



日本原子力研究開発機構機関リポジトリ  
Japan Atomic Energy Agency Institutional Repository

Title	燃料デブリの取り出しに係る検討状況と遠隔技術
Author(s)	芳中 一行
Citation	技術士,28(10),p.4-7
Text Version	出版社版
URL	<a href="https://jopss.jaea.go.jp/search/servlet/search?5057045">https://jopss.jaea.go.jp/search/servlet/search?5057045</a>
Right	日本技術士会

## 福島第一原発事故の影響と現状、これから (その3)

## 燃料デブリの取り出しに係る検討状況と遠隔技術

Status of Research for Fuel Debris Retrieval with Remote Technology

芳中 一行

Yoshinaka Kazuyuki

福島第一原子力発電所では廃炉に向けた各種検討、取組みが行われている。本稿では、廃炉における最大の課題である燃料デブリの取り出しについて、CPD 講座で講演された内容を中心に解説する。現在、各号機では、燃料デブリの位置・状況を含む原子炉内の調査、解析評価、それらの結果を考慮したアクセス方法（上部・側面）及び燃料デブリ取り出し方法の検討、遠隔技術開発等の様々な取組みが進められている。

For decommissioning the Fukushima-Daiichi Power Plant, various studies and activities have continued. In this paper, it was mainly described the status of research for fuel debris retrieval with remote technologies, which was the most difficult challenge, introduced in CPD program. Investigation and analyzing for debris condition in each reactor have been done. Various researches and developments for the way of fuel debris retrieval with remote technology, including in access route, from the top or side, have continued with the result.

キーワード：燃料デブリ、福島第一原子力発電所、廃炉、遠隔技術

## 1 はじめに

燃料デブリの位置を把握し、その取り出しを行うことは、福島第一原子力発電所（以下「1F」と称す）の廃炉を実現する上で重要な課題である。本稿では、CPD 講座での 1F に係る 2 つの講演（「廃炉に向けた燃料デブリの取り出しに関する課題を理解する」鈴木俊一氏（東京大学）、「原子力ロボットと東電福島第一事故」川妻伸二氏（JAEA））の内容を中心に、燃料デブリの取り出しに係る諸課題に対する取組み状況と関連する遠隔技術開発について、その概要を紹介する。

燃料デブリとは、燃料集合体、制御棒、その他の炉内の構造材が溶融して発生したもののことである。1979 年のスリーマイルアイランド原子力発電所 2 号機（以下「TMI-2」と称す）の事故、1986 年のチェルノブイリ事故の際にも炉心が溶融し、燃料デブリが発生している。

燃料デブリの性状については、TMI-2 から回収した燃料デブリを用いた研究のほか、模擬燃料デブリを作製し、その性状等を調査する研究も行われており、その結果等から、生成の過程や成分によって燃料デブリの特性が異なると考えられている。特に、ホウ素を含む形態となっている場合は、

硬度が大きく（鈴木氏の講演資料では、JIS 規格に基づくビッカース硬さ試験の荷重をくぼみの表面積で除した値で、15 GPa~20 GPa 程度）、切り出し等の対応において困難が予想されている。

燃料デブリの状態、位置、存在量等については、後述するように解析コードを用いた推定やミュオンを用いた測定、原子炉格納容器内の調査等の取組みが進められている。

## 2 燃料デブリ取り出しに関する取組み

原子力損害賠償・廃炉等支援機構により「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 2016（以下、「戦略プラン 2016」<sup>1)</sup>と称す）」がとりまとめられている。

戦略プラン 2016 では、事故により発生した通常の原子力発電所にはない放射性物質によるリスクを継続的、かつ、速やかに下げることが基本方針としており、その中で、燃料デブリは「周到な準備と技術によって安全・確実・慎重に対処し、より安定な状態に持ち込むべきリスク源」として整理されている<sup>1)</sup>。

鈴木氏による講演では、① TMI-2 の燃料デブリ取り出しの経験等から燃料デブリの取り出しに

相当の期間を要すると考えられること、②その間の構築物の健全性確保の重要性が述べられた。

燃料デブリ取り出しの間中も放射性物質の閉じ込めや冷却等の様々な対応が必要となる。構築物は、炉心溶融や爆発等の事故の影響を受けており、海水注入による鉄筋の腐食等による劣化も考えられる。特に格納容器を水で満たす場合、重量増加を伴うことから、構築物の健全性確保がより重要な意味を持つことになる。

また、同講演において、TMI-2の経験から、予期せぬことが必ず起きると考えた取り組みの重要性や、燃料デブリの取り出しが時間との戦いになることが強調された(東京電力(株)ホームページ<sup>2)</sup>では、燃料デブリの取り出しの対応状況が公表されている)。

### (1) 燃料デブリの取り出し方法の検討

TMI-2では、燃料デブリが原子炉圧力容器内に留まっていたこと、全面マスク等の特別な放射線防護装備なしに建屋上部からのアクセス(関連装置の取扱い)が可能であったことなど、現在の1Fの置かれている状況とは異なっている。また、原子炉のタイプ(BWR/PWR)等が異なるため、TMI-2で適用した技術をそのまま1Fに適用することはできないが、その経験は1Fにおける燃料デブリ取り出しの検討において重要な参考材料となる。

例えば、TMI-2では、燃料デブリ取り出しは格納容器を水で満たした状態(冠水)で、上部(オペレーションフロア)からのアクセスにより取り出された。この方法では、水による放射線の遮蔽、放射性物質の飛散防止の効果が期待できることから、有力な方法であり、1Fにおいても燃料デブリ取り出し方法の候補の一つとして検討されている。ただし、1Fにこの方法を適用する場合、格納容器を水で満たすために貫通部、損傷部等からの水漏れを防止する対策が必要となる。別の方法としては、冠水せずに気中で燃料デブリを取り出す方法が考えられる

が、その場合は、逆に、取り出し時の放射性物質の飛散防止等の対策の検討が必要となる。燃料デブリの位置、後述する止水の成立性等によって合理的な方法が異なると考えられることから、現時点では、その両者について並行して検討が進められている。

また、TMI-2では燃料デブリ取り出しにボーリング装置をはじめとする様々なタイプの装置が用いられた。上部からのアクセスによる場合、1Fでは、格納容器底部(原子炉圧力容器外)に落下した燃料デブリの取扱いを考える必要があり、目標とする燃料デブリまでの距離がかなり遠くなる(TMI-2の約14mに対し最大約35m)<sup>3)</sup>。この状況での取り出しでは、視認性の問題や装置先端部でのトルク不足等の課題を克服する必要があるだろう。別の方法としては、格納容器側面のハッチを利用し横からアクセスする方法も考えられる。

戦略プラン2016では、これまでの検討結果から冠水/気中とアクセスルートとして有力と思われる取り出し工法を絞り込み、引き続き検討が進められている(図1)。

### (2) 燃料デブリの位置の特定に係る取り組み

燃料デブリの位置を見極めることは重要なキーポイントであり、工法の選定と深く関係する。これまでに国内外の協力を得ながら、複数の解析コードを用いて事故の進展についての解析が試みられ、各号機における燃料デブリの位置、量が推定されている。その結果、1号機では大部分が格納容器底部に存在、2号機、3号機は解析コードによって、原子炉圧力容器内、格納容器底部等の存在量にばらつきのある

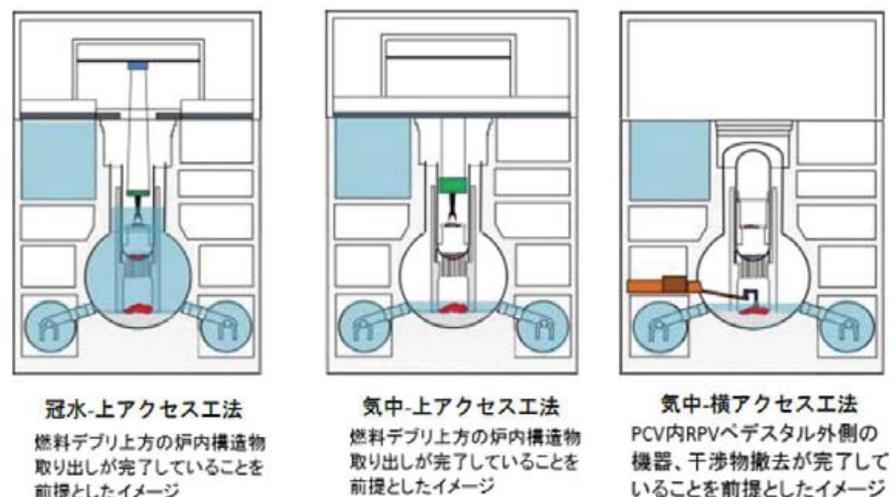


図1 重点的に検討が進められている燃料デブリ取り出し工法の概要<sup>1)</sup>

結果となっている。なお、解析評価は、モデルの特性、事故シナリオの不確かさ等を含んでいる。

また、宇宙から降り注ぐミュオン（負電荷を持つ電子より重い粒子）を用いて、燃料デブリの位置を特定する試みも行われている。ミュオンの透過、散乱の特性からウラン等の重元素の識別が可能とされる。1号機に対しては既に2015年2月から9月にかけて2回のミュオン（透過法）による測定が行われており、炉心の位置には1mを超える大きな燃料は存在しないとの結果を得ている。また、2号機に対しては2016年3月から測定が行われており、圧力容器底部に燃料デブリと思われる高密度物質の影が確認されたことが公表されている<sup>2)</sup>。

これらの調査、解析、事故当時から温度・圧力といったパラメータの分析評価の結果等から、燃料デブリの位置がある程度は予想ができる状況となっているものの、特定に至っておらず、継続して調査、検討が行われている。

### (3) 止水対策

格納容器内を水で満たすためには、貫通部を塞いで止水しなければならない。鈴木氏によれば、ハッチ等に用いられているシール材は健全ではないことが想定されており、弁、配管やハッチ等、様々な箇所からの漏洩箇所全てを個々に止水することは難しいとされた。そこで、漏れ箇所を個々に処置するのではなく、速乾性グラウト材を注入してバウンダリ（止水するための境界）を構築する技術の開発、その適用等の検討が進められている。

### (4) 燃料デブリ取り出しにおける安全確保の検討

燃料デブリ取り出し方法の検討に合わせ、取り出しにおける安全確保のための検討が行われている。ここでは、その主な項目の検討状況等について述べる。

#### ① 構造健全性の確保と耐震性評価

燃料デブリ取り出し中（地震発生時を含む）において、事故で損傷した建屋、格納容器等が重要機器・設備を支持できる状態を維持する必要がある。

このため、東北地方太平洋沖地震時の原子炉建屋の応答評価、事故時の水素爆発による原子炉建屋の損傷を考慮した耐震性評価、原子炉建屋鉄筋コンクリート耐震壁の劣化調査等が行われている。

また、腐食抑制策として、冷却水中への防錆剤の添加を有望視して検討が進められており、放射線による影響や臨界防止剤による影響等を勘案して、タングステン酸ナトリウム、五ホウ酸ナトリウム等の4種類の候補剤が選定されている。今後、さらに実機適用性の観点から絞り込みの検討が行われる。

#### ② 臨界管理

原子炉の通常運転時は、核燃料の配置、水の量などの条件を整えて核分裂が継続して起こる臨界状態とする。現在、1F各号機の炉内状況は臨界が起きやすい状況にはないが、燃料デブリの取り出しにおいて、形状や位置関係などが変化した場合に臨界になることは否定できないことから、その状態を管理し臨界を防止する必要がある。

燃料デブリの取り出しにおいて、臨界に至るシナリオの検討のほか、短寿命核種のガンマ線検出から臨界に至った場合に速やかに検知する技術、中性子検出器、ガンマ線スペクトル検出器等を備えた機器による未臨界状態で臨界近接を監視する技術、溶解性中性子吸収材の常時注入による臨界防止技術等、各種技術開発が進められ、適用性が検討されている。

#### ③ 冷却機能の維持

格納容器補修時、燃料デブリ取り出し時においても冷却機能を維持する必要がある。滞留水処理対策期間中、格納容器補修期間中、燃料デブリ取り出し期間中の3つのフェーズに分け、どのようなルートで冷却水を循環するか（循環ループ）、その概念が検討されている。

#### ④ 取り出した後の安定保管に向けた検討

取り出した後の安定保管のための方策についても検討が進められている。これまでの検討において臨界防止、除熱、閉じ込め、遮へい、放射線分解による水素爆発防止等を考慮した収納缶の基本仕様案が提示されている。収納から移送、保管までのシステム構築に向け、引き続き検討が進められている。

## 3 廃炉に係る遠隔技術開発の状況

鈴木氏の講演でTMI-2の事故当時はロボット等の遠隔技術の導入に消極的であったこと、川妻氏の講演でチェルノブイリでは高線量下での瓦礫除去等にロボットの使用実績があることが紹介さ

れた。1Fにおいても建屋内には未だ高線量下の箇所が多くあり、炉内調査や除染を含め、デブリ取り出しに関連する一連の対応に遠隔技術を適用せざるを得ない状況にある。過去の経験のみならず、実機適用から得られた知見を積み上げつつ、技術開発が展開されている。

### (1) 適用された遠隔技術と課題

川妻氏の講演において、震災後約3年間のロボットの投入実績が紹介された。それによれば、屋内外合わせて約35台のロボットが投入され、調査、瓦礫撤去、サンプル採取等に使用されており、そのうちの5台がトラブルで帰還不能となっているとのことである。このトラブルはほとんどが通信系で発生しており、ケーブル断線等が疑われている。

一方、建屋内は整然とはしておらず、アクセス時に想定姿勢で制御できないこともある。

電子部品は放射線損傷により使用時間が限られることから、より多くの情報を得るためには、耐放射線性を考慮する必要がある。鈴木氏の講演においても、半導体を含む電子機器、通信機器等が高い放射線環境下に曝され、現状では10時間程度しか使用できない状況であることから、電子部品を含まない機構、いわゆるローテクが功を奏する場合も多いとの見解が述べられている。

これらの課題を克服するためには、得られた知見を基に様々な状況を想定してロボットを開発、適用し、そこから情報を得て、また新たなロボットの開発へつなげる繰り返しのアプローチが必要である。

### (2) 檜葉遠隔技術開発センター

廃炉推進に必要不可欠な遠隔操作機器・装置の技術基盤を確立するため、福島県双葉郡檜葉町に遠隔技術開発センターが建設された。そこには、バーチャルリアリティシステム(写真1)、実物大の作業環境を再現した試験設備等が設置されており、格納容器下部の止水作業の実証試験、作業員訓練を行うなど、安全・確実な作業の実現に向けての取組みが行えるようになった。

さらに、ロボット開発の合理化等を目指したシミュレータ開発、災害対応用ロボットの標準試験法の確立等の遠隔基盤技術の開発が期待されている。



写真1 バーチャルリアリティシステム

## 4 おわりに

本稿では、燃料デブリの取り出しの概要について紹介したが、この他、1Fでは各種の安全対策を施しつつ、1号機から3号機の使用済燃料プール内燃料の取り出し準備、建屋外の瓦礫撤去、フェーシング(表面遮水)等の廃炉に向けた作業が着実に進められている。

燃料デブリ取り出しについては、本稿で紹介したように、技術開発要素が多く、その検討、技術開発の取組みは道半ばである。また、幅広い分野に渡るため、関連技術の公募等の取組みも行われている。

関連する部門の技術士は、互いに連携しつつ、各専門分野に係る課題の解決に寄与することが期待される。

### <引用文献>

- 1) 原子力損害賠償・廃炉支援機構:「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2016」, 2016年7月13日

### <参考文献>

- 2) 東京電力ホームページ: [http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/roadmap/images1/images2/d160825\\_05-j.pdf](http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/roadmap/images1/images2/d160825_05-j.pdf), [http://photo.tepco.co.jp/library/160728\\_01/160728\\_01.pdf](http://photo.tepco.co.jp/library/160728_01/160728_01.pdf)
- 3) 検証 福島原発1000日ドキュメント(ニュートン別冊), ニュートンプレス, pp.82~93, 2014年4月

芳中 一行 (よしなか かずゆき)  
技術士(原子力・放射線部門)

日本原子力研究開発機構  
核燃料サイクル工学研究所  
e-mail: yoshinaka.kazuyuki@jaea.go.jp

