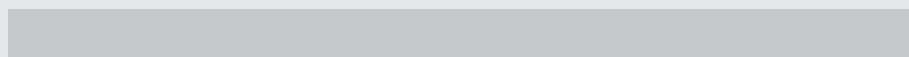


電力中央研究所
研 究 報 告 会
2 0 2 3

「原子力発電という選択肢を次の世代に引き継ぐために」



予 稿 集

2023 年 11 月 16 日 (木)

目次・プログラム

13:00	開 会	
	開会挨拶 理事長 平岩 芳朗	
13:10	【基調報告】 将来のエネルギーシステムを支える 原子力の論点と電中研の取り組み	1
13:45	エネルギートランスフォーメーション研究本部 研究統括室長 研究参事 飯塚 政利	
13:45	【個別報告】 (1) 原子力発電所の再稼働を支援する自然災害評価技術	19
14:15	原子力リスク研究センター 自然外部事象研究チームリーダー 研究参事 松山 昌史 サステナブルシステム研究本部 地質・地下環境研究部門 上席研究員 佐々木 俊法	
14:15	(2) 原子力発電の安全性向上と活用に向けた取り組み	37
14:45	原子力リスク研究センター 研究コーディネーター（リスク評価分野担当） 副研究参事 米田 公俊	
14:45	休 憩	
15:10	(3) 放射性廃棄物処分の実現に向けた研究開発	53
15:40	サステナブルシステム研究本部 研究統括室 原子力（廃棄物処分）分野統括 上席研究員 長谷川 琢磨	
15:40	(4) 原子力発電の継続的活用に向けた社会経済的課題	67
16:10	社会経済研究所 課題統括（原子力政策） 上席研究員 稲村 智昌	
16:10	(5) 次世代革新炉の安全性向上と早期導入に資する研究	83
16:40	エネルギートランスフォーメーション研究本部 研究統括室 研究戦略担当（次期原子炉） 副研究参事 宇井 淳	
	閉会挨拶 専務理事 犬丸 淳	
16:45 (予定)	閉 会	



【基調報告】

将来のエネルギーシステムを支える 原子力の論点と電中研の取り組み

電力中央研究所
エネルギートランスフォーメーション研究本部
研究統括室長・研究参事 飯塚 政利

研究報告会2023
2023年11月16日

 電力中央研究所

© CRIEPI 2023



 電力中央研究所

本報告でお伝えしたいこと

- 脱炭素、エネルギー安全保障などの観点から、国内外で原子力発電利用に対する前向きな情勢変化が見られるが、依然として原子力には**技術的、経済的、社会的な観点から解決すべき課題**が残されている。
- これらの多種多様な課題を俯瞰し、**4つの論点に整理**した。
- それぞれの論点に対し、**着実な技術開発**およびその成果に基づく**客観的な評価**を重ねていかなければならない。

© CRIEPI 2023

1

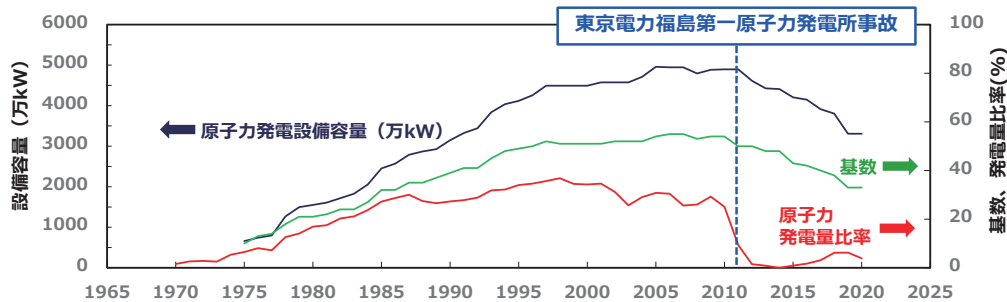
報告内容

1. 原子力をとりまく状況と背景
2. 将来にわたって原子力を活用していくための論点の俯瞰的整理
3. 電力中央研究所における取り組みの概要
4. まとめ

報告内容

1. 原子力をとりまく状況と背景
2. 将来にわたって原子力を活用していくための論点の俯瞰的整理
3. 電力中央研究所における取り組みの概要
4. まとめ

日本における原子力政策の推移



資源エネルギー庁「エネルギー白書2023」（HTML版）、電気事業連合会「電気事業のデータベース（INFOBASE）」などを基に電中研にて作成

2012年「2030年代に原発稼働ゼロを可能に」革新的・エネルギー環境戦略

2014年「原子力は可能な限り依存度を低減」第4次エネルギー基本計画

2015年「原子力発電比率を20～22%に」長期エネルギー需給見通し

2018年「原子力を含めたあらゆる選択肢を追求」

… 第5次エネルギー基本計画

2021年「必要な規模を持続的に活用」

… 第6次エネルギー基本計画

2023年「安全性の確保を大前提に原子力発電を今後も活用」、
「再稼働、運転期間延長、新增設、次世代革新炉など」

… GX 実現に向けた基本方針

S+3Eの原則

- ✓ 安全性(Safety)
- ✓ 安定供給(Energy Security)
- ✓ 経済効率性(Economic Efficiency)
- ✓ 環境適合(Environment)

近年の各国動向（1/2）



ドイツ：2002年の脱原子力法制化以降、2度にわたって閉鎖を延期したが、**2023年4月に最後の3基を停止、脱原子力完遂**



イギリス：原子力比率向上（**現状15%→2050年までに25%**）を目指し、原子力導入拡大を進行中。高温ガス炉を含む**SMR**も開発中



フランス：原子力低減の目標を撤回。**2050年までに革新軽水炉6基を建設し、加えて8基の建設に向けた検討を開始**。エネルギー安全保障確保に向けて原子力産業への政府出資比率を増大



米国：既設炉に対する運転継続支援プログラムを実施。原子炉の投資リスク低減のため、補助金を活用して**さまざまな小型原子炉を開発中**



EU：2022年、制限付き※で**原子力をEUタクソノミー（環境的に持続可能な経済活動の分類）に追加**

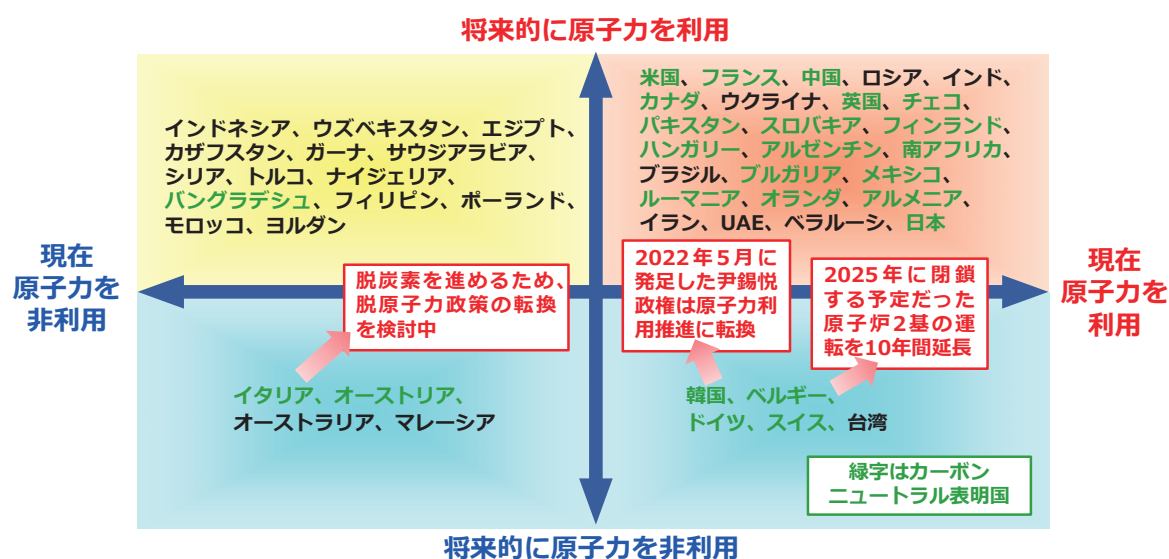
※新設は「利用可能な最良の技術」を用いること、既設設備の改修は「合理的に実装可能な安全性の向上」を図ること。また、新設は2045年までに、既設設備の改修は2040年までに認可取得が必要

近年の各国動向（2/2）

-  中国：世界で建設中の原子炉の大半を占める。高温ガス炉、高速炉開発なども積極的に推進
-  カナダ：ダーリントン原子力発電所の30年間運転延長に向けた改修工事が一部完了。3つの州の間でSMRの開発と実用化の加速に向けた協力覚書を締結し、導入計画が進展中
-  チェコ：建設が予定されている大型軽水炉への採用に向けた関連米国企業との覚書を締結。各種SMRの導入も検討中
-  ポーランド：2040年頃までに最大6基の大型炉の建設を計画。各種SMRの導入も検討中（高温ガス炉に関する日本原子力研究開発機構との研究協力も）
-  ガーナ：SMR導入でアフリカの牽引役となることを支援するため、日米両国が提携

各国の動向

- 現在原子力を利用していない国の中でも将来的に利用の動き
- 現在原子力を利用している国の多くは、将来も利用を継続する見通し。こうした国の多くはカーボンニュートラルを表明



脱炭素化に向けた電源構成

- ✓ 温暖化を1.5℃あるいは2℃に抑えるためには、急速（緊急）かつ大幅な温室効果ガス排出削減が必要
- ✓ 脱炭素化に向け、**再エネ、原子力、およびCCSなどのゼロエミッション火力**の3つが有力
- ✓ 自給率向上と安定供給の観点から、**バランスのとれたエネルギーミックス**が重要

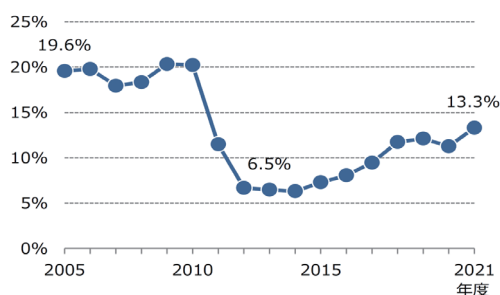


資源エネルギー庁「日本のエネルギー：エネルギーの今を知る10の質問」（2023年2月）より

エネルギー安全保障

- 日本にはエネルギー安全保障上の大きな課題あり
 - 低いエネルギー自給率 13.3%（2021年度）
 - 高い化石燃料依存度 83.2%（2021年度）
 - 国際間の燃料パイプラインや多国間送電網なし
- **再エネ拡充、備蓄の点で有利な原子力利用が重要**

日本のエネルギー自給率
(IEAベース) の推移



資源エネルギー庁「令和3年度におけるエネルギー需給実績（確報）」（2023年4月）より

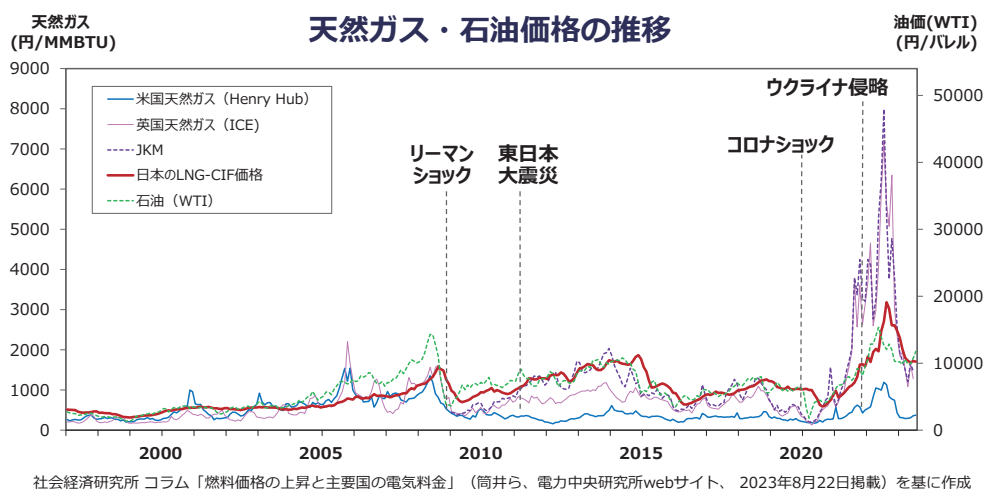
100万kWの原子力発電所と同じ年間
発電量を得るのに必要な燃料（左）
と国内在庫日数（右）

原子力 (濃縮ウラン)	21トン	原子力 (ウラン)	約2.9年分
天然ガス	950,000トン	天然ガス	約20日分
石油	1,550,000トン	石油	約200日分
石炭	2,350,000トン	石炭	約29日分

資源エネルギー庁「原子力政策の課題と対応について」（2021年2月）より

エネルギー価格が経済に与える影響

- ロシアのウクライナ侵略等による国際関係の緊張、需給のひっ迫、経済ブロック化の懸念、長期的な需要増大などに伴い**エネルギー資源価格は大きく変動**
- インフレ、円安が重なり、わが国の**経済に大きな影響**

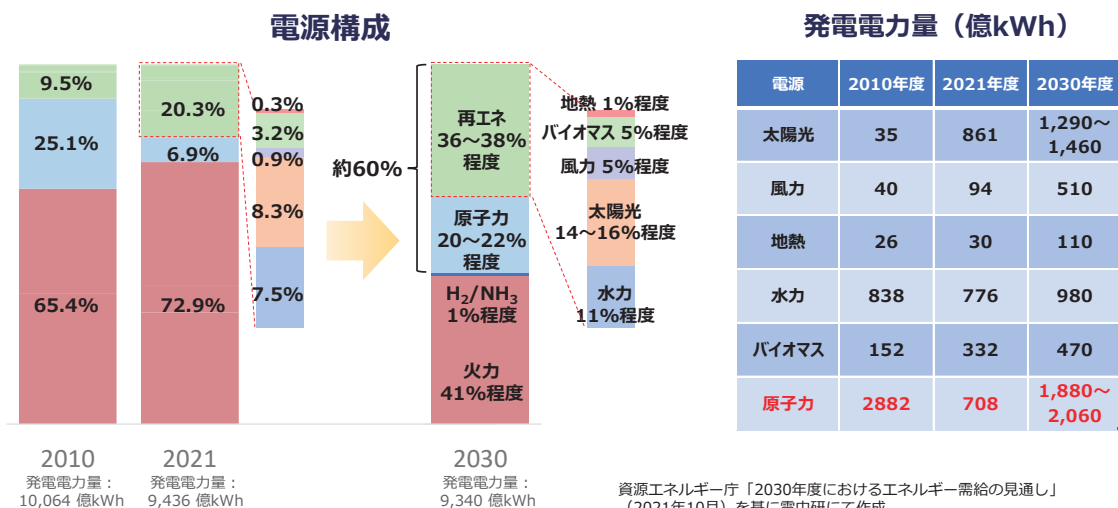


© CRIEPI 2023

10

脱炭素進展時の電源構成における原子力

- 脱炭素、エネルギー安全保障などの観点から、原子力発電を継続し、**2030年度には2021年比で3倍程度の発電量に拡大し、再エネとの合計で電源構成における比率を約60%**とすることが期待されている。

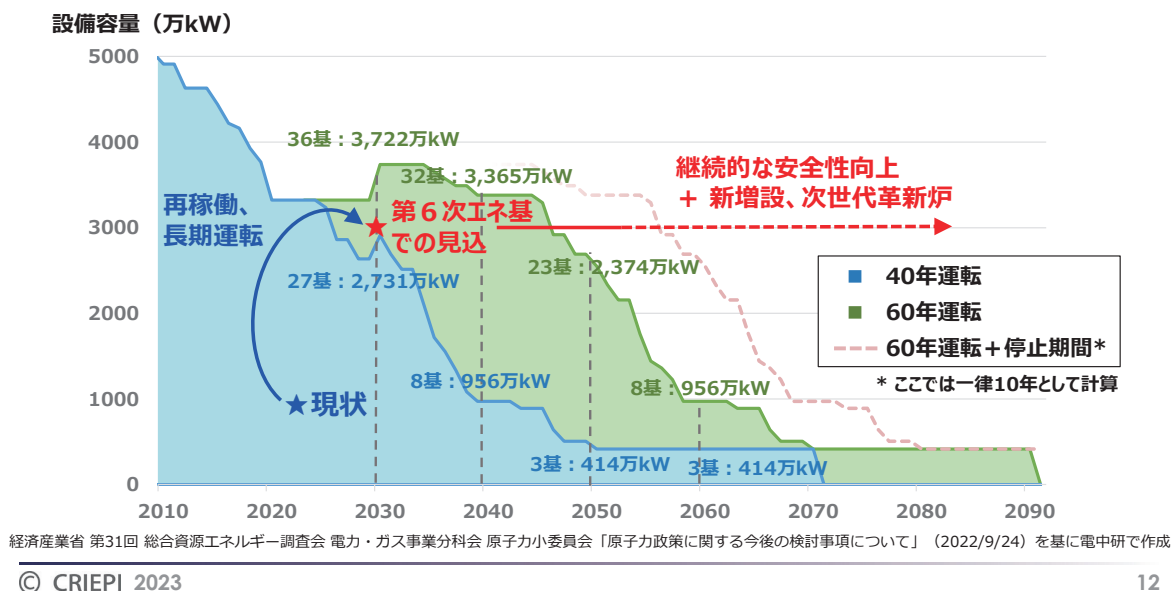


© CRIEPI 2023

11

原子力発電所の設備容量見通し

- 原子力が将来のエネルギーシステムを支えていくためには、**再稼働、長期運転、継続的な安全性向上、新增設などを着実に実現**していく必要あり。



12

原子力利用の継続・拡大における課題

原子力利用に対する期待の高まりなどの前向きな情勢変化が見られる一方、**利用の継続と拡大にあたっては多くの課題と達成すべき目標**あり。

■ 福島第一原子力発電所事故が明らかにした課題

- 地震、津波等のリスク
- 原子力発電の安全性
- 行政、事業者への信頼、対話と信頼獲得

■ 技術的な達成目標

- 安全性、経済性の向上
- 再処理・廃棄物処分による核燃料サイクル完結、など

■ 経済的、社会的な課題

- 投資回収スキーム、訴訟、規制、廃棄物処分事業に関わる制度検討
- 教育、技術継承、事業継続、サプライチェーン維持

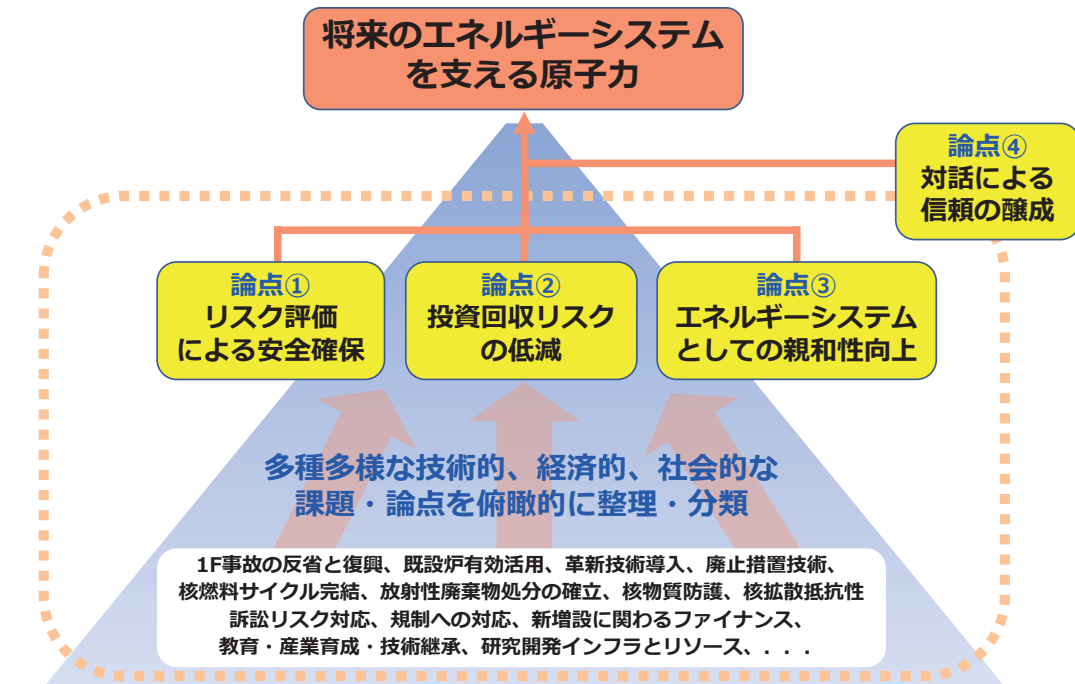
報告内容

1. 原子力をとりまく状況と背景
2. 将来にわたって原子力を活用していくための論点の俯瞰的整理
3. 電力中央研究所における取り組みの概要
4. まとめ

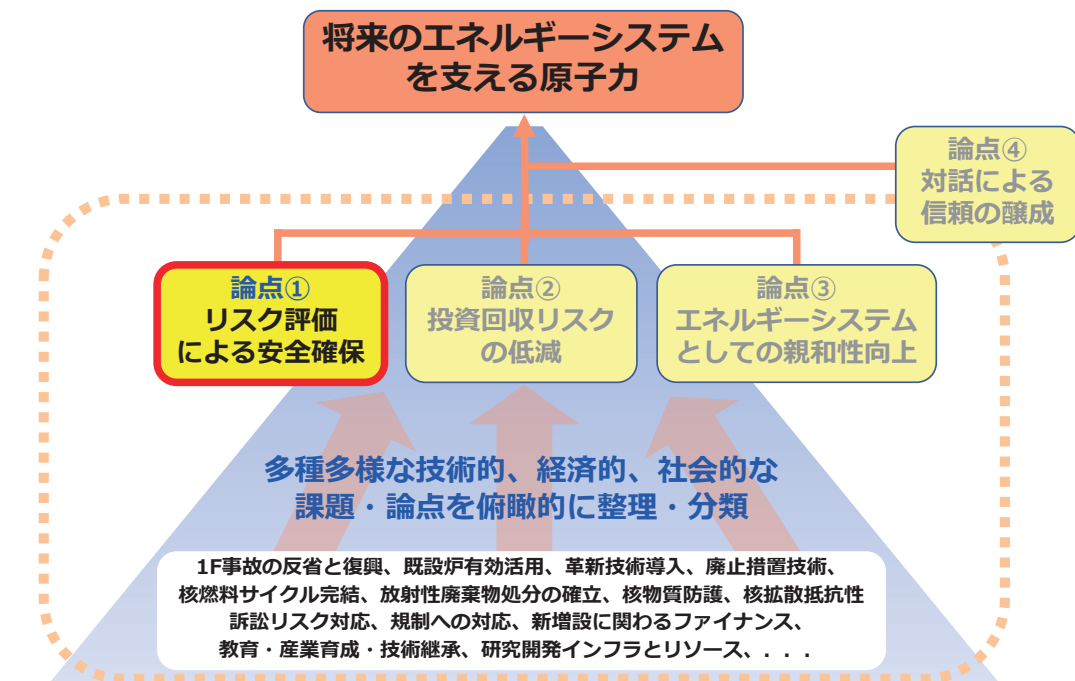
論点整理の必要性

- 原子力利用の継続・拡大にあたって、**多くの課題と達成目標が残されている。**
- 福島第一原子力発電所事故からの回復・復興の途上にあるわが国においては、より一層の努力が必要
- 原子力利用を推進する機運の高まりは、**直ちにこれらの課題の解決をもたらすものではなく、課題と目標の明確化ならびに解決に向けた行動の契機**とすべき。
- **着実な技術開発およびその成果に基づく客観的な評価**のため、多様な課題と達成すべき目標を論点整理し、広く共有する必要がある。

論点の抽出、整理



論点① リスク評価による安全確保



論点① リスク評価による安全確保 (1/2)

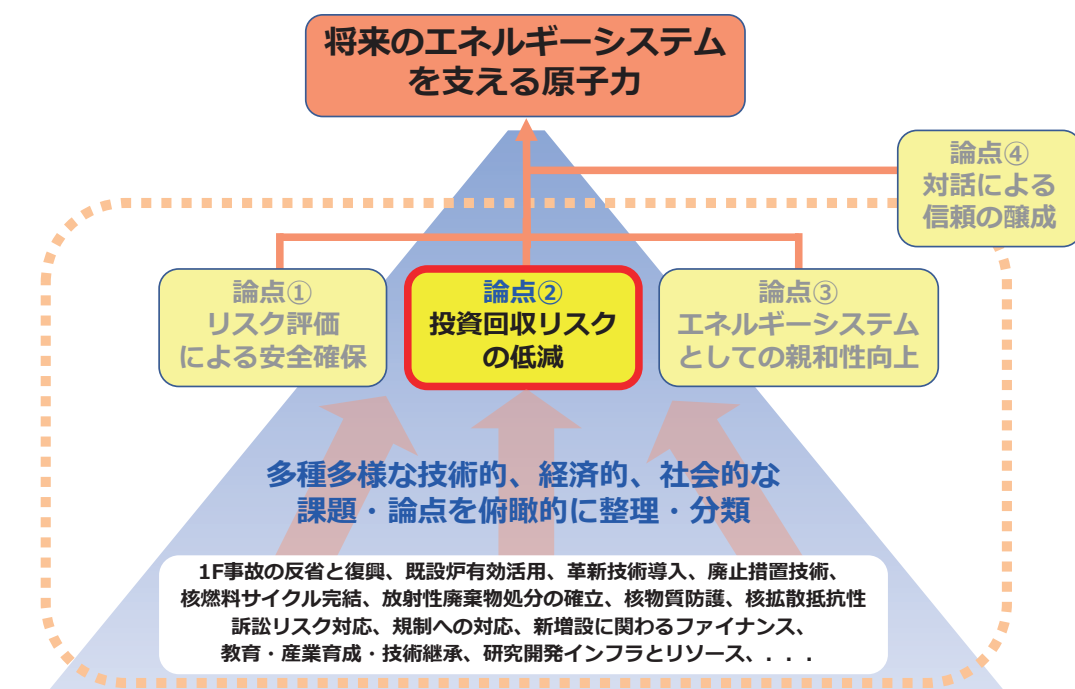
- 「安全」とは、「許容不可能なリスクがないこと」（国際規格 ISO/IEC Guide 51:2014における定義）
- 許容不可能なリスクがない状態は、**リスク低減プロセス（リスク分析・評価＋リスク低減方策）を繰り返す**ことにより達成される。
- 福島第一原子力発電所事故を起こし、社会に大きな被害を及ぼしたことを踏まえ、原子力の利用において安全の確保は最も重要な課題
- 安全性向上への取り組みにより、一部の原子力発電所は再稼働に至っているが、**脆弱な部分が残っている可能性**を常に意識し、それを見つけて**出して対策を図っていく**行動を続けなければならない。

論点① リスク評価による安全確保 (2/2)

個別報告2にて詳述

- 原子力発電所のリスクとは、**炉心損傷、放射性物質の外部放出、それによる周辺住民の健康被害等**が生じる可能性とその影響度
- 原子力発電所のリスク評価
 - **さまざまな対象**（自然災害、人間信頼性、原子炉以外の施設など）を評価できる技術が必要
 - **リスクの許容範囲とその判断基準**を明示することが必要
- 例えば、地震、津波、強風（竜巻・台風）、火山噴火等の原子力発電所のリスク評価技術への要求
 - **災害の規模**（揺れ、津波高さ、風速、噴火規模・時間）と**頻度の的確な評価**
 - それによって、**原子力発電所に生じる影響の評価** 個別報告1にて詳述
- **完成されたリスク評価、リスクマネジメントはない。取りうるベストな選択を常に追求**していくことが必要

論点② 投資回収リスクの低減



論点② 投資回収リスクの低減 (1/2)

■ 社会経済的側面から見た原子力の特徴

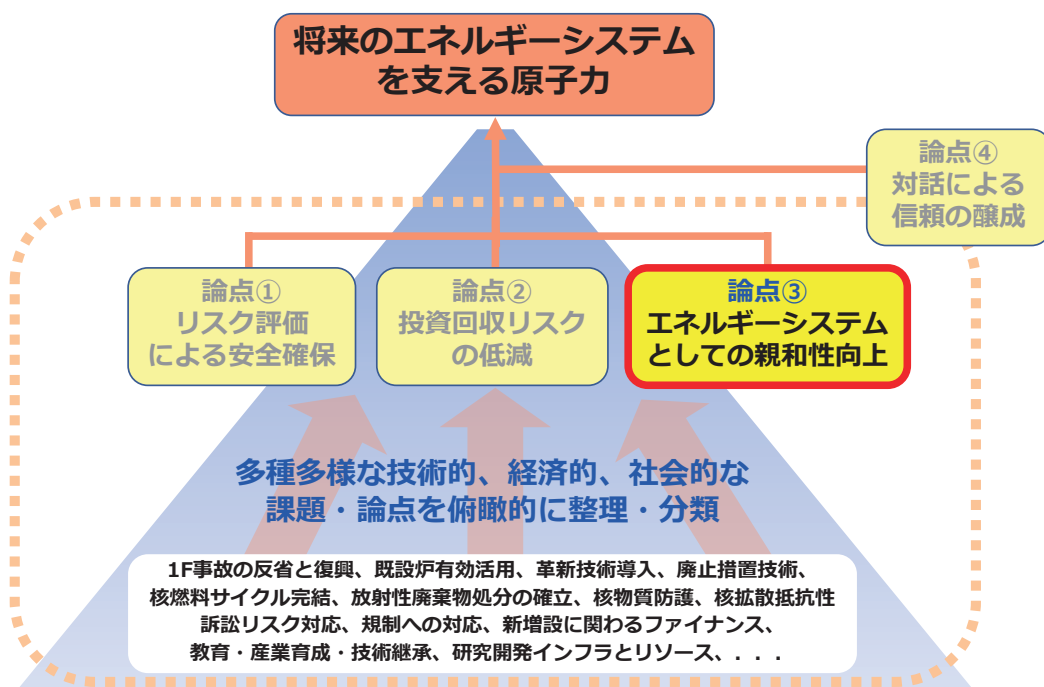
- 新增設における**巨額の初期投資**と極めて長い建設リードタイム
- 長期の投資回収期間
 - ✓ 他電源と比較して**低い運用コスト (kWh当たり)**
 - ✓ **長期にわたる安定運転**により投資回収を見通すことが必要
- 社会的理由による事業継続性への影響
 - ✓ **訴訟**：運転差し止め訴訟等
 - ✓ **規制**：審査の長期化による総事業費の上振れ、バックフィット等による追加コストの可能性
 - ✓ **人材、技術**：長期的な人材、知見、産業基盤の維持が必要
- 将来的な負担
 - ✓ **放射性廃棄物処分事業における不確実性**

論点② 投資回収リスクの低減 (2/2)

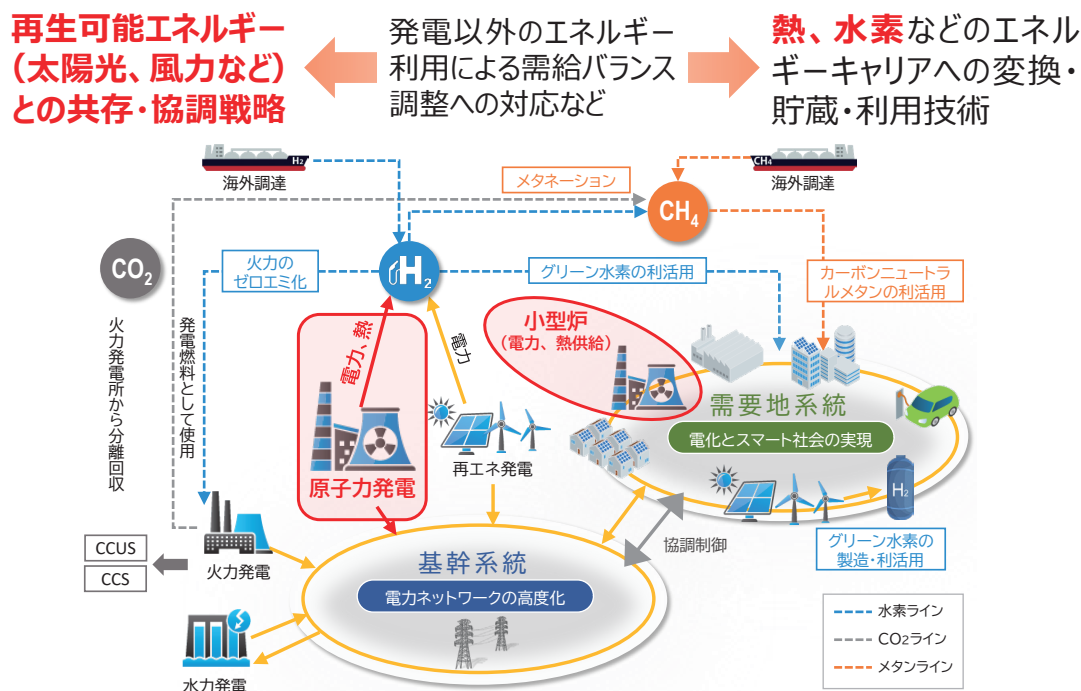
個別報告4にて詳述

- 既設炉の活用に向けた法制度的な論点
 - 十分な経年化管理を前提とする**更なる長期運転**
 - 規制対応等による**追加コストの回収が可能な電力市場**
 - 訴訟に伴う**運転差し止め仮処分**、事業者の損害への対応
- 新規投資に向けた社会経済的な論点
 - **初期投資回収のための収益の予見性向上**
 - 審査の長期化等による**総事業費の上振れへの対応**
- バックエンド事業を巡る政策・制度に関する論点
 - 放射性廃棄物処分に関する**国と事業者の費用・リスクの分担**
- 人材・知見とサプライチェーンの維持に関する課題
 - 長期的視点での**人材育成**支援策、**研究開発インフラの維持・整備**、**サプライチェーン維持**のための施策

論点③ エネルギーシステムとしての親和性向上



論点③ エネルギーシステムとしての親和性向上 (1/2)



© CRIEPI 2023

24

論点③ エネルギーシステムとしての親和性向上 (2/2)

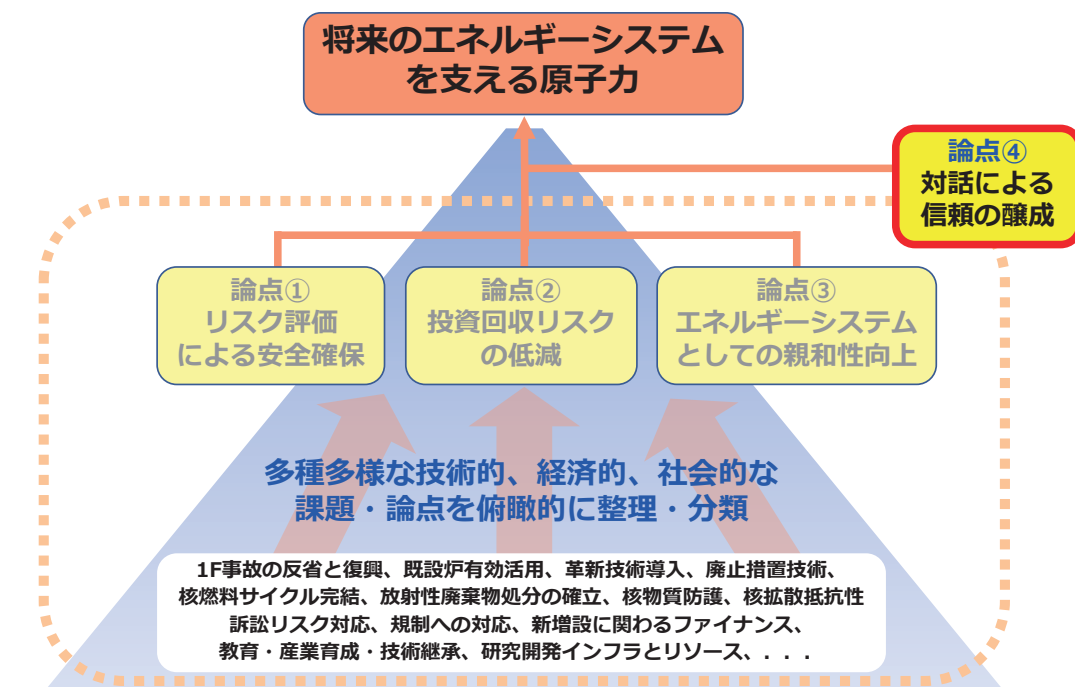
- 産業、生活における便益
 - 医療、農業、工業などへの放射線利用拡大
 - リサイクル、環境への影響低減
 - 核燃料物質の利用効率向上、Pu蓄積量および放射性廃棄物に含まれる放射能低減を目指した**高速炉燃料サイクル開発**
 - 社会の変化・流れとの整合性
 - 安全確保を前提とした**導入スピードと経済性の向上**（標準化、モジュール生産、など）
 - **立地・規模の柔軟性（小型炉など）**
- 個別報告5にて詳述

個別報告5にて詳述

© CRIEPI 2023

25

論点④ 対話による信頼の醸成



論点④ 対話による信頼の醸成（1/2）

- 原子力は多量かつ安定したエネルギーをもたらす一方、利用に伴って潜在的なリスクと放射性廃棄物も発生
- ↓
- 安全協定や防災（事故時対応）などを通じた立地地域・住民との共栄が不可欠
- **透明性が高く、視野の広い対話**を続けることにより、**技術と事業者に対する社会からの信頼を築いていく**ことが必要
 - エネルギー政策や社会像全体の中での再エネと原子力
 - 今後達成すべき課題
 - 事業者にとって都合のよいことも悪いことも
- **原子力行政や原子力規制機関**に対する社会からの信頼、ならびに**事業者を含めた関係者間の対話と信頼**も重要

論点④ 対話による信頼の醸成（2/2）

- **発電所の安定運転に加えて、放射性廃棄物処分に関する科学的知見の蓄積※、コンプライアンスを遵守した経営**についても、弛まぬ実績の積み重ねとレベルアップが求められる。

※ 断層活動性の評価方法、
地下における自然事象の評価技術、
廃棄体および人工／天然バリアの長期安全評価技術、
地下水年代測定による地質環境評価、など

[個別報告3にて詳述](#)

- **研究や技術開発に携わる者**にも、社会との対話と信頼の醸成に向けた**積極的な情報発信**が必要。原子力に関わる技術の意義や価値の発信など、**人材育成や技術継承につながる行動**も重要

報告内容

1. 原子力をとりまく状況と背景
2. 将来にわたって原子力を活用していくための論点の俯瞰的整理
3. 電力中央研究所における取り組みの概要
4. まとめ

当所における原子力分野の研究の基本方針

原子力の安全性向上

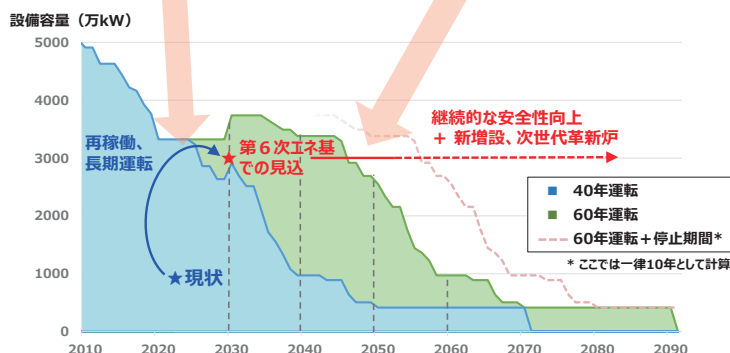
- ・確率論的リスク評価(PRA)手法開発・自然外部事象評価
- ・炉内熱流動事象解明・燃料健全性評価など

原子炉の長期運転

- ・経年劣化評価・定検短縮に向けた保全合理化研究

革新軽水炉開発

- ・革新軽水炉等の研究開発状況調査
- ・事故耐性燃料など革新技術開発
- ・新増設・リプレースに備えた設計段階でのPRA適用



原子力利用の持続性確保

- ・使用済燃料貯蔵技術の合理化・再処理工場の安定運転支援
- ・次期再処理工場の仕様検討・放射性廃棄物処分の合理化・経年炉の廃止措置技術開発
- ・1F廃炉支援・高速炉サイクル技術開発・放射線安全規制強化への対策など

原子力発電の活用に向けた社会経済的課題への対応

- ・バックエンド事業、既設炉活用、新規投資に向けた事例研究と事業環境整備のあり方検討
- ・リスクコミュニケーション研究

© CRIEPI 2023

30

本日の個別報告

個別報告 1

原子力発電所の再稼働を支援する自然災害評価技術

- ・地震、津波、竜巻、火山に関する技術課題と対応状況
- ・再稼働支援の重要課題である断層活動性評価技術の適用事例と最新評価法

個別報告 2

原子力発電の安全性向上と活用に向けた取り組み

- ・確率論的リスク評価手法の開発状況
- ・保全・検査の合理化の検討、プラント設備の経年劣化事象に対する健全性評価技術の高度化

個別報告 3

放射性廃棄物処分の実現に向けた研究開発

- ・放射性廃棄物処分の性能と安全性を評価する上で重要な、地質環境と人工・天然バリアの特性評価に関する研究開発の状況と貢献事例

個別報告 4

原子力発電の継続的活用に向けた社会経済的課題

- ・既存原子力発電所の活用、次世代革新炉への建て替え、バックエンド事業の推進に関する社会経済的課題の整理と解決に向けた研究事例

個別報告 5

次世代革新炉の安全性向上と早期導入に資する研究

- ・次世代革新炉の成立性確認に必要な技術的根拠の取得、立地自由度の拡大、原子炉の安全性を建設前に確認する方法の構築に向けた取り組み

論点①

リスク評価による安全確保

論点④

対話による信頼の醸成

論点②

投資回収リスクの低減

論点③

エネルギーシステムとしての親和性向上

© CRIEPI 2023

31

報告内容

1. 原子力をとりまく状況と背景
2. 将来にわたって原子力を活用していくための論点の俯瞰的整理
3. 電力中央研究所における取り組みの概要
4. まとめ

まとめ

- 脱炭素、エネルギー安全保障などを重要視する観点から、国内外で原子力発電利用に対する期待の高まりなどの情勢変化が見られる。
- 将来にわたって原子力を継続・拡大利用していく上で残されている多種多様な課題を俯瞰し、**①リスク評価による安全確保、②投資回収リスクの低減、③エネルギーシステムとしての親和性向上、④対話による信頼の醸成**、の4つに論点整理し、達成すべき目標を提示した。
- 現在の情勢を、上記の論点における課題を解決し、原子力発電という選択肢を次の世代に引き継ぐ**契機**と捉え、**着実な技術開発、およびその成果に基づく客観的な評価**を続けていくことが重要である。

ご清聴ありがとうございました



参考文献

1. 資源エネルギー庁「エネルギー白書2023（HTML版）」、資料【第214-1-6】発電電力量の推移
(<https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2023/html/data/214-1-6.xlsx>)
2. 電気事業連合会「電気事業のデータベース（INFOBASE）」
(<https://www.fepc.or.jp/library/data/infobase/>)
3. 日本原子力産業協会「日本の原子力発電炉（運転中、建設中、建設準備中など）」（2023年10月10日）
(https://www.jaif.or.jp/cms_admin/wp-content/uploads/2023/10/jp-npps-operation20231010.pdf)
4. 資源エネルギー庁「原子力政策の課題と対応について」（2021年2月）
(https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/genshiryoku/pdf/021_03_00.pdf)
5. 資源エネルギー庁「日本のエネルギー：エネルギーの今を知る10の質問」（2023年2月）
(<https://www.enecho.meti.go.jp/about/pamphlet/energy2022/005/#section1>)
6. 資源エネルギー庁、「令和3年度におけるエネルギー需給実績（確報）」（2023年4月）
(https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total_energy/pdf/honbun2021fykaku.pdf)
7. 筒井、澤部、社会経済研究所 コラム「燃料価格の上昇と主要国の電気料金」（2023年8月）
(<https://criepi.denken.or.jp/jp/serc/column/column65.html>)
8. 資源エネルギー庁、「2030年度におけるエネルギー需給の見通し」（2021年10月）
(https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/)
9. 経済産業省、第31回 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、「原子力政策に関する今後の検討事項について」（2022/9/22）
(https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/)

【個別報告 1】

原子力発電所の再稼働を支援する 自然災害評価技術

電力中央研究所

原子力リスク研究センター 自然外部事象研究チーム
チームリーダー 研究参事 松山 昌史

サステナブルシステム研究本部 地質・地下環境研究部門
兼 原子力リスク研究センター 自然外部事象研究チーム
上席研究員 佐々木 俊法

研究報告会2023
2023年11月16日

電力中央研究所

© CRIEPI 2023

電力中央研究所

本報告でお伝えしたいこと

- 電中研では、長年蓄積してきた自然災害評価・対策に関する現場調査・観測、実験、解析・分析といった基盤技術を基に、科学的根拠に基づいて原子力発電所の再稼働を支援していること
- これらの基盤技術は、再稼働支援にとどまらず、さらなる安全性向上を事業者と共に進めるために、今後も維持・発展させること

報告内容

1. 原子力発電所における自然災害評価技術

- 福島第一原子力発電所事故の教訓
- 事故の教訓を踏まえた新規制基準の概要
- 再稼働に係る科学的評価の取り組み
 - 断層活動性、地震動、津波、竜巻、火山



2. 原子力発電所の断層活動性評価手法の高精度化

報告内容

1. 原子力発電所における自然災害評価技術

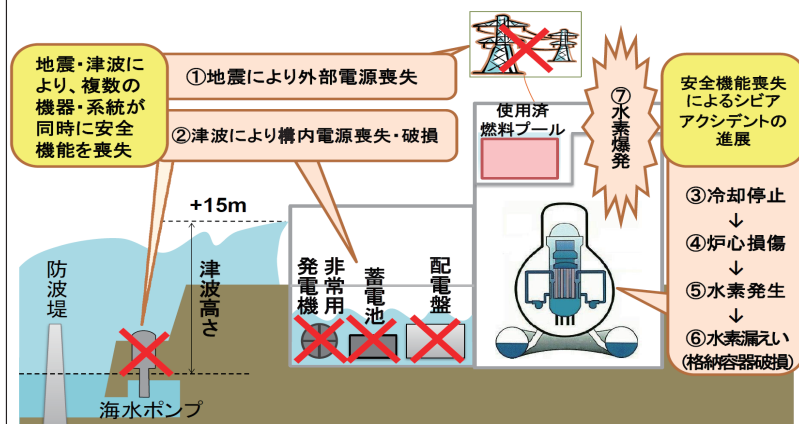
- 福島第一原子力発電所事故の教訓
- 事故の教訓を踏まえた新規制基準の概要
- 再稼働に係る科学的評価の取り組み
 - 断層活動性、地震動、津波、竜巻、火山



2. 原子力発電所の断層活動性評価手法の高精度化

福島第一原子力発電所事故の教訓

- 福島第一原発事故では地震や津波により、複数の機器・系統が同時に安全機能を喪失。
➢ さらに、その後のシビアアクシデントの進展を食い止めることができなかった。

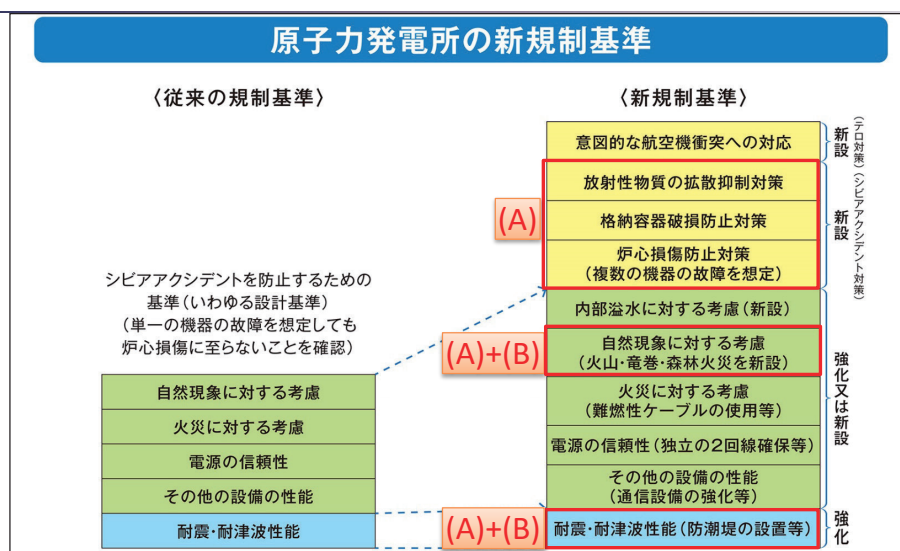


実用発電用原子炉に係る新規制基準について(2016)の図を一部修正

地震と津波による全電源喪失が原因

- (A)設計基準を超えるような自然災害が生じたときへの備え
(B)考慮すべき自然災害規模の増大に伴う設計基準の強化

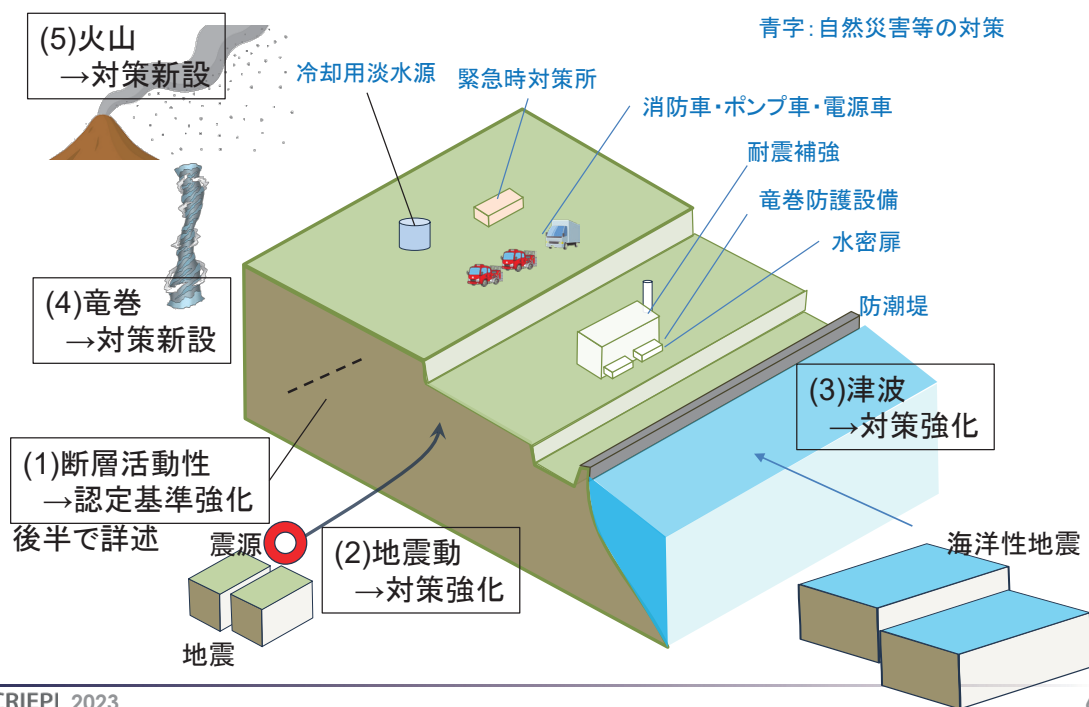
事故の教訓を踏まえた新規制基準の概要



実用発電用原子炉に係る新規制基準について(2016)の図を一部修正

- (A)設計基準を超えるような自然災害が生じたときへの備え
(B)考慮すべき自然災害規模の増大に伴う設計基準の強化

安全性評価・対策の対象となる自然災害



6

再稼働に係る科学的評価の取り組み：地震動(1/2)

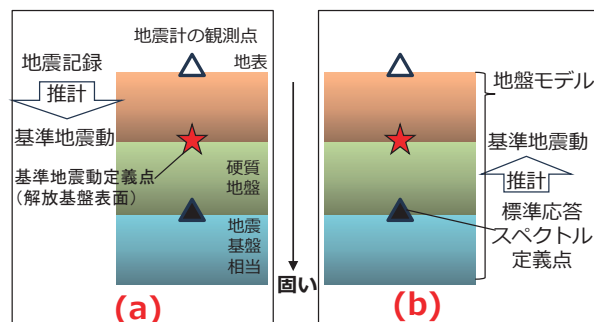
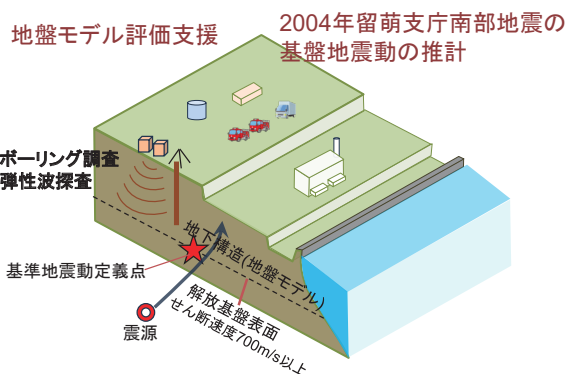
◆規制要求：(B)設計基準強化

- 安全性確保の基準となる地震動（基準地震動）は「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」及び「震源を特定せず策定する地震動」について、水平・鉛直方向の地震動としてそれぞれ策定し、耐震重要施設的安全機能を損なうおそれがないことを要求

◆評価のポイント

震源を特定せず策定する地震動

- 震源と活断層の関連づけが困難な過去の内陸地殻内の地震の記録の収集・分析（審査ガイド*、2013）
 - 地震動記録に含まれる観測点固有の影響評価と解放基盤面相当（基準地震動定義点）の記録への調整→(a)
- 2021年に導入された標準応答スペクトルによる基準地震動策定において、地盤モデルの精緻化が必要→(b)



再稼働に係る科学的評価の取り組み：地震動(2/2)

◆当所の取り組み

- 審査ガイド（2013）に例示された全国一律に考慮すべき地震のうち、最も影響の大きい2004年留萌支庁南部地震のK-NET港町での現地調査と基盤地震動の推計を実施→(a)

- 2021年の審査ガイドの改正において、代表的な地震動として取り扱われる。

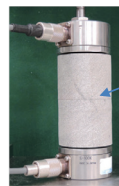
- 標準応答スペクトル導入に伴う地盤モデルの精緻化のため、岩石コアによる地盤減衰評価法を確立→(b)



K-NET港町の地震観測所

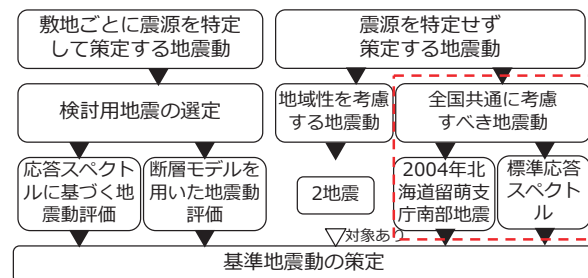


ボーリング調査



人工的に亀裂

亀裂の有無による地盤減衰の評価実験



審査ガイド改正(2021)による基準地震動の策定フロー
赤枠が本報告で示した取り組み(佐藤(2022)を基に作成)

再稼働に係る科学的評価の取り組み：津波

◆規制要求：(B)設計基準強化

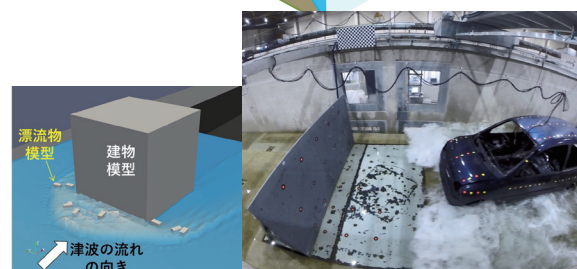
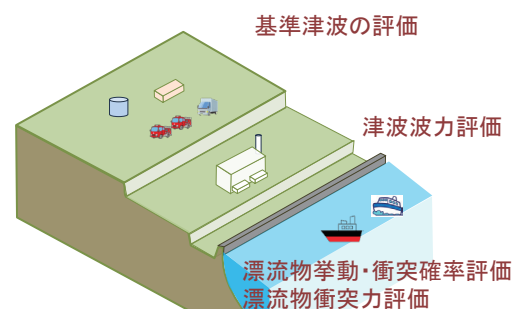
- 津波防護が必要な施設に大きな影響を及ぼす恐れのある津波(基準津波)に対して、安全機能が損なわれるおそれのないことを要求

◆評価のポイント

- 基準津波策定において、国内外の地震及び火山の山体崩壊や地すべりなどによる津波事例を踏まえて検討
- 基準津波に対して、防護施設の設置などにより安全上重要な施設の設置位置に津波を侵入させないことを基本

◆当所の取り組み

- 基準津波策定における考え方や不確かさの考慮方法の確立
- 津波の波力や漂流物衝突による防護施設への影響に関する評価法の確立



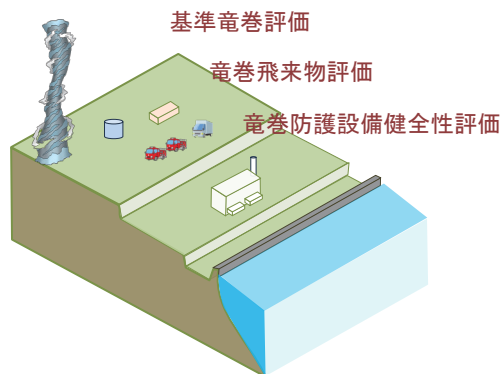
再稼働に係る科学的評価の取り組み：竜巻(1/2)

◆規制要求：(B)設計基準強化

- 竜巻防護が必要な施設に大きな影響を及ぼす恐れのある竜巻(基準竜巻)に対して、安全機能が損なわれるおそれのないことを要求

◆評価のポイント

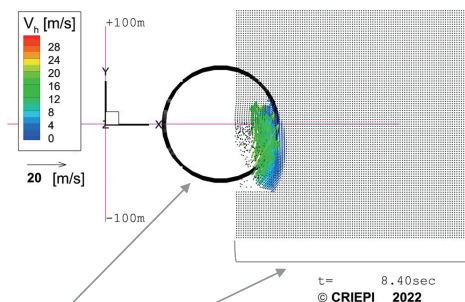
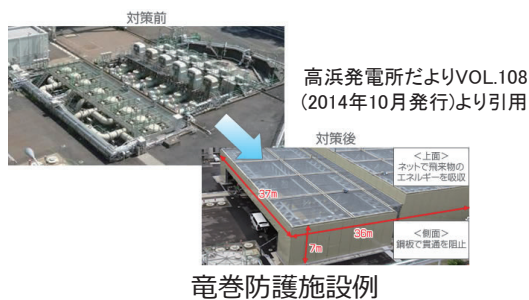
- 基準竜巻の設定
 - 最大風速は下記の内大きな風速を採用
 - 過去に発生した竜巻の最大風速
 - 竜巻風速ハザード曲線の年超過確率 10^{-5} に相当する風速
- 基準竜巻による設計竜巻及び設計荷重の評価
 - 設計荷重として飛来物衝突荷重評価が必要
 - 飛来物衝突荷重に対して竜巻防護施設の構造健全性等が維持されることを確認



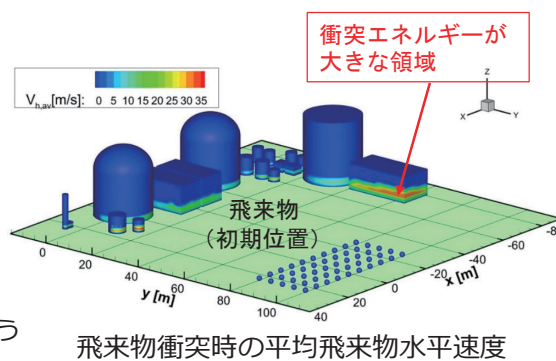
再稼働に係る科学的評価の取り組み：竜巻(2/2)

◆ 当所の取り組み

- 竜巻ハザード曲線策定、基準竜巻の設定方法
- 竜巻飛来物数値解析による影響評価(江口、2021)
- 竜巻防護施設の設計方法及び健全性の確認(南波、2019)



竜巻（左から右に移動する黒円）の通過に伴う物体（右側にある多数の黒丸）の飛散挙動



飛来物衝突時の平均飛来物水平速度

再稼働に係る科学的評価の取り組み：火山

◆規制要求：(B)設計基準強化

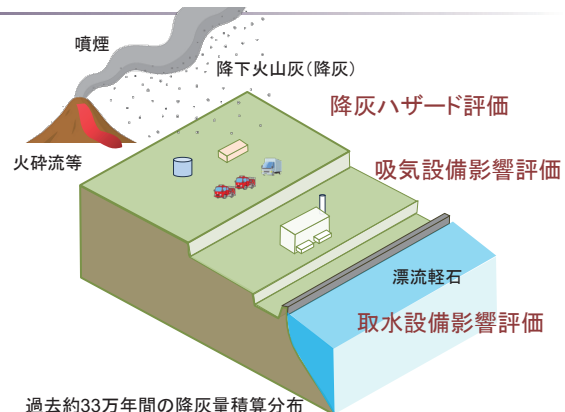
- 設計対応不可能な火砕流等の火山事象の到達可能性が十分に小さいこと（立地評価）、加えて降灰等による設備影響評価（影響評価）をそれぞれ要求

◆評価のポイント

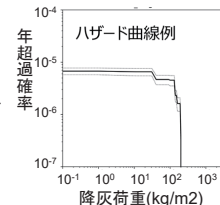
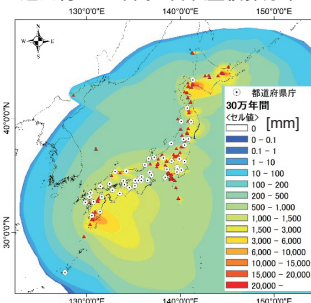
- 降灰評価、降灰等による設備影響評価とも実績が少なく、蓄積が必要
- 多様な火山事象に関し、新知見への対応や文献資料の網羅性が必要

◆当所の取り組み

- 地質調査により降灰、漂流軽石等の発生履歴を解明
- 降灰データベースを構築し、降灰層厚ハザード曲線策定技術
- 数値解析による噴煙拡散・降灰現象の定量評価技術
- 非常用電源等の吸気設備に対する粒子吸引量評価技術



過去約33万年間の降灰量積算分布



原子力発電所における自然災害評価技術

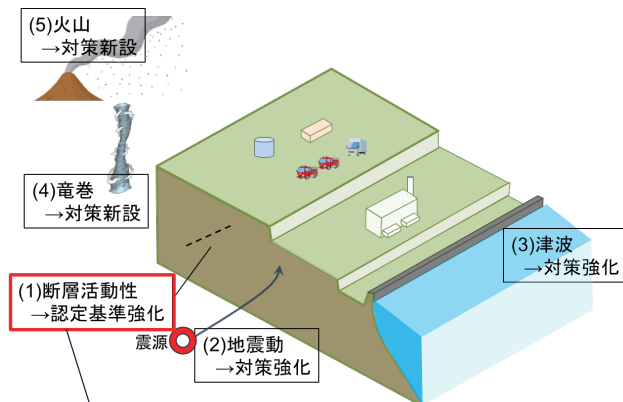
◆まとめ

- 蓄積してきた自然災害評価・対策に関する基盤技術を基に、科学的根拠に基づいて原子力発電所の再稼働を支援

- 現地調査・観測
- 実験検証
- 各種解析・分析

- さらなる安全性向上を事業者と共に進めるため、これらの基盤技術を高度化し、リスク評価技術の構築へ

個別報告(2)で説明



断層活動性評価の詳細を続けて報告

報告内容

1. 原子力発電所における自然災害評価技術

- 福島第一原子力発電所事故の教訓
- 事故の教訓を踏まえた新規規制基準の概要
- 再稼働に係る科学的評価の取り組み

■ 断層活動性、地震動、津波、竜巻、火山



2. 原子力発電所の断層活動性評価手法の高精度化

2. 原子力発電所の断層活動性評価手法の高精度化

原子力発電所の断層活動性評価手法の高精度化



2011年福島県浜通りの地震（M7）に伴う地表地震断層（湯ノ岳断層）の出現

背景

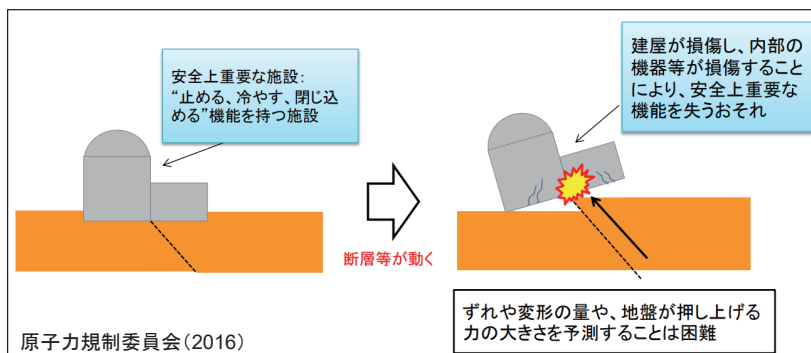
2013年に始まった原子力規制委員会の新規制基準適合性審査においては、耐震重要構造物直下の断層が活断層ではないことを明確に示すことが要求されるようになった。

目的

12.5万年前より古い上載地層の認定の高精度化および断層の破碎部性状に基づく活動性評価手法の確立が急務となった。

手法

- ①精度の高い堆積物の年代推定（上載地層法）
- ②最新鋭の装置群を用いた断層活動性分析フローの確立（鉱物脈法）



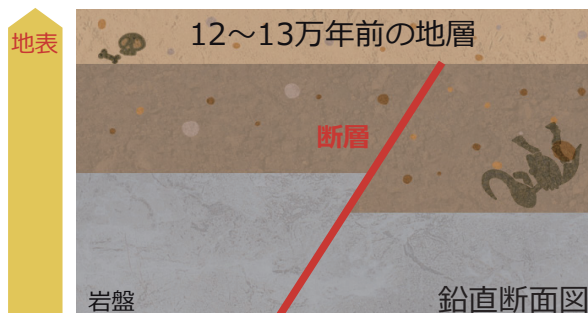
断層活動性評価の基本となる手法（上載地層法）

原子力発電所において耐震設計上考慮する活断層

後期更新世（約12～13万年前）以降の活動性が否定できない断層

断層上載地層法（緒方・本荘，1981）

活断層ではないことを証明できるケース



トレンチ調査の例

1945年三河地震時に活動した深溝断層トレンチ調査



ただし、12～13万年前の地層がない場合には、岩盤内の断層破碎帯の性状等により、活断層かどうかを評価しなければならない。

評価手法の開発が必要【例：鉱物脈法】

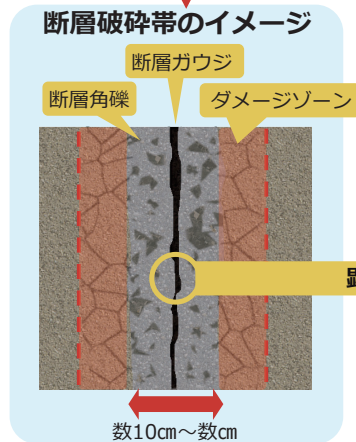
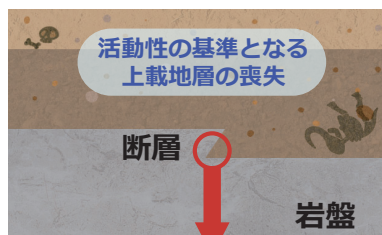
上載地層法の実用例（大飯）



Google Earth
Data SIO, NOAA, U.S. Navy

断層の破碎部性状に基づく活動性評価手法（鉱物脈法）

-電中研所有の装置群を用いた分析フローの確立-

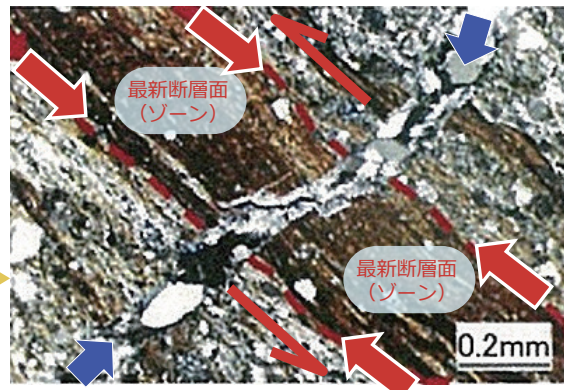


最新断層面を横断する鉱物脈

- ・断層による変位・変形を被っていない。
- ・約300万年前に形成

約300万年前以降、断層は活動していない。

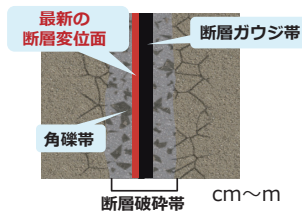
活断層ではない。



顕微鏡写真は九州電力川内原子力発電所「原子力規制委員会第107回原子力発電所の新規規制基準適合性に係る審査会（平成26年4月23日）資料」

鉱物脈法のための断層活動性評価フロー

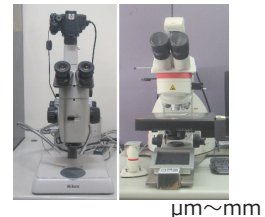
①断層破碎帯の観察・試料採取



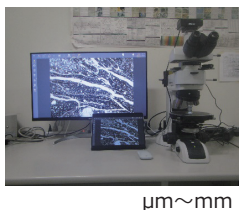
②ヘリカルX線CTを用いて最新断層面を3次元的に認定



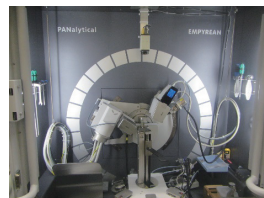
③実体顕微鏡、レーザー顕微鏡による断層のすべり方向、断層型の認定



④偏光顕微鏡による最新断層面沿いの鉱物の種類と破壊・変形構造を観察



⑤X線回折分析装置により最新断層面沿いの鉱物を詳細に認定



⑥マイクロフォーカスX線CTによる最新断層面沿いの3次元変形構造の詳細観察



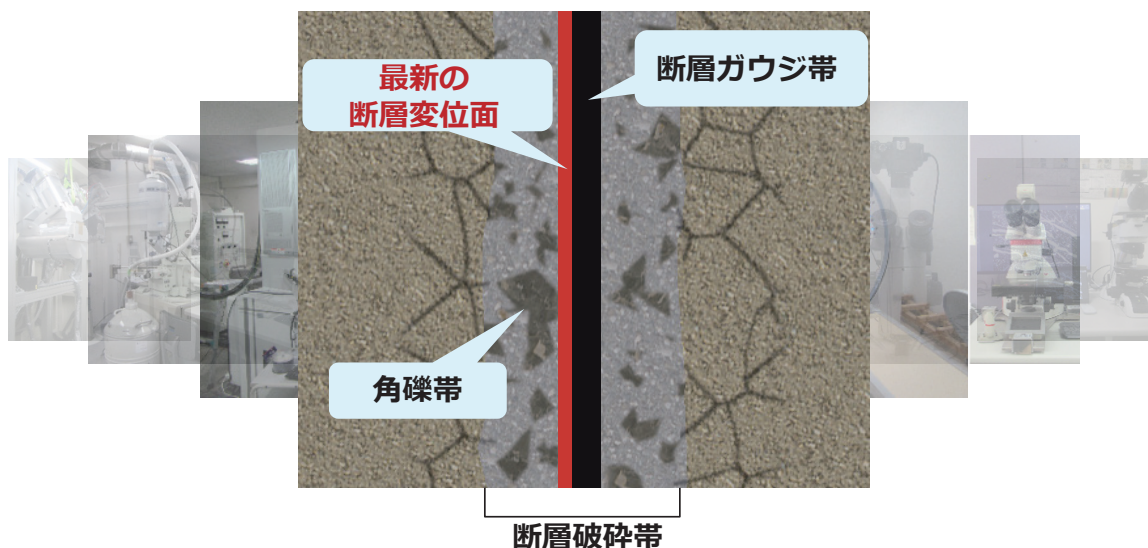
⑦電子顕微鏡により最新断層面沿いの鉱物の破壊・変形の有無を詳細に認定



断層の破砕部性状に基づく活動性評価手法の確立

-電中研所有の装置群を用いた分析フローの確立-

① 断層破砕帯の観察・試料採取

 10^{-2} ~ 10^0 スケール
(センチメートル~メートル)

断層の破砕部性状に基づく活動性評価手法の確立

-電中研所有の装置群を用いた分析フローの確立-

② ヘリカルX線CTを用いて最新断層面を3次元的に認定

 10^{-6} ~ 10^{-2} スケール (マイクロメートル~センチメートル)

最大撮影領域径 : 50cm

空間分解能 : 0.15mm



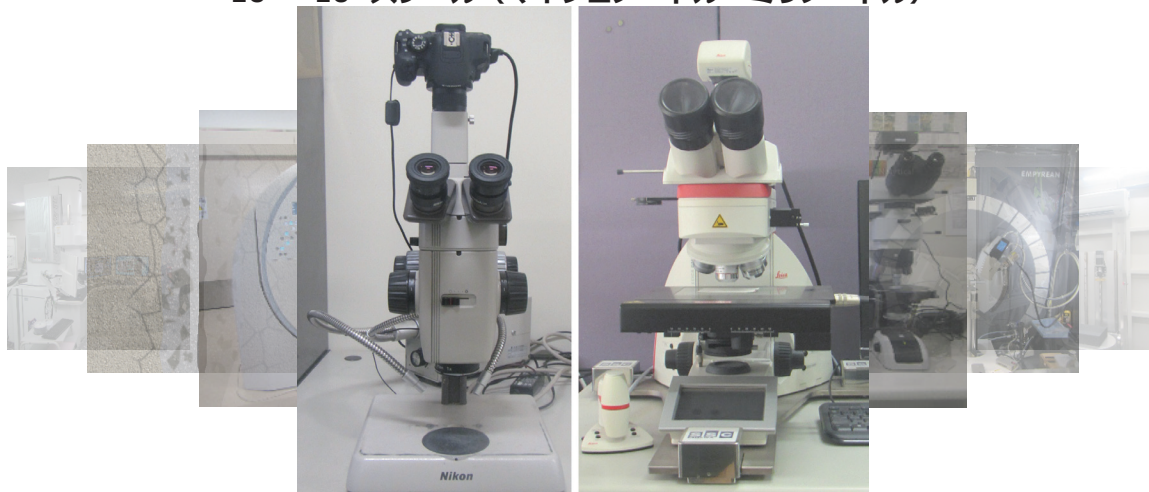
撮影スライス厚0.25mmで、同時に160断面

断層の破砕部性状に基づく活動性評価手法の確立

-電中研所有の装置群を用いた分析フローの確立-

③実体顕微鏡，レーザー顕微鏡による 断層のすべり方向、断層型の認定

10^{-6} ～ 10^{-3} スケール（マイクロメートル～ミリメートル）

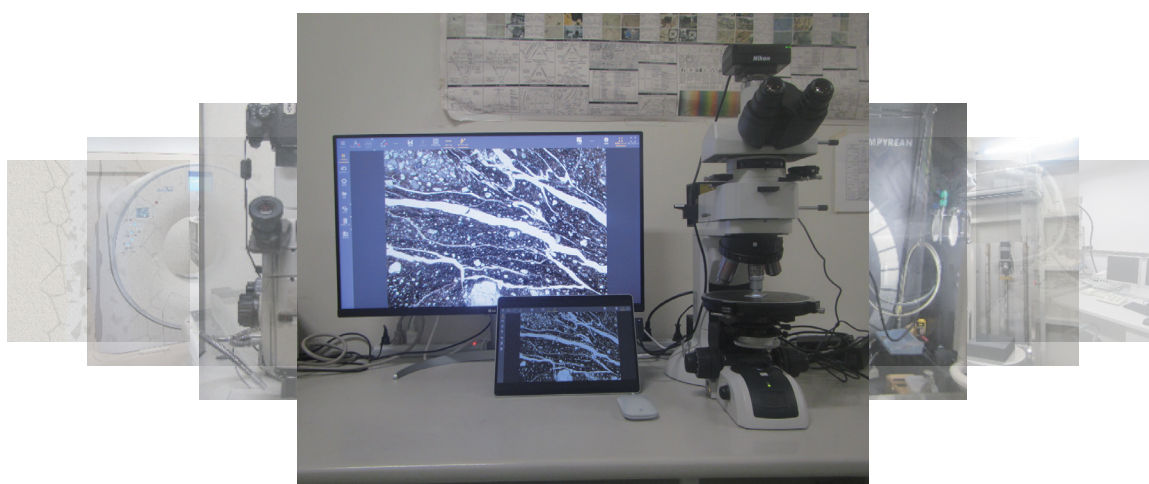


断層の破砕部性状に基づく活動性評価手法の確立

-電中研所有の装置群を用いた分析フローの確立-

④偏光顕微鏡による最新断層面沿いの 鉱物の種類と破壊・変形構造を観察

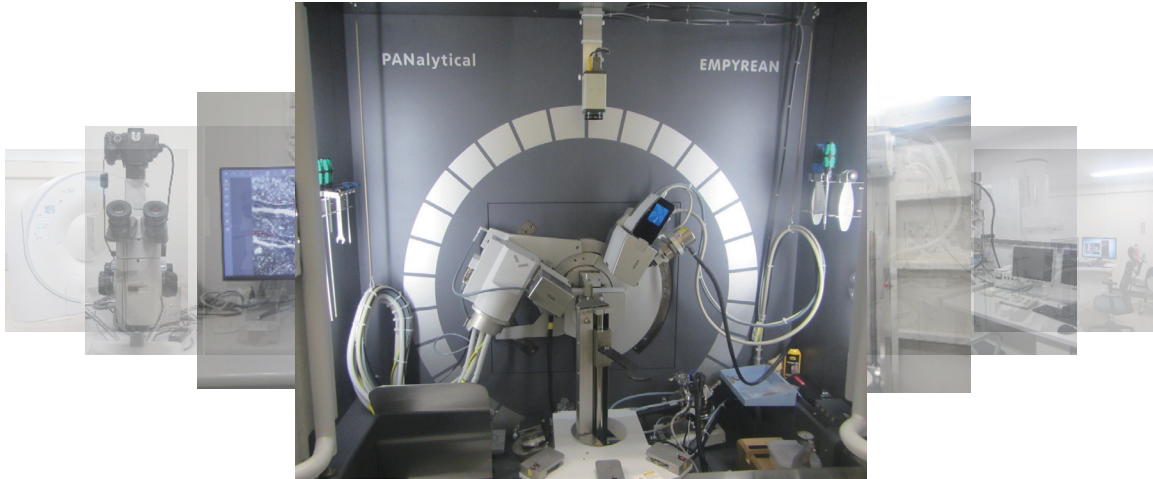
10^{-6} ～ 10^{-3} スケール（マイクロメートル～ミリメートル）



断層の破砕部性状に基づく活動性評価手法の確立

-電中研所有の装置群を用いた分析フローの確立-

⑤ X線回折分析装置により 最新断層面沿いの鉱物を詳細に認定



断層の破砕部性状に基づく活動性評価手法の確立

-電中研所有の装置群を用いた分析フローの確立-

⑥ マイクロフォーカスX線CTによる 最新断層面沿いの3次元変形構造の詳細観察 10⁻⁶~10⁻³スケール (マイクロメートル~ミリメートル)

空間分解能 : 60 μ m



最大撮影領域径 : 61mm

断層の破砕部性状に基づく活動性評価手法の確立

-電中研所有の装置群を用いた分析フローの確立-

⑦電子顕微鏡により最新断層面沿いの 鉱物の破壊・変形の有無を詳細に認定 10⁻⁹~10⁻⁶スケール（ナノメートル~マイクロメートル）



走査型電子顕微鏡

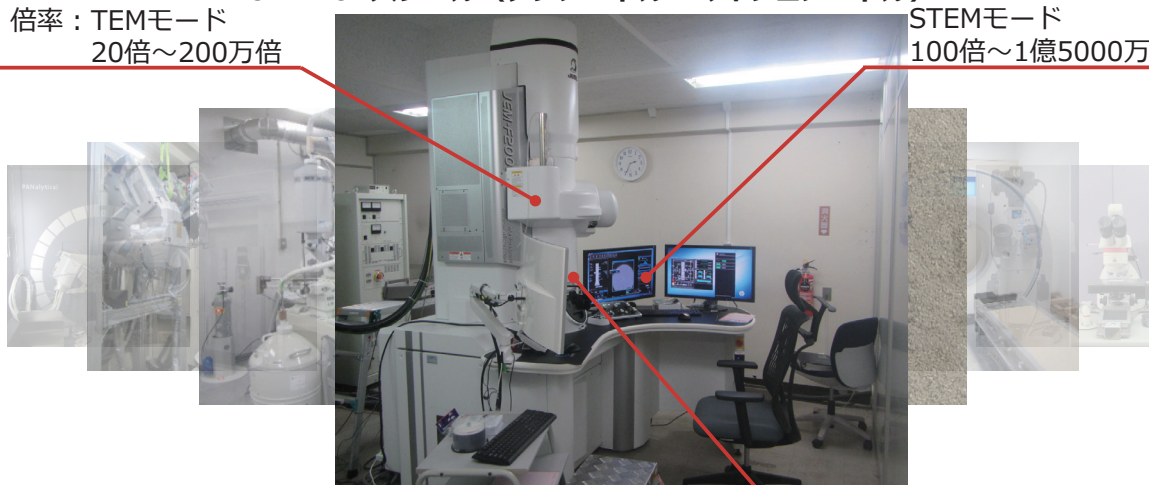
断層の破砕部性状に基づく活動性評価手法の確立

-電中研所有の装置群を用いた分析フローの確立-

⑦電子顕微鏡により最新断層面沿いの 鉱物の破壊・変形の有無を詳細に認定 10⁻⁹~10⁻⁶スケール（ナノメートル~マイクロメートル）

倍率：TEMモード
20倍~200万倍

STEMモード
100倍~1億5000万倍

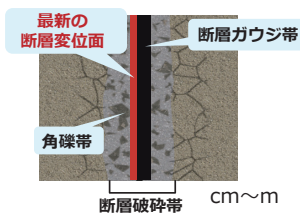


透過型電子顕微鏡

最大視野径：2mm

これらの装置が電中研の我孫子地区に集約→緊急的な課題に対応可能

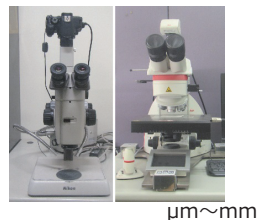
①断層破碎帯の観察・試料採取



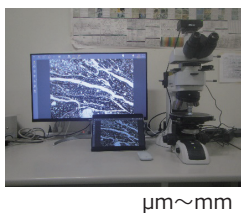
②ヘリカルX線CTを用いて最新断層面を3次的に認定



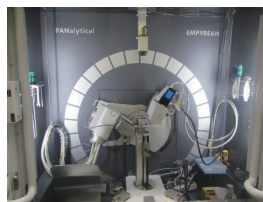
③実体顕微鏡、レーザー顕微鏡による断層のすべり方向、断層型の認定



④偏光顕微鏡による最新断層面沿いの鉱物の種類と破壊・変形構造を観察



⑤X線回折分析装置により最新断層面沿いの鉱物を詳細に認定



⑥マイクロフォーカスX線CTによる最新断層面沿いの3次元変形構造の詳細観察



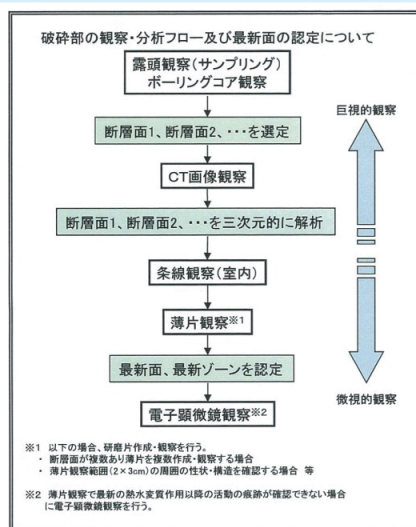
⑦電子顕微鏡により最新断層面沿いの鉱物の破壊・変形の有無を詳細に認定



電中研の分析装置群を用いた断層活動性分析フロー

-関西電力美浜発電所への適用事例-

各原子力発電所の断層活動性評価に関する新規制基準適合性審査において、これまで示した分析装置群を用いた断層活動性分析フローが適用されてきた（例：左下図）。また、この分析フローに従って各装置で分析した結果は、敷地の断層群が活断層ではないことを示していた。



原子力規制委員会
第3回美浜発電所敷地内破碎帯の調査に関する有識者会合(平成27年3月2日)
関西電力資料

<https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/10953979/www.nsr.go.jp/data/000098834.pdf>

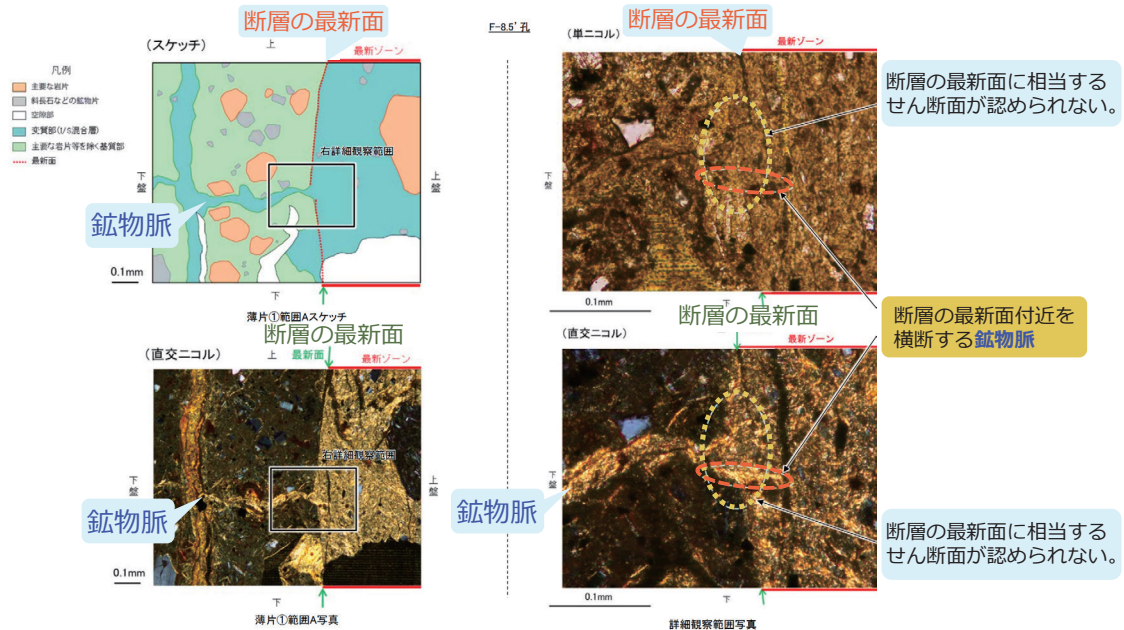
P.2



断層破碎部試料の顕微鏡観察（鉱物脈法）

-北陸電力志賀原子力発電所への適用事例-

鉱物脈が断層の最新面を横断している → 鉱物脈が形成されて以降、断層は活動していない



原子力規制委員会第1121回原子力発電所の新規制基準適合性に係る審査会合（2023年3月3日）北陸電力資料

© CRIEPI 2023

30

断層破碎部試料の高分解能電子顕微鏡観察（鉱物脈法）

-北陸電力志賀原子力発電所への適用事例-

【HRTEM観察】

■ I/S混合層のHRTEM観察に関する知見 (Kim et al., 2004)

Smectite Illite

Smectite

スメクタイト及びイライト構造のHRTEM像

・スメクタイトの典型的な単位層は1.3nm、イライトの単位層は1.0nmとなる。

■ 単位層の測定方法

・電子顕微鏡で撮影したHRTEM像で画像解析を実施し、明確なコントラストが認められる積層構造中の単位層の間隔を測定した。

・積層構造に直交する断面方向で、幅約1nm区間の輝度平均値のピーク間隔を測定。

敷地の粘土鉱物（試料e）のHRTEM観察結果

敷地の粘土鉱物を対象にHRTEM観察（観察装置：JEM-ARM200F）を実施した結果、明確な積層構造を確認し、一連の積層構造中にスメクタイトの単位層（1.3nm）とイライトの単位層（1.0nm）が確認されることから、この粘土鉱物はI/S混合層である。

上記は、東京大学小基研究室、電力中央研究所、北陸電力による観察結果である。

37

原子力規制委員会第875回原子力発電所の新規制基準適合性に係る審査会合（2020年7月10日）北陸電力資料

鉱物脈（イライト-スメクタイト混合層）は約12～13万年前より古い時代に形成された。

敷地内断層は活断層ではない。

「鉱物脈ができて以降、（断層が）動いていないという証拠が出てきた。大きな進展だ。」

規制委員

© CRIEPI 2023

31

断層活動性評価（まとめ）

- 敷地内断層の活動性評価手法として「上載地層法」と「鉱物脈法」を取り上げ、様々な専門分野の知見を総動員した地層の年代評価や系統化された分析装置群による手法の高度化について解説するとともに、具体的に原子力発電所再稼働審査に適用された事例について紹介した。
- その他、「新たな地質年代測定技術」など分析技術の開発、「断層摩擦実験」や「断層変位に着目した模型実験」などの実験研究があり、これらを今後も積極的に進め、多角的・総合的に断層研究を推進していく。
- これら一連の断層研究によって得られた科学的知見や開発された高度な技術は、水力地点（海外を含む）や高レベル放射性廃棄物処分場などの断層評価に役立てていく。

ご清聴ありがとうございました

R 電力中央研究所
Central Research Institute of Electric Power Industry



参考文献

1. 実用発電用原子炉に係る新規制基準について、原子力規制委員会、2016.
(<https://www.nra.go.jp/activity/regulation/tekigousei.html>)
2. 基準地震動及び耐震設計方針に係る審査ガイド、原子力規制委員会、2013.
(<https://www.nra.go.jp/data/000069160.pdf>)
3. 基準地震動等審査ガイドの改正案について、原子力規制委員会、2021.
(<https://www.nra.go.jp/disclosure/committee/kisei/010000713.html>)
4. 「震源を特定せず策定する地震動」の考え方と審査ガイドの改正、佐藤浩章、日本原子力学会誌ATOMOS/64 巻 8 号、2022. (https://www.jstage.jst.go.jp/article/jaesjb/64/8/64_454/_article/-char/ja/)
5. 確率論的強風飛来物解析コードTONBOS-proの開発、江口譲、電中研報告、NR21004、2021.
6. 竜巻飛来物衝突を受ける鋼板の耐貫通性能に関する研究－BRL式の適用性に関する基礎検討－、南波宏介、電中研報告、O19003、2019.
7. 実用発電用原子炉に係る新規制基準の考え方について、原子力規制委員会、2016. (2016、2017、2018、2022改定)
(<https://www.nra.go.jp/data/000155788.pdf>)
8. 電力施設の耐震設計における断層活動性の評価、緒方 正虔、本荘 静光、応用地質、22 巻、1 号、1981.
(https://www.jstage.jst.go.jp/article/jjseg1960/22/1/22_1_67/_article/-char/ja/)
9. 美浜・現調 4－1 美浜発電所敷地内破碎帯の追加調査コメント回答、関西電力、第3回美浜原子力発電所敷地内破碎帯の調査に関する有識者会合資料(平成27年3月2日)、原子力規制委員会、2015.
(<https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/10953979/www.nsr.go.jp/data/000098834.pdf>)
10. 志賀原子力発電所2号炉 敷地の地質・地質構造について、北陸電力、第1121回原子力発電所の新規制基準適合性に係る審査会合(2023年3月3日)、原子力規制委員会、2023. (https://www2.nra.go.jp/disclosure/committee/yuushikisya/tekigousei/power_plants/200000453.html)

【個別報告 2】

原子力発電の安全性向上と活用 に向けた取り組み

電力中央研究所
原子力リスク研究センター
研究コーディネーター（リスク評価分野担当）
兼 エネルギートランスフォーメーション研究本部
プラントシステム研究部門

副研究参事 米田 公俊

研究報告会2023
2023年11月16日

Ⓡ 電力中央研究所

© CRIEPI 2023

Ⓡ 電力中央研究所

本報告でお伝えしたいこと

- 確率論的な手法や評価を原子力発電の運用・管理に活用することは、原子力発電の安全性を高めることに繋がること
- 電中研では、原子力発電の安全性向上や再稼働後の稼働率向上、そして長期運転に向けて、確率論的な手法や評価を活用するための研究開発に取り組んでいること

© CRIEPI 2023

1

報告内容

1. はじめに
2. 安全性向上に向けた取り組み
3. 保全・検査の合理化に向けた取り組み
4. 経年劣化事象の管理に向けた取り組み
5. まとめ

報告内容

1. はじめに
2. 安全性向上に向けた取り組み
3. 保全・検査の合理化に向けた取り組み
4. 経年劣化事象の管理に向けた取り組み
5. まとめ

「GX脱炭素電源法」の概要

- 脱炭素社会の実現に向けた電気供給体制の確立を図るための電気事業法等の一部を改正する法律【GX脱炭素電源法】の概要（2023年5月成立）（以下、一部抜粋）

（2）安全確保を大前提とした原子力の活用

- ①原子力発電の利用に係る原則の明確化
 - ✓ **安全を最優先**とすること、原子力利用の価値を明確化
- ②高経年化した原子炉に対する規制の厳格化
 - ✓ 運転開始から30年を超えて運転しようとする場合、10年以内毎に、**設備の劣化に関する技術的評価**を行うこと
- ③原子力発電の運転期間に関する規律の整備
 - ✓ 運転期間は40年とし、i)**安定供給確保**、ii)GXへの貢献、iii)**自主的安全性向上**や防災対策の不断の改善 について経済産業大臣の認可を受けた場合に限り延長を認める
 - ✓ 延長期間は20年を基礎として、原子力事業者が予見し難い事由による停止期間を考慮した期間に限定する

電中研における原子力分野の研究体制の経緯 （軽水炉の安全および高経年化・保全関連）

▼福島第一原子力発電所事故

研究分野	2000～	2005～	2010～	2015～	2020～
軽水炉の安全			軽水炉安全特別研究チーム (2012/7～)	原子力リスク研究センター (Nuclear Risk Research Center (NRRC)) (2014/10～)	
軽水炉の高経年化・保全	・経済社会研究所 ・柏江研究所 ・我孫子研究所 ・原子力情報センター (NIC) ・ヒューマンファクター研究センター (HFC) ・低線量放射線研究センター	・社会経済研究所 (HFC(～2011/9) 含む) ・原子力技術研究所 (NIC(～2005/4)、HFC(2011/10～)、低線量放射線研究センター(～2007/6)、放射線安全研究センター(2007/7～) 含む) ・地球工学研究所 ・環境科学研究所 ・材料科学研究所 (PDセンター(2005/11～) 含む)			・社会経済研究所 ・エネルギー・システムフォーメーション研究本部 ・グリッドイノベーション研究本部 ・サステナブルシステム研究本部
		軽水炉高経年化研究総括プロジェクト (2007/6～)	軽水炉保全特別研究チーム (2012/7～)		

- 本報告では、これまでの研究開発の中から、安全性向上、保全・検査、経年劣化事象に関する取り組みを紹介

報告内容

1. はじめに
2. 安全性向上に向けた取り組み
3. 保全・検査の合理化に向けた取り組み
4. 経年劣化事象の管理に向けた取り組み
5. まとめ

2. 安全性向上に向けた取り組み

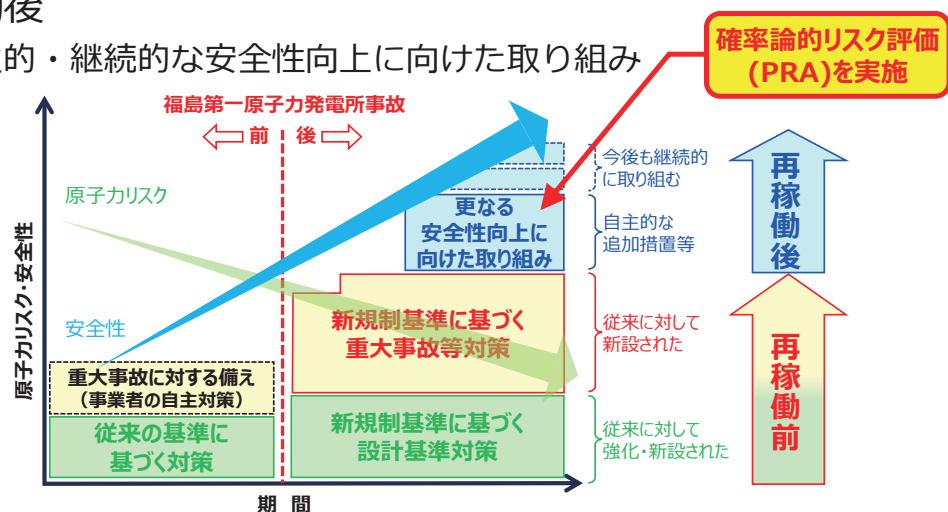
安全の確保および更なる安全性の向上に向けて

■ 再稼働前

- 福島第一原子力発電所事故後の新規制基準への適合

■ 再稼働後

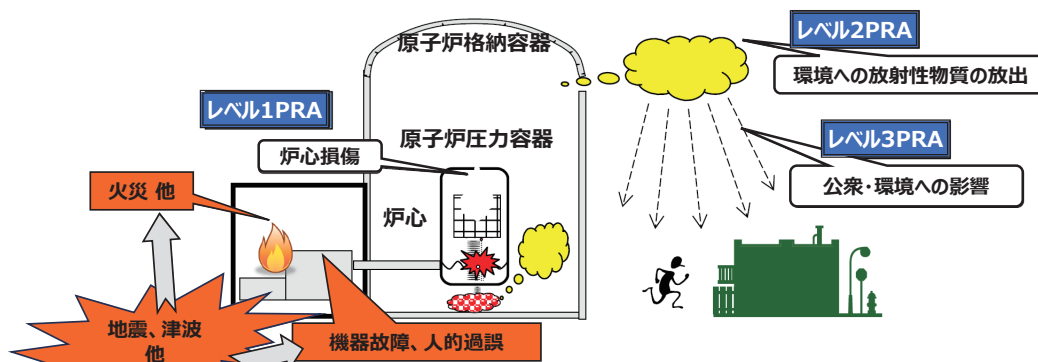
- 自主的・継続的な安全性向上に向けた取り組み



福島第一原子力発電所事故後の安全性向上への取り組み
(四国電力ウェブサイト*掲載図面をもとに作成)

確率論的リスク評価（PRA）とは

- 確率論的リスク評価（**PRA: Probabilistic Risk Assessment**）：
発生し得る事故のシナリオを体系的な方法で網羅的に探索し、
発生頻度および影響の大きさを定量的に推定する安全評価法
 - レベル1：炉心損傷のリスク評価
 - レベル2：格納容器機能喪失のリスクと放出放射性物質の種類・量の評価
 - レベル3：放出放射性物質による発電所周辺の公衆被ばく線量のリスク評価



（成宮、「原子力プラントの包括的なリスク評価」、日本原子力学会2013秋の大会 講演資料をもとに作成）

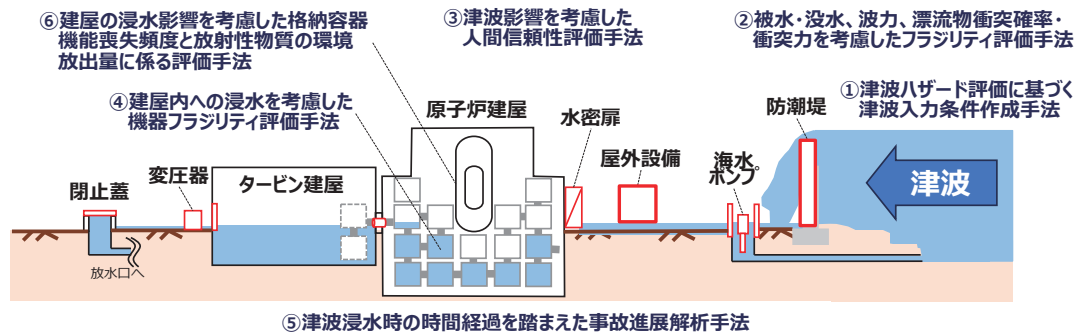
安全性向上に向けた電中研の取り組み

研究開発項目	主な取り組みの概要	
自然災害の影響評価	地震	ハザード評価、断層の活動性評価、土木構造物・建屋・機器等の耐震性評価
	津波	ハザード評価、漂流物の影響評価
	火山降灰	ハザード評価、機器脆弱性評価
	強風（竜巻・台風）	ハザード評価、飛来物の影響評価
内部・外部ハザード に対する 確率論的リスク評価 (PRA)	基盤技術	国内データに基づく故障率等のパラメータ
		人間信頼性解析手法の拡充・高度化
		複数号機発災時（マルチユニット）
		レベル2、レベル3
	内部ハザード	火災、溢水（建屋内の漏水）
	外部ハザード	地震、津波、地震・津波重畳、等
炉心・燃料の 健全性評価	炉心損傷前の炉心・燃料の挙動評価	
	事故耐性燃料、事故耐性制御棒の事故時挙動評価	

モデルプラントを用いた津波PRAの手法開発

■ 津波による建屋内浸水のプラントへの影響を考慮した、レベル2までの津波PRA技術を世界で初めて開発

- 福島第一原子力発電所事故の経緯を踏まえた、一連のPRA手法（地震⇒津波⇒地震・津波重畳）開発研究の一環として実施
- 津波来襲から炉心損傷（レベル1）、格納容器機能喪失・放射性物質の環境放出（レベル2）に至る各種評価手法を構築

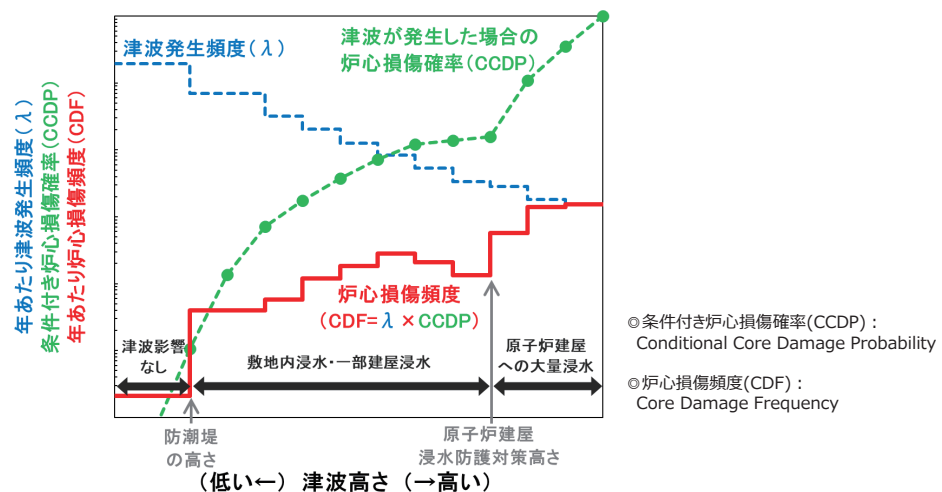


モデルプラントを用いた津波PRAにおいて開発した各種評価手法

（電力中央研究所 Annual Report 2020 (2021)より）

レベル1 津波PRAの成果

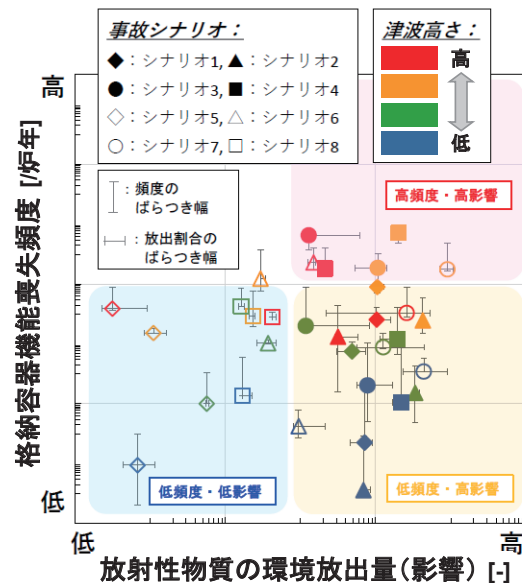
- 津波来襲時のリスク指標を津波高さの区分毎に評価
- 防潮堤や建屋浸水防護等の津波対策による安全性向上への効果（リスク指標の低減）を定量的に把握



レベル1 津波PRAの結果から得られた炉心損傷頻度の評価のイメージ

レベル2 津波PRAの成果

- 津波来襲時に想定される複数の事故シナリオにおける、格納容器機能喪失頻度と放射性物質の環境放出量（頻度×影響）を示すリスクプロファイルを評価
- 相対的な頻度・影響の観点から、優先的に対応すべき事故シナリオを選定し対策を実施する等、リスク情報を活用した意思決定への貢献が可能

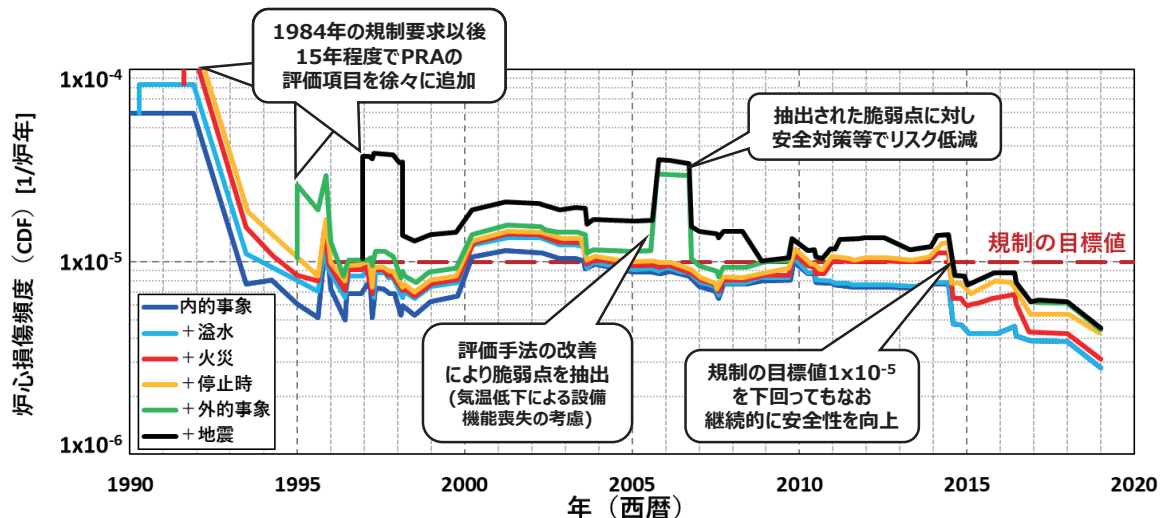


レベル2 津波PRAの結果から得られた
リスクプロファイルのイメージ

（電力中央研究所 Annual Report 2020 (2021)より）

PRAを用いた継続的な安全性向上の例

- PRAの評価項目の追加や手法の改善により脆弱点を抽出
- 脆弱点に対する設備等の追加対策により安全性向上



フィンランドOlkiluoto1号機における炉心損傷頻度評価の推移
（TVO社2020年提供図面をもとに作成）

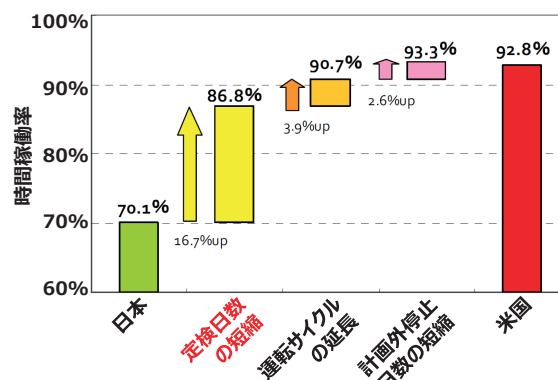
報告内容

1. はじめに
2. 安全性向上に向けた取り組み
3. 保全・検査の合理化に向けた取り組み
4. 経年劣化事象の管理に向けた取り組み
5. まとめ

3. 保全・検査の合理化に向けた取り組み

稼働率に対する保全・検査の合理化の効果

- 「安定供給確保」には稼働率の向上が必要
- 米国プラントの稼働率は近年90%超
- 国内の稼働率向上には定検日数の短縮が最も有効
 - 保全・検査の合理化により、安全性向上を目的としたリソース配分の最適化が可能



国内プラントの稼働率向上に向けた試算
(永富ら(2011年)*をもとに作成)

保全・検査の合理化に向けた電中研の取り組み

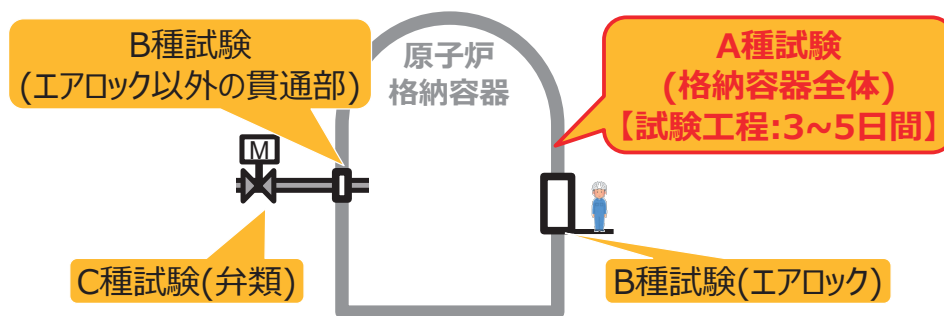
分類	方策	主な対象機器	概要
リスク情報を活用した方策	運転中保全 (研究報告会2022で概要報告)	非常用系統	非常用の安全系統の保全を停止時から出力運転中に移行
	格納容器漏えい率の試験間隔延長	原子炉格納容器	定検毎に実施している格納容器の漏えい率試験の間隔を延長
	リスク情報を活用した供用期間中検査	安全重要度の高い配管	配管の安全重要度と想定される劣化事象に応じて検査の部位と頻度を設定
その他の方策	減肉予測手法を用いた配管肉厚検査の合理化	炭素鋼配管 (復水・給水・ドレン・抽気等)	肉厚測定に基づく減肉率・余寿命評価を代替し得る予測手法に基づく評価の提案
	破損時影響が低い配管に対する保全重要度評価	低エネルギー配管 (負圧系等)	安全重要度が低い配管に対する合理的な保全重要度の評価手法の提案

© CRIEPI 2023

16

格納容器漏えい率試験 (CV-LRT)

- 原子炉格納容器は事故時等に発生する放射性物質の外部への放出を抑制する閉じ込め機能を有する
- 格納容器漏えい率試験：原子炉格納容器の気密性を確認するために、実際に加圧して漏えい率を確認する試験
(**CV-LRT: C**ontainment **V**essel **L**eak **R**ate **T**est)
 - 全体 (A種) または局部 (B種・C種) に対するいずれかの漏えい試験を実施



格納容器漏えい率試験の各種試験の概要

© CRIEPI 2023

17

CV-LRTの試験間隔の日米比較

- 米国では現在、リスク情報を活用しA種試験間隔を最大15年に1回まで延長し、定期検査工程を短縮
 - 米国も従来は日本と同様の試験を実施
 - 米国の規制当局と事業者が、**より安全重要度の高い課題へのリソース投入を可能とする改善活動の一環**で実現

格納容器漏えい率試験の各種試験間隔の日米比較

試験種別	米国	日本
A種 (全体)	・ 1回／最大15年 (概ね1回／7～9定検)	・ 毎定検 もしくは ・ 1回／3定検 (*残り2回はB,C種)
B種 (エアロック等)	・ エアロック以外：1回／最大10年 ・ エアロック：1回／最大30ヶ月	・ エアロック以外：2回／3定検* ・ エアロック：1回／6ヶ月
C種 (弁類)	・ 1回／最大5年	・ 2回／3定検*

© CRIEPI 2023

18

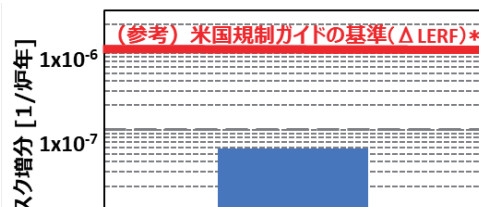
国内CV-LRTの試験間隔延長によるリスク評価

- 国内PWR実績データを用いて、A種試験間隔を3年から15年に延長した場合のリスクを評価
- A種試験間隔延長による格納容器機能喪失頻度の増分 ΔCFF は、米国で用いられる基準に比して充分小さい
- 国内適用による定検期間短縮やリソース配分の最適化が可能

国内PWRプラントのA種試験実績データ

項目	データ
A種試験実績データ	174件
A種試験にて検知可能な有意な漏えい発生件数	0件
対象プラント(16基)の総待機時間	約457年
平均試験間隔(457年／174件)	2.63年

※発生件数0件のため、Jeffreysの無情報事前分布の考え方を適用して発生確率を評価



格納容器機能喪失頻度の増分 (ΔCFF)

A種試験間隔延長によるリスク増分の評価 (高橋(2023年)**をもとに作成)

*米国原子力規制ガイド1.174にて“small change”と認識され許容される放射性物質の早期大規模放出(LERF)の変化量。通常は格納容器機能喪失頻度よりも小さい値。

© CRIEPI 2023

**高橋、日本保全学会 第19回学術講演会、2023

19

報告内容

1. はじめに
2. 安全性向上に向けた取り組み
3. 保全・検査の合理化に向けた取り組み
4. 経年劣化事象の管理に向けた取り組み
5. まとめ

4. 経年劣化事象の管理に向けた取り組み

原子力発電所における機器の経年劣化管理

■ 日常保全

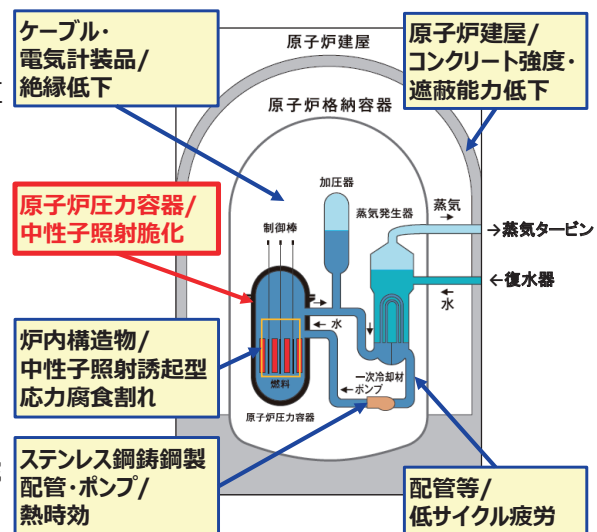
(日常点検、定期事業者検査)

- 消耗品、取替え可能な機器・部位
- 動的機器

■ 高経年化技術評価

(30年目、以降10年毎)

- 取替えが難しい機器・構造物や重要度の高い設備
- 運転期間に依存して劣化が進行する現象
- 機器の健全性に影響を与える可能性のある現象(右図の6事象)
- 長期運転(60年+a)を想定した経年劣化評価で機器・システムの健全性が確保されることを確認



出典: 一般財団法人日本原子力文化財団、原子力総合パンフレット(2020年度版)の図面を一部使用して作成

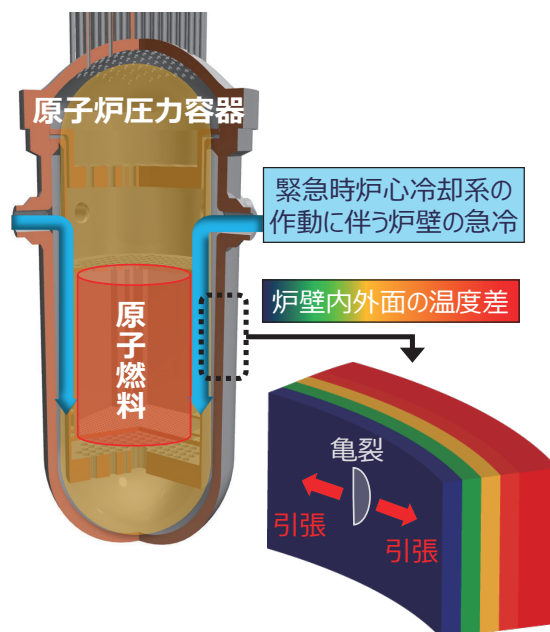
**経年劣化管理の対象機器/劣化事象
(PWR原子力建屋内構造における例示)**

60年超運転に向けた検討

- 米国：80年運転認可に向けた技術基盤整備と認可審査
 - 60年を超えた段階で、材料の劣化が急に発生・進展したり、新しい劣化事象が出現したりするものではない
 - これまでの技術開発や経年劣化管理の延長で対応
- ↓
- 電中研としては、日本においても基本的に同じ考え方で60年超運転に対応可能と認識
 - 現行の基盤技術の改良・高度化に基づく管理で対応
 - 電中研における将来に向けた基盤技術の高度化の例：
 - 原子炉圧力容器の中性子照射脆化に対する健全性評価への確率論的破壊力学の活用
 - 加圧熱衝撃事象に対する破損確率の合理的な評価

原子炉圧力容器の中性子照射脆化と加圧熱衝撃事象

- 中性子照射脆化
 - 原子燃料の核分裂により発生する中性子の照射を受けて、鉄鋼材料が硬く脆くなること
 - 材料が壊れやすくなる温度が上昇
- 加圧熱衝撃事象
 - 緊急時炉心冷却系等の作動に伴い冷水が注入され圧力容器の内外面に温度差が発生
 - 熱収縮により圧力容器内面に引張応力が作用
 - 温度低下に伴い材料の抵抗力が低下



**PWRの原子炉圧力容器に対する
加圧熱衝撃事象のイメージ**

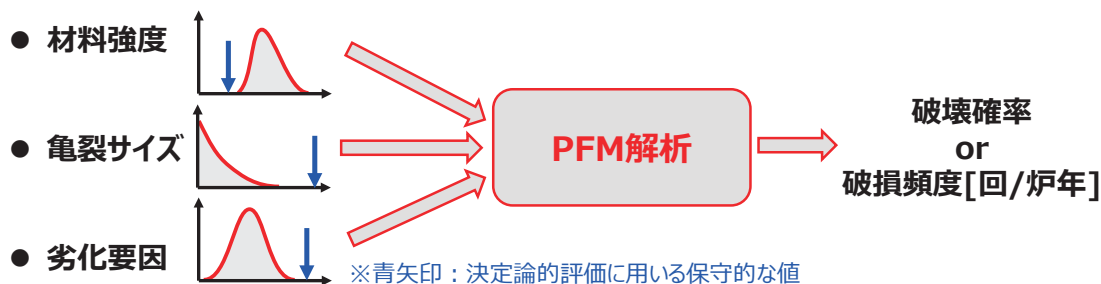
確率論的破壊力学

■ 確率論的破壊力学（PFM: Probabilistic Fracture Mechanics）

- 各パラメータが持つ不確実性を考慮し、統計的なばらつきや評価上の不確実性も踏まえた破壊確率（または破損頻度）として機器の健全性を定量的に評価する工学的手法

■ 決定論的破壊力学（従来手法）

- 壊れるか否かの二択を、各パラメータに対して安全率も考慮して最大限に厳しく設定した評価に基づき判断
- 保守的に管理可能だが機器の健全性を定量的に把握できない

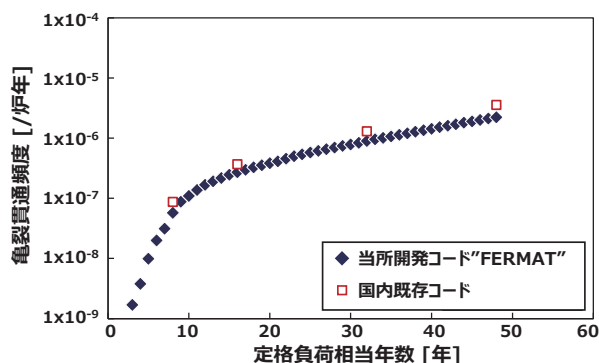


材料の亀裂による破損に対する確率論的破壊力学（PFM）の活用のイメージ

PFMを用いた原子炉压力容器の破損頻度評価

■ 压力容器の健全性評価に対するPFM解析コードを独自開発

- 国内既存コード*1と同等の評価結果
- 国内の電気技術指針(JEAG4640)*2に基づくシンプルなコード
- Windows環境で簡便に扱えるソフトウェアを構築
- 事業者側コードとして将来の事業者ニーズに対応する基盤



加圧熱衝撃による压力容器の破損頻度のベンチマーク解析 電中研報告EX22005

報告内容

1. はじめに
2. 安全性向上に向けた取り組み
3. 保全・検査の合理化に向けた取り組み
4. 経年劣化事象の管理に向けた取り組み
5. まとめ

まとめ

- 安全性の向上
 - モデルプラントを用いてレベル2までの津波PRA手法を開発し、津波に対して優先的に対応すべき安全対策の選定に貢献し得る評価手法を提示
- 保全・検査の合理化
 - 格納容器漏えい率試験の間隔延長に向けて国内データを用いた検討を実施し、間隔延長に伴うリスク増分が確率論的に十分に小さいことを提示
- 経年劣化事象の管理
 - 原子炉圧力容器の中性子照射脆化に対する健全性評価への確率論的破壊力学の活用に向けた環境を整備

おわりに

- 原子力発電の安全性向上と活用に向けた取り組みの中で、主に確率論的な手法の開発について報告
- 確率論的手法の活用は安全性を高めることに繋がる
 - PRAを踏まえた脆弱点の抽出と安全対策の強化
 - 安全重要度の高い設備に対するリソースの最適配分
 - 材料劣化を考慮した機器の健全性の定量的な把握
- 確率論的な評価が原子力発電の安全性向上に繋がることを研究開発による具体例を通じて継続的に発信していきたい

ご清聴ありがとうございました

R 電力中央研究所

Central Research Institute of Electric Power Industry

参考文献

1. 脱炭素社会の実現に向けた電気供給体制の確立を図るための電気事業法等の一部を改正する法律案【GX脱炭素電源法】の概要、内閣官房HP
(<https://www.cas.go.jp/jp/houan/230228/siryou1.pdf>)
2. 四国電力ウェブサイト
(https://www.yonden.co.jp/energy/atom/safety/safety_improvement/index.html)
3. 成宮、原子力プラントの包括的なリスク評価、日本原子力学会2013秋の大会 講演資料 (2013)
4. 電力中央研究所 Annual Report 2020 (2021)
5. 永富、松尾、村上、原子力発電所の設備利用率及び原因別停止時間の各国比較、日本エネルギー経済研究所 (2011) (<http://eneken.iej.or.jp/data/3836.pdf>)
6. U.S.NRC, Regulatory Guide 1.174, Revision 3, An approach for using probabilistic risk assessment in risk-informed decisions on plant-specific changes to the licensing basis (2018)
7. 高橋、リスク情報を活用した国内原子炉格納容器漏えい率試験に係る試験間隔延長の成立性の調査検討、日本保全学会 第19回学術講演会、E-1-2-4 (2023)
8. 一般財団法人日本原子力文化財団、原子力総合パンフレット (2020年度版)、2章
(<https://www.jaero.or.jp/sogo/detail/cat-02-04.html>)
9. 宮代、酒井、原子炉圧力容器を対象とした確率論的破壊力学解析コードFERMATの開発、電力中央研究所報告 EX22005 (2023)

【個別報告 3】

放射性廃棄物処分の実現に向けた研究開発

電力中央研究所
サステナブルシステム研究本部
研究統括室 原子力（廃棄物処分）分野統括
上席研究員 長谷川琢磨

研究報告会2023

2023年11月16日

Ⓡ 電力中央研究所

© CRIEPI 2023

Ⓡ 電力中央研究所

本報告でお伝えしたいこと

- 放射性廃棄物処分は、原子力発電所の運転を継続するうえで喫緊の課題である。発電所内の廃棄物は、増加の一途をたどっている。
- 当所は、放射性廃棄物処分の安全評価において重要となる地下環境（地質・地下水など）の安定性、人工バリア・天然バリアの性能評価に有効な基盤技術を開発してきた。
- 上記の技術を適用し、安全評価の信頼性向上を図ることで、今後の放射性廃棄物処分事業の実現に貢献する。

© CRIEPI 2023

1

報告内容

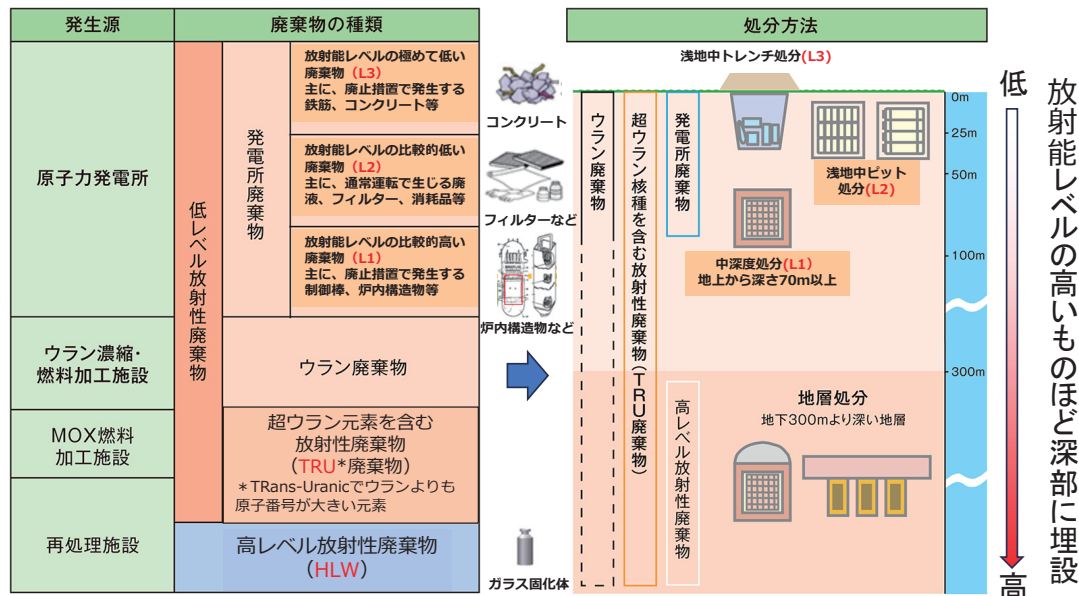
1. 放射性廃棄物の種類と処分の状況
2. 安全確保の考え方
3. 当所の研究開発の取り組み
4. 基盤技術開発事例（地下水年代測定技術）
5. まとめ

報告内容

1. 放射性廃棄物の種類と処分の状況
2. 安全確保の考え方
3. 当所の研究開発の取り組み
4. 基盤技術開発事例（地下水年代測定技術）
5. まとめ

放射性廃棄物の種類と処分方法

- 放射性廃棄物は、発電所、燃料加工施設、再処理施設から発生し、低レベル廃棄物（LLW）と高レベル廃棄物（HLW）に大別される。
- 放射能レベルの高いものほど深部に埋設される。



© CRIEPI 2023

日本原子力文化財団のウェブサイト「原子力・エネルギー図面集」¹⁾に加筆修正

4

放射性廃棄物処分の状況

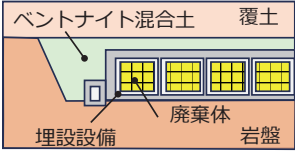
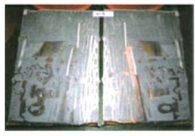
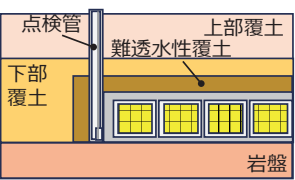
種類	実施主体など	時間			
L3	電気事業者 (敷地内など) 管理期間：50年程度	1986-1996 日本原子力研究所 動力試験炉解体 (埋設実地試験中)	計画 中	日本原子力発電（株） 東海発電所	
L2	日本原燃 六ヶ所低レベル放射性 廃棄物埋設センター 管理期間：300年程度	1990 事業許可取得 (1号：容量 約20万本*)	2000 事業変更許可 (2号増設： 容量約21万本*)	2021 事業変更許可 (3号増設他： 容量約21万本*)	2023/9時点 約35万本受入済 *運転廃棄物 200Lドラム缶換算
L1	電気事業者 場所：未定 管理期間：300～ 400年程度	2002-2006 六ヶ所の試験空 洞で調査・研究	2021 原子力規制委員会 許可基準規則の改定 (断層、火山、侵食など追加)	放射能レベルが高い廃棄物の処分は未実施	
HLW TRU	原子力発電環境整 備機構 (NUMO) 場所：未定	2000 特定放射性廃棄物の 最終処分に関する法 律 (最終処分法) NUMO設立 2008 最終処分法の改正 (TRU廃棄物追加)	2017 科学的特性 マップ公表	2020/11～ 文献調査開始 寿都町 (北海道) 神恵内村 (北海道)	2023 資源エネルギー庁 「文献調査段階の 評価の考え方」 2022 原子力規制委員会 「概要調査地区等の選定時 に安全確保上少なくとも 考慮されるべき事項」 (断層、火山、侵食など)

© CRIEPI 2023

5

低レベル放射性廃棄物処分の状況

六ヶ所低レベル埋設センターでの運転廃棄物（L2）の処分のみ進行中

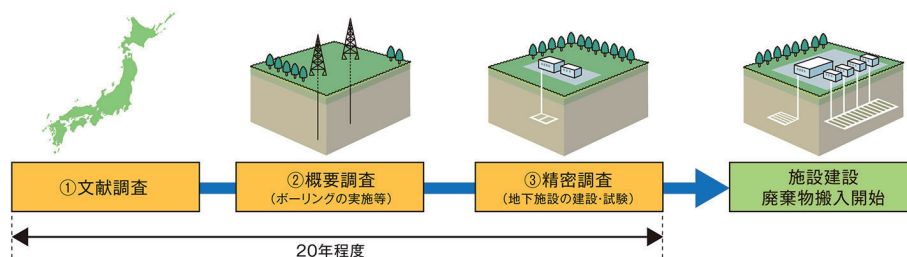
	廃棄体	施設概念図(申請時)	当所の主な協力
1990年 1号埋設 均質・均一 固化体	 モルタルで固化 概念図		● 標準・基準などへの協力 ・日本原子力学会標準 ・土木学会エネルギー委員会 ・地盤工学会基準など
2000年 2号埋設 充填 固化体	 ドラム缶の断面図 概念図		● 許可申請・安全審査への 技術的支援 ● 個別技術課題への協力 ・セメント材料の核種吸着性 ・粘土系材料の変質 ・廃棄体の金属腐食膨張など
2021年 3号埋設 充填 固化体	事業変更内容 1号埋設施設にも充填固化体を 埋設及び埋設数量最大値変更 2号埋設数量の最大値変更 3号埋設の増設 (1&2号も覆土を2層構造から 3層構造に変更)		

© CRIEPI 2023

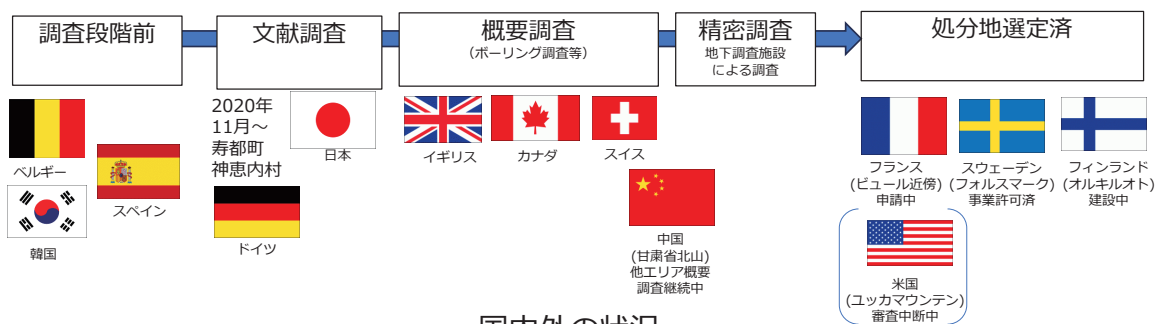
廃棄体写真・概念図、施設概念図は日本原燃のウェブサイト²⁾から引用

6

高レベル放射性廃棄物処分の状況



サイト選定プロセス



国内外の状況

© CRIEPI 2023

経済産業省資源エネルギー庁のウェブサイト³⁾から引用 7

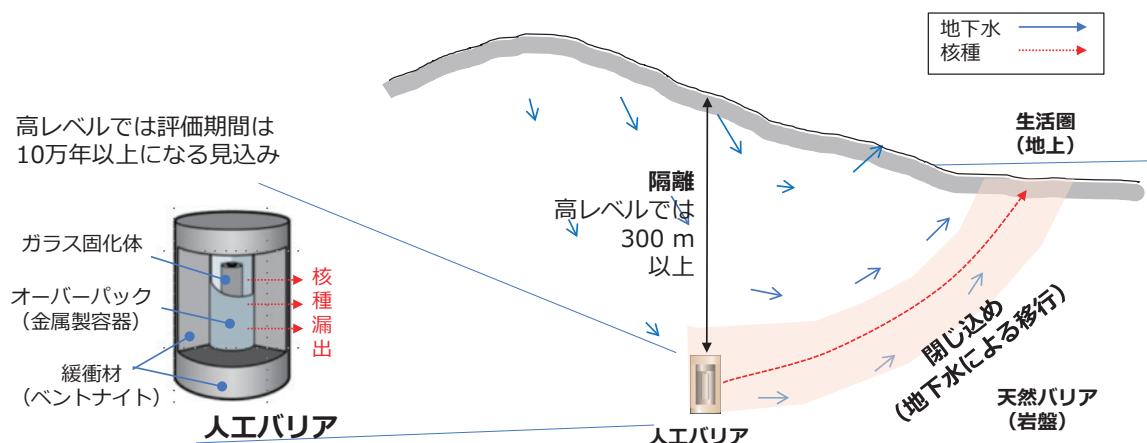
報告内容

1. 放射性廃棄物の種類と処分の状況
2. 安全確保の考え方
3. 当所の研究開発の取り組み
4. 基盤技術開発事例（地下水年代測定技術）
5. まとめ

2. 安全確保の考え方

安全確保の考え方

- 放射性物質の放射能レベルが放射壊変で下がるまで、地中に**隔離・閉じ込め**
- **隔離（接近シナリオ）**：生活圏から物理的に離すこと。断層、火山、侵食などの地質事象によって、放射性物質が生活圏に接近する可能性を評価
- **閉じ込め（地下水シナリオ）**：放射性物質の移行を抑制すること。廃棄体から、人工バリア、天然バリア、生活圏への地下水による移行を評価



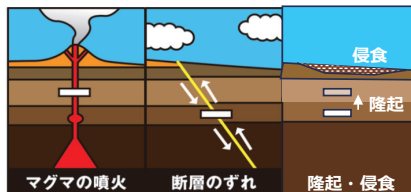
高レベル放射性廃棄物処分の人工バリア・天然バリアの概念図

日本特有の課題

高レベル放射性廃棄物処分のサイト選定に向けて、科学的特性マップが公表された。

好ましくない条件

火山・火成活動、断層活動、隆起・侵食、地熱活動、火山性熱水・深部流体など



⇒変動帯に位置するため、地質の安定性が課題

高レベル廃棄物処分「概要調査地区等の選定時に安全確保上少なくとも考慮されるべき事項」(原子力規制委員会、2022)では、低レベル廃棄物処分(L1)の許可基準規則(原子力規制委員会、2021)と同様の基準を踏襲



科学的特性マップ (2017)

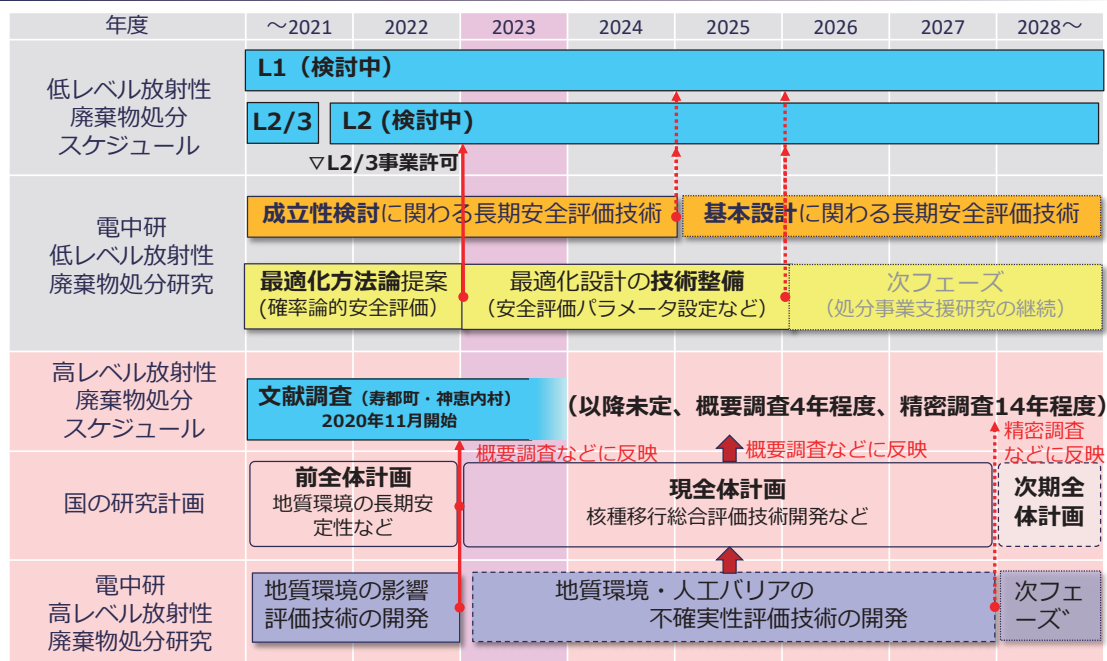
© CRIEPI 2023

科学的特性マップなどの図面は経済産業省資源エネルギー庁ウェブサイト⁵⁾から引用 10

報告内容

1. 放射性廃棄物処分の基本的考え方
2. 放射性廃棄物処分の進捗状況
3. 当所の研究開発の取り組み
4. 基盤技術開発事例 (地下水年代測定技術)
5. まとめ

処分スケジュールと電中研研究



電中研研究は事業スケジュールや国の研究計画⁴⁾ (地層処分研究開発調整会議, 2023) を考慮して実施

隔離 (接近シナリオ) : 地質事象

(主にHLW)

○放射性廃棄物の地表接近を避けるため、火山・火成活動、断層活動、**隆起・侵食**、地熱活動、**火山性熱水・深部流体**などが隔離性能に与える影響を示す。

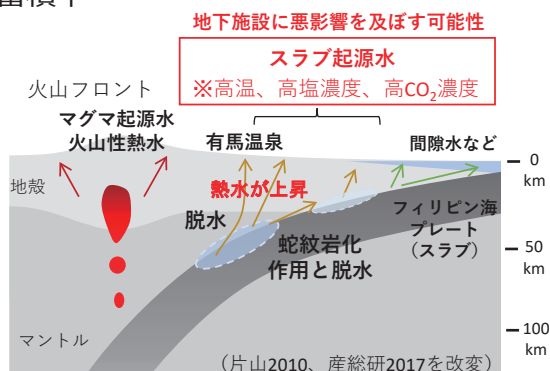
- 過去の**隆起量**を用いて**侵食量**を評価するために、隆起量の指標となる段丘地形 (台地) の形成年代の評価手法を高度化
- 深部流体**の性質と影響範囲を評価するために、全国の深部流体湧出地点を調査し、特徴を明らかにするとともに、データを蓄積中



レキの断面：風化に伴い、未風化部分 (青色部分) が減少
低位段丘 (約5万年) 中位段丘 (約14万年) 高位段丘 (約25万年)

段丘レキの風化と時間の関係 (濱田、2023) ⁶⁾

段丘形成年代評価技術



深部流体 (スラブ起源水) 発生メカニズム
西南日本弧の例 (富岡ほか、2022) ⁷⁾

火山性熱水・深部流体移行経路調査・評価技術

閉じ込め（地下水シナリオ）：天然バリア (主にHLW)

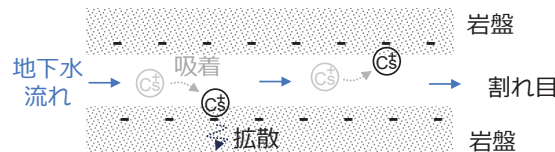
○地下深部では、放射性物質は地下水に溶解しにくく、岩盤に吸着することで移行が遅くなる（遅延効果）。さらに、地下水流速が遅いことも期待される。

◆ 遅延効果

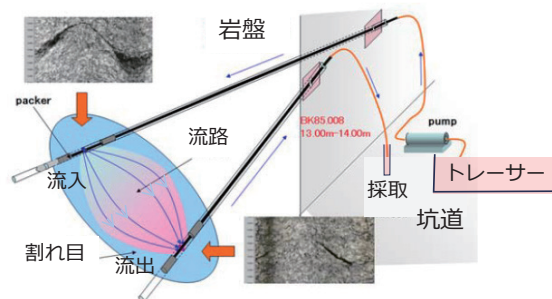
- ・トレーサー試験装置を開発し、割れ目で遅延効果を評価
(田中ほか、投稿中¹⁰⁾；岡本ほか、2023¹¹⁾)
- ・簡便なトレーサー試験方法を開発中

◆ 地下水流速

- ・地下水流速を評価するための地下水年代測定法を開発
- ・地下水年代などを用いた地下水解析モデルの検証技術を開発中



放射性物質の吸着現象
岩盤表面は負に帯電(-)しており、核種（主に陽イオン）は吸着される。この結果、地下水よりも移行が遅くなる。



原位置トレーサー試験の概念図
岩盤への吸着による遅延効果の評価

閉じ込め（地下水シナリオ）：人工バリア (LLW・HLW共通)

○緩衝材としてベントナイト（膨潤性粘土）が用いられる。ベントナイトは、

①低透水性、②膨潤性、③低拡散性、④吸着性、⑤環境の保持などが期待される。

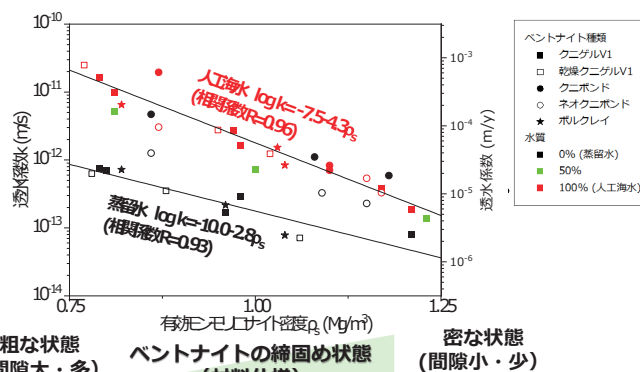


HLW人工バリアの概念図

通りやすい

水の流れやすさ

通りにくい



ベントナイトの透水性
(長谷川、2004⁸⁾；日本原子力学会、審査中⁹⁾)

- 低透水性、膨潤性（力学特性）などについて、種々の密度・水質で試験を実施し、要求性能に応じた、緩衝材（ベントナイト密度）の設計に貢献
(地盤工学会基準、日本原子力学会標準など)
- 熱影響・熱-水理-力学連成現象、変質などを研究中

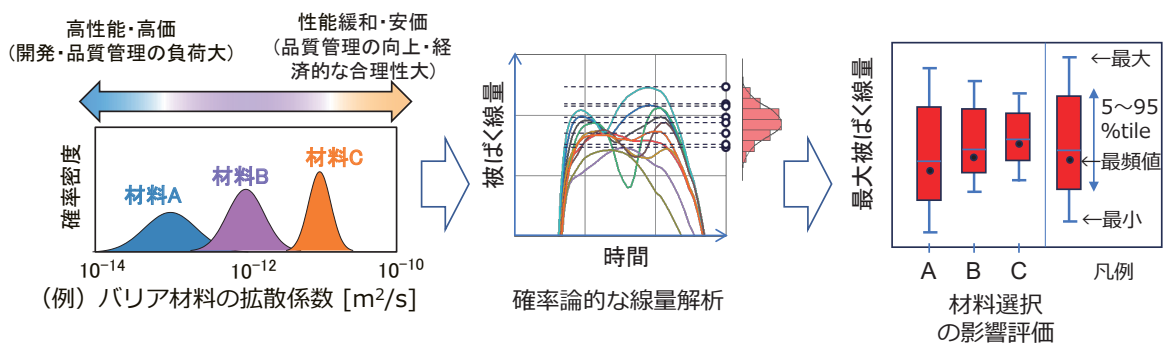
閉じ込め（地下水シナリオ）：安全評価 (LLW)

○漏洩した放射性物質が、人工バリアと天然バリアを通過する過程をモデル化し、**被ばく線量**を評価する。被ばく線量が十分に小さいことを示す必要がある。

- バリア性能等の**パラメータの保守性**を考慮し、より合理的な安全評価となる**確率論的アプローチ**を開発し、学会標準に反映

(Nakabayashi et al., 2018¹²⁾; 中林ほか、2019¹³⁾; 日本原子力学会標準、2023制定承認¹⁴⁾)

- 新許可基準規則に対応するため、バリア性能、品質管理、経済性をバランスさせる**最適化設計方法**を開発中

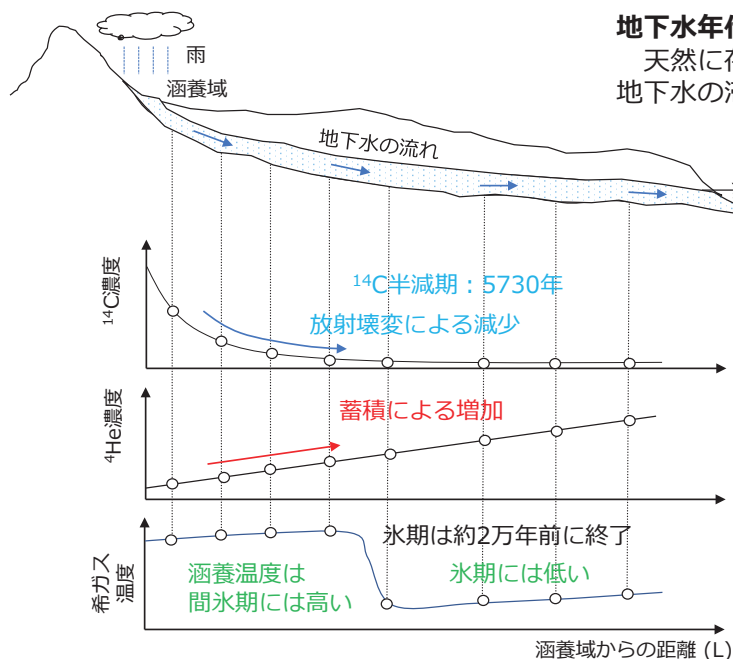


確率論的アプローチの概念図

報告内容

1. 放射性廃棄物の種類と処分の状況
2. 安全確保の考え方
3. 当所の研究開発の取り組み
4. 基盤技術開発事例（地下水年代測定技術）
5. まとめ

地下水年代測定の方法



地下水年代：降水が地下に涵養してからの時間
天然に存在する物質の増減などに着目して、
地下水の滞留時間を評価する方法

- 地下水流動
流下に伴い滞留時間が増加
- 放射壊変に着目
 ^{14}C の放射壊変による濃度の減少に着目して地下水年代を推定
- 蓄積に着目
岩石から発生する ^4He の濃度の増加から地下水年代を推定
- 気候変動に着目
涵養温度に着目し、間氷期と氷期（2万年前より新しいor古い）を推定

滞留時間の増加に伴う濃度変化の概念図

地下水年代測定技術

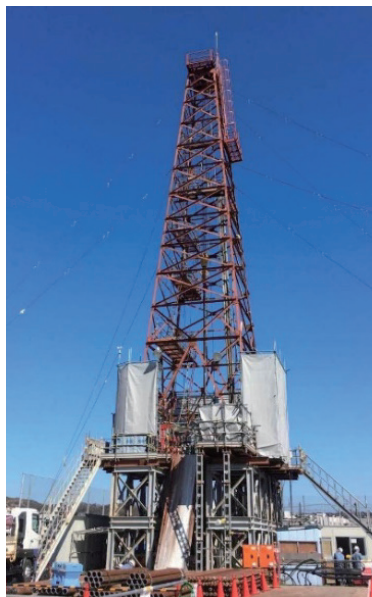
○地下水年代（滞留時間）が長ければ、核種が漏出して、壊変による減衰が期待できる。

- 長い滞留時間が評価可能な方法、 ^{14}C 、 ^{36}Cl 、 ^4He を用いた方法を開発してきた。
- 放射性希ガス(^{85}Kr 、 ^{81}Kr 、 ^{39}Ar)を用いた方法の有効性・適用性を検討中

	対象物質 (半減期: 年)	時間スケール (年)									
		10^{-1}	10^0	10^1	10^2	10^3	10^4	10^5	10^6	10^7	
放射壊変	^{222}Rn (0.01)	~0.03									既存技術
	^{85}Kr (10.72)			1~40							開発技術
	^3H (12.43)			1~60							放射性廃棄物 処分 重要な 評価時間
	($^3\text{H} + ^3\text{He}$)			1~100							
	^{39}Ar (269)				50~2000						
	無機 ^{14}C (5730)					500~20,000					
	有機 ^{14}C (5730)					500~20,000					
	^{81}Kr (2.1×10^5)				$10^4 \sim$	10^6					
	^{36}Cl (3.0×10^5)				$5 \times 10^4 \sim$	2×10^6					
	^{129}I (1.6×10^7)					$5 \times 10^8 \sim$	5×10^8				
蓄積	^4He				蓄積性物質 $1,000 \sim 10^7$						
気候変動	CFCs, SF_6				温暖化ガス 1~60						
	Ne, Ar, Kr, Xe				涵養温度 (氷期or間氷期)						
	$\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$				涵養温度 (氷期or間氷期)						

地下水年代測定技術と開発状況

ボーリング孔での適用事例



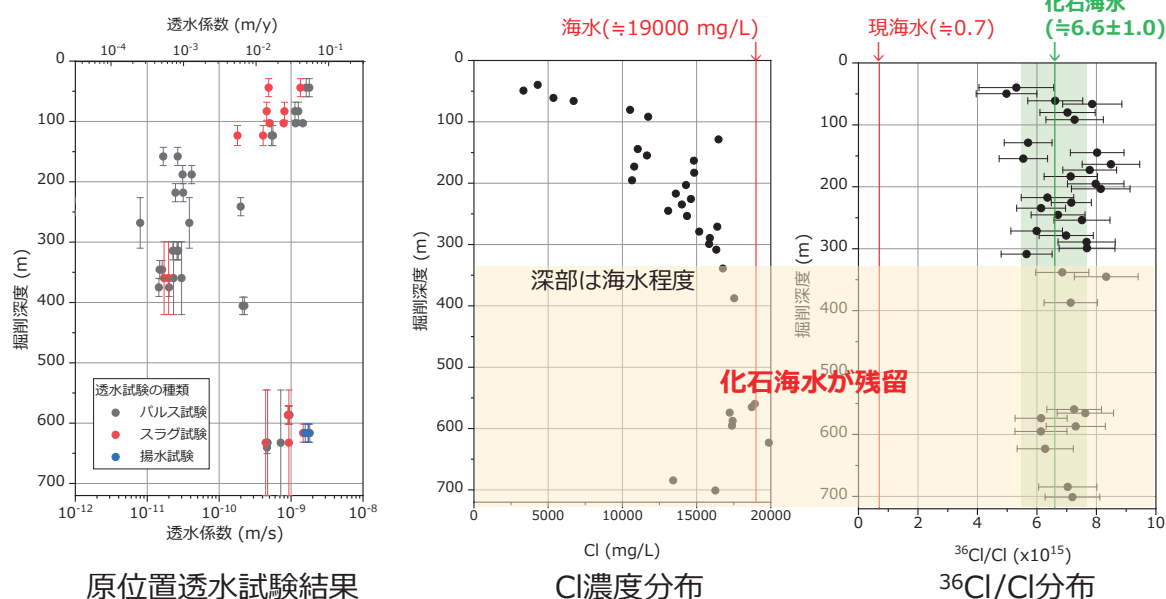
ボーリング孔の
掘削機写真（YDP-4孔）（コア写真（左）とCT画像（右））

- 概要調査で実施するボーリング調査技術の実証を横須賀地区で実施した。
- 透水性が小さく、地下水の揚水が困難なため、コアからリーチング、圧縮抽水などで試料を採取し、地下水年代測定を実施した。



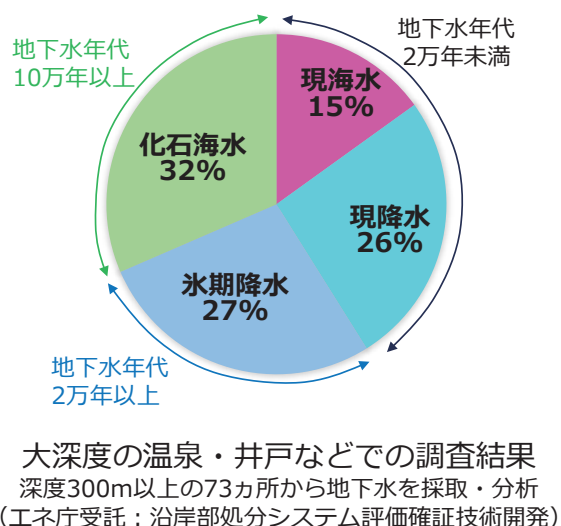
ボーリング孔での調査結果(YDP-4)

- 粘土層で透水係数が低く、揚水が困難なため、コアから試料を採取
- Cl濃度が海水程度、 $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ が化石海水（非常に古い海水）程度のことから、深部には化石海水の残留を確認



地下水年代測定結果

- 大深度の温泉・井戸などでは、地下水年代2万年以上が60%程度
- 大深度ボーリングでは、泥岩、頁岩（堆積岩）で、地下水年代が100万年以上



地点	滞留時間（年）					地質
	10 ³	10 ⁴	10 ⁵	10 ⁶	10 ⁷	
岐阜 瑞浪他	土岐花崗岩 Hasegawa et al.(2016) ¹⁵⁾					花崗岩
北海道 幌延	更別層					砂礫
	勇知層 Hasegawa et al.(投稿中) ¹⁶⁾					泥岩
	声間層					泥岩
	稚内層 Nakata et al.(2018) ¹⁷⁾					頁岩
神奈川 横須賀	三浦層群					砂岩
	葉山層群 Hasegawa et al.(2023) ¹⁸⁾					泥岩

大深度ボーリングでの調査結果

報告内容

1. 放射性廃棄物の種類と処分の状況
2. 安全確保の考え方
3. 当所の研究開発の取り組み
4. 基盤技術開発事例（地下水年代測定技術）
5. まとめ

まとめ

- 低レベル・高レベル放射性廃棄物処分では、隔離と閉じ込めが安全確保の基本であり、それらを調査・評価する技術が重要である。
- 当所は、隔離や閉じ込めの評価に有効な調査・評価技術（地質事象、人工バリア・天然バリア、安全評価など）について、基盤となる技術を開発・実証してきた。
- 今後の放射性廃棄物処分事業の実現に向けて、当所が開発してきた技術を適用し、安全評価の信頼性・説明性向上を図ることで、事業の推進に貢献する。

ご清聴ありがとうございました

R 電力中央研究所

Central Research Institute of Electric Power Industry

参考文献

1. 日本原子力文化財団ウェブサイト, 原子力・エネルギー図面集、第8章 放射性廃棄物。 <https://www.ene100.jp/zumen/8-1-5>
2. 日本原燃ウェブサイト, 埋設事業の概要。 <https://www.jnfl.co.jp/ja/business/about/llw/summary/>
3. 経済産業省資源エネルギー庁ウェブサイト, 放射性廃棄物処分について 高レベル放射性廃棄物。
https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/rw/hlw/hlw01.html
4. 地層処分研究開発調整会議, 地層処分研究開発に関する全体計画（令和5年度～令和9年度）, 2023。
https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/chiso_shobun/20230324_report.html
5. 経済産業省資源エネルギー庁, 科学的特性マップ, 2017。
https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/rw/kagakutekitokuseimap/
6. 濱田崇臣, 放射性廃棄物処分の現状と技術開発 ②地質長期安定性・地質環境特性, 電力土木, 2023.11月予定
7. 富岡祐一ほか, 地下水溶存物質に着目した深部流体の起源と影響領域の評価手法の検討, 原子力バックエンド研究, 29(2), 82-100, 2022.
8. 長谷川琢磨, ベントナイトの透水・浸潤特性への海水影響, 電力中央研究所報告, N04005, 2004.
9. 日本原子力学会, 低レベル放射性廃棄物処分施設の施設検査方法－浅地中処分編：20XX, AESJ-SC-F00○：20XX（パブコメ済）。
10. 田中靖治ほか, 花崗岩を対象とした原位置トレーサー試験と溶質移行特性評価, 地下水学会誌, 投稿中。
11. 岡本 駿一ほか, 割れ目を対象としたトレーサー試験から評価される収着特性の流速依存性と妥当性, 土木学会論文集, 79, 6, 論文ID: 22-00277, 2023. DOI <https://doi.org/10.2208/jscej.22-00277>
12. Nakabayashi, R. et al., Methodology to optimize radiation protection in radioactive waste disposal after closure of a disposal facility based on probabilistic approach", Journal of Nuclear Science Technology, vol. 55, issue.3, 335-347, 2018.
13. 中林亮ほか, 確率論的アプローチによる放射性廃棄物処分施設設計の最適化手法の具体化に向けた検討：核種移行評価パラメータの設定方法, 日本原子力学会和文論文誌, 18(1), 6-20, 2019.
14. 日本原子力学会, 低レベル放射性廃棄物処分施設の安全評価の実施方法－中深度処分編：20XX, AESJ-SC-F00○：20XX（承認済）。
15. Hasegawa, T. et al., Cross-checking groundwater age by ^4He and ^{14}C dating in a granite, Tono area, central Japan, Geochimica et Cosmochimica Acta, 192, 166-185, 2016.
16. Hasegawa, T. et al., Identification of glacial meteoric water and fossil seawater in a deep borehole in the coastal area of Horonobe, north Japan, using groundwater dating method, Chemical Geology (Under Review).
17. Nakata, K. et al., An Evaluation of the Long-Term Stagnancy of Porewater in the Neogene Sedimentary Rocks in Northern Japan, Geofluids, Article ID 7823195, 21 pages, 2018.
18. Hasegawa, T. et al., Modern and fossil seawater identification using groundwater dating from the western coast of the Miura Peninsula, Japan, Chemical Geology, 121299, 2023.



【個別報告4】

原子力発電の継続的活用に向けた 社会経済的課題

電力中央研究所
社会経済研究所 課題統括（原子力政策）
兼 原子力リスク研究センター リスク評価研究チーム
上席研究員 稲村 智昌

研究報告会2023

2023年11月16日

 電力中央研究所

© CRIEPI 2023



 電力中央研究所

本報告でお伝えしたいこと

- 既存の原子力発電所を継続的に活用するためには、さらなる長期運転を中長期的な選択肢として確保しておくことの重要性を考慮に入れ、関連する制度の検討が必要
- バックエンド事業が有する長期的な不確実性を考慮に入れ、事業者が制御可能なリスクかどうかを吟味した上で、官民の役割分担を再検討していくことが必要
- 建て替えに向けた事業者の投資促進のためには、事業者が積極的に投資できる、投資回収リスクや規制リスクを低減する制度的措置の導入等の事業環境整備が必要

© CRIEPI 2023

1

報告内容

1. 原子力発電の必要性とその背景
2. 既存の原子力発電所を可能な限り活用するために
3. 原子力発電所の建て替えの促進に向けて
4. まとめ

報告内容

1. 原子力発電の必要性とその背景
2. 既存の原子力発電所を可能な限り活用するために
3. 原子力発電所の建て替えの促進に向けて
4. まとめ

脱炭素とエネルギー安全保障

脱炭素とエネルギー安全保障の国際動向

気候変動問題への対応の必要性

世界的なエネルギー需給逼迫

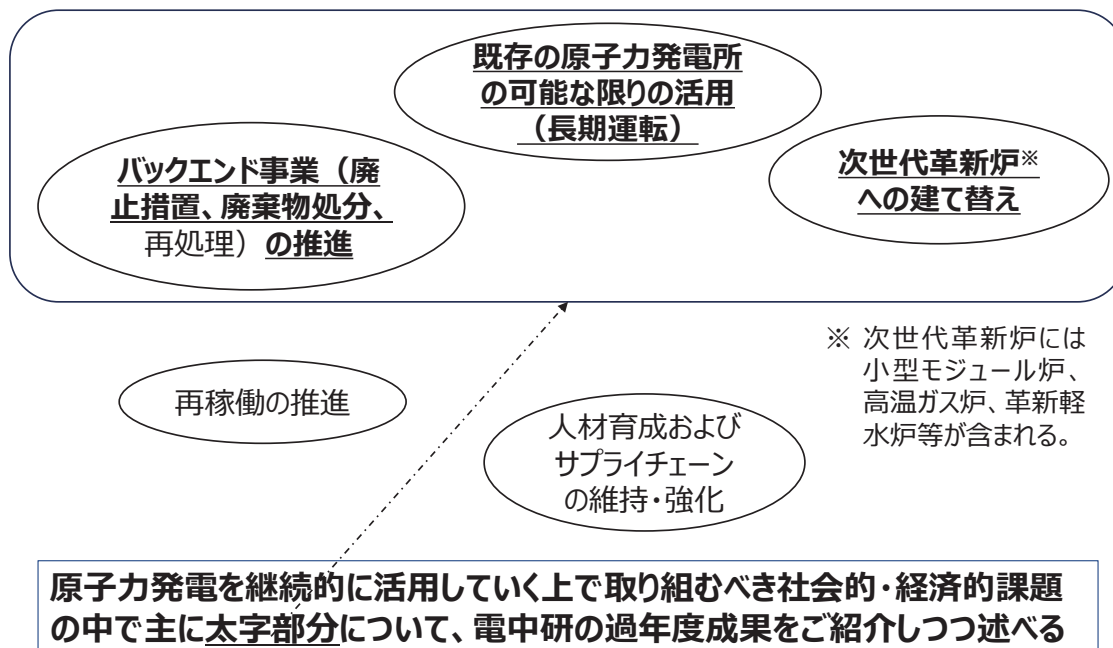


世界的な脱炭素機運の高まり

エネルギー安全保障の確保
に向けた動きの強化

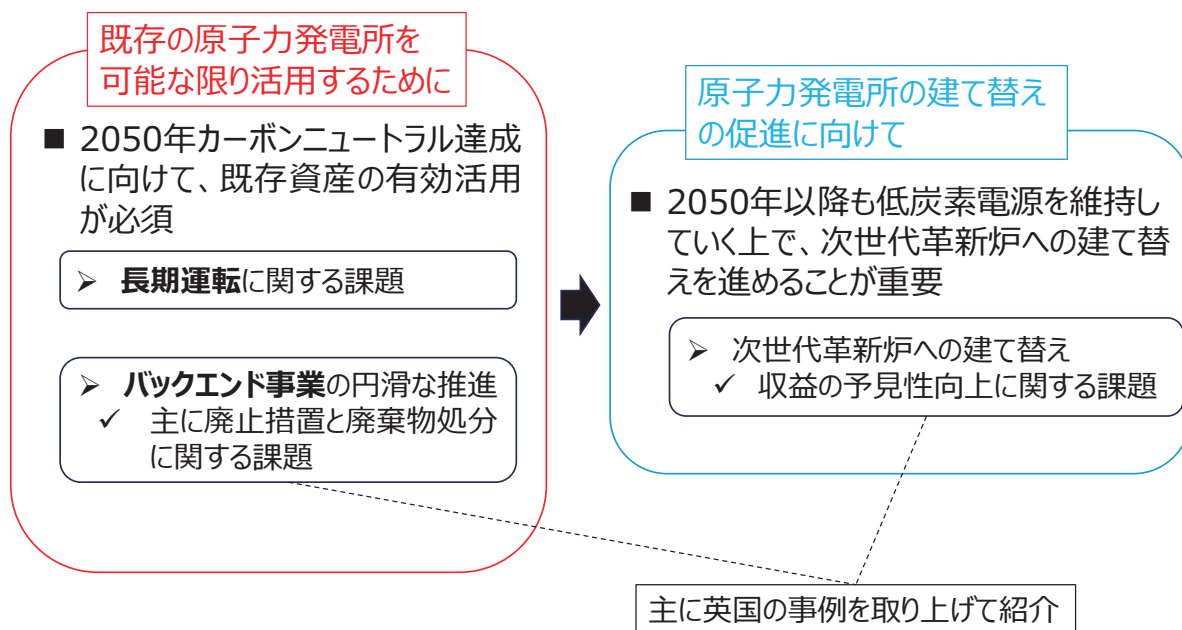
→日本においても、2023年2月に閣議決定された「GX実現に向けた基本方針～今後10年を見据えたロードマップ～」(以下、GX基本方針)にて、エネルギー安全保障に寄与し、脱炭素効果の高い電源(再生可能エネルギーや原子力)を最大限活用する方向性が示された。

原子力発電の継続的活用に向けた取り組み -GX基本方針における例-



※ 次世代革新炉には小型モジュール炉、高温ガス炉、革新軽水炉等が含まれる。

本報告の構成



報告内容

1. 原子力発電の必要性とその背景
2. 既存の原子力発電所を可能な限り活用するために
3. 原子力発電所の建て替えの促進に向けて
4. まとめ



長期運転に関する現在の法的位置づけ

GX基本方針

- 「運転期間は40年、延長を認める期間は20年」との制限を設けた上で、原子力規制委員会による厳格な安全審査が行われることを前提に、**一定の停止期間に限り、追加的な延長を認める**

→ 運転期間延長は、**2023年のGX脱炭素電源法で法制化済み**



※「運転期間は最長で60年（40年＋20年）に制限」という枠組みは維持

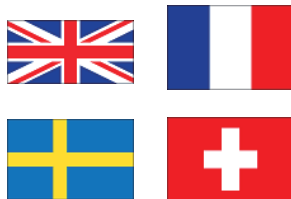
※事業者が予見し難い事由による停止期間に限り、60年の**運転期間のカウントから除外**

長期運転に関する国際動向

長期運転に関する国際動向①

- 欧米主要国では、法令によって運転期間に上限を設けていない（ハンガリー、スロベニアには上限規定あり）
 - 米国は初回40年＋20年更新（更新回数の制限なし）
 - 欧州諸国の多くは、法令で運転期間の上限規定なし

ライセンスに運転期間の規定がない国の例



ライセンスに運転期間の規定はあるが更新回数の制限がない国の例



稲村（2021）を参考に作成

長期運転に関する今後の課題

長期運転に関する国際動向②

- ※ 欧米諸国においても、脱炭素化に寄与する原子力発電が見直されつつある
 - ※ 積極的な新增設の方針を打ち出した国もある
 - ※ 欧米諸国においても、新增設は円滑に進んでいない
- 長期運転の重要性の高まり

OECD/NEA (2021)

- As a result, if utilities implement enhanced ageing management programmes using readily available technical evidence, while performing the necessary repairs and replacements, long-term operation should not face any major, generic, technical barriers.
- Refurbishing existing plants is also simpler from a technical and managerial perspective than building a new plant.
- 十分な高経年化管理がなされれば、長期運転に関する技術的障壁なし
- 既存の原子力発電所の改修は、技術的/管理的な面でも、新設よりも容易

→ 中長期的な電源の脱炭素化、電力の安定供給の観点から、60年超運転のあり方について、停止期間のカウント除外のみで十分かも含めて要検討



バックエンド事業の不確実性への対処の必要性

GX基本方針

- 廃止措置の着実かつ効率的な実現に向けた知見の共有や資金確保等の仕組みの整備を進める
- 最終処分の実現に向けた国主導の取り組みを抜本強化する

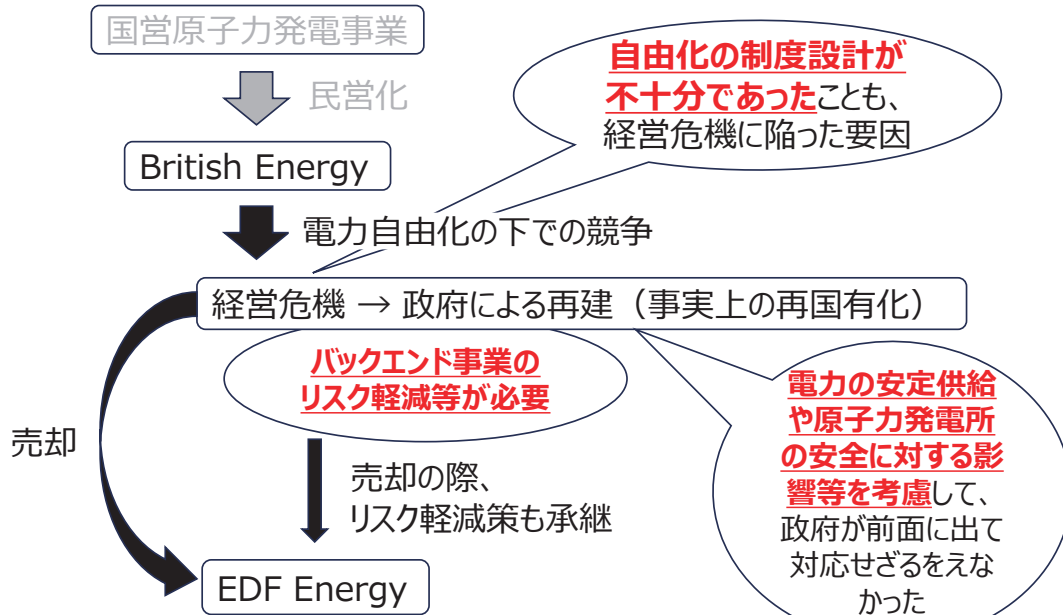
→ 廃止措置に関する仕組みの整備は、**GX脱炭素電源法で法制化済み**（使用済燃料再処理機構の業務に、全国の廃止措置の総合的調整、廃止措置に必要な資金管理等が追加）

バックエンド事業は、**長期間にわたる事業であり、さまざまな不確実性を有する**

→ 円滑に推進するためには、**官民の役割分担等**を検討することが重要



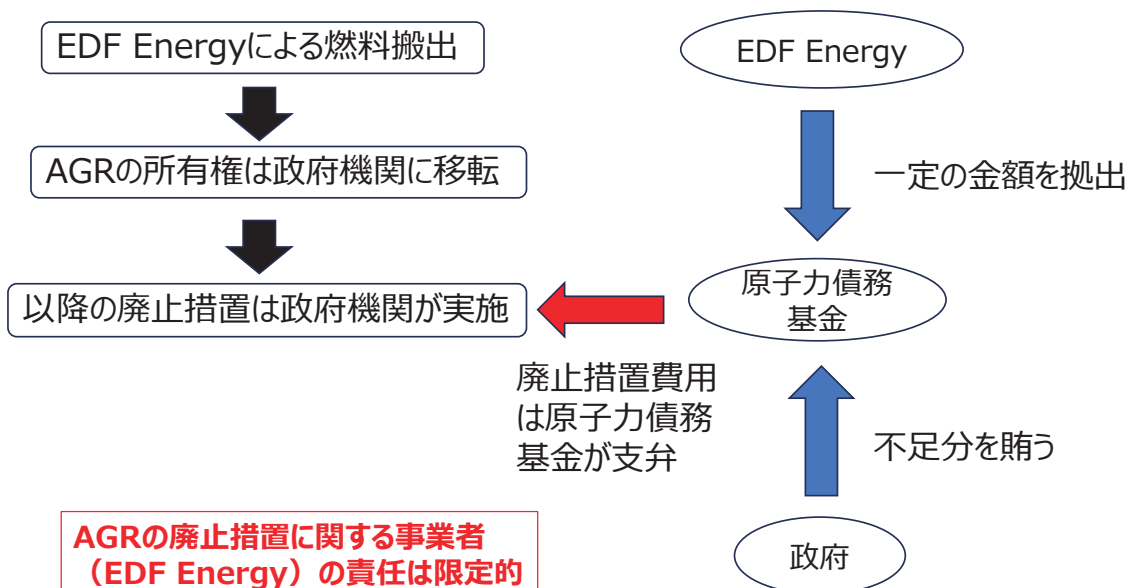
英国のバックエンド事業では 政府の役割が大きい



稲村（2023）を参考に作成



英国のバックエンド事業における官民の役割分担の例 （改良型ガス冷却炉（AGR）の廃止措置）



稲村（2023）を参考に作成



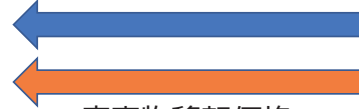
(参考) 英国のバックエンド事業における官民の役割分担の例 (廃棄物移転価格)

地層処分施設（GDF） を建設する政府

放射性廃棄物管理方針の
決定、地層処分施設サイト
選定プログラムの実施など

引き取り後、費用がWTPを
上回った場合は、国が超過
分を負担

GDFで処分する使用済燃料等



廃棄物移転価格
(WTP) の支払い

※ リスクプレミアムを加えたWTPを
事業者が支払うことにより、政府
がリスクを引き受ける仕組み

原子力発電所を 新設する事業者

廃棄物発生者として、
放射性廃棄物管理
費用を引き当て

WTPの支払い後は、費用が
上振れしても追加の支払いの
責任は負わない

服部（2022a）を参考に作成

- WTPによって廃棄物処分費用に関する事業者の予見性を確保
→ 新增設の促進を意図



日本のバックエンド事業における 官民の役割分担の検討

- 廃止措置および廃棄物処分の費用は、発生者負担原則に基づき、事業者が一義的に負担すべきものである。
- 英国のように、事業者がリスクプレミアムも含めて一定の負担をした上で、事業者が制御不能な一定以上のリスクは国が負うという役割分担をしている国もある。
- 日本においても、バックエンド事業が有するリスク（特に長期間にわたる事業の不確実性）について、どこまでが事業者に制御可能なリスクかを見極め、必要に応じ国との役割分担を再検討していくことが重要。

報告内容

1. 原子力発電の必要性とその背景
2. 既存の原子力発電所を可能な限り活用するために
3. 原子力発電所の建て替えの促進に向けて
4. まとめ



次世代革新炉への建て替え

福島第一原子力発電所
事故以降の政府方針
からの大きな転換

GX基本方針

- 新たな安全メカニズムを組み込んだ次世代革新炉の開発・建設に取り組む
- 廃炉を決定した原子力発電所の敷地内での次世代革新炉への建て替えを対象として具体化を進める

➤ 2050年カーボンニュートラルを見据えると、依存度を下げる努力はしつつも、一定程度は原子力発電の活用も必要という政府の姿勢が明確化

→ 建設経験の途絶やサプライチェーンの劣化に対して何も手を打たなければ、新たに建設が必要になったときにコストが上振れするおそれ

建て替えに伴う主な懸念

- 政府方針が前向きになったからと言って、事業として成立する見通しが立たなければ、事業者は建て替えに向けて積極的に動くことはできない

➤ 建て替えに向けた投資判断に際して、主な懸念として考えられるのは、

①投資回収リスク

建て替えに必要な巨額投資の回収予見性

②規制リスク

審査の長期化等による総事業費の不確実性

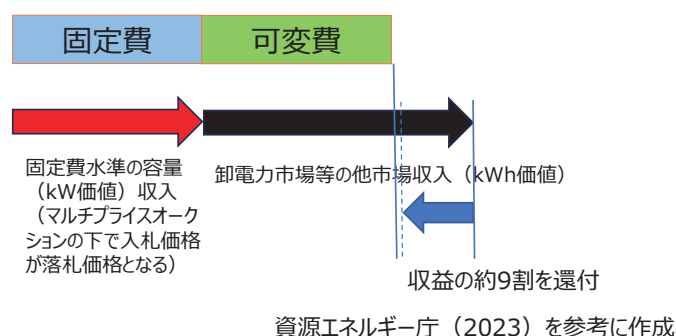
- 英国でも同様の懸念があり、原子力発電所の新設を促進するために、投資回収リスクと規制リスクに対して制度的措置を実施/検討



長期脱炭素電源オークション

- 容量市場の一類型

- 脱炭素電源への新規投資が対象
- 20年価格固定（収益の予見性向上を意図）



- ✓ 20年価格固定という仕組みが、電源の新設費用の不確実性に対処しうるのは不透明

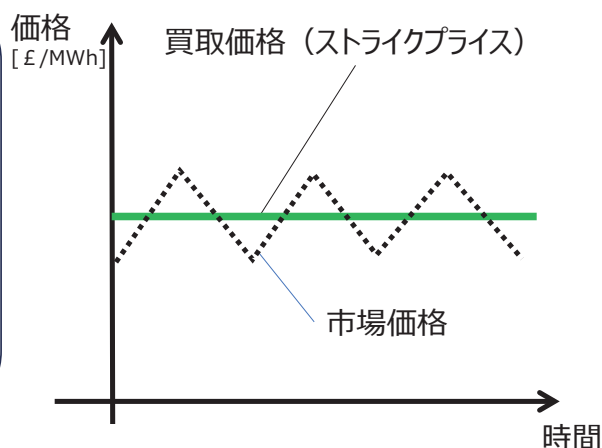


英国における原子力発電所の新設を 促進するための制度的措置I-a

①投資回収リスクに対する制度的措置a

➤ 差額契約型固定価格買取制度 (FIT-CfD)

- ✓ 市場価格と、あらかじめ定められた買取価格（ストライクプライス）の差額を精算することにより、**発電による収入が一定**となるような制度
- ✓ Hinkley Point Cに適用



服部（2022b）を参考に作成



FIT-CfDで明らかになった課題

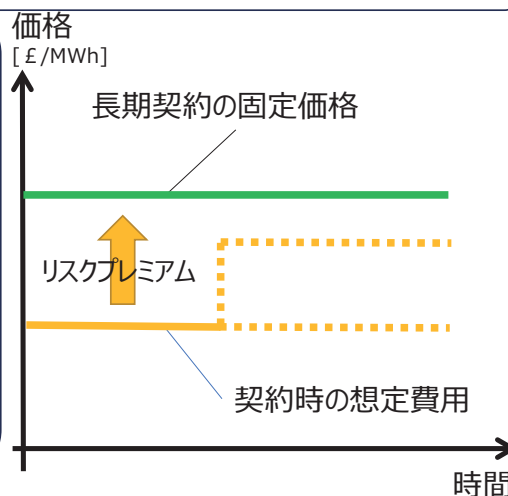
2013年10月に決定したHinkley Point Cに対するFIT-CfDのストライクプライス（92.5 £/MWh）は、当時の卸電力市場価格（40～50 £/MWh）よりかなり高水準

FIT-CfDの下では、建設費が高騰して利益が減少するリスクは、投資家が負担

投資家は、リスク負担のため、リスクプレミアムを加えた高い収益率を要求

資金調達費用の増加

ストライクプライスの上昇



産業界：建設費抑制の努力
政府：RABモデルの導入可能性を検討

総事業費の低減による
国民負担の軽減を意図

服部（2022b）を参考に作成

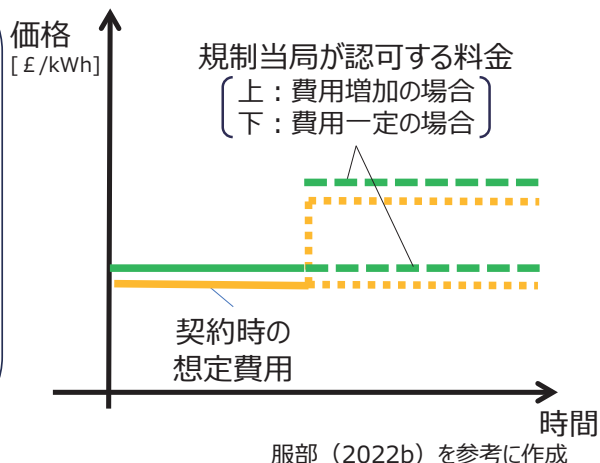


英国における原子力発電所の新設を 促進するための制度的措置I-b

①投資回収リスクに対する制度的措置b

➤ 規制資産ベースモデル (RABモデル)

- ✓ 適正な報酬率に基づき利益を確保できる総括原価を規制料金で回収する制度
- ✓ Sizewell Cへ適用予定 (2023年時点)



※RABモデルの導入によって、資金調達問題の軽減が可能
→ 総事業費の低減
→ 国民負担の軽減 によってRABモデル導入を正当化



英国における原子力発電所の新設を 促進するための制度的措置II

②規制リスクに対する制度的措置

- 包括的設計評価 (GDA)
 - ✓ 炉型ごとの設計認証
 - ✓ 審査が進む中で、原子炉の設計上の不備等によって審査が停滞するリスクを低減することが目的
- 戦略的サイト評価 (SSA)
 - ✓ 新設に適したサイトをあらかじめ特定し評価
 - ✓ 審査が進む中で、当該サイトが政府の基準を満たしていないことが判明して、計画が遅延または中止となるリスクを低減することが目的

→ SSAの結果として適地候補となったサイトに、GDAに適合した炉型の原子力発電所を建設することによって、建設リードタイムの短縮を見込む

稲村 (2022) を参考に作成



原子力発電に関する制度的措置を 英国が導入した背景

■ エネルギー安全保障に対する懸念

■ 電源の低炭素化の必要性

→2つの課題を同時に解決する手段として、再生可能エネルギーの利用拡大を目指すとともに、原子力発電に一定の役割を期待

→ 市場原理に委ねるだけでは円滑に進まない新設については、
前述した種々の制度的措置によって事業者の投資を促進

稲村（2022）を参考に作成

■ **原子力発電に一定の役割が期待される背景は日本も同様であり、新設促進のための制度的措置を正当化する論理は、日本においても参考になる**



日本における制度的措置の必要性

■ 日本においても、建て替えに向けた事業者の投資促進のためには、投資回収リスクと規制リスク等を低減するための制度的措置が必要

➢ 建て替えに対するRABモデル類似の制度的措置

- ✓ 長期脱炭素電源オークションによって建て替えが促進されるかどうかは不透明
- ✓ 投資回収リスクを低減できるRABモデル類似の制度的措置の検討が必要

➢ 立地・新設規制の合理化による総事業費の不確実性低減

- ✓ 最終的な投資判断や設置許可申請等をする前に、部分的な評価を可能とし、総事業費の不確実性を低減する仕組みについて検討が必要

報告内容

1. 原子力発電の必要性とその背景
2. 既存の原子力発電所を可能な限り活用するために
3. 原子力発電所の建て替えの促進に向けて
4. まとめ

4. まとめ

まとめ

既存の原子力発電所を
可能な限り活用するために

➤ 長期運転に関する課題

さらなる長期運転を中長期的な
選択肢として確保しておくことの
重要性を考慮に入れ、関連する
制度の検討が必要

➤ バックエンド事業の円滑な推進

- ✓ 主に廃止措置と廃棄物処分
に関する課題

事業の長期的な不確実性を考慮に
入れ、事業者が制御可能なリスクか
を吟味した上で、官民の役割分担
を再検討していくことが必要

原子力発電所の建て替え
の促進に向けて

- 次世代革新炉への建て替え
 - ✓ 収益の予見性向上に関する課題

事業者の投資促進のためには、事業者
が積極的に投資できる、投資回収リスク
や規制リスクを低減する制度的措置の
導入等の事業環境整備が必要

ご清聴ありがとうございました

電力中央研究所
Central Research Institute of Electric Power Industry

参考文献

1. 稲村（2021）：稲村智昌, 米国及び欧州諸国の原子力発電所の長期間運転を巡る動向, 電力中央研究所報告Y20002, 2021.
2. 稲村（2022）：稲村智昌, 英国の原子力政策の変遷とその背景要因 —退潮から再興へ—, 電力経済研究, No.68, pp.113-126, 2022.
3. 稲村（2023）：稲村智昌, 英国の原子力発電所の廃止措置及び廃棄物処分事業を巡る動向—実施体制の変遷とその要因を中心に—, 電力中央研究所報告SE22002, 2023.
4. 資源エネルギー庁（2023）：資源エネルギー庁, 安定供給に必要な供給力の確保に関する取組の状況等について, 第64回総合資源エネルギー調査会電力・ガス事業分科会電力・ガス基本政策小委員会資料3, 2023.
5. 服部（2022a）：服部徹, 英国の新設原子力発電所を対象とする廃棄物移転価格制度の概要—政府と民間の責任分担のアプローチ—, 電力経済研究, No.68, pp.47-53, 2022.
6. 服部（2022b）：服部徹, 英国における新設原子力発電所の資金調達手法「規制資産ベース（RAB）モデル」の導入をめぐる議論, 電力経済研究, No.68, pp.31-46, 2022.
7. OECD/NEA（2021）：OECD/NEA, Long-Term Operation of Nuclear Power Plants and Decarbonisation Strategies, NEA No.7524, 2021.

略語一覧

- AGR : Advanced Gas-cooled Reactor (改良型ガス冷却炉)
 FIT-CfD : Feed-in-tariff Contract for Difference (差額契約型固定価格買取制度)
 GDA : Generic Design Assessment (包括的設計評価)
 GDF : Geological Disposal Facility (地層処分施設)
 RAB : Regulated Asset Base (規制資産ベース)
 SSA : Strategic Siting Assessment (戦略的サイト評価)
 WTP : Waste Transfer Price (廃棄物移転価格)

【個別報告5】

次世代革新炉の安全性向上と 早期導入に資する研究

電力中央研究所
エネルギートランスフォーメーション研究本部
研究統括室 研究戦略担当（次期原子炉）
兼 原子力リスク研究センター リスク評価研究チーム
副研究参事 宇井 淳

研究報告会2023

2023年11月16日

電力中央研究所

© CRIEPI 2023

電力中央研究所

本報告でお伝えしたいこと

- 2050年のカーボンニュートラルを目指すには、サプライチェーン・技術・人材を維持し、次世代革新炉をタイムリーに導入していくことが重要。
- 本報告では、次世代革新炉の**新たな安全メカニズムの妥当性の確認に必要な知見を拡充**し、現象や解析手法などの**不確かさを低減**する研究、および**立地の自由度を拡大**する方策に関わる研究を紹介する。
- また、**原子力安全に関する国際標準的な考え方**や**今後の規制の近代化 (Modernization)の動向**を踏まえ、**次世代革新炉の安全設計・安全評価手法の構築**に取り組む方針を紹介する。

© CRIEPI 2023

1

報告内容

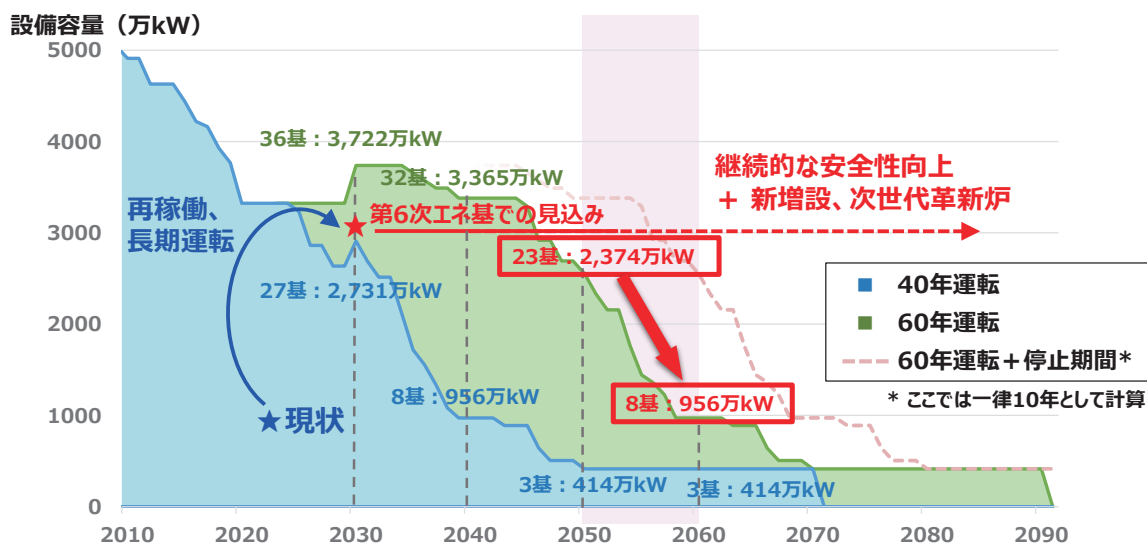
1. 次世代革新炉の計画と導入時期
2. 次世代革新炉の導入に資する研究開発
3. 今後の安全評価や規制の近代化に対応する研究
4. まとめ

報告内容

1. 次世代革新炉の計画と導入時期
2. 次世代革新炉の導入に資する研究開発
3. 今後の安全評価や規制の近代化に対応する研究
4. まとめ

原子力発電所の設備容量の見通し

- 原子力発電所を60年運転としても2050年代に既設炉は急激に減少
- 電源確保のため、2050年までに次世代革新炉の導入が必要
- 設計、許認可、建設期間を踏まえ、着実に実現していく必要がある



© CRIEPI 2023

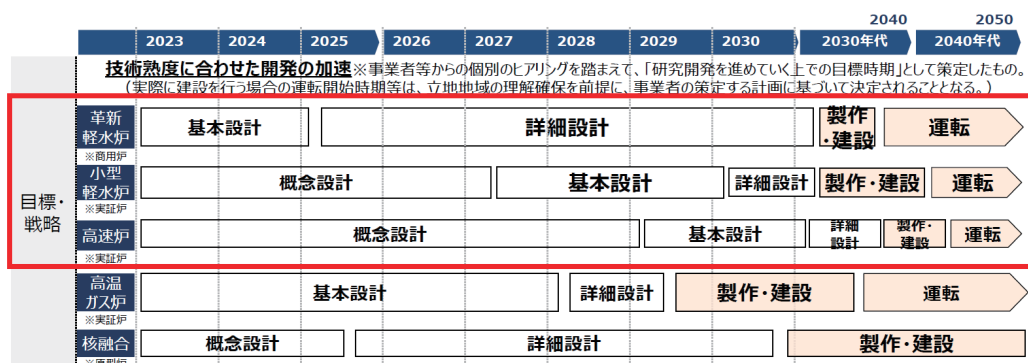
経済産業省 第31回 総合資源エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会 原子力小委員会「原子力政策に関する今後の検討事項について」(2022/9/24) を基に電中研で作成

4

次世代革新炉の今後の目標・戦略 (GX)

- 本発表では、2040～2050年代に運転開始の計画となっている以下の発電用の次世代革新炉¹⁾を対象に説明。

- 革新軽水炉
- 小型軽水炉
- 高速炉



出典：GX実現に向けた基本方針（閣議決定）参考資料（2023年2月10日）に枠を追記

© CRIEPI 2023

5

当所の考える次世代革新炉の課題など

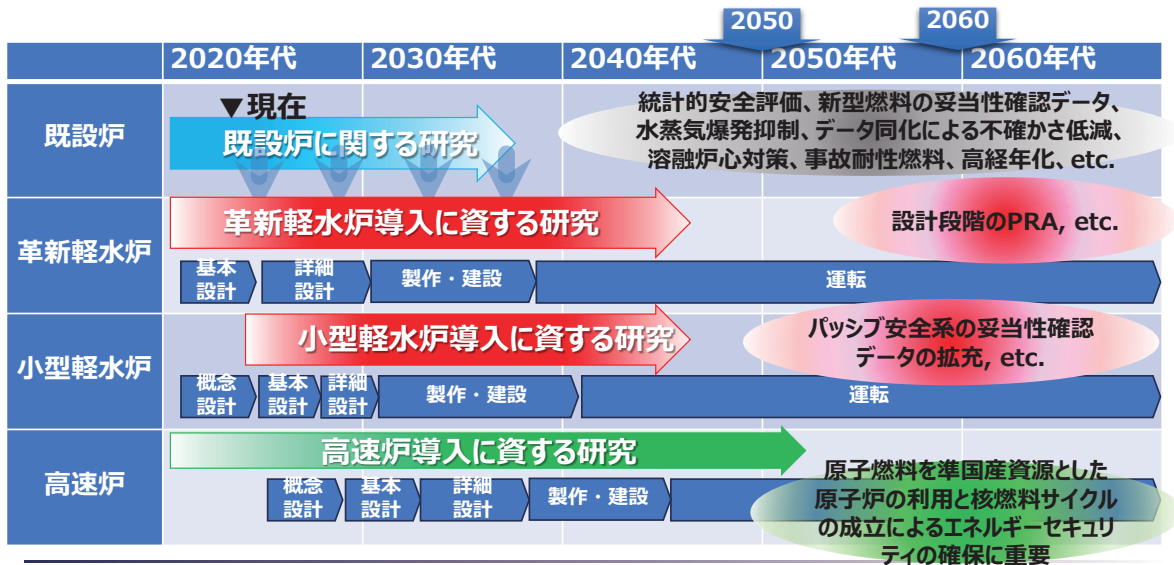
- 次世代革新炉の課題としては、発電事業としての成立性、サプライチェーン、技術・人材の維持、社会的受容性などが挙げられるが、以降では以下に関する研究について紹介。
- **新たな設計や安全メカニズム等の妥当性確認(Validation)の根拠となり不確かさを低減する知見の拡充**
- **立地自由度の拡大**
 - 『廃炉を決定した原子力発電の敷地内での次世代革新炉への建替え』
- **規制制度や要件の今後の変化を踏まえた安全評価等**
 - 小型炉や高速炉向けの規則の改定や制定
 - 今後の許認可の近代化や、原子力安全の考え方の深化による安全設計・安全評価手法の構築

報告内容

1. 次世代革新炉の計画と導入時期
2. 次世代革新炉の導入に資する研究開発
3. 今後の安全評価や規制の近代化に対応する研究
4. まとめ

次世代革新炉の導入に資する当所の研究

- 当所で取り組んできた既設炉の研究の多くは、革新軽水炉に利用可能
- 小型軽水炉向けの設計や安全に関わる研究も、今後進めていく予定
- 高速炉についても、金属燃料などの研究を進めている

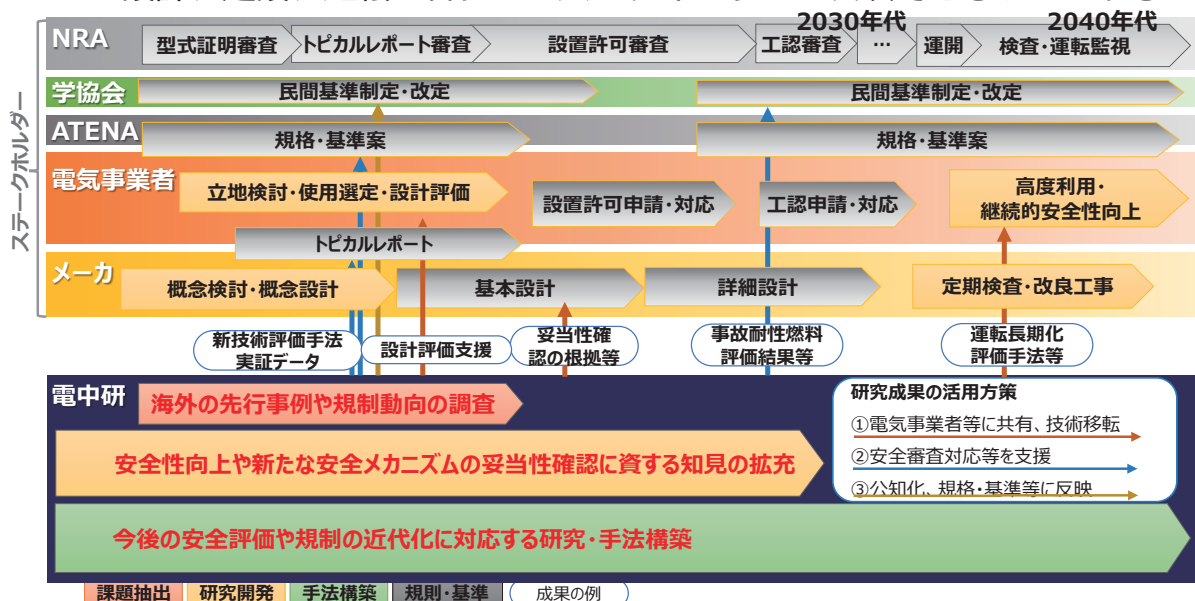


© CRIEPI 2023 GX実現に向けた基本方針（閣議決定）（2023年2月10日）等を参考に作成

8

革新軽水炉に関する研究成果活用とその時期

- 研究成果は、多くのステークホルダーに活用できるよう取り組む
- 設計、建設、運転の各フェーズにタイムリーに反映できるようにする

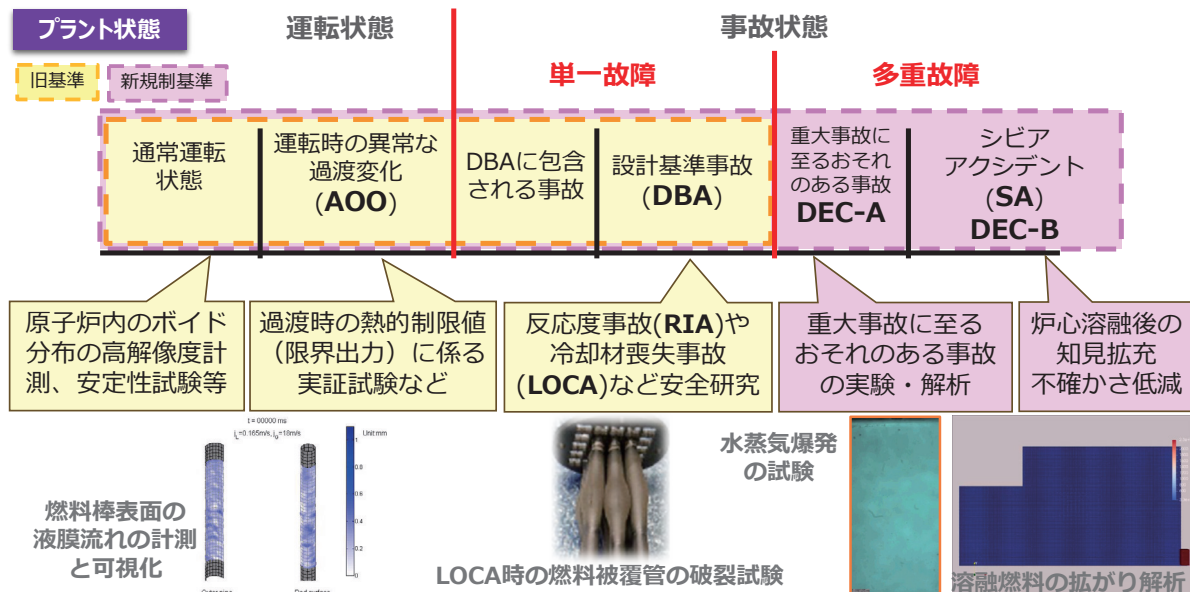


© CRIEPI 2023

9

次世代革新炉の安全性確認に資する知見の拡充

- 各プラント状態（通常運転～シビアアクシデントまで）の重要な課題を抽出し、その解決や知見の拡充に必要な研究に取り組む



© CRIEPI 2023

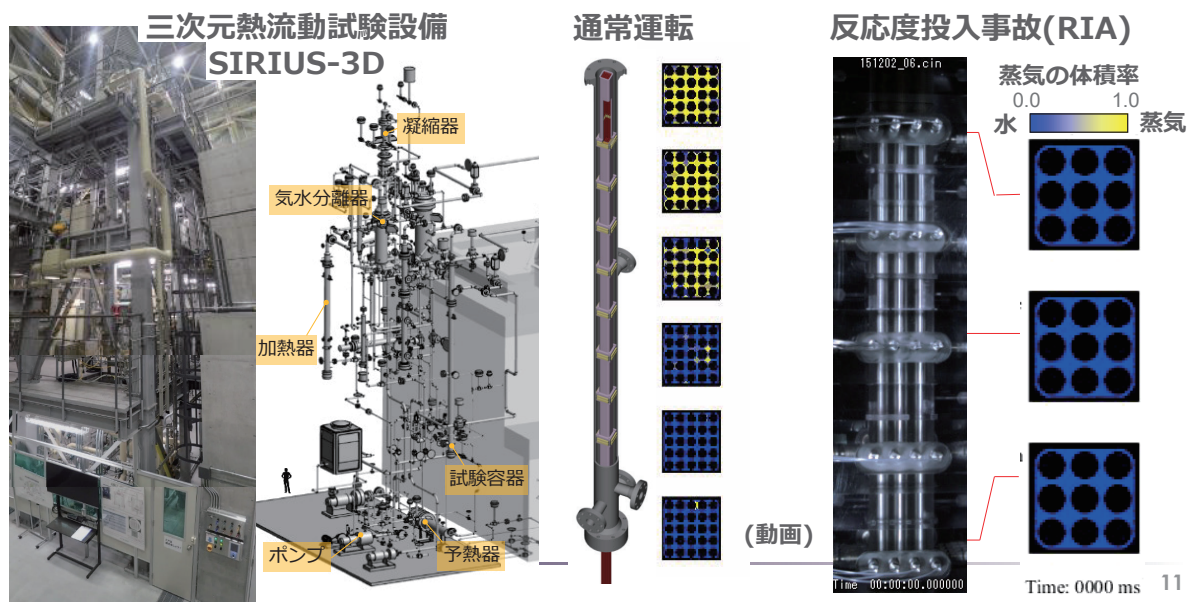
AOO: Anticipated Operational Occurrence, DBA: Design Basis Accident

RIA: Reactivity Insertion Accident, LOCA: Loss-of-coolant Accident, DEC: Design Extension Condition

10

通常運転～事故～シビアアクシデントにおける解析コード(計算プログラム)の妥当性確認データの取得

- 当所の高解像度の熱流動等の計測技術と、原子炉内を再現できる試験インフラを活用して、実際の原子炉と同じ高温・高圧の条件で試験を行い、次世代革新炉の妥当性確認に必要な知見を拡充する



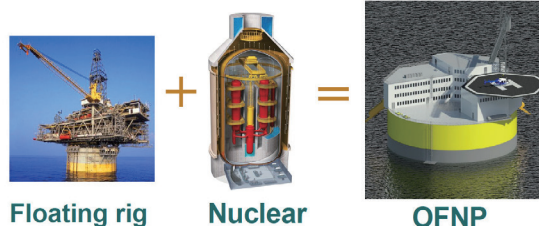
新たな原子力立地に関する研究

■ 次世代革新炉の新たな立地の自由度の拡大を目指して取り組む

■ 洋上立地（浮体式原子力発電所）に関する研究^{2)~4)}

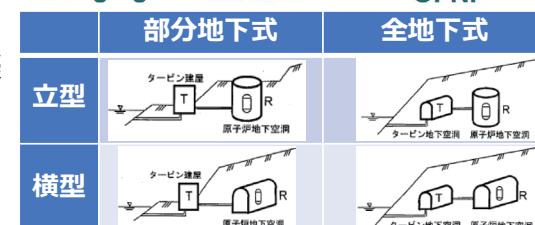
- 沖合30 kmでの稼働 → UPZ¹⁾がすべて洋上 → 住民の避難がほぼ不要
- 外部自然ハザードの影響が緩和される（地震、津波、火山）
- 周辺に海水が豊富 → 炉心溶融事故を実質的に排除する設計が可能
- 経済産業省NEXIP事業²⁾にて実施中

- ✓ 浮体揺動を模擬した熱水力試験
- ✓ 革新軽水炉を搭載するレイアウト
- ✓ 沖合での揺動時の事故のシミュレーション
- ✓ 概念設計 等



■ 地下立地に関する研究

- 敷地内建替の制約の解決策の一つ
- 地下立地は地上と比較して土木・建築の面から耐震設計上有利と評価
- 1990年代に技術的・経済的成立性を確認したが、最新の基準・知見に照らして再評価を実施



© CRIEPI 2023 ¹⁾UPZ：緊急時防護措置を準備する区域 ²⁾NEXIP：経済産業省「社会的要請に応える革新的な原子力技術開発支援事業」¹²⁾

報告内容

1. 次世代革新炉の計画と導入時期

2. 次世代革新炉の導入に資する研究開発

3. 今後の安全評価や規制の近代化に対応する研究

4. まとめ

当所が着目する次世代革新炉の設計や安全の観点

■ 欧米の安全基準や規制規則の近代化 (Modernization)

- IAEAやWENRA : 5)~9)
 - ✓ “放射性物質の大規模放出となる事故の実質的な排除”を要求
- 米国NRCやNEI : 11)~15)
 - ✓ 「原子力エネルギー革新と近代化法」(NEIMA)の制定
 - ✓ 米国産業界(NEI)による規制近代化への取組み (NEI18-04, NEI21-07)
 - ✓ NRCの非軽水炉や革新炉向けの新たな規制制度案 (10CFR Part 53の案)
- いずれも、**環境への放射性物質放出のリスク低減を重視**
 - ✓ 原子力の安全原則「**人と環境を放射線影響から護る**」の基本に回帰
 - ✓ 「**低頻度・高影響**」のシナリオも考慮する方向となっている

■ “How safe is safe enough?”の考え方の深化と対応

- 法令や規則への適合だけでなく、安全性を高めていくには：
深層防護、リスク情報、安全裕度、不確かさ等を踏まえ、新設炉の設計や安全対策をどのように考え、解析・評価・判断するか

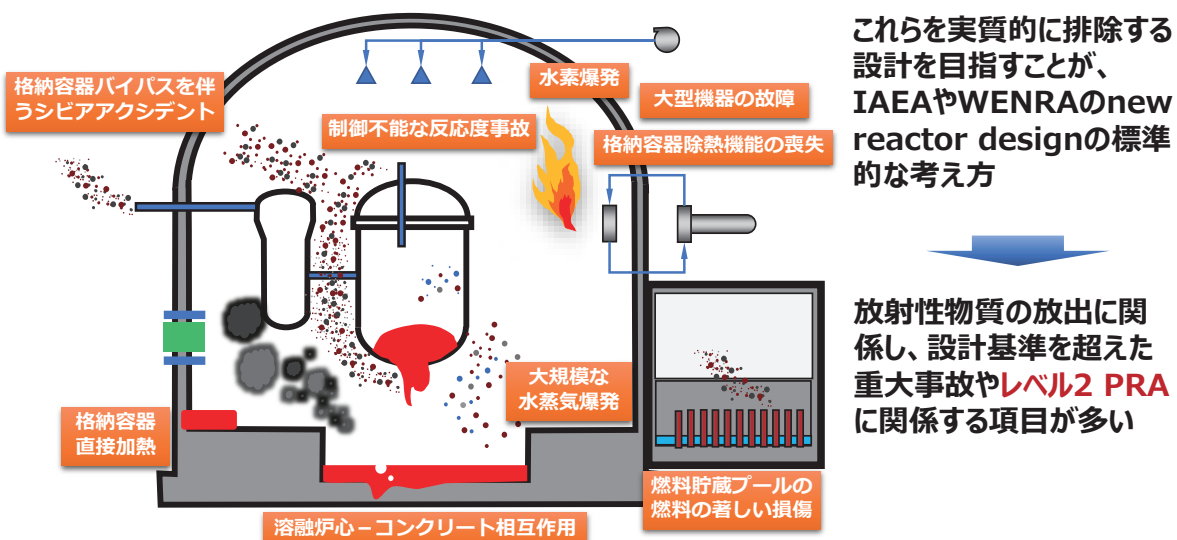
昨今の原子力安全の考え方・安全基準など(1)

■ IAEAやWENRA

- “**Practical Elimination (PE)**”がIAEA SSR-2/1(設計要件)に記載
 - ✓ 『**放射性物質の大規模放出となる事故の実質的な排除(Practical Elimination)**』を目指す設計を求めている
 - ✓ PEと言えるかの正当性は、**単に確率論的な目標を満たすかどうかで判断はしない**
 - ✓ **不確かさと解析の限界**を考慮し**決定論と確率論を組み合わせた安全評価が重要**
 - ✓ 設計や設備の安全性のターゲットとして、**安全目標**と類似の役割
- PEの概念
 - ✓ **第一の概念：物理的不可能性 (physical impossibility)**
 - 不確かさを踏まえて最大範囲や最悪ケースをカバーできることを示す必要がある → 実証が難しい
 - ✓ **第二の概念：高い信頼性を持ってその状態が著しく発生しにくいこと (extreme unlikelihood with a high degree of confidence)**
 - 基本は設計・設備対応。人的要因も可能な限り留意する。不確かさを考慮する（現象の不確かさも含む）。
 - 実証には、**決定論的な要件への適合の確認**と共に、**確率論的な分析**により **extreme unlikelihood**を確認する。（PRAは内的、外的、燃料貯蔵プールを含む）

Practical Eliminationとして取り組むべき項目

- PEとして対処すべきカテゴリーに含まれる現象や事故シナリオの実質的な排除（リスクの低減）に繋がるように、必要な知見や実験的根拠を拡充する研究を進める



© CRIEPI 2023

IAEA TECDOC-1791 (2016), IAEA SSG-88 (近日発行予定)

16

昨今の原子力安全の考え方・安全基準など(2)

■ 米国NRCとNEI

- 既設炉の連邦規則 (10 CFR Part 50)
 - ✓ 段階規制で規範的(prescriptive)であり、申請者から不満が多かった
- 新型炉の連邦規則 (10 CFR Part 52)
 - ✓ 早期サイト許可(ESP)、設計認証(DC)、建設運転一括許可(COL)等の仕組みを用意したが、Part 52で建設が完了したのはまだ2基のみ
 - ✓ DOEの革新炉実証計画*では、柔軟に設計変更できるPart 50を利用
- NEIやSouthern Companyは、許認可近代化プログラム(LMP)を推進し、リスク情報と性能を基準とするガイドを策定(NEI 18-04)
 - 設計段階のPRAによって複数基が立地するサイトの状態を考慮して種々の事象のシナリオがリスク上重要かどうかを確認する
 - 低頻度・高影響の事故シナリオのリスクを下げ、深層防護の充足性(adequacy)の評価を行っていく
- NRCは、非軽水炉と革新炉向けに新たな連邦規則案(Part 53)を策定。NEIと議論が継続中。
 - ✓ 非軽水炉に限らず革新軽水炉にも今後適用される見込み

ESP: Early Site Permission, DC: Design Certification, COL: Combined License, LMP: Licensing Modernization Program

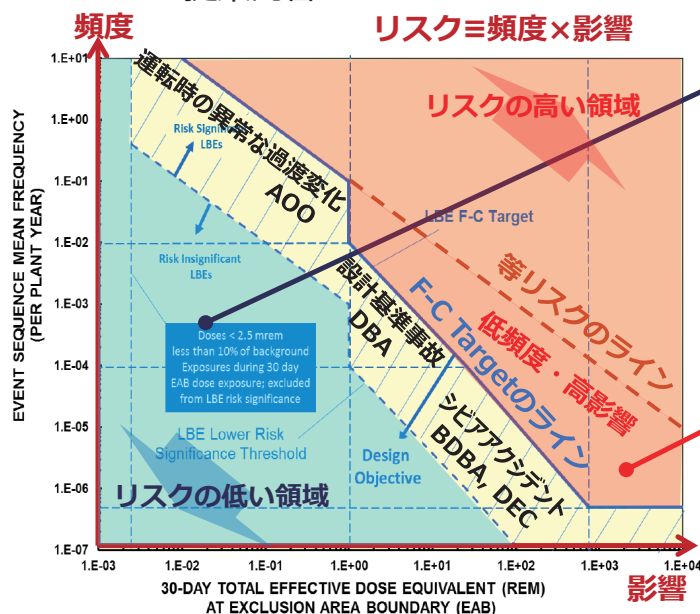
*Advance Reactor Demonstration Projects (ARDP): TerraPowerのNatriumTMやX-energyのXe-100など。設計が成熟していない新型炉は、運転許可が下りるまで柔軟に設計変更できるPart 50の方が進めやすいとのこと。

© CRIEPI 2023

17

リスク重要度の許可基準事象を決める
頻度-影響ターゲット (F-C Target)

■ NEIの提案内容



■ その意味合い

リスクの低い事象は、リスク上重要な許可基準事象(LBE)から除外される

- ✓ **リスク上重要な事象を重点的に評価する**
- ✓ 単一故障と多重故障の区別があまり意味を持たなくなる
- ✓ 瞬時ゼロチン破断(LOCA)や制御棒落下事故(RIA)など従来の代表的な事故が低頻度であればLBEに含めない可能性あり

等リスクのラインではなく、
低頻度・高影響の設計や対策を重視している

- ✓ 人と環境への放射線影響のリスクを下げる設計になる

Figure 3-4. Use of the F-C Target to Define Risk-Significant LBEs

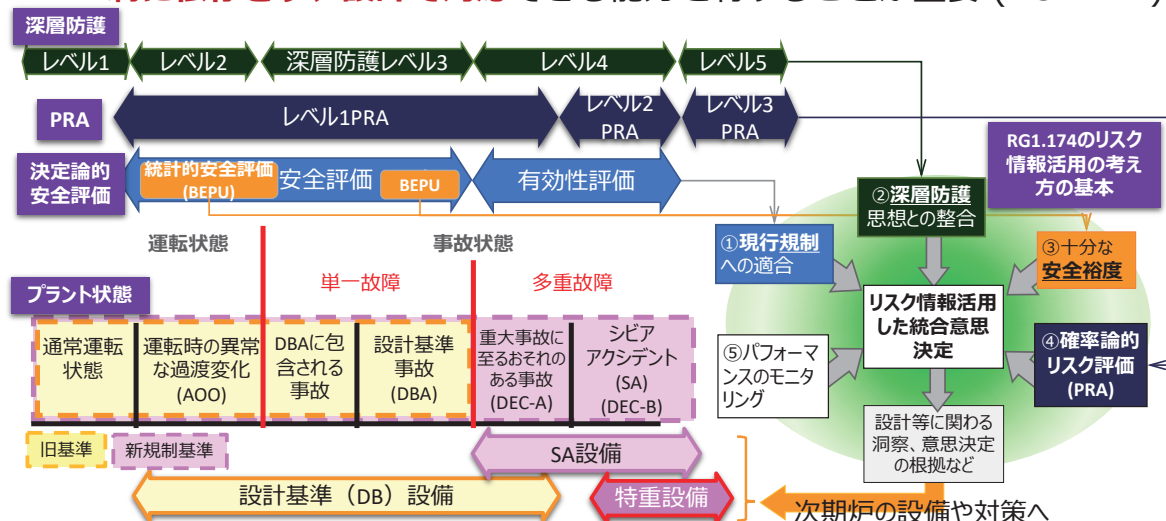
出典：NEI 18-04 (2019)のFig.3-4にFig.3-1の内容を筆者が一部加筆

© CRIEPI 2023

18

次世代革新炉の設計や評価は深層防護の各層のバランス
とリスク情報活用の5つの視点が重要

- 次世代革新炉の設備等は、**規制への適合、深層防護、PRA、安全裕度、モニタリングなどリスク情報活用**の5つの視点で考えることが重要
- また、**深層防護の層間のバランス**が合理的にとれており、**代替策に過剰に依存せず、設計で対応**できる能力を有することが重要 (RG1.174)



© CRIFPI 2023 IAEAのPlant States (Glossary, SSR-2/1 rev.1), 深層防護の分類, Regulatory Guide 1.174の図等を併記して筆者が作成

19

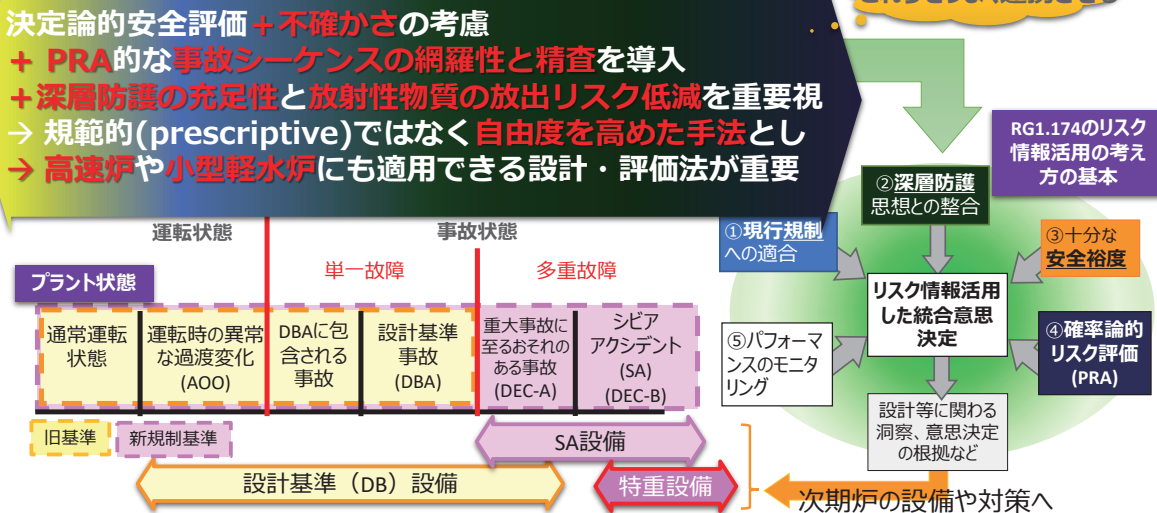
将来の規制の近代化に対応する安全設計・評価

- 前述のような**規制の近代化の動向にも対応**できる準備を進める
 - 建設前の**設計段階のプラント**を対象としたPRA手法を構築する
 - **決定論的安全評価に不確かさの考慮とPRAの長所**を巧く取り込む

決定論的安全評価 + 不確かさの考慮

- + **PRA的な事故シーケンスの網羅性と精査**を導入
- + **深層防護の充足性と放射性物質の放出リスク低減**を重要視
- 規範的(prescriptive)ではなく**自由度を高めた手法**とし
- **高速炉や小型軽水炉**にも適用できる**設計・評価法**が重要

これらをうまく連携させる

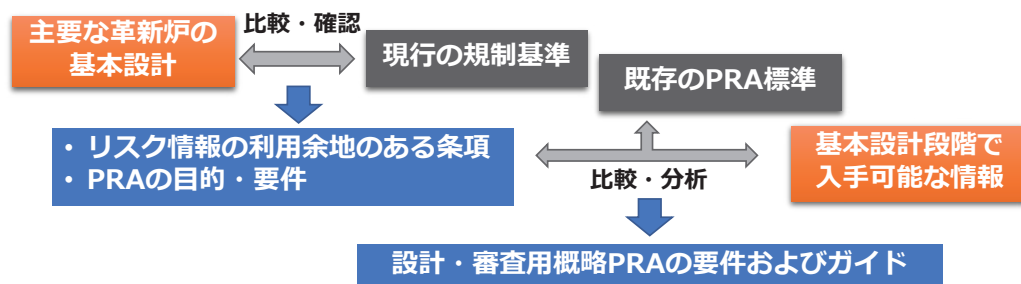


© CRIEPI 2023

20

設計段階のPRAガイドの整備および 種々のハザードを扱う一括評価手法の構築

- 次世代革新炉の**新たな安全メカニズムの規則等への適合性確認**や、**規則の解釈**で言及されていない**新たな方策の導入**において、**既設炉に比べ次世代革新炉の安全性が向上**することを**定量的に示せる**ことは重要
- **設計段階の次世代革新炉**について、**既設炉よりリスク低下**(安全性向上)を確認するPRAの方法論を構築する
 - 恒設/可搬式設備、建屋強化、溶融炉心対策等の効果の定量化, etc.¹⁶⁾
 - 種々の外的ハザードを踏まえたリスク評価
 - PRA等の不確かさを踏まえた深層防護の充足性の確認

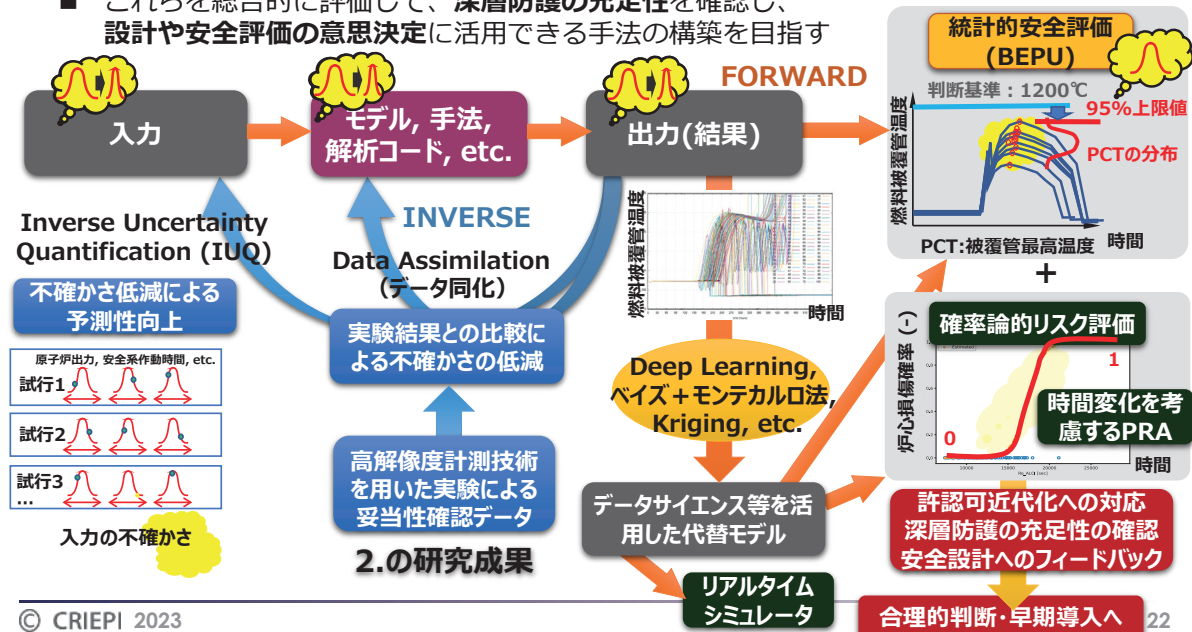


© CRIEPI 2023

21

決定論的安全評価をベースに確率論的アプローチや不確かさを踏まえた手法の構築・高度化

- 統計的安全評価と時間変化を考慮するPRAのプロセスは共通点が多い(**FORWARD**)
- 実測データとの比較や入力の変正化による**不確かさ低減**手法を実用化する(**INVERSE**)
- これらを総合的に評価して、**深層防護の充足性**を確認し、**設計や安全評価の意思決定**に活用できる手法の構築を目指す



報告内容

1. 次世代革新炉の計画と導入時期
2. 次世代革新炉の導入に資する研究開発
3. 今後の安全評価や規制の近代化に対応する研究
4. まとめ

まとめ

- 2050年のカーボンニュートラルを目指すには、目標とする原子力発電の電源構成比率の達成やサプライチェーン・技術・人材の維持のため、次世代革新炉の導入をタイムリーに進めることが重要。
- 当所の次世代革新炉の研究は、原子力安全の基本的な考え方、リスク、**大規模な放射性物質を放出する事故の実質的な排除**等の観点で、**新たな安全メカニズムの妥当性確認に必要な知見や実験的根拠を拡充し、不確かさを低減する研究**を進めていく。また、次世代革新炉の**立地の自由度を拡大**する方策の研究も、引き続き取り組む。
- 次世代革新炉の**安全性向上を設計段階で合理的に確認できるPRA**の活用方法・ガイドの構築や、**将来の規制の近代化に対応する安全設計・安全評価**に関わる研究を進め、早期導入を支援する。

ご清聴ありがとうございました

R 電力中央研究所

Central Research Institute of Electric Power Industry

参考文献

- 1) 内閣官房: GX実現に向けた基本方針 (閣議決定) (2023年2月).
- 2) J. Buongiorno, M. Golay, N. Todreas: Offshore Floating Nuclear Power Plant, IAEA Marine based SMRs (2021).
- 3) 産業競争力懇談会: 2022年度プロジェクト最終報告 浮体式原子力発電 (2023年2月).
- 4) 宇井 淳: 国内における浮体式原子力発電の検討状況, 日本原子力学会誌, 65(9), 547-551 (2023).
- 5) IAEA: Safety of Nuclear Power Plants: Design, Specific Safety Requirements No. SSR-2/1, Revision 1 (2016).
- 6) IAEA: Considerations on the Application of the IAEA Safety Requirements for the Design of Nuclear Power Plants, IAEA-TEDOC-1791 (2016).
- 7) IAEA: Assessment of the Safety Approach for Design Extension Conditions and Application of the Concept of Practical Elimination in the Design of Nuclear Power Plants, Draft Version of SSG-88 (2023).
- 8) WENRA: WENRA Report Safety of new NPP designs (2013).
- 9) WENRA: WENRA Report Practical Elimination to New NPP Design (2019).
- 10) IAEA: Nuclear Safety and Security Glossary (2022).
- 11) NRC: Regulatory Guide 1.174, An Approach for Using Probabilistic Risk Assessment in Risk-Informed Decisions on Plant-specific Changes to the Licensing Basis, Revision 3 (2018).
- 12) NEI: Risk-Informed Performance-Based Technology Inclusive Guidance for Non-Light Water Reactor Licensing Basis Development, NEI 18-04, Rev.1 (2019).
- 13) NRC: Regulatory Guide 1.233, Guidance for a Technology-Inclusive, Risk-Informed, and Performance-Based Methodology to Inform the Licensing Basis and Content of Applications for Licenses, Certifications, and Approvals for Non-Light-Water Reactors (2020).
- 14) NRC: Proposed Rule, SECY-23-0021, NRC Regulations Title 10, Code of Federal Regulations, Part 53 – Risk Informed, Technology-Inclusive Regulatory Framework for Advanced Reactors (2023).
- 15) NEI: Technology Inclusive guidance for Non-Light Water Reactors, NEI 21-07 (2021).
- 16) 日本原子力学会 原子力発電部会: 「次期軽水炉の技術要件検討」ワーキンググループ報告書 (2020).

略語一覧

- AOO: Anticipated Operational Occurrence: 運転時の異常な過渡変化
- ARDP: Advance Reactor Demonstration Projects: DOEの革新炉実証プロジェクト
- BDBA: Beyond Design Basis Accident: 設計基準を超える事故
- BEPU: Best-Estimate Plus Uncertainty: 統計的安全評価
- 10 CFR: NRC Regulations Title 10, Code of Federal Regulations
- COL: Combined License: 建設運転一括許可
- DBA: Design Basis Accident: 設計基準事故
- DEC: Design Extension Condition: 設計拡張状態
- DC: Design Certification: 設計認証
- DOE: Department of Energy: 米国エネルギー省
- ESP: Early Site Permission: 早期サイト許可
- GX: Green Transformation: グリーントランスフォーメーション
- IAEA: International Atomic Energy Agency: 国際原子力機関
- L(E)RF: Large (Early) Release Frequency: (早期)大規模放出
- LMP: Licensing Modernization Program: 許認可近代化プログラム
- LOCA: Loss-of-coolant Accident: 原子炉冷却材喪失事故
- NEI: Nuclear Energy Institute
- NEIMA: Nuclear Energy Innovation and Modernization Act: 原子力エネルギー革新と近代化法
- NEXIP: Nuclear Energy x Innovation Program
- NRC: Nuclear Regulatory Commission: 米国原子力規制委員会
- PE: Practical Elimination, Practical Eliminated: (放射性物質の大規模放出となる事故の) 実質的な排除
- RIA: Reactivity Insertion Accident: 反応度投入事故
- PRA: Probabilistic Risk Assessment: 確率論的リスク評価
- UPZ: Urgent Protective Action Zone 緊急時防護措置を準備する区域
- WENRA: Western European Nuclear Regulators' Association

電力中央研究所

〒100-8126 東京都千代田区大手町 1-6-1 大手町ビル 7 F

TEL : 03-3201-6601 (代)

<https://criepi.denken.or.jp/>

[無断複写・複製を禁じます]