


BWR-ECCSストレーナ 下流側炉内影響について

2022年10月11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)

格納容器内で発生するデブリの整理

- LOCA（設計基準事故）時に格納容器内で発生するデブリを下表の通り整理
 - ECCSストレ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
 （LOCA（設計基準事故）時の安全評価結果に影響なし）

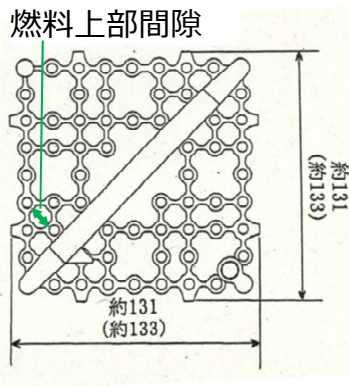
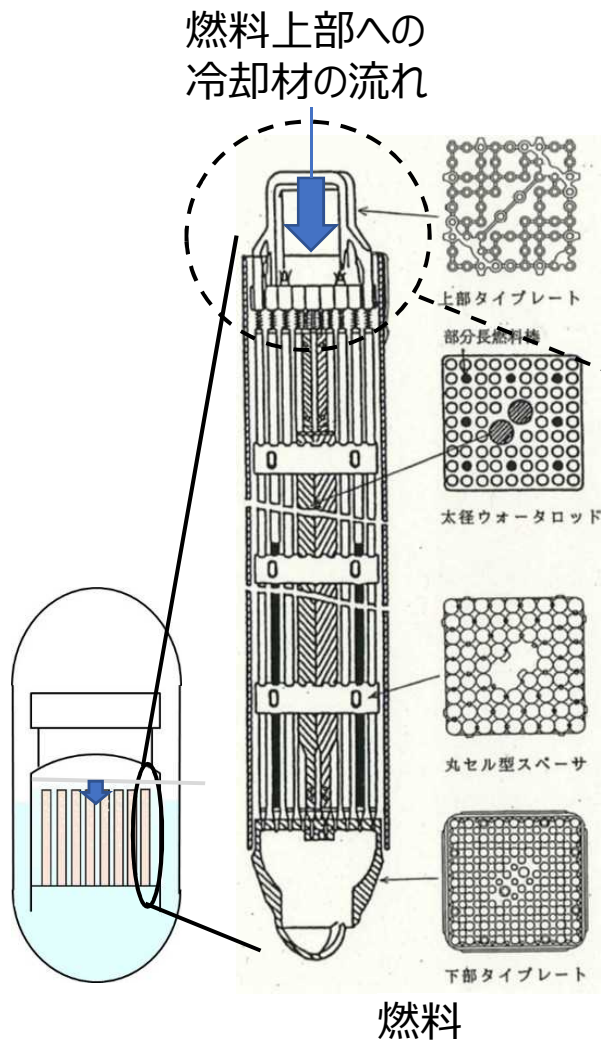
対象機器：ポンプ、弁、熱交換器、炉心（燃料）

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、水中のストレナに到達しないため（ストレナの圧損評価においても考慮不要）

(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。

燃料上部はECCSストレーナより間隙が大きいため
 ストレーナを通過したデブリによる閉塞の影響はない
 ⇒ LOCA後の炉心の再冠水 (BWR5)、冠水の維持 (ABWR)、炉心の冷却に影響はない

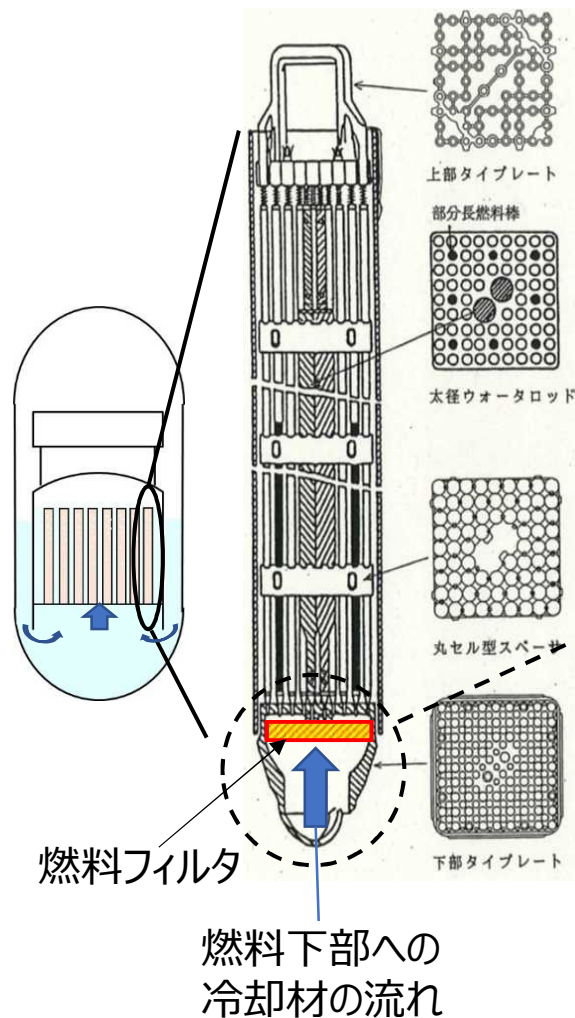


【メッシュサイズ】
 ECCSストレーナ < 燃料上部間隙

【メッシュサイズの例 (KK7、9×9A型燃料)】

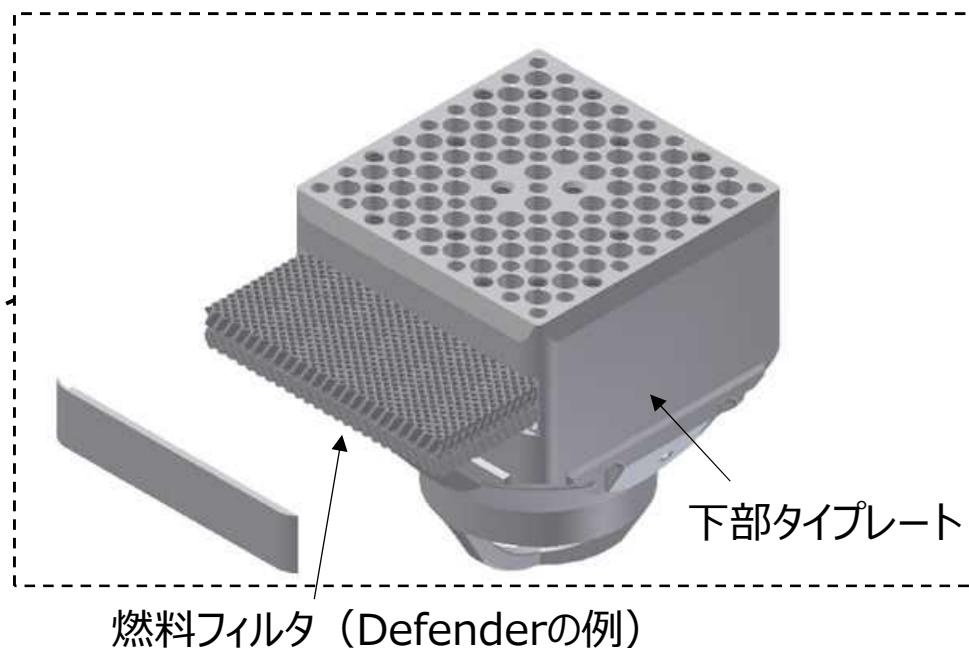
ECCSストレーナ	燃料棒間隙	燃料上部間隙
技-①	約3mm (隣接)	技-②

(ii) 燃料下部の閉塞の影響整理 (2 / 2)



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、ストレーナを通過したデブリによる閉塞の影響はないと評価

⇒ LOCA後の冷却に影響はない



〔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 (Defender) を設置するプラントも有り〕

【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は繊維質保温材を撤去しており、実機を包含した保守的な条件で試験実施]

- 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



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

※9×9B型燃料の燃料フィルタメッシュサイズは

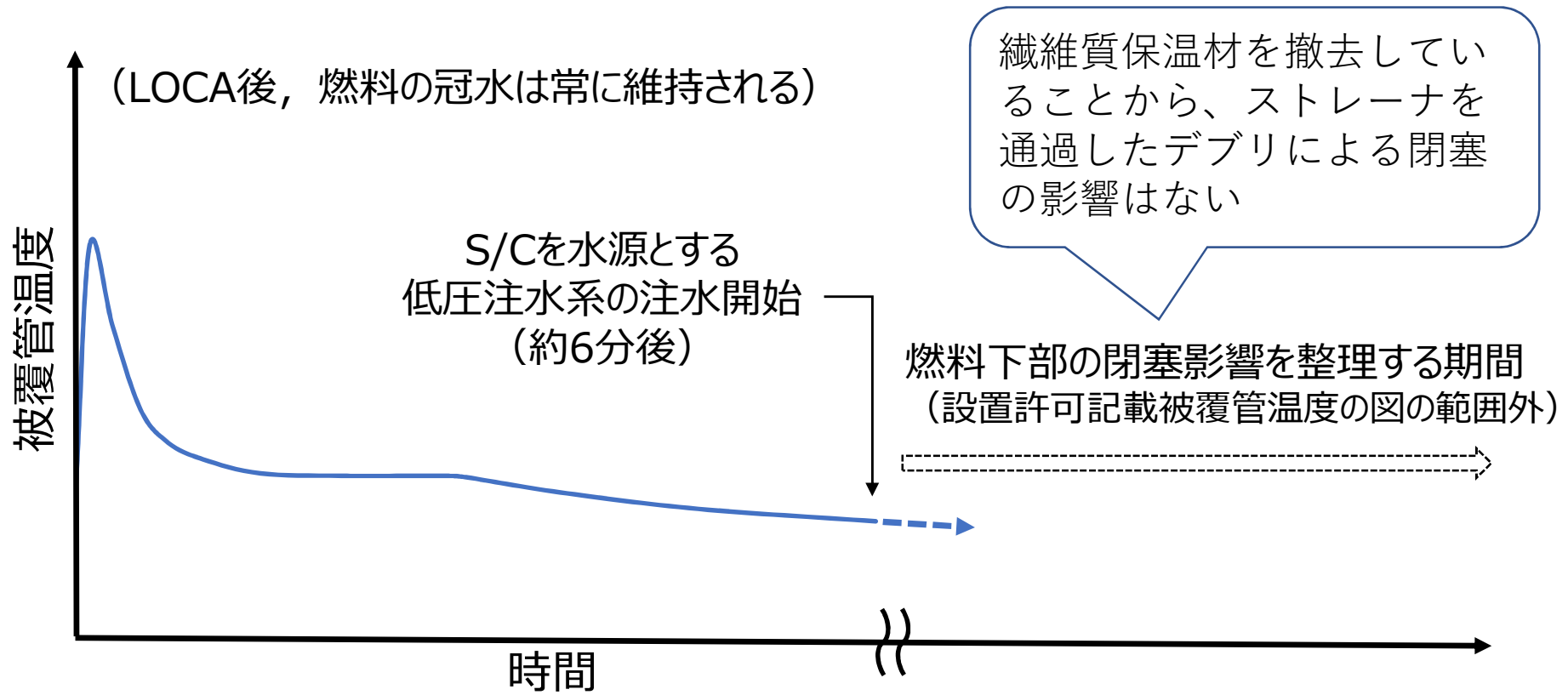
技-⑤

以上

まとめ

- 国内BWRプラントは、繊維質保温材の撤去※やストレナの大型化、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
 - 〔※新規制基準対応の設工認においてSA時のECCSストレ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（LOCA（設計基準事故）時の安全評価結果に影響なし）
- 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】LOCA（設計基準事故）時 被覆管温度の推移例（ABWR※）



※ ここでは、ECCS（高圧炉心注水系を除く）の注水箇所がシュラウド外であり、ECCSによる注水がRPV下部を經由して燃料下部から供給されるABWRについて記載する。6頁及び8頁のとおり、燃料上部及び下部いずれもECCSストレーナを通過したデブリによる影響はないものの、仮に繊維質保温材が撤去されていない状況を仮定すると、燃料下部から冷却材が供給される場合には燃料下部の閉塞影響を整理する必要がある。なお、BWR5ではECCSはシュラウド内の炉心上部から注水される。

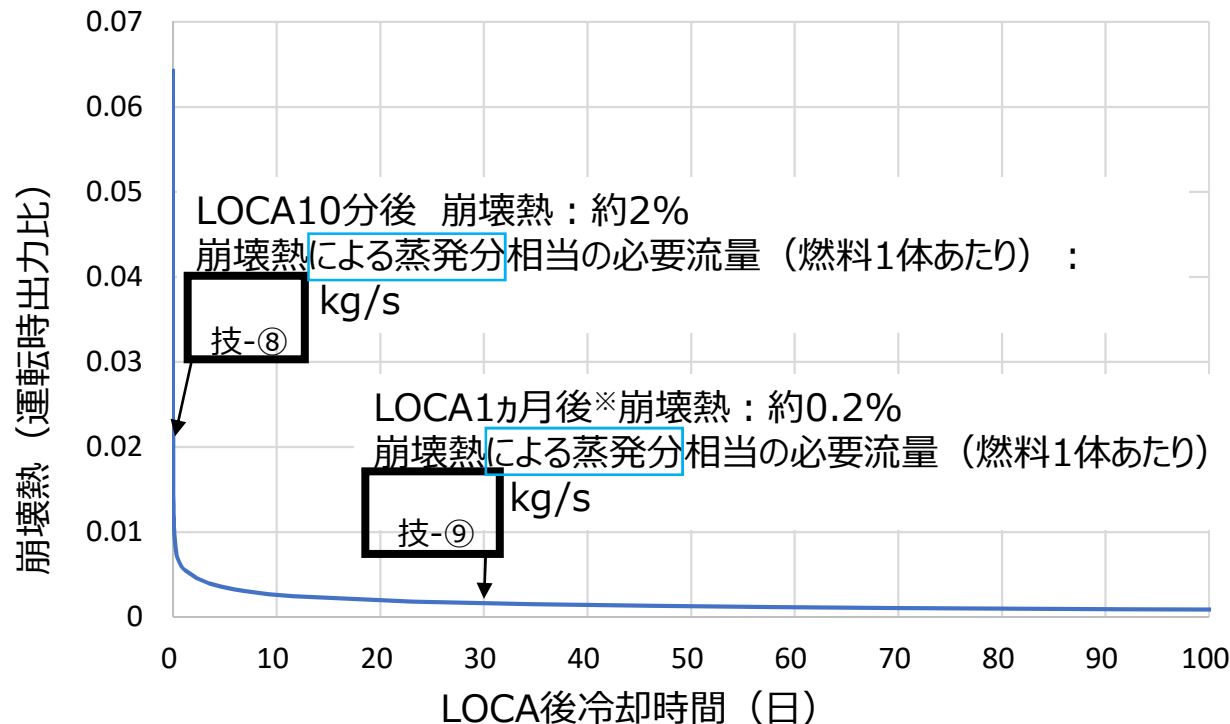
【参考】流量関連 参考例 (KK6/7)

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おり、RIPが全台トリップし、自然循環により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】

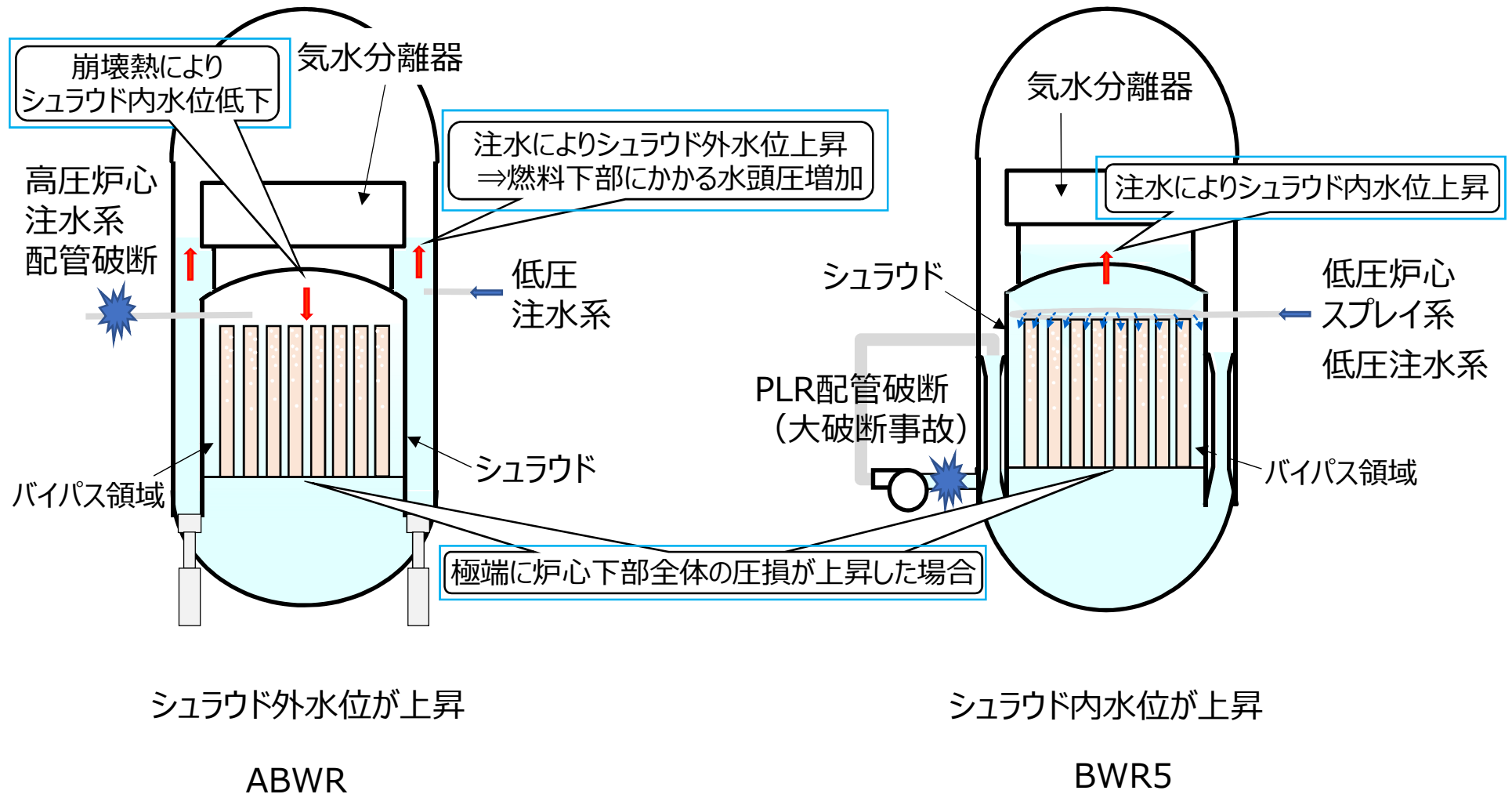
- ・954m³/h
- 燃料1体あたり約0.3kg/s (954m³/h÷872体×1000÷3600)

【LOCA後低圧注水系】

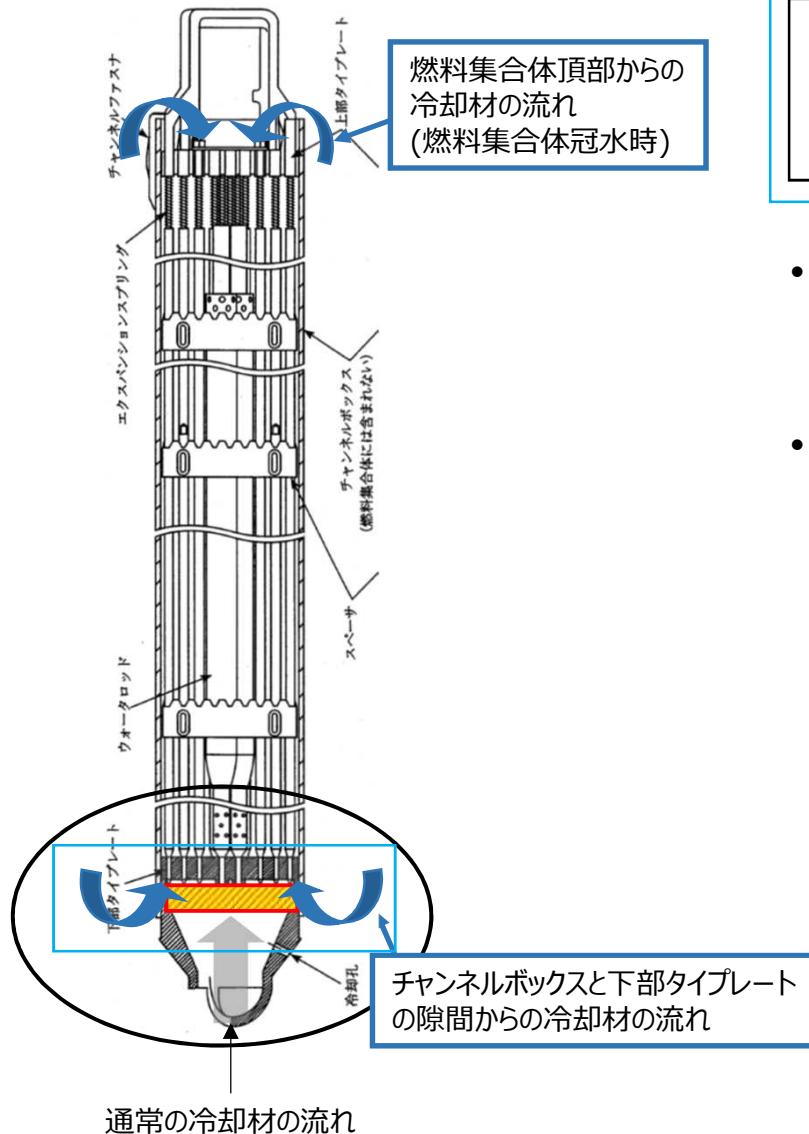
- ・LOCA約6分後に低圧注水系2系統注水開始
- ・LOCA約15分後に低圧注水系1系統で注水 (1系統はPCVスプレーに切替え)

※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】仮に炉心下部全体の圧損が上昇した場合のイメージ

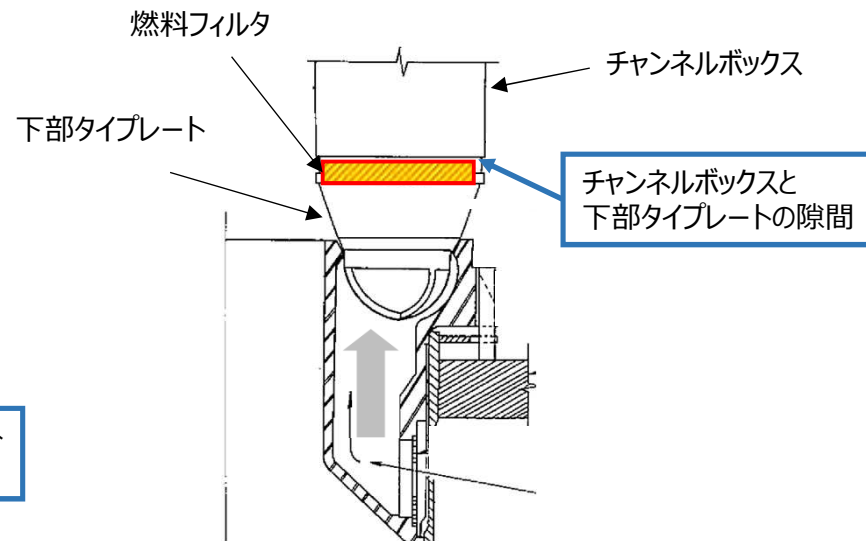


【参考】LOCA後の長期冷却性 補足



燃料下部のフィルタ部を通じた燃料集合体内部への流れ以外にも、長期冷却性評価では考慮していないが、以下に示す冷却材の流れがある

- 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

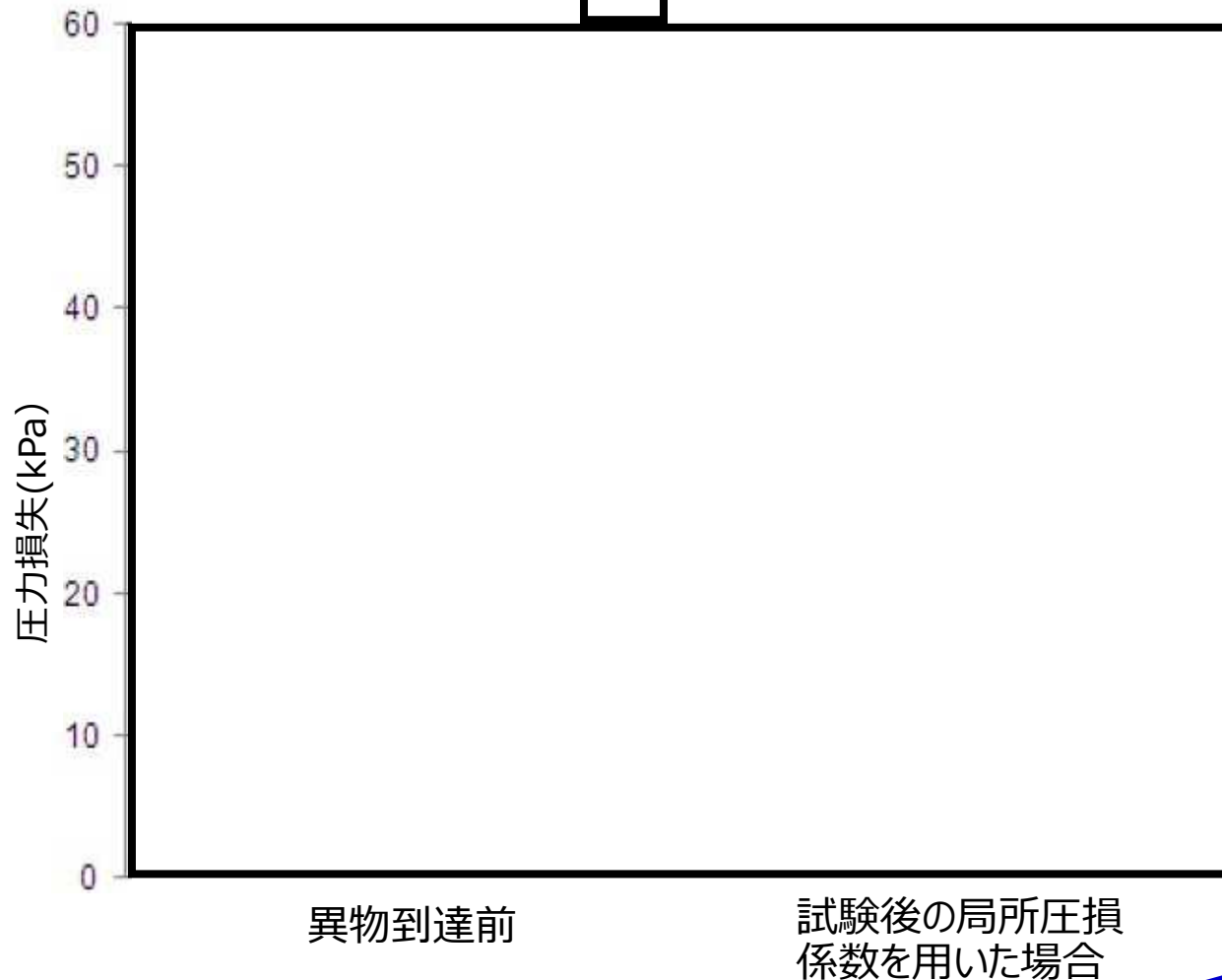


【参考】燃料フィルタに対する試験①（3 / 5） ～実機流量評価～

枠部 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：約 kg/s

技-⑦



注水流量例（KK6/7）

【低圧注水系1系統 定格流量】

・954 m^3/h

＞燃料1体あたり約0.3 kg/s

(954 $\text{m}^3/\text{h} \div 872 \text{体} \times 1000 \div 3600)$

【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

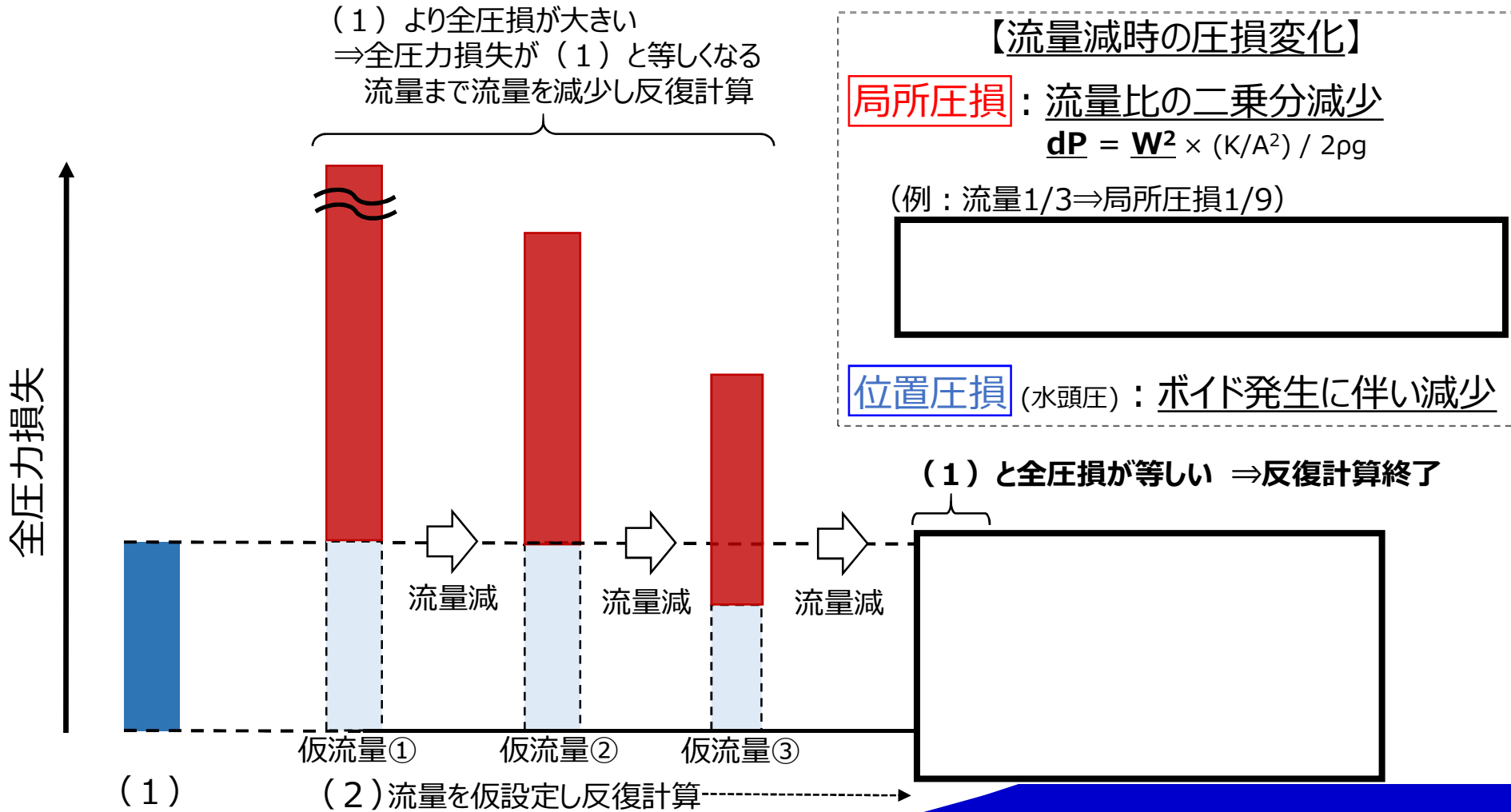
・LOCA約15分後に低圧注水系1系統で注水
(1系統はPCVスプレーに切替え)

【参考】燃料フィルタに対する試験① (4 / 5)

～実機流量計算の流れ イメージ～

枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

- (1) 異物到達前の全圧力損失を算出 (⇒冠水状態であり、ほぼ位置圧損 (水頭圧))
- (2) 試験後の局所圧力損失係数を使用し、全圧力損失が (1) と等しくなる流量まで反復計算



【参考】燃料フィルタに対する試験①（5 / 5） ～実機流量評価方法～

（平成24年8月意見聴取会資料 P15,16 参照）

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、試験後の状態を模擬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（水頭圧） ← 流量が下がると、崩壊熱によりボイドが増加し、水頭圧低下

$dP_{局所, 入口}$: 燃料フィルタ付近の局所圧力損失 ← 燃料フィルタに異物が詰まると、圧力損失増加

$dP_{局所, バンドル}$: スペーサなどの局所圧力損失

$dP_{摩擦}$: 摩擦圧力損失

$dP_{加速}$: 加速圧力損失

※異物到達前は、右辺の項のうち、水頭の項がほとんど全てを占める

【試験後の局所圧力損失係数を用いた場合 圧損評価結果】

・燃料下部に流入する冷却材の圧力が保守的に一定（シュラウド外からの水頭圧が一定）とした場合において、燃料内の全圧力損失は一定となることから、燃料フィルタ部の局所圧力損失の増加と、ボイド増加による水頭圧低下が釣り合い、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（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 □^{技-⑳} 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： □^{技-⑥} 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。

格納容器に存在する実機のデブリを想定したとしても、本試験条件に含まれると考えられ、LOCA時においても長期冷却維持可能

【参考】設置変更許可添付十への影響について

▶ ECCSストレーナを通過したデブリによる設置変更許可添付十への影響は下記の通り

✓ **LOCA（設計基準事故）時：**

⇒ **設置変更許可添付十での評価に影響を及ぼすものではないと考える**

- ・下流機器への影響（閉塞、摩耗）：影響が小さいことを確認（29頁参照）
- ・炉心（燃料）への影響（閉塞）：燃料上部／下部に影響がないことを確認（5～10頁参照）
- ・炉心（燃料）への影響（摩耗）：影響が小さいことを確認（28頁参照）

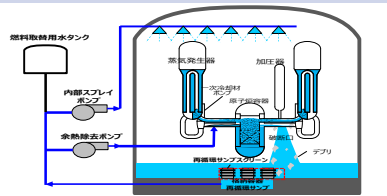
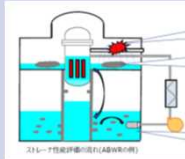
✓ **LOCA（重大事故等）時：**

⇒ **設置変更許可添付十での評価に影響を及ぼすものではないと考える**

- ・下流機器への影響（閉塞、摩耗）：（審査の完了していないプラントもあるが）ストレーナの性能に問題は無く、上記設計基準事故時の評価と同様、影響は小さいと考える。
- ・炉心（燃料）の影響：下記の通り影響は小さい
 - －「炉心損傷防止」シナリオ（LOCA時注水機能喪失）：
有効性評価で示す事象発生から7日後までは、外部水源による注水とPCVバントによるフィードアンドブリードにより安定状態を維持することから影響はない。なお、7日後以降の長期的な安定状態の維持のため代替循環冷却系又はRHRによりS/Cを水源とした操作を実施するが、炉心損傷前には格納容器内の機器・構造物と反応する可能性のある薬品等を添加しないことから、化学影響を考慮する必要はなく、上記設計基準事故時の評価と同様、影響はないと考える。
 - －「格納容器破損防止」シナリオ（格納容器過圧・過温破損）：
炉心損傷後の本シナリオにおいてECCSストレーナが使用されるのは、代替循環冷却系による格納容器除熱操作であるが、代替循環冷却系ポンプのNPSHが確保されることを設工認で審査頂いている。なお、炉心損傷を判断した場合において、外部への放射性物質の放出低減の観点で薬品を添加しpH制御を行うことから、格納容器内の機器・構造物と反応し、発生する化学析出物についても考慮している。
また、このシナリオでは、燃料は損傷しており、炉心冠水維持が重要な状況であることから、影響はないと考える。

※国内BWRプラントでは繊維質保温材を金属保温材に取替えており、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行っている。今回の評価・試験結果は保守的に繊維質保温材を考慮しているため、実際にはさらに裕度が確保されている。

スライド追加

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