

平成 23 年 5 月 23 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20540290

研究課題名(和文) 二重共鳴法による新しい不安定核偏極生成法の確立

研究課題名(英文) Development of a new method for polarizing 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

研究成果の概要(和文)：

本研究では、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、不安定核のスピンの偏極生成手法の確立を目指して、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・移行装置の開発を行った。研究期間内には不安定核の偏極生成には至らなかったが、今後さらに開発を進め、システムの完成を目指している。

研究成果の概要(英文)：

In order to study nuclear moments of neutron-rich nuclei in medium mass region, we have developed a proton spin polarizing system and polarization transfer system. This system will be used with slow RI beam from the RF ion guide isotope separator on-line at CYRIC. The system thus works in vacuum, room temperature and low magnetic field strength, in which nuclear spin polarization has not been realized so far. Although a spin polarization of unstable nuclei has not been achieved in the term, the system will be completed in the near future, together with further development of spin polarizing system.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2009 年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2010 年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

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これまでの研究は、レーザー核分光が容易なアルカリおよび

アルカリ土類元素や、偏極不安定核ビームの生成が可能な質量数 20 前後までの軽核領域に限られており、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、特異な構造をもつ原子核の出現や殻構造の変化に伴う魔法数の変容といった核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、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 β -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、光ポンピング法、そして超低温核偏極法などが用いられている。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。

2. 研究の目的

本研究は、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が目的である。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を確認する。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技術では実現されていない条件下で偏極生成を可能とする事が必要である。また、ここで開発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も利用できるものとする。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研究の展開が可能となる。

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 から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。

この手法による不安定核偏極生成を実現するために、本研究では以下のことを計画した。

- (1) 陽子偏極生成装置の開発。
- (2) 陽子偏極生成装置に二重共鳴型の交差偏極法を導入。
- (3) 核磁気モーメントが既知の原子核を用いて核偏極生成手法の実証。
- (4) 供給装置である RF-IGISOL を改良し不安定核の収量増加を図る。

上記(1)の陽子偏極生成装置は、(a)芳香族分子結晶中の電子スピンを整列させる励起光源、(b)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、(c)陽子の偏極度を測定するための核磁気共鳴装置、そして、(d)標的チェンバーと磁石で構成される。偏極装置の概略図を図 1 に示す。また、芳香族分子として、ペンタセン分子を少量ドープした p-タフェニル分子を用いた。

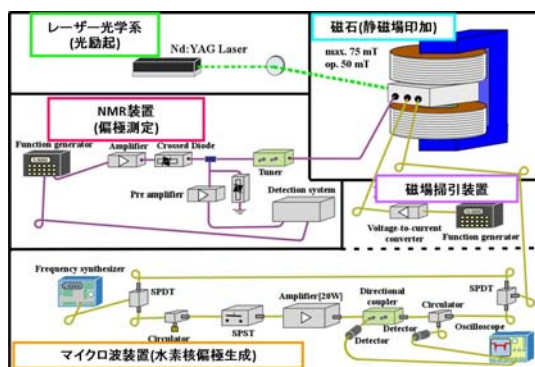


図 1: 陽子偏極装置の概略図

本研究では(a)として既有的の Nd:YAG レーザーを導入している。このレーザーはピーク出力が高いものの、デューティー比が小さく陽子を十分に偏極させる事ができない。そこで光励起効率を上げるために Nd:YAG レーザーからの高出力短パルス光の長パルス化を行った。その光学系を設計・開発し、3 ns のパルス幅を 34 ns まで拡大した。

これと平行して(b)の電子スピン共 (ESR) 装置と(c)の核磁気共鳴 (NMR) 装置の導入を進めた。ESR 用共振器の直径は、RF-IGISOL からの低速不安定核ビームの広がりと同程度の 16 mm とした。また、共振周波数は共振器のサイズが 1/4 波長よりも十分に大きくなるよう 2.5 GHz と設定した。この ESR 用の共振器と NMR 用の RF コイルは互いに干渉し、マイクロ波の放射による損失や NMR 感度の低下を招く。これを避けるために、陽子偏極生成時は NMR コイルを、また陽子偏極観測時には ESR 共振器を干渉しない距離まで外部から移動可能な機構を導入し、周波数帯の異なる ESR と NMR にたいしてインピーダンス整合を取ることに成功している。

外部磁場を与える(d)の磁石としては、既存の磁場強度可変型永久磁石を導入した。導入にあたり、陽子偏極生成と観測に十分な磁場均一度が得られるようシミュレーション計算を行い、その結果をもとに改良を加えた。ペンタセン分子の励起三重項状態の二つの電子スピン共鳴磁場は、周波数 2.5 GHz に対してそれぞれ 60 mT (低磁場遷移) と 113 mT (高磁場遷移) である。

開発した陽子偏極生成装置の NMR に(2)の二重共鳴型交差偏極法を導入した。本研究では単一の NMR コイルを偏極移行前後の二つの核種の共鳴周波数に同調させる方式とした。

4. 研究成果

不安定核の偏極生成ではその偏極のもととなる陽子の偏極度をいかに高くするかが重要である。陽子の到達偏極度は、レーザー照射による電子スピン整列生成と電子スピン整列から陽子への偏極移行によって決まる偏極生成率と、陽子偏極が縦緩和する緩和率との間の競争過程によって決まる。

まず、磁場 60 mT の低磁場遷移を用いて陽子偏極生成を行った。その時間発展から偏極生成時間を求めたところ 3.6 ± 0.9 分であった。一方、偏極生成を止めて測定した偏極緩和時間は 4.0 ± 0.4 分であった。

同様に磁場 113 mT の高磁場遷移を用いて陽子偏極生成時間を測定したところ、 5.2 ± 0.9 分であった。113 mT での偏極生成時間が低磁場遷移の場合より長いのは、分子運動による偏極緩和が抑制されているためであると考えられる。測定した偏極緩和時間は 11.9 ± 2.5 分であった。これは 60 mT の場合と比較しておよそ 3 倍の長さである。また、およそ 12 分の偏極緩和時間は、過去に 300 mT で測定された偏極緩和時間と同程度である。つまり分子運動の偏極緩和率への影響は 113 mT 以下の磁場で現れることがわかる。このことから、RF-IGISOL の不安定核ビーム径の制約から設定したマイクロ波周波数 2.5 GHz で偏極生成を行う場合、陽子の偏極生成には高磁場遷移が有効であることがわかった。

偏極生成時の偏極緩和率を求めるために、レーザー光照射のみを行った状態で偏極緩和率を測定した。その結果、偏極緩和時間は 7.4 ± 1.0 分となった。この結果と偏極生成時間を用いて、電子スピン整列から陽子偏極への偏極移行効率を求めると 0.3 ± 0.2 であった。ペンタセン分子の光励起三重項状態における電子スピン整列として知られている値 73% を仮定した場合、陽子偏極度は $22 \pm 15\%$ となる。

陽子の偏極生成に成功したことから、開発した偏極移行装置を用いて、磁気モーメントが既知の原子核に陽子偏極移行を行った。偏極移行先の核種として、まずは分子結晶中に

含まれる ^{13}C への偏極移行を行った。

本研究で開発した偏極生成装置は幸い東北地方太平洋沖地震による被害が無かったため、今後は、陽子偏極の生成効率を向上させるために、励起光源や偏極生成パラメータの最適化を図りながら開発を進める。東北大学サイクロトロン・ラジオアイソトープセンターの加速器施設が復旧され次第、RF-IGISOL からの低速不安定核ビームを結晶中に植え込み、陽子から不安定核への偏極移行を行っていく。

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 11 件)

以下に主要な 5 件を記載する。

- (1) “Analyzing power for proton elastic scattering from the neutron-rich ^6He nucleus”, T. Uesaka, S. Sakaguchi, T. Wakui 他 33 名(33 番目), Phys. Rev. C82, (2010) 021602(R). 査読有
- (2) “Polarized solid proton target in low magnetic field and at high temperature”, T. Uesaka, T. Wakui 他 3 名(5 番目), Proceedings of PST2009 (2010) 154-161. 査読無
- (3) “Pulse structure dependence of the proton spin polarization rate”, T. Kawahara, T. Wakui 他 3 名(5 番目), Proceedings of PST2009 (2010) 162-169. 査読無
- (4) “Improvement in cross-polarization system for radioisotope polarization”, S. Izumi, T. Wakui, K. Shimada, T. Shinozuka, CYRIC Annual Report 2009, (2010) 19. 査読無
- (5) “Half-life and magnetic moment of the first excited state in ^{132}I ”, M. Tanigaki, T. Wakui, T. Shinozuka 他 8 名(9 番目), Phys. Rev. C80 (2009) 034304. 査読有

[学会発表] (計 5 件)

- (1) “不安定核偏極のための交差偏極装置の開発”、泉さやか、涌井崇志、島田健司、篠塚勉、上坂友洋、平成 22 年度 KUR 専門研究会「短寿命核および放射線を用いた物性研究(II)」、2010 年 11 月 24 日、京都大学原子炉実験所
- (2) “不安定核偏極に用いる交差偏極装置の開発”、泉さやか、涌井崇志、島田健司、篠塚勉、上坂友洋、日本物理学会 2010 年秋季大会、2010 年 9 月 11 日、九州工業大学

- (3) “Recent activities with Tohoku-RF-IGISOL”, K. Shimada, 他 11 名(6 番目), International Workshop on slow and stopped radioisotope, 2010 年 3 月 1 日, 東京工業大学
- (4) “Recent activities with slow and stopped RI at Tohoku-Cyclotron” T. Wakui, K. Shimada, S. Hoshino, H. Ouchi, A. Sasaki, S. Izumi, T. Shinozuka, 第 3 回日米合同核物理分科会、2009 年 10 月 15 日、ハワイ
- (5) “交差偏極法による不安定核の偏極生成計画”、涌井崇志、第 5 回停止・低速不安定核ビームを用いた核分光研究会、2008 年 12 月 24 日、大阪大学

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・准教授

研究者番号 : 10134066