

要 求 仕 様 書

1．事業名

平成20年度高経年化対策強化基盤整備事業（健全性評価の妥当性確認手法の確立等）

2．事業目的

我が国の原子力発電所における高経年化対策に資するため、国内実用原子力発電プラントにおける高経年化に係る技術情報基盤の整備を行うことを本事業の目的とする。

3．事業内容

原子炉压力容器鋼に係る脆化予測及びケーブルの劣化挙動予測のより定量的な評価や監視・診断手法の適用性並びに、炉内構造物及び配管における応力腐食割れ（以下 SCC）に関する健全性評価手法の妥当性を判断するための技術的基盤の整備を図る。

（1）原子炉压力容器鋼の中性子照射脆化に関する研究

原子炉压力容器鋼の中性子照射脆化の評価に関して、関係機関の連携の下に、現行の監視試験方法の妥当性を検討するとともに、イオン照射により照射条件や材料条件等を系統的に設定したデータを取得し、照射脆化予測の技術基盤を整備することにより、高経年化に対応した照射脆化予測評価の科学的・合理的な技術基盤を与える。

a. 原子炉压力容器鋼における溶接熱影響部の照射脆化評価調査

高経年化した原子炉压力容器に対する健全性評価手法の妥当性を判断する根拠の基盤形成に関して、米国では評価対象からすでに除外されている原子炉压力容器の炉心領域部の溶接熱影響部を対象として、金属組織と機械的性質の相関等に着眼した中性子照射脆化評価、及び健全性への影響に関する調査研究を行い、溶接熱影響部試験片の照射脆化評価の必要性を検討する。

b. イオン照射法による照射脆化予測基盤データ取得と効率的評価手法の調査研究

照射条件や材料条件等を容易かつ系統的に設定した試験が可能であるイオン照射法の利便性を最大限に生かし、実機ベースでは取得困難な化学組成依存性、微細組織依存性等のデータを取得し、脆化予測基盤データベースを構築する。また、照射欠陥や不純物の拡散過程を明確化し、組織形成（析出）のモデル化を行う。これらを総合して照射欠陥、組織形成、機械強度の相関性を明確化することにより、照射脆化予測の高度化を図る。

（2）ケーブル劣化のメカニズム及び監視・診断手法に関する研究

ケーブルの劣化挙動をより定量的に評価するため、劣化メカニズムの基礎的検討を行うとともに、ケーブルの電気絶縁特性に関する非破壊測定法を用いたケーブル劣化の監視・診断手法

の適用性を評価する。

a. ケーブル劣化メカニズム調査研究

ケーブルの初期寿命評価では、実環境よりも高温かつ高線量率下における加速試験を採用しているが、高温下での劣化速度が、いわゆるアレニウス則に必ずしも従わないことが指摘されている。その原因として、安定剤等の揮発が推定されるようになってきた。本事業ではケーブル絶縁材料の放射線と熱による化学反応を追跡し、放射線と熱の順序及び相乗効果、絶縁材料の安定剤などの種類と添加量の効果を解明して、化学反応と機械特性・電気絶縁特性との相関を定量的に解析評価する。これによりケーブル劣化のメカニズムを検討するとともに加速試験の妥当性を評価する。

b. ケーブル劣化の監視・診断特性試験（広帯域インピーダンス分光(BIS)法）

本事業では、先見的な非破壊ケーブル劣化監視・診断技術として、広帯域インピーダンス分光(BIS)法について、その信頼性、適用性を検証する。具体的には、種々の劣化を与えたケーブルについて、インピーダンス値及び位相角を測定し、劣化と測定値の関係を解明する。この際、劣化の影響がより明瞭となるデータ解析法を検討するとともに、劣化程度と測定値の関係を解明するために、酸化物の蓄積や活性種（フリーラジカル）の挙動を化学発光測定法、顕微赤外分光分析や電子スピン共鳴分光測定等で評価する。時間領域反射法ならびにパルスレーザーを用いて音波等を検出する手法等、BIS法以外の手法についても、その可能性を探る。

(3) 応力腐食割れ評価手法の高度化に関する調査研究

炉内構造物・配管における応力腐食割れ（SCC）に関する健全性評価手法の妥当性判断に必要な技術基盤の形成及びSCC挙動予測法の高度化のため、従来は考慮されていなかった、放射線分解水質及び照射速度がSCC挙動に与える影響について評価する。また、炉内構造物・配管のSCC評価手法に関する総合的整理を行い、高経年化に対応したSCC評価手法の科学的・合理的な技術基盤の形成に資する。

a. 照射影響を考慮したSCC評価手法の高度化に関する研究

イ. 放射線照射下腐食環境評価法の高度化

SCC発生進展挙動の評価精度の向上のためには、炉内直接照射下及び放射線分解生成物の移行による再循環系配管内の腐食環境の定量評価法が不可欠である。そのため、炉内放射線分解水質を模擬する高温水ループ試験装置及びガンマ線照射試験施設などを用い、放射線分解水質及び腐食環境緩和水質が材料表面皮膜の形成・性状に与える影響を評価する。また、炉内のすき間部や材料表面近傍の局所水質を評価可能な放射線分解モデル及び局所腐食環境予測モデルの検討を行い、実機の炉内及び配管内における放射線分解水質が、SCCの発生進展挙動に与える影響を評価するために必要な放射線照射下腐食環境評価法の

高度化を図る。

ロ．放射線分解水質下の SCC 発生進展挙動評価法の高度化

放射線分解生成物である過酸化水素を含む高温水中でのステンレス鋼の腐食挙動は、溶存酸素のみを含む高温水中とは大きく異なることが実証されている。このため、本研究では、溶存水素、酸素、過酸化水素濃度を独立に制御可能な高温水ループ付 SCC 試験装置及びガンマ線照射下 SCC 発生進展装置を用いて SCC 発生進展試験を実施し、炉内腐食環境における SCC 挙動予測法の高精度化に必要な知見を取得するとともに、上記イの研究成果を活用して、表面皮膜の形成と破壊及び局所水化学の影響を含めた放射線分解水質下の SCC 挙動モデルを構築する。これにより、炉内構造物・配管の SCC 健全性評価手法の妥当性判断に必要な技術基盤の形成及び SCC 挙動予測法の高度化に資する。

ハ．照射速度の影響を取り入れた SCC 発生進展挙動評価法の高度化

低照射速度で長期間の照射を受ける高経年化プラント構造物の照射下における健全性を評価するため、材料試験炉などにおいて、高照射速度を用いて短時間で同等の積算線量に達する加速照射試験によってデータが得られている。しかし、原子炉材料の照射下ミクロ組織発達過程においては、照射速度の相違が大きな影響を及ぼし、それに伴う材料特性変化も照射速度の相違によって異なる。このため、ミクロレベルにおいて、照射速度の相違が及ぼす影響を評価し、照射速度の影響を取り入れた材料挙動の予測モデル構築が望まれる。これにより、高経年化プラントの構造物材料に関して、安全性と信頼性の確保に資することが期待される。

具体的には、照射誘起型応力腐食割れ（以下 IASCC）に影響を及ぼす材料のミクロ組織、組成変化、力学的特性変化に関する照射速度依存性を検討する。また、従来の SCC き裂進展モデルに対して照射の影響を取り入れるために必要なパラメータに関して実験的解析を行い、IASCC のき裂進展モデルの高度化に資する。

b．炉内構造物・配管の SCC 評価手法の体系化研究

本研究では、上記 a．により得られる放射線分解水質及び照射速度の影響に関する知見に基づき、SCC 発生進展挙動予測方法へそれらの影響を取り入れる手法について、現状において広く用いられている各種 SCC 評価試験法と比較評価を行い、関連する規格基準について高経年化評価の高度化に必要な課題を抽出・検討する。

4．実施方法

本事業を効果的、効率的に進めるため、JNES との情報交換、協調を図りつつ、専門知識と実績を有する研究機関、大学等の連携の下に下記の通り研究を実施する。これらの研究項目の実施と並行して、本事業全体の統括者はその実施計画、実施内容、研究成果の検討等を行うため、関連研究機関、大学等と連携を密にするとともに、定期的な委員会を開催し、相互補完を行う

(4 回程度開催、委員数 15 名程度)。なお、委員の選定については、原子力発電検査課と協議のうえ、決定すること。

(1) 原子炉压力容器鋼の中性子照射脆化に関する研究

a. 原子炉压力容器鋼における溶接熱影響部の照射脆化評価調査

イ . 溶接熱影響部健全性評価手法の調査

原子炉压力容器鋼の溶接熱影響部について、母材との相違に関する知見や原子炉压力容器への健全性へ与える影響を評価する手法を調査・整備する。

具体的には、溶接熱影響部の金属組織と強度分布に関する特徴付けや、健全性に及ぼす影響評価法等に関する国内外の知見の収集・分析を行うとともに、溶接熱影響部のような非均質部が構造健全性に及ぼす影響を評価する手法を整備し、ロ . 等で取得する溶接熱影響部に関する試験データ等を用いて、原子炉压力容器の健全性に及ぼす溶接熱影響部の影響に関する評価を行う。

ロ . 溶接熱影響部の材料特性評価試験・メカニズム調査

溶接熱影響部特性について、母材との相違をミクロ組織や脆化メカニズムの観点から確認することを目的に、破壊靱性評価に必要な組織観察、破壊靱性試験等を実施する。

具体的には、照射脆化の原因となる不純物元素等の含有率を変えた鋼材試験片を製作し、溶接による熱影響を模擬した熱処理を行い、機械的特性と金属組織に関するデータを取得する。また、過年度製作の溶接継手における溶接熱影響部、並びに溶接熱影響再現熱処理材を用いて破壊靱性等の材料特性データを取得する。これらのデータ等を基に、鋼材中の不純物に対応した溶接熱影響部組織と機械的性質の相関を評価する。

これら、不純物元素等の含有率を変えた鋼材の溶接熱影響部等から採取した試料を用いて、過年度整備の試料加工方法 (走査型電子顕微鏡 (以下 SEM) 観察その場微小領域加工装置を用いることによって、溶接熱影響部のような非均質部からピンポイントで試料を採取する方法) を駆使したアトムプローブ法及び陽電子消滅法によるミクロ組織分析を行い、溶接熱影響部の照射脆化メカニズムを比較評価するために必要な非照射データを取得する。また、SEM 観察その場微小領域加工装置に、結晶粒の傾角を精密に測定出来る粒界工学評価システムを付加し、結晶粒界の性質と粒界偏析の関係を系統的に調べて評価する。

加えて、溶接熱影響部を対象とした脆化メカニズムに関するマルチスケールモデリングに資するため、溶質原子の影響を取り入れた EAM (原子挿入法) 電子密度を用いて、分子動力学法や機構論的モンテカルロ法計算を行う。これに基づいて、溶接熱影響部と母材の照射硬化の相違について検討する。

ハ . 溶接熱影響部の照射脆化感受性試験

溶接熱影響部試験片等に対する中性子照射試験を行い、ミクロ組織分析や破壊靱性試験等により、溶接熱影響部の照射脆化感受性を母材と比較する。

具体的には、過年度に製作した照射キャプセル及び試験片を用いて、中性子照射試験を行う。照射試験の終了後、照射キャプセルを解体し、照射後試験のため照射済試験片をホットラボに搬入する。また、鋼材中の不純物等を変えた試験片に対する中性子照射試験を行うため、照射キャプセル及び試験片の製作を行う。さらに、中性子照射済試験片の破壊靱性等を測定する照射後試験のため熱影響部靱性測定装置等の整備を行い、未照射材を用いたレファレンスデータを取得する。

二．評価

上記イ．～ハ．の調査・試験を通して、監視試験片に関する規格・基準の妥当性評価に活用することを目標として、原子炉圧力容器鋼の溶接熱影響部における照射脆化が構造健全性に及ぼす影響について、予備的な検討を行う。この検討結果に基づき、監視試験方法における溶接熱影響部試験片の必要性を判断するための技術基盤の形成を図る。

b. イオン照射法による照射脆化予測基盤データ取得と効率的評価手法の調査研究

イ．照射脆化予測基盤データベース構築

照射脆化と直接的に関連付けられる照射硬化に着目し、イオン照射と超微小押し込み試験の組合せによって、圧力容器鋼材の照射脆化データベースを拡充させる。

具体的には、化学組成や微細組織の異なる鋼材試験片を準備し、バン・デ・グラーフ加速器とタンデトロン加速器を用いたイオン照射試験を行い、より実機に近い低照射速度領域、及び高経年化で問題となる高照射量領域における、照射脆化に関する照射速度依存性及び化学組成依存性等のデータを取得する。

ロ．照射損傷評価技術の高度化

実機環境条件における照射硬化挙動の予測には、硬化因子の生成過程をモデル化する必要がある、これには照射欠陥の安定性に関する情報や、照射下での欠陥や溶質原子の拡散挙動に関するパラメータ評価が不可欠である。

このため、高経年化で想定される高照射量領域において照射硬化を引き起こす組織因子とその効果を明らかにするため、化学成分や微細組織を調整した試料を準備し、バン・デ・グラーフ加速器とタンデトロン加速器により照射材を作製し、硬度測定、電顕観察、アトムプローブ分析、陽電子ビーム分析及び電気抵抗測定等を行う。そして照射欠陥の形成過程、安定性、蓄積過程、及び照射下での欠陥や溶質原子の拡散などのマイクロ現象を明らかにする。また同種の照射履歴、熱履歴を有するバルク試料に対して硬さ試験を実施する。これらによりマイクロな物性変化とマクロな機械的性質変化との相関を得、これら知見を、脆化予測式と対照させ、物理的意味づけを与える等の活用を図る。

(2) ケーブル劣化のメカニズム及び監視・診断手法に関する研究

a. ケーブル劣化メカニズム調査研究

放射線と熱による高分子絶縁材料の酸化に焦点を絞り、酸化物の生成量、高分子の分

解（切断）、配合組成の変化などについて検討する。また、これらの変化と絶縁材料としての特性（機械特性、電気絶縁特性）との関係を解明する。

このため、ケーブル材料の劣化評価に係る既諸知見を調査分析する。また、放射線照射・熱劣化したケーブル絶縁材料について、熱又は高温下での放射線劣化後の添加剤（酸化防止剤など）の劣化又は表面からの蒸散の空間分布の解析評価を実施し、高温域と室温域での活性化エネルギーの特性を評価する。さらに、照射条件（照射量、温度）を変化させ、ケーブル高分子材料の重量変化と温度の関係の調査を行い、ケーブル材料劣化に関する知見、劣化試験の妥当性等に関する情報を取得する。

具体的には、XLPE（架橋ポリエチレン）及びPVC（ビニル）の加速試験による劣化の分布を重点的に測定分析し、安定剤の濃度変化との関係を解析する。安定剤の中で、特に、微量の酸化防止剤は全体の劣化を左右すると推定されるので、EPR（エチレンプロピレンゴム）及びSiR（シリコンゴム）を含め、酸化劣化との相関を検討し、加速試験の解析結果を独立行政法人原子力安全基盤機構（以下JNES）で実施した長期間劣化試験の結果と比較して、加速条件の妥当性を検討する。

b. ケーブル劣化の監視・診断特性試験（広帯域インピーダンス分光(BIS)法）

原子力発電所内で使用されている安全系ケーブルを対象とした電氣的な非破壊ケーブル劣化監視・診断手法の確立を目指し、広帯域インピーダンス分光(以下BIS)法について、その信頼性、適用性を検証する。

具体的には、JNESにて実施中の原子力プラントのケーブル経年変化評価技術調査研究にて試験されている安全系ケーブルと同種のケーブル等に、原子力発電所実使用環境に可能な限り近い放射線線量率、使用環境温度で、全体若しくは局所のみへの劣化を施す。その後、BIS法により、インピーダンス値及び位相角を測定する。さらに測定に使用したケーブル等について、微量な酸化生成物の検出が可能な化学発光測定法を使用し、劣化度合いと測定値との関係を解明する。さらに、TDR（時間領域反射率測定）法による測定を行い、上記a.項の調査研究において得られた材料劣化データを含む全ての結果を参照し、BIS法のケーブル劣化診断手法としての適用可能性を検討する。

(3) 応力腐食割れ評価手法の高度化に関する調査研究

a. 照射影響を考慮したSCC評価手法の高度化に関する研究

イ. 放射線照射下腐食環境評価法の高度化

炉内放射線分解水質を高温水中への過酸化水素注入により模擬する腐食試験装置及びガンマ線照射下腐食試験装置を用いて、ステンレス鋼の腐食試験を行い放射線分解水質が表面皮膜の形成・性状に与える影響に関する知見を取得するとともに、電気化学的試験法等により放射線分解水質下の腐食環境を高精度に定量評価する手法に関する検討を行う。また、バルク水質と局所水質との相関評価及び放射線分解水質環境での表面皮膜の形成・破壊とSCC発生挙動との関係評価を行う。

具体的には、過年度製作の過酸化水素注入高温水中腐食試験装置によるステンレス鋼の定ひずみ負荷 SCC 試験、高線量率ガンマ線照射下腐食試験装置の製作と腐食試験、酸化剤種の異なる高電位環境での電気化学測定などを行い、放射線分解解析モデルの高度化を図るとともに、表面での溶解や腐食反応を考慮し水のバルク水質と局所水質及び局所腐食環境予測モデルの検討、理論解析モデルの高度化、並びに実機水化学環境の解析評価を行い、放射線分解水質の炉内 SCC 挙動への影響度を明らかにする。

ロ．放射線分解水質下の SCC 発生進展挙動評価法の高度化

ガンマ線照射下 SCC 試験装置及び溶存水素、酸素、過酸化水素濃度を独立に制御可能な高温水ループ付 SCC 試験装置を使用して、ステンレス鋼の SCC 発生進展試験を実施し、炉内腐食環境における SCC 挙動予測法の高精度化に必要な知見を取得するとともに、上記イ．の研究成果を活用して、表面皮膜の形成と破壊及び局所水化学の影響を含めた放射線分解水質下の SCC 挙動モデルを構築する。さらに、IASCC については、材料自体のガンマ線が放射線分解の影響について、特に SCC 緩和環境における影響を実験及び解析に基づき検討する。

具体的には、過酸化水素注入水質及び水素注入により腐食緩和環境における SCC 進展試験を行い、過酸化水素と溶存酸素及び水素の混在条件における SCC 進展挙動に関する知見を取得する。また、試験後の材料表面皮膜の多元分析を行い、水質の違いによる皮膜性状の違いが SCC 進展挙動に与える影響について検討する。さらに、放射線分解水質の影響を取り入れたき裂進展モデルの検討を開始する。

ハ．照射速度の影響を取り入れた SCC 発生進展挙動評価法の高度化

照射硬化、照射誘起偏析に関する照射速度効果の調査分析

オーステナイト鋼を対象として、これまでの照射試験で得られてきた照射誘起偏析、照射ミクロ組織、照射硬化のデータを文献調査により集積する。また、文献調査では不足することが明確である低照射速度のデータ拡充のため、実機材データを取得する。

具体的には、更にデータ集積範囲を拡充し、き裂進展データの存在する中性子照射材データに対して、対応するより多くのミクロ組織データを集積するとともに、実機材データを取得する。

照射硬化、照射誘起偏析に関する照射速度効果の実験的評価及びモデリング評価

オーステナイト鋼に対してイオン照射試験により、材料挙動変化に及ぼす照射速度の効果を明らかにする。また、力学的特性変化に及ぼす影響についてモデルにより評価する。

具体的には、照射データを拡充するとともに、照射下における力学的特性変

化のモデルによる照射速度効果に関する評価を行う。

照射速度の影響を取り入れた SCC 発生進展挙動予測モデルの構築

オーステナイト鋼中性子照射実機材でき裂進展モデル計算に必要なパラメータを取得し、これに基づいてき裂進展に関するモデル計算を行う。また、き裂進展に関する計算結果と実験結果と比較することで、照射の影響を取り入れるための課題を抽出する。

具体的には、き裂進展に関するモデル計算のための機械的特性データ取得のための実験を行い、き裂進展モデル計算と実験データの比較を行う。これらに基づいて、照射の影響を取り入れたき裂進展モデルの課題を抽出する。

b. 炉内構造物・配管の SCC 評価手法の体系的な研究

現状の SCC 評価試験法について高経年化評価の観点から体系的な整理を行うとともに、SCC 評価試験法の高度化に不可欠な情報である実機の材料、構造、環境について、特に炉内構造物・配管の部位毎に異なる特性を SCC 評価試験法に取り込む方法論について検討を行う。また、各種試験方法に関して公開文献などに基づき調査及びその課題の抽出・検討を行うとともに、SCC 試験法により得られる知見・データの妥当性を評価検討するため、実機の SCC 事象に係る材料使用条件及び SCC 発生状況の調査を行い、現状の SCC 評価試験法に反映すべき課題と改良点について検討する。

具体的には、PWR 環境下において実施されている各種の SCC 試験の試験方法・条件及び試験結果について調査・検討を進めるとともに、相違点や共通要素を明らかにする。また、PWR 実機における材料使用条件及び SCC 発生状況の調査を行い、両調査の結果を比較検討することにより、関連する高経年化評価の高度化に必要な課題を抽出・検討する。

5. 事業期間

委託契約日から平成 21 年 3 月 31 日まで

6. 事業報告書

30 部 (CD-ROM 2 部)

7. その他

この委託費に対する再委託費 (金額が 50 万円未満の再委託費、印刷費、会場借料、翻訳費、物質購入費その他これに類するものを除く) の比率が原則として 50% 以内であること。

再委託費合計 (円)

$$\text{再委託比率 (\%)} = \frac{\text{再委託費合計 (円)}}{\text{委託費合計 (円)}} \times 100$$

入札価格（円）

- * 再委託費：入札する者が自ら直接実施しない事業として他者委託・請負する経費。ただし、軽微な再委託（金額が50万円未満の再委託費、印刷費、会場借料、翻訳費、物質購入費（試験機器の設計・製作を含む。ただし、当該設計・製作に加えて、企画・実験その他の業務を含むものは除く。）その他これに類するもの）は再委託費合計の算出には含めないこととする。
- * 入札価格：初回の入札の際予定している入札価格とする。
- * 価格はいずれも税抜きの価格とする。