

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 4 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2014

課題番号：23540341

研究課題名(和文) 中重核領域の中性子過剰核の磁気モーメント測定と希土類不純物の超微細場の研究

研究課題名(英文) Measurement of magnetic moments on neutron rich nuclei in intermediate mass region and studies on hyperfine field of rare-earth impurities

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：希土類不純物の強磁性体中の超微細場は第一原理計算の検証の場として注目されている。またこの超微細場を精度よく決定すれば原子核の励起準位の磁気モーメント測定に用いることができる。今回の研究では希土類元素であるPmの鉄中の超微細場測定を試みた。またCe-140の鉄中の摂動角相関測定から、不純物導入の際に発生する格子欠陥の挙動や試料調製の知見を得た。中間準位を直接挟まないガンマ線の相関を使った摂動角相関の検討や計測系の改良を進めた。

研究成果の概要(英文)：Hyperfine fields at impurity of rare-earth elements in ferromagnetic hosts are important for the verification of the first principle calculations. Once a hyperfine field is determined in a sufficient accuracy, this field can be used for the determination of magnetic moments of intermediate states of nuclei. In this study, the measurement of the hyperfine field of Pm in Fe was performed. Behavior of defects introduced through the implantation process of impurities was also studied by the perturbed angular correlation measurement of Ce-140 in Fe. The possibility of the perturbed angular correlation measurement using the gamma-rays that are not directly interpose the intermediate state is investigated for the magnetic moment measurement. Improvements on the measurement system is performed.

研究分野：原子核構造、核物性

キーワード：超微細相互作用 摂動角相関 希土類元素

1. 研究開始当初の背景

近年の RI ビーム技術の進展により、安定領域から遠く離れた不安定核の核構造についての議論が可能になってきている。特に $Z=50$ 、 $N=82$ の二重閉殻 ^{132}Sn 近傍から変形核の存在領域に至る中重核領域では核の多様な性質が発現する領域であり、かつ核理論の進歩で精密な取扱が可能となってきた。

このような核構造の議論にあたっては、これらの核構造を反映する電磁気モーメントの測定が重要であることから、この中重核領域でも多くのグループによって実施されているが、その際に使用している Transient Field の信頼性の問題や、その Transient Field の較正に使う核の励起準位の核磁気モーメントの信頼性が低い状況が続いており、核理論などから信頼できる磁気モーメントの系統的な測定が求められている状態であった。また、内部磁場の較正につかう核の励起準位の寿命は短い (10^{-9}s 程度) ことから、寿命の間に十分な歳差運動の確認できる強力な磁場を必要とする。このような磁場は強磁性体中の超微細場として与えられることが知られているが、強磁性体中の孤立した不純物位置における超微細場は物性理論における第一原理計算のよい検証の題材として研究が進んでいるが、不純物がランタノイドの場合の内部磁場については信頼できる実験値が少なく、十分な検証が行えない状態であった。

2. 研究の目的

本研究では、核分裂生成を利用した RI ビーム技術の発達で収量の増えた質量数 100~160 の領域の中性子過剰核に、励起準位の磁気モーメント測定技術である摂動角相関法を適用し

- ・ ^{132}Sn 近傍、ランタノイド領域の中性子過剰核の磁気モーメント測定を中心とした核構造研究
- ・ Transient Field での磁気モーメント測定への信頼できる磁場校正用プローブ核の提供
- ・ ランタノイド不純物核位置の超微細場に関する第一原理計算の検証

を進める。この領域のまだ測定されていない核の磁気モーメント測定や、既存の Transient Field による磁気モーメント測定において使用している校正用磁気モーメントを再度測定して精度を改善、この結果を元に再評価をすることで精度改善で行う。後者は今後世界各地の RI ビーム施設で進むであろう中性子ドリップライン近傍での Transient Field による測定の信頼性改善にも寄与する。

同時に、磁気モーメント決定に不可欠な物質中の原子核位置の超微細場のデータを蓄

積し、この領域の超微細場に関する第一原理計算の検証を行う。

3. 研究の方法

京大炉のオンライン質量分析器である KUR-ISOL や東北大 RF-IGISOL から取り出した中性子過剰核 RI ビームを鉄などの強磁性体中に注入、強磁性体中の不純物位置に発生する強力な超微細場を利用した摂動角相関による測定を行い、核磁気モーメントや不純物位置の超微細場を決定する。

従来励起準位の磁気モーメント測定でよく使われる Transient Field は、イオンが強磁性体中を通過するときに発生する動的な磁場であり理論的な取扱いも難しく、現象論的な経験則で推定されているのが現状である。そのためしばしば磁気モーメント既知の準位により較正されるが、例えば Nd での校正に使われている ^{146}Nd の 2^+ 準位の磁気モーメントはいくつかのグループが測定しているが、いずれも校正無しの Transient Field で決定されている上に、それぞれの報告値も $\mu = +0.64 \pm 0.08 \sim +0.83 \pm 0.09 \mu_N$ と誤差の範囲でも一致していない。一方、超微細場は物質中の不純物核の位置に静的に発生する磁場であり、経験則に基づく Transient Field と異なり数多くの不純物元素で高い精度で決定され (Fe 中 Nd の超微細場は $307 \pm 71 \text{ T}$ 、Ni 中では $69 \pm 6 \text{ T}$)、その機構も第一原理計算で一定の精度で与えられる程度に理解されており、磁気モーメント測定に適していると言える。

そこで、この超微細場により Transient Field 校正用の磁気モーメントを精度よく決定すれば、Transient Field による従来の測定結果や、今後世界各地の RI ビーム施設で行われるであろう中性子ドリップライン近傍の Transient Field によるモーメント測定の信頼性改善に寄与できる。また、この超微細場を精度よく決めることができれば、第一原理計算のより詳細な検証が可能となり、物性理論の進展にも寄与する。

このように、今回の研究では、一見関係なさそうに見える原子核と物性という分野が、超微細相互作用や摂動角相関法で結びつけられている。

4. 研究成果

今回の研究期間においては、主要な研究場所として想定していた東北大学サイクロトロン RI センターのオンライン質量分析器と京都大学原子炉実験所の原子炉が、それぞれ東日本大震災による被災からの復旧作業 (東北大学) と原発事故等に伴う新規制対応や RI 使用施設建屋改修や使用再開のための許認可手続き中 (京都大学) のために施設が利用できず、当初の計画通りの研究が行えなかった。しかし、京大炉がごく短期間利用可能であったため、その期間に行えた測定データの

解析や、利用再開時に備えた測定系の整備や測定手法のシミュレーションを実施、施設等の利用の再開時に直ちに当初の目的が達成できる状態を構築した。

1) ^{147}Pm の 91 keV 準位の鉄中の摂動角相関測定

24 年度末～25 年度初頭にかけて一時的に京大原子炉が再稼働したため、今回の研究目的である鉄中での希土類元素不純物の内部磁場の測定として、鉄中の ^{147}Pm の 91 keV 準位について摂動角相関法による測定を実施し、内部磁場の決定を試みた。

第一原理計算の予測や過去の核整列法による測定の結果から、超微細磁場の値は 100～500 T と予想された。そこで、比較的磁場の低い領域の場合適用可能な時間微分型摂動角相関で 100 T 程度の可能性を検証した。

京大原子炉に設置されたオンライン質量分析器(KUR-ISOL)より ^{147}Nd ビームを取り出し、これを 100 keV まで再加速して鉄中に注入した。 ^{147}Nd の崩壊に伴って生成される ^{147}Pm 91 keV 準位(図 1)について 4 カウンター法および 3 カウンター法による時間微分型摂動角相関の測定を実施した(図 2, 3)。

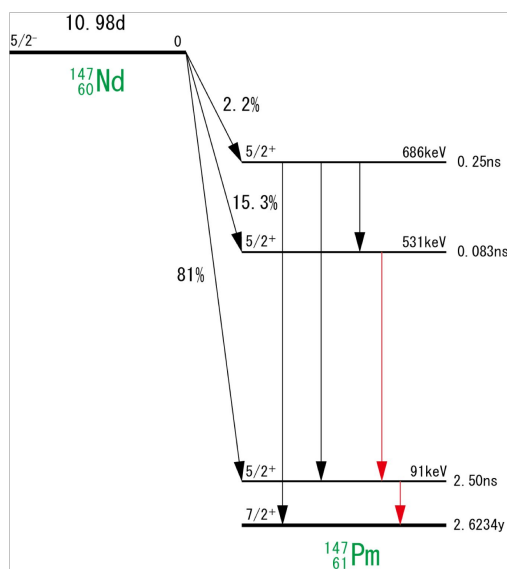


図 1 ^{147}Nd の崩壊様式

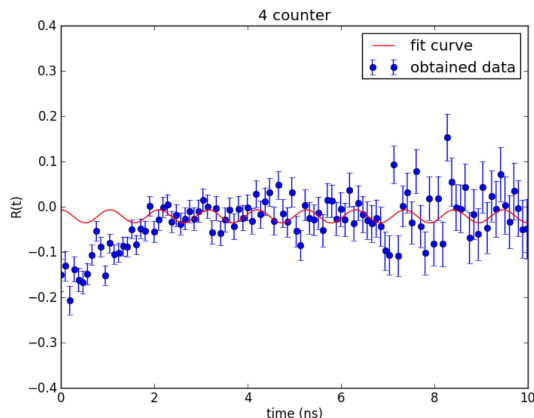


図 2 4 カウンター法での摂動パターン

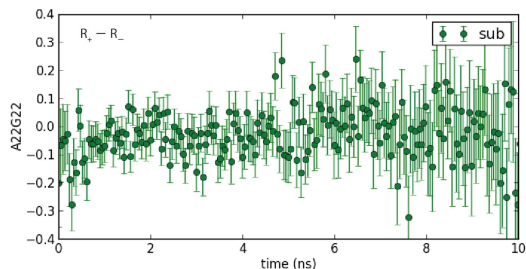


図 3 3 カウンター法での摂動パターン

4 カウンター法および 3 カウンター法それぞれの方法では誤差の範囲で一致しないものの、想定した超微細磁場の 1/10 である 20～50 T という値が得られた。これは他の希土類元素の内部磁場の実測値との系統性などからみても極めて小さく、Pm が鉄結晶の鉄原子の置換位置に入っているという前提から見直す必要を示唆している。この鉄結晶中の Pm 位置の同定には、温度や注入条件を変えた摂動角相関法測定が必要であるが、原子炉が再び新規規制対応のための運転休止期間に入ってしまったため行えていない。

また、測定データの再解析により、今回摂動角相関に使用した カスケードよりも角相関の非対称度が大きく、かつ分岐比も大きい 319 keV - 91 keV の カスケードが使えることがわかった。次回原子炉が稼働した際にはこのカスケードでの摂動角相関測定も試みる予定である。

以上の結果はオーストラリアのキャンベラで 2014 年に行われた HFI/NQI 2014 で発表した。

2) ^{140}Ce の鉄中の摂動角相関測定

今回の研究にあたっては、希土類元素を鉄中の置換位置に適切に導入し、周辺に余計な相互作用をする格子欠陥や歪みなどが存在しない必要がある。そのため、希土類元素であり磁気モーメントが既知である同位体の ^{140}Ce を強磁性体である鉄中に導入し、Ce 近傍の格子欠陥の影響を調べた。格子欠陥は線照射などで人工的な導入も試みた。その照射の順序や照射後の焼鈍過程によって格子欠陥の挙動が異なることがわかり、超微細磁場測定の際の試料調製の知見を得られた。この結果はオーストラリアのキャンベラで 2014 年に行われた HFI/NQI 2014 で発表した。さらにこれらの結果をもとに ^{140}Ce の励起準位の磁気モーメントの再評価を試みた。

3) 測定対象準位を直接挟まない 線カスケードによる摂動角相関法の検討

摂動角相関測定では測定対象となる励起準位を挟む カスケードを利用する。しかし、複雑な励起準位の構造を持つ希土類元素領域の原子核の場合、その一方のエネルギーが極めて低い場合があり、その低いエネルギーの遷移自身を観測するより、そこに連続し

た遷移を観測する方が容易な場合がある。この場合でも一定の角相関が得られ、摂動角相関法が適用可能なこと、またそのような例が本研究以前に行った Rh 同位体の摂動角相関測定でみられることを明らかにした。この検討結果は 2012 年に北京で開催された HFI/NQI 2012 で発表している。

4) 計測系の整備

本研究の手法である摂動角相関法を実施するために必要な計測系の整備を実施した。

まず、摂動角相関では核の励起準位中の歳差運動を観測することからその励起準位を挟む二つの線の角相関を効率よく捉える必要がある。このためには、十分な時間分解能ないし角度分解能を持った検出器を多数用意し、これらの同時計数の組み合わせを漏れなく取り込む必要がある。そのため、エネルギー分解能の高い CdTe 系検出器の採用を目指し、LabVIEW を使用して検出器からのエネルギー情報から迅速に波高スペクトルを構成するソフトウェアを開発した。また、多数の検出器をつかって目的の二つの線の角相関を測定できるようにするための測定プログラムの開発も行った。

さらに時間分解能の改善のため、様々な手法を調査した。特に分散制御系でも高い時間分解能を達成できる WhiteRabbit という手法を調査した。

5) RI ビームの質の向上

本研究で用いるオンライン質量分析器からのビームの質を向上させ、目的外の原子核の混入を防いだり、試料中への注入条件の制御ができるようにした。特に東北大学サイクロ RI センターのオンライン質量分析器において、震災からの復旧作業とともにイオン源部分に SPIG を導入し、Xe の安定核を用いた評価では質量分析器の分解能が大幅に改善されたことを確認した。東北大学サイクロ RI センターのオンライン質量分析器の再稼働とそこで実際に RI を取り出してみても性能確認が待たれる。

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 0 件)

[学会発表](計 3 件)

Y. Ohkubo, A. Taniguchi, Q. Xu, M. Tanigaki, K. Sato, TDPAC studies of interaction between He and A = 140 elements in Fe, September 22-26, 2014, HFI/NQI 2014, Canberra, Australia.

M. Tsuneyama, M. Tanigaki, A. Taniguchi, Q. Xu, Y. Ohkubo, TDPAC measurement of hyperfine fields at Pm impurities in Fe,

September 22-26, 2014, HFI/NQI 2014, Canberra, Australia.

M. Tanigaki, Y. Miyashita, K. Shimada, T. Wakui, T. Shinozuka, Y. Ohkubo, PAC MEASUREMENTS in TRIPLE CASCADE TRANSITIONS, September 10-14, 2012, HFI/NQI 2012, Beijing, China.

[図書](計 0 件)

[産業財産権]
出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

[その他]
ホームページ等

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