

# 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. 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ーナ閉塞事象を踏まえ、BWRプラントにおいてストレ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ストレーナ閉塞評価を進めていたが、当時、米国側はPWRサンプ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にした



- 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ストレナへの移行量を評価
  - ✓ ECCSストレナ閉塞による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ストレナが1/8inch繊維薄膜を形成するまでの間は、ストレ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



- これまでのストレナ対応の際に、同様のリスク評価を実施しECCSストレ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ストレナ閉塞検討において、NUREG/CR-6224<sup>※1</sup>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<sup>※2</sup>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)

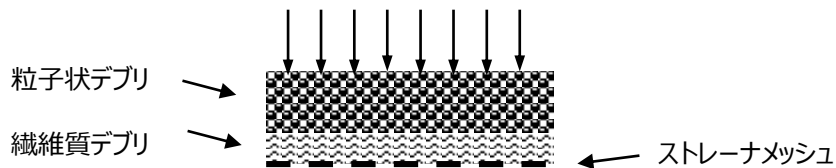


図1 薄膜形成による粒子状デブリの捕捉効果のイメージ

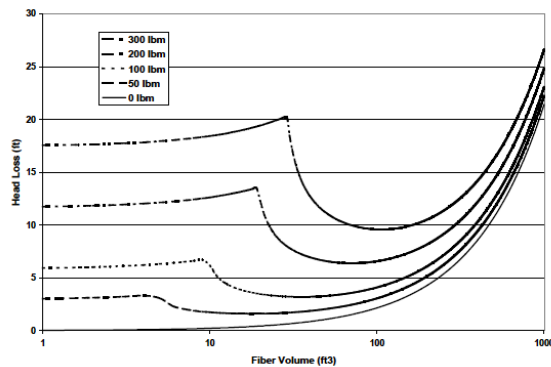


Figure 7-2 Head Losses vs Fiber Volume for Fixed Quantities of Particulate  
(Predictions assumed LDFG insulation debris, dirt particulate, 200°F, 100 ft<sup>2</sup> of screen area, and 5,000 GPM flow.)

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)



図3 LA-UR-04-1227の試験後の写真

※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

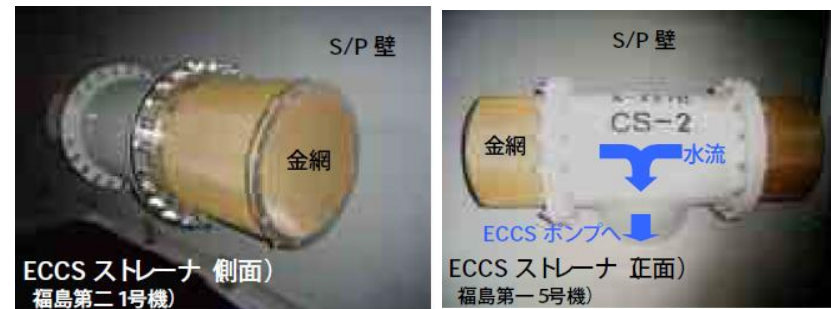
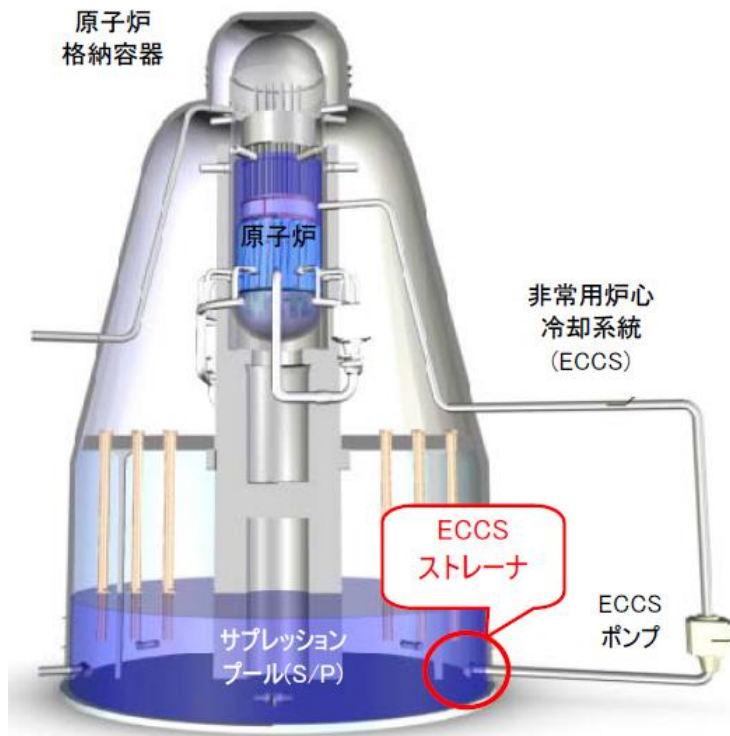
		東北 (女川2)	東電 (KK7)	中部 (浜岡4)	北陸 (志賀2)	中国 (島根2)	原電 (東海2)	電発 (大間)
型式		BWR-5 /Mk-1改	ABWR /RCCV	BWR-5 /Mk-1改	ABWR /RCCV	BWR-5 /Mk- I 改	BWR-5 /Mk- II 改	ABWR /RCCV
一般保温材 (繊維質) [m <sup>3</sup> ]	過去の報告値 <sup>※1</sup>	38	0	126	0	117	12	—
	現状または計画値	0 <sup>※2</sup>	0	0 <sup>※2</sup>	0	0 <sup>※2</sup>	0	0

※1 「非常用炉心冷却システムストレ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ストレナーの大型化

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



ECCSストレナー取替前 (例)



ストレナー大型化 (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


- \*1 K-7実機における繊維質保温材はゼロであるが、設計条件及び試験条件では保守的にストレーナ表面に3mm厚さ相当の量を想定する。
- \*2 RHRデブリ量はHPCFの約30%増となり、より厳しい条件であることから、試験ではRHRのデブリ条件にて実施し、流量をRHR流量からHPCF流量に変化させる。

## (4) 試験結果



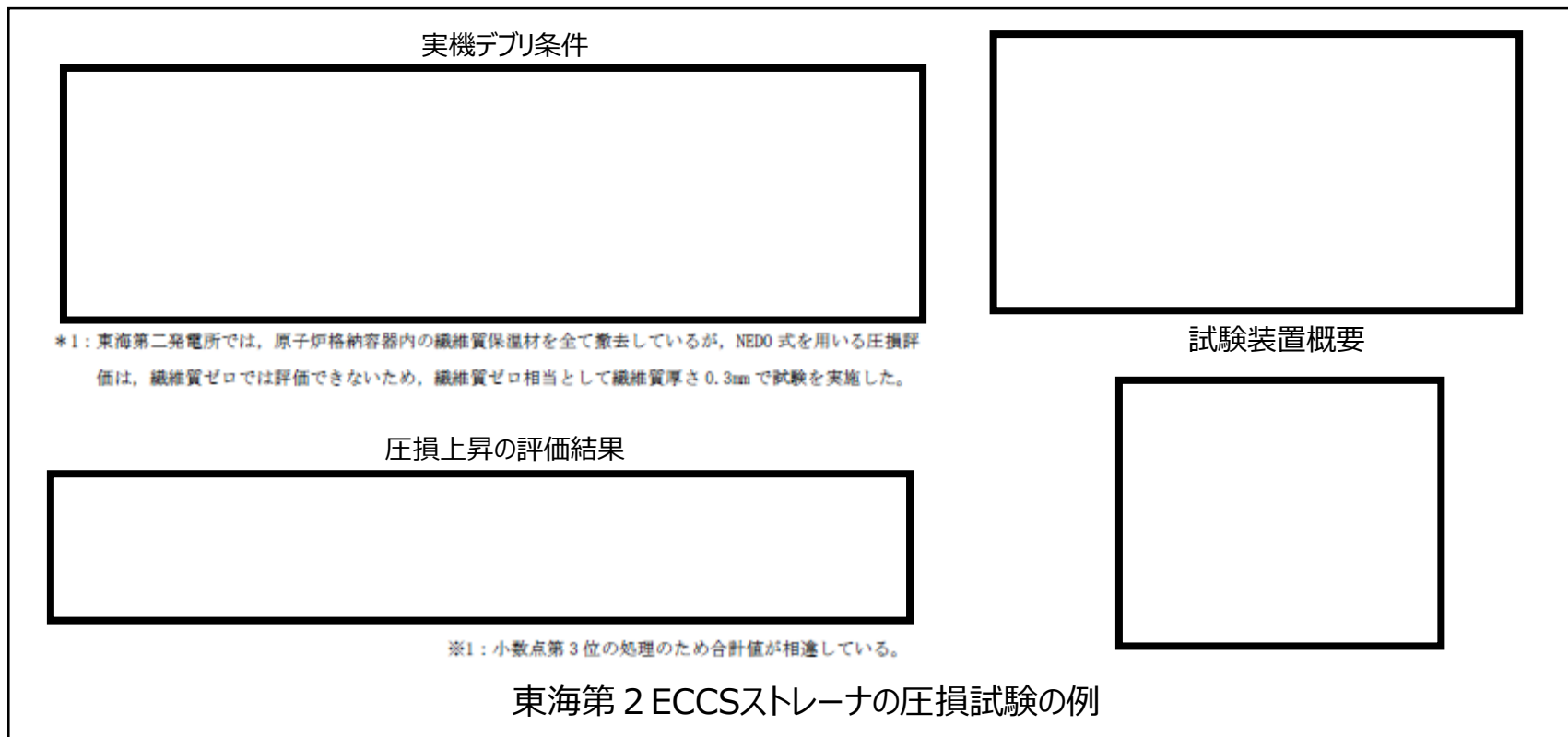
試験結果がNEDO-32721式による予測値以下であることから、本ストレーナの性能が良好であることが確認された。

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ストレナの健全性に影響がないことを確認している



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)

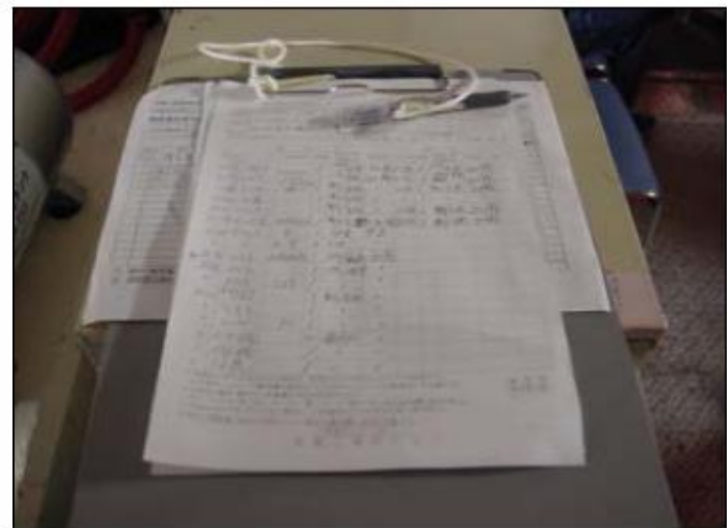
- 原子炉格納容器内の清掃、異物管理は現在以下のように実施しており、今後とも継続して実施する

### サブレッション・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ストレーナ報告徴収回答に合わせ、既設ストレー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) を用いてストレー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



- 手法は、米国BWROGと類似
- 現状の「繊維質撤去+ストレーナ大型化+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、シール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

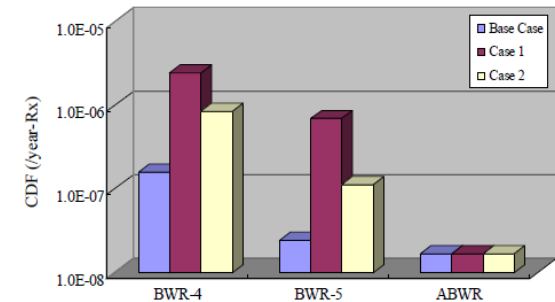


Figure 4. Results of PRA considering ECCS strainer blockage

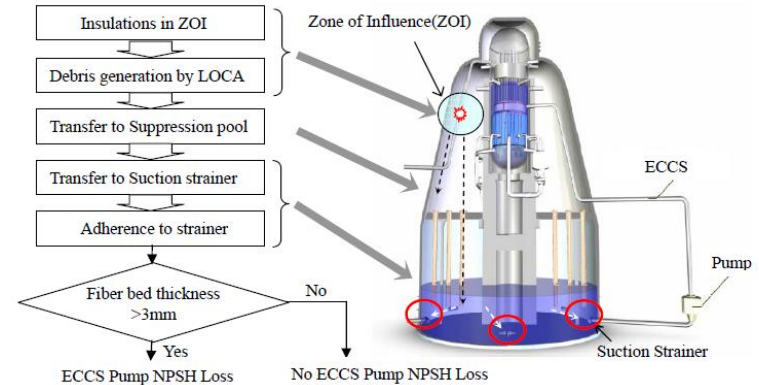


Figure 3-2. Basic concept of probabilistic evaluation of NPSH loss by using the DET Model

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)

- ストレー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>

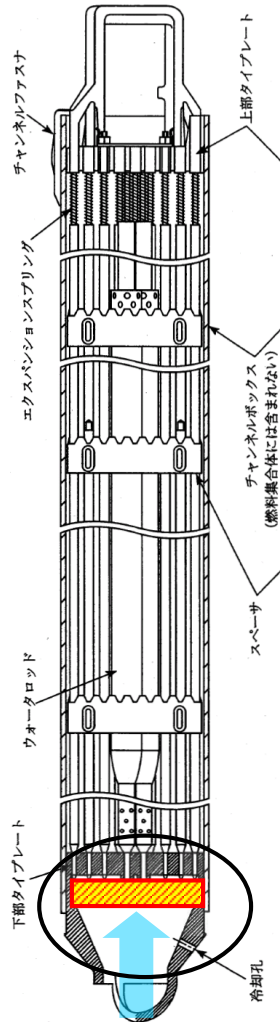
### <コメント回答の概要>

- 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

