

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
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	論文要旨
Type(English)	Summary

(博士課程)

Doctoral Program

論文要旨

THESIS SUMMARY

系・コース： Department of, Graduate major in	融合理工学 原子核工学	系 コース	申請学位 (専攻分野)： Academic Degree Requested	博士 Doctor of	(工学)
学生氏名： Student's Name	原 大輔		審査員主査： Chief Examiner	相樂 洋	

要旨 (和文 2000 字程度)

Thesis Summary (approx.2000 Japanese Characters)

本論文は「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」と題し 5 章から構成されている。

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、洋上特有の核セキュリティ・核不拡散 (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「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、運転サイクル期間延長、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「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「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「結論」では、各章によって得られた結果を総括し、本論文の結論とした。
これを要するに本論文は、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。

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note : Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ (T2R2) にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。

Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).

論文要旨

THESIS SUMMARY

系・コース： Department of, Graduate major in	融合理工学 原子核工学	系 コース	申請学位（専攻分野）： Academic Degree Requested	博士 Doctor of	（工学）
学生氏名： Student's Name	原 大輔		審査員主査： Chief Examiner	相樂 洋	

要旨（英文 300 語程度）

Thesis Summary (approx.300 English Words)

This paper developed a method for quantitatively evaluating the responsiveness to new threats to nuclear security and safeguards (2S) specific to offshore environments. It also demonstrated the potential for enhancing the robustness of Offshore Floating Nuclear Power Plants (OFNPs) by incorporating 2S by design and presented a robust OFNP concept.

Firstly, the study quantified the proliferation risks of OFNPs in non-nuclear-weapon states, highlighting risk reduction effects through nuclear fuel management specific to offshore conditions. It developed indicators to assess nuclear proliferation resistance, considering high-burnup fuels like Mixed Oxide (MOX) and High-Assay Low Enriched Uranium (HALEU). The results showed that managing MOX fresh and spent fuels with bulk transport and inspection every 10-15 years, along with extended operation cycles and dry cask use, was effective.

Secondly, the study evaluated responses to new nuclear security threats unique to offshore and marine environments. It conducted a structural integrity analysis against torpedo attacks and quantitative evaluations of security against boarding threat. Effective security measures included placing underwater nets and identifying vital areas like spent fuel pool room, auxiliary cooling water intake and alternative control room. The vertical structure of OFNPs and extensive surveillance zones enhanced robustness, and immediate response systems were essential.

Thirdly, the study synthesized results above, presenting a robust OFNP concept that integrated 2S by design to maximize safety, security, and safeguards (3S) synergy. The paper mentioned that the robust vertical structure, placing safety-critical equipment underwater and utilizing the ease of offshore surveillance, could enhance robustness. The developed evaluation method was applicable to various reactor types and installation methods. High burnup, extended operational cycles, and vital area identification enhanced robustness for both offshore and land-based nuclear power plants. Additionally, the study discussed mitigation strategies for beyond design basis threat events and offshore defense considerations.

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note: Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1 copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。

Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).