IRID

配布資料　４－２

原子炉格納容器漏えい箇所補修技術の開発

S/C脚部補強技術の開発概要

2016年9月20日（廃炉地盤工学会）

技術研究組合 国際廃炉研究開発機構（IRID）

無断複製･転載禁止　技術研究組合　国際廃炉研究開発機構
©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

S/C脚部補強技術の開発概要

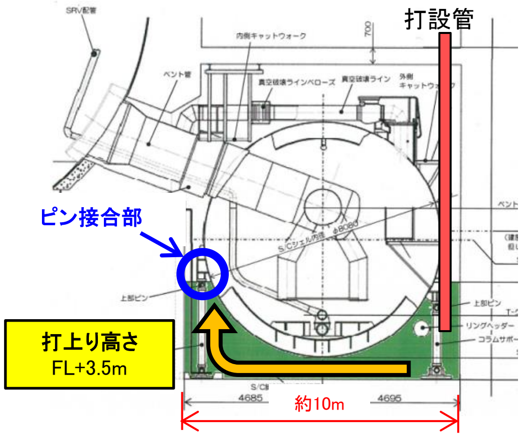
1. 開発目的

PCV健全性評価において，地震時にS/C脚部に発生する応力が許容値を上回ることが判明しており，トーラス室上階床面から補強材（モルタル）を充填し，S/C下部を埋設補強する工法の開発を目的とする。

2.補強計画

地上1階の打設孔からS/C片側のみ（現段階では外周側）へ補強材を充填（打設）し、内・外周のピン接合部までを埋設する計画を進めている。

施工課題	・補強材の水中長距離流動（水平15m以上） ・S/C脚部ピン接合部までの打ち上げ（鉛直3.5m）



■：1号機の補強材充填範囲

3.補強材の要求性能

条件の整理

<打設環境>

①トーラス室には滞留水がある。

②S/C支持脚や配管・ダクト(障害物)がある。

<要求事項>

③S/C支持に必要な強度を満足する。(8.4N/mm^2(暫定))

④膨大な量の打設を実現する。(最大約1,800m^3)

⑤長距離流動を可能とする。(15m以上)

⑥打設位置の反対側にも打ち上げることを可能とする。

⑦トーラス室内の水質で強度を発現する。

補強材に求められる性能

A 水中不分離性（①）

B 圧縮強度（③）

C 低発熱性（④）

D 高流動性（②、⑤、⑥）

E 長期流動保持性（④，⑥）

施工側に求められる能力

F 大容量の供給・打設（④）

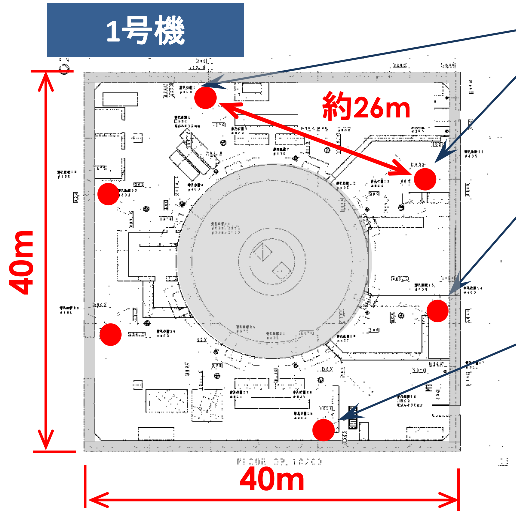
G 途切れのない連続打設（⑥）

H 打設レベルの監視（②、⑥）

IRID

©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

4.S/C脚部補強の要求事項と制約事項



充填口間距離※
Max.26m(1号機)

充填口位置※
全てS/Cの外周側
(1号機)

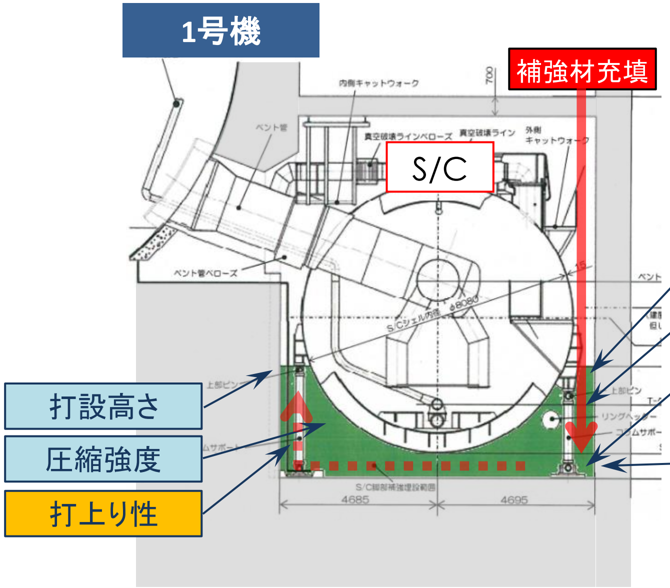
充填口員数※
6箇所(1号機)

※1･2･3号機とも
再評価中

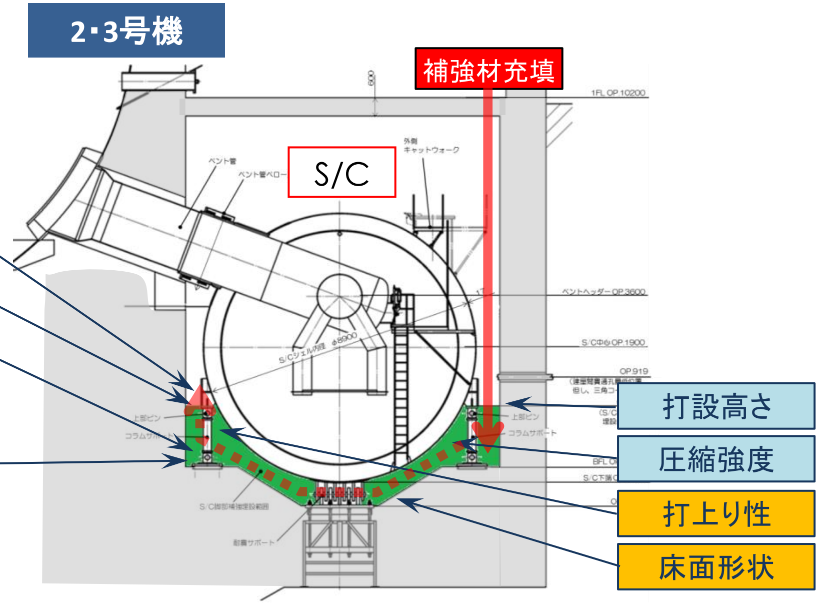
S/C脚部補強工事に於ける、目的を達成するための要求事項と、主に現場環境の要因により対応が必要な制約事項(間接的な要求事項)とを図に示す。

要求事項	圧縮強度 (N/mm²)	打設高さ
1号機	5.4	OP.2140
2･3号機	8.4	OP. -284

凡例：
- 要求事項
- 制約事項



現場環境要因
- 放射線
- 滞留水
- 滞留水(水質)
- 堆積物



IRID
©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

4.S/C脚部補強の要求事項と制約事項

	要求事項	求める仕様	目標とする性能	備考
1	【圧縮強度】 S/Cを支持できること	耐震影響評価Grの要求値 (8.4N/mm^2)	Fc＝8.4N/mm^{2}以上	圧縮強度
2	【打設高さ】 コラムサポート上部ピンまで打設できること	1号機　:OP.2140 2･3号機:OP.-284	確実に打ち上がること	打上り性

※赤文字は2016年度実施項目

	制約事項	内容	求める仕様	目標とする性能	備考
3	充填口配置	充填口スパンが長い(1号機で26m)	長距離流動が可能であること	26m/2=13m⇒15m以上の流動性	流動性
		S/Cの外周側にしか設置できない(1号機)	S/Cの下を潜って内周側へ充填できること	流動性を維持する時間内に内周側に流動･打ちあがること	打上り性
4	床面形状	S/C下部に勾配付き床面がある	床勾配に関わらず内周側へ充填できること	流動性を維持する時間内に内周側に流動･打ちあがること	打上り性
5	**現場環境要因**	トーラス室の放射線環境下で施工できること	**放射線環境下で硬化し、強度を維持できること**	Fc＝8.4N/mm^{2}以上	圧縮強度
6		トーラス室の滞留水環境下で施工できること	**滞留水の水質中で硬化し、強度が発現すること**	Fc＝8.4N/mm^{2}以上	圧縮強度
7			水中で打設できること	水中で分離しないこと	水中不分離性
8		トーラス室の堆積物に関わらず施工できること	**堆積物による流動･強度への影響が無いこと**	支障なく流動すること Fc＝8.4N/mm^{2}以上	流動性 圧縮強度

開発目標:制約事項があるなかで、要求事項を満足する補強材と工法を開発する。
(要求事項が満足できない場合は、制約事項の緩和を検討する)

©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

5.試験内容

（1）要求事項の確認試験マップ

確認項目＼試験名		流動性	充填性	打上り性	水中不分離性	圧縮強度		
		15m以上流動すること →20m流動とした	有意な空隙が出来ないこと	S/Cの反対側へ打ちあがること	水中で分離しないことを目視確認する	必要強度を満足することを確認する（目標値：8.4 N/mm²）		
						打設部	流動先	合流部
要素試験	40m水路試験	●	△	—	●	●	●	●
要素試験	打上り試験	△	△	●	△	●	●	—
要素試験	平面流動試験	△	●*1	—	△	●	●	—
要素試験	立方試験	△	●*2	△	△	●	●	—
要素試験	環境影響試験（2016年度実施）	●（堆積物）	—	—	—	●（放射線）（滞留水）（堆積物）	—	—
楢葉実規模試験		△	●	●	●	●	●	—

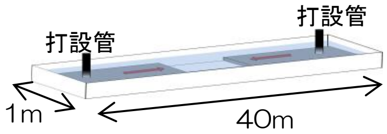
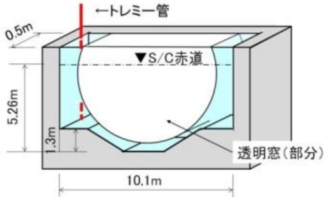
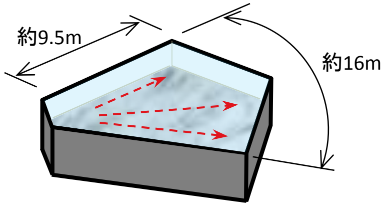
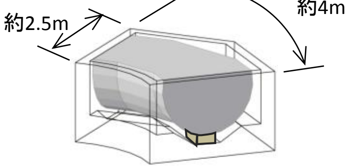
*1：空調ダクトを模擬　／　*2：S/Cの耐震サポートを模擬

●：確認　△：参考確認　—：確認不可

©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

5.試験内容

(2) 試験の概要と現場の再現状況

試験装置	概　　要	現場状況の再現性
[40m水路試験] 	・片側流動20m×双方向打設 →40mの水路状水槽	・滞留水を模擬し、予め水を張って水中打設とした。 ・1号機の流動距離(13m)を十分に網羅できる長さとして、20m×2→40mの水路とした。 ・複数個所からの打設を模擬して両端打設とした。 ・1号機床面～S/C下端高さに合わせて打設高さを700mmとした。 ・実機の打設速度（打上り速度）を模擬した。
[打上り試験] 	・トーラス室の1/1スケールの断面モデル状水槽 ・床面は2･3号の床面形状とした。	・滞留水を模擬し、予め水を張って水中打設とした。 ・床面形状は2･3号機の勾配（溝）付きの方が1号機の平面床よりも流動条件としては厳しいと考えた。 ・打上りの条件としてはより厳しい方向と考えて、1号機の打上り高さ（約3.4m）よりも高い赤道高さ（約5.3m）まで打設した。 ・実機の打設速度（打上り速度）を模擬した。
[平面流動] 	・トーラス室の1/1スケールの平面モデル状水槽 ・床面は1号の床面形状（平面床）とした。	・滞留水を模擬して、予め水を張って水中打設とした。 ・内周側からの打設の可能性を考慮して、外周側よりも広がり条件の厳しい内周側打設とした。 ・純粋な平面（広がり）流動の強度を測定するため、床面は1号の床面形状（平面床）とした ・空調ダクト（1号機に有り）を模擬して、流動に対する支障の有無及び充填性を確認した。 ・1号機床面～S/C下端高さに合わせて打設高さを700mmとした。
[1/4立方試験] 	・1/4スケール×1/8セクターのS/Cを内包するトーラス室を模擬した水槽 ・床面は2･3号の床面形状とした。	・滞留水を模擬して、予め水を張って水中打設とした。 ・内周側からの打設の可能性を考慮して、より広がり条件の厳しい内周側打設とした。 ・耐震サポートは実機の外寸と構造を模擬し、充填性を確認した。 ・実機の打設速度（打上り速度）を模擬した。

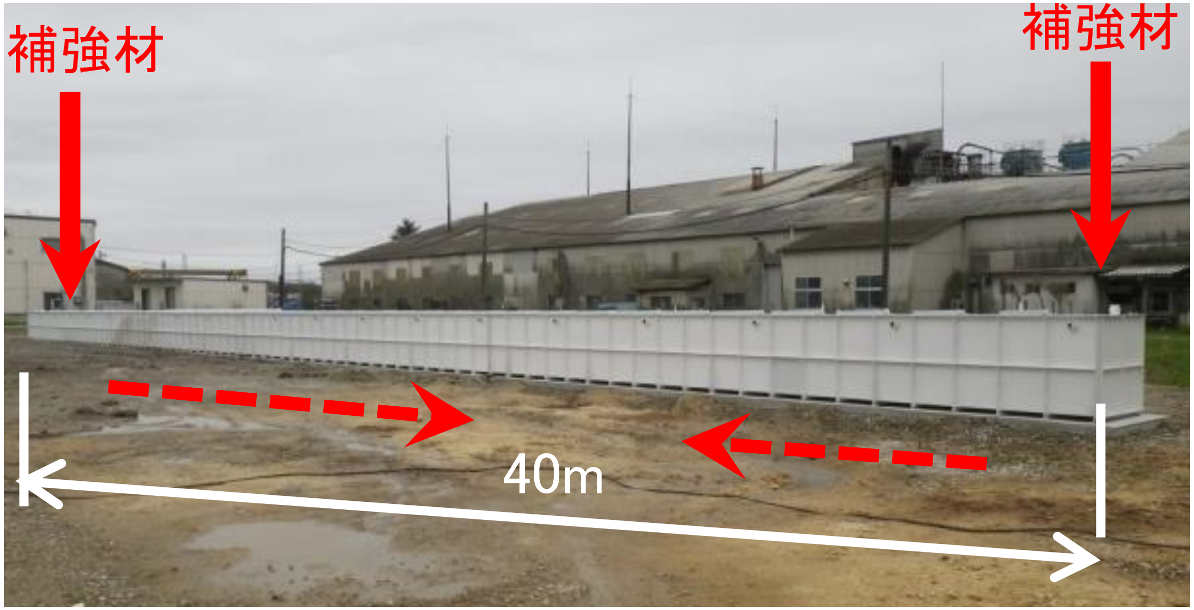
©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

5.試験内容

(3) 試験概要①（40m水路試験）

【長距離流動の可否を確認する】

試験条件
- 40m水槽の両端部から同時に
  補強材を打ち込む
- 打ち込み高さは700mmとする
- 流動状況・打上り勾配を確認する
- 流動に伴う強度の変化を調べる



©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

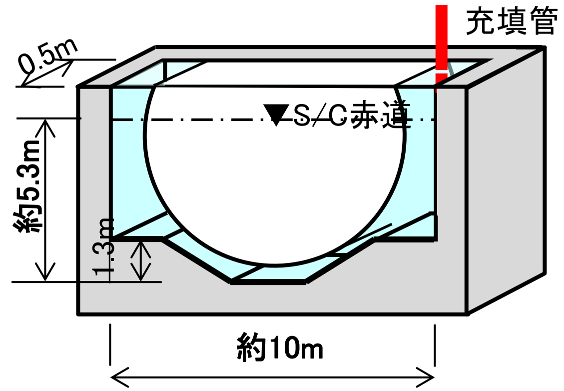
5.試験内容

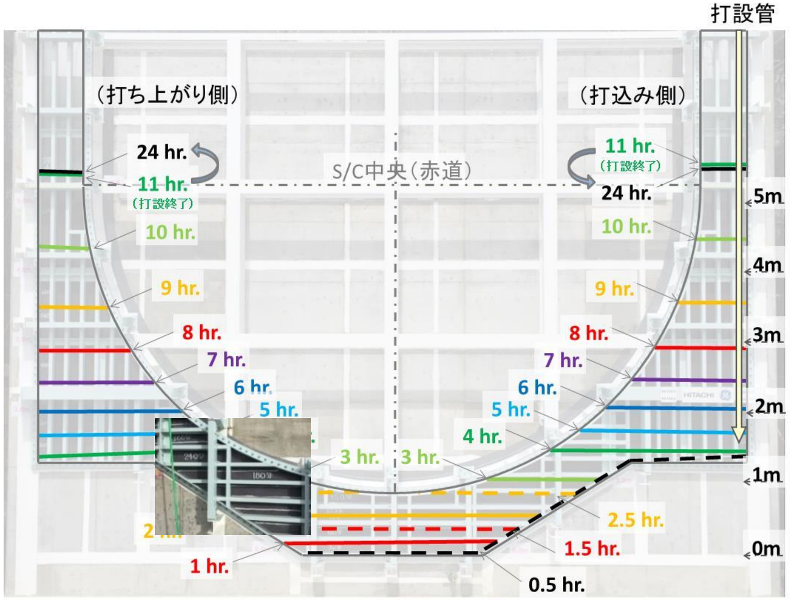
(3) 試験概要②（1/4・1/1スケール打上り試験）

【外周側※で打設した補強材が内周側※へ打ち上がることを確認する】

試験条件
・S/Cを模擬した障害物を設けた水槽の外周側※
　から補強材を打ち込む
・打ち込み高さは赤道高さまでとする(約5.3m)
・流動状況・打上りレベル差を確認する
・流動に伴う強度の変化を調べる

※本試験装置には内周側と外周側の区別はない





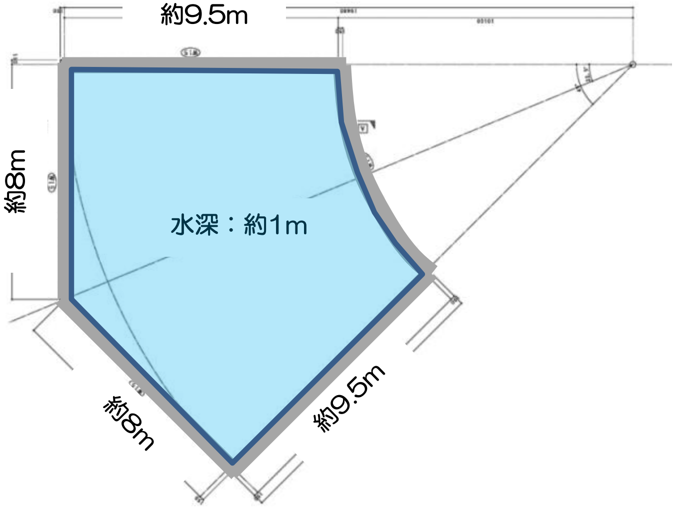
©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

5.試験内容

(3) 試験概要③（平面流動試験）

【二次元的拡がりを伴う流動の影響を確認する】

試験条件
・トーラス室の1/1スケール×1/8平面を模擬した水槽の内周側から補強材を打ち込む
・打ち込み高さは700mmとする
・流動状況・打上りレベル差を確認する
・流動に伴う強度の変化を調べる



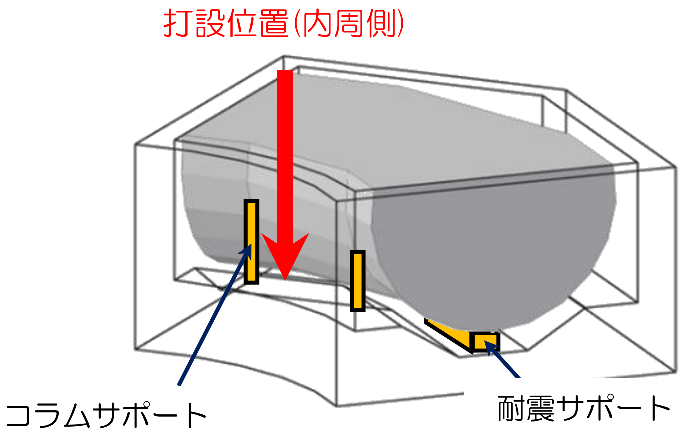
©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

5.試験内容

(3) 試験概要④（1/4スケール立方試験）

【打上り試験と平面流動試験の複合試験】

試験条件
- 1/4スケール×1/8セクターのS/C模擬体を内包する模擬トーラス室の内周側から補強材を充填する。
- 打ち込み高さはコラムサポート上部ピンまでとする
- 流動状況・打上りレベル差を確認する
- 流動に伴う強度の変化を調べる



©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

6.試験結果

(1) 試験結果まとめ

【材齢91日】

試　験　名	実施日	圧縮強度(N/mm²) 最大値 最小値 平均値	判定 圧縮強度 8.4N/mm² 以上	打上りレベル差 (cm)	
40m水路試験	2015 06/24	36.7 21.7 30.7	合	1.0	打設点～ 合流部
打上り試験	2015 09/09	31.3 24.6 28.7	合	4.0	打込み/ 打上り
平面流動試験	2015 11/25	31.6 20.1 25.1	合	1.0	打設点～ 対角部
1/4立方試験	2016 01/21	22.5 21.4 21.9	合	7.0	打込み～ 対角打上り

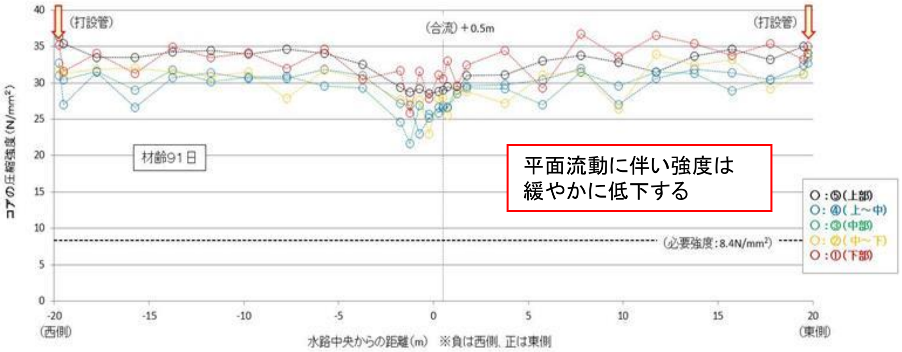
◆圧縮強度

平面流動･打上り･合流等の、様々な流動に伴う圧縮強度のデータをもとに算定式を考案した。
これと充填口配置とを合わせて実施工における強度分布を策定し、要求値を満足できることを確認する。(検証中)

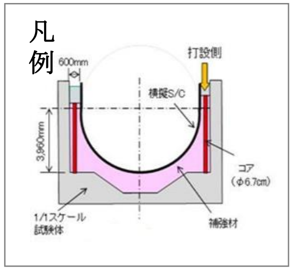
◆打上りレベル差

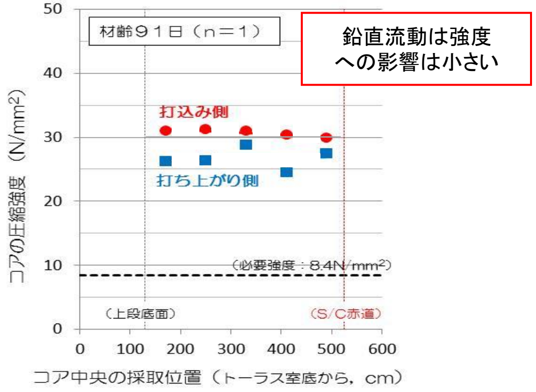
流動末端部で目標高さに打上げるための、施工管理値として使用する。

●40m水路試験

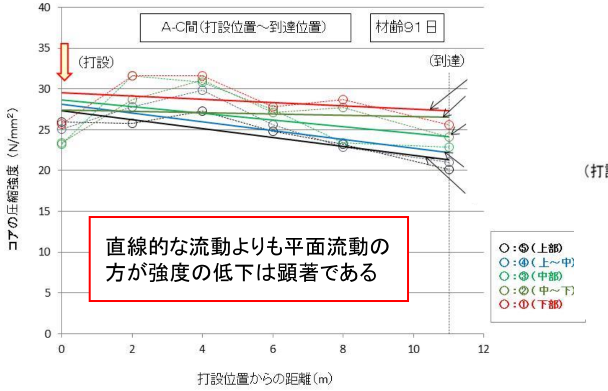


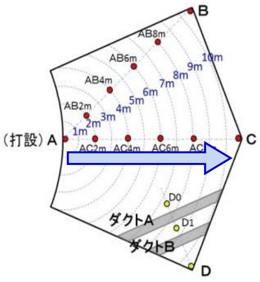
●1/1打上り試験





●平面流動試験





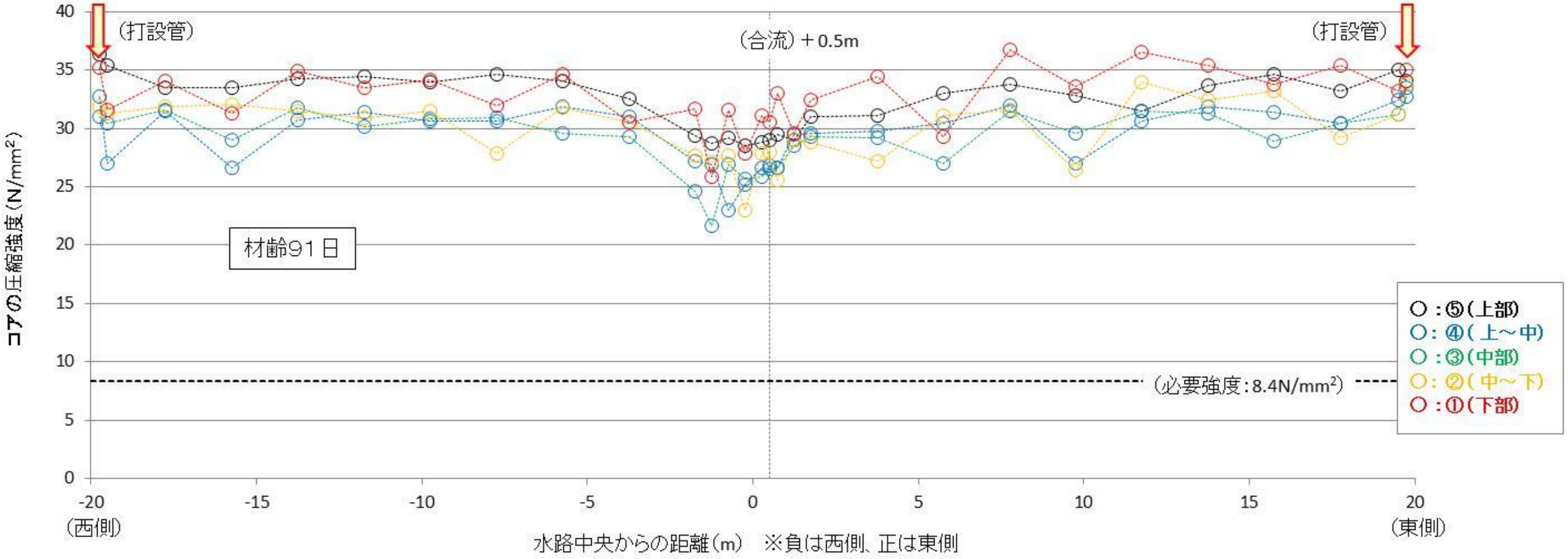
©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

6.試験結果

(2) 補強材の圧縮強度①

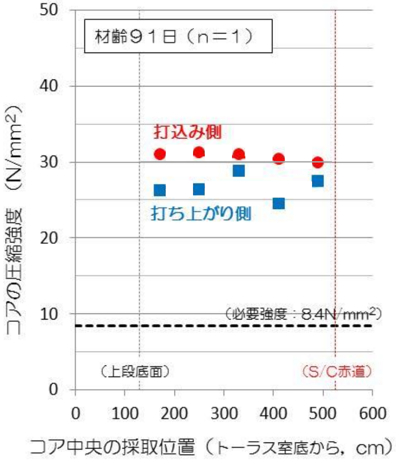
40m水路試験

・全ての箇所で目標圧縮強度〔$8.4N/mm^2$〕を満足した
・20m流動部(合流部)は、流動ゼロmと比較して約20%低下した



打上り試験

・全ての箇所で目標圧縮強度〔$8.4N/mm^2$〕を満足した
・鉛直流動による低下はほとんど見られなかった

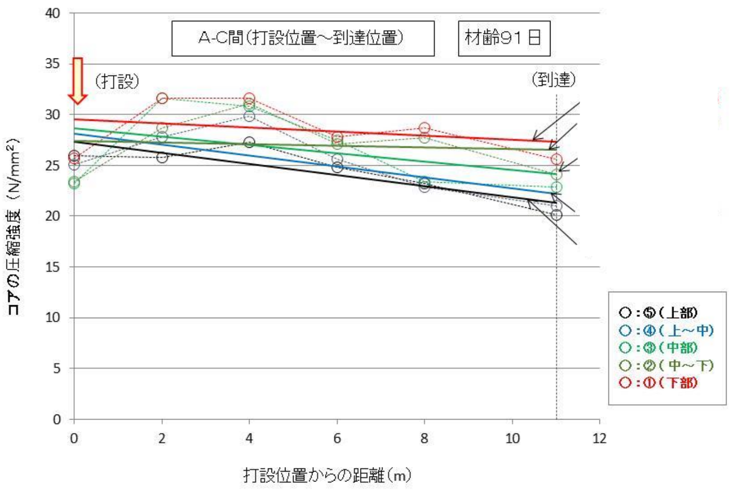


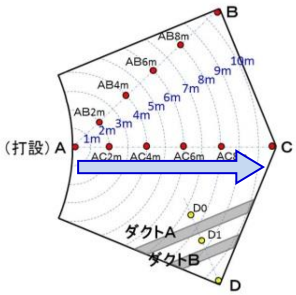
IRID
©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

6.試験結果

(2) 補強材の圧縮強度②

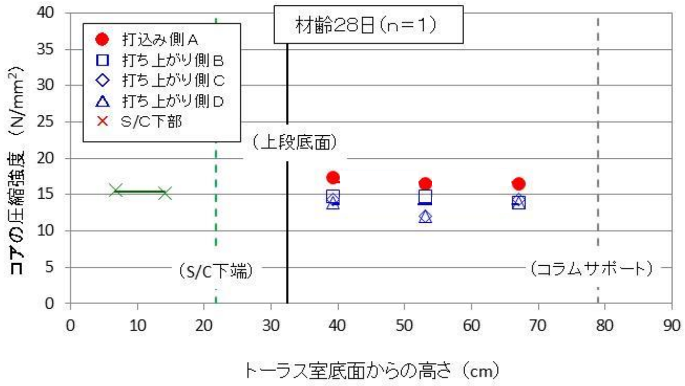
平面流動試験



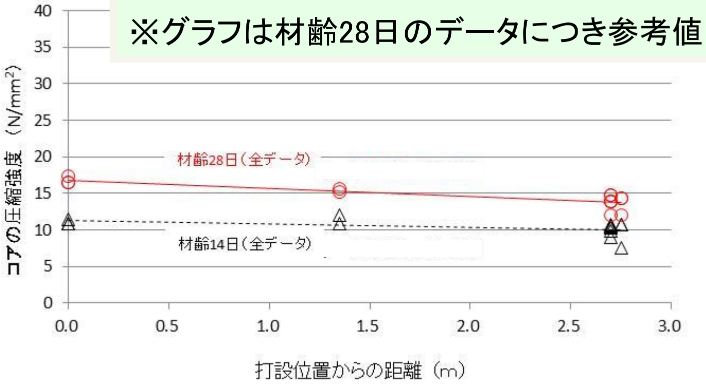


- ・全ての測定箇所で目標圧縮強度〔8.4N/mm²〕を満足した
- ・11m流動部は、流動ゼロmと比較して約8%低下した
- ・流動による強度の低下は40m水路試験よりも顕著であった

¼立方試験



- ・全ての測定箇所で目標圧縮強度〔8.4N/mm²〕を満足した
- ・鉛直流動による強度低下は殆ど見られなかった
- ・2.5m流動部は、流動ゼロmと比較して約19%低下した
- ※グラフは材齢28日のデータにつき参考値とする

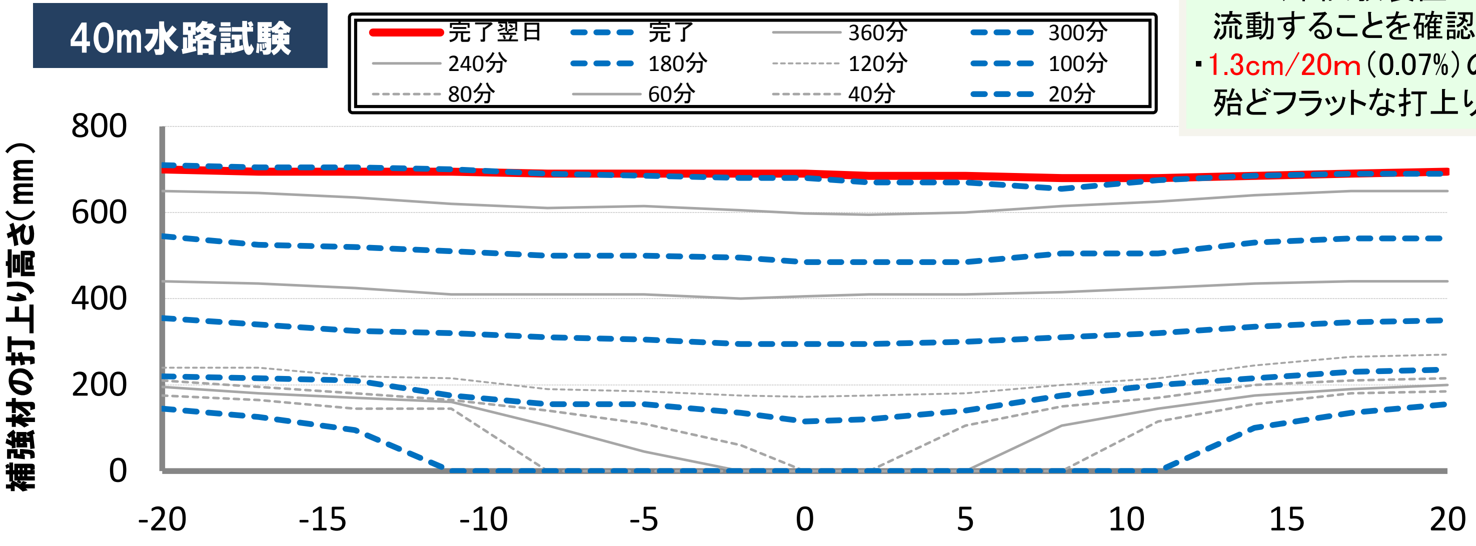


©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

6.試験結果

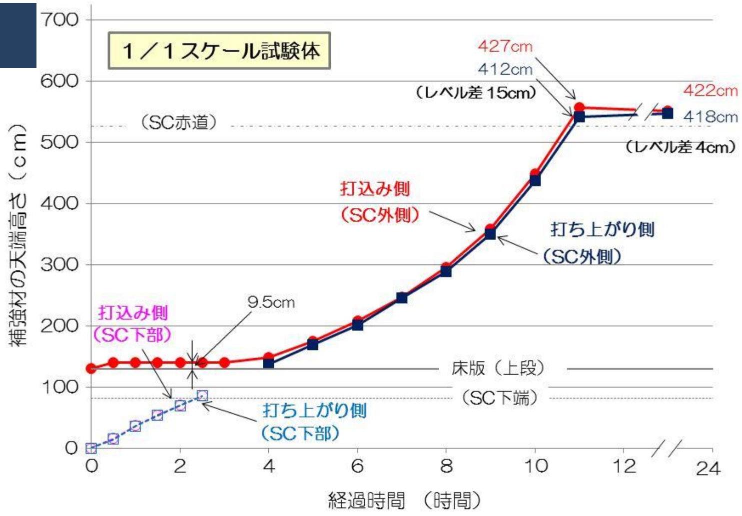
(3) 補強材の流動性と充填性①

40m水路試験



- 20m（本試験装置の最大長さ）まで流動することを確認した
- 1.3cm/20m（0.07%）の偏差であり、殆どフラットな打上りを得た

打上り試験



- S/C外周側※から打設して内周側※へ打上げることができた
- 打込み/打上り側のレベル差は4cm(24h後)となった

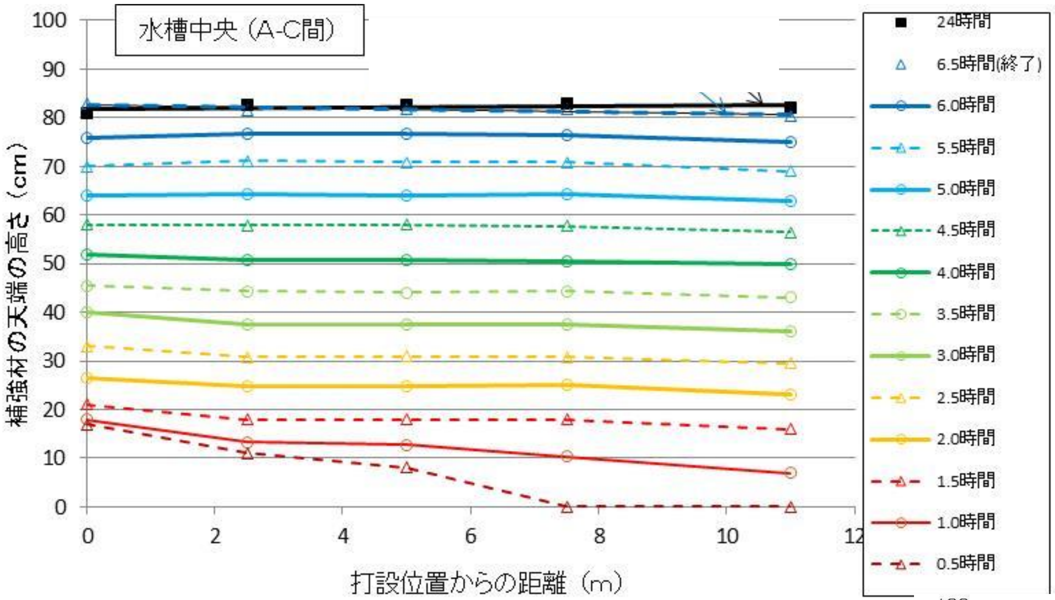
※本試験装置には内周側と外周側の区別はない

©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

6.試験結果

⑶ 補強材の流動性と充填性②

平面流動試験



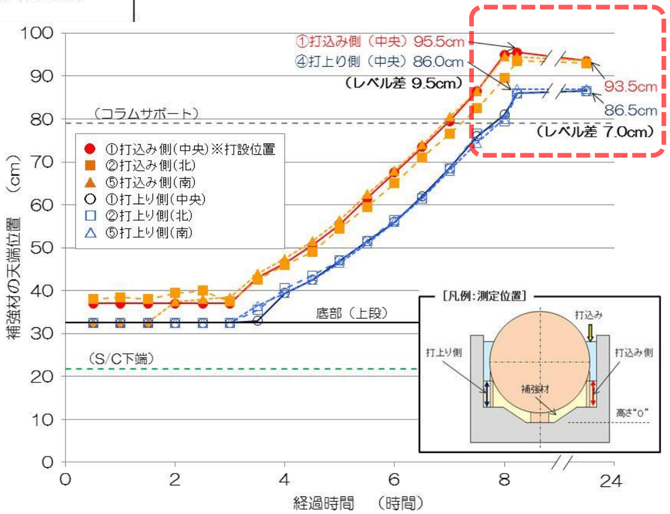
① 流動性
1cm/11m（0.09%）であり、殆どフラットな打上りを得た

② 充填性
模擬ダクト部で隙間の無い良好な充填状態であることを確認した

¼立方試験

① 充填性
耐震サポート周囲に充填できていることを確認した

② 打上り性
S/C内周側から打設して外周側へ打上げることができた
打込み/打上り側のレベル差は7cm(24h後)となった



©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

6.試験結果

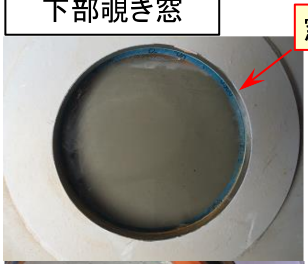
(3) 補強材の流動性と充填性③

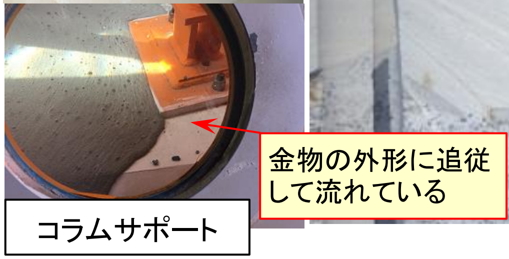
40m水路試験

平面流動試験

打上り試験

¼立方試験



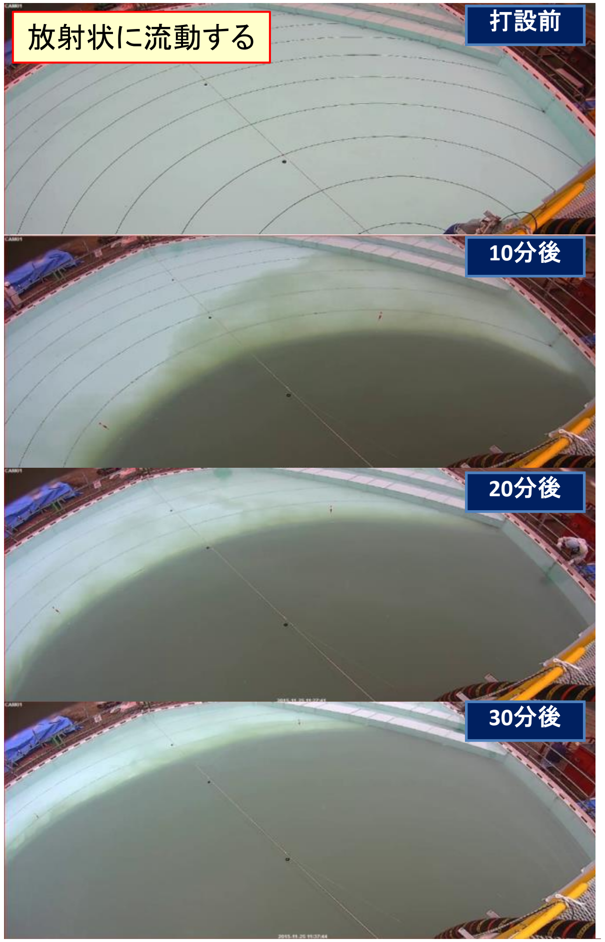


©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

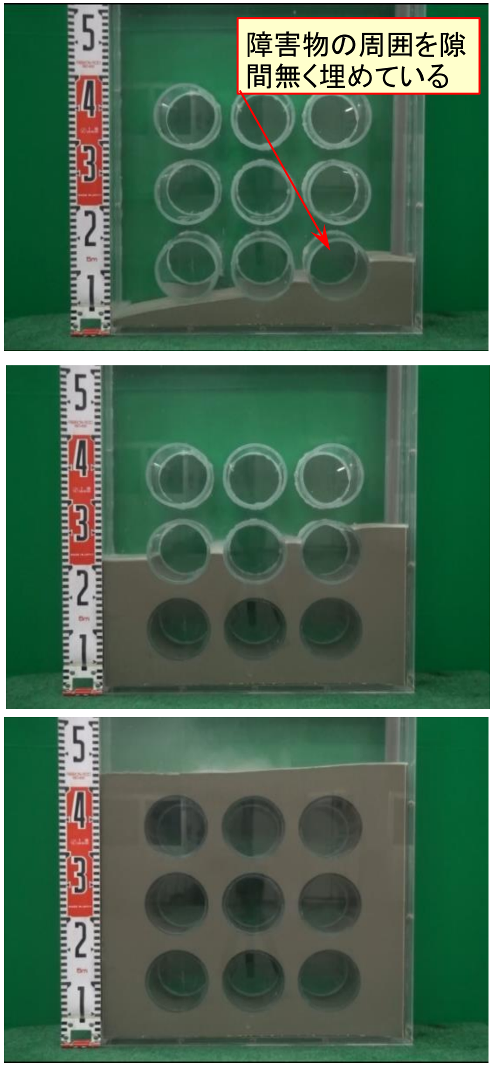
6.試験結果

(3) 補強材の流動性と充填性④

平面流動試験



参考1(デモ)



参考2(デモ)

©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

7.今後の進め方

(1) 2016年度開発の進め方

◆補強材の基本性能に対する試験結果/課題と対応方針

要素試験で補強材の流動性・充填性・打上り性・圧縮強度を確認した。試験結果から、実機での強度評価方法の構築をする必要がある。
→補強材の強度低下要因を検討し、補強材の強度算定式構築する。

◆実機適用性に対する課題と対応方針

①最新の現場状況を考慮して充填口配置見直しが必要
→現場調査状況を反映した充填口配置を再評価

②施工現場であるトーラス室の環境を模擬して現場適用性を確認する。
→耐放性・滞留水水質・堆積物の影響を試験で確認

③耐震性評価に必要なデータの取得
→圧縮繰り返し試験、静弾性係数試験等によりデータを取得

◆実規模試験での確認項目

①現場を模擬した試験装置により主に施工性を確認する。
→打設ホースの干渉物回避操作・充填高さのモニタリング・オーバーフロー水の排水操作等

②サイトレイアウトの検討(現地サイドとの情報共有)
→補強材供給システムの配置検討

基本工事計画の作成

①補強材の強度算定方法の構築

・強度算定式の構築
・欠損の影響の評価(ダクト等)
・空隙の発生の可能性と影響の評価

②実機適用性の確認

1) 流動条件の検討
最新の情報・条件により充填口配置を再検討

2) 放射線の影響確認
打設直後～硬化時の放射線の影響を調査

3) 滞留水の影響確認
ホウ酸の影響を評価
ホウ酸以外の成分についても評価を検討

4) 堆積物の影響確認
砂・錆・塗膜片について評価

5) 耐震性評価に必要なデータ取得
(耐震性評価は、耐震性影響評価PJで実施)

③施工成立性の確認

※モルタル打設は別途

①+②+③:S/C脚部補強工法の成立性を確認

©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

7.今後の進め方

(2) 課題解決の考え方と見通し①

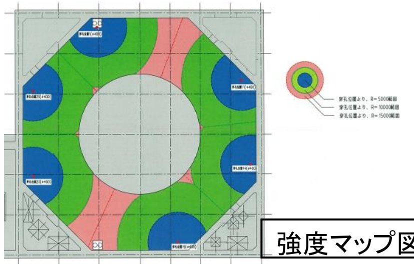
① 強度算定

2014-15年度の試験で得たデータにより、流動による圧縮強度の算定式を以下のように策定した。

[基準強度]×[流動に伴う低下*]ー[合流・側壁部・他による低下*]

なお、現在評価式の妥当性を検証中である。

別途検討中の1･2･3号機の充填口配置に当てはめて、強度マップを作成する。



強度マップ図案

*：S/C脚補強材は水中不分離モルタルではあるが、流動時に水を取り込むことにより希釈され、強度が低下すると考えられる。

② 欠損の影響の評価

1号機トーラス室の空調ダクトをもとに、ダクト内空部を補強材の入り込まない欠損として評価し、周囲充填部の応力の増分を確認した結果、全て1%未満(最大0.4%)であることを確認した。よって、欠損による強度への影響は殆ど無視できる程度と考える。

③ 空隙の発生の可能性と影響の評価

2014-15年度の試験の結果から、補強材の充填に際して殆ど空隙は発生しないと考える。(参考右写真)

仮に空隙が生じたとしても、広範囲に渡る連続したものでなければS/Cの支持に影響は無いものと考える。

④ 充填口配置の再評価

【1号機】

1号機の充填口は、2014-15年度の検討結果(6箇所)に加え、現時点の除染状況や、内周側のキャットウォーク切除を前提とした再評価を実施している。

現段階で11箇所を候補に挙げており、このうち6箇所を選出する予定である。

次頁に1号機の充填口配置検討案を示す。

【2号機】

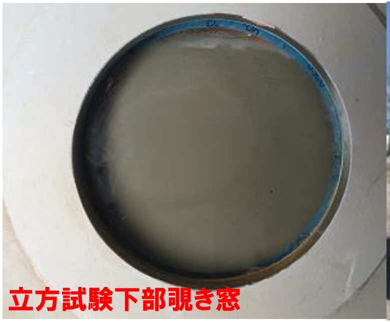
2号機の充填口は、2014-15年度の検討結果をベースにして、現時点の除染状況や、内周側のキャットウォーク切除を前提とした再評価を実施している。

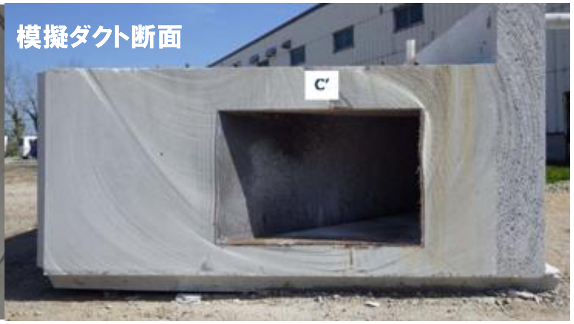
現段階で10箇所を候補に挙げており、このうち5～6箇所を選出する予定である。

【3号機】

3号機の充填口は、2014-15年度の検討結果をベースにして再評価を予定している。

2号機の検討終了後に作業に着手する。





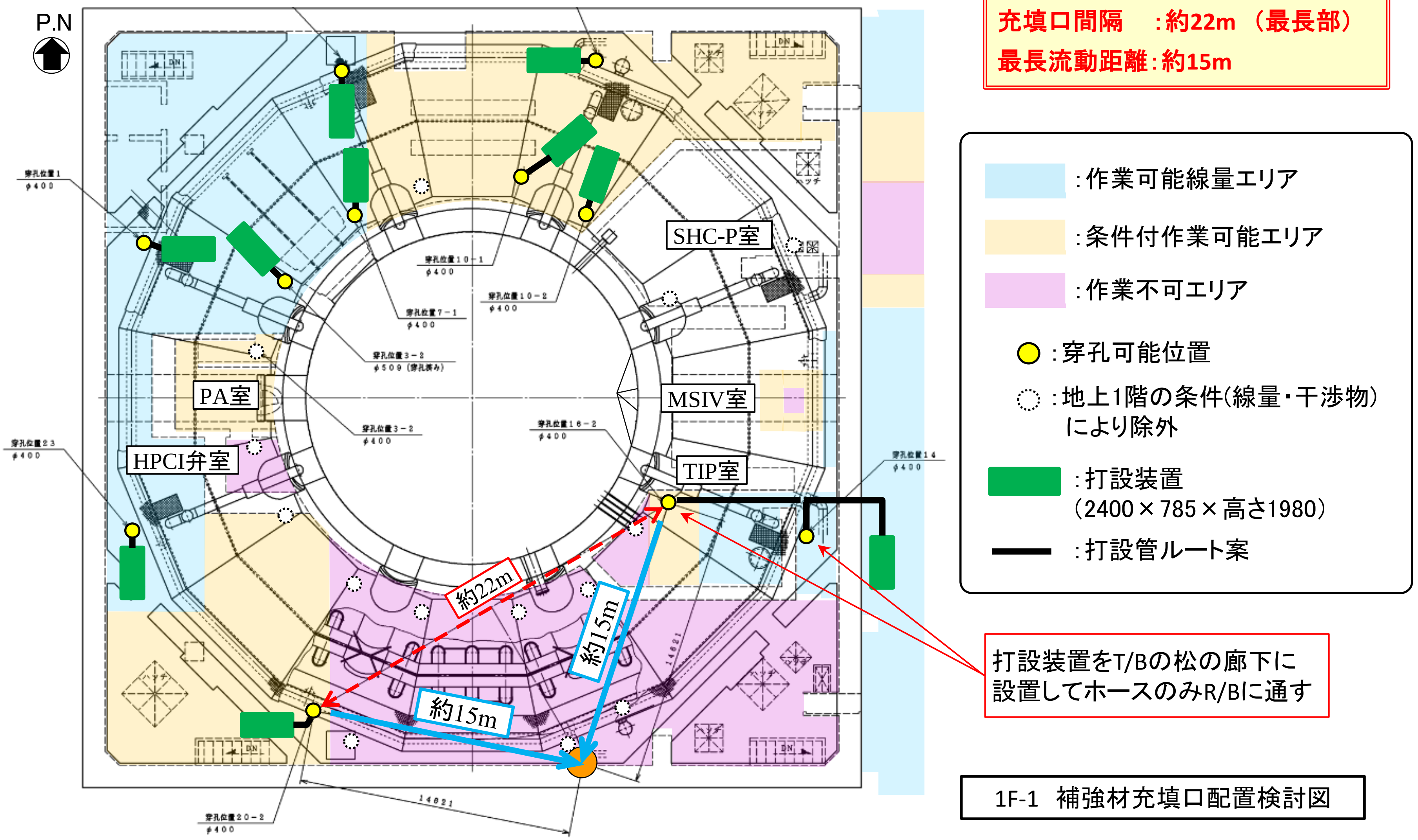
©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

7.今後の進め方

9/16（金） 審議・再掲

(2) 課題解決の考え方と見通し②

1号機の充填口配置検討案を図に示す。
充填口の最長距離は約22m、最長流動距離は約15mである。（当初条件は約13m）



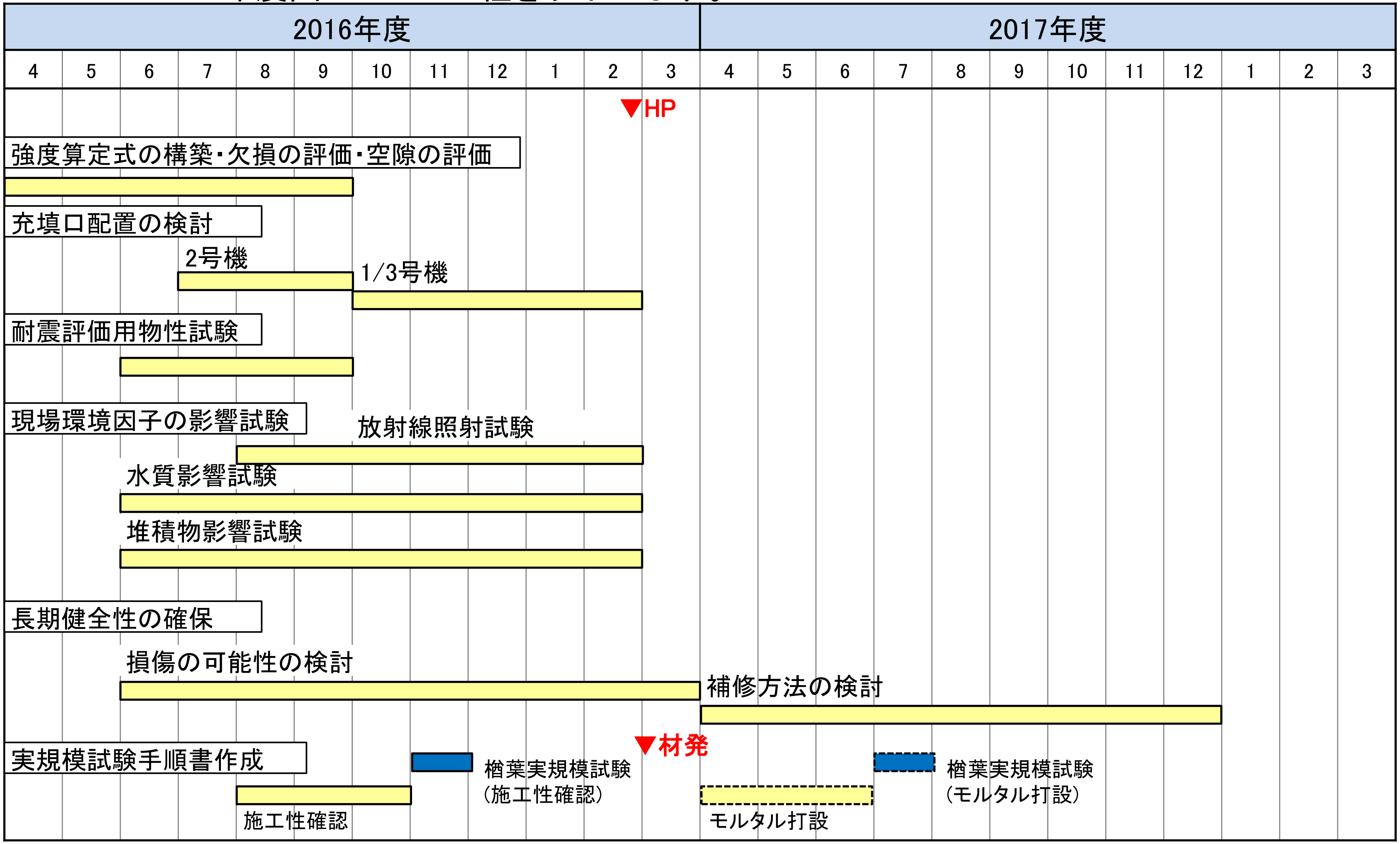
1F-1 補強材充填口配置検討図

IRID
©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

7.今後の進め方

(3) 2016年度の実施工程

2016-2017年度国プロでの工程を以下に示す。



©International Research Institute for Nuclear Decommissioning