

格納容器内塗装の LOCA 後の長期 ECCS 性能への影響(案)

令和 3 年 9 月 9 日

技術基盤課

1. 目的

本報告の目的は、第 44 回技術情報検討会(2021-01-27)にて、2 次スクリーニングに進めることになった IRS8949/Part 21 2014-76「AP1000 プロジェクトにおける配管サポート塗装の逸脱」[1]について、さらなる調査・分析を行うことと、対象を PWR と BWR に拡大して、格納容器内塗装の LOCA 後の長期 ECCS 性能への影響に関する米国と国内の規制動向を整理することを通じて、IRS8949/Part 21 2014-76 を要規制対応技術情報であるかないかの観点で、スクリーニングすることである。

2. IRS8949/Part 21 2014-76

本件は、米国ボーグル 3、4 号機(AP1000、1117 MWe)と VC サマー2、3 号機(同)¹において、安全ハザードをもたらす可能性のある欠陥が見つかったことを報告(Part 21 報告、2015 年 1 月)するものである。具体的な欠陥は、格納容器内に設置される非安全系配管サポート部材(4 基計 2800 カ所以上)の塗装に、本来使用されるはずの下塗不要高固形分エポキシ樹脂(SPHSE)ではなく、無許可の無機亜鉛が使用されていたこと。このような不適合塗装材は、設計基準事故(DBA)である冷却材喪失事故(LOCA)時に、破断部からの噴出流体によって剥がれ落ち、異物となってサンプに流れ込み、サンプを水源とする長期再循環冷却性能に影響する可能性がある。

この可能性は既知であり、米国規制ガイド RG1.82「LOCA 後の長期再循環冷却用水源」[2]には、PWR のサンプ又は BWR のサプレッションプールの長期冷却水源としての適切性や利用可能性を評価するためのガイドラインが示されている。セクション 1.3.5「塗装材異物」には、認可取得者がプラントごとに以下の塗装材の影響評価を行うことを要求している。

- 認可取得者は、塗装材影響評価のために、適切な試験やプラントごとの解析で得られた破損影響範囲(ZOI)を用いなければならない。試験に用いた流体(蒸気、空気、二相流)はプラント条件を代表するものでなければならない。
- 無認証塗装材は、100%剥がれると想定しなくてはならない。ただし、認可取得者がプラントごと、塗装材ごとの試験により、無認証塗装材の性能を実証してもよい。
- 認可取得者は、格納容器内の各塗装材に対して、剥がれて異物となったものの特性(サイズ、形状、密度等)を特定しなければならない。
- 認可取得者は、プラントごとの塗装材タイプに適用可能な範囲で、NUREG/CR-6916「塗装材異物の水力移行」[3]の結果を使って、格納容器内の水の流れに乗って運ばれる塗装材異物(かたまり)の移行特性を求めてもよい。

¹ 2017 年 7 月に建設が中止され、2019 年 3 月に建設・運転一体許認可(COL)が停止された。

AP1000 では、その標準設計認証図書(DCD)のセクション 6.1「工学的安全施設の材料」[4]において、RG1.54「原子力発電所に適用されるサービスレベル I、II、III と許認可更新向け保護用塗装材」[5]に従って、用いられる塗装材のサービスレベル分類を行っている。サービスレベルの定義と分類される AP1000 格納容器内の塗装部位と下地、塗装材、機能と安全分類は、以下の通りであり、格納容器内の非安全系配管サポート部材は炭素鋼製であり、塗装材は下塗不要高固形分エポキシ樹脂(SPHSE)とされている。

| サービスレベル定義 | 塗装部位 | 下地 | 塗装材 | 機能 | 安全分類 |
|---|--------------------|--------|------------|-----------------------------|------|
| I: 格納容器内の塗装で、その不良が DBA 後の流体系の動作に悪影響を及ぼし、安全停止を損なうおそれがあるもの。 | 内表面(オペフロ 7 ft より上) | 炭素鋼 | 無機亜鉛 | 濡れ性 熱伝達 分離不能 腐食抑制 | 安全 |
| | 内表面(オペフロ 7 ft より下) | 炭素鋼 | エポキシ表層無機亜鉛 | 分離不能 腐食防止 | 安全 |
| II: その不良が通常運転性能を損なうが妨げにはならない塗装。レベル II の塗装の機能は、腐食防止と格納容器外で照射されたり、放射能汚染されたりする区画の下地材の除染性を向上させること。レベル II の塗装は、安全関連ではない。 | 壁、天井、床 | コンクリート | SPHSE | ほこり防止 化学保護 除染性 熱伝達 | 非安全 |
| | 鉄板、天井内張、鉄床、柱、梁、筋交等 | 炭素鋼 | SPHSE | 腐食防止 除染性 熱伝達 | 非安全 |
| III: 格納容器外で使用される塗装で、その不良が安全関連 SSC の安全機能に悪影響するおそれがあるもの。 | 非該当 | 非該当 | 非該当 | 非該当 | 非該当 |

さらに、同セクションでは、格納容器内で用いる塗装材(エポキシ樹脂と無機亜鉛)に対する安全評価を行っている。主要なものは以下の通り。

- オペフロ 7 ft より上の内表面の無機亜鉛塗装は、事故後の格納容器内部の熱を格納容器胴に伝達するのを促進するものである。静的格納容器冷却系の試験や解析は、無機亜鉛塗装を前提としている。無機亜鉛塗装材は、サービスレベル I に分類される。
- SPHSE を含むエポキシ樹脂は、コンクリート内張り上の無機亜鉛の表層として、また、炭素鋼の直接塗装として用いられる。エポキシ樹脂塗装の故障モードは、塗装が不適切なことによる層間剝離やはがれである。
- これらのエポキシ樹脂は密度が高いので(乾燥膜密度 $>100 \text{ lb/ft}^3 (1.6 \text{ g/cm}^3)$)、AP1000 格納容器内の事故後の水流にのって、塗装材異物が移行する量は限定的である。そもそも、LOCA 時の格納容器内最大水位以下で、水流が高いと見込まれる領域で使用されている塗装材は、十分に重いことが要求されている(乾燥膜密度 $>100 \text{ lb/ft}^3$)。
- 塗装材の密度が 100 lb/ft^3 以下の場合には、試験／解析を行って、塗装材異物が AP1000 のスクリーンに移行しないこと、もしくは、破断口から炉心に入り込まないことを実証しなければならない。この試験／解析は、NRC 承認を要する。

- さらに、無機亜鉛は、通常運転条件下でエポキシ塗装の使用温度上限を超える表面にかかるとはできない。また、無機亜鉛は水流によって移行しやすいので、LOCA 時にはがれないよう、サービスクラス I かつ安全分類として取り扱わなくてはならない。

なお、同 DCD のセクション 6.3「静的炉心冷却系」[6]には、RG1.82 に沿った LOCA 後の長期再循環冷却能力への影響評価が示されている。異物評価は、以下のように記述されている。

- AP1000 の LOCA では、断熱材の破損により繊維質の異物は発生しない。クラス 1 配管まわりに使用される断熱材はステンレス鋼カプセル型であるため。
- 評価した異物源は、格納容器内に内在する繊維と粒子であり、設計、位置、格納容器清掃プログラムを考慮した。
- それら異物の特性は、運転プラントからのサンプリングにもとづく。
- 化学物質（沈殿）の発生も考慮した。
- 異物発生評価には、格納容器内で使用される材料、LOCA 後の水化学、適用可能な調査や試験を考慮した。
- さらに、LOCA の噴出流が塗装材に衝突し、発生する可能性のある塗装材異物粒子を考慮した。その異物は小さいため、水流によって移行する。
- 低温側配管や原子炉容器直接注入配管の両端破断時に発生する塗装材異物粒子量は、最大 70 lb (32 kg) である。なお、評価に用いた ZOI は、エポキシ樹脂に対しては 4 ID²、無機亜鉛に対しては 10 ID である。
- なお、高温側配管の両端破断ではさらに多くの塗装材異物粒子が発生する可能性があるが、そもそも AP1000 格納容器内には繊維質がほとんど用いられていないので、塗装材異物粒子の発生量は問題にならない。

ところで、IRS8949/Part 21 2014-76 が報告しているのは、建設中プラントの格納容器内の非安全系配管サポート部材で使用されている塗装材の調達不適合である。原因は、発注元の調達仕様書の誤りであり、根本原因は DCD に記載された AP1000 特有の塗装材仕様を誤解したためと推測される。事業者の調達マネジメントに課題があった。

3. 米国規制動向[7]

NRC の一般安全課題-191 (GSI-191)「PWR サンプポンプ性能に関する異物蓄積の評価」(2001 年 9 月)は、PWR において LOCA 後に ECCS サンプストレーナに蓄積する異物が ECCS 性能を劣化させる可能性(課題)を指摘するものである。この課題に対応するために、全 PWR 事業者は自プラントの設備や運転に改善を施した。2004 年 9 月の GL2004-02「DBA 時の PWR 非常用再循環における異物閉塞の潜在的影響」[8]は、事業者に、こうした改善の妥当性を見極めるために処置とその評価をまとめることならびに、ストレーナを通過し、炉内影響をもたらす可能性のある異物に関する技術課題に対応することを要求した。

² 破断を想定した配管の内径。4 ID は、その内径の 4 倍の意味。

2012年7月のSECY-12-0093「GSI-191 終結オプションーPWR サンプ性能に関する異物蓄積の評価」[9]では、事業者に GSI-191 を終結させるために、3つのオプション³を提案した。これらのオプションを用いて、2017年までに21のPWRが、WCAP-16793-NP-A, Rev. 2「再循環流体中の粒子状・繊維質・化学異物を考慮した長期冷却の評価」[10]を用いて、GL2004-02を終結している。残りの44のPWRは、主に炉内影響に対して、確定論もしくはリスク情報を活用した評価を用いて、GL2004-02に対応する意思を表明している。

炉内影響は、GSI-191にはもともと含まれていなかったが、広範囲の試験や評価を必要とする課題である。プラントごとに異なるこの課題に対して、PWR オーナーグループ(PWROG)は、2015年7月にトピカルレポート WCAP-17788「GSI-191 終結に向けた包括的解析・試験プログラム」[11]をNRCに提出した。トピカルレポートのレビューは完了していないが、多くのエビデンスから、NRC スタッフは、「炉内影響は総じて安全重要度が低く、もはや、WCAP-17788 はレビューの対象ではない」と結論付け、2019年6月に、「炉内異物影響の技術評価報告書」[12]をまとめた。例えば、発生確率が相対的に高い小口径配管破断を想定した場合、もっとも繊維質異物が多いプラントでも、構造的に炉内影響が緩和されている。発生確率が相対的に低い大口径配管破断時は、例え、炉心入口部の閉塞が起こったとしても、炉心バレルのバッフル領域を通る流路パスのおかげで、安全影響度は低い。

同年7月にNRC スタッフはNRCに対してGSI-191の終結を提案した[13][14]。NRCは同月、認可取得者は必要な是正処置を全て取り込んでおり、NRCスタッフがそれらの取り組みを確認していることから、GI-191⁴を終結した[15]。今後は、未対応プラントごとにGL2004-02対応状況を確認する。

BWRに対しては、NRCと原子力産業界は、サンプストレーナの異物閉塞問題を解決するために研究と試験を1992-2001年に行った。その間、NRC スタッフは、BL95-02「サプレションプール冷却モードで運転中の余熱除去系(RHR)の予期しない閉塞」[16]とBL96-03「BWRのECCS サクション・ストレーナの異物による閉塞の可能性」[17]を発行した。どちらのBLも、LOCA中に発生する異物がECCS サクション・ストレーナを閉塞させないような措置に言及している。試験、解析、改造(ストレーナ更新含む)を実施した後、全BWR事業者は要求された措置に十分に対応したとNRCは結論付けている。2001年10月に、NRC スタッフは、この結論を「BL96-03とBL95-02のスタッフレビューの完了」[18]として図書化した。

その後、上記のPWRと同様な課題(炉内影響)について検討が行われ、2008年4月に、NRCはレター「BWRのECCS ストレーナに関する潜在的課題」[19]を送付し、BWR オーナーグループ(BWROG)に、更新された知見をもとに閉塞問題に取り組む包括的プランを立てることを勧

³ オプション1: 解析、ストレーナ圧損試験と炉内影響に対して許認可モデルを使って、10CFR50.46「軽水炉のECCSに対する許容基準」適合を証明する。オプション2: グレーデッドアプローチであり、プラント内の繊維質断熱材の量に応じて、事業者の措置と工程が異なる。解析や改造を行ってもストレーナ閉塞もしくは炉内影響が解決できない場合に緩和手段や代替策を取ってもよい。オプション3: ストレーナと炉内影響に対して異なる取扱いをする。ストレーナ閉塞に対しては確定論的方法で扱い、炉内影響に対してはリスク評価を用いる。

⁴ NRCの一般課題管理システム上では、GSI-191ではなくGI-191と表記されている。

めた。同レターの中で NRC は、LOCA 後の異物に関連する ECCS の課題に対して、従前の BWR 解決策が十分に保守的(適用可能)であることを評価すべきと述べている。

BWROG は、自主的活動として、特定された 12 の課題(下記)に対して、RG-1.174「許認可ベースに対するプラントごとの変更におけるリスク情報を活用した意思決定に確率論的評価(PRA)を用いたアプローチ」[20]等を用いて評価し、2017 年 11 月に、BWROG 17-3-381 r0「BWR の ECCS ストレーナ性能に関する潜在的課題に対する最終報告」を発行した[21]。

| 課題名 | 懸念 | リスク評価 |
|---------------------|---|--|
| 1. 下流側影響 (機器、系統) | 異物がストレーナを通り抜けることによる下流側コンポーネントの腐食、摩耗、閉塞のより厳格な評価をすべきである。 | 決定論的方法と合わせて、リスクベースアプローチで取り組んだ。 |
| 2. 下流側影響 (燃料、炉内) | BWR 燃料に対する潜在的異物の下流側影響に関する評価書がない。 | リスク情報を活用した方法で取り組んだ。 |
| 3. 異物圧損相 関 | ①②に関する相関を用いた圧損予測式の信頼性に懸念がある。①多孔質異物及びケイ酸カルシウム断熱材。②繊維質/粒子からなる薄い異物ベッド。 | 解析手法では、1/8 インチ(3.2 mm)厚 ¹ の異物ベッドを評価しているが、圧損予測に相関式の信頼性は考慮していない。実施に仮定した厚さは 1/4 インチ(6.4 mm)に近いので、相関式の信頼性を考慮しなくても、十分に保守的である。1/8 インチより薄い多孔質又はケイ酸カルシウムの異物ベッドが、相対的に高い圧損を与えることは知られており、リスク評価では、ストレーナ不良確率にその薄い異物ベッドを加味した重みファクタを与えている。 |
| 4. 化学影響 | ストレーナや下流側コンポーネントにおける圧損に、腐食生成物を含む化学的環境を考慮すべきである。 | 上記 3. の基準を使用することで、化学影響の圧損への効果は簡素化されている。つまり、異物層が 1/8 インチ以下ならば、化学影響はほぼ無視できる。1/8 より厚い場合は、有効吸込水頭(NPSH)の問題でストレーナ不良(ECCS 能力喪失)となる。よって、化学影響はリスク評価のみで取り組んだ。 |
| 5. 塗装評価 | BWR における非認証の塗装材の使用量が、①②の理由で従前のストレーナ異物検討で算出した量より大きい懸念がある。①: 塗装材の劣化や認証塗装材の監視が十分ではない可能性。②非認証塗装材の変更に十分に対処していない可能性。 | ECCS ストレーナ不良の基準は、1/8 インチ繊維質異物だけであり、異物の中には、塗装材も含まれる。本課題は、保守管理プログラムに関する BWROG の調査対応の中で評価されている。 |
| 6. 潜在的異物 | BWROG の検討では、潜在的異物として粒子状のものを 150 lbm (68 kg) だけ想定している。PWR では、ウォークダウンにより潜在的異物に繊維質のものも含まれるとしている。繊維質のものを無視しているのは、非保守的ではないか。 | 解析手法で繊維質異物の影響を分析している。感度解析では、異物ベッドの形成の有無を判断するため、潜在的異物の 15%を繊維質と仮定し、適切な ZOI を仮定し、全量、ECCS ストレーナに流れ込むとしている。潜在的異物の量は、プラントごとの値か、150 lbm のどちらかを採用している。 |

| 課題名 | 懸念 | リスク評価 |
|---------------------|--|--|
| 7. 空気噴出試験向けの ZOI 調節 | BWROG の ZOI 検討では、空気を用いた試験をベースにしている。空気より蒸気の方が破壊的なので、ZOI を大きくする必要があるのではないか。 | 本課題は NRC スタッフと一緒に解決済みであり、破壊圧力に違いはない。しかし、解析手法の感度解析では、本課題と 12 番に対して ZOI 直径を 10% 拡大している。これにより、容積は 33% 増え、断熱材の多孔質異物及びケイ酸カルシウムをより加えるようにしている。 |
| 8. 塗装材の ZOI | PWR では高エネルギー配管破断による認証塗装材の破壊を ZOI の根拠としているが、BWR では総じて 85 lbm (39 kg) としている。十分に保守的とは言えないのではないか。 | NRC は、2013 年 11 月に BWR 塗装材に影響する破壊圧力と ZOI が適当であることを認めている[22]。 大量の異物捕捉による ECCS ストレーナ不良の基準は 1/8 インチ繊維質異物ベッドのみであるが、その中に、ZOI 内の塗装材異物は含まれている。 |
| 9. 異物の移行と腐食 | 2 つの懸案事項：①PWR と BWR で使用している異物サイズ分布には違いがあり、十分な技術的根拠がない。②異物の腐食に関する相違も調和されるべきではないか。 | 解析手法では、繊維質異物の腐食の増加も考慮している。もともと腐食していない低密度ファイバークラスの 25% が全て 3 時間で腐食している。 感度解析では、異物がサプレションプールに移行する時間は最初の 60 秒と 10 分としている。増加した腐食量の影響を調べるために、異物移行量を多くした感度解析も行っている。 |
| 10. 異物の特性 | ケイ酸カルシウム断熱材や多孔質断熱材の閉塞力について保守的に取り扱われていない懸念がある。最近の PWR の試験では、有意な圧損増加が指摘されている。 | 従前の圧損評価方法は、異物特性に依存していたが、1/8 インチ繊維質異物ベッドの評価によって、異物特性の扱いは簡素化されている。 |
| 11. 相似性 | BWR ストレーナ試験で定着する異物量が、実機の LOCA 後に発生する量と同等以下であるか、解析と整合していることを確認する必要がある。 | リスク評価では、定着する異物を想定していない (ストレーナに移行しない異物) |
| 12. 球形 ZOI | 球形 ZOI は、その領域内のデブリ量を最大に見積もる一方で、少量でも問題のある異物 (多孔質やケイ酸カルシウム) を除外する必要がある。それら異物が、球形 ZOI の外側にあるが、現実的な流体の噴出範囲にある場合はないか。 | 解析手法の感度解析では、7 番と本課題に対して ZOI 直径を 10% 拡大している。これにより、容積は 33% 増え、断熱材の多孔質異物及びケイ酸カルシウムをより加えるようにしている。 |

*1: 1/8 インチ (NRC レビュー済) は、全てのストレーナ表面を均一に 1/8 インチの厚さで覆うに必要な繊維質の装荷量を ECCS 能力の判定基準したことによる。1/8 以下の厚さの異物なら、ECCS ポンプ吸込み力で分解するので、ECCS ストレーナが閉塞したり、ストレーナ下流側の機器が影響を受けることで、ECCS 性能が喪失する可能性が低いことが示されている。

この最終報告の中で、BWROG は、12 の課題は BWR に対して低いリスクしかもたらず、従来の設計方法や設計根拠に変更は不要であり、RG-1.174 に従った評価でも、炉心損傷頻度を高めるような課題はないことから、さらなる措置は必要ないと結論付けている。

NRC スタッフも、BWROG 報告を評価し、特定された課題の影響のリスク重要度は低いと結論付けた。なお、この結論は、従前に完了している ECCS ストレーナのサイズと設計の改善を担保としている。一方で、BWROG の評価は BWR 一般に対するものなので、プラントごとの許認可変更要求 (LAR) に対しては使用できない可能性がある。これらの結論は、2018 年 6 月に NRC レター「ECCS 性能に関する潜在的課題の終結」[23]として BWROG に通知された。

4. 国内の状況

国内においても、技術基準規則解釈[24]において、以下のように非常用炉心冷却設備に係るろ過装置の材料及び構造、性能については、「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)」[25]への適合に言及している。

| | |
|-----------------|---|
| 第17条(材料及び構造) | 5 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材料及び構造については、第2号及び第9号の規定を準用するとともに、「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)」(平成20・02・12原院第5号(平成20年2月27日原子力安全・保安院制定))に適合すること。 |
| 第32条(非常用炉心冷却設備) | 3 第3項に規定する「想定される最も厳しい条件下」とは、予想される最も小さい有効吸込水頭をいい、非常用炉心冷却設備に係るろ過装置の性能については「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)」(平成20・02・12原院第5号(平成20年2月27日原子力安全・保安院制定))によること。 |
| 第44条(原子炉格納施設) | (原子炉格納容器熱除去装置) 17 第5号イに規定する「想定される最も厳しい条件下」とは、予想される最も小さい有効吸込水頭をいい、格納容器熱除去設備に係るろ過装置の性能については「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)」(平成20・02・12原院第5号(平成20年2月27日原子力安全・保安院制定))によること。 |

2008 年 2 月に制定された上記の内規は、ECCS のストレーナの閉塞に関わるストレーナの性能評価、ストレーナの大型化に伴う耐震性及び構造強度の評価を規定するものである。さらに、ストレーナの網目の粗さは、ECCS ポンプ下流のスプレイングル、ECCS ポンプシール部等、下流側機器の機能を損なうことのない設計であることを評価することを求めている。なお、ストレーナの大型化は、異物による閉塞問題に対応する有効な手段の一つで、国内外で採用されているものである。また、異物の炉内影響については言及されていない。

同内規のストレーナの性能評価は、LOCA 時に破損する保温材及び格納容器内に存在する他の異物がストレーナに付着することによる圧損の上昇を考慮しても、ECCS ポンプの NPSH が必要以上であることを確認することが目的である。そのために、次の評価方法を規定している。
①保温材の破損量評価、②破損保温材の ECCS 水源への移行量評価、③破損保温材以外の異物の ECCS 水源への移行量評価、④異物付着による圧損上昇の評価、⑤有効吸込水頭の評価。これらの評価方法は、米国の GSI-191 対応で検討されたものとほぼ同じである。

格納容器内の塗装については、上記③で評価される。内規では、以下のように規定され、これらも米国検討とほぼ同等である。

| 種類 | 定義 | BWR | PWR |
|------------|-------------------------------------|------------------------|-------------------------------|
| 耐 DBA 仕様塗装 | LOCA 時の原子炉格納容器内環境に対する健全性が確認されている塗装 | 39 kg | 半径 10D の球形 ZOI の表面積に塗膜厚さを乗じた値 |
| 非 DBA 仕様塗装 | LOCA 時の原子炉格納容器内環境に対する健全性が確認されていない塗装 | 格納容器内の事故時環境に直接晒されるもの全量 | |

内規等に基づき、DBA 時及び重大事故(SA)時に発生する塗装材を含めた異物量を算出し、算出された異物がストレーナに付着して圧損が上昇しても、ECCS ポンプの NPSH が必要以上であることを試験で確認した例を別紙 1[26]に示す。

ストレーナを通過した異物による炉内影響については、国内 BWR 事業者による取り組みにより、内規より保守的に算出した異物量を用いた燃料フィルタ圧損試験を実施して、燃料フィルタが閉塞することがないことを確認している[27]。さらに、全 BWR において、格納容器内の繊維質保温材の取換え撤去を計画しており、従来から実施している格納容器内の清掃あわせて、異物による炉内影響の有意なリスク増分はないとしている[28]。

国内 PWR 事業者は、原子炉圧力容器内熱流動解析を実施し、炉心入口流路の大半が閉塞しても炉心長期冷却が可能であることを確認するとともに、実機を模擬したデブリ投入試験による検証を実施している。今後、基礎試験の拡充や、バッフルバレルを模擬した流動試験等を行い、炉心長期冷却のシナリオ成立を確認していく[29]。

5. 今後の対応

2 次スクリーニング調査・分析を行った結果、IRS8949/Part 21 2014-76 は、格納容器内で使用されている AP1000 特有の塗装の調達不適合問題であることがわかった。原因は発注元の調達仕様書の誤りであり、根本原因は許認可図書に記載された AP1000 特有の塗装材仕様を誤解したためと推測される。

また、格納容器内塗装の LOCA 後の長期 ECCS 性能への影響に関する米国と国内の規制動向を整理した結果、両国とも、LOCA 時の噴出流で剥がれた塗装材を含めた異物が、ECCS ストレーナやサンプスクリーンに付着して、ECCS ポンプ性能が喪失しないよう事業者が措置を取ることを求め、両国でほぼ同様の評価方法を規定していることがわかった。

さらに、米国 NRC はストレーナ／スクリーンを通り抜けた異物による炉内影響を懸念していたが、オーナーズグループそれぞれの炉内異物影響の技術評価報告書等で、炉内影響による安全影響度は低いと結論付けられた。その結論を NRC も認めたことから、異物による長期 ECCS 性能影響問題は一般課題としては終結している。国内でも、異物による炉内影響は、事業者の自主的対応により評価されており、BWR においては有意な炉内影響がないことが示され、PWR においても原子炉圧力容器内熱流動解析が実施され、検証試験が計画されている。

よって、IRS8949/Part 21 2014-76 は、事業者による不適切な調達マネジメントに関するものであり、かつ、国内では建設されていないプラントに関することから、スクリーニングアウトとする。また、格納容器内塗装の LOCA 後の長期 ECCS 性能への影響の観点からも、既に ECCS ストレーナの性能評価に関する内規が発行され、異物の炉内影響に対しても既に国内事業者による

さらなる対応が行われ、規制庁がその対応状況をフォローしている[30]ことから、IRS8949/Part 21 2014-76 はスクリーニングアウトとする。

6. 参考資料

- [1] IRS8949/Part 21 2014-76, Part 21 Report Regarding Deviations of Coatings for Pipe Supports for AP1000 Projects, 1/20155, <https://www.nrc.gov/docs/ML1502/ML15027A425.pdf>
- [2] RG 1.82 Revision 4, WATER SOURCES FOR LONG-TERM RECIRCULATION COOLING FOLLOWING A LOSS-OF-COOLANT ACCIDENT, 3/2012, <https://www.nrc.gov/docs/ML1113/ML111330278.pdf>
- [3] NUREG/CR-6916, Hydraulic Transport of Coating Debris, A Subtask of GSI-191, 12/2006, <https://www.nrc.gov/docs/ML0702/ML070220061.pdf>
- [4] Westinghouse AP1000 Design Control Document Rev. 19, Tier 2 Chapter 6 – Engineered Safety Features – Section 6.1 Engineered Safety Features Materials, 6/2011, <https://www.nrc.gov/docs/ML1117/ML11171A457.pdf>
- [5] RG 1.54 Revision 3, SERVICE LEVEL I, II, III, AND IN-SCOPE LICENSE RENEWAL PROTECTIVE COATINGS APPLIED TO NUCLEAR POWER PLANTS, 4/2017⁶, <https://www.nrc.gov/docs/ML1703/ML17031A288.pdf>
- [6] Westinghouse AP1000 Design Control Document Rev. 19 - Tier 2 Chapter 6 – Engineered Safety Features – Section 6.3 Passive Core Cooling, 6/2011, <https://www.nrc.gov/docs/ML1117/ML11171A459.pdf>
- [7] NUREG-1650 Revision 7, The United States of America Eighth National Report for the Convention on Nuclear Safety, 10/2019, <https://www.nrc.gov/docs/ML1928/ML19289D687.pdf>
- [8] GL2004-02, POTENTIAL IMPACT OF DEBRIS BLOCKAGE ON EMERGENCY RECIRCULATION DURING DESIGN BASIS ACCIDENTS AT PRESSURIZED-WATER REACTORS, 9/2004, <https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/gen-comm/gen-letters/2004/gl200402.pdf>
- [9] SECY-12-0093, CLOSURE OPTIONS FOR GENERIC SAFETY ISSUE - 191, ASSESSMENT OF DEBRIS ACCUMULATION ON PRESSURIZED-WATER REACTOR SUMP PERFORMANCE, 7/2012, <https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/commission/secys/2012/2012-0093scy.pdf>
- [10] WCAP-16793-NP-A, Revision 2, Evaluation of Long-Term Cooling Considering Particulate, Fibrous and Chemical Debris in the Recirculating Fluid, 7/2013, <https://www.nrc.gov/docs/ML1323/ML13239A111.html>
- [11] WCAP-17788-NP, Volume 1, Revision 0, Comprehensive Analysis and Test Program for GSI-191 Closure (PA-SEE-I1090), 7/2015, <https://www.nrc.gov/docs/ML1521/ML15210A669.pdf>
- [12] NRC Staff Memorandum Enclosure, TECHNICAL EVALUATION REPORT OF IN-VESSEL DEBRIS EFFECTS, 6/2019, <https://www.nrc.gov/docs/ML1917/ML19178A252.pdf>
- [13] NRC Staff Memorandum, CLOSURE MEMORANDUM FOR GENERIC SAFETY ISSUE 191, 7/2019, <https://www.nrc.gov/docs/ML1915/ML19157A120.pdf>
- [14] NRC Staff Memorandum, CLOSURE OF GENERIC ISSUE GI-191, “ASSESSMENT OF DEBRIS ACCUMULATION ON PWR SUMP PERFORMANCE,” 7/2019, <https://www.nrc.gov/docs/ML1920/ML19203A299.pdf>
- [15] NRC, GENERIC ISSUE MANAGEMENT CONTROL SYSTEM REPORT FOR THE SECOND HALF OF FISCAL YEAR 2019, 7/2019, <https://www.nrc.gov/docs/ML1929/ML19291D891.pdf>

⁵ IRS8949 は国際機関との取り決めにより非公開のため、同内容の公開報告である Part 21 2014-76 を引用している。

⁶ RG 1.54 は、IRS8949/Part 21 2014-76 発行時には、Revision 2(10/2020)であった。

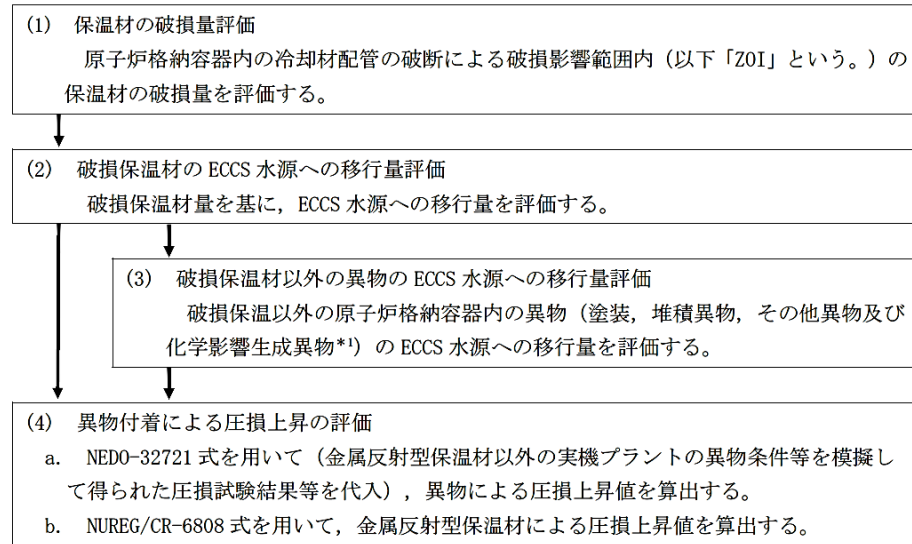
- [16] Bulletin 95-02, Unexpected Clogging of a Residual Heat Removal (RHR) Pump Strainer While Operating in Suppression Pool Cooling Mode, 10/1995, <https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/gen-comm/bulletins/1995/bl95002.html>
- [17] Bulletin 96-03, Potential Plugging of Emergency Core Cooling Suction Strainers by Debris in Boiling-Water Reactors, 5/1996, <https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/gen-comm/bulletins/1996/bl96003.html>
- [18] NRC Staff Memorandum, COMPLETION OF STAFF REVIEWS OF NRC BULLETIN 96-03, "POTENTIAL PLUGGING OF EMERGENCY CORE COOLING SUCTION STRAINERS BY DEBRIS IN BOILING-WATER REACTORS," AND NRC BULLETIN 95-02, "UNEXPECTED CLOGGING OF A RESIDUAL HEAT REMOVAL (RHR) PUMP STRAINER WHILE OPERATING IN SUPPRESSION POOL COOLING MODE," 10/2001, <https://www.nrc.gov/docs/ML0129/ML012970229.pdf>
- [19] NRC Staff Letter, POTENTIAL ISSUES RELATED TO EMERGENCY CORE COOLING SYSTEMS (ECCS) STRAINER PERFORMANCE AT BOILING WATER REACTORS, 4/2008, <https://www.nrc.gov/docs/ML0805/ML080500540.pdf>
- [20] RG 1.174, REVISION 3, AN APPROACH FOR USING PROBABILISTIC RISK ASSESSMENT IN RISK-INFORMED DECISIONS ON PLANT-SPECIFIC CHANGES TO THE LICENSING BASIS, 1/2018⁷, <https://www.nrc.gov/docs/ML1731/ML17317A256.pdf>
- [21] BWROG 17-3-381 r0, Final Resolution of Potential Issues Related to Emergency Core Cooling Systems (ECCS) Strainer Performance at Boiling Water Reactors, 11/2017, <https://www.nrc.gov/docs/ML1732/ML17326A393.pdf>
- [22] NRC Staff Letter, FEEDBACK ON BOILING WATER REACTOR OWNER'S GROUP DRAFT REPORT BWROG-ECCS-TA08-001 DOCUMENTING DAMAGE PRESSURE AND ZONE OF INFLUENCE FOR BOILING WATER REACTOR COATINGS, 11/2013, <https://www.nrc.gov/docs/ML1328/ML13280A347.pdf>
- [23] NRC Staff Letter, CLOSURE OF POTENTIAL ISSUES RELATED TO EMERGENCY CORE COOLING SYSTEMS STRAINER PERFORMANCE AT BOILING WATER REACTORS, 6/2018, <https://www.nrc.gov/docs/ML1807/ML18078A061.pdf>
- [24] 実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則の解釈、改正 令和2年1月15日、<https://www.nsr.go.jp/data/000297052.pdf>
- [25] 平成 20・02・12 原院第5号、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)、平成 20 年 2 月 27 日、<https://www.nsr.go.jp/data/000126301.pdf>
- [26] 東海第二発電所 工事計画審査資料、補足-270-6 改 3、工事計画添付書類に係る補足説明資料「圧力低減設備その他の安全設備のポンプの有効吸込水頭について」、平成 30 年 5 月 11 日、<https://www2.nsr.go.jp/data/000237151.pdf>
- [27] 第 16 回(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)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、<https://www.nsr.go.jp/data/000353830.pdf>
- [28] 第 14 回(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)新規制要件に関する事業者意見の聴取に係る会合、資料14-2-1「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、<https://www.nsr.go.jp/data/000336261.pdf>
- [29] 同上、資料14-1「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」、2020 年 12 月 7 日、<https://www.nsr.go.jp/data/000336258.pdf>
- [30] 第 47 回技術情報検討、資料47-1「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 事業者から意見聴取結果について」、令和 3 年 7 月 8 日、<https://www.nsr.go.jp/data/000358620.pdf>

⁷ BWROG が使用したときは、Revision 2(05/2011)であった。

非常用炉心冷却系ストレナの重大事故等時圧損試験について(参考資料[26]、補足 4 から抜粋)

1. 非常用炉心冷却系ストレナの異物付着による圧損上昇について

重大事故等時の非常用炉心冷却系（以下「ECCS」という。）ストレナの圧損評価においては、原子炉格納容器内の冷却材配管の両端破断による原子炉冷却材喪失事象を想定し、破断口から流出した冷却材により破損した保温材等がドライウェル（以下「D/W」という。）から ECCS 水源であるサブプレッション・プール（以下「S/P」という。）へ流入、代替循環冷却系ポンプの吸込流により ECCS ストレナに付着することに加え、サブプレッション・プールの pH 制御のために注入する水酸化ナトリウム水溶液と原子炉格納容器内構造物等との化学反応により新たに発生する異物（以下、「化学影響生成異物」という。）についても想定し、「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）（平成 20 年 2 月 27 日付け平成 20・02・12 原院第 5 号）（以下「内規」という。）を参考に、ECCS ストレナの圧損上昇の評価を行う。具体的な評価の手順を図 1 に示す。



*1: 化学影響生成異物は、Evaluation of Post-Accident Chemical Effects in Containment Sump Fluids to Support GSI-191 (Westinghouse WCAP-16530-NP (以下「WCAP」という。))に基づいて算出する。

図 1 ECCS ストレナの圧損上昇の評価の手順

2. ECCS ストレナについて

(1) 形式

円錐支持ディスク形ストレナ（アメリカ GE 社製）

(2) 構造と特徴

- ・ディスクを積層させることで、表面積を増加させている。
- ・円錐形の内筒の採用とディスク内径が軸方向で異なる構造により、ストレナ中心部での流速が一定に保たれ、全体として低圧損とすることができる。

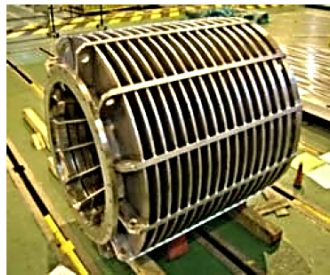


図 2 GE 社製ストレナ

3. ストレナの異物付着による圧損試験

(1) 試験の目的

GE 社製ストレナの実機プラント条件（デブリ条件）での実機模擬ストレナを用いた圧損試験を実施し、d 値（繊維質間距離）を求め、圧損評価式に基づき圧損上昇の評価を行う。

(2) 試験実施場所、試験立合者及び試験実施時期

試験実施場所 米国（ニュージャージー州）
 試験立合者 当社社員
 試験実施時期 2017 年 12 月 4 日～8 日

(3) 試験装置の概要

重大事故等時の圧損試験装置を図 3 に、主要仕様を表 1 に示す。試験用ストレナの表面積は、想定する異物量を考慮して、一部閉止処理（マスキング）を行っている（図 4 参照）。

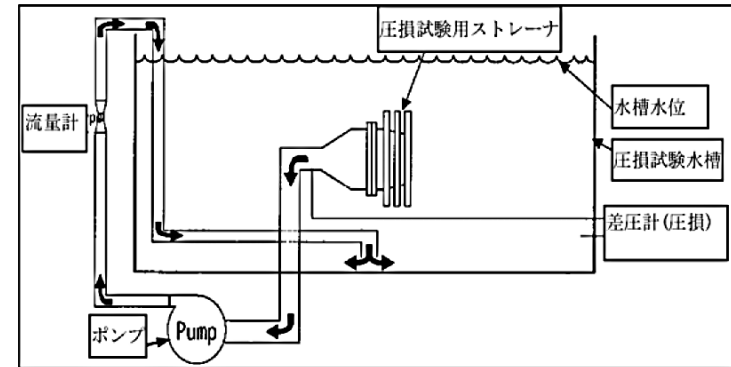


図 3 試験概要図

表 1 試験装置の主要仕様

| 項目 | 主要仕様 |
|-----------|--|
| プール寸法 | 直径 <input type="text"/> 深さ <input type="text"/> |
| プール容量 | <input type="text"/> |
| ポンプ能力 | <input type="text"/> |
| ストレナ直径 | <input type="text"/> |
| プレート穴径 | <input type="text"/> |
| プレート穴ピッチ | <input type="text"/> |
| ディスク間ギャップ | <input type="text"/> |



図 4 試験用ストレナ

本資料のうち、枠囲みの内容は、営業秘密又は防護上の観点から公開できません。

非常用炉心冷却系ストレーナの重大事故等時圧損試験について(参考資料[26]、補足 4 から抜粋)

(4) 実機プラント条件

a. 流量条件

重大事故等における各事象(有効性評価の事故シーケンスグループ)のうち、大破断 LOCA 時注水機能喪失時に S/P を水源として運転を行うポンプは、代替循環冷却系ポンプである。その運転時の通水流量は、250m³/h であるが、保守的な試験となるように、ストレーナの異物付着による圧損上昇評価に用いる ECCS ストレーナを通過する流量としては、ストレーナを兼用する残留熱除去系ポンプの定格流量(1691.9m³/h)を用いる。

表 2 ECCS ストレーナを通過する流量

| 系統設備 | 流量 |
|------------|-------------------------------|
| 代替循環冷却系ポンプ | 250 (m ³ /h) |
| 残留熱除去系ポンプ | 1691.9 (m ³ /h) *1 |

*1: 流量が大きいポンプを流量条件とした。

b. デブリ条件

重大事故等時において考慮する異物の種類及び量は、東海第二発電所の状況調査に基づき、内規を参考に設定している。実機のデブリ条件を表 3 に示す。

表 3 実機デブリ条件(ストレーナ 2 個に付着するデブリ量)

| DBA 時(或いは SA 時)発生デブリ | | | | | | | | SA 時発生デブリ | |
|----------------------|-------------------|-------------------|------|-----------------------|------|------|----------------------|-----------------------|-------------------|
| 繊維質保温材 | ケイ酸カルシウム | 金属反射型 | スラッジ | 耐 DBA 塗料片 (ジェット破損) | 錆片 | 塵土 | 非 DBA 塗料片 (耐性未確認) | 耐 DBA 塗料片 (SA 時考慮) | 化学影響生成異物 ALOOH |
| (kg) | (m ³) | (m ²) | (kg) | (kg) | (kg) | (kg) | (kg) | (kg) | (kg) |
| 0.708*1 | 0 | 500.0 | 89 | 39 | 23 | 68 | 350 | 3,500 | 6,200 |

*1: 東海第二発電所では、原子炉格納容器内の繊維質保温材を全て撤去しているが、NEDO 式を用いる圧損評価は、繊維質ゼロでは評価できないため、繊維質ゼロ相当として繊維質厚さ 0.3mm で試験を実施した。

(5) 試験条件

実機デブリ条件を模擬した圧損試験条件は、試験用ストレーナと実機ストレーナの表面積比率(スケーリング比)、D/W から S/P への移行割合等を考慮し設定している。試験条件を表 4 に示す。

表 4 圧損試験条件

| DBA 時(或いは SA 時)発生デブリ | | | | | | | | SA 時発生デブリ | |
|----------------------|-------------------|-------------------|-------|-----------------------|-------|-------|----------------------|-----------------------|-------------------|
| 繊維質保温材 | ケイ酸カルシウム | 金属反射型 | スラッジ | 耐 DBA 塗料片 (ジェット破損) | 錆片 | 塵土 | 非 DBA 塗料片 (耐性未確認) | 耐 DBA 塗料片 (SA 時考慮) | 化学影響生成異物 ALOOH |
| (kg) | (m ³) | (m ²) | (kg) | (kg) | (kg) | (kg) | (kg) | (kg) | (kg) |
| 0.0095 | 0 | 0 | 1.186 | 0.52 | 0.307 | 0.906 | 1.594 | 0.467 | 32.56 |

(6) 試験結果

圧損試験結果を図 5 に示す。この結果より NEDO-32721 評価式に基づき算出された d 値(繊維質間距離)は m となる。

なお、圧損の静定に十分な試験時間であることから、試験の再現性はあると考えられる。

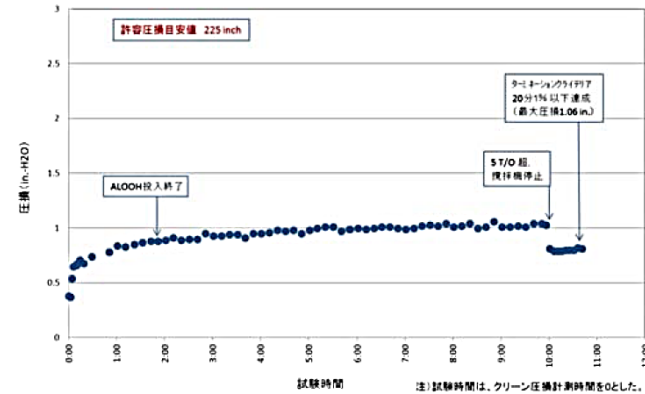


図 3-1 SA 時圧損試験結果 (ト-1) 繊維質付着厚さ 0.3mm 相当: 流量 1,691.9m³/h 相当 [96 GPM]

図 5 圧損試験結果

4. 圧損評価式及び圧損上昇評価結果

(1) 圧損評価式

圧損上昇評価は、考慮するデブリの種類に応じ表 5 の評価式を採用して行う。

表 5 適用する圧損評価式

| 適用する圧損評価式 | 考慮するデブリの種類 |
|---------------|--|
| NEDO-32721 | 繊維質保温材, ケイ酸カルシウム, スラッジ, 塗料片, 錆片, 塵土, 化学影響生成異物等 |
| NUREG/CR-6808 | 金属反射型保温材 |

(2) 圧損上昇評価結果

金属反射型保温材, 繊維質, 粒子状の異物及び化学影響生成異物による圧損値を合計した結果, ECCS ストレーナの異物付着による圧損値は表 6 に示すとおりである。

表 6 圧損上昇の評価結果

| | 代替循環冷却系ポンプ |
|------------------------------|-------------|
| 金属反射型保温材による圧損上昇 | 0.00 (m) |
| 繊維質, 粒子状の異物及び化学影響生成異物による圧損上昇 | 0.02 (m) |
| 合計 | 0.03 (m) *1 |

*1: 小数点第 3 位の処理のため合計値が相違している。

5. まとめ

圧損試験の結果, 異物による有意な圧損上昇は確認されず, 圧損上昇の最大値は 0.03m 程度であった。

本資料のうち、枠囲みの内容は、商業機密あるいは防護上の観点から公開できません