P2003-04

解 説

国際廃炉研究開発機構(IRID)における 福島第一原子力発電所の廃炉に向けた 研究開発の概要

Outline of R&D for decommissioning of the Fukushima Daiichi NPS by International Research Institute for Nuclear Decommissioning (IRID)

検査・測定技術を中心に

技術研究組合 国際廃炉研究開発機構 関 修

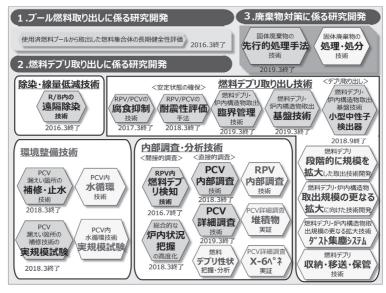
1. はじめに:IRIDの概要⁽¹⁾

(1) IRIDの構成

技術研究組合 国際廃炉研究開発機構(IRID: International Research Institute for Nuclear Decommissioning)は、「将来の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」ことを理念として、2013年8月1日に設立された。組合の構成は、現在下記の通りで、所謂「オールジャパン体制」が構築

されている。

- ① 国立研究開発法人: 2法人(日本原子力研究開発機構JAEA、産業技術総合研究所AIST)
- ② メーカー等: 4社(東芝エネルギーシステムズ㈱、日立GEニュークリア・エナジー(㈱、三菱重工業㈱、㈱アトックス)
- ③ 電力会社等:12社(北海道電力㈱、東北電力㈱、東京電力ホールディングス㈱、中部電力㈱、北陸電力㈱、関西電力㈱、中国電力㈱、四国電力㈱、九州電力㈱、日本原



第1図 IRIDの研究開発プロジェクト (2020年2月現在)

子力発電(株)、電源開発(株)、日本原燃(株))

(2) IRIDの研究開発プロジェクト

研究開発の段階は、一般的に「①基盤研究」「②基礎研究」「③応用開発」「④実用化」の各段階がある。この中で、IRIDの研究開発スコープは、「基礎研究」の一部から、「応用開発」及び「実用化」段階の一部までを担っている。

現在のIRID 研究開発プロジェクトを第1図に示す。これらの研究開発プロジェクトは、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。

本稿では、これらのプロジェクトの中で、「RPV(原子炉圧力容器)内燃料デブリ検知技術:宇宙線ミュオンによる原子炉内の透視」、「小型中性子検出器」、「PCV(原子炉格納容器)内部調査技術」について、検査・測定技術を中心に紹介する。

(3) TMI-2事故との違い

1979年3月28日に発生した米国スリーマイルアイランド原子力発電所2号炉(TMI-2)の事故は、福島第一原子力発電所の事故と同様に「冷却材喪失による燃料冷却不全」に分類される事故であるが、両者には、大きな違いが存在する。TMI-2事故では、燃料が冷却不全により溶融したものの、圧力容器(RPV)内に留まり、RPV及び格納容器(PCV)は健全であった。一方、福島第一原子力発電所事故では、燃

料溶融後、燃料デブリとなって、RPVを破損し、 PCV内に落下した。また、PCVも破損にまで 至り、TMI-2以上の難しさが存在する。

RPV内燃料デブリ検知技術: 宇宙線ミュオンによる 原子炉内の透視^②

ミュオンとは宇宙から飛来する高エネルギーの粒子が地球の大気と衝突し発生する素粒子の一種である。質量は電子の約200倍で、地表では毎秒手のひらの大きさに約1個降り注いでいる。ミュオンは高いエネルギーを持ち物質の透過性が高いため、以前よりピラミッドや火山などの大型の構造物の内部調査研究に使われてきた。

本研究では、高エネルギー加速器研究機構の透過法と米国ロスアラモス国立研究所と(株)東芝の連携チームの散乱法という2方法について開発を進めた。透過法は構造物内を通過するミュオンの透過率の違いから内部を調べる方法で、燃料デブリの識別能力は1m程度、装置は小型となる点に特徴がある(第2図)。一方、散乱法は構造物内を通過する際にミュオンが物質により散乱される角度の違いから内部を調べる方法で装置は大型で2台必要とされるが、識別能力は30cm程度と高いことに特徴がある。

■ 透過法の原理

 Ξ ュオンの透過量 $(N\mu)$ を測定することで Ξ ュオン飛跡上の物質の有無を推定 $N\mu$ (観測量) = $N\mu$ (入射量)・ $\exp(-\Sigma a \cdot p \cdot t)$ a:物質内の減衰係数、 ρ :物質の密度、t:物質の厚さ

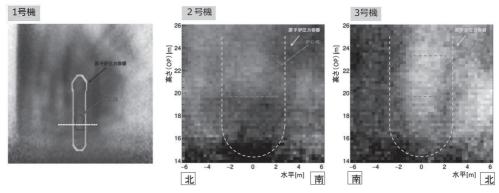
- フラックスの変化を影として画像化 比較的小型の検出器で可能
 - 内部構造の推測にはシミュレーションとの比較





透過法検出器(約2.5mX2.0mX高さ2.1m)

第2図 透過法のイメージ図と検出器外観



第3図 透過法による1~3号機の調査結果

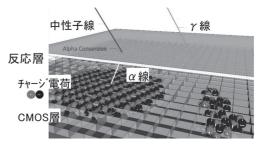
透過法を用いて実施した1~3号機の調査結果を第3図⁽³⁾に示す。1号機の調査結果では、 圧力容器内の炉心位置及び底部に、高密度の物質の存在が確認できず、ほぼ燃料デブリは、格納容器内に落下したものと推定される。一方、2号機の場合には、通常の炉心位置には高密度の物質が確認できないものの、圧力容器の底部には存在が確認できる。従って、2号機では、燃料が溶融して落下しているものの、一部は圧力容器内に留まっているものと推定される。なお、3号機については、圧力容器内の炉心位置および底部に、高密度の物質の存在が確認できず、まだ一部の燃料デブリが圧力容器内に、残存する可能性はあるものの、多くが格納容器内に落下している可能性が高い。

3. 小型中性子検出器(4)

燃料デブリを取り出すためには、対象となる 燃料デブリの位置や量を把握するため、検出器 を燃料デブリ近傍にアクセスし、高γ線量下で 微弱な中性子を計測する必要がある。しかしな がら、燃料デブリ近傍にアクセスするためのル ート狭隘であることから、CMOS型小型中性子 検出器の開発を行った。

CMOS型小型中性子検出器の原理は、以下の通りである(第4図)。

① CMOS層に塗布した反応層に中性子が入



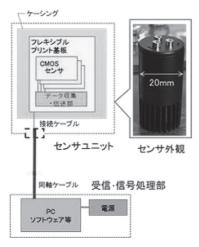
第4図 CMOS型中性子検出器の原理

射すると、重荷電粒子が発生し、CMOS層 に電荷としてチャージされて明るいパター ンが表出される。

② 一方、γ線は比較的小さいパターンが現れるため、中性子の入射とは弁別される。

CMOS型中性子検出器について、要素試験を 実施し、中性子単一場における中性子検出、γ 線の単一場におけるγ線検出、γ線と中性子の 場合の複合照射環境下での性能を確認した。複 合場において中性子起因のα線によるクラスタ パターンを識別できること、γ線の集積線量が 1,000Gy程度までは、中性子の誤検知がないこ とも確認した。

以上の結果を踏まえ、CMOS型中性子検出システムの試作を行った(第5図)。センサユニットは、センサを3枚重ね、感度を確保するとともに、放熱性を考慮した設計とし、映像伝送先のPC内に中性子検出のためのソフトウェアを実装し、リアルタイムで中性子カウントを表示できる構成としている。



第5図 CMOS型中性子検出システム概要

本システムの評価試験の結果、以下の性能を 確認した。

- ① 1時間の中性子計数 (0.1n/(cm²·s)) 取得の要求に対し、7時間の測定を確認。
- ② 中性子東計測範囲: 0.1n/(cm²·s) 以上、1,000n/(cm²·s) 以下を確認。
- ③ 耐放射線性:累積線量1,000Gyまで確認。
- ④ 耐熱性:温度40℃まで常温時と同一性能 確認。
- ⑤ 耐水性:水中においても浸水無く動作を 確認。

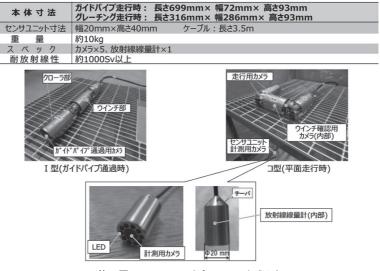
なお、実機適用を想定した場合には、以下の 点の検討が必要であることも確認した。本セン サは適用先によって要求仕様が異なるため、状 況に合わせた設計、製作が必要となる。

- ① 水中環境において、使用エリア近傍(200~300mm以内)の周囲に中性子源がある場合には、中性子吸収材等を用いた遮蔽構造の検討が必要である。
- ② 気中環境においては、中性子が熱化されないので、CMOSセンサの周囲に中性子減速材を設けることで熱化の促進が必要であること、より効率的に中性子を検知するため、また使用目的に応じて、コリメータ形状やコリメータ内減速材サイズを変更することで、実用性が高まると想定できる。

4. PCV (原子炉格納容器) 内部調査技術

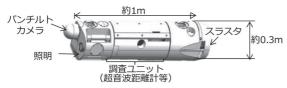
燃料デブリの広がりや格納容器内の損傷状況を調査するために、各号機の調査内容に則した調査用ロボットを開発および調査を実施してきている。現在までのPCV内部のロボットによる調査の技術的課題としては、下記のものが挙げられる。

- ① 高線量率環境への対応
 - ~数百Gy/h、累積線量: ~数1,000Gy
 - ・耐放射線性の高い電子機器、測定器、カメラの採用、交換部品の確保性、部品交換の容易性(遠隔操作による部品交換容易性他)
 - 照射試験による確証、測定誤差の検証
- ② PCVバウンダリの確保
 - ロボットサイズ<貫通口径(走破性、搭 載機器制約)
 - ・隔離弁の追設、シール機構、窒素加圧管理
 - チャンバー内にユニット化されたケーブ ル送り機構
 - 現地施工の取り合い、PCV外装置設置 エリア作業線量率の低減
- ③ ケーブル、ケーブルマネジメント
 - 乱巻の抑制、干渉物の回避、ロボット放 置時の処置
 - ケーブル重量<ロボットのけん引力(調 査範囲を制約)
 - ケーブルサイズ・特性 [動力、制御、通 信] (搭載記載を制約)
- ④ オペレーション
 - (損傷) 環境に応じた走破性
 - 自己位置の確認方法、俯瞰カメラ、後部 カメラ、ランドマークの活用
 - 徹底した訓練(レスキュー対応、メンテナンス対応、部品交換対応等を含む)
 - 実機モックアップ試験
- (1) 1号機におけるPCV内部調査
- 1号機のPCV内は、水位が高い状態にあるこ



第6図 PMORPH (ピーモルフ) 概要

とから、水中での調査機能が求められる。2017年に調査を実施しした「PMORPH」(第6図)と今後実施予定の「潜水機能付ボート型アクセス・調査装置」(第7図)の調査用ロボットが開発され、今後の調査が計画されている。2017年の調査結果では、ペデスタル外底面に各機器

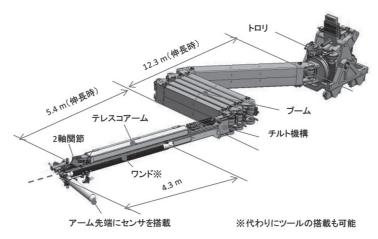


第7図 潜水機能付ボート型アクセス調査装置概要(5)

を覆う堆積物の存在が判明した。次回の調査では、堆積物の下に何が存在するかの解明が期待されている。

(2) 2号機におけるPCV内部調査

2号機のPCV内は、1号機と異なり水位が低く、気中での調査が可能な環境にある。過去、2017年、2018年に開発した調査用ロボットによるPCV内部調査結果により、RPV本体基礎(RPVペデスタル)の内側の画像情報取得に成功した⁽⁶⁾。今後、より詳細な情報を取得するために、現在アーム型アクセス装置(第8図)を開発中である。アーム全長は約22m、アームの

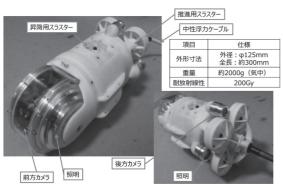


第8図 アーム型アクセス調査装置概要(5)

先端には10kgまでの調査装置を搭載できるよ うに計画している。

(3) 3号機におけるPCV内部調査⁽³⁾

3号機のPCV内は、水位が高いことから、水 中を遊泳できるロボット「ミニーマンボウ」(第 9回)を開発した。本ロボットを用い2017年に 実施した調査の結果から、「ペデスタル下部に おいて、溶融物が固化したと思われるものやグ レーチング等の複数の落下物、堆積物」他が確 認することができた。



第9図 ミニーマンボウ概要

じ、福島第一原子力発電所の廃炉に係わるリス ク低減とそれに向けた安全確保、環境保全など に、着実に効果をあげるよう、積極的に取り組 んでいく。

<参考文献>

- (1) 関修: "福島第一原子力発電所の廃炉に向けた研究開 発の概要"、保全学、Vol.18、No.2、pp.53-56 (July, 2019)
- (2) 永野護・関田俊介: "宇宙線ミュオンによる原子炉内の 透視"、電気学会誌、Vol.138、No.8、pp.522-524 (August,
- (3) 関修: "福島第一原子力発電所の廃炉に向けた燃料デブ リ取り出し技術の研究開発の現況 - 国際廃炉研究開発機 構(IRID)が取り組む研究開発の概要 - "、デコミッショ ニング技法、No.56、pp.29-45 (September, 2017)
- (4) IRID: "研究開発成果概要IRID ANNUAL RESEARCH REPORT2018", pp.20-21 (March, 2019)
- (5) 関修: "福島第一原子力発電所の廃炉に向けた国際廃炉 研究開発機構 (IRID) における遠隔調査技術の開発"、原 子力年鑑2020、pp.120-122 (October, 2019)
- (6) 関修: "福島第一原子力発電所廃止措置に向けた国際廃 炉研究開発機構 (IRID) における研究開発の現状"、原子 力年鑑2019、pp.89-91 (October, 2018)

5. おわりに

IRIDは、今後も国内外の叡智を結集し、廃 炉に必要な研究開発を効率的・効果的に実施す るという設立目的に沿って、研究開発活動を通

【筆者紹介】-

技術研究組合 国際廃炉研究開発機構 研究管理部 部長