

平成 22 年 6 月 4 日現在

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2007～2009

課題番号：19540291

研究課題名（和文）加速器放射線損傷による永久磁石の減磁機構の微視的研究

研究課題名（英文）Microscopic studies on the demagnetization effect on permanent magnets induced by radiations from accelerators

研究代表者

谷垣 実（TANIGAKI MINORU）

京都大学・原子炉実験所・助教

研究者番号：90314294

研究成果の概要（和文）：加速器で発生した放射線（主に中性子）で希土類永久磁石が磁力低下を起こす機構を解明するため、原子炉や加速器からの様々なエネルギーの中性子を照射して減磁効果を調べた。また、不安定な原子核をビームにして磁石内に送り込み、原子核からの放射線計測で減磁に伴う内部の磁気構造や電子構造の変化を調べた。併せて磁石内に送り込むための新たな不安定な原子核や、不安定核を磁石に送り込むためのビーム化技術の開発を行った。

研究成果の概要（英文）：To investigate the mechanism on the demagnetization of permanent magnets caused by radiations (mainly neutrons) from accelerators, the degrees of demagnetization were measured for neutrons of various energies produced by a nuclear reactor and accelerators. The microscopic studies on the changes of electromagnetic structures inside the magnet caused by radiations are also performed by using radioactive nuclei as probes. Additionally, developments on the unstable nuclei as probes and the techniques on radioactive beam are performed.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
平成 19 年度	1,700,000	510,000	2,210,000
平成 20 年度	800,000	240,000	1,040,000
平成 21 年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：原子核物理・核物性・加速器科学

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：加速器放射線・放射線損傷・減磁・超微細相互作用・希土類磁性体

1. 研究開始当初の背景

磁性体素材の開発の進展により NEOMAX などの希土類元素を材料とした強力な永久磁石が開発され市販されている。電源や冷却系の不要なコンパクトかつ省エネルギーの磁場供給源として魅力が大きいことから加速器への幅広い応用も期待されており、例えば放射光施設のアングジュレータとしての応用もなされている。

しかしながら加速器への応用が進むにつれ、特に放射光施設などのアングジュレータなどに応用した際のビームに由来する放射線、特に中性子にさらされる事による磁力の低下が深刻な問題として浮上している。そのような希土類元素永久磁石での減磁効果については、照射量や永久磁石の組成とパルクとしての永久磁石の減磁の度合いをしらべるという巨視的な観点からの研究のみがなされており、それらの結果で得られた劣化の小さい素材の選択、あるいはキュリー・ワイス則を単純に適用して液体窒素等での冷却による磁化率の補完といった対症療法的な対応がおこなわれている。

その一方、そもそもの減磁の起きる素過程や減磁に伴う電子構造や内部での磁気構造などの変化といった微視的な観点からの研究はまだほとんど手が着いていなかった。放射線にさらされた磁性体中での内部の電子構造や磁気構造に関する情報が得られれば、材料設計や耐放射線性をあげるための処理方法などを検討することが可能になると考えられた。

2. 研究の目的

電源や冷却系の不要なコンパクトかつ省エネルギーの磁場供給源として魅力が大きい希土類永久磁石の加速器への応用の可能性を広げるために、その妨げとなっている放射線照射による減磁効果についての機構解明を目指す。特に従来から行われているマクロな磁化の変化だけではなく、永久磁石の結晶内にプローブ核を送り込み、プローブ核位置での電子構造や磁気構造を核物性的手法によって観測し、その内部の変化を捉える研究を行う。このこれまでで行われてこなかった微視的な観点からの研究により、従来の物性的手法ではほとんど進んでいなかった希土類永久磁石内での磁気構造や電子構造の変化の様子を知り、放射線損傷に起因する減磁過程の機構解明を行う。

3. 研究の方法

主に Nd-Fe-B 系の希土類永久磁石に対して原子炉や加速器で発生させた中性子を照射し減磁を起こす。その減磁前後の永久磁石内の磁気構造や電子構造の変化を観察するため、不安定な原子核をプローブとして送り込み、原子核が永久磁石内の磁気構造や電子構造を反映した歳差運動を起こす様子を摂動角相関法によって観察し、内部の電子構造や磁気構造の知見を得る。

摂動各相関法の特徴は、個々の不安定核の歳差運動を原子核自身が出す γ 線によって観測するため極めて感度が高く ($\sim 10^{10}$ 個/cc 程度の濃度で測定可能)、この程度の濃度はプローブ核の試料に対する溶解度に関わらず RI ビームとして試料に対して力学的に注入できること、また歳差運動を観測する際にスピン操作のための高周波磁場を必要としない点にある。従来このような磁気構造や電子構造の研究は NMR などが用いられているが、NMR の場合プローブとなる原子核による高周波磁場の吸収、あるいはプローブとなる核の集団としての磁化の変化を検出しないといけない。今回のような磁性体では表皮効果や磁気遮蔽効果によって十分内側まで高周波磁場を送り込むことができない上に、プローブ核自身の磁化の変動も観測できない。また、プローブ核が多量 ($\sim 10^{18}$ 個/cc 程度は必要) であり、そのような大量のプローブを永久磁石内に導入する際には化学的な溶解度の問題、また溶解に際しての加熱等で内部の電子構造や磁気構造が変化してしまうなどの困難がある。

実際の摂動角相関の測定では、京大原子炉に設置されているオンライン質量分析器を利用する計画であった。これは原子炉内に置いたターゲットチェンバー内の ^{235}U が原子炉の中性子によって核分裂した際にできる核分裂生成物を純度よく選別しビームとして取り出す事のできる装置である。この装置によってプローブ核を磁石中に注入し摂動角相関を行う計画であった。

4. 研究成果

19 年度は京大原子炉は現在燃料変更に伴う許認可作業中で休止状態にあったことから計測系の整備、 ^{111}Cd ($\leftarrow^{111}\text{In}$) による予備実験、および情報収集を中心に行った。

検出系の整備として磁気シールドの追加改造を計画していたため、検出器の強磁場下での特性試験を行ったところ、現在装備中の

磁気シールドでも一定量以上のプローブ核注入ができれば磁場の影響を受けにくい距離での測定も可能である事が判明した。

原子炉稼働時に原子炉の中性子を照射して NEOMAX の減磁試験を行っていたため、減磁試験で使用したサンプルを使って ^{111}Cd ($\leftarrow ^{111}\text{In}$) による摂動角相関を行った。減磁の発生しているサンプルでは摂動角相関のパターンの変化が見られる事、その変化が加熱による減磁を起こしたものと類似している事が確認でき、今回の手法の減磁機構解明への有効性を確認した。この結果を超微細相互作用に関する国際会議 (HFI 2007) に参加して発表し、あわせて核物性的手法による磁性体の電子構造研究に関する情報収集を行った。

計測の効率向上を目指しデータ処理系の改良も進めた。従来の摂動角相関用データ収集システムでは計数時にエネルギー分別などを行うため、測定中にゲインシフトなどが発生した場合データ自体が損なわれていた。そこで既存の VME モジュールを活用し多次元同時計数システムを開発した。これにより不可能であった摂動角相関のオフラインデータ処理が可能となり、実験中の検出器ゲインシフトなどに左右されない安定した測定が出来るようになった。並行して科研費で購入した MCA モジュールによる計数システムも構築し、原子炉再稼働時に様々な条件での測定を同時に行えるよう準備をした。

20 年度も原子炉が稼働せず、原子炉以外の施設において摂動角相関用プローブ核の開発を行った。19 年度後半から東北大学サイクロトロン RI センターの RF-IGISOL で強力な RI ビームが得られるようになったため、RF-IGISOL からプローブ核を得るための実験を行った。摂動角相関プローブ核の満たすべき要件は、1) 内部磁場測定に十分な精度で磁気モーメントが判っている事、2) 磁場測定を行える寿命 (ns 以上) を持つ事、3) 強力かつエネルギー及びビームスポットの広がり少ないビームとして取り出せる事である。そのようなプローブ核の候補として選んだ ^{109}Rh の 226 keV 準位、及び ^{132}I の 49.7 keV 準位についてビーム取り出しと磁気モーメント測定に成功した。

21 年度には東北大サイクロでのマシンタイムが認められたため、サイクロトロンビームを利用して生成した数十 MeV の単色中性子の照射による減磁効果の測定を行った。これまで報告されていた最大の中性子照射量の 100 倍以上の照射量を達成したが有意な減磁は見られなかった。この減磁のエネルギー依存性は減磁機構解明の糸口となる可能性があるため、引き続き単色中性子による減磁効果のエネルギー依存性や

照射量依存性のデータを蓄積する必要がある。

減磁効果探索のためのプローブ核開発も継続して行い、また初年度に開発した多次元系計測システムについて改良を加えた。すでに開発を終えていた VME 系の計測システムはデータ収集のためのプログラミングの知識が必要であったり、多数の検出器が接続可能な反面、各検出器間の信号処理の際のタイミングの扱いに難点があったため、WE-7000 シリーズの MCA モジュールを利用したリスト形式の多次元計測システムを開発した。これにより、VME システムほどの多次元測定は出来ないものの、データ取得に特別なプログラミングなしで摂動角相関測定が可能となった。

この開発した計測系と京大の Linac で得られる中性子を用い、Nd-Fe-B 系磁石の性能改善のために添加されている元素である Dy の安定同位体 ^{164}Dy を放射化して得られる ^{165}Ho の 362 keV 準位の歳差運動を摂動角相関法によって観測する事に成功した。この実験では Linac からの中性子によって Dy203 を放射化、その中に出来た ^{165}Ho について摂動角相関を行った。これは 2010 年秋の超微細相互作用国際会議で報告する予定である。現在磁気モーメントの値を最終的に確定させるための補正データを得る実験を進めており、これに成功すれば Nd-Fe-B 系磁石内の磁気構造やその中で Dy が果たす役割を知るためのツールとなる事が期待される。Dy はハイブリッドカーのモーターの実用化にはなくてはならない添加元素であり、特に希少で重要性の高い希土類元素である。そのため文部科学省および経済産業省でその使用量の低減および代替元素や手法の確立のための研究プロジェクトが立ち上げられており、今回のプローブ開発で希土類磁石での Dy の作用機序が明らかになれば、これらのプロジェクトや産業界へ大きなインパクトを与えられる可能性がある。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

1. Half-Life and Magnetic Moment of the First Excited State in ^{132}I

M. Tanigaki, S. Izumi, H. Ouchi, A. Sasaki, Y. Miyashita, N. Sato, S. Hoshino, K. Shimada, T. Wakui, T. Shinozuka, and Y. Ohkubo

Phys. Rev. C 80 (2009) 034304

2. Magnetic Properties of Rare-Earth

Permanent Magnets under a High Radiation Environment

M. Tanigaki, K. Takamiya, Y. Komeno, A. Taniguchi, and Y. Ohkubo
Hyperfine Interact. 176 (2007) 125-128.

〔学会発表〕 (計 4 件)

1. Half-Life and magnetic moment of the first excited state in ^{132}I

S. Izumi, M. Tanigaki, H. Ouchi, A. Sasaki, Y. Miyashita, N. Sato, S. Hoshino, K. Shimada, T. Wakui, T. Shinozuka, and Y. Ohkubo

第 3 回日米物理学会合同核物理分科会 2009 年 10 月 15 日 アメリカ・ハワイ州・ワイコロア

2. Current Status of KURRI

M. Tanigaki

International Workshop on "Physics with Stopped and Slow Radioisotope Beams (SSRI)" 2010 年 3 月 1 日 東京工業大学

〔その他〕

ホームページ等

京都大学学術情報レポジトリ

<http://repository.kulib.kyoto-u.ac.jp/dspace/handle/2433/87295>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

谷垣 実 (TANIGAKI MINORU)

京都大学・原子炉実験所・助教

研究者番号：90314294