

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と今後の対応について（案）

令和4年7月28日
技術基盤課
システム安全研究部門
シビアアクシデント研究部門
実用炉審査部門

1. 概要

冷却材喪失事故（LOCA）が発生すると、配管から噴出した冷却材が配管の保温材等を破損し、破片等の異物（デブリ¹）が生じる。デブリは格納容器スプレイ等により流され、非常用炉心冷却系（ECCS）再循環運転時の水源に到達するが、水源内のサンプスクリーン²によってデブリは除去される。サンプスクリーンで除去できずに通過したデブリが燃料集合体の流路に堆積するなどし、LOCA 後の長期炉心冷却を妨げる（以下「炉内下流側影響」という。）可能性がある。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³し、米国の規制ガイド（RG）1.82, Rev. 4⁴では炉内下流側影響の評価を要求しているが、日本においては、ストレーナの閉塞問題に対して装置の性能評価等を要求しているものの、炉内下流側影響の評価については明確には定めていないことから、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）」（以下単に「内規」という。）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。

これに関し、令和2年12月7日及び令和3年5月28日に事業者意見を聴取する会合⁵を開催し、PWR 事業者については、2022年を目処に検討結果をとりまとめること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。また、BWR 事業者については、冷却材喪失事故後の長期炉心冷却に対する影響についての説明が理解できなかったことから、再度説明を求めることとした。

¹ LOCA 時に破損した保温材や格納容器内に存在してストレーナに堆積する異物のこと。デブリは繊維質保温材であるロックウールの粉砕物などの繊維デブリ、ケイ酸カルシウムの粉砕物などの粒子デブリ及び ECCS 水と破損した保温材や格納容器内の構造物との化学的要因により生成された化学生成物が析出した化学デブリに分けられる。

² PWR プラントの格納容器再循環サンプスクリーン及び BWR プラントの ECCS ストレーナ

³ 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）

⁴ NRC, “Water Source for Long-Term Recirculation Cooling Following a Loss-of-Coolant Accident”, Regulatory Guide 1.82 Revision 4, 2012.

⁵ 第14回新規要件に関する事業者意見の聴取に係る会合及び第16回新規要件に関する事業者意見の聴取に係る会合

今般、令和4年6月16日に事業者意見を聴取する会合⁶を開催し、事業者から説明を受けた（参考1及び2参照）ことから、その結果と今後の対応に関する検討内容について報告する。

2. 事業者からの聴取の結果

2. 1 PWR 事業者等⁷

2. 1. 1 説明の概要（参考1）

- 長期炉心冷却のシナリオについては、米国と同様に以下を想定。
 - ✓ 再循環開始直後は繊維デブリ及び粒子デブリのみを考慮し、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）
- 国内全プラントを包含する条件で流動試験を実施し、上記のシナリオの妥当性を確認。
 - － 燃料集合体2体試験：繊維デブリ及び粒子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
- 先行する米国の検討状況を踏まえ、上記シナリオにより圧力容器内熱流動解析を実施。また、炉心入口流路の大半が閉塞（99.5%相当）しても長期炉心冷却が可能であることを確認。
- 上記より、炉内下流側影響のLOCA後長期炉心冷却について問題ないことを確認。

2. 1. 2 主な質疑応答

(1) 実験結果の位置づけ

- － NRA：PWR事業者のプラントにおいては、新たな設備の導入や撤去等の対応をせずとも炉心冷却に問題ないという説明を受けたとあってよいか。（技術基盤課 佐々木企画調整官）
- － PWR事業者等：そのとおりである。（関西電力 濱野マネージャー）

(2) 米国における試験との関係

- － NRA：米国では繊維デブリ量の制限として集合体あたり15gなどとなっている

⁶ 第19回新規規制要件に関する事業者意見の聴取に係る会合

⁷ 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（第19回新規規制要件に関する事業者意見の聴取に係る会合資料19-1）

る一方で、日本では集合体あたり kg 単位で投入した試験でも問題ないとの結果となっている。日米の違いは何か。(シビアアクシデント研究部門 塚本主任技術研究調査官)

- **PWR 事業者等**：日本では燃料集合体 2 体系で実験しており集合体間の隙間等の閉塞が生じない流路があるため、非化学デブリを kg 単位で投入しても、途中で圧損が飽和するとそれ以上高くない。これに対して米国は、1/4 体系でそのような隙間が無い場合、圧損がすぐに増加し、繊維デブリの投入量の制限になる。(三菱重工 福田マネージングエキスパート)
- **NRA**：日本は低温側配管破断のときだけ炉心水位が維持できない可能性があるとの前提で検討を進めている。しかし、米国と日本の高温側配管破断時の参考解析では、日本では温度が低く維持されているが、米国では温度が高くなっており、その前提は正しいと言えるか。また、米国の温度上昇が大きく日本の温度上昇が小さいという違いは何か。(シビアアクシデント研究部門 塚本主任技術研究調査官)
- **PWR 事業者等**：再循環開始から化学デブリ析出までの間においては、試験結果に基づき保守的に設定した圧損係数を炉心下部に設定しており、日米の試験体系の違いに起因して米国よりも日本で設定した圧損係数がかなり小さくなっている。そのため、日本の解析では米国と比べて炉心下部から流入する水が多く、被覆管温度の上昇がみられない結果となった。仮に炉心の入り口が完全に閉塞しても、高温側配管破断の場合は、バツフルバレルだけで炉心水位は維持され冷却できる。(三菱重工 福田マネージングエキスパート)

(3) ほう酸及び化学デブリの析出

- **NRA**：ほう酸析出の影響の解析評価例があるが、24 時間以降に析出しそうにみえるが問題ないのか。(シビアアクシデント研究部門 塚本主任技術研究調査官)
- **PWR 事業者等**：24 時間でほう酸析出を防止するための高温側配管切り替え注水を行う。その結果、炉心の上部から注水されるため、ほう酸の濃縮は解消される。(三菱重工 福田マネージングエキスパート)
- **NRA**：ほう酸析出は 24 時間以内に高温配管側からの注入により防ぎ、また、化学デブリの析出時刻は高温配管側からの注水切り替え時刻よりも遅いという説明があった。高温配管側からの注入による対策でほう酸及び化学デブリ析出の両方とも対処が可能という理解でよいか。(システム安全研究部門 江口技術研究調査官)
- **PWR 事業者等**：高温配管側からの注入による対策で両方とも対処が可能である。なお、ほう酸析出の評価に当たり、化学デブリは 24 時間までは析出しないことを試験により確認しているため、炉心入口における化学デブリの析出は考慮

していない。(三菱重工 福田マネージングエキスパート)

- **NRA** : ほう酸析出限界濃度はどのように算出したのか。温度との関係なので、水の注入により温度変化があるのであれば、それにより変わるのではないか。注入水の量が少ないので、急激に冷却されて結晶が析出するというようなことはないか、あったとしても、非常に局所的な現象かと思う。(技術基盤課 佐々木企画調整官)
- **PWR 事業者等** : 圧力に応じた飽和温度に対する溶解度曲線を求めており、その飽和温度での溶解度がほう素濃度で 55,000ppm である。(三菱重工 福田マネージングエキスパート)
- **NRA** : 試験対象が金属材料と無機系のものだが、塗料を模擬した実験もある。塗料が pH 調整された後も問題ないということを確認しているのか。(技術基盤課 佐々木企画調整官)
- **PWR 事業者等** : 塗料の成分については、WCAP⁸において化学影響は小さいことが確認されている。(三菱重工 緒方主席)
- **NRA** : 使われている塗料は、WCAP に報告されているものの範囲に入るのか。(技術基盤課 佐々木企画調整官)
- **PWR 事業者等** : そのとおりである。(三菱重工 緒方主席)

(4) 熱流動解析

- **NRA** : 熱流動解析では最高被覆管温度が一時的に上昇しており、沸騰遷移からリウエットという状況が繰り返されているように見える。このような場合、LOCA 用の解析コードが使えるのか。(シビアアクシデント研究部門 塚本主任技術研究調査官)
- **PWR 事業者等** : プール沸騰と強制対流いずれにも実績のある相関式を用いており、基本的には適用可能だと考える。(三菱重工 寺前主席)
- **NRA** : 燃料集合体 2 体系の試験では、投入したデブリの一部は燃料集合体に付着せずに沈殿する現象が観測されたが、実機でも起こり得るのか。また、起こり得るならば、沈殿したデブリが冷却を妨げることはないか。(システム安全研究部門 江口技術研究調査官)
- **PWR 事業者等** : 実機で起こり得るが、デブリがダウンカマを下りてきた後、広大な下部プレナムに沈殿し、冷却には影響ないと考えている。(三菱重工 福田マネージングエキスパート)

⁸ WCAP-16793-NP-A, Revision 2, "Evaluation of Long-Term Cooling Considering Particulate, Fibrous and Chemical Debris in the Recirculation Fluid", July 2013.

- **NRA**：燃料被覆管への付着影響についての米国の評価事例が示されているが、この結果は日本のプラントの運転条件や事故の条件にも適用可能なのか。(システム安全研究部門 江口技術研究調査官)
- **PWR 事業者等**：WCAP から引用した評価結果を示している。こちらでも WCAP の手法を用い、日本の条件に焼き直して評価し、WCAP とほぼ同等の結果を得ており、日本のプラントでも、付着による安全への影響はないと考えている。(三菱重工 緒方主席)
- **NRA**：解析上のシナリオでは、圧損がステップ状に立ち上がるのは LOCA 発生後 20 分ぐらいと考えてよいか。また、圧損が増加する前に高温配管側注水切り替えにより炉心上部から冷却とあるが、シビアアクシデント時も同じか。さらに、ストレーナの閉塞性の解析では、ECCS へのデブリの移行量は内規を基に評価しているが、実験で用いたデブリ量は、これに比べて保守的なのか。(実用炉審査部門 小林主任安全審査官)
- **PWR 事業者等**：圧損が立ち上がる時間はそのとおりである。再循環が維持されている限りシビアアクシデントの時も時間間隔は変わらない。実験で用いたデブリ量は、内規に沿っている。(三菱重工 福田マネージングエキスパート)

(5) 審査との関係

- **NRA**：試験の条件は実機の現象と比べて相当保守的なものであること及び米国での検討状況等の歴史的な背景を踏まえて、設計基準事象の解析⁹との関係で改めて文書化してほしい¹⁰。かなりリスクの低いことだと思うので、それが分かるようにすることが必要。(実用炉審査部門 小林主任安全審査官)

2. 2 BWR 事業者¹¹

2. 2. 1 説明の概要 (参考 2)

- 繊維質保温材の撤去¹²やストレーナの大型化、格納容器内の清掃など、デブリによるストレーナ閉塞事象に対して裕度を向上させる取り組みを実施している。
- ストレーナを通過したデブリによる炉心への影響に関しては、燃料上部に閉塞の影響はないこと、燃料下部についても薄膜効果¹³の要因となる繊維質保温材を再稼働までに国内全プラントにおいて撤去するため、LOCA 後の冷却に影響のないと考えている。(LOCA (設計基準事故) 時の安全評価結果に影響なし)

⁹ 柏崎刈羽原子力発電所原子炉設置変更許可申請書(6,7号原子炉の増設) 添付書類 10 など

¹⁰ 今後、面談等において受領予定

¹¹ 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

¹² 新規制基準対応の設工認において SA 時の ECCS ストレーナ圧損評価が審査対象となるため、繊維質保温材の撤去計画を反映した条件にて評価を実施している。プラント再稼働までに繊維質保温材を撤去予定

¹³ ストレーナ表面に堆積した繊維デブリが粒子デブリを捕捉することによる効果

2. 2. 2 主な質疑応答

(1) 解析の前提条件

- **NRA** : 再循環運転は何分頃に開始されるのか。また、BWR5 に関しては、注水ラインが全て炉心上部に設置されているので、下部が閉塞したとしても、上から注水されるが、ABWR は代表事象である高圧系の破断の際は低圧注水系で下から注水するので、試験は ABWR の高圧系の破断を対象としているという理解でよいか。(シビアアクシデント研究部門 塚本主任技術研究調査官)
- **BWR 事業者** : 低圧注水系の起動は、LOCA 発生の約 6 分後である。炉内にデブリが到達して閉塞し始めるのは 10 分前後と考えている。BWR5 は全て炉心内に注水するので、ABWR を対象としている。(東京電力 野中チームリーダー)
- **NRA** : 実機プラントでは繊維質保温材を撤去するので、粒子/固形物のデブリのみが発生し、その影響を考える必要があると理解した。一方で試験では粒子/固形物のデブリに加え、繊維デブリも投入している。試験に繊維デブリを投入することによって、どのぐらいの裕度を見込んだことになるのか。(システム安全研究部門 江口技術研究調査官)
- **BWR 事業者** : 粒子状のデブリだけであれば、そもそも粒子径が小さいものはそのままメッシュを素通りし、圧損の上昇はないと考える。(東京電力 野中チームリーダー)
- **NRA** : 試験で得られた局所圧力損失係数を用いた場合、どれだけの流量が流れるのか、それで十分であるという説明を導き出す過程が見えない。(技術基盤課 遠山課長)
- **BWR 事業者** : 試験で局所圧力損失と流量を測定し、係数を求め、その係数を用いて実機の流量を評価し、その流量が崩壊熱による蒸発分相当の流量を上回るという評価をしている。(東京電力 野中チームリーダー)
- **NRA** : 試験で得られた圧力損失係数を用いて、必要流量を導き出す過程を、結果だけではなく示してほしい。(技術基盤課 遠山課長)
- **BWR 事業者** : 異物が到達する前の水頭圧が支配的な状態をまず評価し、そこから全圧損が変わらないという評価で圧力損失を求めている。実際にデブリが詰まってきて流量が減ってくると、冷却できなくなり、ボイドが出てくる。ボイドが出てくると、位置圧損が低下する。実際のフィルタの局所圧損の上昇については、異物が到達する前後で変わらない。(東京電力 野中チームリーダー)

(2) 保温材の変更

- **NRA:** 各プラントによって格納容器内で使われている保温材の絶対量や種類は、いろいろだと思う。今回の試験は、その範囲を網羅しているのか。また、主に金属保温材に交換するとあるが、それ以外はどういうものに交換する予定なのか。(技術基盤課 佐々木企画調整官)
- **BWR 事業者:** 各プラントを包含するような条件で試験を実施している。また、一部、狭隘部などは樹脂系のポリイミド等の保温材に換えている。(東京電力 高尾チームリーダー)
- **NRA:** BWR は今後、保温材を金属製の保温材にするということだが、なぜ PWR は金属製保温材にしないで、繊維質を使い続けるのか。(実用炉審査部門 小林主任安全審査官)
- **BWR 事業者:** PWR は格納容器内に配管の物量が多く、保温材を全て交換というのが難しいという事情がある。(日本原子力発電 浦邊課長)
- **PWR 事業者等:** それ以外に、保温材を取り換えなくても長期炉心冷却が維持できるという予測があり、試験で影響を確認するほうに注力してきた。(三菱重工 福田マネージングエキスパート)
- **NRA:** 繊維質保温材を金属保温材に取り換えるということは、金属保温材の絶対量が増えるということになる。金属保温材が脱落する等により、格納容器内にあるほかの設備に悪影響を与える可能性についてはどのように考えるか。(技術基盤課 佐々木企画調整官)
- **BWR 事業者:** 金属保温材が破損したとしても、他の設備に影響を与えるものではないと認識している。(東京電力 高尾チームリーダー)
- **NRA:** BWR と PWR でなぜ対応が違うのかについて文書化してほしい。BWR と PWR でストレーナ又はサンプスクリーンの大型化の考え方が異なると認識している。PWR は、サンプに、モジュラー式にスクリーンを増設することにより繊維質保温材等のスクリーンへの負荷を低減することなく対応していると認識している。一方、BWR は、サプレッションチェンバの吸い込み口に設置する構造のため、ストレーナサイズを大きくするにしても限界があることから、繊維質保温材から金属保温材に変更する方針にしたと認識している。(実用炉審査部門 小林主任安全審査官)

(3) 化学析出物

- **NRA:** 化学析出物の説明で、設計基準事故環境は純水とあるが、シビアアクシデントでは、自主的な対応として pH 調整がされると思う。そうしたときに影響があるのか。(技術基盤課 照井技術情報係長)

- **BWR 事業者**：シビアアクシデント環境では、薬液等を入れるので、圧損への影響はあると考える。その場合のシビアアクシデント評価も、実施し影響を確認している。（東京電力 高尾チームリーダー）

（４）審査との関係

- **NRA**：BWR は配管が破断すると破損した保温材はダイヤフラムフロア、サブプレッションチェンバ、ストレーナの吸い込み口と移動するため燃料へ到達するには時間がかかるのではないか。薄膜の生成時間も考えると、BWR は LOCA 事象の初期から再冠水するまでの間は、繊維質のデブリが燃料の下部タイプレートを閉塞するということはまずないという認識でよいか。また、添付十の解析では、設計基準事故の場合、LOCA だと 200～300 秒程度しかないので、薄膜の影響は考えなくてよいのか。シビアアクシデント時の炉心の著しい損傷防止の長期冷却のときには、薄膜が生成するかもしれないが、炉心冷却にはほとんど影響がないという認識でよいか。添付十への影響について、PWR 事業者等と同様に文書化してほしい¹⁴。（実用炉審査部門 小林主任安全審査官）
- **BWR 事業者**：時間的にはかなりかかると考える。また、添付十への影響はないと考えている。（東京電力 野中チームリーダー）

（５）その他

- **NRA**：CNO 会議¹⁵で 10×10 燃料の話題があったが、燃料が変更された時は再検討が必要となるのか。（シビアアクシデント研究部門 塚本主任技術研究調査官）
- **BWR 事業者**：10×10 燃料であっても、Defender 等は同じようなものが使われるので、今回の範囲内と思う。繊維質保温材を撤去するので、閉塞の影響はないと考えるが、仮にデブリが投入された場合ということであれば、本試験結果が利用可能と考える。（東京電力 野中チームリーダー）

3. 事業者意見に対する評価

- PWR 事業者等は、燃料集合体を 2 体用いた実験等により、繊維デブリ、粒子デブリ、化学デブリが発生しても長期炉心冷却が維持できるとしている。
 - 実験の条件は保守的に設定され、また、実験結果等を踏まえて実施した熱流動解析により燃料温度が上昇しないことが確認されており、LOCA 後の長期炉心冷却が可能とする説明は妥当と判断した。
- BWR 事業者は、燃料上部は ECCS ストレーナより間隙が大きいため閉塞せず、ま

¹⁴ 今後、面談等において受領予定

¹⁵ 第 14 回主要原子力施設設置者の原子力部門の責任者との意見交換会
<https://www.nsr.go.jp/disclosure/committee/other/CNO/120000070.html>

た、繊維デブリの原因となる保温材を撤去するため、燃料下部についても薄膜効果の要因がないことから、燃料集合体における冷却材流路の全閉塞は生じず長期炉心冷却に対する影響はないとしている。

- 繊維質保温材を撤去することにより燃料集合体における冷却材流路の全閉塞は生じず長期炉心冷却に対する影響はないとする説明は妥当と判断した。

4. 米国における近年の対応

原子力規制庁で炉内下流側影響に関する米国規制活動について調査し、NRA 技術ノート¹⁶としてとりまとめ発行した。米国における近年の対応状況について以下に示す。

- PWR については、炉内下流側影響について、繊維デブリの少ないプラント等が先行して NRC の承認を得たが、NRC は 2019 年に原子炉容器内における下流側影響についての審査ガイドを発行し、残るプラントの審査を進めている。これは炉内下流側影響に関する実験が過度に保守的だったため、全プラントに適用できなかったためである。
- BWR については、米国 BWR オーナーズグループ (BWROG) が炉内下流側影響について自主的活動として、PWR プラントにおける知見を反映させる取組みを行い、日本の対応とは異なり繊維質保温材の撤去ではなく、リスク情報を用いた手法により炉内下流側影響を評価した。NRC は BWR 事業者の評価結果を承認し、これ以上の対応は不要であると結論した。

5. まとめと今後の対応

炉内下流側影響について、内規への反映の要否を検討するため、米国規制活動の調査を行うとともに、令和 2 年 1 2 月より、3 回にわたり公開会合において事業者の取組について聴取した。

PWR については、国内全プラントを包含する条件での試験及び試験結果を反映した熱流動解析により燃料被覆管温度が上昇しないことが確認されており、LOCA 後の長期炉心冷却が可能とする説明は妥当と判断した。

BWR については、国内全プラントで再稼働までに繊維質保温材を撤去するため、炉内での流路の全閉塞は生じず、長期炉心冷却に対する影響はないとする説明は妥当と判断した。

内規には炉内下流側影響についての要求は規定されていないが、事業者から聴取した結果、長期炉心冷却に問題がないことが確認できたため、内規の改正は行わないこととしたい。

¹⁶ NRA 技術ノート「PWR サンプスクリーン及び BWR ECCS ストレーナの下流側影響に関する米国規制活動の調査」[000384635.pdf \(nsr.go.jp\)](https://www.nsr.go.jp/000384635.pdf)

- (参考1) 第19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19-1
- (参考2) 第19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19-2

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6月16日

目次

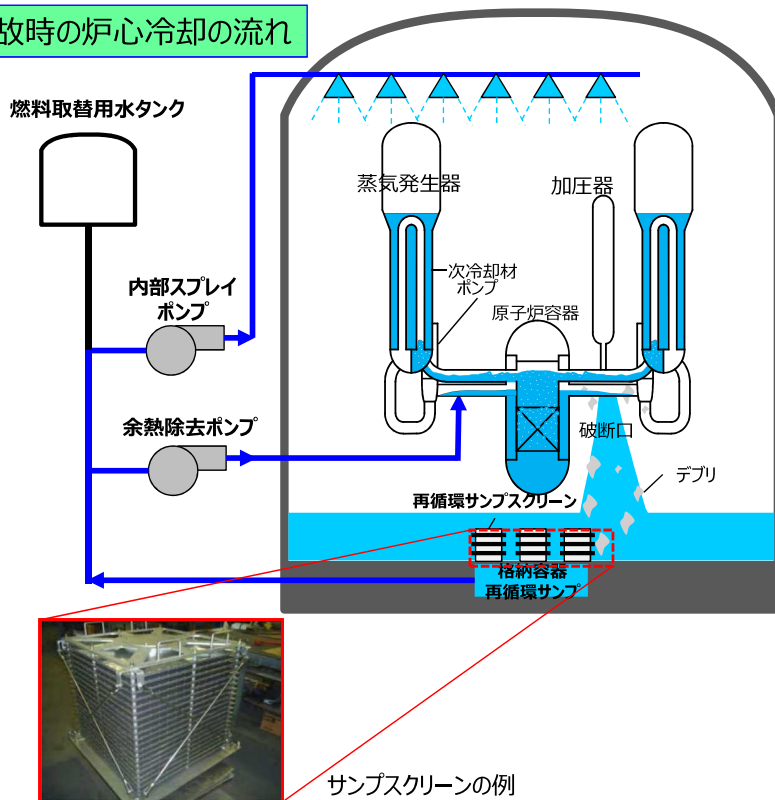
1

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

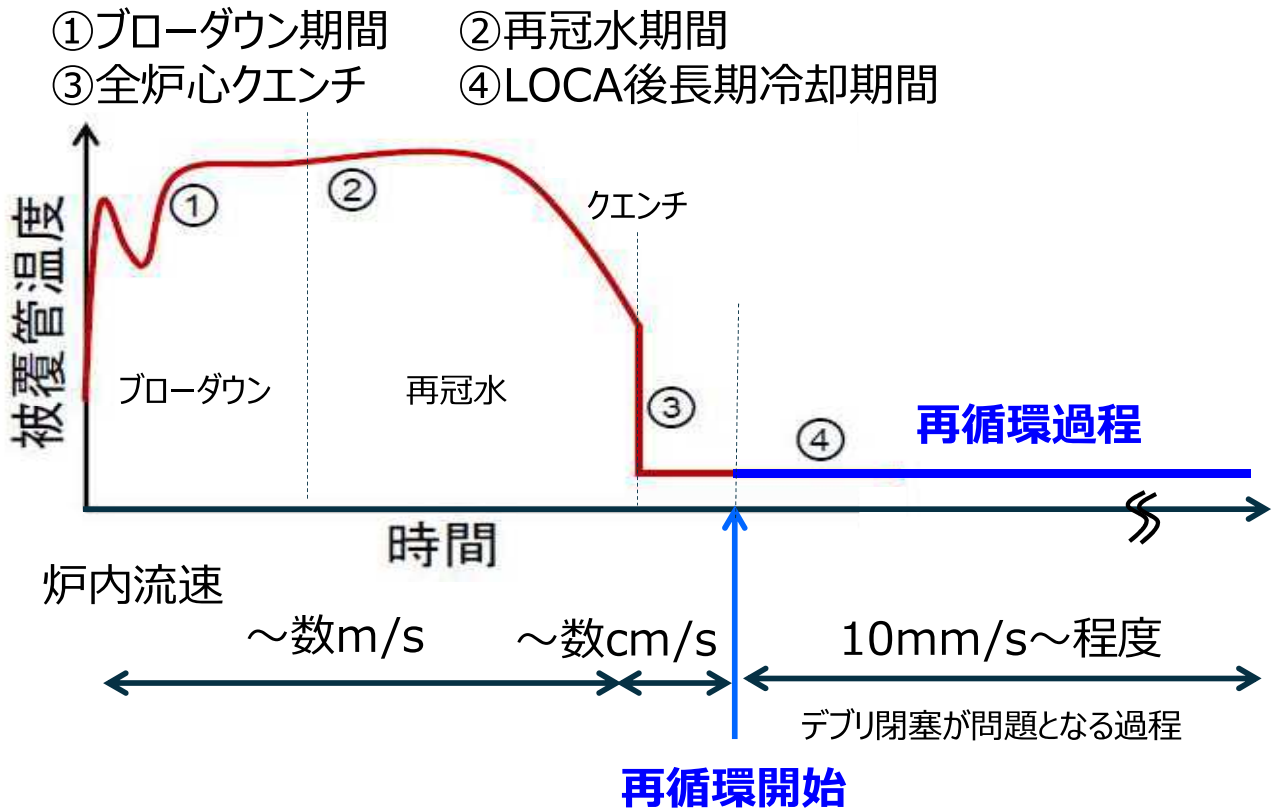


一次系配管破断 (LOCA) 発生

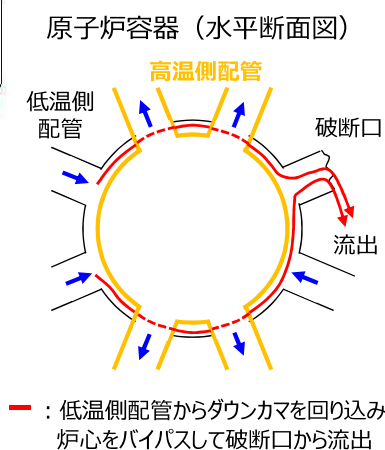
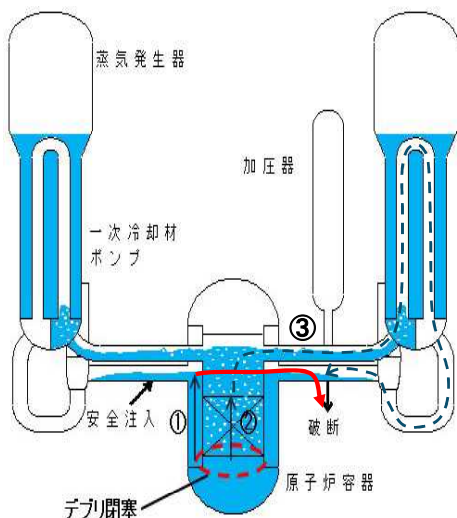
```

    graph TD
      A[一次系配管破断 (LOCA) 発生] --> B[炉心露出  
→ 炉心崩壊熱除去性能低下]
      A --> C[格納容器内の内圧上昇・温度上昇]
      B --> D[ECCS設備作動  
→ 炉心冷却のための冷却材供給]
      C --> E[CVスプレイ作動]
      D --> F[一次系注入のECCS水、CV内スプレイ水が再循環サンプへ]
      E --> F
      F --> G[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]
      G --> H[サンプスクリーンでのデブリの捕捉]
      H --> I[サンプスクリーンを通過したデブリの炉心への流入]
      I --> J[【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. 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

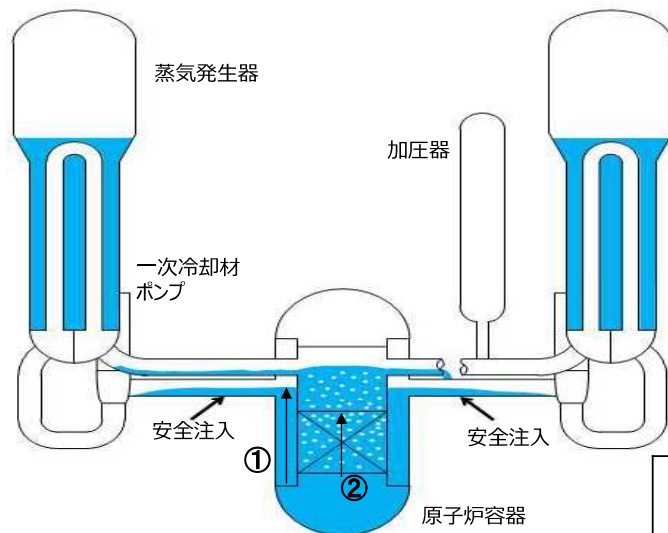
■ 炉心への冷却材供給の駆動力

- 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。



- 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

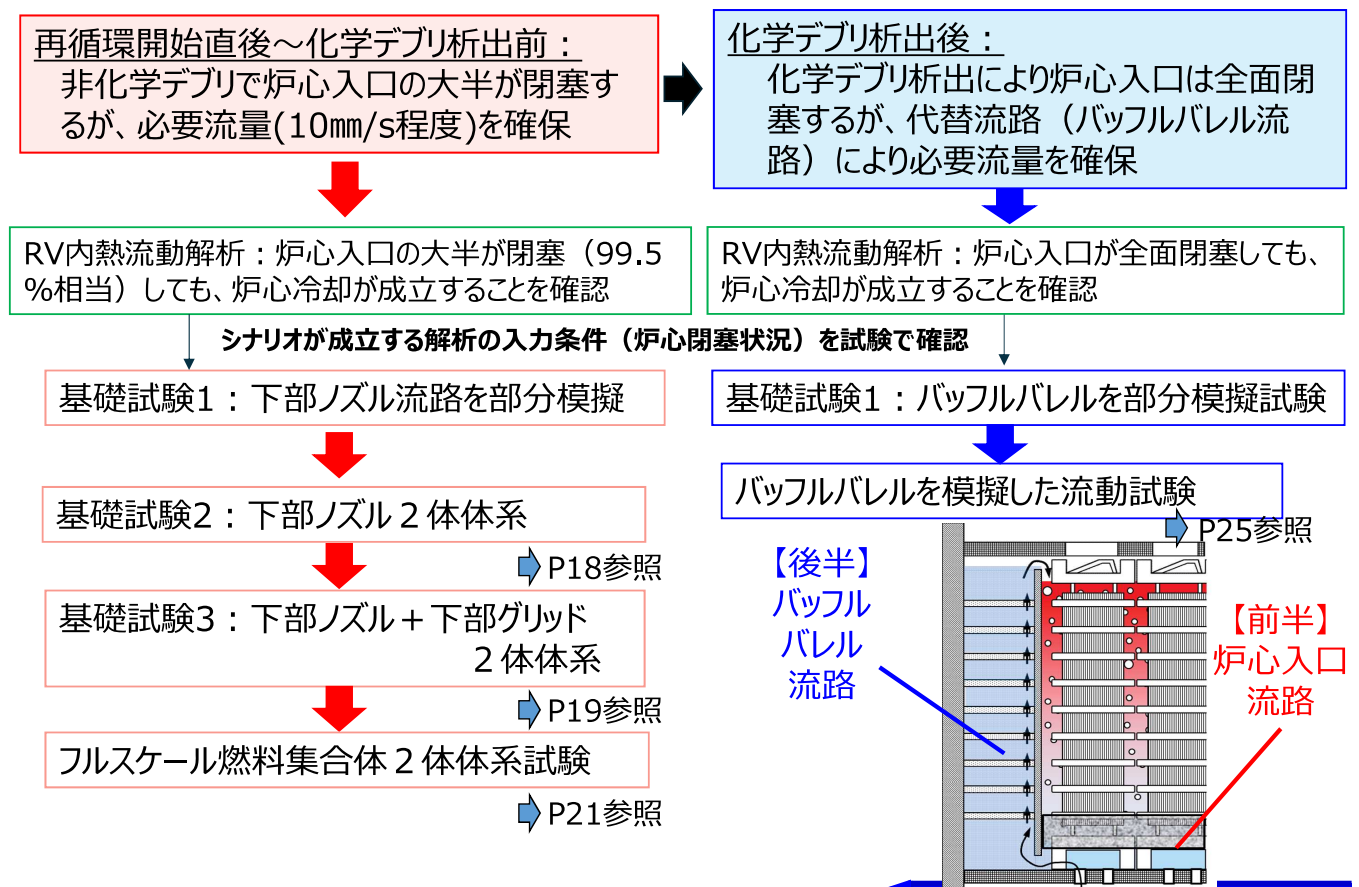
- 炉内への補給となる駆動力（水頭差）
 - 炉心有効長下端より上のダウンコマ水頭（①）
 - ボイドを含む炉心有効長における水頭（②）

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)	バツ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)	バツルバレル流路のみで炉心水位維持
高温側配管破断 (HLB)	バツルバレル流路のみで炉心水位維持	バツ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し、問題ないことを確認。

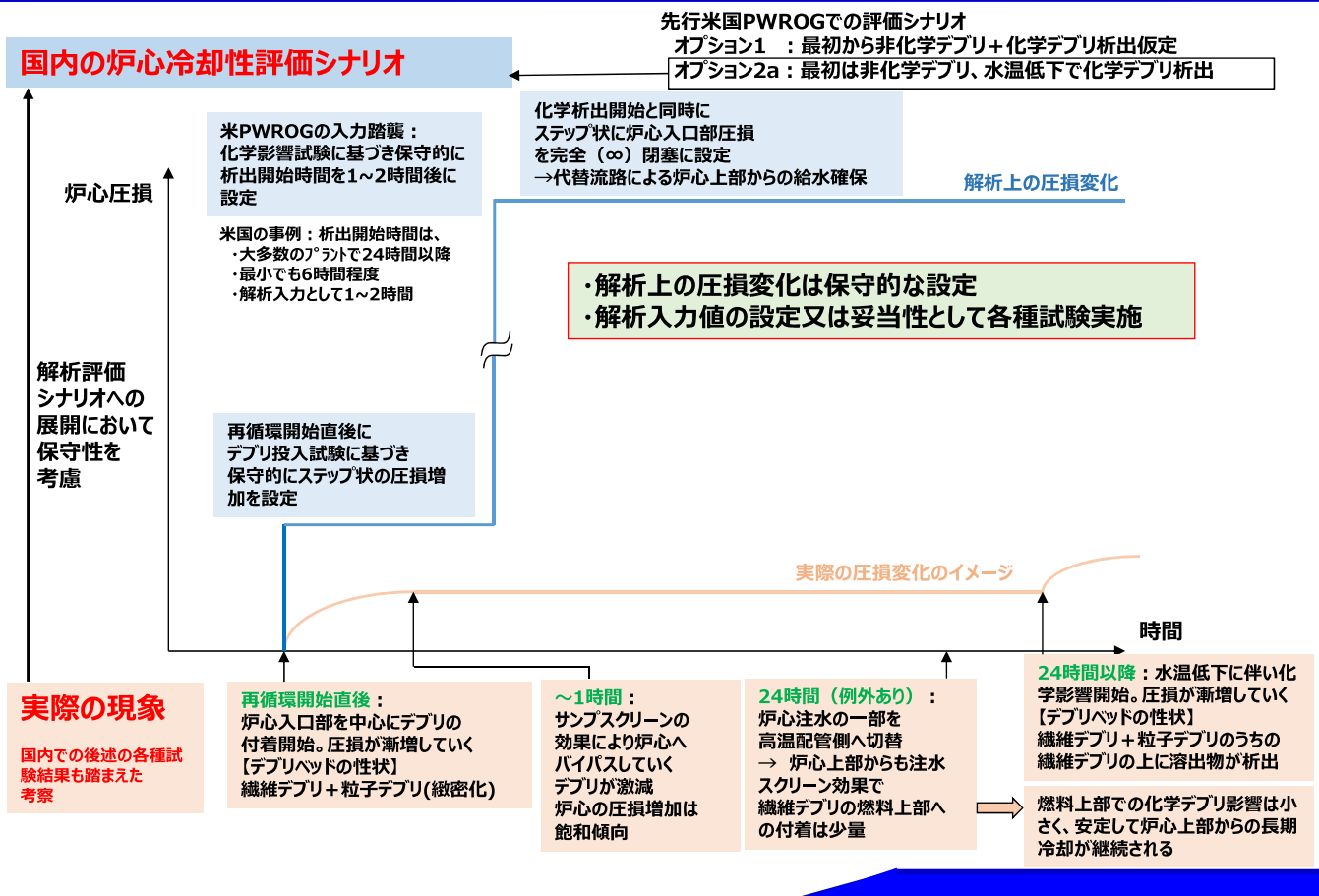


- 化学デブリ析出前、炉心入口から冷却材供給が可能であることを確認するため、燃料集合体2体を用いた流動試験を実施
- 化学デブリ析出後の代替流路の成立性を確認するため、バツフルバレル流路を模擬した流動試験を実施

	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、 下部ノズル間キヤップ 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)	
					フルスケール集合体試験		フルスケール集合体試験 バツフルバレル流動試験	
		基礎試験 1 (バツフルバレル 部分模擬試験)						結果取り纏め

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-



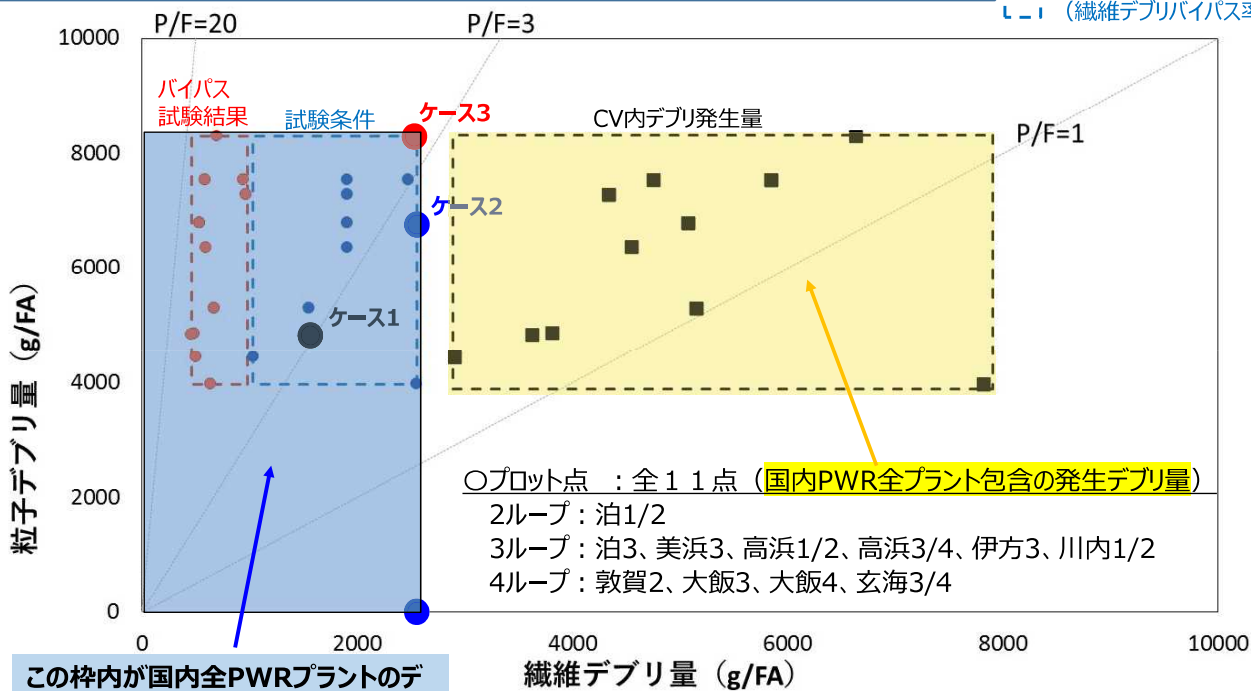
4. 流動試験 (解析の前提・入力の妥当性確認)

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全プラントにおける非化学デブリ発生量（繊維、粒子）を考慮し、サンプスクリーンでのバイパス量を保守的に考慮したうえで、国内PWRプラントすべてのデブリの炉内到達量のデブリ量を2体燃料（集合体、部分）に投入して圧損増加を確認し、それを解析入力として反映している。
 粒子／繊維のデブリ量比（P/F）も全プラントを包含する範囲で圧損増加への感度小確認。

- CV内デブリ発生量
- バイパス試験結果（繊維デブリバイパス率：約10～20%）
- 試験条件(包絡すべき範囲)（繊維デブリバイパス率:30%）



4.1 試験条件 –燃料タイプの選定–

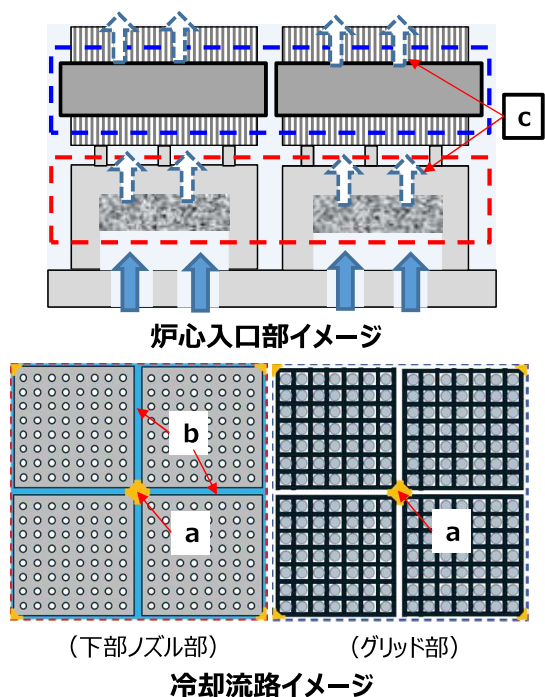
○17×17燃料を用いた試験結果（デブリによる圧損増加）の適用性

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）

- a. 下部ノズル及びグリッドのコーナー部流路
流路面積：17型燃料 < 15型燃料 < 14型燃料
- b. 隣接下部ノズル間流路
流路面積：17型燃料 = 15型燃料 < 14型燃料
- c. 下部ノズル及びグリッド内流路（一部）
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
- 流路aとbだけで炉心入口部の冷却流路の約**1.9% (> 0.5%)** が確保でき、長期冷却可能



4.2 基礎試験 (炉心入口部)

- ▶ 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次元の様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

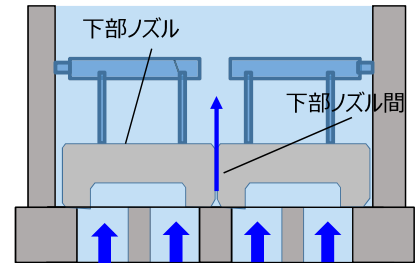
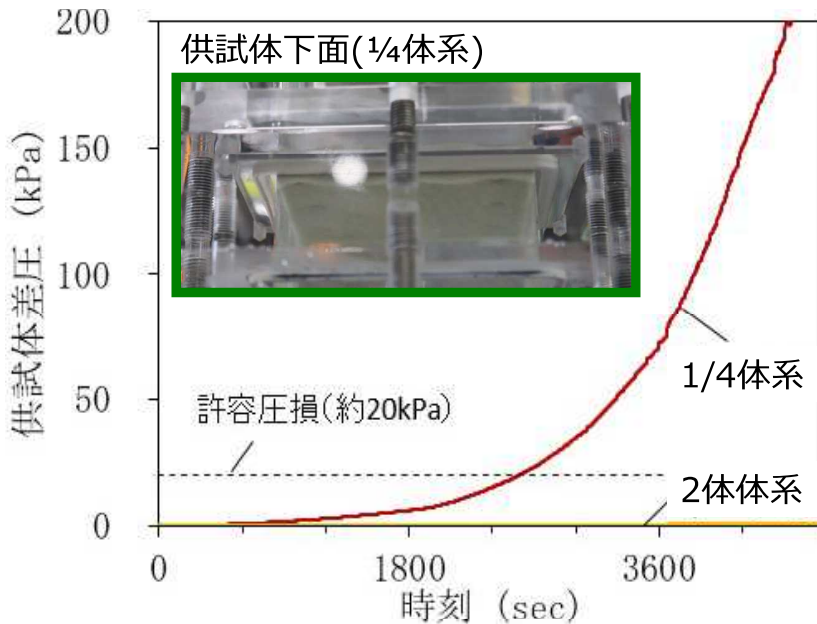


図1 燃料集合体2体系

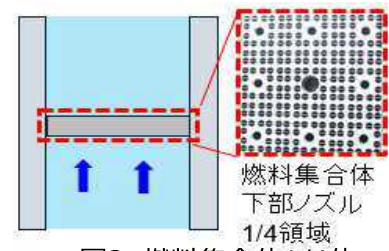
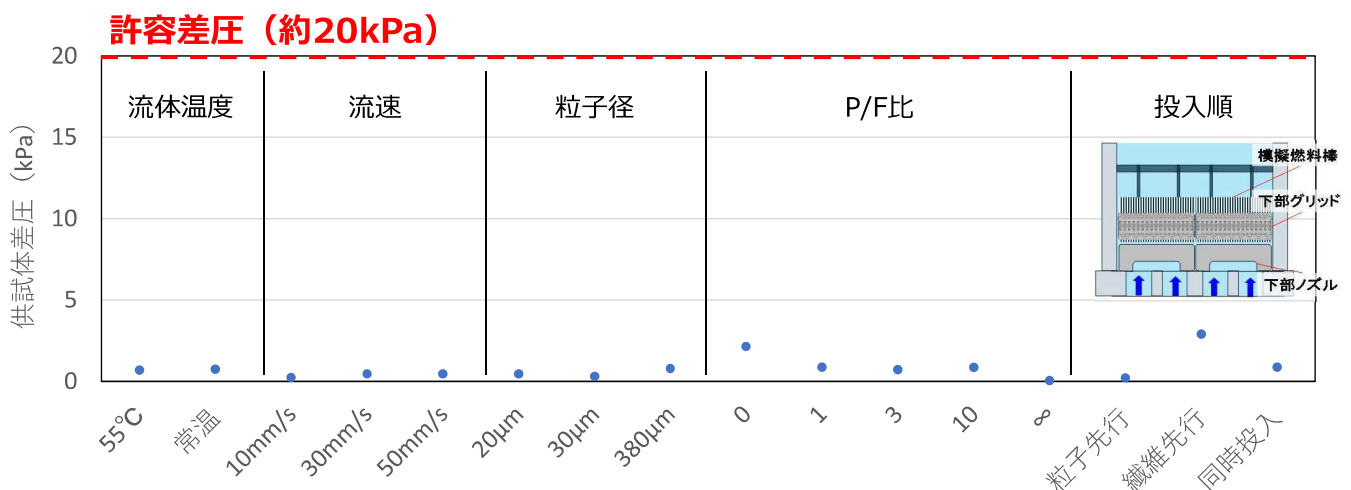


図2 燃料集合体1/4体系

- ▶ 燃料集合体2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られる
- 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

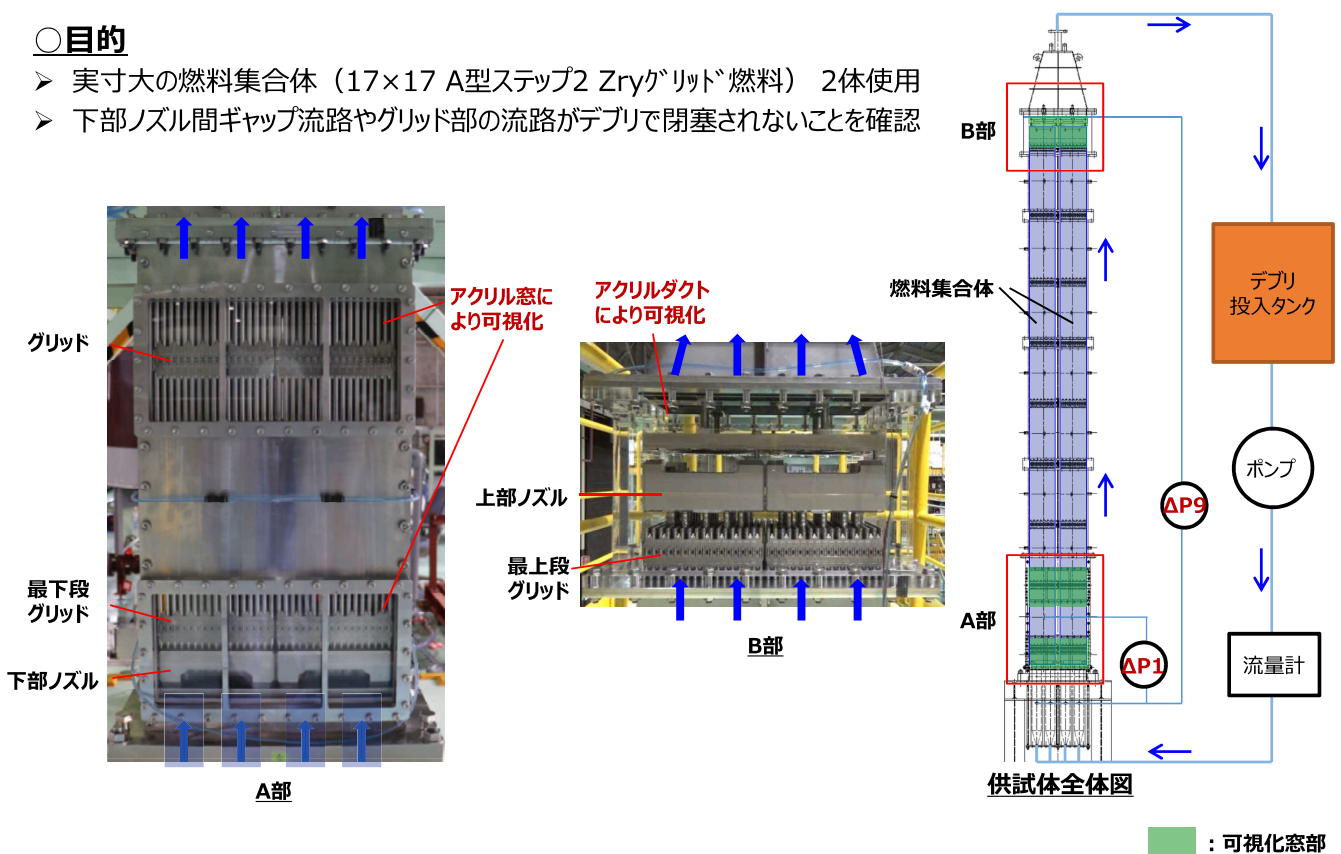


4.3 燃料集合体2体試験

4.3 燃料集合体2体試験 —試験装置概要—

○目的

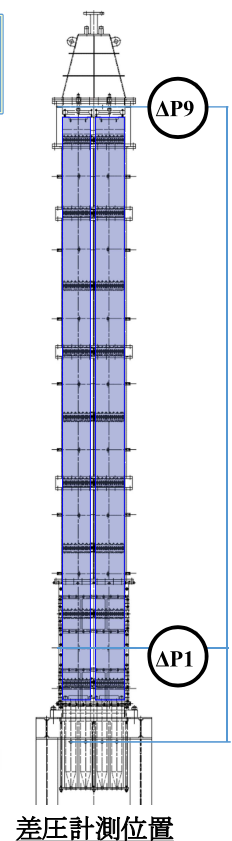
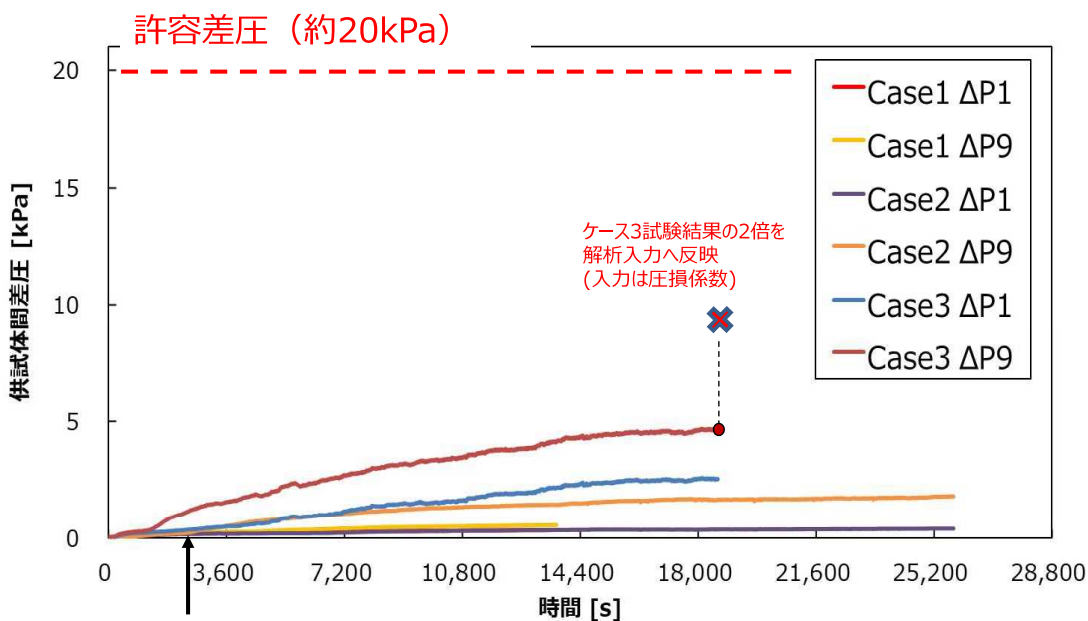
- 実寸大の燃料集合体（17×17 A型ステップ2 Zryグリッド 燃料） 2体使用
- 下部ノズル間ギャップ流路やグリッド部の流路がデブリで閉塞されないことを確認



		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20 μ m	約380 μ m	←
	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。

- 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



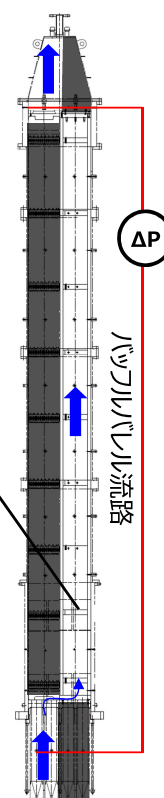
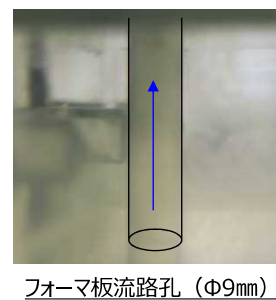
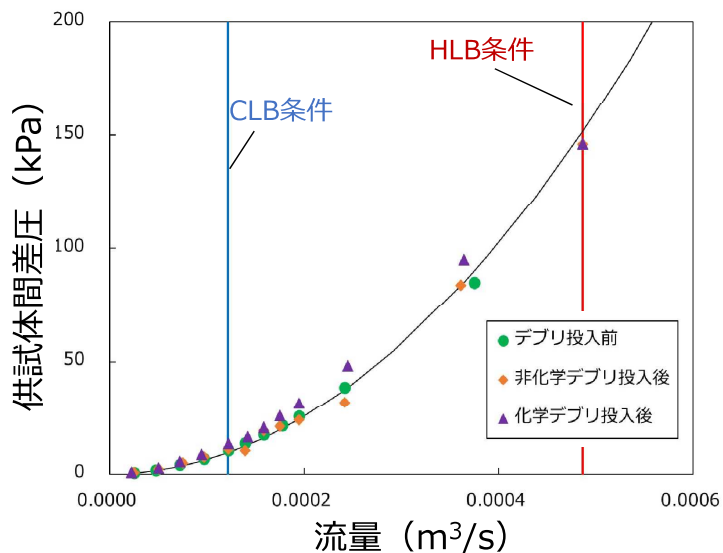
4.4 バッフルバレル流動試験

4.4 バッフルバレル流動試験 –ケース1：BB流路への通水–

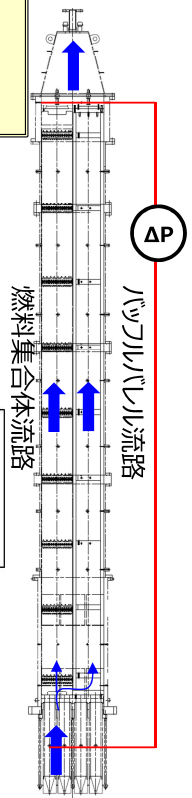
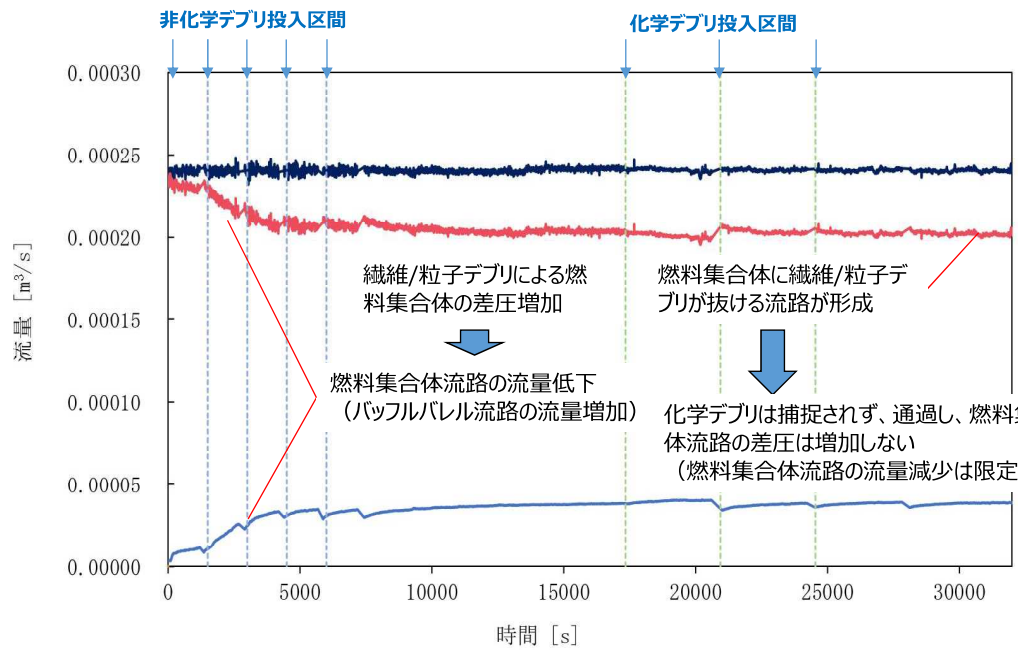
- バッフルバレル流路を模擬した供試体に繊維/粒子/化学デブリを投入
- デブリ投入前後でバッフルバレル流路の差圧は同等、机上検討とも概ね一致
- フォーマ板流路孔が閉塞していないことを目視で確認

【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



- 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

■ 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

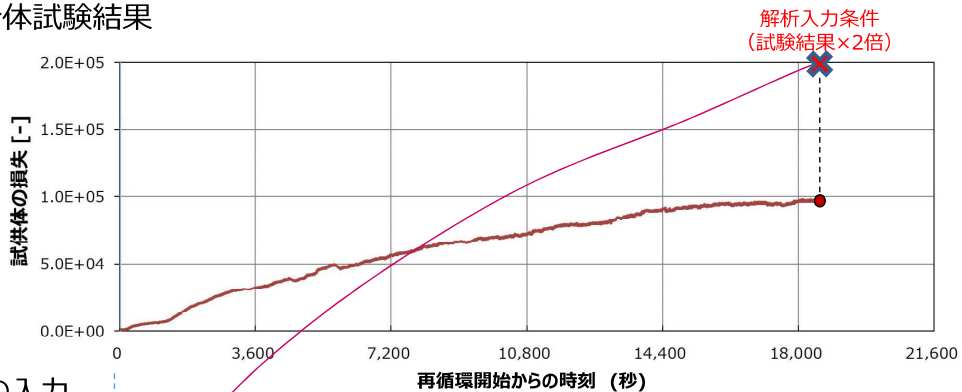
■ 対象とする事故事象

- 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)

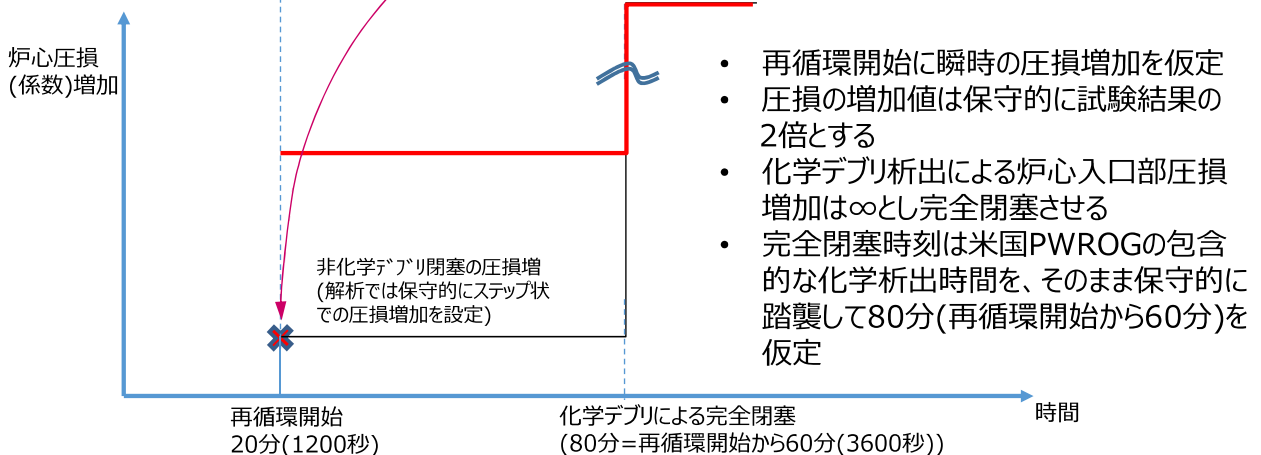
■ 解析条件

- 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

■ 2体集合体試験結果

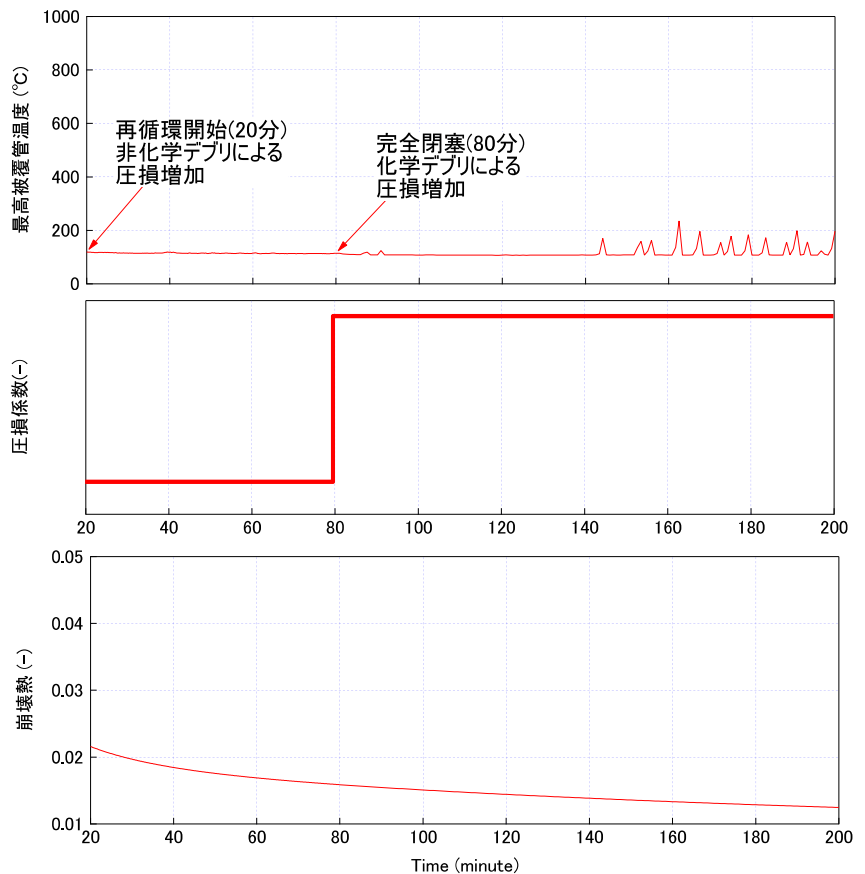


■ 解析時の入力



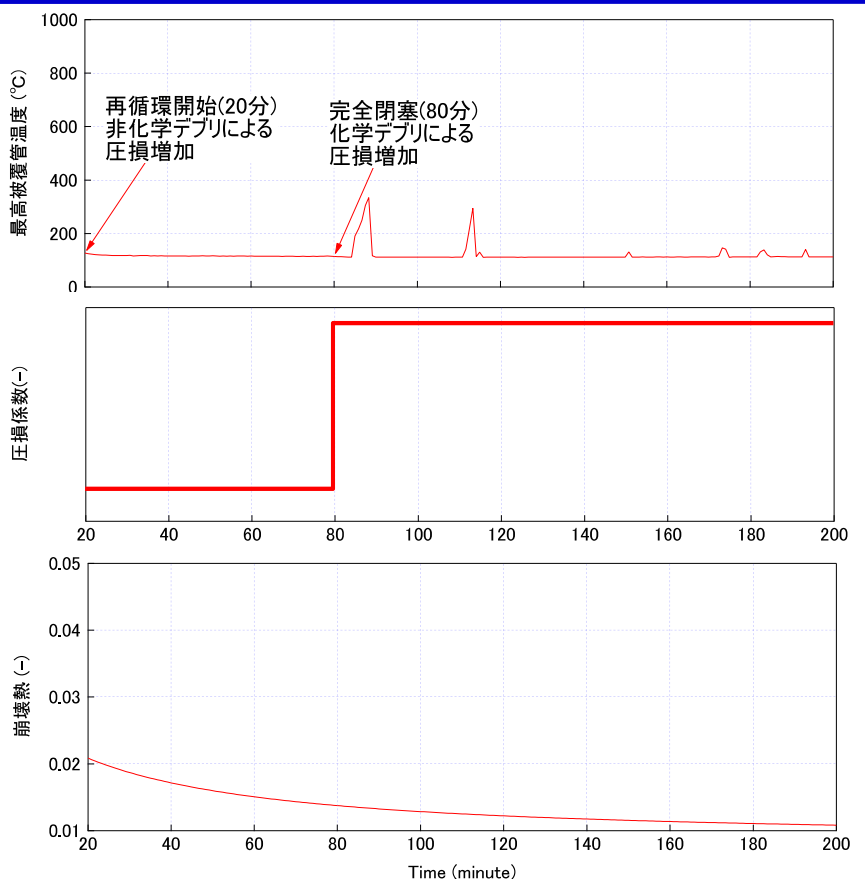
➤ 試験結果を踏まえた評価

- ✓ 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



➤ 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



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

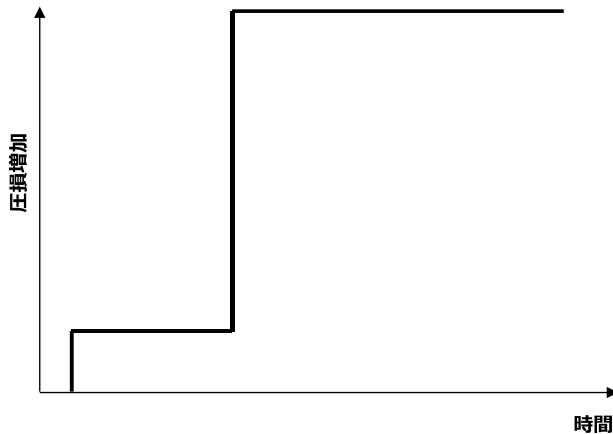
- 再循環開始時点における集合体当りの出力は17型燃料の4ループと3ループが高く、炉心冷却に必要なボイルオフ流量として保守的
 - 単位出力当りの炉心の冷却材体積は17型燃料4ループが少なく、初期保有水の観点で保守的
 - 炉心入口の流路面積は17型燃料が最も小さく（16項参照）、デブリ閉塞の観点で保守的
- 4ループ,3ループの解析結果（長期冷却性の維持が可能）は15型燃料3ループ,2ループに適用できる

	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]	0.371	>	0.355	>	0.325	>	0.286	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	小	<	大		大		大	
炉心入口部流路面積から デブリ閉塞のし易さ	大	=	大	>	小	=	小	

6. 評価に含まれる保守性

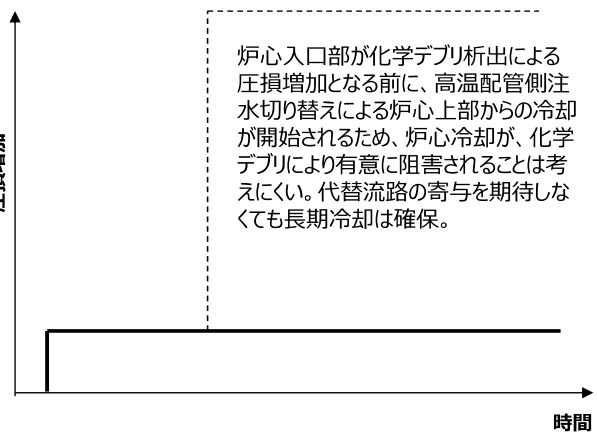
- 以下の知見により、**実際の現象としては、炉心に化学析出による有意な圧損増加が生じることなく、長期の炉心冷却が維持される**
 - 化学デブリ析出開始時刻 \geq 高温配管側（炉心上部）からの注水切り替え時刻
 - 炉心上部へのデブリ付着は大幅に低減（炉心上部からの注水切り替え時刻には、原子炉冷却系中の非化学デブリの濃度はサンプスクリーンによる除去効果で大幅に低減）
- 今回の評価では上記の実現象をそのまま考慮せず、保守的に化学デブリの析出を考慮した評価としている

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

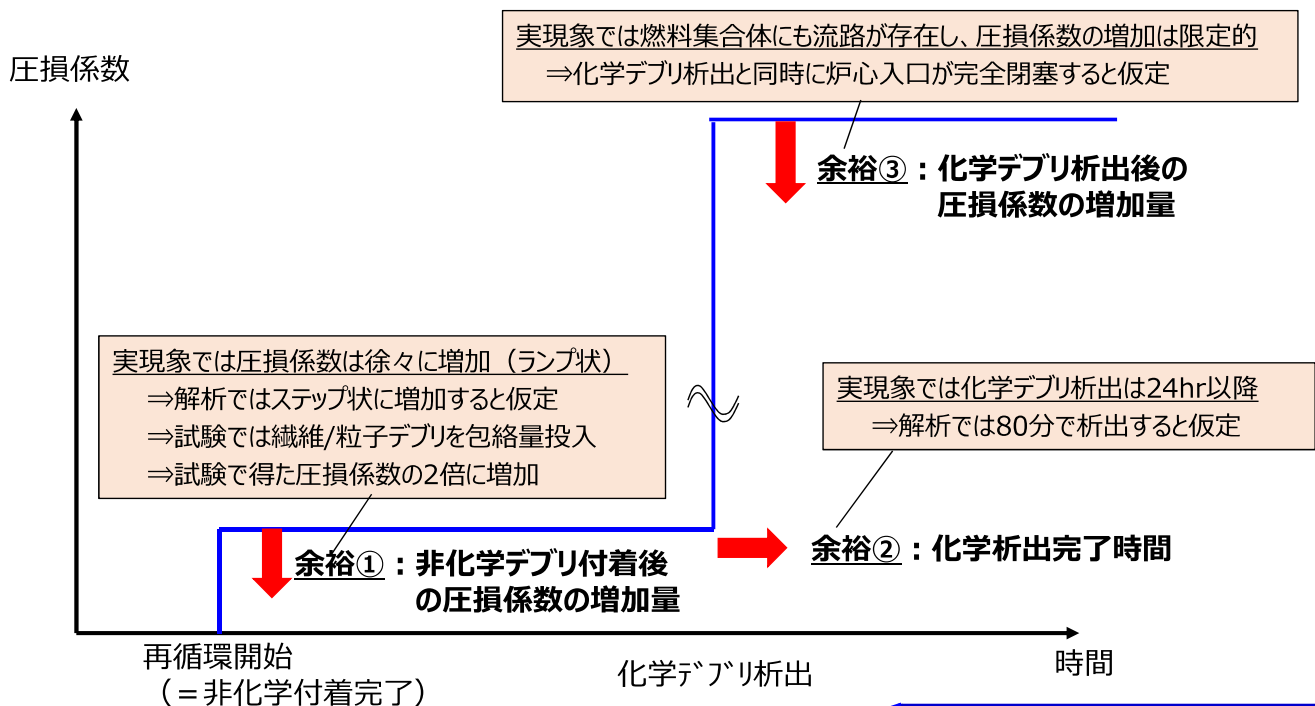


実際に考えられる現象

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。



- 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

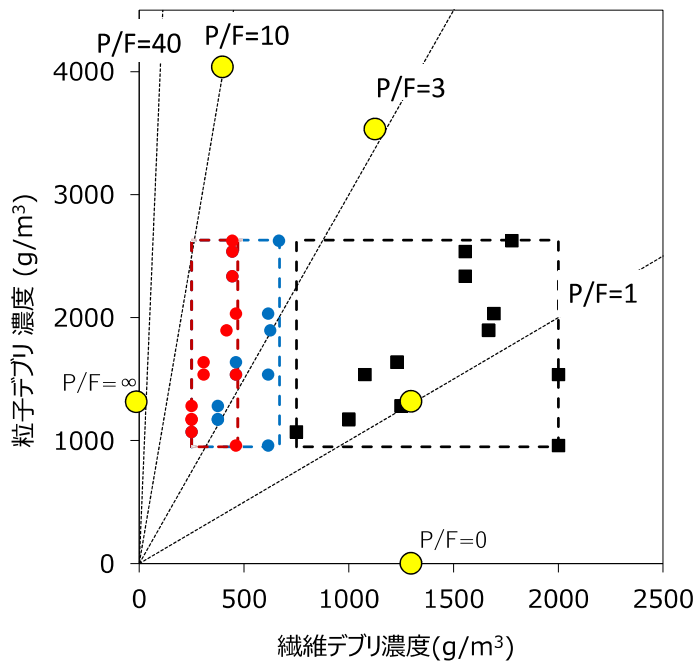
- 再循環サンプスクリーンに関する新規制基準対応時に中長期的な課題として事業者が取り組むとしていた事項のうち、唯一残されていたサンプスクリーン下流側影響のLOCA後炉心長期冷却に関して検討
- 炉心長期冷却のシナリオとして以下を想定
 - － 化学デブリ析出前は炉心入口流路
 - － 化学デブリ析出後は代替流路（バッフルバレル流路）
- 流動試験を実施し、上記のシナリオの妥当性を確認
 - － 燃料集合体2体試験：非化学デブリが流入しても炉心入口から冷却材を供給可能
 - － バッフルバレル試験：化学デブリ析出後は代替流路から冷却材を供給可能
- 上記の流動試験結果を基に実施した熱流動解析によ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

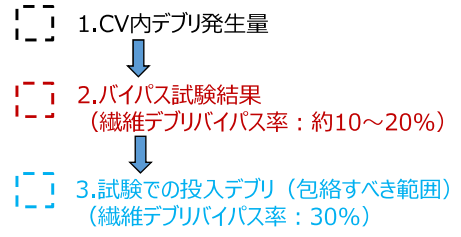
参考1

試験に用いるデブリの投入量について

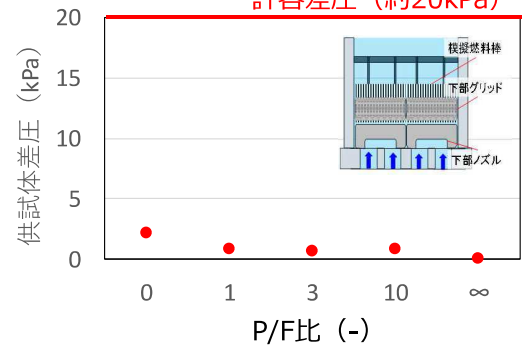
- 実機の繊維/粒子デブリ量、P/F比を包絡する広範囲の条件により基礎試験を実施
- 供試体差圧が大きく増加し、許容差圧を超えることなく、繊維/粒子デブリ量、P/F比による影響は小さいことが確認できた



○繊維デブリ量



○試験結果

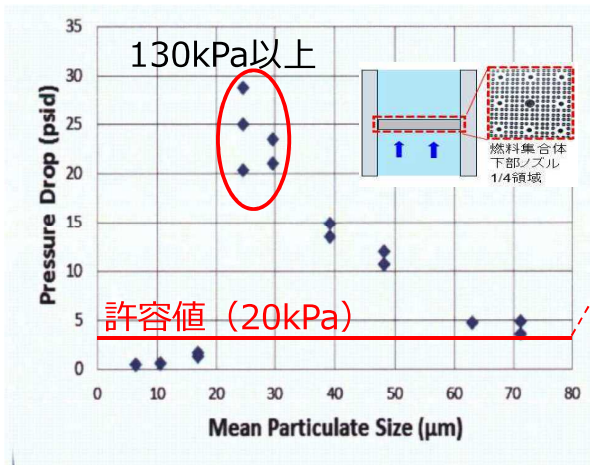


参考2

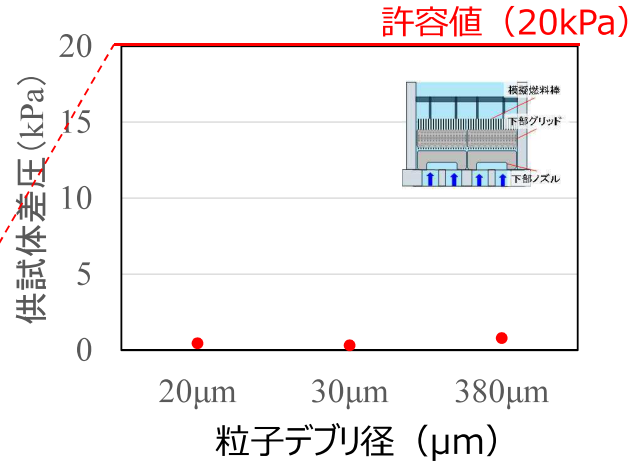
PWROGとの比較(試験および解析)

- 米国体系 (1/4体系) (1)
 - 粒子径20~30 μm 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 μm
- 国内体系 (燃料集合体2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)



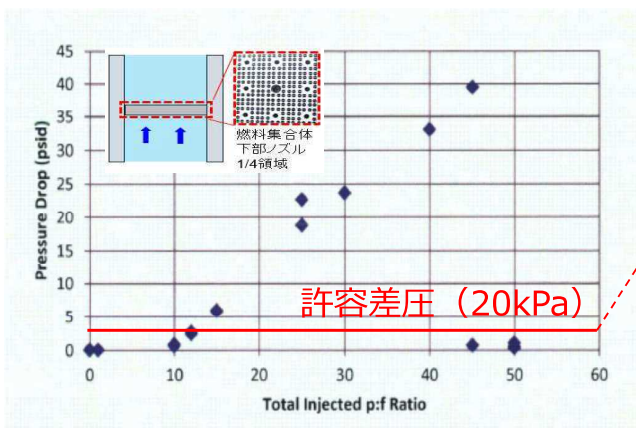
国内体系 (燃料集合体2体系)



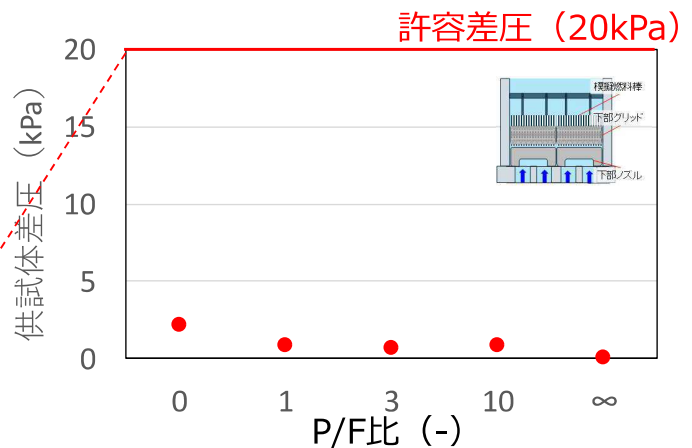
(1) GSI-191 Test Program Summary Scaled Head Loss Testing February 26, 2015

- 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。

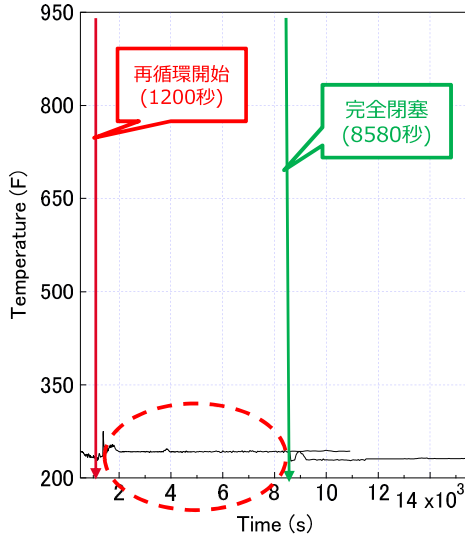


図 高温側配管破断（HLB）解析例

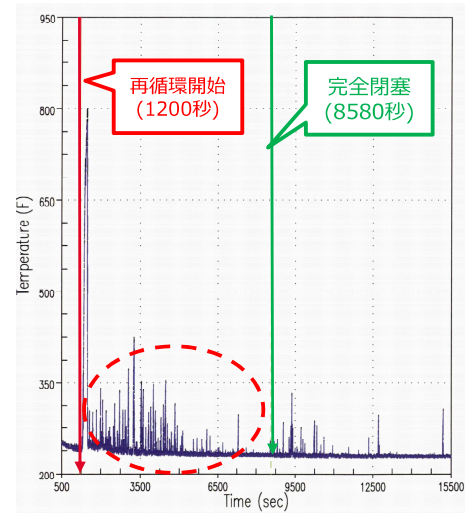


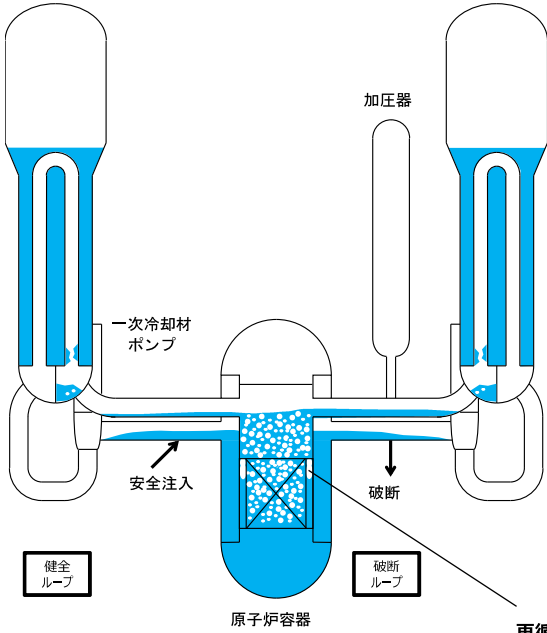
図 米国PWROG解析結果例（HLB）*

* 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

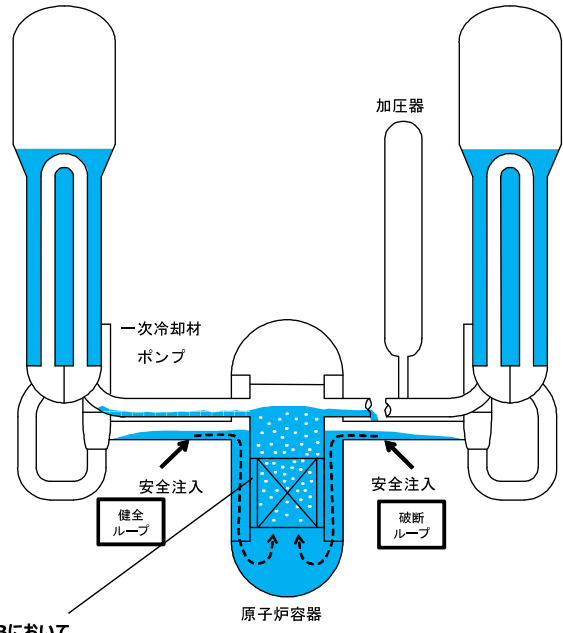
参考3

CLBとHLBの流況の違い

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)

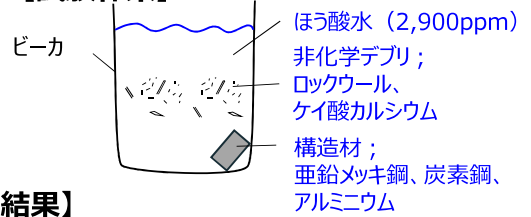
【実機の化学影響概要】

- 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】

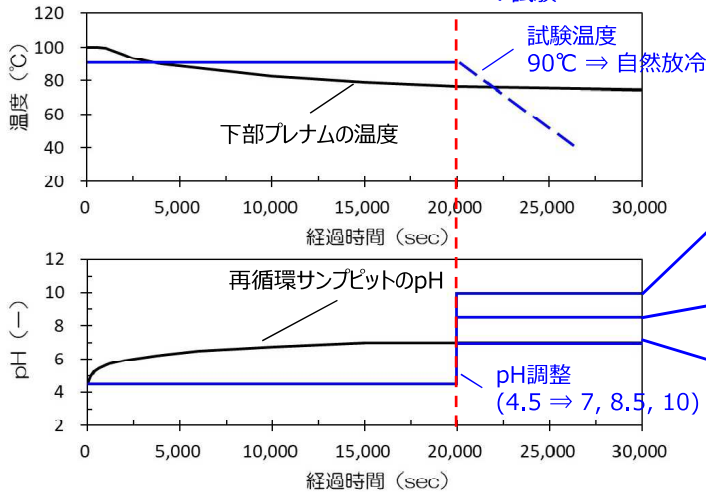
- LOCA直後の水温・pHを模擬し、デブリや構造材を溶出
- その後、**水温を30℃以下に低下させ、化学デブリが析出しないことを確認した**
(炉内の水温が30℃以下となるのはLOCA後24時間以降)

【試験体系】



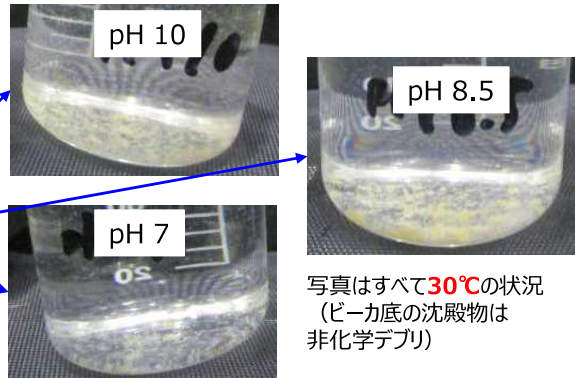
【LOCA後の水温・pHの評価例】

— : 実機の評価値
- - : 試験



【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



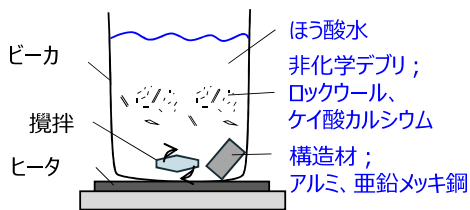
※再循環サンプルピットのpHがほぼ一定値となる時間(20,000秒)でNaOHによるpH調整を実施

【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】

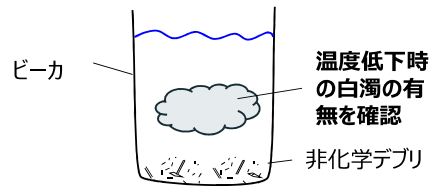
①デブリと構造材の成分を溶出させる

- ・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

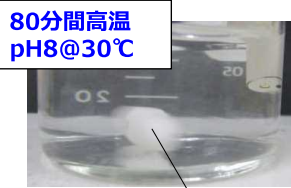
- ・温度低下時の白濁の有無を目視確認
- ・NaOHを添加し、pH変化時の影響も確認



【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



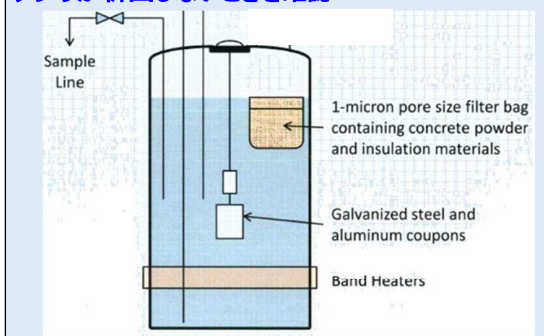
白濁が確認されたケース

24時間高温保持した試料 :

30℃、かつ、pH7以上で白濁を確認



米PWROGの試験 (対象は再循環サンプルピット)



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

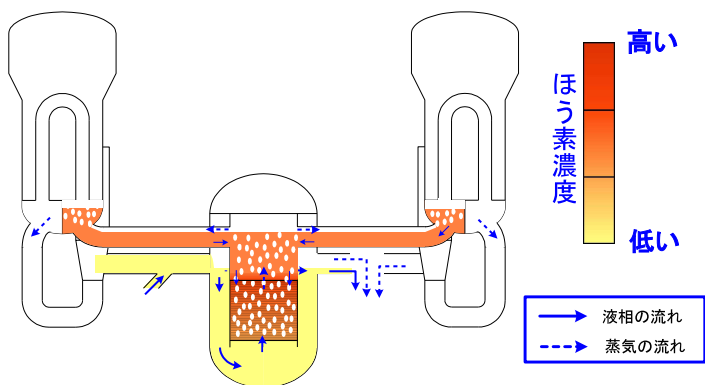


図 LOCA後長期冷却時のほう酸水の濃縮

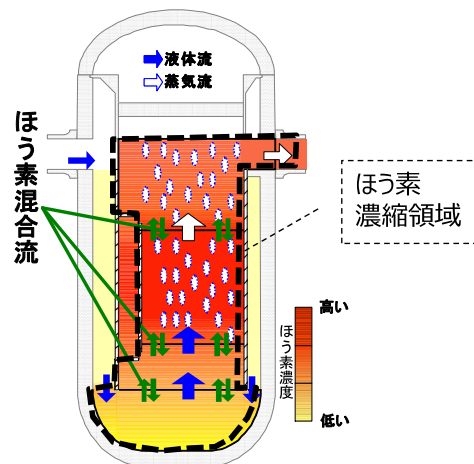


図 現行国内評価モデル

- 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

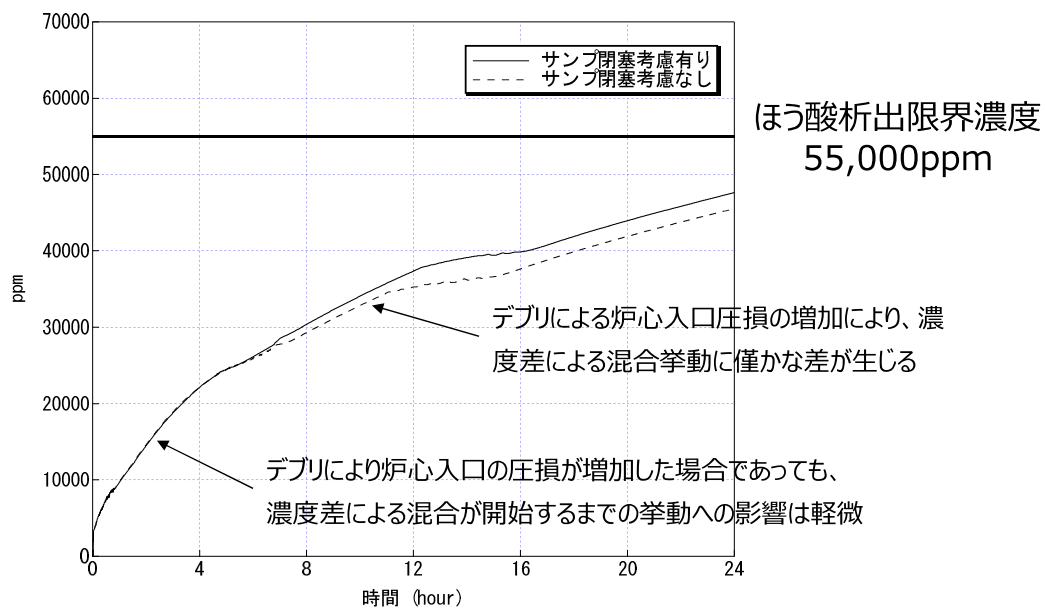


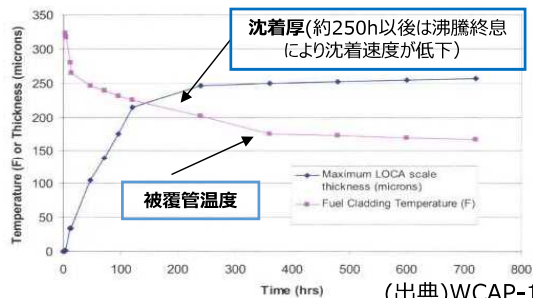
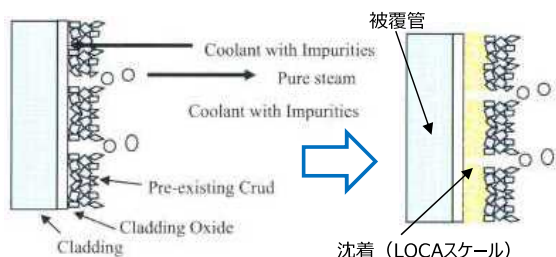
図1 炉内のほう素濃度上昇

参考6

被覆管付着影響

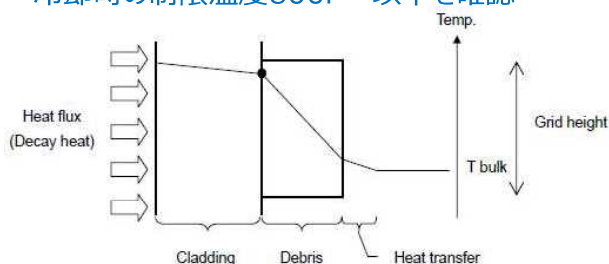
【参考】被覆管付着影響の米国評価事例について

- 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

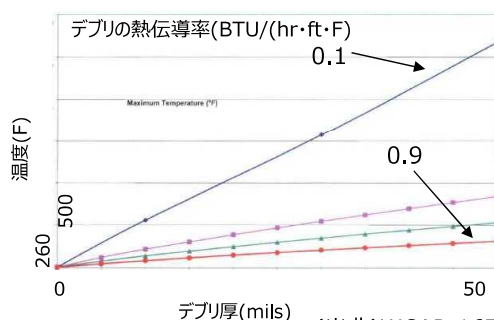


(出典)WCAP-16793Rev2

- 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⁽¹⁾まで蓄積しても被覆管の長期冷却時の制限温度800F⁽²⁾以下を確認



(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



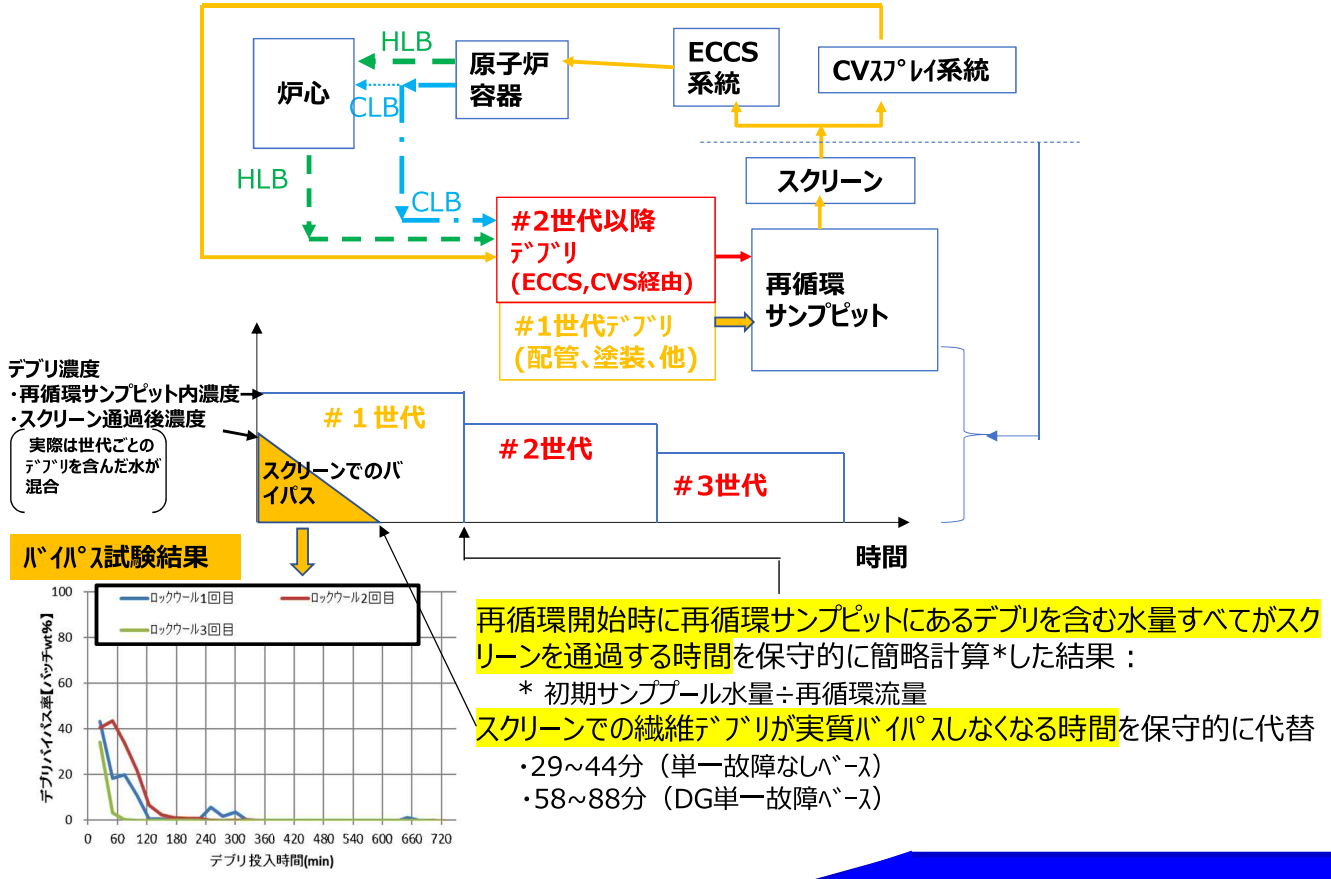
(出典)WCAP-16793Rev2

参考7

サンプルスクリーンをバイパスする繊維デブリ量の変化

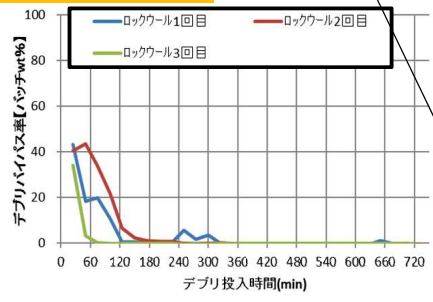
【参考】サンプスクリーンをバイパスする繊維デブリ量の変化

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



BWR-ECCSストレーナ 下流側炉内影響について

2022年6月16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

□ 枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

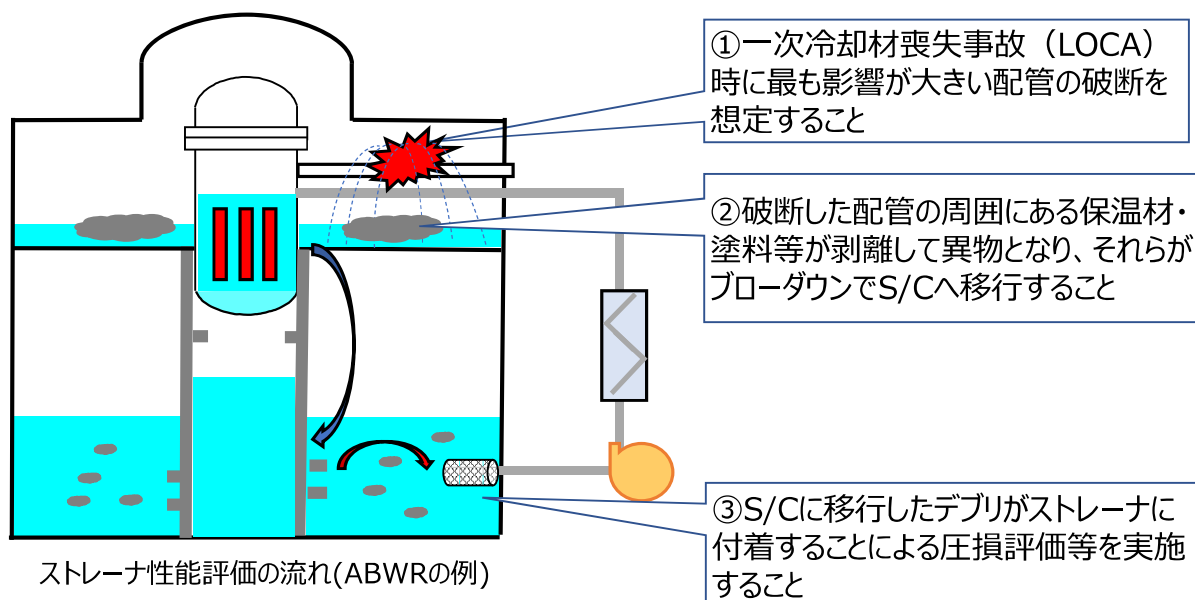
(公開の場での説明用に一部技術情報を附番しております。例：技-①)

1

BWRプラントにおけるストレーナ等の閉塞事象の概要

- ストレーナ等の閉塞事象については、内規※の要求を踏まえ、主に以下の事象を想定してストレーナの性能評価を実施している

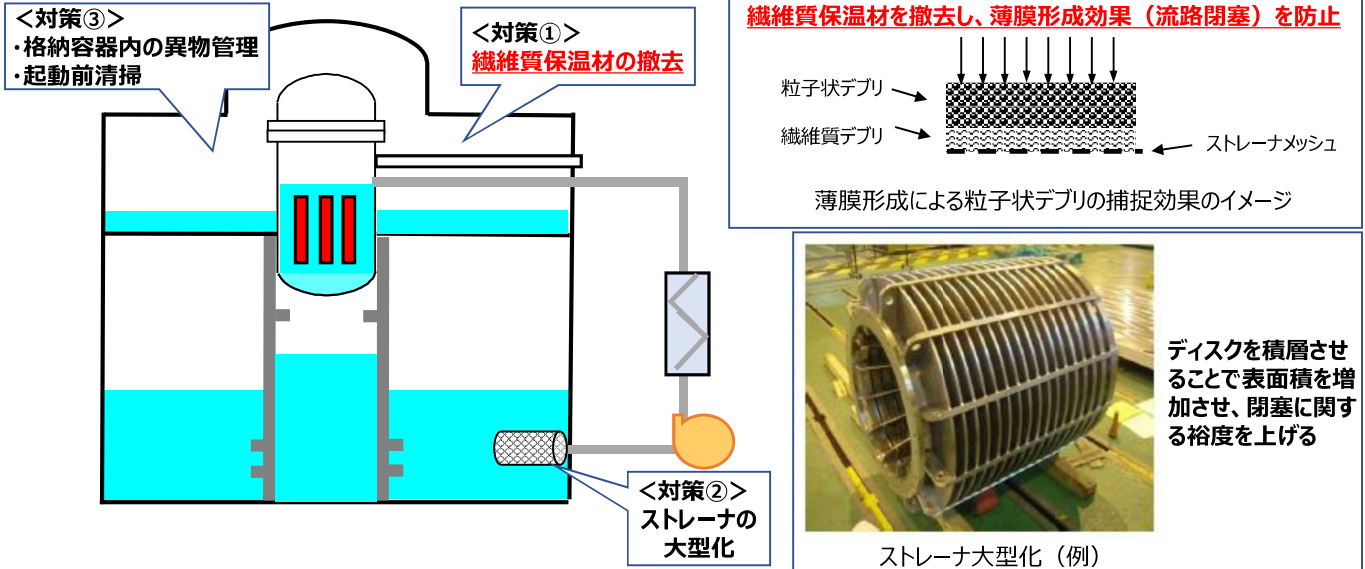
※非常用炉心冷却設備又は格納容器熱除去設備に係る過装置の性能評価等について（内規）



規制に対するBWR事業者の取り組み

- BWRにおいては、デブリによるろ過装置への影響を低減するため、**繊維質保温材の撤去**※やストレーナの大型化、格納容器内の異物管理及び定期的な清掃等を実施
- 内規に従ったストレーナの圧損試験等を実施し、健全性を確認済み

※繊維質保温材から主に金属保温材へ取り替えるため、ストレーナの閉塞に支配的である薄膜形成にほとんど寄与しない。



ECCSストレーナを通過したデブリによる下流側への影響について説明

格納容器内で発生するデブリの整理

- LOCA（設計基準事故）時に格納容器内に発生するデブリを下表の通り整理
➤ **ECCSストレーナを通過したデブリによる各機器への影響はないと評価**

対象機器：ポンプ、弁、熱交換器、炉心（燃料）

デブリ種類	影響	理由
繊維質	なし	影響項目として閉塞が考えられるが、繊維質保温材を撤去しているため
粒子／固形物 ・ケイ酸カルシウム ・金属 ・塗装片 ・スラッジ ・錆片 ・塵土	なし	影響項目として閉塞、摩耗が考えられるが、薄膜効果の要因となる繊維質保温材を撤去しているため、閉塞の影響は小さい ➤閉塞、摩耗について次頁以降で詳細を説明
化学析出物	なし	影響項目として閉塞や燃料表面の冷却性能低下が考えられるが、BWR冷却材は設計基準事故の環境では純水であり、格納容器内の機器・構造物、デブリ等と反応する可能性のある薬品等を添加していないことから、化学影響を考慮する必要はない（ストレーナの圧損評価においても考慮不要）
ウレタン	なし	影響項目として閉塞が考えられるが、ウレタン保温材はS/P水面に浮遊し、水中のストレーナに到達しないため（ストレーナの圧損評価においても考慮不要）

格納容器内で発生するデブリの影響整理

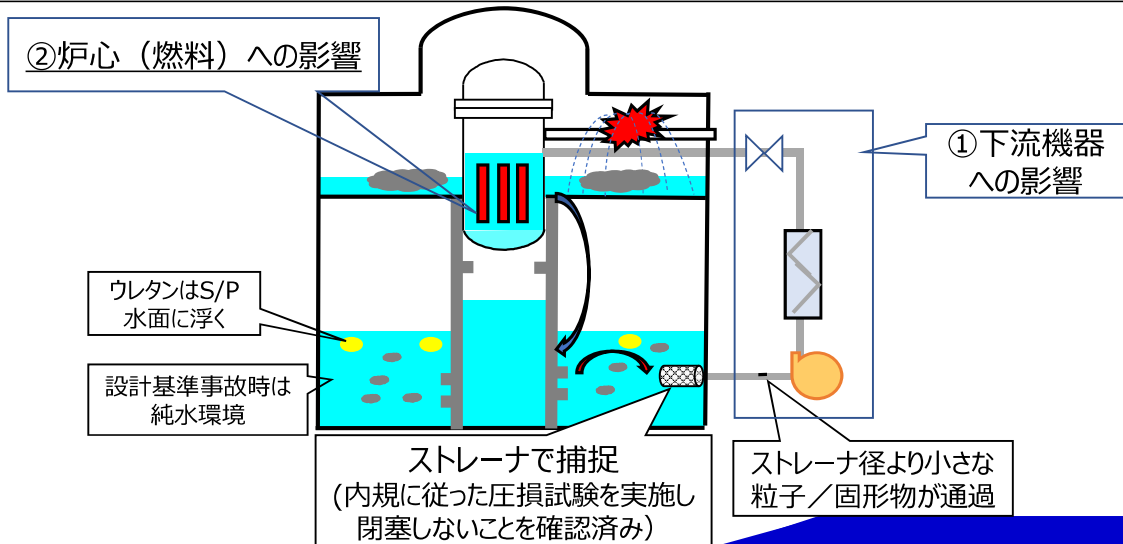
ストレーナ径より小さなデブリ（粒子／固形物）は、ストレーナを通過し、下流側へ移行する。

① 下流機器（ポンプ、弁、熱交換器）への影響

- 閉塞、摩耗：影響が小さいことを確認（29頁参照）

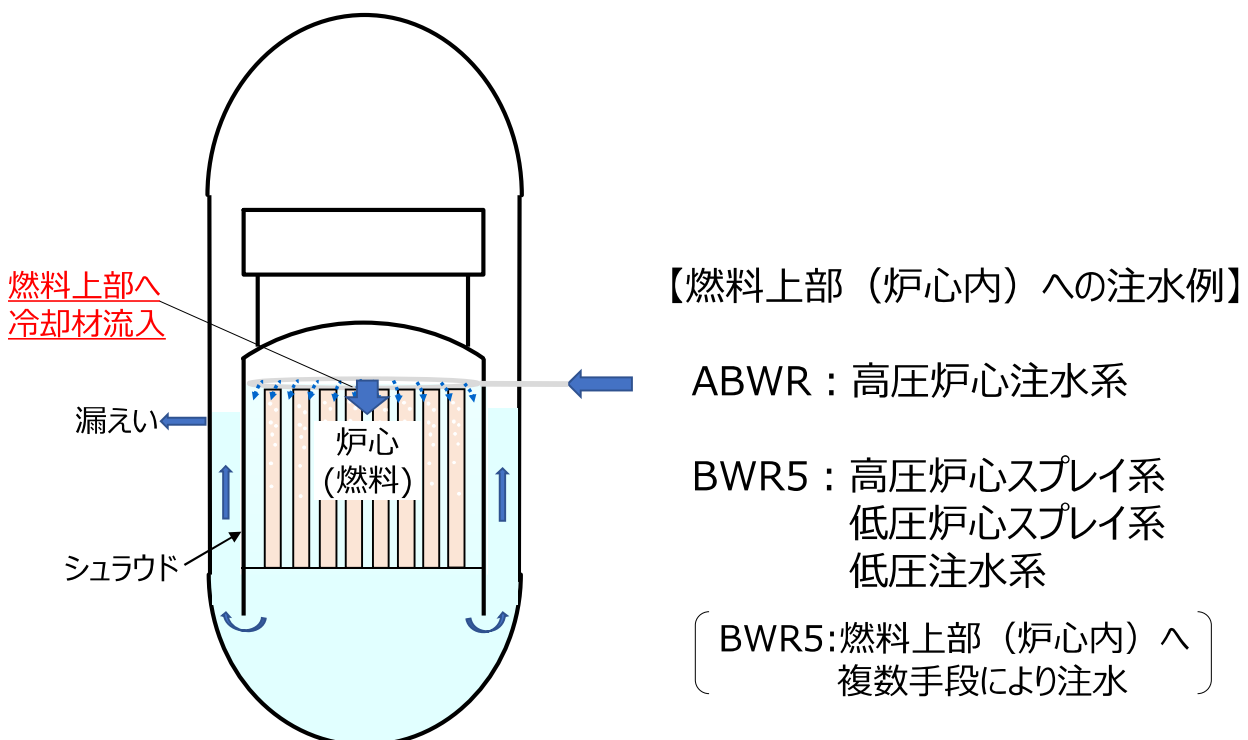
② 炉心（燃料）への影響

- 閉塞：（i）燃料上部／（ii）燃料下部に閉塞の影響がないことを確認
（次頁以降詳細）
- 摩耗：影響が小さいことを確認（28頁参照）



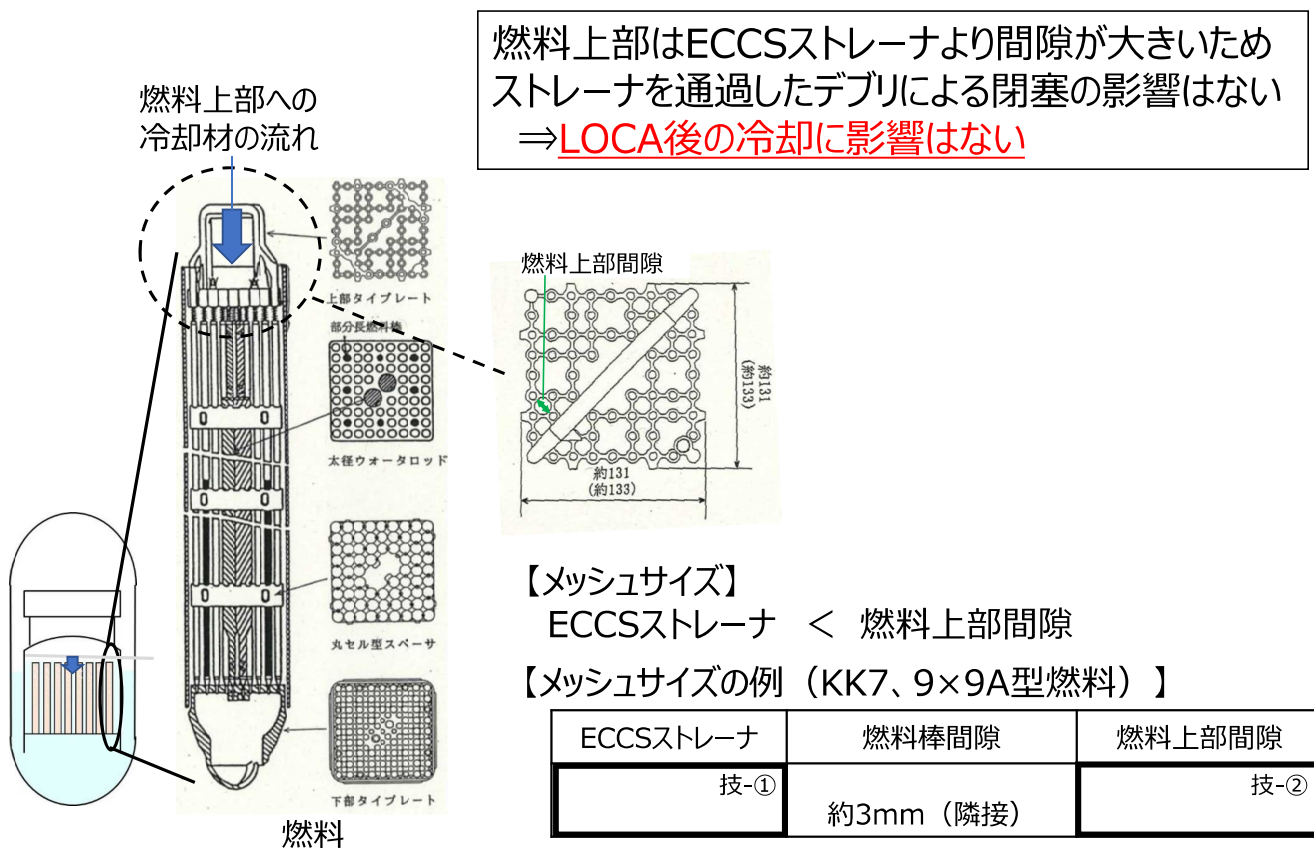
（i）燃料上部の閉塞の影響整理（1 / 2）

LOCA時 燃料上部へ冷却材が流入する際のイメージ



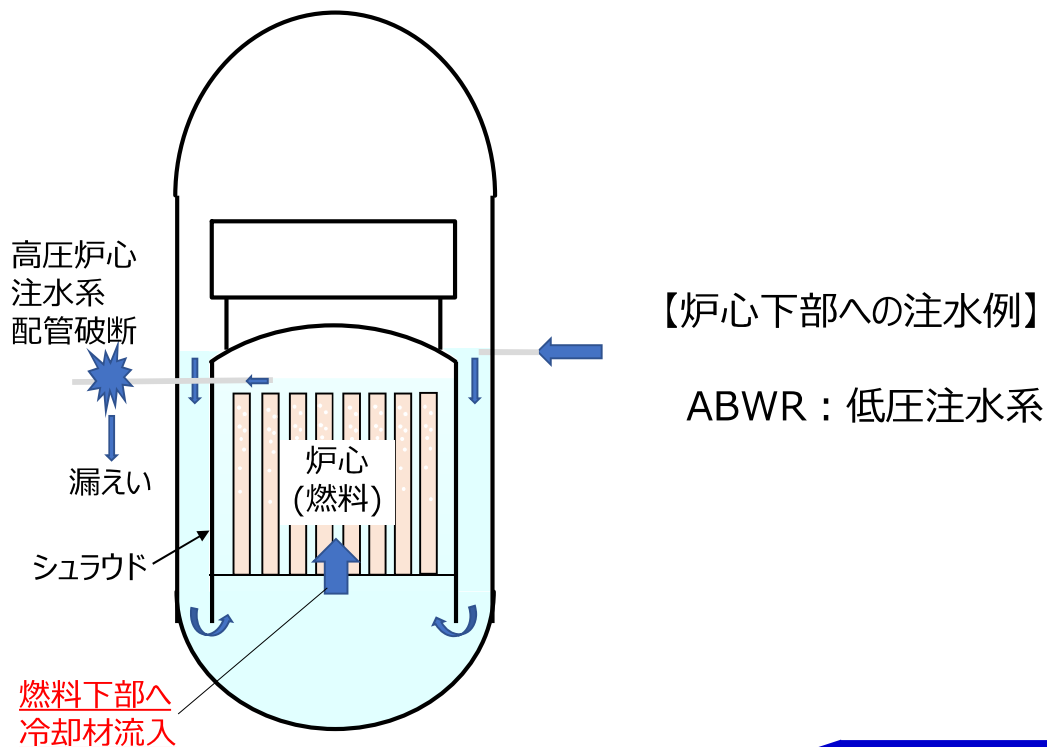
(i) 燃料上部の閉塞の影響整理 (2 / 2)

枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

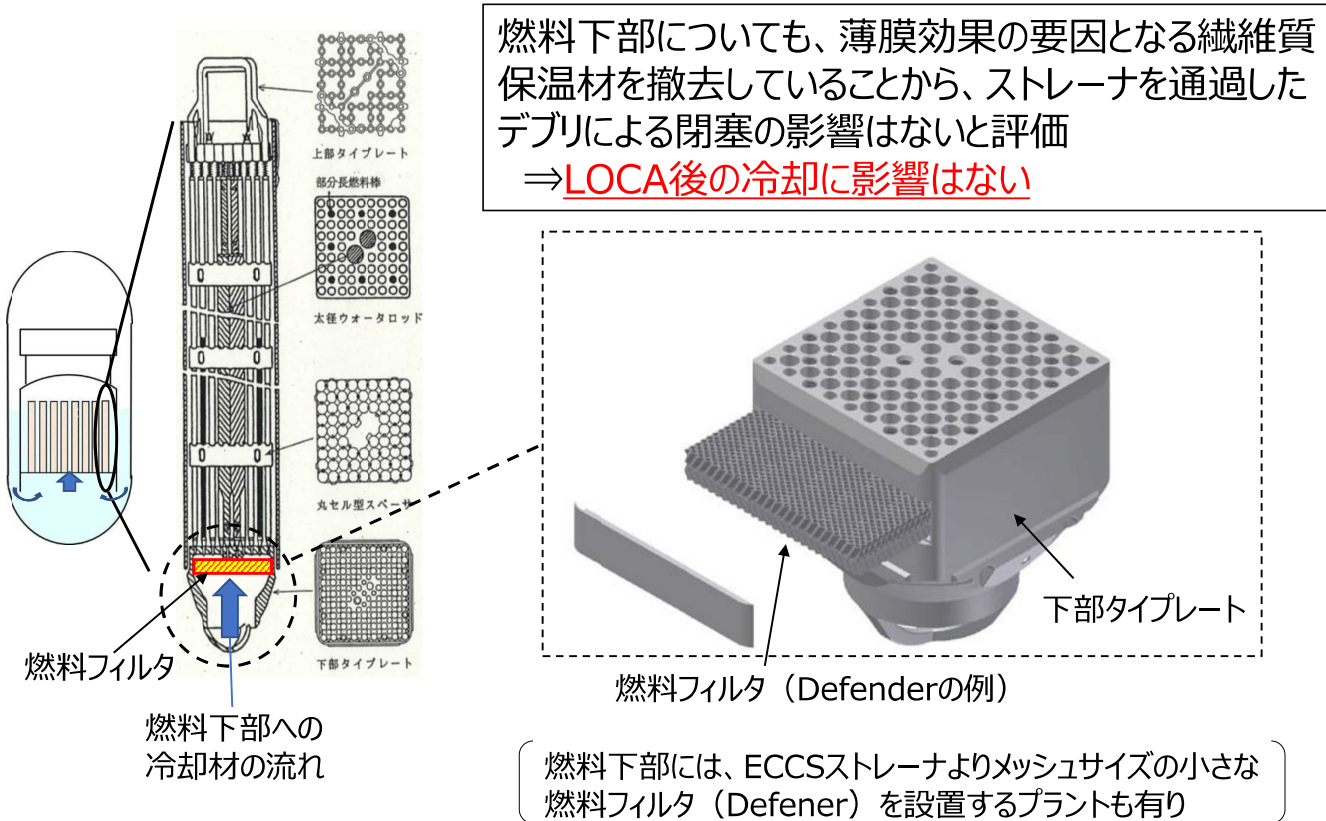


(ii) 燃料下部の閉塞の影響整理 (1 / 2)

LOCA時 燃料下部へ冷却材が流入する際のイメージ



(ii) 燃料下部の閉塞の影響整理 (2 / 2)



【参考】燃料フィルタに対する圧損試験 (1 / 2)

枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

- 燃料下部についても、薄膜効果の要因となる繊維質保温材を撤去していることから、閉塞の影響はないと評価しているが、念のため、デブリが燃料フィルタに到達したと仮定し試験を実施
- デブリが燃料フィルタに到達したと仮定した圧損試験の結果からも、LOCA後の長期冷却に必要な流量が確保できることを確認

- 試験①：繊維質デブリを投入した燃料フィルタの圧損試験の結果から、燃料下部へも必要な流量が確保できることを確認 (19～22頁参照)
- 試験②：繊維質デブリ及び粒子／固形物の代表としてケイ酸カルシウムを投入した燃料フィルタの圧損試験を実施し、試験①の範囲内であることを確認 (23～27頁参照)

[薄膜効果確認のため繊維質デブリも投入しているが、国内BWRは繊維質保温材撤去]

- 燃料フィルタメッシュサイズ
Defender < ECCSストレーナ < 他タイプ燃料フィルタ

- 燃料フィルタメッシュサイズの例 (KK7、9×9A型燃料※)

Defender	ECCSストレーナ	従来型フィルタ
技-③	技-①	技-④

※9×9B型燃料の燃料フィルタメッシュサイズは

技-⑤

以上

⇒ ECCSストレーナよりメッシュサイズの小さいDefenderで試験実施

【参考】燃料フィルタに対する圧損試験（2 / 2）

（平成24年8月意見聴取会資料 P8,15,16）

枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。



デブリが燃料フィルタに到達したと仮定した圧損試験の結果からも、LOCA後の長期冷却に必要な流量が確保できることを確認

試験①の結果から、局所圧力損失係数を算出： \square cm⁻⁴ (19~22頁参照)

試験①の局所圧力損失係数を用いて実機冷却材流量を評価： \square kg/s

LOCA後の長期的な冷却を行うために必要な流量 \square kg/s 以下を上回る

なお、試験②についても、局所圧力損失係数が試験①の範囲内であることを確認
(23~27頁参照)

試験①、②ともに、繊維質デブリを投入（試験②ではケイ酸カルシウムも投入）
実際は繊維質保温材を撤去するため、本評価よりもさらに安全裕度が高くなる
(本評価は、条件を厳しく設定して実施したもの)

燃料フィルタにデブリを投入
燃料下部への流量を評価

まとめ

- 国内BWRプラントは、繊維質保温材の撤去※やストレーナの大型化、格納容器内の清掃等を実施しており、デブリによるストレーナ閉塞事象に対して裕度を向上させる取り組みを実施している

※新規規制基準対応の設工認においてSA時のECCSストレーナ圧損評価が審査対象となるため、繊維質保温材の撤去計画を反映した条件にて評価を実施している。プラント再稼働までに繊維質保温材を撤去予定

- ストレーナを通過したデブリによる炉心への影響に関しては、燃料上部に閉塞の影響はないこと、燃料下部についても薄膜効果の要因となる繊維質保温材を撤去していることから、LOCA後の冷却に影響のないことを確認している
- 現状得られている知見から、安全上問題はないと考えているが、引き続き最新知見の収集を行い安全性の向上に関する取り組みを進めていく

参考

【参考】流量関連 参考例 (KK6/7)

枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

【運転中/LOCA直後 燃料集合体内流量 (目安)】

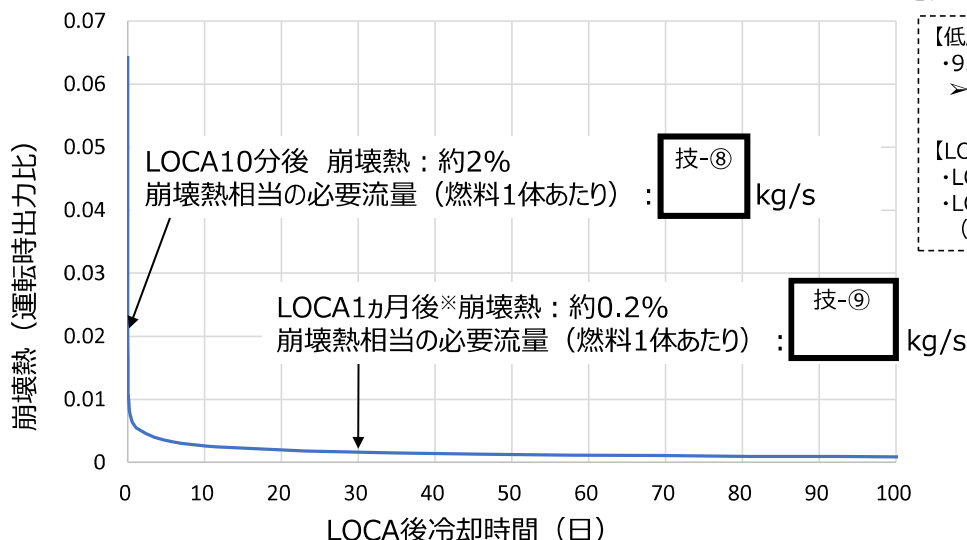
- ・運転中：17 kg/s程度 (定格炉心流量52200t/h÷872体=16.6kg/s (バイパス流量無し))
- ・LOCA直後：7 kg/s程度 (定格炉心流量52200t/h×0.4÷872体=6.7kg/s (バイパス流量無し))
- LOCA (DBA) では外電喪失を仮定しているため、RIPが全台トリップし、炉心流量は定格比約0.4まで低下

【LOCA後長期冷却 必要流量】

【参考 注水流量】

【低圧注水系1系統 定格流量】
 ・954m³/h
 ➢燃料1体あたり約0.3kg/s
 (954m³/h÷872体×1000÷3600)

【LOCA後低圧注水系】
 ・LOCA約6分後に低圧注水系2系統注水開始
 ・LOCA約15分後に低圧注水系1系統で注水
 (1系統はPCVスプレーに切替え)

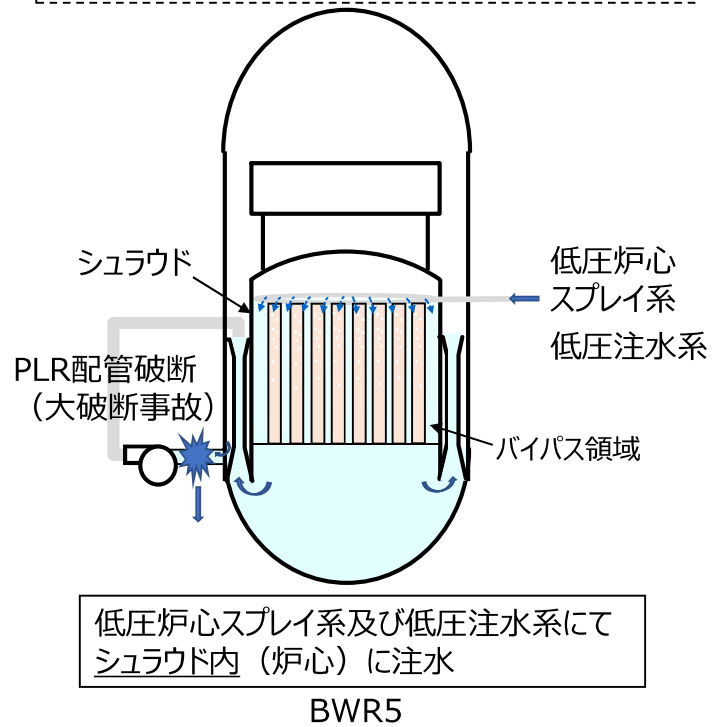
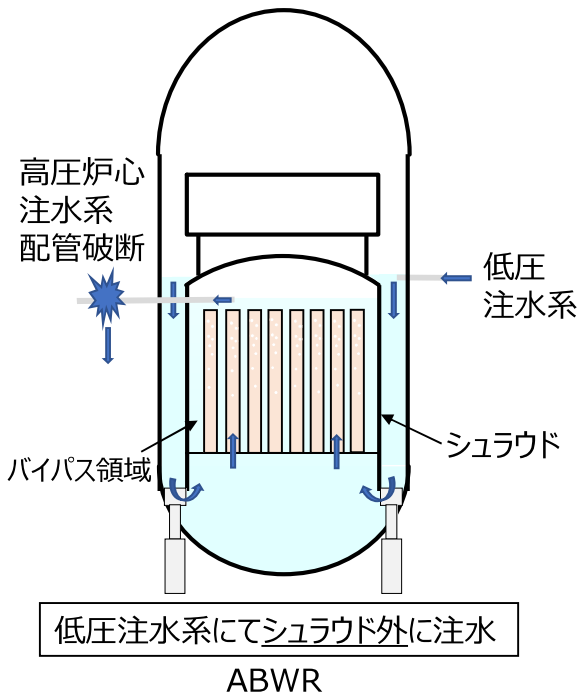


※LOCA解析 (DBA) では、格納容器内圧力・温度・水素濃度等をLOCA1ヵ月後まで確認している

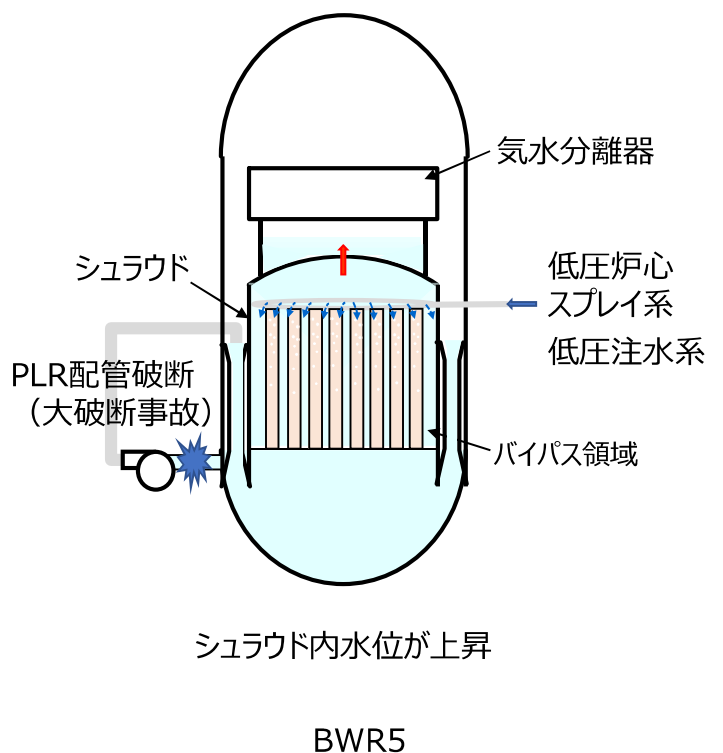
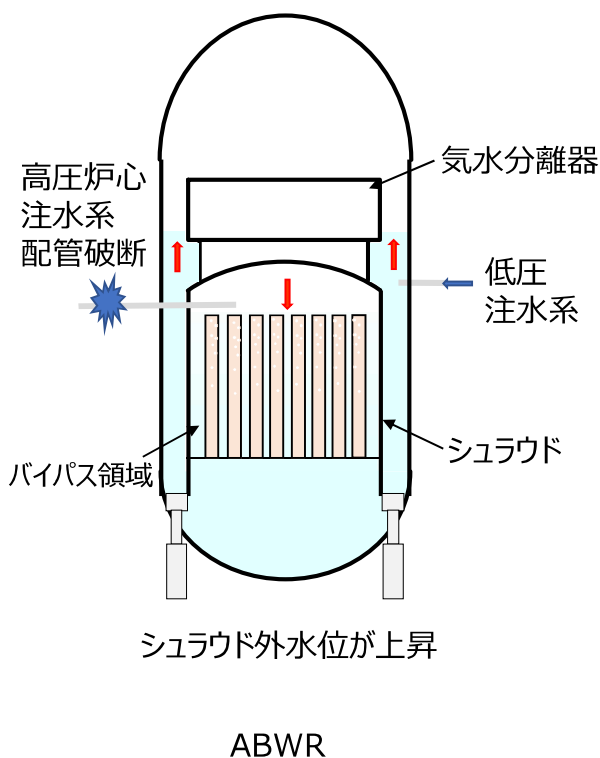
【参考】LOCA（設計基準事故）時の炉心への注水状況例

LOCA後、冠水維持

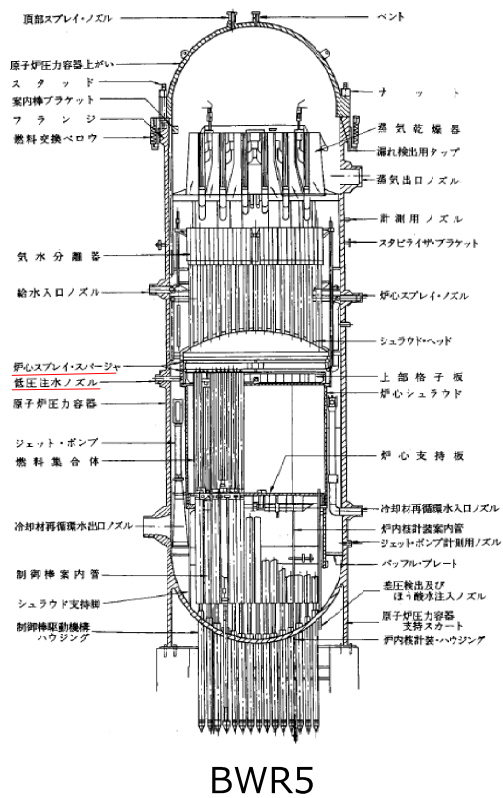
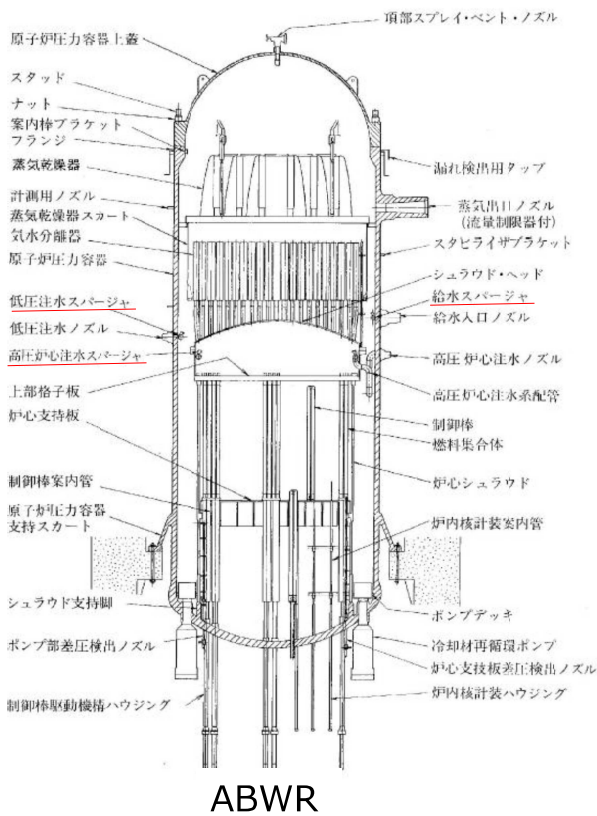
LOCA後、一時燃料露出するが、スプレイ水の一部燃料内流入、燃料外側（バイパス領域）水位上昇後に燃料上部への冷却材流入（まわり込み）により、再冠水



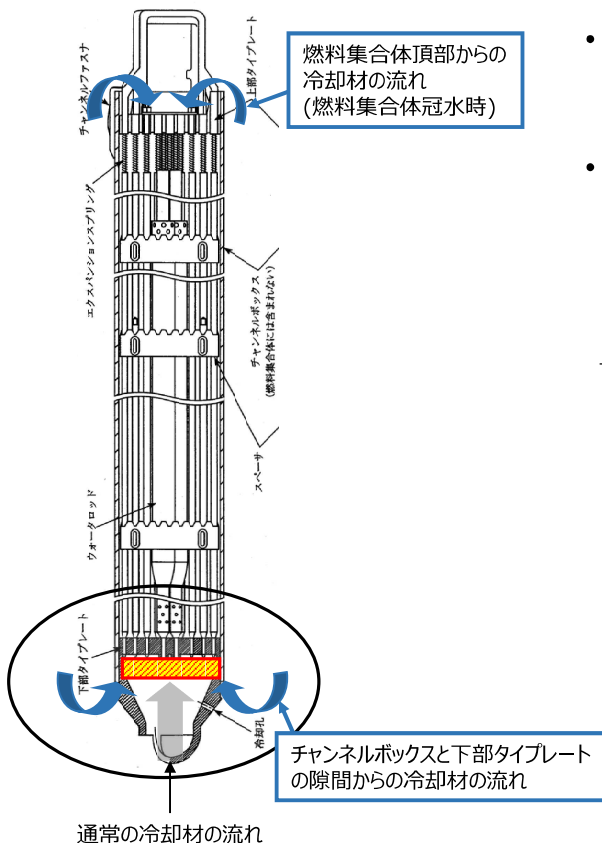
【参考】仮に炉心下部全体の圧損が上昇した場合のイメージ



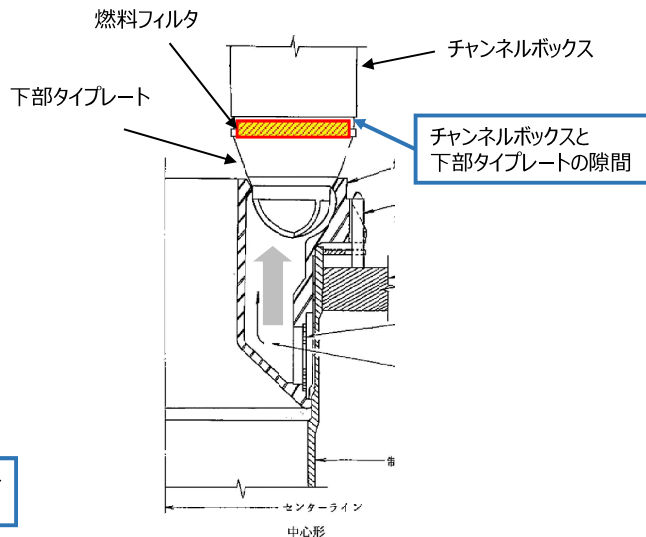
【参考】原子炉压力容器断面図例



【参考】LOCA後の長期冷却性 補足



- 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も、燃料集合体内へ冷却材が流入する
- また、燃料集合体が冠水している場合は、燃料集合体頂部から燃料集合体内に冷却材が流入する



【参考】燃料フィルタに対する試験 ～Defenderによる代表性～

□ 枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

- 燃料フィルタの圧損試験については、Defenderの圧損試験で代表する燃料フィルタにはメーカ及びフィルタ設計の違いによりタイプが幾つかあるが、ECCSストレーナよりメッシュサイズが小さいのはDefenderのみ

【メッシュサイズ比較】

Defender < ECCSストレーナ < 他タイプ燃料フィルタ、燃料棒間隙や上部タイププレート

【メッシュサイズの例（KK7、9×9A型燃料※）】

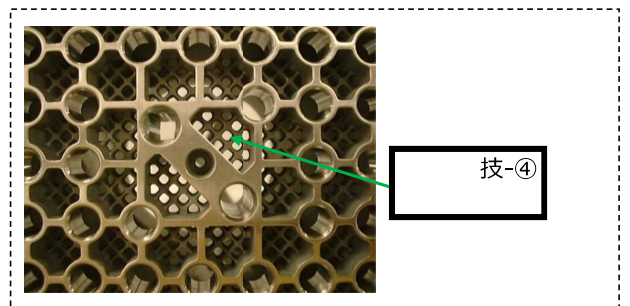
Defender	ECCSストレーナ	従来型フィルタ	燃料棒間隙	上部タイププレート
技-③	技-①	技-④	約3mm（隣接）	技-②

※9×9B型燃料の燃料フィルタメッシュサイズは □ 以上

技-⑤



9×9A型燃料 Defender



技-④

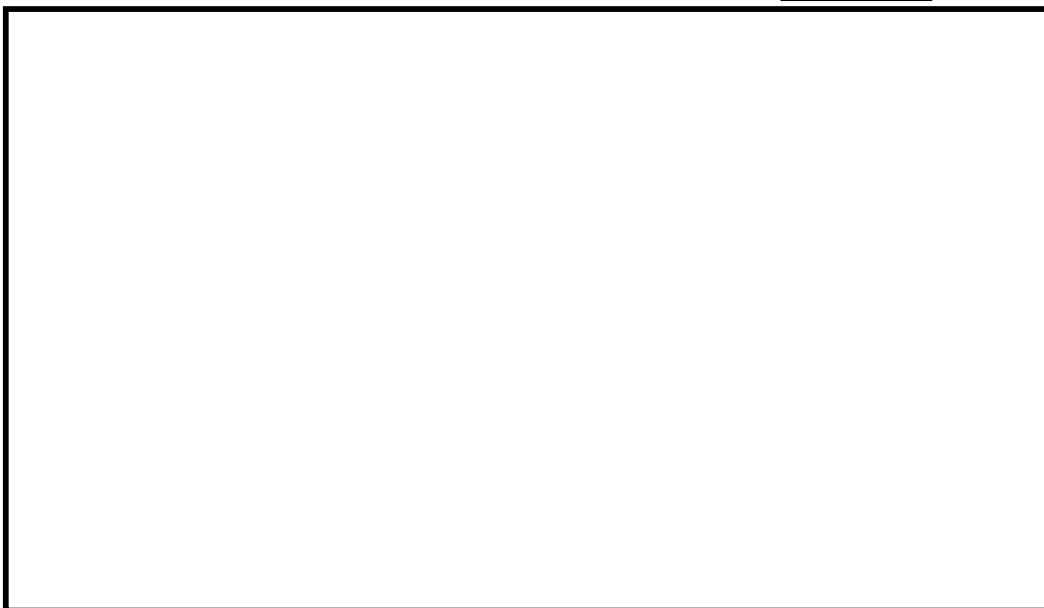
9×9A型燃料 従来型フィルタ

【参考】燃料フィルタに対する試験①（1 / 4） ～試験結果～

（平成24年8月意見聴取会資料 P11）

□ 枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

- ・米国におけるDefender圧損試験の結果（繊維質異物 □ 技-⑩ 投入）
- ・異物投入後、局所圧力損失は □ 技-⑪ 程度（流量 □ 技-⑫ ）



試験装置：試験②と同様（23頁）

【参考】燃料フィルタに対する試験①（2 / 4） ～実機流量評価～

（平成24年8月意見聴取会資料 P8,15,16）

□ 枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

【LOCA後の長期冷却性について】

試験	流量 W [kg/s]	局所圧力損失 dP [kPa]	局所圧力損失係数 K/A ² [cm ⁻⁴]
試験①	技-⑫	技-⑪	技-⑥

$dP = W^2 \times (K/A^2) / 2\rho g$ より、局所圧力損失係数 K/A^2 を算出（密度 $\rho : 1g/cm^3$ ）

- 技-⑥
- 試験結果から求められた局所圧力損失係数 □ cm⁻⁴ を用いて、LOCA発生後を模擬した実機評価条件（自然循環状態）での冷却材流量を評価。
 - その結果、試験後の局所圧力損失係数を用いた場合も □ kg/s 程度となり、LOCA発生後の長期的な冷却を行うために必要な流量（崩壊熱による蒸発分相当）の □ kg/s 以下を上回る。
- 技-⑦
- 技-⑧

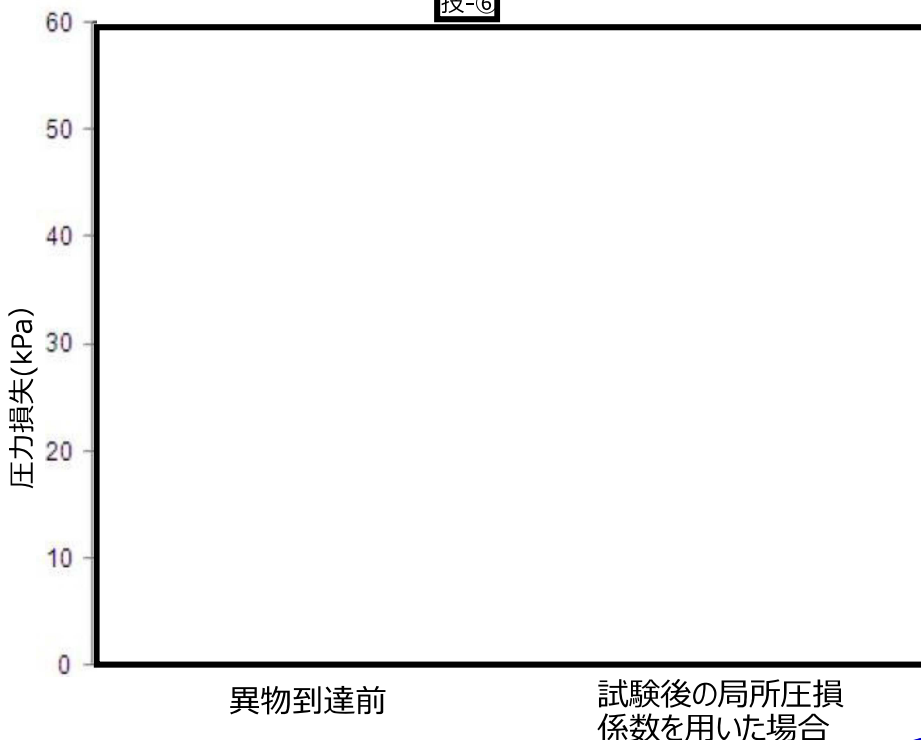
LOCA発生後の長期冷却に必要な流量を確保

〔試験では、繊維質デブリを投入している。実際は繊維質保温材を撤去するため、本評価よりもさらに安全裕度が高くなる（本評価は、条件を厳しく設定して実施したもの）〕

【参考】燃料フィルタに対する試験①（3 / 4） ～実機流量評価～

□ 枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

- 異物到達前は、位置圧損（水頭圧）が支配的で、流れによる圧損は非常に小さい
 - 試験後の局所圧損係数 □ cm⁻⁴ を適用し評価 ⇒ 実機冷却材流量： □ kg/s
- 技-⑥
- 技-⑦



注水流量例（KK6/7）

【低圧注水系1系統 定格流量】

・954m³/h

> 燃料1体あたり約0.3kg/s

（954m³/h ÷ 872体 × 1000 ÷ 3600）

【LOCA後低圧注水系】

・LOCA約6分後に低圧注水系2系統注水開始

・LOCA約15分後に低圧注水系1系統で注水

（1系統はPCVスプレーに切替え）

【参考】燃料フィルタに対する試験①（4 / 4） ～実機流量評価方法～

(平成24年8月意見聴取会資料 P15,16)

 枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

・LOCA 発生後の状況を模擬する場合は、試験から求められた局所圧損係数 K/A^2 を用い、異物到達前／試験後の局所圧力損失係数を用いた場合の炉心入口オリフィスから集合体出口までの圧力損失 dP 全体が等しくなるよう、試験後の状態を仮定した場合の冷却材流量を評価する。

・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

【異物到達前 圧損評価結果】

・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。

【試験後の局所圧力損失係数を用いた場合 圧損評価結果】

- ・燃料フィルタ部に異物が詰まると、入口部の局所圧力損失の項が増大する。
- ・しかし、同時に冷却材流量が減少するため燃料集合体発熱部のボイド率が増大し、位置圧力損失の項が減少する。
- ・両者が相殺するため全圧力損失は変化せず、冷却材流量は 技-⑦ kg/s程度となる。

【参考】燃料フィルタに対する試験②（1 / 5） ～試験条件～

 枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

【試験の概要】

- 試験タンクに異物を投入し、ポンプで循環させて、燃料フィルタの局所圧損を測定（単チャンネル試験）

【投入するデブリの条件】

- デブリ種類：繊維質（繊維質保温材を撤去する（撤去完了プラントも有り）が、保守的に設定）
ケイ酸カルシウム（粒子/固形物の代表として設定）
- 想定デブリ発生量：保温材撤去前の集約結果^{※1}より、Defender装荷の可能性があり保温材量の多い代表プラントについて、格納容器内の繊維質及びケイ酸カルシウム保温材全量がECCSストレナ到達と仮定（内規でのZOIや水源移行割合を考慮しない、保守的な値）
 - 繊維質 : 5600kg (70m³)
 - ケイ酸カルシウム : 3100kg (20m³)
- ECCSストレナ通過量：米国の試験^{※2}を参考に、保温材全量のうち0.4%がストレナを通過すると仮定
 - 繊維質 : 22kg
 - ケイ酸カルシウム : 12kg
- 投入デブリ量：ストレナ通過量÷燃料体数（350体）の保温材量（均一に分布すると設定）を目安に、投入量を決定
 - 繊維質 : 64g/体 → 投入量120g
 - ケイ酸カルシウム : 35g/体 → 投入量50 + 50g

※1：「非常用炉心冷却システムストレナ及び格納容器再循環サンプスクリーン閉塞事象に関する報告徴収並びに沸騰水型原子力発電設備における設備上の対策状況に係る原子力安全委員会への報告について」（平成18年7月3日 経済産業省 原子力安全・保安院）

※2：NEDO-32686-A「Utility Resolution Guide for ECCS Suction Strainer Blockage Volume2」（October 1998 GE Nuclear Energy）

【参考】燃料フィルタに対する試験②（2 / 5） ～試験結果～

□ 枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

【試験内容】

以下のそれぞれの条件で流量を1,4,7kg/sに変化させて局所圧損を測定

- ②-1 繊維質を120g投入
- ②-2 ケイ酸カルシウムを50g追加投入
- ②-3 ケイ酸カルシウムをさらに50g追加投入

【試験結果】

異物投入	質量流量W [kg/s]	局所圧力損失dP [kPa]	局所圧力損失係数K/A ² [cm ⁻⁴]	
②-1 繊維質 120g				技-⑬
				技-⑭
				技-⑮
②-2 (追加) ケイ酸カルシウム 50g				技-⑯
				技-⑰
				技-⑱
②-3 (追加) ケイ酸カルシウム 50g		技-⑲	技-⑲	技-⑳
				技-㉑
				技-㉒

$dP = W^2 \times (K/A^2) / 2\rho g$ より、局所圧力損失係数K/A²を算出 (密度ρ : 1g/cm³)

【参考】燃料フィルタに対する試験②（3 / 5） ～試験結果～

□ 枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

- ②-1投入後、1kg/sで投入した繊維質の異物が全量捕捉されたことを確認
- ②-2、②-3投入後、1kg/sで徐々に圧力損失が上昇していること、②-2投入後と比較し②-3投入後の方が圧力損失が高いことから、投入したデブリがフィルタに捕捉されている状況



技-⑲

技-⑲

【参考】燃料フィルタに対する試験②（4 / 5） ～長期冷却性評価～

枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

【LOCA後の長期冷却性について】

- ・試験②の結果から求めた局所圧力損失係数の最大値は cm^{-4}
 - ・試験②の局所圧力損失係数は、試験①の必要な流量が確保できることを評価済みの試験の範囲内であることを確認（試験①の局所圧力損失係数： cm^{-4} ）
- 試験②ではケイ酸カルシウムに加え、事前に繊維質デブリを投入しているが、薄膜効果による閉塞などの状況は確認されなかった。
- 実際は繊維質保温材を撤去するため、ケイ酸カルシウムのみが燃料フィルタに到達したと仮定しても、さらに安全裕度が高くなると考えられる。

【参考】燃料フィルタに対する試験②（5 / 5） ～試験後のDefender外観～

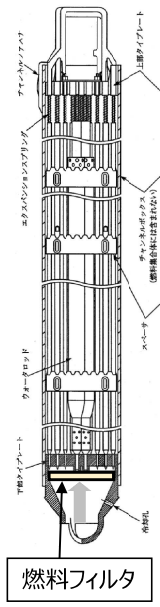
- 試験後の外観写真から、ケイ酸カルシウムが燃料フィルタに到達した場合でも、薄膜効果による閉塞などの状況は確認されなかった



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】ストレーナを通過したデブリによる炉心（燃料）への影響整理

● 炉心（燃料）への影響を下表の通り整理



影響項目	影響の整理
燃料集合体の閉塞	<ul style="list-style-type: none"> 燃料上部はECCSストレーナよりメッシュサイズが大きいので、ストレーナを通過したデブリによる燃料上部への冷却材の流入に影響はない。燃料上部への流入例を以下に示す。 〔ABWR：燃料上部へのまわり込みによる流入〕 〔BWR5：燃料上部へのスプレイ等での流入〕 また、燃料下部にはECCSストレーナよりメッシュサイズの小さな燃料フィルタを設置するプラントもあるが、薄膜効果の要因となる繊維質の保温材を撤去していることから、燃料下部への冷却材の流れは確保できると考えられる。 なお、念のため、デブリが燃料フィルタに到達したと仮定した燃料フィルタの圧損試験の結果からも、LOCA後の長期冷却に必要な流量が確保できることを確認した。 試験①：繊維質デブリを投入した燃料フィルタの圧損試験の結果から、燃料下部へも必要な流量が確保できることを確認 試験②：繊維質デブリ及び粒子／固形物の代表としてケイ酸カルシウムを投入した燃料フィルタの圧損試験を実施し、試験①の範囲内であることを確認 〔薄膜効果確認のため繊維質デブリも投入しているが、国内BWRは繊維質保温材撤去〕
燃料集合体の摩耗	<p>金属デブリによる燃料棒被覆管へのフレッティング摩耗※の影響が考えられるが、上流のストレーナや燃料フィルタによる捕捉により影響は小さい。 また、燃料内部に捕捉された場合にもLOCA後の炉心冷却材の流量は運転中と比べ低いこと、LOCA後の長期冷却期間（1か月程度）は燃料の使用期間（4～5年程度）と比べ短いことから、影響は小さい。</p>

※フレッティング摩耗：燃料内部に捕捉された金属デブリが流体により繰り返し振動することによって燃料棒被覆管が損傷する事象（過去原子炉運転中に発生）

ストレーナを通過したデブリによる下流機器（ポンプ、弁、熱交換器）への影響整理

● 下流機器（ポンプ、弁、熱交換器）への影響を下表の通り整理

対象機器	閉塞	摩耗
ポンプ	<ul style="list-style-type: none"> インペラケーシングの摺動ギャップや軸受けのギャップはストレーナの最小部よりも矮小だが、高速回転するインペラ等が安定した閉塞部の形成を妨げること、デブリはインペラ等により細かく碎かれることから、閉塞する可能性は低い 	<ul style="list-style-type: none"> 想定されるデブリのうち、比較的硬度が低いものは、異常摩耗の原因となる可能性は低い 鏽片や塵土については、高速回転するポンプインペラ等へ衝突することで摩耗を引き起こす可能性があるが、固形物は比重が高く、運転を継続するに従い、系統の各部に沈殿するため、異常摩耗を発生する可能性は低い
弁	<ul style="list-style-type: none"> 事故時に注水経路を構成するECCS系の弁は、運転中は全開状態である為、弁の口径から、閉塞する可能性は低い 	<ul style="list-style-type: none"> 弁箱の肉厚は配管よりも大きく、異物による摩耗の影響は問題ない範囲と考えられる
熱交換器	<ul style="list-style-type: none"> 伝熱管の間隙又は口径は、ストレーナを通過するデブリサイズよりも大きいため、伝熱性能に影響を与えるような閉塞の可能性は低い 	<ul style="list-style-type: none"> 想定されるデブリのうち、比較的硬度が低いものは、異常摩耗の原因となる可能性は低い 鏽片や塵土については、比重が高く、運転を継続するに従い、系統の各部に沈殿して流入量が低下することから、有意な影響はないと考えられる

以上の理由からポンプ、弁、熱交換器への影響は小さいと考えられる