

中性子照射によるフェライト永久磁石の放射線耐性の測定 MEASUREMENT OF RADIATION RESISTIVITY OF FERRITE PERMANENT MAGNETS IRRADIATED BY NEUTRONS

八子丈生^{*A)}、岩下芳久^{A)}、阿部賢^{A)}、栗原俊一^{B)}、福田将史^{B)}、
佐藤将春^{B)}、杉村高志^{B)}、不破康裕^{C)}、高宮幸一^{D)}、飯沼勇人^{D)}

Tomoki Yako^{*A)}, Yoshihisa Iwashita^{A)}, Masashi Abe^{A)}, Toshikazu Kurihara^{B)}, Masahumi Fukuda^{B)},
Masaharu Sato^{B)}, Takashi Sugimura^{B)}, Yasuhiro Fuwa^{C)}, Koichi Takamiya^{D)}, Yuto Iinuma^{D)}

^{A)}Kyoto ICR, ^{B)}KEK, ^{C)}JAEA, ^{D)}KURNS

Abstract

Permanent magnets are used as material of beam optical elements. While rare earth magnets, such as neodymium and samarium cobalt, are known to have radiation demagnetization, there is not enough information for ferrite magnets, which are economical but have less remanent field strength. In order to verify the resistivity of ferrite magnets, we carried out the trial experiment on radiation demagnetization of ferrite magnets irradiated by neutrons at Kyoto University Research Reactor (KUR). As a result, demagnetization of ferrite magnets was not measured up to a maximum neutron dose of 7×10^{16} [cm⁻²].

1. はじめに

永久磁石は電磁石と違って、励磁させるための電源や発熱した電磁石のための冷却システムを必要としないため、低コスト化を目指すことができ、装置や設備の省スペース化が期待出来る。そのため永久磁石はビーム光学素子として様々なところで用いられている。一方で、ネオジウム磁石やサマリウムコバルト磁石といった希土類系の永久磁石では放射線減磁が起こることも知られている [1]。しかしながら、フェライト磁石の放射線減磁については十分な情報が無い。本稿ではフェライト磁石のビーム光学素子としての適合性を確認するために京都大学複合原子力科学研究所 (KURNS) にて中性子照射実験を行い、照射前後の磁場の変化を調べたのでその結果について報告する。

2. 京都大学研究用原子炉 (KUR)

2.1 概要

KUR はスイミングプールタンク型の原子炉である。炉心は、約 20% 濃縮ウランの板状燃料要素と黒鉛反射体要素からなり、軽水を減速・冷却材とした熱出力 5000 kW、平均熱中性子束約 3×10^{13} [n cm⁻² s⁻¹] の原子炉で、物理学、化学、生物学、工学、農学、医学等広く実験研究に使用されている。また付属の実験設備としては、実験孔 (4 本)、照射孔 (4 本)、熱中性子設備 (重水、黒鉛)、圧気輸送管 (3 基)、水圧輸送管、傾斜照射孔、貫通孔および炉心内には照射中の試料温度を制御できる精密制御照射管、週単位で照射が行われる長期照射設備がある [2]。本実験では圧気輸送管を用いた照射を行った。

2.2 圧気輸送管

今回用いた圧気輸送管は、ポリエチレン製のカプセルに試料を入れ、炭酸ガスの圧力を利用してカプ

セルを輸送し、炉心内で中性子照射を行うことができる装置である。Pn-1,2,3 と独立した 3 基で構成され、それぞれ炉心内の異なる場所にカプセルを輸送することができるため、条件に合わせた使い分けが可能になる。今回用いた Pn-2 の平均熱中性子束を Table 1 に示す。

Table 1: Neutron Flux of Pn-2 in KUR

Position	Neutron flux [n cm ⁻² s ⁻¹]	
	1MW	5MW
Top	4.66E+12	2.63E+13
Bottom	5.10E+12	2.78E+13

3. 測定準備

3.1 測定系

今回用いた磁石は異方性フェライト Y30H-1 の $\phi 10 \times 10$ mm で、磁化容易軸が円筒軸方向のものである [3]。磁場測定には Tesla meter (SENIS GmbH type:CH3A-2m 3MH3-2T) を用いた。Figure 1 上部は

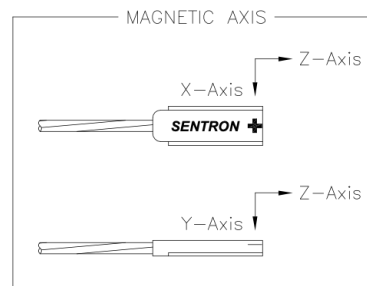


Figure 1: Magnetic axis of hall probe.

プローブを上から見たときを、下部は横から見たと

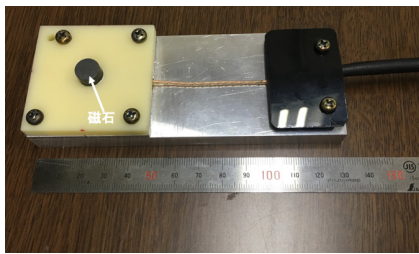


Figure 2: A magnet fixture jig.

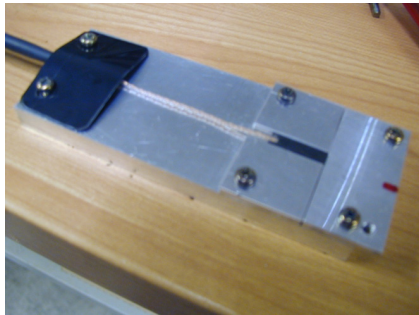


Figure 3: Fixed probe.

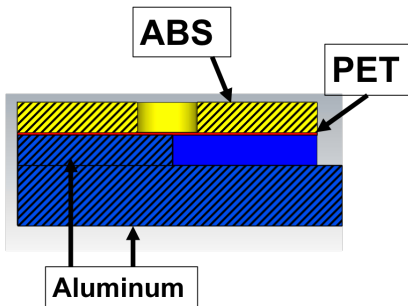


Figure 4: Cross section of the jig.

きを表している。十字の書かれてある位置にホール素子があり、またその素子はプローブの先端と表面から 1 mm 内側にある。Figure 1 の x, y, z 軸はプローブが受ける磁場の座標系である。磁場測定の前に治具を作成した。この治具は測定する際のプローブの固定及び磁石の位置、プローブとの距離を固定するためのものである。磁石の底面の中心に、プローブのホール素子がくるように設計した (Fig. 2)。磁石固定の穴は磁石をポリエチレン袋に封入するため、袋の厚みや折り重なりを考慮し、磁石の径が $\phi 10$ mm なのに対し固定穴の径 $\phi 10.2$ mm にした。プローブの固定については、プローブの幅と溝の幅が同じになるようにアルミニウム板を組み、プローブの下部にゴム製のシムを入れ、プローブごと上から板で押さえつけるようにして固定した (Fig. 3)。またこの治具は、中性子照射後に放射化した磁石がプローブに直に接触することを防ぐため、磁石とプローブの間に厚さ 0.5 mm の PET 製の板を入れている (Fig. 4)。

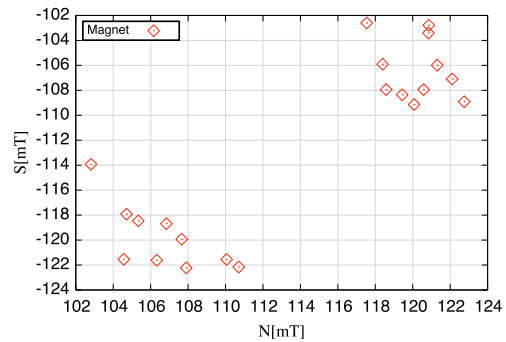


Figure 5: Distribution of magnet.

3.2 照射前測定

磁場測定は Tesla meter の値を PC で読みだして記録する。この時、Tesla meter から B_x, B_y, B_z 各成分ごと 8 個の値を読み取り、それらを各々平均した値を出力している。また、磁石は円柱状であるため、それぞれに対し基準となる方位角方向も決定した。これは必ずしも軸対称性のある磁場分布であると限らないため、磁石を同じ向きでの測定が出来るようにするためである。今回の実験では照射量ごとに別の磁石サンプルを用いるため多数の磁石を用意し、それらについても同様に測定と基準となる方位角の決定を行った。

4. 照射実験と測定

今回の照射実験は原子炉出力が 1 MW の時と 5 MW の時に行った。1 MW 運転では照射時間が 10 秒間から 4 時間まで段階的に行い、5 MW 運転では 12 分間と 36 分間の照射を行った。照射後の磁石は鉛フード内で線量が十分下がるのを待ったのち測定し、照射前を照射後の磁場の大きさを比較した。

5. 測定結果

5.1 照射前

Figure 5 は横軸 N 極、縦軸 S 極として各磁石の B_y をプロットしたものである。これにより磁石には製造時に生じたと思われる軸方向の非対称性があり、ランダムな着磁方向で着磁されていることが推察される。そのため Fig. 5 右上側に着磁方向を揃えるために再着磁をした (Fig. 6)。N 極側、あるいは S 極側の磁場の値の平均値から $\pm 3\%$ 離れている磁石についてはこの時点で取り除いた。

5.2 照射後

測定により得られた B_x, B_y, B_z から $|B|$ を算出し、照射前の磁場を $|B_{\text{before}}|$ 、照射後の磁場を $|B_{\text{after}}|$ とし、 $\frac{|B_{\text{after}}| - |B_{\text{before}}|}{|B_{\text{before}}|} \times 100$ で磁場の中性子照射前後の変化率を求めた。5 MW 運転の 12 分間と 36 分間照射は 1 MW 運転の 1 時間と 1 時間に相当するものとした。Figure 7 の N0、N180、S0、S180 はそれぞれ N 極側基準角 $0^\circ, 180^\circ$ 、S 極側基準角 $0^\circ, 180^\circ$ にお

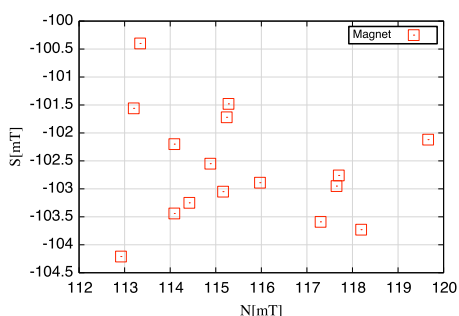


Figure 6: Distribution of magnet after re-magnetized.

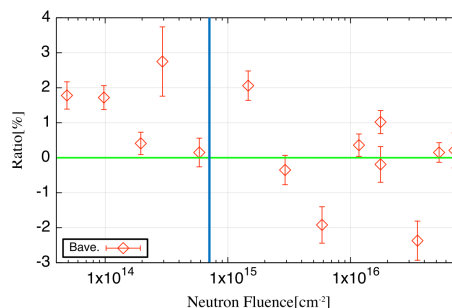


Figure 9: Modified ratio.

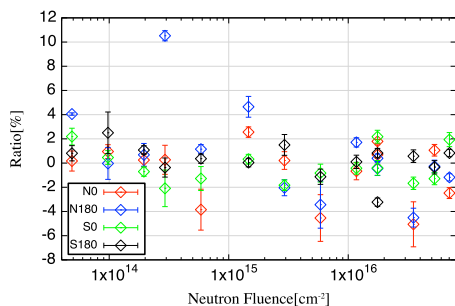


Figure 7: Ratio of each pole and angle.

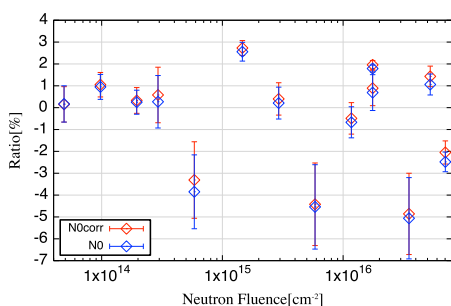


Figure 8: Temperature correction.

ける変化率の平均値を表している。照射後に磁場が増えているものがあるが、これは照射前測定においてポリエチレン製の袋に封入された試料を測定した際、上手く治具にはまっておらず本来の値より低い値を測定してしまったことが考えられる。結果として全体的に変化率は10%程度であり、減磁の程度は大きくないように見える。また、極性や異方性による変化率の差は見られなかった。なお、今回用いた磁石は残留磁化が温度係数を持つことが知られている [3]。つまり、測定時の磁石の温度により磁場の強さが変化する。室温 22°C 換算にするため、残留磁化の温度係数-0.18 %/°C を用いて磁場の温度補正を行った (Fig. 8)。温度補正による磁場の変化は1%未満であり、測定誤差の範囲内であった。よって今回の実験において、測定時の温度変化による磁場の変化はさほど影響がないとわかった。Figure 7で平均値から±5%以上離れている測定データについては、測定に不備があったと判断して除外した。さらにN極側基準角0°、180°、S極側基準角0°、180°

のデータを個別のデータとして扱い、磁石1つに対して16または32回測定したものとして、それらの変化率の平均値 B_{ave} をとった (Fig. 9)。この結果変化率は±4%未満であった。これらの値の相関係数は-0.338であり、やや相関ありに近い方の弱い相関ありの値となった。一方、無相関検定を行ったところP値は0.203であり、有意水準0.05(5%)を下回らなかったため、今回の照射量の範囲ではフェライト磁石の有意な減磁はなかったという結果になった。なお、図中の青色の縦線はネオジム磁石の放射線減磁が起こり始める中性子照射量 $7 \times 10^{14} \text{ [cm}^{-2}]$ である。このレベルの照射でも大きな減磁は観測されておらず、ネオジム磁石と比較して、フェライト磁石の方が放射線耐性が高いことが分かった。

6. まとめ

今回の実験の最大中性子照射量 $7 \times 10^{16} \text{ [cm}^{-2}]$ の範囲まででは、フェライト磁石の大きな減磁は見られなかった。また、ネオジム磁石と比較してフェライト磁石の方が放射線耐性が高いことが分かった。今回の測定では変化率に対して測定誤差の値が±0.5%程度と大きい。これを抑えるには磁石をポリエチレン袋から取り出して測定する、あるいは治具を改良などが考えられる。なお、中性子照射量を増やし減磁自体を大きくすることで、測定誤差の影響を小さくし減磁の程度を明らかにすることができるとは思えない。そのため、2019年7月23-25日にKURNSでより長時間の中性子照射が可能な水圧輸送管を用いた照射実験を行った。磁石の線量が下がるのを待ったのち測定を行う。この測定についてはプローブだけでなく、コイルによる磁気双極子モーメントの測定も予定している。

参考文献

- [1] X. -M. Marechal, T. Bizen, Y. Asano, H. Kitamura, "65 MEV NEUTRON IRRADIATION OF ND-FE-B PERMANENT MAGNETS" Proceedings of EPAC, Edinburgh, Scotland, 2006.
- [2] 京都大学研究用原子炉; <https://www.rri.kyoto-u.ac.jp/facilities/kur>
- [3] https://www.magfine.co.jp/products/detail.php?product_id=5408