

地球の課題に取り組む IHI の原子力技術

IHI's Activities with Nuclear Energy Technologies on Global Agendas

大 島 誠 司 資源・エネルギー・環境事業領域原子力 SBU スタッフグループ 主幹
小池上 一 資源・エネルギー・環境事業領域原子力 SBU 技師長
丸 下 元 治 資源・エネルギー・環境事業領域原子力 SBU スタッフグループ 主幹 技術士（原子力・放射線利用部門）

地球の課題として掲げられる諸課題に対応するものとして、運転期間中に二酸化炭素 (CO₂) を排出しない原子力発電への期待は国際的には大きい。国内においても、2050年カーボンニュートラルに向けて、原子力発電は、実用段階にある無炭素電源として、脱炭素の選択肢とされており、原子力技術の果たすべき役割は依然として大きい。本稿では、気候変動への対策、資源循環型社会の形成、地球環境の保全、エネルギーや資源の安定供給などの地球課題の点から、IHIの原子力事業における取組みを技術の面から解説・紹介する。

As an action against the global agendas, nuclear power generation is highly expected in the world because it does not emit CO₂ gas during operation. In Japan as well, from the perspective of environmental effects, nuclear power generation has an important role as an already practical carbon-free power source for decarbonization toward the 2050 carbon neutrality target. This paper describes IHI's actions and technologies relating to nuclear power in terms of global agendas such as “measures against climate change,” “realization of a circular economy,” “environmental protection,” and “stable supply of energy and resources.”

1. 緒 言

地球の課題に対する捉え方はさまざまなものが考えられる。2020年9月発行の「IHI Sustainability Data Book 2020」の中で、IHIグループにとっての重要課題を列挙している。気候変動への対策、資源循環型社会の形成、地球環境の保全、エネルギーや資源の安定供給、社会インフラの構築と保全、モビリティ社会の発展、ものづくり力の強化と高度化、宇宙空間の利用、安全かつ安心な生活の確保、の九つである。原子力技術もこれら重要課題の解決に向けて、多くにかかわっている。

第一に、気候変動への対策、エネルギーや資源の安定供給に関して、2020年12月に発表された政府の「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」⁽¹⁾の中で、14の重要分野ごとに実行計画の策定が検討されている。この重要分野の一つとして原子力産業も位置付けられており、原子力発電は実用段階にある脱炭素の選択肢とされている。国内での着実な再稼働の進展により、安定的な電力供給を担うとともに、安全性・信頼性のいっそうの向上に加えて、再生可能エネルギーとの共存、カーボンフリーな水素製造や熱利用といった多様な社会的要請に応えることが求められている。国際的にも地球温暖化対策のために原子力発電を活用する動きがみられ、アジア、中近東

でも新たに原子力開発が進展している地区⁽²⁾もある。

第二に、資源循環型社会の形成、地球環境の保全の点からは、原子力発電所から発生する使用済燃料の再処理による核燃料製造の工程で発生する高レベル放射性廃棄物の処理・処分に着目していく必要がある。

これら原子力のライフサイクル全般に対する取組みは、地球の課題の解決に寄与するものといえ、本稿では、IHIにおける原子力にかかわる技術および取組みを紹介する。

2. 原子力発電炉技術への取組み

IHIでは、1960年代以降、24基の沸騰水型軽水炉 (Boiling Water Reactor : BWR) の压力容器の製造を始め、格納容器、配管や熱交換器の供給や保全工事などをおして、国内・国外の原子力発電所の建設・運転に関与⁽³⁾した。これら発電用原子炉技術をつうじて、エネルギーや資源の安定供給および気候変動への対策の課題解決に貢献してきた。今後、再生可能エネルギーが主要電源となっていくことが期待されるなかでも、無炭素電源としての原子力発電の役割は大きい。この実現のためには、さらに安全性・信頼性を向上させ、既設炉の寿命延伸や次世代炉の導入などを含めた発電炉のリプレースが必要になると考えられる。IHIでは、超音波探傷試験による検査装置のシステム開発⁽⁴⁾を進め、寿命延伸に必要となる診断技術の高度

化などに取り組んでいる。今後も、原子力発電所の 60 年運転に向けた寿命延伸を含む設計、検査、製造の一連の技術の維持・向上に努めていく。

3. 核燃料サイクル技術への取組み

原子力発電は、運転期間中に CO₂ を排出しない特性を有する一方で、使用済燃料などの放射性廃棄物の処理・処分に関しては、これから解決していく必要のある課題がある。

ここでは、原子力発電所から発生する使用済燃料にはどのような特徴があり、次にその問題点を解決するためにどのような選択肢があるかを考える。

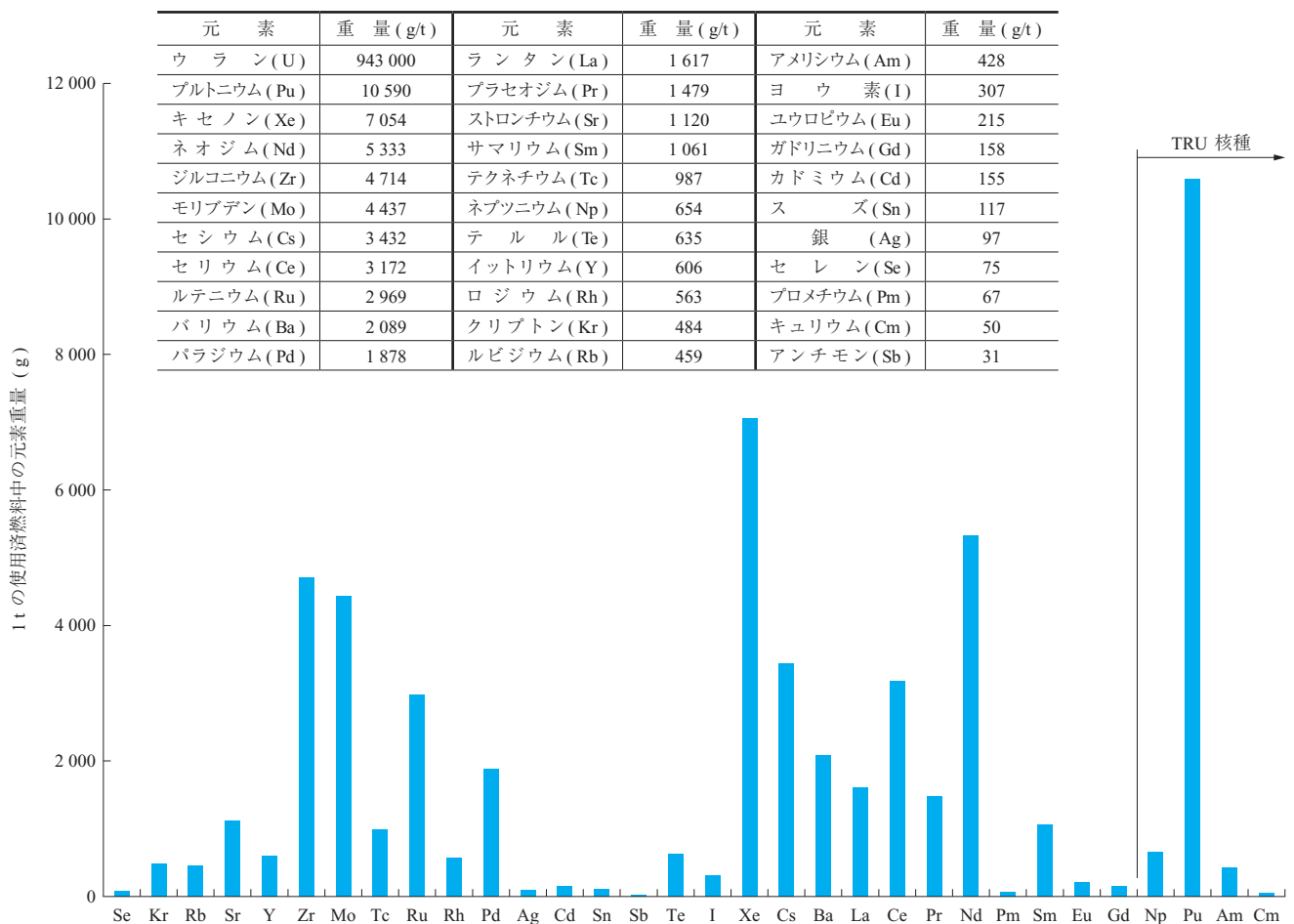
3.1 使用済燃料の特徴

使用済燃料とは、原子炉で使用され、取り出された核燃料のことである。原子炉内での燃焼過程で元の濃縮ウラン燃料が分裂することにより核分裂生成物核種に変換される

ほか、ウランの中性子捕獲反応によってプルトニウムなどウランより重い元素、超ウラン (Trans Uranium : TRU) 核種が生じる。このように使用済燃料の元素組成は変化し、さまざまな元素が生成されることが特徴である。使用済燃料 1 t 中に含まれるウラン以外の元素を第 1 図⁽⁵⁾に示す。

主要な放射性核種の放射線毒性と半減期の関係を第 2 図に示す。縦軸は放射性核種の実効線量係数と呼ばれるものであり、放射線毒性を示す指標である。赤丸で示す TRU 核種は放射線毒性が高く、かつ半減期が数百年から数千年以上のもが多く長期にわたり影響を及ぼす。なお最近、福島第一原子力発電所からの海洋放出の問題として注目されるトリチウム (3H) は、第 2 図の左下側の半減期が短くて毒性が低い核種に相当する。

使用済燃料の放射線毒性の減衰を第 3 図に示す。使用済燃料の放射線毒性は赤線のように減少するが、半減期が

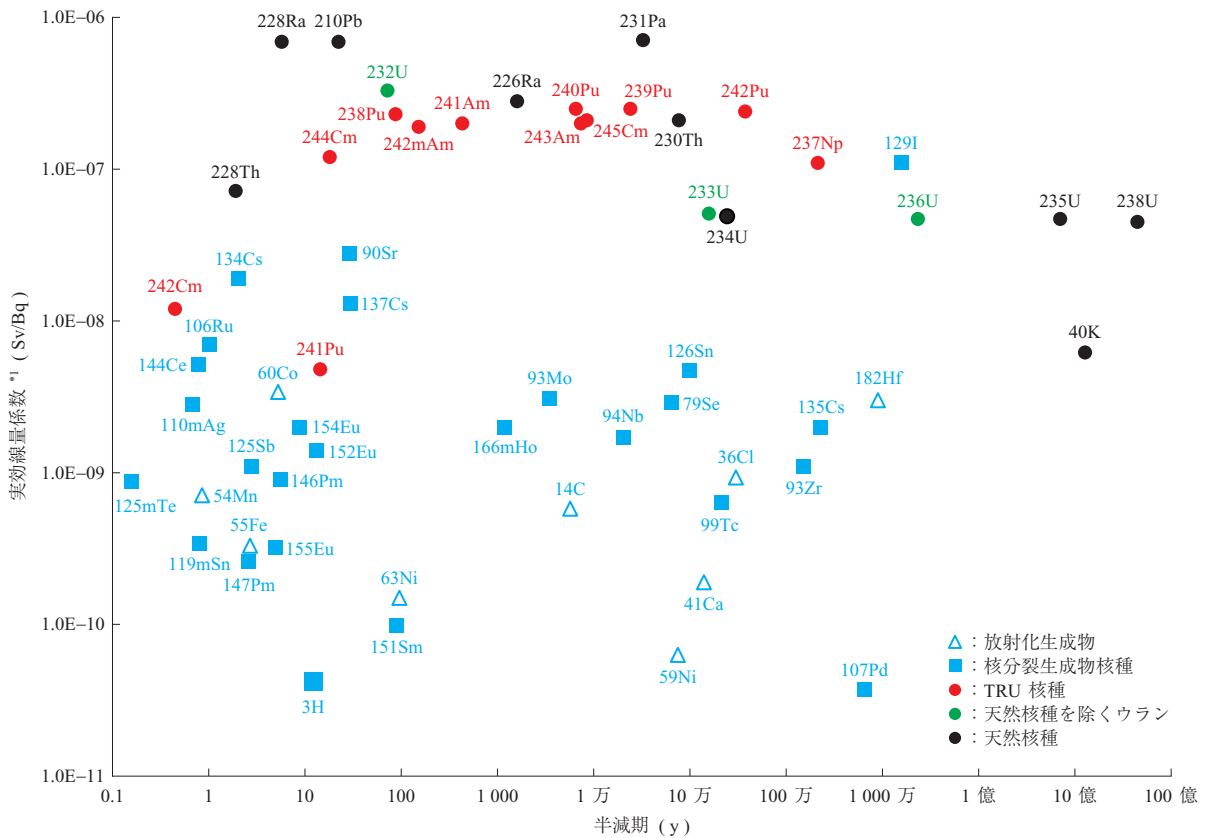


(注) 条 件

- ・加圧水型軽水炉 (Pressured Water Reactor : PWR) 燃料 44 000 MWd/t
- ・原子炉停止後 5 年時点

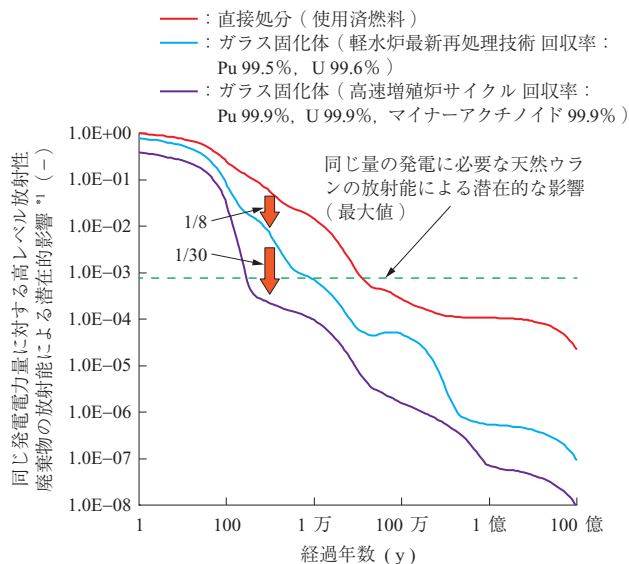
参 考 : 「原子力安全基盤科学 2 原子力バックエンドと放射性廃棄物」⁽⁵⁾ をもとに作図

第 1 図 使用済燃料 1 t 中に含まれるウラン以外の元素
Fig. 1 Elements except uranium contained in a ton of spent nuclear fuel



(注) *1: 放射線毒素 (対数)
 参考: ICRP「Age-dependent Dose to the Members of the Public from Intake of Radionuclides-Part 5 Compilation of Ingestion and Inhalation Dose Coefficients, ICRP Publication 72, Ann. ICRP 26 (1), 1995」をもとに作図

第2図 主要な放射性核種の放射線毒性与半減期の関係
 Fig. 2 Relationship between radiotoxicity and half-life of main radionuclides



(注) *1 : 高レベル放射性廃棄物と人間との間の障壁は考慮されておらず、高レベル放射性廃棄物の実際の危険性ではなく、潜在的な有害度を示している。使用済燃料の1年目の潜在的影響を1とした相対値。
 参考: 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構、文部科学省 Web サイト「第4回高速増殖炉サイクル実用化研究開発 (FaCT) プロジェクト評価委員会」(H23.2.22) 資料をもとに作図
https://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chousa/kaihatu/008/shiryo/_icsFiles/afiedfile/2011/03/07/1302956_6.pdf. (参照 2021.5.20)

第3図 使用済燃料の放射線毒性の減衰
 Fig. 3 Attenuation of radiotoxicity of spent nuclear fuel

長い核種の存在により、天然ウランと同等の放射線毒性になるまでに10万年単位の時間が必要となる。一方、後述する再処理路線の採択によりガラス固化体とした場合は一部のTRU核種が回収され、放射線毒性は1万年程度で天然ウランレベル以下になり、減衰効果が大きい。

3.2 核燃料サイクルの選択肢

放射性廃棄物処理・処分を検討する上で考慮すべき事項を第1表⁽⁵⁾に示す。

原子力発電所から発生する使用済燃料の処理・処分の考え方は、現状、以下のとおりである。

- ① 使用済燃料を廃棄物と見なし、地層処分する(直接処分)
- ② 技術選択を行わず、使用済燃料を長期保存する(長期貯蔵)
- ③ 使用済燃料を再処理し、プルトニウムの分別と再利用を行う(再処理)

海外では、①直接処分を選択している国もあるが、日本では③再処理が選択されている。再処理では、放射性核種を安定なガラス中に閉じ込め、ガラス固化体とし、廃

第 1 表 放射性廃棄物処理・処分を検討する上で考慮すべき事項
Table 1 Basic conditions and elements to be considered in the case of radioactive waste disposal

項 目	考慮すべき事項		
前提となる条件など	前提条件	原子力発電利用計画（規模・時期） 発電所での使用済燃料保管計画 プルトニウムの利用計画（収支） MOX 燃料利用炉の確保	
	資源物質利用の視点	資源利用	世界の原子力事業見通し 世界の天然ウラン需要 世界の天然ウラン価格 海外委託濃縮の価格 日本の天然ウラン資源権益の確保 二次資源利用時のウラン資源節約効果 海水ウラン利用の可能性
		核物理管理	保証措置の実効性 核物質防護の実効性 NPT 体制と二国間協定への順守
		高レベル放射性廃棄物管理の視点	使用済燃料保管
地層処分合理性			地層処分事業計画 地層処分サイトの確保 高レベル放射性廃棄物安全性確保 処分体の潜在属性の長期継続性
放射性核種備蓄			長半減期高毒性核種の生成量 核変換の可能性
その他の条件や影響を与える因子など		必要条件外部因子	コスト 安全性 技術の継承 エネルギー安全保障 社会的な合意

(注) 出 典：「原子力安全基盤科学 2 原子力バックエンドと放射性廃棄物」⁽⁵⁾を参考に作表

棄物の量を減少させることができる。また、前述のとおり、放射線毒性を低減し、使用済燃料中に残留する核燃料物質の有効利用によるエネルギー資源の自給率向上にもメリットがある。

再処理におけるガラス固化体製造の概念を第 4 図に示す。

IHI では、使用済燃料の処理・処分にかかわる製品やサービスに携わっており、資源循環型社会の形成、地球環境の保全にも関連するため、次節以降に具体例を紹介する。

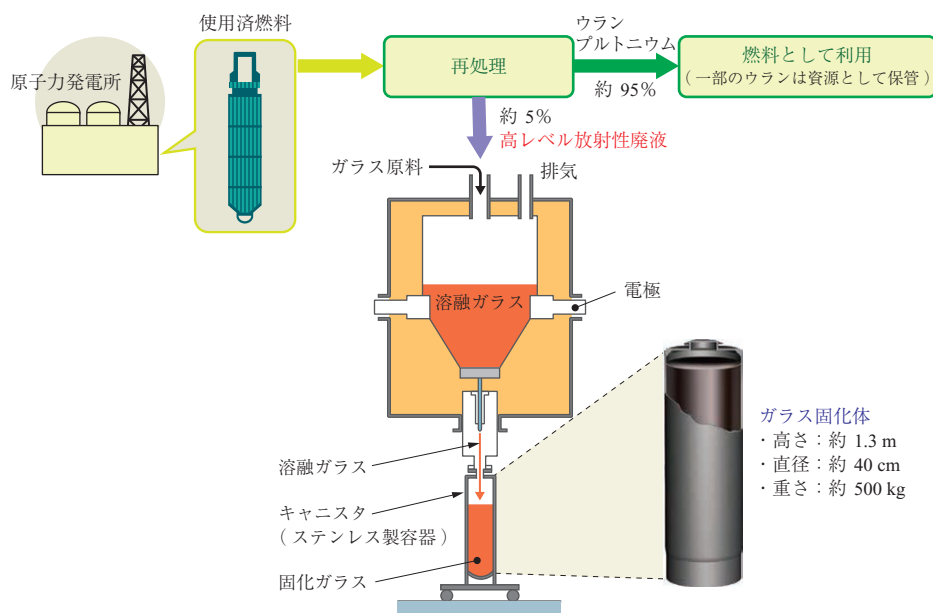
3.3 使用済燃料の再処理技術への取組み

IHI では、再処理技術のうち、高レベル放射性廃棄物を安定的に処理するガラス固化技術に取り組んでいる^{(6),(7)}。高濃度の放射性廃液はガラス原料と混ぜられ、1 000℃以上に加熱され、溶融ガラスとなる。第 5 図にガラス溶融炉の開発にかかわる概念を示す。ガラス溶融炉で溶融したガラスをキャニスタと呼ばれる金属製容器に流下させた後、ふたを溶接で密封することで、ガラス固化体を製造する。

ガラス固化体を製造するためには、ガラス溶融炉およびガラス固化体の取扱い設備や貯蔵設備の設計に加え、高放射線環境下での遠隔操作技術が必要となる。IHI はこれらの技術に大きくかかわっている。

3.4 放射性廃棄物の処分技術への取組み

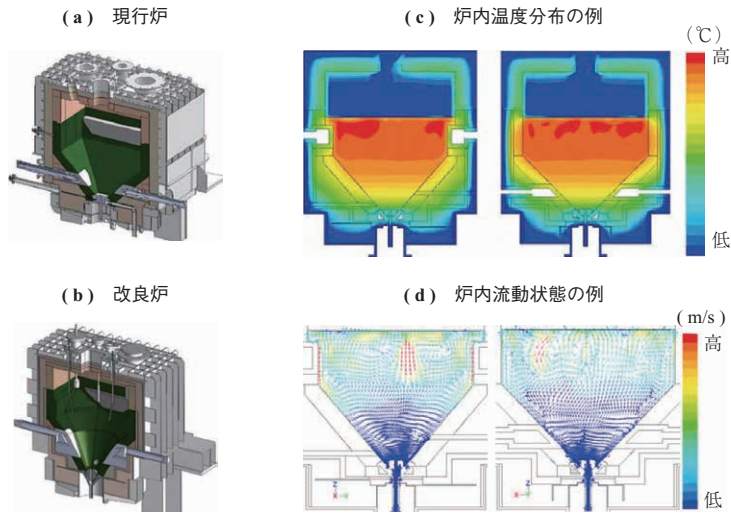
日本では、高レベル放射性廃棄物であるガラス固化体を環境から隔離する方法として、地層処分が選定されている



(注) 出 典：原子力発電環境整備機構 Web サイト「高レベル放射性廃棄物って何？」
<https://www.numo.or.jp/project/explanation-1.html>。(参照 2021. 5. 20)

第 4 図 ガラス固化体製造の概念図

Fig. 4 Conceptual diagram of manufacturing process of glass solidification



(注) 出 典：一般社団法人日本原子力学会 Web サイト「テキスト核燃料サイクル」
http://www.aesj.or.jp/~recycle/nfctxt/nfctxt_7-1.pdf, (参照 2021. 5. 20)

第 5 図 ガラス溶融炉の開発にかかわる概念図

Fig. 5 Conceptual diagram of development of melting furnaces for fused glass solidification

る。北欧では、高レベル放射性廃棄物である使用済燃料の直接処分として、すでに立地が決められている。

地層処分の概要を第 6 図に示す。地層処分は、深度 300 m 以深の安定な地盤中に人工的な廃棄物の施設を建築し、その中に放射線毒性の高い放射性廃棄物を定置して、長期にわたる社会環境からの放射性核種の隔離を実現するための技術である。

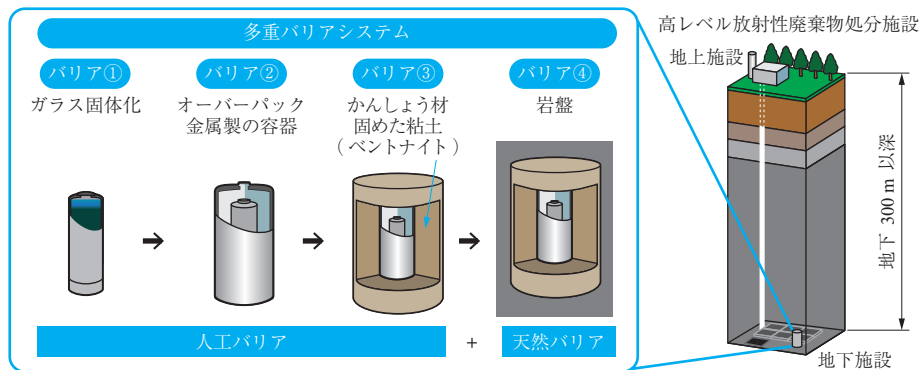
2020 年 11 月に、北海道内の二つの自治体で、地層処分地の候補になり得るかを今後検討していくための「文献調査」を始める計画が示されたことから、国内でも高レベル放射性廃棄物の処理・処分技術への関心が高まっている。

IHI では、この放射性廃棄物処分の実現に向けて、地層環境での腐食速度の計測などの基本的データ採集に協力す

るほか、人工バリアを構成するオーバーパックと呼ばれる厚肉容器の溶接技術などに取り組んでいる。また、高レベル放射性廃棄物であるガラス固化体を受け入れる地上施設、地上施設から地下の埋設設備まで廃棄物を運搬するための搬送システム、地下施設において廃棄物を所定の場所に定置するための搬送システムなどの概念設計などを進めている。

4. 東京電力福島第一原子力発電所事故への取組み

東京電力株式会社（当時）福島第一原子力発電所事故から 10 年を迎える現在、発電所内でも放射線量の低減が実現されている。原子炉は、安定冷却状態を保持しており、使用済燃料プールからの取出しが進むなどの一定の進展がみられる。今後は、廃炉作業の本丸である燃料デブリ取出



(注) 出 典：原子力発電環境機構 Web サイト「地層処分って？」
<https://www.numo.or.jp/project/explanation-2.html>, (参照 2021. 5. 20)

第 6 図 地層処分の概要

Fig. 6 Outline of geological disposal

しに向けた具体的な対策に移行していく段階⁽⁸⁾にある。

IHI は、東京電力福島第一原子力発電所の 1～3, 5, 6 号機の建設に携わってきた経験と知見を活かして、東京電力福島第一原子力発電所の安定と事故からの復旧に取り組んでいる。次節以降に具体例を紹介する。

4.1 汚染水対策に対する取組み

IHI は、事故の発生直後から現場、現物に向き合い緊急対策工事を実施してきた。当時、原子炉建屋内への地下水の流入などにより、増え続けた汚染水の放射能の拡散抑制に寄与したセシウム除去施設 (Simplified Active Water Retrieve and Recovery System : SARRY) や多核種除去設備 (Advanced Liquid Processing System : ALPS) にかかわる機器の製作・据付けなどにも取り組んだ。

現在は、それらにかかわる α 核種を含むスラッジ状沈殿物の除去や放射性物質の吸着材として震災後初期に投入されたゼオライト土のうの処置などの検討も行っている。また、汚染水を処理する段階で発生した吸着材などの 2 次廃棄物を安定化するため、使用済燃料の再処理工場で適用しているガラス固化技術を応用した処理技術の研究開発を推進⁽⁹⁾している。

そのほか高レベルの放射線環境下で必須となる人手によらない遠隔操作技術に多くの経験・知見を有している。その一例として、高放射線環境下での水中遊泳型の遠隔操縦ロボットなどの開発⁽¹⁰⁾にも取り組んでいる。

4.2 燃料デブリ取出しに対する取組み

燃料デブリの取出しは、困難な廃炉作業として位置付けられており、取出しの初号機として選択された 2 号機において、原子炉格納容器内部詳細調査が計画されている。

ここには、現場環境中に大量の放射性物質が含まれ、それらの閉じ込め障壁が完全ではなく、また取扱い対象となる燃料デブリの性状に不確かさがある、などさまざまな制約がある。この内部詳細調査や燃料デブリの試験取出しに向けた装置開発においても、遠隔操作技術は必須である。作業時の動線や装置の保守や救援などにも注意を払う必要があり、要素試験や大規模なモックアップ試験を実施しながら、成立性の検討を鋭意進めている。

その一例として、原子炉格納容器 (Primary Containment Vessel : PCV) 内にアクセスするためのインフレートシールの要素試験の様子を第 7 図に、アクセス通路の確保するための生体遮へい壁撤去の要素試験の状況を第 8 図に示す。

燃料デブリ取出しでは、段階的に取出し規模を拡大する



(注) 出典：経済産業省 Web サイト「2019 年度廃炉研究開発計画」より抜粋して掲載
<https://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/decommissioning/committee/osensuitaisakuteam/2019/02/4-1.pdf>, (参照 2021. 5. 20)

第 7 図 インフレートシールの要素試験の状況
Fig. 7 Condition of component test for inflation seal



(注) 出典：経済産業省 Web サイト「2019 年度廃炉研究開発計画」より抜粋して掲載
<https://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/decommissioning/committee/osensuitaisakuteam/2019/02/4-1.pdf>, (参照 2021. 5. 20)

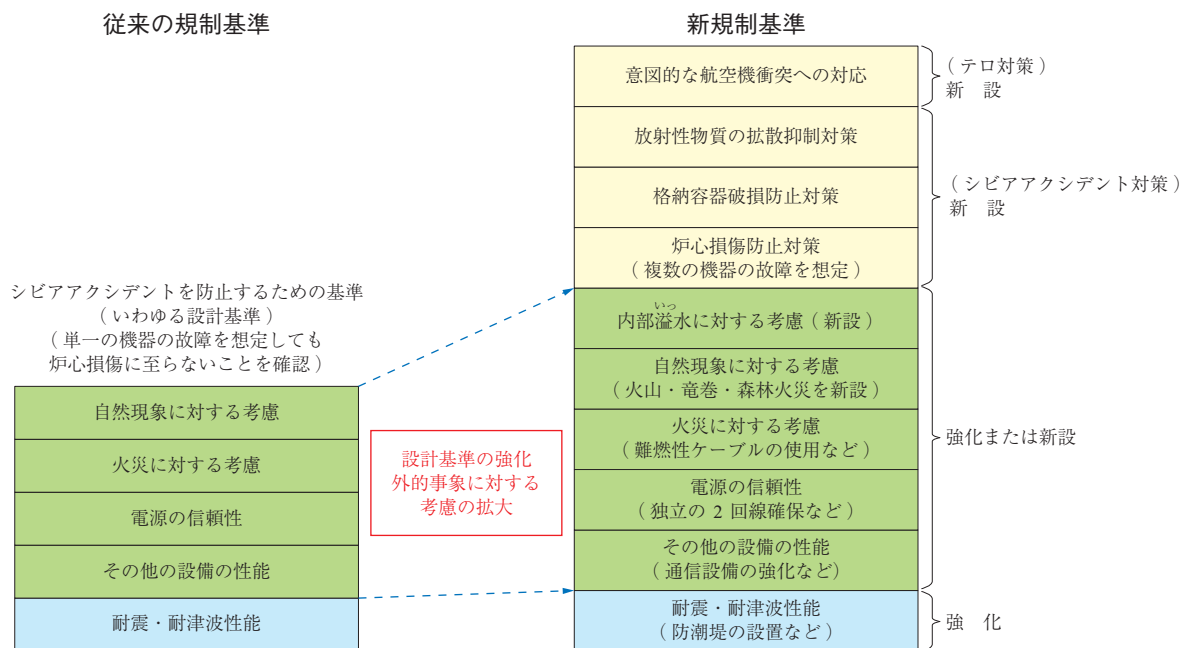
第 8 図 生体遮へい壁撤去の要素試験の状況
Fig. 8 Condition of component test for removal of biological shielding wall

計画が示されており、燃料デブリの取出し、収納、移送、保管をつうじて総合的に安全性を維持したもので工程を進めるシステムが求められる。

5. さらなる安全性の確保に向けた取組み

福島第一原子力発電所における事故を機会として、2013 年に実用発電用原子炉施設および核燃料施設等に係る新規制基準が施行された。第 9 図に従来の規制基準と新規制基準の比較を示す。新規制基準では、地震や津波などの自然災害や火災などへの対策を強化するとともに、万一、過酷事故が発生した場合に対する十分な準備などが必要となる。また、意図的な航空機の衝突などのテロリズム対策として、施設の準備などについての配慮も必要である。

特に、自然災害のうち地震については、新規制基準に基づく評価により施設ごとに設定される基準地震動による地震力に基づき、新規制基準への適合の確認が求められる。



(注) 出典：一般社団法人日本原子力文化財団 Web サイト「原子力・エネルギー図面集」第5章 <https://www.ene100.jp/www/wp-content/uploads/zumen/5-2-8.jpg>, (参照 2021. 5. 20)

第9図 従来の規制基準と新規制基準の比較
Fig. 9 Comparison between the former and new regulatory requirements

IHI では、これまで培ってきた配管、容器、各種の構造物に対する解析・評価技術⁽¹¹⁾、⁽¹²⁾を活用し、さらに高度化して、それぞれの安全機能が損なわれる恐れがないかを一つひとつ確認し、必要に応じて耐震対策としての補強工事を実施している。

また、新規制基準によって求められる過酷事故の影響を低減させるため、原子炉施設および核燃料サイクル施設などの再稼働・竣工に向けた対策工事にも参画している。自然現象に対する考慮として追加される竜巻対策防護ネット設備 (CG イメージ) を第10図に示す。



(注) 出典：日本原燃株式会社 Web サイト「安全を最優先に」より抜粋して掲載 <https://www.jnfl.co.jp/ja/special/our-maximum-priority/>, (参照 2021. 5. 20)

第10図 竜巻対策防護ネット設備 (CG イメージ)
Fig. 10 Protection equipment against tornado (computer-generated image)

6. 将来に向けた取組み

原子力にはさらなる安全性を兼ね備え、再生可能エネルギーとの共存が期待できる技術が求められており、例えば、炉心の小型化や自然循環技術を適用し、事故時にも電源なしに冷却可能な小型炉開発が注目されている。

IHI でも国内外の事業者との協力のもと、原子力関連技術のイノベーションを促進し、安全性・経済性・機動性に優れた原子力技術の開発や、新型炉の実現に向けた生産・管理技術への適用および維持を進めている。

7. 結 言

原子力発電は、運転期間中に CO₂ を排出しない無炭素電源であるため、その技術は 2050 年カーボンニュートラルに向けて、特に、気候変動への対策、エネルギーや資源の安定供給の観点から、果たすべき役割は大きい。

使用済燃料の再処理技術は、使用済燃料中に残留する核燃料物質の有効利用と自国産の資源化、放射性核種を安定な固化体に加工し、高レベル廃棄物をコンパクト化する技術であり資源循環型社会の形成、地球環境の保全の課題に向き合うものといえる。

一方で、東日本大震災から 10 年が経過した現在でも、原子力利用に対する一般の理解・信頼は回復するに至って

いない。原子力に携わるものとして、あらためて福島第一原子力発電所の事故に対する社会の失望を真摯に受け止め、安全かつ安心な生活の確保の課題に対して、原子力ベنگダとして原子力技術をつうじて地球の課題に貢献していく所存である。

参 考 文 献

- (1) 経済産業省：2050年カーボンニュートラルに伴う成長戦略, <https://www.meti.go.jp/press/2020/12/20201225012/20201225012-1.pdf>, (参照 2021. 5. 20)
- (2) 内閣府原子力委員会：平成 30 年度版 原子力白書, <http://www.aec.go.jp/jicst/NC/about/hakusho/hakusho2019/zentai.pdf>, (参照 2021. 5. 20)
- (3) 株式会社 IHI：原子力発電と共に歩んできた道のり, IHI 技報, Vol. 48, No. 4, 2008 年 9 月, pp. 24 - 27
- (4) 株式会社 IHI：ワンランク上の超音波検査, IHI 技報, Vol. 55, No. 4, 2015 年 12 月, pp. 20 - 21
- (5) 山名 元：原子力安全基盤科学 2 原子力バックエンドと放射性廃棄物, 京都大学学術出版会, 2017 年
- (6) 岸野卯吉ほか：原子燃料サイクル小特集号, 石川島播磨技報, Vol. 29, No. 5, 1989 年 9 月, pp. 303 - 340
- (7) 河原幹男ほか：原子燃料サイクル小特集号, 石川島播磨技報, Vol. 40, No. 4, 2000 年 7 月, pp. 163 - 202
- (8) 原子力損害賠償・廃炉等支援機構：東京電力ホールディングス株式会社, 福島第一原子力発電所の廃炉のための技術戦略プラン 2020, https://www.dd.ndf.go.jp/files/user/pdf/strategic-plan/book/20201006_SP2020FT.pdf, (参照 2021. 5. 20)
- (9) 鬼木俊郎, 田尻康智, 味村武史, 鍋本豊信, 福井寿樹：福島汚染水二次廃棄物への溶融ガラス化技術の適用性, IHI 技報, Vol. 59, No. 4, 2019 年 12 月, pp. 90 - 96
- (10) 株式会社 IHI：過酷環境での調査に挑む遠隔アクセス技術, IHI 技報, Vol. 58, No. 3, 2018 年 9 月, pp. 16 - 19
- (11) 山口大輔, 洪鋏賢一, 井田瑞穂, 金子尚昭, 金井太郎：配管構造解析プログラム：ISAP-IV, IHI 技報, Vol. 57, No. 1, 2017 年 3 月, pp. 64 - 69
- (12) 山口大輔, 洪鋏賢一, 金子尚昭, 金井太郎, 井上智臨：鋼構造物構造解析プログラム：ADAMS-V, IHI 技報, Vol. 57, No. 1, 2017 年 3 月, pp. 70 - 75