONFP 研究グループは、2 種類の確立された技術(軽水炉と洋上プラットフォーム)を融合した浮体式洋上原子力発電所(OFNP)と呼ばれる新たな設計の原子力発電所を開発している。原子炉を搭載した浮体式プラットフォームを海上 12 マイル(例：領海の制限)まで配置することは、独特な核セキュリティ上の課題と考察の機会が増加する。最近の出版物では、OFNP の全体の核セキュリティ計画を表しており、コンセプト上のある側面には対応可能であるが、本研究では脅威の

分析、ダメージのモデリング、潜在的な解決策の有効性を特定するための枠組みに係る拡張した詳細までを提案している。特に、意図的な船体衝突に着目した評価である。

衝突の脅威に対する防衛について、OFNP の核セキュリティプログラムは、防護障壁に係る 3 つの主目的に着目した。第 1 の目的は、可能な限りの最大遠方で潜在的な脅威を特定・評価し、その侵入者に接触して離れるように注意を促すことである。第 2 の目的は、侵入者を想定することは脅威について考えることであり、その目的は、距離を保ちつつ奪還・停止させること、プラットフォーム近傍の物的障壁を使用して侵入を逸らす・止めさせることで、脅威の回避または無力化をすることである。第 3 の目的は、他の障壁が突破された場合、衝突に抵抗力を持ったプラットフォームを設計することでダメージを緩和することである。それらの障壁は、Ⅱ章で詳しく図示または説明される。

防護障壁に加えて、潜在的な核セキュリティの解決策を示す。OFNP 設計の考慮から、差し迫った衝突時に実行される運転上の手法、または運転中の OFNP のある距離まで許容可能な船体の種類・サイズ・振る舞い制限するために取り入れられる法的な解決策にまで及ぶ。提案された様々な解決策は、いくつかのタイプに分類される。

- ・法的な解決策—ある船舶の排除領域を導入すること。速度やその他の振る舞いを制限するような OFNP 近傍の航路に制限をかけること。
- ・運転上の解決策—衝突事故時に OFNP の係留を緩めるまたは解放すること。「かすめる打撃」や衝突の相殺を誘発すること。
- ・技術的な解決策—OFNP 船体の物質・設計の変更を指示すること。犠牲用のつぶれるゾーンやバンパーを使用すること。

衝突のシミュレーションと衝突の特性変更をモデリングする有限要素法を使用した最近の研究では、上記の選択肢は最大の成功確率を示すダメージ低下傾向に着目している。Ⅱ章では脅威分析の枠組みを開発し、Ⅲ章では数値モデリング手法を示し、Ⅳ章とⅤ章では様々な解決策に対応し、モデリングの結果に基づいて各々の技術に期待される有効性について解説を与える。

Ⅱ. 対応領域と防衛段階

レーダー(航空または地上の脅威の場合)やソナー(地上または水面下の脅威の場合)などの特定のツールを使用した物体の検出は複雑になる可能性があり、多くの考慮すべき事項がある。特定の信号／雑音比に必要な検出範囲は、環境配慮に基づいている。検出対象物の大きさ、形状、材質;特定の検出技術とデザインはより強力な、またはより洗練された技術により、より広い範囲でより高い検出性を達成可能である。

潜在的な脅威が存在する場合、特定のセキュリティ目標は、防御のさまざまな段階と潜在的な脅威の範囲に相関する。さらに、防御のための正確な技術は、脅威の特性とそれが動作するドメインに依存する。防衛と作戦の両段階を Fig.1 に示す。

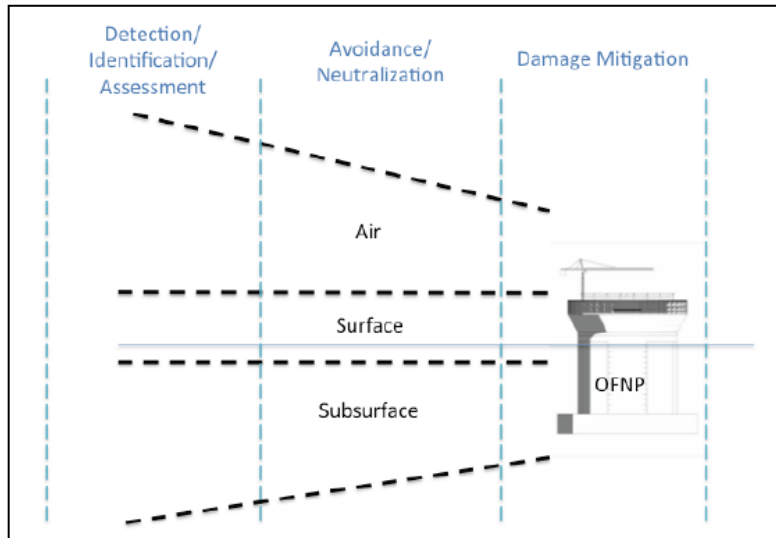


図 1. 対象領域と防衛段階

上の図では、想定される脅威が左から OFNP に接近しています。異なる脅威が 3 つの領域で作用する: 空中、水面、及び海中(水面下)。陸上の原子力発電所は、伝統的に地上攻撃と空中攻撃領域を考慮してきたが、いくつかの沿岸または潮汐河川プラントを除いて、水面と海中領域からの攻撃は比較的新しい考慮事項である。

II.A. 検知・特定・評価

上記の図では、脅威の範囲をこれら 3 つの領域で機能するものに分けることに加えて、攻撃の 3 つの主要な段階とそれに対応する防御応答を示している。最も遠い範囲では、セキュリティチームは連絡先の検出、特定、脅威レベルに応じた評価に関与する必要がある。これは、本質的に攻撃シナリオにおける防御の第 1 段階であり、理想的には、最大応答時間を可能な限り最大の範囲で発生する。

レーダー(航空または地上の脅威の場合)やソナー(地上または地下の脅威の場合)などの特定のツールを使用した物体の検出は複雑になる可能性があり、多くの考慮事項が伴います。特定の信号対雑音比に必要な検出範囲は、環境配慮に基づいている。検出対象物の大きさ、形状、材質;特定の検出技術の力とデザインです実際、より強力な、またはより洗練された検出技術は、より広い範囲でより高い検出確実性を達成可能である。

物体を検出することは重要であるが、物体を識別することも可能であることはより有用である。識別は単に連絡先に気づくだけでなく、脅威評価の次のステップを可能にする。同定の範囲は典型的には、基本的な検出に必要な範囲未満である。最後に、防御行動を開始する前に、識別された物体を評価しなければならない。評価では脅威レベルを決定するために単なる識別を使用する場合もあれば、識別と動作の組み合わせを使用する場合もある。また、対象が不明な場合は、動作の分析のみに依存する場合もある。

MIT の OFNP セキュリティチームによるこれまでの発表では、セキュリティシステムの例の検出と評価の範囲が示されている。以下に記載する。

「このサンプルプラントは、最大 24 マイルまでの船舶をレーダーで探知し、最大 8 マイルまでの小型船舶をレーダーと長距離 CCTV(クローズド・サーキット・テレビ)と熱感知カメラのシステムで探知、評価し、さらにプラントから 3 マイルまでのダイバーをソナーブイで探知する。このレーダーは、24 マイル以内の商業船舶の航行を識別するために、船舶自動識別装置(AIS)を装備する。」

視覚的検出技術及び範囲も上記に追加することができ、範囲を変更する様々な特別な状況が発生する可能性があることに留意することが重要である。例えば、攻撃者は OFNP に接近する際に、自船の自動識別システム (AIS) を無効にする可能性があり、識別が複雑になる可能性がある。とはいえ、AIS をオフにしたり無効にしたりすることは、セキュリティチームが指摘した行動であり、評価フェーズ中に脅威と見なされる可能性がある。

II.B. 回避と無力化

接近する脅威が検出され、特定され、脅威として評価された後、セキュリティチームは、上述のセキュリティ目標を達成するために応答可能である。そうすることは、脅威からの悪影響を回避するための行動をとること(回避)、または攻撃を防止するために脅威自体に対して行動をとること (中和)を意味する場合がある;実際、成功の可能性が最も高いセキュリティ計画は、両方の対応戦略を組み合わせることが可能である。

特定の状況では、脅威自体に影響を与えることなく、脅威を回避するための措置を講じることが可能または必要になる場合がある。このような回避オプションには、攻撃する船舶であれ、接近する氷山であれ、物体の接近に対して垂直な方向にプラットフォームをわずかに移動させる、あるいは接近する脅威を同様の方法で方向転換させるといった行動が含まれ得る。さらなる実現可能性解析が必要であるが、初期概念は係留操作を用いたプラットフォームの移動及び/またはプラットフォーム防衛船として有人または無人タグボートを用いた接近脅威の方向転換を含む。十分な垂直移動が達成されれば、脅威は完全に失われる可能性があるが、脅威の直接進入経路からのわずかなオフセットであっても、衝突による損傷を低減可能である。

場合によっては、または損害に対する追加の保険として、セキュリティチームは脅威を単に回避するのではなく、無力化することを選択することもある。実際、そのような行動は、実施がより容易であり、所望の結果をもたらす可能性が高い場合には、主要な選択肢でさえあり得る。中立化とは、脅威を停止またはリダイレクトすること、脅威の有害な能力を低減すること、または脅威を破壊することさえも意味する。そのような選択肢の実例には、攻撃する船舶の推進及び/又は操舵の不能化、プラットフォーム防衛船舶を利用して脅威に対抗すること、船舶に損傷を与えて流れ又は沈没に至ること、及びプラットフォームに向かう脅威への更なる接近を妨げる OFNP からある程度の距離にある物理的バリアに依存することさえ含まれ得る。

II.C. ダメージ緩和

上記の 2 つのオプションが失敗した場合は、損害を軽減するための設計または手順が必要です。損傷事象が意図的に又は偶発的に発生することが許される場合には、利用可能な処置のための選択肢があるか、又は衝突損傷を低減し、従って悪影響を最小化するのに役立つ構造に組み込まれた設計があるべきである。

このような損傷緩和スキームの例としては、係留物を緩めるか解放すること、あるいは、壁部分を厚くした OFNP、衝突エネルギー吸収構造、または、あらゆる浸水を封じ込めるための多数の防水区画を構築することが挙げられる。

全体として、各脅威レジームまたはドメインに対する防衛の各段階を慎重に検討することは、問題の包括的な構造化に役立ち、OFNP のセキュリティを強化するのに役立つであろう望ましい技術、設計、方針及び行動の組織化と決定に役立つ。

III. 数値解析モデル技術

この分析における数値解析モデル技術の目標は、さまざまな戦略と設計オプションを評価することです。これを達成するために、有限要素モデリングソフトウェア ABAQ を使用して船舶-OFNP 衝突シナリオをシミュレーションする。特に、構造負荷、変形、応力、歪みをシミュレートするために使用されます。材料特性、構造幾何学、荷重、境界条件、相互作用特性、及び様々な制約がモデルに入力され、結果は点の位置、速度、加速度からメッシュ要素内の応力及び歪みに至るまで出力される。

各シミュレーションにおいて、標準モデルは ABAQUS-Explicit と共に計算ソフトに使用される。シミュレーション期間は、個々のケースの詳細によって異なる。また、船舶と OFNP モデルはシェル要素(S4R)を使用し、船舶は剛体と定義され、OFNP は変形可能と定義される。OFNP と船舶部分の両方に複合化したメッシュが使用される。一般的な接触衝突は動的衝突相互作用に使用され、正常な動作に対して「ハード」接触が定義され、接線動作に対して摩擦係数が 0.4 と定義。

完了した分析では、次の入力変数がほとんどのシミュレーションで一定に保たれる。

- ・船舶及び OFNP 幾何学
- ・肉厚、降伏応力、材料不良の定義などの材料特性
- ・摩擦係数やその他の接触特性などの相互作用の定義
- ・メッシュサイズ
- ・流体慣性効果(モデルに質量を加えたものと定義)

対照的に、特定の戦略と設計を評価する場合と比較して、次のような入力はシミュレーションと結果によって異なる。

- ・打撃船の初速
- ・船の形状(船首形状-丸みまたは球根状)と質量
- ・衝突方向-OFNP 上の中心線から船の一定のオフセットとして定義される
- ・OFNP 係留固定性(地面に完全に固定/付着しているものから自由に浮いているものまで)

これらの変数入力を使用してシミュレーションを行い、衝突の変化による異なる影響を評価する。

II.B.解析モデルの検証

解析モデル結果の妥当性を評価するために、公開された ABAQUS の分析結果及び比較結果をエミュレートして、解析モデル技術の検証を実施した。また、特定の予想入力変動による結果の変動を評価するために、いくつかの感度分析が行われた。

予め定められた許容基準に基づいて、OFNP 参照モデルに対する検証モデルの結果が許容可能であると考えられる。それらの結果は公開された事例を満足することを示している。また、検証モデルは公開された参照事例で範囲として定義された様々な入力に過度に敏感でないことが分かった。モデリングと検証技術についてのより詳細な議論は、Ref.2 と Ref.4 で確認可能である。次のセクションでは、数値モデリングから収集した結果を基に構築されるセキュリティ戦略について説明する。

IV. 提案されている核セキュリティ障壁

図 1 で示されているように乗り物が OFNP に近づくためにはいくつかの核セキュリティ障壁を超えなければならない(初めは認知される領域、次にセキュリティチームの防護を通過する)。これらの障壁は OFNP からあらゆる方向に拡張されており、いくつかの特定の領域を持つことで交通を制限可能である(想定外な脅威の侵入を防ぐため)。図 2 ではこのコンセプトを示しており、各防護領域が要する範囲を提案している。

図 2 の領域は OFNP セキュリティチームの行動と関係している。これらの範囲は有限要素モデリングと爆発による被害を想定した結果に基づいている。中心の領域が OFNP である。セキュリティシステムによる解析の最終的な目標は OFNP を接近する脅威から防ぐことである

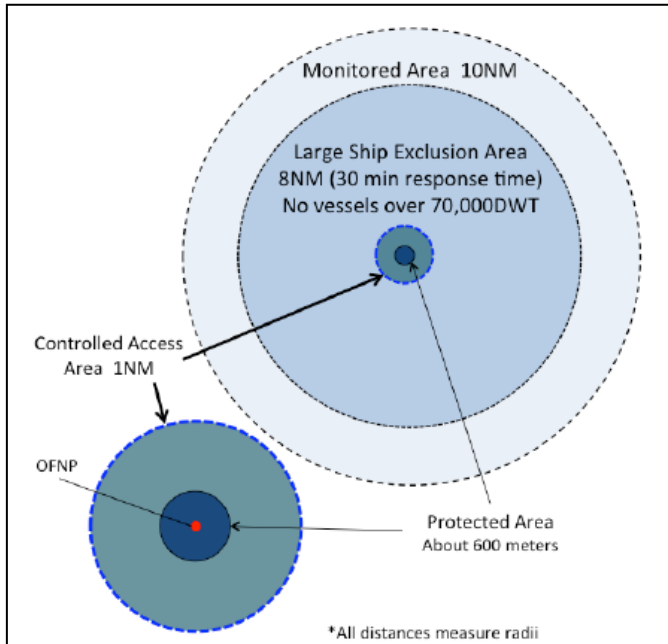


図 2. 核セキュリティ領域 (NM=海里)

一番外側の領域は“監視区域”であり、セクション II. A で示されたように継続的に監視される領域である。推定ではこの領域は OFNP から 10 マイル離れたところにあるが、技術面及び運用面を考慮するともっと伸びるかもしれない。最低でもこの領域は、どの立入禁止区域よりも常に少しだけ大きくなる。この閉じた領域を“監視区域”としたが、それはこの区域より外の監視を除いたわけではなく、技術面及び運用面の観点による最小の防護領域を示している。

IV.A. 大型船禁止区域 – 衝突解析モデルから決定された半径

次の領域は大型船禁止区域(LSEA)である。これは大型船の侵入を防ぎ、小型船の出入りを許可する領域である。この考えは、可能なだけ船舶の交通状況を通常に保ち、一方で脅威となりうる大型船は排除することである。LSEA は OFNP から 8 マイルほど離れている(この半径は、15 ノットの速さの大型船が 30 分間以上進む距離に少し距離を加えたものである)。この区域は、大型船に対して“無力化”を講じるか“回避措置”が取られる領域の範囲内である。大切なのは大型船が衝突した際の想定される目標が、OFNP の内部の侵害を防ぐことであり、それは最大許容貫通距離の 19m に関係する。

15 ノットの船舶の衝突を想定し数値モデルを用いると、OFNP を 19m 貫通する船(強化された内部構造を持つ船)のサイズが決まる。計算で出た船のサイズが LSEA 内を通行可能な最大のサイズとなりうる。これより大きい船は甚大な被害をもたらす可能性があり排除される。反対にこれより小さい船は LSEA 内に入ることが可能である。図 3 は 15 ノットで衝突する船のサイズごとの最大貫通距離の曲線を示している。こちらの方程式は様々なサイズの船が衝突した時の最大貫通距離の評価による回帰方程式である。

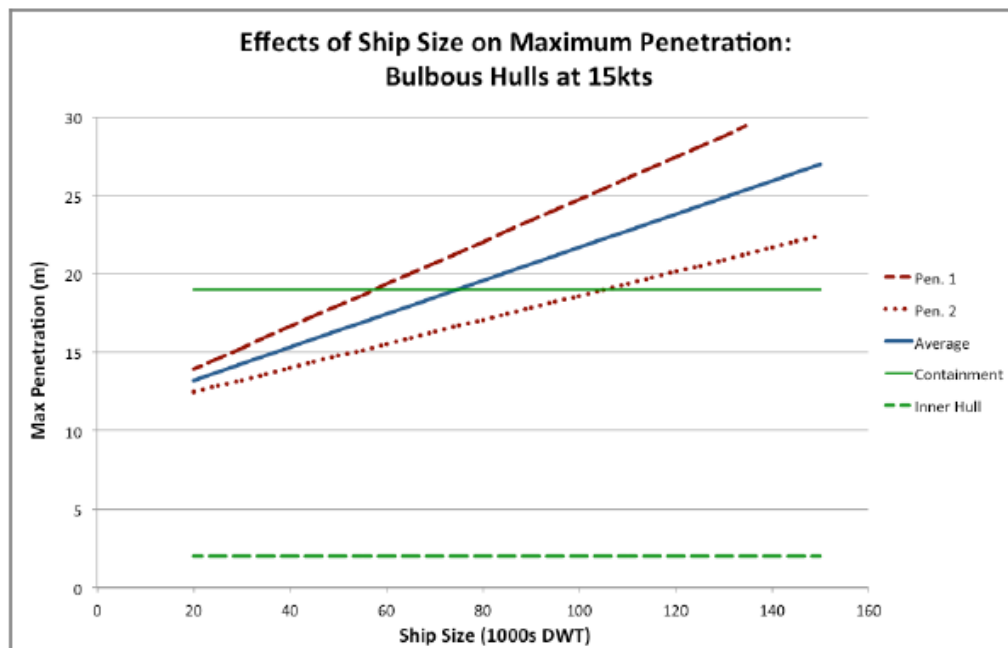


図 3. 船のサイズに応じた最大貫通距離

2つの緑のラインは OFNP の外殻の壁を表しており、貫通距離 0 は外殻の外側と同じである。緑のダッシュ状の線が外殻の内側を表している。緑の直線ラインが 19m の内部構造の外側の壁を表している。3本の斜めの線は 15 ノットの船が衝突した時の最大貫通距離を船のサイズごとで示したものである。緑の直線ラインを超える船のサイズが 19m 貫通可能なことを意味している。

図 3 より 7 万 DWT の船が LSEA に出入り可能な最大の大きさであると思われる。これより大きいと内部構造を侵害する恐れがあるため除外されるべきだ。もし他の防護措置が採られセキュリティシステムに追加されたら、この船のサイズは大きくなることが考えられるが、継続解析が求められる。

先の解析は便利だが、それは船が 15 ノットで衝突してくる仮説に頼り切っている。15 ノットは多くの船の平均速度だが一つの速度を考えても意味は無い。加えて LSEA で除外されるはずの大型船が 15 ノット以上で走行すれば、救援が来る前(30 分以内)に到達できてしまう。また LSEA 内を通過可能なサイズの船でも被害を与える速度で走行可能であるかもしれない。先のサイズによる船舶除外の提案に、速度制限やその船の挙動の制限を付けることが役立つだろう。速度による影響はセクション V. A で示されている。

LSEA の内側の領域が“立入規制区域”(CAA)である。この区域はどの船でも通行することができず、OFNP から 1 マイルの範囲は船の立入が禁止されていることを示す。この区域を跨ごうとする船は脅威とみなされ直ちに防護措置が採られる。

IV.B. 周辺防護区域 – 爆発範囲評価から決定された半径

最後の円が“周辺防護区域”である。“周辺防護区域”の設計は OFNP 周りのタービンの使用を含んでいる。衝突の防護に加え、“周辺防護区域”は爆発からの防護も想定されるだろう。それに応じて、大型船の爆発も許容可能な半径が設計されるだろう。衝突モデルの解析に基づいて算出した 7 万 DWT の船が爆発したとしても OFNP に被害が及ばないような半径を設定しなければならない。

船の爆発半径は様々な要因を持ち、特に重要なのがどういう種類でどれくらいの量があるかである。より詳細な調査が必要であるが、独自の研究により調査が実施された。この研究によると想定される爆薬は、アンホ爆薬である。材料である硝酸アンモニウムと燃料油は入手しやすい。ANFO はテロリスト御用達の混合爆薬である。

計算によると 7 万 DWT の容量の半分を積載した船は OFNP から 440m 離れたところでも甚大な被害を与えることが可能である。したがって保守的に考えて 450m は周辺防護区域として必要である。しかしそれだけ大量の爆薬を入手することは起こりえないので、今後周辺防護区域は低く設定されるだろう。

大切なのは爆発の要因は様々であること。今回の分析では簡単な手法でしか影響を評価していない。したがってより詳細な調査が結果を確固たるものとするだろう。

IV.C. 全体的な核セキュリティ障壁の戦略

以上の数値モデルと爆風評価の結果に基づいて、図 2 に空間的に示されているように、核セキュリティ障壁の根拠と説明を行った。また、図 4 には、船の大きさに応じた核セキュリティ障壁を示している。図 2 の外側の円から OFNP に向かって内側に移動することは、図 4 の赤い破線に向かって下側に移動することに相当する。

監視区域は 12 マイル(22,224m)まで、大型船大型船禁止区域(LSEA)は 8 マイル(14,816m)までとなっている。大型船とは、70,000DWT 以上の船のことで、OFNP から 8 マイル以内に入るとは許されず、衝突の脅威にさらされる可能性がある。LSEA 内では小型船舶の航行が認められていますが、立入規制区域(CAA)内では船舶の航行は認められていません。LSEA 内で許可された船舶は、OFNP に衝突して損害を与える可能性はあるが、格納容器を破壊することは不可能なはずである。実際、周辺防護区域(PA)の物理的保護が十分に強力であれば、貫通部を 2 メートル以下に抑えることで、そのような衝突による浸水を防ぐことさえ可能であるかもしれない。周辺防護区域の半径は 450m とされていますが、今後の研究でさらに評価されます。今回の調査では、70,000DWT 級の船を対象としていますが、この半径を決定するための調査を行う。この結果は、変形可能な船舶ではなく、剛性の高い船舶を使用した保守的なケースであることと、爆風半径に関する予備的な推定値であることに留意する必要がある。また、OFNP の船体に犠牲となるクラッシュゾーンを設計し、衝突時にオフセットを発生させ、周辺防護区域の物理的な防護壁を利用して接近してくる船舶を減速させるなど、他の被害緩和策をとらないことを前提としている。

上の図は、潜在的な脅威の範囲に基づいた具体的な防衛計画を示す。しかし、セキュリティ・チームは、船舶の範囲と位置だけでなく、行動を決定する前に、「脅威の基準」を活用する必要がある。この基準には、評価された損害能力、行動、脅威の速度と方向などの特徴が含まれる。例えば、OFNP に向かって

高速で移動する特に大型の船舶は、OFNP のセキュリティ区域に接する方向に平均的な速度で移動する小型の船舶よりも、はるかに重大な潜在的脅威である。また、警備区域内でぼんやりしている船舶であっても、明らかに通常の航路に沿って警備区域を通過している船舶よりも、注意を促すフラグを立てることが可能である。このような要素を排除範囲に加えて使用することで、潜在的な脅威をより詳細に評価することができ、他の方法では過度の警戒や行動を引き起こす可能性のある状況を明確に可能である。

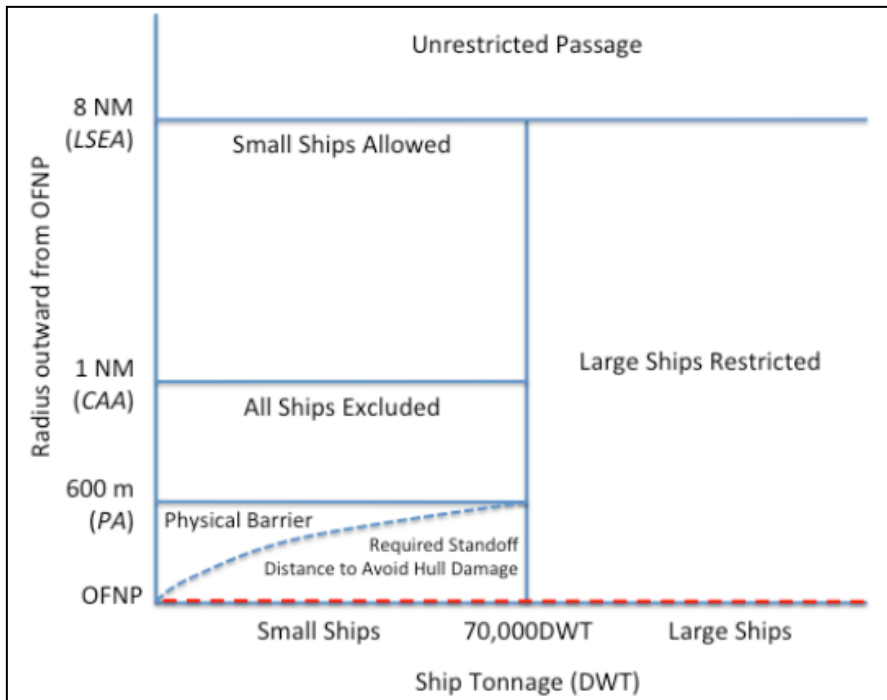


図 4. 接近する船の大きさに関する OFNP の核セキュリティ障壁

V. 提案された技術と運用上の解決策

海洋浮体式原子力発電所の安全性を高めるための潜在的な政策的解決策に加えて、脅威を回避・無力化したり、被害を緩和したりするために、独自の運用上の解決策やプラットフォームの設計が必要となる場合がある。本節では、そのような解決策の有効性を分析する。

V.A. 船底基準線の衝突

このセクションでは、追加のセキュリティ対策を使用しない場合の、想定される設計基準の数百万の衝突の結果を示している。また、設計基準の衝突の脅威として使用される船のサイズを選択した理由も示す。

V.A.1. 想定される設計基礎脅威衝突の決定

想定される設計ベースの衝突脅威は、懸念される船舶について、1)大きな損害を与えるのに十分な大きさの船舶または衝突エネルギー、2)現実的なリスクをもたらすのに十分な一般的な船舶サイズまたは衝

突エネルギー、の 2 つの考え方に基づいて決定される。次のグラフに世界の船隊における船の大きさ別の隻数と総衝突エネルギーの分布を示した。

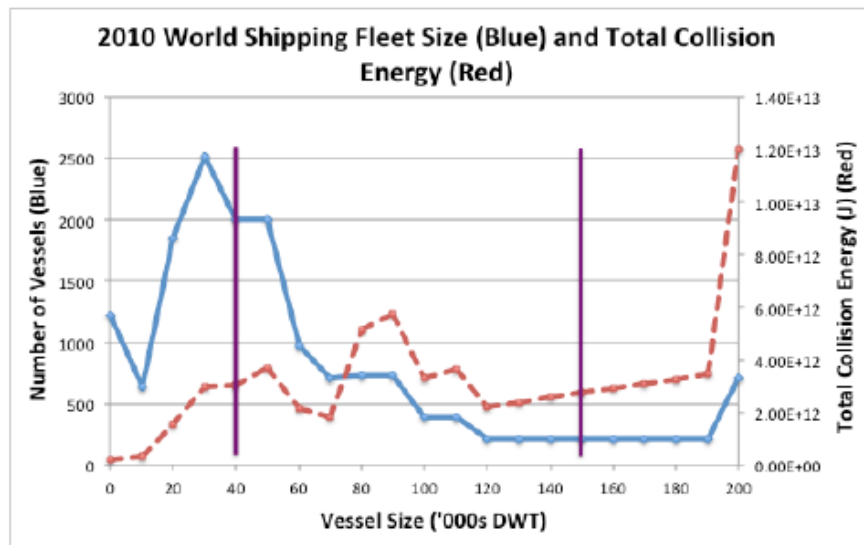


図 5. 船の大きさに関する世界の船舶のおおよその数(青)と衝突エネルギー(赤)

上の図では、それぞれの船の大きさについて、世界の船隊のおおよその数が青で示され、その大きさの船からの累積衝突エネルギーが赤で示されています。世界の船隊の数は動的であり、決定するのは困難ですが、少なくともこの図は、使用されている船のサイズのおおよその分布を示す。このプロットでは、200,000DWT のサイズで若干のピークが見られるが、これは参照データが「200,000DWT 以上」の船舶の情報を提供しているためであり、プロットの最後の増加分は 200,000DWT 以上の船舶を表していることになる。40,000DWT は、より一般的な船舶であり、衝突の可能性が高いことを示しており、150,000DWT は、保守的または最悪のケースの衝突シナリオをモデル化したものである。この分析結果に基づいて、これらの船のサイズは、議論と調査の基準として使用される。

V.A.2. 船速の影響

前節の核セキュリティ障壁の分析では、攻撃船が 15 ノットで航行している前提で分析を行う。次の図(図 6)は、最大貫通力に対する速度の影響を評価するために、検討したすべての船型とサイズの最大貫通力の結果と、OFNP の内部構造を強化したシミュレーションの結果(マルーンの実線、ラベルは「Bulb 40(5-5)」)を示す。前述の図(図 3)と同様に、OFNP 内部の船体と格納容器への侵入距離は、それぞれ緑の破線と緑の実線で示す。

この分析では、ほとんどが予想される傾向を示すが、注目すべき点もある。例えば、ほとんどの場合、15 ノット以上の速度で航行可能な船舶は 30 分以上早く到着することができ、格納容器を貫通することが可能。これは、大型船禁止区域を設定するだけでなく、大型船禁止区域外の船舶にも「脅威基準」のような行動に関する規制を適用することが有効であることを示す。また、このプロットでは一定のダメージを与えるために船舶を減速させなければならない速度が示されており、これは周辺防護区域の設計を検討

する際に有用である。以上の設計基準となる船舶の船底基準線シミュレーションの結果は、次のダメージ緩和技術の項で比較するために使用される。

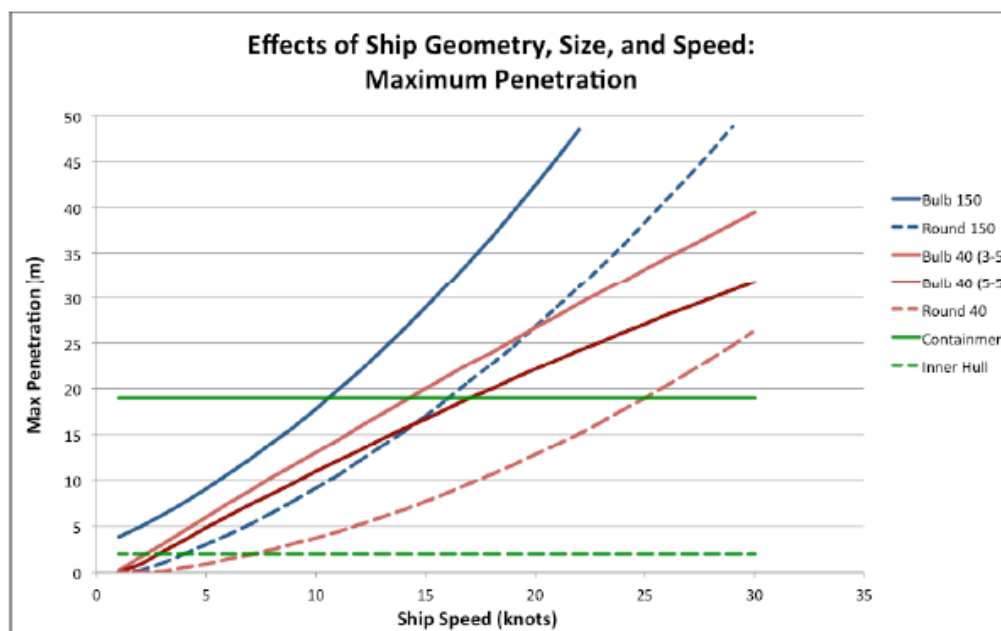


図 6 . 船速に関する最大貫通距離

V.B. プラットフォームの設計と運用上のダメージ緩和技術

V.B.1. 提案されている設計の解決策

OFNP へのダメージを緩和するための最初の論理的なステップは、特定の脅威によるダメージを緩和可能であるような設計の変更を検討することである。このセクションでは、そのようなコンセプトをいくつか紹介する。

プラットフォームの構造設計

次の図(Fig.7)は、材料の厚みの変化を考慮した技術的な解決策の 1 つとして考えられる結果です。衝突特性は各シミュレーションで一定とし、次のようにしました。「15 ノットで OFNP に衝突する球状船首の 150,000DWT の船。」

具体的な結果は衝突シナリオごとに異なるが、一般的な傾向は一定であると考えられる。今回のケースでは、デッキ、バルクヘッド、アウターシェルの材料を厚くすることで、衝突した船の全体的な貫通力を減少させることができ、全体的なエネルギー吸収量はほぼ一定に保たれるという結果が得られた。ただし、これらの点はそれぞれ個別のケースを表しているため、線形ではない。さらなるバリエーションを検討することも有用であるが、上記の結果によれば、外殻よりも内部構造の厚さを増したときに貫通力の低下が顕著になることが観察される。デッキ、隔壁、内外装の材料の厚さの変化をより具体的に示すことができれば、どの厚さを変化させることが最も有益であるかを示すことが可能であるが、その分析は今後の調査に任せることにする。さらに、これらの 3 つのケースは厚さの影響を調べただけであり、有害な衝突の影響に対す

る抵抗力を最適化するためにデッキ、バルクヘッド、外装構造に対する特定の設計がある可能性が非常に高いと考えられる。

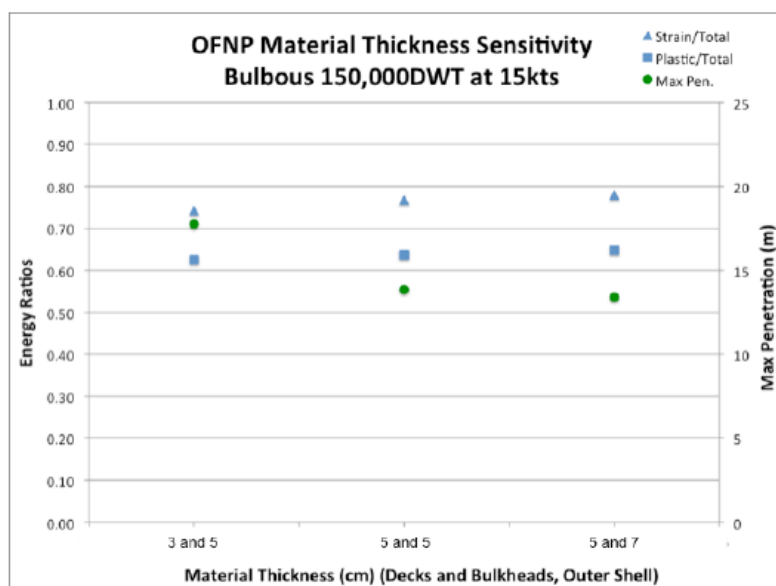


図 7. 壁の厚さの感度解析の結果

犠牲的な構造

また、クラッシュブルゾーンやバンパーが有効であることも示されています。多くのケースを比較すると、ひずみや塑性変形のエネルギー比が高いほど、貫通力の値が低くなる一貫した相関関係が確認される。一般的には、エネルギーを材料の変形に吸収する割合が高いほど、材料の破損やその結果としての貫通力が少なくなると考えられる。因果関係はないが、相関関係はあり、材料の故障につながる前にエネルギーを吸収する戦略を導入することで、全体的に貫入量を減少させることが可能である。

V.B.2. 提案されている運用上の解決策

次の被害緩和策は、衝突が迫っている場合に OFNP のセキュリティ担当者が取ることの可能な操作方法に焦点を当てている。これらが有効であると判断された場合、許容不可能なレベルの損害を防ぐために、最終手段としてスタッフが利用可能な選択肢となる可能性がある。

係留装置の固定

最初に提案された解決策は、OFNP の係留システムを緩める、または解放すること。これは、OFNP が自由に動けないと、より多くの衝突エネルギーを吸収せざるを得なくなるため、「動的係留」や「係留操作」のシステムを開発することが有効であるという考え方。しかしこのようなシステムは開発・構築・維持にかなりの費用がかかるため、期待される効果が著しく高いものでなければコストを正当化することは不可能である。次の図(図 8)は、150,000DWT の球形船首の船が、固定された OFNP(青)または自由に浮遊す

る OFNP(赤)に、様々な速度で衝突した場合の損傷結果を、付加された水量の影響を考慮して示したもの。

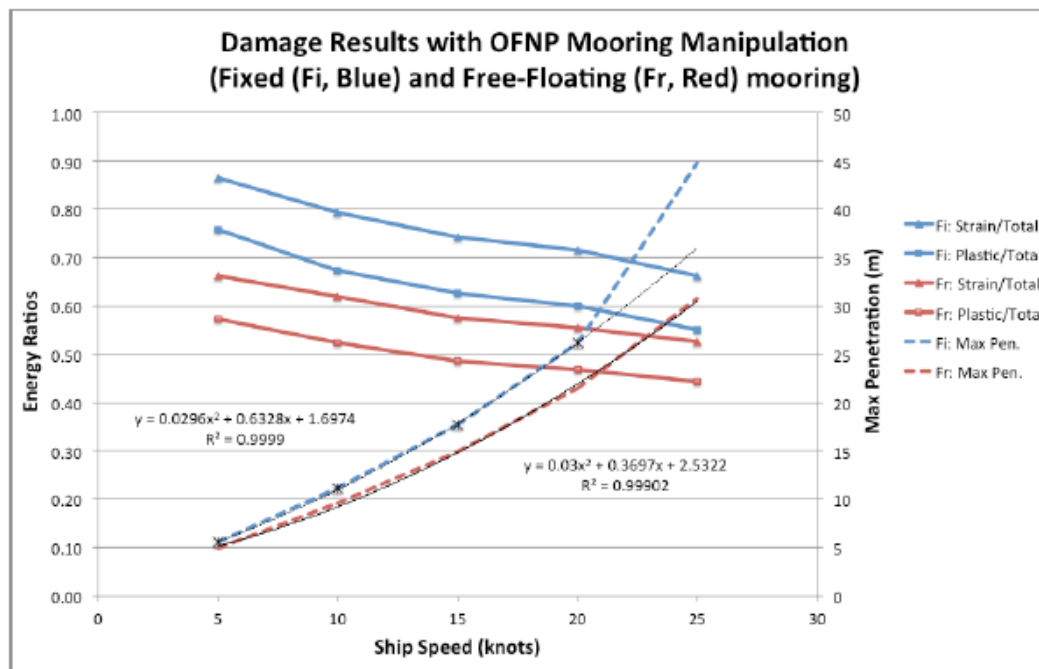


図 8. 150,000DWT の球形船首の船が固定された OFNP(青)または自由に浮遊する OFNP(赤)に様々な速度で衝突した場合の損傷結果

上の図に示した結果は、係留物の固定性に関する当初の予想が正しかったことを示している。OFNP が自由に浮遊している状態をモデル化したシミュレーションでは、全体的な衝突エネルギー比(総エネルギーに対するひずみや塑性変形のエネルギー)が減少し、最大貫入値も小さくなった。しかし他の考慮事項(例えば、25kt で固定された OFNP の大変形をもたらす特異な OFNP 形状など)を除けば、係留方法の変更による減少はそれほど大きくはない。柔軟性のある係留具を使用する(あるいは OFNP を自由に浮かせておく)と、固定係留具に比べて衝突時の損傷や貫通部が小さくなることを知っておくことは有益だが、その減少は、差し迫った衝突への対応として係留具を緩めたり切断したりするのに十分なものではないと思われる。

衝突のオフセット

衝突によるダメージを緩和するために提案されているもう 1 つの運用上の対策は、衝突をオフセットさせることで、OFNP の中心線に直接ぶつかるような正面衝突ではなく、OFNP へのダメージを「かすめる程度の衝撃」に留める可能性がある。特に OFNP の係留が固定されていない場合には、このようなオフセットによって船舶の運動エネルギーのすべてが変形や材料の破損に伝達されるのではなく、衝突エネルギーが垂直方向の動きに変換されることが期待される。この状況を分析するために、衝突のオフセットを伴ういくつか

のシミュレーションの結果を次の図(図 9)に示す。相殺解析と係留固定の検討を組み合わせるため、係留固定(青)とフリーフローティング(赤)の両方の状況でオフセット衝突の結果を示している。

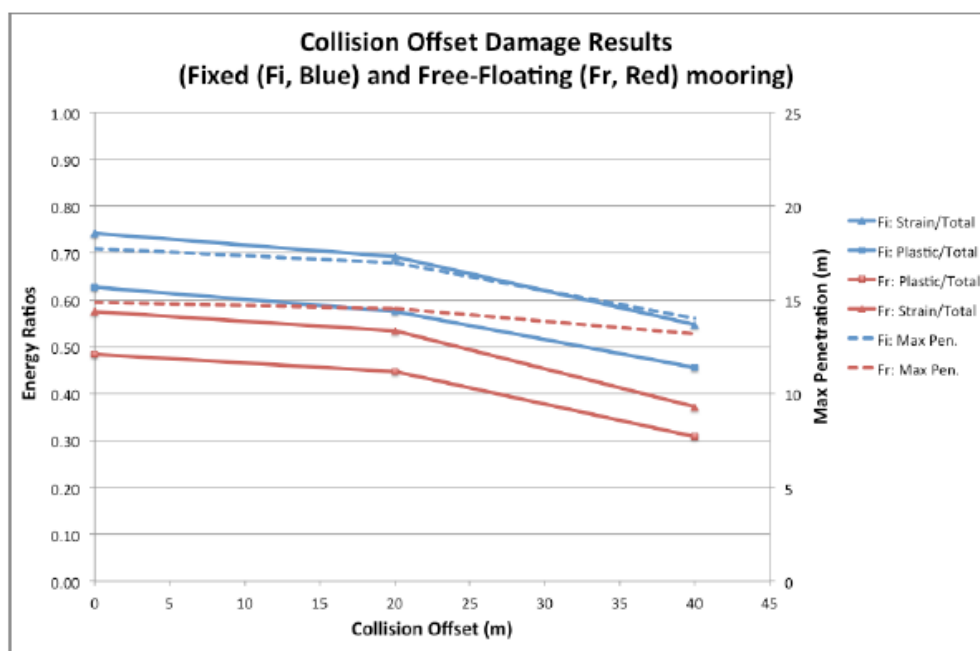


図 9. 150,000DWT の球形船首の船が固定された OFNP(青)または自由に浮遊する OFNP(赤)に 15 ノットで様々なオフセットを考慮して衝突した場合の損傷結果

図は、衝突オフセットを 0 メートル、20 メートル、40 メートルとモデル化してシミュレーションした結果である。数値モデルの結果は、理論をある程度裏付けるものではあるが、著しく大きな衝突被害緩和効果を得るためには、オフセットが著しく大きくなければならないことを示している。20 メートルのオフセットを設けた場合、係留固定とフリーフローティングのいずれの状況でも、衝突被害の大幅な減少にはつながらない。しかし、係留固定の状況において 40 メートルのオフセットを設けた場合には大きな被害緩和効果が得られることがわかった。また、OFNP がフリーフローティングの場合には、同じ 40 メートルのオフセットによって衝突被害が減少するが、その減少量は固定係留の場合に比べて大きくない。以上の結果から、オフセット量が大きい場合の衝突被害緩和効果は十分に大きく、今後の研究・検討の動機付けになると考えられる。

V.B.3. 解析モデル結果の概要

上記の解析モデル結果から、様々な衝突特性の影響と、取り得るダメージ緩和策の影響の両方に関して、いくつかの結論を導き出すことが可能である。

まず、衝突特性の違いによる影響を示しておく。そして、これらが示されると、ダメージの緩和につながるバリエーションを利用したソリューションの可能性について議論可能である。以下の表(TABLE I)は、衝突特性の変化によるひずみエネルギーと最大変形量の変化を示している。

表 1. 参照ケースと比較した衝突特性の変化による損傷の影響

Table 3.5 Effects on Damage from Variations in Collision Characteristics			
Variable Assessed	Specific Variation	Strain Energy Ratio	Max Deformation Ratio
Hull geometry	Rounded	1.17	0.53
Fixity	Free-floating	0.77	0.84
Offset (fixed)	20m	0.93	0.96
	40m	0.74	0.79
Offset (free)	20m	0.72	0.82
	40m	0.50	0.74
OFNP Material Thickness	5cm and 5cm	1.03	0.78
	5cm and 7cm	1.05	0.76

エネルギー比及び変形比は、変動シミュレーションのひずみエネルギーまたは最大変形量を、基準ケース(150,000DWT のバルバス船が 0m オフセットで 15 ノットの速度で係留固定された OFNP に衝突)の対応する値で正規化して算出したものである。このように、比率が 1 より大きい場合は、基準と比較して変動ケースのその値(吸収ひずみエネルギーなど)が増加していることを示し、比率が 1 に等しい場合は基準と同等の値であることを示し、1 より小さい場合は基準と比較して変動ケースのその値(最大貫入量など)が減少していることを示す。

VI. 結論

この分析は、第 2 章で、脅威と安全保障上やるべきことを整理するために、OFNP のために特別に開発されたフレームワークを紹介することから始まる。

第 3 章で数値モデル化の方法を紹介した後、第 4 章では、モデル化シミュレーションの結果から生まれたセキュリティフレームワークを紹介する。

推奨される安全保障のための戦略としては、8 マイルの大型船禁止区域と、今後の爆破解析によって決定された半径内の周辺防護区域が含まれる。

第 5 章では引き続き、運用上の対応や設計変更を示す可能性のあるような、衝突特性の変化による損傷結果を提示し、以下の結論を数値モデルの結果を用いて示す。

速い船、大きい船、船体がとがった形状の船は、OFNP との衝突でより多くの貫通を引き起こす可能性がある。

その中でも、スピードと船体形状が特に重要です。ある速度では、とがった形に膨らんでいる船体は、貫通力が予想の 2 倍になることがある。また、船の速度が 2 倍になると、大きさ(質量)が 4 倍になるよりもダメージが大きくなる。

自由に浮かんでいる ONFP は、係留物に固定されているものよりも損傷が少ないが、衝突した場所によっては、損傷の度合いがそれほど大きく減るわけではない。

センターラインからずれて衝突した場合、ダメージは軽減されますが、ずれが大きくなればその効果は大きくない(例：ONFP の直径の半分程度)。

歪みや塑性変形のエネルギー吸収率の増加は、しばしば最大貫通力の低下と関連している。歪みと塑性変形のエネルギーが増加すると、材料破断とそれに対応する貫通を引き起こすために利用可能なエネルギーが少なくなることが予想される。

浮遊式原子力発電所やその他の洋上施設のための安全保障に関する課題解決は、成長著しい興味深い分野。

このテーマには、さらなる研究の余地がある。

実際、この分析結果は、衝突モデル、爆破モデル、及び全体的な安全保障の課題解決に関する追加研究の動機となっている。

謝辞

以下、略。

以上

Appendix D 軽水炉燃料に関するベンチマーク問題との比較結果

本研究で選択した BWR 用の MOX 燃料と UO_2 燃料について、同型の燃料で計算を行った日本原子力研究所のベンチマーク問題との無限増倍率の比較結果を以下に示す¹。概ね本研究と同様の計算結果となった。計算結果の僅かな違いは、使用している断面積ライブラリが異なることが主な原因であろう。

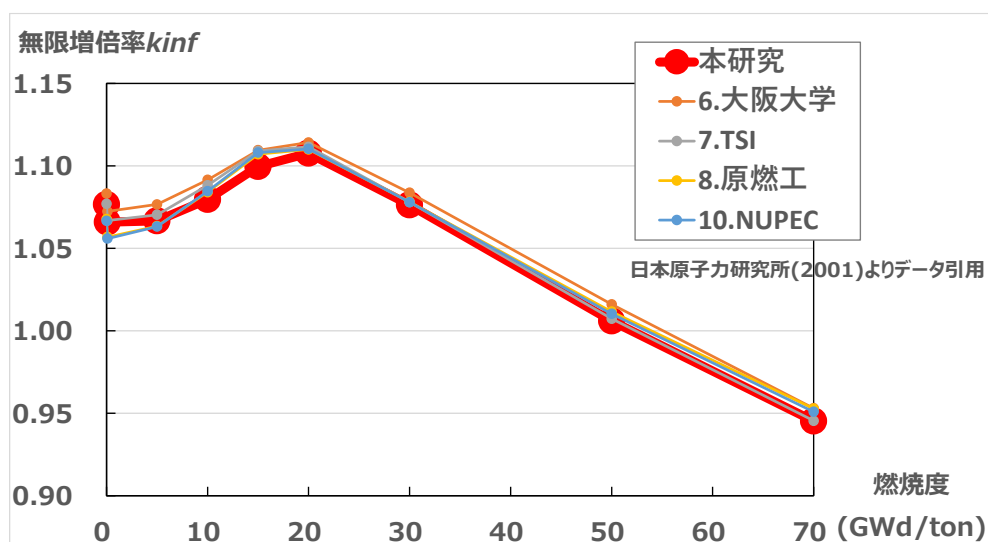


Figure D-1 ベンチマーク問題との比較結果(MOX 燃料)

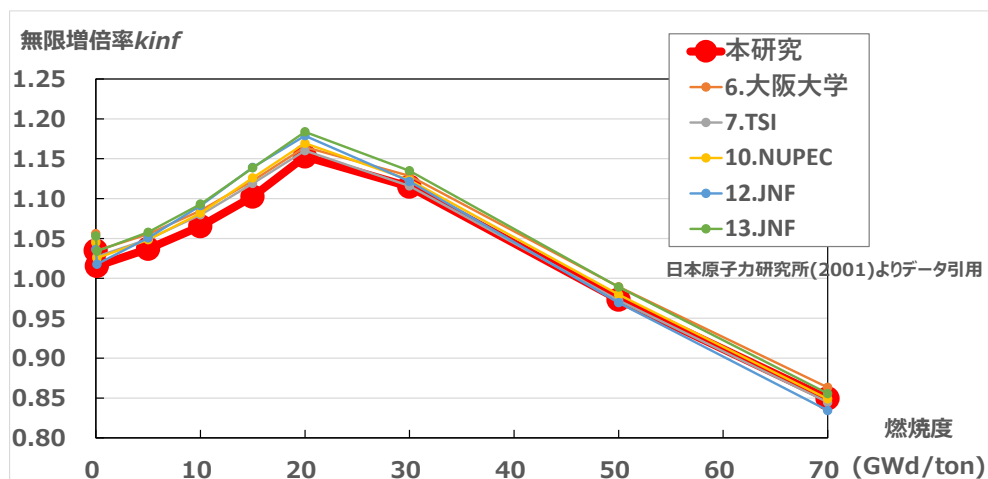


Figure D-2 ベンチマーク問題との比較結果(UO_2 燃料)

¹ 日本原子力研究所 炉物理研究委員会, “軽水炉次世代燃料の炉物理に関するベンチマーク問題の提案及び解析結果”, JAERI-Research 2001-046, P225-260, P265-273, P286-303, (2001), <https://doi.org/10.11484/jaeri-research-2001-046>

Table D-1 ベンチマーク問題との比較結果(MOX 燃料)

期間 [月]	燃焼期間 [月]	累計期間 [月]	燃焼度 [GWd/ton]	本研究	6.大阪大学	7.TSI	8.原燃工	10.NUPEC
0	0	0	0.00	1.0766	1.0832	1.0770	1.0677	1.0667
4	4	4	0.10	1.0658	1.0724	1.0668	1.0568	1.0559
196	200	200	5.00	1.0666	1.0766	1.0703	1.0635	1.0632
200	400	400	10.00	1.0796	1.0915	1.0882	1.0840	1.0846
200	600	600	15.00	1.0996	1.1095	1.1090	1.1071	1.1080
200	800	800	20.00	1.1076	1.1142	1.1115	1.1100	1.1103
400	1200	1200	30.00	1.0763	1.0837	1.0780	1.0781	1.0779
800	2000	2000	50.00	1.0059	1.0160	1.0073	1.0116	1.0103
800	2800	2800	70.00	0.9452	0.9530	0.9454	0.9527	0.9509

日本原子力研究所(2001)よりデータ引用

Table D-2 ベンチマーク問題との比較結果(UO₂ 燃料)

期間 [月]	燃焼期間 [月]	累計期間 [月]	燃焼度 [GWd/ton]	本研究	6.大阪大学	7.TSI	10.NUP EC	12.JNF	13.JNF
0	0	0	0.00	1.0347	1.0561	1.0470	1.0447	1.0364	1.0530
4	4	4	0.10	1.0154	1.0349	1.0274	1.0253	1.0178	1.0340
196	200	200	5.00	1.0369	1.0555	1.0491	1.0484	1.0507	1.0578
200	400	400	10.00	1.0652	1.0850	1.0796	1.0819	1.0912	1.0931
200	600	600	15.00	1.1025	1.1224	1.1190	1.1259	1.1391	1.1385
200	800	800	20.00	1.1528	1.1646	1.1602	1.1694	1.1788	1.1837
400	1200	1200	30.00	1.1149	1.1285	1.1158	1.1233	1.1215	1.1349
800	2000	2000	50.00	0.9733	0.9894	0.9723	0.9796	0.9695	0.9892
800	2800	2800	70.00	0.8495	0.8632	0.8446	0.8489	0.8343	0.8556

日本原子力研究所(2001)よりデータ引用

なお、本研究及びベンチマーク問題の他評価が燃焼計算に使用したコード名やデータライブラリは以下の通りである。

- ・ 本研究：
SCALE 6.2.4/TRITON(二次元輸送・燃焼計算モジュール)²
ENDF/B-VII.1(252 群を使用)³
- 6. 大阪大学：
MVP-BURN(MVP/GMVP システムの Version2.0β5 に付属)
JENDL-3.2
- 7. TSI：
CASMO-4
JEF-2.2
- 8. 原燃工(原子燃料工業)：
CASMO-4
L ライブラリ(主に ENDF/B-IV、一部 ENDF/B-V等)
- 10. NUPEC(原子力発電技術機構)：
CASMO-4/SIMULATE-3
ENDF/B-IV、ENDF/B-V
- 12. JNF(日本ニュクリア・フュエル)：
TGBLA
ENDF/B-IV、ENDF/B-V
- 13. JNF：
VMONT

² W. A. Wieselquist, R. A. Lefebvre, M. A. Jessee, Eds., “SCALE Code System”, ORNL/TM-2005/39, Version 6.2.4, Oak Ridge National Laboratory (ORNL), (2020).

³ M.B. Chadwick, M. Herman, P. Obložinský, et al., “ENDF/B-VII.1 Nuclear Data for Science and Technology: Cross Sections, Covariances, Fission Product Yields and Decay Data, Nuclear Data Sheets, Vol.112, 12, Dec. 2011, P2887-2996, (2011), <https://doi.org/10.1016/j.nds.2011.11.002>

JENDL-3.2、 JENDL-2

Appendix E 水中における超高速ジェット挙動の既往研究ベンチマーク結果

Saroha らによる既往研究の実験値を基に、ベンチマーク比較を行った⁴。また、Saroha らは Ansys-Autodyn コードによる解析も行っており、同解析モデル(**Figure E-1**)を基に、本研究の解析モデルを作成している。既往研究では、水中侵入深さ 0、325、650、1000mm におけるジェット先端速度を表している。一方で、本研究では、解析の都合上、水中侵入深さ 0、325、650mm(1000mm を除く)を表している。また、空気の距離は 200mm と 400mm の場合を評価している (**Figure E-2**~**Figure E-5**)。

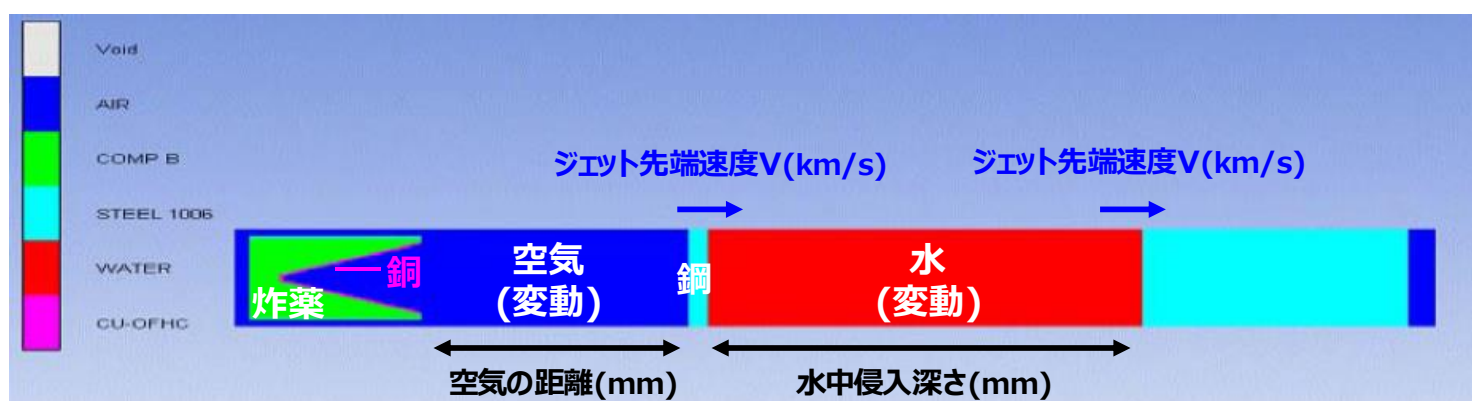


Figure E-1 既往研究における解析モデル

空気の距離 200mm の場合、ジェット先端平均速度の低下率の誤差は、最大でも 3.3%(水中侵入深さ 650mm)と極めて近い結果であることを確認している。一方で、水中への侵入直前のジェット先端平均速度について、既往研究の実験値では 7.20km/s、本研究では 5.40km/s と乖離している。これは、シミュレーション解析上のメッシュサイズを細かくすると、ジェット速度が上がったことから、メッシュサイズが原因である。解析の都合上、メッシュサイズをさらに細かくすることは望ましくないため、本研究の解析結果については、ジェット速度に安全裕度を見込んだ設計を施す必要がある。

空気の距離 400mm の場合、ジェット先端平均速度の低下率の誤差は、上記と同様に、最大でも 4.6%(水中侵入深さ 650mm)と極めて近い結果であることを確認している。一方で、水中への侵入直前のジェット先端平均速度について、上記と同様に、既往研究の実験値では 7.52km/s、本研究では 5.53km/s と乖離している。原因は同上である。

⁴ D. R. Saroha, Davinder Kumar, Y. Singh, "Penetration Behaviour Simulation of Shaped Charge Jets in Water", 26th International Symposium on Ballistics, (2011), <http://proceedings.ndia.org/1210/11910.pdf>

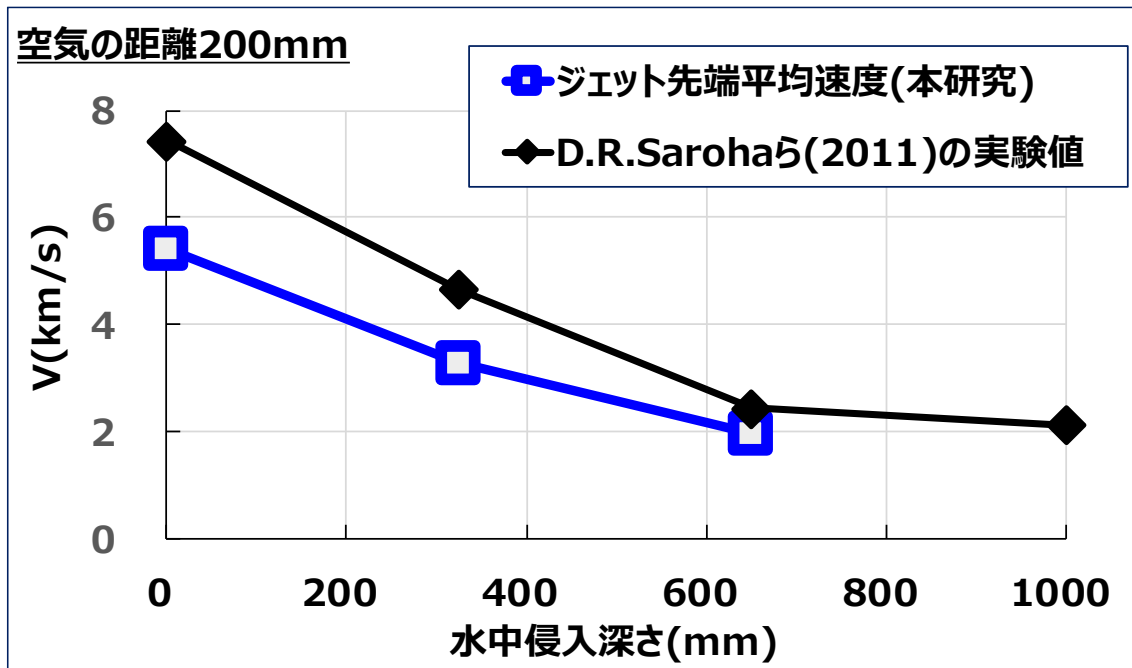


Figure E-2 ベンチマーク比較結果(空気の距離 200mm の場合のジェット速度)

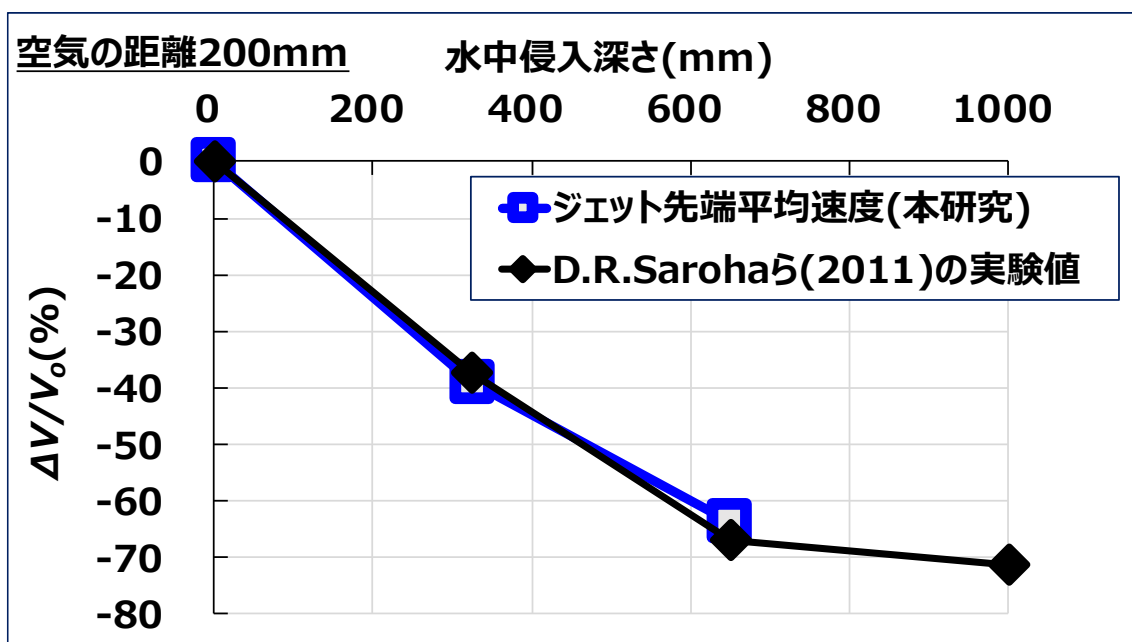


Figure E-3 ベンチマーク比較結果(空気の距離 200mm の場合のジェット速度低下率)

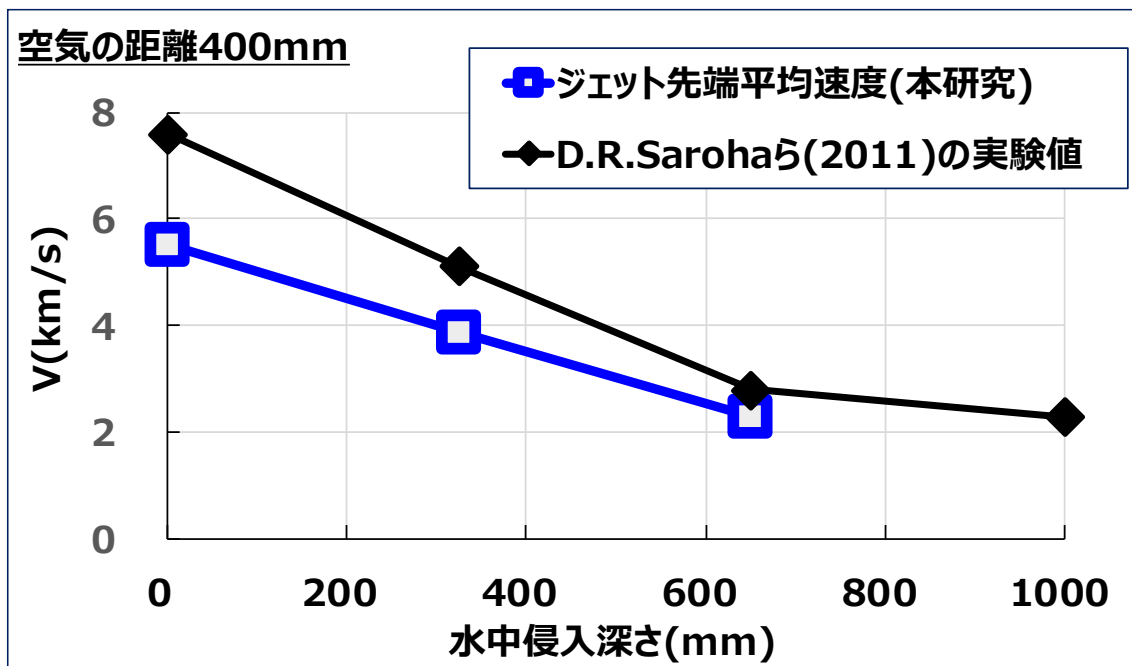


Figure E-4 ベンチマーク比較結果(空気の距離 400mm の場合のジェット速度)

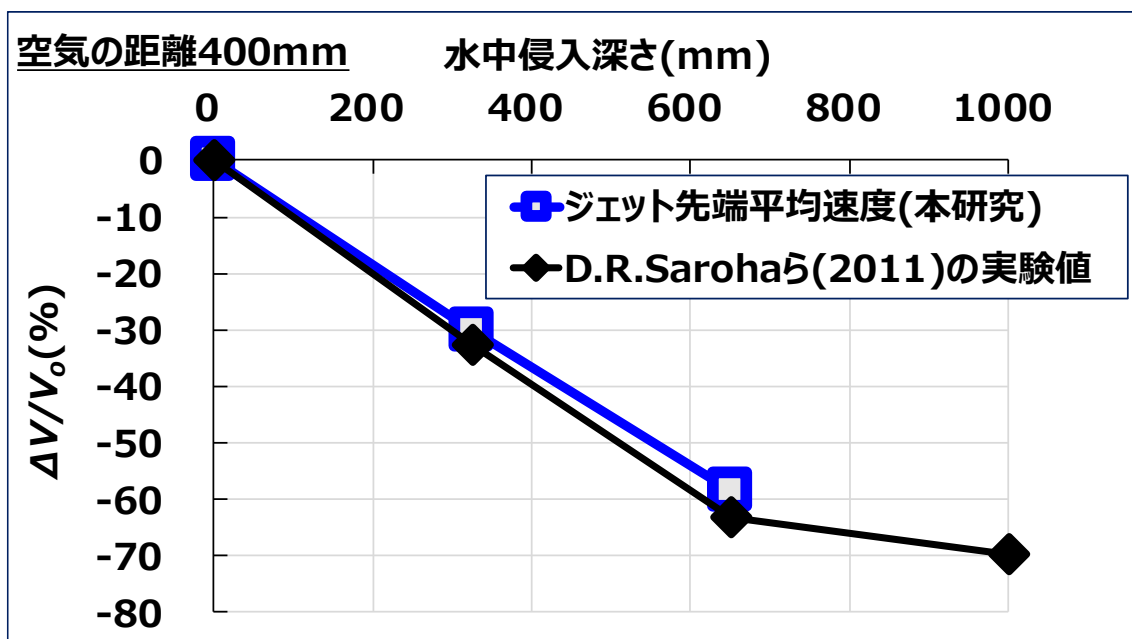


Figure E-5 ベンチマーク比較結果(空気の距離 400mm の場合のジェット速度低下率)

Appendix F 船舶移乗脅威に対するタイムライン評価の詳細

船舶移乗脅威に対するタイムライン評価結果の詳細を示す。

評価シナリオは、以下の通りである。

- ・ OFNP シナリオ. 盗取 (**Figure Ap. 1**～**Figure Ap. 5**)
- ・ OFNP シナリオ A. 直接的妨害破壊 (**Figure Ap. 6**～**Figure Ap. 10**)
- ・ OFNP シナリオ B-1. 間接的妨害破壊: TQUV (**Figure Ap. 11**～**Figure Ap. 15**)
- ・ OFNP シナリオ B-2. 間接的妨害破壊: TQUX (**Figure Ap. 16**～**Figure Ap. 20**)
- ・ OFNP シナリオ B-3. 間接的妨害破壊: TBU (**Figure Ap. 21**～**Figure Ap. 25**)
- ・ OFNP シナリオ C. 中央制御室等占拠 (**Figure Ap. 26**～**Figure Ap. 30**)
- ・ 陸上 NPP シナリオ. 盗取 (**Figure Ap. 31**、**Figure Ap. 32**)
- ・ 陸上 NPP シナリオ A. 直接的妨害破壊 (**Figure Ap. 33**、**Figure Ap. 34**)
- ・ 陸上 NPP シナリオ B-1. 間接的妨害破壊: TQUV (**Figure Ap. 35**、**Figure Ap. 36**)
- ・ 陸上 NPP シナリオ B-2. 間接的妨害破壊: TQUX (**Figure Ap. 37**、**Figure Ap. 38**)
- ・ 陸上 NPP シナリオ B-3. 間接的妨害破壊: TBU (**Figure Ap. 39**、**Figure Ap. 40**)
- ・ 陸上 NPP シナリオ C. 中央制御室等占拠 (**Figure Ap. 41**、**Figure Ap. 42**)

評価ケースは、以下の 7 通りである。

- (a) OFNP：枢要区域、乗降エレベータ経路管理、周辺監視区域の設定無し
- (b) OFNP：枢要区域の設定有り
- (c) OFNP：乗降エレベータ経路管理の設定有り
- (d) OFNP：周辺監視区域の設定有り
- (e) OFNP：枢要区域、乗降エレベータ経路管理、周辺監視区域の設定有り
- (ref.c) 仮想の陸上 NPP：枢要区域の設定無し
- (ref.d) 仮想の陸上 NPP：枢要区域の設定有り

盗取：MOX-FF				(c)	累計遅延時間
枢要区域：無し					
乗降エレベータ経路管理：警備員詰所					
周辺監視区域：無し					
周辺海域					
水中ネット1	$T=6$ $P=0.00$	船舶ゲート1	$T=10$ $P=0.50$		$T_t=2415$
立入制限区域				船舶 $T=1$	$T_t=2409$
レンズ	$T=0$ $P=0.50$	~~カメラ/ソナー~~ ~~$T=0$ $P=0.80$~~			$T_t=2408$
水中ネット2	$T=6$ $P=0.00$	船舶ゲート2	$T=10$ $P=0.50$		$T_t=2408$
周辺防護区域				船舶 $T=1$	$T_t=2402$
レンズ	$T=0$ $P=0.50$	~~カメラ/ソナー~~ ~~$T=0$ $P=0.80$~~			$T_t=2402$
乗降エレベータ3	$T=60$ $P=0.50$	緊急ラダー3	$T=600$ $P=0.50$		$T_t=2402$
防護ゲート3	$T=60$ $P=0.50$	防護扉3	$T=150$ $P=0.50$		$T_t=1802$ ← ③対応時間(秒) 1800 阻止確率 $P_I(\%)$ 88
防護区域				走り $T=54$	$T_t=1742$
扉4	$T=60$ $P=0.10$	壁4	$T=150$ $P=0.50$		$T_t=1688$
管理区域				走り $T=36$	$T_t=1628$
扉6	$T=30$ $P=0.10$	壁6	$T=150$ $P=0.50$		$T_t=1592$
盗取：MOX-FF				$T=600$	$T_t=1562$
管理区域				走り $T=144$	$T_t=962$
防護区域				走り $T=216$	$T_t=818$
乗降エレベータ3	$T=60$ $P=0.50$	緊急ラダー3	$T=600$ $P=0.50$		$T_t=602$ ← ②対応時間(秒) 600 ← ①対応時間(秒) 300 阻止確率 $P_I(\%)$ 95
周辺防護区域				船舶 $T=1$	$T_t=2$
立入制限区域				船舶 $T=1$	$T_t=1$
周辺海域					

Figure Ap. 3 タイムライン評価結果: 盗取 (c)OFNP-乗降エレベータ経路管理有り

盗取：MOX-FF

枢要区域：無し

乗降エレベータ経路管理：無し

周辺監視区域：周辺監視区域

(d)

周辺海域

水中ネット1

T=6

P=0.00

船舶ゲート1

T=10

P=0.50

立入制限区域

船舶

T=1

レンズ

T=0

P=0.50

カメラ/ソナー

T=0

P=0.80

水中ネット2

T=6

P=0.00

船舶ゲート2

T=10

P=0.50

周辺防護区域

船舶

T=1

レンズ

T=0

P=0.50

カメラ/ソナー

T=0

P=0.80

乗降エレベータ3

T=60

P=0.50

緊急ラダー3

T=600

P=0.50

防護ゲート3

T=60

P=0.50

防護扉3

T=150

P=0.50

防護区域

走り

T=54

扉4

T=60

P=0.10

壁4

T=150

P=0.50

管理区域

走り

T=36

扉6

T=30

P=0.10

壁6

T=150

P=0.50

盗取：MOX-FF

T=600

管理区域

走り

T=144

防護区域

走り

T=216

乗降エレベータ3

T=60

P=0.50

緊急ラダー3

T=600

P=0.50

周辺防護区域

船舶

T=1

立入制限区域

船舶

T=1

周辺海域

周辺監視区域による到着短縮(秒)

39

累計遅延時間

←③対応時間(秒)

1761

阻止確率

0

T_t=1335

T_t=1329

T_t=1328

T_t=1328

T_t=1322

T_t=1322

T_t=1322

T_t=1262

T_t=1202

T_t=1148

T_t=1088

T_t=1052

T_t=1022

T_t=422

T_t=278

T_t=62

T_t=2

T_t=1

←②対応時間(秒)

561

阻止確率P_t(%)

99

←①対応時間(秒)

261

阻止確率P_t(%)

99

Figure Ap. 4 タイムライン評価結果: 盗取 (d)OFNP-周辺監視区域有り

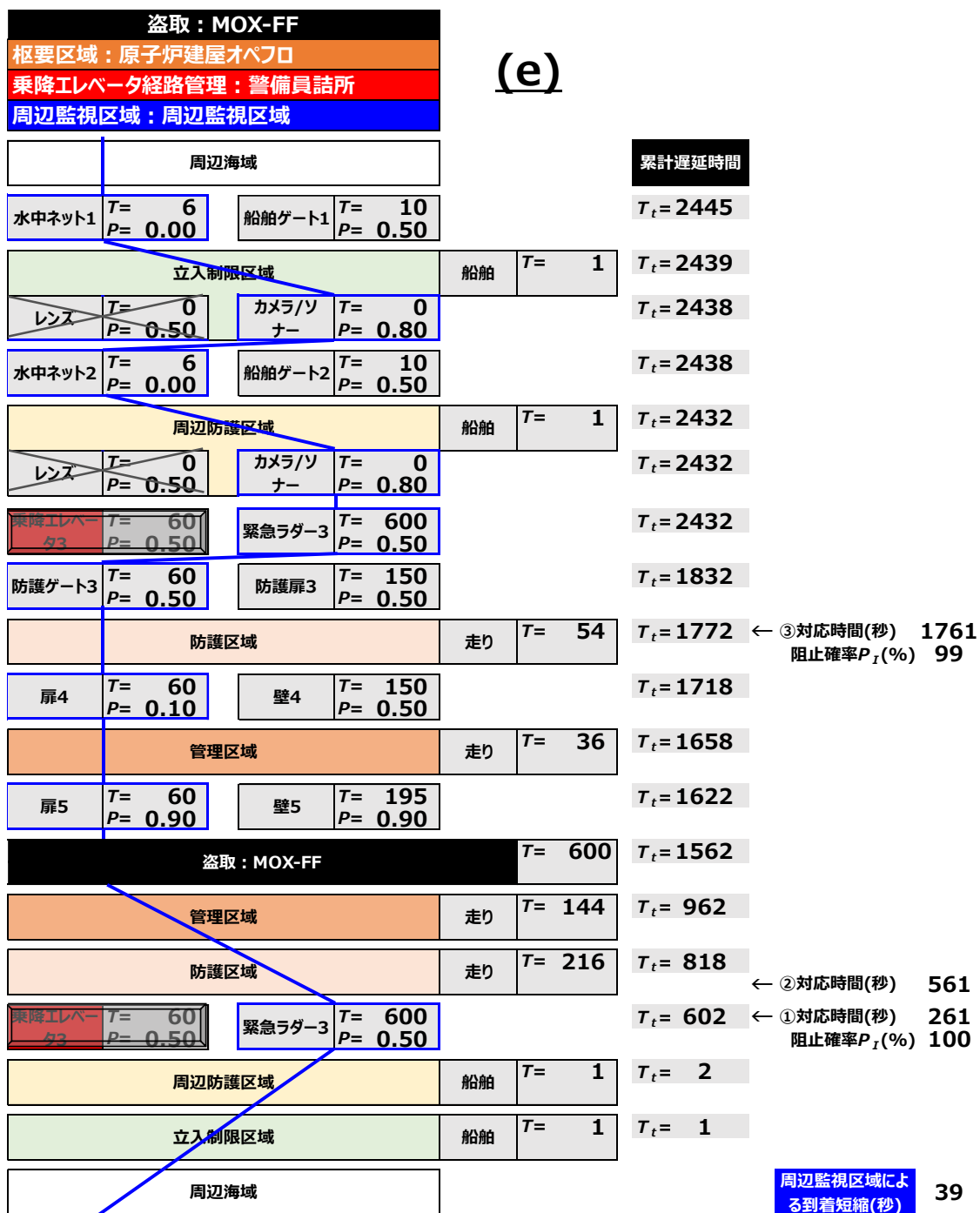


Figure Ap. 5 タイムライン評価結果: 盗取 (e) OFNP-枢要区域など有り

■ OFNP シナリオ A. 直接的妨害破壊

直接的妨害破壊：MOX-FF、SF				
枢要区域：無し				
乗降エレベータ経路管理：無し				
周辺監視区域：無し				
周辺海域				
水中ネット1	$T=6$ $P=0.00$	船舶ゲート1	$T=10$ $P=0.50$	
立入制限区域				船舶 $T=1$
レンズ	$T=0$ $P=0.50$	~~カメラ/ソナー~~	~~$T=0$ $P=0.80$~~	
水中ネット2	$T=6$ $P=0.00$	船舶ゲート2	$T=10$ $P=0.50$	
周辺防護区域				船舶 $T=1$
レンズ	$T=0$ $P=0.50$	~~カメラ/ソナー~~	~~$T=0$ $P=0.80$~~	
乗降エレベータ3	$T=60$ $P=0.50$	緊急ラダー3	$T=600$ $P=0.50$	
防護ゲート3	$T=60$ $P=0.50$	防護扉3	$T=150$ $P=0.50$	
防護区域				走り $T=54$
扉4	$T=60$ $P=0.10$	壁4	$T=150$ $P=0.50$	
管理区域				走り $T=36$
扉6	$T=30$ $P=0.10$	壁6	$T=150$ $P=0.50$	
妨害破壊：原子炉建屋オペロ				$T=60$

(a)

← ③対応時間(秒) 1800

累計遅延時間 ← ②対応時間(秒) 600
阻止確率 0

$T_t = 374$

$T_t = 368$

$T_t = 367$

$T_t = 367$

$T_t = 361$

$T_t = 360$

$T_t = 360$

$T_t = 300$ ← ①対応時間(秒) 300
阻止確率 $P_I(\%)$ 88

$T_t = 240$

$T_t = 186$

$T_t = 126$

$T_t = 90$

$T_t = 60$

Figure Ap. 6 タイムライン評価結果: 直接的妨害破壊 (a)OFNP-枢要区域など無し

直接的妨害破壊：MOX-FF、SF			
枢要区域：無し			
乗降エレベータ経路管理：警備員詰所			
周辺監視区域：無し			
周辺海域			
水中ネット1	$T=6$ $P=0.00$	船舶ゲート1	$T=10$ $P=0.50$
立入制限区域			
レンズ	$T=0$ $P=0.50$	カメラ/ソナー	$T=0$ $P=0.80$
水中ネット2	$T=6$ $P=0.00$	船舶ゲート2	$T=10$ $P=0.50$
周辺防護区域			
レンズ	$T=0$ $P=0.50$	カメラ/ソナー	$T=0$ $P=0.80$
乗降エレベータ3	$T=60$ $P=0.50$	緊急ラダー3	$T=600$ $P=0.50$
防護ゲート3	$T=60$ $P=0.50$	防護扉3	$T=150$ $P=0.50$
防護区域			
扉4	$T=60$ $P=0.10$	壁4	$T=150$ $P=0.50$
管理区域			
扉6	$T=30$ $P=0.10$	壁6	$T=150$ $P=0.50$
妨害破壊：原子炉建屋オペロ			

累計遅延時間 ← ③対応時間(秒) 1800
阻止確率 0

$T_i = 914$

$T_i = 908$

$T_i = 907$

$T_i = 907$

$T_i = 901$

$T_i = 900$

$T_i = 900$ ← ②対応時間(秒) 600
阻止確率 $P_i(\%)$ 75

$T_i = 300$ ← ①対応時間(秒) 300
阻止確率 $P_i(\%)$ 88

$T_i = 240$

$T_i = 186$

$T_i = 126$

$T_i = 90$

$T_i = 60$

Figure Ap. 8 タイムライン評価結果: 直接的妨害破壊 (c)OFNP-乗降エレベータ経路管理有

り

直接的妨害破壊：MOX-FF、SF	
枢要区域：無し	
乗降エレベータ経路管理：無し	
周辺監視区域：周辺監視区域	

(d)

周辺海域			
水中ネット1	T= 6 P= 0.00	船舶ゲート1	T= 10 P= 0.50

立入制限区域		船舶	T= 1
レンズ T= 0 P= 0.50	カメラ/ソナー T= 0 P= 0.80		

水中ネット2	T= 6 P= 0.00	船舶ゲート2	T= 10 P= 0.50

周辺防護区域		船舶	T= 1
レンズ T= 0 P= 0.50	カメラ/ソナー T= 0 P= 0.80		

乗降エレベータ3	T= 60 P= 0.50	緊急ラダー3	T= 600 P= 0.50

防護ゲート3	T= 60 P= 0.50	防護扉3	T= 150 P= 0.50

防護区域		走り	T= 54
扉4	T= 60 P= 0.10	壁4	T= 150 P= 0.50

管理区域		走り	T= 36
扉6	T= 30 P= 0.10	壁6	T= 150 P= 0.50

妨害破壊：原子炉建屋オペフロ		T= 60

← ③対応時間(秒) 1761

累計遅延時間 ← ②対応時間(秒) 561

阻止確率 0

$T_t = 374$

$T_t = 368$

$T_t = 367$

$T_t = 367$

$T_t = 361$

$T_t = 360$

$T_t = 360$

$T_t = 300$ ← ①対応時間(秒) 261

阻止確率 P_I (%) 98

$T_t = 240$

$T_t = 186$

$T_t = 126$

$T_t = 90$

$T_t = 60$

周辺監視区域による到着短縮(秒) 39

Figure Ap. 9 タイムライン評価結果: 直接的妨害破壊 (d)OFNP-周辺監視区域有り

(e)

直接的妨害破壊：MOX-FF、SF
枢要区域：原子炉建屋オペフロ
乗降エレベータ経路管理：警備員詰所
周辺監視区域：周辺監視区域

周辺海域			
水中ネット1	$T=6$ $P=0.00$	船舶ゲート1	$T=10$ $P=0.50$

立入制限区域	船舶	$T=1$	
レンズ	$T=0$ $P=0.50$	カメラ/ソナー	$T=0$ $P=0.80$
水中ネット2	$T=6$ $P=0.00$	船舶ゲート2	$T=10$ $P=0.50$

周辺防護区域	船舶	$T=1$	
レンズ	$T=0$ $P=0.50$	カメラ/ソナー	$T=0$ $P=0.80$
乗降エレベータ3	$T=60$ $P=0.50$	緊急ラダー3	$T=600$ $P=0.50$
防護ゲート3	$T=60$ $P=0.50$	防護扉3	$T=150$ $P=0.50$

防護区域	走り	$T=54$	
扉4	$T=60$ $P=0.10$	壁4	$T=150$ $P=0.50$

管理区域	走り	$T=36$	
扉5	$T=60$ $P=0.90$	壁5	$T=195$ $P=0.90$

妨害破壊：原子炉建屋オペフロ	$T=60$

累計遅延時間	← ③対応時間(秒)	1761
	阻止確率	0
$T_t = 944$		
$T_t = 938$		
$T_t = 937$		
$T_t = 937$		
$T_t = 931$		
$T_t = 930$		
$T_t = 930$	← ②対応時間(秒)	561
	阻止確率 $P_t(\%)$	96
$T_t = 330$		
$T_t = 270$	← ①対応時間(秒)	261
	阻止確率 $P_t(\%)$	99
$T_t = 216$		
$T_t = 156$		
$T_t = 120$		
$T_t = 60$	周辺監視区域による到着短縮(秒)	39

Figure Ap. 10 タイムライン評価結果: 直接的妨害破壊 (e)OFNP-枢要区域など有り

■ OFNP シナリオ B-1. 間接的妨害破壊: TQUV

間接的妨害破壊：TQUV			
枢要区域：無し			
乗降エレベータ経路管理：無し			
周辺監視区域：無し			
周辺海域			
水中ネット1	$T=6$ $P=0.00$	船舶ゲート1	$T=10$ $P=0.50$
立入制限区域			船舶 $T=1$
レンズ	$T=0$ $P=0.50$	~~カメラ/ソナー~~	~~$T=0$ $P=0.80$~~
水中ネット2	$T=6$ $P=0.00$	船舶ゲート2	$T=10$ $P=0.50$
周辺防護区域			船舶 $T=1$
レンズ	$T=0$ $P=0.50$	~~カメラ/ソナー~~	~~$T=0$ $P=0.80$~~
乗降エレベータ3	$T=60$ $P=0.50$	緊急ラダー3	$T=600$ $P=0.50$
防護ゲート3	$T=60$ $P=0.50$	防護扉3	$T=150$ $P=0.50$
防護区域			走り $T=54$
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$
妨害破壊：補機冷却の取水口			$T=60$
扉4	$T=60$ $P=0.1$	壁4	$T=150$ $P=0.5$
管理区域			走り $T=36$
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$
妨害破壊：RCIC(A)			$T=60$
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$
妨害破壊：RCIC(B)			$T=60$

(a)

← ③対応時間(秒) 1800

累計遅延時間 ← ②対応時間(秒) 600
阻止確率 0

$T_t = 554$

$T_t = 548$

$T_t = 547$

$T_t = 547$

$T_t = 541$

$T_t = 540$

$T_t = 540$

$T_t = 480$

$T_t = 420$

$T_t = 366$

$T_t = 336$ ← ①対応時間(秒) 300
阻止確率 $P_I(\%)$ 94

$T_t = 276$

$T_t = 216$

$T_t = 180$

$T_t = 150$

$T_t = 90$

$T_t = 60$

Figure Ap. 11 タイムライン評価結果: TQUV (a)OFNP-枢要区域など無し

間接的妨害破壊：TQUV				(b)		
枢要区域：補機冷却の取水口						
乗降エレベータ経路管理：無し						
周辺監視区域：無し						
	周辺海域				累計遅延時間	← ③対応時間(秒) 1800 阻止確率 0
水中ネット1	$T=6$ $P=0.00$	船舶ゲート1	$T=10$ $P=0.50$		$T_t=1094$	
	立入制限区域			船舶	$T=1$	$T_t=1088$
レンズ	$T=0$ $P=0.50$	カメラ/ソナー	$T=0$ $P=0.80$		$T_t=1087$	
水中ネット2	$T=6$ $P=0.00$	船舶ゲート2	$T=10$ $P=0.50$		$T_t=1087$	
	周辺防護区域			船舶	$T=1$	$T_t=1081$
レンズ	$T=0$ $P=0.50$	カメラ/ソナー	$T=0$ $P=0.80$		$T_t=1080$	
乗降エレベータ3	$T=60$ $P=0.50$	緊急ラダー3	$T=600$ $P=0.50$		$T_t=1080$	
防護ゲート3	$T=60$ $P=0.50$	防護扉3	$T=150$ $P=0.50$		$T_t=1020$	
	防護区域			走り	$T=54$	$T_t=960$
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$		$T_t=906$	
	妨害破壊：常用給水			$T=60$	$T_t=876$	
扉4	$T=60$ $P=0.1$	壁4	$T=150$ $P=0.5$		$T_t=816$	
	管理区域			走り	$T=36$	$T_t=756$
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$		$T_t=720$	
	妨害破壊：RCIC(A)			$T=60$	$T_t=690$	
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$		$T_t=630$	
	妨害破壊：RCIC(B)			$T=60$	$T_t=600$	← ②対応時間(秒) 600 阻止確率 $P_I(\%)$ 96
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$		$T_t=540$	
	妨害破壊：HPCF(C)			$T=60$	$T_t=510$	
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$		$T_t=450$	
	妨害破壊：HPCF(D)			$T=60$	$T_t=420$	
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$		$T_t=360$	
	妨害破壊：RHR(A)			$T=60$	$T_t=330$	← ①対応時間(秒) 300 阻止確率 $P_I(\%)$ 97
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$		$T_t=270$	
	妨害破壊：RHR(B)			$T=60$	$T_t=240$	
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$		$T_t=180$	
	妨害破壊：RHR(C)			$T=60$	$T_t=150$	
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$		$T_t=90$	
	妨害破壊：RHR(D)			$T=60$	$T_t=60$	

Figure Ap. 12 タイムライン評価結果: TQUV (b)OFNP-枢要区域有り

間接的妨害破壊：TQUV				(c)	
枢要区域：無し					
乗降エレベータ経路管理：警備員詰所					
周辺監視区域：無し					
周辺海域				累計遅延時間	← ③対応時間(秒) 1800 阻止確率 0
水中ネット1	$T=6$ $P=0.00$	船舶ゲート1	$T=10$ $P=0.50$	$T_i=1094$	
立入制限区域				船舶	$T=1$
レンズ	$T=0$ $P=0.50$	カメラ/ソナー	$T=0$ $P=0.80$	$T_i=1088$	
水中ネット2	$T=6$ $P=0.00$	船舶ゲート2	$T=10$ $P=0.50$	$T_i=1087$	
周辺防護区域				船舶	$T=1$
レンズ	$T=0$ $P=0.50$	カメラ/ソナー	$T=0$ $P=0.80$	$T_i=1087$	
乗降エレベータ3	$T=60$ $P=0.50$	緊急ラダー3	$T=600$ $P=0.50$	$T_i=1081$	
防護ゲート3	$T=60$ $P=0.50$	防護扉3	$T=150$ $P=0.50$	$T_i=1080$	
防護区域				走り	$T=54$
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$	$T_i=1080$	← ②対応時間(秒) 600 阻止確率 $P_i(\%)$ 75
妨害破壊：補機冷却の取水口				$T=60$	$T_i=480$
扉4	$T=60$ $P=0.1$	壁4	$T=150$ $P=0.5$	$T_i=420$	
管理区域				走り	$T=36$
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$	$T_i=366$	
妨害破壊：RCIC(A)				$T=60$	$T_i=336$
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$	$T_i=336$	← ①対応時間(秒) 300 阻止確率 $P_i(\%)$ 94
妨害破壊：RCIC(B)				$T=60$	$T_i=276$
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$	$T_i=216$	
				$T_i=180$	
				$T_i=150$	
				$T_i=90$	
				$T_i=60$	

Figure Ap. 13 タイムライン評価結果: TQUV (c) OFNP-乗降エレベータ経路管理有り

間接的妨害破壊：TQUV				(d)			
枢要区域：無し							
乗降エレベータ経路管理：無し							
周辺監視区域：周辺監視区域							
周辺海域							
水中ネット1	$T=6$ $P=0.00$	船舶ゲート1	$T=10$ $P=0.50$			累計遅延時間	← ②対応時間(秒) 5610
立入制限区域				船舶	$T=1$	$T_t=554$	
レンズ	$T=0$ $P=0.50$	カメラ/ソナー	$T=0$ $P=0.80$			$T_t=548$	
水中ネット2	$T=6$ $P=0.00$	船舶ゲート2	$T=10$ $P=0.50$			$T_t=547$	
周辺防護区域				船舶	$T=1$	$T_t=547$	
レンズ	$T=0$ $P=0.50$	カメラ/ソナー	$T=0$ $P=0.80$			$T_t=541$	
乗降エレベータ3	$T=60$ $P=0.50$	緊急ラダー3	$T=600$ $P=0.50$			$T_t=540$	
防護ゲート3	$T=60$ $P=0.50$	防護扉3	$T=150$ $P=0.50$			$T_t=540$	
防護区域				走り	$T=54$	$T_t=480$	
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$			$T_t=420$	
妨害破壊：補機冷却の取水口					$T=60$	$T_t=366$	
扉4	$T=60$ $P=0.1$	壁4	$T=150$ $P=0.5$			$T_t=336$	
管理区域				走り	$T=36$	$T_t=276$	← ①対応時間(秒) 261
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$			$T_t=216$	阻止確率 $P_I(\%)$ 99
妨害破壊：RCIC(A)					$T=60$	$T_t=180$	
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$			$T_t=150$	
妨害破壊：RCIC(B)					$T=60$	$T_t=90$	
					$T=60$	$T_t=60$	周辺監視区域による到着短縮(秒) 39

Figure Ap. 14 タイムライン評価結果: TQUV (d)OFNP-周辺監視区域有り

間接的妨害破壊：TQUV				(e)		
枢要区域：補機冷却の取水口						
乗降エレベータ経路管理：警備員詰所						
周辺監視区域：周辺監視区域						
周辺海域				累計遅延時間	← ③対応時間(秒)	1761
水中ネット1	$T=6$ $P=0.00$	船舶ゲート1	$T=10$ $P=0.50$	$T_t=1574$	阻止確率	0
立入制限区域			船舶	$T=1$	$T_t=1568$	
レンズ	$T=0$ $P=0.50$	カメラ/ソナー	$T=0$ $P=0.80$	$T_t=1567$		
水中ネット2	$T=6$ $P=0.00$	船舶ゲート2	$T=10$ $P=0.50$	$T_t=1567$		
周辺防護区域			船舶	$T=1$	$T_t=1561$	
レンズ	$T=0$ $P=0.50$	カメラ/ソナー	$T=0$ $P=0.80$	$T_t=1560$		
乗降エレベータ	$T=60$ $P=0.50$	緊急ラダー3	$T=600$ $P=0.50$	$T_t=1560$		
防護ゲート3	$T=60$ $P=0.50$	防護扉3	$T=150$ $P=0.50$	$T_t=1110$		
防護区域			走り	$T=54$	$T_t=960$	
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$	$T_t=906$		
妨害破壊：常用給水				$T=60$	$T_t=876$	
扉4	$T=60$ $P=0.1$	壁4	$T=150$ $P=0.5$	$T_t=816$		
管理区域			走り	$T=36$	$T_t=756$	
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$	$T_t=720$		
妨害破壊：RCIC(A)				$T=60$	$T_t=690$	
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$	$T_t=630$		
妨害破壊：RCIC(B)				$T=60$	$T_t=600$	← ②対応時間(秒)
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$	$T_t=540$	阻止確率 $P_I(\%)$	561 99
妨害破壊：HPCF(C)				$T=60$	$T_t=510$	
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$	$T_t=450$		
妨害破壊：HPCF(D)				$T=60$	$T_t=420$	
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$	$T_t=360$		
妨害破壊：RHR(A)				$T=60$	$T_t=330$	
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$	$T_t=270$	← ①対応時間(秒)	261
妨害破壊：RHR(B)				$T=60$	$T_t=240$	阻止確率 $P_I(\%)$
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$	$T_t=180$		100
妨害破壊：RHR(C)				$T=60$	$T_t=150$	
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$	$T_t=90$		
妨害破壊：RHR(D)				$T=60$	$T_t=60$	周辺監視区域による到着短縮(秒)
						39

Figure Ap. 15 タイムライン評価結果: TQUV (e) OFNP-枢要区域など有り

■ OFNP シナリオ B-2. 間接的妨害破壊: TQUX

間接的妨害破壊：TQUX				(a)		
枢要区域：無し						
乗降エレベータ経路管理：無し						
周辺監視区域：無し						
周辺海域					累計遅延時間	← ③対応時間(秒) 1800 阻止確率 P_I (%) 0
水中ネット1	$T=6$ $P=0.00$	船舶ゲート1	$T=10$ $P=0.50$		$T_t=914$	
立入制限区域			船舶	$T=1$	$T_t=908$	
レンズ	$T=0$ $P=0.50$	~~カメラ/ソナー~~	~~$T=0$ $P=0.80$~~		$T_t=907$	
水中ネット2	$T=6$ $P=0.00$	船舶ゲート2	$T=10$ $P=0.50$		$T_t=907$	
周辺防護区域			船舶	$T=1$	$T_t=901$	
レンズ	$T=0$ $P=0.50$	~~カメラ/ソナー~~	~~$T=0$ $P=0.80$~~		$T_t=900$	
乗降エレベータ3	$T=60$ $P=0.50$	緊急ラダー3	$T=600$ $P=0.50$		$T_t=900$	
防護ゲート3	$T=60$ $P=0.50$	防護扉3	$T=150$ $P=0.50$		$T_t=840$	
防護区域			走り	$T=54$	$T_t=780$	
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$		$T_t=726$	
妨害破壊：補機冷却の取水口				$T=60$	$T_t=696$	
扉4	$T=30$ $P=0.1$	壁4	$T=150$ $P=0.5$		$T_t=636$	
妨害破壊：ADS(A)				$T=60$	$T_t=606$	← ②対応時間(秒) 600 阻止確率 P_I (%) 95
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$		$T_t=546$	
妨害破壊：ADS(B)				$T=60$	$T_t=516$	
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$		$T_t=456$	
妨害破壊：ADS(C)				$T=60$	$T_t=426$	
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$		$T_t=366$	
妨害破壊：ADS(D)				$T=60$	$T_t=336$	← ①対応時間(秒) 300 阻止確率 P_I (%) 96
扉4	$T=60$ $P=0.1$	壁4	$T=150$ $P=0.5$		$T_t=276$	
管理区域			走り	$T=36$	$T_t=216$	
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$		$T_t=180$	
妨害破壊：RCIC(A)				$T=60$	$T_t=150$	
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$		$T_t=90$	
妨害破壊：RCIC(B)				$T=60$	$T_t=60$	

Figure Ap. 16 タイムライン評価結果: TQUX (a)OFNP-枢要区域など無し

間接的妨害破壊：TQUX
枢要区域：補機冷却の取水口
乗降エレベータ経路管理：無し
周辺監視区域：無し

(b)

	周辺海域		
水中ネット1	$T=6$ $P=0.00$	船舶ゲート1 $T=10$ $P=0.50$	
	立入制限区域		
レンズ	$T=0$ $P=0.50$	~~カメラ/ソナー~~ $T=0$ $P=0.80$	
水中ネット2	$T=6$ $P=0.00$	船舶ゲート2 $T=10$ $P=0.50$	
	周辺防護区域		
レンズ	$T=0$ $P=0.50$	~~カメラ/ソナー~~ $T=0$ $P=0.80$	
乗降エレベータ3	$T=60$ $P=0.50$	緊急ラダー3 $T=600$ $P=0.50$	
防護ゲート3	$T=60$ $P=0.50$	防護扉3 $T=150$ $P=0.50$	
	防護区域		
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6 $T=150$ $P=0.5$	
	妨害破壊：常用給水		
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6 $T=150$ $P=0.5$	
	妨害破壊：ADS(A)		
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6 $T=150$ $P=0.5$	
	妨害破壊：ADS(B)		
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6 $T=150$ $P=0.5$	
	妨害破壊：ADS(C)		
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6 $T=150$ $P=0.5$	
	妨害破壊：ADS(D)		
扉4	$T=60$ $P=0.1$	壁4 $T=150$ $P=0.5$	
	管理区域		
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6 $T=150$ $P=0.5$	
	妨害破壊：RCIC(A)		
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6 $T=150$ $P=0.5$	
	妨害破壊：RCIC(B)		
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6 $T=150$ $P=0.5$	
	妨害破壊：HPCF(C)		
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6 $T=150$ $P=0.5$	
	妨害破壊：HPCF(D)		

累計遅延時間	← ③対応時間(秒) 1800 阻止確率 P_I (%) 0
$T_t=1094$	
$T_t=1088$	
$T_t=1087$	
$T_t=1087$	
$T_t=1081$	
$T_t=1080$	
$T_t=1080$	
$T_t=1020$	
$T_t=960$	
$T_t=906$	
$T_t=876$	
$T_t=816$	
$T_t=786$	
$T_t=726$	
$T_t=696$	
$T_t=636$	
$T_t=606$	← ②対応時間(秒) 600 阻止確率 P_I (%) 96
$T_t=546$	
$T_t=516$	
$T_t=456$	
$T_t=396$	
$T_t=360$	
$T_t=330$	← ①対応時間(秒) 300 阻止確率 P_I (%) 97
$T_t=270$	
$T_t=240$	
$T_t=180$	
$T_t=150$	
$T_t=90$	
$T_t=60$	

Figure Ap. 17 タイムライン評価結果: TQUX (b)OFNP-枢要区域有り

間接的妨害破壊：TQUX				(c)		
枢要区域：無し						
乗降エレベータ経路管理：警備員詰所						
周辺監視区域：無し						
	周辺海域				累計遅延時間	← ③対応時間(秒) 1800 阻止確率 P_I (%) 0
水中ネット1	$T= 6$ $P= 0.00$	船舶ゲート1	$T= 10$ $P= 0.50$		$T_t = 1454$	
立入制限区域			船舶	$T= 1$	$T_t = 1448$	
レンズ	$T= 0$ $P= 0.50$	カメラ/ソナー	$T= 0$ $P= 0.80$		$T_t = 1447$	
水中ネット2	$T= 6$ $P= 0.00$	船舶ゲート2	$T= 10$ $P= 0.50$		$T_t = 1447$	
周辺防護区域			船舶	$T= 1$	$T_t = 1441$	
レンズ	$T= 0$ $P= 0.50$	カメラ/ソナー	$T= 0$ $P= 0.80$		$T_t = 1440$	
乗降エレベータ3	$T= 60$ $P= 0.50$	緊急ラダー3	$T= 600$ $P= 0.50$		$T_t = 1440$	
防護ゲート3	$T= 60$ $P= 0.50$	防護扉3	$T= 150$ $P= 0.50$		$T_t = 840$	
防護区域			走り	$T= 54$	$T_t = 780$	
扉6	$T= 30$ $P= 0.1$	壁6	$T= 150$ $P= 0.5$		$T_t = 726$	
妨害破壊：補機冷却の取水口				$T= 60$	$T_t = 696$	
扉6	$T= 30$ $P= 0.1$	壁6	$T= 150$ $P= 0.5$		$T_t = 636$	
妨害破壊：ADS(A)				$T= 60$	$T_t = 606$	← ②対応時間(秒) 600 阻止確率 P_I (%) 95
扉6	$T= 30$ $P= 0.1$	壁6	$T= 150$ $P= 0.5$		$T_t = 546$	
妨害破壊：ADS(B)				$T= 60$	$T_t = 516$	
扉6	$T= 30$ $P= 0.1$	壁6	$T= 150$ $P= 0.5$		$T_t = 456$	
妨害破壊：ADS(C)				$T= 60$	$T_t = 426$	
扉6	$T= 30$ $P= 0.1$	壁6	$T= 150$ $P= 0.5$		$T_t = 366$	
妨害破壊：ADS(D)				$T= 60$	$T_t = 336$	← ①対応時間(秒) 300 阻止確率 P_I (%) 96
扉4	$T= 60$ $P= 0.1$	壁4	$T= 150$ $P= 0.5$		$T_t = 276$	
管理区域			走り	$T= 36$	$T_t = 216$	
扉6	$T= 30$ $P= 0.1$	壁6	$T= 150$ $P= 0.5$		$T_t = 180$	
妨害破壊：RCIC(A)				$T= 60$	$T_t = 150$	
扉6	$T= 30$ $P= 0.1$	壁6	$T= 150$ $P= 0.5$		$T_t = 90$	
妨害破壊：RCIC(B)				$T= 60$	$T_t = 60$	

Figure Ap. 18 タイムライン評価結果: TQUX (c) OFNP-乗降エレベータ経路管理有り

間接的妨害破壊：TQUX				(d)	
枢要区域：無し					
乗降エレベータ経路管理：無し					
周辺監視区域：周辺監視区域					
周辺海域				累計遅延時間	← ③対応時間(秒) 1761 阻止確率 P_I (%) 0
水中ネット1	$T= 6$ $P= 0.00$	船舶ゲート1	$T= 10$ $P= 0.50$	$T_t = 914$	
立入制限区域				船舶	$T= 1$
レンズ	$T= 0$ $P= 0.50$	カメラ/ソナー	$T= 0$ $P= 0.80$	$T_t = 908$	
水中ネット2	$T= 6$ $P= 0.00$	船舶ゲート2	$T= 10$ $P= 0.50$	$T_t = 907$	
周辺防護区域				船舶	$T= 1$
レンズ	$T= 0$ $P= 0.50$	カメラ/ソナー	$T= 0$ $P= 0.80$	$T_t = 907$	
乗降エレベータ3	$T= 60$ $P= 0.50$	緊急ラダー3	$T= 600$ $P= 0.50$	$T_t = 901$	
防護ゲート3	$T= 60$ $P= 0.50$	防護扉3	$T= 150$ $P= 0.50$	$T_t = 900$	
防護区域				走り	$T= 54$
扉6	$T= 30$ $P= 0.1$	壁6	$T= 150$ $P= 0.5$	$T_t = 900$	
妨害破壊：補機冷却の取水口				$T= 60$	$T_t = 840$
扉4	$T= 30$ $P= 0.1$	壁4	$T= 150$ $P= 0.5$	$T_t = 840$	
妨害破壊：ADS(A)				$T= 60$	$T_t = 780$
扉6	$T= 30$ $P= 0.1$	壁6	$T= 150$ $P= 0.5$	$T_t = 726$	
妨害破壊：ADS(B)				$T= 60$	$T_t = 696$
扉6	$T= 30$ $P= 0.1$	壁6	$T= 150$ $P= 0.5$	$T_t = 636$	
妨害破壊：ADS(C)				$T= 60$	$T_t = 606$
扉6	$T= 30$ $P= 0.1$	壁6	$T= 150$ $P= 0.5$	$T_t = 546$	← ②対応時間(秒) 561 阻止確率 P_I (%) 99
妨害破壊：ADS(D)				$T= 60$	$T_t = 516$
扉6	$T= 30$ $P= 0.1$	壁6	$T= 150$ $P= 0.5$	$T_t = 456$	
扉4	$T= 60$ $P= 0.1$	壁4	$T= 150$ $P= 0.5$	$T_t = 426$	
管理区域				走り	$T= 36$
扉6	$T= 30$ $P= 0.1$	壁6	$T= 150$ $P= 0.5$	$T_t = 366$	
妨害破壊：RCIC(A)				$T= 60$	$T_t = 336$
扉6	$T= 30$ $P= 0.1$	壁6	$T= 150$ $P= 0.5$	$T_t = 276$	← ①対応時間(秒) 261 阻止確率 P_I (%) 99
妨害破壊：RCIC(B)				$T= 60$	$T_t = 216$
扉6	$T= 30$ $P= 0.1$	壁6	$T= 150$ $P= 0.5$	$T_t = 180$	
妨害破壊：RCIC(B)				$T= 60$	$T_t = 150$
扉6	$T= 30$ $P= 0.1$	壁6	$T= 150$ $P= 0.5$	$T_t = 90$	
妨害破壊：RCIC(B)				$T= 60$	$T_t = 60$
				周辺監視区域による到着短縮(秒)	39

Figure Ap. 19 タイムライン評価結果: TQUX (d)OFNP-周辺監視区域有り

間接的妨害破壊：TQUX				(e)	
枢要区域：補機冷却の取水口					
乗降エレベータ経路管理：警備員詰所					
周辺監視区域：周辺監視区域					
周辺海域				累計遅延時間	← ③対応時間(秒) 1761 阻止確率 P_I (%) 0
水中ネット1	$T=6$ $P=0.00$	船舶ゲート1	$T=10$ $P=0.50$	$T_t=1634$	
立入制限区域			船舶	$T=1$	$T_t=1628$
レンズ	$T=0$ $P=0.50$	カメラ/ソナー	$T=0$ $P=0.80$	$T_t=1627$	
水中ネット2	$T=6$ $P=0.00$	船舶ゲート2	$T=10$ $P=0.50$	$T_t=1627$	
周辺防護区域			船舶	$T=1$	$T_t=1621$
レンズ	$T=0$ $P=0.50$	カメラ/ソナー	$T=0$ $P=0.80$	$T_t=1620$	
乗降エレベータ	$T=60$ $P=0.50$	緊急ラダー3	$T=600$ $P=0.50$	$T_t=1620$	
防護ゲート3	$T=60$ $P=0.50$	防護扉3	$T=150$ $P=0.50$	$T_t=1020$	
防護区域			走り	$T=54$	$T_t=960$
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$	$T_t=906$	
妨害破壊：常用給水			$T=60$	$T_t=876$	
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$	$T_t=816$	
妨害破壊：ADS(A)			$T=60$	$T_t=786$	
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$	$T_t=726$	
妨害破壊：ADS(B)			$T=60$	$T_t=696$	
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$	$T_t=636$	
妨害破壊：ADS(C)			$T=60$	$T_t=606$	← ②対応時間(秒) 561 阻止確率 P_I (%) 99
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$	$T_t=546$	
妨害破壊：ADS(D)			$T=60$	$T_t=516$	
扉4	$T=60$ $P=0.1$	壁4	$T=150$ $P=0.5$	$T_t=456$	
管理区域			走り	$T=36$	$T_t=396$
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$	$T_t=360$	
妨害破壊：RCIC(A)			$T=60$	$T_t=330$	
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$	$T_t=270$	← ①対応時間(秒) 261 阻止確率 P_I (%) 100
妨害破壊：RCIC(B)			$T=60$	$T_t=240$	
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$	$T_t=180$	
妨害破壊：HPCF(C)			$T=60$	$T_t=150$	
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$	$T_t=90$	
妨害破壊：HPCF(D)			$T=60$	$T_t=60$	周辺監視区域による到着短縮(秒) 39

Figure Ap. 20 タイムライン評価結果: TQUX (e) OFNP-枢要区域など有り

■ OFNP シナリオ B-3. 間接的妨害破壊: TBU

(a)

間接的妨害破壊：TBU

枢要区域：無し

乗降エレベータ経路管理：無し

周辺監視区域：無し

周辺海域

水中ネット1

$T=6$
 $P=0.00$

船舶ゲート1

$T=10$
 $P=0.50$

立入制限区域

船舶

$T=1$

レンズ

$T=0$
 $P=0.50$

カメラ/ソナー

$T=0$
 $P=0.80$

水中ネット2

$T=6$
 $P=0.00$

船舶ゲート2

$T=10$
 $P=0.50$

周辺防護区域

船舶

$T=1$

レンズ

$T=0$
 $P=0.50$

カメラ/ソナー

$T=0$
 $P=0.80$

乗降エレベータ3

$T=60$
 $P=0.50$

緊急ラダー3

$T=600$
 $P=0.50$

防護ゲート3

$T=60$
 $P=0.50$

防護扉3

$T=150$
 $P=0.50$

防護区域

走り

$T=54$

扉6

$T=30$
 $P=0.1$

壁6

$T=150$
 $P=0.5$

妨害破壊：補機冷却の取水口

$T=60$

扉6

$T=30$
 $P=0.1$

壁6

$T=150$
 $P=0.5$

妨害破壊：外部電源

$T=60$

扉4

$T=60$
 $P=0.1$

壁4

$T=150$
 $P=0.5$

管理区域

走り

$T=36$

扉6

$T=30$
 $P=0.1$

壁6

$T=150$
 $P=0.5$

妨害破壊：RCIC(A)

$T=60$

扉6

$T=30$
 $P=0.1$

壁6

$T=150$
 $P=0.5$

妨害破壊：RCIC(B)

$T=60$

累計遅延時間 ← ③対応時間(秒)
阻止確率

1800
0

$T_t=644$

$T_t=638$

$T_t=637$

$T_t=637$

$T_t=631$

$T_t=630$

$T_t=630$ ← ②対応時間(秒)
阻止確率

600
75

$T_t=570$

$T_t=510$

$T_t=456$

$T_t=426$

$T_t=366$

$T_t=336$ ← ①対応時間(秒)
阻止確率 $P_t(\%)$

300
95

$T_t=276$

$T_t=216$

$T_t=180$

$T_t=150$

$T_t=90$

$T_t=60$

Figure Ap. 21 タイムライン評価結果: TBU (a)OFNP-枢要区域など無し

間接的妨害破壊：TBU				(b)	
枢要区域：補機冷却の取水口					
乗降エレベータ経路管理：無し					
周辺監視区域：無し					
	周辺海域			累計遅延時間	← ③対応時間(秒) 1800 阻止確率 0
水中ネット1	$T=6$ $P=0.00$	船舶ゲート1	$T=10$ $P=0.50$	$T_t=914$	
立入制限区域			船舶	$T=1$	$T_t=908$
レンズ	$T=0$ $P=0.50$	カメラ/ソナー	$T=0$ $P=0.80$	$T_t=907$	
水中ネット2	$T=6$ $P=0.00$	船舶ゲート2	$T=10$ $P=0.50$	$T_t=907$	
周辺防護区域			船舶	$T=1$	$T_t=901$
レンズ	$T=0$ $P=0.50$	カメラ/ソナー	$T=0$ $P=0.80$	$T_t=900$	
乗降エレベータ3	$T=60$ $P=0.50$	緊急ラダー3	$T=600$ $P=0.50$	$T_t=900$	
防護ゲート3	$T=60$ $P=0.50$	防護扉3	$T=150$ $P=0.50$	$T_t=840$	
防護区域			走り	$T=54$	$T_t=780$
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$	$T_t=726$	
妨害破壊：外部電源				$T=60$	$T_t=696$
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$	$T_t=636$	
妨害破壊：DG(A)				$T=60$	$T_t=606$ ← ②対応時間(秒) 600 阻止確率 $P_I(\%)$ 95
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$	$T_t=546$	
妨害破壊：DG(B)				$T=60$	$T_t=516$
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$	$T_t=456$	
妨害破壊：DG(C)				$T=60$	$T_t=426$
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$	$T_t=366$	
妨害破壊：DG(D)				$T=60$	$T_t=336$ ← ①対応時間(秒) 300 阻止確率 $P_I(\%)$ 96
扉4	$T=60$ $P=0.1$	壁4	$T=150$ $P=0.5$	$T_t=276$	
管理区域			走り	$T=36$	$T_t=216$
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$	$T_t=180$	
妨害破壊：RCIC(A)				$T=60$	$T_t=150$
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$	$T_t=90$	
妨害破壊：RCIC(B)				$T=60$	$T_t=60$

Figure Ap. 22 タイムライン評価結果: TBU (b)OFNP-枢要区域有り

間接的妨害破壊：TBU				(c)	
枢要区域：無し					
乗降エレベータ経路管理：警備員詰所					
周辺監視区域：無し					
周辺海域				累計遅延時間	← ③対応時間(秒) 1800
水中ネット1	T= 6 P= 0.00	船舶ゲート1	T= 10 P= 0.50	$T_t = 1184$	阻止確率 0
立入制限区域				$T_t = 1178$	
レンズ	T= 0 P= 0.50	カメラ/ソナー	T= 0 P= 0.80	$T_t = 1177$	
水中ネット2	T= 6 P= 0.00	船舶ゲート2	T= 10 P= 0.50	$T_t = 1177$	
周辺防護区域				$T_t = 1171$	
レンズ	T= 0 P= 0.50	カメラ/ソナー	T= 0 P= 0.80	$T_t = 1170$	
乗降エレベータ3	T= 60 P= 0.50	緊急ラダー3	T= 600 P= 0.50	$T_t = 1170$	← ②対応時間(秒) 600
防護ゲート3	T= 60 P= 0.50	防護扉3	T= 150 P= 0.50	$T_t = 570$	阻止確率 $P_t(\%)$ 75
防護区域				$T_t = 510$	
扉6	T= 30 P= 0.1	壁6	T= 150 P= 0.5	$T_t = 456$	
妨害破壊：補機冷却の取水口				$T_t = 426$	
扉6	T= 30 P= 0.1	壁6	T= 150 P= 0.5	$T_t = 366$	
妨害破壊：外部電源				$T_t = 336$	← ①対応時間(秒) 300
扉4	T= 60 P= 0.1	壁4	T= 150 P= 0.5	$T_t = 276$	阻止確率 $P_t(\%)$ 95
管理区域				$T_t = 216$	
扉6	T= 30 P= 0.1	壁6	T= 150 P= 0.5	$T_t = 180$	
妨害破壊：RCIC(A)				$T_t = 150$	
扉6	T= 30 P= 0.1	壁6	T= 150 P= 0.5	$T_t = 90$	
妨害破壊：RCIC(B)				$T_t = 60$	

Figure Ap. 23 タイムライン評価結果: TBU (c)OFNP-乗降エレベータ経路管理有り

間接的妨害破壊：TBU				(d)	
枢要区域：無し					
乗降エレベータ経路管理：無し					
周辺監視区域：周辺監視区域					
周辺海域				累計遅延時間 ← ③対応時間(秒)	1761
水中ネット1	T= 6 P= 0.00	船舶ゲート1	T= 10 P= 0.50	阻止確率	0
立入制限区域				$T_t = 584$	
レンズ	T= 0 P= 0.50	カメラ/ソナー	T= 0 P= 0.80	船舶 T= 1	$T_t = 578$
水中ネット2	T= 6 P= 0.00	船舶ゲート2	T= 10 P= 0.50		$T_t = 577$
周辺防護区域					$T_t = 577$
レンズ	T= 0 P= 0.50	カメラ/ソナー	T= 0 P= 0.80	船舶 T= 1	$T_t = 571$
乗降エレベータ3	T= 60 P= 0.50	緊急ラダー3	T= 600 P= 0.50		$T_t = 570$
防護ゲート3	T= 60 P= 0.50	防護扉3	T= 150 P= 0.50		$T_t = 570$
防護区域					$T_t = 570$ ← ②対応時間(秒) 561
扉6	T= 30 P= 0.1	壁6	T= 150 P= 0.5	走り T= 54	阻止確率 P_t (%) 98
妨害破壊：補機冷却の取水口					$T_t = 510$
扉6	T= 30 P= 0.1	壁6	T= 150 P= 0.5		$T_t = 456$
妨害破壊：外部電源					$T_t = 426$
扉4	T= 60 P= 0.1	壁4	T= 150 P= 0.5		$T_t = 366$
管理区域					$T_t = 336$
扉6	T= 30 P= 0.1	壁6	T= 150 P= 0.5	走り T= 36	$T_t = 336$
妨害破壊：RCIC(A)					$T_t = 276$ ← ①対応時間(秒) 261
扉6	T= 30 P= 0.1	壁6	T= 150 P= 0.5		阻止確率 P_t (%) 99
妨害破壊：RCIC(B)					$T_t = 216$
扉6	T= 30 P= 0.1	壁6	T= 150 P= 0.5		$T_t = 180$
					$T_t = 150$
					$T_t = 90$
					$T_t = 60$
				周辺監視区域による到着短縮(秒)	39

Figure Ap. 24 タイムライン評価結果: TBU (d)OFNP-周辺監視区域有り

間接的妨害破壊：TBU				(e)	
概要区域：補機冷却の取水口					
乗降エレベータ経路管理：警備員詰所					
周辺監視区域：周辺監視区域					
	周辺海域			累計遅延時間	← ③対応時間(秒) 1761 阻止確率 0
水中ネット1	$T=6$ $P=0.00$	船舶ゲート1	$T=10$ $P=0.50$	$T_t=1394$	
立入制限区域			船舶	$T=1$	$T_t=1388$
レンズ	$T=0$ $P=0.50$	カメラ/ソナー	$T=0$ $P=0.80$	$T_t=1387$	
水中ネット2	$T=6$ $P=0.00$	船舶ゲート2	$T=10$ $P=0.50$	$T_t=1387$	
周辺防護区域			船舶	$T=1$	$T_t=1381$
レンズ	$T=0$ $P=0.50$	カメラ/ソナー	$T=0$ $P=0.80$	$T_t=1380$	
乗降エレベータ3	$T=60$ $P=0.50$	緊急ラダー3	$T=600$ $P=0.50$	$T_t=1380$	
防護ゲート3	$T=60$ $P=0.50$	防護扉3	$T=150$ $P=0.50$	$T_t=930$	
防護区域			走り	$T=54$	$T_t=780$
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$	$T_t=726$	
妨害破壊：外部電源			$T=60$	$T_t=696$	
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$	$T_t=636$	
妨害破壊：DG(A)			$T=60$	$T_t=606$	← ②対応時間(秒) 561 阻止確率 $P_t(\%)$ 99
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$	$T_t=546$	
妨害破壊：DG(B)			$T=60$	$T_t=516$	
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$	$T_t=456$	
妨害破壊：DG(C)			$T=60$	$T_t=426$	
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$	$T_t=366$	
妨害破壊：DG(D)			$T=60$	$T_t=336$	
扉4	$T=60$ $P=0.1$	壁4	$T=150$ $P=0.5$	$T_t=276$	← ①対応時間(秒) 261 阻止確率 $P_t(\%)$ 99
管理区域			走り	$T=36$	$T_t=216$
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$	$T_t=180$	
妨害破壊：RCIC(A)			$T=60$	$T_t=150$	
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$	$T_t=90$	
妨害破壊：RCIC(B)			$T=60$	$T_t=60$	周辺監視区域による到着短縮(秒) 39

Figure Ap. 25 タイムライン評価結果: TBU (e)OFNP-概要区域など有り

中央制御室等占拠：代替中央制御室
枢要区域：無し
乗降エレベータ経路管理：警備員詰所
周辺監視区域：無し

(c)

	周辺海域	
水中ネット1	T= 6 P= 0.00	船舶ゲート1 T= 10 P= 0.50

累計遅延時間 ← ③対応時間(秒) 1800
阻止確率 0

$T_t = 1028$

	立入制限区域	船舶 T= 1
レンズ	T= 0 P= 0.50	カメラ/ソナー T= 0 P= 0.80

$T_t = 1022$

$T_t = 1021$

水中ネット2	T= 6 P= 0.00	船舶ゲート2 T= 10 P= 0.50

$T_t = 1021$

	周辺防護区域	船舶 T= 1
レンズ	T= 0 P= 0.50	カメラ/ソナー T= 0 P= 0.80

$T_t = 1015$

$T_t = 1014$

乗降エレベータ3	T= 60 P= 0.50	緊急ラダー3 T= 600 P= 0.50

$T_t = 1014$ ← ②対応時間(秒) 600
阻止確率 $P_t(\%)$ 75

防護ゲート3	T= 60 P= 0.50	防護扉3 T= 150 P= 0.50

$T_t = 414$

	防護区域	走り T= 54
扉6	T= 30 P= 0.1	壁6 T= 150 P= 0.5

$T_t = 354$

$T_t = 300$ ← ①対応時間(秒) 300
阻止確率 $P_t(\%)$ 94

	妨害破壊：中央制御室	T= 120

$T_t = 270$

扉6	T= 30 P= 0.1	壁6 T= 150 P= 0.5

$T_t = 150$

	妨害破壊：代替中央制御室	T= 120

$T_t = 120$

Figure Ap. 28 タイムライン評価結果: 中央制御室等占拠 (c)OFNP-乗降エレベータ経路管

理有り

(e)

中央制御室等占拠：代替中央制御室
枢要区域：代替中央制御室
乗降エレベータ経路管理：警備員詰所
周辺監視区域：周辺監視区域

周辺海域			
水中ネット1	$T=6$ $P=0.00$	船舶ゲート1	$T=10$ $P=0.50$

立入制限区域	船舶	$T=1$	
レンス	$T=0$ $P=0.50$	カメラ/ソナー	$T=0$ $P=0.80$

水中ネット2	$T=6$ $P=0.00$	船舶ゲート2	$T=10$ $P=0.50$

周辺防護区域	船舶	$T=1$	
レンス	$T=0$ $P=0.50$	カメラ/ソナー	$T=0$ $P=0.80$

乗降エレベータ3	$T=60$ $P=0.50$	緊急ラダー3	$T=600$ $P=0.50$

防護ゲート3	$T=60$ $P=0.50$	防護扉3	$T=150$ $P=0.50$

防護区域	走り	$T=54$

扉5	$T=60$ $P=0.9$	壁5	$T=195$ $P=0.9$

妨害破壊：中央制御室	$T=120$

扉5	$T=60$ $P=0.9$	壁5	$T=195$ $P=0.9$

妨害破壊：代替中央制御室	$T=120$

累計遅延時間 ← ③対応時間(秒) 2755
阻止確率 -

$T_t = 1088$

$T_t = 1082$

$T_t = 1081$

$T_t = 1081$

$T_t = 1075$

$T_t = 1074$

$T_t = 1074$ ← ②対応時間(秒) 561
阻止確率 $P_t(\%)$ -

$T_t = 474$

$T_t = 414$

$T_t = 360$

$T_t = 300$ ← ①対応時間(秒) 261
阻止確率 $P_t(\%)$ -

$T_t = 180$

$T_t = 120$

周辺監視区域による到着短縮(秒) 39

Figure Ap. 30 タイムライン評価結果: 中央制御室等占拠 (e)OFNP-枢要区域など有り

■ 陸上 NPP シナリオ. 盗取

盗取 : MOX-FF				(ref.a)	
枢要区域 : 無し					
	周辺地域			累計遅延時間	←③対応時間(秒) 1800 阻止確率PI(%) 0
車両ゲート1	$T=6$ $P=0.50$	フェンス1	$T=12$ $P=0.80$	$T_t=1327$	
	立入制限区域		トラック $T=30$	$T_t=1321$	
車両ゲート2	$T=6$ $P=0.50$	フェンス2	$T=12$ $P=0.80$	$T_t=1291$	
	周辺防護区域		トラック $T=28$	$T_t=1285$	
扉3	$T=60$ $P=0.50$	壁3	$T=150$ $P=0.50$	$T_t=1258$	
	防護区域		走り $T=54$	$T_t=1198$	
扉4	$T=60$ $P=0.10$	壁4	$T=150$ $P=0.50$	$T_t=1144$	
	管理区域		走り $T=36$	$T_t=1084$	
扉6	$T=30$ $P=0.10$	壁6	$T=150$ $P=0.50$	$T_t=1048$	
	盗取 : MOX-FF			$T_t=1018$	← ②対応時間(秒) 600 阻止確率 P_I (%) 90
	管理区域		走り $T=144$	$T_t=418$	
	防護区域		走り $T=216$	$T_t=274$	← ①対応時間(秒) 300 阻止確率 P_I (%) 90
	周辺防護区域		トラック $T=28$	$T_t=58$	
	立入制限区域		トラック $T=30$	$T_t=30$	
	周辺地域				

Figure Ap. 31 タイムライン評価結果: 盗取 (ref.a)陸上 NPP-枢要区域無し

盗取：MOX-FF				(ref.b)	
枢要区域：原子炉建屋オペフロ					
	周辺地域			累計遅延時間	←③対応時間(秒) 1800 阻止確率PI(%) 0
車両ゲート1	$T=6$ $P=0.50$	フェンス1	$T=12$ $P=0.80$	$Tt=1357$	
	立入制限区域		トラック $T=30$	$Tt=1351$	
車両ゲート2	$T=6$ $P=0.50$	フェンス2	$T=12$ $P=0.80$	$Tt=1321$	
	周辺防護区域		トラック $T=28$	$Tt=1315$	
扉3	$T=60$ $P=0.50$	壁3	$T=150$ $P=0.50$	$Tt=1288$	
	防護区域		走り $T=54$	$Tt=1228$	
扉4	$T=60$ $P=0.10$	壁4	$T=150$ $P=0.50$	$T_t=1174$	
	管理区域		走り $T=36$	$T_t=1114$	
扉5	$T=60$ $P=0.90$	壁5	$T=195$ $P=0.90$	$T_t=1078$	
盗取：MOX-FF			$T=600$	$T_t=1018$	← ②対応時間(秒) 600 阻止確率 P_t (%) 99
	管理区域		走り $T=144$	$T_t=418$	
	防護区域		走り $T=216$	$T_t=274$	← ①対応時間(秒) 300 阻止確率 P_t (%) 99
	周辺防護区域		トラック $T=28$	$T_t=58$	
	立入制限区域		トラック $T=30$	$T_t=30$	
	周辺地域				

Figure Ap. 32 タイムライン評価結果: 盗取 (ref.b)陸上 NPP-枢要区域有り

■ 陸上 NPP シナリオ A. 直接的妨害破壊

直接的妨害破壊 : MOX-FF、SF				(ref.a)		← ③対応時間(秒) 1800	
枢要区域 : 無し						← ②対応時間(秒) 600	
	周辺地域			累計遅延時間		阻止確率PI(%) 0	
車両ゲート1	T= 6 P= 0.50	フェンス1	T= 12 P= 0.80	Tt= 370			
	立入制限区域			トラック T= 30		Tt= 364	
車両ゲート2	T= 6 P= 0.50	フェンス2	T= 12 P= 0.80	Tt= 334			
	周辺防護区域			トラック T= 28		Tt= 328 ← ①対応時間(秒) 300	
扉3	T= 60 P= 0.50	壁3	T= 150 P= 0.50	Tt= 300		阻止確率PI(%) 75	
	防護区域			走り T= 54		Tt= 240	
扉4	T= 60 P= 0.10	壁4	T= 150 P= 0.50	Tt= 186			
	管理区域			走り T= 36		Tt= 126	
扉6	T= 30 P= 0.10	壁6	T= 150 P= 0.50	Tt= 90			
妨害破壊 : 原子炉建屋オパフロ				T= 60		Tt= 60	

Figure Ap. 33 タイムライン評価結果: 直接的妨害破壊 (ref.a)陸上 NPP-枢要区域無し

直接的妨害破壊：MOX-FF、SF				(ref.b)	
枢要区域：原子炉建屋オペフロ					
	周辺地域			累計遅延時間	←②対応時間(秒) 600 阻止確率PI(%) 0
車両ゲート1	T= 6 P= 0.50	フェンス1	T= 12 P= 0.80	Tt= 400	
	立入制限区域			Tt= 394	
		トラック	T= 30		
車両ゲート2	T= 6 P= 0.50	フェンス2	T= 12 P= 0.80	Tt= 364	
	周辺防護区域			Tt= 358	
		トラック	T= 28		
扉3	T= 60 P= 0.50	壁3	T= 150 P= 0.50	Tt= 330	←①対応時間(秒) 300 阻止確率PI(%) 75
	防護区域			Tt= 270	
		走り	T= 54		
扉4	T= 60 P= 0.10	壁4	T= 150 P= 0.50	Tt= 216	
	管理区域			Tt= 156	
		走り	T= 36		
扉5	T= 60 P= 0.90	壁5	T= 195 P= 0.90	Tt= 120	
	妨害破壊：原子炉建屋オペフロ			Tt= 60	
			T= 60		

Figure Ap. 34 タイムライン評価結果: 直接的妨害破壊 (ref.b)陸上 NPP-枢要区域有り

■ 陸上 NPP シナリオ B-1. 間接的妨害破壊: TQUV

間接的妨害破壊 : TQUV				(ref.a)		← ③対応時間(秒) 1800	
枢要区域 : 無し						← ②対応時間(秒) 600	
	周辺地域					阻止確率PI(%) 0	
車両ゲート1	T= 6 P= 0.50	フェンス1	T= 12 P= 0.80			累計遅延時間 T _t = 550	
	立入制限区域			トラック	T= 30	T _t = 544	
車両ゲート2	T= 6 P= 0.50	フェンス2	T= 12 P= 0.80			T _t = 514	
	周辺防護区域			トラック	T= 28	T _t = 508	
扉3	T= 60 P= 0.50	壁3	T= 150 P= 0.50			T _t = 480	
	防護区域			走り	T= 54	T _t = 420	
扉6	T= 30 P= 0.1	壁6	T= 150 P= 0.5			T _t = 366	
	妨害破壊 : 補機冷却の取水口				T= 60	T _t = 336 ← ①対応時間(秒) 300	
扉4	T= 60 P= 0.1	壁4	T= 150 P= 0.5			阻止確率P _I (%) 89 T _t = 276	
	管理区域			走り	T= 36	T _t = 216	
扉6	T= 30 P= 0.1	壁6	T= 150 P= 0.5			T _t = 180	
	妨害破壊 : RCIC(A)				T= 60	T _t = 150	
扉6	T= 30 P= 0.1	壁6	T= 150 P= 0.5			T _t = 90	
	妨害破壊 : RCIC(B)				T= 60	T _t = 60	

Figure Ap. 35 タイムライン評価結果: TQUV (ref.a)陸上 NPP-枢要区域無し

間接的妨害破壊：TQUV				(ref.b)	
枢要区域：補機冷却の取水口					
	周辺地域			累計遅延時間	←③対応時間(秒) 1800
					阻止確率 P_I (%) 0
車両ゲート1	$T=6$ $P=0.50$	フェンス1	$T=12$ $P=0.80$	$T_t=1090$	
	立入制限区域				
		トラック	$T=30$	$T_t=1084$	
車両ゲート2	$T=6$ $P=0.50$	フェンス2	$T=12$ $P=0.80$	$T_t=1054$	
	周辺防護区域				
		トラック	$T=28$	$T_t=1048$	
扉3	$T=60$ $P=0.50$	壁3	$T=150$ $P=0.50$	$T_t=1020$	
	防護区域				
		走り	$T=54$	$T_t=960$	
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$	$T_t=906$	
	妨害破壊：常用給水			$T=60$	$T_t=876$
扉4	$T=60$ $P=0.1$	壁4	$T=150$ $P=0.5$	$T_t=816$	
	管理区域				
		走り	$T=36$	$T_t=756$	
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$	$T_t=720$	
	妨害破壊：RCIC(A)			$T=60$	$T_t=690$
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$	$T_t=630$	
	妨害破壊：RCIC(B)			$T=60$	$T_t=600$ ← ②対応時間(秒) 600
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$	$T_t=540$	阻止確率 P_I (%) 92
	妨害破壊：HPCF(C)			$T=60$	$T_t=510$
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$	$T_t=450$	
	妨害破壊：HPCF(D)			$T=60$	$T_t=420$
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$	$T_t=360$	
	妨害破壊：RHR(A)			$T=60$	$T_t=330$ ← ①対応時間(秒) 300
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$	$T_t=270$	阻止確率 P_I (%) 94
	妨害破壊：RHR(B)			$T=60$	$T_t=240$
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$	$T_t=180$	
	妨害破壊：RHR(C)			$T=60$	$T_t=150$
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$	$T_t=90$	
	妨害破壊：RHR(D)			$T=60$	$T_t=60$

Figure Ap. 36 タイムライン評価結果: TQUV (ref.b)陸上 NPP-枢要区域有り

■ 陸上 NPP シナリオ B-2. 間接的妨害破壊: TQUX

間接的妨害破壊 : TQUX				(ref.a)	
枢要区域 : 無し					
	周辺地域			累計遅延時間	←③対応時間(秒) 1800 阻止確率PI(%) 0
車両ゲート1	$T=6$ $P=0.50$	フェンス1	$T=12$ $P=0.80$	$T_t=910$	
	立入制限区域			$T_t=904$	
		トラック	$T=30$		
車両ゲート2	$T=6$ $P=0.50$	フェンス2	$T=12$ $P=0.80$	$T_t=874$	
	周辺防護区域			$T_t=868$	
		トラック	$T=28$		
扉3	$T=60$ $P=0.50$	壁3	$T=150$ $P=0.50$	$T_t=840$	
	防護区域			$T_t=780$	
		走り	$T=54$		
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$	$T_t=726$	
	妨害破壊 : 補機冷却の取水口			$T_t=696$	
			$T=60$		
扉4	$T=30$ $P=0.1$	壁4	$T=150$ $P=0.5$	$T_t=636$	
	妨害破壊 : ADS(A)			$T_t=606$	← ②対応時間(秒) 600 阻止確率 P_I (%) 90
			$T=60$		
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$	$T_t=546$	
	妨害破壊 : ADS(B)			$T_t=516$	
			$T=60$		
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$	$T_t=456$	
	妨害破壊 : ADS(C)			$T_t=426$	
			$T=60$		
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$	$T_t=366$	
	妨害破壊 : ADS(D)			$T_t=336$	← ①対応時間(秒) 300 阻止確率 P_I (%) 93
			$T=60$		
扉4	$T=60$ $P=0.1$	壁4	$T=150$ $P=0.5$	$T_t=276$	
	管理区域			$T_t=216$	
		走り	$T=36$		
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$	$T_t=180$	
	妨害破壊 : RCIC(A)			$T_t=150$	
			$T=60$		
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$	$T_t=90$	
	妨害破壊 : RCIC(B)			$T_t=60$	
			$T=60$		

Figure Ap. 37 タイムライン評価結果: TQUX (ref.a)陸上 NPP-枢要区域無し

間接的妨害破壊：TQUX				(ref.b)	
枢要区域：補機冷却の取水口					
	周辺地域			累計遅延時間	←③対応時間(秒) 1800
					阻止確率 P_I (%) 0
車両ゲート1	$T=6$ $P=0.50$	フェンス1	$T=12$ $P=0.80$	$T_t=1090$	
	立入制限区域				
		トラック	$T=30$	$T_t=1084$	
車両ゲート2	$T=6$ $P=0.50$	フェンス2	$T=12$ $P=0.80$	$T_t=1054$	
	周辺防護区域				
		トラック	$T=28$	$T_t=1048$	
扉3	$T=60$ $P=0.50$	壁3	$T=150$ $P=0.50$	$T_t=1020$	
	防護区域				
		走り	$T=54$	$T_t=960$	
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$	$T_t=906$	
	妨害破壊：常用給水			$T=60$	$T_t=876$
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$	$T_t=816$	
	妨害破壊：ADS(A)			$T=60$	$T_t=786$
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$	$T_t=726$	
	妨害破壊：ADS(B)			$T=60$	$T_t=696$
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$	$T_t=636$	
	妨害破壊：ADS(C)			$T=60$	$T_t=606$ ← ②対応時間(秒) 600
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$	$T_t=546$	阻止確率 P_I (%) 92
	妨害破壊：ADS(D)			$T=60$	$T_t=516$
扉4	$T=60$ $P=0.1$	壁4	$T=150$ $P=0.5$	$T_t=456$	
	管理区域				
		走り	$T=36$	$T_t=396$	
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$	$T_t=360$	
	妨害破壊：RCIC(A)			$T=60$	$T_t=330$ ← ①対応時間(秒) 300
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$	$T_t=270$	阻止確率 P_I (%) 94
	妨害破壊：RCIC(B)			$T=60$	$T_t=240$
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$	$T_t=180$	
	妨害破壊：HPCF(C)			$T=60$	$T_t=150$
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$	$T_t=90$	
	妨害破壊：HPCF(D)			$T=60$	$T_t=60$

Figure Ap. 38 タイムライン評価結果: TQUX (ref.b)陸上 NPP-枢要区域有り

■ 陸上 NPP シナリオ B-3. 間接的妨害破壊: TBU

間接的妨害破壊 : TBU				(ref.a)	
枢要区域 : 無し					
	周辺地域			累計遅延時間	←③対応時間(秒) 1800 阻止確率PI(%) 0
車両ゲート1	$T=6$ $P=0.50$	フェンス1	$T=12$ $P=0.80$	$T_t=640$	
	立入制限区域			$T_t=634$	
車両ゲート2	$T=6$ $P=0.50$	フェンス2	$T=12$ $P=0.80$	$T_t=604$	←②対応時間(秒) 600 阻止確率PI(%) 50
	周辺防護区域			$T_t=598$	
扉3	$T=60$ $P=0.50$	壁3	$T=150$ $P=0.50$	$T_t=570$	
	防護区域			$T_t=510$	
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$	$T_t=456$	
	妨害破壊 : 補機冷却の取水口			$T_t=426$	
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$	$T_t=366$	
	妨害破壊 : 外部電源			$T_t=336$	←①対応時間(秒) 300 阻止確率 P_T (%) 90
扉4	$T=60$ $P=0.1$	壁4	$T=150$ $P=0.5$	$T_t=276$	
	管理区域			$T_t=216$	
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$	$T_t=180$	
	妨害破壊 : RCIC(A)			$T_t=150$	
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$	$T_t=90$	
	妨害破壊 : RCIC(B)			$T_t=60$	

Figure Ap. 39 タイムライン評価結果: TBU (ref.a)陸上 NPP-枢要区域無し

間接的妨害破壊：TBU				(ref.b)	
枢要区域：補機冷却の取水口					
	周辺地域			累計遅延時間	←③対応時間(秒) 1800 阻止確率PI(%) 0
車両ゲート1	$T=6$ $P=0.50$	フェンス1	$T=12$ $P=0.80$	$T_t=910$	
	立入制限区域			$T_t=904$	
車両ゲート2	$T=6$ $P=0.50$	フェンス2	$T=12$ $P=0.80$	$T_t=874$	
	周辺防護区域			$T_t=868$	
扉3	$T=60$ $P=0.50$	壁3	$T=150$ $P=0.50$	$T_t=840$	
	防護区域			$T_t=780$	
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$	$T_t=726$	
	妨害破壊：外部電源			$T_t=696$	
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$	$T_t=636$	
	妨害破壊：DG(A)			$T_t=606$	←②対応時間(秒) 600 阻止確率 $P_I(\%)$ 90
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$	$T_t=546$	
	妨害破壊：DG(B)			$T_t=516$	
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$	$T_t=456$	
	妨害破壊：DG(C)			$T_t=426$	
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$	$T_t=366$	
	妨害破壊：DG(D)			$T_t=336$	←①対応時間(秒) 300 阻止確率 $P_I(\%)$ 93
扉4	$T=60$ $P=0.1$	壁4	$T=150$ $P=0.5$	$T_t=276$	
	管理区域			$T_t=216$	
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$	$T_t=180$	
	妨害破壊：RCIC(A)			$T_t=150$	
扉6	$T=30$ $P=0.1$	壁6	$T=150$ $P=0.5$	$T_t=90$	
	妨害破壊：RCIC(B)			$T_t=60$	

Figure Ap. 40 タイムライン評価結果: TBU (ref.b)陸上 NPP-枢要区域有り

■ 陸上 NPP シナリオ C. 中央制御室等占拠

中央制御室等占拠：代替中央制御室				(ref.a)		← ③対応時間(秒) 1800	
枢要区域：無し						← ②対応時間(秒) 600	
周辺地域				累計遅延時間		阻止確率PI(%) 0	
車両ゲート1	$T= 6$ $P= 0.50$	フェンス1	$T= 12$ $P= 0.80$	$T_t=$	484		
立入制限区域				トラック	$T= 30$	$T_t=$	478
車両ゲート2	$T= 6$ $P= 0.50$	フェンス2	$T= 12$ $P= 0.80$	$T_t=$	448		
周辺防護区域				トラック	$T= 28$	$T_t=$	442
扉3	$T= 60$ $P= 0.50$	壁3	$T= 150$ $P= 0.50$	$T_t=$	414		
防護区域				走り	$T= 54$	$T_t=$	354
扉6	$T= 30$ $P= 0.1$	壁6	$T= 150$ $P= 0.5$	$T_t=$	300	← ①対応時間(秒) 300	
妨害破壊：中央制御室				$T= 120$	$T_t=$	270	阻止確率 P_t (%) 88
扉6	$T= 30$ $P= 0.1$	壁6	$T= 150$ $P= 0.5$	$T_t=$	150		
妨害破壊：代替中央制御室				$T= 120$	$T_t=$	120	

Figure Ap. 41 タイムライン評価結果: 中央制御室等占拠 (ref.a)陸上 NPP-枢要区域無し

中央制御室等占拠：代替中央制御室				(ref.b)		← ③対応時間(秒) 1800	
枢要区域：代替中央制御室						← ②対応時間(秒) 600	
周辺地域						阻止確率PI(%) -	
車両ゲート1	$T= 6$ $P= 0.50$	フェンス1	$T= 12$ $P= 0.80$			累計遅延時間 $T_t= 544$	
立入制限区域				トラック	$T= 30$	$T_t= 538$	
車両ゲート2	$T= 6$ $P= 0.50$	フェンス2	$T= 12$ $P= 0.80$			$T_t= 508$	
周辺防護区域				トラック	$T= 28$	$T_t= 502$	
扉3	$T= 60$ $P= 0.50$	壁3	$T= 150$ $P= 0.50$			$T_t= 474$	
防護区域				走り	$T= 54$	$T_t= 414$	
扉5	$T= 60$ $P= 0.9$	壁5	$T= 195$ $P= 0.9$			$T_t= 360$	
妨害破壊：中央制御室				$T= 120$		$T_t= 300$ ← ①対応時間(秒) 300	
扉5	$T= 60$ $P= 0.9$	壁5	$T= 195$ $P= 0.9$			阻止確率 P_I (%) -	
妨害破壊：代替中央制御室				$T= 120$		$T_t= 180$	
						$T_t= 120$	

Figure Ap. 42 タイムライン評価結果: 中央制御室等占拠 (ref.b)陸上 NPP-枢要区域有り

Appendix G 日本における実用炉の核セキュリティに関する規制要求

「実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則(実用炉規則)」の第 91 条(防護措置)に定められている規制要求の概要は、以下の通りである。区分Ⅰ～Ⅲに応じたグレーデット・アプロートが採用されている。

Table G 日本における実用炉の核セキュリティに関する規制要求

実用炉規則第 91 条(防護措置)の要求事項		区分Ⅰ/Ⅱ	区分Ⅲ
核物質防護のための区域の設定	防護区域の設定	2 項 1 号	3 項 1 号
	防護区域を鉄筋コンクリート造り等の堅固な障壁で区画し、適切かつ十分な監視を行う装置を設置	2 項 1 号	
	周辺防護区域の設定し、柵等の障壁で区画し、照明装置等の人の侵入が確認可能な装置を設置	2 項 2 号	
	立入制限区域の設定し、柵等の障壁で区画	2 項 3 号	3 項 2 号
	立入制限区域の障壁の周辺に標識及びサイレン、拡声機その他の人に警告するための装置を設置し、照明装置等の人の侵入を確認可能な装置を設置	2 項 3 号	
核物質防護のための区域の監視	見張人の巡視	2 項 4 号	3 項
核物質防護のための区域の出入管理	常時立入者に証明書を発行し、立入時に所持	2 項 5 号イ	3 項
	一時立入者に証明書を発行し、立入時に所持	2 項 5 号ロ	3 項
	防護区域への一時立入者に常時立入者を同行させ監督	2 項 5 号ハ	
	防護区域又は周辺防護区域への業務車両以外の車両立入禁止	2 項 6 号	3 項
	防護区域又は周辺防護区域における車両の駐車区域の設定	2 項 7 号	3 項
	妨害破壊行為用物品の持込み、特定核燃料物質の不法持出し点検	2 項 8 号イ	
	金属探知装置、特定核燃料物質検知装置を利用した点検	2 項 8 号ロ	
	見張人の出入口の常時監視	2 項 8 号ハ	3 項 3 号
特定核燃料物質の管理	防護区域内に置く	2 項 9 号イ	3 項
	見張人の常時監視	2 項 9 号ロ	
	貯蔵施設へ認めた者以外の立入禁止		3 項 4 号イ
	見張人の貯蔵施設周辺巡視		3 項 4 号ロ
特定核燃料物質取扱者の義務	異常の報告	2 項 9 号ハ	3 項
	一日の作業終了後に点検報告	2 項 9 号ニ	3 項

実用炉規則第 91 条(防護措置)の要求事項		区分Ⅰ/Ⅱ	区分Ⅲ
特定核燃料物質の事業所内運搬時の措置	収容する容器の施錠及び封印	2 項 10 号イ	
	関係機関に運搬の日時及び経路を事前に通知	2 項 10 号ロ	
監視装置の設置	人の侵入の確実な検知、速やかに表示する装置の設置	2 項 11 号イ	3 項
	人の侵入を表示するものは見張人が常時監視可能な位置に設置	2 項 11 号ロ	
区域又は施設の出入口の施錠	複製が困難	2 項 12 号イ	
	不審時には速やかに取替えまた構造の変更	2 項 12 号ロ	
	当該者以外の取扱い禁止	2 項 12 号ハ	
中央制御室及び特重施設の緊急時制御室	壁は容易に破壊されないもの	2 項 13 号イ	
	出入口の扉は鉄製その他の堅固な扉	2 項 13 号ロ	
中央制御室外から原子炉施設の停止設備	周囲に容易に破壊されない壁その他の障壁	2 項 14 号イ	
	障壁によって区画された区域への一時立入者に常時立入者を同行させ監督	2 項 14 号ロ	
防護区域内防護対象枢要設備	周囲に柵等を設置し、容易に人が近づけない措置を講ずる	2 項 15 号イ	
	周辺に照明装置等の人の侵入を確認可能な装置を設置	2 項 15 号ロ	
	柵等の中では二人以上の者が同時に作業又は巡視	2 項 15 号ハ	
防護区域外防護対象枢要設備	周囲に容易に破壊されない障壁を設置	2 項 16 号イ	
	障壁の中では二人以上の者が同時に作業又は巡視	2 項 16 号ロ	
	障壁によって区画された区域への一時立入者に常時立入者を同行させ監督	2 項 16 号ハ	
特重施設	特重施設には防護区域を設置し、二人以上の者が同時に作業又は巡視	2 項 17 号	
情報システムセキュリティ	情報システムセキュリティ対策	2 項 18 号	3 項
	情報システムセキュリティ計画の作成	2 項 19 号	3 項
非常用電源設備及び無停電電源装置	防護設備への非常用電源設備及び無停電電源装置の施設	2 項 20 号	3 項
点検及び保守	防護設備への点検及び保守による機能維持	2 項 21 号	3 項
見張人詰所における通信連絡	見張人が常時監視を行うための見張人詰所の設置	2 項 22 号イ	
	見張人から詰所へ迅速かつ確実な連絡と通信傍受対策	2 項 22 号ロ	
	連絡設備の設置と迅速かつ確実な連絡と通信傍受対策	2 項 22 号ハ	
	詰所から関係機関への迅速かつ確実な二重以上の連絡と通信傍受対策	2 項 22 号ニ	3 項 5 号
	詰所への一時立入者に常時立入者を同行させ監督	2 項 22 号ホ	

実用炉規則第 91 条(防護措置)の要求事項		区分Ⅰ/Ⅱ	区分Ⅲ
火災等により 見張人詰所が 使用不可能な 場合の措置	監視所の設置	2 項 23 号イ	
	見張人から詰所へ迅速かつ確実な連絡と通信傍受対策	2 項 23 号ロ	
	連絡設備の設置と迅速かつ確実な連絡と通信傍受対策	2 項 23 号ハ	
	詰所から関係機関への迅速かつ確実な二重以上の連絡と通信傍受対策	2 項 23 号ニ	
	詰所への一時立入者に常時立入者を同行させ監督	2 項 23 号ホ	
教育・訓練	防護のための教育訓練	2 項 24 号	3 項
平常時及び緊急時における 対応体制の確立	防護体制整備	2 項 25 号	3 項
	妨害破壊行為に備え、緊急時対応計画の作成	2 項 26 号	3 項
核物質防護に係る情報の管理	防護のために詳細な事項が必要以外の者に知られないこと	2 項 27 号	3 項
個人の信頼性確認	個人の信頼性確認	2 項 28 号	
設計基礎脅威への対応	国が定める設計基礎脅威に対応した防護措置の実施	2 項 29 号	6 項
定期的な評価・改善	事業者自ら防護措置について定期的な評価及び改善の実施	2 項 30 号	6 項

Appendix H 原子力発電所等への戦争未満の軍事攻撃に関するシナリオプラン
ニングを用いた危機対応の検討 (2024 年度 東京工業大学 技術経営専門職学位課
程 プロジェクトレポート)

2024 年度 プロジェクトレポート

原子力発電所等への戦争未満の軍事
攻撃に関するシナリオプランニング
を用いた危機対応の検討

東京工業大学

環境・社会理工学院

技術経営専門職学位課程

原 大輔

指導教員 池上 雅子 教授

要旨

筆者は本学の後期博士課程において、浮体式洋上原子力発電所（OFNP）のテロ対策に関する技術的設計を研究しているが、ロシアのウクライナ侵攻を踏まえると、OFNP の社会実装にはテロ対策を超えた対国家レベルの危機対応の整備が必要である。一方で、原子力発電所等への国家による軍事攻撃については、国内で問題提起が多数されているものの、ウクライナ侵攻の前後で日本の危機対応は変わっていない。そこで本研究では、原子力発電所に対して起きうる戦争未満の軍事攻撃について、不確実性と影響度が高い多数の未来を考え、状況緩和に必要な対策とその課題を日本及び事業者の観点から明らかにした。また、既存の原子力発電所を OFNP にリプレースした場合のメリットとデメリットを明らかにした。

本論文は、全 5 章から構成される。第 I 章では、先行研究を概観し、原子力施設への軍事攻撃について、事故に至るまでのシナリオを検討した事例は無いこと、また、グレーゾーン事態全般における日本の危機対応の実効性に対し多数の指摘があることを言及し、研究の目的や意義を述べた。第 II 章では、シナリオプランニング手法について、定型化した手法のステップを解説した。第 III 章では、本研究で実施した 2 回のワークショップについて言及した。第 IV 章では、結果と考察を提示した。第 V 章では、本研究で得られた知見を総括した。

結果として、グレーゾーン事態における自衛隊の原子力発電所警備について、法制度のみならず、現実的にも実行可能な運用が重要であることを明らかにした。また、重要影響事態下の自衛隊による後方支援活動等について、国会承認を原則事前から事後承認に変更する必要性を言及した。また、防衛関連の法令について、自衛隊の活動可能な行動を定めるポジティブリスト方式から、禁止事項を定めるネガティブリスト方式に改正する意義を指摘した。また、高出力マイクロ波照射装置等の爆弾搭載型ドローン対策の必要性も訴求した。

既存の原子力発電所を OFNP にリプレースした場合の結果として、法令に基づく自衛隊の行動が命令されていない平時においても、洋上であれば自衛隊は近海の広範囲における警戒監視活動が可能であり、敵対者への抑止力となりえることを明らかにした。また、国会承認不要かつ閣議決定の手続きが迅速化されている海上警備行動が命令可能となるため、国会承認のための過大な証拠集めが不要となるとともに、自衛隊のリソース配分が困難な場合は、事案の発生前ではなく発生後からの対応も戦術に反映可能であることを言及した。最後に、ドローン攻撃等に対する OFNP 固有の強化された技術的堅牢性を訴求した。

これを要するに本論文は、2035 年までに原子力発電所に対して起きうる戦争未満の軍事攻撃に対して、状況緩和に必要な対策とその課題を提示するとともに、OFNP の有する洋上固有の優れた抑止力を明らかにした。

Abstract

The author researches the technical design of counterterrorism measures for Offshore Floating Nuclear Power Plants (OFNPs) in the latter stages of the university's doctoral program. Considering Russia's invasion of Ukraine, societal implementation of OFNPs requires national-level crisis preparedness beyond counterterrorism measures. Despite considerable domestic discussion on state military attacks on nuclear power plants, Japan's crisis response has remained unchanged before and after the Ukraine invasion. This study examines numerous potential futures with high uncertainty and impact concerning sub-war military attacks on nuclear power plants. It identifies necessary measures for situational mitigation and discusses challenges from the perspectives of the Japanese government and plant operators. Additionally, the study clarifies the merits and demerits of replacing existing nuclear power plants with OFNPs.

The dissertation consists of five chapters. Chapter I surveys previous research, noting the absence of scenarios leading to accidents from military attacks on nuclear facilities and highlighting severe criticisms of Japan's effectiveness in crisis response in gray-zone situations. Chapter II explains the steps of standardized scenario planning methodologies. Chapter III discusses two workshops conducted in this study. Chapter IV presents results and discussions. Chapter V summarizes the insights gained from this research.

As a result, the study emphasizes the importance of executable operational feasibility alongside legal frameworks for Self-Defense Forces' (SDF) security of nuclear power plants during gray-zone situations. It suggests changing from the current system of positive list-based regulations defining SDF activities to a negative list-based system and discusses the necessity of measures against bomb-carrying drones, such as high-power microwave emitters.

Replacing existing nuclear power plants with OFNPs would enable the SDF to conduct "vigilant surveillance activities" over a wide area near the coast, which could serve as a deterrent against adversaries, even during peacetime when SDF actions are not mandated by law. Additionally, it was highlighted that "maritime security operations," expedited through the Cabinet decision-making without requiring parliamentary approval, could be ordered. This eliminates the need for excessive evidence collection for parliamentary approval and allows for tactical adjustments after an incident rather than before, addressing challenges in SDF resource allocation. Finally, it emphasized the enhanced technical robustness of OFNPs against drone attacks and similar threats.

In essence, this paper presents necessary measures and challenges for mitigating sub-war military attacks on nuclear power plants by 2035 and highlights the offshore-specific superior deterrence capabilities of OFNPs.

目次

要旨	i
目次	iii
図一覧	v
表一覧	vi
略語一覧	vii
第 I 章 緒言	2
I.1 研究背景	2
I.2 定義等	6
I.3 先行研究等	7
I.3.1 原発への軍事攻撃	7
I.3.2 原発以外への軍事攻撃	8
I.4 本論文の目的とリサーチクエッション	11
I.5 本論文の構成	11
第 II 章 シナリオプランニング手法	13
II.1 シナリオプランニングとは	13
II.1.1 シナリオプランニングの歴史	13
II.1.2 シナリオプランニングの定義	13
II.1.3 シナリオプランニングの特徴	13
II.1.4 シナリオプランニングの活用例	14
II.2 シナリオプランニング手法の各ステップの概説	15
II.2.1 ステップ 1：事前準備	17
II.2.2 ステップ 2：外部環境要因リサーチ	20
II.2.3 ステップ 3：シナリオドライバー抽出	21
II.2.4 ステップ 4：ベースシナリオ作成	22
II.2.5 ステップ 5：複数シナリオ作成	23
II.2.6 ステップ 6：シナリオ詳細分析	25
II.2.7 ステップ 7：対策・戦略検討	26
第 III 章 ワークショップ	28
III.1 第 1 回ワークショップ(対面)	28
III.2 第 2 回ワークショップ(オンライン)	31
III.3 ワークショップにおける留意点	31
第 IV 章 結果と考察	33
IV.1 ステップ 1：事前準備	33
IV.2 ステップ 2：外部環境要因リサーチ	35

IV.3	ステップ3：シナリオドライバー抽出.....	37
IV.4	ステップ4：ベースシナリオ作成.....	39
IV.5	ステップ5：複数シナリオ作成.....	40
IV.5.1	シナリオ1：原発への軍事攻撃の危機.....	41
IV.5.2	シナリオ2：あらゆる対象への軍事攻撃の危機.....	41
IV.5.3	シナリオ3：原発へのテロ攻撃の危機.....	41
IV.5.4	シナリオ4：現状維持.....	41
IV.6	ステップ6：シナリオ詳細分析.....	41
IV.6.1	シナリオ1：原発への軍事攻撃の危機.....	42
IV.6.1.1	シナリオ1－①：日本とロシアが緊迫した状況.....	42
IV.6.1.2	シナリオ1－②：中国と台湾が緊迫した状況.....	43
IV.6.1.3	シナリオ1－③：韓国と朝鮮が緊迫した状況.....	44
IV.6.2	シナリオ2：あらゆる対象への軍事攻撃の危機.....	45
IV.6.2.1	シナリオ2－①：日本とロシアが緊迫した状況.....	45
IV.6.2.2	シナリオ2－②：中国と台湾が緊迫した状況 ⁵	47
IV.6.2.3	シナリオ2－③：韓国と朝鮮が緊迫した状況 ⁶	48
IV.6.3	シナリオ3：原発へのテロ攻撃の危機.....	49
IV.6.4	シナリオ4：現状維持.....	50
IV.7	ステップ7：対策・戦略検討.....	51
IV.7.1	シナリオ上の失敗箇所への共通的な対策及び対策実装の課題.....	51
IV.7.2	既存の原発を浮体式原発へリプレースした場合の考察.....	55
IV.7.3	リサーチクエッションに対する結果のまとめ.....	58
第V章	結論.....	62
	参考文献.....	63
	謝辞.....	65
付録A	現状整理に関するダストビン.....	67
付録B	ロシアによるウクライナ・ザポリージャ原子力発電所攻撃の主な被害.....	86
付録C	法的事態と自衛隊の行動類型.....	87
付録D	自衛隊の行動類型の詳細.....	90

図一覧

Figure I-1 浮体式原発の概念図	3
Figure I-2 浮体式原発のコンセプトー既存技術の融合ー	4
Figure I-3 国際的な核セキュリティ関連事案（出典：直井(2022) [5])	4
Figure I-4 原発特別警備部隊の例（出典：令和 4 年警察白書(2022) [11])	5
Figure I-5 法的事態の概要（事態対処法などにもとづき筆者作成）	9
Figure II-1 シナリオプランニングの概要（新井(2021) [22]をもとに筆者修正）	16
Figure II-2 シナリオプランニングの影響ピラミッド	19
Figure II-3 シナリオプランニングの不確実性マトリクス	22
Figure II-4 シナリオプランニングの十字架モデル	23
Figure III-1 第 1 回ワークショップの成果物ー不確実性マトリクスー	29
Figure III-2 第 1 回ワークショップの成果物ーシナリオドライバー抽出ー	30
Figure IV-1 不確実性マトリクスによる外部環境要因の分類結果	37
Figure IV-2 システム化によるシナリオドライバーの選定結果	38
Figure IV-3 十字架モデルによる複数シナリオの結果	40
Figure IV-4 警戒監視活動の概念図（出典：令和 5 年度防衛白書(2023) 273 頁 [12])	57

表一覧

Table I-1 テロ攻撃と軍事攻撃の脅威者と対応者	5
Table I-2 本研究における言葉の定義.....	6
Table I-3 原発への軍事攻撃に係る先行研究等	7
Table I-4 原発以外への軍事攻撃に係る先行研究等.....	8
Table I-5 行動類型の概要（自衛隊法等にもとづき筆者作成）.....	10
Table II-1 ステップ 1 の概要.....	17
Table II-2 ステップ 2 の概要.....	20
Table II-3 ステップ 3 の概要.....	21
Table II-4 ステップ 4 の概要.....	22
Table II-5 ステップ 5 の概要.....	23
Table II-6 ステップ 6 の概要.....	25
Table II-7 ステップ 7 の概要.....	26
Table IV-1 外部環境要因候補と外部環境要因	35

略語一覧

略語	意味
ABWR	改良型沸騰水型軽水炉 (Advanced Boiling Water Reactor)
AR6	IPCC 第 6 次評価報告書 (Sixth Assessment Report)
COCN	産業競争力懇談会 (Council on Competitiveness-Nippon)
COP	国連気候変動枠組条約締約国会議 (Conference of the Parties)
DBT	設計基礎脅威 (Design Basis Threat)
FSB	金融安定理事会 (Financial Stability Board)
IAEA	国際原子力機関 (International Atomic Energy Agency)
IPCC	気候変動に関する政府間パネル (Intergovernmental Panel on Climate Change)
IS	イスラム国 (Islamic State)
MIT	マサチューセッツ工科大学 (Massachusetts Institute of Technology)
NATO	北大西洋条約機構 (North Atlantic Treaty Organization)
OFNP	浮体式洋上原子力発電所 (Offshore Floating Nuclear Power Plant)
PAC-3	Patriot Advanced Capability3 を指し、地对空誘導弾の一種
SYR	統合報告書 (Synthesis Report)
TCFD	気候関連財務情報開示タスクフォース (Task Force on Climate-related Financial Disclosure)
UNEP	国連環境計画 (United Nations Environment Programme)
WMO	世界気象機関 (World Meteorological Organization)

第 I 章

緒言

第I章 緒言

I.1 研究背景

原子力発電所(以下、「原発」)は温室効果ガスの削減、エネルギーセキュリティの強化、エネルギー安定供給の観点から、持続可能な社会の実現に向けて今後も重要な役割を果たすことが期待されている。ここで、浮体式洋上原子力発電所(OFNP)(以下、「浮体式原発」)は、米国マサチューセッツ工科大学(MIT)の研究チーム [1]が提唱し、日本の産業競争力懇談会(COCN) [2] [3] [4]にて更なる実装検討が進められてきた(**Figure I-1**)。浮体式原発は、陸上だけではなく洋上への設置という新たな原子力平和利用の可能性を示すとともに、福島第一原子力発電所事故の教訓を踏まえた安全性向上の他、以下の長所が期待されている。

- ・ 「既存技術の融合」の設計コンセプトによる、高い実現可能性と速やかな社会実装 (**Figure I-2**)
- ・ 沖合約 30 km 設置による、地震・津波の影響緩和
- ・ 沖合約 30 km 設置による、放射性物質拡散と大規模避難リスクの排除
- ・ 洋上設置に伴う周囲の大量な海水による、冷却・除熱機能の向上
- ・ 洋上設置に伴う設置地点の変換性による、活断層発見等の新知見バックフィットに関する予期せぬ廃炉リスクの回避
- ・ 様々なタイプの原子炉が搭載可能かつ洋上への立地地点の拡大による、原子力平和利用の促進
- ・ 造船所等の建造拠点における一括した生産と移送による、経済競争力の向上

浮体式原発のような新たな原子力システムの検討において、設計初期段階から原子力安全だけではなくテロ対策の観点も含めることで、合理的かつ堅牢なシステム設計が可能となる。筆者は、デュアルディグリー学生として、2021 年より東工大原子核工学コースの後期博士課程にて、浮体式原発の「テロ対策等に関する技術的設計」(例えば、テロリストによる魚雷脅威や船舶移乗脅威への物理的対策)を行っている。

原子力施設のテロ対策は、2001 年に発生した米国の 9.11 航空機衝突テロを契機として、各国で進められているところである。一方で、国際原子力機関(IAEA)の統計では、1992 年～2020 年度までの間で、大小含めると国際的には合計 3.860 件もの核セキュリティ関連事案(違法移転及び悪用、悪用の意図があった否かの判断ができないケース、悪用ではない事案)が発生している (**Figure I-3**) [5]。IAEA は、加盟国に対してガイドラインに基づき、原子力施設のテロ対策を推奨しており [6]、日本を含む多数の国で規制要件となっている。すなわち、国家が策定する想定すべき設計基礎脅威(DBT)に対して、事業者はテロ対策を行い、もしテロ攻撃が発生した場合は、警察組織が対応し、万が一テロ攻撃を超える国家によ

る軍事攻撃が発生した場合は、軍隊が対応することになっている [7]。なお、日本においては、警察組織には海上保安庁及びサブマシンガン等を保有した原発特別警備部隊(Figure I-4)を含む警察が該当し、軍隊には(国内解釈としては軍隊ではないが)自衛隊が該当する (Table I-1)。

一方で、2022 年に発生したロシアのウクライナ侵攻では、それまでに想定・対策されてきたテロ対策を大幅に超過した「国家」による原発への軍事攻撃が史上初めて発生し、2024 年の現在もなお緊迫した状況が続いている。ロシアによるウクライナの原発攻撃を受けて、国内でも国会 [7] [8]や全国知事会 [9]において、原子力施設に対する軍事攻撃への危機対応について問題提起されているが、(機微な内容ということもあり)公開情報が少なく、議論や危機対応が不足しているおそれがある。日本政府の危機対応のスタンスとしては、事業者によるテロ対策に加えて、国家主体による軍事攻撃への対策としては、イージス艦や PAC-3 によるミサイル対応、事態対処法や国民保護法による原発停止命令と住民避難、日米同盟による対処等を日本政府は示している [7] [10]。一方で、日本の上記対策は、ロシアのウクライナ侵攻の前後で全く変わっておらず、本件に関する議論や危機対応が不足している傍証といえるだろう。

このような文脈から、浮体式原発の社会実装及び既存原発の持続運転を考える上では、社会的受容性等の観点から、筆者が博士課程で研究している「テロ対策に関する原発の技術的設計」だけではなく、「テロを超える国家レベルの軍事攻撃に対する原発の危機対応」も研究することが重要であるため、本テーマを選定したものである。

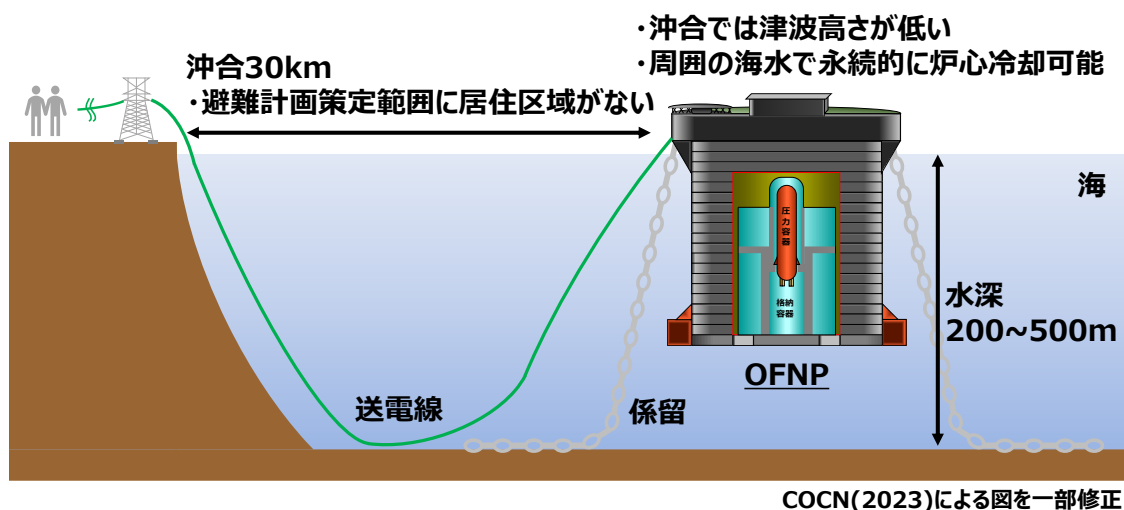


Figure I-1 浮体式原発の概念図

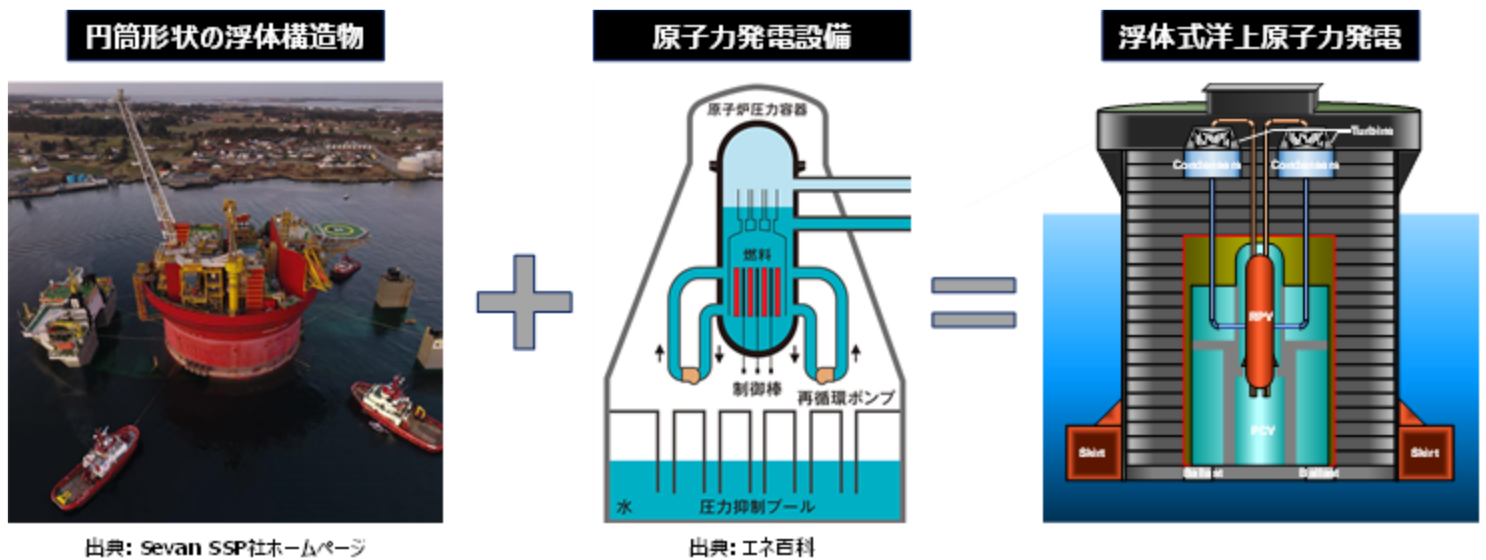


Figure I-2 浮体式原発のコンセプトー既存技術の融合ー

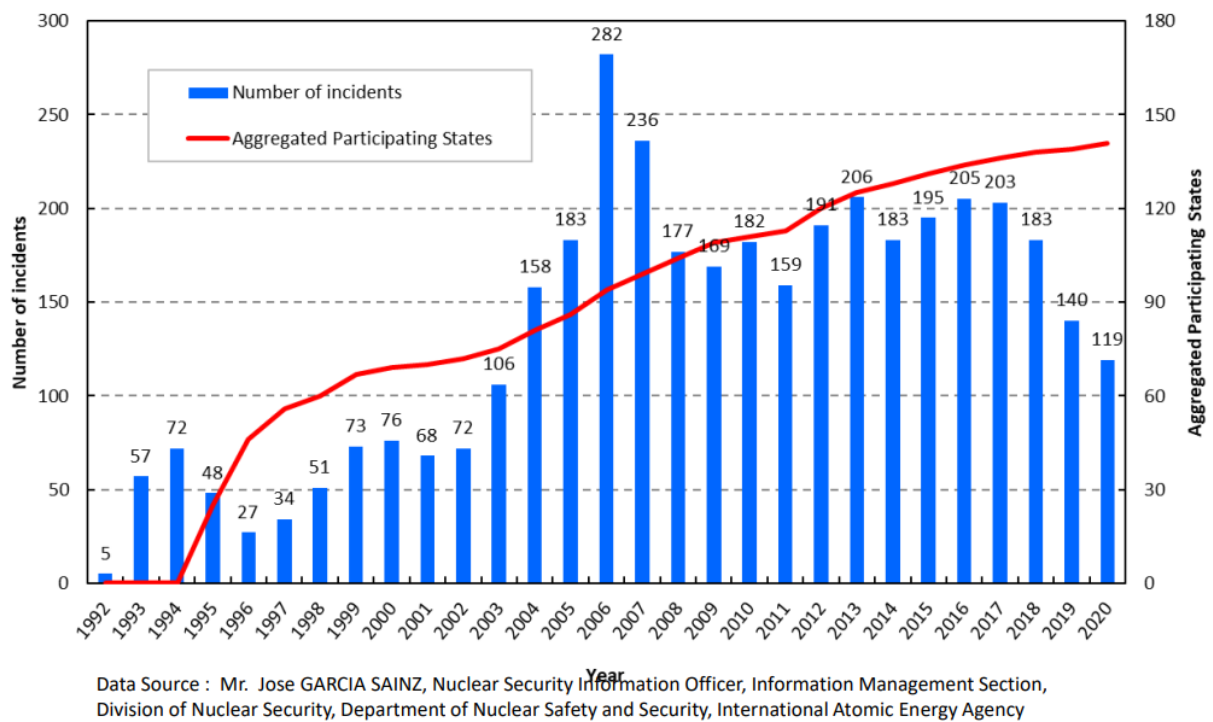


Figure I-3 国際的な核セキュリティ関連事案 (出典: 直井(2022) [5])



Figure I-4 原発特別警備部隊の例（出典：令和 4 年警察白書(2022) [11]）

Table I-1 テロ攻撃と軍事攻撃の脅威者と対応者

事案	脅威者	対応者
テロ攻撃	非国家主体	警察/海上保安庁
軍事攻撃	国家主体	自衛隊

1.2 定義等

本研究における言葉の定義を **Table I-2** に示す。

Table I-2 本研究における言葉の定義

言葉	定義
軍事攻撃	他国、または他国から支援を受けたテロリストから受ける攻撃。グレーゾーン事態からエスカレートした攻撃も含む。対応主体は自衛隊(国家)。
テロ攻撃	他国から支援を受けていないテロリストから受ける攻撃。対応主体は事業者、警察及び海上保安庁。
グレーゾーン事態	純然たる平時でも有事でもない幅広い状況 [12]。すなわち、戦争未満の軍事攻撃が発生しやすい事態。日本が武力紛争の当事者となり、武力行使を行うような事態ではないが、警察・海上保安庁等の通常の警察力では対応できず、自衛隊による警察活動が必要とされる。
不確実性	11 年後の 2035 年までの間、状態が 1 つに特定できるものは不確実性が低く、状態が多数に分岐するものは不確実性が高い。
影響度	11 年後の 2035 年までの間、原発への軍事行為が発生する蓋然性。

1.3 先行研究等

原発または原発以外への軍事攻撃について、主な先行研究の指摘等を以下に示す。なお、その他の関連する先行研究の指摘等は、**付録 A** を参考にされたし。

1.3.1 原発への軍事攻撃

原子力施設への軍事攻撃の主な先行研究等について、

Table I-3 に示す。原子力施設への軍事攻撃については公開されている先行研究が非常に少ないことが特徴である。例えば、日本国際問題研究所が 1984 年に実施した評価では、「付与された事故条件」下における被ばく影響評価に留まっており [13]、事故に至るまでの多様な「シナリオ」を検討した先行研究は確認できなかった。

また、ロシアによるザポリージャ原発攻撃の事例によって、万が一日本が他国と戦争状態となった場合には、敵対国から原発への軍事攻撃が頻繁に行われる危険性が指摘されている [7]。さらに、外部からの攻撃に対して一定の頑健性を有する原子炉内の核燃料に比べて、使用済燃料プール等に保管されている使用済核燃料の脆弱性が指摘されている [14]。なお、ウクライナ侵攻の時系列 [15] については、**付録 B** を参考にされたし。

Table I-3 原発への軍事攻撃に係る先行研究等

文献	著者	出版年	指摘等
1. 原子力施設に対する攻撃の影響に関する一考察(外務省委託研究報告書) [13]	日本国際問題研究所	1984	万が一、原発に対する攻撃が行われた場合の影響を明らかにするため、付与された事故条件において、周辺公衆の被ばく影響を評価。ただし、定量的な評価結果には、他文献を引用。(事故条件:①非常用電源喪失,②格納容器破損,③原子炉破壊)
2. 国会答弁「第 208 回国会・衆議院本会議」19 号(2022 年 4 月 12 日) [7]	—	2022	戦争状態では、敵対国から原発への攻撃が頻繁に行われる危険性を指摘している。
3. ロシアによる原発攻撃と使用済み燃料の安全確保—日本の防護策を検討する— [14]	小林祐喜	2022	外部からの攻撃に対して一定の頑健性を有する原子炉内の核燃料に比べて、使用済燃料プール等に保管されている使用済核燃料の脆弱性を指摘している。
4. Ukraine: Russia-Ukraine War and Nuclear Energy [15]	World Nuclear Association	2024	ウクライナ侵攻の時系列について、主要なイベントをまとめている。

1.3.2 原発以外への軍事攻撃

原発以外への軍事攻撃の主な先行研究等について、**Table I-4** に示す。ここでは、「グレーゾーン事態」全般における日本の危機対応の実効性について、以下の通り多数の指摘があった。

- ・ 自衛隊の警察権行動により、ミリタリーレベルに状況をエスカレートさせる、またはその口実を敵対国に与えるおそれ [16]。
- ・ 自衛隊の他国支援行動によって敵対国から日本が報復の対象とされるというおそれから、国会審議が紛糾するおそれ [17]。
- ・ 自衛隊の行動のための閣議決定・国会承認に必要な証拠集めが困難、かつ時間を要するおそれ [18] [19]。

Table I-4 原発以外への軍事攻撃に係る先行研究等

文献	著者	出版年	指摘等
5. 海と空のグレーゾーン事態への対処－その問題と対策－ [16]	中曽根康弘 世界平和研究所	2018	自衛隊による活動は、警察活動であっても、敵対国や国際社会が「日本は軍事力を使用している」と誤解することにもなりかねないことを指摘。
6. 安全保障政策のリアリティ・チェック 第1章 平和安全法制における法的事態とその認定について [17]	森聡	2017	自衛隊が他国支援を行うことで敵対国から日本が報復の対象とされるというおそれから、自衛隊の行動を審議する国会が紛糾するおそれを指摘。
7. 大規模災害を端緒とする台湾危機に対する日米共同対処をめぐる課題（2018年度 TTX 報告書） [18]	笹川平和財団	2020	台湾有事をケーススタディとして、米国は台湾防衛活動に専念する意思決定をしたが、日本政府はまず国会での事態認定に必要な証拠集めに注力することを指摘。
8. 「安全保障の法的基盤の再構築に関する懇談会」報告書 [19]	安全保障の法的基盤の再構築に関する懇談会	2014	原発等の重要施設の防護を例にとり、グレーゾーン事態における自衛隊の行動に必要な手続きには時間を要し、対応の時機を失してしまうおそれを指摘。

先行研究のまとめ

原発攻撃について、付与された事故条件における影響評価の事例はあるが、事故に至るまでのシナリオを検討した事例は国内外に無かった。また、グレーゾーン事態全般における日本の危機対応の実効性についても、多数の指摘があった。よって、本研究では、グレーゾーン事態における国内原発への戦争未満の軍事攻撃について、多数のシナリオを考え、対策等を検討する。なお、研究の範疇を「戦争未満」と制限した理由は、事案発生時の蓋然性及び費用対効果の観点から、戦争開始後のダメージコントロールよりも、戦争未満の緊迫したグレーゾーン事態からいかに状況をエスカレートさせずに緩和させるかに着目するためである。

なお、他国家による日本の原発への軍事攻撃が発生した場合における、法的事態の概要を Figure I-5 に、自衛隊の行動類型の概要を Table I-5 に示す。(詳細は、付録 C 及び付録 D)

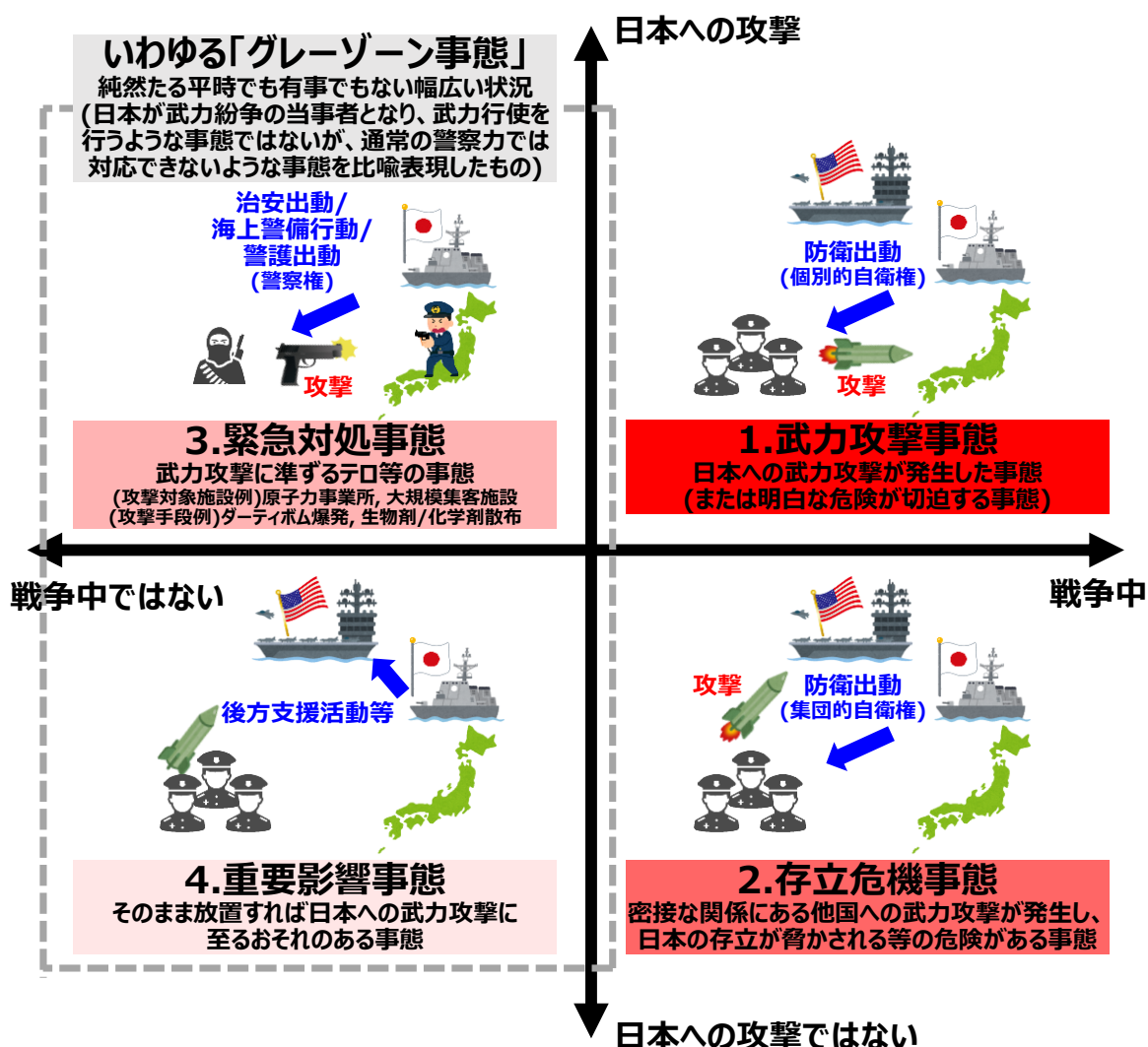


Figure I-5 法的事態の概要 (事態対処法などにもとづき筆者作成)

Table I-5 行動類型の概要（自衛隊法等にもとづき筆者作成）

行動類型	発動条件	閣議決定	国会承認	烈度
防衛出動 (個別的自衛権)	日本への武力攻撃が発生した事態又は明白な危険が切迫する事態	必要	原則事前	高
防衛出動 (集団的自衛権)	密接な関係にある他国への武力攻撃が発生し、日本の存立が脅かされる等の危険がある事態	必要	原則事前	
防衛出動待機	事態が緊迫し、防衛出動命令が発せられることが予測される場合	必要	—	
治安出動	間接侵略その他の緊急事態に際して、一般の警察力をもっては、治安を維持することができないと認められる場合	必要	事後承認	中
海上警備行動 (注2)	海上における人命若しくは財産の保護又は治安の維持のため特別の必要がある場合 (注1)	必要	—	低
自衛隊施設等の警 護出動	自衛隊又は在日米軍施設・区域において、大規模なテロ攻撃が行われるおそれがあり、必要かつ、被害防止の必要があると認める場合	必要	—	
後方支援活動等	我が国の平和及び安全に重要な影響を与える事態	必要	原則事前	
弾道ミサイル等に対する破壊措置(注3)	弾道ミサイル等が日本に飛来するおそれがあり、被害防止の必要があると認めるとき	必要	事後報告	

(注1) 一部の状況で、閣議決定手続きを迅速化(2015年) (注2) 海上警備行動の実績は3回

① 離島などへの武装集団による不法上陸

② 領海及び内水上の外国軍艦の無害ではない通航

③ 公海上の民間船舶へ侵害行為を行う外国船舶

① 能登半島沖不審船事件(1999年)

② 漢級原子力潜水艦領海侵犯事件(2004年)

③ ソマリア沖の海賊対策(2009年)

(注3) 破壊措置の複数回の実績あり

1.4 本論文の目的とリサーチクエッション

本研究の目的は、日本国内の原発に対して起きうる戦争未満の軍事攻撃について、不確実性と影響度が高い多数の未来を考え、必要な対策とその課題を日本及び事業者の観点から明らかにするとともに、設計段階の浮体式原発(OFNP)にリプレイスした場合のメリットとデメリットを明らかにすることである。そのため、本研究では、以下3つのリサーチクエッションを設定した。

RQ1: グレーゾーン事態における原発への戦争未満の軍事攻撃のうち、不確実性と影響度が大きいシナリオは何か。
RQ2: 日本と事業者にとって、複数シナリオへの共通的な対策と、対策実装の課題は何か。
RQ3: 既設の原発を浮体式原発(OFNP)にリプレイスした場合、各シナリオにおけるメリット・デメリットは何か。

上記の RQ1～3 に対して、シナリオプランニング手法(第 II 章で手法を説明)を用いて、仮説を生成し、明らかにすることが本研究の目指すべき成果である。

1.5 本論文の構成

本研究の構成としては、5つの章で構成されている。第 I 章では、先行研究を概観し、研究背景や目的、リサーチクエッションを述べる。第 II 章では、シナリオプランニング手法について、定型化した手法のステップを解説する。第 III 章では、本研究で実施した2回のワークショップについて言及する。第 IV 章では、結果と考察を提示した。第 V 章では、本研究で得られた知見を総括する。

第Ⅱ章

シナリオプランニング手法

第II章 シナリオプランニング手法

II.1 シナリオプランニングとは

II.1.1シナリオプランニングの歴史

シナリオプランニングの原点は、第二次世界大戦中のアメリカ軍の作戦演習にまで遡る。その後、アメリカのシンクタンクであるランド社が民間領域に適用し始め、同社をやめたハマー・カーンが設立したハドソン研究所がさらに大きく発展させた [20]。そして、シナリオプランニングが最も注目されたのは、ロイヤル・ダッチ・シェル社の成功である。第二次世界大戦以降、世界の主要国は石油の重要性を深く認識しその価格安定に取り組んでいたことから、石油価格の高騰を予測できたものはほぼいなかった。しかしながら、ロイヤル・ダッチ・シェル社はシナリオプランニングを早くから導入し、石油価格の高騰の可能性を否定せず、その場合の企業戦略を準備していた。そして第四次中東戦争の勃発による石油危機を唯一乗り切ることによって大躍進を遂げ、1970年には7大メジャー中最下位であったシェル社は1990年には世界最大の石油会社となったのである [21]。

II.1.2シナリオプランニングの定義

シナリオとは、「不確実性に着目して、未来について描いた複数の世界」を指す。シナリオプランニングとは、時代と共に発展しており、その定義は時代や著者によって多少異なるが、「実践シナリオ・プランニング」では、シナリオプランニングについて「将来における不確実な可能性を考える手法」と定義されている [22]。

II.1.3シナリオプランニングの特徴

多くの著書で共通して挙げられているシナリオプランニングの特徴としては、確率に当てはめて絞り込んだ一つの未来に対して予測して対処するのではなく、「どれも起こりうる」という前提のもと、それぞれの世界について考えることである。シナリオプランニングの価値とは、不確実な多数の未来について、視野を広げて思考を促進し続けることで、複数シナリオや戦略等の「直接的な成果物」だけではなく、組織の備えられる土壌の成長等の「間接的な成果」を得ることである。

II.1.4シナリオプランニングの活用例

シナリオプランニングは、シェルの目覚ましい活躍を踏まえ、その後、主に企業戦略策定の手法として発展し、不確実性を増す現代社会において、様々な分野で活用されている [23]。

近年では、従来の企業戦略策定に加えて、気候変動問題へもシナリオプランニングの積極的な活用が行われている。特に、気候変動に関する政府間パネル(IPCC)と気候関連財務情報開示タスクフォース(TCFD)の活動が有名である [24]。

IPCC は、世界気象機関(WMO)及び国連環境計画(UNEP)により 1988 年に設立された研究者集団の国際組織であり、COP(国連気候変動枠組条約締約国会議)に最新の科学的知見を提供するという主目的である。IPCC は、直近では、2023 年に第 6 次評価報告書(AR6)統合報告書(SYR)を公表している [25]。同報告書は現時点で上場企業が年次報告書を公開する際、気候変動が自社に与える影響を報告する箇所ではしばしば参照されている。

TCFD は、金融の安定を司る金融安定理事会(FSB)により「金融機関として、企業の気候関連の情報開示を促進させる」ことを目的として 2015 年に設立された国際組織である。TCFD は、上場企業たるもの、機構問題についての報告書を作成し、開示し、かつその際にシナリオプランニングを行うように全世界の企業に求めている。また、2017 年および 2020 年に公開されたシナリオプランニング活用のガイドラインは翻訳版が公開されている [26] [27]。

パリ協定以降、世界各国が脱炭素に向けた長期目標を発表しており、日本政府も 2020 年にカーボンニュートラルを宣言した。企業は脱炭素化へ向けた経営のシフトと同時に、気候関連の情報開示がますます求められるようになってきている。TCFD のガイドラインは、情報開示のフレームワークにおいても重要な立ち位置を示しており、国内でも多くの企業・機関が同ガイドラインに沿った情報開示を推進している。こうした国内企業・機関の動きを支援・促進するため、例えば、環境省は「TCFD を活用した経営戦略立案のススメ」としてシナリオ分析実践のポイントや、セクター別のシナリオ分析の実践・開示事例を毎年公開している [28]。以下、シナリオプランニングの実践事例として紹介されている一部の企業・機関を記す。

- ・オリックス ・アセットマネジメント ・富士石油 ・九州旅客鉄道 ・西日本鉄道
- ・グンゼ ・信越化学工業 ・日本製紙 ・三井金属鉱業 ・マルハニチロ ・安川電機
- ・アスクル

II.2 シナリオプランニング手法の各ステップの概説

本論文では、「実践シナリオ・プランニング」 [22]を中心として、「シナリオ・プランニングという手法」 [29]や、「TCFD 非金融企業の為のシナリオ分析に関するガイダンス」 [27]をもとに、シナリオプランニング手法を組み立てている¹。本節では各ステップにおける進め方、使用するツール、アウトプット等を概説する (Figure II-1、Table II-1～Table II-7)。

実際に取り組む場合には、7つのステップを1つずつ完璧にしながら進めていくのではなく、時間をかけずに先に進める部分と、基準をもとにアウトプットの是非を判断する部分に分けて進められる。具体的には、7つのステップを以下の通り、3つのブロックに分割して考える。

- ・ シナリオ作成の方向性を決める : ステップ 1
- ・ シナリオを作成する : ステップ 2～ステップ 6
- ・ シナリオをもとに対策を検討する : ステップ 7

3つのブロック間は、原則として後戻りせずに進める。一方で、2つ目の「シナリオを作成する」ブロックでは、考える意義のあるシナリオが作成できるまで、ステップ 2～ステップ 6を場合によっては何度も往復することになる。また、後述する通り、シナリオプランニングでは「外部環境要因」に着目し、その不確実な可能性を考えることになるが、ステップ 2で「外部環境要因を広げる」、その後、ステップ 3～6で「外部環境要因を深める」ことになる。

¹ 数ある著書の中から上記 3点を参考とした理由は、抽象的でノウハウベースの記述が多いシナリオプランニング関連著書の中で、具体的及び体系的並びに各ステップが定型的及び概要の理解が容易であったためである。筆者のように初学者かつ周りにインストラクターもいない中で、シナリオプランニングに興味がある方は、上記 3点のうちいずれかを参考にすることをオススメする。

ループ							
ステップ	1. 事前準備	2. 外部環境要因 リサーチ	3. シナリオドライバー 抽出	4. ベースシナリオ 作成	5. 複数シナリオ 作成	6. シナリオ詳細 分析	7. 対策・戦略 検討
進め方	- プロジェクトメンバー選定 - 現状整理 - 目的とシナリオテーマ設定	- 文献等を使ってシナリオテーマに関連する「外部環境要因候補」を収集 - 統合・集約し、「外部環境要因」を選定	- 外部環境要因を「不確実性」と「影響度」の観点で分類 - 重要な外部環境要因を抽出(右上) - シナリオドライバーを抽出	不確実性マトリクスのうち、不確実性が低く、影響度が高い要因を整理する(左上)	- シナリオドライバーから、軸の作成 2軸の組み合わせ - 複数シナリオの中身の検討	共通の切り口を設定し、複数シナリオの個々のシナリオを具体化	作成した複数シナリオにおける対策・戦略を検討
ツール等	- ダストビン/ダストマン - 影響ピラミッド - テーマ設定の3要素	STEEP分析	- 不確実性マトリクス - システム化	不確実性マトリクス	- 不確実性マトリクス - 十字架モデル(軸)	共通の切り口	風洞実験
アウトプット	- リサーチクエッション - シナリオテーマ	外部環境要因	- 重要な外部環境要因 - シナリオドライバー	ベースシナリオ	複数シナリオ	詳細化された複数シナリオ	共通的な対策

※新井(2021)をもとに筆者修正

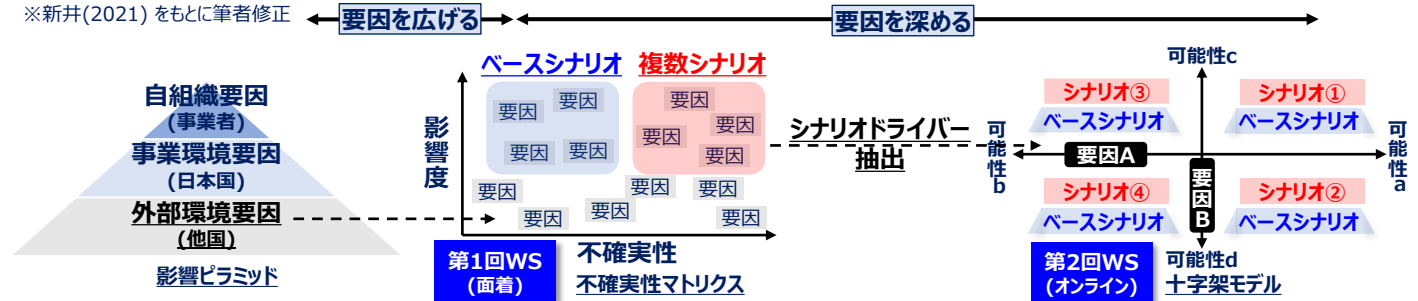


Figure II-1 シナリオプランニングの概要 (新井(2021) [22]をもとに筆者修正)

II.2.1ステップ1：事前準備

Table II-1 ステップ1の概要

1. 事前準備	
進め方	(1) プロジェクトメンバー選定 (2) 現状整理 (3) 目的とシナリオテーマ設定
ツール等	・ ダストビン/ダストマン ・ 年表 ・ 影響ピラミッド ・ シナリオテーマ設定の3要素(時間軸/地理軸/検討スコープ)
アウトプット	・ リサーチクエッション ・ シナリオテーマ

(1) プロジェクトメンバー選定

シナリオプランニングの基本について理解をしているメンバーが1名以上いることを最低条件とする。各メンバーの年齢や性別、部署や専門といったバックグラウンドにも目を向け、全体としてなるべく多様な構成になるように工夫することが重要である。

(2) 現状整理

「ダストビン/ダストマン」というツールが推奨されている。ダストビン(ゴミ箱)は、論文だけではなくネット記事に至るまで、テキスト読んで関係する情報を原文のままで抜き出し、一か所に保存するためのツールである(形式は問わない)。そして、ダストマン(ゴミ収集人)を任じられた仕分け人は、ダストビンの中の多数のデータを漁っていくうちに、データを仕分けできる構造や筋道が直観的に見えてくる、という大変だが創造的な仕事を行うこととなる [24]。

また、過去から現在までの「年表」を自組織・事業環境・外部環境について行うことも推奨されている。シナリオプランニングでは、想定する未来を1つに絞るのではなく複数描くことが基本とされているため、「未来は現在の延長」として捉えるのではなく、「未来は不可確実」として捉えるべきである。一方で、過去を無条件に否定するのではなく、成功や失敗体験等の表面的なところだけでなく、その背後にある個人や組織が積み重ねてきた「資産」に目を向け、未来に向けて変えていくべきもの、変わらずに残しておくべきものを見極めて、それらの活かし方を考えることが重要である。

(3) 目的とシナリオテーマ設定

シナリオプランニングの目的とは、本論文の「リサーチクエッション」である。これ以降、すべてのステップの適否判断において、リサーチクエッションを基準として判断することに留意する。また、シナリオテーマ設定では、「影響ピラミッド」と「時間軸/地理軸/検討テーマ」の2つのフレームワークを活用する。

シナリオテーマ設定のための「影響ピラミッド」とは、**Figure II-2**に示すものであり、上から「自組織」「事業環境」「外部環境」という層に分かれる。自組織は事業環境の影響を受け、さらに事業環境は「外部環境」の影響を受けるとことを示している。シナリオプランニングに取り組む主体としては、一般的に自組織が該当し、コントロールができない要因として「外部環境」が存在する。ここで、コントロールができない不確実な未来を考えるため、シナリオテーマとしては「外部環境」に着目することになる。すなわち、シナリオプランニングとは、「外部環境」の変化の可能性を検討し、それによる事業環境や自社の影響を考えるものである。なお、本論文では、自組織を「事業者」、事業環境を「日本」、外部環境を「他国」としている。

「シナリオテーマ設定の3要素」は、「時間軸」「地理軸」「検討スコープ」であり、3要素をそれぞれ検討した後、3要素を統合する。すなわち、シナリオテーマは、『「時間軸」後までの「地理軸」における「検討スコープ」の環境変化要因』のような形で定義することが可能である。ただし、言葉として自然な書き方を優先することに留意すること。

1番目の「時間軸」としては、不確実性の低い予測と不確実性の高い妄想の中間となる範囲の時間軸が推奨されている。そうすることで、未来の外部環境要因が1つにのみ特定する場合もあれば、多数の可能性が考えられる場合もあり、シナリオプランニングに適しているためである。ただし、あまり先の未来になってしまうと、そもそも現時点で対策を検討する必要性がなくなり、また具体的なデータや情報が取れるか不安である。そのため、最も無難な数字としては「10年後」が推奨されており、経験則から5年区切りの西暦で設定するとデータが揃いやすいこともノウハウとして挙げられる。

2番目の「地理軸」は、シナリオプランニングの目的(リサーチクエッション)に照らして判断することとなる。シナリオプランニングでは外部環境要因に着目するため、一般的な地理軸としては「日本」か「世界」が挙げられるが、仮に「世界」を設定した場合、現状整理すべき情報が膨大となり、難易度が跳ね上がる。そのため、最も無難な地理軸としては「日本」が挙げられる。一方で、「世界」を設定した方がよさそうな場合も、経験則から世界の地域を自分たちにとって意味のある範囲に細分化し、それぞれの範囲を地理軸に設定すると最も効果が高く、結果的に効率よく進めることが可能である。

3 番目の「検討スコープ」としては、プランニングの目的(リサーチクエッション)に照らして考えつつ、リサーチクエッションをそのまま盛り込むことは原則避けることが推奨されている。リサーチクエッション、すなわち日頃の問題意識をシナリオテーマに盛り込んでしまうと、現状の状況を前提とした議論になりがちであり、多様な外部環境の変化を客観的に考えるというよりも、日頃の議論の延長から抜け出せないことがよく起こるためである。検討の視野を広げるためにも、検討する範囲を広げることが望ましい。経験則から、考えたいテーマを含みつつ、視野を広げられるようなスコープとしては、「社会」が挙げられる。



Figure II-2 シナリオプランニングの影響ピラミッド

II.2.2ステップ2：外部環境要因リサーチ

Table II-2 ステップ2の概要

2. 外部環境要因リサーチ	
進め方	(1) 文献等を使ってシナリオテーマに関連する「外部環境要因候補」を収集 (2) 外部環境要因候補を統合・集約し、「外部環境要因」を選定
ツール等	・ STEEP 分析
アウトプット	・ 外部環境要因

(1) 文献等を使ってシナリオテーマに関連する「外部環境要因候補」を収集

STEP1 で作成した「ダストビン」をもとに、外部環境要因候補を可能な限り多く出していく。なお、新規で収集した文献等は適宜ダストビンに反映する。ステップ2で重要なことは、外部環境要因を「広げる」ことであり、質的よりも量的を優先して収集する。

ここで、外部環境要因を広げるための代表的ツールとして、STEEP 分析が挙げられる。STEEP 分析は、社会(Society)、技術(Technology)、経済(Economy)、環境(Environment)、政治(Politics)の観点により、これまで目を向けていなかった視点を得ることが可能である。なお、STEEP はあくまで外部環境要因を広げるために活用するツールであり、収集された要因が STEEP における 5 つの分野のどれに該当するか正確な分類は特段不要である。

(2) 外部環境要因候補を統合・集約し、「外部環境要因」を選定

「外部環境要因候補」のうち、類似のテーマに属するものに対してクラスタリングを行い、統合・集約する形で「外部環境要因」として選定を行う。

II.2.3ステップ3：シナリオドライバー抽出

Table II-3 ステップ3の概要

3. シナリオドライバー抽出	
進め方	(1) 外部環境要因を「不確実性」と「影響度」の観点で分類 (2) 重要な外部環境要因を抽出(右上) (3) シナリオドライバーを選定
ツール等	・ 不確実性マトリクス ・ システム化
アウトプット	・ 重要な外部環境要因 ・ シナリオドライバー

(1) 外部環境要因を「不確実性」と「影響度」の観点で分類

外部環境要因の「不確実性」と「影響度」の高低を分類し、「不確実性マトリクス」上に反映させる。「不確実性マトリクス」は **Figure II-3** の通りであり、縦軸に影響度、横軸に不確実性の大小を示している。ここで、「不確実性」について、未来が1つに特定できるものは不確実性が低く、状態が多数に分岐するものは不確実性が高いと判断する。すなわち、設定した期間の状態において、『外部環境要因が発生する』かつ『発生後の状態が断定できない』または『外部環境要因が発生するかどうか不明』の場合は、不確実性が高いと判断され、『外部環境要因が発生する』かつ『発生後の状態が断定できる』または『外部環境要因が発生しない』の場合は、不確実性が低いと判断される [29]。また、「影響度」については、シナリオテーマに与える影響を基準として高低を分類することになる。

(2) 重要な外部環境要因を抽出(右上)

「不確実性マトリクス」における4象限の位置づけは以下のとおりであり、右上の影響度と不確実性の双方が高い外部環境要因が「重要な外部環境要因」となる。

- ・ 右上象限(影響度高+不確実性高)：「重要な外部環境要因」となる。STEP5で詳述する。
- ・ 左上象限(影響度高+不確実性低)：「ベースシナリオ」となる。STEP4で詳述する。
- ・ 右下象限(影響度低+不確実性高)：検討対象から除外可能。余裕があれば、変化を定点観測。
- ・ 左下象限(影響度低+不確実性低)：検討対象から除外。

(3) シナリオドライバーを選定

上記の右上象限の「重要な外部環境要因」について、因果関係・連動性・相互作用により、分析・集約のシステム化を行い、「シナリオドライバー」を選定する [29]。

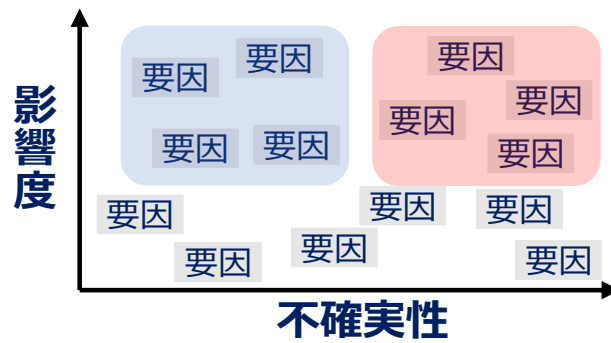


Figure II-3 シナリオプランニングの不確実性マトリクス

II.2.4ステップ4：ベースシナリオ作成

Table II-4 ステップ4の概要

4. ベースシナリオ作成	
進め方	(1) 不確実性マトリクスのうち、不確実性が低く、影響度が高い要因を整理する(左上)
ツール等	・ 不確実性マトリクス
アウトプット	・ ベースシナリオ

(1) 不確実性マトリクスのうち、不確実性が低く、影響度が高い要因を整理する(右上)

本ステップによって、「ベースシナリオ」を得る。ベースシナリオは、すべての複数シナリオの土台となるものである。また、ベースシナリオは複数シナリオを考える上で、「世界観」と「インシデント」として分類・作成される。

II.2.5ステップ5：複数シナリオ作成

Table II-5 ステップ5の概要

5. 複数シナリオ作成	
進め方	(1) シナリオドライバーから、軸の作成 (2) 2軸の組み合わせ (3) 複数シナリオの中身の検討
ツール等	・ 不確実性マトリクス ・ 十字架モデル
アウトプット	・ 複数シナリオ

「複数シナリオ作成」は、**Figure II-4** に示す「十字架モデル」の通り、シナリオドライバーから作成された2つの軸の組み合わせによって実施される。ただし、シナリオドライバーから作成された個々の軸だけを見てもその良し悪しは判断できず、最終的な判断は、2軸を組み合わせる複数シナリオの状態にした上で、リサーチクエッションに照らして、自分たちにとって考える意義があるものか判断が必要である。また、経験則的に、「外部環境ではなく事業環境に関連するもの」や「不確実な状態の自組織への影響があまりにも大きいもの」は原則避けるべきである。

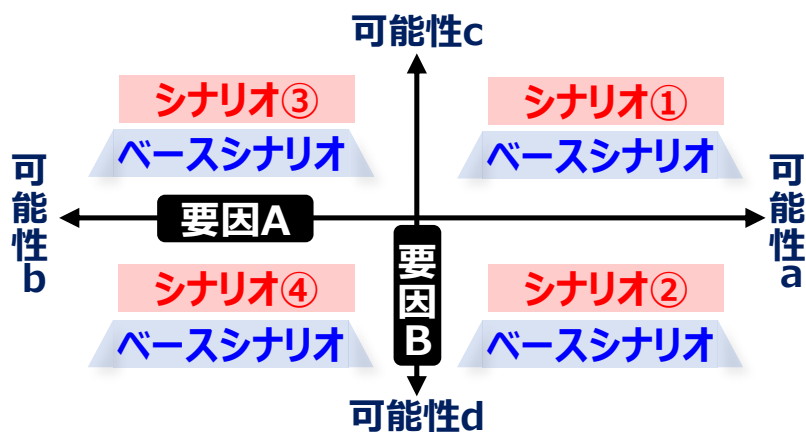


Figure II-4 シナリオプランニングの十字架モデル

(1) シナリオドライバーから、軸の作成

ステップ3で抽出した「シナリオドライバー」をもとに、軸の候補を選び、軸の両端を考
討することで、軸を作成する。軸の作成にあたっては、以下の通り「軸の抽象度」と「軸の
両端のパターン」に注意しながら注意する。

「軸の抽象度」の検討においては、抽象度が高い軸を組み合わせれば複数シナリオの世界
観も抽象度が高いものになり、抽象度が低い軸の場合は抽象度が低く具体的な世界観の複
数シナリオになることに留意する。

「軸の両端のパターン」の検討においては、両端に『「大きく変化する可能性」と「大き
くは変化しない可能性」』または『「プラス方向に変化する可能性」と「マイナス方向に変化
する可能性」』の何れかに落ち着くことが多い。作成した軸の確認のために使用することが
推奨されている。

(2) 2 軸の組み合わせ

複数シナリオは最終的には 2 本の軸を組み合わせることで策定するが、作成段階では、
何本もの軸を作り、さまざまな組み合わせを試すことが一般的である。さまざまな組み合わ
せを試し、自分たちにとって考える意義があるかどうかを考える。

(3) 複数シナリオの中身の検討

複数シナリオのそれぞれの世界観を考えると際は、「もしこんなシナリオが実現したとし
たら、どうなるのだろうか。」という“what if”を問いかけながら、世界観を考えることが重
要である。また、注意点としては、世界観の蓋然性や良し悪しといった主観的な価値判断は
いったん保留し、「シナリオテーマ」に沿って世界観を検討し、「リサーチクエッション」を
もとに最終的なシナリオの適否判断をすることである。

II.2.6ステップ 6：シナリオ詳細分析

Table II-6 ステップ 6 の概要

6. シナリオ詳細作成	
進め方	(1) 共通の切り口を設定し、複数シナリオの個々のシナリオを具体化
ツール等	・ 共通の切り口
アウトプット	・ 詳細化された複数シナリオ

(1) 共通の切り口を設定し、複数シナリオの個々のシナリオを具体化

複数シナリオの内容に自組織が考えたい観点を盛り込むために、「共通の切り口」によって、複数シナリオの各シナリオを詳細化する。共通の切り口として、以下 3 つのカテゴリーを念頭におくことで、様々な切り口が考えやすくなる。

- ・ 登場人物：
それぞれの世界での特定の役割や立場の人が置かれている状況等の違いを考えるために設定する。
- ・ 活動場面：
それぞれの世界での仕事や世界の一場面を切り取って、その状況等の違いを考えるために設定する。
- ・ 考えたい問い：
設定したリサーチクエッションを踏まえて、それぞれの世界で組織や個人が気になっている点についてどのような違いがあるかを考えるために設定する。

また、シナリオを詳細化し、「失敗箇所」を明らかにすることで、対策検討に活かす。

II.2.7ステップ7：対策・戦略検討

Table II-7 ステップ7の概要

7. 対策・戦略検討	
進め方	(1) 作成した複数シナリオにおける対策・戦略を検討
ツール等	・ 風洞実験
アウトプット	・ 共通的な対策

(1) 作成した複数シナリオにおける対策・戦略を検討

作成した複数シナリオにおける失敗箇所に対して「共通的な対策」を立案する。また、共通的な対策について、「対策実装の課題」を考察するとともに、「風洞実験」によって最終チェックが行われ、全てのシナリオで悪影響等の懸念が無いことを確認する。

第Ⅲ章

ワークショップ

第Ⅲ章 ワークショップ

Ⅲ.1 第1回ワークショップ(対面)

- ・ 日時：2024 年 3 月 30 日(土) 10:00-16:20
- ・ 場所：東工大 大岡山キャンパス 研究室学生部屋

- ・ 参加者(7 名)：(*：シナリオプランニングの基本を理解済みの人を指す)
 - A (安全保障の専門家)
 - E, F (原子力技術の専門家)
 - G* (核セキュリティの専門家)
 - B*,C (自衛隊関係者)
 - D (MOT 関係者)

- ・ 議事次第：
 - 10:00-10:30 アイスブレイク/自己紹介
 - 10:30-10:50 全体説明 (STEP 1)
 - 10:50-13:50 WS 前半 (STEP 2-3)
 - 13:50-16:20 WS 後半 (STEP 4-5)

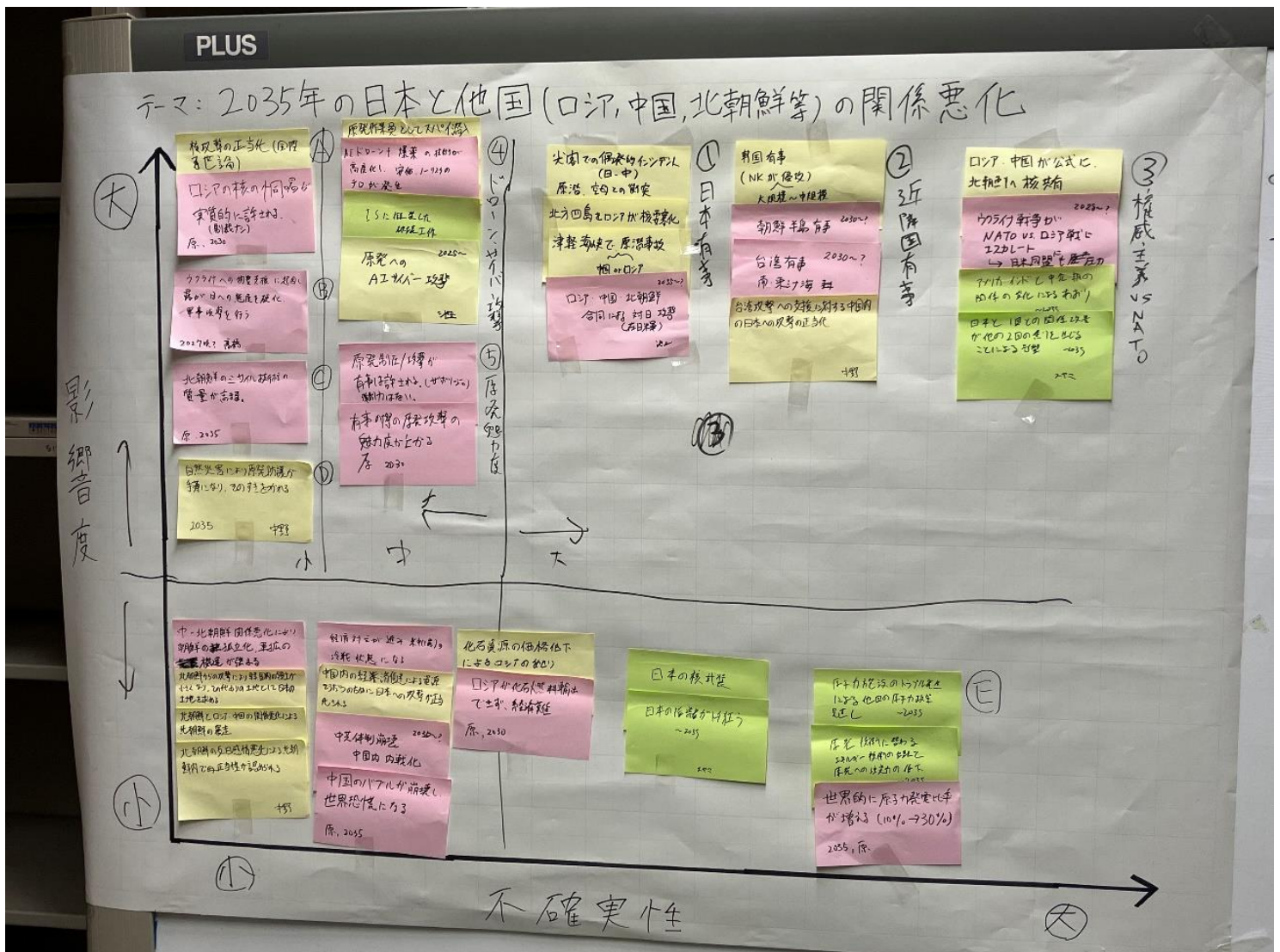


Figure III-1 第1回ワークショップの成果物—不確実性マトリクス—

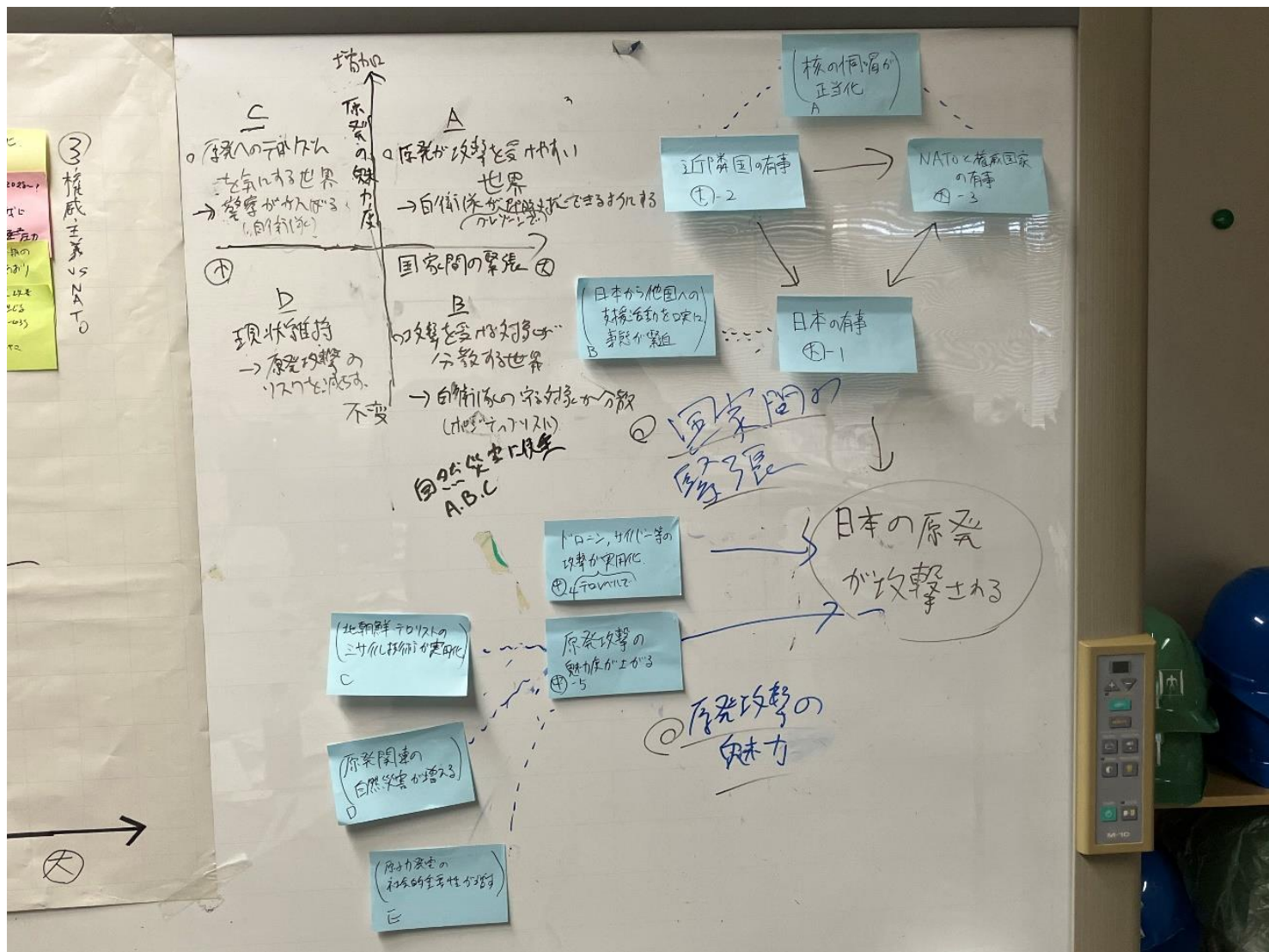


Figure III-2 第1回ワークショップの成果物—シナリオドライバー抽出—

III.2 第2回ワークショップ(オンライン)

- ・ 日時：2024 年 4 月 16 日(火) 18:30-20:30
- ・ 形式：オンライン会議
- ・ 参加者(9 名)：(*：シナリオプランニングの基本を理解済みの人を指す)
 - A (安全保障の専門家)
 - H (原子力技術の専門家)
 - I* (核セキュリティの専門家)
 - B*,C,D (自衛隊関係者)
 - E,F,G (MOT 関係者)
- ・ 議事次第：
 - 18:30-19:00 シナリオ・対策の説明 (STEP 5-7)
 - 19:00-20:30 議論 (STEP 5-7)

III.3 ワークショップにおける留意点

ファシリテーションの心構えとして、メンバーひとりひとりを尊敬することが挙げられる。否定的な意見を控えることは当然として、例えば、チャタムハウスルールの実施、発言とアイデアだしの機会平等や、言葉探しをしている参加者を励ますことが推奨される。また、話しやすい雰囲気を作ることが重要なため、冒頭のメンバー全員の自己紹介やアイスブレイクは原則実施し、ファシリテーターの一方的な説明にならないように、議論の時間を十分にとるべきである。

対面開催時の技法として、ポスト・イットカード等の粘着カードの使い方が挙げられる。カードの並べ方の規則性や、カード間で線を引くことによって、位置関係だけでカード同士の関係性が一目で想像できる。また、外部環境要因をカードに記載するときのルール統一(例：20 文字以内を目安、左下に名前と発生を想定した年代を記載)や、クラスタリング時の色の統一も地味ではあるが重要なノウハウである。なお、筆者らは、788×1085 mm のマス目模造紙の上から、75×127 mm の粘着カードを張り付けていた。

第Ⅳ章

結果と考察

第Ⅳ章 結果と考察

Ⅳ.1 ステップ1：事前準備

(1) プロジェクトメンバー選定

池上研究室の博士学生等を中心として、外部大学の博士学生等も招聘し、プロジェクトメンバー7~9名を選出した。メンバーの専門領域は、安全保障、原子力技術、核セキュリティと多様性に富んだものであった。また、自衛隊関係者や、シナリオプランニングの基本を理解しているメンバーもいたことは幸いであった。

(2) 現状整理

「ダストビン」として、約100個に及ぶ先行研究・コンテンツを収集した。また、「ダストマン」は筆者が行い、「1. 日本の危機対応」「2. ウクライナ侵攻」「3. 軍事攻撃シナリオ」の3つの枠で並び替えをした。最終的には、主な訴求点を以下の7個に分類した。なお、詳細は**付録A**を参考にされたし。

- ① 自衛隊の警察権行動²により、ミリタリーレベルに状況をエスカレートさせる、またはその口実を敵対国に与えるおそれ
- ② 自衛隊の他国支援行動³によって敵対国から日本が報復の対象とされるというおそれから、国会審議が紛糾するおそれ
- ③ 自衛隊の警察権行動²や他国支援行動³のための閣議決定・国会承認に必要な証拠集めが困難、かつ時間を要するおそれ
- ④ 国際社会は、戦争状態の大国に対して集団的自衛権の行使が困難
- ⑤ 戦争状態において、核の恫喝・抑止による実効性が増すおそれ
- ⑥ 戦争状態において、敵対国から原発(特に使用済燃料プール)が狙われるおそれ
- ⑦ 日本では原子力技術に関するセキュリティクリアランスが整っていないことの弊害

² 警察権行動：治安出動、海上警備出動、警護出動、等

³ 他国支援：後方支援活動、協力支援活動、国際平和協力活動、等

(3) 目的とシナリオテーマ設定

シナリオプランニングの目的、すなわち「リサーチクエッション」について、再掲となるが以下の通り設定した。

RQ1: グレーゾーン事態における原発への戦争未満の軍事攻撃のうち、不確実性と影響度が大きいシナリオは何か。
RQ2: 日本と事業者にとって、複数シナリオへの共通的な対策と、対策実装の課題は何か。
RQ3: 既設の原発を浮体式原発(OFNP)にリプレイスした場合、各シナリオにおけるメリット・デメリットは何か。

シナリオプランニング全般の前提となる「影響ピラミッド」に則し、本論文では、自組織要因には「事業者」、事業環境要因には「日本国」、そして検討の中核となる外部環境要因には「他国」を設定した。また、時間軸/地理軸/検討スコープの3要素をもとに、『「時間軸」後までの「地理軸」における「検討スコープ」の環境変化要因』のフレームワークに当てはめることで、以下の通り設定した。

【シナリオテーマ】

2035年までの日本の近隣国(中露朝等)における対日・原発の環境変化要因

1番目の「時間軸」としては、不確実性の低い予測と不確実性の高い妄想の中間となる最も無難な数値である10年後付近で、5年区切りの西暦ということで「2035年」を選定した。

2番目の「地理軸」としては、外部環境要因として「他国」を設定していることから、日本ではなく「世界」に着目した。一方で、情報量や難易度に留意しつつ、本論文によって意味のある地理軸を検討した結果、「日本の近隣国(中露朝等)」を選定した。

3番目の「検討スコープ」としては、リサーチクエッションの内容を含みつつ、さらに視野を広げられるようなスコープを検討した結果、「対日・原発」を選定した。

IV.2 ステップ2：外部環境要因リサーチ

(1) 文献等を使ってシナリオテーマに関連する「外部環境要因候補」を収集

(2) 外部環境要因候補を統合・集約し、「外部環境要因」を選定

「III.1 節 第1回ワークショップ(対面)」により、「外部環境要因候補」を収集し、「外部環境要因」を選定した。結果を **Table IV-1** に示す。

Table IV-1 外部環境要因候補と外部環境要因

外部環境要因	影響度	不確実性	外部環境要因候補 [年代,作成者]
1 日本-他国の有事	高	高	尖閣での日-中の偶発的インシデント。原潜・空母との衝突 [2030,C]
			北方四島をロシアが核要塞化[2035,C]
			津軽海峡で、中国またはロシアが原潜事故 [2035,C]
			露-中-北朝鮮合同による対日(または在日米軍)攻撃[2035,A]
2 近隣国間の有事	高	高	韓国有事(北朝鮮が大~中規模侵攻) [2035,C]
			朝鮮半島有事[2030,A]
			台湾有事。南・東シナ海封鎖[2030,A]
			台湾攻撃への支援に対する中国内の日本への攻撃の正当化 [2035,F]
3 NATO-権威国の有事	高	高	ロシア中国が公式に北朝鮮へ核共有 [2035,C]
			ウクライナ戦争が NATO vs. ロシア戦にエスカレートし、日米同盟にも圧力 [2028,A]
			アメリカ・インドと中-露-北朝鮮の関係の変化による煽り[2035,D]
			日本と1国との関係改善が他の2国の焦りを生じることによる影響 [2035,D]
4 他国支援による緊張感	高	高	ウクライナへの物資支援に起因し、露が日への態度を硬化。軍事攻撃を行う [2027,B]
5 AI実装等によるテロ横行	高	中	原発作業員として(原発への)スパイ潜入 [2030,F]
			AIドローン+爆薬の技術が高度化し、安価・ノーリスクのテロが発生 [2027,B]
			ISに偽装した破壊工作 [2030,D]
			原発へのAIサイバー攻撃 [2025,A]
6 原発攻撃の魅力度	高	中	原発制圧/攻撃が有事は許される。(ザポリージャ原発の件でも)強制力は無い [2030,G]
			有事の際の原発攻撃の魅力度が上がる [2030,G]

外部環境要因	影響度	不確実性	外部環境要因候補 [年代,作成者]
A 核の恫喝の実行性	高	低	核攻撃の(国際世論からの)正当化 [2030,F]
			露の核の恫喝が実質的に許される。制裁無し [2030,G]
B 北朝鮮のミサイル実用	高	低	北朝鮮のミサイル技術の質・量が高まる [2035,G]
C 大きな自然災害	高	低	自然災害により原発防護が手薄になりその隙を突かれる [2035,F]
D 原発の重要性	低	高	原子力施設のトラブル発生による他国の原子力政策見直し [2035,D]
			原発技術に替わるエネルギー技術の台頭と原発への注意力の低下 [2030,D]
			世界的な原子力発電比率が増える(10%→30%) [2035,F]
a 北朝鮮の暴走	低	低	中-北朝鮮関係悪化により北朝鮮の孤立化。軍拡の機運が高まる [2035,E]
			北朝鮮からの攻撃により韓国内の領土が小さくなり、その代わりの土地として日本の土地を求める [2035,F]
			北朝鮮と露中の関係悪化による北朝鮮の暴走 [2035,F]
			北朝鮮の反日感情悪化による北朝鮮内での正当性が認められる [2035,F]
b 中国の暴走	低	低	経済対立が進み米-中(露)が冷戦状態になる [2030,B]
			中国の経済低迷による資源争奪の為に日本への攻撃が正当化される [2035,F]
			中共体制崩壊。中国内内戦化 [2030,A]
			中国のバブルが崩壊し、世界恐慌になる [2035,G]
c ロシアの暴走	低	中	化石資源の価格低下によるロシアの焦り [2035,E]
			ロシアが化石燃料輸出できず、経済難 [2030,G]
d 日本の核武装	低	中	日本の核武装 [2035,D]
			日本の指導者が暴走する [2035,D]

IV.3 ステップ3：シナリオドライバー抽出

(1) 外部環境要因を「不確実性」と「影響度」の観点で分類

「Ⅲ.1 節 第1回ワークショップ(対面)」により、不確実性マトリクスを用いて外部環境要因について「不確実性」と「影響度」の観点で分類した。結果を Figure IV-1 に示す。

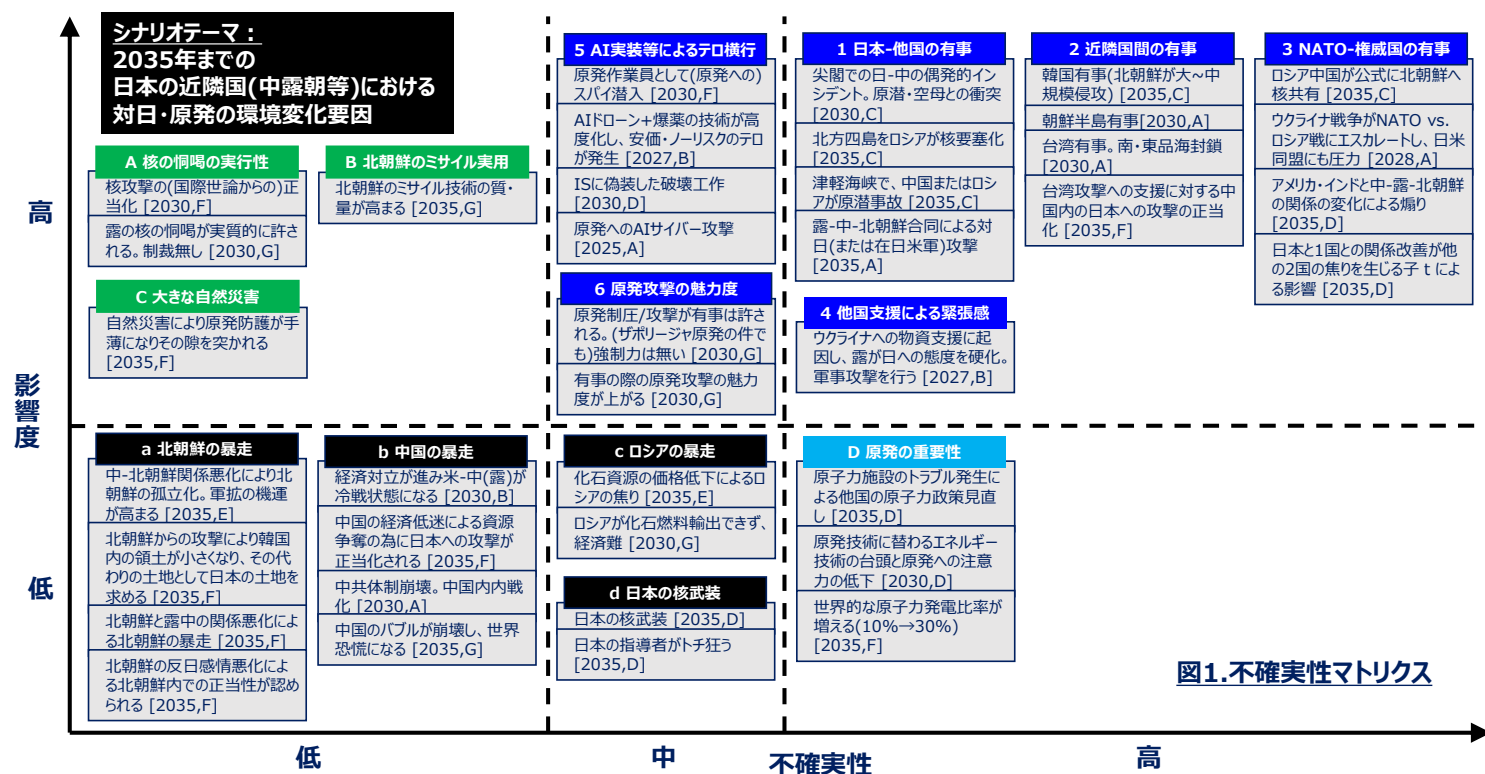


図1.不確実性マトリクス

Figure IV-1 不確実性マトリクスによる外部環境要因の分類結果

(2) 重要な外部環境要因を抽出(右上)

「Ⅲ.1 節 第1回ワークショップ(対面)」により、外部環境要因の中から、「影響度：高」かつ「不確実性：高/中」であるものを「重要な外部環境要因」として選定した。結果は、以下のとおりである。(Table IV-1 及び Figure IV-1 中の外部環境要因 1~6(青字)が該当)

- ・ 1 日本-他国の有事
- ・ 2 近隣国間の有事
- ・ 3 NATO-権威国の有事
- ・ 4 他国支援による緊張感
- ・ 5 AI 実装等によるテロ横行
- ・ 6 原発攻撃の魅力度

(3) シナリオドライバーを選定

「Ⅲ.1 節 第1回ワークショップ(対面)」により、「重要な外部環境要因」等について、分析・集約のシステム化を行い、「シナリオドライバー」を選定した(Figure IV-2)。結果として、「シナリオドライバー」として以下2点が選定された。

- ・ 国家間の緊張感
- ・ 原発攻撃の魅力度⁴

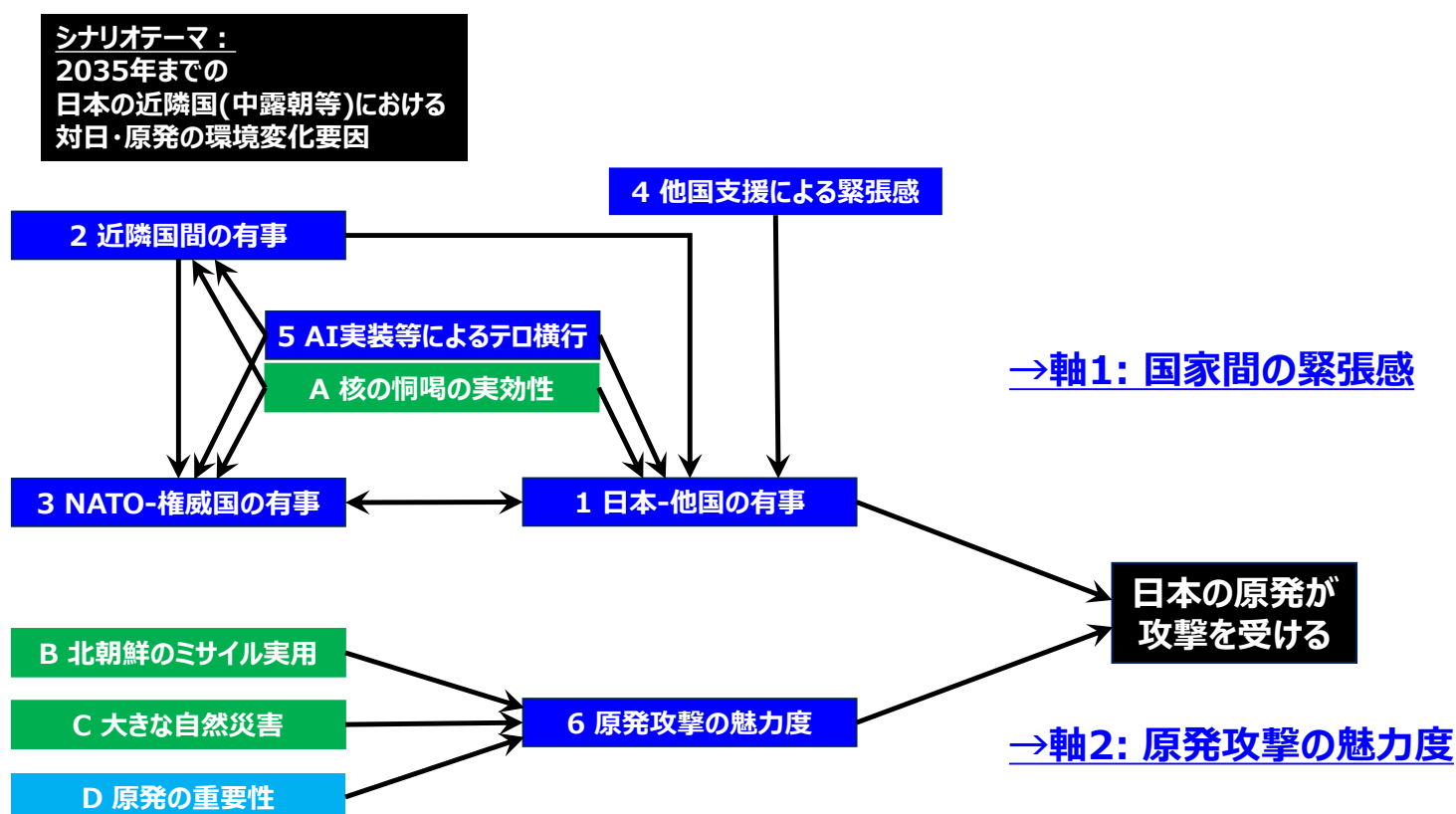


Figure IV-2 システム化によるシナリオドライバーの選定結果

⁴ 「原発攻撃の魅力度」、すなわち原発が攻撃の対象となる理由について、「テロリスト」による攻撃の観点では、「事故による直接的な周辺公衆への放射線被害」や、「事故の有無にかかわらず国内の混乱」が挙げられる。一方で、「国家」による軍事攻撃の観点では、「原発の人質作戦や停電による“個別的自衛能力”の低下」や「国内の混乱による“集団的自衛能力”や“集団的安全保障”の低下」が挙げられる。特に、集団的自衛能力や集団的安全保障の低下について、例えば、韓国や台湾といった日米の同盟国で有事が起きた際に、日本の原発が攻撃されることによって国内は混乱し、日本から在日米軍への支援等に支障をきたすことで、日本の存立または平和及び安全が脅かされるおそれがある。

IV.4 ステップ4：ベースシナリオ作成

(1) 不確実性マトリクスのうち、不確実性が低く、影響度が高い要因を整理する(右上)外部環境要因の中から「影響度：高」かつ「不確実性：低」であるものを、「ベースシナリオ」として選定した(Table IV-1 及び Figure IV-1 中の外部環境要因 A~C(緑字)が該当)。さらに、ベースシナリオとリサーチクエッションをもとに、複数シナリオにおけるベースシナリオの世界観とインシデントとして分類・作成した。そして、「Ⅲ.2 節 第2回ワークショップ(オンライン)」にて議論を行った。

結果は、以下のとおりである。

- ・ ベースシナリオ(世界観)：
 - 核の恫喝の実効性は増す(外部環境要因「A 核の恫喝が実効性」より)
 - 北朝鮮のミサイルは実用化される(外部環境要因「B 北朝鮮のミサイル実用」より)
- ・ ベースシナリオ(インシデント)：
 - 日本の原発付近で震度6弱の地震が発生(外部環境要因「C 大きな自然災害」より)
 - 日本の原発に正体不明の爆弾搭載型のドローン4基が襲撃。プラスチック爆弾/成形炸薬を各1発ずつ搭載(リサーチクエッションより)

IV.5 ステップ5：複数シナリオ作成

(1) シナリオドライバーから、軸の作成

2つの「シナリオドライバー」をもとに、軸の両端を検討し、以下の通り2つの「軸」を作成した。

- ・ 国家間の緊張感（両端：不変⇔増大）
- ・ 原発攻撃の魅力度（両端：不変⇔増大）

(2) 2軸の組み合わせ

上記の2軸を組み合わせることで、「十字架モデル」上の4象限のシナリオについて、「シナリオテーマ」に沿った世界観を検討した。

(3) 複数シナリオの中身の検討

検討した十字架モデル上の4象限のシナリオについて、「リサーチクエッション」をもとに適否を検討し、「III.2節 第2回ワークショップ(オンライン)」における議論も踏まえて、最終的な複数シナリオとして確定した。複数シナリオの結果を Figure IV-3 に示す。

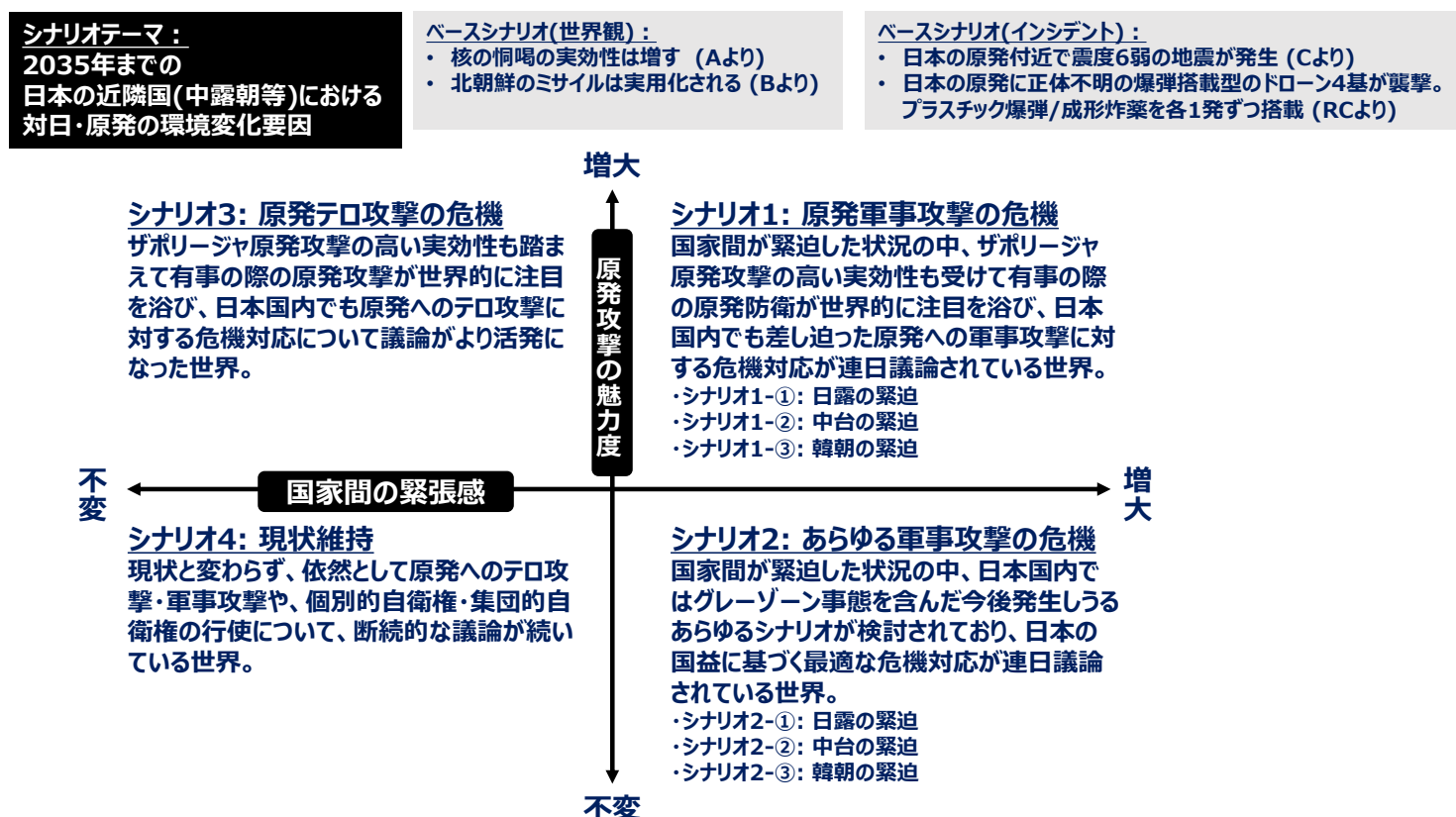


Figure IV-3 十字架モデルによる複数シナリオの結果

IV.5.1 シナリオ 1：原発への軍事攻撃の危機

国家間が緊迫した状況の中、ザポリージャ原発攻撃の高い実効性も受けて有事の際の原発防衛が世界的に注目を浴び、日本国内でも差し迫った原発への軍事攻撃に対する危機対応が連日議論されている世界。さらに、シナリオは以下 3 パターンに分岐される。

- ・シナリオ 1-①: 日露の緊迫
- ・シナリオ 1-②: 中台の緊迫
- ・シナリオ 1-③: 韓朝の緊迫

IV.5.2 シナリオ 2：あらゆる対象への軍事攻撃の危機

国家間が緊迫した状況の中、日本国内ではグレーゾーン事態を含んだ今後発生しうるあらゆるシナリオが検討されており、日本の国益に基づく最適な危機対応が連日議論されている世界。さらに、シナリオは以下 3 パターンに分岐される。

- ・シナリオ 2-①: 日露の緊迫
- ・シナリオ 2-②: 中台の緊迫
- ・シナリオ 2-③: 韓朝の緊迫

IV.5.3 シナリオ 3：原発へのテロ攻撃の危機

ザポリージャ原発攻撃の高い実効性も踏まえて有事の際の原発攻撃が世界的に注目を浴び、日本国内でも原発へのテロ攻撃に対する危機対応について議論がより活発になった世界。

IV.5.4 シナリオ 4：現状維持

現状と変わらず、依然として原発へのテロ攻撃・軍事攻撃や、個別的自衛権・集団的自衛権の行使について、断続的な議論が続いている世界。

IV.6 ステップ 6：シナリオ詳細分析

複数シナリオに対して、「共通の切り口」を設定することで、個々のシナリオを具体化した。本論文では、リサーチクエッションや踏まえて、共通の切り口として「日本政府」および「事業者」を設定した。よって、具体化した個々のシナリオとそれに対応する日本および事業者の対応を記述した。また、次のステップの対策検討に資するため、詳細シナリオの対応における「失敗箇所」を検討した。これらの検討内容をもとに、「III.2 節 第 2 回ワークショップ（オンライン）」にて議論を行い、詳細シナリオを確定した。

IV.6.1 シナリオ 1：原発への軍事攻撃の危機

IV.6.1.1 シナリオ 1—①：日本とロシアが緊迫した状況

【シナリオの詳細】

ロシアは北方領土・オホーツク海を核要塞化し、複数回の軍事演習を行うとともに、戦闘機も日本の領空侵犯を繰り返すという緊迫した状況。さらに、津軽海峡では多数のロシアの軍艦が公海部分を往来していたが、日本のテロリストが仕掛けた水雷によってロシア軍艦の一隻が沈没したというロシアの主張の下、日露間は一触即発の状況にエスカレートした。

加えて、ザポリージャ原発攻撃の高い実効性を受けて、ロシアは日本のウクライナ支援の報復として、日本の原発攻撃を強く示唆している。

さらに、日本のある原発付近で震度 6 弱の地震が発生し、その数日後、正体不明の爆弾搭載型のドローン 4 基が当該原発付近で出沒・襲撃を開始した。事前に対ドローンの総合演習を行っていた警察の原発特別警備部隊はネットランチャー・電波妨害装置等でドローン 4 基すべてを無力化した。よって、核燃料の損傷や放射性物質の漏えいは無かった。

よって、日露間の緊張感と原発攻撃の魅力度は増大している。

(1) 日本の対応

政府は、事態対処法に則り、「武力攻撃予測事態」を宣言し、日本防衛のため対ロシアへの「防衛出動待機」を自衛隊に命じた。また、「日米防衛協力のための指針」(ガイドライン)に則り、自衛隊の支援を米国に要請。米国は速やかに対ロシアの日米共同作戦を実施した。その結果、ロシアから日本への軍事攻撃に対して、防衛出動待機と日米同盟による「抑止力」によって、日露間の武力衝突を回避した。最終的には、継続的な「外交努力」により、日露間の緊張感の緩和に成功した。

政府は、日露間の緊張感が緩和されるまでの間、すべての国内原発への「治安出動」を自衛隊に命じ、警察・海上保安庁に加えて自衛隊による警備も行われるようになり、原発攻撃の魅力度の緩和に成功した。

(2) 事業者の対応

当該原発は震度 6 弱の地震によって自動停止し、安全系作動により冷温停止に向かった。また、武力攻撃予測事態下において、国民保護法に則り、政府の命令により事業者はすべての国内原発を停止した。

IV.6.1.2 シナリオ 1-②：中国と台湾が緊迫した状況⁵

【シナリオの詳細】

台湾国内では独立運動が拡大し、独立の賛成派と反対派が激しく衝突し、中国は東シナ海から台湾海峡にかけての海域で軍事演習を複数回実施する緊迫した状況。さらに、台湾のテロリストが中国の軍艦に攻撃を仕掛けたという中国の主張の下、中台の巡視艇が一時交戦状態となり、双方中破することで、中台間は一触即発の状況にエスカレートした。米国は台湾関係法に基づき軍事行動を含む確固たる台湾防衛の措置をとる姿勢を明らかにしており、米国は日米安保条約に則り、日本からの各種支援を要請した。

加えて、ザポリージャ原発攻撃の高い実効性を受けて、有事の際の敵同盟国の原発攻撃による集団的自衛・集団的安全保障の妨害は戦略の常套手段となっている。

さらに、日本のある原発付近で震度 6 弱の地震が発生し、その数日後、正体不明の爆弾搭載型のドローン 4 基が当該原発付近で出沒・襲撃を開始した。事前に対ドローンの総合演習を行っていた警察の原発特別警備部隊はネットランチャー・電波妨害装置等でドローン 4 基すべてを無力化した。よって、核燃料の損傷や放射性物質の漏えいは無かった。

よって、中台間の緊張感と原発攻撃の魅力度は増大している。

(1) 日本の対応

政府は、警察・海上保安庁に加えて、自衛隊による原発警備を目的として、すべての国内原発への「治安出動」を検討したが、ミリタリーレベルに状況をエスカレートさせる、またはその口実を敵国に与えることをおそれた。その結果、国内原発への治安出動は発出されず、原発攻撃の魅力度の緩和に失敗した【失敗 1】。

政府は、重要影響事態法に則り、米軍と台湾支援を目的として、「重要影響事態」下における自衛隊による「後方支援活動等」について、閣議決定と原則事前となる国会承認を目指した。その結果、米台支援の「後方支援活動等」によって、日本が中国から報復の標的にされるというおそれから日本の世論が割れ、それを追い風に野党が反対し、国会の審議は紛糾した。日本が速やかに行動できないことにより、米中台に対して誤ったシグナルを送ることとなり、多国間同盟による「抑止力」と「外交努力」が十分に機能せず、中台間の緊張感の緩和に失敗した【失敗 2】。

(2) 事業者の対応

当該原発は震度 6 弱の地震によって自動停止し、安全系作動により冷温停止に向かった。

⁵ 中台の台湾有事シナリオは、主に笹川平和財団の報告書(2021)を参考とした [18]。

IV.6.1.3 シナリオ 1－③：韓国と朝鮮が緊迫した状況⁶

【シナリオの詳細】

北朝鮮が核弾頭をミサイルに搭載することに成功し、北朝鮮が実践で有効な核攻撃能力を有するに至った。その後、北朝鮮で未曾有の大干ばつが発生し、食糧不足等により大量の餓死者が発生。国連による人道的な食糧・経済的支援では不足と抗議し、さらなる支援を要求したため、韓国等は核攻撃能力の廃棄を交換条件にしたところ、北朝鮮はそれを拒絶し、韓朝間は一触即発の状況にエスカレートした。米韓両国は在韓米軍を含めて連携して北朝鮮に対応することとしており、日本へも各種支援を要請した。加えて、ザボリージャ原発攻撃の高い実効性を受けて、有事の際の敵同盟国の原発攻撃による集団的自衛・集団的安全保障の妨害は戦略の常套手段となっている。

さらに、日本のある原発付近で震度 6 弱の地震が発生し、その数日後、正体不明の爆弾搭載型のドローン 4 基が当該原発付近で出沒・襲撃を開始した。事前に対ドローンの総合演習を行っていた警察の原発特別警備部隊はネットランチャー・電波妨害装置等でドローン 4 基すべてを無力化した。よって、核燃料の損傷や放射性物質の漏えいは無かった。

よって、韓朝間の緊張感と原発攻撃の魅力度は増大している。

(1) 日本の対応 ※上記シナリオ 1－②と大宗同様。

政府は、警察・海上保安庁に加えて、自衛隊による原発警備を目的として、すべての国内原発への「治安出動」を検討したが、ミリタリーレベルに状況をエスカレートさせる、またはその口実を敵国に与えることをおそれた。その結果、国内原発への治安出動は発出されず、原発攻撃の魅力度の緩和に失敗した【失敗 1】。

政府は、重要影響事態法に則り、米軍と韓国支援を目的として、「重要影響事態」下における自衛隊による「後方支援活動等」について、閣議決定と原則事前となる国会承認を目指した。その結果、米韓支援の「後方支援活動等」によって、日本が北朝鮮から報復の標的にされるというおそれから日本の世論が割れ、それを追い風に野党が反対し、国会の審議は紛糾した。日本が速やかに行動できないことにより、米韓朝に対して誤ったシグナルを送ることとなり、多国間同盟による「抑止力」と「外交努力」が十分に機能せず、韓朝間の緊張感の緩和に失敗した【失敗 2】。

(2) 事業者の対応 ※上記シナリオ 1－②と大宗同様。

当該原発は震度 6 弱の地震によって自動停止し、安全系作動により冷温停止に向かった。

⁶ 韓朝の朝鮮半島有事シナリオは、主に森(2016)を参考とした [17]。

IV.6.2 シナリオ 2：あらゆる対象への軍事攻撃の危機

IV.6.2.1 シナリオ 2—①：日本とロシアが緊迫した状況

【シナリオの詳細】

ロシアは北方領土・オホーツク海を核要塞化し、複数回の軍事演習を行うとともに、戦闘機も日本の領空侵犯を繰り返すという緊迫した状況。さらに、津軽海峡では多数のロシアの軍艦が公海部分を往来していたが、日本のテロリストが仕掛けた水雷によってロシア軍艦の一隻が沈没したというロシアの主張の下、日露間は一触即発の状況にエスカレートした。

日本国内ではグレーゾーン事態を含んだ今後発生しうるあらゆるシナリオが検討されており、国益に基づく最適な危機対応が連日議論されている。

さらに、日本のある原発付近で震度 6 弱の地震が発生し、その数日後、正体不明の爆弾搭載型のドローン 4 基が当該原発付近で出沒・襲撃を開始した。不意を突かれた警察の原発特別警備部隊はネットランチャー等でドローン 3 基を無力化したが、残る 1 基の爆撃により、使用済燃料プールの建屋上部に小さい孔が開いた。よって、使用済燃料の損傷や放射性物質の漏えいは無かったが、原発建屋の一部損傷によって日本国内に混乱が広がった。

よって、日露間の緊張感は増大している。

(1) 日本の対応

政府は、事態対処法に則り、「武力攻撃予測事態」を宣言し、日本防衛のため対ロシアへの「防衛出動待機」を自衛隊に命じた。また、「日米防衛協力のための指針」(ガイドライン)に則り、自衛隊の支援を米国に要請。米国は速やかに対ロシアの日米共同作戦を実施した。その結果、ロシアから日本への軍事攻撃に対して、防衛出動待機と日米同盟による「抑止力」によって、日露間の武力衝突を回避した。最終的には、継続的な「外交努力」により、日露間の緊張感の緩和に成功した。

政府は、日露間の緊張感が緩和されるまでの間、自衛隊による津軽海峡周辺の「海上警備行動」、自衛隊施設等の「警護出動」、原発への「治安出動」等を検討し、その前提となる閣議決定・国会承認のために必要な「証拠集め」に注力した。加えて、多数の行動の候補に対して、適切なリソース配分を検討した。その結果、意思疎通の難しい敵対国等に関する正確な情報収集や分析は困難を極め、証拠集めに失敗したため、自衛隊は行動できず、国益に基づく最適な危機対応に失敗した【失敗 3】。

(2) 事業者の対応

当該原発は震度 6 弱の地震によって自動停止し、安全系作動により冷温停止に向かった。
また、武力攻撃予測事態下において、国民保護法に則り、政府の命令により事業者は当該原発のみを停止とした。

事業者は、爆弾搭載型ドローンの対策と、使用済燃料プールの防護を今後強化することとなった【失敗 4】。

IV.6.2.2 シナリオ 2-②：中国と台湾が緊迫した状況⁵

【シナリオの詳細】

台湾国内では独立運動が拡大し、独立の賛成派と反対派が激しく衝突し、中国は東シナ海から台湾海峡にかけての海域で軍事演習を複数回実施する緊迫した状況。さらに、台湾のテロリストが中国の軍艦に攻撃を仕掛けたという中国の主張の下、中台の巡視艇が一時交戦状態となり、双方中破することで、中台間は一触即発の状況にエスカレートした。米国は台湾関係法に基づき軍事行動を含む確固たる台湾防衛の措置をとる姿勢を明らかにしており、米国は日米安保条約に則り、日本からの各種支援を要請した。

さらに、日本のある原発付近で震度 6 弱の地震が発生し、その数日後、正体不明の爆弾搭載型のドローン 4 基が当該原発付近で出沒・襲撃を開始した。不意を突かれた警察の原発特別警備部隊はネットランチャー等でドローン 3 基を無力化したが、残る 1 基の爆撃により、使用済燃料プールの建屋上部に小さい孔が開いた。よって、使用済燃料の損傷や放射性物質の漏えいは無かったが、原発建屋の一部損傷によって日本国内に混乱が広がった。

よって、中台間の緊張感は増大している。

(1) 日本の対応

政府は、重要影響事態法に則り、米軍と台湾支援を目的として、「重要影響事態」下における自衛隊による「後方支援活動等」について、閣議決定と原則事前となる国会承認を目指した。その結果、米台支援の「後方支援活動等」によって、日本が中国から報復の標的にされるのではないかというおそれから日本の世論が割れ、それを追い風に野党が反対し、国会の審議は紛糾した。日本が速やかに行動できないことにより、米中台に対して誤ったシグナルを送ることとなり、多国間同盟による「抑止力」と「外交努力」が十分に機能せず、中台間の緊張感の緩和に失敗した【失敗 2】。

(2) 事業者の対応

当該原発は震度 6 弱の地震によって自動停止し、安全系作動により冷温停止に向かった。

事業者は、爆弾搭載型ドローンの対策と、使用済燃料プールの防護を今後強化することとなった【失敗 4】。

【シナリオの詳細】

北朝鮮が核弾頭をミサイルに搭載することに成功し、北朝鮮が実践で有効な核攻撃能力を有するに至った。その後、北朝鮮で未曾有の大干ばつが発生し、食糧不足等により大量の餓死者が発生。国連による人道的な食糧・経済的支援では不足と抗議し、さらなる支援を要求したため、韓国等は核攻撃能力の廃棄を交換条件にしたところ、北朝鮮はそれを拒絶し、韓朝間は一触即発の状況にエスカレートした。米韓両国は在韓米軍を含めて連携して北朝鮮に対応することとしており、日本へも各種支援を要請した。

さらに、日本のある原発付近で震度 6 弱の地震が発生し、その数日後、正体不明の爆弾搭載型のドローン 4 基が当該原発付近で出沒・襲撃を開始した。不意を突かれた警察の原発特別警備部隊はネットランチャー等でドローン 3 基を無力化したが、残る 1 基の爆撃により、使用済燃料プールの建屋上部に小さい孔が開いた。よって、使用済燃料の損傷や放射性物質の漏えいは無かったが、原発建屋の一部損傷によって日本国内に混乱が広がった。

よって、韓朝間の緊張感は増大している。

(1) 日本の対応

上記シナリオ 2－②と大宗同様。

政府は、重要影響事態法に則り、米軍と台湾支援を目的として、「重要影響事態」下における自衛隊による「後方支援活動等」について、閣議決定と原則事前となる国会承認を目指した。その結果、米韓支援の「後方支援活動等」によって、日本が北朝鮮から報復の標的にされるのではないかというおそれから日本の世論が割れ、それを追い風に野党が反対し、国会の審議は紛糾した。日本が速やかに行動できないことにより、米韓朝に対して誤ったシグナルを送ることとなり、多国間同盟による「抑止力」と「外交努力」が十分に機能せず、韓朝間の緊張感の緩和に失敗した【失敗 2】。

(2) 事業者の対応 上記シナリオ 2－②と大宗同様。

当該原発は震度 6 弱の地震によって自動停止し、安全系作動により冷温停止に向かった。

事業者は、爆弾搭載型ドローンの対策と、使用済燃料プールの防護を今後強化することとなった【失敗 4】。

IV.6.3 シナリオ 3：原発へのテロ攻撃の危機

【シナリオの詳細】

先進国の国家転覆を目的として、真偽不明なダーティボムの所有を公言する非国家主体の国際的テロリスト集団から、日本が断続的にサイバー攻撃を受けており、国内 ATM、交通機関、インターネット回線等の一部ダウン・復旧が繰り返し発生しており、政府が対応に追われている状況。加えて、ザポリージャ原発攻撃の高い実効性を受けて、有事の際の敵同盟国の原発攻撃による集団的自衛・集団的安全保障の妨害は戦略の常套手段となっている。

さらに、日本のある原発付近で震度 6 弱の地震が発生し、その数日後、正体不明の爆弾搭載型のドローン 4 基が当該原発付近で出沒・襲撃を開始した。事前に対ドローンの総合演習を行っていた警察の原発特別警備部隊はネットランチャー・電波妨害装置等でドローン 4 基すべてを無力化した。よって、核燃料の損傷や放射性物質の漏えいは無かった。

よって、原発攻撃の魅力度は増大している。

(1) 日本の対応

政府は当分の間、すべての国内原発への「治安出動」を自衛隊に命じ、警察・海上保安庁に加えて自衛隊による警備も行われるようになり、原発攻撃の魅力度の緩和に成功した。

(2) 事業者の対応

当該原発は震度 6 弱の地震によって自動停止し、安全系作動により冷温停止に向かった。

IV.6.4 シナリオ 4：現状維持

【シナリオの詳細】

先進国の国家転覆を目的として、真偽不明なダーティボムの所有を公言する非国家主体の国際的テロリスト集団から、日本が断続的にサイバー攻撃を受けており、国内 ATM、交通機関、インターネット回線等の一部ダウン・復旧が繰り返し発生しており、政府が対応に追われている状況。

さらに、日本のある原発付近で震度 6 弱の地震が発生し、その数日後、正体不明の爆弾搭載型のドローン 4 基が当該原発付近で出沒・襲撃を開始した。不意を突かれた警察の原発特別警備部隊はネットランチャー等でドローン 3 基を無力化したが、残る 1 基の爆撃により、使用済燃料プールの建屋上部に小さい孔が開いた。よって、使用済燃料の損傷や放射性物質の漏えいは無かったが、原発建屋の一部損傷によって日本国内に混乱が広がった。

(1) 日本の対応

特になし。

(2) 事業者の対応

当該原発は震度 6 弱の地震によって自動停止し、安全系作動により冷温停止に向かった。

事業者は、爆弾搭載型ドローンの対策と、使用済燃料プールの防護を今後強化することとなった【要対策 4】。

IV.7 ステップ7：対策・戦略検討

IV.7.1 シナリオ上の失敗箇所への共通的な対策及び対策実装の課題

複数シナリオにおける「失敗箇所」に対して、日本および事業者の「共通的な対策」を立案するとともに、「対策実装の課題」を考案した。また、「風洞実験」によって対策の最終チェックを行い、全てのシナリオで悪影響等の懸念が無いことを確認した。これらの検討内容をもとに、「III.2 節 第2回ワークショップ(オンライン)」にて議論を行い、対策等を提示した。

【シナリオ上の失敗箇所1】(原発固有)

政府は、警察・海上保安庁に加えて、自衛隊による原発警備を目的として、すべての国内原発への「治安出動」を検討したが、ミリタリーレベルに状況をエスカレートさせる、またはその口実を敵国に与えることをおそれた。その結果、国内原発への治安出動は発出されず、原発攻撃の魅力度の緩和に失敗した。

(1) 共通的な対策(日本)

グレーゾーン事態における自衛隊の原発警備について、「法制度」だけではなく、「現実的」にも実行可能な運用にすること。十分な防衛力がもたらす「抑止力」によって敵対国の侵略を思いとどまらせることは、ロシアのウクライナ侵攻の教訓である(令和5年版防衛白書[12])。また、ウクライナ侵攻後1ヶ月以内に原発が攻撃された実績があり、原発攻撃によって、日本の個別的自衛力・集団的自衛力の低下が懸念される。具体的には、「治安出動」にまで及ばない烈度の低いグレーゾーン事態においても、自衛隊の抑止力を活用するため、「警護出動」の適用範囲を、自衛隊や在日米軍の施設から原発等にもまで拡大することも現実的な対策として挙げられる。

(2) 対策実装の課題(日本)

自衛隊の出動によって、ミリタリーレベルに状況をエスカレートさせ、またその口実を敵国に与えるおそれが挙げられる。ただし、本件は他国との接触地域ではないため、その蓋然性は低いであろう。問題なし。

(3) 風洞実験

- ・ 新たな懸念はなし。

【シナリオ上の失敗箇所 2】（原発に限らない）

政府は、重要影響事態法に則り、米軍と台湾支援を目的として、「重要影響事態」下における自衛隊による「後方支援活動等」について、閣議決定と原則事前となる国会承認を目指した。その結果、米台支援の「後方支援活動等」によって、日本が中国から報復の標的にされるというおそれから日本の世論が割れ、それを追い風に野党が反対し、国会の審議は紛糾した。日本が速やかに行動できないことにより、米中台に対して誤ったシグナルを送ることとなり、多国間同盟による「抑止力」と「外交努力」が十分に機能せず、中台間の緊張感の緩和に失敗した。

(1) 共通的な対策(日本)

重要影響事態下における自衛隊による「後方支援活動等」について、国会承認を「原則事前」から「事後承認」に変更すること。また、重要影響事態となった場合に影響力が強まる「民主的統制」について、初動の遅れが致命的にならないように「自衛隊の実効的な運用」とバランスを保つことが重要。なお、国会事後承認の例としては、「治安出動」が挙げられる(出動命令から 20 日以内に付議)。

(2) 対策実装の課題(日本)

提示した対策は、原発防衛のみならず国家防衛全般に大きく影響を及ぼし、これまでの安全保障法制を大きく変えることになるため、変更の妥当性について慎重な議論が必要である。一方で、シナリオプランニングの重要な成果は、複数シナリオや対策等の「成果物」だけでなく、参加者や組織の「備える力の成長」である。すなわち、一つの未来を予測して対処するのではなく、不確実な多数の未来について思考を促進させ、備えられる土壌を育むことが重要であり、今後も関係者間の積極的なシナリオプランニングの実施されることを期待する。

(3) 風洞実験

新たな懸念はなし。

【シナリオ上の失敗箇所 3】（原発に限らない）

政府は、日露間の緊張感が緩和されるまでの間、自衛隊による津軽海峡周辺の「海上警備行動」、自衛隊施設等の「警護出動」、原発への「治安出動」等を検討し、その前提となる閣議決定・国会承認のために必要な「証拠集め」に注力した。加えて、多数の行動の候補に対して、適切なリソース配分を検討した。その結果、意思疎通の難しい敵対国等に関する正確な情報収集や分析は困難を極め、証拠集めに失敗したため、自衛隊は行動できず、国益に基づく最適な危機対応に失敗した。

(1) 共通的な対策(日本)

防衛関連の法令について、自衛隊の活動可能な行動を定める「ポジティブリスト方式」から、禁止事項を定める「ネガティブリスト方式」に改正すること。昨今の目まぐるしく状況が変化する安全保障環境下においては、大多数の他国がそうであるように、ネガティブリスト方式が実効的であるといえる。ネガティブリスト方式であれば、閣議決定・国会承認のための証拠集めに注力することなく、あらゆる事態に切れ目なく対応可能である。

(2) 対策実装の課題(日本)

提示した対策は、原発防衛のみならず国家防衛全般に大きく影響を及ぼし、これまでの安全保障法制を大きく変えることになるため、変更の妥当性について慎重な議論が必要。一方で、シナリオプランニングの重要な成果は、複数シナリオや対策等の「成果物」だけではなく、参加者や組織の「備える力の成長」である。すなわち、一つの未来を予測して対処するのではなく、不確実な多数の未来について思考を促進させ、備えられる土壌を育むことが重要であり、今後も関係者間の積極的なシナリオプランニングの実施されることを期待する。

(3) 風洞実験

新たな懸念はなし。

【シナリオ上の失敗箇所 4】（原発固有）

事業者は、爆弾搭載型ドローンの対策と、使用済燃料プールの防護を今後強化することとなった。

(1) 共通的な対策(事業者)

高出力マイクロ波照射装置等の爆弾搭載型ドローン対策、及び使用済燃料プールの建屋外壁の堅牢化、同建屋の物理的隔離。

(2) 共通的な対策(事業者)

今後、継続的かつ速やかに対策を行うためには、機微情報共有に関するセキュリティクリアランス制度を他国と適合させ、国際的に連携してドローン対策に進める必要がある。

(3) 風洞実験

新たな懸念なし。

IV.7.2 既存の原発を浮体式原発へリプレースした場合の考察

リサーチクエッション3より、具体化した複数シナリオにおいて、既存の原発を浮体式原発(OFNP)にリプレースした場合のメリット・デメリットを考察した。そして、これらの内容をもとに、「III.2 節 第2回ワークショップ(オンライン)」にて議論を行った。

【シナリオ上の失敗箇所1】(原発固有)

政府は、警察・海上保安庁に加えて、自衛隊による原発警備を目的として、すべての国内原発への「治安出動」を検討したが、ミリタリーレベルに状況をエスカレートさせる、またはその口実を敵国に与えることをおそれた。その結果、国内原発への治安出動は発出されず、原発攻撃の魅力度の緩和に失敗した。

(1) 浮体式原発のメリット

日本は、「治安出動」等の法令に基づく行動が命令されていない平時においても、洋上であれば海上保安庁のサポート役として、自衛隊は浮体式原発近海の広範囲において「警戒監視活動」が可能であり(**Figure IV-4**) [12]、敵対者への抑止力となりえる。その結果、原発攻撃の魅力度の緩和が期待される。

(2) 浮体式原発のデメリット

特になし。

【シナリオ上の失敗箇所2】(原発に限らない)

政府は、重要影響事態法に則り、米軍と台湾支援を目的として、「重要影響事態」下における自衛隊による「後方支援活動等」について、閣議決定と原則事前となる国会承認を目指した。その結果、米台支援の「後方支援活動等」によって、日本が中国から報復の標的にされるというおそれから日本の世論が割れ、それを追い風に野党が反対し、国会の審議は紛糾した。日本が速やかに行動できないことにより、米中台に対して誤ったシグナルを送ることとなり、多国間同盟による「抑止力」と「外交努力」が十分に機能せず、中台間の緊張感の緩和に失敗した。

(1) 浮体式原発のメリット

特になし。

(2) 浮体式原発のデメリット

特になし。

【シナリオ上の失敗箇所 3】（原発に限らない）

政府は、日露間の緊張感が緩和されるまでの間、自衛隊による津軽海峡周辺の「海上警備行動」、自衛隊施設等の「警護出動」、原発への「治安出動」等を検討し、その前提となる閣議決定・国会承認のために必要な「証拠集め」に注力した。加えて、多数の行動の候補に対して、適切なリソース配分を検討した。その結果、意思疎通の難しい敵対国等に関する正確な情報収集や分析は困難を極め、証拠集めに失敗したため、自衛隊は行動できず、国益に基づく最適な危機対応に失敗した。

(1) 浮体式原発のメリット

日本は、自衛隊による浮体式原発の「海上警備行動」が可能となる。海上警備行動は、国会の「承認不要」のため証拠集めが省力化されている。また、閣議決定の手続きが迅速化されているため⁷、「即応性」に優れている。よって、自衛隊のリソース配分が困難な時、事案の発生前ではなく「発生後」からの対応も戦術となりえる。その結果、国益に基づく最適な危機対応が期待される。

(2) 浮体式原発のデメリット

特になし。

【シナリオ上の失敗箇所 4】（原発固有）

事業者は、爆弾搭載型ドローンの対策と、使用済燃料プールの防護を今後強化することとなった。

(1) 浮体式原発のメリット

浮体式原発(OFPN)では、安全上の重要機器は水面より下に配備されており、また建屋は航空機衝突耐性を有するため、ドローン攻撃等に対する堅牢性が強化されている。加えて、最終的に「沈没」した場合でも、放射線影響低減とサルベージ可能な設計を施すことによって、影響緩和とレジリエンス向上が可能である⁸。

(2) 浮体式原発のデメリット

特になし。

⁷ 2015 年の平和安全法制整備時の閣議決定により、「領海及び内水上の外国軍艦の無害ではない通航」等は閣議決定の手続きが迅速化済み。（電話等により各国務大臣より了承を得る）

⁸ 原(2024), 博士課程学位論文「2S by design を取り入れた洋上浮体式原子力発電所の堅牢性の強化」より。



Figure IV-4 警戒監視活動の概念図（出典：令和5年度防衛白書(2023) 273 頁 [12]）

IV.7.3 リサーチクエッションに対する結果のまとめ

RQ1: グレーゾーン事態における原発への戦争未満の軍事攻撃のうち、不確実性と影響度が大きいシナリオは何か。

(1) シナリオ 1：原発軍事攻撃の危機

国家間が緊迫した状況の中、ザポリージャ原発攻撃の高い実効性も受けて有事の際の原発防衛が世界的に注目を浴び、日本国内でも差し迫った原発への軍事攻撃に対する危機対応が連日議論されている世界。さらに、シナリオは以下 3 パターンに分岐される。

- ・シナリオ 1-①: 日露の緊迫
- ・シナリオ 1-②: 中台の緊迫
- ・シナリオ 1-③: 韓朝の緊迫

(2) シナリオ 2：あらゆる軍事攻撃の危機

国家間が緊迫した状況の中、日本国内ではグレーゾーン事態を含んだ今後発生しうるあらゆるシナリオが検討されており、日本の国益に基づく最適な危機対応が連日議論されている世界。さらに、シナリオは以下 3 パターンに分岐される。

- ・シナリオ 2-①: 日露の緊迫
- ・シナリオ 2-②: 中台の緊迫
- ・シナリオ 2-③: 韓朝の緊迫

(3) シナリオ 3：原発テロ攻撃の危機

ザポリージャ原発攻撃の高い実効性も踏まえて有事の際の原発攻撃が世界的に注目を浴び、日本国内でも原発へのテロ攻撃に対する危機対応について議論がより活発になった世界。

(4) シナリオ 4：現状維持

現状と変わらず、依然として原発へのテロ攻撃・軍事攻撃や、個別的自衛権・集団的自衛権の行使について、断続的な議論が続いている世界。

RQ2: 日本と事業者にとって、複数シナリオへの共通的な対策と、対策実装の課題は何か。

(1) 日本(その 1)

【共通的政策】

グレーゾーン事態における自衛隊の原発警備について、「法制度」だけではなく、「現実的」にも実行可能な運用にすること。

【対策実装の課題】

自衛隊の出動によって、ミリタリーレベルに状況をエスカレートさせ、またその口実を敵国に与えるおそれが挙げられる。ただし、本件は領土外ではなく領土内の警備であるため、その蓋然性は低いであろう。問題なし。

(2) 日本(その 2)

【共通的政策】

重要影響事態下における自衛隊による「後方支援活動等」について、国会承認を「原則事前」から「事後承認」に変更すること。また、防衛関連の法令について、自衛隊の活動可能な行動を定める「ポジティブリスト方式」から、禁止事項を定める「ネガティブリスト方式」に改正すること。

【対策実装の課題】

提示した対策は、原発防衛のみならず国家防衛全般に大きく影響を及ぼし、これまでの安全保障法制を大きく変えることになるため、変更の妥当性について慎重な議論が必要である。一方で、シナリオプランニングの重要な成果は、複数シナリオや対策等の「成果物」だけではなく、参加者や組織の「備える力の成長」である。すなわち、一つの未来を予測して対処するのではなく、不確実な多数の未来について思考を促進させ、備えられる土壌を育むことが重要であり、今後も関係者間の積極的なシナリオプランニングの実施を期待する。

(3) 事業者

【共通的政策】

高出力マイクロ波照射装置等の爆弾搭載型ドローン対策すること。また、使用済燃料プールの建屋外壁の堅牢化及び同建屋の物理的隔離をすること。

【対策実装の課題】

今後、継続的かつ速やかに対策を行うためには、機微情報共有に関するセキュリティクリアランス制度を他国と適合させ、国際的に連携してドローン対策に進める必要がある。

RQ3: 原発を浮体式原発(OFNP)にリブレースした場合、各シナリオにおけるメリット・デメリットは何か。

(1) メリット

日本は、「治安出動」等の法令に基づく行動が命令されていない状況においても、洋上であれば海上保安庁のサポート役として、平時における浮体式原発近海の広範囲における警戒監視活動が可能であり、敵対者への抑止力となりえる。その結果、原発攻撃の魅力度の緩和が期待される。

日本は、自衛隊による浮体式原発の「海上警備行動」が可能となる。海上警備行動は、国会の「承認不要」のため証拠集めが省力化されている。また、閣議決定の手続きが迅速化されているため、「即応性」に優れている。よって、自衛隊のリソース配分が困難な時、事案の発生前ではなく「発生後」からの対応も戦術となりえる。その結果、国益に基づく最適な危機対応が期待される。

浮体式原発(OFNP)では、安全上の重要機器は水面より下に配備されており、また建屋は航空機衝突耐性を有するため、ドローン攻撃等に対する堅牢性が強化されている。

(2) デメリット

特になし。

第 V 章

結論

第V章 結論

筆者は本学の後期博士課程において、浮体式洋上原子力発電所（OFNP）のテロ対策に関する技術的設計を研究しているが、ロシアのウクライナ侵攻を踏まえると、OFNP の社会実装にはテロ対策を超えた対国家レベルの危機対応の整備が必要である。一方で、原子力発電所等への国家による軍事攻撃については、国内で問題提起が多数されているものの、ウクライナ侵攻の前後で日本の危機対応は変わっていない。そこで本研究では、原子力発電所に対して起きうる戦争未満の軍事攻撃について、不確実性と影響度が高い多数の未来を考え、状況緩和に必要な対策とその課題を日本及び事業者の観点から明らかにした。また、既存の原子力発電所を OFNP にリプレイスした場合のメリットとデメリットを明らかにした。

シナリオプランニングの結果として、グレーゾーン事態における自衛隊の原子力発電所警備について、法制度のみならず、現実的にも実行可能な運用が重要であることを明らかにした。また、重要影響事態下の自衛隊による後方支援活動等について、国会承認を原則事前から事後承認に変更する必要性を言及した。また、防衛関連の法令について、自衛隊の活動可能な行動を定めるポジティブリスト方式から、禁止事項を定めるネガティブリスト方式に改正する意義を指摘した。また、高出力マイクロ波照射装置等の爆弾搭載型ドローン対策の必要性も訴求した。

既存の原子力発電所を OFNP にリプレイスした場合の結果として、法令に基づく自衛隊の行動が命令されていない平時においても、洋上であれば自衛隊は近海の広範囲における警戒監視活動が可能であり、敵対者への抑止力となりえることを明らかにした。また、国会承認不要かつ閣議決定の手続きが迅速化されている海上警備行動が命令可能となるため、国会承認のための過大な証拠集めが不要となるとともに、自衛隊のリソース配分が困難な場合は、事案の発生前ではなく発生後からの対応も戦術に反映可能であることを言及した。最後に、ドローン攻撃等に対する OFNP 固有の強化された技術的堅牢性を訴求した。

これを要するに本論文は、2035 年までに国内原子力発電所に対して起きうる戦争未満の軍事攻撃に対して、不確実性と影響度が高い多数の未来を考え、状況緩和に必要な対策とその課題を提示するとともに、OFNP の有する洋上固有の優れた抑止力を明らかにした。

参考文献

- [1] J. Buongiorno, “The Offshore Floating Nuclear Plant Concept,” *Nuclear Technology*, 第 194, pp. 1-14, 2016.
- [2] 浮体式原子力発電研究会, 産業競争力懇談会(COCN), “2020 年度 産業競争力懇談会(COCN) 最終報告,” 2021.
- [3] 浮体式原子力発電研究会, 産業競争力懇談会(COCN), “2021 年度 産業競争力懇談会(COCN) 最終報告,” 2022.
- [4] 浮体式原子力発電研究会, 産業競争力懇談会(COCN), “2022 年度 産業競争力懇談会(COCN) 最終報告,” 2023.
- [5] 直井洋介, “核不拡散と核セキュリティ,” 2022.
- [6] International Atomic Energy Agency (IAEA), Nuclear security recommendations on physical protection of nuclear material and nuclear facilities (INFCIRC/225/Revision 5), IAEA Nuclear Security Series No.13, 2011.
- [7] “国会答弁『第 208 回国会・衆議院本会議』19 号 (2022 年 4 月 12 日),” 2022.
- [8] “国会答弁『第 211 回国会』質問答弁 6 号 (2023 年 2 月 21 日),” 2023.
- [9] 全国知事会, “原子力発電所に対する武力攻撃に関する,” 2022.
- [10] 福井康人, “武力紛争時における原子力施設での日本の国内対応,” 2022.
- [11] 警察庁, 令和 4 年警察白書, 2022.
- [12] 防衛省, “令和 5 年版防衛白書,” 2023.
- [13] 日本国際問題研究所, “原子力施設に対する攻撃の影響に関する一考察(外務省委託研究報告書),” 1984.
- [14] 小林祐喜, “ロシアによる原発攻撃と使用済み燃料の安全確保ー日本の防護策を検討するー,” 2022.
- [15] World Nuclear Association, “Ukraine: Russia-Ukraine War and Nuclear Energy,” 2024.
- [16] 中曽根康弘世界平和研究所, “海と空のグレーゾーン事態への対処ーその問題と対策ー,” 2018.
- [17] 森聡, “安全保障政策のリアリティ・チェック 第 1 章 平和安全法制における法的事態とその認定について,” 2017.
- [18] 笹川平和財団, “大規模災害を端緒とする台湾危機に対する日米共同対処をめぐる課題(2018 年度 TTX 報告書),” 2020.

- [19] 安全保障の法的基盤の再構築に関する懇談会, “「安全保障の法的基盤の再構築に関する懇談会」報告書,” 2014.
- [20] キース・ヴァン・デル・ハイデン (西村行功訳), シナリオ・プランニング (戦略的思考と意思決定), ダイヤモンド社, 1998.
- [21] ピーター・シュワルツ (峠本一雄、池田啓宏訳), シナリオ・プランニングの技法, 日本総合研究所, 2003.
- [22] 新井宏征, 実践シナリオ・プランニング, 2021.
- [23] 池田啓宏, シナリオ・プランニングのご案内, 日本総合研究所, 2003.
- [24] 角和昌浩, シェルに学んだシナリオプランニングの奥義, 2022.
- [25] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), “Climate Change 2023 Synthesis Report,” 2023.
- [26] 気候関連財務上情報開示タスクフォース(TCFD) (サステナビリティ日本フォーラム私訳), “気候関連財務上情報開示タスクフォースの提言 最終報告書,” 2022.
- [27] 気候関連財務上情報開示タスクフォース(TCFD) (サステナビリティ日本フォーラム私訳), “TCFD 非金融企業の為のシナリオ分析に関するガイダンス,” 2022.
- [28] 環境省, “TCFD を活用した経営戦略立案のススメ～気候関連リスク・機会を織り込むシナリオ分析実践ガイド 2022 年度版～,” 2023.
- [29] 福山慎吾, “シナリオ・プランニングという手法ー不確実性の時代において有効な将来分析手法ー,” 鵬友 20 年 7 月号, 第 34, 第 2, pp. 41-57, 2008.
- [30] 田村重信, 新・防衛法制, 2018.
- [31] 田村重信, 日本の原子力防衛 第 2 版, 2016.

謝辞

本論文の執筆にあたり、指導教員である池上雅子教授におかれましては、いつも丁寧にご鞭撻いただき、また、原子核工学コースの後期博士課程におけるデュアルディグリーにも多大なるご理解とご支援をいただき、深く感謝しております。

東京工業大学 技術経営専門職学位課程の仙石慎太郎教授、後藤美香教授、杉原太郎准教授におかれましては、専門科目で多様な知見をご教示いただき、心から深謝いたします。

池上研究室のメンバーにおかれましては、毎週のゼミを始め、当方主催のワークショップでも、多角的なご意見をいただき、感謝の意を述べます。

工期博士課程の指導教員である原子核工学コースの相楽洋教授におかれましては、デュアルディグリー入学の挑戦にも理解し、尊重していただいたことに謝意を表します。

勤務先の東京ホールディングス株式会社の同僚におかれましては、防衛や核セキュリティについて、素人同然の当方に対して、懇切丁寧にご説明いただきましたこと、厚く御礼申し上げます。

中野宏之さまには、浮体式洋上原子力発電所の知見だけではなく、多面的な学習や研究意欲向上につながる機会を多数いただきましたこと、拝謝申し上げます。これからも一緒にいい原子力しましょう。

修士課程時代の IAEA インターン仲間である福田達弥さまにおかれましては、ご自身の経験を基に、デュアルディグリーへの進学という道をご紹介いただき、貴重な経験とさせていただきました。加えて、在学中も公私ともに相談に乗っていただき、心より感謝しております。

最後に、博士後期課程や専門職学位過程への進学を強く後押し、在学期間中もやりたいことを尊重し、見守ってくれ、手厚く支援してくれた妻、3人の娘、両親に心からの感謝を申し上げます。特に、妻・美貴子には、日々研鑽を積むことを半ば夫の責務として課していただき、幸甚の極みです。今まで疎かにしていた家事や育児についても、能動的に研鑽を積む所存ですので、今後とも末永くご指導ご鞭撻のほど、よろしくお願いいたします。

皆さまに、ご理解とご助力いただけたおかげで、本プロジェクトレポートを無事に執筆することができました。重ねてお礼申し上げます。

付録

付録 A 現状整理に関するダストビン

現状整理に関する「ダストビン」(ゴミ箱)として、先行研究やコンテンツを収集した。「ダストマン」(ゴミ収集人)は筆者が行い、「1. 日本の危機対応」「2. ウクライナ侵攻」「3. 軍事攻撃シナリオ」の3つの枠で仕分けをした。

最終的には、主な訴求点を以下の7個に分類した。

- ① 自衛隊の警察権行動⁹により、ミリタリーレベルに状況をエスカレートさせる、またはその口実を敵対国に与えるおそれ
- ② 自衛隊の他国支援行動¹⁰によって敵対国から日本が報復の対象とされるというおそれから、国会審議が紛糾するおそれ
- ③ 自衛隊の警察権行動や他国支援行動のための閣議決定・国会承認に必要な証拠集めが困難、かつ時間を要するおそれ
- ④ 国際社会は、戦争状態の大国に対して集団的自衛権の行使が困難
- ⑤ 戦争状態において、核の恫喝・抑止による実効性が増すおそれ
- ⑥ 戦争状態において、敵対国から原発(特に使用済燃料プール)が狙われるおそれ
- ⑦ 日本では原子力技術に関するセキュリティクリアランスが整っていないことの弊害

⁹ 警察権行動：治安出動、海上警備出動、警護出動、等

¹⁰ 他国支援：後方支援活動、協力支援活動、国際平和協力活動、等

番号	文献	著者	出版年	重要な指摘等	分類
1. 日本の危機対応					
1-1	自衛隊による警察活動における武器使用規定の検討 －危害許容要件を中心に－	森本正 崇	2014	・警職法第 7 条では、「犯人の逮捕若しくは逃走の防止、自己若しくは他人に対する防護又は公務執行に対する抵抗の抑止のため必要であると認める相当な理由」があれば、警察官は「その事態に応じ合理的に必要と判断される限度において、武器を使用することができる」。しかしながら、危害射撃が認められるのは、正当防衛や緊急避難に当たる場合のほかは、兇悪犯を逮捕する場合等に限られている。したがって、警職法における武器使用の限界は、警察比例の原則に基づく「その事態に応じ合理的に必要と判断される限度」であるものの、危害許容要件は、正当防衛、緊急避難に当たる場合等に限定されている。 ・海上保安官の武器使用を規定した海上保安庁法第 20 条では、第 1 項で警職法第 7 条を基本的に準用した上で、第 2 項に特則を置いている。海上保安庁法第 20 条第 2 項は、停船命令に従わず、その上、船舶の外観や航海の態様などから、無害通航でない航行を内水または領海で現に行っていることなど、同項第 1 号から第 4 号に掲げる事態にすべて該当すると海上保安庁長官が判断した場合には、合理的に必要と判断される限度において、武器を使用することができる。合理的に必要とされる限度であれば、正当防衛や緊急避難に当たらない場合等であっても、危害射撃が可能である。このように海上保安庁法第 20 条第 2 項は、警職法第 7 条よりも危害許容要件を緩和している。同項は、北朝鮮の不審船事案を念頭に置き、2001 年に新設された規定である。 (同項第 1 号～第 4 号) 一 当該船舶が、外国船舶と誤認される船舶であつて、かつ、無害通航でない航行を我が国の内水又は領海において現に行っていることと認められること。 二 当該航行を放置すればこれが将来において繰り返し行われる蓋然性があると認められること。 三 当該航行が我が国の領域内において重大凶悪犯罪を犯すのに必要な準備のため行われているのではないかとの疑いを払拭することができないと認められること。 四 当該船舶の進行を停止させなければ、将来における重大凶悪犯罪の発生を未然に防止することができないと認められること ・治安出動の際の武器の使用は、自衛隊法第 89 条第 1 項で警職法を準用することを規定している。しかしながら、治安出動時には一般の警察力では治安を維持することができないような緊急事態であることから、警職法を超える武器使用が認められる。 ・警職法が想定している武器使用は、第一に対内的なものである。国民に対する武器の使用が想定されているので、その使用には人権侵害を防止するために厳重な制約が課せられている。第二に、武器を保有しない相手に対する武器使用として考えられていた。第三に、犯人逮捕という場面に着目した武器使用であるため、それ以外の警察活動については念頭に置いていなかった。最後に、警職法制定当時、自衛隊はおろか警察予備隊も発足していない。したがって、警職法の武器使用に対する厳しい制約は、武力の行使に当たることが懸念されたためではない。 ・自衛隊法や海上保安庁法は、テロ攻撃や武装工作員対策のため、警職法よりも危害許容要件が拡大されているのに対して、同様の事態に対処する必要があると思われる警察には、こうした危害許容要件は認められていない。	一

番号	文献	著者	出版年	重要な指摘等	分類
1-2	グレーゾーン事態対処の射程とその法的性質	森川幸一	2016	・『平成 27 年版防衛白書』のなかでは、「グレーゾーン事態」について、「領土や主権、経済権益などをめぐる、純然たる平時でも有事でもない（事態）」と定義され、具体的には、「①国家などの間において、領土、主権、海洋を含む経済権益などについて主張の対立があり、②そのような対立に関して、少なくとも一方の当事者が自国の主張・要求を訴え、または他方の当事者に受け入れさせることを、当事者間の外交的交渉などのみによらずして、③少なくとも一方の当事者がそのような主張・要求の訴えや受け入れの強要を企図して、武力攻撃に当たらない範囲で、実力組織などを用いて、問題に関わる地域において、頻繁にプレゼンスを示したり、何らかの現状の変更を試みたり、現状そのものを変更したりする行為を行う」事態と説明されている。 ・他方で、2014 年 7 月 1 日の「安全保障法制の整備に関する閣議決定」では、「グレーゾーン事態」という表現は用いられていないものの、防衛白書で「グレーゾーン事態」の定義の一部に用いられている「純然たる平時でも有事でもない事態」という表現が、「武力攻撃に至らない侵害」を説明するためのものとして用いられている。そこで、この「武力攻撃に至らない侵害」として想定されているのは、①「離島周辺地域等において外部からの武力攻撃に至らない侵害が発生し、近傍に警察力が存在しない場合や警察機関が直ちに対応できない場合（武装集団の所持する武器等のために対応できない場合を含む。）」、②「我が国の防衛に資する活動に現に従事する米軍部隊に対して攻撃が発生し、それが状況によっては武力攻撃にまで拡大していくような事態」という 2 つの具体例である。このうち①については、「領土や主権、経済権益などをめぐる」主張の対立を前提とする、防衛白書が「グレーゾーン事態」として想定している具体例と共通するものであるが、②は、日本に対して直接「武力攻撃に至らない侵害」が生じたわけではなく、日本の防衛に資する活動に現に従事する米軍部隊等に対して侵害が生じた場合を想定したものであり、防衛白書が想定している事例とは異なる性質の事態をも包含する、より広義の概念のように思われる。 ・以上のことから、「グレーゾーン事態」とは、「純然たる平時でも有事でもない事態」であり、「領土や主権、経済権益などをめぐる」主張の対立を背景として日本に対して「武力攻撃に至らない侵害」が生じている事態のみならず、日本の防衛に資する活動に現に従事している米軍部隊等に対して同様の侵害が生じているような事態をも含む概念であると言える。 ・民主党と維新の党が共同提出した「領域警備法案」（他の閣議決定 3 本により見送り）に対して、政府からは、おそく尖閣諸島問題を念頭に「仮に自衛隊が平時から警察機関と共に警察権を行使した場合、日本の側が事態をミリタリーのレベルにエスカレートさせたとの口実を与えるおそれもある」として抑制的な姿勢が示されたが、この主張自体が自衛隊の警察活動における行動の難しさ（他国から「有事」として捉えられ）や「切れ目のない十分な対応を確保する」ことの難しさを表しているように思われる。	①
1-3	ウクライナ危機に見えるロシアの介入戦略	小泉悠	2017	・ハイブリッド戦争の例として、2014 年のロシアがウクライナ領クリミア半島を占拠・併合した介入戦略を分析。	－
1-4	「グレーゾーン事態」への対応方法としての危機管理－その有効性と限界－	山下愛仁	2016	・グレーゾーン事態への対応方法として、危機管理＝強制外交が有用であることを指摘。 ・平時→抑止、グレーゾーン事態→危機管理（＝強制外交）、有事→対処。	－
1-5	「グレーゾーン事態」分析－東シナ海における中国の活動と日本の対応を事例として－	山下愛仁	2010	・東シナ海における日中関係をケーススタディとして、グレーゾーン事態がなぜ白・黒ではなく「グレー」に見えるのか分析 ・①日中共に、海域は法執行機関が、空域については軍事組織が活動・対応しており、統一的に事態を把握することが困難 ・②中国の海警は、組織の位置づけ上、法執行機関か軍事組織かグレー ・③海警の活動は、国際仲裁裁判所の判断事例を踏まえると、武力の行使または実力の行使がグレー ・中国による日本への領空侵犯が増加し、自衛隊法 84 条による緊急発進が増加（2010 年 96 回（/計 386 回）→2016 年 851 回（/1168 回））	－
1-6	安全保障における軍事と警察の差異－「グレイエリア」研究のための試論－	遠藤哲也	2005	・グレーゾーン（グレイエリア）や軍・警察の差異について言及 ・グレーゾーンが近年着目されている理由は、法の適用が厳格化・精密化しているため。また、軍の行動に一定の制限を置くべきという考えが強まっているため ・武装主体を武装非国家主体、武装亜国家主体、偽装非国家主体に類型化し、具体的に例示	－
1-7	ハイブリット戦と超限戦	石原敬浩	2010	（特になし）	－

番号	文献	著者	出版年	重要な指摘等	分類
1-8	自衛隊の対処事態と国会承認	沓脱和人	2023	・各種の法的事態について、政府（国家安全保障会議/閣議）と国会の関係性・手続きを経緯を含めて解説 ・基本的に、国家安全保障会議審議（9 大臣会合）→閣議決定→国会承認の流れ（特に武力攻撃事態等） ・近年のシンクタンクのシミュレーションを見ると、①各事態の段階的発生、②複合的・重複的発生、③突然の武力攻撃事態発生が想定されている。②については、時間的制約の中で国会における手続きの正当性を失うことなく、事前に想定しておくことが必要	③
1-9	防衛分野における主な課題－戦略三文書に掲げられた反撃能力の保有と継続能力の向上－	沓脱和人	2023	・2022 年度の戦略三文書の会見にて、2027 年度には GDP の 2%に達する防衛予算措置を講ずる旨を明言 ・5 年間（2023～2027）総額予算は 43 兆円。うち、反撃能力に係る経費は 8 兆円、持続性・強靱性の関連経費は 15 兆円	－
1-10	防衛作用における比例原則に関する一考察	奥田昌宏	2017	・武器の使用に適用される比例原則について、防衛出動時の武力の行使への適用について論じている	－
1-11	ロシアのウクライナ侵攻と武力不行使原則	掛江朋子	2022	・国連憲章第 51 章は「武力攻撃」が発生した場合の自衛権を規定している。 ・国際司法裁判所（ICJ）は、2004 年パレスチナの壁事件勧告的意見で、51 条が認める自衛権は「一国の他国に対する武力攻撃」であると判断している。	－
1-12	海洋安全保障と平時の自衛権－安全保障戦略と次期防衛大綱への提言－	東京財団	2013	・「防衛出動」に基づき出動する自衛隊の部隊は自衛権に基づいた武力の行使によるわが国の防衛ができることに對し、「防衛出動以外」により出動する部隊は警職法を準用した武器の使用しか認められていない。 ・グレーゾーン事態に對し防衛出動が下令されないまま出動した自衛隊の部隊は、仮に海上警備行動で出動したとしても海保と同等あるいはそれ以下の権限と武器の使用しか許されないという致命的な矛盾に直面する。 ・「事前承認」が原則である等、自衛権発動の前提となる防衛出動下令の手続きも複雑で時間を要することが予想される。	－
1-13	日本の防衛政策と抑止－韓国およびオーストラリアとの比較考察－	岩田修一郎	2017	（特になし）	－
1-14	平和安全法制とグレーゾーン－評価と今後の課題－	高橋杉雄	2019	・2015 年の平和安全法制制定の経緯等をまとめつつ、グレーゾーンを法的概念として捉えることで有効な対応が可能になるとは考えにくいこともあり、警察権をベースに、発令手続きの迅速化によることとした平和安全法制のアプローチは適切なものであったと評価。 ・グレーゾーンにおける自衛隊活動の「法的根拠」の概念(1)として、「自衛隊による警察権行使」または「自衛権行使」がある。 ・前者（警察権）について、2015 年の閣議決定により発令手続きを迅速化した海上警備行動や治安出動以外の事態概念（●●事態）が必要とは考えにくい。領域警備法案の領域警備区域はそれ以外の不測の事態が発生した場合の対応は現在の枠組みを踏襲することになる。 ・後者（自衛権）は、新しい事態概念を創出する必要があり、領空侵犯等のさまざまな状況が発生しうるグレーゾーンで、事態を網羅して類型化して使用しようとした場合、際限なく細分化が必要となるおそれがある。また、前者と後者の最も大きな違いである武器使用制限については、グレーゾーンにおいてはエスカレーションを抑制することも重要であるため、抑制的な自衛権と警察比例の原則に基づく警察権は実質的な差異は少ないと考えられる。 ・グレーゾーンの「防衛力整備」上の概念(2)として、自衛隊による警察権行使未済のグレーな状況でも、万が一の事態に備えて、部隊の「質と量」を確保していく必要が高まっている。尖閣諸島に対して中国が行っている政府公船の展開に対しては、海上保安庁が法執行の観点から対応しており、自衛隊に海上警備行動は発令されていないが、自衛隊は、東シナ海のより広い範囲での警戒監視活動を行い、中国海軍や政府公船の活動を監視しつつ、万が一の事態にも備えている。 ・一方で、将来的に、グレーゾーンにおける新領域の非物理的使用について、基本的な考え方や制度的枠組みの整理を行う必要があることを指摘。グレーゾーンにおける対応の主体となる警察・海上保安庁の行動は社会インフラへの依存度が高く、自己完結性に基づく行動を行う自衛隊との大きな違いであるため。	－

番号	文献	著者	出版年	重要な指摘等	分類
1-19	国民保護の経緯、現状、方向性	林浩一	2022	・「武力攻撃事態等」（対国家）への対処は「事前対処」の考え方が基本となっており、「武力攻撃予測事態」が置かれ、事態発生前からの迅速な対処が重要と考えられるとともに、武力攻撃予測事態における自衛隊への防衛出動待機命令に、わが国の強固な防衛意思を明示し、相手国に武力攻撃を断念させる有力な手段となり得るとして、武力攻撃の発生回避に資するとの新たな意義が加わることになったともされている。（国民保護法上は、「国民の保護のための措置」） ・一方、「緊急対処事態」（対テロ）は、その定義に「武力攻撃の手段に準ずる手段を用いて多数の人を殺傷する行為が発生した事態」とあり、その原則は「発生主義」と考えられていた。（国民保護法上は、「緊急対処保護措置」） ・このように現在の事態対処法は、情勢悪化を受けて国の状況判断から対処が始まるいわば「トップダウン・モード」（武力攻撃事態等）と、事案発生により対処が始まり状況に応じて国の関与が始まるいわば「ボトムアップ・モード」（緊急対処事態）の 2 つのモードを備えていること、また防災とは異なり事態発生の原因である武力攻撃などの排除・予防鎮圧と国民保護がセットで実施される制度であることの 2 点に留意する必要がある。 ・ロシアのウクライナ侵略に至る経緯・契機・要因（以下、図表）について 10 年単位の経緯を踏まえ、直前でも約 1 年程度の情勢推移を経てある程度事前に予測可能と言え、事態対処法のトップダウン・モードの意味も理解できよう。そのため台湾有事への対応は、ボトムアップの緊急対処事態対処の認識・発想ではなく、武力攻撃事態等への対処の観点から整理・検討されるべきである。	—
1-20	国民保護と防災・災害対策の 2 つの「相違」	林浩一	2022	（特になし）	—
1-21	「武力攻撃事態等」と「緊急対処事態」の 3 つのモード	林浩一	2022	・武力攻撃予測事態における「防衛出動待機命令の発出」（隊法 77 条）や「予備自衛官などの防衛招集」（隊法 70 条、75 条の 4）などは、相手国に武力攻撃の意図を断念させることになり得る、武力攻撃の発生回避に資する有力な手段とも考えられている。 ・また事態対処法と同時に新設された、自衛隊の部隊が武力攻撃予測事態において自ら防衛陣地などの構築することを可能とする「防衛施設構築の措置」（隊法 77 条の 2）の発令は、わが国防衛の強固な意思を内外に示すものとも考えられている。	—
1-22	国の存立を全うし、国民を守るための切れ目のない安全保障法制の整備について	（閣議決定）	2014	・「武力攻撃に至らない侵害への対処」「国際社会の平和と安定への一層の貢献」「憲法第 9 条の下で許容される自衛の措置」の 3 つの柱について、平和安全法制の整備に向けた政府の基本方針が示したものの。（閣議決定） ・武力攻撃に至らない侵害（≡グレーゾーン事態）への対処として以下 2 つを例示。 ① 離島周辺地域等において外部からの武力攻撃に至らない侵害が発生し、近傍に警察力が存在しない場合や警察機関が直ちに対応できない場合（→状況に応じた早期の下令や手続の迅速化のための方策について具体的に検討することとする。） ② 我が国の防衛に資する活動に現に従事する米軍部隊に対して攻撃が発生し、それが状況によっては武力攻撃にまで拡大していくような事態（→極めて受動的かつ限定的な必要最小限の「武器の使用」を自衛隊が行うことができるよう、法整備をすることとする。） ・自衛権の行使について、我が国に対する武力攻撃が発生した場合のみならず、以下の「新三要件」を定義。 ① 我が国と密接な関係にある他国に対する武力攻撃が発生し、 ② これにより我が国の存立が脅かされ、国民の生命、自由及び幸福追求の権利が根底から覆される明白な危険がある場合において、 ③ これを排除し、我が国の存立を全うし、国民を守るために他に適当な手段がないときに、必要最小限度の実力を行使すること	—

番号	文献	著者	出版年	重要な指摘等	分類
1-23	(1)離島等に対する武装集団による不法上陸等事案に対する政府の対処について (2)我が国の領海及び内水で国際法上の無害通航に該当しない航行を行う外国軍艦への対処について (3)公海上で我が国の民間船舶に対し侵害行為を行う外国船舶を自衛隊の船舶等が認知した場合における当該侵害行為への対処について	(閣議決定)	2015	・米軍等の部隊の武器等の防護の場合とは異なり、法改正は見送られ、2015 年 5 月に 3 件の閣議決定が行なわれたもの。 ・我が国の主権を守り、国民の安全を確保するとの観点から、関係機関がより緊密に協力し、いかなる不法行為に対しても切れ目のない十分な対応を確保するが目的。 ・「①離島などへの武装集団による不法上陸」「②領海及び内水上の外国軍艦の無害ではない通航」「③公海上の民間船舶へ侵害行為を行う外国船舶」に対して海上警備行動、治安出動または海賊対処行動を発令する際に、閣議を開催する場合、特に緊急な判断を必要とし、かつ、国務大臣全員が参集しての速やかな臨時閣議の開催が困難であるときに、内閣総理大臣の主宰により、電話等により各大臣の了解を得て閣議決定を行なうことを可能にした。	③
1-24	領域等の警備に関する法律案	(民主党・維新の党)	2015	・自衛隊に平素から「領域警備行動」という新たな権限を付与することで、海上警備行動や治安出動の発令前であっても、新たに指定する領域警備区域における一定の警備行動を可能にする法律（→「1-23」の閣議決定により見送られた）	③
1-25	「安全保障の法的基盤の再構築に関する懇談会」報告書	(安全保障の法的基盤の再構築に関する懇談会)	2014	・武力攻撃に至らない侵害（キグレーゾーン事態）に関する言及があり、「原発等の重要施設の防護」等を例にとり、自衛隊の行動に必要な手続きに時間を要し、対応の時機を失してしまうことの懸念について言及されている。（P24～25）	③
1-26	長島昭久衆議院議員質疑『第 189 回衆・平安特委』19 号	(長島昭久)	2015	・2015 年の平和安全法制定におけるグレーゾーン事態について、「（政府案のような）運用の改善では、時間のすき間については、これは確かに埋まると思います。しかし、問題なことは、もう一つ、……対処行動の移行がどこまでスムーズにできるか。……わかりやすく言えば、治安出動や海上警備行動の発令前にどこまで自衛隊ができるかということが非常に鍵を握るんです」として、運用の改善にとどまる政府の対応を批判し、平素から自衛隊に「領域警備行動」の権限を付与する必要性を訴えた（民主党・維新の党の提出法案）。	—
1-27	安倍総理大臣答弁『第 189 回参・平安特委』20 号	(安倍晋三)	2015	・領域警備法案に対して「仮に自衛隊が平時から警察機関とともに警察権を行使した場合、日本の側が事態をミリタリーのレベルにエスカレートさせたとの口実を与えるおそれもある」として、現下の安全保障環境での武力攻撃に至らない侵害に対しては、現時点では新たな法整備は必要ではない、との政府からの反論が行なわれている。（P8）	①
1-28	平時からの防衛作用について—国際法に基づく法整備—	吉田真	2017	・航空自衛隊による不明航空機の侵入阻止とともに、海上自衛隊による周辺海域とりわけ他国軍艦等への警戒監視は、365 日 24 時間行われている。 ・軍艦には、沿岸国の管轄権から免除されるという特権がある。国際慣習法上、早い段階から確立しており、今日の国連海洋法条約も、このことを前提として成文化されている。軍艦は国家の分身であり、大使館が動いているようなものと例えられる由縁である。	—

番号	文献	著者	出版年	重要な指摘等	分類
1-29	海上における警備行動の 2 つの側面について－治安出動及び領空侵犯に対する措置との対比から－	林浩一	2022	・陸上と海上の特性の相違などから、「海警行動」は「治安出動」に比べてより緩和された要件と発令手続きで発令可能とされている。 ・「一般の警察力をもつては、治安を維持することができないと認められる」場合に至らない状況であっても海上保安庁のみでは対応が不可能が著しく困難な「特別の必要がある場合」に発令可能なのである。 ・治安出動は内閣総理大臣が発令権者であり、かつ国会の事後承認が必要であるのに対し、海警行動は内閣総理大臣の承認を得て防衛大臣が発令できる。 ・一方、海警行動時には隊法 90 条 1 項に規定される危害許容要件などが緩和された武器使用権限が適用されておらず、その権限は相対的に限定的である。 ・2 つの行動時の権限の具体的差は武器使用権限(隊法 90 条)の有無だが、2001 年の庁法 20 条 2 項の新設によって逃走船舶の停船のために警職法 7 条を超える危害射撃が可能となったので、限定的な範囲ではあれ、海上における質的に対応困難な事態への対処について海警行動は治安出動に準ずるものになったといえるだろう。 ・ただ、庁法 20 条 2 項が適用されるのは領海内から逃走する船舶を停船させる場合と考えられており、例えば多衆集合した船舶の不法な領海侵入の阻止や、ロケットランチャーなどの重火器の所持が明らかな船舶による領水内での不法行動の鎮圧などに対しては適用困難なのではないだろうか。・少なくとも「多衆集合」した対象の鎮圧(隊法 90 条 1 項 2 号)の必要性が生じ得る事態には、海上での治安維持のために治安出動による対応が可能と明確に整理されるべきであろう。 ・よって、海上における治安維持に係る法的枠組みは、(海上保安庁の活動)C(海警行動)C(治安出動)という階層性のある対処の枠組みと捉えなおすことができるようになった。 ・自衛隊による情報収集・提供は海上保安庁の能力を補完する意義が大きかったと思われる。これに鑑みれば、今後例えば尖閣諸島周辺海域で多数の漁船などが関与する領海侵入事案が発生した場合には、海上保安庁の警備体制が整えられた現状では、自衛隊は単なる量的不足を補うよりも、むしろ周辺の広域な警戒監視による情報提供などによって警備実施の効率化に資することが有益であろう。	－
1-30	日本の原子力防衛 第 2 版	田村重信	2016	(必見)	－
1-31	新・防衛法制	田村重信	2018	(必見)	－
1-32	令和 5 年版防衛白書	(防衛省・自衛隊)	2023	(必見)	－
1-33	国内法 ・自衛隊法 ・警職務法 ・海上保安庁法 ・事態対処法 ・国民保護法 ・重要影響事態法 ・国際平和支援法 ・PKO 法 ・国家安全保障会議設置法	－	－	(必見)	－
1-34	戦略三文書： ・国家安全保障戦略 ・国家防衛戦略 ・防衛整備計画	(閣議決定)	2022	(必見)	－
1-35	国際法等： ・国連憲章 ・ジュネーブ条約第 1 追加議定書 ・ジュネーブ条約第 2 追加議定書 ・核テロ防止条約 ・核物質防護条約改正 ・日米防衛協力のための指針	－	－	(必見)	－

番号	文 献	著 者	出 版 年	重要な指摘等	分 類
2. ウクライナ侵攻					
2-1	武力紛争時における原子力施設での日本の国内対応	福井康人	2022	・侵入者の実態や生起している事案の状況が不明な段階においては、第1義的には警察が対応を実施し、防衛省・自衛隊は情報収集、自衛隊施設の警備強化を実施する。状況が明確化し、一般の警察力で対応が可能な場合、必要に応じて警察官の輸送、各種機材の機材への提供などの支援を、一般の警察力で対応が不可能な場合は、治安出動により対応することとしている。更に、我が国に対する武力攻撃と認められる場合には防衛出動により対応することになる。 ・警察力で対応できる攻撃は、基本的に事業者が対応するテロ対策レベルであり、DBT（設計基礎脅威）が前提になっている。他方で、この状況を超えるいわば beyond DBT の状況下では、前述のように国が対応する前提となっている。すなわち、重要な点は DBT の範囲内では警察・海上保安庁の支援を受けつつ事業者が対応し、他方、DBT を越えたところでは国が主体となって対応すべきこと。 ・原子力災害対策特別措置法（原災法）は DBT の状況から beyond DBT の状況まで関係しうるものであり、両者の状態をつなぐものでもある。 ・また、日本では武力攻撃事態等及び存立危機事態における我が国の平和と独立並びに国及び国民の安全の確保に関する法律（事態対処法）が適用される。 ・更に、武力攻撃事態等における国民の保護のための措置に関する法律（国民保護法）が適用される。特に第105条（武力攻撃原子力災害への対処）、第106条（原子炉等に係る武力攻撃災害の発生等の防止）、第107条（放射性物質等による汚染の拡大の防止）が原子力事業者等に関係しうるが、それ以外にも危険物質等に係る武力攻撃災害の発生防止（同法第103条）、石油コンビナート等に係る武力攻撃災害への対処（同法第104条）も書かれており、基本的には原子炉等以外の場合と同様の措置が取られることが想定されている。	—
2-2	ウクライナの原子力施設に対する攻撃を国際法に照らして考える	福井康人	2023	・ウクライナでの原子力施設に対する軍事行為に際し、国際法上いかなる対応が可能かについて考察することを目的とするが、比較事例として日本の国内法制度上は、どのような危機対応になるかについても考察。（「2-1」と類似の訴求点は以下、割愛。） ・核セキュリティ、特に原子力施設の核物質防護については、国際法上は改正核物質防護条約や核テロ防止条約が関連しうるが、武力紛争との関係で特に注意しなければならないのは、対テロ条約は除外規定があるため、武力紛争が発生した段階で対テロ条約から国際人道法（ジュネーブ条約等）に適用法が変わる。	—
2-3	ウクライナの原子力施設に対する攻撃を、国際法に照らして考える(スライド)	福井康人	2022	(2-1 に包絡)	—
2-4	核セキュリティの動向：核物質防護条約改正レビュー締約国会議に向けて	福井康人	2022	(特になし)	—
2-5	国会答弁『第208回国会・衆議院本会議』19号（2022年4月12日）	(岸田文雄・末松義規)	2022	・ウクライナにおいて、ロシアは巨大原発を攻撃しました。この事実は、万が一、日本が戦争状態となったときには、敵対国から原発攻撃が頻繁に行われる危険性があることを明白に示しています。敵対国から通常ミサイルなどの対原発攻撃がなされれば、すぐに原発周辺地域を超える広範な地域が深刻な放射能汚染となります。原発再稼働という平時レベルのチェックではなく、有事対応も想定していかなければならない時代に入ってきました。ロシアからの LNG 供給に頼っているドイツでさえ、これからの問題意識をも踏まえ、原発停止計画を推進しています。（5 頁） ・原子力発電所の安全については、原子炉等規制法に基づく発電所の設備上の対応や事業者の対応によって確保しており、意図的な航空機衝突等のテロリズムへの備えまで事業者に要求をしています。その上で、原発へのミサイルによる武力攻撃に対しては、海上配備型の迎撃ミサイル(SM3)や地上配備型の対空誘導弾(PAC3)により対応するほか、事態対処法や国民保護法等の枠組みの下で、原子力施設の使用停止命令、住民避難等の措置を準備している。（6 頁）	⑥

番号	文献	著者	出版年	重要な指摘等	分類
2-6	国会答弁『第211回国会』 質問答弁 6 号（2023 年 2 月 21 日）	（岸田文 雄・阿部 知子）	2023	(1)我が国における、原子力防護体制の確立は急務であるとするが、今後当該対策の研究・分析をする予定があるか。 →政府として、国民の生命及び財産を守るため、平素より、様々な事態を想定して所要の検討を行っているところである。 (2)テロ対策は講じられているといえるのか、これまで核テロリズムと戦争の境目、すなわちグレーゾーンがあり得ることをどう考えているか。そして、具体的な核テロリズムの対応策をお示しいただきたい。 →「テロ対策」については、政府において、平素より、原子力事業者、警察、海上保安庁、自衛隊、地方公共団体等の関係機関が適切に連携し、迅速かつ確に対応できるよう、必要な対策を講じているところであり、また、原子力事業者に対して、国際原子力機関の核物質防護勧告等の最新の国際的知見を踏まえながら、実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則を改正し、妨害破壊行為等の脅威に備えることを義務付けているところである。 →「グレーゾーン」については、原子力発電所で発生するあらゆる事態への対応に万全を期すため、原子力発電所の敷地内において自衛隊と警察が共同訓練を実施するなど、平素から関係機関相互の連携を強化し、必要な対策に取り組んでいるところである。 →「具体的な核テロリズムの対応策」については、これを明らかにすることにより、今後の対応に支障を来すおそれがあることから、お答えすることは差し控えたい。 (3)我が国の原発関連施設への防護体制としては、2001 年の米国同時多発テロ事件以降から、原発特別警備部隊が 24 時間 365 日警備にあたっている。海上保安庁もこれに同様と認識しているが、テロ発生時には、特殊部隊（SAT）や、緊急事態状況等に応じて自衛隊が動員されることとなっている。また有事の際には、消防、警察も対応にあたると認識するが、2011 年福島第一原発事故を経て、自衛隊、警察、消防等がどのような対策、配置をされ、加えて放射性物質からの被曝管理などをするのかご回答いただきたい。 →これを明らかにすることにより、今後の対応に支障を来すおそれがあることから、お答えすることは差し控えたい。 (4)原発関連施設への攻撃が生じた際は、どのような会議体、あるいは体制で臨むのか。防衛省、警察庁、消防庁、または内閣府や規制庁など多岐にわたる省庁が対応にあたると思うが、実際はどうか。 →政府としては、国民の生命及び財産を守るため、平素より、様々な事態を想定して関係機関が連携して所要の議論、シミュレーション及び訓練を行っているところであり、また、お尋ねの「会議体」又は「体制」としては、例えば、事態対処法第二条第二号に規定する武力攻撃事態に至ったときは、同法第十条第一項の規定に基づき事態対策本部を設置することとされているところである。	—
2-7	緊急提言 ロシアによるウクライナ侵攻：原子力民生利用の諸課題と日本の役割	笹川平 和財団	2022	・原子力施設の防護においては、2001 年に発生した米国同時多発テロ事件を受け、新たに法整備を行ったり、部隊を新設したりして各国で強化が図られた。ロシアなど一部の国を除き、軍隊が直接、原子力施設の防護を担当している国は少なく、民間警備会社や警察を施設防護の主体とし、緊急時に軍隊の出動規定を設けている国が多い。 ・日本においては、内部脅威対策として、原子力規制に基づき、事業者ごとに職員の犯罪歴などを調べる信頼性確認を実施している。IAEA の勧告に応える形にはなっているものの、諸外国と異なり、厳格な法制度に基づき、国が責任を持って実施する体制が確立されていない。 ・原子力に関する機微技術の管理や経済安全保障の観点からも、民間分野における信頼性確認制度やセキュリティ・クリアランス制度の必要性はかつてなく高まっている。わが国においては、外国とほぼ同様の特定秘密保護法があり、公務員は対象になるが、民間人はごく一部しか対象になっておらず、他国との原子力分野における技術協力や核セキュリティに関する情報共有に際して将来、支障を来す可能性がある。日本においても諸外国の取り組みに倣い、政令ではなく、民間分野のクリアランス制度を法制化し、核セキュリティの強化や核物質および原子力機微技術の管理における国際協力を推進できるようにすべきである。	⑦
2-8	原子力施設の保護と日本の役割—ロシアによるウクライナ侵攻と原発攻撃をうけて—	笹川平 和財団	2023	・過去にもイスラエルによるイラクの研究炉への空爆など、原子力施設への攻撃はあったものの、いずれも核燃料が炉に装填される前の攻撃だった。稼働中の原発を軍事攻撃し占拠する事態は初めてであり、核セキュリティの概念を超える前代未聞の出来事だった。 ・今回のロシアによるウクライナ侵攻において、民生用原子力施設への攻撃や占拠により、大規模な放射性物質の放出を伴う核リスクが顕在化する中、国際社会は効果的な対応策を取れていない。戦時下における原子力施設の保護は、従来の国際法や国連の在り方では不十分であり、抜本的な法改正や大胆な思考の転換が必要ながことが明白になった。	④

番号	文献	著者	出版年	重要な指摘等	分類
2-9	ウクライナ戦争と核兵器	浅田正彦	2022	・ロシアによるウクライナ侵攻は、他国に邪魔されことなく侵略を完遂するという邪悪な目的のために核抑止力が利用され、皮肉にもそれが効果を発揮しうを示した。このことは、核抑止論に対して新たな視点を加えることになった。 ・ロシアは、ウクライナを侵略し、その過程で幾度となく核による威嚇を行ってきたが、関連する事実は、皮肉にもそうした威嚇や核抑止が現実機能しうを示した。 (1)ウクライナへは侵攻しつつも、同じく旧ソ連を構成していたバルト三国には手を出していない。それは 1 つには、バルト三国が NATO の加盟国となっており、究極的には米国の核の傘の下にあるからであろう。これは、米国の核抑止（拡大抑止）が機能していると理解することができる。 (2)国を始めとする NATO 諸国も、当初の段階ではウクライナに対する武器支援を躊躇していたし（例えばドイツ）、その後もロシアを攻撃できる能力を持つ兵器の供与には慎重である。これは、武力紛争がロシア対 NATO へと拡大すること、またはロシアが劣勢を挽回するために核兵器の使用に踏み切る可能性があることを危惧したためであり、究極的には（ロシアの）核の抑止力が効いていたということになるであろう。 (3)米国のバイデン大統領は早い段階から、ロシアがウクライナに侵攻した場合でも、同国に米軍を派遣しないことを明らかにしており、1 つにはロシア軍と米軍との衝突は核戦争（「世界戦争」）に至る可能性があることを危惧してのことでありある意味でロシアの核抑止力が機能したということであろう。	⑤
2-10	ロシアによる原発攻撃と使用済み燃料の安全確保ー日本の防護策を検討する	小林祐喜	2022	・ロシアによるウクライナへの軍事侵攻は、原子力発電の在り方に相反する二つの影響を与えている。ロシアからの天然ガスの輸入が滞ったことにより、「エネルギー安全保障」の観点から、西側諸国において、原子力利用の見直しが進んだことである。反面、「原子力施設の安全」に関する懸念が各国で広がっていることである。 ・「使用済み核燃料」の防護強化は喫緊の課題である。原子炉が鋼鉄製で、さらに格納容器に守られ、意図的な航空機の激突に耐えられるなど、外部からの攻撃に一定の頑強さを有するのにに対し、使用済み核燃料の保管は、多重防護の仕組みになっていない場合が多い。 ・原発再稼働、および新増設を進めた場合、「使用済み燃料」の「行き場」と「防護」をどうするのか、日本の新たな課題となるのは間違いない。2010 年時点で、日本は累計 16,330 トンの使用済み核燃料を抱え、世界第 3 位の累積量だった。	⑥

番号	文献	著者	出版年	重要な指摘等	分類
2-11	Ukraine: Russia-Ukraine War and Nuclear Energy	WNA	—	・2022 年 2 月、ロシアはウクライナに対して軍事攻撃を開始した。 ・2022 年 2 月 24 日、ウクライナは国際原子力機関（IAEA）に対し、ロシア軍がチェルノブイリ原子力発電所の全施設を制圧したと通告した。サイトの管理は 2022 年 3 月 31 日にウクライナ職員に返還された。 ・2022 年 3 月 4 日未明、ウクライナ南東部のザボリージャ原発は、稼働中の民生用原子力発電所としては初めて武力攻撃を受けた。部隊間の一晩にわたる戦闘により、6 基の工場の敷地内にある訓練棟に発射体が命中した。その後、ロシア軍が発電所を制圧した。6 基の原子炉には影響はなく、放射性物質の放出もなかった。 ・2022 年 10 月下旬以来、ロシアはウクライナのエネルギーシステムを含む民間インフラをミサイル攻撃で繰り返し標的にしている。広範囲にわたる停電が発生し、国内の 4 つの原子力発電所すべてへの外部電力供給に影響を受けた。 ・2023 年 1 月以来、IAEA はウクライナのすべての原子力発電所に常駐している。 ・主なザボリージャ原発の攻撃被弾地： -2022 年 3 月 4 日、発射体は原発 1 号機から約 300 メートル離れた「訓練棟」に衝突した。（図 3 の赤枠） -2022 年 7 月 22 日、ウクライナ軍諜報機関はザボリージャ工場でのロシア軍に対する無人機攻撃の映像を公開した。（図 3 の緑枠） -2022 年 8 月 5 日、砲撃により窒素酸素ステーションと補助建物が損傷した。 -2022 年 8 月 6 日、砲撃により同原発の「使用済み燃料貯蔵施設エリア」の壁、屋根、窓が損傷し、ウクライナ人の警備員が負傷した。（図 3 のオレンジ枠） -2022 年 8 月 11 日、砲撃により発電所の「消防署にある放射線監視装置」が損傷した。 -2022 年 8 月 20 日と 21 日、砲撃により、原子力発電所付近の「実験施設と化学施設」が損傷した。 -2022 年 9 月 3 日、IAEA の視察により、「タービン潤滑オイル保管タンク」「使用済み燃料移送車庫など各種一般建造物の屋根部分」「新燃料や放射性固体廃棄物を保管する原子力用建屋」「訓練センター」「物理的防護システムの集中監視建屋」「使用済み燃料の乾式貯蔵施設付近の放射線モニタリング装置が設置されたコンテナ」の損傷を確認した。 -2022 年 9 月 26 日の週、発電所近くで多数の地雷が爆発したが、これはおそらく地元地域の野生動物の移動が原因と考えられる。 -2022 年 9 月 27 日、IAEA は、爆発により「2 号機のタービンホール」の窓が割れた。 -2022 年 9 月 30 日、IAEA は、爆発により発電所の境界フェンスのすぐ外側にある「6kV ケーブル」が損傷した。 -2022 年 11 月 19 日と 20 日、ザボリージャ工場への度重なる砲撃により「建物、システム、設備」に被害が生じた。 -2023 年 6 月 6 日、ノヴァ・カホフカ水力発電ダムが深刻な被害を受け、「カホフカ貯水池」が流出した。ダムの背後にある貯水池は、ウクライナ南部の大部分に水を供給し、ザボリージャ工場にとっては究極のヒートシンクでした。	⑥
2-12	ukraine-2ndsummaryreport	JAIF	2022	(2-11 に包絡される内容)	—
2-13	NUCLEAR SAFETY, SECURITY AND SAFEGUARDS IN UKRAINE 2nd Summary Report	IAEA	2022	(2-11 に包絡される内容)	—
2-14	NUCLEAR SAFETY, SECURITY AND SAFEGUARDS IN UKRAINE	IAEA	2023	(2-11 に包絡される内容)	—

番号	文献	著者	出版年	重要な指摘等	分類
2-15	ロシアのウクライナ侵攻と国際法	森川幸一	2022	・国連憲章 2 条 4 項は「すべての加盟国は、その国際関係において、武力による威嚇又は武力の行使を、いかなる国の領土保全又は政治的独立に対するものも、また、国際連合の目的と両立しない他のいかなる方法によるものも慎まなければならない」と規定し、国際法上は戦意の表明を必要とする正式の「戦争」のみならず、正式の「戦争」とは言えないような、武力の行使やその威嚇を広く一般的に禁止した。 ・もともと武力の行使が一般的に禁止されたといっても、そのすべてが禁止されているわけではない。国連憲章が明示的に認めている例外としては、後述する国連の集団安全保障のための軍事的措置（国連憲章 42 条）と個別的・集団的自衛権（同 51 条）とがある。特に後者は、個別国家やその集団が国連安保理の許可を得ずに一方的な武力の行使に訴えることを認めるもので、その濫用を防ぐことが極めて重要になる。（前者について、国連安保理の投票手続きには常任理事国の拒否権（veto）が組み込まれており、常任理事国の一国でも反対すれば決議は成立しない。）	④
2-16	原発危機における自衛隊・日米同盟	秋山信将	2013	・情報共有が実効的になされなかった要因としてもう一つ指摘すべきは、原発の設備の配置やセキュリティ上の機微情報の共有のあり方に関するルールの不在である。とりわけ、設計基礎脅威（DBT）に係る機微情報には、東京電力社内においても極めて限られた人員しかアクセスを許されておらず、この情報を他者に漏洩した場合には刑事罰に問われることになっている。このため、東京電力内部でも、セキュリティ上機微な情報であるかどうかの判断、およびセキュリティ上の要請と事故収束のために関係各機関と情報を共有する必要性との間の優先順位づけについての適切な調整ができなかった。	⑦

番号	文献	著者	出版年	重要な指摘等	分類
3. 軍事攻撃シナリオ					
3-1	原子力施設に対する攻撃の影響に関する一考察	日本国際問題研究所	1984	・原発に対する攻撃が行われた場合の影響を明らかにするため、付与された事故条件において、周辺の公衆被ばくの影響を推定。(事故条件:①非常用電源喪失、②格納容器破損、③原子炉直接破壊) ・ただし、シナリオの代表性や評価可否の観点から、具体的な推定は「②格納容器破損」シナリオのみで行われた。また、同シナリオの推定結果は、既往研究である米国の NUREG/CR-2239「立地基準策定のための技術的指針(Technical Guidance for Siting Criteria Development)」を引用している。なお、同既往研究は平時の原子炉における事故の経過と被害の推定について、確率論的安全評価の検知より体系的に研究したものであり、その中で、格納容器が初期に大きく破損し、かつ他の安全機能がすべて喪失したシナリオをケースの1つとして扱っているため、引用している。 ・「②格納容器破損」で NUREG/CR-2239 を引用した推定結果： -緊急避難を全くしない場合、周辺公衆の急性死亡は平均 3,600 人/最高 18,000 人、急性障害は平均 6,300 人/最高 41,000 人 -警告後 1~5 時間で退避する場合、周辺公衆の急性死亡は平均 830 人/最高 8,200 人、急性障害は平均 3,600 人/最高 33,000 人 -長期的影響として、癌死亡は平均 8,100 人/最高 24,000 人	—
3-2	大規模災害を端緒とする台湾危機に対する日米共同対処をめぐる課題（2018年度 TTX 報告書）	笹川平和財団	2020	・「安全保障政策決定過程において日米間にはギャップが存在するのではないか」という問題意識のもと、中台間のグレーゾーン事態である台湾有事における、付与された複数シナリオについて、日米の両国がとる危機対応を机上演習(Table Top Exercise)形式で検証したもの。 ・本演習は、参加者を日米の2チームに分け、プレイヤーが意思決定を行う時間帯(Move)を1~3で構成した。 -Move1:中国が台湾北部で発生した大地震に伴う混乱を好機として、救援活動に乗り人民解放軍を派遣するなど台湾統一を図る決心をし、その環境整備のためにサイバー攻撃等、台湾社会の混乱を増大させる行動をとった状況を模擬した。(地震発生~4日後までを条件付与) -Move2:大地震の混乱と救援活動に乗り、中国が台湾統一のため侵攻を企図していることが強く示唆される状況を模擬した。(Move1から連続した情勢。地震発生5日目までを条件付与) -Move3:救援活動に向かうと主張する中国の両用戦部隊が台湾への進出を開始し、その前衛の中国海軍艦艇と領海周辺を警戒中の台湾海軍艦艇および米海軍艦艇との間での小規模な衝突が発生した状況を模擬した。(Move1・2のプレイヤーのアクションを引き継がない独立した場面。Move1後の地震発生4~7日目までを条件付与) ・Move2では、日米間の危機対応プロセスの相違が明らかになった。米国は台湾防衛活動に専念する意思決定をしたが、日本政府はまず国会での事態認定に必要な「証拠集め」に注力する(事態:存立危機事態、重要影響事態、等)。日本の国内法の規定上、現状がどの事態に認定されるかによって、日本がとりうる行動の範囲、とりわけ自衛隊の運用と対米支援の範囲が大きく変動する構造となっている。というのも、自衛隊の活動要件や内容に関する法的な整理が、国会審議に耐えうる合憲性を担保するため、現実味を帯びた情勢を想定し、いかなる条件で何ができるかを具体的に規定するポジティブリスト方式でなされているため(他国の大多数はネガティブリスト)。 ・繰り返しになるが、日本の安全保障、特に自衛隊の運用や同盟国等との共同行動にかかる法体系は、情勢の変化が生じること事態認定を行い、事態によって日本が実施しうることを規定するポジティブリスト方式である。しかし、日本が置かれた昨今の厳しい安全保障環境下で、生起するであろう事態を「立法事実」として想定しつくすには限界がある。むしろ、あくまでも憲法の範囲内ではあるが、してはならないことを定めるネガティブリスト方式に改める時機に来ているのではないかと。現行のポジティブリスト方式が有効であるためには、事態を分類する上で、その判断材料となる情報収集および分析が死活的に重要である。とはいえ、正確な情報や真実のみを吸い上げ、分析することはいかなる国においても不可能である。ましてや、意思疎通の難しい政権や政治家、あるいは合理的行為主体でないテロリストの意志を読み取り、情勢を判断することはきわめて困難である。ポジティブリスト方式の日本の安全保障法体系は、この現実を無視して整備が続けられてきたともいえる。	③

番号	文献	著者	出版年	重要な指摘等	分類
3-3	サイバー攻撃に端を発する台湾危機における日米共同対処の課題（2020年度 TTX 報告書）	笹川平和財団	2021	・中国の台湾武力統一を仮定の事象とし、実際の武力行使に至る前の段階である、いわゆるグレーゾーンにおける日米両国の政策決定上の課題、共同作戦の制約を明らかにし、それらの解決策を探ることを目的としたもの。日米両チームは与えられたシナリオに基づいて政策決定のための議論・決定し、その政策を提示し合って次の政策を議論するワークショップ形式で実施した。 ・シナリオは、中国による台湾武力統一における実際の武力行使に至る前から繰り返し実行されと考えられる「中国のサイバー攻撃」に焦点を当てている。 ・日本政府への提言として、各組織に分残し縦割り型となっているサイバーセキュリティ担当機関を相互連携可能な水平型に壊変する組織改編や、国内のみ対象となっているサイバーセキュリティ法制の国外へ拡張した基本法の制定等を挙げている。	ー
3-4	台湾有事シナリオ：低烈度ハイブリッド戦からのエスカレート（2022年度 TTX 報告書）	笹川平和財団	2023	・日本側が作成した「台湾有事」をめぐるシナリオに基づき、日本政府チームを構成する日本人参加者および米国政府チームを構成する米国人参加者がプレーしたもの。 ・シナリオとしては台湾有事の際の低烈度のハイブリッド戦からのエスカレーションを想定し、以下 3 つの Move で構成。 -Move1:「ハイブリッド戦の激化」 -Move2:「通常脅威・ミサイル脅威の高揚」 -Move3:「核の恫喝」 ・日本チームは、事後評価において、日本政府の構造的問題としてグレーゾーン事態に適応できる制度や態勢が未だ不十分であるとの所見を示した。すなわち、事態認定をめぐる日本国内の議論は、有事に際して意味がないことがすでに明らかになっているにもかかわらず、日本チームがその議論に固執していることは顕著であった。また、事態認定に代表される制度的制約による思考および意思決定の混乱の問題は、日本チームの米国主導の作戦への参加にも従来型の影響を与えた。	③
3-5	アジア太平洋地域秩序形成と原子力	大庭三枝 (日本国際問題研究所)	2011	・アジア太平洋地域における原子力を巡る動向及びそれと連動する地域秩序の在り方の将来像について、4 つのシナリオに沿って展望。 (1)「新秩序にむけた抗争」シナリオ：このシナリオは、アジアにおける新興国／途上国は順調な経済発展を遂げ、それに伴い、欧米を中心とする先進国が維持してきた既存の国際秩序やそれを下支えするルールの変更を迫る、そのことにより、新たな秩序のあり方を巡って、新興国／途上国と先進国との間の抗争が激化していく、というシナリオ。 (2)「A concert of Asia Pacific」シナリオ：このシナリオは、新興国／途上国の経済発展が順調に進む、という点ではシナリオ(1)と同様だが、各国間の関係が協調的／協力的であり、国際協調によって問題解決を図るという志向が各国ともに強い状況を想定している。 (3)「現状維持」シナリオ：このシナリオにおいては、インドや中国などの新興国やその他途上国の経済成長が、人口の伸びの鈍化、ないしバブルの崩壊等によって減速し、先進国の成長は回復する。よって依然として先進国が世界経済の中核を担い、新興国や他方途上国は既存の国際秩序に従う、あるいはその枠内での限定された程度に主張を行うにとどまる状況となっていることを想定している。 (4)「ゼロサム対立的アジア」シナリオ：このシナリオは、インドや中国などの新興国やその他途上国の経済成長が、人口の伸びの鈍化、ないしバブルの崩壊等によって減速しているという点ではシナリオ(3)と共通している。しかしながら、新興国・途上国は既存の先進国中心の国際システムやそこでのルールには従おうとはせず、むしろ敵対的な行動をとる。また、新興国間の対立も激化する。他方先進国の経済の回復も思うように進まないものの、既存のシステム維持を政治的には主導権を巡り、経済的には少ないパイを巡って争うといった状況を想定している。	ー

番号	文献	著者	出版年	重要な指摘等	分類
3-6	朝鮮半島のシナリオ・プランニング	阿久津・金田・飯田 (日本国際問題研究所)	2015	・北朝鮮の現状把握、日本の危機対応とその課題を明らかにするため、朝鮮半島情勢の安全保障シナリオを複数導出し（第 10 章）、「防衛」（第 11 章）と「外交」（第 12 章）の両面で日本の危機対応を検討した。 ・第 10 章では、北朝鮮をめぐる朝鮮半島シナリオと日本の対応について、シナリオプランニングの主要な手法の一つである「トレンズ・ショック（趨勢と衝撃）」アプローチを用いて析出した総合的な分析である。ここでは、北朝鮮が取りうる行動ならびに日本が周辺国とともに取りうる行動について、多様なシナリオを図式化した。 ・本研究で採用したシナリオプランニングの手順（主に第 10 章）は以下。なお、十字架モデルで用いる「安定⇔不安定」、「統合的⇔分裂的」、「穏健⇔強硬」という相互に相反する 2 つの軸は、国家の体制の状態や政策動向を分析する際にはしばしば採用される基準である。 ①朝鮮半島情勢について、特に北朝鮮の政策動向を中心とした短中長期的趨勢（トレンド）と衝撃（ショック）の試み（ここでは十字架モデル（4 象限分析）を適用） ②短期的（2015 年～2018 年）事象の趨勢を抽出 ③北朝鮮の行動に対する主要関係国（米国、韓国、中国、ロシア）の行動に関するシナリオを想定し事象シナリオを作成（ここでも十字架モデルを適用する） ④上記事象シナリオに対する日本の対応シナリオを想定 ⑤さらに、②の段階で衝撃も複数想定しておき、対応について示す（衝撃シナリオ作成の試み） ・②で想定される日本にとっての衝撃例を烈度順に特記すると以下ようになる。第 11 章の防衛面の対応では、烈度の高い(1)～(3)の 3 シナリオを検討し、第 12 章の外交面の対応では、烈度の低い(4)～(7)の 4 シナリオを検討した。 (1)北朝鮮の核・ミサイル能力におけるブレークスルー（「核抑止力完成」） (2)北朝鮮の「体制崩壊」（①無政府状態、②指導者交代、の 2 パターン⇒「中国介入による北朝鮮指導者交代」、「北朝鮮南侵」） (3)北朝鮮による南侵 (4)北朝鮮の対米軟化（それに対応する「米国の対北朝鮮軟化」、その延長には「米朝平和協定」の可能性が考えられる） (5)米中協調による対北朝鮮対処 (6)南北緊張緩和（⇒その延長には「南北首脳会談」が考えられる） (7)拉致問題、核問題、ミサイル問題の進捗の不一致、等	—
3-7	DELIBERATE NUCLEAR USE IN A WAR OVER TAIWAN: Scenarios and Considerations for the United States	Matthew Kroenig	2023	・米国と世界が直面する安全保障上の課題を明らかにするため、台湾有事における米中の両国がとる核兵器使用シナリオを複数導出した。	—
3-8	Scenario Analysis on a Ukrainian Insurgency	Emily Harding	2022	・ウクライナ反乱へ NATO 加盟国が支援する際の課題と便益を明らかにするため、ロシアのウクライナ領土シナリオを複数導出した	—
3-9	Risk Analysis Methods for Nuclear War and Nuclear Terrorism	—	2023	（特になし）	—

番号	文献	著者	出版年	重要な指摘等	分類
3-10	安全保障政策のリアリティ・チェック	日本国際問題研究所	2017	・2015 年の新日米防衛協力のための指針、2016 年の新安保法制下の評価を行い、新たな日本の安全保障政策と日米同盟のリアリティ・チェックを行うため、6 名の委員の論文を紹介してある。 ・興味深いことに、分析結果に、以下の四つの点で相似性があった。 ①新安保法制という新たな法的枠組み（および、日本の平和と安全の確保に関しては新たな日米防衛協力のための指針）ができたことで、日本が従来はできなかった多くの活動を行うことが、理論的（法的）には可能になった。 ②しかし、実際にそれを運用しようとする、さまざまな問題があり、それを克服するのは今後の課題である。例えば、まず日本政府が必要な事態認定を速やかに行えるかどうかという点であった。根本には、日本の「政治的意志」の問題がある。日本の平和と安全の確保のためであれ、国際平和に日本が貢献しようとする場合であれ、日本が「できるようになった」ことのうち何を実際に行っていくのかは、日本の国益に基づいて日本自身が判断していかなければならない。 ③その中でも、日本が行う新たな活動に対する国会の承認のとりつけ（日本の平和と安全の確保に関してはそれ以前に事態認定のあり方も）が大きなポイントになる。軍の行動を民主的に統制する必要と軍の活動の実効性の確保の間の緊張関係は、実は日本に限った問題ではない。世界の民主主義国は、全てこの問題と向き合っている。では、なぜ日本の場合にはこの問題が特に先鋭化しやすいのか。それは、本稿の冒頭でもふれたように、「平和のための軍事力の役割」を直視しながらない感情が国民の間に今なお根強く、敵による日本攻撃の脅迫があった場合などに、その感情が、日本が戦争に巻き込まれることを避けるためには自衛隊の活動を制約すべきであるといった意見につながりやすく、それを一部政党が政治的に利用しようとする可能性が否定できないからである。 ④法的枠組みにも、依然としてさらなる改善が必要な点が残されている。	—

番号	文献	著者	出版年	重要な指摘等	分類
3-10 (1)	安全保障政策のリアリティ・チェック 第1章 平和安全法制における法的事態とその認定について	森聡	2017	・森論文は、北朝鮮が日本に対する武力攻撃の恫喝を行うというシナリオを想定して、新たな安保法制の下で、「自衛隊の活動の実効性と、それに対する法的規制という二つの要請にどう折り合いをつけるか」という問題を、特に「事態認定」という観点から検討しようとしたものである。 ・森がこの論文で強調するのは、まず、法的事態の認定には、それに先行する安全保障上の政策判断が存在していなければならないということである。特に、重要影響事態と存立危機事態の場合、ここで求められる政策判断は、主に、①自衛隊の運用によって防衛すべき日本の安全保障上の利益をいかに定義するか、②日本の安全保障に及んでいる脅威の深刻度をいかに評価するか、③米軍との連携方法をいかに判断するか、という諸点に関わるものであるが、このうち①と③をあらかじめ政府内で検討しておくことと、①については国民の安全保障意識を向上させるべく日頃から政策論議を行い、啓蒙を図ることが必要であるというのが森の考えである。 ・次に森が強調するのは、重要影響事態や存立危機事態における自衛隊の活動に関して原則とされている国会による事前承認について、敵対勢力からの威嚇や恫喝に晒される世論に国会が敏感に反応しすぎると、自衛隊の活動の実効性を阻害するリスクがあるという現実が直視されるべきであるということである。たとえば森は、彼の「朝鮮半島有事シナリオ」の中で、北朝鮮の軍事的恫喝があれば日本が報復の標的にされるのではないかというおそれから日本の世論が割れ、それを追い風に野党が、政府の提出した重要影響事態の認定を前提とした自衛隊の活動に関する基本計画に反対した場合、審議が紛糾し、米国あるいは韓国、オーストラリアなどの連携にも悪影響を与えるおそれがあると警鐘を鳴らしている。特に、日米同盟に基づく米国からの後方支援活動の要請に対し、日本が速やかに行動できないならば、「北朝鮮に加えて韓国や米国にも誤ったシグナルを送ることになりかねない」。 ・言い換えれば、敵国による日本に対する軍事的脅迫は、「自衛隊の実効的な運用と民主的統制の緊張関係を先鋭化させる効果を持つ」ため、それが致命的な初動の遅れにつながらぬよう、何らかの対策が必要であるというのが森の主張である。具体的な対策として森が提案しているのは、 ①国会での基本計画の承認手続きの紛糾が予想される場合などには、国会による事前承認を避けて、事後承認を求めるといった方式が採用されるべきこと、 ②当初は事前承認を求めた場合でも、国会での議論が紛糾している間に情勢に重要な変化が生じ、重要影響事態を前提とした自衛隊の後方支援活動の実施などが必要になった場合には、審議途中から事後承認に切り替えることが許されるべきであること。 ・自衛隊の活動の承認に国会が関与するのは、ひとえに「民主的統制」を貫徹する趣旨からであるが、有事が発生しないし発生しつつある状況下で、敵対勢力からの威嚇や恫喝に晒される世論に敏感に反応する国会が自衛隊の活動の承認に係わることはリスクもあり、こうした現実も直視すべきである。自衛隊の活動に対する民主的統制と自衛隊の活動の実効性との間でバランスをとらなければならないが、民意の反映された国会による自衛隊の統制が、自衛隊による対処の実効性を犠牲にし、ひいては日本国民の生命と財産を致命的な危険に陥れるようなことがあってはならない。 ・いわゆるグレーゾーンへの対応に際して、国務大臣全員が参集して臨時閣議を開催することが困難な場合には、内閣総理大臣の主宰により、電話等により各国務大臣の了解を得て閣議決定を行うとされているが、これに準じた手続を武力攻撃事態と存立危機事態の場合についても定めることが考えられる。	②
3-10 (2)	安全保障政策のリアリティ・チェック 第2章 北朝鮮核問題と拡大抑止	高橋杉雄	2017	・高橋論文は、北朝鮮による核兵器と弾道ミサイル開発が進み、北朝鮮の核・ミサイルを「現実的な脅威」とみなさなければならない新たな地政戦略的環境が生まれてきているとの認識に基づき、そうした新たな環境の下で米国の拡大抑止が直面するようになった課題について検討したものである。	—

番号	文献	著者	出版年	重要な指摘等	分類
3-10 (3)	安全保障政策のリアリティ・チェック 第3章 シームレスな安全保障体制への課題「グレーゾーン」事態からのエスカレーションを巡って	神保謙	2017	・神保論文は、新安保法制施行後の日本の防衛・安全保障政策の法的基盤が、実際の運用においてどこまで「シームレス」になっているのかを、グレーゾーン事態から事態がさらにエスカレートする場合を想定して検証しようとしたものである。 ・神保の結論は、海上保安庁と海上自衛隊の間の役割分担には依然として「切れ目」が残っており、十分にシームレスになっていない面があるということである。神保によれば、警察権と自衛権の切れ目を埋める方法としては、海上保安庁（及び警察）の能力と権限を拡大するという「下→上」のアプローチと、自衛隊による警察権行使の適用拡大という「上→下」のアプローチがある。このうち、「上→下」のアプローチについては、新たな安全保障法制では、先に述べた自衛隊の治安出動・海上警備行動等の発令の迅速化に関する2015年5月の閣議決定を行ったことや、平時における米国等に対する武器等防護の規定を設けることなどによって前進が図られている。だが、「下→上」の海上保安庁の権限拡大については、海上保安官の武器使用権限に関する議論が警察官職務執行法第7条を準用した海上保安庁法第20条の規定に「雁字搦め」になったままで、「欠落したまま」になっている。 ・もう一つの結論としては、新安保法制の下での「重要影響事態」の認定と運用は、「予想以上に難しい」ということである。重要影響事態と認定するために必要な「そのまま放置すれば我が国に対する直接の武力攻撃に至るおそれのある事態等」という定義の意味するところについての国内的コンセンサスは依然として十分に形成されていない。そのため、国会における承認プロセスが遅延し、タイムリーな後方支援を実施できないおそれがあると、神保はいう。 ・「(1)尖閣諸島」(日中)と「(2)南シナ海」(中比)における烈度が増すグレーゾーン事態について、シナリオを本文末尾に記載。 ・(1)①中国大型巡視船による尖閣周辺海域封鎖シナリオについて、仮に、中国政府が「グレーゾーン事態」に対する日本側の軍投入によるエスカレーションと解釈した場合（このように解釈する可能性は極めて高いと思われる）、中国は比例原則による対応として中国人民解放軍を投入することが十分考えられる。 ・(1)②武装した非正規組織による尖閣上陸シナリオについて、正規軍ではない民兵組織（例：武装漁民）による上陸行動を「武力攻撃」の法的根拠とすることは困難であると思われる。そのため、治安出動した自衛隊に対し、中国政府は自国民保護を名目に人民解放軍を展開することが十分予想される。	③
3-10 (4)	安全保障政策のリアリティ・チェック 第4章 台湾海峡危機シナリオ	佐橋亮	2017	・佐橋論文は、台湾海峡において、台湾、米国、日本の行動に対する中国の「過剰対応」によって情勢が緊迫する可能性に焦点を当て、そのような場合に日本の安全保障政策に何が問われるのかを探ろうとしたものである。 ・このシナリオでは、「重要影響事態／存立危機事態／武力攻撃事態等のシームレスな移行は対象となっていない」。台湾海峡で緊張が高まった場合、そうした事態に発展する以前にも、「様々な事態の経過があり、そこに日本、日米同盟として問われるものも多いことを示唆する」のがシナリオの目的なのである。 ・「台湾海峡危機」について、低烈度のシナリオを本文に記載。	—
3-10 (5)	安全保障政策のリアリティ・チェック 第5章 南シナ海危機と重要影響事態：切れ目としての船舶検査とアセット防護	小谷哲男	2017	・小谷論文は、南シナ海における中国の力による現状変更の試みが米中間の危機をもたらす可能性に焦点を当て、そのような場合に日本の新たな安全保障政策がいかなる「リアリティ」に直面するのかを探っている。	—
3-10 (6)	安全保障政策のリアリティ・チェック 第6章 安保法制とPKO—カンボジアPKOの事例研究—	村上友章	2017	(特になし)	—

付録 B ロシアによるウクライナ・ザポリージャ原子力発電所攻撃の主な被害

Table B-1 ロシアによるザポリージャ原発攻撃の変遷（出典：WNA(2024) [15]）

日時	被害
2022 年 3 月 4 日	発射体は原発 1 号機から約 300 メートル離れた「訓練棟」に衝突した。（Figure B-1 の赤枠）
2022 年 7 月 22 日	ウクライナ軍諜報機関はザポリージャ工場でのロシア軍に対する無人機攻撃の映像を公開した。（Figure B-1 の緑枠）
2022 年 8 月 5 日	砲撃により窒素酸素ステーションと補助建物が損傷した。
2022 年 8 月 6 日	砲撃により同原発の「使用済み燃料貯蔵施設エリア」の壁、屋根、窓が損傷し、ウクライナ人の警備員が負傷した。（Figure B-1 のオレンジ枠）
2022 年 8 月 11 日	砲撃により発電所の「消防署にある放射線監視装置」が損傷した。
2022 年 8 月 20 日、21 日	砲撃により、原子力発電所付近の「実験施設と化学施設」が損傷した。
2022 年 9 月 3 日	IAEA の視察により、「タービン潤滑オイル保管タンク」「使用済み燃料移送車庫など各種一般建造物の屋根部分」「新燃料や放射性固体廃棄物を保管する原子力用建屋」「訓練センター」「物理的防護システムの集中監視建屋」「使用済み燃料の乾式貯蔵施設付近の放射線モニタリング装置が設置されたコンテナ」の損傷を確認した。
2022 年 9 月 26 日の週	発電所近くで多数の地雷が爆発したが、これはおそらく地元地域の野生動物の移動が原因。
2022 年 9 月 27 日	IAEA は、爆発により「2 号機のタービンホール」の窓が割れた。
2022 年 9 月 30 日	IAEA は、爆発により発電所の境界フェンスのすぐ外側にある「6kV ケーブル」が損傷した。
2022 年 11 月 19 日、20 日	ザポリージャ工場への度重なる砲撃により「建物、システム、設備」に被害が生じた。
2023 年 6 月 6 日	ノヴァ・カホフカ水力発電ダムが深刻な被害を受け、「カホフカ貯水池」が流出した。ダムの背後にある貯水池は、ザポリージャ工場にとっては究極のヒートシンクだった。



Figure B-1 ザポリージャ原発の航空図と被害箇所（出典：WNA(2024) [15]）

付録 C 法的事態と自衛隊の行動類型

Table C-1 法的事態と自衛隊の行動類型（新・防衛法制(2018) [30]、日本の防衛政策(2016) [31]を参考に作成）

法的事態				自衛隊の行動類型							自衛権 / 警察権	烈度	2015 年平和安全法制の整備時の変更点
		定義	攻撃対象	*一般に警職法第 7 条が適用される。合理的に必要と判断される限度(警察比例の原則)を超えてはならない。									
					発動条件	武器使用要件*	危害許容要件*	命令権者	閣議決定	国会承認			
1	武力攻撃事態	日本への武力攻撃が発生した事態又は明白な危険が切迫する事態	他国→日本	防衛出動	日本への武力攻撃が発生した事態又は明白な危険が切迫する事態	・我が国を防衛するため必要な武力を行使できる		内閣総理大臣	必要	原則事前 ※緊急を要する場合は事後承認	自衛権	高	－
	武力攻撃予測事態	事態が緊迫し、武力攻撃が予測されるに至った事態	他国→日本	防衛出動待機命令	事態が緊迫し、防衛出動命令が発せられることが予測される場合	・自衛隊員等の生命・身体防護	・正当防衛、緊急避難	防衛大臣	必要 ※内閣総理大臣の承認	－	自衛権	高	－
2	存立危機事態	密接な関係にある他国への武力攻撃が発生し、日本の存立が脅かされる等の危険がある事態	他国→日本に連関する第三者国	防衛出動	密接な関係にある他国への武力攻撃が発生し、日本の存立が脅かされる等の危険がある事態	・我が国を防衛するため必要な武力を行使できる		内閣総理大臣	必要	原則事前 ※緊急を要する場合は事後承認	自衛権	高	新三要件を満たせば、集団的自衛権の行使可能

(次頁に続く)

法的事態				自衛隊の行動類型							自衛権 / 警察権	烈度	2015 年平和安全法制の整備時の変更点
		定義	攻撃対象		発動条件	武器使用要件*	危害許容要件*	命令権者	閣議決定	国会承認			
3	緊急対処事態 (またはいわゆる「グレーゾーン事態」)	武力攻撃に準ずるテロ等の事態	テロリスト等 →日本	治安出動	間接侵略その他の緊急事態に際して、一般の警察力をもつては、治安を維持することができないと認められる場合	・自己もしくは他人の防護 ・公務執行に対する抵抗の抑制	・正当防衛、緊急避難、兇悪犯による公務執行に対する抵抗の抑制 ・職務上警護する人などが暴行・侵害を受ける危険 ・一定の要件を満たした外国船舶を停船させるため(船体射撃)	内閣総理大臣	必要 ※一部の状況において迅速化	事後承認 ※出動命令から20日以内に付議	警察権	中	閣議決定手続きの迅速化 ①離島などへの武装集団による不法上陸
				海上における警備行動	海上における人命若しくは財産の保護又は治安の維持のため特別の必要がある場合	・自己もしくは他人の防護 ・公務執行に対する抵抗の抑制	・正当防衛や緊急避難 ・一定の要件を満たした外国船舶を停船させるため(船体射撃)	防衛大臣	必要 ※一部の状況において迅速化	—	警察権	低	閣議決定手続きの迅速化 ①離島などへの武装集団による不法上陸 ②領海及び内水上の外国軍艦の無害ではない通航 ③公海上の民間船舶へ侵害行為を行う外国船舶
				自衛隊の施設等の警護出動 ※自衛隊等施設に限定	自衛隊又は在日米軍施設・区域において、大規模なテロ攻撃が行われるおそれがあり、かつ、被害防止の必要があると認める場合	・自己もしくは他人の防護 ・公務執行に対する抵抗の抑制	・正当防衛、緊急避難、兇悪犯による公務執行に対する抵抗の抑制 ・警護施設への大規模な破壊の危険	内閣総理大臣	必要	※事前に関係都道府県知事の意見聴取等が必要	警察権	低	—
				弾道ミサイル等に対する破壊措置	弾道ミサイル等が日本に飛来するおそれがあり、被害防止の必要があると認めるとき	—	・弾道ミサイル等の破壊	防衛大臣	必要 ※内閣総理大臣の承認	事後報告	警察権	低	
				領空侵犯に対する措置	外国の航空機が国際法規等の規定に違反して日本の領空に侵入したとき	—	・正当防衛、緊急避難	防衛大臣	—	—	警察権	低	—

(次頁に続く)

法的事態				自衛隊の行動類型 *一般に警職法第7条が適用される。合理的に必要と判断される限度(警察比例の原則)を超えてはならない。							自衛権 / 警察権	烈度	2015 年平和安全法制の整備時の変更点
		定義	攻撃対象		発動条件	武器使用要件*	危害許容要件*	命令権者	閣議決定	国会承認			
4	重要影響事態 (またはいわゆる「グレーゾーン事態」)	そのまま放置すれば日本への武力攻撃に至るおそれのある事態	他国 →日本に関連する第三者国	後方支援活動等	我が国の平和及び安全に重要な影響を与える事態	・自衛隊員等の身体の防護 ・宿営地の外国軍隊の隊員の生命・身体の防護、等	・正当防衛、緊急避難	防衛大臣	必要	原則事前 ※緊急を要する場合は事後承認	－	低	他国軍を支援可能 ※戦闘行為が行われている現場では活動を実施しない ※武器の提供は不可、弾薬の提供は可能
5	国際平和共同対処事態	国際社会の平和と安全を脅かす事態	テロリスト等 →第三者国	協力支援活動等	国際社会の平和及び安全を脅かす事態であって、国連総会又は安保理の決議が存在する場合	・自衛隊員等の身体の防護 ・宿営地の外国軍隊の隊員の生命・身体の防護、等	・正当防衛、緊急避難	防衛大臣	必要	例外なく事前	－	－	他国軍を支援可能 ※戦闘行為が行われている現場では活動を実施しない ※武器の提供は不可、弾薬の提供は可能
6	－	－	テロリスト等 →第三者国	国際平和協力活動	国際連合平和維持活動、国際連携平和安全活動、人道的な国際救援活動	・自衛隊員等の身体の防護 ・宿営地の外国軍隊の隊員の生命・身体の防護、等	・正当防衛、緊急避難	内閣総理大臣 / 防衛大臣	必要	原則事前 ※本体業務及び安全確保業務に限る	－	－	駆け付け警護、安全確保の業務が可能 ※戦闘行為が行われている現場では活動を実施しない
参考	－	－	テロリスト等 →第三者国	(参考) 警察の場合 ※警職法第7条	－	・自己もしくは他人の防護 ・公務執行に対する抵抗の抑制	・正当防衛、緊急避難、兇悪犯による公務執行に対する抵抗の抑制	－	－	－	警察権	低低	－
参考	－	－	テロリスト等 →第三者国	(参考) 海上保安庁の場合 ※海上保安庁法第20条	－	・自己もしくは他人の防護 ・公務執行に対する抵抗の抑制	・正当防衛、緊急避難、兇悪犯による公務執行に対する抵抗の抑制 ・一定の要件を満たした外国船舶を停船させるため(船体射撃)	－	－	－	警察権	低低	－

(以上)

付録 D 自衛隊の行動類型の詳細

Table D-1. 自衛隊の行動類型の詳細（出典：令和 5 年版防衛白書 [12]）

行動類型	対象となる事態等	行動の要件等	権限に関する主な規定
防衛出動 [自衛隊法第 76 条]	①我が国に対する外部からの武力攻撃が発生した事態又は武力攻撃が発生する明白な危険が切迫していると認められるに至った事態に際して、我が国を防衛するため必要があると認める場合 ②我が国と密接な関係にある他国に対する武力攻撃が発生し、これにより我が国の存立が脅かされ、国民の生命、自由及び幸福追求の権利が根底から覆される明白な危険がある事態に際して、我が国を防衛するため必要があると認める場合	①命令権者：内閣総理大臣 ②国会の承認：必要（原則として事前承認） ③閣議決定：必要	○我が国を防衛するため必要な武力の行使等 ○海上保安庁の統制（武力攻撃事態におけるものに限る）
防衛出動待機 [自衛隊法第 77 条]	事態が緊迫し、前条第一項の規定による防衛出動命令が発せられることが予測される場合において、これに対処するため必要があると認めるとき	①命令権者：防衛大臣 ②国会の承認：不要 ③閣議決定：必要（内閣総理大臣の承認）	—
防衛施設構築の措置 [自衛隊法第 77 条の 2]	事態が緊迫し防衛出動命令（武力攻撃事態におけるものに限る）が発せられることが予測される場合において、出動を命ぜられた自衛隊の部隊を展開させることが見込まれ、かつ、防備をあらかじめ強化しておく必要があると認められる地域（展開予定地域）があるとき	①命令権者：防衛大臣 ②国会の承認：必要（対処基本方針の閣議決定後） ③閣議決定：必要（内閣総理大臣の承認）	○展開予定地域内における陣地・その他の防御のための施設の構築 【武器の使用】 ○防衛施設構築の措置の職務に従事する自衛官について、展開予定地域内において、自己又は自己と共にその職務に従事する隊員の生命・身体の防護のためやむを得ない必要があると認める相当の理由がある場合、その事態に応じ合理的に必要と判断される限度で武器を使用できる。ただし、正当防衛又は緊急避難の要件に該当する場合のほか、人に危害を与えてはならない。
防衛出動下令前の行動関連措置 [自衛隊法第 77 条の 3 及び米軍等行動関連措置法]	事態が緊迫し、防衛出動命令が発せられることが予測される場合	①命令権者：（物品提供）防衛大臣又はその委任を受けた者、（役務提供）防衛大臣 ②国会の承認：（物品提供）不要、（役務提供）必要（対処基本方針の閣議決定後） ③閣議決定：（物品提供）不要（役務提供）必要（内閣総理大臣の承認）	○米軍等行動関連措置法に基づく行動関連措置としての米軍への物品の提供 ○行動関連措置としての役務の提供 【武器の使用】 ○行動関連措置としての役務の提供の実施を命ぜられた自衛隊の部隊等の自衛官について、その職務を行うに際し、自己又は自己と共に当該職務に従事する自衛隊員若しくはその職務を行うに伴い自己の管理の下に入った者の生命又は身体の防護のためやむを得ない必要があると認める相当の理由がある場合に、その事態に応じ合理的に必要と判断される限度で武器を使用できる。ただし、正当防衛又は緊急避難の要件に該当する場合のほか、人に危害を与えてはならない。

（次頁に続く）

行動類型	対象となる事態等	行動の要件等	権限に関する主な規定
国民保護等派遣 [自衛隊法第 77 条の 4]	国民保護法の規定に基づき都道府県知事から要請を受けた場合において事態やむを得ないと認めるとき、又は事態対策本部長（又は緊急対処事態対策本部長）から同法の規定による求めがあったとき	①命令権者：防衛大臣 ②国会の承認：不要 ③閣議決定：必要（内閣総理大臣の承認） ④その他：都道府県知事の要請又は事態対策本部長（内閣総理大臣）の求め	○国民保護法に規定する避難住民の誘導に関する措置、応急措置、交通の規制等 ○警察官職務執行法の一部準用（避難、犯罪の予防・制止、立入等。警察官がその場にいらない場合に限る。） ○海上保安庁法の一部準用（協力要請等） 【武器の使用】 ○国民保護等派遣を命ぜられた部隊等の自衛官の職務の執行について、警察官又は海上保安官若しくは海上保安官補がその場にいらない場合に限り、警察官職務執行法第 7 条を準用する。
命令による治安出動 [自衛隊法第 78 条]	間接侵略その他の緊急事態に際して、 一般の警察力をもっては、治安を維持することができないと認められる場合	①命令権者：内閣総理大臣 ②国会の承認：必要（出動命令から 20 日以内に付議） ③閣議決定：必要	○警察官職務執行法の準用（質問、避難、犯罪の予防・制止等） ○海上保安庁法の一部準用（協力要請、立入検査等） ○海上保安庁の統制 【武器の使用】 ○治安出動を命ぜられた自衛隊の自衛官の職務の執行について、警察官職務執行法第 7 条を準用する。 ○治安出動を命ぜられた自衛隊の自衛官について、準用する警察官職務執行法第 7 条の規定により武器を使用する場合のほか、職務上警護する人等が暴行・侵害を受け又は受けようとする明白な危険がある場合において、武器を使用するほか、他にこれを排除する適当な手段がない場合等の武器の使用を規定。
治安出動待機 [自衛隊法第 79 条]	治安出動命令が発せられることが予測される場合において、これに対処するため必要があると認めるとき	①命令権者：防衛大臣 ②国会の承認：不要 ③閣議決定：必要（内閣総理大臣の承認）	—
治安出動下令前に行う情報収集 [自衛隊法第 79 条の 2]	事態が緊迫し治安出動命令が発せられること及び小銃、機関銃等の武器を所持した者による不法行為が行われることが予測される場合において、情報収集を行うための特別の必要があると認められる場合	①命令権者：防衛大臣 ②国会の承認：不要 ③閣議決定：必要（内閣総理大臣の承認） ④その他：防衛大臣と国家公安委員会と協議	【武器の使用】 ○治安出動下令前に行う情報収集の職務に従事する自衛官について、自己又は自己と共にその職務に従事する隊員の生命・身体の防護のためやむを得ない必要があると認める相当の理由がある場合、その事態に応じ合理的に必要と判断される限度で武器を使用できる。ただし、正当防衛又は緊急避難の要件に該当する場合のほか、人に危害を与えてはならない。
要請による治安出動 [自衛隊法第 81 条]	都道府県知事が治安維持上重大な事態につきやむを得ない必要があると認め、かつ内閣総理大臣が事態やむを得ないと認める場合	①命令権者：内閣総理大臣 ②国会の承認：不要 ③閣議決定：必要 ④その他：都道府県公安委員会と協議の上、都道府県知事が内閣総理大臣に要請	○警察官職務執行法の準用（質問、避難、犯罪の予防・制止等） ○海上保安庁法の一部準用（協力要請、立入検査等） 【武器の使用】 ○治安出動を命ぜられた自衛隊の自衛官の職務の執行について、警察官職務執行法第 7 条を準用する。 ○治安出動を命ぜられた自衛隊の自衛官について、準用する警察官職務執行法第 7 条の規定により武器を使用する場合のほか、職務上警護する人等が暴行・侵害を受け又は受けようとする明白な危険がある場合において、武器を使用するほか、他にこれを排除する適当な手段がない場合等の武器の使用を規定。

（次頁に続く）

行動類型	対象となる事態等	行動の要件等	権限に関する主な規定
自衛隊の施設等の警護出動 [自衛隊法第 81 条の 2]	自衛隊の施設又は在日米軍施設・区域において、大規模なテロ攻撃が行われるおそれがあり、かつ、その被害を防止するため特別の必要があると認める場合	①命令権者：内閣総理大臣 ②国会の承認：不要 ③閣議決定：必要 ④その他：あらかじめ関係都道府県知事の意見を聴き、防衛大臣と国家公安委員会とが協議	○警察官職務執行法の一部準用（質問、避難、立入（以上は警察官がその場にいない場合のみ）、犯罪の予防・制止） 【武器の使用】 ○警護出動を命ぜられた部隊等の自衛官の職務の執行について、警察官職務執行法第 7 条を準用する。 ○警護出動を命ぜられた部隊等の自衛官の職務の執行について、準用する警察官職務執行法第 7 条の規定により武器を使用する場合のほか、職務上警護する施設が大規模な破壊に至るおそれのある侵害を受ける明白な危険があり、武器を使用するほか、他にこれを排除する適当な手段がないと認める相当の理由がある場合、その事態に応じ合理的に必要と判断される限度での武器の使用を規定。
海上における警備行動 [自衛隊法第 82 条]	海上における人命若しくは財産の保護又は治安の維持のため特別の必要がある場合	①命令権者：防衛大臣 ②国会の承認：不要 ③閣議決定：必要（内閣総理大臣の承認）	○海上保安庁法の一部準用（協力要請、立入検査等） 【武器の使用】 ○海上における警備行動を命ぜられた自衛隊の自衛官の職務の執行について、警察官職務執行法第 7 条を準用する。 ○海上における警備行動を命ぜられた海上自衛隊の自衛官の職務の執行について、一定の要件を満たした船舶を停船させるための武器の使用を規定した海上保安庁法第 20 条第 2 項を準用する。
海賊対処行動 [自衛隊法第 82 条の 2 及び海賊対処法]	海賊行為に対処するため特別の必要がある場合	①命令権者：防衛大臣 ②国会の承認：不要（海賊対処行動を総理が承認したとき及び海賊対処行動が終了したとき、国会報告） ③閣議決定：必要（内閣総理大臣の承認） ④その他：防衛大臣が対処要項を内閣総理大臣に提出	○海上保安庁法の一部準用（協力要請、立入検査等） 【武器の使用】 ○海賊対処行動を命ぜられた自衛官の職務の執行について、警察官職務執行法第 7 条を準用する。 ○現に行われている他の船舶への著しい接近や付きまとい等の海賊行為の制止にあたり、当該海賊行為を行っている者が、他の制止の措置に従わず、なお船舶を航行させて当該海賊行為を継続しようとする場合において、当該船舶の進行を停止させるために他に手段がないと信ずるに足りる相当な理由があるときには、その事態に応じ合理的に必要とされる限度で武器を使用できる。
弾道ミサイル等に対する破壊措置 [自衛隊法第 82 条の 3]	弾道ミサイル等が我が国に飛来するおそれがあり、その落下による我が国領域における人命又は財産に対する被害を防止するため必要があると認めるとき	①命令権者：防衛大臣 ②国会の承認：不要（措置がとられたときの事後報告） ③閣議決定：必要（内閣総理大臣の承認） ④その他：緊急の場合に備え、総理の承認を受けた緊急対処要領に従いあらかじめ命令できる。	【武器の使用】 ○我が国に飛来する弾道ミサイル等の破壊措置を命ぜられた自衛隊の部隊は、弾道ミサイル等の破壊のため必要な武器を使用できる。
災害派遣 [自衛隊法第 83 条]	天災地変その他の災害に際して、人命又は財産の保護のため必要があると認める場合等	①命令権者：防衛大臣又はその指定する者 ②国会の承認：不要 ③閣議決定：不要 ④その他：都道府県知事その他政令で定める者の要請（ただし、その事態に照らし特に緊急を要し要請を待つとまがないと認めるときを除く。）	○警察官職務執行法の一部準用（避難、立入等。警察官がその場にいない場合に限る。） ○海上保安庁法の一部準用（協力要請） ○災害対策基本法に規定する権限（警戒区域の設定、緊急通行車両の通行確保等。市町村長、警察官等がその場にいない場合に限る。）

(次頁に続く)

行動類型	対象となる事態等	行動の要件等	権限に関する主な規定
原子力災害派遣 [自衛隊法第 83 条の 3]	原子力災害対策本部の緊急事態応急対策実施区域における緊急事態応急対策を的確かつ迅速に実施するため、自衛隊の支援を求める必要があると認めるとき	①命令権者：防衛大臣 ②国会の承認：不要 ③閣議決定：不要 ④その他：原子力災害対策特別措置法第 17 条第 1 項に規定する原子力災害対策本部長からの要請	○警察官職務執行法の一部準用（避難、立入等。警察官がその場にいない場合に限る。） ○海上保安庁法の一部準用（協力要請） ○災害対策基本法に規定する権限（警戒区域の設定、緊急通行車両の通行確保等。市町村長、警察官等がその場にいない場合に限る。）
領空侵犯に対する措置 [自衛隊法第 84 条]	外国の航空機が国際法規又は航空法その他の法令の規定に違反して我が国の領域の上空に侵入したとき	①命令権者：防衛大臣 ②国会の承認：不要 ③閣議決定：不要	○領空侵犯機を着陸させ又は我が国の領域の上空から退去させるため必要な措置（警告、誘導、武器使用等）
機雷等の除去 [自衛隊法第 84 条の 2]	－	①命令権者：防衛大臣 ②国会の承認：不要 ③閣議決定：不要	○海上における機雷その他の爆発性の危険物の除去及びこれらの処理
在外邦人等の保護措置 [自衛隊法第 84 条の 3]	外国における緊急事態	①命令権者：防衛大臣 ②国会の承認：不要 ③閣議決定：必要（内閣総理大臣の承認） ④その他：外務大臣から生命又は身体に危害が加えられるおそれがある邦人の保護措置の依頼があった場合、当該外国の権限ある当局が現に公共の安全と秩序の維持に当たっており、かつ戦闘行為が行われることがないと認められること、保護措置を行うことについて当該外国の同意があること等	【武器の使用】 ○ 在外邦人等の保護措置の職務に従事する自衛官について、その職務を行うに際し、 ①自己若しくは当該保護措置の対象である邦人若しくはその他の保護対象者の生命・身体の防護又はその職務を妨害する行為の排除のためやむを得ない必要があると認める相当の理由がある場合、②自己若しくは自己と共に当該職務に従事する隊員又はその職務を行うに伴い自己の管理の下に入った者の生命・身体の防護のためやむを得ない必要があると認める相当の理由がある場合、その事態に応じ合理的に必要と判断される限度で武器を使用できる。ただし、正当防衛又は緊急避難の要件に該当する場合のほか、人に危害を与えてはならない。
在外邦人等の輸送 [自衛隊法第 84 条の 4]	外国における災害、騒乱その他の緊急事態	①命令権者：防衛大臣 ②国会の承認：不要 ③閣議決定：不要 ④その他：外務大臣から生命又は身体の保護を要する邦人の輸送の依頼があった場合	【武器の使用】 ○在外邦人等の輸送に従事する自衛官について、その職務を行うに際し、自己若しくは自己と共にその輸送の職務に従事する隊員又は輸送対象者その他職務を行うに伴い自己の管理の下に入った者の生命・身体の防護のためやむを得ない必要があると認める相当の理由がある場合、その事態に応じ合理的に必要と判断される限度で武器を使用できる。ただし、正当防衛又は緊急避難の要件に該当する場合のほか、人に危害を与えてはならない。

(次頁に続く)

行動類型	対象となる事態等	行動の要件等	権限に関する主な規定
後方支援活動等 [自衛隊法第 84 条の 5、重要影響事態安全確保法及び船舶検査活動法]	我が国の平和及び安全に重要な影響を与える事態	①命令権者：（物品提供）防衛大臣又はその委任を受けた者、（役務提供、搜索救助活動、船舶検査活動）防衛大臣 ②国会の承認：必要（原則として措置の実施前） ③閣議決定：必要（対応措置を実施すること及び基本計画の案並びに基本計画に従い定められた実施要項につき内閣総理大臣の承認）	【武器の使用】 ○後方支援活動としての役務の提供又は搜索救助活動の実施を命ぜられた自衛官について、①自己又は自己と共に現場に所在する他の自衛隊員若しくはその職務を行うに伴い自己の管理の下に入った者の生命・身体の防護のためやむを得ない必要があると認める相当の理由がある場合、②外国の領域に設けられた当該部隊等の宿営する宿営地であって米軍等の要員が共に宿営するものに対する攻撃があった場合において、当該宿営地以外にその近傍に自衛隊の部隊等の安全を確保することができる場所がないときは、当該要員と共同して、自己又は自己と共に当該宿営地に所在する者の生命・身体の防護のためやむを得ない必要があると認める相当の理由がある場合には、その事態に応じ合理的に必要と判断される限度で武器を使用できる。ただし、正当防衛又は緊急避難の要件に該当する場合のほか、人に危害を与えてはならない。 ○船舶検査活動の実施を命ぜられた自衛隊の部隊等の自衛官について、自己又は自己と共に現場に所在する他の自衛隊員若しくはその職務を行うに伴い自己の管理の下に入った者の生命・身体の防護のためやむを得ない必要があると認める相当の理由がある場合には、その事態に応じ合理的に必要と判断される限度で武器を使用できる。ただし、正当防衛又は緊急避難の要件に該当する場合のほか、人に危害を与えてはならない。
協力支援活動等 [自衛隊法第 84 条の 5、国際平和支援法及び船舶検査活動法]	国際社会の平和及び安全を脅かす事態であって、その脅威を除去するために国際社会が国際連合憲章の目的に従い共同して対処する活動を行い、かつ、我が国が国際社会の一員としてこれに主体的かつ積極的に寄与する必要があるものに関し、国際連合の総会又は安全保障理事会の決議が存在する場合	①命令権者：（物品提供）防衛大臣又はその委任を受けた者、（役務提供、搜索救助活動、船舶検査活動）防衛大臣 ②国会の承認：必要（例外なき事前承認） ③閣議決定：必要（対応措置を実施すること及び基本計画の案並びに基本計画に従い定められた実施要項につき内閣総理大臣の承認）	【武器の使用】 ○協力支援活動としての役務の提供又は搜索救助活動の実施を命ぜられた自衛官について、①自己又は自己と共に現場に所在する他の自衛隊員若しくはその職務を行うに伴い自己の管理の下に入った者の生命・身体の防護のためやむを得ない必要があると認める相当の理由がある場合、②外国の領域に設けられた当該部隊等の宿営する宿営地であって諸外国の軍隊等の要員が共に宿営するものに対する攻撃があった場合において、当該宿営地以外にその近傍に自衛隊の部隊等の安全を確保することができる場所がないときは、当該要員と共同して、自己又は自己と共に当該宿営地に所在する者の生命・身体の防護のためやむを得ない必要があると認める相当の理由がある場合には、その事態に応じ合理的に必要と判断される限度で武器を使用できる。ただし、正当防衛又は緊急避難の要件に該当する場合のほか、人に危害を与えてはならない。 ○船舶検査活動の実施を命ぜられた自衛隊の部隊等の自衛官について、自己又は自己と共に現場に所在する他の自衛隊員若しくはその職務を行うに伴い自己の管理の下に入った者の生命・身体の防護のためやむを得ない必要があると認める相当の理由がある場合には、その事態に応じ合理的に必要と判断される限度で武器を使用できる。ただし、正当防衛又は緊急避難の要件に該当する場合のほか、人に危害を与えてはならない。
国際緊急援助活動 [自衛隊法第 84 条の 5 及び国際緊急援助隊法]	海外の地域、特に開発途上にある海外の地域において大規模な災害が発生し、又は正に発生しようとしている場合	①命令権者：防衛大臣 ②国会の承認：不要 ③閣議決定：不要 ④その他：被災国政府等より国際緊急援助隊派遣	—

（次頁に続く）

行動類型	対象となる事態等	行動の要件等	権限に関する主な規定
国際平和協力活動 [自衛隊法第 84 条の 5 及び国際平和協力法]	国際連合平和維持活動、国際連携平和安全活動、人道的な国際救援活動	① 命令権者：国際平和協力本部長（内閣総理大臣）（個人派遣される自衛官）防衛大臣（部隊派遣される自衛官） ② 国会の承認：（自衛隊の部隊等がいわゆる本体業務及び安全確保業務を行う場合）必要（原則事前承認）、（いわゆる本体業務及び安全確保業務以外）不要 ③ 閣議決定：必要（国際平和協力業務を実施すること及び実施計画の案） ④ その他：国際平和協力本部長（内閣総理大臣）の要請	【武器の使用】 ○ 国際平和協力業務について、① 自己又は自己と共に現場に所在する他の自衛隊員、国際平和協力隊員若しくはその職務を行うに伴い自己の管理の下に入った者の生命・身体の防護のためやむを得ない必要があると認める相当の理由がある場合、② 宿営する宿营地であって国際平和協力業務に従事する外国の軍隊の部隊の要員と共に宿営するものに対する攻撃があったときは、当該要員と共同して、自己又は自己と共に当該宿营地に所在する者の生命・身体の防護のためやむを得ない必要があると認める相当の理由がある場合、③ いわゆる「安全確保業務」に従事する自衛官については、① 及び②のほか、自己又は他人の生命・身体・財産を防護し、又はその業務を妨害する行為の排除のためやむを得ない必要があると認める相当の理由がある場合、④ いわゆる「駆け付け警護」に従事する自衛官については、① 及び②のほか、自己又はその保護しようとする活動関係者の生命・身体の防護のためやむを得ない必要があると認める相当の理由がある場合、その事態に応じ合理的に必要と判断される限度で武器を使用できる。ただし、正当防衛又は緊急避難の要件に該当する場合のほか、人に危害を与えてはならない。

(以上)