

[寄稿]

国際廃炉研究開発機構における研究開発への取り組み

奥住 直明 (国際廃炉研究開発機構
開発計画部 部長)



1. はじめに

技術研究組合 国際廃炉研究開発機構 (IRID: International Research Institute for Nuclear Decommissioning) は、2013年8月の設立以来、「廃炉技術の基盤強化を視野に、当面の緊急課題である福島第一原子力発電所の廃炉に向けた技術の研究開発に全力を尽くす」ことを基本理念に掲げ、政府の作成する「東京電力ホールディングス(株) 福島第一原子力発電所の廃止措置等に向けた中長期ロードマップ」、原子力損害賠償・廃炉等支援機構 (NDF) の作成する「東京電力ホールディングス(株) 福島第一原子力発電所の廃炉のための技術戦略プラン」に基づき、現場作業を担う東京電力ホールディングス(株)のニーズを踏まえながら研究開発に取り組んできた。本稿では IRID の活動内容について紹介する。

2. 設立の経緯

福島第一原子力発電所の事故が発生して4カ月が経った2011年7月、福島第一原子力発電所の中長期対策の最初の答申が作られた。その際、国としてこの廃炉に専任的に当たる組織が必要であるとの意見が専門家などから出され、原子力委員会で取り上げられた。この流れを受け、2013年3月の東京電力福島第一原子力発電所廃炉対策推進会議において具体的に新組織設立の表明がなされ、準備組織を立ち上げて検討を進めてきた結果、同年7

月下旬、技術研究組合法に基づく非営利公益法人として IRID の設立認可申請を経済産業省に行い、8月1日に同省大臣から認可を受けた。その後組織の自主的な議決機関である総会を開催し活動を開始した。

3. 行動理念・組織構成

IRID は以下に示す五つの行動理念を掲げて研究開発に取り組んでいる。

- (1) 極めて難しい多くの技術課題に直面している中、早期に現場に適用できる最良の技術・システムを開発・提案するための統合的なマネジメントを進めながら、効果的・効率的に研究開発に取り組む。
- (2) 組合員はもとより関係機関との協働を進め、国内外の叡智を結集することにより、最善の研究開発体制を構築する。
- (3) 大学・研究機関との連携等を含め、廃炉や関連技術の分野で次世代を担う人材の育成・確保を図るための取り組みを積極的に推進する。
- (4) 福島をはじめとする国民の皆様や国際社会からの理解・安心を得るために、研究開発活動・成果に対する情報の発信・公開に努める。
- (5) これらの研究開発活動を通して、国際的な研究拠点 (センター・オブ・エクセレンス) を形成し、廃炉、福島復興の加速化、国際社会における技術力の向上に貢献する。

IRID は18の法人 (組合員) で構成される技術研究組合であり、組合員は2つの国立研究開発法人 (日本原子力研究開発機構、産業技術総合研究所)、4つのプラント・メーカーなど (東芝エネルギーシステムズ(株)、日立 GE

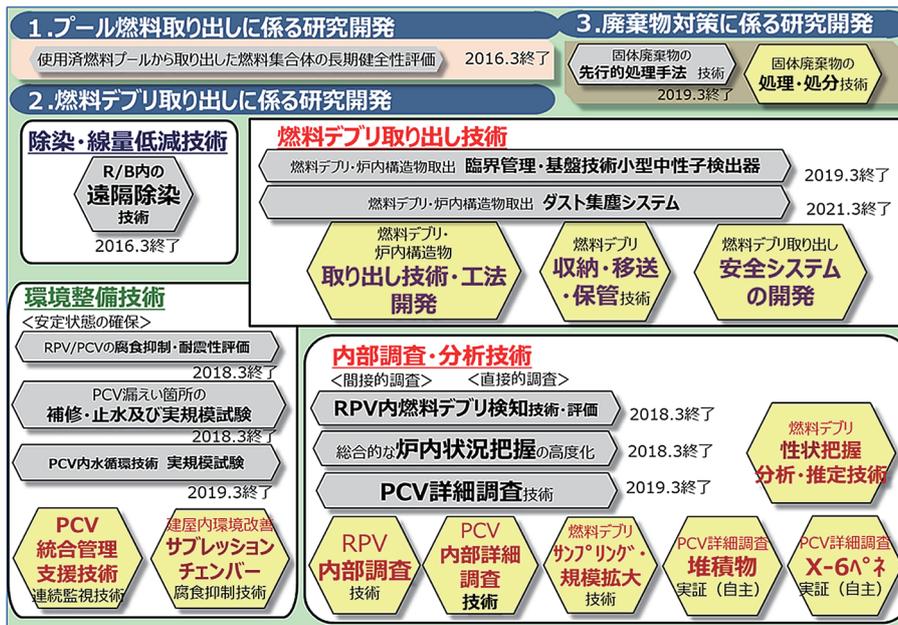


図1 IRIDにおける研究開発プロジェクト

ニュークリア・エナジー(株), 三菱重工業(株), (株)アトックス), 12の電力会社など(東京電力ホールディングス(株)他)で構成されている。IRIDの議決機関は総会であり, 18法人の総意により事業活動が決定され, 執行部門として理事会が設置されている。さらに国内外の叡智を結集するという行動理念に基づき, 理事会には直轄組織として「国際顧問」を置き, 3名の海外の専門家から組織運営・マネジメント面の助言をいただいている。また様々な研究開発を進める上で, 専門家から技術的な助言をいただく体制として, 「技術委員会」を設置している。

IRIDの研究開発は一部の自主研究事業を除いて, 経済産業省「廃炉・汚染水対策事業費補助金」の一部として実施されている。

4. 研究開発内容

図1にIRIDにおける研究開発プロジェクトを示す。IRIDでは大きく分けて「使用済み燃料プールからの燃料取り出しに係る研究開発」「燃料デブリ取り出しに係る研究開発」「固体廃棄物の処理・処分に係る研究開発」の3つの分野の研究開発を実施してきている。

IRIDで実施している研究開発は, このように多岐に亘っているが, 以下, 本稿ではその中の代表的な研究開発プロジェクトの概要を紹介する。本稿で紹介するプロジェクトは, 図2に示す構成となっている。

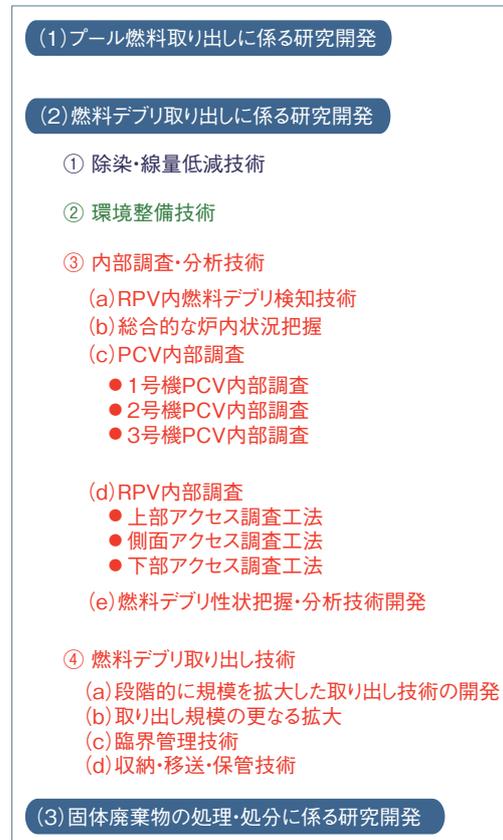


図2 本稿での研究開発内容紹介の構成

(1) 使用済み燃料プールからの燃料取り出しに係る研究開発

福島第一原子力発電所1～4号機の使用済み燃料プールに保管されていた燃料集合体は、海水注入や瓦礫混入といった通常とは異なる水質環境で保管されていたことから、今後共用プールや乾式貯蔵などで長期にわたり安全に保管していくために、部材への影響や最適な保管環境条件などをしっかりと評価する必要がある。

IRIDでは共用プールに保管中の4号機使用済み燃料部材(ロックナット)の堆積物について成分分析などを実施した。その結果堆積物の構成成分はMg, Al, Siなどが主体であり、Clは検出限界以下であったことから腐食の可能性はないと考えられ、また電気化学試験でも共用プールでの腐食の可能性はほぼないことを確認した。

さらに乾式保管時の健全性については、水素化物析出挙動確認試験、クリープ試験を実施し、瓦礫損傷、海水付着などの重量状態においても影響は小さいことを確認した。

また、燃料部材(上部端栓部材)すきま構造部への海水成分の移行挙動評価試験を行い、すきま構造部で海水成分が濃縮することはないことを確認した。

(2) 燃料デブリ取り出しに係る研究開発

① 除染・線量低減技術

福島第一原子力発電所1～3号機から燃料デブリを取り出すにあたっては原子炉建屋内で各種作業が計画・実施されている。その円滑な作業遂行には建屋内作業エリアの総合的な線量率低減を図り、作業環境を改善することが必要である。

このためIRIDでは遠隔除染技術の開発を行った。開発対象としては床面、壁面(高さ約2m程度まで)、高所などを対象とし、除染技術としては「高圧水ジェット除染」「ドライアイスブラスト除染」「吸引・ブラスト除染」を候補として取り上げ、実証試験、実機適用試験を実施した。

② 環境整備技術

環境整備に関する技術開発としては「RPV(原子炉圧力容器)/PCV(原子炉格納容器)の腐食抑制・耐震性評価」,「PCV漏えい箇所の補修・止水技術」,「PCV内水循環技術」などの開発を行った。

「RPV/PCVの腐食抑制・耐震性評価」については事故直後から実施されている注水の脱気処理やPCV内への窒素封入により、RPV/PCVの腐食は通常的环境より抑制されていると考えられるが、燃料デブリ取り出し時、PCV内は大気開放状態になることも考えられることから窒素封入に代わる腐食抑制技術(防錆剤)の開発と実機適用性の評価を進めた。また防錆剤を実機適用するための腐食抑制システムの概念設計を実施した。耐震性評価については大規模地震による大型機器の損傷を起因とする潜在的なリスクに対して、燃料デブリ取り出し開始までに実施すべき設備対策および準備すべき機動的対応をまとめ、安全シナリオを構築した。またRPVベデスタル部について想定されるベデスタル温度履歴と分布、および燃料デブリによる浸食影響評価のための手法開発などを行った。

「PCV漏えい箇所の補修・止水技術」については冠水工法採用時のPCVからの水の漏洩箇所を補修・止水するための技術開発を行った。ベント管内や真空破壊ラインに閉止プラグを入れる技術やサプレッションチャンバー(S/C)内にコンクリートを打設し止水する技術の開発、実規模試験などを実施した。さらにS/C内にコンクリートを打設した場合のS/C脚部補強技術の開発も行った。

「PCV内水循環技術」は燃料デブリ取り出し時に発生するダストをPCV内に閉じ込めておくため、PCV内部の水を循環するシステムを構築する技術である。ここではドライウェル(D/W)とS/Cそれぞれを用いた水循環システムを構築するために必要となる技術を開発した。

③ 内部調査・分析技術

(a) RPV 内燃料デブリ検知技術

燃料デブリを取り出すためには原子炉内の燃料デブリの分布などを把握することが重要である。しかし、原子炉内部は極めて高い放射線環境下にあるため、人が近寄れず確認は困難である。このため、宇宙線ミュオンを利用した原子炉内部の透視技術を開発し、実機にて測定を行った。

この結果、1号機については、元々の炉心位置には高密度の大きな物質の塊が確認できず、燃料はほとんどないと考えられること、また、2号機については、RPV 底部に燃料デブリと考えられる高密度の物質が存在していること、さらに、3号機については、元々の炉心位置には燃料デブリの大きな塊は存在していないが、不確かさはあるものの一部の燃料は RPV 底部に残っている可能性があるなどの結果が得られた。

(b) 総合的な炉内状況把握

ミュオン調査と並行して、総合的な炉内状況把握のための技術開発も行ってきた。これは主に解析コードを用いて事故進展解析や実機データなどを活用し総合的な分析・評価を実施することで炉内状況の把握を行った。

(c) PCV 内部調査

ミュオン調査などの情報をもとに、各号機の燃料デブリの状況をより詳細に把握するため、遠隔による PCV 内部調査技術の開発と現地実証試験を行ってきた。

● 1号機 PCV 内部調査

1号機については、PCV 内部の RPV 本体基礎（RPV ペDESTAL）外側に燃料デブリが流れ出した可能性が考えられたため、まずこのエリアの調査を行うこととし、形状変化型ロボットを開発して現地実証試験を行った。

2015年4月にロボットを X-100B ペネトレーション（PCV 貫通部）から PCV 内部に

アクセスさせ、PCV 内部の1階グレーチング上を走行させて映像/放射線量などのデータを取得した。これにより、PCV 内部の既設設備に大きな損傷のないことを確認するとともに1階グレーチング上の約4分の3週の範囲の放射線量などのデータを取得した。

2017年3月には形状変化型ロボットを改良し、小型のカメラと放射線線量計を1階グレーチング上から PCV 底部につり下ろすことにより、画像データと放射線量データの取得を行った。PCV 底部を撮影した画像データには何らかの堆積物が PCV 底部に堆積していることが確認された。図3に改良された形状変化型ロボットを示す。



図3 形状変化型ロボット

なお、1号機では RPV ペDESTAL 内側に直接アクセスすることのできる X-6 ペネトレーション周辺の放射線量が高く、作業者が長時間滞在することが困難であるため、ロボットのアクセスルートとして X-6 ペネトレーションは現在までのところ使用されていない。

● 2号機 PCV 内部調査

2号機については、RPV ペDESTAL 内側に直接アクセスすることのできる X-6 ペネトレーション周辺の放射線量が1号機に比較して低く、ロボットを X-6 ペネトレーションから PCV 内にアクセスさせるためのセッティング作業ができるため、X-6 ペネトレーションを使用しての調査を実施した。

2017年1月から2月にかけて、図4に示すクローラ型遠隔調査ロボットによる調査

を試みたが、X-6 ペネトレーションとペデスタル内側を結んでいる傾斜路（CRD レール）上に堆積している異物に阻まれ、クローラ型遠隔調査ロボットはRPV ペデスタル内側まで到達できなかった。一方で、事前の検討により、このような事態も想定されていたため、別に用意していた長いポールの先端にカメラを取り付けたものをX-6 ペネトレーションからRPV ペデスタル内側へと挿入し画像情報を取得した。

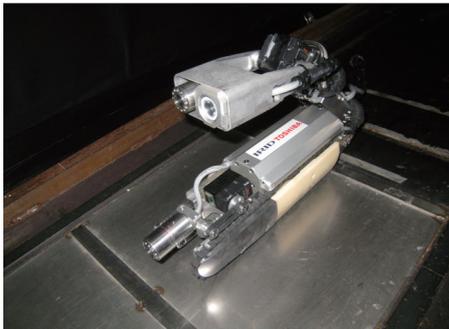


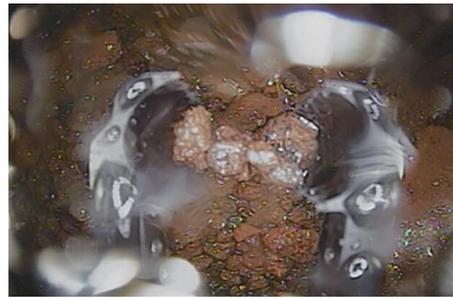
図4 クローラ型遠隔調査ロボット

この後、2018年1月には、図5に示す長いポール先端のカメラをPCV 底部へ釣り下ろせるように改良した釣りざお型調査装置により、RPV ペデスタル内部のより詳細な画像情報および放射線量データを取得した。



図5 釣りざお型調査装置

画像データからは堆積物の一部は小石状のように見えたことから、2019年2月には釣りざお型調査装置先端部分に物をつまむことができる装置を取りつけ、堆積物に対する接触調査を実施した。この結果、図6に示すように、一部の堆積物は掴まみ上げることなどにより動かせることを確認した。



(東京電力㈱ 提供)

図6 堆積物に対する接触調査

●3号機 PCV 内部調査

3号機は、1号機/2号機と比較するとPCV 内部の水位が高いため、図7に示す水中遊泳型ロボットを開発し、RPV ペデスタル内部を含むPCV 内部の調査を実施した。3号機のX-6 ペネトレーションは現状水没しているため、ロボットはX-53 ペネトレーションからPCV 内部にアクセスした。



図7 水中遊泳型ロボット

調査は、2017年7月に実施され、RPV ペデスタル内側下部の損傷状況などが明らかとなった。

●現在実施中および今後計画しているPCV 内部調査（2022年5月現在）

前項に述べたように、PCV 内部の状況は次第に明らかとなっているが、より多くの情報を得ることを目的に、新たな調査装置の開発に取り組んでいる。

1号機のPCV 内部は水位が約2m 程度あることから、新たに図8に示す潜水機能付ポート型アクセス・調査装置を開発した。

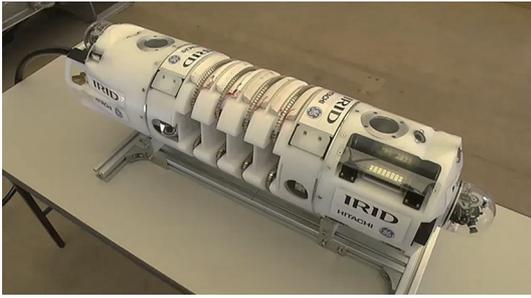


図8 潜水機能付ポート型アクセス・調査装置

この装置は、全長約 1.1m 直径 25cm の円筒形で、PCV 底部の堆積物形状データ取得のための走査型超音波距離計や、堆積物の厚さを測定するための高出力超音波センサー、燃料デブリの分布を把握するための放射線計測器など、多くの情報を得るためのセンサー類を搭載する。搭載する計測器ごとに専用のポート型アクセス・調査装置を使用し、あわせて堆積物の少量サンプリングをすることができるポート型アクセス・調査装置も用意している。さらに、小型の調査装置も用意し、パンチルトカメラにより PCV 内部の状況を確認する。

これらの調査装置を PCV 内に安全に投入し、より広範囲・長時間の調査が可能となるようなアクセスルートを構築する技術および高い耐放射線性を有する各種センサーの開発も進めてきた。現在これら装置を使用している調査を実施中である。

2号機については、既存の X-6 ペネトレーションを使用して PCV 内部にアクセスし、より詳細な調査を実施するとともに、燃料

デブリの試験的取り出しができるアーム型アクセス装置の開発を進めている。装置のイメージを図9に示す。この装置は全長が約 22m あり、使用前は PCV 外側に接続された収納箱（エンクロージャ）に折りたたんだ形で収納され、使用時にアームを順次展開して PCV 内部に挿入していく。アーム先端には約 10kg までの調査装置などを搭載できる。

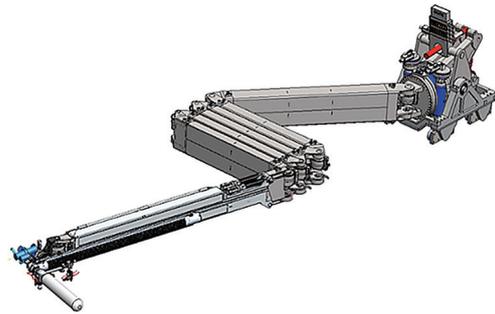


図9 アーム型アクセス装置

アーム型アクセス装置による PCV 内部調査のイメージを図 10 に示す。エンクロージャ内に収納されているアームが PCV への接続構造を経由し、X-6 ペネトレーションを通過して PCV 内部に順次送り出されていく構成となっている。アーム型アクセス装置の先端に取り付ける極細線金ブラシ方式と真空容器方式の 2 種類の燃料デブリサンプル採取・回収装置（試験的燃料デブリ取り出し回収装置）を設計し、動作確認を行っている。

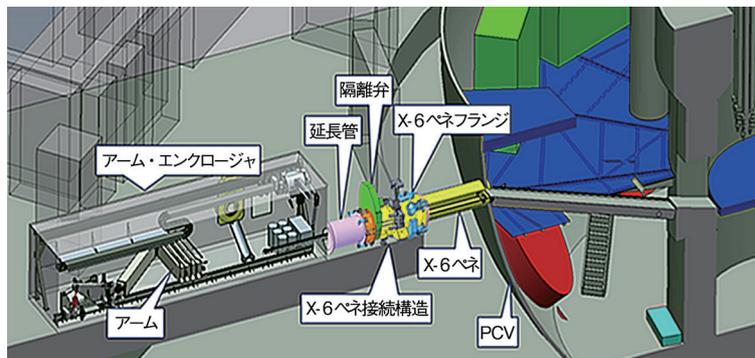


図 10 アーム型アクセス装置による PCV 内部調査のイメージ

(d) RPV 内部調査

前節で述べた PCV 内部調査がまずは先行しているが、RPV 内部の状況を把握することも重要な課題である。RPV 内部は構造が複雑で、かつ放射線量も極めて高いためアクセスすること自体が困難であり、放射線の遮蔽や加工に伴う放射性ダストの舞い上がりを防ぎながらアクセスできる新たな調査工法が求められている。

現在 RPV 上部・側面・下部の三方向からのアクセスルートを選定し、上部・側面からは PCV 外部から穴開けにより炉心部を目指す工法、下部からは PCV 内部調査などで構築されたアクセス方法を利用して RPV 内部へアクセスする工法を検討している。

● 上部アクセス調査工法

RPV 内部へ上部からアクセスするルートや調査ニーズを検討し、オペレーティングフロアから穴あけによりアクセスする工法を開発している。

上部アクセス調査工法の技術のコアとなる作業用セル、バウンダリ機能維持装置、加工装置および調査システムを対象として要素試験を実施し、それらの実現性を確認するとともに、装置仕様の策定に資するための設計情報を取得した。

● 側面アクセス調査工法

上部アクセス調査工法は、オペレーティングフロアなどで他作業との干渉なども考えられることから、代替案として、RPV 側面にアクセスルートを構築する案も検討している。

PCV のバウンダリを維持しつつ、生体遮蔽壁や、PCV、RPV などを穿孔して、調査装置を炉心内に送り込む装置を検討した。加工装置、処理水回収装置、シール、ガイドチューブ保持機構などを対象として要素試験を実施し、実現性を確認するとともに、装置仕様の策定に資するための設計情報を取得した。

● 下部アクセス調査工法

穴開けによる上部／側面アクセス調査工法の実現にはまだ時間を要すると考えられ、より早期に情報を入力すべく、RPV 下部からアクセスする調査工法も検討した。

1号機は、RPV 下部の開口径が比較的大きいと想定されるため、ドローン（有線、無線）により RPV 内部へアクセスする工法を検討している。2号機と3号機は、RPV 下部の開口径が比較的小さいと想定されるため、アーム型アクセス装置にテレスコピック装置を搭載しアクセスする工法を検討している。

(e) 燃料デブリ性状把握・分析技術開発

燃料デブリの取り出し方法の立案や安全対策の策定には、炉内に存在する燃料デブリの性状把握が必要である。

現在はまだ燃料デブリを直接観察、分析をすることができないため、燃料デブリの性状を、国内外の類似した研究例や福島第一原子力発電所で採取された汚染試料の分析結果から推定している。また、福島第一原子力発電所の事故条件を模擬した MCCI（溶融炉心-コンクリート相互作用）の炉外模擬試験を実施している。

④ 燃料デブリ取り出し技術開発

(a) 段階的に規模を拡大した取り出し技術の開発

図9、10に示した PCV 内部詳細調査用の装置構成をベースとして、段階的に燃料デブリ取り出し量を拡大していくことを検討している。

アームの積載量を向上させるためにアームの前半部分の剛性を高めるとともに、先端部のアクセス範囲を拡大させたり、エンクロージャを取り外すことも考慮したダブルドアシステムを設置するなどの改良を検討している。

また、燃料デブリ回収装置として、小石・砂状燃料デブリ回収用（バケット型、フレキシブルグリッパ型）、切削・粉状燃料デブリ回

収用、円柱状燃料デブリ切削・回収用の各燃料デブリ回収装置について、実作業に向けて課題を抽出し、実用性の向上を図った改良設計を実施した。改良した装置で、模擬デブリの回収試験や切削試験を行っている。

(b) 取り出し規模の更なる拡大

将来行われる「取り出し規模の更なる拡大」を見据えた技術開発としては、RPV 上部からアクセスする「上アクセス工法」について、構造物単位で一括搬出し、原子炉建屋から離れた場所に新設する建屋にて細断して容器へ収納する「構造物一括撤去・搬出」技術や、構造物は RPV に近い位置で分割し容器に収納し搬出する「構造物大分割」技術などを検討している。

また、主に PCV 下部に存在する燃料デブリ取り出し工法として検討している「横アクセス工法」については、原子炉建屋 (R/B) 1 階の床に大きな荷重をかけずに燃料デブリ搬出ルート構築する案として、R/B 外の増設建屋と PCV を遮へい機能を有するアクセストンネルで接続して搬出入ルートを構築し、アクセストンネルの荷重を R/B 外壁と生体遮へい壁で受ける「アクセストンネル」方式や、既存の X-6 ペネトレーションを拡幅し、最短距離で PCV ベデスタル内にアクセスする横アクセス工法を検討している。

(c) 臨界管理技術

現状の燃料デブリは、プラントの監視データから未臨界であることが確認されている。しかし、今後の燃料デブリ取り出し作業などにおいては、燃料デブリの形状やまわりの水量が変化することも想定される。

現実的なデブリ組成を考えれば臨界リスクは小さいと評価しているが、デブリ取り出し作業を安全かつ円滑に進めるためには未臨界を維持し、適切に臨界を管理することが必要である。未臨界を維持し万が一の臨界発生を防ぐために、深層防護に基づく臨界管理案を検討している。

大きな反応度が入らないようにする作業手順制限や、必要に応じて中性子吸収材を使用する臨界防止技術、作業中に臨界に近づいていないかを監視する臨界近接監視技術、早期に臨界を検知する臨界検知技術、万が一に臨界が検知された場合は、緊急ホウ酸水注入系にて臨界を止める、といった案を検討している。

(d) 収納・移送・保管技術

燃料デブリを安全かつ合理的に収納・移送・保管するため、燃料デブリの仕分けから長期保管設備での管理までのシナリオを仮構築した。

検討の結果、長期的に燃料デブリを乾式保管することが、湿式保管（プール保管）と比較して有力な保管方法であることが確認され、本技術開発のゴールとなるシナリオとして仮設定した。福島第一原子力発電所では、米国スリーマイルアイランド原子力発電所 2 号機と比較して事故初期の海水注入や溶融した炉心が RPV 下部のベデスタル底部に到達しているなど、収納缶に要求される条件はより複雑／高度となることや燃料デブリの搬出方法なども異なることから、燃料デブリを安全かつ合理的に収納・移送・保管するための福島第一原子力発電所専用の収納缶や関連する技術開発を進めている。

(3) 固体廃棄物処理・処分技術

福島第一原子力発電所の廃止措置に向けた取り組みを進めるには廃炉に伴い発生する放射性廃棄物を適切に管理するとともに、性状把握、処理、処分の検討を進めて行く必要がある。しかし、福島第一原子力発電所の廃棄物は、従来の原子力発電所で発生する放射性廃棄物とは様々な点で異なる特徴を有している。種類の点では事故直後に水素爆発により飛散した瓦礫や放出された放射性核種が付着した樹木、土壌などのほか、汚染水から放射性核種を取り除くのに用いられた吸着塔などの水処理二次廃棄物など様々なものがある。

IRID では、実処理に適用できる見通しのある安定化・固定化処理方法の研究開発、適用

可能な処理技術を踏まえた処分概念の検討，燃料デブリ取り出しに際して発生する高線量廃棄物の保管・管理方法の検討，多核種除去設備発生スラリー安定化，固体廃棄物の分別に係る汚染評価技術の開発などを進めている。

5. まとめ

IRID 設立の経緯とその活動内容についてまとめたが，本稿が少しでも IRID の活動をご理解いただく一助となればと考えている。福島第一原子力発電所の廃炉は言うまでもなく大変困難な道程であるが，ここで得られた技術的知見は必ず将来の原子力安全の向上や，遠隔技術の発展などに資するものであると考えている。引続き，福島第一原子力発電所の廃炉にご関心を寄せていただければ幸いである。