

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：新学術領域研究(研究領域提案型)

研究期間：2009～2013

課題番号：21104005

研究課題名(和文)冷却不安定原子を用いた電子電気双極子能率探索

研究課題名(英文)Search for the electric dipole moment with laser cooled 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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 206,200,000円、(間接経費) 61,860,000円

研究成果の概要(和文)：物質優勢宇宙の創成機構を探る上で、電子の電気双極子能率(EDM)は重要な情報を与える。本研究では、レーザー冷却放射性元素を用いた新しいEDM測定手法を確立した。標準理論を超える有力な候補の一つ・超対称性理論では、電子のまわりを超対称性粒子が伝搬することで、大きなEDMを生じる事が予測されている。我々は、相対論効果により原子系で最大の電子EDM増幅効果を有する放射性元素・フランシウムに着目し、レーザー冷却・トラップ技術を用いて、国際的に先駆けてFr生成・冷却・トラップによるオンラインEDM測定技術を確立した。冷却・トラップ原子を用いる事で、相互作用時間を格段に伸ばし測定精度の向上を実現した。

研究成果の概要(英文)：The search for the permanent electric dipole moment (EDM) of the electron gives the important information on the evolution mechanism of the matter dominant space. In this research program, the new experimental method to measure the EDM has been established with the laser cooled radioactive atoms.

The super symmetry model (SUSY), which is one of the most powerful theory beyond the standard model (SM), predicts the finite value of the electron EDM through the propagation of the SUSY particles, which are the partner particles of the SM particles. We selected the radioactive atoms Francium (Fr), which has the largest enhancement factor of the electron EDM, and the new experimental method to measure the Fr EDM has been established using online procedure to produce, cool and trap the Fr. The improvement of the measurement sensitivity was realized by the long coherence time using the laser cooled and trapped atoms.

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：電気双極子能率 超対称性 CP非保存 冷却原子 フランシウム

1. 研究開始当初の背景

反物質消失 (CP 非保存) の機構は、素粒子標準模型で十分に説明することは困難であり、K/B 中間子崩壊の他に、新たな CP 非保存現象の観測がその理解の重要な指針を与えると考えられている。電子等の素粒子において、電荷分布の非対称性 (電気双極子能率・EDM) が生じると、時間反転対称性を破ることとなり、CPT 普遍性を考慮すると、EDM は CP 非保存の観測量となる。特に始状態と終状態でフレーバー (粒子の種類) が変わらない遷移である EDM は、標準模型からの寄与が抑制され、新物理を探索するバックグラウンドフリーの測定として常に注目されている。この 50 年来、様々な素粒子や量子多体系に対して、EDM の測定が行われてきたが、未だに有限値は発見されていない。

電子 EDM は、電子を構成要素として持つ様々な原子系・分子系を対象に測定されてきたが、従来は速度分布が高い粒子集団を対象にしたビームや蓄積セルで行われ、その結果、相互作用時間が短く、粒子系の運動により生じる磁場により偽 EDM 信号が誘起され、統計誤差・系統誤差とともに精度向上の限界があった。本計画では、レーザー冷却技術を駆使し、原子集団を局所的に閉じ込め・捕捉して測定感度の限界を打ち破ることを目標とし、電子 EDM 増幅度最大 (895 倍) である原子量最大のアルカリ原子・フランシウム (Fr) を対象とした。本研究では、レーザー冷却放射性元素の EDM 測定技術を国際的に先駆けて確立する^[9]。

2. 研究の目的

CP 非保存機構の解明を目指して、レーザー冷却放射性元素を用いた EDM 探索技術を確立する。電子 EDM は、標準模型では、電子から放出された weak boson を介しクォークが遷移する高次過程を通して発現し、現在の実験技術では測定できないほど小さい。LHC で発見されたヒッグス粒子の質量 126GeV を、超対称性理論 (SUSY) で説明するためには SUSY 粒子 (stop) の質量が $\sim 10 \sim 100$ TeV スケールに存在する可能性が示唆されている (図 1)。タリウム原子や YbF 分子による上限値を超える $10^{-29} e \cdot \text{cm}$ の EDM 領域は、 ~ 10 TeV 以上の質量スケールに該当し、注目されている測定領域である。

従来の実験において、精度向上限界の要因は、以下の点である。

- ビームや蓄積セル中での高温原子・分子集団を測定対象とするため、EDM 測定のための高電場印加の電極中を通過する時間 (相互作用時間) が短い ($\sim \text{msec}$)
- 相互作用時間を長くするために外場印加領域を長くする必要があり ($\sim 1\text{m}$ 程

度)、その結果、非一様外場による影響で、EDM の偽信号が生じる。

- 磁場の時間変動により、EDM の偽信号が生じる。

EDM 測定精度は、原子における電子 EDM 増幅度を K 、印加電場を E 、観測対象とする原子個数を N 、原子偏極を保持する時間 (相互作用時間) を τ 、測定時間を T とすると、 $\delta d = \hbar / (2 \cdot K \cdot E \cdot \sqrt{N \cdot \tau \cdot T})$ と表される。本研究では、上記の測定精度限界を打ち破るために、相互作用時間を伸ばし、かつ、外場の非一様性を抑制するために、原子集団を空間的に局在化してトラップ (捕捉) する開発研究を進め、測定感度 $\sim 10^{-27} e \cdot \text{cm}$ 以上を可能にする技術を確立する。さらに、放射性元素 Fr のオンライン生成・冷却・トラップ・EDM 測定技術を国際的に先駆けて実現する。

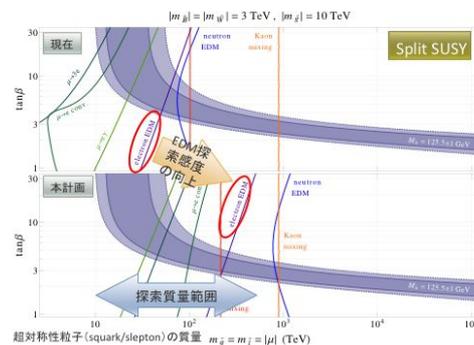


図 1：電子 EDM と超対称性粒子の質量の相関

3. 研究の方法

放射性元素・フランシウムを生成・輸送・冷却・トラップしてオンラインで EDM を測定する装置を東北大学・サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター (CYRIC) において開発・性能評価を行い、超対称性理論をはじめとする標準模型を超える理論に制限をつけ、未知の粒子の性質を調べる感度を実現する事を確認する。EDM 実験は、Fr を核融合反応により生成し、放射線等のバックグラウンドが低い領域まで輸送して、Fr イオンを中性化したあと、レーザー冷却技術を用いて真空中にトラップし、そのスピン歳差周期を高精度に測定する。超対称性粒子等の効果から、このスピン歳差周期が磁場に対する電場の向きの違い (並行・反並行) により変化するので、超対称性粒子の質量や CP を破る位相に関する情報を得る事ができる。

開発した装置は上流から以下のとおり：

- 放射性元素 (Fr) イオン源・輸送系
- 中性化装置
- 磁気光学トラップ (MOT)
- 光双極子トラップ (ODT)
- 磁力計

本計画では、従来の原子・分子ビームによる

測定精度限界を破るために、原子のスピン歳差をさせる時間（相互作用時間）延伸を目標とした。ビーム実験は、1m 程度の電極中をオープンで500度程度に熱せられた高速原子線が通過するため、ミリ秒程度の相互作用時間となる。そこで「冷却原子」に着目し、1000倍程度の相互作用時間の増倍（～1秒）をデザイン値として、トラップ可能な寿命の長いアイソトープ（RI）を選択した。イオン源からトラップ装置に至る過程で、滞在時間を支配するのはイオン源中であり、一次ビームエネルギーや標的の温度に依存するものの、ターゲット表面への RI 拡散時間のスケールは～秒程度である。従って～分スケールの寿命をもつ RI であれば、オンライン生成・トラップ・測定が可能である。そこで3分程度の寿命を有する²¹⁰Frを測定対象として選定した。

Frは、クーロン障壁より高い一次ビーム入射エネルギーで融合反応の断面積が最大になることを考慮し、¹⁸O ビーム（ビームエネルギー：100 MeV）と¹⁹⁷Auターゲットの組み合わせを用いた。中性化装置でイオンから原子に荷電変換された後、磁気光学トラップで捕獲・冷却され、その後、光双極子トラップに移行してスピン歳差周期を測定する（図2）。これらの装置を全て組み合わせて、測定精度と系統誤差の評価を行い、標準理論を越える理論の識別や、未知粒子の質量階層構造に関して、探査できる領域を評価する。



図2：レーザー冷却 EDM 装置の概観

4. 研究成果

LHCによりヒッグズ粒子の質量が126GeVと評価され、SUSY粒子がこれまでの予想（universality：全てのSUSY粒子の質量が同じスケールで存在）と異なり、ゲージ粒子のパートナー粒子・ゲージノ、squark、slepton等で、各々、異なる質量階層構造を持つ可能性が示唆されている。シンプルな超対称性理論（Split SUSY）では、EDMとSUSY粒子質量には相関があり、tanの値に依存するものの、 $10^{-27}e \cdot cm$ では～10 TeV程度の質量スケール探査に該当する。本研究ではレーザー冷却 Fr 原子による EDM 測定装置の開発を進め、現在、 $10^{-25}e \cdot cm$ の探索精度を実

現している^[10]。2011年の大震災の影響で、サイクロトロンが破損し、復旧作業に2年近く要したため、研究期間の後半はFr実験が限られたが、類似の化学的性質を有するRbを用いて性能向上の見通しをたてており、 $10^{-27}e \cdot cm$ の精度を実現すると評価している。以下、各装置の開発研究の結果と性能を示す。

4-1. フランシウム生成イオン源・輸送系：加速エネルギー100MeVの¹⁸Oビームと¹⁹⁷Au標的との融合反応によりFrを生成する。今回、標的を融点以上に高温加熱し（～1000度）溶解標的中に生成されたFrを速やかに表面に拡散させ、表面電離により1価のイオン（²¹⁰Fr⁺）として引き出す融解標的型表面電離イオン源の開発に成功した。融解標的を用いることで、固体中より拡散定数が変化し、短時間でイオン引き出しが可能であり、また国際的にも最高レベルの引き出し効率（35%）を実現した。¹⁸Oビーム強度～2euAで、3kVのFr収量～ $10^6 Fr^+/s$ を得ている^{[3][11][14]}。

4-2. 中性化装置：放射性元素・Frの原子構造は十分には調べられておらず、EDM増幅度の理論計算には分光実験が必要である。そこで一次ビームを有効活用し、並行して複数のFr実験ができるよう3種類の中性化装置を開発した（図3）^{[5][6]}。

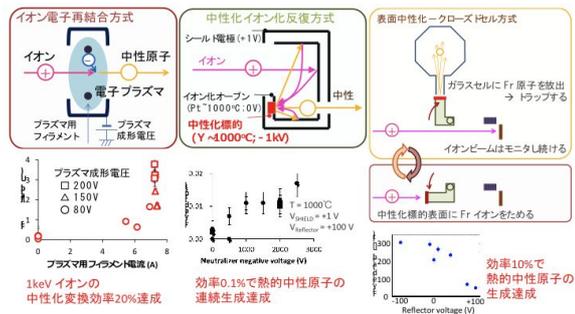


図3：3種類の中性化装置の構造と性能

電子再結合方式：リング状電極から発生する電子プラズマにFrイオンを通過させ電子再結合により中性Frを得る。この反応の断面積はビームエネルギーが～keV程度で大きくなり、高速イオンの中性化に効率が低い。オープン方式：白金をコーティングした高温オープン壁面でビームを停止させ、低速イオンとして再放出させる。イットリウム（Y）電極へ再放出イオンを収束させ、Y表面で中性化して、出射ポートで決まる小エミッタンスFrビーム生成に成功した。この方式では、下流に配置する横・軸方向レーザー冷却装置でビームをコリメート・減速する事でMOTでのトラップ効率を向上させる特徴を持つ。クローズドセル方式：回転駆動Y標的をビーム軸上に配置し、Frをターゲット表面に一定時間蓄積させたあと、90度回転させて、上

方向に配置した MOT セルを閉じる形でターゲットを加熱し Fr をセル内に放出させる。ビーム軸上に上流からクロズドセル方式、オープン方式を連結して配置し、少数原子で可能な分光実験をクロズドセル方式 MOT で、オープン方式 + レーザー冷却 + MOT による大強度 Fr 源で EDM 実験を行い、ビーム供給を最大限活用して、EDM 測定感度向上に必要な各種実験を並行してできる構成とした。

4-3. 磁気光学トラップ (MOT):

Fr 原子を冷却し、直径 \sim mm 程度に局在化してトラップして、外場の非一様性から生じる系統誤差を抑制し、相互作用時間を伸ばす事で測定感度を向上させる。本研究では、2つの MOT を連結したダブル MOT システムを開発した。初段の MOT で Fr 原子をトラップ・予備冷却して、後段の MOT (サイエンスチャンバー) にプッシュ光を用いて移送し、磁場を切って光双極子トラップへ移行し、EDM を測定する構成とした。Fr トラップ用光源 (718nm) として Ti:S 波長可変レーザーを導入し (\sim 3W)、化学的性質が類似した Rb を用いて同時に参照実験が行えるよう、Rb トラップ光源 (780nm) として外部共振器ダイオードレーザーとテーパーアンプから構成される高強度光源 (\sim 1W) を開発した。さらに、様々な RI をトラップするための実験パラメータ最適化の際、少数原子でも観測できるよう、トラップ領域に光学系を近づけて大立体角で集光できる構造とし、かつ水冷コイルで高磁場勾配を実現しトラップ位置を固定できるようにした。その結果、1原子のトラップから観測する事に成功し、またその寿命も 10 秒程度であることを確認した (図 4)。長時間安定したトラップを行うために、ヨウ素分子の回転振動準位を基準にして、718nm の Fr 共鳴波長光の周波数安定化を開発した。アルカリ原子・Fr は壁面への吸着力が強く、MOT に導入された Fr の大半が損失する。そこで、光誘起脱離現象を用いて、壁面から Fr を再離脱させてトラップ効率の向上を試み、光の波長が短いほど、脱理効果が高いことを確認し、今後の MOT 組み込みへの方針を確立した^[2]。

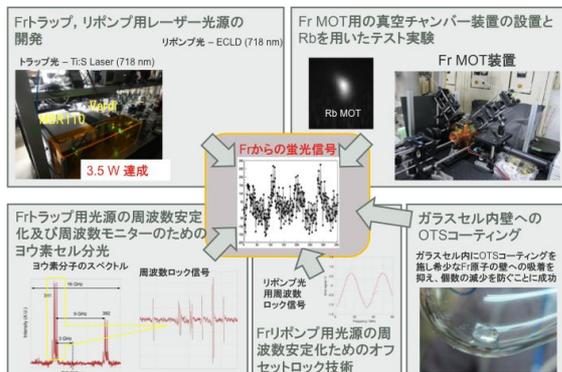


図 4 : Fr-MOT の各構成要素と性能

4-4. 光双極子トラップ (ODT):

サイエンスチャンバーは、少数原子観測の機能とともに、ODT に移行し、光のみで原子を捕捉し、電場・磁場を印加して、Fr のスピン歳差周期を測定する機能を持たせた。MOT から ODT へ原子集団を損失することなく高効率で移行するために、偏光勾配冷却による予備冷却を導入し、 \sim 60 μ K 程度まで冷却した (図 5)^[4]。光源として波長 \cdot 1083nm のファイバーレーザーを用いて、半径 30 μ m 程度の横長の領域に \sim 10³ 程度トラップされることを確認した。さらに 100 kV/cm の電場印加を目標に電場印加システムの開発を行った。電極は直径 20 mm、長さ 20 mm の円柱形無酸素銅から成り、電極間距離を 10 mm に固定し、 5×10^{-5} Pa の真空環境のもとで、電場印加試験を行った。1週間近くのコンディショニングを経て、44 kV/cm までの印加に成功した。

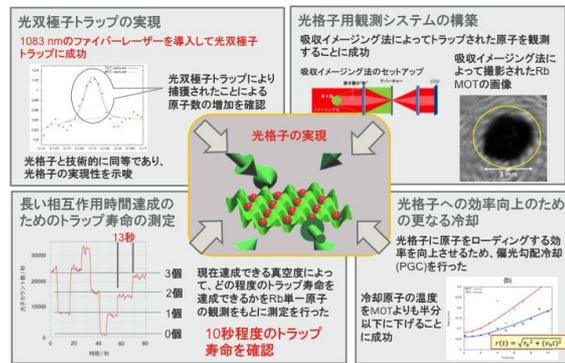


図 5 : ODT の性能評価と光格子磁力計の基礎開発

4-5. 磁力計:

電子 EDM 測定において、最大の系統誤差要因となりうる印加磁場変動をモニターするため、 3×10^{-16} T/ Hz の感度の実績を持つ NMOR 型磁力計の開発を開始した。本磁力計の感度を決定する要因の1つである Rb 原子のコヒーレンス時間は 3.6 ± 0.1 ms であった。このコヒーレンス時間を制限している要因を調べるため、Rb 原子を封入しているガラスセル内壁との衝突による壁緩和時間を測定し、 9.97 ± 0.03 ms であった。この結果からコヒーレンス時間・磁力計感度を制限しているのは、ガラスセルが置かれた磁気シールド内の残留磁場であることを突き止めた^[1]。

以上、これらの構成要素が所定の性能を実現していることをふまえて、現状の EDM 測定感度を評価すると \sim 10⁻²⁵ e \cdot cm である。現在、精度を抑制している主な要因は、セルに蓄積される Fr 収量である。収量は、MOT セルでのトラップ効率で決まるが、これはビーム輸送系にウィーンフィルターを導入し、Fr の純度を向上させることで、所定の Fr 収量 (\sim 10⁶/s) を達成し、10⁻²⁷ e \cdot cm を実現することができる。さらに系統誤差の最大の要因であ

る電子 EDM 増幅度に関して、相対論的結合クラスター理論により全ての電子の配位を考慮した第 1 原理計算をスパコンにより進め、1%以内の精度で計算値を得る事が確実である。また極性分子による EDM 測定の基礎研究も進めた。独自のアイデアとして、レーザー冷却原子からフェッシュバハ共鳴により極性分子を生成することで、冷却・トラップ分子を用いた EDM 探索を提案した。この系を実現するため、Sr のレーザー冷却光源を立ち上げ、Fr-Sr 系の予備段階として、Rb と Sr の同時トラップを世界で初めて実現した^{[7][8]}。

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] 査読有り 14 件 (計 14 件)

T. Inoue, Y. Sakemi et al., "Development of the Measurement System for the Search of an Electric Dipole Moment of the Electron with Laser-Cooled Francium Atoms", EPJ Web of Conferences 66, 05008 (2014) <http://dx.doi.org/10.1051/epjconf/20146605008> 査読あり

H. Kawamura, Y. Sakemi et al., "Search for a permanent EDM using laser cooled radioactive atom", EPJ Web of Conferences 66, 05009 (2014) <http://dx.doi.org/10.1051/epjconf/20146605009> 査読あり

H. Arikawa, Y. Sakemi et al., "Radioactive ion beam transportation for the fundamental symmetry study with laser trapped atoms", Rev. Sci. Instrum. 85, 02A732 (2014); <http://dx.doi.org/10.1063/1.4852218> 査読あり

T. Hayamizu, Y. Sakemi et al., "Laser cooled francium factory for the electron electric dipole moment search", JPS conf. proc. 1, 031065 (2014) <http://journals.jps.jp/doi/abs/10.7566/JPSCP.1.013065> 査読あり

H. Kawamura, Y. Sakemi et al., "Laser-cooled radioactive francium factory at CYRIC", Nucl. Instr. Meth. B317, 582-585 (2013) <http://dx.doi.org/10.1016/j.nimb.2013.07.038> 査読あり

H.Kawamura, Y.Sakemi et al., Search for permanent EDM using laser cooled Fr atoms, Hyperfine Interactions 214(2012)133-139, 査読有, 10.1007/s10751-013-0788-7

T.Aoki, Y.Sakemi et al., Photoionization loss in simultaneous

magneto-optical trapping of Rb and Sr, Phys.Rev.A87(2013)0632426-1-5, <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevA.87.063426> 査読あり

T.Aoki, Y.Sakemi et al., A 461 nm laser system and hollow-cathode lamp spectroscopy for magneto-optical trapping of Sr atoms, J.Phys.Soc.Jpn. 81 (2012) 34401 10.1143/JPSJ.81.034401

酒見泰寛、電子の電気双極子能率の上限値をついに更新、パリティ(丸善出版株式会社)27(2012)19-23

Y.Sakemi et al., Search for a permanent EDM using laser cooled radioactive atom, J.Phys.Conf.Ser.302 (2011) 012051-012056, 査読有, doi:10.1088/1742-6596/302/1/012051

S.Hou, Y.Sakemi, et al., Radiation hardness of optoelectronic components for the optical readout of the ATLAS inner detector., Nucl.Instrum.Meth. A636 (2011) S137-S142, 査読有, DOI: 10.1016/j.nima.2010.04.098

T.Wakasa, K.Hatanaka, Y.Sakemi et al., Complete set of polarization transfer observables for the $^{16}\text{O}(p,n)^{16}\text{N}$ reaction at 296 MeV and 0 degree., Phys.Rev. C84 (2011) 014614, 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevC.84.014614

K.Hatanaka, Y.Sakemi et al., A HTS Scanning Magnet and AC Operation., Conf.Proc. C100523 (2010) MOPEB036, 査読有, <http://ipac10.org/>

K.Fujita, Y.Sakemi et al., Development of GEM tracking detector for intermediate-energy nuclear experiments., Nucl.Instrum.Meth. A608 (2009) 48-54, 査読有, DOI: 10.1016/j.nima.2009.06.051

[学会発表] (計 11 件)

Y.Sakemi, Search for a permanent EDM with radioactive atoms, 3rd workshop on the physics of fundamental symmetries and interactions at low energies and the precision frontier : PSI2013 (招待講演) 2013 年 9 月 9 日~13 日、スイス・Paul Scherrer Institute

酒見 泰寛、レーザー冷却フランシウムを用いた電子 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

H.Kawamura,Y.Sakemi et al., Laser-cooled radioactive francium factory at CYRIC, nternational

conference EMIS2012 'Electromagnetic Isotope Separators and Technique related to their applications', 2012年12月2日～7日、松江

T.Inoue, Y.Sakemi et al., Search for electron EDM with laser cooled radioactive atom, The 8th China-Japan joint nuclear physics symposium(招待講演), 2012年10月15日～19日, 中国・北京

K.Harada, Y.Sakemi et al., Development of a double MOT system and spectroscopy of iodine molecule at 718 nm toward the electron EDM measurement, The 23rd International conference on Atomic Physics ICAP2012, 2012年7月23日～27日, Ecole Polytechnique, Palaiseau, France

K.Kawamura, Y.Sakemi et al., Search for electron EDM in laser-cooled francium factory, 5th International Symposium on Symmetries in Subatomic Physics:SSP2012, 2012年6月18日～22日, オランダ・フローニンゲン

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」, 2011年9月18日、弘前大学

原田 健一、酒見 泰寛 et al., Search for a permanent EDM using cold Fr atoms (招待講演)、GCOE International symposium on 'Weaving Science Web beyond Particle-Matter Hierarchy', 2011年2月17日、東北大学

酒見 泰寛、Search for a permanent EDM using laser cooled radioactive atoms (招待講演) International symposium nanoPHYS '11 "Nanoscience and Quantum Physics 2011", 2011年1月16日、国際文化会館(東京)

酒見 泰寛、Searches for a permanent EDM in Francium (招待講演)、International workshop on Violation of discrete symmetries in atoms and nuclei, 2010年11月16日、ECT*研究所(イタリア・トレント)

酒見 泰寛、Search for permanent electric dipole moment in Francium (招待講演) International workshop on UCN and Fundamental Neutron Physics : UCN2010, 2010年4月9日、大阪大学・核物理研究センター

[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

<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) 研究分担者

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
青木 貴稔 (AOKI TAKATOSHI)
東京大学・総合文化研究科・助教
研究者番号：30328562
畑中 吉治 (HATANAKA KICHIJI)
大阪大学・核物理研究センター・教授
研究者番号：50144530
若狭 智嗣 (WAKASA TOMOTSUGU)
九州大学・大学院理学研究院・准教授
研究者番号：10311771

(3) 連携研究者

村上 哲也 (MURAKAMI TETSUYA)
京都大学・大学院理学研究科・講師
研究者番号：50219896
今井 憲一 (IMAI KENICHI)
独立行政法人日本原子力研究開発機構・研究員
研究者番号：70025493
清水 康弘 (SHIMIZU YASUHIRO)
東北大学・大学院理学研究科・助教
研究者番号：80396423