

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年3月31日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2012

課題番号：23654075

研究課題名（和文）

レーザー冷却偏極不安定原子によるパリティ非保存現象の探索

研究課題名（英文）

Search for the parity non-conservation with laser cooled polarized radioactive atom

研究代表者

酒見 泰寛 (SAKEMI YASUHIRO)

東北大学・サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター・教授

研究者番号：90251602

研究成果の概要（和文）：

原子における空間反転対称性の破れ（パリティ非保存効果：PNC）の探索は、標準模型によるクォークと Weak ボゾンの結合から、弱い相互作用がどのようにして核子間の長距離を伝搬するのか、その機構の解明につながる。PNC の高精度探索を行うため、PNC 効果の増幅度が大きい放射性元素・フランシウム（Fr）に着目し、測定技術の確立を進めた。Fr 大強度生成装置、輸送、トラップ装置の開発を完了した。

研究成果の概要（英文）：

The search for the parity non-conservation (PNC) in atom is powerful tool to understand the weak interaction between the nucleons inside the nucleus. We selected the Fr atoms for the PNC search, which is the radioactive and its enhancement of the PNC signal became large. The experimental apparatus such as the high intensity Fr source, transport system, and trapping system were developed successfully.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	2,900,000	870,000	3,770,000

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：パリティ アナポールモーメント 核力 弱い相互作用 冷却原子

レーザー冷却 磁気光学トラップ フランシウム

1. 研究開始当初の背景

^{60}Co の β 崩壊におけるパリティ非保存の観測をはじめ、様々な高エネルギー加速器実験により弱い相互作用の全容はあきらかになってきており、素粒子標準模型としてその理解は深まっている。電弱相互作用の統一により、電子と原子核（クォーク）の量子多体系である原子のパリティ非保存現象が示

唆されてきたが、主な寄与は電荷移行を伴わない中性カレント（Z ボゾンの伝搬）であり、その検出は極めて困難な挑戦的課題である。この中性カレントは、Z ボゾンの質量と比較して、電磁相互作用の寄与と同程度になってくる運動量移行が大きい領域での高エネルギー電子-陽子散乱実験で主に調べられてきた。しかし、運動量移行が小さい領域での実験はなく、また、強い相互作用の効果がある

原子核媒質中での中性カレントの影響を実験的に調べるのは困難であった。

この背景をふまえ、本研究はクォークと弱い力を媒介する Z ボゾンの結合から生じる基本相互作用が、核子間の長距離をどのように伝搬するのか、核力における弱い相互作用の伝搬機構解明を目指した実験装置の開発を進める。特に極端な原子核物質である中性子星等、高密度核物質では、核力の短距離成分と核媒質効果のクォークレベルからの解明がその構造の理解には重要であることに着目し、核力における弱い相互作用の伝搬に敏感な原子核パリティ非保存効果（アナポールモーメント：AM）の高精度探索を提案する。国際的には安定元素のセシウムとタリウムの実験があるのみである。

2. 研究の目的

本研究は、これまで大型加速器による散乱実験で進められてきた弱い相互作用、特に実験的検出が困難な中性カレントについて、「レーザー冷却偏極不安定原子」を用いて研究を遂行するものである。これは原子におけるパリティ非保存効果（アナポールモーメント：AM）が質量数の 2/3 乗に比例して増幅されることに着目し、核反応で生成される重い放射性元素をオンラインで急速冷却・トラップすることで AM の高精度探索を実現する実験である。融合反応で原子量最大のアルカリ原子である放射性元素・フランシウム (Fr) を生成し、高強度レーザーを用いて Fr の冷却を行い、さらに高真空中の局所空間に高密度で Fr 原子を蓄積することで、AM 測定の系統誤差を格段に小さくするために必要な外場の一様性や高感度光検出等を実現する。核物理の実験技術を用いて高強度 Fr 生成を実現し、原子ボーズ・アインシュタイン凝縮を実現させた量子光学先端技術を用いて Fr 冷却・トラップを行い、これら 2 つの学問分野の実験技術を融合し、テーブルトップで行う新しい精密素粒子物理学の分野を開拓することは、大型加速器実験による素粒子物理学実験と相補的で斬新な研究手法を確立させるものである。

3. 研究の方法

本手法は、レーザー冷却不安定原子のもつ特徴～非常に大きい荷電 (Z) や大きい質量数 (A) ～が、基本対称性を破る非常に微弱な信号を格段に増幅することに着目したものであるが、この実験方法が確立していくと、基本対称性・基本相互作用の精密研究をテーブルトップで行うことが可能となり、パリティ非保存核力研究の主流である加速器

実験と相補的に特徴を活かして進めることができる。特に AM の増幅度が大きい不安定原子・放射性元素は、核図表の中で多くの候補があり、図 1 に示される AM の中に含まれる複数の寄与 ((a)パイ中間子ループ等による 1 体の擬ベクトルカレント、(b)一つは strong でもう一つは weak のバーテックスを有する 2 体の擬ベクトルカレント、(c)弱い相互作用により縮退した奇パリティ状態の原子核基底状態からの寄与) は各々異なった質量数依存性を持つことから、様々な不安定原子の AM を系統的に測定することでそれらの寄与を分解して研究を進めていくための突破口となる。核力における弱い相互作用の働きを精密に探る新しい手段を与える。

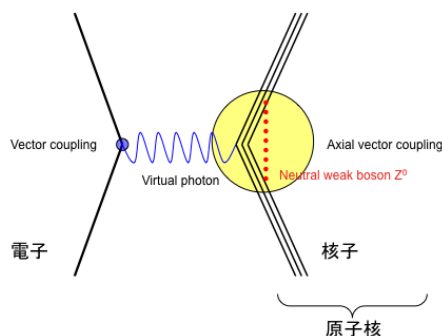


図 1：原子系におけるパリティ非保存効果

実験的には、原子核反応で生成されるフランシウム (Fr) 原子を高真空中の非常に限られた空間に大量に蓄積・スピン偏極させ、外場の向きを反転させることで空間反転状態を実現し、第 1 禁止遷移からの微弱な光信号強度の差を高感度で検出することが実験の鍵となる。その心臓部である高強度 Fr 原子蓄積用磁気光学トラップ装置と、高感度光検出器を開発する。開発した装置は、加速器を用いずにオフラインでルビヂウム (Rb) 原子を用いて動作試験を進める。オフラインで性能評価を行った後、開発した装置を高強度 Fr 中性原子ビームラインに配置し、Rb ビームによる全系の総合テストを行い、加速器を用いて Fr での動作試験を行い、装置の運転パラメータの最適化を行う。その後、長期間のデータ蓄積を開始する。

現在建設を進めている高強度 Fr 生成装置は、本研究施設・東北大学・CYRIC のサイクロトロンから供給される ¹⁸O ビームと ¹⁹⁷Au 標的との核融合反応により ²¹⁰Fr を生成し、表面電離現象を利用して 1 価のイオンとして引き出し、10 m 程度輸送・中性化する構造となっている。図 1 に構成要素の配置を示すが高強度 Fr 生成装置は、Fr 引き出し効率 10% 以上、Fr 生成収量 106 個/秒以上を実現し、Fr 実験を行っている米国 SUNY、イタリア LNL 研究所等における Fr 収量を超

え、国際的にも最高水準を実現している。

この Fr 生成装置の最下流に、今回、新しく大強度 Fr 原子蓄積用磁気光学トラップ装置 (MOT) を開発する。MOT は、アンチヘルムホルツコイルによる 4 重極磁場と 6 方向から入射するレーザー光によるトラップポテンシャルにより、中心領域に冷却原子集団を蓄積する。アナポールモーメント探索は、スピン偏極 Fr 原子の基底状態 $7S \rightarrow 8S$ への禁止遷移からの微弱蛍光信号を高感度検出することが鍵となる。そこで本研究では、できる限り大量の Fr 原子を高密度に空間的に限られた領域にトラップし、さらに高感度光検出器・光学系を配置することで高精度測定を行う構造にする。

この実現には、原子集団のトラップ位置を精度よく制御・局所化する必要があるが、高磁場勾配をもった MOT によりこれを実現する。EDM 探索では、外場中でのラーモア才差運動の周期を精度よく測定する必要があり、Fr 原子同士の衝突を避けるため、比較的浅い光定在波の 3 次元周期ポテンシャルにより光格子を形成し、各格子中に 1 個づつ原子を広い領域に渡ってトラップする。この点が空間的に局所化した場所に高密度の Fr 原子を蓄積して、微弱な光信号を高効率で検出するアナポールモーメント探索と違うところであり、そのために深い磁気ポテンシャル中に Fr 原子を多数蓄積可能なように設計を進める。もう一つの特徴は、微弱な蛍光信号を高効率に検出するために、MOT チェンバーの一つのポートを原子がトラップされる中心まで接近させアクセプタンスを広く確保し、集光用光学系の下流に高感度光検出器 APD (Avalanche Photo Diode) を配置する構造とする。

4. 研究成果

本研究では、PNC・アナポールモーメント探索の実験装置の開発を行い、その性能評価を完了した。実験装置は、放射性元素・Fr を生成する大強度イオン源、Fr イオンビーム輸送装置、中性化装置、磁気光学トラップ装置、高電場印加電極、微弱蛍光測定系で構成される。これまで、大強度イオン源とビーム輸送系の開発は終え、本研究では、中性化装置・MOT・高電場印加電極・蛍光測定系の開発を行った。実験装置の全体を図 2 に示す。サイクロトロンからの一次ビーム・180 が左方向から供給され、金標的との融合反応による Fr を生成する。高温に加熱された金標的の表面から、表面電離現象によりイオンとして Fr が引き出され、10m 程度輸送された後、中性原子に変換され、レーザートラップする。

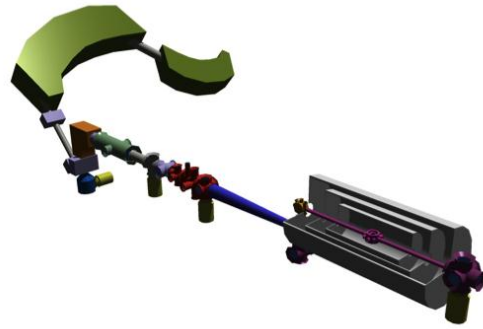


図 2：左から加速器からの酸素ビームが入射され、金標的との融合反応により Fr を生成する。

(1) 磁気光学トラップ装置の開発

磁気光学トラップ装置 (MOT) は、磁場勾配を持たせた領域に存在する原子集団に対して、相対する 3 軸方向にレーザーを照射する事で、レーザー光の偏光と磁場勾配により光の輻射圧に位置依存性を持たせる。そこで、真空チェンバー、磁場勾配生成用アンチヘルムホルツコイル、レーザー光源で構成される。今回、サイクロトロンからの一次ビームは直流電流であるので、Fr は連続ビームとして生成・供給されるが、この Fr をいったん蓄積し、ある一定時間バッファリングし、パルス化して後段の測定用 MOT に移送する構造とした。従って 2 つの MOT を開発したが、第 1 段目は標準的な MOT、第 2 段目は少数原子も観測可能な MOT を構成し、この 2 段目の MOT で微弱蛍光信号を測定する構成とした。

真空チェンバーは、以下の点を考慮して開発した。MOT 中での原子トラップ時間は真空槽内の残留ガスとの衝突率によって大きく支配される。その為、真空槽内は超高真空 ($\sim 10^{-11}$ Torr) を実現し、残留ガスの個数を可能な限り減らす必要がある。本研究では、1st MOT と 2nd MOT の二つの真空チェンバーで構成し、ゲートバルブを用いて真真空的に分離することが可能である。それぞれのチェンバーには真空引きを行うために、粗引き用ポンプとしてロータリーポンプ (RP) もしくはスクロールポンプ (SP) が接続されたターボ分子ポンプ (TMP) とイオンポンプ (IP) を取り付けた。より高真空が求められる 2nd MOT チャンバーには、チタンサブリメーションポンプ (TSP) を取り付けチャンバー内壁にチタン蒸着膜を生成することで超高真空域の実現を目指している。二つのチャンバーは $\phi 6$ mm の細いダクトで接続することで差動排気を行っており、比較的真空度の悪い 1st MOT チャンバー側から真空度の良い 2nd MOT チャンバー側への残留ガスの流入を防いでいる。

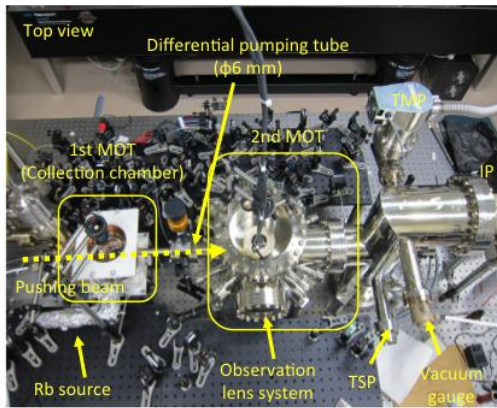


図3：開発したダブル MOT の概観。左の 1st MOT から右側の 2nd MOT に原子は輸送される。

各 MOT チャンバーにはトラップ光及びリポンプ光を入射するためのビューポートを設置し、直交する 6 方向からレーザー光を照射出来るようにしてある。直交する 3 方向からレーザー光を入射し、各入射光と対になるビューポート側に波長板とミラーを設置することで、実質的に 6 方向からレーザー光を入射した場合と同等の構成としている。図3に装置概観を示す。

(2) 高感度蛍光観測装置の開発

本研究では 2nd MOT 中に少数原子 ($N_{atom} < 50$) をトラップすることを目的としており、そのためにはトラップ原子からの蛍光を離散的な値として観測する必要がある。原子一個からの蛍光は全立体角の積分で毎秒 $\hbar\omega \Gamma/2 \approx 3 \text{ pW}$ 程度と評価されるが、検出器のアクセプタンス、及び検出効率や、周辺からの散乱光に起因するバックグラウンド光等により微弱な信号は検出が困難である。そこで高感度かつ低ノイズの検出系を実現するために、検出器として APD (Avalanche Photo Diode) と冷却 CCD (Charge Coupled Device) を使用し、トラップ原子から検出器まではレンズチューブを用いて散乱光を遮蔽し、暗室状態にしている。なお、オフラインテスト時など、微弱信号を超える強度の光を検出する場合に備えて、トラップ原子の寿命等、マクロスコピックな原子集団の情報を得るために、通常の光検出器 (光電子増倍管) を設置する構成とした。

今回、これらの高感度かつ低ノイズの検出系を構成する上で、全立体角へと放出される原子からの蛍光を可能な限り大きな立体角で検出する必要がある。そこで、トラップ原子の近くに 4 枚のレンズで構成される光学系を設置して一度平行ビームへと整形した後、検出器直前で再度レンズを用いて受光面で収束させるようなシステムを製作し

た。これらのレンズ群と BS 等は全てレンズチューブで覆われているので、蛍光灯からの迷光は完全に遮蔽できていると考えている。図4に示すように、光線軌道シミュレーションを行って、4 枚のレンズの間隔・厚み・曲率半径等を決定した。

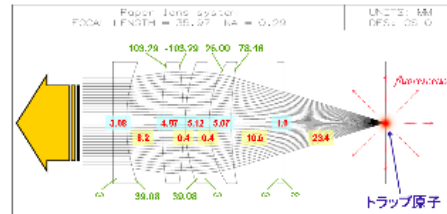


図4：蛍光軌道のシミュレーション結果。

(3) 高電場印加装置の開発

原子系のパリティ非保存現象を観測するには、電磁相互作用による遷移振幅と弱い相互作用による遷移振幅の干渉項が、空間反転した環境において、どの程度の差を生じるか、その精密測定が重要になる。その際、高電場を印加する必要があるが、真空チャンバー中で放電やリーク電流が少ない電極の開発を行った。トラップ原子集団のサイズが直径数ミリ程度になることを想定し、このトラップ領域で電場が一樣になるような電極形状、サイズを有限要素法によるシミュレーションにより決定した。原子集団が存在する直径 $\sim 1 \text{ mm}$ の領域での垂直方向の電場勾配は約 10 kV/cm^2 であり、原子集団に印加された電場が、最大で 1 kV/cm 異なることになる。

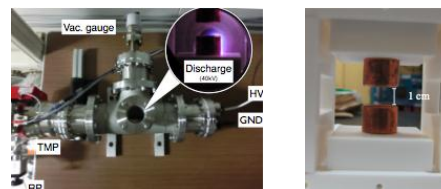


図5：組み立てた電極 (右) とテストチャンバー (左)。

暗電流測定結果を図6に示す。0 kV から徐々に印加電圧を上げていき、30 kV まで測定を行った。その後、3 日間 10 kV、1.5 日間 20 kV の電圧を電極に印加し、コンディショニングを行った。その際のチャンバー内真空度はどちらも $\sim 7 \times 10^{-6} \text{ Pa}$ 。実験結果より、コンディショニング後にリーク電流が小さくなっていることがわかる。コンディショニング後には放電が起こる電圧が上昇し、より高電圧を印加することが可能になった。以上、PNC 実験のための電圧印加システムの要素技術を確立した。

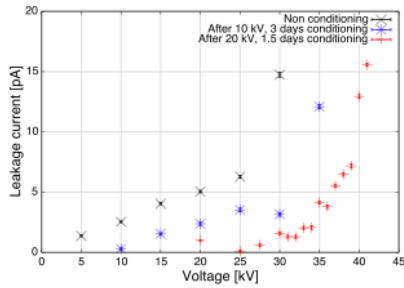


図 6：電極のリーク電流の測定結果。横軸は印加電圧、縦軸はリーク電流。

(4) Rb によるトラップ実験

2011 年 3 月の震災の影響で、Fr を生成するためのサイクロトロン加速器が破損し、その復旧に 2 年弱要した。そこで、Fr と同じアルカリ原子で、化学的性質が類似した安定元素・Rb を用いて開発を進める事とし、Rb を用いたトラップ実験を行った。

レーザー光源は、ポンピング光とリポンピング光として、780nm の波長の光が必要である。今回、外部共振器付レーザーとテーパアンプを製作し、光強度 1W の光源を実現した。この光を図 7 に示す光学系で 3 軸方向から相対して光を照射し、MOT を構成した。

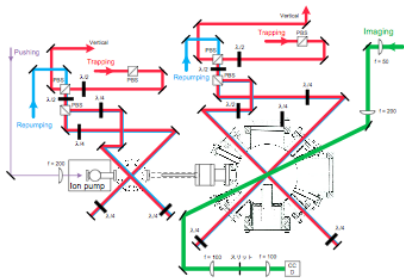


図 7：ダブル MOT の光学系

1 段目の MOT-1 でアンプルからトラップされた Rb はプッシュ光を用いて 2 段目の MOT-2 に輸送される。それぞれの MOT に捉えられた Rb の蛍光を CCD カメラを用いて撮影したものを図 8 に示す。MOT-1 のトラップ原子の数は 1×10^8 個、MOT-2 のトラップ原子数は 2×10^8 個である。本研究で、ダブル MOT の構成で、PNC 測定の基盤である原子トラップ技術を確立した。次に MOT-2 に原子を十分に蓄積した後、プッシュ光切ることによってトラップ寿命 τ を測定した。トラッピング光とプッシュ光を同時に入射し、 $t=0 \sim 30$ s までの 30 秒間 MOT-1 に原子を貯め続け、その後プッシュ光のみを遮断した状態で $t=30 \sim 100$ 秒までの 70 秒間、蛍光強度の変化を測定した。

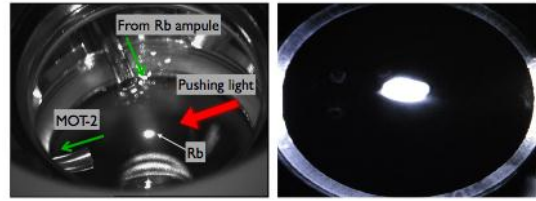


図 8：左が 1 段目の MOT でのトラップ原子からの蛍光。右が 2 段目の MOT からの蛍光。

蛍光強度の時間変化を図 9 に示す。 $t = 30 \sim 40$ 秒にみられる蛍光強度の減衰の主な原因は light assisted collision と呼ばれ、MOT のトラッピング光により原子が MOT よりはじき飛ばされる効果によるものである。この衝突による効果が無視出来る $t = 40 \sim 100$ 秒の範囲において、指数関数によるフィッティングを行うことにより、蛍光強度が初期状態 ($t = 40$ s) から $1/e$ になるまでの時間である寿命 τ を見積もり、 $\tau \sim 38$ 秒と評価した。この値はチャンバー内の真空度に依存しており、 τ を長くすることがアナポールモーメント測定の鍵となる。また図 12 中の $t = 45, 58$ 秒付近で回帰曲線からのずれが見られるが、これはトラッピング光の周波数の変動により、トラップ原子に加わる中心方向への復元力がうまく働かなかったためと考えられる。サイクロトロン加速器の復旧が完了したので、今後 Fr の生成を再開し、Fr のトラップ実験を進め、確立した PNC 実験技術をもとに、測定に着手する。

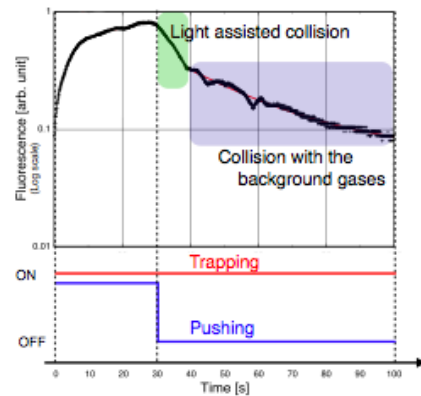


図 9：トラップ原子数の時間変化。

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4件)

- ① Hirokazu Kawamura, T. Aoki, H. Arikawa, S. Ezure, T. Furukawa, K. Harada, A. Hatakeyama, K. Hatanaka, T. Hayamizu, K. Imai, T. Inoue, T. Ishikawa, M. Itoh, T. Kato, T. Murakami, H.S. Nataraj, T. Sato, Y. Shimizu, T. Wakasa, H.P. Yoshida and Y. Sakemi, "Search for permanent EDM using laser cooled Fr atoms", Hyperfine Interact, 214, 133-139, 2013 (査読付き)
DOI: 10.1007/s10751-013-0788-7
- ② Takatoshi Aoki, Kotaro Umezawa, Yuki Yamanaka, Naotomo Takemura, Yasuhiro Sakemi, and Yoshio Torii, A 461 nm Laser System and Hollow-Cathode Lamp Spectroscopy for Magneto-Optical Trapping of Sr Atoms, J. Phys. Soc. Jpn. 81 (2012) 34401 (査読付き)
DOI: 10.1143/JPSJ.81.034401
- ③ 酒見泰寛、電子の電気双極子能率の上限値について更新、パリティ 27(2012)19-23 (解説記事・査読無し)
- ④ Y. Sakemi, K. Harada, T. Hayamizu, M. Itoh, H. Kawamura, S. Liu, H.S. Nataraj, A. Oikawa, M. Saito, T. Sato H.P. Yoshida (CYRIC, Tohoku U.), T. Aoki (Tokyo, U. Earth Sci. Astron.), A. Hatakeyama (Tokyo U. of Agric. Tech.), T. Murakami, K. Imai (Kyoto U.), K. Hatanaka (Osaka U., Res. Ctr. Nucl. Phys.), T. Wakasa (Kyushu U.), Y. Shimizu (Tohoku U.), M. Uchida (Tokyo Inst. Tech.), J. Phys. Conf. Ser. 302 (2011) 012051-012056 (査読付き)
DOI: 10.1088/1742-6596/302/1/012051

[学会発表] (計2件)

- ① 酒見泰寛、「レーザー冷却フランシウム原子を用いた電子 EDM 探索」、中性子物理研究会 (招待講演)、2012 年 11 月 20 日～21 日、名古屋大学
- ② 酒見泰寛、「レプトン双極子モーメントの測定」、日本物理学会 2011 年秋季大会、シンポジウム「LHC 時代の precision physics」(招待講演)、2011 年 9 月 18 日、弘前大学

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年月日:

国内外の別:

○取得状況 (計0件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

取得年月日:

国内外の別:

[その他]

ホームページ等

<http://cycgw1.cyric.tohoku.ac.jp/index-j.html>

6. 研究組織

(1)研究代表者

酒見 泰寛 (SAKEMI YASUHIRO)

東北大学・サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター・教授

研究者番号: 90251602

(2)連携研究者

伊藤 正俊 (ITOH MASATOSHI)

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: 30400435

吉田 英智 (YOSHIDA HIDETOMO)

東北大学・サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター・教育研究支援者

研究者番号: 20399744

原田 健一 (HARADA KENICHI)

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: 00515447

川村 広和 (KAWAMURA HIROKAZU)

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: 50586047