



高浜発電所3,4号炉 運転期間延長認可申請 審査会合における指摘／質問事項の回答

2024年3月7日
関西電力株式会社

審査会合における指摘／質問事項の一覧

No	日時	指摘／質問事項	回答頁
① 特別点検(コンクリート)	2023年 6月1日	遅延膨張性のアルカリ骨材反応の潜在性について説明すること。	2023年9月5日 回答済
② 共通事項	2023年 6月1日	社内規程に基づいてどのような体制で評価プロセスのチェックを行ったか説明すること。	2023年10月10日 回答済
③ 中性子照射脆化	2023年 6月1日	第5回監視試験で得られたデータについて、どのように分析して、特異な脆化が生じていないと考えたか説明すること。	個別事項説明時 別途説明予定
④ 照射誘起型応力腐食割れ	2023年 6月1日	3号炉の第9回定検で実施したバッフルフォーマボルトの超音波探傷検査について、具体的な方法、目的、適用規格等について説明すること。	個別事項説明時 別途説明予定
⑤ 特別点検(原子炉容器)	2023年 9月5日	炉心領域の超音波探傷試験(UT)の規格について、審査会合資料には3号炉はJEAC4207-2008、4号炉は2016との記載があるが、特別点検結果報告書では3・4号炉とも2008または2016となっている。実際に適用した規格を特別点検結果報告書に明記すること。	2023年10月10日 回答済
⑥ 特別点検(原子炉容器)	2023年 9月5日	渦流探傷試験(ECT)の検出性について、一次冷却材ノズルコーナ一部(1mm)と炉内計装筒(0.5mm)の違いを整理すること。(BMI確性試験の成績書を提示すること。)	2023年10月10日 回答済
⑦ 特別点検(原子炉容器)	2023年 9月5日	炉心領域の超音波探傷試験(UT)の試験範囲について、自主点検として中性子照射量が $1 \times 10^{17} \text{n/cm}^2$ を超える範囲まで拡大していることが分かる記録を提示すること。	2023年10月10日 回答済

審査会合における指摘／質問事項の一覧

No	日時	指摘／質問事項	回答頁
⑧ 特別点検(原子炉格納容器)	2023年 9月5日	壁面走行ロボットによる遠隔目視において、ロボットの走行による塗膜への影響がないこと、点検範囲を重ねて実施しているといった点検手順や内容が特別点検としての適切性を有していることを説明すること。	2023年10月10日 回答済
⑨ 特別点検(コンクリート)	2023年 9月5日, 10月10日	中性化深さの点検について、削孔時に切断水を使用しているかどうかについて確認し、切断水を使用している場合は、点検方法の適切性を説明すること。 中性化深さ測定における切断水について、コンクリート標準示方書では切断水を用いると正確な測定ができないと記載されている。切断水による測定への影響について説明すること。	P.4
⑩ 共通事項	2023年 10月10日	蒸気発生器取替に伴う影響確認実施を長期施設管理方針とするか検討すること	P.7
⑪ 絶縁低下	2023年 10月10日	モジュラー型電気ペネトレーションについて、審査会合資料で代表としている理由(劣化モード観点)、導入の経緯(知見に基づいての観点)を説明すること。	P.8
⑫中性子照射脆化	2023年 12月14日	第5回監視試験で得られた破壊靱性値のデータについて、どのように分析して特異な脆化が生じていないと考えたか説明すること。	P.10
⑬照射誘起型応力腐食割れ	2023年 12月14日	バッフルフォーマボルト材の割れ発生応力線について、説明を補足すること。	P.15
⑭コンクリートの強度低下及び遮蔽能力低下	2023年 12月14日	MOX燃料装荷後以降の中性子束を1.2倍して評価したとしているが、ガンマ線束についても1.2倍とする理由を説明すること。	P.21

審査会合における指摘／質問事項の一覧

No	日時	指摘／質問事項	回答頁
⑮コンクリートの強度低下及び遮蔽能力低下	2023年 12月14 日	取水構造物(気中帯)における鉄筋位置での塩化物イオン量について、1・2号炉が3・4号炉に比べて大きい理由を説明すること。	P.22
⑯コンクリートの強度低下及び遮蔽能力低下	2023年 12月14 日	30年目に中性化深さの評価を行っている外部遮蔽壁について、40年目の点検結果等を踏まえた評価結果を示すこと。	P.25
		以下余白	

⑨ 中性化深さ測定における水の影響要因と対応策について

■ 中性化試験における切断水の使用による影響要因の確認

コンクリート標準示方書[維持管理編]において、「コンクリートの切断に水を用いると正確な中性化深さが測定できない」と記載されている点について、当該記載に関与された学識経験者へ確認した結果、当該記載のもととなった文献および記載の解釈が確認できた。

2022年制定コンクリート標準示方書[維持管理編:標準附属書]

(p.106)1編劣化機構, 3章中性化と水の浸透に伴う鋼材腐食

中性化深さは、フェノールフタレイン溶液をコンクリート割裂面に吹き付けたときの非発色部分とし、コンクリート表面から発色部と非発色部の境界までの深さを数箇所求め、その平均値を中性化深さとする。測定は、コアを採取した後、速やかに行う必要がある。また、コンクリートの切断に水を用いると正確な中性化深さが測定できないので、割裂により測定面を露出させる必要がある。中性化深さの測定方法については、JIS A 1152「コンクリートの中性化深さの測定方法」を参考とすることができる。

○ 文献の確認

記載のもととなった文献:コンクリート構造物の耐久性シリーズ・中性化 p.5-6,1986

- ・「水酸化カルシウムは水溶性であるため、溶出したり、移動したりして着色の境界線が不正確になりがちである。」と水の影響の要因が記載されている。
- ・「ボーリング面やダイヤモンドカッタで切断した面において中性化を測定する場合には、その面を十分水洗いし、表面水を乾燥させた後で試薬を噴霧することが必要である。」と水を使用した場合の対応策が記載。

○ 学識経験者への記載の解釈の確認

- ・コンクリート標準示方書[維持管理編]に記載されている水の影響は上記文献に記載の水酸化カルシウムの溶出・移動の影響であり、コンクリート標準示方書[維持管理編]として、水の影響を受けない方法を推奨していること。
- ・一方で、水の影響に対する対応策は、上記文献にも記載されており、JIS A 1152「コンクリートの中性化深さの測定方法」における対応策を適切に行えば問題はないということ。

⑨ 高浜3・4号炉 特別点検における切断水の使用に対する対応策について

JIS A 1152:2018「コンクリートの中性化深さの測定方法」

5 測定方法

5.1 測定面の準備

測定面の準備は、次のいずれかによる。

なお、a)～c)において測定面がぬれている場合は、測定面を自然乾燥させるか、ドライヤを用いるなどして乾燥させる。

a) 試験室又は現場で作製されたコンクリート供試体を用いる場合

割裂面を測定面とする場合は、圧縮試験機などで供試体を割裂し、割裂面に付着するコンクリートの小片、粉などをはけ、電気掃除機などで除去する。

切断面を測定面とする場合は、コンクリートカッタなどで供試体を切断する。切断時に散水しない場合は切断面に付着するコンクリートの粉をはけ、電気掃除機などで除去し、散水する場合は切断面付着している切断面に付着するのろを水洗いによって除去する。

注記 散水しない場合は切断面が過度に高温にならないように注意する。また、散水の有無にかかわらず、コンクリートの粉、のろなどが切断面に付着していると中性化深さの測定が正確に行われなことがある。

b) コア供試体を用いる場合

割裂面を測定面とする場合は、a)による。側面を測定面とする場合は、コア供試体採取後、その側面に付着するのろを水洗いによって除去する。

注記 圧縮強度試験に供するコア供試体を用いて中性化深さの測定を行う場合には、圧縮強度試験時に最大荷重に到達した後できるだけ速やかに除荷して供試体の破損を避けるのが望ましい。圧縮強度試験に供するコア供試体に研磨による端面処理を行う場合、中性化した部分が削られ、中性化深さの測定が正確に行われなことがある。このため、研磨前にコアの任意の位置に印を付け、端面からの距離を測定しておくなど、研磨による中性化深さの欠損量が分かるような対策を事前に行うことが望ましい。

c) コンクリート構造物のはつり面で測定する場合

はつり面は、a)によってコンクリートの小片、粉などを除去する。

注記 コンクリートをはつるとき、あらかじめはつり面の周囲にコンクリートカッタで切れ込みを入れておくと、はつり及び中性化深さの測定が容易になる。

■ 高浜3・4号炉 特別点検における切断水の使用に対する対応策について

高浜3・4号炉の特別点検で、コンクリートの切断に水を用いている場合には、JIS A 1152:2018「コンクリートの中性化深さの測定方法」に従い、測定面を水洗いし、ドライヤを用いて乾燥させており、コンクリート標準示方書[維持管理編]の記載のもととなった文献の対応策とも整合している。

■まとめ

学識経験者への聞き取りの結果、以下の通り、高浜3・4号炉の中性化測定への切断水の影響に対する対応が適切であることが確認できたことから、切断水の影響は問題ないものとする。

1. コンクリート標準示方書[維持管理編]に記載されている水の影響は水酸化カルシウムの移動・溶出であること。
2. 水の影響に対しては、JIS A 1152:2018「コンクリートの中性化深さの測定方法」だけでなく、コンクリート標準示方書[維持管理編]のもととなった文献にも対応策(水洗い・測定面の乾燥)が記載されていること。
3. 高浜3・4号炉の中性化深さ測定は2. に基づく方法で実施していること。

長期施設管理方針として策定する事項

蒸気発生器の取替に当たっては、高経年化技術評価への影響確認を行うこととしているが、前々回審査会合(2023.10.10)のご指摘も踏まえ、取組みを明確にしておく観点から、長期施設管理方針に追記し管理することとする。

現行申請書の長期施設管理方針

機器名	長期施設管理方針	実施時期
蒸気発生器	蒸気発生器については、取替計画に基づき取替を実施する。	中長期

補正案 (変更箇所赤字)

機器名	長期施設管理方針	実施時期
蒸気発生器	蒸気発生器については、取替計画に基づき取替を実施するとともに、高経年化技術評価への影響を確認する。	中長期

短期 : 3号炉は2025年1月17日、4号炉は2025年6月5日からの5年間
 中長期: 3号炉は2025年1月17日、4号炉は2025年6月5日からの10年間
 長期 : 3号炉は2025年1月17日、4号炉は2025年6月5日からの20年間

モジュール型電気ペネトレーションを審査会合資料で代表としている理由について

➤ 気密性に係る構造

○キャニスター型

ステンレス鋼製円筒の両端に端板を溶接し、この端板を貫通する銅棒とアルミナ磁器間およびアルミナ磁器と端板間に熱膨張係数の小さい封着金具(ニッケル合金)をろう付することにより気密性を維持。【シール構造は金属シール】

○モジュール型

胴体部分をエポキシ樹脂でモールドしたものを2重Oリング(EPゴム)の端板部分で保持し気密性を維持。【シール構造は有機材シール】

⇒モジュール型は有機材が熱および放射線により経年劣化が進行することにより原子炉格納容器バウンダリ機能に係る気密性が低下するおそれがある。また、気密性が低下した場合、湿気が電気ペネトレーション内部に浸入し、絶縁性能の低下を起こす可能性がある。

➤ 想定される経年劣化事象

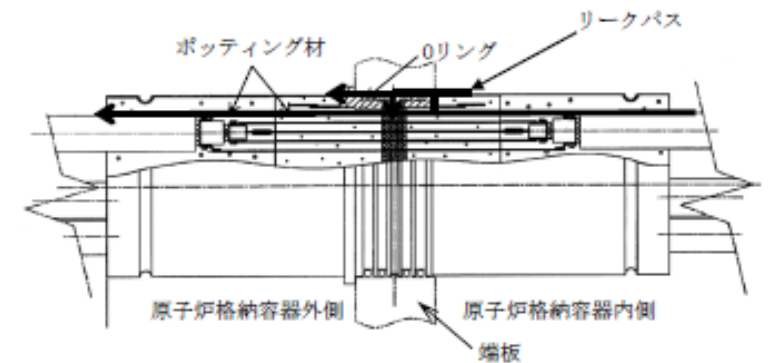
○キャニスター型

絶縁低下(本体、外部リード)

○モジュール型

絶縁低下(本体、外部リード)

原子炉格納容器バウンダリ機能に係る気密性低下(本体)



モジュール型の構造図

絶縁低下と気密性の経年劣化事象が想定されるモジュール型を審査会合資料で説明

モジュラー型電気ペネトレーション導入の経緯について

- 原子力規制庁の安全研究成果報告である「電気・計装設備用高分子材料の長期健全性評価に係る研究(RREP-2020-1001)」(令和2年6月。以下、「成果報告」という。)において、SA時環境下の電気ペネトレーションの絶縁性能等に係る調査・試験が行われている。
- 成果報告における事故時環境暴露試験条件については、従来の試験条件においても、高浜3、4号炉のSA時環境下の試験条件を包絡していることから問題ないと考える。
- 一方、通常時劣化条件については、成果報告の長期健全性試験に基づいたキャニスター型三重同軸型電気ペネトレーションの評価の実施を想定すると、従来の評価に比べて厳しい結果になることは否定できない。
- このため、高浜発電所3、4号炉の事故時に環境条件が著しく悪化する環境において機能要求のあるキャニスター型三重同軸型電気ペネトレーション2台/ユニットについて、今後の長期健全性確保を見据え、自主的安全性向上対応として、60年の通常運転に加えてその後の事故環境においても健全性を維持できることを評価しているモジュラー型への取替えを計画※¹した。

※1 高浜3号炉:令和4年12月28日付(原規規発第2212285号)で認可を受けた工事計画認可申請※²

高浜4号炉:令和4年12月28日付(原規規発第2212286号)で認可を受けた工事計画認可申請※²

※2 高浜発電所3、4号機において、事故時環境下で絶縁性能の要求がある電気ペネトレーションには、キャニスター型のピッグテール型電気ペネトレーションも存在するが、ピッグテール型については、成果報告の劣化手法と同等の手法にて、供用期間の健全性は確認できている。

1. 概要

高浜3号炉の第5回監視試験片の照射量は 1.47×10^{20} (n/cm²)、高浜4号炉の第5回監視試験片の照射量は 1.40×10^{20} (n/cm²)であり、JEAC4201の国内脆化予測法の適用範囲($1.0 \times 10^{17} \sim 1.3 \times 10^{20}$ (n/cm²))を超えるため、JEAC4201に基づく関連温度予測値の算出ができない。

このため、以下に示す確認をすることで、第5回監視試験で得られた実測値が特異な脆化を示すものではないことを確認している。

①関連温度

適用範囲までの予測結果の傾向を踏まえて確認することとし、具体的には適用範囲の上限である照射量(1.3×10^{20} (n/cm²))における関連温度予測値と、第5回監視試験で得られた関連温度実測値を比較する。

②破壊靱性値

適用範囲までの予測結果の傾向を踏まえて確認することとし、具体的には照射前から第4回監視試験までで得られた破壊靱性実測値を用いて、適用範囲の上限である照射量(1.3×10^{20} (n/cm²))までの関連温度移行量を予測して設定した K_{IC} 曲線と、第5回監視試験で得られた破壊靱性実測値を比較する。

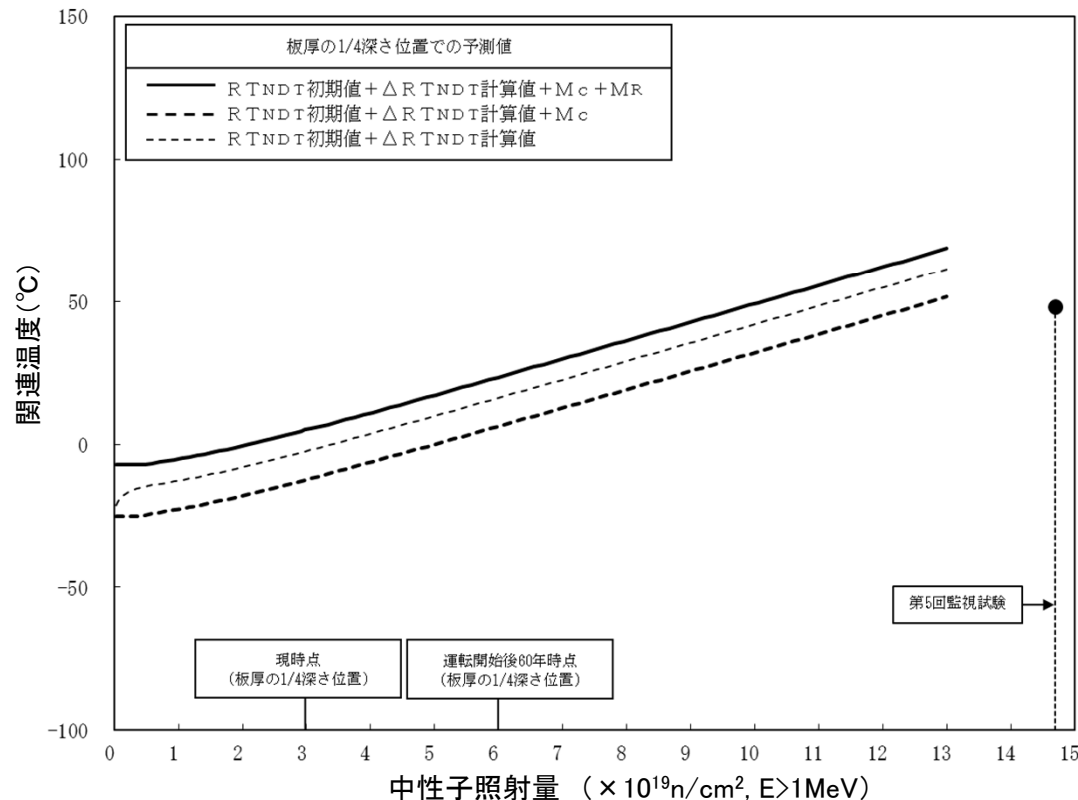
なお、高浜3, 4号炉の第5回監視試験で得られたデータは日本電気協会の破壊靱性検討会にて報告しており、今後の規格の高度化検討などに取り入れられていくものと認識している。

⑫ 第5回監視試験で得られたデータについて(2/5)

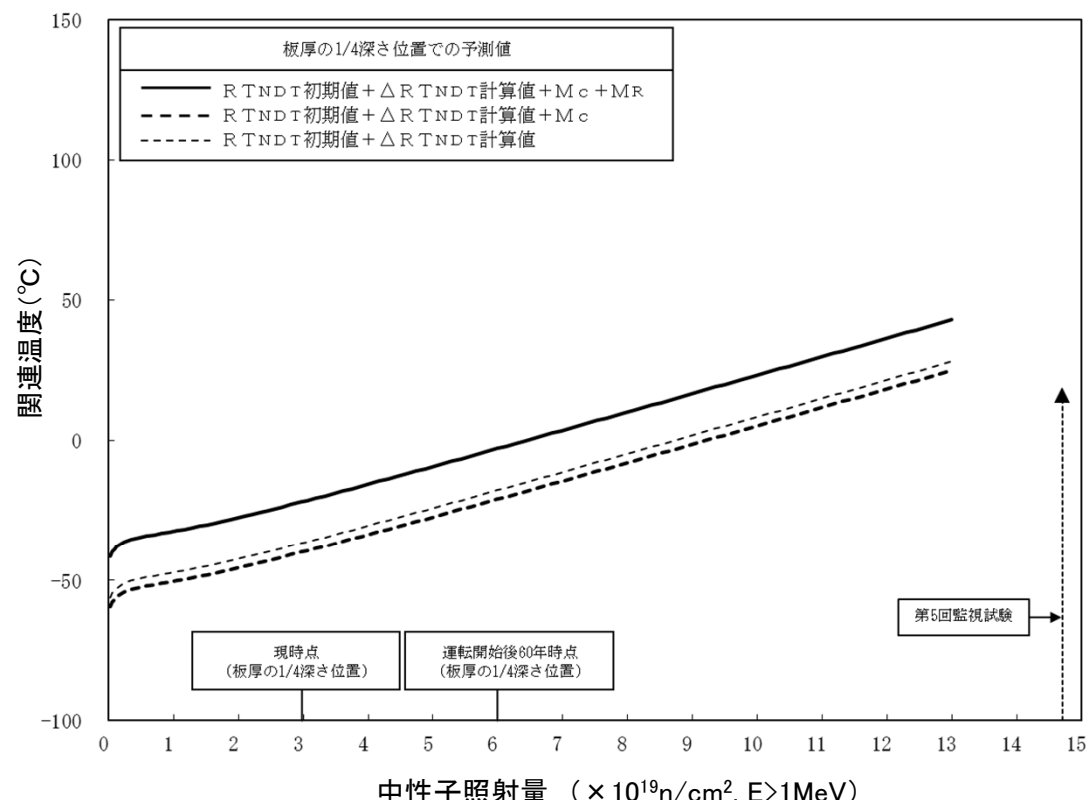
① 関連温度

高浜3号炉について比較した結果を以下に示す。第5回監視試験において得られた関連温度実測値(母材、溶接金属)は、それより照射量の低い 1.3×10^{20} (n/cm²)における関連温度予測値を下回っている。JEAC4201の適用上限を超える照射量の領域における関連温度は評価できないものの、一般的に照射量が増加するにつれて鋼材の脆化は進行する(関連温度は高くなる)と考えられる※ことから、その照射量より低い照射量における関連温度予測値を下回る結果が得られた高浜3号炉の第5回監視試験の関連温度実測値は、適用範囲までの予測結果の傾向を踏まえても特異な脆化を示すものではないと考えられる。

※ 例えば「Technical Basis for Revision of Regulatory Guide 1.99: NRC Guidance on Methods to Estimate the Effects of Radiation Embrittlement on the Charpy V-Notch Impact Toughness of Reactor Vessel Materials」(ML081120289)では、 1.3×10^{20} (n/cm²)を超えるような高照射量の試験データが紹介されており、そのような照射量が高い領域でも特異な脆化を示すようなデータは見られなかった。



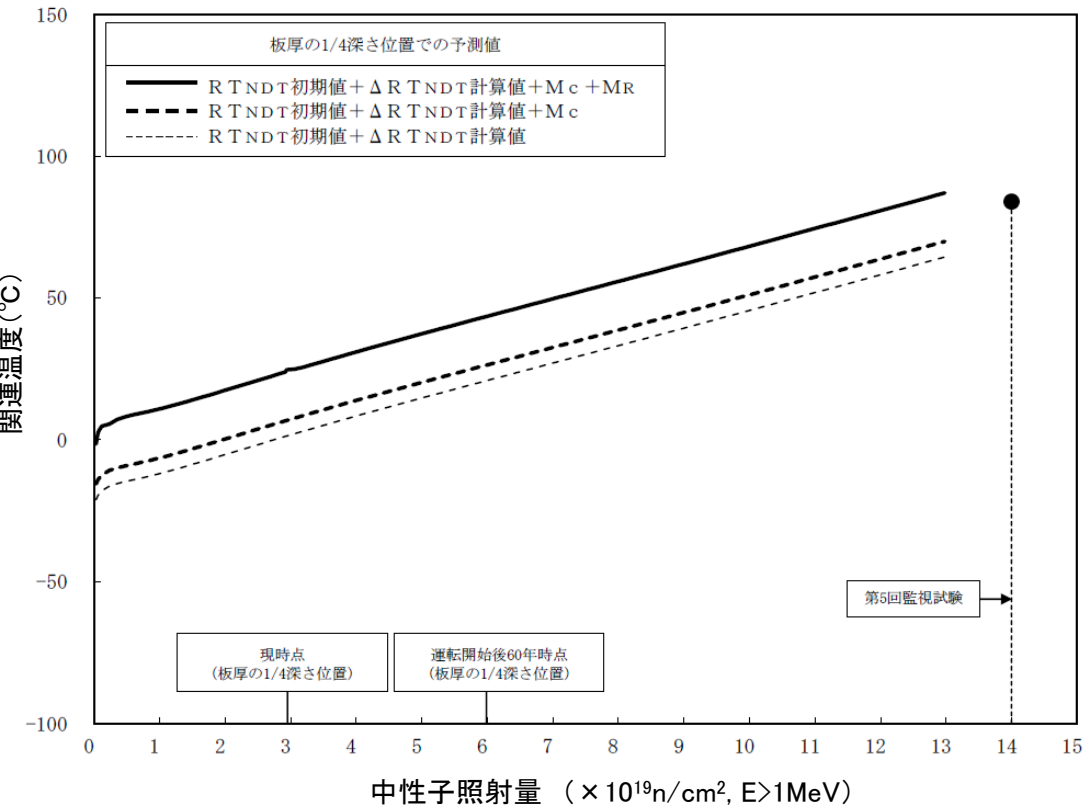
高浜3号炉 第5回監視試験で得られた
関連温度実測値(母材)に対する分析結果



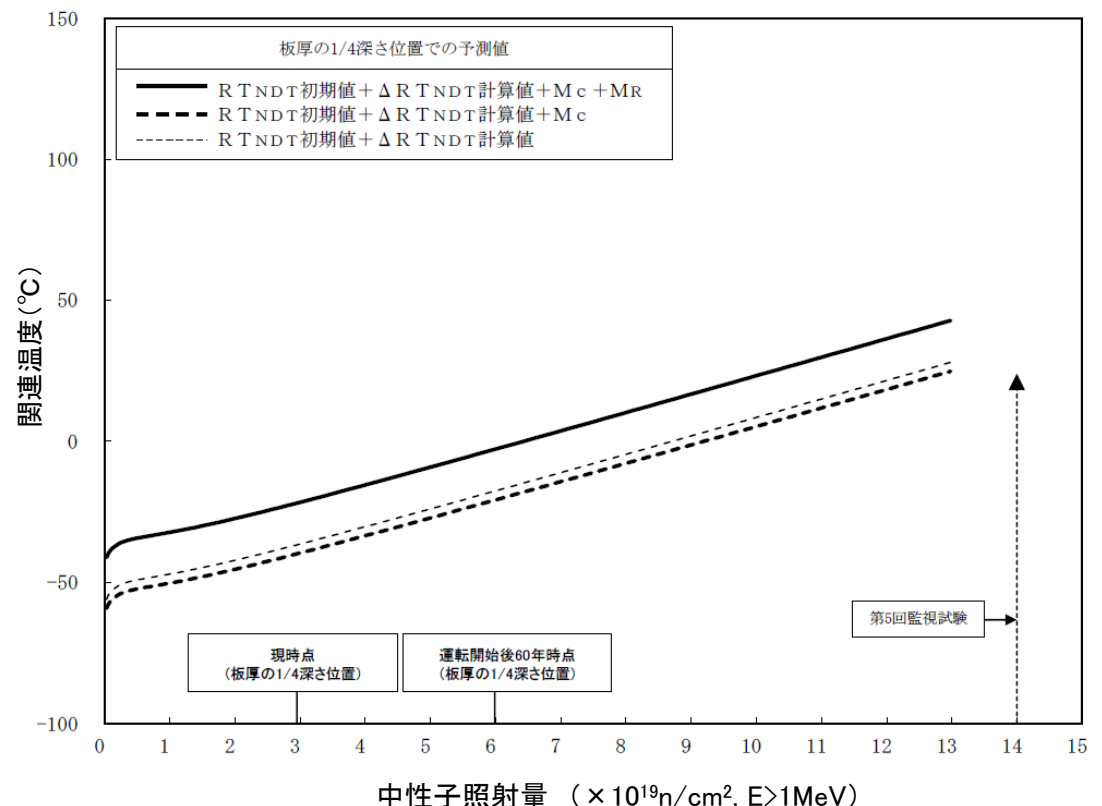
高浜3号炉 第5回監視試験で得られた
関連温度実測値(溶接金属)に対する分析結果

① 関連温度

高浜4号炉について比較した結果を以下に示す。第5回監視試験において得られた関連温度実測値(母材、溶接金属)は、それより照射量の低い 1.3×10^{20} (n/cm²)における関連温度予測値を下回っており、高浜4号炉の第5回監視試験の関連温度実測値は、適用範囲までの予測結果の傾向を踏まえても特異な脆化を示すものではないと考えられる。



高浜4号炉 第5回監視試験で得られた
関連温度実測値(母材)に対する分析結果



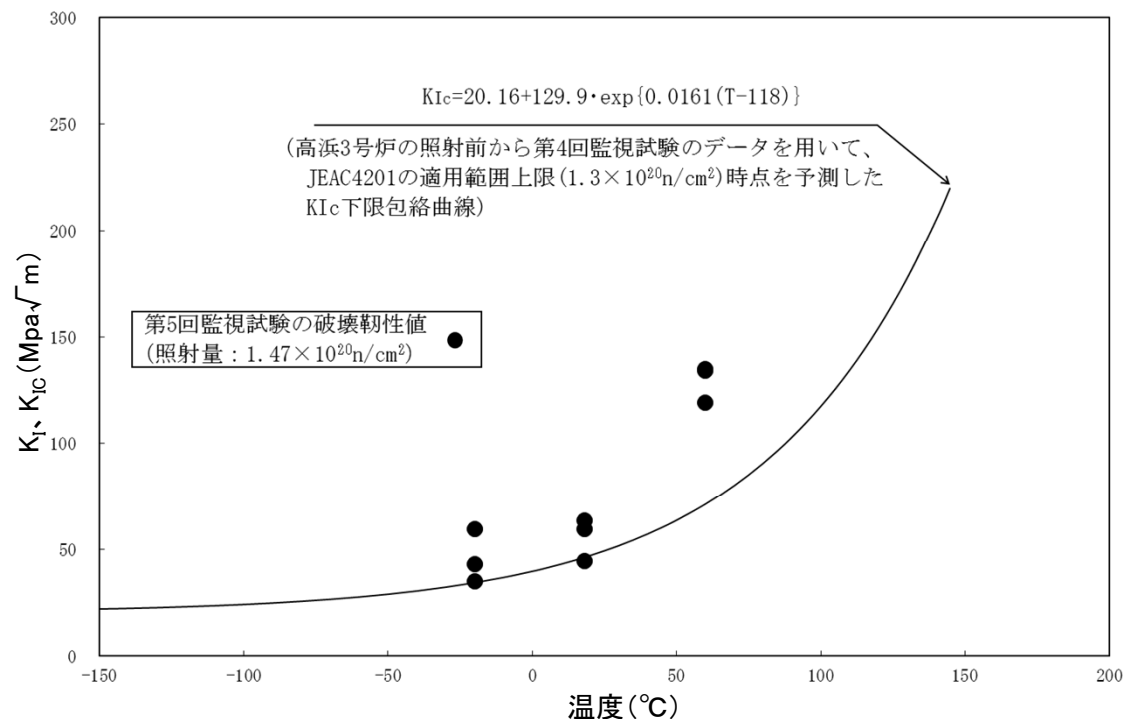
高浜4号炉 第5回監視試験で得られた
関連温度実測値(溶接金属)に対する分析結果

⑫ 第5回監視試験で得られたデータについて(4/5)

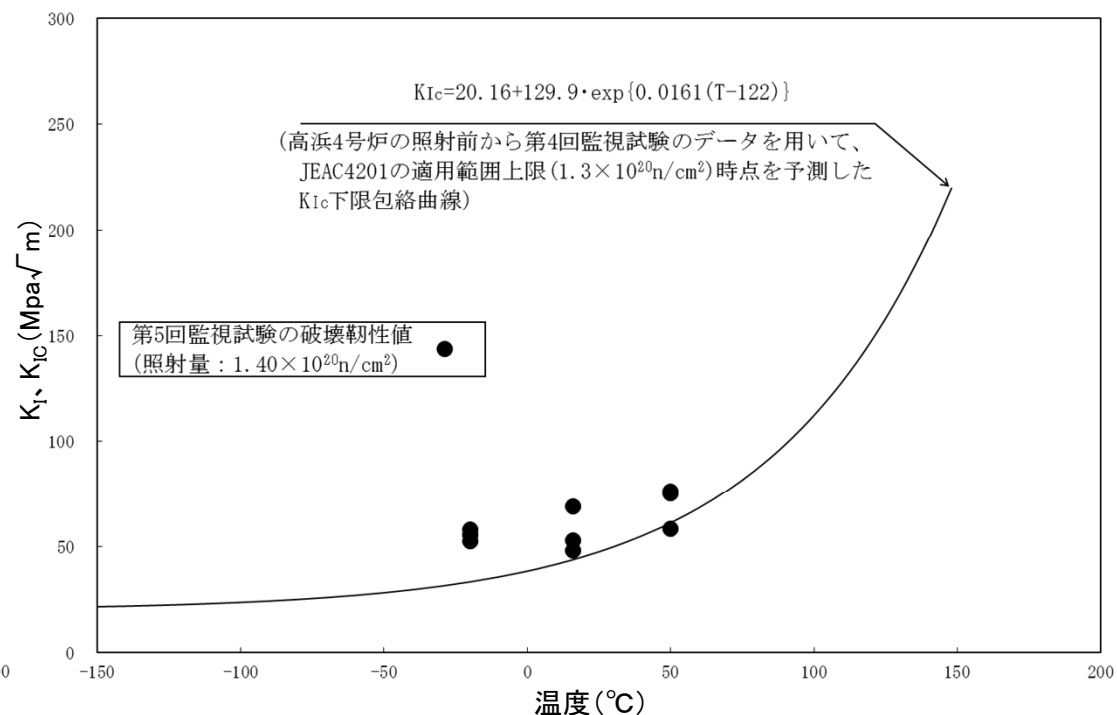
②破壊靱性値

比較結果を以下に示す。第5回監視試験において得られた破壊靱性実測値は、それより照射量の低い 1.3×10^{20} (n/cm²)における K_{IC} 曲線と比較して、概ね同等以上の破壊靱性値を示している。

一般的に照射量が増加するにつれて鋼材の脆化は進行する(K_{IC} 曲線は右方へ移行する)と考えられることから、より低い照射量における K_{IC} 曲線と概ね同等以上の結果が得られた高浜3、4号炉の第5回監視試験の破壊靱性実測値は、適用範囲までの予測結果の傾向を踏まえても特異な脆化を示すものではないと考えられる。



高浜3号炉 第5回監視試験で得られた破壊靱性値に対する分析結果

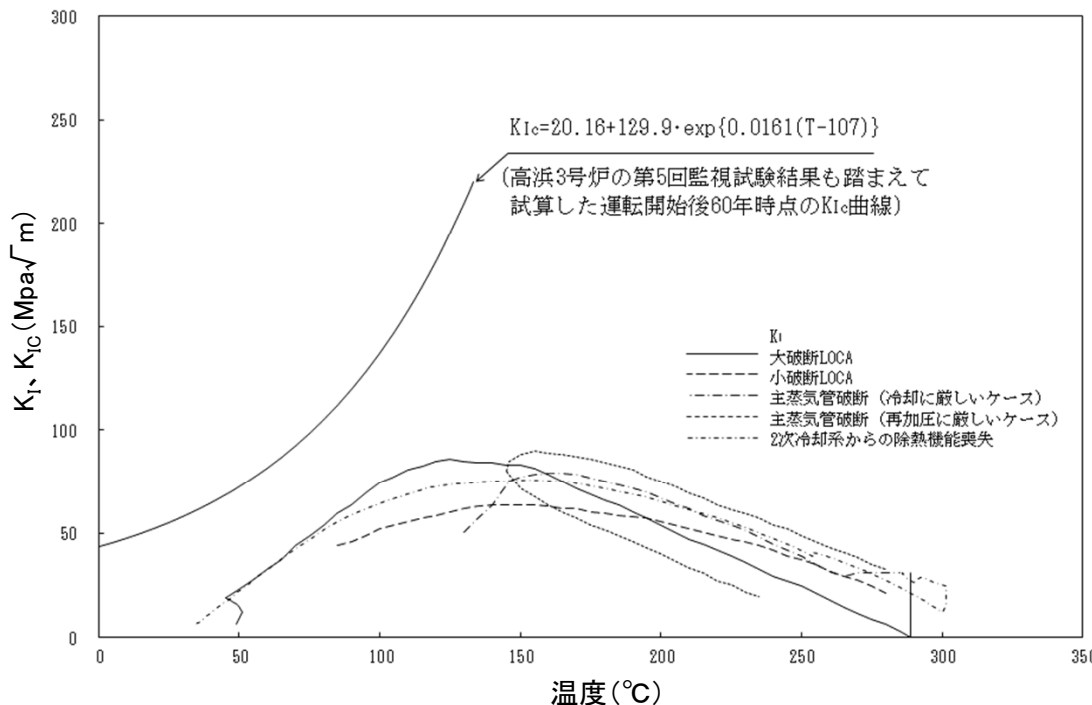


高浜4号炉 第5回監視試験で得られた破壊靱性値に対する分析結果

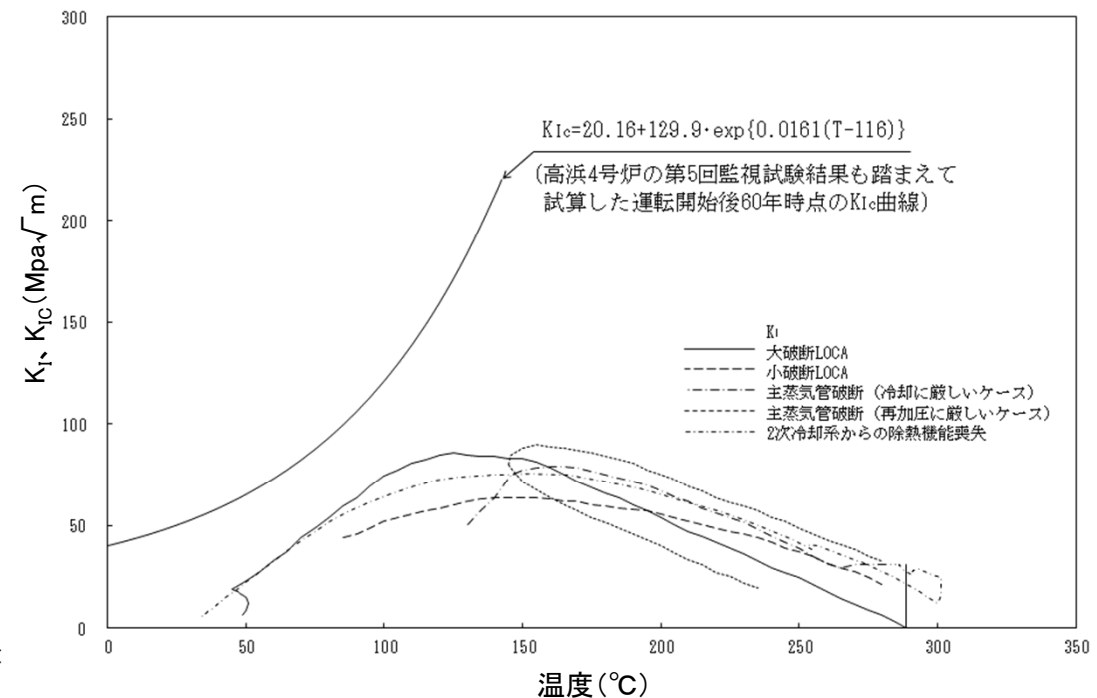
(参考評価)

高浜3, 4号炉の第5回監視試験の照射量はJEAC4201に基づく国内脆化予測法の適用範囲を超えるが、ここでは、参考に適用範囲を超えて第5回監視試験の照射量での関連温度予測値を試算し、照射前及び第1回から第5回の監視試験で得られた破壊靱性実測値を用いて運転開始後60年時点のPTS評価を実施した。試算にはJEAC4201-2007(2013追補版)附属書B-2200による方法を用いた。

試算結果を以下に示す。第5回監視試験で得られた破壊靱性実測値を踏まえても、 K_{IC} 曲線が K_I 曲線を上回ることを確認した。



高浜3号炉 第5回監視試験で得られた破壊靱性実測値を踏まえたPTS評価



高浜4号炉 第5回監視試験で得られた破壊靱性実測値を踏まえたPTS評価

1. 「平成20年度 照射誘起型応力腐食割れ(IASCC)評価技術に関する報告書」の評価ガイド(案)の記載

○定荷重SCC試験では同一条件下での試験に対して割れ発生の有無が分かれており、SCC発生試験の特性あるいは照射速度や照射温度等に起因していると考えられるものの、その理由全てについてメカニズムを基にして説明できる段階ではない。そのため定荷重SCC試験で割れが一つでも発生した応力条件を割れ発生応力下限値とし、それより高い応力領域を「割れ発生可能性有り」と評価している。

○定荷重SCC試験によりBFB材とFTT材を比較したとき、FTT材の方が割れ発生に対して厳しい条件となることを考慮して、割れ発生応力線図では、FTT材による線とBFB材による線の2本が引かれている。

それぞれの割れ発生応力線を以下のとおり定義

- ・FTT材の割れ発生応力線より応力が大きい領域
⇒ 割れが発生する**可能性が有る**。
- ・BFB材の割れ発生応力線より応力が大きい領域
⇒ 割れが発生する**可能性が高い**。

○その上で、BFB材については高照射域でのデータがないことが課題とされている。

BFB材とFTT材について、IASCCに対する影響因子として考えられる材料組織や変形挙動などの違いを示した上で、IASCCに対してはFTT材の方が感受性が高いと評価。

「評価ガイド(案)」では、高照射領域においては、FTT材の割れ発生応力線を使用することが妥当と判断されている。

2. 原子力安全システム研究所(INSS)研究による知見拡充

○評価ガイド(案)において検討されたIASCCに対する影響因子について、INSSによる研究活動を通じて知見の拡充が図られている。

その結果、BFB材とFTT材の材料の違いによるIASCC感受性の違いをメカニズム的に説明可能な知見の蓄積がなされてきた。(詳細は参考に示す。)

影響因子	評価結果
変形挙動	FTT材は局所的に変形しやすく、材料の一部のひずみが偏る傾向がある。
変形挙動(マイクロ組織)	材料変形時に局所的に発生する最大ひずみはFTT材が大きい。
粒界の耐食性	耐食性については同等。
粒界強度	FTT材の方が粒界割れしやすい。
材料強度	FTT材はマイクロ組織から材料強度が高くなる要因があり、IASCCの発生・進展の可能性が高い。



- ・BFB材とFTT材のIASCC感受性の違いが材料の違いに起因するとの知見が拡充され、**メカニズム的にBFB材の方がIASCC感受性が低いと考える。**
- ・ただし、定荷重SCC試験データによりBFB材の高照射領域まで割れ発生応力線の妥当性を確認したものでないことから、BFB材の割れ発生応力線の検証として、解析評価によるボルト損傷評価の結果と実機のUT検査結果の比較を次ページにて説明する。

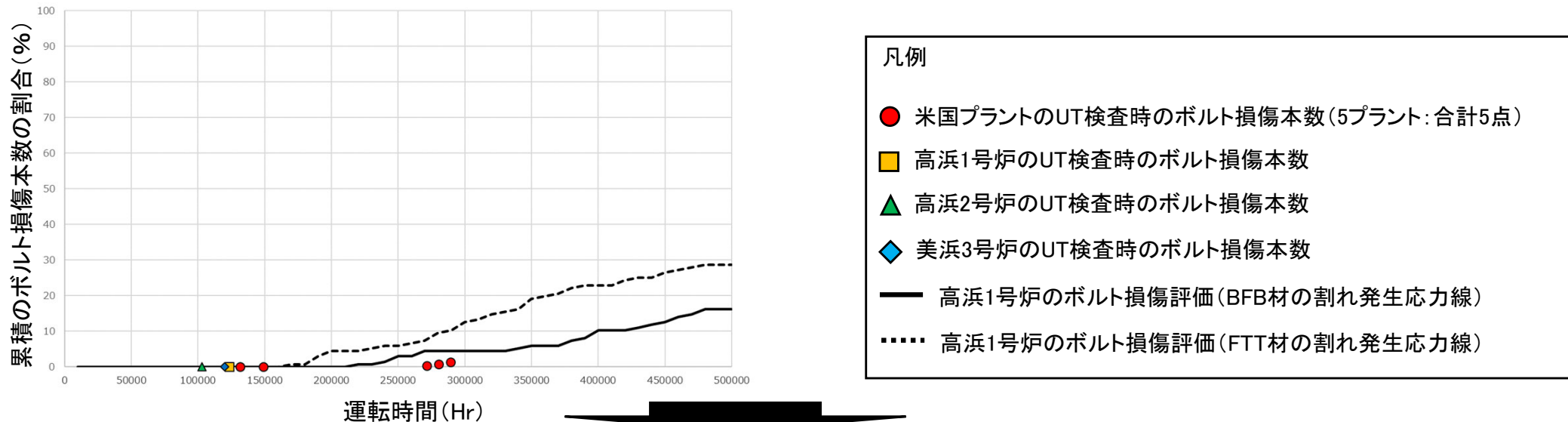
3. ボルト損傷評価結果と実機UT検査結果との比較

- 解析評価によるボルト損傷評価結果※¹(黒色の実線および破線)と、実機UT検査により確認されたボルト損傷本数(プロット)との比較を以下に示す。
- IASCCの感受性ごとに分類されたグループ※²において、高浜3,4号炉と同じ分類のプラントではUT検査によるボルト損傷実績を確認していない。
- そこで、高浜1号炉と同じ分類のプラントのUT検査によるボルト損傷実績を確認していることから、BFB材の割れ発生応力線の検証という観点で、ボルト損傷評価結果は高浜1号炉の評価結果とし、実機UT検査の結果は高浜1号炉と同じ分類のプラント※³の点検結果とした。

※¹ 解析評価によるボルト損傷評価を行い、損傷するボルト本数を運転時間に対して累積加算したもの。実線はBFB材の割れ発生応力線を用いた評価であり、破線はFTT材の割れ発生応力線を用いた評価である。BFB材の割れ発生応力線を用いた解析評価については、定荷重SCC試験データが不足している高照射領域の部分も含めた割れ発生応力線を用いた評価となっており、UT検査結果との比較によりBFB材の高照射領域部分の割れ発生応力線の検証となっていると考える。

※² WH社がプラントループ数や炉内バイパス流の流れ方向ごとにIASCC感受性の違いを分類したもの(WH社技術資料: NSAL-16-1)。

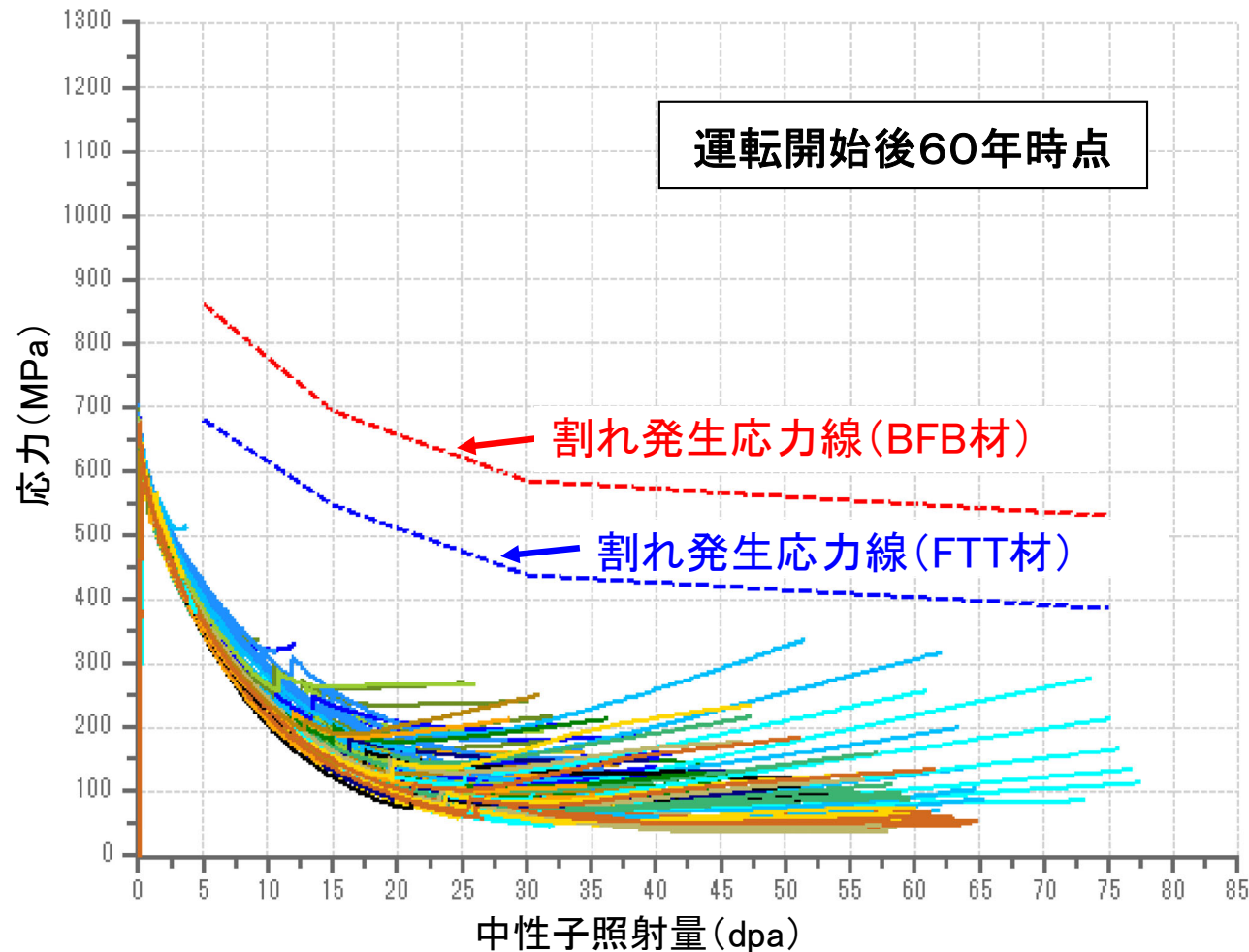
※³ 米国にて多数(100本以上)のボルト損傷が確認されているプラントについては、高浜1号炉の分類と異なるIASCC感受性が最も厳しい分類であり、それらのUT検査結果は含めていない。



FTT材の割れ発生応力線を用いたボルト損傷評価だけでなく、BFB材の割れ発生応力線を用いたボルト損傷評価結果においても、実機UT検査結果を包絡している。

4. まとめ

- INSS研究において、材料の違いによるIASCC感受性について知見拡充を行ってきた。また、BFB材の割れ発生応力線を用いたボルト損傷評価結果は実機UT検査の結果を包絡していることを確認した。
- しかし、BFB材の高照射領域での定荷重SCC試験データがなく、実機UT検査の実績はまだ十分とは言えないと考えられる。高浜3,4号の劣化状況評価においてボルト損傷評価に用いる割れ発生応力線としては、**より保守的なFTT材のものを使用することとする。**



評価ガイド(案)で示された研究成果とINSS研究の知見の比較

影響因子	IASCC感受性要因	評価ガイド(案)		INSS研究	
		研究成果	結論	研究成果	結論
① 変形挙動	局所的に変形が生じる方が局所応力が高くなり、当該領域の粒界が割れやすくなる。	表面観察結果より、運転温度域にて同程度のひずみ量を与えた場合、FTT材の方が局所的に変形。	FTT材のIASCC感受性が高い	運転温度域にて同程度のひずみ量を与えた場合に、BFB材は一樣に変形するのに対し、FTT材は局所的に変形しすべり変形の集中が大きい。 【参考文献】 ・中性子照射ステンレス鋼の変形挙動—バップルフォーマボルト材とフラックスシンプルチューブ材の比較—, 三浦他, INSS JOURNAL Vol.26 2019 NT-5	FTT材のIASCC感受性が高い
② 変形挙動 (マイクロ組織)	転位ループ密度が高い方が、転位チャンネル※1生成時のすべり変形の集中が起こりやすく、局所的なひずみが発生しやすくなる。	マイクロ組織観察結果より、FTT材の方が転位ループ密度が高い。	FTT材のIASCC感受性が高い	電子後方散乱解析結果より、運転温度域にて同程度のひずみ量を与えた場合に局所的に発生する最大ひずみ量は、FTT材の方がBFB材の4倍程度大きい。 【参考文献】 ・中性子照射ステンレス鋼の変形挙動—バップルフォーマボルト材とフラックスシンプルチューブ材の比較—, 三浦他, INSS JOURNAL Vol.26 2019 NT-5	FTT材のIASCC感受性が高い
③ 粒界の耐食性	粒界の耐食性の低い方が粒界は割れやすくなる。	粒界の照射誘起偏析の観察結果より、FTT材とBFB材とで有意な差異がなく、粒界の耐食性に差異がない。	同等	粒界の照射誘起偏析挙動、粒界腐食試験による酸化挙動、酸化した粒界の引張試験による破壊様式と強度について、BFB材とFTT材で有意な差異なし。 【参考文献】 ・照射ステンレス鋼の粒界酸化挙動, 福村他, INSS JOURNAL Vol.27 2020 NT-8 ・Fracture behavior of grain boundaries of neutron-irradiated stainless steels oxidized in simulated PWR primary water, T.Miura et al., Fontevraud 10, 2022 ・電子顕微鏡とアトムプローブによる中性子照射ステンレス鋼の粒界偏析の評価, 三浦他, INSS JOURNAL Vol.30 2023 NT-6	同等

※1 照射により導入される欠陥の一つである転位ループが転位のすべり運動により消失することで、転位が移動しやすい帯状の領域が結晶粒内に形成されて塑性変形がその領域のみに集中する現象。粒界の転位チャンネルと接している部分にひずみが生じ、割れの原因となる。

評価ガイド(案)で示された研究成果とINSS研究の知見の比較(続き)

影響因子	IASCC感受性要因	評価ガイド(案)		INSS研究	
		研究成果	結論	研究成果	結論
④ 粒界強度	粒界にヘリウムバブルが形成されることにより、粒界の結合断面積が低下し、粒界が割れやすくなる。	中性子照射後の母材中のヘリウム生成量はFTT材とBFB材で同等。	同等	粒界の引張試験結果より、FTT材のみ粒界割れが発生。 マイクロ組織観察結果より、FTT材では粒界上のキャビティが観察されたのに対し、BFB材では観察されない。 【参考文献】 ・Micro-mechanical investigation about degradation of grain boundary cohesive strength of neutron-irradiated stainless steels, T.Miura et al., J.Nucl. Sci. Mat. 59(2002) 1251-1265	FTT材のIASCC感受性が高い
⑤ 中性子照射による生成物	水素の生成による材料の体積膨張により、ボルトに発生する応力が高くなることでIASCCの発生・進展の可能性が高くなる。	中性子照射後の母材中の水素生成量はFTT材とBFB材で同等。	同等	—	—
⑥ 材料強度	材料の強度が高い方がIASCCの発生・進展の可能性が高くなる。	引張試験結果より、中性子照射後の0.2%耐力、引張強さ、伸びはFTT材とBFB材で同等。	同等	アトムプローブ分析結果より、同じ照射量で比較した場合の照射誘起溶質クラスタはFTT材の方が数密度・サイズが大きく、FTT材の方が材料の強度が高い傾向と想定。 ※INSSへの委託研究の報告書(2020年度)にて確認	FTT材のIASCC感受性が高い
⑦ 硬さ特性	材料が硬い方がIASCCの発生・進展の可能性が高くなる。	硬度測定結果より、FTT材の方が表面近傍の硬度が高い。	FTT材のIASCC感受性が高い	—	—

MOX燃料装荷後以降の中性子束を1.2倍として評価しているが、ガンマ線束についても1.2倍としている理由は以下のとおり。

- MOX燃料装荷後の中性子束を1.2倍として評価することに伴い、中性子に起因する二次ガンマ線源も1.2倍となる。
- 評価上は、保守的に1次遮蔽壁のガンマ線源全体を1.2倍している。

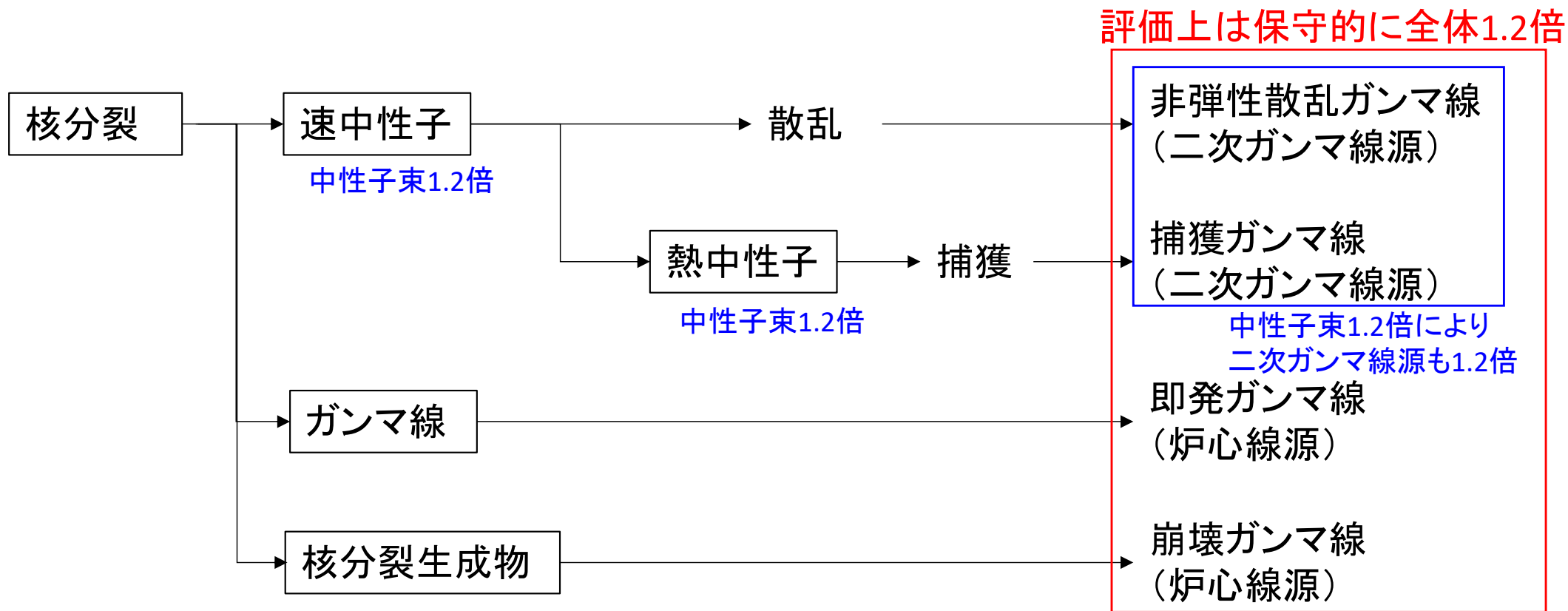


図 1次遮蔽壁のガンマ線源

⑮1・2号炉と3・4号炉の塩化物イオン量の違いについて

調査時点の塩化物イオン量 及び 3・4号炉運転開始後60年経過時点の鉄筋腐食減量が大きい1・2号炉の気中帯において、鉄筋位置での塩化物イオン量が、3・4号炉に比べて大きくなった要因について考察を行う。

■塩分浸透のコア採取箇所の使用環境条件について

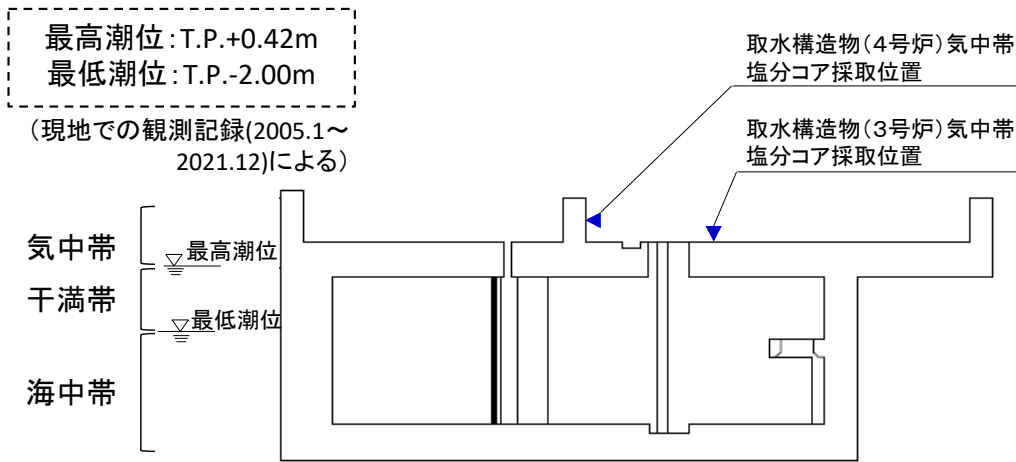
取水構造物(気中帯)における塩分浸透のコア採取は以下の通り。

3・4号炉・・・水路の外でコア採取

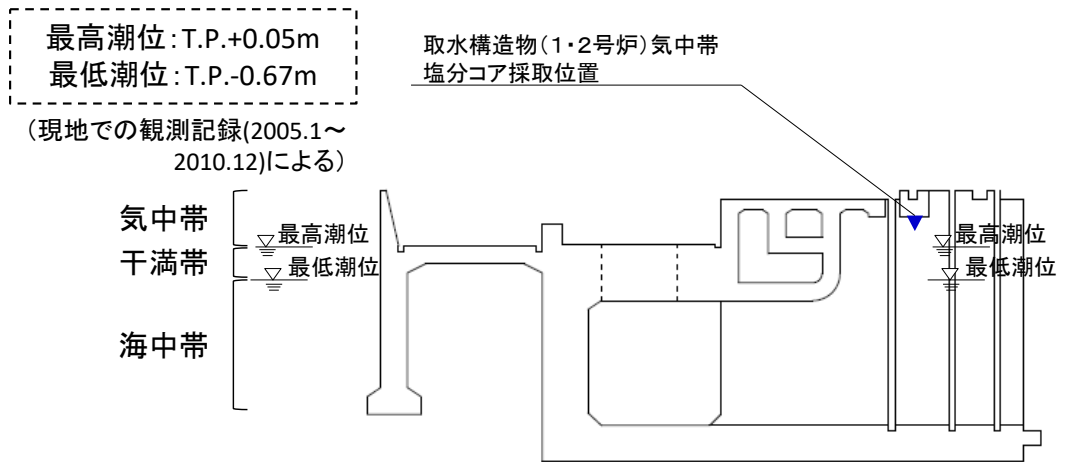
1・2号炉・・・水路の中でコア採取

水路の中では、水路の外と比較して、海水の影響を受けやすいと考えられることから、使用環境条件として、1・2号炉は3・4号炉と比較して、塩分の影響を受けやすいと推定される。

※取水構造物(3・4号炉)については、
構造形式や最高潮位・最低潮位の関係から、水路の中に気中帯が存在しない。



取水構造物(3・4号炉) 断面図



取水構造物(1・2号炉) 断面図

⑮ 1・2号炉と3・4号炉の塩化物イオン量の違いについて・健全性評価結果

■ 3・4号炉と1・2号炉のコンクリートの違いについて

塩分浸透の観点で、3・4号炉と1・2号炉の水セメント比および圧縮強度の違いは以下の通り。

構造物名	水セメント比 W/C(%)	平均圧縮強度(N/mm ²)
取水構造物(3号炉)	48	49.4
取水構造物(4号炉)	48	49.6
取水構造物(1・2号炉)	53	33.4* ¹

* 1: 2号炉の特別点検結果

以下の塩分浸透におけるコンクリートの特徴から、1・2号炉は3・4号炉と比較して、塩分の影響を受けやすいと推定される。

- ・水セメント比が大きいほど塩分浸透しやすい。
- ・圧縮強度が大きいほど密実性が高く、塩分浸透しにくい。

■ 健全性評価結果一塩分浸透による強度低下

取水構造物(気中帯)における塩化物イオン量について、1・2号炉が3・4号炉に比べて大きくなったが、運転開始後60年経過時点における鉄筋腐食減量は、かぶりコンクリートにひび割れが発生する時点の鉄筋腐食減量を下回っていることを確認している。また、定期的な目視確認を実施しているが、鉄筋腐食に起因すると判断されるひび割れなどは認められていない。

	調査時期 (3・4号炉運転開始後経過年数)	鉄筋位置での 塩化物イオン 濃度及び量 上段(%) 下段(kg/m ³)	鉄筋の腐食減量 (×10 ⁻⁴ g/cm ²)			判定
			調査時点	3・4号炉運転開始 後60年経過時点	かぶりコンクリート にひび割れが発生 する時点	
取水構造物(3号炉) (気中帯)	2022年1月 (37年)	0.02 (0.47)	3.2	6.0	90.1	OK
取水構造物(4号炉) (気中帯)	2022年1月 (36年)	0.01 (0.19)	3.0	5.1	90.1	OK
取水構造物(1・2号炉) (気中帯)	2015年2月 (29・30年* ¹)	0.21 (5.11)	10.7	26.6* ²	90.1	OK

* 1: 3号炉運転開始後経過年数は30年、4号炉運転開始後経過年数は29年、2号炉運転開始後の経過年数は39年。

* 2: 2号炉運転開始後の経過年数は70年。

■まとめ

1. 取水構造物(気中帯)において、1・2号炉は3・4号炉と比較して、使用環境条件およびコンクリートの水セメント比や圧縮強度の観点で、塩分の影響を受けやすいことから、塩化物イオン量について、1・2号炉が3・4号炉に比べて大きくなったと推定される。
2. 塩化物イオン量について、1・2号炉が3・4号炉に比べて大きくなったが、3・4号炉運転開始後60年経過時点における鉄筋腐食減量は、かぶりコンクリートにひび割れが発生する時点の鉄筋腐食減量を下回っており、塩分浸透による強度低下については、長期健全性評価上問題とならない。また、定期的な目視確認を実施しているが、鉄筋腐食に起因すると判断されるひび割れなどは認められていない。

なお、取水構造物(干満帯・海中帯)においても、塩化物イオン量について1・2号炉が3・4号炉に比べて大きいのが、理由はコンクリートの水セメント比や圧縮強度の違いによるものと推定される。

- ・取水構造物(干満帯・海中帯)においては、コア採取箇所の使用環境条件について、1・2号炉は3・4号炉と大差はない。
- ・コンクリートの水セメント比や圧縮強度の違いがあり、1・2号炉の方が塩分の影響を受けやすい。

⑩ 40年目の点検結果等を踏まえた外部遮蔽壁の中性化深さ評価について

30年目および40年目の中性化評価では、それぞれ環境測定を実施し、評価対象となる構造物を選定しており、特に40年目においては、特別点検箇所を選定するため、より網羅的に環境測定を実施している。

その結果、下表のとおり30年目と40年目で異なる部位を評価対象に選定している。

30年目および40年目の中性化評価部位（環境条件が最も厳しい部位）

	3号炉	4号炉
30年目の評価	外部遮蔽壁（屋内面）	外部遮蔽壁（屋内面）
40年目の評価	原子炉補助建屋（内壁及び床）	内部コンクリート（ループ室）

本資料では、30年目の評価で中性化深さの評価点としていた3・4号炉の外部遮蔽壁（屋内面）について、40年目の点検結果等を踏まえた評価結果を示す。

a. 評価手順

以下の手順にて評価を実施した。

(1) 中性化深さの推定

- ・中性化速度式により、運転開始後60年時点の中性化深さを算出（森永式※1、vt式※2）

※1 森永繁「鉄筋の腐食速度に音づいた鉄筋コンクリート建築物の寿命予測に関する研究－東京大学学位論文（1986）」

※2 土木学会「コンクリート標準示方書 維持管理編（2018）」

(2) 最大中性化深さ推定値の抽出

- ・上記2式のうち最大値となる中性化深さを抽出

(3) 運転開始後60年時点の中性化深さの評価

- ・推定された最大の中性化深さと鉄筋が腐食し始める時の中性化深さを比較

b. 健全性評価結果

外部遮蔽壁の運転開始後60年経過時点における中性化深さの評価結果を下表に示す。

40年目の点検結果等を踏まえた場合においても、外部遮蔽壁の運転開始後60年経過時点における中性化深さは、鉄筋が腐食し始める時の中性化深さに達していないことを確認した。

以上から、外部遮蔽壁の中性化による強度低下については、長期健全性評価上問題とならない。

運転開始後60年時点と鉄筋が腐食し始める時点の中性化深さの比較

		中性化深さ(cm)			鉄筋が腐食し始める時の中性化深さ(cm)	判定	
		測定値 (調査時点の運転開始後経過年数)	推定値				
			調査時点 (中性化速度式)	運転開始後60年経過時点 (中性化速度式)			
3号炉	外部遮蔽壁(屋内部)	0.2 (37年)	2.2 (森永式)	2.7*1 (森永式)	9.7*2	OK	
4号炉	外部遮蔽壁(屋内部)	0.2 (36年)	2.2 (森永式)	2.8*1 (森永式)	9.7*2	OK	
【参考】 30年目の評価	3号炉	外部遮蔽壁(屋内部)	0.2 (27年)	1.6 (森永式)	2.4*1 (森永式)	9.7*2	OK
	4号炉	外部遮蔽壁(屋内部)	0.1 (26年)	1.6 (森永式)	2.4*1 (森永式)	9.7*2	OK

* 1: 森永式および実測値に基づくvt式による評価結果のうち最大値を記載

* 2: 当該箇所のかぶり厚さに2cmを加えた値