

令和6年第35回原子力委員会 資料第1号

## 原子炉の長期運転に向けた 原子炉圧力容器の中性子照射脆化に係る取組み

## 一般財団法人 電力中央研究所

### 研究参事 新井 拓

原子力委員会

2024/10/29

**R**電力中央研究所

CRIEPI



- 1. 原子炉圧力容器の中性子照射脆化
- 2. 長期運転に向けて考慮すべき事項
- 3. 脆化予測法の高度化とミクロ組織変化に関する 知見の拡充
- 4. まとめ

# 国内の原子力発電所の状況



© CRIEPI 2024

# 長期運転において特に考慮すべき劣化現象

◆運転期間が長くなることに伴い劣化が進行する 現象でかつ、取替えが容易ではない機器・構造 物に発生する劣化事象

## ≻原子炉圧力容器の中性子照射脆化

- ≻炉内構造物の中性子照射誘起応力腐食割れ
- ▶容器・配管の低サイクル疲労
- ≻ステンレス鋼鋳鋼の熱時効
- ≻ケーブル・電気計装品の絶縁低下
- ▶コンクリート構造物の強度および遮蔽性能の低下

# 中性子照射脆化とはどのような現象か

- ◆鋼材に中性子が照射されることにより、鋼材の粘り強さが徐々に失われていく現象。
- ◆ シャルピー衝撃試験により求めた吸収エネルギーの温度依存性の変化から照射脆化量を把握する。



## シャルピー衝撃試験



試験機の全体像

試験片の破壊の様子

# 中性子照射脆化はなぜ生じるか

- ◆ 中性子が原子を弾き出し, 材料中に結晶の乱れ(格子欠陥)を生じる。
- ◆ 格子欠陥や溶質原子が集合体を形成したり, 偏在したりすることで照射損 傷が形成される。
- ◆ 溶質原子クラスターや格子欠陥集合体などの照射損傷が、金属の変形の 障害となり、変形しにくくなる=硬く、脆くなる。





### ◆ 原子炉圧力容器

原子カプラントにおける主要構造物の一つ。 炉内構造物や炉水と共に核燃料が納められ た鋼鉄(圧力容器鋼)製の容器。

◆ 中性子照射脆化(照射脆化) プラント運用中に燃料の核分裂により発生する中性子の照射を受けることで材料が脆くなること。

照射脆化が進んでも原子炉圧力 容器の健全性が確保されている こと(壊れないこと)を確認する ことが安全上重要



**R**電力中央研究所

#### 概略寸法(出力110万Kwクラス)

炉型	直径(m)	高さ(m)	板厚(m)
BWR	6.4	22	0.16
PWR	4.4	13	0.2

# 原子炉圧力容器の破壊の防止

◆事故時には冷却のために原子炉圧力容器内に温度の低い冷却水が注入される。この際、原子炉圧力容器鋼には強い力(応力)が発生するため、この力による原子炉圧力容器の破壊を防止する必要がある。

監視試験

脆化予測

健全性評価

- 破壊の防止のためには破壊に対する 鋼材の抵抗力(靭性:粘り強さ) が破壊力より大きい必要がある。ただし鋼材の抵抗力は、中性子照射よって高温にシフトする(照射脆化)。
- 破壊の防止の評価では以下が必要
  - □ 初期の鋼材の抵抗力の情報
  - □ 照射脆化の測定
  - □ 評価時点での照射脆化の予測
  - □ 破壊力と抵抗力の比較



- ✓ 破壊靭性は鋼材の温度によって値が変わる。
- ✓ 破壊力は、冷却による鋼材の温度変化等に よって生じ、オレンジの曲線上を矢印の方向に 変化する。

## 中性子照射脆化への対応

◆ 監視試験による脆化量の評価(監視試験と脆化予測) JEAC4201:原子炉構造材の監視試験方法(日本電気協会)に規定

- 原子炉圧力容器内に同じ鋼材で製作した監視試験片を装荷し、あらかじめ定められた時期に取り出して破壊試験(シャルピー衝撃試験)を実施し、脆化量を測定する。
   取り出しと試験は、監視試験計画に基づき実施
- ▶ 鋼材の化学組成と中性子照射量から<</p>
  施化予測法
  を用いて
  施化量を予測評価する。



## 監視試験

- ◆ 監視試験キャプセルを原子炉圧力容器の内壁近傍に設置
  - ▶ 圧力容器内面よりも大きな照射速度で照射される → 将来の脆化挙動を把握できる
  - ▶ キャプセル数は、BWRで約4個、PWRで約6個
  - ▶ 1キャプセルあたり、母材、溶接金属、溶接熱影響部に対してそれぞれ10数本のシャル ピー衝撃試験片を装荷
  - > 中性子照射量も測定

**CRIEPI 2024** 

監視試験プログラムに定められた間隔で監視試験キャプセルを取り出し、 シャルピー衝撃試験等を行い、脆化量や中性子照射量などを評価する。





"Nuclear Reactor Pressure Vessel Surveillance Programs," ASTM STP1603, Eds. W.L. Server, M. Brumovsky, (2018) より引用

11

## 長期運転に向けて中性子照射脆化において検討すべき事項

- ① 運転期間の延伸に伴い中性子照射量が増えることで 新しい脆化メカニズムが発現しないか?
- ② 脆化予測が高照射量まで対応できるか?
- ③ 脆化監視を継続的に実施できるか?
- ④評価対象部位の拡大への対応
  - ▶ 中性子照射脆化の評価が求められる範囲が炉心領域の上下 方向に拡大する。

# 米国における検討(1)

- ◆ US NRCの潜在劣化事象の検討、EMDA(Expanded Material Degradation Assessment, 2013年)\*
  - ▶ 60年超運転時において材料劣化について考慮すべき事項について材料劣化に 詳しい各国の専門家を集めて検討
  - ▶ 60年を超えたからといって想定していなかった新しい劣化メカニズムの発現は想定 されない。(①)ただし、継続的に知見を拡充していくことは重要。
  - ➤ ここでの検討結果を2回目のライセンス更新(60年→80年)の審査ガイド等に反映。
- ◆2回目のライセンス更新(60年→80年)における審議
  - ▶ 申請者が各劣化事象について60運転までの取り組み(保全活動)をベースに 着実にかつ責任を持って継続実施していくことができるかを中心に審議。
  - ▶ 中性子照射脆化について審査において大きな指摘事項等はなく、事業者の対応方針が基本的に承認された。
  - ▶ 例えば、③継続的な脆化監視:監視試験片の再生技術、統合化監視試験プログラム(ISP)の活用

**R**電力中央研究所

# 米国における検討(2)

- NRC Hybrid Workshop on Structural Materials: What Research for Beyond 80Years?, NRC本部, October 1-4, 2024
  - ▶ 80年超運転を実現するために軽水炉構造材料に関してどのような研究開発を 行っていく必要があるかについて、議論するワークショップ
  - ▶ 原子炉圧力容器の照射脆化については以下の研究開発を継続的に行っていく。
    - ■脆化予測の高照射量への対応(②)

□米国の予測式R.G. 1.99 rev2は1991年以降改訂されていないため、 改訂を検討中

- ■継続的な監視試験の実施(③)
- ■評価対象部位拡大への対応(④)
- ▶ 基本的には80年を超えても各材料劣化について大きく対応を変える必要はない。
- ▶ ただし、着実に知見を拡充し、研究開発を行っていく必要ある。

# 国内における対応/検討状況

- 運転期間の延伸に伴い中性子照射量が増えることで新しい脆化メカニズムが発現しないか?
   \*: IGRDM(International Group on Radiation Damage Mechanisms):
  - ▶ 照射損傷に関する研究の継続
- \*: IGRDM(International Group on Radiation Damage Mechanisms 欧米日の照射損傷の専門家によるメンバー制の学術会議体
- ▶ 国際的な活動の参加による知見拡充(IGRDM\*など)
- ② 脆化予測が高照射量まで対応できるか?
  - ▶ 監視試験の継続実施と監視試験片に対するナノレベルの組織分析
  - ▶ 脆化予測法(JAEC4201)の継続的な改訂
- ③ 脆化監視を継続的に実施できるか?
  - ▶ 運転期間延長をに対応する監視試験の取り出し時期の規定を追加 (JEAC4201-2024年追補)
  - ▶ 小型試験片技術(ミニチュアCTマスターカーブ法)の開発など
- ④ 評価対象部位の拡大への対応
  - > 対象部位の選定や使用材料、照射条件に関する検討
  - ▶ 照射量の絶対値は小さい。脆化そのものが問題となることはないと予想される。

## 電気技術規程:原子炉構造材の監視試験方法 JEAC4201

- ■発電用軽水炉原子炉鋼材の中性子照射による機械的性質の変化を定期的に調査し評価するための監視試験方法について規定
- □ 1970年の初版制定以降,新しい知見等を 加えて改定を実施
- 2007年度の改定で、中性子照射による脆化量(関連温度)移行量の予測法を、米国評価式から最新の研究成果に置き換えることにより予測精度を向上(国内脆化予測法)
- □ 最新版: 原子力規制庁 技術評価完了 JEAC4201-2007[2013追補版]
  - **改定版**:原子力規制庁 技術評価開始 JEAC4201-2007[2024追補版]



**R**電力中央研究所

JEAC4201の改訂が継続的に実施されている。

## JEAC4201-2007以降の改定概要

#### JEAC4201-2007

- 中性子照射による関連温度移行量の予測方法を最新の研究成果に置き換えることにより予測精度の向上
- ・監視試験片再生に関する(独)原子力安全基盤機構のプロジェクトの研究成果に基づく試験片再生に係わる項目の追加
- 高経年化プラントに対応するため長期監視試験計画の新たな導入による 試験用カプセル取り出し時期の改定 等

#### JEAC4201-2007 [2010年追補版]

- ・ 監視試験用カプセルの取り出し時期の一部変更
- 関連温度移行量の予測法についての技術的根拠の追加

#### JEAC4201-2007 [2013年追補版]

• 中性子照射による関連温度移行量の予測法の改善

⇒JEAC4201-2007 [2013年追補版]の技術評価では、 監視試験片の取り出し及び中性子照射による関連温度移行量の予測法に関して指摘事項

JEAC4201-2007 [2024年追補版]

指摘事項のうち、監視試験計画について、照射 量を指標とした一元的、かつ、適切な間隔での 監視試験の計画・運用を可能とする改定を実施 出典:原子力規制庁 第1回原子炉構造材の監視試験方法及び 破壊靭性の確認試験方法に係る日本電気協会の規格の技術評価 に関する検討チーム 令和6年09月03日 資料1-2-1 <u>https://www.da.nra.go.jp/detail/NRA100004603</u> に一部加筆して引用

**R**電力中央研究所

#### 主要改定項目

- 監視験の取り出し計画
- 照射脆化の予測(評価)式
- > NRA技術評価要件への対応

JEAC4201-202X [追補統合と全体改定]

指摘事項のうち、予測法について、照射脆化メカ ニズムに関する最新知見及び専門家との議論結 果を取り入れ見直した脆化評価式を導入

## 脆化予測の高照射量への対応

### ■ 高照射量における照射脆化挙動の把握

- □ 国内脆化予測法\*1の中性子照射量の適用上限は1.3×10<sup>20</sup>n/cm<sup>2</sup>
- □国内PWRの60年運転時の中性子照射量は、5~8x10<sup>19</sup>n/cm<sup>2</sup>程度
- □ 10<sup>20</sup>n/cm<sup>2</sup>を超える高照射量のデータは少なく、拡充が必要
- □ 至近の監視試験片の中性子照射量は10<sup>20</sup>n/cm<sup>2</sup>を超える値となりつつあり、 60年運転時の照射量に相当する<sup>\*2</sup>。また過去に試験炉照射などによって得られた高照射量のデータの上限を超える値となっている。





#### これまでに国内で実施された監視試験におけるその時点 までの中性子照射量の最大値

**II**電力中央研究所

## 脆化予測法の継続的な改良

## | 継続的に得られる監視試験データを用いた脆化予測法の高度化

● **基本モデル**:照射による脆化量 ΔT<sub>412</sub>とクラスター体積率の平方根に線形の相関



50

100

Measurement(°C)

150

200

## ナノスケールの組織変化に関する知見の拡充

### ■ 原子炉圧力容器の照射脆化はマトリクス損傷と溶質原子クラス ターの形成が主要因であると考えられている。

### ▶ 溶質原子クラスター

中性子照射で生成する格子欠陥の拡散によって不純物(または添加元 素)がクラスター化することに起因。

#### ▶ マトリクス損傷

中性子照射による金属結晶の乱れに起因。(電子顕微鏡でも測定可能) 日本の圧力容器鋼で主流となっている低Cu材では、中/高Cu材よりも相対 的にマトリックス損傷の寄与が大きくなる。(製造年代の古い原子炉で多く認 められたCu含有量の多い原子炉の多くは震災後、廃炉となっている。)

### 監視試験片残材より分析試料を採取

- ▶ アトムプローブトモグラフィー (APT) → 溶質クラスタ形成の分析
- ▶ 収差補正機能を有する走査透過電子顕微 → マトリックス損傷の分析

## アトムプローブによる溶質原子クラスターの分析

### ■ 材料中の原子の3次元位置と種類を同定できる分析法



収差補正機能付き(走査)透過電子顕微鏡(STEM)を 用いたマトリックス損傷の分析 JEM-ARM300F (JEOL Ltd.) 従来型透過電子顕微鏡(TEM)による結晶構造の 分析に加え、高速度での組成分析が可能な装置 転位ループの観察/分析手法を新規に開発 溶質原子の偏析の分析 STEMによる 新規手法 TEMによる従来手法 rradiated JRQ Ni-Ka Mn-Ka 同一種類の転位ルー 種類の転位ル PAGB\_ プを<mark>簡便</mark>に強調可能 PAGB のみを強調可能 •) ~50x50nm characteristic X-ray maps 2 µm 3.0 結晶粒界への Mr 2.5 元素の偏析挙 Concentration (mass%) 2.0 50 nm 純ニッケル 純アルミニウム 動の評価 1.5 Ni 1.0 圧力容器鋼に対して本手法を適用し、転位 Мо 0.5 ループ形成に関する知見拡充の加速を図る 0.0 -10 -8 -6 -4 -2 0 2 6 8 Distance from GB (nm)

国内プラントの多数を占める低Cu材で、かつ、高照射量領域まで照射された圧力 容器鋼を中心に分析、脆化評価法の次々期改訂に向けた知見の拡充を実施中

© CRIEPI 2024

|3.脆化予測法の高度化とミクロ組織変化に関する知見の拡充

**II** 電力中央研究所



- ◆原子炉圧力容器の中性子照射脆化について、長期運転時に新たな劣化機構が発現する可能性は低いと考えられている。
- ◆中性子照射によるミクロ組織変化に関する知見を拡充し、脆化予測法の高度化を継続的に実施していくことにより長期運転に対応していくことが可能であると考えられる。