

---

# サンプスクリーン下流側炉内影響 LOCA後の炉心長期冷却に係る検討

国内PWRにおける検討状況

関西電力(株)、北海道電力(株)、四国電力(株)、九州電力(株)  
日本原子力発電(株)、三菱重工業(株)

2022年10月11日

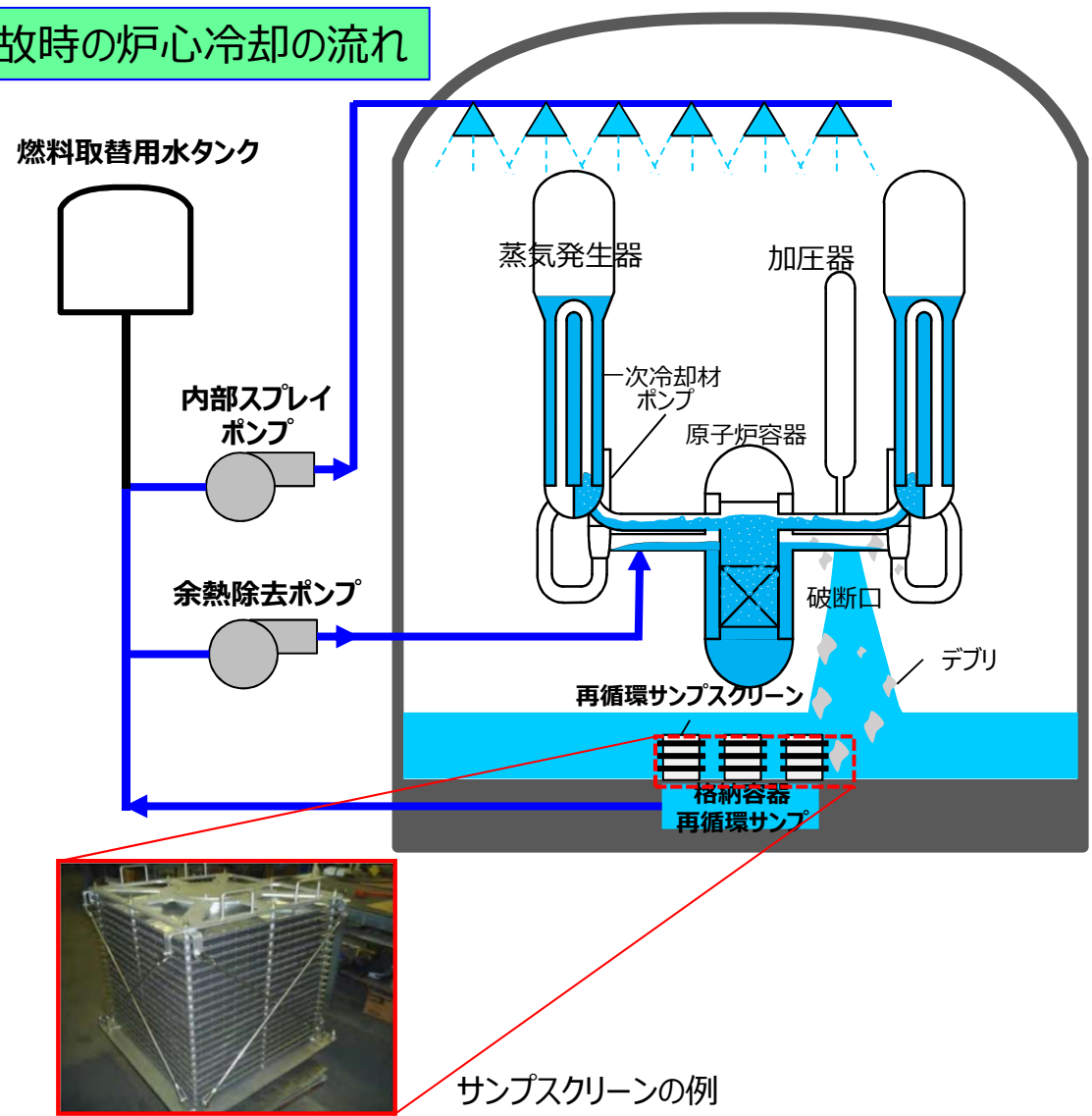
---

- 
1. 背景
  2. 全体計画
  3. 実現象と評価シナリオへの展開
  4. 流動試験（解析の前提・入力の妥当性確認）
  5. 熱流動解析
  6. 評価に含まれる保守性
  7. まとめ
-

# 1. 背景

# 1. 背景 (1/4) - サンプスクリーン下流側影響の概要 -

## 事故時の炉心冷却の流れ



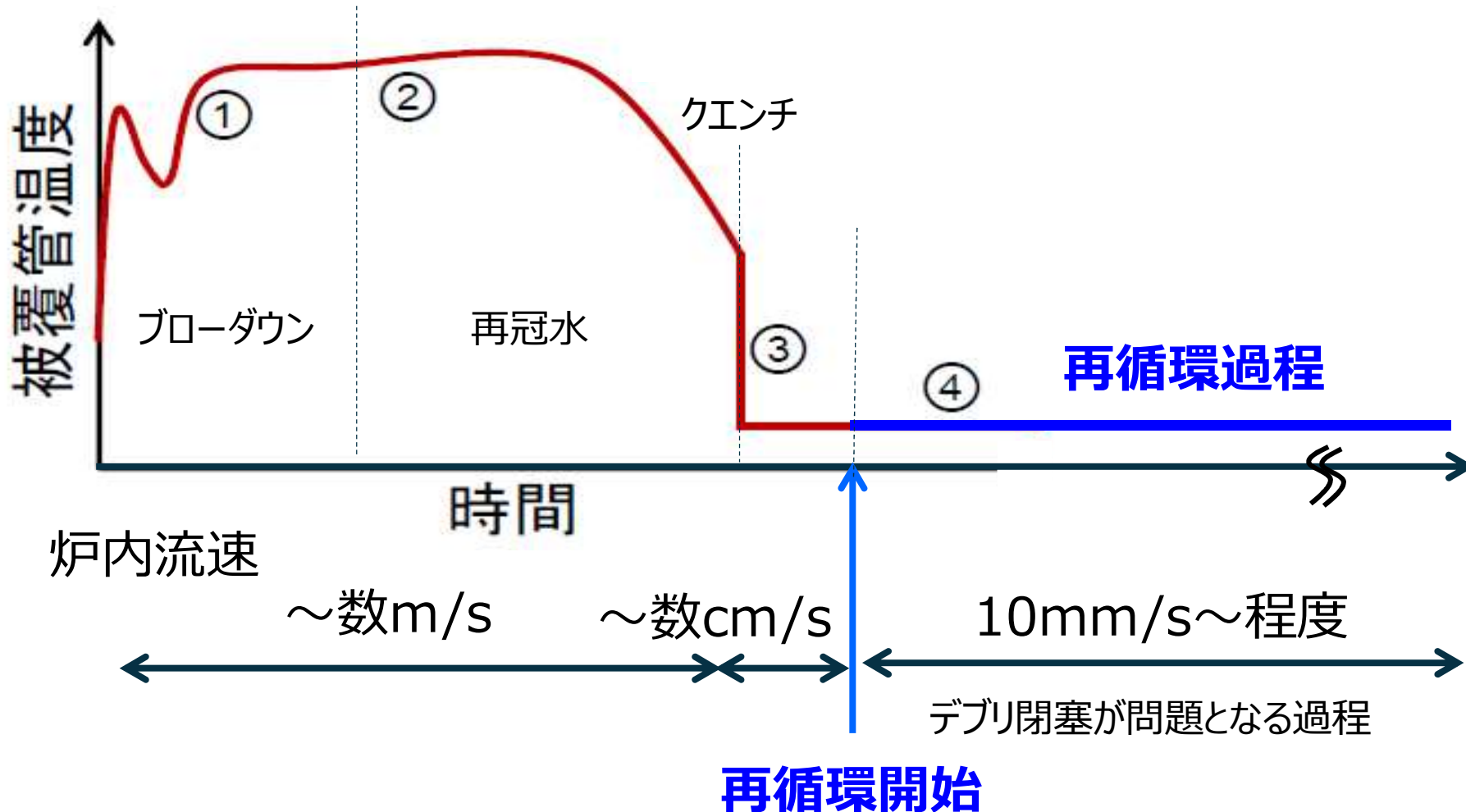
一次系配管破断 (LOCA) 発生

- 炉心露出 → 炉心崩壊熱除去性能低下
- 格納容器内の内圧上昇・温度上昇
- ECCS設備作動 → 炉心冷却のための冷却材供給
- CVスプレイ作動
- 一次系注入のECCS水、CV内スプレイ水が再循環サンプへ
- 配管破断に伴う保温材等がデブリとなって再循環サンプへ
- サンプスクリーンでのデブリの捕捉
- サンプスクリーンを通過したデブリの炉心への流入

**【懸案】炉心入口閉塞による炉心冷却水量の不足**

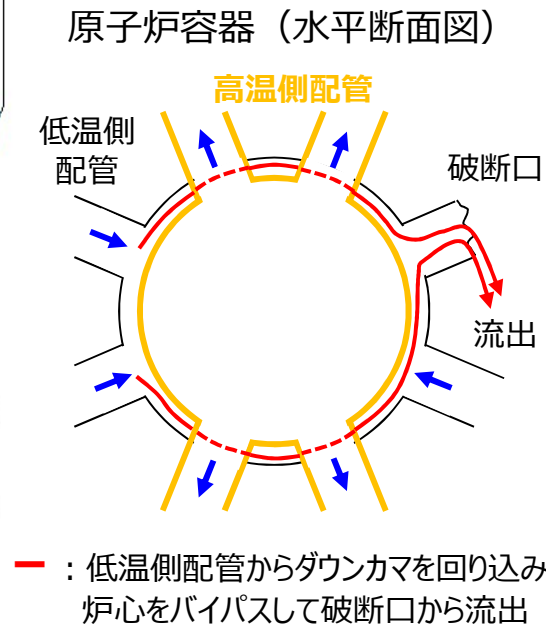
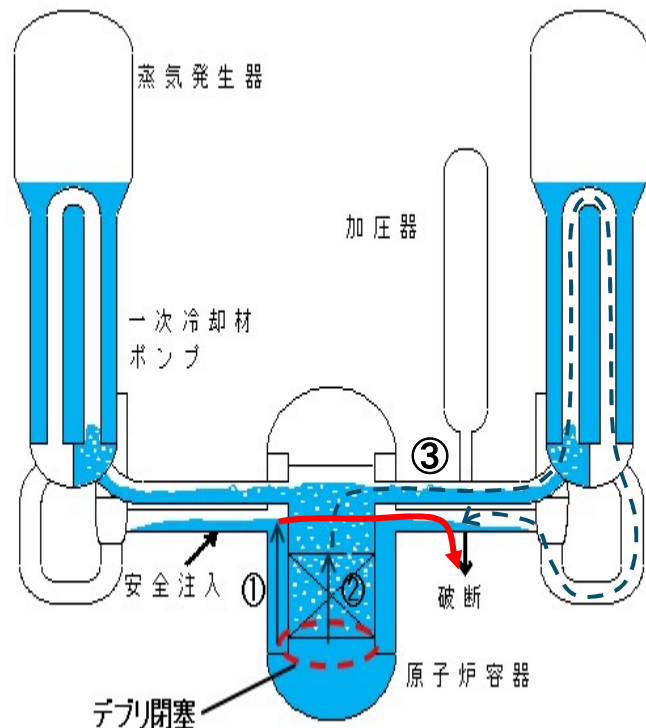
# 1. 背景 (2/4) 大LOCA時の被覆管温度 & 炉内流速の挙動

- ①ブローダウン期間
- ②再冠水期間
- ③全炉心クエンチ
- ④LOCA後長期冷却期間



# 1. 背景 (3/4) 再循環モード RV内流動 -低温側配管大破断(CLB)の例-

5



- 流動の特徴：
  - 低温側配管から冷却材を注水
  - 一部は炉心をバイパスし、破断口（低温側配管）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

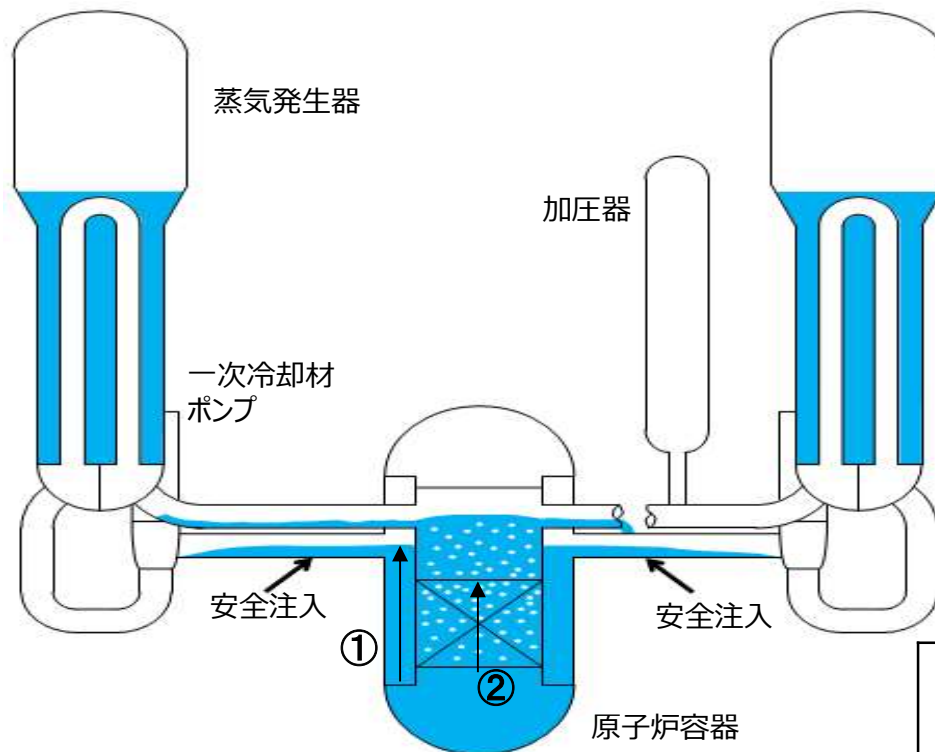
## ■ 炉心への冷却材供給の駆動力

- ダウンカマと炉心の水頭差が駆動力となる：約20kPa（① - ② - ③）
  - 炉心有効長下端より上のダウンカマ水頭（①）
  - ボイドを含む炉心有効長における水頭（②）
  - 炉心発生蒸気によるループ圧損（③：炉心出口からSGを經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。

# 1. 背景 (4/4) 再循環モード RV内流動 -高温側配管大破断(HLB)の例-



- 流動の特徴：
  - 低温側配管からの注水は**すべて炉心を経由して**そのまま破断口（高温側配管）から流出（液放出）する。
- 炉内の流況：低温側配管破断と同じ
  - 蒸散による水位低下：
    - ～約10mm/s
  - 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ム水頭（①）
  - ボイドを含む炉心有効長における水頭（②）

水頭差は低温側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。

	再循環(前半) 化学デブリ析出前	再循環(後半) 化学デブリ析出後
低温側配管破断 (CLB)	バッフルバレル流路のみでは炉心水位低下の可能性 (炉心入口からの一定量の冷却材補給が必要)	バッフルバレル流路のみで炉心水位維持
高温側配管破断 (HLB)	バッフルバレル流路のみで炉心水位維持	バッフルバレル流路のみで炉心水位維持

## 2. 全体計画



## 2. 全体計画（1/3） 先行する米国の状況を踏まえた取り組み

- 再循環サンプスクリンに関する新規規制基準対応時に中長期的な課題として事業者が取り組むとしていた事項のうち、現在検討中の事項は「サンプスクリン下流側影響のLOCA後炉心長期冷却に関する検討」である。
- 炉心長期冷却のシナリオについては、米国と同様に以下を想定。
  - 再循環開始直後は非化学デブリのみ、冷却材温度が低下した後に化学デブリが析出し、炉心入口に付着することで圧損が急増するものと仮定。
  - 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流路
    - － 化学デブリ析出後は代替流路（バッフルバレル流路）
- 本検討については、先行する米国の検討状況を踏まえ、上記シナリオによりRV内熱流動解析を実施。炉心入口流路の大半が閉塞（99.5%相当）しても炉心長期冷却が可能であることを確認。
- 解析の入力条件（炉心閉塞状況）に関して、実機を模擬したデブリ投入流水試験による検証を実施し、問題ないことを確認。

## 2. 全体計画 (2/3) 評価シナリオと検討の概要

9

再循環開始直後～化学デブリ析出前：  
非化学デブリで炉心入口の大半が閉塞するが、必要流量(10mm/s程度)を確保

化学デブリ析出後：  
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（バッフルバレル流路）により必要流量を確保

RV内熱流動解析：炉心入口の大半が閉塞（99.5%相当）しても、炉心冷却が成立することを確認

RV内熱流動解析：炉心入口が全面閉塞しても、炉心冷却が成立することを確認

シナリオが成立する解析の入力条件（炉心閉塞状況）を試験で確認

基礎試験1：下部ノズル流路を部分模擬

基礎試験1：バッフルバレルを部分模擬試験

基礎試験2：下部ノズル2体体系

バッフルバレルを模擬した流動試験

➡ P18参照

基礎試験3：下部ノズル+下部グリッド2体体系

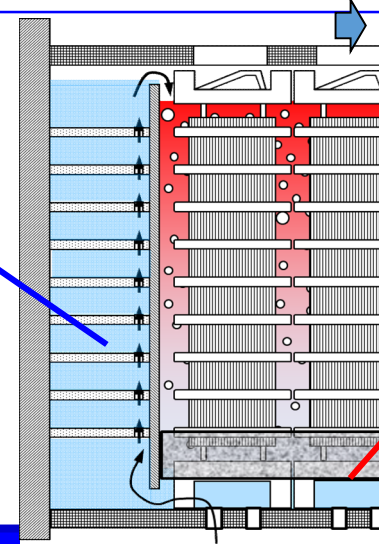
➡ P19参照

フルスケール燃料集合体2体体系試験

➡ P21参照

【後半】  
バッフル  
バレル  
流路

【前半】  
炉心入口  
流路



## 2. 全体計画（3/3） 全体スケジュール

- 化学デブリ析出前、炉心入口から冷却材供給が可能であることを確認するため、燃料集合体2体を用いた流動試験を実施
- 化学デブリ析出後の代替流路の成立性を確認するため、バツフルバレル流路を模擬した流動試験を実施

	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
解析 炉内熱流動	感度解析						● 最終解析 (試験反映)	
試験 デブリ投入	メーカー自社試験							
	基礎試験1 (下部ノズル流路孔 部分模擬試験、 下部ノズル間ギャップ 部分模擬試験)		試験計画策定		基礎試験2 (下部ノズル2体体系試験)		基礎試験3 (下部ノズル+下部グリッド 2体体系試験)	
							基礎試験の拡充 (小規模体系試験)	
					フルスケル集合体試験		フルスケル集合体試験	
	基礎試験1 (バツフルバレル 部分模擬試験)						バツフルバレル流動試験	
							結果取り纏め	

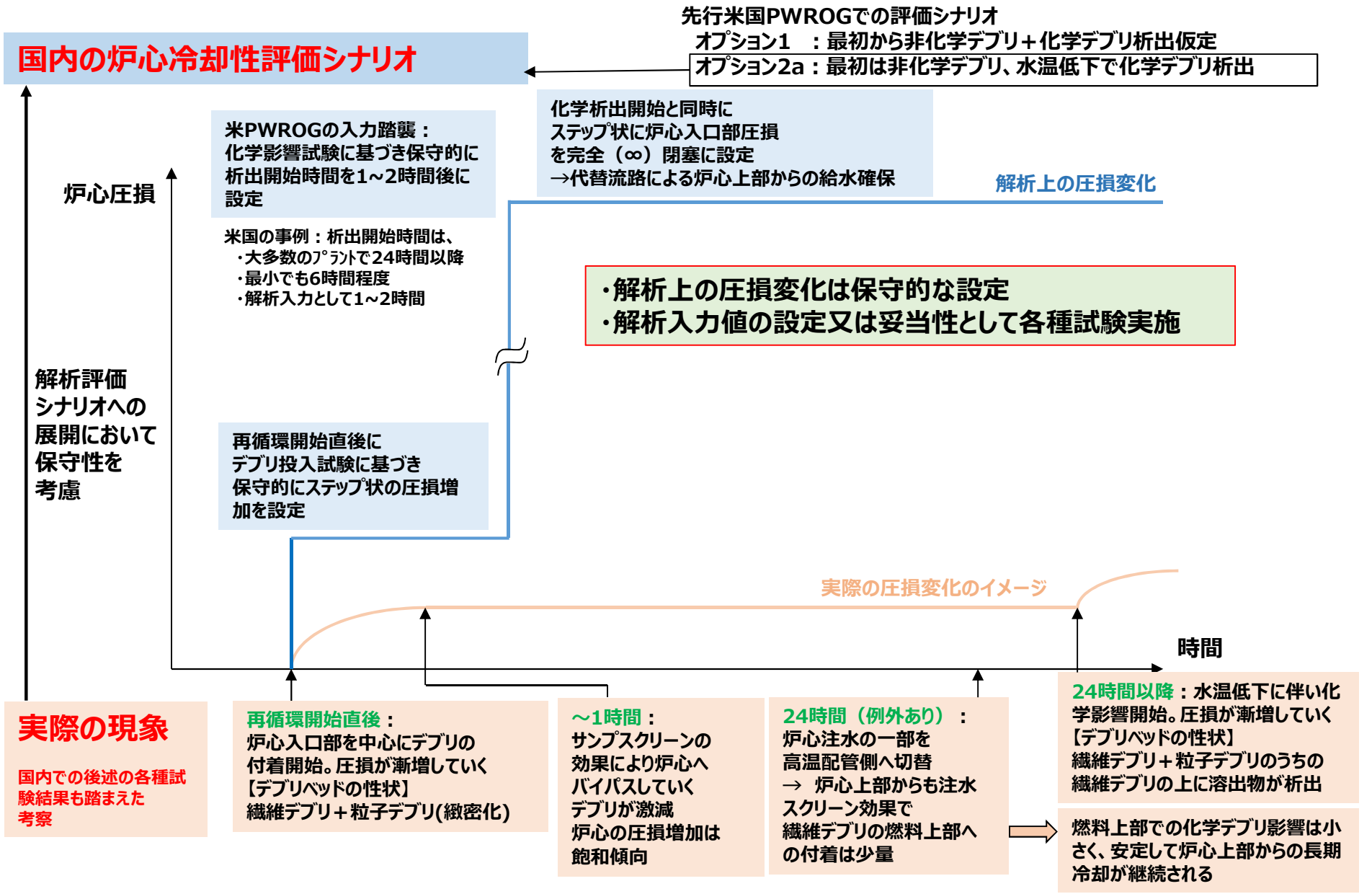
---

### 3. 実現象と評価シナリオへの展開

---

# 3. 実現象と評価シナリオへの展開

-再循環時炉内デブリ閉塞に関する現象と冷却性評価での扱い-



---

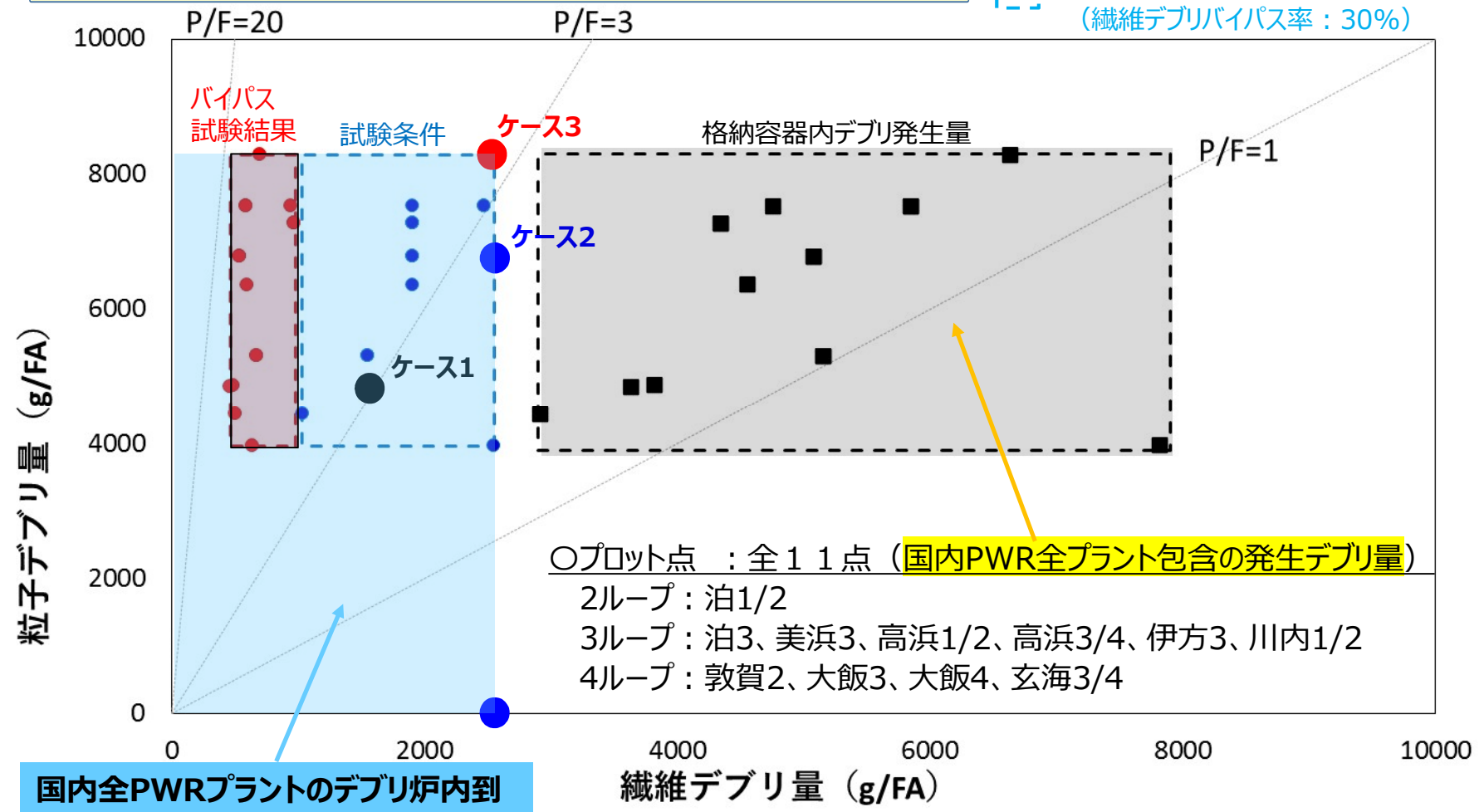
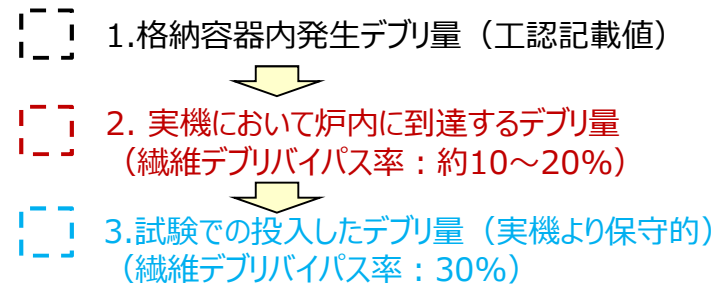
## 4. 流動試験 (解析の前提・入力の妥当性確認)

---

## 4.1 試験条件

# 4.1 試験条件 -非化学デブリ投入量の設定-

- 国内PWR全プラントにおいて格納容器内で発生する繊維/粒子デブリを考慮（工認記載値を使用）
- サンプスクリーンでのバイパス率を試験で評価すると10~20%であり、バイパス20%で設定した繊維デブリ量が炉内に到達する上限
- 試験ではバイパス率30%として投入デブリ量を保守的に設定



国内全PWRプラントのデブリ炉内到達量を包含する範囲



## 4.1 試験条件 —燃料タイプの選定—

### ○17×17燃料（17型燃料）を用いた試験結果（デブリによる圧損増加）の適用性

炉内流動解析において、デブリにより炉心入口部（下部ノズル及び下部グリッド）が99.5%閉塞し、かつ閉塞部で圧損を無限大として冷却水が通水しないと仮定した場合でも、**炉心入口部で0.5%程度の非閉塞部**があれば、炉心はヒートアップせず長期冷却が可能

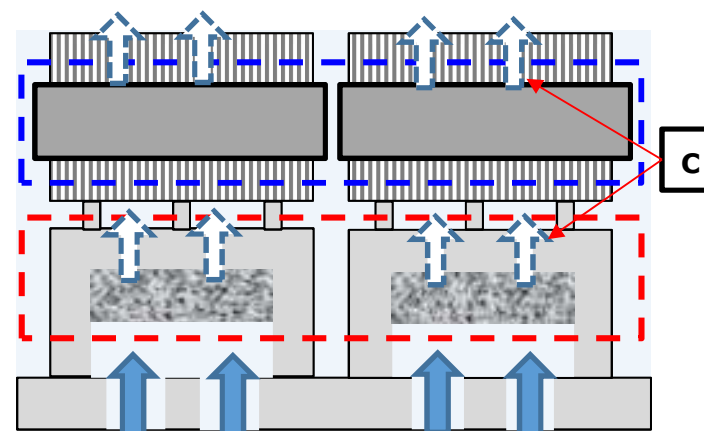
### ○冷却流路が確保される箇所（試験結果より）

- 下部ノズル及びグリッドのコーナー部流路**：デブリは閉塞せず通過  
流路面積：17型燃料 < 15型燃料 < 14型燃料
- 隣接下部ノズル間流路**：デブリは閉塞せず通過  
流路面積：17型燃料 = 15型燃料 < 14型燃料
- 下部ノズル及びグリッド内流路**：デブリは閉塞するが一部通過  
流路面積：17型燃料 < 15型燃料 = 14型燃料

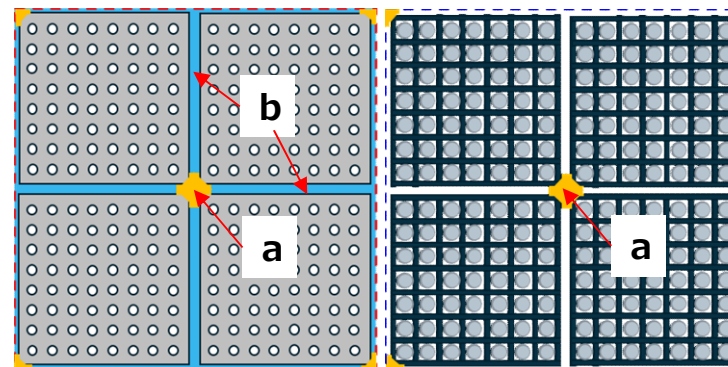
⇒ **17型燃料が最も流路面積が小さく、デブリ閉塞の観点で保守的**  
17型燃料においても流路a、bだけで炉心入口部の流路面積の約**1.9% (> 0.5%)**を確保できる

### ○燃料集合体2体から炉心規模へ展開した場合

- 下部ノズル及びグリッドのコーナー部流路**：  
2体→4体の増加で流路面積が増加し、デブリ閉塞が生じ難くなる
- 隣接下部ノズル間流路**：デブリは閉塞せず通過  
2体から増加させてもデブリが閉塞しない流路面積と割合は不変
- 下部ノズル及びグリッド内流路**：デブリは捕捉されるが、一部通過  
2体→4体→実機規模(4ループでは193体)と体系が大きくなるにつれ、流路断面での非均一効果によりデブリ非閉塞部分の割合増加



炉心入口部イメージ



(下部ノズル部)

(グリッド部)

冷却流路イメージ

---

## 4.2 基礎試験 (炉心入口部)

---

## 4.2 基礎試験 –1/4体系と2体系の比較–

- ▶ 供試体の体系の違いによる影響を検討するため基礎試験を実施
- ▶ 供試体差圧は **燃料集合体1/4体系 (200kPa以上)** >> **燃料集合体2体系 (1kPa)**
- ▶ 燃料集合体1/4体系では1次元の一樣な流れにより一様デブリベットを形成、差圧が大幅に増加
- ▶ 燃料集合体2体系では下部ノズル間等の3次元の流れによりデブリが通過し、差圧は1kPa以下

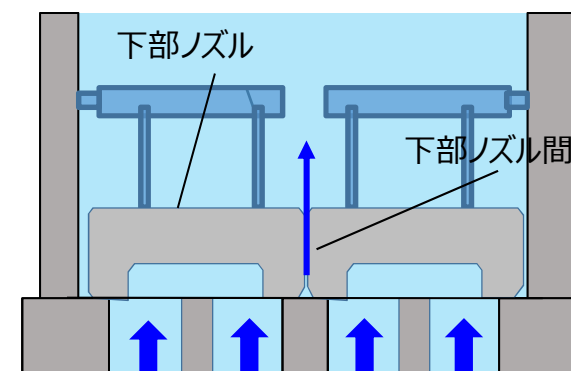
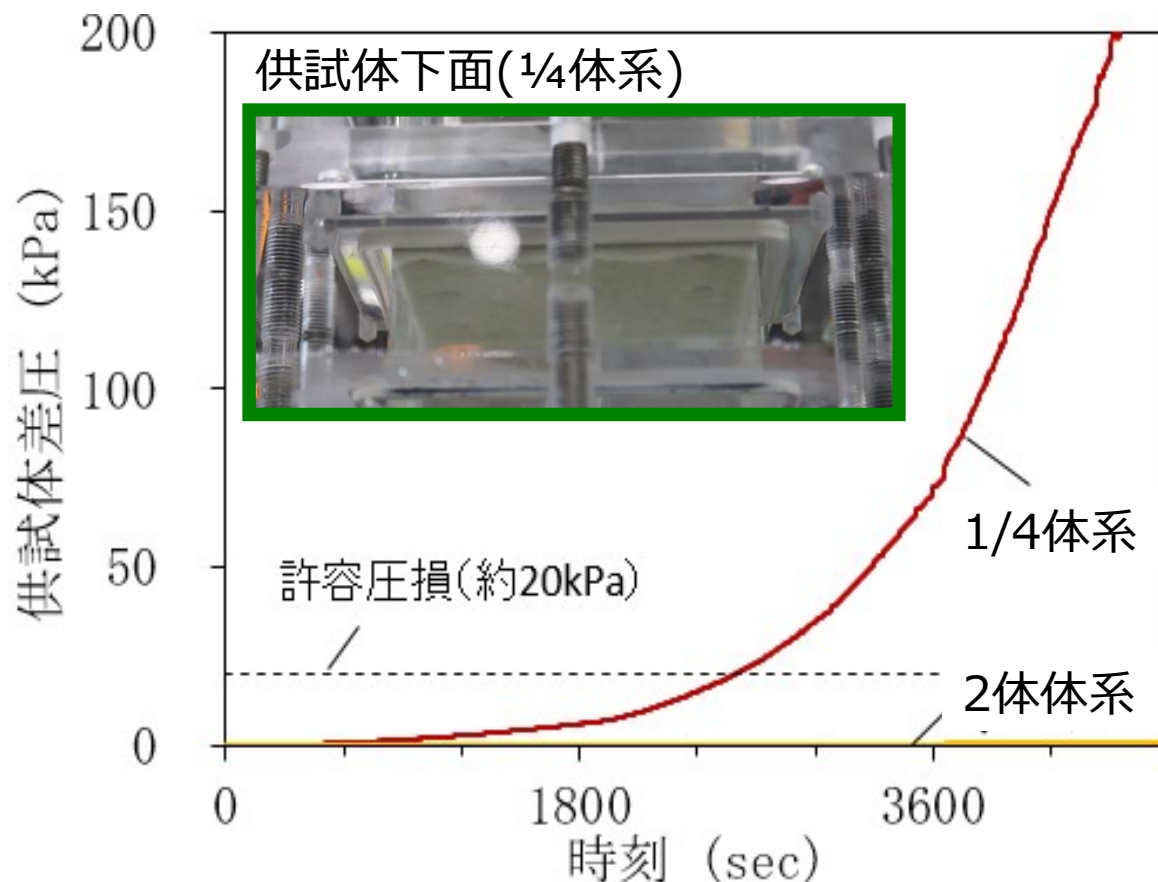


図1 燃料集合体2体

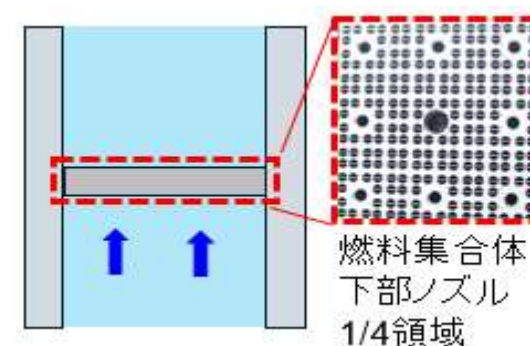


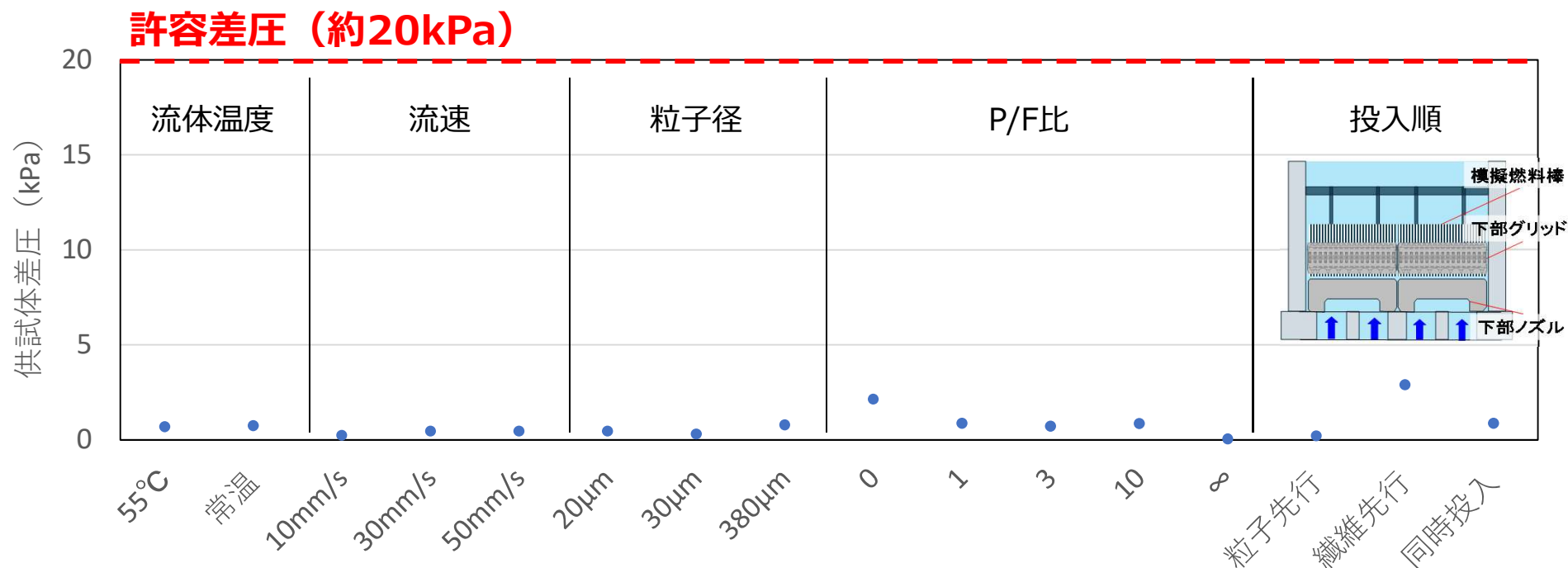
図2 燃料集合体1/4体

## 4.2 基礎試験 —試験条件の感度把握—

- ▶ 燃料集合体2体体系により試験条件（温度、流速、粒子デブリ、デブリ径等）に対する感度を検討
- ▶ 全試験条件で大きな感度はなく、供試体差圧は許容差圧を大きく下回った

### 【結果及び考察】

- 流体温度：常温の方が僅かに差圧が大きく、要因として流体の粘性/密度による影響が考えられる
- 流速：流速の増加によりデブリ捕捉が阻害され、流動抵抗が減少したため、流速が増加しても差圧は変化しなかった
- 粒子径：粒子デブリは下部ノズル間のような流路パスを抜けていくことから、粒子径の影響は小さい
- P/F比：繊維デブリのみ(P/F=0)において差圧が増加。粒子デブリは繊維デブリの捕捉を阻害する効果があると考え
- 投入順：繊維を先行して投入した場合、繊維デブリの捕捉が促進され、差圧が増加

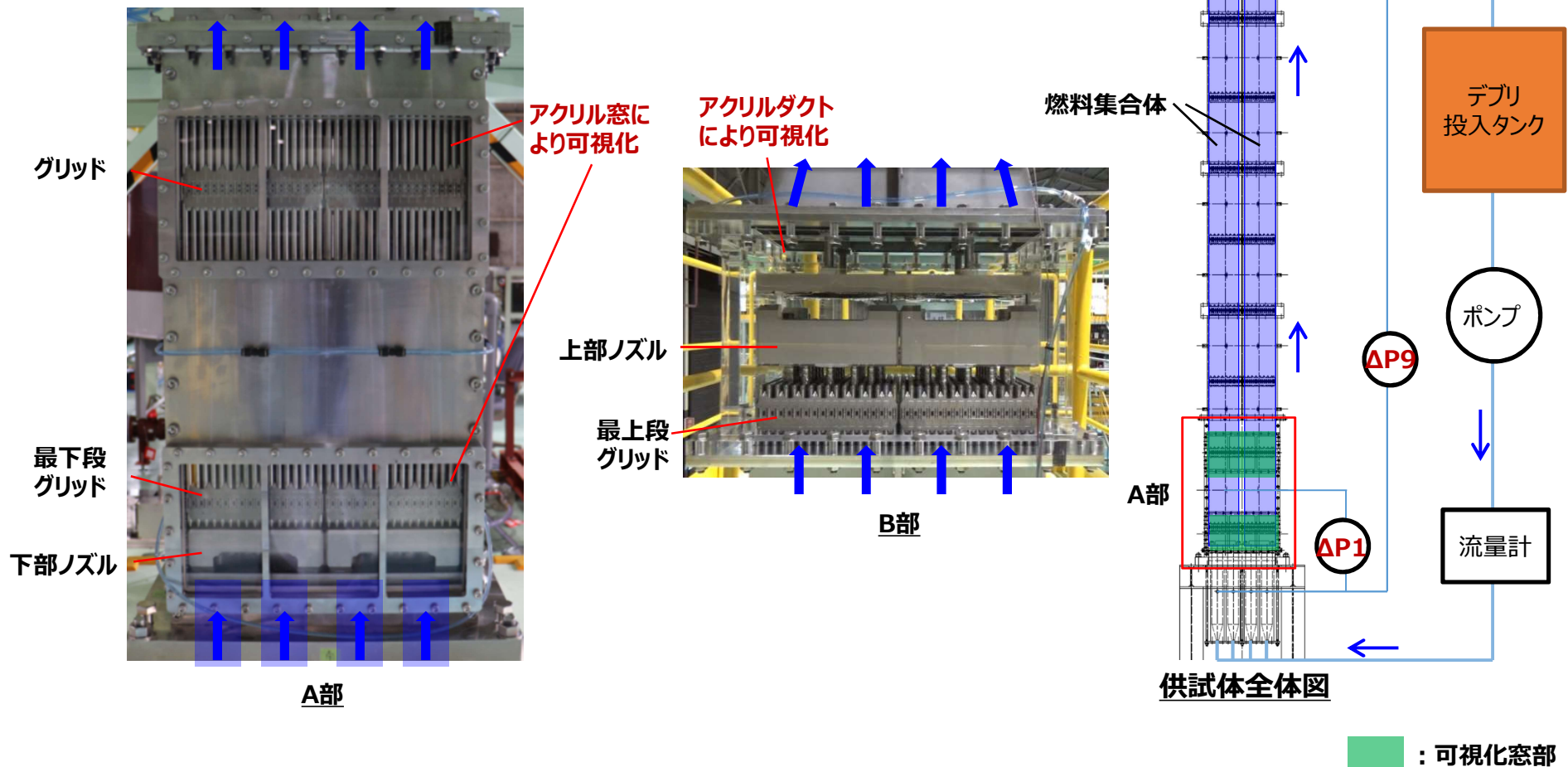


## 4.3 燃料集合体2体試験

## 4.3 燃料集合体2体試験 —試験装置概要—

### ○目的

- 実寸大の燃料集合体（17×17 A型ステップ2 Zryグリッド燃料） 2体使用
- 下部ノズル間ギャップ流路やグリッド部の流路がデブリで閉塞されないことを確認



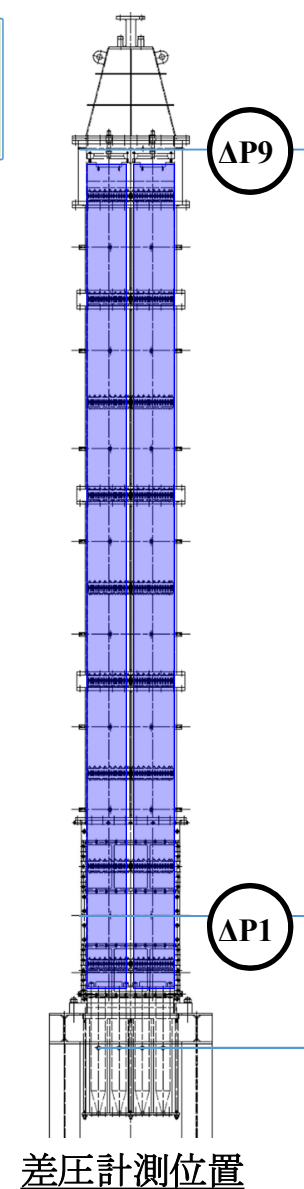
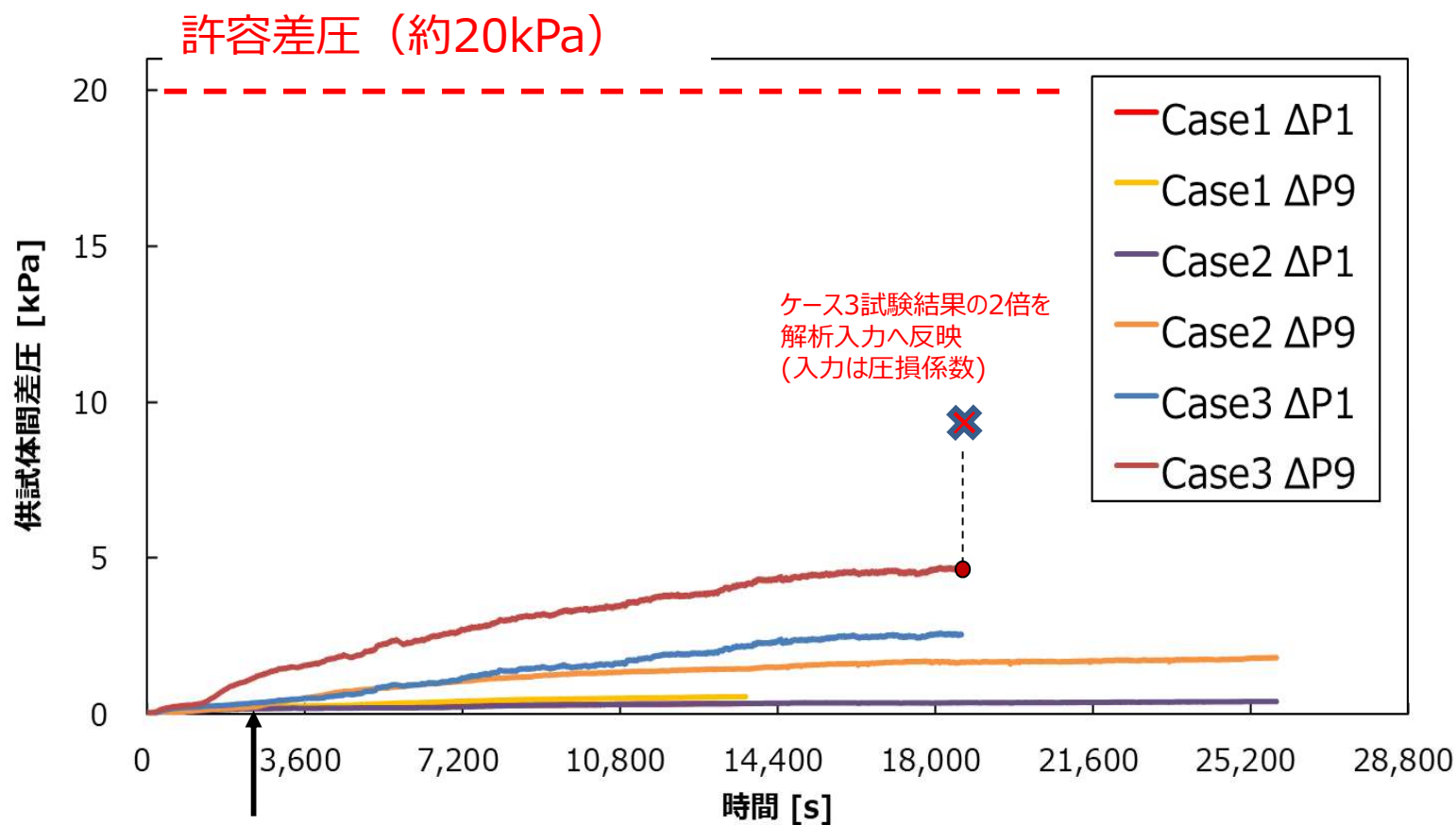
## 4.3 燃料集合体2体試験 ー試験条件ー

		ケース1 (代表プラント条件)	ケース2 (繊維先行投入)	ケース3 (包絡条件)
流体条件	温度/圧力	常温/常圧	←	←
	炉心流速	10mm/s※	←	←
デブリ条件	デブリ種類	繊維デブリ： 保温材（ロックウール） 粒子デブリ： 塗料（アクリルパウダー） ケイ酸カルシウム保温材 潜在粒子（珪砂）		
	繊維デブリ量	約1.6kg/FA	約2.6kg/FA	約2.6kg/FA
	粒子デブリ量	約4.9kg/FA	約6.4kg/FA	約8.3kg/FA
	平均粒子径	約20μm	約380μm	←
	P/F	約3	約2.5	約3
	投入方法	P、F同時	F先行	P、F同時

※ 炉心での蒸散量を補う最小流量（炉心流速10mm/s）で試験を実施。基礎試験の結果から流速が遅い方がデブリが捕捉されやすく、安全側の試験条件となる。

## 4.3 燃料集合体2体試験 —試験結果—

- 燃料集合体の全差圧 ( $\Delta P9$ ) はケース3で最大の約4.6kPa
- ケース3の供試体間差圧は許容差圧 (約20kPa) を大きく下回った





---

## 4.4 バッフルバレル流動試験

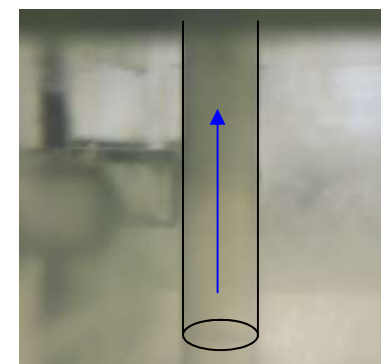
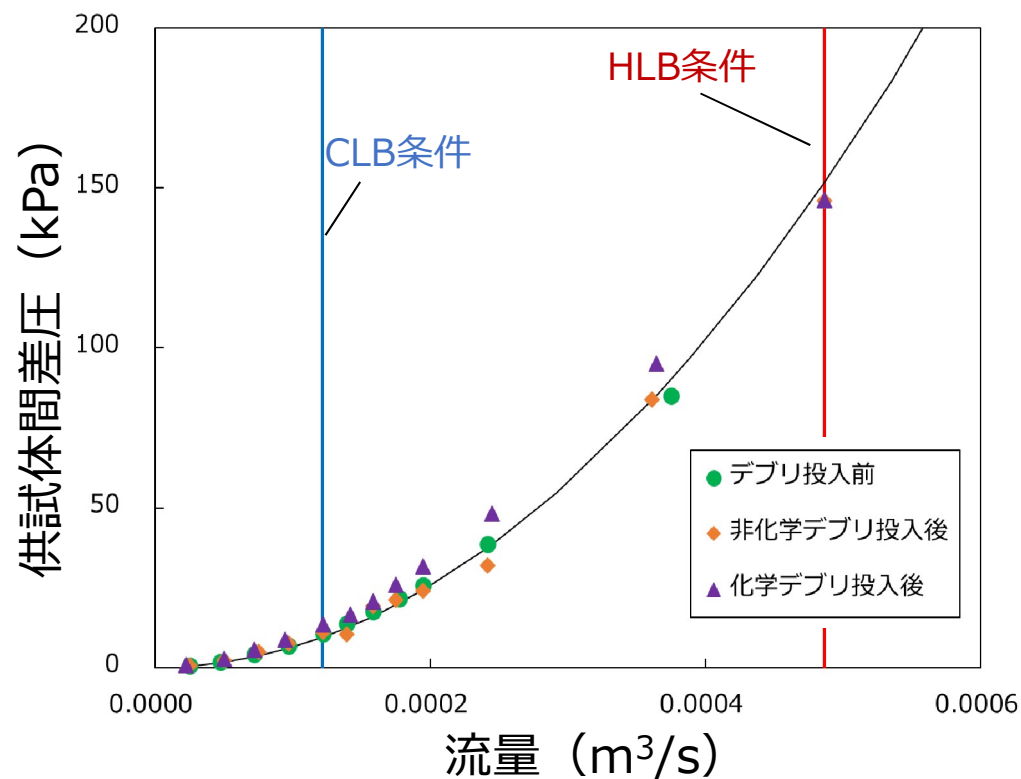
---

## 4.4 バッフルバレル流動試験 ケース1：BB流路への通水ー

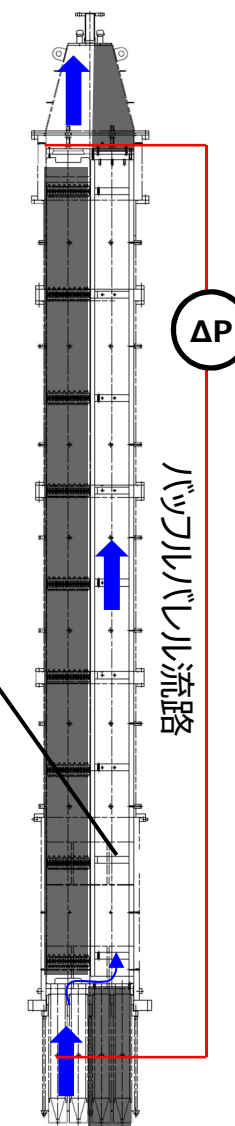
- バッフルバレル流路を模擬した供試体に繊維/粒子/化学デブリを投入
- デブリ投入前後でバッフルバレル流路の差圧は同等、机上検討とも概ね一致
- フォーマ板流路孔が閉塞していないことを目視で確認

### 【試験条件】

- 流路： バッフルバレル流路のみ
- 温度/圧力： 常温/常圧
- 投入デブリ： 繊維/粒子デブリ、化学デブリ（実機包絡量）
- 流量： CLB~HLB条件

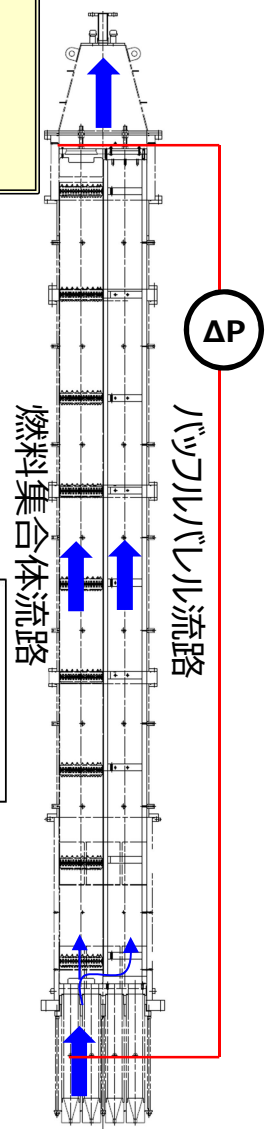
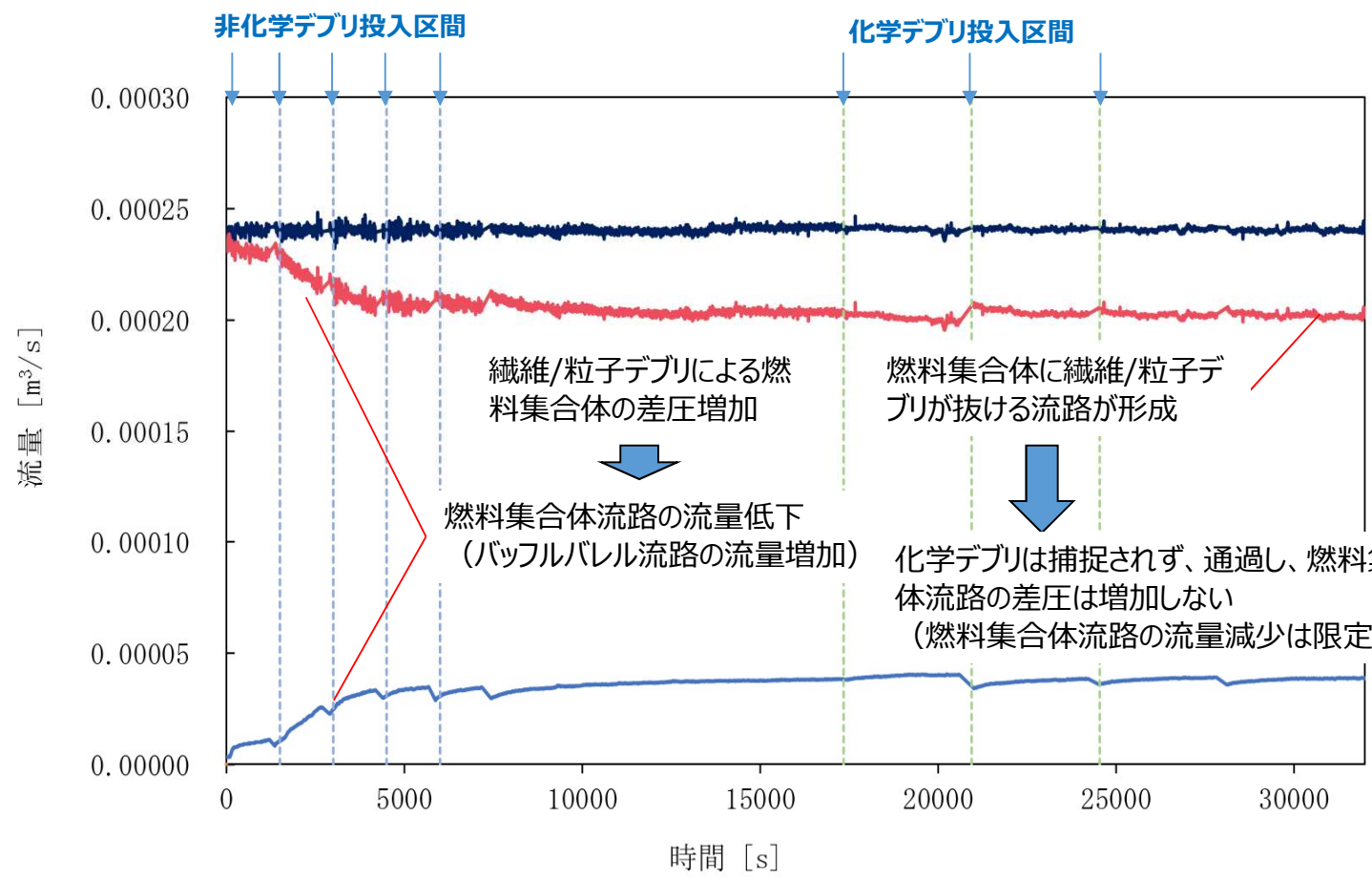


フォーマ板流路孔 (Φ9mm)



# 4.4 バッフルバレル流動試験 ケース2：BB流路+FA流路

- バッフルバレル流路と燃料集合体流路を並行させた供試体に繊維/粒子/化学デブリを投入
- 繊維/粒子デブリにより燃料集合体の一部が閉塞し、バッフルバレル流路の流量が増加
- 化学デブリを投入しても燃料集合体流路は変化せず（燃料集合体流路の閉塞は限定的）



---

## 5. 熱流動解析

---

## 5. 熱流動解析 —解析条件—

---

### ■ 使用解析コード

- 最適評価コードMCOBRA/RELAP5-GOTHIC
  - ✓ 局所的な閉塞の模擬やそのような状況下での炉心および原子炉容器内の熱水力挙動の予測
  - ✓ 炉心内流動の多チャンネルによるモデル化

### ■ 対象プラント

- 国内4ループ及び3ループPWR

### ■ 対象とする事故事象

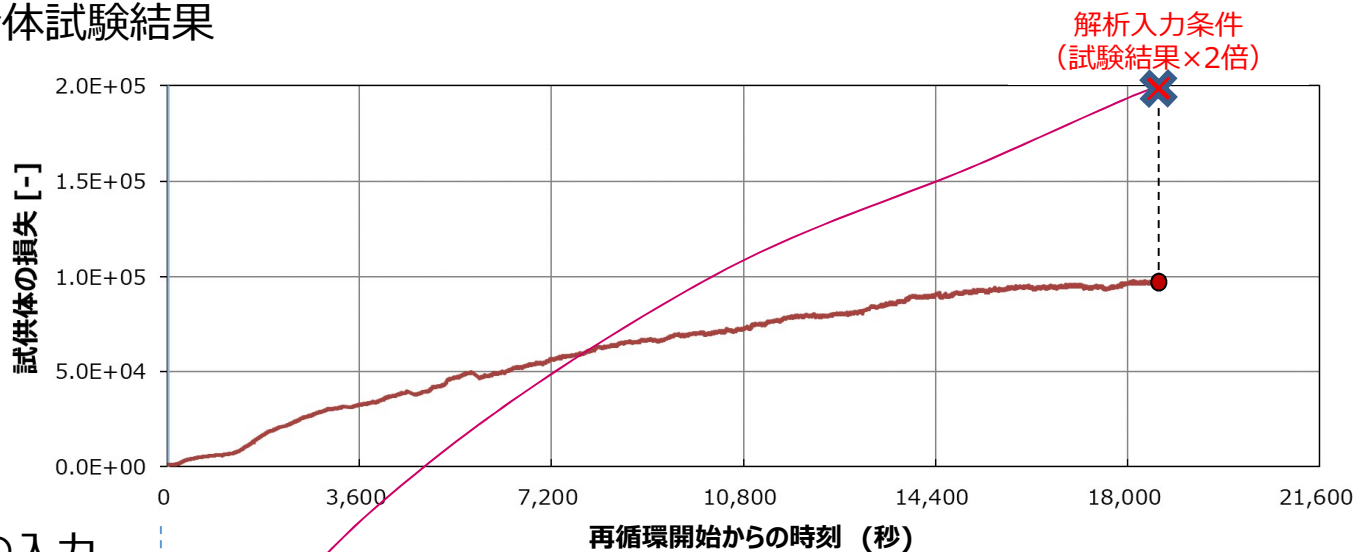
- 低温側配管の両端破断LOCA後の長期冷却事象  
(低温側配管破断：被覆管温度評価として保守的となるケース)

### ■ 解析条件

- 主要条件は国内のECCS性能評価に準じて設定
  - デブリによる炉心入口閉塞は再循環開始と同時に発生、圧損増加を試験結果に基づいて設定
-

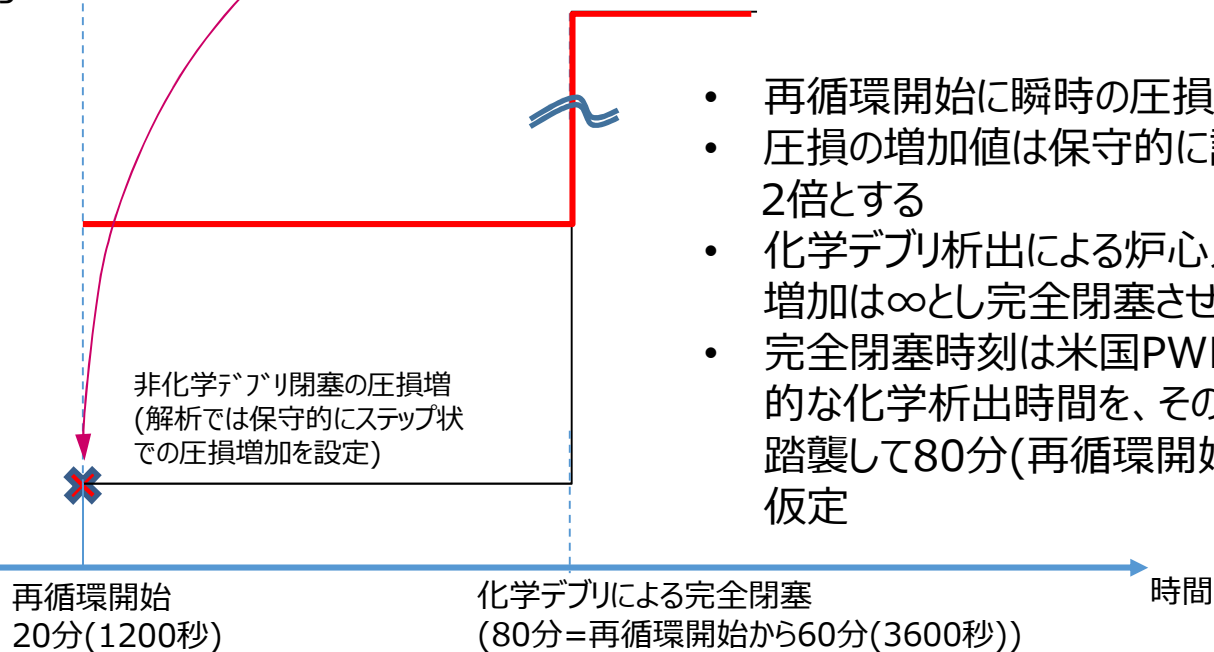
## 5. 熱流動解析 —試験結果に基づいたデブリによる圧損増加の設定—

### ■ 2体集合体試験結果



### ■ 解析時の入力

炉心圧損  
(係数)増加

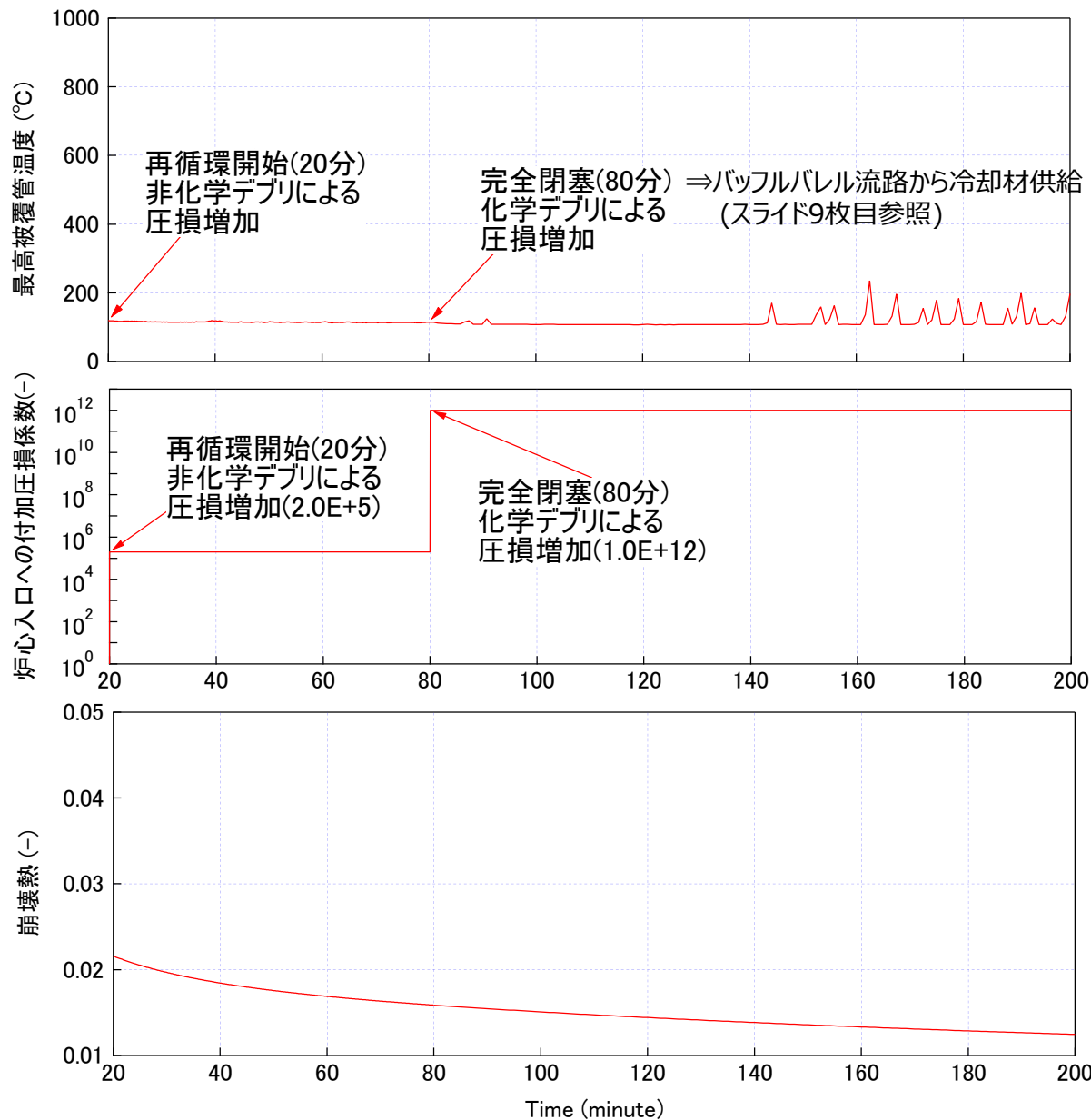


- 再循環開始に瞬時の圧損増加を仮定
- 圧損の増加値は保守的に試験結果の2倍とする
- 化学デブリ析出による炉心入口部圧損増加は $\infty$ とし完全閉塞させる
- 完全閉塞時刻は米国PWROGの包含的な化学析出時間を、そのまま保守的に踏襲して80分(再循環開始から60分)を仮定

# 5. 熱流動解析 –試験結果を踏まえた解析による評価(4ループPWR CLB)–

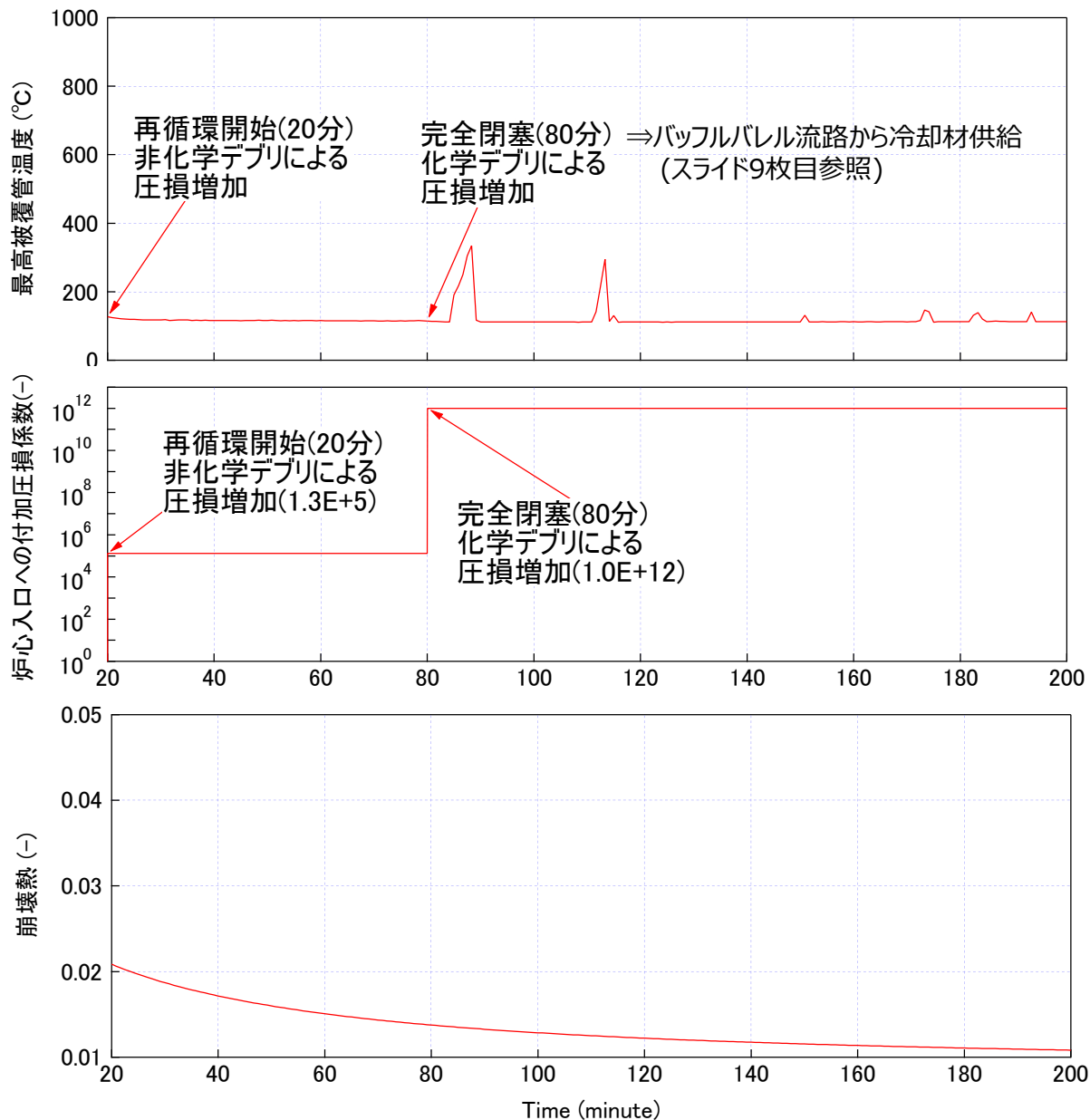
## ➤ 試験結果を踏まえた評価

- ✓ 事象後半(LOCA後80分)に化学デブリにより完全閉塞することを想定した解析
  - 非化学デブリによる圧損増加を試験結果に基づいて設定
  - 米国PWROGの包含的な化学析出時間(80分)を保守的に踏襲
  - 化学デブリによる完全閉塞時炉心入口圧損をほぼ無限大に増加
- ✓ 80分以降に完全閉塞した場合でも、長期的な炉心水位の低下による燃料棒のヒートアップは無く、炉心冷却維持が可能であることを確認
- ✓ 上記より、LOCA後の長期冷却性評価に係る現行の設置許可申請書の記載において、変更が必要となるような影響はない



# 5. 熱流動解析 –試験結果を踏まえた解析による評価(3ループPWR CLB)–

- 試験結果を踏まえた評価
  - ✓ 4ループPWR CLBと同様に事象後半(LOCA後80分)に化学デブリにより完全閉塞することを想定した解析
  - ✓ 80分以降に完全閉塞した場合でも、長期的な炉心水位の低下による燃料棒のヒートアップは無く、炉心冷却維持が可能であることを確認
  - ✓ 上記より、LOCA後の長期冷却性評価に係る現行の設置許可申請書の記載において、変更が必要となるような影響はない





## 5. 熱流動解析 –他プラントへの適用性–

### ○熱流動解析（4ループ、3ループ）結果の他プラントへの適用性

- 再循環開始時点における集合体当りの出力は17型燃料の4ループと3ループが高く、炉心冷却に必要なボイルオフ流量として保守的
- 単位出力当りの炉心の冷却材体積は17型燃料4ループが少なく、初期保有水の観点で保守的
- 炉心入口の流路面積は17型燃料が最も小さく（16項参照）、デブリ閉塞の観点で保守的

→4ループ,3ループの解析結果（長期冷却性の維持が可能）は15型燃料3ループ,2ループに適用できる

	4ループ (17型燃料)	3ループ (17型燃料)	3ループ (15型燃料)	2ループ (14型燃料)	備考			
炉心出力 [MWt]	3,411	2,652	2,432	1,650				
集合体数	193	157	157	121				
再循環開始時刻 [s]	1,200	1,200	1,200	1,200				
再循環開始時出力 (1集合体当り) [MWt]	<b>0.371</b>	>	<b>0.355</b>	>	<b>0.325</b>	>	<b>0.286</b>	102%出力時 崩壊熱：AESJ
炉心冷却材体積	大		中		中		小	
単位出力当りの炉心 冷却材体積	<b>小</b>	<	大		大		大	
炉心入口部流路面積から デブリ閉塞のし易さ	<b>大</b>	=	<b>大</b>	>	小	=	小	

## 5. 熱流動解析 –従来 of 設置変更申請解析への影響について–

- 再循環開始前は燃料取替用水タンクから冷却材が供給されることから、デブリによる炉心のデブリ閉塞は発生しない。
- したがって、再循環開始前を対象とした解析の入力/結果へのデブリ影響はない（スライド4枚目参照）
- 炉心入口部へのデブリ閉塞を考慮した解析を行った結果、炉内の状況は、以下の点において、デブリ閉塞問題が生じる前の従来の状況と有意な変化が生じないことが確認された
  - 再循環開始後において炉心に有意なヒートアップが生じていないこと
  - 炉心の水位が低下して炉心が露出することがないこと
  - 燃料被覆管の温度が再循環開始直後から増加しないこと
- 上記を確認した解析は、解析入力において、大きな保守性を考慮して行われたもので、全PWRプラントに対する評価を包含する結果と判断できる
- また従来からのLOCA後の長期炉心冷却性が維持されることの判断として「炉心の冠水状態が維持されることを確認できればよい」旨を変更する必要もない

---

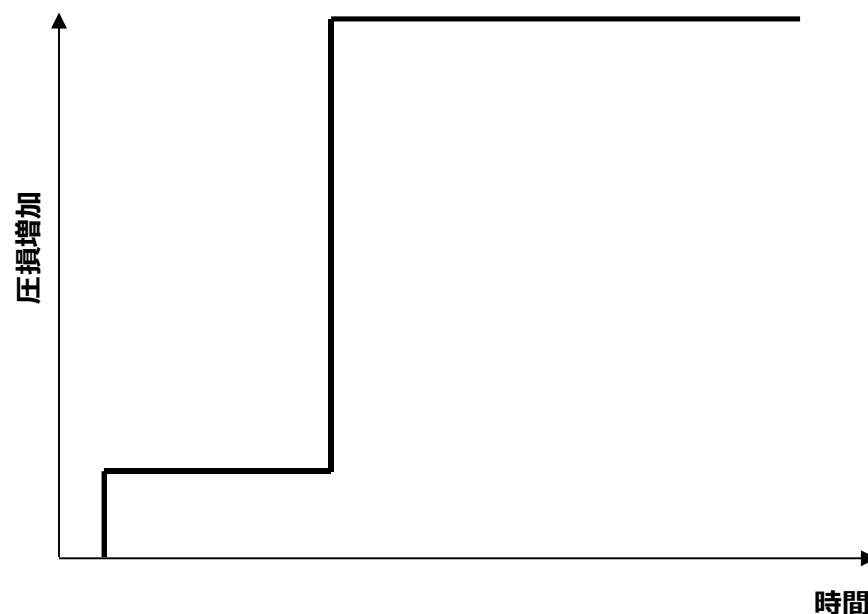
## 6. 評価に含まれる保守性

---

## 6. 評価に含まれる保守性(1) -シナリオの設定における保守性-

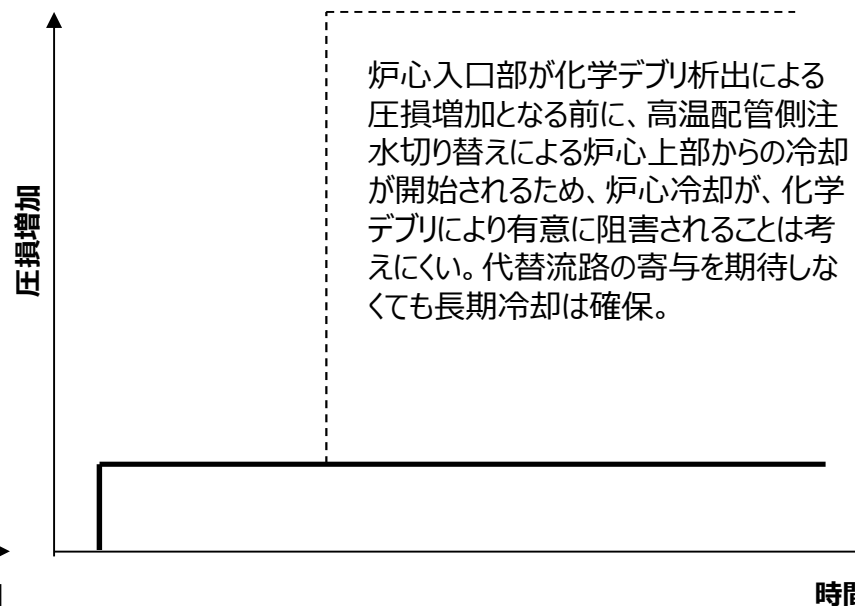
- 以下の知見により、**実際の現象としては、炉心に化学析出による有意な圧損増加が生じることなく、長期の炉心冷却が維持される**
  - 化学デブリ析出開始時刻  $\geq$  高温配管側（炉心上部）からの注水切り替え時刻
  - 炉心上部へのデブリ付着は大幅に低減（炉心上部からの注水切り替え時刻には、原子炉冷却系中の非化学デブリの濃度はサンプスクリーンによる除去効果で大幅に低減）
- 今回の評価では上記の実現象をそのまま考慮せず、保守的に化学デブリの析出を考慮した評価としている

解析上のシナリオ：炉心入口部の化学デブリ析出による冷却性低下



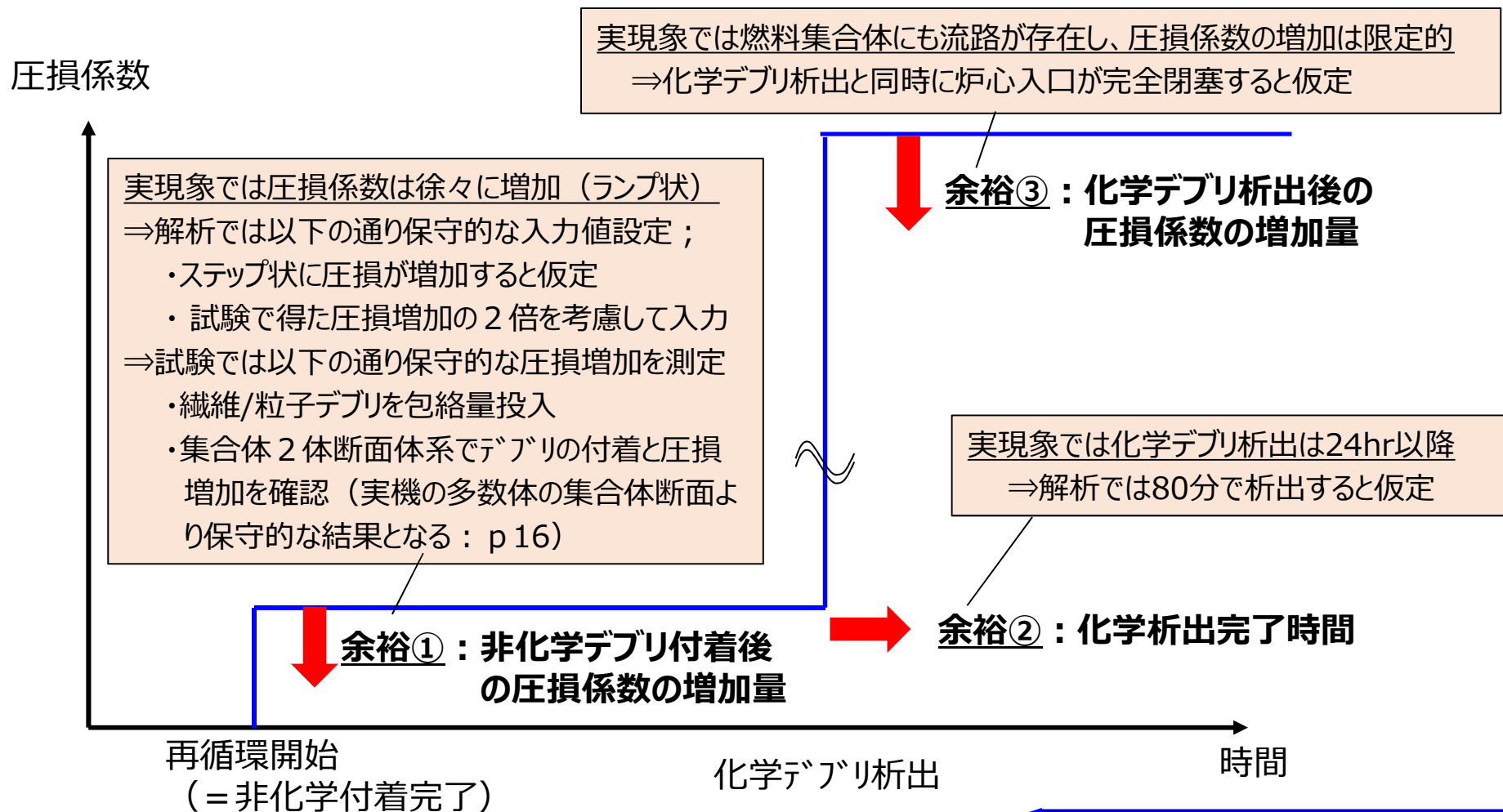
実際に考えられる現象

炉心入口部が化学デブリ析出による圧損増加となる前に、高温配管側注水切り替えによる炉心上部からの冷却が開始されるため、炉心冷却が、化学デブリにより有意に阻害されることは考えにくい。代替流路の寄与を期待しなくても長期冷却は確保。



## 6. 評価に含まれる保守性(2) -シナリオ内での解析条件の保守性-

- 熱流動解析では試験で得られた知見を基に保守的な仮定を置いた条件を用いている
- 主な余裕は下図の①～③であり、十分に保守的な解析結果となっている



## 7. まとめ

## 7. まとめ

---

- 再循環サンプスクリーンに関する新規規制基準対応時に中長期的な課題として事業者が取り組むとしていた事項のうち、唯一残されていたサンプスクリーン下流側影響のLOCA後炉心長期冷却に関して検討
- 炉心長期冷却のシナリオとして以下を想定
  - － 化学デブリ析出前は炉心入口流路
  - － 化学デブリ析出後は代替流路（バッフルバレル流路）
- 流動試験を実施し、上記のシナリオの妥当性を確認
  - － 燃料集合体2体試験：非化学デブリが流入しても炉心入口から冷却材を供給可能
  - － バッフルバレル試験：化学デブリ析出後は代替流路から冷却材を供給可能
- 上記の流動試験結果を基に実施した熱流動解析により燃料温度が上昇しないことから、LOCA後の炉心長期冷却性を確認
- 本検討により唯一残されていた中長期的な課題であるサンプスクリーン下流側影響のLOCA後炉心長期冷却について問題ないことを確認

---

# 参考

---



---

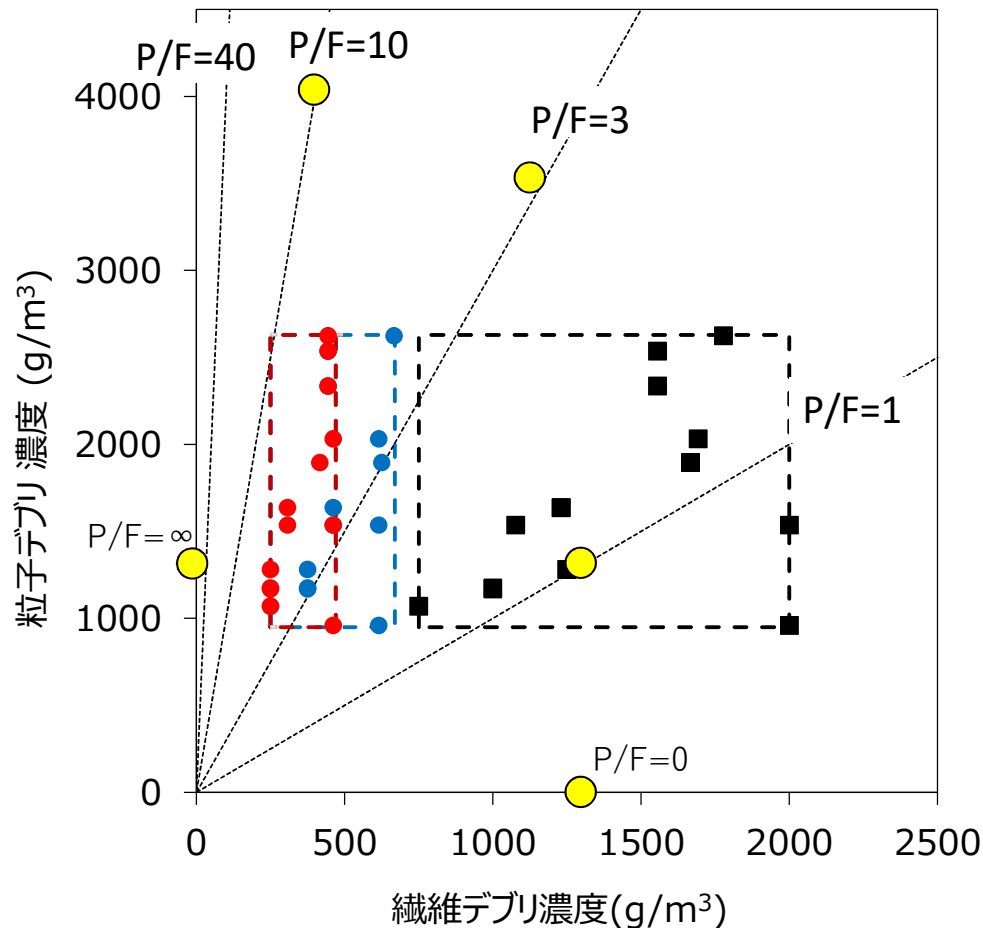
## 参考1

試験に用いるデブリの投入量について

---

# 【参考】基礎試験 2体体系 –デブリ投入条件–

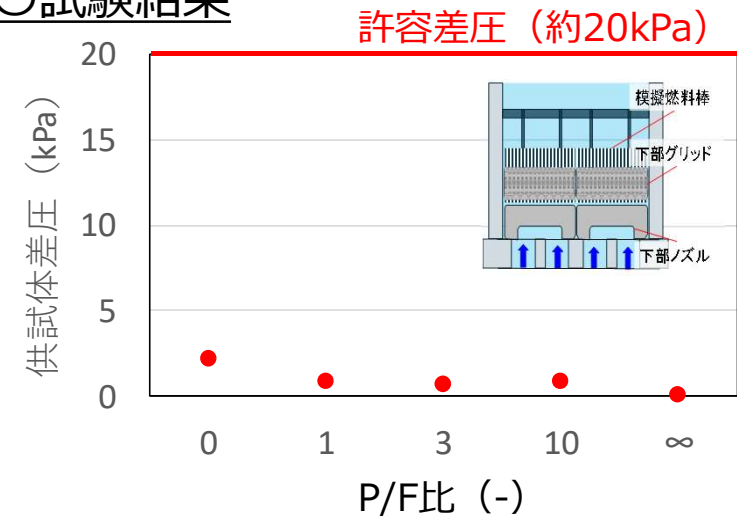
- 実機の繊維/粒子デブリ量、P/F比を包絡する広範囲の条件により基礎試験を実施
- 供試体差圧が大きく増加し、許容差圧を超えることはなく、繊維/粒子デブリ量、P/F比による影響は小さいことが確認できた



## ○繊維デブリ量

1. 格納容器内発生デブリ量 (工認記載値)
2. 実機において炉内に到達するデブリ量 (繊維デブリバイパス率: 約10~20%)
3. 試験での投入したデブリ量 (実機より保守的) (繊維デブリバイパス率: 30%)

## ○試験結果



---

## 参考2

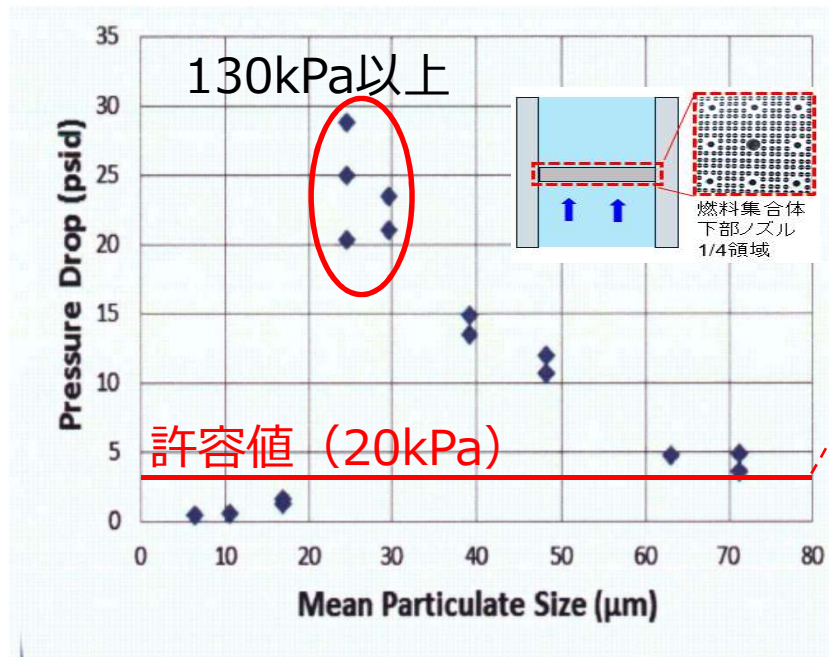
PWROGとの比較(試験および解析)

---

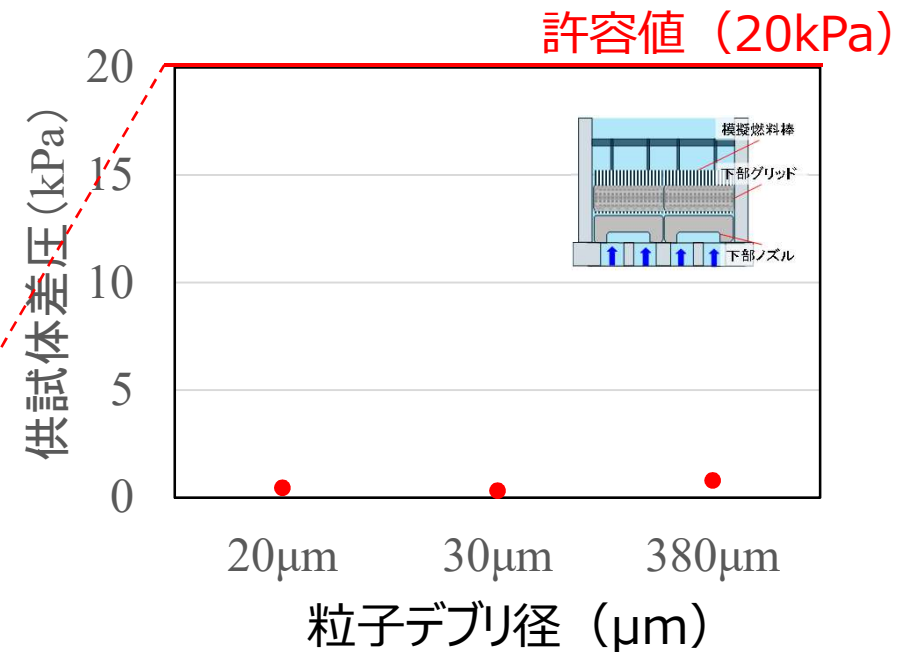
# 【参考】基礎試験の結果 —粒子径の影響—

- 米国体系（1/4体系） (1)
  - 粒子径20～30 $\mu\text{m}$ で差圧の**ピークが発生**
  - 一様な繊維デブリ層の間隙を効率的に閉塞する粒子径は20～30 $\mu\text{m}$
- 国内体系（燃料集合体2体体系）
  - 粒子径を変更して試験を実施したが供試体差圧は1kPa未満
  - 粒子デブリ径の違いによる圧損差は0.5kPa程度であり、**明確なピークは存在せず**

## 米国体系（1/4体系）(1)



## 国内体系（燃料集合体2体体系）



(1) GSI-191 Test Program Summary Scaled Head Loss Testing February 26, 2015

## 【参考】基礎試験の結果 –P/F比の影響–

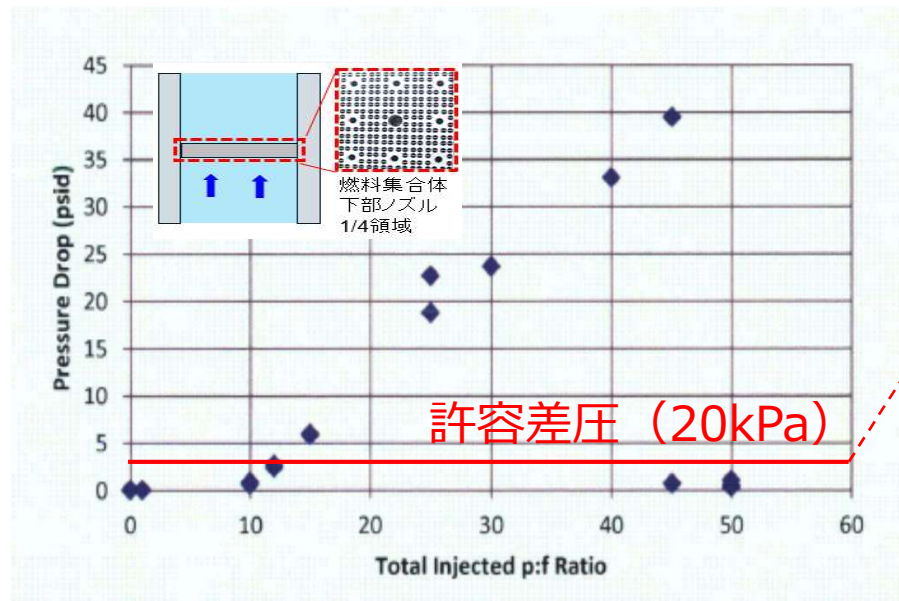
### ➤ 米国体系（1/4体系）

- P/F=45近傍で差圧の**ピークが存在**
- 供試体下部に発生した一様な繊維デブリ層の間隙を粒子が閉塞することで圧損が増加

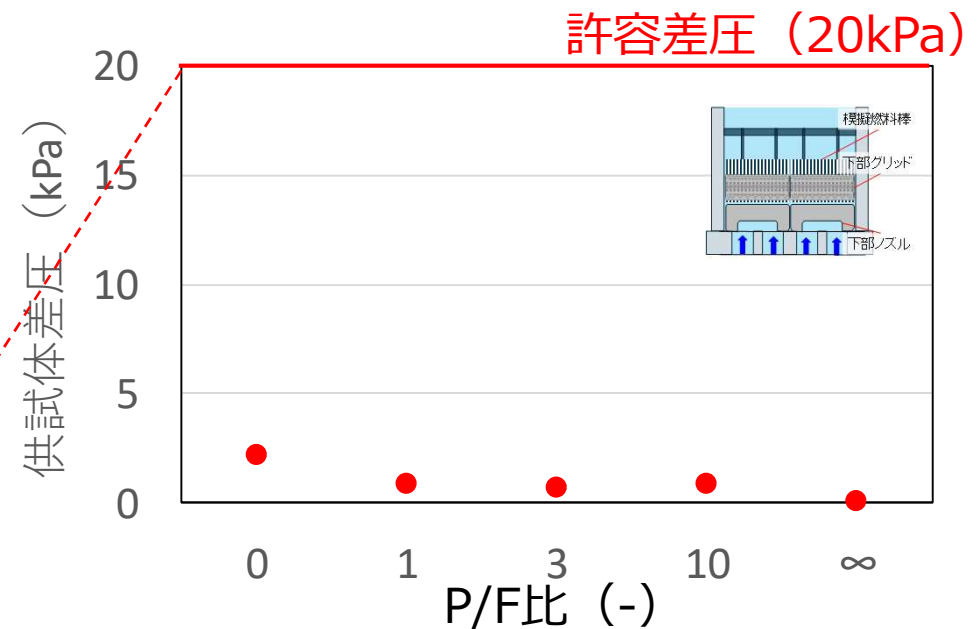
### ➤ 国内体系（燃料集合体2体体系）

- P/F=0～∞の範囲で試験を実施したが、**明確なピークは存在しない**
- P/F=0（繊維デブリのみ投入）において供試体差圧が約2kPa
- 繊維デブリのみを投入することで供試体差圧が増加することが分かった

### 米国体系（1/4体系）(1)



### 国内体系（燃料集合体2体体系）



(1) GSI-191 Test Program Summary Scaled Head Loss Testing February 26, 2015

## 【参考】米国PWROGの解析結果との比較（HLB解析）

非化学デブリの集合体試験での圧損増加は、試験での各部圧損をそのまま解析にも、炉心の各グリッド位置に分散させて入力

- 結果：下図のとおり、化学デブリ析出時間を米国PWROGの評価(約8580秒=143分)と同じに設定しても、析出までに炉心でのヒートアップが生じず、被覆管温度の増加も認められない。

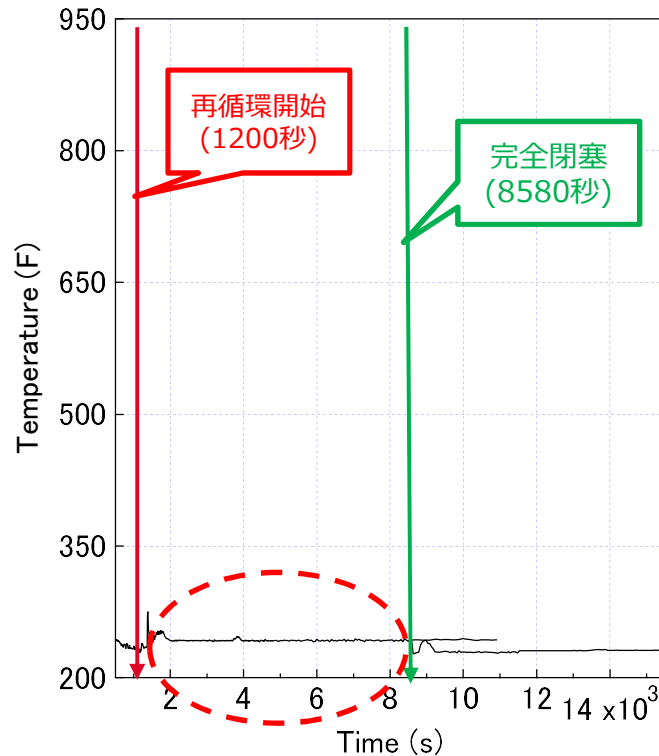


図 高温側配管破断（HLB）解析例

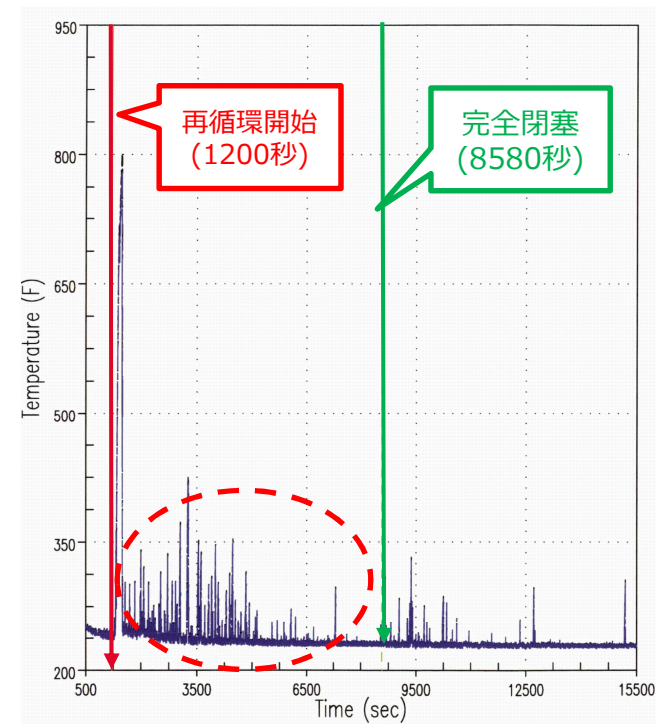


図 米国PWROG解析結果例（HLB）\*

\* WCAP-17788-NP volume4 Rev0 Comprehensive Analysis and Test Program for GS1-191 Closure (PA-SEE-I1090) - Thermal-Hydraulic Analysis of Large Hot leg Break with Simulation of Core Inlet Blockage

---

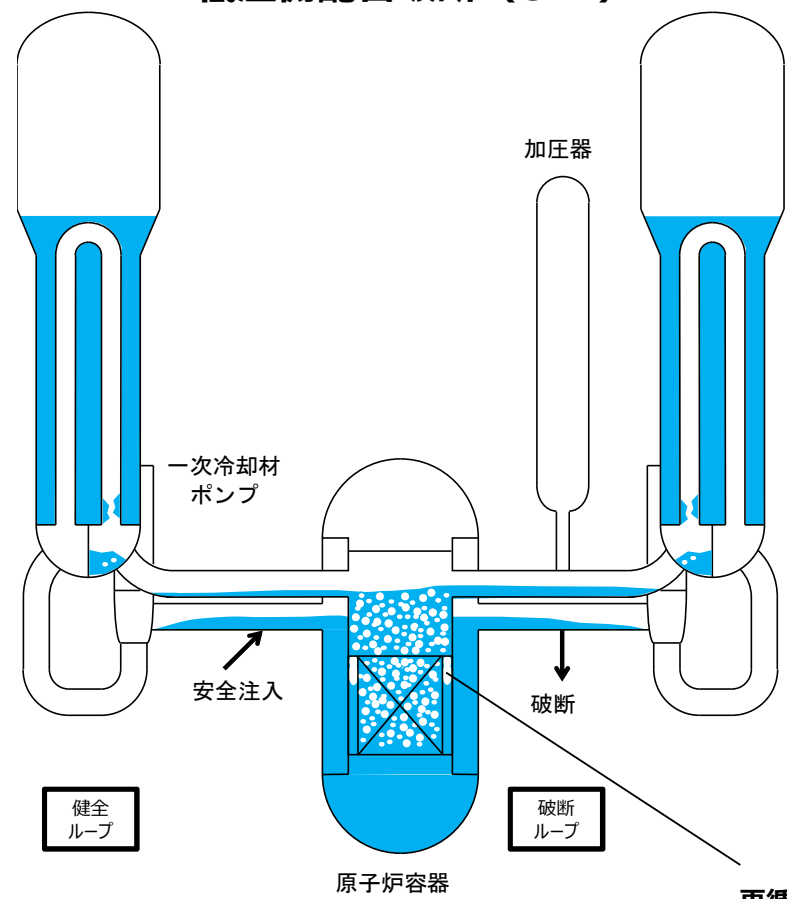
参考3

CLBとHLBの流況の違い

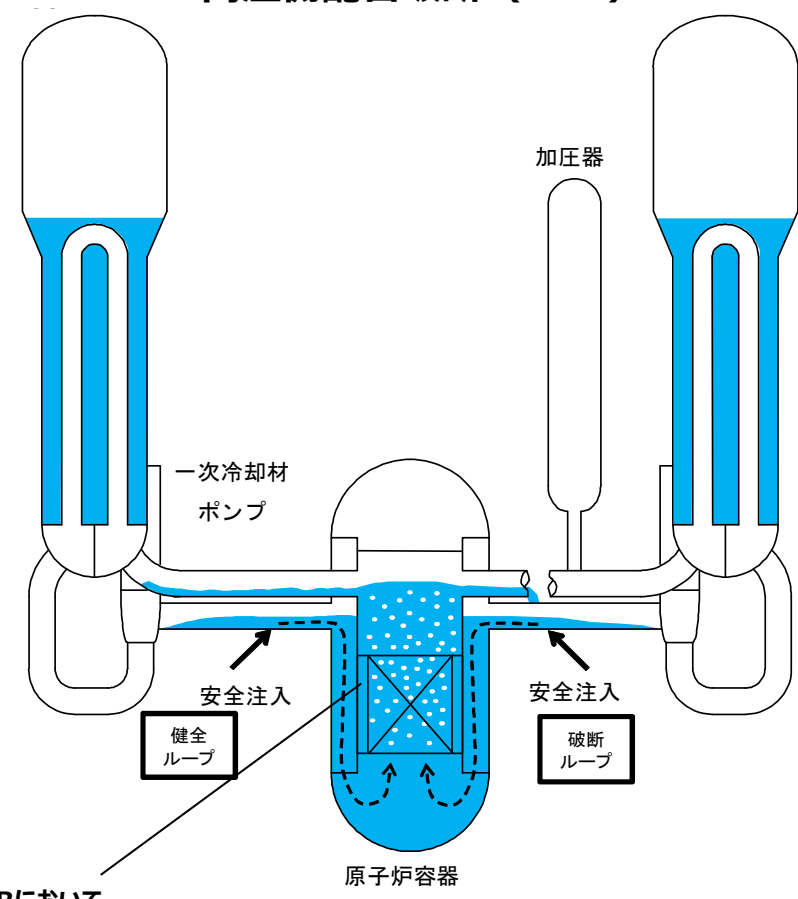
---

# 【参考】炉心入口全面閉塞の仮定と代替流路(バブルバレル流路)の有効性

### 蒸気発生器 低温側配管破断 (CLB)



### 蒸気発生器 高温側配管破断 (HLB)



再循環開始直後のCLBにおいては、バブルバレルの水位が低い

### 再循環開始直後の流況 (CLB)

健全ループからの注入は炉心部等での蒸気発生分のみがダウンカマに流入する。バブルバレルの水位は炉心部の水頭とバランスし低めに維持される。  
 炉心入口部からの通水が停止すると、バブルバレル流路からの冷却水がバブル板の上端に達するまでの間、炉心内の蒸散に対する補給は行われない。

### 再循環開始直後の流況 (HLB)

健全・破断ループからの注入は全て炉心及びバブルバレル流路を経由して破断口から流出する。RV内の水位は高温側配管レベルとなり、液相率も高い。  
 炉心入口部からの通水が停止しても、バブルバレル流路から炉心内の蒸散に対する補給が、CLBのような時間遅れがなく行われる。



---

参考4

化学デブリの析出

---

# 【参考】化学デブリ析出時間に関する基礎試験 (1/2)

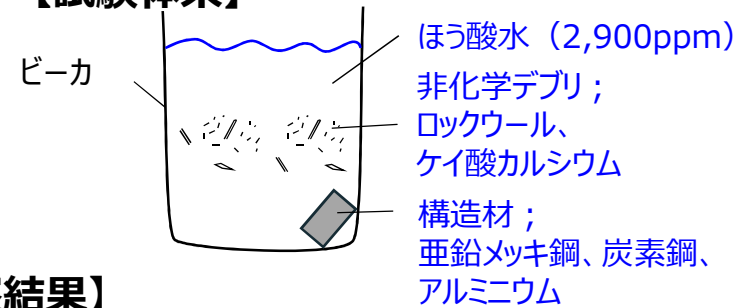
## 【実機の化学影響概要】

- ① 高温のほう酸水・スプレイ材溶液に、デブリや構造材の一部が溶出する
- ➡
- ② 低温となるにつれ、溶出した成分が閉塞していた繊維デブリの上に析出し、圧損に影響する可能性がある

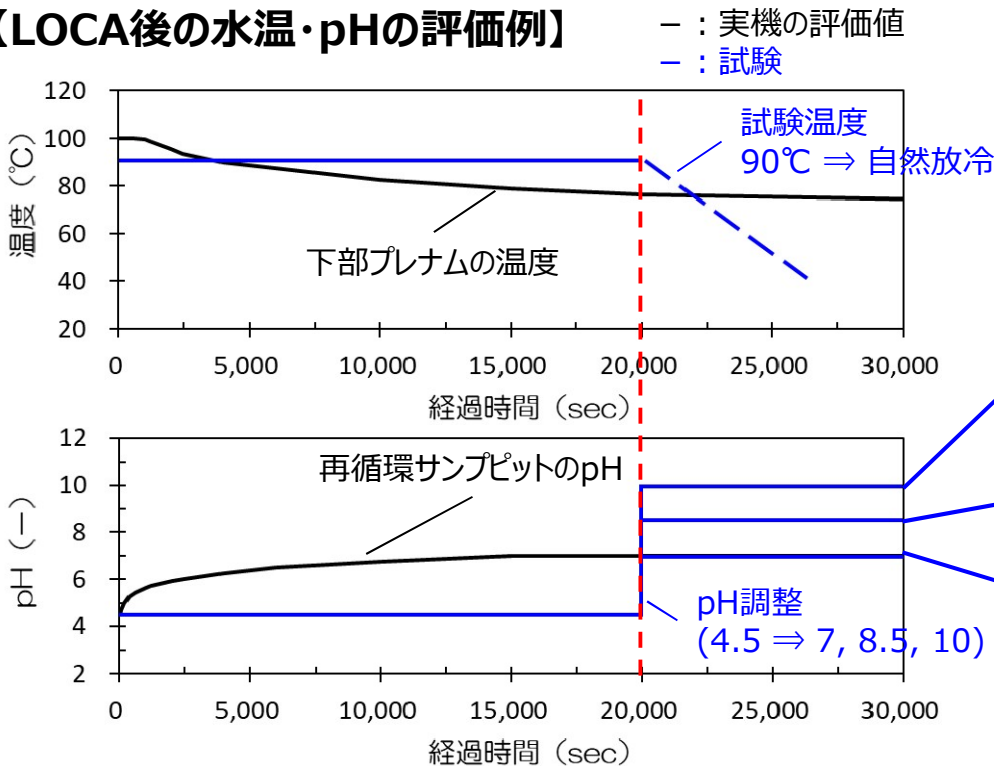
## 【試験概要】

- LOCA直後の水温・pHを模擬し、デブリや構造材を溶出
- その後、**水温を30℃以下に低下させ、化学デブリが析出し**  
**ないことを確認した**  
(炉内の水温が30℃以下となるのはLOCA後24時間以降)

## 【試験体系】

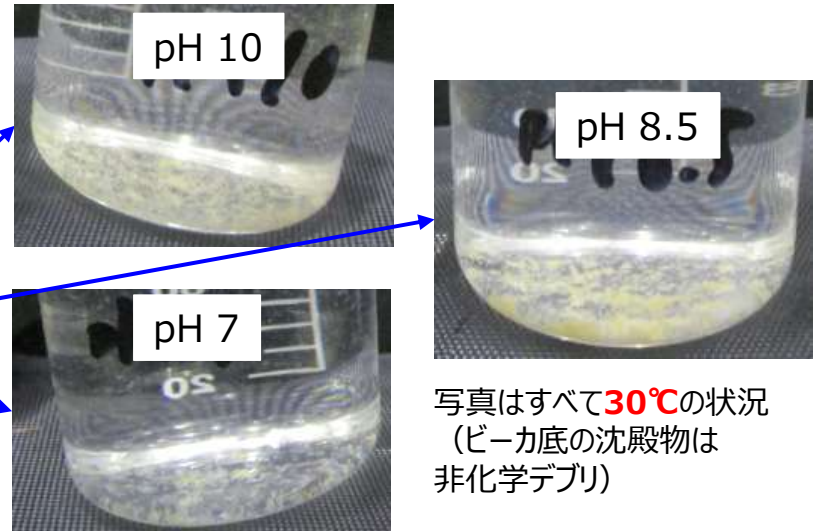


## 【LOCA後の水温・pHの評価例】



## 【観察結果】

- 水温が常温(30℃以下)となっても、全条件 (pH7, 8.5, 10)で白濁が生じないことを目視確認



写真はすべて30℃の状況  
(ビーカ底の沈殿物は非化学デブリ)

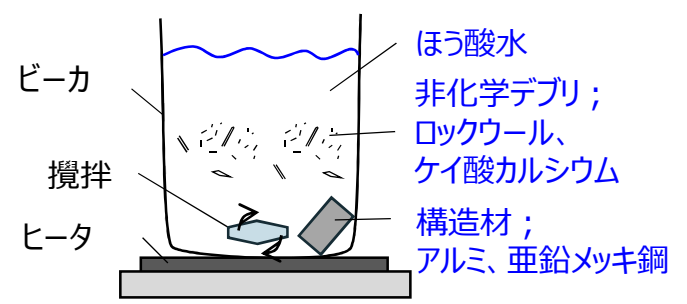
※再循環サンプピットのpHがほぼ一定値となる時間 (20,000秒) でNaOHによるpH調整を実施

# 【参考】化学デブリ析出時間に関する基礎試験 (2/2)

## 【試験手順】

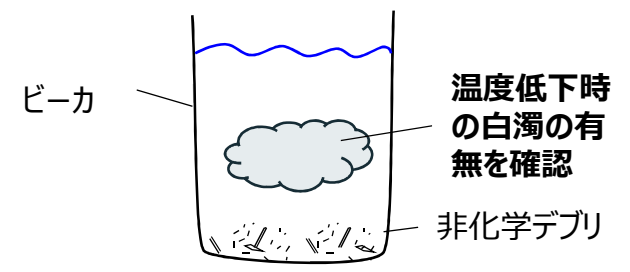
### ①デブリと構造材の成分を溶出させる

- ・90℃のほう酸水 (pH3.8) に、デブリと構造材を投入
- ・高温保持・攪拌 (80分間・24時間)



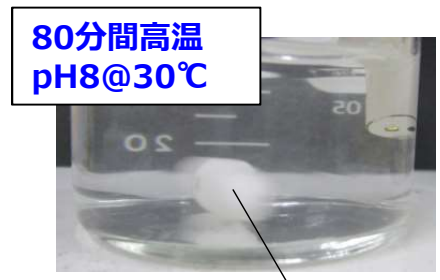
### ②化学デブリの析出有無を確認する

- ・温度低下時の白濁の有無を目視確認
- ・NaOHを添加し、pH変化時の影響も確認

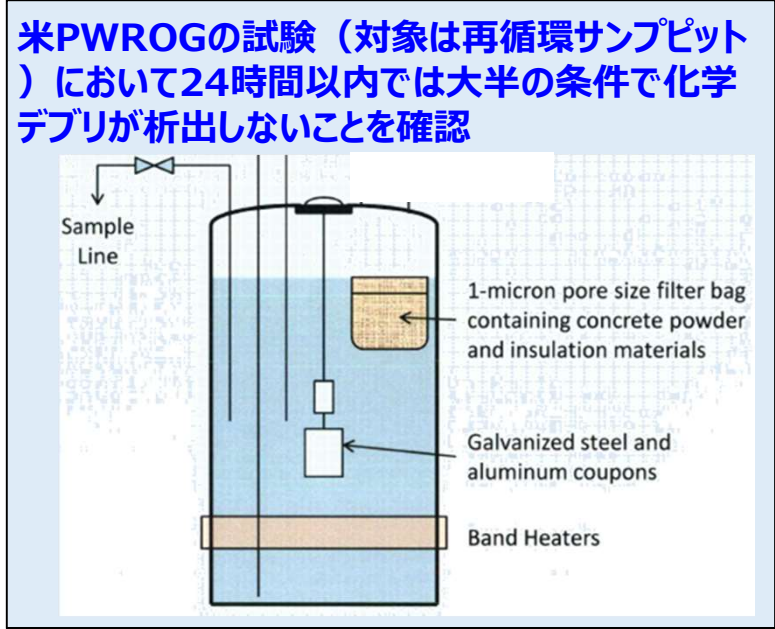


## 【試験結果】

**80分間高温保持した試料 :**  
30℃および80℃において、  
pH3.8~10の範囲で白濁が生じ  
ないことを確認



**白濁が確認されたケース**  
**24時間高温保持した試料 :**  
30℃、かつ、pH7以上で白濁を  
確認



---

参考5

ほう酸析出への影響

---

## 【参考】ほう酸析出への影響

### ▶ LOCA後長期冷却時のほう酸析出

- ✓ 炉心で沸騰・濃縮されたほう酸水が炉内に蓄積し、ほう素濃度が上昇する
- ✓ ほう酸析出時間の評価においては、LOCA後の1日間の炉内ほう素濃度を計算し、1日時点でのほう酸析出がないこと、若しくは析出する時間を評価

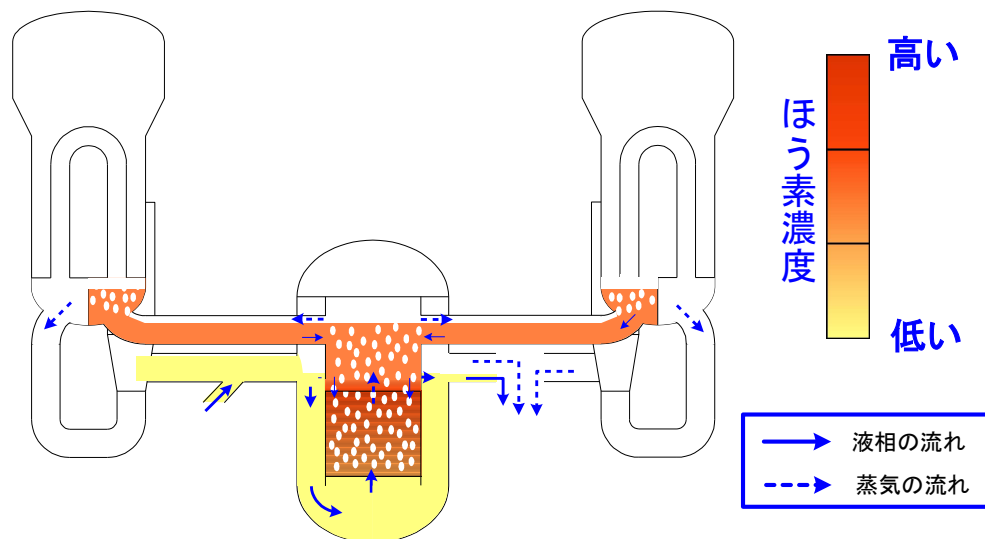


図 LOCA後長期冷却時のほう酸水の濃縮

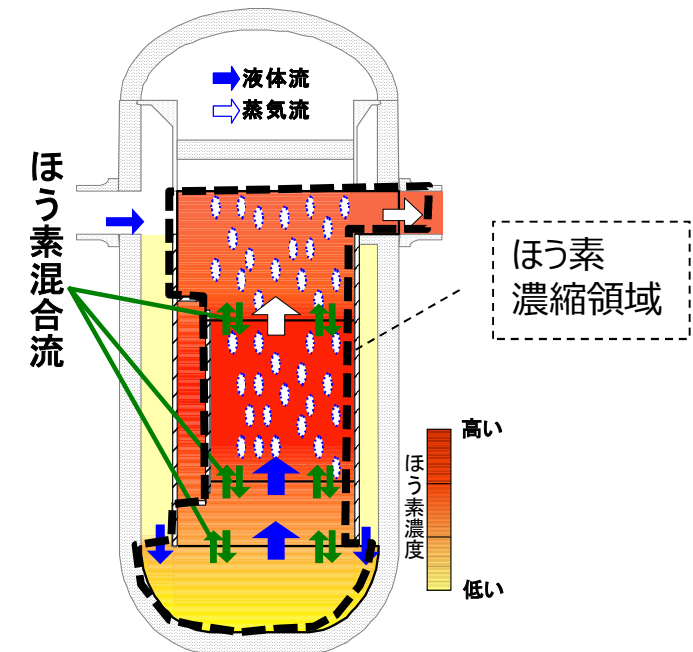


図 現行国内評価モデル

### ▶ ほう酸析出時刻評価への影響

- ✓ 燃料集合体2体試験の結果から、炉心入口デブリ蓄積（閉塞）等による炉心－下部プレナム混合性能への影響は軽微と考えられ、ほう素濃度上昇への影響は軽微であり、炉心の長期冷却性は確保される
  - ⇒化学デブリの析出時間は24時間以降
  - ⇒非化学デブリによる圧損増加は小さい

## 【参考】ほう酸析出への影響の評価例

- 代表4ループPWRを対象とし、デブリによる炉心入口圧損増加を考慮した炉内ほう素濃度上昇の評価
- 評価の結果、炉内のほう素濃度は析出限界濃度（55,000ppm）※を下回ることを確認

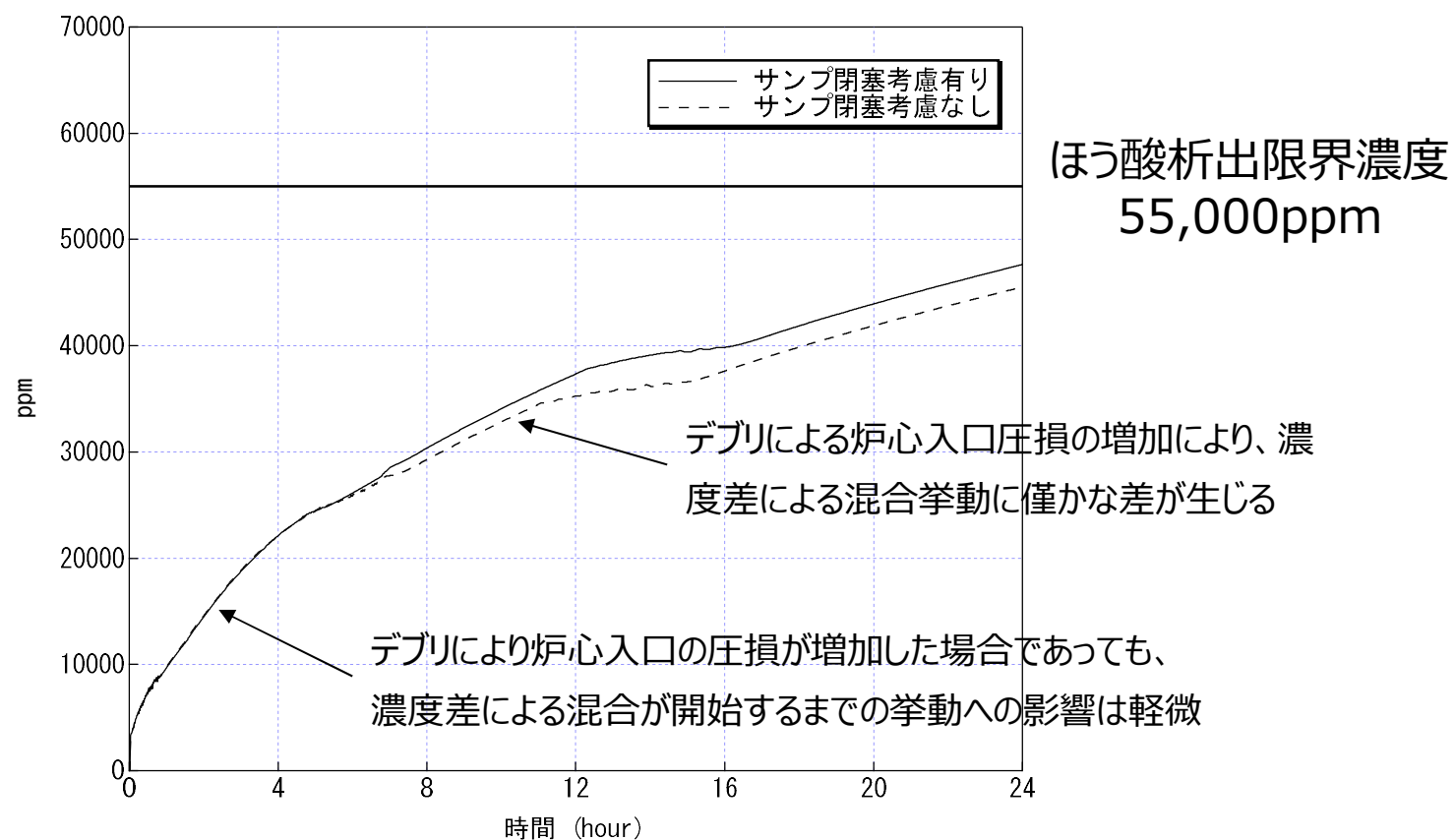


図1 炉内のほう素濃度上昇

※ 日本原子力学会 2007年秋の大会「LOCA時長期炉心冷却におけるほう素濃縮挙動に関する研究（その1） BACCHUS試験装置による炉内濃縮挙動試験」において68,000ppmまでほう酸の析出/沈殿が見られなかったことを確認

---

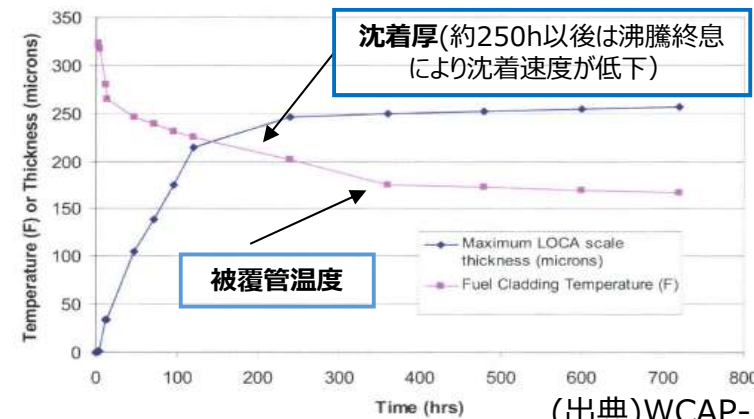
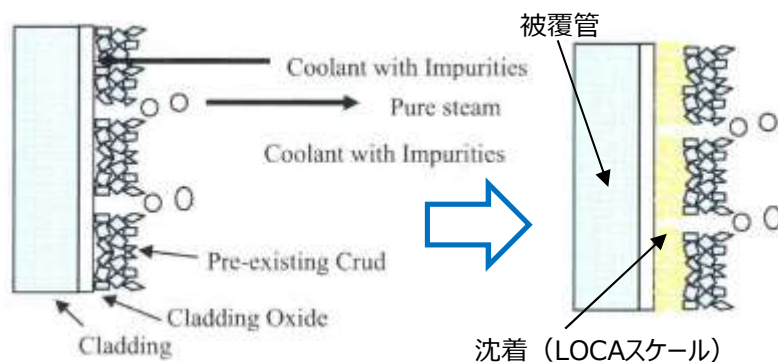
参考6

被覆管付着影響



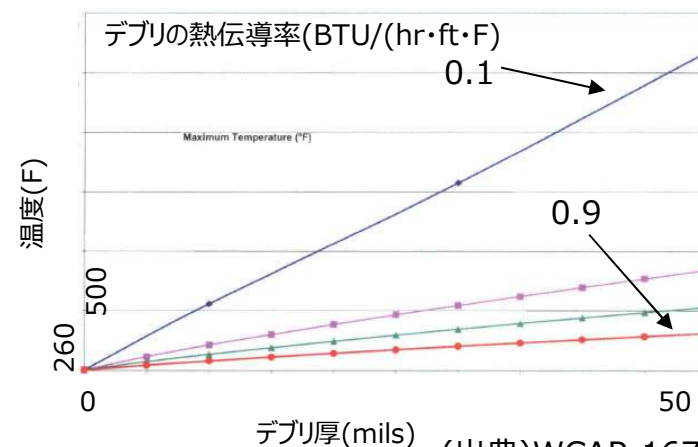
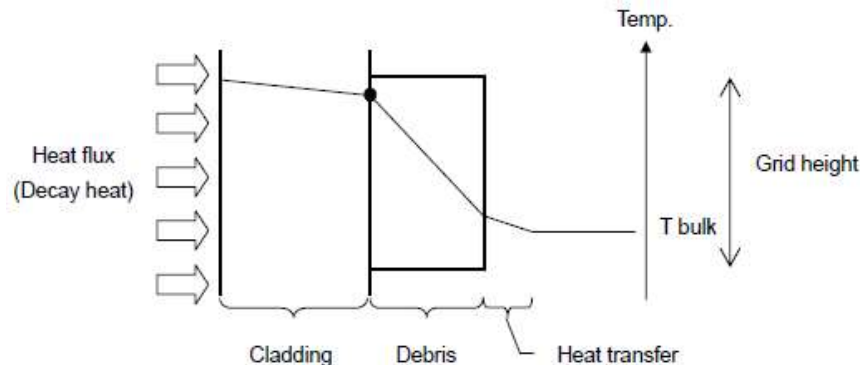
# 【参考】被覆管付着影響の米国評価事例について

- 化学デブリの被覆管表面への沈着による伝熱性能、被覆管温度への影響
- ✓ 燃料表面における沸騰等により化学デブリが被覆管表面への沈着（プレートアウト）をする挙動（被覆管表面温度、沈着厚）を30日（～800H）について解析
- ✓ 崩壊熱の低下、及び約250hでの炉心沸騰終息により、顕著な沈着は生じず、また被覆管の温度上昇も生じない



(出典)WCAP-16793Rev2

- グリッドや被覆管表面等へのデブリ付着蓄積による伝熱性能、被覆管健全性への影響
- ✓ 被覆管間に付着蓄積を仮定した熱伝導解析の結果、最大厚50mils<sup>(1)</sup>まで蓄積しても被覆管の長期冷却時の制限温度800F<sup>(2)</sup>以下を確認



(出典)WCAP-16793Rev2

(1) グリッドを考慮し被覆管間の最小距離 < 100milsであり1燃料棒当50mils  
 (2) 30日間の運転で更なる腐食、水素吸収による顕著な影響が生じない温度

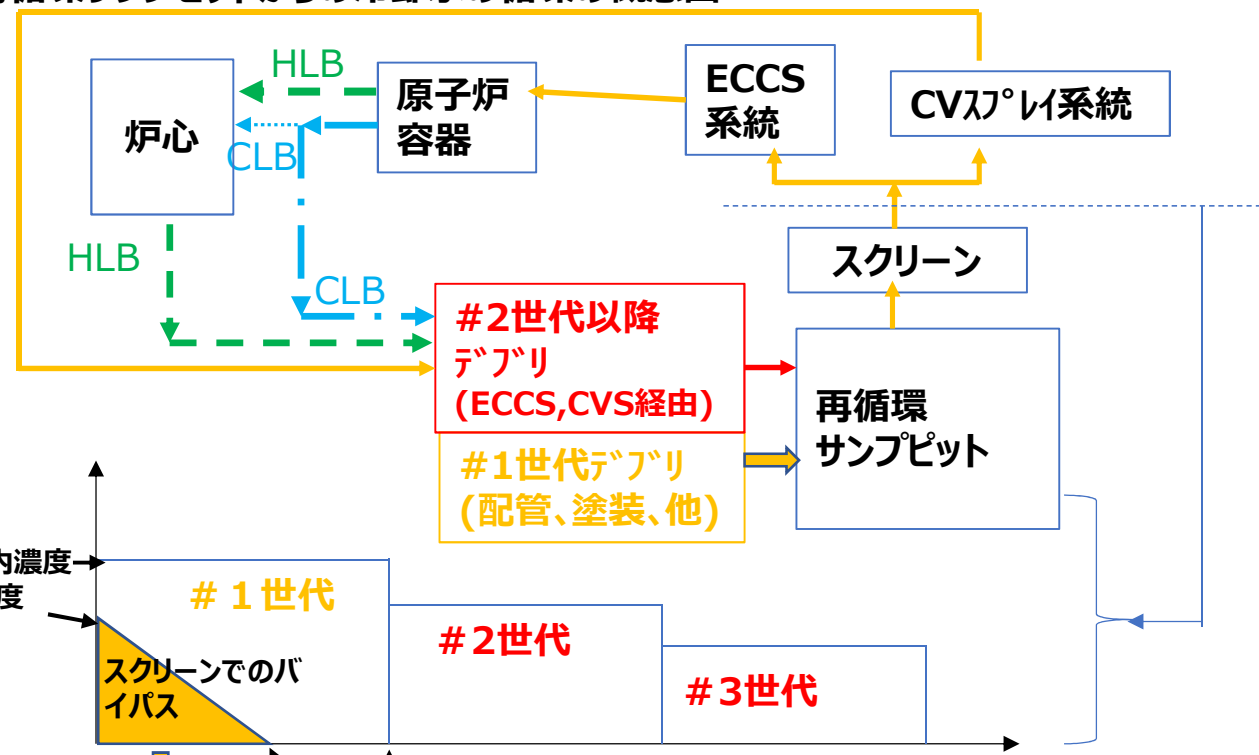


## 参考7

サンプスクリーンをバイパスする繊維デブリ量の変化

# 【参考】サンプスクリーンをバイパスする繊維デブリ量の変化

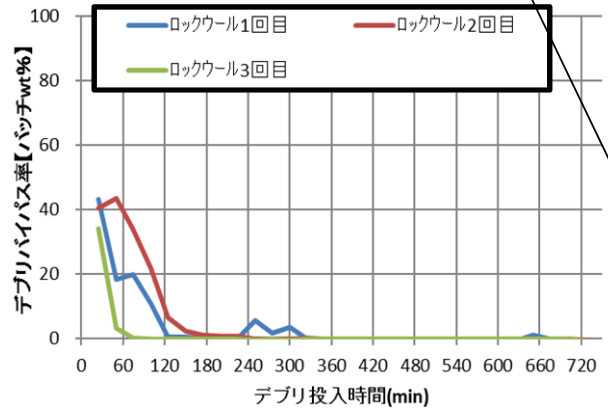
デブリを含む再循環サンプピットからの冷却水の循環の概念図



デブリ濃度  
 ・再循環サンプピット内濃度  
 ・スクリーン通過後濃度  
 実際は世代ごとの  
 デブリを含んだ水が  
 混合



## バイパス試験結果



再循環開始時に再循環サンプピットにあるデブリを含む水量すべてがスクリーンを通過する時間を保守的に簡略計算\*した結果：

\* 初期サンププール水量 ÷ 再循環流量  
 スクリーンでの繊維デブリが実質バイパスしなくなる時間を保守的に代替

- ・29~44分 (単一故障なしへへへ)
- ・58~88分 (DG単一故障へへへ)

---

## 参考8

PWRとBWRにおけるサンプスクリーン/ECCSストレーナ  
大型化に対する設計の比較

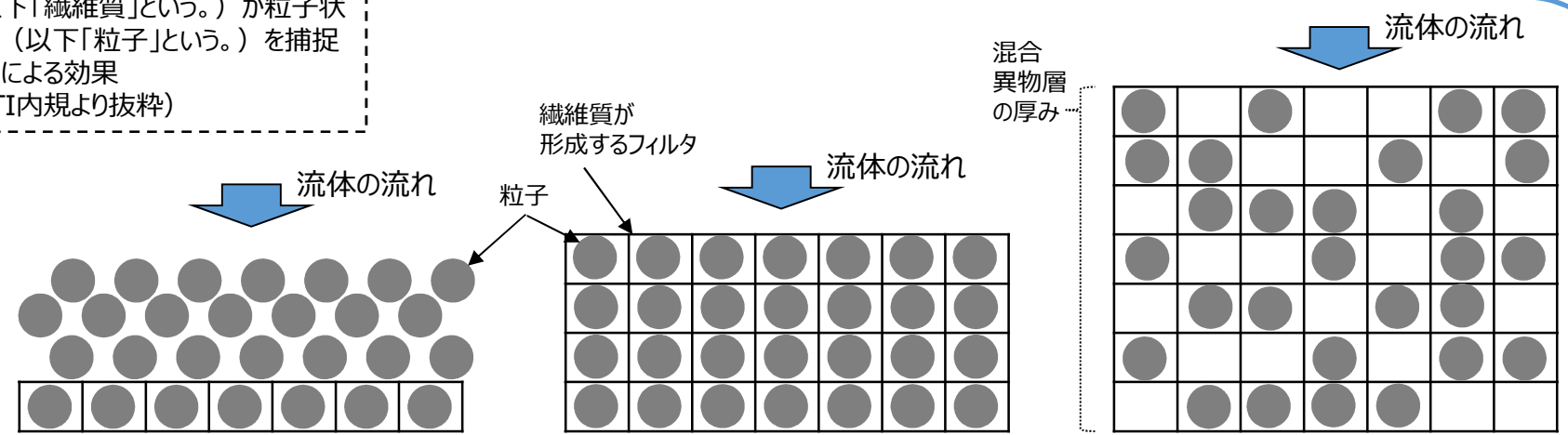
---

		PWR	BWR
サンプスクリーン/ECCCSストレナ性能評価	設備構成 (格納容器内)	<ul style="list-style-type: none"> <li>1次系全体(SG、加圧器等)を格納容器内に収容 ⇒CV内構造体、保温対象設備が多い ⇒LOCA時ジェットによる破損塗装/保温材が多い</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>原子炉で直接蒸気を発生させることから、SG/加圧器が不要 ⇒格納容器内構造体、保温対象設備が少ない ⇒LOCA時ジェットによる破損塗装/保温材が少ない</li> </ul>
	規制要求	非化学デブリによる異物圧損は <b>薄膜効果が発生する事を前提</b> としても許容圧損以下であること。	
	設計対応	<ul style="list-style-type: none"> <li>格納容器内構造体、保温対象設備が多いが圧損低減のためのスクリーン大型化の構造上の制約がない ⇒<b>スクリーン大型化により圧損低減を図る</b> (スクリーンの異物圧損評価に影響しないため、繊維系保温材量低減は不要と評価)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>格納容器内構造体、保温対象設備が少ない</li> <li>圧損低減のためのストレナ大型化は構造上の制約がある(配置スペース、耐震評価上) ⇒<b>ストレナ大型化(従来から実施)に加え繊維質保温材を撤去し、圧損低減を図る</b></li> </ul>
	設備対応方針	<ul style="list-style-type: none"> <li><b>スクリーン大型化(スクリーン表面積拡大)で対応(繊維保温材の取替は実施しない)</b></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><b>繊維保温材を可能な限り撤去</b></li> <li><b>ストレナ大型化(従来から実施)</b>の組み合わせで対応</li> </ul>
下流炉内影響	燃料集合体	<ul style="list-style-type: none"> <li>オープンチャンネル (局所から流入した冷却材が炉心全体へ広がる)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>クローズチャンネル (他の燃料集合体との冷却材の移動はない)</li> </ul>
	対応方針	<ul style="list-style-type: none"> <li>非化学デブリによる炉心入口部の圧損は小さい</li> <li>化学デブリ析出後は代替流路から冷却材供給可能</li> <li>非化学/化学デブリによるLOCA後の炉心長期冷却への影響はない</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>燃料上部は流路が広く、デブリによる閉塞は生じない</li> <li>繊維保温材を撤去しており、LOCA後の炉心長期冷却性への影響はない</li> <li>燃料下部に仮に繊維質含め実機を包含する保守的な条件のデブリが到達したと仮定しても、冷却材を供給可能</li> </ul>

# 【参考】薄膜効果を踏まえたPWRの対応の考え方について

**薄膜効果とは**  
 ストレーナ表面に堆積した繊維状の異物（以下「繊維質」という。）が粒子状の異物（以下「粒子」という。）を捕捉することによる効果  
 (METI内規より抜粋)

＜異物層（粒子及び繊維質）で生じる圧損メカニズムのイメージ＞  
 異物層の厚み方向の堆積イメージを下図に示します。



**粒子が繊維質のフィルタの捕捉量を上回る状態 (A)**

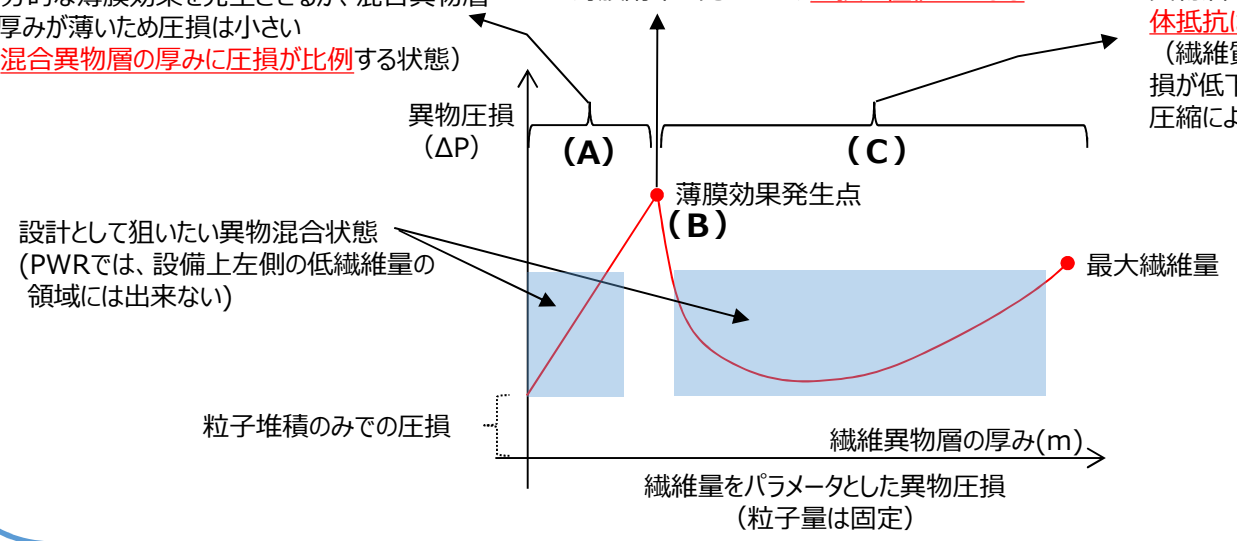
部分的な薄膜効果を生じさせるが、混合異物層の厚みが薄いため圧損は小さい  
 (混合異物層の厚みに圧損が比例する状態)

**混合異物層の厚み方向に対して一様に異物層の密実度が最も高い状態 (B)**

薄膜効果を生じさせ、**圧損の極値を生じる**

**繊維質によるフィルタに粒子が入り込むが、フィルタの隙間が生じている状態 (C)**

異物層の密実度が低下し、**単位厚さあたりの流体抵抗は低下する**  
 (繊維質のフィルタ厚みの上昇に伴い一度は圧損が低下するが、フィルタ厚みの更なる増加及び圧縮により圧損は再上昇する。)



この混合状態を維持し、  
 ・異物層厚の低減  
 ・通過流速の低減  
 の両者を達成出来るのが  
**“スクリーン面積の増強”**

(安易に繊維異物の低減を行うと、プラント異物条件を薄膜効果発生点に近づけることとなるため保守性の排除につながる)