

電子線照射による鉄合金の電気特性変化

Electron radiation studies on electric and magnetic properties in a low alloy steel

藤田 敏之¹⁾ 平林 潤一¹⁾ 鹿野 文寿¹⁾

山崎 翔太²⁾ 宇野 定則²⁾

Toshiyuki FUJITA Junichi HIRABAYASHI Fumihisa KANO

Shota YAMASAKI Sadanori UNO

¹⁾東芝エネルギーシステムズ株式会社 ²⁾量子科学技術研究開発機構高崎量子応用研究所

（概要）

低合金鋼の中性子照射脆化評価方法を検討するため、加速電圧 2.0 MV の電子線で照射欠陥を模擬的に導入し電磁気特性の変化を測定した。磁気ヒステリシス曲線から評価した飽和磁化値で規格化した残留磁化は、照射量が $15.0 \times 10^{18} \text{ e/cm}^2$ まで単調増加を示した。またビッカース硬さは照射量の平方根に比例した上昇を示した。これらの結果は、電子線照射により生成した照射欠陥が、磁場を変化させた際の磁壁の運動を阻害するピン止め源として作用していることを示唆している。

キーワード：低合金鋼、電子線照射、磁気ヒステリシス、ビッカース硬さ

1. 目的

原子炉圧力容器鋼は高速中性子に長期間暴露される。プラントを安全かつ有効に活用するには、中性子照射による機械特性の変化を適切に評価・管理する必要がある。機械特性の一つに脆性があり、照射による脆化因子として、ミクロ組織中に現れる溶質原子クラスタ形成、照射欠陥の集合体形成が知られている[1]。これまで Fe-Cu モデル合金を用いた脆化因子と電磁気特性の相関が報告されている[2-4]ことから、本研究では、照射脆化因子を電磁氣的に検出する可能性を検討するため、電子線照射と熱時効により脆化因子である欠陥集合体、溶質原子クラスタを各々独立に生成し、その電磁気特性変化を検討することを目的としている。2018 年度には、 $9.2 \times 10^{18} \text{ e/cm}^2$ の電子線を約 100℃で照射した低合金鋼の電気抵抗、磁化の振舞いを評価し、照射量増加とともに残留磁化は単調増加することを示した[5]。本稿では、より高照射量での照射量と残留磁化との相関性を確認し、硬さなど他のパラメータとの関連性を評価した結果を報告する。

2. 実施方法

電子線照射には量子科学技術研究開発機構高崎量子応用研究所の 1 号加速器を利用した。Cu を 0.36wt%含む低合金鋼鍛造材の未時効材と、中性子照射によって生成した溶質原子クラスタを模擬するために、熱拡散により Cu を主要元素とする溶質原子クラスタを生成させた熱時効材の 2 種類に対して電子線照射を行った。2018 年度には、温度約 100 °C、加速電圧 2.0 MV、電子線束 $2.5 \times 10^{13} \text{ e/cm}^2 \text{ s}$ の条件で $9.2 \times 10^{18} \text{ e/cm}^2$ の電子線を照射しているが、今年度は、同試験片に対して追加照射し、最大照射量 $15.0 \times 10^{18} \text{ e/cm}^2$ の試験片を作製した。試験片中の損傷量を均一にするため、照射面を時間で区切り反転・回転させた。

磁気ヒステリシス測定は、外形・20mm 内径・10 mm のリング状試験片に対し、1 次コイル 80 巻き、2 次コイル 80 巻きで、温度 25℃における低周波 10 Hz での交流磁気測定を N 数 4 で行った。得られた磁気ヒステリシス曲線を解析し、保持力、残留磁化、透磁率等の磁気パラメータを評価した。また電気抵抗測定用短冊状試験片（ $40 \times 1 \times 0.5 \text{ mm}$ ）、および組織観察用試験片（ $10 \times 10 \times 1 \text{ mm}$ ）を用いビッカース硬さ測定を行った。各試験片 5～7 点の平均値を評価し、電子線照射前後の平均増加量を得た。

3. 結果及び考察、今後の展開等

図1に、磁化測定で得られた磁気ヒステリシス曲線より解析した規格化残留磁束密度の電子線照射量依存性を示す。規格化残留磁束密度の振舞いは、電子線照射量が $9.2 \times 10^{18} \text{ e/cm}^2$ 以下の場合と同様に $15.0 \times 10^{18} \text{ e/cm}^2$ まで変わらず増加傾向を示すことを確認した。一方、図には示さないが保持力の大きさは $970 \pm 2 \text{ A/m}$ の範囲で優位な変化は示しておらず、ヒステリシス領域の面積は増加した。この傾向は照射による磁壁ピン止め効果の増強により、磁壁運動におけるエネルギー散逸量が増加したためと考えられる。

図2にビッカース硬さの変化量と電子線照射量の相関性を示す。電子線照射によるビッカース硬さの増加量は、図中の実線で示す照射量の平方根に比例するフィッティング曲線で合わせることができる。Orowanモデルでは、転位が強度の高い析出物や欠陥を迂回し通過するときの強化量は、欠陥の平均密度を N 、平均直径を d とおくと、それらの積の平方根 $(Nd)^{0.5}$ に比例した増加を示す[6]。このため図2の振舞いは、欠陥の直径を一定と仮定すると、電子線照射量に比例して欠陥密度が増加していることを意味している。残留磁束密度の増加量は、電子線照射量に比例して増加する照射欠陥密度に由来した現象であると考えられる。

本研究では、電子線照射により導入した低合金鋼中の照射欠陥を残留磁束密度の変化として検出できる可能性を示した。しかしながら、今のところ透過型電子顕微鏡などを用い直接照射欠陥の観察ができていない。今後さらに高い照射量で、照射欠陥の実観察数密度との対応関係を把握するとともに、電磁気特性変化の相関をモデル化し、新しい評価方法を構築していきたいと考えている。

4. 引用(参照)文献等

- [1] K. Fukuya, J. Nucl. Sci. Tech. 50, 213(2013).
- [2] S. Ishino et al., J. Nucl. Mat. 323, 354(2003).
- [3] T. Tobita et al., J. Nucl. Mat. 452, 241(2014).
- [4] S. Takahashi et al., J. Appl. Phys. 100, 023902(2006).
- [5] 平林ほか, 照射脆化因子の形成に伴う低合金鋼の電磁気特性変化, 日本金属学会 第164回講演大会概要集, 93 (2019).
- [6] J. S. Kohler et al., Dislocations in Metals, AIME, 129(1954).

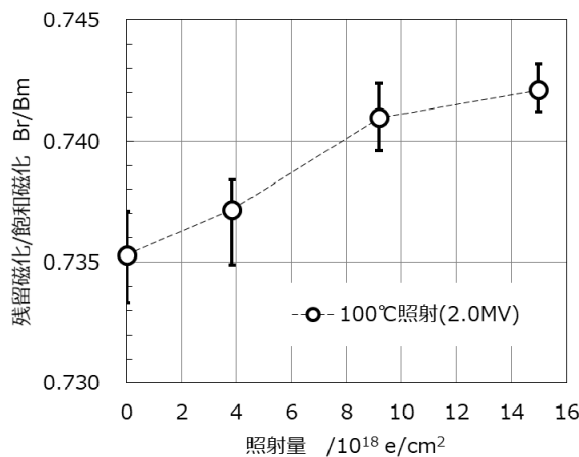


図1 残留磁化の電子線照射量依存性

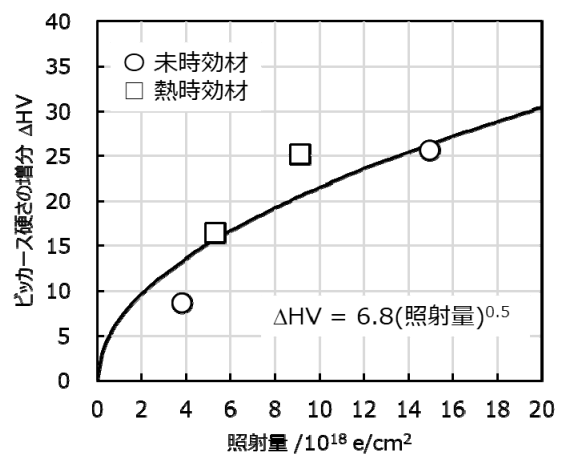


図2 ビッカース硬さの照射量依存性