

超重泥水の材料科学的検討 と廃炉技術としての活用

一般社団法人 NB研究所
(株テルナイト)

説明項目

- 1.泥水について
- 2.超重泥水の機能と調整方法について
- 3.超重泥水の廃炉技術への活用

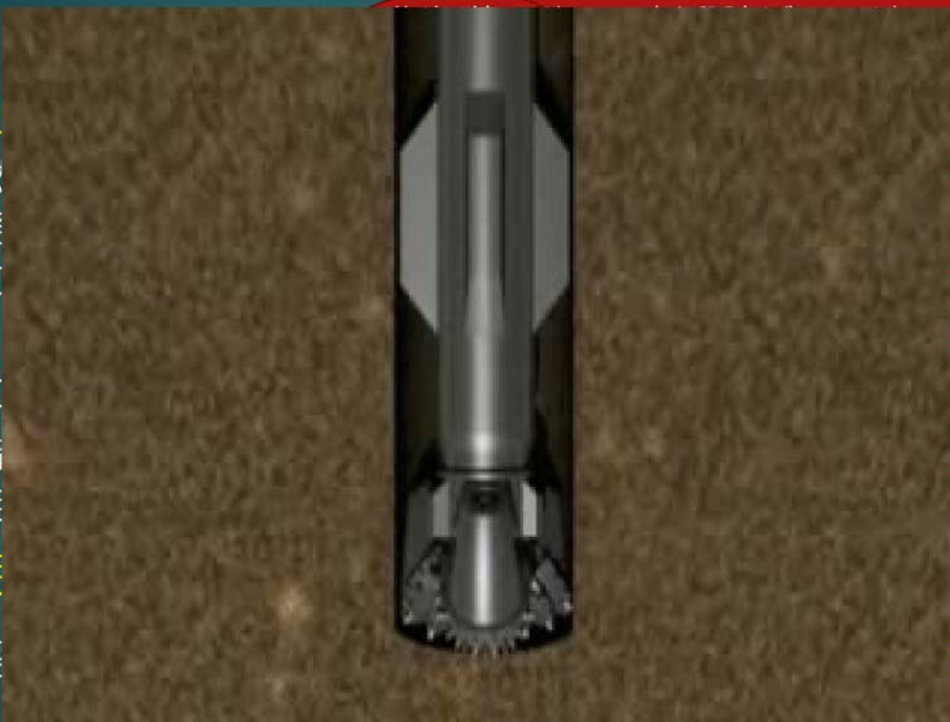
はじめに

泥水とは…

- 石油天然ガスや油へ各種の泥状の
- 特徴は、
- 圧下での
- 土木基礎などに使用

泥水に使用

- 泥水調剤の種類は300種類を超える



3

スラ

高温・高

壁工事な

300種類を

超重泥水の使用環境及び要求仕様の調査

福島第一原子力発電所廃炉作業で「泥水技術」を活用できないか？検討

使用環境は？

- 長期間、高線量の放射線照射を受ける環境
- 冷却水、地下水に曝される
- 高温度のデブリと接触する可能性大

要求される仕様は？


- 安全な施工性（充填性等）
- 放射線遮蔽機能を有する
- 耐放射線特性を有し、土
- 止水性・遮水性機能を有する
- デブリ回収作業時の飛散防止機能
- 最終処分が容易である

適用できる材料は無機系材料に限定

4



超重泥水の基本配合組成

<p>泥水密度：2.5 (g/cm³) シリンダーフロー値：350 (mm)</p>		
 <p>NBウェイト (加重剤)</p>	 <p>NBフロー (分散剤)</p>	 <p>NBクレイ (無機増粘剤)</p>
<p>加重剤</p>	<p>NBウェイト (硫酸バリウム)</p>	<p>密度調整、放射線遮蔽</p>
<p>無機増粘剤</p>	<p>NBクレイ (高膨潤性粘土)</p>	<p>遮水性、粘度調整</p>
<p>分散剤</p>	<p>NBフロー (シリカ)</p>	<p>粘度 (流動性調整)</p>



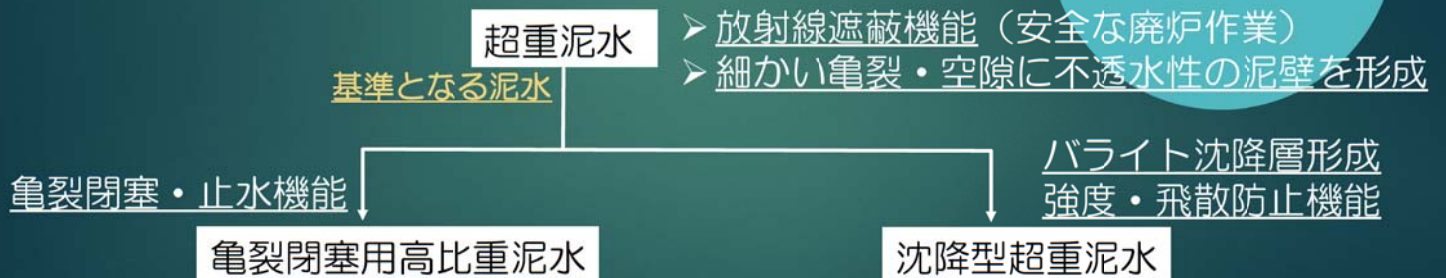
超重泥水

泥水機能の調整

超重泥水は一般性状を調整して直接使用、或いは要求仕様を満たす為の機能を有する泥水に調整して使用する

一般性状の調整

- 粘度調整 (泥水の打設・充填)
- 密度調整 (放射線遮蔽、冷却水との混合防止)



超重泥水機能の調整

粘度の調整

超重泥水の配合組成（NBクレイ及びNBフローの配合）を変えることで流動性質の調整が可能

NBクレイ：7.0～10.0（g/100g水）

NBフロー：0.1～0.5（g/100g水）に調整する事によりフロー値：250±50（mm）

の範囲に調整可能



高流動性

フロー試験

低流動性

2023/2/15

密度の調整

超重泥水の密度は、内容量が一定な鋼製容器にスラリーを擦り切れ一杯充填し、重量を測定する。得られたスラリー重量より密度を求める。また、密度調整は、（式-1）及び（式-2）を用いて計算し、必要な水量及び加重材の量を算出して作泥（製造）に使用

$$S = D_0 * V_1 * (D_2 - D_1) / (D_0 - D_2) \dots \dots \dots \text{（式-1）}$$

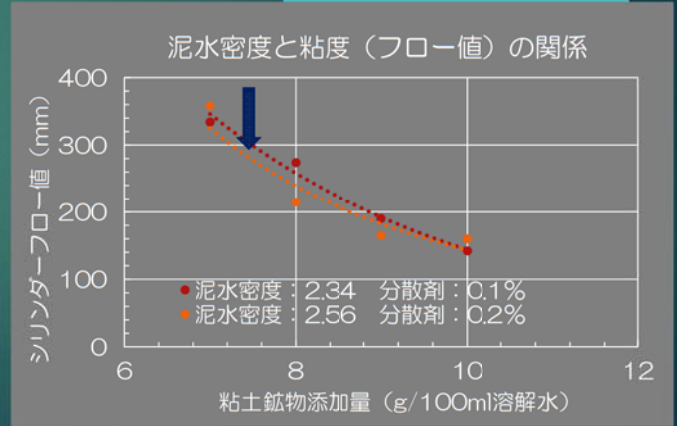
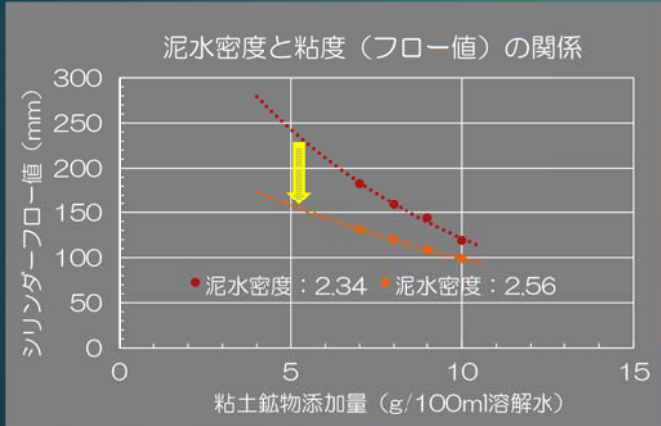
$$W = (D_1 - D_2) * V_1 / (D_2 - D_w) \dots \dots \dots \text{（式-2）}$$

- | | | | |
|---------|------------------------|----------------|-------------------------|
| V_1 ： | 初期の泥水容量（ m^3 ） | D_1 ： | 初期泥水密度（ g/cm^3 ） |
| D_2 ： | 目的の泥水密度（ g/cm^3 ） | D_w ： | 加える水又は泥水の密度（ g/cm^3 ） |
| D_0 ： | NBウェイトの真密度（ g/cm^3 ） | （通常4.2g/ccを使用） | |
| S ： | NBウェイトの必要量（t） | W ： | 加水(泥)量（ m^3 ） |

泥水配合と密度及び粘度の関係

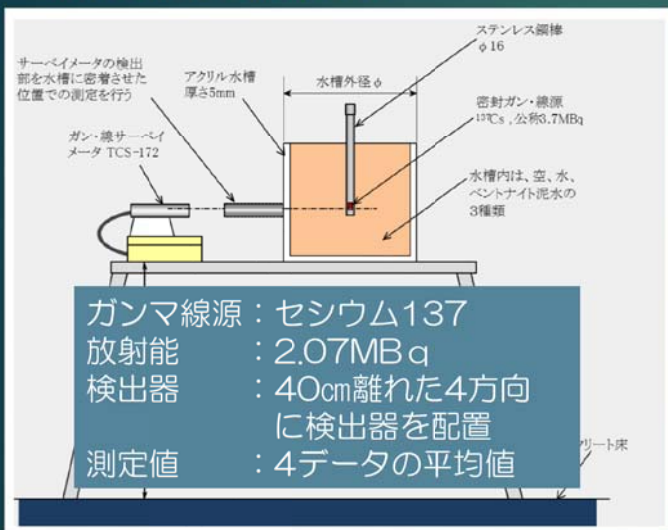
添加剤名	配合組成	添加量 (g)	
		密度 : 2.34	密度 : 2.56
水道水		100	100
NBウェイト (バライト等)		300	400
NBクレイ (粘土鉱物等)		7.0~10.0	
NBフロー (分散剤)		0.0	0.0

添加剤名	配合組成	添加量 (g)	
		密度 : 2.34	密度 : 2.56
水道水		100	100
NBウェイト (バライト等)		300	400
NBクレイ (粘土鉱物等)		7.0~10.0	
NBフロー (分散剤)		0.1	0.2



放射線遮蔽機能

ガンマ線測定結果



遮蔽体	遮蔽態の厚さ(cm)	BG補正後の実効値 (μ /Sv/h)	遮蔽体が無い状態を1とした場合の透過率
空気	-	1.11	-
水	4.5	1.03	0.92
	9.5	0.88	0.79
	14.5	0.74	0.66
	24.5	0.50	0.45
密度 : 2.60 (g/cm ³) 超重泥水	4.5	0.70	0.63
	9.5	0.35	0.32
	14.5	0.17	0.15
	24.5	0.03	0.03

放射線遮蔽試験の概念図

放射線遮蔽機能 \rightarrow 泥水密度を2.60 (g/cm³) に設定し、層厚を2.5cmに設定する事により γ 線透過量を水の約1/15に低減可能

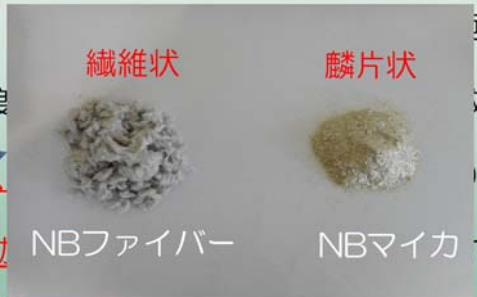
遮水・止水機能の調整 (PCV下部からの漏水防止技術として検討中)

遮水・止水機能の調整は、ベース泥水として超重泥水を用い、逸水(水)防止用泥水の技術を応用して新しい泥水配合を開発する

材 料 名	粒度分布範囲 (μ)	平均粒子径 (μ)
NBクレイ I 型	0.2~32	2.6
NBウェイト	0.7~96	18.3
NBプラグ6号	50~275	100
NBプラグ4号	125~925	400
NBプラグ2号	425~2180	2 (mm)
NBプラグ1号	425~5175	3~4 (mm)
NBファイバー	繊維太さ：4 μ 長さ：数ミリ	
NBマイカ	123~4788	900

超重泥水
を求め
を選定

隙：
広い粒度
5、2.0、



- iii. 超重泥水の基本配合に閉塞材の種類、組合せ、添加量を調整し、逸水層に対して逸水試験を実施する。
- iv. 試験圧力、温度の水準を変えて同様の試験を実施する。

止水試験装置(簡易型)

亀裂幅：0.2~2.8(mm)
通水量：250 (ml/分) ~2000 (ml/分)
@大気圧下

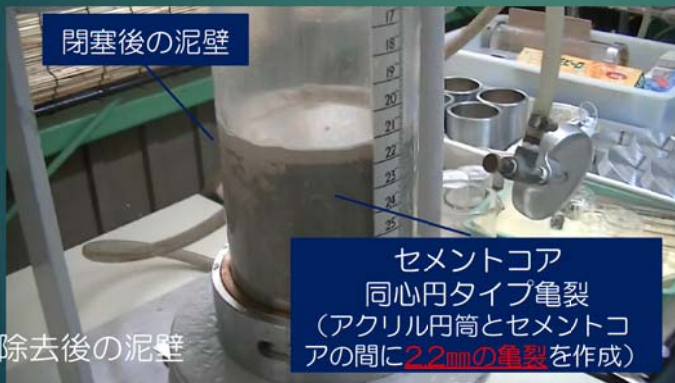


小型閉塞試験装置



閉塞用高比重泥水

加圧測定中



閉塞後の泥壁

セメントコア
同心円タイプ亀裂
(アクリル円筒とセメントコアの間に2.2mmの亀裂を作成)

超重泥水除去後の泥壁

遮水・止水機能の調整

超重泥水の基本配合組成の**バライト量を400 → 130 (g/100ml)**
ベントナイト量を7.0~11.0 (g/100ml)の範囲に調整した泥水に各種閉塞材を併用して止水試験を実施する。

次のステップ

No7の配合組成を用いて大型試験装置にて詳細な試験を実施

- 亀裂閉塞用高比重泥水充填前の漏水速度を1とした場合、**充填後は 10^{-5} ~ 10^{-6} まで、漏水量を低下**させることができる。
- 各種閉塞材を併用する事により**0.55MPa圧力下で幅2.5mm亀裂閉塞可能**

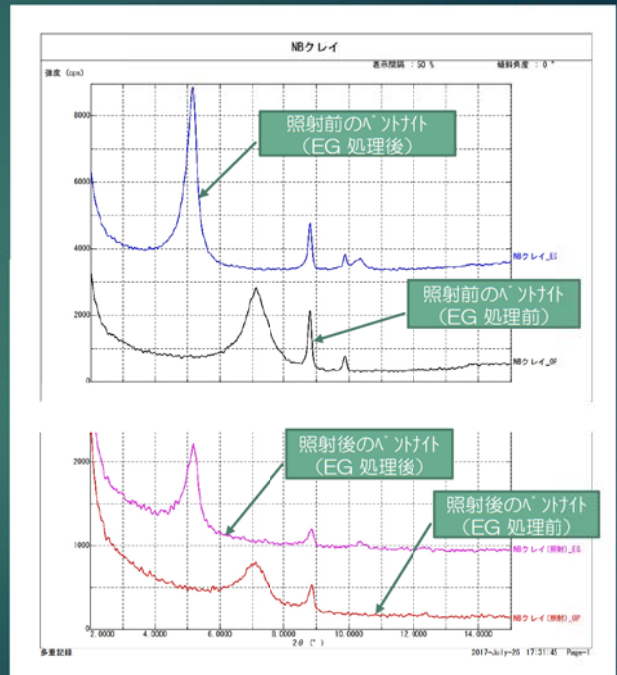
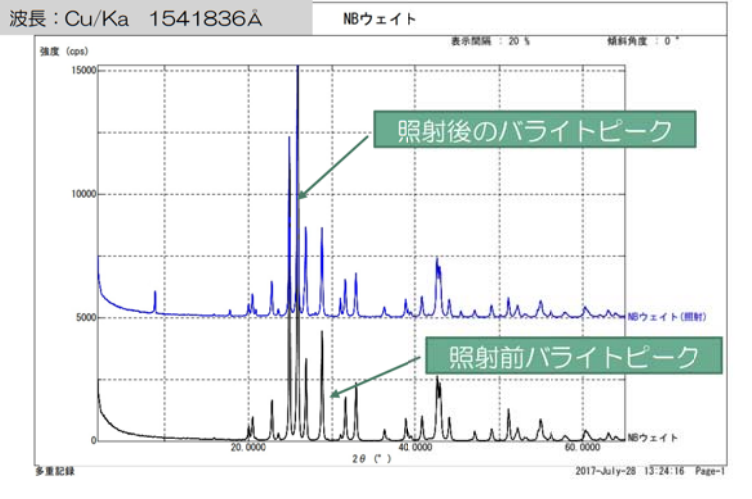
閉塞
繊維
粒状
粒状
粒状
板状

0.17	4.0	3.4							
0.22	4.9	3.5							
2.04	X	X	114	8.0	5.1				
2.79	X	X	X	X	X	52.1	6.7	25.4	15.0

亀裂閉塞用高比重泥水の耐放射線性

超高比重泥水に閉塞材を併用した亀裂閉塞用高比重泥水に70Sv/hで40年間相当のγ線量：10 (kSv/h) 照射時間：2550時間 (106日) の放射線を照射し、照射前後の試料のX線回折及び機能評価を試みた。

X線出力：40kV 40mA
 波長：Cu/Ka 1541836Å



バライト沈降機能の調整（飛散防止機能と作業基盤確保）

目的：デブリ回収時の α 核種等の飛散、水素ガス発生の抑制及びRPV脚部の補強、遮蔽層上部での作業基盤確保

方法：ジオポリマーでデブリを覆い固化する手法が検討されている
 （回収時の飛散防止措置が不完全）

超重泥水を用いる方法：

- 超重泥水の**バライト粒子を一定時間で沈降させる様に調整**し、強度を有する**バライト沈降層をデブリ上に形成**させる。
- 調整方法には有機系と無機系の2種類の材料を用いる事ができる。

「(例) 無機系材料を用いた調整方法」

① 低濃度ベンゾトレン分散剤溶液を任意の比率で泥水と混合して粘度の低下を図る。分散剤溶液 添加前

② 分散剤水溶液を任意の比率で泥水と混合して粘度の低下を図る。分散剤溶液 添加10分後

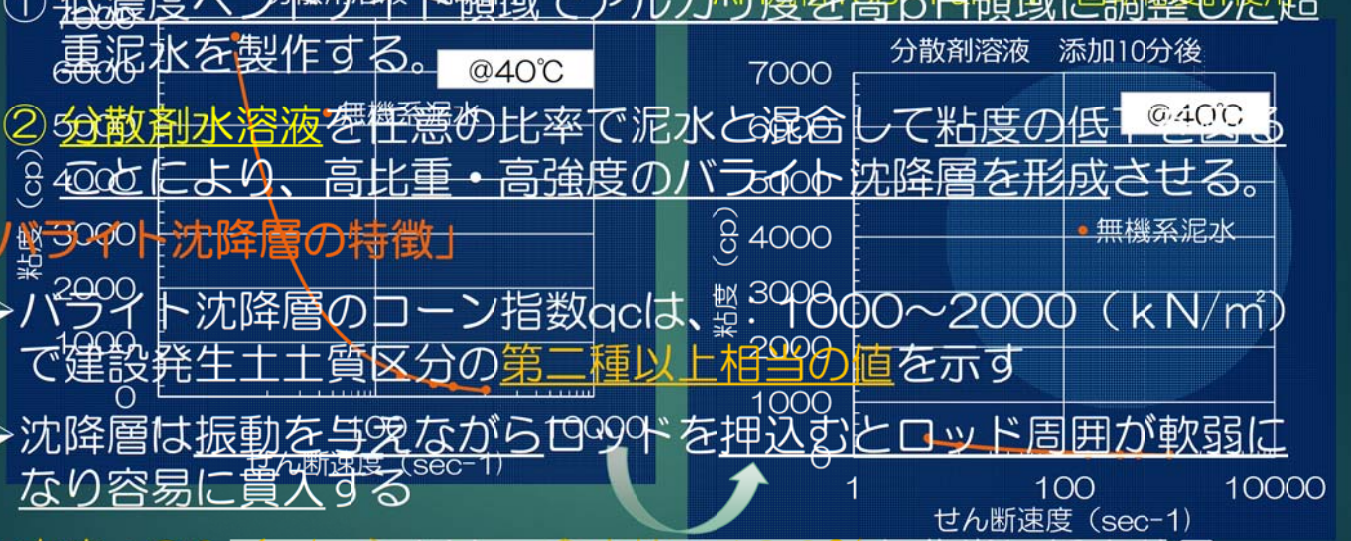
③ 400とにより、高比重・高強度のバライト沈降層を形成させる。

「バライト沈降層の特徴」

- バライト沈降層のコーン指数 q_{cl} は、1000~2000 (kN/m²)で建設発生土土質区分の**第二種以上相当の値**を示す
- 沈降層は振動を与えながら1000を押し込むとロッド周囲が軟弱になり容易に貫入する

➤ 密度：3.0 粘度破壊剤を添加すると 含水比：13.0%と非常に低水分量

1. 泥水粘度、特に低せん断速度領域の粘度低下が顕著になる。
2. 泥水のシアースリング特性が失われる。



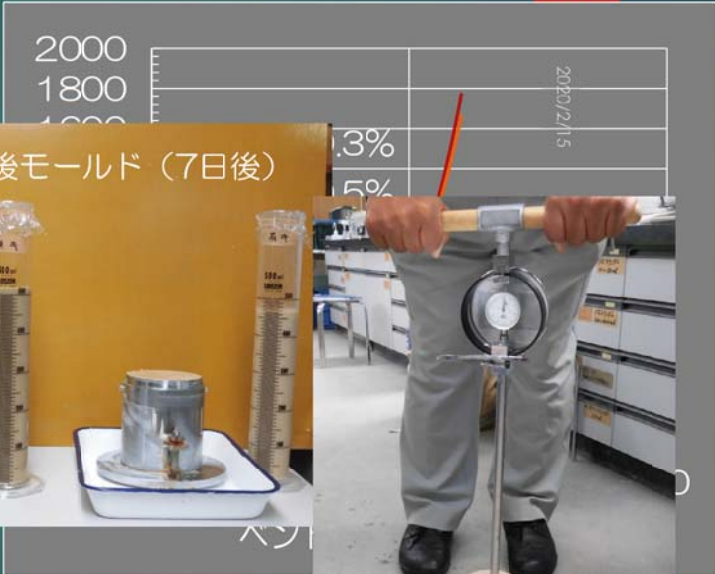
バライト沈降機能の調整（飛散防止機能と作業基盤確保）



沈降試験前モールド

※ 泥水のアルカリ度をpH:11.0程度に(1.0%)を用いて調整

質量(g)
2000
1800
1600
1400



沈降試験後モールド (7日後)



コーン貫入試験中

測定項目		
フロー値 (cm)	分散剤溶液添加前	
流体密度 (g/ml)	分散剤溶液添加前	2.56
沈降層のコーン貫入値 q_c (kN/m ²)		1578.3
沈降層の平均密度 (g/cc)		3.07
分離水の密度 (g/cc)		1.04

分散剤の使用量とバラ

関係

各超重泥水の代表的な配合組成

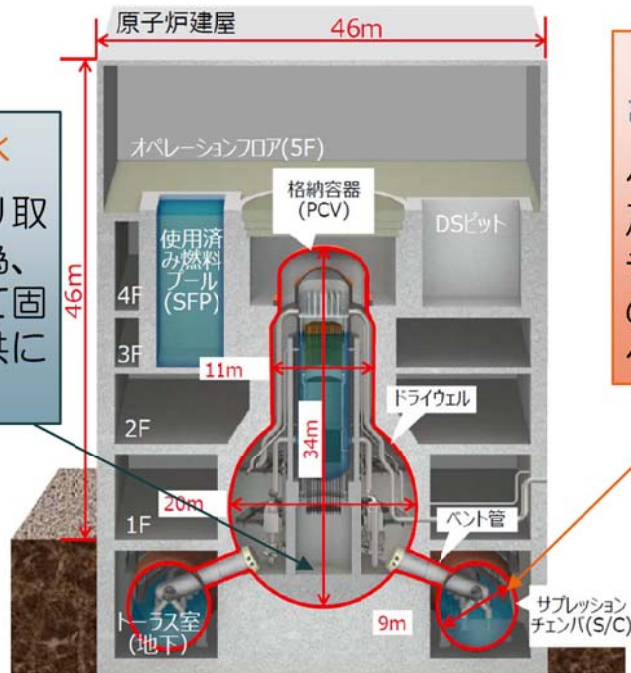
材料名	製品名	超重泥水	亀裂閉塞用高比重泥水	沈降型超重泥水 (無機系)
溶媒	水道水	100	100	100
無機増粘剤	NBクレイ	7	10	4
分散剤	NBフロー	0.3	0.3	0.05
無機閉塞材	NBファイバー	—	12	—
	NBプラグ1号	—	12	—
	NBプラグ2号	—	12	—
	NBプラグ4号	—	12	—
	NBプラグ6号	—	12	—
	NBマイカ	—	12	—
加重材	NBウェイト	400	130	400
粘度低下剤	NBブレーカー	—	—	0.45

項

沈降型超重泥水

PCV内のデブリ取出し環境構築の為、飛散防止剤として固化材等の材料と共に適用

活



超重泥水
亀裂閉塞用高比重泥水
ベント管、トラス室
及びサブプレッション
チェンバ（S/C）内
の漏水・止水防止技術
への適用

のデブリ
飛散防止
に固化材等
と共に活用

ご清聴ありがとうございました。

亀裂閉塞用超重泥水の耐放射線性

超高比重泥水に閉塞材を併用した亀裂閉塞用高比重泥水に70Sv/hで40年間相当のγ線量：10（kSv/h）照射時間：2550時間（106日）の放射線を照射し、泥水機能劣化について評価した。

放射線照射後の止水機能

		平均漏水量 (ml/分)					
亀裂幅(mm)		0.14			2.95		
試料名	昇圧範囲 (MPa)	無照射	照射		無照射	照射	
			No.1	No.2		No.1	No.2
測定時間							
30分	0.05~0.55	0.30	0.34	0.28	2.22	2.65	2.74

沈降型超重泥水



モールド内で7日間沈降後のパライト沈降層（乾燥前の試料）

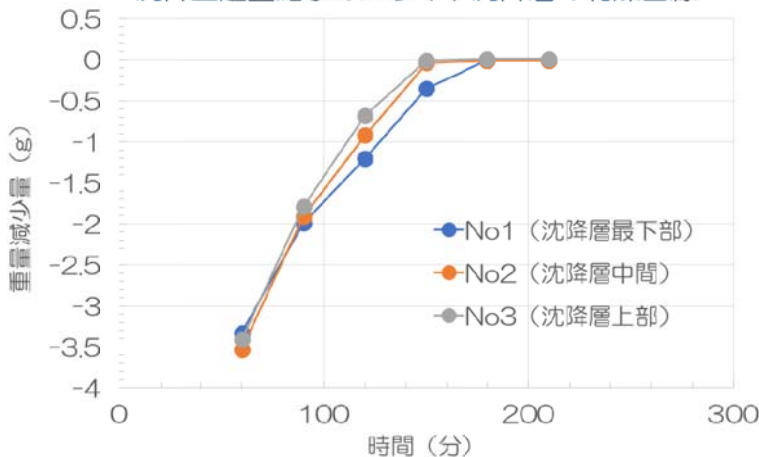
沈降型超重泥水



110°C、3時間乾燥後のパライト沈降層

結晶水を含む固化物及び保水性の高い材料は110°Cの温度では容易に乾燥しないが、吸水性の低い材料を使用している（沈降型）超重泥水は、容易に乾燥・減容化が可能

沈降型超重泥水のパライト沈降層の乾燥曲線

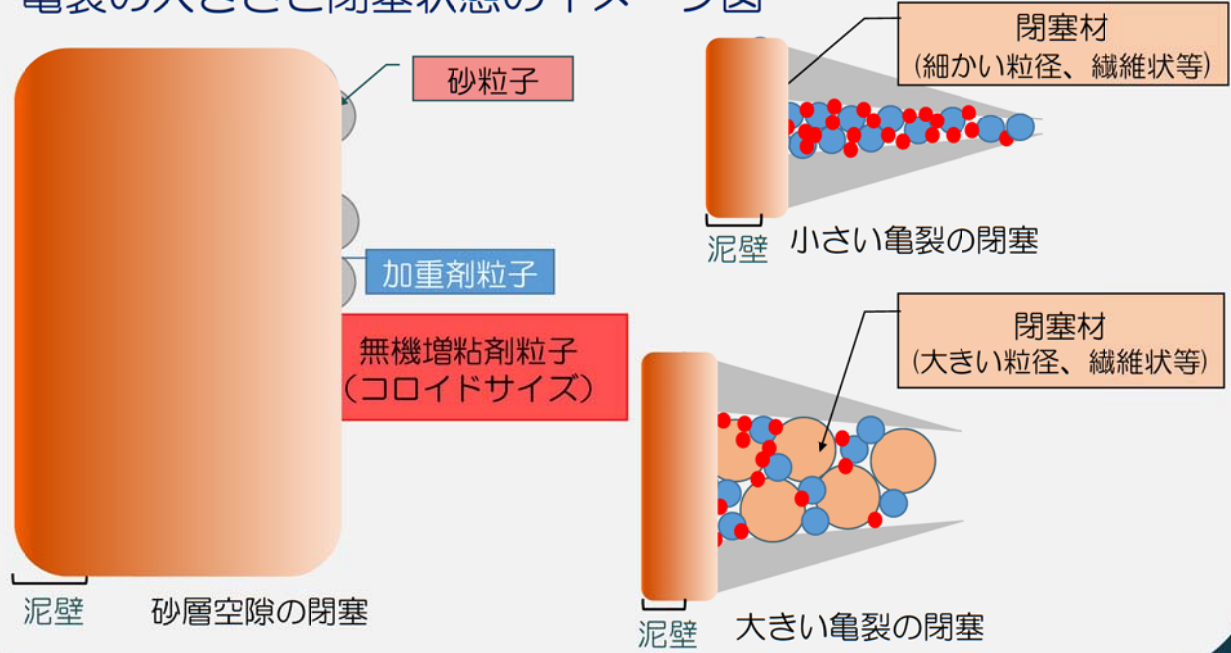


超重泥水を構成する材料

製品名	NBウェイト	NBクレイ	NBフロー
化合物名	硫酸バリウム	モンモリロナイト粘土鉱物	ピロリン酸ナトリウム塩
化学式	BaSO ₄	AlとOH基の八面体シートがSiとOの四面体シートに挟まれたサンドウィッチ構造	Na ₄ P ₂ O ₇
化学的特徴	<ul style="list-style-type: none"> 溶解度：0.285mg/100g水 分解開始温度：1200℃以上 空気、熱に安定な物質（濃硫酸：12%程度溶解） 	<ul style="list-style-type: none"> 水和膨潤・増粘性：層間陽イオンが水和して膨潤、結晶が単位層まで分離して液相の粘度を増加 泥壁（膜）形成性：透水層表面に不透水性の泥壁（膜）を形成し、遮水機能を発揮 	<ul style="list-style-type: none"> 白色結晶又は粉末 溶解度：5.9g/100g水 分解温度：94℃ 密度：1.80 g/cm³
用途	防振材、プレーキパッド、掘削流体の加重剤	廃棄物、鋳物、農業及び掘削流体の増粘剤、泥壁形成剤	分散剤、解こう剤、金属封鎖剤
規格	API規格（アメリカ石油協会(American Petroleum Institute)に準拠した製品		JIS規格

参考文献：化学大辞典 粘土ハンドブック

亀裂の大きさと閉塞状態のイメージ図



デブリ回収イメージ図

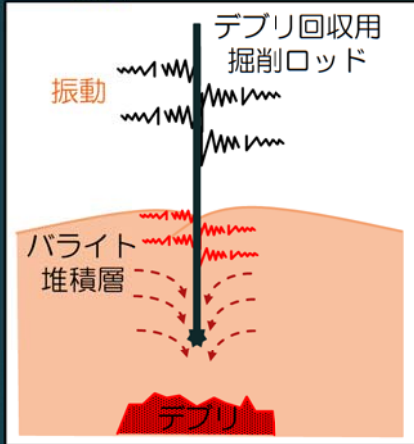
飛散防止機能

ゲル化及び振動による液状化によりデブリを被覆した状態で掘削・回収が可能（検討中）

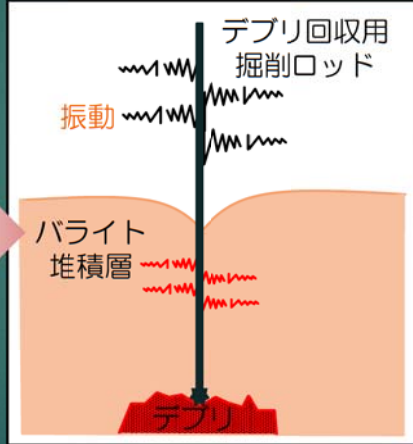
掘削ロッド挿入直後

デブリ掘削中

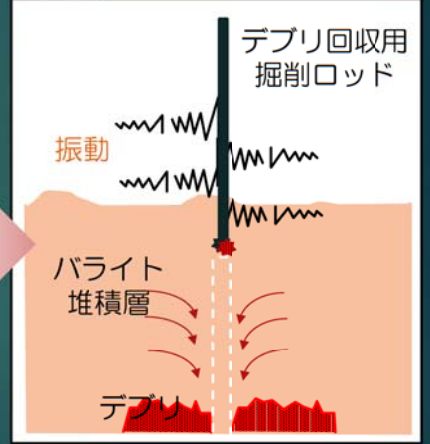
デブリ回収掘削ロッド引き上げ直後



掘削用のロッドを振動させながら挿入、ロッド挿入直後はバライト堆積物は下方へ引っ張られるが振動により、元の状態に復元



デブリの固化処理は破壊により、 α 核種等の微粒子の飛散がロッド周囲より発生するが、バライト堆積物により密閉状態になる為、飛散を防止



デブリ固化処理と異なり回収後、再び、振動させてロッドを引き抜く為、掘削孔は残らない。放射線の再放出、 α 核種の飛散を防止