

原子炉圧力容器鋼の照射硬化メカニズム究明

- 照射温度制御実験 -

Study on irradiation hardening mechanism of RPV steel
- Experiments for irradiation temperature control -

河 侑成¹⁾ 下平 昌樹¹⁾ 飛田 徹¹⁾ 埴 悟史¹⁾ 山崎 翔太²⁾ 宇野 定則²⁾

Yosung HA Masaki SHIMODAIRA Tohru TOBITA Satoshi HANAWA 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)

原子炉圧力容器の母材の内表面から約 10 mm 深さの範囲に生じるステンレスオーバーレイクラッド下溶接熱影響部の照射脆化感受性を調査するための電子線照射試験の準備として、原子炉圧力容器鋼の実機環境相当である 290 °C を目標とした照射温度の制御実験を実施した。冷却装置や試料固定治具の製作等を行い、電子線照射時の電流値による試料の発熱と熱伝導による冷却のバランスを調整し、照射温度を 290 °C に制御できる条件を調べた。その結果、適切な厚さのステンレススペーサーの使用により、290.6 °C ± 4.7 °C 範囲で照射温度を制御できることを確認した。

キーワード：原子炉圧力容器鋼、溶接熱影響部、照射硬化、照射温度制御実験

1. 目的

原子炉圧力容器 (Reactor pressure vessel、RPV) 鋼は、中性子照射により延性—脆性遷移温度が上昇するとともに、高温域のシャルピー吸収エネルギーが低下することが知られている (照射脆化)。ここで、原子炉圧力容器 (RPV) の照射脆化を把握するための監視試験には、RPV の板厚 1/4 の位置 (1/4T) から採取した試料が用いられている。

一方、RPV の健全性評価においては、RPV の母材の内表面から深さ 10mm の欠陥を想定する。RPV の内表面には、冷却水による腐食を抑制する目的でステンレスオーバーレイクラッド (クラッド) が溶接されており、その直下の領域には溶接熱影響部 (Heat-affected zone、HAZ) が生じている。HAZ は結晶粒径、金相組織、炭化物分布、転位分布などが板厚方向に変化するため、1/4T 位置と異なる複雑な組織となっている。健全性評価の保守性を確認するためには、1/4T 位置の母材とクラッド下 HAZ の照射脆化感受性の違いを明らかにすることが重要である。本研究では、照射脆化に係る指標として硬さ変化に着目し、電子線照射による母材とクラッド下 HAZ の照射硬化の違い、及び微細組織変化等の照射硬化メカニズムを調査する。

照射温度は照射欠陥の生成及び拡散において重要なパラメータであるため、RPV 実機環境相当である 290 °C で照射することが必要である。本年度は、照射温度を 290 °C で制御するために必要な冷却装置や試料固定治具の製作等を行い、電子線照射による試料の発熱と冷却の最適条件を調べた。

2. 実施方法

(1) 試料

試料は RPV を模擬して製作した低合金鋼 (A533B) である。試料の化学成分を表 1 に示す。板厚 200 mm で製作された A533B の表面にクラッド溶接を行った。Figure 1 に示すように、試料はクラッド直下 HAZ に対して粗粒 HAZ、細粒 HAZ から採取した。母材については板厚の表面から 1/4T 位置から採取した。試料の寸法は幅 20 mm × 長さ 10 mm であり、厚さはそれぞれ粗粒 HAZ 2.5 mm、細粒 HAZ 2.7 mm、母材 2 mm である。

Table 1 使用する RPV 鋼模擬材の化学成分 (wt. %)

Cu	Si	Mn	Ni	C	P	S	Cr
0.13	0.25	1.43	0.58	0.19	0.013	0.014	0.1

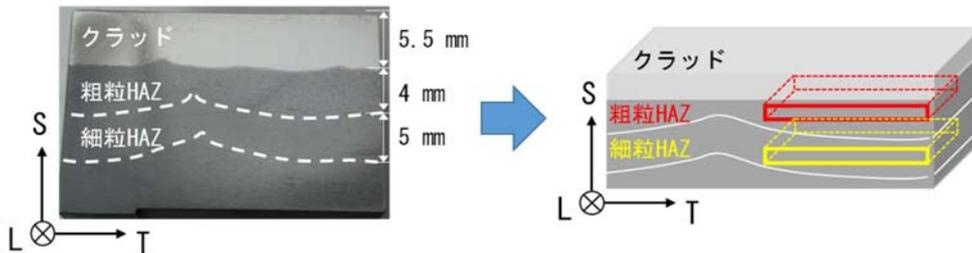


Figure 1 試料の採取位置

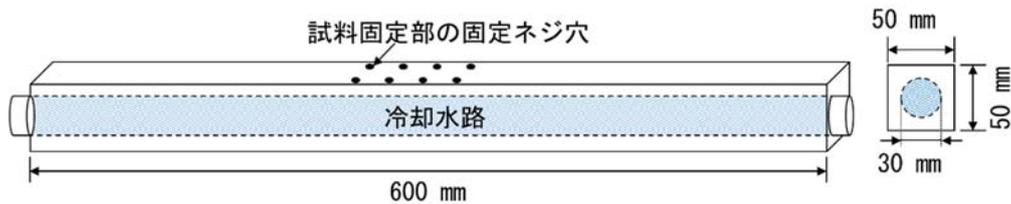
(2) 電子線照射条件

電子線照射は、1号加速器を利用し、2MVの加速エネルギーで実施した。照射窓から試料までの距離を200mmに設定し、幅60mmで600mmのビームスキャンを行った。電流値は9mAから12mAの範囲とした。実験中はRPVの照射温度である290℃になるように、試料の温度を測定しながら電流量を0.1mAの精度で調整した。

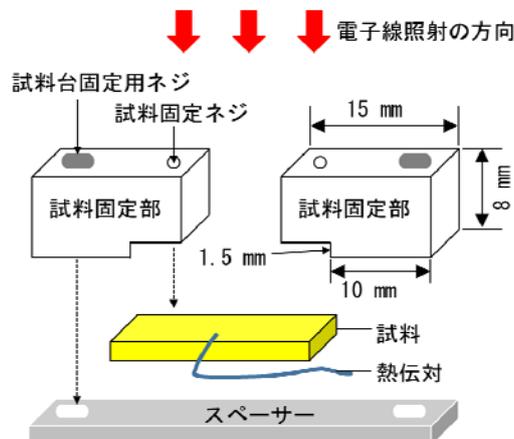
(3) 温度制御の準備

電子線照射による発熱を効率よく冷却させるために熱伝導率が高い銅材で冷却台及び試料固定部を製作した(Figure 2(a))。冷却台の内部には冷却水を流した[1]。

冷却台との接触を良くするため、試料固定部で試料の両側を抑えつけた。試料の表面に熱電対をスポット溶接し、照射される表面での温度を測定した。また、照射温度の制御のため、Figure 2(b)に示すようにステンレス鋼材のスペーサーを試料と冷却台の間に設置した。スペーサーの寸法は幅50mm×縦10mmで、厚さは照射中の試料の温度を測定し、3mm-4mmの範囲で調整した。



(a) 冷却台



(b) 試料固定部

Figure 2 (a)冷却台と(b)試料固定部の寸法

3. 結果及び考察、今後の展開等

試料の厚さによって冷却の状況が異なるため、粗粒 HAZ、細粒 HAZ 及び母材に対して、それぞれ異なる厚さのスペーサーを用意した。具体的には、Figure 3(a)のように、粗粒 HAZ は 3.5 mm、細粒 HAZ は 3 mm、母材は 4 mm 厚さのスペーサーを用い、電子線照射を行った。温度測定の結果を Figure 3(b)に示す。電流値を 10.2 mA とした場合、3 つの試料の平均照射温度は $290.6 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 4.7 \text{ }^{\circ}\text{C}$ であり、複数の試料に対して同時に精度よく温度制御が可能であることを確認した。

Fujii ら[2]は、電子線照射による RPV 鋼の照射硬化は照射損傷量 1 mdpa (約 $3.13 \times 10^{19} \text{ e/cm}^2$ 相当) から有意となることを報告していることから、本研究における目標損傷量を 1 mdpa とした。今年度の継続課題により粗粒 HAZ、細粒 HAZ 及び母材の試料に対して、照射電流値を微調整しながら照射温度をモニタリングし、 $290 \text{ }^{\circ}\text{C}$ で照射実験を行う。また、複数回の照射実験にわたって照射量を積算することで、目標照射損傷量を得る予定である。

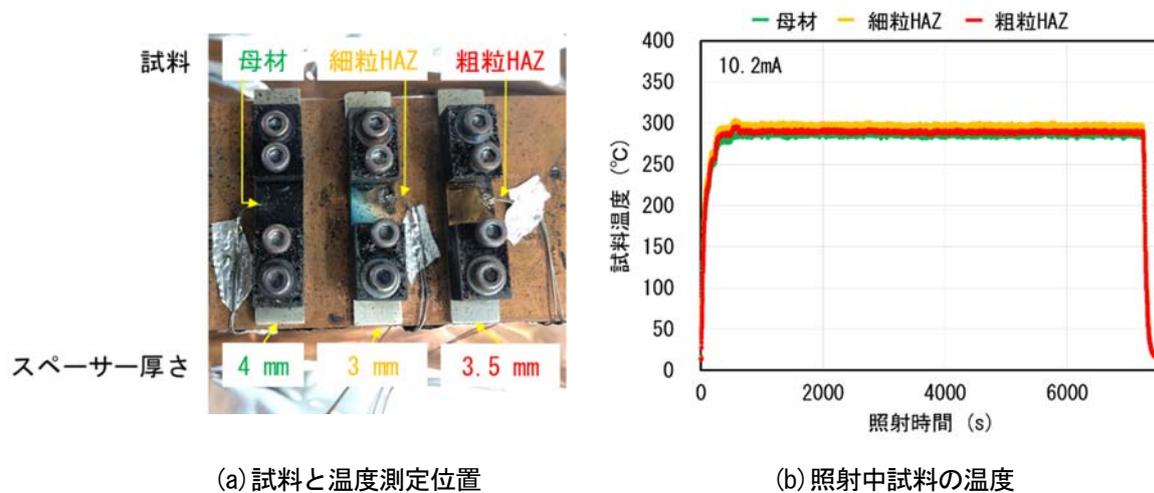


Figure 3 (a) 試料と温度測定位置及び(b) 照射中の試料温度

4. 引用(参照)文献等

- [1] T. Tobita et al, Journal of nuclear materials, 452 (2014) 241-247
- [2] K. Fujii et al, Journal of nuclear materials, 304 (2005) 247-258