

原子炉圧力容器鋼の照射硬化メカニズム究明

- 電子線照射実験 -

Study on irradiation hardening mechanism of RPV steels
- Electron irradiation experiment -

河 侑成¹⁾ 下平 昌樹¹⁾ 勝山 仁哉¹⁾ 山崎 翔太²⁾ 宇野 定則²⁾

Yoosung HA Masaki SHIMODAIRA Jinya KATSUYAMA Shota YAMASAKI Sadanori UNO

¹⁾ 日本原子力研究開発機構 ²⁾ 量子科学技術研究開発機構

(概要)

原子炉圧力容器のステンレスオーバーレイクラッドから約 10 mm 深さまでの溶接熱影響部 (HAZ) における照射硬化感受性を調査するため、実機環境相当である 290°C に照射温度を制御しながら、2MV の加速エネルギー及び 10.4 mA の平均電流値の照射条件で電子線照射実験を行った。その結果、粗粒 HAZ、細粒 HAZ 及び母材の試料に対する複数回にわたる照射実験を通じて、本年度の目標であった積算 1 mdpa 損傷量の照射を達成した。

キーワード： 原子炉圧力容器鋼、溶接熱影響部、金属組織、電子線照射

1. 目的

原子力圧力容器 (Reactor pressure vessel, RPV) の内表面は、耐腐食の向上を目的にステンレスオーバーレイクラッド (以下、クラッド) が溶接されており、その直下には溶接熱影響部 (Heat-affected zone, HAZ) が生じている。HAZ は、化学組成は母材と同じであるものの、溶接熱の影響により相等の金属組織が異なり、粗粒 HAZ (マルテンサイトとベイナイト混合組織)、細粒 HAZ (ベイナイト主体で一部フェライトが含まれる組織) で分類され、HAZ 中のベイナイト相は、母材と比べて炭化物分布や転位分布等の微細組織も異なる非均質な組織を呈している。RPV の構造健全性評価は RPV 内表面付近に亀裂を想定して行われるため、その領域 (板厚内表面から深さ 10 mm) に含まれる HAZ の非均質性が照射による破壊靱性等の機械的特性に及ぼす影響を照射メカニズムを踏まえて確認することが重要である。

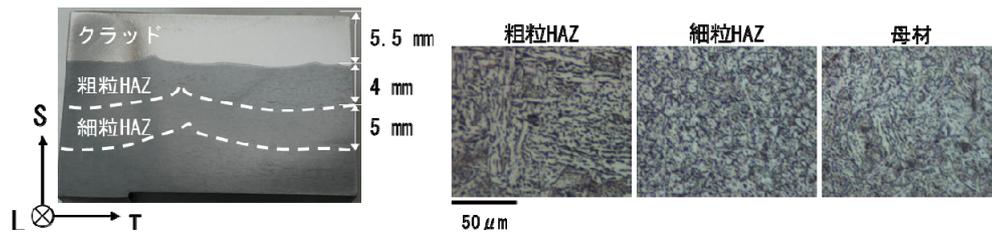
イオン照射実験から脆化に係る指標とする硬さ変化 (硬化) を調べた結果により、HAZ における照射硬化と溶質原子クラスターの形成が母材と異なる可能性が示唆されている [1]。ここで、照射損傷速度は材料の照射メカニズムに影響する重要因子の一つであるが、実機 RPV 鋼における照射速度は $\sim 10^{-11}$ dpa/s 程度であるのに対し、イオン照射では約 $10^{-5} \sim 10^{-4}$ dpa/s と照射速度が速いことから、照射欠陥の回復や微細組織変化がイオン照射では実機と異なると考えられる。また、イオン照射では照射表面から深さ $\sim \mu\text{m}$ と損傷領域が浅いため、ナノインデントを用いた相対的な硬化評価は可能なものの、中性子照射された実機材で得られるビッカース硬さとの定量的比較が難しい。そのため、原子炉内の環境により近い照射速度条件下で照射試験を行いつつ、定量的な硬化量の測定を通じて、HAZ と母材に対する照射硬化メカニズムを究明することが重要であると考えられる。電子線照射は、イオン照射と比べて照射損傷速度が低く、実機と同等な硬さ測定が可能となる十分な照射領域が得られる。電子線照射は、それにより導入される欠陥種が主に Frenkel ペアであり、中性子照射によるカスケード形成等とは異なるものの、照射メカニズムに含まれる欠陥導入や拡散等の素過程に係る基礎的知見を得るためには有用な手段であると言える。

本研究では、照射硬化と微細組織変化に着目し、HAZ における相分布と照射硬化の相関及び炭化物分布とその近傍に生成する照射欠陥などの相関を調べることを目的とする。本年度は、昨年度の研究で得られた照射温度制御に係る知見に基づき、HAZ と母材に対して電子線照射実験を行った。

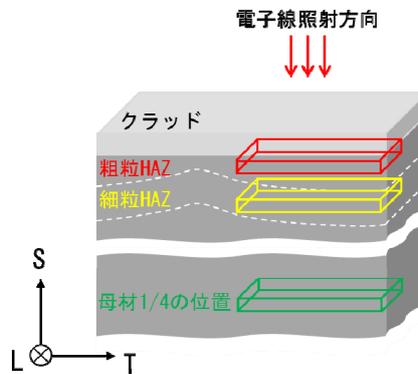
2. 実施方法

(1) 試料作製

材料は、1970年代後半に製作された国内RPVを模擬して板厚200mmで製作し、表面にクラッドを付与した低合金鋼(A533B)を用いた。材料の主な化学組成は0.13Cu-0.25Si-1.43Mn-0.58Ni-0.19C-0.013P-Bal.Fe(wt.%)である。図1(a)のように、クラッド直下から母材までに、粗粒HAZや細粒HAZが形成されており、結晶粒径と金属組織の形態が母材と異なることを確認している。電子線照射実験に用いる試料の採取位置を図1(b)に示す。HAZの試料は粗粒HAZ領域及び細粒HAZ領域の中央部から採取し、母材の試料は板厚の表面から1/4T(Tは板厚)位置から採取した。試料の寸法は幅20mm×長さ10mmである。



(a) クラッド下 HAZ の分布及び HAZ 組織

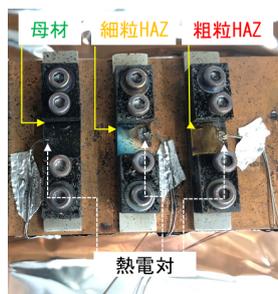


(b) 照射試料の採取位置

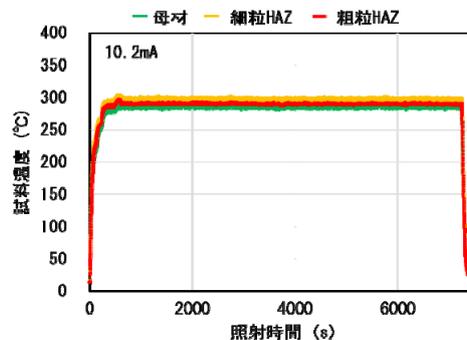
図1 (a)クラッド下 HAZ の分布及び HAZ 組織と (b)照射試料の採取位置

(2) 電子線照射条件

電子線照射装置には1号加速器を利用し、2MVの加速エネルギーにて電子線照射を実施した。照射窓から試料までの距離を200mmに設定し、幅60mm、スキャン方向600mmのビームスキャンで3種類試料を同時に照射した(図2(a))。昨年度得られた実験結果を踏まえ、冷却用スパーサーの厚さを試料の厚さに合わせて用意した。実験中に3種類試料の温度を測定しながら、電流値を9mAから12mAの範囲で0.1mAの精度で調整することで、RPVの照射温度である $290^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ に試料温度を制御し(図2(b))、照射実験を実施した。



(a) 試料の温度測定位置



(b) 照射中試料の温度

図2 (a) 試料の温度測定位置と (b) 照射中試料の温度

3. 結果及び考察、今後の展開等

電子線照射による RPV 鋼の照射硬化は照射損傷量 1 mdpa から有意となることが報告されていることを鑑み [2]、本研究における目標損傷量を 1 mdpa と設定した。なお、この照射損傷目標値は、材料の化学組成により照射損傷量が異なることを考慮し、物質の原子あたりの平均はじき出し原子数 (displacement per atom, dpa) を基に、はじき出しエネルギーを 40eV として求めた。HAZ と母材の試料に対してそれぞれ複数回にわたって電子線照射を行い、得られた結果を図 3 及び表 1 に示す。照射損傷量は深さによって変化し、照射最表面で約 1.08 mdpa、表面から深さ約 0.2 mm で 1.47 mdpa 程度であり、目標とした損傷値を達成することができたことを確認した。以上より、損傷速度は平均 3×10^{-9} dpa/s であり、イオン照射に比べて十分に低い損傷速度となったことを確認した。

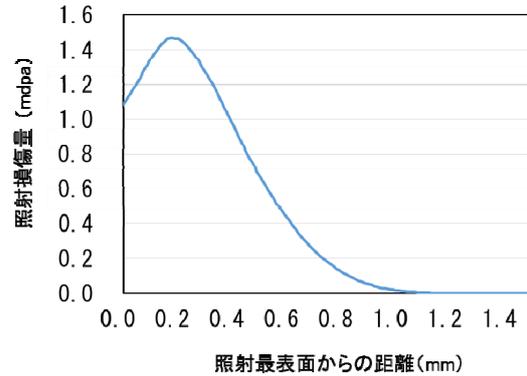


図 3 照射面から深さ方向による照射損傷量

表 1 電子線照射条件及び照射損傷

平均電流 (mA)	平均電子線速度 (e/cm ² /s)	照射量 (e/cm ²)	平均損傷速度@表面 (dpa/s)	照射量@表面 (dpa)
10.4	9.57×10^{13}	3.41×10^{19}	3.05×10^{-9}	1.08×10^{-3}

今年度、RPV 鋼の粗粒 HAZ、細粒 HAZ 及び母材の試料に対して、290°C で複数回の照射実験を行うことにより、目標とした約 1 mdpa の照射損傷量を達成した。今後、電子線照射による材料特性変化の評価及び微細組織変化の分析を行う予定であり、3 種類試料の初期組織による照射硬化及び微細組織変化の違いを明らかにする計画である。

4. 引用(参照)文献等

[1] Y. Ha et al, Nuclear Inst. and Methods in Physics Research B 461 (2019) 276-282
 [2] K. Fujii et al, Journal of nuclear materials, 304 (2005) 247-258