

永久磁石放射線減磁評価のための磁化測定手法

MAGNETIZATION MEASUREMENT SCHEME FOR RADIATION DEMAGNETIZATION EVALUATION OF PERMANENT MAGNETS

不破康裕^{#, A)}, 栗山靖敏^{B)}, 岩下芳久^{B)}

Yasuhiro Fuwa^{#, A)}, Yasutoshi Kuriyama^{B)}, Yoshihisa Iwashita^{B)}

^{A)} J-PARC center, Japan Atomic Energy Agency

^{B)} Institute for Radiation and Nuclear Science, Kyoto University

Abstract

In order to evaluate the radiation resistance of permanent magnet materials used in the beam optics system of accelerators, radiation demagnetization due to neutron irradiation is measured using samples irradiated in a research reactor at Kyoto University. In the evaluation of demagnetization ratio, it is important to accurately measure the magnetization of the samples before and after neutron irradiation. In order to examine the methods, two measurement methods using Hall probe and using pickup coils were compared. The deviation of measured values of these methods were $\pm 0.85\%$ and $\pm 0.088\%$, respectively.

1. はじめに

永久磁石は磁場の発生においてエネルギーを消費することがなく、加速器システムの消費電力の削減に寄与できる重要な材料である。社会として SGD やカーボンニュートラルの目標を掲げエネルギー問題や気候変動問題の解決に取り組む中で、加速器デバイスにおける永久磁石の重要度は今後さらに増大していくと考えられる。永久磁石を使用すれば磁場の発生に電源が不要で電源本体や電力ケーブル、除熱のための冷却水系統などの付帯設備も不要となるため、加速器システムの消費電力低減だけでなく電源故障や熱、冷却水トラブルなどの抑制が期待できる。また、停電時も磁場は失われないため、電力喪失が局所的な場合、運転継続する設計の可能性も期待される。このように高効率・高信頼性を有する加速器システム構築に永久磁石の採用が寄与する。現在、加速器に使用される永久磁石材料としては残留磁化、保磁力が共に大きな希土類磁石であるネオジム磁石 ($\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$)、サマリウムコバルト磁石 ($\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$) が用いられている。これらの希土類磁石に加えて我々の研究グループではフェライト磁石を用いた加速器用デバイスを考案・製作している。フェライトは酸化鉄を主成分とした永久磁石材料であり、残留磁化は 0.38 – 0.4 T と比較的小さいが、材料の酸化鉄が豊富に存在するため安価に入手できるという特徴がある。そのため、大きな体積中に 1 kg (0.1 T) 程度の磁場を形成したい場合において、フェライトは有用な磁石材料となる。これらの特徴から我々の研究グループでは、クライストロン用ビーム集束磁石 [1] や、蓄積リングやビーム輸送系に用いる軌道補正磁石 [2] としてフェライト磁石を

用いた加速器用デバイスを開発している。

2. KUR を用いた中性子照射による放射線減磁測定

永久磁石の磁化の大きさは温度や外部磁場、経年変化などに変化することが知られており、これらの要因による磁化の変化には様々な対策が考案されてきた。これらに加えて、永久磁石は放射線の影響で残留磁化が低下することも知られている。大強度化が進む加速器で永久磁石を長期間にわたり使用するためには、放射線による永久磁石の減磁をあらかじめ評価しておく必要がある。

従来の研究では放射光施設のアンジュレータ用に、電子ビームがネオジム磁石やサマリウムコバルト磁石に与える放射線減磁の効果が研究されているが [3, 4]、フェライト磁石に対する減磁評価の報告は見つからない。大強度加速器へ永久磁石を採用した場合の減磁を評価するためフェライト磁石やネオジム磁石、サマリウムコバルトなどの永久磁石材料の放射線減磁データを系統的に取得するため永久磁石材料に対する放射線照射実験を実施している。現在は研究の初期段階として京都大学複合原子力科学研究所の研究用原子炉 KUR [5] において永久磁石試料に中性子を照射し、その照射による磁石の減磁効果を測定している。

3. 減磁量評価のための磁化測定手法

放射線減磁量の評価においては照射前後の永久磁石サンプルの磁化を正確に測定することが肝要となる。研究の当初段階では、直径 10 mm 高さ 5 mm の円柱形のサンプルを採用し、磁化の測定にホールプローブを使用していた [6]。これらを用いた測定

[#] yfuwa@post.j-parc.jp

では磁石サンプルの放射線照射時に生成する放射エネルギーが大きいことと、測定対象となる減磁の大きさに対して測定誤差が大きいという問題があった。そこで実験手法を再考し、磁石サンプルの大きさを直径 5 mm 高さ 1.5 mm に変更するとともに、磁化測定の方法を再検討することとした。磁化の測定にホールプローブを用いる方法と、ヘルムホルツコイル中心で磁石を回転させてコイルに生ずる誘導起電力から磁化量を測定する 2 つの手法を試用することとした。以下で、その 2 つの磁化測定手法を比較する。

3.1 ホールプローブを用いた磁化測定

2019 年までの磁化測定にはホールプローブを用いてきた [6]。この方法ではホールプローブと磁石サンプルを取り付けることができる治具を用いて、予めホールプローブを固定した治具に磁石サンプルを測定のために固定してホールプローブが検出した磁束密度を読み取ることでサンプルの磁化量を評価するものである。この方法にはサンプルを所定の位置に置くだけで磁化測定ができるというメリットがある。直径 5 mm 高さ 1.5 mm 用に作成した測定治具を用いて測定を実施した場合の磁化測定値のばらつきを Fig. 1 に示す。この図の横軸は測定値の平均値からの相対的なずれを表しており、縦軸は頻度を表している。この結果より磁化測定値のばらつきは標準偏差にして $\pm 0.85\%$ 程度であることがわかる。このばらつきは磁石とホールプローブの相対的な位置に関する誤差によるものと考えられる。磁石表面から 0.5 mm 離れた高さにおいてホールプローブの位置が磁石中心軸から変位した場合の磁束密度の測定値を計算した結果が Fig. 2 であり、この結果から磁石とホールプローブの相対位置が数百マイクロメートルの場合に磁束密度の測定値に 1% 程度の誤差が生ずることが確認できる。また、ホールプローブでの測定ではサンプルの磁化方向の差異に起因する誤差の影響を受けるため、磁化測定時にサンプル設置の位置や角度のズレに起因する誤差が発生するという欠点があった。この欠点は放射化したサンプルを取り扱う際に作業時間が長くなることにつながるため、作業者の被曝量低減のため別の測定手法を検討した。

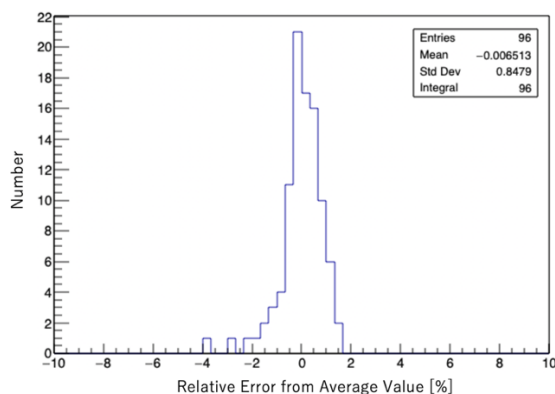


Figure 1 Deviation of magnetization amplitude measured with Hall probe.

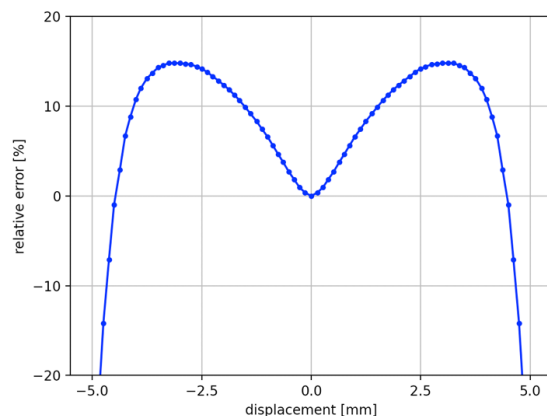


Figure 2: Calculated relative magnetic field error due to displacement between Hall probe and magnet samples.

3.2 コイルを用いた磁化測定

測定誤差を抑制する磁化測定の手法としてコイルを用いた手法を検討した。この手法では Fig. 3 に示すようなヘルムホルツ型コイル (コイル直径約 14 mm、60 回巻き) を用意して、その中央位置に磁石サンプルを設置しコイルの中心軸と直交する方向に磁石を回転させる。磁石の回転によりコイルを鎖交する磁束量が増えるため、誘導起電力がコイルに誘起される。その誘導起電力の大きさを測定することでサンプルの磁化の大きさを測定することができる。Figure 3, 4, 5 に製作した測定器と測定セットアップの写真を示す。磁石は回転駆動用のパルスモータに取り付けられた治具に固定され、70 rps の速度で回転する。コイルに誘起された電圧はオシロスコープで 28 周期分計測する。計測した電圧波形をフーリエ変換しその基本波成分の大きさからサンプルの持つ磁気モーメントの大きさを評価できる。ヘルムホルツ型コイルであるため、位置誤差の影響を受けにくく、高い精度での測定が可能となっている。

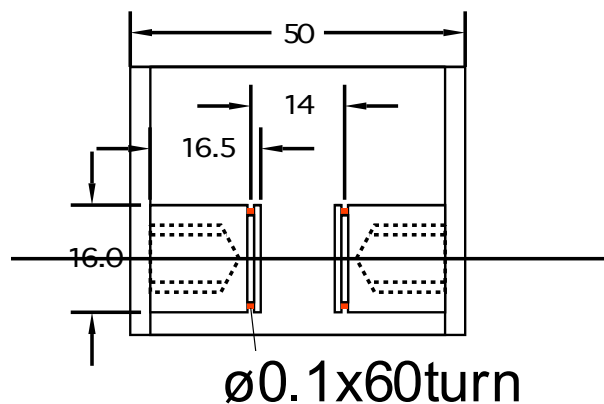


Figure 3: Layout of pickup coils for magnetization measurement.

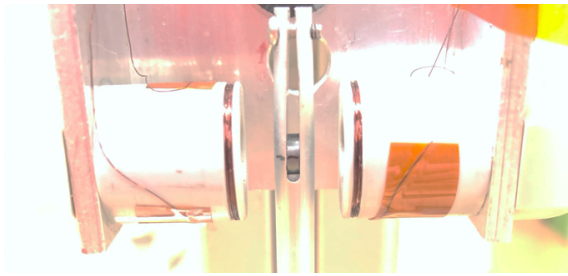


Figure 4: Picture of pickup coils and magnet sample.

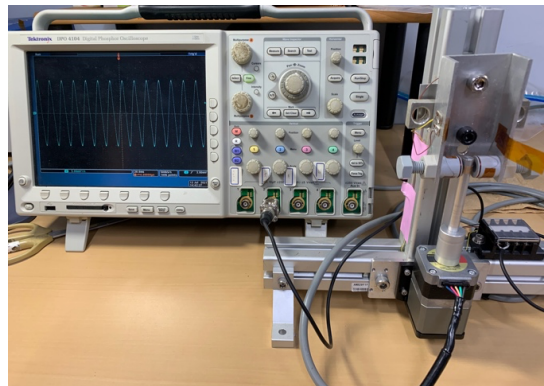


Figure 5: Picture of measurement setup with coils and rotated magnet.

コイルと回転磁石を用いた磁化測定手法で測定したした場合の磁化測定値のばらつきを Fig. 6 に示す。この結果からこの手法における磁化測定値のばらつきを示す標準偏差は $\pm 0.088\%$ 程度であり減磁量測定に必要な精度での測定が実現できていると言える。

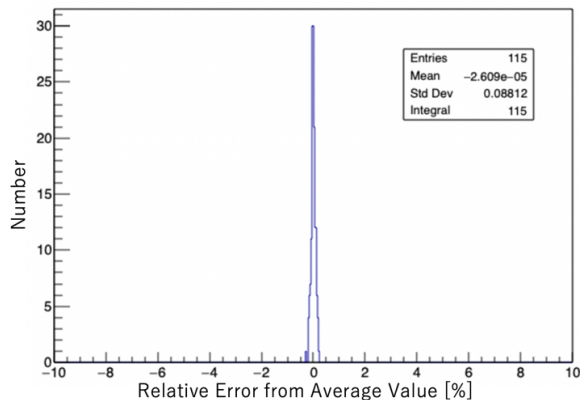


Figure 6: Deviation of magnetization amplitude measured with pickup coils and rotated magnet.

ここまで述べた結果より、今後の減磁評価実験においてはコイルと回転磁石を用いた磁化測定手法を採用することとした。現在、測定のためのサンプルセットアップにかかる時間を短縮し作業者の被曝量を低減するために回転磁石を保持する治具を改良し、照射を実施した実サンプルの減磁量測定の体制が整えられた。

4. まとめと今後の展望

大強度加速器において永久磁石を用いたデバイスを導入するにあたり永久磁石材料の耐放射線特性の評価を実施している。減磁評価に必要なサンプルの磁化量の測定手法としてホールプローブ及びコイルを用いる手法を比較して、コイルを用いる手法を採用することで減磁量評価に必要な 0.1% 以下の精度での測定を実現できることが確認された。本手法を採用することで減磁特性を正確に評価することができるようになった。

これまでにフェライト磁石サンプル (Y30H) に対する照射を終え、そのサンプルの放射線量が低減したのちに磁化量の測定を計画している。また、同実験手法にてフェライト (Y30BH) やネオジウム磁石、サマリウムコバルト磁石に対する放射線減磁測定も計画しており、同一の手法を用いて系統的に複数のサンプルに対する減磁測定データを取得する予定である。また、放射線の照射についても京都大学の Co60 ガンマ線照射施設や J-PARC の加速器トンネルで照射を行うことで照射する放射線の粒子種や強度、スペクトルが異なる場合の減磁特性の評価も計画している。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP21K17996 の助成を受けたものです。本研究は京都大学複合原子力科学研究所共同利用研究によるものです。研究の遂行にあたり協力いただいた京都大学複合原子力科学研究所の高宮幸一准教授、飯沼勇人氏、日本原子力研究開発機構の高柳智弘主任研究員に感謝いたします。

参考文献

- [1] Y. Fuwa and Y. Iwashita, "Performance evaluation of a klystron beam focusing system with anisotropic ferrite magnet", Progress of Theoretical and Experimental Physics, 2017, 023G01.
- [2] Y. Iwashita, M. Abe, T. Yako, Y. Fuwa and N. Terunuma, "Bipolar Correction Magnet With Permanent Magnets", IEEE Transaction on Applied Superconductivity, Vol. 30, No. 4, JUNE 2020, 4003703.
- [3] 備前輝彦、北村英男, "挿入光源用永久磁石(Nd₂Fe₁₄B)の放射線減磁 について", Journal of JSSRR, March 2004 Vol. 17 No. 2 pp. 53-58.
- [4] X.-M. Maréchal, T. Bizen, Y. Asano, and H. Kitamura, "65 MeV Neutron Irradiation of Nd-Fe-B Permanent magnets", Proceedings of European Particle Accelerator Conference (EPAC) 2006, THPCH135, pp. 3116-3118 (2006).
- [5] <https://www.rri.kyoto-u.ac.jp/en/facilities/kur>
- [6] 八子 丈生, 岩下 芳久, 阿部 賢, 栗原 俊一, 福田 将史, 佐藤 将春, 杉村 高志, 不破 康裕, 高宮 幸一, 飯沼 勇人, "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", Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, FRPH045, pp. 1003-1005 (2019).