

第53回地盤工学研究発表会 2018.7.25

【特別セッション】廃炉地盤工学の活用と原子力発電所廃止措置への地盤工学的技術の貢献方法の検討

福島第一原子力発電所の廃止措置への貢献を目指す『廃炉地盤工学』～地盤施工学の創設～

# デブリ取出しにおける超重泥水の活用方法

— 超重泥水を用いた止水・遮へい技術 —

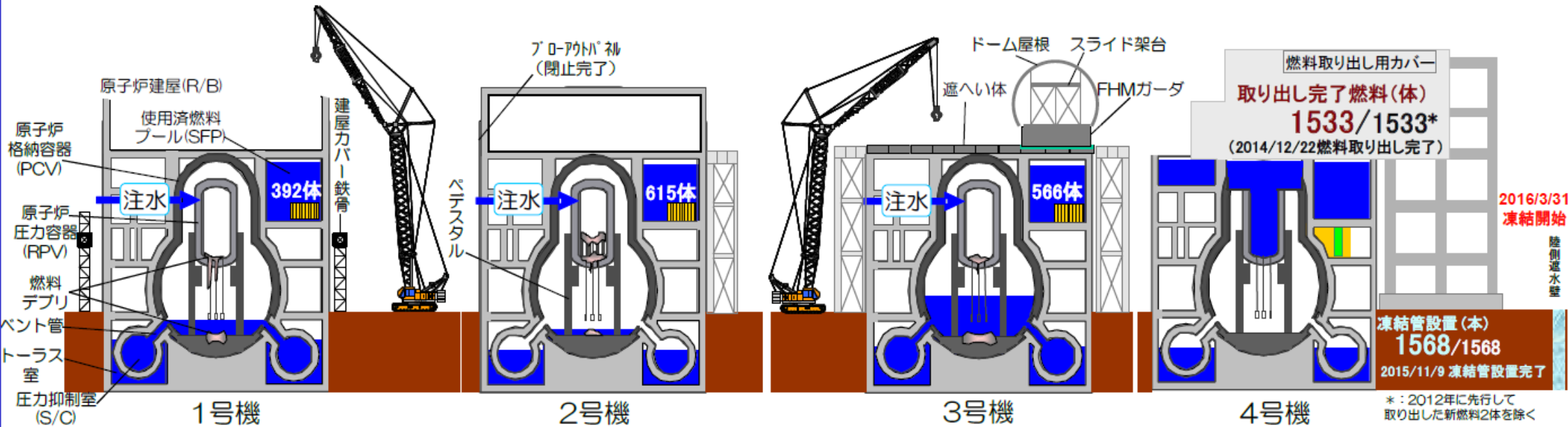


一般社団法人  
NB研究所

<http://nb-institute.com/>



# 1F格納容器の現状



出典: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止措置等に向けた中長期ロードマップ進捗状況(概要版)

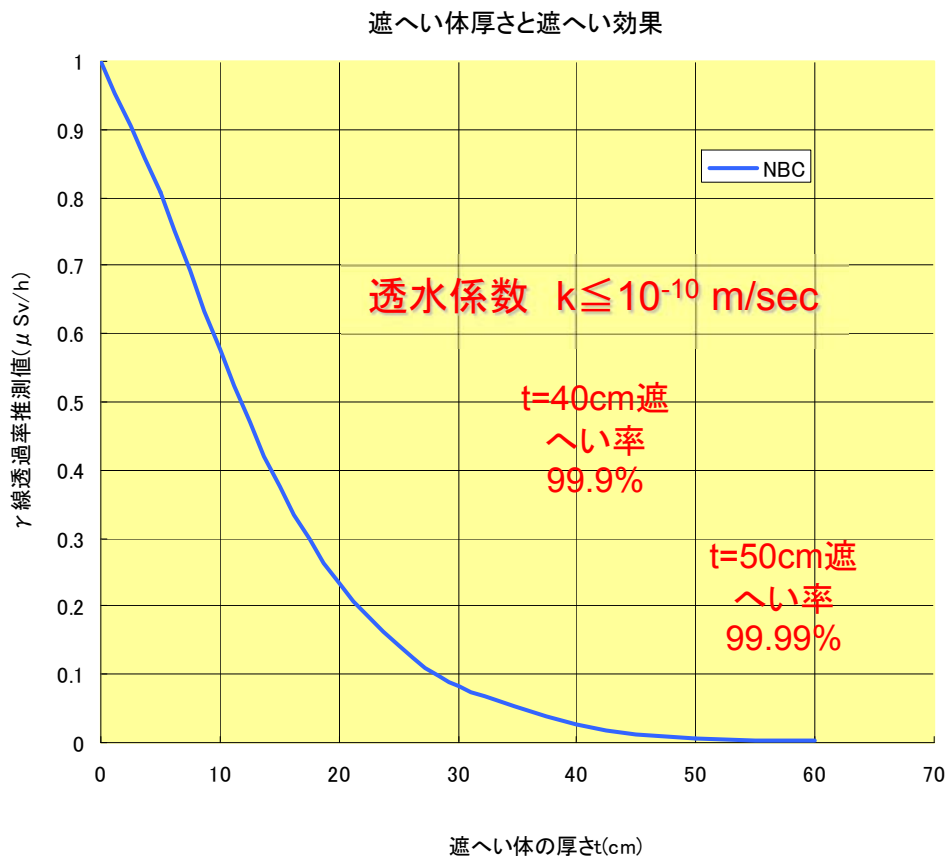
1号機 底部水位1.9m 9.7Sv/h 28°C  
 2号機 底部水位30cm 70Sv/h 34°C  
 3号機 底部水位6.3m 1Sv/h 31°C  
 D/W 1Fステージより充填  
 PCV底部、ベント管充填

# 1F汚染水対策提案 遮へい遮水変形追従材

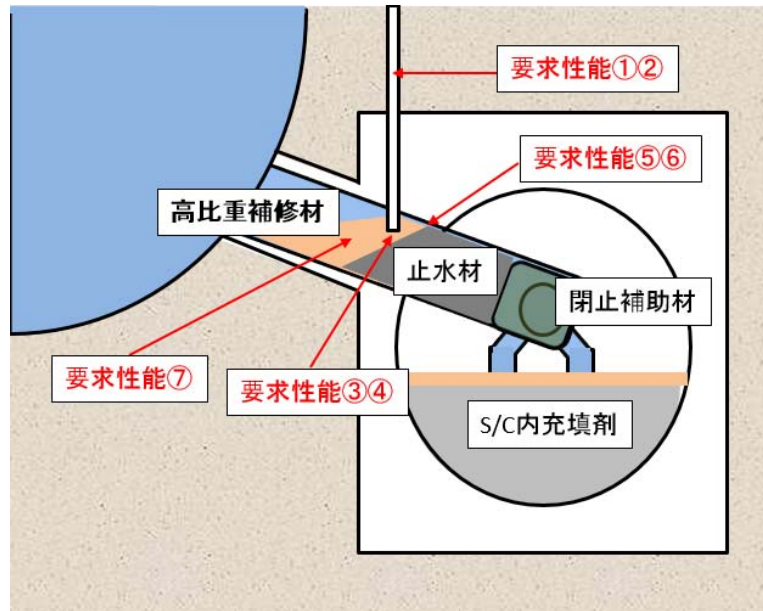
放射能汚染物の遮水および遮へいする流動性が良く充填性に優れた変形追従材

## 配合組成

水 : 100.0重量部  
NBクレイ : 6.0～20.0重量部  
NBウェイト : 400.0重量部以下  
(比重:2.60以下)で任意に調整  
ブリージング率 : 1%以下



# 補修材の要求性能



## 耐ホウ素性

8,000ppmのホウ酸水との接触した際に、各種性能を維持すること

## 閉塞性、遮水性

0.23mmの隙間を閉塞・遮水すること

## 耐放射線性

73Sv/h × 40年分(25,596kSv)照射後に、閉塞性・遮水性を維持すること

## ベント管閉塞概念図

要求性能①: 建屋内部への充填に必要な**流動性** (フロー試験)

要求性能②: 製造から打設まで材料の均一性を維持するための**沈降防止性** (遊離水試験)

要求性能③: 水中打設時に材料が分散しない**水中不分離性** (水中不分離性試験)

要求性能④: ホウ酸水と接触した際に性能維持することができる**耐ホウ素性** (耐ホウ素試験)

要求性能⑤: 想定される水みちの大きさに対する**閉塞性** (簡易閉塞性試験、止水性能確認試験)

要求性能⑥: 補修材圧密層中での汚染水の流動を防ぐ**遮水性** (簡易脱水試験)

要求性能⑦: 高い放射線環境下で性能維持する**耐放射線性** (放射線照射による耐久性能確認試験)

# 止水材の分類と補修材としての適性

属 性		主な配合成分
有機系材料	吸水性樹脂系	吸水性樹脂、エポキシ樹脂、ポリウレタン等の混合物など
	発砲ウレタン系等	親水性ポリウレタンプレポリマーなど
無機系材料	水ガラス・シリカ系	コロイダルシリカ、ナノサイズシリカと硬化剤、ゲル化剤併用、水ガラスシリカゾルとイソシアネートプレポリマー混合物、珪酸ナトリウム+ホウ酸カルシウム+高炉スラグ混合物
	セメント・水ガラス系	セメント・水ガラスと水膨潤性繊維、セメントとエポキシ樹脂、ゲル化剤等併用、早強セメント含有グラウト材、等
	ベントナイト系	ベントナイトシート、ベントナイト砕石、造粒ベントナイト、ベントナイトと高分子化合物、活性剤、アスファルトワックス、フライアッシュ等併用
	複合系	高比重止水材（ベントナイト、硫酸バリウム、リン酸系無機分散剤に雲母、軽量骨材ロックウールを配合した高比重流体）

# 止水材の分類と補修材としての適性

属 性		主な配合成分
有機系材料	吸水性樹脂系	<p>高放射線量下では劣化が激しく補修材として使用するには好ましくない</p>
	発砲ウレタン系等	
無機系材料	水ガラス・シリカ系	コロイダルシリカ、ナノサイズシリカと硬化剤、ゲル化剤併用、水ガラスシリカゾルとイソシアネートプレポリマー混合物、珪酸ナトリウム+ホウ酸カルシウム+高炉スラグ混合物
	セメント・水ガラス系	セメント・水ガラスと水膨潤性繊維、セメントとエポキシ樹脂、ゲル化剤等併用、早強セメント含有グラウト材、等
	ベントナイト系	ベントナイトシート、ベントナイト碎石、造粒ベントナイト、ベントナイトと高分子化合物、活性剤、アスファルトワックス、フライアッシュ等併用
	複合系	高比重止水材（ベントナイト、硫酸バリウム、リン酸系無機分散剤に雲母、軽量骨材ロックウールを配合した高比重流体）



# 止水材の分類と補修材としての適性

属 性		主な配合成分
有機系材料	吸水性樹脂系	吸水性樹脂、エポキシ樹脂、ポリウレタン
	発砲ウレタン系等	高放射線量下では劣化が激しく補修材として使用するには好ましくない
無機系材料	水ガラス・シリカ系	コロイダルシリカ、ナノサイズシリカと硬化剤、ゲル化剤併用、水ガラスシリカゾル
	セメント・水ガラス系	乾燥収縮や水との接触によるシリカ溶脱の問題があり、長期安定性に問題がある
	ベントナイト系	トリエポキシ樹脂、ゲル化剤等併用、早強セメント含有グラウト材、等
	複合系	ベントナイトシート、ベントナイト碎石、造粒ベントナイト、ベントナイトと高分子化合物、活性剤、アスファルトワックス、フライアッシュ等併用
		高比重止水材（ベントナイト、硫酸バリウム、リン酸系無機分散剤に雲母、軽量骨材ロックウールを配合した高比重流体）

# 止水材の分類と補修材としての適性

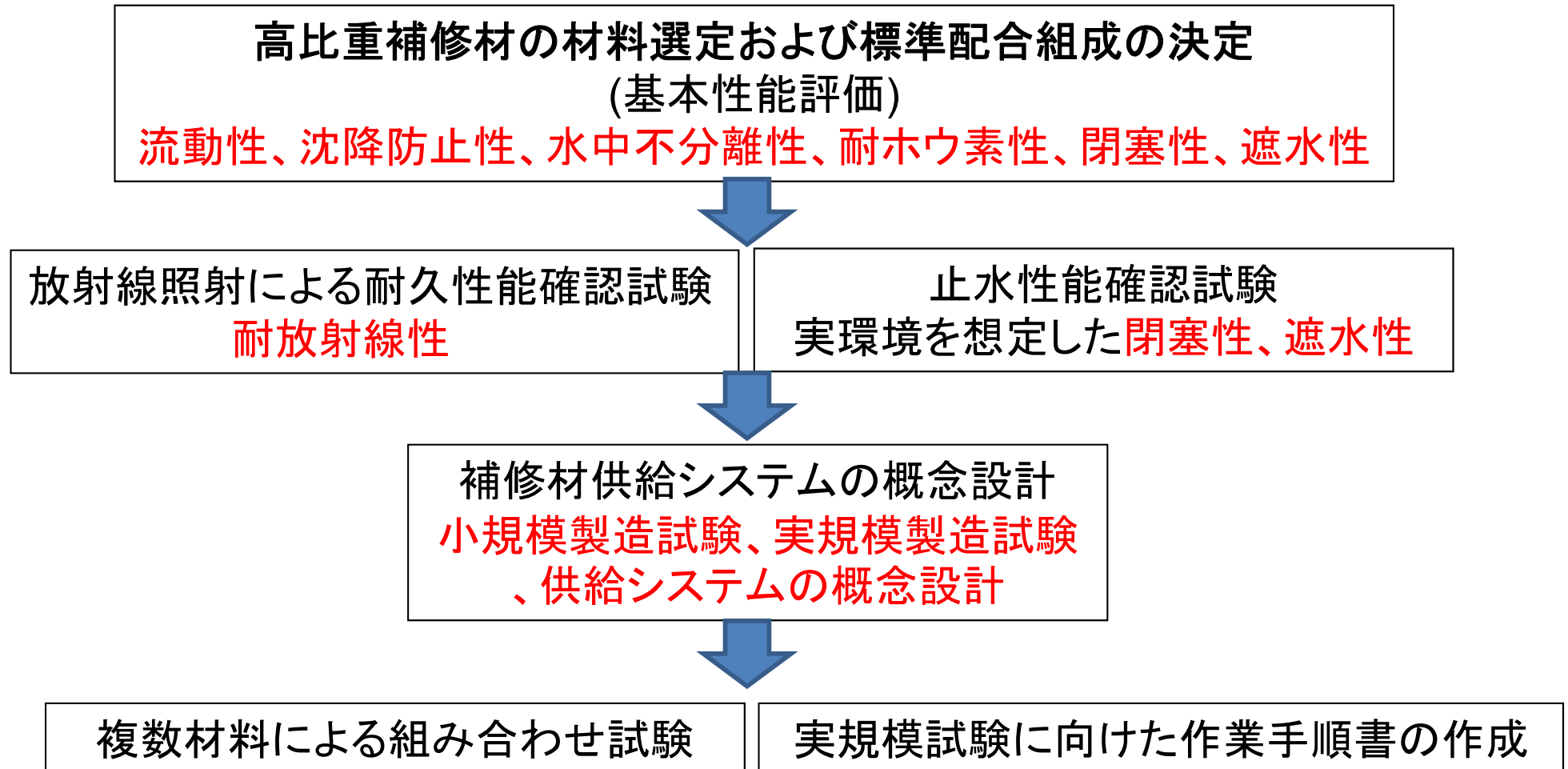
属 性		主な配合成分
有機系材料	吸水性樹脂系	高放射線量下では劣化が激しく補修材として使用するには好ましくない <small>吸水性樹脂、エポキシ樹脂、ポリウレタン</small>
	発砲ウレタン系等	
無機系材料	水ガラス・シリカ系	乾燥収縮や水との接触によるシリカ溶脱の問題があり、長期安定性に問題がある <small>コロイダルシリカ、ナノサイズシリカと硬化剤、ゲル化剤併用、水ガラスシリカゾル</small>
	セメント・水ガラス系	
	ベントナイト系	自己修復性、遮水性能に優れるが、大きな亀裂の修復には、亀裂閉塞材等の併用が必要 <small>膨潤性粘土、セメント、エポキシ樹脂、ケル化剤等併用</small>
複合系	高比重止水材（ベントナイト、硫酸バリウム、リン酸系無機分散剤に雲母、軽量骨材ロックウールを配合した高比重流体）	



# 止水材の分類と補修材としての適性

属性		主な配合成分
有機系材料	吸水性樹脂系	<small>吸水性樹脂、エポキシ樹脂、ポリウレタン等の</small> <b>高放射線量下では劣化が激しく補修材として使用するには好ましくない</b>
	発砲ウレタン系等	
無機系材料	水ガラス・シリカ系	<small>コロイダルシリカ、ナノサイズシリカと硬化剤、ゲル化剤併用、水ガラスシリカゾル</small> <b>乾燥収縮や水との接触によるシリカ溶脱の問題があり、長期安定性に問題がある</b>
	セメント・水ガラス系	
	ベントナイト系	<small>膨潤性粘土、セメント等併用</small> <b>自己修復性、遮水性能に優れるが、大きな亀裂の修復には、亀裂閉塞材等の併用が必要</b>
	複合系	<small>膨潤性粘土、セメント、樹脂等併用</small> <b>亀裂閉塞性、遮水性、変形追従性、耐放射線性、長期安定性に優れ、流動性の調整も容易</b>

# 研究開発フロー



# 補修材の材料および製造



無機増粘材



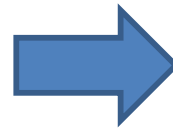
無機閉塞材



加重材



材料添加



攪拌状況

# 基本性能評価試験



## フロー試験

試験方法:  
JHS313-1192  
必要物性:  
フロー値  
300±50mm



## 遊離水試験

試験方法:  
JSCE-F 522-2007  
必要物性:24時間後、ブリージング率1%未満



## 水中不分離性試験

試験方法:トレミー工法を模擬してシリンジ注入  
必要物性:懸濁物質量50(mg/l)以下



## 簡易脱水試験

試験条件:  
補修材層厚:1cm  
ガス圧:0.3MPa  
必要物性:  
透水係数 $1.0 \times 10^{-9}$  (m/s)以下



## 簡易閉塞性試験

条件:隙間最大2.8mm  
ガス圧最大  
0.4MPa  
必要物性:  
閉塞可能であること

## 標準配合組成の性能

材料名	製品名	流体 (Ⅰ)		流体 (Ⅱ)
		①	②	①
溶媒	水道水	100	100	100
無機増粘剤	NBクレイⅠ型	10		—
	NBクレイⅡ型	—	32	75
活性剤	NBリ्यूーブ PPG	—	—	5
分散剤	NBフロー ピロリン酸Na	0.2	0.2	2
無機系閉塞材	NBファイバー	12	12	12
	NBプラグ(1～6号)	48	48	48
	NBマイカ	12	12	12
加重材	NBウェイト	130	130	130



# 放射線照射による耐久性能確認試験

【24時間照射後】



流体(Ⅰ)①  
(高膨潤性ベント)

5～10%程度の体積膨張を確認



流体(Ⅰ)②  
(低膨潤性ベント)

蓋を開けた際に、補修材があふれ出し、内部に気泡を確認。ガス発生が原因と推測。



流体(Ⅱ)①  
(低膨潤性ベント)

補修材膨張による圧力が高く、容器を開けた際に、勢いよく飛散

# 評価試験結果

		流体 (I)				流体 (II)	
		①		②		①	
		基本配合	ホウ素含有	基本配合	ホウ素含有	基本配合	ホウ素含有
遊離水 (%) 24時間後 要求性能 : ブリージング率1% 未満		0	0	0	0	0	0
フロー値 (mm) 1分後 要求性能 : 250mm ±50mm		267	291	279	147	295	169
水中不分離性 試験	懸濁物質量 (mg/l) 目標値 : 50 (mg/l) 以下	47	26	70			
	pH 目標値 : 7.0~8.0	7.8	7.7				
簡易閉塞性試験 目標値 : 0.4MPaで0.23~2.8mmの隙間を閉塞		閉塞確認	閉塞確認	閉塞確認	閉塞確認	閉塞確認	閉塞確認
透水係数 (m/sec) 24時間後 要求性能 : $1.0 \times 10^{-9}$ (m/sec) 以下		$7.2 \times 10^{-11}$	$1.2 \times 10^{-10}$	$2.4 \times 10^{-11}$	$9.1 \times 10^{-11}$	$3.7 \times 10^{-11}$	$2.1 \times 10^{-10}$
流体比重 (g/ml)		1.81	1.83	1.87	1.85	1.70	1.81
放射線照射による性状変化 (10kSv/h 24時間照射)		体積膨張率 5~10%	-	体積膨張率 10% 以上	-	体積膨張率 10% 以上	-

配合組成  
流体 ( I ) ①に決定



# 配合組成の決定

放射線照射試験の結果、体積膨張の主たる原因はガス発生によるものと考えられ、体積膨張の大きい低膨潤性ベントナイトを使用した配合、およびガス発生の一因となっていると推測される有機系材料を使用した配合は選定から除外。



配合組成  
流体( I )(高膨潤性ベントナイト使用)  
に決定



放射線照射による耐久性能確認試験  
(2,550時間照射)

止水性能確認試験  
(最大圧力0.55MPa)

補修材供給システムの概念設計  
小規模製造試験、実規模製造試験、供給  
システムの概念設計

# 放射線照射耐久性試験



放射線照射設備



補修材容器設置状況

## 【照射条件】

ガンマ線源:コバルト60

線量:10kGy/h

照射時間:2550時間

## 【試験内容】

照射中、定期的に性状を確認

照射後、基本性能評価試験を実施

## 【試料】

容器No.1: 補修材のみ充填  
補修材充填量 1476.3g

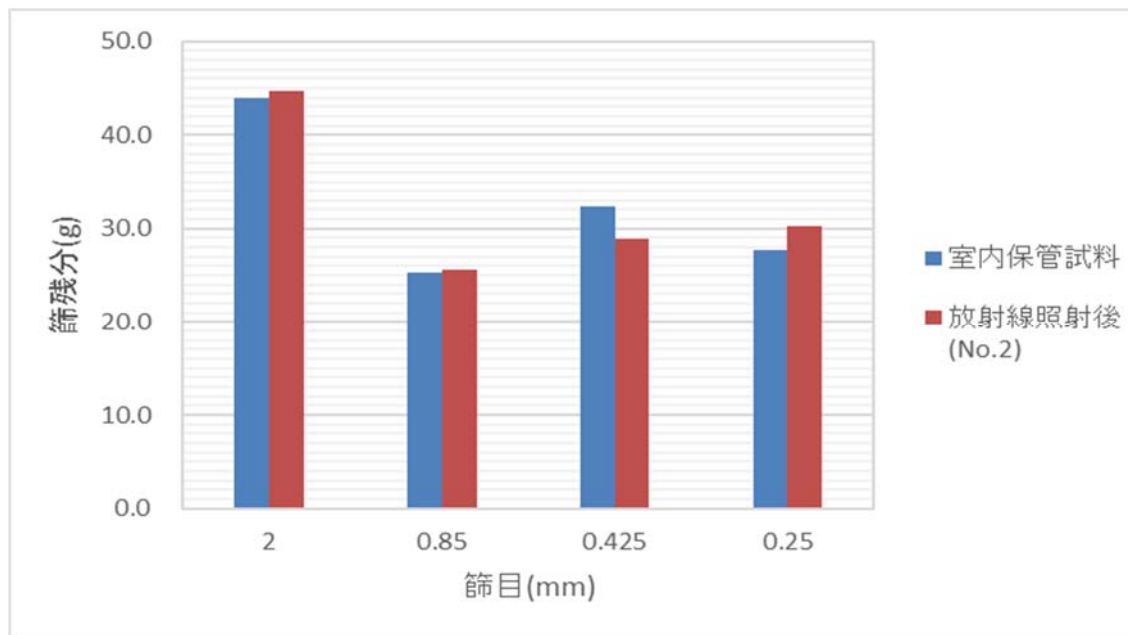
容器No.2: 補修材のみ充填  
補修材充填量1475.6g

容器No.3: 補修材の上に水を充填  
補修材充填量1484.6g

# 放射線照射耐久性試験

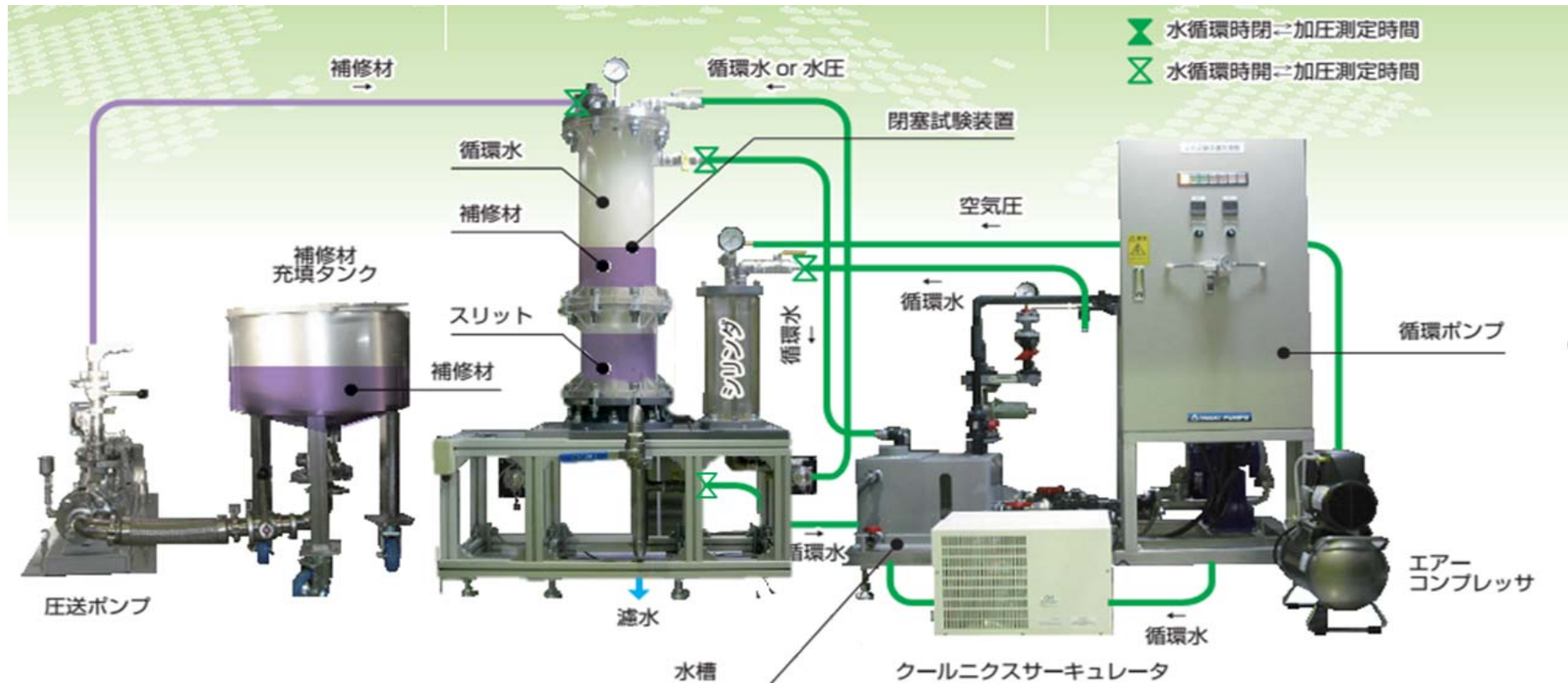
## 放射線照射後の物性試験結果

	室内保管試料	放射線照射後試料		
		No.1	No.2	No.3
性状確認	変化なし	表面乾燥	表面乾燥	変化なし
フロー値 [mm]	182.5	測定不可	測定不可	120
含水率[%]	32.5	21	20.5	30.9
密度[g/cm <sup>3</sup> ] ※充填容器内での体積より算出	1.83	1.45	1.46	1.56
簡易脱水試験[m/s]	5.8E-11	7.4E-11	-	9.9E-11
簡易閉塞性試験	閉塞確認	閉塞確認	-	閉塞確認



放射線照射後の粒度測定結果

# 止水性能確認試験



試験装置全体構成

## 《構造・条件》

装置:1/10スケールのベント管  
スリット幅(隙間):0.25～2.5mm  
水温:35℃  
打設:トレミー工法  
充填量:5～10ℓ 圧力:最大0.55MPa  
補修材:流体(I)(高膨潤性ベントナイト)

- 要求仕様:ベント管からの漏水量が  
1.0(ℓ/min)以下
- 必要性能:圧力負荷後、試験装置からの  
漏水量が100(ml/min)以下

# 止水性能確認試験

## 《条件》

補修材:流体(Ⅰ)(高膨潤性ベントナイト)

充填量:5ℓ

水温:35℃

空隙層タイプ:①スリットタイプ(金属製)

②同心円タイプ(金属製)

③セメント破碎体

スリット幅(隙間):0.25～2.5mm

## 《昇圧条件》

工程1:0.06MPaまで2時間かけて昇圧

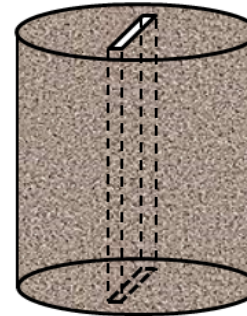
工程2:0.06MPaで30分間保持

工程3:0.55MPaまで0.05MPaごとに昇圧

し、各段階で5分間保持

工程4:0.55MPaで30分間保持

総試験時間は4時間、一定時間ごとに漏水量を測定し遮水性を定量的に評価する。

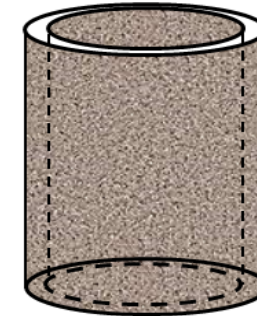


スリットタイプ

空隙幅:  
0.25～2.5mmの間  
で5種類



スリットタイプ写真

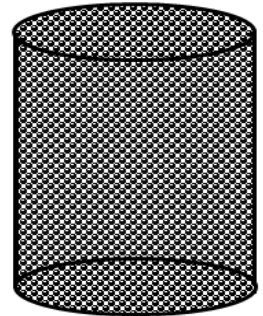


同心円タイプ  
空隙層タイプ

空隙幅:  
0.25～2.5mmの間  
で5種類



同心円タイプ写真



セメント破碎体

粒径:  
1.0, 2.5mm

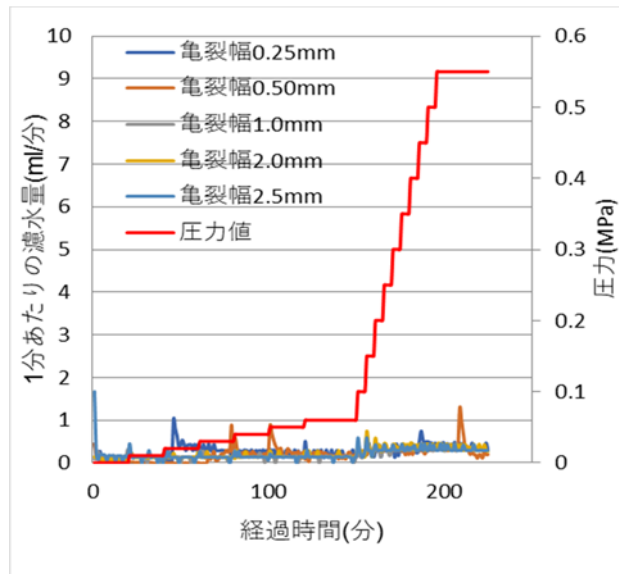


# 止水性能確認試験

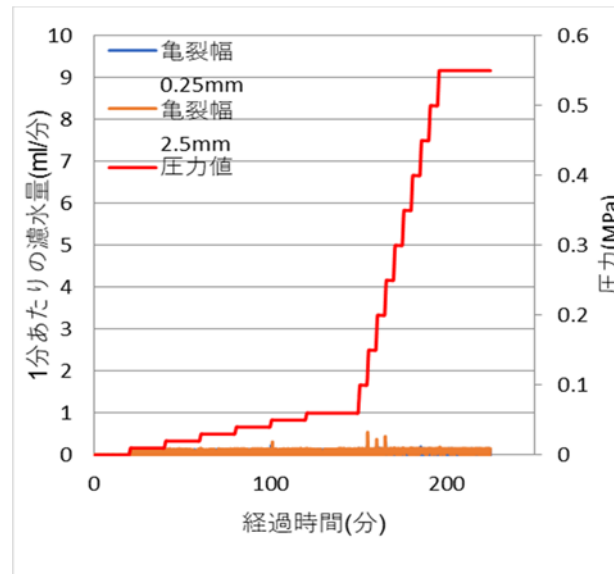
亀裂の形状、大きさ、材質による影響評価

## 同心円タイプ

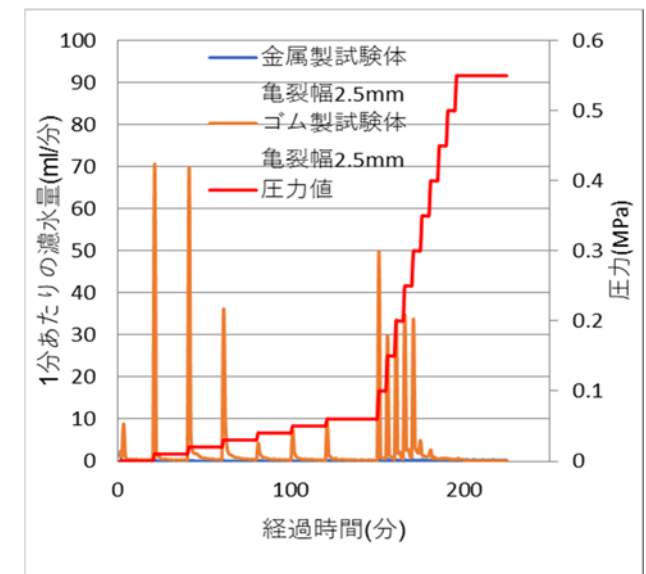
(要求性能: 試験装置からの濾水量が100[ml/分]以下)



金属製試験体



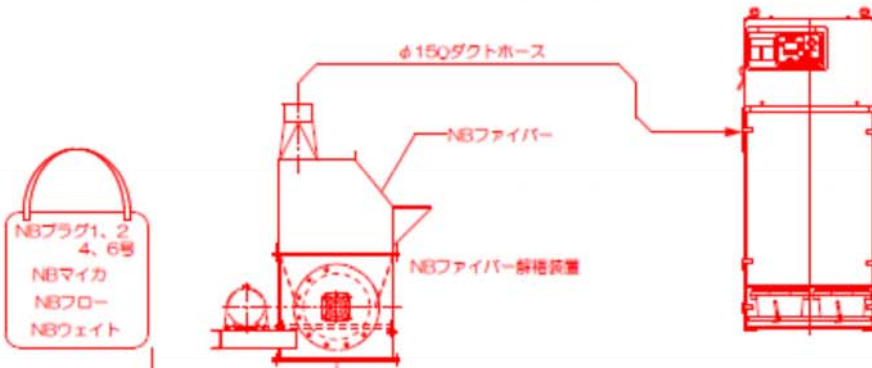
セメント製試験体



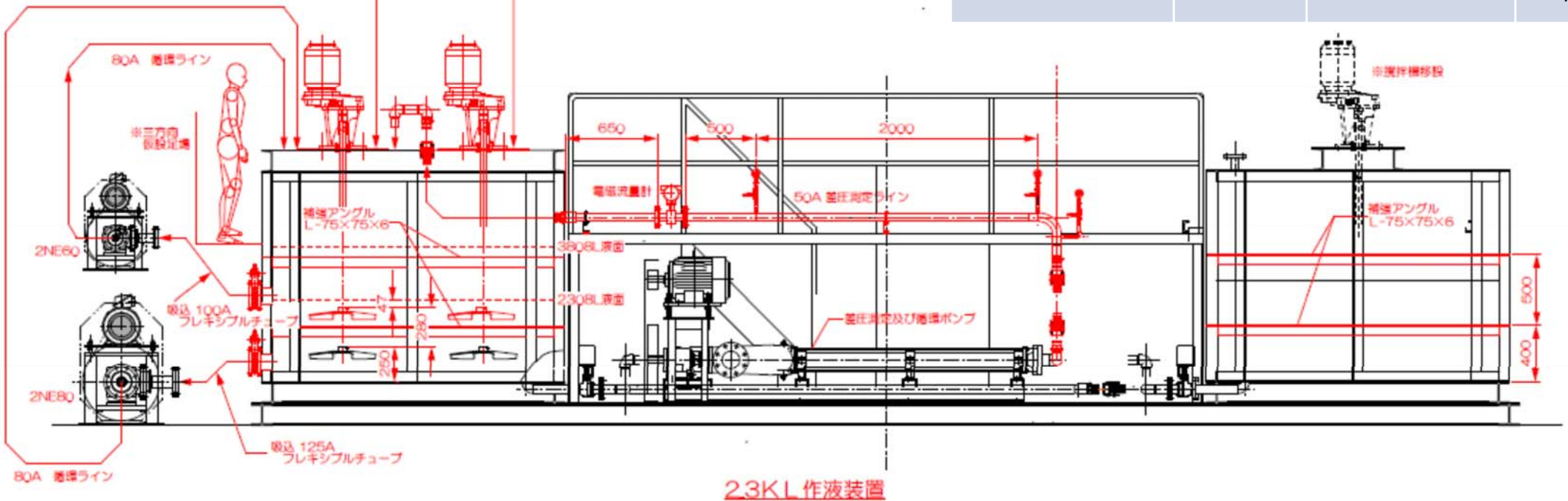
ゴム製試験体

# 実規模製造（作泥）試験用プラント

- ※配載の作液材料はクレーンを使用し添加
- ※作液タンクの3方に仮設足場を取付ける。
- ※攪拌機は2台運転とし攪拌羽根2枚追加
- ※天板は取外し開放できる構造とする



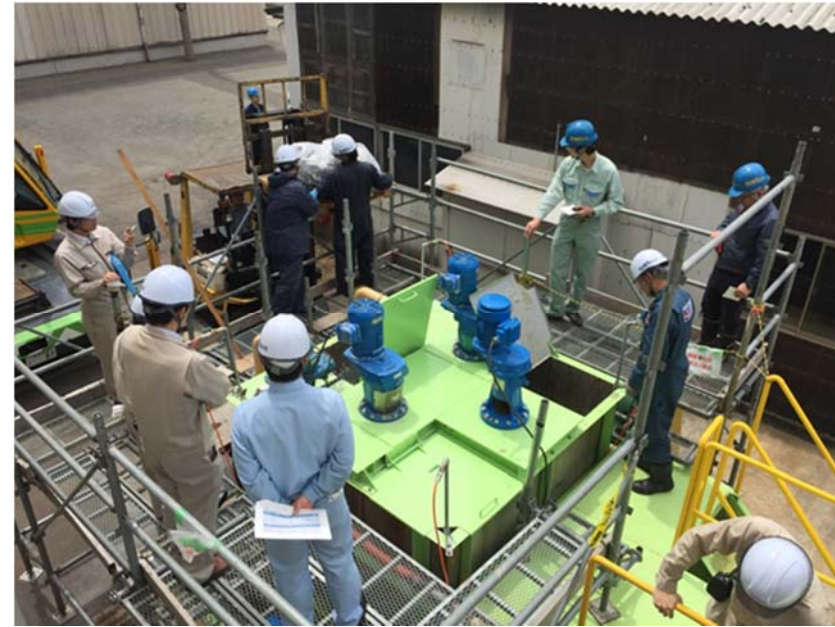
材料名	作泥量 (kg)	材料名	作泥量 (kg)
水	2,308	N B プラグ2号	277
N B クレイ	231	N B プラグ4号	277
N B フロー	11.5	N B プラグ6号	277
N B ファイバー	277	N B マイカ	277
N B プラグ1号	277	N B ウェイト	3,000



23KL作液装置



# 実規模製造試験



# 実規模製造試験

(試験結果－室内作製との比較)

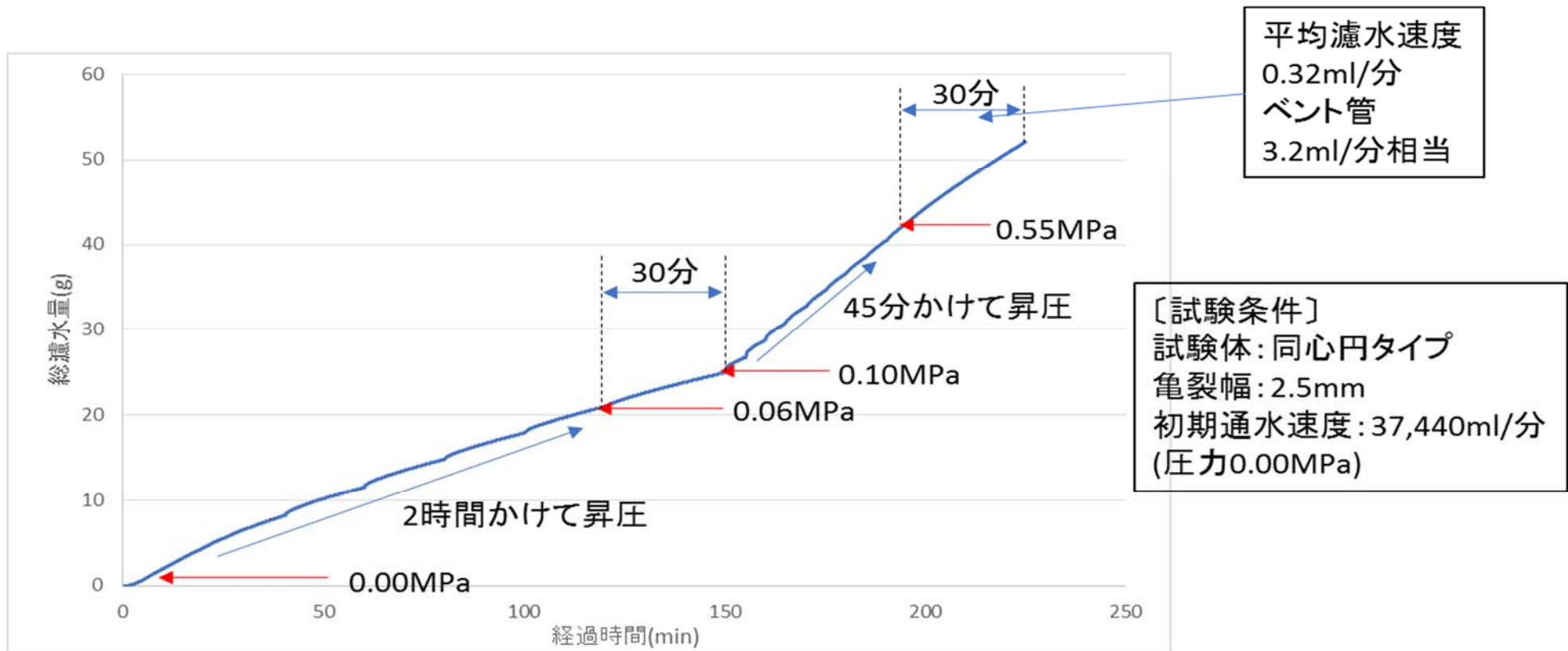
測定項目		室内作製	実規模製造試験 製造直後	実規模製造試験 10日後
遊離水(%) 24時間後		0	－	0
コーンフロー値(mm) 1分後		267	207	216
B型粘度計測定(cp)		－	30,000	－
水中不分離性試験	懸濁物質 量 (mg/ℓ)	47	－	28
	pH	7.8	－	7.62
透水係数(m/s)		$7.2 \times 10^{-11}$	－	$5.8 \times 10^{-11}$
流体比重		1.810	1.825	1.857

- コーンフロー値は室内製造と比較して減少
- 止水性能に影響を与える透水係数は同等
- 施工性や材料分離抵抗性の指標である水中不分離性や遊離水の発生は同等



室内作製と大きな差異はなく、実規模現場製造においても基本性能を確保できることを確認

# 実規模製造試験 (試験結果－止水性能)



- 0.55MPaの水圧を載荷した状態での平均濾水量は0.32ml/分
- ベント管換算で3.2ml/分
- 要求性能である1,000ml/分の1/313の濾水量

# 補修材供給システムの概念設計 (基本方針)

- 攪拌混合装置は、二軸パドル型を適用する
- 二軸パドル型のミキサーでは、攪拌混合装置の底部にモノポンプを配置し、攪拌混合と循環が同時に行える機能を備えたものとする
- NBファイバーの開梱は開梱装置によりおこなうものとする
- NBプラグ、NBマイカは、専用工場でプレミックス状態にし、フレコンに封入して納入する
- NBクレイは、フレコン納入とする
- NBウェイトはバラ納入とし、専用サイロにストックする
- フレコン納入されるNBクレイ、NBプラグ、NBマイカのミキサーへの投入は、ラフタークレーンにより行う
- 補修材供給システムは、施工現場外に設置し、現場への納入はアジテータ車により行う
- 施工現場には、アジテータ車からの補修材を受けるタンク、ストックタンクを設置し、打ち込み先へはストックタンクよりポンプ圧送する
- NBクレイ、NBフローの添加は、別途作泥タンクで事前に作製したNBクレイ懸濁液とする

# 補修材供給システムの概念設計

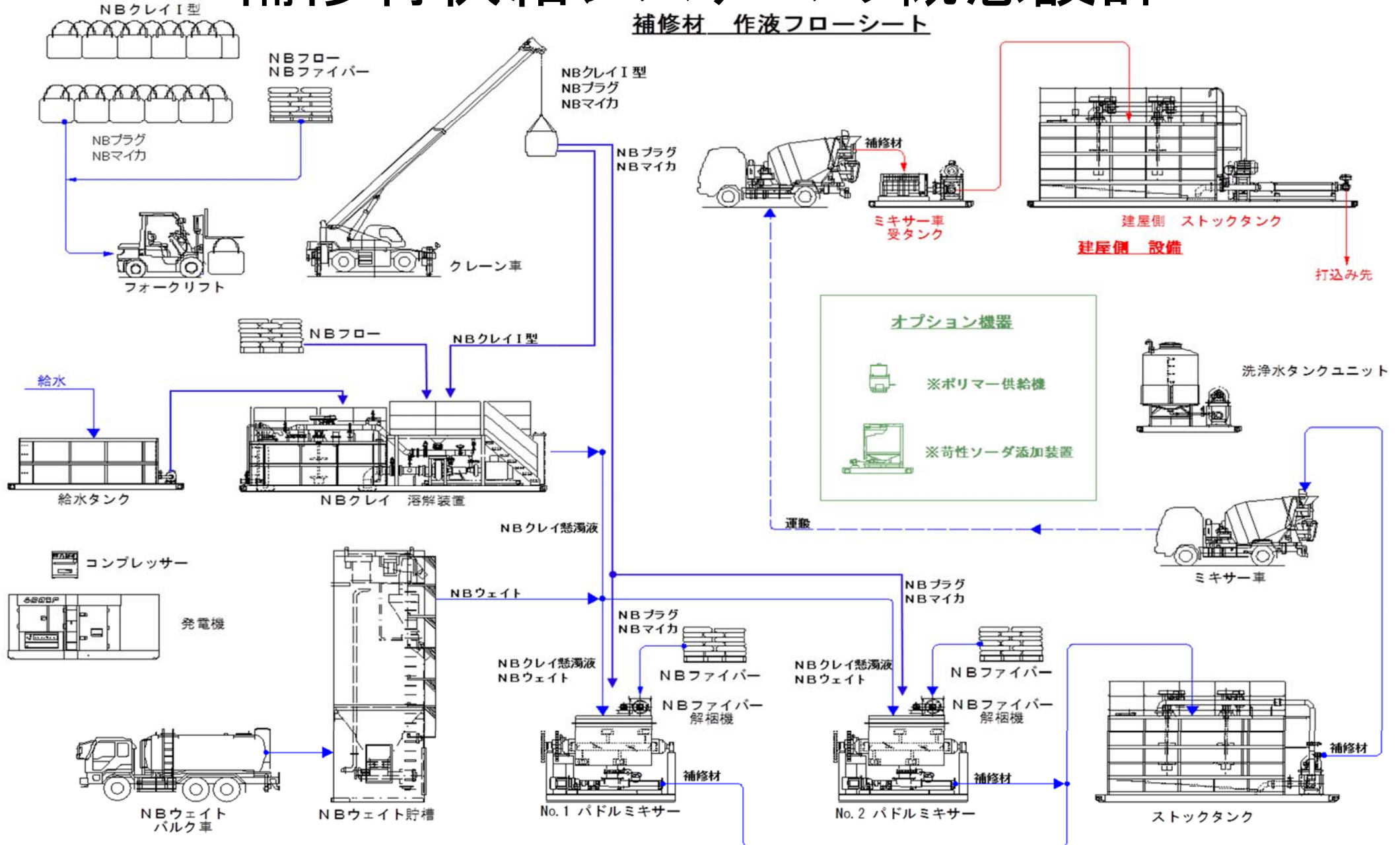
## (補修材の製造条件)

項目	単位	設定値
1日当りの補修材作液量	m <sup>3</sup>	10
補修材密度	g/cm <sup>3</sup>	1.85±0.5
補修材コーンフロー値	mm	250±50
補修材配合組成 (1バッチ当り2.5m <sup>3</sup> )		
水	m <sup>3</sup>	1,500±75
NBクレイ I 型	kg	150±30
NBフロー		8±1
NBファイバー		180±45
NBプラグ1号		180±45
NBプラグ2号		180±45
NBプラグ4号		180±45
NBプラグ6号		180±45
NBマイカ		180±45
NBウェイト		2,000±200



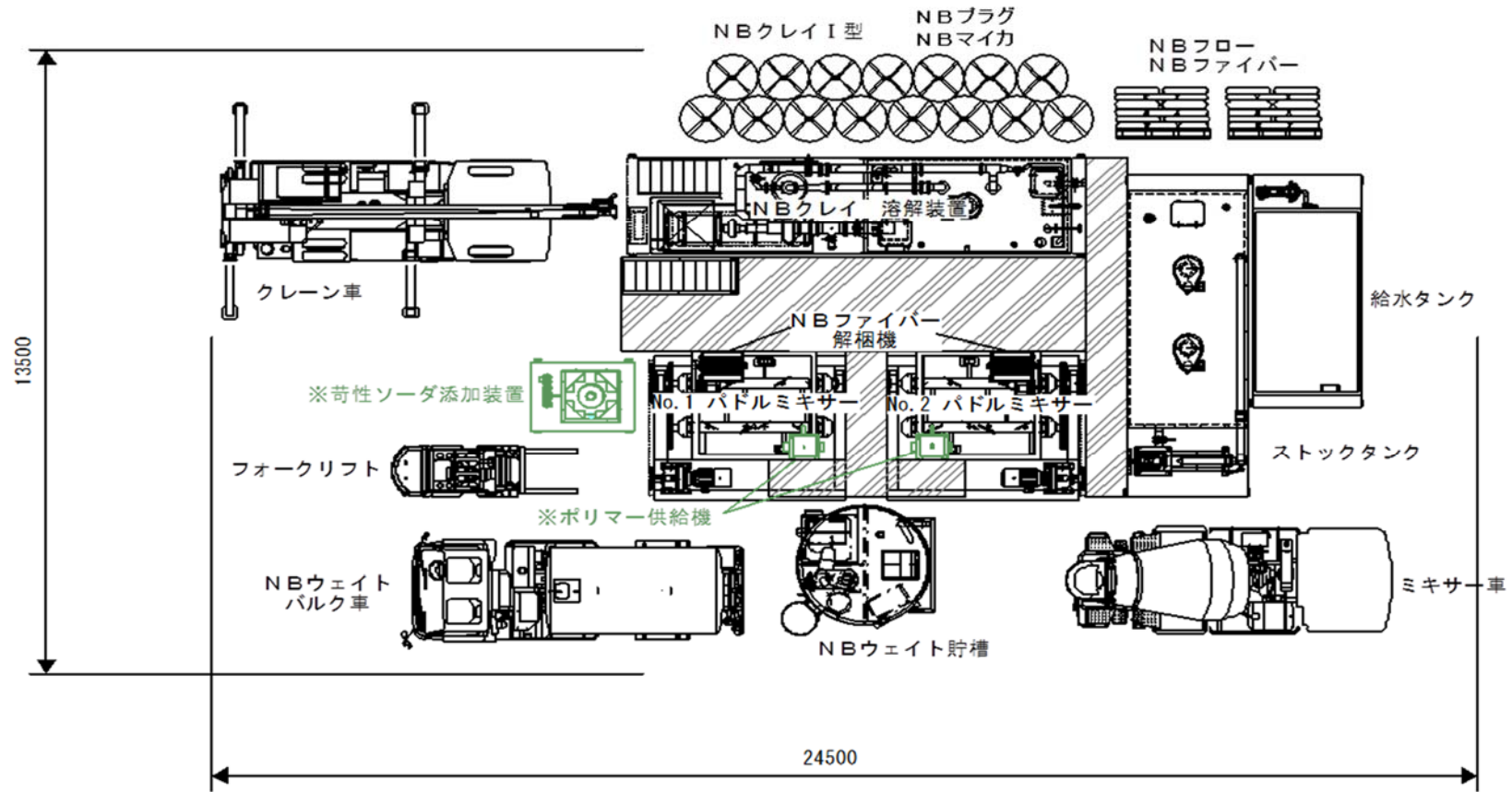
# 補修材供給システムの概念設計

補修材 作液フローシート

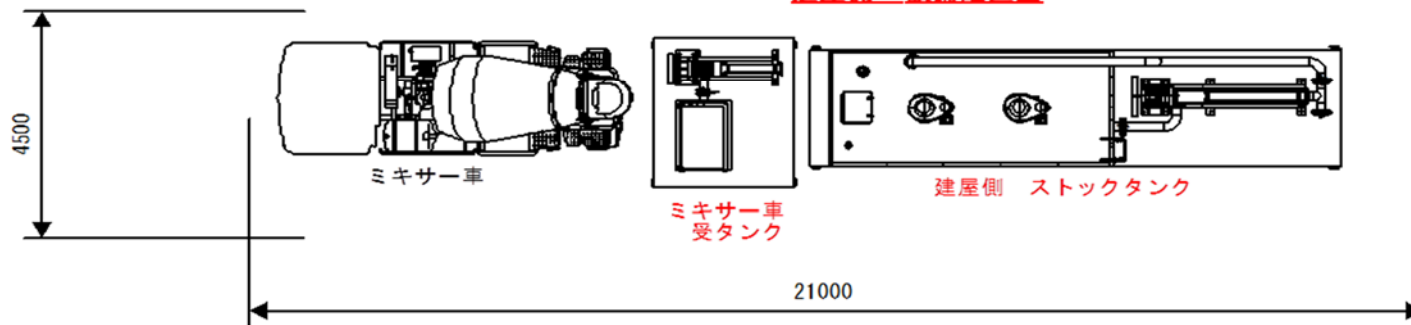


製造フロー

# 補修材供給システムの概念設計



建屋側 設備配置図



プラント配置図



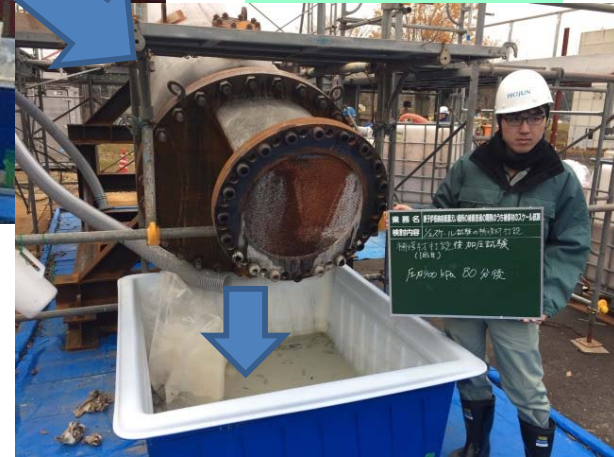
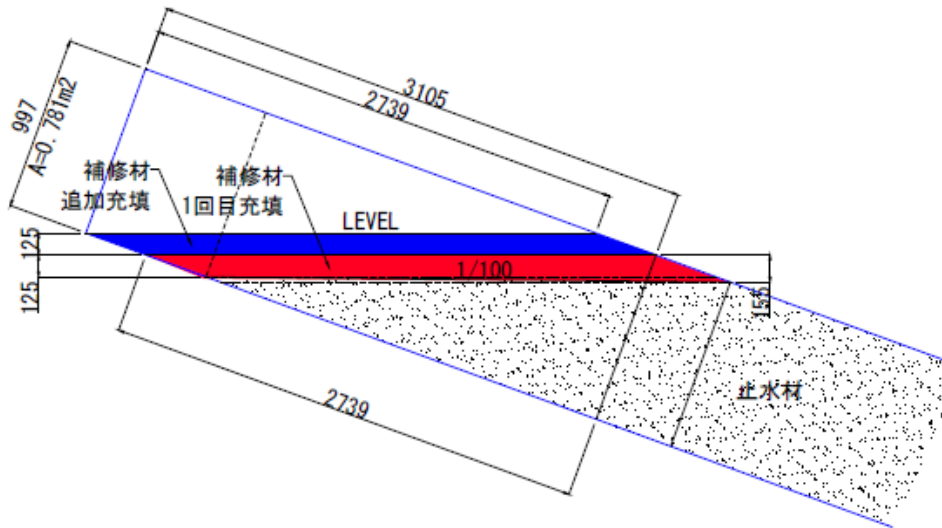
# 実規模ベント管1/2スケール試験



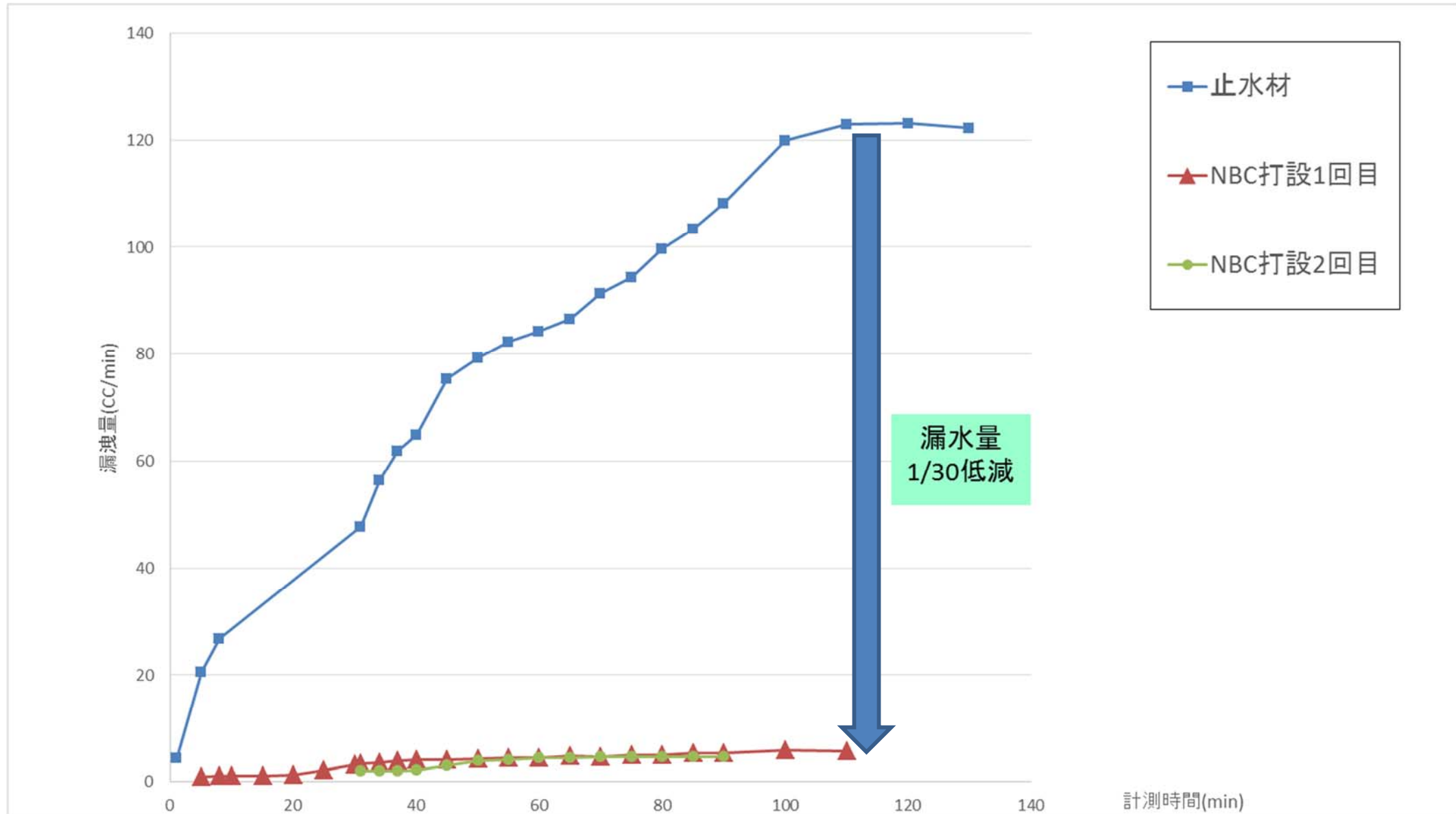
0.35MPa  
0.4MPa  
昇圧



漏水量  
測定  
1/30  
低減効果



# 実規模ベント管1/2スケール試験

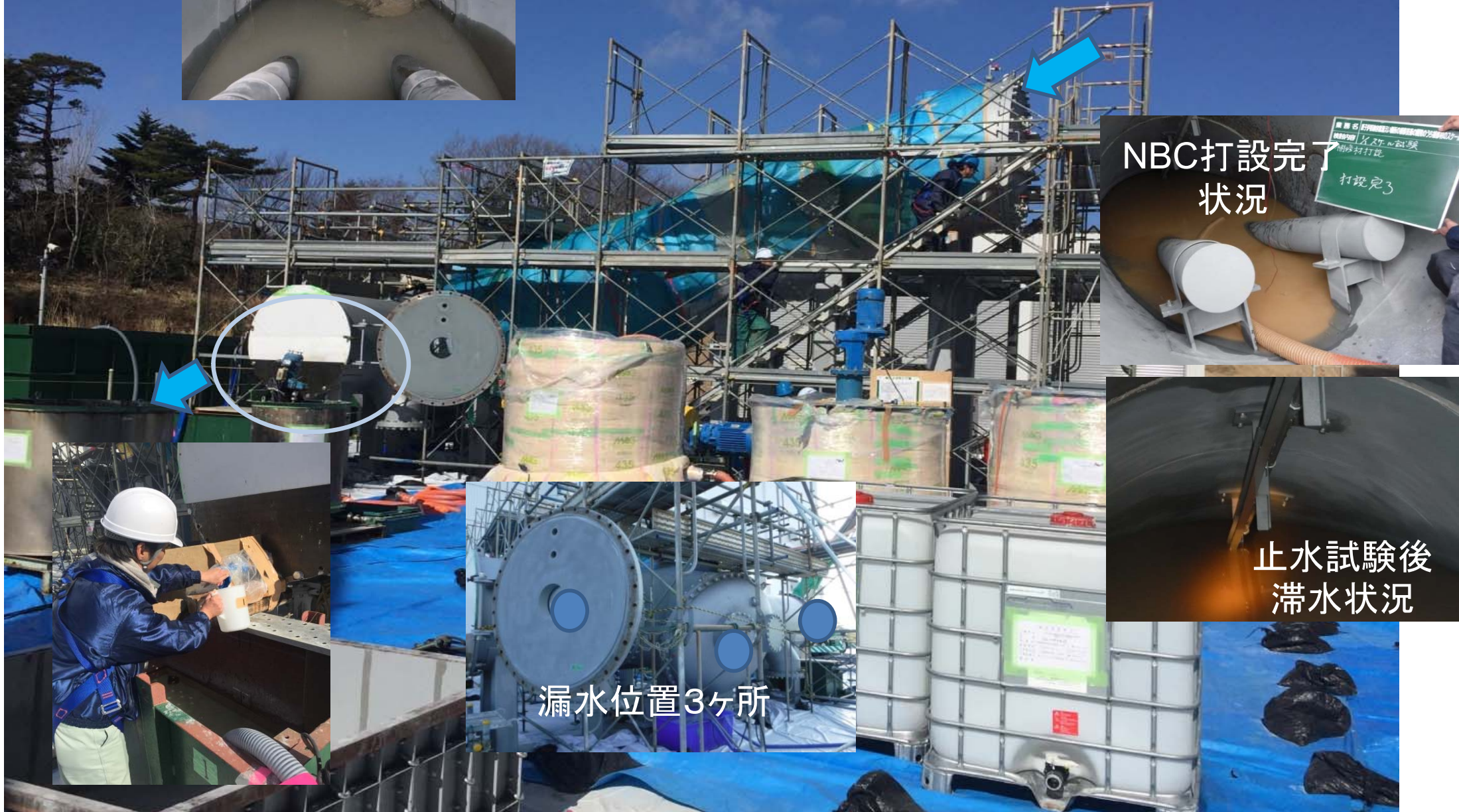




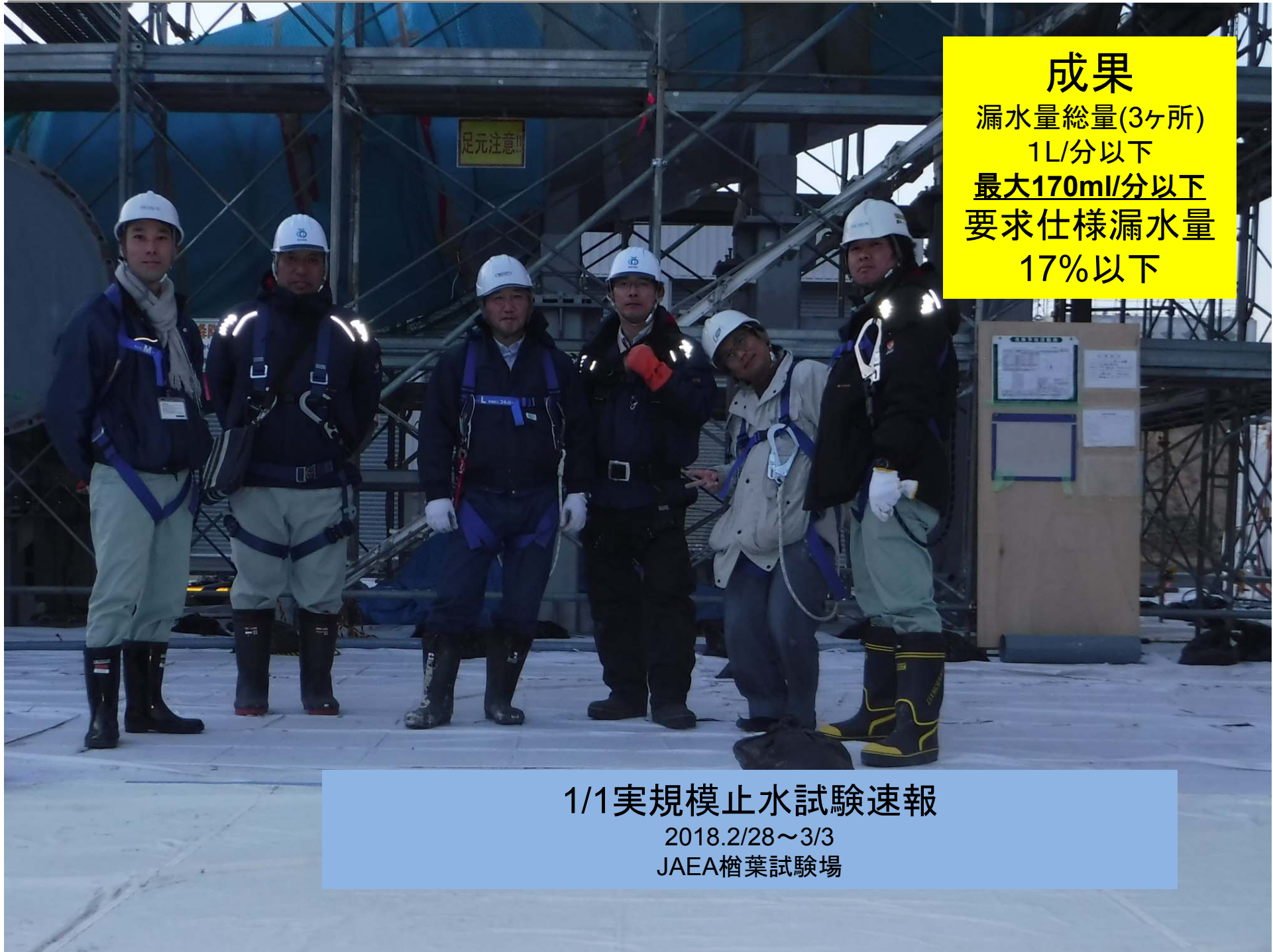
# 福島第一原子力発電所の廃止措置への貢献を目指す『廃炉地盤工学』～地盤施工学の創設～



耐圧=0.4MPa  
(水圧40m相当)







## 成果

漏水量総量(3ヶ所)

1L/分以下

最大170ml/分以下

要求仕様漏水量

17%以下

1/1実規模止水試験速報

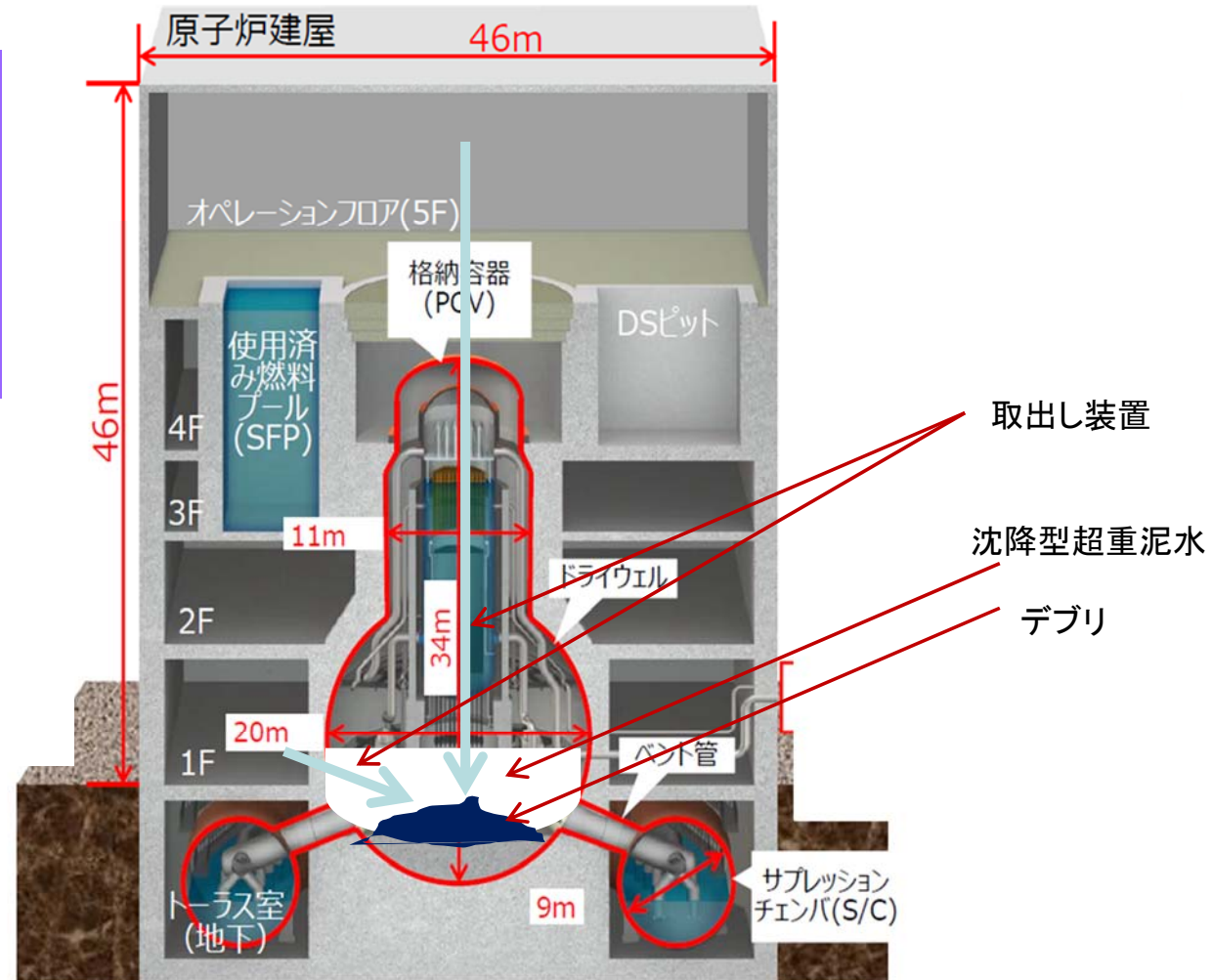
2018.2/28～3/3

JAEA櫛葉試験場

# デブリ取出し環境技術

## 沈降型超重泥水

- ・飛散、高線量の遮へい
- ・遮へい層上部での作業基盤
- ・デブリ回収
- ・デブリ取出し後の分級



# 沈降型超高比重泥水の検討

## 超重泥水の種類と機能

泥水種類		超高比重泥水	亀裂閉塞型重泥水 (補修材)	沈降型超高比重泥水
配合材料	加重材	硫酸バリウム	硫酸バリウム	硫酸バリウム
	増粘剤	ベントナイト	ベントナイト	天然・半合成高分子化合物
	分散剤	リン酸塩	リン酸塩	—
	閉塞材	—	無機鉱物（6種類）	—
	粘性破壊剤			酵素
性状	密度(g/cm <sup>3</sup> )	2.5以上	1.8以上	3.0以上
	フロー値 (mm)	350以上	200～300	350以上
機能	1次	放射線遮蔽	亀裂閉塞/遮水	放射線遮蔽
	2次	低浸透性空隙(亀裂)閉塞/遮水	放射線遮蔽	飛散防止
	3次	(自己修復)	自己修復	強度発現/自己修復
使用目的(F1事故対応)		放射線遮蔽等全般	ベント管/SCの亀裂漏水箇所の亀裂閉塞/止水	デブリ回収時のPCV充填材
適用方法		F1トーラス室、PCV内に同流体を充填し、建屋内への地下水流入を防止すると共に放射線を遮蔽する。	ベント管/SCの亀裂漏水箇所に同流体を打設し、閉塞材で亀裂を閉塞後、ベントナイトなどにより低透水層を形成して遮水する。	高比重ポリマー泥水に粘性破壊剤を添加する事により高比重・自己修復性が高く且つ、強度の高いバライト沈降層を形成させる。



# 分散と沈降機能

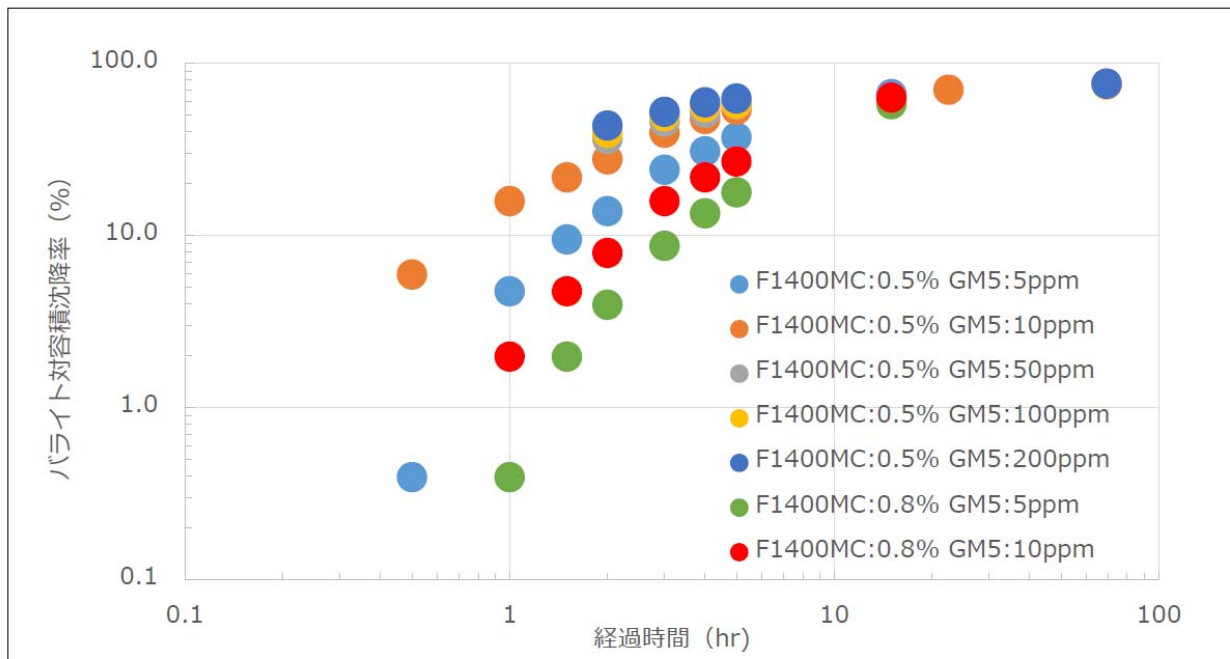
沈降型超高比重泥水の配合組成

材料名	添加量 (g)
水道水	100
高粘性タイプポリマー (F1400MC)	0.5
バライト	400
酵素 (GM5) 対ベース流体 セルロシン	10~200ppm

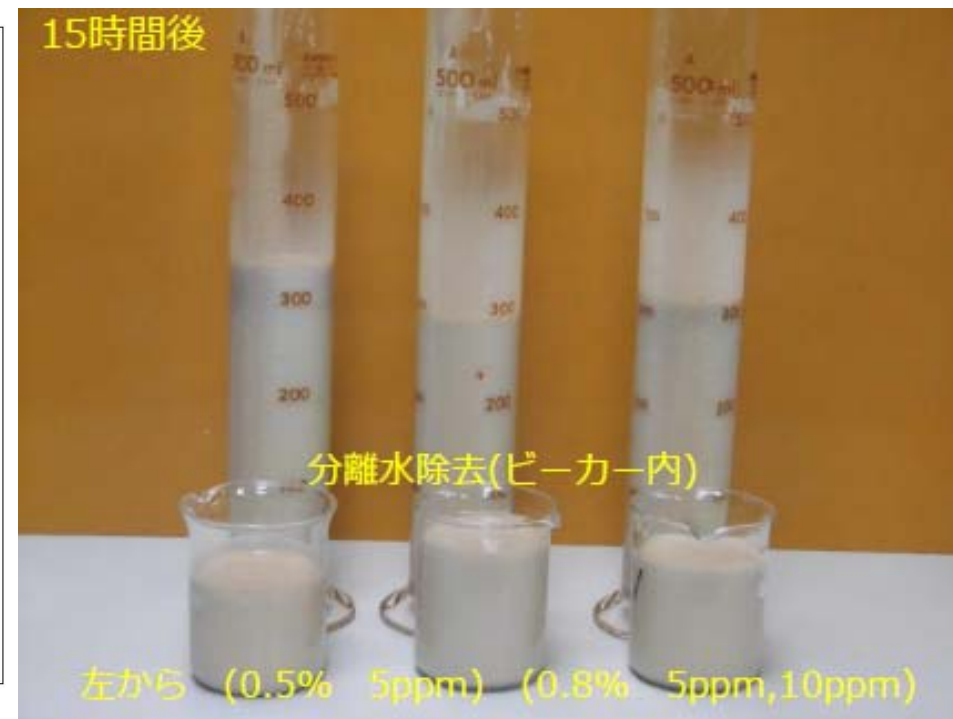
沈降型超高比重泥水の物性値

出来上がり重量 (g)	500.5	
出来上がり容量 (ml)	195.2	
流体密度 (g/cc)	2.56	
フロー値 (cm)	F1400MC:0.5%	320
	F1400MC:0.8%	225

※ 流体の比重計算においてはGM5とF1400MCは無視した。  
 ※ バライト密度は4.2(g/cc)を用いた。



バライトの時間と対容積沈降率の関係





## 基盤強度と遮へい機能

測定項目		経過日数	
		2日	7日
分離水密度 (g/cc)		1.18	1.01
バライト沈降層水分 (%)	モールド上部	11.96	12.42
	モールド下部	7.12	9.59
バライト沈降層密度 (g/cc)	モールド上部	3.04	3.01
	モールド下部	3.42	3.21
貫入抵抗力(N)	5.0(cm)	393.7	414.2
	7.5(cm)	675.0	613.6
	10.0(cm)	715.9	715.9
$q_c$ (kN/m <sup>2</sup> )	5.0(cm)	1215.3	1278.4
	7.5(cm)	2083.4	1894.0
	10.0(cm)	2209.6	2209.6

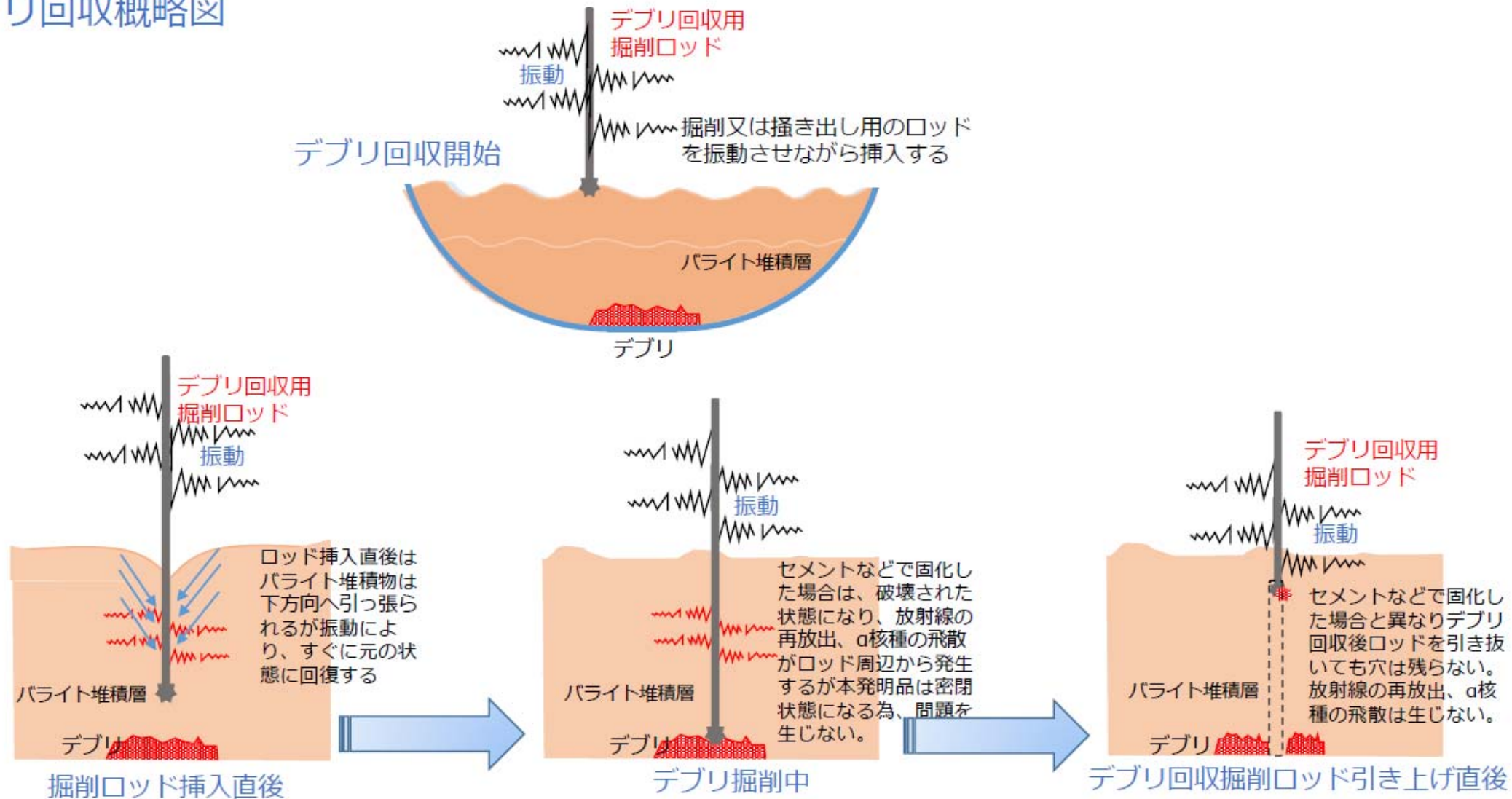


コーン貫入試験中

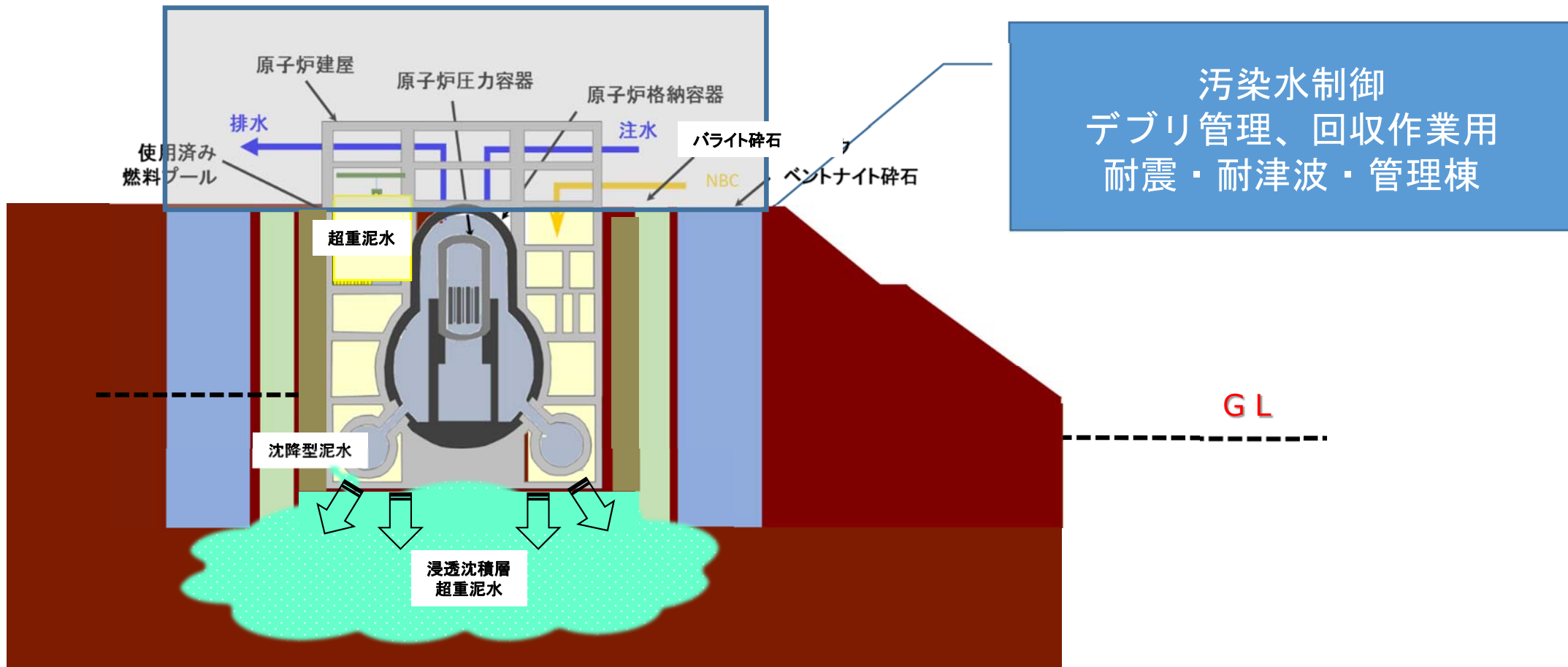
# 遮へい、飛散防止、回収

比重3.0、 $q_c \geq 1,200 \text{ kN/m}^2$

デブリ回収概略図



# 超長期保管・300年構想



1. 土構造隔離トップ部分は耐震・耐津波性の被覆型構造
2. 建屋周囲を埋める土質系材料はベントナイト砕石遮水・バライト砕石で遮へい
3. 原子炉建屋と格納容器間の充填は超重泥水、底盤遮水は浸透沈積層形成で保持
4. 格納容器内は水の循環で冷却管理
5. 原子炉建屋とバライト砕石間の空隙充填は沈降型超重泥水



土木学会基本認識抜粋

現代の世代は未来の世代の生存条件を保証する責務があり、自然と人間を共生させる環境の創造と保存は、土木技術者にとって光栄ある使命である。



**Thank you for your attention.**



一般社団法人  
NB研究所

<http://nb-institute.com/>

