

中性子線照射による原子炉構造材料の経年劣化と磁化過程の 相関に関する研究

Correlation between degradation and magnetic properties
under neutron irradiation in nuclear reactor materials

高橋 正氣 (TAKAHASHI SEIKI)
岩手大学・工学部・教授



研究の概要

マイナー・ヒステリシスループに着目した新しい関係式・物理量を見出し、従来法よりも優れた磁気的非破壊評価手法を構築した。この手法を利用し中性子照射中のその場磁気計測に世界で初めて成功し、原子炉圧力容器材および純鉄の磁気的物理量の照射量依存性を明らかにした。照射欠陥である銅析出物が転位の周りに偏在して分布することを発見し、照射損傷と磁気的物理量の相関メカニズムを明らかにした。

研究分野／科研費の分科・細目／キーワード

工学／総合工学・原子力学／磁性、格子欠陥、経年劣化、非破壊検査、照射脆化

1. 研究開始当初の背景・動機

高度経済成長期以降、次々と建設された社会基盤構造物の高経年化（老朽化）が進んでいる、21 世紀を迎えた今日、これらの全面的更新は経済的に不可能であり、社会基盤構造物の保全への取り組みが重要視されている。特に原子力発電所の高経年化対策は緊急課題である。原子炉圧力容器は原発の心臓部でその中で核反応を制御し、有害な放射能を閉じこめており破損は許されない。しかし、核反応で生じる中性子による照射脆化が進行するため、健全性の確認が必要である。これまで圧力容器の健全性評価では、炉内に装荷された監視試験片を定期的に取り出し破壊検査を行ってきた。しかし、運転期間の延長に伴う監視試験片の不足が懸念されており、代替技術の一つとして非破壊評価法の開発が期待されている。本研究では、格子欠陥と密接な相関があると予想される磁気的物理量に着目した。

2. 研究の目的

中性子照射中のその場磁気計測を試み、磁気的物理量の照射量依存性を明らかにする。この種の実験は国内外を通じて初めての試みである。さらに照射前後での機械特性・内部組織の変化を詳細に調べ、磁気計測の結果と合わせて、照射損傷と磁性の相関を解明し、原子炉圧力容器の磁気的非破壊検査方法の基礎を確立させる。圧力容器鋼の他にも、炉内構造材料のステンレス鋼やインコネル合金に対しても、材料劣化

の磁気的非破壊検査の可能性について検討する。

3. 研究の方法

本課題は複数の工学分野にまたがっており、各分担者・協力者との密接な協力関係のもとに研究を実施し成果をあげた。岩手大学では主に模擬実験などの原理的研究および専用測定装置開発を進めた。中性子照射実験については、日本原子力研究開発機構（前・原研）と協力研究を締結し、その場計測専用の照射キャプセルを設計・製作し、材料試験炉を用いて 2 回実施した。

4. 研究の主な成果

(1) マイナー・ヒステリシスループによる新しい関係式、物理量の発見：

強磁性体に比較的弱い磁場を周期的に加えて得られる磁化と磁界との関係を示す閉曲線をマイナー・ヒステリシスループという。2003 年高橋等がマイナー・ヒステリシスループに普遍的関係があることを発見した。また、その関係から材料の劣化に敏感な 6 個の物理量を発見した。

(2) 原子炉の中での磁性のその場観察技術の確立：

中性子照射しながらの磁気的物理量の計測は世界で初めての試みであった。反磁界効果を取り除くためにリング型の試料に導線を巻き、温度も 290°C で数ヶ月間磁気計測を行うための導線の開発、その他ノイズ対策などの技術を確立した（図）。

〔4. 研究の主な成果（続き）〕

(3) 銅析出物の転位の周りに偏在した分布の発見：

従来、圧力容器材の照射欠陥は銅析出物が均一に材料内に生成されるとされていた。このことはアトムプローブ法などで検証されていた。それに対し、磁気的物理量のその場計測結果から、転位の近傍に偏在して分布することが分かった。発見当時は日本でも、米国でもこの結果には反対する意見が強かったが、2005年には原子力材料の日本の研究者間では我々の見方に同調するようになり、2006年には米国の研究者もこの考えを認めた。

(4) 純鉄の中性子照射による転位ループの生成と成長：

純鉄に中性子線を照射することで格子間型の転位ループが生成され、成長することを明らかにした。その場観察によって $3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-2}$ 以上の照射量で転位ループと最初から結晶内に存在する転位と相互作用し、内部応力を緩和することがマイナー・ループ計測から示され、照射後の透過電子顕微鏡観察からも確かめられた。

(5) 原子炉内での中性子照射しながらの磁気計測：

本研究では原子炉中で中性子を照射しながら、290°Cで磁気特性の測定に世界で初めて成功した。それによって中性子照射量と磁気的物理量の相関を連続して得ることができた。これまで中性子照射後磁気測定をし、照射欠陥と磁気的物理量との関係が米国、韓国の限られた研究者によって調べられた。照射後原子炉から試料を取り出し、ホットセル内での計測のため測定点が少ないこともあり、これらの関係が明確にされなかった。例えば、保磁力が中性子線照射により増加するというデータと、減少するというデータがあった。今回のその場計測でこの2つの矛盾したデータの物理的意味を明らかにし、統一した。

(6) ステンレス鋼およびインコネル合金の研究結果：

ステンレス鋼では反磁界効果のため、転位などの格子欠陥を磁気利用により定量的に評価することは不可能とされた。マイナー・ループ法を用いることでこの問題を解決した。インコネル合金の応力腐食割れはクロム原子が結晶粒界に析出することで起こる。結晶粒界でのクロム原子濃度とその分布を磁気計測により非破壊的に解析する方法を発見した。

5. 得られた成果の世界・日本における位置づけとインパクト

本研究ではマイナー・ヒステリシスループにおける新しい関係式と新しい物理量を発見した。前者は普遍定数を含んでおり、磁壁と格子欠陥の相互作用に関する新たな知見を与え、学術的にも重要な意味を持つ。また後者については、保磁力より精度・感度共に優れ、小さな磁場でも計測できるという特色を有している。今後磁気利用における非破壊検査の最も重要な物理量となると確信している。これらの成果は、2005年に設立した磁性を用いた材料劣化の非破壊評価方法を研究する国際組織(Universal Network for Magnetic NDE)においても認知されている。

照射脆化メカニズムに関しては、照射欠陥である銅析出物が転位の周りに偏在して分布することを発見した。均一に分布するという従来の考え方を国内外で変えた。

また本研究で実施した磁性による照射中その場計測が欧州、韓国でも行うことが決定した。本研究が世界的に認められ、大きなインパクトを与えたことを示す。

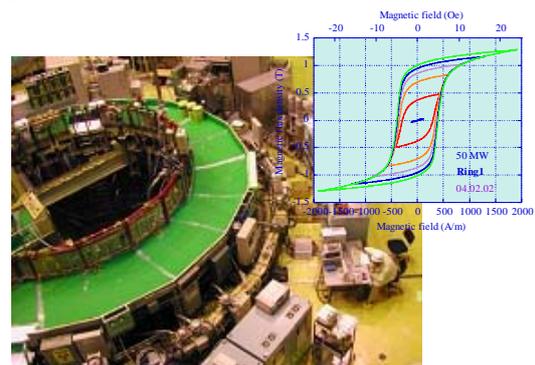


図1 原子力機構・材料試験炉での照射中のその場計測の様子と測定したマイナー・ループ

6. 主な発表論文

(研究代表者は太字、研究分担者には下線)

- (1) **S. Takahashi**, S. Kobayashi, H. Kikuchi and Y. Kamada, J.Appl.Phys. Vol.100, pp.113908 1-6 (2006).
- (2) **S. Takahashi**, H. Kikuchi, K. Ara, N. Ebine, Y. Kamada, S. Kobayashi, and M. Suzuki, J. Appl. Phys. Vol.100, (2006) pp.023902/1-6.
- (3) **S. Takahashi**, L. Zhang, S. Kobayashi, Y. Kamada, H. Kikuchi, and K. Ara, J. Appl. Phys. Vol.98, (2005) pp.033909 1-8.
- (4) **S. Takahashi** and L. Zhang, J. Phys. Soc. Japan, Vol.73, No.6, (2004) pp.1567-1575.

ホームページ等

<http://www.ndesrc.eng.iwate-u.ac.jp/>