



Japan Atomic Energy Agency

未来へげんき
To the Future / JAEA

令和3年度
原子力規制庁技術基盤グループ-原子力機構安全研究・防災支援部門
合同研究成果報告会

材料評価研究Grの研究概要 及び 原子炉圧力容器の健全性評価に関する研究

令和3年11月2日

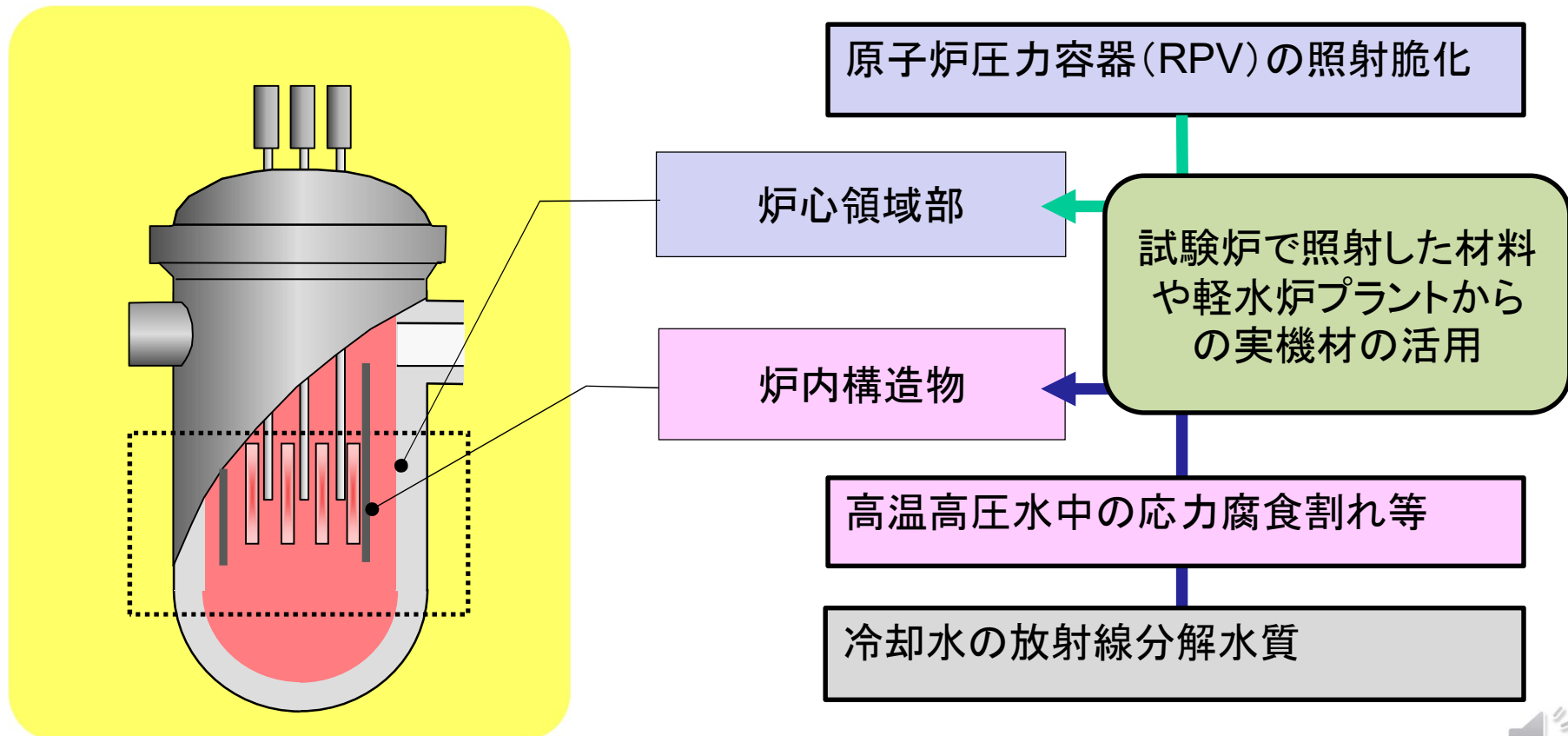
国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
安全研究・防災支援部門 安全研究センター
材料評価研究グループ

本研究の一部は原子力規制庁からの受託事業「軽水炉照射材料健全性評価研究」の成果である。



材料評価研究Gr.の研究概要

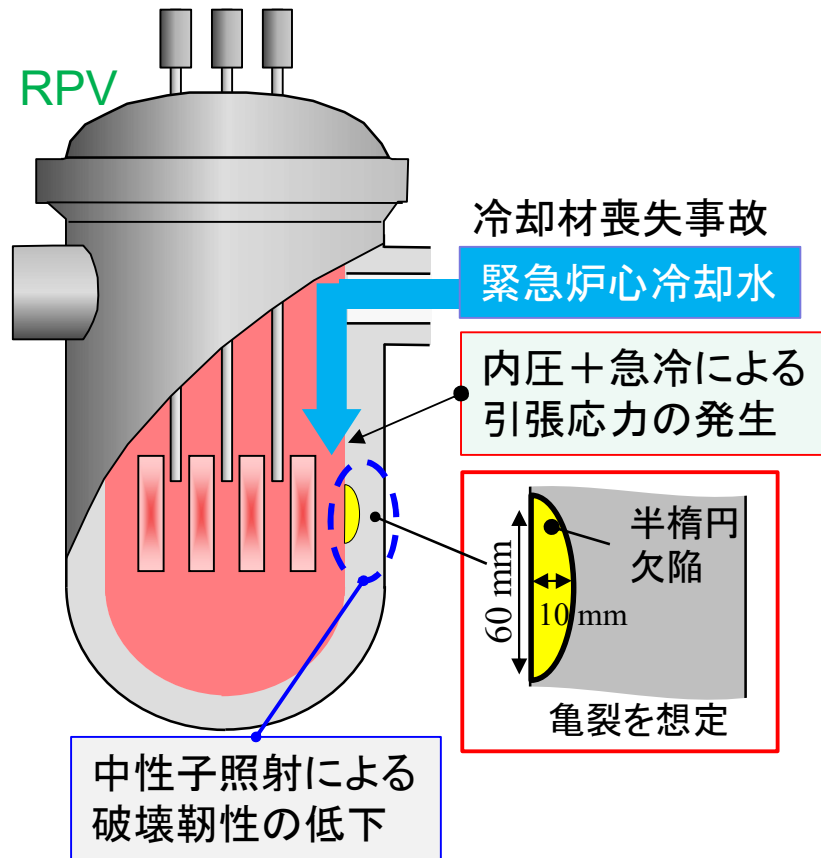
試験炉で照射した材料や軽水炉プラントで使用された実機材を活用し、安全上重要な機器の経年劣化（原子炉圧力容器中照射脆化等）を対象に、長期運転や新検査制度に資するため、脆化メカニズムから構造健全性評価までの総合的な研究を推進



RPVの健全性評価の概要^[1]

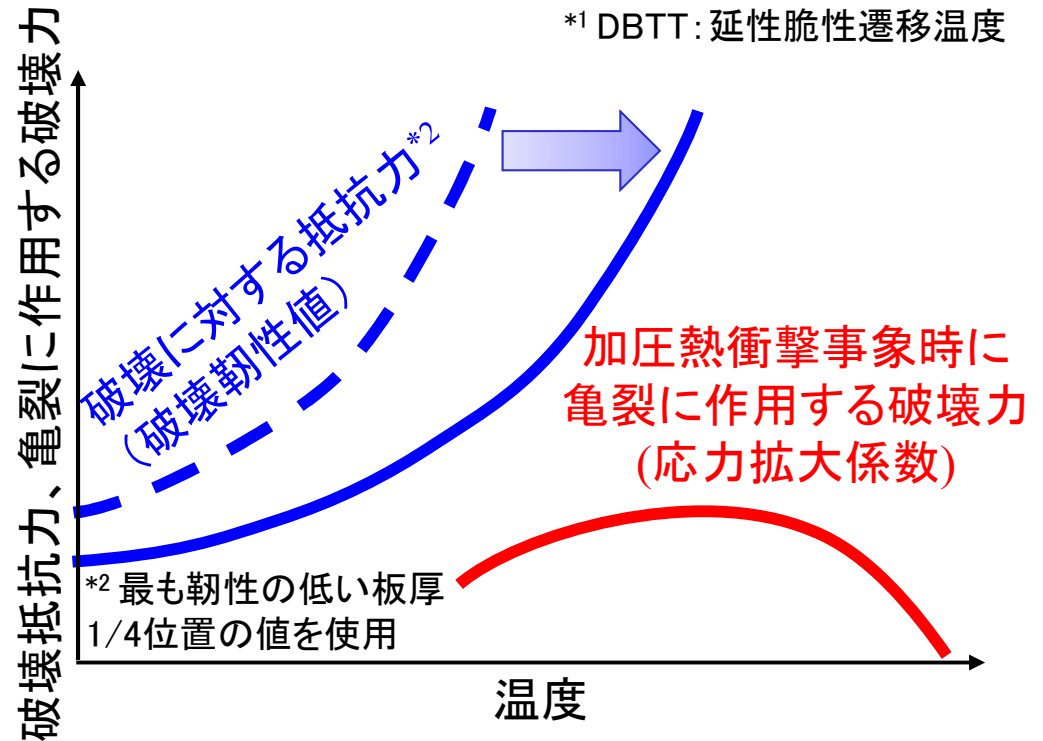
中性子照射脆化を考慮した破壊力学評価により供用期間中に脆性破壊しないことを評価

加圧熱衝撃事象
(評価上最も厳しい事象)



中性子照射による脆化量の上昇(ΔRT_{NDT})を DBTT^{*1}の上昇と等価と仮定し、DBTTの上昇から破壊靱性の低下を予測

*1 DBTT: 延性脆性遷移温度



以下の条件が満足されることを確認することにより、脆性破壊しないことを評価

破壊靱性値

>

応力拡大係数

3

[1] 日本電気協会 JEAC4206-2016「原子炉圧力容器に対する供用期間中の破壊靱性の確認方法」。

RPVの健全性評価に関する研究

脆化予測に係る微細組織分析から実機規模の破壊力学評価まで、幅広いスケールで研究を展開



- 材料劣化メカニズムの理解
- 材料劣化評価精度の向上

- 実機材等の試験片加工及び材料特性評価試験

中性子照射脆化の予測精度の向上

評価手法の整備

- 確率論的手法に基づく評価手法の実用化等

実機材や試験炉(JRR-3等)での照射材等を活用

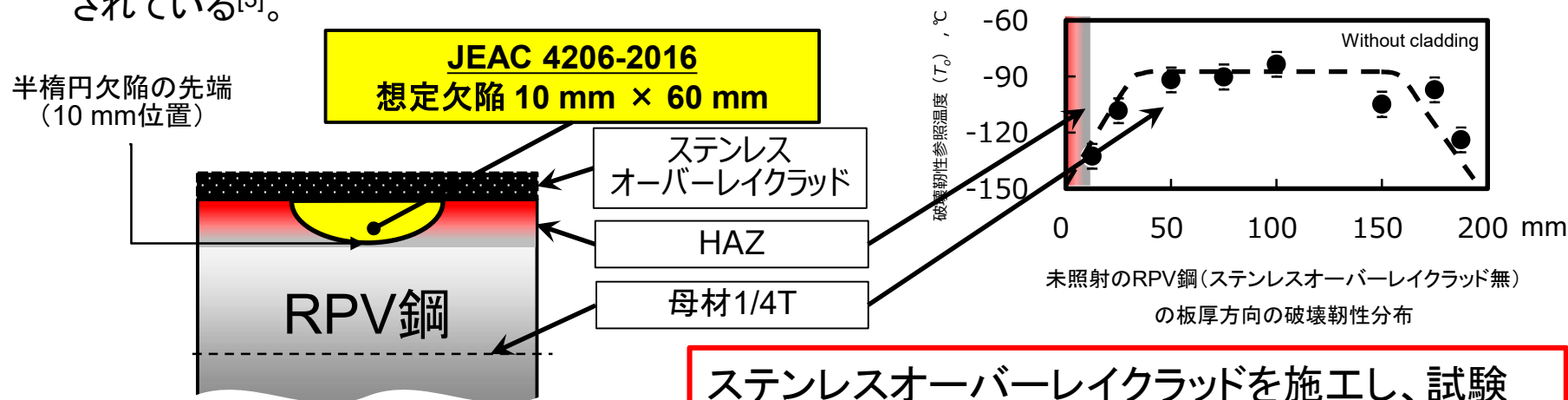


RPVの健全性評価に関する研究

健全性評価対象部位の代表性に
関する研究

健全性評価対象部位の代表性に関する研究

- 実機の評価では、炉心領域にある部材と同一の材料から作られ炉内に装荷された監視試験片を定期的に取り出し、 ΔRT_{NDT} を評価。監視試験片は破壊靱性値が低い母材の板厚1/4位置(以下、1/4T)から採取されている(下図)^[2]。一方で、健全性評価の対象部位はRPVの内面^[1]。
- RPVの健全性評価で想定する半楕円欠陥(10 mm x 60 mm)にはステンレスオーバレイクラッド下HAZ^{*1}(以下、クラッド下HAZ)が含まれるため、HAZも考慮した1/4Tの代表性確認が必要 ^{*1 HAZ: 溶接熱影響部}
 - 溶接時の入熱が場所ごとに異なるため、HAZは非均質な材料となっている。
 - 熱処理により初期特性(降伏応力)を変化させた材料に対して、照射硬化の感受性の変化が指摘されている^[3]。



ステンレスオーバレイクラッドを施工し、試験炉で照射したRPV鋼を対象とし、クラッド下HAZに対する1/4Tの破壊靱性値の保守性を微小な破壊靱性試験片を用いて確認する。

[1] 日本電気協会 JEAC4206-2016「原子炉圧力容器に対する供用期間中の破壊靱性の確認方法」。

[2] 日本電気協会 JEAC4201-2007「原子炉構造材の監視試験方法」

[3] K. Wilford, IAEA, conference ID: 45320, 5-8, November (2013).

供試材(中性子照射材)[4]

◆ 原子炉圧力容器鋼(A533B cl. 1)の化学組成 (wt.%)

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Mo
0.22	0.21	1.44	0.019	0.021	0.16	0.60	0.48

Cu含有量が高く、脆化しやすい(感受性が高い)材料

◆ オーバーレイクラッド、溶接後熱処理(PWHT)条件

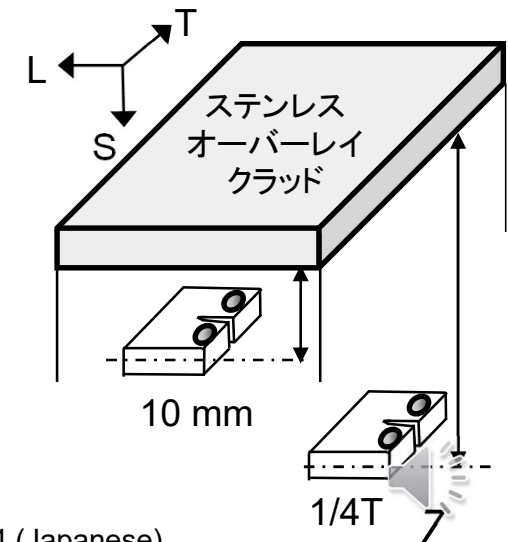
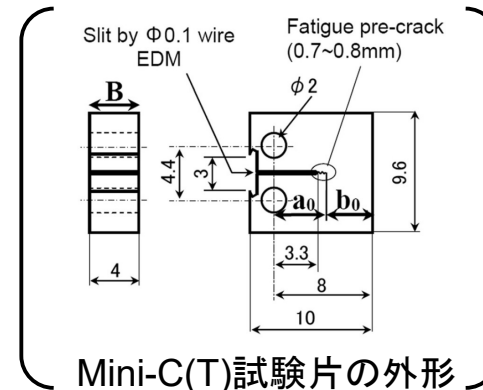
- サブマージアーク溶接 $\xrightarrow{\text{PWHT}}$ 615°C for 420 min.

◆ 照射条件

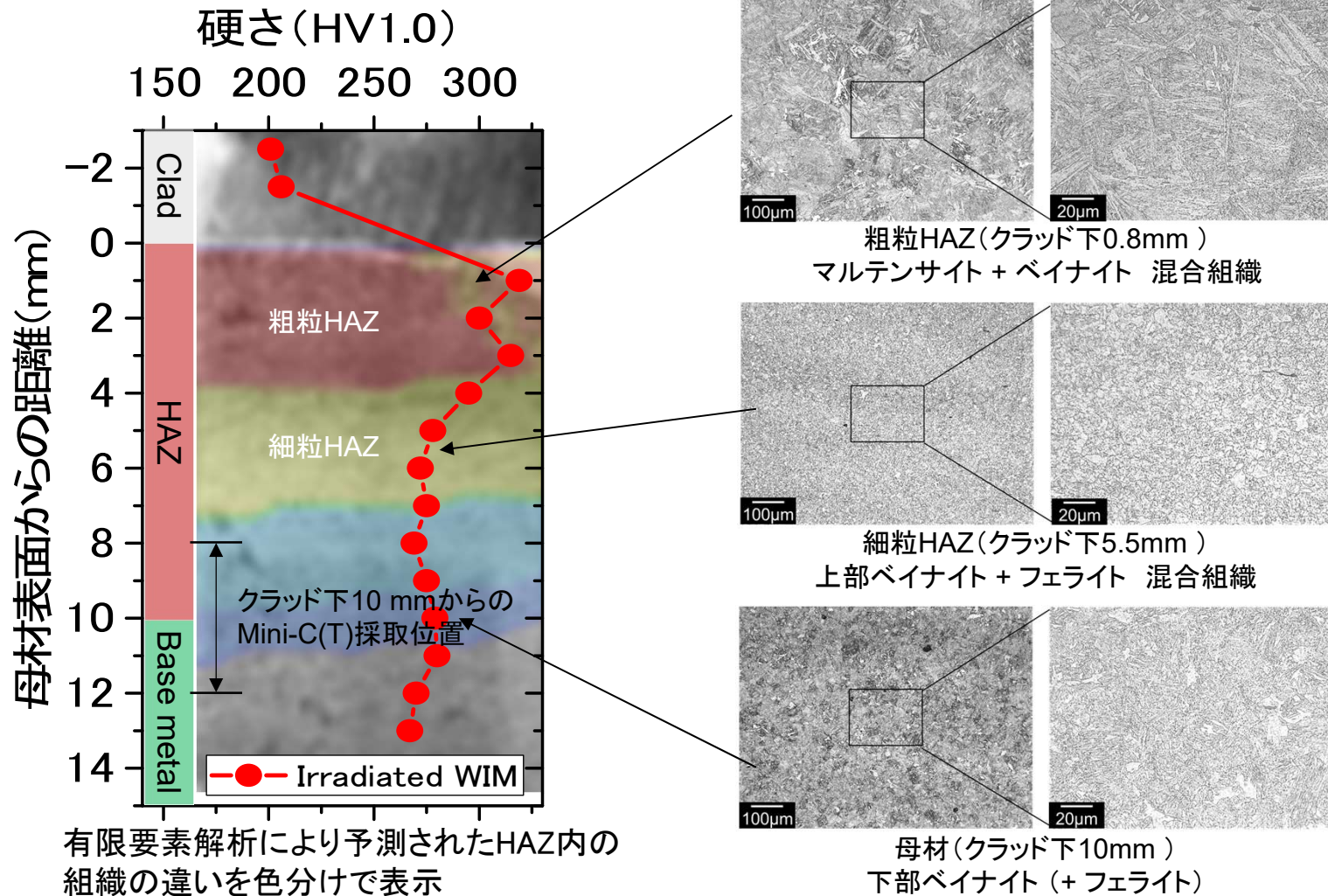
- 照射量: 1×10^{20} n/cm²
- 中性子束: 10×10^{12} n/cm²/s
- 照射温度: $290 \pm 10^\circ\text{C}$

◆ 試験片

- HAZを含む微小な領域を調べるため、厚さ4mmの微小な破壊靱性試験片(Mini-C(T)試験片)を使用
- 母材のクラッド下10 mm位置と、1/4Tから試験片を採取

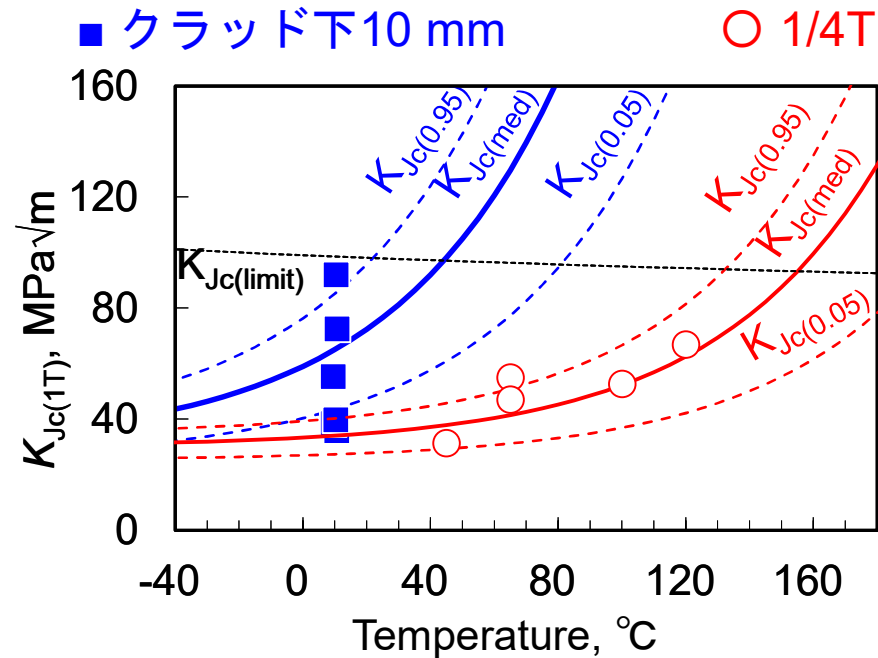


硬さ分布と金属組織



- ◆ ステンレスオーバーレイクラッドから母材にかけて、ビッカース硬さを測定
 - ・ クラッド施工に伴いクラッド直下で硬さが最も高く、板厚内部に向かって単調に減少

破壊靱性試験結果



- マスターカーブ法^[5]に基づき、1/4Tの方がクラッド下10 mm位置より十分に靱性が低いと評価された。
- 本研究で使用した $1 \times 10^{20} \text{ n/cm}^2$ 程度の照射量のRPV鋼に対して、1/4Tで材料の破壊靱性を評価する現行の健全性評価手法の保守性を確認した。

[5] ASTM E1921-12, ASTM International (2012).

まとめ

- ◆ 材料評価研究グループでは、RPV鋼の照射脆化等を対象に、長期運転や新検査制度に資するため、脆化メカニズムから構造健全性評価までの総合的な研究を推進
- ◆ RPVの健全性評価対象部位の代表性の評価に関する研究では、1/4Tの破壊靱性を用いて材料の健全性を評価することの保守性を調べるため、中性子照射材を用いて、クラッド下10 mm位置と1/4Tの破壊靱性や硬さを比較
 - 金属組織はHAZ内で細かく変化していること、及びクラッド下には母材より硬い部位が存在することを確認
 - 高照射量領域まで照射した今回の材料に関して、1/4Tの破壊靱性はクラッド下10 mm位置より十分に低いことから、1/4Tで材料の破壊靱性を評価する現行の健全性評価手法の保守性を確認

今後も、脆化メカニズムの理解の深化、健全性評価手法の高度化による安全性の向上に資する研究成果を得て、発信していきます。