

福島第一原子力発電所の廃止措置に向けて開発した超重泥水の材料特性

Material Properties of Super Heavy Slurry for Decommissioning of Fukushima Daiichi NPS

氏 家 伸 介 (うじいえ しんすけ)
(一社)NB 研究所

成 島 誠 一 (なるしま せいいち)
(一社)NB 研究所

新 井 靖 典 (あらい やすのり)
(一社)NB 研究所

長 江 泰 史 (ながえ やすし)
(一社)NB 研究所

1. はじめに

福島第一原子力発電所事故（以下本件）から8年が経過した現在、各方面で同発電所の廃止措置に向けた様々な技術開発が行われている。なかでも技術的に最難関といえるのが燃料デブリ取出し作業である。同工程の際には作業員の被ばくリスク上昇や放射性微粒子の大気中への飛散、燃料デブリ切削屑を含む放射性汚染水の建屋外流出などが懸念される。したがって燃料デブリ取出し工程では、あらかじめ十分な放射線遮蔽対策を講じるとともに放射性物質に対する閉じ込め機能を強化しておかなければならない。その対策として一般的に考えられるのがコンクリートやモルタルなどセメント系材料の打設である。セメント系材料は建屋補強において非常に有効である一方、固化時の収縮や経年劣化、地震などの外力により亀裂が発生する恐れがあるため、放射性核種の閉じ込め対策としては長期安定性に懸念が指摘されている。そこで筆者等は長期安定性に優れ変形追従性を有する超重泥水を考案し、本件へ適用可能かを検討したのでこれらについて詳述する。

2. 超重泥水の概要

超重泥水はモルタルやコンクリートと同様にポンプ圧送可能な流動性を有する一方で、固化せず長期的に変形追従性を示すことを特長とする。もともとは国際廃炉研究開発機構（IRID）に対し汚染水対策材料として技術提案したものである¹⁾。結果的に本案は採用されることはなかったが、現在まで続く超重泥水開発の基盤となっている。その後、筆者等は変形追従性を共通のコンセプトとして3種類の超重泥水を開発した。これらはそれぞれガンマ線遮蔽性、閉塞止水性、強度特性を高めたものであり、燃料デブリ取出し工程における補助材料として適用できると考えている。参考のため超重泥水の性状を写真-1に示す。また、3種類の超重泥水の構成材料を表-1に、それらの特性を表-2に示す。

本稿では以降、これら3種類の超重泥水に対して特性評価した結果を報告する。

3. 遮蔽型重泥水

遮蔽型重泥水は、上述のIRIDに技術提案した材料と

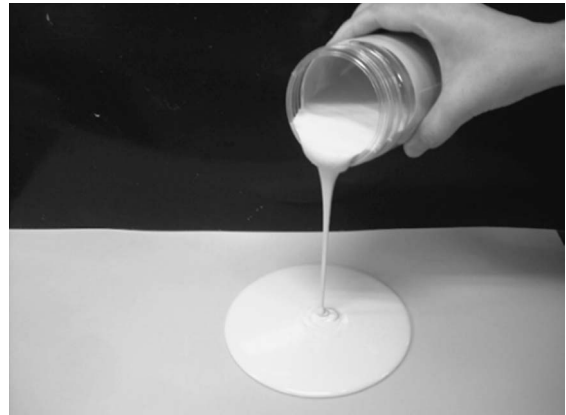


写真-1 超重泥水の性状

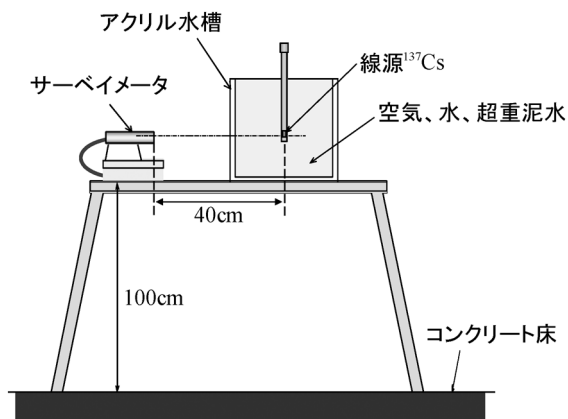
表-1 超重泥水の構成材料

	遮蔽型 重泥水	閉塞止水型 重泥水	沈降型 重泥水
水	○	○	○
パライト	○	○	○
ベントナイト	○	○	-
分散剤	○	○	-
閉塞材	-	○	-
半合成高分子 化合物 (CMC)	-	-	○
セルロース 分解酵素	-	-	○

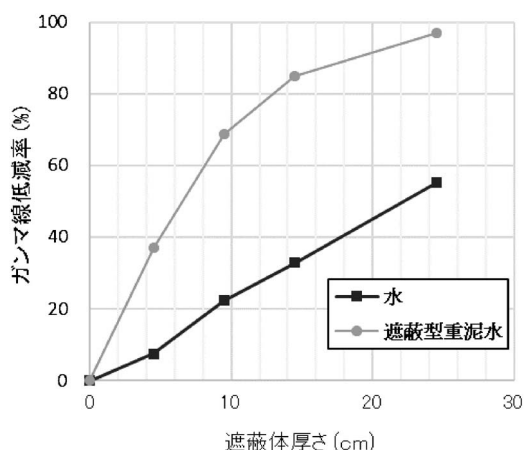
表-2 超重泥水の特性

	遮蔽型 重泥水	閉塞止水型 重泥水	沈降型 重泥水
主特性	ガンマ線遮蔽性	空隙閉塞・遮水性	強度特性
補助特性	遮水性	ガンマ線遮蔽性	密閉掘進性

ほぼ同様の構成であり、材料密度の高さから作業員の外部被ばくリスク低減においても有効であると考えられる²⁾。ガンマ線遮蔽には一般に密度の高い物質が有効とされているため、遮蔽型重泥水は流動性を維持できる範



図一 1 ガンマ線遮蔽実験概念図

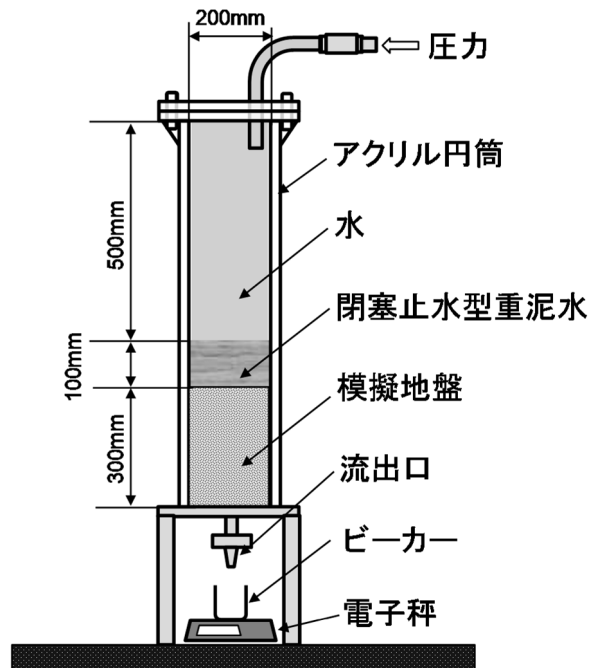


図一 2 遮蔽体厚さとガンマ線低減率の関係

囲で加重材であるバライトの配合量を増やしており、密度はおよそ 2.6 g/cm^3 を示す。また、バライトの沈降を防止するためベントナイトを配合しており、これが遮水材としての役割も担っている。このような遮蔽型重泥水に対してそのガンマ線遮蔽性を評価するため、図一 1 に示す構成で遮蔽実験を実施した。

線源は円筒型アクリル水槽の中心部に固定し、サーベイメーター（放射線検出器）との距離は40 cmで一定とした。アクリル水槽は外径10 cm, 20 cm, 30 cm, 50 cm（うち1 cmがアクリル水槽壁）の4種類を使用し、それぞれの水槽に超重泥水を充填し透過ガンマ線量を測定した。また比較のため、アクリル水槽が空の場合や水を充填した場合についても測定を行った。図一 2 にアクリル水槽が空の場合を基準とした遮蔽型重泥水と水のガンマ線低減率を示す。

遮蔽型重泥水は水と比較して、厚さの増加によりガンマ線低減率が急激に大きくなっている。例えば、厚さ4.5 cmと9.5 cmの場合とで比較すると、水のガンマ線低減率は7.4%から22.3%への上昇で変化量は14.9%であったのに対し、遮蔽型重泥水のガンマ線低減率は36.9%から68.8%への上昇で変化量は31.9%であった。このように、遮蔽型重泥水は空気や水と比較して、高いガンマ線遮蔽性能を有することが確認された。



図一 3 止水性評価試験概念図

4. 閉塞止水型重泥水

本タイプの超重泥水は、燃料デブリ取出し工程で発生する高濃度汚染水が原子炉建屋外へ漏洩するのを抑制するため開発したものである。汚染水漏洩を抑制するためには、原子炉建屋に生じた微細な亀裂や原子炉建屋周辺地盤など、水みちとなる空隙を閉塞しなければならない。遮蔽型重泥水も遮水性を有しているため漏洩抑制に効果を発揮するが³⁾、空隙が大きい場合には重泥水自体が外部へ流出し遮水性を発揮できない可能性がある。そのため、閉塞止水型重泥水は遮蔽型重泥水をベースとし、さまざまな形状、粒径の閉塞材を配合することで、空隙に対する閉塞性を高めたものとなっている⁴⁾。このような閉塞止水型重泥水に対し、地盤への閉塞止水性を評価するため図一 3 に示す構成で止水性評価試験を実施した。

試験はまずアクリル円筒内に模擬地盤となるセメント破砕体を設置し、層厚100 mmになるように閉塞止水型重泥水を充填したあと上部を水で満たした。なお、模擬地盤の透水係数は事前試験によっておよそ $3.0 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ であることが確認されており、これは福島第一原子力発電所建屋周辺地盤のおよそ10倍の値である。その後、試験装置に蓋をして密閉し、3時間かけて圧力を段階的に上昇させた後、550 kPaで70時間保持した。この際、模擬地盤を通過した水は、試験装置下部の流出口から漏出する仕組みとなっており、本試験では一定時間ごとに漏水量の測定を行った。漏水速度の時間変化を図一 4 に示す。

図一 4 中に示した模擬地盤の推定漏水速度は模擬地盤の透水係数をもとに算出した値である。本試験の結果、加圧後時間の経過とともに漏水速度は小さくなることが確認された。これは閉塞止水型重泥水が模擬地盤中の空隙を閉塞した後、その上部に遮水性を有する脱水層が徐

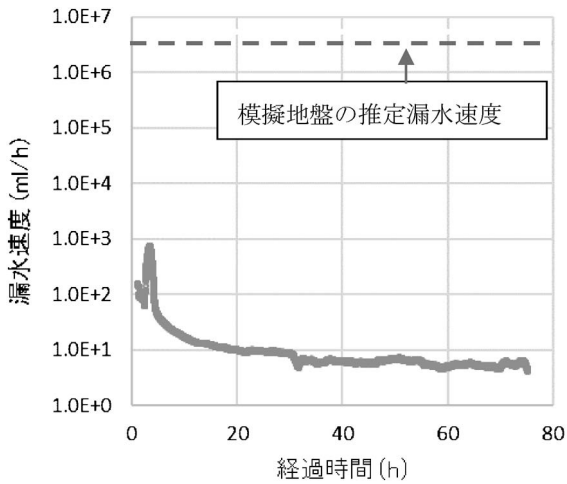


図-4 漏水速度の時間変化



写真-2 模擬地盤上に形成された脱水層

々に形成されていったためである。参考のため、模擬地盤の上部に形成された脱水層を写真-2に示す。

また、550 kPaに昇圧してから70時間経過後の漏水速度は、同圧力での模擬地盤の推定漏水速度と比較して100万分の1以下の値となっている。このように、閉塞止水型重泥水は、原子炉建屋周辺地盤の10倍の透水係数をもつ地盤に対しても高い遮水効果を発揮することが確認された。したがって、同発電所における汚染水漏洩対策として適用可能と考えられる。

5. 沈降型重泥水

燃料デブリ取出し工程では、作業員はガンマ線による外部被ばくだけでなく放射性微粒子の飛散に伴う内部被ばくについてもリスクが高まると想定されている。両被ばくリスクを低減させるには、原子炉格納容器(PCV)底部にガンマ線に対する遮蔽性が高く一定の強度を持ち密閉掘進可能な層を形成することが有効と考えられる。そこで筆者等は、超高密度でかつ変形追従性を有する沈降層を形成可能な沈降型重泥水を開発した。沈降型重泥水は上述の2種類の超重泥水と異なり、ポンプ圧送後に流体粘性を低下させることで、意図的に材料分離を生じさせるものである。したがって粘度調整剤には経時増粘効果を有するベントナイトではなく、半合成高分子化



写真-3 沈降層作製状況



写真-4 コーンペネトロメーター試験

表-3 沈降層の性状とコーン指数

水分 (%)	モールド上部	12.4
	モールド下部	9.6
密度 (g/cm ³)	モールド上部	3.01
	モールド下部	3.21
コーン指数 q_c (kN/m ²)	貫入量5.0cm	1278
	貫入量7.5cm	1894
	貫入量10.0cm	2210

合物(以下CMC)を使用しており、セルロース分解酵素を添加することで流体粘性を低下させる。施工の際にはCMCで粘性を付与したパライト溶液をポンプ圧送し、途中移送管内において分解酵素を注入混合することで徐々に流体粘性を低下させ、PCV内充填後にパライト沈降層を形成させる。今回、このパライト沈降層を作製し、その性状、強度特性、貫入挙動に関する評価を行った。試験においては、写真-3に示すように上部に円筒を取り付けた金属モールドに沈降型重泥水を注ぎ込み、7日間静置してパライトを沈降させた。その後上部の円筒を取り外し、上澄み液を除去して試験体となる沈降層を得た。このようにして作製した沈降層に対して、まず写真-4に示すコーンペネトロメーター試験(JGS1431準拠)と水分及び密度測定を実施した。その結果を表-3に示す。

密度については、モールドの下部と上部とでやや異なるものの、いずれも3.0 g/cm³以上であり遮蔽型重泥水よりも15%以上高い値であることが確認された。次にコーン指数 q_c については、いずれの貫入深さにおいても1200 kN/m²以上であり、一般にダンプトラックのトラフィカビリティが確保できるとされている強度が認められた。次にコーンペネトロメーター試験のコーンロッドを使用して、沈降層に対する貫入挙動を確認した。その結果、上述のコーンペネトロメーター試験のように静的にコーンロッドを挿入した場合には、沈降層はコーンロッドとともに下方向へ引っ張られ掘進に対する抵抗を示したが、上下のロッド振動を与えるとコーンロッドの自沈掘進現象が確認され、沈降層は即時的に平滑な状態に復元することが確認された。この現象は、ロッド振動によって飽和状態の沈降層がダイレイタンシーの影響で

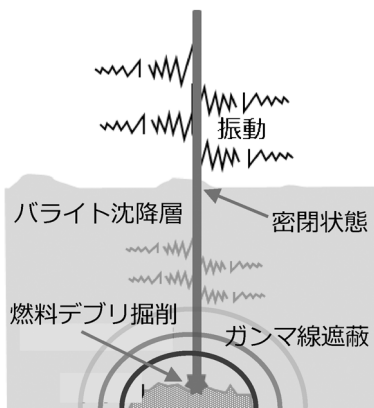


図-5 燃料デブリ掘削概念図

間隙水圧が上昇し、液状化現象を生じたためと考えられる。これらの結果をもとに考えた燃料デブリ取出し概念を図-5に示す。

このようにPCV内にバライト沈降層を形成させた場合、ガンマ線遮蔽材として有効であるとともに、建屋に大きな力を与えることのない密閉掘進が可能な人工地盤としても活用できると考えられる。なお、燃料デブリ取出し完了後、バライト沈降層自体を回収する場合、沈降層にCMC水溶液を高圧噴射して流動性を回復させた上で回収する方法を検討している。これは、既存のウォータージェット技術や土質改良体の深層攪拌混合工法などを適用すれば十分に可能であると考えている。

6. 超重泥水の適用概念

上述の特性評価の結果をもとにして考えた燃料デブリ取出し工程における超重泥水の適用概念を図-6に示す。

PCV外側の地上階はガンマ線遮蔽性が高く長期的に安定した性状を維持することが可能な遮蔽型重泥水を充填する。こうすることで原子炉建屋から放出されるガンマ線を低減することができ、原子炉建屋周辺で作業する作業員の外部被ばくリスクを大幅に低減できると考えられる。地下階に位置するトラス室は汚染水の漏洩経路であるため閉塞止水型重泥水を充填する。こうすれば建屋と接する地盤に対して遮水性を有する脱水層を形成するため、外部への汚染水漏洩量を大きく抑制できると考えられる。PCV内には上述のように沈降型重泥水を充填しバライトの沈降層を形成させる。こうすることで燃料デブリ切削時にPCV底部から放出されるガンマ線量を低減しかつ放射性微粒子の飛散を防止することができるため、作業員の外部被ばくと内部被ばくの両方のリス

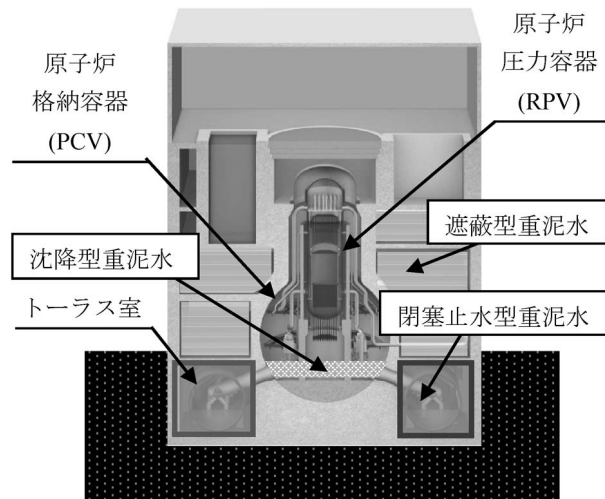


図-6 燃料デブリ取出し工程における適用概念図

クレベルを低減できると考えられる。このように、3種類の重泥水をその特性に応じて原子炉建屋内の最適な位置に充填すれば、燃料デブリ取出し工程における作業環境を整えるのに大きく貢献できると考えられる。

7. おわりに

最初に述べた通り、福島第一原子力発電所における燃料デブリ取出しは技術的に最難関の工程であり、本工程において道筋が立てば、同発電所の廃炉に向けて大きく前進する。その一助として寄与できれば技術者としてこの上ない喜びである。このような筆者らを受け入れ日頃からご指導下さっている早稲田大学小峯秀雄先生に対してここに謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 国際廃炉研究開発機構 (IRID) 資料, 入手先 <<http://irid.or.jp/cw/public/104.pdf>> (参照 2019.7.1)
- 2) 氏家伸介・長江泰史・成島誠一ら: 変形追従型放射線遮蔽材の開発, 第11回環境地盤工学シンポジウム発表論文集, pp. 471~478, 2015.
- 3) Ujiie, S., Komine, H., Goto, S., Yoshikawa, E., Narushima, S. and Nagae, Y.: Water-proof Property of Super Heavy Bentonite Slurry for Decommissioning of Fukushima Daiichi NPS, WM2019, 089a-a4, Phoenix, 2019.
- 4) 氏家伸介・小峯秀雄・吉川絵麻・成島誠一・長江泰史: 超重泥水を構成する固形材料の配合組成と亀裂閉塞性・遮水性との関係, 第53回地盤工学研究発表会, pp. 389~390, 2018.

(原稿受理 2019.7.5)