

令和 6 年度

文部科学省 国家課題対応型研究開発推進事業

原子力システム研究開発事業

小型モジュール炉の社会実装を支援する社会
総合リスク情報基盤

成果報告書

令和 7 年 3 月

国立大学法人 横浜国立大学

本報告書は、文部科学省の原子力システム
研究開発事業による委託業務として、国立大
学法人 横浜国立大学が実施した令和4年度
－令和6年度「小型モジュール炉の社会実装
を支援する社会総合リスク情報基盤」の成果
を取りまとめたものです。

目次

概略	iv
1. はじめに	1-1
2. 業務計画	
2.1 全体計画	2.1-1
2.2 各年度計画	2.2-1
3. 業務の実施内容および成果	
3.1 SMR 評価に必要なリスク情報の収集と整理【R4-R6】	3.1-1
3.1.1 各分野のリスク情報の再整理【R4】	3.1-1
3.1.2 SMR 評価に必要なリスク情報の精査【R5】	3.1-2
3.1.3 リスク情報の高度化【R6】	3.1-3
3.1.4 項目(1)のまとめ	3.1-4
3.2 社会総合リスクを考慮した包括的なシナリオ想定と 影響予測手法の開発【R4-R6】	3.2-1
3.2.1 エネルギーシステムとしての要件整理とリスク指標の体系化【R4】	3.2-1
3.2.2 リスク指標毎のリスク特定とシナリオ抽出【R5-R6】	3.2-11
3.2.3 リスク分析、評価手法指針開発【R6】	3.2-17
3.2.4 項目(2)のまとめ	3.2-21
3.3 SMR に対する社会総合リスク評価の試行【R4-R6】	3.3-1
3.3.1 SMR における標準モデルの策定【R4】	3.3-1
3.3.2 SMR のリスク分析および評価の予備検討【R5】	3.3-3
3.3.3 SMR のリスク評価の実施【R6】	3.3-4
3.3.4 項目(3)のまとめ	3.3-31
3.4 研究推進【R4-R6】	3.4-1
3.5 自発的研究活動【R4-R6】	3.5-1
4. 結言	4.1
5. 附属書 A. 脱炭素エネルギーのリスクフレームガイド	5.1

表一覧

表 2. 1-1	年度別全体計画表	2. 1-1
表 3. 2-1	エネルギーシステム事業の成立性	3. 2-14
表 3. 2-2	生活・経済・科学技術等の一般社会にもたらす影響	3. 2-15
表 3. 3-1	リスク分析結果（質・量の安定供給）	3. 3-5
表 3. 3-2	リスク分析結果（安全性）	3. 3-6
表 3. 3-3	リスク分析結果（適正な価格）	3. 3-8
表 3. 3-4	リスク分析結果（供給の継続性）	3. 3-9
表 3. 3-5	リスク分析結果（地球環境対応の視点）	3. 3-10
表 3. 3-6	リスク分析結果（産業としての成立性）	3. 3-14
表 3. 3-7	リスク分析結果（地域の安全・安心への影響）	3. 3-15
表 3. 3-8	リスク分析結果（地域経済への影響）	3. 3-16
表 3. 3-9	リスク分析結果（地域の文化・風土への影響）	3. 3-16
表 3. 3-10	リスク分析結果（生活・社会活動イノベーションへの影響）	3. 3-17
表 3. 3-11	リスク分析結果（経済イノベーションへの影響）	3. 3-18
表 3. 3-12	リスク分析結果（科学技術イノベーションへの影響）	3. 3-18
表 3. 3-13	リスク分析結果（地球環境以外の自然や社会への影響）	3. 3-19
表 3. 3-14	点推定評価と不確実さ評価の比較	3. 3-22
表 3. 3-15	各計算条件での HCLPF	3. 3-24
表 3. 3-16	SMR の LCOE 算出にかかわるパラメータおよび参照値	3. 3-28
表 3. 3-17	経済性不成立となるリスク（確率）の定量化結果	3. 3-29

図一覧

図 3. 2-1	新エネルギーシステムの選択要件	3. 2-7
図 3. 2-2	生活者を対象としたエネルギーシステムの評価視点	3. 2-8
図 3. 2-3	事業者を対象としたエネルギーシステムの重要度分析結果	3. 2-9
図 3. 2-4	生活者を対象としたエネルギーシステムの重要度分析結果	3. 2-10
図 3. 3-1	サイト全体の炉心損傷リスクを評価する統合 FT	3. 3-21
図 3. 3-2	不確実さ評価の計算フロー	3. 3-22
図 3. 3-3	PWR1 基の CCDP	3. 3-23
図 3. 3-4	PWR1 基および SMR12 基が立地するサイト全体の SCCDP （SMR12 基の SCCDP と併記）	3. 3-23
図 3. 3-5	サイト全体のリスクの概念図	3. 3-25
図 3. 3-6	建設期間短縮および建設費用削減の効果を考慮した場合の 不確実さ解析結果	3. 3-29

略語一覧

ATF	: accident tolerant fuel	(事故耐性燃料)
DHRS	: decay heat removal system	(崩壊熱除去システム)
ECCS	: emergency core cooling system	(非常用炉心冷却システム)
ET	: event tree	(イベントツリー)
EPZ	: Emergency Planning Zone	(緊急時計画区域)(注)
FT	: fault tree	(フォールトツリー)
FOAK	: first of a kind	(初号機)
HCLPF	: high confidence of low probability of failure	(低い損傷確率であることが高い信頼度で推定できる加速度)
LCOE	: levelized cost of electricity	(均等化発電原価)
LOCA	: loss of coolant accident	(冷却材喪失事故)
LOOP	: loss of offsite power	(外部電源喪失)
LWR	: light water reactor	(軽水炉)
NOAK	: Nth of a kind	(量産機)
PAZ	: Precautionary Action Zone	(予防的防護措置を準備する区域)
PRA	: probabilistic risk assessment	(確率論的リスク評価)
RHRS	: residual heat removal system	(崩壊熱除去系)
SCCDP	: site conditional core damage probability	(サイト内で少なくとも一基が炉心損傷する条件付確率)
SGTF	: steam generator tube failure	(蒸気発生器細管破損)
SMR	: small modular reactor	(小型モジュール炉)
UPZ	: Urgent Protective action planning Zone	(緊急防護措置を準備する区域)
VRE	: variable renewable energy	(変動性再生可能エネルギー)

注 日本では PAZ および UPZ に相当

概略

本研究開発では、地球温暖化対応のエネルギーシステムである小型モジュール炉（以下「SMR」と略す）のような新型炉に対して、その社会実装に必要な要件を社会実装課題のリスクという視点で整理し、SMR の必須要件である社会受容要件を明らかにするとともに、社会から選択される要件を他のエネルギーシステムと比較しながら、整理するための検討フレームを構築することを目指した。

本研究では、まず、脱炭素エネルギーシステムの社会実装の課題となる視点毎にリスクを特定し社会実装を行う際に検討すべき課題を体系的なリスク構造として整理を行った。

次に体系的に整理したリスクの分析に必要な各種情報の整理を行い、リスクの評価のあり方の検討を行った。検討の結果、今回分析の対象とするリスクの多くは、その発生や顕在化シナリオに影響をもたらす要因の不確かさが大きく、これまでの多くの工学システムのリスク評価に見られる故障等のデータベースに基づく定量評価手法は適用が難しいことから、ランク評価を中核としたリスク分析手法を開発した。

この手法では、対象とするエネルギーシステムの社会実装における課題を明らかにするとともに、他のエネルギーシステムとの社会実装に関する選択のためのリスク比較が可能となる。

本研究では、前記の手法を用いて SMR に関する社会実装における有利な事項、対応が必要な事項を整理した。また、本手法を他のエネルギーシステムに対する検討においても使用可能なように、脱炭素エネルギーシステムの社会実装のリスク構造と検討目的毎のリスク評価の考え方をリスクアセスメントガイドとしてとりまとめた。

本研究では、脱炭素エネルギーシステムの社会実装における要件を、社会の重要インフラとしての視点から、安定供給、環境対応、産業成立性、地域影響、その他のイノベーションの各視点でシナリオ抽出を行い、軽水炉型 SMR へ試行して、その有効性、客観性を確認した。

軽水炉型 SMR に開発したリスク分析、評価手法を適用した結果、社会実装において考慮すべき点を以下のようにまとめた。

- 1 原子力システムとして SMR については、他の脱炭素エネルギーシステムと比較して、安全性に対する要求は高いが、SMR は、緊急時計画区域（EPZ）を敷地内に設定することも可能であるため、既存の軽水炉と比較しても優位性がある。また、SMR を既存の軽水炉と併設することも選択肢として存在し、その場合地域の負担を増加させる可能性は少ない。
- 2 人口減少社会である日本では、産業成立性の観点から設計・製造技術者の獲得がボトルネックとなるため、モジュール化による建設リソースを節約できる SMR は有効な選択肢となり得る。一方、耐震性を考慮した型式認証のあり方や、これまでとは異なる型式認証をベースとする規制対応のあり方が導入障壁となる可能性があり、事業者の投資を呼び込むためには、社会制度の改革が急務である。

- 3 経産省のロードマップでは、SMRの実装は2040年以降が見込まれるが、カーボンニュートラルの実現目標である2050年対応として、他のシステムと比較すると出遅れの感があり、2040年の稼働を確かなものとして、民間の投資計画に計上できるシステムとして認識させる必要がある。
- 4 脱炭素エネルギーであるSMRを推進するには、社会全体の脱炭素エネルギー転換への切迫性・必要性を高めることが必須である。

1. はじめに

電気出力が概ね 30 万 kW 以下の小型で、パッケージ（モジュール）で製造される小型モジュール炉（Small Modular Reactor, SMR）への期待が世界中で高まっている。OECD/NEA によると 2035 年までに約 2000 万 kW に達する可能性も指摘されており、世界で約 70 種類以上の SMR が開発されている。国内でも 2020 年 1 月 21 日に策定された、エネルギー・環境分野の革新的技術の確立を目指す「革新的環境イノベーション戦略」において、原子力は重要なエネルギーとして位置づけられている。「安全性・信頼性・効率性の一層の向上」に加えて、「再生可能エネルギーとの共存」、「水素製造や熱利用といった多様な社会的要請の高まり」も見すえて、原子力関連技術のイノベーションを促進することとしており、SMR は、次世代原子力システムとして期待が高い。

社会技術システムは、期待が高いから実現できるわけではなく、その稼働要件を満足するか、他の代替システムと比較してより稼働に有利な条件を持っていることが必要である。小型化によるコスト面の負担が大きい SMR では、パッケージ化による大きな世界的市場の構築が不可欠であるが、実現には課題も多い。SMR の課題については、OECD/NEA が 2021 年 4 月に発刊した「Small Modular Reactors: Challenges and Opportunities」の中で整理されている。世界的展開に向けた課題としては、新技術としての不確実性、サプライチェーンの構築、世界的な規制体制の調和、および社会受容性が挙げられている。中でも社会受容性の獲得は、SMR の世界的市場の構築における大きな課題となっている。

SMR の社会技術としての受容性の獲得には、まず、そのリスクを体系的な評価体系の中で、その課題を明らかにしてボトルネック課題を明らかにする必要がある、そのためにはリスク評価が重要となる。原子力システムは、他のエネルギーシステムと比較して、多様なリスクの中で、安全に関するリスクに関して特に重視する必要がある。原子力では、その安全確保のために、確率論的リスク評価（Probabilistic Risk Assessment, PRA）を主体としたリスク評価を採用し、工学システムにおけるリスク評価の活用を先導してきた。しかし、これまでの安全は、発生した事故に対する再発防止を中心に進められてきた安全活動を主体としてきた我が国においては、まだ経験が無い事象や発生していない状況で安全を判断していくリスクアプローチに関する社会の理解は十分とは言えない状況である。また、これまで PRA を主体とした定量的リスク評価をその主たる手法として活用してきた為に、リスク評価の対象が定量評価をできる範囲に止まり、さらにその視点が技術者視点によるという特徴を持っていた。しかし、リスクの原因、顕在化シナリオや影響の種類によって、その分析手法や評価方法は大きく異なり、テロ等の様に、確率論の正規分布等の既存の分布に当てはまらない事象も存在する。

このようなボトルネック課題を解決するためには、行政や自治体に加え、社会や一般市民の視点も考慮した多様な視点でリスク構造を考慮したうえで、「安全・安心にかかわる課題への対応のために個別技術・知識を統合する仕組み」やその他の社会要件を満足するための仕組みを構築する研究開発が不可欠であり、既存の分野の更なる深化に加え、トレードオフなどを考慮した効率的な合意形成プロセスの確立が不可欠となるが、我が国においてこれらのプロセスが確立されているとは言い難い。リスクアプローチによる安全性や社会受容に必要なリスクアセスメントのより一層の向上を実現するためには、定量的なリスク評価の高度化だけでなく、多様な主体と社会

リスク構造に基づくシナリオベースの定性的なリスク評価技術の高度化が必要となる。

横浜国立大学では、新規科学技術システムを対象とした社会総合リスク評価手法を開発し、これまで水素システムや産業プラントに適用し、その有効性を検証してきた。本手法は、工学的な視点からのシステム内部のリスク評価にとどまらず、関係主体、開発段階、社会の価値観等を考慮したリスクアセスメント手法であり、新しい技術システムの社会実装の有効な支援技術となる。工学システムの計画段階では、その基本的要件に加えて、競合システムとのリスク比較により、産業的競争力を評価する必要がある。その為には、俯瞰的にリスクを取り扱うとともに、総合リスク評価指標の構築が不可欠である。

本研究開発では、SMR の社会実装を適切に判断できる社会の実現を目標としている。目標の実現のため、本研究開発では、SMR に適用できる社会総合リスク評価基盤の構築を行う。SMR のような新型炉に対して未整備となっているリスク情報を整理するとともに、社会リスク構造に基づきシナリオベースの定性的なリスク評価技術を高度化することを目指す。その開発した手法を、SMR 標準モデルに試行して、その有効性を確認することで客観的なリスク評価技術を確立させる。

2. 業務計画

2.1 全体計画

本業務の全体計画図を表 2.1-1 に示す。

表 2.1-1 年度別全体計画

項目 \ 年度	令和 4 年度	令和 5 年度	令和 6 年度
(1) SMR評価に必要なリスク情報の収集と整理			
① 各分野のリスク情報の再整理	情報収集 再整理		
② SMR評価に必要なリスク情報の精査		リスク情報の精査	
③ リスク情報の高度化			リスク情報の高度化
(2) 社会総合リスクを考慮した包括的なシナリオ想定と影響予測手法の開発			
① エネルギーシステムとしての要件整理とリスク指標の体系化	要件 指標 整理 体系化	リスク特定とシナリオ抽出	
② リスク指標毎のリスク特定とシナリオ抽出			指針案の策定
③ リスク分析、評価手法指針開発			
(3) SMRに対する社会総合リスク評価の試行			
① 検討対象とするSMRのモデルの策定	モデル策定		
② SMRのリスク分析及び評価の予備検討		予備的なリスク分析及び評価	
③ SMRのリスク評価の実施			リスク分析及び評価まとめ
(4) 研究推進	ヒアリング実施	意見交換	意見交換
	まとめ・評価	まとめ・評価	まとめ・評価

2.2 各年度計画

各項目における成果の目標および業務の方法を以下に示す。

(1) SMR 評価に必要なリスク情報の収集と整理

①各分野のリスク情報の再整理（令和4年度）

各分野でのリスク分析、リスクマネジメント技術について精査し、エネルギーシステムに必要なリスク情報の再整理を行う。

②SMR 評価に必要なリスク情報の精査（令和5年度）

前年度収集・整理した情報を、SMR のリスク情報（リスク源、分析手法、評価手法）としての必要性の観点から精査を行う。

③リスク情報の高度化（令和6年度）

前年度までに実施した SMR の試行結果から、リスク情報の高度化を進める。

(2) 社会総合リスクを考慮した包括的なシナリオ想定と影響予測手法の開発

①エネルギーシステムとしての要件整理とリスク指標の体系化（令和4年度）

エネルギーシステムが、社会システムとして成立するための要件を整理するとともに、エネルギーシステムの評価に必要なリスク指標の体系化を行う。

②リスク指標毎のリスク特定とシナリオ抽出（令和5年度）

令和5年度に、整理されたリスク指標毎にリスクを特定し、シナリオ抽出を行う。

令和6年度は、前年度までに実施した SMR の試行結果から、特定されたリスク群の妥当性を確認する。

③リスク分析、評価手法指針開発（令和6年度）

令和5年度は、抽出したシナリオについて、その影響を予測するための手法を開発する。

令和6年度は、SMR の試行結果をフィードバックして、リスク分析、評価手法指針の高度化を図る。

(3) SMR に対する社会総合リスク評価の試行

①検討対象とする SMR のモデルの策定（令和4年度）

検討対象とする SMR のモデルを策定し、評価に求められるリスク分析および評価手法を整理する。

②SMR のリスク分析の実施（令和5年度）

各リスク評価指標に有効な分析および評価手法を検討し、軽水炉型 SMR を対象にリスク分析および評価の予備的な検証を行う。

③SMR のリスク評価の実施（令和6年度）

SMR の標準モデルを対象としたリスク評価を行う。結果の妥当性については、軽水炉型 SMR と異なるシステムを対象にアセスメントを実施して検証するとともに、事業者、有識者のヒアリングを実施する。

3. 業務の実施内容および成果

3.1 SMR 評価に必要なリスク情報の収集と整理【R4-R6】

3.1.1 各分野のリスク情報の再整理 【R4】

各分野（太陽光発電、風力発電、水素エネルギー等）でのリスク分析、リスクマネジメント技術について精査し、SMR に対して必要なリスク情報の再整理を行った。文献調査やヒアリングにより得られたリスク情報を、エネルギーシステムが社会から要求される視点に基づき再整理を実施した。

(1) 社会活動・生活のインフラとしての安定供給の視点

安定供給の視点において、エネルギーシステムのシステム安全性評価は必要不可欠である。システムの特性に応じてシナリオ抽出が行われ、その影響評価が実施される。エネルギーシステムの特性に応じてリスク事象は異なるが、FMEA、HAZOP、FTA、ETA 等の技法が用いられる場合が多い。また、原子力分野では炉心損傷や外部事象を対象とした PRA が行われる。Zhao は、評価基準の一つとしてエネルギー供給信頼性（Energy supply reliability）を採用している。エネルギー需要と供給の差を用いて指標を設定し、モンテカルロ法を用いて分析を実施した[1]。

エネルギー価格も安定供給における欠かせない要素である。建設コストリスク（Construction cost risk）は、プロジェクトの建設に関わるインフラや土地購入、エネルギーネットワークの接続等のコストの評価を行う。また、計画した工期内、工事予算内で工事が完了するかどうかの評価も行なわれている。運営・保守コスト（Operational and maintenance cost）は、政府の間接的な補助によるリスク低減や、機器の供給メーカーが保守サービスを担当することでコストやリスク低減につながる[12]。具体的なコスト（作業員や管理者の賃金、設備の清掃・保守コスト、設備のオーバーホールコスト、老朽化設備への交換コスト）を算出して評価している。モンテカルロ法にて、収益性ととも発電量・消費量を考慮した電力の売買をシミュレートしている。

エネルギーの質・量や供給の継続性について指摘しているものは今回の文献調査の結果では確認されなかった。太陽光発電を単体とした場合、変動性エネルギーの影響を考慮することはあまり重要でないためであると考えられる。また、多くの場合プロジェクトマネジメントの視点で行われており、その後の運用面でのリスクを考慮することは少ないと考えられる。

(2) エネルギーシステムの地球環境対応の視点

資源状況リスク（Resource condition risk）は、設置容量や発電量、太陽電池の安全性や信頼性について評価する必要がある、土地面積や設置場所、設備・資材の供給、サプライヤーの遅延・不履行などについて考慮している[1], [2], [3]。

(3) 産業としての成立性の視点

太陽光発電においては、補助金、政策や規制等、政府からの介入等の政策リスクがある[4]。政策補助金は、太陽光発電を電源とする発電設備に対して、一定の基準に応じて補助金や物資の支援がある。これらの拡充や不安定さは、太陽光発電事業の産業成立性に影響を及ぼす。政府の介入もリスクの一つとして挙げられる。市場の失敗の補填や産業の発展支援が成され、市場メカニズムの保護へつながる。

市場参入リスクは、国内や海外企業が参入する際の技術的・経済的リスクである。特に、経済的リスクについては収益性や初期投資後の出口戦略も評価指標に含める分析も存在する。Betz は、

投資対象としての太陽光発電のリスク評価を実施している。南アフリカの居住地区を対象に、コスト算出の式を導出しモンテカルロシミュレーションにより、その変動を調査することで太陽光発電の産業競争力を評価している[5]。

産業としての成立性の視点では、サプライチェーンに関するリスク等も含まれるが、文献では多くがプロジェクト推進の視点からの評価となっており、その後の運用面についてのリスクは考慮されていない。

(4) 地域の支持・社会制度の視点

プロジェクトマネジメントの視点では、パブリック・アクセプタンス (Public acceptance) は、利用者の受入態勢がプロジェクトの建設投資に影響を与えるかどうかを示す[4], [6]。Hitzeroth は、ドイツにおける再生可能エネルギープロジェクトを分析し、社会受容には特定の地域や地方の特性を踏まえることに重要性を指摘している[7]。また、Kim らは、階層分析法を用いて太陽光発電の投資評価を分析した結果、社会受容性の影響を他の要因と相対的に比較している[8]。

(5) 技術・経済・環境等への多様な影響の視点

生態系影響リスク (Ecological damage risk) は、現地の植生や土壌に影響を与える可能性をリスクとして扱う。太陽光発電では、環境リスクアセスメントが義務付けられる場合もあり、プロジェクトに期待される利益に与える不確実な影響を考慮している。

3.1.2 SMR 評価に必要なリスク情報の精査 【R5】

令和4年度に収集・整理した情報を、SMR のリスク情報 (リスク源、分析手法、評価手法) としての必要性の観点から精査を行う。具体的には、項目(2)「社会総合リスクを考慮した包括的なシナリオ想定と影響予測手法の開発」と合同でリスク指標の策定を進め、SMR のリスク情報としての必要性の観点から令和5年度構築した社会総合リスク評価フレームの精査を行った。

軽水炉型 SMR が社会で実装されるためには、二つの視点でリスクの検討を行なう必要がある。一つは、SMR システムに受容できないことが明らかなリスクが存在しないことであり、もう一つは、他のエネルギーシステムとの相対比較において優位性を保つことである。

この二つの視点で検討を行なうためには、SMR の社会実装を検討するためのリスクを体系的に検討し、その課題を明らかにする必要がある。

本プロジェクトで作成するリスク検討フレームは、カーボンニュートラル施策に対応する SMR の社会実装に関するリスクを新エネルギーの社会実装のリスクへの対応という視点で、原子力発電と再生エネルギーシステムを対立関係で議論するのではなく、我が国のエネルギー需要に対応するためのリスク対応の中で考える為のものである。そのために、まず各システムの社会実装の要点を明確にして、社会実装するエネルギーシステムの選定に資する要件を整理した。

これは、カーボンニュートラル施策によるエネルギーシステムは、原子力システムや各再生エネルギーシステムの組み合わせにより実現されるものであり、SMR の個別リスク評価だけで、その選択を行う事はできないということによる。

したがって、SMR の社会実装では、他のシステムとの相対的評価において、優位もしくは遜色のない状況を実現する必要がある。そのためには、社会実装のボトルネックとなる課題を明らかにして、まず、選択肢の対象となることが出きる状況を維持し、他のシステムとの相対評価におい

て、その必要性、優位性を主張できる状況を確保する必要がある。

また、SMR を再生エネルギーとの競争関係で捉えるだけでなく、再生エネルギーの課題の補完の視点から評価することで、SMR の有効性を評価することができるし、新エネルギーシステム体系の信頼性・有効性を高めることができるのも、本評価システムの活用法の一つである。この補完機能の一つとして、SMR による水素製造という機能により原子力が得意でないとされている電力量の調整機能も持つということを SMR の有効性としてアピールすることができる。

本評価システムは、各エネルギーシステム相対評価と社会実装の課題を検討できる構造を持っているものとして構築している。本プロジェクトでは、本評価フレームの構築と、活用法を構築することを目的としている。

3.1.3 リスク情報の高度化 【R6】

令和5年度に実施した SMR のリスク分析の試行結果から、精査した情報の高度化を進めた。SMR に関しては、廃棄物も含めたライフサイクルの成立性や国内外の原子力施設の事故の発生のように原子力全般に共通の課題となる項目や火力発電の廃止時期等の新エネルギーの共通課題の他に、以下の重要な検討事項を整理した。

(1) 事故時の敷地外への影響

炉心損傷等による放射性物質の敷地外への漏えいの評価は、SMR においてまず実施すべきハイリスクであり、定量的評価による検討を行った。この評価は、原子力防災の仕組みに関する行政・地域の判断に影響をもたらす。

この評価により、SMR の事故時の影響の規模の小ささを前提とすると、工学的にあらゆる状況に対する敷地外への影響が無いことを保証できなくても、現在の原子力防災の考え方の枠内でも、より住民安全の仕組みを構築することにより、住民の安心感を醸成できる可能性がある。

(2) 発電所建築単価の低減のための条件

- ・メーカーの型式認証に関する力量の高度化
- ・規制の型式認証機能の構築

(3) メーカーの製造能力

(4) 発電所建設地の確保の時期 等

これらの検討事項の重要性に基づき、SMR ボトルネックの詳細分析候補案として、以下の通り整理した。

(1) SMR 事故時の敷地外への影響への対応

SMR が強みとしている事故時の敷地外影響が発生しないという事項を原因事象に限らず明確にできるかを評価することが必要である。評価は、事故時の住民の安全を担保する原子力防災の実効性を担保することが期待される。

(2) SMR の建設コスト減少・建設期間の短縮

SMR 製造者が型式認証によって、建設に必要な人材の確保を容易にするとともに、個々の発電所の許認可に関する期間を短くし、建設期間を短くできるかを分析する必要がある。とくに、規制が型式認証を認証できるかは、大きなリスクとなる。

(3) 放射性物質の処分方法

他のエネルギーシステムとの相対比較をするとき、放射性物質の処分方法は原子力共通の課題である。

(4) 国内外の原子力関連の事故、テロ等の発生による原子力に関する受容感の喪失 等

社会状況の変化は、原子力システムに社会が求める要件を大きく変える可能性がある。

3.1.4 項目(1)のまとめ

各分野でのリスク分析、リスクマネジメント技術について収集した情報を精査し、SMR に対して必要なリスク情報の再整理を行った。SMR に対しての必要性については技術的仕様に加え、社会的状況も考慮した検討を行った。続いて、SMR 評価に必要なリスク情報の精査を進め、廃棄物も含めたライフサイクルの成立性や国内外の原子力施設の事故の発生のように原子力全般に共通の課題となる項目や火力発電の廃止時期等の新エネルギーの共通課題の他、重要な検討事項を整理した。以上の成果に基づき、項目(2)で開発したリスク評価フレームに必要な情報を体系的に整理した。

参考文献(3.1)

- [1] Zhao Haoran, Guo S, Zhao Huiru. Selecting the optimal micro-grid planning program using a novel multi-criteria decision making model based on grey cumulative prospect theory, *Energies*, 2018, 11, 1840.
- [2] Jinrong H., Enyi Z., Engineering risk management planning in energy performance contracting in China. In: Wu DD, editor. *Engineering and risk management*, Amsterdam: Elsevier Science Bv; 2011, 195-205.
- [3] Wu Y, Zhou J, Hu Y, Li L, Sun X. A TODIM-based investment decision framework for commercial distributed PV projects under the energy performance contracting (EPC) business model: a case in East-Central China, *Energies*, 2018, 11(5), 1210.
- [4] Wu Y, Wu C, Zhou J, Zhang B, Xu C, Yan Y, Liu F. A DEMATEL-TODIM based decision framework for PV power generation project in expressway service area under an intuitionistic fuzzy environment, *J Clean Prod*, 2020, 247, 119099.
- [5] Betz S, Caneva S, Weiss I, Rowley P. Photovoltaic energy competitiveness and risk assessment for the South African residential sector, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2016, 24(12), 1577-91.
- [6] Fang H, Li J, Song W. Sustainable site selection for photovoltaic power plant: an integrated approach based on prospect theory. *Energy Convers Manag*, 2018, 174, 755-68.
- [7] M. Hitzeroth and A. Megerle, *Renewable Energy Projects: Acceptance Risks and Their Management*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, 27, 576-584.
- [8] Kim B, Kim Juhan, Kim Jinsoo. Evaluation model for investment in solar photovoltaic power generation using fuzzy analytic Hierarchy process, *Sustainability*, 2019, 11, 2905.

3.2 社会総合リスクを考慮した包括的なシナリオ想定と影響予測手法の開発 【R4～R6】

3.2.1 エネルギーシステムとしての要件整理とリスク指標の体系化 【R4】

ここでは、社会インフラとしてのエネルギーシステムのリスクを評価する視点を整理する。評価フレームの作成に関しては、社会インフラとエネルギーシステムに関して過去論点になった事項を整理し、以下に示す大項目を設定した。

1. エネルギーシステムの基本要件であるエネルギーの安定供給
2. カーボンニュートラル施策の目的である地球環境への影響
3. エネルギーシステムを民間事業として成立させる基本要件である事業の成立性
4. エネルギーシステムがもたらす影響として心配されてきた地域への影響
5. 生活・経済・科学技術等の一般社会にもたらす影響

3.2.1-1～5 では、大項目をトップ事象とする要因分析を行い、過去の事象で明らかになっていない要素に関する見落としがないように検討を行なった。また、3.2.1-6 で実施した一般の生活者を対象とした重要度の調査を行い、その結果に基づき 3.2.1-1～5 に整理している構造の検証を行い、構造の見直しを行った。

3.2.1-1 エネルギーシステムの基本要件であるエネルギーの安定供給

(1)質・量の安定性

①質の安定

電力の質は、高度な製品製造等に重要な影響を及ぼす場合も有り、今後の技術社会の要求する質を満足すべきである。

1)電圧の安定性

- ・通常時の電圧の安定性
- ・瞬時電圧低下

2)周波数の安定性

- ・周波数変動

②量の安定

量の安定性は、社会インフラとして当然の要求で有り、必要なときに必要な量を供給できる必要がある。

1)発電の原材料の供給安定性

- ・システム基盤の供給安定性
- ・原材料の供給安定性

2)環境の変化に対する供給安定性

- ・自然環境・天候に関する安定性
- ・地域支持に対する安定性

3)事故時の復旧性

- ・早期復旧性
- ・代替性

4)規制に対する安定性

5)定期点検期間も含めた供給安定性

(2)安全性

安全性は、社会インフラにとって重要な要求であり、多様な状況における安全性を評価する必要がある。

①日常の事業システム安全

- ・第三者に被害を与える事故
- ・従業員に被害を与える事故
- ・エネルギー供給に支障を与える事故

②事故時の安全対応性

- ・事故の未然防止
- ・事故の早期発見
- ・事故の拡大防止（時間・エリア）

③自然災害時の安全性

- ・地震時の安全性
- ・台風時の安全性

(3)安定的な価格

エネルギー価格は、社会活動・生活の多くの分野に影響を与え、その価格を適切に設定することは重要な要件である。

①電力供給価格

- ・システム構築コスト
- ・電力製造コスト（運転に必要なコスト、事故対応コスト等を含む）
- ・供給補完コスト
- ・廃棄コスト

②システム維持のための地域コスト

- ・地域による事故の未然防止コスト・災害発生時の地域防災コスト

(4)エネルギー供給の継続性

社会インフラとしてのエネルギーシステムは、そのエネルギー供給がその事業環境や制約に関わらず中長期的に維持される必要がある。

①事業制度の継続性

- ・国の推進政策の継続性
- ・システム運営に影響を与える規制対応を含めた継続性

②ライフサイクルシステムの成立性

- ・原材料・システム基盤生産時
- ・施設製造時
- ・システム運転時（運転に必要な物流も含む）
- ・廃棄・処分時

(5) エネルギーセキュリティ

社会の基幹インフラとしては、国際情勢の変化や技術特許の状況に大きな影響を受けないようなシステムであることが求められる。

- ① 製造・技術に関する視点でのセキュリティ
- ② 原材料・基盤製品確保の視点でのセキュリティ

3.2.1-2 エネルギーシステムの地球環境対応の視点

既存のエネルギーシステムからの転換の主要因である地球温暖化対応への評価は、重要である。

(1) ライフサイクル全体としての対応の成立性

社会インフラであるエネルギーシステムでは、以下に記す各ライフサイクルのステップにおいて、それぞれの環境に関する成立要件を満足する必要がある。

- ① 原材料・システム基盤生産時
 - ・原材料確保に関する CO₂ 排出量
 - ・システム基盤製造に関する CO₂ 排出量
- ② 施設製造時
 - ・システム自体の製造に関する CO₂ 排出量
 - ・システム立地地産成のための CO₂ 排出量
- ③ システム運転時（運転に必要な物流も含む）
 - ・システム運転における CO₂ 排出量
 - ・システム補修における CO₂ 排出量
- ④ 廃棄・処分時
 - ・廃棄物処分に必要な化工に関する CO₂ 排出量
 - ・廃棄物輸送に関する CO₂ 排出量
 - ・廃棄物保管に関する CO₂ 排出量

(2) カーボンニュートラル実現の視点

地球温暖化対応策は、カーボンニュートラル施策として展開されるが、その実現時期によっては対策が完成しても地球温暖化を阻止できない状況が想定され、さらにはシステムの構成要件に影響を与える国内外の状況変化への対応性が求められる。

① 実現時期

エネルギーシステムは、必要な要件を満足するステップが重要であり、それぞれの完成時期がシステムの実用化に大きな影響をもたらす。

- ・システム技術開発の完成時期
- ・システムの運転継続に関する仕組み（規制、事業仕組み等）の完成時期
- ・システム運用の開始時期
- ・システムが求められるエネルギーの供給開始時期

② 状況の変化に対する対応性

- ・国内状況への変化への対応

- ・国際情勢変化への対応

3.2.1-3 産業としての成立性の視点

エネルギーシステム事業が継続的に展開されるためには、その事業が国家事業でない以上、その事業が産業として成立する必要がある。

(1) 事業競争力の視点

エネルギー供給事業も、事業であるかぎり常に競争に曝されており、その競争に優位的な状況を確保する必要がある。

① システム運転における優位性

- ・運転コストの競争力
- ・運転期間に関する競争力（必要な時に必要なエネルギーを供給できるか）

② システム製造における優位性

- ・製造事業者の他のシステムに対する国内競争力
- ・製造事業者の国際競争力

(2) 新産業育成のための人材・科学技術力

① 人材確保力

- ・新規人材採用の可能性
- ・既存人材のリスキリングの可能性

② 研究開発力（複数の研究機関で総合的に研究開発力があれば、可）

- ・大学・研究機関の研究開発力
- ・企業の研究開発力

(3) 新規事業への投資・投資回収

① 投資資金の確保

- ・企業資金の可能性
- ・銀行融資の可能性
- ・政府融資の可能性

② 投資の回収性

- ・投資回収の確実性
- ・投資回収期間

③ 既存システムの事業投資の回収

- ・既存システムの投資回収
- ・既存システム運転コストの転換

3.2.1-4 地域への影響の視点

社会インフラとして長期に運営されるためには、規制を満足するだけでなく地域に支持される必要や社会制度に順応していく必要がある。

(1) システム事故の地域の人身・物的安全と安心の視点での評価

① 安全への影響

- ・システム自体の事故の地域への影響
- ・自然災害時に誘発される事故の地域への影響
- ・テロ等の意図的な攻撃の地域への影響
- ② 安心への影響
 - ・立地地域市民の安心
 - ・近隣地域市民の安心
- (2) システム事故の地域経済への影響（立地地域経済、近隣地域経済への影響）
 - ① 直接的影響
 - ・購買力への影響
 - ・産業力への影響
 - ・環境等の経済環境への影響
 - ② 風評被害等の間接被害
 - ・風評被害の大きさ
 - ・風評被害の長さ
- (3) 産業・地域振興への影響（好ましい影響も含む）
 - ① 地元雇用への影響
 - ・システム運転に関する雇用
 - ・関連需要に関する雇用
 - ② 経済波及効果
 - ・システム運転に関する利益
 - ・システム運転に関する補助金
 - ・システム運転に関する関連利益
- (4) 地域の文化・風土への影響
 - ① 地域イメージの向上
 - ・エネルギーシステム運転に関するイメージ
 - ・地域の先進性に関するイメージ
 - ② 地域文化への貢献
 - ・エネルギーシステム運転がもたらす新たな文化の醸成
 - ・エネルギーシステム運転が貢献する既存文化の保護

3.2.1-5 一般社会への影響の視点

エネルギーシステムは、社会活動や生活の基盤であるとともに、技術開発や経済や社会環境等に与える影響も大きい。

- (1) イノベーションへの影響
 - ① 社会イノベーションへの影響
 - ・エネルギーシステムがもたらす社会活動への影響
 - ・エネルギーシステムがもたらす生活イノベーションへの影響
 - ② 科学技術イノベーションへの影響

- ・研究機関のイノベーションへの影響
- ・企業の研究開発力へのイノベーションへの影響

(2) 経済への影響

新たなエネルギーシステムの社会実装の時期や程度によって、経済に好ましい、または好ましくない影響を与えることが想定される。この影響は、他の国の状況や国際的な取り決めによっても大きく影響を受ける項目である。

① 国内経済への影響

- ・国内産業への影響
- ・個人消費への影響

② 国際競争力への影響

- ・国内での日本企業の競争力
- ・国外での日本企業の競争力

(3) 地球環境以外の環境への影響

① 自然環境への影響

- ・景観への影響
- ・生物多様性への影響

② 社会環境への影響

- ・地域環境への影響
- ・個人環境への影響

3.2.1-6 階層分析法による各項目の重要度分析

エネルギーシステムのリスクに関する重点項目について、階層分析法を用いた調査を実施した。本調査では、一般の生活者を対象としたアンケート調査を行った。調査対象は、日本国内 20 歳～89 歳の一般市民を対象として、性別、年代別、地域別に割付を行った。なお、20 代は学生と社会人で割合を分けて設計している。Web アンケート調査は、株式会社三菱総合研究所とエム・アール・アイ リサーチアソシエイト株式会社が独自に毎年一般の生活者に対し実施している、有効サンプル数 3 万人のアンケート調査データベースである「生活者市場予測システム」(mif) を用いて、アンケート調査項目を加える形で行った。

実施するアンケート調査は、階層分析法に基づくエネルギーシステムのリスクにおける一般市民の認識の体系化を成果として設計した。エネルギーシステムのリスク項目について、以下の階層構造を対象者に示し、各階層の分岐下にある項目同士の一対比較により、重要度の相対評価を行った。重要度の尺度は、重要 (9) やや重要 (3) 同じくらい (1) とし、一対比較行列 (表) とした。重みの計算は、主固有ベクトル法を用いた。主固有ベクトルを、和が 1 になるように基準化し、結果をサンプル毎の評価の重みとした。整合度の検証を確認した後、各項目の重みはサンプルごとの重みの算術平均を用いた。

令和 4 年度は、生活者を対象として計 3,750 名の回答を回収した。分析は、性別、年代、地域、職業などで重要度が異なることを想定し、性別、年代別、地域別で分析するとともに、エネルギーシステムに関係が深い業種 (電気・ガス・熱供給・水道業) の従事している者についての分析

も実施した。ただし、電気・ガス・熱供給・水道業については、サンプルサイズが小さい (N=27) ことに留意する必要がある。

第一階層では、安定供給の重要度の重みが最も高い結果となった。なお、電気・ガス・熱供給・水道業の勤務者はこれを特に重視する傾向が認められた。一方、全体では地球環境対応が安定供給に次ぎ重要とされるが、電気・ガス・熱供給・水道業の勤務者においては、重要度が低いことが傾向の違いとして見られた。

令和 5 年度は、新エネルギーシステム全体と原子力発電システムのリスクに関して、特に重点を置くべき項目についての調査を行った。調査対象は全国の 20 歳から 89 歳の男女で、新エネルギー全体と原子力エネルギーを対象にした一対比較調査および階層分析は、それぞれ N=1000 で実施され、総回収数は 2000 名だった。安定供給の評価では、「質・量の安定供給」と「安全性」の間に顕著な差があり、特に原子力では「安全性」が非常に高く評価された。これは原子力エネルギーシステムにおける安全性の重要性を強調している。地球環境対応の評価では、「ライフサイクル全体としての地球環境対応の成立性」が重要視され、特に原子力でその差がわずかに大きくなった。これは原子力エネルギーが地球環境に与える影響に対する懸念を反映している可能性がある。

令和 6 年度は、令和 5 年度までの成果を基に、事業者を対象に新エネルギーシステムの選択要件について重要度分析を実施した。電力供給事業者、電力設備供給事業者、電力需要事業者のいずれか勤務者をスクリーニングし、それぞれ N=100 の回収データにより重要度の分析を実施した。一方、市民を対象とした分析では、図 3.2-X に示すように、階層構造を簡略化してより回答がしやすい形で聴取を実施した (N=3,750)。

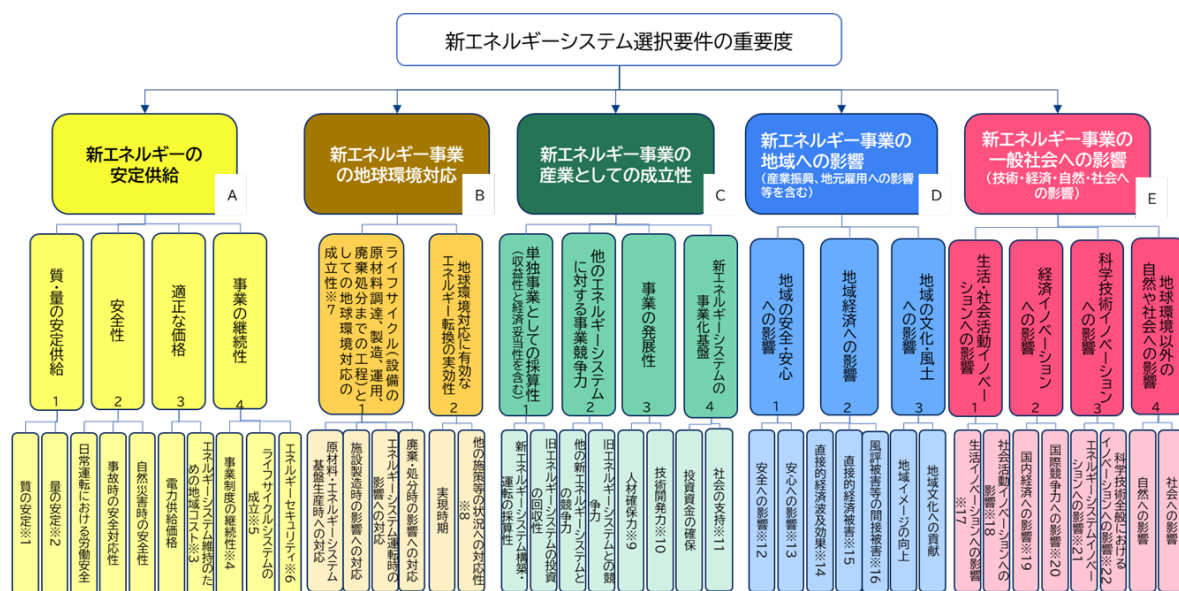


図 3.2-1 新エネルギーシステムの選択要件

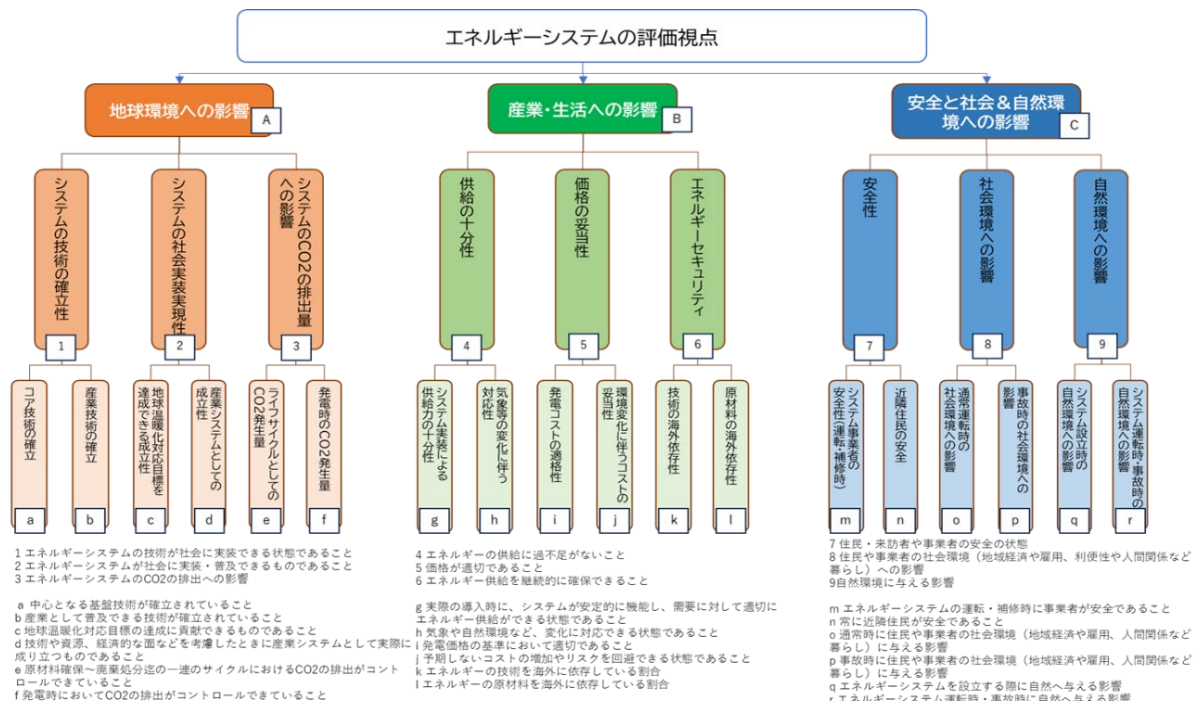


図 3.2-2 生活者を対象としたエネルギーシステムの評価視点

図 3.2-3 は、事業者を対象とした重要度の分析結果を示す。電力供給事業者は相対的に「電力供給価格」よりも「安全への影響」や「安心への影響」が優位であること、電力設備供給事業者では地球環境対応に有効なエネルギー転換の実効性における「実現時期」が最上位であること、需用事業者では「電力供給価格」や「質の安定」が最上位であること、などの差異が見られた。

図 3.2-4 は、一般市民を対象とした調査結果を示す。安全性や事故への対応の重要度が高いことは共通しているが、その他の面では、ライフステージや職業（職務）により、重要度の優先傾向は異なることが示唆された。大きく異なるのは、20～40代は、コストの適格性が優先されており、生活基盤としてかかわるエネルギーコストへの関心、が高い層であることが背景と考えられる。また職務においても契約や購買にかかわる層では同様にコストの適格性が優先されている。一方で高齢層や、サステナビリティにかかわる層においては、発電時のCO2発生量等の地球環境対応が優先されている。

以上のことから、リスクを考える視点によって、その重要性も変化することが明らかになり、すべての項目を対象としてエネルギーシステム間の比較を行う場合と、地域の特性や事業の選択の立場で、本評価システムを使用する場合は、そのリスクの重みの取扱い方が変わること留意されたい。

C.I.<0.15																								
比較内重み 比較内順位	Q1 w1					Q1 w2			Q1 w3															
	安定供給					地球環境対応			産業としての成立性															
	0.25 1					0.18 4			0.19 2															
比較内重み 階層内重み 比較内順位 階層内順位	Q2A 1w1	Q2A 1w2	Q2A 1w3	Q2A 1w4	Q2B 1w1		Q2B 1w2	Q2C 1w1	Q2C 1w2	Q2C 1w3	Q2C 1w4													
	質・量の安定供給	安全性	適正な価格	事業の継続性	ライフサイクル全体としての地球環境対応の成立性		地球環境対応に有効なエネルギー転換の実効性	単独事業としての採算性	他のエネルギーシステムに対する事業競争力	事業の発展性	新エネルギーシステムの事業化基盤													
	0.25 0.063 2 9	0.28 0.070 1 6	0.25 0.064 2 9	0.22 0.056 4 17	0.53 0.097 1 1		0.47 0.087 2 2	0.25 0.048 2 9	0.25 0.048 2 9	0.24 0.047 4 15	0.27 0.052 1 7													
比較内重み 階層内重み 比較内順位 階層内順位	Q3A.1w1	Q3A.1w2	Q3A.2w1	Q3A.2w2	Q3A.2w3	Q3A.3w1	Q3A.3w2	Q3A.4w1	Q3A.4w2	Q3A.4w3	Q3B.1w1	Q3B.1w2	Q3B.1w3	Q3B.1w4	Q3B.2w1	Q3B.2w2	Q3C.1w1	Q3C.1w2	Q3C.2w1	Q3C.2w2	Q3C.3w1	Q3C.3w2	Q3C.4w1	Q3C.4w2
	質の安定	量の安定	日常運転における労働安全	事故時の安全対応性	自然災害時の安全性	電力供給価格	エネルギーシステム維持のため の地域コスト	事業制度の継続性（推進政策、 規制等）	ライフサイクルシステムの成立	エネルギーセキュリティ	原材料・エネルギーシステム基 盤生産時への対応	施設製造時の影響への対応	エネルギーシステム運転時の影 響への対応	廃棄・処分時の影響への対応	実現時期	他の施策等の状況への対応性	新エネルギーシステム構築・運 転の採算性	旧エネルギーシステムの投資の 回収性	他の新エネルギーシステムとの 競争力	旧エネルギーシステムとの競争	人材確保力	技術開発力	投資資金の確保	社会の支持
	0.53 0.033 1 5	0.47 0.030 2 7	0.34 0.024 1 19	0.34 0.024 1 19	0.32 0.022 3 30	0.57 0.036 1 3	0.43 0.028 2 8	0.32 0.018 2 37	0.32 0.018 2 37	0.35 0.020 1 34	0.26 0.024 1 19	0.23 0.023 4 25	0.26 0.025 1 15	0.26 0.024 1 19	0.50 0.043 1 2	0.50 0.044 1 1	0.56 0.027 1 9	0.44 0.021 2 31	0.53 0.026 1 12	0.47 0.023 2 25	0.50 0.023 1 25	0.50 0.023 1 25	0.51 0.026 1 12	0.49 0.025 2 15

Q1 w4					Q1 w5									
地域への影響					一般社会への影響									
0.18 4					0.19 2									
Q2D 1w1		Q2D 1w2		Q2D 1w3		Q2E 1w1		Q2E 1w2		Q2E 1w3		Q2E 1w4		
地域の安全・安心への影響		地域経済への影響		地域の文化・風土への影響		生活・社会活動イノベーションへの影響		経済イノベーションへの影響		科学技術イノベーションへの影響		地球環境以外の自然や社会への影響		
0.38 0.068 1 3		0.32 0.056 2 4		0.30 0.054 3 5		0.26 0.050 1 8		0.25 0.046 2 9		0.24 0.045 4 15		0.25 0.048 2 9		
Q3D.1w1	Q3D.1w2	Q3D.2w1	Q3D.2w2	Q3D.2w3	Q3D.3w1	Q3D.3w2	Q3E.1w1	Q3E.1w2	Q3E.2w1	Q3E.2w2	Q3E.3w1	Q3E.3w2	Q3E.4w1	Q3E.4w2
安全への影響	安心への影響	直接的経済波及効果	直接的経済被害	風評被害等の間接被害	地域イメージの向上	地域文化への貢献	生活イノベーションへの影響	社会活動イノベーションへの影響	国内経済への影響	国際競争力への影響	エネルギーシステムイノベーションへの影響	科学技術全般におけるイノベーションへの影響	自然への影響	社会への影響
0.52 0.035 1 4	0.48 0.032 2 6	0.34 0.019 1 35	0.34 0.019 1 35	0.31 0.018 1 37	0.51 0.027 3 9	0.50 0.027 2 9	0.52 0.026 1 12	0.48 0.024 2 19	0.54 0.025 1 15	0.46 0.021 2 31	0.53 0.024 1 19	0.47 0.021 2 31	0.52 0.025 1 15	0.48 0.023 2 25

図 3.2-3 事業者を対象としたエネルギーシステムの重要度分析結果

3.2.2 リスク指標毎のシナリオ特定とシナリオ抽出【R5】

本節では、3.2.1の社会フレームの要素の中で、特にSMRとして検討すべき事項を整理する。ここでは、現時点におけるSMRの相対評価とリスク分析の前提となる重要事項を示す。

3.2.2-1 エネルギーシステムの基本要件であるエネルギーの安定供給

(1) エネルギーの質・量の安定性

この項目は、SMRが再生エネルギーシステムに対して、優位性を持っていると考えられる項目であり、その分析の差異に必要な検討事項は、以下の通りである。

但し、電力供給量の確保は、SMRだけで確保する見通しは立っていないために、他の電力システムとの連携が重要となる。

- ・電源の安定・変動特性
- ・送電系統の特性 電源予備力、 電源供給信頼度
- ・短・長周期変動に対する調整能力
- ・需要側の要求する品質
- ・(系統の安定を確保するための) システムコスト
- ・重要な原材料、希少材料、基幹部品、人的資源
- ・量の確保のための調達先のポートフォリオ 資源の採掘可能性
- ・調達先の安定性 (地政学的、知的財産権紛争から回避)
- ・量の確保の為に必要な価格の変動幅の上限
- ・市場価格変動 (資源枯渇による、需要増減による)
- ・長期変動/短期変動
- ・為替変動
- ・事故や自然災害からの復旧 (=再稼働)

(復旧に必要な作業の規模、原因究明と対策、設備更新対象)

- ・レジリエンスレベル

(技術力 (事業者、サプライチェーン)、資金調達力、人材育成、設備更新、

組織文化)

- ・ステークホルダー関連事項 (再稼働ニーズ、受容と理解)
- ・規制側の取り組み
- ・事故時の行政訴訟対応
- ・賠償・補償対応力
- ・規制に対する供給安定性
- ・定期点検も踏まえて供給安定性

(2) 安全性

安全性は、SMRにとって最大の懸念事項となり得る項目である。

- ・安全リスク検討時 運転・保守点検時、事故時
- ・事故の未然防止状況、事故対応機能の十分性)
- ・事故の影響：人的損害：労災 (運転時/保守時)、物的損害、
環境影響：事業所構内/事業所外)

- ・地域被害（人身被害、避難、経済影響、生活影響）
- ・広域被害（人身被害、避難、経済影響
（国内・外）、生活影響、日本への信頼、国外への影響）

(3) 適正な価格

エネルギー価格は、どこまで供給価格に含むかによって SMR の評価が異なる事項であり、その検討の前提を明らかにする必要がある。

- ・電力製造コスト（運転に必要なコスト、事故対応コスト等を含む）
（運転コスト、原材料の購入コスト、事故対応コスト、教育・訓練コスト、保全コスト）
- ・供給補完コスト
（補完システムの稼働コスト、補完システムの維持・投資回収のためのコスト、顧客に安定供給を果たすため複数システムの調整コスト）
- ・廃棄コスト
（廃棄用地検討・確保 立地募集、評価コスト）
（棄の即した形態への転換コスト：廃棄体の製造、再資源化の計画、許認可）
（廃棄物の物流コスト）
（廃棄物施設の運転コスト：単年度コスト、運転期間）
（エンドステート、操業計画、事業主体の合意形成コスト）
（処分・廃炉に関する資金調達）
- ・規制等の事故対応コスト
- ・地域防災コスト

(4) 事業の継続性

SMR は投資額が大きくなるために一旦事業として承認されれば、事業の継続性は期待される。

- ・政策・制度の継続性による影響
（推進政策への依存度：運転長期化への期待度、バックエンド政策、国の参画、寄与、カーボンニュートラル政策、国際協調、国内政策、水素利用、熱利用政策、核セキュリティ、保障措置）
（規制政策の影響（強化/緩和）：規制変更の技術的妥当性、セキュリティ強化、安全性の向上の妥当性、運転長期化への期待度）
- ・エネルギーセキュリティにおける継続性
（エネルギーシステム組み立て・製造、運転など、製造・技術の保持、設計・製造技術や特許等に関する国際情勢からの影響：特許行政と評価体制）
（製造技術に関する国内外規制の影響：セキュリティ by デザイン）
（セキュリティ対策の実情）
（経済安全保障（エネルギーセキュリティ）による影響：原材料確保の国際情勢、原材料・基盤材料に関する国際情勢、原材料・基盤技術等の国内外規制）

3.2.2-2 カーボンニュートラル施策の目的である地球環境への影響

地球環境問題への影響に関しては、SMR は有利な局面が大きいと想定されるが、原材料や製品に関するカーボンエネルギー施策の影響も注視すべきである。

3.2.2-3 エネルギーシステムを民間事業として成立させる基本要件である事業の成立性

この項目で検討する事項は、体系的に検討した結果として表 3.2-1 としてとりまとめた成果を示す。

3.2.2-4 エネルギーシステムがもたらす影響として心配されてきた地域への影響

以前は、地域に与える影響は、SMR が大きいとされていた面もあったが、近年は、再生エネルギーシステムに関する複数の問題が発生しており、今後の醸成も勘案しながら評価を進めていく。

SMR の社会実装に大きな影響を及ぼすリスクは、事故時にどの程度敷地外に影響を及ぼす可能性があるかという事項である。敷地外に及ぼす影響が 0 でなくても、かなり影響範囲が絞り込めれば、リスク評価に大きな影響を及ぼしうる。

3.2.2-5 生活・経済・科学技術等の一般社会にもたらす影響

この項目で検討する事項は、体系的に検討した結果として表 3.2-2 としてとりまとめた成果を示す。

階層Q1	階層Q2	階層Q3	階層Q4	リスク基準	基準の定量評価に必要な事項	原子力適用基準	原子力リスク指標	原子力リスク基準の定量評価に必要な事項
Q産業としての 成立性(技術 成熟度・市場 性・開発体制・ 規制対応等)	事業競争力 の指 点	システム運転にお ける優位性	競争力 競争力 競争力	・均等化発電原価(LCOE)	・資本費、運転維持費、原料費、輸送 費、製造費など	・均等化発電原価(LCOE)	核燃料サイクルの各ステップごとのコスト	・左記項目に加え、廃炉、中間貯蔵、最終処 分にかかるコストを考慮
				・システムコスト ・最大供給量 ・供給変化量	・供給力維持費用、系統調整費用、系 統対策費用	・システムコスト ・最大供給量 ・供給変化量		・最大供給量、供給変化量、供給力維持費 用、系統調整費用、系統対策費用
		システム製造にお ける優位性	競争力 競争力 競争力	基準1 ・発電量当たりの製造コスト 基準2 ・変圧量	基準1 ・資材調達費、人件費、立地地域、規 制対応費 基準2 ・サプライチェーンの安定性、工場稼働 率、納期	基準1 ・発電量当たりの製造コスト 基準2 ・変圧量	基準1 ・資材調達リスク ・規制対応リスク(型式証明(SMR)) 基準2 ・原子力政策リスク ・社会受容性	基準1 ・資材調達費、人件費、立地地域、規制対応 費、 基準2 ・サプライチェーンの安定性、工場稼働率、納 期
				・システム製造への影響	・エネルギー市場の世界シェア	・原子力システムへの海外展開への影 響	・規制リスク(国際調和) ・経済安全保障リスク(国内政策) ・立地地域(海外)リスク	・原子力市場の世界シェア
	新規事業へ の投資・投 資回収	人材確保力	競争力 競争力 競争力	・新規人材採用の可能性	・研究開発人材の熟練率 ・地域のシステム運転に係る就業率	・原子力システムに新規人材が過不 足なく確保できるか	・新規原子力システムの研究開発力 ・放射線医療などの新規産業分野	・研究開発人材の熟練率 ・放射線医療従事者の就業率 ・地域のシステム運転に係る就業率
				・既存人材のリスクキリングの可能 性	・研究開発人材の熟練率 ・地域のシステム運転に係る熟練率	・既存人材からリスクキリングによる人 材確保が可能か	・経済安全保障による雇用リスク(外国人、異 業種等)	・研究開発人材の熟練率 ・地域のシステム運転に係る熟練率
				・大学・研究機関の研究開発力	・関連学部の募集定員 ・関連研究機関の従事者数 ・論文数、特許数	・原子力対象とした大学・研究機関 への影響	・大学の原子力関連学科の募集定員 ・研究開発法人(JAEA等)の研究費 ・論文数、特許数	・大学の原子力関連学科の募集定員 ・研究開発法人(JAEA等)の研究費 ・論文数、特許数
		研究開発力	競争力 競争力 競争力	・企業への影響	・研究、開発業務の従事者数 ・研究開発に係る予算 ・論文、特許数	・原子力事業への投資への影響	・研究開発業務の従事者数 ・研究開発に係る予算 ・論文、特許数	・研究、開発業務の従事者数 ・研究開発に係る予算 ・論文、特許数
				・企業資金の可能性	・事業計画 ・財務状況 ・保険	原子力事業への投資への影響	・長期にわたる投資計画が策定できるか ・スケーラビリティの理解が得られるか	・原子力事業計画 ・財務状況 ・保険
				・銀行融資の可能性	・事業計画 ・融資金額 ・利息等	・原子力事業融資への影響	・融資を受けるための長期事業計画リスク ・原子力政策のリスク	・事業計画 ・財務状況 ・保険
		新規事業へ の投資・投 資回収	競争力 競争力 競争力	・政府融資の可能性	・エネルギー政策費 ・政府予算	・原子力政策に基づく継続的な支援	・エネルギー政策予算リスク(ロードマップの変更など)	・原子力関連予算 ・ロードマップ
				・投資回収への影響	・発電コスト ・事故、故障による追加費用	・原子力事業における投資回収への影 響	・発電コストのリスク ・エネルギー需要リスク ・事故、故障等による投資回収リスク	・発電コスト ・エネルギー需要 ・事故、故障対応に係る費用
				・投資回収期間	・発電コスト ・事故、故障の影響	・原子力事業の投資回収期間への影 響	・発電コストのリスク ・エネルギー需要リスク ・事故、故障等による投資回収リスク	・発電コスト ・エネルギー需要 ・事故、故障の影響
		既存システム の事業 投資の回収	競争力 競争力 競争力	・既存システムへの投資回収	・発電コスト ・運転期間 ・廃止に係るコスト	・既存システムへの投資回収状況	・発電コストのリスク ・エネルギー需要リスク ・事故、故障等による投資回収リスク	・発電コスト ・運転期間 ・廃炉、中間貯蔵、最終処分費用
				・既存システム運転コストの転換への 影響	・既存システム運転コストの転換への 影響	・既存システムへの投資回収への影 響	・事故、故障等による投資回収リスク	・運転停止に係るコスト ・廃炉に必要なコスト、期間

表 3.2-1 エネルギーシステム事業の成立性

表 3.2-2 生活・経済・科学技術等の一般社会にもたらす影響

表 3.2-2 生活・経済・科学技術等の一般社会にもたらす影響（続き）

3.2.3 リスク分析、評価手法指針開発【R5～R6】

3.2.3-1 リスク分析の基本的考え方

地球温暖化対応のための脱炭素エネルギーシステムの社会実装を行う為には、その実装課題を把握して対応を行う必要がある。

本研究では、社会実装のための課題を実装リスクとして把握して、社会実装のための対応に資するために新エネルギーの社会実装の判断に必要な情報を把握するためにリスク体系を整理した。

社会実装の判断に必要なリスク情報として、リスクの影響、起りやすさ、リスク顕在化シナリオ、不確かさやその要因等様々なものがある。

リスク分析は、これらの情報を把握するためのものであり、本節では、その為の手法を述べる。

適切なリスク分析で大切なことは、判断に必要なリスクを特定することである。一般的な工学システムのリスクは、経験した事故やトラブルを基に設定することが多いが、新たなシステムの社会実装の達成という視点では、社会実装に必要な要件を整理し、その達成できない不確かさを分析すべきリスクとして特定することになる。

リスク分析では、以下の観点で手法を整理した。

(1) 影響の大きさ

社会実装のリスクには、特定の技術の成立性のように決定的な影響をもたらすようなものもあれば、状況により軽度の影響から致命的な影響まで変化するリスクもある。社会実装に関するリスクの影響の把握は、様々な社会環境等の変化によってリスクがどのように変化するかを把握することでもある。

そのために、リスク分析では影響の大きさを推定する際にその大きさに影響を与える要因の分析も重要である。

そして、影響の大きさを評価する際に、環境等の変化をどのように想定したかをリスク評価の付加情報として判断者に提供することで、意思決定者はリスク評価の前提を知り、前提が変化した場合には、評価を修正することができる。

(2) 起りやすさ

起りやすさの評価に関しても、影響の大きさの評価時と同様に、機械的な故障の連鎖によって発生するリスクは、時代が変化しても基本的には同じ起りやすさと考える事ができるが、社会的要因に起因するリスクは、状況の変化によって起りやすさも大きく変化する。したがって、その分析に関しては、影響の大きさと同じように環境等の変化をどのように想定したかをリスク評価の付加情報として判断者に提供する必要がある。

(3) 定量評価

工学システムのリスク分析では、影響の大きさを死亡者数や危険物質の拡散面積等を数値で評価したり、起りやすさに関しては故障データベース等を用いた確率で表わしたりすることがある。このような定量評価は影響の大きさが物理的数値で表わされる様なリスクやリスクの顕在化シナリオが機器の故障率のように再現性があるような要因が支配的な場合は過去のデータを基にした

発生確率で評価することで可能である。しかし、本評価対象のように影響自体が物理的影響として表現できなかったり、起りやすさが社会的状況等によって大きく変化したりする場合は、データを基にした数値評価が難しい場合も多い。

したがって、本評価では、判断前提を付加したランク評価を採用することとした。一般的な工学システムリスクの様に詳細な定量評価ができる場合は、その評価結果をランク評価に置き換えることで、全体評価に組み込むこととする。

(4) シナリオに影響をもたらす要因

本リスク分析に関しては、リスク顕在化シナリオにおいてリスクの影響や起りやすさの大きな影響をもたらす要因を把握することが重要となる。この要因は分析においては、分析時の前提として重要なパラメータとなると同時に、リスク対応を考える際の重要な対処とする。

3.2.3-2 リスク評価の構造

(1) リスク構造の分析

リスクは、システムのリスク構造のどのような構成要素かによって、分析すべき影響や起りやすさの前提等が異なってくる。

例えば、事故リスクは、地域への影響を考える視点と、供給が継続できるかという視点では、対象とする事象が異なってくる場合がある。

リスク顕在化シナリオに関しては、そのリスク項目の内容が十分に理解できるレベルになるために分析を行う必要がある。そのリスク項目に関して既存の分析実績や経験が存在する場合は、リスク項目の評価を行うことができる場合もあるが、一般的には、リスク分析結果の求める要求に応じてリスク分析を行う必要がある。

本評価では、以下の検討を行なった。

- ・検討したいリスク項目をトップ事象として、FT 等により詳細分析を行った。

社会的要因も重要なリスク顕在化要因となる可能性があり、その不確かさも大きな判断条件となる場合もある。

- ・特に重要なリスクに関しては、シミュレーションや詳細分析を行った。

(2) リスクの要点分析

リスク分析は、リスクの影響の大きさや起りやすさを分析するだけでなく、リスクシナリオにおける顕在化のトリガーや影響を変化させる分岐点、さらには影響や起りやすさに大きな影響をもたらす重要な検討の要点を知ること重要である。

特に不確かさが大きな事項は、その状況によってリスクを大きく変える可能性があるために、不確かさの変化に大きな影響を与えるトリガーに関する検討も重要である。

(3) リスク評価

脱炭素エネルギーシステムの社会実装リスクの構成要件は、時々々の社会状況や技術状況が含まれているものが多い。

そのために、リスクがもたらす影響や起りやすさは、どの程度将来の期間のリスクを評価するかによって、変化が大きくなる可能性もあり、不確かさも大きくなる場合がある。リスクの構成要因がシステムの内部部品等の故障等に依存する場合は大きい場合は、故障率データベース等を基に、リスクの起りやすさ等を数値的に精度良く定量評価を行う事も可能であるが、脱炭素エネルギーシステムの社会実装リスクは、ランク評価による評価が実態を良く反映するものとなる。

また、エネルギーシステムをとりまく状況の不確かさをすべてエネルギーシステムのリスク評価に直結させてもリスクへの対処が難しくなる。

リスク分析の結果は、リスクの理解を増すためやリスクシナリオをより良く理解するために活用する方法も有効となる。

以上の観点から、エネルギーシステムの社会実装リスクに対する評価のためのリスク基準を以下の3つの視点に分けて評価する手法を検討した。

① リスク基準の設定

1) カーボンニュートラル（CN）施策自体の推進リスク

- ・ 起りやすさの評価基準 CN 推進への課題が発生する可能性

- 5 ほぼ確実
- 4 かなり高い
- 3 可能性がある
- 2 状況によって発生する可能性がある
- 1 可能性は小さい

- ・ 影響の大きさの評価の基準 CN の推進に与える影響

- 5 大きな障害となるレベル
- 4 推進を妨げるレベル
- 3 一定の影響があるレベル
- 2 大きな状況の変化がない限り影響は少ない
- 1 影響は少ない

2) カーボンニュートラル施策推進の中で、他のシステムと比較して、対象とするシステムを選択してもらうための検討すべきリスク

- ・ 起りやすさの評価基準 対象のシステムの選択を妨げる可能性

- 5 ほぼ確実
- 4 かなり高い
- 3 可能性がある
- 2 状況によって発生する可能性がある
- 1 可能性は小さい

- ・ 影響の大きさの評価の基準 対象のシステムの選択に与える好ましくない影響

- 5 社会全体が対象システムに反対するレベル
- 4 対象システムの選択に対し立地地域で反対が大きくなるレベル

- 3 対象システムの選択の問題が指摘されるレベル
- 2 対象システムの選択に一部に反対意見がある
- 1 対象システムの選択に影響がない

3) 対象システムの中で特に特定の型式のシステムを選択してもらうために検討すべきリスク

特定の型式のシステムの例：

太陽光発電システム（住宅地の屋根に設置する型式、大型パネルシステム等）

風力発電システム（洋上風力型式、陸上設置 等）

原子力システム（革新炉、SMR 等）

・ 起りやすさの評価基準 特定の型式の選択を妨げる可能性

- 5 ほぼ確実
- 4 かなり高い
- 3 可能性がある
- 2 状況によって発生する可能性がある
- 1 可能性は小さい

・ 影響の大きさの評価の基準 特定の型式のシステムの選択に与える好ましくない影響

- 5 社会全体が特定の型式システムに反対するレベル
- 4 特定の型式の選択に対し事業者が選択しなくなるレベル
- 3 特定の型式の選択の問題が指摘されるレベル
- 2 特定の型式の選択に一部に反対意見がある
- 1 特定の型式の選択に影響がない

尚、該当システムの個別の技術的要件のように、影響の大きさとして具体的な指標が設定できる場合や、起りやすさとして発生確率が設定できる場合もあるため、対象のリスク毎にリスク基準を設定した方が適切に適切な場合もある。

② リスク構造における評価

リスク項目・シナリオ毎に評価を実施し、そのリスク対応の必要な視点や要点を整理する。

また、該当しない項目に関しては、評価対象外として 「―」 を記す。

定量評価を実施する項目は、最下層の項目とは限定せず、中間項目の場合もあり得る。その場合は、その項目より下位の構造は、そのリスクの評価を行う際の参考となるシナリオとなる。

また、各項目で定量評価による成果は、各データによって評価する定量的評価結果だけでなく、リスクの評価に影響を与えるシナリオの説明・不確かさの分析である場合もある。

本フレームにおける評価結果は、その評価値のみならず、その評価のためのシナリオ分析自体も対応の可否・要点を検討する際の重要な根拠となる。

リスク評価結果を用いた意思決定では、その定量評価の値だけでなく、リスクが持っている不確かさやその不確かさを生じさせる要因を把握することで、より有効な評価を行うことができる。

定量評価を行う場合は分析の前提・根拠を明らかにして評価を実施することで、その前提や根拠の状況や考え方が変化した場合は、定量評価を適切に変更できる。

③リスク対応のまとめ

エネルギーシステムの社会実装に関するリスクを明らかにして、必要なリスク対応に関して、対応主体、優先度、対策内容等を整理する。

リスク対応には、以下の事項が含まれる

- ・システムの技術的な改善・開発（企業、学会、国としての対応）
- ・規制に対する対応
- ・制度の改善
- ・人材の確保
- ・必要資金の確保
- ・社会や地域の課題への対応
- ・産業との連携
- ・計画の変更等

3.2.3-3 ガイドラインの概要

本研究では、SMR の社会実装に関する課題を明らかにしたが、本リスク評価システムは、脱炭素エネルギーシステムの以下の検討にも活用できる。

(1) 各システムの社会実装に関する課題を把握する

(2) 社会において実装するエネルギーシステムの選択

- ・期間ごとの各エネルギーシステムの実装割合の検討
- ・特定の地域の状況を設定することで、その地域に相応しいエネルギーシステムの選択を行う

(3) エネルギー事業の成立性の検討

本研究では、本エネルギーリスクフレームの活用として SMR 課題の検討として限定的であったため、本フレームを様々な用途で広く活用して頂くために、本リスクフレームの説明と活用法をガイドラインとして取り纏めた。

脱炭素エネルギーのリスクフレーム参照。

3.2.4 項目(2)のまとめ

社会インフラとしてのエネルギーシステムに関して、過去論点になった事項を整理して抽出された大項目をトップ事象として要因分析を行い、リスク構造を体系的に整理した。各項目の重要度を階層分析法を用いた調査から算出した結果、調査対象者の属性によって重要度の傾向が変化することを確認するとともに、構築したリスク構造の有効性を確認した。各項目で設定したリスク指標毎にシナリオ分析を行い、SMR の相対評価とリスク分析の前提となる重要事項を整理した。構築したリスク構造に対して、脱炭素エネルギーシステムのための課題を実装リスクとして分析、評価するための指針を開発し、脱炭素エネルギーのリスク評価フレームとしてまとめた。

3.3 SMR に対する社会総合リスク評価の試行【R4～R6】

3.3.1 検討対象とする SMR のモデルの策定 【R4】

(1) SMR の特徴

SMR は、従来の大型軽水炉と比較して小さな発電容量で標準化されたモジュール構造を有する。核燃料のインベントリが小さく、受動的安全性を有することが特徴である。これにより、過酷事故時のリスクが低減し、緊急時計画区域（EPZ）を小さくできる可能性がある。実際、米国の VOYGR（NuScale）では、米国規制委員会（Nuclear Regulatory Commission、NRC）の審査において EPZ をリスクアセスメント結果に基づき縮小している。また、燃料について軽水炉型 SMR は軽水炉燃料（濃縮度 5%以下）をほぼ流用でき、廃棄物処理に関するリスクも既存の軽水炉と同様の課題を有している。将来的に MOX 燃料の利用は想定しないが、事故耐性燃料（ATF）導入の可能性は期待される。

スケールメリットの小さい SMR では、モジュール化は重要な要素である。モジュール化して工場での製造を実現することで、熟練工不足に適応や現地工事の遅延リスクの減少等スケールメリットのデメリットを補う製造イノベーションが期待できる。加えて、小型化により一度の投資額も小さいため、投資回収までの期間短縮が期待でき、ファイナンスリスクも小さい。

SMR は、石炭火力の置き換えによる低炭素発電技術としての期待が大きい。小型の SMR は石炭火力と同程度の発電規模であり、必要敷地面積が小さく既存敷地内に建設が可能であるため、石炭火力の置き換えとしては最適の選択肢となりうる。また、既存の電力系統への追加投資も少なく、大型炉に比べて運転の柔軟性も高いことから、変動性再生可能エネルギー電源を持つ電力網に適合した発電システムとなっている。

(2) SMR が期待される点

世界的な動向としては、2035～2040 年代に SMR 市場が拡大する見込みとなっており、グローバルビジネスとしての輸出産業としての SMR への期待も大きい。SMR に期待される点を以下に示す。

① 現地作業の生産技術力における課題解決

AP1000、EPR など大型炉建設で大幅な遅延を招いたのは、原子炉本体ではなく、建設工事と組み立てにあった。Westinghouse と AREVA（現 Framatome）は、長らく原子炉の受注実績がなく、シニアエンジニアのリタイアによる熟練工の枯渇、金属製品を含むサプライチェーン技術力の低下などが問題となっていた。新世代大型炉の FOAK 炉に取り組む経過の中で、エンジニアリング上の大きなリスクが相次いで顕在化してしまった。

これに対し、ロシアと中国は、両国とも原子力事業には国家的な支援も与えられており、原子力事業の長期的展望が与えられていたことが成功の要因として考えられる。日本の ABWR（柏崎刈羽 6、7）、韓国 AP1400 の UAE での建設も成功しているが、現地作業の生産技術力によるところが大きいと考えられる。

② ファイナンス

大型炉建設の大幅な遅延をみて民間金融機関は投資リスクの大きさにおよび腰になっている。ホライズン（日立 ABWR）のウィルヴァ・ニューイッド計画は、資金面で断念した。一方、英国ヒンクリーポイント C 計画には中国 CGN の資本参加を得て着工にこぎつけた。近年の大型炉ビジネスで ROSATOM が圧倒的優位となった背景には、導入国への手厚い財政支

援にロシア政府が低利子の借款を提案していることがあり、とくに開発途上国へのターンキー輸出には有効に働いている。

③目標となる時期

既存石炭火力の寿命が2030～40年代と見込まれる中、最も先行しているVOYGR(NuScale)が、2020年代後半に米国内2地点で送電開始するとみられる。この時点で10数基程度同一仕様の原子炉を生産していることになる。しかし、現在このため後続の欧米SMRは、遅くとも2030年代前半には初号機(FOAK炉)を運転開始し、量産機(NOAK炉)ビジネスに備える必要がある。

(3) SMRによるイノベーション

①モジュール化によるコストダウン、工期短縮など

大型炉建設のコストを引き上げている要因を分析すると、建設工事に関する経費とされる。工場生産したモジュールを輸送・現地組立により、現地工事の最小化、工期短縮が期待できる。標準化したモジュールを、工場内生産による品質向上、並列生産でコストダウンが期待できる。現地工事の短期化、出張を必要としない工場作業は、将来の熟練工不足にも適応可能となっている。

②VREと共存する原子力技術

今後再生可能エネルギーの均等化発電原価(LCOE)が低下する見込みで、価格面からはオフショア風力、太陽光発電など「変動性再生可能エネルギー(VRE)」の導入が予想される。原子力発電は、低炭素電源としてVREと同等の低価格であるとともに、VREの変動性に適応する能力が求められる。SMRは大型炉に比べ変動への対応ができるとされる。VOYGR(NuScale)では、複数のSMRに対して、個別に発電機を結合している。これは、定期検査時におけるアベイラビリティの確保だけでなく、変動への柔軟な対応が期待できる。将来的には、熱利用、水素製造などの多様な機能を付加することも期待される。

③魅力ある投資対象としての量産機(NOAK炉)

小さく抑えられた投資総額、モジュール化と工場生産により、着工から操業開始までのスケジュールの明確化することにより、投資リスク低下の面で有効である。量産機(NOAK炉)段階には、民間の融資マインドを高めた魅力的なソリューションを提供できる可能性がある。まずは初号機(FOAK炉)の資金調達がポイントとなる。

④量産化を見据えた各国規制の共通化

合理的な安全規制の導入が重要となる。各国の安全規制を共通化できれば、許認可プロセスの短縮、作業負荷の削減となり、コストダウンと投資リスクの低下、グローバルな販売促進につながる。とくに、EPZの縮小の実現は、国民のリスク受容に効果的であり、リスクアセスメントによる適切なEPZの決定が必要となる。

(4) 想定される利用形態

現在、安価なLCOEであるVREの普及が推進されており、VRE普及の弊害である電源の変動を補完するための対策が必要となっている。とくに、日本のような島国では、欧州のような国際連携線の活用などは難しい。また、電力の安定供給には、大容量電池設備なども必要となるが、コストでのリスクが大きい。水力発電および揚水発電設備は、VREを補完する重要な設備であ

るが、立地点は限定されるため、大規模に VRE が普及した段階での対応としては十分とは言えない。また、現在最も VRE の補完に有用な化石燃料発電施設は、今後は老朽化が進み、建替は困難である。このため、調節可能な低炭素電源の必要性が高まっている。SMR 利用には、このような調整可能な電源としてのニーズも想定される。

これまでの軽水炉は、規模の経済 (Economics of scale) を目指し、1 基あたりの出力を高めてきた。しかし、前述の現地作業の生産技術力における課題やファイナンスリスクなどが要因となって、今後は大型炉輸出の競争力は低下すると考えられる。これに対し、量産の経済 (Economics of multiple) によるコストダウンが期待できる軽水炉型 SMR については、グローバル展開を図り多様な利用形態に適用していく必要がある。

(5) 検討対象とする SMR モデルケース

整理した SMR の特徴を踏まえ、検討対象とする SMR モデルについて、以下のように設定した。

①炉のタイプ：LWR-SMR (PWR, BWR)

現行の商用軽水炉と特性が大きく変わらない、軽水炉型の SMR を対象とする。基本的には、構造、安全対策は同じであるが、受動安全性を有する SMR では不要な安全機能があるため、SMR の特性を考慮してリスク分析を実施していく必要がある。

②用途：VRE と連携を前提とする発電を中心とする。

エネルギーシステムとして、将来的には熱利用や水素製造なども期待されるが、現時点では発電用途を対象とする。欧州では、熱利用等小型の SMR に適した用途も想定されているが、国内では現行軽水炉の代替として設置する可能性が高い。

③現在稼働中の原子炉に使用されている既存の燃料とする。

(濃縮度 5%を超えるウラン燃料 (HALEU: High-Assay Low-Enriched Uranium) は不要とするタイプ)

④立地：複数炉

上述の通り、現行の軽水炉の置き換えを前提とするため、発電量の需要から複数炉での運転を前提とする。

5) 規模：100 (@50×2)～924 (@77×12) MWe

複数炉の現状の開発状況と現行軽水炉の置き換えを想定して上記のように設定した。

3.3.2 SMR のリスク分析および評価の予備検討【R5】

令和 5 年度は、本格的な分析、評価の準備として試行を実施した。SMR に関しては、廃棄物も含めたライフサイクルの成立性や国内外の原子力施設の事故の発生のように原子力全般に共通の課題となる項目や火力発電の廃止時期等の新エネルギーの共通課題の他に、以下の重要な検討事項の重要性を整理した。

(1) 事故時の敷地外への影響

- ・ 定量的評価の妥当性 事故発生的前提整理の十分性、定量評価の妥当性
- ・ 原子防災の仕組みに関する行政判断

SMR の事故時の影響の小ささを前提とすると、工学的にあらゆる状況に対する敷地外への影響を保証できなくても、現在の原子力防災の考え方を変更して、より住民安全の仕組みを構築することにより、住民の安心感を醸成できる可能性がある。

(2) 発電所建築単価の提言

- ・メーカーの型式認証の力
- ・規制の型式認証機能

(3) メーカーの製造能力

(4) 発電所建設地の確保の時期 等

SMR による発電が社会に受け入れるか否かは、事業の継続性及び発電の安全性が主要な判断基準となり得る。これらの要素を適切に分析するためには、SMR が工学システムとして抱える事故のリスクを定量的に評価することが不可欠である。さらに、この評価は、ステークホルダー間の議論や、事業者や規制当局における意思決定プロセスにおいて有益な情報と考えられる。しかし、リスク評価の結果が、SMR のみに関する定量的なデータに限られる場合、そのリスクの規模を一般市民や社会が理解するのは難しいと考えられる。この問題を解決するための一つの方法として、SMR の事故のリスクについて、既に社会で受容されていて、かつ、SMR と同種の放射線被ばくのリスクを有する従来型の原子炉の事故のリスクと比較すれば、それらの大小関係を比較可能となり、一般市民・一般社会において議論が可能になると考えられる。

3.3.3 SMR のリスク評価の実施 【R6】

令和 6 年度は、開発した評価フレームを適用し、SMR のリスク評価を実施した。各視点の分析を以下に示す。

(1) 安定供給の視点

①質・量の安定供給

1) 質の安定

a) 電圧の安定性

SMR を含む原子力発電は、蒸気タービンと発電機から構成される。いわゆる同期電源に区分され安定性は高い。また、時間スケールの出力変動が可能な SMR は、VRE の補完電源として期待されている。

可能性：1、影響：1

b) 周波数の安定性 同様に安定性が高い

可能性：1、影響：1

2) 量の安定

a) 必要な量の供給

SMR を含む原子力発電は、発電量が安定しており、ひとたび運転が出来れば安定した電源となる。FOAK 炉操業までには、立地選定、装置製作、核燃料調達、現場工事、許認可、資金調達、地元合意など多岐にわたる要因がある。

可能性：3、影響：5

b) 環境の変化に対する供給安定性

SMR を含む原子力発電は、自然環境変化に関わらず比較的安定的に発電が可能である。

可能性：1、影響：4

c) 事故時の復旧性（レジリエンス）

運転期間中には大小の事故トラブルに遭遇する可能性があり、速やかな復旧と再開には、事業主体やサプライチェーンの技術力、許認可体制の能力および地元地域社会の受容などが必要である。

可能性：2、影響：4

d) 規制の変化に対する供給の安定性

類似事故の知見から、あるいは長期運転に伴う検査項目の強化など、規制強化の見直しをおこなう可能性がある。

可能性：3、影響：3

e) 定期点検期間も含めた供給安定性

原子力は規制官庁による検査、これに伴う保守作業、核物質に関する IAEA 国際査察などが予定されており、所要の運転停止を伴う。一方で技術進展により検査合理化の可能性もある。SMR は定期検査の短縮を考慮している可能性がある。

可能性：2、影響：2

f) 発電原材料（希少材料、基幹部品）の供給安定性

運転寿命の 60 年間においては基幹部品調達先のサプライチェーン、濃縮ウラン燃料の調達先に影響を与える可能性がある。

可能性：2、影響：3

表 3.3-1 リスク分析結果（質・量の安定供給）

階層 Q3	階層 Q4	再生エネルギー		原子力		SMR	
		起りやすさ	影響の大きさ	起りやすさ	影響の大きさ	起りやすさ	影響の大きさ
質の安定	電圧の安定性	4	4	1	1	1	1
	周波数の安定性	4	4	1	1	1	1
量の安定	必要な量の供給	4	2～3	3	5	3	5
	環境の変化に対する供給安定性	2～5	2～5	2	4	1	4
	事故時の復旧性（レジリエンス）	3	2～5	2	4	2	4
	規制の変化に対する供給の安定性	2	1	3	3	3	3
	定期点検期間も含めた供給安定性	1	1	2	3	2	2
	発電原材料（希少材料、基幹部品）の供給安定性	2	1	2	3	2	3

② 安全性

1) 日常運転における労働安全

事業者並びにサプライチェーンの安全管理体制は体系化されており、教育訓練は安定的に運営されており、安全実績が積みあがっている。SMR は、運転保守に関する IT 導入が予定されており、従業員安全性が期待される。

可能性：2、影響：2

2) 事故時の安全対応性

a) 社員安全

緊急時対応計画の立案や教育訓練が行われている。緊急時に適切に対応するかの懸念はある

可能性：2、影響：3

b) 一般市民安全

SMR は炉心溶融の可能性は低く、また大型炉においても福島事故後の規制強化（フィルタベント設置など）により可能性は低く抑えられている。また地域防災計画の立案や教育訓練が行われている。緊急時に適切に対応するかの懸念はある。

可能性：1、影響：2

3) 自然災害時の安全性

設備は自然災害に対して高い安全性を持つが、南海トラフ地震等の大規模災害に原子炉運転寿命 60 年間に於いて遭遇する可能性がある。現在緊急時対応計画の立案や教育訓練が進められているところである。緊急時に適切に対応するかの懸念はある。

a) 社員安全

可能性：2、影響：4

b) 一般市民安全

可能性：2、影響：4

表 3.3-2 リスク分析結果（安全性）

階層 Q3	階層 Q4	再生エネルギー		原子力		SMR	
		起りやすさ	影響の大きさ	起りやすさ	影響の大きさ	起りやすさ	影響の大きさ
日常運転における労働安全		2	2	2	2	2	2
事故時の安全対応性	社員安全	2	2	2	3	2	3
	一般市民安全	2	1	1	3	1	2
自然災害時の安全性	社員安全	2	2	2	5	2	4
	一般市民安全	2	1	2	5	2	4

③ 適正な価格

1) 電力供給価格

a) システム構築コスト

SMR はモジュール構造で大型炉に比べ現地工事を縮小し、工期遅延リスクを抑えている。初期投資額を抑えることが可能。LCOE は大型炉より高くなると想定される。ただし初号機 (FOAK 炉) には不確実性があり、量産機 (NOAK 炉) では安定が期待されている。

可能性：2～3、影響：3～4

b) 発電コスト

出力相当の核燃料コストは軽水炉よりやや高いがほぼ同じ。モジュール化による運転管理のコストダウンが期待される。

可能性：2、影響：3

c) 供給補完コスト

定期検査などの長期の運転停止に対しては、複数基の運転により、電力需要に柔軟に対応でき、補完コストの発生が少なく抑えられる。また VRE 低発電時に SMR が補完する関係が期待される。

可能性：2、影響：2

d) 廃棄コスト

軽水炉と同等のウラン燃料を用いるため、使用済核燃料の取扱い（貯蔵、再処理、処分も）は同一。施設の解体については、モジュール構造の採用により安価となる。

可能性：2、影響：2

2) エネルギーシステム維持のための地域コスト

a) 地域による事故の未然防止コスト

SMR は安全性が高く緊急時対応計画を策定する区域（EPZ、以下緊急時計画区域という）を小さくできる。（施設敷地内となることを目標に検討が進められている。）既存炉に隣接する場合には、既存炉の緊急時計画区域の内に対応が可能。立地自治体の負担が抑えられる可能性がある。

可能性：2、影響：1～2

b) 災害発生時の地域防災コスト

SMR の安全性が高いことから災害発生時のコストも低くなる。

可能性：1、影響：3

表 3.3-3 リスク分析結果（適正な価格）

階層 Q3	階層 Q4	再生エネルギー		原子力		SMR	
		起りやすさ	影響の大きさ	起りやすさ	影響の大きさ	起りやすさ	影響の大きさ
電力供給価格	システム構築コスト	2～3	2	2～3	3	2～3	3～4
	発電コスト（運転に必要なコスト、事故対応コスト等を含む）	1	1	2	3	2	3
	供給補完コスト	3	4～5	2	2	2	2
	廃棄コスト	2	1	2	3	2	2
エネルギーシステム維持のための地域コスト	地域による事故の未然防止コスト	2	1	2	1～3	2	1～2
	災害発生時の地域防災コスト	2	1	2	5	1	3

④供給の継続性

1) 事業制度の継続性（推進政策、規制等）

SMR 導入国において、3S（原子力安全、核セキュリティ、保障措置）に関する体制構築は原子力と同様に必要。各国規制との調和、国際機関との連携が期待される。

一方、運転寿命の 60 年間には、社会環境の変化が予想され、国際政治や経済情勢により、事業者自身、事業者とサプライチェーンとの関係性に影響を受ける恐れはある。

可能性：2、影響：4

2) ライフサイクルシステムの成立

SMR では濃縮度 5%ウラン燃料を採用しており、軽水炉を踏襲できる。

可能性：2、影響：2

3) エネルギーセキュリティ

システムエネルギーシステムの製造・運転・保守技術・仕組みの継続性

事業者およびサプライチェーンにおける技術力確保、人材育成は安定運転、安全確保上重要。

可能性：3、影響：3

4) 原材料・基盤製品供給の継続性

基盤技術、基盤製品、ウラン濃縮役務については国内および友好国からの調達に継続性確保が重要である。ウラン資源調達は地政学リスクを考慮した多様化（ポートフォリオ）が重要となる。

可能性：3、影響：3

表 3.3-4 リスク分析結果（供給の継続性）

階層 Q3	階層 Q4	再生エネルギー		原子力		SMR	
		起りやすさ	影響の大きさ	起りやすさ	影響の大きさ	起りやすさ	影響の大きさ
事業制度の継続性（推進政策、規制等）		1	2	2	4	2	4
ライフサイクルシステムの成立	ライフサイクルシステムの成立	2	2	2	2	2	2
エネルギーセキュリティ	システムエネルギーシステムの製造・運転・保守技術・仕組みの継続性	2	2	3	3	3	3
	原材料・基盤製品供給の継続性	2	2	3	3	3	3

（2）エネルギーシステムの地球環境対応の視点

本項では、再生可能エネルギー（太陽光・風力など）・原子力（大型炉）・SMR の三者について、ライフサイクル全般（原材料調達、施設製造・建設、システム運転〈物流含む〉、廃棄・処分）にわたる地球環境へのリスクを比較・整理する。原子力と SMR は本質的に放射性物質の管理が課題となる一方、再生可能エネルギーもレアメタル資源の採掘や大量の設備廃棄物など、それぞれ性質の異なるタイプの環境リスクを抱えている。地球環境対応の視点でのリスク分析を、表 3.3-5 に示す。表の「可能性」と「影響」は、ともに 1～5 の 5 段階評価で示し、具体的なリスクの背景は下記本文中で詳述した。

（3）産業としての成立性の視点

産業としての成立性の視点での分析結果を表 3.3-6 に示す。各項目について、「原子力システムの中で SMR を選択しないリスク」の視点として分析結果の概要を以下に示す。

① 新システム構築・運転の採算性

1) 新システム構築投資の回収性

小型モジュール炉（SMR）は新規設置に関して投資の回収が難しい。米国 NuScale 社で開発中の VOYGR は、米国規制委員会 NRC から承認を受けたにもかかわらず、2023 年 11 月には進行中のユタ州公営共同電力事業体（UAMPS）プロジェクト（77MWe×6 基）の中止が発表された[1]。初号機は、規制対応などの費用負担が大きくファイナンスの確保が大きなリスクとなる。物価の上昇は、経済状況に依存するが確実に起こる可能性がある（可能性：4）。

一方、国内では地震の影響を考慮する必要がある、規制対応コストが上昇することが SMR の選択を妨げる可能性がある（可能性：4）。（複数の可能性により可能性：4→5）投資の回収が見

込めない場合、SMR を事業者が選択しなくなる（影響：4）。

表 3.3-5 リスク分析結果（地球環境対応の視点）

階層 Q3	階層 Q4	再生エネルギー		原子力		SMR	
		起りやすさ	影響の大きさ	起りやすさ	影響の大きさ	起りやすさ	影響の大きさ
原材料・エネルギーシステム基盤生産時の影響	原材料調達時の影響	4	2	2	2	2	2
	システム生産時の環境影響	3	4	2	4	2	3
施設製造時製造時の影響	施設建設に関する環境影響	1	2	1	2	1	2
	施設建設に付随する物流等の環境影響	2	3	2	3	1	2
エネルギーシステム運転時の影響	システム運用の直接的環境影響	3	4	2	1	2	1
	システム運用に付随する物流等の環境影響	2	3	1～2	2	1～2	2
廃棄・処分時の影響	廃棄・処分地や施設の建設に伴う環境影響	3	4	1～2	4	1～2	4
	廃棄・処分の直接的環境影響	1	2	2	4	2	4
	廃棄・処分に付随する物流等の環境影響	1	2	2	4	2	4
実現時期	なるべく早く実現	3	4	2	4	3	5
	確実に実現	1	2	2～3	3	2～3	3
他の施策等の状況への対応性	国際状況の変動への対応	3	4	3	5	3	5
	政策・規制要求への対応	3	4	3	5	3	5
	生活視点の要求への対応	3	4	3	3	3	4
	経済視点の要求への対応	3	4	3	3	3	4
	技術開発遅れへの対応	3	3	3	2	3	4

2) 運転の採算性

人件費の高騰：人口減少が進む日本では、人件費の高騰は避けられず、SMR の導入をほぼ確実に妨げる（可能性：5）。既存の軽水炉と比較した場合、複数炉になることで運転、維持にかかわる費用は大きくなる。コロラド州立大の研究グループの試算では、LCOE で比較した場合、軽水炉型 SMR の運転コストは既存の原子炉の平均値と比較して約 35% 高い値となった[2]。運転コストが高い点は、SMR の導入に一部問題が生じる可能性がある（影響：3）。

② 旧システムの投資の回収性

1) 旧システムの投資残金の回収性

エネルギーシステムは長期で投資を回収するため、長期間安定して運用することが前提となる。旧システムの多くは、投資の回収に必要な期間を超えて運転している炉も存在しており、残金は確実に回収される見込みが高い（可能性：1）。旧システム（軽水炉）の投資残金が回収されない場合、事業者は SMR に充てる投資を別途調達する必要があるため、事業者が SMR を選択しない可能性がある（影響：4）。

2) 旧システムの廃棄コストの回収性

旧システムが軽水炉の場合、廃棄コストの回収は困難である。ただし、廃棄コストは原子力システム共通の特徴を有しており、回収が困難であることを理由に事業者が SMR を選択しない可能性は小さい（可能性：1）。同様に共通の特徴により、SMR の選択に一部問題が指摘される（影響：3）。

3) 旧システムに関する産業の移行

旧システムからの産業の移行が失敗した場合、原子力産業は維持されるが、SMR の産業は成立しないため、SMR の選択を確実に妨げる（可能性：5）。この場合、事業者は SMR を選択しない（影響：4）。

③ 他の新エネルギーシステムとの競争力

1) 運転コストの競争力（他の新エネルギーシステムとの競争力）

運転コストの上昇は、SMR の導入を妨げる可能性はかなり高い（可能性：4）。原子力システム全体で運転コストが上昇する場合は SMR の選択への影響は小さい。一方、規制の国際調和に失敗した場合、SMR の運転コストが相対的に上昇するため、SMR 選択の問題となる（影響：3）

2) 供給安定性の競争力（他の新エネルギーシステムとの競争力）

原子力としては、供給安定性は再生エネルギーと比較して質・量ともに安定している。定期検査やトラブル、規制対応等状況により、供給が停止する可能性があるが、SMR 特有の問題はなく、可能性は低い（可能性：2）。また、供給安定性の競争力低下がもたらす影響も小さい（影響：1）。

3) 利用者の利便性に関する競争力（他の新エネルギーシステムとの競争力）

再生可能エネルギーと比較して、適切な管理が求められる原子力システムは、利便性が相対的に低い可能性がある。SMR を設置した地域では、事故時の影響が事業所内に止まるが、避難訓練などが要求される（可能性：2）。利便性の観点から、他の新エネルギーと比較して SMR を

選択に一部問題が指摘される。(影響：3)。

④ 旧エネルギーシステムとの競争力

1) 運転コストの競争力(旧エネルギーシステムとの競争力)

旧エネルギーシステム(軽水炉)と比較して、SMRの運転コストはほぼ同等であるが、複数の炉を制御する必要があるため、運転コストは若干高いことが選択を妨げる可能性がある(可能性：3)。SMR特有の事情により、事業者がSMRを選択しない可能性がある(影響：4)

2) 供給安定性の競争力(旧エネルギーシステムとの競争力)

SMRは、短期の電力供給変動に対応できるため、軽水炉と比較して供給安定性に貢献できるシステムとして競争力を有する。また、定期検査の時期をずらすことで高い供給安定性を確保できるため、供給安定性の競争力が低くなる可能性は小さい(可能性：1)また、供給安定性が低下しても旧エネルギーシステムと同程度であり、SMRの選択に影響はない(影響：1)

3) 利用者の利便性に関する競争力(旧エネルギーシステムとの競争力)

SMR特有の影響はなく、利用者の利便性が低下する可能性は小さく(可能性：1)、SMRの選択に与える影響はない(影響：1)。

⑤ 人材確保力

1) 新規人材採用による確保

人口減少が社会課題となっており、原子力分野共通の課題として、新規人材採用による確保は確実に生じる(可能性：5)。また、新規人材が獲得できた場合も、SMRに割り当てる余裕がない場合、事業者がSMRを選択しない可能性がある(影響：4)。

2) 既存人材のリスキリングによる確保

既存人材をリスキリングにより確保することができない場合、SMRの選択を妨げる可能性は高い(可能性：4)。原子力分野で人材が確保できない場合、事業者の負担が大きくなるが、SMRはモジュール化により熟練工が不足した場合にも適用可能な特徴を有する。(影響：3)。

⑥ 技術開発力

1) 大学・研究機関の研究開発力

原子力分野における研究人材は減少しており、必要な研究ができない場合、原子力システムの選択を妨げる可能性がある(原子力システムの選択可能性：3)。研究開発力が十分ではないことは、原子力システムの選択において問題として指摘される(影響：3)。

2) 企業の研究開発力

企業の研究開発力は、起こる可能性がある(可能性：3)企業の研究開発力は、エネルギーシステムの実装に直結するため、その低下がシステムの選択においてもたらす影響は大きい。研究開発力が低い事業者は、SMRを選択しない(影響：4)

⑦ 投資資金の確保

1) 企業資金の可能性

企業が新規エネルギーシステムの事業化へ投資することは、SMRの社会実装を推進することが期待できる。とくに、近年はAI分野・データセンターへの投資に伴うエネルギー需要の増加により、関連企業からの投資が増加している。一方、特定の産業分野の需要に依存する場合、当該分野の発展が進まない場合、企業の投資が増加しない可能性がある(可能性：3)。企業の投資がな

い場合、資金不足のため事業者が SMR を選択しない（影響：4）

2) 銀行融資の可能性

企業資金による投資と同様、エネルギー需要の増大に伴う銀行融資により SMR の社会実装が推進されるが、経済状況の変化により銀行融資も進まない可能性が高い（可能性：3）。銀行融資が確保できない場合、事業者が SMR を選択しない（影響：4）。

3) 政府融資の可能性

SMR が、政府融資の対象となるには、政府が策定するエネルギー計画において SMR の重要度が高いことが要件となる。しかし、現在は現行軽水炉の発展形である革新炉への関心が高く、SMR への関心は高くはない。そのため、政府融資の可能性は低く、政府融資が行われない可能性はかなり高い（可能性：4）。一方、政府融資がないことが SMR の選択を妨げることはほとんどなく、その影響は小さい（影響：1）

⑧ 社会の支持

1) 政府の支持

SMR のボトルネックである規制の国際調和対応については、政府の支持により解決する可能性が高い。現在、具体的な支援策は推進されていないが、政府が策定するエネルギー計画において、SMR は開発ロードマップが示されており、政府の支持を受けない可能性は低い（可能性：1）。政府の支持が得られないことは、政府の方針転換、事業者が信用を失う、市民が強く反対する、などがあり得るが、いずれの場合も社会全体が SMR に反対することとなるため SMR への影響は大きい（影響：5）

2) 投資家の支持

投資家は事業の採算性、将来性等に基づき判断する。SMR が事業として採算性があり、将来的にシェアが拡大されていくことが見込める場合には、投資家の支持は得やすい。海外において原子力システムの大きな選択肢となっている SMR は将来性が高く、投資家の支持が得られやすい。一方、スケールメリットの点で不利な SMR では、規制の国際調和が必須であるが、状況によっては国際的な合意が得られない可能性はあり得る（可能性：2）。投資家の支持が得られない場合でも、政府の補助などで推進される可能性があり、その影響は SMR の選択の問題が指摘されるレベルにとどまる（影響：3）。

3) 市民の支持

市民の支持は、社会受容性を獲得するための重要な要素である。現行の軽水炉と比較して、EPZ が敷地内に収まるなどの利点はあるものの、軽水炉としての原理は同じであり、市民の反対はほぼ確実に起こると考えられる（可能性：5）。市民が反対した場合、社会コストの増加により高コストの SMR は事業者が選択しない可能性がある（影響：4）。

表 3.3-6 リスク分析結果（産業としての成立性）

階層 Q3	階層 Q4	再生エネルギー		原子力		SMR	
		起りやすさ	影響の大きさ	起りやすさ	起りやすさ	影響の大きさ	起りやすさ
新システム構築・運用の採算性	新システム構築投資の回収性	3	4	4	5	5	4
	運用の採算性	4	3	2	4	5	3
旧システムの投資の回収性	旧システムの投資残金の回収性	1	1	1	1	1	4
	旧システムの廃棄コストの回収性	2	3	3	4	1	3
	旧システムに関係する産業の移行	2	2	1	1	5	4
他の新エネルギーシステムとの競争力	運転コストの競争力	3	4	2	3	4	3
	供給安定性の競争力	5	3	2	3	2	1
	利用者の利便性に関する競争力	3	4	2	3	2	3
旧エネルギーシステムとの競争力	運転コストの競争力	3	4	3	4	3	4
	供給安定性の競争力	5	3	2	3	1	1
	利用者の利便性に関する競争力	3	4	2	3	1	1
人材確保力	新規人材採用による確保	2	3	4	4	5	4
	既存人材のリスクリングによる確保	2	3	2	3	4	3
技術開発力	大学・研究機関の研究開発力	2	2	3	3	3	3
	企業の研究開発力	3	4	3	4	3	4
投資資金の確保	企業資金の可能性	2	4	3	4	3	4
	銀行融資の可能性	2	4	2	4	3	4
	政府融資の可能性	2	3	1	3	4	1
社会の支持	政府の支持	1	4	1	5	1	5
	投資家の支持	2	3	2	2	2	3
	市民の支持	3	3	5	4	5	4

(4) 新エネルギー事業の地域への影響

新エネルギー事業の地域への影響に関する分析結果を表 3.3-7～9 に示す。各項目の分析結果の概要を以下に示す。

① 地域の安全・安心への影響

表 3.3-7 リスク分析結果（地域の安全・安心への影響）

階層 Q3	階層 Q4	再生エネルギー		原子力		SMR	
		起りやすさ	影響の大きさ	起りやすさ	影響の大きさ	起りやすさ	影響の大きさ
安全への影響	システムが地域住民の生命に及ぼす影響	1～2	2	1～2	5	1	3
	システムが地域住民の生活に及ぼす影響	2	2	2～3	5	2	2
	システムが地域環境に及ぼす影響	2	2	2	2	2	2
安心への影響	システムが地域住民の生命に及ぼす影響	2	2	2～3	3	1～2	2～3
	システムが地域住民の生活に及ぼす影響	1～2	2	2～3	4	1～2	2～3
	システムが地域環境に及ぼす影響	1	2	1	1	1	1

1) 安全への影響

原子力の安全に関するリスクは、良く議論されているが、**再生エネルギーも立地の条件によっては被害を引き起こす可能性**があり、地震時に倒壊・半壊した建物に設置されている太陽光発電システムは、火災や感電を引き起こす可能性がある。

原子力間の比較としても、SMR は軽水炉に対して影響が小さいことは想定されるが、**事故時の健康被害には、システムの工学的リスクだけでなく、地域の原子力防災のレベルが大きく影響する。SMR を既存施設に併設する場合は、地域に対して現在の計画内で対応できるために新たな負荷は発生しない。**

2) 安心への影響

住民が原子力システムに持つ不安は、一定レベルで存在する状況である。安全は軽水炉と SMR の差異が明確にでてくると想定できるが、不安はその実態に関わらず、個人の心情に依存する事が多く、SMR も既存の軽水炉との差異を理解出来ない状況では不安が残存することは避けられないために、安全に比べて安心に関するリスクは、軽水炉と SMR の差異を小さく評価した。**SMR を既存施設とは別の場所に実装する場合は、既存施設と同様の原子力防災の仕組みを地域から要求される可能性があり、SMR の敷地外への影響を理解してもらうことが重要となる。**影響の大きさや起りやすさの不確かさは、今後のリスクコミュニケーションの進展に依存すると考えられる。

② 地域経済への影響

表 3.3-8 リスク分析結果（地域経済への影響）

階層 Q3	階層 Q4	再生エネルギー		原子力		SMR	
		起りやすさ	影響の大きさ	起りやすさ	影響の大きさ	起りやすさ	影響の大きさ
直接的経済被害	システム建設時に地域産業に与える影響	1～2	2	1～2	2	1～2	1
	システム運用時に地域産業に与える影響	1	1	1～2	1	1	1
	事故時に地域産業に与える影響	1～2	2	1～2	5	1	3
風評被害等の間接被害	日常における風評被害	1～2	1～2	1～2	2～3	1～2	1～2
	事故時の風評被害	1～2	1	3～5	5	2～4	3
	システムの事故が地域文化に及ぼす影響	3	2	3	2	3	2

事故時の実影響や風評被害の影響の大きさは、原子力が最も大きくなると想定される。SMR も地域の不安を前提とすると風評被害は再生エネルギーよりは大きくなる可能性が高い。この影響を小さくするためには、安心への施策と同様の活動が必要となる。

③ 地域の文化・風土への影響

表 3.3-9 リスク分析結果（地域の文化・風土への影響）

階層 Q3	階層 Q4	再生エネルギー		原子力		SMR	
		起りやすさ	影響の大きさ	起りやすさ	影響の大きさ	起りやすさ	影響の大きさ
地域イメージの向上	システムの設置が及ぼす地域イメージ	1～2	1	2～4	3	1～3	2
	システムの事故が及ぼす地域イメージ	1～2	2	2～3	5	1～2	3
地域文化への貢献	システムの設置が地域文化に及ぼす影響	1～2	1	2～3	3	1～2	2
	システムの事故が地域文化に及ぼす影響	1～2	2	1～2	5	1～2	3

事故が発生した場合は、原子力の地域に対する影響は大きくなる。SMR と軽水炉の違いを理解して SMR の理解が進むような状況を創ることも科学技術社会における新たな地域風土を創ることに繋がると考える。

(5) 新エネルギー事業の一般社会への影響

新エネルギー事業の地域への影響に関する分析結果を表 3.3-10～13 に示す。各項目の分析結果の概要を以下に示す。

① 生活・社会活動イノベーションへの影響

(この項目評価が大きい程、イノベーションに対する影響は大きいと評価する)

表 3.3-10 リスク分析結果（生活・社会活動イノベーションへの影響）

階層 Q3	階層 Q4	再生エネルギー		原子力		SMR	
		起りやすさ	影響の大きさ	起りやすさ	影響の大きさ	起りやすさ	影響の大きさ
生活イノベーションへの影響	エネルギーシステムの変化が直接もたらす生活への影響	2～4	4	1～3	2	1～3	2
	エネルギーシステムの変化が他産業の変化にもたらすことによる間接的生活への影響	2～4	4	1～3	3	1～3	4
社会活動イノベーションへの影響	エネルギーシステムの変化が直接もたらす社会活動への影響	2～4	4	1～3	3	1～3	4
	エネルギーシステムの変化が他産業の変化にもたらすことによる間接的社会活動への影響	2～4	4	1～3	3	1～3	4

原子力に関しては、革新炉の影響は考慮していないために、安全の改善や原子力防災の推進で一定の影響は存在すると考えられる。再生エネルギーや SMR は、全面的な展開で新たな技術展開や地域展開で、社会の変化に対するインパクトは大きいと想定される。SMR を既存の軽水炉より影響を大きいと推定しているのは、SMR で必要な型式認証が規制で認められれば、社会的インパクトが大きいためである。ただし、SMR は、既存の軽水炉との差異が認識されないと影響の可能性は、影響の範囲を認識しやすい再生エネルギーと比較すると既存の軽水炉と同視される可能性があるために影響の可能性を再生エネルギーより低く算定した。

② 経済イノベーションへの影響

(この項目評価が大きい程、影響は大きいと評価する)

表 3.3-11 リスク分析結果 (経済イノベーションへの影響)

階層 Q3	階層 Q4	再生エネルギー		原子力		SMR	
		起りやすさ	影響の大きさ	起りやすさ	影響の大きさ	起りやすさ	影響の大きさ
国内経済への影響	国内産業への影響	3～5	5	3～5	5	3～5	2～4
	個人消費への影響	3～5	5	3～5	5	3～5	2～4
国際競争力への影響	国内での日本企業の競争力	3～5	5	3～5	5	3～5	2～4
	国外での日本企業の競争力	3～5	5	3～5	5	3～5	2～4

SMR はその設置台数が少ないと想定されるために、他のシステムと比較して影響の評価を小さくした。但し、SMR の推進が進めば多様な経済効果が期待できる。

③ 科学技術イノベーションへの影響

(この項目評価が大きい程、イノベーションへの影響は大きいと評価する)

表 3.3-12 リスク分析結果 (科学技術イノベーションへの影響)

階層 Q3	階層 Q4	再生エネルギー		原子力		SMR	
		起りやすさ	影響の大きさ	起りやすさ	影響の大きさ	起りやすさ	影響の大きさ
エネルギーシステムイノベーションへの影響	エネルギーシステムの機能向上に関するイノベーション	3～5	5	3～5	5	1～3	5
	エネルギーシステムの多様性に関するイノベーション	3～5	5	3～5	5	1～3	5
科学技術全般におけるイノベーションへの影響	エネルギーを必要とする科学技術システムの活用 の推進	3～5	5	3～5	5	1～3	5
	エネルギーシステムの技術のスピントアウトによる 科学技術の発展	3～5	5	3～5	5	1～3	5

この視点では、すべてのシステムの影響は大きいと評価できる。ただし、SMR はその設置台数が少ないために、起りやすさを小さく評価した。SMR の設置が進めば、影響の起りやすさも大きくなる。

④ 地球環境以外の自然や社会への影響

表 3.3-13 リスク分析結果（地球環境以外の自然や社会への影響）

階層 Q3	階層 Q4	再生エネルギー		原子力		SMR	
		起りやすさ	影響の大きさ	起りやすさ	影響の大きさ	起りやすさ	影響の大きさ
自然への影響	景観への影響	3～4	3	1～2	5	1～2	1
	生物多様性への影響	3～4	3	1～2	5	1～2	1
社会への影響	地域環境への影響	3～4	3	1～2	5	1～2	2
	個人環境への影響	3～4	2	1～2	5	1～2	3

再生可能エネルギーは、より身近なエネルギーシステムであり数も多い為に自然・社会的環境への影響の起りやすさは大きくなる。原子力は、事故の発生自体の起りやすさは小さいが事故が発生した際の影響は大きくなる。

SMR の影響は事故時においても限定的であるが、個人や地域のあり方には、一定の影響が存在すると想定した。

参考文献(3.3.2(1)から(4)まで)

- [1] NuScale, “Utah Associated Municipal Power Systems (UAMPS) and NuScale Power Agree to Terminate the Carbon Free Power Project (CFPP)” , 2023/11/8.
- [2] Anthony Asuega, Braden J. Limb, Jason C. Quinn (2023). Techno-economic analysis of advanced small modular nuclear reactors. Applied Energy, 334, 120669.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.120669>

(6) SMR の個別事象のリスク分析例

本項では、SMR が有する設計上の特徴を考慮した場合に、従来型の原子炉と比較してどのようなリスクが想定されるのかを分析した結果を報告する。その評価対象とする指標については、炉心損傷リスクと経済性リスクを選定した。炉心損傷リスクを選定した理由は、東京電力福島第一原子力発電所事故の影響からも明らかなように、原子力発電所で炉心損傷や格納容器破損と言った事故が発生した場合、避難等で近隣住民の生活へ影響が及ぼされるとともに、放射線による環境への影響も想定されるため選定した。また、経済性リスクについては、SMR による発電を電力事業者が選択するかどうかは、他の発電システムの経済性に強く依存すると考えられるため選定した。

炉心損傷リスクについては、内部事象だけでなく、地震等の自然災害によるものも考慮する必要がある。本検討では、複数の炉が同時に影響を受け、また事前に襲来の予測が困難である地震を対象とした評価を行った。

経済性リスクについては、他の発電システムとの経済性比較を念頭に、LCOE の不確実さ解析を実施した。

① 地震時炉心損傷リスクの分析

1) 評価モデル

本検討で対象とした SMR の一種である NuScale は、12 基で構成することが提案されている[1]。そのため、過年度同様 12 基が立地している場合の地震時炉心損傷発生確率を定量化することとした。また、仮想的に、PWR1 基が立地しているサイトに、12 基の SMR を設置した場合に、サイト全体として、どの程度の炉心損傷リスクになるのかを分析した。それぞれの炉に対する ET および FT 構造に加えて、機器のフラジリティについては、過年度同様先行研究を参照することとした[2]。

ET は、先行研究で利用された PWR および SMR のものを炉心損傷の発生の有無の分類だけに簡略化したものを利用した。このモデルは非常に簡略化されており、PWR において想定された起因事象は、冷却材喪失事故 (Loss of Coolant Accident: LOCA) および外部電源喪失 (Loss of Offsite Power: LOOP) の二種類のみである。炉心損傷が発生する条件としては、LOCA 発生時に非常用炉心冷却システム (Emergency Core Cooling System: ECCS) が作動しない場合、または、LOOP など発生時に崩壊熱除去系 (Residual Heat Removal System: RHRS) が作動しない場合の 2 つ条件である。

SMR の ET は、起因事象として蒸気発生器細管破損 (Steam Generator Tube Failure: SGTF) と LOCA の二種類が考慮されている。SGTF に対しては、崩壊熱除去システム (Decay Heat Removal System: DHRS) の作動または ECCS の作動の成功によって炉心損傷を回避できる。LOCA については、ECCS の作動の成功により回避できる。

複数号機が設置されたサイトのリスク評価に用いる指標は、種々提案されているが、今回注目している事故による被害の影響としては、いずれか一つの炉だけでも炉心損傷したとすれば、甚大になると考えられる。そのため、図 3.3-1 に示すように PWR1 基の炉心損傷と SMR12 基それぞれの炉心損傷を OR ゲートで接続した統合 FT を作成し、サイト内で少なくとも一基が炉心損傷する条件付確率 (Site Conditional Core Damage Probability: SCCDP) [3] の評価を行った。なお、ここでは損傷の相関について、完全独立を仮定した上で評価を行った。

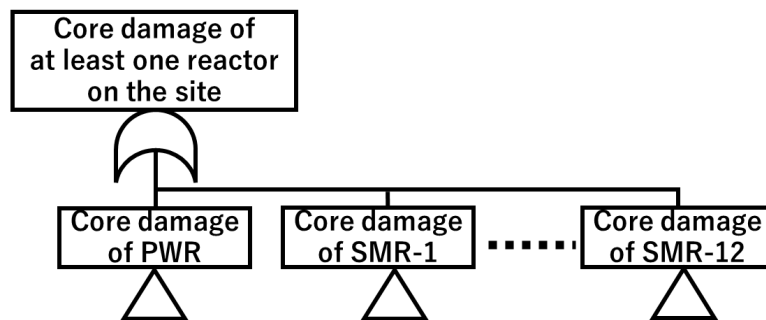


図 3.3-1 サイト全体の炉心損傷リスクを評価する統合 FT

上記 FT 内に含まれる基事象に対応する fragility パラメータは、参考文献に基づいて設定した [2]。

2) 定量化方法

本検討では、過年度と同様 FT の定量化には、過年度同様モンテカルロ法に基づく方法を採用した。本定量化手法では、図 3.3-2 に示す計算フローにより、SCCDP の不確実さ解析が可能である。過年度の点推定による評価と異なる点を表 3.3-14 に示す。過年度は、aleatory な不確かさ β_a および epistemic な不確かさ β_e を統合した上で考慮したが、令和 6 年度は個別に考慮することで SCCDP の不確実さを考慮できるようにした。これにより、 β_a および β_e に対して、それぞれ N_a 回及び N_e 回試行を繰り返すため、必要な計算処理は増加する結果となった。また、過年度の点推定値評価では、平均値の SCCDP のみを取得していたが、令和 6 年度は、 β_a に対する 1 試行あたり 1 本、すなわち N_a 本の SCCDP が取得される。これを統計処理することにより、SCCDP の値の不確実さが評価可能となるが、本検討では、今回は、平均値に加えて、中央値、5%値、95%値を評価することとした。

表 3.3-14 点推定評価と不確実さ評価の比較

項目	点推定評価	不確実さ評価
不確実さの取扱い	$\sqrt{\beta_a^2 + \beta_e^2}$ と二種類の不確実さを統合して考慮	β_a および β_e を個別に考慮
試行回数	不確実さパラメータは、 $\sqrt{\beta_a^2 + \beta_e^2}$ のみの一種類であることから、一種類の N_{total} 回	不確実さパラメータは、 β_a および β_e のみの二種類であることから、それぞれに対して N_a 回、 N_e 回、合計で $N_a \times N_e$ 回
統計処理の要否	不要。平均値が算出される。	必要。今回は、平均値に加えて、中央値、5%値、95%値を評価

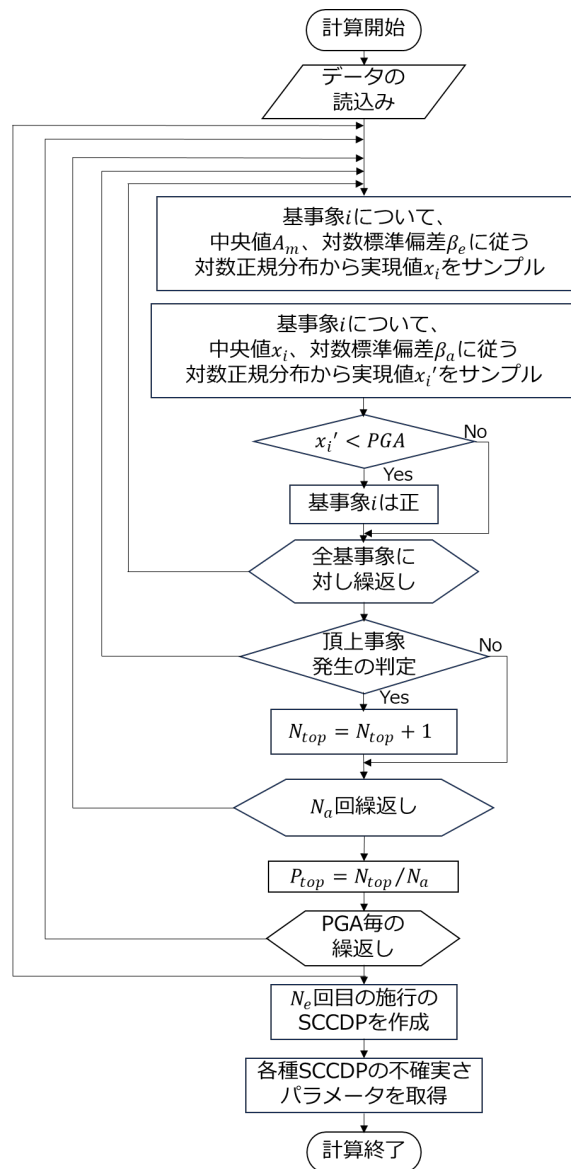


図 3.3-2 不確実さ評価の計算フロー

3) 定量化結果

統合 FT による SCCDP の評価に先立ち、図 3.3-3 に 1 基の PWR での CCDP の不確実さ解析結果を示す。図中太線で表される平均の CCDP は約 0.4 g 付近で立ち上がり始め、約 2 g では 1 に漸近した。耐震裕度評価 (Seismic Margin Analysis) において、低い損傷確率であることが高い信頼度で推定できる加速度として使用される High Confidence of Low Probability of Failure (HCLPF) [8] (具体的には、式 3.3-1 で定義される。) の値については、0.4 g であった。

$$HCLPF = A_m \exp[-1.65(\beta_a + \beta_e)] \quad (\text{式 3.3-1})$$

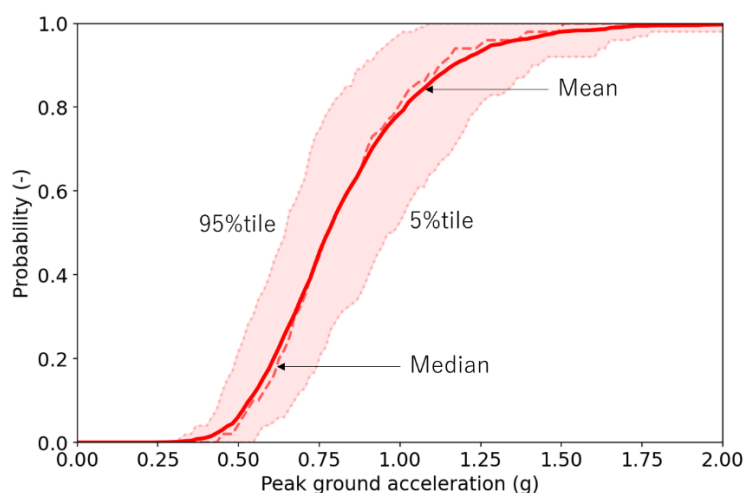


図 3.3-3 PWR1 基の CCDP

次に、図 3.3-4 に 1 基の PWR および 12 基の SMR での SCCDP の不確実さ解析結果 (赤線) を示す。この条件での SCCDP は、ほぼ PWR1 基の CCDP (図 3.3-3 参照) と同じものとなることが確認できた。また、この傾向は、不確実さを考慮しても同等であった。HCLPF については 0.4 g であり、ほぼ 1 基の PWR の HCLPF と同じである。

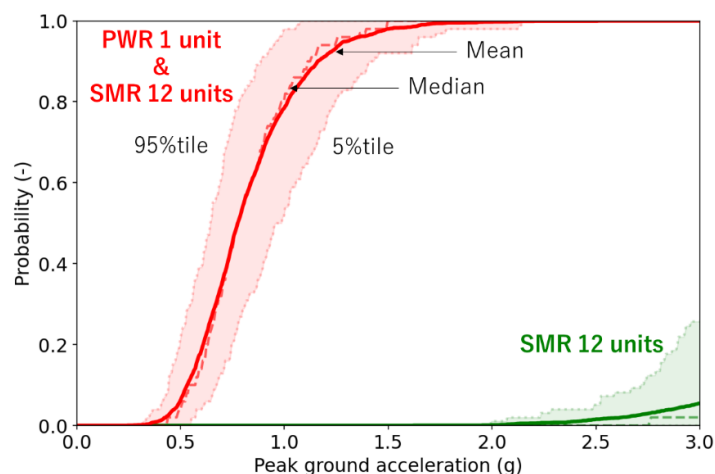


図 3.3-4 PWR1 基および SMR12 基が立地するサイト全体の SCCDP (SMR12 基の SCCDP と併

記)

表 3.3-2 に各条件での HCLPF の評価結果を示す。まず、SMR の基数と HCLPF の関係としては、基数の増加とともに、HCLPF が低下することが確認できた。

表 3.3-15 各計算条件での HCLPF

条件	HCLPF	PWR1 基の HCLPF との比
PWR1 基	0.4	1.0
SMR1 基	3.3	8.3
SMR4 基	2.8	6.9
SMR8 基	2.5	6.2
SMR12 基	2.5	6.2
PWR1 基+SMR12 基	0.40	1.0

4) 考察

・PWR の SMR のリスク比較

本検討で用いた条件では、SMR の CCDP は、PWR のそれと比して、低く見積もられることがわかった。その度合を HCLPF で比較すると、SMR の HCLPF は PWR の HCLPF の 8 倍程度である。この結果は、SMR の設計が PWR と異なり、地震時の主要な損傷メカニズムが異なることを示唆している。特に、SMR の ECCS は PWR と異なり、外部電源や非常用ディーゼル発電機に依存しない静的システムを採用しているため、LOOP や非常用発電機の故障が炉心損傷に直結しにくいという特性を有する。この設計上の違いが、HCLPF の大幅な向上につながっていると考えられる。また、SMR は一般に設計がモジュール化されており、各ユニットが独立した冷却・安全システムを有するため、単一のユニットの損傷が他のユニットに波及しにくいという特性がある。このような特性を考慮すると、本研究で得られた SMR の HCLPF が PWR の HCLPF の 8 倍程度であるという結果は、十分に合理的なものであり、SMR の耐震裕度が高いという傾向は、設計上の特性を踏まえて議論可能である。

図 3.3-4 に示した CCDP および SCCDP の傾向および表 3.3-15 に示した HCLPF の変動から、SMR の事故リスクを評価する際には、複数基のリスクを適切に取り扱うことの必要性が主張できる。特に、NuScale においては、12 基が同一の設計で建設されることになるため、それぞれのユニットが概ね同等なリスク、すなわち、炉心損傷確率や炉心損傷頻度を有していると考えられる。

同等の大きさのリスクを有する炉が 2 基ある場合のリスクの概念図を図 3.3-5 (a) にベン図で示す。ここで、A 号機のリスクを青色塗りつぶしの領域、B 号機の領域を赤色塗りつぶしの領域、サイト全体としてのリスクの領域を黒枠線で示す。サイト全体のリスクは、A 号機と B 号機が同時に炉心損傷するリスク (図 3.3-5 (a) 中緑色塗りつぶし領域) の大きさによって変動するものの、概ね 1 基のリスクの 2 倍程度であると考えられる。このような傾向を適切に考慮したリスク評価が必要である。

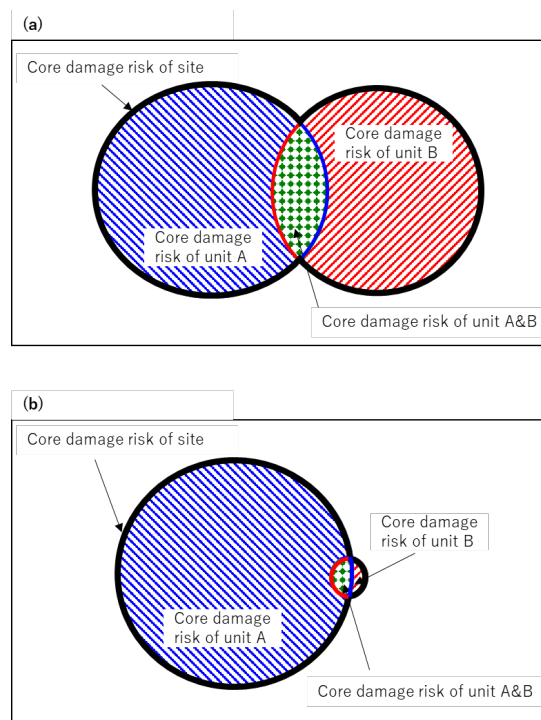


図 3.3-5 サイト全体のリスクの概念図

また、PWR1 基と SMR12 基が立地したサイトにおいては、サイトのリスクを PWR のリスクがほぼ 100%占めている。このように、リスクの大小関係に大きな隔たりがある状態での全体としてのリスク概念を図 3.3-5 (b) に示す。ここで、青色塗りつぶし領域が PWR のリスク、赤色塗りつぶし領域が SMR のリスク、赤枠線で囲まれた領域がサイト全体のリスクに相当する。このベン図のように SMR のリスクは PWR のリスクにほぼ吸収されており、PWR のリスクがサイトの全体リスクを表すと言っても過言ではない。

既設サイトにおいて、議論はまだあるものの、一般的には、既存炉のリスクは、地域住民に受容されており、また、事故時の対策も十分なされていると考えられる。そのようなサイトに、SMR のような既設炉よりもリスクが小さな炉を建設されたとしても、地域住民が被るリスクの増加量は、元々受容しているリスクよりも低く、地域住民へ与える影響は限定的であると考えられる。加えて、SMR のリスクが PWR のリスクに比べて極めて小さいことを考慮すると、SMR の導入によるサイト全体の地震によるリスク増加は実質的に無視できる範囲に留まる可能性が高い。さらに、既設サイトには、既に防災計画や緊急事態対策が整備されており、SMR の追加によってそれらの対策が大幅に見直される必要性も限定的である。

本検討では、地震を対象としたリスク評価を実施したが、他の自然ハザード（例えば、津波や火山）においても、同等の傾向となるのか検討の継続が必要である。

5) まとめ

本研究では、PWR1 基と SMR12 基が立地するサイトにおける地震時炉心損傷確率（CCDP および SCCDP）の評価を行い、それぞれの炉型の耐震性とサイト全体のリスク特性について分析を行った。その結果、以下の知見が得られた。

SMR の HCLPF は PWR の約 8 倍となり、地震に対する耐震裕度が相対的に高いことが確認された。この要因として、SMR は PWR と異なり、外部電源や非常用ディーゼル発電機に依存しない静的な ECCS を採用している点、およびモジュール化設計により個々のユニットが独立した冷却機能を持つ点が挙げられる。これらの設計上の特性により、SMR の炉心損傷リスクは PWR に比べて低く抑えられている。

SMR の基数が増加すると、サイト全体の SCCDP は上昇する傾向にある。ただし、リスクの上昇は単純な線形加算とは異なり、SMR の基数が多い場合には、個別のリスク評価だけでなく、サイト全体の安全性を考慮した評価が不可欠である。

PWR1 基と SMR12 基が同一サイトに立地する場合、サイト全体の炉心損傷リスクは PWR が支配的となることが示された。リスクの概念図（図 3.3-5 (b)）に示すように、PWR のリスクがサイト全体のリスクを決定し、SMR のリスクは相対的に小さいため、サイトの安全性に与える影響は限定的と考えられる。

既存の炉が設置された既設サイトでは、既に防災計画や緊急対応策が整備されているため、新たに SMR を導入した場合の追加リスクは、地域住民の受容可能な範囲に留まる可能性が高い。この結果は、SMR の新設に際して、新設サイトを選定する場合、Not In My Backyard (NIMBY) 問題[4]と呼ばれる、「社会的に重要な施設について必要性は認めるものの、自らの居住地域への建設は認めない」という近隣住民の行動が生じることが容易に想定できるが、既設サイトを選定したとすれば、NIMBY 問題を回避無し、抑制できる可能性を示唆していると言える。

ただし、本研究では、地震によるリスク評価のみを対象としたが、津波や火山噴火など他の自然ハザードに対しても同様の傾向が成立するかについて、さらなる検討が必要である。また、設置サイトの選定に際しては、既設サイトであっても新設サイトであっても、適切な情報提供やリスクコミュニケーション戦略を確立することにより、地域住民の理解を得た上で、建設等を進めることが求められる。

② SMR の経済性リスク評価

過年度までの検討において、SMR の新たな建設・設置に際して、新設サイトおよび既設サイトを選定した場合のメリットとデメリットを整理した。過年度は、その傾向を定性的に分析するに留まったが、令和 6 年度は、経済性の観点でのリスクを不確実さも含めて定量的に分析するために、LCOE を指標とした不確実さ解析を実施した。

1) 評価モデル

本検討では、発電の経済性を評価する代表的な指標として、LCOE を選定した。当該指標は、ある発電所の寿命期間にわたって、現在の価値で見た総コストを同寿命期間の発電電力で割って求められ、式 3.3-2 で表される。

$$LCOE = \frac{\sum_{t=0}^T \frac{C(I_t + O_t + F_t + D_t)}{(1+r)^t}}{\sum_{t=0}^T \frac{E_t}{(1+r)^t}} \quad (\text{式 3.3-2})$$

ここで、 C ：発電容量 (Capacity)、 I_t ：年間建設投資費用 (Investment Cost)、 O_t ：年間運転・保守費用 (Operation & Maintenance)、 F_t ：年間燃料費 (Fuel Cycle Cost)、 D_t ：年間廃炉関連費用 (Decommissioning)、 E_t ：年間発電量 (Energy generated)、 r ：年割引率、 T ：寿命である。

SMR の LCOE の検討結果は、複数の研究で報告されている [10, 11]。本研究では、先行研究を参考に表 3.3-3 に示すパラメータを用いて、LCOE を算出した。なお、 I_t について、総建設費 OCC (Overnight construction cost) を建設期間 $T_{const.}$ で均等に分割されると仮定した。すなわち、本研究では、 I_t と $T_{const.}$ は、次式の関係にある。

$$I_t = \frac{OCC}{T_{const.}} \quad [\$/(kWh \cdot yr)] \quad (\text{式 3.3-3})$$

また、 E_t については、 C に稼働率 F_C (Factor for capacity) および 1 年間の時間を乗じた次式で表される。

$$E_t [MWh] = C [MW] \times F_C \times (24 \times 365) [h] \quad (\text{式 3.3-4})$$

O_t 、 F_t および D_t は、建設完了後、すなわち発電開始から発生し、毎年同じ費用であると仮定した。 r についても、年ごとに変動はないと仮定し、 T は、 $T_{const.}$ と発電寿命 T_{life} の和とした。上記の仮定の下計算した LCOE は、90.2 \$/MWh と見積もられ、先行研究での評価結果 (Boarin らによると 59.1 \$/MWh [5]、Asuega らによると 89.6 \$/MWh [6]) と概ね一致することを確認した。

表 3.3-16 SMR の LCOE 算出に係るパラメータおよび参照値

パラメータ	参照値
発電容量: C (MW)	924
稼働率: F_c (%)	95
割引率: r (%)	10
総建設投資費用 OCC (\$/kW)	4500
運転・保守費用: O_t (\$/MWh /yr)	11.0
燃料費: F_t (\$/MWh /yr)	7.0
廃炉関連費用: D_t (\$/MWh /yr)	6.0
建設期間: $T_{const.}$ (yr)	5.0
発電寿命: T_{life} (yr)	60

LCOE の不確実さ評価は、表 3.3-16 に示した各パラメータの参照値を平均値、標準偏差を参照値の 10 分の 1 とする正規分布を仮定して、モンテカルロ法によって評価し、収束性を確認しつつ 10^5 回の試行を行った。なお、本検討では、各パラメータについて正規分布に従うと仮定しているが、他の分布形状にも対応可能できるように計算プログラムを設計している。

2) 既設サイトへの設置による効果の仮定

本検討では、既設サイトに SMR を建設する場合、既設炉の安全対策、土地およびインフラを活用できると想定した。また、既存の地域住民や建設業者との関係性を活用可能とも想定した。そこで、建設期間が短縮された場合と建設費用が削減された場合、そして、それらが組み合わさった場合の 3 つの条件で検討を行った。建設期間については、新設サイトでは Normal (5.0, 0.5) 年を想定しているが、既設サイトでは、Normal (3.0, 0.3) 年とした場合の LCOE を算出した。建設費用については、新設サイトでは Normal (4500, 450) \$/kW が想定されていたところ、Normal (4000, 400) \$/kW となった場合を仮定して計算した。

3) 各ケースの比較結果

図 3.3-6 に各ケースの比較結果を示す。新設サイトの LCOE に対して、既設サイトを想定したいずれの条件も LCOE を低く見積もることがわかった。具体的には、平均値では、建設期間短縮および建設費用削減では、それぞれ 93%程度に LCOE を低減でき、またそれらを組み合わせることによって 87%程度に低減できることがわかった。平均値以外にも、最悪の想定となる最大値についても低減される傾向が確認された。

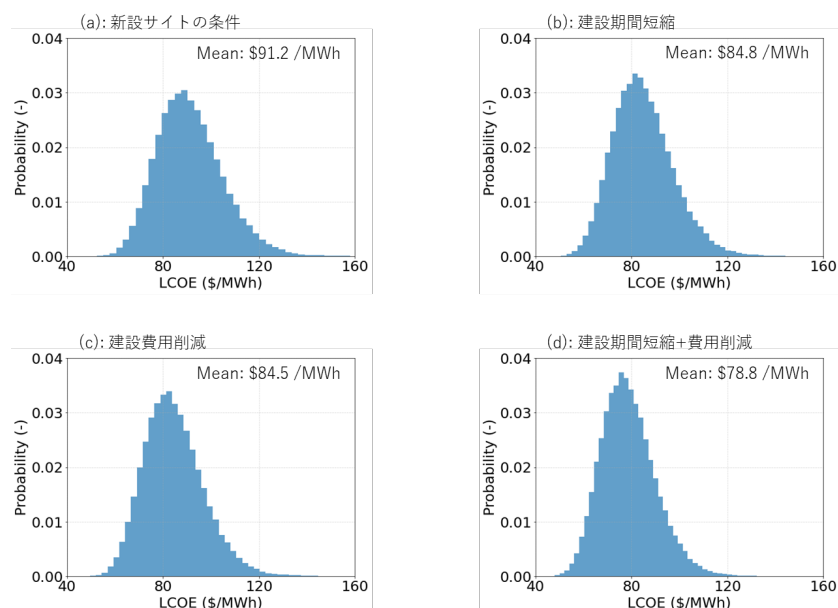


図 3.3-6 建設期間短縮および建設費用削減の効果を考慮した場合の不確実さ解析結果
 ((a)：新設サイト条件、(b)：建設期間短縮、(c)：建設費用削減、(d) 建設期間短縮および費用削減)

例えば、他の発電システムとの競争性から LCOE が 100、110 または 120 \$/MWh を超えた場合に、経済性が成立しなくなると仮定する。このとき、各条件の元、経済性が成立しなくなる確率は、表 3.3-17 のとおり見積もられる。まず、いずれの条件においても、基準値が高くなればなるほど、経済性が不成立となる確率は減少した。今回の計算条件では、その基準値が 10 \$/MWh 上昇するごとに、不成立となる確率が 1 桁程度低減した。次に、既設サイトへの建設による効果としては、建設期間短縮と建設費用削減のそれぞれで、不成立となる確率を半分以上に抑制した。また、それらを組合せた場合には、不成立となる確率を一桁程度抑制した。この結果は、SMR の建設・設置に際して、既設サイトを選定することにより経済性が成立しなくなるリスクを回避できる可能性を高められると言える。

表 3.3-17 経済性不成立となるリスク（確率）の定量化結果

条件		成立—不成立の基準値		
		100 \$/MWh	110 \$/MWh	120 \$/MWh
新設サイト		0.241	0.092	0.029
既設サイト	建設期間短縮	0.116	0.034	0.009
	建設費用削減	0.097	0.026	0.006
	建設期間短縮および費用削減	0.037	0.008	0.002

4) 考察

本検討では、SMRの経済性評価指標としてLCOEを採用し、モンテカルロ法による不確実さ解析により、各種パラメータがLCOEに与える影響を定量的に評価した。この手法により、平均のLCOEだけでなく、意図せず高コストとなるリスクを識別することが可能となった。特に、図 3.3-6 が示すように、パラメータ分布を考慮することでLCOEの幅やその確率分布を把握し、意思決定に資する情報を提供できたことは、他の発電方法のLCOEとの比較を通じ、SMRが市場競争力を持つかどうかを判断する基盤となり得る点でも有用である。

既設サイトと新設サイトの比較に基づく経済性評価では、既設サイトの利用が優位性を持つことが示唆された。具体的には、既設サイトでは建設期間が短縮され、建設費用が削減される可能性があり、それによりLCOEが新設サイトに比べて低減されることを表 3.3-17 や図 3.3-6 で確認した。特に、建設期間短縮と費用削減を組み合わせた条件では、新設サイトのLCOEの平均値に対して87%程度への縮減が可能であることが示された。また、最悪ケース（最大値）を含む経済性不成立のリスクも既設サイト利用で大幅に抑制できることも確認された。さらに考慮すべき点として、既設サイトは安全性確認や既存インフラ・地域関係性の活用といった定性的メリットを有しており、これらが経済性をさらに補完する要因となり得る。

経済性が成立しなくなるリスクの分析（表 3.3-17）では、基準値を100 \$/MWh、110 \$/MWh、120 \$/MWhと設定した場合、基準値が10 \$/MWh上昇するごとに経済性不成立の確率が約1桁低下する傾向が確認された。これは、政策目標や市場競争性を考慮した基準値設定がSMRの導入可否に大きく影響を与えることを示唆している。また、既設サイト利用のケースでは、建設期間短縮や建設費用削減によって不成立リスクが半分以上に抑えられ、さらに両者を組み合わせた場合には一桁程度抑制できることが確認された。これにより、既設サイトへの建設が経済性成立の可能性を大幅に向上させる有力な戦略であると考えられる。

5) まとめ

本研究では、SMRの経済性評価指標としてLCOEを採用し、モンテカルロ法を用いた不確実さ解析を実施した。この解析により、LCOEの平均値に加え、意図せず高コストとなるリスクやLCOEの幅を把握することが可能となった。また、既設サイトと新設サイトの比較を通じて、既設サイトの利用が経済性の向上に寄与することを確認した。具体的な知見として、以下が挙げられる：

- ・ 各ケースの不確実性解析結果では、既設サイトで建設期間短縮および建設費用削減を組み合わせた場合、LCOEを新設サイトに比べて約87%に低減できることが示された。
- ・ 経済性の成立基準を超えるリスクは、既設サイトの利用によって大幅に抑制され、特に建設期間短縮と費用削減を組み合わせた場合、不成立リスクが一桁程度低減されることが確認された。

以上の結果から、SMRの建設において既設サイトを選定することは、経済性の向上とリスクの低減を両立する有効な選択肢であると言える。

参考文献 (3.3.3(6)節のみ)

- [1] Welter, K., Reyes, J. N., & Brigantic, A. (2023). Unique safety features and licensing requirements of the NuScale small modular reactor. *Frontiers in Energy Research*, 11. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1160150>
- [2] F. Di Maio, L. Bani, E. Zio, Seismic resilience assessment of Small Modular Reactors by a Three-loop Monte Carlo Simulation, *Nucl. Eng. Des.* 410 (2023) 112385. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2023.112385>.
- [3] Choi, G. G., Jung, W. S., & Park, S. K. (2021). Sensitivity Study on the Correlation Level of Seismic Failures in Seismic Probabilistic Safety Assessments. *Energies*, 14(10), 2955. <https://doi.org/10.3390/en14102955>
- [4] Benford, R. D., Moore, H. A., & Williams, J. A. (1993). In Whose Backyard?: Concern About Siting a Nuclear Waste Facility. *Sociological Inquiry*, 63(1), 30-48. <https://doi.org/10.1111/j.1475-682X.1993.tb00200.x>
- [5] Boarin, S., Locatelli, G., Mancini, M., & Ricotti, M. E. (2012). Financial case studies on small- and medium-size modular reactors. *Nuclear Technology*, 178(2), 218-232. <https://doi.org/10.13182/NT12-A13561>
- [6] Asuega, A., Limb, B. J., & Quinn, J. C. (2023). Techno-economic analysis of advanced small modular nuclear reactors. *Applied Energy*, 334(July 2022), 120669. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.120669>

3.3.4 項目(3)のまとめ

項目(2)で開発したリスク分析、評価フレームを SMR に試行してその有効性を検証した。まず、検討対象とする SMR のモデルを事業者へのヒアリング、文献などを整理して策定した。分析、評価の準備として、SMR に関しては、廃棄物も含めたライフサイクルの成立性や国内外の原子力施設の事故の発生のように原子力全般に共通の課題となる項目や火力発電の廃止時期等の新エネルギーの共通課題の他、重要な検討事項について整理した。開発したリスク分析、評価フレームを SMR のリスク評価に適用し、各視点について詳細な項目に対して半定量的評価を実施した。各視点について、SMR を社会実装するうえで課題となる事項が抽出できており、開発したフレームの有効性を確認した。また、SMR が工学システムとして抱える事故のリスクについては、既に社会で受容されていて、かつ、SMR と同種の放射線被ばくのリスクを有する従来型の原子炉の事故のリスクと比較することで、リスク情報活用の有効性を示した。

3.4 研究推進 【R4～R6】

本研究を推進するに当り産官公学の関係者からのヒアリングを行いつつ研究開発を推進した。

令和4年度は、原子力メーカーからヒアリングを行い、SMRの標準モデルの策定を進めた。令和5年度には、階層分析法の調査対象として従来の市民調査に加え、各分野のエキスパートからの意見をもとに階層分析を実施して、提案したリスク評価フレームの妥当性を検証した。

令和5年度および6年度は原子力分野の関係者が集まるNEXIP交流会に参加した。ポスターセッションを通じて事業者との意見交換を実施することで、研究の方向性を確認するとともに、考慮すべき項目のブラッシュアップを図った。

3.5 自発的研究活動【R4～R6】

令和5年度には、自発的研究活動の一環として複数の国際的な学术交流や地域への防災啓発活動を展開し、横浜国立大学総合学術高等研究院傘下のリスク共生社会創造センターの取り組みをさらに発展させた。具体的には、災害管理におけるデータ標準化・共有プラットフォーム適用を議論する日韓共同セミナーを開催し、韓国国家危機管理学会が主催する学術大会に参加して本プロジェクトの成果を発表した。また、ノルウェー科学技術大学からの訪問を受け、互いの研究やプロジェクトについて情報交換を行うことで、将来的な研究協力の可能性を探った。内閣府が主催する「ぼうさいこくたい2023」においては子ども会議プログラムへ参画し、防災教育や地域社会における防災意識向上に貢献した。さらに、京都大学防災研究所のクルーズ教授との交流を通じ、自然災害が誘発する技術的事故であるナテック（Natech）研究における連携の可能性を議論し、研究領域の拡大に向けた意欲を示した。加えて、仁川大学校仁川学研究院や韓国国家危機管理学会との共同研究契約を締結し、国際的な研究協力の枠組みを確立してリスク共生社会の創造に向けた活動を強化した。以上のように令和5年度の活動を通じて、センターは国際的な研究連携と地域社会への貢献という二つの面で大きな進展を遂げているが、これはSMRや新たなエネルギーシステムの社会実装を検討するうえでも、幅広い視野からリスクを俯瞰できる基盤づくりに直結する意義を持つ。

令和6年度の研究活動では、前年度に続きリスク共生社会の実現を目指し、国際的な学术交流と地域連携をさらに深めた。韓国・亜細亜大学行政学科社会科学研究所との連携により、エネルギー転換体制の実証研究や高レベル放射性廃棄物処分施設をめぐる社会的対立と信頼形成に関して議論を交わし、後者のプロジェクトについてはLOI（了解覚書）を締結して具体的な協力を進める素地を整えた。また、日韓水素経済学術セミナーの開催では、水素社会の実現に向けた課題と社会的受容性、政策の重要性が幅広く取り上げられ、エネルギー領域における国際的な学术交流がさらに促進された。韓国と日本におけるSMRの社会受容性を比較分析する研究への協力では、両国のエネルギー政策やリスク認識の相違点を洗い出し、社会的受容性向上に資する要因を多角的に検討した。ノルウェーでの水素エネルギー社会受容性調査にも協力し、現地専門家や市民を対象とした意識調査を支援することで水素エネルギーに関する国際的な知見を拡充している。超学際研究コラムを企画・推進する試みでは、気候変動や都市計画、災害リスクマネジメントなど多様な分野の知見を集約し、社会との対話を深めることでリスク共生社会の理解を促した。さらに、三浦市三崎港地域と連携し、哲学カフェの開催に向けた企画を進めることで、地域固有の環境保護や漁業資源の維持、防災・減災に対する住民の意見を集約し、今後の社会的連携基盤を築いた。これら一連の活動は、本プロジェクトが目標とする社会総合リスク評価基盤の構築に寄与するとともに、国際的な視野でのSMRや水素エネルギーの社会実装に向けたリスク評価技術の発展を後押しする成果をもたらしている。共同研究契約やLOIの締結、学術セミナーの開催、地域との対話の場づくりを通じて、学术界・産業界・行政・市民が連携できる枠組みを強化し、社会総合リスクへの理解と対応策の検討をより深めていく土台を固めつつある。今後も国内外の研究機関や地域社会との協力を一層進め、SMRを含む先進エネルギーシステムのリスク評価と社会受容性の向上に向けた研究を継続していく予定である。

4. 結言

3ヵ年計画の業務実績を以下に示す。

(1) SMR 評価に必要なリスク情報の収集と整理

令和4年度は、各分野でのリスク分析、リスクマネジメント技術について収集した情報を精査し、SMR に対して必要なリスク情報の再整理を行った。SMR に対しての必要性については技術的仕様に加え、社会的状況も考慮した検討を行った。令和5年度は、収集・整理した情報を、SMR のリスク情報（リスク源、分析手法、評価手法）としての必要性の観点から精査を行った。

(2) 社会総合リスクを考慮した包括的なシナリオ想定と影響予測手法の開発

令和4年度は、エネルギーシステムが重要社会インフラとして成立するための要件を整理するために、社会の構造を要素に分割し、要素毎の視点で影響を整理して、重要インフラとして社会を成立させるための条件を分析した。また、エネルギーシステムに必要なリスク指標の体系化について、リスク要素を抽出し、それぞれにリスク指標を設定した。令和5年度は、設定したリスク指標に対して、それぞれの相互作用を検討し、構造を明らかにした。整理されたリスク指標ごとにリスクを特定し、シナリオを抽出した。抽出したシナリオについて、その影響を予測するための手法の指針を開発した。

(3) SMR に対する社会総合リスク評価の試行

令和4年度は、検討対象とする SMR の標準モデルについては、各メーカーのヒアリングによる検証後、仕様を策定し、そのモデルに対して、評価に求められるリスク分析および評価手法（定性または定量）を整理して、社会総合リスク評価指標の特性毎に類型化した。令和5年度に、軽水炉型 SMR を対象に予備的なリスク分析および評価を行うとともに、令和6年度には令和5年度に開発したガイドラインに沿ったリスク分析と評価を実施した。SMR だけでなく、原子力システム、再生可能エネルギーとの比較、評価を行うことで、提案した手法の妥当性を検証した。また、事業者、有識者との意見交換を通じて、本手法の有効性を確認した。

(4) 研究推進

産官公学の関係者からのヒアリングを行いつつ研究開発を推進した。

上記の研究項目を通じて、軽水炉型 SMR に開発したリスク分析、評価手法を適用した結果、社会実装において考慮すべき点を以下のようにまとめた。

- ・原子力システムとして SMR については、他の脱炭素エネルギーシステムと比較して、安全性に対する要求は高い。容量の小さい SMR は、緊急時計画区域を敷地内に設定することも可能であるため、既存の軽水炉と比較しても優位性がある。

日本のように新規立地に制約が高い条件では、既存の軽水炉と併設することも選択肢として存在し、SMR が有効となる可能性は高い。ただし、現行の軽水炉と同様、複数の軽水炉のドミノ効果を考慮する必要がある。

- ・人口減少社会である日本では、産業成立性の観点から技術者の獲得がボトルネックとなるため、モジュール化による建設コストを節約できる SMR は有効な選択肢となり得る。一方、耐震性を考慮した型式認証のあり方や、これまでとは異なる型式認証をベースとする規制対応のあり方が導入障壁となる。事業者の投資を呼び込むためには、社会制度の改革が急務である。
- ・経産省のロードマップでは、SMR の実装は2040年以降が見込まれるが、カーボンニュートラル

の実現目標である 2050 年には間に合わない可能性がある。環境対応の視点から、社会実装の遅延はボトルネックとなる可能性がある。

- ・脱炭素エネルギーとして SMR を推進するため、社会全体の脱炭素エネルギー転換への切迫性が重要な要素となる。すなわち、エネルギーシステムに社会が求める要件として、環境対応の視点の重要性を高める対策が有効となる。

以上、3 ヶ年計画の全ての業務項目を実施し、所期の目標を達成した。

5. 付属書 A-1 脱炭素エネルギーのリスクフレームガイド

目 次

<u>I. 本リスクフレームの基本構造</u>	5-3
1. <u>本リスクフレームの概要</u>	5-3
2. <u>リスクフレームの構造</u>	5-4
2.1 <u>脱炭素エネルギーシステムリスクの捉え方</u>	5-4
2.2 <u>リスクフレームの基本構造の考え方</u>	5-4
2.2.1 <u>リスクフレームの基本構造</u>	5-4
2.2.2 <u>リスクフレームの基本要素の解説</u>	5-11
2.3 <u>リスクアセスメントの要点</u>	5-12
2.3.1 <u>リスクフレームの活用について</u>	5-12
2.3.2 <u>リスク分析以前に実施すべき事項</u>	5-13
1) <u>エネルギーシステムの社会実装における社会環境変化の調査</u>	5-13
2) <u>エネルギーシステムの社会実装における技術・組織変化の調査</u>	5-14
2.3.3 <u>リスク特定</u>	5-14
2.3.4 <u>リスク分析</u>	5-14
1) <u>リスク構造の分析</u>	5-14
2) <u>リスクの要点分析</u>	5-15
2.3.5 <u>リスク評価</u>	5-15
3. <u>脱炭素エネルギーシステム選択への活用</u>	5-18
3.1 <u>リスクフレーム活用目的に対する基本的な検討</u>	5-18
3.2 <u>エネルギー選択の方法</u>	5-18
3.2.1 <u>エネルギー需要を満足する視点で供給計画を作成する場合</u>	5-19
3.2.2 <u>特定のシステムの社会実装に関する検討を行なう場合</u>	5-19
3.3 <u>評価における検討事項</u>	5-19
3.4 <u>価値観の取扱いについて</u>	5-20
1) <u>各システムの相対評価に対する活用</u>	5-20
2) <u>リスク項目の重みを検討することによる考察</u>	5-21
<u>II. 活用事例 原子力システム評価への適用</u>	5-22
1. <u>リスク基準の設定</u>	5-22
2. <u>SMR を対象とした評価の考え方</u>	5-24
3. <u>リスク評価のために実施する分析事例</u>	5-25

<u>3.1 リスクのランク評価分析事例</u>	5-25
<u>3.2 詳細分析のための FT 事例</u>	5-28
<u>3.3 リスクの評価にシミュレーション等の詳細な分析を行う事例</u>	5-29

I. 本リスクフレームの基本構造

1. 本リスクフレームの概要

地球温暖化は人類社会に対する大いなる脅威であり、その対応策としての脱炭素エネルギーシステムの社会実装は急務である。

本リスクフレームは、再生エネルギーシステム、原子力エネルギーシステム等の脱炭素エネルギーシステムの成立性に対するリスクの検討システムである。

脱炭素エネルギーの社会実装に関しては、各システムの保有するリスクを整理し、選択を行う必要がある。

エネルギーシステムの一つ目の要件は、許容できない重大なリスクがないことである。本フレームでは、この要件を検証するために各システムのクリフエッジとなるリスクの有無を検証することを、フレーム作成の目的の一つとしている。

二つ目の要件は、システムの社会実装を確実にすることであり、そのため、本フレームを活用し、エネルギーシステムの社会実装に必要な要件を体系的に整理し、各システムの検討課題を明らかにすることである。

三つ目の要件は、他のシステムとの競合関係の中で相応しいシステムを選定することで、本フレームの活用により、各システムの社会・環境状況によって、もっとも相応しいシステム選定に寄与することである。

この目的を達成するために、本フレームでは、脱炭素エネルギーの社会実装の重要な要件として、以下の5つの視点として整理した。

- ① エネルギーシステムの基本要件であるエネルギーの安定供給
- ② カーボンニュートラル施策の目的である地球環境への影響
- ③ エネルギーシステムを民間事業として成立させる基本要件である事業の成立性
- ④ エネルギーシステムがもたらす影響として心配されてきた地域への影響
- ⑤ 生活・経済・科学技術等の一般社会にもたらす影響

この5つの視点に関する説明は、2.2.2を参照されたい。

2. リスクフレームの構造

本章では、本フレームのリスク構造とその分析の要点を整理している。

2.1 脱炭素エネルギーシステムリスクの捉え方

本フレームでは、エネルギーシステムに要求される事項を満足できない可能性をエネルギーシステムリスクとして定義している。

エネルギーシステムへの要求事項としては、一般に S+3E（安全+安定供給、経済合理性、環境適合性）として捉えることが多いが、安全は、安定供給、経済合理性、環境適合性のすべての事項自体の前提でもあるために、それぞれの事項に中の基礎要件として整理している。

本フレームでは、地球環境問題への対応という新エネルギーシステムの本質的問題から、個別の技術の成立性までの多くのエネルギーシステムの構成要素を包含している。

2.2 リスクフレームの基本構造の考え方

2.2.1 リスクフレームの基本構造

本リスクフレームは、検討対象とするリスクを4階層構造として整理を行った。

このリスク階層構造の階層1～2を、表1に示す。この第1階層には、リスクの大項目として、5つの視点で整理している。それぞれのリスクの第1から第4階層までを以下の通り整理した。

- ・表1-1 新エネルギーの安定供給
- ・表1-2 新エネルギー事業の地球環境対応、
- ・表1-3 新エネルギー事業の産業としての成立性
- ・表1-4 新エネルギー事業の地域への影響
- ・表1-5 新エネルギー事業の一般社会への影響 を示す。

本フレームを用いてリスクの分析・評価を行う際は、第4階層のリスクを直接評価できる場合もあれば、必要に応じ第4階層のリスクをトップ事象として、さらなる分析を行う必要が在る場合もある。

表 1 リスクフレーム 階層 1～2

階層 Q1	階層 Q2
新エネルギーの安定供給	質・量の安定供給
	安全性
	適正な価格
	事業の継続性
新エネルギー事業の地球環境対応	ライフサイクルとしての地球環境対応の成立性
	地球環境対応に有効なエネルギー転換の実効性
新エネルギー事業の産業としての成立性	単独事業としての採算性
	他のエネルギーシステムに対する事業競争力
	事業の発展性
	新エネルギーシステムの事業化基盤
新エネルギー事業の地域への影響	地域の安全・安心への影響
	地域経済への影響
	地域の文化・風土への影響
新エネルギー事業の一般社会への影響	生活・社会活動イノベーションへの影響
	経済イノベーションへの影響
	科学技術イノベーションへの影響
	地球環境以外の自然や社会への影響

表 1－1 新エネルギーの安定供給の評価項目

階層 Q1	階層 Q2	階層 Q3	階層 Q4
新エネルギー の安定供給	質・量の安定 供給	質の安定	電圧の安定性
			周波数の安定性
		量の安定	必要な量の供給
			環境の変化に対する供給安定性
			事故時の復旧性(レジリエンス)
			規制の変化に対する供給の安定性
			定期点検期間も含めた供給安定性
			発電原材料(希少材料、基幹部品) の供給安定性
	安全性	日常運転における労働安全	
		事故時の安全対応性	社員安全
			一般市民安全
		自然災害時の安全性	社員安全
			一般市民安全
	適正な価格	電力供給価格	システム構築コスト
			電力製造コスト(運転に必要なコスト、事故対応コスト等を含む)
			供給補完コスト
			廃棄コスト
		エネルギーシステム維持のための 地域コスト	地域による事故の未然防止コスト
			災害発生時の地域防災コスト
	事業の継続性	事業制度の継続性(推進政策、 規制等)	
		ライフサイクルシステムの成立	
		エネルギーセキュリティ	エネルギーシステムの製造・運転・保 守技術・仕組みの継続性
			原材料・基盤製品供給の継続性

表 1-2 新エネルギー事業の地球環境対応

階層 Q1	階層 Q2	階層 Q3	階層 Q4
新エネルギー事業の地球環境対応	ライフサイクル(設備の原材料調達、製造、運用、廃棄処分までの工程)としての地球環境対応の成立性	原材料・エネルギーシステム基盤生産時の影響	原材料調達時の影響
			システム生産時の環境影響
		施設製造時製造時の影響	施設建設に関する環境影響
			施設建設に付随する物流等の環境影響
		エネルギーシステム運転時の影響	システム運用の直接的環境影響
			システム運用に付随する物流等の環境影響
	地球環境対応に有効なエネルギー転換の実効性	廃棄・処分時の影響	廃棄・処分地や施設の建設に伴う環境影響
			廃棄・処分の直接的環境影響
			廃棄・処分に付随する物流等の環境影響
		実現時期	なるべく早く実現
			確実に実現
		他の施策等の状況への対応性	国際状況の変動への対応
			政策・規制要求への対応
			生活視点の要求への対応
			経済視点の要求への対応
			技術開発遅れへの対応

表 1-3 新エネルギー事業の産業としての成立性

階層 Q1	階層 Q2	階層 Q3	階層 Q4
新エネルギー事業の産業としての成立性	単 独 事 業 と し ての採算性	新エネルギーシステム構築・運転の採算性	新システム構築投資の回収性
			運転の採算性
		旧エネルギーシステムの投資の回収性	旧システムの投資残金の回収性
			旧システムの廃棄コストの回収性
			旧システムに関係する産業の移行
		他のエネルギーシステムに対する事業競争力	他の新エネルギーシステムとの競争力
	供給安定性の競争力		
	利用者の利便性に関する競争力		
	旧エネルギーシステムとの競争力		運転コストの競争力
			供給安定性の競争力
			利用者の利便性に関する競争力
	事業の発展性	人材確保力	新規人材採用による確保
			既存人材のリスキリングによる確保
		技術開発力	大学・研究機関の研究開発力
			企業の研究開発力
	新エネルギーシステムの事業化基盤	投資資金の確保	企業資金の可能性
			銀行融資の可能性
			政府融資の可能性
		社会の支持	政府の支持
			投資家の支持
市民の支持			

表 1-4 新エネルギー事業の地域への影響

階層 Q1	階層 Q2	階層 Q3	階層 Q4
新エネルギー事業の地域への影響	地域の安全・安心への影響	安全への影響	システムが地域住民の生命に及ぼす影響
			システムが地域住民の生活に及ぼす影響
			システムが地域環境に及ぼす影響
		安心への影響	システムが地域住民の生命に及ぼす影響
			システムが地域住民の生活に及ぼす影響
			システムが地域環境に及ぼす影響
	地域経済への影響	直接的経済波及効果	システム建設時に地域産業に与える影響
			システム運用時に地域産業に与える影響
		直接的経済被害	システム建設時に地域産業に与える影響
			システム運用時に地域産業に与える影響
			事故時に地域産業に与える影響
		風評被害等の間接被害	日常における風評被害
			事故時の風評被害
	地域の文化・風土への影響	地域イメージの向上	システムの設置が及ぼす地域イメージ
			システムの事故が及ぼす地域イメージ
		地域文化への貢献	システムの設置が地域文化に及ぼす影響
			システムの事故が地域文化に及ぼす影響

]表 1-5 新エネルギー事業の一般社会への影響

階層 Q1	階層 Q2	階層 Q3	階層 Q4
新エネルギー事業の一般社会への影響	生活・社会活動イノベーションへの影響	生活イノベーションへの影響	エネルギーシステムの変化が直接もたらす生活への影響
			エネルギーシステムの変化が他産業の変化にもたらすことによる間接的生活への影響
		社会活動イノベーションへの影響	エネルギーシステムの変化が直接もたらす社会活動への影響
			エネルギーシステムの変化が他産業の変化にもたらすことによる間接的社会活動への影響
	経済イノベーションへの影響	国内経済への影響	国内産業への影響
			個人消費への影響
		国際競争力への影響	国内での日本企業の競争力
			国外での日本企業の競争力
	科学技術イノベーションへの影響	エネルギーシステムイノベーションへの影響	エネルギーシステムの機能向上に関するイノベーション
			エネルギーシステムの多様性に関するイノベーション
		科学技術全般におけるイノベーションへの影響	エネルギーを必要とする科学技術システムの活用の推進
			エネルギーシステムの技術のスピンアウトによる科学技術の発展
	地球環境以外の自然や社会への影響	自然への影響	景観への影響
			生物多様性への影響
		社会への影響	地域環境への影響
			個人環境への影響

2.2.2 リスクフレームの基本要素の解説

本フレームの基本構造の第一、二階層の概念について説明する。

① エネルギーの安定供給

このリスク項目は、エネルギーシステムの基本且つ必須な要求の視点での項目であり、その要素は以下の通りである。

・質、量の安定供給

安定供給の対象としては、需要をまかなうだけのエネルギー量を供給できる事と、精度の高い製品を作る斎藤に必要となる周波数等のエネルギーの質の安定が検討の対象となる。

・安全性

安全でないシステムは、稼働自体ができなくなるために安定供給においても重要な確立事項である。

・適正な価格

産業や生活においてエネルギーの価格は、大きな影響をもたらすものであり、エネルギーシステムの重要な評価要件である。

・事業の継続性

エネルギーの供給は、社会の基盤として必須のものであり、その持続性は社会の安定に必須の要件である。その継続には、事故、天候等の環境の変化に対する冗長性も含まれる。

② 地球環境への影響

このリスク項目は、新たなエネルギーシステム構築の基本理念であるカーボンニュートラル施策としての有効性・課題の視点で、エネルギーシステムのライフサイクルにおける地球環境への影響を評価する。

その構成要素は、以下の通りである。

・ライフサイクル（設備の原材料調達、製造、運用、廃棄処分までの工程）としての地球環境対応の成立性

地球環境への影響は、発電時のCO₂排出のみならず、原材料の調達から廃棄までのライフサイクルにおけるCO₂排出等の地球環境への影響を評価する必要がある。

・地球環境対応に有効なエネルギー転換の実効性

地球環境問題に対して有効なシステムの実現時期やシステムの開発・社会実装の影響や必要な技術、システムの信頼性、制度の実効性等に関する評価が必要となる。

③ 事業の成立性

このリスク項目は、民間事業としてのエネルギーシステムの構築・運営における成立性を評価した視点の項目であり、その構成要素は以下の通りである。

・単独事業としての採算性

・他のエネルギーシステムに対する事業競争力

エネルギー事業として成立するためには、事業としての採算性は当然のこととして、同等の機能を持つエネルギーシステムとの事業競争に対して有利な状況を構築する必要がある。

ある。

- ・事業の発展性

事業は参入時の条件を満足するだけでなく、事業を安定的に続けるには事業自体の発展性を支える人材や技術開発力等の評価も重要である。

- ・新エネルギーシステムの事業化基盤

新事業を立ち上げ・維持するための、必要な資金や立地地域の支持を確保できるかを評価する必要がある。

④ 地域への影響

このリスク項目は、エネルギーシステムがもたらす影響として心配されてきた地域への影響についての視点であり、その構成要素は以下の通りである。

- ・地域の安全・安心への影響

エネルギー施設内の事項等意外にも、立地地域への安全や安心に関わる影響を評価する必要がある。

- ・地域経済への影響

当該システムの事業がもたらす雇用や関連産業等の経済効果や風評被害等の経済への影響を評価する必要がある。

- ・地域の文化・風土への影響

当該システムの事業が地域にもたらす文化等への影響も事業の影響として評価する必要がある。

⑤ 一般社会への影響

このリスク項目は、生活・経済・科学技術等の一般社会にもたらす影響の視点の項目であり、その構成要素は以下の通りである。

- ・生活・社会活動イノベーションへの影響

新たなエネルギーシステムが社会実装されることによる生活形態や社会価値等への影響

- ・経済イノベーションへの影響

新たなエネルギーシステムがもたらす産業・消費等への影響

- ・科学技術イノベーションへの影響

新たなエネルギーシステムがもたらす材料やシステムの開発にもたらす影響や、エネルギーシステムに高度化に必要な科学技術開発に関する影響

- ・地球環境以外の自然や社会への影響

新たなエネルギーシステムがもたらす自然環境や生活環境にもたらす影響

2.3 リスクアセスメントの要点

2.3.1 リスクフレームの活用について

本リスクフレームは、カーボンニュートラルに対応する各エネルギーシステムを比較できるフレームとして設計している。

本フレームの構造は、各視点におけるリスク体系の構造となっている。そのため、本フレームを活用してリスク分析を行う際は、その評価対象が特定され検討するリスクを

詳細・具体的に行う必要がある場合は、その評価事項を詳細に分析し評価する必要がある。その対応には、以下の例がある。

- ① 階層 4 のリスク事項をトップ事象としてリスク構成要素と顕在化シナリオを分析する
- ② そのリスクの特性に大きな影響を与えるリスクシナリオを選定し、FT 等の手法を用いて詳細分析を行う

本リスクフレームを活用することで、そのリスクの構成要素を分析しその変化を検討することで、リスクの顕在化シナリオやその起りやすさを評価することができる。また、その影響構造を検討することで、影響の大きさも評価することが可能である。

本リスクフレームを活用することで、複数のエネルギーシステムのリスクに関して相対評価が可能となる。

さらに、本リスクフレームの活用によって、再生可能エネルギーや原子力システム個々のシステムの課題抽出や対応の効果を検証することが可能である。この個別のシステムの評価の際は、このフレームで該当するパートを選定し活用することが効果的である。

2.3.2 リスク分析以前に実施すべき事項

本リスクフレームの活用によって、そのリスクの構成要素や顕在化シナリオ自体の分析は論理的に実施することができるが、その顕在化の可能性や影響の範囲や大きさは、その時の各要素の状況によって大きく異なるため、分析に必要なリスクの構成要素の現状や将来の可能性を検討や定量評価を行うためには、分析の対象となるエネルギーシステムに関する知識に加えて、リスクに影響を与える社会や環境等の状況に関する現状と変化の可能性を検討する必要がある。

1) エネルギーシステムの社会実装における社会環境変化の調査

エネルギーシステムの社会実装に関するリスクは、システムを取り巻く社会環境の変化によっても変化するため、調査項目の例としては、以下の事項がある。

① 地球環境問題に対する切迫性・国際動向

この調査によって、何時までに新エネルギーシステムをどの程度社会実装をするべきかの目標を設定する。

新エネルギーの社会実装目標には、国際的競争・協調のあり方によっても目標が異なってくる。

② 地域の価値観

新エネルギーシステムは、地域との共生が求められる場合が多く、地域としてその受け入れが難しい場合もあり、立地地域の状況把握は重要な場合がある。また、地位との関係はエネルギーの製造時だけではなく、原材料の取得や廃棄物の処理等のシステムのライフサイクルの視点での分析も重要となる。

③ 規制の動向

新エネルギーシステムには、新たな規制が貸せる場合もあり、その規制のあり方は事業に大きな影響をもたらす可能性がある。

2) エネルギーシステムの社会実装における技術・組織変化の調査

エネルギーシステムの社会実装に関するリスクは、システムに関係する技術の変化によっても変化するため、調査項目の例としては、以下の事項がある。

- ① CN 技術に関する事項
- ② システム供給事業者の状況
- ③ システム運転事業の状況
- ④ システムに関するライフサイクル事業の状況
- ⑤その他、エネルギー事業に影響を与える事項

2.3.3 リスク特定

本フレームでは、脱炭素エネルギーシステムのリスクの基本構造を図1に示している。しかし、この基本構造で示すリスク項目に含まれるシナリオは、対象となるエネルギーシステムによって、その示す具体的なリスク項目は異なってくる場合がある。

本フレームを用いて具体的なリスク分析を行う為には、本フレームのリスク項目に含まれるリスクシナリオを対象システムに合わせて特定する必要がある。この事例を第1階層：新エネルギーの安定供給、第2階層：質・量の安定供、第3階層：量の安定の評価について説明する。

また、本フレームのリスク構成自体も、今後の状況を踏まえて修正する必要がある場合もある。

事例

再生エネルギーシステムでは、環境の変化に対する供給安定性が重点評価項目になると考えられるが、原子力システムに関しては、事故時の復旧性や規制の変化に対する供給の安定性の項目が重要評価項目になると想定される。

また、必要な量の供給という項目に関しては、それぞれのシステムに対して個別の目標が設定された場合は、それぞれのシステム毎の評価になるが、電力全体として目標が設定された場合は、需要量や各システムの実装状況全体の問題となると想定される。

2.3.4 リスク分析

1) リスク構造の分析

リスクは、システムのリスク構造のどのような構成要素かによって、分析すべき影響や起りやすさの前提等が異なってくる。

例えば、事故リスクは、地域への影響を考える視点と、供給が継続できるかという視点では、対象とする事象が異なってくる場合がある。

2.3.2で特定したリスクに対して、そのリスク構造を前提として、対象とするリスク

の顕在化シナリオを明らかにする必要がある。

リスク顕在化シナリオに関しては、そのリスク項目の内容が十分に理解できるレベルになるために分析を行う必要がある。そのリスク項目に関して既存の分析実績や経験が存在する場合は、リスク項目の評価を行うことができる場合もあるが、一般的には、リスク分析結果の求める要求に応じてリスク分析を行う必要がある。

以下にリスク分析の方法を記すので、リスク評価等に必要な内容や精度に基づいて選択されたい。

- ・検討したいリスク項目をトップ事象として、FT 等により詳細分析を行う。
- ・社会的要因も重要なリスク顕在化要因となる可能性があり、その不確かさも大きな判断条件となる場合もある。
- ・特に重要なリスクに関しては、シミュレーションや詳細分析でリスクに対する知見を得る。

2) リスクの要点分析

リスク分析は、リスクの影響の大きさや起りやすさを分析するだけでなく、リスクシナリオにおける顕在化のトリガーや影響を変化させる分岐点、さらには影響や起りやすさに大きな影響をもたらす重要な検討の要点を知ること重要である。

特に不確かさが大きな事項は、その状況によってリスクを大きく変える可能性があるために、不確かさの変化に大きな影響を与えるトリガーに関する検討も重要である。

2.3.5 リスク評価

脱炭素エネルギーシステムの社会実装リスクの構成要件は、時々々の社会状況や技術状況が含まれているものが多い。

そのために、リスクがもたらす影響や起りやすさは、どの程度将来の期間のリスクを評価するかによって、変化が大きくなる可能性もあり、不確かさも大きくなる場合がある。リスクの構成要因がシステムの内部部品等の故障等に依存する場合は大きい場合は、故障率データベース等を基に、リスクの起りやすさ等を数値的に精度良く定量評価を行う事も可能であるが、脱炭素エネルギーシステムの社会実装リスクは、ランク評価による評価が実態を良く反映するものとなる。

また、エネルギーシステムをとりまく状況の不確かさを全てエネルギーシステムのリスク評価に直結させてもリスクへの対処が難しくなる。

リスク分析の結果は、リスクの理解を増すためやリスクシナリオをより良く理解するために活用する方法も有効となる。

以上の観点から、エネルギーシステムの社会実装リスクに対する評価のためのリスク基準を以下の3つの視点に分けて評価する手法を検討する。

(1) リスク基準の設定

① カーボンニュートラル (CN) 施策自体の推進リスク

- ・起りやすさの評価基準 CN 推進への課題が発生する可能性

5 ほぼ確実

- 4 かなり高い
- 3 可能性がある
- 2 状況によって発生する可能性がある
- 1 可能性は小さい
- ・影響の大きさの評価基準 CNの推進に与える影響
 - 5 大きな障害となるレベル
 - 4 推進を妨げるレベル
 - 3 一定の影響があるレベル
 - 2 大きな状況の変化がない限り影響は少ない
 - 1 影響は少ない
- ② カーボンニュートラル施策推進の中で、他のシステムと比較して、対象とするシステムを選択してもらうための検討すべきリスク
 - ・起りやすさ評価基準 対象のシステムの選択を妨げる可能性
 - 5 ほぼ確実
 - 4 かなり高い
 - 3 可能性がある
 - 2 状況によって発生する可能性がある
 - 1 可能性は小さい
 - ・影響の大きさの評価基準 対象のシステムの選択に与える好ましくない影響
 - 5 社会全体が対象システムに反対するレベル
 - 4 対象システムの選択に対し立地地域で反対が大きくなるレベル
 - 3 対象システムの選択の問題が指摘されるレベル
 - 2 対象システムの選択に一部に反対意見がある
 - 1 対象システムの選択に影響がない
- ③ 対象システムの中で特に特定の型式のシステムを選択してもらうために検討すべきリスク

特定の型式のシステムの例：

太陽光発電システム（住宅地の屋根に設置する型式、大型パネルシステム等）

風力発電システム（洋上風力型式、陸上設置 等）

原子力システム（革新炉、SMR 等）

 - ・起りやすさ評価基準 特定の型式の選択を妨げる可能性
 - 5 ほぼ確実
 - 4 かなり高い
 - 3 可能性がある
 - 2 状況によって発生する可能性がある
 - 1 可能性は小さい
 - ・影響の大きさの評価基準 特定の型式のシステムの選択に与える好ましくない影響
 - 5 社会全体が特定の型式システムに反対するレベル

- 4 特定の型式の選択に対し事業者が選択しなくなるレベル
- 3 特定の型式の選択の問題が指摘されるレベル
- 2 特定の型式の選択に一部に反対意見がある
- 1 特定の型式の選択に影響がない

尚、該当システムの個別の技術的要件のように、影響の大きさとして具体的な指標が設定できる場合や、起りやすさとして発生確率が設定できる場合もあるため、対象のリスク毎にリスク基準を設定した方が適切に適切な場合もある。

(2) リスク構造における評価

リスク項目・シナリオ毎に評価を実施し、そのリスク対応に必要な視点や要点を整理する。

また、該当しない項目に関しては、評価対象外として「―」を記す。

定量評価を実施する項目は、最下層の項目とは限定せず、中間項目の場合もあり得る。その場合は、その項目より下位の構造は、そのリスクの評価を行う際の参考となるシナリオとなる。

また、各項目で定量評価による成果は、各データによって評価する定量的評価結果だけでなく、リスクの評価に影響を与えるシナリオの説明・不確かさの分析である場合もある。

本フレームにおける評価結果は、その評価値のみならず、その評価のためのシナリオ分析自体も対応の可否・要点を検討する際の重要な根拠となる。

リスク評価結果を用いた意思決定では、その定量評価の値だけでなく、リスクが持っている不確かさやその不確かさを生じさせる要因を把握することで、より有効な評価を行うことができる。

定量評価を行う場合は分析の前提・根拠を明らかにして評価を実施することで、その前提や根拠の状況や考え方が変化した場合は、定量評価を適切に変更できる。

リスク評価の幾つかの形態について、Ⅱに記載した事例を参照されたい。

(3) リスク対応のまとめ

エネルギーシステムの社会実装に関するリスクを明らかにして、必要なリスク対応に関して、対応主体、優先度、対策内容等を整理する。

リスク対応には、以下の事項が含まれる

- ・システムの技術的な改善・開発（企業、学会、国としての対応）
- ・規制に対する対応
- ・制度の改善
- ・人材の確保
- ・必要資金の確保
- ・社会や地域の課題への対応
- ・産業との連携
- ・計画の変更等

3. 脱炭素エネルギーシステム選択への活用

脱炭素エネルギーの選択や実装の優先順位の決定においては、実装の時期、システムの機能レベル、システム自体の供給の安定性・継続性や立地地域の状況を勘案し、本リスクフレームを活用したリスク評価を参考にして実施することを推奨する。

3.1 リスクフレーム活用目的に対する基本的な検討

本節では、本フレームが目的とするエネルギーシステムの要件毎に、その基本的な考え方を示す。

1) システムのクリフエッジとなるリスクの有無の検証

システムの社会実装には、まずシステムの社会実装を妨げる大きな要因を把握し、その社会実装自体を左右する重要な実装課題を解決する必要がある。

対象システムの社会実装を行う上で、クリフエッジの把握には、以下の視点が検討を行なう必要がある。

① そのシステム採用の理由になるシステムの特徴を失わせる事項

視点事例

- ・環境にやさしいシステムあり、安定的なエネルギーを供給できる。
- ・生活や産業で活用できるエネルギー価格である
- ・必要な時期までに必要なエネルギー供給が可能である 等

② 社会がそのシステムに対して大きな懸念を有している事項

- ・自然環境に大きな影響を与えない
- ・社会生活に大きな影響を与えない
- ・エネルギー供給に継続性が期待できる
- ・ライフサイクルで社会に負担を与えない 等

2) システムの社会実装の進展に影響を与える検討課題の明示

エネルギーシステムの社会実装の推進を確実にするためには、エネルギー事業としての成立性や技術的課題等に関する課題を整理する必要がある。

本ガイドのリスク項目参照

3) 競合関係の中で相応しいシステムの選定

複数のエネルギーシステムから、対象となるシステムを選択してもらうためには、経時的合理性、社会コストの低減等の視点で、エネルギーシステムとしての競争力を確保する必要がある。

3.2 エネルギー選択の方法

エネルギーシステムの選択における方法は、社会価値の変化やエネルギー事情によって、幾つかの選択方法が存在する。

いずれの方法も、その検討項目は同じであるが、その評価の優先順位や重要性は異なる場合がある。この評価は、先にも記したように社会情勢や実装するシステムと地域等の関

係等によっても変化するものも存在する。

以下に選択の視点毎に、フレームの活用の要点を記す。

3.2.1 エネルギー需要を満足する視点で供給計画を作成する場合

- 1) エネルギー需要を期間ごとに予測し、必要な供給量を想定する
- 2) 期間毎に必要な供給量をまかなうエネルギーシステム毎の供給計画を設定する
- 3) 次に選択するエネルギーシステム毎に対象期間ごとに解決すべき課題に対するリスクを評価する。
- 4) 課題への対応策の検討を行ない、その対策の効果を検討する。
- 5) 以上の評価を行い、期間内で達成できないシステム課題を基に、各システムの供給計画の再設定を行う。

3.2.2 特定のシステムの社会実装に関する検討を行なう場合

- 1) 該当システムの社会実装に大きな障害となるリスクの検討を行なう
- 2) 課題解決の要点を明らかにする
- 3) 対象期間内における課題対応の可能性を検討する
- 4) 対象期間内に社会実装が難しい場合は、計画の再検討を行なう

3.3 評価における検討事項

1) 安定供給の視点

エネルギーシステムとしての必須要件であり、安定供給のためには、事故・災害にも強く、供給が継続できる事がエネルギーシステムの基本要件である。

安定供給のためには、自然環境や社会環境が変化する状況でも、必要なエネルギーを安定した価格や量で供給する必要がある、需要の変動にも的確に追従できることが求められる。

2) 地球環境対応の視点

この評価視点は、脱炭素エネルギーシステムの基本的要求項目であり、エネルギーシステムのライフサイクルにおいて、如何にCO₂の排出が少なく抑えられているかを評価する必要がある。

3) 産業としての成立性の視点

エネルギーシステムを民間事業として運営するためには、エネルギー供給事業が事業として成立している必要がある。

その評価視点の事例を以下に示す。

- ・事業としての採算性
- ・事業主体としての投資の可能性
- ・事業継続のための製造技術・保守運営技術および必要な人財の確保 等

4) 地域への影響の視点

エネルギーシステム事業は、そのシステムの立地地域等の地域との共存が求められる。

地域に与える自然や社会への影響の事例を以下に示す。

- ・自然環境への影響

- ・地域安全への影響
- ・地域揭示への影響
- ・地域文化への影響 等

5) 一般社会への影響の視点

新たなエネルギーシステムの社会実装には、4) に記した立地地域への影響の他にも一般社会にも様々な影響を及ぼす。

以下にその事例を示す。

- ・生活への影響
- ・社会インフラへの影響
- ・経済への影響
- ・産業への影響
- ・学術への影響
- ・価値観への影響 等

3.4 価値観の取扱いについて

リスクフレームの各項目の達成に関する課題は、エネルギーシステムの選択において同じ重みを持つとは限らない。

エネルギーシステムの社会実装に際しては、各課題の軽重を考慮して課題対応を行う必要がある。

本リスクフレームを活用による評価を行うに際して各項目の重要性を検討するために、階層分析を用いたフレーム項目の階層分析による価値評価を行った。

実施した階層分析は、参考資料を参照されたい。

ここでは、階層分析結果の活用について説明を行う。

1) 各システムの相対評価に対する活用

①重要リスクに関する相対評価

各項目のリスク値が高い項目が N 項目あり、その重みを $R_1 \dots R_n$ として、 i 番目のリスクに対する各システムの重みを、原子力システム (α_{NCi})、太陽光発電 (α_{si})、風力発電 (α_{wi}) とすると、原子力システムの重みの総和は、 $\sum R_i \times \alpha_{NCi} (i=1 \sim n)$ 、太陽光発電は $\sum R_i \times \alpha_{si} (i=1 \sim n)$ 、風力発電は $\sum R_i \times \alpha_{wi} (i=1 \sim n)$ となり、重要リスクに対する各システムの重みを評価することができる。

但し、各リスクに対する各システムの重み α は、各システムの知識を必要とする評価である。

③ 重み分析結果を用いたリスクの総合評価

この方法は、各システムの個々の項目のリスク値に対して各項目の重みを掛け合わせた値を足し合わせることで、対象フレームのリスク値を算定することができる。

このフレームの重みには、エネルギーシステムの事業に関係するグループの価値観の重みを評価したデータと一般市民の価値観の重みを評価したデータがある。どの視点でリ

スクの重みを考える方で評価が変化する。

評価項目の視点に知識や経験に近い項目としては、以下の様になる

- ・安定供給の視点（システムの事業に関係するグループ）
- ・地球環境対応の視点（一般市民）
- ・産業としての成立性の視点（システムの事業に関係するグループ）
- ・地域への影響の視点（一般市民）
- ・一般社会への影響の視点（一般市民）

2) リスク項目の重みを検討することによる考察

①各要求項目の成立条件を体系的に理解する

各要求項目には、複数の要件が存在する

例えば、本フレームを活用すれば、事業採算に関しても、新たなシステムの採算性に加えて旧システムの投資回収の視点でも検討することが必要であることがわかる。（表 1-3 参照）

このように、各立場による評価項目の見落としを防ぐことが大切になる。本フレームの重みを認識することで、各項目の重要性を確認することが可能となる。

② 事業者と一般市民の価値観の差異から、社会実装に必要な検討事項を知る

システムの評価においては、ややもすると専門家はその専門の視点で検討を行ないがちになったり、社会を客観的に観ることができる高齢者は地球間問題への対応を重視する傾向にあったり、産業活動の中核にある年代はエネルギーコストを重視したりする傾向がある。

システムの社会実装の検討する際は、対象となるステークホルダーの価値観に留意しながらリスク対応を検討する必要がある。特に地域との共生が必要な課題に対しては、一般市民の価値観を知り課題対応を行う事が、システムの社会実装には有効である。

Ⅱ. 活用事例 原子力システム評価への適用

本章では、ガイドに示したリスク評価について、原子力システムを対象にして解説を行う。

1. リスク基準の設定

本節では、リスク基準の説明に関して、SMR の選択に関する評価を再生エネルギーシステムや既存原子力システムとの比較で検討する際の分析を事例として説明する。

① 原子力発電と比較するための太陽光発電システムの推進リスク

- ・ 起りやすさの評価基準 太陽光発電の課題が発生する可能性
 - 5 ほぼ確実
 - 4 かなり高い
 - 3 可能性がある
 - 2 状況によって発生する可能性がある
 - 1 可能性は小さい
- ・ 影響の大きさの評価の基準 太陽光発電の推進に与える影響
 - 5 大きな障害となるレベル
 - 4 推進を妨げるレベル
 - 3 一定の影響があるレベル
 - 2 大きな状況の変化がない限り影響は少ない
 - 1 影響は少ない

② カーボンニュートラル施策推進の中で、再生エネルギー（太陽光発電）と比較して、原子力システムを選択してもらうための検討すべきリスク

- ・ 起りやすさ評価基準 原子力システムの選択を妨げる可能性
 - 5 ほぼ確実
 - 4 かなり高い
 - 3 可能性がある
 - 2 状況によって発生する可能性がある
 - 1 可能性は小さい
- ・ 影響の大きさの評価基準 原子力システム選択に与える好ましくない影響
 - 5 社会全体が原子力システムに反対するレベル
 - 4 原子力システムの選択に対し立地地域で反対が大きくなるレベル
 - 3 原子力システムの選択の問題が指摘されるレベル
 - 2 原子力システムの選択に一部に反対意見がある
 - 1 原子力システムの選択に影響がない

③ 原子力システムの中で SMR を選択してもらうために検討すべきリスク

- ・ 起りやすさ評価基準 SMR の選択を妨げる可能性

- 5 ほぼ確実
 - 4 かなり高い
 - 3 可能性がある
 - 2 状況によって発生する可能性がある
 - 1 可能性は小さい
- ・影響の大きさの評価基準 SMR 選択に与える好ましくない影響
- 5 社会全体が SMR システムに反対するレベル
 - 4 SMR の選択に対し事業者が選択しなくなるレベル
 - 3 SMR の選択の問題が指摘されるレベル
 - 2 SMR の選択に一部に反対意見がある
 - 1 SMR の選択に影響がない

2. SMR を対象とした評価の考え方

各リスク項目に対して、前記の①再生エネルギー（太陽光発電の霊）の視点、②原子力システム選択の視点、③SMR 選択の視点の 3 つの視点で評価を行い、リスク対応が必要な視点と対応を行うべき主体を明らかにする。

基本的には、施策の上位概念から、順番に対処していく必要があるが、課題によっては、CN は推進しなくても原子力は推進する、または原子力全体は推進しないが SM は推進するという場合も想定されるが、その場合は、問題を切り分け、より効果的な対策の検討に資する。

SMR を選択の対象とした場合の評価の流れを以下に示す。

表Ⅱ—1 リスク評価の SMR の評価

評価対象	再生エネルギーの視点	原子力選択の視点	SMR 選択の視点	SMR の評価
リスク評価	低	低	低	全てのシステムが受入れられる
	低	低	高	SMR 導入に支障がある
	低	高	低	他の原子力には支障があるが SMR は受け入れられる
	低	高	高	原子力・SMR の導入は難しい
	高	低	低	原子力・SMR であれば導入可能
	高	低	高	原子力としては受入れ可能であるが SMR 限定の問題がある
	高	高	低	SMR は導入可能
	高	高	高	新システム自体の導入が難しい

3. リスク評価のために実施する分析事例

本章は、本ガイドに示す各リスクの分析の事例として、3つの手法の分析の考え方を原子力システムの社会実装を対象として記述する。

3.1 リスクのランク評価分析事例

ここでは、安全問題が原因で地元が受入れないリスクとエネルギーシステムの変化が直接もたらす社会活動へのリスクについてのランク評価の事例を示す。

ランク評価は、その可能性の不確かさが大きいリスクを取り扱うことができる。その評価は、評価したランク値自体だけではなく、その評価の前提としている事項やその前提の不確かさがリスクに与える影響を分析して、判断者に判断情報を提供することが重要である。

3.1.1 安全問題が原因で地元が受入れないリスク

1) 地域に影響をもたらす事故の発生自体が受入れられない

リスク要素	再生エネルギーリスク	原子力リスク	SMRリスク
起りやすさ	2	1～2	1～2
影響	1～2	5	3～4

リスク評価の説明

- ① 再生エネルギー自体の事故の影響は限定的だが、設置場所の土砂崩れ等の自然災害を誘発する可能性もあり、影響を1～2と評価した。事故の発生確率は、豪雨等の影響も考慮して2と設定した。
- ② 既存の原子力システムの大規模事故は、地域に対する影響は甚大で5と評価した。起りやすさは、現在の安全性も考慮して1から2とした。
- ③ SMRの影響に関しては、フィルターベントが健全な場合は、屋内退避までの避難の可能性に留まり3の影響で良いが、現在の原子力防災においては、UPZにおいても一時移転施策が必要と認識されている場合が多く、その状況も考え4まで拡大する可能性がある。

2) 事故が発生した際の避難計画が受入れられない

リスク要素	再生エネルギーリスク	原子力リスク	SMRリスク
起りやすさ	2	2～4	1～3
影響	1	3～4	2～3

リスク評価の説明

このリスクを構成する要素としては、以下の事項がある。

① 計画自体が受入れられない

- ・避難に必要な人数の多さが考慮されていない
- ・避難人の状況の多様性が考慮されていない
- ・避難の手段が十分ではない
- ・避難に必要な時間が少なすぎる
- ・避難時の状況の悪化が考慮されていない

② 実効性に問題がある

- ・行政の準備が不十分
- ・市民の準備が不十分

現在の避難計画は、原子力システムの状況を基にした考え方をすべての地域に適用する考え方で、地域の特長を反映した計画となっていない。

訓練内容も、F1の事故の経験から、地震時の事故という前提をおいているが、地震被害の可能性を十分に反映したものとなっていない。

また、訓練の多くが一時避難に対するものであり、屋内退避に関する訓練やその課題の洗い出しも十分ではなく、住民の支持を十分に受入れられているとはいいがたい。

3.1.2 エネルギーシステムの変化が直接もたらす社会活動への影響

1) エネルギーの十分性を前提とした社会構造

リスク要素	再生エネルギーリスク	原子力リスク	SMRリスク
起りやすさ	4	2～3	2～3
影響	4～5	4～5	4～5

リスク評価の説明

このリスクを構成する要素としては、以下の事項がある。

- (1) 交通形態の変化
- (2) 物流形態の変化
- (3) DX への影響

これらの項目に共通しているのは、新たなシステムが十分なエネルギーを提供できるかという点に依存している。

その影響は、再生エネルギーも原子力（SMR）を含む同じ影響であるが、その起りやすさはそれぞれ別の原因による。

再生エネルギーシステムだけでは、現状の延長線上ではその供給が難しいのは、ほぼ確実

である。

原子力に関しては、国の政策は推進に傾きつつあるが、地元の受け入れが進むか否かは、今後の安全や防災に対する活動の有り様によって大きな影響を受ける可能性がある。SMRに関しては、その建設に必要な法改正やメーカー・事業者の選択による影響が大きいと考えられる。

2) エネルギーの十分性を前提とした経済活動

リスク要素	再生エネルギーリスク	原子力リスク	SMRリスク
起りやすさ	4	2～3	2～3
影響	4～5	4～5	4～5

リスク評価の説明

このリスクを構成する要素としては、以下の事項がある。

要素としては、社会活動と同じように、必要とする電力の増大はほぼ確実である。リスク評価の考え方は、前項を参照。

- (1) 産業形態の変化
- (2) サービス形態の変化
- (3) 人口構造の変化

3) エネルギーの十分性を前提とした自然保護活動

リスク要素	再生エネルギーリスク	原子力リスク	SMRリスク
起りやすさ	4	2～3	2～3
影響	2～4	3	2

リスク評価の説明

このリスクを構成する要素としては、以下の事項がある。

- (1) エネルギーシステムの立地に伴う景観の変化
- (2) エネルギーシステムの立地に伴う生物多様性の変化

再生エネルギーの設置は、自然立地によるものが多数であり、その設置箇所も多数に及ぼすために一定の影響は避けられない。その影響の大きさは、自然界との協調をどこま

で事前に勘案し、対策が十分にできるか否かによって変わってくる。

一方、原子力は、その設置が限定的であり、自然界に与える影響は最終処分地の影響はまだ確定できないが限定的であると考えられる。SMR は、既存の軽水炉と比較してその面積が狭いために、評価を一段低いレベルとした。

起りやすさは、事故・テロの影響も含めて2～3としている。

3.2 詳細分析のための FT 事例

本節では、原子力発電所の原子炉の炉心損傷により、敷地外の市民に健康被害をもたらすリスクを評価する際は、図に示すような FT によりリスクシナリオ分析を行う事で、詳細な分析が可能になる。

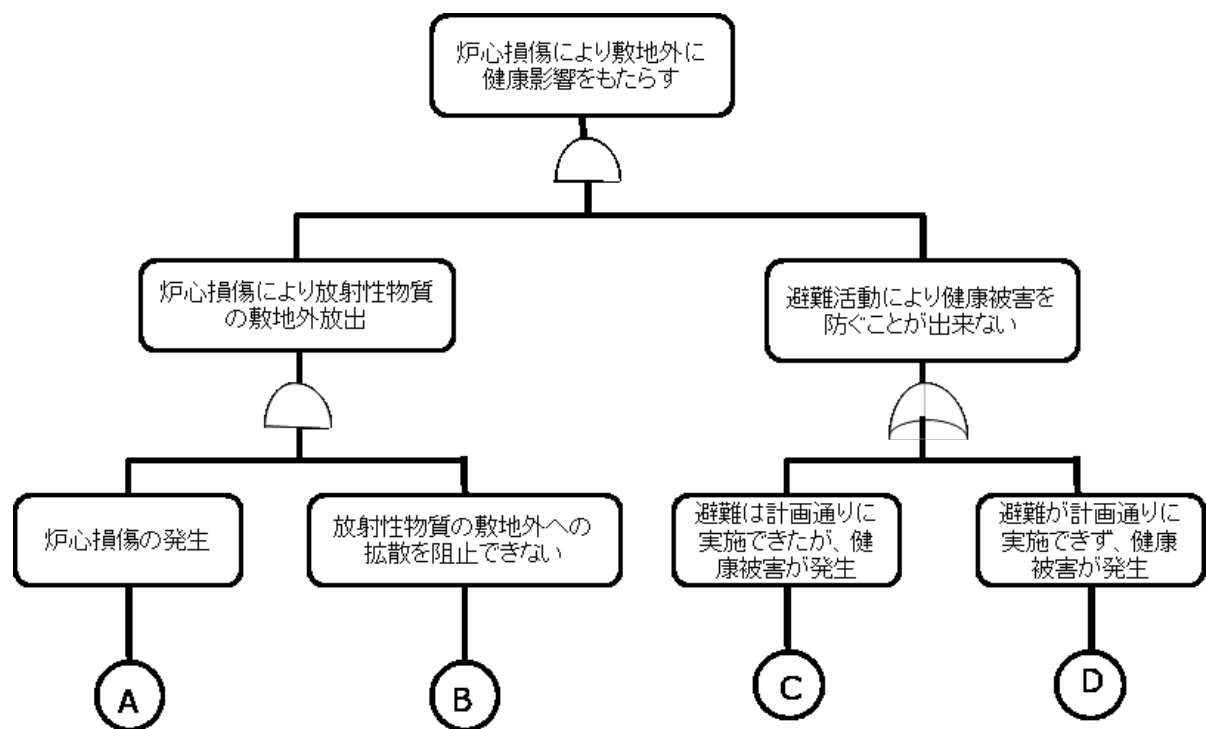


図 炉心損傷により、敷地外の市民に健康被害が出るリスク上位構造例

実施の分析ではAに続くシナリオを分析する事で、炉心の発生するリスクに関するその原因や発生確率等の対応に有効な情報を得ることができる。また、Bに続くシナリオを分析する事で、放射性物質を炉外に放出するに至る可能性を把握することができる。この際、フィルターベント等が機能せずに多量の放出となった場合とフィルターベントは機能したが少量の影響が出た場合は、リスクとして区別する必要がある。

さらに、放射性物質が敷地外に放出された場合でも、避難対応が機能すれば健康被害の発生を防ぐことができるために、市民の健康被害リスクには、避難対応が上手いかわからないリスクを検討する必要がある。

この際、事前に検討した避難計画通りに対応が実施されたのに健康被害が発生する可能性のシナリオCを検討とすることによって、対象としている避難計画の前提の課題を検討課題が明らかになったり、計画していた避難行動が実施出来なかったりすることによる結構被害の発生リスクシナリオDを検討することで対象となる避難計画の実効性を検証することが可能となる。

3.3 リスクの評価にシミュレーション等の詳細な分析を行う事例

本節では、原子力発電システムの安全に重要な影響をもたらす事例として、地震時における炉心損傷確率のシミュレーションの事例を示す。

下図は、SMRが有する設計上の特徴を考慮した場合に、従来型の原子炉と比較してどのようなリスクが想定されるのかを分析した一例であり、横軸に地震最大加速度（Peak ground acceleration）を縦軸にその加速度における条件付炉心損傷確率を示している。このようなシミュレーションによる評価結果を用いると、不確実さも含めた数値的なデータとして定量的にリスクを比較できるようになる。

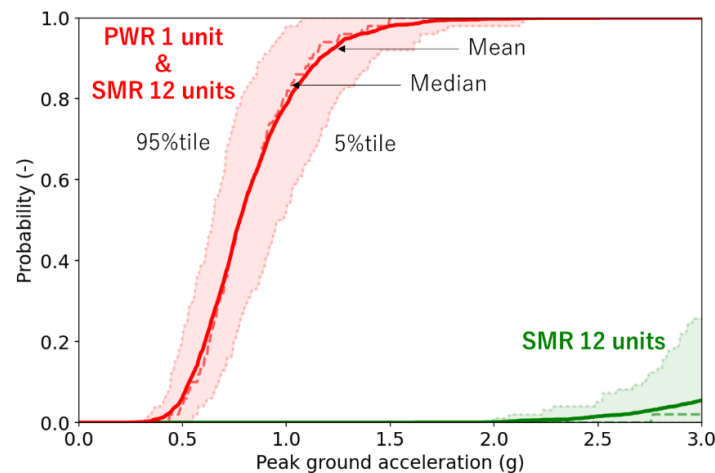


図 PWR1 基及び SMR12 基が立地するサイト全体の炉心損傷確率
(SMR12 基の炉心損傷確率と併記)