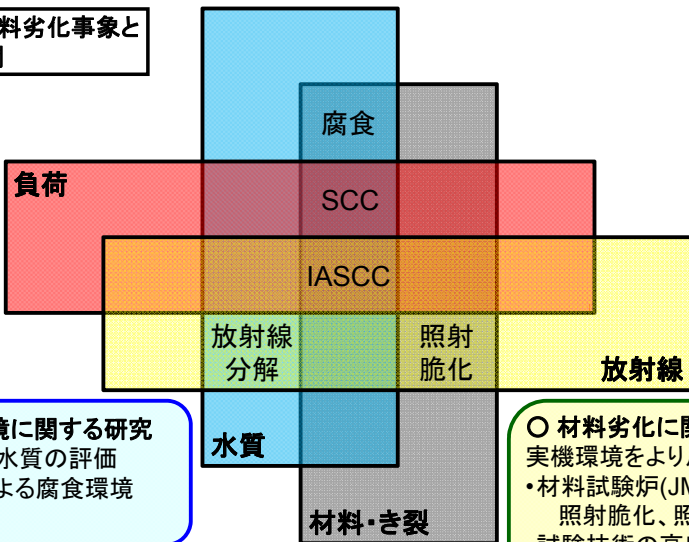


## 軽水炉長期化対応研究ユニット 材料・水化学研究グループ

軽水炉の運転期間延長認可、高経年化対策に関する技術的妥当性の規制判断等に資することを目的として、構造健全性、材料劣化、及び水化学環境に関する研究を実施しています

### 軽水炉における材料劣化事象と種々の要因の相関



- 構造健全性に関する研究
    - 確率的破壊力学手法による健全性評価 (原子炉圧力容器、配管、セーフエンド等)
    - 構造不連続部などの複雑形状部における残留応力評価
    - き裂進展解析
    - 熱水力学解析
  - 3次元大規模構造応答解析
  - 地震時における機器の損傷評価手法の整備 (設計基準事象を超えた場合や低頻度の事象も対象とした健全性解析)
- (→ 構造健全性評価研究Gr.にて実施)

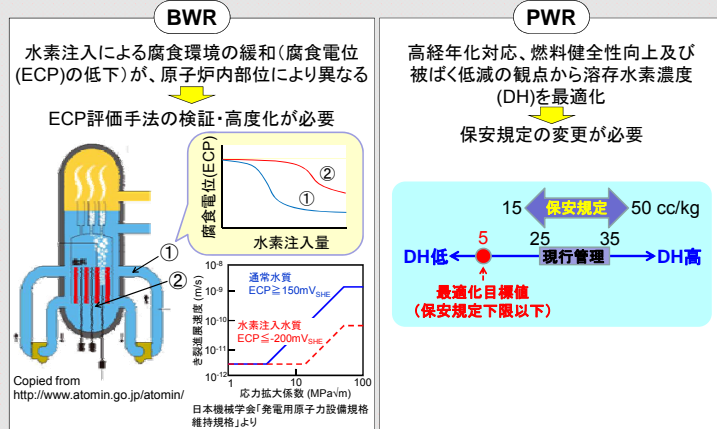
- 水化学環境に関する研究
  - 放射線分解水質の評価
  - 水質変更による腐食環境変化の評価

- 材料劣化に関する研究
  - 実機環境をより反映できる経年劣化予測と合理性確認
  - 材料試験炉(JMTR)による照射試験: 照射脆化、照射誘起応力腐食割れ (IASCC)
  - 試験技術の高度化: 微小試験片による破壊靱性試験、照射下き裂進展試験
  - ふげん実機材調査

U.S. DOE "Light Water Reactor Sustainability Program Integrated Program Plan"より抜粋・加筆

### 水化学環境に関する研究

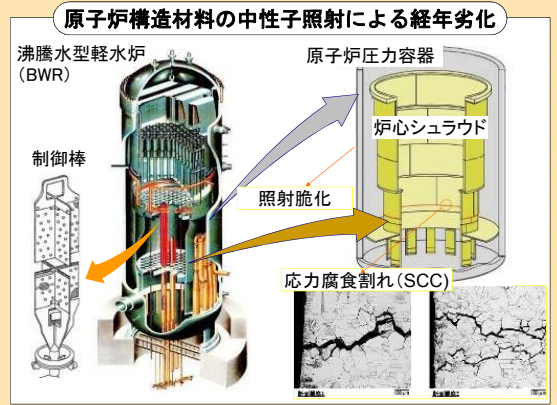
- 既設軽水炉の構造材料の耐腐食劣化や燃料被覆管健全性の確保を目的とした水質管理の変更



- 今後見込まれる保安規定変更認可申請等に対応するために必要な技術的知見を収集・整備する

### 材料劣化に関する研究

- 原子炉容器では脆化予測に基づき緊急炉心冷却時の脆性破壊を防止することが必要。炉心シュラウド、制御棒では応力腐食割れが発生。



- 高経年化対応技術戦略マップなどで整理された課題のうち、中子照射試験が不可欠なものに関する研究を行い、民間規格などの妥当性評価を行うための技術基盤を得る

### 試験炉(JMTR等)を活用した実機模擬環境での照射試験

- ECP測定技術の開発・高度化
  - 耐久性・安定性に優れたECPセンサー
- 理論モデルによる解析コードの開発
  - ラジオリシスモデル
  - 腐食電位(ECP)モデル
- 放射線下水質データの取得と理論モデルの検証
  - 水サンプリングによる水質測定 (酸素濃度、水素濃度、過酸化水素濃度、導電率、pH)
  - 腐食電位(ECP)測定
  - 理論モデルの検証 (比較・評価)
  - 水の放射線分解解析 + 腐食電位(ECP)解析

照射キャプセル (→ 口頭発表にて一部説明)

### 材料試験炉(JMTR)を活用した実機模擬環境での照射試験

- 試験技術の開発・高度化
  - 微小試験片による破壊靱性試験
  - 照射下SCCき裂進展試験
- 既存照射材を活用したホットラボでの試験
  - 照射後破壊靱性試験装置
  - 照射後SCC試験装置
- 原子炉圧力容器鋼の照射脆化試験
- BWR炉内構造材料の応力腐食割れ(SCC)試験 (→ 別ポスターにて説明)

研究の背景・目的

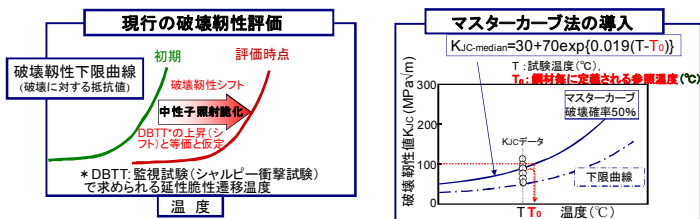
実施内容

本研究グループで実施しています材料劣化に関する研究のうち、材料試験炉(JMTR)を活用した実機模擬環境での軽水炉材料(原子炉圧力容器鋼及び炉内構造材料)の照射試験の概要についてご説明します

### － 原子炉圧力容器鋼の照射脆化試験 －

#### 評価手法における課題

- 原子炉圧力容器の照射脆化に対する健全性評価に必要な、破壊靱性評価法の適用性検証、高精度化
  - ✓ 現行のシャルピー衝撃試験に基づく間接的な破壊靱性評価手法の妥当性確認
  - ✓ 直接的な破壊靱性評価手法であるマスターカーブ法の導入

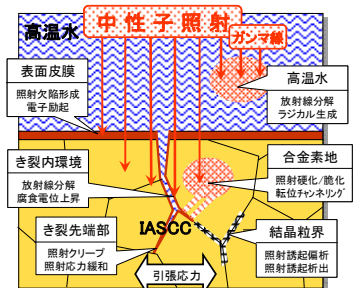


- ・ 照射脆化: 中性子照射により材料が脆くなること
- ・ 破壊靱性: 原子炉圧力容器の起動、停止、加圧熱衝撃による健全性評価に必要で、脆くなり破壊すること(脆性破壊)に対する抵抗値
- ・ マスターカーブ法: 破壊靱性値のばらつきを最弱リンク説に基づくワイプ分布にあてはめ、その分布の温度依存性を一本の指数型曲線で表現する。一つの試験温度で数本の試験片で試験することにより破壊靱性値の温度依存性が求められる。

### － BWR炉内構造材料の応力腐食割れ(SCC)試験 －

#### 評価手法における課題

- BWR炉内構造物(炉心シュラウド等)の照射誘起応力腐食割れ(IASCC)に対する健全性評価に必要な、き裂進展速度評価法の検証、高精度化
  - ✓ 照射材の炉外での試験(照射後試験(PIE))で得られた知見に基づく評価手法の保守性の確認

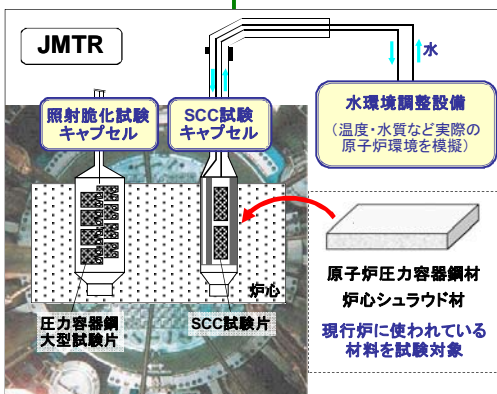
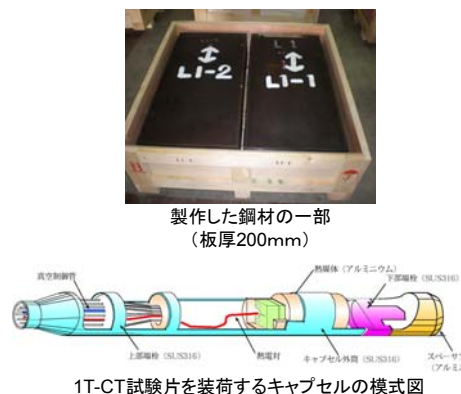


原子炉内でのIASCCに関わる放射線照射効果

- ・ 照射誘起応力腐食割れ(Irradiation-Assisted Stress Corrosion Cracking, IASCC): 高温高圧水中の腐食環境に置かれた材料に引張応力が掛かることにより、ひび割れが発生して進む応力腐食割れ(SCC)が、材料の中性子照射により加速される現象

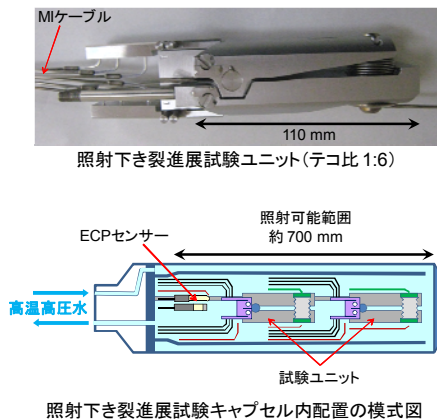
### JMTRでの照射試験

- 試験済みの監視試験片から加工が可能なサイズの破壊靱性試験片(0.16インチ厚さコンパクトテンション型試験片(0.16T-CT))から、マスターカーブ法での標準サイズである1インチ厚さの1T-CT試験片を用いて中性子照射試験を実施
- 鋼材の化学成分と照射条件によって、国内鋼材で想定される脆化量をカバー
  - ✓ 試験用鋼材
    - ・ 母材: 実機相当の厚板鋼材。Cu=0.1wt.%程度、Ni=0.6wt.%(1970年代初頭の鋼材成分)を基準として、3種類の鋼材を製作。照射データが豊富な、既往研究の鋼材(PWR標準材)も利用。
    - ・ 溶接金属: 化学成分は、国内PWRプラント鋼材の上限値を目標として、高Cu(0.2wt.%)、高Ni(1.1wt.%)
  - ✓ 照射条件、照射データ
    - ・ 高照射量条件( $1 \times 10^{20}$  n/cm<sup>2</sup>(E>1MeV)以上)でのデータを取得
    - ・ 破壊靱性試験に加え、硬さ試験、引張試験、シャルピー衝撃試験等により、基本的な機械的性質に関するデータも取得
  - ✓ 脆化量
    - ・ 国内脆化予測式(JEAC 4201-2007)を用いて脆化量を予測した結果、シャルピー遷移温度シフトで200°C程度までのデータを取得できる見込み



### JMTRでの照射試験

- BWR炉心シュラウドの供用期間を考慮して予備(ベース)照射した鋼材を用いて、照射下でSCCき裂進展試験を実施
  - ✓ 0.5T-CT試験片(板厚12.7 mm)の使用
    - ・ 破壊力学的validityを満足する条件の試験で、環境の影響を評価
  - ✓ 照射下でECPを実測しながら、き裂長さをモニター
  - ✓ 試験パラメータ
    - ・ 材質: 国内BWR炉心シュラウドに使用されているSUS316L鋼(母材/溶接熱影響部(HAZ))
    - ・ 中性子照射量:  $3 \times 10^{24} \sim 3 \times 10^{25}$  n/m<sup>2</sup> (E>1 MeV)
    - ・ 水質(ECP): -100 mV<sub>SHE</sub>以下 ~ 100 mV<sub>SHE</sub>以上
    - ・ 応力拡大係数(K値): 10 ~ 30 MPa√m
- 照射下試験のための技術開発
  - ✓ BWR炉水環境(約288°Cの高温高圧水)を模擬した照射キャプセル(φ44 mm)内で、0.5T-CT試験片に荷重を負荷(最大約7 kN)
    - ・ テコ方式及びペローズ(水圧とガス圧との差圧)を利用した荷重負荷機構
  - ✓ 炉内照射環境下で、0.5T-CT試験片のき裂長さを電位差法(PDM)によりモニター
    - ・ ホットラポセル内での遠隔操作性を考慮したウイング付き試験片の採用



### 期待される成果

- 破壊靱性試験値の試験片形状・寸法効果を把握
  - ➔ 高脆化材で現行のシャルピー衝撃試験による延性脆性遷移温度(DBTT)による間接的な破壊靱性評価手法の妥当性を確認
- マスターカーブ法の導入に向け、高脆化材で破壊靱性値の温度依存性(マスターカーブの形状)に関するデータも取得
  - ➔ 監視試験片を利用した微小試験片による破壊靱性評価手法の妥当性を判断するために必要な技術的根拠を取得

### 期待される成果

- 中性子照射を受けた材料について、炉内と炉外でのき裂進展速度及び酸化皮膜性状等の相違を把握
  - ➔ 現行のIASCC健全性評価手法の妥当性を確認
- 照射環境下でのECPを実測し、き裂進展速度へのECPの影響を把握
  - ➔ 材料の照射量に応じた炉内での環境緩和効果の有効性を確認

# 照射環境での材料劣化・水化学に関する研究

独立行政法人日本原子力研究開発機構 安全研究センター  
軽水炉長期化対応研究ユニット 材料・水化学研究グループ

## 1. 概要

本研究グループでは、軽水炉の運転期間延長認可、高経年化対策に関する技術的妥当性の規制判断等に資することを目的として、材料劣化及び水化学環境に関する研究を実施しています。

## 2. 研究の背景・目的

### 2.1 水化学環境に関する研究

既設軽水炉において、構造材料の耐腐食劣化や燃料被覆管健全性の確保を目的とした水質管理の変更が検討されています。

沸騰水型軽水炉(BWR)では、炉内の腐食環境を緩和する目的で水素注入が行われています。水素注入水質(HWC)で構造材の健全性を担保するには、炉内各部位で腐食電位(ECP)が日本機械学会「維持規格」で示される基準値を満足する必要があります。プラント予防保全に「維持規格」を適用するため、原子力学会では、水素注入量の設定やその効果(炉内のECP)を確認する方法を標準化する目的で「HWC標準」の策定が進められています。

一方、加圧水型軽水炉(PWR)では、高経年化対応、燃料健全性向上及び被ばく低減の観点から、炉水中の水素濃度(DH)の最適化の検討が進められています。DHの最適化では、現在のDH保安規定下限値15 cc/kgを下回る5 cc/kgが目標値とされており、この場合には保安規定の変更が必要となります。

このような事業者の動向を踏まえて、今後見込まれる保安規定の変更認可申請等に対応するために必要な技術的知見を収集・整備することを目的としています。

### 2.2 材料劣化に関する研究

原子炉圧力容器では脆化予測に基づき緊急炉心冷却時の脆性破壊を防止することが必要であり、また、BWRの炉心シュラウドや制御棒では応力腐食割れ(SCC)が発生しています。このような実機での状況を踏まえて、高経年化対応技術戦略マップなどで整理された課題のうち、中性子照射試験が不可欠なものに関する研究を行い、今後見込まれる軽水炉の運転期間延長認可申請、高経年化対策、及び民間規格などの妥当性評価を行うための技術基盤を得ることを目的としています。

## 3. 実施内容

### 3.1 水化学環境に関する研究

実機環境に近い条件で任意に照射条件を変更できる試験炉(JMTR等)の試験装置を用いた照射試験を行い、照射条件や水質条件をパラメータとしたECP及び化学種濃度等のデータを取得します。照射試験の実施に当たり、耐久性・安定性に優れたECPセンサーや理論モデルを用いたラジオリシス及びECP解析コードなどのECP測定・評価技術の開発・高度化を進めています。

### 3.2 材料劣化に関する研究

JMTRを用いて原子炉圧力容器の照射脆化、炉心シュラウドの照射誘起応力腐食割れ(IASCC)に関する実機模擬環境での照射試験を実施します。照射試験の実施に当たり、照射済鋼材を用いた監視試験片サイズの微小試験片による破壊靱性試験や照射下SCCき裂進展試験のための試験技術の開発・高度化を進めています。また、既存照射材を活用したホットラボでの試験に着手し、メカニズム検討等に資するデータの拡充を開始しました。

本報告の一部は、原子力規制庁(旧 原子力安全・保安院)からの受託事業「軽水炉燃材料詳細健全性調査」の一環として実施したものです。