

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	電力システムの設置環境影響評価に関する研究
Title(English)	Study of environmental impact assessment from the installation site of power system
著者(和文)	野田英樹
Author(English)	Hideki Noda
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9943号, 授与年月日:2015年6月30日, 学位の種別:課程博士, 審査員:奥野 喜裕,堀岡 一彦,岡村 哲至,末包 哲也,栗山 透,伊坪 徳宏
Citation(English)	Degree:, Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第9943号, Conferred date:2015/6/30, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

電力システムの設置環境影響評価に関する研究

Study of environmental impact assessment
from the installation site of power system

2015 年 6 月

指導教員 奥野喜裕 教授

東京工業大学 大学院総合理工学研究科
創造エネルギー専攻

野田英樹

略称一覧	4
第1章 序論	7
1.1 背景	7
1.2 評価手法	10
1.3 先行評価例	16
1.4 本論文の目的	22
1.5 本論文の開発対象	22
1.6 本論文の構成	25
第2章 太陽光発電システムにおける土地利用影響評価	27
2.1 はじめに	27
2.2 方法	28
2.2.1 LIME2	28
2.2.2 被害係数の算出方法	31
2.3 日本の森林植生別評価	38
2.3.1 条件設定	38
2.3.2 評価結果	51
2.3.3 感度分析	54
2.3.4 日本の森林植生別評価まとめ	56
2.4 世界の代表地域別評価	57
2.4.1 条件設定	57
2.4.2 評価結果	61
2.4.3 海外の他手法との比較	65
2.4.4 世界の代表地域別評価まとめ	68
2.5 まとめ	69
第3章 バイオマス発電システムにおける森林施業影響評価	70
3.1 はじめに	70
3.2 方法	71
3.2.1 LIME2	71
3.2.2 条件設定	72
3.2.3 被害係数の算出方法	78
3.3 結果および考察	84

3.3.1	被害係数	84
3.3.2	発電までの環境影響	85
3.3.3	アカマツ林施業の効果	88
3.3.4	設定シナリオの継続性	90
3.4	まとめ	92
第4章	都市ビル内変電設備の火災影響評価	102
4.1	はじめに	102
4.2	方法	103
4.2.1	内部コストの算出方法	103
4.2.2	条件設定	104
4.3	評価結果	105
4.3.1	内部コストの算出	105
4.3.2	感度分析に基づく評価	110
4.4	まとめ	113
第5章	変電設備の設置環境影響総合評価	114
5.1	はじめに	114
5.2	方法	114
5.2.1	評価範囲	114
5.2.2	条件設定	115
5.3	評価結果	119
5.3.1	LCIA	119
5.3.2	内部コスト分析	121
5.3.3	LCIA と内部コスト分析の結果比較	123
5.3.4	LCIA 結果と内部コストの統合	126
5.4	まとめ	129
第6章	総合議論	130
6.1	はじめに	130
6.2	設置環境に起因する環境影響	130
6.3	LIME2 重み付け係数の不確実性影響	137
6.4	引用データの精度とずれの範囲	142
6.5	先行研究との比較	144
6.5.1	電力システム評価	144
6.5.2	CO ₂ 排出影響と土地利用影響	146

6.6	評価範囲とその網羅性	150
6.7	限界と課題.....	155
第7章	結論.....	157
参考文献		160

略称一覧

AIS: Air Insulated Switchgear
 ARRL: Appearance Ratio per Area of the Red List
 BDI: Biodiversity Influence
 BDI(trans): BDI by Transformation
 BDP: Biodiversity Damage Potential
 BERR: Department for Business, Enterprise and Regulatory Reform
 BLC: Borrowed Light Coefficient
 CCS: Carbon Dioxide Capture and Storage
 CDM: Clean Development Mechanism
 CE: Compensation Expense
 CF: Characterization Factors
 CR: Critically Endangered
 CSR: Corporate Social Responsibility
 CVM: Contingent Valuation Method
 DALY: Disability-Adjusted Life Year
 DF: Damage Factor
 DRL: Density of the Red List
 EE: Egalitarian
 EDC: Environmental Damage Cost
 EDP: Ecosystem Damage Potential
 EF: CO₂ Emission Factor
 EINES: Expected Increase in Number of Extinct Species
 EN: Endangered
 GHG: Green House Gas
 GIS: Gas-Insulated Switchgear
 GIT: Gas-Insulated Transformer
 GWP: Global Warming Potential

HA: Hierarchist
 HSB: Hartford Steam Boiler Inspection and Insurance Co
 II: Individualist
 IF: Integration Factor
 IMIA: International Association of Engineering Insurers
 INC: Initial Cost
 IUCN: International Union for Conservation of Nature and Natural Resources
 LCA: Life Cycle Assessment
 LCC: Life Cycle Cost
 LCI: Life Cycle Inventory Analysis
 LCIA: Life Cycle Impact Assessment
 LIME2: Life-cycle Impact assessment Method based on Endpoint modeling 2
 NPP: Net Primary Production
 NPPa: Present NPP after Land Use
 NPPb: Present NPP before Land Use
 NPPp: Potential NPP
 OECD: Organization for Economic Co-operation and Development
 OIT: Oil-Immersed Transformer
 OPC: Operations Costs
 ORNL DAAC: Oak Ridge National Laboratory Distributed Active Archive Center
 PAF: Potentially Affected Fraction
 PDF: Potentially Disappeared Fraction
 PPI(occ): PPI by Occupation
 PPI(trans): PPI by Transformation
 PPI: Primary Production Influence
 PPP: Polluter Pays Principle
 PV: Photovoltaic
 RTap: Recovery Time from NPPa to NPPp
 RTbp: Recovery Time from NPPb to NPPp
 SDC: Social Damage Cost
 SE: Sensitivity
 SI: Single Index
 SRL: Species of the Red List
 SS: Suspended Solids
 TBL: Triple Bottom Line

TC: Technical Committee

TDC: Total Damage Cost

TP: CO₂ Trading Price

UCE: Unit of Compensation Expense

USBR: U.S. Department of the Interior

VU: Vulnerable

WF: Weighting Factor

WTP: Willingness To Pay

第1章 序論

1.1 背景

地球規模で進む温室効果ガス（Green House Gas: GHG）排出の増加にともない、低炭素型社会を目指した社会システムの導入に関する取り組みが世界的に進んでいる。エネルギーに関する分野においても、低炭素型発電設備の普及をはじめ、スマートグリッドなどの送配電設備から需要家設備まで系統制御を含む関連設備を対象とした地域単位での取り組みが進んでいる[1]。一方で、近年、低炭素型発電設備導入時に新たに生じる環境問題が顕在化しつつある。そこで、本論文では電力システムを 1,000MW 級の大規模集中型の発電設備から数 MW 級の小規模分散型の発電設備、および変圧器と開閉装置からなる送変電設備と位置付け、それらの設備がもたらす GHG 排出量抑制効果と地域に与える新たな影響を評価可能な範囲で抽出し定量化することで、温暖化影響抑制以外に考慮すべき環境影響を明確にする。

(1) 電力システムと環境問題への取り組み

電力システムとして定義した発電設備と送変電設備では環境問題に対する様々な取り組みが実施されている。発電設備では太陽光発電（Photovoltaic: PV 発電）、風力発電、地熱発電、水力発電などの GHG 排出抑制を目指した低炭素型発電設備の開発や普及が進んでいる。石炭火力発電では高効率化に加え CCS (Carbon Dioxide Capture and Storage) の検討も進んでいる[2]。一方、送変電設備においても GHG 排出量の抑制に向けた取り組みがみられる。特筆すべき事例としては、従来、絶縁媒体として多用されてきた温室効果ガスである SF₆ ガスに代わる絶縁方式を用いた開閉装置の開発[3]や、送変電設備における SF₆ ガスの管理方法に関する業界の自主的な対策などがある[4]。

また、発電設備を中心にライフサイクルにおける GHG 排出量の分析が 1990 年前後から今日に至るまで世界各国で継続的にすすめられている。例えば、2007 年には発電設備の GHG 排出量分析に関する研究をレビューした論文が公表されている[5]。わが国の代表的な評価としては、2000 年に（財）電力中央研究所の本藤、内山、森泉が代表的な発電設備の評価モデル（電中研モデル）を構築し GHG 排出量の分析結果を報告書としてまとめている[6]。同報告は 2010 年に最新データへの更新がなされ[7]、わが国の標準的データとして扱われている。例えば、電源別の平均 CO₂ 排出量は PV 発電が 38g-CO₂/kWh、風力発電が 25g-CO₂/kWh、地熱発電が 13g-CO₂/kWh であり、大規模石炭火力発電システム（石炭火力）の 943g-CO₂/kWh に対して一桁以上小さい分析結果が示されている。

(2) 電力システムの設置場所に起因する環境問題

電力システムの設置場所は、エネルギー供給のための技術的な制約や、高信頼性や高効率化の確保などのため、自由に選定できない場合がある。たとえば、地熱発電の設置場所には井戸が必要であり、大規模な風力発電の設置場所の選定には風況が重要であり、燃料輸送の効率を考えると木質系バイオマス発電システム（バイオマス発電）は山間地域、石炭火力などの大規模発電設備は沿岸に設置することが一般的である。変電所の設置場所については、都市部で十分な敷地面積が得られない場合は地下やビル内部が候補になる場合もあれば、発電所と需要家の位置関係から山間部に設置しなくてはならない場合もある。他方、PV 発電は設置場所の制約が比較的少ない。

<設置場所に起因する影響の顕在化>

電力システムの設置場所に起因する様々な影響が顕在化してきている。特に設置場所の制約が少ない PV 発電では、山林への設置計画の是非をめぐる議論が生じており[12]、周辺住民による反対運動もおきている[13]。世界遺産に登録された富士山ろくでは、富士市が PV 発電の土地利用に係る自粛要請を行っている[14]。変電設備に関しては変圧器火災の影響が想定される[15]。東日本大震災では、変電設備からの出火が確認されている[16]。風力発電においては、景観の阻害やバードストライクなどの対策が検討されている[17]。

<設置環境影響の定義>

そこで本論文では、電力システムの設置場所、および、その機器の運用にともない発生する周辺地域（エリア）における影響を「設置環境影響」と定義する。次に設置環境影響と電力システムの関係性を述べる。

<トレードオフと波及効果>

電力システムの設置環境影響には以下に示すような他の影響とのトレードオフと波及効果の関係が存在する。これらの事例の設置環境影響は一般市民との関わりも生じるため、環境影響の利害関係者への説明には、評価ケースに沿う詳細な設置条件を考慮した評価が必要である。

トレードオフ

- ・ PV 発電導入による GHG 排出抑制と土地利用増加
- ・ ガス絶縁開閉装置導入による土地利用抑制と GHG 排出増加
- ・ ガス絶縁変圧器導入による火災や油流出リスク抑制と GHG 排出増加
- ・ 風力発電導入による GHG 排出抑制と低周波騒音、バードストライク影響、景観影響など

波及効果

- ・ 木質系バイオマス発電導入による燃料供給源としての森林施業効果
- ・ メタンガス回収などの再生燃料を使用する発電設備の導入による資源再生効果
- ・ 地域分散発電設備導入による GHG 排出削減効果と当該エリアの雇用創出効果など

トレードオフと波及効果の各要素は、直接影響と間接影響に分けて、社会、環境、経済の 3 側面に分類できる。この 3 側面とはトリプル・ボトム・ライン（Triple Bottom Line: TBL）と呼ばれ、1997 年にイギリスの環境コンサルタント会社 Sustainability 社代表のジョン・エルキントンが著書“Cannibals With Forks”の中で提唱したものである。2001 年のヨーテボリサミットにおいて、欧州における企業の社会的責任（Corporate Social Responsibility: CSR）戦略の中核となり、「経済性、環境適合性、社会適合性」の 3 つの側面から社会に対して価値を与えていける企業のみが 21 世紀に存続を許されるとされている[18]。

図 1-1 は 3 つの側面に環境影響のトレードオフと波及効果の各要素を直接影響と間接影響に分けて記載したものである。◎印は直接影響、○印は間接影響を示している。経済分類はコストや損害賠償費用などにより影響を経済的に直接計ることができる場合である。社会分類は周辺市民や周辺事業者が影響を受ける場合である。環境分類は温暖化影響や資源枯渇などの環境影響である。括弧内には具体的な損失や影響を記載している。社会分類と環境分類に記載した各要素は、経済的な影響として対応する要素を経済分類に記載している。例えば、土地利用影響は森林伐採により林業が影響を受ける場合は事業停止として社会分類に属し、水源涵養機能の低下などの社会全体に係る影響は森林機能損失として環境分類に属す。両者の経済的な影響が、林業に対する事業賠償として定量化できる場合は経済分類に属することになる。

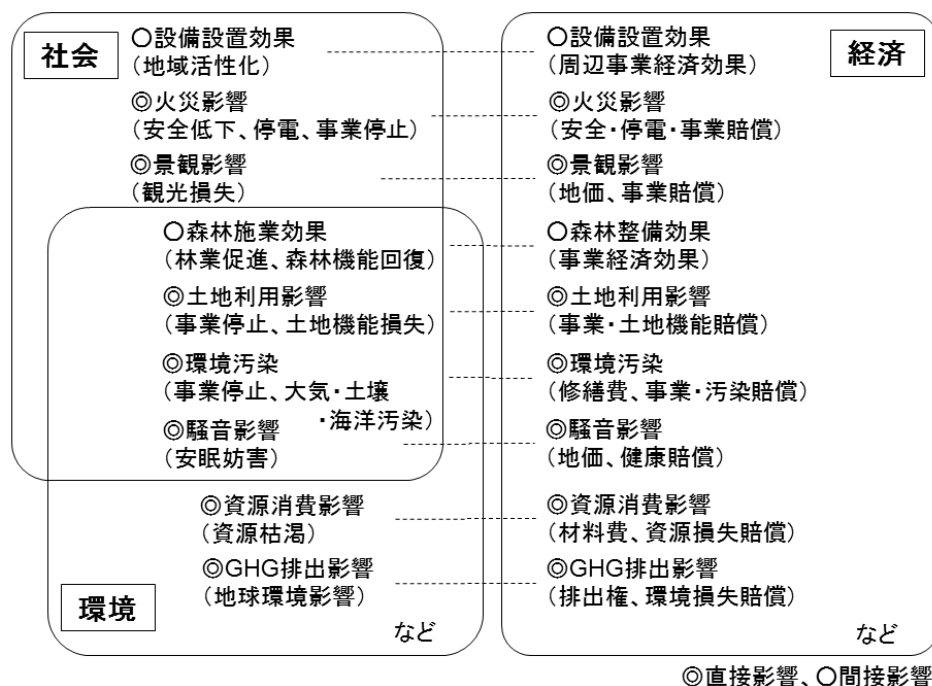


図 1-1 トレードオフと波及効果の各要素の TBL へ展開

1.2 評価手法

図 1-1 に示した経済分類の各要素は実際に支払う可能性のある経済活動に組み込まれているコストであり、一般的に内部コストと言われる。一方、社会や環境の分類の各要素の影響や効果を定量化する場合、その算出結果は経済活動に組み込まれておらず、経済外部性（外部コスト）として扱われる。以降、本論文では経済活動に組み込まれたコストを内部コストとし、それ以外のコストを外部コストとする。内部コストの支払者の決定は、EU などの海外では OECD（Organization for Economic Co-operation and Development）が提示した「汚染者支払いの原則（Polluter Pays Principle: PPP）」[19]の考え方が適用される可能性が高く、本論文の場合は電力事業者となる。特に図中◎印の直接影響の項目は、PPP が適用されると想定できる。

外部コストを求める手法の一つとして ISO 14040 番台として評価の枠組みが規格化[20]-[23]されているライフ・サイクル・アセスメント（Life Cycle Assessment: LCA）の一部であるインパクト評価（Life Cycle Impact Assessment: LCIA）と費用便益分析[24]がある。LCIA では手法により統合化プロセスなどにおいて費用便益分析を用いる場合があるが、本論文では要素ごとの影響を決められたルールに基づいて外部コスト化する LCIA と、特定の要素を決められた目的に沿って外部コスト化する費用便益分析とを分けて表現する。

図 1-2 は図 1-1 に示した TBL 各要素の外部コストと内部コストの関係を示している。社会や環境の分類の各要素の外部コストは一般的に費用便益分析により算出されるが、環境分類では、環境影響評価手法である LCIA によって外部コストを求めるケースがある。異なる要素の外部コストを統合評価できると、設置環境影響に起因するトレードオフと波及効果を分析できる。しかし、異なる要素の外部コストを統合することは評価範囲やコスト化の考え方が同じ場合においてのみ可能である。LCIA の場合は同一の手法を用いて算定された結果は、評価範囲やコスト化の考え方が統一されており統合可能である。一方、費用便益分析の場合、評価範囲やコスト化の考え方が個別に決めているケースが多く、統合化は難しい場合が多い。内部コストは一般の経済社会で扱われるコストであるため統合が可能である。

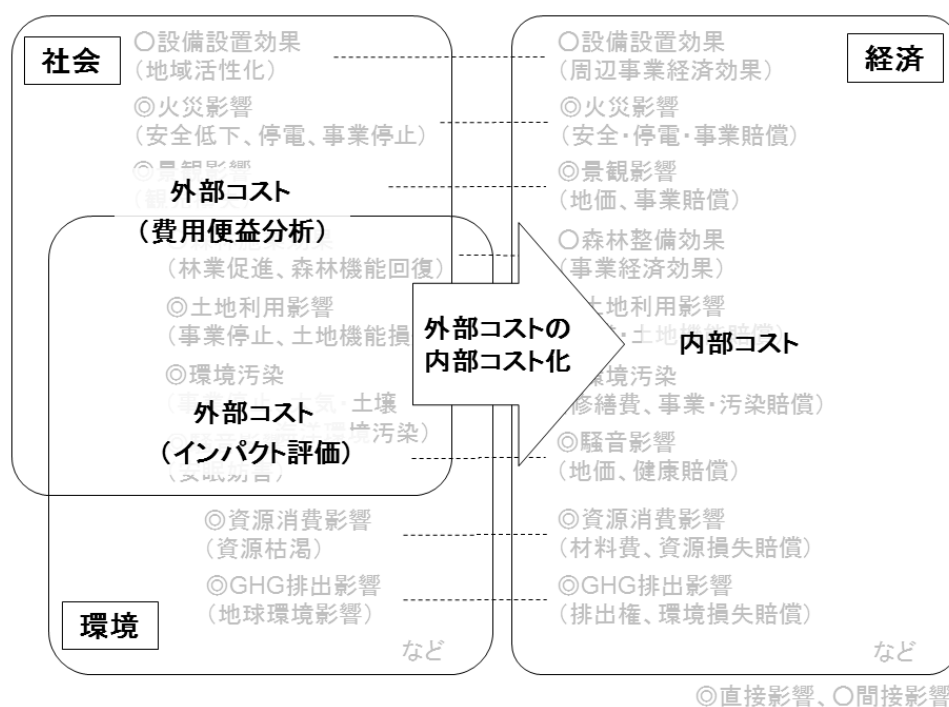


図 1-2 外部コストと内部コストの関係

次に LCIA と費用便益分析の概要を述べる。

(1) LCIA

LCIA を包含している LCA は製品システムのライフサイクルにわたり、各ライフステージのエネルギーや材料などの投入、および、ガスや廃棄物などの排出に起因する、環境影響を定量化する枠組みで、環境配慮設計などの意思決定に用いられる。LCA は図 1-3 に示すように目的と範囲の設定、インベントリ分析 (Life Cycle Inventory Analysis: LCI)、および LCIA から構成され、各プロセスにおいて結果の解釈がなされ、その内容はクリティカルレビューを受ける。

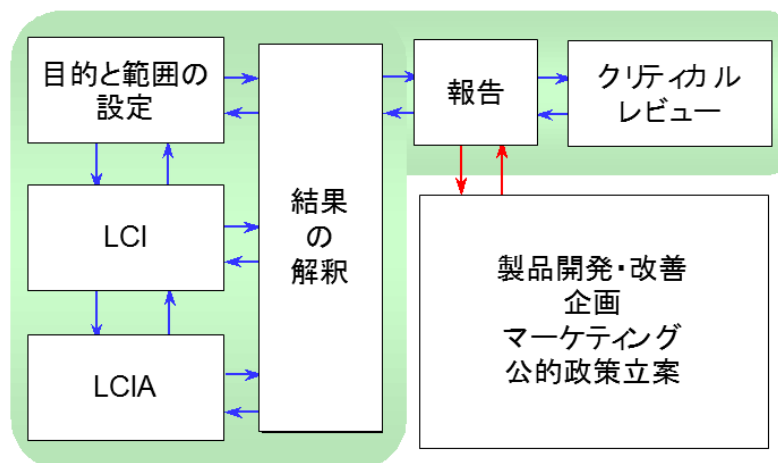


図 1-3 ISO14040 の構成

図 1-4 は LCI と LCIA の概念構成を示した図である。LCI では、評価対象に対してライフサイクルの各段階で投入される資源、エネルギー、大気などの環境中に排出される排出物のデータを収集する。その結果は物質ごとに明細表にリスト化し、各物質に対応した原単位を収集する。収集するデータは、実測・ヒアリングなどによるフォアグラウンドデータと公開されている汎用的なバックグラウンドデータに区別される。LCI の計算結果はインベントリごとの資源採取量または環境排出量となる。インベントリ種には、資源採取として、鉄鉱石、ボーキサイト、土地利用、石炭、原油、LNG などがあり、環境への排出物として、CO₂、NO_x、SO_x、フロン、水域への排出として BOD (Biochemical Oxygen Demand)、COD (Chemical Oxygen Demand)、SS (Suspended Solids) などがあげられる。計算精度は用いるデータの信頼性に影響されるため、データの根拠、出典などの明示が求められる。LCIA では、LCI の結果を使ってインベントリごとの環境影響を統合し、インベントリデータの特定の影響領域ごとの潜在的影響力を表す特性化、各影響領域の影響を主に科学的知見から分析し保護対象ごとの被害量に集約する被害評価、重み

付けを考慮して単一指標に表す統合化、のプロセスを有する。統合化では後述する費用便益分析を用いる場合がある。また、LCIA 手法によっては被害評価のプロセスを省略する場合もある。

LCIA の代表的手法に、日本の LIME2 (Life-cycle Impact assessment Method based on Endpoint modeling 2) [25]、スウェーデンの EPS2000[26]、オランダの Eco-Indicator99[27]、ReCiPe[28]、ドイツの ExternE [29]などがある。

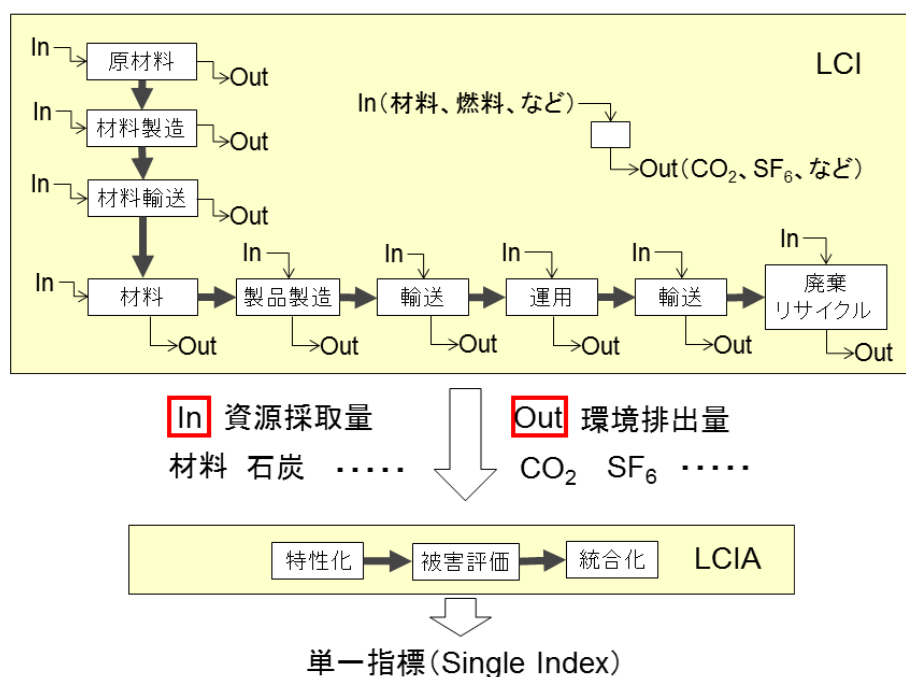


図 1-4 LCA の概念構成

(2) 費用便益分析

費用便益分析は、市場化されていない価値を金額として提示する場合に用いられる分析方法である。公共事業の便益測定など、世界各国で検討が進み、多くの手法が存在する。公益的機能の評価手法としては、評価する機能を市場性を持つ利用価値として代表させる間接的非市場評価法と、市場性を持たない非利用価値に対して仮想的な機能を設定して設問形式で人々の支払い意志額などを計測する直接的非市場評価法に大別される。間接的非市場評価法の代表的な手法として、代替法、トラベルコスト法、ヘドニック法、があげられ、直接的非市場評価法としては、仮想市場評価法（Contingent Valuation Method: CVM）、コンジョイント分析などがある。以下では電力システム分野での利用が想定される代替法、CVM、コンジョイント分析について概説する[24]。

(2-1) 代替法

代替法は評価対象の公的な機能の外部コストを同等の機能を持つ市場に存在する装置などの導入費用を求めることで対象便益として算出する方法である。ただし、装置による当該機能の代替がどこまで可能であるかという点において実現性やその検証が難しい面もあり、代替装置の妥当性が明確にできる場合以外は、誤差が大きくなる。加えて、代替装置が存在しない場合、適用は難しい。また、消費者の支払意思額に基づいておらず、経済学的な裏付けを欠いている。

(2-2) CVM

CVM は評価対象となる機能に対する支払意思額（Willingness To Pay: WTP）をアンケートなどを用いて一般市民に尋ねることで、対象機能の便益を算出する方法である。前述した代替装置が存在しない場合などでも評価が可能である。しかし、アンケートにおける質問方法によって評価額にバイアスがかかりやすい課題がある。

(2-3) コンジョイント分析

コンジョイント分析は評価対象となる機能に関し、関係する様々な属性を組合せた代替案を準備し人々の選好を明らかにし、それらの選好の順序を基に支払意思額を推定する方法である。CVM に比べると、多属性の政策について属性別に評価を行うことが可能である。

(3) 算出方法の標準化動向

LCIA や費用便益分析の評価枠組み関係する標準化動向としては国際標準化やガイドライン策定があげられる。

(3-1) 国際的な標準化

環境影響評価に関係する国際標準化の検討は、環境マネジメントや LCA を対象とした ISO の Technical Committee である ISO/TC 207、スマート・コミュニティのパフォーマンス指標を検討する ISO/TC 268 などで行われる。ISO/TC 207 は ISO 14001 のさらなる有効な運用のための支援規格（環境監査、環境ラベル、環境パフォーマンス、LCA、温室効果ガス）を作成している[30]。ISO/TC 268 はスマート・コミュニティの持続的開発の設計から運用に至るプロジェクトのライフサイクルを対象とし、技術パフォーマンス指標および、その評価、計測、検証方法の標準化を議論している[31]。これらの ISO 規格では環境影響の計算方法は規定していない。

その他の国際標準化を検討している活動として環境フットプリントがある[32]。環境フットプリントとは GHG 排出量に加えて土地利用影響などの多様な環境影響を評価する指標で 14 の影響領域を設定しており、LCIA に関係する活動である。2011 年 3 月に欧州委員会の環境総局は「製品の環境フットプリント」と「組織の環境フットプリント」に関する方法論の開発を開始。2013 年には国際標準化のためのパイロット事業検討が 2016 年 10 月末までの予定で始まっており、動向をウォッチする必要があるが、現時点で LCIA の計算方法は規定されていない。

(3-2) ガイドライン

ガイドラインに関しては発電設備や電力系統全体の GHG 排出量の算定方法に関する国際的な取組として京都議定書の CDM (Clean Development Mechanism) の枠組みがあげられる。CO₂ 排出量取引という内部コストを扱う枠組みである。ここでは、電力系統や発電設備の GHG 排出量の算定方法が規定されている[33]。しかし、CDM の計算方法は CO₂ 削減効果を過大評価しないよう独自の工夫がされている。CDM 以外でも CO₂ 排出量取引に関しては、国や州ごとの算出ガイドラインが検討または実施されている[34]。わが国においては、上述した（財）電力中央研究所の報告に加え、環境省の温室効果ガス排出量算定・報告・公表制度[35]に沿い、客観的な算出手順に基づく定量化が行われている。このように CO₂ 排出量については様々な手法が存在している状況で、統一的な計算方法は決まっているわけではない。

また、公共事業の環境影響や社会価値の分析を目的としたガイドラインも複数策定されている。代表的なガイドラインに米国の EPA の Guidelines for Preparing Economic Analyses (EPA Guide) [36]や、国土交通省のガイドライン[37]がある。これらのガイドラインは費用便益分析に分類されるが、CO₂ 排出量計算同様、複数の手法が提言されている段階である。

上述したように、LCIA や費用便益分析の国際的な標準化やガイドラインは複数存在するが、統一された計算方法は存在していない。

1.3 先行評価例

(1) 電力システムの外部コスト分析

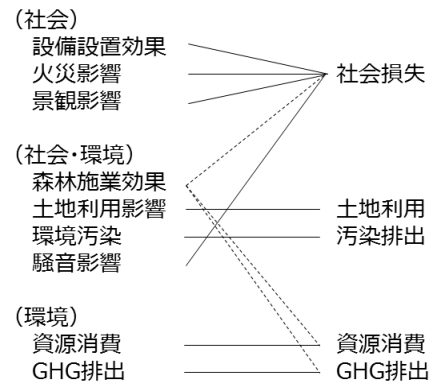
電力システムの外部コスト分析に関する先行研究として、表 1-1 に示すとおり国内外の論文と報告書の全 55 件を調査した[38]-[65]。表 1-1 では図 1-1 に示したトレードオフと波及効果の各要素は図 1-5 に示す 5 つの評価領域に集約した。図 1-5 において森林施業効果は先行研究例が無いため点線とした。

図 1-6 は電力システムの環境影響評価に関する先行研究の推移を発行件数別と評価領域別に示した図である。図 1-7 は図 1-6 の内訳を製品分類別と評価領域別に示した。

表 1-1 国内外の論文と報告書を対象とした先行研究の調査結果（順不同）

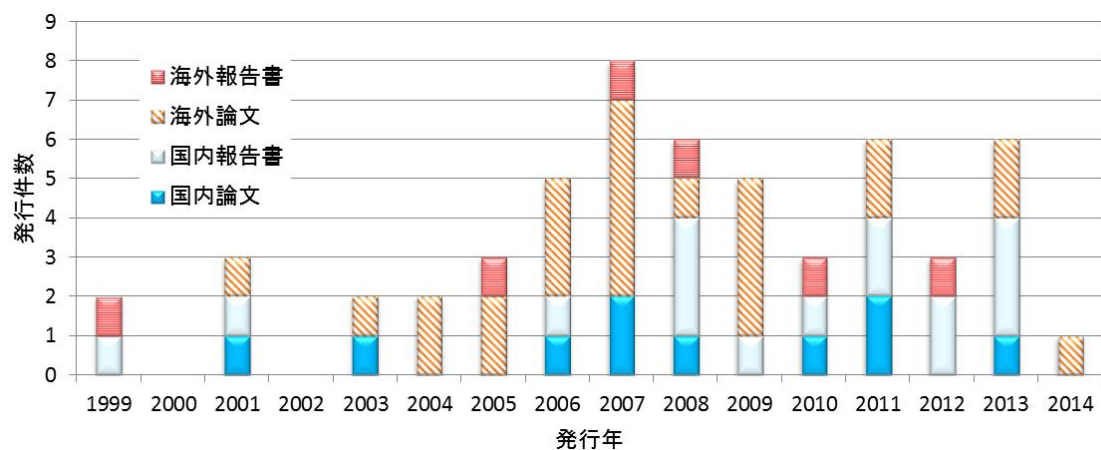
タイトル	製品分類										評価 分類	評価領域					発表年	種別	提案国*	文献			
	発電					送変電																	
	原子力	火力	水力	地熱	PV	風力	バイオマス	その他(水素等)	開閉装置	二次・蓄料電池	送電線・電線	その他	社会	環境	GHG排出	汚染・排出	資源消費	土地利用	社会損失				
1 エコマテリアル電線・ケーブルとライフサイクルアセスメント																				2008	報告	日本	[38]
2 電線ケーブルの導体サイズアップによるCO2 排出量低減効果の検討																				2007	論文	日本	
3 ライフサイクルCO2 排出量による原子力発電技術の評価																				2001	報告	日本	
4 欧州のExternE プロジェクトにおける発電用燃料サイクルの外部コストの紹介																				1999	報告	イギリス	
5 Life Cycle Environmental Analysis of Hydrogen Storage Technology Using Organic Hydride: Energy Requirement and CO2 Emission有機ハイドライドを用いた水素貯蔵技術のライフサイクル環境分析: エネルギー消費とCO2 排出																				2008	論文	日本	
6 A comparison of environmental benefits of transport and electricity applications of carbohydrate derived ethanol and hydrogen																				2009	論文	南アフリカ	
7 Global warming potential of the sulfur-iodine process using life cycle assessment methodology																				2009	論文	米国	
8 Life cycle assessment of high temperature electrolysis for hydrogen production via nuclear energy																				2006	論文	ロシア	
9 LCA による色素増感太陽電池のCO2 削減効果の評価																				2007	論文	日本	
10 Environmental aspects of electricity generation from a nanocrystalline dye sensitized solar cell system ncDSC 太陽電池システムの環境影響																				2001	論文	スウェーデン	
11 リサイクル対応型太陽電池モジュールの開発—曝露結果とLCA 評価—																				2006	論文	日本	
12 Life cycle assessment of solar PV systems: An example of a 2.7kWp distributed solar PV system in Singapore																				2006	論文	スイス	
13 Evaluation of technical improvements of photovoltaic systems through life cycle assessment methodology																				2005	論文	イタリア	
14 LCA of Multicrystalline Silicon Photovoltaic Systems Part1, Part2																				2006	論文	ギリシャ	
15 Life Cycle Assessment for Emerging Technologies: Case Studies for Photovoltaic and Wind Power																				2005	論文	スイス	
16 Life cycle assessment study of a 4.2 kWp stand-alone photovoltaic system																				2009	論文	デンマーク	
17 Life cycle assessment and energy pay-back time of advanced photovoltaic modules: CdTe and CIS compared to poly-Si																				2007	論文	フィンランド	
18 Life cycle assessment of photovoltaic electricity generation																				2008	論文	イタリア	
19 定置用燃料電池システムのライフサイクル評価																				2008	報告	日本	
20 Assessing Future Energy and Transport Systems: The Case of Fuel Cells																				2003	論文	ドイツ	
21 LCA of a molten carbonate fuel cell system																				2004	論文	米国	
22 Life Cycle Assessment of Electrical and Thermal Energy Systems for Commercial Buildings																				2007	論文	米国	
23 Life-cycle assessment of fuel cell stacks																				2007	論文	米国	
24 The Environmental Impact of Disposable Versus Re-Chargeable Batteries for Consumer Use																				2007	論文	オーストラリア	
25 CO2 abatement by co-firing of natural gas and biomass-derived gas in a gas turbine																				2007	論文	イタリア	
26 重要社会インフラの相互依存性解析に関する調査																				2013	報告	日本	[39]
27 原子力発電の社会・環境経済学的研究																				2010	報告	イギリス	[40]
28 Risk analysis of geothermal power plants using Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) technique																				2013	論文	イラン	[41]
29 気候変動緩和策としての低炭素発電技術および適応策に対する人々の意識と受容性																				2011	報告	日本	[42]
30 地熱発電開発と温泉事業との相互理解と地域共生に向けた方策																				2012	報告	日本	[43]
31 確率論的リスク評価システムの開発																				2001	論文	日本	[44]
32 ライフサイクルCO2 排出量による発電技術の評価																				1999	報告	日本	[6]
33 日本の発電技術のライフサイクルCO2 排出量評価																				2010	報告	日本	[7]
34 ExternE Externalities of Energy																				2005	報告	ドイツ	[29]
35 火力発電所から排出される硫酸化合物の外部性評価																				2003	論文	日本	[45]
36 Life cycle analysis to estimate the environmental impact of residential photovoltaic systems in regions with a low solar irradiation																				2011	論文	ベルギー	[46]
37 LCAs of a polycrystalline photovoltaic module and a wind turbine																				2011	論文	シンガポール	[47]
38 家電所の環境影響評価比較																				2011	論文	日本	[48]
39 LCA手法を用いた地熱発電システムの環境影響評価																				2013	論文	日本	[49]
40 太陽光発電システムのライフサイクルに関する調査研究																				2009	報告	日本	[50]
41 木質バイオマスLCA 評価事業報告書																				2013	報告	日本	[51]
42 Life Cycle Assessment of Crystalline Photovoltaics in the Swiss ecoinvent Database																				2004	論文	スイス	[52]
43 Life Cycle Assessment of Metals: A Scientific Synthesis																				2014	論文	米国	[53]
44 Life Cycle Inventories of Energy Systems																				2007	報告	スイス	[54]
45 Life Cycle Assessment of Photovoltaics																				2008	報告	オランダ	[55]
46 定置用燃料電池システム及び燃料電池自動車のライフサイクル評価に関する調査																				2008	報告	日本	[56]
47 Life cycle assessment of a multi-megawatt wind turbine																				2009	論文	スペイン	[57]
48 北杜メガソーラのライフサイクル評価																				2011	報告	日本	[58]
49 Review on life cycle environmental effects of geothermal power generation																				2013	論文	スイス	[59]
50 日本におけるCCS付き石炭火力発電のライフサイクルアセスメント																				2013	報告	日本	[60]
51 Life Cycle Greenhouse Gas Emissions from Electricity Generation: A Comparative Analysis of Australian Energy Sources																				2012	報告	オーストラリア	[61]
52 ライフサイクルからみた蓄電池の電力負荷平準化等によるエネルギー・環境改善効果																				2012	報告	日本	[62]
53 気温・日射量を考慮したヒートポンプ・太陽光発電の地域別導入評価																				2011	論文	日本	[63]
54 拡張産業連関表を利用した再生可能エネルギー導入の雇用効果分析																				2010	論文	日本	[64]
55 需要家から見た供給信頼度の重要性和停電影響																				2006	報告	日本	[65]

*) 提案国はfirst otherの所属部門を筆者が調査し、所属部門が属する国とした。わが国において海外文献を調査した報告書は調査先の国名を記載した。

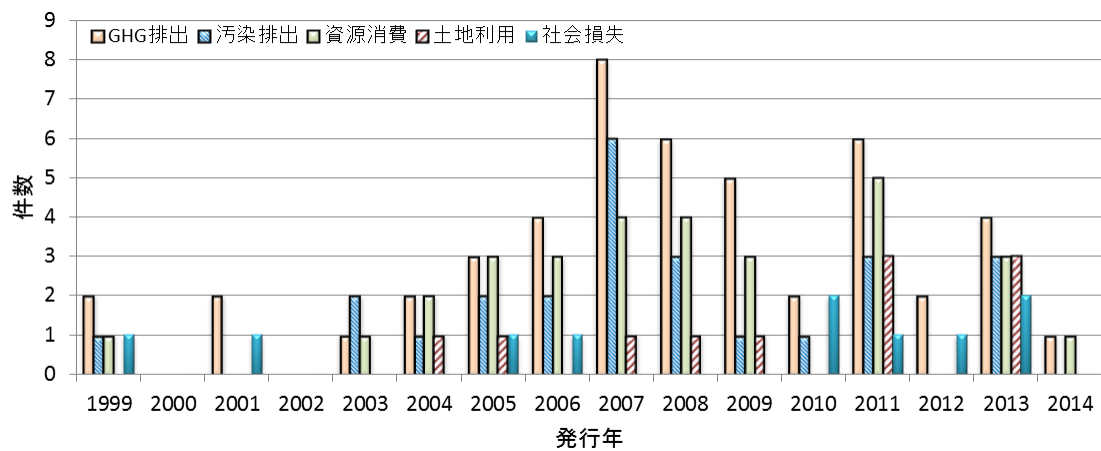


(図 1-1 の各要素) (評価領域)

図 1-5 先行研究調査における評価領域

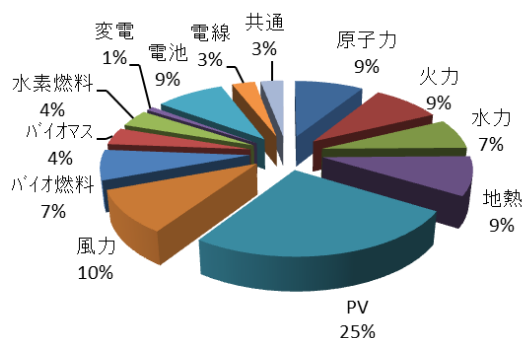


(1) 発行件数の推移

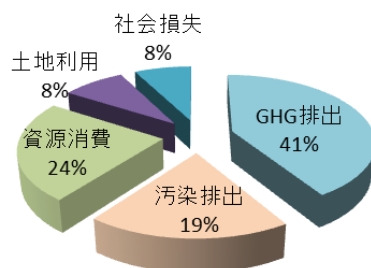


(2) 評価領域の推移

図 1-6 電力システムの環境影響評価に関する先行研究の推移



(1) 製品分類別



(2) 評価領域別

図 1-7 電力システムの環境影響評価に関する先行研究の内訳

図 1-6 と図 1-7 から、以下のことが分かる。

- ・ 発行件数は 2005 年から増え、2007 年以降は多少増減があるが横ばいとなる。
- ・ 海外は論文が多く、日本は論文と報告書が同程度である。
- ・ 評価領域の傾向は GHG 排出が常に多く全体の 41%を占め、汚染（物質）排出と資源消費が続き、これらで 84%を占める。一方、土地利用は 2004 年からみられ、2011 年以降やや増加しているが、全体の 8%と少ない。
- ・ 設備別分析では PV が 25%と多い。評価が少ない設備としては変電の 1%、電線の 3%、バイオマスと水素燃料の 4%となる。

ここで、事例が多い PV の主な評価領域は、各々の文献から GHG 排出、パネル材料の資源消費や製造エネルギーである[38],[46],[53],[55]。多様な評価領域を対象としている ExternE[29]については次項で概述する。他の事例としては、火力発電所から排出される硫黄酸化物の影響を考察した事例[45],[54]、土地利用影響、CO₂ 排出影響、資源枯渇影響などを Eco-Indicator99 を用いて統合評価した事例[46],[47]、変電所の土地利用と CO₂ 排出影響などを LIME2 を用いて統

合評価した事例[48]がある。また、LIME2、EPS2000、および Eco-Indicator99 の手法間の比較検討もされている[25],[66],[67]。

(2) 電力システムの内部コスト分析

電力システムの内部コスト分析については、人の安全に関する損害額[68]、事業停止に対する補償額[69]の検討例がある。一方で、一般論として外部コストの内部化の方法には、A.C.Pigou が提案[70]した排出量取引や炭素税などの課税や補助金として社会的な仕組みに組み込まれる場合と、裁判において外部コストに基づいて損害賠償額が決定する場合がある。代表的な排出量取引として EU の CO₂ 排出量取引市場[71],[72]と京都メカニズム制度[73]がある。また、わが国における最新の事例として、福島で放射能汚染が林業に与える影響に関する損害賠償が検討され、2014 年 5 月に森林所有者への賠償額として人工林が 100 万円/ha、天然林が 30 万円/ha という基準が示されている[74]。ここでの賠償額は森林所有者への賠償であるため、図 1-1 における経済領域の「土地利用影響（事業賠償）」にのみ相当すると想定される。

(3) ExternE

表 1-1 において広い範囲の製品分類と評価領域を対象にする ExternE について概述する。ExternE は Externalities of Energy の略称で、欧州で 1991 年から 1997 年に研究が行われ、2005 年に更新されている[29]。電力システムの環境影響を燃料採掘段階から作業員の交通事故リスクなども含む広い範囲で影響経路手法により分析し、外部コストを中心にダメージコストと回避コストとして定量化している。図 1-8 に図 1-1 に示した設置環境影響と ExternE の評価項目との関係を示す。回避コストは不確実性を有しダメージコスト化が難しい場合に用いており、生態系影響などのエコシステムと地球温暖化に用いている。また、長期の時間的な影響を考慮する場合は必要に応じて割引率の概念を導入している[29]。外部コストは主に CVM によって算出しているが、地価などの直接市場価値で表現できる項目は内部コストを用いている[75]。発電プラントや送電線などを対象に、環境負荷に加え発電設備故障時の周囲への様々な影響をリスク論に基づいて経済的影響として計算している。ExternE の土地利用影響は、NEEDS プロジェクトにより生物種の消失割合を表す PDF (Potentially Disappeared Fraction) を用いて外部コスト化している[76],[77]。図 1-8 から、ExternE の評価項目は想定される設置環境影響を多く含むが、間接影響、および直接影響のうち火災による停電などの内部コスト影響は含まれていないことが分かる。

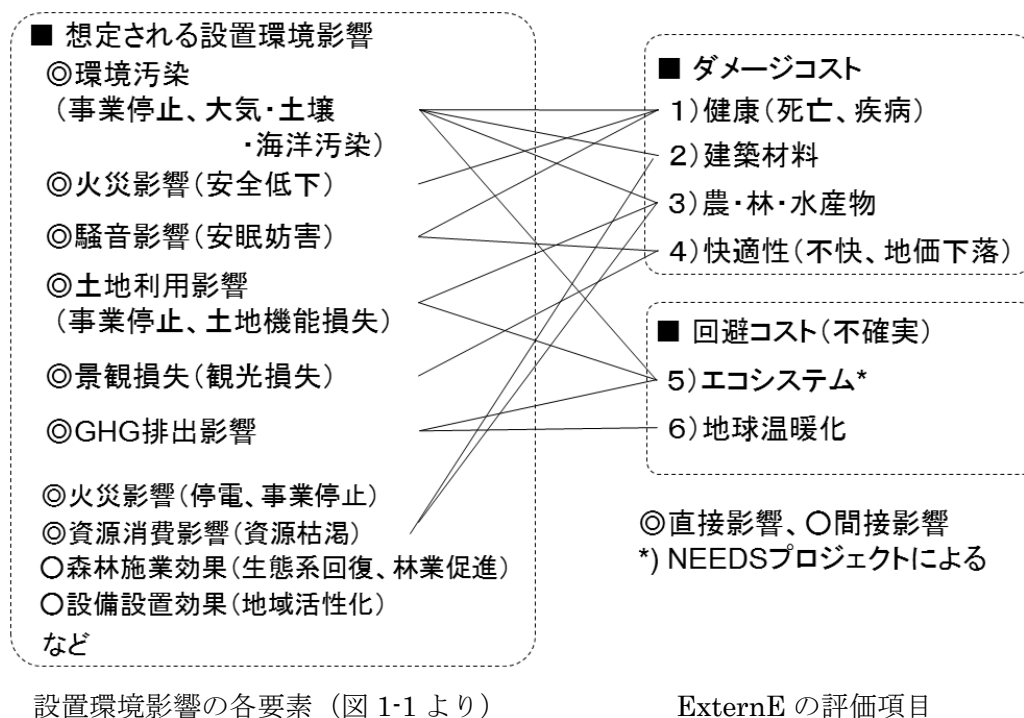


図 1-8 想定される設置環境影響と ExternE の評価項目

(4) 設置環境影響の未研究領域と本論文の対象

電力システムの環境影響評価に関する先行研究では図 1-1 に示した設置環境影響の要素において、外部コストの GHG 排出影響、資源消費影響、環境汚染 (大気)、内部コストの排出権取引、事業賠償害に加え、ExternE では外部コストにあたる健康や内部コストの地価などより広い要素を対象としている。しかし、火災による停電や事業停止、景観影響による観光損失、間接影響である森林施業効果、火災影響の内部コスト影響は未実施の要素である。また、評価事例が少ない土地利用影響に関しては電力システムの設置場所の違いを評価する事例はみられない。内部コストに関しては排出量取引や安全や事業停止に対する損害賠償の例がみられるが、電力システムへ適用して他の環境影響と統合評価した事例はみられない。

そこで、上述した設置環境影響の未実施または評価例が少ない要素から、評価手法の開発に必要な情報を得ることができる項目を未研究領域として抽出し、本論文の評価対象とした。図 1-9 は図 1-1 に示した各要素に対し、本論文の評価対象を先行研究の評価要素と比較した図である。本論文の評価対象は囲い部で、地域特性や設置条件を考慮した LCIA 領域の土地利用影響 (土地機能回復) と森林施業効果 (森林機能回復)、および内部コスト領域の火災影響 (安全・停電・事業賠償) である。LCIA では、石炭を対象とした資源消費影響 (資源枯渇)、GHG 排出影響 (地球環境影響) と統合評価を行い、内部コストでは、GHG 排出影響 (排出権) と統合評価を行う。

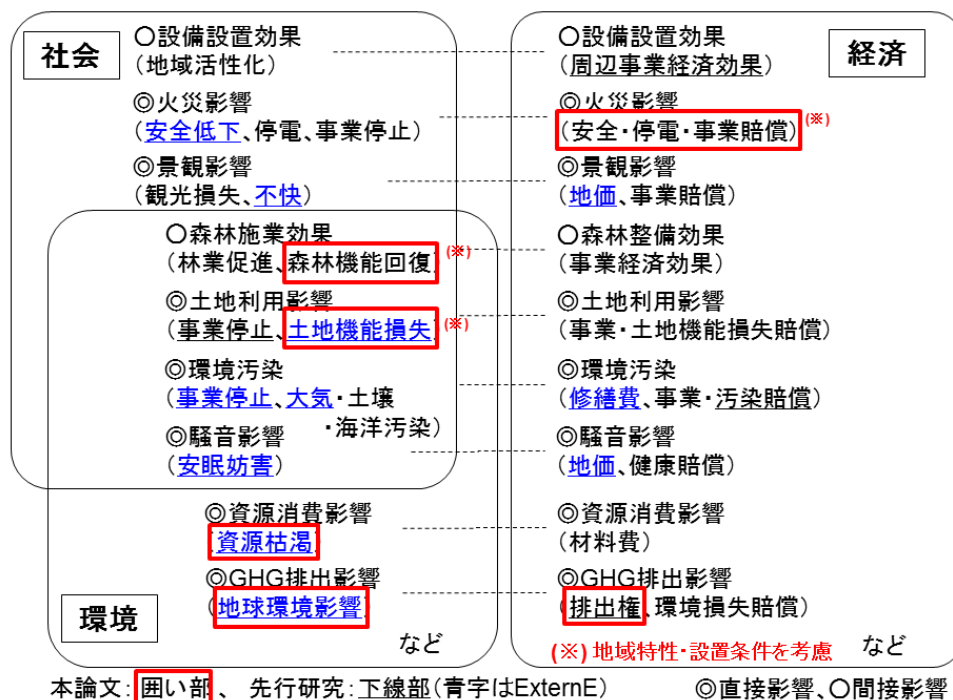


図 1-9 電力システムに関する先行研究と本論文の評価対象

1.4 本論文の目的

本論文の目的は、電力システムの設置環境が及ぼす環境影響の未研究領域に対し、LCIA や内部コストを用いて設置条件に合わせて定量化する手法を開発し、評価事例から温暖化影響を含む他の影響とのトレードオフや波及効果の関係を分析し、設置条件ごとに着目すべき環境影響を明らかにすることである。

1.5 本論文の開発対象

(1) LCIA 手法の選定

LCIA による土地利用影響評価には複数の手法があることから既存手法を比較して本論文に適用する手法を決めた。検討にあたり、土地が有する機能が多様な森林の評価を想定することで、評価領域を明確にできる。そこで、まず、森林の多様な機能の価値評価事例を有する費用便益分析をレビューする。森林の機能の評価事例としては、地球生物圏の生態系全体が行うサービスを過去の評価例に基づいて分析した事例[78]、わが国の森林の価値をコスト換算した事例[79],[80]

がある。さらに、世界銀行や各国でそれぞれの目的にしたがった算出が行われている[81]。図 1-10 は林野庁が公表している森林の機能と価値の定量化範囲である[80]。評価事例がある費用便益分析においても定量化範囲は朱書き部であり、多様な機能のごく一部である。

[1] 生物多様性保全 遺伝子保全 生物種保全 植物種保全 動物種保全(鳥獣保護) 菌類保全 生態系保全 河川生態系保全 沿岸生態系保全(魚つぎ) [2] 地球環境保全 地球温暖化の緩和 二酸化炭素吸収 化石燃料代替エネルギー 地球気候システムの安定化 [3] 土砂災害防止機能/土壌保全機能 表面侵食防止 表層崩壊防止 その他の土砂災害防止 落石防止 土石流発生防止・停止促進 飛砂防止 土砂流出防止 土壌保全(森林の生産力維持) その他の自然災害防止機能 雪崩防止 防風 防雪	防潮など [4] 水源涵養機能 洪水緩和 水資源貯留 水量調節 水質浄化 [5] 快適環境形成機能 気候緩和 夏の気温低下(と冬の気温上昇) 木陰 大気浄化 塵埃吸着 汚染物質吸収 快適生活環境形成 騒音防止 アメニティ [6] 保健・レクリエーション機能 療養 リハビリテーション 保養 休養(休息・リフレッシュ) 散策 森林浴 レクリエーション 行楽 スポーツ つり	[7] 文化機能 景観(ランドスケープ)・風致 学習・教育 生産・労働体験の場 自然認識・自然とのふれあい 芸術 宗教・祭礼 伝統文化 地域の多様性維持(風土形成) [8] 物質生産機能 木材 燃料材 建築材 木製品原料 パルプ原料 食糧 肥料 飼料 薬品その他の工業原料 緑化材料 観賞用植物 工芸材料 赤字: 貨幣評価されたもの
--	---	--

図 1-10 森林が有する多様な機能の林野庁公表の評価範囲[80]

次に LCIA の定量化範囲について述べる。土地利用影響の評価では前述した LCIA の代表的な手法である ExternE、LIME2、EPS2000、Eco-Indicator99、ReCiPe に加え、Ecosystem Damage Potential (EDP) [82],[83]、UNEP/SETAC の手法[84]などがあり、さらに資源枯渇を主な評価対象とする Ecological footprint[85]など、いくつかの手法が提案されている[86],[87]。そこで、代表的 LCIA 手法と EDP、UNEP/SETAC の土地利用影響評価の評価指標を表 1-2 に比較した。ここから、評価指標は手法ごとに異なり、LIME2、EPS2000、Eco-Indicator99、ReCiPe では図 1-10 に示した生物多様性保全と植物の生産性や生長量を評価できる一方、ExternE、EDP、UNEP/SETAC は生物多様性保全にフォーカスしている。このように、LCIA で評価できる範囲は図 1-10 の多様な機能のうちごくわずかである。

上記の LCIA 手法間比較から、本論文では、生物多様性に加え植物生長量を評価でき、生長量の分析にデータが得やすい純一次生産性（Net Primary Production: NPP）を用いる LIME2 を適用することとした。

表 1-2 土地利用影響評価指標の LCIA 手法比較

土地利用 評価指標	ExternE	LIME2	EPS2000	Eco- Indicator99	ReCiPe	EDP	UNEP/ SETAC
PDF	○			○	○		
PAF				○			
NPP		○					
EINES		○					
NEX			○				
Wood			○				
EDP						○	
BDP							○

PDF (Potentially Disappeared Fraction): 維管束植物の消失割合

PAF (Potentially Affected Fraction): 生体毒性により影響を受ける維管束植物の割合

NPP (Net Primary Production): 維管束植物の時間あたりの生産量

EINES (Expected Increase in Number of Extinct Species): 維管束植物の絶滅リスク種の数

NEX (Normalised Extinction of species): 生物種の年間の絶滅割合

Wood: 単位面積あたりの年間木材生産量

EDP (Ecosystem Damage Potential): 生物の生息種数の自然状態に対する比

BDP (Biodiversity Damage Potential): 生物の生息種数の自然状態に対する比

(2) 開発項目

本論文では、LIME2 を用いた土地利用影響評価における植生別評価手法と森林施業影響評価におけるアカマツ人工林評価手法、および内部コストを用いた火災影響評価における故障時火災リスク評価手法を開発する。LIME2 の開発項目は被害評価に用いる被害係数の定量化手法とし、主観的価値判断が含まれる統合化係数は既存データを活用する。

(3) 評価対象設備とその設置環境影響

評価対象設備は評価対象とした設置環境影響の要素ごとに決めた。土地利用影響を対象とする設備は発電量あたりに広い面積を必要とする PV 発電とし、比較対象として石炭火力を選定した。森林施業効果を対象とする設備はわが国のバイオマス発電とし、火災影響を対象とする設備は火災を想定した変電設備（変圧器と開閉装置）とした。

PV 発電と石炭火力の評価では土地利用影響、資源消費影響、GHG 排出影響を LIME2 で統合し、トレードオフの関係を明らかにする。バイオマス発電の評価では燃料供給による森林施業影響、土地利用影響、GHG 排出影響を LIME2 で統合し、トレードオフや波及効果の関係を明

らかにする。変電設備の評価では、変圧器の絶縁油の火災影響と SF₆ ガスの GHG 排出影響を内部コストで定量化し、トレードオフの関係を明らかにする。変電所の評価では、変圧器と開閉装置を対象として土地利用影響、GHG 排出影響、火災影響を LIME2 と内部コストの両手法により総合的に分析する。

なお、本論文で開発した手法は評価対象とした電力システム以外にも適用可能である。例えば、山間部に設置する風力発電システムの土地利用影響と温暖化影響のトレードオフの定量化など、図 1-9 に示す評価範囲における分析は実施可能である。

1.6 本論文の構成

本論文の構成を図 1-11 に示す。第 1 章は背景、先行研究、研究目的を述べ、第 2 章から第 5 章で開発した手法と電力システムの設置環境が及ぼす環境影響の評価結果を述べる。同図には開発項目、事例評価の対象機種、評価項目を示している。評価項目は図 1-9 に示した項目に対応している。第 6 章は総合議論、第 7 章が結論である。以下に第 2 章から第 6 章の概要を述べる。

第 2 章は PV 発電の設置場所の植生の違いによる土地利用影響、化石燃料の資源消費影響と GHG 排出影響のトレードオフの関係を LIME2 に基づいて石炭火力と比較評価した。

第 3 章は木質系のバイオマス発電にアカマツ人工林からチップ供給を行う場合の森林施業の波及効果を LIME2 に基づいて土地利用影響、GHG 排出影響と統合評価した。

第 4 章は都市ビル内に設置した変圧器の故障影響を温室効果ガスである SF₆ ガス絶縁を用いたガス絶縁変圧器 (Gas-Insulated Transformer: GIT) と火災リスクのある絶縁油を用いた油入り変圧器 (Oil-Immersed Transformer: OIT) を対象に火災影響と GHG 排出影響のトレードオフの関係を内部コスト分析により比較評価した。

第 5 章はガス絶縁と気中/油絶縁の変電所を山間部に設置する場合の土地利用影響、火災影響、GHG 排出影響のトレードオフの関係を LIME2 と内部コスト分析を用いて評価している。LIME2 では第 2 章の知見を、内部コスト分析では第 4 章の知見を取り入れ、比較分析した。

第 6 章は総合議論として、第 2 章から第 5 章の評価結果に基づいて電力システムの設置環境影響の GHG 排出影響とのトレードオフと波及効果の関係を分析し設備別の特徴を示した。

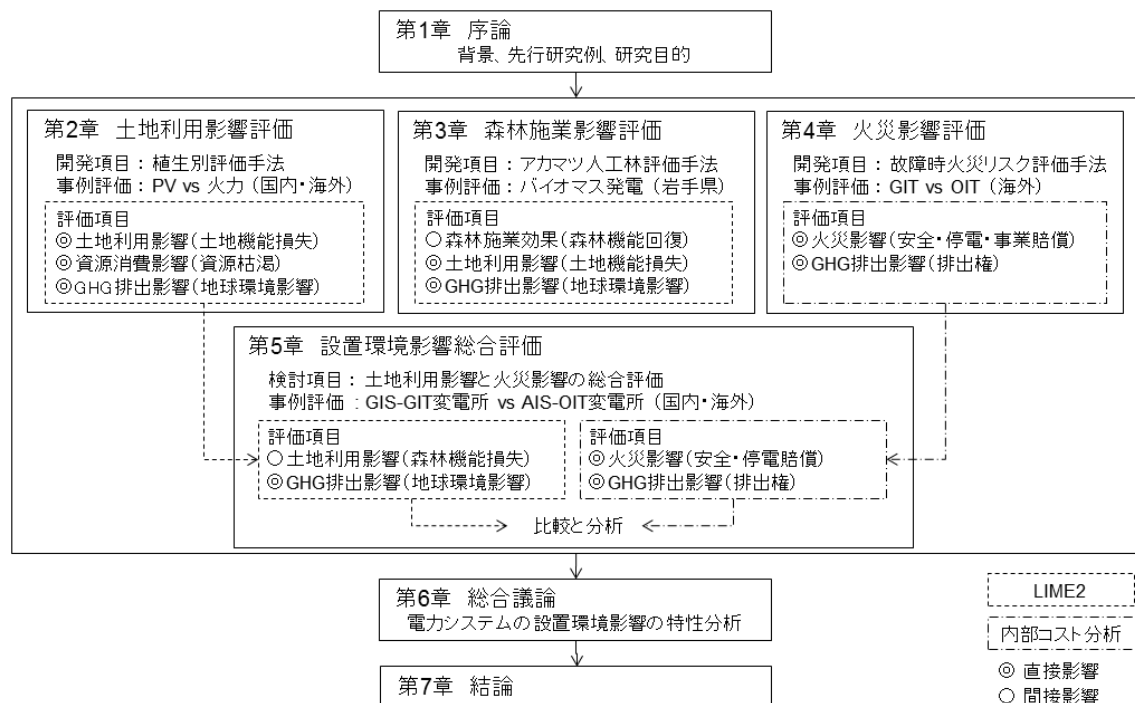


図 1-11 本論文の章構成

第2章 太陽光発電システムにおける土地利用影響評価

2.1 はじめに

第1章では電力システムの設置環境が及ぼす環境影響を定量化し、温暖化影響とのトレードオフや波及効果の関係を分析することの必要性を指摘した。そこで、第2章ではPV発電を取り上げ、石炭火力などの大規模電源に比べて発電量あたりの土地利用面積は増加する[88]トレードオフの問題について検討する。PV発電の土地利用影響についてはメガソーラー発電所の実証実験に基づく導入手引書[89]においても、土地改変への影響調査の必要性を指摘している。また、近年は山間部へメガソーラー発電所の建設計画[90],[91]もみられ、第1章に示した地域住民の反対活動につながっている[12],[13]。このような背景から、森林植生の違いを考慮して土地利用影響を定量評価する社会的ニーズは十分に出てくるといえる。海外でもPV発電の導入は進んでおり、わが国と同じように山間部へのPV発電建設計画が生じることも想定できる。

PV発電をはじめとした再生可能エネルギーに関しては、一般的には発電量が不安定といった課題に対して発電量の不確実性、系統の安定性、環境性などを総合的に評価する研究[92]がなされている。一方、土地利用影響に関する先行研究として、前述のとおりLCIA手法であるEco-Indicator99を用いた研究[46]があるが、土地利用影響の評価指標となる生物多様性や生物の成長量は気候や土壌環境の影響を受けるため、多様な森林を一律で評価するのではなく、森林植生を考慮した評価が望まれる。加えて、わが国の森林評価には日本のLIME2が適していると手法が地域の関係者との丁寧な合意形成には、その地域の植生を考慮した情報の提供が望ましい。

LIME2を用いた電力設備の環境影響評価に関する先行研究には、小規模系統へPV、風力、蓄電池を導入した場合のPVと風力の土地改変と土地占有の影響を一次生産性から定量評価した事例[93]、変電所の土地利用影響を土地改変と土地占有の影響を一次生産性と生物多様性から定量評価しSF₆ガス絶縁機器のGHG排出と土地利用抑制のトレードオフを分析した事例[48]、地熱発電を森林や荒地に導入した場合の土地改変と土地占有の影響を一次生産性と生物多様性から定量評価した事例[49]があるが、森林の植生の違いを評価した事例は無い。

本章の目的は、多様な植生の違いを考慮した土地利用影響をLIME2に基づいて温暖化影響、および石炭資源消費影響と統合評価する植生別評価手法を開発し、PV発電と石炭火力の評価を行い、土地利用影響と温暖化影響のトレードオフの関係を明らかにすることである。評価対象は、多様な植生を有する日本の森林と、植生の違いが大きい世界の代表的な森林および草原とする。

LIME2では土地利用影響評価に関して、一次生産性影響についてはわが国の森林植生別の情報が提供[25]されているが、海外の森林の情報は提供されていない。また、生物多様性影響については国内外ともに植生別の情報は提供されていない。そこで、植生ごとのデータを補間して一

次生産性と生物多様性影響の被害係数を植生別に詳細化することで、PV 発電を山間部に導入する場合の森林植生別の土地利用の影響を、生物多様性と一次生産性の両側面から定量化する。その際、一次生産について土地利用後の被覆形態の違いも考慮できるようにした。その上で、PV と石炭火力の評価を行い、CO₂ 削減効果と土地利用影響のトレードオフの関係を明らかにするとともに、感度分析により PV の設計と計画における有効な施策とその効果を示す。

2.2 方法

2.2.1 LIME2

LCIA の要素として、環境負荷物質をインベントリカテゴリに振り分ける分類化、特性化係数を用いてインパクトカテゴリごとに影響を評価する特性化がある。付加要素としては製品システムが引き起こすカテゴリを特定範囲内での寄与として算出する正規化と、インパクトカテゴリ間の重みづけにより統合指標で表す統合化がある。図 2-1 に、LIME2 の統合化プロセスを示す。インベントリをインパクトカテゴリ化し保護対象別に整理、コンジョイント分析でコスト化する。LIME2 の保護対象は人間健康、社会資産、一次生産、生物多様性である。人間健康は疾病により失われた余命と障害を持って過ごす時間の和 (Disability-Adjusted Life Year: DALY) で表し、社会資産は農作物、水産、森林資源の価格、鉱物資源、化石燃料のユーザコスト、一次生産は陸上植物、海洋プランクトンの純一次生産力である NPP、生物多様性は織管束植物の絶滅種数の増分期待値 (Expected Increase in Number of Extinct Species: EINES) でそれぞれ表現する [25]。

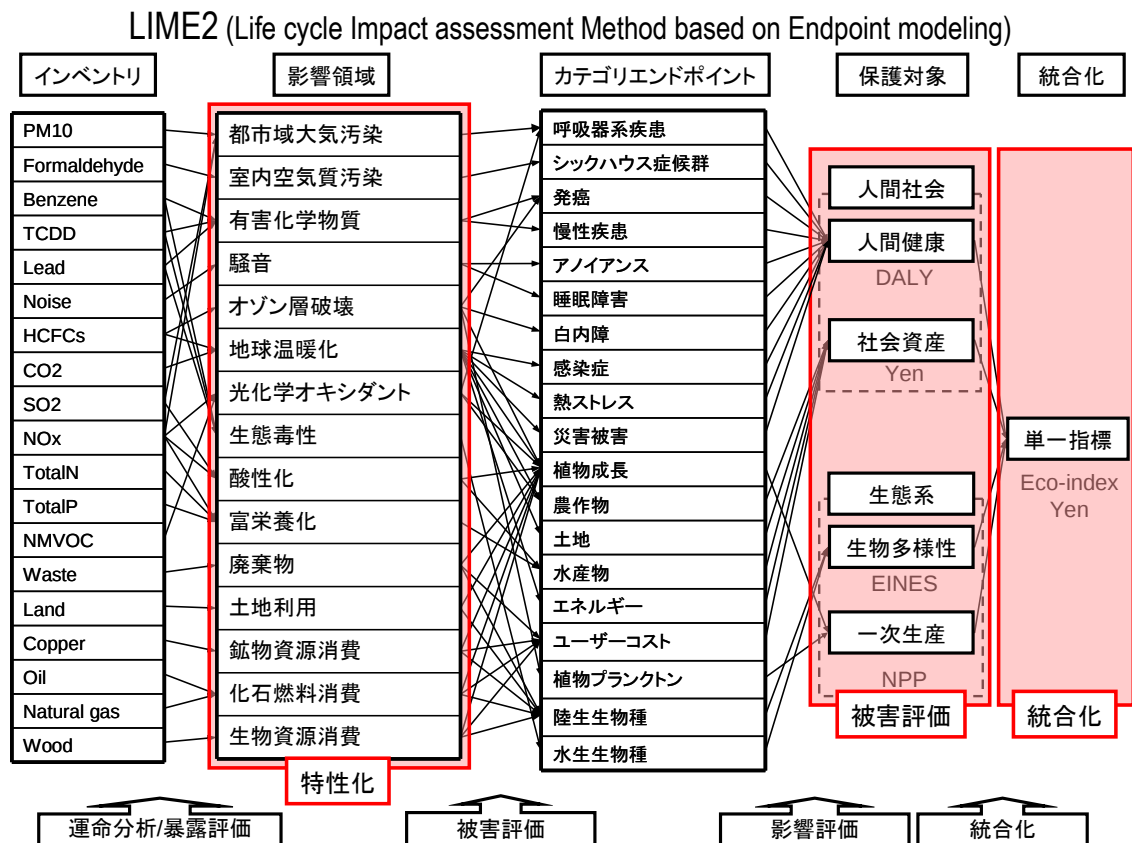


図 2-1 LIME2 の統合化プロセス[25]

LIME2の統合指標 (Single Index: SI) は統合化係数 (Integration Factor: IF)、被害係数 (Damage Factor: DF)、重み付け係数 (Weighting Factor: WF) を用いて式(2-1)～(2-3)により求める。

$$SI_{inventories} = \sum_{inventories} (LCI_{inventory} \times IF_{inventory}) \quad (2-1)$$

ここで、

SI : LIME2統合指標SI (円)

$IF_{inventory}$: インベントリごとのIF (円/g-CO₂、円/m²)

$LCI_{inventory}$: インベントリごとのLife Cycle Inventory (LCI) 結果 (g-CO₂、m²)

$$LCI_{inventory} = \sum_{\text{全投入資源}} (\text{原単位}_{inventory} \times \text{投入資源}_{inventory}) \quad (2-2)$$

ここで、

原単位_{inventory}：インベントリごとの単位量あたりの環境負荷（g-CO₂/g、g-CO₂/kWh）

投入資源_{inventory}：インベントリごとの材料やエネルギーなどの投入資源量（g、kWh）

$$IF_{inventory} = \sum_{\text{protected_area}} (DF_{\text{protected_area}} \times WF_{\text{protected_area}}) \quad (2-3)$$

ここで、

DF_{protected_area}：当該インベントリの保護対象ごとのDF

（DALY/kg、円/kg、EINES/kg、など）

WF_{protected_area}：当該インベントリの保護対象ごとのWF

（円/DALY、円/EINES、など）

表 2-1 は保護対象ごとのインパクトカテゴリ、表 2-2 は保護対象別の WF、表 2-3 は DF 代表値をそれぞれ示す。

表 2-1 保護対象ごとのインパクトカテゴリ [25]

インベントリ \ 保護対象	人間健康	社会資産	一次生産	生物多様性
CO ₂ 排出	温暖化	温暖化	—	—
石炭消費	—	資源消費	資源消費	資源消費
土地利用 (建物用地)	—	—	土地占有	土地改変
土地利用 (畑地または森林→建物用地)	—	—	土地改変	—

表 2-2 保護対象別の重み付け係数（WF）[25]

保護対象	LIME2重み付け係数ver.2	
人間健康	1.47×10^7	円/DALY
社会資産	1.00	円/円
一次生産性	46.2	円/kg
生物多様性	1.42×10^{13}	円/EINES

表 2-3 被害係数（DF）代表値[25]

インベントリ	インパクトカテゴリ	保護対象	被害係数代表値	
CO ₂ 排出	温暖化	人間健康	1.31×10^{-7}	DALY/kg
		社会資産	3.23×10^{-1}	円/kg
石炭消費	資源消費	一次生産性	1.07×10^{-2}	kg/kg
		生物多様性	1.10×10^{-14}	EINES/kg
		一次生産性	1.20×10^{-1}	円/kg
土地利用 (建物用地)	土地改変	生物多様性	2.22×10^{-10}	EINES/m ²
	土地占有	一次生産性	1.28	kg/m ² /年
土地利用 (畑地→建物用地)	土地改変	一次生産性	90.7	kg/m ²
土地利用 (森林(平均)→建物用地)	土地改変	一次生産性	92.8	kg/m ²

2.2.2 被害係数の算出方法

植生別評価手法では、ターゲットとする利用前の土地形態に対し、土地利用後の環境影響を算出する土地利用の DF を構築する。

LIME2 における土地利用 DF は、土地改変による NPP への影響を示す一次生産性影響（Primary Production Influence: PPI）の被害係数 DF_PPI(trans) (kg/m²)、土地占有による PPI を示す被害係数 DF_PPI(occ) (kg/m²/年)、土地改変による生物多様性影響（Biodiversity Influence: BDI）を示す被害係数 DF_BDI(trans) (EINES/m²) からなる。ここで、“occ”は“occupation”、“trans”は“transformation”の略である。

森林植生の違いを評価するための土地利用被害係数の詳細化に必要な調査値と算出手順を図 2-2 に示す。本論文で調査した値は生物多様性影響に起因する土地利用影響の植生別評価に必要なデータと、土地改変後の被覆形態に関するデータである。これらの調査値と LIME2 提供値[25]を用いて Step 1 から Step 5 の手順により各 DF を森林植生別に設定した。

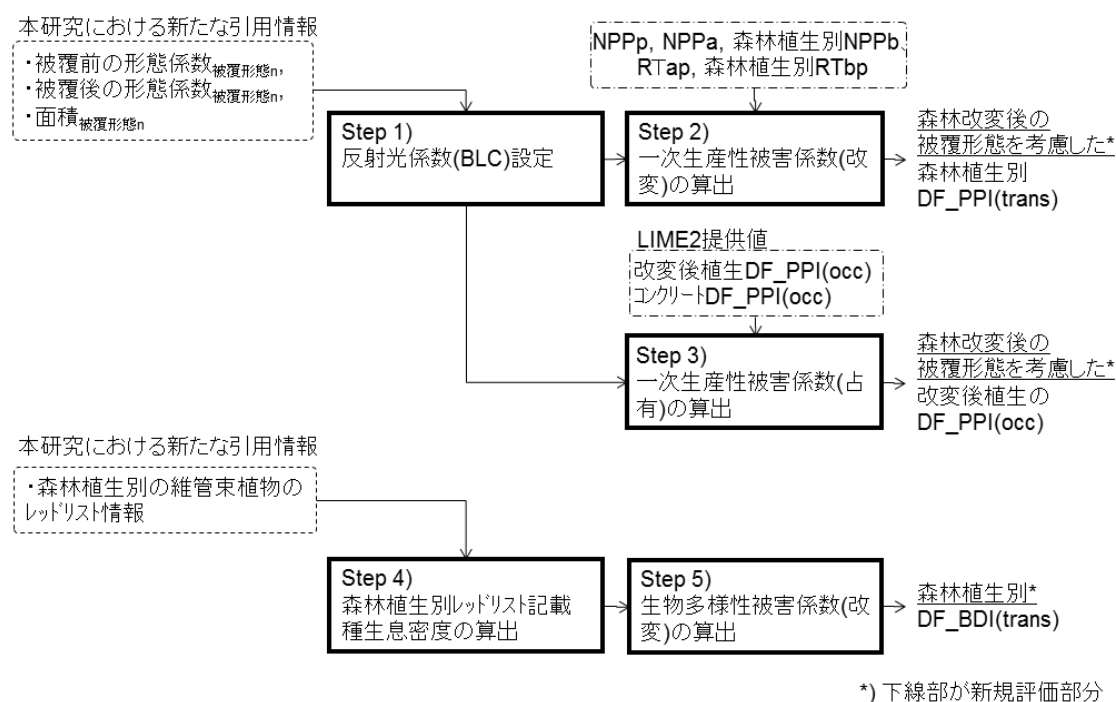


図 2-2 被害係数 (DF) の策定に必要な調査値と算出手順

以下に Step ごとの手順を概説する。詳細な算出方法は後述する。

Step 1 では、①土地利用後のコンクリート被覆率、または、②土地被覆前後の形態係数、を用いて反射光係数 (Borrowed Light Coefficient: BLC) (倍) を設定する。PV 発電の場合、パネル下部をコンクリートにせず草地にすることも想定される。BLC は草地とした場合に、パネルによる直射日光の光量変化を表す係数である。形態係数の説明は後述する。

Step 2 では、①Step 1 で求めた BLC、②潜在 NPP (Potential NPP: NPPp)、③土地改変後の現況 NPP (Present NPP after land use: NPPa)、④土地改変前の森林植生別現況 NPP (Present NPP before land use: NPPb)、⑤NPPa から NPPp への回復時間 (Recovery time from NPPa to NPPp: RTap)、⑥NPPb から NPPp への回復時間 (Recovery time from NPPb to NPPp: RTbp)、を用いて DF_PPI(trans)を求める。

Step 3 では、①Step 1 で求めた BLC、②土地改変後の植生の直射日光入射時の DF_PPI(occ)、③コンクリートの DF_PPI(occ)、を用いて土地改変後の被覆形態を考慮した DF_PPI(occ)を算出

する。BLC 以外は LIME2 提供値である。ただし海外の植生など、LIME2 提供値が適用できない場合は NPP 値を用いる。

Step 4 では、①総森林面積、②優占種（属）別レッドリスト出現割合（Appearance Ratio per area of the Red List ; ARRL）、③優占種（属）別森林面積、から主要植生別 ARRL と主要植生別森林面積割合を求める。ここで、レッドリストは維管束植物を対象としている。優占種（属）別の分類は林野庁が ARRL 調査に用いた分類であり、主要植生分類とは異なる。

Step5 では、①主要植生別 ARRL、②主要植生別森林面積割合、③総森林面積、④レッドリスト記載種総数、⑤DF_BDI(trans)森林代表値、から主要植生別 DF_BDI(trans)を算出する。DF_BDI(trans)森林代表値は LIME2 提供値であり、主要植生別 DF_BDI(trans)の平均値とした。次に Step ごとに詳細な詳細化方法を記す。

（Step 1）反射光係数の設定

光量と NPP は比例関係にある[94]ことから、地面に差し込む直射日光の入射度合を表す 0～1 の係数として BLC を以下のとおり定義した。以下では、コンクリートを打設する場合などの土地改変後のコンクリート被覆率が分かる場合と、コンクリートの打設はないが上部を構造物が覆っている PV パネルなどを想定したコンクリート被覆率が分からない場合に分けて算出方法を記載した。ここでは PV パネル下部を緑化した被覆率が分からない場合について計算を行った。

（a）土地改変後のコンクリート被覆率が分かる場合

BLC は森林改変後の植生に直射日光が入射する割合を示しており、コンクリート被覆率%を用いて式(2-4)のとおり定義した。コンクリート被覆率が 100%の場合に BLC は 0、コンクリート被覆率が 0%の場合に BLC は 1 となる。

$$BLC = 1 - \frac{\text{コンクリート被覆率}}{100} \quad (2-4)$$

（b）土地改変後の被覆率が分からない場合（PV パネル下部を全面的に緑化した場合など）

PV パネル下部を緑化した場合、パネル下部の植物の成長は日陰となるため制限される。この場合の BLC は形態係数を用いて式(2-5)のとおり定義した。形態係数とはある面 A から放射されたエネルギーが別の面 B に入射するときに、面 B が受けるエネルギーと面 A で放射されたエネルギーの比を表し、形態係数が 1 とは面 A で放射されたエネルギーが全て面 B に到達する場合で、形態係数が 0 とは面 B にエネルギーが全く届かない場合である。式(2-5)では、被覆形態 area_n

の対象床面の形態係数と日向床面の形態係数の比を求め、面積 $area_n$ に応じた加重平均から BLC を算出する。

$$BLC = \sum_{n=1 \sim x} \left(\frac{\text{対象床面の形態係数} \times \text{面積} \times area_n}{\text{日向床面の形態係数} \times \text{評価対象面積}} \right) \quad (2-5)$$

ここで、評価対象面積は複数の被覆形態 ($area_1$ 、 $area_2 \cdots area_x$) に分割され、各面積 (面積 $area_1$ 、面積 $area_2$ 、 $\cdots$ 面積 $area_x$) の総和は評価対象面積となる。

BLC が 0 とは対象床面の形態係数が 0 で対象エリアの地面が直射日光の入射から完全に遮断されていることを表し、BLC が 1 とは、対象床面と日向の形態係数が同じ場合であり、対象床面には直射日光が減衰せずが届く場合を表す。

図 2-3 は PV パネル下部が草地の場合を事例とした BLC の設定に関する説明図である。PV パネル下部は草地を想定し、各被覆形態における直射日光の入射と反射光の状況を示している。PV パネル下部には個々の被覆形態が $area_n$ ($n=1 \sim x$) だけ存在し、面積 $area_1$ 、面積 $area_2$ 、 $\cdots$ 面積 $area_x$ の総和は敷地面積である。各 $area_n$ にはそれぞれの被覆形態に応じた個別の BLC $area_n$ が存在している。日光の直射を示す直射日光 K は、草地や木々などに反射しながら反射光として入射するが、パネル下部端では直射日光も時間帯により含まれるため一日の平均では入射光はパネル中心部の下部より増加し、厳密には入射光は $area_n$ ごとに異なる。PV パネル下部全体の BLC は式(2-5)のとおり、 BLC_{area-1} から BLC_{area-x} に対して各 $area$ の面積に応じた加重平均から算定する。

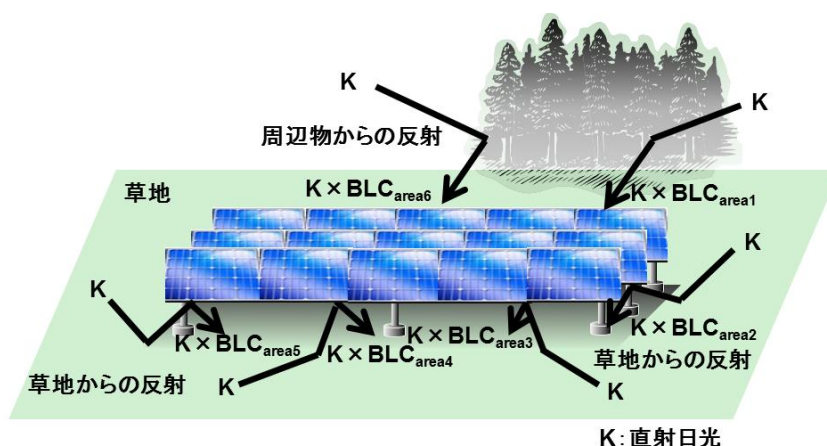


図 2-3 BLC の設定に関する説明図

ここでは BLCarea_n の違いは考慮せず PV パネル下部の日射の量およびその減衰は均一であるとして、対象床面の形態係数は金ら[95]の調査による日陰床面の形態係数 0.047 を用い、日向床面の形態係数は同調査における 0.345 を引用した。これにより BLC を式(2-6)のとおり 0.136 と設定した。このことは、PV パネル下部では光のエネルギー到達量が 13.6%に減衰していることを示している。なお、日向床面および日陰床面の形態係数は屋内の値であるため、厳密にはガラスによる直射日光の減衰が含まれているが、必要な情報は日向と日陰の形態係数の比であるため、適用可能とした。

$$BLC = \frac{\text{日陰の日射量}}{\text{日向の日射量}} = \frac{\text{日陰床面の形態係数}}{\text{日向床面の形態係数}} = \frac{0.047}{0.345} = 0.136 \quad (2-6)$$

(Step 2) 一次生産性被害係数（改変）の算出

DF_PPI(trans) (kg/m²) の算出式を式(2-7)に示す。第 1 項は土地改変後に抑制されて失われた ha あたりの一次生産量であり、0.5 は成長が直線的に回復すると仮定した設定値である。第 2 項も同様、土地改変前の ha あたりの一次生産量である。第 1 項から第 2 項を引くことで、土地改変により失われた ha あたりの一次生産量を求める。

$$DF_PPI(trans) = (NPPp - NPPa \times BLC) \times RTap \times 0.5 - (NPPp - NPPb) \times RTbp \times 0.5 \quad (2-7)$$

ここで、

NPPp : 潜在 NPP (kg/m²/年)

NPPa : 土地改変後の現況 NPP (kg/m²/年)

NPPb : 土地改変前の現況 NPP (対象森林植生の NPP) (kg/m²/年)

RTap : NPPa から NPPp への回復時間 (年)

RTbp : NPPb から NPPp への回復時間 (年)

BLC : 反射光係数 (PV パネル下部が草地の場合は 0.136。左記以外は 0。)

(Step 3) 一次生産性被害係数（占有）の算出

土地占有時の一次生産性の被害係数である DF_PPI(occ) (kg/m²/年) は式(2-8)のとおり定義した。

$$DF_PPI(occ) = DF_PPI(occ)_{asp} \times (1 - BLC) + DF_PPI(occ)_{after} \times BLC \quad (2-8)$$

ここで、

DF_PPI(occ)_{after} : 土地改変後植生の直射日光入射時の DF_PPI(occ) (kg/m²/年) (LIME2 提供値[25])

DF_PPI(occ)_{asp} : コンクリート面の DF_PPI(occ) (kg/m²/年) (LIME2 提供値[25])

BLC : 反射光係数 (PV でパネル下部草地の場合は 0.136。左記以外は 0。)

注) 海外の植生など、LIME2 提供値が適用できない場合は NPP 値を用いる。

式(2-8)において、BLC は直射日光の入射度合を示している。反射光係数の説明で述べたとおり、BLC が 0 とはコンクリートで覆われ直射日光の入射が完全に遮断されている状態であり、逆に、BLC が 1 とはパネルが無く草地に光が直接入射している状態である。従って、DF_PPI(occ) は最大が DF_PPI(occ)_{asp}、最小が DF_PPI(occ)_{after} になる。BLC はその間のどのレベルにあるかを示す係数である。ここで、BLC は小さいほど DF_PPI(occ)は増加する関係にある。

(Step 4) 森林植生別レッドリスト記載種生息密度の算出

森林植生別のレッドリスト生息密度は特定の植生に生息している維管束植物のレッドリスト記載種であり、式(2-9)により算出する。

$$DRLi = \frac{SRLi}{AREAi} \quad (2-9)$$

ここで、

DRLi : 植生 i の森林のレッドリスト密度 (種/ha)

SRLi : 主要植生 i の森林のレッドリスト記載種数 (種)

AREAi : 主要植生 i の森林面積 (ha)

(Step 5) 生物多様性被害係数（改変）の算出

森林植生別の生物多様性被害係数（改変）DF_BDI(trans)は日本の DF_BDI(trans)代表値と式(2-9)で求めた DRLi を用いて式(2-10)により算出する。

$$DF_BDI(trans)i = DF_BDI(trans)_{代表値} \times \frac{DRLi}{DRL_{代表値}} \quad (2-10)$$

$$DRL_{代表値} = \frac{SRL_{代表値}}{AREA_{代表値}}$$

ここで、

DF_BDI(trans)i：主要植生 i の DF_BDI(trans)（EINES/m²）

DF_BDI(trans)_{代表値}：DF_BDI(trans)の日本の森林の代表値（EINES/m²）

DRLi：主要植生 i の森林のレッドリスト密度（種/ha）

SRL_{代表値}：レッドリスト記載種数の日本の森林の代表値（種）

AREA_{代表値}：SRL_{代表値}の種数が生息する森林面積（m²）

上述した土地利用 DF の算出手順の Step 1 から Step 5 を図 2-4 にまとめた。

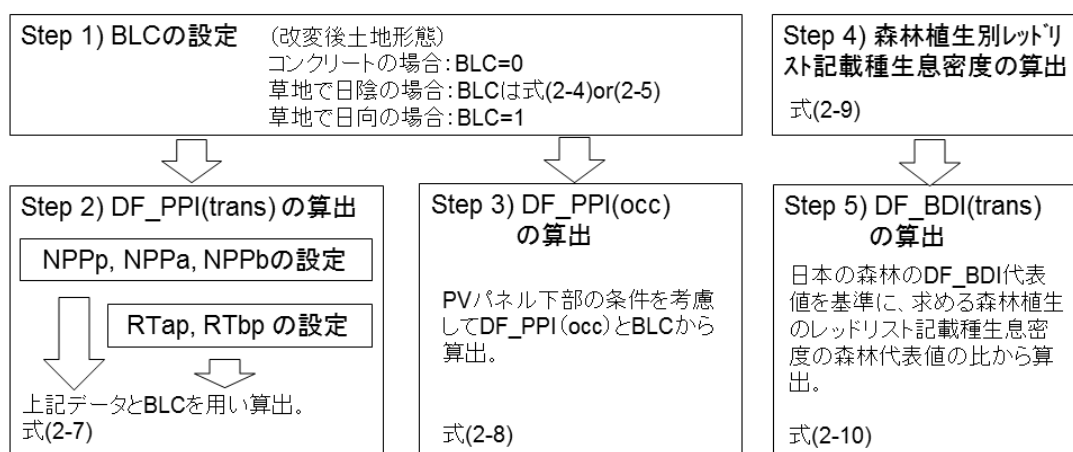


図 2-4 土地利用 DF 算出 Step の概要まとめ

2.3 日本の森林植生別評価

2.3.1 条件設定

日本の山間部に PV 発電を設置する場合を想定した日本の森林植生別の評価を行う。わが国は、国土が南北に約 3,000km と長く、季節風の影響、四季の変化、急峻な地形、自然と共存してきた人間活動、などにより、国土の 67% を占める森林には様々な段階の生態系が存在している [96]。LIME2 では、土地利用による一次生産性影響の DF 算出に必要な純一次生産力 (Net Primary Production: NPP) に関して、日本の代表的な 13 の森林植生 (主要植生分類) の値を事例表示している [25]。そこで、本論文では、新たに生物多様性影響の $DF_BDI(trans)$ を主要植生分類に詳細化する。同分類は、1) 常緑広葉樹林、2) ブナ林、3) カバ林、4) ナラ林、5) 天然性針葉樹林、6) マツ林、7) スギ・ヒノキ林、8) 落葉針葉樹林、9) 高山低木林、10) 亜熱帯低木林、11) 低山常緑低木林、12) 低山落葉低木林、13) 竹林、からなる。

図 2-4 の手順に基づいて $DF_PPI(trans)$ 、 $DF_PPI(occ)$ 、 $DF_BDI(trans)$ を算出する。植生別評価手法の土地利用被害係数計算プロセスを図 2-5 に示す。ここでは、図 2-4 における森林植生分類を主要植生別分類とし、一次生産性影響の評価では LIME2 の提供値を引用した。調査した値は生物多様性影響の植生別評価に必要なデータと、土地改変後の被覆形態に関するデータである。以下に図 2-5 に示した Step ごとに条件設定手順を示す。

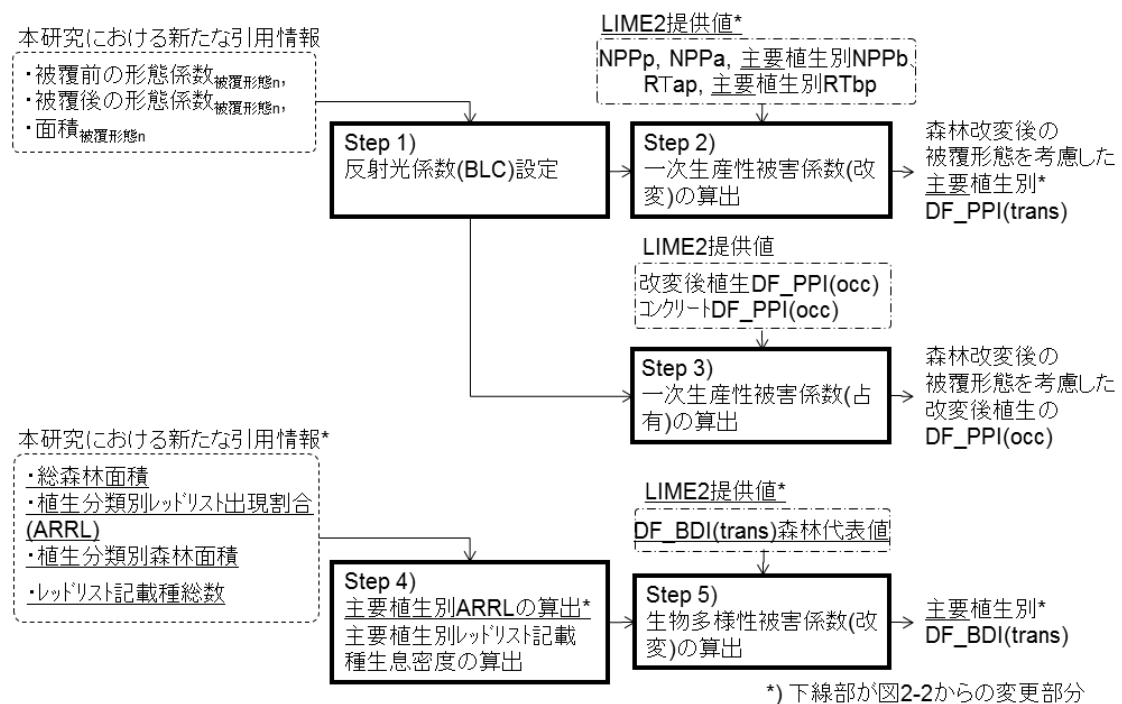


図 2-5 日本の森林の土地利用 DF 算出手順

Step 1 では、PV パネル下部がコンクリートの場合と草地の場合を想定する。コンクリートの場合は BLC を 0 とし、草地の場合は式(2-6)により求めた 0.136 を用いた。

Step 2 では、式(2-7)を用いて DF_PPI(trans)を求める。NPPp は LIME2 の森林代表値、NPPa、NPPb、RTap、RTbp についても LIME2 記載値を引用した[25]。NPPp は緯度や経緯や標高や土壌条件で変わるものであるが、ここでは一律に日本の平均値である 13.4kg/m²/年[25]を用いた。NPPb は NPPp から主要植生別分類の現況 NPP を差し引いた。表 2-4 に DF_PPI(trans)の算出プロセスと算出結果を示す。表中、常緑広葉樹林の NPPb は、現況 NPP が潜在 NPP よりも大きいためマイナス値となっている。このようなケースは現状の樹種の成長が潜在的に生息している樹種より速い場合であり、定期的に森林を利用する場合に生じるもので、マツ林やスギ・ヒノキ林も同様にマイナス値を示している。一方、高山低木林の NPPb は最も大きい値となっている。高山帯では潜在 NPP が小さいことが想定されるが、潜在 NPP を一律で設定したためであり、本評価のデータ入手における課題である。反射光を考慮した人工草地の NPPa は表中に示した式のとおり、人工草原の NPP である 8kg/m²/年[25]に式(2-4)で求めた BLC を乗算した値を NPPp から差し引いて求めた。コンクリートの場合の NPPa は潜在 NPP と同じ値となる。

表 2-4 DF_PPI(trans)の算定プロセスと算定結果

	利用前土地タイプ	潜在NPP (NPPp) 日本平均 (kg/m ² /年)	現況NPP (kg/m ² /年)	潜在NPP - 現況NPP			回復時間 (RT)		DF_PPI(trans)	
				土地利用前 NPP (NPPb) (kg/m ² /年)	土地利用後NPP (NPPa)		土地利用 前 (RTbp) (年)	土地利用 後 (RTap) (年)	人工草地 +反射光 (kg/m ²)	コンクリート (kg/m ²)
					人工草地 +反射光 (kg/m ² /年)	コンクリート (kg/m ² /年)				
No.	A1	A2	A3	A4a	A4b	A5	A6	A7a	A7b	
備考	*1)	*1)	A1-A2	A1-0.8 × 0.136 ^{*2)}	A1-0	*1)		A4 × A6 × 0.5-A3 × A5 × 0.5		
1	常緑広葉樹林	1.34	2.00	-0.66	1.23	1.34	0	150	92.1	100.3
2	ブナ林	1.34	0.90	0.44	1.23	1.34	0	150	92.1	100.3
3	カバ林	1.34	0.90	0.44	1.23	1.34	0	150	92.1	100.3
4	ナラ林	1.34	0.90	0.44	1.23	1.34	0	150	92.1	100.3
5	天然性針葉樹林	1.34	1.10	0.24	1.23	1.34	0	150	92.1	100.3
6	マツ林	1.34	1.40	-0.06	1.23	1.34	0	150	92.1	100.3
7	スギヒノキ林	1.34	1.40	-0.06	1.23	1.34	0	150	92.1	100.3
8	落葉針葉樹林	1.34	1.00	0.34	1.23	1.34	0	150	92.1	100.3
9	高山低木林	1.34	0.50	0.84	1.23	1.34	15	150	85.8	94.0
10	亜熱帯低木林	1.34	0.80	0.54	1.23	1.34	15	150	88.1	96.2
11	低山常緑低木林	1.34	0.80	0.54	1.23	1.34	15	150	88.1	96.2
12	低山落葉低木林	1.34	0.60	0.74	1.23	1.34	15	150	86.6	94.7
13	竹林	1.34	1.00	0.34	1.23	1.34	0	150	92.1	100.3

*1) 参考文献[25]

*2) 8.0(t/ha/年) は人工草原の NPP。0.136 は BLC。

Step 3 では、式(2-8)を用いて DF_PPI(occ)を求めた。表 2-5 には土地改変後植生が草地とコンクリートの場合の DF_PPI(occ)算出結果を示す。草地の DF_PPI(occ)after は LIME2 提供値「その他樹木畑」の DF_PPI(occ)である 0.305kg/m²/年[25]、DF_PPI(occ)asp は LIME2 提供値「都市利用土地」の DF_PPI(occ)である 1.28kg/m²/年[25]、BLC は式(2-6)で求めた 0.136、をそれぞれ用いて式(2-8)により算出した。コンクリートの DF_PPI(occ)は LIME2 提供値「都市利用土地」の DF_PPI(occ)である 1.28kg/m²/年[25]を用いた。

表 2-5 DF_PPI(occ)の算定プロセスと算定結果

	DF_PPI(occ)	
	土地利用後	
	人工草地 +反射光 (kg/m ² /年)	コンクリート (kg/m ² /年)
算出値	1.14	1.28
備考	*1)	*2)

*1) 式(2-8)参照。

DF_PPI(occ)after は「その他樹木畑」の DF_PPI(occ) 0.305 (kg/m²/年) [25]

DF_PPI(occ)asp は「都市利用土地」の DF_PPI(occ) 1.28(kg/m²/年) [25]

BLC は 0.136

*2) "1.28(kg/m²/年)"は「都市利用土地」の DF_PPI(occ) [25]

Step 4 では、まず、林野庁が調査した優占種（属）別森林面積割合[97]と「森林における生物多様性保全の推進方策検討会」が調査したデータ[98]を用いて主要植生別 ARRL を求める。表 2-6 にその結果を示す。主要植生別 ARRL を求めるにあたり、1.常緑広葉樹林、7.スギ・ヒノキ林、12.低山落葉低木林、については優占種（属）ごとの ARRL を主要植生別に集約する必要がある。そこで、レッドリスト記載種の出現頻度が森林面積に比例すると仮定し、森林面積による重みづけを考慮して式(2-11)により算出した。主要植生別の森林面積割合は当該する優占種（属）別森林面積割合を加算して求めた。

$$ARRLi = \sum_{a=a1,a2,\dots} \left(ARRLi_a \times \frac{FAa}{\sum_{a=a1,a2,\dots} FAa} \right) \quad (2-11)$$

ここで、

ARRLi：主要植生 i(i=1,7,12)の森林におけるレッドリスト記載種出現割合（%）

ARRLa：主要植生 i(i=1,7,12)に含まれる優占種（属）a(a=a1,a2・・・)の森林におけるレッドリスト記載種出現割合（%）

FAa：優占種（属）a が生息している森林面積（ha）（総森林面積に森林面積割合を乗算）

表 2-6 主要植生別森林別 ARRL の算定プロセス

主要植生別森林分類	優占種(属)別 森林面積割合 (%)	優占種(属)別 森林面積 (10 ⁴ ha)	レッドリスト記載種(維 管束植物)出現割合 (%)
占育種(属)	A ^{*1)}	総森林面積 ^{*2)} × A	*3)
1 常緑広葉樹林 (Sum)	7.0		(Weighting) ^{*4)} 18.5
シイ属	2.0	50.2	
スタジイ			27.0
カシ類	2.0	50.2	
アラカシ			10.0
その他	3.0	75.3	データ無
2 ブナ林			
ブナ	5.0	125.5	9.0
3 カバ林			
カバノキ	3.0	75.3	
ダケカンバ			12.0
4 ナラ林			
ナラ類	12.0	301.2	22.0
5 天然性針葉樹林 (Sum)	8.0		
モミ	6.0	150.6	
トドマツ			11.0
その他	2.0	50.2	データ無
6 マツ林			
マツ	8.0	200.8	
アカマツ			6.0
7 スギヒノキ林 (Sum)	33.0		(Weighting) ^{*4)} 14.2
スギ	21.0	527.1	16.0
ヒノキ	12.0	301.2	11.0
8 落葉針葉樹林			
カラマツ	4.0	100.4	11.0
9 高山低木林	データ無	データ無	データ無
10 亜熱帯低木林	データ無	データ無	データ無
11 低山常緑低木林	データ無	データ無	データ無
12 低山落葉低木林 (Sum)	14.0		(Weighting) ^{*4)} 11.2
ハンノキ	1.0	25.1	データ無
シナノキ	1.0	25.1	10.0
カエデ	2.0	50.2	
イタヤカエデ			8.0
クマシデ	1.0	25.1	データ無
その他	9.0	225.9	
クリ			12.0
13 竹林			
竹林	1.0	25.1	データ無

*1) 参考文献[97]

*2) 総森林面積 : 2,510 × 10⁴(ha) [97].

*3) 参考文献[98]

*4) 森林分類(13 種)ごとの出現割合は面積による重み付けを考慮し式(2-11)を用いて算定

次に、主要植生の森林のレッドリスト記載種数を式(2-12)により算出する。式(2-11)で求めた ARRLi、主要植生分類ごとの森林面積、レッドリスト記載種（維管束植物）の全国総種数[99]を用いて式(2-12)により算出した。

$$SRLi = SRLall \times \frac{AREAi \times ARRLi}{\sum_{i=1 \sim 13} (AREAi \times ARRLi)} \quad (2-12)$$

ここで、

SRLi：主要植生 i(i=1~13)の森林のレッドリスト記載種数(種)

SRLall：レッドリスト記載種総数(1,690 種)[99]

AREAi：主要植生 i(i=1~13)の森林面積(ha)（総森林面積 $2,510 \times 10^4$ ha[97]に ARRLi を乗算）

ARRLi：主要植生 i(i=1~13)の森林におけるレッドリスト記載種出現割合(%)

式(2-12)で求めた SRLi と AERAi から式(2-9)を用いて DRLi を求めた。一方、DRL 代表値は式(2-13)により求めた。

$$DRL_{\text{代表値}} = \frac{\sum_{i=1 \sim 13} \frac{SRLi}{AREAi}}{i_0} \quad (2-13)$$

ここで、

i_0 ：SRLi/AREAi の有効データ数（高山低木林、亜熱帯低木林、低山常緑低木林、竹林はデータがないため 13 から 4 を差し引き 9 とした）

Step5 では、Step 4 で求めた DRLi と $DRL_{\text{代表値}}$ を式(2-10)に適用し、主要植生分類ごとの DF_BDI(trans)を求めた。表 2-7 に DF_BDI(trans) の算出プロセスと算出結果を示す。

DF_BDI(trans)代表値は LIME2 提供値であり、主要植生別 DF_BDI(trans)の平均値 2.22×10^{-10} EINES/m²[25]とした。

ここでは、以下の仮定に基づいた算出をしており、今後、フィールドデータの蓄積と分析に基づくデータ更新が望まれる。

- SRLi は ARRLi に AREAi を乗算した値に比例すると仮定した。すなわち、出現割合が高いほど広い面積に分布しているとした。実際には、例えばスギ・ヒノキ林とブナ林では、標高や気候条件、土壌の性質などが異なり、その林に存在する維管束植物のレッドリストの種

の数の推定には、面積に加えてこれらの影響も考慮すべきであるが、本評価では反映できていない。

- ・ 高山低木林、亜熱帯低木林、低山常緑低木林、竹林、優占種無は有効なデータが得られず、DF_BDI(trans)は LIME2 提供の森林代表値 2.22×10^{-10} EINES/m²[25]を適用した。
- ・ レッドリスト出現割合として引用した森林資源モニタリング調査は平成 11 年から平成 20 年までの計画である。今回、引用したデータは第一期報告のもので、全調査プロットの 12% に留まっている。

表 2-7 DF_BDI(trans) の算定プロセスと算定結果

No	主要植生別森林分類	森林面積 AREAi	ARRLi	レッドリスト記載種数 SRLi	レッドリスト記載種の 生息密度	レッドリスト記載種の 生息密度比率 (合計1に正規化)	DF_BDI(trans)i
		(10 ⁴ ha)	(%)	(種)	(種/10 ⁴ ha)	(倍)	(EINES/m ²)
		No. B1 ^{*1)}	B2	B3 ^{*2)}	B4	B5	B6 ^{*3)}
		備考	2,510 × 森林面積割合	*4)	1,690 × (B1 × B2)/Σ(B1 × B2)	B3/B1	B4/B4 _{average}
1	常緑広葉樹林	177	18.5	171	0.96	1.45	3.23 × 10 ⁻¹⁰
2	ブナ林	127	9.0	59	0.47	0.71	1.57 × 10 ⁻¹⁰
3	カバ林(ダケカンバ)	76	12.0	48	0.63	0.94	2.09 × 10 ⁻¹⁰
4	ナラ林	304	22.0	349	1.15	1.72	3.84 × 10 ⁻¹⁰
5	天然性針葉樹林	203	11.0	116	0.57	0.86	1.92 × 10 ⁻¹⁰
6	マツ林	203	6.0	63	0.31	0.47	1.05 × 10 ⁻¹⁰
7	スギ・ヒノキ林	837	14.2	618	0.74	1.11	2.47 × 10 ⁻¹⁰
8	落葉針葉樹林	101	11.0	58	0.57	0.86	1.92 × 10 ⁻¹⁰
9	高山低木林	データ無	データ無	データ無	データ無	データ無	2.22 × 10 ⁻¹⁰
10	亜熱帯低木林	データ無	データ無	データ無	データ無	データ無	2.22 × 10 ⁻¹⁰
11	低山常緑低木林	データ無	データ無	データ無	データ無	データ無	2.22 × 10 ⁻¹⁰
12	低山落葉低木林	355	11.2	207	0.58	0.88	1.95 × 10 ⁻¹⁰
13	竹林	25	データ無	データ無	データ無	データ無	2.22 × 10 ⁻¹⁰
	優占種無	101	データ無	データ無	データ無	データ無	2.22 × 10 ⁻¹⁰
	Average	—	—	—	0.67	1.00	2.22 × 10 ⁻¹⁰
	Total	2,510	—	1,690	—	—	—

*1) 2,510 × 10⁴(ha) は総森林面積[97]、森林面積割合は表 2-6 から引用

*2) SRL_yは ARR_yに ARE_{Ay}を乗算したものと仮定(出現割合が高いほど広い面積に分布していると考えた)、1,690 種は 2007 年版レッドリスト記載種総数[99]

*3) 2.22×10^{-10} (EINES/m²)は LIME2 における森林の代表値[25]

*4) 表 2-6 参照

(1) 主要植生別森林の統合化係数

主要植生別の森林 13 分類[25]に詳細化した DF に表 2-2 に示した WF を乗算して求めた主要植生別 IF を図 2-6 に示す。土地改変後はすべてコンクリートにする条件とした。図から IF は最大のナラ林で 12,455 円/m²、最小のマツ林で 8,502 円/m²となり、平均値 10,100 円/m²に対してプラス側に 23%、マイナス側に 18%の差となった。植生による IF の違いは、生物多様性影響が植生ごとに異なることによるものである。

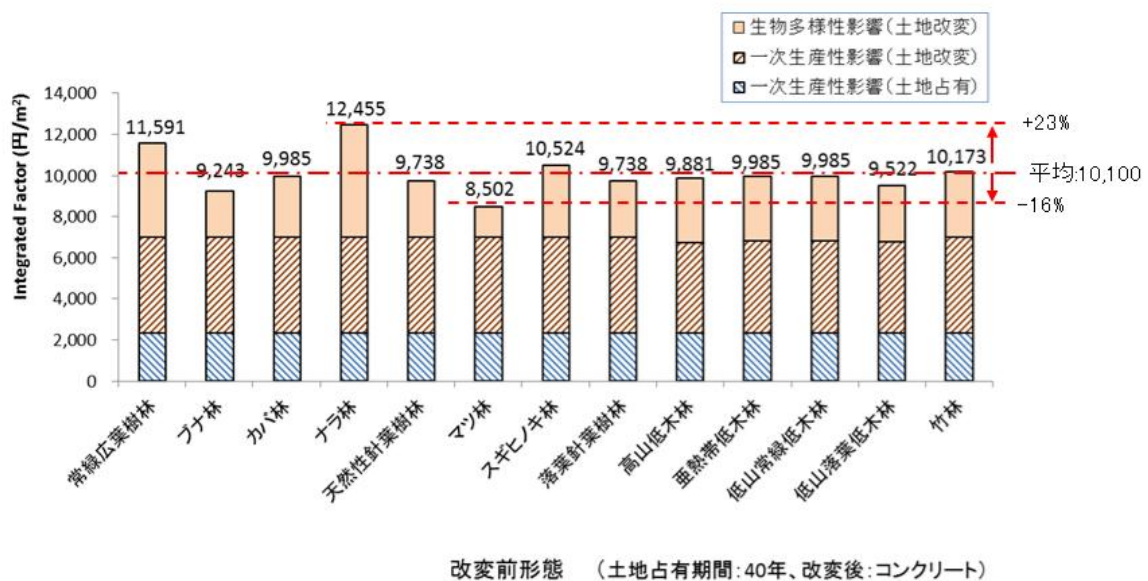


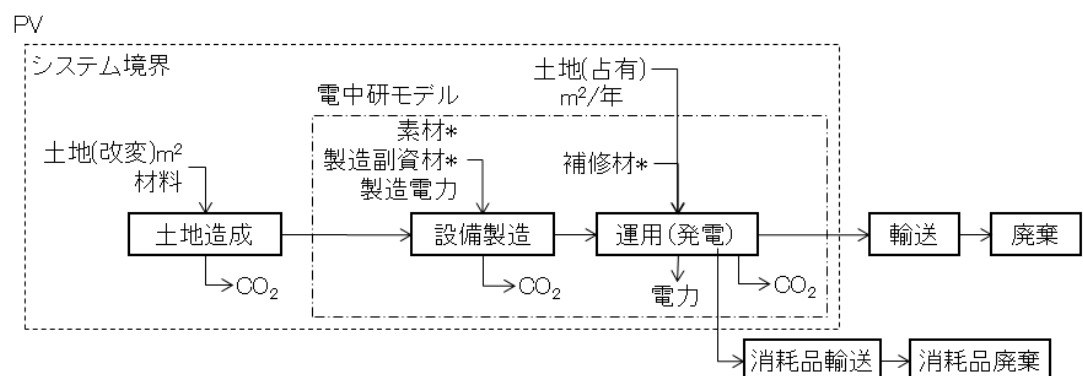
図 2-6 森林植生別の土地利用統合化係数 (IF) 比較

(2) 評価条件

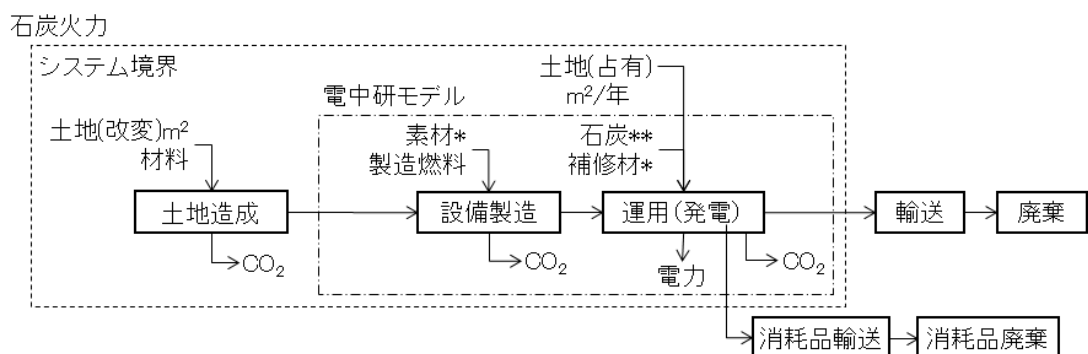
<評価範囲>

森林の主要植生別に詳細化した LIME2 の被害係数を PV 発電と石炭火力の環境影響評価に適用し発電システム導入前後の環境影響を CO₂ 排出影響、化石資源消費影響、および土地利用影響により評価した。PV 発電の設置場所は森林と屋根とし、森林は図 2-6 において IF が最大のナラ林、最小のマツ林、および平均値とし、屋根に設置する場合は PV 発電のための新たな土地利用は無いものとした。

発電システムの設備仕様は、わが国の標準的なシステムとして電中研モデル[6],[7]を用いた。システム境界を図 2-7 に示す。評価範囲は土地造成、設備製造、運用（発電）である。そのうち土地造成以外は電中研モデルを引用した。ここで、素材、製造副資材、補修材は原材料と間接工程を考慮している。間接工程とは原材料から素材や副資材にする際の燃料や電力の投入による CO₂ 排出を指す。また、石炭の消費については、海外炭の輸入を想定し、輸入炭採取・前処理、国際輸送、現地輸送、および燃焼時の CO₂ 排出を対象とした。機能単位は 1kWh の単位発電量とし、PV 発電と石炭火力の比較は環境影響を発電量で割り戻した SI 値を用いた。発電の目的によっては PV 発電に蓄電池などの設備を含めることが望ましいが、本評価は電中研モデルに準じた標準的な設備を対象としているため、蓄電池などの設備は考慮しないこととした。PV 発電については、パネル下部をコンクリートとする Case1 と、人工草地とする Case2 を設定した。



*) 原材料、および間接工程(原材料から素材や副資材にする際の燃料や電力の投入によるCO₂排出)



*) 原材料、および間接工程(原材料から素材や副資材にする際の燃料や電力の投入によるCO₂排出)

**) 輸入炭採取・前処理、国際輸送、現地輸送、および燃焼時

図 2-7 システム境界

Case2 において、パネル脚部の部分的なコンクリートの影響は除外した。石炭火力は大規模設備を想定しており通常は都市部の海辺への設置が一般的であることから、改変前の条件は LIME2 が土地利用に関する DF を提供している「畑地」とし、レッドリスト記載種は存在せず石炭火力設置における生物多様性影響はないものとした。

＜インベントリデータ＞

本評価は標準的な PV 発電と石炭火力を対象としているため、インベントリデータにはバックグラウンドデータを用い、CO₂ 排出原単位にはわが国の標準値を用いた。PV 発電と石炭火力の評価条件とインベントリデータを表 2-8 と表 2-9、CO₂ 排出原単位を表 2-10 に示す。表 2-8 と表 2-9 の建設に必要な素材・資源・エネルギーの投入量、使用段階の効率、設備利用率、保守部品のための資源・エネルギー投入量、および表 2-10 の CO₂ 排出原単位は全て電中研モデル[6],[7]を引用した。PV 発電は多結晶シリコンパネルを想定している。PV 発電の設備利用率は標準的な 12%とし[100]、PV 発電の運用期間はパネルの寿命に合わせ 20 年とした。PV 発電の敷地面積は（一社）太陽光発電協会が、パネルの角度 5 度、パネル間の必要スペース、基礎の張り出し分、制御装置の設置スペース 120m² を考慮したメガソーラーを対象とした一般的な結晶系モ

ジュールで設備利用率が 14%の場合の単位容量あたりの敷地面積（単位容量敷地面積）の推奨値 13,000m²/MW[101]を用いた。設備利用率 12%の単位容量敷地面積は 13,000m²/MW から設備利用率の比である 12/14 を除して 15,200m²/MW とし、設備出力 3.84kW を乗算して 58.2m² と算出した。ここで、電中研モデルのデータは家庭用設備を想定した値であるが、対象パネルは多結晶シリコン(Si)であり、家庭用と商業用は基本的に同じであるため、そのまま引用した。また、電中研モデルが引用しているみずほ情報総研の報告書[50]においても家庭用と商業用の区別はしていない。PV 発電のコンクリート量は一般的な PV 発電における単位面積あたりのコンクリート量 0.015m³/m²[50]から算出した。

石炭火力の敷地面積は北海道電力苫東厚真発電所のデータ[102]を引用した。4 基 165 万 kW 分の敷地面積である約 0.58km² からビオトープ 0.093km² 分を差し引いた 0.487km² とし、発電機の熱効率は電中研調査値である 39.55%[7]と仮定して年間発電量を求め、その値を敷地面積で割り戻した算出値 19.3MWh/m²を用いた。

CO₂ 排出原単位については、電中研モデル[6],[7]が引用している情報を表 2-10 のデータ分類の項目に再掲した。ここで、詳細情報が得られない項目は「－」とした。図 2-7 に記した間接工程についても考慮している場合はデータ分類に記載した。

土地改変の影響は改変時に一度発生するのみであるが、改変後の土地形態は発電設備が更新されても長期継続する。本評価では、改変時の影響を初代の発電設備に全て計上することは過剰評価になると考え、改変後の設備が発電目的で利用される期間に対する評価対象となる発電設備の耐用期間の比を算出し、その比を発電目的で利用される期間の環境影響に乗算した値を当該設備の影響として計上することとした。発電目的で利用される期間は想定したコンクリートの耐用年数の 100 年とした。すなわち、PV 発電の場合は 20 年/100 年、石炭火力の場合は 40 年/100 年分を計上する。例えば、PV 発電の残りの 80 年分の影響は、リプレイス後の次の世代の PV 発電設備が負担するとして本評価範囲からは除外される。さらに、機能単位は 1kWh の単位発電量であるため、最終的に計上される影響は、対象設備の耐用年数分の発電量で除すことになる。計算式を式(2-14)に示す。PV パネル下部の人工草地による土地改変の場合もコンクリート同様に 100 年人工草地として利用されると仮定した。

$$\text{Area_land(trans)} = \text{Area_equipment} \times \frac{\left(\frac{\text{Life_equipment}}{\text{Life_land}} \right)}{\text{Power_total}} \quad (2-14)$$

ここで、

Area_land(trans)：土地改変影響に計上する機能単位あたりの利用面積（m²/kWh）

Area_equipment : 敷地面積 (m²)

Life_equipment : 耐用年数 (年) (PV 発電は 20 年、石炭火力は 40 年)

Life_land : 発電目的で土地利用が継続する年数 (年) (100 年と仮定)

Power_total : 設備の耐用年数分の総発電量 (kWh)

土地占有の影響は設備の使用期間中に発生する影響として、式(2-15)のとおり計上する。

$$\text{Area_land(occ)} = \text{Area_equipment} \times \frac{\text{Life_equipment}}{\text{Power_total}} \quad (2-15)$$

ここで、

Area_land(occ) : 土地占有影響に計上する機能単位あたりの利用面積 (m²/kWh)

Area_equipment : 敷地面積 (m²)

Life_equipment : 耐用年数 (年) (PV 発電は 20 年、石炭火力は 40 年)

Power_total : 設備の耐用年数分の総発電量 (kWh)

表 2-8 PV 発電の設備条件と LCI データ

条件					
項目				備考	
出力	PA	3.84	kW	参考文献(2)*1)	
設備利用率	PB	12	%		
所内率	PC	0.0	%		
耐用年数	PD	20	年		
補修比率	PF	1	%/年		
発電量(発電端)	PG	4.037	kWh/年	PA×24(h)×365(days)×PB/100 PG×(1-PC/100)	
発電量(送電端)	PH	4.037	kWh/年		
LCIデータ					
ステージ	ユニット	パーツ		備考	
素材	アレイパネル	シリコン	26.5	kg	*2)
		板ガラス	207.1	kg	
		アルミニウム	55.4	kg	
		銅	2.5	kg	
		充填剤	41.4	kg	
		PET	15.8	kg	
		PPE	1.4	kg	
	架台	鉄鋼	207.6	kg	
	制御装置等 (パワーコンディショナ、接続箱)	鉄鋼	11.8	kg	
		銅	2.6	kg	
アルミニウム		5.5	kg		
絶縁材料		12.0	kg		
基礎	コンクリート	0	kg	*3)	
製造副資材	アレイパネル基盤化	Arガス	8.38	kg	*2)
		シリカルツボ	2.65	kg	
		水溶性切削油	0.02	L	
		SiC	35.21	kg	
		切削油	35.21	L	
		ピアノ線	28.17	kg	
		ガラス板	2.93	kg	
		洗浄用灯油	0.09	L	
	アレイパネルセル化	NaOH	0.72	kg	
		純水	1,790.14	kg	
		POCl3	0.01	kg	
		N2	8.22	kg	
		SiH4	0.03	kg	
		NH3ガス	0.05	kg	
		真空オイル	0.02	L	
		Alペースト	2.51	kg	
Agペースト	0.36	kg			
製造	アレイパネル基盤化	電力	0.58	MWh	
	アレイパネルセル化	電力	1.07	MWh	
	アレイパネルモジュール化	電力	0.07	MWh	
運用(20年)	補修	アレイパネル	70.0	kg	パネル質量350(kg)×PF×PD
土地利用	パネル面積		58.2	m ²	*4)

*1) 参考文献[7]

耐用年数はアレイパネルに合わせ 20 年と設定、設備利用率は NEDO フィールドテストに基づき 12%[100]と設定

*2) 参考文献[7]

*3) $1,721(\text{kg})=5,046(\text{kWh}/\text{年})/(101.1(\text{kWh}/\text{年}/\text{m}^2))\times 0.015(\text{m}^3/\text{m}^2)\times 2.3(\text{t}/\text{m}^3)\times 1,000$

コンクリートの耐用年数は 100 年と仮定し、LCA 評価ではこの表の質量のうち 20 年/100 年分を計上

*4) $58.2(\text{m}^2)=13,000(\text{m}^2/\text{MW})\times 3.84(\text{kW})/1,000(\text{kW})\times 14(\%)/12(\%)$

コンクリートの耐用年数は 100 年と仮定し、LCA 評価ではこの表の質量のうち 20 年/100 年分を計上

表 2-9 石炭火力の設備条件と LCI データ

条件				
項目				備考
出力	CA	1,000 MW	*1)	
設備利用率	CB	70 %		
所内率	CC	6.93 %		
熱効率	CD	39.55 %		
耐用年数	CE	40 年		
発熱量	CG	25,692 MJ/t		6,139Mcal/t×4.19
発電効率(送電端)	CH	36.8 %		CD×(1-CC/100)
発電量(発電端)	CI	6,132,000 MWh/年		CA×24(h)×365(days)*CB/100
発電量(送電端)	CJ	5,707,052 MWh/年		CI×(1-CC/100)
海外炭発熱量	CK	55,821,976 GJ/年		CI×860/(CD/100)/1000×4.19
石炭消費量(輸入炭)	CL	2,172,762 t/年		CK×1000/CG
LCIデータ				
ステージ	ユニット	パーツ		備考
素材	ボイラー	鉄鋼	27,227 t	*2)
	タービン	炭素鋼(低合金鋼)	2,922 t	
	給水復水設備	鉄鋼	1,739 t	
	脱硫設備	鉄鋼	5,979 t	
	脱硝設備	鉄鋼	1,310 t	
	集塵設備	鉄鋼	3,891 t	
	電気設備	鉄鋼	984 t	
	機械その他	鉄鋼	11,410 t	
	土木	鉄鋼	69,090 t	
		コンクリート	747,520 t	
製造	燃料	軽油	14,730 kl	*2)
		A重油	965 kl	
運用(40年)	補修	石灰石	1,302,121 t	
		アンモニア	57,527 t	
		触媒	2,880 百万円	
		建設補修	185,873 百万円	
		機械修理	229,092 百万円	
	運用	海外炭	86,879,331 t	
土地利用	設置面積		295,152 m ²	CJ/19.3 ^{*4)}

*1) 参考文献[7]

*2) 参考文献[6]

*3) 参考文献[6]、コンクリートの耐用年数は 100 年と仮定し、LCA 評価ではこの表の質量のうち 20 年/100 年分を計上

*4) 参考文献[102]

表 2-10 本論文で用いた CO₂ 排出原単位[6],[7]

	項目	原単位	データ分類 ^{*)}
PV	シリコン	76.84 g-CO ₂ /g	D
	板ガラス	1.54 g-CO ₂ /g	C
	アルミニウム	6.28 g-CO ₂ /g	B
	銅	2.43 g-CO ₂ /g	B
	充填剤	1.25 g-CO ₂ /g	A
	PET	1.35 g-CO ₂ /g	B
	PPE	6.54 g-CO ₂ /g	D
	鉄鋼	1.43 g-CO ₂ /g	A
	鉄鋼(制御装置等)	6.60 g-CO ₂ /g	A+間接工程
	銅(制御装置等)	11.22 g-CO ₂ /g	A+間接工程
	アルミニウム(制御装置等)	28.96 g-CO ₂ /g	B+間接工程
	絶縁材料(制御装置等)	11.46 g-CO ₂ /g	C+間接工程
	コンクリート	0.02 g-CO ₂ /g	C
	Arガス	0.52 g-CO ₂ /g	B
	シリカルツボ	0.32 g-CO ₂ /g	D
	水溶性切削油	0.15 g-CO ₂ /mL	B
	SiC	7.46 g-CO ₂ /g	D
	切削油	0.15 g-CO ₂ /mL	B
	ピアノ線	1.43 g-CO ₂ /g	B
	ガラス板	1.54 g-CO ₂ /g	C
	洗浄用灯油	0.15 g-CO ₂ /mL	B
	NaOH	0.35 g-CO ₂ /g	—
	純水	0.03 g-CO ₂ /g	C
	POCl ₃	2.37 g-CO ₂ /g	D
	N ₂	0.12 g-CO ₂ /g	—
	SiH ₄	6.62 g-CO ₂ /g	D
	NH ₃ ガス	1.09 g-CO ₂ /g	C
	真空オイル	0.15 g-CO ₂ /mL	B
	Alペースト	6.28 g-CO ₂ /g	B
	Agペースト	0.65 g-CO ₂ /g	D
	電力消費	454 g-CO ₂ /kWh	F
石炭火力	鉄鋼(ボイラー用)	2.62 g-CO ₂ /g	A+間接工程
	鉄鋼(タービン用)	3.12 g-CO ₂ /g	A+間接工程
	鉄鋼(給水復水設備)	5.85 g-CO ₂ /g	A+間接工程
	鉄鋼(脱硫設備用)	3.52 g-CO ₂ /g	A+間接工程
	鉄鋼(脱硝設備用)	3.52 g-CO ₂ /g	A+間接工程
	鉄鋼(集塵設備用)	3.52 g-CO ₂ /g	A+間接工程
	鉄鋼(電気設備)	4.50 g-CO ₂ /g	A+間接工程
	鉄鋼(機械用)	3.89 g-CO ₂ /g	A+間接工程
	鉄鋼(土木用)	1.43 g-CO ₂ /g	A
	コンクリート	0.12 g-CO ₂ /g	C
	軽油	2.59 g-CO ₂ /mL	F
	A重油	2.72 g-CO ₂ /mL	F
	石灰石	0.44 g-CO ₂ /g	B
	アンモニア	1.09 g-CO ₂ /g	C
	触媒	6.30 g-CO ₂ /円	E
	建設補修	2.93 g-CO ₂ /円	E
	機械修理	1.98 g-CO ₂ /円	E
	輸入炭(採取・前処理、輸送、燃焼)	2.51 g-CO ₂ /g	F

*) 参考文献[7]

A: JLCA-LCA データベース(2004 年度 2 版、LCA フォーラム記載値)を直接引用

B: JLCA-LCA データベースのデータを複数用いて積み上げ計算

C: JLCA-LCA データベースのデータ及び他の情報ソースからのデータを元に積み上げ計算

D: JLCA-LCA データベース以外の情報ソースからのデータのみを元に積み上げ計算

E: 産業連関法(国立環境研究所 環境負荷原単位データブック(3EID)-LCA) に基づいて計算

F: IEA のエネルギーバランス表(2007 年)と燃料 CO₂ 排出量(2009 年)に基づいて計算

間接工程: 原材料から素材や副資材にする際の燃料や電力の投入による CO₂ 排出

2.3.2 評価結果

PV 発電を山間部に導入時した場合の石炭火力と PV 発電の LIME2 評価結果を図 2-8 に示す。図 2-8 では評価結果を人間健康、社会資産、一次生産性、生物多様性の影響領域別に示している。PV 発電は Case1 で土地利用 DF が最大のナラ林、森林（平均）、土地利用 DF が最小のマツ林、および屋根設置の場合を示した。人間健康と社会資産において、PV 発電の影響は石炭火力の 7.1%と 6.2%となり、PV 発電の効果が確認できる。一方、一次生産性と生物多様性の場合には、PV 発電の負荷は石炭火力より大きくなる。一次生産性において、PV 発電の影響は石炭火力の 7.8 倍から 7.9 倍となった。ここで土地占有影響は森林の植生に関係なく一定であり、影響の変

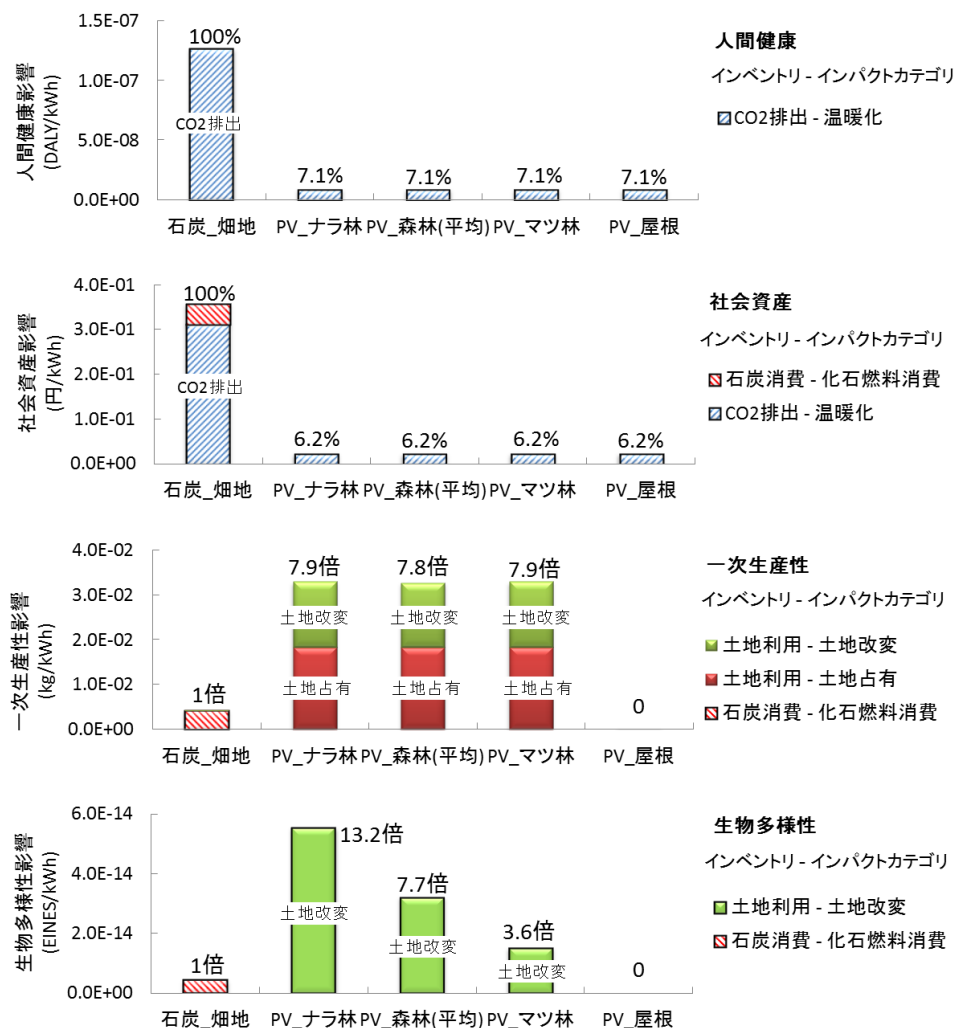
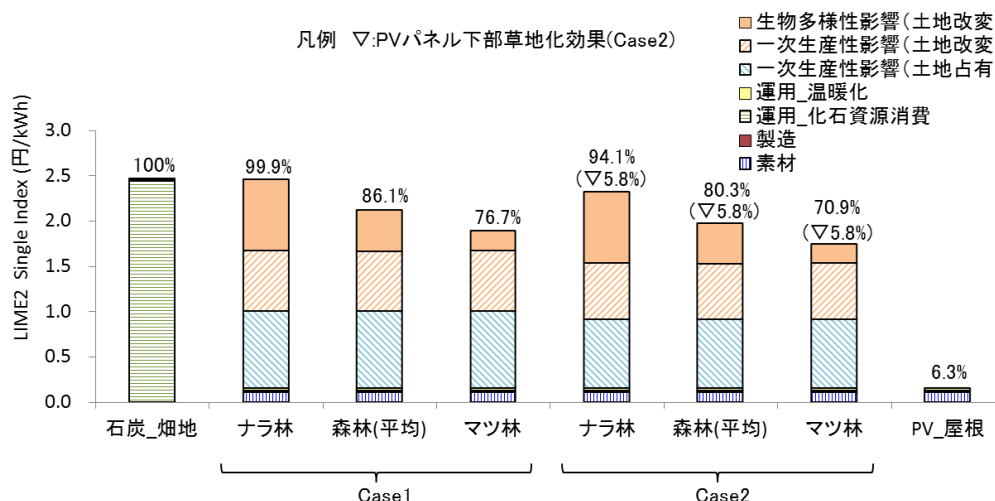


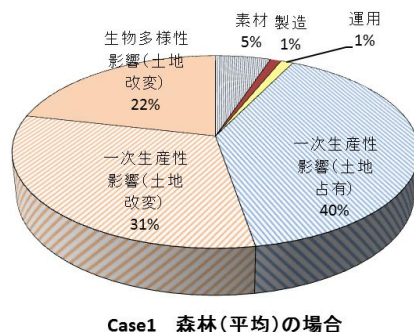
図 2-8 石炭火力と PV 発電の LIME2 影響領域別評価結果

化は土地利用影響によるものである。生物多様性において PV 発電の影響は、石炭火力に対してナラ林が 13.2 倍、森林（平均）が 7.7 倍、マツ林が 3.6 倍となり、森林の植生により影響が異なることが分かる。

ライフサイクル別評価結果および内訳を図 2-9 に示す。(a)は森林植生別、Case 別に SI 値を比較した図で、(b)は代表例として Case1 において PV 発電を森林（平均）に設置した場合の内訳を示している。図 2-9(a)から、石炭火力に対する PV 発電の環境影響は、屋根に設置する場合が 6.3%であるのに対し、Case1 ではナラ林に設置する場合は 99.9%、森林（平均）に設置する場合は 86.1%、マツ林に設置する場合は 76.7%となりナラ林では石炭火力同等の結果となった。Case1 と Case2 の比較から、PV パネル下部を草地にする効果はすべての場合に 5.8%の削減であることを確認した。図 2-9(b)からは、PV 発電を Case1 で森林（平均）に設置する場合、SI 値の内訳は生物多様性影響が 22%、一次生産性影響の土地改変影響が 31%、同土地占有影響が 40%となり、土地利用影響が全体の 93%を占めた。



(a) 森林植生および Case 別の比較



(b) PV 環境影響の内訳 (代表例)

図 2-9 PV 導入時のライフサイクル別 LIME2 評価結果比較

図 2-10 は図 2-9 に示した石炭火力と PV_森林（平均）の評価結果をインベントリ別にし、CO₂削減効果と土地利用影響のトレードオフの関係と Case1 と Case2 の違いを示した図である。トレードオフの関係としては、Case1 の場合、PV 発電の CO₂排出影響が石炭火力の 1/14 倍であるのに対し、PV 発電の土地利用影響は石炭火力の 378 倍となり、その影響は石炭火力の CO₂排出影響に匹敵している。石炭火力の環境影響の主要因は CO₂排出影響（温暖化影響－人間健康）（図中 No.1）である。PV_森林（平均）のパネル下部草地化による 5.8%の効果の内訳は一次生産性（土地占有）（図中 No7）の 10%減と一次生産性（土地改変）（図中 No8）の 8%減によるものであることが分かる。

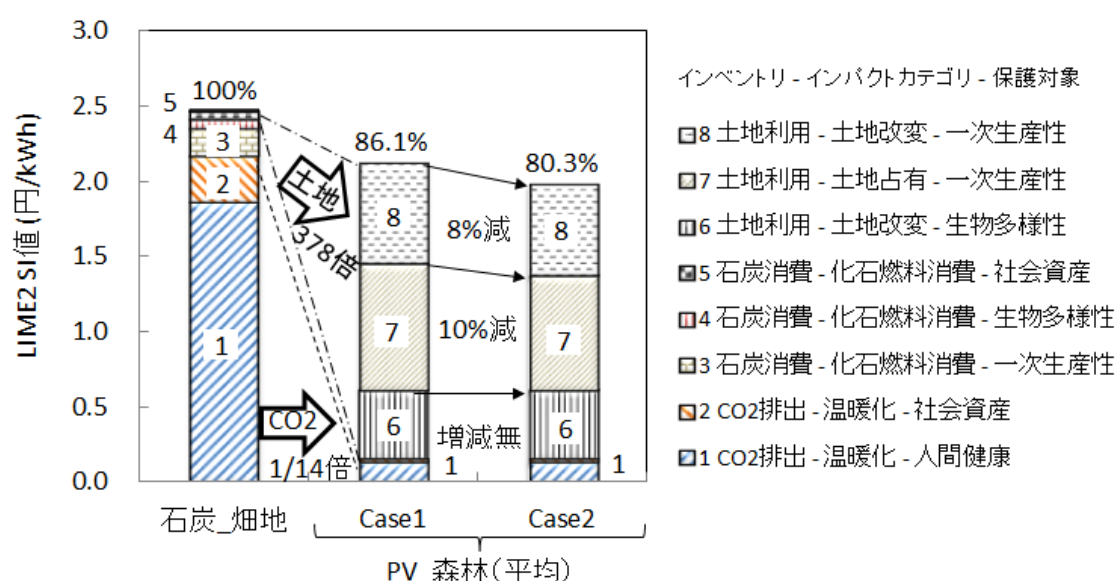


図 2-10 LIME2 評価結果のインベントリ別内訳

図 2-9 と図 2-10 に示した PV の森林の利用の影響が石炭火力の影響に CO₂排出や石炭消費の影響に匹敵するという結果は、PV の土地利用影響が少ない Eco-Indicator99 を用いた先行研究 [46] と異なる傾向を示している。この理由として、土地利用影響の評価方法と重み付け方法が LIME2 と異なる点があげられる。Eco-Indicator99 では土地利用影響の算出には、生物種の消失割合を示す PDF (Potentially Disappeared Fraction)、および生体毒性により影響を受ける生物種の割合を示す PAF (Potentially Affected Fraction) という LIME2 とは異なる指標を用いており、評価対象も欧州の森林である。また、重み付け方法は LIME2 がわが国のコンジョイント分析であるのに対し、Eco-Indicator99 は欧州の階層主義者 (Hierarchist: HA)、平等主義者 (Egalitarian: EE)、個人主義者 (Individualist: II) を対象としたパネル法である。このような LCIA 手法の相違から評価結果が異なる傾向を示した。また、本論文と同じ LIME2 を用い

た先行研究[93]は生物多様性影響を除外したうえで、PV の導入比率を考慮した算出結果であるため、土地利用影響は大きく表れていない。ここから、本論文の森林植生別評価は、わが国の森林を対象に一次生産性と生物多様性を指標として開発された LIME2 に基づき、わが国の重み付け係数により算出したものといえる。

2.3.3 感度分析

PV 発電設計段階の指標として、PV の単位容量敷地面積、BLC、製品寿命、立地計画段階の指標として、設置場所の森林の NPP、RTap、生物多様性（EINES）が SI 値に与える影響を感度分析した。感度（Sensitivity: SE）は、上記項目のインプット量を 10%変えた際（ ΔIN ）の、単位機能（発電量）あたりの SI 値変化量（ ΔSI ）との比とし、式(2-16)により求めた。

$$SE = \frac{\Delta SI}{\Delta IN} \quad (2-16)$$

$$\Delta SI = \frac{SI_{After} - SI_{Before}}{SI_{Before}}$$

$$\Delta IN = \frac{IN_{After} - IN_{Before}}{IN_{Before}} = 10\%$$

ここで、

SE : 感度（Sensitivity）（倍）

SI : 単位機能あたりの LIME2 結果（円/kWh）

IN : インプット量

PV 単位容量敷地面積を変化させた場合の SI 値の計算は、PV 出力、設備利用率、年間発電量が表 2-8 の条件で一定とした。厳密には、設備利用率は PV パネルの温度依存性の改善により向上することも想定されるが[103]、本評価ではこの効果は除外している。また、BLC の影響を分析するために PV パネル下部を草地とした Case2 の条件を選定した。

図 2-11 は Case2 で PV を森林（平均）に設置した場合の感度分析結果である。ここから PV 単位容量敷地面積の感度が特に高く、森林 RTap、森林生物多様性と続く。PV 単位容量敷地面積の感度が高い理由は、敷地面積は土地利用による一次生産性と生物多様性の両方の影響に関係するためである。

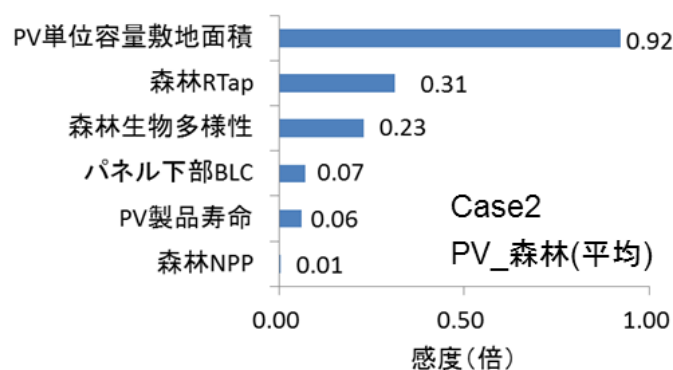


図 2-11 感度分析結果

次に、設備容量敷地面積を変化させた場合の SI 値の変化を土地改変後がコンクリートの Case1 を事例に分析した。Case1 を選定した理由は図 2-9 に示したように、設備利用率 12% の条件でナラ林に PV を設置した場合、PV の SI 値が石炭火力を超える最も厳しい条件であるためである。単位容量敷地面積は（一社）太陽光発電協会の推奨値 13,000m²/MW[101]を基準に、15,000 m²/MW から 11,000m²/MW の範囲に設定した。森林植生がナラ林、森林（平均）、マツ林の場合の分析結果を図 2-12 に、分析ケースごとの PV 設備条件とナラ林の場合の結果を表 2-11 に示す。PV_ナラ林の SI 値は単位容量敷地面積が 15,200m²/MW の評価対象の場合の 2.46 円/kWh から 11,000m²/MW では 1.83 円/kWh と 25.7%削減された。この削減効果は、図 2-9 における石炭火力の SI 値を 100%とした場合の PV の SI 値として 74.2%に相当するもので、単位容量敷地面積の改善による SI 値の削減効果を明らかにした。図 2-12 においては、森林（平均）とマツ林においても同様の傾向を確認した。

表 2-11 単位容量敷地面積の影響

	評価対象	分析ケース				
単位容量 敷地面積 m ² /MW	15,200 (=13,000/(12/14))	15,000	14,000	13,000 文献推奨値*)	12,000	11,000
発電量 kWh/年	4,037	4,037				
設備利用率 %	12.0	12.0				
必要出力 kW	3.84	3.84				
敷地面積 m ²	58.2	57.6	53.8	49.9	46.1	42.2
SI値(ナラ林) 円	2.46	2.44	2.28	2.13	1.98	1.83
効果(ナラ林) %	基準	1.0	7.2	13.4	19.6	25.7

*) 参考文献[101]

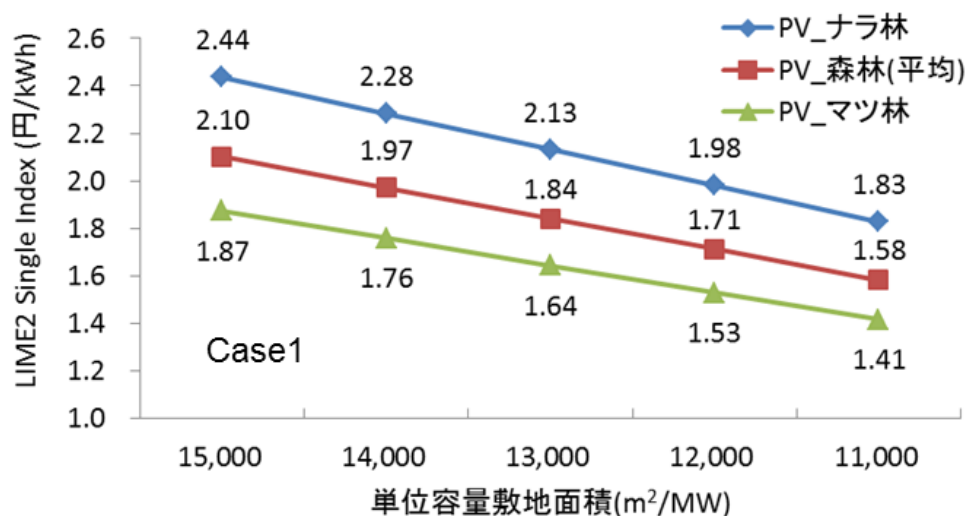


図 2-12 PV の単位容量敷地面積改善効果

2.3.4 日本の森林植生別評価まとめ

本章では LIME2 手法に最新の森林植生別の調査データを適用して、土地利用時の生物多様性影響に関する DF を 13 の植生に詳細化した。加えて、一次生産性影響では土地改変後の被覆形態の影響を考慮できるようにした。その DF を用いて PV 発電と石炭火力の SI 値を求めた結果、石炭火力の SI 値を 100%とした場合に、PV 発電の SI 値は設置場所が屋上設置の場合に 6.3%であるのに対し、パネル下部がコンクリートの場合でナラ林に設置した場合に 99.9%、森林（平均）の場合に 86.1%、マツ林の場合に 76.7%となり、山間部への PV 発電設置時の土地利用影響が大きいことが明らかになった。CO₂ 排出影響と土地利用影響のトレードオフの関係については、PV 発電を森林（平均）に設置する場合に、PV 発電の CO₂ 排出影響は石炭火力の 1/14 倍であるのに対し、土地利用影響は石炭火力の 378 倍となり、その影響は石炭火力の CO₂ 排出影響とほぼ同等となった。同条件の PV 発電の土地利用影響は環境影響全体の 93%を占める。

また、感度分析から PV 発電の環境影響を改善する項目として単位容量敷地面積に着眼した。PV パネル下部がコンクリートでナラ林に PV 発電を導入するケースにおいて、単位容量敷地面積を 15,200m²/MW から 11,000m²/MW に抑制させると環境影響を表す SI 値は 25.7%削減された。これにより PV の SI 値は石炭火力を 100%とした場合に、99.9%から 74.2%に改善し、単位容量敷地面積の改善効果を明らかにした。なお、パネル下部を草地とする効果は 5.8%であった。

本論文の限界としては、レッドリスト記載種の種数は生息面積に比例すると仮定している点、レッドリスト記載種の生息面積は出現割合と森林面積で加重平均していることがあげられる。

2.4 世界の代表地域別評価

2.4.1 条件設定

本節では世界の代表地域生別評価を行う。評価対象は、一次生産性や生物多様性の情報が得られる地域として、IUCN（International Union for Conservation of Nature and Natural Resources）がレッドリスト記載種の情報を提供し、かつ、熱帯雨林や乾燥地域の違いを明らかにできる森林として図 2-13 に示す中央アジア[104]、メキシコ[105]、グアテマラ[106]、および日本[107]を選定した。中央アジアは IUCN の報告に準じ、タジキスタン、ウズベキスタン、キルギスタン、カザフスタン、トルクメニスタンである。土地利用前の形態は森林と草原とし、メキシコの森林は雲霧林とした。雲霧林は晴天率が少ないため PV 発電を設置することは考えにくい。レッドリスト記載種が多い極端な事例として設定した。PV パネル下部の土地形状は前章から草地化の効果が少ないことが分かっているため、シンプルなコンクリートの条件とした。



図 2-13 評価対象地域

(1) 主要地域の森林と草原の統合化係数

図 2-4 の手順に基づいて $DF_PPI(trans)$ 、 $DF_PPI(occ)$ 、 $DF_BDI(trans)$ を算出する。植生別評価手法の土地利用被害係数計算プロセスを図 2-14 に示す。ここでは、図 2-4 における森林植生分類を Oak Ridge National Laboratory Distributed Active Archive Center (ORNL DAAC) のデータ[108]を用いた国別の分類とし、純一次生産性を表す NPP データ、NPP の回復時間は

森林、草原ごとに公開データ[109]-[111]を用いて設定した。DF_BDI(trans)の算出では、維管束植物のレッドリスト情報にはIUCNのデータを用い、対象地域ごとの森林面積は公開情報[105]、[112]を用いた。以下に図2-14に示したStepごとに条件設定手順を示す。

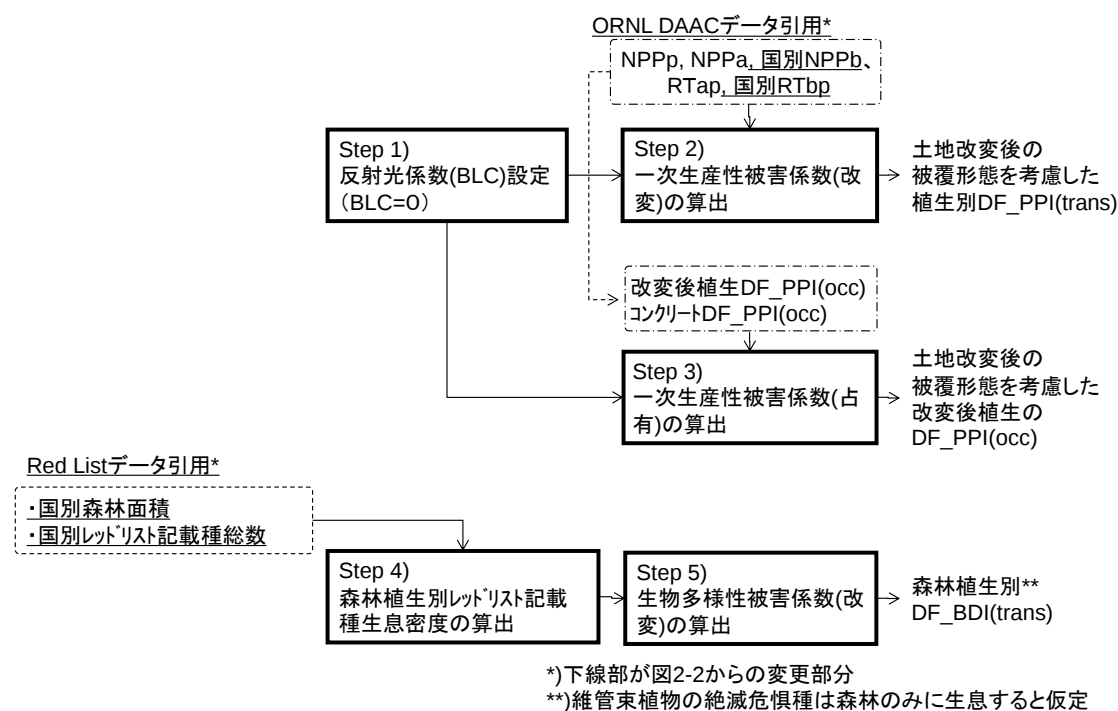


図 2-14 世界の代表地域の土地利用 DF 算出手順

Step 1 において、PV パネル下部の土地形態はコンクリートのため、BLC は 0 と設定した。

Step 2 では、式(2-7)を用いて DF_PPI(trans)を求める。NPPp は評価対象国ごとに ORNL DAAC のデータ[108]を用いて算出した。引用元データを表 2-12 に、同データを用いて推定した評価対象国の NPP を表 2-13 に示す。対象国のデータが無い場合は、気候が近い地域のデータを引用し、複数のデータを有する場合は平均化した。森林の NPP は日本が 1.23kg/m²/年、中央アジアが 0.41kg/m²/年、メキシコが 1.85kg/m²/年、グアテマラが 1.49kg/m²/年となった。一方、草原の NPP は、日本が 0.62kg/m²/年、中央アジアが 0.10kg/m²/年、メキシコが 1.49kg/m²/年、グアテマラが 1.07kg/m²/年である。

NPP の回復時間は土地改変前が森林の場合、既に本来の植生の状態にあると考えて RTbp は 0 年とした。土地改変後の RTap は植生回復に関する公開情報から、日本と中央アジアを 150 年[109]、グアテマラとメキシコを 100 年[110],[111]と設定した。土地改変前が草原の場合の RTbp は土地改変後段階からの森林への遷移が 10 年進んだ状態と同じと考え RTap から 10 年を差し引いて、日本と中央アジアが 140 年、グアテマラとメキシコが 90 年と設定した。土地改変前が森林の場合の算出プロセスと算出結果を表 2-14 に、土地改変前が草原の場合の算出プロセ

スと算出結果を表 2-15 に示す。NPP と NPP_p は表 2-13 で推定した値を用い、NPP_a、NPP_b は表中の計算式で算出した。なお、NPP_p と土地改変前が森林の場合の NPP_b は、当該する森林の NPP と同じである。

Step 3 では式(2-8)で BLC が 0 であるため DF_PPI(occ)は DF_PPI(occ)_{asp} と等しく、コンクリート面の DF_PPI(occ)となる。ここではコンクリート面の DF_PPI(occ)は国ごとの NPP_p に相当すると考え、上述した森林の NPP と同じと仮定し、日本が 1.23kg/m²/年、中央アジアが 0.41kg/m²/年、メキシコが 1.85kg/m²/年、グアテマラが 1.49kg/m²/年と設定した。

Step 4 では、レッドリストの情報から、国ごとの維管束植物の種数を調べ、森林面積で除すことでレッドリスト記載種生息密度を算出した。対象としたレッドリスト種別は Critically Endangered (CR)、Endangered (EN)、および Vulnerable (VU) である。レッドリスト記載種生息密度は、日本が 5.60×10^{-3} 種/km²、中央アジアが 1.47×10^{-4} 種/km²、メキシコが 3.09×10^{-2} 種/km²、グアテマラが 1.67×10^{-3} 種/km² である。ここでは草原は都市部を想定し、レッドリスト記載種は生息していないものとし、生物多様性影響評価の対象外とした。

表 2-12 ORNL DAAC からの引用した NPP 値

	場所	オリジナルデータ	適用値
X1	北方林 Finland	411 g/m ² /年	0.41 kg/m ² /年
X2	Siberian Scots Pine Forests	1018-1695 g/m ² /年	1.36 kg/m ² /年
X3	温帯林 USA (Humbolt redwoods state park, California)	7-10 Mg/ha/年	0.85 kg/m ² /年
X4	USA (Great smoky mountains, Tennessee)	6-13 Mg/ha/年	0.95 kg/m ² /年
X5	熱帯林 Mexico tropical dry deciduous forest	1206 g/m ² /年	1.21 kg/m ² /年
X6	U.S. Virgin Islands Tropical Forest	1064 g/m ² /年	1.06 kg/m ² /年
X7	Puerto Rico	1945 g/m ² /年	1.95 kg/m ² /年
X8	Costa Rica	1400-2100 g/m ² /年	1.75 kg/m ² /年
Y1	草原 Kazakhstan	100 g/m ² /年	0.10 kg/m ² /年
Y2	USA	200 g/m ² /年	0.20 kg/m ² /年
Y3	China	155 g/m ² /年	0.16 kg/m ² /年
Y4	China	150 g/m ² /年	0.15 kg/m ² /年
Y5	Australia	182-319 g/m ² /年	0.25 kg/m ² /年
Y6	Costa Rica	1220-2254 g/m ² /年	1.74 kg/m ² /年
Y7	India Vindhyan	1082-1391 g/m ² /年	1.24 kg/m ² /年

表 2-13 国別 NPP の算出プロセス

対象	設定値	計算方法
森林	日本 中央アジア メキシコ (雲霧林) グアテマラ	Average (X2-X7) = X1 Average (X7,X8) Average (X5-X8)
草原	日本 中央アジア メキシコ グアテマラ	Average (Y2-Y7) = Y1 Average (Y6,Y7) Average(Y5-Y7)

表 2-14 土地改変前が森林の場合の DF_PPI(trans) 算出プロセスと結果

	No.	潜在NPP (NPPp) 森林 ^{*2)} (kg/m ² /年)	現況NPP 森林 (kg/m ² /年)	潜在NPP - 現況NPP		回復時間 (RT)		DF_PPI(trans)
				土地利用前 NPP (NPPb) (kg/m ² /年)	土地利用後 NPP (NPPa) (kg/m ² /年)	土地利用 前 (RTbp) (年)	土地利用 後 (RTap) (年)	森林→人工利用 (kg/m ²)
		AA1	AA2	AA3	AA4	AA5	AA6	AA7 ^{*5)}
	備考	*1)	*1)	AA1-AA2	AA1-0 ^{*3)}	*4)		AA4 × AA6 × 0.5 - AA3 × AA5 × 0.5
日本		1.23	1.23	0.00	1.23	0	150	92.1
中央アジア		0.41	0.41	0.00	0.41	0	150	30.8
メキシコ (雲霧林)		1.85	1.85	0.00	1.85	0	100	92.4
グアテマラ		1.49	1.49	0.00	1.49	0	100	74.6

*1) 表 2-13 から引用

*2) 対象とする土地の潜在 NPP は森林の NPP と同一であると仮定

*3) "0"はコンクリートの NPP

*4) 日本と中央アジアの AA6 は[109]から引用、メキシコ (雲霧林) とグアテマラの AA6 は[110]と[111]から引用、森林の場合、NPP の低下は無いとし AA5 は全て"0"と設定

*5) 式(2-7)を参照

表 2-15 土地改変前が草原の場合の DF_PPI(trans) 算出プロセスと結果

	No.	潜在NPP (NPPp) 森林 ^{*2)} (kg/m ² /年)	現況NPP 草原 (kg/m ² /年)	潜在NPP - 現況NPP		回復時間 (RT)		DF_PPI(trans)
				土地利用前 NPP (NPPb) (kg/m ² /年)	土地利用後 NPP (NPPa) (kg/m ² /年)	土地利用 前 (RTbp) (年)	土地利用 後 (RTap) (年)	森林→人工利用 (kg/m ²)
		AA1	AB2	AB3	AB4	AB5	AB6	AB7 ^{*5)}
	備考	*1)	*1)	AA1-AB2	AA1-0 ^{*3)}	*4)		AB4 × AB6 × 0.5 - AB3 × AB5 × 0.5
日本		1.23	0.62	0.61	1.23	140	150	49.6
中央アジア		0.41	0.10	0.31	0.41	140	150	9.1
メキシコ (雲霧林)		1.85	1.49	0.36	1.85	90	100	76.1
グアテマラ		1.49	1.07	0.42	1.49	90	100	55.8

*1) 表 2-13 から引用

*2) 対象とする土地の潜在 NPP は森林の NPP と同一であると仮定

*3) "0"はコンクリートの NPP

*4) 日本と中央アジアの AB6 は[109]から引用、メキシコとグアテマラの AB6 は[110]と[111]から引用、人工利用の土地から草原までの回復時間を 10 年とし、AB5 は AB6 から 10 年を引いた値に設定

*5) 式(2-7)を参照

Step 5 では Step 4 で求めたレッドリスト記載種生息密度を式(2-10)に適用し、国ごとの DF_BDI(trans)を求める。DF_BDI(trans)代表値は LIME2 における日本の平均値(2.22×10^{-10} EINES/m²)[25]とし、生物多様性の影響は、面積当たりのレッドリスト記載種数に比例するという仮定のもと求めた。表 2-16 に DF_BDI(trans)の算出プロセスと算出結果を示す。式(2-10)の DRL_{代表値}は表 2-16 の BB3 の日本の値であり、DRL_i は BB3 の各国の値が該当する。計算の結果、DF_BDI(trans)は、日本が 2.22×10^{-10} EINES/m²、中央アジアが 5.83×10^{-12} EINES/m²、メキシコが 1.23×10^{-9} EINES/m²、グアテマラが 6.63×10^{-11} EINES/m² となった。

表 2-16 各森林タイプの DF_BDI(trans)の算定

No. 式/備考	森林面積 (km ²)	レッドリスト記 載種数 (種)	面積あたりのレッ ドリスト記載種数 (種/km ²)	レッドリスト記 載種生息比率 (倍)	DF_BDI(trans) (EINES/m ²)
	BB1 ^{*1)}	BB2 ^{*2)}	BB3	BB4 ^{*3)}	BB5 ^{*4)}
			BB2/BB1	BB3/0.0056	(2.225 × 10 ⁻¹⁰) × BB4
日本	249,790	1,399	5.60 × 10 ⁻³	1.0	2.23 × 10 ⁻¹⁰
中央アジア	299,610	44	1.47 × 10 ⁻⁴	0.026	5.83 × 10 ⁻¹²
メキシコ(雲霧林)	15,000	464	3.09 × 10 ⁻²	5.52	1.23 × 10 ⁻⁹
グアテマラ	53,290	89	1.67 × 10 ⁻³	0.30	6.63 × 10 ⁻¹¹

*1) 日本、中央アジア、グアテマラの値は[112]から引用、メキシコ(雲霧林)の値は[105]から引用

*2) Critically Endangered (CR), Endangered (EN), および Vulnerable (VU)の合計値

*3) "0.0056(species/km²)" は BB3 の日本の値.

*4) "2.22 × 10⁻¹⁰(EINES/m²)" は森林の DF の LIME2 代表値[25]

(2) 評価条件

<評価範囲>

発電設備の評価条件は前節の日本を想定した PV 発電と石炭火力の評価と基本的に共通としている。以下では条件設定が異なる部分のみ記載する。PV 発電と石炭火力の設置場所は森林と草原とした。発電システムの設備仕様は、わが国の標準的なシステムとして前節同様に電中研モデル[6],[7]を用いた。システム境界も図 2-7 と同様である。前述のとおり、草原は都市部と想定しレッドリスト記載種は存在しないものとしている。機能単位は 1kWh の単位発電量とし、PV 発電と石炭火力の比較は環境影響を発電量で割り戻した SI 値を用いる。

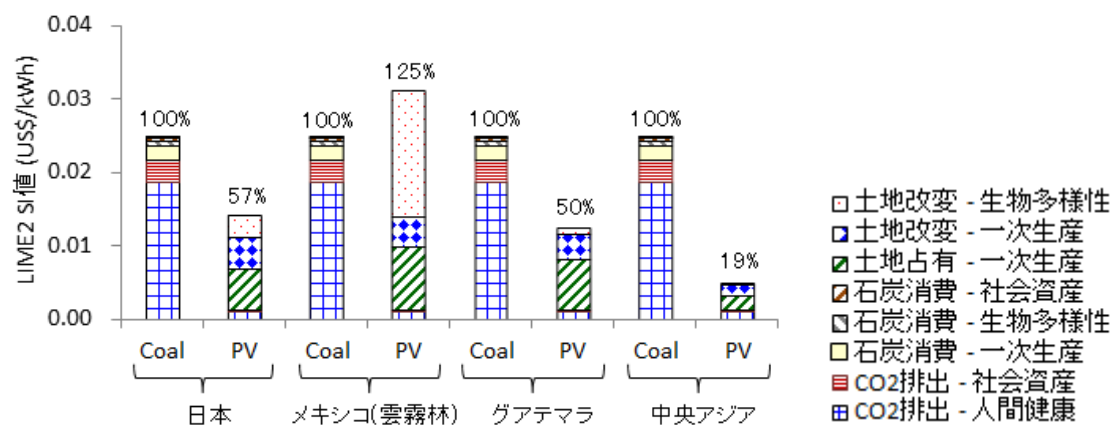
<インベントリデータ>

インベントリデータは前節同様、PV 発電は表 2-8、石炭火力は表 2-9、CO₂ 排出原単位は表 2-10 である。ただし、PV 発電の設備利用率は前節ではわが国の実績に基づき 12%を標準値としたが、ここでは電中研モデルの設定値である 15%のままとした。このため、表 2-8 に記載している年間発電量 4,037kWh は本条件では 5,046kWh となる。また、敷地面積は PV 発電では海外での不確定性を踏まえ一律 50m²とし、石炭火力は前節で考慮した発電所内の緑化は考慮しないこととし、筆者の調査値である 11.3MWh/m²を用いて一律 507,000m²とした。

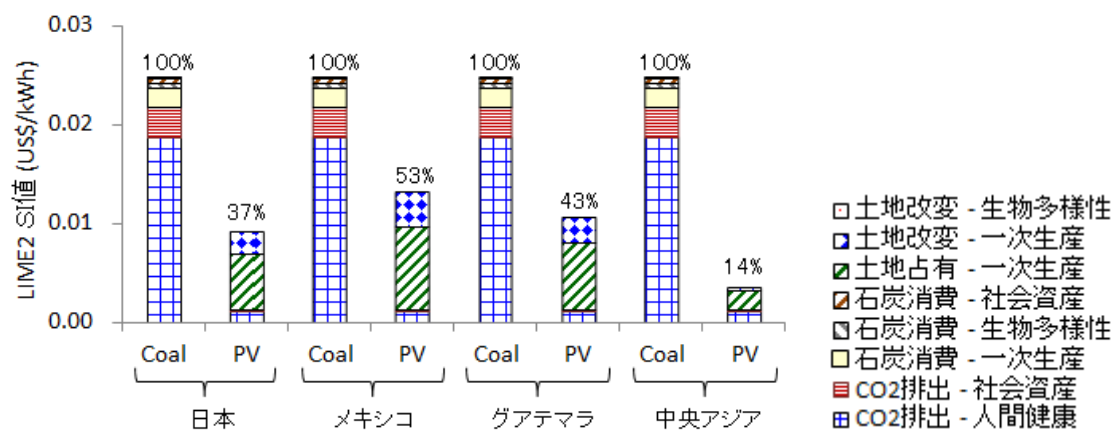
2.4.2 評価結果

PV 発電と石炭火力を対象国の山間部と草原に導入時したことを想定した場合のインベントリ別評価結果を図 2-15 に示す。土地利用前が森林の場合、森林の土地利用影響の国による違いは

大きく、メキシコの雲霧林の場合は PV 発電の環境影響が石炭火力を上回る結果となった。内訳では、生物多様性影響が大きく、土地改変と土地占有の一次生産性影響にも違いがみられる。一方で、土地利用前が草原の場合の評価結果はレッドリスト記載種が存在しないと想定したため、国による違いは小さく、すべての場合で PV 発電の環境影響が石炭火力を下回り、最大でも 53% となった。



土地利用前が森林の場合



土地利用前が草原の場合

図 2-15 PV 導入時の LIME2 評価国別比較

次に、中央アジアの土地利用影響が小さい理由と、土地占有による一次生産性影響が土地利用前が森林と草原の場合で若干の異なる理由を考察する。

(1) 中央アジアの土地利用影響が小さい理由

中央アジアの土地利用影響が小さい理由は、表 2-12 に示した NPP と表 2-16 の面積あたりのレッドリスト記載種数が小さいためである。そこで、それら設定値を検証した。

NPP 設定値は ORNL DAAC が公表している中央アジアに近い地域としてフィンランドの値を用いた。一方で世界の NPP の分析は Haberl[113]や清野[114]が実施しているが、両者とも同じ傾向を示しており、後者の分析では図 2-16 のとおり中央アジアは 5t/ha/年以下、フィンランドは 1-10t/ha/年である。本論文でデータの共通性を確保するため用いた ORNL DAAC のフィンランドの NPP は 4.1t/ha であり中央アジアの値として引用するには若干高い値であるが、上記の中央アジアの 5t/ha/年以下に合致していること、土地利用影響が厳しい側で評価されること、から設定値は妥当であると判断した。

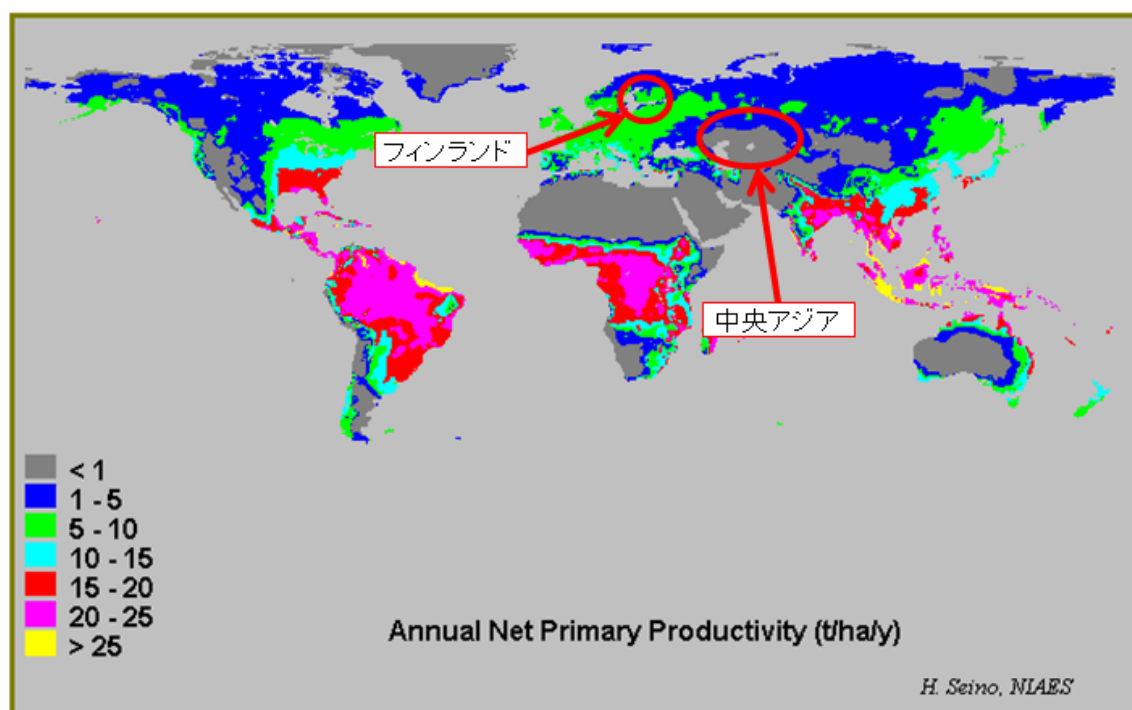


図 2-16 世界の NPP[114]

面積当たりのレッドリスト記載種は、レッドリスト記載種を森林面積で除した値である。表 2-17 に示すとおり、中央アジアのレッドリスト記載種は 44 と少なく、一方で、対象とする 4 か国の森林面積は表 2-18 に示すとおりであり、合計で 299,610km²と日本に匹敵する。そのため、面積当たりのレッドリスト記載種が小さくなる。なお、表 2-18 に示すとおり、中央アジアの森林面積の国土に対する比率は 3.9%から 9.3%で日本の 67%に対してはるかに小さいことも中央アジアの特徴である。

表 2-17 国別の森林面積とレッドリスト記載種内訳

	森林面積 km ²	レッドリスト記載種数(IUCN分類)			
		CR Critically Endangered 絶滅寸前 種	EN Endangered 絶滅危機 種	VU Vulnerable 危急 種	合計
日本	249,790	471	410	518	1,399
中央アジア	299,610	23	13	8	44
メキシコ(雲霧林)	15,000	83	206	175	464
グアテマラ	53,290	19	42	28	89

表 2-18 中央アジアの森林面積内訳[112]

	森林比率 %	国土面積 km ²	森林面積*) km ²
タジキスタン	3.9	143,100	5,520
ウズベキスタン	9.3	447,400	41,500
キルギスタン	6.8	198,500	13,440
カザフスタン	7.3	2,717,300	197,880
トルクメニスタン	8.5	488,100	41,270

*) "other wooded land"を含む。

(2) 植生別統合化係数の比較

表 2-19 は算出した植生別の統合化係数 (IF) を比較したものである。生物多様性影響の IF_BDI(trans)は、最小の中央アジアの森林と最大のメキシコの雲霧林で 200 倍以上の差がある一方、森林の土地占有による一次生産性影響の IF_PPI(occ)は 4.5 倍、森林の土地改変による一次生産性影響の IF_PPI(trans)は 3 倍程度と小さい。生物多様性影響が森林によって大きく異なる理由は、雲霧林はレッドリスト記載種数が多い一方、中央アジアの森は一次生産性が小さく、且つ、レッドリスト記載種数が少ないためである。対象国における土地改変時の一次生産の統合化係数 IF_PPI(trans)は森林と草原で異なる、この理由は、表 2-14 と表 2-15 から、NPPb と

RT の森林と草原による違いから生じていることが分かる。一方で土地占有時の一次生産の統合化係数 IF_PPI(occ)が森林と草原で同じ理由は、土地占有はその土地の潜在植生に対する影響を表しており、改変前の植生に影響しないためである。

表 2-19 植生別の統合化係数

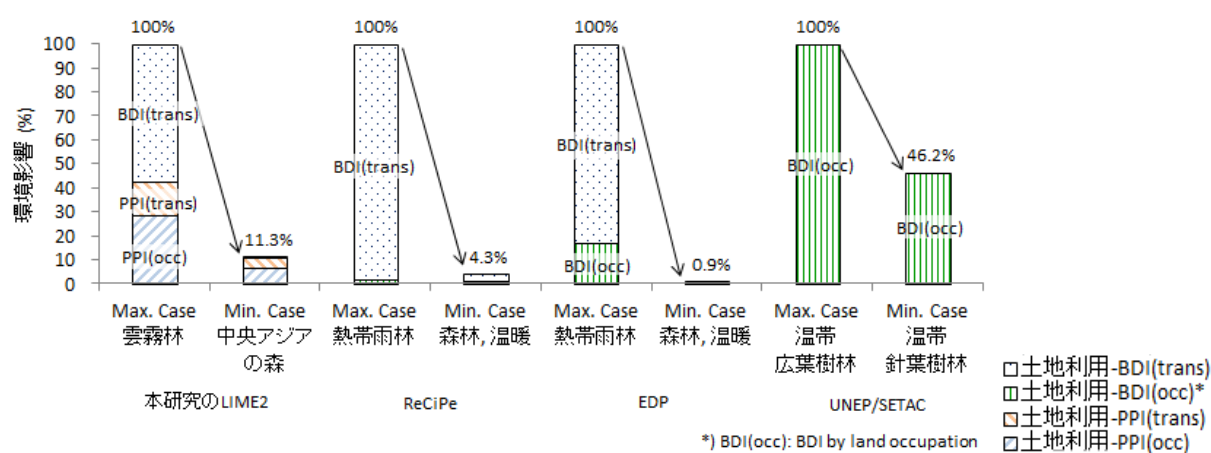
		IF_PPI(trans) US\$/m ²	IF_PPI(occ) US\$/m ² /year	IF_BDI(trans) US\$/m ²
日本	森林→人工利用	42.5	0.567	31.5
	草原→人工利用	22.9	0.567	0.00
中央アジア	森林→人工利用	14.2	0.190	0.83
	草原→人工利用	4.2	0.190	0.00
メキシコ	雲霧林→人工利用	42.6	0.853	174
	草原→人工利用	35.2	0.853	0.00
グアテマラ	森林→人工利用	34.4	0.689	9.40
	草原→人工利用	25.8	0.689	0.00

2.4.3 海外の他手法との比較

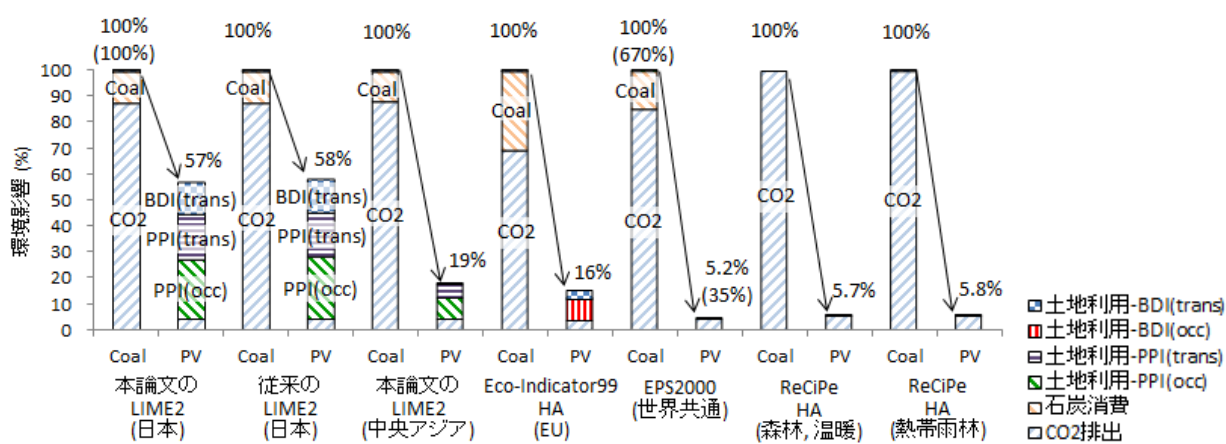
本論文で開発した LIME2 に基づく評価を海外の他の手法と比較する。比較は、森林利用影響評価を ReCiPe[28]、EDP [82],[83]、UNEP/SETAC[84]と比較し、PV 発電と石炭火力における統合評価を LIME2 のオリジナル評価値[25]、EPS2000[26]、Eco-Indicator99[27]、ReCiPe[28]と比較した。図 2-17 の(a)と(b)にそれぞれの評価結果を示す。為替は 100 円/US\$、0.77ELU/US\$とした。

図 2-17(a)では各手法の 1m²あたりの年間の環境負荷が最大となる場合と最小となる場合をそれぞれ「Max. Case」と「Min. Case」とし、各手法の「Max.Case」を 100%として、最小値との比較を示している。ここで、ReCiPe と EDP の特性化係数 (Characterization factors; CF) は既存の比較調査値[86]を参照した。図 2-17(a)から「Min. Case」の値は、UNEP/SETAC では 46.2%であるが、他の手法は 1-10%程度となった。これらの考察については後述する。

図 2-17(b)の比較では、PV 発電と石炭火力の評価条件は変えずに LCIA の統合化方法のみ変更している。図の縦軸は環境影響指標が手法により異なるため相対値とした。ReCiPe では統合化の単位が異なる石炭消費影響は除外している。石炭消費の統合化単位は「ELU」であるが、CO₂排出影響と土地利用影響は「Year」である。括弧内の数字は、単位系が同じ金額である LIME2 と EPS2000 について LIME2 の石炭火力を 100%とした比較値である。図 2-17(b)において、本論文の LIME2 と従来の LIME2 の比較において両者に大きな差は見られなかった。ここから、国際的な公開データに基づく本章の算出結果が日本国内データに基づくオリジナルの LIME2 とほぼ同じことを確認した。一方で、LIME2 の PV 発電の土地利用影響は他の手法に比べて大



(a) 森林利用影響比較



(b) 統合評価比較

図 2-17 LCIA 手法比較

きい傾向がある。図 2-17(a)と(b)の結果を考察するため、表 2-20 に各手法の土地利用影響の評価方法を比較した(評価指標は表 1-2 を参照のこと)。この表と図 2-17 から以下のことが分かる。

- 図 2-17(a)の UNEP/SETAC の「Min. Case」の環境影響は他に比べて大きい。この理由は、LIME2、ReCiPe、EDP の「Max. Case」が熱帯雨林や雲霧林であるのに対し、UNEP/SETAC の場合は「Max. Case」と「Min. Case」とともに温帯の森林を対象としている点があげられる。また、表 2-20 から、UNEP/SETAC は BDI(trans) の土地利用影響が評価対象外となっていることが他の手法とは異なる。
- 図 2-17(a)の ReCiPe と EDP は BDI(trans)による土地利用影響が BDI(occ)より大きい。表 2-20 から BDI(trans)の算出では生態系の回復時間が考慮されている点が異なる。
- 図 2-17(a)において、LIME2 は「Min. Case」が 11.3%と他の手法より大きい。この理由は他の手法で評価していない PPI の影響によるものである。
- 図 2-17(b)において手法間で結果が異なる要因としては表 2-20 に示したように重付け係数の設定方法の違いがあげられる。各手法で方法が異なることに加え、LIME2、Eco-Indicator99、ReCiPe の手法には国民意識のバイアスが影響する。Eco-Indicator99 と ReCiPe では、階層主義者 (Hierarchist: HA)、平等主義者 (Egalitarian: EE)、個人主義者 (Individualist: II)、に分けた調査を行っている。例えば、Eco-Indicator99 では工業用地 (Industrial area) の土地占有影響の重み付け係数において、HE が 0.0656unit/m²/年、EE が 0.0819unit/m²/年、II が 0.0466unit/m²/年であり [27]、EE と II

表 2-20 海外の LCIA 手法との比較

LCIA	Revised LIME2		EPS		Eco-Indicator99		ReCiPe		EDP		UNEP/SETAC
評価メトリック	NPP	EINES	Wood	NEX	PDF and PAF		PDF		EDP		BDP
保護領域	PPI	BDI	PPI	BDI	BDI		BDI		BDI		BDI
維管束植物の特性化の母集団	全て	絶滅 危惧種	全て	絶滅 危惧種	全て		全て		全て		全て
モデル化タイプ (Trans: Transformation) (Occ: Occupation)	Occ	Trans	Occ	Occ	Occ	Trans	Occ	Trans	Occ	Trans	Occ
植生回復時間の考慮	-	100-150年 (NPP回復時間)	-	-	-	30年	-	2.2- 3,300年 *1)	-	1,000年 <	-
分析地域	Local (日本)		Local (Finland, Sweden)		Regional, Local (ヨーロッパ)		Regional, Local	Local	Regional, Local (スイス)		Regional
世界的視野	本研究にて考慮		考慮		-		考慮		考慮		考慮
特性化係数 (Characterization Factor; CF)の分類	代表値 (日本、メキシコ雲霧林、グア テマラ、中央アジア)		代表値 (世界)		代表値 (ヨーロッパ)		代表値 (森林タイプ別)		代表値 (森林タイプ別)		代表値 (森林タイプ別)
重付け係数の 設定方法	コンジョイント分析 (日本)		CVM (ヨーロッパ)		パネル法 (ヨーロッパ)		損失年 (寿命、植物種)		-		-

(*1)階層主義者 (Hierarchist: HA) の場合 (例えば、3,300年は 1,000~10,000年という情報からHAが選定した値)

では倍近い差がみられる。なお、Eco-Indicator99 と ReCiPe の評価は中間的な HE の値を用いた。

- 図 2-17(b)において、EPS2000 は石炭火力の CO₂ 排出と石炭消費影響の合計は本章の LIME2 の石炭火力の結果に対して 670%であり、EPS2000 は CO₂排出と石炭消費の環境影響が LIME2 より大きく算出されている。このため、PV の土地利用影響が相対的に小さくなっている。
- 表 2-20 から LIME2 の特徴として次の 3 点があげられる。1 点目の特徴は、土地利用時の一次生産性影響を土地改変と土地占有の両面から分析している。2 点目の特徴は、生物多様性影響の評価対象母集団がレッドリスト記載種のみで、種の削減影響が顕著に表れる傾向がある。3 点目の特徴は、NPP の回復時間を考慮している点である。これらの特徴が図 2-17(b)において、LIME2 の土地利用影響が他の手法に比べ大きい理由である。

2.4.4 世界の代表地域別評価まとめ

本節では LIME2 手法を用いた PV 発電を山間部に設置することを想定した森林植生の違いによる土地利用影響について、代表的な世界の森林として、中央アジア、日本、グアテマラ、メキシコ雲霧林を選定した評価を行った。石炭火力発電と比較評価から以下を明らかにした。

- ・ 森林の土地利用影響の国別の違いを統合化係数で比較すると、生物多様性影響において、最小の中央アジアの森林と最大のメキシコの雲霧林で 200 倍以上の差がある。一方、土地占有による一次生産性影響は 4.5 倍、土地改変による一次生産性影響は 3 倍程度であり、生物多様性の影響が地域により大きく異なる。
- ・ PV 発電の石炭火力発電に対する環境影響は、日本の森林が 57%、メキシコ雲霧林で 125%、グアテマラの森林で 50%、中央アジアの森林で 19%であり、絶滅種数の密度と一次生産性が高い森林は、PV 発電の環境影響が石炭火力を上回る可能性がある。一方、土地利用前が草原の場合は、日本が 37%、メキシコが 53%、グアテマラが 43%、中央アジアが 14%となり、いずれの場合も PV 発電の効果が確認された。

限界として以下の 2 点があげられる。

- ・ 植生別評価手法の生物多様性影響の評価では、生物種は森林内で均一に分布するとしており、局所的な分布の変化を考慮できていない。
- ・ 植生別評価手法の一次生産性影響の評価では、潜在 NPP は国や地域の平均値であり、固有の特性を考慮していない。NPP の設定では、他地域データからの推定が含まれている。

2.5 まとめ

LIME2 手法に基づいて土地利用影響を植生別に定量化する植生別評価手法を開発し、PV 発電の土地利用と温暖化削減効果のトレードオフの関係を明らかにした。PV 発電の設置場所として、わが国の主要植生別森林分類 13 種、および海外の代表的な 4 地域（中央アジア、日本、グアテマラ、メキシコ）の森林と草原を設定した。わが国のケースで、PV 発電の設備利用率が 12% でパネル下部がコンクリートの場合、PV 発電の環境影響は石炭火力を 100%とした場合に屋上設置が 6.3%であるのに対し、ナラ林が 99.9%、平均的な森林が 86.1%、マツ林が 76.7%となり、ナラ林では PV の温暖化影響削減効果がほぼ相殺されることを明らかにした。トレードオフの定量的な関係としては、PV 発電を平均的な森林に設置するケースで、PV 発電の石炭火力に対する環境影響は、温暖化影響が 1/14 に削減されるが土地利用影響は 378 倍となる。

PV 発電の土地利用影響の感度分析結果から単位容量敷地面積に着眼した分析を行った。その結果、PV パネル下部がコンクリートで PV 発電の設置場所がナラ林の場合に単位容量敷地面積を 15,200m²/MW から 11,000m²/MW に抑制させると、環境影響は 25.7%削減することが分かった。これにより、PV 発電の環境影響は石炭火力を 100%とした場合に、99.9%から 74.2%に改善する。なお、パネル下部をコンクリートから草地にする効果は 5.8%であり大きな改善効果は見られなかった。

一方、世界の代表地域を対象とした評価では、PV 発電の設備利用率が 15%でパネル下部がコンクリートの場合の石炭火力に対する環境影響は、日本の森林が 57%、メキシコ雲霧林が 125%、グアテマラの森林が 50%、中央アジアの森林が 19%となった。メキシコ雲霧林は降雨による植物の成長が比較的早いうえに、絶滅種の密度が高い特徴があり、このような場合に土地利用影響が大きくなった。一方で土地利用影響が少ない中央アジアの森林は生物多様性影響が小さい。統合化係数で比較すると、生物多様性影響は、最小の中央アジアの森林と最大のメキシコの雲霧林で 200 倍以上の差があるのに対し、一次生産性影響は 5 倍弱となり、植物の成長が早くレッドリスト記載種数が多いメキシコ雲霧林と、逆の中央アジアの森林との差は 6 倍以上になる結果となった。また、土地利用前が維管束植物のレッドリスト記載種が存在しない草原の場合は、日本が 37%、メキシコが 53%、グアテマラが 43%、中央アジアが 14%となり、いずれの場合も PV 発電の効果が確認された。海外の LCIA 手法との比較からは、各々評価方法が異なるものの、森林の植生により特性化係数が 90%程度変わる場合が多いこと、本論文で用いた LIME2 は他の手法に比べ、土地利用影響が大きい傾向があること、を示した。

本章では、PV 発電を設置する場合に、発電容量あたりの敷地面積が小さい高性能設備の導入が有効であるが、特に成長量と多様性が豊かな森林では、慎重な土地利用影響評価が必要であることを明らかにした。

第3章 バイオマス発電システムにおける森林施業影響評価

3.1 はじめに

木質系バイオマス発電は PV 発電同様に低炭素型の発電設備として再生可能エネルギー固定価格買取制度の対象となり、森林資源が豊富なわが国では地産地消の発電方式として期待されている[115]。特に、東日本大震災の被害を受けた東北地方の太平洋側地域では豊富な森林資源を活かしたバイオマス発電の導入可能性が検討されている[116]。バイオマス発電の導入によって長期の安定した森林資源の活用が計画されれば、林家の林業への意欲は一層高まり、間伐・主伐などを伴う丸太生産、保育・再造林という森林施業の継続が期待される。更に、未利用材を主とした森林資源の活用は森林施業の範囲を広げ、樹木の成長促進という環境面の改善が見込まれる。しかし、発電コストなどの経済性評価ではそれらの効果を定量化することはできない。

一方で、第2章で検討した LIME2[25]を用いた森林の土地利用影響評価は一次生産性と生物多様性の影響として定量化しており、一次生産性評価は NPP を用いて評価を行った。NPP は植物の生長量に係る指標であり、樹木の成長促進という効果を定量化できる。LIME2 を用いて、資源消費、地球温暖化、酸性化などの複数の影響領域の統合評価や GHG 排出量の比較が行われているが[51]、森林施業を推進することによる環境面の効果を定量化した事例はない。

本章の目的は、東北太平洋側地域の主要な人工林を構成するアカマツ (*Pinus densiflora*) 人工林の施業が木質系バイオマス発電設備への燃料供給により維持されることによる環境面の効果を、LIME2 を用いて一次生産性の改善効果として定量化するアカマツ人工林評価手法を開発することである。そして、その手法を岩手県のバイオマス発電に適用し、人工林の林齢と施業方法の違いによる影響を明らかにし、施業の継続性について考察する。加えて、バイオマス発電設計時の環境配慮点も明らかにする。

東北太平洋側地域では東日本大震災による放射性物質が林業に影響を与えている場合がある。この影響は長期にわたるため、モニタリング結果に基づく林業への課題整理と方針策定の必要性が指摘されている[117]。本論文では放射性物質の林業への影響は考慮できていないため、森林施業の計画には最新情報に基づく地域ごとの配慮が望まれる。

3.2 方法

3.2.1 LIME2

LIME2 の統合指標 (Single Index: SI) は統合化係数 (Integration Factor: IF)、被害係数 (Damage Factor: DF)、重み付け係数 (Weighting Factor: WF) を用いて式(2-1)~(2-3)により求める。

本章で評価するチップはバイオマス発電導入効果の定量化が目的であるため燃料用チップとし、人工林の施業は一次生産性への影響が大きい間伐と主伐、およびその後の保育と再造林を対象とする。アカマツの標準伐期齢は 40 年、長伐期施業の主伐林齢は 80 年であるが[118],[119]、公益的機能の発揮と調和[118]、または松くい虫対策[120]のために、施業時期を弾力的に運用することがある。そこで、施業対象を林齢 30 年から 65 年とし、間伐と主伐を並列に扱う。主伐には皆伐と択伐があるが、主伐後に再造林したアカマツ稚樹の成長量には皆伐と択伐の違いを考慮していないため、両者の区別は行わない。GHG 排出は二酸化炭素 (CO₂)、メタン (CH₄)、および亜酸化窒素 (N₂O) を対象とし、各排出量に地球温暖化係数 (Global Warming Potential: GWP) を乗算して算出する。

(1) 被害係数の設定

土地造成影響評価のための被害係数には、土地を畑からコンクリートに改変した時の DF_PPI(trans) として LIME2 代表値である 98.2kg/m² を、コンクリートで土地を占有した時の DF_PPI(occ)として LIME2 代表値である 1.28kg/m²/年を、それぞれ用いた[25]。第 2 章と同様に land(occ)は land occupation、land(trans)は land transformation、PPI は Primary Production Influence の略称である。

アカマツ人工林の施業による生長量の評価は土地改変による一次生産に関する被害係数である DF_PPI(trans)を算出して行う。図 3-1 に森林施業時の DF_PPI(trans)の構築手順を示す。

ここで、公的な情報に基づいて設定した項目はアカマツ人工林の施業後の NPP、施業面積、放置部の NPP であり、これらの値は毎年の成長の変化を考慮して施業後の年ごとに設定した。それらの値を用いて、NPPp、NPPa、NPPb、RTap、RTbp をそれぞれ設定した。NPPa と NPPb は年ごとに設定した値に基づいて算出した結果の平均値とした。

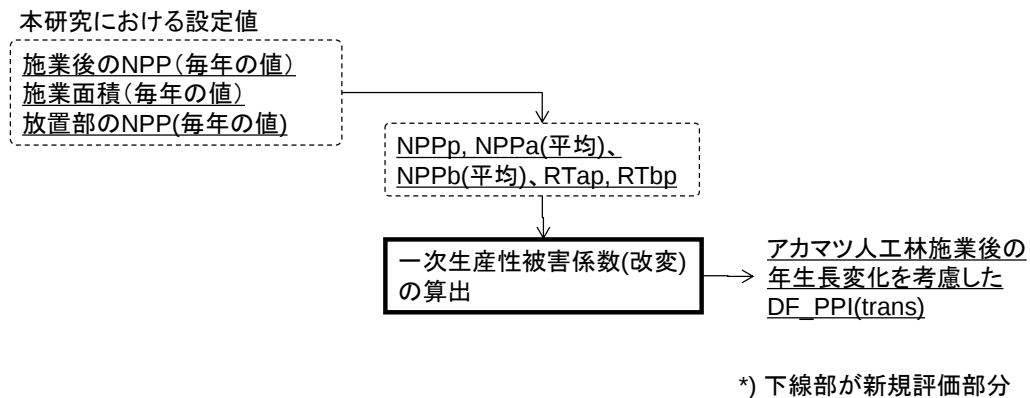


図 3-1 森林施業時の土地利用 DF の構築手順

3.2.2 条件設定

(1) システム境界

本評価のシステム境界を図 3-2 に、評価対象のインベントリおよび保護対象を表 3-1 に示す。評価対象は、保育・再造林、丸太生産、丸太輸送、チップ製造設備のための土地造成、チップ製造、チップ輸送、発電設備のための土地造成、発電とし、造林、チップ製造設備と発電設備の設

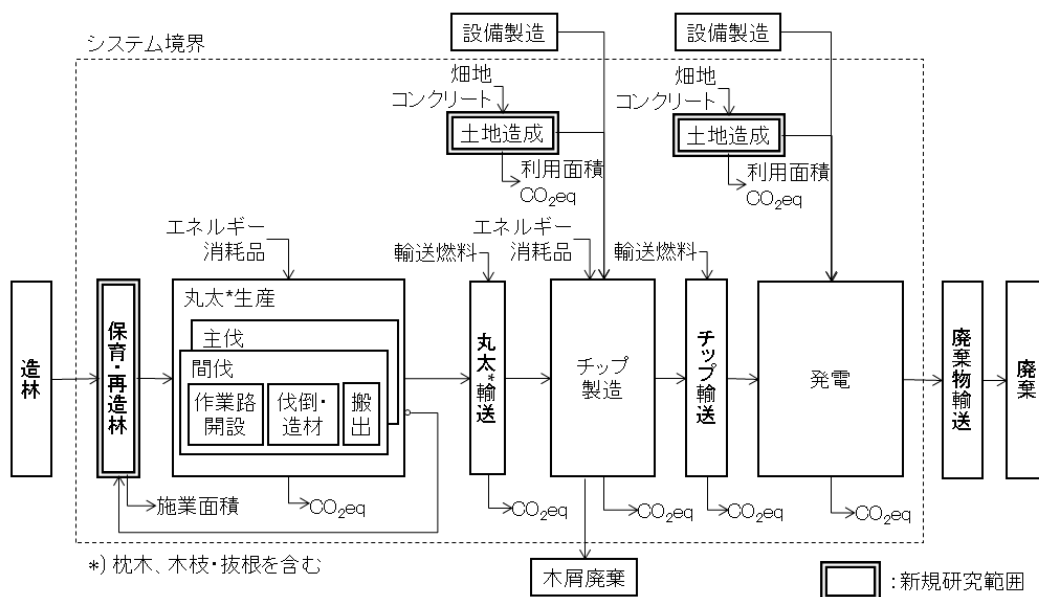


図 3-2 システム境界

備製造、木屑廃棄、廃棄物輸送と廃棄については境界外とした。土地造成前の土地利用形態は畑地とした。図中の二重四角枠が新規の研究範囲である。対象インベントリは表 3-1 のとおり、GHG 排出、畑地の利用面積およびアカマツ林の施業面積である。畑地とアカマツ人工林では維管束植物のレッドリスト記載種は存在しないと仮定し、生物多様性影響は除外した。

本評価の機能単位は、1kWh の発電量とした。造林工程の環境影響は先行研究によりその他のプロセスより小さいことが報告[51]されていることからシステム境界外とした。発電設備とチップ製造設備の建設に伴う環境影響は環境省ガイドライン[121]に基づきシステム境界外とした。

表 3-1 評価対象インベントリと重み付け係数[25]

インベントリ	保護対象	影響領域	重み付け係数 (WF)
GHG排出	温暖化	人間健康	1.47×10^7 円/DALY
		社会資産	1.0 円/円
利用面積(畑地)	土地占有	一次生産	46.2 円/kg
	土地改変		
施業面積(アカマツ林)	土地改変		

(2) インベントリデータの構築

<調査対象発電設備>

本調査の対象とする木質系バイオマス発電設備の仕様を表 3-2 に示す。本評価は標準的な木質系バイオマス発電設備を対象としているため、評価データは全て 2 次データとした。出力は 1MW とし、各条件は以下のとおり設定した。

- (a) 設備利用率はコスト等検証委員会報告書[100]から 80%と設定した。
- (b) 発電端の熱効率は木質バイオマス発電の容量と熱効率の関係[122]から、1MW 級の設備として 10%と設定した。
- (c) 燃料発熱量は含水率で変わるため、湿量基準含水率に対する針葉樹の低位発熱量の関係を図 3-3 のとおり調べた[123]。ここではアカマツの情報が得られなかったため針葉樹木部のデータを用いた。バイオマス発電用のアカマツのチップの湿量基準含水率は実測値が 22%-24%[124]であるため、ここでは 25%と設定し、図 3-3 からアカマツの低位発熱量を 13.9MJ/kg と決めた。

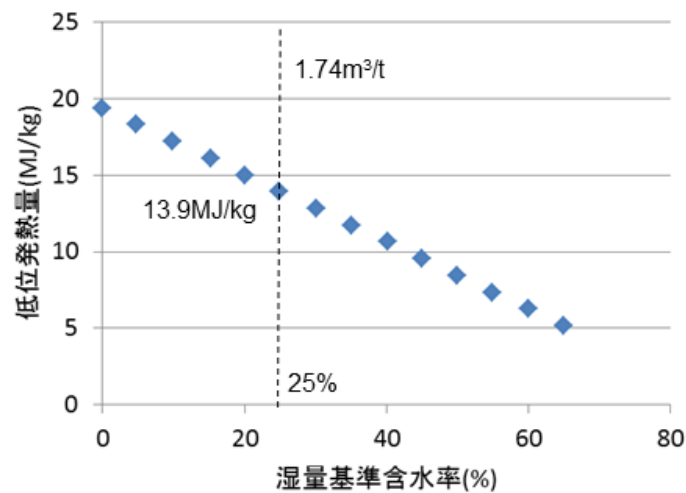


図 3-3 湿量基準含水率と針葉樹の低位発熱量[123]

(d) 伐採量はチップ使用量にチップ製造時残渣を考慮して求めた。チップ使用量は(b)で求めた熱効率と年間の発電量から算出した総発熱量を燃料発熱量で除して 18,139t/年と求めた。詳細な算出過程は表 3-2 に示している。伐採量はチップ使用量にチップ製造時の残渣 0.03%を考慮して 18,145t/年とした。チップ製造時の残渣は 1GJ のチップを製造する場合に、製品となるチップ 9.59×10^{-2} トンに対して木くずが 2.90×10^{-5} トンとなるという調査値[51]から製品となるチップに対する木くずの比率として 0.03%とした。ここではアカマツを製造してい

表 3-2 木質系バイオマス発電設備の仕様

項目	設定値	備考
出力	A 1 MW	設定値
設備利用率	B 80 %	*2)
熱効率(発電端)	C 10 %	*3)
燃料発熱量(低位発熱量)	D 13.9 MJ/kg	図3-3参照
使用年	E 20 年	設定値
発電量	F 7,008,000 kWh/年	$A \times 24h \times 365日 \times B / 100$
総発熱量	G 252,315 GJ/年	$F \times 860 / (C / 100) / 1,000,000 \times 4.1865$
チップ使用量	H 18,139 t/年	G / D
伐採量	I 18,145 t/年	$H / (1 - 0.0003)$ 、0.03%:チップ製造時残渣 ^{*4)}
設備面積 ^{*1)}	J 10,000 m ²	設備設置面積(5000m ²) + チップ置き場(5000m ²)
コンクリート ^{*1)}	K 8,050 t	$J \times 0.7m$ (基礎深さ)、比重2.3t/m ³ 、チップ置き場は除外

*1) 基礎は設備の倍の 40 年利用すると仮定し、コンクリートの資源影響と設備面積に基づく土地改変影響の算定には設定値の 1/2 を計上

*2) 参考文献[100]

*3) 参考文献[122]

*4) $0.03\% = 2.90 \times 10^{-5} (t/GJ) / 9.60 \times 10^{-2} (t/GJ)$ 、参考文献[51]

る設備の情報が得られず、スギやヒノキを製造している設備の情報をを用いた。チップの製造過程における樹種による違いについては、全国木材チップ工業連合会において実績データを比較した事例[125]があるが、同一の製造設備で樹種を変えたデータではないため、残渣に関してアカマツを想定した補正は行わなかった。

- (e) 使用年は20年とした。
- (f) 設備面積は設備設置面積 5,000m² とチップ置き場 5,000m² の合計値とし、基礎深さ 0.7m とした。設備面積と基礎深さはヒアリングによる調査値である。基礎は設備の倍の40年、設備更新後も利用すると仮定し、コンクリートの資源影響と設備面積に基づく土地改変影響の算出には設定値の1/2を計上する。
- (g) 発電時の GHG 排出量は表 3-2 に示した発電量、チップ使用量とわが国の公開データ[126]を用いて表 3-3 のとおり算出した。排出原単位は CH₄ と N₂O を合計して 0.073t-CO₂eq/MWh である。ここで、CH₄ の排出係数は「ボイラー（木材）」を、N₂O の排出係数は「ボイラー（流動床以外、固体燃料）」をそれぞれ使用した。また、CH₄ と N₂O の GWP は IPCC 第4次報告書の100年値である25と298を用いた[121]。

表 3-3 発電時 GHG 排出量

		CH ₄	N ₂ O	備考
燃料発熱量	D	13.9 GJ/t		*3)
発電量	F	7,008 MWh/年		
チップ使用量	H	18,139 t/年		
排出係数	EF	0.000074 t-CH ₄ /GJ ^{*1)}	0.00000058 t-N ₂ O/GJ ^{*2)}	*4)
年間排出量	EM	18.7 t-CH ₄ /年	0.1 t-N ₂ O/年	H×D×EF
GWP	G	25	298	*5)
CO ₂ 排出係数		0.067 t-CO _{2eq} /MWh	0.006 t-CO _{2eq} /MWh	EM／F×G

*1) 排出係数は「ボイラー(木材)」を使用

*2) 排出係数は「ボイラー(流動床以外、固体燃料)」を使用

*3) 表 3-1 参照

*4) 参考文献[126]

*5) 参考文献[121]

<発電設備以外の条件設定>

(a) 保育・再造林

アカマツ人工林の保育・再造林時の一次生産性は施業シナリオの影響を受ける。そこで、ここでは間伐と主伐のシナリオを岩手県の太平洋側地域の森林整備計画[118],[119]を参考に設定した。間伐はおおむね10年ごとで60年を超えた高齢級の場合は15年ごととされ、岩手県で最も多い林齢は45年である[127]。これらの現状を踏まえ、前述した林齢30年から65年の人工林を対象に標準伐期施業と長伐期施業を想定したシナリオを設定した。各シナリオは森林整備計画に準ずるが、前述した弾力的運用を想定し林齢30年の主伐も設定した。各シナリオを表3-4に

示す。間伐と主伐の区別は a と b をシナリオ番号に追加して表現した。表 3-4 において本評価が対象とする 20 年間に含まれる施業は下線部斜体とした。

ここでは施業計画の違いを明確化するため、各シナリオが対象とする森林の林齢はすべて同一年代とした。例えば、シナリオ 1 であれば林齢 30 年の森林を 20 年分計画的に対象林として確保しておき、対象林の施策を毎年進めていくという考え方である。

表 3-4 アカマツ人工林施策シナリオ

林齢		30年	40年	50年	65年	80年
シナリオ1a1 標準伐期施業	対象 林齢 :30年	<i>間伐</i>	<i>主伐 (再造林)</i>			
シナリオ1a2 長伐期施業		<i>間伐</i>	<i>間伐</i>	[間伐]	[間伐]	[主伐]
シナリオ1b 臨時施業		<i>主伐 (再造林)</i>				
シナリオ2a 長伐期施業	対象 林齢 :40年		<i>間伐</i>	<i>間伐</i>	[間伐]	[主伐]
シナリオ2b 標準伐期施業			<i>主伐 (再造林)</i>			
シナリオ3a 長伐期施業	対象 林齢 :50年			<i>間伐</i>	<i>間伐</i>	[主伐]
シナリオ3b 長伐期施業				<i>主伐 (再造林)</i>		
シナリオ4a 長伐期施業	対象 林齢 :65年				<i>間伐</i>	<i>主伐 (再造林)</i>
シナリオ4b 長伐期施業					<i>主伐 (再造林)</i>	

(斜体は評価期間の 20 年を表す)

(b) 丸太生産、丸太輸送

丸太生産は、間伐および主伐における作業路開設、伐倒・造材、搬出を含むものとし、エネルギーと消耗品の投入量は先行研究成果[51]を引用した。引用したデータは間伐の主伐の区別はせず 4 事業者の調査値の平均をとっている。集材方法は路網集材、間伐方式は列状間伐と定性間伐、各作業はグラップル、パワーショベル、チェーンソー、プロセッサ、ハーベスター、フォワーダなどを想定している。また、先行研究成果はスギ・ヒノキを対象としているため、伐倒・造材および搬出の環境負荷は収量比数に比例するとして補正した。森林計画[118]によると、収量比数はスギが 0.60 以上、アカマツが 0.70 以上であるため、1.17 倍の補正を行った。GHG 排出対象は CO₂、CH₄、および N₂O である。GWP には IPCC 第 4 次報告書データを用いた。丸太輸送距離は平均 100km とし、トラック輸送とした。丸太の輸送には、枕木、木枝・抜根を含むものとした。

(c) チップ製造設備の土地造成

チップ製造設備に必要な設備面積、コンクリート量は、表 3-5 のとおり設定した。設備面積は調査値[128],[129],[130]から年間にチップ 1t を製造するために必要な平均的な面積を $0.769\text{m}^2/\text{t}$ と求め、表 3-2 から引用した年間のチップ使用量 18,139t を乗算して求めた。コンクリート量は設備面積に基礎深さ 0.7m と比重 $2.3\text{t}/\text{m}^3$ を乗算して求めた。コンクリートの耐用年数は発電設備の場合と同様に 40 年とし、次の世代の設備も利用するとした。一方で、ライフサイクルの評価範囲は 20 年であるためコンクリートと造成基礎の環境負荷も 20 年分として設定値の $1/2$ を計上した。

表 3-5 チップ製造設備の土地造成条件

項目		設定値	備考
設備面積 ^{*1)}	L	13,954 m^2	$18,139(\text{t}) \times 0.769(\text{m}^2/\text{t})$ ^{*2)}
コンクリート ^{*1)}	M	22,466 t	$L \times 0.7\text{m}$ (基礎深さ)、比重 $2.3\text{t}/\text{m}^3$

*1) 基礎は設備の倍の 40 年利用すると仮定し、コンクリートの資源影響と設備面積に基づく土地改変影響の算定には設定値の $1/2$ を計上

*2) 18,139(t)は年間チップ使用量(表 3-2 参照), $0.769(\text{m}^2/\text{t})$ は以下調査値の平均
 $1.21(\text{m}^2/\text{t})=4,000(\text{m}^2)/3,300(\text{t})$ 参考文献[128]
 $0.463(\text{m}^2/\text{t})=25,000(\text{m}^2)/54,000(\text{t})$ 参考文献[129]
 $0.633(\text{m}^2/\text{t})=8,442(\text{m}^2)/13,340(\text{t})$ 参考文献[130]

(d) チップ製造、チップ輸送

チップ製造におけるエネルギーと消耗品の投入量は先行研究成果[51]を引用した。木材種による差は無いと考え、補正は行わない。GHG 排出対象は CO_2 、 CH_4 、および N_2O である。GWP には IPCC 第 4 次報告書データを用いた。チップ輸送距離は 10km とし、トラック輸送とした。

<GHG 排出原単位>

本評価に用いた GHG 排出原単位を表 3-6 に示す。各原単位は公開データを用い、丸太生産の

表 3-6 GHG 排出原単位

項目	GHG排出原単位	備考
コンクリート	502 $\text{kg-CO}_2\text{eq}/\text{t}$	セメント製造原単位 ^{*1)}
丸太生産	26.4 $\text{kg-CO}_2\text{eq}/\text{t}$	内訳 ^{*2)} $7.9(\text{作業路開設})+11.6(\text{伐倒・造材}) \times 1.17(\text{アカマツ補正係数})$ $+3.3(\text{搬出}) \times 1.17(\text{アカマツ補正係数})+0.1(\text{その他})+1.0(\text{通勤})$
チップ製造	66.9 $\text{kg-CO}_2\text{eq}/\text{t}$	内訳 ^{*2)} $6.42(\text{kg-CO}_{2\text{eq}}/\text{GJ})/9.59 \times 10^{-2}(\text{t/GJ})$
トラック輸送	0.163 $\text{kg-CO}_2\text{eq}/(\text{t} \cdot \text{km})$	内訳 $2,376(\text{kJ}/(\text{t} \cdot \text{km})) \times 0.0187(\text{t-C/GJ}) \times 44/12/1000$ $2,376(\text{kJ}/(\text{t} \cdot \text{km}))$: 営業用トラックの消費エネルギー ^{*3)} $0.0187(\text{t-C/GJ})$: 軽油の排出係数 ^{*4)}

*1) 参考文献[7]

*2) 参考文献[51]

*3) 参考文献[131]

*4) 参考文献[132]

伐倒・造材、搬出に関する原単位については上述のとおりアカマツへの補正を行っている。コンクリートにはセメントの製造原単位[7]を、丸太生産とチップ生産は先行研究[51]を、トラック輸送は国土交通省と経済産業省が提示する標準値[131],[132]を、それぞれ用いた。

3.2.3 被害係数の算出方法

<土地造成影響評価の被害係数>

土地造成影響の算出には、土地を畑からコンクリートに改変した時の被害係数である $DF_PPI(trans)$ (kg/m^2) と、コンクリートで土地を占有した時の被害係数である $DF_PPI(occ)$ ($kg/m^2/年$) を用いた。 $land(occ)$ は $land\ occupation$ 、 $land(trans)$ は $land\ transformation$ 、 PPI は $Primary\ Production\ Influence$ の略称である。ここで用いた $DF_PPI(trans)$ と $DF_PPI(occ)$ はそれぞれ LIME2 代表値[25]の $90.7kg/m^2$ と $1.28kg/m^2/年$ である。

<アカマツ人工林施業時の被害係数算出方法>

アカマツ人工林の施業は土地を占有するものではないため、土地改変時の被害係数である $DF_PPI(trans)$ のみを用いた。また、 $DF_PPI(trans)$ の値を決める現況 NPP ($NPPp:Present\ NPP$) は、アカマツの成長段階により変わることから、 $DF_PPI(trans)$ は式(3-1)を用いてアカマツ施業後の経過年数ごとに設定することとした。

$$DF_PPI(trans) = ((NPPp - NPPa) \times RTap \times 0.5 - (NPPp - NPPb) \times RTbp \times 0.5) \times 0.1 \quad (3-1)$$

ここで、

$NPPp$: 潜在 NPP ($t/ha/年$)

$NPPa$: 土地改変後の $NPPp$ ($t/ha/年$)

$NPPb$: 土地改変前の $NPPp$ ($t/ha/年$)

$RTap$: $NPPa$ から $NPPp$ への移行時間 (年)

$RTbp$: $NPPb$ から $NPPp$ への移行時間 (年)

算出方法の策定にあたり、まず、アカマツの林齢と現存量、 NPP 、および生長量の関係を数式化するとともに、間伐および主伐後にバイオマス燃料として使えるチップ化率を設定した。アカマツの林齢と現存量の関係については、関東地方収穫表ではほぼ I 等地下と E 等地上にあたる土地条件の調査データ[133]および岩手県岩手営林署管内のデータ[134]を用いた。引用したデ

ータを表 3-7 に示す。数式化にあたっては既存調査[135]でアカマツ上木の主林木構成数値に比較的合うとされた Korun 式を適用し最小自乗法を用いて式(3-2)のとおり設定した。

$$\log Y1 = -0.250 \times (\log X1)^2 + 1.586 \times (\log X1) + 0.299 \quad (3-2)$$

ここで、

Y1：現存量 (t/ha)

X1：林齢 (年)

表 3-7 林齢と現存量の関係

林齢 (年)	現存量(t/ha)			備考
	幹	枝	合計	
10	38.1	9.0	47.1	*1)
12	42.7	9.4	52.1	
15	45.3	9.7	55.0	
20	75.9	12.5	88.4	
23	85.1	12.3	97.4	
25	93.8	13.7	107.5	
33	163.4	14.6	178.0	
48	198.5	16.6	215.1	
55	225.9	21.1	247.0	
120	290.4	29.6	320.0	
46	83.9	14.1	98.0	*2)
44	126.0	13.4	139.4	
43	153.6	15.6	169.2	
46	198.5	16.6	215.1	

*1) 参考文献[133]

*2) 参考文献[134]

アカマツの林齢と NPP の関係については公知の情報として、関東地方収穫表でほぼ I 等地下と E 等地上の土地条件にあたるデータ[133]を用いた。東北地方の公知データは得られなかったが、表 3-7 の現存量のデータでは東北地方と上記関東地方の値に大きな差がみられなかったことから適用した。また、林齢 10 年以前のデータがなく、林齢 20 年前後のデータにはバラツキがみられることから、調査データに基づく数式化は行わず、筆者にてデータを補完した。図 3-4 にアカマツの林齢と NPP の関係における調査データと筆者が補完したデータをプロットした図を示す。この特性を使う場合は、先行研究[133]で示されたアカマツの NPP の特性が得られている森林であることが前提になる。そこで、アカマツが主要な樹種を占める久慈市の森林施業の実績

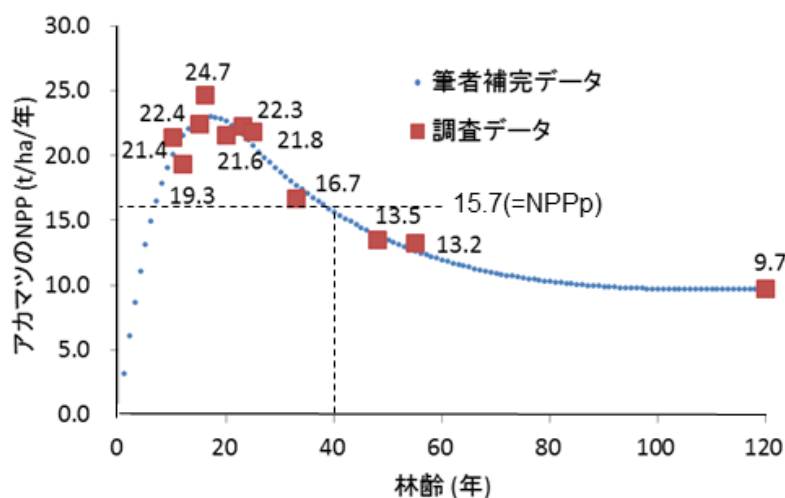


図 3-4 アカマツの林齢と NPP の関係[133]

を調査した。その結果、造林面積では計画を下回っているが、伐採立木材積は主伐と間伐で増減があるが計画を上回る施業がなされているため[118]、図 3-4 の特性に対して施業不足による成長鈍化などの補正は実施しなかった。

アカマツの林齢と生長量の関係については、表 3-8 に示す既存のデータ[133]を用いた。ここで生長量とは NPP から枯死した質量を除いた値である。表から式(3-3)のとおり直線近似式を設定した。

表 3-8 NPP と成長量の関係[133]

林齢 (年)	NPP (t/ha/年)	成長量 (t/ha/年)
10	21	7.5
20	21	6.5
30	17	5.0
40	15	3.5
50	14	2.5
60	13	2.0
80	12	1.0
100	12	1.0
120	11	0.5

$$Y2 = 0.663 \times X2 - 6.748 \quad (3-3)$$

ここで、

Y2 : 生長量 (t/ha/年)

X2 : NPP (t/ha/年)

チップ化率に関しては、製材所において通常の木材に使われなかった未利用材がチップに利用されると想定した。東北太平洋側地域の調査結果[136]から、素材生産全体平均の歩止りは大よそ素材生産量の 3 割程度と予測されており、未利用材がすべてチップに活用できると想定し、

チップ化率を 3 割と設定した。本調査は樹種ごとには調べられていないが、宮古地区などの比較的アカマツが多い地域を含む調査であるため引用した。つぎに、間伐と主伐の評価データの設定方法を記す。

(a) 間伐評価モデル

(a-1) 年間施業面積の設定

年間施業面積は表 3-2 に示した年間伐採量を供給できる面積で、式(3-4)により求めた。

$$\text{年間施業面積}_{x1} = \frac{\text{伐採量}}{\text{現存量}_{x1}} \times \frac{1}{(\text{間伐率} \times \text{チップ化率})} \quad (3-4)$$

ここで、

年間施業面積 X1：林齢 X1 の森林を間伐する場合の年間面積 (ha/年)

伐採量：18,145t/年 (表 3-2)

現存量 X1：林齢 X1 の森林の現存量 (式(3-2)から算出)

間伐率：30% (森林計画書指定率 35%[118]以下)

チップ化率：30% (上述のとおり未利用材の率を設定)

実施率は施業開始時に計画する将来 20 年分の同林齢の総施業面積に対する実施年の年間施業面積の比であり、式(3-5)のとおり算出する。

$$\text{実施率}_n = \frac{\text{年間施業面積}_n}{\text{総施業面積}} \times 100 \quad (3-5)$$

ここで、

実施率 n：施業開始後の n 年目の実施率 (%)

年間施業面積 n：施業開始後の n 年目の年間面積 (ha)

(a-2) NPP の設定

NPP は放置部の NPP、施業部の NPP、施業部と放置部全体の NPP、および NPP_p からなる。放置部の NPP は式(3-1)の NPP_b に該当し、対象林すべてが放置された場合の対象林全体の NPP を表す。放置部の NPP を求めるには人工林の放置が NPP に与える影響を定量化する必要がある。そこで、間伐によりアカマツの幹の直径成長が 1.5 倍程になるとの調査報告[137]を用いて、間伐がされない場合の影響を定量化した。ここでは、幹の直径成長は NPP から枯死した質量を除いた生長量に相当するとして式(3-3)を用い、生長量が 1.5 倍になった場合の NPP の向上倍率を 1.11 倍と算出した。そして、図 3-4 の特性データから 1.11 を除すことでアカマツ林を放置した場合の NPP の特性を図 3-5 のとおり設定した。図 3-5 では本評価で用いる林齢 30 から 80 年の範囲を記載している。放置部の NPP は図 3-5 のデータを用いて林齢ごとに行う。ここで、放置林の NPP の低下は経年に関係なく一定とした。

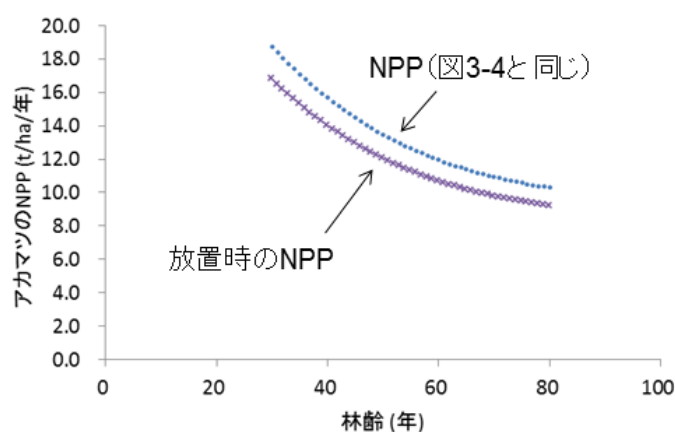


図 3-5 放置時における NPP と林齢の関係

施業部の NPP の算出では間伐効果を NPP に反映する。そこで、上述した間伐による NPP の向上倍率 1.11 倍を用いて間伐による NPP の効果を式(3-6)により算出した。

$$\text{NPP 間伐 } n = \text{NPP} \times 1.11^n \quad (3-6)$$

ここで、

NPP 間伐 n : 間伐 n 回実施後の NPP (t/ha/年) (本論文では $n=1,2$)

施業後の NPP である施業部と放置部全体の NPP は式(3-1)の NPPa に該当し、計画とおりに 20 年間対象林の施業が行われた場合の対象林全体の NPP であり、式(3-7)を用いて算出する。式(3-7)の第 1 項は NPPb に総施業面積に対する放置部の比率を乗算したもので、第 2 項は NPPs に対象林全体に対する施業部の比率を乗算したものである。第 2 項では施業場所の毎年の増加と施業済み箇所毎年の NPP 変化を計算に反映している。

$$NPP_{an} = NPP_{bn} \times \frac{100 - \sum_{i=1 \sim n} RP_i}{100} + \sum_{i=1 \sim n} (NPP_{sn+1-i} \times \frac{RP_i}{100}) \quad (3-7)$$

ここで、

NPP_{an} : 施業開始後 n 年目の NPP (t/ha/年)

NPP_{bn} : 施業開始後 n 年目の放置部の NPP (t/ha/年)

NPP_{sn} : 施業開始後 n 年目の施業部の NPP (t/ha/年)

RP_i : i 年目の実施率 (%)

NPP_p はアカマツ人工林が適切に施業されている状態の NPP であり、標準伐期齢である林齢 40 年の NPP を参照することとし、図 3-4 から 15.7t/ha/年と設定した。また、式(3-1)の NPPa と NPPb はそれぞれ施業年ごとに求めた NPP_{an} と NPP_{bn} の平均とした。

(a-3) RT_{ap} と RT_{bp} の設定

まず RT_{bp} から設定する。RT_{bp} は NPP_b から NPP_p への移行時間であり、標準伐期の 40 年とした。RT_{ap} は NPP_a から NPP_p への移行時間であり、表 3-4 のとおり設定した施策による NPP の改善効果が回復時間の短縮に寄与すると考え式(3-8)により算出した。

$$RT_{ap} = RT_{bp} \times \left(1 - \frac{NPP \text{ 向上率}}{100}\right) \quad (3-8)$$

ここで、

NPP 向上率 : NPP_a の NPP_b に対する向上率 (%) であり、施業期間の 20 年間の平均値の比

(b) 主伐評価モデル

(b-1) 年間施業面積の設定

間伐の場合と同様に年間施業面積と実施率を求める。年間施業面積は式(3-9)により求める。間伐モデルとの違いは間伐率を考慮していないことである。実施率は間伐評価モデルと同じであり式(3-5)により算出する。

$$\text{年間施業面積}_{X1} = \frac{\text{伐採量}}{\text{現存量}_{X1}} \times \frac{1}{(\text{チップ化率})} \quad (3-9)$$

ここで、

年間施業面積 X1：林齢 X1 の森林を主伐する場合の年間面積 (ha/年)

伐採量：18,145t/年 (表 3-2)

現存量 X1：林齢 X1 の森林の現存量 (式(3-2)から算出)

チップ化率：30% (上述のとおり未利用材の率を設定)

(b-2) NPP の設定

間伐の場合と同様、放置部の NPP、施業部の NPP、および NPP_p は図 3-4 を用い、施業部と放置部全体の NPP は式(3-7)を用いて設定する。ここで、主伐後の保育・再造林した林分の NPP 変化は図 3-4 の林齢 1 年目からの特性を用いた。

(b-3) RTap と RTbp の設定

間伐の場合と同様、RTbp は 40 年とし、RTap は式(3-8)により算出した。

3.3 結果および考察

3.3.1 被害係数

上述したアカマツ人工林評価手法を用いて表 3-4 のシナリオごとにアカマツ人工林施業時の DF_PPI(trans)を表 3-9 のとおり算出した。DF_PPI(trans)の算出に用いたNPPaはアカマツの成長段階で変わる。そこで、対象林齢が同じシナリオごとの NPPa を図 3-6 に示す。横軸は施業実施後の林齢とし、放置時の NPP も比較用に示した。NPP は式(3-7)により求めている。

表 3-9 各シナリオの被害係数算出結果

	DF_PPI(trans) (kg/m ²)
シナリオ1a1	-1.9
シナリオ1a2	-3.9
シナリオ1b	-1.9
シナリオ2a	-3.7
シナリオ2b	-4.0
シナリオ3a	-3.1
シナリオ3b	-6.1
シナリオ4a	-2.2
シナリオ4b	-8.0

施業開始時に主伐を行うシナリオの NPP は、放置時に対して最初の数年間は低下するが、保育・再造林したアカマツの生長が早いいため、数年で増加に転じている。その低下度合いはシナリオ 1 からシナリオ 4 の順に少なくなっており、高齢な林齢ほど主伐が効果を発揮することが分かる。間伐は主伐ほどの NPP 変化はないが、NPP の低下を抑制する効果をシナリオ 1～3 で確認できる。また、シナリオ 1a1 と同 1a2 の林齢 30 年から 39 年までの施業は共に間伐のみであるが、NPPa はシナリオ 1a1 の方がわずかに大きい。この理由はシナリオ 1a1 が 40 年目以降に主伐を行うため総施業面積が同 1a2 より小さくなり、林齢 31 年から 39 年までの実施率が同 1a2 より大きくなるためである。各シナリオの NPPa 計算プロセスは付録に記載する。

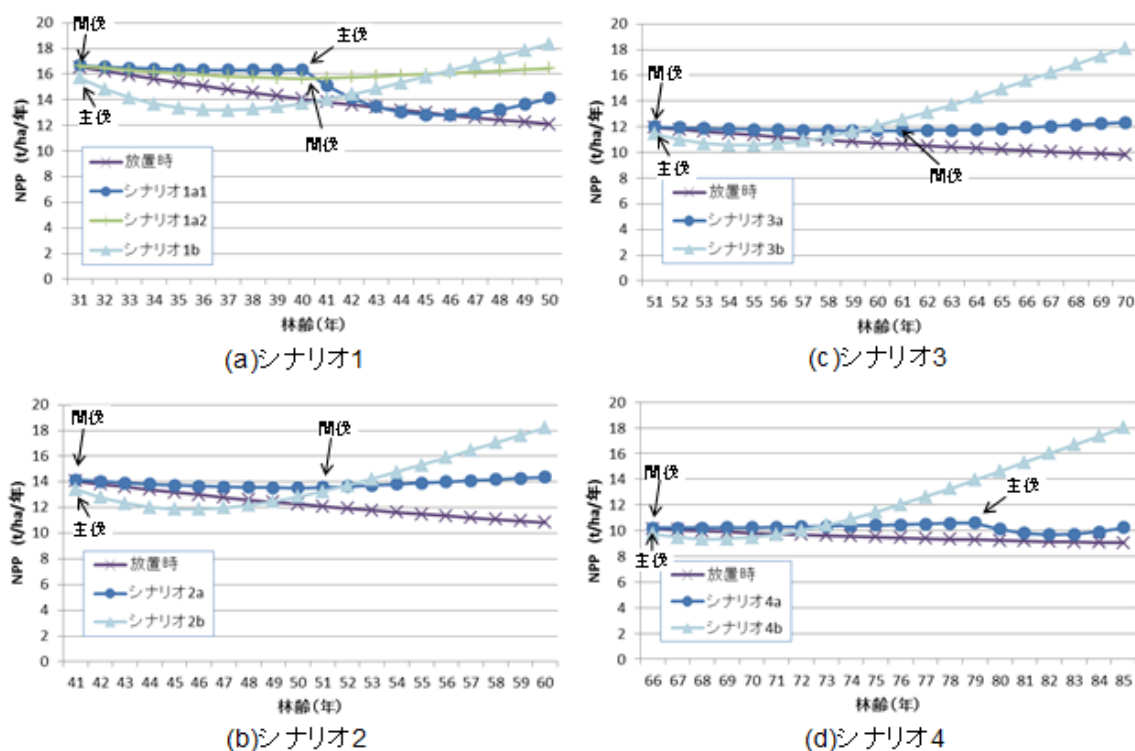


図 3-6 シナリオごとに算出した NPPa

3.3.2 発電までの環境影響

図 3-2 における丸太生産から発電までの土地造成を含むプロセスの GHG 排出量評価結果を図 3-7 に示す。図 3-7 のとおり、バイオマス発電の GHG 排出量は 437 (g-CO₂eq/kWh) となった。システム境界が異なるため参考ではあるが、東北電力の Grid の実排出係数[138]の 81%に相当する。内訳はチップ製造が 39%、丸太生産、丸太輸送、チップ設備と発電設備の基礎、および発電段階は比較的同レベルで 9～16%である。基礎の影響を合計すると全体の 18%になる。基礎の影響はコンクリート製造負荷であるが、使用期間を 40 年として 1/2 の影響を計上しているに

もかかわらず大きいことから、発電設備やチップ製造工場の建設ではコンクリート量を減らす設計が望まれる。

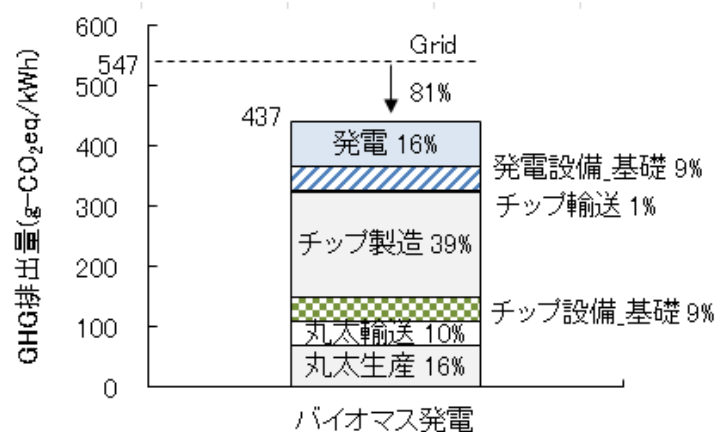


図 3-7 CO₂ 排出量評価結果（土地造成影響を含む場合）

図 3-8 にバイオマス発電の LIME2 評価結果を、人間健康、社会資産、一次生産性の影響領域別に示す。ここで Grid における発電のための土地利用は評価範囲外としたためゼロとなっている。人間健康と社会資産において、バイオマス発電の影響は CO₂ 排出に由来するもので、すべてのシナリオにおいて Grid の 75.9%となった。一方、一次生産性の場合、バイオマス発電への燃料チップ供給のための森林施業効果が-1.04kg/kWh から-3.88kg/kWh と土地利用影響より

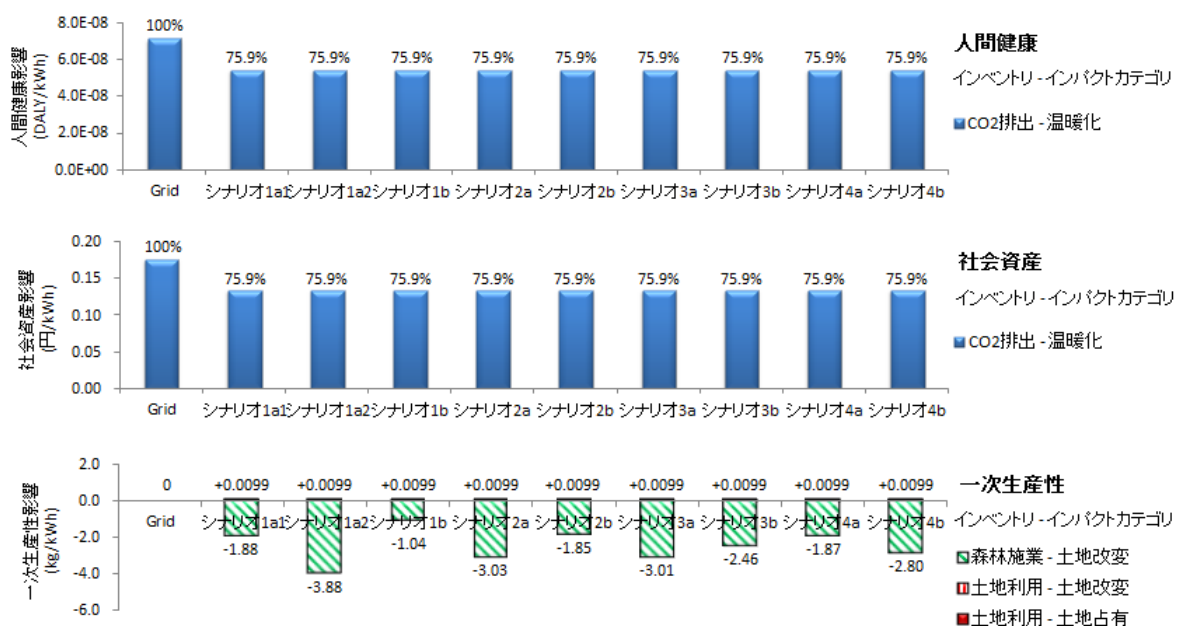


図 3-8 バイオマス発電の LIME2 影響領域別評価結果

も大きい結果となった。

土地利用影響を加えた LIME2 の SI 値は図 3-9 のとおり 1.39 円/kWh となった。内訳は、チップ製造段階が 28%と多く、土地利用影響はチップ設備が 19%、発電設備が 14%となる。土地利用影響は上述した基礎同様に 1/2 の影響を計上していることから、設置面積の低減が重要である。

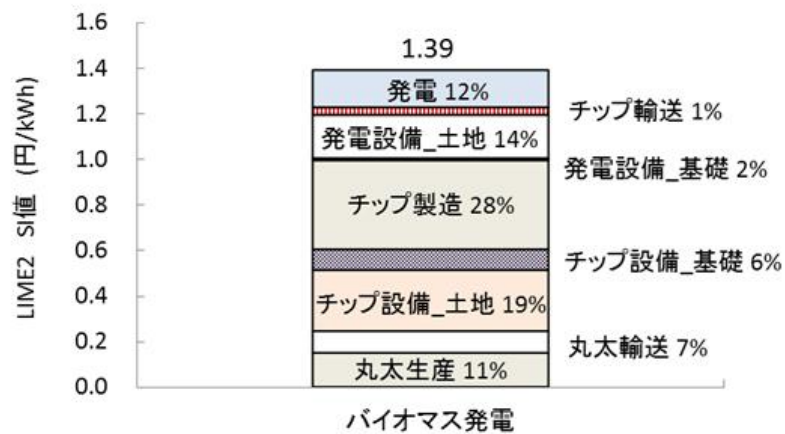


図 3-9 LIME2 評価結果（土地造成影響を含む場合）

3.3.3 アカマツ林施業の効果

(1) LIME2 評価結果

図 3-10 は図 3-9 の結果にアカマツ林施業の効果を追加した LIME2 評価結果である。森林施業による環境影響低減量は発生する環境負荷の 1.39 円/kWh に対し-48.6 円/kWh から-180 円/kWh であり、森林施業効果が極めて大きいことを確認した。森林施業効果が大きくなる理由を最も高い施業効果を有するシナリオ 1a2 を事例に説明する。シナリオ 1a2 では、NPPa は図 3-6(b) の特性から 20 年平均値として 1.65kg/m^2 、NPPb は図 3-5 の特性のから 1.41kg/m^2 と求めた。これらの値と式(3-1)を用いて DF_PPI(trans)を表 3-9 のとおり -3.85kg/m^2 と算出している。この値は、例えば、第 2 章のマツ林における土地利用の DF_PPI(trans)の 100.3kg/m^2 に対しては 1/26 程で、大きい値とは言えない。一方、SI 値を求めるために DF_PPI(trans)に乗算する面積は、20 年間の総施業面積のうち、間伐のため 2 回目の施業の重複部分を除外して 14,151ha となるが、この広い面積が SI 値の改善効果を高めている。図 3-11 は各シナリオの総施業面積である。

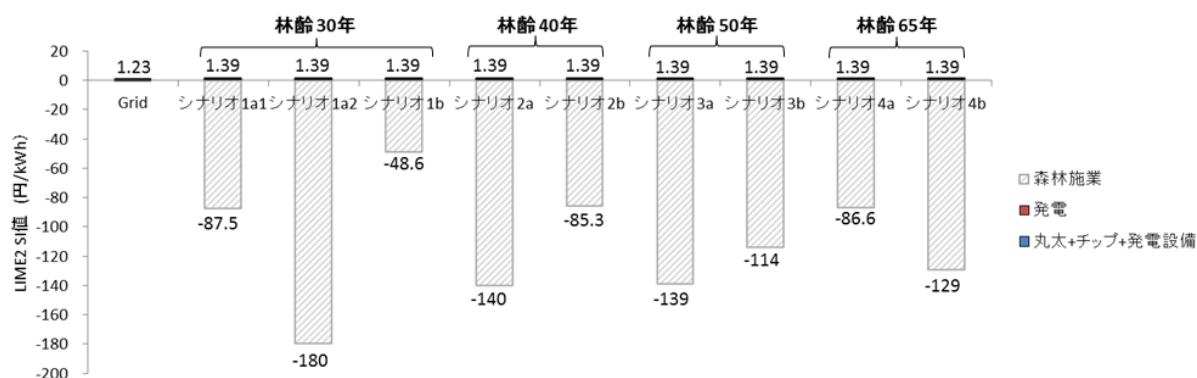


図 3-10 LIME2 評価結果（土地造成影響とアカマツ林手入を含む場合）

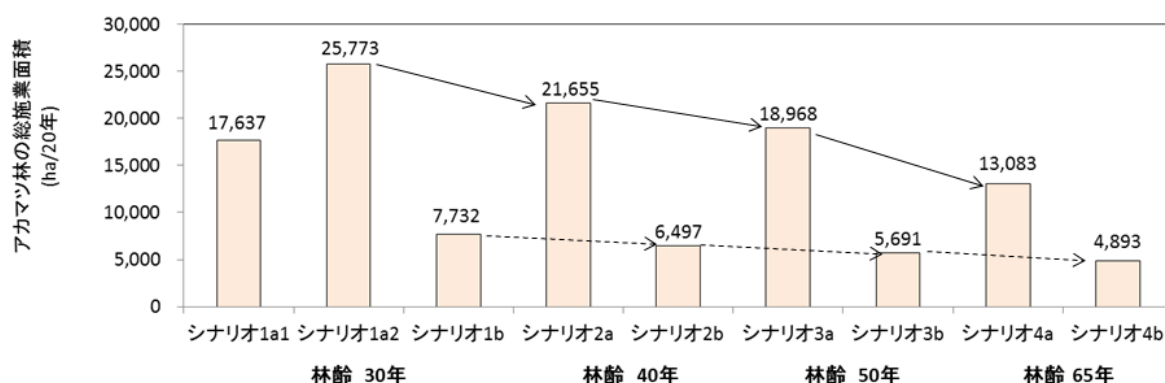


図 3-11 アカマツ林の総施業面積

る。図 3-10 で効果が大きいシナリオ 1a2、同 2a、同 3a は総施業面積に比例していることが分かる。一方で、次に効果が大きいシナリオ 4b は総施業面積が多い間伐よりも主伐の方が効果を有する。この理由は林齢が 65 年であり間伐による NPP の向上効果が減っているためである。また、図 3-11 の実線矢印は間伐を 10 年ごとに 2 回実施するケースを結んだ線であり、点線矢印は主伐のケースを結んだ線である。両ケースとも林齢が増すことによる現存量の増加にともなう総施業面積の減少傾向が確認された。

(2) SI 値の改善度

面積あたりの SI 値改善度をシナリオごとに比較した結果を図 3-12 に示す。ここで面積とは総施業面積と必要森林面積である。主伐の場合は両者が一致するが、間伐の場合は異なるため 2 とおりの計算結果を示しその違いを実践の矢印で示した。横軸は当該するシナリオ番号のみを提示しており、間伐の場合は SI 値の増加分を除いた面積も表示した。図中の点線は主伐のケースを、一点鎖線は間伐のケースを比較したものである。

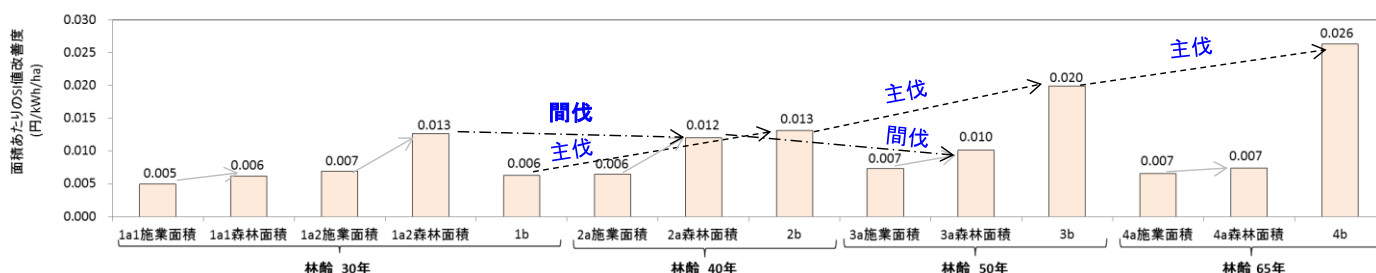


図 3-12 SI 値の改善度比較

まず全体の傾向を考察する。実線矢印は、間伐の場合はすべての林齢において森林面積で除した方が SI 値の改善度が高いことを示している。この理由は、間伐は同じ現場で 2 回の施業をするため必要な森林面積が抑制されるためである。一方、点線矢印は、主伐の場合は林齢が増すほど現存量が増え必要な面積が少なくなり SI 値の改善度が増加することを示している。主伐の効果は林齢 40 年以降で顕著となり林齢 40 年を標準伐期としている森林整備計画[118],[119]は環境改善効果の効率性という点で妥当な時期であるといえる。

つづいて細部の考察を行う。間伐の対象が林齢 30 年のシナリオ 1a1 と同 1a2 の SI 値改善度の比較では、除する面積に関係なくシナリオ 1a1 の標準施業よりも同 1a2 の長伐期施業の方が良い。すなわち 30 年目に間伐を行った後は、主伐より間伐の方が効果が高い。この理由は、図 3-6(a)にみられるように 40 年目の主伐後の 10 年間に NPP が低下することにより相対的に間伐の効果が高くなったためである。図 3-6 では高齢林になるほど主伐による低下影響は少なくなることが示されており、林齢 30 年の人工林の 10 年後の施業は間伐も選択肢に入れても良いとい

える。また、図 3-12 のシナリオ 2a 森林面積と同 2b の比較では SI 値の改善度はほぼ同程度である。この理由は林齢 40 年の人工林の場合に 50 年目に間伐を行うことの利用森林面積あたりの NPP 向上効果が主伐とほぼ同等であることを意味する。

以上から、現状の林齢をパラメータとした今後 20 年のバイオマス発電へのチップ供給を想定した施業計画においては、林齢 50 年以上の場合は主伐を優先すべきで、林齢 30 年では主伐と間伐の両者を選択でき、林齢 40 年では総施業面積あたりの効果は主伐が大きいが必要森林面積あたりの効果は主伐と間伐が同等となることが分かった。

(3) 評価の限界

本章で開発したアカマツ人工林評価手法の限界として、土地造成影響と森林施業影響の評価対象が一次生産性のみであり、水源涵養、土砂流出などの他の評価項目は網羅できていないことが挙げられる。今後の LCA における評価範囲の拡大が望まれる。

また、今回用いた評価データとして、以下の課題がある。

- ・土地造成影響の算定に用いた被害係数は、LIME2 の代表値を用いており、東北地方の特性が考慮されていない。
- ・放置林における NPP 低下率は一定としており、経年による NPP 低下率の変化は考慮されていない。
- ・対象とした民有アカマツ人工林はシナリオにて設定した林齢において図 3-4 に示したアカマツの特性[133]が得られていることを前提としており、森林施業が滞っているなどの個別の状況は考慮されていない。
- ・チップ製造設備から発生する残渣はスギやヒノキを用いた場合のデータであり、アカマツのデータになっていない。

3.3.4 設定シナリオの継続性

岩手県の民有アカマツ人工林を想定した各シナリオの継続性を、必要森林面積の人工林面積に対する比である占有率、年間施業面積平均値の実績値に対する比である実績比、年間生長量の岩手県のアカマツ成長量 5t/ha/年 [134]に対する比である対生長量比、から考察する。必要森林面積の算出では、2 回目の施業は 1 回目と同じエリア内で行われるため 1 回目の施業面積を対象とした。一方、年間施業面積は 2 回目の施業も含むシナリオ全体の平均値であり、再造林を含む 2 回目の施業効果を反映している。

まず岩手県の民有アカマツ人工林面積に齢級分布率を乗算して林齢シナリオごとのアカマツ人工林面積を求めた。林齢 30 年のシナリオ 1 を齢級 6,7 級、林齢 40 年のシナリオ 2 を齢級 8,9 級、林齢 50 年のシナリオ 3 を齢級 10,11 級、林齢 65 年のシナリオ 4 を林齢 12 級以上とした。

アカマツの齢級分布率は、筆者が関係者にヒアリングした結果、6,7 級が計 24%、8,9 級が計 45%、10,11 級が計 25%、12 級以上が 3%と設定した。岩手県の民有アカマツ人工林面積は 118,166ha[127]を用いた。つぎに、齢級別間伐実績値[127]から間伐面積を 6,7 級が計 1,102ha、8,9 級が計 1,135ha、10,11 級以上が 615ha と求めた。主伐面積は実績値が得られなかったため、同じ岩手県内の久慈地域の主伐と間伐の伐採立木材積[118]の実績値比較から主伐面積は間伐面積の 1/3 と想定した。表 3-10 に占有率、実績比、対生長量比の算出結果を示す。

表 3-10 設定シナリオの継続性検討

林齢	シナリオ No.	必要森林面積		年間施業面積(平均値)			年間伐採量	
		(ha)	占有率 ^{*1)} (%)	(ha/年)	実績比 ^{*2)} (%)	施業	(t/年)	対生長量比 ^{*3)} (%)
30年 (6,7 級)	1a1	14,151	50.9	882	80.0	間伐+主伐	18,145	13.1
	1a2	14,151	50.9	1,289	116.9	間伐+間伐		
	1b	7,732	27.8	387	105.2	主伐		
40年 (8,9 級)	2a	11,622	21.2	1,083	95.4	間伐+間伐		6.6
	2b	6,497	11.9	325	85.9	主伐		
50年 (10,11 級)	3a	13,719	47.0	948	154.2	間伐+間伐		12.4
	3b	5,691	19.5	285	138.8	主伐		
65年 (12 級以上)	4a	11,701	366.1	654	データ無	間伐+主伐		114
	4b	4,893	153.1	245	データ無	主伐		

*1)アカマツ人工林面積 118,166ha[127]に当該齢級別分布(6,7 級=24%、8,9 級=45%、10,11 級=25%、12 級以上=3%)を乗算した値に対する比率

*2)齢級別間伐実績値[127] (6,7 級=1,102ha、8,9 級=1,135ha、10,11 級以上=615ha)と、間伐の 1/3[118]と推定した主伐実績面積に対する比率

*3)アカマツ成長量を 5t/ha/年[134]として求めた当該齢級別森林の年間成長量に対する比率

必要森林面積の占有率から林齢 65 年のシナリオ 4 は成立せず、他のシナリオとの組み合わせが必要となる。一方、他のシナリオの占有率は最大でも 50.9%で、岩手県の民間アカマツ人工林が 1MW 級のバイオマス発電のチップを供給できるポテンシャルを有することが分かる。年間施業面積の実績比は、標準伐期施業であるシナリオ 1a1、同 2b 以外のケースの多くが 100%を超える結果となり、現在の間伐や主伐のペースでは木材供給が不足することが判明した。特に、林齢 50 年を主伐していくシナリオ 3b は占有率が小さく対象となる林齢の森林が多くあるにもかかわらず主伐実績が少ない状況である。図 3-12 から同シナリオは SI 値の改善度が高いことが分かっており、今回検討したバイオマス発電に組み合わせる施業としては、林齢 50 年にフォーカスした主伐を計画的に実行できるような検討が重要であることが分かる。なお、ここでは間伐率を 30%、未利用材を想定しチップ化率を 30%と設定しており、必要森林面積や年間施業面積を削減するにはこの率を可能な限り多くすることも対策になる。また、本考察では評価対象林以外の岩手県内の民有アカマツ人工林施業による継続性への影響は考慮されていない。

3.4 まとめ

森林施業影響として、アカマツ人工林の一次生産性向上効果を定量化するアカマツ人工林評価手法を LIME2 に基づいて開発し、岩手県の木質系バイオマス発電の評価を行い、チップを供給するための森林施業の波及効果を、GHG 排出と土地利用の影響と統合評価した。その結果、以下の 4 点を明らかにした。

- (1) アカマツ人工林の施業が維持されることによる環境改善効果は、土地利用や GHG 排出の影響に比べ大きく、発電のための燃料チップの供給プロセス（施業方法）が重要である。
- (2) アカマツ人工林の施業を除いた環境影響の内訳はチップ製造段階が 28%、チップ製造設備と発電設備の土地利用影響が 33%となり、チップ製造と土地利用が設計時に環境配慮すべき項目である。
- (3) 標準伐期施業と長伐期施業を想定し、林齢 30 年から 65 年の範囲で間伐と主伐を行う 20 年分のシナリオに対して、施業方法の違いと林齢が環境改善効果に与える影響を分析した結果、環境影響の改善効果を高めるためには、林齢 50 年以上の場合は主伐を優先する計画が有効である。一方、林齢 30 年と 40 年の場合は主伐と間伐の効果はほぼ同等である。
- (4) 設定したシナリオの継続性を岩手県の民間アカマツ人工林を事例に分析した結果、林齢 65 年を対象とする場合を除いて、1MW 級の発電のために 20 年間チップを供給するポテンシャルを有することを確認した。一方、実際の年間施業量との比較では、標準伐期施業以外のケースの多くで現在の間伐や主伐のペースでは木材供給が不足する。特に、環境改善効果が高い林齢 50 年で主伐を計画するシナリオでは対象森林が豊富であるにもかかわらず主伐実績が不足しており、林齢 50 年の主伐を優先する継続可能な施業計画の立案が課題である。

本章では、バイオマス発電においてチップを供給する森林施業効果は、温暖化影響削減効果や土地利用影響に比べて極めて大きいことが、持続可能な施業方法の立案が課題であることを明らかにした。今後は、本手法を代表的な人工林の樹種であるスギやヒノキなどへ展開する必要がある。

付表 3-1 NPP 被害係数算定に必要な NPP (シナリオ 1a1)

経過 (年)	施業面積(間伐)				NPP				
	現存量 (t/ha)		面積 (ha/年)	実施率 (%)	放置部 (t/ha/年)		施業部 (t/ha/年)	施業部+放置部 (t/ha/年)	潜在NPP (t/ha/年)
	式(3-2)		式(3-4)	式(3-5)	図3-5		式(3-6)	式(3-7)	図3-4
	林齡 (年)				林齡 (年)	NPPb	間伐部 主伐	NPPa	NPPp
1	31	128	1,574	8.9	31	16.5	18.4	16.7	15.7
2	32	132	1,532	8.7	32	16.2	18.1	16.6	
3	33	135	1,494	8.5	33	15.9	17.7	16.5	
4	34	138	1,458	8.3	34	15.6	17.4	16.4	
5	35	142	1,424	8.1	35	15.3	17.1	16.3	
6	36	145	1,391	7.9	36	15.1	16.8	16.3	
7	37	148	1,361	7.7	37	14.8	16.5	16.3	
8	38	151	1,332	7.6	38	14.5	16.2	16.3	
9	39	154	1,305	7.4	39	14.3	15.9	16.3	
10	40	158	1,280	7.3	40	14.1	15.7	16.4	
11	41	161	377	2.1	41	13.8	3.2	15.1	
12	42	164	370	2.1	42	13.6	6.1	14.1	
13	43	167	363	2.1	43	13.4	8.7	13.5	
14	44	170	357	2.0	44	13.2	11.0	13.0	
15	45	173	351	2.0	45	13.0	13.1	12.8	
16	46	175	345	2.0	46	12.8	14.9	12.8	
17	47	178	339	1.9	47	12.6	16.5	12.9	
18	48	181	334	1.9	48	12.4	17.9	13.2	
19	49	184	329	1.9	49	12.3	19.1	13.6	
20	50	187	324	1.8	50	12.1	20.1	14.1	
平均	882				14.1	15.0	15.0	15.7	
合計	17,637				100				
NPP向上率						6.3%			

土地改変時の被害係数

NPPp-NPPb (t /ha/年)	NPPp-NPPa (t /ha/年)	R T bp 図3-4 (年)	R T ap 式(3-8) (年)	DF_PPI(trans) 式(3-1) (kg/m ²)
1.6	0.7	40	37	-1.9

付表 3-2 アカマツ林手入効果の被害係数算定に必要な NPP（シナリオ 1a2）

経過 (年)	施業面積(間伐)				NPP				
	現存量 (t/ha)		面積 (ha/年)	実施率 (%)	放置部 (t/ha/年)		間伐部 (t/ha/年)	間伐部+放置部 (t/ha/年)	潜在NPP (t/ha/年)
	式(3-2)		式(3-4)	式(3-5)	図3-5		式(3-6)	式(3-7)	図3-4
	林齢 (年)				林齢 (年)	NPPb	1回目 2回目	NPPa	NPPp
1	31	128	1,574	6.1	31	16.5	18.4	16.6	15.7
2	32	132	1,532	5.9	32	16.2	18.1	16.5	
3	33	135	1,494	5.8	33	15.9	17.7	16.3	
4	34	138	1,458	5.7	34	15.6	17.4	16.2	
5	35	142	1,424	5.5	35	15.3	17.1	16.0	
6	36	145	1,391	5.4	36	15.1	16.8	15.9	
7	37	148	1,361	5.3	37	14.8	16.5	15.8	
8	38	151	1,332	5.2	38	14.5	16.2	15.8	
9	39	154	1,305	5.1	39	14.3	15.9	15.7	
10	40	158	1,280	5.0	40	14.1	15.7	15.6	
11	41	161	1,255	4.9	41	13.8	17.2	15.7	
12	42	164	1,232	4.8	42	13.6	16.9	15.8	
13	43	167	1,210	4.7	43	13.4	16.6	15.8	
14	44	170	1,189	4.6	44	13.2	16.4	15.9	
15	45	173	1,168	4.5	45	13.0	16.1	16.0	
16	46	175	1,149	4.5	46	12.8	15.9	16.1	
17	47	178	1,131	4.4	47	12.6	15.7	16.2	
18	48	181	1,113	4.3	48	12.4	15.4	16.2	
19	49	184	1,096	4.3	49	12.3	15.2	16.3	
20	50	187	1,080	4.2	50	12.1	15.0	16.4	
平均	1,289				14.1		16.5	16.0	15.7
合計	25,773				100				
NPP向上率					13.9%				

土地改変時の被害係数

NPPp-NPPb (t /ha/年)	NPPp-NPPa (t /ha/年)	R T bp 図3-4 (年)	R T ap 式(3-8) (年)	DF_PPI(trans) 式(3-1) (kg/m ²)
1.6	-0.4	40	34	-3.9

付表 3-3 アカマツ林手入効果の被害係数算定に必要な NPP（シナリオ 1b）

経過 (年)	施業面積(主伐)				NPP					
	現存量 (t/ha)		面積 (ha/年)	実施率 (%)	放置部 (t/ha/年)		主伐部 (t/ha/年)		主伐部+放置部 (t/ha/年)	潜在NPP (t/ha/年)
	式(3-2)		式(3-9)	式(3-5)	図3-5		図3-4		式(3-7)	図3-4
	林齡 (年)				林齡 (年)	NPPb	林齡 (年)		NPPa	NPPp
1	31	128	472	6.1	31	16.5	1	3.2	15.7	15.7
2	32	132	460	5.9	32	16.2	2	6.1	14.8	
3	33	135	448	5.8	33	15.9	3	8.7	14.2	
4	34	138	437	5.7	34	15.6	4	11.0	13.7	
5	35	142	427	5.5	35	15.3	5	13.1	13.4	
6	36	145	417	5.4	36	15.1	6	14.9	13.2	
7	37	148	408	5.3	37	14.8	7	16.5	13.2	
8	38	151	400	5.2	38	14.5	8	17.9	13.3	
9	39	154	392	5.1	39	14.3	9	19.1	13.5	
10	40	158	384	5.0	40	14.1	10	20.1	13.7	
11	41	161	377	4.9	41	13.8	11	20.9	14.0	
12	42	164	370	4.8	42	13.6	12	21.6	14.4	
13	43	167	363	4.7	43	13.4	13	22.1	14.8	
14	44	170	357	4.6	44	13.2	14	22.5	15.3	
15	45	173	351	4.5	45	13.0	15	22.8	15.8	
16	46	175	345	4.5	46	12.8	16	22.9	16.3	
17	47	178	339	4.4	47	12.6	17	23.0	16.8	
18	48	181	334	4.3	48	12.4	18	23.0	17.3	
19	49	184	329	4.3	49	12.3	19	22.8	17.8	
20	50	187	324	4.2	50	12.1	20	22.7	18.3	
平均	387				14.1		17.8		15.0	15.7
合計	7,732				100					
NPP向上率					6.4%					

土地改変時の被害係数

NPPp-NPPb (t /ha/年)	NPPp-NPPa (t /ha/年)	R T bp 図3-4 (年)	R T ap 式(3-8) (年)	DF_PPI(trans) 式(3-1) (kg/m ²)
1.6	0.7	40	37	-1.9

付表 3-4 アカマツ林手入効果の被害係数算定に必要な NPP（シナリオ 2a）

経過 (年)	施業面積(間伐)				NPP				
	現存量 (t/ha)		面積 (ha/年)	実施率 (%)	放置部 (t/ha/年)		間伐部 (t/ha/年)	間伐部+放置部 (t/ha/年)	潜在NPP (t/ha/年)
	式(3-2)		式(3-4)	式(3-5)	図3-5		式(3-6)	式(3-7)	図3-4
	林齡 (年)				林齡 (年)	NPPb	1回目 2回目	NPPa	NPPp
1	41	161	1,255	5.8	41	14.1	15.7	14.2	15.7
2	42	164	1,232	5.7	42	13.8	15.4	14.0	
3	43	167	1,210	5.6	43	13.6	15.2	13.9	
4	44	170	1,189	5.5	44	13.4	14.9	13.8	
5	45	173	1,168	5.4	45	13.2	14.7	13.7	
6	46	175	1,149	5.3	46	13.0	14.5	13.7	
7	47	178	1,131	5.2	47	12.8	14.3	13.6	
8	48	181	1,113	5.1	48	12.6	14.1	13.6	
9	49	184	1,096	5.1	49	12.4	13.8	13.5	
10	50	187	1,080	5.0	50	12.3	13.7	13.5	
11	51	189	1,064	4.9	51	12.1	15.0	13.6	
12	52	192	1,049	4.8	52	11.9	14.8	13.7	
13	53	195	1,035	4.8	53	11.8	14.6	13.7	
14	54	197	1,021	4.7	54	11.6	14.4	13.8	
15	55	200	1,008	4.7	55	11.5	14.3	13.9	
16	56	203	995	4.6	56	11.3	14.1	14.0	
17	57	205	983	4.5	57	11.2	13.9	14.1	
18	58	208	971	4.5	58	11.1	13.8	14.2	
19	59	210	959	4.4	59	11.0	13.6	14.3	
20	60	213	948	4.4	60	10.8	13.5	14.4	
平均	1,083				12.3		14.4	13.9	15.7
合計	21,655 100								
NPP向上率					12.9%				

土地改変時の被害係数

NPPp-NPPb (t /ha/年)	NPPp-NPPa (t /ha/年)	R T bp 図3-4 (年)	R T ap 式(3-8) (年)	DF_PPI(trans) 式(3-1) (kg/m ²)
3.4	1.8	40	35	-3.7

付表 3-5 アカマツ林手入効果の被害係数算定に必要な NPP (シナリオ 2b)

経過 (年)	施業面積(主伐)				NPP					
	現存量 (t/ha)		面積 (ha/年)	実施率 (%)	放置部 (t/ha/年)		主伐部 (t/ha/年)		主伐部+放置部 (t/ha/年)	潜在NPP (t/ha/年)
	式(3-2)		式(3-9)	式(3-5)	図3-5		図3-4		式(3-7)	図3-4
	林齡 (年)				林齡 (年)	NPPb	林齡 (年)		NPPa	NPPp
1	41	161	377	5.8	41	14.1	1	3.2	13.4	15.7
2	42	164	370	5.7	42	13.8	2	6.1	12.8	
3	43	167	363	5.6	43	13.6	3	8.7	12.3	
4	44	170	357	5.5	44	13.4	4	11.0	12.0	
5	45	173	351	5.4	45	13.2	5	13.1	11.9	
6	46	175	345	5.3	46	13.0	6	14.9	11.9	
7	47	178	339	5.2	47	12.8	7	16.5	12.0	
8	48	181	334	5.1	48	12.6	8	17.9	12.2	
9	49	184	329	5.1	49	12.4	9	19.1	12.5	
10	50	187	324	5.0	50	12.3	10	20.1	12.8	
11	51	189	319	4.9	51	12.1	11	20.9	13.3	
12	52	192	315	4.8	52	11.9	12	21.6	13.7	
13	53	195	311	4.8	53	11.8	13	22.1	14.2	
14	54	197	306	4.7	54	11.6	14	22.5	14.8	
15	55	200	302	4.7	55	11.5	15	22.8	15.3	
16	56	203	298	4.6	56	11.3	16	22.9	15.9	
17	57	205	295	4.5	57	11.2	17	23.0	16.5	
18	58	208	291	4.5	58	11.1	18	23.0	17.1	
19	59	210	288	4.4	59	11.0	19	22.8	17.6	
20	60	213	284	4.4	60	10.8	20	22.7	18.2	
平均	325				12.3		17.8		14.0	15.7
合計	6,497				100					
NPP向上率					14.2%					

土地改変時の被害係数

NPPp-NPPb (t /ha/年)	NPPp-NPPa (t /ha/年)	R T bp 図3-4 (年)	R T ap 式(3-8) (年)	DF_PPI(trans) 式(3-1) (kg/m ²)
3.4	1.7	40	34	-4.0

付表 3-6 アカマツ林手入効果の被害係数算定に必要な NPP（シナリオ 3a）

経過 (年)	施業面積(間伐)				NPP					
	現存量 (t/ha)		面積 (ha/年)	実施率 (%)	放置部 (t/ha/年)		間伐部 (t/ha/年)		間伐部+放置部 (t/ha/年)	潜在NPP (t/ha/年)
	式(3-2)		式(3-4)	式(3-5)	図3-5		式(3-6)		式(3-7)	図3-4
	林齡 (年)				林齡 (年)	NPPb	1回目	2回目	NPPa	NPPp
1	51	189	1,064	5.6	51	11.9	13.3		12.0	15.7
2	52	192	1,049	5.5	52	11.8	13.1		11.9	
3	53	195	1,035	5.5	53	11.6	13.0		11.9	
4	54	197	1,021	5.4	54	11.5	12.8		11.8	
5	55	200	1,008	5.3	55	11.3	12.6		11.8	
6	56	203	995	5.2	56	11.2	12.5		11.8	
7	57	205	983	5.2	57	11.1	12.3		11.7	
8	58	208	971	5.1	58	11.0	12.2		11.7	
9	59	210	959	5.1	59	10.8	12.1		11.7	
10	60	213	948	5.0	60	10.7	12.0		11.7	
11	61	215	937	4.9	61	10.6	11.8		11.7	
12	62	218	927	4.9	62	10.5	11.7		11.7	
13	63	220	916	4.8	63	10.4	11.6		11.7	
14	64	222	907	4.8	64	10.3	11.5		11.7	
15	65	225	897	4.7	65	10.2		12.7	11.8	
16	66	227	888	4.7	66	10.1		12.6	11.9	
17	67	229	879	4.6	67	10.0		12.5	12.0	
18	68	232	870	4.6	68	10.0		12.4	12.1	
19	69	234	862	4.5	69	9.9		12.3	12.2	
20	70	236	854	4.5	70	9.8		12.2	12.3	
平均	948					10.7	12.4		11.9	15.7
合計	18,968				100					
NPP向上率					10.5%					

土地改変時の被害係数

NPPp-NPPb (t /ha/年)	NPPp-NPPa (t /ha/年)	R T bp 図3-4 (年)	R T ap 式(3-8) (年)	DF_PPI(trans) 式(3-1) (kg/m ²)
4.9	3.8	40	36	-3.1

付表 3-7 アカマツ林手入効果の被害係数算定に必要な NPP（シナリオ 3b）

経過 (年)	施業面積(主伐)				NPP						
	現存量 (t/ha)		面積 (ha/年)	実施率 (%)	放置部 (t/ha/年)		主伐部 (t/ha/年)		主伐部+放置部 (t/ha/年)	潜在NPP (t/ha/年)	
	式(3-2)		式(3-9)	式(3-5)	図3-5		図3-4		式(3-7)	図3-4	
	林齡 (年)				林齡 (年)	NPPb	林齡 (年)		NPPa	NPPp	
1	51	189	319	5.6	51	11.9	1	3.2	11.4	15.7	
2	52	192	315	5.5	52	11.8	2	6.1	11.0		
3	53	195	311	5.5	53	11.6	3	8.7	10.7		
4	54	197	306	5.4	54	11.5	4	11.0	10.6		
5	55	200	302	5.3	55	11.3	5	13.1	10.6		
6	56	203	298	5.2	56	11.2	6	14.9	10.7		
7	57	205	295	5.2	57	11.1	7	16.5	10.9		
8	58	208	291	5.1	58	11.0	8	17.9	11.2		
9	59	210	288	5.1	59	10.8	9	19.1	11.6		
10	60	213	284	5.0	60	10.7	10	20.1	12.1		
11	61	215	281	4.9	61	10.6	11	20.9	12.6		
12	62	218	278	4.9	62	10.5	12	21.6	13.1		
13	63	220	275	4.8	63	10.4	13	22.1	13.7		
14	64	222	272	4.8	64	10.3	14	22.5	14.3		
15	65	225	269	4.7	65	10.2	15	22.8	14.9		
16	66	227	266	4.7	66	10.1	16	22.9	15.6		
17	67	229	264	4.6	67	10.0	17	23.0	16.2		
18	68	232	261	4.6	68	10.0	18	23.0	16.9		
19	69	234	259	4.5	69	9.9	19	22.8	17.5		
20	70	236	256	4.5	70	9.8	20	22.7	18.1		
平均	285				10.7		17.8		13.2	15.7	
合計	5,691				100						
NPP向上率					22.7%						

土地改変時の被害係数

NPPp-NPPb (t /ha/年)	NPPp-NPPa (t /ha/年)	R T bp 図3-4 (年)	R T ap 式(3-8) (年)	DF_PPI(trans) 式(3-1) (kg/m ²)
4.9	2.5	40	31	-6.1

付表 3-8 アカマツ林手入効果の被害係数算定に必要な NPP（シナリオ 4a）

経過 (年)	施業面積(間伐)				NPP					
	現存量 (t/ha)		面積 (ha/年)	実施率 (%)	放置部 (t/ha/年)		施業部 (t/ha/年)		間伐&主伐+放置部 (t/ha/年)	潜在NPP (t/ha/年)
	式(3-2)		式(3-4)	式(3-5)	図3-5		式(3-6)		式(3-7)	図3-4
	林齢 (年)				林齢 (年)	NPPb	間伐	主伐	NPPa	NPPp
1	66	227	888	6.8	66	10.1	11.3		10.2	15.7
2	67	229	879	6.7	67	10.0	11.2		10.2	
3	68	232	870	6.7	68	10.0	11.1		10.2	
4	69	234	862	6.6	69	9.9	11.0		10.2	
5	70	236	854	6.5	70	9.8	10.9		10.2	
6	71	238	846	6.5	71	9.7	10.9		10.3	
7	72	241	838	6.4	72	9.7	10.8		10.3	
8	73	243	830	6.3	73	9.6	10.7		10.3	
9	74	245	823	6.3	74	9.5	10.6		10.4	
10	75	247	816	6.2	75	9.5	10.6		10.4	
11	76	249	809	6.2	76	9.4	10.5		10.5	
12	77	251	802	6.1	77	9.4	10.5		10.5	
13	78	253	796	6.1	78	9.3	10.4		10.6	
14	79	255	789	6.0	79	9.3	10.3		10.6	
15	80	258	235	1.8	80	9.2		3.2	10.1	
16	81	260	233	1.8	81	9.2		6.1	9.8	
17	82	262	231	1.8	82	9.2		8.7	9.7	
18	83	264	229	1.8	83	9.1		11.0	9.7	
19	84	266	228	1.7	84	9.1		13.1	9.9	
20	85	268	226	1.7	85	9.0		14.9	10.2	
平均	654				9.5		10.4		10.2	15.7
合計	13,083				100					
NPP向上率					7.4%					

土地改変時の被害係数

NPPp-NPPb (t /ha/年)	NPPp-NPPa (t /ha/年)	R T bp 図3-4 (年)	R T ap 式(3-8) (年)	DF_PPI(trans) 式(3-1) (kg/m ²)
6.2	5.5	40	37	-2.2

付表 3-9 アカマツ林手入効果の被害係数算定に必要な NPP（シナリオ 4b）

経過 (年)	施業面積(主伐)				NPP						
	現存量 (t/ha)		面積 (ha/年)	実施率 (%)	放置部 (t/ha/年)		主伐部 (t/ha/年)		主伐部+放置部 (t/ha/年)	潜在NPP (t/ha/年)	
	式(3-2)		式(3-9)	式(3-5)	図3-5		図3-4		式(3-7)	図3-4	
	林齡 (年)				林齡 (年)	NPPb	林齡 (年)		NPPa	NPPp	
1	66	227	266	5.4	66	10.1	1	3.2	9.8	15.7	
2	67	229	264	5.4	67	10.0	2	6.1	9.5		
3	68	232	261	5.3	68	10.0	3	8.7	9.3		
4	69	234	259	5.3	69	9.9	4	11.0	9.3		
5	70	236	256	5.2	70	9.8	5	13.1	9.5		
6	71	238	254	5.2	71	9.7	6	14.9	9.7		
7	72	241	251	5.1	72	9.7	7	16.5	10.0		
8	73	243	249	5.1	73	9.6	8	17.9	10.4		
9	74	245	247	5.0	74	9.5	9	19.1	10.9		
10	75	247	245	5.0	75	9.5	10	20.1	11.4		
11	76	249	243	5.0	76	9.4	11	20.9	12.0		
12	77	251	241	4.9	77	9.4	12	21.6	12.6		
13	78	253	239	4.9	78	9.3	13	22.1	13.3		
14	79	255	237	4.8	79	9.3	14	22.5	13.9		
15	80	258	235	4.8	80	9.2	15	22.8	14.6		
16	81	260	233	4.8	81	9.2	16	22.9	15.3		
17	82	262	231	4.7	82	9.2	17	23.0	16.0		
18	83	264	229	4.7	83	9.1	18	23.0	16.7		
19	84	266	228	4.7	84	9.1	19	22.8	17.4		
20	85	268	226	4.6	85	9.0	20	22.7	18.0		
平均	245				9.5		17.8		12.5	15.7	
合計	4,893				100						
NPP向上率					31.3%						

土地改変時の被害係数

NPPp-NPPb (t /ha/年)	NPPp-NPPa (t /ha/年)	R T bp 図3-4 (年)	R T ap 式(3-8) (年)	DF_PPI(trans) 式(3-1) (kg/m ²)
6.2	3.2	40	27	-8.0

第4章 都市ビル内変電設備の火災影響評価

4.1 はじめに

第2章と第3章では電力システムの設置環境に関して土地利用の影響と、人工林を活用することの波及効果について定量化を行い、その影響や効果が無視できないレベルであることを示した。一方、電力システムの設置環境として、機器からの出火による火災影響も存在する。防火対策が施されているわが国においても、東日本大震災では、変電設備の出火が2件確認されている[16]。火災が発生すると、復旧に時間がかかるため、その影響は大きいことが想定される。特に、社会インフラ機能が集中する都市部に設置された変電設備の場合、その影響は広範囲に及ぶことが容易に想定できる。特に、海外では電力事業者は経営におけるリスクとしてとらえておく必要がある。

変電設備の火災要因として変圧器故障が想定される。その理由は絶縁媒体として油を使用しているためである。一方、近年、SF₆ガス絶縁技術の進歩により油を用いない大容量のガス絶縁変圧器（Gas-Insulated Transformer: GIT）が開発されている[139]。GITは従来の油入り変圧器（Oil-Immersed Transformer: OIT）に比べて、絶縁油を使用しないため火災影響がないが、SF₆ガスが温室効果ガスであるため、地球温暖化影響が懸念される。変圧器の故障発生影響やその管理方法についてはこれまでも分析や検討が行われている[140],[141]。しかし、火災の影響と温暖化影響のトレードオフの関係を分析した事例はない。

本章の目的は、火災影響と温暖化影響のトレードオフの関係を明らかにするために、火災影響を故障発生時の損害リスクとしてとらえ、内部コスト化されたデータに基づいてトータルダメージコスト（Total Damage Cost: TDC）として定量化する火災リスク評価手法を開発し、OITとGITの評価をから温暖化影響と火災影響のトレードオフの関係を明らかにすることである。GITのニーズは都市部に多いことから、本章の分析は都市ビル内に変圧器が設置される条件とする。

TDCの算出方法はスウェーデンのChalmers工科大学と検討した手法[142]を用いる。同手法では、TDCは変電所における設備故障による直接コストと間接コストから算出する。直接コストとは設備本体や周辺設備の修復コスト、停電により生じるサービス停止コストなどである。間接コストとは温暖化影響を示す環境ダメージコストである。

4.2 方法

4.2.1 内部コストの算出方法

内部コストとして、都市部のビルに設置された変圧器の火災影響と温暖化影響を算出する。火災影響の評価では、損害賠償費用を用いて社会的ダメージコスト (Social Damage Cost: SDC) を算出する。一方、温暖化影響の評価では、CO₂ 排出量の取引額を用いて環境ダメージコスト (Environmental Damage Cost: EDC) を算出する。各々の評価結果は統合して TDC とする。表 4-1 はそれらの関係を示した表である。SDC は、RISK1:建物補償 (設置ビル、隣接ビル)、RISK2:人的補償 (死亡、重傷、軽傷、避難)、RISK3:電力供給停止補償、RISK4:テナント業務停止補償からなり、EDC はエネルギー損失と SF₆ ガスリークを対象とする。ここで、テナント業務停止補償には労務費が含まれる。また、電力供給停止補償とテナント業務停止補償の対策として無停電電源装置などの設置が想定されるが、火災発生時の無停電電源装置の機能継続を考慮したシナリオ設定は不確実性が高いと考え、評価対象外とした。

表 4-1 評価範囲

評価手法	評価指標		内訳
火災影響評価	トータルダメージコスト (TDC)	社会的ダメージコスト (SDC)	RISK ₁ :建屋損害補償(設置ビル、隣接ビル)
			RISK ₂ :人災補償(死亡、重傷、軽傷、避難)
			RISK ₃ :電力供給停止補償 ((20min,4h,12h×7days)
			RISK ₄ :入居テナント業務停止補償 (20min,4h,12h×7days)
温暖化影響評価		環境ダメージコスト (EDC)	CO ₂ 排出影響(エネルギー損失、SF ₆ ガスリーク)

本論文の算出対象は TDC であるが、初期コスト (INC)、運転コスト (OPC) を加えることで、(4-1)式のとおりライフサイクルコスト (LCC) となる。単位は US\$とする。

$$LCC = INC + OPC + TDC \quad (4-1)$$

TDC は社会的ダメージコスト (SDC) と環境ダメージコスト (EDC) により(4-2)式で求める。

$$TDC = SDC + EDC \quad (4-2)$$

ここで、SDC は(4-3)式、EDC は(4-4)式で求める。

$$SDC = \sum_{RISK_n} (CE_{RISK_n} \times FR_{RISK_n}) \quad (4-3)$$

ここで、

CE_{RISK_n} : $RISK_n$ による補償費用 (US\$)

FR_{RISK_n} : $RISK_n$ の発生率 (times)

$RISK_n$: 評価対象リスク ($n=1\sim4$)

$$EDC = TP \times (EF \times EC + GWP \times SE) \quad (4-4)$$

ここで、

TP: CO₂ 排出量取引価格 (US\$/t-CO₂)

EF: CO₂ 排出係数 (t-CO₂/kWh)

EC: 電力消費 (損失) (kWh)

GWP: SF₆ ガスの地球温暖化係数

SE: SF₆ ガス排出量 (t-SF₆)

4.2.2 条件設定

評価条件を表 4-2 に、運転段階の評価項目を表 4-3 に示す。評価対象は送電用変圧器本体とする。

表 4-2 基本条件

定格	132kV-60MVA級	
台数	1	
運転期間	30 年	
負荷率	50 %	
設置場所	商業ビル(床面積 55,000m ²)	
隣接場所	商業ビル(床面積 10,000m ²)	
為替	円→US\$(US\$/円)	1/100
	EUR→US\$(US\$/EUR)	1.3

表 4-3 運転段階の評価項目

	温暖化影響評価	火災影響評価
SF ₆ ガスリーク	○	
エネルギー損失	○	
各種補償費用		○

4.3 評価結果

4.3.1 内部コストの算出

(1) 温暖化影響

温暖化影響の評価データを表 4-4 に示す。変圧器の運転時電力損失と、SF₆ ガスリーク量は電機メーカーのヒアリング値である。CO₂ 排出量取引価格は 500~1,000 円/t-CO₂ 程度まで下落しているが、その影響が過小評価されることを避けるため、3,000 円/t-CO₂ と設定した。CO₂ 排出係数は電事連が公表した 2005 年国内実績値[143]とし、SF₆ ガスの地球温暖化係数はわが国の公表値[126]とした。CO₂ 排出係数については震災後で原子力発電が停止する影響による上昇がみられるが、2011 年度の調整後の排出係数は東京電力 0.000463t-CO₂/kWh、関西電力 0.000414t-CO₂/kWh、中部電力 0.000469t-CO₂/kWh であり [138]、3 電力平均が 0.000448t-CO₂/kWh と 2005 年実績値に対して 5%の差に留まったため、2005 年実績値のままとした。

表 4-4 温暖化影響の評価データ

設備	運用時電力損失(30年) (MWh)	OIT	GIT
		29,742	29,744
	計算条件	温度; 75°C, 負荷率; 50%	
	無負荷損 (kW)	33	42
	負荷損 (kW)	80	71
	合計 (kW)	113	113
	SF ₆ ガスリーク (g) (0.1%/年)	—	17,100
その他	CO ₂ 取引価格 (円/t-CO ₂)	3,000	
	CO ₂ 排出係数 (t-CO ₂ /kWh) ^{*1)}	0.000425	
	SF ₆ 地球温暖化係数 ^{*2)}	23,900	

*1) 参考文献[143]

*2) 参考文献[126]

(2) 火災影響

火災影響の評価では、様々な補償費用を評価する補償費用評価と、OIT と GIT の故障から火災発生影響を定量化する故障発生度を設定する。ここで、補償費用と発生度の算出にあたっては、透明性・客観性を確保するため、公開情報を用いる。

(a) 補償費用条件の設定

(a-1) 建屋損害

建屋損害は設置ビルの損傷面積にエリアコストを乗算することにより求めた。損傷面積は設置ビルと隣接ビルともに全体面積の 1/3 と仮定した。設置ビルと隣接ビルの床面積は表 4-2 に示したよう前者が 55,000m²、後者が 10,000m²で、為替が 100US\$/円である。エリアコストは総務省「2000 年産業連関（I/O）表・部門別品目別国内生産額表」の「鉄骨鉄筋コンクリート造」データである m² 当り生産額を引用し 276,028 円/m²とした[144]。

(a-2) 人災

人災の補償費用は S. Hirschberg らの調査データ[68]である死亡が 1,358,500US\$/人、重傷が 91,000US\$/人、避難が 187US\$/人を用いて各条件で 1 名を補償すると設定した。軽傷の損害費用は重傷の 1/2 と仮定した。

(a-3) 電力供給停止

電力供給補償費用の策定にあたり、既存の停電補償費用を調査した。その結果を表 4-5 に示す。停電時の補償費に関する調査として、2006 年に開催された KTH 国際会議における提示値[145]、および IMIA（International Association of Engineering Insurers）が 1997 年に調査した故障 1 回あたりの平均的な損失値[146]がある。両者の発生費用は比較的近い値であり、ここでは停電期間を設定できる KTH 国際会議のデータを用いることとした。停電補償の対象となる容量は設備容量と負荷率を乗算することとし、両者は表 4-2 に記載した定格と負荷率を用いた。

表 4-5 停電補償費用の調査結果

停電期間	発生費用 (US\$/回)	補足説明	備考
20分	206,640	標準的停電損失: 19.68US\$/kWh KTH国際会議*1)	採用
4時間	2,379,680		
1週間	52,073,280		
変圧器故障1回の平均	566,370	故障1回あたりの平均損失: 8,990US\$/MVA IMIA調査*2)	

*1) 参考文献[145]

*2) 参考文献[146]

(a-4) 入居テナント業務停止

入居テナント業務停止による補償費用については、カリフォルニア大学の研究データ[69]を用いて評価条件を策定した。表 4-6 は設定した評価条件を示す。変圧器の設置ビルには、Credit card

表 4-6 業務停止の補償費用単価設定

設置ビルの設定シナリオ	UCE (US\$/h)	UCEの内訳*1)
6種の多様なサービステナントが入居	2,883,000	1.Credit card authorization; 2,600,000US\$/h 2.Home shopping channel; 113,000US\$/h 3.Catalog sales center; 90,000US\$/h 4.Cellular service activation; 41,000US\$/h 5.On-line network fees; 25,000US\$/h 6.ATM service fees; 14,000US\$/h

*1) 参考文献[69]

authorization、Home shopping channel、Catalog sales center、Cellular service activation、On-line network fees、ATM service fees の 6 種のテナントが入居しているものとし、それらのテナントは同時に業務停止になると想定。補償費用単価（Unit of compensation expense: UCE）を 2,883,000US\$/h と求めた。業務停止による補償費用は UCE に業停止時間を乗算することにより求めることができる。

上述した(a-1)建屋損害、(a-2)人災、(a-3)電力供給停止、(a-4)入居テナント停止の各補償費用を用いて火災影響評価における補償費用を表 4-7 のとおり構築した。

表 4-7 補償費用の設定

補償対象	No.	補償費用		備考
		分析項目	(US\$)	
建屋損害	A _H	設置ビル損傷	50,000,000	276,028円/m ² *1) × 55,000m ² × 100US\$/円 × 1/3 *2)
	B _H	隣接ビル損傷	9,000,000	
人災	C _H	死亡 1名あたり	1,358,500	*3) 軽傷は重傷の1/2と仮定
	D _H	重傷 1名あたり	91,000	
	E _H	軽傷 1名あたり	45,500	
	F _H	避難 1名あたり	187	
電力供給停止	G _H	停電期間 20min	206,640	19.68US\$/kWh *4) × 設備容量(kVA) × 負荷率 × 停止期間(h)
	H _H	停電期間 4h	2,479,680	
	I _H	停電期間 12h-7days	52,073,280	
入居テナント 業務停止	J _H	停電期間 20min	961,000	2,883,000US\$/h *5) × 停止期間(h)
	K _H	停電期間 4h	11,532,000	
	L _H	停電期間 12h-7days	242,172,000	

*1) 参考文献[144]

*2) ビルの損傷は全体面積の 1/3 と仮定

*3) 参考文献[68]

*4) 参考文献[145]

*5) 表 4-6 から引用

(b) 故障発生条件の設定

(a-1)建屋損害、(a-2)人災、(a-3)電力供給停止、(a-4)入居テナント業務停止の各条件に対応する故障発生度を設定する。まず、変圧器の故障発生度に関する調査を行った。その結果、William. H らによる HSB（Hartford Steam Boiler Inspection and Insurance Co）の分析[147]、BERR（Department for Business, Enterprise and Regulatory Reform）の分析[148]、および CIRGE の分析[149]が確認された。そこで、変圧器の運転期間である 30 年間の故障発生度を表 4-8 のとおり算定した。この結果の比較は図 4-1 となり、ここでは中間値である HSB を用いることとし

表 4-8 OIT 故障発生度の調査結果

文献名	発生度(回)	備考
HSB *1)	0.0259	故障発生確率式 $f(t) = 0.005 + 0.0001e^{0.1780t}$ を引用 (t=30年)
BERR *2)	0.0200	変圧器故障率が平均2%との記述を引用
CIGRE *3)	0.0401	20年間のOIT故障データから故障率の算定式 $f(t) = 0.0008t + 0.0161$ を引用 (t=30年)

*1) 参考文献[147]

*2) 参考文献[148]

*3) 参考文献[149]

た。

変圧器に関する故障発生度を変圧器故障、修理不能な故障、修理可能な故障に分けて表 4-9 のとおり設定した。ここで、変圧器故障 X は表 4-8 に示した HSB の値であり、OIT と GIT は共通とした。修理不能な故障については、U.S. Department of the Interior (USBR) において、産業用 OIT が 5 回に 1 回は火災を発生する旨の記述[150]を引用し X に 0.2 を乗算した。一方、L.Chan らの調査結果[151]を用いて GIT の故障発生度は 20 年間で $0.0002(=1/(4635+63))$ と求めた。GIT のデータが 20 年であるため、OIT も 20 年間の故障発生度を HSB 算出式[147]に基づいて 0.0085 と算定した。そして、変圧器の故障発生度 X に $0.0002/0.0085$ を乗算して GIT の修理不能な故障発生度とした。修理可能な故障の発生度は変圧器故障発生度から修理不能な故障発生度を差し引いて求めた。

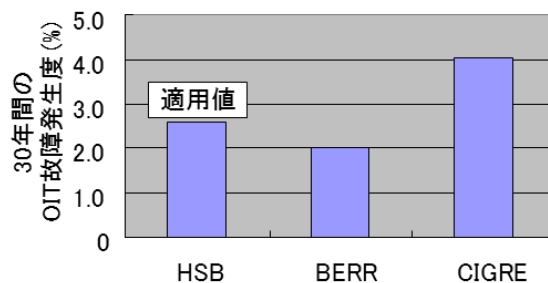


図 4-1 故障発生度の比較検証

表 4-9 変圧器に関する故障発生度の設定

	No.	発生度		発生度設定の考え方
		対象	(回)	
変圧器故障	X	OIT GIT	0.0259	*1)
修理不能な故障	Yo	OIT	0.0052	$X \times 0.2^{*2)}$
	Yg	GIT	0.0006	$0.0002 \times 0.0259 / 0.0085$ “0.0002(=1/(4635+63))”は20年間のGIT故障発生度 ^{*3)} “0.0259”は上記X “0.0085”は20年間のOITの故障発生度 ^{*4)}
修理可能な故障	Zo	OIT	0.0207	X-Yo
	Zg	GIT	0.0252	X-Yg

*1) 表 4-8 参照

*2) 参考文献[150]

*3) 参考文献[151]

*4) $0.0085=0.005+0.0001e^{0.178T}$ (T=20 年) [147]

表 4-9 に示した Yo、Yg、Zo、Zg を用いて算出した(a-1)建屋損害、(a-2)人災、(a-3)電力供給停止、(a-4)入居テナント業務停止の各条件に対応する故障発生度を表 4-10 に示す。

最初に建屋損害について述べる。設置ビル損傷の発生度は OIT では修理不能な故障発生度の 50%、GIT は不燃特性のため発生度はゼロとそれぞれ設定した。隣接ビル損傷の発生度は OIT では修理不能な故障発生度の 5%、GIT は不燃特性のため発生度はゼロとそれぞれ設定した。

人災について、死亡の発生度は OIT、GIT とともに修理不能な故障発生度の 20%で被災者は 1 名とした。重傷の発生度は OIT、GIT とともに修理不能な故障発生度の 40%で被災者は 3 名、軽傷の発生度は OIT、GIT とともに修理不能な故障発生度の 50%で被災者は 10 名とした。避難の発生度は OIT、GIT とともに修理不能な故障発生度に同じとし、被災者は 100 名とした。

表 4-10 補償対象項目に対する故障発生度設定

補償対象	No.	分析項目	発生度		計算式	発生度設定の考え方
			対象	(回)		
建屋損害	A _L	設置ビル損傷	OIT	0.0026	$Y_o \times 0.5$	修理不能な故障発生度の50%
			GIT	0		不燃特性のため発生度はゼロ
	B _L	隣接ビル損傷	OIT	0.0003	$Y_o \times 0.05$	修理不能な故障発生度の5%
			GIT	0		不燃特性のため発生度はゼロ
人災	C _L	死亡 1名	OIT	0.001	$Y_o \times 0.2 \times 1$	修理不能な故障発生度の20%
			GIT	0.0001	$Y_g \times 0.2 \times 1$	被災者1名
	D _L	重傷 3名	OIT	0.0062	$Y_o \times 0.4 \times 3$	修理不能な故障発生度の40%
			GIT	0.0008	$Y_g \times 0.4 \times 3$	被災者3名
	E _L	軽傷 10名	OIT	0.0259	$Y_o \times 0.5 \times 10$	修理不能な故障発生度の50%
			GIT	0.0032	$Y_g \times 0.5 \times 10$	被災者10名
	F _L	避難 100名	OIT	0.517	$Y_o \times 1.0 \times 100$	修理不能な故障発生度に同じ
			GIT	0.0646	$Y_g \times 1.0 \times 100$	被災者100名
電力供給停止	G _L	停電期間 20min	OIT	0.0103	$Z_o \times 0.5$	修理可能な故障発生度の50%
			GIT	0.0126	$Z_g \times 0.5$	
	H _L	停電期間 4h	OIT	0.0103	$Z_o \times 0.5$	修理可能な故障発生度の50%
			GIT	0.0126	$Z_g \times 0.5$	
	I _L	停電期間 12h-7days	OIT	0.0052	$Y_o \times 1.0$	修理不能な故障発生度に同じ
			GIT	0.0006	$Y_g \times 1.0$	
入居テナント業務停止	J _L	停電期間 20min	OIT	0.0103	$Z_o \times 0.5$	G _L と同じ
			GIT	0.0126	$Z_g \times 0.5$	
	K _L	停電期間 4h	OIT	0.0103	$Z_o \times 0.5$	H _L と同じ
			GIT	0.0126	$Z_g \times 0.5$	
	L _L	停電期間 12h-7days	OIT	0.0052	$Y_o \times 1.0$	I _L と同じ
			GIT	0.0006	$Y_g \times 1.0$	

電力供給停止と入居テナント業務停止について、停電期間 20min の発生度は OIT、GIT とともに修理可能な故障発生度の 50%、停電期間 4h の発生度は OIT、GIT とともに修理可能な故障発生度の 50%とした。停電期間 12h-7days の発生度は OIT、GIT とともに修理不能な故障発生度に同じとした。

表 4-7 において算出した補償費用と表 4-10 において算出した故障発生度を用いて、(a)建屋損害、(b)人災、(c)電力供給停止、(d)業務停止の各条件に対応する内部コスト分析データを表 4-11 のとおり作成した。

表 4-11 内部コスト分析データ

補償対象	分析項目	補償費用		故障発生度		
		No	(US\$)	No.	OIT	GIT
建屋損害(保険険費用)	設置ビル損傷	A _H	50,000,000	A _L	0.0026	0
	隣接ビル損傷	B _H	9,000,000	B _L	0.0003	0
人災(保険費用)	死亡 1名	C _H	1,358,500	C _L	0.001	0.0001
	重傷 3名	D _H	91,000	D _L	0.0062	0.0008
	軽傷 10名	E _H	45,500	E _L	0.0259	0.0032
	避難 100名	F _H	187	F _L	0.517	0.0646
電力供給停止	停電期間 20min	G _H	206,640	G _L	0.0103	0.0126
	停電期間 4h	H _H	2,479,680	H _L	0.0103	0.0126
	停電期間 12h*7days	I _H	52,073,280	I _L	0.0052	0.0006
入居テナント業務停止	停電期間 20min	J _H	961,000	J _L	0.0103	0.0126
	停電期間 4h	K _H	11,532,000	K _L	0.0103	0.0126
	停電期間 12h*7days	L _H	242,172,000	L _L	0.0052	0.0006

4.3.2 感度分析に基づく評価

(1) 感度分析とシナリオ設定

表 4-11 の内部コスト分析データによる TDC の算出結果を用いて、主要な 6 つの設定項目に対する感度を分析した。6 つの設定項目とは、故障発生度、設置ビルの補償費用単価、人災（死亡）の補償費用単価、電力供給停止の補償費用単価、テナント事業停止への補償費用単価、SF₆ ガスリークである。感度（sensitivity: SE）とはインプットデータの変化が TDC に与える影響であり、(4-5)式により求めた。

$$SE = \frac{\Delta IR}{\Delta IN} \quad (4-5)$$

$$\Delta IR = \left(\frac{TDC_{GIT}}{TDC_{OIT}} \right)_{After} - \left(\frac{TDC_{GIT}}{TDC_{OIT}} \right)_{Before}$$

$$\Delta IN = \frac{IN_{After} - IN_{Before}}{IN_{Before}} = 10\%$$

ここで、

SE: 感度 (Sensitivity) (%)

IR: 改善率 (Improvement Ratio) (%)

IN: 入力値

TDC: トータルダメージコスト (US\$)

感度分析結果を図 4-2 に示す。図から火災故障発生度と変圧器設置ビル入居テナント種が感度の高い項目となることが分かる。そこで、それらをパラメータとした評価シナリオを表 4-12 と表 4-13 のとおり設定した。

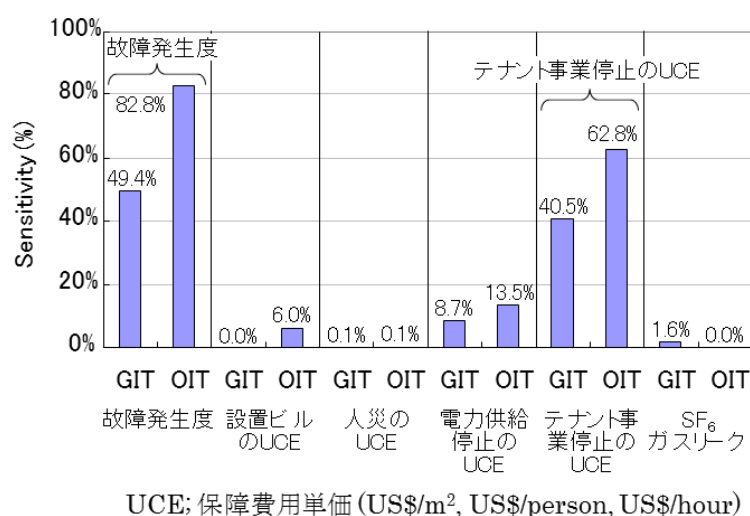


図 4-2 感度分析結果

表 4-12 火災故障発生度に関するシナリオの設定

シナリオ		発生度			備考
		停電期間 20min	停電期間 4h	停電期間 12h-7days	
A	OIT	0.0103 ($Z_o \times 0.5$)	0.0103 ($Z_o \times 0.5$)	0.0052 ($Y_o \times 1.0$)	修理可能な故障の50%は20分以内に停電復旧可能。修理不能な故障は全ての場合に12h-7daysの停電を伴う。*)
	GIT	0.0126 ($Z_g \times 0.5$)	0.0126 ($Z_g \times 0.5$)	0.0006 ($Y_g \times 1.0$)	
B	OIT	0.0165 ($Z_o \times 0.8$)	0.0041 ($Z_o \times 0.2$)	0.0052 ($Y_o \times 1.0$)	修理可能な故障の80%は20分以内に停電復旧可能。他の条件はシナリオAと同じ。
	GIT	0.0202 ($Z_g \times 0.8$)	0.0050 ($Z_g \times 0.2$)	0.0006 ($Y_g \times 1.0$)	
C	OIT	0.0103 ($Z_o \times 0.5$)	0.0129 ($Z_o \times 0.5 + Y_o \times 0.5$)	0.0027 ($Y_o \times 0.5$)	修理不能な故障の50%は4h以内に停電復旧可能。他の条件はシナリオAと同じ。
	GIT	0.0126 ($Z_g \times 0.5$)	0.0129 ($Z_g \times 0.5 + Y_g \times 0.5$)	0.0003 ($Y_g \times 0.5$)	

*1) 表 4-11 と同じ

火災故障発生度に関するシナリオはシナリオ A～C のとおり設定した。シナリオ A は修理可能な変圧器故障の 50%は 20 分以内に停電復旧可能とし、修理不能な故障は全ての場合に 12h-7days の停電を伴うと想定している。表 4-11 と同じ条件である。シナリオ B は修理可能な変圧器故障の 80%は 20 分以内に停電復旧可能とし、シナリオ A に比べ修理可能な故障時の復旧が早い設定とした。他の条件はシナリオ A と同じである。シナリオ C は修理不能な変圧器故障の 50%は 4h 以内に停電復旧可能とし、シナリオ A に比べ修理不能な故障時の復旧が早い設定とした。他の条件はシナリオ A と同じである。

変圧器設置ビル入居テナント種に関するシナリオはシナリオ 1～3 のとおり設定した。各シナ

表 4-13 ビル入居テナント種に関するシナリオの設定

シナリオ	変圧器設置ビル 入居テナント種	UCE (US\$/h)	内訳*)
1	金融機関(証券取引所)のみ	6,450,000	1.Brokerage authorization; 6,450,000US\$/h
2	6 種の多様なサービス企業 (表4-11と同じ)	2,883,000	1.Credit card authorization; 2,600,000US\$/h 2.Home shopping channel; 113,000US\$/h 3.Catalog sales center; 90,000US\$/h 4.Cellular service activation; 41,000US\$/h 5.On-line network fees; 25,000US\$/h 6.ATM service fees; 14,000US\$/h
3	一般サービス企業(10店舗)	1,030,000	以下平均×10店舗 1.Home shopping channel; 113,000US\$/h 2.Catalog sales center; 90,000US\$/h 3.Cellular service activation; 41,000US\$/h 4.On-line network fees; 25,000US\$/h 5.ATM service fees; 14,000US\$/h 6.Ebay; 225,000US\$/h 7.Amazon.com; 180,000US\$/h 8.Package shipping services; 150,000US\$/h 9.Airline reservation center; 89,000US\$/h

*1) 参考文献[69]

リオはカリフォルニア大学が調査した事業者別の業務停止被害額[69]を引用した。シナリオ 1 では入居テナントが金融機関（証券取引所）のみと想定した。シナリオ 2 では入居テナント種がクレジットカード会社からホームショッピングチャンネルまで 6 種の多様なサービス企業で、それらが同時に業務停止になると想定している。表 4-11 と同じ条件である。シナリオ 3 では入居テナントは平均的な一般サービス企業が 10 店舗入居していると想定した。

(2) 改善度の分析

シナリオ A～C、シナリオ 1～3 の全組合せ 9 ケースの TDC 改善度(=TDC_OIT / TDC_GIT)を図 4-3 に示す。ここから、GIT の OIT に対する TDC 改善度は 1.8 から 3.9 とシナリオにより大きく異なる結果となった。変圧器設置ビルのテナントに金融機関（証券取引所）が入居しているシナリオ 1 や、OIT の火災が長時間の事業停止を発生させるシナリオ A や B において、GIT の効果が大きく表れる。

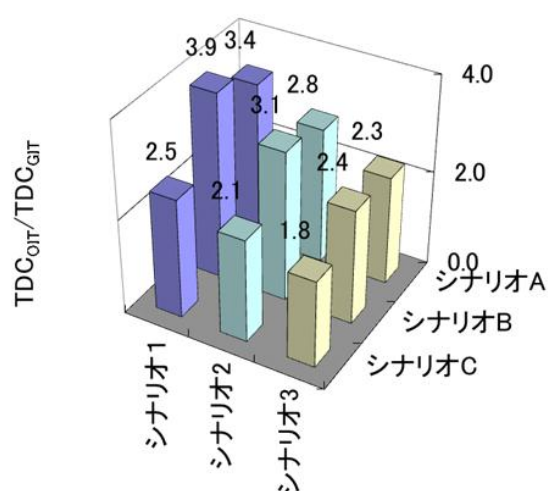


図 4-3 TDC 改善度比較

(3) トータルダメージコスト

図 4-4 は GIT の TDC 改善効果が大きいシナリオ A1 と B1、および GIT の TDC 改善効果が最も少ないシナリオ C3、の評価結果の内訳を示す。TDC は内部コストに相当する。ここから、停電時テナント補償費用の違いが大きいことが分かる。また、GIT の SF₆ ガスリークの影響が小さい。

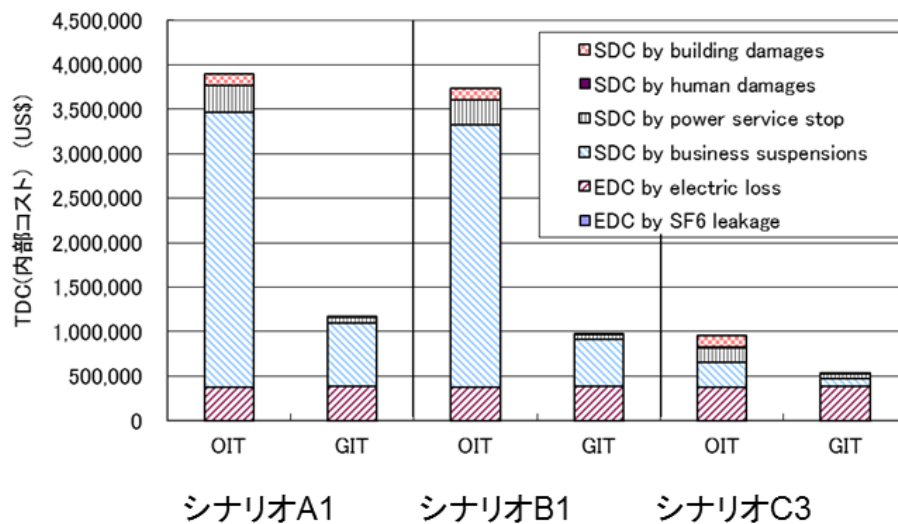


図 4-4 TDC 改善度比較

4.4 まとめ

変圧器故障時の火災影響と温暖化影響のトレードオフの関係を内部コストによって定量化する故障時火災リスク評価手法を開発し、GIT と OIT の評価を行った。火災影響は損害賠償、温暖化影響は CO₂ 排出量取引価格を用い、火災影響には発生度を用いるリスク評価の考えを導入した。

評価条件は 132kV-63MVA 級変圧器を都市ビル内に設置する場合とし、環境影響は TDC として算出した。その結果、変圧器を設置したビルに入っているテナントの営業停止を補償する影響が、GIT の SF₆ ガスリークの影響、送電損失、事故時供給停止補償、人的被害、建物損害などの他の項目に比べ大きく、重要な項目であることが分かった。

火災故障発生度と変圧器設置ビル入居テナント種の条件を変えた評価では、GIT の OIT に対する TDC 改善度は 1.8 倍から 3.9 倍と大きく変わる結果となった。特に、テナントに証券取引所が入居しているケースや、OIT の火災が長時間の事業停止を誘発するケースは火災影響が大きく、GIT の導入効果が顕著である。

本章では、設置場所に起因する影響として変圧器を都市商用ビルに設置する場合、火災による補償リスクの分析を踏まえて、変圧器の絶縁方式を決定することが望ましいことを明らかにした。

第5章 変電設備の設置環境影響総合評価

5.1 はじめに

第2章では温暖化と土地利用影響を LIME2 に基づき定量化する植生別評価手法を開発し、第4章では温暖化と火災影響を内部コストにより定量化する故障時火災リスク評価手法を開発した。これらの手法を用いた評価から、土地利用や火災の影響が温暖化影響に比べて同等以上になるケースがあり、それぞれの評価が必要な条件を提示した。

本章の目的は、温暖化影響に対して、土地利用影響と火災影響のトレードオフの関係が存在する山間部の屋外に変電所を設置する場合を対象に植生別評価手法と故障時火災リスク評価手法を用いて統合評価することである。評価対象は、火災影響があり広い設置面積が必要となる従来型の気中絶縁と油絶縁の機器を設置した変電所と、コンパクトで火災影響がないガス絶縁機器を設置した変電所の比較である。

5.2 方法

5.2.1 評価範囲

(1) LCIA による土地利用影響評価

第2章の土地利用影響を評価する植生別評価手法を用いて LIME2 による評価を行う。評価対象インベントリと保護対象は表 5-1 に示すとおり、表 2-1 からインベントリ「石炭消費」を除外したものである。

表 5-1 評価対象インベントリとインパクトカテゴリ

インベントリ \ 保護対象		人間健康	一次生産	生物多様性	社会資産
CO ₂ 排出		地球温暖化			地球温暖化
土地利用	建物用地		土地占有	土地改変	
	森林→建物用地		土地改変		

(2) 内部コスト分析による火災影響評価

第4章の故障時火災リスク評価手法を用いて、変圧器の火災影響と温暖化影響のTDCを分析する。火災影響は損害賠償費用を用いてSDCとして求め、温暖化影響はCO₂排出量の取引額を用いてEDCとして求める。表5-2は本章の評価範囲を示している。評価対象は、SDCがRISK2: 人的補償（死亡、重傷、軽傷、避難）とRISK3: 停電時電力供給補償、EDCはエネルギー損失、SF₆ガスリークを対象とする。第4章で実施したSDCのRISK1: 建物補償（設置ビル、隣接ビル）とRISK4: 停電時テナント営業損失補償は、山間部の屋外変電所であるため、評価対象外とした。TDCは(4-2)式から(4-4)式により求める。

表 5-2 評価範囲

評価指標		内訳
トータル ダメージ コスト (TDC)	社会的ダメージ コスト (SDC)	RISK ₂ : 人的補償 (死亡、重傷、軽傷、避難)
		RISK ₃ : 停電時電力供給補償 (20min, 4h, 12h × 7days)
	環境ダメージコスト (EDC)	CO ₂ 排出影響 (エネルギー損失、SF ₆ ガスリーク)

注) 第4章で評価したRISK1: 建物補償(設置ビル、隣接ビル)とRISK4: 停電時テナント営業損失補償は、山間部の屋外変電所であるため除外

5.2.2 条件設定

(1) 変電所設備

評価対象設備は1次電圧が145kV級で2次電圧が11kV級のSF₆ガス絶縁変電所と旧型の気中絶縁変電所である。SF₆絶縁変電所はガス絶縁開閉装置(GIS)とガス絶縁変圧器(GIT)からなる。以降GIS-GIT変電所と略す。旧型気中絶縁変電所は気中絶縁開閉装置(AIS)と油入変圧器(OIT)からなる。以降旧AIS-OIT変電所と略す。図5-1にはGIS-GIT変電所と旧AIS-OIT変電所の設置スペースの比較イメージ図を示す。気中絶縁をガス絶縁にすることで設置スペースは大幅に削減できるが、ガス絶縁媒体には地球温暖化ガスであるSF₆ガスを使用する。

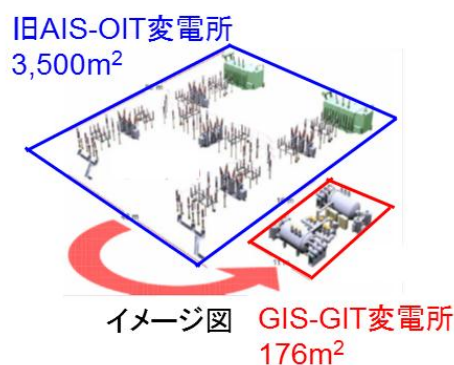
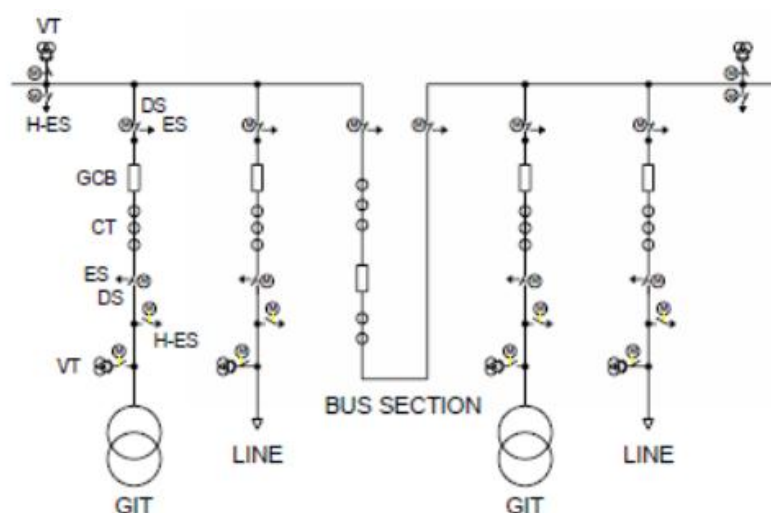


図 5-1 GIS-GIT 変電所と旧 AIS-OIT 変電所の設置スペース

変電所の回線数は図 5-2 の単線結線図に示すとおり送電線 (LINE) 2 回線、変圧器 (BANK) 2 回線、母線区分 (BUS) 1 回線であり、遮断器 (CB)、断路器 (DS)、接地開閉器 (ES)、電流計測器 (CT)、電圧計測器 (VT)、避雷器 (LA)、碍管 (Bg)、ケーブルヘッド (GIS の BANK 回線) からなる。



単線結線図 (GIS-GIT 変電所の例)

図 5-2 評価条件

変電所としての設備共通の評価条件を表 5-3 に示す。運転期間は 30 年、コンクリート耐用年数は 90 年とする。コンクリート耐用年数が運転期間の 3 倍となるため、コンクリートの環境負荷は 1/3 を計上する。設置場所は山間部の屋外変電所とし、隣接場所の類焼は考慮しない。為替は 100 円/US\$、1.3US\$/EUR とする。

表 5-3 変電所共通条件

	設定条件	備考
設備運転期間	30年	
コンクリート耐用年数	90年	耐用年数は設備運転期間の3倍あるため、環境負荷は1/3を計上
設置場所	山間部屋外	隣接場所への火災の類焼はないものとする
為替	100円/US\$	
	1.3US\$/EUR	

各設備の評価条件設定値を表 5-4 に示す。対象設備は LCIA 評価、内部コスト分析ともに図 5-2 の単線結線図に示した変圧器と開閉装置である。開閉装置は CB、DS/ES、CT、VT、LA、架構、Bg、電線からなる。変圧器の定格容量は 180MVA で質量は表に示したとおりである。開

閉装置の定格は送電線回線で 145kV・40kA・3150A とした。GIS と AIS は絶縁油を用いないことから、火災の発生はないものとした。なお、AIS では CT 部分に絶縁油を使う場合があるが、使用量はきわめて少ないことから除外した。変電所の面積は、旧 AIS-OIT 変電所が 3,500m²、GIS-GIT 変電所が 176m² である。変電所の 2 次側設備、本館建屋&装置、引き込み鉄塔は評価対象から除外する。

表 5-4 条件設定値

		設定値		備考
変圧器		OIT	GIT	180MVA変圧器は第4章の60MVA級変圧器モデル3台に相当 質量には絶縁油、SF ₆ ガスを含む
	定格	180MVA×2台		
	質量	221t×2台	215t×2台	
開閉装置		AIS	GIS	LINE×2、BANK×2、BUS×1 開閉装置はCB、DS/ES、CT、VT、LA、架構、Bg、電線からなる
	定格	145kV-40kA-3150A (LIME回線)		
	質量	80 t	28t	
変電所		AIS-OIT	GIS-GIT	2次側設備、本館建屋&装置、引き込み鉄塔は除外
	面積	3,500m ²	176m ²	
	コンクリート量	1,190m ³	210m ³	

(2) システム境界

システム境界を図 5-3 に示す。LCIA の評価対象は点線枠で示した素材、製造、基礎造成、使用の各ステージである。使用時はエネルギー損失と SF₆ ガスリークを対象とする。一方、内部コスト分析の評価対象は一点鎖線で示した使用時のエネルギー損失と SF₆ ガスリーク、および火災影響であり、素材、製造、基礎造成は含まない。また、両評価とも廃棄段階は評価対象から除外した。

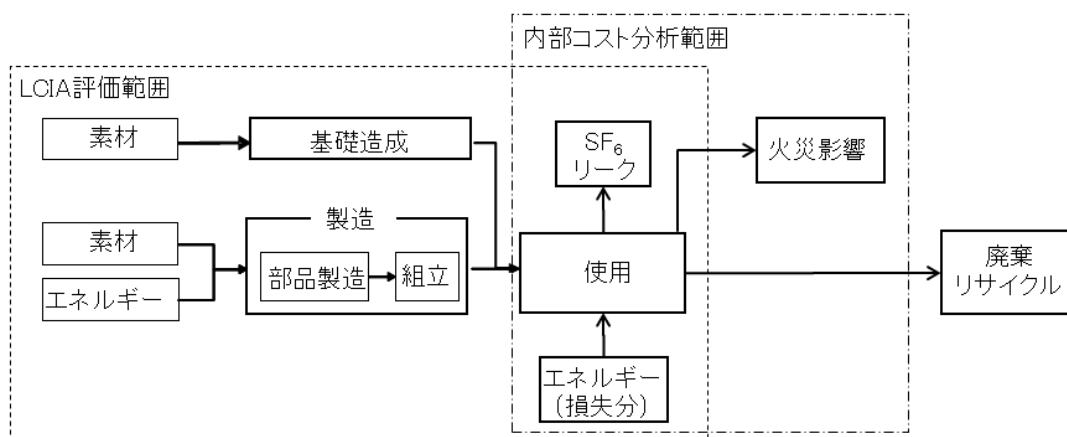


図 5-3 システム境界

(3) 使用時の条件

使用時の条件として設定した変圧器と開閉装置の運転時電力損失と SF₆ガスリーク量を表 5-5 に示す。変圧器は無負荷損と負荷損から損失を求めている。開閉装置の電力損失は接触抵抗値から求めた。負荷率は 50%とし、SF₆ガスリーク量の算出条件は運転時のガスリーク率を 0.05%/年、開放点検時のガスリーク率を 1%/回とし、開放回数は撤去時 1 回のみとした。

表 5-5 使用時の条件設定

			設定値	
変圧器			OIT	GIT
	運用時電力損失(30年)(MWh)		178,178	178,178
	計算条件		温度: 75°C, 負荷率: 50%	
	無負荷損(kW/台)		99	126
	負荷損(kW/台)		240	213
	合計(kW/台)		339	339
	SF ₆ ガスリーク(30年)(kg)		—	250
開閉装置			AIS	GIS
	運用時電力損失(30年)(kWh)		3,125	196
	SF ₆ ガスリーク(30年)(kg)		—	15

SF₆ ガスリーク条件：運転時 0.05%/年、開放点検時 1%/回（開放回数は撤去時 1 回）

5.3 評価結果

5.3.1 LCIA

(1) 評価データの策定

LCIA 評価のためのインベントリ分析対象と計算に用いた CO₂ 排出原単位を表 5-6 に示す。基礎造成プロセスはコンクリートの素材、製造プロセスは素材と製造エネルギー、使用プロセスは SF₆ ガスの漏えい (SF₆ ガスリーク) と電力損失を対象としている。CO₂ 排出原単位はそれぞれの分析対象に対応している。開閉装置と変圧器の CO₂ 排出原単位は表に示した分析対象のデータを引用した[48],[152]。変圧器のデータは OIT を前提としているが、OIT と GIT は絶縁媒体以外の基本構成は比較的似ていること、先行研究[153]において変圧器の環境影響は使用プロセスが 97%を占め製造プロセスは小さいこと、から GIT にも OIT と同じ原単位を用いた。その他のコンクリートと電力の原単位も公開値を引用した[7],[143]。

表 5-6 インベントリ分析対象と CO₂ 排出原単位

プロセス	項目		分析対象	CO ₂ 排出原単位 ^{*1)}
基礎造成	素材		コンクリート ^{*2)}	0.023 g-CO ₂ /g
製造	素材、エネルギー	開閉装置	アルミ、鉄、ステンレス、銅、エポキシ樹脂、FRP、ZnO、Sb ₂ O ₃ 、碍子、SF ₆ ガス、銅電線、アルミ電線、電力、ガス(LA製造)、など	GIS: 6.0 g-CO ₂ /g AIS: 13.1 g-CO ₂ /g
		変圧器	鉄、珪素鋼板、銅、プレスボード、エポキシ樹脂、碍子、絶縁油、電力、など	2.3 g-CO ₂ /g
使用	漏えい		SF ₆ ガス	-
	損失		電力	0.000425 t-CO ₂ /kWh

*1) 各原単位の参考文献：コンクリート[7]、開閉装置[48]、変圧器[152]、電力[143]

*2) コンクリート量は比重を 2.3t/m³とし、設備面積×0.7m (基礎深さ)として算出。

保護対象別の重み付け係数 (WF) は表 2-2 の値を用い、日本と中央アジアの森林の被害係数 (DF) は 2-4 節の算出値を用いた。それらの WF と DF から決めた統合化係数を表 5-7 に示す。2-4 節の表 2-19 からの引用である。

表 5-7 統合化係数

評価条件 \ 統合化係数	IF_PPI(trans) (円/m ²)	IF_PPI(occ) (円/m ² /年)	IF_BDI(trans) (円/m ²)
日本	4,254	56.7	3,153
中央アジア	1,423	19.0	82.7

(2) LCIA 結果

変電所の LCIA 結果を図 5-4 に示す。同図(a)は日本の場合、同図(b)は中央アジアの場合である。括弧内の%値は各変電所の環境影響の内訳を表す。日本の場合は GIS-GIT 変電所の環境影響は旧 AIS-OIT 変電所の 91%となり、土地利用面積が小さい GIS-GIT 変電所の優位性が確認された。一方、中央アジアの場合では逆に 103%に増加する結果となった。そこで、両者の違いを顕著にするため、支配的な環境影響で両者が同じ値となる OIT と GIT の電力損失の環境影響を除外したグラフを示した。両変圧器の損失設計は表 5-6 に示すとおり全体の損失が同じになるように設計されており電力損失による環境影響は同一である。この比較から、評価結果は旧 AIS-OIT 変電所の土地利用影響と GIS-OIT 変電所の SF₆ ガスリークの影響(1.42×10^7 円)との関係で、ほぼ決まっていることが分かる。中央アジアと日本の森林の植生の違いが設置環境に与える影響は、第 2 章の図 2-15 に示した PV 同様に、変電所でも影響を与える結果となった。

また、図 5-4 では変圧器の電力損失の環境影響が変電所全体の環境影響の 82%-93%を占める重要な要因であることがわかる。一方で土地利用の影響は変電所全体の 4%-15%、SF₆ ガスリークの影響は 8%に留まるものの、上下関係を決める重要な要因になることが分かる。

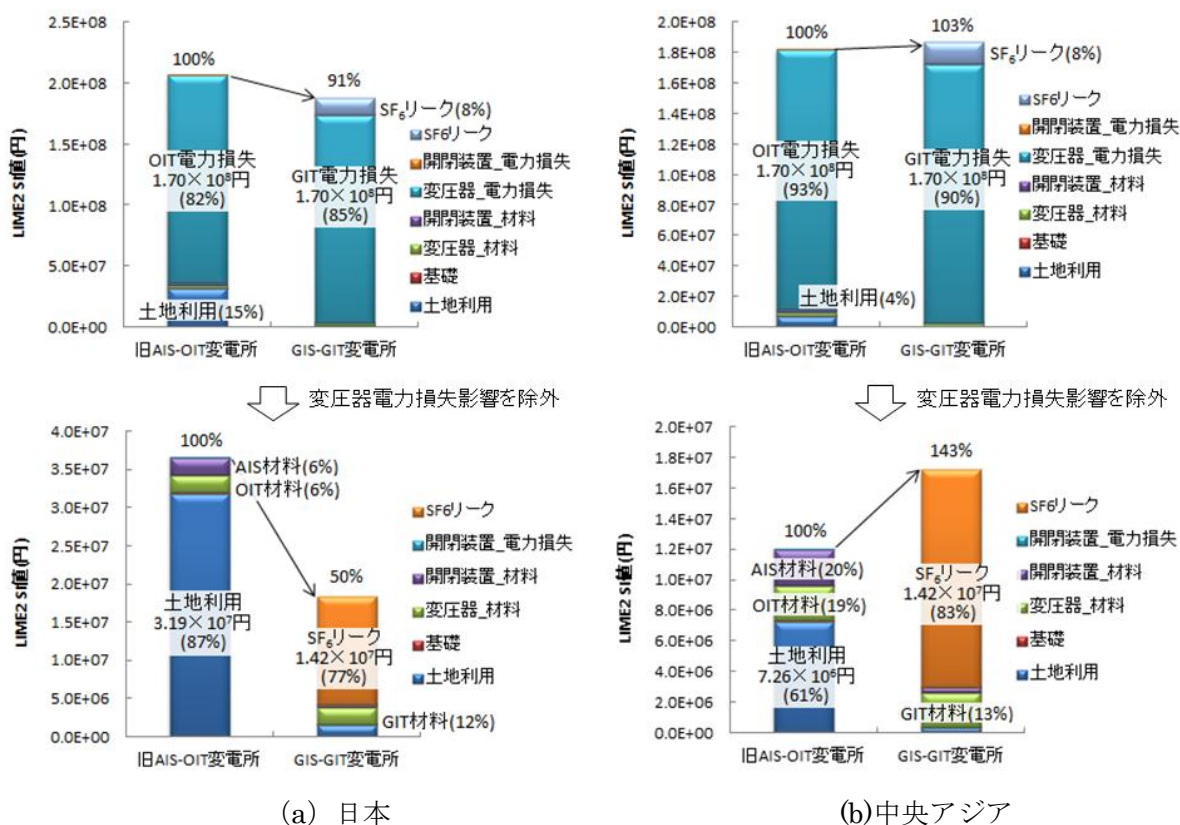


図 5-4 土地利用を考慮した変電所の LCIA 評価結果

5.3.2 内部コスト分析

(1) 内部コストの特定

内部コスト分析における温暖化影響の評価条件を表 5-8 に示す。第 4 章で分析した表 4-4 の条件を引用した。CO₂ 排出量取引価格については第 4 章同様の 3,000 円/t-CO₂ に加え、現在の相場を考慮した 1,000 円/t-CO₂ の条件を追加設定した。

火災影響評価の補償費用は第 4 章の表 4-7 に示した条件を引用して表 5-9 のとおり設定

した。本評価のシナリオは山間部への変電所設置であるため、補償対象は人災と電力供給停止とし、表 4-7 に記した建屋損害と入居テナント業務停止は除外している。また、補償対象項目に対する故障発生度は表 4-10 に示した評価モデルを引用して表 5-10 のとおり設定した。表 5-10 における Yo、Yg、Zo、Zg の値の算出根拠を表 5-11 に示す。引用元は表 4-9 である。

内部コスト分析の条件設定における停電期間の発生シナリオは表 4-12 に示したシナリオを引用して表 5-12 のとおり設定した。設定したシナリオは第 4 章の結果において TDC が厳しい結果を示したシナリオ A と比較的厳しくない結果を示したシナリオ C とした。

表 5-8 温暖化影響の設定条件

	設定値
CO ₂ 取引価格 (円/t-CO ₂)	3,000、1,000
CO ₂ 排出係数 (t-CO ₂ /kWh)	0.000425 ^{*1)}
SF ₆ 地球温暖化係数]	23,900 ^{*2)}

*1) 参考文献[143]

*2) 参考文献[126]

表 5-9 補償費用の設定（引用元：表 4-7）

補償対象	No.	補償費用		備考
		分析項目	(US\$)	
人災	C _H	死亡 1名	1,358,500	*1) 軽傷は重傷の1/2と仮定
	D _H	重傷 1名	91,000	
	E _H	軽傷 1名	45,500	
	F _H	避難 1名	187	
電力供給停止	G _H	停電期間 20min	206,640	*1) 19.68US\$/kWh ^{*2)} ×設備容量(kVA)×負荷率 ×停止期間(h)
	H _H	停電期間 4h	2,479,680	
	I _H	停電期間 12h-7days	52,073,280	

*1) 参考文献[57]

*2) 参考文献[145]

表 5-10 補償対象項目に対する故障発生度の設定（引用元：表 4-10）

補償対象	No.	分析項目	発生度		計算式	発生度設定の考え方
			対象	(回)		
人災	C _L	死亡 1名	OIT	0.001	$Y_o \times 0.2$	修理不能な故障発生度の20%
			GIT	0.0001	$Y_g \times 0.2$	
	D _L	重傷 1名	OIT	0.0021	$Y_o \times 0.4$	修理不能な故障発生度の40%
			GIT	0.0003	$Y_g \times 0.4$	
	E _L	軽傷 1名	OIT	0.0026	$Y_o \times 0.5$	修理不能な故障発生度の50%
			GIT	0.0003	$Y_g \times 0.5$	
電力供給停止	F _L	避難 1名	OIT	0.0052	$Y_o \times 1.0$	修理不能な故障発生度に同じ
			GIT	0.0006	$Y_g \times 1.0$	
	G _L	停電期間 20min	OIT	0.0103	$Z_o \times 0.5$	修理可能な故障発生度の50%
			GIT	0.0126	$Z_g \times 0.5$	
	H _L	停電期間 4h	OIT	0.0103	$Z_o \times 0.5$	修理可能な故障発生度の50%
			GIT	0.0126	$Z_g \times 0.5$	
	I _L	停電期間 12h-7days	OIT	0.0052	$Y_o \times 1.0$	修理不能な故障発生度に同じ
			GIT	0.0006	$Y_g \times 1.0$	

表 5-11 Y_o、Y_g、Z_o、Z_g の値（引用元：表 4-9）

	No.	発生度		発生度設定の考え方
		対象	(回)	
変圧器故障	X	OIT	0.0259	*1)
		GIT		
修理不能な故障	Y _o	OIT	0.0052	$X \times 0.2^{*2)}$
	Y _g	GIT	0.0006	$0.0002 \times 0.0259 / 0.0085$ “0.0002(=1/(4635+63))”は20年間のGIT故障発生度 ^{*3)} “0.0259”は上記X “0.0085”は20年間のOITの故障発生度 ^{*4)}
修理可能な故障	Z _o	OIT	0.0207	$X - Y_o$
	Z _g	GIT	0.0252	$X - Y_g$

*1) 表 4-8 参照

*2) 参考文献[150]

*3) 参考文献[151]

*4) $0.0085 = 0.005 + 0.0001e^{0.178T}$ (T=20 年) [147]

表 5-12 故障発生度の設定（引用元：表 4-12）

シナリオ		発生度			備考
		停電期間 20min	停電期間 4h	停電期間 12h-7days	
A	OIT	0.0103 ($Z_o \times 0.5$)	0.0103 ($Z_o \times 0.5$)	0.0052 ($Y_o \times 1.0$)	修理可能な故障の50%は20分以内に停電復旧可能。修理不能な故障は全ての場合に12h-7daysの停電を伴う。 ^{*1)}
	GIT	0.0126 ($Z_g \times 0.5$)	0.0126 ($Z_g \times 0.5$)	0.0006 ($Y_g \times 1.0$)	
C	OIT	0.0103 ($Z_o \times 0.5$)	0.0129 ($Z_o \times 0.5 + Y_o \times 0.5$)	0.0027 ($Y_o \times 0.5$)	修理不能な故障の50%は4h以内に停電復旧可能。他の条件はシナリオAと同じ。
	GIT	0.0126 ($Z_g \times 0.5$)	0.0129 ($Z_g \times 0.5 + Y_g \times 0.5$)	0.0003 ($Y_g \times 0.5$)	

*1) 表 4-11 と同じ

(2) 分析結果

内部コスト分析の評価対象である温暖化影響と火災影響は地域の特性に依存しないため、本評価結果は日本と中央アジアに共通である。CO₂ 排出量取引価格が 1,000 円/t-CO₂ の場合の内部コスト分析結果を図 5-5 に示す。また、図 5-6 は CO₂ 排出量取引価格が 3,000 円/t-CO₂ の場合の結果である。これらの結果から両変電所の違いは停電時供給補償費用に表れることが分かる。旧 AIS-OIT 変電所の停電時供給補償費用の影響は CO₂ 排出量取引価格が 1,000 円/t-CO₂ の場合において、シナリオ A で内部コスト全体の 70.1%、長期の停電時供給補償発生度を小さく見込んだシナリオ C においても 57.2%である。CO₂ 排出量取引価格が 3,000 円/t-CO₂ の場合はシナリオ A で 43.9%、シナリオ B で 30.8%となった。

このように停電時供給補償費用の影響が多くを占めるため、GIS-GIT 変電所の内部コストは旧 AIS-OIT 変電所に対し、CO₂ 排出量取引価格が 1,000 円/t-CO₂ の場合においてシナリオ A が 40%、シナリオ B が 55%、CO₂ 排出量取引価格が 3,000 円/t-CO₂ の場合にシナリオ A が 66%、シナリオ B が 80%と、停電時供給補償費用の抑制効果が確認できた。また、CO₂ 排出量取引価格の上昇により両者の差は減っていく傾向も確認できた。

5.3.3 LCIA と内部コスト分析の結果比較

植生別評価手法を用いた LCIA では森林植生の違いから日本と中央アジアで GIS-GIT 変電所と旧 AIS-OIT 変電所の環境影響の大小関係が逆転する結果となった。GIS-GIT 変電所の環境影響は日本の場合に旧 AIS-OIT 変電所の 91%、中央アジアの場合に 103%である。一方、故障時火災リスク評価手法を用いた内部コスト分析では、変電所の内部コストは長期の停電時供給補償発生度のシナリオや CO₂ 排出量取引価格の増減の影響を受け、GIS-GIT 変電所の環境影響は旧 AIS-OIT 変電所の 40%-80%となった。

今回の評価において、中央アジアの場合は LCIA と内部コスト分析で異なる結果となった。この結果は LCIA と内部コスト分析の両方を評価することの必要性を示しているが、結果が異なるため評価者は判断を迷う。そこで、中央アジアのケースを事例に、両手法の統合化を検討する。

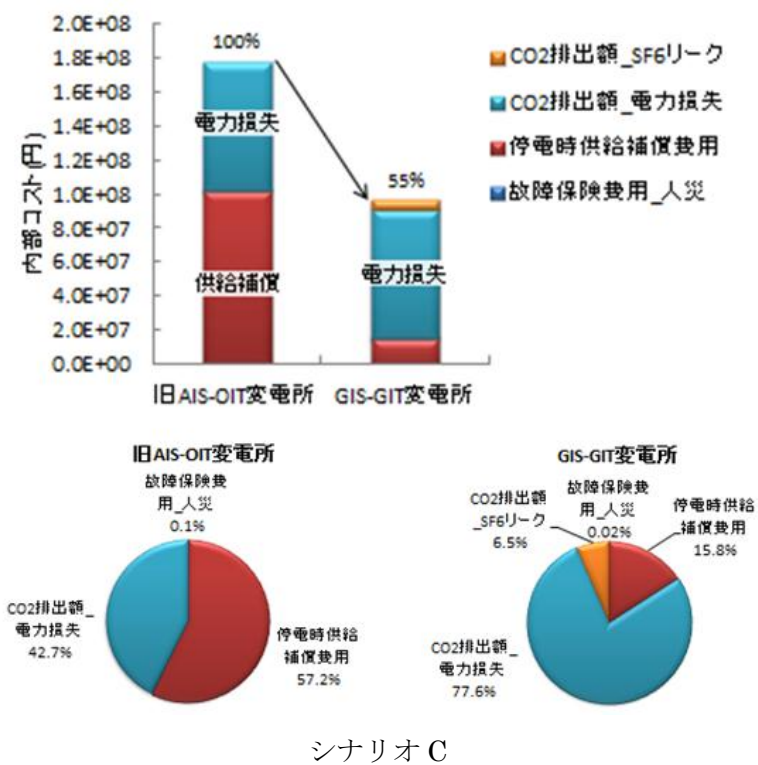
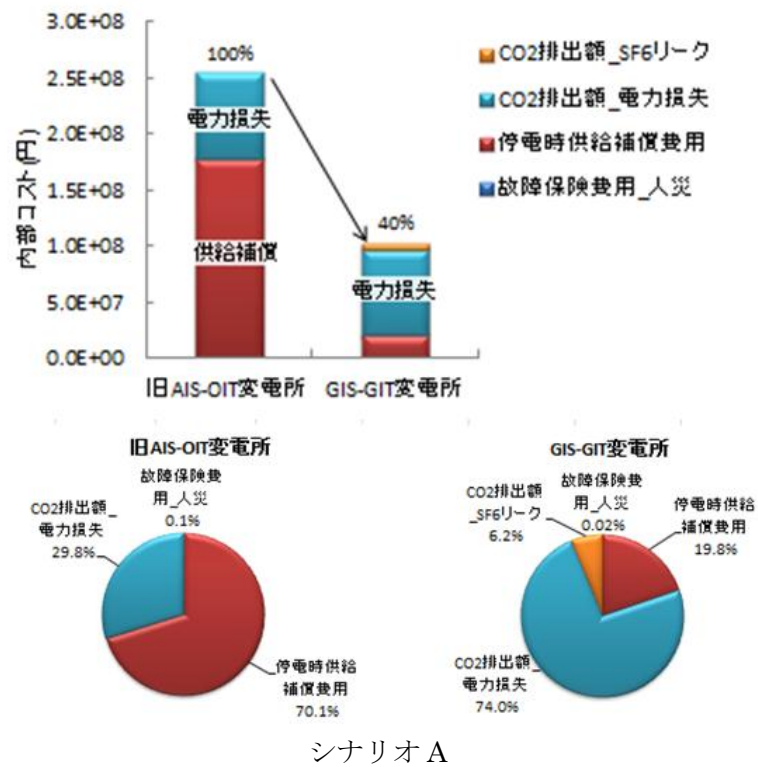
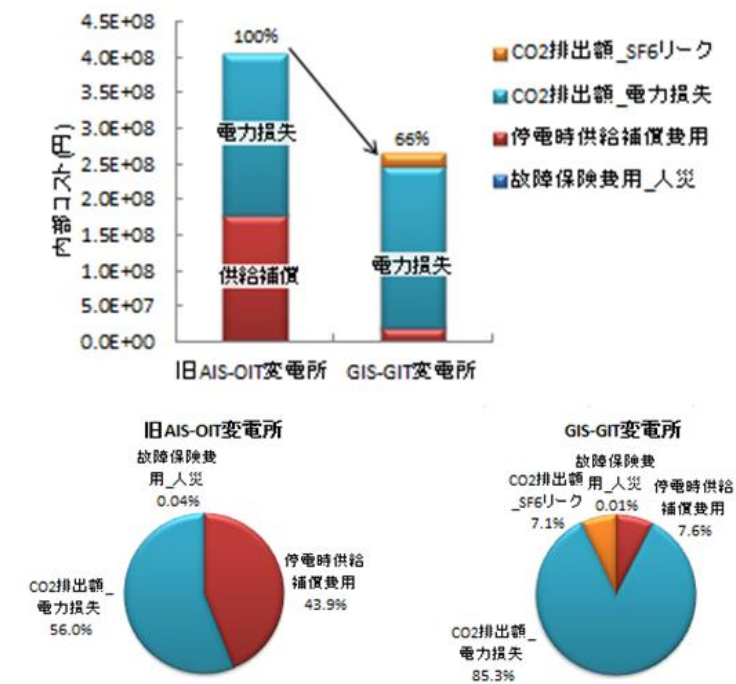
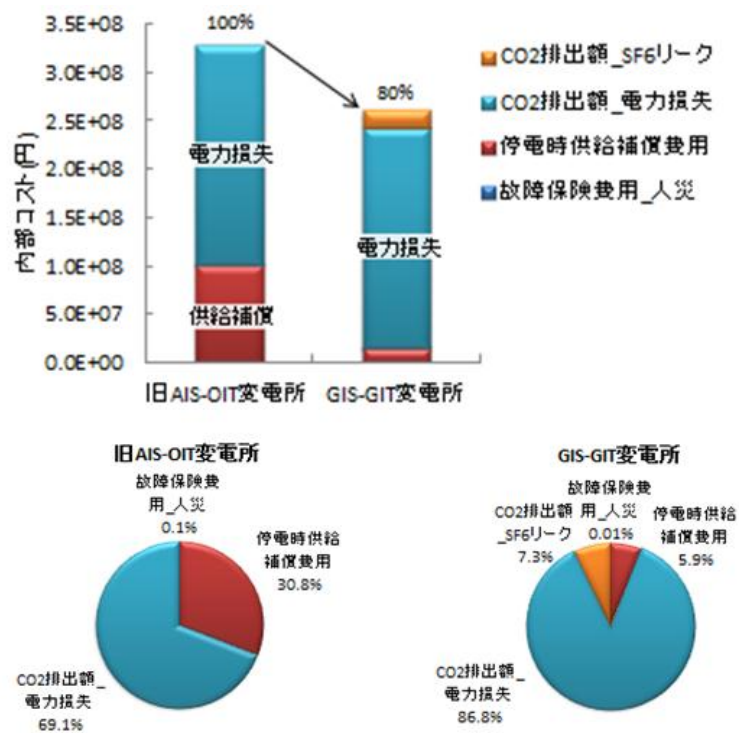


図 5-5 火災リスクを考慮した変電所の内部コスト分析結果(1,000 円/t-CO₂)



シナリオ A



シナリオ C

図 5-6 火災リスクを考慮した変電所の内部コスト分析結果(3,000 円/t-CO₂)

5.3.4 LCIA 結果と内部コストの統合

LCIA の結果と内部コスト分析の結果が異なる中央アジアの場合、GIS-GIT 変電所と旧 AIS-OIT 変電所の環境影響の大小関係を判断するには、温暖化影響、土地利用影響、および火災影響を統合評価が必要である。そこで、両手法の評価結果の統合を検討する。

LIME2 の SI 値はコンジョイント分析により求めた表 2-2 記載の重み付け係数により被害金額として外部コスト化している。一般論として、コンジョイント分析や CVM で算出した外部コストには社会全体が支払うコストとして、非利用価値と利用価値の両方が含まれる。したがって、それらの手法で求めた外部コストの値を内部コストと統合する場合は、非利用価値分を割引く必要がある。一方、LIME2 のコンジョイント分析は、分析範囲を保護対象として定義した人間健康、社会資産、一次生産、生物多様性影響に対して実施しているため、一般的なコンジョイント分析とは異なり、支払者が明確化されている内部コストと同等と位置づけられる。そこで、ここでは、LIME2 の外部コストを内部コスト化では、基本的には非利用価値分の割引を行わない条件とし、参考として割引く場合を計算した。内部コスト分析で扱うコストは事業者が支払う利用価値とみなすことができることから、割引率は次に示す米国の訴訟事例を踏まえ極端なケースとして 66%とした。米国の訴訟事例はコンジョイント分析と同じ表明選好法に分類される CVM による社会が支払うコストを事業者が支払う損害賠償額の根拠に扱ったものである。この事例はタンカーの油流出事故であるが、CVM で求めた生態系被害の 28 億ドルに対し、生態系被害額には非利用価値が含まれるため 50%割引くべきとの主張がなされ、結果的にタンカーの運航事業者は 10 億ドルをアラスカ州に支払ったとされる[154]。この事例を根拠に、SI 値の 1/3 (割引率 66%) が事業者負担の内部コストになると極端な仮定を行った。

SI 値と内部コスト値の統合結果を図 5-7 に示す。SF₆ ガスリークと電力損失を対象とした温暖化影響の算出方法は内部コスト分析と LIME2 の 2 通りあるため、図では両者を比較している。シナリオ A とシナリオ C、内部コスト分析の CO₂ 排出量取引価格 1,000 円/t-CO₂ と 3,000 円/t-CO₂ の場合、LIME2 参考条件のすべての場合に、旧 AIS-OIT 変電所の停電時供給補償費用の影響は GIS-GIT 変電所の SF₆ ガスリークの影響に比べ大きく、GIS-GIT 変電所の効果が確認できた。また、土地利用影響は十分小さい結果になった。

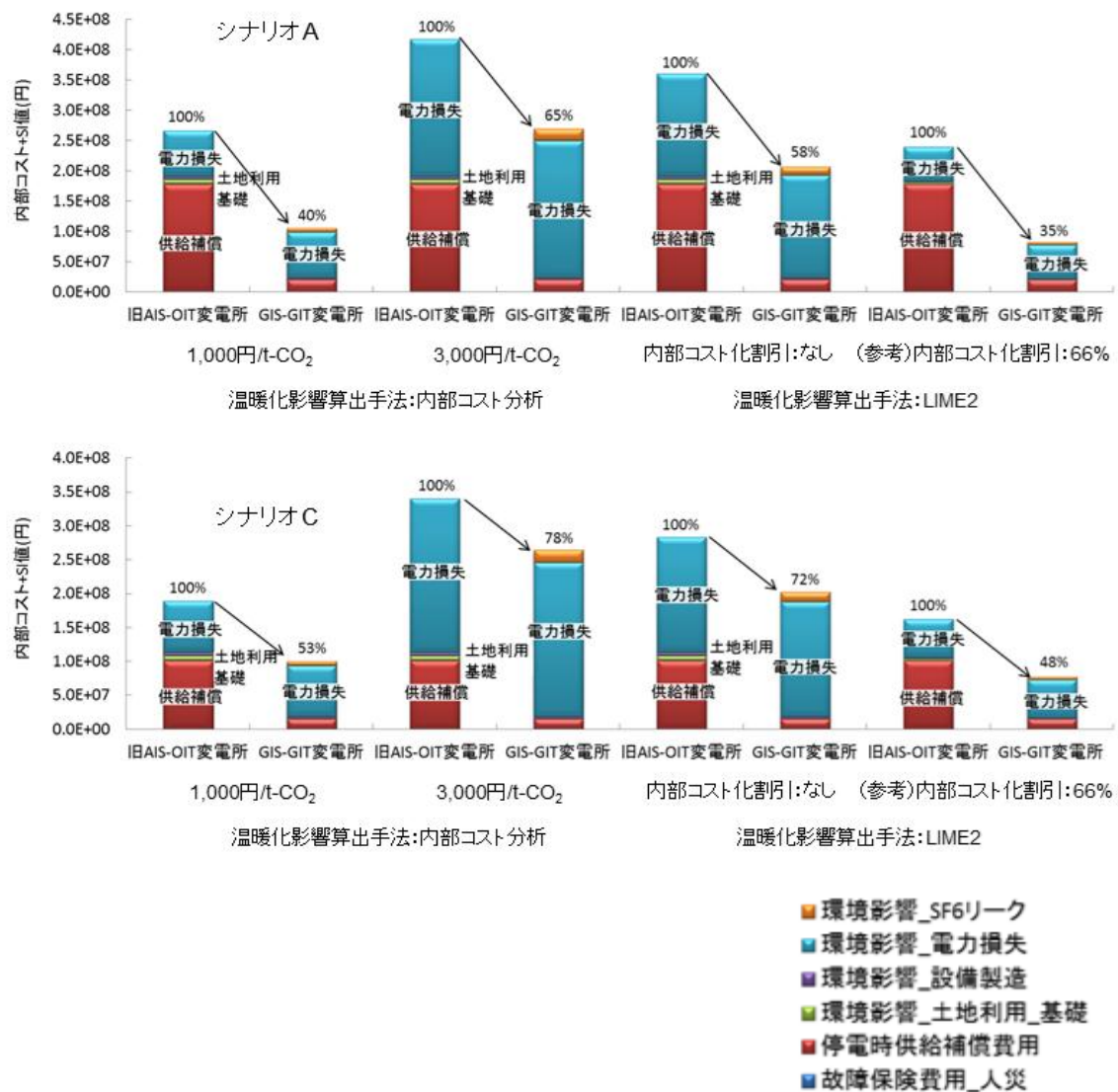
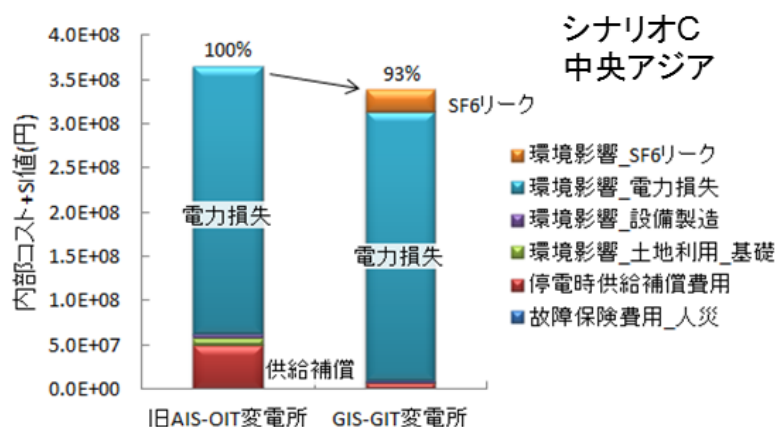


図 5-7 SI 値と内部コストの統合（中央アジア）

ここでは更に統合化結果の不確定性を検討する。GIS-GIT 変電所と旧 AIS-OIT 変電所の環境影響が最も均衡するシナリオは、停電による TDC が小さく算出されるシナリオ C で温暖化影響算出手法に内部コスト分析を用い CO₂ 排出量取引価格が 3,000 円/t-CO₂ の場合である。その際、GIS-GIT 変電所の環境影響は旧 AIS-OIT 変電所の 78% である。そこで、この条件で不確定性を有し影響が大きい項目として CO₂ 排出量取引価格と停電時供給補償費用を選定し、両変電所の評価が拮抗する条件を設定する。CO₂ 排出量取引価格は EU 市場の最高値である 4,000 円/t-CO₂ とした。停電時供給補償費用については、わが国の分析であるが、停電コスト単価が 1,600 円/kWh から 5,200 円/kWh[155]、または 300 円/kWh から 1,000 円/kWh[156] という試算がある。両者の絶対値は異なるものの、平均値に対する変動幅は共に 0.5~1.5 倍である。そこで、停電時供給補償費用は表 5-9 の設定値の 1/2 になる条件を想定した。

その結果を図 5-8 に示す。GIS-GIT 変電所の環境影響は旧 AIS-OIT 変電所に比べて 93% に増加した。この条件は変圧器故障シナリオ、CO₂ 排出量取引価格、停電時供給補償費用のすべてを想定される範囲で厳しい側に設定した結果である。ここから、評価者は不確定性を考慮しても、中央アジアのケースにおいて、GIS-GIT 変電所の導入効果を確認することができた。

内部コスト分析と LCIA の統合を検討した結果は、LCIA の結果ではなく、内部コスト分析の結果に近いものとなった。今回の評価ケースでは、土地利用影響や CO₂ 排出影響より火災影響が重要であることが分かった。



温暖化影響算出手法：内部コスト分析

図 5-8 統合化結果の不確実性分析

5.4 まとめ

AIS と OIT からなる旧 AIS-OIT 変電所と GIS と GIT からなる GIS-GIT 変電所を山間部に設置した場合を想定して、温暖化、土地利用、および火災の各影響を総合的に評価した。評価には、第 2 章で開発した植生別評価手法を用いた LCIA による温暖化と土地利用の統合と、第 4 章で開発した故障時火災リスク評価手法を用いた内部コスト分析を用いた。LCIA による GIS-GIT 変電所の環境影響は旧 AIS-OIT 変電所を 100%とすると、日本の場合に 91%、中央アジアの場合に 103%となった。中央アジアは土地利用影響が少なく、GIS-GIT 変電所の SF₆ ガスリークの影響が相対的に大きくなるためである。一方、内部コスト分析による GIS-GIT 変電所の環境影響は旧 AIS-OIT 変電所を 100%とすると、日本、中央アジアともに CO₂ 取引価格と故障発生シナリオでばらつくものの、40%から 80%となった。

中央アジアの評価は LCIA と内部コスト分析で評価結果の大小関係が逆転するため、LCIA 結果を内部コスト化し、温暖化、土地利用、火災の各影響を統合した。その結果、最も厳しいシナリオにおける GIS-GIT 変電所の環境影響は不確定性を考慮すると、GIS-GIT 変電所の環境影響は、旧 AIS-OIT 変電所との比で 40%から 93%となり、GIS-GIT 変電所の導入効果を確認することができた。ここで最も厳しいシナリオとは火災による停電時供給補償が発生する可能性が低いシナリオ（シナリオ C）であり、不確定性としては、SF₆ ガスリークや通電損失影響に関係する CO₂ 排出影響の内部コストが 4,000 円に増加し、停電時供給補償額が事例に基づく想定値の 1/2 に小さくなる条件である。また、山間部に変電所を建設する場合に考慮すべき設置環境影響の優先順位は、火災発生リスクの抑制と設置変圧器の効率向上がほぼ同等で重要であり、次に土地利用と SF₆ ガスリークの抑制となった。ここで、土地利用と SF₆ ガスリークの抑制の優先順位は、日本が土地利用、中央アジアが SF₆ ガスリークと森林植生の違いで異なることが分かった。

この事例評価の結果から、LCIA と内部コスト分析のいずれかの設置環境影響評価では結論が異なる可能性があるため、両手法を用いて不確定性も考慮した比較検証が必要な場合があることを明らかにした。

第6章 総合議論

6.1 はじめに

第2章から第5章ではPV発電、バイオマス発電、変圧器、変電所の設置環境影響の波及効果と温暖化影響とのトレードオフの関係を、電力システムごとの分析から明らかにした。

本章の目的は、第2章から第5章で明らかにして各電力システムの設置環境影響を、石炭火力の温暖化影響を基準に相互比較することにより、評価設備の設置環境影響の優先順位を明らかにすることである。加えて、先行研究との比較分析、評価範囲の網羅性、開発した評価手法の限界について考察する。

6.2 設置環境に起因する環境影響

以下の(1)から(4)では、第2章から第5章で算出した電力システムごとの設置環境に起因する環境影響についての結論を再掲する。

(1) 土地利用と温暖化影響のトレードオフの関係

LIME2 手法に基づいて土地利用影響を植生別に定量化する植生別評価手法を開発し、PV発電の土地利用と温暖化削減効果のトレードオフの関係を明らかにした。PV発電の設置場所として、わが国の主要植生別森林分類13種、および海外の代表的な4地域（中央アジア、日本、グアテマラ、メキシコ）の森林と草原を設定した。わが国のケースで、PV発電の設備利用率が12%でパネル下部がコンクリートの場合、PV発電の環境影響は石炭火力を100%とした場合にナラ林が99.9%、平均的な森林が86.1%、マツ林が76.7%となり、PV発電の土地利用影響が温暖化影響削減効果を同等程度となるケースがあることを明らかにした。トレードオフの定量的な関係としては、PV発電を平均的な森林に設置するケースで、PV発電の石炭火力に対する環境影響は、温暖化影響が1/14に削減されるが土地利用影響は378倍となる。

PV発電の土地利用影響の感度分析結果から単位容量敷地面積に着眼した分析を行った。その結果、PVパネル下部がコンクリートでPV発電の設置場所がナラ林の場合に単位容量敷地面積を15,200m²/MWから11,000m²/MWに抑制させると、環境影響は25.7%削減することが分かった。これにより、PV発電の環境影響は石炭火力を100%とした場合に、99.9%から74.2%に改善する。なお、パネル下部をコンクリートから草地にする効果は5.8%であり大きな改善効果は見られなかった。

一方、世界の代表地域を対象とした評価では、PV 発電の設備利用率が 15%でパネル下部がコンクリートの場合の石炭火力に対する環境影響は、日本の森林が 57%、メキシコ雲霧林が 125%、グアテマラの森林が 50%、中央アジアの森林が 19%となった。メキシコ雲霧林は降雨による植物の成長が比較的早いうえに、絶滅種の密度が高い特徴があり、このような場合に土地利用影響が大きくなった。一方で土地利用影響が少ない中央アジアの森林は生物多様性影響が小さい。統合化係数で比較すると、生物多様性影響は、最小の中央アジアの森林と最大のメキシコの雲霧林で 200 倍以上の差があるのに対し、一次生産性影響は 5 倍弱であり、生物多様性の影響が地域により大きく異なる結果となった。また、土地利用前が維管束植物のレッドリスト記載種が存在しない草原の場合は、日本が 37%、メキシコが 53%、グアテマラが 43%、中央アジアが 14%となり、いずれの場合も PV 発電の効果が確認された。海外の LCIA 手法との比較からは、各々評価方法が異なるものの、森林の植生により特性化係数が 90%程度変わる場合が多いこと、本論文で用いた LIME2 は他の手法に比べ、土地利用影響が大きい傾向があること、を示した。

ここでは、PV 発電を設置する場合に、一次生産性や生物多様性の影響評価が重要であることを明らかにした。特に、維管束植物のレッドリスト記載種が存在する場合には土地利用の影響が増加する。また、PV 発電の設備利用率の感度が高いことから、評価のシナリオ設定段階では地域の晴天率などに即した稼働率の設定を考慮すべきである。

(2) 森林施業の波及効果

森林施業影響として、アカマツ人工林の一次生産性向上効果を定量化するアカマツ人工林評価手法を LIME2 に基づいて開発し、岩手県の木質系バイオマス発電の評価を行い、チップを供給するための森林施業の波及効果を、GHG 排出と土地利用の影響と統合評価した。その結果、以下の 4 点を明らかにした。

第 1 点目として、アカマツ人工林の施業が維持されることによる環境改善効果は、土地利用や GHG 排出の影響に比べ大きく、燃料チップの供給プロセス（施業方法）が重要である。

第 2 点目として、アカマツ人工林の施業を除いた環境影響の内訳はチップ製造段階が 28%、チップ製造設備と発電設備の土地利用影響が 33%となり、チップ製造と土地利用が設計時に環境配慮すべき項目である。

第 3 点目として、標準伐期施業と長伐期施業を想定し、林齢 30 年から 65 年の範囲で間伐と主伐を行う 20 年分のシナリオに対して、施業方法の違いと林齢が環境改善効果に与える影響を分析した結果、環境影響の改善効果を高めるためには、林齢 50 年以上の場合は主伐を優先する計画が有効である。一方、林齢 30 年と 40 年の場合は主伐と間伐の効果はほぼ同等である。

第 4 点目として、設定したシナリオの継続性を岩手県の民間アカマツ人工林を事例に分析した結果、林齢 65 年を対象とする場合を除いて、1MW 級の発電のために 20 年間チップを供給するポテンシャルを有することを確認した。一方、実際の年間施業量との比較では、標準伐期施業

以外のケースの多くで現在の間伐や主伐のペースでは木材供給が不足する。特に、環境改善効果が高い林齢 50 年で主伐を計画するシナリオでは対象森林が豊富であるにもかかわらず主伐実績が不足しており、林齢 50 年の主伐が優先した継続可能な施業計画の立案が課題である。

ここでは、バイオマス発電においてチップを供給する森林施業効果は、温暖化影響削減効果や土地利用影響に比べて極めて大きい、持続可能な施業方法の立案が課題であることを明らかにした。

(3) 火災影響と温暖化影響のトレードオフの関係

変圧器故障時の火災影響と温暖化影響のトレードオフの関係を内部コストによって定量化する故障時火災リスク評価手法を開発し、GIT と OIT の評価を行った。火災影響は損害賠償、温暖化影響は CO₂ 排出量取引価格を用い、火災影響には発生度を用いるリスク評価の考えを導入した。

評価条件は 132kV-63MVA 級変圧器を都市ビル内に設置する場合とし、環境影響は TDC とし算出した。その結果、変圧器を設置したビルに入っているテナントの営業停止を保証する影響が、GIT の SF₆ ガスリークの影響、送電損失、事故時供給停止補償、人的被害、建物損害などの他の項目に比べ大きく、重要な項目であることが分かった。

火災故障発生度と変圧器設置ビル入居テナント種の条件を変えた評価では、GIT の OIT に対する TDC 改善度は 1.8 倍から 3.9 倍と大きく変わる結果となった。特に、テナントに証券取引所が入居しているケースや、OIT の火災が長時間の事業停止を誘発するケースは火災影響が大きく、GIT の導入効果が顕著である。

ここでは、設置場所に起因する影響として設備故障時の火災影響に関する補償や損害賠償は都市部の商用ビルが影響を受ける場合には、温暖化影響より大きくなるケースがあることを明らかにした。

(4) 温暖化、土地利用、および火災影響の関係（総合評価）

AIS と OIT からなる旧 AIS-OIT 変電所と GIS と GIT からなる GIS-GIT 変電所を山間部に設置した場合を想定して、温暖化、土地利用、および火災の各影響を総合的に評価した。総合的な評価として、第 2 章で開発した植生別評価手法を用いた LCIA による温暖化と土地利用の統合と、第 4 章で開発した故障時火災リスク評価手法を用いた内部コスト分析による温暖化と火災影響の統合を行った。LCIA による GIS-GIT 変電所の評価結果は旧 AIS-OIT 変電所を 100% とすると、日本の場合に 91%、中央アジアの場合に 103% となった。この結果の違いは森林植生の違いによる旧 AIS-OIT 変電所の土地利用影響と GIS-GIT 変電所の SF₆ ガスリークの影響との関係から決まることを明らかにした。一方、内部コスト分析による GIS-GIT 変電所の評価結果

は旧 AIS-OIT 変電所を 100%とすると、中央アジアの場合で 40%から 80%となり LCIA とは異なる結果となった。分析結果の幅は、停電時供給補償発生度と CO₂ 取引価格の設定シナリオによるものである。

中央アジアの評価は LCIA と内部コスト分析で評価結果の大小関係が逆転するため、LCIA 結果を内部コスト化し、温暖化、土地利用、火災の各影響を統合した。その結果、最も厳しいシナリオにおける GIS-GIT 変電所の環境影響は不確定性を考慮しても、旧 AIS-OIT 変電所に対して 93%であり、GIS-GIT 変電所の導入効果を確認することができた。ここで最も厳しいシナリオとは火災による停電時供給補償が発生する可能性が低いシナリオ（シナリオ C）であり、不確定性としては、SF₆ ガスリークや通電損失影響に関係する CO₂ 排出影響の内部コストが 4,000 円に増加し、停電時供給補償額が事例に基づく想定値の 1/2 に小さくなる条件である。また、山間部に変電所を建設する場合に考慮すべき設置環境影響の優先順位は、火災発生リスクの抑制と設置変圧器の効率向上がほぼ同等で重要であり、次に土地利用と SF₆ ガスリークの抑制となった。ここで、土地利用と SF₆ ガスリークの抑制の優先順位は、日本が土地利用、中央アジアが SF₆ ガスリークと森林植生の違いで異なることが分かった。

ここでは、LCIA と内部コスト分析のいずれかの設置環境影響評価では結論が異なる可能性があり、両手法を用いた比較検証が必要な場合があることを明らかにした。

(5) 設置環境影響の相互比較と特徴

第 2 章から第 5 章で評価した各電力システムの温暖化影響と設置環境影響のトレードオフと波及効果の関係を図 6-1 に示す。図の縦軸と横軸は単位電力量あたりの環境影響であり、「トレードオフを考慮すべき領域」と「波及効果を有する領域」を図示している。「トレードオフを考慮すべき領域」とは温暖化影響が石炭火力の 1/2 以下でありながら、設置環境影響が同等以上に増加する条件とし、「波及効果を有する領域」とは、温暖化影響が石炭火力同等以下の場合に、設置環境影響の改善効果が石炭火力の温暖化影響よりも上回る条件とした。この図の目的は電力システムの設備間の特徴を示すことであるため、システム境界や評価手法が異なる評価結果であっても同一グラフ上にプロットした。また、評価条件は各章に記載した評価ケースや評価シナリオから以下の条件を代表値として記載した。単位電力量あたりの環境影響は、発電設備の場合は発電量、送変電設備の場合は送電量で割り戻した。発電量は各章で設定した値を用い、送電量は以下のとおり求めた。石炭火力の化石燃料資源の影響は図 2-10 に示したとおり影響が少ないため除外した。

<図 6-1 記載値の評価条件>

- ・第 2 章：PV_日本森林(平均)、石炭火力・・・Case1（PV 設備利用率 12%）
- ・第 3 章：バイオマス・・・・・・・・・・・・ シナリオ 2b（林齢 40 年、主伐）

・第4章：OIT_都市ビル、GIT_都市ビル・・・・・・シナリオ B1

想定送電量（30 年間）：344,925,000kWh（63MVA-50%負荷）

CO₂排出量取引価格：3,000 円/t-CO₂

為替：100 円/US\$

・第5章：GIS-GIT 変電所_日本森林(平均)、旧 AIS-OIT 変電所_日本森林(平均)：シナリオ A

CO₂排出量取引価格：3,000 円/t-CO₂

想定送電量（30 年間）：2,069,550,000kWh（63MVA×3units×2bank-50%負荷）

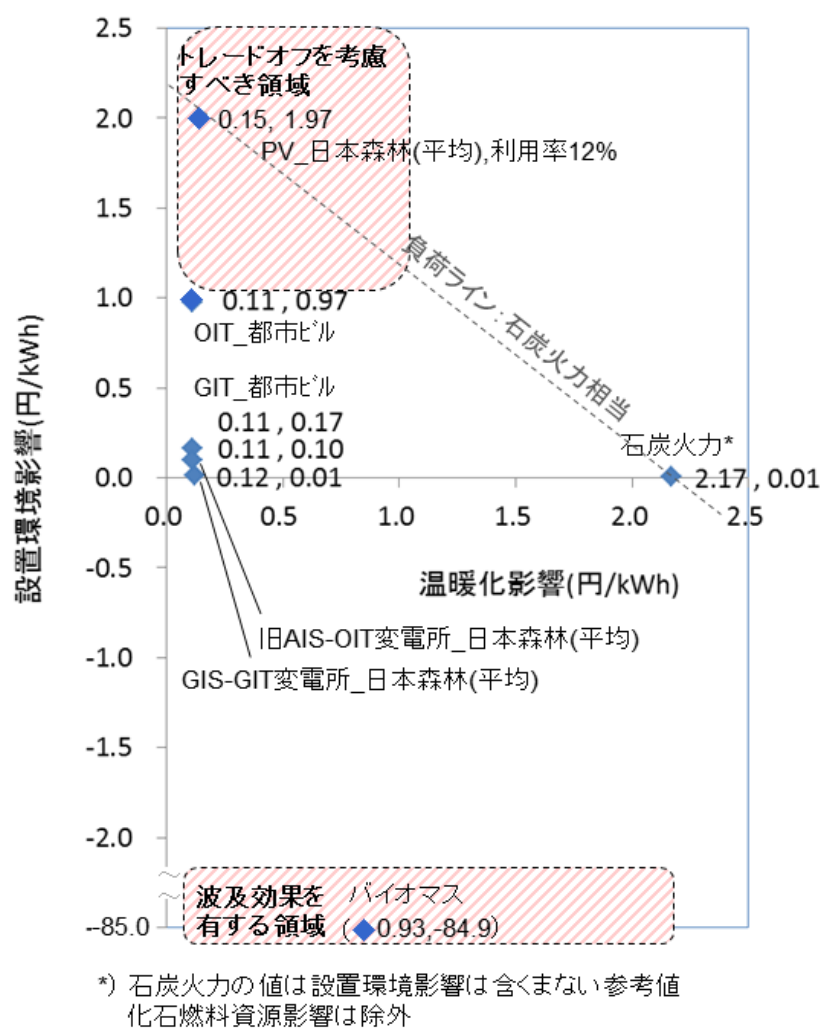


図 6-1 温暖化影響と設置環境影響のトレードオフと波及効果の関係

図 6-1 の負荷ラインは設置環境影響と温暖化影響と統合した負荷が石炭火力の温暖化影響と同等となるレベルを示している。ここから、「トレードオフを考慮すべき領域」に PV 発電を日

本の森林（平均）に設置した場合が該当し OIT を都市ビルに設置する場合が境界的な位置づけにあることが分かる。また、「波及効果を有する領域」にはバイオマス発電が該当している。次に個別設備ごとに考察する。

図 6-1 において、PV 発電を日本の森林（平均）に設置した場合の環境影響は、負荷ライン上にプロットされ、温暖化影響が小さいが土地利用による設置環境影響が大きく、石炭火力相当の影響が想定されることを示している。OIT_都市ビルの場合、PV と評価手法が異なるが、温暖化影響は PV とほぼ同レベルで、火災による設置環境影響が PV の 1/2 程度となった。一方で、GIT_都市ビル、GIS-GIT 変電所_森林、旧 AIS-OIT 変電所_森林、はともに温暖化影響、設置環境影響とも他の電力システムに比べ小さい。この理由は、温暖化影響は通電損失と設備製造によるため石炭火力などに比べ小さいこと、設置環境影響は設置場所が森林のために事業停止影響が小さいこと、によるものである。バイオマス発電に関しては、温暖化影響は PV 発電や変圧器程小さいが、設置環境影響は大幅なマイナスとなり、広範囲のアカマツ林施業の波及効果が極めて高く、他の電力システムとは傾向が異なる。このように図 6-1 に示したプロットから各電力システムの設置環境影響と温暖化影響の関係を考察することができる。

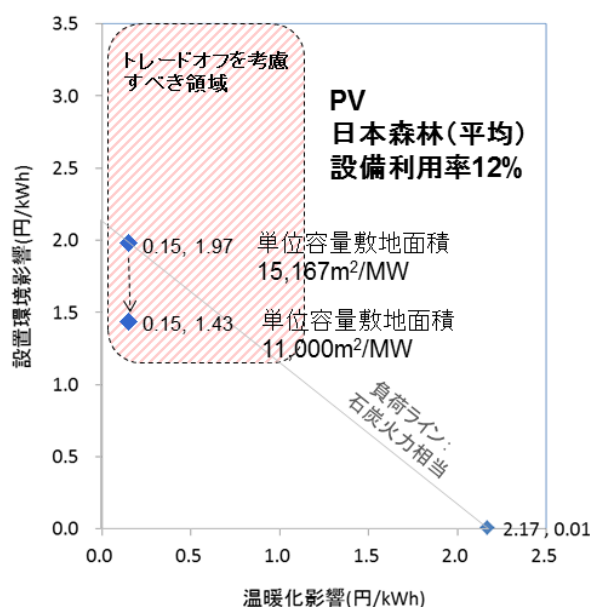
図 6-2 は図 6-1 に示した設備ごとに、設置条件が設置環境に与える影響を示した図である。同図(1)は PV 発電の設置場所を日本の平均的な森林とし、設備利用率が 12%の場合に、単位容量敷地面積を 15,200m²/MW から 11,000m²/MW に削減した効果を示している。単位容量敷地面積が 11,000m²/MW でも、我が国の場合には「トレードオフを考慮すべき領域」に含まれてしまう。

同図(2)は PV 発電を海外の森林に設置した場合であり、設備利用率を 15%に固定して設置する森林植生による影響を示している。同図(1)との比較から、森林植生の違いが設置環境影響に与える影響は大きい。また、中央アジアの森林の様に成長量が鈍く生物多様性少ない場合は、トレードオフの関係を考慮するほどの負荷が発生しないことがわかる。なお、降雨が多いメキシコ雲霧林において設備利用率 15%を達成することは難しいと思われるが、本論文では生物多様性が豊かな特徴的な森林として取り上げている。

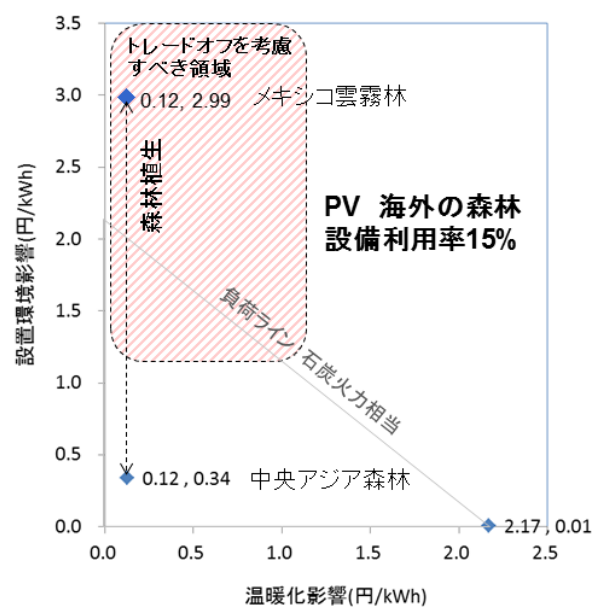
同図(3)はバイオマス発電の燃料供給元となるアカマツ人工林の林齢と施業種別が設置環境に与える影響を示している。設置環境影響の改善幅は第 3 章で設定したシナリオの影響を受け、最大で 130 円/kWh 程である。この変動幅は他の電力システムに比べて大きく、木質系バイオマス発電導入時の燃料チップの供給プロセスが設置環境影響に大きく関係することを確認できる。

同図(4)は変圧器を都市ビルに設置した場合の OIT の火災が及ぼす設置環境影響と GIT の SF₆ ガスリークによる温暖化影響の関係を示した。設置環境影響が大きい条件でも「トレードオフを考慮すべき領域」とはならない。設置環境影響の変動幅は第 4 章で設定したシナリオをプロットすると 0.8 円/kWh 程である。異なる評価手法間の比較であるが、この変動幅は同図(1)の PV 発電の設置環境影響の変動幅と同程度である。このことは PV を山間部に設置する場合の森林植生の影響と、都市ビルに OIT を設置する場合の入居テナント種などの影響が比較的近いことを示している。SF₆ ガスリークによる温暖化影響増加分は 0.004 円/kWh と小さい。

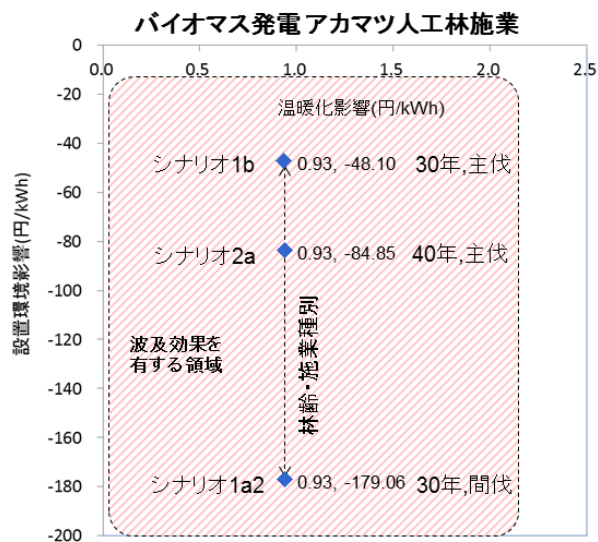
同図(5)は変電所を日本と中央アジアの森林に建設した場合の土地利用と火災による設置環境影響、およびSF₆ガスリークによる温暖化影響を示している。第5章のシナリオAで温暖化影響はCO₂排出権取引価格が3,000円/tと場合の内部コスト分析結果を引用した。図には中央アジアの森林に旧AIS-OIT変電所を設置した場合の環境影響に相当する0.2円/kWh相当の負荷



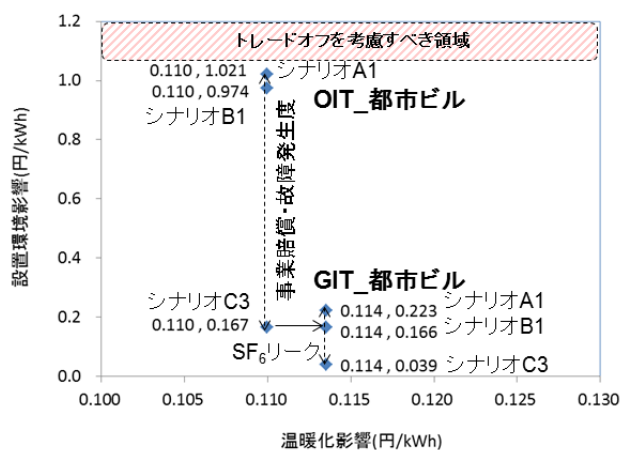
(1) PV 単位容量敷地面積の影響（日本）



(2) PV 設置場所の森林植生の影響（海外）



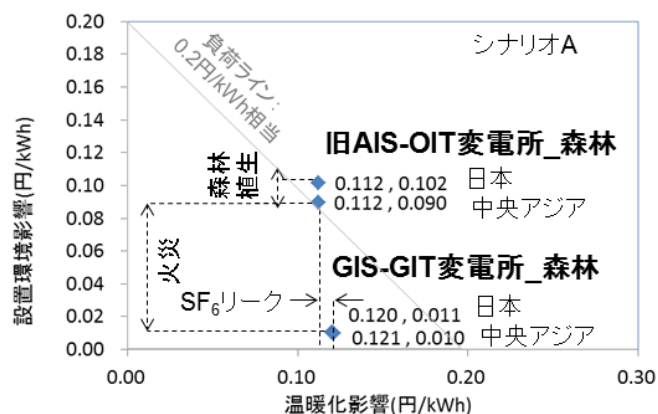
(3) 燃料供給森林の林齢と施業種別の影響



(4) 変圧器の火災とSF₆ガスリークの影響

図 6-2 設置環境影響のシナリオによる変動

ラインも記載した。ここから環境影響の変動幅は火災による設置環境影響、森林植生による設置環境影響、SF₆ガスリークによる温暖化影響の順に大きく、特に火災の影響が大きい。また、負荷ラインとの比較から、日本、中央アジアのいずれのケースも GIS-GIT 変電所の環境影響が小さいことが分かる。



(5) 変電所予定地の森林植生、火災と SF₆ ガスリークの影響

図 6-2 設置環境影響のシナリオによる変動 (つづき)

6.3 LIME2 重み付け係数の不確実性影響

LIME2 の統合化プロセスで引用する重み付け係数 (Weighting Factor; WF) はアンケート調査に基づいた値であるため不確実性を有する。そこで、WF の不確実性が本論文の評価結果に与える影響を考察する。WF は 1,000 サンプル (回収率 50%) のアンケート結果に基づくもので、各保護対象の WF の統計的な分析が行われており正規分布であることと、その平均値と標準偏差が提示されている[25]。そこで、平均値 μ と標準偏差 σ から 99.7% が分布する $\pm 3\sigma$ 値を求め、各 WF に $\pm 3\sigma$ 値を使って各章の不確実性の影響を考察した。図 6-3 には各保護領域の WF の確率分布と $\pm 3\sigma$ 値を示す。第 2 章、第 3 章、第 4 章の LIME2 に基づく環境影響の算出では WF の平均値を代表値として用いており、以下では、その結果との比較分析を行う。

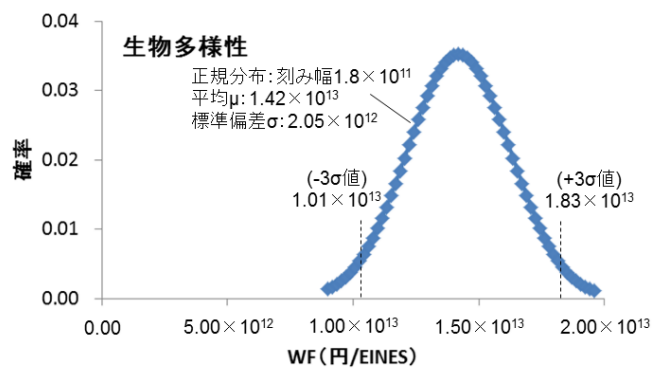
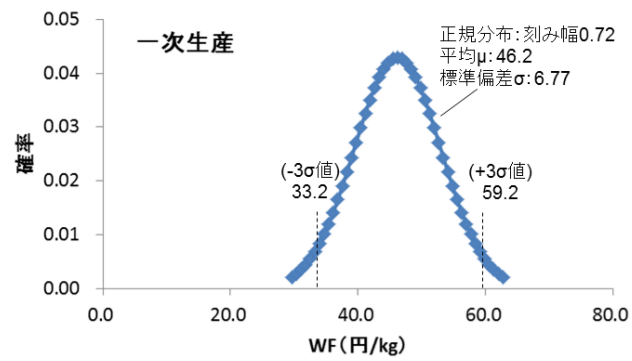
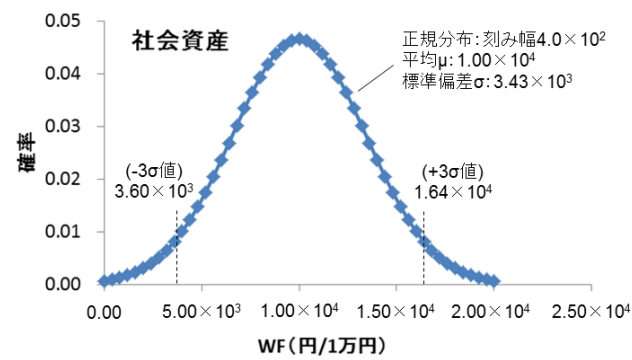
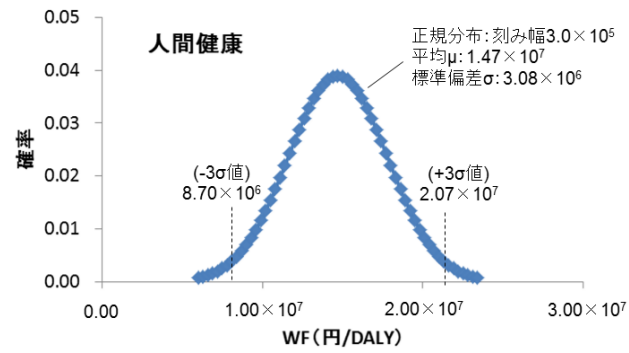


図 6-3 重み付け係数(WF)の分布と 3 σ 値

(1) 第2章の森林植生別評価に与える影響

WFの不確実性がPVの評価結果に与える影響を石炭火力のSI値を基準に比較した結果を図6-4に示す。この図からWFが $\pm 3\sigma$ 値となった場合、SI値は石炭火力で $\pm 43\%$ 、PVで $\pm 30\%$ ほど変化するが、PVのSI値の石炭火力に対する比は、 -3σ の場合に第2章の平均値に対しほぼ2割増、 $+3\sigma$ の場合にほぼ1割減となった。

ここから、WFの不確実性は、「PV発電を設置する場合に、一次生産性や生物多様性の影響評価が重要であり、特に、維管束植物のレッドリスト記載種が存在する場合には土地利用の影響が増加する」という第2章の結論に影響を与えないことを確認した。

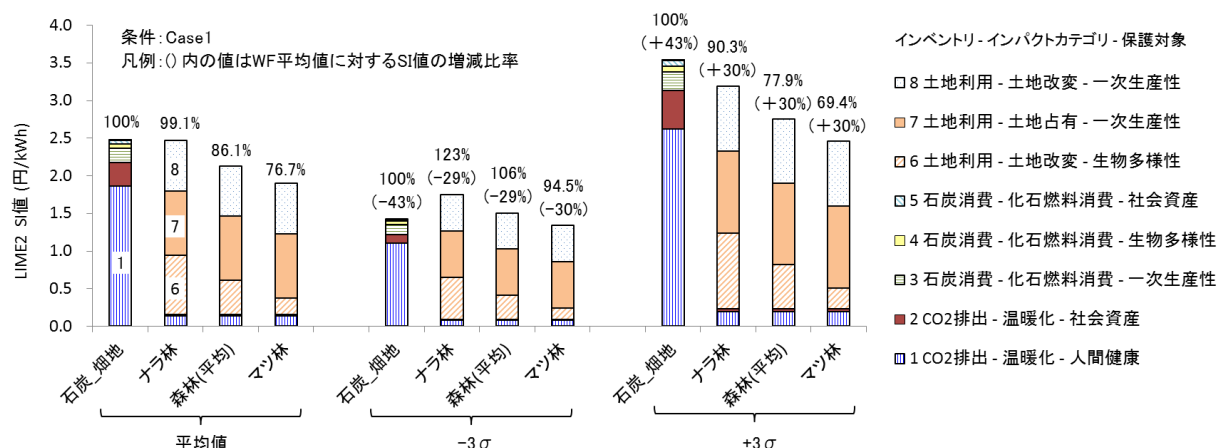


図 6-4 WFの不確実性がPVの森林植生別評価に与える影響

(2) 第3章のアカマツ人工林評価に与える影響

WFの不確実性がバイオマス発電の評価結果に与える影響を比較した結果を図6-5に示す。WFが $\pm 3\sigma$ 値となった場合、SI値はGridで $+44\%$ 、 -45% 、バイオマス発電の環境負荷側で $\pm 39\%$ 、環境改善側で $\pm 28\%$ 、それぞれ変化しているものの、林齢30年から65年の各シナリオにおける環境影響の大小関係は変わっていない。

ここから、WFの不確実性は、「バイオマス発電においてチップを供給する森林施業効果は、温暖化影響削減効果や土地利用影響に比べて極めて大きい」という第3章の結論に影響を与えないことを確認した。

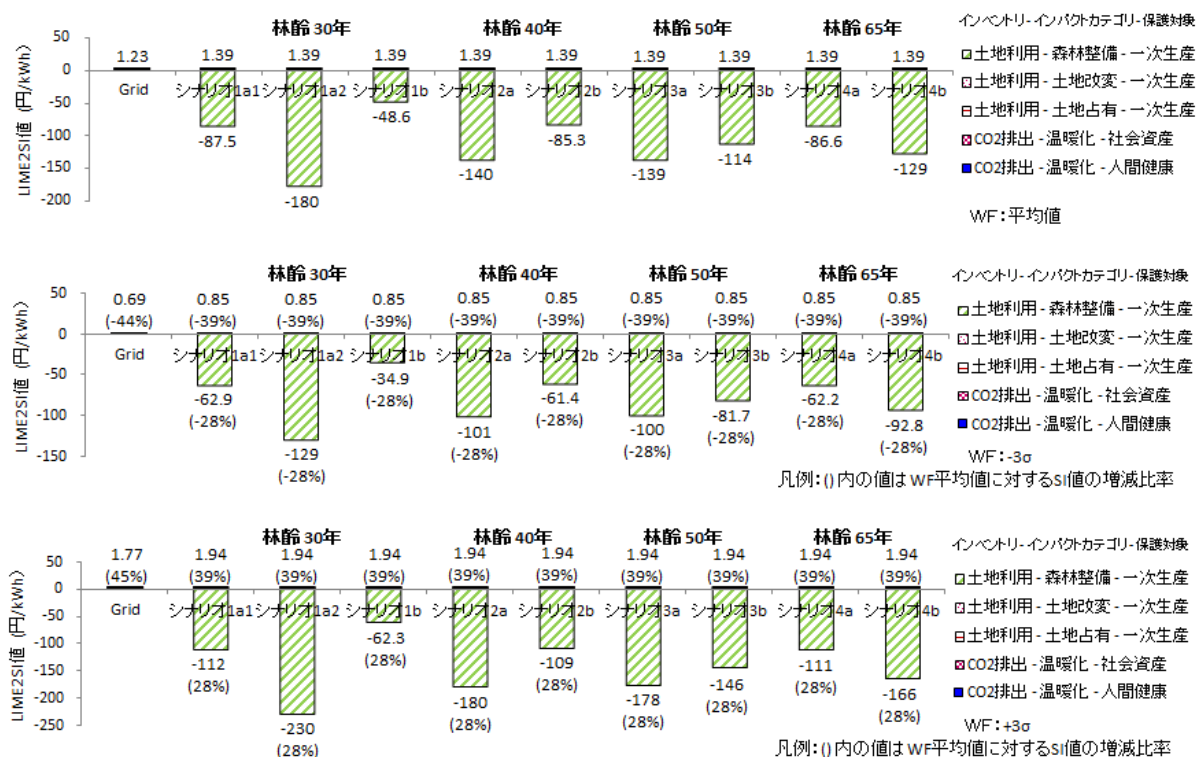


図 6-5 WF の不確実性がアカマツ人工林評価に与える影響

(3) 第 5 章の温暖化、土地利用、および火災の総合的評価に与える影響

WF の不確実性が変電所の評価結果に与える影響を、中央アジアの評価ケースで比較した結果を図 6-6 と図 6-7 に示す。図 6-6 は LIME2 結果、図 6-7 は LIME2 結果を内部コスト化して統合した場合である。図 6-7 の括弧内の値は WF 平均値に対する「内部コスト+SI 値」の増減比率である。図 6-6 から WF が $\pm 3\sigma$ 値となった場合でも、GIS-GIT 変電所の SI 値は旧 AIS-OIT 変電所より大きく結果が変わらない。また、図 6-7 では WF が $\pm 3\sigma$ 値となった場合、統合した内部コストの変化は最大で $\pm 41\%$ であるが、旧 AIS-OIT 変電所を基準とした GIS-GIT 変電所の SI 値の変化率の差は最大で 2 割程であり、環境影響の大小関係が変わることはなかった。

ここから、WF の不確実性が、「土地利用と SF₆ ガスリークの抑制の優先順位は、日本が土地利用、中央アジアが SF₆ ガスリークと森林植生の違いで異なり、LCIA と内部コスト分析のいずれかの設置環境影響評価では結論が異なる可能性があり、両手法を用いた比較検証が必要な場合があること」という第 5 章の結論に影響を与えることがないことを確認した。

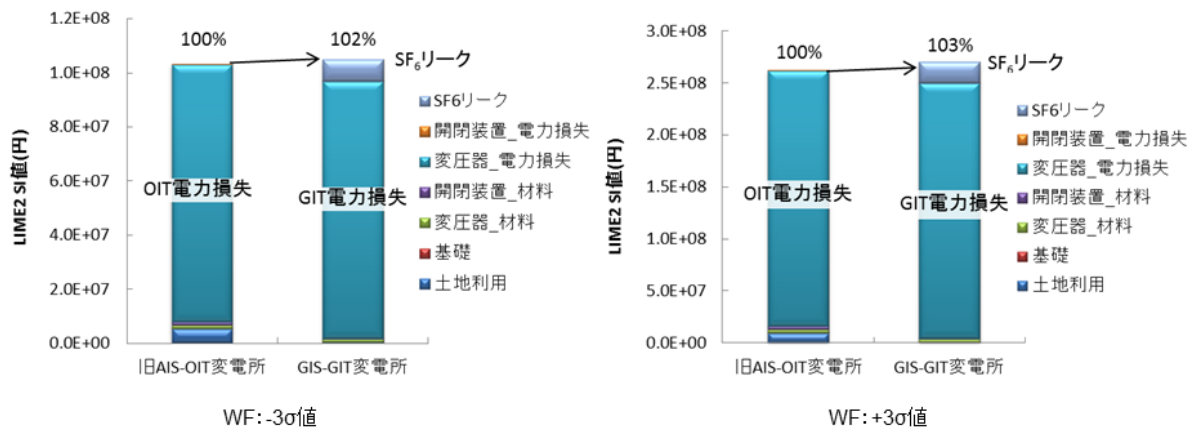


図 6-6 WF の不確実性が温暖化、土地利用、火災の総合評価に与える影響 (LIME2 評価)

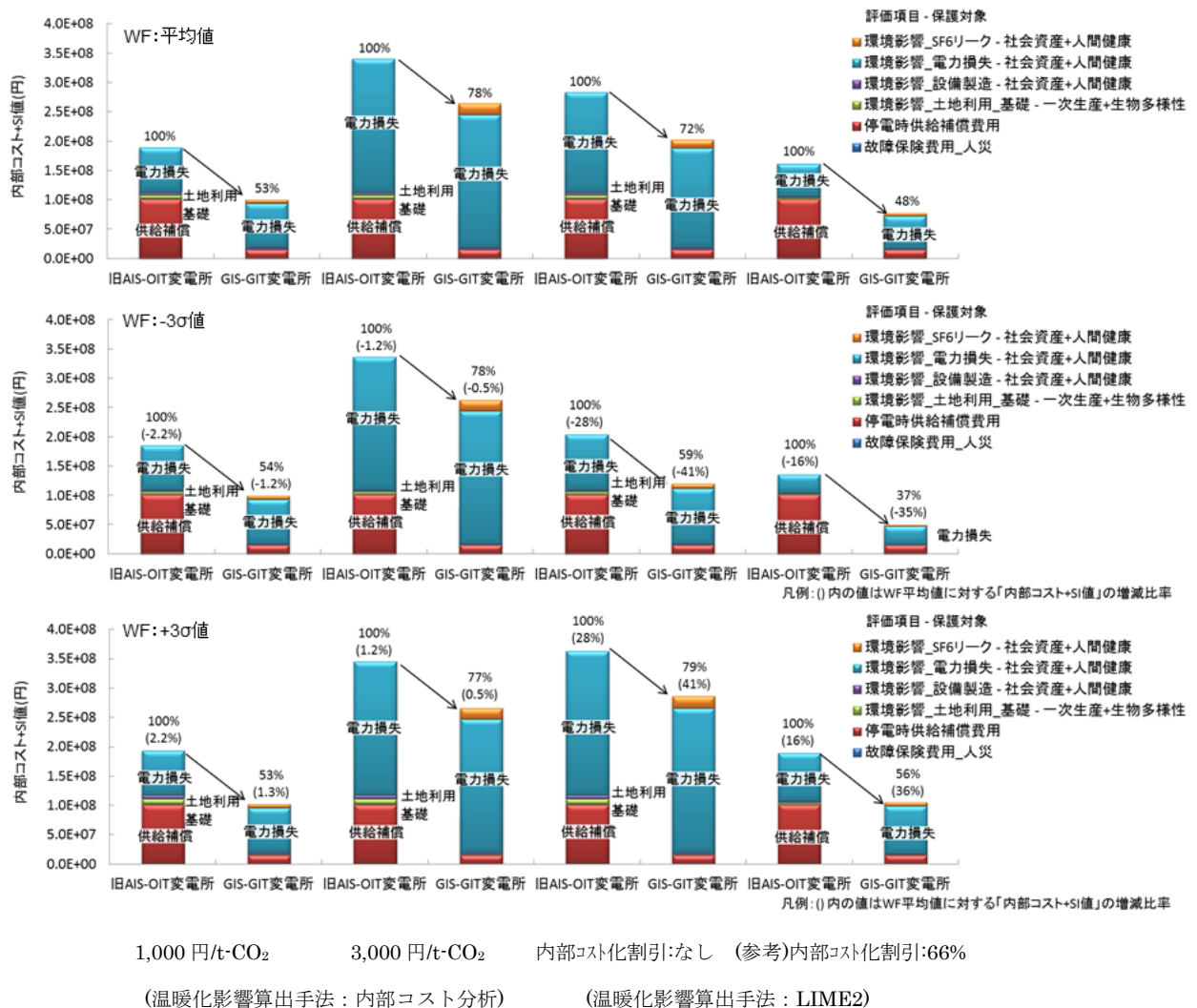


図 6-7 WF の不確実性が温暖化、土地利用、火災の総合評価に与える影響 (統合化)

6.4 引用データの精度とずれの範囲

(1) PV パネル材料の違いが第 2 章の結果に与える影響

第 2 章で評価した PV パネルは多結晶シリコン (Si) を想定しているが、多結晶 Si と同様に代表的な PV パネル材料である単結晶 Si を想定した場合の評価結果への影響を考察する。単結晶 Si の評価に必要なデータのうち、得られるデータは製造副資材を除く素材と土地利用面積である[50]。そこで、得られるデータが十分であるかを、図 2-8 に示した PV を森林 (平均) に設置した場合を事例に分析する。図 6-8 は、図 2-8 において素材の製造副資材を別出した環境負荷の内訳である。得ることができる素材と土地利用面積に起因する環境負荷は全体の 97% を超えることから、十分であると考えた。なお、得ることができない、製造副資材、製造、運用のデータには多結晶 Si の値を流用することとした。

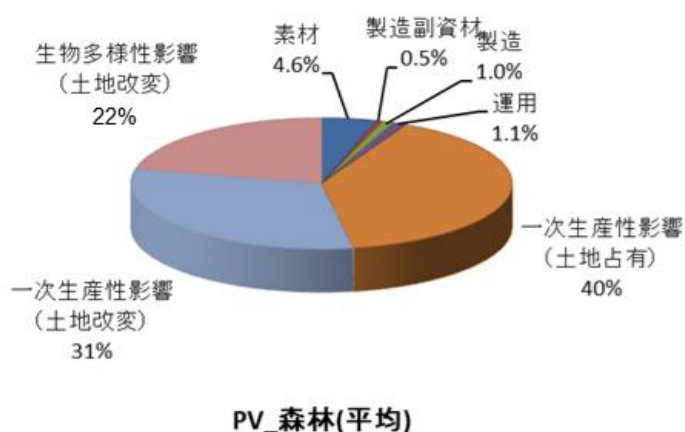


図 6-8 PV の環境負荷の内訳 (PV_森林 (平均) の場合)

表 6-1 は単結晶 Si の素材データを多結晶 Si と比較した表である。Si 差とは、多結晶 Si のデータを 1 とした場合の単結晶 Si の倍率である。単結晶 Si の評価データは、表 6-2 に示すように表 2-8 に示した多結晶 Si の評価データに SI 差を乗算して設定した。単結晶 Si の土地利用面積は、パネルの面積に点検などの必要スペースを考慮して設定する。パネル面積は表 6-1 から多結晶 Si が約 7,200m²/MW、単結晶 Si が約 7,000m²/MW となる。第 2 章では多結晶 Si の必要面積を 15,200m²/WM と設定していることから、必要スペースは 8,000m²/MW となる。そこで、単結晶 Si の土地利用面積は 7,000m²/MW に 8,000m²/MW を加え、15,000m²/MW と設定した。

表 6-1 多結晶 Si と単結晶 Si のモジュール比較[50]

		多結晶Si	単結晶Si	Si差(倍)
モジュール寸法	mm ²	1,336,608	1,153,350	
モジュール出力	W	186	165	
モジュール効率	%	13.9	14.3	
モジュール重量	kg	16	14.5	
セル結晶シリコン	kg	0.5	0.5	1.0
フロントカバーガラス	kg	10	8.7	0.9
フレームアルミ	kg	2.5	2.9	1.2
電極材料銅／はんだ	kg	0.1	0.1	1.0
充填材、シール、カバー	kg	2.8	1.8	0.6
端子ボックスプラスチック	kg	0.1	0.4	4.0

表 6-2 多結晶 Si と単結晶 Si の評価データ

アレイパネルの素材 (参照:表2-8)		多結晶Si A	単結晶Si A×Si差	備考 表6-1の素材名
シリコン	kg	26.5	26.5	セル結晶シリコン
板ガラス	kg	207.1	180.2	フロントカバーガラス
アルミニウム	kg	55.4	64.3	フレームアルミ
銅	kg	2.5	2.5	電極材料銅／はんだ
充填剤	kg	41.4	26.6	充填材、シール、カバー
PET	kg	15.8	63.2	端子ボックスプラスチック
PPE	kg	1.4	5.6	端子ボックスプラスチック

日本の森林（平均）に PV を設置した場合の多結晶 Si と単結晶 Si の SI 値を、石炭火力との比較で図 6-9 に示す。多結晶 Si の結果は図 2-9 の Case1 と同じである。単結晶 Si では石炭火力との比が 86.1%から 85.3%となった。ここから、第 2 章で評価した森林植生別評価における PV パネル材料による評価結果への影響は 1%程度と僅かであり、本論文の結論に影響を与えないことを確認した。

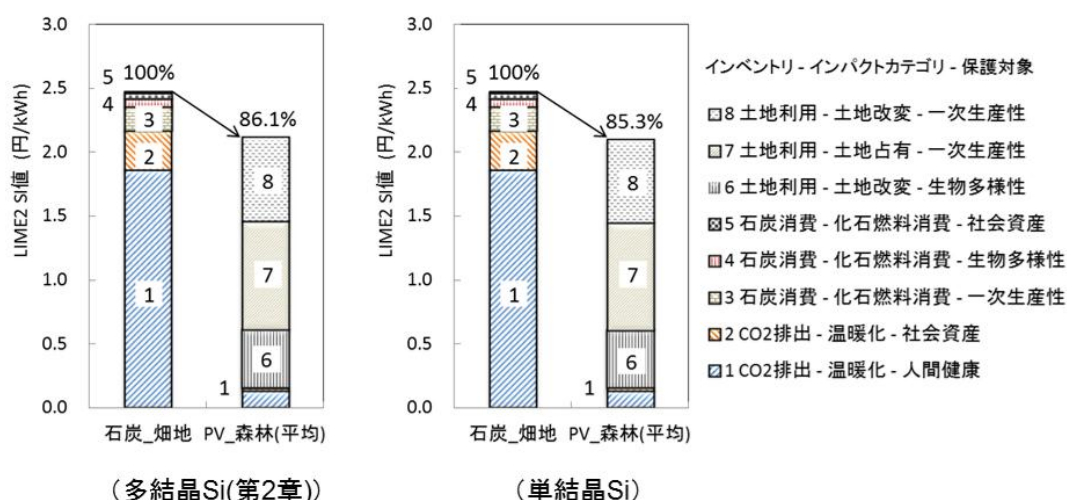


図 6-9 太陽光パネル材料の違いが森林植生別評価に与える影響

(2) 日照による PV 発電量の偏在が第 2 章の結果に与える影響

わが国の日照による PV 発電量 (kWh/kW) の偏在の影響を考察する。発電量の偏在は全国平均を 1 とした場合に、最大が高知県の 1.13、最小が岩手県の 0.87 である[101]。そこで、高知県と岩手県を想定した分析を行った。分析では第 2 章で設定した設備条件を用い、PV 発電の発電量を偏在に応じて変化させた。その結果を図 6-10 に示す。PV 発電の SI 値の石炭火力に対する比率は第 2 章 (全国平均) が 86.1%であるのに対し、高知県が 85.3%、岩手県が 87.0%となった。ここから、第 2 章で評価した森林植生別評価への影響は±1%程度で、本論文の結論に大きな影響を与えないことを確認した。

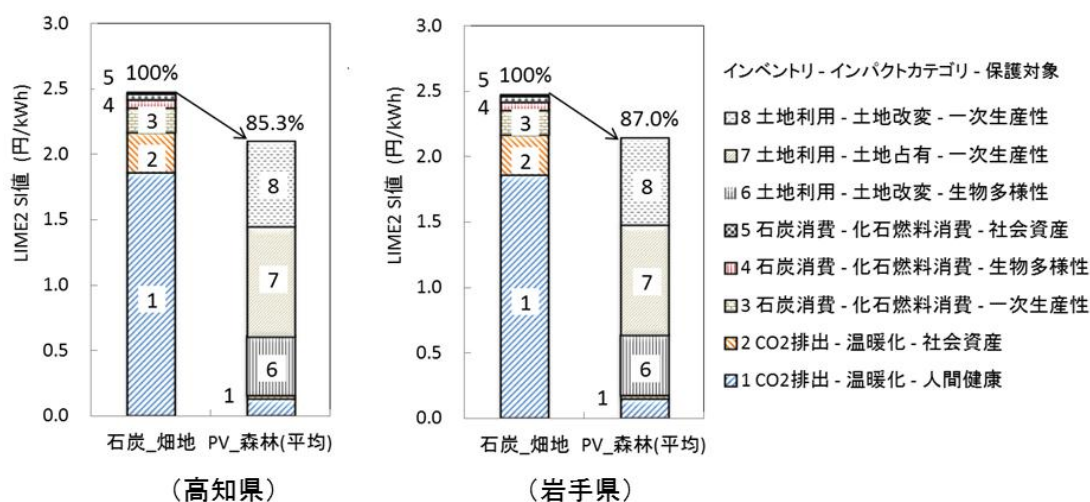


図 6-10 わが国の日照の偏在が森林植生別評価に与える影響

6.5 先行研究との比較

6.5.1 電力システム評価

1.3 節(1)「電力システムの外部コスト分析」に記載した代表的な先行研究と本論文の評価結果を比較することで、本論文の限界を示すとともに、研究成果の位置づけを明確化する。

(1) PV 発電の評価

Ruben らの研究[46]では、複数のパネル構造を有する PV 発電の環境影響を Eco-Indicator99 を用いて統合評価している。PV の主要な環境影響は製造段階の燃料消費とオゾン層破壊であるが、重み付け係数を、階層主義者 HA の場合から個人主義者 II が求めた係数に変えると資源枯渇影響が 5~6 倍増加し、主要因が資源枯渇となる。この結果は本論文と異なるものであり、本論文の評価範囲に石炭以外の資源消費影響とオゾン層破壊が含まれていないことによる限界といえる。一方で、本論文は植生を考慮して生物多様性と一次生産性による土地利用影響を評価できる。

上記の PV 製造時の影響に関しては、以下の先行研究も本論文で扱うことができない限界である。

- ・ PV セル・モジュールの半導体に用いる希少資源や、シリコンの製造エネルギーの影響を指摘した研究[38]
- ・ PV 製造における銀などの資源消費は、大量普及次第で注目すべき環境影響になりえることを指摘した研究[53]
- ・ PV パネルにカドミウムテルル半導体を用いる場合の、毒性と資源採掘影響を指摘した研究[55]

(2) 電力システム比較

スイスの電力システム比較の研究[52]では、PV の環境影響は他の環境配慮型の発電システム（水力、風力、木質バイオマス）より大きく、CO₂排出量は PV が 39g-CO₂/kWh~110g-CO₂/kWh、火力発電が 880g-CO₂/kWh である。本論文は PV 発電と石炭火力の設備データに電中研モデルを引用しており CO₂排出量は PV が 38g-CO₂/kWh で石炭火力が 943g-CO₂/kWh となりスイスの値に近い。一方、第 3 章の木質系バイオマス発電の CO₂排出量は 437g-CO₂/kWh であり PV の 10 倍以上と大きい。この理由は、熱供給を考慮していないこと、チップ製造段階等の評価範囲と条件の違い、によると推測される。

また、LIME2 の SI 値の比較では、PV が 0.15 円/kWh（屋根設置）、木質系バイオマス発電が 1.39 円/kWh（森林整備効果を除外）、火力発電が 2.47 円/kWh であり、バイオマス発電は PV 発電と石炭火力の中間に位置し、CO₂排出影響と同様、熱供給を考慮しないこととチップ化率の設定が上限による影響が表れている。

(3) その他

電力システムの先行研究比較における他の限界は以下のとおりである。

- ・ PV 発電の廃棄段階の主要な環境影響は化石燃料消費であり、リサイクル効果を分析した研究[47]
- ・ 石炭火力の脱硫装置設置コストと健康被害の抑制効果の外部コストを比較した研究[45]
- ・ 石炭火力から排出する SO_x、NO_x、PM₁₀ の国ごとの影響差を示した研究[54]

6.5.2 CO₂ 排出影響と土地利用影響

第 2 章、第 3 章、および第 5 章で用いた LIME2 の重み付け係数は国民に対してアンケートを行うコンジョイント分析に基づいていることから国民意識によるバイアスがかかっており、地域や時間の変化に影響を受けることに注意する必要がある。一方、第 4 章と第 5 章で用いた CO₂ 排出量取引価格や損害賠償費用は社会経済や損害対象などの影響を受ける。そこで、本論文の評価結果や引用データを他の公開データと比較し、国民意識によるバイアスや社会経済などの影響を明らかにする。対象は情報が得られる CO₂ 排出量影響と土地利用影響とする。

異なる評価手法の算定結果を比較することは、評価範囲や金額への換算方法が異なるため、意味を持たないという指摘がある。しかし、ここでは温暖化影響以外に留意すべき設置環境影響を明らかにすることを目的としており、CO₂ 排出影響と土地利用影響において本論文が採用していない手法や分析結果との違いを明らかにしておくことは必要である。

(1) CO₂ 排出影響

図 6-11 に CO₂ 排出影響の評価結果に関する評価手法間の違いを示す。LIME2 の結果は WF の不確実性を示すため WF が平均値と $\pm 3\sigma$ 値の場合を記載している。比較は LCA 手法として EPS2000[26]と ExternE (WTPg(幾何平均)、WTPa(算術平均)、回避コスト) [29]、費用便益手法の外部コスト算出方法として国土交通省のガイドライン (国土交通省 Guide) [37]、米国の EPA Guide[36]、および英国の Sigma ガイドライン (Sigma Guide) [157]、内部コストとして CO₂ 排出量取引価格 (欧州 Credit, 日本 Credit) [71],[72]を比較した。為替は 100 円/US\$、0.77EUR/US\$、0.67 £/US\$とした。LIME2 の WF の不確実性影響は $\pm 44\%$ である。また、全体の傾向として、ExternE_WTPg_min(2005)、Sigma Guide_min(2003)と欧州 Credit(2013)が低い値を示し、EPS2000(2000)が高い値を示している。

ExternE_WTPg_min(2005)は支払意思額の幾何平均を用いており、例えば、極端に高い損失額 (価値) を提示した少数の回答の影響が小さく表れている可能性がある。Sigma Guide_min(2003)は環境影響の回避・修復コストの下限值を表している。このコストは場所と排出量増加前のシナリオにより大きく左右されることを示している。

次に、欧州 Credit(2013)が価格変動により小さくなっている理由を考察する。図 6-12 は原油価格、石炭価格、電力価格と欧州の EU 市場の CO₂ 排出量取引価格の変化を同一グラフ上に示

した図である。図から CO₂ 排出量取引価格は原油価格の影響を受け変動し 2011 年には下がっていることが分かる。しかし、2012 年以降はその傾向がみられず、原油価格や石炭価格が上昇しているが、CO₂ 排出量取引価格は低下している。2012 年は取引の顧客であったわが国が京都議定書から離脱しことが影響している可能性がある。このように CO₂ 排出量取引価格の低下は原油や石油価格の影響と京都議定書の環境変化によるものと考えられる。

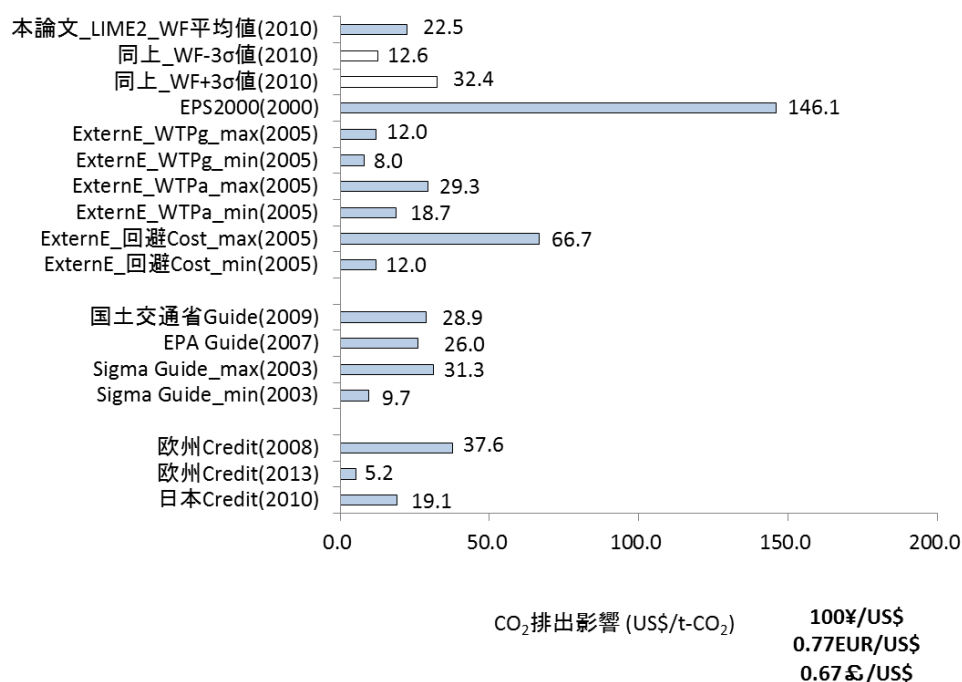


図 6-11 CO₂ 排出影響評価の既存手法との比較

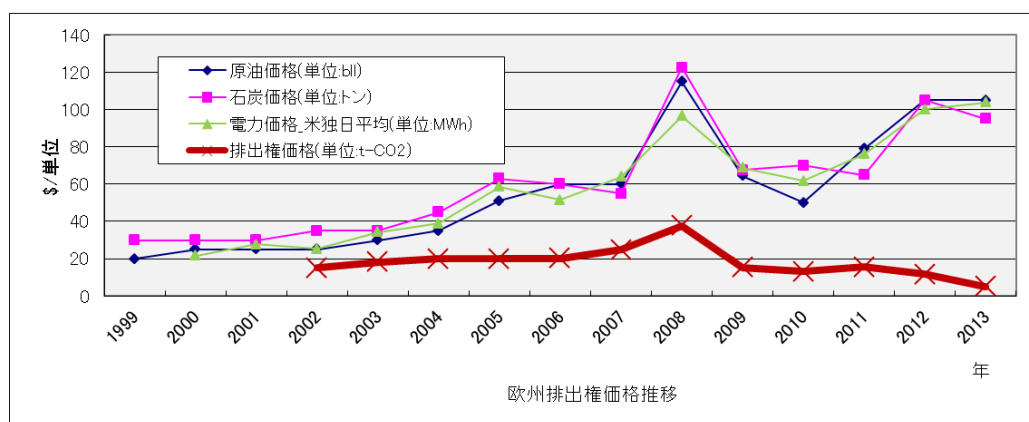


図 6-12 欧州 EU 市場の CO₂ 排出量取引価格の推移（内部コスト）

一方、図 6-11 において EPS2000(2000)の CO₂ 排出影響は同じ LCIA 手法の LIME2 に比べ 5 倍程大きい。この理由は LCA 方法論と影響領域に関する以下の違いによると考察できる。

- EPS2000 の CO₂ 排出に伴う地球温暖化影響は人間健康 (human health)」「生態系の生産能力 (ecosystem production capacity)」「非生物資源 (abiotic stock resources)」「生物多様性 (biodiversity)」を保護対象としている。これに対し LIME2 では地球温暖化影響を「人間健康」と「社会資産」の損失に関連付けており、EPS2000 と比較すると、生態系の生産能力と生物多様性が欠落している。
- 各保護対象の統合のための重み付けを検討する際に、EPS2000 は将来世代への影響を重視している特徴がある。地球温暖化影響は健康影響などの身近な問題より、将来世代への影響が大きいため、EPS2000 は温暖化影響の重み付けが LIME2 よりも大きい。
- EPS2000 は各保護対象の統合のためのコストを、問題を回避するために社会が進んで支払おうとする金額と位置づけ CVM により求めている。統合化のための指数 ELU (Environmental Load Unit) は貨幣価値として評価されたものであり、1ELU は 1EUR に相当する。一方、LIME2 は同貨幣価値をコンジョイント分析によって決めている。CVM とコンジョイント分析は共に支払意思額のアンケート調査を行うが、コンジョイント分析は、評価対象財の様々な属性・組み合わせ別に人々の選好を明らかにし、それらの仮想状況に付された選好の順序を基に支払意思額を推定するため、CVM に比べバイアスのかかり方は抑制されると考えられている。また、CVM は特定の事象を想定した分析に基づくため、その結果を汎用的な指標に適用する場合は便益移転に伴う誤差が 20%から 40%想定されるとの指摘もある[158]。このことは、EPS2000 の評価が大きくなる理由にはならないが、LIME2 と結果が異なる要因の一つである。

また、図 6-11 の ExternE_回避 cost の最大値と最小値では 5 倍ほどの違いがみられ、回避コストのシナリオによる変動幅が大きいことが分かる。

(2) 土地利用影響

土地利用影響に関する本論文の評価結果と他の評価手法と評価対象機能ごとに比較した結果を図 6-13 に示す。図中の本論文の評価結果は第 2 章の LIME2[25]に基づく植生別評価手法を用いて算出した結果を一年あたりの単位面積当たりの環境負荷に割り戻した値である。WF の不確実性を示すため WF が平均値と $\pm 3\sigma$ 値の場合を記載している。PV の設備利用率は 15%で土地改変後はコンクリートになる条件である。比較した手法は、LCA として EPS2000[26]と ExternE(Needs)[76]、費用便益分析の外部コストとして日本の森林を対象とした 2001 年の林野庁公表値[80]、米国 Costanza らによる世界の森林の分析 (Costanza ら_世界森林) [78]、2011 年の (財) 電力中央研究所による日本の森林の分析 (電中研_日本森林) [159]、CJC コンサル

タントによるイギリスの森林の分析（CJC_イギリス森林）[160] である。為替は 100 円/US\$、0.77EUR/US\$、0.67£/US\$とした。LIME2 の WF の不確実性影響は±28%から±29%である。また、全体の傾向として、LIME2 固有の対象機能である一次生産性機能の損失影響は中央アジアを除いて他に比べ大きく一定である。生物多様性機能の損失影響は条件による差があり、特にメキシコ雲霧林は突出して大きい。林野庁公表の多様な森林機能の影響（価値）は算定手法が LIME2 などと異なるが、上記の一次生産性と生物多様性影響のほぼ中間である。一方、市場価値を対象とした評価はどれも小さい。この傾向は、森林の機能が市場価値に反映されていない現状を表しているといえる。

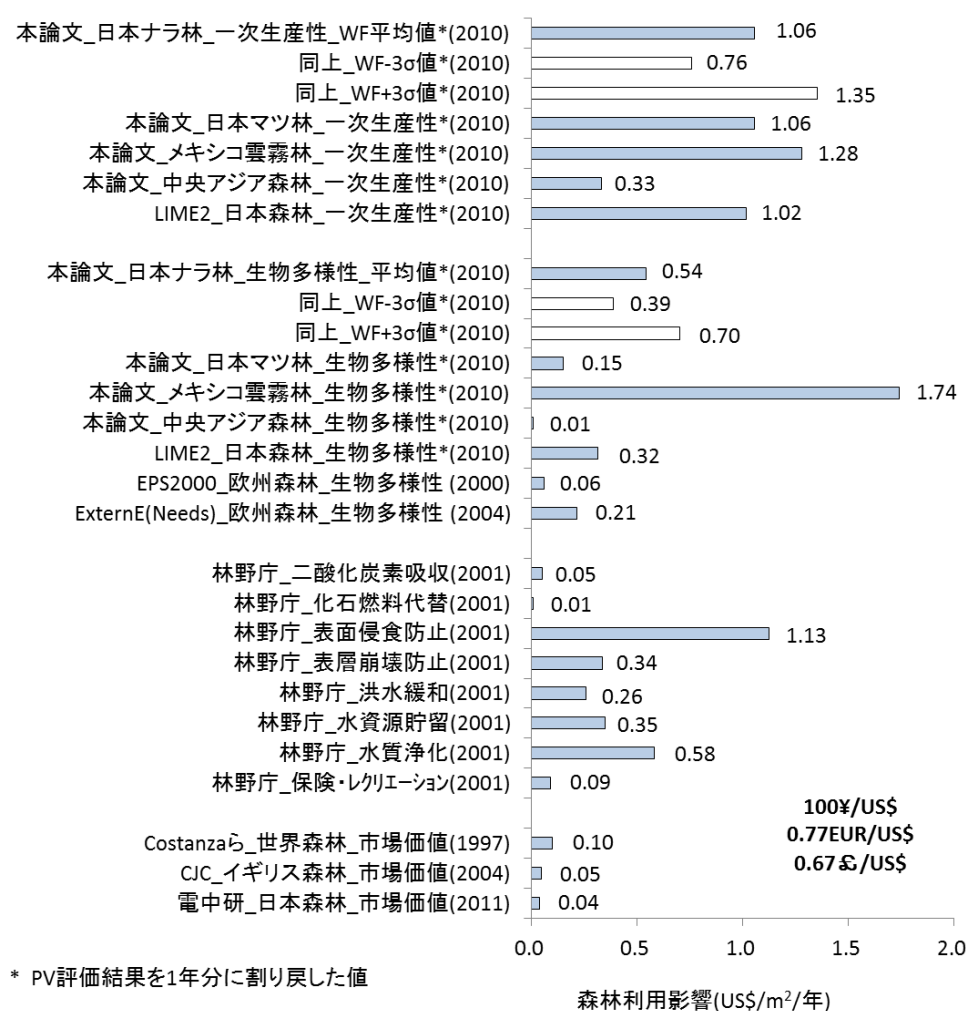


図 6-13 土地利用影響評価の既存手法との比較

次に LCA 手法間の違いを考察する。EPS2000 が LIME2 に比べ小さい理由としては、第 2 章で述べたとおり、①EPS2000 では LIME2 で考慮している機能回復の時間と土地改変影響が考慮されていないこと、②EPS2000 はデータ設定のための分析エリアが北欧の森林生態系に基づいていること、③統合化方法が異なること、による。ExternE は対象地域が異なるが、LIME2 に比較的近い値であるといえる。

最後に LCA 以外の外部コスト分析結果の違いについて考察する。違いが最も大きい日本の森林の比較として、林野庁公表値と電中研の評価値の違いについて述べる。林野庁の公表値は、保険・レクリエーションがトラベルコスト法を採用し、それ以外は代替法である。また、電中研の分析も代替法であるが、林野庁の公表値が過大であるとして再評価したものである。その論点は、例えば土砂流出した際の被害額を見積もる際に、流出した下流に民家のある場合とない場合で評価を変えるべきであり、民家がある場合のみを、すなわち直接の経済的損失のみをカウントすべきという主張である。このような価値評価の考え方の違いにより、代替法はその結果が大きく異なる。Costanza らが主に取り上げる項目は、地球環境保全 (Climate regulation、Nutrient cycling)、土壌保全 (Erosion control)、物質生産 (Raw material)、レクリエーションなどである。この研究は既存の様々な手法を分析し、地球生物圏の生態系全体が行うサービスを価格評価しているが、評価値が小さい理由は、経済的損失のみを計上していること、世界の標準的な森林を想定していること、と推測できる。CJC によるイギリスの森林の評価は林業関係者のヒアリングなどによる市場価格を対象とした調査であり、評価値が小さい。

6.6 評価範囲とその網羅性

(1) 評価指標の比較

第 2 章から第 5 章の評価内容と評価指標を表 6-3 に示す。各章の評価は事例 1 から事例 4 とした。この表から、4 つの事例を通じて分析した評価指標は、①設備故障発生度 (図 1-10「安全」に対応)、②停電発生度 (同「停電」に対応)、③資源消費量 (同「資源枯渇」に対応)、④GHG 排出量 (同「地球環境影響と排出権」に対応)、⑤周辺市民の事故・避難発生度 (同「安全」に対応)、⑥周辺部の事業停止発生度 (同「事業賠償」に対応)、⑦維管束植物成長量 (同「森林機能回復と一次生産性」に対応)、⑧レッドリスト記載維管束植物密度 (同「生物多様性」に対応) である。事例 1 は土地利用影響と温暖化影響のトレードオフの関係を PV 発電と石炭火力を対象に分析した。事例 2 では波及効果である森林施業効果と土地利用影響と温暖化影響のトレードオフの関係をバイオマス発電を対象に分析した。事例 1 と 2 は LCIA を用いた。事例 3 は内部コスト分析により火災影響と温暖化影響のトレードオフの関係を評価した。事例 4 は事例 1 から 3 の組合せであり、LCIA と内部コスト分析を用いて変電所を山間部に設置した場合の、火災、温暖化、土地利用の影響を評価した。

表 6-3 本論文の評価内容と評価指標

	第2章 事例1	第3章 事例2	第4章 事例3	第5章 事例4
適用手法	LCIA	LCIA	内部コスト分析	LCIA 内部コスト分析
評価設備	PV、石炭火力	バイオマス発電	変圧器	変電所全体
設置場所	森林、畑地	人工林	商用ビル	森林
設置地域	日本/海外4地区	日本	海外(指定なし)	日本/中央アジア
影響項目	土地利用 温暖化	森林整備 土地利用 温暖化	ビル内TR火災 温暖化	変電所火災 温暖化 土地利用
評価指標				
直接 影響	① 設備故障発生度	×	×	×
	② 停電発生度	×	×	×
	③ 資源消費量	○	○	○
	④ GHG排出量	○	○	○
間接 影響	⑤ 周辺市民の事故・避難発生度	×	×	×
	⑥ 周辺部の事業停止発生度	×	×	×
	⑦ 維管束植物成長量	○	×	○
	⑧ レッドリスト記載維管束植物密度	○	×	○

(2) 本論文の網羅性

電力システム向け評価としての網羅性を表 6-3 に示した①から⑧の評価指標を用いて考察する。考察にあたっては、スマート・コミュニティの評価指標設定のためのニーズとして国際的な合意を得ている ISO/TC 268[31]の技術報告書 TR37150[161]に記載された利害関係者のニーズに対し、本論文の評価指標を関連付けることにより、未評価項目を調べた。表 6-4 は TR37150 が定義した社会ニーズを電力システムにあてはめ、筆者が設定した評価指標例と本論文の評価指標を併記した表である。TR37150 では利害関係者を市民（社会）、管理者（経済）、環境に分類しており、同表では TR37150 が事例提示している各分類に対応したニーズに対し、ニーズ提供者、影響種別、評価指標例、本論文の評価指標を示している。ニーズ提供者は電力システム本体、または設置環境とし、設置環境の対象を森林と市街に分けた。影響種別はニーズ提供者が電力システムの場合に直接影響、設置環境の場合に間接影響となる。評価指標はニーズを定量化するため指標であり、本論文の評価指標は表 6-3 に対応している。ここで、電力普及率、電力料金、ライフサイクルコスト、情報公開度などの評価指標は、経済分析などの環境影響評価以外の手法で分析する項目であるため本論文の対象外とした。また、本論文の評価指標が対応していない部分を未評価項目として表中に色を付けて示した。

表 6-4 電力システムに対する社会ニーズと本論文の評価指標

対象 (ISO分類)*1	ニーズ (ISO分類)*1	ニーズ提供者	影響 種別	評価指標例	本論文の評価指標
市民	入手・アクセスし易い	電力システム	直接	電力普及率、など	(本論文の対象外)
	購入し易い	電力システム	直接	電力料金、など	
	安全である	電力システム	直接	設備故障率、など	① 設備故障発生度
		設置環境	市街 間接	周辺市民の被災に関する指標	⑤ 周辺市民の事故・避難発生度
	サービスの質が高い	森林	間接	土砂災害や土壌保全に関する指標	未評価項目a)
		電力システム	直接	停電率、など	② 停電発生度*1
		設置環境	市街 間接	地域経済効果	未評価項目b)
		森林	間接	周辺事業者への影響に関する指標	⑥ 周辺部の事業停止発生度
管理者	経済効率が良い	電力システム	直接	ライフサイクルコスト、投資回収年、など	(本論文の対象外)
	操作し易い	電力システム	直接	(ライフサイクルコストに包含)	
	メンテナンスし易い	電力システム	直接	(ライフサイクルコストに包含)	
	性能情報を得やすい	電力システム	直接	情報公開度、など	
	回復力がある	電力システム	直接	(停電率に包含)	
環境	資源の有効利用	電力システム	直接	希少資源消費量、資源消費量	③ 資源消費量
	気候変動の緩和	設置環境	間接	伐採面積、など	⑦ 植物成長量
		電力システム	直接	GHG排出量、など	④ GHG排出量
	汚染防止	電力システム	直接	有害物質排出量(大気)、騒音値、など	未評価項目d)
	生態系保全	設置環境	間接	有害物質排出量(土壌・河川・海洋排出)	未評価項目e)
				生物種数、絶滅危惧種数、など	⑧ レッドリスト記載維管束植物密度

*1) 参考文献[161]

*2) 参考文献[79]

この表から、電力システムとその設置環境が提供するスマート・コミュニティの ISO ニーズに対し、本論文の未評価項目として、a)森林の土砂災害や土壌保全に関する指標、b)地域経済効果、c)森林の水源涵養や快適環境に関する指標、d)有害物質排出量（大気排出）と騒音値、e)有害物質排出量（土壌・河川・海洋排出）が抽出される。そこで、これらの未評価項目に対して今後の対応を含めた考察を行った。

表 6-5 は各未評価項目に対する LCIA と内部コストの検討状況をまとめ、その状況をうけた今後の方針を考察した内容をまとめた表である。未評価項目 a)、b)、c)水源涵養、e)は LCIA の評価範囲外または未整備の項目であり、評価する場合は内部コスト分析を適用する必要がある。この中で、未評価項目 a)と c)の水源涵養に関する指標は内部コストも未検討であり、外部コストの内部化が必要である。その他として、b)の地域経済効果はわが国において統計データの分析による評価例[64]があり、c)景観と d)騒音は ExterneE の評価対象に含まれ、e)有害物質排出量は第 5 章で参照した海洋流出の訴訟事例がある。しかし、地域活性化、景観影響による地価下落、海流や地下水による拡散影響を受ける海洋や地下水の汚染影響は、地域固有の影響を大きく受けることから、個別の案件ごとに内部コスト分析を行うことが望ましい。これらの評価項目は、第 1 章に記載した「地域分散発電設備導入による GHG 排出削減効果と当該エリアの雇用創出効果」、「ガス絶縁変圧器導入によるオイル流出リスク抑制と GHG 排出増加」、「風力発電導入による GHG 排出抑制と低周波騒音影響」、「風力発電導入による GHG 排出抑制と景観影響」のトレードオフの関係に該当するものである。

未評価項目 c)の有害物質排出の大気排出影響については発電所の SO_x、NO_x、ばいじんなどが想定されるが、既に多くの研究がなされており[29],[45],[93]、本論文では対象としなかった。しかし、最新の動向としてグローバルスケールの大気汚染を考慮した LCIA 手法の研究開発が進んでおり[162]、今後はそれらの成果を反映した研究が必要である。

未評価項目 d)の騒音評価については、第 1 章に記載した風力発電などの新しい騒音問題は低周波騒音が対象であるが、LIME2 の手法は自動車の交通騒音を対象としていること、ExternE の内部コストは地価の下落に基づく分析で汎用化が難しいこと、から本論文では対象外とした。ただし、低周波騒音と安眠妨害の関係が明らかになれば LIME2 を用いて汎用的に評価することは可能になるため、ExternE のアプローチも含めて今後の検討課題である。

また、第 1 章に記した「メタンガス回収などの再生燃料を使用する発電設備の導入による資源再生」による波及効果は表 6-4 の評価対象「電力システムの資源消費」に該当する。再生燃料に関する資源消費削減効果は、メタンなどの温室効果ガスを回収して燃料化する電力システムについては CDM で国際的方法論が確立され計算例も多いこと[163]から本論文では対象としなかった。一方、電力システムの設備本体の廃棄段階の評価は材料が有価物として引き取られることが多く[164]、リサイクル率などのシナリオ設定が困難であるため除外した。「風力発電導入による GHG 排出抑制とバードストライク」のトレードオフの問題は、移動する動物を対象とした生物多様性の定量的データが得られないため除外した。今後のデータ蓄積と評価手法の確立が望ま

表 6-5 本論文の未評価項目に対する考察

未評価項目	評価指標	LCIA	内部コスト	今後の方針に関する考察
a	森林の土砂災害や土壌保全に関する指標	対象外	未検討	外部コストの内部化検討が必要
b	地域経済効果	対象外	わが国の統計分析による評価例あり ^{*1)}	先行研究の継続(実績値のフィードバック)が望ましい
c	森林の水源涵養に関する指標	対象外	未検討	外部コストの内部化検討が必要
	快適環境に関する指標	対象外	景観は ExternEにおいて地価評価	景観以外にも多様なメトリックが想定されるが、文化的側面など地域の影響を大きく受けるため、案件毎の内部コスト分析が望ましい
d	有害物質排出量(大気排出)	多くの先行研究が実施済み ^{*3)}		グローバルスケールの大気汚染に関する研究が進んでおり ^{*2)} 、それらの成果を取り入れた研究継続が望ましい
	騒音値	未整備	ExternEにおいて地価評価	LIME2には交通騒音を評価指標があり、ExternEのアプローチも含めて、今後の検討課題である
e	有害物質排出量(土壌・河川・海洋排出)	未整備	海洋では先行訴訟事例あり	地下水、海流など地域の影響を受けるため、案件毎の内部コスト分析が望ましい

*1) 参考文献[64]

*2) 参考文献[162]

*3) 参考文献[29],[93],[45]

れる。

(3) 評価結果の使用者

表 6-4 に示した ISO のスマート・コミュニティ向けのインフラ指標は、ステークホルダーを「市民」「管理者」「環境」としている。ここで、「市民」と「管理者」が扱うコストは内部コストであり、「環境」が扱うコストは、社会全体が支払うコストと捉えると外部コストとなる。したがい、外部コストを扱う本論文の第 2 章と第 3 章の支払者は社会全体であり、この成果を使用者は公共性の高い政府機関や自治体が想定される。一方、第 4 章と第 5 章の一部は火災の損害賠償という内部コストを扱っているため、これらの成果の使用者は「管理者」のなかでも主に電力事業者が想定される。

(4) 統合化方法について

異なる環境影響要因のトレードオフや波及効果を分析するには、①同一の LCIA 手法を適用する、②内部化されたコストを用いる、③共通した評価範囲でかつ同じ分析方法により求めた外部コストによる費用便益分析を行う、という 3 つの選択肢がある。本論文では、事例 1 と事例 2 では①の LIME2 を用いた植生別評価手法とアカマツ人工林評価手法を開発し、事例 3 では②を用いた故障時火災リスク評価手法を開発した。事例 4 では事例 1 と事例 3 の開発手法を適用し、外部コストの内部コスト化を検討した。LCIA は現在も様々な手法の開発が進んでいる。一方、排出権取引や訴訟などによる内部コストについても事例が増えていくことが想定される。今後はこれらの動向を取り入れ、評価結果の更新や、新規領域の評価を検討していくことが望まれる。

6.7 限界と課題

本論文は以下に示す限界を有しており、継続した分析やデータ収集による精度向上が望まれる。

(1) 土地利用影響評価－植生別評価手法

(a) 生物多様性影響の被害係数算出方法の限界

- ・ 主要植生別森林分類のレッドリスト記載種の生息面積は、レッドリスト記載種出現割合に森林面積を乗算したものになると仮定している。
- ・ 主要植生別森林分類の維管束植物の生息種数は森林面積に比例すると仮定している。

(b) 生物多様性影響の被害係数算出時のデータ不足

- ・ 森林面積およびレッドリスト出現割合のデータが得られていないわが国の高山低木林、亜熱帯低木林、低山常緑低木林、竹林の $DF_BDI(trans)$ は、LIME2 の代表値を用いている。
- ・ わが国のレッドリスト出現割合として引用した森林資源モニタリング調査の引用データは第一期報告で、全調査の 12% に留まっている。
- ・ 生物種は森林内で均一に分布するとしており、局所的な分布の変化を考慮できていない。

(c) 一次生産性影響の被害係数算出時のデータ不足

- ・ わが国の潜在 NPP は全国代表値を用い、標高や緯度などによる変化を反映できていない。
- ・ 世界の森林の NPP の算出において、他地域のデータからの推定が含まれている。

(2) 森林施業影響評価－アカマツ人工林評価手法

(a) 評価範囲の限界

- ・ 本論文で策定した評価範囲は土地造成影響と森林施業影響の評価対象が一次生産性のみであり、水源涵養、土砂流出などの他の評価項目は網羅していない。

(b) 算出用データ不足

- ・ 土地利用影響評価に用いた被害係数は LIME2 代表値で、東北地方の特性を考慮していない。
- ・ 放置林の NPP 低下率は一定としており、経年変化が考慮されていない。
- ・ 対象とした民有アカマツ人工林の林齢に対する特性は代表的な特性[133]が得られることを前提としており、森林施業が滞っているなどの個別の状況は考慮されていない。
- ・ チップ製造設備の残渣はスギやヒノキの場合であり、アカマツのデータではない。
- ・ アカマツの生息場所による間伐による成長量促進や潜在 NPP の違いが考慮されていない。

(3) 火災影響評価－故障時火災リスク評価手法

(a) 評価範囲の限界

- ・ 評価範囲は隣接建物までとしており、例えば通行止めなどの他のインフラシステムへの波及的な影響は含まれていない。
- ・ 建物や地域の防火対策などの効果を考慮できていない。

(b) 算出用データ不足

- ・ GIT の故障発生確率に関する情報はまだ少なく香港電力の情報[151]のみに基づいている。
- ・ テナントの営業補償のデータは米国の情報に基づいており、地域の違いを考慮できていない。

(4) 設置環境影響総合評価

(a) 算出用データ不足

- ・ 外部コストの内部コスト化においては、CO₂排出量取引価格と停電時供給補償額ともに不確定性を考慮せざるを得ない。

第7章 結論

本論文では電力システムの設置環境影響を **LIME2** と内部コストを用いて温暖化影響と統合評価する手法を開発し事例評価を行った。設置環境影響評価のために開発した手法は、**LIME2** の土地利用被害係数を森林植生別に算出する植生別評価手法、森林施業効果を同被害係数として林齢別に算出するアカマツ人工林評価手法、および内部コストにより変圧器故障時の火災影響を設置条件別に定量化する故障時火災リスク評価手法の 3 つである。これらの手法を具体的な事例として PV 発電、木質系バイオマス発電、変圧器、および変電所に適用した。その結果、それぞれの設置環境影響は温暖化影響に対して留意すべきインパクトを有し、そのインパクトは設置条件の影響を受けることを定量化し、電力システムごとにトレードオフと波及効果の特徴を明らかにした。

事例評価では、①PV 発電を山間部に設置する場合の温暖化影響削減効果と土地利用影響、②バイオマス発電を導入する場合の温暖化影響削減効果、土地利用影響、および、燃料供給のための森林施業効果、③都市ビル地下変電所に **GIT** を設置する場合の故障時火災影響削減効果と温暖化影響、④山間部に **GIS-GIT** 変電所を建設する場合の土地利用削減効果、故障時火災影響削減効果、および温暖化影響、を統合評価した。事例評価から、①PV 発電の土地利用影響は設置場所の森林植生の影響が大きく温暖化影響のトレードオフの関係に影響を与えること、②バイオマス発電へのチップ提供のための森林施業効果は温暖化影響に比べ極めて高いこと、③ビル地下に設置した変圧器の故障時火災影響は温暖化影響より大きくビル入居テナント種によって大きく変わること、④山間部に変電所を設置した場合は **LCIA** と内部コスト分析で評価地域の森林植生の違いで結果が異なる場合があり両手法の統合を検討する必要があること、不確実性を考慮した統合化検討の結果、ガス絶縁機器の不燃性能による供給補償低減効果が **SF₆** リークによる温暖化影響を上回ること、を明らかにした。各事例評価の要点は以下のとおりである。

事例 1：山間部へ PV 発電を設置する場合の土地利用影響は大きく、生物多様性が豊富で成長量の早い森林では **CO₂** 排出量削減効果を打ち消し石炭火力とほぼ同等になる。この影響は PV の単位容量敷地面積により変わり、15,200m²/MW から 11,000m²/MW に抑制できると約 25%削減する。

事例 2：バイオマス発電を導入することによるアカマツ人工林の施業が維持されることによる環境改善効果は、土地利用や **GHG** 排出の影響に比べ十分に大きい。特に燃料チップの供給プロセス（森林の施業方法）が重要である。

事例 3：都市部のビルに設置された変圧器において、ビルの入居テナントの営業停止を保証するリスクが、**GIT** の **SF₆** ガスリークや通電損失による温暖化影響、事故時供給停止補償、人的被害、建物損害などの他の項目に比べ大きく重要な項目になる。

事例 4：山間部へ変電所を設置する場合、電力損失の温暖化影響と変電所火災による供給保障の影響が大きく、SF₆ ガスリークと土地利用影響は小さいため、火災影響が少ない GIS-GIT 変電所の導入が効果的になる。しかし、CO₂ 排出影響の内部コストが上昇すると、供給保障の影響が相対的に下がり、GIS-GIT 変電所の導入効果は小さくなる。

ここから、電力システムの導入検討時には、温暖化影響以外に、少なくとも今回取り上げた 3 つの設置環境影響については、その電力システムの特性と設置条件を考慮した評価が必要である。

また、今後の課題としては、個別の案件ごとにその地域のデータに基づいて評価すべき項目と、本論文で取り上げたように、標準的な指標を構築して効率的に評価すべき項目を見極めて、研究開発を継続することが望ましい。特に、騒音影響は標準的な指標が提供できる領域であり、研究開発が望まれる。なお、本論文において開発した手法における今後の課題を以下に記す。

- ・ 土地利用影響評価の植生別評価手法の生物多様性被害係数算出過程の精度向上
 - 主要植生別森林分類の維管束植物およびレッドリスト記載種の生息種数の森林内分布の反映
- ・ 火災影響評価の故障時火災リスク評価手法の評価範囲の拡大
 - 火災が及ぼす他のインフラシステムへの波及的な影響の評価
 - 火災リスクの抑制対策の反映

謝辞

本学位論文をまとめるにあたり、多くのご支援とご指導を賜りました指導教官である東京工業大学 奥野喜裕教授に感謝の意を表します。また、博士課程への進学および研究全般にわたり支援をいただいた東京工業大学 栗山透連携教授、環境影響評価について多くの支援とご指導を賜りました東京都市大学 伊坪徳宏教授、論文全般に適切なご指導を賜りました東京工業大学 堀岡一彦教授、岡村哲至教授、末包哲也教授、に感謝申し上げます。

事例評価におきましては、貴重な情報を教示いただいた Swerea IVF(元 Chalmers 工科大学) Raul Carlson 博士、Sandra Roos 氏、有益な議論と支援をいただいた株式会社東芝の電力・社会システム技術開発センター 風尾幸彦センター長、村上俊明元首席技監、宮崎保幸部長、高橋玲子主務、社会インフラシステム社 横田岳志カンパニー社長、電力流通システム事業部 高木喜久雄技師長、渡辺憲治部長、上原京一元主幹、小林恒夫元主幹、堀田明元主査、内田葉子参事、細川修参事、電力システム社 火力・水力事業部 林正孝技師長、高畑和夫元主幹、コミュニティ・ソリューション社 事業開発センター 野間毅参事、小西千晶参事、に感謝いたします。

論文のとりまとめにあたっては、株式会社東芝 コミュニティ・ソリューション社 技術企画部 中川和明部長、牛丸茂雄グループ長、鈴木謙二参事に理解と支援をいただきました。ここに感謝申し上げます。

最後に、論文執筆を温かく見守り、辛抱強く支援してくれた家族に感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 環境省 低炭素社会構築に向けた再生可能普及拡大方策等検討会：「低炭素社会づくりのためのエネルギーの低炭素化に向けた提言」，平成 24 年度,2012
<http://www.env.go.jp/earth/report/h25-01/full.pdf>, (参照 2014-8-6)
- [2] Bert Metz, Ogunlade Davidson, Heleen de Coninck, Manuela Loos, Leo Meyer:
“Carbon Dioxide Capture and Storage”, IPCC Special Report, Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2005,
http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srccs/srccs_wholereport.pdf, (参照 2014-10-12)
- [3] 佐藤純一：「24/36kV 固体絶縁スイッチギヤの開発」，日本機械学会誌, Vol. 107, p.395, 2004.5
- [4] 西村嘉晃, 杉山大志：「非 CO₂ 温室効果ガスの削減について」，一般財団法人 電力中央研究所, 研究報告 Y07012, 2008
- [5] Daniel Weisser: “A guide to life-cycle greenhouse gas (GHG) emissions from electric supply technologies”, PESS / IAEA, Elsevier, ISSN 0360-5442, ZDB-ID 1968257. - Vol. 32.2007, 9, pp.1543-1559
- [6] 本道祐樹, 内山洋司, 森泉由恵：「ライフサイクル CO₂ 排出量による発電技術の評価-最新データによる再推計と前提条件の違いによる影響-」，一般財団法人 電力中央研究所, 研究報告 Y99009, 2000
- [7] 今村栄一, 長野浩司：「日本の発電技術のライフサイクル CO₂ 排出量評価-2009 年に得られたデータを用いた再推計-」，一般財団法人 電力中央研究所, 研究報告 Y09027, 2009
- [8] 竹内昭, 「電力の安定供給を目指して」，中部電力, 電気学会誌, 119 巻 6 号, p.373, 1999
- [9] 独立行政法人 鉄道建設・輸送施設整備支援機構, 「鉄道建設技術」，
<http://www.jrtt.go.jp/02Business/Construction/const-rtHenden.html>, (参照 2014-10-12)
- [10] 株式会社 日本総合研究所, 株式会社 森のエネルギー研究所：「平成 23 年度木質系震災廃棄物等の活用可能性調査報告書(2012 年 3 月)」，林野庁委託事業, 3.4 項, 2012
- [11] 独立行政法人 都市再生機構：「大規模太陽光発電所(メガソーラー)の稼働について(平成 26 年 1 月 28 日)」，<http://www.ur-net.go.jp/west/press/pdf/20140128.pdf>, (参照 2014-10-12)
- [12] 日本経済新聞 電子版：「メガソーラー、長野県内で反発相次ぐ 上田市や伊那市(2013 年 11 月 12 日)」，日経スマートシティコンソーシアム,
<http://bizgate.nikkei.co.jp/smartcity/kanren/201311151229.html>, (参照 2014-10-12)

- [13] 東信ジャーナル: 「メガソーラー建設に反対運動(2013 年 10 月 26 日)」,
 <http://shinshu.fm/MHz/22.56/archives/0000427710.html>, (参照 2014-10-12)
- [14] 富士市: 「富士・愛鷹山麓地域環境管理計画の対象区域における太陽光発電設備の設置に係る土地利用事業に関する行政指導方針」, 平成 25 年 12 月 1 日
- [15] Jackson Bishop, Alonso Rodriguez: “Electrical Transformer Fire and Explosion Protection”, KA Factor Group Inc., March 2011
- [16] 国土交通省国土技術政策総合研究所: 「平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震被害調査報告(平成 24 年 3 月)」, 国総研資料 第 674 号, 2012
- [17] 環境省総合環境政策局: 「風力発電施設に係る環境影響評価の基本的考え方に関する検討会報告書(資料編)」, 平成 23 年 6 月
- [18] 独立行政法人 労働政策研究・研修機構: 「諸外国において任意規範等が果たしている社会的機能と企業等の投資行動に与える影響の実態に関する調査研究」, 労働政策研究報告書, No. 88, 2007
- [19] European Commission, “Principles of EU Environmental Law - The Polluter Pays Principle”, Workshop on EU Legislation, 2012
- [20] ISO 14040: “Environmental Management-Life cycle assessment-Principles and framework,” ISO International Standards, 2006
- [21] ISO 14044: “Environmental management-Life cycle assessment-Requirements and guidelines,” ISO International Standards, 2006
- [22] ISO/TR 14047: “Environmental management-Life cycle assessment- illustrative examples on how to apply ISO 14044 to impact assessment situations,” ISO International Standards, 2012
- [23] ISO/TR 14049: “Environmental management-Life cycle assessment- illustrative examples on how to apply ISO 14044 to goal and scope definition and inventory analysis,” ISO International Standards, 2012
- [24] 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング株式会社: 「アメリカ及びイギリスにおける費用便益分析の手法と実例に関する調査研究(平成 24 年 2 月)」, 平成 23 年度会計検査院委託業務報告書
- [25] 伊坪徳宏, 稲葉敦: 「LIME2-意思決定を支援する環境影響評価手法」, 一般社団法人 産業環境管理協会, 2010
- [26] Bengt Steen: “A systematic approach to environmental priority strategies in product development (EPS) Version 2000 – Models and data of the default method”, CPM report 1999:5, Chalmers University of Technology, May 1999

- [27] Mark Goedkoop and Renilde Spriensma: “The Eco-indicator 99 A damage oriented method for Life Cycle Assessment Methodology Report Third edition”, Pre Consultants B. V., PRé Consultants, 2001
- [28] Mark Goedkoop, Reinout Heijungs, Mark Huijbregts, An De Schryver, Jaap Struijs, Rosalie van Zelm: “ReCiPe 2008, A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level”, 6 January 2009
- [29] Peter Bickel, Rainer Friedrich: “ExternE Externalities of Energy Methodology 2005 Update”, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Universität Stuttgart, Germany, 2005
- [30] 一般財団法人 日本規格協会: 「ISO 14000 ファミリー規格開発情報」, 2014 年 7 月, <http://www.jsa.or.jp/stdz/iso/iso14000.asp>, (参照 2014-10-12)
- [31] ISO TC 268/SC 1: “Smart community infrastructures Executive summary” , http://www.iso.org/iso/executive_summary_iso_37150.pdf, (参照 2014-10-12)
- [32] みずほ情報総研株式会社: 「EC 環境フットプリント及びサステナビリティコンソーシアムの概要」, 経済産業省 グローバル対応分科会, 第 2 回サプライチェーンを通じた組織の温室効果ガス排出等に関する調査・研究会, 2011 年 12 月 26 日
- [33] Clean Development Mechanism: “Grid-connected electricity generation from renewable sources Version 14.0” , ACM0002 Large-scale Consolidated Methodology, <http://cdm.unfccc.int/methodologies/DB/MPY3HVVJIMTKE5P0UNTYE827D6Q7EHB>, (参照 2014-10-12)
- [34] 環境省 市場メカニズム室: 「炭素市場の現状と傾向 2012 の概要」, 平成 24 年 8 月 1 日
- [35] 環境省: 「温室効果ガス排出量算定・報告・公表制度」, 環境省ホームページ, <http://ghg-santeikohyo.env.go.jp/>, (参照 2015-5-6)
- [36] National Center for Environmental Economics Office of Policy U.S. Environmental Protection Agency: “Guidelines for Preparing Economic Analyses”, December 17, 2010
- [37] 国土交通省: 「公共事業評価の費用便益分析に関する技術指針（共通編）」, 平成 21 年 6 月
- [38] 伊坪徳宏, 原田幸明: 「環境エネルギー材料に関わる LCA に関する文献のレビュー作成報告書」, 物質・材料研究機構 元素戦略センター, 2010 年 3 月
- [39] 湯山安由美: 「重要社会インフラの相互依存性解析に関する調査－災害時における電力システムの機能評価に向けて－」, 一般財団法人 電力中央研究所, 研究報告 N12017, 2013 年 5 月

- [40] 本間俊充, 木村仁宣, 高原省五, 加藤尊秋, 西川雅史: 「原子力発電の社会・環境経済学的研究」, 平成 21-23 年度原子力安全基盤調査研究(その 2), 日本原子力研究開発機構, 平成 22 年 2 月
- [41] Hamid Reza Feil, Navid Akar, Hossein Lotfizadeh, Mohammad Bairampour, Sina Nasiri: “Risk analysis of geothermal power plants using Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) technique”, *Energy Conversion and Management* 72, pp.69–76, 2013
- [42] 窪田ひろみ, 馬場健司, 本藤祐樹: 「気候変動緩和策としての低炭素発電技術および適応策に対する人々の意識と受容性」, 一般財団法人 電力中央研究所, 研究報告 V10023, 2011 年 5 月
- [43] 窪田ひろみ, 海江田秀志, 稗貫峻一, 本藤祐樹: 「地熱発電開発と温泉事業との相互理解と地域共生に向けた方策」, 一般財団法人 電力中央研究所, 研究報告 V10033, 2012 年 4 月
- [44] 古池祥蔵, 大田修一: 「確率論的火災リスク評価システムの開発」, 火災(252 号), Vol.51, No.3, pp.11-17, 2001 年 6 月
- [45] 石川佳宏: 「火力発電所から排出される硫黄酸化物の外部性評価」, 筑波大学, 2003
- [46] Ruben Laleman, Johan Albrecht, Jo Dewulf: “Life cycle analysis to estimate the environmental impact of residential photovoltaic systems in regions with a low solar irradiation”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(1), pp.267-281, 2011
- [47] Z. W. Zhong, B. Song, P. E. Loh: “LCAs of a polycrystalline photovoltaic module and a wind turbine”, *Renewable Energy*, 36(8), pp.2227-2237, 2011
- [48] 野田英樹, 高橋玲子, 細川修: 「変電所の環境影響評価比較」, 日本 LCA 学会誌, Vol.7 No.3, pp.274-280, July 2011
- [49] 高橋玲子, 野田英樹, 高畑和夫: 「LCA 手法を用いた地熱発電システムの環境影響評価」, 日本 LCA 学会誌, Vol.9 No.3, pp.234-241, July 2013
- [50] みずほ情報総研: 「太陽光発電システムのライフサイクルに関する調査研究」, 平成 19-20 年度 NEDO 報告書, 2009
- [51] 株式会社 森のエネルギー研究所: 「木質バイオマス LCA 評価事業報告書」, 平成 23 年度 林野庁補助事業 地域材供給倍增事業, 2013
- [52] Niels Jungbluth: “Life Cycle Assessment of Crystalline Photovoltaics in the Swiss ecoinvent Database”, *PROGRESS IN PHOTOVOLTAICS: RESEARCH AND APPLICATIONS*, 2005
- [53] Philip Nuss, Matthew J. Eckelman: “Life Cycle Assessment of Metals: A Scientific Synthesis” , Public Library of Science, PMC4085040, 2014, <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4085040/>, (参照 2015-5-14)

- [54] Seiss Centre for Life Cycle Inventories: “Life Cycle Inventories of Energy Systems: Results for Current Systems in Switzerland and Other UCTE Countries”, ecoinvent report No.5, 2007.12
- [55] Niels Jungbluth, Matthias Tuchschnid, Mariska de Wild-Scholten: “Life Cycle Assessment of Photovoltaics: Update of ecoinvent data v2.0”, Working Paper, ESU-services Ltd., 2008
- [56] みずほ情報総研: 「定置用燃料電池システム及び燃料電池自動車のライフサイクル評価に関する調査」, 平成 19 年度 新エネルギー・産業技術総合開発機構委託業務成果報告書, 2008
- [57] E.Martinez, F.Sanz, S.Pellegrini, E.Jimenez, J.Blanco: “Life cycle assessment of a multi-megawatt wind turbine”, *Renewable Energy* 34, pp.667–673, 2009
- [58] 伊藤雅一: 「北社メガソーラのライフサイクル評価」, 第 13 回太陽光発電システム研究発表会論文集, pp.34-36, 2011
- [59] Peter Bayer, Ladislaus Rybach, Philipp Blum, Ralf Brauchler: “Review on life cycle environmental effects of geothermal power generation”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 26, pp.446–463, 2013
- [60] 湯龍龍, 横山隆壽, 窪田ひろみ, 下田昭郎: 「日本における CCS 付き石炭火力発電のライフサイクルアセスメント(その 2)ー太陽光発電、地熱発電との環境影響比較評価ー」, 一般財団法人 電力中央研究所, 研究報告 V13021, 2014 年 5 月
- [61] Paul E. Hardisty, Tom S. Clark and Robert G. Hynes: “Life Cycle Greenhouse Gas Emissions from Electricity Generation: A Comparative Analysis of Australian Energy Sources”, *Energies* 2012, 5, pp.872-897; doi:10.3390/en5040872, 2012
- [62] 梶山啓輔, 岡島敬一, 内山洋司: 「ライフサイクルからみた蓄電池の電力負荷平準化等によるエネルギー・環境改善効果」, 日本 LCA 学会誌 2(4), pp.379-385, 2006
- [63] 岡島敬一, 簗生容子, 内山洋司: 「気温・日射量を考慮したヒートポンプ・太陽光発電の地域別導入評価」, 日本 LCA 学会誌, Vol.7, No.2, pp.152-163, 2011
- [64] 松本直也, 本藤祐樹: 「拡張産業連関表を利用した再生可能エネルギー導入の雇用効果分析」, 日本エネルギー学会誌 90(3), pp.258-267, 2011
- [65] 蟻生俊夫, 後藤久典: 「需要家から見た供給信頼度の重要性和と停電影響ー国内需要家調査および首都圏停電調査にもとづく分析ー」, 一般財団法人 電力中央研究所, 研究報告 Y06005, 2007 年 3 月
- [66] 富士総合研究所: 「求められる LCA に基づく費用効果分析を考慮したリサイクル政策」, みずほレポート, 02-02F, 2002

- [67] 小杉隆信: 「CO₂ 削減技術としての燃料電池自動車とバイオエタノール燃料の環境影響評価」, 平成 24 年電気学会全国大会, Journal of Japan Society of Energy and Resources, Col.30, No.6, pp.1-9, 2008
- [68] Stefan Hirschberg, P. Burgherr: “Damage costs and external costs of non-nuclear accidents”, Paul Scherrer Institut (PSI), Workshop on Approaches to Comparative Risk Assessment, Warsaw, Poland, pp.20-22, October 2004
- [69] David A Patterson: “A Simple Way to Estimate the Cost of Downtime”, LISA2002 Paper, University of California, 2002
- [70] A. C. Pigou: “The Economics of Welfare (1920) Fourth edition”, Macmillan, 1932
- [71] 平野信行: 「排出量取引における市場機能強化」, 三菱東京 UFJ 銀行, 環境省国内排出量取引制度検討会, 2008 年 5 月 9 日
- [72] 石油エネルギー技術センター: 「欧州排出量取引制度 EU-ETS に関する最新動向」, JPEC レポート, 2013 年度第 2 回, 平成 25 年 4 月 19 日
- [73] 公益財団法人 地球環境戦略研究機構: 「図解 京都メカニズム」, 第 22 版, 2014 年 3 月
- [74] 河北新聞オンラインニュース: 「避難区域山林 1 ヘクタール 100 万円 東電方針(2014 年 09 月 19 日)」, http://www.kahoku.co.jp/tohokunews/201409/20140919_63007.html, (参照 2014-10-12)
- [75] 一般財団法人 高度情報科学技術研究機構: 「化石燃料利用の外部性研究」, 原子力百科事典 ATOMICA, No01-01-03-01, 2007
- [76] Walter Ott, Martin Baur, Yvonne Kaufmann, Rolf Frischknecht, Roland Steiner: “Assessment of Biodiversity Losses”, NEEDS, New Energy Externalities Developments for Sustainability Integrated Project, Deliverable D.4.2.- RS 1b/WP4 - July 06, 2004
- [77] A.Ricc, ISIS-with contributions from NEEDS parthersi: “Policy use of the NEEDS results”, NEEDS - New Energy Externalities Developments for Sustainability, 2009
- [78] Robert Costanza, Ralph d'Arge, Rudolf de Groot, Stephen Farberk, Monica Grasso, Bruce Hannon, Karin Limburg, Shahid Naeem, Robert V. O'Neill, Jose Paruelo, Robert G. Raskin, Paul Suttonkk & Marjan van den Belt: “The value of the world's ecosystem services and natural capital”, Nature vol.387, pp.253-260, 1997
- [79] 日本学術会議: 「地球環境・人間生活にかかわる農業及び森林の多面的な機能の評価について (答申)」, 平成 13 年 11 月
- [80] 林野庁: 「森林が有する機能の定量的評価」, http://www.rinya.maff.go.jp/j/keikaku/tamenteki/con_3.html, (参照 2014-10-12)
- [81] 菅原鈴香: 「貧困解消に向けての社会調査の重要性、可能性と困難性」, JICA 国際協力総合研修所(名古屋大学), 2005 年 3 月

- [82] Thomas Koellner and Roland W. Scholz: “Assessment of Land Use Impacts on the Natural Environment-Part 1: An Analytical Framework for Pure Land Occupation and Land Use Change”, *Int J LCA* 12 (1), pp.16–23, 2007
- [83] Thomas Koellner and Roland W. Scholz: “Assessment of Land Use Impacts on the Natural Environment- Part 2: Generic Characterization Factors for Local Species Diversity in Central Europe”, *Int J LCA* 13 (1), pp.32–48, 2008
- [84] Laura de Baan, Rob Alkemade and Thomas Koellner: “Land use impacts on biodiversity in LCA: a global approach”, *Int J Life Cycle Assess* (2013) 18, pp.1216–1230, 2013
- [85] Brad Ewing, David Moore, Steven Goldfinger, Anna Oursler, Anders Reed and Mathis Wackernagel: “Ecological Footprint Atlas 2010”, Oakland: Global Footprint Network, 13 October, 2010
- [86] Tuomas Mattila, Tuomas Helin, Riina Antikainen, Sampo Soimakallio, Kim Pingoud and Helena Wessman: “Land use in life cycle assessment”, *THE FINNISH ENVIRONMENT* 24 2011, Finnish Environment Institute, 2011
- [87] Arnold Tukker, Martin Charter, John Ehrenfeld, Gjalt Huppes, Reid Lifset, Theo de Bruijn: “Handbook on Life Cycle Assessment”, *ECO-EFFICIENCY IN INDUSTRY AND SCIENCE VOLUME 7*, 2002
- [88] 内閣府:「電源特性比較表」, 資料第 2 号,
<http://www.aec.go.jp/jicst/NC/senmon/vision/siryo/vision06/siryo2.pdf>, (参照 2014-8-6)
- [89] 独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO): 「大規模太陽光発電システム導入の手引書」, 2011
- [90] 飯田市地球温暖化対策課 地域エネルギー担当, 「飯田市における公民協働の太陽光発電事業」, 中部ブロック地球温暖化対策事例紹介セミナー, 2011 年 10 月 19 日
- [91] 神奈川県, 「メガソーラーの誘致に係る基礎調査の結果一覧」,
<http://www.pref.kanagawa.jp/uploaded/attachment/422081.pdf>, (参照 2014-10-12)
- [92] 真鍋勇介, 原亮一, 北裕幸: 「再生可能エネルギー発電の大量導入と供給信頼度を考慮した電源開発計画」, *電気学会論文誌 B*, 133(6), pp.505-514, 2013
- [93] 野田英樹, 高橋玲子: 「自然エネルギー導入時の環境影響評価」, 平成 24 年電気学会全国大会, IEE 6-001, 2012
- [94] 清野 裕: 「気候的植物生産力モデルと土壌物理性・土壌水分の気候学的推定の試み」, *土襲の物理性* 第 61 号, pp.11-18, 1990
- [95] 金秀耿, 河野良坪, 佐藤誠, 金田一清香, 赤嶺嘉彦, 前真之, 坂本雄三: 「日射ダイレクトゲインとヒートポンプを利用した蓄熱式床暖房システムの省エネルギー性能」, *日本建築学会環境系論文集*, Vol.76 No.660, pp.169-176, 2011

- [96] 環境省自然環境局：「生物多様性条約 第 4 次国別報告書」, 2009 年 3 月
- [97] 農林水産省：「森林資源モニタリング調査について」, 森林における生物多様性保全の推進方策検討会, 委員会資料, 2009 年 3 月
- [98] 環境省：「森林における生物多様性の保全及び持続可能な利用の推進方策」, 森林における生物多様性保全の推進方策検討会, 平成 21 年 7 月
- [99] 環境省：「環境白書・循環型社会白書」, 平成 20 年版
- [100] 国家戦略室：「コスト等検証委員会報告書」, エネルギー・環境会議コスト等検証委員会, 平成 23 年 12 月 19 日
- [101] 一般社団法人 太陽光発電協会：「固定価格買取制度を利用した太陽光発電事業について」, 2012,
<https://www.pref.yamanashi.jp/energy-seisaku/documents/jpeasangyofooramukouen.pdf>, (参照 2014-8-6)
- [102] 庄司聰, 角谷英一郎, 吹上精一, 大場和彦：「苫東厚真火力発電所における生態系に配慮した緑化手法の採用」, 平成 13 年度土木学会北海道支部論文報告集, 第 58 号, pp.994-997, 2001
- [103] 資源エネルギー庁：「最近の太陽光発電市場の動向及び前回のご指摘事項について」, 省エネルギー・新エネルギー部, 2014
- [104] Antonia Eastwood, Georgy Lazkov and Adrian Newton: “The Red List of Trees of Central Asia”, IUCN, 2011
- [105] Mario González-Espinosa, Jorge A. Meave, Francisco G. Lorea-Hernández, Guillermo Ibarra-Manríquez and Adrian C. Newton: “The Red List of Mexican Cloud Forest Trees”, IUCN, 2011
- [106] Jose Luis Vivero, Michelle Szejner, James Gordon and Georgina Magin: “The Red List of Trees of Guatemala”, IUCN, 2011
- [107] Ministry of the Environment: “Red List of Threatened Plants of Japan”, IUCN, 2007
- [108] The Oak Ridge National Laboratory Distributed Active Archive Center: “NET PRIMARY PRODUCTIVITY (NPP) Data Sets”, Get ORNL DAAC Data Products and Services, 2013, http://daac.ornl.gov/get_data.shtml, (参照 2014-10-13)
- [109] Emily B. Peters, Kirk R. Wythers, John B. Bradford and Peter B. Reich: “Influence of Disturbance on Temperate Forest Productivity”, *Ecosystems* vol.16, pp.95–110, 2013
- [110] Manuel R. Guariguata, Rebecca Ostertag: “Neotropical secondary forest succession: changes in structural and functional characteristics”, *Forest Ecology and Management* 148, pp.185-206, 2001
- [111] John A. Parrotta, Christoph Wildburger, Stephanie Mansourian: “Understanding Relationships between Biodiversity, Carbon, Forests and People: The Key to

- Achieving REDD+ Objectives”, A Global Assessment Report, the Global Forest Expert Panel on Biodiversity, Forest Management and REDD+, International Union of Forest Research Organizations (IUFRO), World Series Vol. 31, 2012
- [112] Food and Agriculture Organization of the United Nations Rome: “Global Forest Resources Assessment 2010”, Main report, FAO Forestry Paper 163, 2010
 - [113] Helmut Haberl, Karl-Heinz Erb, Fridolin Krausmann: “Global human appropriation of net primary production (HANPP)” , The Encyclopedia OF EARTH, 2013, <http://www.eoearth.org/view/article/153031/>, (参照 2015-5-14)
 - [114] 清野 裕: 「自然植生の純一次生産力と農業気候資源の分布図」, 国立研究開発法人 農業環境技術研究所, <http://www.niaes.affrc.go.jp/topics/g7/>, (参照 2015-5-14)
 - [115] 林野庁: 「木質系バイオマスと固定価格買取制度について」, 林野 No.63, 2012
 - [116] 株式会社 三菱総合研究所: 「岩手県、宮城県及び福島県の農山漁村における再生可能エネルギー導入可能性等調査報告書」, 平成 23 年度農林水産省委託事業, 2012
 - [117] 日本学術会議 農学委員会 林学分科会: 「報告 福島原発事故による放射能汚染と森林、林業、木材関連産業への影響－現状及び問題点－」, 平成 26 年 9 月 1 日
 - [118] 林野庁東北森林管理局: 「久慈・閉伊川国有林の地域別の森林計画書(案)」, 計画期間 自平成 24 年 4 月 1 日・至平成 34 年 3 月 31 日
 - [119] 岩手県花巻市: 「花巻市森林整備計画書」, 計画期間 自平成 25 年 4 月 1 日・至平成 35 年 3 月 31 日
 - [120] 岩手県盛岡市: 「松くい虫対策としてのアカマツ伐採施業指針」, 改正 平成 26 年 2 月 20 日森整第 768 号, 2014
 - [121] 環境省: 「バイオ燃料の温室効果ガス削減効果に関する LCA ガイドライン Ver.1.0」, 平成 22 年 3 月
 - [122] 一般財団法人 電力中央研究所: 「バイオマスエネルギー高度利用技術の開発」, http://criepi.denken.or.jp/jp/energy/research/img/research2_leaflet.pdf, (参照 2014-8-9)
 - [123] 株式会社 森のエネルギー研究所: 「木質バイオマスボイラー導入指針」, 平成 23 年度・林野庁木質バイオマス利用に係る環境影響評価調査等支援事業, 木質バイオマス人材育成枠, 平成 24 年 3 月
 - [124] 全国木材チップ工業連合会: 「木材チップ等原料転換型事業調査・分析事業報告書」, 平成 23 年度林野庁補助;地域材供給事業, 第 2 章, 平成 24 年 3 月, <http://zmchip.com/houkoku232.pdf>, (参照 2014-10-13)
 - [125] 全国木材チップ工業連合会: 「木材チップ等原料転換型事業調査・分析事業報告書」, 平成 23 年度林野庁補助;地域材供給事業, 第 1 章, 平成 24 年 3 月, <http://zmchip.com/houkoku231.pdf>, (参照 2014-10-13)

- [126] 環境省・経済産業省:「温室効果ガス排出量算定・報告マニュアル v3.5」, 算定・報告・公表制度における算定方法・排出係数一覧, 2013
- [127] 株式会社 森林環境リアライズ, 環境エネルギー普及 株式会社, 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング:「平成 23 年度木質系震災廃棄物等の活用可能性調査(岩手県域調査(2号契約)) 最終報告書」, 林野庁委託事業, 2.3.1 節, 2012 年 3 月 9 日
- [128] いび森林資源活用センター協同組合:「木質ペレット・チップ製造工場を訪ねて」, WOODFAST '11-2, 2011, <http://www.woodfast.net/23-1IBI.html>, (参照 2014-1-26)
- [129] スマートジャパン:「木質バイオマスの半分を吸収、兵庫県の官民連携でチップ加工から発電まで」, 2013 年 12 月 11 日, <http://www.itmedia.co.jp/smartjapan/articles/1312/11/news028.html>, (参照 2014-1-26)
- [130] タマタイ産業株式会社:「環境活動レポート」, 2012 年 12 月, <http://tamatai.com/pdf/new-report.pdf>, (参照 2014-1-26)
- [131] 国土交通省総合政策局情報管理部:「交通関係エネルギー要覧 平成 18 年版」, 2006
- [132] 経済産業省・国土交通省:「物流分野の CO₂排出量に関する算定方法ガイドライン」, 2006
- [133] 蜂屋欣二, 竹内郁雄, 柑秋一延:「高密度のアカマツ林の一次生産の解析」, 林業試験場報告第 354 号, 林試研報, pp.39-97, 1989
- [134] 蜂屋欣二, 土井恭次, 小林玲爾:「アカマツ林の林分成長の解析」, 林業試験場報告第 176 号, 林試研報, pp.75-88, 1965
- [135] 井上由扶:「アカマツ林の中林作業法に関する研究」, 九州大学農学部演習林報告 32, pp.1-26, 1960
- [136] 株式会社 森林環境リアライズ, 環境エネルギー普及 株式会社, 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング:「平成 23 年度木質系震災廃棄物等の活用可能性調査(岩手県域調査(2号契約)) 最終報告書」, 林野庁委託事業, 2.3.3 節, 2012 年 3 月 9 日
- [137] 正木隆, 森茂太, 梶本卓也, 相澤州平, 池田重人, 八木橋勉, 柴田銃江, 櫃間岳:「高齢・高密度のアカマツ林の間伐は固体の成長を改善するか」, 日林誌(2011) 93, pp.48-57, 2011
- [138] 環境省・経済産業省:「温室効果ガス排出量算定・報告マニュアル v3.5」, 電気事業者別の CO₂排出係数 2011 年度実績, 平成 24 年 11 月 6 日公表 平成 25 年 7 月 25 日一部追加・修正, 2013
- [139] D. Kunze, K. Toda, and D. Paton: “Sydney’s Haymarket substation-A major milestone in applied innovation in substation design”, CIGRE SC A3 & B3, May 2005
- [140] M. Arshad and S. M. Islam: “Power transformer life cycle management using fuzzy logic technique”, in Proc. IEEE 8th IASTED Int. Conf., Marina del Rey, CA, Oct. 24–26, pp.239–245, 2005

- [141] M. Sacotte and J.Wild: “Transformer faults and protection systems,” in CIREN 97, 2-5, Conf. Publ. 438, O IEE, pp.1.10.1–1.10.5, Jun. 1997,
- [142] R. Carlson, S. Roos, H. Noda, and R. Takahashi: “Damage cost calculation method for energy apparatuses,” in Proc. 8th Int. Conf. EcoBalance, vol. S14-02, p.1402, 2008
- [143] Federation of Electric Power Companies of Japan: “Energy and environment”, p.7, 2009.
- [144] Ministry of Internal Affairs and Communications Japan: “2000 Input-Output Tables for Japan”, June 2005
- [145] A.A.Chowdhury, L. Bertling, D. E. Custer: “Determining Distribution Substation Transformer Optimal Loading Using a Reliability Cost-Benefit Approach”, 9th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems, KTH, Stockholm, Sweden – June 11-15, 2006
- [146] William. H, Bartley P.E.: “Analysis of Transformer Failures”, The Hartford Steam Boiler Inspection & Insurance Co., International Association of Engineering Insurers 36th Annual Conference – Stockholm, IMIA-WGP 33 (03), 2003
- [147] William. H: “An Action Plan for America's Aging Utility Transformers”, Hartford Steam Boiler (HSB), 1997
- [148] Department for Business, Enterprise and Regulatory Reform (BERR), “Cost Benefit Analysis Information”, GB SQSS Offshore Networks Review
- [149] CIGRE Working Group 12.05: “An international survey on failures in large power transformers in service”, Electra, no.88, 1983
- [150] Hydroelectric Research and Technical Services Group: “Transformer Fire Protection”, U.S. Department of the Interior (USBR), January 2005
- [151] L.Chan: “20 Years Operating Experience of Gas Insulated Transformer”, The Hongkong Electric Co., Ltd. (HEC)
- [152] 一般社団法人 日本電機工業会: 「重電及び産業システム機器ライフサイクル CO₂ 排出量評価ガイドライン(JEM-TR243)事例集」, 重電・産業システム機器 LCA 検討 WG, 技 08-20ver1, 2008
- [153] Hideki Noda, Reiko Takahashi and Takenori Kobayashi: “LCA based design of Environmental Conscious Products for Transmission and Distribution Apparatuses”, The International Conference on Electrical Engineering 2008, July 2008
- [154] 薫祥哲: 「仮想評価法 (CVM)のわが国への適用」, 南山大学経営学部, 2003
- [155] 蟻生俊夫, 後藤久典: 「需要家から見た供給信頼度の重要性と停電影響-国内需要家調査および首都圏停電調査にもとづく分析-」, 一般財団法人 電力中央研究所, 研究報告 Y06005, 2006

- [156] 今中健雄: 「需給対策コストカーブの概観」, 一般財団法人 電力中央研究所社会経済研究所ディスカッションペーパー, SERC11006, 2011
- [157] The SIGMA Project: “SUSTAINABILITY ACCOUNTING GUIDE”, THE SIGMA GUIDELINES- TOOLKIT, September 2003
- [158] 栗山浩一: 「環境評価の新たな展開-便益移転とコンジョイント分析-」, 早稲田大学政治経済学部, 国民経済研究会, 1999
- [159] 林直樹, 杉山大志: 「農業の多面的機能の評価方法の問題点について」, 一般財団法人 電力中央研究所社会経済研究所ディスカッションペーパー, SERC11037, 2011
- [160] CJCCONSULTING economics environment countryside: “Economic Analysis of the Contribution of the Forest Estate Managed by Forestry Commission Scotland”, Final report for Forestry Commission Scotland, April 2004
- [161] ISO/TR 37150: “Smart community infrastructures -- Review of existing activities relevant to metrics”, 2014
- [162] 伊坪徳宏, 湯龍龍, 本下晶晴, 井伊亮太, 松田健士, 山口和子: 「LIME3 における規格値の算定-世界を対象にしたエンドポイントタイプの年間環境影響量の算出-」, 第 10 回日本 L C A 学会研究発表会, A1-07, pp12-13, 2015
- [163] United Nations: “Framework Convention on Climate Change” , Registered Project, <http://cdm.unfccc.int/Projects/registered.html>, (参照 2014-10-22)
- [164] 一般社団法人 日本電機工業会: 「受配電機器リサイクルの現状と動向、今後の課題に関する調査報告書」, リサイクル技術専門委員会, 2000 年 12 月

以上