

## 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<sup>1)</sup> 平林 潤一<sup>1)</sup> 鹿野 文寿<sup>1)</sup>

横山 彰人<sup>2)</sup> 山崎 翔太<sup>2)</sup> 宇野 定則<sup>2)</sup>

Toshiyuki FUJITA Junichi HIRABAYASHI Fumihisa KANO

Akihito YOKOYAMA Shota YAMASAKI Sadanori UNO

<sup>1)</sup>東芝エネルギーシステムズ株式会社 <sup>2)</sup>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、低合金鋼に加速電圧 2.0 MV および 2.5 MV、最大  $9.2 \times 10^{18}$  e/cm<sup>2</sup> の電子線で照射欠陥を模擬的に導入し、電磁気特性の測定を行った。電子線照射量に対する電気抵抗率の変化は単調ではなく、低照射領域では熱処理や照射温度、加速電圧により異なる変化を示し、 $4 \times 10^{18}$  e/cm<sup>2</sup> 以上ではほぼ一定値もしくは減少傾向を示した。一方、磁気ヒステリシス曲線から評価した残留磁化の大きさは、電子線照射量が増えると単調に増加することが分かった。

**キーワード**：低合金鋼、電子線照射、電気抵抗率、磁気ヒステリシス

### 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脆化する。プラントを安全かつ有効に活用するには、中性子照射脆化を適切に評価管理する必要がある。脆化因子としては、マイ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多く報告されているが[2-4]、低合金鋼を用い脆化因子の影響を独立に検討した事例は希少である。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、電子線照射による低合金鋼の電磁気特性変化を把握することを目的とした。

### 2. 実施方法

低合金鋼は Cu を 0.36wt% 含む鍛造材を供試材とした。未時効材と熱時効により 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 種類を用意した。電子線照射は、国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構 高崎量子応用研究所の電子加速器 (1 号加速器) およびイオン照射研究施設 3MV シングルエンド加速器を利用した。1 号加速器では、未時効試験片に対して温度約 100 °C、加速電圧 2.0 MV、電子線束  $2.5 \times 10^{13}$  e/cm<sup>2</sup> s で最大  $9.2 \times 10^{18}$  e/cm<sup>2</sup> の電子線を照射した。3MV シングルエンド加速器では極低温電子線照射損傷解析装置 (SX1) を使い、熱時効試験片に対してヒータ制御 290°C で、加速電圧 2.5 MV、電子線束  $4.6 \times 10^{13}$  e/cm<sup>2</sup> s で最大  $5.3 \times 10^{18}$  e/cm<sup>2</sup> の電子線照射を行った。試験片中の損傷量均一度向上のため、照射面を時間で区切り反転・回転させ照射した。電気抵抗率測定は、直流 4 端子法で室温 22°C にて行った。偏析等によるばらつき考慮のため、N 数は 4 または 2 とし平均値で評価した。磁気ヒステリシス測定は、外形φ20mm 内径φ10 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°C 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。

### 3. 結果及び考察、今後の展開等

電子線照射前の熱時効材の電気抵抗率は、未時効材の値よりも低下する。これは Fe-Cu 二元合金でも認められている溶質原子のクラスタ化により母相中の伝導電子の散乱因子となる不純物濃度の低下によると思われる[2]。図 1 は照射前電気抵抗率で規格化した電気抵抗率  $\rho/\rho_{\text{unirrad}}$  の電子線照射量依存性である。照射初期の電気抵抗率はわずかに増加するが、照射量が  $4 \times 10^{18}$  e/cm<sup>2</sup> 以上では電気抵抗率はほぼ一定もしくはわずかに減少する。照射後の TEM/EDS 分析では電子線照射由来の溶質原子クラスタ生成は認められて

おらず、母相中の溶質原子濃度を反映しているものと思われる。

図2は、磁気ヒステリシス曲線および解析評価した残留磁束密度の電子線照射量依存性である。残留磁束密度は飽和磁束密度で規格化している。残留磁束密度は、溶質原子クラスタ生成で増加している。また電子線照射量が増えると単調に増加する。残留磁束密度の増加は、溶質原子クラスタや照射欠陥の導入により磁気異方性もしくは磁壁ピン止め効果の増強を示唆している。磁壁ピン止め効果は保持力にも表れるはずであるが、本研究では顕著な変化は認められていない。

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電気抵抗率や残留磁束密度の変化として検出できる可能性を示した。今回、電子線照射後の試験片のTEM観察では、照射欠陥(転位ループ)を観測できていない。電子線照射量を増やした材料を用意し、組織観察による照射欠陥のサイズや数密度と電磁気特性変化の相関を明らかにし、現象をモデル化していく予定である。

#### 4. 謝辞

シングルエンド加速器を用いた電子線照射試験を遂行するにあたり、ご指導・ご支援を賜りました岩瀬彰宏大阪府立大学名誉教授に厚く御礼申し上げます。

- [1] K. Fukuya, J. Nucl. Sci. Tech. 50 (2013) 213-254.
- [2] S. Ishino et al., J. Nucl. Mat. 323 (2003) 354-359.
- [3] T. Tobita et al., J. Nucl. Mat. 452 (2014) 241-247.
- [4] S. Takahashi et al., J. Appl. Phys. 100 (2006) 023902.

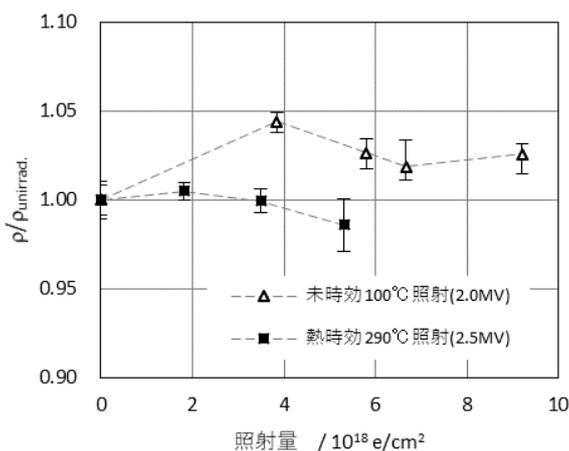


図1 照射前の値で規格化した電気抵抗率 $\rho/\rho_{\text{unirrad}}$ の電子線照射量依存性

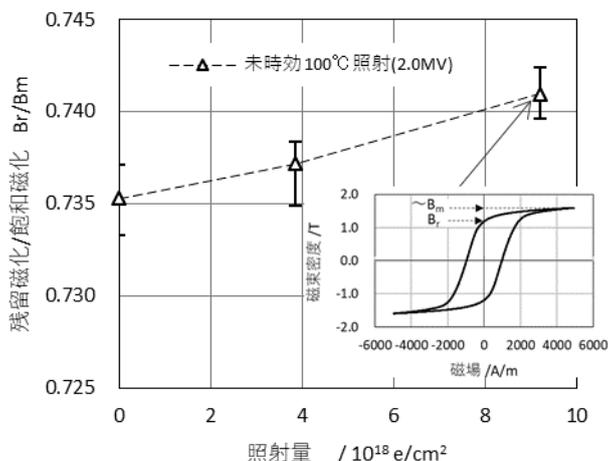


図2 飽和磁化で規格化した残留磁化の電子線照射量依存性