

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 4 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23540335

研究課題名(和文)二重共鳴法による不安定核偏極生成装置の高度化

研究課題名(英文)Improvement of a spin polarizing system for unstable nuclei

研究代表者

涌井 崇志(WAKUI, TAKASHI)

東北大学・サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター・助教

研究者番号：70359644

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円、(間接経費) 1,200,000円

研究成果の概要(和文)：核磁気モーメントを質量数40以上の中性子過剰核を含めた幅広い領域にわたって系統的に決定するために、不安定核のスピン偏極生成手法の確立を目指している。本研究では、真空中、常温かつ低磁場という従来の核スピン偏極生成技術では実現されていない条件下で偏極生成が可能なスピン偏極生成・移行装置の高度化を行った。今回行った高度化は主として、偏極生成により適した励起光源の導入と、それに伴う結晶の温度上昇による偏極生成効率の低下を抑えるための結晶冷却機構の導入などである。これらの改良を行った後に偏極生成試験を実施し、その結果、本研究以前と比較して、偏極度を12.5倍に増大させることに成功した。

研究成果の概要(英文)：To study nuclear moments of neutron-rich nuclei in medium mass region, we have been developing a nuclear spin polarizing system for unstable nuclei. The system is used at CYRIC with slow R1 beam from the RF ion guide isotope separator on-line. The system thus works in vacuum, room temperature, and low magnetic field, under which nuclear spin polarization has not been realized so far. In this study, we have newly installed an Ar-ion laser instead of a Nd:YAG laser for the optical excitation, and a cooling mechanism for the crystal in which protons are polarized. After the optimization of polarization parameters such as pulse width and repetition rate for the laser and temperature of the crystal, we have conducted polarizing tests. From the results, the polarization is more than 10 times higher than that before this study. We have succeeded in increasing the polarization by the improvement of the polarizing system.

研究分野：数物系科学

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：スピン偏極 不安定核 芳香族分子 固体標的

### 1. 研究開始当初の背景

核磁気モーメントは、陽子と中性子に対するスピン  $g$  因子と軌道  $g$  因子の符号や大きさがそれぞれ大きく異なるために、価核子が占有する単一粒子軌道とその混合度を知るうえで強力な観測量である。しかし、安定線から離れた不安定核に対する研究は、偏極不安定核ビームの生成が可能であった質量数 20 前後までの軽核領域や、レーザー核分光が比較的容易なアルカリおよびアルカリ土類元素に限られており、中重核領域を含めた幅広い不安定核を対象とするには至っていない。これまでの軽核領域での実験的研究から、特異な構造を持つ原子核の出現や殻構造の目覚ましい変化が発見されたことを踏まえると、核磁気モーメントの測定を含めた核構造の実験的研究を今後、質量数 40 以上の中重核領域にまで展開していく必要がある。

不安定核の核磁気モーメントの測定では、核スピン偏極と  $\beta$ -NMR 法との組み合わせが絶大な威力を発揮する。その鍵を握る不安定核のスピン偏極生成法として、これまで入射核破砕法や光ポンピング法、そして超低温核偏極生成法などが用いられてきた。これらの手法は、スピン偏極生成が困難な元素あるいは核種が存在することや、偏極度が低いなどの問題を有しており、中重核を含めた幅広い領域の不安定核を偏極させ得る偏極生成法は確立されていない。最近、スピン整列した不安定核ビームの生成技術が確立され、中重核領域へとその応用が広げられ始めており、今後の展開が期待されている。

一方、我々の研究グループでは、オンライン同位体質量分離法 (ISOL 法) を用いた低速不安定核ビーム生成装置として、RF イオンガイド型同位体質量分離装置 (RF-IGISOL) を開発し、核分光実験を行っている。RF-IGISOL ではサイクロトロンからの陽子ビームを薄いウラン標的に照射することにより核分裂反応を起こし、質量数 90 から 150 の領域の中性子過剰核を生成している。生成した中性子過剰核に対し、微分型摂動角相関法 (TDPAC) を用いて、励起状態の磁気モーメント測定を行っている。しかし、PAC 法はその測定原理のために、基底状態の磁気モーメントを測定手法にはなり得ない。そこで、我々は、基底状態の磁気モーメントを測定するための偏極生成法として、交差偏極法を応用した二重共鳴法を提案し、開発を進めている。

### 2. 研究の目的

質量数 40 以上の中重核を含めた幅広い領域にわたる不安定核を偏極させ得る偏極生成手法の確立に向けて、二重共鳴法による核偏極生成手法やそれを実現する偏極生成装置の開発を進めてきた。不安定核としては、東北大学サイクロトロン・ラジオアイソトープセンターにおいて開発された RF イオンガイド型同位体質量分離装置 (RF-IGISOL) を

活用し、そこから取り出される低速な不安定核ビームを用いることを前提に核スピン偏極生成技術の確立を進めている。そのため、真空中、常温、かつ低磁場という従来の核スピン偏極生成技術では実現されてない条件下で、高偏極度を実現する事が必要である。また、ここで開発・高度化される不安定核偏極技術は、低速不安定核ビームを供給する他の研究施設での利用も視野に入れ、進めている。これによって研究対象となる核種にとって最適な施設での研究の展開が可能となる。本研究は、これまでに開発を進めてきた偏極生成装置の高度化を目的としている。

### 3. 研究の方法

不安定核偏極の生成は以下の 3 つのステップで行う。

- (1) 芳香族分子結晶を用いた固体標的中の陽子を偏極させる。陽子偏極生成ではまず、レーザー光を照射し、励起三重項状態の副準位間に電子スピン整列を生成する。この電子スピン整列を電子スピン共鳴の断熱通過法を応用した交差偏極法により陽子へと移行する。
- (2) 標的結晶の表面付近に RF-IGISOL で生成、引き出された低速不安定核ビームを止める。
- (3) 二重共鳴型の交差偏極法により陽子偏極を不安定核へと移行する。偏極移行では、陽子と不安定核の各々に共鳴する周波数の RF パルス照射する。その際に、印加する RF パルスの強度を調整することにより、交差偏極を実現し、陽子から不安定核へと偏極移行する。

ステップ(1)では、芳香族分子結晶として、陽子偏極の種となるペンタセン分子をドーブした p-タフェニル結晶を用いる。p-タフェニル結晶は、ペンタセン分子のドーブに適し、かつ真空中での昇華性が低い。室温かつ真空中で偏極生成が可能な p-タフェニル結晶を用いることで、RF-IGISOL からの低速不安定核ビームを結晶に直接入射することが可能となる。図 1 にペンタセンをドーブした p-タフェニル結晶を示す。



図 1 : ペンタセンをドーブした p-タフェニル結晶

この手法により不安定核偏極生成を実現

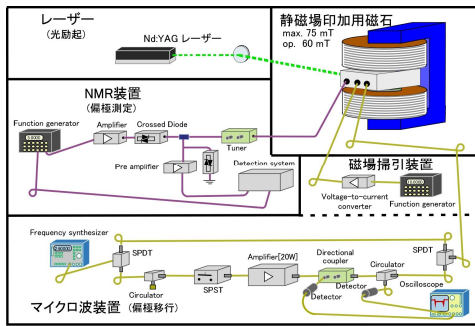


図 2：偏極生成装置の概略図

する偏極生成装置を図 2 に示す。この偏極生成装置は、以下の装置で構成されている。

結晶を設置し、低速不安定核ビームを入射するための真空チェンバーと、スピンの量子化軸を決めるための静磁場印加用電磁石

芳香族分子中の電子スピンを整列させる励起光源

電子スピン整列を陽子偏極へと移行するための電子スピン共鳴装置

陽子の偏極度測定と交差偏極法のための核磁気共鳴装置

本研究ではまず、の真空チェンバーとして、RF-IGISOL ビームラインへの接続に適し、かつ結晶や偏極生成装置の設置が可能なものを新たに製作した。真空チェンバー内には、結晶のほかに電子スピン共鳴用のマイクロ波共振器(ループギャップ共振器、LGR)と磁場掃引用コイル、偏極度測定や交差偏極法に用いる NMR コイルなどが設置されている。

また、静磁場印加用磁石としては、これまで磁場強度可変型永久磁石を用いていたが、新たに製作した真空チェンバーの設置や、-NMR 用検出器の配置を考慮すると磁極間隔が狭いという問題があった。そこで、従来、摂動角分布(PAD)法での測定に使われていた C 型電磁石を新たに導入した。図 3 に導入した C 型電磁石と真空チェンバーを示す。この C 型電磁石は、PAD 測定用に磁極間隔が 20 mm、磁極直径が 35 mm となるポールチップが取り付けられており、そのままでは偏極生成に用いることができない。そこで、導入に際し、偏極に必要な磁場強度、磁場均一度、磁極間隔などについてシミュレーション計算を行って検討し、その結果をもとに PAD 測定用に最適化されていたポールチップに改良を加えた。改良後は、磁極間隔を 90 mm、



図 3：導入した電磁石と真空チェンバー

磁極直径を 147 mm とした。この状態で水中の水素核の NMR を用いて磁場均一度を測定した結果、 $1 \times 10^{-4}$  と得られ、偏極生成に十分であることを確認した。

次に、の励起光源を変更した。励起光源にはこれまで Nd:YAG レーザーを用いてきたが、このレーザーはピーク出力が 100 mJ/pulse と高いものの、パルス幅が 3 ns と短いうえに、繰り返し率が 20 Hz と低いためデューティー比が小さく、陽子を十分に偏極することができない。そこで、光励起効率を上げるために、Nd:YAG レーザーの代わりに Ar イオンレーザーを導入した。導入した Ar イオンレーザーの出力は 25 W である。Ar イオンレーザーは、連続波出力であるが、光チョッパーを用いることでデューティー比やパルス幅を任意に設定でき、偏極生成に最適化することが可能となった。

p-タフェニル結晶中の陽子の偏極緩和率は、300 K 前後で低くなることが知られている。Ar イオンレーザーの導入に伴い、結晶に照射される励起光の平均出力が増大する。励起光照射時の温度上昇が偏極緩和率を増加し、到達偏極度が下がる事を抑えるため、本研究では結晶の冷却機構を真空チェンバー内に導入した。

#### 4. 研究成果

新たに導入した結晶の冷却機構は、金属製のロッドを結晶に接触させ、熱伝導により冷却する方式である。この場合、電子スピン共鳴に用いる LGR と金属製のロッドとの間に干渉が生じ、LGR が電子スピン共鳴周波数でマイクロ波回路と共振しなくなる可能性がある。そこで、いくつかの金属製ロッドの直径に対して、LGR の共振が取れるかを調べた。その結果、直径 16 mm の LGR に対して直径が 8 mm までの金属製ロッドであれば LGR とマイクロ波回路の結合を妨げないことを確認した。さらに、レーザー光を照射した状態で冷却機構を動作させ、レーザー光出力と結晶温度との関係を測定した。その結果、結晶に照射されるレーザー光出力が 1 W の場合に、結晶温度を 10 まで冷却できることを確認した。

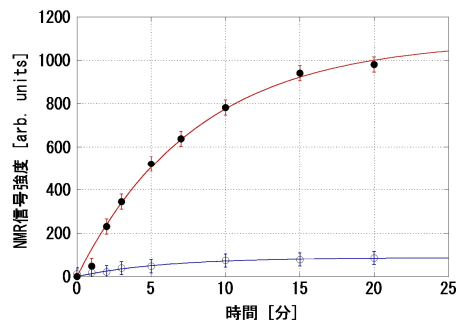


図 4：偏極の時間発展

これらの改良を行った後、偏極パラメータの最適化を実施し、最適化されたパラメータ

を用いて、偏極生成を行った。偏極生成により得られた偏極時間発展の結果を図4に示す。図中の黒丸は、本研究で偏極生成装置を高度化した後に Ar イオンレーザーを用いて偏極生成を行った結果である。一方、白丸は偏極生成装置を高度化する前に Nd:YAG レーザーを用いて偏極生成した結果である。また、実線はそれぞれを関数フィットした結果である。関数フィットの結果から、NMR 信号の到達強度は、高度化後の場合で 1092、高度化前の場合で 87 となり、今回の高度化により、高度化前と比較して、到達偏極度をおよそ 12.5 倍に増大させることに成功した。

#### 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 17 件)

S. Sakaguchi, T. Wakui(9 番目)他 7 名、Proton polarization in photo-excited aromatic molecule at room temperature enhanced by intense optical source and temperature control、Nucl. Instrum. and Methods B、査読有、317 (2013) 679-684.

DOI:10.1016/j.nimb.2013.07.067

T. Furukawa, T. Wakui(2 番目), T. Shinozuka(30 番目)他 30 名、Novel nuclear laser spectroscopy method using superfluid helium for measurement of spins and moments of exotic nuclei、Nucl. Instrum. and Methods B、査読有、317 2013 年、590-594  
DOI: 10.1016/j.nimb.2013.08.023

X. F. Yang, T. Wakui(3 番目), T. Shinozuka(28 番目)他 28 名、Control of stopping position of radioactive ion beam in superfluid helium for laser spectroscopy experiments、Nucl. Instrum. and Methods B、査読有、317、2013 年、599-602

DOI: 10.1016/j.nimb.2013.07.068

T. Sonoda, T. Shinozuka(10 番目), T. Wakui(11 番目)他 21 名、Development of a resonant laser ionization gas cell for high-energy, short-lived nuclei、Nucl. Instrum. and Methods B、査読有、295、2013 年、1-10

DOI: 10.1016/j.nimb.2012.10.009

S. Sakaguchi, T. Wakui(19 番目)他 17 名、Shallow and diffuse spin-orbit potential for proton elastic scattering from neutron-rich helium isotopes at 71 MeV/nucleon、Phys. Rev. C、査読有、87、2013 年、021601(R)

DOI: 10.1103/PhysRevC.87.021601

[学会発表](計 15 件)

園田哲、RIBF-SLOWRI 共鳴イオン化レー

ザーイオン源(PALIS)の開発とレーザー核分光への応用、日本物理学会 2013 年秋季大会、2013 年 9 月 20 日~2013 年 9 月 23 日、高知大学

川瀬頌一郎、偏極陽子標的を用いた陽子ノックアウト反応による 14,22,240 のスピン軌道分離の研究 II、第 68 回日本物理学会年次大会、2013 年 3 月 26 日~2013 年 3 月 29 日、広島大学

河原朋美、ペンタセン分子の光励起三重項状態の時間発展とその温度依存性、第 68 回日本物理学会年次大会、2013 年 3 月 26 日~2013 年 3 月 29 日、広島大学

K. Shimada、Recent activities with RF-IGISOL at CYRIC、EMIS2012(XVI International conference on electromagnetic isotope separators and techniques related to their applications)、2012 年 12 月 2 日~2012 年 12 月 7 日、松江

T. Sonoda、Development of a gas cell-based laser ion source for RIKEN PALIS、EMIS2012(XVI International conference on electromagnetic isotope separators and techniques related to their applications)、2012 年 12 月 2 日~2012 年 12 月 7 日、松江

#### 6. 研究組織

##### (1)研究代表者

涌井 崇志 (WAKUI, TAKASHI)

東北大学・サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター・助教

研究者番号：70359644

##### (2)研究分担者

篠塚 勉 (SHINOZUKA, TSUTOMU)

東北大学・サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター・非常勤講師

研究者番号：10134066