

廃棄物管理を考慮した大規模燃料デブリ 取り出し工法の提案

Proposal on large- scale fuel debris retrieval considering waste management

東京大学
東京大学

鈴木 俊一
高橋 佑介

Shunichi SUZUKI
Yusuke TAKAHASHI

Member
Non-member

Abstract

In order to retrieve fuel debris on a large scale, it is effective to use Geopolymer to stabilize the fuel debris. In this study, we proposed a new disposal concept for various radioactive wastes and evaluated the barrier material performance and heat generation as wastes when using Geopolymer. As a result, it was shown that the method using Geopolymer was effective in the process from fuel debris retrieval to waste disposal.

Keywords: Fukushima Daiichi NPP, Geopolymer, Waste Management, Fuel Debris Retrieval

1. 大規模燃料デブリ取り出し

福島第一原子力発電所（以下、1F）の廃止措置で最大の課題である燃料デブリ取り出しは2022年からの開始に向けて工法の検討が進められている。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[1]、バウンダリー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。

一方、1F2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、燃料ハンドルの制御棒が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があることを示唆している。

従って、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は、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重要な概念である。この場合、安定化材料は、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にわたり保管可能であることが

必須条件であり、欧州において廃棄物処理に使用されているジオポリマー[4]により、燃料デブリを安定化してから取り出しする方法は安全かつ合理的な工法であると判断される[5]。

このように安定化により一旦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と考えられる。例えば、図1に示すようにRPV内の燃料デブリをワイヤーソーにより切断し、分割した廃棄体を原子炉建屋外に新設する廃棄体保管建屋に輸送して保管し、その中で内容物を確認しつつ細断して、保管容器に入れることも可能となる。

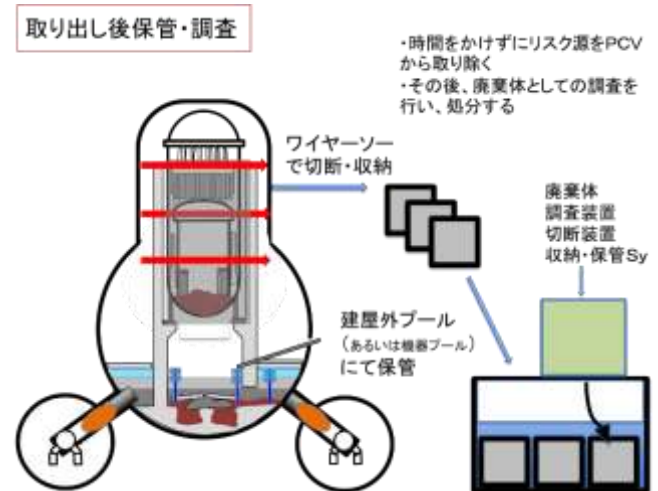


図1 ジオポリマーによる大規模燃料デブリ取り出し

通常の原子力発電所の廃止措置で発生する放射性廃棄物は、放射能レベルによってL1からL3までの低レベル放射性廃棄物と放射性廃棄物として扱う必要のないクリアランス廃棄物、そして再利用不可の放射能レベルの高い高レベル放射性廃棄物に分類される。一方、1F事故に起因する放射性廃棄物及び燃料デブリも放射能レベルに応じて区分して分類ごとに処理、処分することは必要であるが、通常の原子力発電所の廃止措置で発生する廃棄物とは異なり、燃料デブリを含む多種多様で膨大な量の廃棄物が発生している。不確実性を含む廃棄物の処理・処分を考える際には、廃炉戦略のエンドステート（最終形態）を明確に示し、廃棄物ストリーム、即ち、廃棄物の発生、性状把握、保管、処理、処分まで放射性廃棄物をどのように扱うのかをマクロ的に示したプランが必要となる。

2. 基本シナリオ

1F 廃棄物処分にあって考慮すべき基本シナリオを、以下に示す。

- ① 長期の亘る安全性を最優先で確保
 - ・安定化した状態（核種が移動しない状態）を早くつくる（例えばジオポリマーで安定化する）
 - ・低レベル廃棄物に対しても、より安全な設計を採用
 - ・被曝の時間的ピークを深さ方向でずらす
- ② 多種・多量の廃棄物を極力シンプルに処理・処分
 - ・作業性向上
 - 発生廃棄物をその都度廃棄可能
 - ・被曝低減
 - ・手間・コスト低減
 - 極低レベル廃棄物測定の合理化
 - 人工バリアの合理化
- ③ 社会的な認知
 - ・“掘削時の気づき”など将来の人間侵入への配慮

ここで、一旦ジオポリマーで安定化する概念は、燃料デブリ取り出しの合理化とともに、廃棄体化を PCV 内で行うことになるため、廃棄物処分概念が成立する場合には、極めて有効な工法となりうる。

図2には、新たに考案した廃棄物処分概念を示す。

本処分概念では、異なる汚染レベル、異なる種類の放射性廃棄物が一つの処分場で処分され、最深部では汚染レベルの異なる廃棄体が混在（ブレンディング）する。利点としては、詳細な検認が省略でき、膨大な数のサンプリングや核種分析調査を回避し廃棄物を容易に分別して収納可能となることや、管理対象施設を一つに絞ることに

より、時間が短縮されコストが削減できるということが挙げられる。ここで汚染レベルが曖昧で評価が困難な廃棄物は、より上位の概念（より深い位置）で処分を行うことにより安全性を担保する。

具体的には、次のステップで燃料デブリを取り出して、廃棄体を一時保管し、最終的には処分場で管理を行う。

①まずは解析で PCV 内の Waste Stream をつくり、廃棄体の代表性を議論し、サンプリングを行って確認する。それが成立する場合には、廃棄体をレベルに応じて、青、黄、赤にわけるとわかる。わかりにくいものはより管理レベルをあげる（青は黄色、黄色は赤に入れる）。

②廃棄体は、青・黄・赤のラベルを貼って移送・保管する。なお、 α 核種が若干ついて可能性のある廃棄物は黄色（あるいは赤）として保管する。

③ジオポリマーで安定化した燃料デブリや炉内構造物は赤として管理する。

④原子炉建屋から取り出し後には、建屋外に設置される一次保管場所において廃棄体を十分に調査し、最終処分時の管理レベルに反映する。

⑤赤ラベルの廃棄体は、処分要件として必要なインベントリと発熱量を評価する。

但し、黄色を赤に入れる場合、ベントナイト緩衝材の付与により、コストが高くなるか、評価する必要がある。

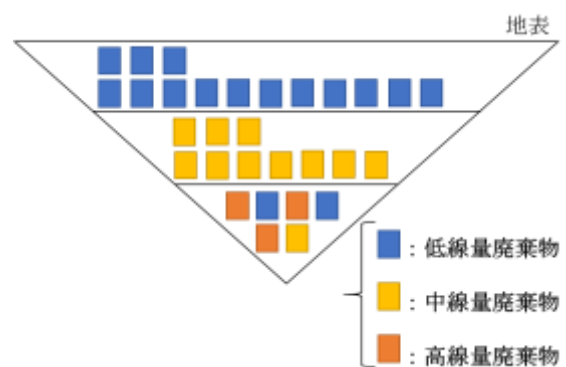


図2 1F廃棄物の新たな処分イメージ

一方、本処分概念を実現させるためには、インベントリ評価、燃料デブリの発熱性評価、核種浸出性評価等の技術的な課題から、規制や合意形成等の社会的な課題まで幅広く検討する必要がある。

本処分概念では、ジオポリマーで安定化した燃料デブリ等の高線量廃棄物は処分場の最下層に埋設することになるが、廃棄体間の離間距離を小さくすると燃料デブリを被覆している廃棄体の温度が上昇し、ベントナイトの

緩衝材としての性能が劣化する。このため、発熱性評価では長期的に性能を保つために廃棄体の離間距離と温度上昇の関係を調べ、どの程度の離間距離であればバリア機能を失わずに、かつ高効率に廃棄体を地層に埋設できるかを評価する必要がある。

なお、ジオポリマーは取り出し時の安定化材料として使用されるが、同時に廃棄物処分においては、高い耐熱性や耐放射線性を有し、放射性核種の溶出率が低い緩衝材としての機能が期待される。

以下ではジオポリマーの性能評価を行い、緩衝材としての適用可能性を評価する。

3. ジオポリマーの性能評価

3.1 必要な要求性能

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反応によって形成される非晶質ポリマーの総称であり、材料の組合せにより性状が異なる[6][7]。ジオポリマーを処分工程において緩衝材として使うための要求性能を表1に示す。

表1 ジオポリマーに求められる機能

機能	内容	評価指標	目標数値・状態
流動性	廃棄体容器内に完全に充填する	粘度・テーブルフロー	注入完了前に固化しない
強度特性	廃棄体および周囲の構造を一体化し、支持する	圧縮強度	1.47MPa [8]
熱伝導性	廃棄体からの発熱を閉じ込める	熱伝導率	発熱廃棄体の温度が許容温度を超えない
耐熱性	高温環境下で性能を失わない	各種	想定環境で諸性能を保つ
耐放射性	放射線環境下で性能を失わない	各種	想定環境で諸性能を保つ
水素発生	水の放射線分解による水素発生を抑える	G(H ₂)値 水素発生量	従来の緩衝材より低い値
核種浸出	放射性核種を閉じ込める	溶出率等	溶出を抑える

3.2 実験

3.2.1 流動性評価試験

3.2.1.1 試験方法・条件

溶液の混練完了後から15分毎に計8回、サンプルの粘度を振動式粘度計で測定した。

3.2.1.2 試験結果

粘度測定結果を図3に示す。

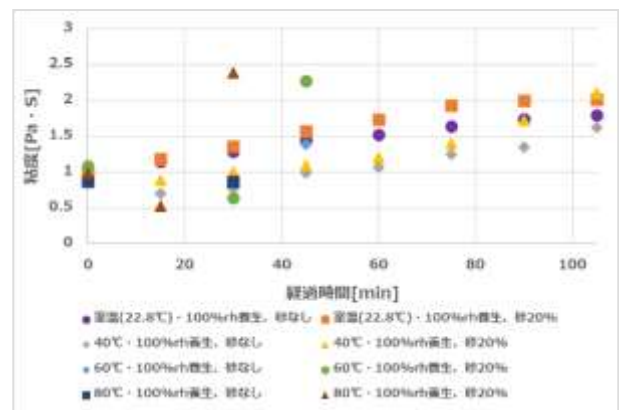


図3 粘度測定結果

室温養生試料は養生開始後105分まで粘度が単調に増加することが確認された。一方40°C養生試料では、養生開始後15分で粘度が一度減少し、その後に増加した。60°Cおよび80°C養生試料でも同様であり、養生温度が60°C以上では固化過程の進展が速いことが確認された。これは周囲からの熱によりジオポリマーの縮重合反応が促進されるためと考えられる。80°C養生試料では、養生完了後30分以内では十分な流動性を確保できた。また珪砂添加により流動性の減少が確認されたが、ジオポリマー内の相対的な含水量が減少しているためと考えられる。

3.2.2 強度評価試験

3.2.2.1 試験方法・条件

強度評価試験として圧縮強度試験を実施した。試験体の大きさは直径50mm、高さ100mmであり、種類は27種類、サンプルサイズはn=1である。

3.2.2.2 試験結果

試験結果を図4に示す。

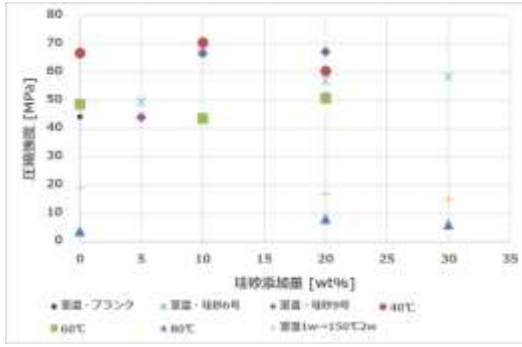


図4 圧縮強度試験結果

室温養生試料では、珪砂 10wt%以上添加によって、圧縮強度向上が確かめられた。また粒径による圧縮強度への影響は認められなかった。

室温養生以外の高温養生試料については、珪砂添加による圧縮強度の向上は確認されなかった。養生温度別の傾向としては、40°C養生試料の圧縮強度は室温養生試料よりも大きく、60°C養生試料では室温養生試料と同程度、80°C以上では室温養生試料よりも小さくなった。

3.2.3 熱伝導性評価試験

3.2.3.1 試験方法・条件

未照射材及び γ 線照射材(約 1MGy)について、保護熱流計法で熱伝導率測定を実施した。サンプル種類は 10 種類(珪砂や Ti、Zr 粉末添加等)である。

3.2.3.2 試験結果

試験結果を図 5 に示す。

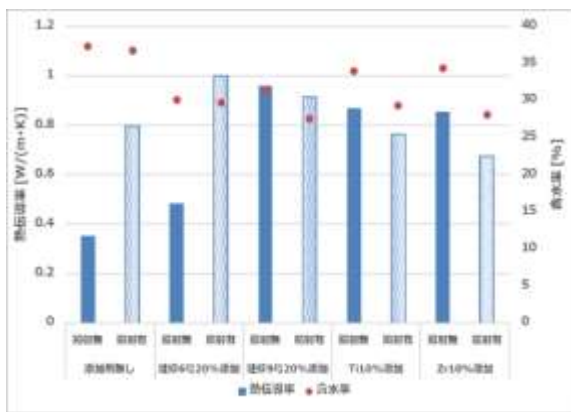


図5 熱伝導率測定結果

未照射試料のデータでは、無添加試料と比較して、Ti 粉末や Zr 粉末を添加した試料の熱伝導率が 2 倍以上に向上することが確認された。Ti、Zr の熱伝導率はジオポリマーよりも高いため、一定量以上添加することで熱伝導率を向上可能と考えられる。また未照射試料と照射済試料の熱伝導率を比較すると、添加剤無しおよび珪砂 6 号

20%添加の試料を除いて、照射により熱伝導率が小さくなる傾向が確認された。この傾向は含水率の増減とも概ね一致していることから、照射によってジオポリマー内の水分が抜けたため熱伝導率が低下したと考えられる。

3.3 ジオポリマーの緩衝材としての検討

本研究で実施した試験結果のまとめを表 2 に示す。

表 2 ジオポリマーの性能評価

(↑: 性能向上に寄与、↓: 性能低下、→: 影響無し、?: 本研究の対象外)

		流動性	強度	熱伝導性	耐熱性	水素発生抑制
含水率	高い	↑	↑	↑	→	↓
	低い	↓	↓	↓	→	↑
養生温度	高温	↓	↓	?	?	?
	中温	→	↑	?	?	?
	室温	↑	↑	→	→	→
添加剤	無し	↑	→	→	↓	→
	珪砂	→	↑	↑	↑	→
	金属粉	→	↑	↑	↑	→
	Pd 系	→	↑	↑	↑	↑

廃棄体材料として検討したジオポリマーは、室温環境だけでなく高温・放射線環境下においても各種性能を発揮することが確認され、求められる状況に応じて添加剤(珪砂、Pd、 Gd_2O_3)等の添加材もしくは養生条件(乾燥・湿潤)を変えることで、さらに性能向上を図れる見通しが得られた。

4. 処分場の廃棄体発熱影響に関する検討

4.1 目的

処分時に緩衝材として用いられるベントナイトは、高温環境で人工バリアとしての機能が失われる。ジオポリマーについてもベントナイトと比較すると耐熱性に優れてはいるが、特に 300°C 以上で表面にひび割れが生じることが過去の研究より判明している[9]。よって燃料デブリ等の発熱性廃棄物の処分を考える際には熱解析にて伝熱による緩衝材の温度上昇を評価する必要がある。また廃棄体間の距離(ピッチ)は処分場のサイズにも直結し、採掘コストにも関係する。ピッチが大きければ大きいほど

採掘体積も大きくなり、採掘コストも増大していく。そこで、熱流体解析プログラム (STAR-CCM+) を用いてベントナイトの温度上限値である 80°C に達する離間距離について解析を行った。

4.2 方法

4.2.1 解析モデルおよび条件

解析モデルにおける処分場のイメージを図 6 に示す。

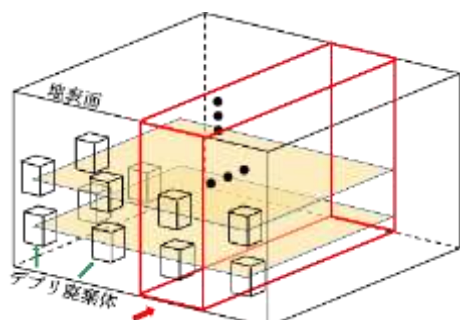


図 6 最終処分場イメージ図

燃料デブリ廃棄体を 3 次元空間上に並べて、基本単位として赤枠をモデルとして抜き出し、4 つの廃棄体を縦に並べて二次元非定常熱伝導解析を行った。解析モデルを図 7 に示す。

側面は断熱境界とし、地表面は 15°C、最深部は 3°C/100m の地温勾配より 45°C の温度固定境界と仮定した。

また、1F 各号機の放射性核種量を ORIGEN2 コードにより評価した報告書[10]より、発熱量を合計し、廃棄体容器 1 基当たりの発熱量を算出し、処分までの冷却期間を 20 年と仮定した。

ここで本解析で用いた材料の物性値を表 3 に示す。

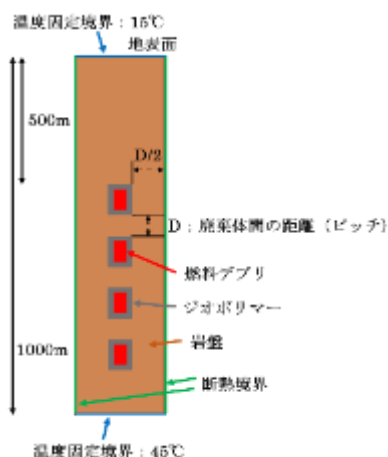


図 7 解析モデル

表 3 熱解析に用いた材料物性値

	ジオポリマー	岩盤 (花崗岩)	燃料デブリ
密度 [kg/m ³]	4940	1750	2600
熱伝導率 [W/m·K]	2.5	0.5	3.8
比熱 [J/kg·K]	350	700	840

4.2.2 解析結果

解析結果を図 8 に示す。ピッチが 6m 以上の場合ではベントナイトが機能を失わず緩衝材として使用できることが確認された。またピッチが大きくなると最高温度が下がることが確認された。

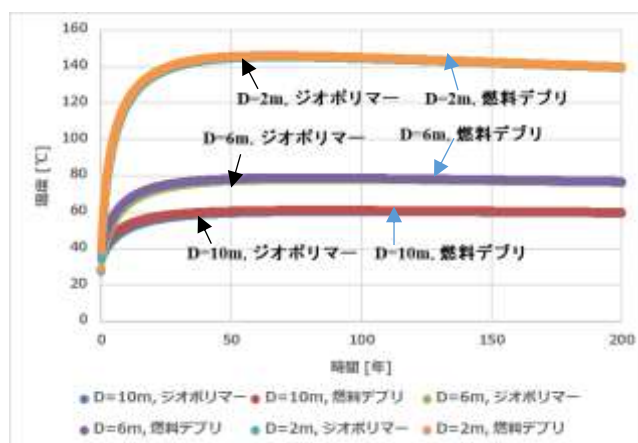


図 8 ジオポリマーの温度の経時変化

5. 結論 —処分概念の総合評価—

本研究では、ジオポリマーを使った大規模燃料デブリ取り出し工法により発生する廃棄体に対して、材料因子、ならびに処分場における発熱性を検討し、1F 廃棄物の処分概念に関する技術的成立性を評価した。

取り出し時の安定化材として使用するジオポリマーは、室温環境だけでなく、高温・放射線環境下においても各種性能を発揮することが確認された。また他研究において、水素発生は Pd 等の添加により抑制されることが示されている[9]。今後ジオポリマーへの添加材についてさらに検討を深める必要があるが、求められる状況に応じてジオポリマーに適切な添加材を加えることにより、さらなる性能向上が可能であると判断される。

処分場における燃料デブリからの発熱に関しては、解析結果から離間距離を一定以上取ることで、周囲の緩衝材の温度上昇を抑えられることが分かった。具体的にはピッチを 6m 以上確保することで、ベントナイトの温度上限値である 80°Cを下回ることが確認された。

本提案処分概念成立のためには、この他にも検討すべき事項は残されているものの、物理的強度、流動性、水素ガス発生等の人工バリア材の性能および発熱の観点から、ジオポリマーは本処分概念に適用可能であるとの見通しが得られた。

以上の結果及び低い核種浸出性の結果[4]等から、ジオポリマーを使った大規模燃料デブリ取り出し工法は、取り出し時の安全性や時間短縮のみならず、廃棄物管理の視点からも有効な手法であり、燃料デブリ取り出しから廃棄物管理に至る廃炉工程全体を合理的に実施可能な工法であると判断される。

参考文献

- [1] NDF, 「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 2020」
- [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)
- [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)
- [4] 富士電機株式会社, “ジオポリマーによる廃棄物封じ込め技術,” 2016.
- [5] 鈴木俊一, “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”, 日本保全学会, 保全学 Vol.17, No.3 (2018)
- [6] 原田耕司, “ジオポリマーの特性と施工事例,” 西松建設技報 VOL.39, 2015
- [7] 河尻留奈, 国枝稔, 上田尚史, 中村光, “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, 2011
- [8] 原子力規制庁, “廃棄物確認に関する運用要領”, 2014
- [9] 平成元年度英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業, “燃料デブリ取出し時における放射性核種飛散防止技術の開発”, JAEA-Review2020-043, 2020
- [10] 西原健司, 須山賢也, 岩本大樹, “福島第一原子力発電所の燃料組成評価,” 日本原子力研究開発機構, 2012