日本原子力学会 2020年秋の大会

サンプスクリーン下流側影響の LOCA後炉心長期冷却に係る検討

(4) 炉心入口部の冷却材供給流路に関する2体燃料集合体試験

*東 慧,緒方智明,福田龍,坂田英之(三菱重工業)

白土 雄元 (MHI NSエンジニアリング)

中野 利彦 (関西電力)

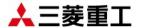
2020.9.17

三菱重工業株式会社

本検討は、関西電力、北海道電力、四国電力、九州電力、日本原子力発電による電力共同委託の成果の一部である。

★三菱重工

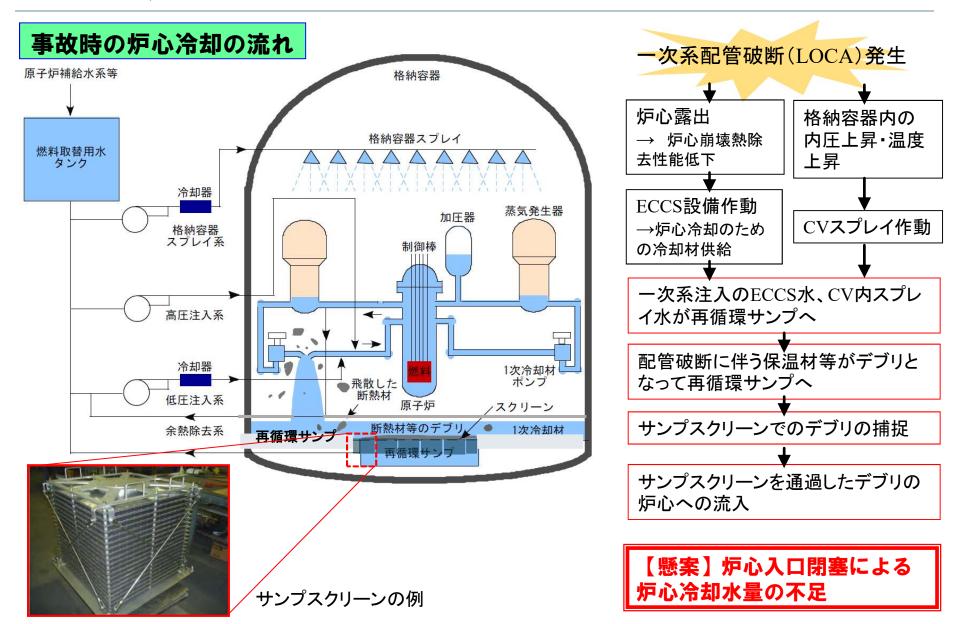
- 1. 背景
- 2. 全体計画
- 3. 基礎試験
 - •下部ノズル2体(2019年度成果)
 - 下部ノズル+下部グリッド(2020年度成果)
- 4. 燃料集合体2体を用いた流動試験
- 5. 1/4下部ノズル試験(2020年度成果)
- 6. 今後の計画
- 7. まとめ



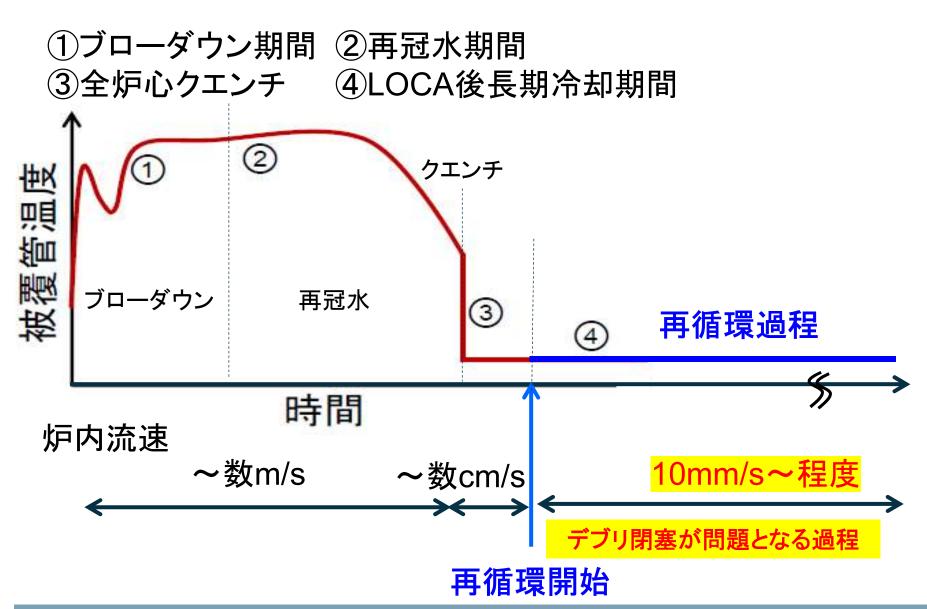
1. 背景

1. 背景(1/3) -サンプスクリーン下流側影響の概要-

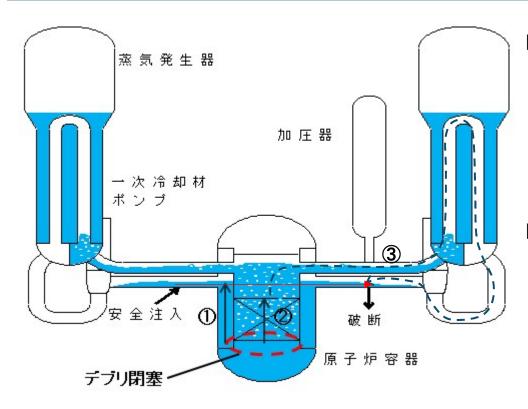
★三菱重工



1. 背景(2/3) 大LOCA時の被覆管温度&炉内流速の挙動 ♣三菱重工



1. 背景(3/3) -再循環モード RV内流動 低温側配管大破断の例- ♣三菱重工



■ 流動の特徴:

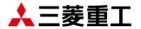
- ▶ 低温配管から冷却材を注水
- → 一部は炉心をバイパスし、破断口(低温 配管)から流出
- ▶ 残りは炉内の蒸散による水位の低下 の補給にあてがわれる

■ 炉内の流況:

- ▶ 蒸散による水位低下:
 - ~約10mm/s
- ▶ 炉心入口部の流速:
 - ~約10mm/s(蒸散分を補給)
- ➤ 上記からRV内水位に変化なし

- 炉心への冷却材供給の駆動力
 - ▶ ダウンカマと炉心の水頭差が駆動力となる:約20kPa (1) 2 3)
 - 一 炉心有効長下端より上のダウンカマ水頭(①)
 - ー ボイドを含む炉心有効長における水頭(②)
 - ー 炉心発生蒸気によるループ圧損(③:炉心出口からSGを経由し蒸気が破断口から流出)
- クライテリア: デブリによる炉心圧損増加(@炉心入口流速10mm/s程度) < 約20kPa* *高温側配管大破断では許容圧損は約100kPa以上に増加。

先行する米国(PWR)での取り組み



解析及び試験による(繊維)デブリ発生源量に対する制限による長期の炉心冷却性確保

RV内熱流動解析

(炉心入口部でのデブリ付着による圧損増加又は断 面閉塞割合仮定) CLB.HLB(大LOCA)を解析。

デブリ投入流水試験

(燃料及び代替流路へのデブリ投入による圧損増 加量や閉塞割合をデブリ投入量を増加させて測定) CV内のデブリ発生源の制限

(繊維デブリの発生源としての 配管保温材(繊維)の量を制限

決定論的アプローチの2つのオプション

解析は再循環開始直後にデブリが炉心に到達し、付着・圧損増加を仮定

オプション1:

再循環開始直後から非化学デブリに加 え化学析出物が炉心に付着し圧損が最 初から急増すると仮定

オプション2(2a) ⇒ 国内PWRの選択

再循環開始直後は非化学デブリのみ、 炉心の水温が低下した後に化学析出物 が炉心に付着し圧損が急増すると仮定

炉内への冷却は 炉心入口部のみを考慮。

炉内への冷却は2段階で考慮:

- ・化学デブリ析出前は炉心入口部
- ・化学デブリ析出後は代替流路*

(*バレル-バッフル(BB)間流路) BB間は大きな流路孔が複数あり。また再循環開始直後



2. 全体計画

2. 全体計画

▲三菱重工

評価シナリオと研究の概要

再循環(前半):

非化学デブリで炉心入口が一部閉塞するが、必要流量(10mm/s程度)を確保

<u>再循環(後半):</u>

化学デブリ析出により炉心入口は全面 閉塞するが、代替流路(バレル-バッフ ル間流路: AFP)により必要流量を確保

LOCA解析:流路が一部閉塞(99.5%相当)でも、上記シナリオ成立することを確認

基礎試験1:下部ノズル流路を簡易模擬

基礎試験2:下部ノズル2体模擬

基礎試験3:下部ノズル+下部グリッド 2体模擬

(2019年度 秋の大会)

燃料集合体2体を用いた流動試験

比較

1/4下部ノズル試験

基礎試験:B/B板孔を簡易模擬

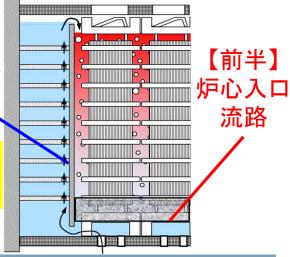
(2018年度 秋の大会)

B/Bを模擬した流動試験

(次年度予定)

【後半】 B/B部流路

(今年度 秋の大会) (一部次年度予定)



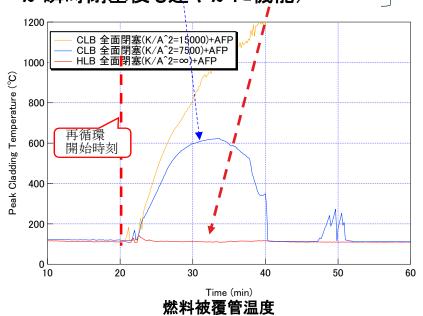
2. 全体計画 【参考】代替流路(AFP)の有効性 (解析結果例)

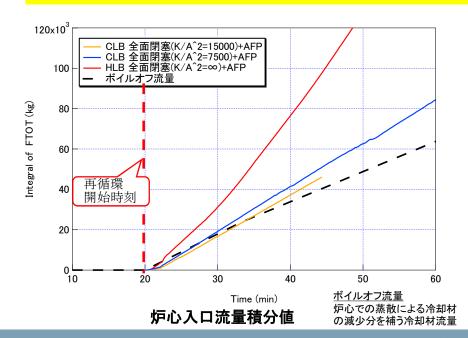
★三菱重工

- 入口圧損が瞬時に増加すると仮定
- ➤ CLB:圧損増加の程度によってAFPによる炉心への冷却材供給に時間を要する場合がある
 - --全面閉塞で圧損増加で温度上昇
- ➤ HLB:圧損増加の程度に依らずAFPによる炉心への冷却材供給が可能
 - --全面閉塞&圧損∞でも温度は上昇しない。 ない。(バレル-バッフルの代替流路冷却が瞬時閉塞後も速やかに機能)



デブリ付着時の炉心の通水性要求はCLBの化学析出前



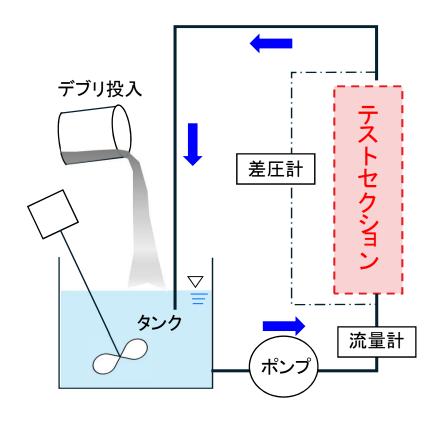


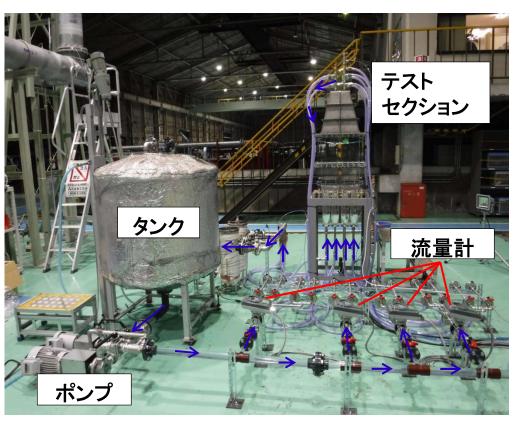
3. 基礎試験

- 概要 -

目的:

- ▶ 非化学デブリを投入した場合における燃料集合体各部の閉塞状況を部分的に確認
- ➤ 試験パラメータに対する感度確認





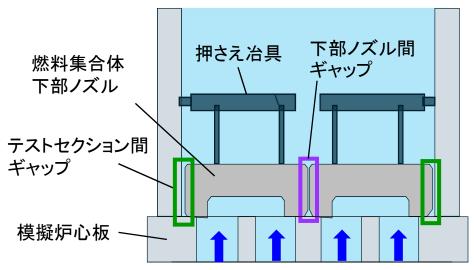
試験装置概略図

供試体外観

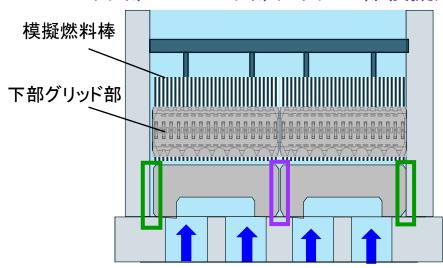
3. 基礎試験 -試験装置(テストセクション)-

▲三菱重工

基**礎試験2** (下部ノズル2体模擬)



基礎試験3 (下部ノズル+下部グリッド2体模擬)



【試験条件】

•流量: 炉心流速約10~30mm/s(CLB条件)

•温度、圧力 :常温、常圧

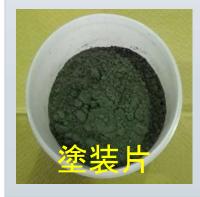
・デブリ条件 :国内代表プラントのデブリ濃度を基準として投入

種類	濃度(kg/m³)		
繊維デブリ	約0.4		
粒子デブリ	約1.2		

〇繊維デブリ



○粒子デブリ







3. 基礎試験

•下部ノズル2体(2019年度成果)

目的:

- ▶ 下部ノズルへのデブリ影響を確認
- ▶ 下部ノズル、下部ノズル・テストセクションのギャップをパラメータとした試験を実施

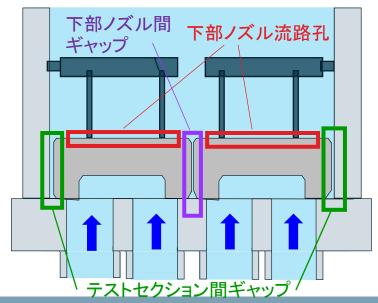
3. 基礎試験:下部ノズル2体-試験条件-

▲三菱重工

【試験ケース】

- ▶ 下部ノズルへのデブリ影響を確認
- ▶ 下部ノズル、下部ノズル-テストセクションのギャップをパラメータとした試験を実施

ケース No.	下部ノズル間 ギャップ	下部ノズル流路孔	テストセクション間 ギャップ	体系	P/F (粒子デブリ量 /繊維デブリ量)	
1	Open	Close	Close			
2	Open	Open Close		下部ノズル	約3 (国内プラント相当)	
3	Open	Close	Open (2体)			
4	Open	Open	Open			





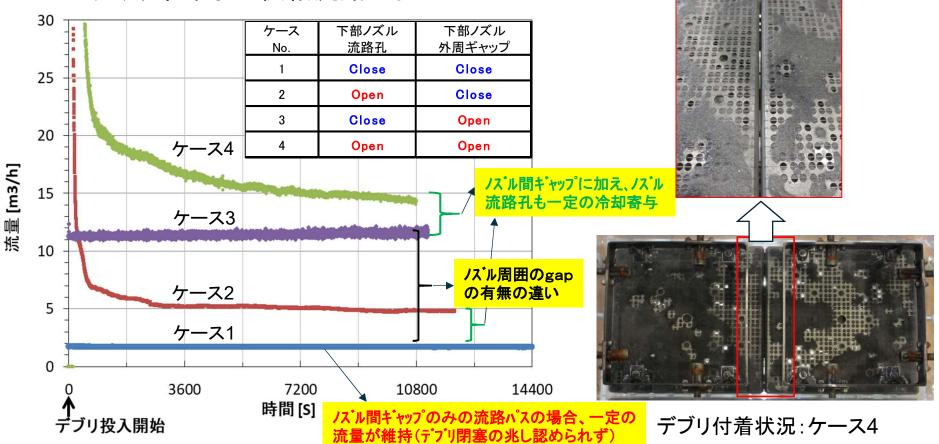
供試体外観

(2019年度成果)

▶ ケース1、ケース3:下部ノズル間ギャップが閉塞せず、デブリ投入開始から 終了まで一定の流量が確保された

▶ ケース2、ケース4:ギャップ部に加え、下部ノズル流路孔の一部が開口し

ており、冷却水の供給流路となった



デブリ付着状況:ケース4

(2019年度成果)

3. 基礎試験

・下部ノズル+下部グリッド2体

目的:

- ▶ 下部ノズルに加え、グリッド部へのデブリ付着状況を確認
- ➤ 粒子デブリと繊維デブリの重量比(/P/F比)を変えて感度 を確認

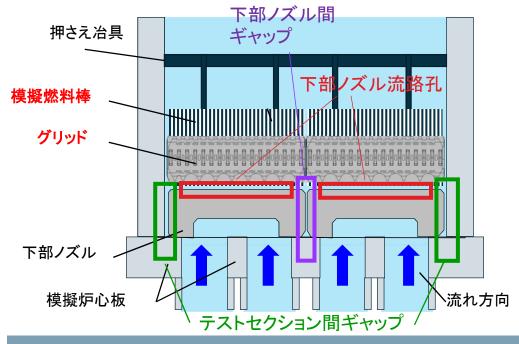
3. 基礎試験:下部ノズル+下部グリッド2体-試験条件-

▲三菱重工

【試験ケース】

- ▶ 下部ノズルに加え、グリッド部(+(短尺)燃料棒)へのデブリ付着状況を確認
- ➤ 粒子デブリと繊維デブリの重量比(P/F比)を変えて感度を確認

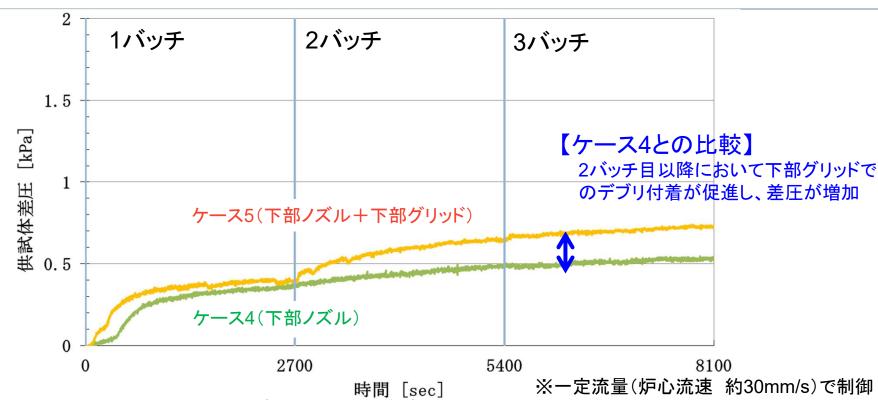
ケース No.	下部ノズル間 ギャップ	下部ノズル 流路孔	テストセクション間 ギャップ	体系	P/F (粒子デブリ量/繊維デブリ量)
5	Open	Open	Open	下部ノズル	約3
6	Open	Open	Open	+下部グリッド(2体)	約10





供試体外観

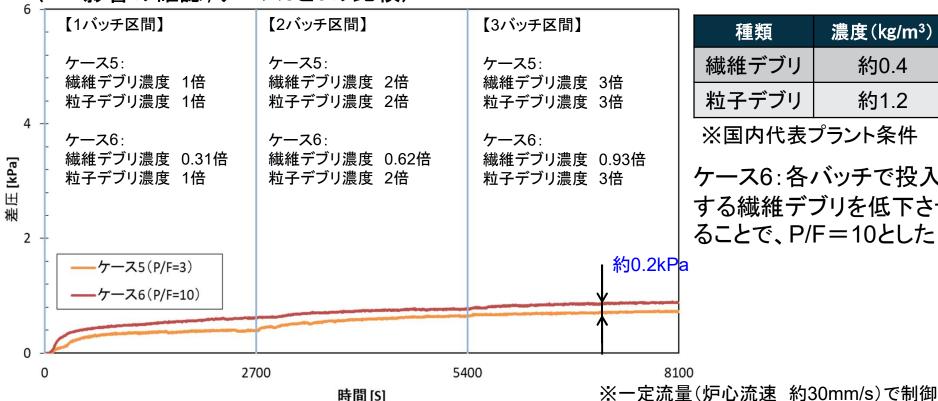
3. 基礎試験:下部ノズル+下部グリッド2体−試験結果(1/3)- ▲三菱重工



- ▶ ケース5はケース4に比べ、グリッドへのデブリ付着に相当する分の差圧増加が見られた
- ▶ しかしながら、ケース5における差圧増加量は1kPa以下
- > 詳細な付着状況は下記の通り
 - ✓ 下部ノズル間ギャップ: 非化学デブリを投入しても閉塞なし
 - ✓ 下部グリッド間ギャップ: グリッドストラップの凹凸にデブリが捕捉されギャップの大半が閉塞
 - ✓ 下部グリッド内部:
 - デブリ投入直後、グリッド内部の流路の一部が閉塞
 - 閉塞の進行に伴いグリッド内部の流速が増加
 - 流速増加により流路にデブリが捕捉されにくくなる(一定の流路が確保される)

3. 基礎試験:下部ノズル+下部グリッド2体−試験結果(2/3)- ♣三菱重工

(P/F影響の確認:ケース5と6の比較)



種類	濃度(kg/m³)
繊維デブリ	約0.4
粒子デブリ	約1.2

※国内代表プラント条件

ケース6:各バッチで投入 する繊維デブリを低下させ ることで、P/F=10とした

- 差圧はP/F=10(ケース6)>P/F=3(ケース5)であるが、その差は高々0.2kPa
- 本試験の性質上、デブリの作成・投入等を同一条件で試験したとしてもデブリの堆積状況は試験ごと に異なり、差圧の測定結果は試験毎にある程度バラつきが生じると考えられる。
- 上記のことを勘案し、今回の試験結果はケース間で差圧が僅かに異なっているものの両者は不確か さの範囲で一致しており、本試験体系におけるP/Fの影響は軽微と判断できる。

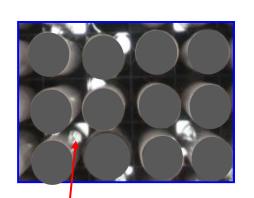
3. 基礎試験:下部ノズル+下部グリッド2体−試験結果(3/3)- ★三菱重工

デブリ付着状況

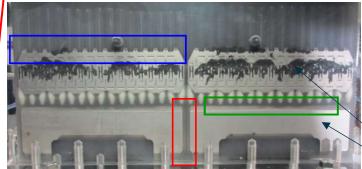
<u>ケース5</u>

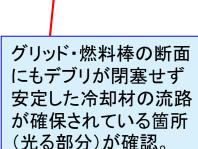
【試験終了後の試験体観察】

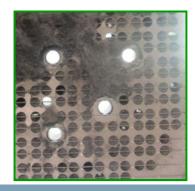
<u>ケース6</u>

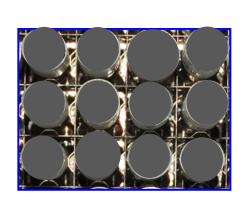




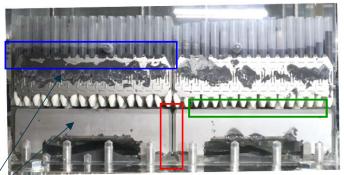












ノズル側面はデブリ 付着が有意でないが、 グリッド側面はデブリ 付着が確認される。



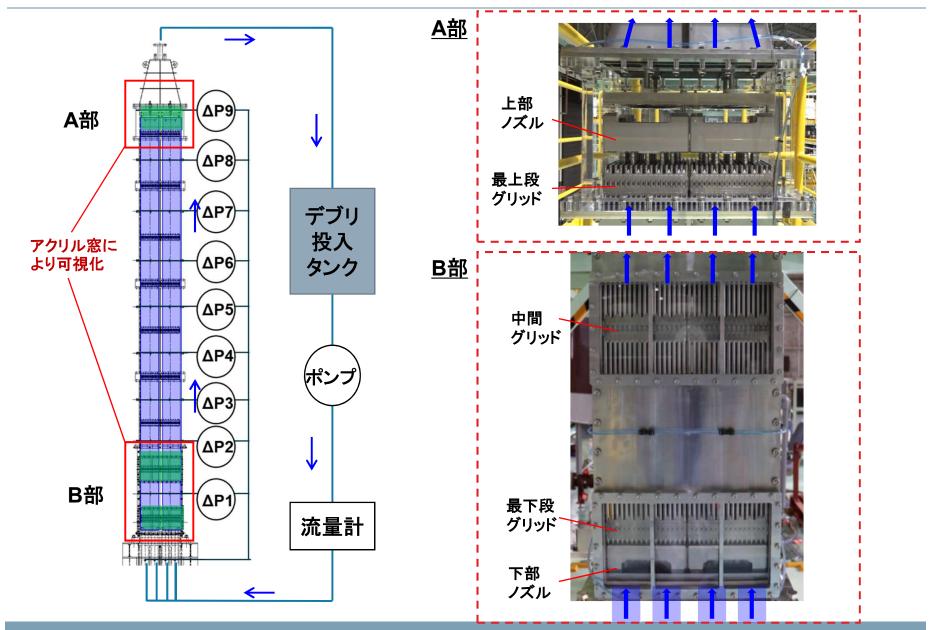
4. 燃料集合体2体を用いた流動試験

目的:

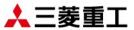
- ➤ 実寸大の燃料集合体2体を並べ、CLB時の流速(約 10mm/s)にて非化学デブリを投入
- ▶ 非化学デブリを投入しても燃料集合体内に安定した流路パスが確保され、許容圧力損失 20kPa以下となることを確認

4. 燃料集合体2体を用いた流動試験 -試験装置-

▲三菱重工



4. 燃料集合体2体を用いた流動試験 -試験条件-



【試験条件】

·流量:炉心流速 約10mm/s(CLB再循環時流速条件)

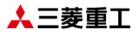
•温度、圧力:常温、常圧

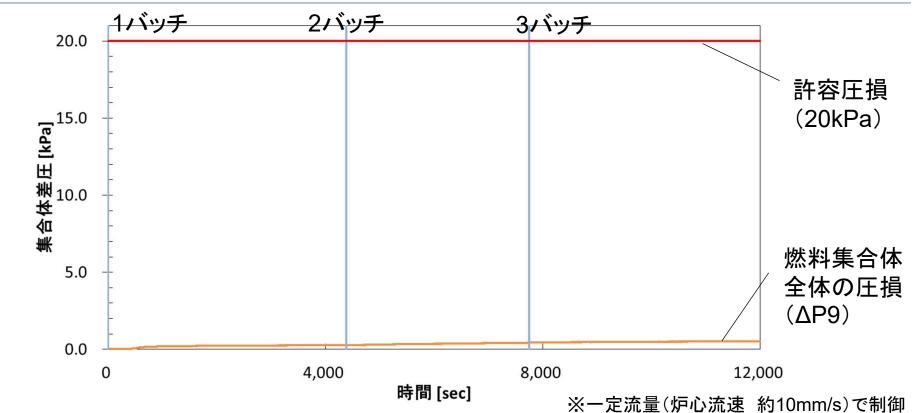
・デブリ条件 :国内代表プラントのデブリ総量(濃度)を投入

種類	デブリ総量	濃度
繊維デブリ (ロックウール)	約1.6 kg/FA	約0.4 kg/m ³
粒子デブリ (塗装、潜在粒子、 ケイ酸カルシウム)	約4.9 kg/FA	約1.2 kg/m ³

※P/F(粒子デブリ量/繊維デブリ量)=3

4. 燃料集合体2体を用いた流動試験 -試験結果(1/3)-

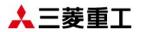


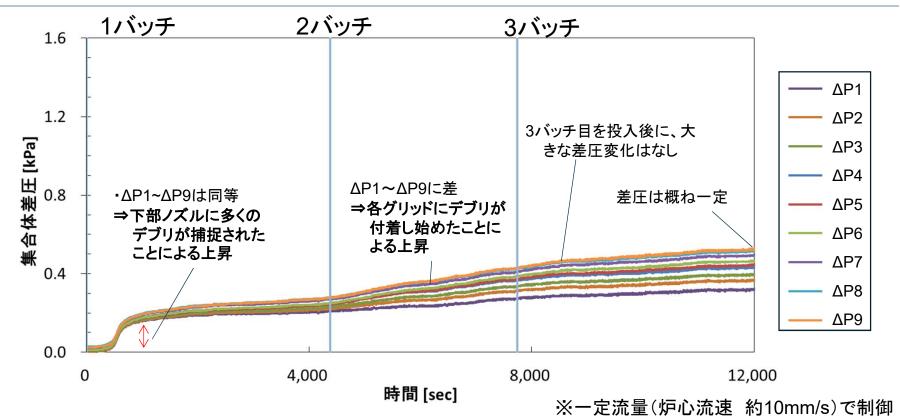


- 燃料集合体間の差圧は最大で約0.6kPa
- CLB時の許容圧力損失(約20kPa)に対して十分な余裕あり
- 燃料集合体内に安定した流路パスが確保されることを確認
- ・ 所定のデブリ量投入後、流速を増加(10→40mm/s)させ圧損が流量にほぼ比例することを確認。

クライテリア : 炉心の流路圧損(@炉心入口流速10mm/s程度) < 約20kPa

4. 燃料集合体2体を用いた流動試験 -試験結果(2/3)-

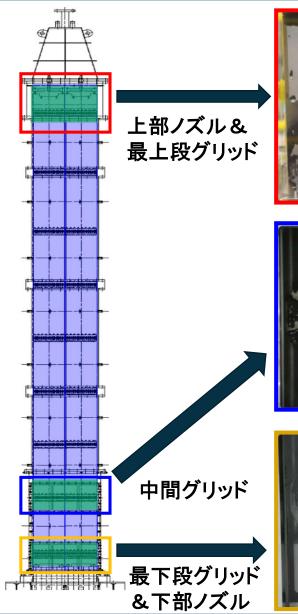


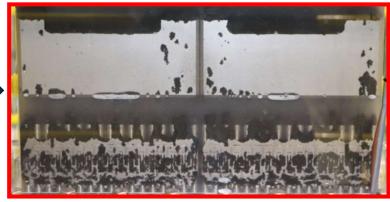


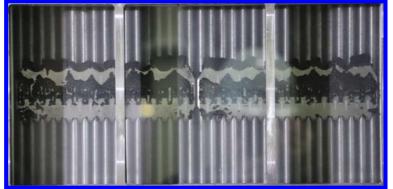
- 燃料集合体間の差圧は最大で約0.6kPa
- CLB時の許容圧力損失(約20kPa)に対して十分な余裕あり
- 燃料集合体内に安定した流路パスが確保されることを確認
- ・ 所定のデブリ量投入後、流速を増加(10→40mm/s)させ圧損が流量にほぼ比例することを確認。

クライテリア : 炉心の流路圧損(@炉心入口流速10mm/s程度) < 約20kPa

4. 燃料集合体2体を用いた流動試験 -試験結果(3/3)- ♣三菱重工







上部ノズルまでデブリ は到達するが閉塞なし

デブリの付着による圧 損増加は燃料集合体 下部で認められ、上半 分での増加は僅か。

グリッド間ギャップは大部分で閉塞するが、コーナー部での閉塞はなし

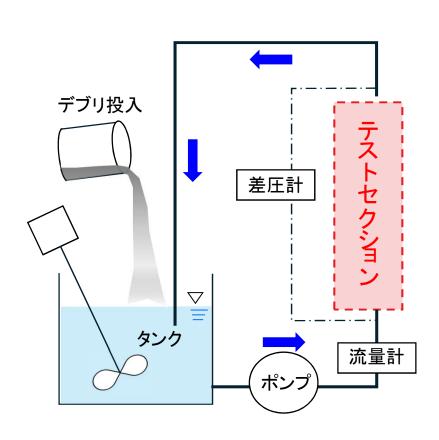


下部ノズル間ギャップは、部分的にデブリが付着するが閉塞なし (付着・剥離の繰り返し)

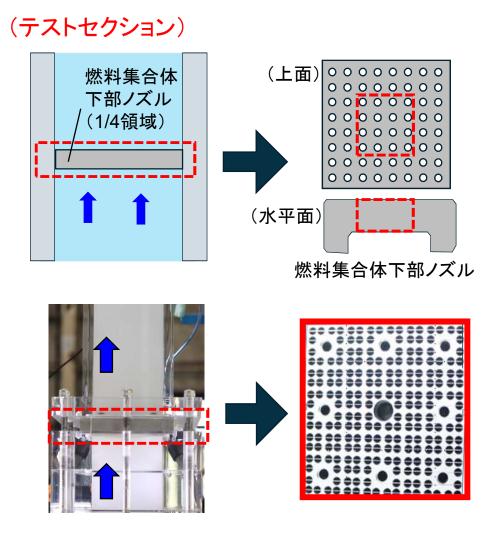
5. 1/4下部ノズル試験

目的:

- ▶ 下部ノズルアダプタープレート部に対するデブリ付着状況 を国内と異なる試験体系にて確認。
- ▶ 1/4断面は米国PWROGでオプション2aによる繊維デブリ制限量を設定した際の試験体系と考えられ、国内で進めてきた2体断面体系との相違を明確にする。



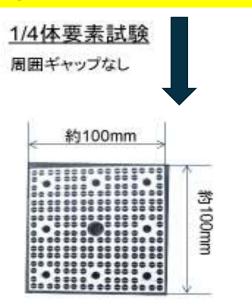
試験ループ概略図



供試体(写真)

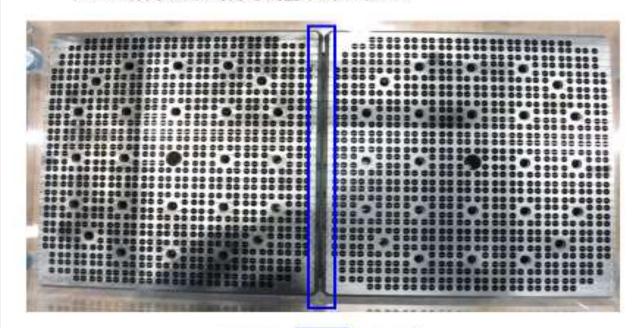
国内2体試験体系と比較してデブリ投入後の安定した冷却流路パスが確保されにくいと予想。

- ①ノズル間ギャップ、試験体周囲(試験容器との)ギャップが存在しない。
- ②スケール効果:断面が小さいため、デブリがノズル断面一様に付着し流路パスが確保されにくい。



2体要素試験

ノズル2体間ギャップおよび周囲ギャップは1mm



さらに2体試験では下部ノス・ルの直下に設置した下部炉心板の流路孔(4孔/集合体)を通過したデブリが下部ノス・ルに分布をもって到達するものと予想。



【試験条件】

流量 : 炉心流速約10~30mm/s(CLB条件)

•温度、圧力:常温、常圧

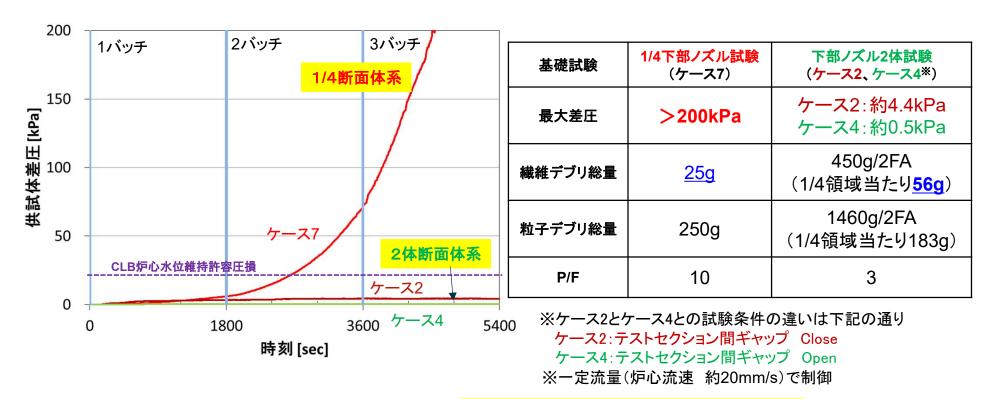
・デブリ条件:繊維デブリ濃度:0.04kg/m3(繊維デブリ総量: 25g)

粒子デブリ濃度:0.4 kg/m³(粒子デブリ総量:250g)

【試験ケース】

▶ 下部ノズルアダプタープレート部に対するデブリ付着状況を確認

ケース No.	下部ノズル間ギャップ	下部ノズル流路孔	テストセクション 間ギャップ	体系	P/F (粒子デブリ量/繊維デブリ量)
7	なし	Open	Close	下部ノズル 1/4領域	約10



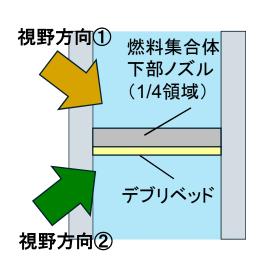
予想通り、デブリ投入に伴う圧損増加は 1/4断面体系 >> 2体断面体系 となった。

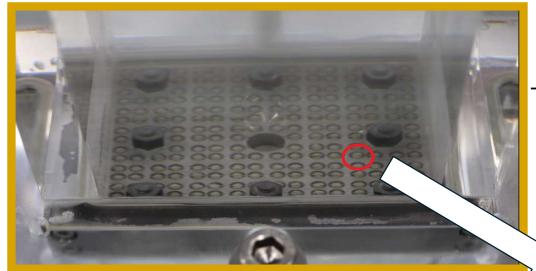
- ▶ 1/4下部ノズル体系では一様な流れによりデブリが運ばれ、下部ノズルの下面に一様な デブリベットが形成
- > 供試体間の差圧が大幅に上昇(最終的に装置の耐圧限界200kPaに到達)
- ▶ 一方、基礎試験ケース2、4(下部ノズル2体体系)においては下部ノズル間ギャップをデブリが通過するため、圧損増加は1kPa以下

5. 1/4下部ノズル試験-試験結果(2/2)-

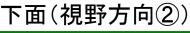
★三菱重工

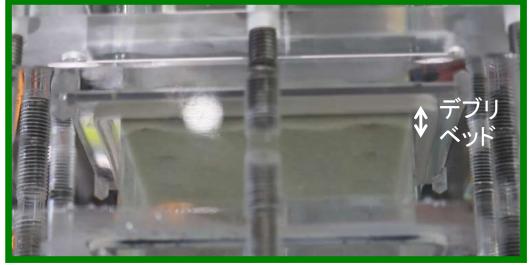
上面(視野方向①)





下部ノズル流路孔内 のデブリベッド





〇炉心入口部に対するパラメータ感度の把握

- ▶ 基礎試験(下部ノズル+下部グリッドからなる2体体系)により 下記の非化学デブリの性状の違いに対する感度を把握
 - ・ 繊維デブリと粒子デブリの重量比(P/F比)
 - ・粒子デブリの粒子径、他

〇代替流路(バレル-バッフル流路)に関する流動試験

- ▶ 化学デブリが析出後、代替流路(バレル-バッフル流路)により冷却材を供給できることを確認する必要がある
- ▶ 部分モデル試験ではバレル・バッフル流路の大きな流路孔に おいて化学デブリは閉塞せず通過することを確認済み。
- > 今後、より詳細な流動試験を実施予定

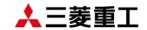
- ▶ 昨年度(秋の大会)に引き続き、再循環開始直後(非化学デブリ)における炉心入口部のデブリに対する通水性能を検討
- ▶ 実機品(下部ノズル+下部グリッド)を用いた基礎試験により、非 化学デブリを投入した際の炉心入口部の閉塞状況、及び試験パ ラメータに対する感度を確認
- ▶ また、実寸の燃料集合体を用いた試験により非化学デブリを投入しても燃料集合体内に安定した流路パスが確保され、圧損増加が許容値(20kPa)を大きく下回ることを確認した
- 今後、化学デブリが析出後において代替流路(バレル-バッフル 流路)が冷却材を供給に有効であることを確認するために流動 試験を実施予定

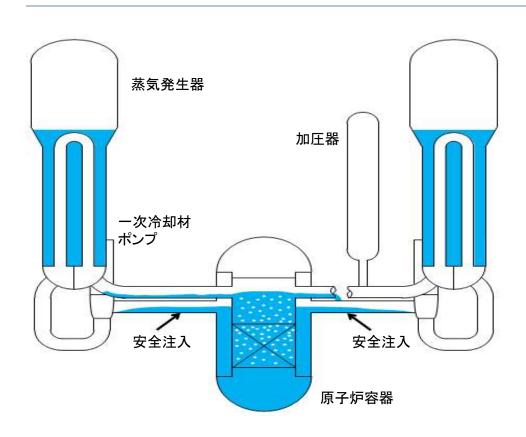
MOVE THE WORLD FORW➤RD

MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES GROUP

【参考】全体計画 補足 再循環モード RV内流動 高温側配管大破断の例

【参考】再循環モード RV内流動 高温側配管大破断の例





- 流動の特徴:高温側配管破断
- 低温配管からの注水はすべて炉心を経由して
 - そのまま破断口(高温配管)から 流出(液放出)し、
 - ・余剰分(ECCS注入量が蒸散補給を 上回る分)が健全ループをRCP側に 逆流し出口配管へ溜まる。
- 炉内の流況:低温配管破断と同じ
 - ・蒸散による水位低下:
 - ~約10mm/s程度
 - ・炉心入口部の流速

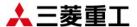
~注入流量に対応 (30mm/s~程度)

⇒余剰分は破断口から液放出

- 炉内への補給となる駆動力(水頭差):
- ・炉心有効長下端より上のダウンカマ水頭(①) ー ボイドを含む炉心有効長における水頭(②)

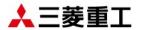
水頭差 : 低温配管破断よりも大きく、炉心を冠水させている水位を低下させないため

の水頭差減少の余裕(デブリ閉塞上限量の目安)も大きくなる方向。

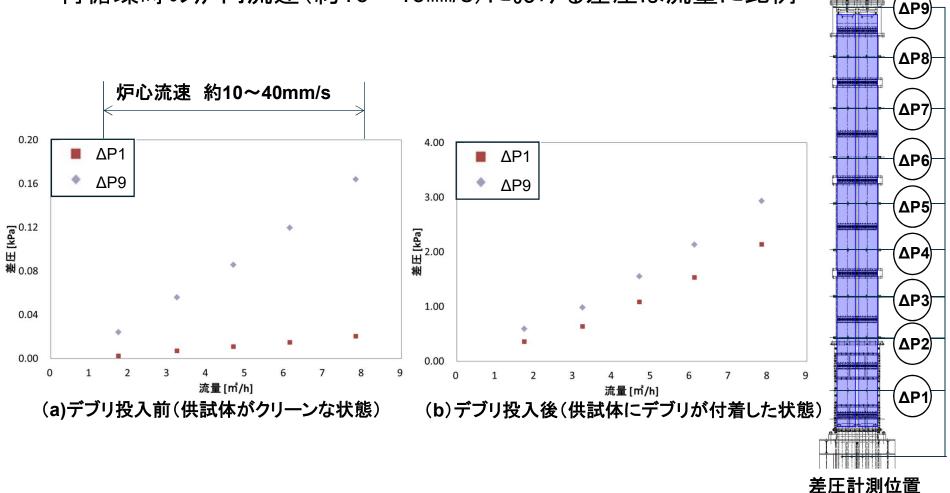


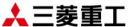
【参考】燃料集合体2体を用いた流動試験 補足 差圧-流量の関係 (デブリ付着前後における感度確認)

差圧-流量の関係(デブリ投入前後)

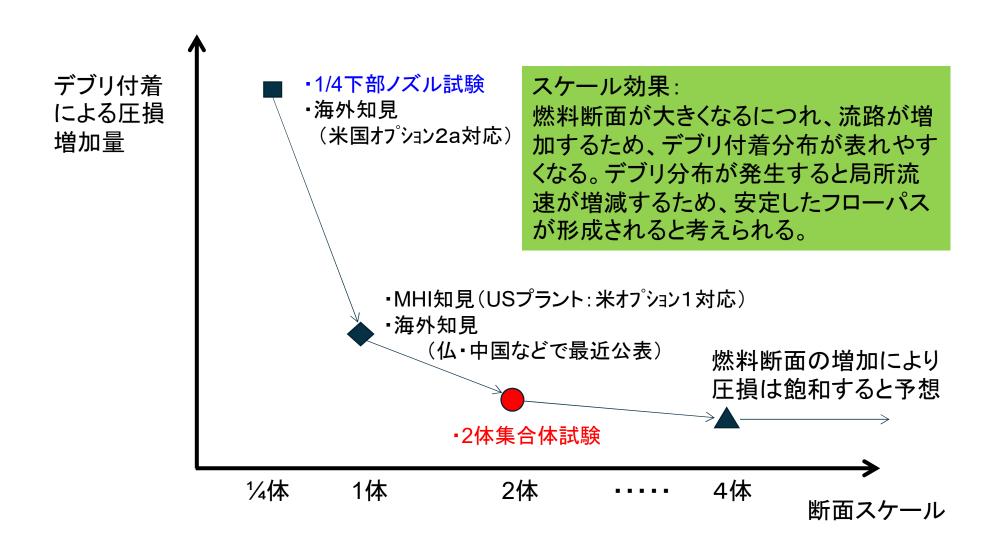


- デブリ投入前(供試体がクリーンな状態)及びデブリ投入後(供試体にデブリが付着した状態)において流量を変化させ差圧を計測
- 再循環時の炉内流速(約10~40mm/s)における差圧は流量に比例





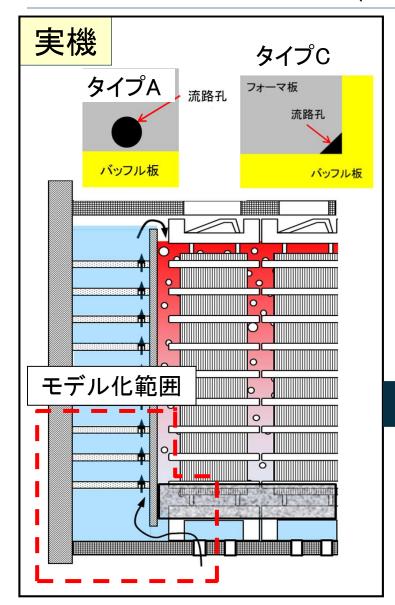
【参考】燃料集合体2体を用いた流動試験 補足 差圧-試験体系の関係

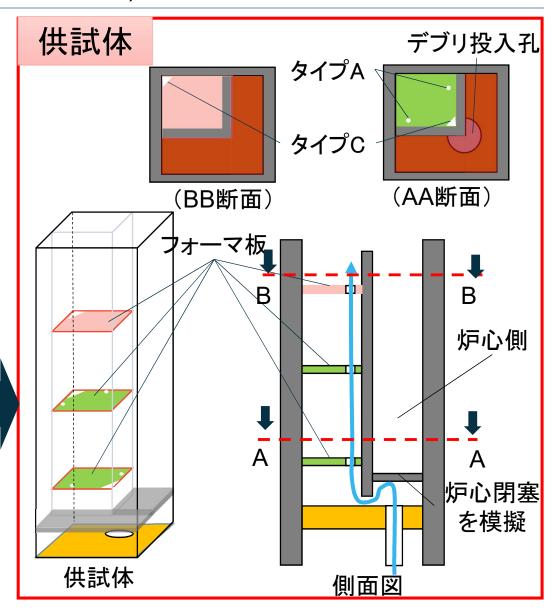


【参考】今後の計画 補足 バレル/バッフル試験 (基礎試験 2018年度成果)

【参考】基礎試験-BB試験(2018年度成果) (1/3)

▲三菱重工







供試体の外観(写真)



〇試験条件

•流量: 一定圧力(800mmH₂O)で制御

・デブリ濃度:実機デブリ濃度の約2倍

種類		濃度(kg/m³)
繊維デブリ	ロックウール	約0.75
粒子デブリ	塗装片	約1.9
	ケイ酸カルシウム	約0.2
	潜在粒子	約0.2
<u>化学デブリ</u>	水酸化アルミニウム	<u>約0.9</u>

〇計測項目:流量

デブリ投入口

○試験結果

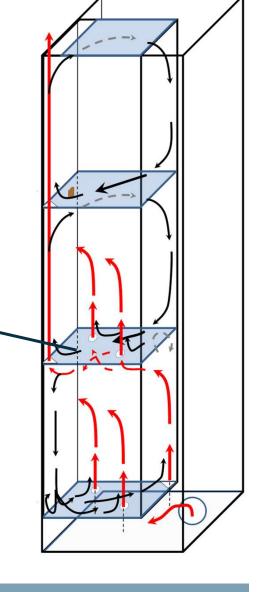
フォーマ板にデブリが堆積するものの流路孔の閉塞は見られず一定の流量が確保された

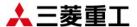


供試体の外観写真 (試験中)



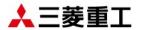
堆積デブリ (水抜き後)

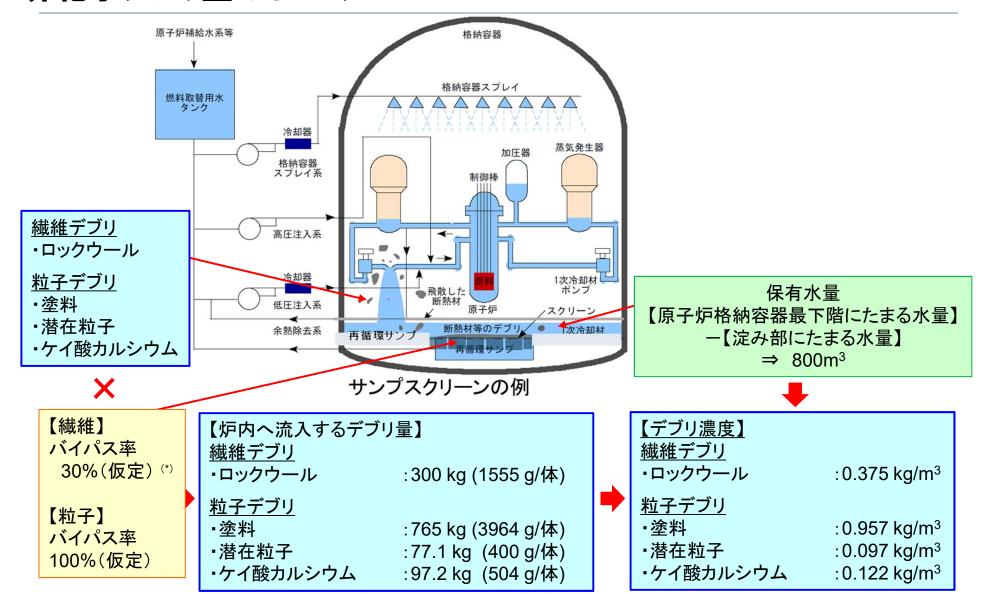




【参考】試験条件 補足 非化学デブリ量のイメージ

非化学デブリ量のイメージ





(*) 繊維デブリについては、過去の社内試験より仮定。