

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 BWR 事業者からの意見聴取結果について

令和 3 年 7 月 8 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¹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²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。

これに関し、令和 2 年 12 月 7 日に事業者意見を聴取する会合³を開催したところ、BWR 事業者は、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た。

今般、令和 3 年 5 月 28 日に事業者意見を聴取する会合⁴を開催し、その技術的妥当性について BWR 事業者から説明を受けた（参考参照）ことから、その結果を報告する。

2. BWR 事業者⁵からの聴取の結果

リスク増分がなく評価は不要とした技術的妥当性について、別紙により説明を受けた。主な説明は以下の通り。

(1) 炉心に悪影響を与える項目の整理

- ストレーナを通過したデブリによる炉心への影響という観点で、整理した結果、燃料フィルタの閉塞について確認が必要と考え、試験により LOCA 後の冷却に影響のないことを確認した。

(2) 燃料フィルタに対する圧損試験

¹ 原子炉冷却材喪失事故時の保温材の破損等により発生した異物

² 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）

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

⁴ 第 16 回新規制要件に関する事業者意見の聴取に係る会合

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

- 試験タンクに繊維質保温材、ケイ酸カルシウム保温材の順で投入し、ポンプで循環させて、燃料フィルタの圧損を測定したところ、圧損は一時的に上昇したが、継続しないことを確認した
- (3) その他（格納容器内に存在するデブリの影響、下流機器への影響、リスク評価）
 - 格納容器内に存在するデブリの影響については、内規に基づきストレーナ性能評価に反映している。また、繊維質保温材撤去等の取り組みを実施していることから格納容器内に存在するデブリの影響は小さいと考えている。
 - 下流機器（ポンプ、弁、熱交換器）への影響については、閉塞や摩擦の可能性は低く影響は小さいと考えている。
 - 日本国内の BWR は、米国の確率論的なアプローチではなく、決定論的に閉塞の可能性を排除する対策としている。この前提では、LOCA 時のストレーナ閉塞等に起因したリスクは増加しないため、リスク評価にストレーナの閉塞を考慮する必要はない。

3. 主な質疑応答

3. 1 圧損試験に関するもの

(1) 試験条件

- 原子力規制庁（以下「NRA」という。）から、試験は、最初に繊維質を投入し、後からケイ酸カルシウムを 2 回投入している。今後、繊維質断熱材を除去するので、ケイ酸カルシウムだけを想定することになる。ケイ酸カルシウムが燃料フィルタのメッシュよりも細かい場合、燃料フィルタを通過して炉心に到達し、影響を与えるのではないかと質問した。
BWR 事業者から、燃料集合体に影響を与える項目としては、金属デブリ等が燃料被覆管に接触するフレットィングによる摩耗、デブリによる化学析出物の堆積による影響というところがある。摩耗については、ケイ酸カルシウムの粒子状のデブリだと大きな影響はない、化学析出物については、純水を使用しているので、大きく水質環境が変わって析出するというようなところも考えにくく、影響は小さいと考えているとの説明があった。
- NRA から、試験条件として、米国の試験を参考にストレーナを通過するデブリの量を決め、保温材全量のうち 0.4%とあるが、日本でもこの条件でよいとした根拠について質問した。
BWR 事業者から、米国では、メッシュ径など国内より大きめに 3 mmと設定されている。全体のデブリの投入量として、デブリの想定発生量にかなり保守性を持たせているので、投入量としては妥当と考えるとの説明があった。

(2) 試験の代表性

- NRA から、この試験は全プラントに適用できるのか、その他の断熱材（ウレタン等）の影響についてどのように考慮しているのか質問した。

BWR 事業者から、全 BWR に適用できるよう試験条件を設定したこと、その他の断熱材（ウレタン等）は密度が低い浮遊性のものであるので、燃料まで到達することは考えづらいとの説明があった。

- NRA から、燃料フィルタが設置されていないプラントもあるとのことだが、フィルタがない分デブリは通過しやすいと思う。一般論として影響は小さいといえるのか質問した。

BWR 事業者から、例えば摩耗については、フレットングという事象自体が、運転中のような大量の流量がある流速が早い状況で、かつ例えば、数か月とか 1 年オーダーで燃料棒を少しずつ叩きながら貫通するという事象なので、ストレーナを通過したデブリが多少あったとしても、摩耗の影響は小さいと考えたとの説明があった。

（3）粒子デブリが燃料集合体、下流側機器に与える影響

- NRA から、繊維質保温材の撤去以外の対策（ストレーナ大型化、格納容器内清掃）も炉内影響に対して有効なのか、ストレーナの網目より小さく燃料フィルタの網目より大きいデブリを試験で考慮したのか、試験では投入しなかった金属異物による燃料フィルタの閉塞の可能性をどのように考えているのか質問した。

BWR 事業者から、繊維質保温材の撤去以外による対策も炉内の対策につながると考えている、ストレーナの網目より小さく燃料フィルタの網目より大きい異物も考慮して実験を行い、圧損が上昇しないことを確認している、金属異物は燃料フィルタで補足されても圧損が上がることはなく、閉塞への影響は小さいと考えたとの説明があった。

- NRA から、実際に DBA の事象が起きたときに、ケイ酸カルシウム以外にも金属、スラッジ、塗料の破片等が発生すると思うが、繊維デブリを撤去した状況でケイ酸カルシウム以外の粒子デブリが燃料集合体の閉塞に悪影響を及ぼすことはないのか質問した。

BWR 事業者から、燃料フィルタを通過した異物については、ケイ酸カルシウムと同様と考えており、水が流れて冷却できるということが一番重要で、摩耗等に関しても影響はないと考えたとの説明があった。

- NRA から、ポンプ、弁、熱交換器は、きれいな流体を流す場合と、粉体が入っているものを流す場合で通常は違う仕様になっている。メーカーの実験データ等調査検討の結果があるのか質問した。

BWR 事業者から、大きな異物の影響を考慮して、ストレーナのメッシュ径を規定し、それ以下の異物については、基本的には、機器に対しては大きな影響はないというふうに考えているとの説明があった。

（4）長期炉心冷却機能に与える影響

- NRA から、冷却材喪失事故などの後の炉心の冷却の期間、冷却性能についてはどのように考えているか質問した。

BWR 事業者から、崩壊熱を補う分だけが注水できればいいという観点からすると、長期炉心冷却（1ヶ月間程度）はこの圧損試験より流速は低い領域になり、燃料フィルタ以外からの冷却材の流入によっても冠水が維持できるとの説明があった。

- NRA から、「LOCA 後の冷却に影響のないことを確認」とあるが、圧損の数値が低いことをもって確認をしたということか、具体的な数値はいくつかについて質問したが、二つの異なる試験を比較して説明されたため、理解できなかったと発言した。

(5) リスク評価を不要としたことについて

- NRA から、前回会合では、過去にリスク評価を行って、この問題については、リスク上の影響は小さいと説明されており、米国では決定論だけでなくリスク評価に基づいた評価でアプローチをする事業者もいるということだったが、今回、リスク評価に基づくのではなく決定論的に評価をし、対策をするということで、その点は理解した。今後の PRA においてストレーナの閉塞を考慮したリスクの変化要因は、考慮する必要がないとしている意図を質問した。
BWR 事業者から、前回会合で示したリスク評価は、大型化する前のストレーナに対して行ったリスク評価で、 Δ CDF の差分は非常に小さいということを確認していた。今回ストレーナを大型化し、繊維質断熱材も撤去し、清掃もし、燃料フィルタに対する健全性も確認したので、今の PRA モデルにストレーナ閉塞のリスクを考慮する必要がないとの説明があった。

4. 今後の進め方

- BWR 事業者については、冷却材喪失事故後の炉心長期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い。
- なお、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ている。

(参考) BWR-ECCS ストレーナ下流側炉内影響に対する NRA 殿指摘事項への回答（7 第 16 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 16-1）

BWR-ECCSストレーナ下流側 炉内影響に対する NRA殿指摘事項への回答

2021年5月28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

指摘事項に対する説明方針

【NRA殿からの指摘事項】

ストレーナを通過したデブリが、炉心に悪影響を及ぼさないとした根拠や評価結果を示すこと

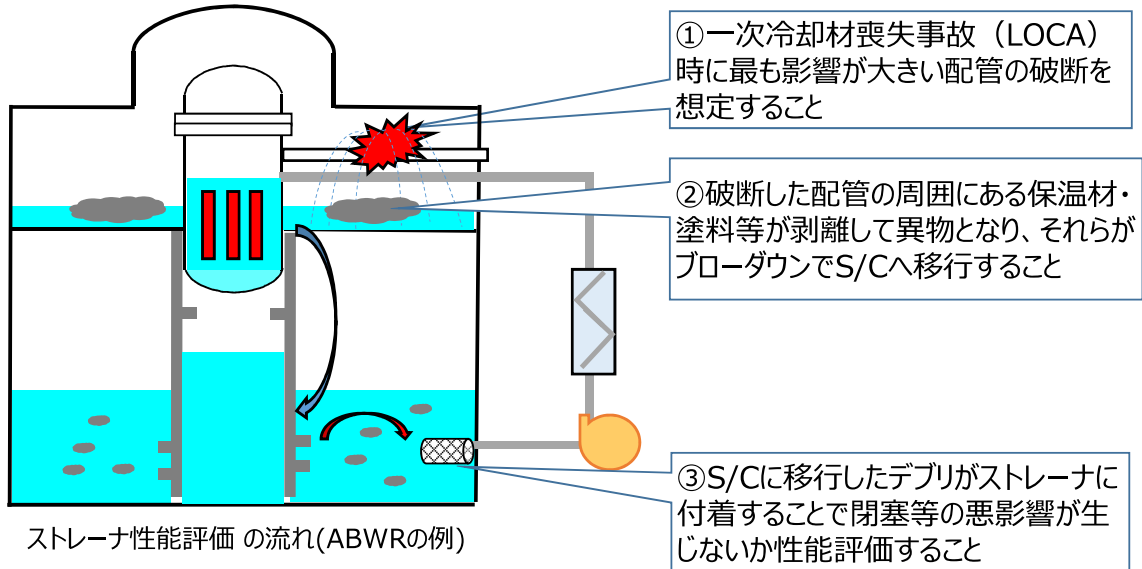
上記の指摘事項を踏まえ、以下の内容で回答する

1. BWRプラントにおけるストレーナ等の閉塞事象の概要と取り組み
2. 炉心に悪影響を与える項目の整理
3. 燃料フィルタに対する圧損試験
4. その他（格納容器内に存在する異物の影響、下流機器への影響、リスク評価）

1 - 1. BWRプラントにおけるストレナ等の閉塞事象の概要

- ストレ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

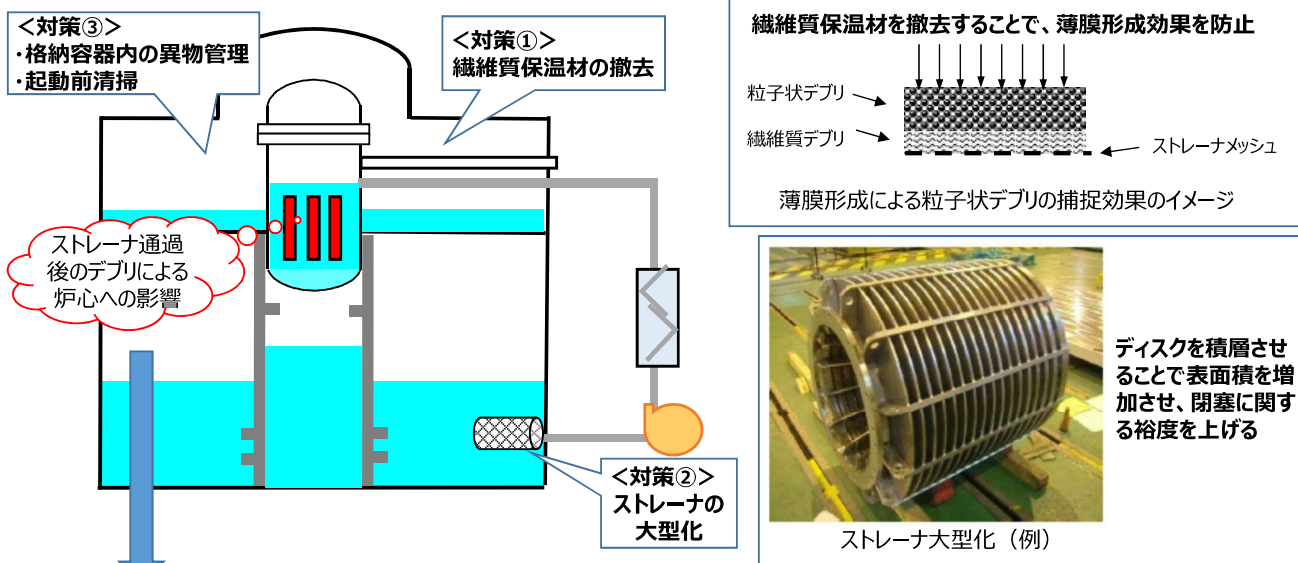
*1:非常用炉心冷却設備又は格納容器熱除去設備に係るろ過装置の性能評価等について(内規)



3

1 - 2. BWRプラントにおける閉塞事象への取り組み

- 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し、ストレナの圧損試験等により健全性を確認している



今回、ストレナを通過したデブリによる炉心への影響について、再度ご指摘があったため、その点を中心にご説明する

4

2. 炉心に悪影響を与える項目の整理

- ストレーナを通過したデブリによる炉心への影響という観点で、下表のとおり整理を実施
 - 整理の結果、燃料フィルタの閉塞について確認が必要と考え、試験によりLOCA後の冷却に影響のないことを確認（後述）

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としては燃料集合体の下部から上向きに流れる方向であるが、燃料集合体の下部には燃料フィルタが設置されているものもあり、 燃料フィルタがデブリにより閉塞した場合、燃料の冷却性能に影響を与える可能性あり ➢ 圧損試験による確認を実施
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ECCSストレーナ・燃料フィルタ等による金属異物の捕捉や運転中に比べ炉内の流速が低いこと等から影響は小さい
燃料集合体への化学析出物の堆積による冷却性能低下	BWRの冷却材は純水を使用しており、設計基準事故の環境では化学析出物による影響は小さい

5

3. 燃料フィルタに対する圧損試験(1/5)～Defenderによる代表性～

- 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】

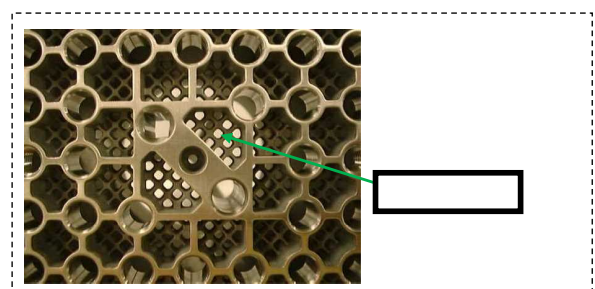
Defender < ECCSストレーナ < 他タイプ燃料フィルタ、燃料棒間隙や上部タイププレート

【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）	



9×9A型燃料 Defender



9×9A型燃料 従来型フィルタ

□ 枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

6

3. 燃料フィルタに対する圧損試験(2/5)

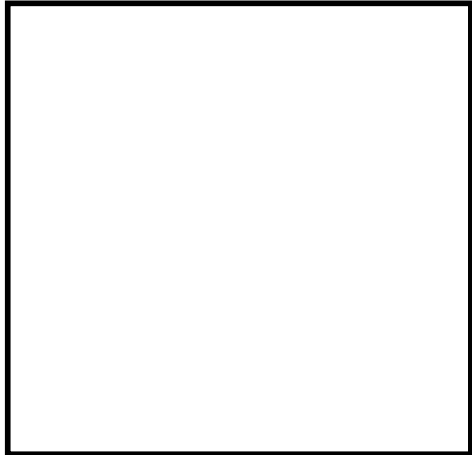
□ 枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

【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：繊維質とケイ酸カルシウム（繊維質保温材撤去済み（予定）だが、保守的に設定）
- 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÷燃料体数の保温材量を目安に、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）

3. 燃料フィルタに対する圧損試験(3/5)

【試験内容】

以下のそれぞれの条件で流量を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

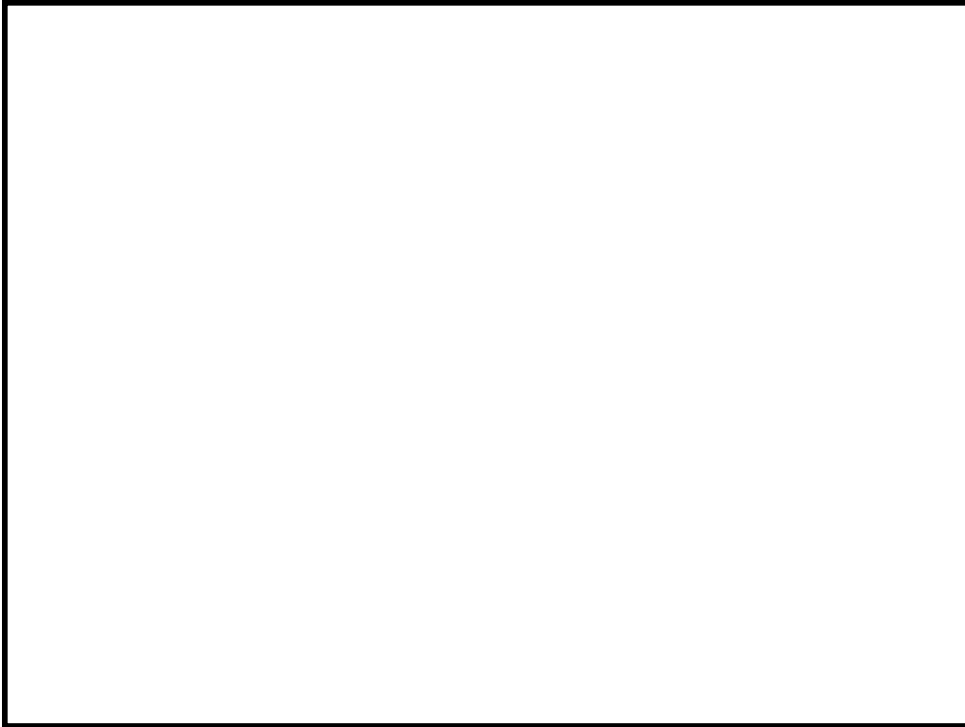
【試験結果】

異物投入	体積流量目安 [l/s]	局所圧力損失 dP[kPa]	質量流量 W[kg/s]
① 繊維質 120g	1		
	4		
	7		
② (追加) ケイ酸カルシウム 50g	1		
	4		
	7		
③ (追加) ケイ酸カルシウム 50g	1		
	4		
	7		

3. 燃料フィルタに対する圧損試験(4/5)

【試験結果】

- ②でケイ酸カルシウム投入後、圧損は一時的に上昇したが、継続しないことを確認した
- ③で再度ケイ酸カルシウム投入後、同様に圧損上昇は継続せず、Defenderが目詰まりを生じていることは確認されなかった ⇒薄膜効果は発生しないことが確認された



⇨ LOCA後の冷却に影響
のないことを確認



枠囲みの内容は機密に係る
事項のため公開できません。

9

3. 燃料フィルタに対する圧損試験(5/5)

【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



枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

10

4. その他（格納容器内に存在する異物の影響）

格納容器内に存在する異物（塵埃等）の影響については、内規に基づきストレーナ性能評価に反映している。また、BWRプラントは以下の取り組みを実施していることから格納容器内に存在する異物の影響は小さいと考えている

【BWRプラントの取り組み】

- 格納容器内にある繊維質保温材を全て撤去する方針であること
- 繊維質による3mm厚さの薄膜発生を想定したストレーナの大型化を実施しており、デブリに対しての裕度を向上させていること
- 炉内影響に関しても、前述のDefenderの圧損試験にて、保守的な条件での繊維質を含んだ圧損評価を実施し、健全性を確認していること
- 格納容器内は異物混入対策の実施及び起動前の格納容器内清掃を実施していること

11

4. その他（下流機器への影響）

下流機器への影響については、下記の理由から影響は小さいと考えている

ECCS系対象機器	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、異物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と考えられる 	<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と考えられる ✓ 固形物（土砂や錆片）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と考える 	<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と考えられる ✓ 固形物（土砂や錆片）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、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

12

4. その他（リスク評価について）

（2020年12月7日 資料14-2 再掲）

- 米国では、BWRオーナーズグループ（BWROG）が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、リスク情報活用アプローチを適用した報告をNRCへ実施（2017年11月20日付）
 - この報告を受け、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、下流影響含め、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が確認され、追加の規制措置は不要であるとした
- **日本国内のBWRは、米国の確率論的なアプローチではなく、決定論的に閉塞の可能性を排除する対策としている**
 - 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たECCSストレーナ閉塞検討当時、当時実施されていたLos Alamos 国立研究所の試験にて、ケイ酸カルシウムと繊維との混合ベットが大幅な圧損上昇を引き起こす知見が得られていたため、新たな知見反映として、当時より繊維質は可能な限り撤去するとの方法を選択していたこと
 - 加えて、ストレーナ大型化の設計は、繊維質による薄膜形成を前提としたストレーナ表面積確保を原則としており、非常に大きなマージンを持たせたこと
 - 下流側影響として、燃料フィルタに対する圧損試験においても問題のないことが確認されていること

上記の前提では、LOCA時のストレーナ閉塞等に起因したリスクは増加しないため、リスク評価を実施する必要はない

13

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異物による炉心への悪影響に関しては、繊維質を考慮した保守的な条件での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】Defender 前回圧損試験結果（平成24年8月意見聴取会時）

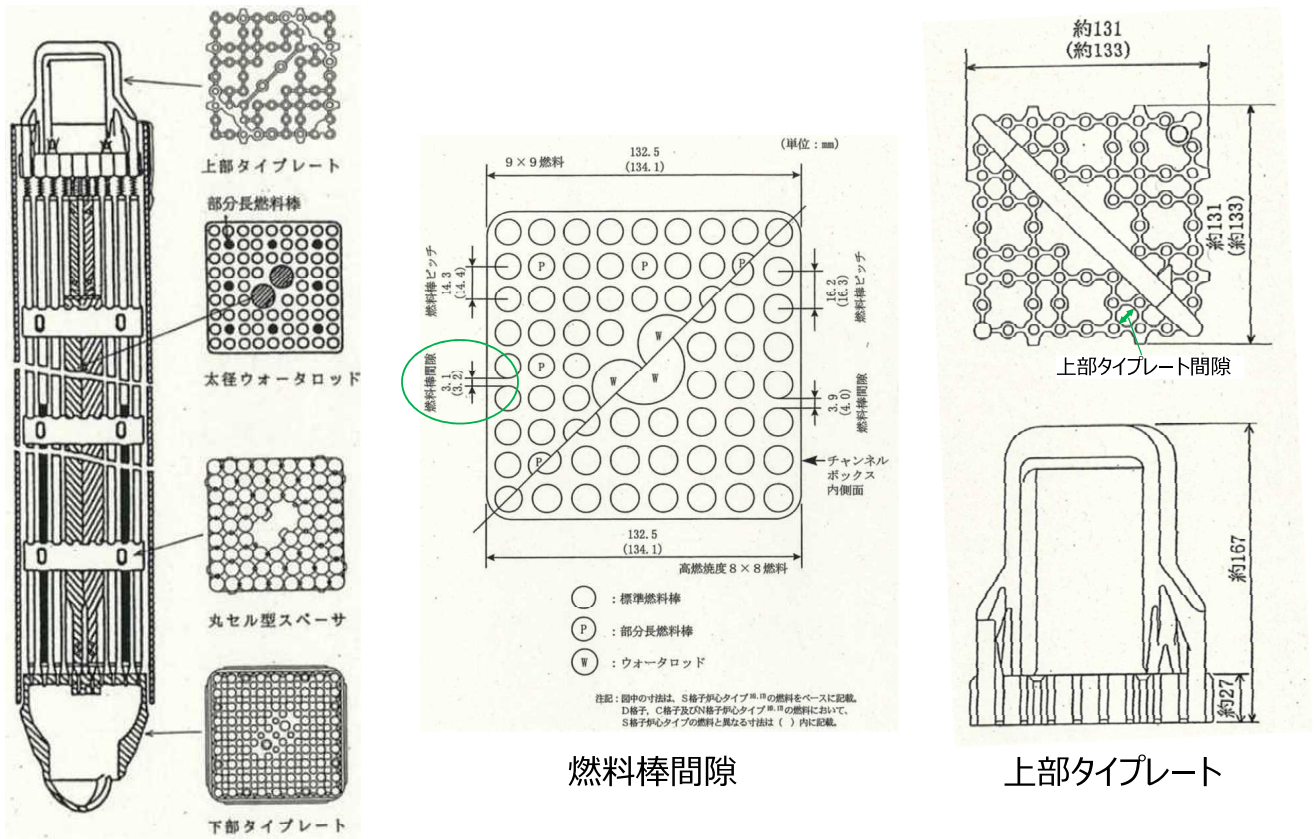
【試験結果※】

- ・異物投入後、局所圧力損失は [] 程度（流量 []）
- ・実機冷却材流量は [] 程度となり、LOCA発生後の冷却を行うために必要な流量 [] は確保される

※平成24年8月
意見聴取会資料より

⇒今回新たにご説明した本文中の試験についても、上記試験より圧力損失が低いことから、LOCA発生後の冷却を行うために必要な流量は確保されると考える

【参考】9×9燃料A型 構造図



「GLR-001 沸騰水型原子力発電所 9×9燃料について」 (GNF-J) より

【参考】化学影響を考慮した場合の圧損試験データ(1/4)

BWR事業者のストレナ試験(東京電力HD 7号機のSA条件での試験の例)
 ● プラントの状況調査を踏まえたSA時に想定される異物量によるストレナの試験を実施しており、SA時においてもストレナが閉塞しないことを確認している(K7設工認で説明済み)

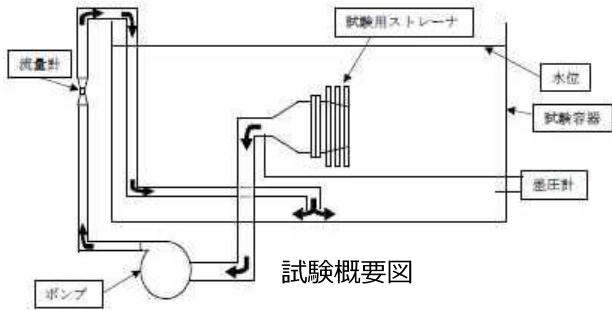
【試験条件】

		試験量	試験量根拠
DBA時発生異物 (SA含む)	繊維質		厚さ0.3mm相当量 (すべて撤去しているため実量は0kgとなるが、設工認でNEDO-32721評価式を用いるために設定)
	ケイ酸カルシウム		内規のZOI・移行割合に基づいて、格納容器調査より設定
	金属		DBA時の環境に曝される全量
	非DBA塗料		内規より設定
	スラッジ		
	耐DBA塗料(ジェット破損分)		
	錆片		
SA時発生異物	耐DBA塗料(SA環境剥落分)		SA時の環境に曝される全量
	化学影響生成異物(AIOOH)		WCAP-16530-NP等により算出

【参考】化学影響を考慮した場合の圧損試験データ(2/4)

【試験内容】

- ① 化学影響生成異物(化学異物)以外の物質を投入して循環運転を実施
- ② 化学異物を追加投入して再度循環運転を実施
- ①、②それぞれの運転中に圧損を測定し、異物による影響を確認



試験概要図



繊維質



耐DBA塗料



ケイ酸カルシウム

枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

19

【参考】化学影響を考慮した場合の圧損試験データ(3/4)

【試験結果】

- ① 化学異物を投入する前の循環運転
- ⇒化学異物投入前の異物条件では、ストレーナの圧損がほとんど上昇しない



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。

20


【参考】化学影響を考慮した場合の圧損試験データ(4/4)

【試験結果】

②化学異物を投入した後の循環運転
⇒圧損上昇は許容範囲内に収まっており、化学異物が混在していても、ストレナーナの性能への影響は小さいことを確認



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。

21

【参考】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ベ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

22