

原子炉圧力容器の経年変化に関する 運用の適正化について

2023年3月23日

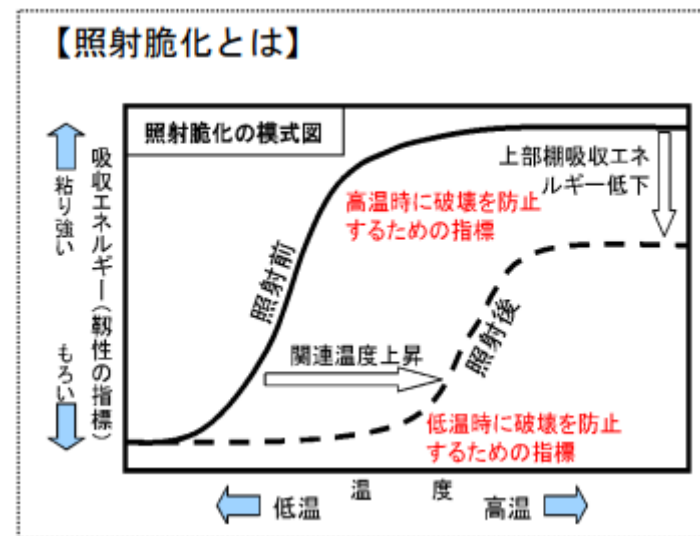
原子力エネルギー協議会

はじめに

- ATENAとしては、プラントの運転実績に応じた劣化の状況を適切に把握し、長期運転における安全性を理解いただくための評価の重要性が増していくものと認識している。
- 高経年化した発電用原子炉の安全規制に関する意見交換会（第2回）において、安全な長期運転・評価の信頼性向上・精緻化の観点から、プラント状況や、プラントの実態を踏まえた運用・管理を実施していくために、議論させていただきたい事項についてご説明させていただきました。
- 本日は、原子力規制委員会において検討されている高経年化した原子炉に係る安全規制に関わるものとして、実用発電用原子炉の運転期間延長認可申請に係る運用ガイドにおいて、原子炉圧力容器（以下、RPV）の経年変化（中性子照射脆化）に関わる以下の点について、科学的・技術的な観点から、検討状況をご説明させていただく。
 - ✓ プラント状況を考慮した監視試験の計画・運用の適正化

RPVにおける照射脆化の管理・評価について

- RPVは、運転に伴い中性子の照射を受けて徐々に材料の靱性（粘り強さ）が低下するため、この脆化の進行程度を評価・把握し、健全性を確認していくことが重要である。
- 将来の脆化の進行程度を評価・把握することを目的として、RPVの内側には予め試験片を入れた監視試験カプセルを装荷することにしており、このカプセルを計画的に取り出し、試験を行うことにしている。
- これらの監視試験の結果を踏まえて、日本電気協会の電気技術規程に定められる脆化の評価手法に基づいて、想定する運転期間に対する将来の脆化の進行程度に関する評価を行っている。
- RPVに亀裂があると仮定し、想定される荷重を受けた場合の破壊に対する評価を行うことで、RPVの健全性が十分に確保可能であることを確認している。

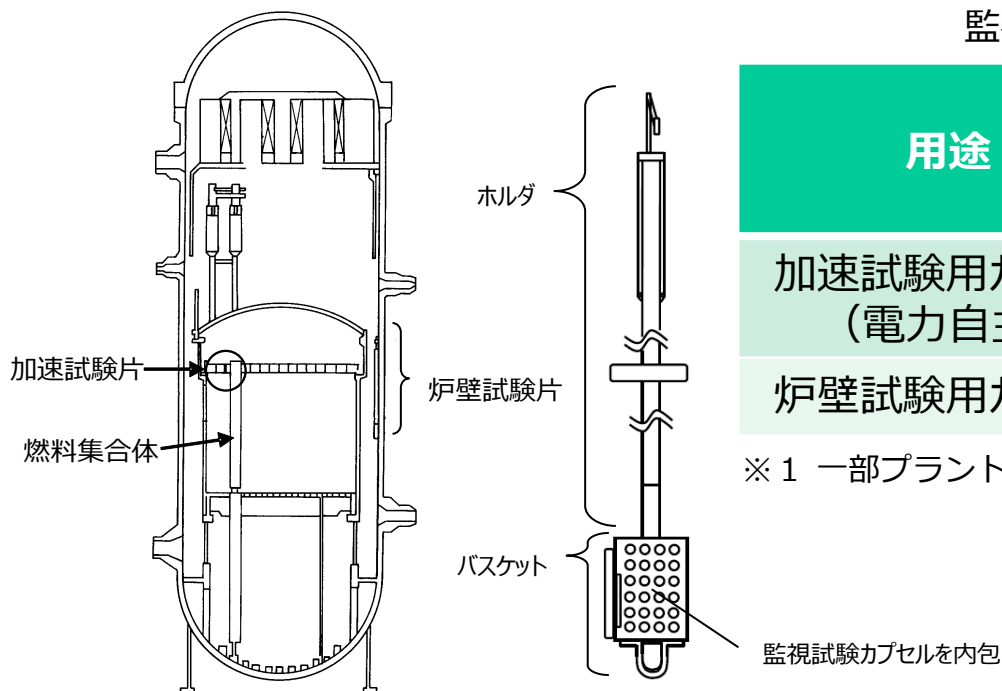


照射脆化の模式図※

監視試験カプセルの装荷状況（BWR）

- 告示（現在はJSME設計・建設規格）や、日本電気協会の電気技術規程「原子炉構造材の監視試験方法(JEAC4201)」に基づき、監視試験カプセルを建設時に炉内に装荷している。また、必要に応じて再装荷を実施している。
- 標準的なBWRプラントでは、監視（炉壁）試験用のカプセル3つに加え、加速試験用のカプセル1つ（電力自主）を装荷している。

監視試験カプセルの装荷状況（BWR）



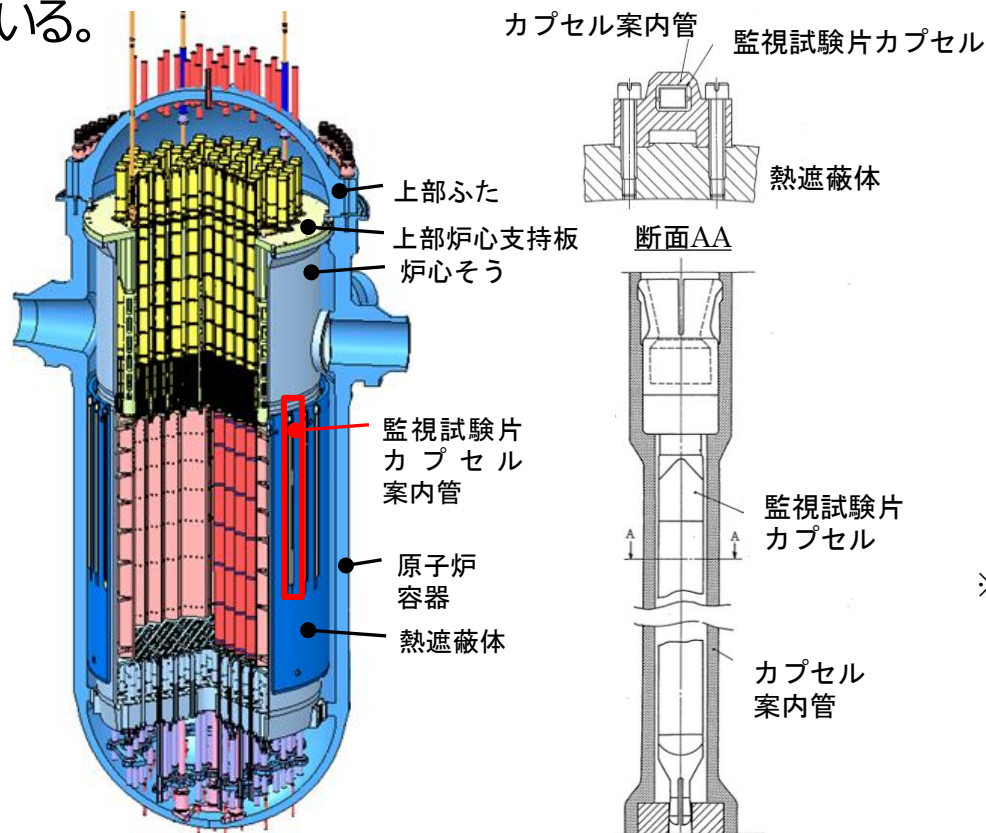
用途	カプセル 個数	カプセル内の シャルピー衝撃試験片数 (母材、溶金、熱影響部)
加速試験用カプセル (電力自主)	1	各12個以上
炉壁試験用カプセル	3※1	各12個以上

※1 一部プラントでは追加の炉壁試験用カプセルを装荷している場合がある。

監視試験カプセルの装荷位置（BWRの例）

監視試験カプセルの装荷状況 (PWR)

- 告示（現在はJSME設計・建設規格）や、日本電気協会の電気技術規程「原子炉構造材の監視試験方法(JEAC4201)」に基づき、監視試験カプセルを建設時に炉内に装荷している。
- 標準的なPWRプラントでは、建設時に6つ（一部プラントでは8つ）のカプセルを装荷している。



監視試験カプセルの装荷状況 (PWR)

カプセル 個数	カプセル内の シャルピー衝撃試験片数 (母材、溶金、熱影響部)
6 ※1	各12個以上

※1 一部プラントでは8つのカプセルを装荷している場合がある。

監視試験カプセルの装荷位置 (PWRの例)

監視試験カプセルの取り出し・試験について

- JEAC4201に基づき、“定格負荷相当年数（EFPY：Effective Full Power Year）”に応じて計画的に監視試験カプセル（シャルピー衝撃試験片やモニタリングワイヤを含む）を取り出して、試験を実施している。
- 一方、これとは別に、運転期間の延長認可申請においては、“経過時間（暦年）”による試験が求められている。

表1 定格負荷相当年数（EFPY）による指標（JEAC4201）

JEAC4201-2007	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目
$\Delta RT_{NDT} \leq 28$	12EFPY	24EFPY	相当運転期間	—	—
$28 < \Delta RT_{NDT} \leq 56$	6EFPY	15EFPY	相当運転期間	—	—
$56 < \Delta RT_{NDT} \leq 111$	3EFPY	6EFPY	15EFPY	相当運転期間	—
$111 < \Delta RT_{NDT}$	1.5EFPY	3EFPY	6EFPY	15EFPY	相当運転期間

表2 経過時間（暦年）による指標（運用ガイド）

「実用発電用原子炉の運転期間延長認可申請に係る運用ガイド」における監視試験の実施に関する要求

- 運転後30年を経過する日から10年以内の出来るだけ遅い時期に取り出し
- 運転後40年を経過する日から10年以内の適切な評価が出来る時期に取り出し



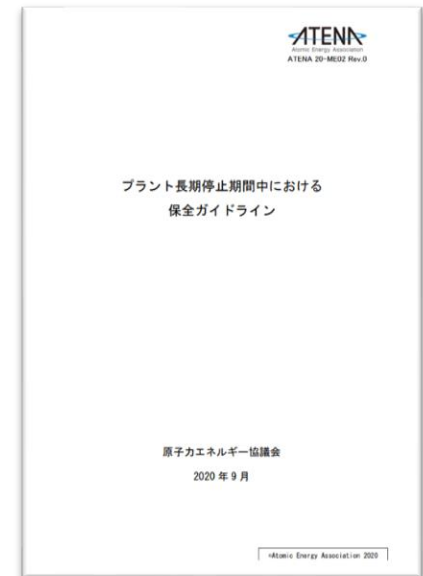
異なる指標（定格負荷相当年数／経過時間）を踏まえた監視試験の計画・運用が必要

監視試験カプセルに対する経過年数での取り出しに関するもの

- 実用発電用原子炉の運転期間延長認可申請に係る運用ガイド（抜粋）※1
 - ✓ 3.2（1）のうち
 - ②運転開始後30年を経過する日から10年以内のできるだけ遅い時期に取り出した監視試験片の試験結果（監視試験片の取り出し時期は、試験等に要する期間（3年程度を目安）を考慮した上で、1. の申請書の提出期限に最も近い定期事業者検査（原則として計画外の原子炉停止によるものを除く。）とする。）。
 - ✓ 3.3（1）のうち
 - ②運転開始後40年を経過する日から10年以内の適切な評価が実施できる時期に監視試験片を取り出し、当該監視試験片に基づき行う監視試験の計画。

停止期間における経年変化の進行・進展について

- RPVに使用されている低合金鋼については、運転中に燃料の核分裂反応により発生する中性子の照射を受けるとボイド、溶質原子クラスタや転位ループ形成や粒界偏析などのマイクロ組織変化が生じ、溶質原子クラスタや転位ループは材料の変形の際（転位の移動）の抵抗となり、破壊に対する抵抗（靱性）の低下が生じる（中性子照射脆化）。
- 「安全な長期運転に向けた経年劣化管理の取り組み」における経年劣化影響に関するガイドライン及び米国EPRIによるレビューの結果や、技術レポートに纏められている通り、RPVにおいては、「運転中のような燃料の核分裂反応が起こらないプラントの停止期間中には、中性子の照射による劣化の進展・進行を考慮する必要はない」ことは明らかであり、原子力規制委員会も同様の見解を発出されていると認識している。



- ✓ プラント長期停止期間中における保全ガイドライン
(<https://www.atena-j.jp/report/docs/ATENA20-ME02%20%EF%BC%88Rev.0%EF%BC%89.pdf>)
- ✓ 運転期間延長認可の審査と長期停止期間中の発電用原子炉施設の経年劣化との関係に関する見解 令和2年7月29日原子力規制委員会
(<https://www.nra.go.jp/data/000323916.pdf>)

監視試験計画・運用の適正化について

<監視試験計画（取り出し間隔）における指標>

- 設計に応じた監視試験カプセル数を装荷しているが、数量は有限であること、RPVは運転に伴い中性子の照射を受けて、徐々に経年変化が進行していくことを踏まえ、経過時間（暦年）ではなく定格負荷相当年数（EFPY）を指標とした一元的な監視試験の計画・運用を行うことが科学的・技術的な観点からも有効と考える。
 - ✓ 将来の傾向を評価・把握する手法を用いるにあたり、適切な照射量の間隔による監視試験データを充実化・蓄積することは、評価の信頼性向上、さらにはプラントの安全性向上にも資する。
 - ✓ プラントの実状況（中性子照射を受けない）を踏まえた計画立案・管理が可能。

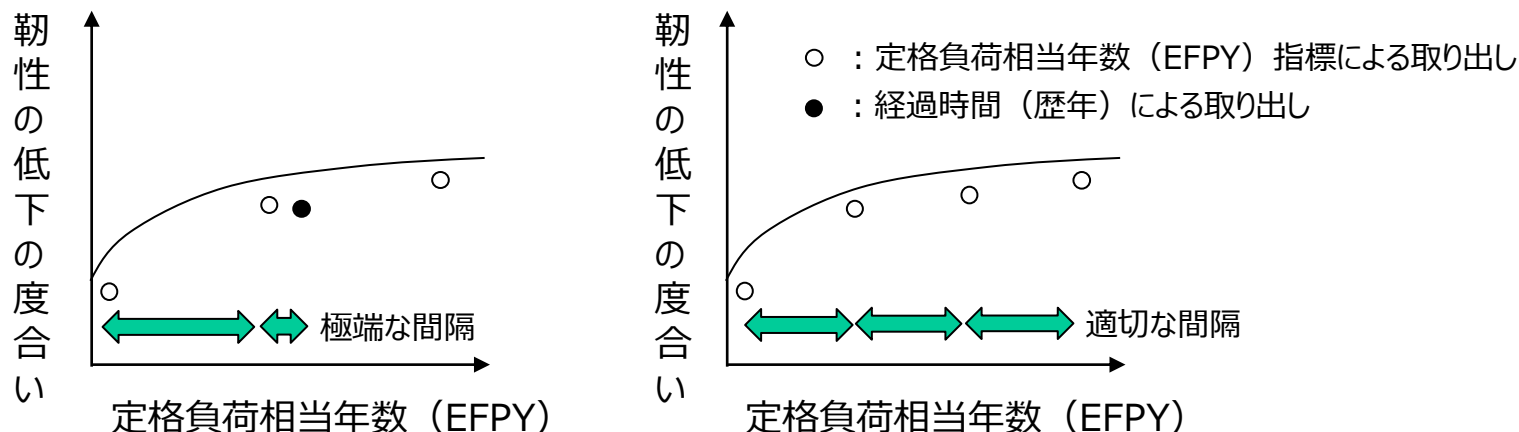


図 監視試験間隔の差異による経年変化の確認イメージ

定格負荷相当年数 (EFPY) に基づく適切な照射量の間隔での監視試験の計画・運用が望まれる

実機状況を考慮した監視試験の計画・運用 (1 / 2)

<原子炉の設計に応じた監視試験の計画・運用>

- PWRプラントとBWRプラントでは、原子炉の設計の差異から供用期間中に受ける中性子照射量が異なることを踏まえた監視試験計画を立案し・運用している (P.3、4参照)
- また、BWRプラントで想定される照射量はPWRに比べて 10^2 程度小さく、想定される運転期間における照射量の領域において十分なデータが取得されている。

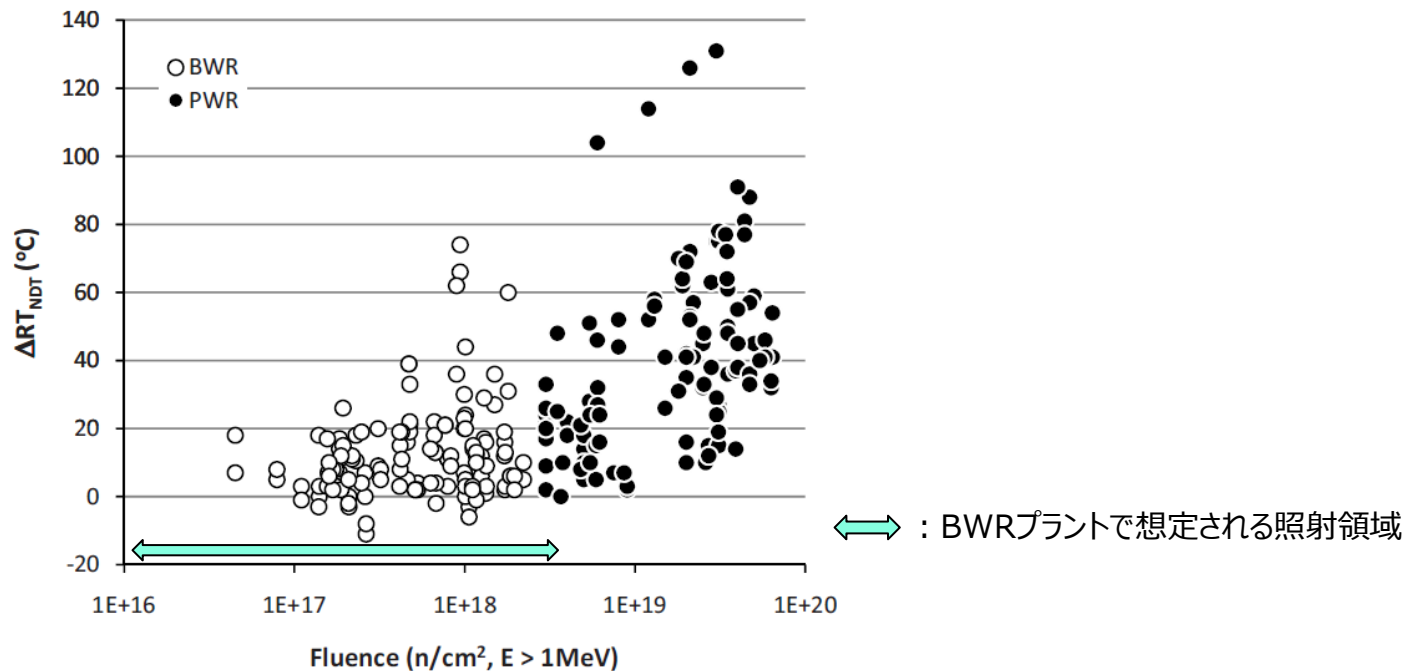


Fig. 5 Transition temperature shifts of BWR and PWR plants with neutron fluence ※1

実機状況を考慮した監視試験の計画・運用（2 / 2）

- BWRプラントでは、加速試験用カプセルを装荷・試験しており、加速試験データにより長期運転で予想される照射量が包絡されるとともに、これまでに取得された監視試験データ（加速試験結果を含む）の傾向において、鋼材の不純物成分（Cu含有率他）が低く抑えられ、中性子照射脆化に対する感受性の低い国内のBWRプラントにおける関連温度移行量は十分に低い値であることが示されている。

BWRプラントの監視試験データの傾向※2

原子炉の設計に応じた監視試験計画・運用とすることが望まれる

まとめ（プラント状況を考慮した監視試験の計画・運用の適正化）

- RPVは、運転に伴い中性子の照射を受けて徐々に材料の靱性（粘り強さ）が低下するため、経年変化の進行程度を把握して、計画的に健全性を確認することにより管理していくことが重要である。
- 原子炉の設計に応じた監視試験カプセル数を装荷しているが、数量は有限であること、RPVは運転に伴い中性子の照射を受けて、徐々に経年変化が進行していくことを踏まえ、科学的・技術的な観点に基づく規制・ガイドが整備されることをATENAとして要望する。
 - ✓ 定格負荷相当年数（EFPY）に基づき適切な照射量の間隔で監視試験を計画・実施。
 - ✓ 原子炉の設計（PWR/BWRの照射量の差など）に応じた監視試験の計画・運用。
- プラント状況を考慮した監視試験の計画・運用の適正化を図ることにより、監視試験データの充実化・蓄積にもつながり、RPVの健全性を評価する際の信頼性向上さらにはプラントの安全性向上にも資すると考える。

終わりに

- ATENAは、RPVの経年変化に対して、今後も継続的に監視試験データの充実化、国内外の最新の知見・運用を取り入れることにより評価の精度を高めるとともに、これらの手法を民間規格にも反映する等を通じて、信頼性・安全性の向上に努めていくため、今後別の場で適宜議論させていただきたい。

<今後、本会合とは別の場で議論させていただきたい主な事項>

◆ 脆化評価手法（評価式）の高度化

- ・国内外の最新知見や、継続的に得られる監視試験から得られるデータを評価に反映し、更なる信頼性向上に努める。

◆ PTS評価における仮想欠陥寸法適正化

- ・特別点検結果といった実機状況を適切に取り入れ、個別プラント毎に仮想欠陥寸法を設定することにより、評価の信頼性向上に資する。

◆ 確率論を用いた評価

- ・諸外国で導入が進められている確率論的破壊力学による評価を実機に適用することにより、より現実的な評価が可能となり、評価の更なる信頼性向上に資する。

◆ 小型試験片（マスターカーブ法含む）による評価手法

- ・監視試験片の有効活用のため、シャルピー衝撃試験片から採取した小型の試験片を導入する。導入にあたっては、少ない試験片から破壊靱性の中央値や統計的な信頼下限を評価するマスターカーブ法を用いた評価手法を導入する。

◆ 統合型監視試験

- ・更なる監視試験片の有効活用による信頼性向上のため、米国で実績のある統合型監視試験プログラム（プラント間でのグルーピング化により監視試験計画を最適化）を導入する。