



俯瞰的アプローチによる燃料デブリ取り出し代替工法の提案

Proposal for the alternative method of the fuel debris retrieval
by the hypothesis driven planning

東京大学大学院 鈴木 俊一 Shun-ichi Suzuki Member

The alternative method to retrieve fuel debris and MCCI (Molten Core Concrete Interaction) products in Fukushima Daiichi Nuclear Power Plants (1F) is proposed based on the hypothesis driven planning. The whole picture of the decommissioning of 1F was discussed with the experts from different fields, taking the end state of 1F into consideration. Though the discussion, we recognized that stabilization of radioactive materials including fuel debris was one of the most important work steps to ensure the safety during the fuel debris retrieval, such as reducing the dispersion of small particles of radioactive dusts and keeping the structural integrity of damaged components. As the candidate material to accomplish the above objective, geopolymer which has used in Europe for the containment of various kinds of radioactive wastes was recommended.

Keywords: Fukushima, Hypothesis driven planning, Fuel debris, Decommissioning, Geopolymer

1. 緒言

福島第一原子力発電所の廃止措置で最大の課題である燃料デブリ取り出しは2021年からの開始に向けて工法の検討が進められている[1]。取り出し案として冠水工法と気中工法が主に検討されているが、格納容器の止水や放射性核種を含む粉塵の飛散防止など不確定要素は多い。

昨年、福島第一原子力発電所2号機及び3号機において原子炉格納容器（以下、PCV: Primary Containment Vessel）の内部調査が行われ、燃料ハンドルや制御棒がPCV底部において観察された[2,3]。この結果はともに事故時に原子炉圧力容器（以下、RPV: Reactor Pressure Vessel）の底部に制御棒のRPV貫通孔よりも大きな開口部が生じたことを示しており、燃料デブリ取り出し時にはRPV底部を構造的により安定な状況にして作業安全を高める必要性があることを示唆している。ここでPCV内の状況をFig. 1に示す。PCV内には燃料デブリのみならず、Csをはじめとする多数の放射性物質の場所、分布、濃度が現状不明確であるため、ホットスポット等高線量領域の特定の不確かさによる作業リスクや取り出し後の廃棄物の処分時区分けをどのようにすべきか等の大きな課題がある。

このように、福島第一原子力発電所の燃料デブリ取り

出しを完遂するためには、現状並びに将来を見据えて、数多くの視点から課題を捉える必要がある。ここで何が起るかわかりにくい不確実性の高い現象を完全に予測することは確かに困難である。但し、将来何が起りそうかリスクを含めて俯瞰し、仮説をたてた上で、あらかじめ何らかの備えをすることは可能である。

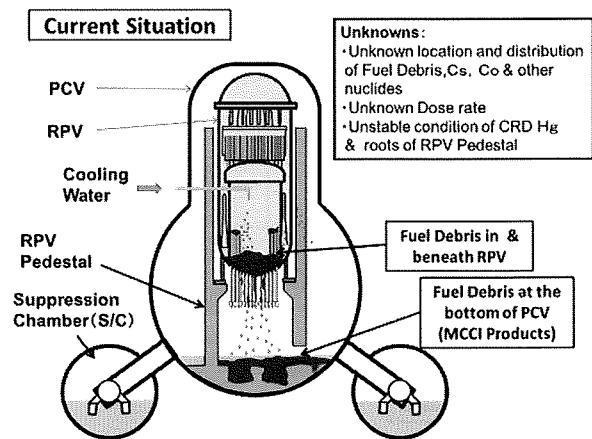


Fig. 1 Current Situation of Fukushima NPP (Unit1-3)

仮説によりリスクを評価する場合には、影響度合いが大きいと思われる不確実な事象を徹底的に洗い出し、モニタリングすることによって仮説を検証することが重要となる。

連絡先:鈴木俊一、〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1
東京大学大学院工学系研究科原子力国際専攻
E-mail: s_suzuki@n.t.u-tokyo.ac.jp

廃炉に本質的な課題を見つけるには、従来の現状から考える意図的計画法と異なるエンドステート(最終状態)から考える仮説指向計画法も有効な手段である[4]。

本研究では、福島第一原子力発電所の廃止措置を俯瞰的視点で捉えるため、廃炉に関する重要課題を抽出し、課題を解決するための要求機能及び機構を検討した。更に、抽出された重要機能を満たす大規模燃料デブリ取り出し手法として、ジオポリマーにより PCV/RPV 内にある燃料デブリを安定化して取り出す代替工法を考案した。なお、課題抽出及び工法選択にあたっては、原子力専門家の他、化学プラント、再処理技術、土木・建築技術、遠隔技術、リスク評価などに関する学内外の専門家及び学生(計50名以上)の意見を反映して実施した。

2. 廃炉の課題抽出

2.1 要求機能

課題抽出のためには本質的に何が廃炉完遂のための幹であるか上位の概念を見極めることが重要である。そこで、先ずエンドステートを意識して全体像を俯瞰した。議論では、閉じ込めと燃料デブリ取り出しに必要な要求機能を洗い出し、相互に連携して見直しを行った。また廃棄物管理はどうあるべきか、エンドステートから燃料デブリ取り出しまで遡って全体を俯瞰しながら議論を実施した。ここで、福島第一の廃炉の全体俯瞰図を Fig. 2 に示す。図中で囲みは議論の範囲、矢印は議論の方向を示す。

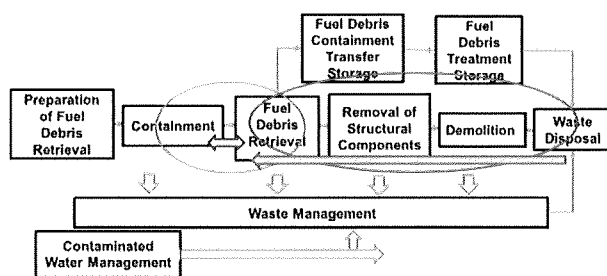


Fig. 2 Process of Fukushima Daiichi Decommissioning

主題としては、全体工程に関係のある①遠隔技術を、またそれぞれの工程として、②放射性物質の閉じ込め、③燃料デブリ取り出し、④放射性廃棄物処理・処分の計4分野について以下の手順で課題を抽出した。なお、議論の最初に各工程の失敗を仮定したが、これは成功するための課題設定では、潜在的な問題点が顕在化しにくくなるためであり、失敗から抽出された問題点をベースに解

決策を求める逆プロセスにより、新たな工法・技術を考案した[5]。

- (1) 何故失敗したのか(仮想)を議論
時間軸を意識した危険ホルの抽出
- (2) 失敗せずに成功するためにはどうすればよいか、既存概念に囚われない発想を思考展開図より抽出[2]
- (3) 外的リスクを踏まえて問題点・課題を議論
- (4) リスクを踏まえたアイデア改善案を抽出
- (5) 時間軸を意識した成功パスを構築
- (6) パス毎にリスクを評価

ここで、放射性廃棄物の処理・処分についてはエンドステートとは何かを議論した結果、「安定化=放射性物質が移動しないこと」が最も重要な概念との結論に達した。このため、閉じ込めや燃料デブリ取り出しに際しても、「安定化」は考慮すべき重要な概念であると認識された。以下には、それぞれの課題において抽出された上位の概念である要求機能を示す。

<課題1：遠隔技術(例、燃料デブリ調査)における要求機能>

- ① 放射性物質を外に出さない、②被曝低減、③調査に時間を要しない(放射線影響が小さいうちに終了)
- ④不整地での調査を可能とする、
- ⑤多数回の調査を可能とする、⑥事故・故障も想定したリスクマネジメント(共通要因)

<課題2：放射性物質の閉じ込めにおける要求機能>

- ①放射性物質を外に出さない、②被曝低減、③事故・故障も想定したリスクマネジメント(共通要因)
 - a. 独立であって他に影響を及ぼさない(多重防護)
 - b. それぞれのシステムがノイズの影響を受けにくい(冗長性の確保)
 - c. システムに問題(電源喪失等)があっても回復(レジリエンス概念の適用)

<課題3：燃料デブリ取り出しにおける要求機能>

- ①放射性物質を外に出さない(a. 切断時の粉塵を飛散させない、b. 切断時の汚染水を外に出さない)
- ②被曝低減、③取り出しに長期間を要しない(建屋・機器損傷前に取出す)、④再臨界防止、⑤事故・故障も想定したリスクマネジメント(共通要因)

<課題4：放射性廃棄物処理・処分における要求機能>

- ①エンドステートを見極めること、
- ②放射性物質を外に出さず、何かしらの安定化した状態を構築すること、具体的には、

- a. 核種を閉じ込めて移動させないこと (例、STEP 1 : タンクで水を閉じ込めて移動させない STEP 2 : 固化する、水抜き・乾燥する)
- b. 外部に影響を与えないこと

2.2 要求機能に対応した機構

2.2.1 閉じ込め

いずれの要求機能においても「放射性物質の閉じ込め」は重要であり、閉じ込めに対する解決策として抽出された機構を以下に示す。

(1) 信頼性の高いバウンダリーを構築する

a. 放射性物資の飛散を防止する

①PCV バウンダリー外への大量放出に備え、原子炉建屋の外にバウンダリーを設ける、②原子炉建屋内面をコーティングする、③PCV 内側に負圧のバウンダリーをつくる、④作業員が被ばくしないように作業拠点を遮蔽する、⑤バウンダリーを多重化する (例、独立したバウンダリーを構成して、次々に除染する)、⑥なるべく狭い小さな空間で閉じ込める。(例、小部屋で閉じ込める、バウンダリーに開ける孔を極力小さくする、大物機器は炉内で一旦切断してから取り出す)

b. 原子炉建屋の外部を土で埋める

①タービン建屋の高さにまで埋める、②PCV 外側をグラウト等で埋める

c. 汚染水・気体のバイパスルートをなくす

①トレーサーでリーク箇所を同定して塞ぐ、②サンドクッションドレンラインを塞ぐ

d. 止水を行う

①ジェットデフレクタで閉じ込め、サプレッションチャンバー (以下 S/C: Suppression Chamber) と PCV を隔離する、②発生汚染水が外部に流失しないように燃料デブリ切断周りに堰を構築する、②地下水流入入に対する対策をとる

(2) 放射性微粒子等粉塵飛散防止のシステムを構築する

a. PCV 内で燃料デブリや放射性物質を固めて取り出す

①PCV, RPV 内壁を固化材で被覆、②燃料デブリをグラウト、セメント等で固めてから切断する、③燃料デブリを凍らせる

b. 水をかけながら燃料デブリや機器を切断する

①切断する炉壁・炉内機器に水スプレーで乾燥を防止する、②異なる性状の燃料デブリ切断粉塵が飛散しない水スプレー方式を開発する

c. 切断時に放射性微粒子等粉塵が散らない工夫をする

①作業領域に密閉空間をつくり、切断・吸引する、②歯治療のように切削、水、吸引を最適化する、③ウォータージェットで飛散しにくくする、④大きな寸法で切り出してから、管理容易な水容器に移動し細断する、⑤エアークッションにより取り出し部を隔離する、⑥ジェルのような粘性材で切断部を被覆する、⑦界面活性剤により粉塵を取りこむ、⑧レーザー等で加温して柔らかくしてから切断する、⑨泡で切断箇所を覆う

d. 粉塵が発生しても外部に拡散しにくい構造とする

①切断エリアを水で覆う (例、エアロゾルのような微粉末が空中に飛散しないための最低水深を解析により求める)、②RPV 上部に穴をあけた時に容器内部に風船・傘を拡げて拡散を防止する、③泡で上面を覆う、④気流の制御をおこなう (例、熱源を評価して PCV 内での気流・粉塵移動をシミュレーション、湿度・温度等環境の調整により開口部温度を上げて粉塵飛散を防止)、⑤上部アクセスの場合、粉塵が上昇しないようにする (例、ペダスタルに排気ラインを設け、粉塵を排気シフィルタで回収、RPV 上部から給気し、RPV 内気流が下向きとなるよう給排気を設計)、⑥上部機器プール上側部または底部から PCV, RPV 内部気体を導く配管を設置し、水により飛散を防止する。

e. α 核種を含む核種除去可能な空気浄化システムを構築する

(3) 高濃度汚染水を処理可能なシステムを構築する

(4) 放射性微粒子等粉塵をモニタリングする

a. 粉塵発生をモニタリングする

①線量等リアルタイムで計測可能なダストモニタを設置する、②パルスレーザーでモニタリングする (ライダー)、③あらかじめ粉体種類ごとの検定曲線を設定する、④レーザーで核種検知する技術と組み合わせ飛散物をオンラインで同定する

(5) 放射性物質の放出量=物量 x 放出率を極力低減する

a. 切断エリアを小さくする

b. 切断量を小さくする

(6) 放射性微粒子等粉塵が付着する範囲を限定する

a. 発生した微粉末が PCV 等壁面につかないシステムとする (あらかじめ内面を付着しにくい素材で被覆)

b. スプレーや気流等を工夫し、上部空間は極力汚さず、微粉末は底部に澱ませる。

2.2.2 燃料デブリ取り出し

燃料デブリ取り出しに関しては、下記機構を抽出するとともに前述の「遠隔技術」「閉じ込め」機構と連携した。

- (1) 共通基盤
 - a. モニタリングシステムを構築する
 - b. アクセスルートを構築する
- (2) 事前調査を行う
 - a. PCV 内の多様な放射性核種付着状況及びデブリ位置を把握する (将来の廃棄体も考慮要)
 - b. サンプルングにより多様な核種並びにデブリ性状を把握する
- (3) 取り出し前に燃料デブリを長期安定化する
 - a. コンクリート・グラウト材等で閉じ込め、汚染水を減らすとともに線量を低減する。
 - b. MCCI 生成物を容器あるいはグラウト等で閉じ込め、アクセスしやすくなった上部構造物、デブリを取り出し終了後に取り出す
 - c. 放射性物質は PCV 下部に落とし固めて安定化する
- (4) 燃料デブリを安全に取り出す
 - a. 取り出し時に粉塵を発生させない (「閉じ込め」機構とリンク)
 - b. 取り出し時の汚染水を減らす
 - c. 確実かつ迅速な取り出し・回収方法とする
 - d. 加工作業を確実に行う
 - e. 損傷した RPV 底部や RPV ベDESTAL 基部等の構造物を安定化してから取り出す
 - f. 取り出し時に PCV など重要構造物を損傷しない
 - g. 臨界を防止する
 - h. 水素爆発・火災を防止する
 - i. 不要な機器を除外する
- (5) 取り出した燃料デブリや汚染切断機器を適切に収納・保管する
- (6) 将来の廃棄物管理をしやすくする
 - a. 多種多量の分散した廃棄物を分別・管理可能とする。
 - b. その後の廃棄物管理がしやすいように、燃料デブリ取り出しを行う

このうち、(4) c. の「確実かつ迅速な取り出し・回収方法とする」に対する工法案として以下を抽出した。

- ① PCV 横から穴をあけてアクセスし回収
- ② 上部アクセスで RPV を撤去した後で回収
- ③ オペフロからボーリングして取り出す
- ④ S/C、トール室から水平ボーリングして取り出す
- ⑤ 原子炉建屋地下にトンネルを造成し、ペDESTAL 下部から取り出す
- ⑥ S/C を切断時の切粉等のシンクとして利用して回収
- ⑦ ベント管を使って 8 か所から同時に取り出す

- ⑧ 連続搬送する (例、適度な大きさに砕いてスクリーコンベアで搬送、超高压水ジェットで粉碎し、連続的に搬送、シールドマシンのような取り込み埋没型機構の利用)
- ⑨ RPV と PCV を切り離して回収する (例、RPV を上方から取り出し後 PCV 底部の MCCI 生成物を取り出す、RPV を横に移動しタービン建屋内新設プールで保管してから MCCI 生成物を取り出す、RPV を PCV 底部から取り出し、原子炉建屋地下で保管解体)
- ⑩ 全体を固めた後、切断・分割して取り出す

3. 燃料デブリ取り出し工法の基本概念

前章で議論された燃料デブリ取り出し準備及び取り出し工法を選別して、以下に示す工法概念を構築した。

3.1 燃料デブリ取り出し準備の概念

燃料デブリを取り出す前には、先ず閉じ込め機能の強化が必要であり、そのためには閉じ込めを多重化し、最終壁で可能な限り閉じ込めることが重要である。最終壁としての PCV での閉じ込めは、高線量作業であり困難なことから、アクセス容易な原子炉建屋の内面をコーティングする、あるいは他建屋を壊してから原子炉建屋の外を覆う (Fig. 3)。また、PCV・原子炉建屋の負圧管理とともに作業エリアを閉じ込めて多重化する。その他、空調系は負圧管理とともに、 α 核種も含めた核種除去可能な空気浄化系の設置や、燃料デブリを取り出す閉じ込め空間は管理しやすいように極力コンパクトとする。

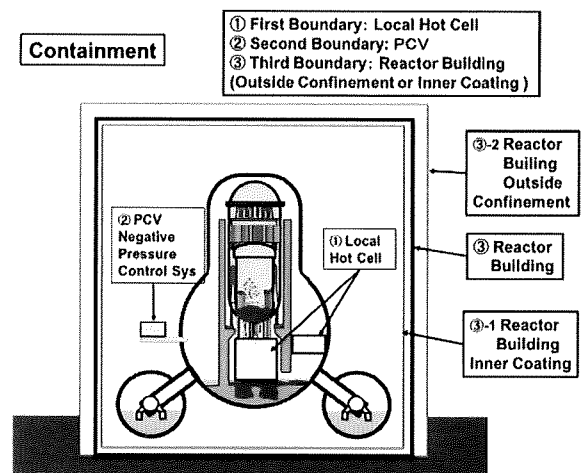


Fig. 3 Concept of Confinement

3.2 燃料デブリ取り出し工法概念

燃料デブリ取り出しに際して何らかの手法で燃料デブリや構造物を一旦移動しないように安定化してから取り出すことが、燃料デブリの安定性維持、放射性物質の飛散防止及び構造物の補強の観点から最も重要な概念である。この場合、安定化被覆材としては、RPV 底部やペDESTALを補強可能で、高温の燃料デブリに耐性があり、また将来の廃棄物として長期保管可能であることが条件として求められる。そこで本条件を満たす可能性が高い材料として、高温特性・強度に優れ、核種溶出率や水素発生がコンクリートと比較して低く欧州において放射性廃棄物保管材として実績のあるジオポリマーを候補材として選択した[6]。なお、耐震性については既存の建屋で確保できるように施工を行う。

4. ジオポリマーの活用

ジオポリマーはアルカリシリカ溶液とアルミナシリカ粉末の脱水縮合反応によって形成される非晶質ポリマーの総称であり[7]、優れた耐放射線性・耐熱性と低い核種浸出性等の特徴を有しているため、欧州の他、福島第一原子力発電所の廃棄物固化などへの適用が検討されている[8]。しかしながら、ジオポリマーは通常のセメントコンクリートに比べて混練から固化までの時間が短く、施工性の検討が不可欠である。特に、水中環境や高温環境などより過酷な環境における流動挙動の特性を把握することは重要である。

ジオポリマーの施工可能性 (a. 輸送機能、b. 拡散機能、c. 固化機能) に関する研究を実施した結果、以下に示すように同材の現地施工が可能であることが判った[9]。

①輸送工程においては、ジオポリマーの一種である SIAL®は高い流動性を備え、想定される施工時間で十分な輸送性能を持つ。

②拡散工程においては、想定される施工時間において従来の材料と同等の拡散性能を備え、燃料デブリの水冷及び空冷のいずれの条件においても適用可能である。

③固化工程においては、80℃以下の環境であれば健全な構造が保たれ、100℃高温水中環境及び 300℃高温気中環境でも多層構造の適用により、被覆施工が可能である。

以上、ジオポリマー SIAL®は実機環境を想定した条件下では、輸送・拡散・固化の各工程において十分な施工性を備えており、また廃棄体としても安定な長期保管の可能性が高いため、大規模燃料デブリ取り出し時にお

る有効な工法の一つとなると判断される。なお、同材は高温気中条件でも多重流し込みの多層構造構築により、施工可能となることが示唆され、表面を冷却する水スプレーとの併合により、より安定した充填が可能になると判断される。

5. 新たな燃料デブリ取り出し工法

5.1 大規模燃料デブリ取り出し工法の提案

前章までの結果から、ジオポリマーを活用して一旦固化により安定化してから燃料デブリを取り出す手法は、安全かつ合理的な工法と判断される。Fig. 4 はジオポリマーにより PCV 底部及び RPV 底部を固化し、PCV 内に作業プラットフォームを構築して燃料デブリを取り出す工法である。

Basic Concept for Fuel Debris Retrieval

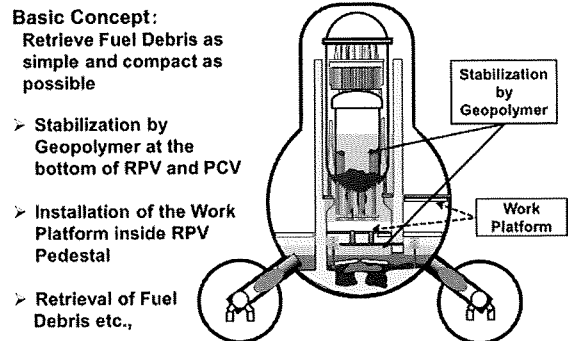


Fig. 4 Concept of Fuel Debris Retrieval (1)

PCV 底部を固化することにより、PCV と S/C の隔離、RPV ペDESTALの補強、取り出し時の飛散防止などを図ることができる。また、RPV 底部及び制御棒駆動機構 (以下、CRD: Control Rod Drive Mechanism) ハウジングは固化によって取り出し時に燃料デブリが落下することなく、取り出しが可能となる。なおジオポリマーに鉄ビーズ、ボロンビーズなど充填剤を添加することにより、遮蔽の強化や臨界防止などの機能を追加することも可能である。前述のように同材は廃棄物の保管に使用されていることから、ある意味、廃棄体化を行いながら、燃料デブリを切断し取り出すこととなる。このため、放射性物質の拡散が少なく、将来循環ループを設置した場合の粉塵除去フィルター削減が可能になるなど、今後の廃棄物戦略

によっては、より合理的な廃棄物対策となりうる。ここで、上記の課題を満たす手順を Fig. 5 に示す。

- ① PCV/RPV 内部状況についてサンプリング等により調査を行い、燃料デブリを含む放射性物質がどこにあるかを十分に把握する。
- ② 原子炉建屋の閉じ込めを行う。
- ③ RPV ペDESTAL 内の機器を極力除去する
- ④ 汚染水とならずに燃料デブリを冷却するため、アイソレーションコンデンサー (IC) を活用した冷却配管あるいはヒートパイプなどの受動的安全性を有する冷却システムを燃料デブリ周辺に設置する。
- ⑤ ジオポリマーにより PCV 底部を安定化し、PCV と S/C を隔離する。
- ⑥ PCV 内にプラットフォームを構築、あるいは下部充填により RPV 底部にアクセスし、RPV 底部及び CRDハウジングを安定化する。
- ⑦ 切断は PCV 内部から燃料デブリを直接取り出すか、あるいはペDESTAL 自体をワイヤーソー等で切断し、構造物と一体で燃料デブリを分割して取り出し、原子炉建屋外のプールで保管する。

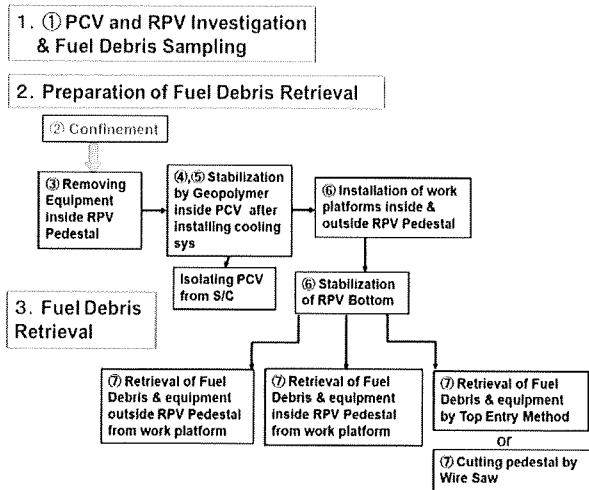


Fig. 5 Process of Fuel Debris Retrieval

Fig. 6 は、より広範囲にジオポリマーを流しこむことにより、PCV 内のプラットフォームを容易に構築する工法である。特に、燃料デブリが堆積している CRD ハウジングは上部からのアクセスが困難であり、また横からのアクセスも上下作業となるため困難が伴う。落下防止を図りながら、本作業を行うためには、RPV の下部に機構を設置するよりも、充填してから取り出し作業を行う方が

よりシンプルな工法と考えられる。本工法は充填中にプラットフォーム外枠を挿入して、最終的に充填する工法であるが、プラットフォームを設置せずに全体を充填してから、ワイヤーソー等により切断分割する方法も選択肢として考えられる (Fig. 7)。

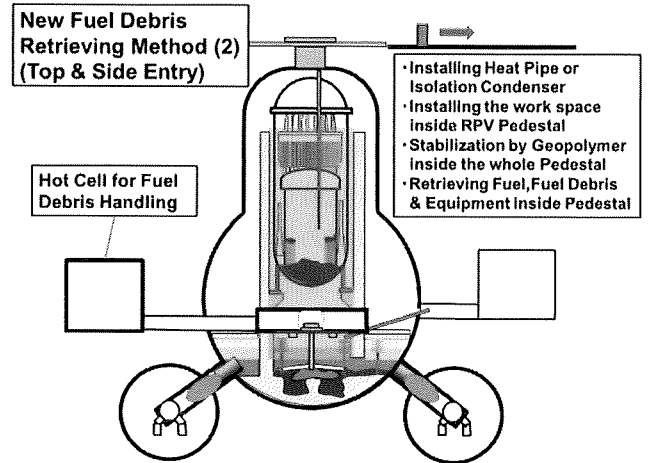


Fig. 6 Concept of Fuel Debris Retrieval (2)

Fig. 7 に示す工法は施工的には最もシンプルな工法であり、ペDESTAL 内に空間をつくらないことから、RPV の落下等を防止することが可能である。またペDESTAL 内部の Cs 等多種多様な放射性物質の飛散を防止して取り出すことが可能となることから、最終的にはより迅速な解体ができるかと判断される。

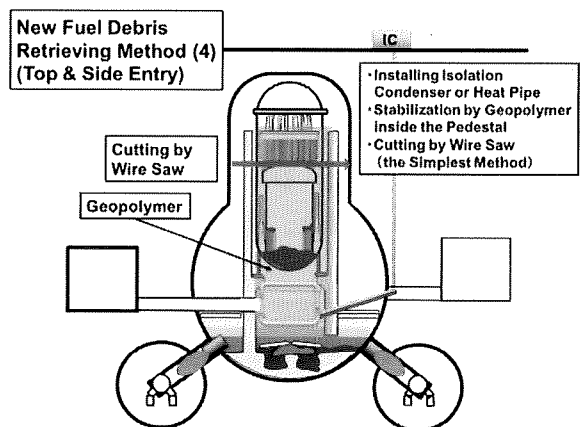


Fig. 7 Concept of Fuel Debris Retrieval (3)

なお、ジオポリマーの速い硬化特性を利用することにより、RPV に流し込み、RPV 底部を長期に亘り部分安定化することも可能である。

Fig. 8 は燃料デブリ周辺はジオポリマー、その他は沈降型超重泥水を使用する工法である。ここで沈降型超重泥水はNB 研究所が開発した比重の重い充填材であり[10]、高粘性材料のため燃料デブリ掘削時に発生する放射性微粒子等粉塵を飛散させずに閉じ込める機能を有する。また、施工後不要になった際には加水により流し取ることが可能となるため、燃料デブリ以外の場所に本材料を適用することによりシンプルな取り出しが可能になると判断される。

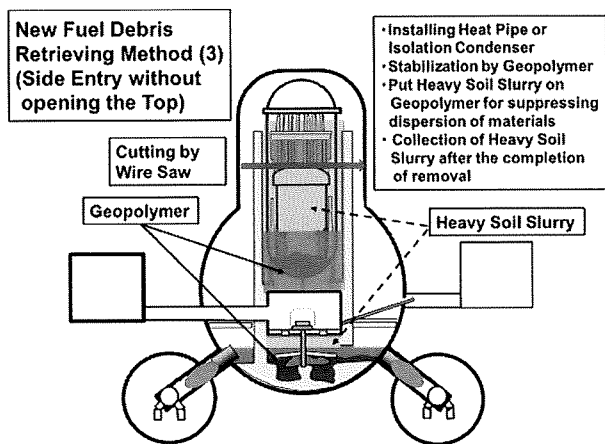


Fig. 8 Concept of Fuel Debris Retrieval (4)

以上、安定化により廃棄体がつくられると、切断、スライス、構造物との一体移動などの様々なオプションが可能となるため、時間軸を考慮した工法選択肢が増えることが判断される。例えば、RPV を分割した廃棄体はプールに輸送して保管し、その中で内容物を確認しつつ切断し、保管容器に入れることも可能となる (Fig. 9)。

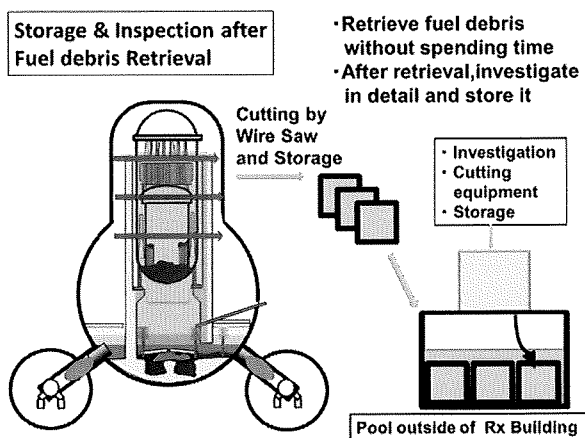


Fig. 9 Storage after Fuel Debris Retrieval

5.2 工法成立のための課題

本工法の実現のためには、

- ①ジオポリマーの流動・固化特性、他材料との化学反応等の界面特性の把握、
- ②ジオポリマーの耐久性・強度評価、③MCCI 生成物及びRPV 底部の除熱技術、④耐環境・放射線ロボットの開発、⑤ペDESTAL内機器撤去技術、⑥デブリ取り出し装置・治具の開発、⑦ PCV 側面アクセス技術、⑧負圧管理システムの構築、⑨水・放射性物質のシール技術、⑩キャスク保管時の臨界評価、⑪ジオポリマーの水素発生量評価、⑫廃棄物としての長期健全性確認等が必要である。

なお、上記のうちジオポリマー特性を除く技術の多くは、現在、国際廃炉研究開発機構 IRID が開発・実証中の廃炉技術[11]の適用が可能であり、今後の連携が望まれる。

6. 結論

福島第一原子力発電所の燃料デブリ取り出しは、現在PCV やRPV の内部調査、燃料デブリサンプリング及び小規模燃料デブリ取り出しが計画されており、情報を得ながら、着実・安全に廃炉を進める方針となっている。本調査過程において燃料デブリを含む放射性物質の位置・分布等に関する十分な情報が得られた際には、その後の大規模燃料デブリ取り出しは、より合理的に実施することが可能と考えられる。本研究では、長期に亘って安全にかつ合理的に取り出す工法を検討した結果、ジオポリマー等を利用して燃料デブリなど放射性物質を安定化した後、放射性物質を閉じ込めながら取り出す工法が適切な工法であるとの結論を得た。

謝辞

課題抽出の実施にあたっては、大学・研究所、廃炉関連機関、化学プラント、土木・建築、粉塵、ロボット技術、電力・プラントメーカーOB など、多数の多岐にわたる分野の専門家と3年にわたり実施し、多くの技術アドバイスをいただいた。また成果レビューについては海外機関の廃炉専門家からも貴重なご意見をいただいた。この場を借りて厚く感謝の意を表す。

なお、本内容は、文科省「英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業 廃止措置研究・人材育成等強化プログラム」の東京大学「遠隔操作技術及び核種分析技術を基盤とする俯瞰的廃止措置人材育成」における成果の一部である。

参考文献

- [1] 原子力損害賠償・廃炉等支援機構, “東京電力(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 2015” (2015) <http://www.dd.ndf.go.jp/jp/strategic-plan/index.html>
- [2] 3号機原子炉格納容器内部調査について (2017年11月30日廃炉・汚染水対策チーム会合/事務局会議 (第48回) 報告資料)
http://irid.or.jp/wp-content/uploads/2017/12/20171130_2.pdf
- [3] 福島第一原子力発電所2号機原子炉格納容器内部調査実施結果 (2018年2月1日廃炉・汚染水対策チーム会合/事務局会議 (第50回) 報告資料)
<http://irid.or.jp/wp-content/uploads/2018/02/20180201.pdf>
- [4] Clayton M. Christensen, *イノベーションのジレンマ*, Harvard business school press
- [5] 畑村洋太郎編、*実際の設計*、日刊工業新聞社
- [6] Milena Prazska, Marcela Blazsekova, Peter Tatransky, Radovan Hlavacka, “Application of SIAL® solidification technology for processing of problematic waste streams – 18267” WM2018 Conference, March 18 – 22, Phoenix, (2018)
- [7] 川尻留奈、他、”ジオポリマーの基礎物性と構造利用に関する基礎的研究”, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.33 No.1, pp.1943-1948 (2011)
- [8] 特定原子力施設放射性廃棄物規制検討会 (第5回) 東京電力ホールディングス株式会社, “水処理二次廃棄物の処理にむけた検討状況”, 2017年2月10日
<http://www.nsr.go.jp/data/000178233.pdf>
- [9] 酒井 泰地, 鈴木 俊一, 岡本 孝司, “燃料デブリ取り出しに向けた ジオポリマーの適用可能性に関する研究”, *日本保全学会, 保全学 Vol.17, No.2*, pp.87-94 (2018)
- [10] 一般社団法人NB 研究所パンフレット
http://nb-institute.com/technical_expertise/nbc-natural-blanket-clay/
- [11] IRID 平成29年度研究開発成果
<http://irid.or.jp/press/2017/>

(平成30年9月3日受理,平成30年12月13日採択)