



材料劣化・高経年化対策技術に関する研究

平成22年12月24日

第8回安全研究審議会

日本原子力研究開発機構

安全研究センター

(説明者： 鈴木雅秀)



原子力の重点安全研究計画(第1期) H17-H21

【重点安全研究計画の課題】

- き裂進展評価法やき裂のサイジング技術等に関する最新の知見の整備、経年変化現象の解明とその予測評価手法の整備、き裂や劣化の検出・測定法の開発整備、構造信頼性評価手法の整備等が重要。

【原子力機構に期待する安全研究】

- 材料劣化現象の解明と評価手法の開発
 - 放射線場における材料劣化の機構論的な評価手法の高度化
 - 圧力バウンダリ配管等の高経年化を考慮した地震時信頼性評価手法の高精度化
 - 確率論的破壊力学(PFM)解析に基づく構造信頼性評価手法の確立
 - 監視試験片による原子炉圧力容器の破壊靱性評価手法の高精度化
- 上記成果を基にした高経年化に対する安全規制手法の提案(定期安全レビュー、リスク評価等)

材料劣化・高経年化対策技術に関する 研究目的と実施体制(第1期) H17-H21

【研究目的】

経年機器の構造信頼性評価のための確率論的破壊力学解析手法を整備するとともに、放射線による材料劣化挙動についての照射試験を通して機構論的な経年変化の予測手法及び検出手法の整備や、照射誘起応力腐食割れ(IASCC)に関する照射後試験データの取得を行い、高経年化機器の健全性確認に関わる規制基準や民間規格の高度化に資する。

【実施体制】

確率論的破壊力学解析手法の整備では、保安院からの受託事業「確率論的構造健全性評価調査」による原子炉压力容器と配管溶接部に対する解析コードの整備を中心に、プロパー研究としてニッケル基合金溶接部のSCC評価のための解析コードを開発・整備した。材料劣化挙動に関しては、プロパー研究として機構内の研究開発拠点等と連携し、照射脆化の機構論的予測に関する試験研究等を実施した。

これらの成果や機構内の連携体制を基に、JNESから外部資金を獲得し、粒界脆化に関する実験・解析、地震時におけるき裂進展挙動評価法、IASCCに関する照射後試験、及び「ふげん」の材料調査等を実施した。

原子力安全・保安院からの受託事業として、軽水炉燃材料詳細健全性調査では、安全研究センターが照射試験炉センター及び原子力基礎工学研究部門と連携し、平成23年度から再稼動するJMTRを用いて実施する高経年化対策に係る材料照射試験に必要な照射試験装置の整備や技術開発を行った。これにより、国が「戦略的に重要な安全基盤研究施設」と位置付けたJMTRを活用する高経年化対策に係る研究基盤の構築に貢献した。

高経年化対策強化基盤整備事業では、茨城地区を中心に東大、東北大、早大、茨城大や日立GE、東芝等、産学官の連携により照射脆化、ケーブル劣化及びSCCに関する試験研究を実施、とりまとめを行った。

確率論的構造健全性評価調査を含めて、これら保安院受託事業に関しては、外部有識者による専門部会等を開催し、事業計画及び成果についての審議を通して研究を実施した。

材料劣化・高経年化対策技術に関する 研究成果の概要と活用

【平成17～21年度の成果】

- 原子炉圧力容器及び配管溶接部に対する経年劣化や溶接残留応力の確率論的評価手法を整備し、PFM解析コードを公開。
- 原子炉圧力容器鋼の中性子照射脆化に関して、不純物含有率の異なる鋼材のナノ組織分析を行い、照射脆化機構の解明に資する知見を取得。
- 原子炉圧力容器鋼の破壊靱性評価手法として、IAEA国際協力を通して破壊靱性マスターカーブ法の確立に貢献。
- 中性子照射による不純物の粒界偏析に関わる試験データ分析とシミュレーションから、国内原子炉での粒界脆化の発生可能性、及び照射速度効果に関する知見を取得。
- 原子炉圧力容器鋼溶接熱影響部の照射脆化評価に必要な金属組織と破壊靱性等のデータを取得して両者の相関を明確化するとともに、熱影響部の健全性評価手法を確立。
- 戦略的に重要な安全基盤研究施設と位置付けたJMTRをH23以降活用するため、材料照射試験に必要な照射試験装置の整備や技術開発を実施。
- ふげん実機配管の肉厚を実測しデータベース化し、配管減肉管理に関する妥当性評価を行った。

【平成17～21年度の成果】(続き)

- IASCCに関してJMTR照射材の照射後き裂進展試験データを取得。
- 3次元仮想振動台の整備については、解析結果を実振動データと比較し、応答解析精度を検証することにより、実プラントデータによる地震応答解析技術を実証。

【成果の活用】

- 原子炉圧力容器鋼の破壊靱性評価手法として、破壊靱性マスターカーブ法に関するIAEA技術報告書策定に貢献するとともに、日本電気協会技術規程(JEAC)の新規規程策定及び現行規程の改定に対し技術的根拠として提供した。
- IASCCに関する照射材のき裂進展データをJNESのIASCC評価ガイド(案)策定のために提供した。

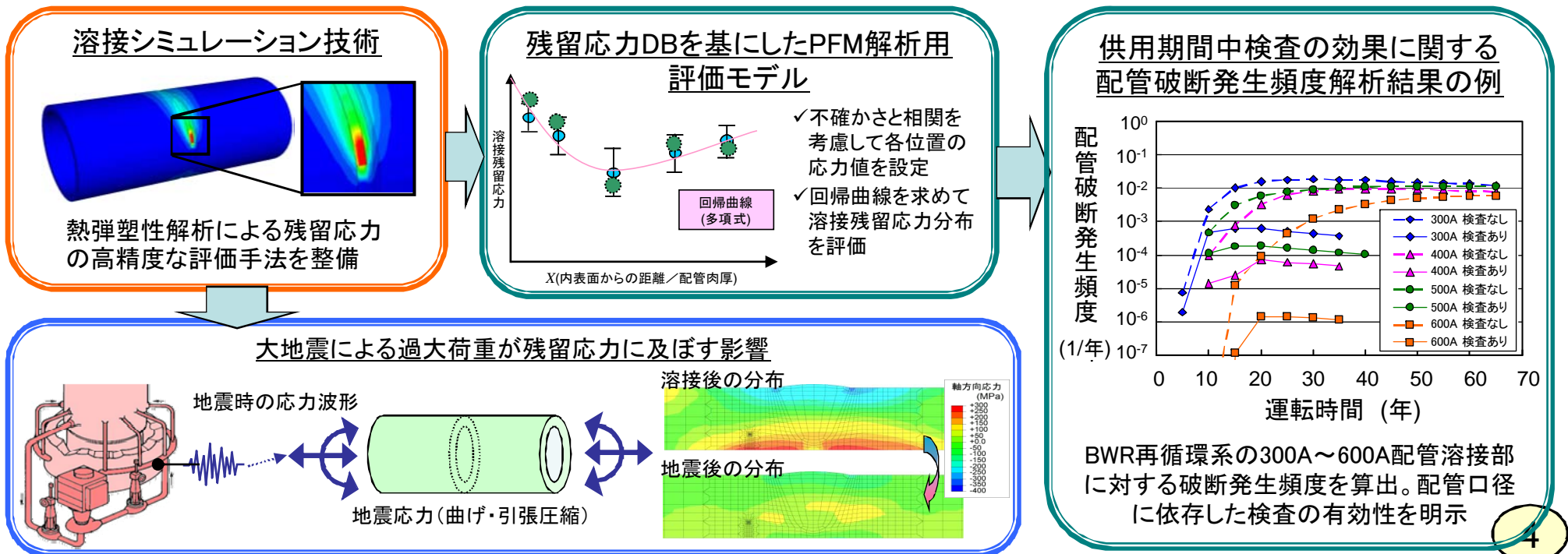
【成果活用に向けた進行中の取り組み】

- 原子炉圧力容器鋼の溶接熱影響部に関して、中性子照射材のデータを取得し、日本電気協会規程及び日本機械学会設計・建設規格における熱影響部監視試験片の必要性に対する技術的根拠を提示予定。
- 3次元仮想振動台については、従来の地震応答解析法の保守性の評価や地震PSAにおける機器損傷確率評価の技術基盤として活用予定

材料劣化・高経年化対策技術に関する主な研究成果(1)

【主な成果】 確率論的破壊力学(PFM)解析手法の整備と活用方策に関する研究-1

- 配管溶接部残留応力評価モデル・データベース(DB)化
 - 有限要素法による溶接シミュレーション技術を確立し、溶接条件のばらつきを考慮したPFM解析用残留応力DBを整備
- PFM解析コードを整備し、原子炉冷却材圧力バウンダリ配管溶接部の健全性評価に対する活用方策を検討
 - 維持規格等に基づく健全性評価手法に準拠して破損確率を評価する PASCAL-SPコードを整備し、公開
 - 決定論的手法とPFM解析手法に基づく安全裕度の相対比較や、PSAにおける故障率に相当する破断発生頻度の評価を行い、現行規格の安全率における保守性や検査の有効性等に関する知見を得た。
- 過大荷重を受ける配管のき裂進展評価手法の高度化
 - 溶接部に対する過大荷重負荷による溶接残留応力の緩和を定量的に評価
 - 巨大地震時の繰返し過大荷重に対応したき裂進展挙動の評価手法を提案



材料劣化・高経年化対策技術に関する主な研究成果(2)

【主な成果】 PFM解析手法の整備と活用方策に関する研究-2

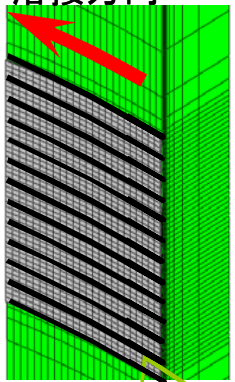
- PFM解析コードを整備: 原子炉压力容器(炉心領域部)
 - 国内の健全性評価手法に準拠したPASCAL ver.3を整備 (現在公開手続き中)
- 原子炉容器肉盛溶接部の残留応力解析と構造健全性への影響評価
 - 肉盛溶接クラッドによる残留応力がき裂進展確率に及ぼす影響は最大で10倍程度であることを示した。
 - ⇒ 肉盛溶接部(溶接残留応力や非破壊検査への影響)を考慮する必要性を提示
 - 現行規程における健全性評価の安全余裕を確率的に定量評価。また、現行規程では未採用の高温予荷重効果が健全性評価における温度裕度、及び破壊確率に及ぼす影響を定量的に評価
- PFM解析手法に基づくより合理的な評価方法に基づいて、現行の決定論的評価における安全裕度の定量化や相対評価など、安全規制の高度化を図ることが可能であることを明示

【今後の取り組み】

- 高経年化対策(照射脆化)に関するPFM解析の適用性を明確化する。

原子炉压力容器内表面の肉盛溶接シミュレーション

溶接方向

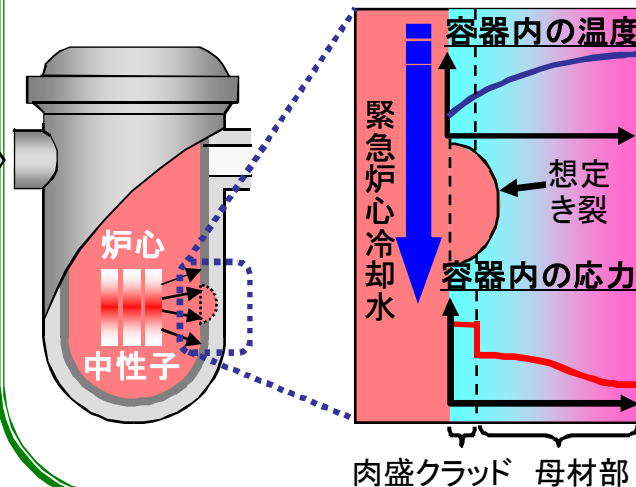


熱弾塑性解析による残留応力評価手法を整備

■ : 肉盛クラッド

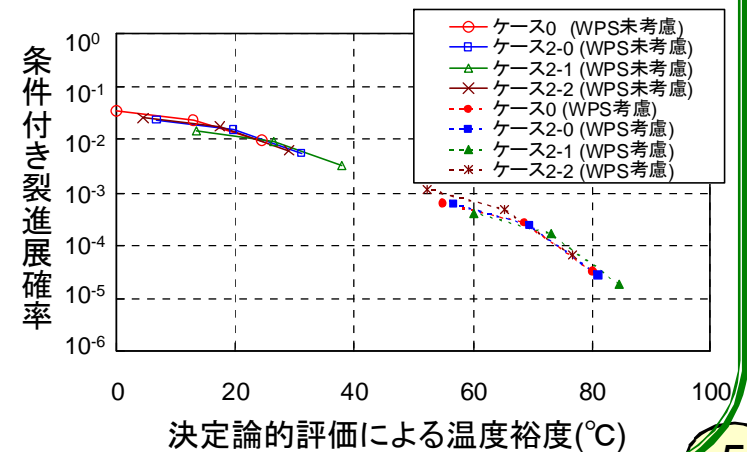
原子炉容器の加圧熱衝撃(PTS)事象に対する構造健全性評価

破壊力と破壊靱性の比較による評価



肉盛溶接を考慮したPTS時のPFM解析例

肉盛溶接や高温予荷重(WPS)に関する種々の解析ケースの結果から、決定論的評価による温度裕度との良い相関を確認



【主な成果】放射線による材料劣化挙動の予測と 検出に関する研究

●高照射量での原子炉圧力容器鋼の照射脆化機構解明

- 長期供用に対応した高照射量を受ける場合の照射損傷に関するナノ組織分析を行い、銅を中心とした析出物の生成と、その後のSi-Mn-Niを中心とする析出物の生成を確認
- 高照射量域でも中性子照射による粒界P偏析による非硬化型脆化(粒界脆化は顕著)ではなく、硬化型脆化のみによる照射脆化の予測評価は可能であることを確認

●破壊靱性評価手法の整備

- 試験片寸法効果や粒界脆化材への適用性等の破壊靱性マスターカーブ法に関するデータ取得し、国内における試験法規格化に向けて技術的根拠を提供

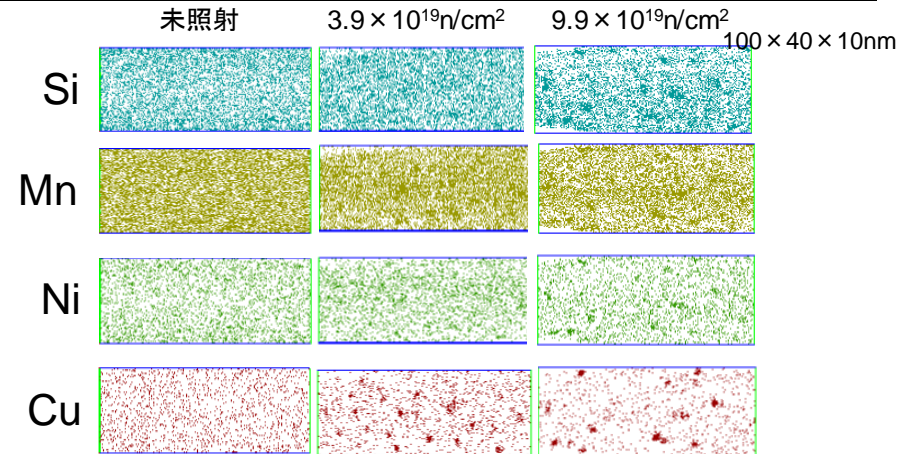
●原子炉圧力容器鋼熱影響部の照射脆化評価法の整備

- 非照射状態における熱影響部の特徴を詳細化
- 非均質材の確率論的破壊力学評価手法を整備
- JRR-3で中性子照射を実施し、照射後試験を準備中

●照射誘起応力腐食割れ(IASCC)に関する研究

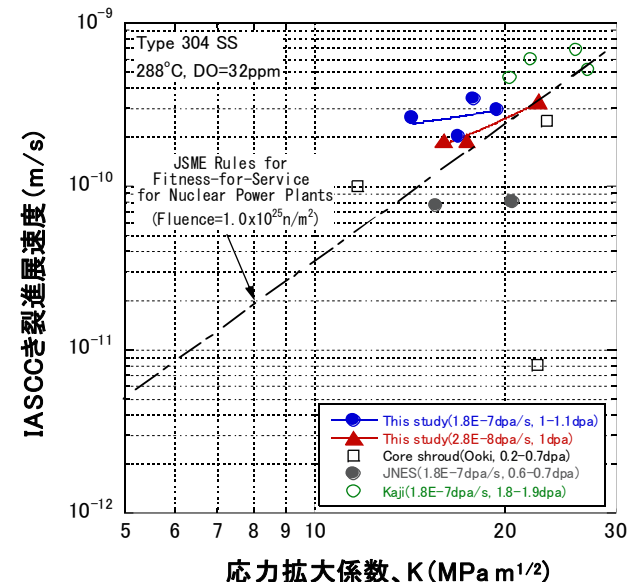
- 照射速度の異なるJMTR照射済み試験片を用い、BWR条件を模擬した高温水中におけるSCCき裂進展試験を高溶存酸素濃度(DO)水質中で実施し、SCCき裂進展速度への照射速度の影響に関する知見を取得。(右下図)
- 照射後SCC試験データをJNESへ提供し、き裂進展速度式の提案及びIASCC評価ガイド(案)の作成に貢献。

中性子照射した圧力容器鋼の原子プローブによる原子マップ



☆高照射量領域でCu富裕析出物とSi-Mn-Niクラスターの形成を確認

IASCCき裂進展速度に与える中性子照射速度の影響

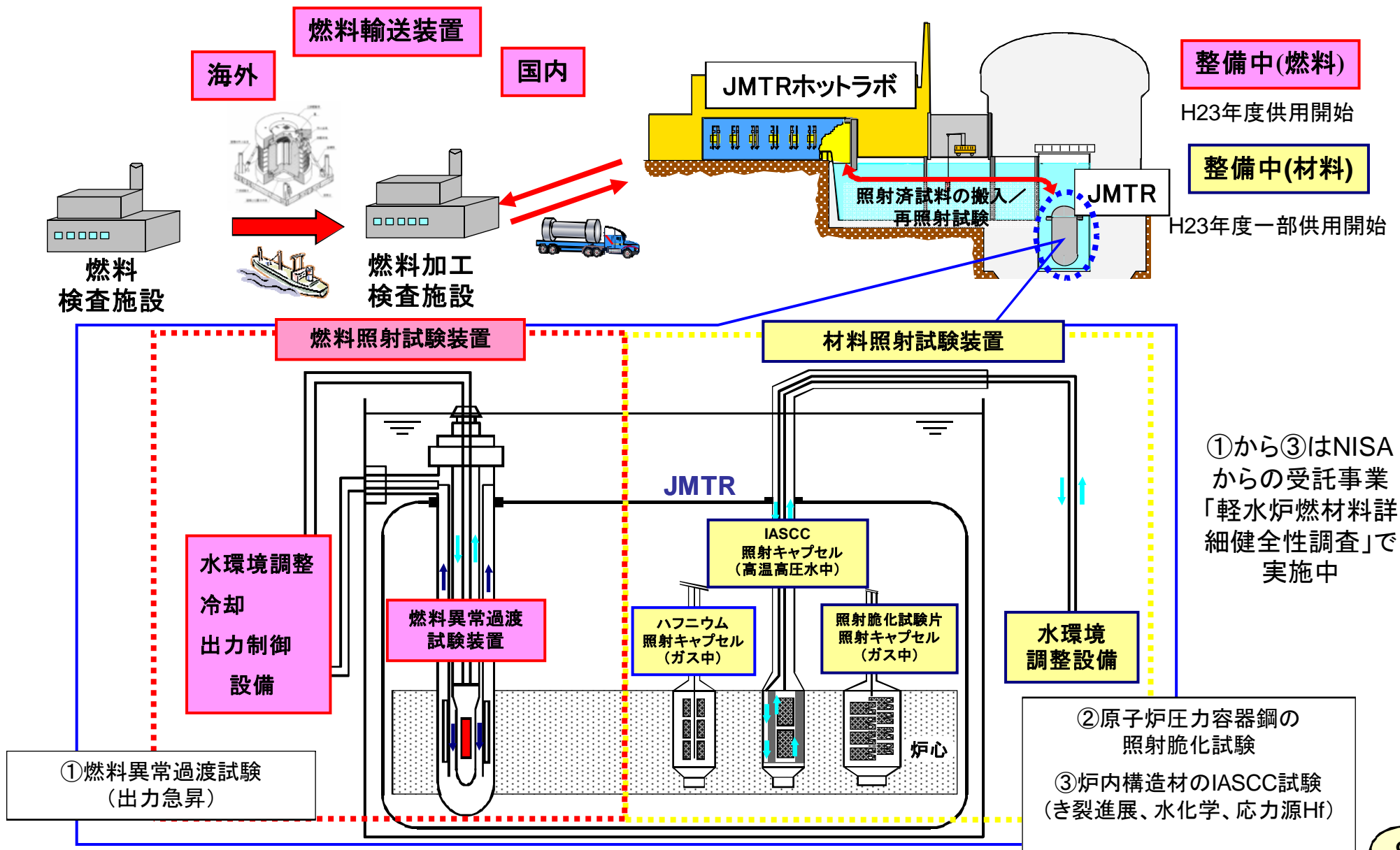


☆き裂進展速度の応力拡大係数依存性に照射速度の影響を確認

参考資料 目次

1. JMTRにおいて整備中の照射試験装置
2. 「ふげん」を利用した高経年化研究
3. 高経年化対策基盤研究におけるJAEAの活動
4. 原子力の重点安全研究計画(第2期) H22-H26

JMTRにおいて整備中の照射試験装置



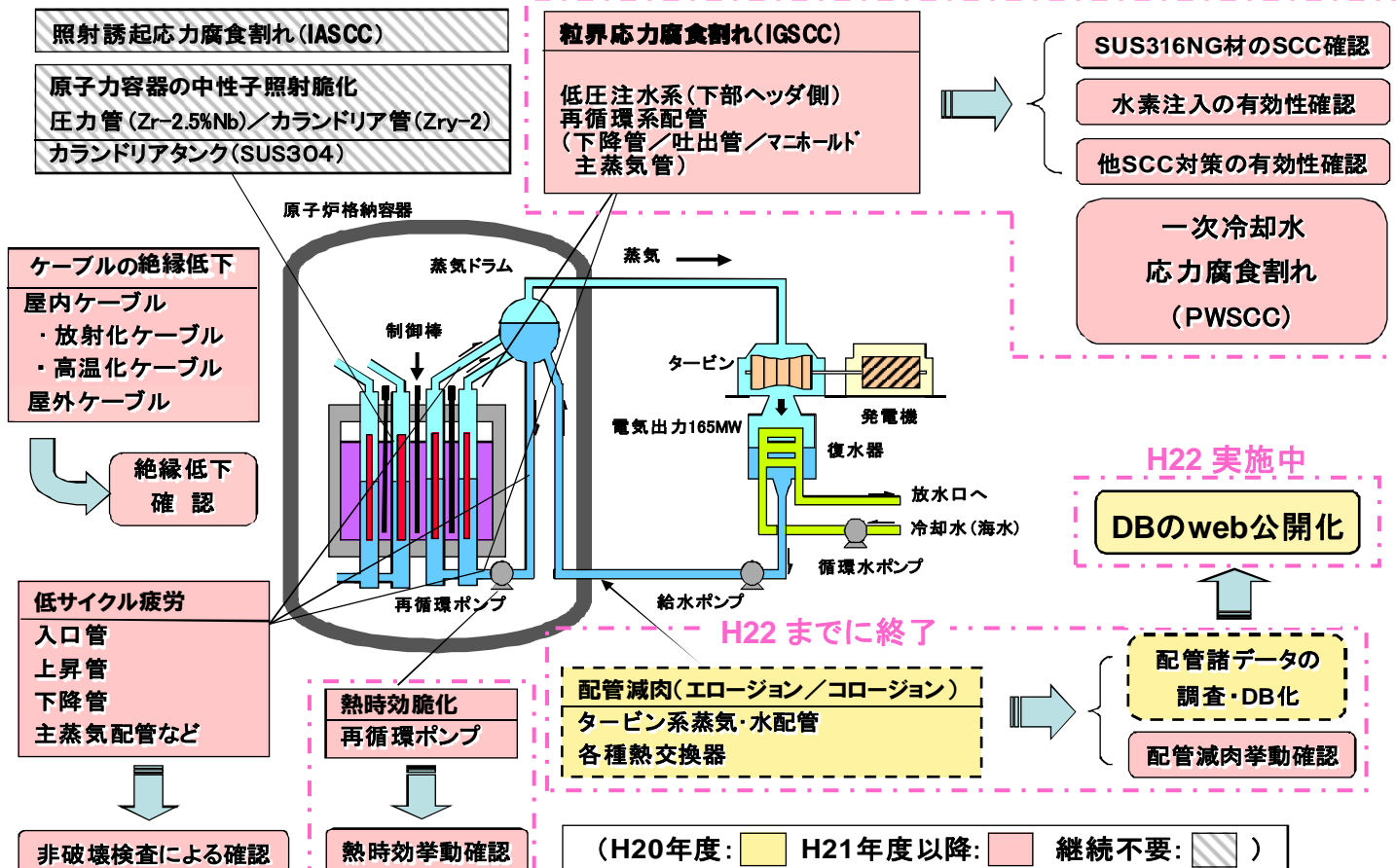
「ふげん」を利用した高経年化研究

【目的】

現在、廃止措置工事が進捗中である「ふげん発電所」の実機材料等を用いて、原子力発電所の高経年化対策の充実を目的とする調査研究を、長期運転プラントや研究機関等が集積する福井県下で実施する。

- 高経年化対策技術の妥当性の検証
- 長期保全技術の適用性や有効性の評価手法の整備

ふげん実機材で確認可能な試験項目



原子力の重点安全研究(第2期) H22-H26

【重点安全研究計画の課題】

- き裂進展評価法やき裂のサイジング技術等に関する最新の知見の整備、経年変化現象の解明とその予測評価手法の整備、き裂や材料劣化の検出・測定・予測・予防保全に関する研究、経年劣化を考慮した確率論的破壊力学解析手法等による構造信頼性評価手法の整備、材料損傷の防止に関わる原子炉冷却水化学に関する研究等が重要
- 必要な基礎・基盤的な研究事例として、機器の構造健全性評価に係るシミュレーション技術の整備

【原子力機構に期待する安全研究】

- JMTR等を用いた放射線、高温水に起因する原子炉材料の経年劣化に対する予測評価法の高度化の研究
- 確率論的破壊力学解析手法を導入した検査や保全手法に関わる構造信頼性評価手法に関する研究
- 設備の健全性評価や材料に関わるシミュレーション技術に関する研究

【研究目的】

軽水炉の運転実績は最長で40年を経過し、今後も引き続き長期供用が検討されていることから、このような長期供用に対する安全確保の確認を行うため、材料の経年劣化事象の予測評価、長期供用機器の健全性評価手法、予防保全技術の高度化等に関する技術基盤を整備し、規格基準類の高度化に資する。

【実施体制】

運営費交付金予算を中心として実施するプロパー研究においては、照射脆化やIASCC等の材料劣化の機構解明に関わる試験研究を、安全研究センターを中心として、照射試験炉センターや原子力基礎工学研究部門等と連携して照射試験等の基礎基盤研究を実施するとともに、シミュレーション技術に関するシステム計算科学センター等との緊密な連携により研究を実施。構造信頼性評価手法に関しては、第1期の成果であるPFM解析コードの改良・活用方策を推進するとともに、構造材料不連続部に対する適用性の検討を進める。

また、上記プロパー研究での成果や連携体制を活かして、(独)原子力安全基盤機構から安全研究センターが窓口となり外部資金を獲得し、ホット試験施設等の研究開発拠点や前記の連携により効率的に試験研究を実施する。「ふげん」調査に関しては、安全研究センターと原子炉廃止措置研究開発センターが福井大学と連携して「ふげん」での長期供用材料を利用する研究に取り組む。

保安院からの受託事業として、第1期に引続き、軽水炉燃材料詳細健全性調査では、原子力基礎工学研究部門、照射試験炉センターやホット試験施設と緊密に連携を取り、改修後のJMTRを利用した照射脆化及び照射下IASCCに関する試験研究を実施。

【具体的研究計画】

- 構造材料不連続部に対する健全性評価法として、確率論的破壊力学解析手法を整備する。22年度は構造不連続部の残留応力解析手法の整備と破壊力学解析手法の適用性について検討に着手する。
- ニッケル基合金溶接部に対するPFM解析コードの改良を行い、データとの比較等を通して検証し、解析コードの整備を完了する。
- 構造健全性評価に関する従来法の保守性分析等に適用するため、従来法の解析結果や実測データとの比較等を通して、3次元仮想振動台を整備する。
- ふげん実機材等を使用して、2相ステンレス鋳鋼の熱時効脆化予測法の妥当性、及びオーステナイト系ステンレス鋼のSCC緩和対策の有効性に関するデータを取得する。
- 炉内構造材用ステンレス鋼のSCC進展への中性子照射影響に関する機構論的検討を行う。
- 原子炉圧力容器鋼熱影響部の照射脆化、ケーブルの絶縁劣化及びSCC評価手法高度化に必要な基礎データを取得する。
- 軽水炉燃材料詳細健全性調査では、JMTRにおいて原子炉圧力容器鋼の破壊靱性寸法効果に関する照射前後のデータを取得し、破壊靱性評価法の確立に資するとともに、照射下SCC試験技術開発及び設備の整備を進め、照射下SCCデータを取得する。

【達成目標】

- 構造材料不連続部に適用可能な確率論的破壊力学解析コードを整備し、決定論的評価法による健全性評価の保守性等について確認する。
- ニッケル基合金溶接部に対するPFM解析コードを公開するとともに、学協会規格の改訂等に有用な活用方策を提示する。
- 構造健全性評価に関する従来法の保守性分析等への3次元仮想振動台の適用の妥当性を例証する。
- 2相ステンレス鋳鋼について、フェライト量などの熱時効による金属組織変化の靱性に及ぼす影響などを定量的明らかにする。また、オーステナイトステンレス鋼のSCC緩和策の有効性について確認する。
- JMTR照射材のBWR模擬高温水中でのSCCき裂進展への照射影響に関する知見を取得する。
- 熱影響部監視試験片の必要性、ケーブル絶縁劣化機構・診断手法、SCC高度評価手法に関する知見を取得し、高経年化対策に関する規制の高度化に資する。
- 原子炉圧力容器鋼の照射脆化に関連した破壊靱性データ及びハフニウムの照射成長データを取得
- 炉内構造材用ステンレス鋼の照射中き裂進展測定及び水質測定によるデータを取得