

A RADIATION DAMAGE TEST OF PERMANENT MAGNET MATERIALS FOR RESIDUAL GAS IONIZATION PROFILE MONITORS

Y. Sato¹, K. Agari¹, M. Iio², M. Ieiri¹, Y. Katoh¹, S. Sawada¹, Y. Suzuki¹, H. Takahashi¹, M. Takasaki¹,
K. H. Tanaka¹, A. Toyoda¹, H. Noumi¹, E. Hirose¹, M. Minakawa¹, Y. Yamanoi¹, and H. Watanabe¹

¹Institute for Particle and Nuclear Study, High Energy Accelerator Research Organization (KEK)
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801

²Advanced Meson Science Laboratory, Nishina Center for Accelerator-Based Science, RIKEN
2-1 Hirosawa, Wako, Saitama 351-0198

Abstract (英語)

The residual gas ionization profile monitors (RGIPMs) have been developed to monitor the beam profiles in the slow-extraction beam line at Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC). Each RGIPM is equipped with Sr-ferrite based permanent magnets to reduce diffusion of ionization electrons under 1 Pa pressure until they reach segmented electrodes. It is well known that some permanent magnet materials lose their coercive forces under high radiation exposure. To evaluate long-term stability of the RGIPMs at J-PARC, a radiation damage test of permanent magnet materials (Sr-ferrite, Sm_1Co_5 , $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$, and Nd-Fe-B) was carried out up to the integrated fluence of 10^{14} neutrons / cm^2 at KEK Neutron Science Laboratory (KENS) and 10^{17} protons / cm^2 at Tohoku University Cycrotron Radioisotope Center (CYRIC). Sr-ferrite sample did not lose its coercive force after irradiations while other material samples significantly lost their coercive force. The present results confirmed that the RGIPMs using Sr-ferrite permanent magnets will be sufficiently radiation-hard at J-PARC. The present article reports the experimental setup and results in details.

残留ガスビームモニタ用永久磁石の放射線耐性試験

1. 概要

現在建設中の大強度陽子加速器施設 (J-PARC) の遅い取り出しビームラインでは、陽子ビームのプロファイル測定するために残留ガスビームプロファイルモニタ (Residual Gas Ionization Profile Monitor: RGIPM) を使用する^[1]。RGIPMは陽子ビームが1Pa程度の残留ガスを通過する際に生じる電離電子を電場およびそれに平行に印加した一様磁場でセグメントされた電極まで誘導し、横方向および縦方向のプロファイル分布を測定する。1Pa程度の真空中では電離電子と残留ガス分子の衝突による拡散による分解能の劣化が起こる。これを抑制するため、400 Gauss程度の磁場を印加して電子の軌道を閉じこめ、必要な空間分解能 (1mm程度) を得ることができる。RGIPMではSr-ferriteを用いた永久磁石を用いて磁場を印加するが、ここで問題となるのがSr-ferrite磁性体の放射線による減磁である。

永久磁石に用いられる磁性体材料の放射線による減磁については過去にネオジム系 (Nd-Fe-B) や REC (Rare Earth Cobalt: Sm_1Co_5 や $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$) 系磁性体については様々な実験データがある^{[2]-[10]}。過去のデータのまとめは文献^[10]に詳しい。ネオジム系は安価で強い起磁力を持つことからよく調べられているが放射線による減磁の効果が最も大きく、 10^5Gy 程度の吸収線量で起磁力を失うことはよく知られている。REC系についてもCERNおよびTRIUMFでの実験

データがあり、ハドロン照射で 10^7Gy 程度の吸収線量で起磁力を失うことがわかっている。しかしSr-ferriteについては放射線による減磁についてのデータが少なく、文献^[11]および^[12]によると 10^{18} n/cm²までの速発中性子照射では減磁が見られなかったが、J-PARCの放射線環境下での高エネルギーの陽子、中性子線に対する減磁の影響は不明である。

J-PARC遅い取り出しビームライン^[13]では、厚さ200 μm のAl製真空膜や厚さ6cmのNi製標的 (T1) 等、大きなビームロスが発生するため、この付近に設置されるRGIPMは強い放射線にさらされる。MARSコード^[14]による評価では、T1標的上流に設置されるRGIPMは30GeV- 10^{14} proton/secの陽子ビームがT1に年間2500時間照射された場合、7.4年で 10^{17} hadron/cm²の積算線量になることがわかった。Sr-ferriteが^[12]らの結果の通り 10^{18} hadron/cm²の寿命を持っているとするとRGIPMはJ-PARCの放射線環境でも十分使用できるが、これを定量的に評価する必要がある。我々はRGIPMで使用するSr-ferriteと、比較対照としてネオジム系およびREC系磁性体試料を用意し、KEK中性子科学実験施設 (KENS) において 10^{14} neutrons/cm²、東北大学サイクロトロンRIセンター (CYRIC) で 10^{17} protons/cm²の積算フルエンスまで照射を行い、放射線による減磁の効果を測定した。

本報告はKENSおよびCYRICでの照射実験のセットアップおよび実験結果について詳細に述べる。

2. KENSでの照射実験

KENSでの照射実験は中性子生成用タングステン標的下流の照射用縦穴^[15]で行われた。磁性体はSr-ferrite、Nd-Fe-B、Sm₁Co₅及びSm₂Co₁₇の試料各1枚をまとめた試料を4組用意し、標的に近い4カ所の縦穴に試料を設置した。各磁性体試料の大きさは2cm×2cmであり、ビーム方向の厚みは5 mmであった。2006年3月9日から3月22日までの間合計168時間照射を行い、タングステン標の上で6.53 Coulomb相当の500MeV陽子ビームが照射された。文献^[15]でのMARS^[14]による照射用縦穴での積算線量を計算すると、標的に最も近い縦穴での積算中性子線量は 1.02×10^{14} n/cm²であった。

照射試験終了後、2日間残留放射線が低減するのを待ち、ガウスメータで試料の中心部の表面磁場を測定し、照射前の測定と比較してどれだけ減磁したかを求めた。この際の系統誤差は約10%であった。結果は図3の通り、Nd-Fe-Bが 10^{14} n/cm²の照射でほぼ100%減磁していることがわかる。これはTRIUMFでの結果^[3]と一致している。その他のサンプルについては目立った変化は見られなかった。



図1 KENSでの実験セットアップ。KENS中性子標的下流の縦穴上部(右図)およびSlot 1に設置した磁性体試料

3. CYRICでの照射試験

CYRICでの照射実験は大型930サイクロトロン第2ターゲット室31コースで行われた。実験セットアップを図1に示す。今回は一次陽子ビームが磁性体試料に直接照射されるため、ビームによる発熱を極力抑え、熱によって減磁しないよう注意する。そのため磁性体試料のサイズは1 cm×1 cm、厚さを1 mmとした。陽子ビームのエネルギーは70 MeVであり、最大で1.6μAのビーム強度で照射した。最大ビーム強度での磁性体試料の熱入力は8 W程度である。図1に示すように、磁性体試料の温度上昇を緩和するため、試料をAlの板に熱伝導接着剤で接着した。Al板のビームが通過する領域の厚さは0.5 mmである。磁性体試料付近の温度をモニターするため、熱電対を接着した。磁性体試料はビーム軸上に設置され、ビームが試料上に照射されていることを確認するため試料の前後に蛍光板を取り付けた。

照射実験は以下の4つの段階に分けて行われた。

1. 16 nAビーム(約 10^{11} protons/sec.)で1020秒間、 10^{14} protons/cm²の積算線量まで照射。Nd-Fe-B試料が完全に減磁したので取り除いた。
2. 160 nAビーム(約 10^{12} protons/sec.)で1020秒間、 10^{15} protons/cm²の積算線量まで照射。
3. 1.6 μAビーム(約 10^{13} protons/sec.)で1020秒間、 10^{16} protons/cm²の積算線量まで照射。Sm₁Co₅試料が完全に減磁したので新しい試料と交換した。
4. 1.6 μAビーム(約 10^{13} protons/sec.)で9000秒間、 10^{17} protons/cm²の積算線量まで照射。Sm₁Co₅試料が完全に減磁したので新しい試料と交換した。

照射するビームの強度はビームライン上流に設置されたビームプラグ(ファラデーカップ)を挿入して測定した。照射期間中磁性体試料近傍の温度を常時モニタし、ビーム照射時の温度上昇は約60℃であった。

実験結果は図3に示す通り、 10^{17} protons/cm²の照射後でのSr-ferriteには目立った減磁は見られなかった。これは文献^[12]の結果と合致する。それに対して、REC系永久磁石ははっきりと減磁の効果が見られた。特にSm₁Co₅を 10^{17} protons/cm²照射した試料ではわずかに磁場が反転しており、CERNでの実験結果^[2]と同様の減少が見られた。Sm₂Co₁₇の方がSm₁Co₅よりも減磁の効果が少なく、CERNおよびTRIUMFでの傾向と合致する。

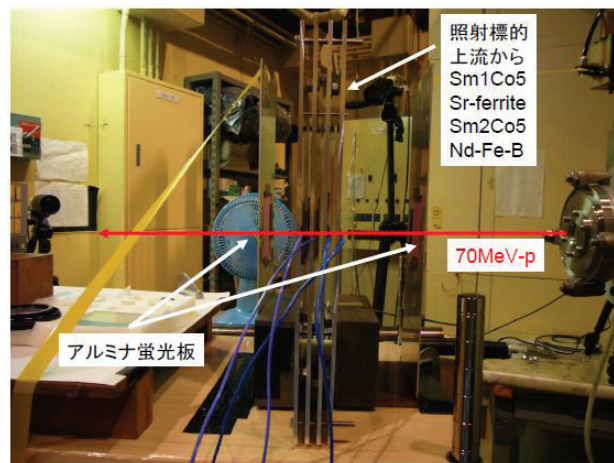


図2 CYRICでの照射試験セットアップ

4. まとめ

RGIPMに使用するSr-ferrite磁性体の放射線による減磁の効果を定量的に評価するため、対照実験としてNd-Fe-B系およびSm-Co系磁性体試料を用意して 10^{17} protons/cm²までの照射実験を行った。実験の結果、Nd-Fe-BやSm-Co系磁性体試料は放射線により減磁し、過去の実験データと同様の傾向を示した。一方、Sr-ferriteには放射線による減磁の効果は見

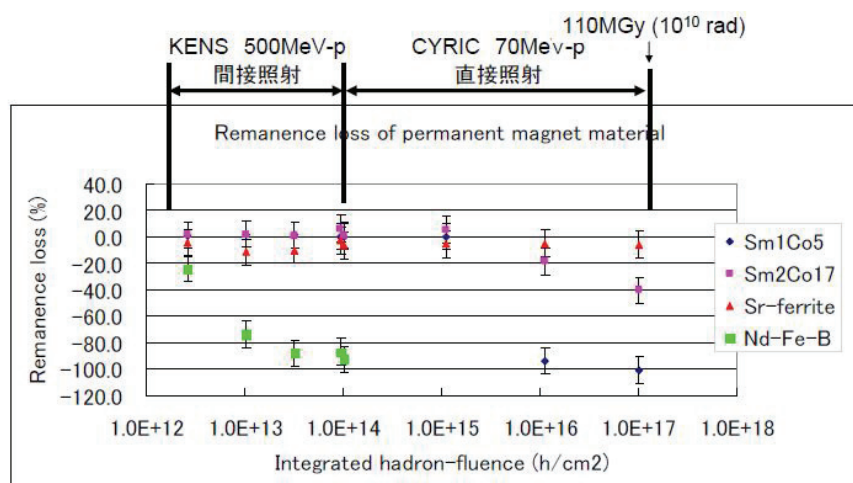


図3 KENSおよびCYRICでの照射試験結果。横軸は中性子及び陽子線の積算フルエンス、縦軸は照射後に測定された磁性体試料の表面磁場の減少率。

られなかった。MARSでの評価によると、J-PARC遅い取り出しビームラインの二次粒子生成標的付近に設置されるRGIPMは最低でも7年程度は減磁せずに使用できることがわかった。

謝辞

本研究の一部は文部科学省科学研究費補助金若手研究(B)(課題番号17740175)の補助の基に行われた。KENSでの実験に協力して頂いたKEK放射線科学研究センターのスタッフに感謝します。また、東北大学サイクロトロンRIセンターのスタッフのご協力に感謝します。

参考文献

- [1] 里嘉典他、第3回日本加速器学会年会報告書、pp.118-120 (2006).
- [2] F. Coninckx, *et al.*, CERN/SPS TIS-RP/IR/83-07.
- [3] E. W. Blackmore, IEEE Trans. Nucl. Sci. Vol. NS-32, No. 5, pp.3669-3671 (1985).
- [4] R. D. Brown and J. R. Cost, IEEE Trans. Mag., Vol. 25, No. 4, pp.3117-3120 (1989).
- [5] S. Okuda, *et al.*, Nucl. Instr. Meth. B94, pp.227-230 (1994).
- [6] Y. Ito, *et al.*, Nucl. Instr. Meth., B183, pp.323-328 (2001).
- [7] Y. Ito, *et al.*, Nucl. Instr. Meth., B191, pp.530-535 (2002).
- [8] Y. Ito, *et al.*, Nucl. Instr. Meth., B209, pp.362-366 (2003).
- [9] Y. Ito, *et al.*, Nucl. Instr. Meth., B245, pp.176-179 (2006).
- [10] H. B. Luna, *et al.*, Nucl. Instr. Meth., A285, pp.349-354 (1989).
- [11] R. F. Holsinger, Proceedings of Particle Accelerator Conference, Vol.2, pp.1305-1309 (1995).
- [12] R. S. Sery, *et al.*, "Radiation Damage Thresholds for Permanent Magnets", NOLTR 61-45, U.S. Naval Ordinance Laboratory, 1961.
- [13] 田中万博他、大強度陽子加速器施設ハドロンビームラインサブグループ第2次中間まとめ、KEK Internal 2004-3 (2004).

- [14] N.V. Mokhov, "The MARS Code System User's Guide", Fermilab-FN-628 (1995); N.V. Mokhov, O.E. Krivosheev, "MARS Code Status", Proc. Monte Carlo 2000 Conf., p. 943, Lisbon, October 23-26, 2000; Fermilab-Conf-00/181 (2000); N.V. Mokhov, "Status of MARS Code", Fermilab-Conf-03/053 (2003); N.V. Mokhov, K.K. Gudima, C.C. James *et al.*, "Recent Enhancements to the MARS15 Code", Fermilab-Conf-04/053 (2004); <http://www-ap.fnl.gov/MARS/>. MARS was developed in part with Government funding provided under DOE Contract DE - AC02 -76CH03000.
- [15] H. Matsumura, *et al.*, Radiation Protection Dosimetry Vol. 116, No. 1-4, pp. 1-5 (2005).