

3.3 原子力区分

2.2.2 で述べたように、原子力区分においては、(1) 原子力をより安全に維持・活用する場合に取り組むべき研究課題、(2) 原子力の将来にかかわらず取り組むべき研究課題、(3) 原子力に依存しない場合に取り組むべき研究課題、の3つの観点から構成し、原子力の利用を社会的な観点から俯瞰的に捉え、諸課題を図のように抽出・整理した。領域の構成は、「原子力発電の社会的位置づけが明確となる目次構成とすること」、「持続可能な社会が実現していくためのグローバルな視点、地球全体の視点を入れること」、「社会がどう受け入れるか考慮すること」を基本的な方針とした。

(1) 原子力をより安全に維持・活用する場合に取り組むべき研究課題 については、以下の8領域を選定した。

- 3.3.1.1 リスク評価と管理の手法
- 3.3.1.2 原子炉の設計・建設・維持
- 3.3.1.3 原子炉の保全学
- 3.3.1.4 原子力に関する防災
- 3.3.1.5 過酷事故への対応
- 3.3.1.6 原子力基盤技術の開発
- 3.3.1.7 新型炉（核融合含む）の研究・開発
- 3.3.1.8 核燃料サイクルの技術

(2) 原子力の将来にかかわらず取り組むべき研究課題 については、以下の14領域を選定した。

- 3.3.2.1 高レベル放射性廃棄物の管理・処分
- 3.3.2.2 低レベル放射性廃棄物の管理
- 3.3.2.3 使用済み核燃料の管理
- 3.3.2.4 プルトニウムの管理手法
- 3.3.2.5 ウラン廃棄物の管理手法
- 3.3.2.6 原子炉の廃止措置（デコミ）
- 3.3.2.7 福島第一原子力発電所事故への対応
- 3.3.2.8 環境修復の手法
- 3.3.2.9 環境・人体への放射線影響（防護含む）
- 3.3.2.10 原子力に関するリスクと人間・社会
- 3.3.2.11 原子力に関する規制
- 3.3.2.12 3S（原子力安全、核セキュリティ、保障措置）
- 3.3.2.13 原子力に関する国際的視野
- 3.3.2.14 原子力の政治経済学

(3) 原子力に依存しない場合に取り組むべき研究課題 については、以下の1領域を選定した。

3.3.3.1 国際的視野、社会的視野を含んだ原子力に依存しないための戦略
 なお、原子力発電に依存しない場合において（2）の3.3.2.3～3.3.2.6の4領域は、特に考慮すべき共通項目であることを明記した。

これ以降、各領域の詳細な内容を記述する。

なお、原子力区分に関しては、多くの略語が本文中に記載されているため、447頁以降に略語一覧を掲載した。

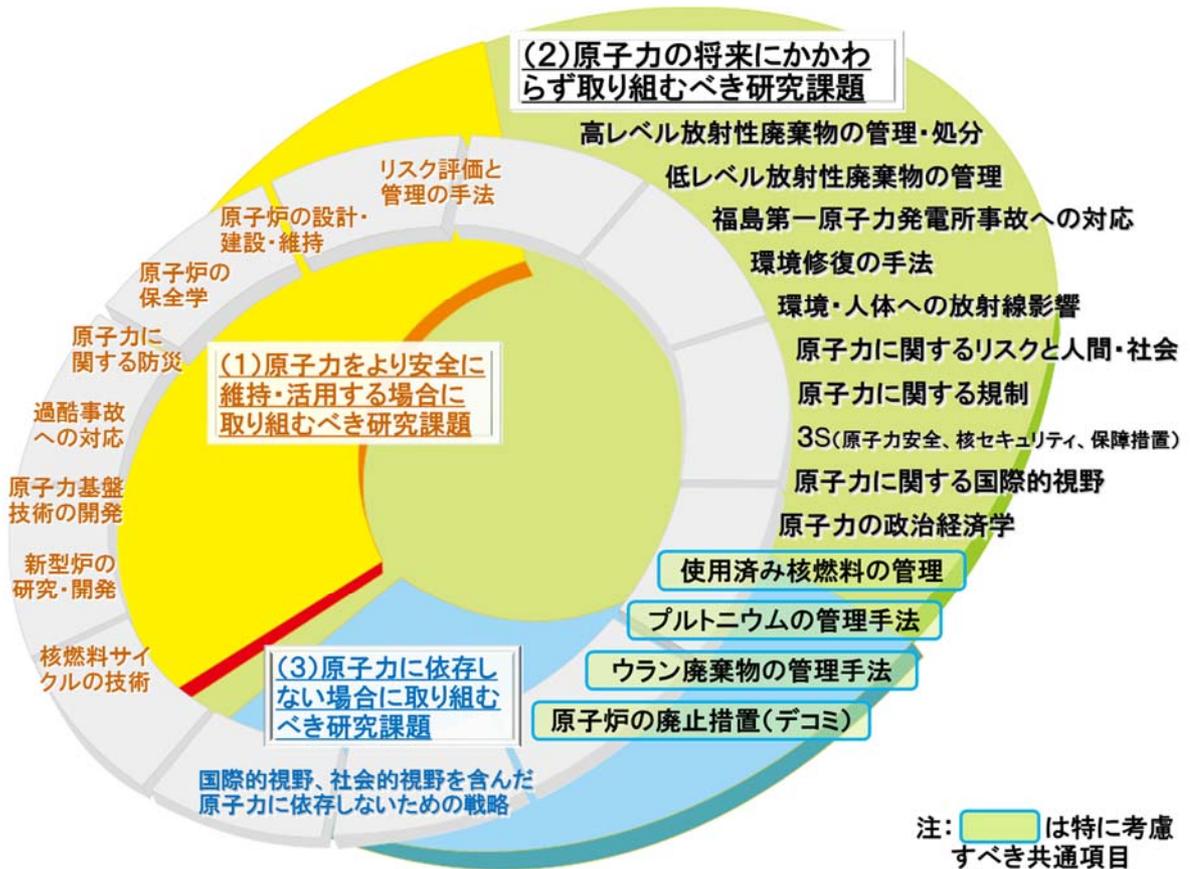


図 2.2.20 原子力区分の俯瞰図（再掲）

3.3.1 原子力をより安全に維持・活用する場合に取り組むべき研究課題

3.3.1.1 リスク評価と管理の手法

(1) 研究開発領域名

リスク評価と管理の手法

(2) 研究開発領域の簡潔な説明

原子力施設におけるさまざまなリスクを定性的・定量的に評価する手法の開発。また、その評価結果を活用し、原子力施設の安全性向上対策などを効果的に行うための管理手法の開発。

(3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

東京電力福島第一原子力発電所事故（以下、福島第一原子力発電所事故）により、原子炉施設、再処理施設、核燃料加工施設などの原子力施設全般の安全性向上が極めて大きな課題になっている^{1,2)}。

一般に、科学技術において絶対安全は存在せず、安全な状態とはリスクが受容可能なレベルまで低減されていることとされている。すなわち、この受容可能なレベルを安全上の目標（安全目標）と考えることができる。安全目標を設定する際には、「どこまで安全であれば十分に安全か？（“How safe is safe enough?”）」が一つの大きな問題となり、古くから繰り返し問われてきた。原子力関連施設においては、原子力施設が存在することによる付加的なリスクが、日常のリスクに比べて有意なレベルでないことという考え方が国際的に採用されている³⁾。

安全の定義上、原子力施設の安全性は、それらのリスクを定量評価することによって、初めて明らかにできる。そのリスク評価手法は、リスクトリプレットと呼ばれる、以下の三つの質問に対する答えを与えるものと考えることができる：What can go wrong?（何がどのように起こるのか）、What is the likelihood of that happening?（どれくらい起こりやすいか）、What are the consequences?（起こった場合の影響は）。リスク評価手法は、評価対象とするハザードの特徴に応じて定性的から定量的までさまざまな手法が存在する⁴⁾が、以下では代表的な手法についてその概要を説明する。

1) 定性的評価によるスクリーンアウト手法：福島第一原子力発電所事故の主要因が大津波であったように、原子力施設の外部で発生するハザードは、施設の安全性に大きな影響を及ぼす可能性がある。したがって、地震、津波、洪水、高潮、火山、森林火災、航空機落下など数十にも及ぶ外的ハザードに対するリスクを評価対象とする必要がある。これらのハザードの中には、明らかに施設の安全性に影響を及ぼさないものもあり、①発生頻度が極めて小さいことが明確か、②当該のハザードの影響が及ぶ範囲内にプラントが存在しないことが確認できるか、③当該のハザードが進展していくタイムスケールがプラントの寿命に比べて十分長いか、④ハザードが到達したと想定しても炉心損傷につながる起因事象を引き起こさないか、などの判断基準により、当該ハザードをより詳細なリスク評価の対象とすべきかどうか、予備的にスクリーニングすることが可能である。本手法は、比較的实施が容易であるが、一方で非常に複雑な事故進展などを扱うことはできない。福島第一原子力発電所事故の背後要因の一つとし

て、外的ハザードに対する包絡的なリスク評価が行われていなかったことが指摘されており²⁾、日本原子力学会において外的ハザードに対するリスク評価手法の標準策定が進められている。

- 2) 保守的バウンディング評価：定性的評価により除外できなかったハザードについて、保守的な（安全側の）解析条件設定を行い、その条件においてもハザードが施設にリスクを与えないことを評価する手法である。条件設定によっては、保守性が非現実的なほど大きくなる可能性がある。
- 3) 確率論的リスク評価：確率論的リスク評価（PRA：Probabilistic Risk Assessment）は、原子力施設の内外で発生するハザードに起因して発生する炉心損傷確率、格納容器閉じ込め機能喪失確率、放射性物質放出量、周囲への影響などを定量評価する手法である。核燃料が溶融するなど、炉心が大規模に損傷する炉心損傷事故が発生する確率の評価をレベル 1PRA、事故時の放射性物質閉じ込めのために設置されている格納容器の閉じ込め機能喪失が発生する確率およびその際に外部に放出される放射性物質量の評価をレベル 2PRA、外部に放出された放射性物質による周囲への影響評価をレベル 3PRA と呼んでいる。確率論的リスク評価では、時間とともに進展する事故の様相（事故シーケンス）を、機器動作や運転員操作の成功・失敗により枝分かれする樹形図状のイベントツリーによって展開する。機器動作や運転員操作などの成功・失敗確率を与えることにより、炉心損傷に至る事故シーケンスを特定し、また、その確率を定量的に評価することができる。この評価結果は、プラントの脆弱性を特定する際に特に有用であると考えられている。確率論的リスク評価は、原子力分野で開発された手法で^{5, 6)}、大規模かつ複雑な体系におけるリスクを定量評価できることから、航空や宇宙など他分野においても利用されている。確率論的リスク評価は、事故シーケンスを網羅的に確認できる、複雑なシステムにおけるサブシステム間の干渉効果を定量評価できる、評価結果の不確かさを確認できるなどの優れた特徴がある一方、解析モデルを作成するのに非常に大きな労力を要する、非常にまれな事象を扱うため、確率を実績データに基づいて設定できない場合がある、未知のメカニズムに基づく事故進展を取り扱うことができない、モデルにあたって仮定や前提を用いる必要がありその妥当性の吟味が必要、操作ミスあるいはリカバリー操作などの人的要因の取り込みにさらなる検討が必要、などの課題がある。外的ハザードに対する確率論的リスク評価は、今後取り組みを強化していく必要があるが、特に影響が大きいと考えられる地震および津波に対する確率論的リスク評価手法が日本原子力学会の標準として整備されている^{7, 8)}。
- 4) 安全余裕度評価（ストレステスト）：原子力施設の事故は、「想定外」により発生する場合がある。この「想定外」には三通りあり、①事象自体は考慮していたが実際に発生した事象が設計時の想定を上回っていた場合、②事象自体は認識していたが発生確率が低いと認識し設計時に想定していなかった場合、③事象自体が認識されていなかった場合、である。このような「想定外」が発生した場合でも、設計限界に至るまでの安全余裕により、その影響を吸収できる場合がある。そこで、さまざまなハザードに対する安全余裕を評価することで、原子力施設のリスク低減の傍証とすることが可能であると考えられる。これが安全余裕度評価（ストレステスト）と呼ばれるもので

あり、欧州において、原子力施設の安全余裕の評価手段の一つとして用いられている⁹⁾。

(4) 研究開発推進上の課題・ボトルネック (科学技術的課題、政策的課題)

1) 包絡的外的ハザード評価手法の開発

原子力施設において考慮すべき外的ハザードの種類は極めて多く、これらの外的ハザードによるリスクを包絡的に評価する手法を検討・開発していく必要がある。すべての外的ハザードに対して、詳細な確率論的リスク評価を適用することは難しいため、効果的な定性的スクリーニングの利用も合わせて検討を行っていく必要がある。

2) ハザードカーブの設定

一般に外的ハザードは、その影響が大きくなるほど発生頻度が減少する。ハザードの大きさと発生頻度の関係性を評価したものをハザードカーブと称する。地震や津波によるリスク評価において、ハザードカーブは重要な入力となるが、これを適切に設定する必要がある。ハザードカーブの設定は、関連する学協会間で、その利用目的を十分に共有した上で密に連携を取りつつ実施する必要がある。

3) 標準の策定

リスク評価手法は、実施手順や評価条件を明確に文書化した標準やガイドの形にすることが望まれる。リスク評価は、評価範囲 (レベル 1:炉心損傷、レベル 2:格納容器機能喪失、レベル 3:敷地外影響)、原子力施設の状態 (例えば発電用動力炉であれば、停止時、出力運転時)、事故の原因となる事象 (施設内部、施設外部自然現象、施設外部人的事象) を考慮して行う必要があるため、そのスコープはこれらの組み合わせとなり広範囲にわたる。これらの組み合わせのうち、より優先度が高いスコープに対して検討・開発・標準策定などを進めていく必要があり、そのためには、関連する学協会などでの協議が必要である。

4) 複数ハザード・マルチユニット・マルチサイトに対するリスク評価

外部ハザードは、複数のハザードを引き起こすことがある (例:地震の後の火災)。このような複数のハザードが同時に発生する場合のリスク評価手法についての取り組みを強化する必要がある。また、外部ハザードは複数の原子炉 (マルチユニット)、複数の発電所サイト (マルチサイト) において同時に影響を及ぼす可能性があり、このような状態におけるリスク評価の定量化も重要である。

5) リスク評価手法の高度化

最先端のシミュレーション技術を用いることで、地震動による原子力施設の建屋および内部に設置されている機器の振る舞い、津波の遡上と波力が施設に及ぼす評価などを、詳細な物理モデルに基づいて評価可能となりつつある。現在のリスク評価においては、設計で想定されたハザードがある大きさを超えると、設備などが機能喪失するとして保守的な評価がなされている場合が多い。しかし、実際には、設計時における機器の耐力の余裕、ハザード評価時の保守的な前提などにより、潜在的な安全余裕があると考えられる。最先端のシミュレーション技術により、より現実的な耐力評価を行うことにより、原子力施設が潜在的に有している安全余裕を定量化することが可能となり、これによりリスク評価結果の不確かさを低減することが可能となる。

6) 人材の確保と養成

国内においては、これまで確率論的リスク評価などのリスク評価に対する取り組みが、特に大学において限定的であったことから、リスク評価全般に係わる人材が不足している。大学での人材育成も合わせて原子力関連工学科、原子力関連専攻以外でも体制の強化に取り組む必要がある。

(5) 注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

福島第一原子力発電所事故に関する各種報告書では、リスク低減の取り組みを体系的に検討する上で、これまで確率論的リスク評価が効果的に活用されてこなかったことから、リスクの定量評価手法を活用し、安全性向上策を構築すべきであるとの指摘がなされている¹⁾。

2013年7月に施行された原子力規制委員会による動力炉に対する新規制基準においては、炉心損傷を含む重大事故への安全対策を求めている。この際、原子炉の炉型（加圧水型軽水炉、沸騰水型軽水炉）ごとに、代表的な事故シーケンスを確率論的リスク評価に基づき設定し、さらに、個別プラントにおいて確率論的リスク評価を実施することで、個別プラントの特性を加味した形で有意な炉心損傷・格納容器損傷を引き起こす事故シーケンスの同定を求めている。また、これらの事故シーケンスに対して安全対策の有効性評価を求めている。5年ごとに原子力事業者が実施する「総合的な安全性評価」においては、個別プラントに対して確率論的リスク評価を実施し、安全対策を行う上でこの結果を活用することを求めている。このように、リスク評価手法が規制に利用されつつある。

福島第一原子力発電所事故を受けて設置された総合資源エネルギー調査会原子力の自主的安全性向上に関するワーキンググループにおいては、リスクマネジメントが最重要課題として取り上げられ、低頻度の事象を見逃さない網羅的なリスク評価の実施、深層防護の充実を通じた残余のリスクの低減、我が国特有の立地条件に伴う地震・津波などの外的事象に着目したプラントごとの事故シーケンスおよびクリフエッジの特定と、既存のシステムでは想定されていない事態への備えおよび回復を含むレジリエンスの向上などが提唱されており、リスク評価への取り組みが原子力事業者の動きとして行われている¹⁰⁾。

(6) キーワード

安全目標、定量的リスク評価、定性的リスク評価、総合的リスク低減、ストレステスト、外的ハザード評価、確率論的リスク評価

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> 福島第一原子力発電所事故の教訓として、確率論的リスク評価の活用を含むリスク評価の重要性が再認識されている。標準の策定、リスク評価手法の高度化などさまざまな取り組みが精力的になされている。 一方で、福島第一原子力発電所事故以前の取り組みは低調であったことから、米国などに比べると遅れがある。
	応用研究・開発	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> 発電用原子力プラントやその他の原子力施設における重大事故評価の際、確率論的リスク評価によって事故進展シナリオの特定が行われ、この事故シナリオに対して安全性評価が求められるなど、規制への導入が進んでいる。ただし、取り組みは緒に就いたばかりである。
	産業化	×	→	<ul style="list-style-type: none"> リスク評価手法ソフトウェアの自主開発などの取り組みはまだなされていない。
米国	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> 1970年代から確率論的リスク評価に対する取り組みがなされ、広い範囲で基礎研究が行われている。外的事象に対する包絡的なリスク評価も1990年代に実施されている。
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> 1979年のスリーマイル島2号機事故を契機として、本格的にリスク情報を活用した規制が行われている。すべての規制上の意思決定において、確率論的リスク評価を活用する方針がとられている。
	産業化	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> 確率論的リスク評価の際、国際的に用いられているソフトウェアが開発され、商業ベースで提供されている。
欧州	基礎研究	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> 原子力発電所を多数有するフランスでは、1990年代初頭から確率論的リスク評価が実施されている。
	応用研究・開発	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> 2012年に、従来の安全評価（決定論的手法に基づく）を補完するものとして、規制において確率論的リスク評価を導入することをフランスが決定。 英国では、1980年代にサイズウェルB原子力発電所（加圧水型軽水炉）導入の際にレベル1～3の確率論的リスク評価が実施されている。 フィンランドでは、1980年代に設定された規制指針において、新設炉に対して設計時に考慮すべき確率論的設計目標が示されている。
	産業化	×	→	<ul style="list-style-type: none"> 商業用ソフトウェアの開発など、目立った動きはみられない。
中国	基礎研究	×	→	<ul style="list-style-type: none"> リスク評価手法に関する国際会議などにおいては、研究開発に関する報告はあまりなされていない。
	応用研究・開発	×	→	<ul style="list-style-type: none"> 応用研究について、目立った動きはみられない。
	産業化	×	→	<ul style="list-style-type: none"> 産業化について、目立った動きはみられない。
韓国	基礎研究	△	→	<ul style="list-style-type: none"> リスク評価手法に関する国際会議などで研究開発に関する報告がなされている。
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> 応用研究について、目立った動きはみられない。
	産業化	△	→	<ul style="list-style-type: none"> 産業化について、目立った動きはみられない。

（註1）フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

（註2）現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○：ある程度の活動・成果が見えている、

△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
(註3) トレンド
↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

(8) 引用資料

- 1) 「原子力安全に関するIAEA閣僚会議に対する日本国政府の報告書」, 原子力災害対策本部, (平成23年).
- 2) 「福島第一原子力発電所事故 その全貌と明日に向けた提言: 学会事故調 最終報告書」, 日本原子力学会, (2014年).
- 3) 「平成15年度版原子力安全白書」, 第3章, 原子力安全委員会, (平成15年).
<http://www.nsr.go.jp/archive/nsc/hakusyo/hakusyo15/mokuji.html>
- 4) “Perspectives Gained From the Individual Plant Examination of External Events (IP-EEE) Program,” NUREG-1742, (2002).
- 5) J. W. Hickman, et al. “PRA Procedures Guide: A Guide to the Performance of Probabilistic Risk Assessments for Nuclear Power Plants,” NUREG/CR-2300, NRC, (1982).
- 6) Lee McCORMICK (著), 西原 英晃, 杉本 純, 村松 健(訳), 「原子力発電システムのリスク評価と安全解析」, 丸善出版, (2013).
- 7) 「原子力発電所の地震を起因とした確率論的安全評価実施基準: 2007(AESJ-SC-P006:2007)」, 日本原子力学会, (2007).
- 8) 「原子力発電所に対する津波を起因とした確率論的リスク評価に関する実施基準: 2011(AESJ-SC-RK004:2011)」, 日本原子力学会, (2011).
- 9) http://ec.europa.eu/energy/nuclear/safety/stress_tests_en.htm
- 10) 総合資源エネルギー調査会原子力の自主的安全性向上に関するWG会合資料, (2013～2014).
http://www.meti.go.jp/committee/gizi_8/21.html#anzen_wg

3.3.1.2 原子炉の設計・建設・維持

(1) 研究開発領域名

原子炉の設計・建設・維持

(2) 研究開発領域の簡潔な説明

主として発電用原子炉施設の設計、建設および維持に関わる研究および開発

(3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

現在、世界各国における発電用原子炉の主流は、軽水炉である。本稿では、主として発電用軽水炉の設計、建設および維持に関わる研究・開発について述べる。

1) 設計・建設

米国において 1950 年代に開発された加圧水型および沸騰水型の 2 タイプの軽水炉が日本国内に導入され、使用されている。1950～1960 年代中旬にかけて建設された原子炉は第 1 世代炉と呼ばれ、日本国内では旧原子力研究所に建設された動力試験炉 (JPDR、廃止措置済) がこの世代に相当する。第 2 世代炉は 1990 年頃までに建設されたものであり、発電用原子炉としては敦賀 1 号機 (沸騰水型)、美浜 1 号機 (加圧水型) など、実用化後のもっとも初期の発電プラントを含んでいる。第 2 世代炉の建設は、当初、米国の原子炉メーカーからの技術導入によって進められ、後に国産化率が向上した。第 3 世代炉は、第 2 世代炉の運用経験を踏まえ、国内の技術開発を元に安全設備の強化、熱効率の向上、設計の標準化などが進められたものであり、1990 年頃以降に建設されている^{1,2)}。

現在の最新の原子炉は、第 3+ 世代と呼ばれるもので、国内メーカーが開発した ABWR、APWR、米国 Westinghouse 社が開発した AP1000、米国 GE 社が開発した ESBWR、フランス フラマトム社が開発した EPR などがその代表例である。第 3+ 世代炉心は、反応度制御系の多様化、冷却系の多重化、系統分離の強化、物理現象に基づき動作に動力源を要しない受動安全系の導入、航空機落下への設計対応、過酷事故への設計対応、長期間の全交流電源喪失への対応など、第 2, 3 世代炉と比べより強化された安全設備が導入されている。第 3+ 世代炉は、ほぼ実用化の段階に入っており、海外において新規原子力プラントとして導入が進みつつある³⁾。

第 4 世代炉は、2030 年以降に導入が計画されている革新型の原子炉であり、現在研究が進められている。受動安全系の大幅な導入、物理的な現象を用いた原子炉の反応度制御 (固有安全性) の強化、核物質の軍事転用を困難とする技術の導入 (核拡散抵抗性・核物質防護性)、発電コストの低減 (経済性) などを目指して、超臨界圧軽水炉、ナトリウム冷却高速炉、鉛冷却高速炉、超高温ガス炉、ガス冷却高速炉、熔融塩炉の 6 タイプが第 4 世代原子力システム国際フォーラムで選定され、研究開発が進められている⁴⁾。

近年、米国では小型・長寿命でモジュール型の原子炉が注目を集めており、エネルギー省が研究資金を提供している。従来のように大型の原子炉を単独で設置するのではなく、小型の原子炉を複数基設置する考え方である。原子炉を小型化することで原子炉停止後の崩壊熱除去が容易になるなど、固有安全性・受動安全性が向上する反面、スケー

ルメリットが活かしにくくなり、建設コストが上昇する可能性がある。これらの中小型炉は、既存の電力ネットワークによる電力供給が困難な遠隔地などでの電力・熱供給にも合わせて期待が持たれている。

福島第一原子力発電所事故以降、国内では、原子力への依存度をできるだけ低減する方向となっている。一方、海外においては、特に新興国を中心に旺盛なエネルギー需要に応える形で、新規原子力発電所の建設計画が進められている。国際エネルギー機関によると⁵⁾、世界の原子力発電の発電量は、2011年の2584TWhから、2035年には4294TWhに約70%増加する見通しが示されている。アジアにおいては、中国において100基以上、インドにおいて約40基の建設計画があるなど、原子力の大幅な導入が計画されている。またベトナム、タイ、マレーシア、アラブ首長国連邦、サウジアラビア、トルコなどで新規に原子力を導入する計画が進められている³⁾。

2) 維持

国内においては、1960年代中頃から商業用軽水炉が導入され始めており、運転開始後、30年以上経過している経年プラントの数が増えている。原子力発電プラントでは、原子炉圧力容器、格納容器、ベースマット（基礎）コンクリートなどの少数の例外を除き、機器の交換が可能であり、定期検査時に行う点検結果などから機器の劣化状況を把握・予測し、予防的に機器の交換を行っている。取替が困難な機器については、劣化の状況を定期的に計測・評価している。また、運転開始後30年を迎える原子力発電プラントについては、30年を超えるまでに、原子炉施設の安全性を確保するための機器・設備について経年劣化に関する技術評価を行い、この評価結果に基づき、30年を超えてからの10年間に実施すべき保守・維持管理に関する方針を定めている。経年劣化に関する技術評価については、安全確保の観点から、非常に幅広い研究開発がなされている。

国内においては、2012年に改訂された原子炉等規制法により、発電用原子炉施設の運転期間は、運転開始後40年とされている。ただし、原子力規制委員会の認可を受けることで、1回に限り20年間を超えない期間（政令で定める）において、運転期間を延長できるとされている。海外においては、米国やスウェーデンにおいて、機器の余寿命などの評価を通じて安全性確認が行われ、運転開始後60年までの運転許可が発給されつつある状況である。

また、維持のみならず、福島第一原子力発電所事故を受けて、既存の軽水炉に対する安全対策が強化されつつある。従来の規制では事業者の自主的対応とされてきた炉心損傷などの過酷事故への対応が新たに規制要件化され、既設の原子力発電所に対しても、バックフィットの形で対応が要求されている。新規基準においては、意図的な航空機落下などの人為事象に対する対応も要求されている。このため、原子炉建屋と隔離された場所に、過酷事故に対応するための制御盤や冷却系などの安全機器を新たに設置することを求めている。また、格納容器が過酷事故時の過大な圧力により損傷するリスクを低減するため、格納容器圧力を低減するフィルタードベントなどの設置が要求されている。

(4) 研究開発推進上の課題・ボトルネック (科学技術的課題、政策的課題)

1) 原子炉設計技術の維持・発展

国内において、原子力への依存低減の方向から新規原子力発電所の設置が困難である状況のもと、原子炉の設計技術の維持・発展が大きな課題になる⁶⁾。伊勢神宮の遷宮にみられるように、技術の伝承は20年単位で行っていく必要がある。一般に20年経過すると技術を所有している人材が入れ替わることから、技術伝承が困難になると言われている。米国では、1970年代以降、30年以上にわたって新規発電用プラントの建設がなかったが、その間に原子炉圧力容器の製造技術などが失われ、現在では、大型機器の多くを海外(特に日本)に依存している状況である。原子炉の設計技術は、安全確保のためにも不可欠であることから、その維持に対する取り組みをどのように進めていくかが課題となる。

2) サプライチェーンの確保

原子力発電所の設計・建設・維持は、非常に幅広い分野に及ぶ。したがって、いわゆる原子炉設計メーカーのみならず、幅広いサプライチェーンが存在して成り立つものである。一方で、2014年8月現在、国内で稼働している原子力発電所はなく、原子力発電所の停止期間が延びるほど、このサプライチェーンを維持することが困難な状況になると予想される。

3) 人材の確保

福島第一原子力発電所事故の後、原子力分野に進む学生の数が減少しており、将来的に原子力発電所の設計・建設・維持に関する活動に大きな影響が出ることが懸念されている。特に、安全確保の面から影響が出る可能性があることが大きな課題としてあげられる。原子力は総合工学であることから、原子力分野のみならず、土木・機械・電気工学などから原子力に係わる人材を集める方策についても検討が必要である。

4) 経年評価技術の高度化

現在、経年劣化の評価は、個々の機器に対して実施されている。この評価結果は、機器の取替やメンテナンスなどの保全活動の入力として用いられている。一方、将来にわたって、個々の機器の経年劣化がプラントの安全性に与える影響を定量的に評価するためには、1)個々の機器の経年劣化予測、および2)原子力発電所をシステムとしてみたときの各機器の経年劣化の影響、の二つの観点から評価を行う必要がある。経年劣化の進展予測を行うためには、さまざまな劣化モードに対して物理的・現象論的な理解を深める必要があるが、特に材料系の劣化に関しては、まだ十分な理解が得られていないものもあり、継続して物理的現象の解明に取り組む必要がある。これらの経年劣化の予測を受けて、各機器が地震などの外的ハザード時に機能喪失する確率を評価し、その機能喪失確率を確率論的リスク評価の入力として用いることで、個々の機器の経年劣化事象がプラント全体のシステム安全にどの程度影響するかを定量的に評価することが可能となる。このような取り組みはまだ緒に就いたばかりであり、経年プラントの数が増加して行く中、今後の進展が期待される。

5) 安全対策の高度化

福島第一原子力発電所事故の教訓を受け、既設の原子炉に対する安全性の向上策を積極的に行う必要がある。このためには、例えばリスク情報の活用など、従来十分に取り

組まれていなかった課題を系統的に解決していく必要がある。その観点から、安全性の高度化に必要となる技術ロードマップの策定を通じて研究課題を整理しておくことが望まれる。

(5) 注目動向 (新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など)

現在、米国、中国、フィンランドにおいて第3+世代炉の建設が進められている。また、米国内においては、複数の立地点において、第3+世代炉の導入計画があり、米国原子力規制委員会 (NRC : Nuclear Regulatory Commission) の認可を受けつつある状況である。

第3+世代炉は、もともと動力源を必要としない受動的な安全システムが特徴の一つであったが、福島第一原子力発電所の事故後、その重要性が再認識され、特に長期間の全交流電源喪失への対応が強化されている。第3+世代炉では、受動系の安全機器により、72時間にわたる余裕時間 (運転員が介入しなくても安全が保たれる期間) が一般的に確保されている。

高温ガス炉は、その高い固有安全性能から、あらたに脚光を浴びている⁷⁾。この炉型では、燃料を含む微粒子を炭化ケイ素 (SiC) で被覆し、その被覆粒子燃料を黒鉛からなる母材の中に分散させた形で燃料コンパクトを作成し、この燃料コンパクトを減速材の黒鉛ブロック中に規則的に配置することで炉心を構成している。冷却は、一般的にヘリウムガスが使用されている。高温ガス炉は冷却材出口温度が非常に高い (900℃以上、軽水炉は300℃程度) ことから、この熱そのものを利用して化学的なプロセス (ISプロセス) を通じて水素製造などを行うことが検討されている。高温ガス炉は、被覆粒子燃料および減速材の黒鉛の耐熱性能が非常に高いこと、冷却材に不活性のヘリウムガスを使っていること、炉心の温度上昇により核分裂が抑制される特性があること、炉心内の黒鉛の熱容量が大きく温度変化が緩やかであることなどから、高い固有の安全性を有している。そのため、長期間の全交流電源喪失など、軽水炉では厳しい事象においても、輻射と自然対流により崩壊熱を除去可能であり、動的機器の動作を期待しなくても炉心損傷に至ることはない設計が可能であるとされている。我が国においては、2014年に策定されたエネルギー基本計画において、高温ガス炉の開発を国際協力のもとに推進することが示されている。

(6) キーワード

第3世代炉、第3+世代炉、第4世代炉、高温ガス炉、経年劣化、メンテナンス、サプライチェーン

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> 福島第一原子力発電所事故後、安全研究基盤の再構築が急がれている。また、原子力分野に関わる人材を確保・育成する方策について政府としての取り組みがなされている。 原子炉の安全評価に使用するソフトウェアの一部に海外（特に米国）のものが使用されており、ソースコードの開示制限が生じた場合の影響などが懸念されている。このため、ソフトウェアの国産化の取り組みも行われている。
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> 主として、安全性向上に関する研究が精力的に行われている。特にシビアアクシデント関係の研究が多く行われている。
	産業化	○	↓	<ul style="list-style-type: none"> 設計・建設に関しては、海外における新規発電所の受注への取り組みがなされている。 一方で、国内において、新規プラントの建設が不透明であり、サプライチェーンの維持などが課題となっている。
米国	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> 設計から維持まで、幅広い分野において基礎研究がなされている。 大学、国立研究所、民間の協働体制がうまく機能しており、これに対して、米国エネルギー省 (DOE: United States Department of Energy) などの資金が配分される形となっている。
	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> 原子炉の安全評価に広く用いられるソフトウェアを開発・メンテナンスするなど、応用研究についても幅広い分野で取り組まれている。
	産業化	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> 新規プラントの建設が進行中であり、複数の立地点において、新規プラントの建設計画がある。これらに対し、米国のプラントメーカーが主として契約を獲得している。 一方、長期間にわたって米国内で新規プラントの建設がなかったことから、主要機器 (圧力容器など) の製造技術が米国内から失われており、これらを海外に依存している。
欧州	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> フランスでは基礎研究が継続して行われている。ドイツにおいては、脱原子力政策がとられているが、安全確保のための基礎研究の重要性が認識されている。
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 脱原子力政策がとられているドイツ、スイス、ベルギーなどでは、応用研究は限定的である。フランスでは、応用研究も含めた取り組みがなされている。安全性評価に関しては、欧州として、原子炉の安全評価を行う統一ソフトウェアの研究開発が行われている。
	産業化	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 東欧、フィンランド、英国などにおいて、新規プラントの建設、計画が進められている。
中国	基礎研究	△	↑	<ul style="list-style-type: none"> 原子力発電の導入を積極的に進める方針であることから、研究開発に従事する人数は多い。 基礎研究の内容は急速に充実しつつある。また、国際会議などでの研究成果発表も積極的に行われている。
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 国内で多くのプラントが建設中であり、また、建設計画も多い。 これらに関連し、多くの実用化研究が行われている。
	産業化	△	↑	<ul style="list-style-type: none"> プラントの建設は、現時点では海外の技術導入によって進められている。
韓国	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 米国に留学経験のある指導者が、欧米との協力関係のもと、広く基礎研究を進めている。
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 国内に多様なタイプの原子炉があり、幅広く応用研究がなされている。
	産業化	○	→	<ul style="list-style-type: none"> アラブ首長国連邦の新規原子力プラントの建設を受注するなど、積極的にプラントの海外輸出に取り組んでおり、政府としてこの取り組みをサポートしている。

(註1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

(註2) 現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○：ある程度の活動・成果が見えている、

△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

(8) 引用資料

- 1) 「軽水炉発電所のあらし」, 原子力安全研究協会, (2008).
- 2) 日本の原子力発電開発の歴史、ATOMICA.
http://www.rist.or.jp/atomica/data/dat_detail.php?Title_Key=16-03-04-01
- 3) 世界の原子力発電開発の動向（プレスキット）、日本原子力産業協会、(2014).
http://www.jaif.or.jp/ja/joho/press-kit_world_npp.pdf
http://www.jaif.or.jp/ja/joho/index_press-materials.html
- 4) 第4世代炉の概念、ATOMICA.
http://www.rist.or.jp/atomica/data/dat_detail.php?Title_Key=07-02-01-11
- 5) “World Energy Outlook 2013,” International Energy Agency, (2013).
- 6) 今後の原子力政策について、総合資源エネルギー調査会、基本政策分科会資料、資源エネルギー庁, (2013).
http://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/007/pdf/007_002.pdf
- 7) 原子力技術開発の動向、総合資源エネルギー調査会、基本政策分科会資料、資源エネルギー庁, (2013).
http://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/008/pdf/008_003.pdf

3.3.1.3 原子力の保全学

(1) 研究開発領域名

原子力の保全学

(2) 研究開発領域の簡潔な説明

原子力発電所などにおける安全を確保するためには、設計製作において十分な余裕をもってシステムが稼働することを保証することが重要である。一方で、これらのシステム（機器だけではなく、組織などのソフト的なものも含む）は、時間とともに劣化する。ハード的には腐食や振動などによる構造の劣化などに伴い、配管や弁などが損傷することによって、本来、設計で保障されている機能が担保できなくなる。ソフト的には、人事異動や慣れなどにより、設計で期待されているマネジメントが遂行できなくなり、機能が担保できなくなる。これらの機能が、時間の経過があつたとしても、安全を確保するために十分な余裕をもって担保されていることを保証することが保全である。原子力発電所や飛行機などの複雑なシステムになればなるだけ、保全の考え方が重要となる。40年や60年にわたる長期間、安全を確保するためには、常に新しい保全学を開拓し続けていくことが重要である。

(3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向^{1,2)}

保全学は、ハード的な機器の機能維持を担保するための領域と、ソフト的なマネジメントシステムとしての組織を含めた機能維持を担保するための領域に大きく分けられる。これらは相互に関連している。

機器やシステムシステムの機能維持を担保するための保全学には、運転・保守管理などを含めた通常時の保全学と、長期的な維持管理を担保するための高経年劣化管理に関する保全学がある。いずれも、内容はオーバーラップしている。

運転・保守管理などを含めた保全においては、リスク情報を活用する保全を構築することが重要である。数十万点に及ぶ機器やシステムシステムについて、もっともリスクを低減する保全の手法を開発し、また優先度や重要度を明確化したうえで、重要なシステムに対して重厚な保全を実施することになる。このリスク情報を保全に活用することがもっとも進んでいるのは米国である。発電所のリスクを定量的に数字で求め、保全の手法についての意思決定を、リスクを元に実施している。このためには、確率論的リスク評価（PRA : Probabilistic Risk Assessment）と呼ばれる定量的リスク評価手法を確立するとともに、その信頼性を高めるための努力が必要である。米国や台湾においては、PRAを現場の保全に活用することで、安全性を高めると同時に、PRAの信頼性を大幅に高める努力を継続してきている。一方、日本では、PRAを保全に用いる試みは、停止時などに一部用いられているが、ほとんど使われていないと言ってよい。このため、データベースの充実度や、信頼性については、非常に遅れている。PRAを高度化することと、保全の信頼性を高めることは同一であり、現場でPRAを有効活用することによって保全を充実させることが必要である。

高経年劣化管理については、メカニズムの整理とデータベースの構築が、日本原子力学会において進められてきている。これらのデータベースの整理を継続的に進めて行く

とともに、リスクの概念を応用した、より信頼性の高い管理を進めることが必要である。特に、発電所建設当初から交換の効かない、コンクリート構造物、ケーブル、原子炉容器などの経年劣化に関する知見を充実させていくことは、世界共通の課題である。

マネジメントシステムを保全していくことは、これからの重要な研究開発課題である。福島第一原子力発電所事故の事故原因は、発電所、事業者、国、規制当局などのマネジメントシステムが十全に機能しなかったことも一つの要因と考えられる。国際原子力機関（IAEA: International Atomic Energy Agency）などにおける定期安全レビュー（PSR: Periodic Safety Review）や、日本原子力学会が提案している予防的安全レビュー（PSR+: Proactive Safety Review）などを活用し、マネジメントシステムの保全を担保していくことが重要であり、また、重要な研究開発課題である。

（４）研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）³⁾

原子力保全学を研究開発していくうえでもっともボトルネックとなっているのは、PRA 技術の信頼性を高めることである。具体的には、計算手法の開発も課題であるが、やはり故障率やシナリオなどのデータベースの充実も必須である。現在、原子力発電所が稼働していないため、故障データベースの入力が少なくなっている。また、PRA の信頼性を高めるためには、毎日の保全で活用して経験値を上げることが重要である。そのためには、オンラインメンテナンスを実施することが必要であり、これにより原子力発電所の安全を大幅に高めるとともに、保全のリスク情報活用の信頼性を大きく高めることができる。日本においても、オンラインメンテナンスを積極的に利用することが期待される。

なお、日本の場合は 13 カ月ごとの定期検査が要求されている。より安全な発電所を構築するために、検査間隔の最適化や、検査方法の最適化、リスク情報による検査などを検討していくことも必要である。

これらの課題に対応するための人材確保は急務である。専門的知識を有し、さらに社会人として、また、ジェネラリストとしての一般教養を身につけた人材を原子力関連学科のみならず機械、電気、化学工学などの卒業生も含め幅広く確保する必要がある。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

PRA（確率論的リスク評価）^{4,5)}

確率論的リスク評価（PRA）技術は、米国で開発が進められており、現在は世界中で利用されている技術である。事故の発生シナリオとその発生確率を評価することで、炉心溶融や放射性物質放出に繋がるリスクにおいて、どのような設備や系統の寄与が大きくなるかを定量的に評価することができる。このため、保守管理においてリスクを用いることは、危険性の高いシステムや系統に対して重点的な保守を行うことや、システムそのものの改善を進めることによって、より効果的に安全性を高めることができる。1990 年代に、米国ではこの PRA を保守管理において積極的に応用することを目的とした、保守規則（メンテナンスルール）を設定した。さらに保守だけではなく、リスクを、発電所の活動を評価する指標としても導入し、ROP（俯瞰的原子炉評価）として、発電所全体の安全性を見える化している。日本においては、古くから、PRA の重要性は認識

されてきていたが、ほとんど原子力安全においては利用されてなかった。今後、特に現場における PRA の活用を積極的に進めることを目的とした研究開発が進められる必要がある。

高経年化評価⁶⁾

原子力発電所においては、保守管理において、ほとんどの部品は新品に交換されていく。一方で、原子炉容器やケーブル、コンクリートなど交換ができないシステムも多数存在する。これらのシステムは、高温、放射線、中性子線、地震など、さまざまな環境の履歴や、荷重の履歴を受ける。材料の損傷メカニズムを評価し、システムとしての寿命を知ることによって適切に保全し、長期的にシステムを安全に利用していくことが可能となる。科学的に材料劣化を評価し、保守記録と合わせて評価することで、長期にわたり安全性を確保できることを説明することが重要となる。高経年化評価は、原子力発電所のすべての重要なシステムについて、長期間の利用に対する評価を与えていくものである。このためには、設計段階から、また、試運転を含む運転開始からの継続的な評価が重要となってくる。また、新品に交換されていくのは、部品だけではなく、組織や人員も重要な視点となる。さらに、社会情勢の変化や新しい科学的知見の充実など評価手法そのものも、時間とともに変化していく。これらの長期的な時間の経過における、ハードウェア、ソフトウェア、環境を含むすべての変化が原子力安全に著しい影響を与えないことを保証していく活動が高経年評価である。日本や米国が世界的にも先導して進めており、今後もより積極的な研究が必要な領域である。

オンラインメンテナンス⁷⁾

原子力発電所の安全を担保するためには、リスクを管理したうえで保守保全を進める必要がある。このとき、日本においては原子炉を止めて保守を行うことが、世界では運転中に行うことが一般的である。こういったオンラインメンテナンスは、十分に管理された状態で、わずかなリスクの短期的な増加を許容することにより、発電所全体の大きなリスクを低減する活動ととらえることもできる。オンラインメンテナンス（運転中保全）は、十分信頼性の高い PRA が整備されていることが前提となる。

RCM（信頼性重視保全）

保全活動にリスクの概念を持ち込み、リスクによって点検間隔や交換間隔を評価するとともに、定期的に取り得られるデータから劣化傾向を推定し、点検や交換作業を実施する保守の方法である。機器の故障データベースや、運転中の状態データベースといった大量の情報を元に保全を進める方法であり、ある意味、IT 応用保全と言ってもよい。PRA を用いることによって、より充実した信頼性重視保全（RCM : Reliability Centered Maintenance）を行うことができるが、日本ではあまり普及していない。

シビアアクシデントマネジメント⁸⁾

充実した保守保全を行ったとしても、事故が発生しうることを考慮し、事故が起きた場合において炉心溶融を防ぐためのマネジメント策をあらかじめ検討しておくものであ

る。さらに炉心溶融が起きた場合を想定し、放射性物質放出を防ぐためのマネジメント策についても検討する。アクシデントマネジメントは保全と強く関連しており、刻一刻と変わる状態変化の中で、どの系統が利用できて、どの系統が利用できないのかを管理するとともに、効果的なマネジメント策を考案し、改善を進めていくことが必要である。日本原子力学会で標準化が進められているが、さらなる改善を行うことが重要である。また、放射性物質を放出することを想定した防災とのリンクも重要な課題である。

（6）キーワード

高経年化評価、リスクマネジメント、信頼性重視保全、PRA、オンラインメンテナンス、シビアアクシデント

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	△	→	・高経年評価に関する取り組みが進められている。 ・津波 PRA など外部事象に絡んだリスク評価に関する取り組みが進められている。
	応用研究・開発	△	↘	・法律遵守を目指した保守保全を要求されている。 ・まだ机上検討にとどまっている PRA も多く、今後、現場の状況を反映した実践的な取り組みが必要とされる
	産業化	△	→	・海外での輸出を考慮し、PRA などの充実が図られている。
米国	基礎研究	○	↑	・高経年評価に関する取り組みを積極的に進めている。 ・PRA について、レベル 2 やレベル 3 の見直しを含め検討が進んでいる。
	応用研究・開発	○	↑	・発電所の現場におけるリスク評価の充実が図られている。 ・規制当局によるリスク評価の活用が進んでいる。 ・より高度な PRA の開発が進められている。
	産業化	○	↑	・リスク評価を用いた保守の高度化により、安全性が目に見えて高まっており、国民が原子力発電所の安全を享受しているとともに、事業者は経済的にも潤う、双方に都合のよい関係が構築され、さらに産業化が進んでいる。
欧州	基礎研究	○	→	・高経年化評価に対する検討が進む。 ・リスク評価の導入に積極的な国が多い。
	応用研究・開発	○	→	・システムの標準化により、保全の最適化が進められている。例えば、フィンランドでは 12 ヶ月ごとの燃料取替停止、24 ヶ月ごとの保全など。
	産業化	○	→	・欧州においては西欧原子力規制者協会（WENRA : Western European Nuclear Regulators' Association）が、原子力発電所をより安全にするための活動を積極的に実施し、その中で保全活動の最適化が進められている。
中国	基礎研究	○	↑	・新規プラント建設や新型炉設計が積極的に進められており、原子力保全に関しても積極的な研究開発が進んでいる。 ・基本的にはプラント輸入国の仕組みをそのまま輸入していたが、新型炉や輸出においては保全の考え方が重要となる。
	応用研究・開発	○	↑	・リスクやシビアアクシデントマネジメントなどに関する研究に、国家として積極的に投資している。
	産業化	○	-	・不明。しかし、原子炉を輸出する場合には保守保全技術が重要であるため、戦略的に進めていると考えられる。
韓国	基礎研究	○	↑	・米国などの輸入であるが、リスク評価を積極的に導入している。
	応用研究・開発	○	↑	・近年の、ケーブル品質に関する重大な課題が公になったのち、品質保証を含めた保全に関する検討が進められている。
	産業化	○	↑	・海外プラント建築、運転においては、保守管理技術の輸出も重要な視点であり、米国の仕組みをベースとした応用が進んでいる。

（註 1）フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

（註 2）現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○：ある程度の活動・成果が見えている、△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註 3）トレンド

↑：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

(8) 引用資料

- 1) 岡本孝司「安全規制の高度化」NDEシンポジウム2013, (2013)
- 2) 日本機械学会. A-TS 08-08「原子力の安全規制の最適化に関する研究会」,
欧米での原子力安全規制及び原子力プラントの運用、保全を中心とした活動状況
<http://www.jsme.or.jp/pes/Research/A-TS08-08/index01.html>
- 3) 日本機械学会. A-TS 08-08「原子力の安全規制の最適化に関する研究会」,
新検査制度の定着と今後の課題
<http://www.jsme.or.jp/pes/Research/A-TS08-08/index.html>
- 4) 岡本孝司「原子力発電所のリスク評価とは」エネルギーレビュー Vol.34, No.10 (2014)
- 5) JANSI Annual Conference 2014,(2014年4月24日)
- 6) 日本原子力学会「原子力発電所の高経年化対策実施基準」AESJ-SC-P005:2008
- 7) 吉田智朗「原子力発電所におけるオンラインメンテナンス導入のためのリスク評価の検討」
(2006)
<http://www.nsr.go.jp/archive/nsc/senmon/shidai/risktask/risktask012/siryo31.pdf>
- 8) 日本原子力学会「原子力発電所におけるシビアアクシデントマネジメントの整備及び維持向上に関する実施基準」AESJ-SC-P008:2014 (2014)

3.3.1.4 原子力に関する防災

(1) 研究開発領域名

原子力に関する防災

(2) 研究開発領域の簡潔な説明

原子力または放射線の緊急事態時には、公衆および作業者の健康影響を防護し、インフラおよび環境への影響を効果的に低減し、影響を受けた地域ができる限り通常の社会経済活動へ復帰できるよう支援するための対策が求められる。原子力防災は実務そのものであり、関係機関が緊急事態の時間的推移に沿って、計画・準備段階から対応段階、復旧段階において関連するさまざまな分野で準備すべき人と技術の基盤を整備する必要がある。

(3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

福島第一原子力発電所事故後、その教訓を反映し同様の原子力災害が発生する可能性を十分に低減するため、深層防護の原則の再確認と安全機能の喪失に対するアクシデントマネジメント策の強化が各国で進んでいる。同時に、事故を完全に防止することはできないので、深層防護の第5層に当たるサイト外の緊急時対応計画を適切に立案・整備し、資源配分、訓練、実地演習、評価および日常の管理から得られた経験に基づく知見を反映して絶えず見直していく必要がある。

国際放射線防護委員会 (ICRP: International Commission on Radiological Protection) の2007年勧告後、原子力防災に係る新しい放射線防護の考え方^{1,2)}が示され、国際的に緊急時マネジメントの考え方³⁾や国際原子力機関 (IAEA: International Atomic Energy Agency) による新しい判断基準⁴⁾が定着しつつある。そこでは、緊急時対応における実質的な目標を確実に達成できるよう、もっとも効率的かつ効果的な方法によって防災システムを確立するという管理的アプローチ⁵⁾が採用されている。公衆および作業者の放射線影響の防止、個人および集団における放射線以外の影響の防止、財産および環境の保護、通常の社会経済活動への復帰という目標を定め、対策の正当化・最適化の原則と同時に、過去の緊急事態や防災訓練の経験、緊急事態の詳細な分析や理解、そして国際法から導かれた原則に基づく対応の戦略を検討し、そこから準備と対応の詳細な要件が導かれている⁵⁾。

各国では、緊急事態への備えを改善するために、事態の時間的推移に沿って準備、緊急時対応 (危機管理段階および影響管理段階) および復旧に関する方策の再検討が進められている。これには、緊急時対応段階から復旧段階への移行期における国としての復旧準備の検討も含まれている。危機管理段階では、事業者、地方、国の関連機関間の迅速で強固な連携を維持するためのクライシスコミュニケーションのハード・ソフト面の強化、事故現場でのファースト・レスポンスの防護を含む緊急時手順・ガイダンスの見直し・改善への取り組みである。また、地震、津波などの外部起因事象によって地域、国あるいはサイトのインフラが重大な損傷を被る複合災害の状況下における緊急時対応計画の実効性の確保も大きな課題である。そのため、自然災害を含む外部事象を考慮した確率論的リスク評価 (PRA: Probabilistic Risk Assessment) によるリスク情報を活

用した緊急時対応計画における防護措置（避難、屋内退避と安定ヨウ素剤の予防服用など）の組み合わせを含む防護戦略の検討、避難時間推定などのシミュレーションモデルの研究開発⁶⁾も実施中である。放射性物質の広範な環境汚染後の影響管理の段階では、福島第一原子力発電所事故で大きな役割を果たした航空機モニタリングを含む迅速な環境モニタリング技術の開発、個人スクリーニングやホールボディカウンターを含む簡易で迅速な個人モニタリング技術の開発、広域の除染技術の開発が重要な課題である。

チェルノブイリ事故や福島第一原子力発電所事故の経験から、防護措置の意思決定およびその実行については放射線防護上、まだ課題がある。防護措置の意思決定支援技術については、欧米で長年研究開発が行われているマルチクライテリア意思決定分析（MCDA：Multi-Criteria Decision Analysis）手法⁷⁾に代表されるような基盤技術の開発も重要分野である。特に長期にわたる復旧段階への移行に際しては、避難者の懸念を理解し、それに対して適切に対処するため、ステークホルダーを効果的に関与させる仕組みやプロセスの構築にあたり社会的アプローチとの協力が重要となる。これは、放射線防護の国際コミュニティとの連携によって、国際的に取り組むべき課題でもある。

福島第一原子力発電所事故では国内関係機関の間だけでなく、各国政府、規制機関や緊急時対応センターとの国際的な情報交換およびデータ提供などのコミュニケーションを大幅に改善する必要性が認識された。欧州ではチェルノブイリ事故後、欧州委員会（EC：European Commission）が緊急放射線情報交換システム（ECURIE：European Community Urgent Radiological Information）や放射線データ交換プラットフォーム（EURDEP：European Radiological Data Exchange Platform）を長年整備している。我が国も韓国、中国を含む東アジア周辺諸国との国際的な枠組み、技術基盤の整備が必要であろう。また、食物摂取制限のための基準に代表される緊急時の勧告、基準が国によって異なること、発災国の防護勧告と異なる勧告を諸外国が発災国に在住の自国民に対して行うなどのコミュニケーションの不備の改善を図るために、原子力緊急事態に関する国際的な情報交換のあり方を検討すべきである。

（４）研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

原子力防災の分野は、オンサイトにおける緊急時対応（広い意味でのアクシデントマネジメントに相当し、ここでは対象としない）からオフサイトの緊急時対応まで広範である。オフサイトの緊急時対応も、放射性物質の放出源情報（ソースターム）、環境移行挙動、人への被ばくおよび健康影響評価とその関連する分野の裾野が広い。東海村 JCO 臨界事故、福島第一原子力発電所事故後を見ると、それを契機としてさまざまな分野の研究者が一時的にこの領域に参入してくるが、その継続性がないというのがこれまでの経験である。原子力防災を専門とする研究者は極めて限られているのが実態であり、海外の原子力発電所の事情にも通じた原子力防災に関わる専門家、研究者の養成が必須の要件である。原子力防災の最終的な目標は、緊急事態に際して人の放射線およびそれ以外の健康影響の防止、インフラと環境の防護であり、それを遂行するのはまさしく実務である。このように、原子力の安全は、極めて目的重視型で、かつ生起する確率は稀でも社会・経済的インパクトが非常に大きい。このため、決して備えを怠ってはならない領域においては、トップダウン的アプローチでニーズを限定的に検討する必要がある。

また、不確実さが非常に大きい危機管理段階での防護戦略、ステークホルダーの関与が政策決定に必須となる復旧段階での効果的な方策、の策定に関与する人材、資源、技術基盤の整備を支える研究開発が必要である。

繰り返しになるが、生起する確率は稀でも常に準備を怠ってはならない原子力防災を原子力特有のものとして、一般災害に対する防災と共通の枠組み (All hazard approach) の中で強化するのがもっとも効果的であり、世界共通の認識である。そのためには、関係当局、機関の連携がもっとも重要となる。

(5) 注目動向 (新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など)

チェルノブイリ事故の影響が大きかった欧州では、国境を越える影響という観点から欧州委員会 (EC) の主導する共同研究が数多く進められた。その延長上にある原子力・放射線危機対応・回復に係る欧州プラットフォーム (NERIS プラットフォーム : European Platform on Preparedness for Nuclear and Radiological Emergency Response and Recovery, 2010年設立)⁸⁾は、原子力または放射線緊急事態の対応および復旧の備えを効果的に改善するために、国、地方当局、技術支援機関 (TSO : Technical Support Organization)、事業者、研究機関、大学、非政府組織 (NGO : Non-Governmental Organizations) などあらゆる関係機関 (2013年現在、51機関) から構成されるプラットフォームで、さまざまなプロジェクト支援、共同研究を組織している。

フランスでは、原子力安全規制当局 (ASN : Autorité de Sûreté Nucléaire) が中心となり 2005年に原子力事故後管理運営委員会 (CODIRPA : COmité DIRecteur pour la gestion de la phase Post Accidentelle d'un accident nucléaire ou d'une situation d'urgence radiologique)⁹⁾が設置された。同委員会へは、行政当局、事業者、協会・団体、有識者など、事故後管理に携わる多くの関係者が参画している。これはチェルノブイリ事故の経験から、フランスが国土の広範な汚染を引起す原子力事故の影響を想定し、事故後の人と環境を防護するための対策改善を目的としている。福島第一原子力発電所事故後もその経験を反映した改善計画が進行中である。

米国では、原子力規制委員会 (NRC : Nuclear Regulatory Commission) が NUREG-0654/FEMA-REP-1 Supplement 3「防護措置戦略のガイダンス」を福島第一原子力発電所事故後に改定した。この改定には米国の PRA 技術用いた原子力災害解析 (SOARCA : State-of-the-Art Reactor Consequence Analyses) 研究の成果やサンディア国立研究所のレベル 3PSA 手法による防護措置効果の検討の成果が反映されている。

(6) キーワード

緊急時マネジメント、緊急時対応計画、クライシスコミュニケーション、防災訓練・演習、レベル 3PRA

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> 福島第一原子力発電所事故を契機に、新たな個人モニタリング機器の開発、無人航空機モニタリングの開発、除染技術、農作物対策技術、放射性物質の環境移行挙動、線量再構築モデルの開発など、さまざまな分野での基礎研究が進められている。
	応用研究・開発	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> 原子力災害対策指針に基づいて実効的な地域防災計画策定のためにリスク情報を活用した防護措置戦略のガイダンスなどの研究が進められている。 地域防災計画策定に有用な避難時間推定などのシミュレーションモデルの応用などが開始されている。
	産業化	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 福島第一原子力発電所事故後、その教訓と国際基準を反映した原子力災害対策指針が策定された。その実効性を改善するための更なる見直しが継続中である。
米国	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 緊急事態への防護目標を達成するための基本的な技術基盤はすでに整備されているとあってよく、防災訓練・演習手法の改良、リスクコミュニケーション分野などで基礎的研究は継続している。
	応用研究・開発	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> 長期間検討されていた NRC の NUREG-0654/FEMA-REP-1 Supplement 3「防護措置戦略のガイダンス」が福島第一原子力発電所事故後に改定された。この改定に際しては、PRA 手法による防護措置効果の検討が NRC の委託でサンディア研究所を中心に進められた。 10 年来改定作業が続いている防護措置クライテリアのベースである米国環境防護庁 (EPA: United States Environmental Protection Agency) の防護措置マニュアルも最終局面を迎えている。 米国放射線防護測定協議会 (NCRP: National Council of Radiation Protection and Measurements) は、ICRP2007 年勧告を考慮した復旧期の防護ガイダンスを作成中である。
	産業化	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> スリーマイル島原子力発電所事故以後、法的枠組み、事業者・地方政府・国の緊急時対応計画、技術支援システム、評価・監査システムなど、防災システムの整備がもっとも進んでいる。9.11 以降はテロ起因の防災訓練・演習を充実させている。福島第一原子力発電所事故の教訓の反映のステップも開始されている¹⁰⁾
欧州	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> NERIS プラットフォームを中心に、さまざまなプロジェクト支援、共同研究が進められている。
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> NERIS プラットフォームを中心に、さまざまなプロジェクト支援、共同研究が進められている。 北欧諸国では、従来から共同で意思決定支援技術の開発が進められていた。現在も、防護措置効果の研究、防災訓練・演習の共同研究が進められている。
	産業化	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> 欧州各国では、チェルノブイリ原子力発電所事故以後、東欧市域でも法的枠組み、事業者・地方政府・国の緊急時対応計画、技術支援システム、評価・監査システムなど、防災システムの整備が進んだ。特に、国境を越える災害対応の連携に力を入れている¹¹⁾。 欧州委員会 (EC) が迅速放射線情報交換システム (ECURIE) や放射線データ交換プラットフォーム (EURDEP) を長年整備している。
中国	基礎研究	△	→	<ul style="list-style-type: none"> 特段の動きは、みられない。
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> 特段の動きは、みられない。
	産業化	△	→	<ul style="list-style-type: none"> 近年の原子力発電所の増設計画に沿って、法的整備も進み、緊急時対応計画は IAEA 基準に沿って整備されている。
韓国	基礎研究	△	→	<ul style="list-style-type: none"> 特段の動きは、みられない。

韓国	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ・福島第一原子力発電所事故以前には、日本と同様のソースターム、環境線量予測システムの整備が重視されてきていた。 ・福島第一原子力発電所事故後、日本の原子力災害対策指針の策定を受け、緊急時計画範囲 (EPZ: Emergency Planning Zone) の検討などが開始されている模様。
	産業化	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ・国レベルの原子力防災は、米国型の対応が一応整備されている。

(註1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

(註2) 現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○：ある程度の活動・成果が見えている、

△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

(8) 引用資料

- 1) ICRP Publication 109, 緊急時被ばく状況における人々の防護のための委員会勧告の適用, 日本アイソトープ協会 (2013).
- 2) ICRP Publication 111, 原子力事故または放射線緊急事態後の長期汚染地域に居住する人々の防護に対する委員会勧告の適用, 日本アイソトープ協会 (2012).
- 3) OECD/NEA, Strategic Aspects of Nuclear and Radiological Emergency Management, Radiation Protection 2010, OECD (2010).
- 4) IAEA Safety Standards, GSG-2, IAEA (2011).
<http://www.nsr.go.jp/archive/jnes/content/000120491.pdf> (日本語翻訳版)
- 5) IAEA Safety Standards, GS-R-2, IAEA (2002).
- 6) 藤田雅久, et al., 原子力発電所災害における避難計画策定のための支援システム開発, 土木計画学研究・論文集, No.28, I_25-I_34, 2011.
- 7) K.N. Papamichail and S. French, 25 Years of MCDA in nuclear emergency management, IMA journal of management mathematics 24(4), 481-503 (2013).
- 8) NERISプラットフォーム：<http://www.eu-neris.net/>
- 9) CODIRPA:
<http://www.french-nuclear-safety.fr/Information/News-releases/National-doctrine-for-nuclear-post-accident-management>
- 10) United States Government Accountability Office (GAO), EMERGENCY PREPAREDNESS NRC Needs to Better Understand Likely Public Response to Radiological Incidents at Nuclear Power Plants, Report to Congressional Requesters, GAO-13-243 March 2013.
- 11) European Commission, OFF-SITE NUCLEAR EMERGENCY MANAGEMENT AND RESTAURATION OF CONTAMINATED ENVIRONMENTS, SAMEN and MOSES thematic clusters, EUR 21297 (2007)

3.3.1.5 過酷事故への対応

(1) 研究開発領域名

過酷事故への対応

(2) 研究開発領域の簡潔な説明

主として軽水炉を対象として、設計基準事故を超える過酷事故(シビアアクシデント)時の原子炉・格納容器内の熱流動挙動および環境に放出される放射性の核分裂生成物(FP: Fission Products)の挙動を明らかにするとともに、過酷事故の防止対策および影響軽減対策(両者を合わせてアクシデントマネジメント)の有効性を評価するため、基礎・基盤的研究から大規模な実験および総合解析コードの開発などの研究開発を実施する。

(3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向¹⁾⁻³⁾

過酷事故時の炉心の熔融進展については、米国やフランスの研究用原子炉を用いた炉心熔融実験やドイツの電気加熱による模擬実験、日本原子力研究開発機構(JAEA: Japan Atomic Energy Agency)の原子炉安全性研究炉(NSRR: Nuclear Safety Research Reactor)を用いた実験などにより、燃料の過熱と損傷・熔融挙動、水素発生挙動が明らかにされ、解析モデルが開発された。燃料の損傷では、低融点の制御棒材料が最初に熔融・落下し、その後の空間を被覆材や構造物の融体が落下することが実験的に示された。特に、燃料が熔融した構造物や制御棒と反応すると、純物質の融点より低い融点の共晶物質を生成し、融解することがあることが判明した。ただし、世界的に基数が圧倒的に多いため実験数が多いPWR体系に比べて、B₄C制御材の影響、スペーサ、チャンネルボックスとの相互作用、ドライシーケンスの状況を含めたBWRを対象とした実験データは少ない。

原子炉圧力容器の健全性については、スリーマイル島事故炉心の調査が国際協力によって行われ、約19tの熔融炉心が複数の経路から原子炉圧力容器下部ヘッドに再移動したことが明らかになった。下部ヘッド壁は最大1100°C程度まで昇温したと推定された。また、スリーマイル島事故で下部ヘッドが破損しなかった熔融炉心冷却メカニズムとして、大規模な炉心融体の再移動が生じる前に、クラスト層が形成され、下部ヘッド内壁とデブリクラスト間のすき間や固化デブリのクラックに冷却水が侵入したと推定され、実験でもこれを支持する結果が得られている。福島第一原子力発電所事故におけるように海水注入が長引いた場合、ボイルオフにより海水が高濃度化し、炉心部(出入口含む)に析出し、流路を閉塞する可能性がある。また、下部ヘッドデブリベッドの除熱特性に影響を及ぼす可能性がある。

格納容器内挙動については、格納容器健全性への脅威となり得る種々の現象について研究が行われた。そのうち、熔融炉心と冷却材が接触したときに発生し得る水蒸気爆発について、内外で実施された多くの実験を通じて、熔融炉心の水中におけるブレイクアップ、蒸気発生、熔融炉心と冷却材の混合、熔融炉心の固化など、水蒸気爆発過程の初期条件に係わる知見が得られ、解析コードの整備が進展した。特に、実燃料を用いた熔融炉心の場合、水蒸気爆発は生じにくいことなどが実験的に明らかにされた。水蒸気爆

発過程については、実験データベースや解析手法の整備は進展しているものの、溶融炉心内金属成分（ジルコニウムやウラン）の酸化熱発生による爆発の大規模化や爆発の規模に及ぼすボイド率の影響に関して課題が残されている。

格納容器直接加熱（DCH : Direct Containment Heating）については、原子炉容器の破損箇所からの高速蒸気流の速度は、原子炉容器破損面積に依存するが、原子炉容器壁の破損箇所、初期面積、拡がり挙動は必ずしも明確になっていない。ただし、デブリ分散が発生する場合の高速ガス流による液滴発生限界、液滴発生率、液滴径、また、デブリ分散時の圧力・温度上昇は評価可能であり、モデル開発とコードへの組み込みが行われている。PWR に関しては高圧シーケンスにおける過熱蒸気自然循環や SG 伝熱管を含めた原子炉冷却系配管などの破損に係わる研究が実施されており、格納容器健全性の脅威とは見なされていない。ただし、BWR についてはほとんど研究が実施されていない。

溶融炉心と格納容器床のコンクリートとの反応（MCCI : Molten Core Concrete Interaction）については、ドライな条件でのコンクリートの浸食に関する多くの実験に基づき、解析モデルはほぼ確立している。、現象は複雑で、MCCI の抑制が期待される早期上方注水に関する実験データは不足している。特に、注水時に溶融デブリの上部に形成されるクラストについて、コンクリート侵食に伴う非凝縮性ガス発生によるクラストへの浸水効果およびクラスト上面への沸騰熱伝達率に及ぼす影響に関するデータが不足している。また、溶融デブリの対流熱伝達率について、コンクリート侵食に伴うガス発生による対流熱伝達率の増加のデータが不足している。また、BWR ドライウェル床面のドレインピットの影響に関して検討が不十分であり、侵食には異方性があるがそのメカニズムについては解明が不十分である。

格納容器の過圧による破損についても、スケールモデルを用いた米国などで試験が行われ、設計圧力の 3~4 倍までの耐性があることや、過圧破損のモードは、鋼製格納容器では破裂的、コンクリート製格納容器では鋼製ライナ部でリークが生じることなどが明らかにされた。ただし、格納容器からの漏洩格納容器設計条件を超えた圧力・温度条件における漏洩率に不確かさが大きく、これまでのデータの再検証が必要である。格納容器内の水素挙動については、水素混合についての実験と解析がすでに多く実施されている。水素の燃焼についても実験が行われ、理論構築、解析モデルの開発が行われている。スプレイ作動時における水素燃焼に関しては知見が少ないが、現在、経済協力開発機構原子力機関（OECD/NEA : Organization for Economic Co-operation and Development, Nuclear Energy Agency）の THAI2（Thermal-hydraulics, Hydrogen, Aerosols and Iodine）計画で実験を実施中である。水素燃焼対策として、イグナイタ、触媒による水素処理設備（PAR : Passive Autocatalytic Recombiner）が実機配備されている。ただし、福島第一原子力発電所事故を踏まえて、過酷事故晩期の格納容器圧力高圧維持による水素および FP 漏えいの抑制や水素爆発の防止の観点からの水素処理設備に関する研究が今後は重要である。

ソースターム（環境に放出される核分裂生成物の種類と量）挙動については、高温燃料からの FP 放出実験が米国、フランス、日本などで実施され、放出に及ぼす温度や雰

囲気の影響が明らかにされた。特に、JAEA の VEGA (Verification Experiments of radionuclides Gas/Aerosol release) 実験では、1MPa までの圧力の影響について初めて実験的に調べられ、高圧ではセシウムなどの放出が抑制されることを明らかにした。原子炉冷却系内の FP 挙動では、FP の冷却系内や格納容器内での移行挙動に関する実験がフランス、イタリア、カナダなどで実施され、FP の安定な化学形やエアロゾルの沈着、再蒸発、再浮遊などの挙動が明らかにされた。ただし、制御材やほかの炉心構成物質のヨウ素、セシウム、テルルなどの化学への寄与に関しては解明が不十分である。格納容器内の FP 挙動については、フランス、カナダなどで行われた実験などに基づき、ヨウ素挙動についての基本的な評価枠組みは構築されているものの、水相内不純物の影響や高温条件下のヨウ素化学、BWR での低酸素濃度雰囲気条件下における水相内反応、気相ペイント壁やエアロゾル表面におけるヨウ素の吸着および有機ヨウ素の生成などが残された課題である。特に、福島第一原子力発電所事故におけるような、格納容器ベント時に起こりうるプール水の急減圧下、減圧沸騰下でのプールのスクラビングによる FP 除去効果に不確かさがある。また、福島第一原子力発電所の 3 号機のように炉容器の減圧と格納容器ベントがほぼ同時に行われる場合に想定される、サブプレッションプールへの FP 蒸気を含む高温ガスが大量に流入する状況下における知見はほとんどない。さらに、福島第一原子力発電所事故におけるような水相内ヨウ素化学に及ぼす海水の影響については知見がない。

アクシデントマネジメントの有効性に関する研究では、過酷事故発生防止策として、JAEA の ROSA-V (Rig Of Safety Assessment-V) 計画において、炉心冷却操作の最適化などが明らかにされた。また、過酷事故の影響軽減策として、PWR で格納容器キャビティに注水して原子炉圧力容器底部を冠水させ、原子炉圧力容器を外部から冷却することにより、原子炉圧力容器下部ヘッド内で熔融炉心を冷却・保持する対策の有効性について、実験および解析的研究が幅広く実施された。限界熱流束に対する相関式が開発されているが、ほかのプラントに対しては相関式の適用性の検討が必要である。MCCI 軽減策として格納容器に水張りするアクシデントマネジメントに関連して、熔融炉心ジェットの水中におけるブレイクアップ長さに係わる研究が実施されている。冷却性を評価する上で重要な格納容器床面における熔融炉心の堆積挙動については知見が不十分である。

解析コードの開発では、水蒸気爆発、MCCI、水素混合・燃焼、FP 挙動など個々の単一現象の解析に特化した専用解析コードが開発され、実験結果に基づき検証が進められた。また、シビアアクシデント時のプラント全体の挙動を解析するため、熱水力挙動と炉心損傷、ソースターム移行などの現象論モデルを統合することにより、研究成果が集大成された総合解析コードが開発された。米国原子力規制委員会 (NRC : Nuclear Regulatory Commission) は MELCOR、米国産業界は MAAP、欧州では ASTEC などのコードが開発され、我が国では JAEA の THALES などのコードが開発されている。個々の事故シナリオにおける事故進展の時間的スケール、格納容器破損モード、ソースタームの評価に利用され、福島第一原子力発電所事故の解析でも利用されている。さらに、物理現象を精緻に表現した多次元の数式・理論式で構築した機構論的モデルを用いて詳細な解析を実施するための詳細解析コードが開発されている。米国規制委員会は SCDAP/RELAP5、米 ISS は RELAP/SCDAPSIM、フランス IRSN は ICARE/CATHARE、

ドイツ GRS は ATHLET-CD などのコードが開発され、我が国では経済産業省の支援によりエネルギー総合研究所において SAMPSON コードが開発されている。

(4) 研究開発推進上の課題・ボトルネック (科学技術的課題、政策的課題)

過酷事故現象は、一般に炉心の大幅な損傷や溶融が伴うことから、溶融炉心と冷却材の相互作用、溶融炉心とコンクリートの反応、水蒸気ないし水素雰囲気中での FP エアロゾルの挙動や水素の格納容器内での挙動など、一般に多成分・多相流が関与するとともに、高温・非平衡など現象として複雑な系の熱流体力学、物理、化学の混合課題であることに大きな特徴がある。科学技術的課題としては、こうした複雑な現象を解明するためには、異なる分野の多くの専門家の協働により、基礎・基盤的研究から比較的大規模な実験、総合解析コードを有機的に結びつけるとともに、達成可能で合目的的な研究課題として目標を明確に限定する必要がある。また、福島第一原子力発電所事故における、炉心、原子炉容器、格納容器の損傷箇所や損傷程度など、今後の調査により重要な知見が得られることが期待されるが、高線量下の作業のため、調査は相当長期にわたると予想されていることも課題であろう。

政策的課題としては、福島第一原子力発電所事故前までの大幅な予算縮減により、過酷事故に関する研究規模が縮小された結果、90年代までは一定程度いたこの分野の専門家がほとんど枯渇していることである。福島第一原子力発電所事故を踏まえ、シビアアクシデント研究を中心とする安全研究基盤の充実強化を図り、研究を通じて優秀な人材を育成することは、我が国ばかりでなく国際的な安全性の向上に貢献する。産学官の連携と適切な役割分担により、国際協力も視野に入れて、この分野の研究開発を効果的・効率的に進めつつ、若手の研究者の参画を得て専門家を中長期的に育成することが政策的課題として重要である。

(5) 注目動向 (新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など)

欧州では、2004年より19ヶ国が参加する過酷事故研究ネットワーク (SARNET: Severe Accident Research Network of Excellence) を EU (European Union) 内に設立して、過酷事故に関する共同研究、研究成果のデータベース化、教育・人事交流などを実施している⁴⁾。SARNET では、過酷事故における優先課題を、1) 原子炉における溶融炉心冷却、2) 溶融炉心コンクリート反応 (MCCI) 時における溶融炉心冷却、3) 圧力容器外水蒸気爆発、4) 格納容器内の水素混合・燃焼、5) ソースタームに及ぼす高燃焼度燃料および MOX 燃料 (Mixed-Oxide Fuel) の酸化の影響、6) 原子炉冷却系および格納容器内におけるヨウ素化学の6項目に絞って研究開発を重点的に進めている^{5,6)}。

我が国の日本原子力学会では、福島第一原子力発電所事故前から熱流動部会熱水力学ワーキンググループの下でのシビアアクシデント・サブワーキンググループにおいて研究課題の整理と優先度付けが行われ、事故後に見直しが行われた。一方、解析モデルの開発・改良の観点から、同学会「シビアアクシデント評価」研究専門委員会が2011年10月より PIRT (Phenomena Identification and Ranking Table) 手法に基づく研究課題の抽出を進めている⁷⁾。この一環として、総合解析コード SAMPSON の開発が経済産業省の支援の下、エネルギー総合研究所を中心として産官学の参画により進めている。2013

年2月より、既設軽水炉の安全対策の高度化を図る観点から、国が実施すべきシビアアクシデントを含む安全研究の網羅性や緊急度・重要度を明確化する技術マップの策定が同学会「安全対策高度化技術検討」特別専門委員会で進められている。さらに、2012年10月からは熱水力ワーキンググループの下に基盤技術サブワーキンググループにおいて、シビアアクシデント研究ロードマップの作成に着手している。今後はこれらの検討結果に基づき、重要なシビアアクシデント研究が着実に実施され、その成果が現場などへ反映されて行くことが期待される^{8,9)}。

国際研究協力プロジェクトとして、OECD/NEAの主催により、福島原子力発電所の事故炉の廃止に向けた燃料デブリの取り出しの準備として、シビアアクシデント解析コードの改良、および事故進展と現在の炉心状況の解析のための共同研究計画（BSAF計画：Benchmark Study of the Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Project）が進められている。本計画には、フランス、ドイツ、日本、韓国、ロシア、スペイン、スイス、米国の8ヶ国が参加し、JAEAをホスト機関として、国内関連研究機関、産業界の協力により、2012年11月に開始し2014年3月までの予定で、各国で利用可能な総合解析コードを用いた解析を実施している¹⁰⁾。

（6）キーワード

シビアアクシデント、過酷事故、炉心損傷、熔融炉心、水蒸気爆発、熔融炉心コンクリート反応（MCCI）、格納容器直接加熱（DCH）、水素爆発、核分裂生成物（FP）、ソースターム、エアロゾル除去、ヨウ素化学、総合解析コード、詳細解析コード

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本 ¹¹⁾	基礎研究	○	↑	・筑波大学、早稲田大学、東京大学、京都大学、JAEAなどで基礎的な研究を実施している。
	応用研究・開発	○	↑	・福島第一原子力発電所事故後にJAEAでは応用を目指した新たなプロジェクトを開始している。エネ総研では、総合解析コードSAMPSONの開発を実施している。東京電力では格納容器フィルターベント、東芝ではコアキャッチャーなどの開発を進めている。
	産業化	○	↑	・日立、東芝、三菱などの産業界では、主として国プロジェクトのもとでシビアアクシデント対策機器の開発を進めている。
米国 ^{11,12)}	基礎研究	○	→	・Perdue 大学、Wisconsin 大学などで基礎的な研究を実施している。
	応用研究・開発	○	↑	・サンディア国立研究所 (SNL : Sandia National Laboratories) で総合解析コード MELCOR、ISS 社で RELAP/SCDAPSIM の開発を進めている。
	産業化	○	→	・Westinghouse 社などで PAR などが産業化されている。
欧州 ¹¹⁾	基礎研究	◎	→	・放射線防護・原子力安全研究所 (IRSN : Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire, フランス)、スウェーデン王立工科大学 (KTH : Kungliga Tekniska högskolan,) などを中心とした SARNET の枠で基礎的な研究を実施している。
	応用研究・開発	◎	↑	・これまで、フランス、ドイツなどで大規模な炉心損傷・FP 挙動実験が実施されてきたが、現在も IRSN などで比較的大規模な実験を実施するとともに、総合解析コード ASTEC の開発が SARNET の枠で実施されている。また、OECD/NEA 主催による水素挙動に関する大規模実験が原子力・代替エネルギー庁 (CEA : Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives, フランス)、ポール・シェラー研究所 (PSI : Paul Scherrer Institute, スイス) などで実施されている。
	産業化	◎	↑	・AREVA 社 (フランス) などで格納容器フィルターベント、水素再結合器などが実用化されている。IMI Nuclear 社 (スイス) は PSI と共同で有機ヨウ素を高率に除去できる第2世代格納容器フィルターベントを開発している。
中国 ^{11)・13)}	基礎研究	○	→	・上海交通大学 (SJTU : Shanghai Jiao Tong University)、西安交通大学 (XJTU : Xi'an Jiao Tong University) などで基礎的な研究が実施されている。
	応用研究・開発	○	→	・SJTU、上海核工程研究設計院 (SNERDI : Shanghai Nuclear Engineering Research and Design Institute) などで応用を目指した比較的大規模な熱流動実験が実施されている。
	産業化	△	→	・産業化では現在までの所あまり見るべき点は少ない。
韓国 ^{11,14)}	基礎研究	○	→	・KAIST (Korea Advanced Institute of Science and Technology)、浦項工科大学校 (POSTEC : Pohang university of Science and TEchnology)、韓国原子力研究所 (KAERI : Korea Atomic Energy Research Institute) などで基礎的な研究が実施されている。
	応用研究・開発	○	→	・KAERI などで応用を目指した格納容器健全性、コアキャッチャーなどに比較的大規模な実験が実施されている。
	産業化	△	→	・産業化では現在までの所あまり見るべき点は少ない。

(註1) フェーズ

基礎研究フェーズ : 大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ : 研究・技術開発 (プロトタイプの開発含む) のレベル

産業化フェーズ : 量産技術・製品展開力のレベル

(註2) 現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

- ◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない
(註3) トレンド
↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

(8) 引用資料

- 1) Y. Abe, Phenomena Identification in Severe Accident Sequence and Safety Issues for Severe Accident Management of Light Water Reactors, International Workshop on Nuclear Safety and Severe Accidents (NUSSA), Sept. , 2012, Beijing, China.
- 2) 杉本 純. 福島事故を踏まえたシビアアクシデント研究の展望. エネルギー・資源. 2013, vol. 34-4, p. 2-6.
- 3) 杉本 純 他. シビアアクシデント研究協力に関するCSARP計画の成果. 日本原子力学会誌. 1997, vol. 39-2, p. 123-134.
- 4) <http://www.sar-net.eu/node/4>
- 5) Magallon, D., et al., European expert network for the reduction of uncertainties in severe accident safety issues (EURSAFE), Nuclear Engineering and Design, 2005, vol. 235, p. 309-346.
- 6) Jean-Pierre Van Dorselaere, et al.; Sustainable integration of EU research in severe accident phenomenology and management, Nuclear Engineering and Design, 2011, vol. 241, p. 3451-3460.
- 7) Sakai, N., et al.: Phenomena Identification Ranking Table (PIRT) for the MAAP Enhancement Project, ICONE-21, July 29-August 2, 2013, Chengdu, China.
- 8) Sugimoto, J.: Important Severe Accident Research Issues after Accident at Fukushima Daiichi Nuclear Station, ICONE21, July-August 2013, Chengdu, China.
- 9) 杉本 純. フクシマ後の原子力安全の再生に向けて -シビアアクシデント研究者の反省と教訓, 今後の展望 -. 日本原子力学会誌. 2014, vol. 56-3, p. 162-163.
- 10) <https://www.oecd-nea.org/jointproj/bsaf.html>
- 11) <http://www.asmeconferences.org/ICONE22/pdfs/FinalProgram.pdf>
- 12) Corradini, M., Nuclear Safety: Lessons Learned after Fukushima, International Workshop on Nuclear Safety and Severe Accidents (NUSSA), Sept. 7-8, 2012, Beijing, China.
- 13) <http://iwsar.com/Xu-Cheng.pdf>
- 14) <http://iwsar.com/Yong-Hoon-JEONG.pdf>

3.3.1.6 原子力基盤技術の開発

(1) 研究開発領域名

原子力基盤技術の開発

(2) 研究開発領域の簡潔な説明

原子力基盤技術には、原子核・原子炉工学、熱流動、燃料・材料工学、原子力化学、環境科学、放射線防護、放射線影響などがあり、各分野で基盤的データベースや計算コード、先進技術などを開発している。ここでは、その中でも原子力に特有の原子炉物理および原子核工学に関して記述する。原子炉物理は、その名の通り原子炉における種々の核的性質を予測する技術で、基本的には原子炉内の中性子のふるまいを計算する。放射線の物質や生体中でのふるまいを記述するシミュレーション技術においても核燃料を取り扱わないだけで、ほぼ同様の計算を行う。核データは、この輸送計算における入力データの役割を果たす、原子核で起こる各種反応の確率、原子核の崩壊に係る情報などに係るデータであり、原子核工学研究によって得られ、データベースにまとめられて使用される。

(3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

原子力技術は、工学的にあらゆる分野を包含し、全体のバランスの上に成り立っていると言える。基盤技術という意味では、原子力に関わるすべての分野における基盤となる技術が存在するが、その範囲が広いため、本領域では原子力に特有な分野に限定して記述することとする。原子力発電を火力発電と比較すると、蒸気でタービンを回して発電する部分は共通であるが、蒸気を発生させる部分において熱の発生過程が核反応（核分裂反応、核融合反応など）である点が大きく異なる。また、放射線の利用で言えば、放射線とその対象（物質の物理または化学的反応、細胞または個体レベルの生物反応など）によってもその反応機構が異なるため、多くの知見を必要とする研究開発領域である。このような広範囲の研究開発領域を支える原子核的な研究分野として、核データおよび原子炉物理の分野¹⁾がある。このほか、原子炉の冷却・除熱に係る熱的な研究基盤技術に熱流動分野、原子燃料や原子炉材料の物性研究、再処理・群分離および廃棄物処理・処分に関わる分離・分析などの原子力化学研究、放射性核種の移行挙動を含む環境動態の研究などがあるが、対象が広範囲に及ぶため本領域では言及せず、シミュレーションコードやモデリング技術および教育訓練の部分にとどめる。

原子炉物理における「輸送計算」は、原子炉における核分裂の連鎖反応の進行度合いおよび原子炉出力を表す臨界性の計算、燃料の核的な燃焼に伴う構成元素または構成原子核の変化の割合を示す燃焼計算、内部放射線の遮蔽計算などに用いられる。この計算には、もっとも計算上モデル化の不確かさを持ち込まないモンテカルロ法による計算（正確には「連続エネルギーモンテカルロシミュレーション」）があるが、複雑な原子炉全体を記述するためにはまだ計算機の能力が十分と言えない。このため、原子炉の詳細な構造を平均化（均質化）したり、中性子のエネルギーによって複雑に変化する原子核反応の確率をエネルギーごとに平均化したりして、実際の原子炉設計などに用いている。これを先の「モンテカルロ法」に対して「決定論的手法」という。こういった計算では、

原子炉などのモデリング技術により不確かさが変化するので、コードに対してモデル化の信頼性（verification）および計算結果がどれくらい実際のもを再現できているかの妥当性（validation）検証が不可欠となる。このような信頼性および妥当性検証のことを「V&V」（Verification and Validation）と呼び、コードおよび全体の計算結果に対する不確かさの指標を伴った情報として提供される。このため、炉物理コード検証のためのベンチマーク実験に関するデータベースの整備も国際協力で行われている。一方、炉物理コードは、各国でそれぞれ開発されているが、近年、核不拡散のためか輸出規制がかかることが多くなってきている。

核データベースは、原子核反応の起こりやすさの確率、反応当たりのエネルギーの収支、核分裂において生成される核種および中性子の割合、崩壊に係る放出エネルギーや放射線の強さの情報をまとめたものである。原子核反応に関しては、「評価済核データファイル」と呼ばれるデータベースとして、表のように基本的に各国でまとめられている。

表 世界の評価済み三大核データファイルの比較

核データファイル	ENDF/B-VII.1/0	JEFF-3.1.2/1	JENDL-4.0
開発国	US	EU	Japan
公開年	2011/2006	2012/2009	2010
総格納核種数	423/393	381/381	406
ガンマ線データ 格納核種数	286/206	216/136	354
二重微分断面積 格納核種数	255/171	161/83	319
共分散データ 格納核種数	190/26	36/36	95
主な評価計算コード	GNASH EMPIRE	TALYS	CCONE POD
自給率	51%/60%	12%/20%	96%

注：ここで「評価済」とあるのは、原子炉などで必要な原子核反応データは、数百核種に対して中性子の広い範囲のエネルギー（おおよそ $10^{-5} \sim 10^7$ eV の 12 桁をカバーする範囲）に亘るものを対象とするため、すべて実験で求めているわけではない（ただし、実験データの収集に関しては、50 年以上前から国際協力で行われている）。

原子核の崩壊および原子核構造データに関しては、国際協力（国際分担）が進んでおり、データベースが整備されている。

原子炉物理に関連するコードや核データベースに関しては、国際原子力機関（IAEA：

International Atomic Energy Agency)²⁾ や経済協力開発機構原子力機関 (OECD/NEA: Organisation for Economic Co-operation and Development, Nuclear Energy Agency)³⁾ などを中心とした国際協力によって、取りまとめられている部分と各国で独自に整備しているものがある。データの収集は効率的に国際協力で行われるものの、コードやデータベースに関しては各国の事情により興味の対象が若干異なるため、独自のものとなっている ((7) 国際比較 参照)。

原子炉物理および核データは上記のように原子力の基盤技術であるが、原子力工学専門家養成という意味では脆弱化している。原子炉物理を専門とする講座をもつ大学 (北海道大学、東北大学、東京工業大学、名古屋大学、京都大学、大阪大学、東京都市大学、東海大学、近畿大学など) は限られており、その中に核データに関する専門の講座はない。より基礎科学的な原子核物理などに各データに関する研究室はあるが、その内容は基礎的な素粒子や物理理論であるため、いわゆる工学的なデータを扱うような教育は行われていない。したがって、日本原子力研究開発機構 (JAEA: Japan Atomic Energy Agency) のような研究機関での教育訓練や他分野専門家への原子力教育の充実が必要となる。特に核データに関して言えば、上述したように膨大なデータベースを整備する人材の枯渇は、(4) で述べるが、種々のコードやデータベースの国産化を進めなければならない現在において、死活問題になりかねない。

そのほか、熱流動や材料損傷の分野では、可能な限り基本原理から計算できるようなシミュレーションコードが開発されつつあるが、妥当性検証のための実験データ不足などのため、前述の原子炉物理および核データに関する V&V のような検証については、今後の課題となっている。人材確保に関しては大学に関連する学科が存在するものの、実際の応用研究につなげるためには研究機関などでの教育訓練が必要である。また、V&V にも関連するが、種々の技術的な検証のためには実験が必要であるが、これらの各種分析技術、計測技術などの人材を継続的に維持しなければならないことにも注意しなければならない。特に、燃料工学や原子力化学などの研究分野では、核燃料物質および放射性核種の取り扱い技術の継承が重要であるが、大学における放射化学などの講座の減少、大学・JAEA での取り扱い施設の廃止措置などにより、人材の育成・技術の継承がますます困難な状況にある。材料の照射損傷研究においては、国内外を問わず中性子照射に利用できる材料研究炉が少なくなっていることや照射に長時間を有することから、イオン加速器などを利用した模擬照射試験法の開発が注目されてきている。若手研究者の人材育成の観点からも大学、研究機関が協力して進めていくべき課題である。

(4) 研究開発推進上の課題・ボトルネック (科学技術的課題、政策的課題)

近年、米国が核不拡散に係る輸出規制として、モンテカルロ輸送計算コード MCNP などの輸出規制を打ち出してきた。最初は、最新のコードは国外に出さないという非常に厳しいものであったが、のちに、日本に対しては実行形式のコードは提供する (改訂が可能なソースコードは未提供) とのこととなった。MCNP は日本国内に多くのユーザが存在するので、一時期騒然となったが、JAEA が開発した同等の機能をもつコード MVP および臨界計算機能はないがほぼすべての放射線の輸送計算が可能な PHITS などがあったため対応可能であり、後の緩和も伴って現在は沈静化している。一方、MCNP に核

データライブラリとして評価済核データファイルから処理を行うコード NJOY についても同様なことが起こる可能も示唆され、重要なコードの国産化が不可欠であるとの指摘がなされている。ソースコードが未公開で内容が検証できないコードを国内で使用することは V&V の面から危険であり、かつ、海外へ原子炉を輸出することを検討している現状において、国産の設計コードと一体化できないことは大きな不利要因となっている。これに対して、国内の関連機関においては、可能な限り対応しようとする努力が続けられてはいるものの、安易に解決できない状況である。

輸送計算コードや核データの国産化のためにも、国内の研究者が協力して開発を実施する必要がある。一方、原子力規制委員会における透明性確保のため、規制と開発における役割分担を明確化する方向で議論が進んでおり、「規制のためのコードなど」と「開発のためのコードなど」との区別の問題がある。本来は、どちらも同じ学術分野の成果として得られるものであるが、これらの開発方針が分断されており効率的でないと思われる。

近年、原子炉の耐久性（構造材の長期健全性）を示す指標である放射線による照射損傷や上述した V&V に係る不確かさの問題などに関する規格基準類の整備・拡充が、国際標準化機構（ISO : International Organization for Standardization）や日本原子力学会標準委員会などで議論され始めている。これら機関に、原子力基盤技術に係る輸送計算コードや核データが、正しく認知され、その継続的な整備（国産化を含む）を推奨されることが、人材確保や研究開発のために不可欠となる。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

放射性廃棄物の有害度低減のための加速器による核変換研究⁴⁾や医療用加速器（陽子線や炭素線によるがん治療およびホウ素中性子捕獲療法）に関して、近年、プロジェクト研究が進められつつある。これらの基盤データとして、マイナーアクチノイド（MA : Minor Actinoid）や長寿命核分裂生成物（LLFP : Long-Lived Fission Products）核種および高エネルギー核データの整備の必要性が提言されている。また、関連する輸送計算コード PHITS の開発が進んでいる。核変換研究においては、これまでの実験室レベルでの小規模な MA や LLFP の分離試験を大規模な工学試験に拡大し、分離、燃料製造、再処理の実証試験が期待されている。

福島第一原子力発電所事故以来注目を浴びるようになったが、それ以前から原子力施設の廃止措置に関連し、施設内構造物中での放射化物生成量の推定が問題とされてきた。この量をできるだけ正確に予測することにより、廃止措置の過程で廃棄物を低減でき、この経済効果により、さらに廃止措置事業を促進することができる。このため、原子炉物理における燃焼計算およびそのための放射化断面積などの核データ整備が重要となってきた。また、高レベル放射性廃棄物の地層処分の安全評価では、処分に由来する公衆の被ばく線量に大きく影響する難分析長寿命核種のインベントリ評価が重要である。燃焼・崩壊計算コードによるインベントリ評価法を確立するためには、難分析長寿命核種の精密な分析法による実測値と計算値の比較検証が求められる。これは、福島第一原子力発電所事故で発生する廃棄物にも共通の課題である。

(6) キーワード

原子力基盤技術、核データ、原子炉物理、熱流動、燃料工学、材料工学、原子力化学、環境科学、放射線防護、放射線影響、シミュレーションコード、モデリング技術、データベース、国際協力、教育訓練、人材育成、規格、基準

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> 原子炉物理コード開発 (MVP (モンテカルロ)、MOSRA/SRAC (決定論)、PHITS (モンテカルロ) など)。 評価済核データファイル (JENDL)。評価済核データファイルに関しては、添付資料「世界の三大核データファイルの比較」を参照。 原子炉熱流動コード開発 (ACE3D (炉内熱流動)、TPFIT (気液二相流)、NASCA (サブチャンネル)) シビアアクシデントコード開発 (SAMPSON (炉心溶融)、THALES (ソースターム)、JUPITER (溶融物移行)) 地球上の任意地点からの放射性物質放出に対応した大気拡散予測システム開発 (WSPEEDI)
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 上記研究成果などを利用して、原子力企業 (三菱、東芝、日立、その他燃料メーカーなど) ごとに独自の開発を実施している。
	産業化	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 炉心設計などの分野で、米国産などのコードが利用されている。 日本国内の原子力事故に対応した大気拡散予測システム SPEEDI が、原子力規制委員会の監督の下、原子力安全技術センターにおいて運用
米国	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> 原子炉物理計算コード開発 (MCNP (モンテカルロ)、SCALE (システム)、NJOY (核データ処理コード))。 評価済核データファイル (ENDF)。評価済核データファイルに関しては、添付資料「世界の三大核データファイルの比較」を参照。 原子炉熱流動コード開発 (TRAC (システム安全)、RELAP (システム安全)、TRACE (システム安全)、COBRA-TF (サブチャンネル)) シビアアクシデントコード開発 (MAAP (炉心溶融)、MELCOR (炉心溶融))
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 上記研究成果などを利用して、原子力企業 (GE、ウェスチングハウスなど) ごとに独自の開発を実施している。
	産業化	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 炉心設計など核特性解析の分野で、炉物理核データが利用されている。 大気拡散予測については、ローレンスリバモア国立研究所 NARAC (National Atmospheric Release Advisory Center) において、世界の原子力事故に即座に対応するシステムが運用されている
欧州	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> 原子炉物理計算コード開発 (TRIPOLI (モンテカルロ、フランス)、APOLLO (決定論、フランス)、WIMS/MONK (決定論/モンテカルロ、英))。 評価済核データファイル (JEFF)。評価済核データファイルに関しては、添付資料「世界の三大核データファイルの比較」を参照。 原子炉熱流動コード開発 (Trio-U (気液二相流)、FLICA (炉内熱流動))、CATHARE (システム安全) シビアアクシデントコード開発 (ASTEC (ソースターム))
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 上記研究成果などを利用して、原子力企業 (アレバなど) ごとに独自の開発を実施している。
	産業化	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 炉心設計など核特性解析の分野で、炉物理核データが利用されている。 緊急時大気拡散予測システムとして、欧州連合を中心に利用される RODOS が開発されている。

研究開発領域
原子力区分

中国	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 各種炉型の原子炉（高速炉、軽水炉、高温ガス炉など）を開発しているため、原子炉物理計算に関する研究はあるはずであるが、外国へ情報があまり伝わっていない。核データとの連携はあまり行われていないようである。 評価済核データファイル（CENDL）を独自に開発。ただし、JENDL（日本）、ENDF（米国）、JEFF（欧州）の三大ファイルに比べると、質・量ともに若干劣る。 原子炉熱流動コード開発（SNPSDC（システム安全））
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 原子炉導入を進めていることから、開発が進んでいると思われるが、情報が少ない。
	産業化	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 原子炉導入を進めていることから、開発が進んでいると思われるが、情報が少ない。
韓国	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 原子炉物理に関して独自の研究はあるが、特筆すべき情報は少ない。 独自の評価済核データファイルはない。NEA加盟国としてJEFFに協力。また、米国のENDFにも一部貢献。 原子炉熱流動コード開発（MARS（システム安全）、SPACE（システム安全））
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 原子炉導入を進めていることから、開発が進んでいると思われるが、独自研究開発についての情報が少ない。基本的に海外技術導入型と思われる。
	産業化	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 原子炉導入を進めていることから、開発が進んでいると思われるが、独自研究開発についての情報が少ない。基本的に海外技術導入型と思われる。
国際機関	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> OECD/NEAにおける原子炉物理および核データに関する活動：原子力科学委員会（NSC：Nuclear Science Committee）において、加盟国の提案により共通の問題に関する共同研究を推進。特に、原子炉物理コードの検証のためのベンチマーク実験データベース（ICSBEP（臨界）、IRPhE（そのほか）など）が国際協力により進められている。 IAEAにおける核データ活動：国際協力（日本、米国、欧州、中国、ロシアなど）による原子核反応実験データベース EXFOR のとりまとめ、国際核融合炉のための評価済核データファイル FENDL の編集など。
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> OECD/NEAにおけるNSC以外の各委員会（安全研究など）との連携による応用。
	産業化	—	—	<ul style="list-style-type: none"> なし

（註1）フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

（註2）現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○：ある程度の活動・成果が見えている、

△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註3）トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

（8）引用資料

- 1) 日本原子力研究開発機構 原子力基礎工学研究センターホームページ
(<http://nsec.jaea.go.jp/>)
- 2) IAEA/NDSホームページ (<http://www-naweb.iaea.org/napc/nd/index.html>)
- 3) OECD/NEAデータバンクホームページ (<http://www.oecd-nea.org/databank/>)
- 4) 文部科学省 原子力科学技術委員会 群分離・核変換技術評価作業部会ホームページ
(http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu2/070/index.htm)

3.3.1.7 新型炉（核融合を含む）の研究・開発

(1) 研究開発領域名

新型炉（核融合を含む）の研究・開発

(2) 研究開発領域の簡潔な説明

世界的に見れば原子力発電の新規導入を計画している国が多数あり、長期的展望の下で段階的に実用発電に供する新型炉の技術を確認する必要がある。技術開発の成熟度と海外動向を考慮して、特に、次世代軽水炉・第4世代炉・小型炉・ナトリウム冷却高速炉・高温ガス炉・核融合炉の研究開発が重要である。

(3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

米国エネルギー省より、2030年頃からの実用化を目指して、安全性や経済性に優れた第4世代原子炉の研究開発が提唱され、第4世代原子力システムフォーラム（GIF：Generation-IV International Forum）の枠組みが作られた。その中で、一般的な概念を示すために発電用原子炉の開発世代が次のとおり定義された¹⁾。

- ・第1世代（Gen-I）

1950年代から1960年代前半に運転を開始した初期の原型炉

- ・第2世代（Gen-II）

1960年代後半から1990年代前半に建設された商業用原子炉

- ・第3世代（Gen-III）

1990年代後半から2010年代頃に運転開始した原子炉で、第2世代の改良型として開発された原子炉

- ・第4世代（Gen-IV）

現在、研究が進んでいる原子炉で、高い安全性、火力発電所と比肩できる経済性、放射性廃棄物の負担の最小化および高度な核拡散抵抗性などの特徴をもつ革新的原子炉

現在の発電用原子炉は第2世代と第3世代原子炉であり、主に軽水炉である。これらの研究開発を通じて、建設コスト低減のための標準化や先進的な安全方策を取り入れた次世代軽水炉（第3世代+）の技術が確立されつつある。一方で、一般的な原子力発電所は建設コストが高いと言われており、投資リスク回避のため小型炉開発が最近活発化してきている。非軽水炉分野では、ナトリウム冷却高速炉と高温ガス炉が軽水炉と同様に1950年代から研究開発が進められており、現在では第4世代炉開発において実用化に近いと考えられている。これらは、ウランやプルトニウムを燃料として原子核分裂反応を維持することで発熱させ、タービンと発電機で発電させる。それに対し、水素やヘリウムによる核融合反応を利用するのが核融合炉である。ここでは、これら新型炉について述べる。

1)次世代軽水炉（GenIII+）

次世代軽水炉は基本的には現行第3世代の改良であり、炉心損傷頻度の低減、建設コストや建設工期の低減、長寿命化、高燃焼度化、航空機対策を実現したものである²⁾。

従来設計と大きくなる点はパッシブセーフティ（受動安全）を取り入れたことにある。これは異常時に電源駆動機器による制御や運転員による介入なしに自然循環などの物理現象によって事故発生を防ぐ概念である。米国では AP1000 や ESBWR といったこの概念を積極的に設計に取り入れた原子炉がある。AP1000 は、2011 年に米国規制当局 NRC（Nuclear Regulatory Commission）から設計認証を受けた。その際、NRC 議長より、AP1000 の設計は簡素化され、固有、受動的あるいは革新的な安全およびセキュリティ機能を有することで安全余裕を向上させており、有意な放射性物質放出なしに航空機衝突に対して耐えることができると評価された。我が国でも 2009 年に国策として次世代軽水炉（第 3 世代+）の開発に着手し、濃縮度 5%超燃料、免震技術、80 年寿命のための新材料と水化学、建設工期短縮のための建設技術、パッシブ・アクティブ技術の最適組合せ、プラントデジタル化技術を枢要技術に掲げた³⁾。しかし、2011 年 3 月以降は開発を大幅に縮小化することになった。現在、我が国の APWR や ABWR（第 3 世代炉）は、輸出の可能性についても検討されているが、欧米で開発された AP1000 や EPR（第 3 世代+）は世界中で採用されており受注競争が激しくなっている状況である。福島第一原子力発電所事故の教訓を取り込み、プラント輸出を通じて世界の原子力安全に貢献するためには、次世代軽水炉開発などに継続的に取り組む必要がある。

2)第 4 世代炉（Gen IV）

第 4 世代炉とは高い安全性・信頼性の実現などを開発目標とした革新的原子炉であり、2002 年にナトリウム冷却高速炉、ガス冷却高速炉、鉛冷却高速炉、超高温ガス冷却炉、超臨界圧水冷却炉、熔融塩炉の 6 炉型が選定された⁴⁾。ナトリウム冷却高速炉はフランス、ロシア、インド、中国、韓国および EU（European Union）では積極的に研究開発が進められており、GIF でもっとも活発である。超高温ガス冷却炉は高温ガス炉を発展させたもので、出口温度は 950℃以上を念頭に設計されている。これら 2 炉型は後述する。ガス冷却高速炉はフランス主導で欧州中心に ALLEGRO の研究開発が進められているが、最近では減速傾向である。鉛冷却高速炉はロシアで BREST や SVBR 設計が先行し、現在では欧州で ALFRED プロジェクトが推進されるとともに、ベルギーで燃料・材料試験を目的とした MYRRHA 炉の建設計画がある。超臨界圧水冷却炉は、相対的に研究に着手した段階と言え材料試験など課題解決を図る必要がある。熔融塩炉はトリウム液体燃料をポンプで循環し熱交換器で熱を除去するシステムであり、米国で実験炉を建設した実績があり、最近はいくつかの国で研究開発が開始されている⁵⁾。

3)小型炉（小型モジュラー炉、受動的・固有安全炉）

IAEA の定義によれば、出力 30 万 kWe 以下が小型炉、それから 70 万 kWe 以下が中型炉とされている⁶⁾。出力あたりの建設コストは高くなるが、投資リスクは低くなる。また、電気料金の高い僻地であれば、大きな電気出力も必要でないことから、小型炉は発電競争力を有している。さらに、水素製造や熱利用などの多目的利用を可能とする。機器が小型であることから、工場製造および機器輸送が容易であり、現地工事が少なく建設工期を短くできるメリットがある。機器の標準化によって複数基設置のモジュラー型を志向することもある。また、異常時に受動安全や固有安全を取り入れた設計が多い。

世界では 2011 年時点で 125 基の中小型炉があり、28 か国で 17 基が建設中である。米国では 2012 年に mPower 設計を選択し 5 年間の開発資金援助することになった。2013 年には 2 回目の開発提案申請を受け付け、NuScale が選択された。中国では小型高温ガス炉、インドでは重水冷却炉の開発がなされている。ナトリウム冷却高速炉は米国では 1989 年に PRISM と SAFR、我が国では東芝の 4S (寿命期間中に燃料交換不要) の開発が進められた。

4) ナトリウム冷却高速炉

開発の歴史は長く商業的にも電力供給しており、400 炉年 (原子炉数×稼働年) の運転経験 (非水炉の中では一桁長い) を有している原子炉である。高速炉は高速中性子を燃えないウラン 238 に吸収させることで燃えるプルトニウム 239 に変えることによって燃料を増殖させることが可能である⁷⁾。また、放射性毒性が強く寿命の長いマイナーアクチノイド (MA : Minor Actinoid) の核変換ができ、高レベル放射性廃棄物を減量させることができる特徴を有しており⁸⁾、その重要性はエネルギー基本計画⁹⁾でも記述されている。この炉は、ナトリウムの優れた特徴により、原子炉は低圧にすることができる。また、高沸点のため単相ナトリウムで炉心冷却ができ、電気駆動を不要とする自然循環による崩壊熱除去が可能である。一方、ナトリウムは水や空気と接触すると急激に反応する特性などがある。

我が国には実験炉「常陽」と原型炉「もんじゅ」があるが、「もんじゅ」においては 1995 年にナトリウム漏えい事故が起きた。現在は両炉とも再稼働準備を進めている。米国では、EBR-I、EBR-II、Fermi-I、FFTF などの実験炉を建設し多くの実験データを取得したが、原型炉建設時に核不拡散政策により大型炉開発は中止された。フランスでは、実験炉 Rapsodie、原型炉 Phenix、実証炉 Superphenix を建設し、開発を進めてきたが、政治的理由により Superphenix を廃炉にした。現在は ASTRID の開発を精力的に進めている状況であり、「もんじゅ」で燃料の照射試験を計画している。欧州では英国やドイツでも初期に開発が行われていた。ロシアは、実験炉 BOR-60、原型炉 BN-350 (カザフスタン)、実証炉 BN-600 と着実に開発を進め、商業炉 BN-800 が 2014 年に臨界に達した。中国およびインドも実験炉を建設し、世界中で開発競争が増してきている。

我が国は、第 4 世代炉として JSFR の開発を、2011 年までは欧米ではリードしてきた。現在、我が国が主導してナトリウム冷却高速炉の安全基準の国際標準化を働きかけており、それを新興国が参照している状況である。開発先進国として積極的に世界貢献を果たすべく国際協力を進める一方で、高速炉技術の国際標準化競争に乗り遅れないようにする必要がある。

5) 高温ガス炉

黒鉛減速ヘリウム冷却熱中性子炉であり、熱電併給が可能である。その熱源は製鉄などの産業熱源として、また水素製造や石炭液化などでも利用できる。セラミックスで被覆した粒子状燃料を用いることが特徴的で、1600℃の高温状態においても被覆材の閉じ込め機能は損なわないことが実験的に示されている。被覆粒子燃料の封入方法によりブロック型とペブルベッド型の燃料体に分類できる。ヘリウムガスは 100 気圧以下に加圧

するが、ヘリウム漏えい事故時が生じても黒鉛減速材の熱容量が大きいこと燃料温度は急激に上昇しない固有の安全特性を備えている^{10,11)}。

開発の歴史は古く英国、米国、ドイツで開発が先行した。米国では、1990年代に安全性と経済性を向上させたGT-MHRの設計が行われ、2000年代に原子力2010プログラムやNGNPプログラムなどを発表し、水素利用の検討に着手した。南アフリカではペブルベッド型のPBMR建設を推進していたが、2009年に経済的理由により中止になった。中国ではペブルベッド型実験炉HTR-10を建設し、2003年に定格運転を達成した。実証炉HTR-PMは建設中で、2017年に建設完了予定であり、本格的な実用化展開を図っている。我が国では実験炉HTTRが建設され2004年に950℃で定格運転を達成した。水素製造技術も併せて開発している。資源国カザフスタンとの研究協力やHTTRを用いた安全性試験国際共同研究プログラムを実施するなど、これまで技術開発を先導してきた我が国は固有安全を有する高温ガス炉の研究開発を積極的に進め国際貢献の一役を担う必要がある。

6)核融合炉

核分裂は重いウランやプルトニウムを用いるのに対し、核融合は軽い水素やヘリウムを用いてエネルギーを発生する。地上の太陽と呼ばれる核融合炉だが、地球上で核融合反応を発生させるためには、人工的に数億℃もの高温環境を作り出す必要がある¹²⁾。この核融合反応を起こすための高温高压の反応プラズマを閉じ込める技術が開発課題として大きかった。長期的な視野をもって研究開発が進められており、原型炉開発のための技術基盤構築の課題として、原型炉概念の構築と設計、構成要素に関する研究開発（超電導コイル、ブランケット、ダイバータ、駆動システム、理論・計算、炉心、燃料、材料、規格・基準、安全、運転・保守）が整理されている¹³⁾。

現在の閉じ込め技術の主流は我が国でも研究されてきたトカマク型(JAEAのJT-60)であり、1988年に日米欧ソにより開始された国際熱核融合実験炉(ITER: International Thermonuclear Experimental Reactor)で実証を視野に入れて研究が推進されている。ITERは韓国、中国、インドが加わりフランスで建設中であり、我が国では、ITERを補完し、原型炉へ向けた検討を欧州と連携して行う「より幅広いアプローチ(BA: Broader Approach)」活動としてITER遠隔実験、シミュレーション、サテライトトカマクなどの研究が行われている。ITERをはじめ核融合研究はグローバル化しており、長期的展望の下で各国が研究を進めている。我が国はBA活動で整備される施設を活用して産学官が緊密に連携して上記課題を解決して実用化への道筋を確度の高いものにしていく必要がある。長期にわたり計画的に研究開発を進める必要があるため、若手研究者の育成とともに産学官の組織基盤の構築および維持が重要となる。

(4) 研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

1) 次世代軽水炉については、材料試験を除き2015年に終了予定の計画だったため、当初の技術的課題は5年程度で解決可能と考えられる。また、2013年に施行された規制基準に適合するためにはシビアアクシデント対策などの安全性向上技術が課題としてあげられる。政策的課題は、縮小化されたプロジェクトを再開できるように人材維持

を図るとともに、将来の既設炉のリプレースの可能性に対応できるように安全性向上技術開発を進める必要がある。また、我が国単独ではなく国際協力の活用などの検討が必要である。

- 2) 第4世代炉については、ナトリウム冷却高速炉と高温ガス炉を除けば、実験炉も十分に建設されておらず実用技術確立までには程遠く、技術的に課題が多い。高温ガス冷却高速炉については、発熱密度が高く高温ガス炉と比べて炉心溶融の可能性が高くなるため安全性向上技術の開発とともに、燃料開発などが必要である。鉛冷却高速炉については、懸念されていた材料腐食などの研究開発が進められ、別途開発が進められている放射性廃棄物低減を目的とした加速器駆動原子力システムの成果が共有できる可能性があるが、プラントとしての技術確立には安全性や保守補修などの課題が残る。超臨界圧水冷却炉については、高温高压であるため被覆管などの材料開発の課題は困難を極めている。熔融塩炉については、材料の長期健全性、化学状態制御、大型熱交換機器などが課題としてあげられる¹⁴⁾。これら第4世代炉の政策的課題としては、2030年以降の実用化を目指しているものであり、原子力縮小化傾向時には長期的視野にたって人材維持を図りながら基礎研究を進める必要がある。
- 3) 小型炉については、既存技術の小型化で、その特徴を発揮するものであることから、大きな技術的課題はない。政策的課題としては、我が国では電力自由化によりコスト競争が厳しい中で小型炉導入のメリットがなく、僻地立地の可能性を検討する必要がある。
- 4) ナトリウム冷却高速炉については、実用炉の技術開発確立に向けて、「常陽」「もんじゅ」を用いた照射試験による許認可データの取得に加えて、安全性と信頼性を向上させる技術開発、コスト低減のための革新技术（基礎的な開発は終了）の許認可に向けたデータ取得が課題として残っている。政策的課題としては、国内プロジェクトを再開できるように技術競争力を確保しつつ、海外プロジェクト（ASTRID など）への参画により技術基盤を維持していく必要がある。
- 5) 高温ガス炉については、「HTTR」を用いた技術実証や併設水素製造技術開発に加えて、燃料の超長期安定性などの技術的課題があげられる。政策的課題としては、技術実証に向け現状の研究開発体制を維持し、中国やカザフスタンなどとの国際協調を進める必要がある。
- 6) 核融合炉については、ITER と BA 活動の中で技術課題が整理されている。政策的課題としては、ほとんどが国際共同研究であるため ITER 機構との協力など継続的な人材供給が長期に必要なとともに、原型炉開発に向けた研究基盤体制と計画が必要である。

(5) 注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

- 1) 次世代軽水炉については、国外では実用化段階であり、受注競争が激化している。
- 2) 第4世代炉については、鉛冷却高速炉は、ロシアでは連邦特別プログラム(2005-2010)の中で BREST-300 と SVBR-100 の開発・建設が進められている。熔融塩炉は、トリウムを資源（レアアース採掘時の残渣として発生）にもつ中国ではトリウム熔融塩炉開発計画を 2011 年に発表した。

- 3) 小型炉については、米国では 2012 年に小型モジュラー炉認可支援プログラム (5 年間) を発表し、mPower 炉を選定した。その 2 回目の公募を 2013 年に発表し、Nuscale 炉を選定した。助成金は 50% 上限とされた。民間では、ビル・ゲイツ氏をオーナーとするテラパワー社が 2008 年に TWR と命名した新たな原子炉開発を開始した。TWR の基本炉型は金属燃料ナトリウム冷却高速炉で、過渡時の安全性や電源喪失の除熱性能の高い固有安全炉で、実用化に向けて研究機関と産業界との国際協力で開発を進めている。
- 4) ナトリウム冷却高速炉については、フランスではプロトタイプ炉の設計・開発を進めている ASTRID プロジェクトを推進しており、欧州における開発を先導している。ロシアでは BN800 炉が臨界となり運転が順調であり、BN1200 炉 (商用炉) を設計し、実用化に向けてしのぎを削っている。中国では、CEFR 実験炉の運転を含めて国家エネルギー科学技術計画 (2011-2020) で研究開発に取り組んでいる。韓国では、原子力研究開発事業の中でナトリウム炉の予算が全体の半分を占めるほど重点化して、プロトタイプ炉 PGSFR の設計を進めている。インドでは、実験炉を現在建設中であり、同サイトにさらに 2 基を建設し、別サイトに 2 基を建設する計画である。
- 5) 高温ガス炉については、米国では、NGNP プロジェクトが立ち上がりフェーズ 1 (2005~2010) でプラント概念設計検討が終了したが、フェーズ 2 (当初は 2011~2021; プラント詳細設計、許認可、建設、運転実証) に移行できないでいる。欧州では、過去の実績を踏まえて欧州圏内に建設して実用化をリードしたいと考え、いくつかのプロジェクトを立ち上げている。南アフリカでは、リーマンショックで 2010 年に PBMR 開発が中止に追い込まれた。中国では、HTR-10 と HTR-PM プログラムが国家エネルギー科学技術計画の中で位置づけられている。韓国では、原子力水素開発実証プログラムが 2000 年から開始されており、原子力研究開発予算の中では、2 番目に重要な項目となっている。
- 6) 核融合炉については、ITER プロジェクトは、2013 年に本部建屋が完成した。

(6) キーワード

新型炉、次世代軽水炉、第 4 世代炉、小型炉、ナトリウム冷却高速炉、高温ガス炉、核融合炉、APWR、ABWR、常陽、もんじゅ、JSFR、HTTR、ITER

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 福島第一原子力発電所事故は炉心溶融を伴うシビアアクシデントの現象解明や解析コード開発などが進められている。 第4世代炉のナトリウム冷却高速炉や鉛ビスマス炉などについては材料・熱流動・核特性に関する研究が進められている。 小型炉 (4S)、高温ガス炉 (HTTR) の開発は縮小化されている。 核融合では実験炉 ITER がフランスで建設中であり、シミュレーションなどの補完的な研究 (BA 活動) を主に青森県六ヶ所村にて実施中。
	応用研究・開発	△	↘	<ul style="list-style-type: none"> 国際競争力を目指した次世代軽水炉の開発は縮小化されている。 技術的優位だった第4世代炉としてのナトリウム冷却高速炉 (JSFR) の開については、国際的に調和する安全基準を策定中。 ナトリウム冷却高速炉 (もんじゅ) は性能試験を中断しているが、国際共同研究の場としてナトリウム取扱研修に活用されている。
	産業化	△	↘	<ul style="list-style-type: none"> 第3世代炉 (APWR、ABWR) は輸出されているが、次世代軽水炉などの新型炉については現状では産業化の議論に至っていない。
米国	基礎研究	△	→	<ul style="list-style-type: none"> シビアアクシデント耐性燃料などの新型材料開発、積極的にシミュレーション技術を活用する計算技術開発などの研究が活発である。
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 小型モジュール炉の開発が活発である。mPower 炉や NuScale 炉などの軽水炉改良版に加えて、非軽水炉であるナトリウム炉 (PRISM) やガス炉 (PBMR) もあげられる。 ビルゲイツ氏が出資したテラパワー社によりナトリウム炉 (TWR) の開発が進められている。 エネルギー省は認可支援のための資金援助を含めて積極的に開発を推進している。
	産業化	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> 次世代軽水炉 AP1000 は米国と中国で建設中であり、英国などでも建設計画があり、次世代軽水炉は勢いがある。
欧州	基礎研究	△	→	<ul style="list-style-type: none"> 欧州全体で共同して着実に研究を進めている。 核融合では実験炉 ITER を建設中であり、世界の中心となって着実に推進している。
	応用研究・開発	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> 第4世代炉のナトリウム冷却高速炉 ASTRID の予備的な概念設計段階であり、多額の予算で研究開発を進めている。規制側と調和を図りながら概念設計に進める準備をしている。 第4世代炉のガス冷却高速炉 ALLEGRO は予算を削りつつも研究開発は継続している。
	産業化	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> 次世代軽水炉 EPR はフランスとフィンランドと中国で建設中であり、英国や米国などでも建設計画があり、次世代軽水炉は勢いがある。
中国	基礎研究	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ナトリウム冷却高速炉は中国原子能科学研究院 (CIAE: China Institute of Atomic Energy) により実験炉 CEFR が 2011 年に初送電を達成し、性能試験を実施している。
	応用研究・開発	△	↗	<ul style="list-style-type: none"> ガス炉は精華大学により実験炉 HTR-10 の知見を踏まえて、実証炉 HTR-PM を建設している。
	産業化	△	→	<ul style="list-style-type: none"> 自主技術で開発するため、(次世代軽水炉ではない) 軽水炉 CAP1400 の設計を推進している。
韓国	基礎研究	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ガス炉の燃料体である TRISO 燃料を多目的照射炉 HANARO で照射実験を行い、基礎研究が進められている。
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ナトリウム冷却高速炉は PGSFR を設計中であり、自然循環試験ループを製作するなどして研究開発を推進中。

研究開発領域
原子力区分

	産業化	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ・米国 System80+をベースに自主技術で開発された次世代軽水炉 APR1400 は UAE に輸出成功しており、他国でも受注競争に参加している状況である。 ・小型モジュラー炉 SMART は海水淡水化と熱供給が可能な多目的原子炉であり、海外輸出戦略を展開している。
アジア	基礎研究	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ・第 4 世代炉の鉛冷却高速炉 BREST300、鉛ビスマス冷却高速炉 SVBR100 を建設計画であり、幅広く基盤技術を開発することが目標とされている。小型の熱利用コージェネ炉や浮揚型原子炉の研究開発も実施中。
	応用研究・開発	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ・ナトリウム冷却高速炉は堅実に開発を維持しており、実験炉 BOR60、原型炉 BN600 に次いで、実証炉 BN800 が 2014 年に初臨界を達成した。BN1200 実用炉の設計も進めており、実用段階に近くなってきている。
	産業化	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ・軽水炉 VVER は東欧や中央アジア諸国を中心に輸出しており、燃料供給も合わせて輸出産業と位置づけている。
インド	基礎研究	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ・大学や研究所で軽水炉を中心に研究が進められている。
	応用研究・開発	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ・ナトリウム冷却高速炉は PFBR 原型炉を建設しており、さらに同型炉を複数建設し、技術確立を図っている。
	産業化	×	→	<ul style="list-style-type: none"> ・輸入して技術習得が優先であり、産業化までには発展していない。

(註 1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

(註 2) 現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○：ある程度の活動・成果が見えている、△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註 3) トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

(8) 引用資料

- 1) https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_9260/public
- 2) <http://www.world-nuclear.org/info/Nuclear-Fuel-Cycle/Power-Reactors/Advanced-Nuclear-Power-Reactors/>
- 3) <http://www.meti.go.jp/committee/materials2/downloadfiles/g90331c05j.pdf>
- 4) <http://www.world-nuclear.org/info/Nuclear-Fuel-Cycle/Power-Reactors/Generation-IV-Nuclear-Reactors/>
- 5) http://www.meti.go.jp/meti_lib/report/2013fy/E003617.pdf
- 6) <http://www.world-nuclear.org/info/Nuclear-Fuel-Cycle/Power-Reactors/Small-Nuclear-Power-Reactors/>
- 7) <http://www.world-nuclear.org/info/Current-and-Future-Generation/Fast-Neutron-Reactors/>
- 8) http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu2/061/houkoku/1344598.htm
- 9) http://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/pdf/140411.pdf
- 10) http://www.iaea.or.jp/htgr/pdf/00_summary01/00_1.pdf
- 11) http://www.iaea.or.jp/htgr/pdf/02_result/infomation/02result_20130903_04.pdf
- 12) http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu2/056/shiryu/attach/1338925.htm
- 13) <http://www.aesj.or.jp/~fusion/aesjfmt/rensai.htm>
- 14) <http://www.aec.go.jp/jicst/NC/iinkai/teirei/siryu2013/siryu17/siryu2-2.pdf>

3.3.1.8 核燃料サイクルの技術

(1) 研究開発領域名

核燃料サイクルの技術

(2) 研究開発領域の簡潔な説明

原子力発電で一度使ったウラン燃料（使用済燃料）は、分別処理することで、もう一度原子力発電の燃料としてリサイクルできる。ウラン資源を再利用すれば、エネルギーを長期にわたり安定供給することが可能となる。

発電後の使用済燃料の中の核分裂していないウランや、原子炉内で生まれたプルトニウムを再処理して取り出す技術、これを再利用するための濃縮技術および燃料加工技術が含まれる。再加工した燃料は軽水炉または高速炉で再利用されることになる。

(3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向¹⁻⁵⁾

再処理技術に関しては、大きく湿式法と乾式法に分けられ、大型商業施設として稼動しているものは湿式法を採用している。再処理技術は、1944年米国で原子爆弾製造を目的にプルトニウム生産炉の燃料からプルトニウムを回収することからスタートした経緯があり、核拡散防止の観点からもウラン濃縮技術と並んで機微技術に属する。初期の軍事用プルトニウム生産、天然ウラン・ガス炉燃料再処理というステップを経て、現在の主流である軽水炉使用済燃料の処理へと進んだ結果、機械的前処理法にピューレックス（PUREX: Plutonium Uranium Redox EXtraction）溶媒抽出法を組み合わせた方式（湿式法）が世界的に確立されている。

湿式法は溶液を用いる連続処理であるため、大規模化したときのスケールメリットが大きく、このため各国の商業施設で採用されている。湿式法は空気中の処理が可能であり、軽水炉燃料の再処理で実績が豊富である一方、有機溶媒を使用するため、放射線による劣化により二次廃棄物が発生する。また、元来プルトニウムの単離を目的としたプロセスであるため、日本では核拡散抵抗性の観点で最後のプロセスでウラン溶液と混合する必要がある。高レベル放射性廃棄物処分の負荷を低減するためにマイナーアクチノイド（MA: Minor Actinoid）を回収する場合には MA 回収工程を付加する必要がある。

乾式法は商用段階には至っていないが、有機溶媒などを使用せず、熔融塩や液体金属を使用するため、溶媒劣化がなく、冷却時間の短い使用済燃料も処理可能であり、二次廃棄物も少ない。また、原理的にプルトニウムの単離ができず、また、MA や希土類の核分裂生成物（FP: Fission Products）の一部がウラン-プルトニウムに同伴するため、核拡散抵抗性が高い。金属燃料サイクルの場合、ウラン-プルトニウム合金の回収物には MA が同伴するため、MA のサイクル内の閉じ込めが容易である。バッチ式の処理のため、小規模施設でも経済性が悪くならないことが期待される。しかしながら、実用化に向けては、高温での運転に長期に耐える材料やプロセス内の核物質の計量管理方法など課題が存在する。

我が国では日本原子力研究開発機構（JAEA: Japan Atomic Energy Agency）を中心に 1999年7月から 2006年3月まで実用化戦略調査研究が行われ、FBR、再処理、燃料製造などに関するこれまでの研究開発により得られた知見や事故の経験などを踏まえ、

幅広い FBR サイクル技術の中から技術選択肢の評価を行い、革新的な技術を取り入れつつ、競争力のある実用化候補概念の構築とその研究開発計画などの検討・策定を行った。国は、その研究成果を評価し、酸化物燃料を用いたナトリウム冷却 FBR、PUREX 法の簡素化を図り MA 回収も行う先進湿式法再処理、燃料粉末の取扱いを改善し遠隔操作により燃料を製造する簡素化ペレット法燃料製造の組合せを現在の知見で実用施設として実現性がもっとも高い実用システムの主概念とし、今後は実用化に集中した技術開発を行い、FBR サイクルの研究開発を加速すべきとした。2006 年からは、文部科学省・経済産業省・電力会社・メーカ・JAEA が一体となって、「高速増殖炉サイクル実用化研究開発 (FaCT: Fast reactor Cycle Technology development project) プロジェクト」を進めてきた。また、軽水炉から高速増殖炉への移行期における核燃料サイクルに適用可能な再処理技術に関して、湿式法や乾式法を含むさまざまな再処理技術を対象として検討が行われた⁶⁾。

濃縮技術に関しては、微細穴を透過するときの拡散速度の違いを用いる「ガス拡散法」、遠心力の場で質量差による違いを用いる「遠心分離法」、電磁場で質量差による違いを用いる「電磁法」、およびノズルから吹き出す速度差を利用する「ノズル法」などが考え出された。また化学的に酸化還元時の反応差を利用した「イオン交換法」、光化学反応速度差を利用した「光化学的分離法」などがある。これらの方法は、すでに第二次世界大戦以前から原理的に可能であることが知られていたが、1960 年に米国のメイマンがレーザーを発明すると、レーザー光線を照射して分離する「レーザー法」が提案され、1970 年代から世界各国でガス拡散法および遠心分離法に代わる次世代のウラン濃縮法として研究開発が行われた。レーザー法には、ガス拡散法、遠心分離法などで利用される六フッ化ウランを使用する「分子レーザー法」と「SILEX 法 (Separation of Isotopes by Laser EXcitation)」、金属ウランを高温にして発生させたウラン蒸気を使用する「原子レーザー法」がある。また、塩酸ウラン溶液を使用するイオン交換法についても次世代濃縮法として開発が行われた。

現在、商業用ウラン濃縮工場に採用されているのはガス拡散法と遠心分離法であり、ガス拡散法については、米国とフランスに、遠心分離法については、英国、オランダ、ドイツ、中国、ロシア、日本に商業用ウラン濃縮工場がある。ほかの方法については、実験室規模からパイロットプラントに至る色々な段階まで研究開発が行われたが、SILEX 法を除いてすべて開発は中止された。開発内容は、機微技術のため不明である。

MOX 燃料 (Mixed-OXide fuel) は、天然ウランまたは回収ウランの二酸化物にプルトニウム二酸化物を混ぜて焼き固めたペレット燃料である。軽水炉に用いる MOX 燃料のプルトニウムの含有量 (富化度) は平均すると数% 以下であり、高速増殖炉用の MOX 燃料では約 20% である。プルトニウム含有量の少ない軽水炉用 MOX 燃料は、ウラン酸化物燃料の性質とおおよそ類似している。ウラン酸化物燃料の製造とほぼ同様であるがプルトニウムを含むことから、プルトニウム混合工程が追加されるほか、必然的にプルトニウムスポットをチェックする検査工程もまた追加される。プルトニウムがウランより強い α 放射体であること、臨界量が小さいことから、その取扱いにおいてウラン施設よりも厳しい安全上および保障措置上の規制が課せられる。

また、これら再処理の技術の研究レベル、技術レベルを国際交流も含めて高く維持す

るため、広い見識と豊かな教養をもった有能な研究者、技術者を育成していかなければならない。

(4) 研究開発推進上の課題・ボトルネック (科学技術的課題、政策的課題) ¹⁻⁴⁾

湿式法による商業再処理施設では、経済性を向上させるために建設・運転費の削減は重要な課題であり、建屋敷地面積の削減と運転コストの削減を同時に達成するため、抽出サイクルの性能向上と全工程の簡素化による高度化が検討されている。また、気体、液体の形で発生する放射性廃棄物の適切な処理による環境放出低減化、運転・保守の遠隔化による従事者の被ばく低減化、材質、設計、施工に関する品質管理の高度化、保障措置対応の向上、深層防護設計に基づく安全確保、稼働率の向上など、多面的な技術開発の進展により大型施設が稼働しているが、継続的な改善のためにはこの取組みの継続が必要である。

個別プロセスで見ると、燃料の燃焼度が高まるにつれ残渣の量が増えるため、溶解液から残渣を除去 (清澄) することが重要になり、最近の大型再処理施設では遠心式が採用されている。装置が回転機であるため保守が重要となる。また、PUREX 法の分離プロセスは非常に早いため、燃料の高燃焼度化による溶媒の放射線劣化対策として溶媒と水溶液との接触時間を短くするため、抽出装置がミキサセトラからパルスカラムに変わってきており遠心抽出器の採用も検討されている。

再処理はウラン資源有効利用のために使用済燃料からプルトニウムを回収し、それを FBR で利用することを基本としているため、先進的リサイクル技術の確立に向けた検討を継続していくことが重要であり、我が国では FaCT プロジェクトがこれに当たる。先進湿式法再処理では、晶析技術開発、ウラン・プルトニウム・ネプツニウムの共回収技術、抽出クロマトグラフィなどについて技術開発が、簡素化ペレット法燃料製造では脱硝・転換・造粒技術、成型技術などについて技術開発が進められた。

政策的な課題としては、現在商用 FBR がなく当面はプルサーマルとして軽水炉で利用することが考えられているが新規制基準対応もあり利用計画は進展していない。用いられている再処理技術がウラン、プルトニウムを高純度に分離回収するためのものであることから、回収したプルトニウムの平和利用のための使用計画が明確になっていることが国際的に重要である。我が国では核拡散抵抗性を考慮して、回収したプルトニウムはウランとの混合物として貯蔵されるが、それでもプルサーマルでの利用計画が明確でないことで批判を受けることがある。

濃縮技術は機密措置のため詳細は明確ではないが、主流技術である遠心法に関しては経済性向上のために、単機分離能力向上やメンテナンスフリーの運転時間の延長が求められ、遠心機材料開発、製造技術高度化などの技術開発が進められている。

MOX 燃料製造については、ウラン新燃料に比べ放射能が高い (特にアルファ線、中性子線が著しく高い) ため、燃料の製造については遠隔操作化を行い、作業員の不要な被ばくに十分配慮して行う必要がある。二酸化ウラン中に二酸化プルトニウムを混ぜることにより、燃料の融点上がるが、熱伝導率が下がり、電気抵抗率が上がり、これにより燃料温度が高くなり溶けやすくなる。使用済 MOX 燃料の再処理では、使用済ウラン燃料に比べ、プルトニウムの取扱量が増えるため、臨界への配慮が重要になることや溶

媒劣化が起りやすくなること、核分裂生成物のうち白金族の収率が増えるため、不溶解残渣が増加する傾向にあること、MOX 使用済燃料を再処理した高レベル廃液には発熱性の MA を多く含むため、それをガラス固化した場合、地層処分施設に熱的影響を与える可能性があることなど、対応すべき点がある。フランスでは MOX 使用済燃料の再処理に関して当初 APM (1962 年にマルクールで建設された再処理パイロットプラント) で研究が進められ、その後 UP2-400、UP2-800 においては、使用済 MOX 燃料溶解液を使用済ウラン燃料溶解液あるいは再処理で回収したウラン燃料溶解液で希釈することにより商用炉で発生した MOX 使用済燃料の再処理に成功している。我が国の東海再処理施設においては、同様の方法でふげん MOX 燃料の再処理を成功させている。

(5) 注目動向 (新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など) ^{4,9)}

我が国においてはウラン資源有効利用の観点から、FaCT を進めてきたが、福島第一原子力発電所事故を受けて、現在、プロジェクトは事実上凍結の状態にある。その一方で、2013 年 9 月に文部科学省から示された「もんじゅ研究計画」に沿って放射性廃棄物の減容・有害度低減のための研究開発が進められつつある ⁷⁾。

甘粛省嘉峪関では年間 800t の商業用再処理プラントの建設を AREVA 社の技術支援を得て計画しているが、2020 年頃には年間 800tHM の六ヶ所再処理工場と同規模の商業工場をフランスより導入し、運転する計画で、2013 年 4 月 25 日、中国とフランスの首脳 (習近平主席 - オランド大統領) が再処理工場建設契約前の仕様を取り決めた同意書にサインした。

GE 日立によるレーザー法濃縮施設 (SILEX 法) はパイロットプラント運転を経て 2012 年に許認可を取得した。今後商業化の最終判断が行われる予定。

(6) キーワード

先進的リサイクル技術、MA 回収、Pu 利用、MOX 使用済燃料再処理、核拡散抵抗性、保障措置

(7) 国際比較^{1,8,9)}

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	△	→	・大学の研究環境変化およびJAEAへの研究集中化により研究者数が減少している。
	応用研究・開発	○	→	・FaCTプロジェクトが進められてきたが、福島での事故を受けて事実上凍結。乾式再処理に関しては電中研で研究が進められている。放射性廃棄物の減容・有害度低減を目指す研究が進められつつある。
	産業化	◎	→	・六ヶ所のサイクル施設の建設（再処理、MOX）・操業（濃縮）が進んでいる。
米国	基礎研究	△	→	・再処理路線は放棄されているため目立った研究活動は行われていない。
	応用研究・開発	○	→	・GE日立社によるレーザー濃縮施設（SILEX法）はパイロットプラント運転を経て2012年に許認可を取得した。今後商業化の最終判断が行われる予定。
	産業化	○	→	・濃縮はUSEC社がガス拡散法、LES社が遠心法による工場で生産している。政策により商業用再処理は行わない。再転換・燃料加工設備は順調に運転されている。
欧州	基礎研究	○	→	・英国原子力公社（UKAEA：United Kingdom Atomic Energy Authority）、フランス原子力・代替エネルギー庁（CEA：Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives）などの研究機関や大学において広範な研究が進められている。
	応用研究・開発	○	→	・英国においてはUKAEAが、フランスにおいてはCEAが核燃料サイクルに関する研究開発を行っている。
	産業化	○	→	・再処理に関しては、フランスのラアージュ、英国のセラフィールドで大規模な工場が操業している。濃縮はフランスのトリカスタンに国際共同企業体ユーロディフ（EURODIF：European Gaseous Diffusion Uranium Enrichment Consortium）が大規模なガス拡散法の工場を操業し、遠心法はURENCO社がカーペンハースト（英）、アルメロ（オランダ）、グロナウ（ドイツ）に濃縮工場をもっている。MOX燃料加工工場はマルクール（フランス）とデッセル（ベルギー）で操業中である。
中国	基礎研究	○	↑	・東工大・小澤教授の日中大学間核燃料サイクル学術討論会の状況などから広範囲にわたり戦略的に研究が進められている。
	応用研究・開発	○	→	・上記同様、産業化に向けたマイルストーンを明確にして開発が進められている。
	産業化	◎	↑	・酒泉に軍事用再処理プラント、蘭州には多目的再処理プラント（50t/y）が稼働している。甘粛省嘉峪関では年間800tの商業用再処理プラントの建設をAREVA社の技術支援を得て計画している。ウラン燃料加工工場は1950年代より建設が開始され設備容量が順次拡大されている。国策が再処理路線のため、MOX燃料製造のためのパイロットプラント建設が中国核工業総会社とベルゴニュークリア、ベルギー原子力研究センター（SCK-CEN：Studiecentrum voor Kernenergie・Centre d'étude de l'Energie Nucléaire）などとの間で技術指導・技術移転が図られる予定である。
韓国	基礎研究	×	→	・ワンスルー政策により核燃料サイクルに関する研究はほとんど実施されていない。

研究開発領域
原子力区分

応用研究・開発	○	→	・韓国原子力研究所 (KAERI : Korea Atomic Energy Research Institute) において、次世代炉・先進的核燃料リサイクルの研究開発を行っている。使用済み燃料の再処理技術開発の一環として、世界で初めてパイロプロセスのすべての工程を工学規模の一貫工程で模擬できる試験施設の PRIDE (Pyroprocess Integrated inactive DEMonstration facility) を 2013 年上半期中に完成、試運転を経て、年内に運営を開始する予定である。
産業化	△	→	・韓国電力公社傘下の KNFC 社において、再転換および燃料の成型加工を実施している。再処理・濃縮施設に関しては保有の放棄を宣言している。

(註 1) フェーズ

基礎研究フェーズ : 大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ : 研究・技術開発 (プロトタイプの開発含む) のレベル

産業化フェーズ : 量産技術・製品展開力のレベル

(註 2) 現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎ : 他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○ : ある程度の活動・成果が見えている、

△ : 他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、× : 特筆すべき活動・成果が見えていない

(註 3) トレンド

↑ : 上昇傾向、→ : 現状維持、↓ : 下降傾向

(8) 引用資料

- 1) 原子力百科事典「ATOMICA」、(財)高度情報科学技術研究機構 (RIST)
- 2) 「原子力ポケットブック2012年版」、(社)日本電気協会
- 3) 「原子力年鑑2014」、(社)日本原子力産業協会
- 4) 「核燃料サイクルを巡る現状について」新大綱策定会議 (第4回) 資料第2-1号、内閣府原子力政策担当室、平成23年2月
- 5) 電中研ニュース、460、2009年7月
- 6) 「核燃料サイクル分野の今後の展開について【技術的論点整理】」、高速増殖炉サイクル実証プロセス研究会、2009年7月7日 「もんじゅ研究計画」、文部科学省 科学技術・学術審議会 研究計画・評価分科会 原子力科学技術委員会 もんじゅ研究計画作業部会、2013年9月
- 8) 平成24年度発電用原子炉等利環境調査 (諸外国における原子力発電及び核燃料サイクル動向調査) 最終報告書、一般財団法人 日本エネルギー経済研究所、平成25年3月
- 9) Science Portal China、中国の核燃料サイクルレビュー、中国科学技術月報2013年6月号 (第80号) (www.spc.jst.go.jp)

3.3.2 原子力の将来に関わらず取り組むべき研究課題

3.3.2.1 高レベル放射性廃棄物の管理・処分

(1) 研究開発領域名

高レベル放射性廃棄物の管理・処分

(2) 研究開発領域の簡潔な説明

過去の原子力発電利用を通してすでに発生している高レベル放射性廃棄物、ならびに今後の原子力発電利用により発生する高レベル放射性廃棄物および使用済み核燃料を、科学技術的に妥当で、経済的に合理的で、社会的に受容可能な形で管理・処分するための研究開発領域である。そこには、福島第一原子力発電所事故により発生したデブリについても同様に安全に管理・処分することも含む。本領域では、高レベル放射性廃棄物、使用済み核燃料、デブリの総称として、高レベル放射性廃棄物と称するものとする。

少なくとも既存の高レベル放射性廃棄物とデブリの管理・処分のための研究開発は、それらの発生者として現世代が全責任を負っているが、同時にそれは将来世代の意思決定プロセスに相応の柔軟性を保証するものでなければならない。また、放射性廃棄物の管理・処分の問題は、デブリを含めてすでに発生した廃棄物についての対応は求められるのであって、我が国が原子力に依存しないと決めたとしても、廃棄物問題からは決して解放されない。本研究開発領域は、処分の性能評価・安全評価を支える物理、化学、数学から、処分場の設計・建設・操業・閉鎖までの工学技術のほか、世代内・世代間倫理や国際政治まで幅広い。

(3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

高レベル放射性廃棄物の管理・処分では、いわゆる工学・自然科学という範疇に絞っても、ピコ秒レベルで発生する物理反応、化学反応の理解から 100 万年を超える時間スケールでの性能を論理で立証する性能評価の体系化や、原子・分子レベルでの反応の理解から数 km 以上の空間スケールでの地層の安定性や海水準変動・地球温暖化の影響などを取り込む評価を可能とする研究開発が不可欠である。また、高レベル放射性廃棄物の管理・処分システムの構築とは、自動車開発のように、試験や実際の事故・故障を通しての安全性向上という既存の人工物の開発と同じ方法論が取れないこと、すなわち数世代という時間枠ですら安全を実証することは不可能という人類がこれまで経験したことのない人工システムの構築を意味する。さらに事故や故障を通して同時に発展する安全基準・安全規制のあり方も、安全を決して実証できない人工システムを対象とすることでこれまでの考え方とは異質なものとならざるを得ない。

また、工学、物理、化学、数学に重心をおく研究開発領域だけが対象となるのではない。核不拡散や核セキュリティといった国際政治との関係、立地地域と処分施設ならびに日本という国全体との共生のあり方、倫理観や文明史観における世代間のギャップをどのように考えるのか、といった研究領域も含まれる。

高レベル放射性廃棄物の管理・処分について、具体的には以下のような研究開発課題例が存在する。なお、主要な放射性核種の吸着挙動解明、コロイドや微生物の影響の定量化、掘削影響領域での物質輸送の理解、地下処分施設建設のための掘削技術の高度化、

日本に処分場を建設できる安定な地層は本当にあるのかといった過去 30 年間重要な研究開発課題として指摘され続けてきているものは他書¹⁻³⁾に譲る。ただし、それらの課題は下記の課題例とも相互に密接に関連しており、重要であることには変わりはない。

1. 高レベル放射性廃棄物の管理・処分における性能評価の信頼性向上

管理・処分システムが長期にわたってどのような振る舞いをするのかについてシナリオを想定し、モデルを構築して、将来の最大被ばく線量率を計算し、安全基準値より小さいことを示すことは性能評価のごく一部に過ぎない。性能評価とは、決して実証し得ないシステムの振舞いを、上述の計算やそれを支える物理、化学、数学を含め、有形・無形の知識・知恵のデータベース化や体系化などを包含して記述する論理の総体をいう。国ごとの事情も勘案し、科学技術的にはもちろん、経済的、社会的、環境的にいかにロバストな論理体系とできるかが問われている。

2. 長期リスクに対応した安全規制科学の確立

高レベル放射性廃棄物の管理・処分の通常シナリオでは、そのリスクは小さくまた最大リスクは数 10 万年後に現れることになっている。また、管理・処分システムが安全であることは、実験や試験を通して実証することは決してできない。そのようなリスクを対象とする安全規制の考え方は確立していない。また、閉鎖後モニタリング終了までも数 100 年とされる時間枠内でも、操業許可時や閉鎖許可時とは違う知識や技術の発展があり、社会的要請の変化もあり得る。それに柔軟に対応し社会的に合理的な安全を確保するための安全規制に関する技術開発が望まれる。

3. 可逆性と回収可能性に関する技術開発と制度整備

可逆性は処分計画を段階的に進め、それぞれの段階において可能な選択肢を残すことによって、所定の期間、処分場の管理に柔軟性を残すことを意図する。回収可能性は、廃棄物の処分場への埋設段階を逆戻りさせる可能性を意図する。我が国における、可逆性および回収可能性の定義とその社会的、技術的な位置づけを明確にするとともに、管理・処分戦略の中にどの程度取り込むべきなのか、国のエネルギー政策や安全規制との関係をどうするのかを明らかにし、そのための技術開発を行う必要がある。

4. 核不拡散・核セキュリティ確保のための技術開発と制度設計

使用済み核燃料やデブリの中には、原子炉級のプルトニウムが含有される。原子炉級のプルトニウムは核兵器転用が可能であるため、使用済み核燃料やデブリの管理施設、処分施設には相応の核不拡散・核セキュリティ確保のための技術開発、制度設計が求められる。インサイダー対策や出入口監視カメラの設置などほかの原子力施設と同様な課題のほか、地下 300 m 以深への遠隔での埋設や、埋設作業と処分坑道埋め戻し作業が並行して進む、閉鎖後数 100 年後には安全確認のためのモニタリングは終了することが想定されているなどの処分施設特有の特性に対応する必要がある。そしてそれらを勘案した保障措置、核物質防護の制度設計が求められる。

5. 分離変換技術開発

かつて分離変換技術は、主にインベントリのハザードを大幅に低減するものとして研究開発されたものであり、分離変換によっても高レベル放射性廃棄物管理・処分は必須ではあるが、一部においては、処分システムでのリスク低減の効果がみられる⁴⁾。ただ、使用済み核燃料の処分では重要となるセシウム 135 やヨウ素 129 への対応など、高レベル放射性廃棄物処分システム高度化の一翼を担うものとしての位置づけを明確にした上で、例えば加速器駆動核変換システム (ADS : Accelerator Driven System) による変換のための核特性評価や燃料製造技術開発、燃料挙動評価といった要素技術の実証と確立、窒化物燃料の乾式再処理技術の実証と確立、ADS をコアとした分離変換トータルシステムの設計や原子力システム全体での評価が望まれる⁵⁾。

6. 社会的意思決定

高レベル放射性廃棄物管理・処分における大きな課題は最終処分場の選定問題である。この問題は、処分場候補地だけの問題ではなく、原子力エネルギーを利用している国民全体の問題でもある。処分場候補地を含む地域コミュニティと国民全体が一緒になって意思決定することを支援するための、情報の提供方法、住民の主体的参加と理解促進方法 (処分場受け入れを前提とするのではなく、参加と理解の結果受け入れないという意思決定を住民が行うことを支援する方法も含まれる)、主に便益のみを享受する消費地とリスクも負うことになる候補地との関係、何世代にもわたる長期的リスクを現世代の判断だけで引き受けるという決定ができるのかという世代間倫理の問題などのほか、原子力政策や処分実施主体の組織論などに関する研究開発が必要である。

7. 知識や情報の長期管理と継承

高レベル放射性廃棄物が、いつ、どこに、どのような経緯で、どれだけ、どのような形態・状態で埋設されたのかなどの知識や情報を、何世代にもわたって正確に伝承できるようにするための技術開発は必須である。これがいかに困難な課題であるかは、エジプトのピラミッドの建設理由が専門家の間でも意見が一致していないこと、多くの重要な書籍や書類が戦火や政権交代の中で消失し隠滅されてきたこと、パソコンの OS の更新により過去のデータが読めなくなること、古代文字で解読できていない文字があることなどから、容易に理解できる。

8. デブリの管理・処分特有の課題

多くのところで上記 1~7 と重なるが、デブリの保管方法、保管容器の長期健全性、デブリの地下環境中での安定性の理解などのほか、デブリの処分方法は一般の高レベル放射性廃棄物と同等でよいのか、管理・処分施設立地は社会的にどのように考えるべきなのか、合理的な処分を実現するための処理方法はどうか、などの課題がある。

高レベル放射性廃棄物処分の管理・処分の研究開発領域の多くは世界共通であるが、一方で例えばカナダの場合、氷河期には最大で厚さ 3 km の氷床に覆われることによって地下水流動や地質構造に変化が生じる可能性がありそれらを定量的に予測する必要がある。また、オンタリオ州南西部の地下水はイオン強度が 5~8 mol/L (海水は 0.7 mol/L)

の高塩濃度であるため、そこでの放射性核種の物質輸送の解明が重要となる。さらに、原油を満載した列車が脱線し多数の死者・行方不明者を出した 2013 年のラック・メガンティック事故の例にみるように、鉄道で高レベル放射性廃棄物を輸送する際の安全確保技術（竜巻など悪天候の影響なども含む）が求められているなど、それぞれの国固有の事情による研究開発項目は、それぞれの国で着実に進められている。

（４）研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

地質環境が複雑で地震や火山の活動が活発な我が国では、地質環境の長期安定性に関する科学技術的合意が専門家の間でも必ずしも取れているという段階に至っていないことをはじめ、核不拡散・核セキュリティ・核物質防護の分野で米国の専門家と対等に議論できる専門家がほとんどいないことや、放射性廃棄物管理・処分の専門家と一般社会とはもちろん、社会科学や倫理学、歴史学などの専門家とのコミュニケーションがほとんど皆無であるだけではなく、物理や化学の専門家、さらには放射性廃棄物管理・処分以外の原子力の専門家との連携も弱い。他流試合を避け、小さいアカデミアの中だけで閉じてしまっている。ただし、これは我が国だけにみられる問題ではない。また社会科学系分野やほかの自然科学系分野にも放射性廃棄物管理・処分分野を理解しようという意識がないことにも問題がある。

また、本分野は、材料面、場所、冷却、社会工学、維持管理、品質保証など放射線以外にもさまざまな分野の技術を総合しなければならない重要技術である。撤退、推進に関わらず必須の技術であり、原子力関係のみならず材料、機械、電気、化学など多様な人材の確保が急務である。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

米国では、2012 年 1 月にブルーリボン委員会により放射性廃棄物管理を含むバックエンド対策の代替案が検討され勧告が出された。現在連邦議会でも勧告に沿った検討が進められるとともに、勧告への対応に関連した研究開発も開始されている^{6,7)}。

カナダでは「適応性のある段階的管理」が実施され、2014 年 7 月現在で 14 箇所（すべて原子力施設が立地していない自治体）においてサイト選定の評価が進められている⁸⁾。数年以内に 1、2 箇所に絞り込まれる予定である。

英国では、原子力産業界と政府が共同で「英国の原子力の将来」と題した報告書を 2013 年 3 月に取りまとめ、「地層処分場の開発は優先度の高い課題」とした⁹⁾。この報告書は、英国の原子力開発の中長期戦略となるものであり、地層処分に関するマイルストーンが設定された。

中国では、2006 年に決定された「高レベル放射性廃棄物地層処分に関する研究開発計画ガイド」¹⁰⁾に基づき、技術開発とサイト選定が着実に進められている。

（６）キーワード

高レベル放射性廃棄物、使用済み燃料、デブリ、廃棄物管理、廃棄物処分、性能評価・安全評価、長期リスク管理、核不拡散、核セキュリティ

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	・大学や研究機関において世界トップクラスの基礎研究が継続的に実施されている。
	応用研究・開発	△	→	・福島第一原子力発電所事故以降、応用研究・開発レベルでの研究は世界的に顕著な成果をあげるには至っていない。
	産業化	×	↓	・福島第一原子力発電所事故以降、サイト選定プロセスは事実上停止している。
米国	基礎研究	◎	↑	・ブルーリボン委員会の勧告に対応した基礎研究が大学や研究機関で進められている ⁶⁾ 。
	応用研究・開発	◎	↑	・使用済み燃料の長期化した貯蔵を支援する研究開発、発熱性廃棄物処分のための岩塩処分場のフィールド試験、同意に基づくサイト選定プロセスの計画策定ほか、ブルーリボン委員会勧告に対応した使用済み燃料処分などプログラムが予算の裏づけのもとで実施されている ⁶⁾ 。
	産業化	○	→	・米国エネルギー省 (DOE : United States Department of Energy) は、2013年1月に「使用済燃料及び高レベル放射性廃棄物の管理・処分戦略」を公表し、2025年までに使用済燃料の中間貯蔵施設が使用可能となるようにサイト選定と許認可を実施すること、2048年までに地層処分場を実現するように処分場のサイト選定とサイト特性調査を進めることなどのスケジュールを示した ⁷⁾ 。 ・連邦議会でもブルーリボン委員会の勧告に基づいた法案の審議が進んでいる。
カナダ	基礎研究	◎	↑	・大学や研究機関において高塩濃度における物質輸送、鉱物空隙水化学、吸着のデータベース化などが着実に進められている ^{11,12)} 。
	応用研究・開発	◎	↑	・カナダ楕状地の結晶質岩系での処分システムの安全評価に続き、堆積岩系での安全評価も実施できるレベルに達している ¹³⁾ 。
	産業化	◎	↑	・21箇所の関心表明を受け、サイト選定プロセスが進められ、14箇所まで絞り込まれている ⁸⁾ 。数年内に1、2箇所に絞られる予定である。
欧州	基礎研究	◎	↑	・高塩濃度や標準状態よりも高い温度での化学熱力学、物質輸送などに関する基礎研究が継続して実施されるとともに、欧州内でのデータベース整備も進んでいる ^{14,15)} 。
	応用研究・開発	◎	↑	・フランス・ビュール地下研究所やスイス・モンテリ岩盤研究所などで、ガス拡散、微生物活動、母岩への熱影響などさまざまな応用研究や技術開発が進められている ^{16,17)} 。
	産業化	○	→	・フィンランドで放射線・原子力安全センターによる建設許可申請書に対する安全審査の第一段階が完了した。 ・スウェーデン・フォルスマルクにおける立地・建設許可申請書に対する安全審査が実施中である。
中国	基礎研究	◎	↑	・大学や研究機関により基礎研究が精力的に行われている ¹⁸⁾ 。
	応用研究・開発	○	↑	・甘粛省北山の地質環境などを意識した応用研究や技術開発に関する論文も最近多く発表されるようになってきている ¹⁹⁾ 。
	産業化	○	↑	・過去の調査で選定された5箇所の候補地域のうち、甘粛省北山とその周辺での調査が進んでいる。さらに新疆地域も追加された。
韓国	基礎研究	◎	↑	・乾式再処理を前提にした処分に関する研究を中心に、基礎研究が大学や研究機関において実施されている ²⁰⁾ 。ただし、米韓原子力協定改定時における乾式再処理承認を目指し、国内に相当の学術的・技術的背景があるという証拠を積み上げたいという事情もあると思われる。

研究開発領域
原子力区分

応用研究・開発	△	→	・使用済み核燃料の処理・処分に關する方針策定が議論されている途上で、放射性廃棄物管理基本計画が2014年中に決定される予定である。このため、応用研究や技術開発に顕著な活動はまだみられていない。
産業化	○	↑	・公論化と呼ばれる社会的コンセンサスを得るための枠組みやスケジュールが決定された ²¹⁾ 。

(註1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

(註2) 現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○：ある程度の活動・成果が見えている、

△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド

↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向

(8) 引用資料

- 1) 長崎晋也, 中山真一編, 放射性廃棄物の工学, オーム社 (2011).
- 2) 電気事業連合会, TRU廃棄物処分技術検討書: 第2次TRU廃棄物処分研究開発取りまとめ (2005).
- 3) 原子力発電環境整備機構, 地層処分事業の安全確保(2010年度版), NUMO-TR-11-01 (2011).
- 4) J. Ahn and T. Ikegami, Effective Application of Partitioning and Transmutation Technologies to Geologic Disposal, Eighth Information Exchange Meeting on Actinide and Fission Product Partitioning & Transmutation, Las Vegas, Nevada, Nuclear Energy Agency, Organization for Economic Co-operation and Development (OECD/NEA), Nov. 9-11, 2004.
- 5) 科学技術・学術審議会 研究計画・評価分科会 原子力科学技術委員会 群分離・核変換技術評価作業部会(第5回), 配布資料2-1, 2-2, 3 (2013).
- 6) <http://energy.gov/ne/downloads/used-fuel-disposition-campaign-disposal-research-and-development>
- 7) DOE, Strategy for the Management and Disposal of Used Nuclear Fuel and High-Level Radioactive Waste (2013)
- 8) http://www.nwmo.ca/home?language=en_CA
- 9) https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/168048/bis-13-627-nuclear-industrial-strategy-the-uks-nuclear-future.pdf
- 10) http://www.gov.cn/gzdt/2006-02/23/content_208957.htm
- 11) S. Nagasaki, Impact of Colloid Formation on Safety Assessment of Waste Disposal in Brine, Proceedings of PBNB 2014, Vancouver, Canada, August 24-28 (2014).
- 12) NWMO, Technical Program for Long-Term. Management of Canada's Used Nuclear Fuel - Annual Report 2012, NWMO-TR-2013-01 (2013).
- 13) NWMO, Adaptive Phased Management: Postclosure Safety Assessment of a Used Fuel Repository in Sedimentary Rock, NWMO-TR-2013-07 (2013).
- 14) <https://www.thereda.de/>
- 15) <https://www.hzdr.de/db/res3t.login>

- 16) <http://www.andra.fr/international/>
- 17) <http://www.nagra.ch/en>
- 18) 例えば、JF. Liu, et al., Characterizing the Mechanical Tensile Behavior of Beishan Granite with Different Experimental Methods, 2014, Inter. J. Rock Mech. Mining Sci., Vol. 69, 50-58.
- 19) 例えば、ZG. Ah, et al., Multi-geophysical Investigation of Geological Structures in a Pre-selected High-level Radioactive Waste Disposal in Northwestern China, 2013, J. Environ. Eng. Geophys., Vol. 18, 137-146.
- 20) 例えば、B. Wang, et al., Finite Element Analysis of Stresses and Deformations Occurring in the Spent Nuclear Fuel (SNF) Disposal Canister Deposited in a Deep Geological Repository, 2014, Nucl. Eng. Design, Vol. 266, 166-179.
- 21) <http://www.misowe.kr/activity/news.asp?menu=10&idx=310&state=view>

3.3.2.2 低レベル放射性廃棄物の管理

(1) 研究開発領域名

低レベル放射性廃棄物の管理

(2) 研究開発領域の簡潔な説明¹⁾

原子力発電所をはじめとする原子力関連施設や大学の研究機関、放射性医薬品を利用する病院などからは、紙、布、ゴム手袋、雑固体、洗浄廃液などさまざまな低レベル放射性廃棄物が発生する。これらの低レベル放射性廃棄物は焼却、圧縮、固化などの処理を行った後、ドラム缶などに収納し、おのおの施設の敷地内貯蔵庫に安全に保管されている。放射性廃棄物の減容は、物理的・化学的な安定化とともに貯蔵や処分における負担を軽減する上で有効であり、従来からさまざまな処理技術が開発されてきている。

我が国では、低レベル放射性廃棄物の処分は、放射能濃度に応じて3種類（1）放射能レベルが極めて低い廃棄物、2）放射能レベルの比較的低い廃棄物、3）放射能レベルの比較的高い廃棄物）に分類し、すでに1）および2）の廃棄物の処分が実施されている。

放射能レベルが極めて低い廃棄物を対象としたトレンチ処分方式の浅地中埋設処分は、旧日本原子力研究所東海研究所（現日本原子力研究開発機構原子力科学研究所）の動力試験炉JPDRの解体によって発生した非常にレベルの低いコンクリートなど廃棄物の埋設実地試験の処分方式として採用されている。また、放射能レベルの比較的低い廃棄物を対象としコンクリートピットを設置した浅地中処分は、日本原燃（株）の六ヶ所低レベル放射性廃棄物埋設センターにおいて1992年12月以降実施している。放射能レベルの比較的高い廃棄物を対象にした余裕深度処分については、六ヶ所村において本格調査が行われた。

また、RI・研究所等廃棄物は、施設解体物分を含め多くが浅地中処分の対象物であり、日本原子力研究開発機構が処分施設の開設目標を平成30年として検討を進めている。

処分する廃棄体中の放射性核種濃度を確認することは法令要求であるだけでなく、処分後の安全性を評価するうえで重要であり、さまざまな放射能濃度決定方法が開発され運用されている。

(3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向¹⁻³⁾

原子力発電所で発生する低レベル放射性廃棄物には、建物の換気、洗濯廃液、使用済みのペーパータオルや古い作業衣や手袋など、「気体状のもの」、「液体状のもの」、「固体状のもの」があり、これらは性状を踏まえて管理、処理される。気体状のものは、放射性物質を減衰させ、フィルターにかけて粒子状物質を除いたあと、放射性物質の濃度を測定し、安全を確認し排気筒から放出される。その後は排気筒モニタで排気中の放射線量を測定し、測定値はリアルタイム情報として各電力会社のホームページ上で公開されている。液体状のものは、ろ過し、脱塩され、あるいは蒸発濃縮される。濃縮液はセメント、アスファルトなどで固化し、ドラム缶（200 L）に詰められ発電所内の放射性固体廃棄物貯蔵庫に安全に保管される。また、蒸留水は再利用するか、放射性物質の濃度を測定し安全を確認したうえで海へ放出される。このように、処分施設に埋設される前に

は、廃棄物は減容および安定化のために固化処理される。

放射性の固体状廃棄物としては、可燃性のもの、難燃性のもの、金属のように不燃性のものが発生する。一般的には、減容のためこれらの廃棄物のうち可燃物については焼却処理を行い、難燃物や不燃物については圧縮処理または溶融処理が行われている。

圧縮装置には、廃棄物をドラム缶の内部で圧縮する方式と、廃棄物を圧縮機内部で円筒形など一定形状に圧縮形成した後にドラム缶に充填する方式がある。加圧力は 5～200t のものが大半であったが、2000 t 級の高圧縮装置の採用が進んでいる。

焼却設備にはさまざまな方式があり、燃焼様態からは燃焼に十分な空気を供給して積極的に燃焼させる過剰空気燃焼式と、低酸素濃度の高温雰囲気下で廃棄物を熱分解させ、発生するガスに空気を吹き込んで燃焼させる熱分解ガス化燃焼式に分類される。また、炉の形式からは固定炉床、可動炉床、流動床に分類される。焼却能力としては 15～300 kg/h のものがほとんどである。排ガスの処理には、セラミックなどの無機材料をろ過材とする高温フィルターのほか、バグフィルタ、サイクロン、排気冷却器、HEPA フィルター (High Efficiency Particulate Air Filter)、排気洗浄塔 (スクラバ) などが、目的に応じて選択・組合わされて用いられる。大半の焼却設備は、廃棄物を焼却し灰として取り出すものであるが、高温で焼却するとともに灰を溶融してガラス質の粒子 (グラニューール) にする高温焼却炉も国内の原子力発電所に導入されている。

不燃性廃棄物に関しては、近年、さらに高い減容安定化効果をもつ溶融処理技術が開発され、国内の一部では実規模施設が整備されて導入が進んでいる。溶融方法は、1) 誘導溶融、2) プラズマ溶融、3) マイクロ波溶融がある。

ドイツ、スウェーデン、フランス、米国では、再利用を目的とした金属廃棄物の溶融処理が工業規模で行われている。ステンレス鋼や炭素鋼などの廃材を主な対象とし、それぞれの国の放射能レベル基準にしたがって区分した後、溶融処理によってインゴット、鋼管、レールなどに作り替えて、原子力施設などの限定された範囲での再利用や、一般鋼材と同様の非限定的な再利用を図っている。

金属以外の廃棄物の溶融処理の例は少ないが、スイスでは、アールガウ州に建設した放射性廃棄物の集中処理と中間貯蔵を行う ZWILAG 中間貯蔵施設に、プラズマ焼却・溶融設備を整備して試運転を行っている。この設備は、スイス国内の原子力発電所、医療機関、研究機関などで発生する廃棄物の減容、安定化のために使用される。また、ロシア国営廃棄物処理機関 RADON のモスクワ科学工業協会には、廃棄物を焼却しその焼却灰をスラグ (ガラス状の固形物) 化する焼却炉とプラズマ溶融炉の複合設備が整備された。

原子力施設において発生する放射性廃棄物は、安全に貯蔵、処分するために、各種の材料を用いて安定な形態に固化される。低レベル放射性廃棄物の固化法としては、セメント固化法、アスファルト (ビチューメン) 固化法およびプラスチック固化法がある。このうち我が国を始め世界的にももっとも多く採用されているものがセメント固化法である。

セメント固化法は、原子力発電所から発生する放射性廃棄物のうち、放射性濃縮廃液、使用済みイオン交換樹脂、フィルタスラッジ、放射性スラリー、焼却灰および不燃性の雑固体を水硬性セメントと混和して、通常は 200 L ドラム缶などに充填して固化、もし

くは、ドラム缶中に固体廃棄物を充填しておき、その空隙にセメントミルクを注入して固化するものである。放射性廃棄物のセメント固化における利点は、セメント自体が安価であり、また、装置が簡単で処分容器内で固化処理も可能であり、放射線による劣化が起こりにくいなどがある。一方、欠点としては、減容性が期待できず増容となること、耐浸出性が劣ることなどである。しかし、近年、優れたセメント固化手法や混和材料の開発がなされ、ますます利用が期待されている。

アスファルト固化法は、原子力発電所、使用済核燃料の再処理施設などで発生する低レベル放射性廃棄物を加熱・溶融したアスファルトとともに混合し、固化体内に安定に閉じ込める廃棄物処理法である。廃棄物中の残存水分のほとんどが作製過程において除去されるので、セメント固化法に比べ優れた減容効果を持ち、また、耐浸出性も高い。廃棄物を数十%の高濃度まで含有可能であることも特徴である。問題点としては、固化体自身が可燃性であることなどがある。アスファルト固化体は、廃棄物塩を高濃度で含むため純粋なアスファルトとは異なる性質をもつ。固化体内での塩の不均質化や塩の吸水による固化体の膨潤は浸出特性に悪影響を及ぼす。国際的にアスファルト固化体の発生量は減少している。

放射性廃棄物の放射能濃度決定方法は、評価の対象となる廃棄物の種類や核種の条件を十分に考慮して、核種ごとに決定する。方法としては、1) 非破壊外部測定法、2) スケーリングファクタ法、3) 平均放射能濃度法、4) 理論計算法、5) 廃棄体破壊分析法、6) 原廃棄物分析法、がある。対象の廃棄物の放射能濃度が高くなるほど分析が困難になるため、理論計算法などの解析的手法の適用が重要となる。また、処分後の安全評価で重要な核種には難測定核種もあるため、それらの分析手法の開発も行われている。

低レベル廃棄物処分場については、現状すでに浅地中処分施設（ピット）は操業されているものの埋設対象は原子力発電所の運転廃棄物に限定されている。今後は、廃止措置にとまなう解体廃棄物やサイクル施設からの廃棄物を埋設可能とするよう検討が必要である。また、余裕深度処分施設に関しては、旧原子力安全委員会で検討が進められたものの現在は規制基準が未整備のため、制度が明確になった後にさらなる技術検討が必要な段階である。

（４）研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

廃棄物の処理・処分の観点では、原子力発電所で発生した廃棄物でさえ、そのすべてが埋設対象となっていないため、埋設のための技術基準を満足できるような処理技術の開発が課題であり、その際には環境に影響を及ぼす物質への配慮も必要である。サイクル施設のように今後本格的に操業する原子力施設からの廃棄物や、RI・研究所等廃棄物のように雑多な廃棄物が混在するものについては、主要な放射性核種を同定することと、その放射能濃度決定法の検討が重要である。

低レベル廃棄物の処分に関しては、幅広い廃棄物が対象となるものの、まだ一部の廃棄物の処分しか行われていない。規制制度に関しては、余裕深度処分について未整備である。今後、廃止措置が進むことを考えると、解体によって発生するすべての廃棄物の処分先、再利用先を確保することによって円滑な廃止措置実施が可能となるため、処分

先の立地とクリアランスの廃棄物および放射性廃棄物でない廃棄物（NR物：Non Radioactive Waste）の再利用先の確保が重要な課題である。これらが進まない日本原電・東海発電所、浜岡発電所1、2号機の廃止措置の進捗に影響を与えるおそれがある。

処理技術に関しては、まだ埋設施設に搬出できておらず発電所で保管を継続している廃棄物も、いずれは処分できないと廃止措置が完了できないことから、当該廃棄物について処理技術の開発および処分後の安全性評価の検討を進め、すべての廃棄物を処分可能とすることが必要である。また、廃止措置が進むことにより廃棄物発生量は一段と増加することになるが、最終処分先の確保が非常に難しいことを鑑みれば、減容・安定化技術をさらに進めて、廃棄物の管理・処分の負担を軽減することが肝心である。

低レベル放射性廃棄物ではないが、クリアランスレベルの廃棄物およびNR物の再利用や産廃処分が進められないと、原子力施設における廃棄物管理の負担が増え、最悪の場合、それらを放射性廃棄物として処分せざるを得ない状況も考えられるため、クリアランスレベルの廃棄物およびNR物の再利用や産廃処分を進めることは低レベル放射性廃棄物量の低減に寄与するものと考えられる。

処分施設の安全性の評価は、ほかの原子力施設と異なり長期の評価が求められるため、評価の信頼性を向上させるために、データの蓄積のみならず、不確実性の取り扱い方、長期のシミュレーション技術開発などの取組みを着実に実施していくことが重要である。

法体系が異なるものの、福島第一原子力発電所事故に由来する除染廃棄物も放射能レベルとしては大部分が低レベル放射性廃棄物と同等であり、現在は除染技術開発が各機関において実施されている。除染廃棄物の最終処分方法については、従来の検討成果を活用して安全かつ合理的な方式を今後定めていく必要がある。

以上のように低レベル放射性廃棄物の処理・処分の重要性は今後ますます高まるため、技術開発のみならず、確実に処理・処分を実施するためにも人材確保は大きな課題である。また、処理・処分を進めるためには事業者は説明責任を根気よく果たしていくとともに、国も規制制度の安全性についてわかりやすく説明していくことが肝要である。

(5) 注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

環境法関連では放射性物質の除外規定が外されたことにより、放射性廃棄物中の環境影響物質への配慮がますます重要になっており、難測定核種の濃度決定方法の開発のみならず、廃棄物中の組成評価手法の開発が重要となってくる。

福島第一原子力発電所事故に由来する除染廃棄物については、中間貯蔵に向けた取組みが進みつつあるが、その後の最終処分について、立地だけでなく廃棄物特性を踏まえた技術的検討を加速することが重要であり、動向が注目される。

新規制基準では放射性廃棄物処分場の安全確保のために、埋設後施設閉鎖までの間のモニタリングの重要性が高められており、埋設施設に擾乱を与えない効果的なモニタリング手法の開発が進められるものと考えられる。

処分後の長期評価は放射性廃棄物処分の特徴であり、従来から検討されていたが、より現実的な評価が求められており、限られたデータを基にした外挿評価の信頼性を向上させるために研究開発が、よりいっそう活発に進められると思われ、国際的にも各種解析手法の開発ならびにデータベースの拡充が期待される。また、処分の安全性を示すた

めに国際的に Safety Case の作成・提示が有効と考えられており、我が国でも Safety Case と呼ばれるすべての安全論拠の文書体系の作成を念頭に日本原子力研究開発機構（JAEA：Japan Atomic Energy Agency）における知識管理システムの開発がなされている。

（6）キーワード

放射能濃度決定法、難測定核種、モニタリング手法、Safety Case、不確実性、減容、安定化

(7) 国際比較 ⁴⁻⁶⁾

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	↑	・福島第一原子力発電所事故による除染廃棄物に関する研究が各機関において盛んに行われている。
	応用研究・開発	◎	↑	・JAEAによる除染モデル実証事業が行われている。 ・発電所廃棄物においても処理技術の高度化検討が行われている。
	産業化	○	→	・浅地中ピット処分を日本原燃(株)の六ヶ所低レベル放射性廃棄物埋設センターにおいて1992年12月以降実施。 ・研究施設等廃棄物の処分をJAEAが準備中。
米国	基礎研究	△	→	・処理処分技術に関する大学などによる研究の情報は少ない。
	応用研究・開発	○	→	・WCS社はクラスCを超える放射性濃度の廃棄物(GTCC: Greater Than Class C)およびTRU(Trans-Uranium)廃棄物の受入長期貯蔵の認可取得。
	産業化	○	↓	・バーンウェル処分場(サウスカロライナ州)、リッチランド処分場(ワシントン州)、クライブ処分場(ユタ州)、WCSテキサス処分場(テキサス州)が操業中で、A-Cクラス廃棄物を受入。州間協定に基づき処分をするため事業者によっては処分サイトがないという問題を早急に解決する必要がある。
欧州	基礎研究	△	→	・処理処分技術に関する大学などによる研究の情報は少ない。
	応用研究・開発	○	→	・特に顕著な活動は行われていない。
	産業化	○	→	・主要各国とも低レベル放射性廃棄物処分場は整備済み。
中国	基礎研究	×	→	・処理処分技術に関する基礎研究情報はない。
	応用研究・開発	○	→	・蒸発減容された中・低レベル液体放射性廃棄物の処理方法については、アスファルト(ビチューメン)固化、セメント固化技術が、1994年からフランス原子力・代替エネルギー庁(CEA: Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives)の技術協力を得て実証されている。
	産業化	○	→	・1999年には「西北廃棄物処分場」(甘粛省北山地区)の工事が終了し、試験操業段階に入った(処分容量: 6万 m ³)。また、中低レベル廃棄物処分用の水圧注入インシチュウグラウト処分施設(液体廃棄物を水圧で直接地層に注入・セメント固化する)も建設されている。 ・2000年には稼働中の広東嶺澳・大亜湾原子力発電所から5km離れた北龍サイトに低・中レベル放射性廃棄物処理場が試験操業を開始している(処分容量: 8万 m ³)。 ・両処理場に関しては2011年1月、中国国家核安全局が操業許可を発給し、本格操業を開始している。
韓国	基礎研究	△	→	・KAIST(Korea Advanced Institute of Science and Technology)により基礎研究が行われている。
	応用研究・開発	○	→	・韓国水力原子力社の傘下の原子力環境技術院(NETEC: Nuclear Environment Technology Institute)が放射性廃棄物処理処分の研究開発およびサイト確保事業を担当している。
	産業化	◎	→	・韓国放射性廃棄物管理公団(KRMC: Korea Radioactive Waste Management Co.)により2008年8月より建設中の中・低レベル放射性廃棄物の処分場である慶州市の「月城(ウォルソン)原子力環境管理センター」の建設工事が2014年6月30日に完了し、2014年7月中旬に竣工検査を実施予定であることを公表した。

(註1) フェーズ

基礎研究フェーズ: 大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ: 研究・技術開発(プロトタイプの開発含む)のレベル

産業化フェーズ: 量産技術・製品展開力のレベル

（註2）現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註3）トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

（8）引用資料

- 1) 「原子力年鑑2014」、(社)日本原子力産業協会
- 2) 「原子力ポケットブック2012年版」、(社)日本電気協会
- 3) 原子力百科事典「ATOMICA」、(財)高度情報科学技術研究機構（RIST）
- 4) 諸外国における放射性廃棄物関連の施設・サイトについて(2014年版)、原子力環境整備促進・資金管理センター
- 5) 平成22年度 放射性廃棄物海外総合情報調査報告書、原子力環境整備促進・資金管理センター
- 6) 諸外国における低レベル放射性廃棄物処分の現状について、R I ・研究所等廃棄物作業部会(第4回)、資料第4-1-1号、2010

3.3.2.3 使用済み核燃料の管理

(1) 研究開発領域名

使用済み核燃料の管理

(2) 研究開発領域の簡潔な説明

使用済み核燃料の貯蔵能力の拡大需要に備えて、コンクリートキャスク貯蔵の実用化技術および長期貯蔵に必要な経年劣化管理技術を開発する。

(3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

1) 国内外の動向

米国では 1980 年代に金属キャスク貯蔵が実用化した¹⁾が、1990 年以降、経済的なコンクリートキャスク貯蔵技術が開発され、現時点では約 9 割を占める¹⁾。また、使用済み燃料の長期貯蔵に向けた大規模な研究開発を推進している。欧州ではドイツで金属キャスク貯蔵²⁾が実用化され、今後予想される長期貯蔵に備えた定期安全レビューを法制化しつつある。スペインでは、コンクリートキャスクおよび金属キャスク貯蔵技術が実用化している³⁾。韓国では、毎年約 700t 以上の使用済み燃料が発生しており、サイト内の中間貯蔵容量は 2016 年には貯蔵容量の限度に達する見込みである⁴⁾。韓国ではコンクリートキャスク貯蔵を選択肢の一つとして、実用化に備えて、航空機衝突時の評価試験などの研究開発を行っている⁵⁾。

国際原子力機関 (IAEA : International Atomic Energy Agency) では、世界各国での使用済み燃料の再処理や処分計画の遅れなどから、使用済み燃料の長期貯蔵に備えて技術文書の作成や長期経年劣化管理計画作成の技術文書技術の作成に着手している。

日本においては、使用済み燃料はこれまでに約 1.7 万 t が発生しており、今後も原子力発電に伴い発生することになる。エネルギー基本計画では、使用済み燃料の再処理やプルサーマルなどを推進するとしているが、それまでの間、使用済み燃料の安全な管理が不可欠である。これまで、使用済み燃料の輸送・貯蔵兼用金属キャスクによる貯蔵技術が実用化しつつあるが、今後の貯蔵能力の拡大需要に備えて、コンクリートキャスク貯蔵方式などの代替方式の要素研究が行われている。

2) コンクリートキャスク貯蔵技術の実用化

コンクリートキャスクは、コンクリート製貯蔵容器とステンレス鋼製の円筒状密封容器 (キャニスタ) より構成される。キャニスタ内の使用済み燃料の崩壊熱については、上下に設けた空気の流通口を通じ外気を自然対流させることにより、効率的に除去する構造となっている。

コンクリートキャスクのメリットは、次のような点である。金属キャスクより経済的で製造期間が短い (12 か月)、貯蔵後の処分が金属キャスクに比べて簡単、直接キャニスタを空冷するので金属キャスクに比べて冷却能力が高い、コンクリート容器は貯蔵専用のため、輸送重量の制限を受けず貯蔵時の遮蔽設計が可能、縦横の寸法比が地震時に転倒しにくい形状、製造に際し地元産業を活用できる割合が大きい、原子炉の燃料デブリやデコミで発生する高線量の放射性廃棄物の貯蔵にも使用可能、である。

一方、我が国での実用化には次のような課題がある。キャニスタはオーステナイト系ステンレス鋼製の溶接密封構造を採用しており、キャニスタ蓋溶接部の施工時の溶接欠陥を検出する超音波探傷試験技術の信頼性を確認する必要がある。さらに、我が国特有の海岸立地を想定した場合、貯蔵施設へ流入する冷却空気に塩分が含まれることにより、応力腐食割れ (SCC : Stress Corrosion Cracking) によるキャニスタの密封機能喪失が懸念される。このため、SCC の発生条件の解明、空気中やキャニスタ表面の塩分濃度の測定技術開発、SCC 防止技術が必要である。次にこれらの研究の現状の概略を述べる⁶⁾。

① キャニスタの蓋溶接部超音波探傷試験技術

人工欠陥を付与した実径大のステンレス鋼 304 L 製のキャニスタ蓋モデルを対象に、超音波探傷結果の画像化による識別可能性が評価されている。その結果、初層溶接部に故意に生じさせた割れや融合不良などのき裂状欠陥は、概ね識別可能であった。

② キャニスタの応力腐食割れ予防技術

a) SCC 発生 の 3 因子 と SCC 発生 防止 基準

SCC は応力と環境と材料の三つの因子が重畳したときに発生する現象である。これらの 3 因子に対して、キャニスタは、素材がオーステナイト系ステンレス鋼であること、海塩粒子が付着する可能性があること、溶接部近傍に引張残留応力が存在することから、SCC が生じる懸念がある。対策の一例として、応力と環境による SCC 対策シナリオが考えられている。まず、最初のシナリオでは、キャニスタ表面への付着塩分量測定で限界塩分量を超えるか否かの判断を行うことで、SCC の発生を抑える。仮に、限界塩分量を超えたと判断した場合でも、き裂進展管理のシナリオに移行し、SCC によるき裂貫通を抑制する。すなわち、貯蔵期間中にキャニスタ表面塩分濃度が SCC 発生限界濃度を超えることがなければ、SCC 発生の心配はない。仮に表面付着塩分濃度が限界量を超え、万一 SCC が発生したとしても、き裂進展を管理することにより密封機能を維持できると考える。

海塩による大気中 SCC が生じやすい湿度と温度条件で SCC 試験を行った結果、304 L および 316 L ステンレス鋼の限界塩分濃度の閾値が、実験室レベルでの研究で明らかにされている。

b) 応力対策 (残留応力緩和処理の効果)

実験室で実径大の 304 L ステンレス鋼製キャニスタを用いた SCC 発生試験が行われ、残留応力緩和処理の効果が確認されている。溶接部の一部に残留応力緩和処理した実径規模キャニスタ試験体に塩分を付着させ、SCC 発生条件を超える雰囲気恒温恒湿槽内に置き、SCC 発生に及ぼす残留応力の効果が調べられた。試験の結果、残留応力未処理の溶接部表面にき裂が多数発生したが、ショットピーニングを施した溶接部にはき裂の発生はなく、溶接残留応力改善処理の有効性が確認された。

c) 環境対策

ア. 気中・表面付着塩分量評価

自然環境下でのコンクリートキャスク内のキャニスタ表面を模擬した試験片上への付着塩分量評価試験が行われた。その結果、付着量に時間および温度による依存性はみられなかった。これは、SCC 発生 の 閾値 以下 の 微量 の 塩分 が、初期に付着するが、その後、ほとんど値は変化せず、増加しないことを示して

いる。すなわち、キャニスタの鉛直表面では、空気が表面と平行に流れ、空気中の海塩粒子が表面に付着・増加する量が小さいことを示している。

イ. 流入塩分低減技術開発

コンクリートキャスクに自然対流効果で流入する空気中の塩分を、水平に設置された多段の金属薄板表面に付着させることで低減させる技術が開発され、その効果が確認されている。

ウ. キャニスタ表面付着塩分濃度の非破壊試験手法（レーザー誘起ブレイクダウン分光法）

レーザー光を用いて、キャニスタ表面に付着した塩分濃度を非破壊かつ非接触で測定する手法が開発されている。

d) 材料対策

高耐食性の二相ステンレス鋼やスーパーステンレス鋼を用いてキャニスタを製造することで、SCC 対策とする研究が行われ、304 L や 316 L ステンレス鋼よりも SCC 発生の閾値となる塩分濃度が高くなることが実験で分かっている。ただし、これら材料は高価であることや、溶接性などに留意しなければならない。

以上の SCC 対策技術は、いずれも実験室レベルの研究段階にあり、これら技術の有効性について、実規模のコンクリートキャスクを海岸近くの実環境下に、通年および複数年設置して、SCC 予防対策などの系統的な確認試験を行うことが望ましい。

3) 使用済燃料の長期貯蔵技術の開発

使用済燃料貯蔵施設においては、経年劣化現象の解明・理解とモニタリングや検査による経年劣化の早期発見と対応が重要である。

① 金属キャスクの貯蔵後輸送の規則適合性

数十年に及ぶ使用済燃料貯蔵の期間中には、輸送規則などの改訂があり得るので、貯蔵後輸送時にその改訂を輸送・貯蔵兼用キャスクにどのように反映させるかが課題となる。すなわち、輸送規則は貯蔵中（例えば 50 年間）に進化・改訂される可能性があり、貯蔵開始時に製造・使用されてきた輸送・貯蔵兼用金属キャスクが貯蔵後の規則に適合しなくなる可能性がある。いわゆる改訂規則のバックフィットの是非である。どのような条件であれば、貯蔵後の安全輸送が可能になるのか、研究が必要である。

② コンクリートキャスク貯蔵の経年劣化管理計画

a) キャニスタの閉じ込め性能モニタリングの技術と解析手法の開発

SCC により、キャニスタの溶接部などにき裂が貫通すると、ヘリウムが漏洩する結果、ヘリウムの対流による除熱性能が乱される。その結果、キャニスタ表面の温度分布も変化することが実験で分かっている。このような現象の解析手法が確立されれば、ヘリウム内圧や温度などの設計条件が異なっても、解析で予測することが可能になる。今後、異なる設計のキャニスタのコンクリートキャスク貯蔵においても、この原理に基づくモニタリングが可能になるので、早急な開発が望まれる。

b) キャニスタの SCC き裂検査技術の開発

コンクリートキャスク貯蔵中のキャニスタ表面に万が一、SCC き裂が発生しても、

早期に発見できれば、き裂貫通による閉じ込め性能が損なわれる前に何らかの対策が可能になる。現在までのところ、研究室レベルの知見では、渦電流による SCC き裂の非破壊検査技術が有望である。コンクリートキャスク貯蔵にこのような検査技術を適用するには、遠隔の自動検査システムの実規模大の技術開発が必要である。

（４）研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

科学技術的課題

コンクリートキャスク貯蔵における内のステンレス鋼製キャニスタの潮風塩分による SCC 対策技術や SCC 検査技術などは、実験室レベルでの開発の目処は、得られているが、実用化には、実際の海岸近くの自然環境下での系統的な大規模かつ、長期（加速試験を含む）にわたる確証試験が必要である。このような確証試験は、予算規模の点で民間での実施は困難であり、国によるプロジェクト研究が必要である。

政策的課題

世界的な動向と同様、我が国においても使用済燃料貯蔵期間の長期化の可能性を見越しておく必要がある。長期貯蔵は、その立地や経済性に支障をきたすので、貯蔵期間や貯蔵後の使用済燃料対策などの政策や制度を明確にしておく必要がある。輸送・貯蔵兼用金属キャスクには、貯蔵後輸送時の輸送規則適合性の制度的課題がある。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

総合エネルギー調査会原子力小委員会では、国のエネルギー基本計画（2014年4月）における「使用済燃料の貯蔵能力の拡大」に向けた政府の取組を強化するため、どのような施策を講じていくかが問われている。

また、日本学術会議では、我が国で進まぬ高レベル放射性廃棄物処分に使用済燃料処分も含めて、暫定保管の具体的検討を行っている。

米国では、エネルギー省や原子力規制委員会が、使用済燃料貯蔵期間の長期化に備えて、大学や研究機関での研究開発を推進している。

IAEA でも、使用済燃料の長期貯蔵が世界の動向と考え、関連の技術文書などの作成をしている。

（６）キーワード

コンクリートキャスク貯蔵、長期貯蔵、経年劣化管理、モニタリング、応力腐食割れ

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ・金属キャスク貯蔵の基礎研究はほぼ終了している⁶⁾。 ・コンクリートキャスク貯蔵におけるステンレス鋼キャニスタの蓋溶接部の超音波探傷試験やステンレス鋼の塩化物応力腐食割れ感受性評価がほぼ終了している⁶⁾。
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ・金属キャスク貯蔵の応用開発研究はほぼ終了している⁶⁾。 ・コンクリートキャスクの除熱性能試験、キャニスタの落下試験など、一部の応用開発研究は終了している⁶⁾。
	産業化	×	↘	<ul style="list-style-type: none"> ・金属キャスク貯蔵の確証試験はほぼ終了している⁶⁾。 ・コンクリートキャスク貯蔵の実規模・実環境下での確証試験が未実施。
米国	基礎研究	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ・米国エネルギー省 (DOE : United States Department of Energy) から大学での基礎研究として、次の研究が委託されている⁷⁾。 ・100年以上の中間貯蔵のための材料評価 ・使用済燃料貯蔵用キャニスタ材料の寿命評価 ・乾燥および搬送中の使用済燃料被覆管温度解析・試験 ・使用済燃料への放射線および熱的影響 ・乾式キャスクの確率論的リスク評価 ・使用済燃料長期貯蔵のための超耐損傷性および自己検知性を有するコンクリート材料 ・乾式キャスク貯蔵におけるアルカリ骨材反応損傷の超音波診断・予測 ・使用済燃料プールおよび乾式キャスクの自然対流実証試験 ・長期間の乾式貯蔵キャスク貯蔵における耐震性能 ・使用済燃料貯蔵施設の構造健全性モニタリング ・輸送キャスクの構造健全性リスク評価 ・次世代貯蔵システムのためのナノ改良コンクリートの開発
	応用研究・開発	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ・DOE から研究機関に、次の使用済燃料長期貯蔵研究が委託されている⁸⁾。 ・長期貯蔵中の使用済燃料貯蔵システムの健全性実証 ・長期貯蔵後の回収・輸送の技術開発 ・高燃焼度燃料の輸送技術開発
	産業化	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ・電力会社による使用済燃料貯蔵施設の長期貯蔵に向けた許認可期間の更新が始まっており、規制当局の審査要領が公刊されている⁹⁾。 ・現在 1900 基の乾式貯蔵キャスクが使用されているが、90%はコンクリートキャスクで、金属キャスクからコンクリートキャスクへの切り替えが進んでいる¹⁰⁾。
欧州	基礎研究	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ・ドイツで、金属キャスク貯蔵の基礎研究はほぼ終了している。 ・フランス・ドイツで MOX 使用済燃料長期貯蔵中のヘリウム蓄積・拡散について研究。
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ・金属キャスク貯蔵の応用開発研究はほぼ終了している。 ・フランスがコンクリートキャスクと金属キャスクの融合方式を開発・設計。
	産業化	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ・ドイツ、スイス、チェコなどで金属キャスク貯蔵が実用化している。 ・使用済燃料の長期貯蔵に備えて、乾式貯蔵の経年劣化管理計画について、規制当局から勧告 (草案) が公刊されている¹¹⁾。 ・スペインでコンクリートキャスク貯蔵中。 ・スイスはコンクリートキャスク貯蔵技術の導入を予定。 ・アルメニア、ウクライナでコンクリートキャスク貯蔵を導入。
中国	基礎研究	×	↘	<ul style="list-style-type: none"> ・使用済燃料乾式貯蔵の基礎研究はあまり盛んではない。
	応用研究・開発	×	↘	<ul style="list-style-type: none"> ・使用済燃料乾式貯蔵の応用開発研究はあまり盛んではない。
	産業化	×	↘	<ul style="list-style-type: none"> ・使用済燃料乾式貯蔵は実用化していない。

韓国	基礎研究	◎	→	・長期貯蔵における使用済燃料被覆管の特性調査 ¹²⁾ 。
	応用研究・開発	◎	↑	・コンクリートキャスクへの飛来物衝突解析・試験 ¹³⁾ 。
	産業化	×	↑	・貯蔵のニーズは逼迫しており、立地が迫っている。
台湾	基礎研究	△	→	・SCC、耐震設計などの研究を実施。
	応用研究・開発	△	→	・米国メーカーより、技術導入。
	産業化	○	↑	・貯蔵のニーズが逼迫しており、コンクリートキャスクを60基程度、国内で製造済。

(註1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

(註2) 現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○：ある程度の活動・成果が見えている、△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド

↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向

(8) 引用資料

- 1) Jeff Williams. DOE' s Storage and Transportation Activities. NEI Used Fuel Management Conference. May 6-8, 2014.
- 2) Christoph Gastl, "Interim Storage of Spent Nuclear Fuel (SNF) and Vitrified Highly Active Waste (HAW) in Germany", IAEA Technical Meeting on Spent Fuel Storage Options, 2-4 July 2013.
- 3) Fernando Zamora, Manuel Garcia, et al., "Spanish Regulatory Approach for Dual Purpose Casks for Spent Nuclear Fuel", IAEA International Workshop on the Development and Application for a safety Case for Dual Purpose Casks for Spent Nuclear fuel", 19-21 May 2014.
- 4) 韓国で使用済燃料公論化委員会が発足<http://www2.rwmc.or.jp/nf/?p=10764>
- 5) Sanghoon Lee, et al. Impact Analyses and Tests of Concrete Overpacks of Spent Nuclear Fuel Storage Casks. Nuclear Engineering and Technology. Vol.46, No.1, p.73-80, 2014.
- 6) 電力中央研究所. 使用済核燃料貯蔵の基礎. ERC出版. 2014.
- 7) https://inlportal.inl.gov/portal/server.pt/community/neup_home/600/fy13_r_d_awards
- 8) DOE. Gap Analysis to Support Extended Storage of Used Nuclear Fuel, Jan 2012.
- 9) US NRC. NUREG-1927. Standard Review Plan for Renewal of Spent Fuel Dry Cask Storage System Licenses and Certificates of Compliance. March 2011.
- 10) J. Williams. DOE' s Storage and Transportation Activities. NEI Used Fuel Management Conference. May 6-8, 2014.
- 11) RSK/ESK-Geschäftsstelle. Alterungsmanagement bei der trockenen Zwischenlagerung bestrahlter Brennelemente und Wärme entwickelnder Abfälle in Behältern. ESK 25/Info-AM. 18.01.2012.
- 12) J. Kim, et al. A Study on the Initial Characteristics of Domestic Spent Nuclear Fuels for

- Long Term Dry Storage. Nuclear Eng. Tech.. Vol. 45, No.3, June 2013.
- 13) S. Lee, et al. Impact Analyses and Tests of Concrete Overpacks of Spent Nuclear Fuel Storage casks. Nuclear Eng. Tech.. Vol. 46, No.1, June 2014.

3.3.2.4 プルトニウムの管理手法

(1) 研究開発領域名

プルトニウムの管理手法

(2) 研究開発領域の簡潔な説明

原子力に依存しなくなった後にいわゆる「プルトニウム鉱山」を残さないためには、新たなプルトニウムを生成することなく、蓄積したプルトニウムを効率的に燃焼する原子炉技術の開発が必要となる。この技術には大きく分類して、軽水炉や高温ガス炉といった原子炉の炉型で分類できる炉技術群と、燃料の母材成分（ウラン、トリウム、不活性母材）や燃料形態（ペレット、被覆粒子、熔融塩）によって分類できる燃料技術群が存在する。

(3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

原子力に依存しない場合、軽水炉の使用済燃料に含まれるウランやプルトニウムなど重元素のエネルギー資源としての価値はなくなるため、それらを回収・利用することを主目的とした再処理に対するインセンティブは低下する。再処理を行わない場合、使用済燃料は一定の一時貯蔵期間を経て直接処分されることとなる。直接処分はスウェーデン、フィンランド、米国などが元来採用している方式であり、日本においても技術的には可能とされている¹⁾。

この直接処分廃棄体は、使用済燃料に存在したすべての重元素を含むため、再処理後のガラス固化体に比べて（発電量単位当たりの）容積が大きい。また放射性毒性が高くその存続期間も長い。これは廃棄体中に超ウラン元素、とりわけプルトニウムが含まれることが主要因であるが、核物質でもあるプルトニウムを処分場内に長期に残存させることは、地球環境保全のみならず、核拡散の観点からも望ましくないとの見方がある。廃棄体は処分後、核分裂生成物の放射能減衰にともない接近が容易になることや²⁾、プルトニウム 240（半減期 6500 年）の減衰により核分裂性プルトニウム同位体の比率が相対的に高まり、プルトニウム自体の物質的魅力度が高まる傾向があるためである³⁾。

原子力に依存しなくなった後に処分場を含めプルトニウムを残存させない、もしくはその量を減じるとともにプルトニウム組成を劣化させ、環境や核拡散上の懸念を最小化するため、さらには超長期に存続する放射性廃棄物の世代間倫理的問題を軽減するためのプルトニウム燃焼技術の開発が、いくつかの国（主として再処理政策をとらない原子力先進国）で進められている。

発電と同時にプルトニウム燃焼を行う動力原子炉、もしくはプルトニウムの燃焼を主目的とした専焼炉の種類として、軽水炉 (LWR)、CANDU 炉、液体金属冷却高速炉 (FBR)、高温ガス炉 (HTR)、液体熔融塩炉 (MSR)、加速器駆動未臨界炉 (ADSR) などがあげられる。また、これらの原子炉へ装荷される燃料種類として、ウラン・プルトニウム混合酸化物燃料 (U-MOX : Uranium -Mixed OXide)、トリウム・プルトニウム混合酸化物燃料 (T-MOX : Thorium-Mixed OXide)、U-Pu-Zr 三元合金燃料、岩石型燃料 (ROX : Rock like OXide)、被覆粒子燃料 (CPF : Coated Particle Fuel)、熔融塩などがある。

これらの炉型と燃料の組み合わせにはある程度自由度があるが、比較的技術開発が進

んでいるのは、LWR と MOX or ROX 燃料、CANDU 炉と MOX 燃料、FBR と MOX or 合金燃料、HTR と CPF 燃料の組み合わせである。溶融塩炉については、溶融塩に燃料を溶解させた従来概念と、溶融塩は冷却材としてのみ使用し燃料には固体の CPF を用いる概念の 2 通りがある。ADS の燃料としては合金燃料、窒化物燃料、そして溶融塩を用いる概念も検討されている。以下では、「炉型+燃料」組み合わせのおおのこの炉概念について技術的特徴や開発状況について簡潔に述べる。

軽水炉で U-MOX 燃料を用いる (いわゆるプルサーマル) 方式は、40 年以上前に実用化され、全世界で 6,000 集合体以上の使用実績があり、特にフランス、ドイツの二国でその大半を占める。日本では、廃止措置中の新型転換炉 (ATR)「ふげん」で約 800 体、軽水炉では、2009 年 12 月以降、4 基で約 100 体の MOX 燃料が使用されている⁴⁾。

ウランを母材とする U-MOX 燃料は、プルトニウムを消費する傍ら、大量に存在するウラン 238 からの新たなプルトニウム生成を避けられない。一方、トリウムとプルトニウムを混合した T-MOX 燃料では、燃焼ビルドアップの出発物質は質量数が 6 ほど小さいトリウム 232 であるため、効率的なプルトニウム燃焼が可能である。近年ではノルウェーの Thor Energy 社が、各国の企業や研究機関とコンソーシアムを構成し、軽水炉へ T-MOX 燃料を実装するための許認可に必要な知見やデータの取得を目的に燃料製造試験や実験炉での照射を行っている。約 90t の分離済み原子炉級プルトニウム在庫をかかえる英国は⁵⁾、プルトニウムの効率的燃焼方法としてこの T-MOX 燃料に関心を示し、英国国立原子力研究所 (NNL : National Nuclear Laboratory) がこのコンソーシアムに参加している⁶⁾。

ROX 燃料は、旧日本原子力研究所 (現日本原子力研究開発機構、JAEA : Japan Atomic Energy Agency) が研究開発を進めている燃料である。これは、YSZ (Yttria-Stabilized Zirconia) 粒子球をスピネルマトリックス中に分散させた粒子分散型燃料であり岩石と同様の結晶構造をもつ。母材に重元素を含まない、もしくは少量 (<10at%) しか含まないためプルトニウムの効率的燃焼が可能であるとともに残存核分裂性物質が少ない。また核分裂生成物 (FP : Fission Products) 保持特性や燃料組織安定性に優れているため使用済燃料を直接処分できる特徴を有する。照射試験、照射後試験、地質学的安定性を調べる進出試験が実施され、良好な結果が得られている。ウランを含まないためドブラー効果が小さく反応度事故時の安全性に課題があったが、エルビウムもしくはウラン、トリウムなど重元素の少量添加で回避できる見通しが得られている⁷⁾。

CANDU 炉の燃料には本来天然ウランが用いられるが、U-MOX、T-MOX、もしくはそれらとトリウム燃料ピンをバンドル内で独立配置して、プルトニウムを利用した高燃焼度化とトリウムの有効活用を狙った技術開発が中国、カナダで行われている⁸⁾。中国はレアアースの副産物として大量に生じるトリウムを CANDU 炉で利用するための技術開発を、カナダ AECL の支援の下 2007 年頃から開始し、燃料製造、照射試験、照射後試験を実施している。トリウム利用政策を掲げるインドも、CANDU 炉を基に国産技術化した PHWR や詳細設計段階にある新型重水炉 AWHR を対象に、プルトニウム燃焼技術が検討されている。なお AWHR は外部から供給されるプルトニウムを消費しつつウラン 233 を自給するよう設計された炉である⁹⁾。ただし、近年は軽水炉の輸入が進んでいるためか、中国ほどの開発活動はみられない。

高速炉は本来、原子力を持続可能エネルギーとするためにプルトニウム増殖を行う原子炉型であるが、炉心を取り囲む径軸ブランケットを削除することでプルトニウム燃焼炉に比較的容易に変更可能である。フランスは1990年代初頭に高速炉でのPu燃焼を目的としたCAPRA (Consommation Accrue de Plutonium dans les Réacteurs à Neutrons Rapides)計画を実施しU-MOX燃料高速炉を¹⁰⁾、米国は2000年代後半のGNEP(Global Nuclear Energy Partnership)構想の中でTRU金属燃料先進燃焼炉(ABR)と再処理および燃料製造を行う施設である統合核燃料取扱センター(CFTC: Consolidated Fuel Treatment Center)を検討し¹¹⁾、高速炉を用いた効率的プルトニウム燃焼の基本的な見通しを得ている。

高温、高燃焼度に対する耐性の強いCPFを用いた高温ガス炉によるプルトニウム燃焼技術が検討されている。米国のオークリッジ国立研究所(ORNL: Oak Ridge National Laboratory)や日本のJAEAでは、その究極的概念として、化学的に不活性なYSZを母材とするPuO₂-YSZ被覆燃料粒子を用いて500 GWd/ton以上の超高燃焼度を達成するDeep Burn型高温ガス炉の開発を進めている¹²⁾。

プルトニウム燃焼を目的とした熔融塩炉では、フリーベ(LiF・BeF₂)と称するフッ化物熔融塩に、親物質としてトリウムをThF₄形で混入した混合熔融塩(約500°C以上で液体)に、核分裂性物質として少量のPuF₃を混合したものを燃料とする。熔融塩炉は1960年代にORNLで実験炉が建設・運転された以降しばらく研究開発は沈静化していたが、中国は2010年3月にトリウム熔融塩炉プロジェクト開始を政府決定し、上海応用物理研究所(SINAP: Shanghai Institute of Applied Physics)を中心として、2011年1月よりTMSR(Thorium Molten Salt Reactor)計画を開始した。核燃料を熔融塩に溶解させた熔融塩炉は工学的課題が多いため、当面は米国のORNLや大学の協力を受けつつ、燃料に固体のCPFを用い熔融塩を冷却材として使用するFHRから手がけ、2 MW出力のPB-FHR実験炉を2017年に建設する計画である。ただし、PB-FHRでは燃料ペブルにトリウムやプルトニウムではなく低濃縮ウランが用いられる可能性が高い。PB-FHRに続いて、熔融塩燃料を用いた2 MW出力MSR実験炉の建設を2020年と予定している⁶⁾。

未臨界で運転する加速駆動未臨界炉(ADS)は、安全設計上の反応度係数の制約が小さくプルトニウム燃焼性能を最大化しやすい反面、燃焼による実効増倍率低減が大きく、燃焼末期で必要となる陽子ビーム電流値が大きくなり燃料集合体の設計温度の点から成立性が厳しくなる難しさがある¹³⁾。フランス(CEA、CNRS)、ドイツ(KIT)、イタリア(ENEA)、スイス(PSI)、ベルギー(SCK・CEN)、米国(DOE)、日本(JAEA、京都大学)、韓国(KAERI)など多くの国が一部実験炉建設も視野に入れ基礎研究に取り組んでいる。燃料/冷却材に熔融塩を用いるADS概念では上述の問題はなく、ロシア、日本、インドなどが検討しているが、臨界熔融塩炉と同様な開発課題を克服しなければならない。安定性が高く安価な大電流・高エネルギー加速器の開発も並行して進められている。

(4) 研究開発推進上の課題・ボトルネック(科学技術的課題、政策的課題)

米国、カナダ、スウェーデン、そしてフィンランドは、使用済燃料からプルトニウム

を回収・利用することなく直接処分する方針を従来から掲げてきた。また、原子力に依存しない、もしくは依存度低減を表明している国として、ドイツ、スイス、ベルギー、イタリアがあげられるが、これらの国がプルトニウムを燃焼処分するか、使用済燃料のまま直接処分するかは明確でない。これら以外の、今後大きな経済発展を遂げようとする中国、アジア、中東などの多くの国々は、原子力を持続的エネルギー源としてとらえているため、燃料資源であるプルトニウムを意図的に燃焼させる技術開発には積極的でない。解体核からの兵器級プルトニウムや再処理後の余剰プルトニウムを除き、商業プルトニウム燃焼処分技術の研究開発は世界的に積極的には推進されていないのが実情である。

ただし、原子力に依存しない場合のプルトニウム燃焼技術と、今後も原子力を継続利用する場合に必要な原子炉や燃料の技術基盤は重複する部分が少なくないため、政策に応じて柔軟に相互流用が可能と考えられる。

(5) 注目動向 (新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など)

一定規模のプルトニウム燃焼を早期に実現するためには、既設基数の多い軽水炉もしくは CANDU 炉を活用することになる。U-MOX 燃料はすでに実用化されている技術であるが、取り出し時のプルトニウム量は装荷時の 3 割減程度であるため¹⁴⁾、さらに燃焼効率を高めるには、ウランを含まない T-MOX や ROX 燃料とするのが有効である。ただし、T-MOX の場合には母材のトリウムから核分裂性のウラン 233 が生成されるため、使用済燃料中に残存する核分裂性物質を最小化することが要求される場合には不適なオプションとなる。JAEA が開発してきた ROX 燃料軽水炉は、プルトニウム処理量も大きく、原子力への依存をなくすシナリオにもっとも適合する概念と考えられる。

高燃焼度耐性が高いとされる CPF はプルトニウムを燃焼しきる燃料形態として有望である。再処理政策をとる国では、再処理に不向きな CPF 燃料やそれをを用いる高温ガス炉が主流概念に据えられることはなかったが、原子力への依存をなくすシナリオにおいての役割は大きい。ただし、ガス炉自体の建設基数が極少のため、早期に大量のプルトニウム処理を行うことは難しいと予想される。これは実証段階にある高速炉、さらには基礎実験段階にある溶融塩炉や ADS についても同様である。

(6) キーワード

MOX、ROX、トリウム、被覆粒子、Deep burn、軽水炉、ガス炉、高速炉、溶融塩、ADS

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	↑	・ROX-LWR、Deep Burn 型 CPF-HTR、ADS の基礎研究では世界を先導。
	応用研究・開発	○	→	・MOX 燃料高速炉（プルトニウム消費でなく増殖目的だが共通技術多）開発は停滞気味。HTTR を有するがプルトニウム燃焼用燃料開発は基礎レベル。
	産業化	○	↓	・MOX 軽水炉の運転実績は福島第一原子力発電所事故で停滞。MOX 燃料加工工場建設は 2017 年 10 月竣工予定。
米国	基礎研究	◎	→	・Deep Burn 型 CPF-HTR、熔融塩冷却固体燃料 FHR の基礎研究実施。FHR では中国をバックアップ。先進燃焼高速炉（ABR）検討は低迷気味。
	応用研究・開発	×	↓	・実証レベルの技術開発なし。
	産業化	△	↓	・解体核プルトニウムを軽水炉用燃料に加工する MOX 工場（サブナリバー）を 2007 年に建設開始していたが、財政難のオバマ政権は 2014 年 3 月中止を決定。
欧州	基礎研究	◎	↑	・ノルウェー企業が欧諸国や Westinghouse を含む国際コンソーシアムを設立しプルトニウム燃焼目的のトリウム燃料（T-MOX）開発中。 ・ADS の基礎研究や実験炉建設計画を精力的に推進中。
	応用研究・開発	◎	↑	・フランスは MOX 燃料高速炉 ASTRID（プルトニウム消費でなく増殖目的だが共通技術多）を 2019 年頃建設開始予定。
	産業化	◎	→	・フランス、ドイツは MOX 軽水炉の運転実績最多で世界を牽引。
中国	基礎研究	◎	↑	・CANDU 炉やガス炉でのプルトニウム燃焼に関し、U-MOX や T-MOX 燃料技術を開発中。将来のトリウム熔融塩炉実現を目的に 2011 年から TMSR 計画を開始。プルトニウム燃焼も視野に、まずは PB-FHR 実験炉の建設を 2017 年に予定。
	応用研究・開発	△	↑	・高速実験炉 CEFR は 2010 年に臨界、2014 年フルパワー達成予定。高速実証炉 CFR 概念設計を開始し 2023 年運用予定。 ・10 MW ペブルベッド型高温ガス実験炉 HTR-10 は 2003 年送電開始、30 MW 同実証炉 HTR-PM を 2012 年に建設着工。（いずれもプルトニウム燃焼目的ではないが関連技術として）
	産業化	×	→	・原子力拡大政策のためプルトニウムを燃焼する技術実用化は意図していない。高速炉商業化は 2030 年を予定。
韓国	基礎研究	◎	↑	・軽水炉の使用済燃料（SF）に 1%程度残存するプルトニウムを燃料として有効利用するため、SF を破碎→酸素中加熱で揮発性 FP 排除→CANDU 燃料に再加工する DUPIC 燃料をカナダ、米国と開発中。 ・超高温ガス炉 VHTR、ADS の開発も行っている。
	応用研究・開発	○	→	・プルトニウム単体を分離せず TRU を一括回収する乾式再処理試験施設 PRIDE を建設完了し 2014 年からウラン試験を開始。これと対をなす金属燃料高速炉（KALIMER）は 2020 年許認可、2028 年建設開始を予定。
	産業化	×	→	・原子力拡大政策のためプルトニウムを燃焼する技術実用化は意図していない。

(註1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

(註2) 現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○：ある程度の活動・成果が見えている、

△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド

▲：上昇傾向、→：現状維持、▼：下降傾向

(8) 引用資料

- 1) 朽山修、原子力委員会 新大綱策定会議（第12回）資料第1-1号 高レベル放射性廃棄物（ガラス固化体）の処分について
<http://www.aec.go.jp/jicst/NC/tyoki/sakutei/siryo/sakutei12/index.htm>
- 2) Waltar, A.E., Omberg, R.P., An Evaluation of the Proliferation Resistant Characteristics of Light Water Reactor Fuel with the Potential for Recycle in the United States. Final Report. Pacific Northwest National Laboratory (November, 2004).
- 3) 千葉敏、高温ガス炉の持続可能性 ―クリーン燃焼高温ガス炉とADSによるTRU変換システムを用いたバックエンド問題の解決―、日本原子力学会2013年秋の大会
- 4) 「原子力・エネルギー」図面集2014、日本原子力文化財団
- 5) International Panel on Fissile Material (<http://www.fissilematerials.org/>)
- 6) 平成24年度発電用原子炉等利用環境調査（諸外国における高い安全性・信頼性の実現等を目標とした革新的原子炉研究開発の動向調査）、経済産業省原子力政策課
- 7) 山下 利之、プルトニウムを燃やす新型燃料「岩石型酸化物(ROX)燃料」の開発、セラミックス Vol.39, No.10, pp.817 - 821, 2004/10
- 8) 高木 直行、動き始めた中国のトリウム燃料利用 ―第二回トリウム利用国際シンポジウムに参加して―、原子力eye Vol.55 No.12, 2009
- 9) 高木 直行、インドにおける持続可能な新型炉の開発動向 ―バーバー原子力研究所・炉物理部を訪問して―、原子力eye、Vol.55 No.8, 2009
- 10) 山下英俊、第29回IAEA/IWGFR定例年会報告、PNC-TN1410-96-030, 1996
- 11) 日本原子力研究開発機構、平成12年以降の分離変換に対する国外の状況変化、原子力委員会、研究開発専門部会、第2回分離変換技術検討会資料第2-1号、平成20年10月1日
- 12) Lance L. Snead et.al., Deep Burn: Development of Transuranic Fuel for High-Temperature Helium-Cooled Reactors, ORNL/TM-2010/300, October 2010
- 13) Sugawara Takanori et.al., Investigation of Pu-burner accelerator-driven system with burnable poison, International Youth Nuclear Congress 2012 (IYNC 2012)
- 14) 日本原子力研究開発機構、廃棄物の減容・有害度の低減のためのシステム概念と研究開発課題、科学技術・学術審議会 研究計画・評価分科会、原子力科学技術委員会もんじゅ研究計画作業部会（第10回）資料2、2013/7

3.3.2.5 ウラン廃棄物の管理手法

（1）研究開発領域名

ウラン廃棄物の管理手法

（2）研究開発領域の簡潔な説明

ウラン廃棄物は、ウラン鉱石の製錬・転換、ウラン濃縮、再転換、原子炉燃料製造・加工や研究施設などから発生するウランに汚染された放射性廃棄物である。ウランは自然界に広く存在し、また自然崩壊により、数十万年後に、放射能が最大となるため、その処理・処分にあたり、これらを考慮する必要がある。また、ウランは国際核物質管理対象物質であり、放射性廃棄物として処分するためには、一定量のウランが含まれている場合は、保障措置を解除する必要がある。ウランの定量化（計量管理手法）が必要となる。

一方でウラン濃縮により発生する劣化ウラン（ウラン235の割合が天然ウランよりも少ないウラン）は、有用資源として位置付けられており、ナトリウム冷却高速炉燃料への利用が考えられている。

ウラン廃棄物や劣化ウランとも、ウランに関連する事業をどのようにしていくかに関わらず、今後の対応が必要になる。

（3）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

ウラン核種は、天然起源の放射性核種であり、自然界にも広く存在し、半減期が長いという特徴がある。また、ウランは機器・設備の内表面の付着物であり、主要な部分は除染が比較的容易である。ウラン関連施設の廃止措置にあたっては、除染による有用資源の回収を行い、微量なウランが含まれた放射性廃棄物（ウラン廃棄物）を減容・安定化処理して、処分することになる。

1) ウラン回収・除染技術

ウラン取扱い施設の解体後のウラン回収・除染方法には、解体後に行う硫酸や水ジェットを用いた湿式法があるが、二次廃棄物の発生や廃液の処理といった観点から、なるべく使用しないほうが望ましい。二次廃棄物を極力低減する手法としては、IF₇を用いた濃縮設備の解体前のウラン回収・除染方法の技術¹⁾、また、廃液中に含まれるウラン回収技術として、エマルジョンフロー法の技術開発が行われている²⁾。

2) 廃棄物中の微量ウランの定量化

ウラン廃棄物を処理し、廃棄体として処分あるいはウランを使用し、除染した解体物（金属）をクリアランスして再利用を行うためには、含まれているウランを定量化する必要がある。ウラン廃棄物を処分するためには、廃棄物中の微量なウランを定量化（廃棄体確認など）して保障措置を解除する必要がある。また、クリアランスを行う際にも、解体金属に含まれる微量なウランを定量化する必要がある。測定対象となる廃棄物は、焼却灰・可燃物・難燃物・金属と多種多様であるため、測定方法も含めて工夫が必要である。

現在、日本原子力研究開発機構 (JAEA: Japan Atomic Energy Agency) にて、10 Bq/g 程度 (極低レベル廃棄物としてウランを処分することを想定した濃度) のウランの定量化が可能なパッシブγ法とウラン廃棄物の多数を占める鉄材に対して高感度測定が可能なアクティブ中性子法を中心に研究開発が進められている^{3,4)}。

ウラン廃棄物の管理手法として、有用資源としてのウランの回収・除染技術や保障措置や処分などの観点からウラン廃棄物中の微量ウランの定量化についての技術は、まだ開発段階であるが、今後数万本の廃棄体 (処分体) 中のウランの定量化に必須となる技術であり、実用化が急がれる。

(4) 研究開発推進上の課題・ボトルネック (科学技術的課題、政策的課題)

1) ウラン廃棄物対策

ウラン廃棄物については、2000年に原子力委員会により、「ウラン廃棄物の処理処分の基本的考え方」がとりまとめられた。その後、2010年に原子力安全委員会 (現在の原子力規制委員会) で、「第二種廃棄物埋設の事業に関する安全審査の基本的考え方」が取りまとめられた。これは、従来の対象であった浅地中処分に加えて、余裕深度処分も対象として追加し、最新の科学的知見を取り入れている。

放射性廃棄物の処理・処分は、発生者や発生源によらず一元的に処分すること、また、国はそのために制度を整え、場合によってはできるように制度を変えていくことが、国の方針 (原子力委員会政策大綱) であるが、ウラン取扱施設から発生するウラン廃棄物については、原子力安全委員会は、基本的考え方の中で以下のように述べている。「ウラン廃棄物については、自然起源の放射性物質を主たる組成とする放射性廃棄物であり、長期にわたり放射能の減衰が期待できず、かつ、安全性の判断に当たり自然環境中の放射能との関連なども考慮する必要があると考えられることから、本基本的考え方の適用対象外とする。」

すなわち、現在に至るまで、ウラン廃棄物については、処分のための安全規制制度が確立されていない状況にある (図) ⁵⁾。ウラン廃棄物は、JAEA が実施主体となっている「研究施設等廃棄物処分事業」で処分される多種多様な発生源の廃棄物の一部である。この事業の処分対象となるウラン廃棄物は、JAEA のみならず、多数の中小のウラン使用施設を設置している事業・研究機関およびウラン加工メーカーのものも含まれている。したがって、処分事業に必要な時期までには確立しておくことが急務である。

放射性廃棄物処分に係る制度化・事業化の状況

廃棄物の区分	発生場所	原子力委員会	原子力安全委員会			安全規制に係る関係法令等	事業化の動向	
		処分方針	安全規制の考え方	濃度上限値	安全審査指針			
高レベル放射性廃棄物	再処理施設	報告 (1984年5月、1998年5月)	報告 (2000年11月、2002年9月、2007年5月)		今後検討	整備済 (2008年4月)	原子力発電環境整備機構が文献調査を行う地域を公募中	
低レベル放射性廃棄物	超ウラン核種を含む放射性廃棄物 (TRU廃棄物)	再処理施設 MOX燃料加工施設	報告 (2000年3月、2006年4月)	報告 (2007年7月)	報告 (2007年5月) (地層処分を除く)	整備済 (2008年4月)	原子力発電環境整備機構が文献調査を行う地域を公募中	
	放射能レベルの比較的高い廃棄物 (余裕深度処分)	原子炉施設	報告 (1998年10月)	報告 (2000年9月、2007年7月)	報告 (2000年9月、2007年5月)	報告 (2010年8月)	整備済 (2008年4月)	六ヶ所村において、日本原燃(株)が本格調査を実施
	放射能レベルの比較的低い廃棄物 (浅地中ピット処分)		報告 (1984年8月、1985年10月)	報告 (1985年10月、2007年7月)	報告 (1987年2月、1992年6月、2007年5月)	報告 (1988年3月、1993年1月、2001年3月)	整備済 (2008年4月)	六ヶ所村において、日本原燃(株)が埋設を実施中
	放射能レベルの極めて低い廃棄物 (浅地中トレンチ処分)		報告 (1984年8月、1985年10月)	報告 (1985年10月、2007年7月)	報告 (1992年6月、2000年9月、2007年5月)	検討済 (1993年1月、2001年3月)	整備済 (2008年4月)	日本原子力研究所が試験研究炉 (JPR) の解体廃棄物の埋設を実施
ウラン廃棄物	ウラン濃縮・燃料加工施設	報告 (2000年12月)	一部検討済 (2006年4月)	今後検討	今後検討	一部整備済 (2008年4月)	研究施設等廃棄物については、日本原子力研究開発機構が検討中	

浅地中処分:今の社会の中(法律等の制度が継続する期間)で決着がつく処分

「放射性廃棄物廃棄物の基本的考え方と課題」バックエンド週末基礎講座より
2012年11月17日 原子力安全研究協会 枋山 修

図 我が国の廃棄物処分の安全規制制度の整備状況

2)劣化ウラン対策

ウラン濃縮施設で3~5%に天然ウランを濃縮すると、製品のバイプロダクトとして劣化ウランが発生する。この劣化ウランは昇華しやすいUF₆の状態にて、JAEAの人形峠環境技術開発センターに約2,600t、ウラン濃縮事業を行っている日本原燃株式会社に約12,000tが保管されており、現在、約14,600tの劣化ウランが我が国に有用資源として保管されている。

劣化ウランについては、我が国では、2005年に策定された原子力委員会の原子力政策大綱において、「劣化ウランは、将来の利用に備え、適切に貯蔵していくことが望まれる」⁶⁾、また「濃縮後の再転換については、これが可能な事業者は、国内において1社となっている。」としている。原子力政策大綱は、ほぼ5年ごとに改定されていたが、2012年10月に策定作業を中止することを決定した。しかしながら、2014年6月に閣議決定された「エネルギー基本計画」では、原子力が重要なベースロード電源と位置づけられており、濃縮事業は今後も継続されることになった⁷⁾。

したがって、劣化ウランは今後も増え続けることになり、これを将来の利用に備えて適切に貯蔵していくためには、昇華しやすいUF₆ではなく、再転換を行い、U₃O₈にして固体状で貯蔵することが必要である。核燃料サイクルを継続していく場合には、政策課題としての対応が求められる。

(5) 注目動向 (新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など)

1)ウラン濃縮施設解体前のウラン回収・除染技術

ウラン施設の運転停止後に解体撤去していく必要があるが、解体物や廃液などには、多くのウランが含まれている。資源の少ない我が国においては、解体物やウラン資源を有効利用していく必要がある。ウラン施設のうち、濃縮施設（遠心分離施設）は運転停止後に機器・系統内に多量のウランが付着している。これを解体前に取り除くと、二次廃棄物の発生を防ぐとともに、運転設備がそのまま利用できることになり、放射性廃棄物の大幅な低減につながる。また、有用資源としてのウランの回収を容易に行うことができる。この技術として、IF₇ガスを用いたウランの回収・除染技術は画期的な方法であり、二次廃棄物の発生がほとんどなく、系統内のウランも 96～99%が回収可能である。この技術は、商業用のウラン濃縮施設の設備更新前のウラン回収・除染にも適用されている。

2)廃棄物中のウランの定量化

ウラン廃棄物の処分についての安全規制制度は今後の課題であるが、ウラン廃棄物中のウランの定量化は処分を行っていくためには必須の技術である。パッシブ法は、技術的には新しいものではないが、定量解析方法として新しい方式である等価モデル方式を開発中である。廃棄物中のウランは均一に分散しているわけではなく、偏在している。この等価モデルは偏在している場合でも定量化が可能となる解析方式であり、今後の技術実証が期待される。

(6) キーワード

ウラン廃棄物、ウラン除去・回収、微量ウランの定量化、保障措置、劣化ウラン政策、核燃料サイクル

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	研究開発	○	→	現在我が国では実用に近いレベルの研究開発が行われている。
	産業化	○	→	国内にとどまらず、上記技術の確立が、ほかの同様な施設を有する諸外国にも適用できるものと考えられる。
米国	研究開発	—	—	ウランを含む施設からのウラン回収・除染およびウラン廃棄物の定量化についての研究は、ほとんど実施されていない。
	産業化	—	—	—
欧州	研究開発	—	—	ウランを含む施設からのウラン回収・除染およびウラン廃棄物の定量化についての研究は、ほとんど実施されていない。
	産業化	—	—	—
中国	研究開発	—	—	ウランを含む施設からのウラン回収・除染およびウラン廃棄物の定量化についての研究は、ほとんど実施されていない。
	産業化	—	—	—
韓国	研究開発	—	—	ウランを含む施設からのウラン回収・除染およびウラン廃棄物の定量化についての研究は、ほとんど実施されていない。
	産業化	—	—	—

研究開発領域
原子力区分

（註1）フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

（註2）現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○：ある程度の活動・成果が見えている、

△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註3）トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

（8）引用資料

- 1) 江間晃ほか, フッ化ヨウ素ガスによる系統除染技術開発－IF₇処理条件とウラン除染結果の評価－, JAEA-Technology 2008-037, 2008, 50p.
- 2) 日本原子力研究開発機構プレス発表, エマルションフロー法での除染廃液からのウラン除去 2014. 5. 2
- 3) 横山薫, 杉杖典岳 放射性廃棄物収納容器中のウラン放射能簡易定量評価のためのパッシブγ線計測, RADIOISOTOPES, 59, 707-719 (2010)
- 4) 日本原子力研究開発機構プレス発表, 原子力施設の解体物などを詰めたドラム缶中に偏在するウランの総量を非破壊測定する技術を実証, 2014.5.2
- 5) 朽山修, 放射性廃棄物廃棄物の基本的考え方と課題, バックエンド週末基礎講座, 2012.11.17
- 6) 原子力委員会, 原子力政策大綱, 2005.10.11
- 7) 経済産業省, エネルギー基本計画, 2014.4.11

3.3.2.6 原子炉の廃止措置（デコミ）¹⁾

(1) 研究開発領域名

原子炉の廃止措置（デコミ）

(2) 研究開発領域の簡潔な説明

原子炉施設の廃止措置（デコミ）は、残存放射能を含む施設特性の評価技術、除染および解体技術、遠隔操作技術、放射性廃棄物の処理技術、廃止措置工事を円滑に遂行するためのプロジェクト管理技術など、さまざまな技術の組合せにより実施される。廃止措置工事は既存技術で対応可能であるが、安全で合理的な作業の実施には、現場の状況に合わせた技術の改良や開発が求められる。また、廃止措置工事で発生する放射性廃棄物の処理処分の実施には国の関与が必要であり、廃棄物対策を含む廃止措置プロジェクトの推進体制に係る政策面での検討や研究開発が必要である。

(3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

国外では、すでに 100 基に及ぶ原子炉施設で廃止措置に係る工事が行われ、そのうち 15 基以上の原子力発電所の廃止措置が終了しており、廃止措置工事を進める上で、技術上の大きな障害はないと考えられている。しかし、特に事故後の施設のように、高放射線下で進められる廃止措置工事は容易ではなく、作業員の被ばく低減・安全確保や放射能汚染の拡大防止などなどに関して多大の努力が払われる。

我が国では、事故で停止した福島第一原子力発電所に加え、東海発電所、ふげん発電所、浜岡原子力発電所 1、2 号機の廃止措置が進められている。これらの原子炉施設の廃止措置工事では、周辺機器の撤去作業などが進められており、高度な技術が必要とされる炉心部機器の解体はまだ行われていない。他方、これまで、我が国では、動力試験炉（JPDR）の廃止措置プロジェクトを初めとして、試験研究用原子炉の廃止措置工事や幾つかの技術開発が行われ、遠隔解体、低レベル放射能汚染の測定など多くの技術情報や経験が蓄積されている。これまでに培われた廃止措置の技術は、これから実施される商業用原子力発電所の廃止措置にも適用可能と考えられるが、商業用原子力発電所では、残存放射能レベルが高いこと、放射性廃棄物の発生量の低減（解体廃棄物の減容のみでなく、解体工事の二次廃棄物の抑制も含む）が必要なことなどにより、廃止措置する施設固有の条件に応じた技術の改良が必要となる。また、経済性の追求など廃止措置プロジェクトに課せられる要求事項はさまざまなものがあり、現場に密着した課題を見出し、その解決に向けた技術開発や改良、リスク分析を含む最適な計画立案、意思決定などに係る検討が必要になる。さらに、これまでに蓄積された経験や技術情報の将来に向けた整理・移転など知識マネジメントに係る研究開発も重要である。加えて、廃止措置工事で発生するクリアランス物の有効利用や放射性廃棄物（低レベル）の処理処分は重要な課題であり、これらは、商業用原子力発電所のみならず大学や研究機関の原子炉施設も対象となるため、我が国としてその推進方策を明らかにするとともに、国や研究機関の役割を明確にし、環境負荷をできる限り低減するための政策や技術に係る研究が必要となる。

（４）研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

廃止措置工事を進めるためには、廃止措置に係る戦略・計画の検討が前提条件であり、十分な検討の下で作成された最適な廃止措置シナリオに基づく具体的な技術の改良および開発が必要である。これまで、廃止措置プロジェクトの費用評価も含めて最適なシナリオ評価の管理（プロジェクトマネジメント）に係る研究は少なく、これからの原子炉施設の廃止措置の遂行のボトルネックとなることが懸念される。

他方、廃止措置において廃棄物対策は重要な課題であるが、クリアランス検認の合理性やクリアランス物の有効利用やサイト解放に係る具体的な技術や政策上の検討（課題の抽出も含む）がなされていない。事業者のみでなく官民一体となり、おのおのの役割を明確にした上で、廃棄物対策の推進を目指す必要がある。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

原子力施設の廃止措置は試験研究施設や開発段階の施設を対象にして 1980 年代から開始されたが、これら比較的小型施設の廃止措置が概ね終了し、その知見が蓄積されてきた。また、米国では経済性に問題のある商業用の原子力発電所などを対象にした廃止措置が 1990 年代から始められたがその幾つかは終了した。これらの知見を反映し、作業員による手作業を遠隔装置や高性能機器を用いて作業の効率化を図る技術の改良が進められつつある。また、3次元 CAD（Computer Aided Design）を用いた、施設概要や廃止措置手順の説明に加え作業分析なども進められるようになった。

福島第一原子力発電所 1～3 号機の燃料デブリ取り出し作業には、遠隔操作装置の開発など多くの技術開発が必要になる。作業員による手作業に頼らない高度な遠隔操作技術、また、計算機を使用した廃止措置作業シナリオの分析、3次元 CAD による作業分析など、更なる高度化を進める流れにある。

（６）キーワード

プロジェクトマネジメント、廃止措置シナリオ、知識マネジメント、遠隔操作、3次元 CAD

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	×	→	・廃止措置技術は基礎研究の段階ではない。
	応用研究・開発	○	↑	・個別の施設などを対象として、コスト低減、被ばく低減、安全向上などを目的に、特性評価、測定、解体、除染、減容化、処分などの開発が実施されている ²⁾ 。 ・特にレーザーによる除染や切断技術について精力的な研究が実施されている ³⁾ 。 ・また、シナリオ評価技術など、廃止措置全体の最適化に関する技術開発が行われている ⁴⁾ 。 ・サイト解放に関する検討は福島第一原子力発電所事故のフォールアウトなどの影響もあり進んでいない ^{5,6)} 。
	産業化	○	↑	・2005年に廃止措置規制が整備され、クリアランス制度も同時に導入された。 ・日本原子力発電東海発電所などいくつかの発電所で、廃止措置が進み、関連技術が成熟化している。 ・低レベル放射性廃棄物に関しては、青森県六ヶ所村の施設において処分が実施されている。ただし、解体廃棄物および研究所等廃棄物については、処分場が立地していない。 ・原子力発電所および研究炉において、実際のクリアランス測定および検認が行われ、一部において再利用も行われている ⁷⁾ 。
米国	基礎研究	×	→	・廃止措置技術は基礎研究の段階ではない。
	応用研究・開発	◎	↑	・廃止措置の効率向上のため、冷戦の遺産である施設を対象とした浄化に伴う、特性評価、測定、解体、除染、減容化、処分などの技術開発が盛んに実施されてきている ⁸⁾ 。
	産業化	◎	→	・廃止措置の規制制度は確立しており、国内で10基以上の原子力発電所の廃止措置が完了しており、技術は成熟している ⁹⁾ 。 ・低レベル廃棄物処分場も利用可能なものがいくつか運用されている。 ・ただし、クリアランスについて検討は行われたものの、完全には制度化されていない ¹⁰⁾ 。 ・サイト解放についての基準や詳細な手順が運用され、実際の解放が行われている。
欧州	基礎研究	×	→	・廃止措置技術は基礎研究の段階ではない。
	応用研究・開発	◎	↑	・廃止措置の効率向上のため、特性評価、測定、解体、除染、減容化、処分などの開発が各国で実施されている ⁸⁾ 。
	産業化	◎	→	・廃止措置の規制制度は各国でほぼ確立しており、各国で数十基の原子力発電所が廃止措置に移行し、実際の解体作業が行われているものが多数あることから、技術的には成熟している ⁹⁾ 。 ・ドイツ、スウェーデンなどではクリアランスが制度化され、実際の測定や検認、再利用が実施されている ¹¹⁾ 。 ・主要国では、低レベル放射性廃棄物処分場が運用されている。 ・ドイツ、英国などでは、サイト解放についての基準が運用され、解放されたサイトがいくつかある。
中国	基礎研究	×	→	・廃止措置技術は基礎研究の段階ではない。
	応用研究・開発	△	→	・一部研究炉の廃止措置研究が進んでいるが、商業炉の廃止措置についての研究・開発は進んでいないと思われる ¹²⁾ 。
	産業化	△	→	・廃止措置の制度は法制化されているが、実際の廃止措置が進んでいないため、詳細化はされていない ¹²⁾ 。

韓国	基礎研究	×	→	・廃止措置技術は基礎研究の段階ではない。
	応用研究・開発	○	↗	・いくつかの高経年の発電所を対象に、廃止措置を想定した検討や研究開発が進みつつある。
	産業化	○	↗	・2基の研究炉について廃止措置が実施されているが、商業炉については検討段階にある ¹³⁾ 。 ・クリアランス制度が整備されており、実際のクリアランス測定および検認が行われ、一部において再利用も行われている ¹³⁾ 。 ・慶州市に低レベル放射性廃棄物処分場が建設され、2015年には運用が開始される ¹³⁾ 。

(註1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

(註2) 現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

(8) 引用資料

- 1) (財)原子力発電技術機構廃止措置総合調査委員会編. 廃止措置技術ハンドブック 除染・解体・再利用編. 2007年5月
- 2) 長崎晋也他. 放射性廃棄物の工学. 2011. オーム社
- 3) 大道 博行. Laser Review. 原子炉廃止措置における光・レーザー技術の適用可能性 (レーザー学会創立40周年記念) -- (「原子力施設の保守安全,廃止措置のためのレーザー技術」特集号). 2013年11月
- 4) 芝原 雄司他. 原子力施設の廃止措置における大型機器解体シナリオの最適化に関わる検討. 日本原子力学会和文論文誌. 2013年9月
- 5) 山中 武、水越 清治. 原子力施設のサイト解放基準に関する考察. 原子力安全基盤機構. JNES-RE-2013-2038. 2014年2月
- 6) 総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会 廃止措置安全小委員会. 廃止措置の終了の確認に係る基本的考え方 (中間とりまとめ) -主な論点と今後の検討の方向性について-. 2011年1月
- 7) ATOMICA(11-03-04-10). 日本のクリアランス制度
http://www.rist.or.jp/atomica/data/dat_detail.php?Title_No=11-03-04-10
- 8) R&D and Innovation Needs for Decommissioning Nuclear Facilities. OECD/NEA. 2014年7月
<http://www.oecd-nea.org/rwm/pubs/2014/7191-rd-innovation-needs.pdf>
- 9) 山中 武、水越 清治. 廃止措置規制の継続的改善に関する考察. 原子力安全基盤機構. JNES-RE-2013-2034. 2014年2月
- 10) ATOMICA(05-01-03-25). クリアランスに対する米国の取組み.
http://www.rist.or.jp/atomica/data/dat_detail.php?Title_No=05-01-03-25
- 11) ATOMICA(11-03-04-05). 各国における放射性廃棄物規制除外 (クリアランス) の動向
http://www.rist.or.jp/atomica/data/dat_detail.php?Title_No=11-03-04-05

- 12) National Report for Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management. China. 2011年10月
- 13) National Report for Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management. Korea. 2011年10月

3.3.2.7 福島第一原子力発電所事故への対応

(1) 研究開発領域名

福島第一原子力発電所事故への対応

(2) 研究開発領域の簡潔な説明

福島第一原子力発電所事故への対応については、国などが中心になって取りまとめた「東京電力福島第一原子力発電所 1～4 号機の廃止措置などに向けた中長期ロードマップ」(以下、中長期ロードマップ)に基づいて進められている。その中では、エンドステートに関わる明確な全体像の記載はないが、燃料デブリの取り出し後、燃料デブリ・廃棄物を敷地外に搬出・処分と記述されている。本領域では、この中長期ロードマップを参考にして、その一部について以下に記載する。

(3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

炉内状況把握に関する技術開発について、格納容器や圧力容器内の状況を推定することは、熔融燃料(デブリ)取り出しを含む発電所の廃止措置作業を進める上で重要であるため、既存のシビアアクシデント解析コードを用いて事故進展を推定するとともに、解析コードの改良を行って炉内状況やデブリ分散に関する予測精度を高めるための研究開発が、技術研究組合国際廃炉研究開発機構(IRID: International Research Institute for Nuclear Decommissioning)を中心に行われている。また、圧力容器下部ヘッ드의破損挙動などに関する実験データの取得やモデル化も IRID、日本原子力研究開発機構(JAEA: Japan Atomic Energy Agency)、大学などで進められている。さらに、欧米を中心に開発が続けられてきた各国の解析コードを比較しつつ福島第一原子力発電所での事故進展挙動などを評価することを目的とした経済協力開発機構/原子力機関(OECD/NEA: Organisation for Economic Co-operation and Development, Nuclear Energy Agency)主催の国際ベンチマーク解析プロジェクト(BSAF: Benchmark Study of the Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Project)が、我が国の提案により 2012 年に開始された。BSAF には、米、フランス、ドイツ、ロシア、韓国など 8ヶ国、15 機関が参加し、我が国からは原子力規制委員会、JAEA、電力中央研究所およびエネルギー総合工学研究所の 4 機関が参加している。BSAF においては、福島第一原子力発電所のプラント情報などを整理した情報ポータル(<https://fdada.info/>)の整備、公開も行われており、BSAF メンバー以外にも事件事象解析のための境界条件が提供されている。

事故荷重・環境変化による構造物健全性評価については、燃料取出し&使用済み燃料取出しと密接な関係がある。このため、2013 年 6 月の中長期ロードマップ改訂時には、使用済み燃料プールからの燃料取り出し、原子炉格納容器などからの燃料デブリ取り出しについて、各号機の状況を踏まえ、複数のプランを用意し検討を進めることとしている。1、2 号機ともにプランの絞り込みや修正・変更を行う時期的なポイントとして、2014 年度上半期を「判断ポイント」と設定している。3 号機原子炉については、建屋上部ガレキ撤去後の建屋躯体調査が実施されている。4 号機については、原子炉建屋および使用済み燃料プールの健全性を確認するため、これまで 8 回の点検が実施され、安全に使用

済み燃料を貯蔵できる状態であることを確認済みである。

ロボット開発について、原子炉建屋内外の瓦礫などの解体撤去作業には、無人重機が使用され、原子炉建屋内の偵察に米国 iRobot 社製の PackBot などが使用された。その後の原子炉建屋内の調査には、より走破性の高い Quince や SurveyRunner などの国産ロボットも開発され使用され始めている。今後の原子炉建屋内の狭隘部や高所部の偵察、除染、解体撤去、熔融燃料などの回収に多数の遠隔ロボットが必要になると考えられ、それらの開発が始められている。

発生した放射性廃棄物の処理・処分に関する研究開発は、中長期ロードマップに沿って、IRID が中心となって実施している。IRID における研究開発は、JAEA および東京電力が中心となって実施しており、国内外の大学、メーカー、関連機関などと連携して進めている。事故により発生した、放射性廃棄物は、汚染のレベルが多岐にわたりその物量も大きいことなど、従来の原子力発電所で発生する放射性廃棄物と異なる特徴があるため、従来の放射性廃棄物とは異なる点を把握したうえで、研究開発を実施する必要がある。これら放射性廃棄物は、汚染範囲が広く、高線量箇所もあることなど、非常に多くの不確実性があり、これを解消し適切に管理することが事故廃棄物に関する対策、技術開発の大きな課題となっている。この放射性廃棄物処理・処分に関する研究開発は、「性状把握」、「長期保管方策検討」、「廃棄物の処理に関する検討」、「廃棄物の処分に関する検討」の4つの観点から研究開発を行っている。特に「性状把握」と「廃棄物の処理に関する検討」および「廃棄物の処分に関する検討」に関しては、研究開発成果を相互に活用しながらそれぞれの開発計画にフィードバックし、廃棄物管理戦略（廃棄物ストリーム）を最適化することが重要である。

熔融燃料の取出しについて中長期ロードマップでは、最速ケースでは、2020 年前半に燃料デブリの取り出しを開始する工程となっている。原子炉格納容器（PCV：Primary Containment Vessel）/原子炉圧力容器（RPV：Reactor Pressure Vessel）の内部調査技術と PCV/RPV からの燃料デブリ取り出し技術に関して、国内外の英知を結集すべく情報提供依頼（RFI：Request for Information）、続けて提案提供依頼（RFP：Request for Proposal）が実施されている。

福島第一原子力発電所における汚染水問題への対策では、1. 汚染源を取り除く、2. 汚染源に水を近づけない、3. 汚染水を漏らさない、の3つを基本方針としている¹⁾。技術的難易度が高いと考えられる海水浄化技術、土壌中放射性物質補修技術、汚染水貯蔵タンク除染技術、無人ボーリング技術、トリチウム分離技術の5つの技術については、検証事業を実施している²⁾。また、汚染水処理対策委員会の下に設置したトリチウム水タスクフォースにおいて、福島第一原子力発電所の汚染水を高性能多核種除去設備（ALPS：Advanced Liquid Processing System）で処理した後に残るトリチウム水の扱いに関する総合評価を実施している²⁾。

（4）研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

ロボット開発に関しては、これまでに投入された数十台の遠隔ロボットのうち5台が未帰還となっている。このうち3台は通信系のトラブルによるものと考えられており、原子炉建屋のように無線が到達しにくいところでも確実かつ高速で通信できる無線シス

テムが必要となっている。また、除染や解体撤去などの長時間かかる作業や、格納容器などの極めて線量率の高いところの偵察や作業を念頭に、遠隔ロボットの耐放射線性の向上について検討を加速する必要がある。さらに、今後、狭隘部や高所部の偵察、除染、解体撤去、熔融燃料などの回収に多数の遠隔ロボットが必要になると考えられる。これら多数のロボットの効率的な運用、管理などを行うため、メーカーごとにロボットを開発する体制から、基本方針の作成を集約し、メーカーでの開発を指導・管理しながら、ロボットを開発する体制の整備も望まれる。

除染に関して、建屋全体については、遠隔作業装置の開発、除染方法選定のための汚染状態の把握、個別の遮へい装置の開発、内包汚染物質撤去のための工法確立と装置開発など、また上部階の除染については、遠隔除染装置の昇降、1階高所除染では、線源の特定や高所に届く除染装置の開発などが課題であり、新たな対策が必要となっている。下図に想定汚染の模式図を示す。ここで、除染技術の分類、適用性検討の項目は、技術カタログに掲載された主要な除染要素技術を示している。これらは、国内外への公募の結果集まった除染技術であり、どのような汚染に有効かという視点で分類されている。抽出された技術について、遠隔機器への搭載性や狭隘部への適用性といった観点で関係者による評価を行い、まず低所での除染方法を確立し、各汚染形態に対して、適用可能と考えられる除染技術を分類し、課題を明確にしている。

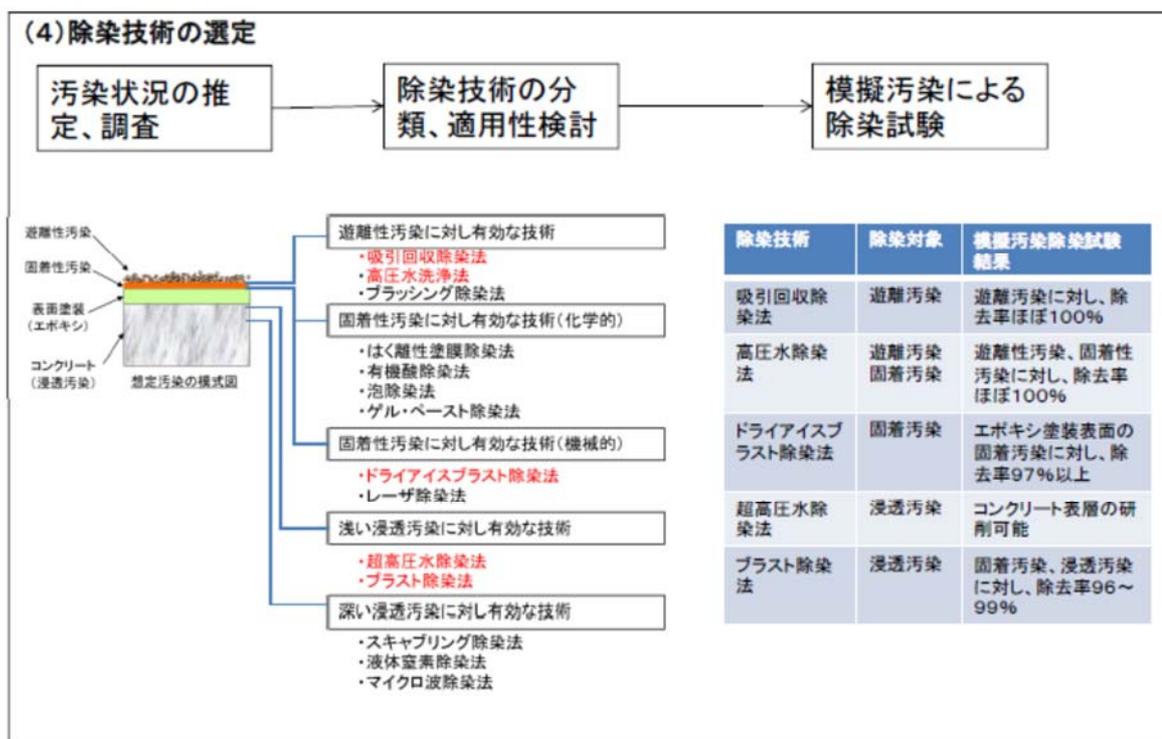


図 想定汚染の模式図

(5) 注目動向 (新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など)

諸外国の専門家とともに事故進展や炉内状況を解析的に評価し、また各国のシビアアクシデント解析コードの改良に貢献するため、我が国は OECD/NEA 主催の国際ベンチ

マーク解析プロジェクト (BSAF) を提案した。米、フランス、ドイツ、ロシア、韓国など 8 各国が参加し、2012 年 11 月に開始。2014 年内に成果をとりまとめる。ソースターム評価の精度向上を目指した第 2 期計画の検討も並行して進められている。

また、今後必要となる狭隘部や高所部の偵察、除染、解体撤去、熔融燃料などの回収に必要な遠隔ロボットの開発が、国の補助事業で進められている。

除染装置の開発は、2011 年度の国の補助事業により開始している。また、総合的に線量を低減させるための作業計画の検討については、2012 年度により開始している。

熔融燃料の取出しについては、IRID では、RFI を実施し、提供された情報を詳細に検討した結果、RFP のテーマ選定並びにその技術仕様を作成した。

汚染水対策としての凍土方式の陸側遮水壁については、1~4 号機を囲む凍土遮水壁構築の本体工事を着工した。小規模凍土壁の閉合および遮水性を確認した²⁾。また、ALPS については、フィルタや吸着材が 62 核種を除去できる条件を確認した²⁾。

さらに、国は必要な人材を確保するため、2013 年度に必要な基礎基盤研究および人材などの情報に係る事前調査を行った。これを踏まえ、2014 年度より、「国家課題対応型研究開発推進事業 (廃止措置等基盤研究・人材育成プログラム委託費)」を開始した。また、福島第一原子力発電所の廃止措置等研究開発の加速プランとして、JAEA に廃炉国際共同研究センターを 2015 年度に設置した。この加速プランでは、人材育成についても強化することとしている。

研究情報基盤の整備として、政府関係機関が発信するインターネット情報や学会発表の書誌情報については、JAEA において「福島原子力事故関連情報アーカイブ」としてデータベースの構築・提供が行われている。このほか、IRID において実施している廃止措置に関連する研究開発については、適宜、国の会議体 (廃炉・汚染水対策チーム会合 / 事務局会議など) において共有・公開されている。

(6) キーワード

ロボット、除染、解体撤去、放射線計測、ガンマカメラ、耐放射線性、放射性廃棄物処理・処分、核種分析、原子力発電所廃止措置、遊離性汚染、固着性汚染、除染技術、総合的線量低減、燃料デブリ、冠水、気中取り出し、汚染水問題に関する基本方針、廃炉・汚染水問題に対する追加対策、凍土方式の陸側遮水壁、国際廃炉研究開発機構、多核種除去設備、国際原子力機関、トリチウム水、耐震安全性、経時変化

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基本研究	—	—	<ul style="list-style-type: none"> IRIDにて、事故時のプラント挙動分析、シビアアクシデント解析コード (MAAP、SAMPSON) の高度化および関連する模擬試験を実施している。JAEAでは、シビアアクシデント解析コード THALES2の開発と、THALES2および MELCOR を用いた事故進展解析を実施している。 東京工業大学、北海道大学、東北大学、京都大学、九州大学、長岡技術科学大学が共同し「福島原子力発電所で発生した廃棄物の合理的な処理・処分システム構築に向けた基盤研究」を実施している。 トリチウム水の処理については、蒸留法、同位体交換法、電気分解法、そのほかの方法が開発されている。
	応用研究・開発	—	—	<ul style="list-style-type: none"> IRID の提案が国の補助事業に採択され、中長期ロードマップに沿った研究開発を実施している。 トリチウム分離プラントの実績はあるが、福島第一原子力発電所のトリチウム水は、この実績と比較しても、濃度が数桁低く、量が数桁大きい。
	産業化	—	—	<ul style="list-style-type: none"> JAEAにてパワーマニピュレータ型の動力試験炉遠隔解体装置や遠隔保守作業用の両腕型バイラテラルサーボマニピュレータなどが開発され、実用化されている。 第二セシウム吸着装置として、東芝などが開発した SARRY (Simplified Active Water Retrieve and Recovery sYstem) が整備され汚染水処理 (セシウム除去) が実施されている。 多核種除去設備として、東芝などが開発した ALPS が整備され汚染水処理が実施されている。
米国	基本研究	—	—	<ul style="list-style-type: none"> トリチウム水の処理については、蒸留法、同位体交換法、電気分解法、そのほかの方法が開発されている。
	応用研究・開発	—	—	<ul style="list-style-type: none"> スリーマイル島事故で発生した3個のゼオライトベッセルについて PNNL でガラス固化処理試験を実施し、16個をコンクリート・オーバーパック (HIC: High Integrity Container) し埋設保管した。
	産業化	—	—	<ul style="list-style-type: none"> MELCOR コード、MAAP コードを使用して事故進展解析を行い BSAF に参加している。 原子力施設の廃止措置について、オークリッジ国立研究所などの国立研究所が中心となって、所要の遠隔ロボットを開発し、実用に供してきている。 セシウム除去設備として、KURION 社の設備が整備され汚染水処理 (セシウム除去) が実施されている。
欧州	基本研究	—	—	<ul style="list-style-type: none"> フランス原子力・代替エネルギー庁 (CEA: Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives)、放射線防護・原子力安全研究所 (IRSN: Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire, フランス) にて幅広い実験的研究が進めてきた。また、カールスルーエ工科大学 (KIT: Karlsruher Institut für Technologie, ドイツ) においても、再冠水時の燃料集合体挙動などに関する研究を継続している。
	応用研究・開発	—	—	<ul style="list-style-type: none"> KIT、CEAにて原子力施設を廃止措置するための遠隔機材開発を継続している。

	産業化	—	—	<ul style="list-style-type: none"> ・ KIT では WAK (Wiederaufarbeitungsanlage Karlsruhe) 再処理施設にて BROOK 社 (スウェーデン) の小型無人重機に油圧アームを搭載した遠隔ロボットを開発し、塔槽類の解体撤去を行った。 ・ GroupeINTRA (フランス) では、遠隔ロボットを配備しており、常時、訓練と整備、継続的に更新を行っている。また、CEA では、BROOK 社の小型無人重機を改良したロボットを用いて、セル内機器の解体撤去を行った。 ・ BROKK 社では、作業員に変わって解体撤去作業を行う、小型無人重機型ロボットを製造している。 ・ 除染設備として、AREVA 社 (フランス) 製設備が整備され汚染水処理 (セシウム除去) を実施したが、操業開始約 3 ヶ月後から休止している。 ・ エネルギー・環境・技術研究センター (CIEMAT : Centro de Investigaciones Energeticas, Medioambientales y Tecnologicas, スペイン)、ポール・シェラー研究所 (PSI : Paul Scherrer Institute, スイス) は、MELCOR コードを用いて福島第一原子力発電所事故の進展解析を行い、BSAF に参加している。
中国	基本研究	—	—	・ 特筆すべきものはない。
	応用研究・開発	—	—	・ 特筆すべきものはない。
	産業化	—	—	・ 特筆すべきものはない。
韓国	基本研究	—	—	・ 特筆すべきものはない。
	応用研究・開発	—	—	・ トリチウム分離のプラントについて実績はある。
	産業化	—	—	・ 韓国原子力研究所 (KAERI : Korea Atomic Energy Research Institute) は、事故進展解析について独自コードを開発する動きもあるが、BSAF には MELCOR コードを用いて参加している。
ロシア	基本研究	—	—	・ チェルノブイリ事故以降、燃料溶融や溶融炉心コンクリート相互作用 (MCCI : Molten Core Concrete Interaction) などに関する多様なシビアアクシデント研究が展開された。
	応用研究・開発	—	—	・ チェルノブイリのデブリ分析および処理は、クルチャトフ研究所 (KI : Kurchatov Institute) が中核となって実施した。また、アレクサンドロフ科学技術研究所 (NITI : Nauchno-Issledovatel'skii Tekhnologicheskii Institut im. A.P. Aleksandrova)、ロシア科学アカデミー原子力安全研究所 (IBRAE : Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences)、LUTH、サロフ研でシビアアクシデント研究が継続されている。
	産業化	—	—	・ IBRAE は、ロシア型加圧水型原子炉 (VVER : Voda Voda Energo Reactor) でのシビアアクシデント解析を目的とした SOCRAT コードを開発してきたが、これを BWR に対応させ BSAF に参加し福島第一原子力発電所事故の進展解析を行っている。

(註 1) フェーズ

基礎研究フェーズ : 大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ : 研究・技術開発 (プロトタイプの開発含む) のレベル

産業化フェーズ : 量産技術・製品展開力のレベル

(註 2) 現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎ : 他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○ : ある程度の活動・成果が見えている、

△ : 他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、× : 特筆すべき活動・成果が見えていない

(註 3) トレンド

↗ : 上昇傾向、→ : 現状維持、↘ : 下降傾向

(8) 引用資料

1) http://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/pdf/140217/140217_01f.pdf

2) http://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/pdf/140609/140609_02h.pdf

3.3.2.8 環境修復の手法

(1) 研究開発領域名

環境修復の手法

(2) 研究開発領域の簡潔な説明

原子力発電所、そのほかの原子力施設の事故により広く環境中に放出された放射性物質で汚染された環境を除染などにより修復し、環境再生を図る技術とその技術開発の現状を述べる。放射性物質に起因する放射線量率の低減、土壌中の放射性物質の除去を合理的、効率的に行うことが必要である。また、汚染環境は土壌、建物、森林など多種多様に渡ることからそれぞれに適した技術を選定、開発しなければならない。さらに、環境修復では多量の汚染物、土壌、瓦礫、草木類、などが発生するため、体積の減容、焼却などによる安定化が必要となる。加えて、多量の汚染物を貯蔵、処分する施設、場所を整備することが環境修復を迅速に行うには不可欠となる。住環境、生活環境の修復には除染とともに地域再生が不可欠である。

(3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

2011年3月11日に起きた東日本大震災に起因して、福島第一原子力発電所の炉心損傷や建屋の爆発で放射性物質が大気中に多量に放出され、福島県を中心として東日本に広がり、広範囲にわたり土壌、建物、農地、河川・湖沼、森林などの汚染がもたらされた。それをもたらした放射性核種は、セシウム134（半減期2.06年）、セシウム137（半減期30.2年）、ヨウ素131（半減期8.04日）が主要なものである。そのうちヨウ素131は半減期が短いため中長期に影響を及ぼすのはセシウムの放射性核種であり、線量や濃度の低減にあたってはこのセシウムが主要な対象となる。この汚染により放射線量が高い地域では、住民の長期にわたる避難生活が余儀されている。このため放射線量や土壌表面、土壌中の放射性核種の濃度を低減させて、住民が以前のように安心して生活し、生産活動に従事できるように環境を修復していくことが重要となる。

このためにもっとも基本となるのが放射性核種の除去や単位面積・体積当たりの濃度を薄めることであり、前者は比較的汚染度が高いところ、後者は汚染度が比較的低いところに適用できるが、修復の対象は多種、多様であり、その対象物により適切な技術を選定していく必要がある。主要な修復技術としては、建物や屋根に対しては、放水洗浄、ブラシ洗浄、ふき取り、閉じ込め、屋根の葺き替えなど、敷地や庭に対しては表土の剥ぎ取り、表土と下土の入れ替え、芝刈り・草の除去、灌木の剪定、落ち葉の回収、樹木、灌木の伐採、閉じ込め（汚染物の表面固定）などがある。また、道路などに対しては散水洗浄、側溝・法面の泥、草、枯葉などの除去、固定化、剥ぎ取りと再舗装などが、農地（畑地、水田）に対しては耕起、表土の剥ぎ取り、代掻き、土壌洗浄（物理的、化学的）、植物栽培による土壌浄化（ファイトレメディエーション）がある。さらに、森林に対してはモニタリング、落ち葉の回収、樹木、灌木の剪定・間伐、集水域での水処理、濃集域における堆積物の除去、立ち入り制限・摂取制限などがある。しかし、同一技術を適用しても、除染係数が低いものから高いものまで変化し、除染の対象とする物質の性質（表面形状、気候、汚染後の経過期間など）により大きく変化することがこの除染

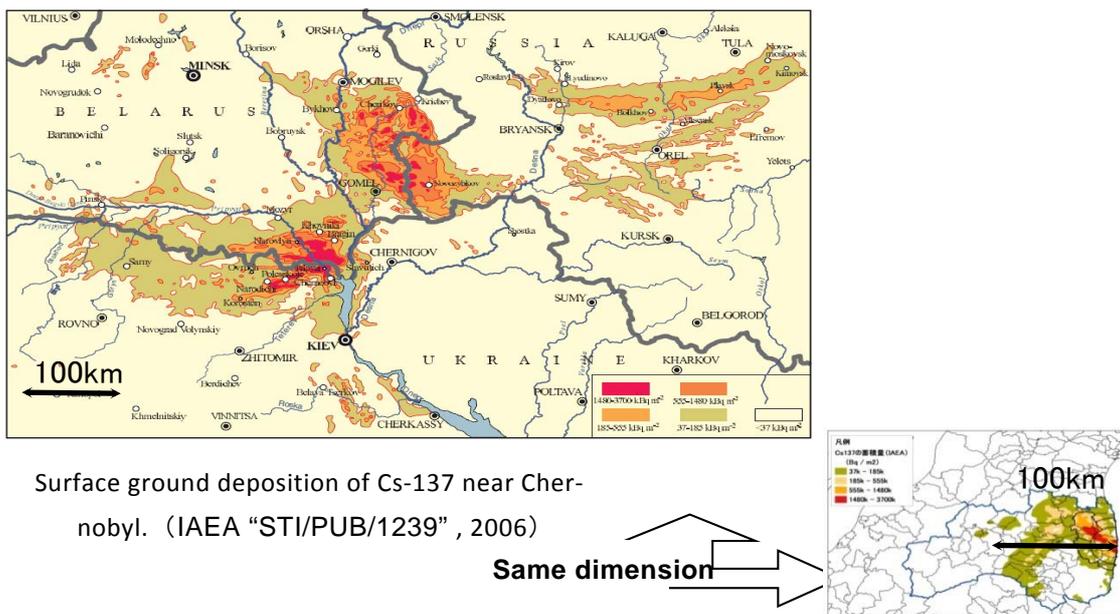
の特徴である。

このように除染対象は建物、土壌、農地、森林など多岐に渡り、汚染した土壌、瓦礫、草木類が多量に発生する（福島県の除染からは 1500 万～2800 万 m^3 の汚染物が発生すると予想されている）。このためにはそれらを保管する場所（仮置き場）の整備が、効率的に除染するためには必要であるが、仮置き場設置に住民の理解が得られない場合には、暫定的に現場保管を行って進めているところもある。これらの汚染物には庭、公園、森林などから発生する草木類などが多く含まれている。それらの有機廃棄物は腐敗、分解による温度上昇、ガス発生が予想されるため、火災などの発生を抑制するため焼却などによる減容化と安定化が必要とされる。

さらに、福島県の除染で発生する放射性廃棄物の保管・処分法は、仮置き場保管（3 年間）、その後の中間貯蔵（30 年間）とそれに続く最終処分となっている。しかしこれらの施設の設置には、住民の理解と受け入れという大きな課題が存在する。また、現在（2014 年 7 月）でも現場保管や仮置き場が 1 万か所以上存在するが、これを福島県内数か所に予定されている中間貯蔵施設に合理的、効率的に運搬することも課題となっている。さらに、中間貯蔵施設搬入までには時間を要することから 3 年間以上の仮置き場での保管も考慮しなければならず、技術面も含めて住民に対する不安の払しょくも今後の課題である。

一方、放射性物質は時間の経過とともに風雨などにより森林からダム、ため池、宅地、農地などへの移行も懸念され住民の関心となっている。さらには、この放射性物質による地下水汚染の懸念も住民の高い関心となっている。

国際的な汚染の事例としては、いくつかあげられるが中でも広範囲に影響を及ぼしたものとして、国際原子力事象評価尺度（INES : International Nuclear Event Scale）で福島第一原子力発電所事故と同じもっとも大きいレベル 7（深刻な事象）として位置付けられた旧ソ連（現ウクライナ）にて 1986 年に炉心が溶融し、爆発して多量の放射性物質が広範囲に飛散したチェルノブイリ原子力発電所 4 号炉の事故がある。チェルノブイリ発電所の事故では炉心自体が爆発したため、その中に装荷されている核燃料物質であるウランやプルトニウム、さらに各種の核分裂生成物が広範囲に飛散した。その領域は、セシウム 137 濃度 $40 \text{ kBq}/m^2$ 以上の汚染が $200,000 \text{ km}^2$ 以上に及んでおり、そのうちの 71% はベラルーシ、ロシア、ウクライナであった。これにより 34 万人が避難し、村や住居の移動をしなければならなかった。一方、福島第一発電所の事故では、 $40 \text{ kBq}/m^2$ 以上の領域は約 5100 km^2 であった。図に同じ尺度で示したチェルノブイリ事故と福島第一原子力発電所事故により汚染した地域の地図を示す^{1,2)}。同地図で同じ色は同じ汚染程度を示している。



Surface ground deposition of Cs-137 near Chernobyl. (IAEA “STI/PUB/1239”, 2006)

Same dimension

図 チェルノブイリ事故と福島第一原子力発電所事故により汚染した地域の比較

一方、両者における土地の利用形態も異なっている。福島の場合は、セシウム 137 により 300 kBq/m² 以上汚染したところの土地利用形態は、市街地が 5%未満、水田・畑地などの農業地が 20%未満、山林が 75%以上（全村避難に至った飯館村、川内村では 90%以上が山林）であるのに対し、チェルノブイリ発電所周辺は農用地が 43%、森林 39%および河川・湖沼地帯が 2%となっており、福島の場合は森林の占める割合が大きい。チェルノブイリ事故による汚染の場合、腐植化した砂質土では 1996 年時点でもセシウムはその 95%程度が表層 2 cm 以内にとどまっていると報告されている。しかし、ストロンチウムは移動しやすく同時点で表層 2 cm 並びに 50-60 cm 深さの場所に多くが存在している。一方、芝土に用いられた砂質のグレイ土ではセシウムは、1987 年時点で 80%以上が表層 5 cm 以内にとどまっていたが、2000 年には表層には 40%程度となり深さ 20 cm 程度まで移動していたという報告がある。

チェルノブイリ事故で汚染された都市や村では、1986~1989 年にかけて大規模な除染が行われ、水や特殊洗浄液による建物の洗浄、居住地区の清掃、汚染した表土の除去、道路の清掃と洗浄、表面水（川や湖）の水源での除染が行われた。これらは合計で約 1000 の居住地で数万の家屋や公共建物と 1000 以上の農場が対象となった。除染効果は、同じ除染方法を使っても差が出ており、空間線量率の低減率が 2/3 から 1/15 まで変化している。しかしその後、チェルノブイリ発電所周辺では除染の費用が大きいかさむため、汚染地区全体での総合的な除染はなされなかった。

次に大きな環境の汚染事故として、1957 年に旧ソ連の再処理施設（MAYAK）で高レベル放射性廃液タンクの冷却機能の喪失により、発熱し化学爆発を起こして、周辺環境が広範囲に汚染した。この汚染領域は、7.4×10¹⁰ Bq/km² 以上の汚染が長さ 105 km 幅 8-9 km におよびその面積は 1000 km² となっている¹⁾。また、3.7×10⁹ Bq/km² 以上の汚染は長さ 300 km、幅 30-50 km におよびその面積は 200,000 km² であった。このタンク内に貯蔵されていた主な放射性核種は、セリウム 144 (+プラセオジウム 144) が 65.8%、

ジルコニウム 95 (+ニオブ 95) が 24.8%、ストロンチウム 90 (+イットリウム 90) が 5.4% およびルテニウム 106 (+ロジウム 106) が 3.7% であった。ここでとられたサイト内除染方法は、高汚染の場所では新しい土壌で表面を覆うことによりであった。比較的汚染が低い領域では汚染した土壌を汚染していない下部の土壌と入れ替えることによりであった。これにより約 320,000m³ の汚染土壌が発生している。当初計画された環境修復は、村や住居の移転、放射線モニタリングシステムの開発や食物や飼料の検査、居住地域や農業地の除染と、農業企業体の再構築であった。また汚染地の主な除染方法は、コンクリートやアスファルトの道路では水による洗浄であり、自動車や鉄道貨車などについては水洗浄、リンスや汚染の固定化という方法が取られた。

(4) 研究開発推進上の課題・ボトルネック (科学技術的課題、政策的課題) ³⁾

科学技術的課題

除染にあたってまず重要なことは除染の対象となる場所の詳細な線量を知ることであり、放射性物質はそれが出す放射線の種類 (アルファ線、ベータ線、ガンマ線、中性子線) とそのエネルギーにより周辺に及ぼす影響が異なる。福島第一原子力発電所事故の場合には、汚染の源となっているのはセシウム 134 (半減期 2.06 年) とセシウム 137 (半減期 30.1 年) であり、長期に影響を及ぼすのはセシウム 137 である。このセシウム 137 によるガンマ線 (正確には、セシウム 137 がベータ崩壊により準安定なバリウム 137m になり、それが安定なバリウム 137 に変わるときにエネルギー 0.662MeV のガンマ線を放出) は影響の範囲が 20 m 以上に及ぶため、その場の線量がその地点での汚染なのか、ほかの場所の汚染が影響しているのかを知ることが重要である。

除染方法の選定にあたっては、同じ方法を適用しても場所や対象物によって効果が大きく異なるため、その特徴に応じて個別に判断することが必要である。また特に広範囲の除染には、必要となる時間やコスト、発生する廃棄物量を考慮して、効率的かつ合理的に除染方法を選定することが必要である。

除染により極めて多量の放射性的汚染物質が発生する。その多くは土壌、ガレキ、草木類の有機物であり、これらの量の低減は必要な技術となっている。土壌は分級などを使う物理的除染や化学薬品 (アンモニアなど) を添加することによる化学除染があるが、現状の技術では大きな除染効率が得られなく、費用も高価なものとなっている。このため効率的な方法で安価で高い除染係数が得られる除染技術が求められている。また、このためにも放射性セシウムがどのような形態で土壌などのどこに取り込まれるのか、吸着されるのか早急に解明する必要がある ⁴⁾。

除染により発生する草木などの有機物については時間の経過とともに腐敗、可燃性ガスの発生、発熱、高温化などにより、ときには発火する危険性が存在する。このためには燃焼させて減容とともに安定化を図ることが必要である。燃焼させる場合には燃焼後に発生する飛灰、主灰の長期安定化のための固化技術なども求められる。

また、農地などでは穀物、果樹などへの取込みが懸念されているが、ここ 2、3 年の研究で実際にそれらの生産物に取り込まれるセシウムの量 (移行係数) はかなり低いことが分かってきているが、移行のメカニズムは明らかとなっていない。このため取り込まれる機構や穀物、果樹中での濃縮機構なども明らかにする必要がある ⁵⁾。

今後の大きな関心として時間の経過（年単位）とともに放射性物質は風雨や河川の流れなどにより移行することが予想されるため、除染後も定期的に調査（動態調査）しておくことが必要である。現在、森林からため池や河川に、また河川の流れによりセシウムがどのような速度で移行するか明確になっていないのが現状である。また、汚染された場所の住民にとっては時間の経過とともに、地下水の汚染が大きな懸念となっている。このため、長期間にわたり表面土壌から地下水への移行についても調査しておくことは重要な課題である。

政策的課題

環境修復は宅地、農地、河川、道路などの除染、地域再生と多分野にまたがり、多くの行政機関が直接関係するため、全体を管理、統括して進める制度設計が不可欠である。また、現在除染特別地域については国直轄で、また汚染状況重点調査地域では各自治体単位で除染計画が策定され除染実施区域が定められている。その一部には優先順位の考え方も導入されている。今後、除染計画の見直しの過程において利害関係者による議論がなされ、放射線防護の確保と社会・経済的な要因などがバランスした計画のもとに除染が実施されることが必要である。除染の推進にあたっては、多量に発生する廃棄物を保管する場所、施設の確保が極めて重要である。このため仮置き場、中間貯蔵施設などの安全確保と周辺住民への理解の促進がキーとなる。

除染した後に発生する放射性物質は濃度が低いものも多量に発生するため、土壌や、金属、コンクリート類などは放射線影響を十分考慮したうえで、特に低いもの（クリアランスレベル以下）については無条件の使用が、クリアランスレベル以上ではあるが適切な処置をして国際放射線防護委員会（ICRP : International Commission on Radiological Protection）の推奨値である年間の追加被ばく線量が 1 mSv 以下であれば、堤防の中心殻や道路の下層の土壌として利用できるような再利用の推進に向けた改善、基準の策定、地元住民の理解促進が必要である。

また環境修復は、住民の生活インフラの整備、生産活動拠点の整備など地域活性が不可欠であり、除染とともに地域再生を同時に進めなければならない。

(5) 注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

このほかの大きな環境修復としては米国の例がある。米国では、軍事用の原子力技術開発が活発であった 1980 年ころまでの負の資産として、国立の原子力施設（サバンナリバー、ハンフォード、オークリッジなど）の環境修復が大きなプロジェクトとして進められている。汚染源は多様であり、サバンナリバー施設は、ウラン、テクネチウム 99、ヨウ素 129、硝酸塩、ハンフォード施設はテクネチウム 99、ウラン、クロム、ストロンチウム 90、オークリッジ施設は水銀である。これらのサイトの修復には環境保護庁が毎年多くの予算をつけて、土壌、地下水、河川の修復作業が続けられている。

一方、福島第一原子力発電所の事故を受けて、なかでも国際原子力機関（IAEA : International Atomic Energy Agency）は早くから福島の教訓を取り入れたガイドラインの見直しや技術報告書の作成を行っている。ここではそのいくつかを紹介する。

- ・ IAEA は 2007 年に”Remediation process for areas affected by past activities and accidents”という安全ガイド (Safety Guide, IAEA No.WS-G-3.1) を刊行した。しかし、今回福島第一原子力発電所事故を受けてこの改定作業を実施している。そこでは公衆の被ばくを減らすために現存被ばく状況への修復戦略、環境修復の基準など広い範囲にわたって見直しが行われている。
- ・ IAEA ではこれまでに各国に存在する負の資産の修復について、”Technologies for Remediation of Radioactively Contaminated Sites”; IAEA-TECDOC-1086 (1999) を取りまとめたが、現在福島第一原子力発電所のサイト外の環境修復の基本的考え方、戦略、使われている除染技術などを大幅に取り入れた技術報告書が作成中である。
- ・ 事故による環境修復から多量に発生する汚染廃棄物の管理について、技術報告書を作成している。この報告書では、量的制約、迅速さおよび効率を考えると通常時の許認可では環境修復の速度に障害が出ることから、事故などで発生する放射性廃棄物の許認可を加速させるための簡素で効果的な制度とその方法について、および政策決定上考慮すべき重要な課題について報告がまとめられる。

(6) キーワード

環境修復、除染方法 (技術)、福島第一原子力発電所事故、放射性廃棄物、セシウム 134、セシウム 137、米国原子力施設 (サバンナリバー、ハンフォード、オークリッジ)、チェルノブイリ発電所事故、汚染廃棄物・土壌の貯蔵

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本 4, 6, 7)	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・ 土壌中のセシウムの動態（吸着機構、脱着機構）についての研究が進んでいる。 ・ 土壌中（深度方向）へのセシウムの移行が経年的に調べられている。 ・ 環境中での移行動態の評価、線量評価モデル、シミュレーションコードの開発が行われている。
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・ 土壌の成分（土壌の種類、交換性カリウム濃度）と作物中への放射性セシウム、放射性ストロンチウムの移行率との関係が明らかになってきている。 ・ 環境中での放射性セシウムの移行動態の研究が進んできている。 ・ 汚染水中の放射性セシウム、ストロンチウムの除去材、技術の開発が行われている。 ・ 汚染土壌からの放射性セシウムの除去技術が進められている。 ・ 環境修復には多大なコストを要するため、除染の効果とコストの関係に関する分析がなされている。 ・ 地域再生のモデル評価が進められている。
	産業化	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・ 建物、宅地、農地などを対象にしてそれぞれに適した放射性物質除去技術を使って修復事業が行われている。 ・ 農地除染のための農業機械の開発が行われている。
米国 8)	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ・ 地質、水質の変化によるセシウムの吸着特性が調べられている。
	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ・ 汚染の性質の把握、モニタリング、除染、モデリングなど一連の流れで修復が行われ、そのための技術開発、比較、実証も同時に行われている。 ・ 剥ぎ取り、洗浄、固定化、物理的・化学的手法で高放射能濃度と低放射能濃度の土壌選別が行われている。 ・ 長期間にわたる土壌、河川中の放射性セシウムや放射性ストロンチウムの移行評価（動態調査）が行われている。 ・ 除染性能向上、コストの削減が可能により効率的で効果的な技術の探査が行われている。
	産業化	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ・ 原子力研究開発施設（ハンフォード、サバンナリバー、オークリッジなど）で土壌汚染、河川汚染からの環境修復事業が1980年代ころから進められている。 ・ 汚染された地下水の処理（汲み上げ、除染、地下に再注入）が行われている。 ・ 大規模な地下水汚染処理施設が建設中である。
欧州	基礎研究	-	-	<ul style="list-style-type: none"> ・ 特に目立った動きはない。
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ・ 原子力廃止措置機関（NDA : Nuclear Decommissioning Authority, 英）が中核となって廃止措置、環境回復に関する技術開発が行われている。
	産業化	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・ 英国にてセラフィールド原子力施設の老朽した原子炉廃止措置、汚染土壌の回復計画が進められている。また、研究開発用の高速炉など（現在廃止措置段階）を運転していたドンレイ原子力施設の汚染土壌の回復計画が作成されている。
中国	基礎研究	-	-	<ul style="list-style-type: none"> ・ 特に目立った動きはない。
	応用研究・開発	-	-	<ul style="list-style-type: none"> ・ 特に目立った動きはない。
	産業化	-	-	<ul style="list-style-type: none"> ・ 特に目立った動きはない。
韓国	基礎研究	-	-	<ul style="list-style-type: none"> ・ 特に目立った動きはない。
	応用研究・開発	-	-	<ul style="list-style-type: none"> ・ 特に目立った動きはない。
	産業化	-	-	<ul style="list-style-type: none"> ・ 特に目立った動きはない。

ウクライナ (旧ソ連) ¹⁾	基礎研究	×	-	・特に目立った動きはない。
	応用研究・開発	△	↘	・土壌、水、食物のモニタリングを行い、汚染地図を作成することを行った。 ・環境修復は困難であり、高汚染地では村や居住地の移転が主であった。 ・農地や牧草地については深い層までの耕起を行ったり、高濃度のカリウムの添加を行った。
	産業化	×	-	・特に目立った動きはない。
ロシア ¹⁾	基礎研究	△	↘	・環境中、食物ならびに食物連鎖系でのストロンチウム 90 とセシウム 137 の挙動調査を行った。 ・人間の体内中でのストロンチウム 90 とセシウム 137 の分布の把握。 ・異なる土壌中でのストロンチウム 90 とセシウム 137 の移行挙動の把握。 ・河川・湖沼地のストロンチウム 90 とセシウム 137 の蓄積、分布。
	応用研究・開発	○	→	・高汚染地では 1 m 厚さのクリーンな土壌でカバーし、低汚染地では汚染土壌の剥ぎ取りを実施した。 ・道路に対しては水洗浄をしたり、表土 10 cm 程度の剥ぎ取りを行った。 ・自動車や鉄道貨車の洗浄を行うとともに、高汚染地では鉄道軌道上とその周辺の土壌の剥ぎ取りを行った。
	産業化	×	↘	・現段階でも開発の段階であり本格的な産業化による修復はなされていない。

(註 1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

(註 2) 現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註 3) トレンド

↑：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

(8) 引用資料

- 1) International Experts' Meeting on Decommissioning and Remediation after a Nuclear Accident, IAEA Headquarters in Vienna, Austria, from 28 January to 1 February 2013
- 2) IAEA, "Environmental Consequences of the Chernobyl Accident and their Remediation: Twenty Years of Experience", IAEA, Vienna, 2006
- 3) 福島第一原子力発電所事故「その全貌と明日に向けた提言 - 学会事故調最終報告書 - (一財) 日本原子力学会、丸善出版、平成26年3月
- 4) <http://aerap.dc.affrc.go.jp/research/01top.html>
- 5) <http://www.naro.affrc.go.jp/project/challenge/project23/index.html>
- 6) http://www4.pref.fukushima.jp/nougyou-centre/kenkyuseika/kenkyu_seika_radiologic.html
- 7) 農業及び土壌の放射能汚染対策技術国際研究シンポジウム、農林水産省、2012年3月8日～10日、郡山市
- 8) Japan/U.S. Department of Energy Workshop on Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Cleanup, Feb.13-15, 2012, Hanford Site in Richland, Washington State

3.3.2.9 環境・人体への放射線影響（防護を含む）

（1）研究開発領域名

環境・人体への放射線影響（防護を含む）

（2）研究開発領域の簡潔な説明

環境放射線と放射能、放射性物質の環境挙動、放射性物質の体内動態、放射線の計測と線量評価、放射線の人体影響と防護、などのキーワードに代表される、実測定と解析計算に基づく知見の集積、その成果を利用した防護理念の構築と関連技術の開発に関する基盤的研究について記載する。

（3）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

「環境放射線と放射能」に関しては、国連科学委員会（UNSCEAR : United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation）の2008年報告書で、ラドンによる被ばく線量が自然放射線源からの被ばく線量の約50%を占めているとされ¹⁾、欧州による屋内ラドンの疫学調査の結果より、国際放射線防護委員会（ICRP : International Commission on Radiological Protection）や世界保健機構（WHO : World Health Organization）がラドンの肺がんリスクの有意性を報告書にまとめている^{2,3)}。WHOは飲料水中ガイドラインを現在検討中である。国内では2011年12月に「新版 生活環境放射線（国民線量の算定）」が公表され、最新の国民線量が提示された。

「放射性物質の環境挙動」に関しては、福島第一原子力発電所事故に関連する研究が集中的に進められている⁴⁾。また、再処理施設や放射性廃棄物処分施設、自然起源の放射性物質（NORM : Naturally Occurring Radioactive Material）などに着目した研究も継続して進められている。

「放射性物質の体内動態」に関しては、ICRPが関連のモデルを提示し⁵⁾、摂取量から線量を計算するための換算係数を整備している。これらのモデルを解析するソフトウェアが国内外で開発^{6,7)}されている。

「放射線の計測と線量評価」に関しては、福島第一原子力発電所事故を受けて、特に環境計測を目的とした低線量領域を対象として、エネルギー分析が可能で、かつ指向性の高い測定器の開発が進められている。低線量内部被ばくを正確に評価する検出器が整備されつつある⁸⁾。

「放射線の影響と防護」に関しては、線量基準の設定に用いられるLNTモデル（人体に対する放射線の影響にしきい値なしとする仮説、Linear Non-threshold Theory）の妥当性や低線量における放射線リスクに関する議論が活発である。また、水晶体、循環器系疾患など、放射線被ばくが非がん疾患に与える影響についても注目が高まっている^{8,10)}。

（4）研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

「環境放射線と放射能」について、一部の国や地域における屋内ラドン調査で使用された測定器の中にラドン220の影響を受けているものがあり、このことがラドンの人体影響を小さく見積もる原因になっていることが問題となっている¹¹⁾。ラドンおよびトロ

ンによる被ばく線量の評価手法の確立と校正場の整備が重要である。欧米においてはラドンによる防護規準が設けられているが、我が国ではまだ議論が始まっていない。

「放射性物質の環境挙動」について、福島第一原子力発電所事故に関連した研究を進め、周辺住民の事故直後や将来の線量を正確に評価する必要がある。その結果を今後の政策へ反映させるとともに、被ばく線量を効果的に低減するための対策などに活用することが重要となる。特に、適切な環境モニタリングを継続的に実施するとともに、地域特性を反映したより現実的な評価のためのモデル・パラメータ研究が重要となる。その際に生じる不確実性の取扱いに関する議論も忘れてはならない。

「放射性物質の体内動態」について、標準的な欧米人を想定して ICRP の線量換算係数が計算されている。しかし、欧米人と日本人では食生活や代謝などが大きく異なるため、より正確な被ばく線量評価のためには、標準的な日本人に対する代謝パラメータについて検討することが課題となる。例えば、日本人のヨウ素に関する代謝を明らかにし、関連の指針などに反映させる必要がある。

「放射線の計測と線量評価」について、低線量の放射線を長期にわたり測定すること^{12, 13)}や、細胞レベルの放射線影響を評価するための検出器開発が課題となっている¹⁴⁾。また、環境測定においてスポット的に汚染された箇所の同定や線量分布測定を正確に行うための高度な技術と装置の開発が重要である。

「放射線の影響と防護」について、放射線被ばくから疾病発現にいたるまでの詳細な生物学的メカニズムを解明し、さらに、それを検出するための生物学的指標の開発が必要である。また、リスクを総括的な視点で判断できる疫学データは将来的にも重要であり¹⁵⁾、原爆被ばく者、高自然放射線地域住民、放射線業務従事者などを対象とした継続した疫学調査の意義は極めて大きい。これら生物学と疫学とを繋ぐためのモデル化研究・システム生物学的研究の発展も必要である¹⁶⁾。

これらの研究的課題を国民の理解を得ながら克服し、推進するための背景を整えることも重要である。関連する政策的な課題のひとつとして、放射線や放射性物質に関する国民全体のリテラシー醸成がある。義務教育に放射線教育が導入されたばかりではあるが、福島第一原子力発電所の事故に起因した国民感情の影響も強く残り、学校における科学教育としての放射線の扱いもいまだ手探りの状況が続いている。人工放射線の有効利用、自然放射線の理解、事故後の放射性物質汚染状況とのかかわりなどを適切に整理し、教育することが求められている。放射線リテラシーの醸成に資する仕組みづくり、特に指導者やコミュニケーターの継続的な育成に取り組むことが重要である。

(5) 注目動向 (新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など)

「環境放射線と放射能」について、例えば、2009～2011年度に文部科学省科学技術振興調整費による「自然放射線被ばく研究ネットワークの構築」のプロジェクトがある(目的は、アジア主要国における自然放射線源による被ばく線量の測定法を標準化すること。被ばく状況調査および疫学調査を実施)¹⁷⁾。欧州ではラドンによる被ばくの低減を目的として2013年に欧州ラドン協会(非政府組織)が設立された¹⁸⁾。

「放射性物質の環境挙動」については、例えば、UNSCEARは福島第一原子力発電所事故初期の線量評価を実施し、報告書が公開された⁴⁾。IAEAでは、放射線影響評価に

関するモデルとデータの向上のためのプロジェクト MODARIA¹⁹⁾ (Modelling and Data for Radiological Impact Assessment) が進められている。また、ヒト以外の生物相への影響を把握する研究も重要であり、例えば ICRP はタスクグループ活動を展開し、関連の情報を収集している。このような活動に積極的に参加することにより、関連の研究活動を展開することが必要である。

「放射性物質の体内動態」については、例えば、ICRP が現在の体内動態モデルの全面的な見直しを実施している²⁰⁾。さらに、内部被ばく線量を計算するための各臓器・組織間の比吸収割合についても、ICRP が刊行物をまとめる予定である。これらを踏まえて、最新のモデルおよび知見に基づいた内部被ばく線量評価システムを国内で構築することが重要となる。

「放射線の計測と線量評価」について、例えば、国際的な議論が続いている眼の水晶体の線量限度の変更に関する各国の採用動向を IAEA が調査している。これは、医療分野のみならず、原子力分野、そして福島第一原子力発電所作業員にも関連する。眼の水晶体被ばくの実態調査、人体ファントムを使用した線量測定および従事者の水晶体被ばく評価が行われている²¹⁾。

「放射線の影響と防護」について、例えば、ICRP では低線量・低線量率領域におけるリスク評価のあり方や、個人の放射線感受性の議論が進められている^{10,22)}。欧州委員会では産官学および多様な専門家が一体となり、低線量放射線影響と防護に関するプロジェクトが進行しつつある。今後数年～十数年にわたって新知見創出と議論の蓄積が考えられ、我が国においても中長期的な横断的・専門的な大規模な取組みが必要であろう²³⁾。

(6) キーワード

環境放射線、環境放射能、放射性物質の環境挙動、放射性物質の体内動態、放射線計測、線量評価、放射線の人体影響、放射線防護

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 環境放射能に関して、線量評価のためのパラメータが取得されているとともに、実験動物を用いたラドンの被ばく影響研究が実施されている。 例えばダイヤモンドや各種シンチレータを用いた新たな放射線検出器の開発が進んでいる。 原爆被ばく者の追跡調査、高放射性自然地域の疫学調査など、国際的基準に参考とされ得る品質の高い研究が行われている。 放射線照射設備により動物実験も実施可能であり、実験的に生物学的メカニズム解明に貢献できるポテンシャルを有する。
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ラドン・トロンを弁別した測定技術が開発されすでに製品化。特にトロン校正場の構築技術に関しては世界をリードしている。 大気環境モデルについては日米欧が協力し、同一レベルで研究が進められている。農作物への移行データは着実に取得されている。 国内で開発されたソフトウェアによって体内動態モデルの解析が可能。 線量測定と画像情報を組み合わせた線量分布画像表示システムにつき、実用器が開発されている。
	産業化	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ラドンおよびトロン測定の校正施設が整備されており、国際共同比較実験を実施している。トレーサビリティ制度の構築により産業化の拡大へ。 土壌表面の汚染度測定に関連して、α線、β線、γ線を同時分析できる検出器などが開発されている。
米国	基礎研究	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ラドンおよびトロンに関する基礎研究成果の報告は少ない。 ミシガン大学にて CZT (CdZnTe) を使用したコンパクトな放射線可視化カメラが開発された。 BEIR-VII で新たな線量・線量率効果比 (DDREF : Dose and Dose-Rate Effectiveness Factor) が示されている。 放射線作業員 100 万人規模の疫学調査が進行中である。 放射線防護に向けて研究を統合する活動はあまり行われていない。
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> エレクトレットタイプの新しいラドン・トロンモニタが製品化されている。エネルギー省環境測定研究所 (EML: Environmental Measurements Laboratory) にはラドン測定器の校正場があるが、現在は稼動していない。 大気環境モデルについては日米欧が協力し、同一レベルで研究が進められている。 独自に体内動態モデルを開発し、米国放射線防護測定協議会 (NCRP : National Council of Radiation Protection and Measurements) レポートとしてまとめているものの、ここ数年では大きな進捗は特にみられない。 日本への協力としてキュリオン社による汚染水浄化技術が福島第一原子力発電における多核種除去設備 (ALPS : Advanced Liquid Processing System) に採用されている。 ロボットを用いた生物線量評価システムの開発が進められており、将来的な個人の放射線感受性予測への応用などが視野に入っている。
	産業化	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ラドン測定や濃度低減サービスが充実している。 軍用として用いられている GM (Geiger-Müller) サーベイメータや ZnS(Ag)シンチプローブなどにつき、各国で採用件数が上昇している。
欧州	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> WHO ガイドラインを受け、水中放射性核種に関する測定技術開発や放射能評価研究が行われている。また、学校、観光洞窟などにおけるラドン濃度の現地調査も積極的に行われている。 フランスやドイツの大学が環境中に放出された放射性物質の拡散シミュレーションを行っている。 学際的欧州低線量イニシアティブ (MELODI : Multidisciplinary European Low Dose Initiative) による欧州大での放射線防護に直結した生物研究が進みつつある。

	応用研究・開発	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ・屋内や土中ラドン濃度を基にした欧州全域マッピングが実施されている。 ・大気環境モデルについては日米欧が協力し、同一レベルで研究が進められている。 ・体内動態モデルが ICRP 勧告にまとめられ、新しいモデル開発も進んでいる。 ・ドイツやイタリアにおいて重粒子線治療の線量測定および評価に関する応用研究が行われ、臨床にフィードバックされている。 ・規制と研究との意見交換が活発に行われている。
	産業化	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ・多くの国で屋内ラドンの規制レベルが設けられ、企業、研究所や政府によって一般家屋内のラドン測定サービスが実施されている。 ・フランスを中心として線量計の生産が盛んであり、高精度なものが多い。また、ウクライナなどの線量計メーカーが、福島第一原子力発電所事故以来、日本にも多くのサーベイメータを輸出している。
中国	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ・甘粛省や広東省には高自然放射線地域があり、疫学調査が実施されている。鉱山などの特殊環境におけるラドン調査も実施されている。 ・医学放射線物理系の大学において、放射線治療線量の実測とシミュレーションが実証研究の対象となっている。 ・原子力発電所立地地域において、環境放射線モニタリングが実施されている。
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ・復旦大学や南華大学で新しいラドン測定技術の開発が進められている。ラドンおよび壊変生成核種に対する校正場が構築されている。 ・大気環境、陸域環境研究とともに、特筆する研究は行われていない。 ・日本開催の「アジアにおける被ばく医療に関するワークショップ」に参加するとともに、内部被ばく線量評価コード（MONDAL3: monitoring to dose calculation ver.3）が適宜配布されている。 ・医療放射線被ばく測定に関する重要性の認識に劣り、放射線診断能力向上と線量低減の研究が進んでいない。
	産業化	×	→	<ul style="list-style-type: none"> ・低層住宅におけるラドン防護策の標準指針や屋内空気質標準が出されている。一般家屋向けラドン測定サービスはない。 ・環境測定用検出器として GM 計数管が主流であるが、品質が保たれていないものも多く存在する。
韓国	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ・韓国標準科学研究所では 2012 年にラドン放射能標準の開発を行った。NORM に関する研究が大学や研究機関において実施されている。 ・CZT 半導体検出器を用いて陽電子断層撮像装置の精度管理が行われている。
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ・国立環境科学研究所による 20 万家屋を対象とした屋内ラドン調査プロジェクト（2011～2020 年）がある。 ・EMRAS-II などに積極的に参加し、放射性物質のコメへの移行モデルや環境防護のためにモデル構築などを行っている。 ・ボクセルファントムを導入した計算技術などの向上がみられる。 ・国家主導で核融合エネルギーおよび線量測定技術を重点育成技術としているが、顕著な進展はみられない。
	産業化	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ・屋内ラドンの大規模調査が始まったことから今後は測定サービスの需要の可能性がある。

(註 1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

(註 2) 現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○：ある程度の活動・成果が見えている、

△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註 3) トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

(8) 引用資料

- 1) United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation UNSCEAR 2008 Report to the General Assembly, with scientific annexes. Annex B: Exposures of the public and workers from various sources of radiation.
http://www.unscear.org/docs/reports/2008/09-86753_Report_2008_Annex_B.pdf
- 2) M. Tirmarche, J.D. Harrison, D. Laurier, F. Paquet, E. Blanchardon, J.W. Marsh. Lung Cancer Risk from Radon and Progeny and Statement on Radon. ICRP Publication 115. Ann. ICRP 40(1), 2010.
- 3) WHO handbook on indoor radon - a public health perspective:
http://whqlibdoc.who.int/publications/2009/9789241547673_eng.pdf
- 4) UNSCEAR 2013 Report: "Sources, effects and risks of ionizing radiation". Volume I comprises the main text of the 2013 Report to the General Assembly (A/68/46) and one scientific annex: Annex A: Levels and effects of radiation exposure due to the nuclear accident after the 2011 great east-Japan earthquake and tsunami (2013).
- 5) International Commission on Radiological Protection, "Human alimentary tract model for radiological protection", ICRP Publication 100, Ann. ICRP36(1-2) Elsevier Ltd. (2006)
- 6) 放射線医学総合研究所, MONDAL3,
<http://www.nirs.go.jp/db/anzendb/RPD/mondal3j.php> (2014年7月25日)
- 7) Birchall, A., Jarvis, N. S., Peace, M. S., Riddell, A. E. and Battersby, W. P., "The IMBA Suite: Integrated Modules for Bioassay Analysis" *Radiat. Prot. Dosim.* **79**(1-4), 107-110 (1998)
- 8) 松井英介、「低線量」放射線内部被曝をいかに知るのか (特集 放射線測定とその評価をめぐって)都市問題 102(11), 20-25, 2011
- 9) K. Ozasa et al., Studies of the Mortality of Atomic Bomb Survivors, Report 14, 1950-2003: An Overview of Cancer and Noncancer Diseases, *RADIATION RESEARCH* 177, 229-243 (2012)
- 10) ICRP Task Group 91, Radiation Risk Inference at Low-dose and Low-dose Rate Exposure for Radiological Protection Purposes, http://www.icrp.org/icrp_group.asp?id=83 (last accessed 4 July 2014).
- 11) S. Tokonami. Why is ²²⁰Rn (thoron) measurement important. *Radiat. Prot. Dosimetry*.141(4):335-339 (2010).
- 12) 新田裕史、東日本大震災被災地における環境モニタリング 学術の動向, 18 (7), 26-33, 2013
- 13) Ogino H, Ichiji T, Hattori T, "Verification of screening level for decontamination implemented after Fukushima nuclear accident.", *Radiation Protection Dosimetry* 151(1), 36-42, 2012
- 14) http://www.nirs.go.jp/information/event/report/2014/04_18/houkokusho.pdf
- 15) 放射線医学総合研究所, 低線量・低線量率放射線影響研究分野における研究推進方策,
<http://www.nirs.go.jp/information/event/report/2012/1122.shtml> (last accessed 4 July

- 2014).
- 16) 甲斐他, 放射線リスク評価における疫学と生物学のギャップを超えるためのアプローチ, 2010年保物セミナー, http://anshin-kagaku.news.coocan.jp/hobutsu2010_kai.pdf (last accessed 4 July 2014).
 - 17) 科学技術振興機構のホームページ :
<http://www.jst.go.jp/shincho/program/kadai/pdf/h23jisshi/200915502011pp.pdf>
 - 18) ヨーロッパラドン協会のホームページ : <http://radoneurope.org/>
 - 19) <http://www-ns.iaea.org/projects/modaria/>
 - 20) International Commission on Radiological Protection, Consultations,
http://www.icrp.org/consultation_page.asp (July 25, 2014)
 - 21) http://www.rea.or.jp/kikaku/rea_news/news/2012_72.pdf
 - 22) International Commission on Radiological Protection 2013 Annual Report, (in press).
 - 23) 岩崎他, 欧州における低線量リスク研究動向の分析, 電力中央研究所報告L09007, (2010).

3.3.2.10 原子力に関するリスクと人間・社会

(1) 研究開発領域名

原子力に関するリスクと人間・社会

(2) 研究開発領域の簡潔な説明

原子力利用は広範、複合的かつ潜在的なポテンシャルが大きいリスクを内包し、その適切な管理によって初めて成り立つ。しかし、そのリスクの内実を適確、多面的、包絡的に把握するとともに、人間の認知や社会にとっての重大性・重要性の観点を合わせて検討し、適切なリスク・ガバナンス（リスクを適切に管理する仕組みや活動の総体を指す）を構築する取り組みはまだ十分ではない。この課題を解決するためには、学際的な探究によりリスクを多面的に把握すること、それらに対する人びとの認知や選好を知悉し、倫理的評価・検討を交えた上で対処の原則を社会的に共有すること、これらの検討結果が示す条件を満たし、専門的な妥当性と民主的な正統性をともに満たすリスク・ガバナンスの具体的な設計を行うことが必要となる。

(3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

欧米では 1970 年代から科学技術に関する社会的意思決定を改めて民主化し、人びとの多様な価値観や要求を科学技術政策や科学研究・技術開発そのものに積極的に入力することで、上記に示した課題の解決を図ろうとの努力が目立つようになった。いわゆる（市民）参加型社会的意思決定（政策決定）の動きである。専門知や専門家と非専門家である市民やほかのステークホルダー（利害関係者）の間を取りもつために、さまざまな手法が考案され、既存の代議制民主主義との接合が試みられてきた。コンセンサス会議、サイエンス・ショップ、市民陪審などの試みがつとに知られており、1990 年代後半から、日本においても関連分野の研究者などによって試行と検討が重ねられてきた¹⁾。

原子力分野に関しても、欧米ではこうした考え方に基づく制度が多くで実装され、運用されている。例えば、高レベル放射性廃棄物処分の分野では、積極的に参加型社会的意思決定の拡大が取り組まれてきた分野である。スウェーデン、フィンランド、フランス、カナダ、英国、スイス、ベルギーなどで、参加型社会的意思決定プロセスの導入による政策の再構築が図られ、さまざまな課題に直面しつつも、多くの成果があがっている²⁾。

日本の原子力分野においても、こうした海外での動きは関係機関や関連分野の研究者などによって早くから認識され、取り組みが着手されてはいた。早い時期のものでは、1996 年から 1999 年にかけて開催された原子力政策円卓会議があげられる。同会議は原子力に批判的な研究者や市民団体の代表を委員に加えたことは、まさに「参加」の拡大と言える。同時期には上述の高レベル放射性廃棄物処分問題についても、従来よりも原子力利用に対する立場や専門分野の範囲を拡大して有識者を招いた「高レベル放射性廃棄物処分懇談会」が原子力委員会によって設置され、議論が行われた³⁾。こちらは直接的に高レベル放射性廃棄物処分政策における事業化の制度設計に寄与した点で、実際に政策形成・決定に接続した参加型社会的意思決定プロセスの試みとして注目される。

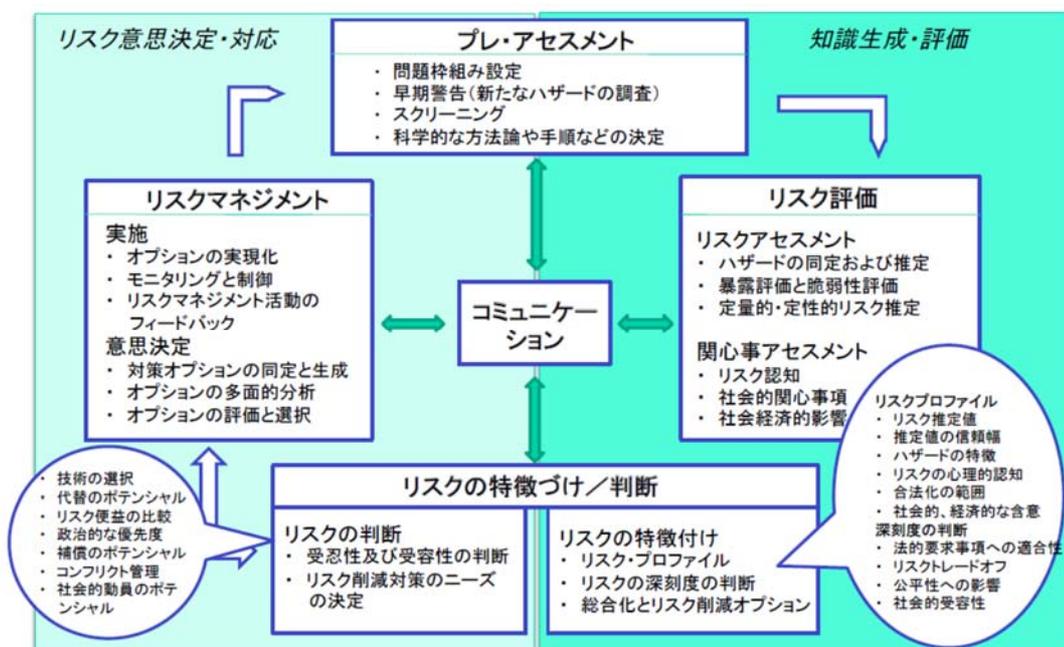
2000 年代に入ると、「双方向」や「市民」などの語を冠し、広報にとどまらない「広

聴」を目的に掲げた取り組みは一般化し、研究者が主宰する、学術的な裏付けをもつ参加拡大の手法開発も複数、取り組まれるようになってい 4)。

また、リスクの顕在化を未然にいかん適切に抑え込むかという課題だけではなく、万一の事態が発生した場合の社会の回復力をいかに高めるかという視点も重要であるという、「レジリエンス」の考え方が東日本大震災・福島第一原子力発電所事故後の日本においては注目されている 5)。

(4) 研究開発推進上の課題・ボトルネック (科学技術的課題、政策的課題)

国際リスク・ガバナンス評議会 (IRGC : International Risk Governance. Council) はリスク・ガバナンスの総体を下記に示す図のように整理している (「リスク・ガバナンス・フレームワーク」) 6)。



これまでの日本における議論、とりわけ工学的な議論は、「リスク」の含意を極めて狭義に捉える傾向がある。典型的には「危害の程度×危害の発生確率＝リスク」とし、「危害」を死亡確率などの特定の尺度で代表させることが一般的だ。しかし、この整理は、そもそもリスクには多面性があり、その性質を特定し、それに応じた評価を行い、その上でリスクの受忍可否や限度、具体的なリスク管理の方法を決定し、実際に適用する必要があることを含意している。この「フレームワーク」はこうしたリスク・ガバナンスのプロセスを大きく4つのフェーズに分けた上で、それらの不断のサイクルと見なしている。また、各部面すべてに「コミュニケーション」が関わることを明確にしている。こうした認識を踏まえて日本の現状を眺めると、例えば以下のような項目に課題がある。

① 「プレ・アセスメント」の重要性

そもそも何がリスクなのか、どのようなリスクに対処すべきなのかといった、対処すべきリスクを洗い出すフェーズが重要である。また、その作業を多様なステークホルダーの参加を得て行うことで、リスクへの対処に漏れが生じたり、リスクについての認識

に齟齬が生じたりする可能性を低減しなければならない。

②「リスク評価」における公平性

「リスク評価」を狭義に工学的なものとして捉え、定量化しているように見受けられる。また、「関心事アセスメント」は意識されていないか、是正すべき対象と捉えている場合もある。実際には人びとの不安や関心の在処が現実の社会の動きを大きく左右し、リスク受忍についての決定やリスク管理の上で取り得る選択肢が規定されることを肝に銘じなければならない。

③「受忍性および受容性の判断」における予断

「リスクの特徴づけ/判断」として示されている、リスクの性質を捉えた上で対処するステップを十分に意識しなければならない。さまざまな質的な差異をもつリスクを、死亡確率や金銭化した被害総額など、単一の尺度で共役しないようにすべきである。また、リスク受忍の判断が帰結主義的（代表的には功利主義的）な倫理的規準に偏らないようにしなければならない。

④「リスクマネジメント」についての理解

リスクの性質、内容、大きさと社会の意向を把握した上で行われる「リスクマネジメント」は本来的に極めて経営的なタスク（トップレベルの意思決定）としての性質をもつにもかかわらず、社会や組織の意思決定とのつながりが意識されておらず、事業の現場における「安全確保」と混同されている場合がある。

⑤「コミュニケーション」についての理解

リスク・ガバナンスにおけるコミュニケーションは、このフレームワークも参照した文部科学省の有識者委員会の報告書が示すように、「リスクのより適切なマネジメントのために、社会の各層が対話・共考・協働を通じて、多様な情報および見方の共有を図る活動」である⁷⁾。ところが、日本においては、リスク評価やリスクについての判断の結果を周知することや、防災情報を広く周知することなど、特定の一部分を「リスク・コミュニケーション」そのものと見なす誤解が存在する。また、その際に、行政機関、事業者、専門家などの側の見解を、市民やほかのステークホルダーに伝達することを「コミュニケーション」という言い方で表現していると思われる例も少なくない。

以上のような課題群に加え、日本においては、2011年3月に発生した福島第一原子力発電所事故がもたらした教訓や影響を極めて重く受け止める必要がある。

一般に、参加の拡大は意思決定に輸入される知を多様化し、その質と量の向上に資するとされるが、いわゆる政府事故調の中間報告が指摘するように例えば地震・津波研究や土木工学研究の分野と原子力利用との間では専門知が適切にやりとりされず、リスク管理の欠陥が結果的に見過ごされた可能性がある⁸⁾。

また、従来においては、原子力過酷事故のリスクは現実的には特段の考慮を要しないレベルに十分確実に抑え込まれているとの前提のもとで、さまざまなリスク・ガバナンス改善の取り組みがなされ、市民やステークホルダーの参加拡大もその文脈を踏襲していたが、現実には発生した出来事（事故）がそうした暗黙に共有されていた事柄を完全に否定する結果となった。

他方、同事故は我々の社会が対処の経験を（十分に）持たないさまざまなリスクへの

対応を待たずに迫ってきた（例：緊急事態の過酷環境下での原子力事故への対処、大規模な避難の実施、避難の長期化、低線量放射線被ばくの健康影響の見極めと管理、事故施設の安定化や長期にわたる廃止措置の実施、など）。こうした事例に対しては、リスクの性質を把握し、評価し、管理するというリスク・ガバナンスの各部面においてイノベティブに対処方法の立案・実施を行うことが求められる。福島第一原子力発電所事故後のエネルギー政策見直し論議の中で政府が行った討論型世論調査（DP：Deliberative Poll）についてのさらなる分析と検証、原子力関係省庁などが実施してきた「双方向」を銘打つ市民参加イベントや福島第一原子力発電所事故を受けた原子力規制改革や安全性向上対策を上記の視点から評価して見直す検討など、すぐにも取り組むべき課題は多い。上述した「レジリエンス」についての研究やその成果の社会への実装化も、日本においてはまだその端緒が見いだされるに過ぎず、今後の研究が期待される。

また、同事故の発生とその後の一連の経緯が、原子力利用に主たる責任を負うべき関係主体や関連専門家に対する社会からの信頼を大きく毀損していることも深刻な問題である。基本的な信頼を欠く状況では、リスク・ガバナンスのためのいかなる制度設計も、実務手法も、関連研究も何らの力も持ち得ない。いわゆる信頼の非対称性原理に鑑みれば、信頼の回復には相当の時間と努力を要する。中長期的に原子力分野の政策、行政、事業が良好実績を蓄積し、社会全体の信頼を取り戻すことが、関連知見を生かすための最低限かつ必須の条件である。

（5）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

上記のような問題を解決するためには、確かな情報や専門知に基づく妥当な判断の担保という命題と、幅広い参加による政治的な正統性の確保や入力される知の多様化という命題という、2つの異なる（ときには相克しうる）命題を両立できるリスク・ガバナンスを構想し、実現する必要がある。科学技術社会論を中心に、関連の分野では2000年代からこの問題についての議論が続き、具体的に高レベル放射性廃棄物処分を取り上げて解決策として熟議民主主義の採用を提言した研究もある⁹⁾。

これと並行して、具体的な対処策を見いだす取り組みもまた、各国でなされている。原子力関係においても、例えばフランスでは、2015年にも予定される高レベル放射性廃棄物処分場の設置許可申請に先立って、2012年に高レベル放射性廃棄物処分の実施主体である放射性廃棄物管理機関（ANDRA：Agence Nationale pour la Gestion des Dechets Radioactifs）が公開討論国家委員会（CNDP：Commission Nationale du Débat Public）に包括的な公開討論の実施を付託し、CNDPは2013年から2014年にかけて公開討論会や市民会議を実施した¹⁰⁾。ANDRAは2014年5月に公開討論を経て市民会議が提言した内容を取り入れた改善案を政府に提案しており、参加型社会的意思決定プロセスを経た政策形成・決定が事業進捗の不可欠な一部となっていることが伺える。また、同国の原子力分野では地域情報委員会（CLI：Commission Locale d'Information）の活用もまた、上記の2つの命題を両立する取り組みと言えるだろう¹¹⁾。

日本においては、特に高レベル放射性廃棄物処分政策について、原子力委員会、日本学術会議、総合資源エネルギー調査会などからの提言があり¹²⁾、政策の見直しが現在進行中である。これが上記の課題群を克服しうるものとなるかは、原子力分野全体のリス

ク・ガバナンスにとっても大きな試金石となるはずだ。

また、リスクについての公共的な議論を実りあるものにするためには、事実認識のレベルでの齟齬をなるべく解消することが有効であるとの観点から（このステップはステークホルダー間の信頼構築にも有効である）、共同事実確認（ジョイント・ファクト・ファインディング）と呼ばれる手法を日本で試行する研究も行われているほか¹³⁾、「レジリエンス」についても、東京大学が2013年度に「レジリエンス工学センター」を設立したことにもみられるように、まさに組織だった研究が着手されたところであり、今後の成果が期待される。

（6）キーワード

リスク・ガバナンス、参加型社会的意思決定、専門知、熟議民主主義、共同事実確認、レジリエンス

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	研究開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ・リスクとそのガバナンスの捉え方が狭く、分野間で分断されている。 ・工学的なリスク研究とリスク認知についての研究（社会心理学など）、リスクへの対処の原則や手法についての研究（政治哲学、倫理学、科学技術社会論など）の協働が待たれる。 ・「レジリエンス」についての研究は初期段階にある。
	実装化	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ・政府による討論型世論調査（DP：Deliberative Poll）の実施、研究者グループによる「共同事実確認」の試行など、実装化に向けた萌芽は少なからず認められるが、実際の政策形成・決定に明確に結びつくような成果に乏しい。
米国	研究開発	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ・そもそも工学的にリスクを把握し、管理する手法の研究開発の中心であると同時に、社会心理学的にリスク認知について把握する研究の伝統も長い。現在でも研究開発は活発である。
	実装化	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ・原子力分野においては、欧州に比べると、（市民）参加型社会的意思決定を政策の質の向上に活かすという方向性は強くないようにみられる。政策の見直しは専門家動員によって行い、民主的正統性の担保は積極的な透明性の確保や手続き的公正によってなされることも多い。
欧州	研究開発	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ・高度産業社会において、民主的価値を擁護しつつ、リスクをいかに適切に管理するかという課題に早くから取り組んで来ている。関連研究の拠点や有力研究者が多数みられる。 ・（市民）参加型社会的意思決定手法の多くの開発、試行の発信地である。
	実装化	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ・各国が（市民）参加型意思決定をリスク・ガバナンスに積極的に取り入れているほか、欧州連合（EU：European Union）のフレームワーク・プログラムによって全欧州的な推進・支援が行われている。 ・冷戦終結後に民主化・経済発展を遂げた中東欧諸国にそれらの成果を移転する試みもみられる。
中国	研究開発	△	↗	<ul style="list-style-type: none"> ・政治体制の違いもあり、従来、これらの分野の研究でのプレゼンスは高くないと思われてきたが、経済発展に伴う環境問題の激化など、関心は高まっており、関連研究も強化されるものと思われる。清華大学には公共政策大学院が設置されており、院長の教授は最近、東京大学での科学技術ガバナンス関連の学術行事に参加している。
	実装化	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ・こちらも政治体制の違いがあるため、他国と同列の比較は難しいが、今後何らかの取り組みがなされる可能性はある。
韓国	研究開発	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ・日本と類似の状況にあるものと思われるが、最近、KAIST（Korea Advanced Institute of Science and Technology）において、原子力工学科と科学技術政策学科の協働が開始されたとの情報があり、今後、原子力分野においても取り組みが強化されるものと思われる。
	実装化	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ・日本と類似の状況にあるものと思われる。

（註1）フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

（註2）現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○：ある程度の活動・成果が見えている、△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註3）トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

(8) 引用資料

- 1) 一連の経緯を概観できる文献として、例えば小林傳司『トランス・サイエンスの時代：科学技術と社会をつなぐ』NTT出版、2007
- 2) 経緯や現状の概観は、経済産業省資源エネルギー庁「諸外国における高レベル放射性廃棄物の処分について（2014年版）」参照。Web版は原子力環境整備・資金管理センター「諸外国での高レベル放射性廃棄物処分」<http://www2.rwmc.or.jp>
- 3) 原子力委員会 高レベル放射性廃棄物処分懇談会「高レベル放射性廃棄物処分に向けての基本的考え方について」、1998
- 4) 例えば八木絵香『対話の場をデザインする：科学技術と社会のあいだをつなぐということ』大阪大学出版会、2009
- 5) 例えば政府は2013年に「ナショナル・レジリエンス（防災・減災）懇談会」を設置している。<http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/resilience/>
- 6) International Risk Governance Council (IRGC) “IRGC’s White Paper Risk Governance - Towards an Integrative Framework,” 2005. 引用した日本語訳の図は東京大学政策ビジョン研究センターの谷口武俊教授の提供による。
- 7) 文部科学省 安全・安心科学技術及び社会連携委員会「リスクコミュニケーションの推進方策」（平成26年3月27日）、2014
- 8) 東京電力福島原子力発電所における事故調査・検証委員会「中間報告」、2013年
- 9) ジュヌヴィエーヴ・フジ・ジョンソン『核廃棄物と熟議民主主義-倫理的な政策分析の可能性』、船橋晴俊、西谷内博美（監訳）、新泉社、2011
- 10) Commission Nationale du Débat Public (CNDP) “Report on the public debate: Project to develop the reversible deep geological radioactive waste disposal facility in Meuse / Haute-Marne (Cigéo) 15 May - 15 December 2013,” 2014.
- 11) 菅原慎悦「我が国における原子力防災制度改革の動向と課題 —フランスの原子力防災体制におけるステークホルダー関与の実態と我が国への教訓—」電力中央研究所報告、研究報告Y12013、2013
- 12) 原子力委員会の提言としては、原子力委員会（「今後の高レベル放射性廃棄物の地層処分に係る取組について（見解）」、2012。日本学術会議の提言としては、日本学術会議「回答 高レベル放射性廃棄物の処分について（2012年9月）」、2012、同「報告 高レベル放射性廃棄物問題への社会的対処の前進のために」、2014、さらに、同「報告 高レベル放射性廃棄物の暫定保管に関する技術的検討」、2014があげられる。総合資源エネルギー調査会の提言としては、総合資源エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会 原子力小委員会 放射性廃棄物WG「放射性廃棄物WG中間とりまとめ」、2014が出されている。
- 13) 同研究については研究プロジェクトのウェブサイト参照。<http://ijff.jp/>

3.3.2.11 原子力に関する規制

(1) 研究開発領域名

原子力に関する規制

(2) 研究開発領域の簡潔な説明

原子力利用のリスクを許容し得るレベルに抑えるためにも、また社会的受容性を獲得する上でも、行政による規制は重要な役割を果たす。原子力利用の増大、再処理など利用形態の多様化などの実態も踏まえた上で、効果的規制のあり方や制度実現への道筋の研究が必要である。法制度の整備は立法府が責任をもって行うものであるが、それは社会から信頼されるものでなければならない。規制の有効性評価には原子力技術の特性や利用者のマネジメントの実態などを踏まえる必要がある。こうしたことから、多方面の専門家が参画した研究が法制度整備を支えねばならない。

(3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

原子力規制は原子力利用によるリスクの低減が目的であり、そのためには、まずその技術的特性を踏まえなければならない。規制は法令に基づく行為であることから、法学・行政学の知見も必要である。さらには、規制政策が科学的に妥当であるだけでなく社会から公正なものとして認められることも大切である。したがって規制政策への信頼確保にはどうすればいいかなど、規制のあるべき姿の研究も必要である。すなわち原子力規制の研究は、工学と、法学・政治学、さらには広く人文・社会科学分野全般にまたがる学際的研究である。

我が国には 1981 年に設立された日本エネルギー法研究所¹⁾があり、研究テーマの一つとして主として法的観点から原子力安全規制の問題を取り上げてきている。また、科学技術と社会の良好な関係構築を追求する立場から原子力規制を考える場としては、科学技術社会論学会²⁾などがある。工学と社会科学などとの学際的研究は 2007 年から東京大学において原子力法制研究会が実施し、その成果³⁻⁵⁾は 2011 年の福島第一原子力発電所事故後の法改正に活かされたが、その後は中断状態にある。

原子力災害の被害は国境を越えて広がることから、国際原子力機関（IAEA：International Atomic Energy Agency）が安全基準を定め、加盟各国がその責任において規制する支援としている。我が国の原子力安全の確保は、確立された国際的な基準を踏まえること⁶⁾としており、この基準を守ることは義務である。

IAEA は加盟各国に対しその安全基準に基づいて専門家によるピアレビュー・評価サービスを提供しており、我が国は 2007 年に総合原子力安全規制評価サービス⁷⁾（IRRS：Integrated Regulatory Review Service）を受け入れている。そこで受けた指摘の主なものとは次の通りである。

1. 法制度と政府の責任：特に安全指針策定の関係で、原子力安全・保安院と原子力安全委員会の役割を明確化すべき（勧告）
2. 規制機関の権限と機能：産業界との間で率直で隠し立てがなくしかもフォーマルな、相互に理解し尊重しあう関係を醸成し続けるべき（提言）
3. 規制機関の組織：能力向上プログラムを強化し人員計画を作成すべき（勧告）

4. 許認可プロセス：
 - ①許認可の根拠全体を要約する包括的文書の作成と、定常運転開始前の包括的審査というホールドポイントを追加すべき（提言）
 - ② 同程度の安全性を確保できる場合に代替技術の採用を奨励すべき（提言）
 - ③設計基準を超える事故を考慮し、補完的に確率論的手法やアクシデントマネジメントに関する体系的アプローチを継続すべき（提言）
5. 安全評価：
 - ① 軽微な検査所見や事象報告に何を期待しているのか明確にすべき（勧告）
 - ②検査や行政処分は原子力事業者が国内外の経験から教訓を得る効果的プロセス構築につながるようにすべき（勧告）
 - ③保安規定に人的・組織的要因を含む安全確保の要素が盛り込まれるよう、規制要件の見直しを継続すべき（勧告）
6. 検査および行政処分・措置：
 - ①検査官がいつでもサイトで検査（文書審査を含む）を行える権限を確保すべき（勧告）
 - ②検査の種類や頻度を柔軟に変えることや、検査結果に基づいた検査プログラムの修正をおこなうべき（提言）
 - ③ 設備の製造業者の品質保証プログラムの検査を実施すべき（提言）
7. 規則および指針の整備：原子力安全・保安院が民間規格の活用を含め責任をもって当たるべき（勧告）
8. 規制機関のマネジメントシステム：理念や原則論でなく実践的なシステム整備に努めるべき（勧告）

これらのうち1.と7.の点は、福島第一原子力発電所事故後の原子力規制委員会の設置により、すでに一定の対応が行われた。4.①については、法改正により新基準へのバックフィットが要求されたことで、規制基準が改定されるごとにホールドポイントが置かれることになり、ある意味では提言以上の対応がとられたが、許認可の根拠全体を要約する包括的文書作成の提言には対応できていない。4.③の提言の関係では、シビアアクシデント対策は規制要件化されたが、確率論的手法の活用が規制制度に盛り込まれたとは言いがたい。6.③の製造業者の品質保証プログラム検査は導入された。しかし、今なお、そのほかの指摘事項にはまだ十分対応できておらず、2.や8.のように一部後退したものすらあるのが実情で、国際基準への適合にはかなりの努力が必要である。

IAEAの安全基準は、事故・トラブル経験を反映し、改定され続けているが、原子力施設は多重防護（defense-in-depth）により分厚く安全を守らねばならないことを一貫して説いている。福島第一原子力発電所事故発生時は現在の基準 SSR-2/1⁸⁾は発行直前であったが、その前の安全基準である NS-R-1⁹⁾でも多重防護は5層からなるとし、その第4層の防護策である設計基準事故を超えるシビアアクシデント対策の重要性について明記している。SSR-2/1ではさらに踏み込んで、設計拡張状態すなわち設計基準事故より厳しい事故などの状態を導出し、検討することを要求している。IAEAの動きに合わせ、原子力安全委員会もシビアアクシデント対策の高度化を目指してはいた¹⁰⁾が、シビアアクシデントの発生に間に合わず、その後、原子力規制委員会が設計拡張状態を導出し、

規制基準化している¹¹⁾。原子力規制の研究には、このような遅れを指摘することで規制改革を迫る効果もある。

なお、米国や欧州では新設炉への規制とは分けて既設炉の基準を考えるのが普通である。リスク低減の目標値についても異なる値とし、ALARA (As Low As Reasonably Achievable) の原則にしたがって継続的に安全性向上を追求する姿勢である。このような考え方を社会に受け入れてもらう方策の検討は、どこまでのリスクなら受容可能かといった議論とともに、まさに工学と人文・社会科学の学際的研究が必要な分野の一つの例である。

2007年のIRRSの評価対象分野ではなかったが、IAEAの安全基準では緊急事態に対する準備と対応¹²⁾も定めている。そこには予防的防護措置準備区域 (PAZ: Precautionary Action Zone) の範囲を定めておかねばならないと明記されていたにも拘らず、我が国が対応したのは福島第一原子力発電所事故後であった。シビアアクシデント対策とともに国際的基準を踏まえていなかった大きな問題点の一つである。緊急事態への対応では、地方自治体が国の防災基本計画に基づき地域の実情に即して地域防災計画を立てることになっており、その役割は大きい。国と地方自治体の役割分担の見直しなど、高い視点からの検討が行われることが好ましい。また、緊急事態への対応能力は事業者とともに規制機関にも要求されるが、その充分性は今現在まだ示されておらず、今後の大きな課題である。さらに緊急時にこそ事業者と規制機関の連携が大切となるが、そのためには日頃からの連携が必要で、そのあり方も研究課題である。

原子力規制への信頼醸成を目指して原子力安全・保安院は自ら多くの対話活動を実施してきた¹³⁾。また、学会などが主催するワークショップ¹⁴⁾などに積極的に関わってきた。原子力規制委員会の組織理念では国内外の多様な意見に耳を傾け、孤立と独善を戒めるとしているが¹⁵⁾、実際にはそれに反して対話活動に消極的であり、特に規制される側との率直な対話を避けているのではないかとの批判もある¹⁶⁾。一方的に批判するのではなく、そういう場の形成はどうあるべきかを提案する研究も大切である¹⁷⁾。

原子力規制は法制度の問題であり、その整備の責任は国にある。しかし規制される側の協力が不可欠で、IRRSが指摘するように規制機関と産業界間の相互に理解し尊重しあう関係を構築しなければならない。原子力規制は高度に技術的課題であることから、まずは学会のような学識経験者も交えた透明性の高い場で規制機関と産業界が意見交換し、規制改革の原案を作成する。それをさらに地方自治体代表、消費者代表、マスコミ代表といった全ステークホルダーの集まる審議会で確認し、改革を実施することが望まれる。ステークホルダー間において相互に理解し尊重しあう関係が確立している国では、原子力に関する規制を研究開発領域とまで捉える必要はないとも言えるが、我が国では力を入れなければならない領域であることを認識しなければならない。

(4) 研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

研究開発推進上の課題・ボトルネックはすべて政策的なものである。したがって規制機関が責任をもって規制制度の実効性向上に努めるなら、原子力規制の研究は不要とすら言える。ただ、これまでの規制機関にも問題意識をもつ者はいたが、担当者が頻繁に異動すること、後任者に問題意識が継承されないことから、1, 2年で可能な制度改革に

留まっていた。また、専門性不足の問題も大きい。法改正で導入されたノーリターン・ルールは単に原子力推進組織への転職を規制するものであり、専門性向上には寄与していない。例えば IRRS の勧告 6.①や提言 6.②はあらかじめ決められた項目を決められたとおりに確認する検査の形骸化への批判であり、毎回指摘事項がほとんどない項目は検査頻度を減らし、指摘のある項目へ重点化することを説いている。そのような検査の実効性は適切に指摘する検査官の能力に依存するが、能力向上策の検討は始まったばかりである¹⁸⁾。業務内容の適切性を継続的に見直すには規制機関自身のマネジメントシステム構築が必要であるが、それもようやく始まったところであり¹⁹⁾、確立された国際的な基準への適合はこれからである。このような状況の解決に原子力規制の研究は必要である。また、社会にとって規制、特に原子力規制のもつ意味、規制のあり方、規制組織のあり方、規制に関わる人材の確保、養成、あり方、国際整合性などについて研究する研究者、規制担当者の確保が重要である。

産業界には、原子力規制について国に陳情はするものの、自ら積極的に改革案を作ろうとしないという問題がある。安全確保の一義的責任は原子力施設を管理する者にあるのにも拘らず、規制の要求を超える対策の実施には消極的である。そのような中で規制機関と産業界が対峙すると、産業界側からは規制を緩める要望だけが出され、国民の理解は得られにくい。まずは規制の要求を超えた安全確保策を自主的に講じるとともに、安全確保の十分性に関する国民への説明責任を果たすべく、第三者機関による確認などの重層的な制度を自らの負担で用意すべきで、そういう指摘をする研究も必要である。

さらに付言するならば、原子力規制は国の責任であり、産業界の意見を聞くことすら責任の放棄だとする我が国の風潮にも問題がある。原子力に理解を示す者を原子力ムラの住民だとして、すべての政策決定から締め出そうとするマスコミの論調すらある。このような中で原子力規制のあり方について冷静に検討するためには、まずは規制する側とされる側の対話の重要性をあらゆるステークホルダーが認識することから始めざるを得ない。規制と社会の関係を考える研究はその解決に重要な役割を果たす。

(5) 注目動向 (新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など)

原子力規制は、歴史風土や法体系、政治制度などさまざまな要因を考慮して制度設計すべきものであるから、国によって最適なあり方に差が生じるのは当然である。さらに利用経験の蓄積や技術進歩を踏まえ、規制のあり方は継続的に改善されなければならない。そこで主導的役割を果たすべきは規制機関自身であるが、(4)で述べた課題の解決には産業界はもちろん、広く国民の理解も必要である。

原子力規制委員会は 2013 年 12 月、IRRS の受け入れを決定した。原子力安全の確保のために確立された国際的な基準を踏まえることとしている我が国としては当然のことである。今回 IRRS がどのような指摘をするにせよ、きちんと対応するには原子力規制の課題の検討は急務である。主なステークホルダーによる検討開始が望まれる。

(6) キーワード

原子力規制、国際的基準、国際原子力機関、総合原子力安全規制評価サービス、相互理解、ステークホルダー、科学技術社会論

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	研究開発	△	↘	・東京大学の原子力法制研究会は休眠状態にあり、ほかには技術と法制度の両面から改善策を提案しようという動きはみられない。
	実装化	△	→	・福島第一原子力発電所事故を受けて法改正はなされたものの、新制度への対応に手一杯で、原子力規制の実効性をさらに上げようとする動きはみられない。
米国	研究開発	◎	→	・1979年のスリーマイル島事故後設立された原子力発電運転協会（INPO：Institute of Nuclear Power Operations）が原子力発電所運営の質を向上させるための活動を実施するとともに、規制機関ほかとの関係調整も行っている。 ・原子力エネルギー協会（NEI：Nuclear Energy Institute）が規制法制に関する政策を立案し、規制機関ほかには産業界の声を届けている。
	実装化	◎	→	・原子力規制委員会（NRC：Nuclear Regulatory Commission）は従来から全交流電源喪失事故の規制やテロ対策の義務付けなど、規制の実効性を高める改革に積極的である。 ・NRCは福島第一原子力発電所事故直後に短期タスクフォースを設置し報告書を公表、またNEIから多重防護強化策の提案を受けつつ具体策をとるなど、素早く対応している。
欧州	研究開発	△	→	・フランスのプラントメーカー Areva 社や電力会社 EDF は国が多くの株式を保有する国策会社ともいえる存在で、規制機関と良好な関係にあるため、民間独自の規制改革への働きかけは目立たない。 ・そのほかの国でも民間からの規制改革を望む働きかけは目立たず、規制機関と良好な関係があるものと考えられる。
	実装化	◎	→	・欧州には原子力規制機関が構成する西欧原子力規制者会議（WENRA：Western European Nuclear Regulators' Association）という組織があり、各国の規制改革を指導している。 ・福島第一原子力発電所事故後、WENRAの提案によりEU加盟国は直ちにストレステストを実施するなど安全確認を実施した。
中国	研究開発	—	—	・特に情報がない。
	実装化	△	→	・中国は2010年にIRRSを受け入れ、法や規制機関の整備などに関する厳しい指摘を受けたが、今のところフォローアップ調査を受け入れていない。
韓国	研究開発	—	—	・特に情報がない。
	実装化	△	→	・韓国は2011年に原子力安全委員会が原子力振興を担う教育科学技術部から大統領直属に再編されたところである。 ・2013年、関連書類の偽造発覚により多くの原子力発電所が運転停止に追い込まれるなど、規制改革に向けた課題は多い。

（註1）フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

（註2）現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○：ある程度の活動・成果が見えている、

△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註3）トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

（8）引用資料

- 1) <http://www.jeli.gr.jp/>
- 2) <http://jssts.jp/>
- 3) <http://www.n.t.u-tokyo.ac.jp/nishiwaki/tonnbunn-toukou-houkokusyo/2008gijyutu-houkokusyo.pdf>
- 4) <http://www.n.t.u-tokyo.ac.jp/nishiwaki/tonnbunn-toukou-houkokusyo/2009gijyutu-houkokusyo.pdf>
- 5) <http://www.pp.u-tokyo.ac.jp/SEPP/research/documents/report200906.pdf>
- 6) 改正原子力基本法 第2条第2項
- 7) <http://www.nsr.go.jp/archive/nisa/genshiryoku/files/report2.pdf>
- 8) http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1534_web.pdf
- 9) http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1099_scr.pdf
- 10) <http://www.nsr.go.jp/archive/nsc/info/20101202.pdf>
- 11) http://www.nsr.go.jp/committee/yuushikisya/shin_anzenkijyun/data/0021_06.pdf
- 12) http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1133_scr.pdf
- 13) <http://www.nsr.go.jp/archive/nisa/koho/>
- 14) 例えば <http://ponpo.jp/SSWS/>
- 15) <http://www.nsr.go.jp/nra/idea.html>
- 16) 例えば、政権与党である自由民主党のプロジェクトチームからも批判が出されている。自由民主党 原子力規制に関するPT「原子力規制行政強化に向けての緊急提言 ——国民と世界からの「信頼と信認」確保を目指して——（2013年12月3日）」。
https://www.jimin.jp/policy/policy_topics/pdf/pdf125_1.pdf
- 17) そうした研究の方向性を示す重要な一例として以下があげられる。田邊朋行「原子力規制体制の制度的課題とその解決策 ——敦賀発電所敷地内破砕帯問題——」電力中央研究所報告、研究報告Y13024、2014。
- 18) http://www.nsr.go.jp/committee/kisei/h26fy/data/0001_03.pdf
- 19) http://www.nsr.go.jp/committee/kisei/h26fy/data/0010_04.pdf

3.3.2.12 3S（原子力安全、核セキュリティ、保障措置）

（1）研究開発領域名

3S（原子力安全、核セキュリティ、保障措置）

（2）研究開発領域の簡潔な説明

原子力平和利用を推進する上で、安全（Safety）とともに保障措置（核不拡散、Safeguards）および核セキュリティ（Security）に配慮した原子力システムを構築することが重要である。本領域ではこれら 3S に係る制度基盤・技術基盤を系統的に研究する。

（3）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

原子力においては平和利用の拡大と同時に核拡散の懸念も増大するという特殊性があり、それに対する配慮は重要である。

原子力の平和利用は「核兵器の不拡散に関する条約（NPT：Treaty on the Non-Proliferation of Nuclear Weapons）」第4条に基づく各国固有の権利であり、各国は自国の状況に応じた原子力活動を行う権利を有している。しかし、同条では、原子力平和利用の権利は NPT 第1条および第2条に定める核不拡散義務を遵守することが前提であることが明記されていることから、各国は原子力平和利用における国際的な透明性・信頼性を確保することが必要である。しかし現実には、NPT 下において秘密裏に核兵器を取得使用とする国は歴史的に後を絶たず、いかに核不拡散を担保しつつ平和利用を推進するかが常に国際社会の課題となっている。

一方、上述の国家による拡散に加え、近年、ソ連崩壊後、核物質の防護に対する関心が高まり、特に 9.11 以来、非国家主体（テロリスト）による核拡散の懸念が増大している。2009 年、米国オバマ大統領によるプラハ演説を契機に、核セキュリティサミットを中心に核セキュリティ強化についての世界的取り組みが展開されて、現在も多くの具体的な検討や研究開発が実施されている。

国際原子力機関（IAEA：International Atomic Energy Agency）は、原子力発電を導入しようとする国が整備すべき事項を 19 項目の形に整理しているが¹⁾、国際的な核拡散への懸念の高まりなどを踏まえ、その中でも重点的に取り組む必要がある事項、すなわち、原子力安全とともに、保障措置（核不拡散）、核セキュリティを 3S として最重要課題として取り上げ²⁾、国際的な協力の下にその実現を図っていくことを目的とした 3S イニシアティブが、2008 年の G8 北海道洞爺湖サミット首脳宣言および続くラクイアサミットの G8 首脳宣言に盛り込まれた。以下、核不拡散（国家を対象）、核セキュリティに係る研究開発領域について、最後に 3S 全体への取り組みの現状について説明する。

保障措置（核不拡散）に係る研究開発について

NPT 下において非核兵器国は包括的保障措置協定が義務付けられているが、この協定に基づく保障措置の対象となるすべての核物質について、国内計量管理制度を確立し維持することが基本とされる。国内のすべての平和的な原子力活動に係る原料物質および特殊核分裂性物質について国内計量管理制度を適用するに当たり、その原料物質および

特殊核分裂性物質が核兵器そのほかの核爆発装置に転用されていないことを確認するために IAEA と協力するという考え方である。保障措置の実施にあたっては、計量管理を主要手段とし、封じ込め・監視を補助手段とする方法が採られてきた。

1997年には、包括的保障措置に加え、未申告の原子力活動や核物質がないこと、また保障措置下にある核物質の軍事転用がないことを検認するために IAEA に付与される追加的な権限などを記載した「追加議定書」が IAEA で採択された。従来の「申告された核物質」が兵器に転用されていないことを検証する査察から、「未申告施設」が存在するかもしれないという前提に基づく査察へと変革した。法的には従来の「包括的保障措置協定」に加え、「追加議定書」を発効することにより、申告すべき情報および IAEA の入手する情報が拡大、また「補完的アクセス」とよばれる方法により査察範囲が大幅に拡張（申告施設以外も基本的に査察が可）されるとともに、「環境サンプリング」と呼ばれる手法により、仮に未申告活動などがあった場合に、いわば「証拠」を押さえる、ということが可能な形態に変わった。包括的保障措置協定 + 追加議定書の組み合わせに基づく保障措置が適用された場合、「情報」に基づく新たな査察手段を併せて駆使すれば、核物質の抜き取り、原子力施設のプロセスの不正な使用はもとより、核兵器製造に係る秘密裡な活動の存在などについては、非常に高い確率で検知できる状況にあると言える。このような新たな手法に則り、かつ査察の効率化を図るために「統合保障措置」とよばれる新しい概念に基づく保障措置が適用されるようになった。統合保障措置は、従来の包括的保障措置協定に基づく申告された核物質の転用がないことを検認する査察（従来型の査察、正確性）と、追加議定書に基づき、IAEA に新たに付与された権限を行使して、当該国に未申告の核物質および原子力活動がないことを確認する（完全性）活動を、最適形で組み合わせて、保障措置の強化と効率化を同時に実現しようとするものである。これにより、核物質の転用、および未申告の核物質および原子力活動が存在しないとの「結論」が出れば、その国家における保障措置の効率化、すなわち、ある意味での緩和が行えるということになった。これまでの施設単位の査察からサイト単位へのアプローチへ変更、また必要な情報（当事国の申告、検認活動の結果、オープンソースなど）からその国の過去、現在、未来の核（平和）利用計画に一貫性があることを評価するなどが適用され、「国レベルの統合保障措置アプローチ」という方法・考え方が適用されるに至っている。

このような背景の下、保障措置に係る研究開発は、加盟国による IAEA 保障措置技術支援計画（MSSP : Member State Support Programme、1977年に開始）に基づき進められてきた今日では 20 か国および 1 国際機関の参加のもと行われており、我が国による研究開発協力は JASPAS（Japan Support Programme for Agency Safeguards）と呼ばれている。IAEA では、国際保障措置に必要と思われる MSSP の研究開発項目について示しているが、最近では、2014-2015 年における必要とされる項目について次の領域ごとにまとめられている³⁾：1) 測定方法および測定技術-破壊分析（破壊分析（DA : Destructive Assay）、環境サンプリング分析（ES : Environmental Sampling）など）、非破壊分析（NDA : Non Destructive Assay）、非立会い測定技術、2) トレーニング、3) システム・スタディー保障措置アプローチ概念研究や品質管理、4) 情報処理-サテライトイメージ、情報解析、統計解析、情報セキュリティ、5) 封じ込め・監視技術、リモ

ートモニタリング技術、6) 保障措置評価（DA・ES 分析結果解析）および運営支援。

核不拡散対策としては、上述のような保障措置とともに、輸出管理や二国間協定により濃縮・再処理といった機微技術の取得を制限するなどの措置が採られているが、今後の原子力利用のグローバル的な拡大の可能性を視野に入れば、そのような制度による措置だけでは限界があるという考え方が根強い。今後、より強力かつ効果的な不拡散対策が求められている。

その1つの対策として「核拡散抵抗性」という考え方が取り上げられ議論されるようになった⁴⁾。核拡散抵抗性をもつ技術とは、原子力システム自らが核不拡散性の高い性格を有するものであることを意味する。「保障措置」が、外部から付加した抵抗性の制度的な対策（外在的措置）であるとすれば、「核拡散抵抗性技術」とはシステム自体の内に秘めた不拡散対策（内在的措置）、すなわちシステム自体が核拡散（転用、不正使用など）を起こしにくいような技術を示す。一般に、外在的措置（保障措置）と内在的措置（抵抗性技術）両者の組み合わせにより、核不拡散として効果を示すとされるが、後者については、例えば、プルトニウムの単離が困難となるように、扱う物質の特性やプロセス設計に抵抗性を考慮すること、プルトニウムが仮に盗取されても兵器への転用が困難な物理化学形態であること、兵器としての価値の低いプルトニウムであることなどが、技術的対策案として現在検討されている。いずれにしても、近未来の商業規模での展開を見据え、核拡散抵抗性を向上させたモデルの開発について、核燃料サイクルおよびその保障措置技術の先駆者である我が国が、率先して検討し国際社会に提案していくことが今求められている。

オバマ政権は、上記のような保障措置を含む核拡散抵抗性の必要性を唱える一方で、民生用核燃料サイクルに取り組むための多国間協定の確立には高い関心を寄せている⁵⁾。代表的な多国間アプローチでは、核燃料サイクルが、各国に保持するには非効率的な技術であるという特徴に基づき、その国際的共有化など、国際協力枠組みのなかで濃縮・再処理のような機微技術を含むサイクル全体を国際的に効率的に展開しようと試みられている⁶⁾。保障措置においても、多国間管理による施設であれば、国家による転用・不正使用のリスクは減少し、さらなる多国間協力の一環として「地域による保障措置」の実現化など併せて考えれば、その効果を、多国間枠組みという制度で補完すること、多国化により保障措置の効率化が図れることなど）利点は多大である。ただし、現在、国際的に議論されている多国間アプローチが、燃料供給保証、すなわち核燃料サイクルのフロントエンドにおける核燃料供給途絶時の保証に焦点が置かれているため⁷⁾、使用済み燃料の処理処分といったバックエンド問題への解決策への適用性についても今後併せて検討していくことが重要と思われる。

核セキュリティに係る研究開発について

核セキュリティとは、「核物質、そのほかの放射性物質、その関連施設およびその輸送を含む関連活動を対象にした犯罪行為または故意の違反行為の防止、探知および対応」⁸⁾であり、さらにテロリストなどにより、1) 核兵器の盗取、2) 盗取された核物質を用いた核爆発装置の製造、3) 放射性物質の発散装置（いわゆる「汚い爆弾」）の製造、4) 原子力施設や放射性物質の輸送などに対する妨害破壊行為、という脅威が想定される⁹⁾。

核セキュリティについて IAEA では、2002 年 1 月に核セキュリティ諮問委員会 (AdSec: Advisory Group on Nuclear Security) が設置され、同年 3 月には核セキュリティ基金が設立されるなど IAEA での活動が開始された。近年、前述の核セキュリティサミットなどの支援とともに IAEA や国連、有志国による各種の取組を通じて国際協力が強化されている。我が国は、原子力の利用経験が長く、高い水準の技術や人材を有しているが、セキュリティという面においては、必ずしも他国に比べ認識は高くない。よって、この分野で他国と同じレベルでリーダーシップを発揮するためには、まずセキュリティの重要性を認識し、いわゆるセキュリティ文化を国内で高めていく必要がある。

このような背景の下、核セキュリティに係る研究開発については、日米核セキュリティ作業グループによる活動が参考になろう¹⁰⁾。ここでは、核セキュリティに関し；a) 研修訓練 (アジアの中核拠点としてのトレーニングセンター) の実施、b) 核鑑識、核物質の検知および測定に係る技術の研究開発、c) 新規施設の設計における核セキュリティに関する優良事例の共有 (セキュリティ・バイ・デザイン)、d) 輸送のセキュリティに係る協力 (盗取または妨害破壊行為の機会の減少)、e) 研究炉などからの高濃縮ウラン利用の低減化、f) IAEA による核物質及び原子力施設の防護に関する核セキュリティ勧告 (INFCIRC/225/Rev.5) の理解の深化と勧告の履行の推進、g) 施設における盗取および妨害破壊行為に対処する対応、h) 高濃縮ウランおよびプルトニウムの管理に係る物質の魅力低減、について取り組みがなされている。

そのほか、福島第一原子力発電所事故を契機に、核セキュリティでは、インサイダー脅威を含む原子力施設への妨害破壊行為に対する対策の必要性が重視されており、それによるリスクの究明の研究が必要である。同時に、施設内で活動している関係者の位置情報を自動的に確認できる方法や不審な動きを検知するような異常事象早期検知、意図的な行為による計画外行動を検知することについても研究が必要と考えられる。

安全に係る研究開発について

安全に係る研究は、これまで原子炉から核燃料サイクルまで多岐にわたり実施されてきたが、福島第一原子力発電所事故に際し、改めてその基本的な研究開発のあり方が問われた。事故以前は、想定外の事故は起こらないという前提に立った研究であり、その結果、過酷事故への取り組みが十分なされなかった。また、多段階で事故を防ぐ「深層防護」の考え方が徹底されず過酷事故への備えができていなかった点から国際標準から遅れをとっていたことが指摘されている (日本原子力学会事故調報告書)。今後は、このような安全に係るこれまでの取り組みの問題を認識し、改めて安全研究に取り組むことが求められる。

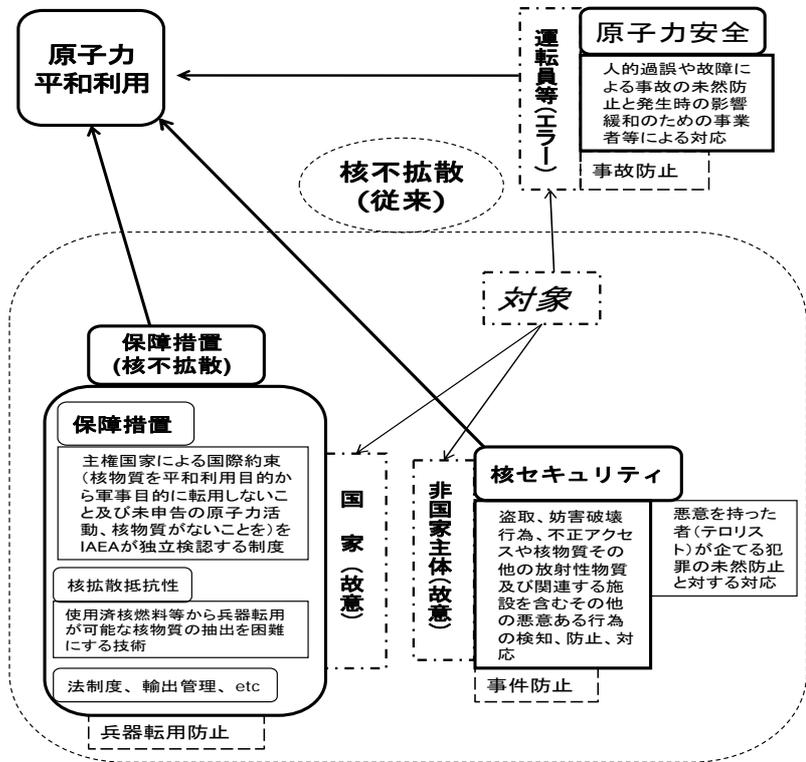
3S 全般に係る研究について

3S の向上について、特に各 S 間の相乗効果という点を中心に IAEA などにおいて検討を行っているが、それは、あくまで各国が原子力の平和利用を円滑に進めていくことを支援するためのものであり、いたずらに手続きを複雑化することなく、また規制項目の追加に繋がる要素は極力排除するよう議論がなされている。3S については、以下のとおり条約などの基本的枠組みは整備されている。

- 原子力安全→原子力安全条約
- 核セキュリティ→核物質防護条約
- 保障措置 (核不拡散) →NPT (IAEA との保障措置協定)

しかしながら、その目的、対象、取組み状況は上図に示すように大きく異なっていると同時に、それらに係る重要性認識度 (文化) にも差があると思われる。「原子力安全文化」という言葉に象徴されるように、安全確保活動の実効性を高めるため、安全を最優先する基本姿勢は共有されている。一方、核セキュリティ文化についての議論が IAEA でなされ、概念が固まりつつあるものの、各国間でその重要性の認識に差がある。また、保障措置を中核とする「核不拡散文化」という概念については議論はなされていない。国家として保障措置の重要性は理解されているものの、原子力技術導入の程度の差により国民の核不拡散文化 (重要性の認識) には差があると思われる。

3S に係る問題点としては、1) 各 S 間の重要度認識のアンバランス (文化の差)、2) 各 S 間の連携不在 (原子力安全、核セキュリティおよび保障措置 (核不拡散) は、これまで独立して進められてきた。最近、安全とセキュリティの連携などが一部で考えられはじめているが、まだ不十分である。3S をパッケージで捉えた場合に見えてくる新たな相乗効果などについて検討を深めることが必要である。例えば「3S バイデザイン」であり、相乗効果を認識した設計を行うことにより、より 3S について効果的、効率的な施設設計が可能、原子力安全と核セキュリティには相反する場合が想定されるケースもあるが、それらを認識しながら設計することにより、より実質的に有効な取り組みが可能と考えられる) がある。



3S 間で相乗効果が期待される技術分野とそれを発揮する方策として、例えば、現在、核不拡散（保障措置）として核物質の封印管理（監視）が実施されており、封印破損を査察時に光学的あるいは電子的に探知することとしている。この現行の封印管理（監視）を改良し、封印が破壊されたと同時に発報させることは技術的に可能であり、これにより核セキュリティにも応用できると考えられる（このような付加機能を取り入れることについては、IAEA 保障措置との調整は別途必要であろう）。また、原子力安全上の理由から管理区域内に設置されている監視カメラについて、赤外線探知・首振り・ズームなどの遠隔制御あるいは自動化機能を付加することにより、核物質防護区域への不正なアクセスを探知可能とすれば、補完機能として核セキュリティにも活用できると考えられる。

(4) 研究開発推進上の課題・ボトルネック（技術的課題、政策的課題）

上述のように核不拡散（保障措置）に係る技術開発は、時代ごとの IAEA のニーズに従い、加盟国の支援により実行されてきており、検知・封じ込め監視、リモートモニタリング、情報収集解析、評価などの分野において高度な技術が確立されてきた。保障措置においては、正確かつ適時に核物質の転用を検知することが重要であるが、核物質取扱い施設規模の拡大に伴い、保障措置の「正確性」について更なる性能向上が求められている。しかし、検知・分析技術については、その感度・精度に自ずと限界があるため、測定精度に起因する核物質特有の不明核質量（MUF : Material Unaccounted For）が問題視されることがある。それを補完するための技術として近適時性のある計量管理技術やオンサイト分析所の設置など取り組まれているが、さらなる技術として、例えばプラント内の核物質の移動をタイムリーに把握するための濃度情報を含むソリューションモニタリングなどが望まれている。また、追加議定書による「完全性」については、環境サンプリングなどにおける更なる性能向上はいまだ可能であると考えられ、それに向けた取り組みをいかに進めるかが今後の課題となっている。さらに、保障措置全体において、分析・計測および解析の迅速性は常に課題である。さらに保障措置の効率化について、「リアルタイム高度監視システム」の開発が進められている。使用済燃料直接処分の議論の本格化にともない、これまで燃焼計算に基づく計量管理が行われてきた使用済燃料中のプルトニウムについてもその直接測定ニーズがクローズアップされている。

核拡散抵抗性については、制度・枠組み以外に技術（外在的抵抗性）として核拡散抵抗性を確保する方策が多方面で研究されている。例えば、マイナーアクチノイド（MA : Minor Actinoid）を混合した燃料の研究や燃料のディープバーンや回収されたプルトニウムの専焼技術などによるプルトニウムの低品位化など、原子力システムおよび取扱う物質固有の核拡散抵抗性を高める研究開発がなされている。しかし、原子力システムの核拡散抵抗性を評価する手法については、第 4 世代原子力システム国際フォーラム（GIF : Generation-IV International Forum）や革新的原子炉及び燃料サイクルに関する国際プロジェクト（INPRO¹¹ : International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles）の議論を通し確立されつつあるが、これらは抵抗性を高めるためのガイドラインに過ぎない。また保障措置のような制度による手法と異なる点は、すべての国家にこれら抵抗性の高い技術を採用させることは困難であることであり、すなわち潜

在的に拡散を目論む国家に対しても、いかに抵抗性の高い技術を適用させるかという課題が残される。

多国間アプローチは、3S 向上の究極の手段とも言えるが、多国間協力は各国の利害が絡むため政治的な面が非常に強くその実現には長期的な取組みが必要である¹²⁾。

核セキュリティについての研究開発は、先に示したような領域において推進されているが、検知・測定においては、感度や精度のターゲットが存在せず、国際的な推進においても、サミットのようなイベントを契機とする合意に基づく取組みはあるものの、保障措置と異なり強制力のある具体的な国際的な制度や協定ではなく、IAEA を中心として作成されるガイドラインを基にした核セキュリティ強化への取組みが各国ベースでなされているのが現状である。技術開発については、核検知技術および核鑑識技術の研究開発が日本原子力研究開発機構（JAEA：Japan Atomic Energy Agency）を中心に実施されているが、それらを実際に適用する体制については必ずしも明確になっておらず、技術確立に向けた研究開発成果を将来のユーザへいかに反映するかといった政策的課題が残されている。

3S 全般に係る取り組み（3S 文化確立・向上）のボトルネックは先に示した通り、各国間での重要性の認識の差、各 S 間の重要度認識のアンバランス（文化の差）、各 S 間の連携不在などであり、安全文化に比べほかの 2S に係る重要性の認識を国内・国際においていかに高めるかが政策的課題である。

（5）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

核不拡散（保障措置）に係る技術開発では、近年特に、情報量の増大に基づく改良、環境サンプリングやリモートモニタリングといった技術分野で保障措置の進化が遂げられてきたが、限度のある IAEA の人的・財政的リソースにおいて保障措置エフォートのかけ方を決めるためには施設や核物質における拡散リスクを評価する方法を考えると不可欠である。この観点から、ステートレベルコンセプトが IAEA 理事会で継続的に議論されている。換言すれば、IAEA 保障措置をいかに効率的に実施するかというための新たな方策である。ここではステートファクターというものを基に国別に評価されるが、そこには国内計量管理制度の技術的能力や保障措置実施への当事国の協力やそこでの保障措置技術能力などが含まれることから、今後も保障措置技術における技術レベルを向上させていくことは重要である。一方、福島第一原子力発電所事故以来、使用済燃料中の取扱問題がクローズアップされつつあり、近年使用済燃料中のプルトニウムをいかに求めていくかという技術テーマが取り上げられるようになった。これについて従来のパッシブ・アクティブ中性子技術の改良や、高エネルギーガンマ線を発生させ、高エネルギーの 2 次ガンマ線（X 線）からプルトニウム量を求める方法など、新たな測定技術の開発が進められており注目されている。また福島第一原子力発電所における熔融燃料の計量管理のための測定技術をいかに確立するかという課題も議論されている。ただ、保障措置においては、査察への実用化という観点でのコストパフォーマンスおよび適用し易さが重要と考えられ、基礎技術の研究開発とは異なる観点からの技術の選択が重要となる。

多国間アプローチは、近年 IAEA を中心に積極的な議論がなされ、そのいくつかは、

現在国際枠組みとして樹立されつつある。ただし、その議論の焦点は、フロントエンド（燃料供給）に置いたものが多く、今後、使用済燃料や高レベル廃棄物を含め、いかにバックエンドにおいて国際枠組みを形成するかが焦点となっている。その点では、東京大学の研究¹²⁾や国際原子力エネルギー協力フレームワーク（IFNEC¹³⁾：International Framework For Nuclear Energy Cooperation）における議論が注目される。

核拡散抵抗性については、GIF/INPROとも福島第一原子力発電所事故以来、若干停滞気味であるが、核拡散抵抗性の議論から端を発した物質魅力度が、核セキュリティ分野で盛んに議論されている。例えば日米核セキュリティ作業グループでは、高濃縮ウラン・プルトニウムなどの物質による核テロ誘引を低下するための核物質の魅力度評価がなされ、さらに共同研究の提案内容の実現可能性を検討する共同インパクト分析を行うという米国の提案を日本側が検討中である^{14,15)}。米国は、英国およびフランスとの間においても物質の誘引に関する評価を行っており、今後注視していく必要がある。

核セキュリティについての研究開発では、上述の核セキュリティサミットに関連した技術開発が、核鑑識、核検知の分野で積極的になされている。また3S全体とも関連するが、確率論的安全評価手法（PSA：Probabilistic Safety Assessment）によるハザード分析を核セキュリティ、核不拡散へ応用するという議論が始まっている。原子力施設において、核セキュリティ、保障措置の分野に応用し、脆弱性の同定やシナリオ分析などに活用するというものである。核セキュリティ・核不拡散においては、敵対者・転用者が悪意をもって意図的な行動により核兵器取得や妨害破壊行為を起こすという考え方が安全と異なるが、そのような観点を含めたPSA分析の開発が課題となる。

3S理解増進（文化）については、2014年の米国核物質管理学会において、3S文化に焦点を当てた特別セッションを企画するなど活発な議論がなされている¹⁶⁾。韓国の専門家は、福島第一原子力発電所事故後は特に3S文化の構築の重要性を認識したことを表明、IAEAの専門家は、IAEAにおける原子力施設3Sワークショップについて紹介し、3Sは平和利用の基礎、安全文化は基本だが、核不拡散・セキュリティ文化を同レベルまで引き上げることが重要、そのためには効果的で明確な責任のある政府・組織構造が不可欠、3Sは独立したものではなく共通のインフラを整備すべき、などとした。米国の専門家は、安全と核セキュリティは施設へのインパクトがあり、核不拡散（保障措置）は国際へのインパクトが強く、これについては国家がしっかり受け止めることが肝要だと述べている。いずれの専門家も、今3Sのうちの、安全だけでなく核不拡散（保障措置）核セキュリティ文化の向上を図る時であることを強調した。

（6）キーワード

核不拡散、保障措置、包括的保障措置、追加議定書、核セキュリティ、3S、INFCIRC225、INFCIRC153、INFCIRC540、非国家主体、テロ、核拡散抵抗性、多国間アプローチ、核検知、核鑑識、破壊分析、非破壊分析、IAEA

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	△	→	・検知への加速器など高度技術の適用（基礎科学レベル）。
	応用研究	○	↑	・核不拡散（保障措置）。 1)使用済燃料中プルトニウム（福島を含む）のNDA 2)JMOX（Japanese MOX）に焦点を併せた技術開発 ・核セキュリティ（サミットでの宣言に従い推進）。 1)各種 新検知の開発 2)ヘリウム3代替中性子検出技術開発 3)核鑑識技術開発（世界レベルへむけ取組み中） 4)物質に特化したセキュリティレベル化研究（日米） 5)核セキュリティ総合支援センター設置
	実用化	△	→	・核不拡散・セキュリティ技術とも実用化は多くない。
米国	基礎研究	△	→	・基礎技術研究は減少、応用技術へ。
	応用研究	○	↑	・核不拡散（保障措置）。 1)IAEA-MSSP に従い研究開発を推進 2)米国エネルギー省（DOE：United States Department of Energy） ／ロスアラモス国立研究所（LANL：Los Alamos National Laboratory）にて使用済燃料中プルトニウムの非破壊測定（NDA）が開発中 3)プルトニウムの解体核からの廃棄技術が進行 ・核セキュリティ。 1)核鑑識では米国国研が欧州 JRC-ITU とともに世界をリード 2)各種検知装置の開発で国際イニシアティブ 3)物質に特化したセキュリティレベル化研究
	実用化	○	↑	・空港、港湾での検知強化。
欧州	基礎研究	○	↑	・核セキュリティ。 1)欧州共同研究センター 超ウラン元素研究所 イタリア環境保護研究所（JRC-ITU（Ispra）：European Commission Joint Research Center, Institute for Transuranium Elements（Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale））において遅発ガンマ線（DG：Delayed Gamma-ray）法が、JRC-IRMM では、即発捕獲ガンマ線分析（PGA：Prompt Gamma ray Analysis）法や中性子共鳴透過分析（NRTA：Neutron Resonance Transmission Analysis）法が進められる。
	応用研究	○	↑	・核不拡散（保障措置）。 1)IAEA-MSSP に従い研究開発を推進 ・核セキュリティ。 1)核鑑識では JRC-ITU が米国国研とともに世界をリード 2)物質に特化したセキュリティレベル化研究（米・英、米・フランス）
	実用化	△	→	・核不拡散・セキュリティとも新技術の実用化は多くない。
中国	基礎研究	-	-	・特に情報はない。
	応用研究	-	-	・特に情報はない。
	実用化	-	-	・特に情報はない。
オーストラリア	基礎研究	△	→	・基礎技術研究は多くない。
	応用研究	○	↑	・核不拡散（保障措置）。 1)IAEA-MSSP に従い研究開発を推進
	実用化	△	→	・核不拡散・セキュリティとも新技術の実用化は多くない。
カナダ	基礎研究	△	→	・基礎技術研究は多くない。
	応用研究	○	↑	・核不拡散（保障措置）。 1)IAEA-MSSP に従い研究開発を推進
	実用化	△	→	・核不拡散・セキュリティとも新技術の実用化は多くない。

韓国	基礎研究	△	→	・基礎技術研究は多くない。
	応用研究	○	↗	・パイロプロセス-高速炉路線のための核拡散抵抗性研究。 ・教育訓練センターの充実。
	実用化	△	→	・核不拡散・セキュリティとも新技術の実用化は多くない。

(8) 引用資料

- 1) IAEA文書Milestones Approach
http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1305_web.pdf
- 2) 「3S」とは、保障措置 (Safeguards)、原子力安全 (Safety) 及び核セキュリティ (Security) の頭文字
- 3) IAEA STR-277 2013年12月IAEA発行
- 4) 久野,J-S.Choi : 核拡散抵抗性と保障措置一次世代核燃料サイクル設計における核不拡散対策の基本的考え方, 日本原子力学会誌, Vol.51, No.2, p22-27 (2009)
- 5) 核不拡散強化のための海外散動向調査報告書
http://www.jaea.go.jp/04/np/activity/2010-11-01/mextcons_2008-01.pdf
- 6) Choi,久野 : 原子力eye Vol. 55, No.5, p59-63 (2009)、鈴木達治郎、日本原子力学会誌Vol49 No.6 (2007)など
- 7) 直井、小林、若林、田崎、原子力eye, Vol.56, No.2, p52-56 (2010)
- 8) 原子力委員会報告書「核セキュリティの確保に対する基本的考え方」H23)
- 9) 外務省 : http://www.mofa.go.jp/mofaj/dns/n_s_ne/page22_000968.html
- 10) 日米核セキュリティ作業グループ (概要と成果)
http://www.mofa.go.jp/mofaj/dns/n_s_ne/page18_000243.html
- 11) GIFPR&PP手法 : 第4世代国際フォーラム (GIF : Generation IV International Forum) 核拡散抵抗性と物理的防護評価専門家グループ (PR&PP Proliferation Resistance And Physical Protection) の評価手法。対象とする原子力システム全体を対象にして、脅威ごとに解析を実施して強弱を評価するシステム応答評価。定量的評価である。INPRO手法 : 革新的原子炉及び燃料サイクル国際プロジェクト (IAEA-INPRO : International Atomic Energy Agency International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles) の評価手法。原子力システムが兵器製造目的に転用されないための措置についての要件、指標、許容レベルを定めて評価する属性評価。システム全体あるいは個々のプロセスについて評価する定性的評価である。
- 12) 国際保障学研究会MNA報告書(2013.03)
<http://www.flanker.n.t.u-tokyo.ac.jp/modules/labDownloads/index.php?page=single-file&cid=1&lid=5>
- 13) International Framework For Nuclear Energy Cooperation (IFNEC),
<http://www.ifnec.org/>
- 14) http://www.mofa.go.jp/mofaj/dns/n_s_ne/page18_000243.html,
- 15) C.Bathke, Summary of Joint US-Japan Study of Potential Approaches to Reduce Nuclear Materials for Use in Nuclear Explosive Device by a Potential Terrorist of Sub-national Group, Proc. Global 2013.
- 16) Interface among 3S Session, 55th INMM Annual Meeting, July 20-24, 2014, Atlanta, USA

3.3.2.13 原子力に関する国際的視野

(1) 研究開発領域名

原子力に関する国際的視野

(2) 研究開発領域の簡潔な説明

世界的な原子力発電導入国の増加に伴う核拡散の懸念の対処、核セキュリティや安全確保に向けた国際協力の在り方について、エネルギー資源を巡る国際関係も踏まえた検討を行う。

(3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

近年、中東やアジアなどの新興国では経済発展やエネルギー安全保障を理由とした原子力発電導入の機運が高まっている。米国や欧州先進国でも、地球環境問題への対処やエネルギー安全保障上の理由から、原子力の位置づけを見直す動きがある。一方、イランの核開発問題、イラクを中心とした中東情勢、原子力技術導入国増加に伴う核関連技術拡散の懸念など、原子力発電利用に伴う国際情勢のリスク要因は年々増大しており、これらのリスクに適切に対処していくためには最新の国際情勢の把握と分析が必要である。

それに加え、2011年3月の福島第一原子力発電所事故を受け、原子力発電の新規導入検討国のみならず多数の既設発電所の運転実績がある先進国においても、原子力安全の強化、特に自然災害やテロなど外部脅威への対策、および万一の事故時における国境を越えた迅速な情報共有と国際協力の在り方が重要となってきた。この分野における調査・研究は我が国では比較的新しい分野であり、中東やロシアとの緊張感のある国際関係が恒常化している欧州や、2001年の同時多発テロを経験した米国における研究実績には我が国にとっても参考になるところが多い。

我が国では、日本原子力研究開発機構（JAEA：Japan Atomic Energy Agency）において核拡散防止の枠組みおよび関連技術開発動向の調査・分析が行われている。2014年4月に組織変更で発足した核不拡散・核セキュリティ総合支援センター（ISCN：Integrated Support Center for Nuclear Nonproliferation and Nuclear Security）¹⁾では、核不拡散に係る国際動向に対応し、技術的知見に基づく政策的研究を行うとともに、核不拡散に関連した情報を収集し、分析を行っている。代表的な調査・研究としては2010年9月に発行された「核不拡散に関する日本のこれまでの取組みとその分析；原子力平和利用の信頼確立の要素と今後の課題」²⁾があげられる。これは、これまでの日本の核不拡散対応を“国内法の担保”“国際核不拡散体制へのコミットメントと貢献”“保障措置”など、7つの措置に分類して評価を行い、それぞれの措置に関して、我が国の原子力平和利用に対する信頼確立の要因となった事項および今後の課題を抽出したものである。また、「アジア地域の原子力平和利用の信頼性・透明性向上に関する研究」として、東南アジアを中心としたアジア諸国の核不拡散体制の整備状況などの調査、課題の抽出、協力プログラムの策定などを実施している。

ISCNではプロジェクト調査に加え、月刊発行文書「ISCN ニューズレター」³⁾において、「英国における民生用プルトニウム所有権の移転」など、核拡散防止や核セキュリテ

ィと関連の深い事項について最新動向を取り上げている。「米ベトナム原子力協定に係る米国議会での議論」など重要な特定トピックスについて、国際関係・国際情勢、原子力協定締結の背景などの多角的な観点から解説を加えている。

公益財団法人日本国際問題研究所軍縮・不拡散促進センターでは、軍縮および大量破壊兵器の不拡散に係る外交・安全保障政策の企画・立案に有用な分析や政策提言を実施している。近年の主要な研究成果としては、外務省委託事業「核兵器使用の多方面における影響に関する調査研究」⁴⁾、核軍縮に向けた各国の取組状況を調査・評価した広島県受託事業「核不拡散条約 (NPT : Treaty on the Non-Proliferation of Nuclear Weapons) 体制等貢献事業」⁵⁾ があげられる。

米国では政府機関・民間研究機関ともにこの分野の研究が幅広く行われている。政府機関で本分野を所掌するのは国務省であり、その中の国際核不拡散・核セキュリティ局 (ISN : Bureau of International Security and Nonproliferation) で核拡散防止や二国間協定などに係る調査を実施している⁶⁾。ISN では IAEA の原子力局 (Office of Nuclear Energy) に対して、新興国の原子力発電事業環境整備プロジェクト (Peaceful Use Initiative) への資金提供も行っている⁷⁾。

核不拡散研究センター (CNS : James Martin Center for Nonproliferation Studies) では核不拡散を中心に広く米国を中心とした安全保障・国際関係問題を調査・研究している⁸⁾。近年の研究成果としては、韓国の使用済燃料蓄積が北太平洋地域の核セキュリティに与える影響の地政学的分析⁹⁾、ロシアが中距離核戦力 (INF : Intermediate-range Nuclear Forces) 条約に違反したとする米国政府の声明に係る分析¹⁰⁾ などがあげられる。

米国を代表するシンクタンク・戦略・国際問題研究センター (CSIS : Center for Strategic and International Studies) では、PONI (Project on Nuclear Issues) というプロジェクトで原子力国際協力関係研究を総括している¹¹⁾。国防・学术界・産業界・行政府といった機関で横断的に活用できる知見と研究者を育成することを目的に、多様な研究を行っている。PONI は政府、研究機関、政策立案者、事業者など幅広い専門家集団 1300 人で構成されており¹²⁾、英・フランスにも研究拠点が存在している。

政策シンクタンク・ブルッキングス研究所 (Brookings) でも原子力政策や国際原子力協力の研究を実施している¹³⁾。主要な研究分野は原子力エネルギーの政策決定過程やエネルギー政策上の位置づけなどであったが、福島第一原子力発電所事故以降は原子力の潜在リスクが意思決定に与える影響や社会的受容性についても研究を行っている。イランの核脅威が国際情勢に与える影響も研究事例の一つとなっている。

英国で国際協力や核拡散防止を扱う研究機関・研究課題としては以下があげられる。オックスフォードリサーチグループ (ORG : Oxford Research Group) では、国際関係や安全保障を広く扱う中で核拡散防止研究などを実施している¹⁴⁾。最近では「核のない世界」を取り上げ、米国オバマ大統領の「核兵器のない世界の実現」構想にも言及して解説を加えている¹⁵⁾。

英国国立原子力研究所 (NNL : National Nuclear Laboratory) は原子力の基礎研究を行う国立研究機関であり、核拡散抵抗性と核物質防護についての研究を実施している¹⁶⁾。最近ではその分野の最新知見をとりまとめた「核拡散抵抗性と核物質防護に関する政策

提言」を公表¹⁷⁾し、国際原子力エネルギー協力フレームワーク（IFNEC: International Framework For Nuclear Energy Cooperation）や第4世代原子力システム国際フォーラム（GIF: Generation-IV International Forum）などの国際協力枠組みにおける透明性をいかに高めていくべきかを分析・提言している。

そのほかの欧州諸国で代表的な研究機関としては、スウェーデンに本拠をおくストックホルム国際平和研究所（SIPRI: Stockholm International Peace Research Institute）があげられる。SIPRIでは核拡散防止・核セキュリティを中心とした原子力国際協力および関連技術を調査するだけでなく、自らロシアおよびウクライナの原子力船における核兵器解体プロジェクトを手掛け、核物質防護（PP: Physical Protection）、使用済燃料輸送リスクの調査研究も実施している¹⁸⁾。

（4）研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

核拡散防止や核セキュリティ面での国際協力のあり方研究や、その根拠となる国際動向の調査という分野では、日本の研究水準は国際的にみて決して低くはないが、米国との比較では質、量ともに相当な差があると言わざるを得ない。これは各省庁に割り当てられた予算規模が日米で2桁程度の違いがあることや、予算割り当ての柔軟性に日米で違いがあることにも起因しているが、そもそも日本では核拡散防止や核セキュリティ面の研究の歴史がまだ浅く、研究のシーズも限定的であることが最大の要因であろう。学部や大学院でこの分野の講座をもつ大学も限られており、全米で数十の大学がこの分野での研究成果を競い合っている米国とは対照的である。核拡散防止や核セキュリティを巡る国際情勢の調査・研究体制を拡充していくことは、原子力産業の国際競争力向上を目指すにあたり必須であるといえる。

国際的視点でもう一つ重要なのは、我が国の「原子力三原則」があくまで我が国の原則であり、他国の原則とは必ずしも相容れないという現実を踏まえることである。「核兵器のない世界」構想の背景には依然として新たな核兵器開発を継続中の国、核軍縮交渉で自国の安全保障を最優先にする国が存在する。かつて世界の多くの国で核兵器開発競争が行われていたこと、現在でもそれに類似した行動をとっている国があることを踏まえた研究と提言が重要であり、その観点からは、この分野の研究拡充には国際政治・外交・安全保障といった視点の研究との相互交流が強く望まれる。

以上を踏まえ、政策的課題として3点をあげる。

1 点目は研究体制の拡充、公的部門の研究予算の拡充である。日本でこの分野に優れた知見・実績をもつ研究機関は極めて限られており、有識者も概ねその機関に集中していることから、予算の配分先を増やすより、優れた研究実績のある機関への重点配分のほうが望ましいであろう。

2 点目は、国際関係的な視点を強化した新たな研究分野の創出である。「国際関係」「法」「政治」「技術（工学）」といった従来の仕切りを超え、それらのすべてを包括した「国際関係に基づく原子力エネルギーの利用に係る考察」のような、いわばトランス・サイエンス的な問題意識と取り組みが今後は必要となってくる。従来の研究項目の分類では収まりきれないことも予想されるため、研究開発施策立案・制度設計側の認識も改める

必要があろう。

3 点目は、このようなトランス・サイエンス的な問題意識を持ち、幅広い分野の知見を活用できる人材の育成である。そのためには専門的教育プログラムの強化もさりながら、国語、数学といった基礎基盤科目をまずはしっかり身につけていることが重要であり、特に総合的教育を旨とする大学などにおけるカリキュラムの強化が期待される。

(5) 注目動向 (新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など)

原子力施設、とりわけ商業用原子力発電所やウラン濃縮プラントなどのサイクル施設における核拡散抵抗性や核セキュリティの強化は古典的な課題であるが、近年の傾向として、その懸念が使用済燃料の管理のあり方に及んでいることがあげられる。従来は、使用済燃料保管施設での安全対策と言えは主に臨界防止であったが、福島第一原子力発電所事故の際に 4 号機使用済燃料プールに大量の燃料が保管されていたことをきっかけとして、使用済燃料の保管がもたらす技術および地政学的リスクについての研究が行われている。

一例をあげれば、米国のシンクタンク Nautilus Institute が 2011 年から 2013 年にかけて実施した” Spent Fuel and Reduction of Radiological Risk/Deep Borehole and Spent Fuel in East Asia”では、東アジア (日本・韓国・中国) における使用済燃料およびその処分の現状を各国の研究者から報告し、それをベースとして使用済燃料の保管方法 (水プール、乾式キャスクなど)、安全管理体制、事故時のリスク管理のあり方が議論された。併せて、米国の原子力発電所を舞台とした外部脅威による使用済燃料からの放射性物質放出リスク評価結果も示され、東アジアで同様の事象が生じた場合の国際的な影響についても議論された¹⁹⁾。

事故時の情報共有と国際協力のあり方も近年関心が高まっている研究分野である。例としては、東アジア経済研究センター (ERIA: Economic Research Institute for ASEAN and East Asia) における「原子力安全管理に係る国際協力のあり方」があげられる²⁰⁾。これは福島第一原子力発電所事故を契機として、原子力施設の大事故時の迅速な情報共有と国際協力の具体的な方法について議論し、とりまとめたものである。価値観の異なる多くの国が国境を接している欧州における既存の体制・枠組みを参考として、その東アジア版構築に向け議論を重ねているところであり、今後の研究の進展が期待される。

(6) キーワード

核拡散防止、核拡散抵抗性、核セキュリティ、国際協力、安全保障

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↗	大学や日本原子力研究開発機構などで恒常的な情報収集・分析・最新の知見に基づく提言がなされている。
	応用研究・開発	○	↗	日本原子力研究開発機構・国際問題研究所などで、国内施策や外交政策立案に資する研究や国際会議などが行われている。
	産業化	—	—	—
米国	基礎研究	◎	→	国務省・戦略国際問題研究センターや多数の大学・シンクタンクなどで、原子力利用と核拡散防止の両立や核セキュリティ強化、国際的な技術支援のあり方などの基礎研究が実施されている。
	応用研究・開発	◎	↗	シンクタンクなどにおいて、研究プロジェクトや国際フォーラムの形で、政策立案に資する提言が多くなされている。近年、核脅威がもたらす地政学リスクの研究が多様化・活性化している。
	産業化	—	—	—
欧州	基礎研究	○	→	英国国立原子力研究所や民間シンクタンクなどで、核拡散防止・核セキュリティなどの基礎研究が継続的に実施されている。
	応用研究・開発	○	→	シンクタンクなどにおいて、研究プロジェクトや国際フォーラムの形で政策立案に資する提言がなされている。
	産業化	—	—	—
中国	基礎研究	—	—	目立った動きはない。
	応用研究・開発	—	—	目立った動きはない。
	産業化	—	—	—
韓国	基礎研究	—	—	目立った動きはない。
	応用研究・開発	—	—	目立った動きはない。
	産業化	—	—	—

（註1）フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

（註2）現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○：ある程度の活動・成果が見えている、

△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註3）トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

（8）引用資料

1) 日本原子力研究開発機構 核不拡散・核セキュリティ総合支援センター、

<http://www.jaea.go.jp/04/iscn/index.html>

2) 『核不拡散に関する日本のこれまでの取組みとその分析』核不拡散科学技術センター、2010年9月

<http://jolissrch-inter.tokai-sc.jaea.go.jp/pdfdata/JAEA-Review-2010-040.pdf>

- 3) 『ISCNニューズレター』、2014年8月
http://www.jaea.go.jp/04/iscn/nnp_news/attached/0208.pdf
- 4) 外務省 http://www.mofa.go.jp/mofaj/dns/ac_d/page23_000872.html
- 5) 広島県 <http://www.pref.hiroshima.lg.jp/site/peace/hiroshimareport2014.html>
- 6) 国務省 国際核不拡散・核セキュリティ局 <http://www.state.gov/t/isn/58378.htm>
- 7) 国務省ファクトシート、2014年8月6日 <http://www.state.gov/t/isn/factsheet/230375.htm>
- 8) CNS <http://www.nonproliferation.org/research/>
- 9) “Rethinking Spent Fuel Management in South Korea”、2013年8月10日、CNS
<http://www.nonproliferation.org/rethinking-spent-fuel-management-in-south-korea/>
- 10) “Russian Cheating Is Not New—Neither is Compelling Them Back Into Treaty Compliance”、2014年7月31日、CNS
<http://www.nonproliferation.org/russian-cheating-treaty-compliance/>
- 11) CSIS <http://csis.org/program/project-nuclear-issues>
- 12) CSIS <http://csis.org/programs/project-nuclear-issues/poni-membership>
- 13) ブルッキングス研究所 <http://www.brookings.edu/research/topics/nuclear-energy>
- 14) オックスフォード研究所 <http://www.oxfordresearchgroup.org.uk/ssp>
- 15) “A Sustainable Approach to Nuclear Zero: Breaking the Nuclear-Conventional Link”、
2013年10月25日、オックスフォード研究所
- 16) NNL <http://www.nnl.co.uk/science-technology/position-papers/>
- 17) “Proliferation Resistance and Physical Protection -Position Paper”, NNL
http://www.nnl.co.uk/media/1054/prpp_position_paper_-_final.pdf
- 18) SIPRI http://www.sipri.org/research/disarmament/nuclear/researchissues/strengthening_reduction/G8/eu_g8/sweden
- 19) Nautilus Institute
http://nautilus.org/wp-content/uploads/2013/08/Meeting_Intro_5-28-13_von_Hippel.pdf
- 20) “Study on International Cooperation Concerning Nuclear Safety Management in East Asian Countries” 2013年6月、ERIA
http://www.eria.org/publications/research_project_reports/FY2012-no.28.html

3.3.2.14 原子力の政治経済学

(1) 研究開発領域名

原子力の政治経済学

(2) 研究開発領域の簡潔な説明

合理的なエネルギー政策の形成を目的として、原子力やそのほかのエネルギー源の位置付けを経済性などの観点から客観的に評価できる分析ツールを構築、利用することなどを通じて、エネルギー全体の将来シナリオを開発する。

(3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

我が国では、2011年3月の東日本大震災ならびに福島第一原子力発電所事故を受けて、原子力発電を中核的エネルギー源として位置付けてきたエネルギー政策の再検討が現在行われている。それに際して、中長期的なエネルギー構成の中で、さまざまな将来見通しが予期される原子力発電やほかのエネルギー源の位置付けを、経済性などのさまざまな観点を踏まえて客観的に評価することが重要となる。そのためには、原子力発電などを定量的に評価できる分析ツールを開発し、適切に利用することなどを通じて、原子力を含めたエネルギー構成の統合的な将来シナリオを作成する必要がある。

現在、エネルギーモデルの開発・利用、経済計算や、将来シナリオの作成を通じて、原子力発電やそのほかのエネルギー源の政策的評価が内外において実施されている。エネルギーモデルの場合、さまざまな技術のコスト、特性やエネルギー・フローを詳細に考慮に入れた技術評価モデル（ボトムアップ型モデル）や、経済とエネルギーの巨視的關係を定量化し、それらに基づくモデル（トップダウン型モデル）が主として開発、利用されている。経済計算では、最新のモデルプラントの技術データに基づいた各電源の発電コストの計算と電源間でのコストの比較検討が行われている。そして、エネルギーモデルの分析結果や、経済計算など定量的な情報に基づき、エネルギー構成の将来シナリオが検討されている。

特に日本では、福島第一原子力発電所事故以降、最新のエネルギー情勢を踏まえ、精力的に原子力発電とそれを含めたエネルギー構成の評価が行われている。事故以降、原子力発電の安全性に対する不安が高まり、当時の政府は、2012年9月に「革新的エネルギー・環境戦略」を発表し¹⁾、2030年代に原子力発電所の稼働をゼロとするエネルギーミックスを目指す政策が示された。再生可能エネルギーの導入拡大、省エネの推進を主要な機軸としている。しかし、従来の我が国の原子力政策の大転換を伴うため、原子力発電所の稼働を中長期的にゼロとする政策実現に向けて、数多くの社会経済的課題が顕在化すると考えられる。そのため、その実現可能性に関して、技術的対策やコスト負担などの経済的影響の評価などを通じて、多くの分析が行われた。一例として、エネルギー・環境会議コスト等検証委員会が2011年12月に、各電源の発電コストの試算結果を公表した²⁾。典型的なモデルプラントを想定し、2030年時点に想定される発電コストを計算している。試算の結果、原子力発電の発電コストは8.9円/kWh以上に達する可能性があり、火力発電とほぼ同等のコスト水準であると報告されている。

また、総合資源エネルギー調査会基本問題委員会は、将来の原子力発電の位置付けな

どに関して検討を行い、「エネルギーミックスの選択肢の原案について」を公表し、2030年の原子力発電比率に関して4つの選択肢（0%程度、15%程度、20%～25%程度、電力市場での需要家の選択に委ねる）を示した³⁾。すべての選択肢において、約1割の節電（2010年比）、再生可能エネルギー比率を25～35%まで増加させることを方針としている。各選択肢がエネルギー需給と経済に与える影響が試算され、原子力発電への依存度低下が電気料金を上昇させ、経済への悪影響が増大するとの結果が報告された。

また、2050年の原子力発電の複数の選択肢が、我が国の電源構成に与える影響に関して、エネルギーモデルを用いた分析が行われている⁴⁾。このモデルは、大量導入に向けた期待が高まる太陽光や風力発電の出力変動やバッテリーを詳細にモデル化している点に特徴がある。分析の結果、厳しいCO₂排出削減実施の下で（2030年までにCO₂排出量を1990年比3割削減）、原子力発電の比率が将来縮小する場合、その程度に応じて、原子力発電の代替電源として太陽光発電が2050年に2.2億kW～3.9億kW導入され、総発電量に占める太陽光発電比率は3割～6割に達し、太陽光発電への依存度が大きくなる。そして、2050年の電灯・電力料金は2割～6割上昇（世帯当たり月額1,100円～4,000円上昇）すると試算されている。

欧州でも2050年という長期を見据えたエネルギーシナリオが作成されている。「エネルギー・ロードマップ2050」⁵⁾や「低炭素経済ロードマップ2050」⁶⁾によって示された欧州のエネルギー構成のシナリオでは、主に再生可能エネルギー、原子力、省エネ、二酸化炭素回収・貯留（CCS：Carbon dioxide Capture and Storage）の4技術に着目したエネルギーミックスが提示され、EU（European Union）加盟各国が最適なエネルギー政策を立案するように促している。EUの温室効果ガス（GHG：GreenHouse Gas）を2050年までに1990年比80～95%削減する重要政策として、再生可能エネルギー比率の引き上げ、省エネ推進、インフラ整備を強調している。また、電力価格はいずれのシナリオでも2030年まで上昇するが、新技術への持続的な投資は、コスト負担よりも、域内の雇用増加、輸入燃料削減などの便益の方が大きく、経済的影響は少ないと指摘されている。

米国では、米国エネルギー省エネルギー情報局が、ボトムアップ型とトップダウン型のエネルギーモデルを用いて、今後30年間におけるエネルギー構成の見通しを毎年発表している⁷⁾。「2014年エネルギー年次見通し（AEO2014：Annual Energy Outlook 2014）」では、2040年までの米国のエネルギー構成を予測分析している。分析のポイントとして、米国の天然ガス国内生産が引続き拡大し、2040年には天然ガスが石炭を追い越し発電比率で最大となる可能性などが示されている。発電構成では、電力需要の伸びの鈍化、「シェール革命」に伴う価格競争力のある天然ガス供給の拡大、環境保護庁（EPA：United States Environmental Protection Agency）の環境規制の実施が、これまで経済合理性があり電力供給の中核にあった石炭火力を抑制し、石炭火力の発電比率は現状の約4割（37%）から2040年には約3割（32%）へ低下すると予測されている。一方、天然ガス発電の比率は現状の30%から2040年には石炭火力を上回り35%に達すると試算されている。原子力発電量自体は微増で推移するが、その発電比率は現状の19%から2040年には16%へ低下する見込みである。また、数箇所の原子力発電所が閉鎖する見込みのため、原子力設備量は現状の1億200万kWから2020年には9,800万kWに縮小

するが、2025年以降、新規発電所が運転開始し、2040年には1億200万kWへ推移する。そして再生可能エネルギー（水力含む）が総発電量に占める比率は現状の12%から2040年には16%まで増加する。

中国でもエネルギー研究所が、ボトムアップ型のエネルギーモデルを利用することにより、2050年までのエネルギー構成を分析し公表している⁸⁾。最新の分析では、需要面では省エネを着実に進めれば2020年以降の一次エネルギー消費および電力消費の伸びを大幅に抑制することが可能であると評価する一方、供給面では、原子力発電と再生可能エネルギーが大幅に拡大し、石炭火力への依存度を低減可能であると分析している。特に再生可能エネルギー、原子力の導入ポテンシャルは大きく、2050年で原子力4~5億kW、水力4~5億kW、風力4億kW、太陽光2~6億kWの潜在的な導入可能量が存在すると分析している。原子力発電に関しては、福島第一原子力発電所事故の影響は軽微であり、2020年8,000万kW、2030年1億5,000万kW~2億kWまで導入拡大する可能性があることを指摘している。

韓国も定量的なエネルギー開発計画を公表するようになった。韓国政府は、2014年1月に第二次国家エネルギー基本計画を公表し、2035年までのエネルギー需給見通しを示した⁹⁾。原子力導入計画に関しては福島第一原子力発電所事故などをうけて、第一次国家エネルギー基本計画では原子力発電比率を2030年までに41%へ拡大する予定であったが、第二次計画では2012年の26.4%から2035年に29%へ引き上げる方針が示され、第一次計画に比較して下方修正が行われている。

そして国際機関においてもエネルギー構成における原子力の位置付けに関して、数多くの分析が試みられている。国際エネルギー機関（IEA: International Energy Agency）は、トップダウン型のエネルギーモデルを用いて、将来数十年を分析した世界エネルギー見通しを毎年公表している。最新の見通し「Word Energy Outlook 2013」¹⁰⁾では、現状の新規原子力発電所の建設テンポは、福島第一原子力発電所事故後の安全規制の見直しの影響を受けて国際的に鈍化しているが、長期的には中国、韓国、インド、ロシアや中東に牽引される形で継続的に増加すると見込まれている。その中で、新技術の展開を織り込んだ「新政策シナリオ」では、2035年には世界の原子力発電の設備量は5億7,800万kWに達し、現状の約1.5倍まで拡大する見通しが示されている。また欧州では固定価格買取制度などの政策支援を受けて太陽光や風力発電といった出力間欠性電源の普及が急速に進んでいるが、経済協力開発機構原子力機関（OECD/NEA: Organisation for Economic Co-operation and Development, Nuclear Energy Agency）が、これらの普及が原子力発電に与える影響を定量的な分析ツールを用いて評価している¹¹⁾。分析の結果、短期的には間欠性電源の普及は、燃料費の高い火力発電を代替するため原子力への影響は軽微であるが、長期的には資本の代替効果を通じて、間欠性電源が原子力発電を代替する可能性があることを定量的に分析している。

（4）研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

定量的な分析ツールを用いたこれまでの内外の原子力発電の分析では、垂直統合型の独占的電力市場を前提とした評価が主として行われている。我が国において今後実施される可能性のある発送電分離など電力市場自由化の下での原子力発電の位置付けは重要

となる。また、核燃料サイクル、特に核燃料燃焼前後でのプルトニウムをはじめとする同位体組成の変化を詳細に考慮に入れたエネルギー政策の評価があまり行われておらず、これらを考慮に入れた定量的ツールの開発と評価が重要な課題として位置付けられる。

国際的な電力自由化の中で、我が国でも規制緩和の流れを反映して自由化が徐々に進められたが、電力事業体制の抜本的改革は行われてこなかった。しかし、2011年の福島第一原子力発電所事故以降、原子力発電に依存しない新しい電力ビジネスモデルの創出や需要家の選択肢の拡大を図るためには、電気事業改革が不可欠であるとの認識が広まり、2013年11月に改正電気事業法が参議院本会議で成立した。同法により、電力システム改革が今後3段階で進められる予定である。この後、電力システム改革の推進と我が国における原子力発電の位置付けを関連させた政策的議論が重要となる。例えば、原子力発電所の過酷事故リスクなどへの政府の政策支援を明確にせず発送電分離を進めれば、電気事業者は安定的な事業収益を確保できず、財務基盤の脆弱化により、投資リスクの大きい原子力発電を放棄する事態や、バックエンド事業の運営が円滑に進まない可能性もあるからである。電力市場自由化の下で原子力発電の位置付けを経済性などの観点から分析できる政策評価ツールの開発が必要である。また近年英国では、電力市場自由化の下で、原子力発電導入促進のため、原子力に対しても固定価格買取制度導入を検討し、原子力発電所の建設に向けた投資インセンティブ確保を目指す政策的な動きが現れている。

また、核燃料サイクルの同位体組成も考慮に入れた詳細な政策分析も今後の課題である。従来のエネルギーモデルでも中長期的な原子力技術評価が行われているが、おもにウランやプルトニウムの物質バランスのみに着目した評価が行われている¹²⁾。しかし、プルトニウムには分裂性、非分裂性同位体が存在するため、核不拡散政策や高速増殖炉を含めた核燃料サイクルに係る政策をより精緻に分析するためには、放射性物質の同位体組成を考慮に入れた原子力技術評価ツールの開発が必要である。軽水炉、使用済み燃料貯蔵、再処理、高速増殖炉、地層処分などの一連の原子力技術の位置付けに関して、同位体組成を考慮した実効的でより説得性のある原子力政策立案に資する定量的なモデル分析が必要である。

(5) 注目動向 (新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など)

国際原子力機関 (IAEA : International Atomic Energy Agency) が近年、トリウム資源の導入可能性を報告している¹⁴⁾。具体的には、トリウムを燃料とする原子炉と、既存炉である軽水炉などとの発電コストの比較分析や、ボトムアップ型のエネルギーモデルを用いた2100年までの世界の発電構成見通しを分析している。発電コストの比較分析の結果、ウラン価格にも依存するが、トリウム燃料を消費するワンスルーの重水炉については、経済優位性をもつ可能性が示されているものの、短中期的にトリウム燃料サイクル技術が持続的に市場展開されるためには、既存炉を上回る経済性、核不拡散性、安全性などを確保する必要があると指摘されている。

（6）キーワード

原子力発電、エネルギーモデル、発電コスト、電力市場自由化、核燃料サイクル、エネルギー需給見通し、同位体組成

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	↗	福島第一原子力発電所事故以降、大学および研究機関において数多くの分析ツール開発や将来のエネルギー構成の評価が行われている。著名な国際学会でも発表が数多くみられる。
	応用研究・開発	—	—	—
	産業化	—	—	—
米国	基礎研究	◎	↗	米国エネルギー省エネルギー情報局は過去数十年にわたり詳細なエネルギーモデル開発に継続的に取り組み、近年ではシェールガス開発も詳しく考慮した上で、内外のエネルギー需給を分析している。同モデルの分析結果は頻繁に引用されている。
	応用研究・開発	—	—	—
	産業化	—	—	—
欧州	基礎研究	◎	↗	大学、研究機関、国際機関において分析ツール開発や将来のエネルギー構成の評価が行われている。国際的に見ても厳しい欧州の温室効果ガス排出規制下でのエネルギー構成見通しについて数多くの研究が行われている。著名な国際学会でも発表が数多くみられる。
	応用研究・開発	—	—	—
	産業化	—	—	—
中国	基礎研究	○	→	他国の分析ツールを参照しながら、大学、研究機関において分析ツール開発や将来のエネルギー構成の評価が行われている。世界最大のエネルギー消費国であり、多くの研究課題が存在していると考えられるが、独自性のある研究の形跡はあまりみられていない。
	応用研究・開発	—	—	—
	産業化	—	—	—
韓国	基礎研究	○	→	他国の分析ツールを参照しながら、研究機関などにおいて分析ツール開発や将来のエネルギー構成の評価が行われている。ただし国際会議の場において、インパクトのある発表はそれほど多いとは言えず、独自性のある研究はあまり存在しない模様である。
	応用研究・開発	—	—	—
	産業化	—	—	—

（註1）フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

（註2）現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○：ある程度の活動・成果が見えている、

△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註3）トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

(8) 引用資料

- 1) エネルギー・環境会議, 革新的エネルギー・環境戦略, 2012
http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/npu/policy09/pdf/20120914/20120914_1.pdf
- 2) エネルギー・環境会議コスト等検証委員会, コスト等検証委員会報告書, 2011
<http://www.npu.go.jp/policy/policy09/pdf/20111221/hokoku.pdf>
- 3) 経済産業省, エネルギーミックスの選択肢の原案について, 2012
http://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_problem_committee/pdf/sentakushi.pdf
- 4) 小宮山涼一, 藤井康正, 原子力の長期シナリオと太陽光・風力発電の大量導入を考慮に入れた日本の長期エネルギー需給に関する分析, 電気学会論文誌B, Vol. 132, No. 9, pp.780-79, 2012
- 5) European commission, Energy Roadmap 2050, 2011
http://ec.europa.eu/energy/publications/doc/2012_energy_roadmap_2050_en.pdf
- 6) European commission, Roadmap for moving to a low-carbon economy in 2050, 2011
http://ec.europa.eu/clima/policies/roadmap/index_en.htm
- 7) EIA/DOE, Annual Energy Outlook 2014, 2014
<http://www.eia.gov/forecasts/aeo/>
- 8) Jiang Kejun, Green Roadmap: China's power sector's pathway to lower carbon emissions, 2011
- 9) ATOMICA, 韓国のエネルギー事情とエネルギー政策, 2014
http://www.rist.or.jp/atomica/data/dat_detail.php?Title_Key=14-02-01-01
- 10) OECD/IEA, World Energy Outlook 2013, 2013
<http://www.worldenergyoutlook.org/>
- 11) OECD/NEA, Nuclear Energy and Renewables, 2012
<http://www.oecd-nea.org/ndd/pubs/2012/7056-system-effects.pdf>
- 12) 山地憲治, 長野浩司, 燃料サイクル最適化モデルの開発 -高速増殖炉実用化条件の解析-, 1988
- 13) 経済産業省, 低炭素社会実現のための次世代送配電ネットワークの構築に向けて～次世代送配電ネットワーク研究会 報告書～, 2010
http://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/electric_power_industry_subcommittee/001_038/pdf/038_009.pdf
- 14) IAEA, Role of Thorium to Supplement Fuel Cycles of Future Nuclear Energy Systems, 2012

3.3.3 原子力に依存しない場合に取り組むべき研究課題

3.3.3.1 国際的視野、社会的視野を含んだ原子力に依存しないための戦略

（1）研究開発領域名

国際的視野、社会的視野を含んだ原子力に依存しないための戦略

（2）研究開発領域の簡潔な説明

エネルギー安定供給を目指す従来の国家戦略の下では顕在化しなかった不整合性が福島第一原子力発電所事故により顕在化した。それは主に原子力利用における出口の部分に顕われており、レジリエントな国家戦略の構築と実施を妨げている。多様なステークホルダーの意向を踏まえつつ整合性のある技術選択肢のパッケージ（複数）を構築、実施するための方法論を確立する。

（3）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

一次エネルギーの安定供給と国際社会における発言権の確保を目指して、日本の原子力利用政策は、核燃料サイクル、高速炉という技術的中核の実現に向けて進められてきた。エネルギー資源の乏しい日本において国家生存のもっとも重要な一次エネルギーの安定供給の基礎を原子力によって確保するという明確な動機があった。しかし、2011年の福島第一原子力発電所事故以降、それまでの国家戦略と原子力関係者に対する国民の支持と信頼は毀損し、それに代わる戦略を立てる基本的な合意点を見い出せないでいる。事故後の多くの議論を経て、原子力発電への依存度を逡減する方向性では国民多数の支持を得られた観があるが、それを具体化するための基礎と手順が確立されていないように見受けられる。例えば、技術的成熟度の度合いや緊急性の異なる複数の技術的オプションが時系列を考慮したシナリオの中で検討されるのではなく、同列に比較されている。また、依存度逡減を多数が支持するといっても、なぜそれを目指すのかという根本的な動機と逡減後のビジョンに関しては同床異夢であるにもかかわらず、異なるステークホルダー間に存在する非均質性を塗りつぶし、原子力発電賛成反対の二分法によって議論がなされるため、すこし踏み込んだ具体論になると議論が発散する。このように議論が浅く混迷する主な理由は、たとえ原子力利用逡減を企図するにしてもそれによってどのような状況がもたらされるのか、つまり、「出口」の部分に関する十分な理解を構築し、共有してこなかったことによると考えられる¹⁾。

「出口」は短期（前期）、中期、長期（後期）に分けて考えることができる。短期の出口はすでに存在する使用済み燃料の処理とほぼ同義であり物質のインベントリ管理と捉えることができる。この段階の処理の仕方によって、中期、長期で適用できる選択肢も変わり、もたらされるリスクも影響を受ける。福島第一原子力発電所事故後の状況においては、この段階で国民の信頼を得ない限り先には進めない。また、国民の健康リスクだけでなく、現在のプルトニウムストックパイル問題のように短期的であり、かつ、二国間あるいは国際問題に影響を与えるリスクもある。中期において考えなければならないのは、老朽化した炉の退役と更新の問題である。これは、原子力利用をどの程度継続するのか（中期をどのくらい長く続けるのか）という点と関連し、インベントリ管理と処分の問題にも影響する。さらに、長期的・究極的には原子力システム全体の最終的撤

退に対しても検討し、これら、短期、中期、長期のどのフェーズに対しても矛盾のない整合性のあるシナリオを構築する必要がある。

最終的に原子力に依存しない場合のシナリオを完了するまでに許される時間スパンの長さによって、必要とされる、あるいは供用可能な技術が異なってくる。しかし、もし、原子力への依存をなくすのであれば、それをどの程度の時間で行うのかは、国民の合意のもとに定めるべきことであり、逆に国民は合意形成の議論を進める上でどの技術がいつ供用可能になるのか、そしてその効果や影響を知りたがるであろう。

この鶏と卵のような関係の中で、まず定めなければならない「定点」は、前述のように、原子力への依存をなくすことによって何を実現したいのか、という根本的な問いに対する国民の意思を正しく把握することであろう。「出口戦略」構築とは、原子力への依存をなくすことによって何を実現したいのか、という根本的な問いに対する国民の合意形成に資する客観的な知識を体系的に提供しつつ、短期、中期、長期のどのフェーズに対しても矛盾のない整合性のあるシナリオを構築することである。出口戦略構築では、提供される知識の中に何を含めるのかも含めて社会的議論からのフィードバックを得て、随時修正を加える (adaptive) という、反復的 (iterative) で柔軟な (flexible) 対応により技術的現実性を提示しつつ国民の求める将来像を収斂させていく。そして、そのためには自然科学と人文社会科学の協働による国民的合意形成の方法論を構築することが不可欠である。これは、知識体系を主に科学技術の専門家が用意し一方的に提示した上で、いわゆるパブリックアクセプタンスを増進するために人文社会科学を利用するという従来原子力開発でとられていたアプローチとは根本的に異なる、あるいは方向性が逆のものである。

もし原子力への依存をなくすとしたら、どのようにして実現できるのか、どのような影響があるのか (国民の負担はどの程度になるのか)、それに対する対策はあるのか、という問いは、高度な国家レベルのリスク管理上の問いである。しかし、実際にその戦略を実施に移すかどうかということとは別に、当然行っておくべきリスク管理上の図上演習であったはずだが、そのような国家の根幹にかかわることに関して準備を行ってこなかった。ただ、このような状況 (出口部分のシナリオを不明確なままに放置しておいたこと) は日本だけではなく、原子力を利用してきたほぼすべての国にあてはまる。数少ない例外を探すとすれば、成功例としてのスウェーデン、フィンランド、そして反面教師としての米国と韓国であろう。

スウェーデンは 1980 年に 30 年後には原子力に依存しないことを国民投票で決定し、それに向けて中間貯蔵施設の運用、廃炉で発生する低レベル廃棄物にも対応した低レベル廃棄物処分施設の運用、さらに使用済み燃料最終処分場のサイト選定 (2009 年) と技術、規制システム開発を進めてきた。いわば出口戦略とその理論的技術的基盤を着実に整えてきた最先進国である。興味深いことに、これらの出口部分の見通しがついた頃、既設原子炉の新規炉へのリプレースメントを認める国民投票結果が得られている。

フィンランドは西側とロシアの両方の炉が併存する複雑な状況におかれてきた。ロシア製の炉から出る使用済み燃料はロシアが引き取り再処理することになっていたが、さまざまな国民的議論、国際情勢の変化などを経て 1997 年自国における処分に方針を定め 2001 年にオルキルオトを最終処分地として選定することに成功した。

米国は歴史的にもっとも早く放射性廃棄物を発生させ、その問題の困難さを認識した国である²⁾。また、1970年代から現在まで何回か試みたにもかかわらず使用済み燃料の処分に関する方針が定まらない。インドの核実験後、再処理を禁じる国策が確立し以後踏襲されてきたが国立研究所ではさまざまな技術的オプションが研究されてきた。1990年代後半のクリントン政権下では経済競争原理から自然発生的に原子力に依存しない方向への流れがあったが、1999年に大統領科学技術諮問委員会（PCAST：President's Council of Advisors on Science and Technology）が原子力への依存をなくした場合のインパクトの大きさ、特に米国の原子力分野における国際的指導性の低下に対して警告してから、ブッシュ大統領のリーダーシップによっていわゆる原子力カルネッサンスが起きた。これは原子力への依存をなくすという崖っぷちに立ってみてその深遠さを改めて認識し、前述の中期の期間を延長することで原子力への依存をなくすことを先送りにする努力と見ることもできる。しかし、巨大で長期な投資を必要とする原子力発電が米国の金融投資環境にマッチせず、期待したほどの盛り上がりを見せることはなかった。オバマ政権下では伝統的な民主党の反再処理政策が踏襲され、さらに国内政治力学によってヤッカマウンテン処分場計画が中止されるに至った³⁾。これらの動きと並行して、科学アカデミーは、段階的、反復的で柔軟な意思決定プロセスを含む技術開発の必要性を1990年代から数次の研究調査委員会によって明らかにした⁴⁻⁶⁾。ヤッカマウンテン処分場計画が中止されたあとの方向性を諮問されたブルーリボン委員会の報告書⁷⁾は主にこの科学アカデミーにおける議論を踏襲している。

韓国は1980年代から本格的な原子力発電の展開を始め、現在では総発電量の4割を超えるまでになっている。複雑な周辺国際環境のため、米国から使用済み燃料の管理に関して厳しく制約を加えられており、使用済み燃料直接処分のみが認められている。しかし、2014年に失効する原子力協定の改定交渉の中で韓国は米国に対して乾式再処理を認めるよう要求している⁸⁾。その動機は複数認められるものの、韓国にとって実際上もっとも重要と思われることは、蓄積する使用済み燃料に見合うだけの中間貯蔵容量が不足していること、さらには最終的な処分地の選定プロセスにすら入れない国民合意の欠如という状況を乾式再処理という技術的方策によって打開しようということである。しかし、技術開発計画が先行し、それを支えるべき国民合意の有無や米国との交渉の行方などが不明であり状況は予断を許さない⁹⁾。(2015年4月22日、米韓原子力協定妥結、仮署名)

(4) 研究開発推進上の課題・ボトルネック（科学技術的課題、政策的課題）

前述のように、世界を見渡せばいくつかの成功例があるものの、今の日本はそれらの成功例よりも格段に複雑で喫緊の必要性に迫られている。ことが起きてしまいうすでに図上演習にとどまらず、自然科学と人文社会科学の有機的協働による adaptive、iterative で flexible な方法論を見だし、実際にそれを用いて国民的合意を構築し今の閉塞状態を打開することが求められている。

このプロセスは2つの要素を必須とする。すなわち、膨大な専門知（繰り返し指摘するが自然科学だけでなく人文社会科学を含めることが肝要）を駆使して問題の所在と根源を客観的に提示することができる専門家集団とそれを用いて幅広いステークホルダー

が合意できる選択肢を探索する参加型の議論を進める仕組みである。専門家集団は、ステークホルダー会議からのフィードバックを注意深く分析しさらに提案をする、というフィードバック・ループを実現することを求められる。しかし、あくまでも主体はステークホルダー会議であり専門家集団はそのアドバイザーに徹する必要がある。そのため、専門家集団に含まれる専門家には高度の専門性というまでもなく、高度の倫理性と公益性、そして社会的なリテラシーが求められる。一方、ステークホルダー会議にも高度の倫理性と公益性が求められる。従来の円卓会議のように自説の主張をぶつけ合うのではなく、専門家集団から出てきた提案に基づき過不足を述べ、ほかのステークホルダーのもつ利害を理解しようとする姿勢とリテラシーが求められる。

米国であれば通常、科学アカデミーと連邦議会が協働してこのようなプロセスが進められるであろうが、日本においては具体的で膨大な作業を伴う専門家集団の仕事をこなし、社会的信頼を得ている学際横断的な組織は見当たらない。まずはこの出口戦略構築に特化した専門家集団を新たに編成し必要な予算措置を講じることを検討する必要がある。ステークホルダー会議も新たに編成することが考えられるが、脳死移植の前例のように党議拘束を外した国会の委員会で行うことも考えられる。

技術的には、膨大な数に上る検討・評価項目をまずはもれなく列挙し、さらにステークホルダー会議との議論によって優先順位付け、絞り込みを行い、さらにはそれらを適切に評価する手法の開発が課題となる。また、多数の性能評価指標に関して、複数の選択肢を俯瞰的に比較するための手法の開発も課題となる。地層処分の性能評価手法の開発においてすでに一定の蓄積があるものの、性能評価指標の数が格段に大きくなることが予想され、迅速な評価を可能にする技術革新が求められる。またこれらの膨大な評価結果を求められた切り口で表示してみせる知識マネジメントシステムの構築が必須となる¹⁰⁾。

(5) 注目動向 (新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など)

- ・ 日本原子力研究開発機構の地層処分グループが開発を進めてきた性能評価技術と知識マネジメントシステムはそのプロトタイプとして有効。
- ・ 米国ブルーリボン委員会の答申とその後の動き。例えば、エネルギー省による The Fuel Cycle Evaluation and Screening プロジェクト (アイダホ国立研究所主導)。
- ・ スウェーデンの既設炉のリプレースメントを容認する国民投票結果がもたらす既存の枠組み (処分施設の容量など) への影響とそれに対する国民、住民の反応。
- ・ 韓国と米国の原子力協定交渉の行方と韓国の使用済み燃料管理。
- ・ オランダ・デルフト工科大学における responsible innovation 概念の研究¹¹⁾。

(6) キーワード

原子力発電、出口戦略構築、自然科学と人文社会科学の協働、国民合意形成、

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> 核燃料サイクルの要素技術に関する技術開発は基礎研究レベルにおいて他国を先導するレベルにある。 ただし、福島第一原子力発電所事故後、雨後の筈のように言及されてはいるものの原子力と社会に関する基礎的研究、特に自然科学との協働に資する研究には特筆すべき成果がない。左記の現状に対する評価◎は個別の要素技術に関するものであって「出口戦略構築」に必要な基礎研究に対するものではない。
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> 核燃料サイクルの要素技術のうち応用研究段階にあるものの中に重要な意味をもつものが含まれているもの（例えば、高温ガス炉、高速炉）、出口戦略的観点から再検討されておらず従来のコンテキストでの開発が続けられている。
	産業化	×	↓	<ul style="list-style-type: none"> 中間貯蔵施設、低レベル処分場など産業化の段階に到達しているものの、地層処分施設、再処理工場など重要な施設が供用のめどが立っていない。 またそれらの原子力に依存しないための戦略における位置づけがなされていない。
米国	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> 卓越した技術力とイノベーションで他国が試したこともない多くの可能性を実験的に研究した蓄積があり、いったん国家社会の求める方向性が定まればそれを実現するだけの潜在的実力を備えている。 科学アカデミーを中心に原子力と社会の関係に関する議論の蓄積があり、この分野においても世界を先導してきた。
	応用研究・開発	○	↓	<ul style="list-style-type: none"> プロトタイプ規模の開発で留まり日の目を見なかったアイデアが多数あり、情勢の変化に応じて対応できる分厚い蓄積がある。 社会的な合意形成プロセスに対してもさまざまな試行錯誤を重ねてきた。TRU (TRANS-Uranium) 廃棄物処分場の核廃棄物隔離試験施設 (WIPP : Waste Isolation Pilot Plant) において顕著な成功を収めたが、それ以外については顕著な成果がない。
	産業化	×	↓	<ul style="list-style-type: none"> ブルーリボン委員会の答申後、オバマ政権から見るべき対応がない。
欧州	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> 核燃料サイクルの要素技術に関する技術開発は基礎研究レベルにおいて他国を先導するレベルにある。 社会的合意形成の基礎的研究や EU (European Union) 域内の国際処分場に関する研究など、着実に成果を上げている。
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 多様な欧州各国の実情を反映して多様な選択肢を抱えている。
	産業化	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> フィンランド、スウェーデンで世界初の使用済み燃料の処分場が運用を開始する可能性が高い。また、フランスでは核燃料サイクルをフルに利用した方法による開発が進んでいる。ドイツの脱原発政策も欧州の多様性が可能にする試行と捉えることができる。
中国	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 核燃料サイクルの基礎的研究は軍事技術をベースに一定の成果を上げている。地層処分の概念検討などが進んでいる。 社会体制の違いから、国民合意形成に関しては西側とは異なるアプローチがとられるであろうが、どのような取り組みがされているのか見えていない。
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> 高速炉、高温ガス炉など応用研究段階にあつて将来出口戦略に利用できそうな技術がみられる。 しかし、それらの開発を進める動機の中に出口戦略が含まれているかどうか見えていない。
	産業化	△	→	<ul style="list-style-type: none"> 原子力民生利用の勃興期にあり、発電所増設に忙殺されて包括的な出口戦略構築を検討する余裕がない。

韓国	基礎研究	○	↗	・乾式再処理、高温ガス炉の基礎研究、地層処分の概念研究などが進んでいる。 ・低レベル処分場サイト選定の際に社会的合意形成の貴重な経験をしたがその後の展開が見えていない。
	応用研究・開発	△	→	・乾式再処理のプロトタイプを建設し天然ウランによる実験を計画 中。 ・社会的合意形成に関しての取り組みが見えない。
	産業化	×	→	・2020年代半ばに使用済み燃料貯蔵のスペースが満杯になるが具体的対応が見えない。また、米国との原子力協定改定交渉の行方が不透明。

(註1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

(註2) 現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○：ある程度の活動・成果が見えている、

△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

(8) 引用資料

- 1) 安 (2012) 原子力発電「出口戦略」構築のすすめ、科学、82(6): 623-628.
- 2) Walker, JS (2009) The Road to Yucca Mountain, The Development of Radioactive Waste Policy in the United States, University of California Press.
- 3) 安 (2011) 時論：ヤッカマウンテン処分場計画の終焉と今後、日本原子力学会誌、53(11), 2-3, 2011.
- 4) National Research Council (1990) Rethinking High-Level Radioactive Waste Disposal, A position Statement of the Board of Radioactive Waste Management, Washington, DC, National Academy of Sciences.
- 5) National Research Council (1995) Technical Bases for Yucca Mountain Standards, Washington, DC, National Academy of Sciences.
- 6) National Research Council (2003) Disposition of High-Level Waste and Spent Nuclear Fuel: The Continuing Societal and Technical Challenges, 2001、One Step At a Time, the Staged Development of Geologic Repositories for High-Level Radioactive Wastes, Washington, DC, National Academy of Sciences
- 7) Blue Ribbon Commission on America's Nuclear Future (Jan, 2012) Report to the secretary of energy, January 2012. Washington DC: Blue Ribbon Commission on America's Nuclear Future;158 p.
- 8) Ko, W.I. and Kwon, W.H. (2009) Implications of the New National Energy Basic Plan for Nuclear Waste Management in Korea, Energy Policy, 37, 3484-3488
- 9) Ahn, J. (2014) Roles and Effects of Pyroprocessing for Spent Nuclear Fuel Management in South Korea, Progress in Nuclear Energy, 75: 49-62
- 10) Umeki, H., Takase, H., and McKinley, I.G. (2011) Geological disposal: KM challenges and solutions, Knowledge Management Research & Practice, 9: 236-244.
- 11) Delft University of Technology (2014) Responsible Innovation (LDE)
<http://www.tbm.tudelft.nl/en/study/minors-and-electives/minors/minors/responsible-innovation-lde/>

3.3.3.2 3.3.2章と共通の研究課題

(1) 研究開発領域名

3.3.2章と共通の研究課題

(2) 研究開発領域の簡潔な説明

本章において下記領域の内容については、3.3.2章「原子力の将来にかかわらず取り組むべき研究課題」と共通かつ特に考慮すべき領域と思慮し、3.3.2章に記載する。

「使用済み核燃料の管理」

3.3.2.3章「使用済み核燃料の管理」（361頁）に記載。

「プルトニウムの管理手法」

3.3.2.4章「プルトニウムの管理手法」（368頁）に記載。

「ウラン廃棄物の管理手法」

3.3.2.5章「ウラン廃棄物の管理手法」（374頁）に記載。

「原子炉の廃止措置（デコミ）」

3.3.2.6章「原子炉の廃止措置（デコミ）」（379頁）に記載。

原子力区分 略語一覧

3S: 原子力安全 (Safety)、核不拡散 (保障措置 Safeguards)、核セキュリティ (Security)

4S: 小型ナトリウム冷却高速炉 (Super-Safe, Small & Simple)

A:

ABR : TRU 金属燃料先進燃焼炉 (Advanced Burner Reactor)

ABWR : 改良型沸騰水型軽水炉 (Advanced Boiling Water Reactor)

ADS : 加速器駆動核変換システム (Accelerator Driven System)

AdSec : IAEA 核セキュリティ諮問委員会 (Advisory Group on Nuclear Security)

ADSR : 加速器駆動未臨界炉 (Accelerator Driven Subcritical Reactor)

AECL : カナダ原子力公社 (Atomic Energy of Canada Limited)

AEO2014 : 2014 年エネルギー年次見通し (Annual Energy Outlook 2014)

ALARA の原則 : 合理的に達成可能な範囲でできる限り低くすること

(As Low As Reasonably Achievable)

ALFRED : 鉛冷却高速炉 (Advanced Lead Fast Reactor European Demonstrator)

ALPS : 多核種除去設備 (Advanced Liquid Processing System)

ANDRA : 放射性廃棄物管理機関

(Agence Nationale pour la gestion des Dechets RAdioactifs, フランス)

APM : 1962 年にマルクールで建設された再処理パイロットプラント

(Atelier Pilote de Marcoule, フランス)

APWR : 改良型加圧水型原子炉 (Advanced Pressurized Water Reactor)

AREVA : アレバ社 (フランス)

ASN : フランス原子力安全機関 (Autorité de Sûreté Nucléaire)

ASTRID : 高速増殖技術実証炉

(Advanced Sodium Technological Reactor for Industrial Demonstration)

ATR : 新型転換炉 (Advanced Thermal Reactor)

AWHR : 新型重水炉 (Advanced Heavy Water Reactor)

B:

BA : より幅広いアプローチ (Broader Approach)

BEIR : 電離放射線の生物学的影響に関する委員会

(Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiation)

BSAF 計画 : 福島第一原子力発電所事故に関する国際ベンチマーク解析計画

(Benchmark Study of the Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Project)

BWR : 沸騰水型原子炉 (Boiling Water Reactor)

C:

- CANDU 炉：カナダ型重水炉 (CANadian Deuterium and Uranium reactor)
- CAPRA 計画：フランスのプルトニウム燃焼計画
(Consommation Accrue de Plutonium dans les réacteurs à neutrons RAPides)
during an Accident of Reactor and safety Evaluation)
- CCS：二酸化炭素回収・貯留 (Carbon dioxide Capture and Storage)
- CDFR：中国の高速実証炉 (China Demonstration Fast Reactor)
- CEA：フランス原子力・代替エネルギー庁
(Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives)
- CEFR：中国の高速増殖実験炉 (China Experimental Fast Reactor)
- CFTC：統合核燃料取扱センター (Consolidated Fuel Treatment Center)
- CIAE：中国原子能科学研究院 (China Institute of Atomic Energy)
- CIEMAT：エネルギー・環境・技術研究センター
(Centro de Investigaciones Energeticas, MedioAmbientales y Tecnologicas, スペイン)
- CLI：地域情報委員会 (Commission Locale d' Information, フランス)
- CNDP：公開討論国家委員会 (Commission Nationale du Débat Public, フランス)
- CNRS：フランス国立科学研究センター
(Centre National de la Recherche Scientifique)
- CNS：核不拡散研究センター (James Martin Center for Nonproliferation Studies, 米)
- CODIRPA：原子力事故後管理運営委員会
(COmité DIRecteur pour la gestion de la phase Post Accidentelle d'un accident nucléaire ou d'une situation d'urgence radiologique, フランス)
- CPF：高レベル放射性物質研究施設 (Chemical Processing Facility)
- CPF：被覆粒子燃料 (Coated Particle Fuel)、
- CSIS：米国戦略国際問題研究センター
(Center for Strategic and International Studies)
- CZT：テルル化亜鉛カドミウム (CdZnTe)

D:

- DA：破壊分析 (Destructive Assay)
- DCH：格納容器直接加熱 (Direct Containment Heating)
- DDREF：線量・線量率効果比 (Dose and Dose-Rate Effectiveness Factor)
- DG 法：遅発ガンマ線 (Delayed Gamma-ray) 法
- DOE：米国エネルギー省 (United States Department of Energy)
- DP：討論型世論調査 (Deliberative Poll)
- DUPIC 燃料：CANDU 炉で再使用する PWR の使用済燃料
(Direct Use of spent PWR fuel In CANDU)

E :

- EC : 欧州委員会 (European Commission)
- ECURIE : 欧州共同体緊急放射線情報交換システム
(European Community Urgent Radiological Information)
- EDF : フランス電力会社 (Électricité de France)
- EML : 米国エネルギー省環境測定研究所 (Environmental Measurements Laboratory)
- EMRAS : 放射線安全のための環境モデリング
(Environmental Modelling for RAdiation Safety)
- ENEA : イタリア原子力・代替エネルギー研究開発委員会
(National Commission for Nuclear Alternative Energy Sources)
- EPA : 米国環境保護庁 (United States Environmental Protection Agency)
- EPR : 欧州加圧水型炉 (European Pressurized Water Reactor)
- EPZ : 防災対策重点地域 (Emergency Planning Zone)
- ERIA : 東アジア経済研究センター
(Economic Research Institute for ASEAN and East Asia)
- ES : 環境サンプリング (Environmental Sampling)
- ESBWR : 高経済性単純化沸騰水型原子炉
(Economic Simplified Boiling Water Reactor)
- EU : 欧州連合 (European Union)
- EURDEP : 欧州放射線データ交換プラットフォーム
(European Radiological Data Exchange Platform)
- EURODIF : 国際共同企業体ユーロディフ
(European Gaseous Diffusion Uranium Enrichment Consortium)
- EXFOR : 国際原子核反応実験データベース (EXchange FORmat)

F :

- FaCT プロジェクト : 高速増殖炉リサイクルの実用化に重点を置いた研究開発プロジェクト。
(Fast reactor Cycle system Technology development project)
- FBR : 高速増殖炉 (Fast Breeder Reactor)
- FFTF : 高速中性子束試験装置 (Fast Flux Test Facility)
- FHR : フッ化物塩冷却高温炉 (Fluorite High Temperature Reactor)
- FP : 核分裂生成物 (Fission Products)

G :

- G8 : 主要国首脳会議 (Group of Eight)
- GE : ゼネラル・エレクトリック社 (General Electric Company)
- GHG : 温室効果ガス (GreenHouse Gas)
- GIF : 第4世代原子力システム国際フォーラム (Generation-IV International Forum)
- GM : ガイガーミュラー計数管 (Geiger-Müller)
- GNEP 構想 : 国際原子力エネルギー・パートナーシップ構想

(Global Nuclear Energy Partnership)

GTCC : クラス C を超える放射性濃度の廃棄物 (Greater Than Class C)

GT-MHR : ガスタービンモジュール型高温ガス炉

(Gas-Turbine Modular Helium Reactor)

H :

HANARO : 韓国の研究用多目的照射炉 (High-flux Advanced Neutron Application Reactor)

HEPA フィルター : エアフィルタの一種 (High Efficiency Particulate Air filter)

HIC : 高性能容器 (High Integrity Container)

HTR : 高温ガス炉 (High Temperature Reactor)

HTR-10 : ペブルベット型高温ガス実験炉 (High Temperature Reactor-10, 中)

HTR-PM : ペブルベット型高温ガス実証炉

(High Temperature Gas-Cooled Reactor-Pebble bed Module, 中)

HTTR : 高温工学試験研究炉 (High Temperature Engineering Test Reactor, 日)

I :

IAEA : 国際原子力機関 (International Atomic Energy Agency)

IBRAE : ロシア科学アカデミー原子力安全研究所

(Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences)

ICRP : 国際放射線防護委員会 (International Commission on Radiological Protection)

ICSBEF : 国際臨界安全ベンチマーク評価プロジェクト

(International Criticality Safety Benchmark Evaluation Project)

IEA : 国際エネルギー機関 (International Energy Agency)

IFNEC : 国際原子力エネルギー協力フレームワーク

(International Framework For Nuclear Energy Cooperation)

IMI Nuclear : IMI Nuclear 社 (スイス)

INES : 国際原子力事象評価尺度 (International Nuclear Event Scale)

INF : 中距離核戦力 (Intermediate-range Nuclear Forces)

INFCIRC : IAEA の刊行物 (Information Circulars)

INIS : 国際原子力情報システム (International Nuclear Information System)

INPO : 米国原子力発電運転協会 (Institute of Nuclear Power Operations)

INPRO : 革新的原子炉及び燃料サイクルに関する国際プロジェクト

(International PROject on innovative nuclear reactors and fuel cycles)

IRGC : 国際リスク・ガバナンス評議会 (International Risk Governance Council)

IRID : 技術研究組合国際廃炉研究開発機構

(International Research Institute for Nuclear Decommissioning)

IRPhE : 国際炉物理ベンチマーク実験プロジェクト

(International Reactor Physics benchmark Experiment project)

IRRS : 総合原子力安全規制評価サービス (Integrated Regulatory Review Service)

IRSN : 放射線防護・原子力安全研究所

(Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire, フランス)

IS プロセス : ヨウ素 (I) - 硫黄 (S) 系熱化学水素製造プロセス

ISCN : 核不拡散・核セキュリティ総合支援センター

(Integrated Support Center for Nuclear nonproliferation and Nuclear security)

ISN : 国際核不拡散・核セキュリティ局

(bureau of International Security and Nonproliferation)

ISO : 国際標準化機構 (International Organization for Standardization)

ISPRA : イタリア環境保護研究所

(Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale)

ISS : Innovative Systems Software 社 (米)

J :

JAEA : 日本原子力研究開発機構 (Japan Atomic Energy Agency)

JASPAS : 日本による IAEA 保障措置技術支援

(Japan Support Programme for Agency Safeguards)

JMOX : 国内 MOX 燃料加工事業 (Japanese MOX)

JPDR : 日本最初の発電用試験原子炉 (Japan Power Demonstration Reactor)

JRC-IRMM : 欧州共同研究センター 標準物質・計量研究所 (European commission Joint Research Center, Institute for Reference Materials and Measurements)

JRC-ITU : 欧州共同研究センター 超ウラン元素研究所

(European Commission Joint Research Center, Institute for TransUranium elements)

JSFR : 高速増殖実証炉・商業炉 (Japan Sodium-cooled Fast Reactor)

JT-60 : 臨界プラズマ試験装置 (JAERI Tokamak 60)

JUPITER : 大型高速増殖炉炉心臨界実験

(Japanese-United states Program of Integral Tests and Experimental. Researches)

K :

KAERI : 韓国原子力研究所 (Korea Atomic Energy Research Institute)

KAIST : カイストウ (Korea Advanced Institute of Science and Technology)

(旧称 : 韓国科学技術院)

KALIMER : 韓国新型液体金属燃料高速炉 (Korea Advanced Liquid Metal Reactor)

KHNP : 韓国水力原子力株式会社 (Korea Hydro & Nuclear Power Limited)

KI : クルチャトフ研究所 (Kurchatov Institute, ロシア)

KIT : カールスルーエ工科大学 (Karlsruher Institut für Technologie, ドイツ)

KNFC : 韓国原子燃料株式会社 (Korea Nuclear Fuel Co., Limited)

KRMC : 韓国放射性廃棄物管理公団 (Korea Radioactive waste Management Co.)

KTH : スウェーデン王立工科大学 (Kungliga Tekniska Högskolan)

L :

LANL : ロスアラモス国立研究所 (Los Alamos National Laboratory, 米)

LES : ルイジアナ・エネルギー・サービシズ

(ウラン濃縮会社、Louisiana Energy Services, 米)

LLFP : 長寿命核分裂生成物 (Long-Lived Fission Products)

LNT : しきい値無し直線仮説 (Liner Non-threshold Theory)

LWR : 軽水炉 (Light Water Reactor)

M :

MA : マイナーアクチノイド (Minor Actinoid)

MCCI : 溶融炉心コンクリート相互作用 (Molten Core Concrete Interaction)

MCDA : マルチクライテリア意思決定分析 (Multi-Criteria Decision Analysis)

MELODI : 学際的欧州低線量イニシアティブ

(Multidisciplinary European LOw Dose Initiative)

MODARIA : 包括的なモデリングプロジェクト

(MOdelling and DAta for Radiological Impact Assessment)

MOSRA : 決定論的手法コードシステム (MOdular System for Reactor Analyses)

MOX 燃料 : 混合酸化物燃料 (Mixed-Oxide Fuel)

MSSP : IAEA 保障措置技術支援計画 (Member State Support Programme)

MSR : 液体溶融塩炉 (Molten Salt Reactor)

MUF : 不明核質量 (Material Unaccounted For)

MYRRHA : 加速器駆動未臨界炉

(Multipurpose hYbrid Research Reactor for High-tech Applications, ベルギー)

N :

NCRP : 米国放射線防護測定協議会

(National Council of Radiation Protection and measurements)

NDA : 原子力廃止措置機関 (Nuclear Decommissioning Authority, 英)

NDA : 非破壊分析 (Non Destructive Assay)

NEI : 米国原子力エネルギー協会 (Nuclear Energy Institute)

NETEC : 原子力環境技術院 (Nuclear Environment TEChnology Institute, 韓)

NGNP : 次世代原子力プラント (Next Generation Nuclear Plant)

NGO : 非政府組織 (Non-Governmental Organizations)

NITI : アレクサンドロフ科学技術研究所

(Nauchno-Issledovatel'skii Tekhnologicheskii Institut im. A.P. Aleksandrova, ロシア)

NNL : 英国国立原子力研究所 (National Nuclear Laboratory Limited)

NORM : 自然起源の放射性物質 (Naturally Occurring Radioactive Material)

NPT : 核兵器の不拡散に関する条約

(Treaty on the Non-Proliferation of Nuclear weapons)

NR 物 : 放射性廃棄物でない廃棄物 (Non-Radioactive Waste)

NRC : 米国原子力規制委員会 (Nuclear Regulatory Commission)
NRTA 法 : 中性子共鳴透過分析法 (Neutron Resonance Transmission Analysis)
NSC : 原子力科学委員会 (Nuclear Science Committee)
NSRR : 原子炉安全性研究炉 (Nuclear Safety Research Reactor)
NuScale : NuScale Power 社 (米)

O :

OECD/NEA : 経済協力開発機構原子力機関
(Organisation for Economic Co-operation and Development, Nuclear Energy Agency)
ORG : オックスフォードリサーチグループ (Oxford Research Group, 英)
ORNL : オークリッジ国立研究所 (Oak Ridge National Laboratory)

P :

PAR : 静的触媒式水素再結合装置 (Passive Autocatalytic Recombiner)
PAZ : 予防的防護措置準備区域 (Precautionary Action Zone)
PB-FHR : 球形燃料フッ化物塩冷却高温炉
(Pebble Bed Fluorite High temperature Reactor)
PBMR : ペブルベッドモジュール型高温ガス炉 (Pebble Bed Modular Reactor, 南ア)
PCAST : 米国大統領科学技術諮問委員会
(President's Council of Advisors on Science and Technology)
PCV : 原子炉格納容器 (Primary Containment Vessel)
PFBR : 高速増殖原型炉 (Prototype Fast Breeder Reactor, インド)
PGA 法 : 即発捕獲ガンマ線分析法 (Prompt Gamma ray Analysis)
PGSFR : 高速増殖プロトタイプ炉 (Prototype of Gen-IV Sodium-cooled Fast Reactor)
PHWR : 加圧型重水炉 (Pressurized Heavy Water Reactor)
PIRT : 重要度ランク表 (Phenomena Identification and Ranking Table)
PONI : CSIS 傘下の核イシュープロジェクト (Project On Nuclear Issues)
POSTEC : 浦項工科大学校 (POhang university of Science and TEChnology, 韓)
PP : 核物質防護 (Physical Protection)
PRA : 確率論的リスク評価 (Probabilistic Risk Assessment)
PRIDE : 韓国のウラン試験用乾式処理試験施設
(PyRoprocess Integrated inactive DEmonstration facility)
PRISM : 革新的小型モジュール原子炉 (Power Reactor Innovative Small Module)
PSA : 確率論的安全評価 (Probabilistic Safety Assessment)
PSI : ポール・シェラー研究所 (Paul Scherrer Institute, スイス)
PSR : 定期的安全レビュー (Periodic Safety Review)
PSR+ : 予防的安全レビュー (Proactive Safety Review)
PUREX 法 : ウランとプルトニウムを回収する溶媒抽出法
(Plutonium Uranium Redox EXtraction)
PWR : 加圧水型原子炉 (Pressurized Water Reactor)

R :

- RCM : 信頼性重視保全 (Reliability Centered Maintenance)
RFI : 情報提供依頼 (Request For Information)
RFP : 提案提供依頼 (Request For Proposal)
ROX : 岩石型燃料 (Rock-like OXide)
RI : 放射性同位体 (RadioIsotope)
RODOS : 緊急時意思決定支援オンラインシステム
(Real-time On-line DecisiOn Support system)
RCM : 信頼性中心保全 (Reliability Centered Maintenance)
ROP : 原子炉監視システム (Reactor Oversight Process)
ROSA-V : 冷却材喪失事故模擬試験装置 (Rig Of Safety Assessment-V)
RPV : 原子炉圧力容器 (Reactor Pressure Vessel)
RWMC : 放射性廃棄物管理委員会 (Radioactive Waste Management Committee)

S :

- SAFR : ナトリウム冷却新型高速炉 (Sodium Advanced Fast Reactor)
SARNET : 過酷事故研究ネットワーク
(Severe Accident Research NETwork of excellence)
SARRY : 単純型汚染水処理システム－第二セシウム吸着装置－
(Simplified Active water Retrieve and Recovery sYstem)
SCC : 応力腐食割れ (Stress Corrosion Cracking)
SCK-CEN : ベルギー原子力研究センター
(StudieCentrum voor Kernenergie - Centre d'étude de l'Energie Nucléaire)
SF : 使用済燃料 (Spent Fuel)
SILEX 法 : レーザー原子法 (ウラン濃縮法の一つ)
(Separation of Isotopes by Laser EXcitation)
SINAP : 上海応用物理研究所 (Shanghai INstitute of Applied Physics)
SIPRI : ストックホルム国際平和研究所
(Stockholm International Peace Research Institute)
SJTU : 上海交通大学 (Shanghai Jiao Tong University)
SMART : システム一体型モジュラー炉
(System-integrated Modular Advanced ReacTor, 韓)
SNL : サンディア国立研究所 (Sandia National Laboratories)
SNERDI : 上海核工程研究設計院
(Shanghai Nuclear Engineering Research and Design Institute)
SNPSDC : 国家核ソフトウェア開発センター
(State Nuclear Power Software Development Center, 中)
SOARCA : 最先端技術に基づく原子力災害解析
(State-Of-the-Art Reactor Consequence Analyses)
SPEEDI : 緊急時迅速放射能影響予測ネットワークシステム

(System for Prediction of Environmental Emergency Dose Information)

SRAC : 決定論的手法コードシステム (Standard Reactor Analysis Code)

SVBR-100 : 鉛ビスマス冷却高速炉 (Svintsovo-Vismutovyi Bystryi Reaktor, ロシア)

T :

THAI2 計画 : 格納容器挙動研究計画 (容器冷却、水素、エアロゾル、ヨウ素など)
(Thermal-hydraulics, Hydrogen, Aerosols and Iodine)

T-MOX : トリウム・プルトニウム混合酸化物燃料 (Thorium-Mixed OXide)

TMSR : トリウム溶融塩炉 (Thorium Molten Salt Reactor)

TRISO : 被覆燃料粒子燃料 (TRistructural ISOtropic)

TRU 廃棄物 : 超ウラン元素 (TRans-Uranium) を含む放射性廃棄物

TSO : 技術支援機関 (Technical Support Organization)

TWR : 進行波炉 (Traveling Wave Reactors)

U :

UKAEA : 英国原子力公社 (United Kingdom Atomic Energy Authority)

U-MOX : ウラン・プルトニウム混合酸化物燃料 (Uranium-Mixed OXide)

UNSCEAR : 原子放射線の影響に関する国連科学委員会

(United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation)

URENCO : ウレンコ社 (英国、ドイツ、オランダが共同で出資するウラン濃縮会社)

USEC : ユーゼック (ウラン濃縮会社、米)

V :

V&V : 信頼性および妥当性検証 (Verification and Validation)

VEGA 実験 : 放射性物質放出実験

(Verification Experiments of radionuclides Gas/Aerosol release)

VHTR : 超高温炉 (Very High Temperature Reactor)

VVER : ロシア型加圧水型原子炉 (Voda Voda Energo Reactor)

W :

WAK : カールスルーエ再処理工場 (WiederaufarbeitungsAnlage Karlsruhe, ドイツ)

WCS 社 : 米国の廃棄物処分会社 (Waste Control Specialists)

WENRA : 西欧原子力規制者協会 (Western European Nuclear Regulators' Association)

WHO : 世界保健機構 (World Health Organization)

WIPP : 米国核廃棄物隔離試験施設 (Waste Isolation Pilot Plant)

WSPEEDI : 世界版緊急時迅速放射能影響予測ネットワークシステム (Worldwide version of System for Prediction of Environmental Emergency Dose Information)

X :

XJTU : 西安交通大学 (Xi'an Jiao Tong University)

Y:

YSZ : イットリア安定化ジルコニア (Yttria-Stabilized Zirconia)

Z:

ZWILAG : スイスの中間貯蔵施設会社 (Zwischenlager Wurenlingen AG)