

漏えい磁束密度による照射損傷評価のための 測定技術の改良

Improvement of Magnetic Flux Density Measurement Technique for Irradiation Damage Evaluation

原子力機構	今野 将太郎	Shotaro KONNO	Non Member
原子力機構	高屋 茂	Shigeru TAKAYA	Member
原子力機構	永江 勇二	Yuji NAGAE	Member
原子力機構	山県 一郎	Ichiro YAMAGATA	Non Member
原子力機構	小川 竜一郎	Ryuichiro OGAWA	Non Member
原子力機構	赤坂 尚昭	Naoaki AKASAKA	Non Member
原子力機構	西野入 賢治	Kenji NISHINOIRI	Non Member

We are developing a method for evaluation of irradiation damage on structural materials in nuclear plants by using change in magnetic flux density due to irradiation damage. In this study, the magnetic flux density measurement technique has been improved by introducing a new magnetizer which enables local magnetizing by contacting the sample surface. We can magnetize samples, especially ferromagnetic samples, more precisely compared to the existing method. Furthermore, the new method can remove many limitations for the application to real plants. In addition, we established the calibration method of the flux gate sensor for the magnetic flux density. As a result, accuracy and the reliability of the measurement of the flux density became better, and also, the comparison with the result of the measurement with other flux gate sensors became possible.

Keywords: Nondestructive Evaluation, Magnetic Property, Magnetizing Method, Flux Gate Sensor, Structural Materials, High-Chromium Steel, Neutron Irradiation, Calibration

1. 緒言

現在、独立行政法人日本原子力研究開発機構で開発中である高速増殖炉の原子炉容器や冷却系機器（配管等）の構造材料は、設計寿命が60年と長期間使用され交換が困難なものである。構造材料の特性の経年評価や健全性確保のためには、照射等による損傷の進行を監視し、適切な管理を行うことが重要となる。これまでの研究により、原子炉容器に用いられるオーステナイト系ステンレス鋼（常磁性体）について、変形の初期や照射下で変化した磁気特性を試験片表面から漏えいする磁束密度で検出し、材料の特性変化を評価できる可能性が示されている[1-3]。一方、冷却系機器には強磁性体である高クロム鋼が用いられていることから、強磁性体に対する従来着磁技術の適用性及び材料の特性変化による磁気特性変化の検出可能性を確認する必要がある。

連絡先: 今野将太郎, 〒311-1393 茨城県東茨城郡大洗町成田町 4002, 独立行政法人日本原子力研究開発機構大洗研究開発センター燃料材料試験部材料試験課, 電話: 029-267-4141, E-mail: konno.shotaro@jaea.go.jp

そこで、本研究では、強磁性体の非照射試験片を用いて、測定対象物の磁性に影響されない新たな着磁器及び適切な着磁方法の開発を行った。また、磁束密度を測定するセンサの測定精度を保証するために、センサの較正方法の開発を行った。併せて、高クロム鋼の中性子照射材へ開発した技術を適用し、漏えい磁束密度の測定を行った。

2. 着磁方法の開発

2.1 供試材

供試材には、強磁性体である高クロム系フェライト鋼のHCM12Aを用いた。化学組成を表1に示す。また、試験片形状を図1に示す。試験片は3種類調製しており、後述する2.2.1に用いた試験片①は $17 \times 5 \times t0.3\text{mm}$ 、2.2.2に用いた試験片②は $6.9 \times 4.8 \times t1.7\text{mm}$ 、試験片③は $21.3 \times 20.2 \times t1.7\text{mm}$ である。また、試験片②及び③は、焼きならしとして 1050°C で1.05時間保持後空冷、焼き戻しとして 770°C で7.03時間保持後空冷を行った。

Table 1 Chemical composition of HCM12A (wt%)

C	Si	Mn	P	S
0.11	0.27	0.64	0.016	0.002
Cu	Ni	W	Cr	Mo
1.02	0.39	1.89	10.83	0.30
V	Nb	N	B	Fe
0.19	0.054	0.06	0.0031	bal.

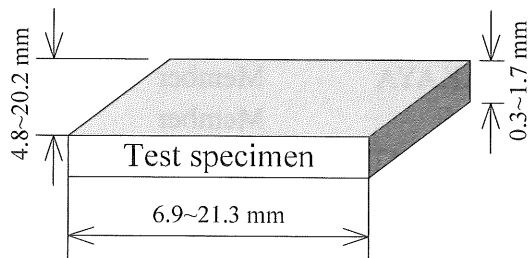


Fig.1 Dimensions of the sample.

2.2 着磁方法の開発

2.2.1 従来の着磁方法

従来の方法による着磁は、以下の手順で行っている。まず、試験片を変動交流磁場により消磁する。次に、上下一対の永久磁石で構成された着磁器の間に試験片を差し込み、着磁器の中心で保持する。着磁の際の模式図を図2に、着磁器の写真を図3に示す。保持位置における磁場強度は、約 $0.3/\mu_0$ A/m である。

これにより、漏えい磁束密度の測定面に対して垂直方向に着磁する。垂直方向に着磁することで、材料表面から漏えいする磁束密度の検出値を高めることができ、また、試験片の着磁方向を同一に揃えることで漏えい磁束密度の定量的な比較が可能となる。

上記の方法で着磁を行った試験片の漏えい磁束密度分布は、フラックスゲートセンサ（以下、「FGセンサ」という。）を取り付けた磁束密度測定装置により、試験片の測定面にセンサを近接させ、走査させて測定した。測定の際の模式図を図4に示す。Z軸の近接間隔（Lift off）は0.5~数 mm、XY軸走査間隔は0.1~1.0 mmで測定を行った。FGセンサは、外筒内の端部に1ヶ収納されており、サイズが $1.0 \times 0.3 \times 0.9$ mm、分解能が $1 \mu\text{T}$ のものを用いた。また、測定の際は、磁気シールドで装置全体を覆い外部磁場を遮断した。

強磁性体の試験片①に着磁した際の漏えい磁束密度の測定結果を図5に、模式図を図6に示す。図5より、試験片が垂直方向に着磁されていないことがわかる。これは、図6に示したように、従来法は強磁性体である試験片を磁力線に直交して移動させるため、試験片を着磁器から引き出す際に着磁方向が変化したと考えられる。なお、これまで行ってきた、オーステナイト系ステンレス鋼（常磁性体）の試験片に対しては、従来の着磁方法を適用しても、顕著に着磁方向が変化する問題は生じていない。

以上のように従来の着磁方法では強磁性体への適切な着磁が困難であることから、強磁性体に対しても適切な着磁が可能な新たな着磁方法の開発を行った。

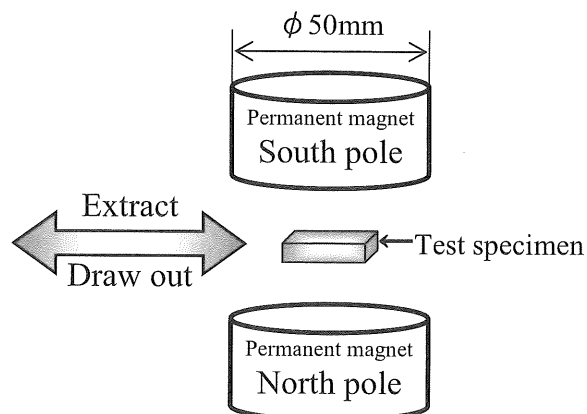


Fig.2 Schematic diagram of the traditional magnetizing method.



Fig.3 Photograph of the traditional magnetizer.

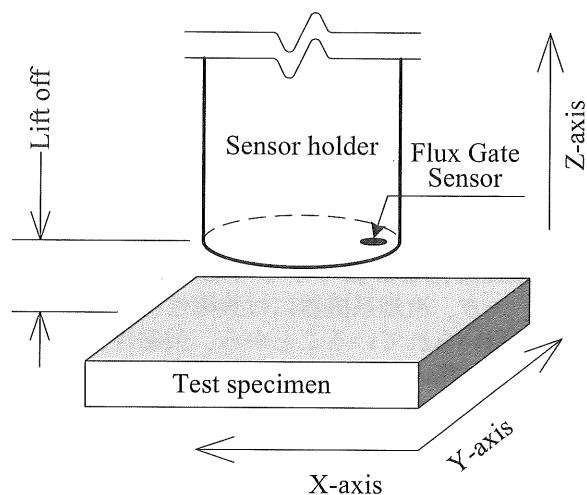


Fig.4 Schematic diagram of the magnetic flux density measurement system.

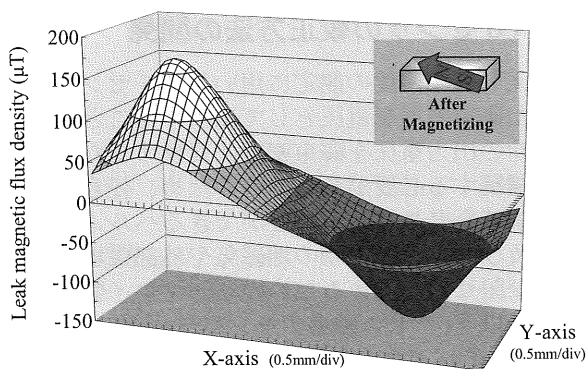


Fig.5 Leakage magnetic flux density of ferromagnetic specimen by the traditional magnetizing method.

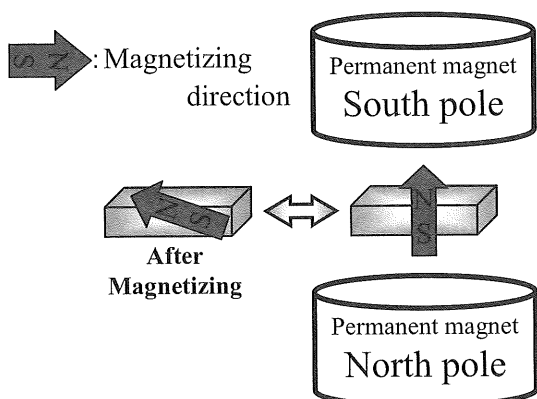


Fig.6 Schematic diagram of magnetizing of ferromagnetic specimen.

2.2.2 着磁方法の改良

従来の着磁方法に替わる方法として、開発した新たな着磁器（以下、「点状着磁器」という。）を図7に、着磁の際の模式図を図8に示す。点状着磁器は、樹脂の先端にφ2×H2.3 mmの円柱形永久磁石を埋め込み製作したものであり、その表面の磁場強度は従来と同様の約 $0.3/\mu_0$ A/mである。点状着磁器は、測定対象物表面に近接させることで局所的な着磁（以下、「点状着磁」という。）が可能であり、且つ測定対象物表面に対して垂直に動かすことで磁力線に沿った動きとなるため、着磁方向の変化を小さくすることができる。非照射試験片②の測定面中心の垂直方向に点状着磁を行った際の漏えい磁束密度の測定結果を図9に示す。測定には、2.2.1で述べたFGセンサを使用する方式を適用した。先に示した従来の着磁結果（図5）と異なり、適切に測定面の垂直方向に着磁することができた。これにより、強磁性体について、漏えい磁束密度が測定可能であることを確認できた。

ここで、点状着磁により着磁される範囲が試験片サイズよりも広い場合、試験片のサイズにより磁化量が異なるため、漏えい磁束密度測定結果の相互比較が困難となる。そこで、点状着磁による着磁範囲

を把握するため、サイズの異なる非照射試験片③についても測定面中心に点状着磁を行い、漏えい磁束密度の測定を行った。点状着磁した結果は図10に示す。図9と図10の比較からわかるように、大片である試験片③は、点状着磁による着磁範囲に比べて十分に大きいことから、無限平板状態として取扱可能であると考えられる。

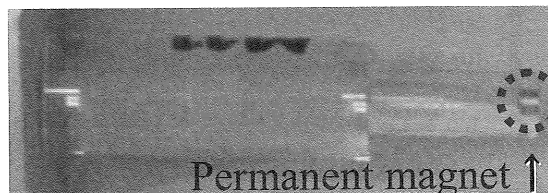


Fig.7 Newly developed magnetizer.

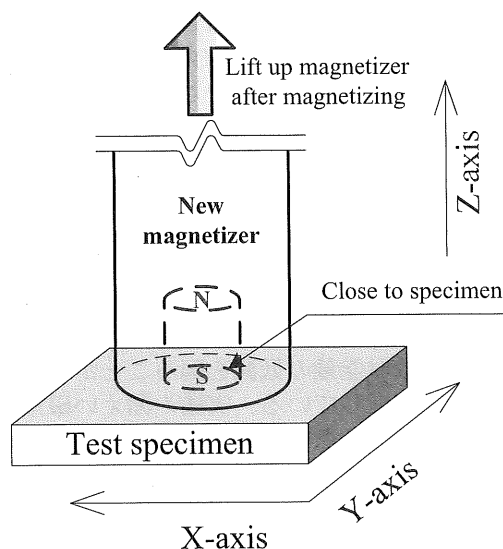


Fig.8 Schematic diagram of new magnetizing method.

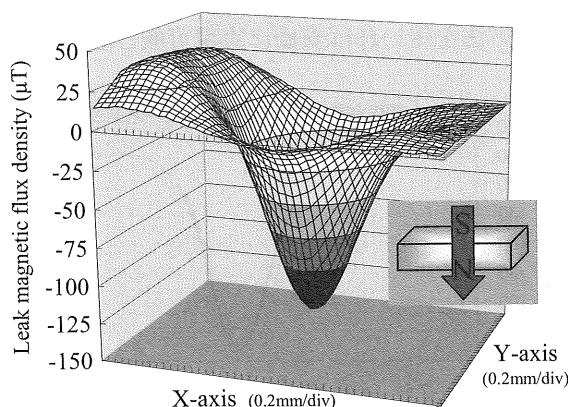


Fig.9 Leakage magnetic flux density of ferromagnetic specimen by new magnetizing method.

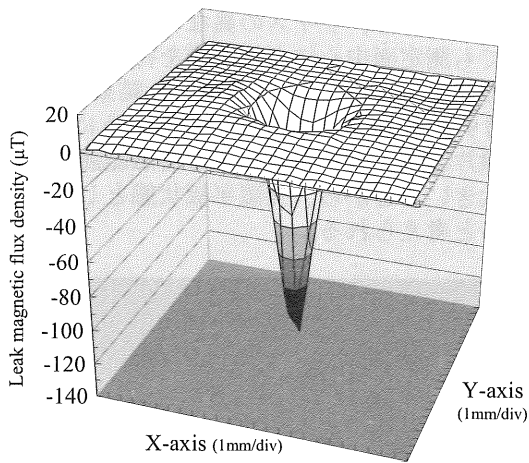


Fig.10 Leakage magnetic flux density of large test specimen.

また、測定した大小の試験片の漏えい磁束密度について、そのピーク位置における断面図を図 11 に示す。大小の試験片の漏えい磁束密度ピーク値が等しいことから、磁化量が等しいことが示唆された。このことから、着磁範囲は、試験片②の短辺を直径とする円と同じ範囲か、もしくは狭い範囲であると考えられる。よって、φ5 mm 以上の試験片の中心に着磁することで試験片サイズに依存せず、漏えい磁束密度の相互比較が可能であることが示唆される。また、φ5 mm の微小な試験片を活用することにより、原子炉内等の照射スペースの有効利用及び照射後の取扱い放射エネルギーの低減を図ることが可能となる。

将来的に目指している、実機の漏えい磁束密度の直接測定に対する点状着磁器の適用性を考えると、点状着磁器の特長である着磁範囲（φ5 mm 未満）及び永久磁石サイズ（φ2 mm）が小さいこと並びに片面から近接させるだけで簡便に着磁できることから、従来に比較して適用の可能性は高く、特に、配管等の曲面箇所、従来の着磁器が入らない狭隘箇所及び溶接部等の局部的検査を要する箇所への適用が想定される。また、小型永久磁石は安価に入手可能であることから、実機への着磁についても、開発した着磁方法を用いれば安価に実現可能と思われる。

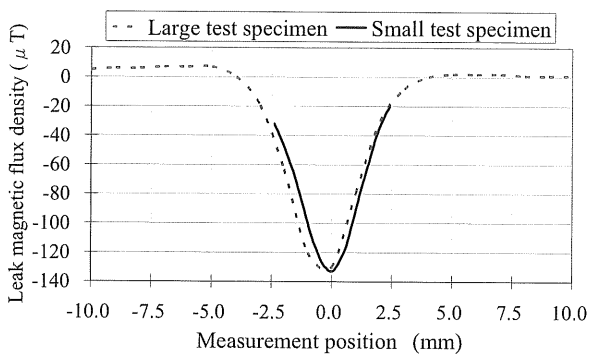


Fig.11 Comparison of leakage magnetic flux density between large and small test specimen at peak position.

3. FG センサの較正方法の開発

漏えい磁束密度の測定に用いる FG センサは、検出した磁束密度を電圧として出力することから、FG センサの出力電圧を磁束密度に変換するための検量線を構築する必要がある。そのため、任意の均一な磁場領域を発生させることができるヘルムホルツコイル及びゼロ点較正時の地磁気や外部磁場の影響を可能な限り低く抑えるためのパーマロイ製のチャンバー（以下、「ゼロ磁場チャンバー」という。）を製作した。それぞれの外観写真を図 12 に示す。これらの装置は、ホットセル内で使用するため、マニピュレータを用いた遠隔操作で簡便な取り扱いが可能なように、吊り紐や把持用の面取り部及び専用架台等を有した構造とした。また、ヘルムホルツコイルの電源ユニットは、放射線による劣化抑制、操作の容易さ、廃棄の際の放射性廃棄物量の低減のために、ホットセル外の操作室に設置した。

検量線は、線形範囲内について一次式「 $Y(\mu T) = aX(mV) - b$ 」で構築した。検量線の傾き a は、ヘルムホルツコイルに線形範囲限界の磁場 ±150 μT を印加した際のセンサ出力電圧から求めた。また、切片 b は、ゼロ磁場チャンバーを用いて磁場ゼロの際のセンサ出力電圧から求めた。地磁気等、その時々で変化する環境の磁場は予め測定しておき、試験片の測定結果から減算することでその影響を除いて評価することができる。

併せて、FG センサ製造時に構築した検量線（2004 年）と新たに構築したものとの差異を確認するため、検量線の比較を行った。図 13 に比較結果を示す。検量線の ±150 μT の範囲において、製造時のものは新たに構築したものに比べ、+側で 3 μT、-側で 11 μT の差があった。一般に、センサの感度は使用しているうちに製作当初とのズレが生じることが知られている。FG センサ感度のズレに備えて、適宜、検量線を更新することが必要である。

今回開発した FG センサの較正方法は、比較的簡便な手法である。従って、磁束密度測定の精度向上のために FG センサの較正頻度を高めることは、合理的である。また、本較正方法は、ホットセル外に設置されている FG センサにも適用可能であることを確認できており、汎用性が高いといえる。

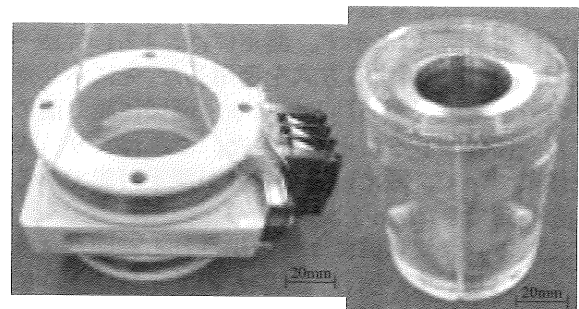


Fig.12 Photograph of helmholtz coil (left) and zero magnetic field chamber (right).

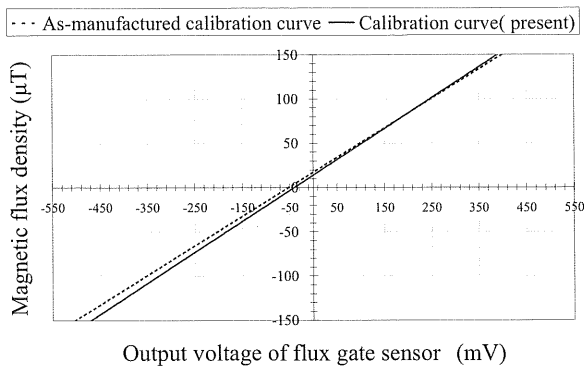


Fig.13 Comparison of new and manufactured calibration curve.

4. 照射材の漏えい磁束密度測定結果

上記の改良手法を用いて、照射試験片の中心に点状着磁を行い、漏えい磁束密度の測定を行った。

試験片の中性子照射試験は、独立行政法人日本原子力研究開発機構の高速実験炉「常陽」及び研究用実験炉「JRR-3」を用いて、各炉での単独照射及び両炉を用いた組み合わせ照射を実施したものである。照射試験の雰囲気は、不活性ガス (Ar, He) 中とした。弾き出し損傷量は、0.11~1.54 dpa であり、照射温度は、約 450~600 °C である。試験片の組成、形状は、2.1 項の試験片②に示すものと同様である。

弾き出し損傷量と漏えい磁束密度ピーク値との関係を図 14 に示す。弾き出し損傷量が増加するに伴い、漏えい磁束密度ピーク値が低下する傾向であることが有意に確認できる。

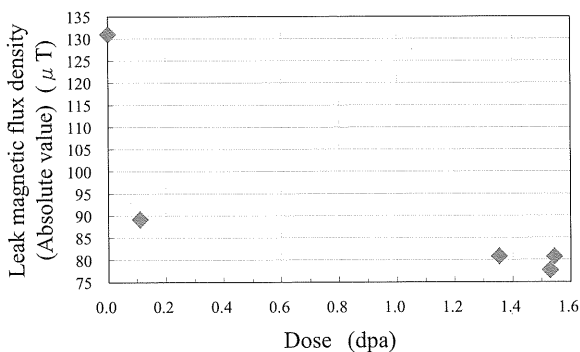


Fig.14 Relation between dose and leakage magnetic flux density.

ここで、高橋ら[4]は、材料の磁気特性を示す磁化曲線について、強磁性体である A533B 鋼 (改良 Mn-Mo 鋼、軽水炉の代表的な圧力容器鋼) の試験片に 0 MPa、550 MPa 及び 663 MPa の引張応力を生じさせて、それぞれの磁化曲線を測定しており、引張応力による材料内の微視的な変化で残留磁化が低下する傾向を示している。

残留磁化は着磁後の材料の磁化量であり、一方、漏えい磁束密度は着磁後の材料から漏えいする磁束密度であることから両者には密接に関係があり、漏

えい磁束密度も磁化曲線同様に材料内の微視的な変化と関係していると考えられる。このことから、データ数は限られているものの、図 14 は、照射下での微視的な変化を新たに開発した漏えい磁束密度測定手法を用いて検知できたことを示唆している可能性がある。以上のことから、強磁性体の漏えい磁束密度を測定することにより、常磁性体と同様に、照射下での材料特性変化の評価が可能であると考えられる。

今後は、漏えい磁束密度からの損傷評価方法の確立に向けて、漏えい磁束密度の変化と損傷量との定量的相関関係を記述するモデルの開発を進めていく予定である。

5. 結言

現在開発中である高速増殖炉の冷却系機器に用いられる強磁性体に対して、その漏えい磁束密度測定が可能となる点状着磁器及び点状着磁方法を新たに開発した。点状着磁器は、測定対象物表面に近接させることで局所的に着磁し、且つ測定対象物表面に対して垂直に動かすことで強磁性体に対しても適切に着磁することができる。これにより、強磁性体に対しても漏えい磁束密度の測定が可能となった。また、φ5 mm 以上の試験片の中心に点状着磁することで試験片サイズに依存せず、漏えい磁束密度の相互比較が可能であることが示唆された。さらに、φ5 mm の微小な試験片を活用することにより、原子炉内等の照射スペースの有効利用及び照射後の取扱い放射エネルギーの低減を図ることが可能となる。将来的に目指している実機の漏えい磁束密度の直接測定について、点状着磁器は、着磁範囲及び永久磁石サイズが小さいこと並びに片面から近接させるだけで簡便に着磁できる特長を有していることから、従来に比較して適用の可能性は高い。

併せて、磁束密度を測定する FG センサの較正について、ホットセルでの遠隔操作性を有した較正用装置 (ヘルムホルツコイル及びゼロ磁場チャンバー) を用いた、比較的簡便で汎用性が高い較正方法も開発した。

開発した手法を用いて、強磁性体の照射試験片へ点状着磁した結果、弾き出し損傷量が増加するに伴い漏えい磁束密度ピーク値が低下する傾向が得られた。一方、高橋らは引張応力を生じさせた強磁性体の磁化曲線を測定しており、応力の発生により残留磁化が低下する傾向を示している。漏えい磁束密度と残留磁化は密接に関係していると考えられることから、前述の傾向は、照射下での特性変化を検知できたことを示唆していると考えられる。このことから、強磁性体の漏えい磁束密度を測定することにより、照射下での材料特性変化の評価が可能であると考えられる。

参考文献

- [1] 永江ら, “オーステナイト系ステンレス鋼を対象とした損傷非破壊検出技術の開発”, サイクル機構技報, No.14, p125-135, (2002.3)
- [2] S.Takaya et al.:“Nondestructive Evaluation of neutron irradiation damage on austenitic stainless steels by measurement of magnetic flux density”, Proc. of the 17th International Conference on Nuclear Engineering (2009) ICONE17-75215.
- [3] 上野ら, “原研-サイクル機構 融合研究成果報告書 照射環境における原子炉構造材料の劣化現象に関する研究”, JAERI-Research 2005-023, JNC TY9400 2005-013, (2005.9)
- [4] S.Takahashi et al.:“Magnetization curves of plastically deformed Fe metals and alloys”, J. Appl. Phys. 87 (2000) 805.