

令和5年度
原子力機構安全研究・防災支援部門-原子力規制庁長官官房技術基盤グループ
合同研究成果報告会

原子炉圧力容器鋼の非均質性を考慮した 健全性評価の信頼性向上を目指して ～溶接熱影響部の破壊靱性評価～

令和5年11月21日

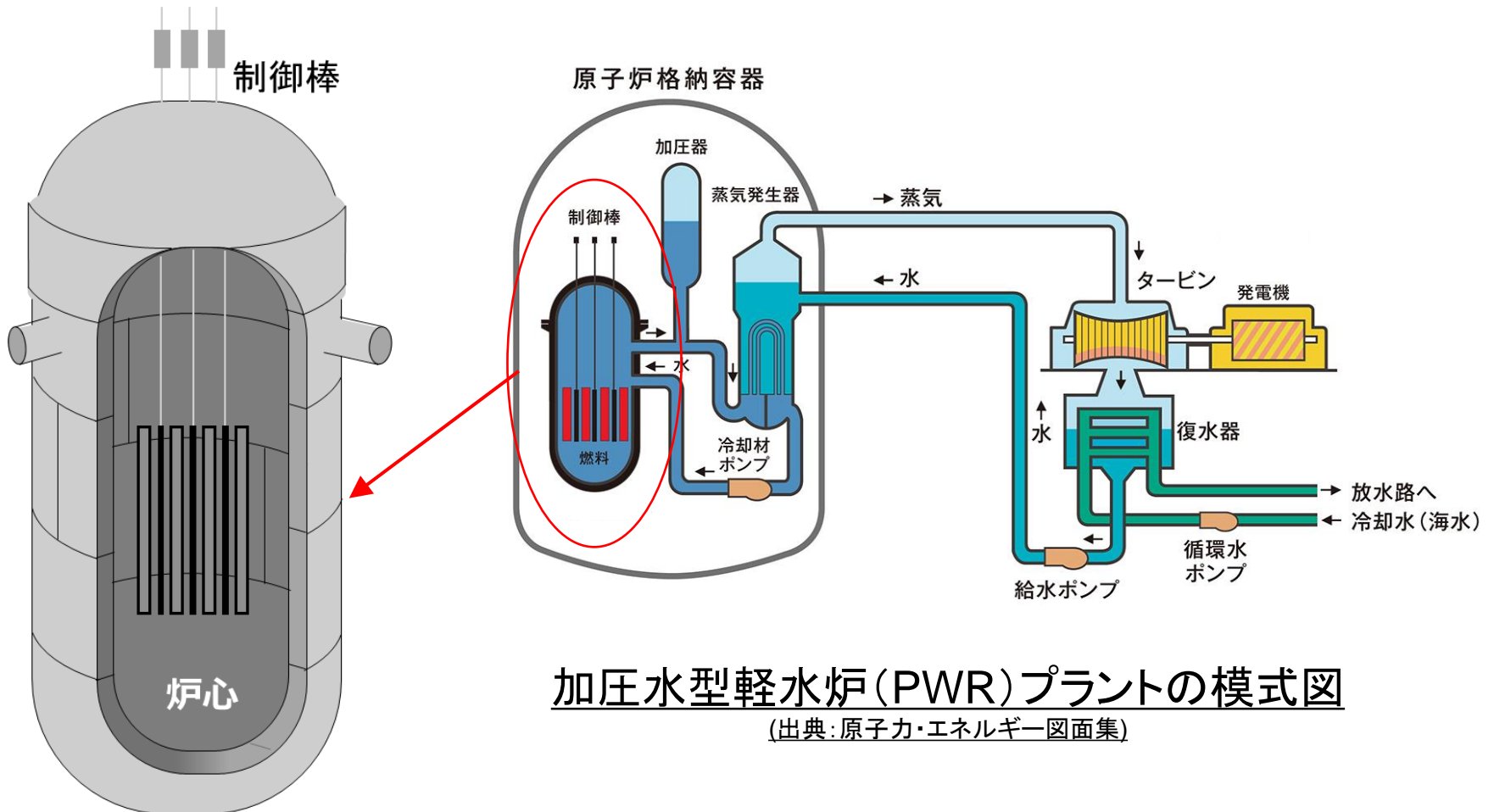
国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
安全研究・防災支援部門 安全研究センター
経年劣化研究グループ

ハ ユソン
河 侑成

本研究の一部は、「原子力発電施設等安全性実証解析等(軽水炉照射材料健全性評価研究)」事業及び「実機材料等を活用した経年劣化評価・検証(原子炉圧力容器の健全性評価研究)」事業の成果である。

原子炉压力容器 (RPV)

核燃料と冷却材・減速材としての水(軽水)を格納し内部に閉じ込める機器で、取り替えができないため、原子炉を安全に運転する上で最も重要

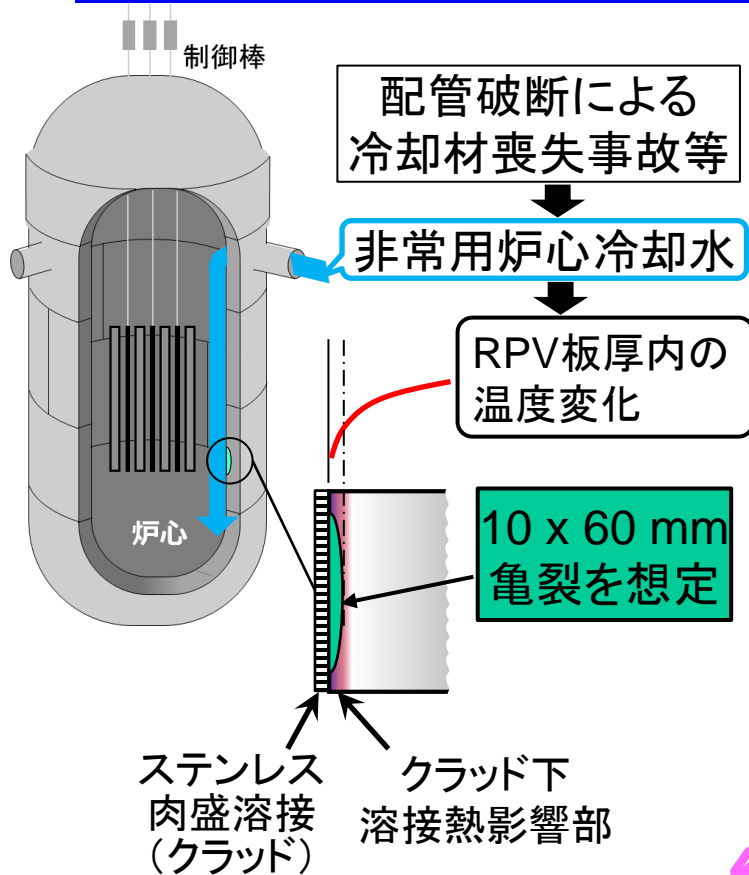


加圧水型軽水炉 (PWR) プラントの模式図

(出典:原子力・エネルギー図面集)

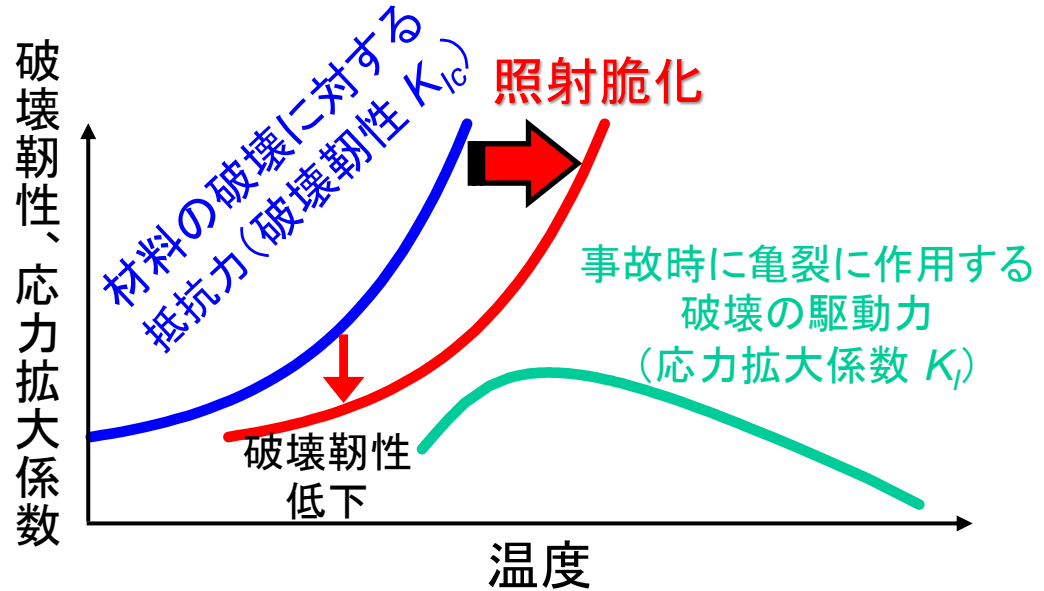
原子炉压力容器

RPVの健全性評価



◆ 健全性評価

民間規格 (JEAC4206等) により定められている。



破壊靱性

応力拡大係数

>

発表

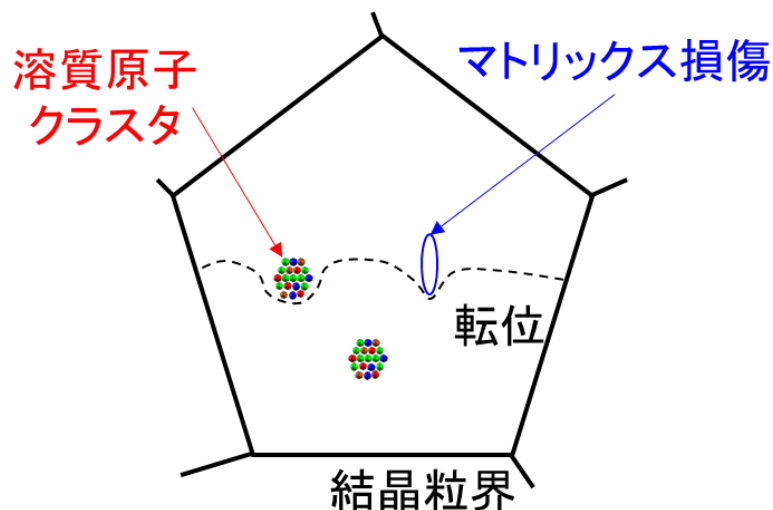
温度依存性を有し、
低温で低い値

RPV板厚内の温度勾配に起因する
応力が亀裂最深部にかかる際の値

- **照射脆化**: 同じ温度での破壊靱性が低下し、すなわち破壊靱性曲線が高温側にシフト
- 監視試験片を炉内に装荷し、計画的に試験 → 脆化が生じても健全であることを確認

中性子照射によるRPV鋼の微細組織の変化

◆ 材料の原子レベルの構造の変化



- **溶質原子クラスタ**
照射によって形成される溶質原子の集合体
→ **Cu**を主体とし、Ni, Mn等も集積
- **マトリックス損傷**
照射によって生じる原子構造の乱れ
(転位ループ)等

◆ RPV鋼の化学成分

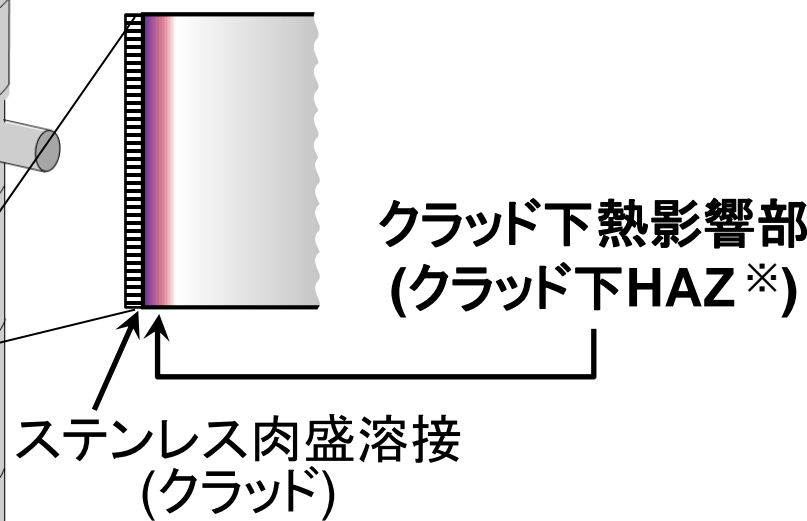
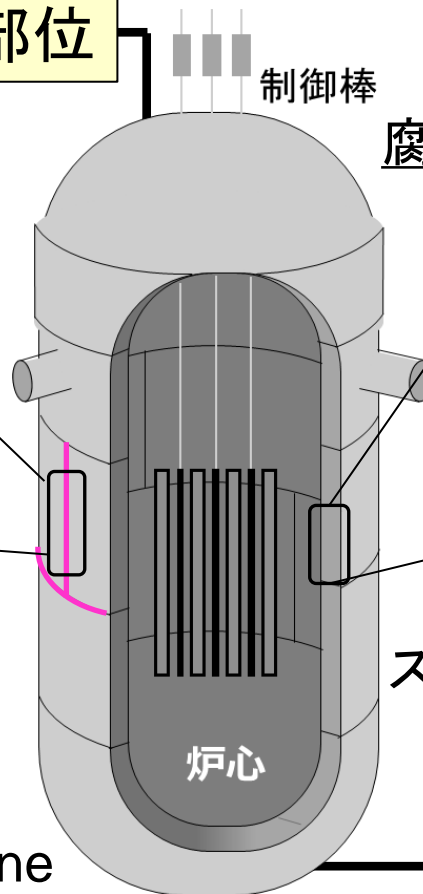
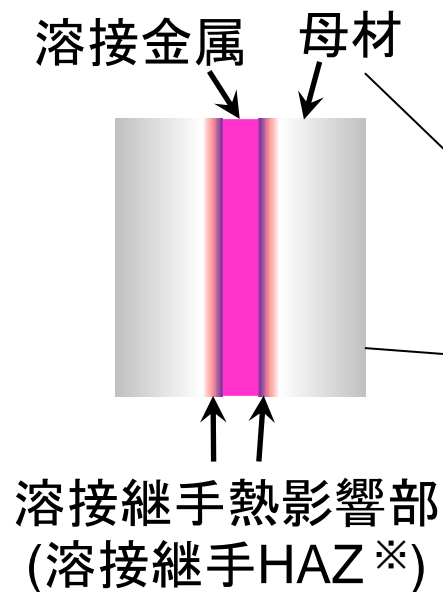
- 1%程度の添加元素(Mn、Mo、Niなど)を含む低合金鋼
- 40年以上の長期運転となるRPV鋼は、不純物元素であるCu含有量が比較的高い。
※ 技術の発展とともにCu含有量が低減されている。

RPVの構造及び監視試験片の採取部位

監視試験片の採取部位

鋼板をつなげる継手溶接

腐食抑制のためのステンレス肉盛溶接



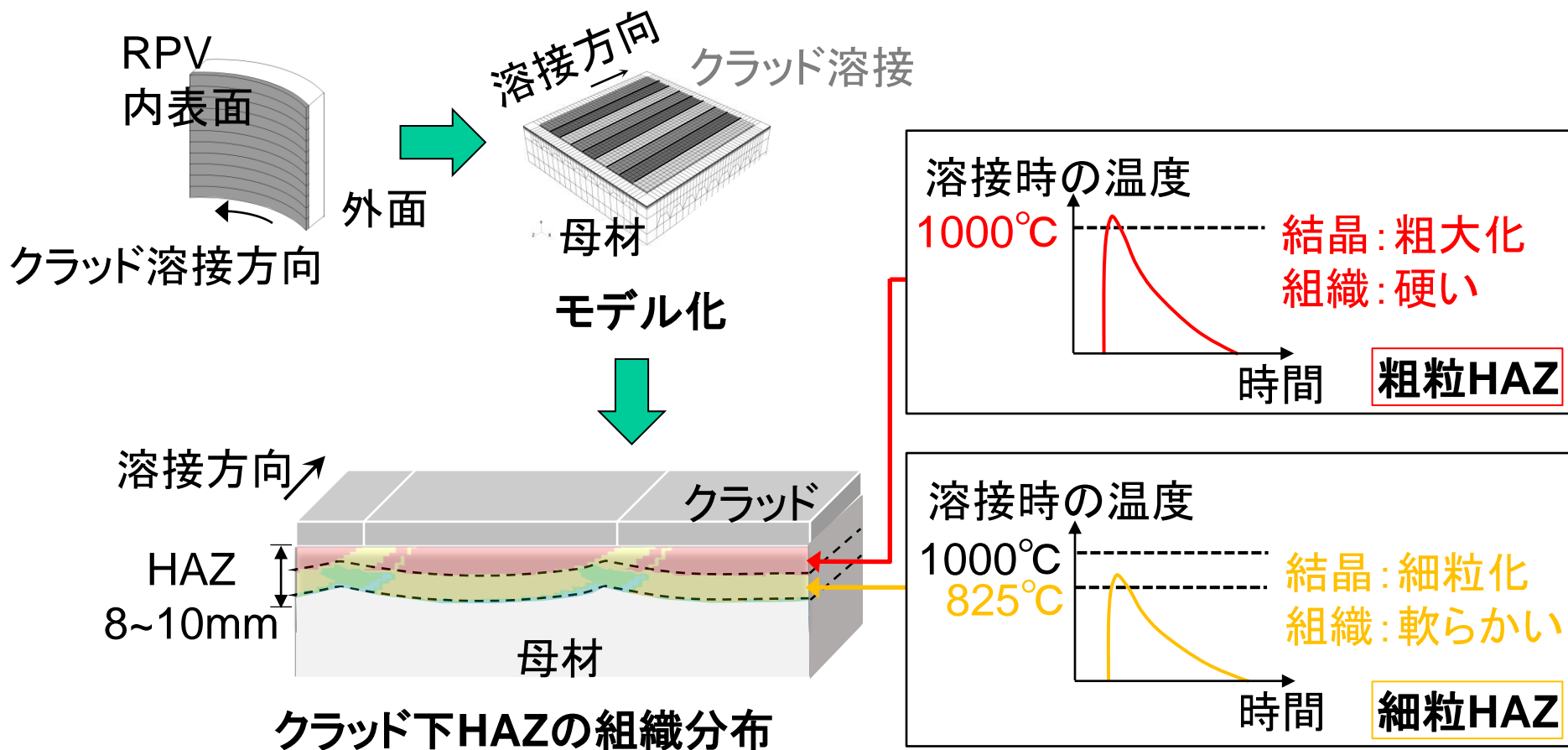
※HAZ: Heat-affected zone

- 監視試験片の採取部位: 母材、溶接金属、溶接継手HAZ
- 溶接継手HAZ: 多層溶接により、繰り返し溶接熱が与えられる。
継手溶接時の加熱・冷却により母材と異なる金属組織が分布

クラッド下HAZの非均質組織

溶接時の入熱によって到達する温度等の違いにより、非均質な金属組織となる。

◆ 伝熱解析によるHAZの非均質な組織の確認



➤ 監視試験ではクラッド下HAZの破壊靱性は確認されず、母材の破壊靱性で代表

研究の目的

【目的】

母材と異なる非均質な組織となっているクラッド下HAZを考慮しても、母材の破壊靱性を用いた現行の健全性評価手法が保守的かを確認

【着目点】クラッド下HAZの破壊靱性を詳細に調べる。

→ 組織ごとの破壊靱性及び照射脆化

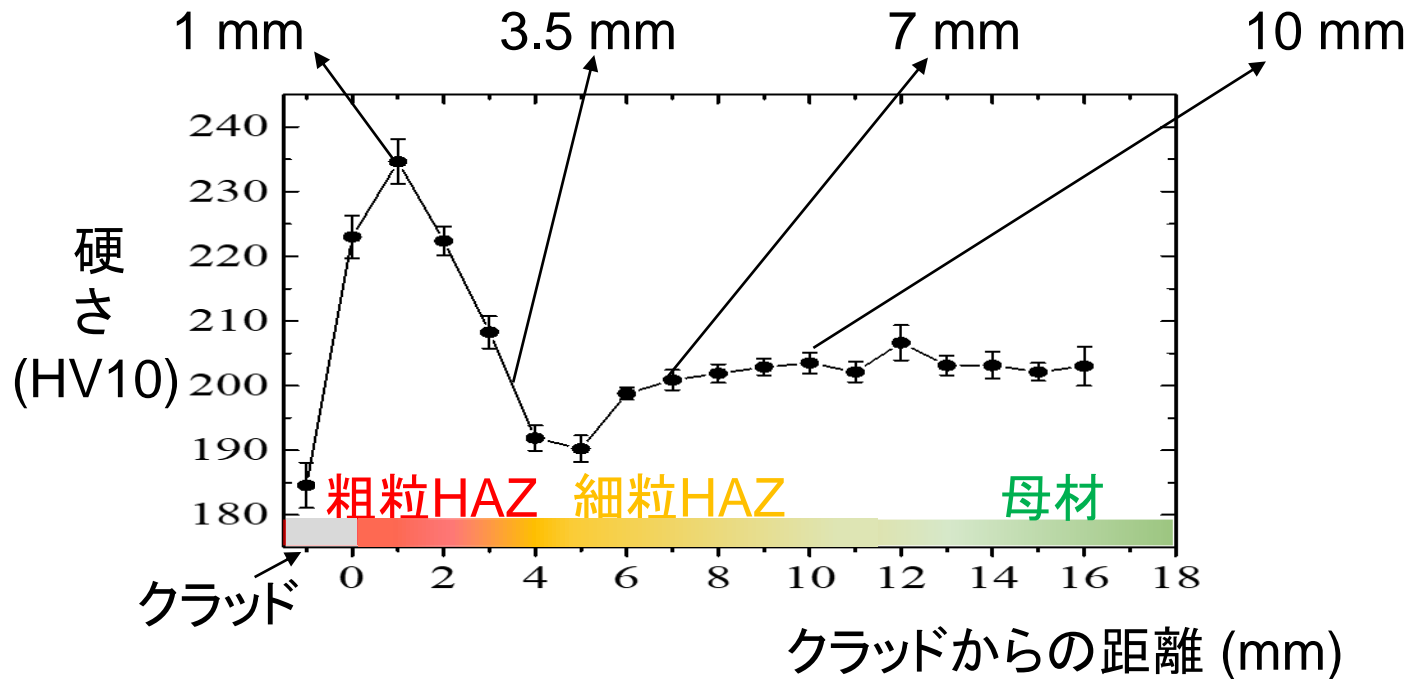
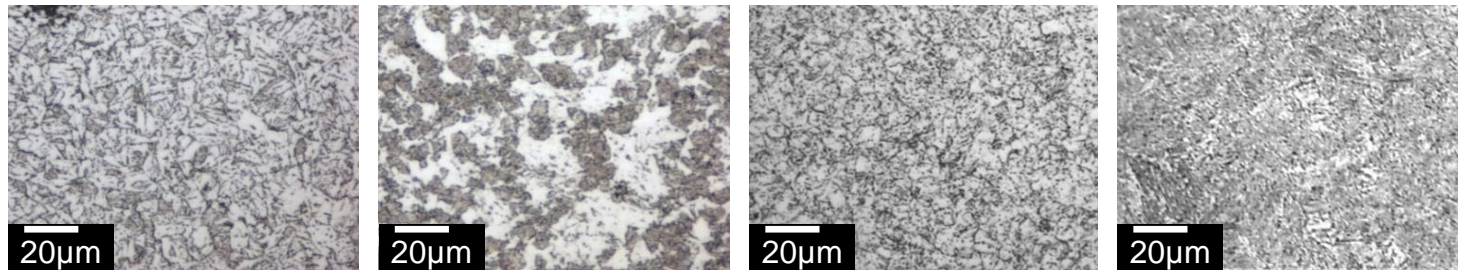
ステップ 1 未照射クラッド下HAZの破壊靱性評価
→ 微小試験片を用いてHAZ組織ごとの破壊靱性を確認

ステップ 2 クラッド下HAZの照射脆化感受性を把握
→ イオン照射法を用いて照射による硬化量と微細組織変化を確認

ステップ 3 クラッド下HAZの照射脆化評価
→ 中性子照射した材料を用いて破壊靱性試験を予定

未照射HAZの金属組織と硬さ

- 比較的Cu含有量が高いRPV鋼を模擬した低合金鋼を製作



- HAZの非均質な金属組織が連続的に変化するとともに硬さも変化

HAZの組織ごとの破壊靱性試験

ステップ 1

未照射クラッド下HAZの破壊靱性評価

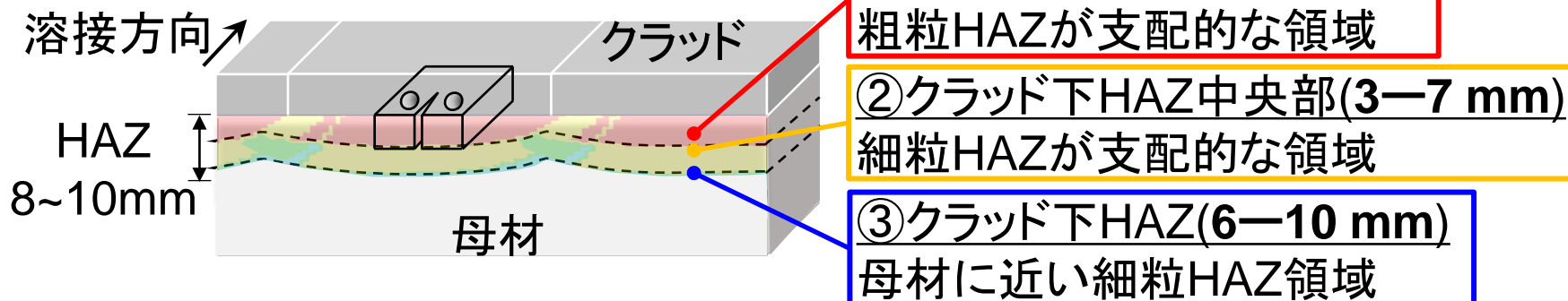
→ 微小試験片を用いてHAZ組織ごとの破壊靱性を確認

◆ Mini-C(T)試験片の採用



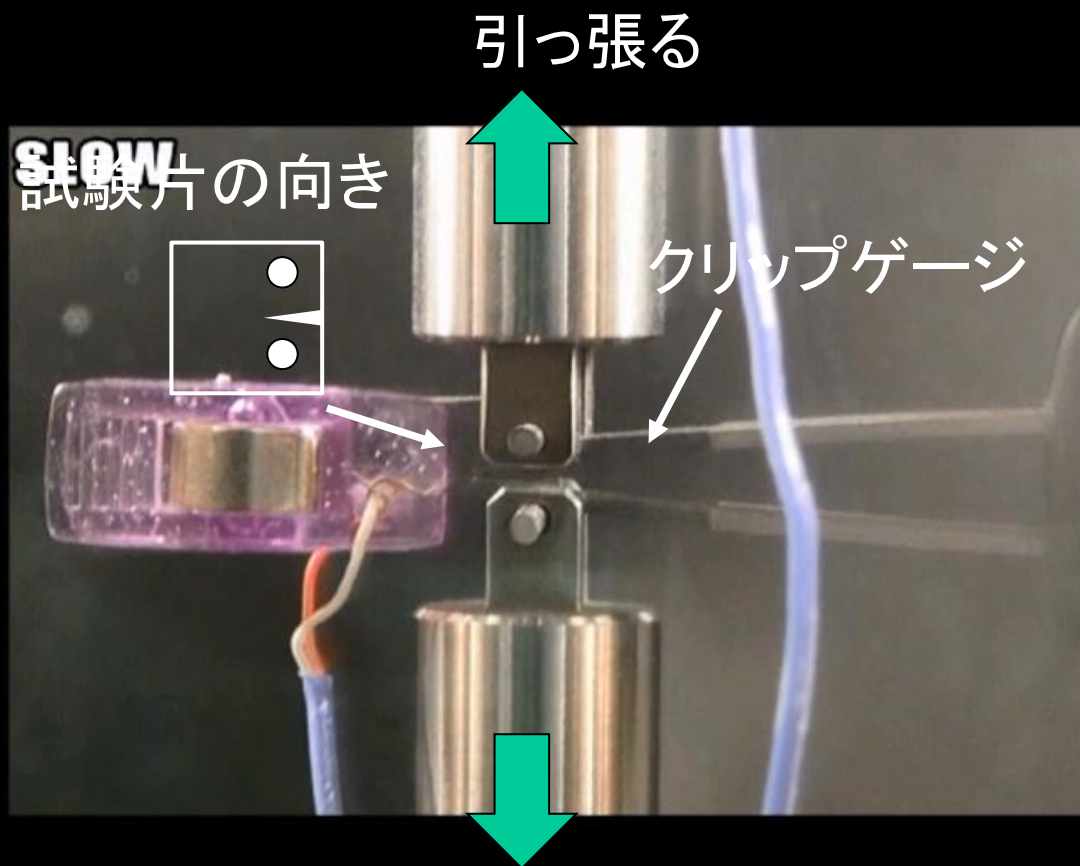
- Mini-C(T)試験片: 10 × 9.6 × 4 mm (厚さ)
- 小さい面積 (標準試験片の板厚25.4mm)
- Mini-C(T)を用いた破壊靱性試験に取り組んで、破壊靱性評価への適用性を確認
→ 監視試験片不足への対策として有効
- 本研究の狭い領域の破壊靱性評価に活用

◆ 試験片の採取位置



試験片採取位置

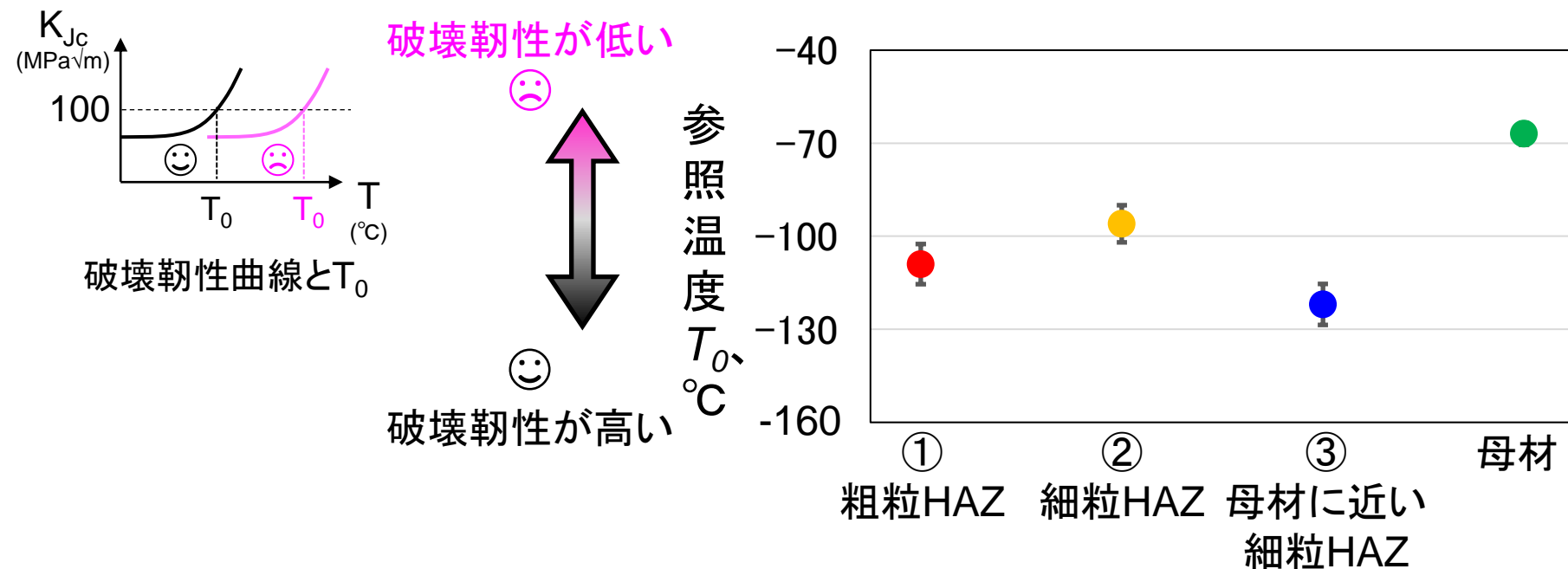
Mini-C(T)を用いた破壊靱性試験



破壊靱性試験結果：HAZの破壊靱性分布

破壊靱性曲線 $K_{Jc} = 30 + 70 \times \exp(0.019 \times (T - T_0))$

参照温度 T_0 : 破壊靱性曲線上の破壊靱性 (K_{Jc}) が $100 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ に相当する温度



クラッド下HAZの採取位置における T_0

- HAZの破壊靱性は組織により異なり、細粒HAZの破壊靱性が最も低い。
- HAZ内のいずれの組織も母材より高い破壊靱性

【成果】 未照射材を用いて、非均質組織であるクラッド下HAZの破壊靱性分布を初めて明らかにし、母材より破壊靱性が高いことを確認

HAZのイオン照射試験

ステップ 2

クラッド下HAZの照射脆化感受性を把握

→ イオン照射法を用いて照射による硬化量と微細組織変化を確認

◆ イオン照射

クラッド下HAZの照射による機械的変化・微細組織変化の程度を見積る。

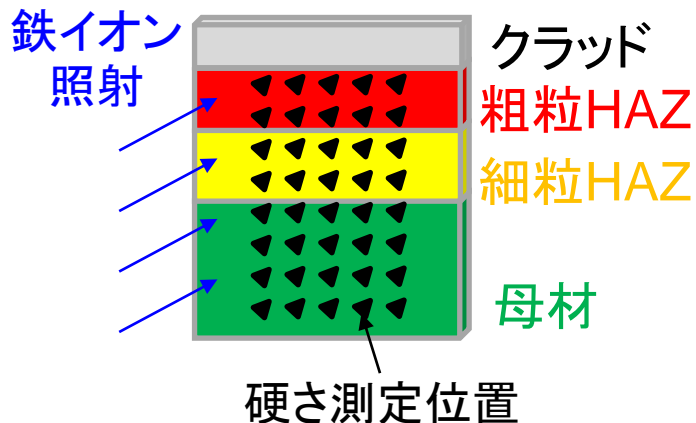
- 短時間で高い照射量までの照射可能(照射速度が速い)
- 局所的な照射損傷領域(表面から浅い領域(約1.5 μ m))
- 硬さ測定が可能

「照射による硬さの変化(照射硬化)と照射脆化の相関」を利用

→ イオン照射による照射硬化を評価

イオン照射後試験

◆ 硬さ測定による照射硬化量の評価

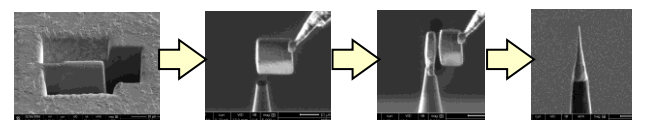


照射量 0.5 dpa@290°C

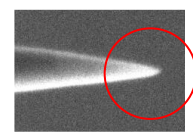
※PWRの場合、0.2dpaが60年相当

照射前後の硬さ測定

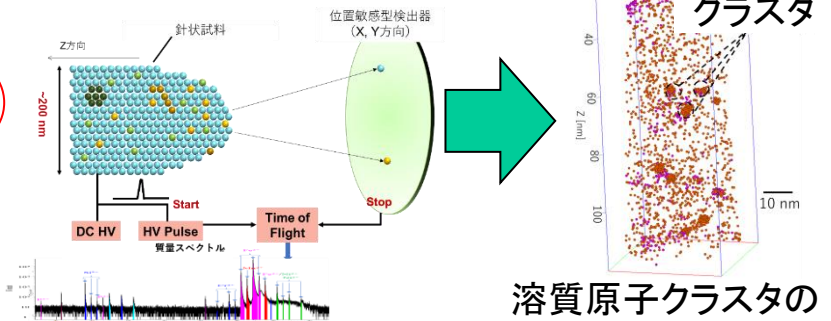
◆ 照射による溶質原子クラスタの分析



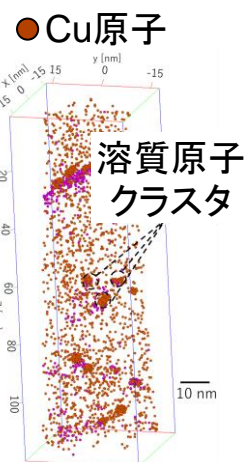
先端の直径100nm以下の針状サンプルを製作



500nm

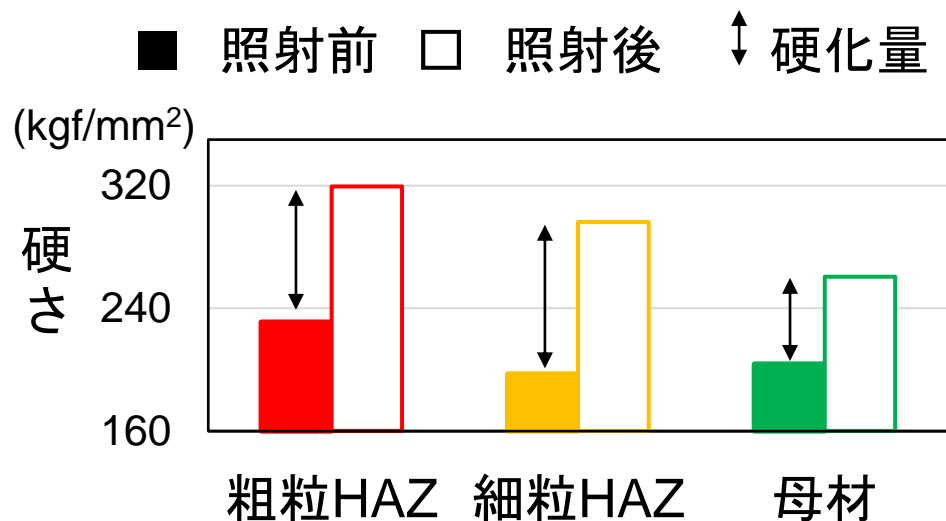


溶質原子クラスタの
マッピング例



- アトムプローブトモグラフィー (APT)を用いて、原子の種類、位置情報を取得し、3次元に再構成
- クラスタの大きさ、数密度及び体積率を分析

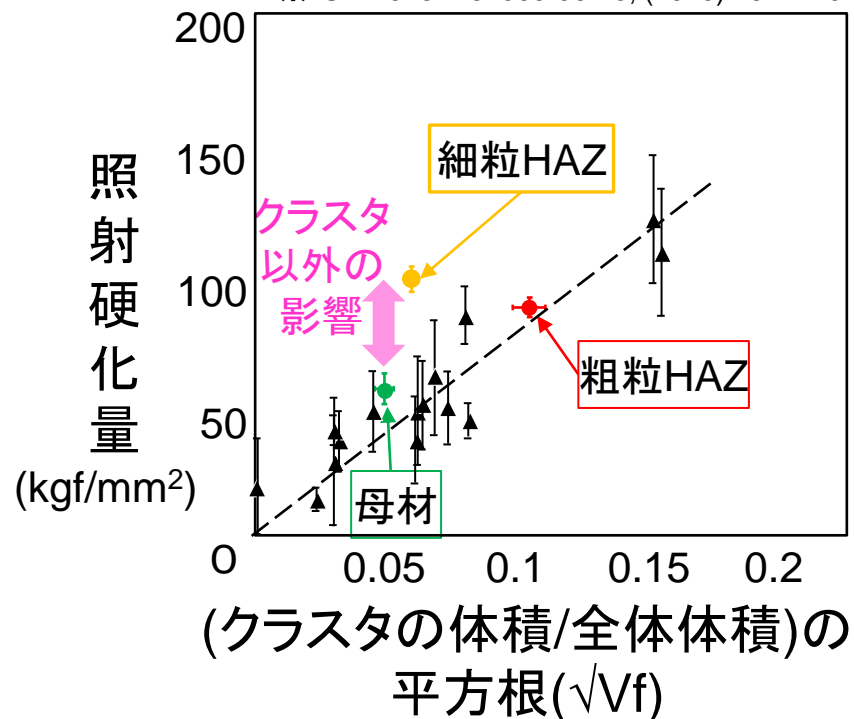
HAZの照射硬化



- 照射前から細粒HAZは軟らかく、照射硬化量が他に比べて大きい。

- クラスタ体積率↑ → クラスタがHAZの硬さの変化に寄与
- 細粒HAZでの硬さの変化 → クラスタ以外の因子も寄与

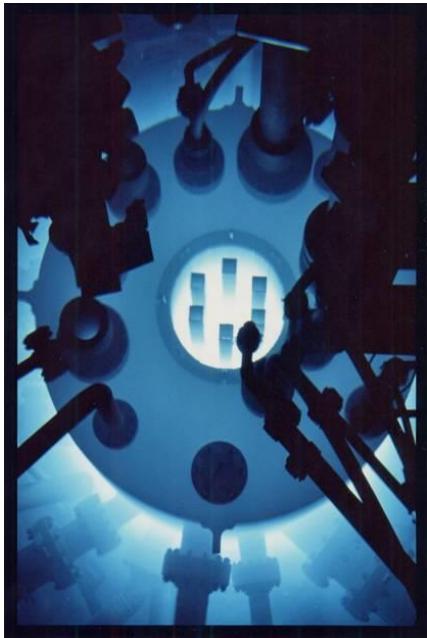
▲ 文献(母材)データ※
 ※ ISBN 978-1-84569-967-3, (2015) 181-210.



【成果】 HAZの照射硬化が母材より大きい可能性があり、細粒HAZでは硬化因子が母材と異なることを示唆

ステップ3: 照射脆化評価 (今後の予定)

中性子照射後もクラッド下HAZの破壊靱性は良い？
→60年超運転相当 (高照射量領域) まで照射したRPV鋼が必要



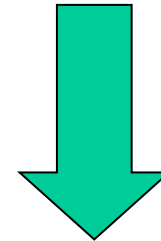
JRR-3炉心内

JRR-3ホームページにより (<https://jrr3.jaea.go.jp>)

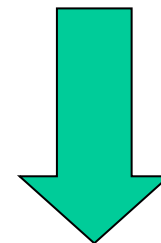


内容物

キャプセル



原子力機構の試験研究炉 (JRR-3) 等を用いる照射試験



将来的には

RPV実機材料を用いた破壊靱性評価に取り組みたい！

長期運転されたRPVの健全性評価手法の妥当性を確認

まとめ

- Mini-C(T)試験片の破壊靱性評価への適用性を確認してきた実績を活かして、HAZの微小領域の破壊靱性評価に取り組んだ。その結果、非均質なHAZ組織の破壊靱性が母材より高いことを初めて明らかにした。
- イオン照射後の照射硬化量と、イオン照射により形成されたクラスタを確認し、HAZの照射硬化が母材より大きいことが示唆された。

今後の予定

60年超運転相当まで中性子照射したHAZの破壊靱性を評価し、健全性評価手法の保守性を確認する。

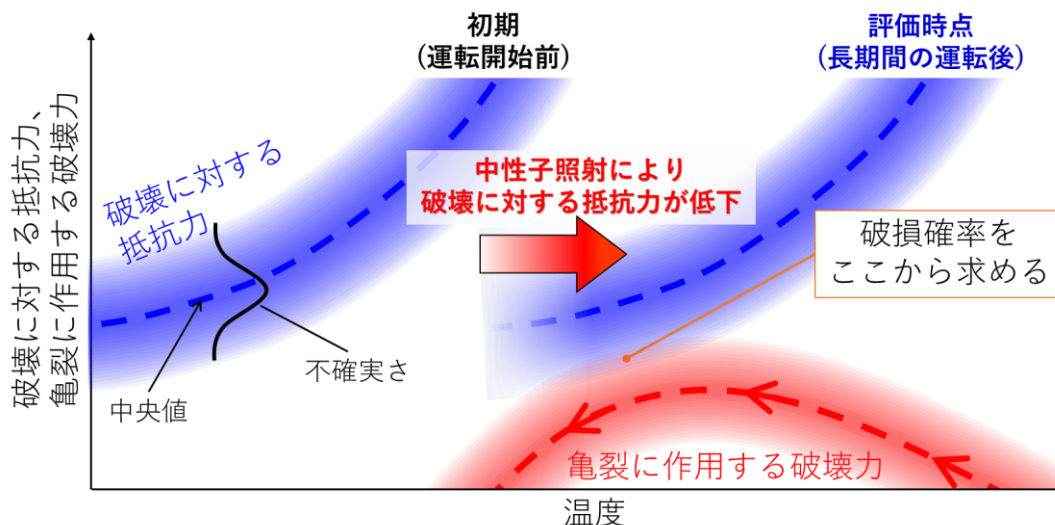
【参考文献】

- [1] Yoosung Ha et al., “Ion-induced irradiation hardening of the weld heat-affected zone in low alloy steel”, Nuclear Inst. And Methods in Physics Research B 461 (2019) 276–282.
- [2] Yoosung Ha et. Al, “Fracture Toughness Evaluation of the Heat-Affected Zone Under the Weld Overlay Cladding in Reactor Pressure Vessel Steel,” Journal of Pressure Vessel Technology(2023) 021501.

RPVの健全性評価手法に係るJAEAの取組

◆ 確率論的な健全性評価

- 現在の決定論的な健全性評価手法では、亀裂の進展を保守的に評価している。
- 破壊靱性、応力拡大係数、脆化量等、健全性評価に用いる各評価パラメータは不確実さを有する。
- それらの不確実さを考慮して機器・構造物の亀裂進展確率・亀裂貫通確率、頻度等を求める評価方法を確率論的破壊力学(PFM)という。
- JAEAでは、PFMを用いて、より合理的な健全性評価に取り組んでいる。



詳しくは「経年劣化研究グループ」の発表ポスターへ！

ご清聴、ありがとうございました！