

# 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におけるこれまでの検討状況

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)

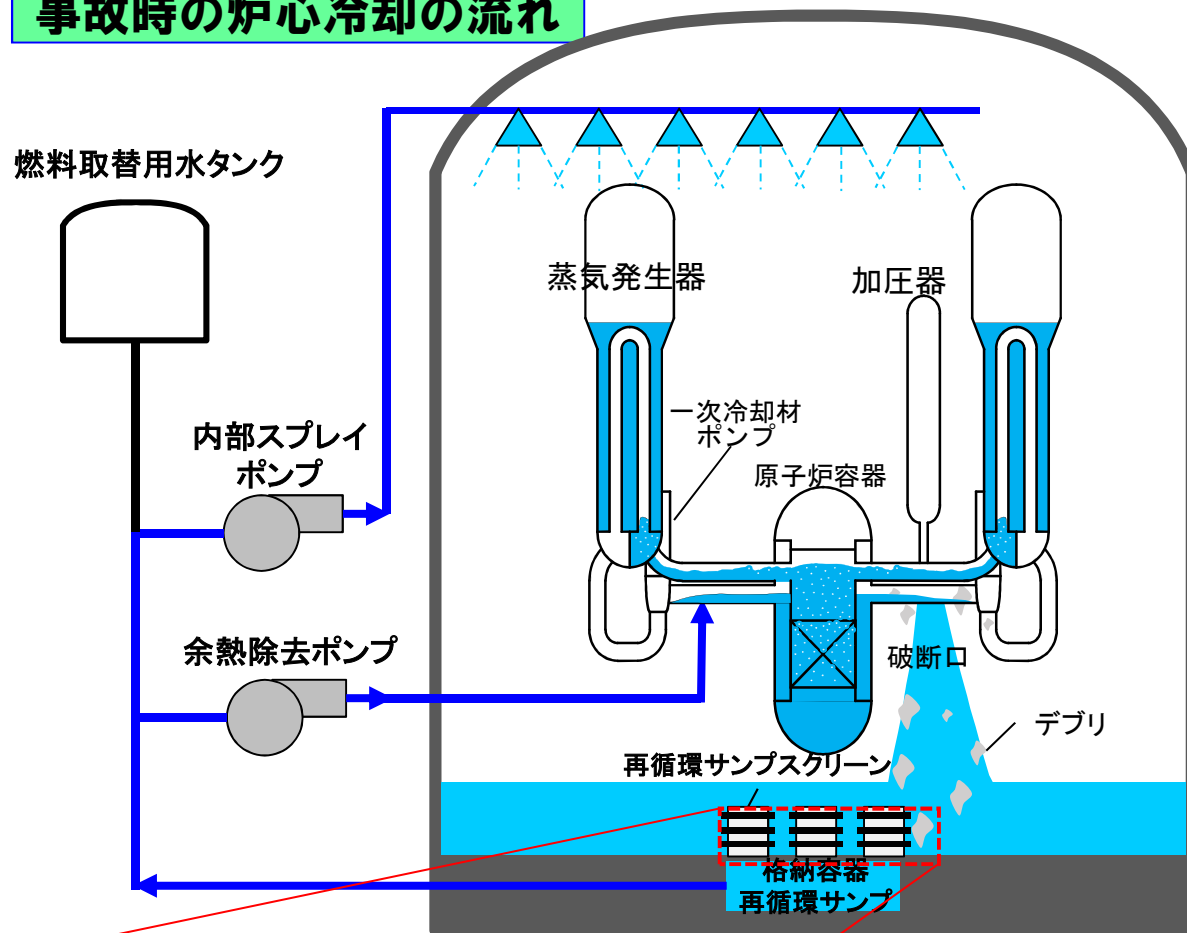
2020年12月7日

---

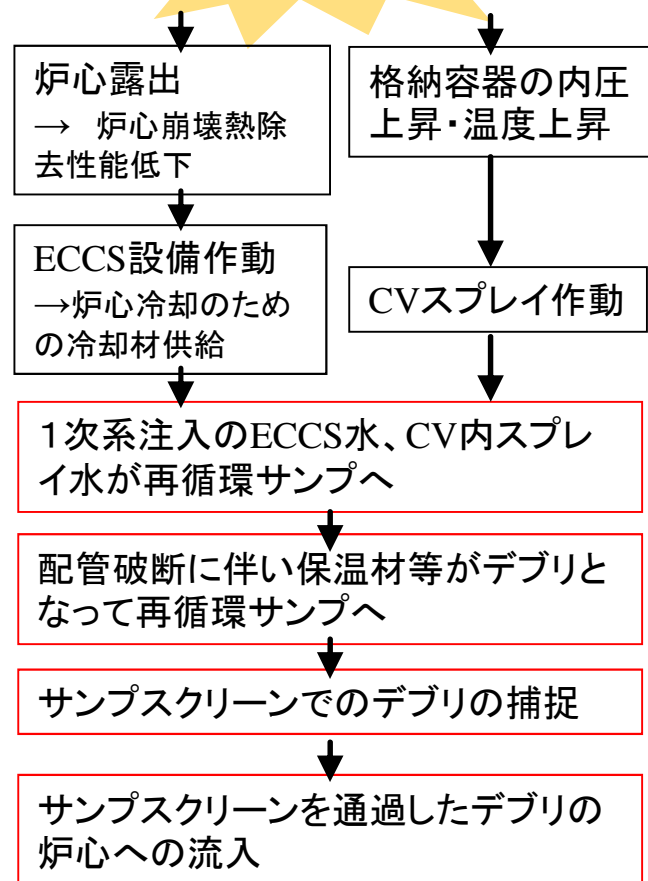
1. 背景
2. 全体計画
3. デブリ投入試験
4. まとめ

# 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



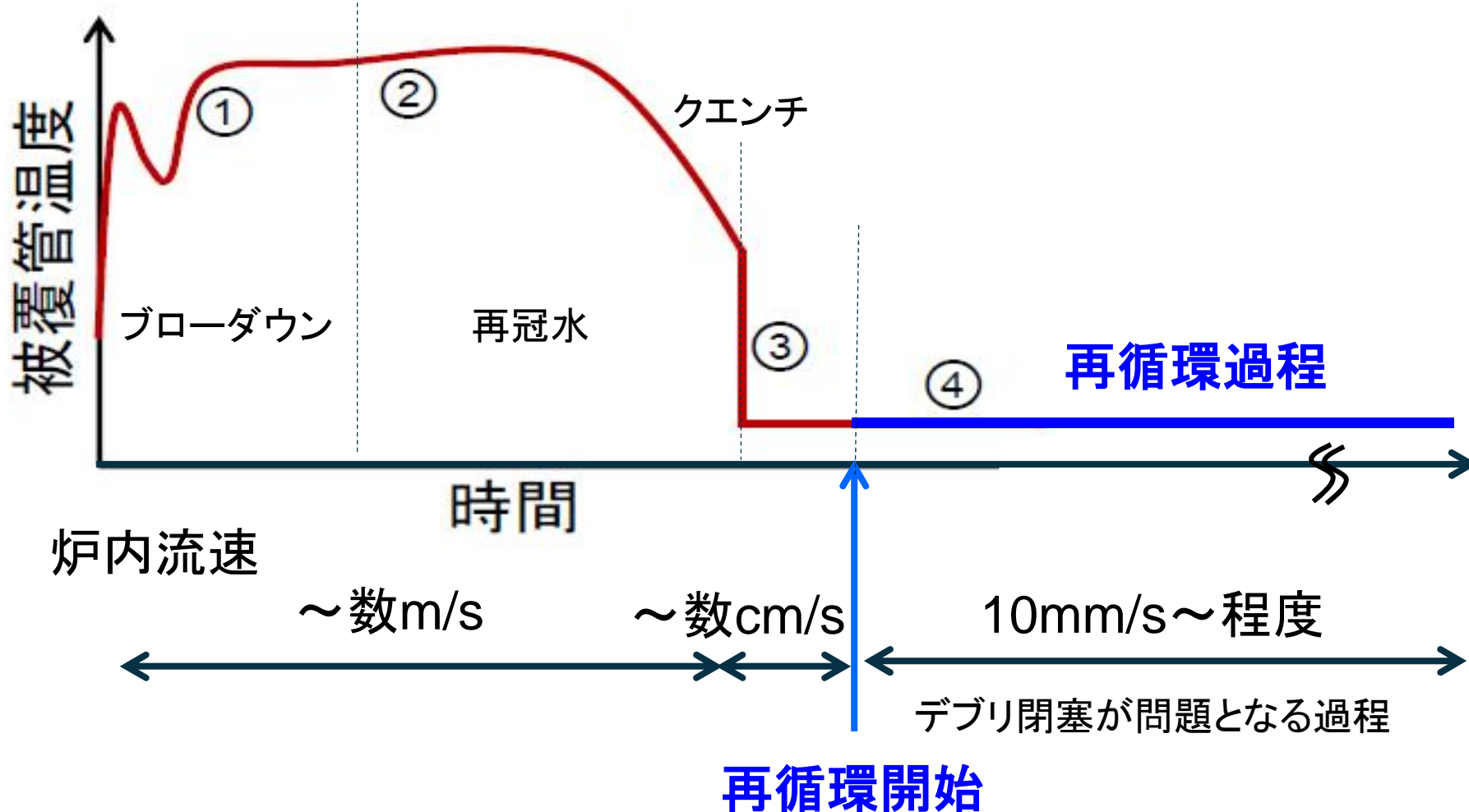
### 1次系配管破断(LOCA)発生



**【懸案】炉心入口閉塞による炉心冷却水量の不足**

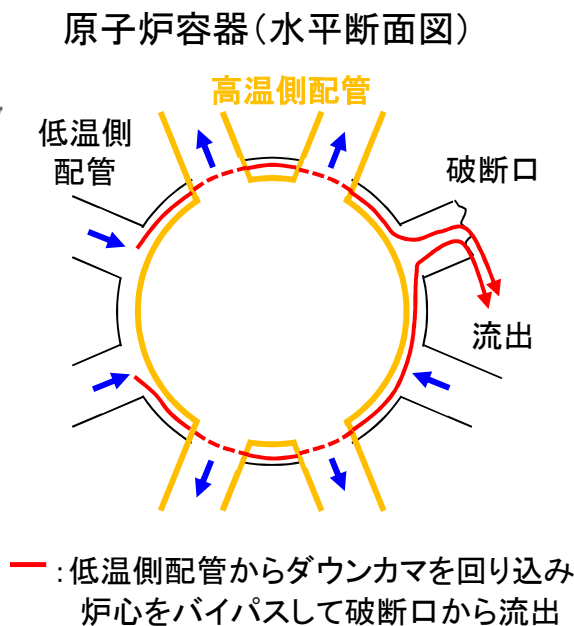
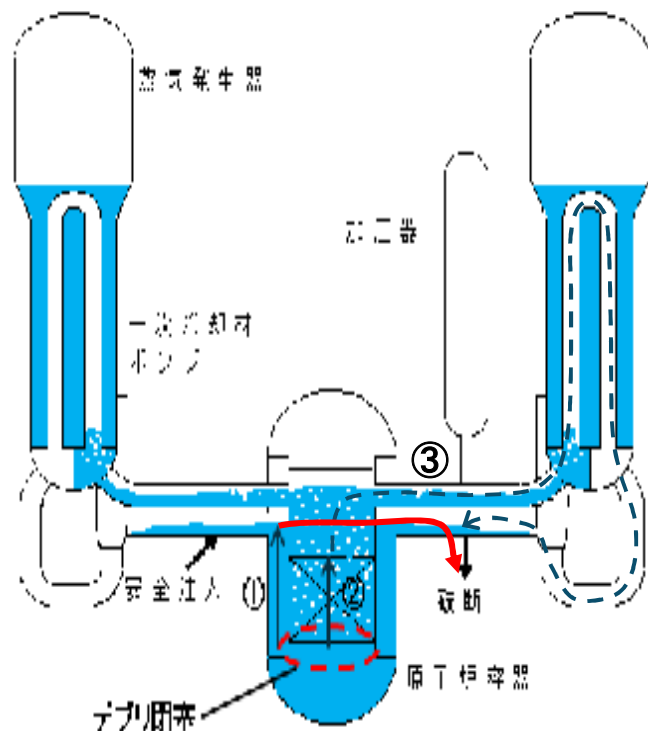
# 1. 背景(2/4) 大LOCA時の被覆管温度 & 炉内流速の挙動

- 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-

4



- 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

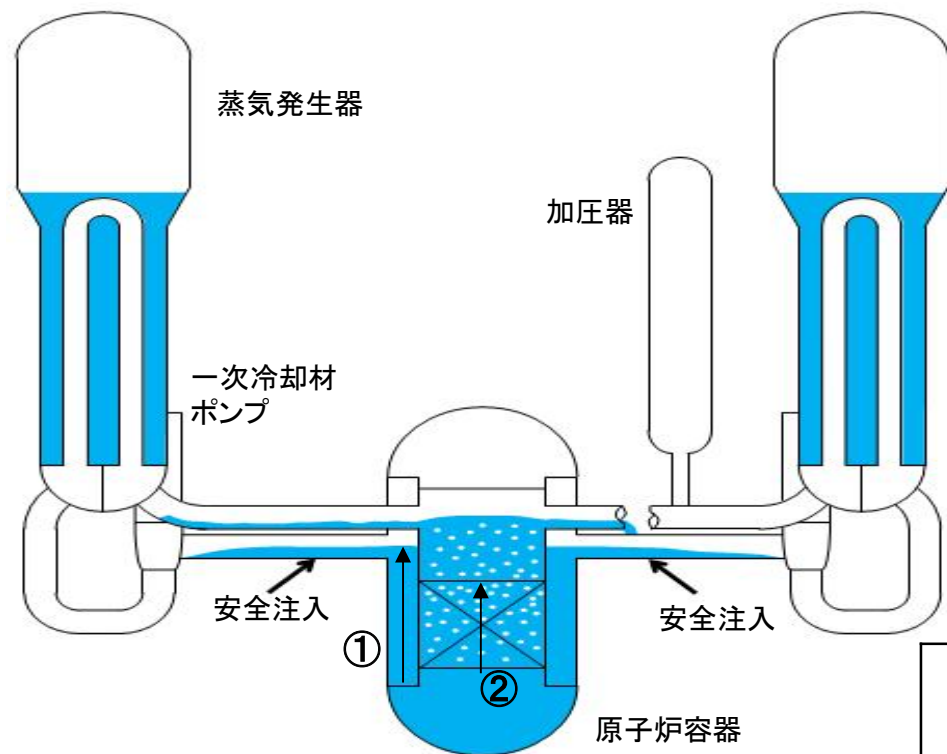
## ■ 炉心への冷却材供給の駆動力

- 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コマ水頭(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

- 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、現在検討中の事項は「サンプスクリーン下流側影響の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中。



## 2. 全体計画(2/3) 評価シナリオと検討の概要

8

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

→ P13参照

→ P13参照

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

→ P19参照

基礎試験3: 下部ノズル+下部グリッド  
2体体系

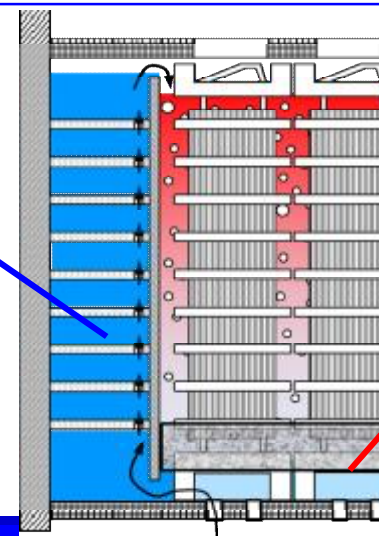
→ P19参照

フルスケール燃料集合体2体体系試験

→ P25参照

【後半】  
バッフル  
バレル  
流路

【前半】  
炉心入口  
流路





---

### 3. デブリ投入試験 (解析の前提・入力の妥当性確認)

## 3. デブリ投入試験

### 3.1 基礎試験1: 簡易小体系でのデブリ通過性確認

- 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
- バッフルバレル 部分模擬試験

### 3.2 基礎試験2, 3: 炉心入口部模擬 2体試験

- 下部ノズル2体体系試験
- 下部ノズル+下部グリッド2体体系試験

### 3.3 フルスケール燃料集合体2体体系試験

### 3.4 海外試験条件模擬 小規模体系試験

### 3. デブリ投入試験 【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(大飯3, 4号)のデブリ濃度を基準として投入※

※基準濃度の3倍まで濃度を高めて試験を実施

種類	基準濃度 (kg/m <sup>3</sup> )
繊維デブリ	約0.4
粒子デブリ	約1.2

○繊維デブリ



保温材  
(ロックウール)

○粒子デブリ



塗装片



保温材  
(ケイ酸カルシウム)



潜在粒子

### 3. デブリ投入試験

#### 3.1 基礎試験1: 簡易小体系でのデブリ通過性確認

- ・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
- ・バッフルバレル 部分模擬試験

##### 目的:

- Ø デブリによる閉塞が発生した場合の影響を確認
- Ø バッフルバレルによる炉心冷却の成立性の確認

#### 3.2 基礎試験2, 3: 炉心入口部模擬 2体試験

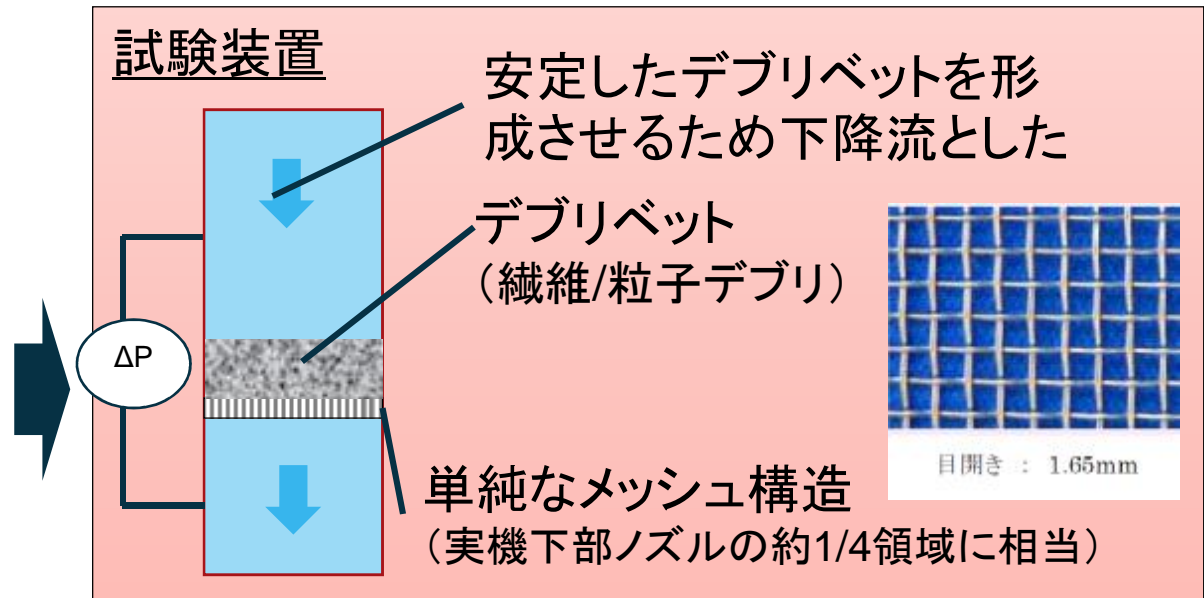
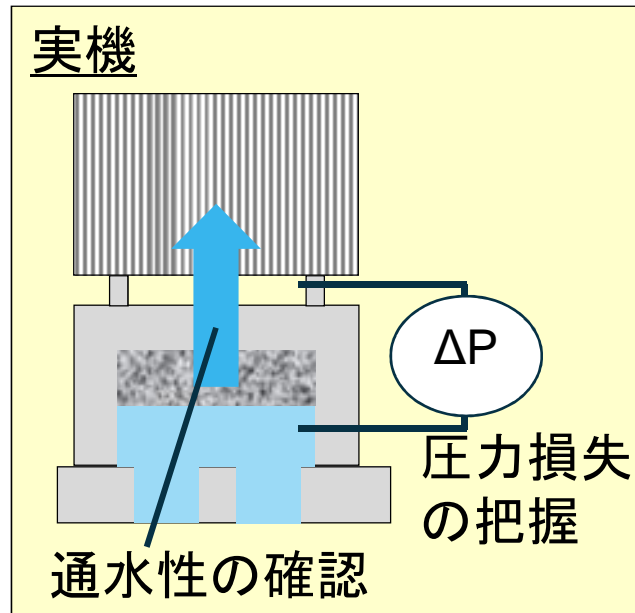
- ・下部ノズル2体体系試験
- ・下部ノズル+下部グリッド2体体系試験

#### 3.3 フルスケール燃料集合体2体体系試験

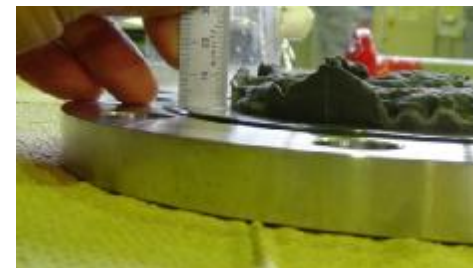
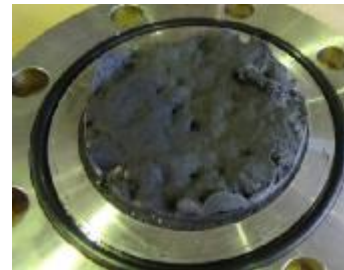
#### 3.4 海外試験条件模擬 小規模体系試験

### 3.1(1) 下部ノズル流路孔 部分模擬試験

#### ○試験装置の概要



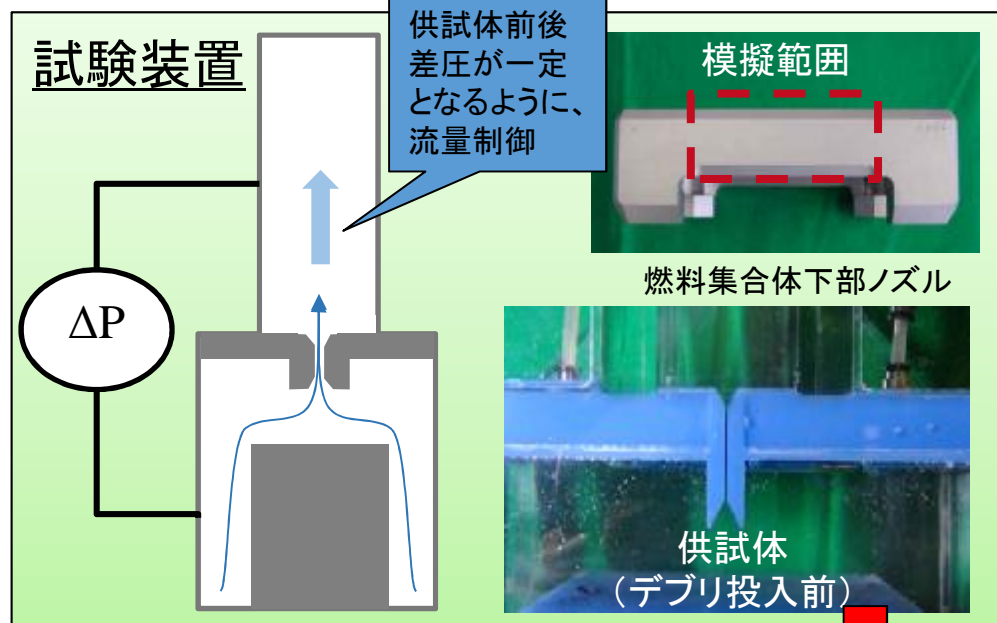
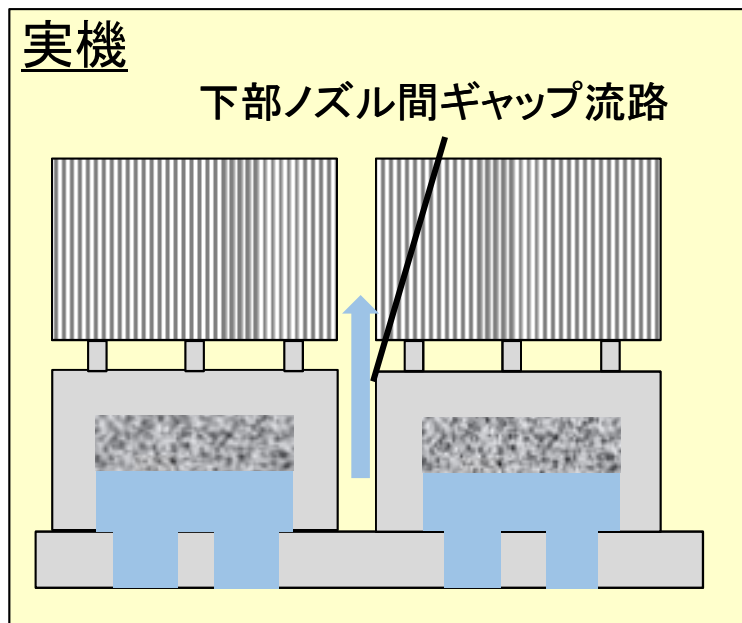
#### ○試験結果



試験後の  
デブリベッド

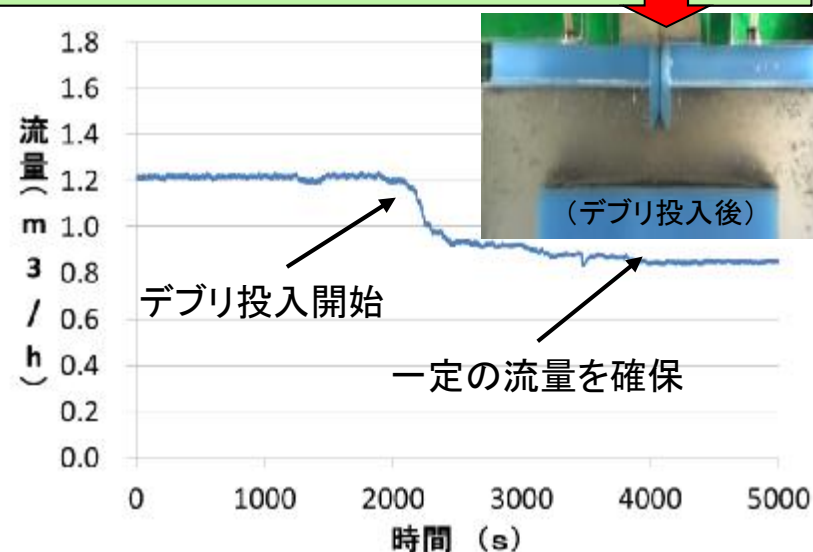
- デブリベッドが形成され圧力損失が200kPaに到達
- 下部ノズル流路孔はデブリにより全閉塞する可能性が高いことが判明
- 下部ノズル流路孔以外で冷却材供給に有効な流路を検討

## ○試験装置の概要



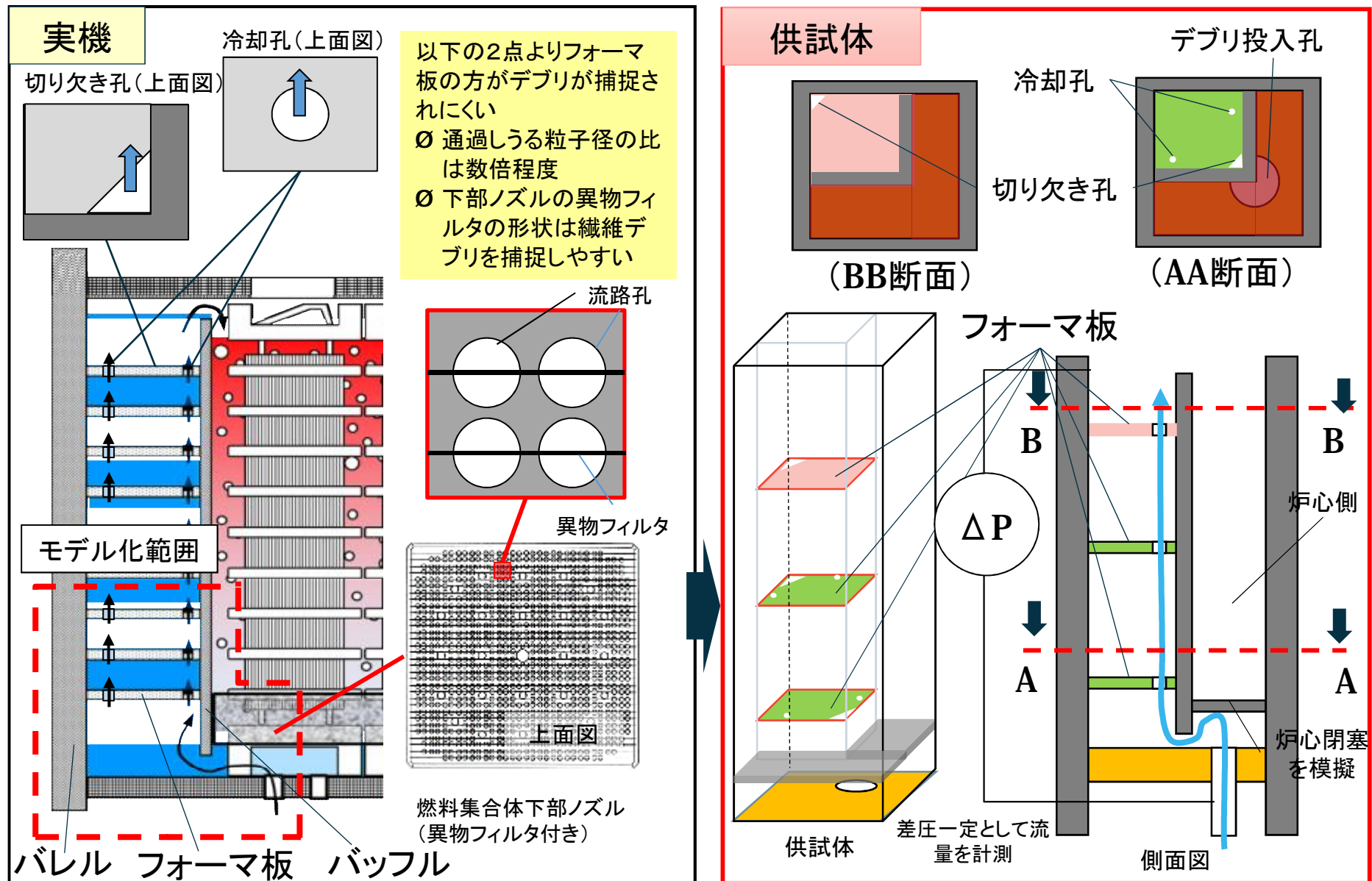
## ○試験結果

- 下部ノズル間ギャップはデブリで閉塞せず、一定の流量を確保できる見通しを得た
- これ以降に実施する試験では下部ノズル間ギャップを模擬する必要がある



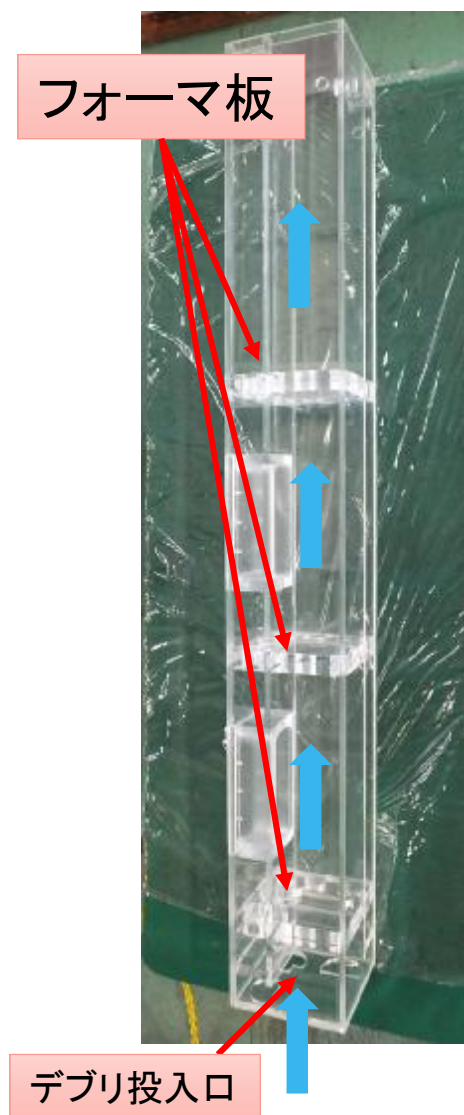


### 3.1(3) バッフルバレル 部分模擬試験



### 3.1(3) バッフルバレル 部分模擬試験

供試体の外観(写真)



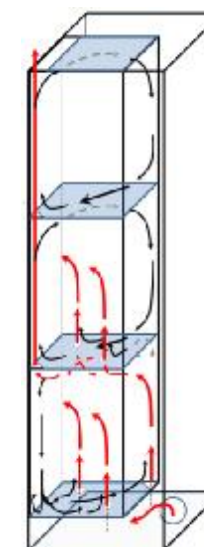
#### ○試験条件

- ・流量：一定圧力(800mmH<sub>2</sub>O)で制御
- ・デブリ濃度：国内代表プラントデブリ濃度を基準※

※基準濃度の2倍まで濃度を高めて試験を実施

種類	基準濃度(kg/m <sup>3</sup> )
繊維デブリ	約0.4
粒子デブリ	約1.2
化学デブリ	約0.5

#### ○計測項目：流量



## ○試験結果

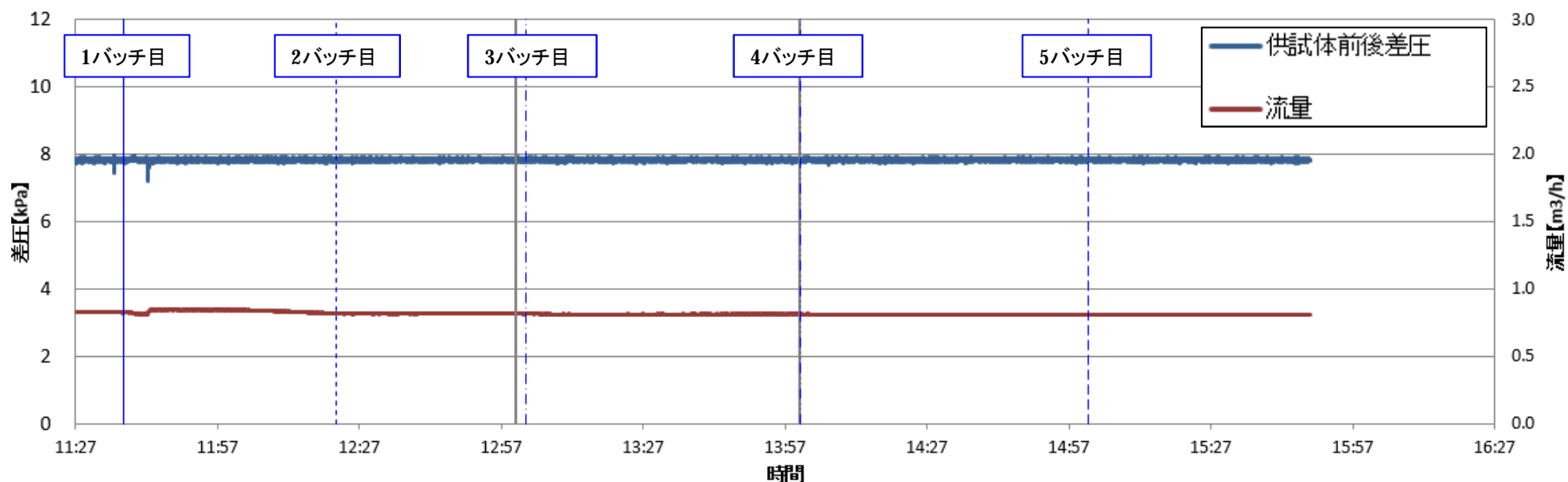
- フォーマ板にデブリが堆積するものの流路孔の閉塞は見られず一定の流量が確保された
- バッフルバレル流路による炉心冷却の見込みを得た



供試体の外観写真(試験中)



堆積デブリ(水抜き後)



差圧及び流量の時系列データ

### 3. デブリ投入試験

#### 3.1 基礎試験1：簡易小体系でのデブリ通過性確認

- 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
- バッフルバレル 部分模擬試験

#### 3.2 基礎試験2, 3：炉心入口部模擬 2体試験

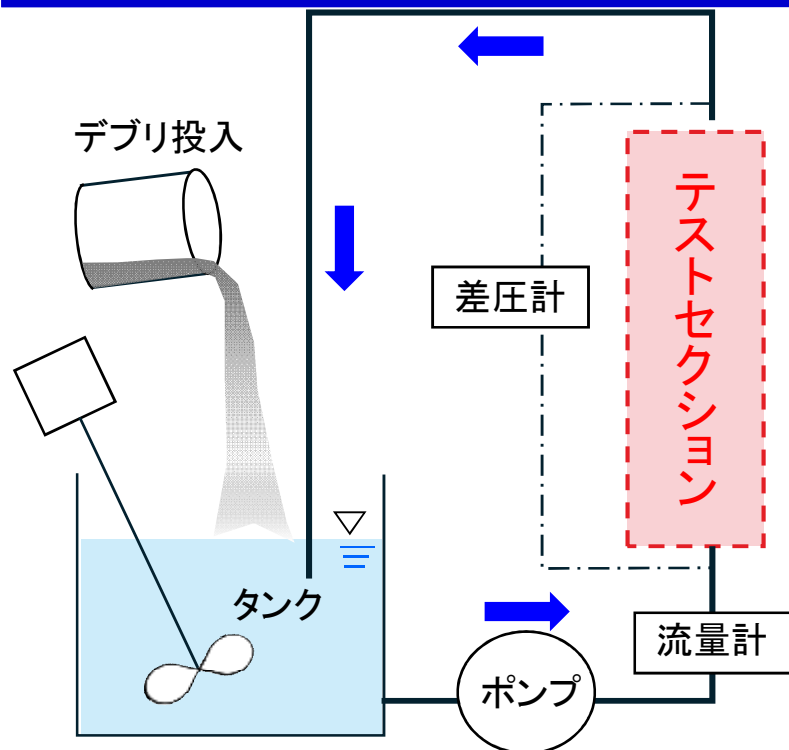
- 下部ノズル2体体系試験
- 下部ノズル＋下部グリッド2体体系試験

#### 目的:

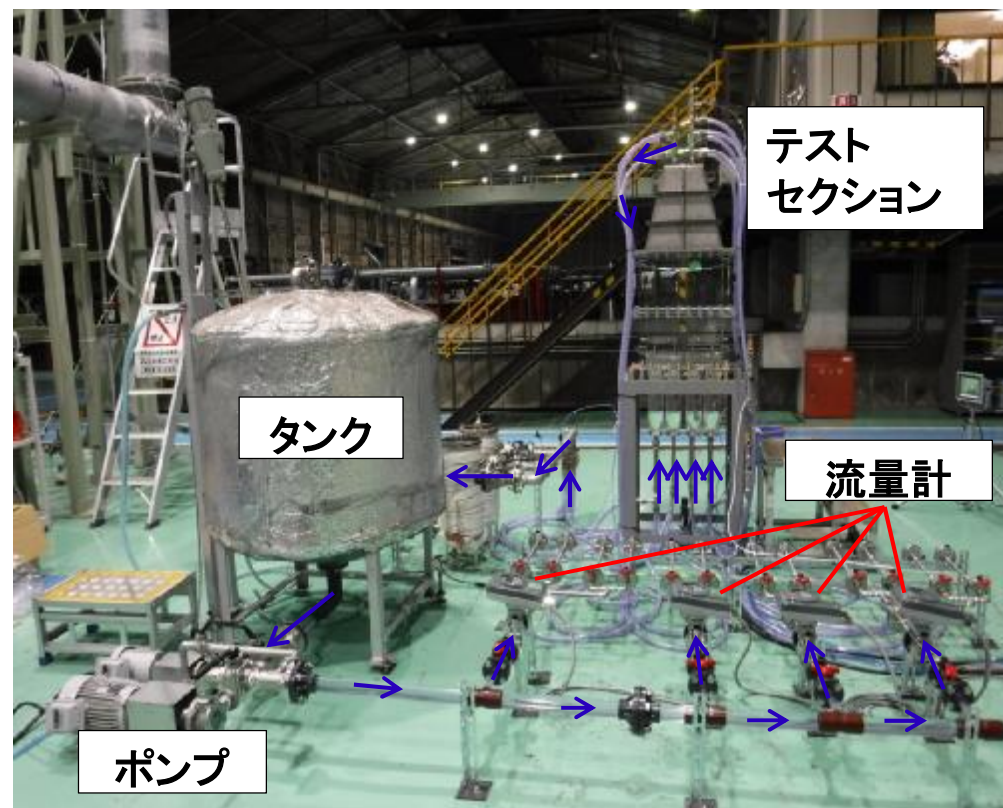
- 非化学デブリを投入した場合における燃料集合体下部の通水性を確認

#### 3.3 フルスケール燃料集合体2体体系試験

#### 3.4 海外試験条件模擬 小規模体系試験



試験装置概略図



供試体外観

- ・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※

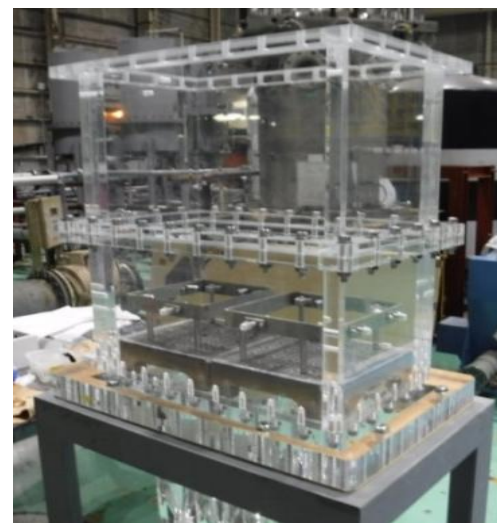
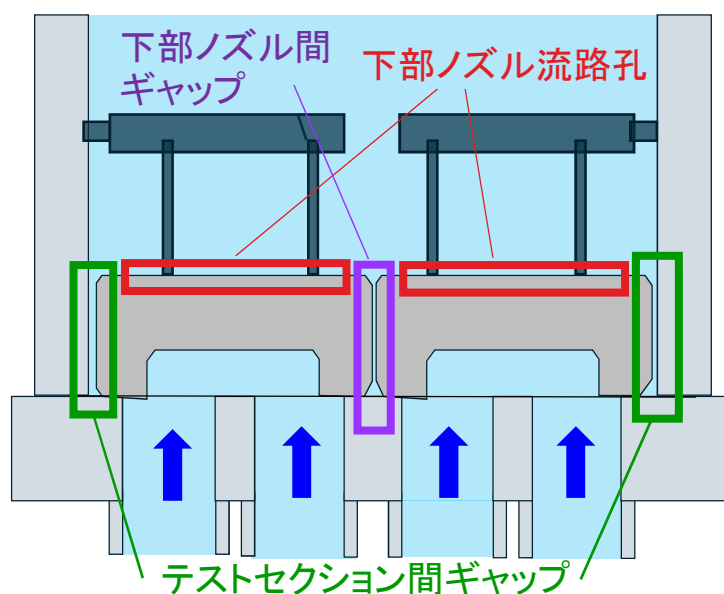
※基準濃度の3倍まで濃度を高めて試験を実施

## 3.2 下部ノズル2体体系試験 -試験条件-

### 【試験ケース】

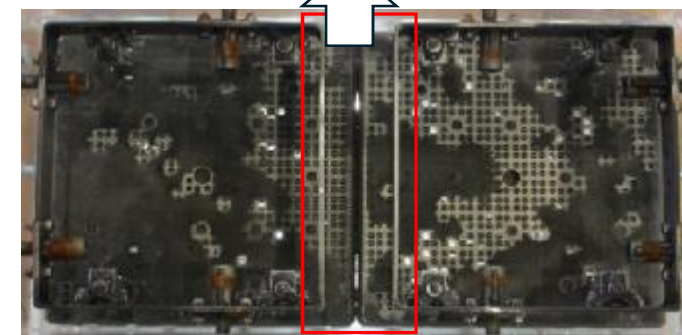
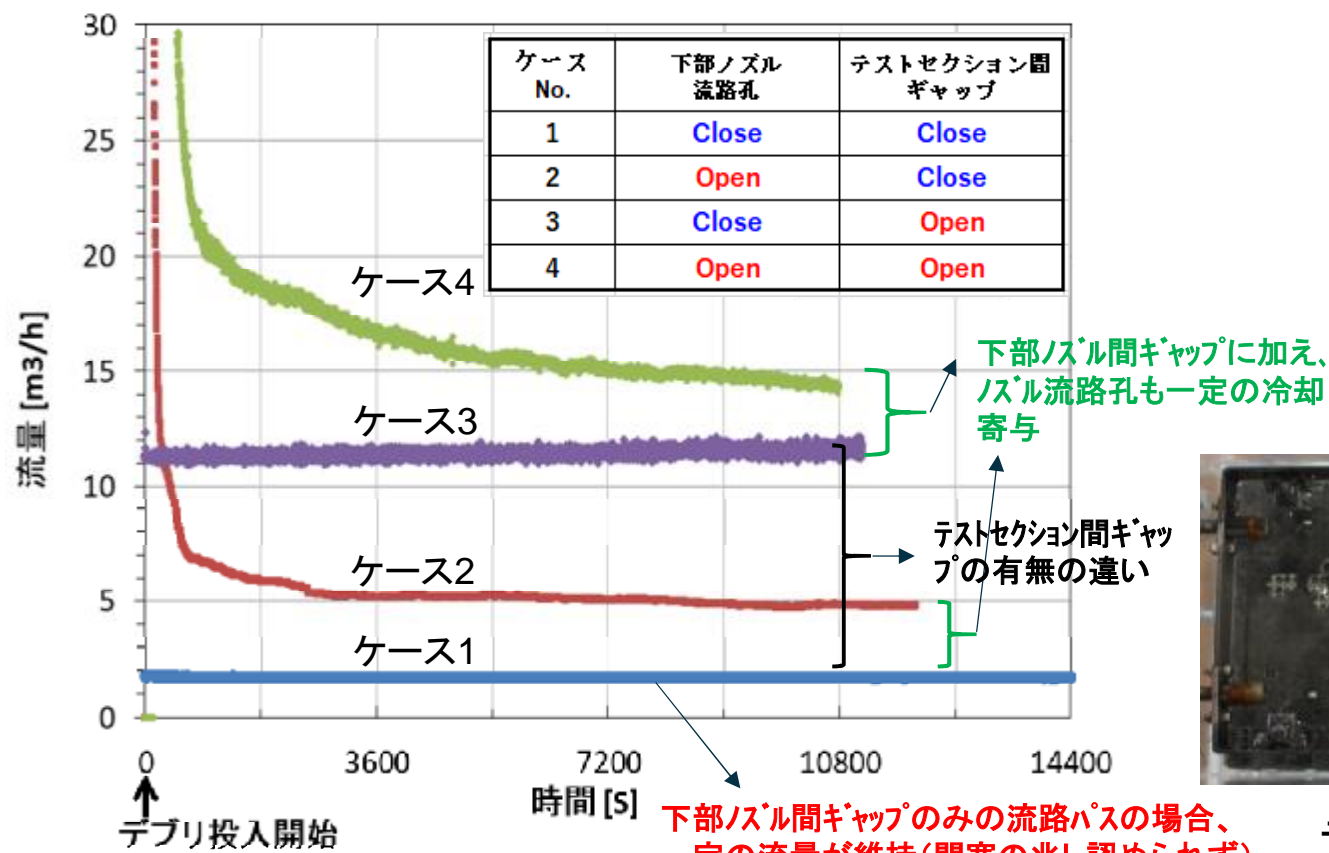
- 下部ノズルへのデブリ影響を確認
- 下部ノズル流路孔、下部ノズル-テストセクション間のギャップをパラメータとした試験を実施

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
1	Open	Close	Close	下部ノズル (2体)
2	Open	Open	Close	
3	Open	Close	Open	
4	Open	Open	Open	



供試体外観

### 3.2 下部ノズル2体体系試験 -試験結果-



デブリ付着状況: ケース4

※一定差圧条件で整理

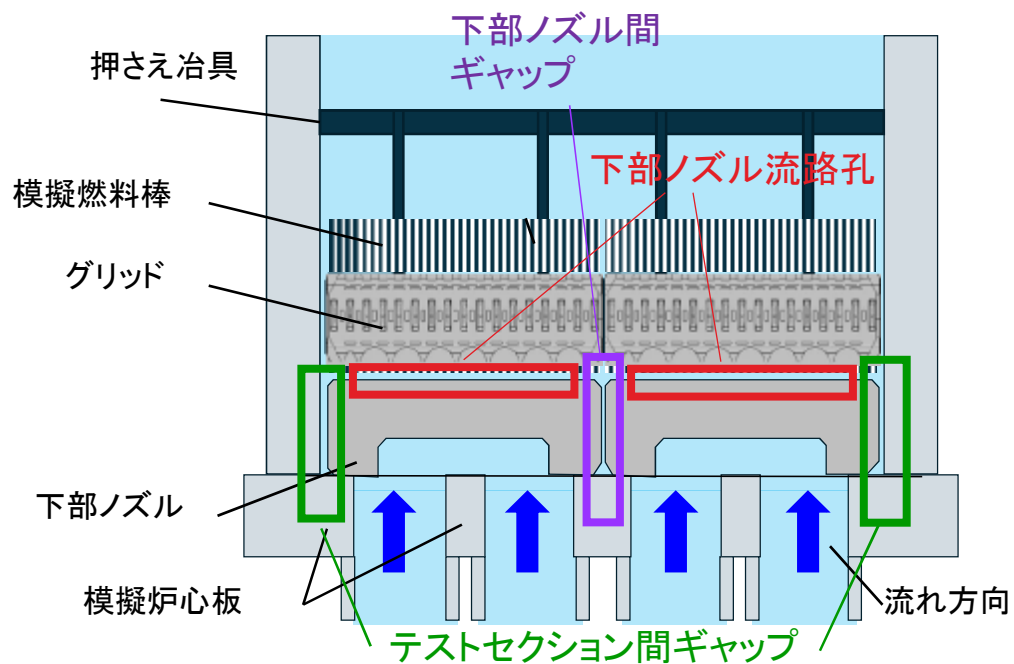
- 下部ノズル流路孔が全面閉塞した場合であっても、十分な流量を確保できることが判明。下部ノズルの通水性に問題がないことを確認した。
- 下部ノズル流路孔についても完全に閉塞はせず、一定の冷却効果があることを確認した。

## 3.2 下部ノズル+下部グリッド2体体系試験 -試験条件-

### 【試験ケース】

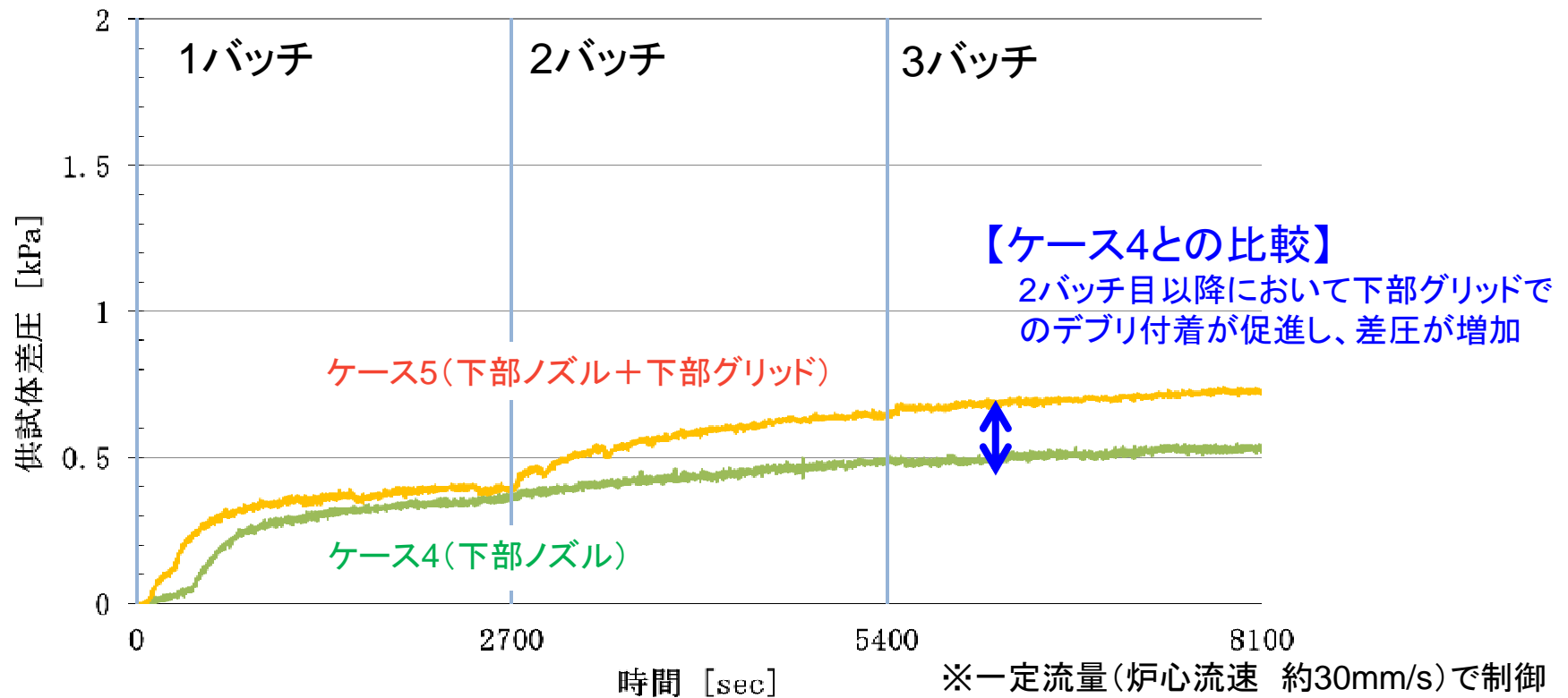
○ 下部ノズルに加え、グリッド部(+(短尺)燃料棒)へのデブリ付着状況を確認

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
4	Open	Open	Open	下部ノズル(2体)
5	Open	Open	Open	下部ノズル +下部グリッド(2体)



供試体外観





- ∅ 下部グリッドを模擬することで下部ノズルだけを模擬した場合よりも圧損がやや増加
- ∅ しかしながら、圧損の増加量は小さく通水性に問題がないことを確認

### 3. デブリ投入試験

#### 3.1 基礎試験1: 簡易小体系でのデブリ通過性確認

- 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
- バッフルバレル 部分模擬試験

#### 3.2 基礎試験2, 3: 炉心入口部模擬 2体試験

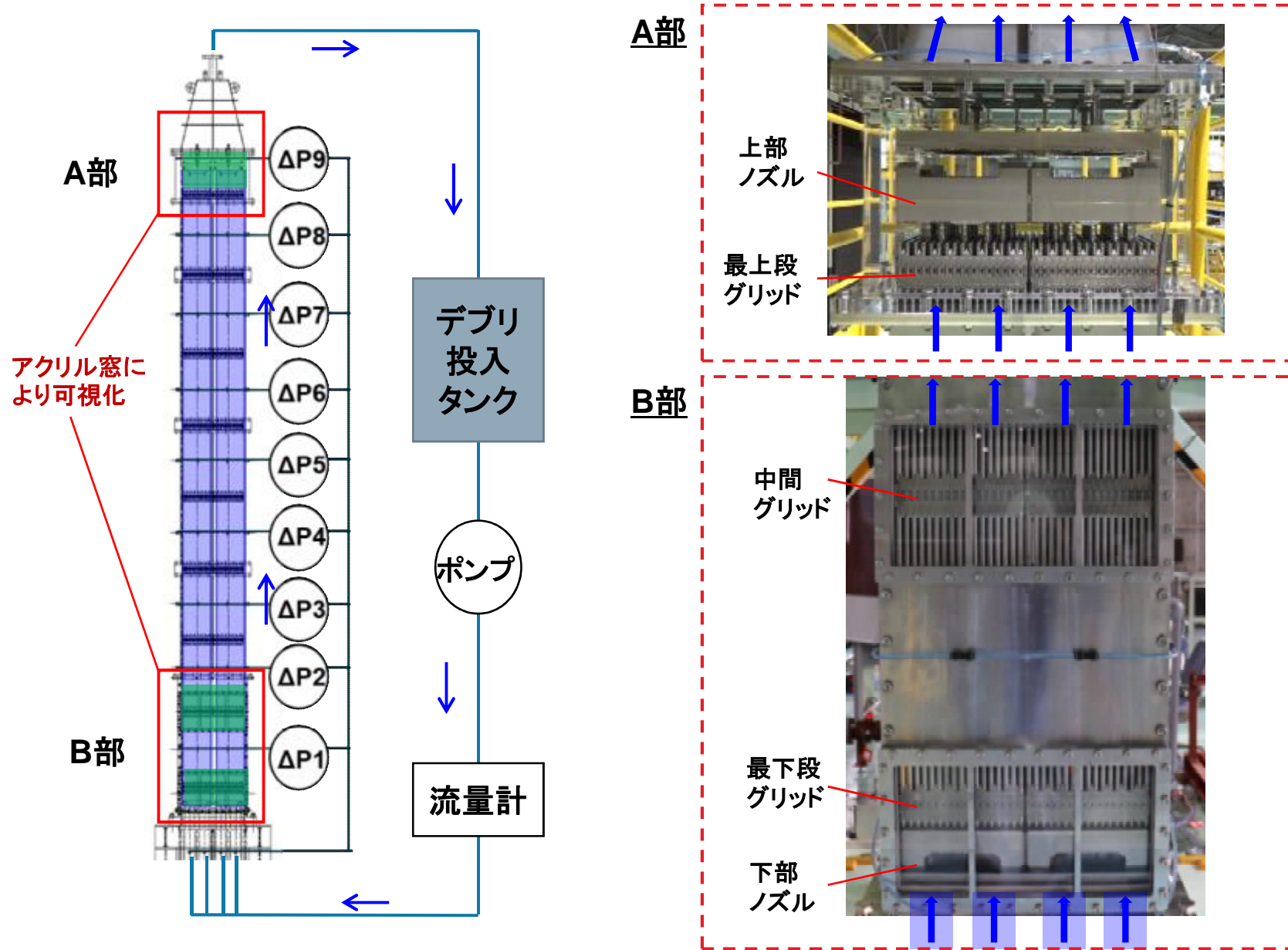
- 下部ノズル2体体系試験
- 下部ノズル+下部グリッド2体体系試験

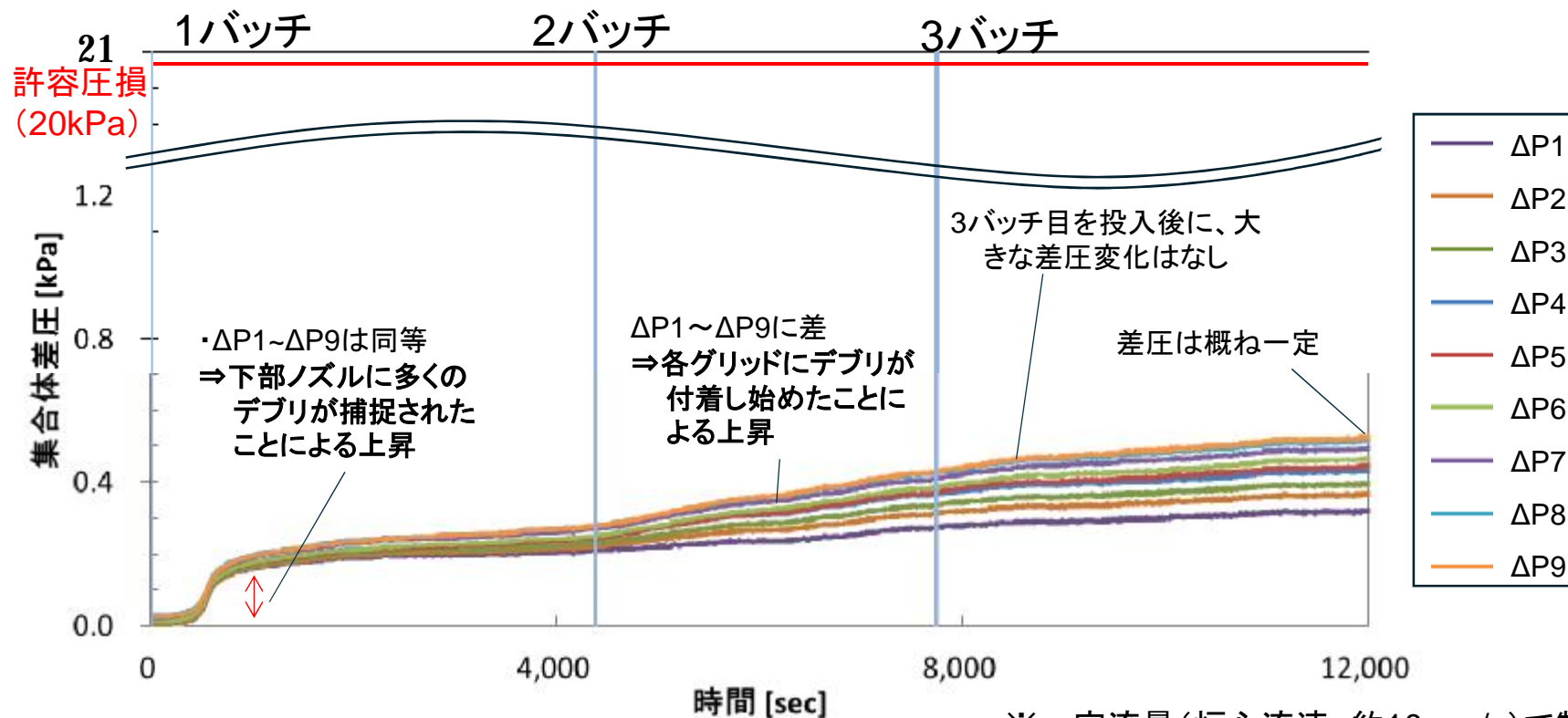
#### 3.3 フルスケール燃料集合体2体体系試験

##### 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した際に、燃料集合体内に安定した流路パスが確保され、十分な冷却が可能であることを確認

#### 3.4 海外試験条件模擬 小規模体系試験





※一定流量(炉心流速 約10mm/s)で制御

- 全燃料集合体の差圧 $\Delta P9$ は約0.6kPaで概ね一定になった
- CLB時の許容圧力損失(約20kPa)に対して十分な余裕あり
- 許容圧力損失以下であり燃料集合体内に安定した流路パスが確保され、燃料が十分に冷却できることを確認

### 3. デブリ投入試験

#### 3.1 基礎試験1:簡易小体系でのデブリ通過性確認

- 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
- バッフルバレル 部分模擬試験

#### 3.2 基礎試験2, 3:炉心入口部模擬 2体試験

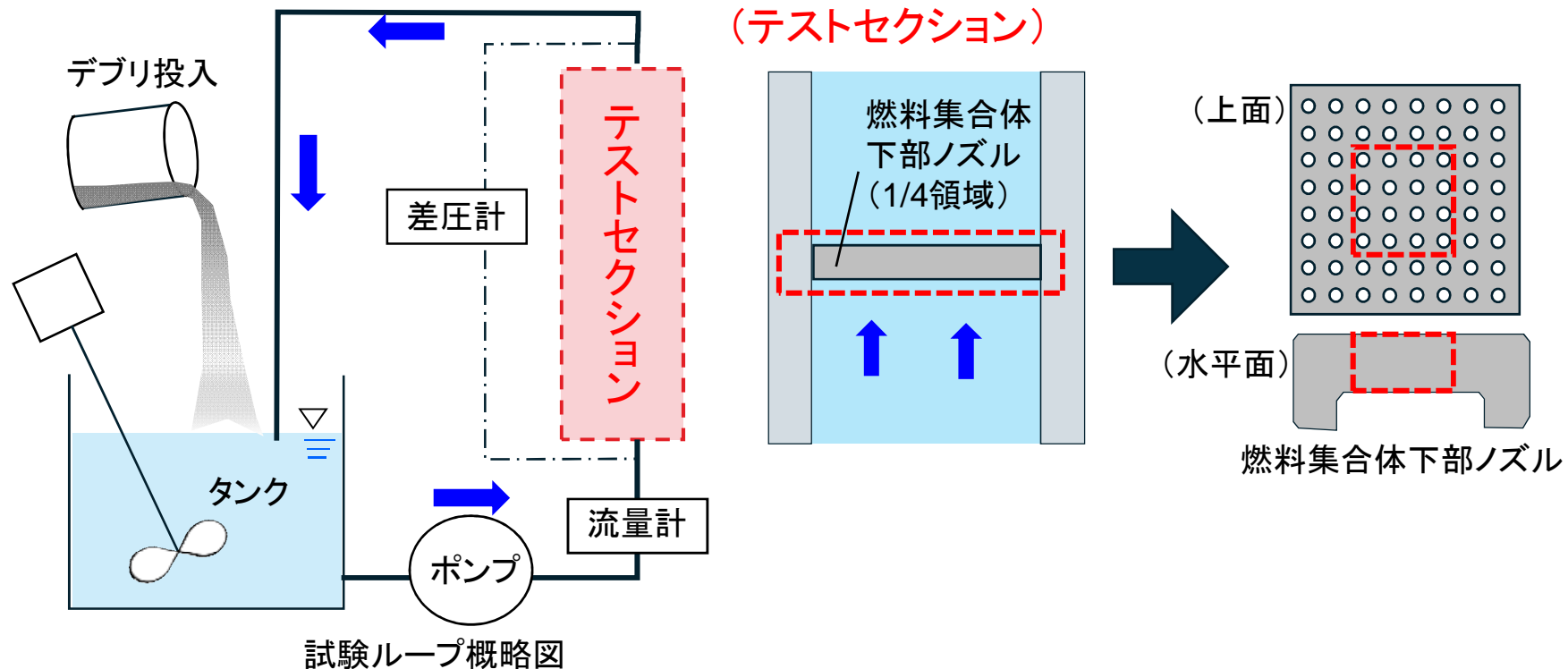
- 下部ノズル2体体系試験
- 下部ノズル+下部グリッド2体体系試験

#### 3.3 フルスケール燃料集合体2体体系試験

#### 3.4 海外試験条件模擬 小規模体系試験

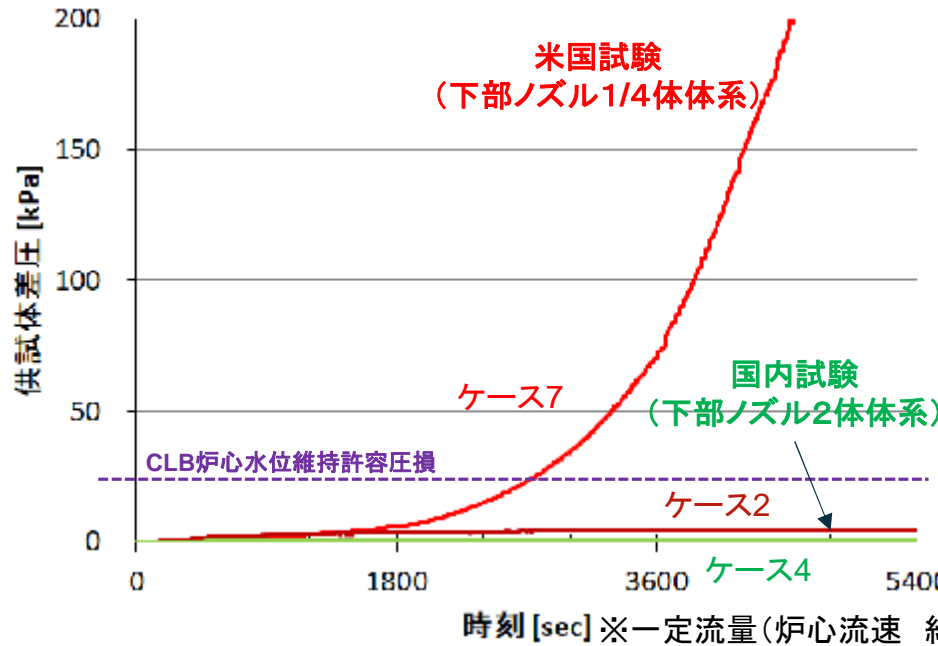
##### 目的:

- 米国試験体系と国内試験体系を比較し検討の妥当性を確認。



#### ○国内試験(下部ノズル2体体系)と米国試験(下部ノズル1/4体体系)の差異

- 米国試験では下部ノズル間ギャップ、テストセクション間ギャップが存在しない
- 米国試験は供試体の模擬範囲が小さいため、デブリが下部ノズル下面に均一に付着しやすく、流路パスが確保されにくい(模擬範囲の影響)
- 国内試験では下部ノズルの直下に下部炉心板の流路孔(4孔/集合体)が設置されていることから流れが乱され、非均一にデブリが付着し、流路が形成されやすくなる効果がある



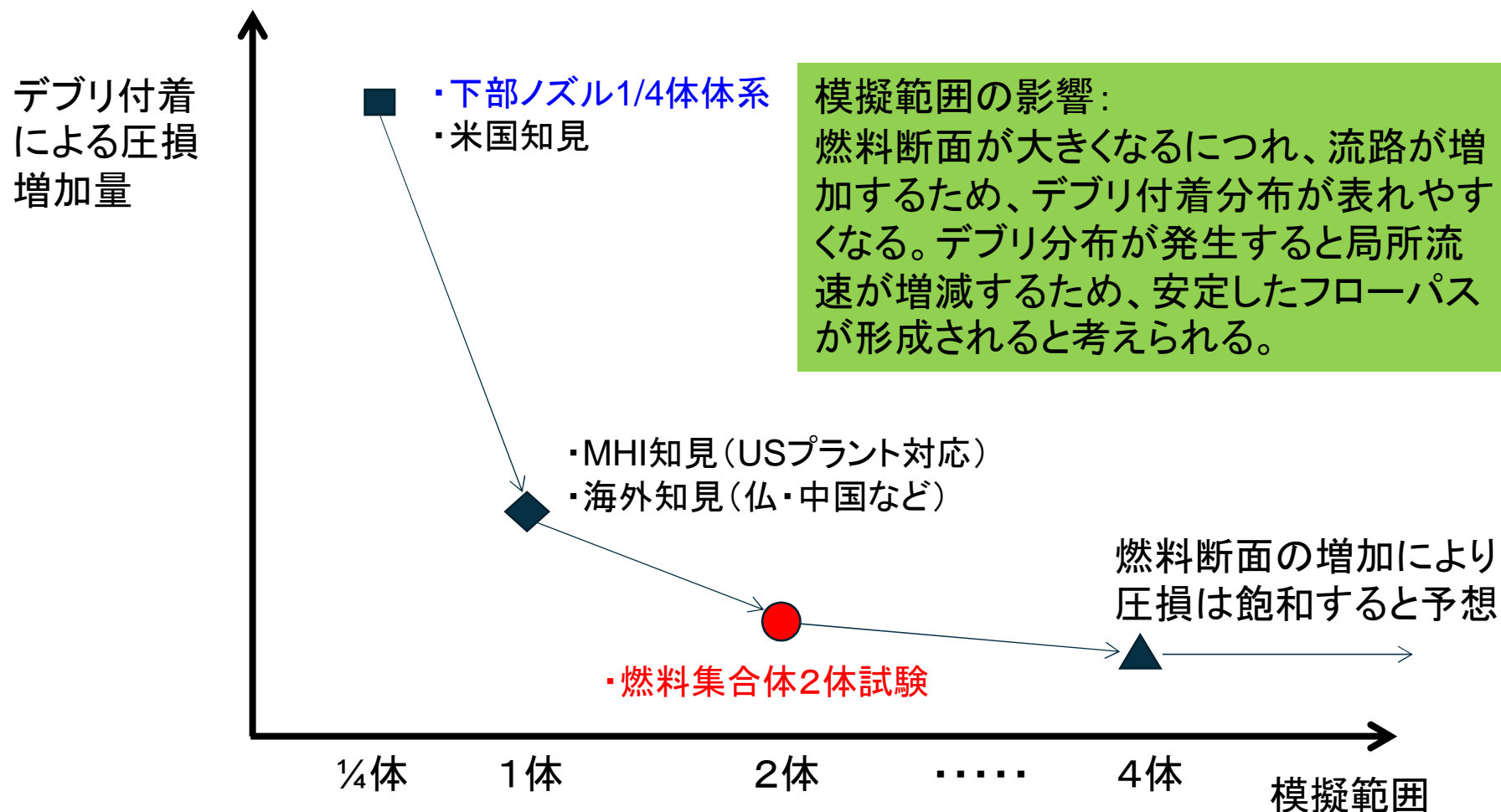
基礎試験	下部ノズル1/4体体系 (ケース7)	下部ノズル2体体系 (ケース2、ケース4※)
最大差圧	>200kPa	ケース2: 約4.4kPa ケース4: 約0.5kPa
繊維デブリ 総量	25g	450g/2FA (1/4領域当たり56g)
粒子デブリ 総量	250g	1460g/2FA (1/4領域当たり183g)
P/F	10	3

※ケース2: テストセクション間ギャップ **Close**  
 ケース4: テストセクション間ギャップ **Open**

デブリ投入に伴う圧損増加は **下部ノズル1/4体体系 >> 下部ノズル2体体系** となった。

- 下部ノズル1/4体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
- 下部ノズル2体体系では下部ノズル間ギャップ及び下部炉心板の流路孔により圧損増加が抑制されていることを確認

米国試験(下部ノズル1/4体体系)は実機に対し過度な保守性を持っており、国内試験(下部ノズル2体体系)は下部ノズル間ギャップ及び下部炉心板の流路孔の効果を反映できていることを確認



- 模擬範囲が大きいほど圧損増加量は低下する。
- 実機では試験体系に比べ格段に模擬範囲が大きくなり、燃料が十分に冷却できる見込み



---

## 4. まとめ

---

## 4. まとめ

---

- 基礎試験およびフルスケール燃料集合体2体体系試験により炉心入口流路による炉心冷却について成立の見込みが得られた。
- 米国試験との比較により、国内試験(下部ノズル2体体系)で得られた結果は妥当であることを確認した。
- LOCA後の炉心長期冷却性を確認するためには、バッフルバレル流動試験にて化学デブリ析出後の炉心冷却性の検証が必要。
- 今後の検討項目
  - 化学デブリが析出後、代替流路(バッフルバレル流路)により冷却材を供給できることを大型体系で最終確認
  - 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

---

# 参考

---

---

## 参考1

デブリ閉塞を仮定した炉内熱流動解析結果について

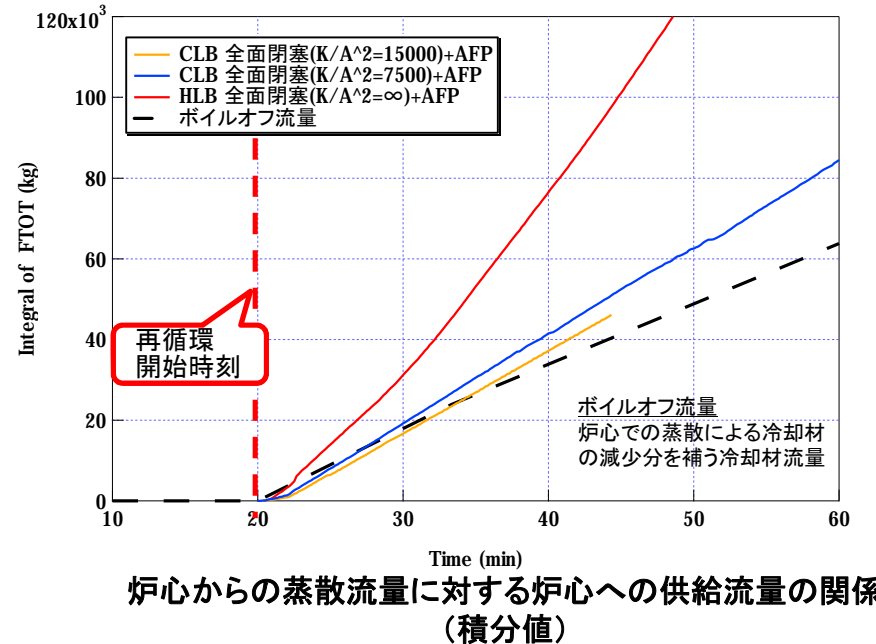
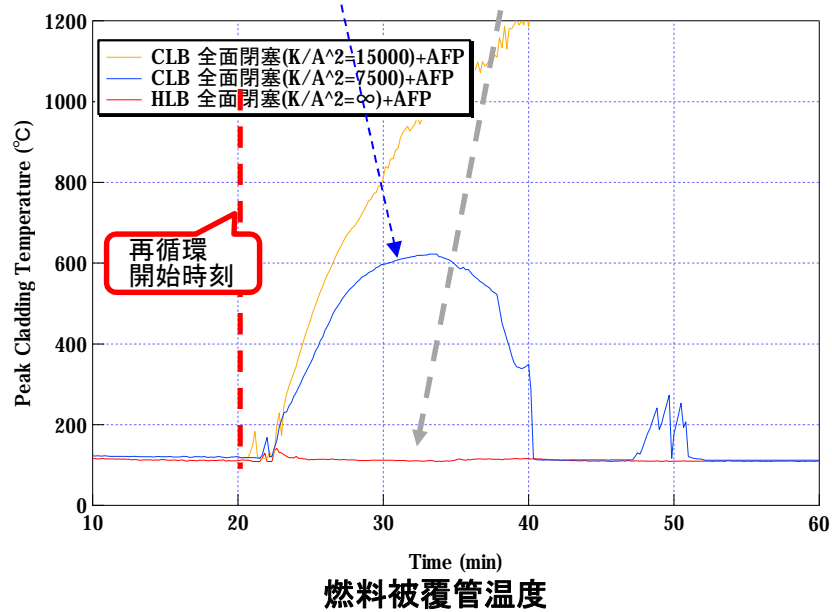
---

# バッフルバレル流路(AFP)の有効性

- n 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バッフルバレル流路による炉心への冷却材供給に時間を要する場合がある
  - 全面閉塞による圧損増加で温度上昇
- HLB: 圧損増加の程度に依らずバッフルバレル流路による炉心への冷却材供給が可能
  - 全面閉塞&圧損 $\infty$ でも温度は上昇しない。(瞬時の炉心全面閉塞後もバッフルバレル流路が速やかに機能)

	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(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

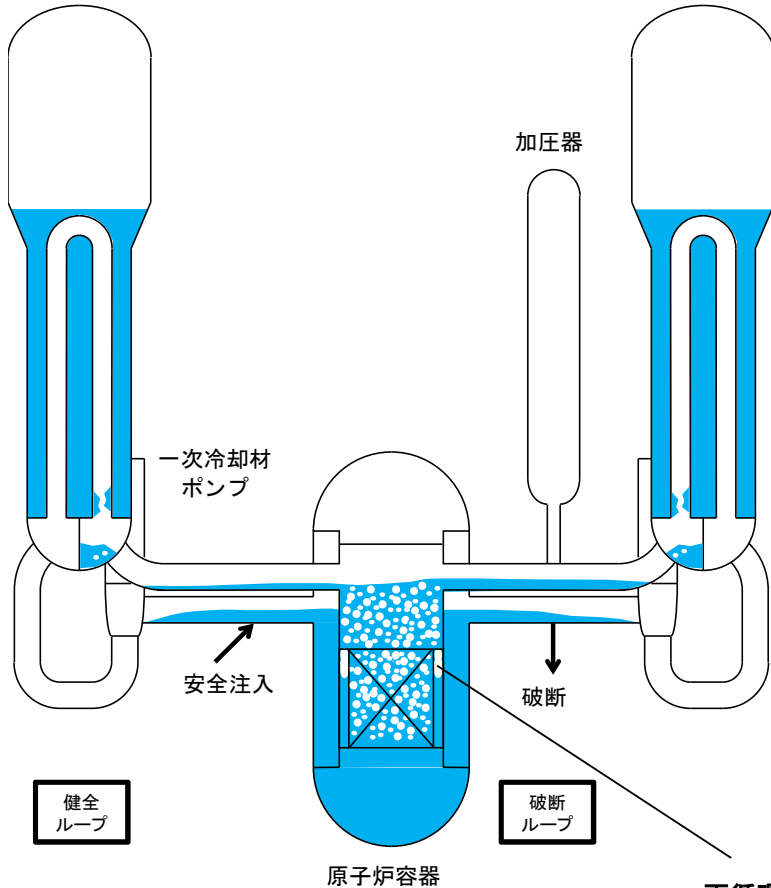
→ デブリ付着時の炉心の通水性要求はCLBの化学析出前



# 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

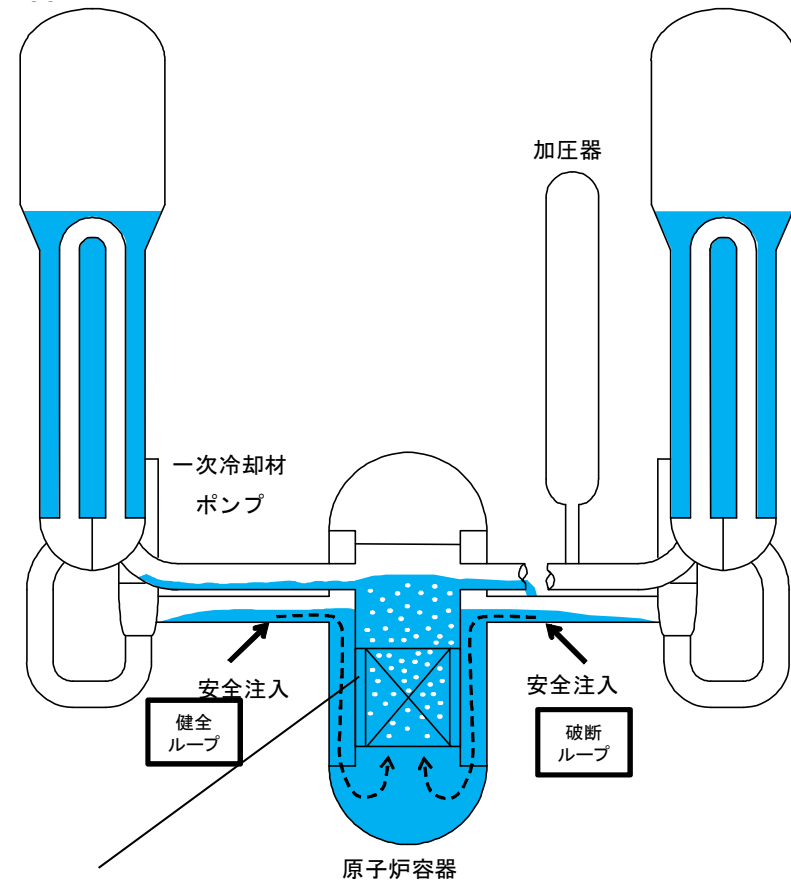
蒸気発生器

## 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)

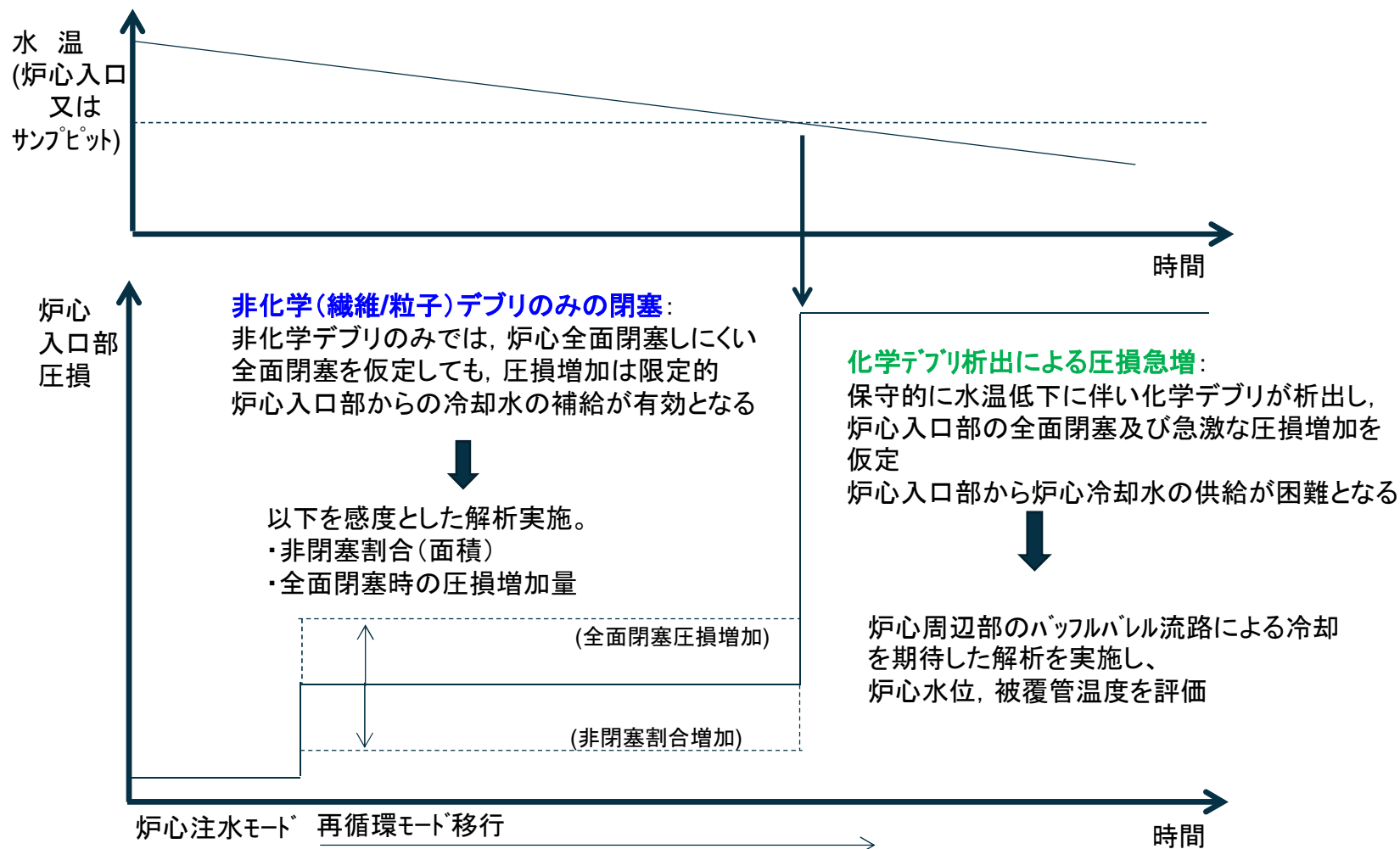
健全・破断ループからの注入は全て炉心及びバブルバレル流路を経由して破断口から流出する。RV内の水位は高温側配管レベルとなり、液相率も高い。炉心入口部からの通水が停止しても、バブルバレル流路から炉心内の蒸散に対する補給が、CLBのような時間遅れがなく行われる。

# - シナリオ概念 -

n 非化学(繊維/粒子)デブリが事象前半に、化学デブリは析出温度以下となる時刻以降となる事象後半に炉心入口部に付着

n 繊維/粒子デブリが瞬時に炉心入口を閉塞,その後化学デブリによる閉塞で圧損が急増

ü 繊維/粒子デブリによる閉塞割合を全面から緩和した場合の影響を解析



## n 使用解析コード

- 最適評価コードMCOBRA/RELAP5-GOTHIC
  - ü 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
  - ü 炉心内流動の多チャンネルによるモデル化

## n 対象プラント

- 国内4ループPWR

## n 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  
(被覆管温度評価として保守的となるケース)

## n 解析条件

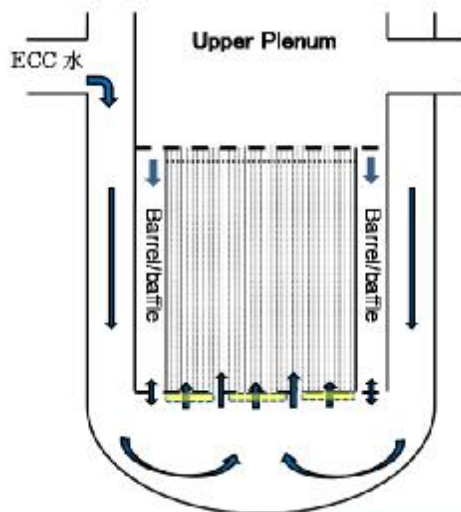
- デブリによる炉心入口閉塞は再循環開始と同時に発生
- 主要条件は国内のECCS性能評価に準じて設定



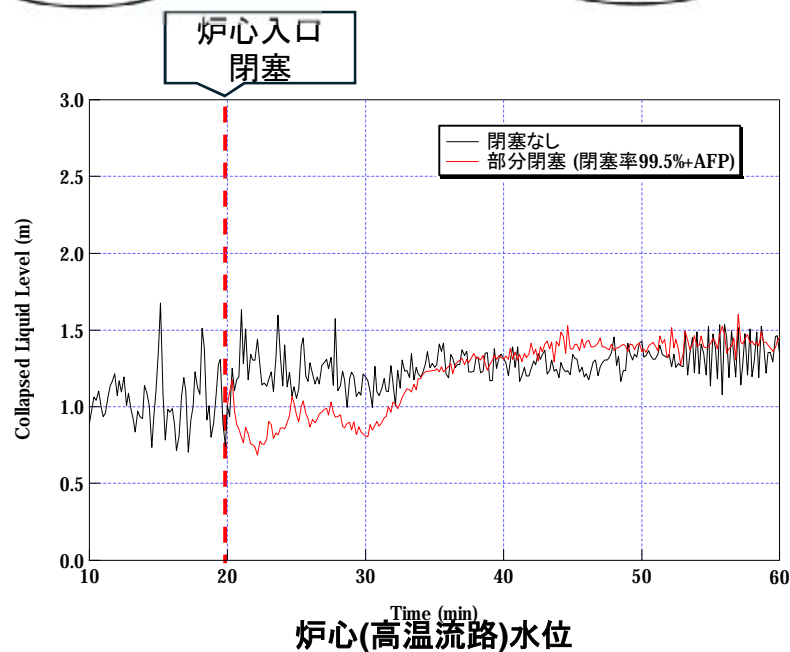
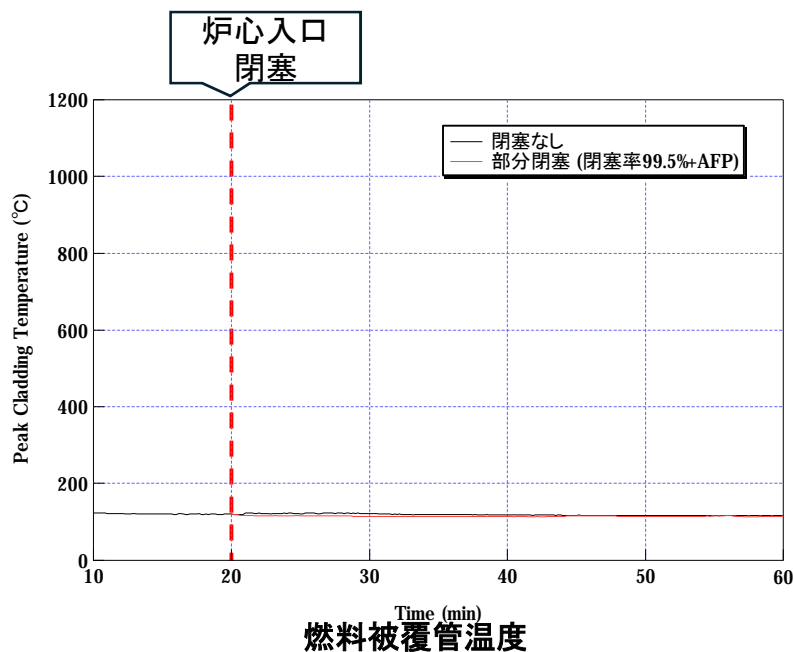
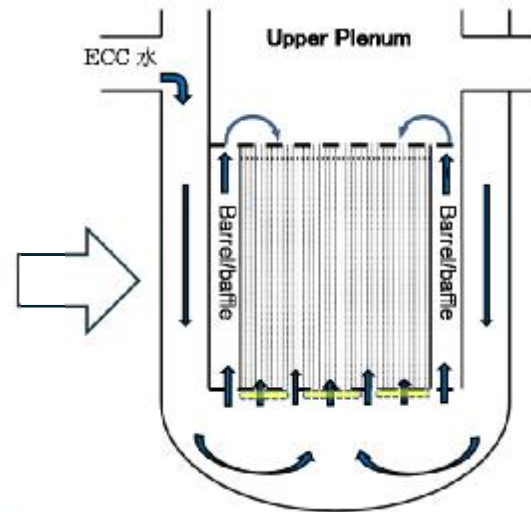
# 解析結果 (炉心入口一部非閉塞:前半)

- n 事象前半に非化学デブリにより**部分**閉塞すると仮定
- n 炉心入口部に0.5%程度の流路穴(非閉塞部)が確保されると、後半(化学デブリの析出)の前までには、被覆管の温度上昇は生じないことを確認

①炉心入口閉塞直後



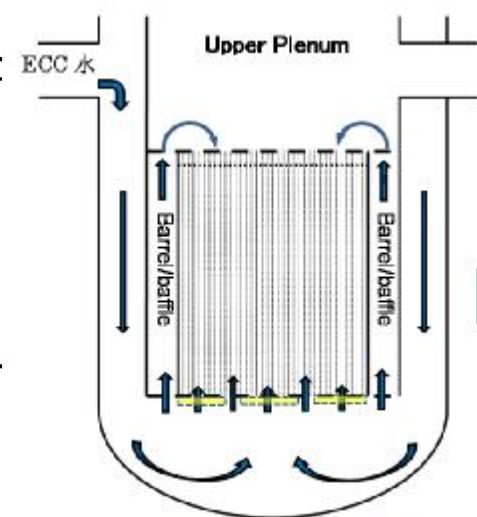
②バブルバレルの上昇流確立後



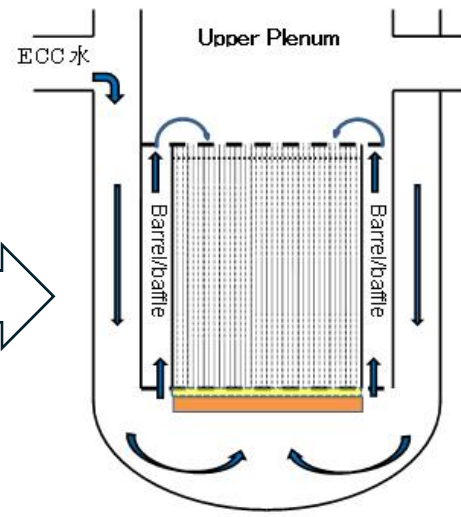
# 解析結果 (炉心入口一部非閉塞:後半(化学析出))

- n 事象**後半**(LOCA発生後80分を仮定)に化学デブリの析出による炉心入口部の全面的な閉塞と大幅な圧損増加を仮定
- n 炉心入口部の代替流路として, バッフルバレル流路からの冷却材流入により, 炉心は上部から冷却水が供給され, 炉心冷却は維持されることを確認

② バッフルバレルの上昇流確立後

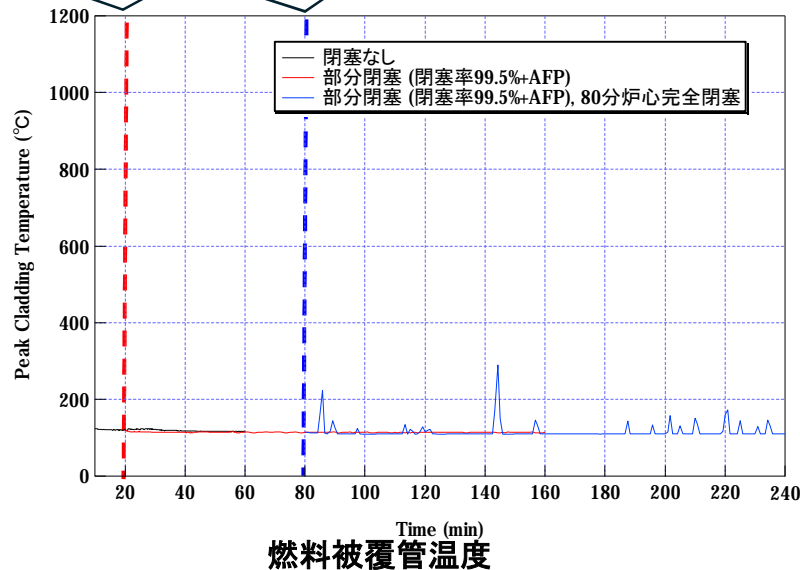


③ 化学異物による全面閉塞後



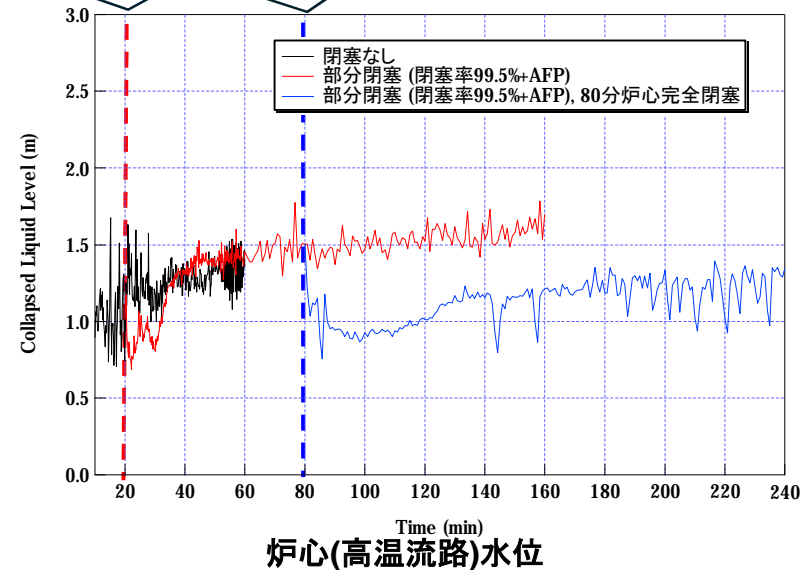
非化学異物による炉心入口閉塞

炉心入口全面閉塞 (80min)



非化学異物による炉心入口閉塞

炉心入口全面閉塞 (80min)



## 参考2

デブリ投入試験に用いるデブリの投入量及び性状の  
設定の根拠について

# デブリ(非化学デブリ)のサンプルピット内での量と濃度

## (1) 配管破断に伴うデブリ発生量

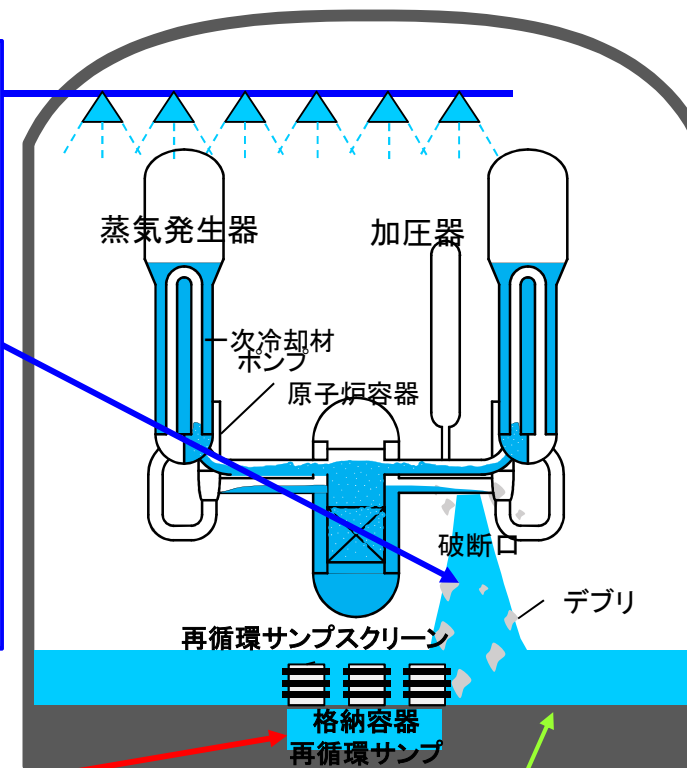
### ①保温材破損からの異物量

- 破断点を中心とした球形領域に存在する保温材等の総量
- 内規※に基づき以下を異物として設定(D:破断口径)
  - カプセル保温(ロックウール): 2.4D(繊維)
  - 一般保温(ケイ酸カルシウム): 5.5D(粒子)
  - 一般保温(ロックウール): 36.5D(繊維)

### ②破損保温材以外の異物量

- 内規に基づき以下を異物として設定
  - 塗装 : 10D (粒子)
  - 潜在粒子: 約14kg(繊維)
  - 約77kg(粒子)

※平成20・02・12原院5号「非常用炉心冷却設備又は格納容器熱除去設備に係るろ過装置の性能評価等について(内規)」



## (2) サンプスクリーンのバイパス率

サンプスクリーンを通過(バイパスする)繊維デブリ割合を30%と仮定  
粒子デブリは保守的に100%バイパスと仮定

## (3) サンプの保有水量

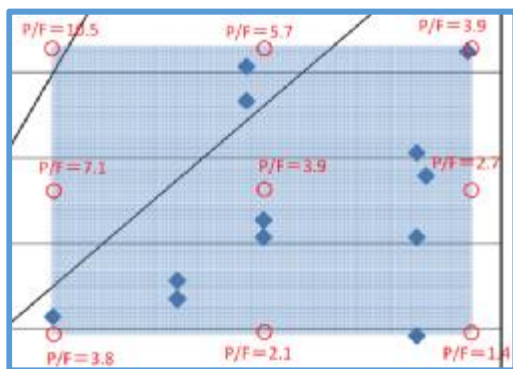
サンプ内保有水量 = (原子炉格納容器最下階の保有水量) - (淀み部の保有水量)

## (4) デブリ濃度

デブリ濃度 = (1)デブリ発生量 × (2)バイパス率 ÷ (3)サンプの保有水量

# デブリ投入試験において考慮すべきP/Fの範囲

国内プラントのピット内の  
デブリ総量分布  
(繊維デブリのストレナの  
バイパス率30%仮定)



ストレナバイパス割合:  
 ・粒子デブリ: 100%通過を仮定  
 ・繊維デブリ: 30%\* ~ 60%通過  
 \*簡易体系試験での知見。保守的に2倍まで考慮。  
 今後, 詳細試験にて最終確認予定。

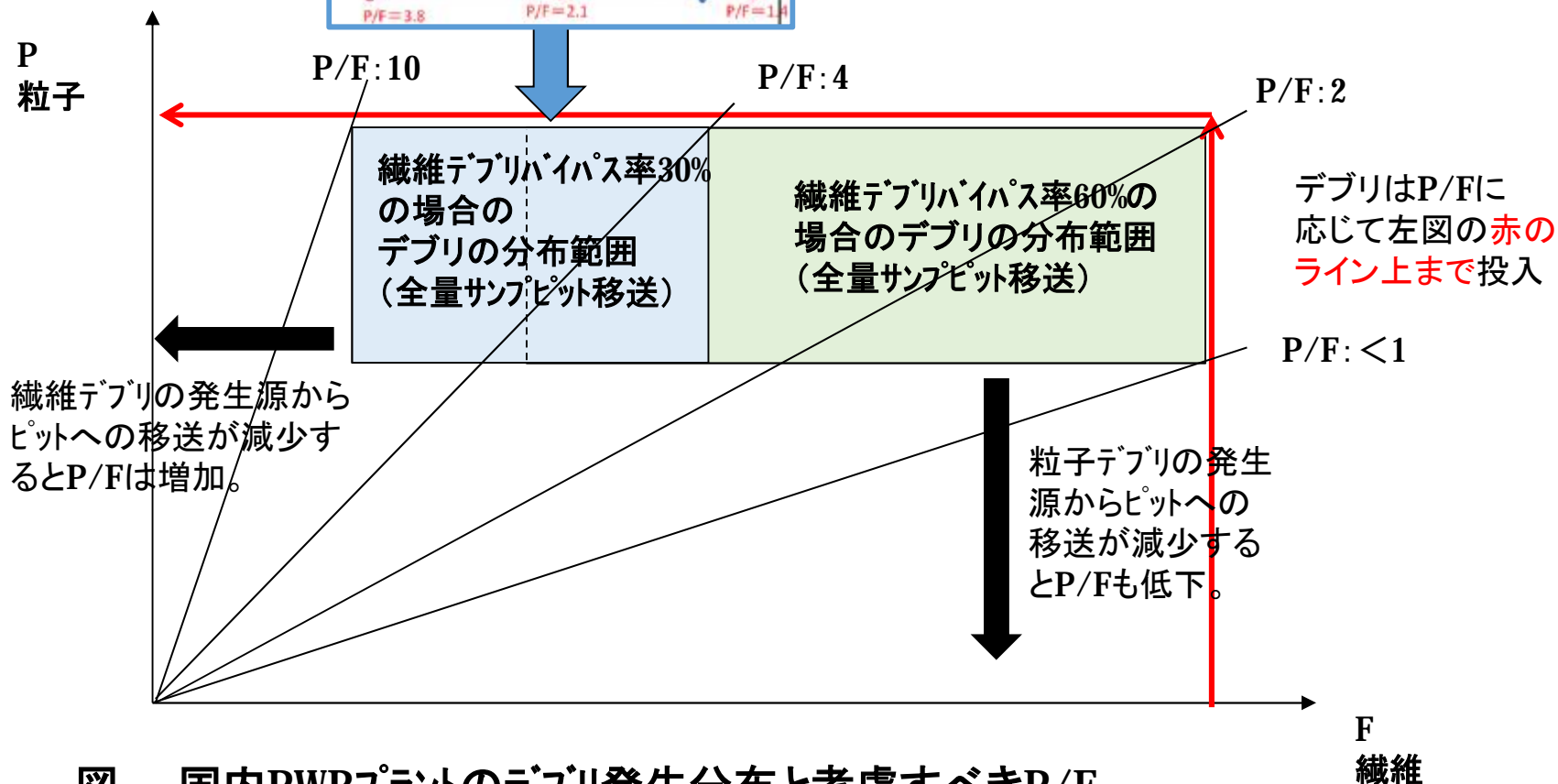
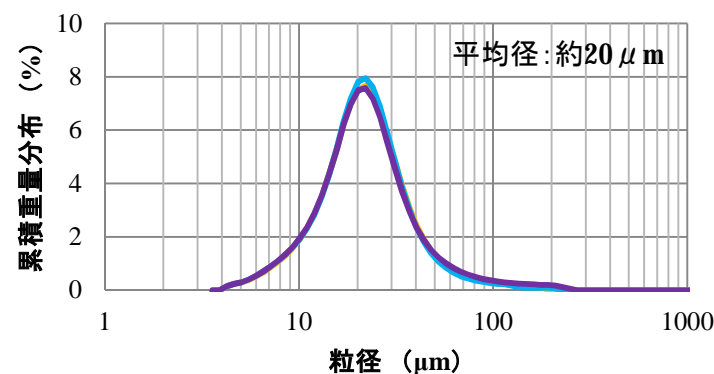
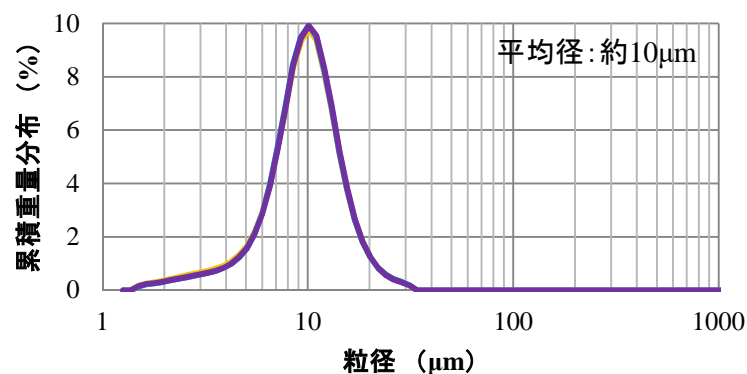


図 国内PWRプラントのデブリ発生分布と考慮すべきP/F

# デブリ投入試験において考慮すべき粒子デブリ径の範囲

## (1) 粒子デブリ

- 海外文献※からサンプスクリーンに到達する粒子デブリの平均径は10  $\mu\text{m}$ 程度
- また、粒子径が小さい方が繊維デブリの隙間に入り込み圧損が増加することから、粒子径が小さい方が安全側
- 本試験で使用した粒子デブリの平均径は約10  $\mu\text{m}$ 、約20  $\mu\text{m}$ (下図参照)
- 粒子径を変えた試験を今後本格的に実施予定。現在までの試験では圧損に対する影響は小さい。



## (2) 潜在粒子

- 海外文献※からサンプスクリーンに到達するによる潜在粒子の粒子径分布を模擬して試験を実施(下表参照)

	海外文献	試験
~75 $\mu\text{m}$	37%	37%
75~500 $\mu\text{m}$	35%	23%
500~2000 $\mu\text{m}$	28%	40%

※ US Nuclear Regulatory Commission, Characterization and Head-Loss Testing of Latent Debris from Pressurized-Water-Reactor Containment Buildings, NUREG/CR-6877