

高い発生磁界を持つ永久磁石の放射線照射による劣化

川久保 忠通^{A)}、中村 英滋^{A)}、楨田 顕^{B)}、青木 雅昭^{B)}、杉山 英二^{B)}、草野 譲一^{C)}

^{A)} 高エネルギー加速器研究機構 〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

^{B)} 住友特殊金属株式会社 〒618-0013 大阪府三島郡島本町江川 2-15-17

^{C)} 日本原子力研究所 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

概要

大強度加速器ではビームの形状もエネルギーも大きいので入射・取り出しに使用するセプタムマグネットのコイル電流は大きくなる。このコイルに直流電流を流せば、コイルの保持は困難でないがジュール熱による発熱が大きくなり冷却が大変である。パルス電流を流すと冷却は楽になるがコイルの支持が難しくなってくる。そこでもしこのマグネットが永久磁石で製作出来るなら、コイル板の固定と冷却という難問題が一挙に解決する。しかしながらセプタムマグネット付近はビームロスが大きく永久磁石への放射線照射量が多いので、高発生磁界を持つ数種の永久磁石の放射線劣化を各種放射線場で調べる必要がある。この件に関しては今までにも種々の報告はあるが[1],[2],[3]、本論はその追測定並びに KEK-PS に於ける測定結果である。

1 放射線劣化テスト用永久磁石試料

1.1 永久磁石材料

近年、高い発生磁界を持つ永久磁石の開発が目覚ましく、これらの材料を用いてギャップ内で 1[T]以上の磁場を発生する事が可能になった。この材料として Nd-Fe-B 焼結磁石があるが、本論では固有保磁力の異なる種々の NEOMAX (住友特殊金属 KK 社の製品名) の 47, 44H, 35EH, 32EH 等を各種放射線で照射しその減磁度を調べた。

1.2 減磁測定用試料

放射線照射による永久磁石の減磁テスト用の為に(図1)に示す試料を製作した。厚み 1.6mm のスペーサーで作られた間隙の中にホール素子を挿入してギャップ内部の磁場を測る事が出来る。当初このスペーサーとしてアクリル材を使用していた。日本原子力研究所(以後「原研」と略) FNS 施設での中性子照射や高エネルギー加速器研究機構陽子加速器(以後「KEK-PS」と略)の主リング(12GeV 陽子)での照射では問題なかったが、原研(高崎研)での ^{60}Co による γ 線照射では溶けて間隙を塞いだのでアルミ材で作直した。

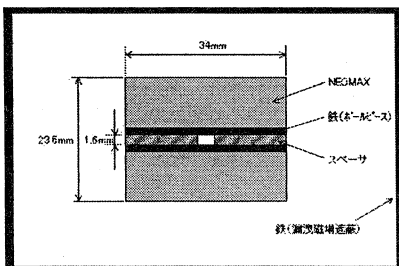


図1：永久磁石の放射線劣化テスト用試料の構造

この試料を一時に多数放射線照射する為に(図2)に示す保持箱を製作した。試料の数は放射線源によって変わっているが、この図は KEK-PS 主リング引き出し部に設置した物である。各々の試料は他の試料からの磁場影響を受けぬように鉄板で磁気遮蔽されている。試料の製作バラツキを確認する為に同じ永久磁石材料の試料を3個ずつ製作し、それを上中下と一列に配置した。この保持箱の場合、3種の試料が照射テスト出来るようになっている。引出しビームラインの高さが最も照射量が大きくなるが、その高さが中央の行になるように設置した。

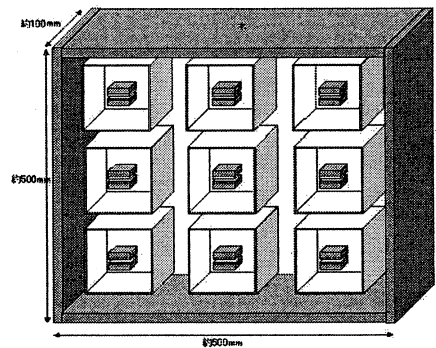


図2：永久磁石の放射線劣化テスト用試料保持箱
(注：試料の製作バラツキを確認する為に同じ列の上中下と同じ材料を装着している。別の列には異なる材質の永久磁石を配置している。中央の行が引出しビームラインの高さになるように設置してある)

2 放射線照射測定

2.1 放射線照射量モニター

永久磁石の放射線劣化テストでは γ 線や中性子線、陽子線の試料への累積照射量を測定する事が必要である。このモニターとして以下のものを用いた。

- γ 線測定用：アラニン(日立電線 KK 製の「アミノグレイ」使用、アミノ酸の一種であるアラニンを主成分としたパラフィン、フィルム等で作られた固形素子に放射線照射をすることにより、その吸収線量に比例して生じるラジカルの相対濃度を電子スピン共鳴 (ESR, Electron Spin Resonance) を用いて測定する。線量測定範囲が $1 \sim 10^5$ Gy と広い。)
- 中性子線と 12GeV ビームロスによる放射線測定用：Al 円板 ($20\text{mm} \phi * 5\text{mm}$) (Al 中に生成した Na-22 の量から高いエネルギー(30MeV 以上)の粒子(陽子, 中性子)の量を測定する。)

2.2 γ 線照射

原研（高崎研） Co^{60} 照射室で γ 線照射を行った。10MGy以上の照射を行ったが（図3）に示すように、この程度のエネルギーの γ 線によっては永久磁石の減磁は起きない事が明らかである。

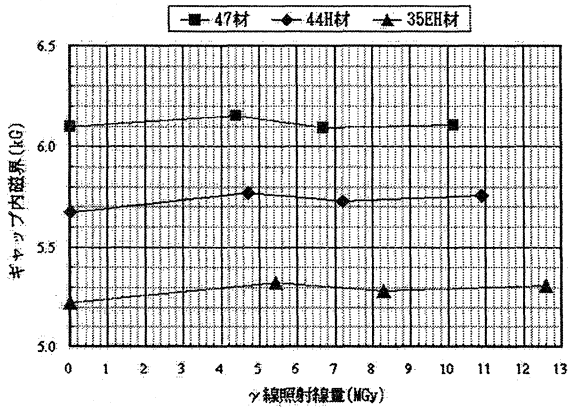


図3： Co^{60} - γ 線照射による永久磁石発生磁界の γ 線累積照射線量依存性

2.3 中性子線照射

原研（東海研）FNS 施設で14MeV 中性子線の照射を行った。（図4）に示すように、照射前と照射後の2点の測定しか出来なかったが、減磁が起きているのは明瞭である。

（図4）より、 1×10^{13} 個/cm²の中性子照射による各永久磁石の発生磁界は以下の減衰率となる。

- 47材：10.2%
- 44H材：1.8%
- 39SH材：0.7%
- 32EH材：0.3%

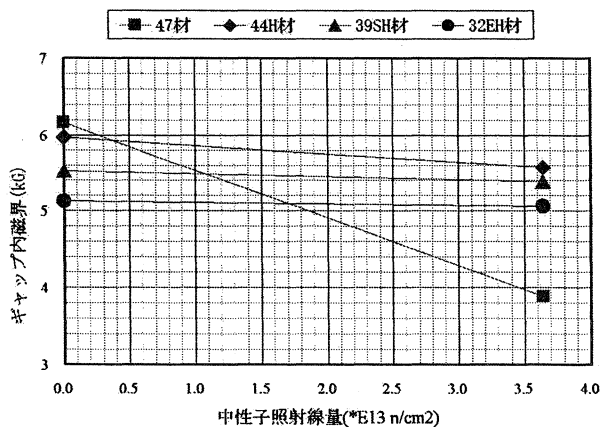


図4：永久磁石発生磁界の14MeV 中性子線累積照射線量依存性

放射線照射によって減磁した後のリバンドの効果も測定した。照射後試料を大気中（室温）に保った時の各試料

の磁場測定結果は（図5）の通りである。

照射後約15日間までに永久磁石の発生磁界は以下の増加率を示し、その後は一定となる。

- 47材：1.1%
- 44H材：1.9%
- 39SH材：2.5%
- 32EH材：1.4%

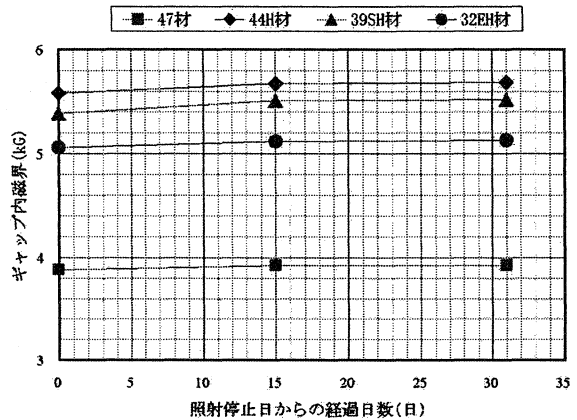


図5：14MeV 中性子線照射後の永久磁石減磁のリバンド（照射後の日経過依存性）

2.4 KEK-PS 主リング取り出し付近でのビームロスによる放射線照射

KEK-PS 主リングにはEP1ライン（北カウンターホール行き）とEP2ライン（東カウンターホール行き）の2本の取り出しラインがある。照射期間が異なるがそれぞれの場所で行った劣化テストの報告を行う。この場合の永久磁石に照射される放射線は、12GeV 陽子ビームが金属に衝突して生じる中性子線や γ 線と、陽子ビームの一部がそのまま真空ダクトを突き抜けて大気中に出て来た陽子線である。

(1) EP2 取り出しライン付近での照射

（図6）より、1kGy 当たりの放射線照射による各永久磁石の発生磁界は以下の減衰率となる。

- 47材：11.6%， 44H材：3.7%， 35EH材：1.0%

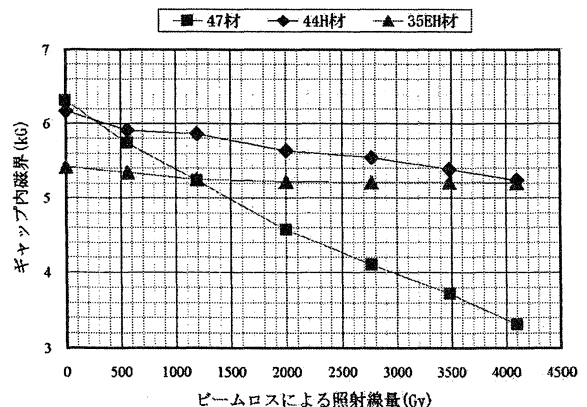


図6：主リング EP2 引出点付近での永久磁石発生磁界の12GeV ビームロスによる累積照射線量依存性

(2) EP1 取り出しライン付近での照射

(図 7) より、1kGy 当たりの放射線照射による各永久磁石の発生磁界は以下の減衰率となる。32EH 材でエージングの効果は見られない。

32EH 材(エージング無):0.34%, 32EH 材(エージング有):0.34%
35EH 材:0.54%

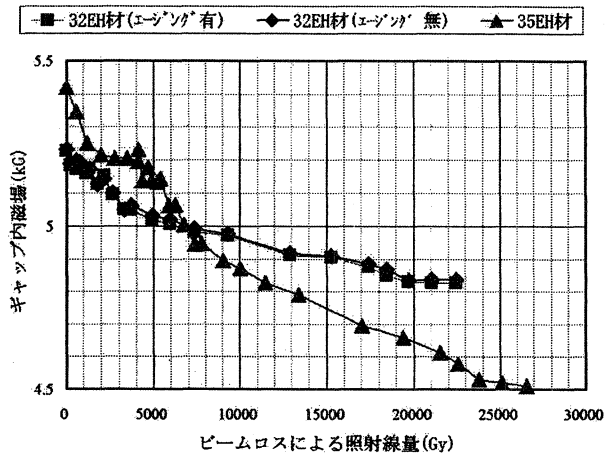


図 7: 主リング EP1 引出点付近での永久磁石発生磁界の 12GeV ビームロスによる累積照射線量依存性

2.5 永久磁石の保磁力と減磁度の関係

(図 4) の中性子線束(1×10^{13} 個/cm²)と (図 6), (図 7) の Gy の換算係数が不明なので中性子線照射での減磁測定の結果は除き、(図 6) と (図 7) の KEK-PS 主リング取り出し位置でのビームロスによる永久磁石の放射線照射による 47, 44H, 35EH, 32EH の減磁率を考える。これ等の試料の固有保磁力を横軸、1kGy 当たりの放射線照射による減磁率を縦軸に示したのが (図 8) である。固有保磁力が高い程減磁率は急激に減少する事が明瞭である[4]。(注: 35EH 材は EP1 と EP2 の測定値の平均値(0.77%)を取った。)

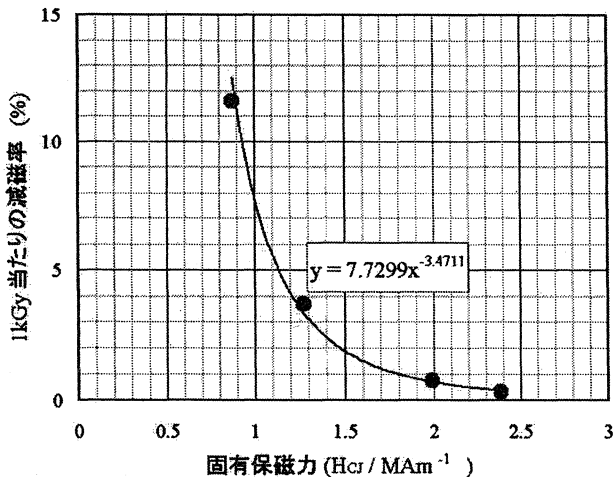


図 8: 磁石の固有保磁力に対する照射線量 1kGy 当たりの減磁率

3 今後の課題

今まで述べて来たようにこれまでに以下の仕様で測定を行った。

- 線源の種類: γ 線、中性子線、12GeV 陽子ビームロスによる放射線
- 永久磁石の磁化方向と放射線の向き: 垂直方向

この結果を踏まえ、今後は線源の種類と、磁化方向と放射線の向きの 2 点のテーマに於いて、以下に示すように各々典型的な 2 条件の場合の照射比較を行う予定である。

- 線源: 12GeV と 500MeV 陽子ビームロスによる放射線
- 永久磁石の磁化方向と放射線の向き: 垂直方向と同方向

参考文献

[1] O.-P. Kähkönen, S. Mäkinen, M. Talvitie and M. Manninen: J. Phys.: Condens. Matter 4 (1992) 1007-1014.
[2] T. Bizen, T. Tanaka, Y. Asano, D. E. Kim, J. S. Bak, H. S. Lee and H. Kitamura: Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A 467-468 (2001) 185-189.
[3] Yoshifumi Ito, Keisuke Yasuda, Ryoya Ishigami, Satoshi Hatori, Osami Okada, Ken Ohashi and Shintaro Tanaka: Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B 183 (2001) 323-328.
[4] 榎田, 川久保, 中村, 杉山, 青木, 第 27 回日本応用磁気学会学術講演概要集(2003)

謝辞

永久磁石の γ 線照射と中性子線照射時にそれぞれ多大な御協力を頂きました原子力研究所の高崎研の森下憲雄氏と FNS の落合謙太郎氏に深く御礼を申し上げます。又、KEK-PS での放射線場測定に御協力・御指導頂きました KEK の沼尻正晴氏にも感謝致します。