

サンプスクリーンを通過したデブリが炉心に与える影響に関する 事業者からの意見聴取結果について

令和3年1月27日
技術基盤課
システム安全研究部門

1. 概要

令和2年8月19日に開催された第42回技術情報検討会において、サンプスクリーンを通過したデブリが炉心に与える影響に関する知見（以下「本知見」という。）について報告¹し、本知見の「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）」への反映について、国内外の情報収集を継続し、検討することとなった。

その後、令和2年10月28日の原子力規制委員会において、本知見に加え、海外で発生した非常用炉心冷却設備等に係るろ過装置の閉塞現象とその後明らかになった課題に関し国内外で行われた一連の対応についてもとりまとめて報告し、事業者からの意見聴取の結果を踏まえ、今後の対応を検討することが了承された²。

これを受け、令和2年12月7日に事業者意見を聴取する会合³を開催し、事業者から対応状況等を聴取したので、その結果を報告する。

2. 事業者からの聴取の結果

事業者の検討状況について、別紙1及び2により説明を受けた。主な説明は以下の通り。

(1) PWR 事業者⁴の検討状況

- 米国と同様の炉心長期冷却のシナリオを想定し、検討を行っている（化学デブリの析出前後に分けて評価）。
- 原子炉圧力容器内熱流動解析を実施し、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した。
- 実機を模擬したデブリ投入試験による検証を実施しており、燃料集合体2体を用いた流動試験により、炉心冷却について成立の見込みを得た。

¹サンプスクリーンを通過したデブリが炉心に与える影響に関する米国の対応状況及びこれを踏まえた国内の対応について（第42回技術情報検討会資料42-1-2）

²非常用炉心冷却設備等に係るろ過装置の閉塞現象及びその後明らかになった課題への対応について（第35回原子力規制委員会資料6）

³第14回新規要件に関する事業者意見の聴取に係る会合

⁴関西電力株式会社、北海道電力株式会社、四国電力株式会社、九州電力株式会社、日本原子力発電株式会社、三菱重工業株式会社

- 今後、基礎試験の拡充や、バツフルバレルを模擬した流動試験等を行い、炉心長期冷却のシナリオ成立を確認していく。
- 検討結果は、2022年度を目処にとりまとめる予定である。

(2) BWR 事業者⁵の検討状況

- 全プラントで再稼働までに繊維質保温材を撤去する。
- 引き続き格納容器内清掃等により異物発生防止に努める。

(3) 進捗状況の報告

- 事業者が主体となって、検討状況を公開会合等において説明する。
- BWR 事業者については、再稼働までに繊維質保温材を撤去することから、プラント毎に工事計画認可申請において対応状況を説明する。

3. 主な質疑応答

3. 1 PWR 事業者の検討内容に関するもの

(1) 炉心長期冷却について

① 炉心長期冷却が成立する要件

- 原子力規制庁出席者（以下「NRA」という。）から、デブリ投入試験において炉心差圧が 20 kPa 未満をクライテリアとすること、解析による検討において長期冷却が可能との説明があるが、炉心長期冷却が成立する要件をどのように考えているか質問した。
- PWR 事業者から、炉心差圧が 20 kPa 未満であれば炉内で蒸散される分の水が供給され、炉心の冠水状態が維持され温度上昇しないため長期冷却可能と判断している。仮に燃料が露出しても、燃料被覆管温度が 1200℃まではもつという基準を設けている。これはクエンチインテグラル試験⁶に基づくものとの説明があった。

② 炉心長期冷却が成立する判断基準について

- NRA から、燃料被覆管温度が 1200℃までもつとの説明だが、米国では燃料被覆管温度 800F（≒427℃）までとしている。また、米国では温度の他にホウ酸の析出や燃料棒表面の化学生成物の付着も要件となっている。要件が異なる理由について質問した。
- PWR 事業者から、米国の 800F は腐食加速が進む温度で、長期間その温度が維持された条件として設定されている。PWR 事業者は、ECCS の炉心冷却と同様に燃料被覆管のクエンチインテグラル試験を実施し 1200℃と設定してい

⁵ 東北電力株式会社、東京電力ホールディングス株式会社、中部電力株式会社、北陸電力株式会社、中国電力株式会社、日本原子力発電株式会社、電源開発株式会社

⁶ LOCA 時の被覆管高温酸化及び再冠水時に被覆管に生じる熱応力を模擬した試験

る。ホウ酸析出の試験は実施していないが、今後解析などでその影響は検討していくとの説明があった。

③ 炉心長期冷却に関する課題認識について

- NRA から、LOCA 後の炉心の長期冷却に対して、サンプルスクリーン又はストレーナの閉塞以外に、燃料の健全性に関して課題だと考えていることはあるか質問した。
- PWR 事業者、BWR 事業者いずれも、現段階では他に課題はないとの認識を示した。

(2) 低温側配管破断を想定した試験条件について

- NRA から、低温側配管破断を想定した試験条件としている理由について質問した。
- PWR 事業者から、高温側配管破断において再循環運転直後に炉心入口が閉塞したとしても、バッフルバレル流路の水位が高いため水が即座に供給されるため、炉心の冷却が可能であることを解析により確認した。低温側配管破断ではバッフルバレル流路の水位が低く炉心への水の供給に時間を要して冷却できない恐れがあるため、試験で確認することとしたとの説明があった。

(3) 化学デブリの影響について

- NRA から、化学デブリとして想定する物質と析出時間を事故後 80 分（再循環開始後 60 分）としている理由について質問した。
- PWR 事業者から、物質としてはオキシ水酸化アルミニウム等を、析出時間は、炉心入口部の水温がオキシ水酸化アルミニウム等の化学デブリが析出し得る 80°C 以下となる時間を評価して設定したとの説明があった。

(4) 繊維質保温材の撤去の可能性について

- NRA から、国内 PWR プラントにおいて、繊維質保温材の撤去は考えているか質問した。
- PWR 事業者から、繊維質保温材の撤去が必要かについては、試験の結果を踏まえて最終的に判断をしたい。ここまでの試験結果からは、現状の状況でも問題はなく、撤去する可能性は低いと考えているとの説明があった。

3. 2 BWR 事業者の検討内容に関するもの

(1) 繊維質保温材の撤去について

① 下流側影響を考慮したリスク評価を不要としたことについて

- NRA から、繊維質保温材の取替と清掃の徹底等により繊維質の異物が発生しなくなるので、下流側影響は安全上問題ないという認識か。また、米国では

下流側影響を考慮したリスク評価を行っているが、繊維がなければ閉塞しないので、米国のような評価は不要ということか質問した。

- BWR 事業者から、そのとおりであり、格納容器内の清掃、繊維質保温材の撤去を進めている。リスク評価は、以前にストレーナ閉塞の検討の際に実施したが、当時に比べてストレーナの大型化や繊維除去などの対応がなされており、リスク増分がなく、評価は不要との説明があった。

② 繊維以外の物質の影響について

- NRA から、PWR 事業者の試験で考慮している塗料片や潜在粒子、化学物質の影響についてどのように考えるのかについて質問した。
- BWR 事業者から、ストレーナ閉塞に関する実験の結果からすると、繊維質保温材がないので、閉塞しないと考えるとの説明があった。

4. 今後の進め方

- PWR 事業者の対応状況については、2022 年を目処に検討結果をとりまとめるとしていることから、検討状況に合わせて公開で説明を受けることとしたい。
- BWR 事業者が実施する繊維質保温材から金属保温材等への変更については、引き続き、新規制基準適合性に係る設計及び工事の計画の審査において確認していく。
- また、BWR 事業者は、サンプスクリーンを通過したデブリが炉心に与える影響に関する試験等を実施する予定はないとのことである。以前にストレーナ閉塞の検討の際にリスク評価を実施し、当時に比べてストレーナの大型化や繊維除去などの対応がなされており、リスク増分がなく評価は不要としていることの技術的妥当性については、公開で説明を受けることとしたい。

資料一覧

- 別紙1 第14回新規制要件に関する事業者意見の聴取に係る会合 資料14-1
サンプル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
- 別紙2 第14回新規制要件に関する事業者意見の聴取に係る会合 資料14-2
-1 BWR-ECCS ストレーナ下流側炉内影響の対応状況について
- 別紙3 第14回新規制要件に関する事業者意見の聴取に係る会合 資料14-2
-2 「柏崎刈羽原子力発電所6号機及び7号機 9×9燃料(A型)異物
フィルタの変更について」へのコメント回答について(一部改訂)
- 参考 第42回技術情報検討会 資料42-1-2 サンプルスクリーンを通過したデブリ
が炉心に与える影響に関する米国の対応状況及びこれを踏まえた国内の対
応について(案)

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)

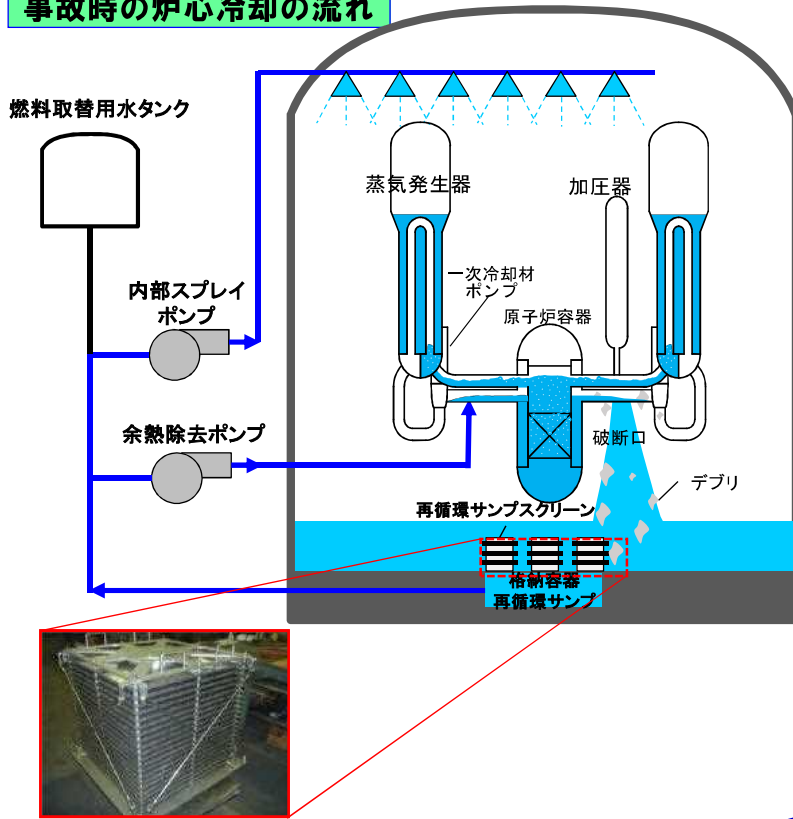
2020年12月7日

目次

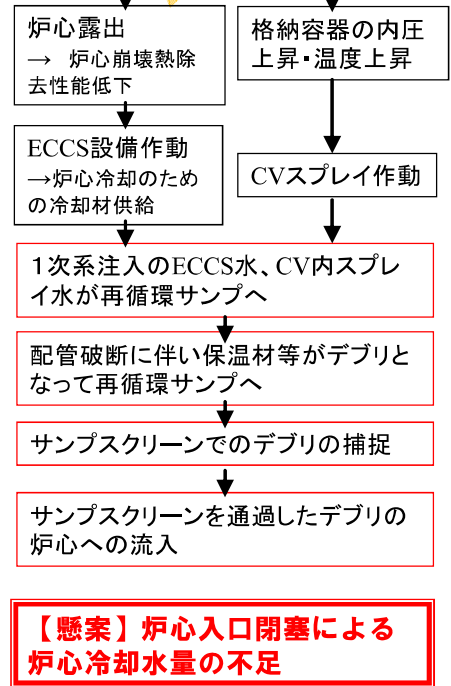
1

1. 背景
2. 全体計画
3. デブリ投入試験
4. まとめ

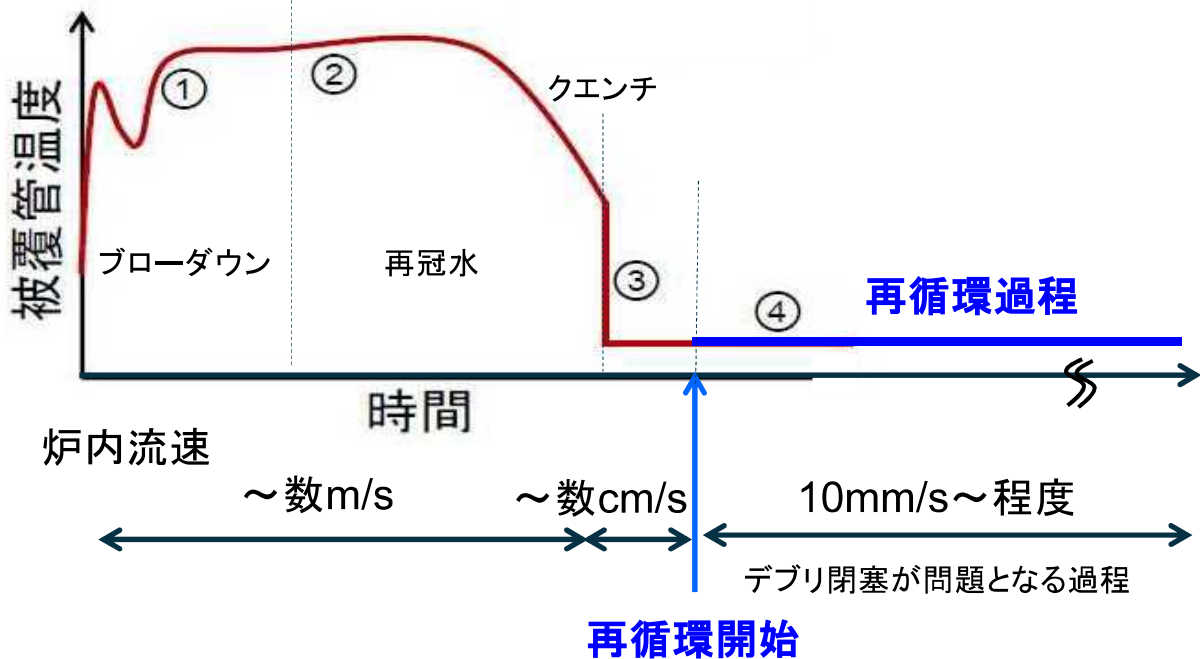
事故時の炉心冷却の流れ



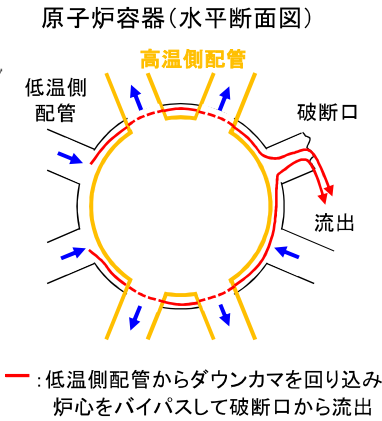
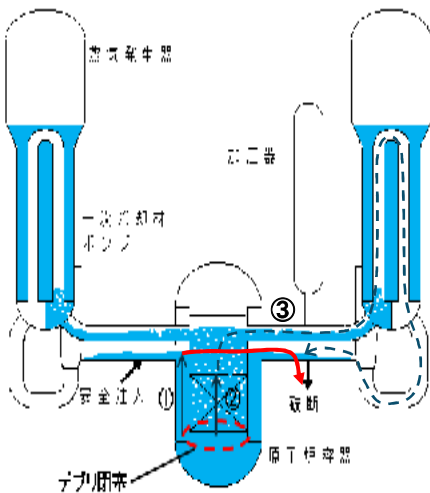
1次系配管破断 (LOCA) 発生



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



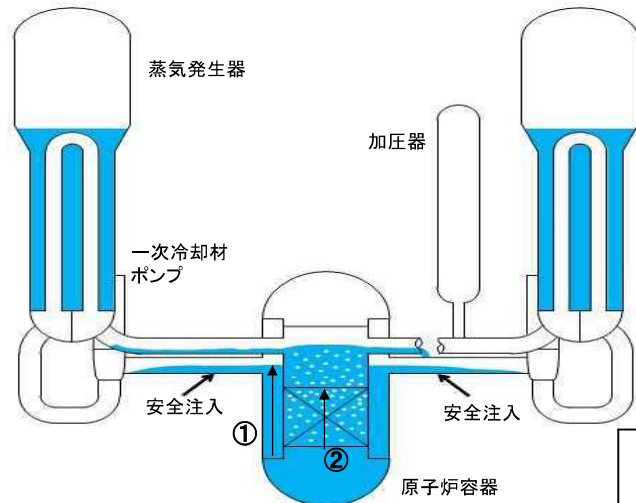
1. 背景 (3/4) 再循環モード RV内流動 -低温側配管大破断(CLB)の例-



- 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)

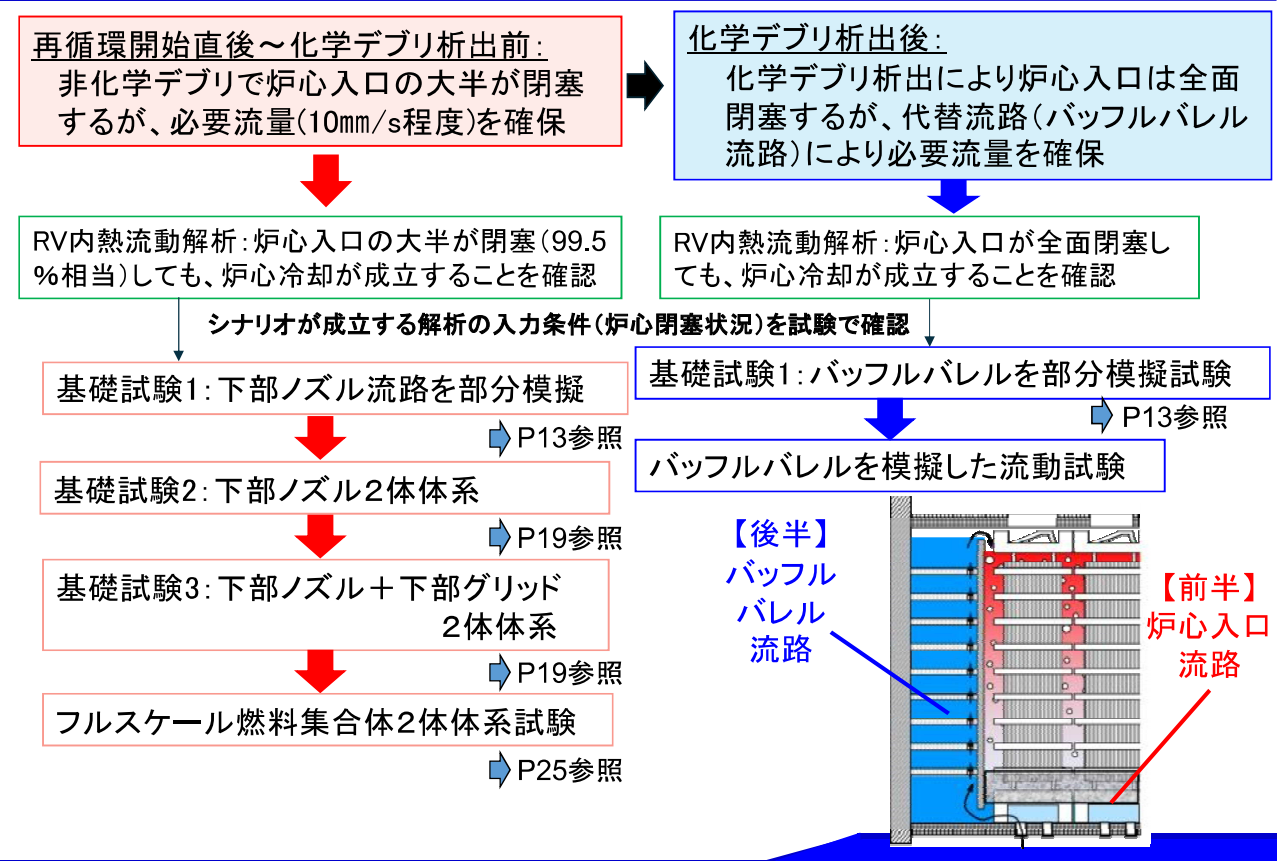
水頭差は低温側配管破断よりも大きく、炉心を冠水させている水位を低下させないための水頭差減少の余裕(デブリ閉塞上限量の目安)も大きくなる方向。

	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)	バブルパ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)	バブルパレル流路のみで炉心水位維持
高温側配管破断(HLB)	バブルパレル流路のみで炉心水位維持	バブルパ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。



- 現在、燃料集合体2体を用いた流動試験により、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。(詳細は「3. デブリ投入試験」参照)
- 今後は、基礎試験の拡充や、バッフルバレルを模擬した流動試験等を行い、炉心長期冷却のシナリオ成立を確認していく。
- 本検討については、2022年度を目途に結果を取り纏める予定である。

	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、 下部ノズル間キャップ 部分模擬試験)		試験計画策定		基礎試験2(下部ノズル2体系試験)	基礎試験3(下部ノズル+下部グリッド2体系試験) (小規模体系試験)	基礎試験の拡充	
					フルスケール集合体試験		フルスケール集合体試験 バッフルバレル流動試験	
		基礎試験1 (バッフルバレル 部分模擬試験)						結果取り纏め

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

- ・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 ³)
繊維デブリ	約0.4
粒子デブリ	約1.2



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:

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

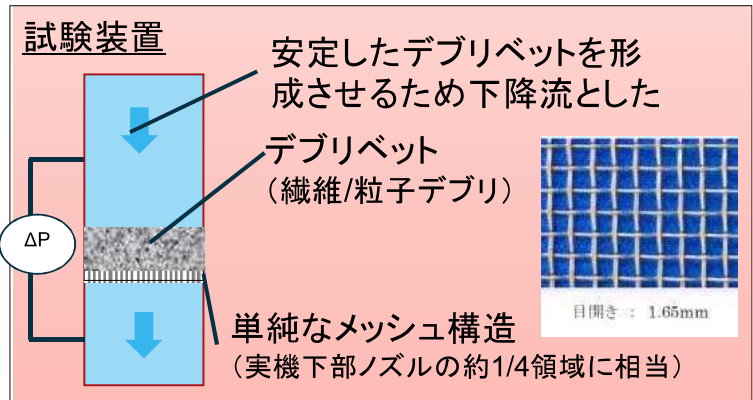
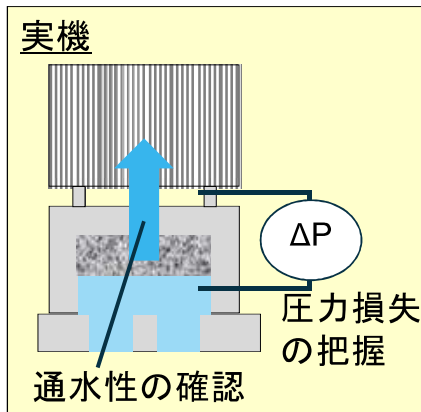
3.2 基礎試験2, 3: 炉心入口部模擬 2体試験

- ・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

○試験装置の概要

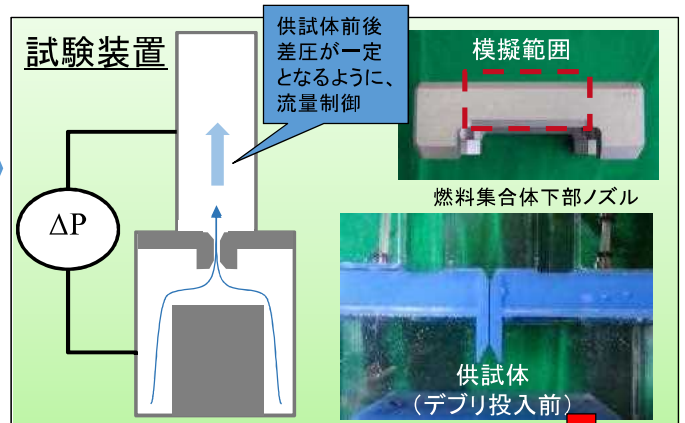
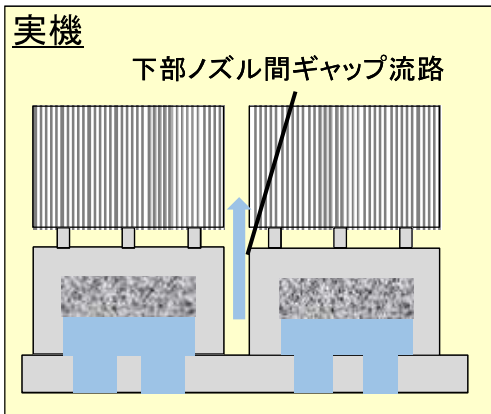


試験後のデブリベット

○試験結果

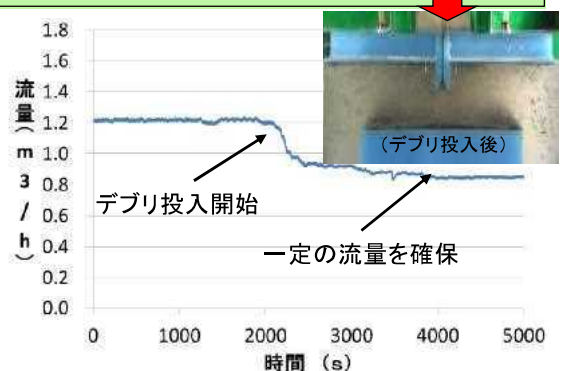
- デブリベットが形成され圧力損失が200kPaに到達
- 下部ノズル流路孔はデブリにより全閉塞する可能性が高いことが判明
- 下部ノズル流路孔以外で冷却材供給に有効な流路を検討

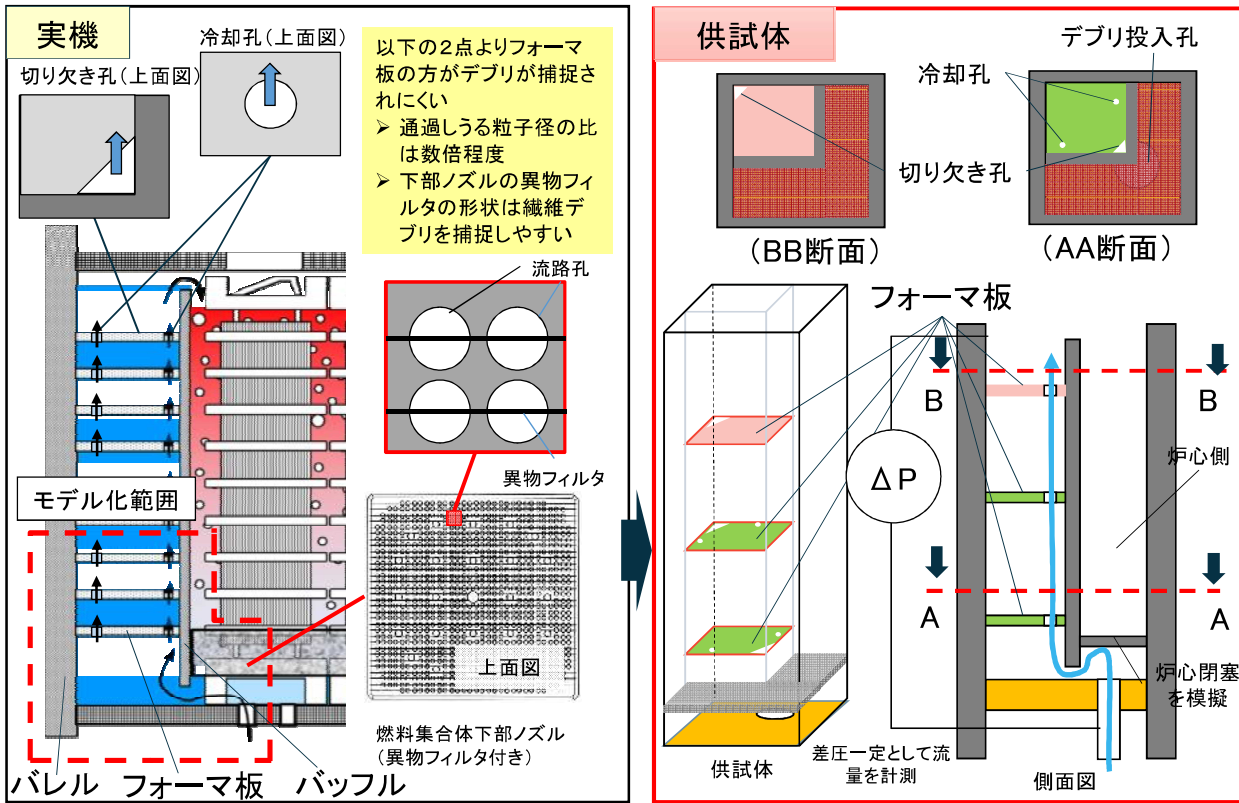
○試験装置の概要



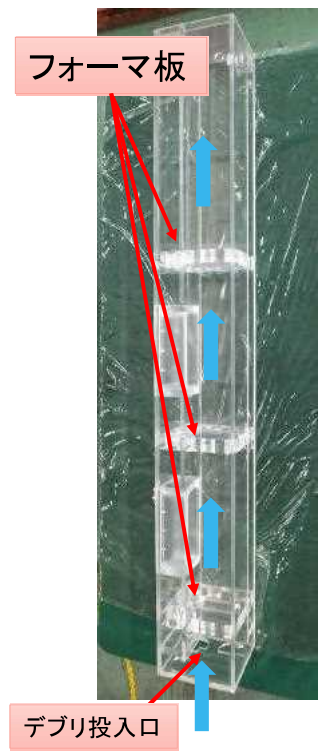
○試験結果

- 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





供試体の外観(写真)



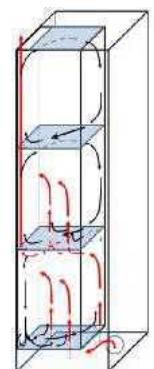
○試験条件

- ・流量：一定圧力(800mmH₂O)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 ³)
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

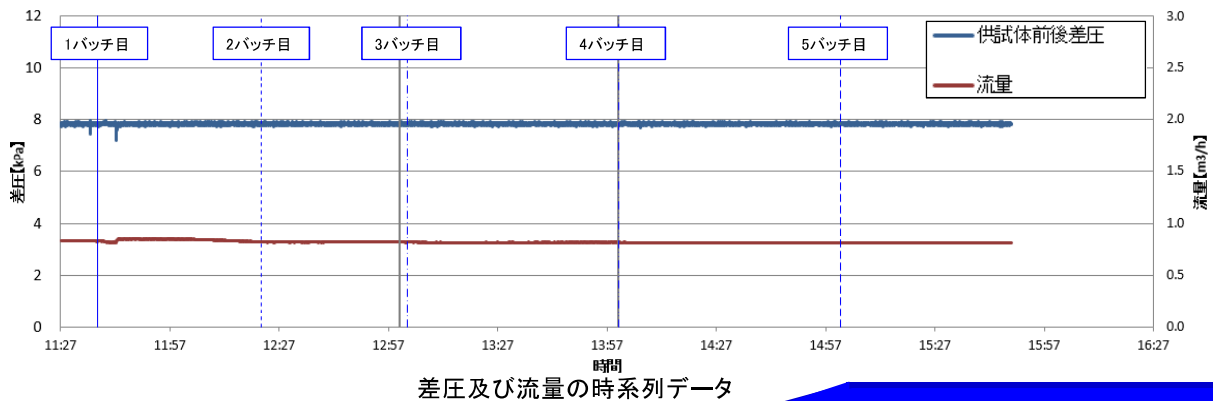
- フォーマ板にデブリが堆積するものの流路孔の閉塞は見られず一定の流量が確保された
- バッフルバレル流路による炉心冷却の見込みを得た



供試体の外観写真(試験中)



堆積デブリ(水抜き後)



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

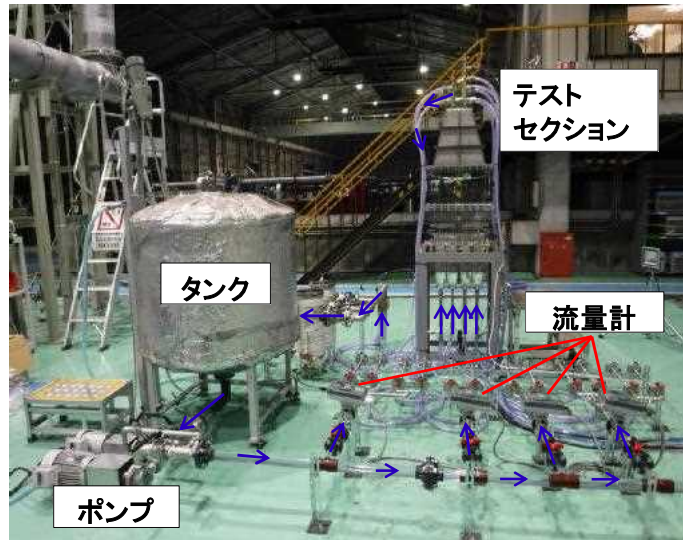
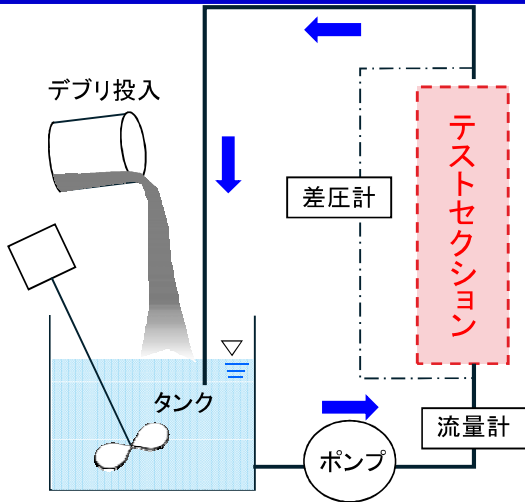
- 下部ノズル2体体系試験
- 下部ノズル+下部グリッド2体体系試験

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

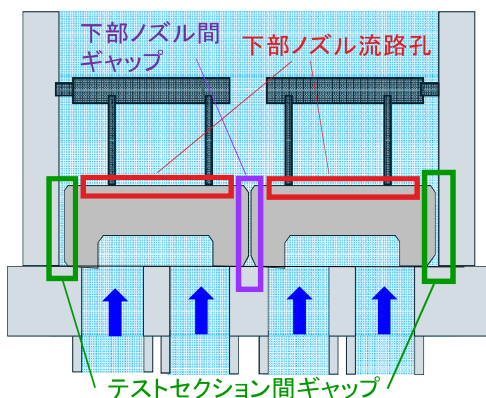
- ・流量 : 炉心流速約10~30mm/s (CLB条件)
- ・温度、圧力 : 常温、常圧
- ・デブリ条件 : 国内代表プラントのデブリ濃度を基準※

※基準濃度の3倍まで濃度を高めて試験を実施

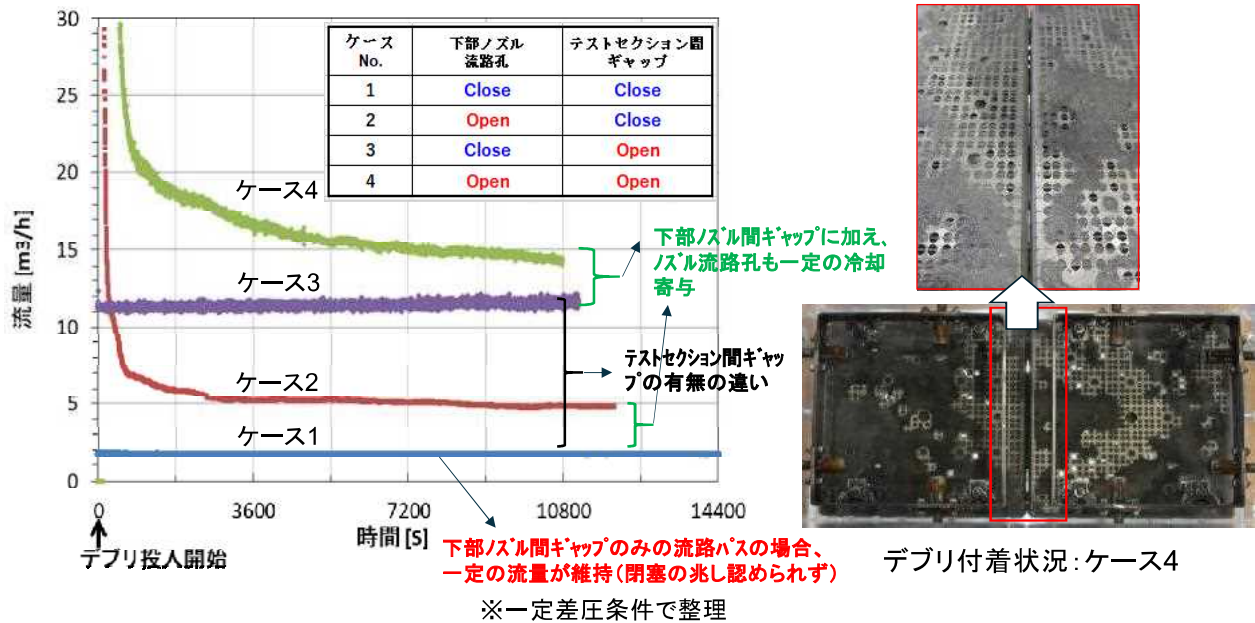
【試験ケース】

- 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

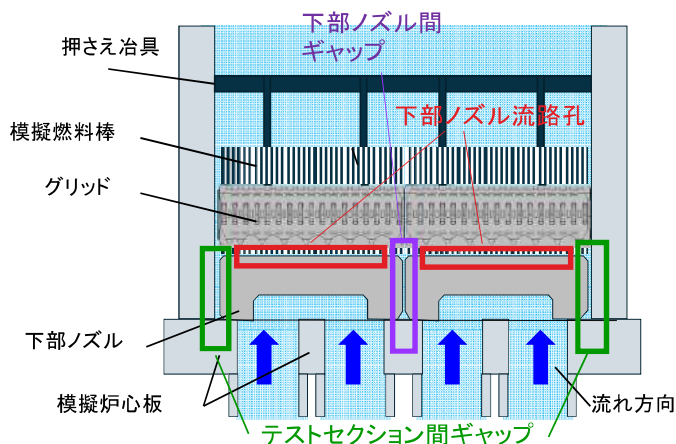


- 下部ノズル流路孔が全面閉塞した場合であっても、十分な流量を確保できることが判明。下部ノズルの通水性に問題がないことを確認した。
- 下部ノズル流路孔についても完全に閉塞はせず、一定の冷却効果があることを確認した。

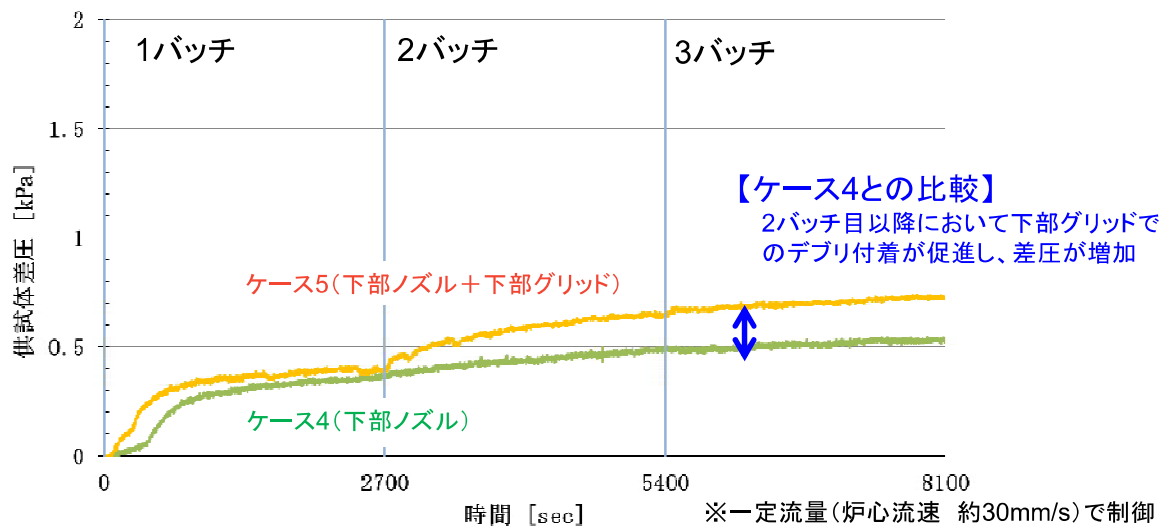
【試験ケース】

- 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

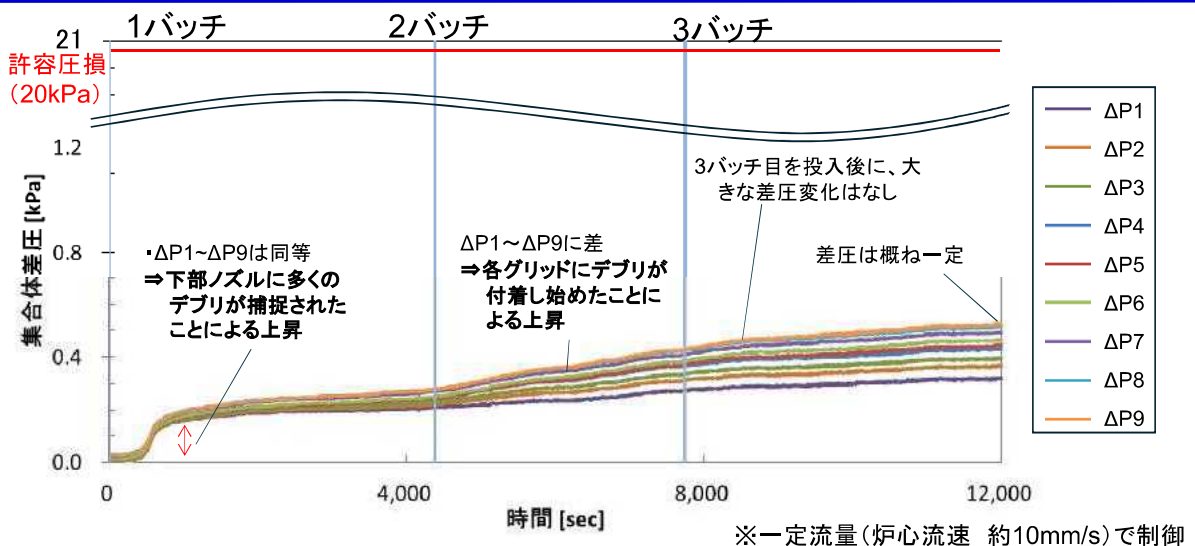
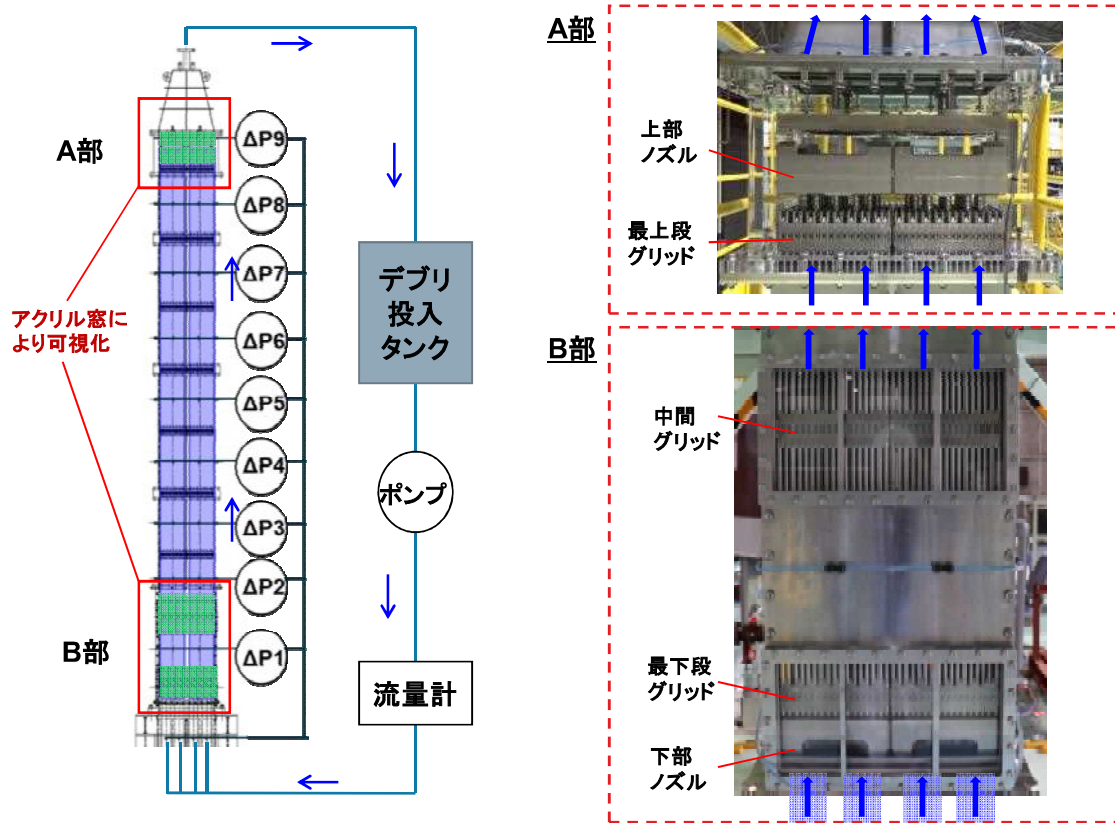
- 下部ノズル2体体系試験
- 下部ノズル+下部グリッド2体体系試験

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



- 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

3.1 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

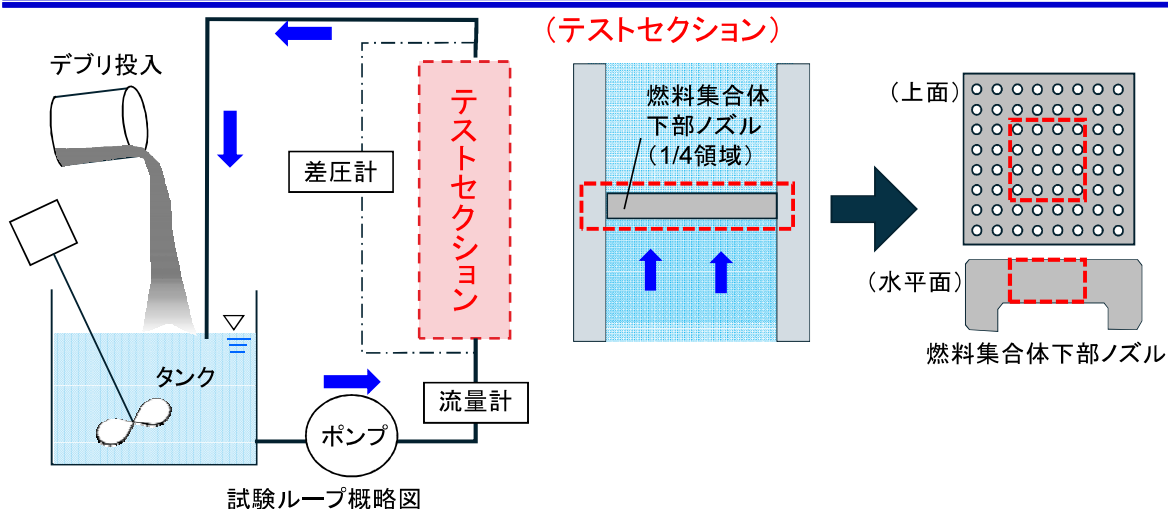
3.3 フルスケール燃料集合体2体体系試験

3.4 海外試験条件模擬 小規模体系試験

目的:

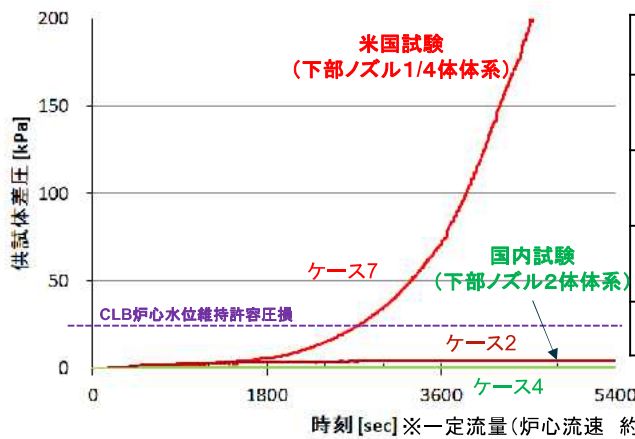
- 米国試験体系と国内試験体系を比較し検討の妥当性を確認。

3.4 海外試験条件模擬 小規模体系試験 -試験装置-



○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



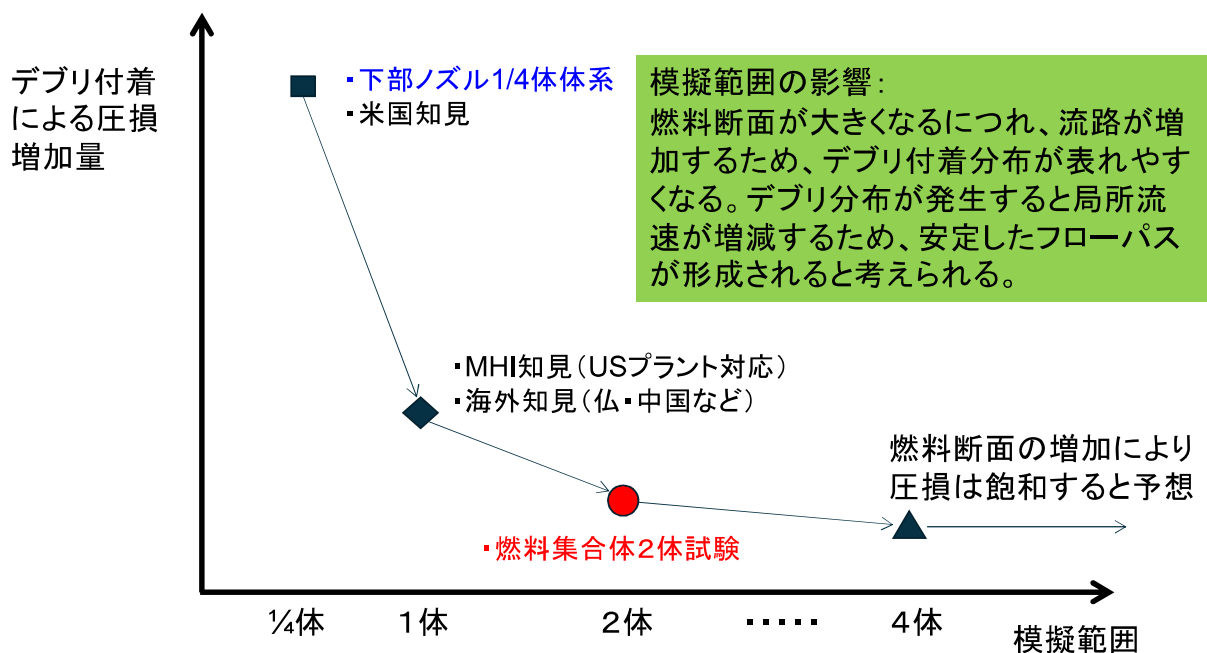
基礎試験	下部ノズル1/4体体系 (ケース7)	下部ノズル2体体系 (ケース2、ケース4※)
最大差圧	>200kPa	ケース2: 約4.4kPa ケース4: 約0.5kPa
繊維デブリ総量	25g	450g/2FA (1/4領域当たり56g)
粒子デブリ総量	250g	1460g/2FA (1/4領域当たり183g)
P/F	10	3

※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

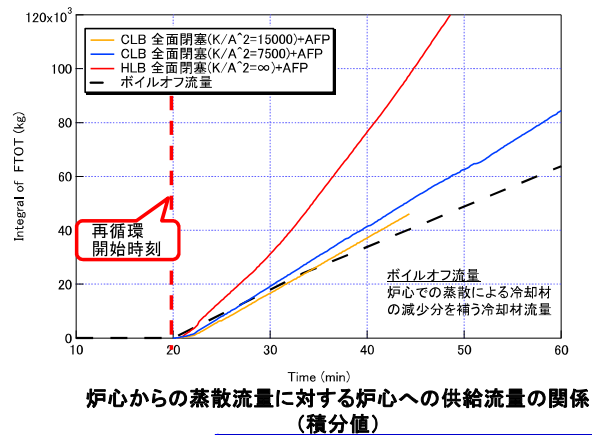
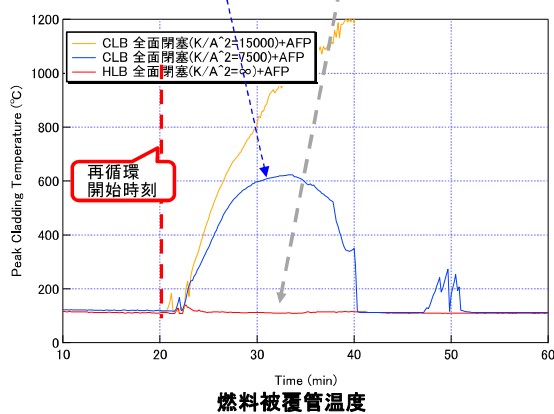
参考1

デブリ閉塞を仮定した炉内熱流動解析結果について

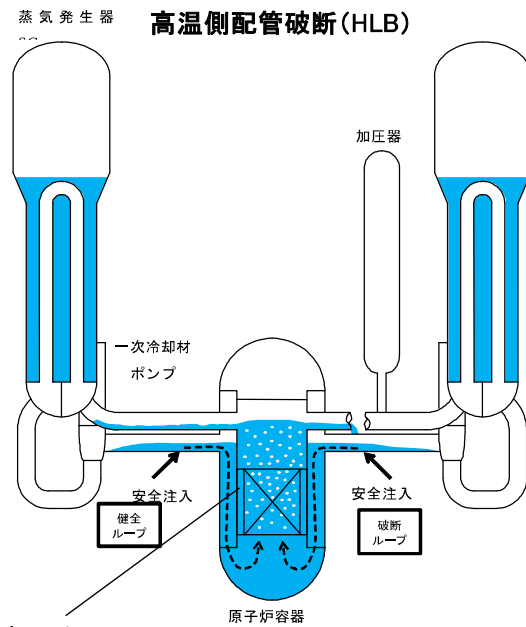
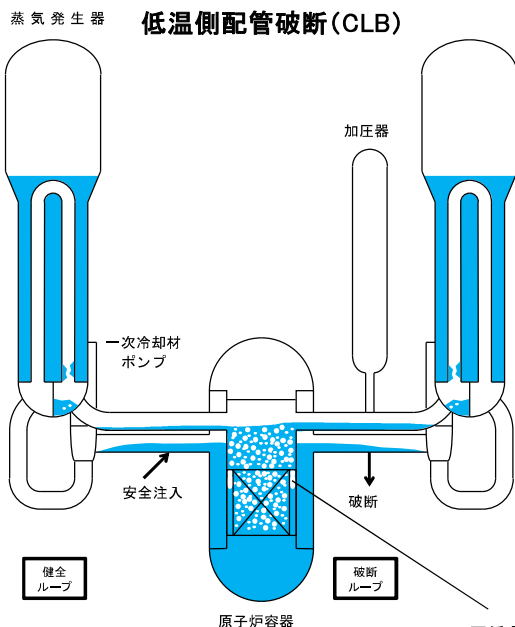
- 入口圧損が瞬時に増加すると仮定
- CLB: 圧損増加の程度によってバッフルバレル流路による炉心への冷却材供給に時間を要する場合がある
 - 全面閉塞による圧損増加で温度上昇
- HLB: 圧損増加の程度に依らずバッフルバレル流路による炉心への冷却材供給が可能
 - 全面閉塞&圧損 ∞ でも温度は上昇しない。(瞬時の炉心全面閉塞後もバッフルバレル流路が速やかに機能)

	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(バッフルバレル流路)の有効性



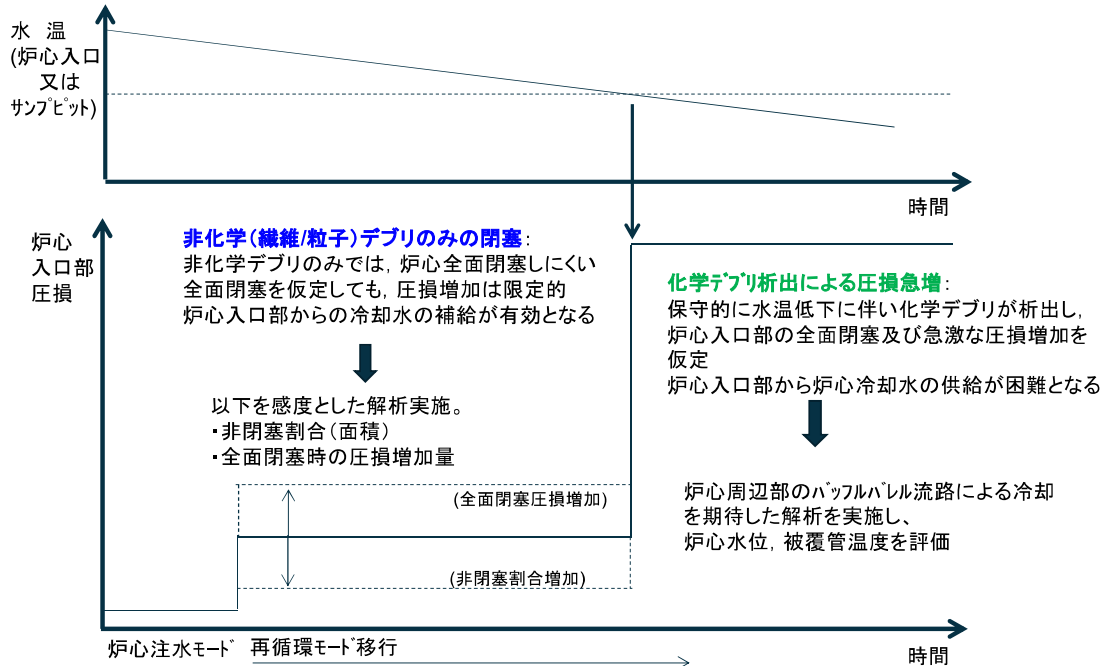
再循環開始直後の流況 (CLB)
健全ループからの注入は炉心部等での蒸気発生分のみがダウンカマに流入する。バッフルバレルの水位は炉心部の水頭とバランスし低めに維持される。炉心入口部からの通水が停止すると、バッフルバレル流路からの冷却水がバッフル板の上端に達するまでの間、炉心内の蒸散に対する補給は行われない。

再循環開始直後のCLBにおいては、
バッフルバレルの水位が低い

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ッフ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、バッフ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。

➤ 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

- 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
 - 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



解析条件 (低温側配管破断)

➤ 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

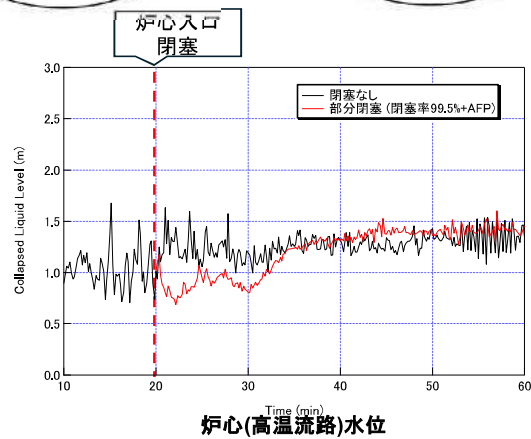
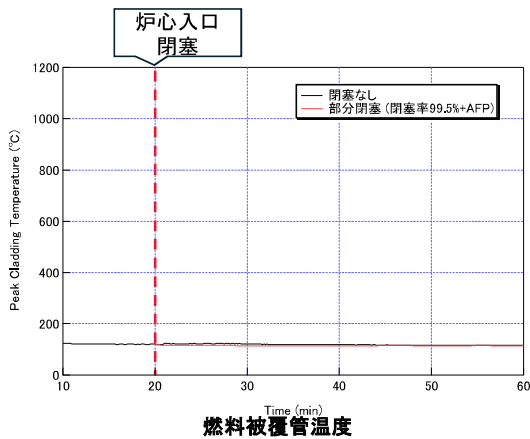
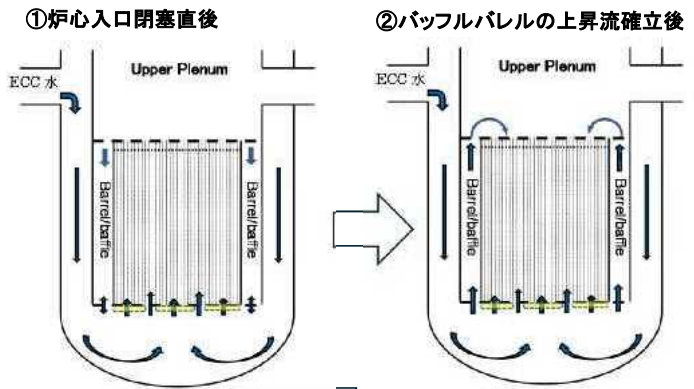
➤ 対象とする事故事象

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

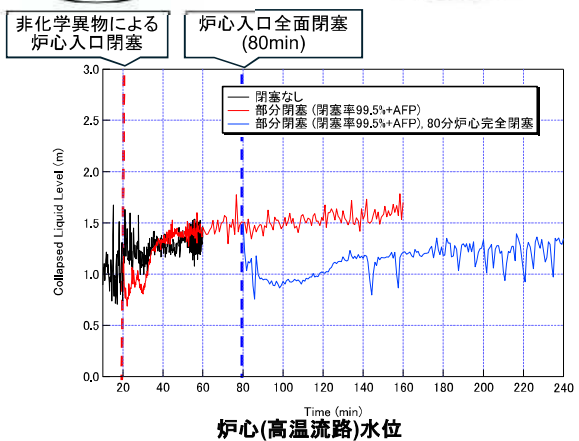
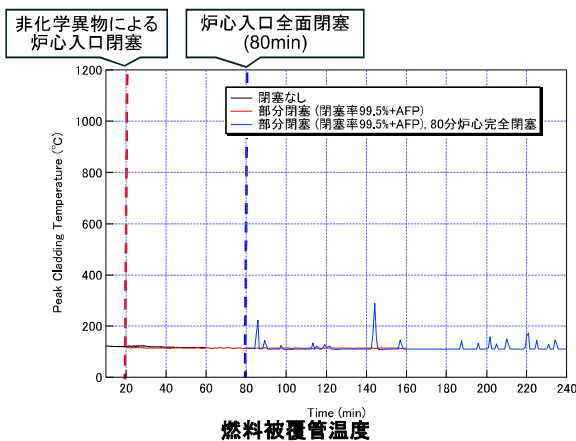
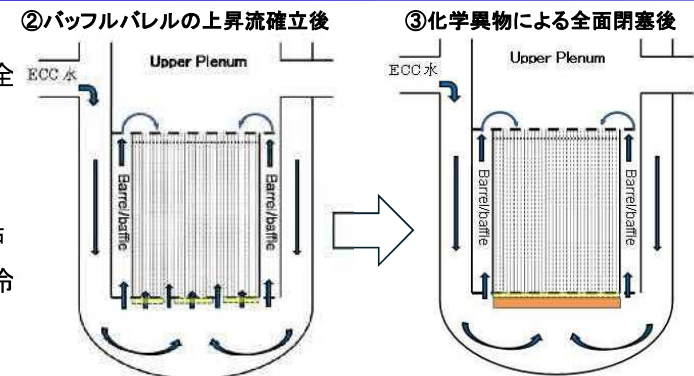
➤ 解析条件

- ・ 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

- 事象前半に非化学デブリにより**部分**閉塞すると仮定
- 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) の前までは、被覆管の温度上昇は生じないことを確認



- 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
- 炉心入口部の代替流路として、バツ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



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

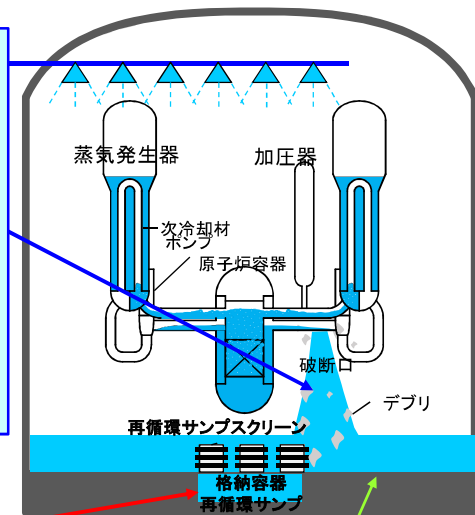
① 保温材破損からの異物量

- 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) サンプルスクリーンのバイパス率

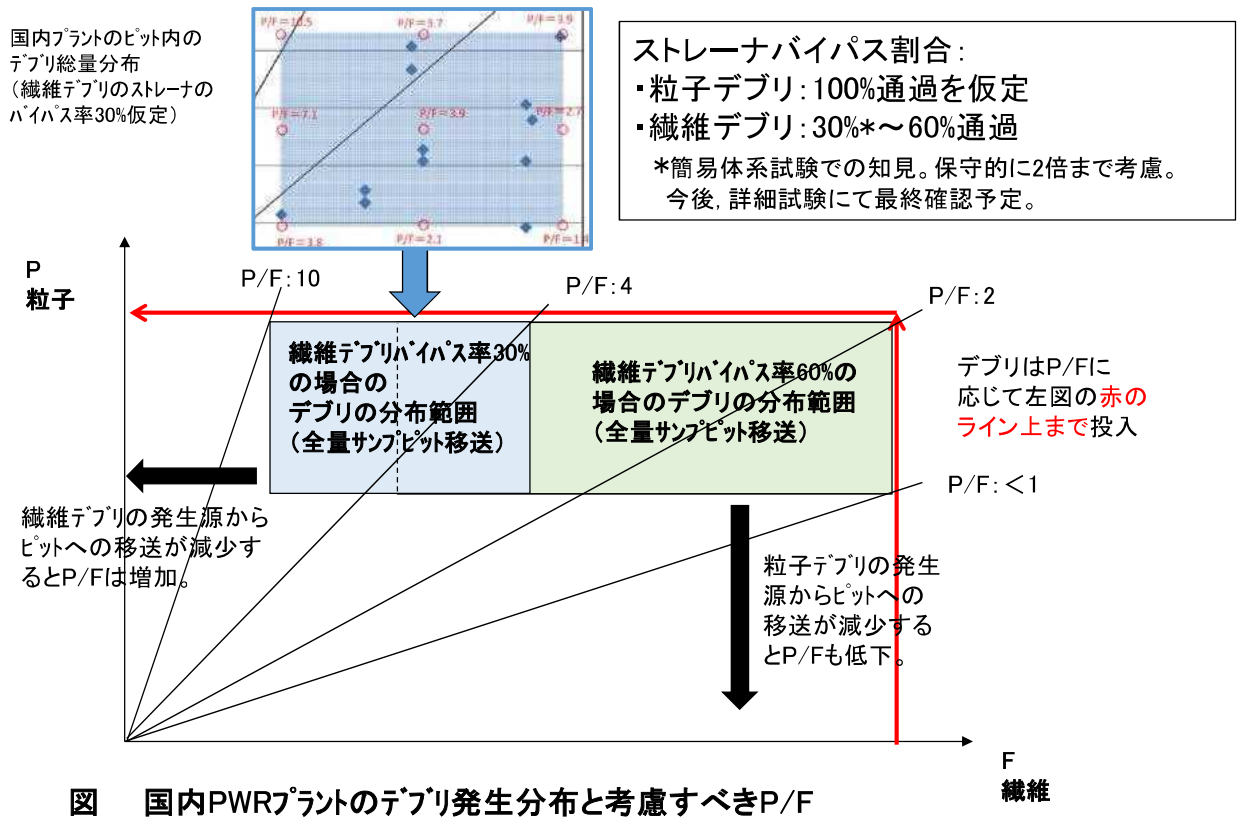
サンプルスクリーンを通過(バイパスする)繊維デブリ割合を30%と仮定
粒子デブリは保守的に100%バイパスと仮定

(3) サンプルの保有水量

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

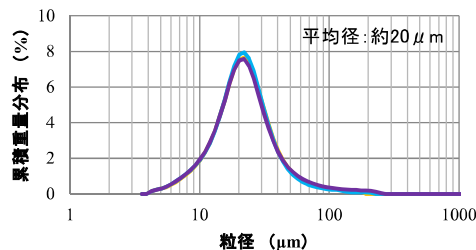
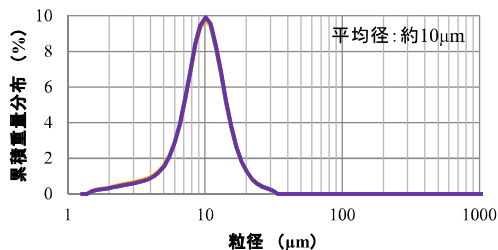
(4) デブリ濃度

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



(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10μm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10μm、約20μm(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
~75μm	37%	37%
75~500μm	35%	23%
500~2000μm	28%	40%

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

BWR-ECCSストレーナ 下流側炉内影響の対応状況について

2020年12月7日

東 北 電 力 株 式 会 社
東 京 電 力 ホ ー ル デ ィ ン グ ス 株 式 会 社
中 部 電 力 株 式 会 社
北 陸 電 力 株 式 会 社
中 国 電 力 株 式 会 社
日 本 原 子 力 発 電 株 式 会 社
電 源 開 発 株 式 会 社

1

1. はじめに

- 米国でのPWRサンプスクリーンに対する課題（GSI-191、GL2004-02）のうち炉内下流影響について、国内BWR事業者の検討状況をご説明するものです

- GSI-191:Assessment of Debris Accumulation on PWR Sump Performance (1996.9)
- GL2004-02:POTENTIAL IMPACT OF DEBRIS BLOCKAGE ON EMERGENCY RECIRCULATION DURING DESIGN BASIS ACCIDENTS AT PRESSURIZED-WATER REACTORS (2004.9.13)

2. 米国BWR事業者のECCSストレナーナの主な対応状況

1992年～1999年

- 1992年に発生したスウェーデンのバーセバック発電所におけるストレナーナ閉塞事象を踏まえ、BWRプラントにおいてストレナーナ大型化等の閉塞防止対策が講じられた

2008年～

- NRCからBWRに対して、GSI-191の活動でPWRで得られた知見を参考にBWRへの影響を検討をすることが推奨された
- 米国BWROGにおいて、炉内下流側影響を含めた課題について検討することを表明、検討を開始

2017年

- 米国BWROGでは、炉内下流側影響を含めた課題に対して最終的にリスク評価を行い、安全上の問題がないとの評価結果をNRCに報告した

2018年

- NRCは、最終的にBWRプラントに関して、追加の規制は不要であることを表明

3. 国内BWR事業者間での検討状況（大型化までの経緯）

- 2003年の東京電力（株）における格納容器内の不適切な異物管理を契機として、旧原子力安全委員会において、ストレナーナ健全性をめぐる国際動向を勘案し追加対策の要否を検討するよう指摘
- 以降、事業者は米国における評価手法（Regulatory Guide 1.82, Rev. 3など）を参照し、ECCSストレナーナ閉塞評価を進めていたが、当時、米国側はPWRサブ冷却閉塞の検討へ移行しており、繊維質が1/8 inch以上では安定的な薄膜を形成し、ケイ酸カルシウム保温材と混合することで非常に高い圧損を引き起こす新たな知見がLos Alamos 国立研究所の試験※で得られていた（参考1）

※：LA-UR-04-1227, "GSI-191: Experimental Studies of Loss-of-Coolant-Accident-Generated Debris Accumulation and Head Loss with Emphasis on the Effects of Calcium Silicate Insulation, Los Alamos National Laboratory, April 2004

- 繊維質保温材を比較的多く使用する米国BWRに対し、国内BWRは繊維質保温材は少ないものの、上記の知見を国内評価手法へ反映することとし、加えて、上記の状況を勘案し、以下の対応を取ることとした



- 繊維質保温材の可能な限りの撤去：繊維質による薄膜形成の防止（参考2）
- ストレーナ大型化：ストレナーナ交換、繊維質による薄膜形成が生じるとの保守的な条件を採用し実機デブリ条件による圧損評価を実施 表面積は繊維質による薄膜形成が生じるとの保守的な条件を採用（参考3、4）

上記に加え、定検時の格納容器内の異物混入管理、清掃等を行い異物の低減を実施（参考5）

3. 国内BWR事業者間での検討状況（大型化以降の対応）

- 福島第一原子力発電所事故以降のシビアアクシデント対策（新規制基準対応）においては、
 - ✓ 格納容器内塗料などの環境条件が、設計基準事故で想定していた温度条件を超える可能性があること
 - ✓ 加えて、pH制御設備（自主対策設備）の導入により、PWRにおいて議論されている化学的影響についての確認が必要となったこと

より、改めて圧損試験等により、シビアアクシデント環境下においても閉塞の可能性がないことを順次確認し、新規制工認の審査にて確認頂いている（東海第二、柏崎刈羽7号）

4. 米国BWRオーナーズグループによる対応

- BWRオーナーズグループ（BWROG）は、GSI-191（PWR格納容器サンプ閉塞問題）で得られた新たな知見に対しては、リスク情報活用アプローチで確認し、追加の対応は必要がないことを確認したと2017年11月20日付でNRCに報告
- NRCは、2017年11月20日付のBWROG報告書及び関連する技術文書の審査結果として、追加の規制措置は不要であるとした
- リスク評価は主に以下が考慮されており、全てのプラントがReg. Guide 1.174に基づきリスクの増分が小さいことを確認されている
 - ✓ NUREG-1829「専門家からの意見抽出プロセスを用いたLOCA発生頻度の想定」に示されたLOCAの起因事象の頻度をPRAモデルに適用
 - ✓ CASA Grandeモデル（破断サイズ、方向、位置に対してデブリの発生量及び輸送量を評価）を用い、破断箇所毎とのECCSストレーナへの移行量を評価
 - ✓ ECCSストレーナ閉塞によるECCS機能喪失確率は、1/8inchの繊維薄膜が形成される量が付着することをもって評価
 - ✓ ECCSストレーナが1/8inch繊維薄膜を形成するまでの間は、ストレーナを通過した繊維質が燃料バンドルの下端フィルタを閉塞させると仮定



- これまでのストレーナ対応の際に、同様のリスク評価を実施しECCSストレーナの閉塞事象によるリスクの増分が小さいことを当時保安院とともに確認している（参考6）
- また、ストレーナを通過したデブリによる炉内下流側影響についても試験等実施し、影響は小さい旨が確認されている（参考7）

5. 今後の予定

- 繊維質保温材については、全プラントにて計画的に（再稼働までに）撤去を実施
- 引き続き格納容器内清掃など、繊維質による異物発生防止に努める

【参考 1】ケイ酸カルシウムと繊維質混合状態における圧損上昇

- 米国の初期のECCSストレーナ閉塞検討において、NUREG/CR-6224^{※1}において繊維質による捕捉効果(Thin bed effect)による圧損上昇は検討がされていたものの（図1, 図2）、その後、PWRを念頭においたLos Alamos 国立研究所の試験^{※2}にて、ケイ酸カルシウムによる混合ベツトが大幅な圧損上昇を引き起こす知見が得られた
- なお、繊維質は1/8 inch厚さ以下の場合、安定な薄膜形成をせず、大幅な圧損上昇とならないことも確認されている（図3）

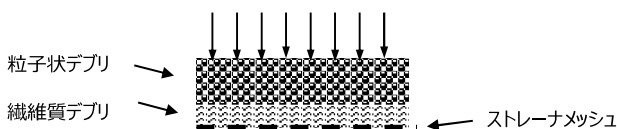


図1 薄膜形成による粒子状デブリの捕捉効果のイメージ

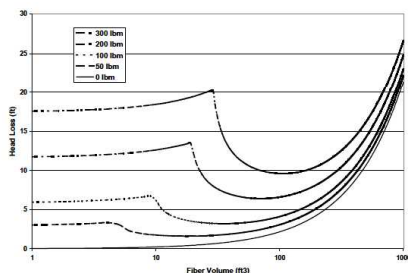


Figure 7-2 Head Losses vs Fiber Volume for Fixed Quantities of Particulate
(Predictions assumed LDFG insulation debris, dirt particulate, 200°F, 100 ft² of screen area, and 5,000 GPM flow.)



図3 LA-UR-04-1227の試験後の写真

図2 NUREG/CR-6224評価式による圧損評価の例
(粒子状デブリの量を一定とした場合の繊維質の量と圧損のグラフ)

※1:NUREG/CR-6224, G. Zigler et al., "Parametric Study of the Potential for BWR ECCS Strainer Blockage Due to LOCA Generated Debris" (SEA No. 93-554-06-A:1), USNRC, October 1995.

※2:LA-UR-04-1227, "GSI-191: Experimental Studies of Loss-of-Coolant-Accident-Generated Debris Accumulation and Head Loss with Emphasis on the Effects of Calcium Silicate Insulation, Los Alamos National Laboratory, April 2004

【参考2】国内BWRプラントの繊維質保温材の使用状況

BWR各社の代表プラント格納容器内における繊維質保温材の使用量

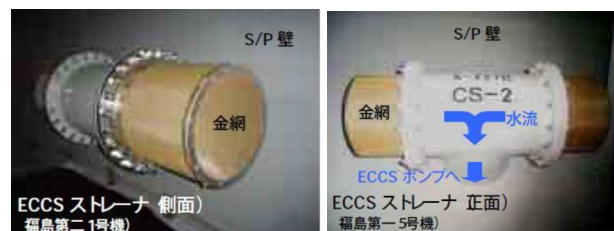
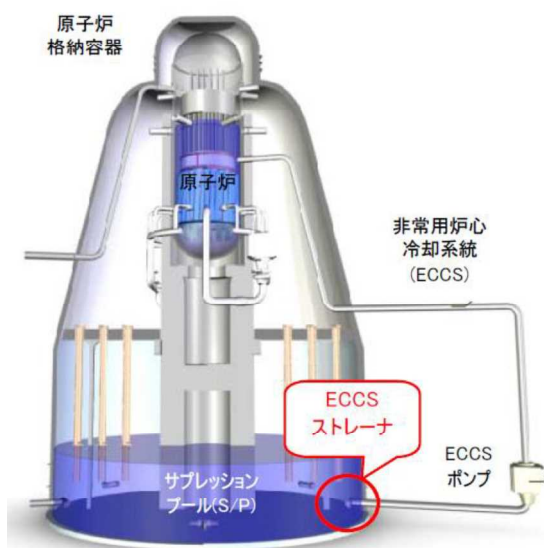
		東北 (女川2)	東電 (KK7)	中部 (浜岡4)	北陸 (志賀2)	中国 (島根2)	原電 (東海2)	電発 (大間)
型式		BWR-5 /Mk-1改	ABWR /RCCV	BWR-5 /Mk-1改	ABWR /RCCV	BWR-5 /Mk- I 改	BWR-5 /Mk- II 改	ABWR /RCCV
一般保温材 (繊維質) [m ³]	過去の報告値 ^{※1}	38	0	126	0	117	12	-
	現状または計画値	0 ^{※2}	0	0 ^{※2}	0	0 ^{※2}	0	0

※1 「非常用炉心冷却システムストレーナ閉塞事象に関する報告徴収について」(H16.6.25)を受けての報告値

※2 計画値（再稼働までに繊維質を含む保温材を計画的に取替える予定）

【参考3】ECCSストレーナの大型化

- 国内BWRプラントにおいては、海外でのECCSストレーナの閉塞事象を踏まえ、ストレーナの大型化を実施済み



ECCSストレーナ取替前 (例)



ストレーナ大型化 (例)

ディスクを積層させることで
表面積を増加

【参考4】圧損試験によるECCSストレーナの健全性確認(1/2)

- ECCSストレーナの大型化に伴い、実機デブリ条件による圧損影響評価を実施済み

(3)試験条件
側面の接近流速は設計条件と同一とし、各デブリ量は、設計条件から、設計ストレーナの表面積と試験ストレーナの表面積の比により決定する。

試験装置概要

(4)試験結果

試験結果がNEDO-32721式による予測値以下であることから、本ストレーナの性能が良好であることが確認された。

柏崎刈羽7号機 ECCSストレーナの圧損試験の例（平成18年）

枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

【参考4】圧損試験によるECCSストレーナの健全性確認(2/2)

- 新規制基準対応プラントについては、重大事故環境下でのデブリ条件を模擬した圧損試験も実施し、ECCSストレーナの健全性に影響がないことを確認している

実機デブリ条件

試験装置概要

圧損上昇の評価結果

東海第2 ECCSストレーナの圧損試験の例

枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

【参考5】原子炉格納容器内の異物管理について(1/2)

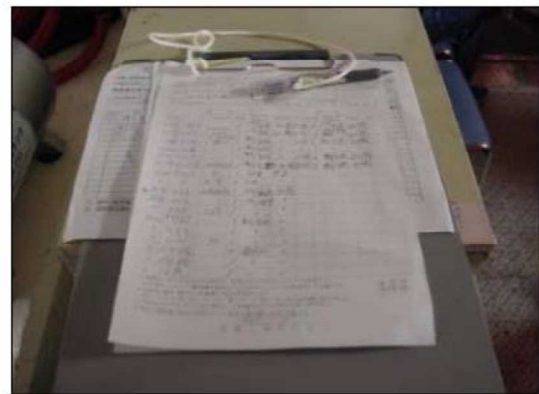
- 原子炉格納容器内の清掃、異物管理は現在以下のように実施しており、今後とも継続して実施する

サプレッション・プール (S/P)

- ✓ S/Pは、原子炉格納容器開放中、異物混入防止エリアに設定しており、S/Pへの立ち入り、作業等の際には、異物混入防止チェックシートにより物品持込み・持出し管理を実施している
- ✓ プラント起動前にS/P内の最終点検を実施し、異物のないことを確認している



持ち込み工具管理（番号、識別管理）の例（東電）



圧力抑制室入口での持込チェックシートの例（東電）

【参考5】原子炉格納容器内の異物管理について(2/2)

ドライウェル (D/W)

- ✓ 原子炉格納容器内にて、工事等を実施する場合は、ベント管（S/Pへつながる開口部）の養生を行い異物がS/Pへ落下・混入しないように措置している
- ✓ D/W内で工事等を実施した場合は終了時等に、片付け・清掃を都度実施している
- ✓ プラント起動前にベント管（S/Pへつながる開口部）の養生を撤去した後に作業等でD/W内に立ち入る場合には、S/Pへ異物が混入しないように物品の管理を行っている。
- ✓ プラント起動前にD/W内清掃及び最終点検を実施し、異物のないことを確認している



ベント管開口部の養生（東電）



清掃後のD/W内マンホールの管理（東電）

【参考6】国内BWRに対するリスク評価の概要

- 保安院によるECCSストレナ報告徴収回答に合わせ、既設ストレナのリスク上の影響を見るため、リスク評価を実施し提出（2005年）
- なお、評価結果は旧JENSによるリスク評価との比較とともに旧保安院及び事業者にて内容の確認を行っている
- ✓ PRAISEにより計算した40年目の溶接線累積破断確率を基に、溶接線破断頻度を発生頻度として採用
- ✓ NPSH喪失確率は、分解イベントツリー（DETモデル）を用いてストレナへのデブリ到達量を評価
- ✓ 閉塞の条件は3mm（1/8inch）をクライテリアに設定
- ✓ 他、外部水源への切り替え、逆洗などの運転員操作にもクレジット

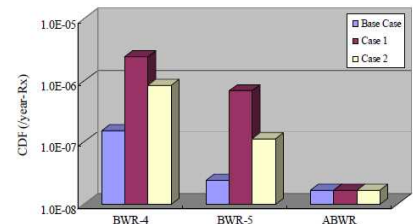


Figure 4. Results of PRA considering ECCS strainer blockage

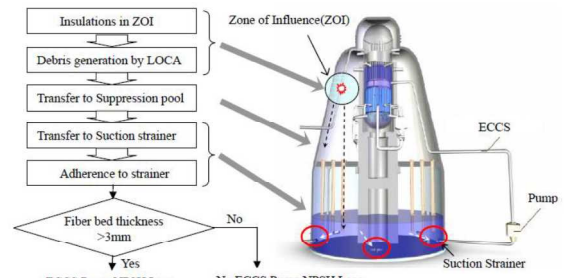


Figure 3-2. Basic concept of probabilistic evaluation of NPSH loss by using the DET Model

- 手法は、米国BWROGと類似
- 現状の「繊維質撤去 + ストレナ大型化 + 清掃」の状況では、ECCSの機能喪失には至らないため、リスク増加要因とはならない
- よって、参考 7 に示す下流影響についても、シユラウド内外の両方からの注水が可能となるため、影響は極めて小さい

T.UEMURA,K.SATO,S.ODA"APPLICATION OF PRA METHODOLOGY TO ECCS SUCTION STRAINERS BLOCKAGE ISSUE" International Conference on Probabilistic Safety Assessment and Management, May 14-18, 2006

【参考7】炉内下流影響に関する検討(1/2)

- ストレナを通過したデブリによる炉内下流側影響については、東京電力HD 柏崎刈羽原子力発電所6,7号機の「9×9燃料（A型）異物フィルタの変更」時に開催された燃料意見聴取会にて、議論が行われている

*1「柏崎刈羽原子力発電所第6号機及び第7号機 9×9燃料（A型）異物フィルタの変更について」へのコメント回答について（一部改訂） 平成24年8月 原子力安全・保安院

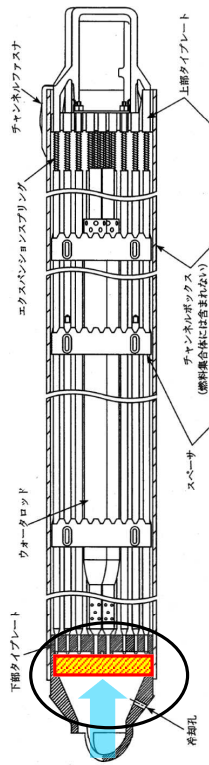
<https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/9483636/www.nsr.go.jp/archive/nisa/shingikai/800/23/006/240808.html>

<コメント回答の概要>

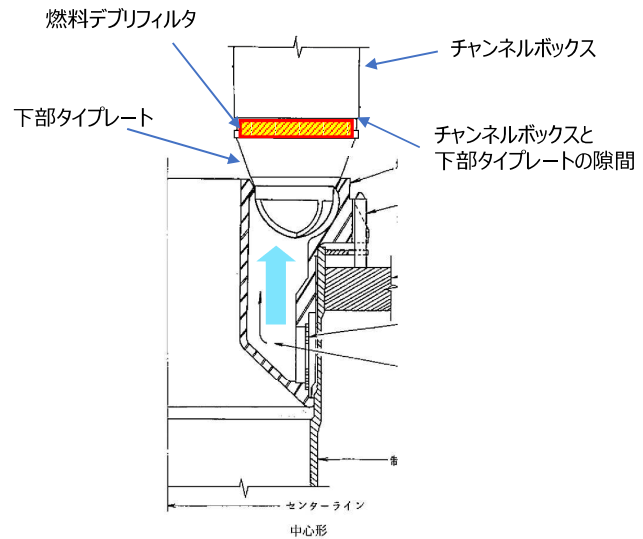
- デブリによる燃料フィルタの閉塞影響について、当時米国において閉塞試験を実施した結果があり、繊維状異物が堆積した場合でも一定の冷却材流量が確保され、長期間の冷却を妨げられることはないと評価している
- フィルタが完全閉塞した場合でも、チャンネルボックス外側と燃料集合体内の水頭差により、チャンネルボックスと下部支持板の隙間から燃料集合体内へ冷却材が供給され、燃料冷却は継続されると考えられる

国内BWRは繊維質保温材を撤去している状況と上述の異物閉塞試験の結果から、炉内燃料フィルタの異物閉塞によって燃料の冷却が損なわれることはないと考えられる

【参考7】炉内下流影響に関する検討 (チャンネルボックスと下部タイプレートの構造イメージ) (2/2)



燃料デブリフィルタが閉塞した場合でも、チャンネルボックス外側と燃料集合体内の水頭差により、チャンネルボックスと下部タイプレートの隙間から燃料集合体内へ冷却材が供給される



資料 1 4 - 2 - 2

別紙 3

改訂資料 1

「柏崎刈羽原子力発電所第 6 号機及び第 7 号機 9 × 9 燃料 (A 型) 異物フィルタの変更について」へのコメント回答について (一部改訂)

平成 2 4 年 8 月
原子力安全・保安院

第 5 回燃料意見聴取会 「9 × 9 燃料 (A 型) 異物フィルタの変更について」
コメント回答

No	コメント	回答ページ
1	Defender に到達すると想定される異物を整理するとともに、それによる閉塞を設計上どの程度考慮するのか整理すること【更田委員、三島委員、山口委員】	1 頁目参照
2	燃料体に装着されたチャンネルボックスが別の燃料体で再度装着されるか確認すること【天谷委員】	17 頁目参照

注) 第 6 回燃料意見聴取会 (平成 24 年 8 月 8 日開催) で委員から頂いたコメントを踏まえ、資料を平成 24 年 9 月 7 日に一部改訂しました。

コメント No. 1
Defender に到達すると想定される異物を整理するとともに、それによる閉塞を設計上どの程度考慮するのか整理すること【更田委員、三島委員、山口委員】

(回答)

Defender の採用に伴い、異物捕捉性能が向上する一方で、異物による冷却材流路閉塞が考えられることから、考慮すべき異物の種類及び影響について、原子炉設置者に確認した。原子炉設置者による異物に対する全般的な評価及び管理は以下のとおりである。

1. 異物の種類及び混入経路とその影響について

異物は発生箇所、性状、混入経路、原因が多様であるが、これまでの経験を踏まえた異物の種類と影響を表1に示す。

- 種類：代表的なものを列挙した。発生が本質的に避けられないもの（クラッド等）と作業等で混入してしまうもの（金属デブリ等）に分けられる。
- 性状：マイクロメートルオーダーの微粒子から、工具のような比較的大きなものまで多様なものが考えられる。金属等で比較的重い異物は自重により発生箇所に滞留（沈降）する可能性が高いが、小さなものは冷却材等の流れに従い移動する可能性がある。
- 影響
 - かみこみ：異物が隙間を有する機械的動作部又は摺動部にかみこむことによって、動作機能、シール機能等に生じる影響。かみこみを考慮すべき機器（例えば制御棒駆動機構）は元々フィルタ等が設けられ対策が施されていることから問題はない。また、定期検査や運転中の定例試験で動作・機能確認を行うため、仮にかみこみが発生しても早期に影響を発見することができる。
 - 閉塞：異物が流れを閉塞することによって、通水機能、冷却機能等に影響を及ぼすもの。炉内の構造物及び各機器が対象として挙げられるが、系統への異物混入防止（後述）やフィルタ設計において異物サイズを考慮するなどの対策が施されていることから問題はない。燃料集合体の冷却機能確保は特に重要であり、燃料集合体異物フィルタにおいて、金属デブリ、サブプレッションプール内の異物の影響を考慮し設計を行っている。
 - フレティング：異物が流体振動によって構造物を摩耗することによって、機械的強度等に影響を及ぼすもの。特に燃料被覆管でフレッシングが発生すると放射性物質の漏洩につながるため、集合体内における異物捕捉性、流体振動を起こす形状を特定し、燃料フレッシングの発生を防止することが重要である。

表1 異物の種類と影響

異物の種類	性状	発生源	混入経路・原因	影響及び対策 (機器のかみ込み・流路閉塞)	影響(燃料フレッシング)	
					評価	内容
クラッド	微粒子	給水中に元々あるもの及び系統配管内面から剥離したもの	冷却材浄化系で除去しきれないものが系統内に存在	付着した場合流路面積が低下するが、最大でも数十μm程度で影響は小さい。 ・燃料フィルタ部も同上	×	微粒子であることから影響はない
イオン交換樹脂	粒状	原子炉冷却材浄化系	イオン交換樹脂層下流のストレーナ(0.3 mm)を通過	・ストレーナを通過した粒径以下の場合には可能性がある ・微小のため燃料は通過する	×	粒状であることから影響はない
金属デブリ (グラインダ切削粉)	粒状		原子炉開口部及び作業時の養生不備等により炉内につながる配管から混入	・大きさによっては可能性あり ・異物混入防止の運用を徹底 ・燃料は閉塞の影響を考慮して設計	×	粒状であることから影響はない
金属デブリ (針金、切削屑等)	線状、板状	定検工事・作業			○	フレッシングの主要因と考えられる
金属デブリ (損傷した炉内部材)	形状多種、比較的大	炉内の各設備	運転中に損傷等で分離		○	形状次第でフレッシングの要因となる
工事に伴う工具類(養生シート、テープなど)	形状多種、比較的大	定検工事・作業	作業時の養生不備等により、原子炉開口部及び炉内につながる配管から混入	・合成化学製品は炉内で形状を維持することは少ないと考えられる ・異物混入防止の運用を徹底	×	硬くないことから影響はない
酸化皮膜剥離片	薄板状	燃料被覆管、チャネルボックス、その他炉内構造物	運転中に母材から剥離	・薄く脆いため、可能性は小さい	×	脆いため影響はない
サブプレッションプール(圧力抑制室)内異物	形状多種	・定検工事・作業 ・配管保温材	・作業時の養生不備等により混入 ・LOCA 時に配管からの蒸気で保温材が分離、落下	・ストレーナを通過した粒径以下の場合には可能性がある ・燃料は閉塞の影響を考慮して設計	×	粒子であれば影響はない

○：影響あり，×：影響なし

2. 異物混入防止対策について（ハード）

設備設計上の異物混入防止対策としてストレーナやフィルタを各部に設置している他、漏えい燃料の対策としては「燃料集合体異物フィルタ」の導入を進めている。

3. 異物混入防止対策について（ソフト）

定検中の作業・工事について、設備設計上の異物混入防止対策を行うことは困難であることから、以下のような運用上の異物混入防止策を行っている（工事・委託仕様書等に記載）。また、異物による漏えい燃料が発生しているプラントは定期的に炉内清掃を行い異物を除去している。

○使用済燃料プールや原子炉ウエル等の開口部での作業

- ・物品持ち込みの管理強化（持ち込み物品、持ち出し物品の記録照合等）
- ・異物混入防止のための専任監視員の配置
- ・紛失、落下防止のための整理整頓（回収を容易にする観点から、透明シートの使用禁止、水に浮くシートの使用）

○原子炉圧力容器に接続された配管、ポンプ、弁等の点検手入れ時

- ・治工具の使用制限（金属ワイヤブラシ・ワイヤバフの使用の原則禁止、代替品使用）
- ・点検手入れ時の開口部への養生
- ・点検手入れ終了後の清掃実施

上記の対策には、作業に従事する作業員の協力が欠かせない。「極めて小さな異物の存在が漏えい燃料の発生につながる」との認識を作業員に浸透させることが課題であると考えており、教育・周知の方法を様々に工夫している。

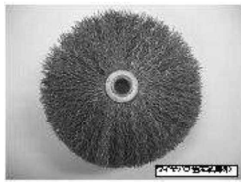


図1 金属ワイヤバフ



図2 金属ワイヤブラシ

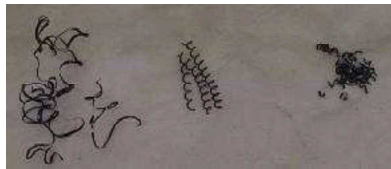


図3 金属加工による切粉

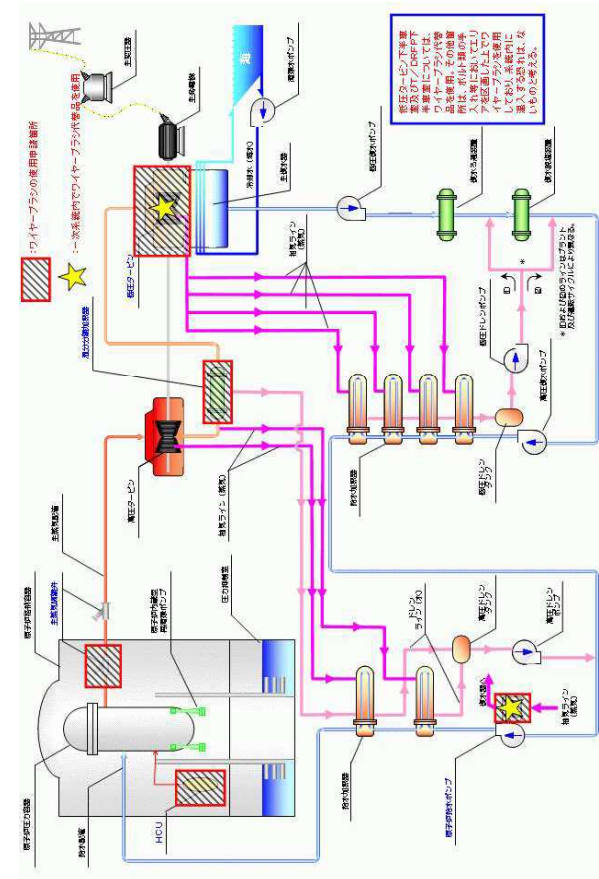


図4 ワイヤブラシ使用制限エリアの例※

※図4の解説

図4は、柏崎刈羽7号機第9回定検（平成22年4月22日～7月23日）において、実際にワイヤブラシが使用申請された場所を例として示したものである。使用制限エリアは、ワイヤ素線が原子炉内部に混入する可能性が否定できないことから、下記系統図中の全てのライン（一次系ではない循環水系統は除く）で原則使用禁止となっている。ただし、作業上代替品（ナイロンブラシ等）を使用することが困難な場合は、異物飛散防止対策（下記1.b.）を講じた上でワイヤブラシ等を使用可としている。

ワイヤブラシ使用に係わる社内規定として、「工事共通仕様書」の記載は以下の通りである。原則使用禁止を明示している。

1. ワイヤを使用した工具の使用制限

a. ワイヤを使用した工具の使用禁止

- ・給水加熱器室水室内の点検手入れについてはワイヤバフ等の使用を禁止する。
- ・原子炉本体に直接接続されている機器の分解点検において、ワイヤバフおよびワイヤブラシ（以下「ワイヤバフ等」という。）を機器内部ならびに原子炉オペフロにおいて使用することを原則禁止する。
- ・機器内部に組み込むポンプの回転体等の内蔵物を手入れする場合もワイヤバフ等の使用を原則禁止とする。ただし、開口部から離れた場所で実施する等、異物混入防止管理の容易なボルト類の手入等についてはこの限りではない。

b. ワイヤを使用した工具の使用を認める場合の措置

やむを得ずワイヤバフ等を機器内部や原子炉オペフロで使用する場合は、作業状況に応じたワイヤ（素線）の飛散防止・養生および回収策等について「工事施行要領書」に記載し、工事監理箇所の確認を得る。

c. 類似箇所への適用

主蒸気系や抽気系等、一次冷却材の循環する系統を構成している機器内部でワイヤバフ等を使用する場合も上記a.b.と同様とする。

2. 掃除機、粘着テープ等による確実な異物の除去

ワイヤバフ等を使用する作業においては、「掃除機（吸引装置）」「粘着性のあるテープ」等による清掃を実施し、確実に異物を除去する。

なお、その後代替品の普及をすすめ、現在は上記のような実績のある場合も含めてワイヤバフ等を使用禁止としている。

以上のとおり、異物による流路閉塞の要因となり得るものとして、定期検査中の工事で発生する針金、切削屑等及び機器損傷によって発生するルースパーツといった金属デブリのほか、サブプレッションプール内の異物が選定されている。これらの異物について申請者及び原子炉設置者は以下のように評価している。

○針金、切削屑等

設置者において、ストレーナ及びフィルタを設置するほか、異物管理を徹底することにより、異物混入試験で投入されたような大量の金属ワイヤが一つの燃料体に運び込まれる可能性は小さいとしている。

○機器の損傷による異物

これまでの運転実績からして機器の損傷による金属デブリが大量に発生することはなく、仮にそのような金属デブリがDefenderに持ち込まれたとしても閉塞率が までであれば冷却は保たれるとしている。

○サブプレッションプール内の異物

定期検査工事・作業時の養生不備等により混入した形状多様な異物、原子炉冷却材喪失事故（LOCA）の際、配管破断時に噴出するジェットの影響で破損した配管の保温材がある。これらの異物の大半は、非常用炉心冷却系ストレーナ（ECCS ストレーナ）で捕捉されると考えられるが、微細な粒子状の異物（粒子径約2mm未満の塗装片やPCV内の塵等）がECCS ストレーナを通過してDefenderに到達することが考えられる。

このような異物による影響について、原子力安全・保安院の「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）」では、「ストレーナの網目の粗さは、ECCSポンプ下流のスプレイノズル、ECCSポンプシール部等、下流側機器の機能を損なうことのない設計であること。」としており、ストレーナのメッシュは冷却材流路のうち最も狭隘となる部分よりも細くなるように設計されている。本内規を制定する際に参考とされた米国規制指針 Regulatory Guide 1.82 Revision 3 “Water Sources for Long-term Recirculation Cooling Following a Loss-of-Coolant Accident”（以下「R.G. 1.82」と

注)第6回燃料意見聴取会(平成24年8月8日開催)で委員から頂いたコメントを踏まえ、本頁を平成24年9月7日に追加しました。

いう。)では、燃料体の異物フィルタを含む ECCS ストレーナの downstream の機器において異物が蓄積されることを考慮すべきとしており、Defender を先行して導入している米国では、この R.G. 1.82 に基づき、下部支持板での流路閉塞は LOCA 時の燃料冷却に影響を及ぼさないことが試験等により評価されている。

Defender の異物閉塞試験の概要、R.G. 1.82 への適合性及び繊維状異物の影響と完全閉塞時の評価については以下のとおりである。

【Defender 付下部支持板で行われた異物閉塞試験の概要】

米国 10×10 燃料の Defender 付下部支持板について、繊維状異物の堆積の影響を調査するため、LOCA 発生後の状況を模擬した試験を行った。試験ループ及び試験体の模式図を図5、6 に示す。冷却材が単一集合体を循環するループにおいて、写真1に示すような繊維状異物を混入して循環させ、冷却材流量及び図6の①～④に対応する箇所の圧力損失を測定した。なお、異物混入前の初期流量は [] とし、水温約 20℃、大気圧の下で試験を行った。

[] の繊維状異物が堆積したケースの試験結果を図7、試験後の下部支持板の外観を写真2に示す。図6の①と④での圧損が同様に上がり、②と③における圧損はほとんど変化がないことから、混入した異物のほとんどは下部支持板で捕捉されたことがわかる。

また、図7より、混入した繊維状異物のほとんどが下部支持板に堆積された状態で、[] の冷却材流量が確保されている。この結果より、[] の繊維状異物が蓄積した場合でも、長期間の冷却を妨げるものではないと評価している。

また、過去に米国 10×10 燃料の鋳物一体型異物フィルタ付下部支持板(以下、DFLTP)でも同様の試験が実施され [] の繊維状異物が下部支持板に堆積しても、流路閉塞のない場合の流量の [] 以上が確保され、長期間の冷却を妨げるものではないと評価している。

注) 第6回燃料意見聴取会(平成24年8月8日開催)で委員から頂いたコメントを踏まえ、下線部分を平成24年9月7日に改訂しました。 [] 商業機密に属するため公開できない事項。

【GNF-A における Defender の R.G. 1.82 への適合性検討の概要】

LOCA 時の配管破断により、配管の保温材が剥がれてサブプレッションプール水に混入し、その後の ECCS システムの作動により、保温材の材料である繊維が燃料集合体に到達し、この繊維状の異物が下部支持板で捕捉されることが想定される。

これに対し、ECCS ストレーナを通過する繊維状異物の量、及びその異物が下部支持板へ堆積することによる冷却材の流れへの影響の調査を目的とした試験を行った。

ECCS ストレーナを通過する異物量については BWR オーナーズグループの試験に基づいたいくつかのモデルを用い、繊維状異物の質量として、保守側の [] (※1)と仮定している。さらに、ECCS ストレーナを通過した繊維状異物が全て炉心に到達し、[] (異物フィルタが導入される取替バッチの最小単位)に異物が分配されると仮定し、1体の下部支持板に [] の異物が堆積すると評価している。この異物量の仮定は、LOCA 発生後の長期的な冷却を行うため必要な冷却材流量(※2)が確保されると評価された前述の試験条件に比べて少なく、繊維状異物による閉塞によって長期間の冷却を妨げられることは無いと言えることから、R.G. 1.82 の要求に適合すると評価している。

(※1)ECCS ストレーナを通過する繊維状異物の総量はストレーナの表面積に比例すると仮定し、ストレーナ(表面積 18ft²)に 8 lb の繊維状異物を投入したときの通過割合が約 0.4%という試験結果(出典1)に基づき、式①で評価されると仮定している。

[通過する繊維状異物の量(lb)] ~ [] …①
米国 BWR プラントの中で ECCS ストレーナの表面積が広いものは [] であり、この値を式①に当てはめれば [] となる。(lb:ポンド、ft²:平方フィート)

式①に基づく繊維状異物量評価手法の柏崎刈羽6号機及び7号機への適用性は別紙1のとおり。

(出典1) NEDO-32686-A「Utility Resolution Guide for ECCS Suction Strainer Blockage Vol. 2」

(※2)LOCA 発生後の崩壊熱を、冷却材の潜熱によって長期的に冷却するために必要な流量はおおよそ [] 以下となる。

注) 第6回燃料意見聴取会(平成24年8月8日開催)で委員から頂いたコメントを踏まえ、下線部分を平成24年9月7日に追記しました。 [] 商業機密に属するため公開できない事項。

【Defender における繊維状異物閉塞の影響及び完全閉塞時の評価】

通常運転時においては、繊維状異物が大量に到達することは考えられないが、大量の繊維状異物の堆積による影響については、前述のように LOCA 後の冷却特性の観点から試験し、確認している。

Defender は [] 以上の粒子状異物が通過することができないのに対し、米国 10×10 燃料の DFLTTP の異物フィルタ部の流路孔は [] である。これらの下部支持板について、大量の繊維状異物を堆積させて試験した結果によると、前述のように冷却材流量への影響は両者で大きな相違はなく、燃料の冷却機能を損なうものではないことを確認している(別紙②)。Defender の設計は 9×9 燃料と米国 10×10 燃料で同じであることから、9×9 燃料においても繊維状異物による流路閉塞が Defender 特有の課題になる可能性はないと考える。

さらに、BWR のチャンネルボックスと下部支持板は嵌め合い構造となっており、通常運転時はその隙間を通り、燃料集合体内からチャンネルボックス外側へ冷却材が流出する。LOCA 時には、再循環ポンプによる強制循環力が喪失するため、チャンネルボックス外側(单相)と燃料集合体内(二相)の水頭差により、チャンネルボックス外側の圧力が燃料集合体内より高くなる。このため、おおよその事故期間中、チャンネルボックスと下部支持板の隙間を通り、チャンネルボックス外側から燃料集合体内へ冷却材が供給され、燃料冷却に寄与する。したがって、万一、Defender が異物により完全閉塞した場合でも、チャンネルボックスと下部支持板の隙間の流れにより、燃料集合体内への冷却材の供給は確保され、燃料冷却は継続されると考える。

注) 第 6 回燃料意見聴取会(平成 24 年 8 月 8 日開催)で委員から頂いたコメントを踏まえ、下線部分を平成 24 年 9 月 7 日に追記しました。

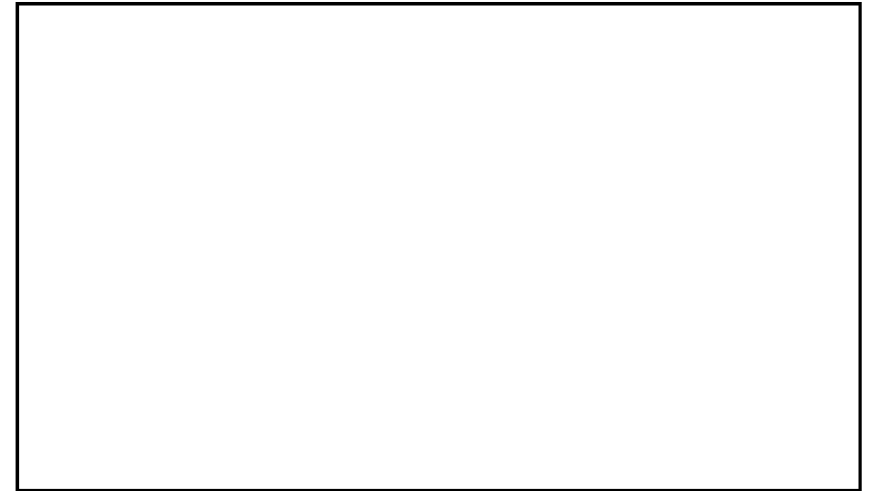


図5 試験ループの模式図

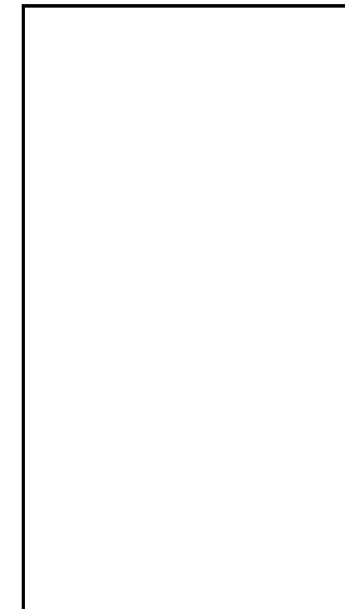


図6 模擬燃料体模式図

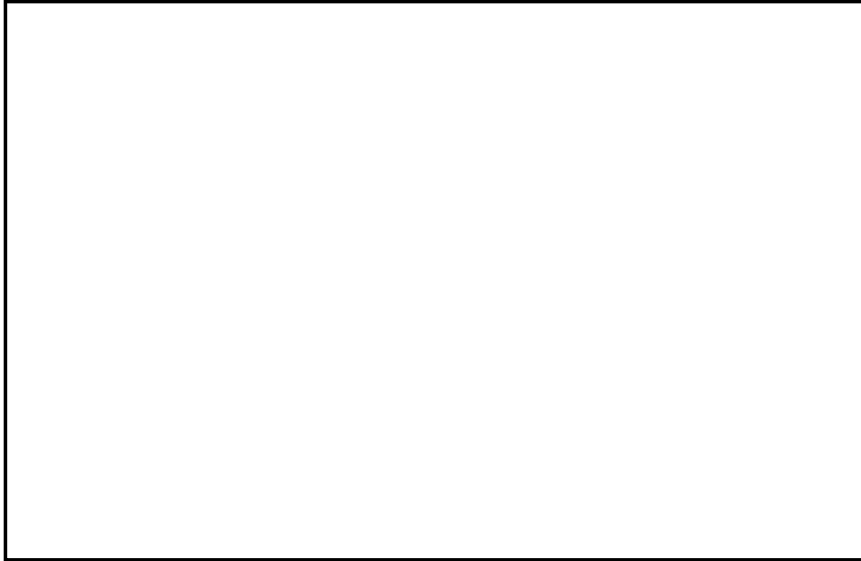


図7 Defender 付下部支持板の異物閉塞試験結果

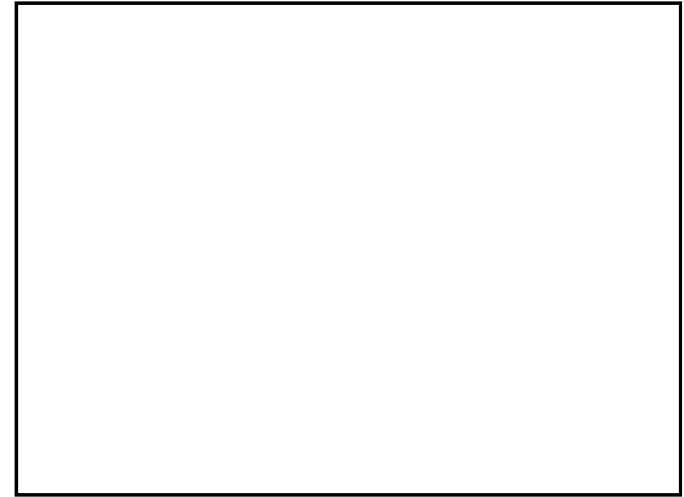


写真2 試験後の下部支持板の外観

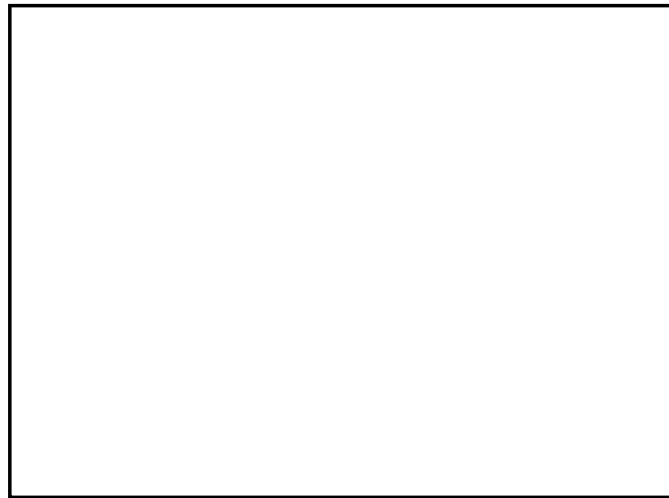


写真1 試験に用いた繊維状異物

異物閉塞試験の結果から、繊維状異物の閉塞によっても燃料体の冷却は確保されるが、柏崎刈羽原子力発電所第6号機及び第7号機では、ECCS ストレーナ閉塞への対策として、サブプレッションプールに落下するおそれがある繊維質保温材は現在までにすべて撤去したとしており、繊維状異物を考慮する必要はないとしている。

以上の申請者及び原子炉設置者による検討結果から、本件申請に係る Defender を採用した燃料体については、異物閉塞によって燃料の冷却が損なわれることはないと考えられる。

なお、異物が ECCS ストレーナの下流側の機器に与える影響について、現在我が国を含め各国でPWRを対象に検討が進められているところであるが、BWRではPWRのような化学的影響を伴う下流側機器への影響は確認されていない。このためBWRでは今後得られるPWRの知見に応じて、必要な対応をとるべきものと考えられる。

米国における試験結果に基づく繊維状異物量評価手法の柏崎刈羽6号機及び7号機への適用性について

ECCS ストレーナを通過する繊維状異物の総量の評価式①を導出する際に用いた試験(出典1)の条件、柏崎刈羽6号機及び7号機における ECCS ストレーナのメッシュ径、表面積及び通過する繊維状異物量を比較したものを表1に示す。

[通過する繊維状異物の量(lb)] ~ …①

表1 ECCS ストレーナの諸元と繊維状異物通過量の比較

	資料中の評価条件	柏崎刈羽 6号機	柏崎刈羽 7号機
ECCS ストレーナ メッシュ径	約 3mm (1/8 インチ)	約 2mm	約 2mm
ECCS ストレーナ 表面積	 (*1)	 (残留熱除去系)	 (残留熱除去系)
		 (高圧炉心注水系)	 (高圧炉心注水系)
通過する繊維状異物 量 (*2)		 (残留熱除去系)	 (残留熱除去系)
		 (高圧炉心注水系)	 (高圧炉心注水系)

柏崎刈羽6号機及び7号機では、式①の導出に用いた試験に比べて ECCS ストレーナのメッシュ径が小さいことから、相対的に ECCS ストレーナを通過する繊維状異物は少なくなり、式①を適用する場合は保守側の評価となる。

また、異物性状や系統流量などの条件が異なる点については定量的に評価できないが、米国で実施された異物閉塞試験で投入された繊維状異物量は米国 BWR プラントの中で ECCS ストレーナの表面積が広いものを基に算出した値を上回るものであり、柏崎刈羽6号機及び7号機における ECCS ストレーナの表面積よりも厳しい条件となっている。

(出典1) NEDO-32686-A Vol.2「Utility Resolution Guide for ECCS Suction Strainer Blockage」

(*1) ft²: 平方フィート

(*2)式①を適用した場合の評価値

注)第6回燃料意見聴取会(平成24年8月8日開催)で委員から頂いたコメントを踏まえ、本頁を平成24年9月7日に追加しました。 14 商業機密に属するため公開できない事項。

下部支持板に大量の繊維状異物が入り込んだ状態での冷却水の流れについて

異物閉塞試験に用いられた異物が全て下部支持板内部(Defender より上流側)に収まったと仮定すると、繊維状異物の体積占有率は終[](*1)となっており、試験結果のように下部支持板の中が異物で全て満たされた場合でも、目視できない空隙は存在し、完全閉塞に近い状態にはならない。このため、ある程度の圧力損失増加の範囲内で、流量が確保されていると考えられる。なお、異物閉塞試験に用いられた模擬燃料体下部には下部支持板以外の流路は無く、全流量が下部支持板を通過している。

また、Defender異物閉塞試験で測定された局所圧力損失 $dP_{局所}$ (例えば全異物投入後[])と質量流量 W (例えば全異物投入後[])を用いて、閉塞前後の局所圧損係数 K/A^2 を評価すると表1の結果となる。

次に、得られた全異物投入後の局所圧損係数[]を用いてLOCA 発生後を模擬した評価条件(自然循環状態)での冷却材流量を評価した結果、下部支持板の異物閉塞による局所圧損の増加分と流量が減少してボイド率が增大することによる位置圧損(静水頭)の減少分が相殺されることにより、流量が著しく減少することはなく、閉塞前は[]であった冷却材流量は[]程度となり、LOCA発生後の長期的な冷却を行うため必要な冷却材流量は確保されるとのことである。(*3)

表1 閉塞試験における圧損と流量の関係例(*2)

	局所圧力損失 $dP_{局所}$ [kPa]	質量流量 W [kg/s]	局所圧損係数 K/A^2 [cm^{-4}]	
試験開始直後				(基準)
全異物投入後				[]

(*1)

繊維状異物の量:終[]

繊維状異物の密度:2.5 g/cm³(仮定)

下部支持板のDefender より上流側の体積:終[]

体積占有率:[]

注)第6回燃料意見聴取会(平成24年8月8日開催)で委員から頂いたコメントを踏まえ、本頁を平成24年9月7日に追記しました。

(*2)

測定された局所圧力損失と質量流量を用い、 $dP_{局所} = W^2 \times (K/A^2) / 2\rho_c$ の関係式から局所圧損係数を評価した(ρ_c :液相密度(1×10^3 [kg/m³]))

Defender 異物閉塞試験では、単体の短尺模擬集合体を用い、試験体が発熱しない条件下で、下部支持板付近の圧力損失だけを測定している。試験中は、冷却材ポンプ容量の範囲内で冷却材流量が[]一定となるよう調整されているが、閉塞率が進み圧力損失がある程度高くなると、ポンプ容量が上限に達するため流量が低下し、上記試験例では最終的な流量が[]になっている。

(*3)

LOCA 発生後の状況を模擬する場合は、上記で求められた局所圧損係数 K/A^2 を用い、閉塞前の冷却材流量を[]として、閉塞前後の炉心入口オリフィスから集合体出口までの圧力損失(全圧力損失) $dP_{全体}$ が等しくなるよう、閉塞後の冷却材流量を評価する。すなわち、閉塞前の冷却材流量を[]として全圧力損失を求め、次にその全圧力損失になるように閉塞後の冷却材流量を求める。

評価にあたって、全圧力損失 $dP_{全体}$ は以下の式で与えられる。

$$dP_{全体} = dP_{水頭} + dP_{局所, 入口} + dP_{局所, バンドル} + dP_{摩擦} + dP_{加速}$$

$dP_{全体}$: 炉心入口オリフィスから集合体出口までの圧力損失
 $dP_{水頭}$: 位置圧力損失(静水頭)
 $dP_{局所, 入口}$: 下部支持板など入口部の局所圧力損失
 $dP_{局所, バンドル}$: スペースなどの圧力損失
 $dP_{摩擦}$: 摩擦圧力損失
 $dP_{加速}$: 加速圧力損失

閉塞前の状態では、右辺の項のうち、水頭の項がほとんど全てを占めており、残りの4項はほぼ無視できる。一方、下部支持板が閉塞すると、入口部の局所圧力損失の項が顕著に増大する。しかし、同時に冷却材流量が減少するために燃料集合体発熱部のボイド率が増大し、水頭が減少して、全圧力損失は変化しない。

注)第6回燃料意見聴取会(平成24年8月8日開催)で委員から頂いたコメントを踏まえ、本頁を平成24年9月7日に追記しました。

[] 商業機密に属するため公開できない事項。

コメントNo. 2

燃料体に装着されたチャンネルボックスが別の燃料体で再度装着されるか確認すること【天谷委員】

(回答)

現在、設置者において、燃料集合体とチャンネルボックス（以下、「CB」という。）は照射前から使用済燃料として取り出されるまでの間、一体のものとして取り扱うこととしており、CB は別の燃料体に再度装着されていない。燃料集合体外観検査等で一時的にCBを燃料集合体から取り外す場合でも、検査後は同一のCBが装着されている。

なお、過去においては使用済燃料からCBを取り外し、再利用する運用が行われていたが、以下の理由により現在は行われていない。

- ・燃料集合体の高燃焼度化が進んだことから、CBを再使用した場合に使用期間が長期に及び、曲がり等の影響が大きくなること。
- ・日本原燃六ヶ所再処理施設では、使用済燃料をCBと一体での受け入れを基本としていること。
- ・CBの価格低下に伴い、CBを再利用する場合のコストダウン効果が小さくなったこと。

注)第6回燃料意見聴取会(平成24年8月8日開催)で委員から頂いたコメントを踏まえ、下線部分を平成24年9月7日に改訂しました。

サンプスクリーンを通過したデブリが炉心に与える影響に関する米国の対応状況及びこれを踏まえた国内の対応について(案)

令和 2 年 8 月 19 日
システム安全研究部門

1. はじめに

この文書は、原子炉冷却材喪失事故（LOCA）時の保温材の破損等により発生した異物（以下「デブリ」という。）がサンプスクリーンを通過し、炉心へ与える影響（以下「炉内下流側影響」という。）についてまとめたものである。米国 NRC の規制ガイド RG1. 82 Rev. 4 [1] が 2012 年に発行されて以降、炉内下流側影響に関しては、米国で炉内繊維デブリ制限値の緩和等について議論があったが、プラントごとの情報を用いた評価を行うなど、米国の対応の方向性が明確化されてきた。以下、米国及び国内における経緯及び対応状況について報告する。

2. 米国における経緯及び対応状況

1992 年に発生したスウェーデンのバーセベック発電所におけるストレーナ閉塞事象¹を契機に、BWR プラントにおいてはストレーナ大型化等によるストレーナの閉塞防止対策が講じられた。PWR プラントにおいても、LOCA 発生後、デブリがサンプスクリーンに堆積し、緊急時炉心冷却装置（ECCS）や格納容器スプレッド冷却系（CSS）ポンプの正味吸い込みヘッド（NPSH）が確保されない可能性があるため、NRC は Generic Safety Issue（GSI）-191 として検討を開始し、サンプスクリーンに対する要件を LOCA 後の長期炉心冷却に必要な水源の要件に関する規制指針 RG1. 82 Rev. 3 [2] として 2003 年に取りまとめた。また、2004 年に NRC は GL2004-02 を発行し、事業者に対してサンプスクリーンの評価を要求し、事業者はサンプスクリーンの面積を大幅に増やす等²、サンプスクリーンが閉塞するリスクを下げる対応を行った。

GSI-191 で検討を進めるうちに、炉内下流側影響という問題が顕在化した。事業者はこの問題の解決のため試験を実施し、サンプスクリーンを通過した繊維、粒子及び化学デブリが炉心に与える影響を検討し、その安全性を評価する手法をトピカルレポート WCAP-16793-NP Rev. 2 [3] としてまとめた。NRC が 2012 年に改定した RG1. 82 Rev. 4 で

¹ 安全弁の誤作動により、配管断熱材が脱落し、これがサブプレッションプールに流入して ECCS の吸込ストレーナの閉塞を引き起こした。米国においてもベリール発電所等でストレーナの閉塞が発生した。

² 他の対策の例として、繊維デブリや粒子デブリを発生させる保温材の除去、化学的影響を低減するための pH 緩衝材の変更等がある。

は、WCAP-16793-NP Rev. 2 を参照する形で炉内下流側影響の考慮を要求している³。

ところが、WCAP-16793-NP Rev. 2 ではサンプスクリーンを通過した繊維デブリにより炉心下部が閉塞しないことを担保するために、炉内に到達する繊維デブリ量の制限値を設けているが、保守的に設定されているため、複数のプラントでその制限値を満たせない状況であった。このため、NRC は炉内下流側影響についての問題を解決するために、次のオプションを承認した[4]。

- ・ オプション 1：炉内における繊維デブリ量制限値については WCAP-16793-NP Rev. 2 に記載された評価手法を用いる。炉内に到達し得る繊維デブリ量が少ないプラントは、このオプションを採用している。
- ・ オプション 2A：炉内繊維デブリ量の制限として WCAP-16793-NP Rev. 2 で示される包絡的な値ではなく、各プラント固有の情報を用いて、追加試験や解析することで制限値を定める。事業者は炉内繊維デブリ量制限値を個別プラントに対して評価する手法についてトピカルレポート WCAP-17788 [4-95-10] を NRC に提出した。
- ・ オプション 2B：確率論（リスク・インフォームド）的アプローチ。炉心入口閉塞によるリスク増分を評価し、リスクが小さいことを示す。
- ・ オプション 3：サンプスクリーン閉塞と炉内下流側影響を分離して扱う。前者に対してはオプション 1、後者に対してはオプション 2B の手法を用いる。

オプション 1、2A、2B はそれぞれ 19 プラント、35 プラント、11 プラントに採用され、オプション 3 を選択したプラントはない。2016 年にオプション 1 を選択した全プラントが、また、2017 年にオプション 2B を選んだ 2 プラントが GL2004-02 の対応終了となった。残りのプラントについては NRC 及び事業者が対応中であるが、PWR オーナーズグループは 2019 年 9 月のニュースレターの中でこの対応が 2020 年中に解決する見通しと述べている[4011]。

なお、BWR プラントについては、GSI-191 で PWR プラントに対して得られた知見⁴に対して、事業者が自主的取組みとしてリスク評価を行い、2017 年に安全上問題がないとの評価結果を NRC に提出した[4112]。NRC は事業者の評価結果を受け、2018 年に規制上のアクションは不要と結論づけている[4113]。

3. 国内の経緯及び対応状況

旧原子力安全・保安院は、2004 年 6 月に電気事業者に対して保温材の実態調査やストレーナの有効性評価を行うよう指示するとともに、総合資源エネルギー調査会原子炉安全小委員会の下に設置した安全評価ワーキンググループにおいて、原子炉冷却材喪失

³ WCAP-16793-NP Rev. 2 では、長期炉心冷却の基準として以下が定められている。（1）燃料被覆管表面温度は 800 F（427 °C）を超えないこと（2）燃料被覆管への付着物の厚さが 50 mil（1.27 mm）を超えないこと（3）炉内繊維デブリが 15 g/FA を超えないこと

⁴ 炉内下流側影響に加え、下流側機器への影響、化学的影響、塗膜影響等

時のストレーナ（BWR プラントの非常用炉心冷却系統ストレーナ、PWR プラントの格納容器再循環サンプスクリーン）の閉塞事象に関して審議・検討を行った。

その検討結果を踏まえ、2008年2月に、PWR プラント及びBWR プラントを対象とした「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）」~~[43]~~[14]を制定した。

電気事業者は工事計画手続きにおいて、上記内規に基づきストレーナの有効性評価を行い、必要に応じて保温材の取替えやストレーナの大型化などの対策を実施した。

上記内規では、詳細な炉内下流側影響の評価については要求していないが、高浜3/4号炉の新規制基準適合性審査において、電気事業者はPWR共通の中長期的な安全性向上の取組みとして炉内下流側影響について検討する旨を表明している~~[44]~~[15]。

4. 今後の予定

新規制基準において、「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）」~~[43]~~[14]は技術基準規則解釈第17条、第32条及び第44条において引用されている。3.でも述べたように内規では、炉内下流側影響については、「ストレーナの網目の粗さは、ECCSポンプ下流のスプレインズル、ECCSポンプシール部等、下流側機器の機能を損なうことのない設計であること。」を要求しているが、ストレーナの網目の粗さに関するものであり、今回報告したような炉内下流側影響の評価についてはではない。

このため、米国における対応状況を勘案し、PWRプラント及びBWRプラントを対象に、内規等への反映の要否について、規制庁として検討する必要があると考える。検討に際しては、関係部署を交えて国内外の情報収集を継続して行いたい。

参考文献

- [1] Regulatory Guide 1.82 Revision 4, “Water Source for Long-Term Recirculation Cooling Following a Loss-of-Coolant Accident”, March 2012.
- [2] Regulatory Guide 1.82 Revision 3, “Water Source for Long-Term Recirculation Cooling Following a Loss-of-Coolant Accident”, November 2003.
- [3] WCAP-16793-NP-A, Revision 2, “Evaluation of Long-Term Cooling Considering Particulate, Fibrous and Chemical Debris in the Recirculation Fluid”, July 2013.
- [4] SECY-12-0093, “CLOSURE OPTIONS FOR GENERIC SAFETY ISSUE - 191, ASSESSMENT OF DEBRIS ACCUMULATION ON PRESSURIZED-WATER REACTOR SUMP PERFORMANCE”, July 2012.
- [45] WCAP-17788-NP, Volume 1, Revision 1, “Comprehensive Analysis and Test Program for GSI-191 Closure (PA-SEE-1090)”, December 2019.

- [66] WCAP-17788-NP, Volume 2, Revision 1, “Comprehensive Analysis and Test Program for GSI-191 Closure (PA-SEE-1090) – Phenomena Identification and Ranking Table (PIRT) for GSI-191 Long-Term Cooling”, December 2019.
- [67] WCAP-17788-NP, Volume 3, Revision 0, “Comprehensive Analysis and Test Program for GSI-191 Closure (PA-SEE-1090) – Cold Leg Break (CLB) Evaluation Method for GSI-191 Long Term Cooling”, December 2014.
- [78] WCAP-17788-NP, Volume 4, Revision 0, “Comprehensive Analysis and Test Program for GSI-191 Closure (PA-SEE-1090) – Thermal-Hydraulic Analysis of Large Hot Leg Break with Simulation of Core Inlet Blockage”, December 2019.
- [89] WCAP-17788-NP, Volume 5, Revision 1, “Comprehensive Analysis and Test Program for GSI-191 Closure (PA-SEE-1090) – Autoclave Chemical Effects Testing for GSI-191 Long-Term Cooling”, December 2019.
- [910] WCAP-17788-NP, Volume 6, Revision 1, “Comprehensive Analysis and Test Program for GSI-191 Closure (PA-SEE-1090) – Subscale Head Loss Test Program Report”, December 2019.
- [4011] PWROG September 2019 Newsletter,
(<https://pwrogpublic.westinghouseuclear.com/Pages/PWROG-News.aspx>)
- [4412] BWR0G Letter, BWR0G17-3-381r0, “Final Resolution of Potential Issues Related to Emergency Core Cooling Systems (ECCS) Strainer Performance at Boiling Water Reactors”, November 20, 2017.
- [4413] “Closure of Potential Issues Related to Emergency Core Cooling Systems Strainer Performance at Boiling Water Reactors,” U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC, June 29, 2018, ADAMS Accession No. ML18078A061.
- [4414] 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）」、平成20年2月27日
※本内規は、平成17年10月に制定した「沸騰水型原子炉発電設備における非常用炉心冷却設備及び格納容器熱除去設備に係るろ過装置の性能評価及び構造強度について（内規）」をPWRプラントにも適用できる共通の審査基準（内規）として改めて策定しなおしたものである。
- [4415] 第93回原子力発電所の新規制基準適合性に係る審査会合資料1-2,
(<https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndl.jp/pid/10953979/www.nsr.go.jp/data/000035481.pdf>)