
BWR-ECCSストレーナ 下流側炉内影響について

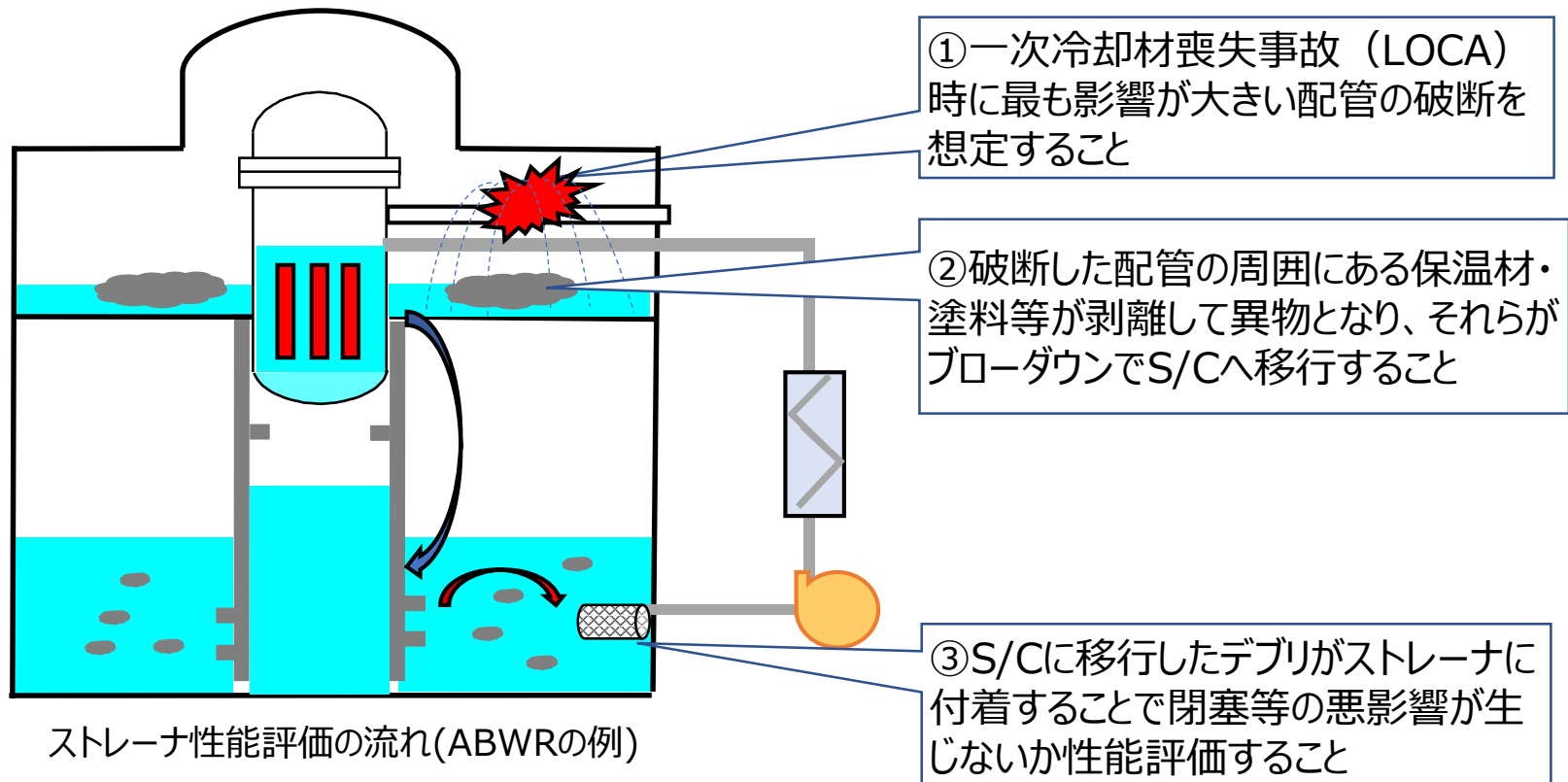
2022年6月3日

東京電力ホールディングス株式会社
日本原子力発電株式会社

BWRプラントにおける規制について

- ストレーナ等の閉塞事象については、内規*¹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

*1: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)



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。

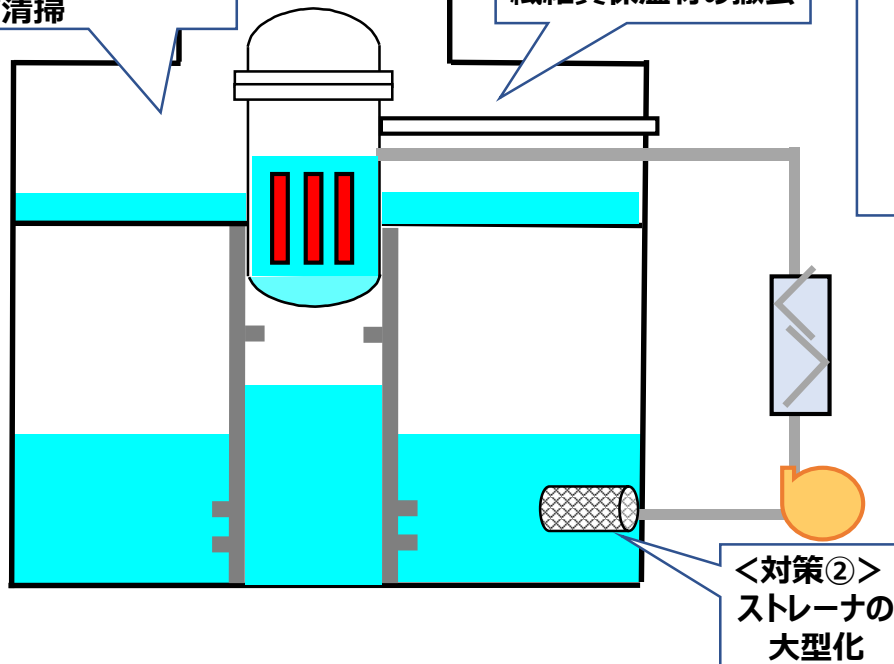
※繊維質保温材から主に金属保温材へ取り替えるため、ストレーナの閉塞に支配的である薄膜形成にほとんど寄与しない。

<対策③>

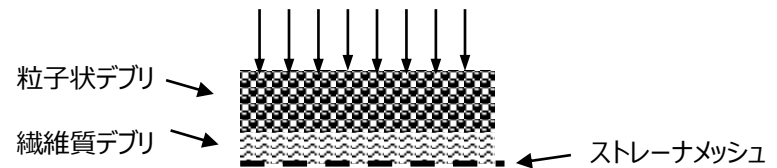
- ・格納容器内の異物管理
- ・起動前清掃

<対策①>

繊維質保温材の撤去



繊維質保温材を撤去し、薄膜形成効果（流路閉塞）を防止



薄膜形成による粒子状デブリの捕捉効果のイメージ



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させ、閉塞に関する裕度を上げる

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（1/2）

- 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対象機器への影響の観点で、粒子／固形物について確認が必要（赤枠）

対象機器：ポンプ、弁、熱交換器、炉心（燃料）

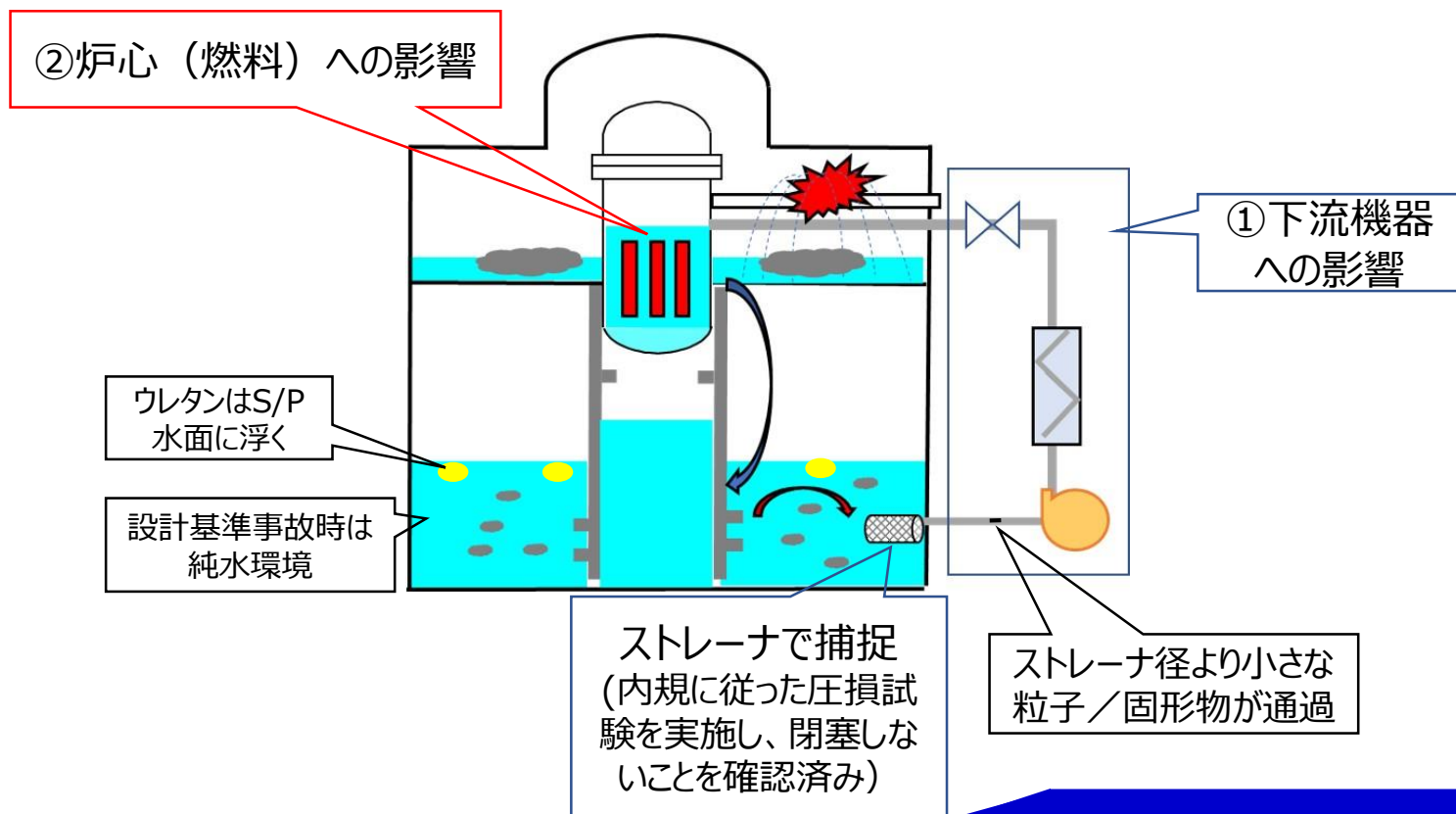
デブリ種類	影響	理由
繊維質	なし	影響項目として閉塞が考えられるが、繊維質保温材を撤去しているため
粒子／固形物 <ul style="list-style-type: none"> ・ケイ酸カルシウム ・金属 ・塗装片 ・スラッジ ・鋳片 ・塵土 	閉塞、摩耗について次頁以降で説明	
化学析出物	なし	影響項目として閉塞や燃料表面の冷却性能低下が考えられるが、BWR冷却材は設計基準事故の環境では純水であるため、塗料含め化学析出物の影響は小さい（ストレーナにおいても考慮不要）
ウレタン	なし	影響項目として閉塞が考えられるが、ウレタン保温材はS/P水面に浮遊するため（ストレーナにおいても考慮不要）

格納容器内で発生するデブリの整理 (2/2)

格納容器内で発生した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。

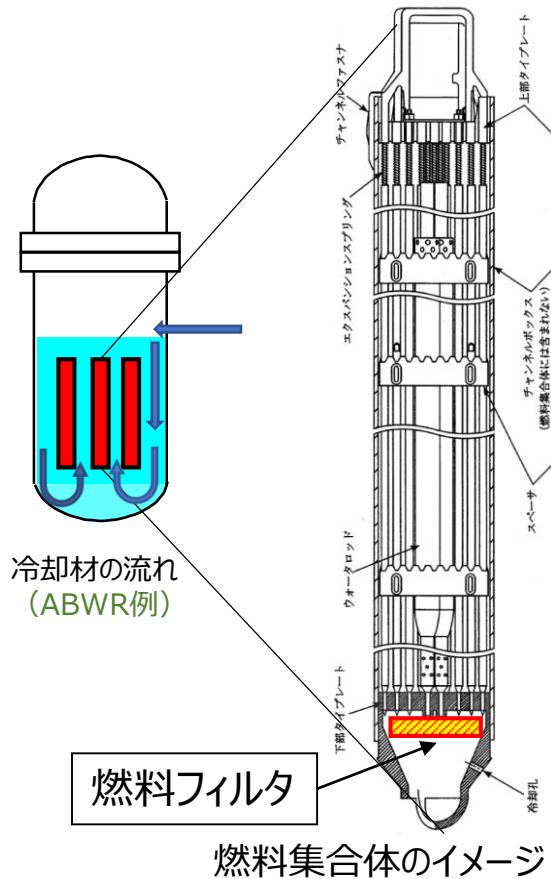
①下流機器（ポンプ、弁、熱交換器）への影響（閉塞、摩耗）：
 ➤ 影響が小さいことを確認済み（21頁参照）

②炉心（燃料）への影響（閉塞、摩耗）：前回会合に補足して今回説明



ストレーナを通過したデブリ（粒子／固形物）による炉心への影響整理

● 炉心（燃料） への影響を下表の通り整理



炉心への影響項目	影響の整理
燃料集合体の閉塞	炉内の冷却材の流れは自然循環状態では燃料集合体の下部から上向き方向であり、燃料集合体の下部には燃料フィルタが設置されているプラントもある 燃料フィルタがデブリにより閉塞した場合、燃料内の冷却材流量に影響を与えることが想定されるため、燃料フィルタの圧損試験を実施した結果、LOCA後の長期冷却に影響はないことを確認
燃料集合体の摩耗	ストレーナを通過した金属デブリによる燃料棒被覆管へのフレットング摩耗※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

※フレットング摩耗：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）

燃料集合体の閉塞について、燃料フィルタの圧損試験による冷却性能への影響を確認

燃料フィルタに対する圧損試験(1/6) ～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。

- 燃料フィルタ閉塞については、Defender圧損試験で代表する
 なお、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

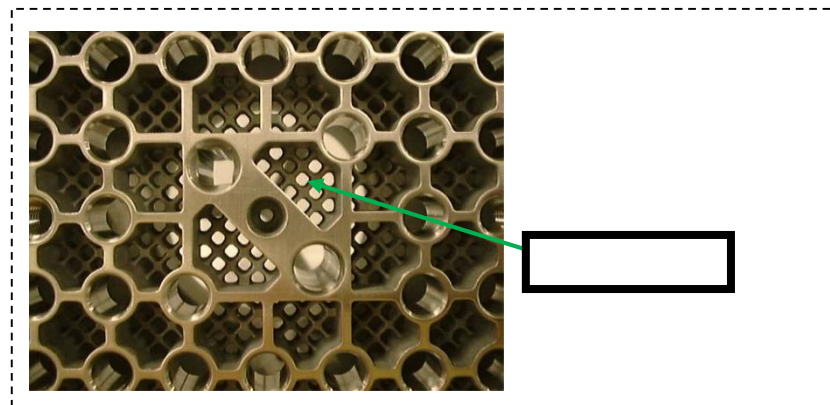
【メッシュサイズの例（KK7、9×9A型燃料※）】

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
▭	▭	▭	約3mm（隣接）	▭

※9×9B型燃料の燃料フィルタメッシュサイズは▭以上



9×9A型燃料 Defender



9×9A型燃料 従来型フィルタ

燃料フィルタに対する圧損試験(2/6)

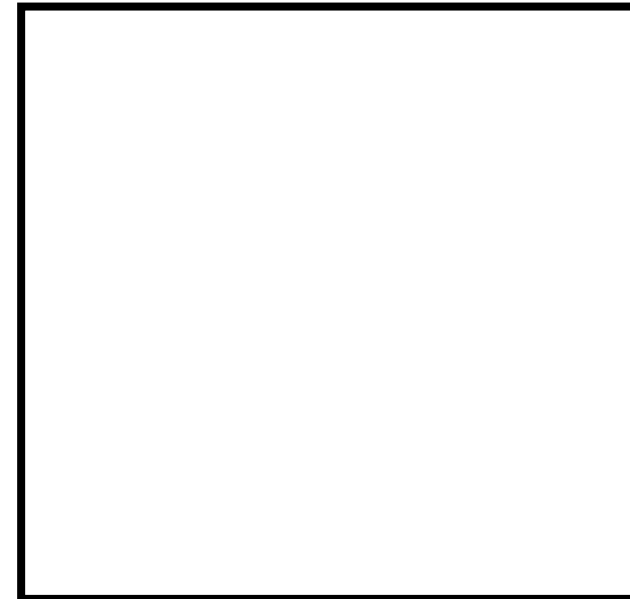
枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

【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、燃料フィルタの圧損を測定

【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ストレーナ到達と仮定（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ストレーナ通過量：米国の試験※²を参考に、保温材全量のうち0.4%がストレー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：ストレーナ通過量÷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：「非常用炉心冷却系統ストレー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）

燃料フィルタに対する圧損試験(3/6)

□ 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に変化させて圧損を測定

- ① 繊維質を120g投入
- ② ケイ酸カルシウムを50g追加投入
- 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]
①	繊維質 120g			
②	(追加) ケイ酸カルシウム 50g			
③	(追加) ケイ酸カルシウム 50g			

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

燃料フィルタに対する圧損試験(4/6)

【試験結果】

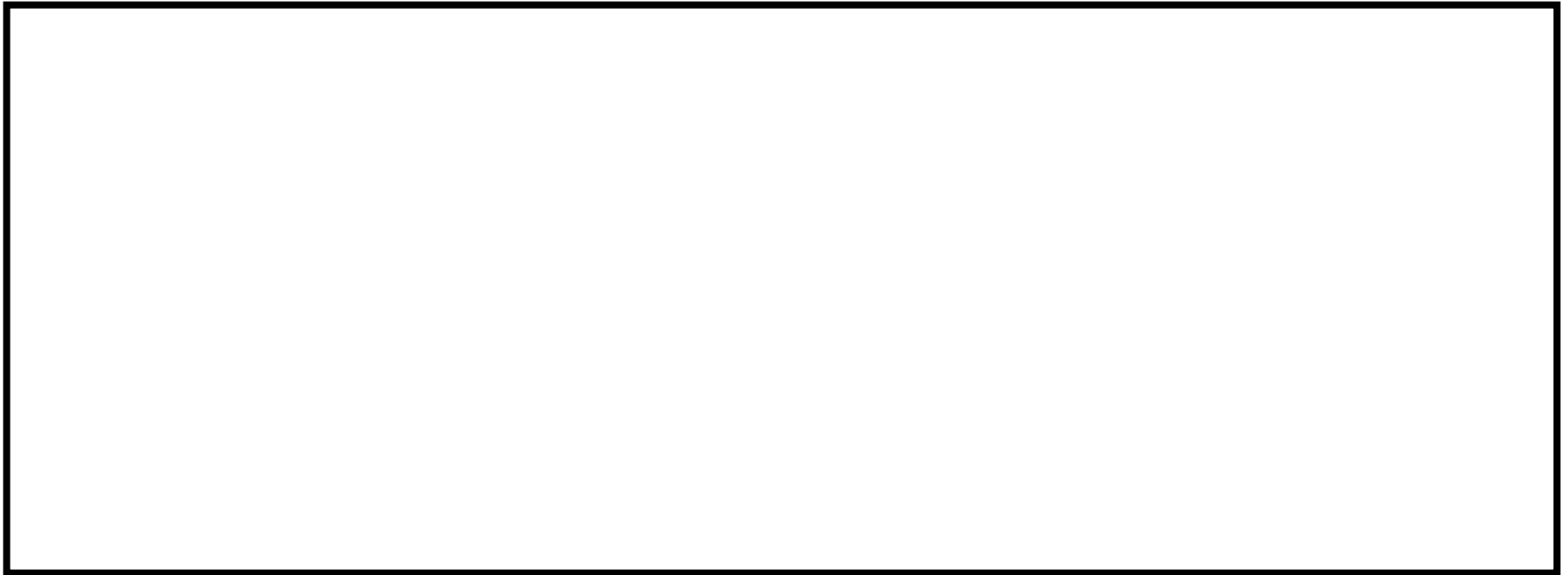
- ②、③でケイ酸カルシウム投入後、圧損は一時的に上昇。流量を上げると圧損は増加傾向を示すが、その後圧損が急減するなど、流路が継続して目詰まりを生じている状況ではない



枠囲みの内容は機密に係る
事項のため公開できません。

燃料フィルタに対する圧損試験(5/6)

- 【参考】試験後のDefender外観
 - 試験後の外観写真からもDefenderが目詰まりを生じていないことが確認された



燃料フィルタに対する圧損試験(6/6)

▭ 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】

- 試験結果から求めた局所圧力損失係数（8頁表）の最大値は以下のとおり

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]
③投入後			

(平成24年8月意見聴取会資料 P8,15,16)

- 試験から求めた局所圧力損失係数 ▭ cm⁻⁴ よりも保守的な ▭ 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、異物到達前は ▭ kg/sであった実機冷却材流量は、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 ▭ kg/s以下を上回る。

LOCA発生後の長期冷却に必要な流量を確保

〔なお、本試験は薄膜効果による閉塞状況を確認するため、繊維質とケイ酸カルシウムを投入している。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。〕

まとめ

- 国内BWRプラントは、繊維質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
- 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、燃料フィルタの圧損試験を実施しており、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

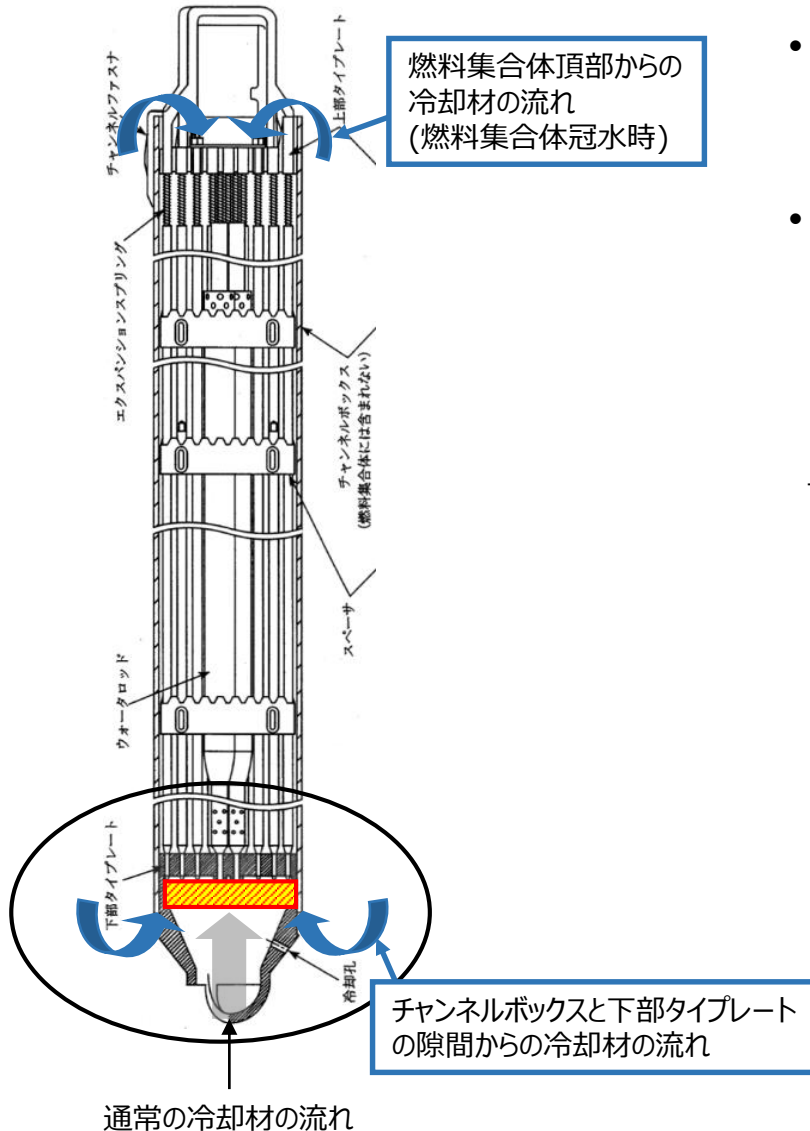
参考

【参考】LOCA後の長期冷却性 補足

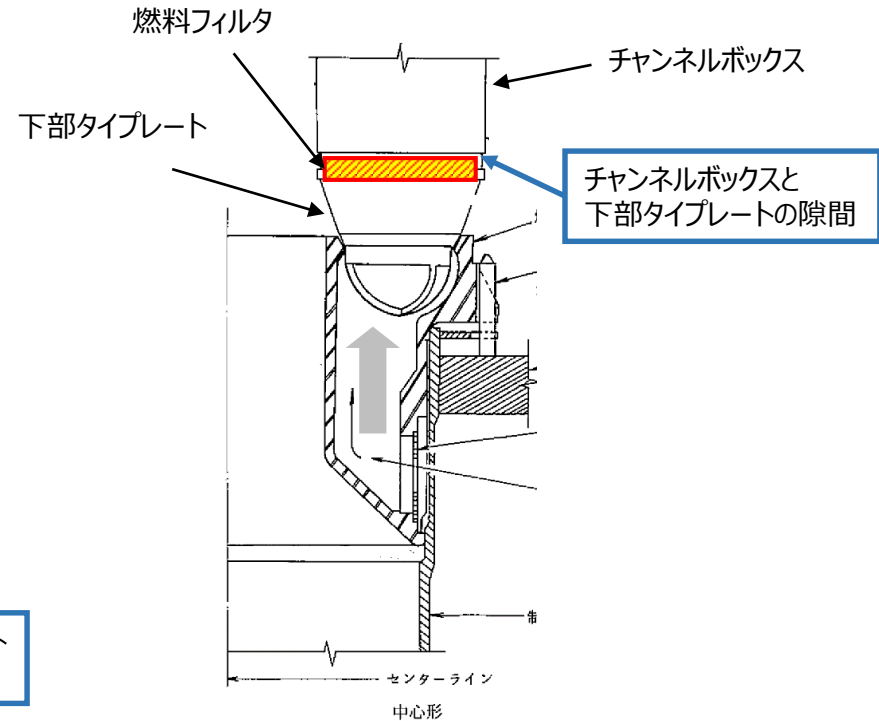
▭ 枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

- 本試験ではLOCA直後含めた自然循環状態を仮定し、1、4、7kg/sで試験を実施している。
 - 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している。
 - 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投入後と比較し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である。
- なお、仮にさらに捕捉されるデブリの量が増えたとしても、以下のとおり大幅に流量が減少することはないと考えられる。
 - 流量が低下すると燃料集合体内のボイド率が上昇するため、流量低下を緩和させる自然循環駆動力が生じる。
 - ▭の流量に対する局所圧力損失係数を簡易評価すると▭以上であり、本試験より求めた▭に対し、▭以上の余裕がある。（19頁参照）
- また、本試験は薄膜効果による閉塞状況を確認するため、繊維質とケイ酸カルシウムを投入している。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。
- さらに、仮に燃料フィルタが閉塞した場合でも、チャンネルボックスと下部タイプレートの隙間、もしくは燃料集合体が冠水している場合は燃料集合体の頂部から燃料集合体内へ冷却材が供給される。（次頁参照）

【参考】LOCA後の長期冷却性 補足（燃料フィルタ閉塞を仮定した場合）



- 燃料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
- 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水が供給される



【参考】Defender 前回圧損試験結果（平成24年8月意見聴取会時）

（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。

【前回試験結果】

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



【参考】Defender 前回圧損試験 長期冷却性評価（平成24年8月意見聴取会時）

（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]
前回試験	□	□	□

$dP = W^2 \times (K/A^2) / 2\rho g$ より、流量に依存しない局所圧力損失係数 K/A² を算出

（密度 ρ : 1g/cm³）



- ・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、異物到達前は □ kg/s であった実機冷却材流量は、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 □ kg/s 以下を上回る。



LOCA発生後の長期冷却に必要な流量を確保

【参考】Defender 前回圧損試験 実機流量評価方法（平成24年8月意見聴取会時）

（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イ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。

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

$dP_{全体}$: 炉心入口オリフイ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
 $dP_{局所, バンドル}$: スペーサなどの圧力損失
 $dP_{摩擦}$: 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、異物到達前□ kg/sであった冷却材流量は□ kg/s程度となる。

【参考】Defender 前回圧損試験 実機流量評価（平成24年8月意見聴取会時）

□ 枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

【前回圧損試験 実機流量評価】

【さらに捕捉されるデブリの量が増え、流量が□となった場合（簡易評価）】

圧力損失(kPa)



異物到達前

□

試験後の局所圧損
係数を用いた場合

□

流量低下仮定

□

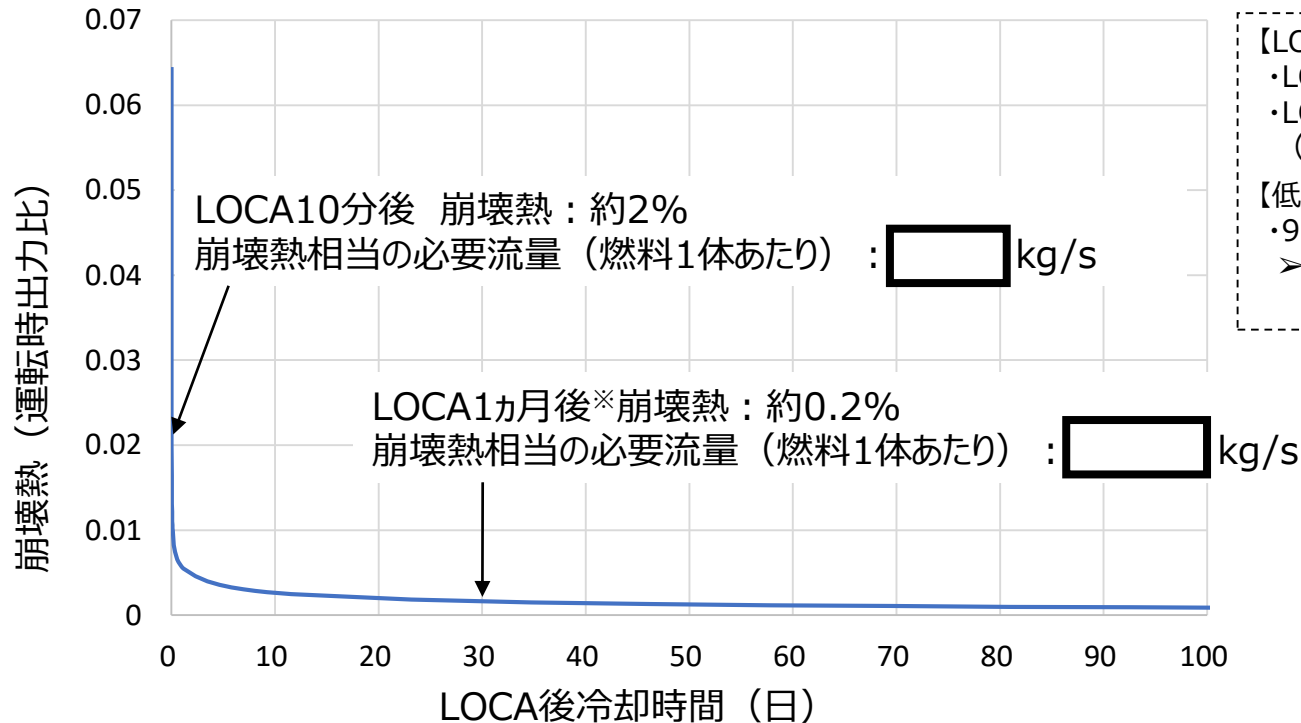
【参考】流量関連 参考例 (KK6/7)

▭ 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、自然循環流量 (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】

【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)

【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

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した

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砕かれることから、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 ✓ 錆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 ✓ 錆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