

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月31日現在

機関番号：82401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2009～2011

課題番号：21740210

研究課題名（和文） Mg 同位体の励起状態の磁気モーメント測定による核構造研究

研究課題名（英文） Study of nuclear structure for Mg isotopes via measurement of magnetic moment in excited states

研究代表者

市川 雄一 (ICHIKAWA YUICHI)

独立行政法人理化学研究所・偏極 RI ビーム生成装置開発チーム・客員研究員

研究者番号：20532089

研究成果の概要（和文）：

中性子過剰領域における異常核構造発現機構を解明するために、異常核構造が報告されている<sup>32</sup>Mgの近傍核<sup>32</sup>Alの核異性体励起状態の核磁気モーメント測定を行った。本研究では高いスピン整列度の不安定核（RI）ビームを生成するための新たな手法 - 分散整合二回散乱法の開発も行った。理化学研究所 RIBF にて行った実験では、分散整合二回散乱法により 8(1) % のスピン整列度を持つ<sup>32</sup>Al ビームを生成することができ、<sup>32</sup>Al の核異性体の核磁気モーメントを初めて測定することに成功した。

研究成果の概要（英文）：

In order to understand the mechanism that anomalous nuclear structure appears in the neutron-rich region, the measurement of the nuclear magnetic moment for the isomeric excited state of <sup>32</sup>Al, one of the neighboring nuclei of <sup>32</sup>Mg for which anomalous nuclear structure was reported, was carried out. An innovative method to produce spin alignment in radioactive-isotope (RI) beams, the two-step fragmentation method with momentum-dispersion matching, was also developed in this study. In the experiment at RIKEN RIBF, we have succeeded to produce the RI beam of <sup>32</sup>Al with 8(1)% of spin alignment by applying the new method as well as to determine the nuclear magnetic moment of the isomeric state of <sup>32</sup>Al for the first time.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,500,000	750,000	3,250,000
2010年度	600,000	180,000	780,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

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：不安定原子核、核スピン、スピン整列、核磁気モーメント、ガンマ線、励起状態、核異性体、加速器

## 1. 研究開始当初の背景

不安定核 (RI) ビーム生成技術の発達により、安定線から離れた原子核の核構造研究は新しい局面を迎えている。この 10 年余り、中性子過剰核  $^{32}\text{Mg}$  周辺の “island of inversion” と呼ばれる領域において従来の描像とは異なる特殊な核構造が注目されてきた。 $^{32}\text{Mg}$  は中性子数が魔法数  $N=20$  となるため球形となって安定すると考えられていたが、形状が大きく変形している事を示唆する実験データが数々報告され、魔法数がこの “island of inversion” と呼ばれる領域で消失していることが示唆された。それ以来 “island of inversion” 近傍核の核構造研究が積極的になされ、現在は特に微視的視点からその異常性の発現機構を明らかにするという段階に入っている。

核構造を微視的に調べる際は核磁気モーメントが有用である。核磁気モーメントは原子核の磁石的性質を現す固有の基礎物理量であり、核内核子の軌道配位を先鋭に反映するため核構造の異常性を核子配位から微視的に議論するのに適している。

核磁気モーメント測定による核構造研究は、まず基底状態に対して積極的に行われ、中性子数/陽子数比 ( $N/Z$  比) の変化に対する軌道配位の変化が議論されてきた。そして異常核構造の発現機構を、 $N/Z$  比の変化のみならずその励起エネルギーも含めたより包括的な不安定性の観点からも議論を行うことが求められるようになってきた。特に、“island of inversion” 近傍核である  $^{32}\text{Al}$  においては、その励起状態に “island of inversion” としての性質が現れている、すなわち核配位の逆転現象が起きているのではないかという議論が起きていた。

## 2. 研究の目的

核磁気モーメントは核スピンの付随する量であるため、その測定のためには目的核の核スピン配向アンサンブルを生成することが不可欠である。特に励起状態の核磁気モーメントは後述する摂動角分布法 (PAD 法) によって測定を行うため、二次の核スピン配向である核スピンの生成が必要となる。

不安定核を生成する際の核破砕反応においてある特定の運動量を選択することによって、核スピン配向した RI ビームを生成できることが 1990 年代に明らかになった。しかしこの従来の核スピン配向生成法では、一次ビームとして使える核種は限られているため、その核種から離れた不安定核種に対しては大きな核スピン配向状態を生成できないという弱点があった。

そこで本研究では核図表のあらゆる範囲の不安定核に対して高い核スピン配向を実現するための新たな手法、分散整合二回散乱法を開発する。そして分散整合二回散乱法によって生成した核スピン配向  $^{32}\text{Al}$  に対し比較的長寿命の励起状態 (核異性体) の核磁気モーメントの測定を行い、異常核構造発現の解明を目指す。

## 3. 研究の方法

本研究で開発した新しい核スピン配向 RI ビーム生成法である分散整合二回散乱法では、まず第一反応で目的核より一核子多い核を生成する。そして第二反応として一核子除去反応を選び出すことで、目的核における高い核スピン配向の実現が可能になる。ただし単純な二回散乱法では目的核の最終的な収量が少なくなってしまう。そこで高い核スピン配向を維持したまま収量の増加を図るために、イオン光学における分散整合に着目した。第二反応を運動量分散焦点面で起こし、その後の二重消光焦点面までを分散整合条件を満たしながらビームの輸送を行うことで、二重消光焦点面においては第二反応由来の相対的な運動量分散のみによる選択を行うことができる。つまり最終的な運動量選択は、第一反応由来の運動量分散には依存しなくなるので、収量に最適化した一次標的を用いることが可能になり、さらに運動量分散焦点面のあらゆる反応点において生成した目的核を利用することで大幅な収量の増加が見込める。つまり、二回散乱と分散整合条件を組み合わせることで、高い核スピン配向をもつ高強度の核スピン配向 RI ビームを生成することが可能になる。(図 1 参照。)

$^{32}\text{Al}$  の核異性体励起状態の核磁気モーメント測定実験は理化学研究所 RIBF において行った。一次ビーム  $^{48}\text{Ca}$  から、第一反応として  $^{33}\text{Al}$  を生成し、さらに第二反応として分散整合焦点面において  $^{32}\text{Al}$  の生成を行った。核異性体励起状態の生成もこの第二反応で同時に行われる。

生成した  $^{32}\text{Al}$  に対して時間微分型摂動角分布法 (TDPAD 法) を適用して、核磁気モーメントの測定を行った。TDPAD 法の実験セットアップを図 2 に示す。TDPAD 法では、まず核スピン配向した RI ビームを十分な横スピン緩和時間を持つストッパー中に停止させる。核スピン配向した不安定核の励起状態は脱励起する際のガンマ線放出角度に異方性を持つ。従って、止めた不安定核に静磁場をかけて歳差運動させ、そのガンマ線強度の時間変化を測定することで、ラーモア歳差周波数を決定することができる。

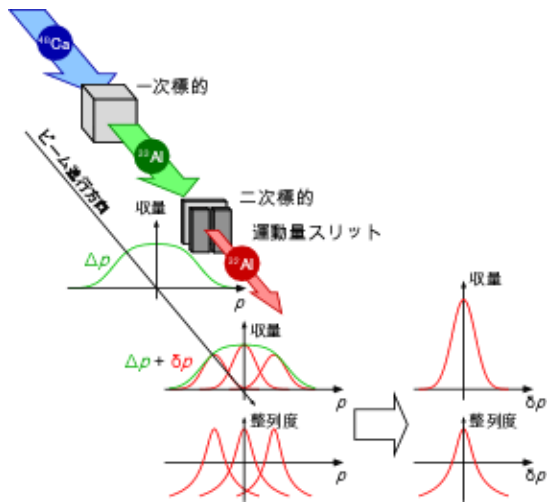


図 1. 分散整合二回散乱法の原理。ここでは一次ビーム  $^{48}\text{Ca}$  から  $^{33}\text{Al}$  を経由して分散整合焦点面にて  $^{32}\text{Al}$  を生成する場合を示す。分散整合条件を満たすことで、二重消光焦点面では第一反応起源の運動量分散  $\Delta p$  を打消し、第二反応による「相対運動量変分  $\delta p$ 」のみに対する運動量選択が可能になる。

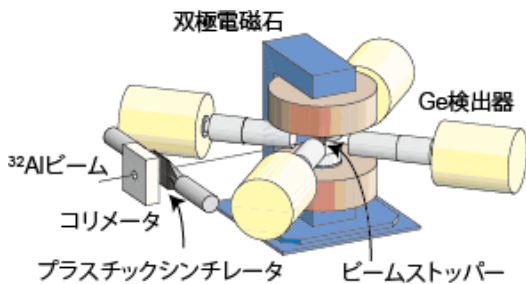


図 2. 実験セットアップの概略図。 $^{32}\text{Al}$  ビームは Cu ストッパー中に停止する。双極電磁石で静磁場をかけてスピン整列した  $^{32}\text{Al}$  を歳差運動させ、その脱励起ガンマ線を Ge 検出器で測定する。プラスチックシンチレータはビームの到来を検出するために用いる。

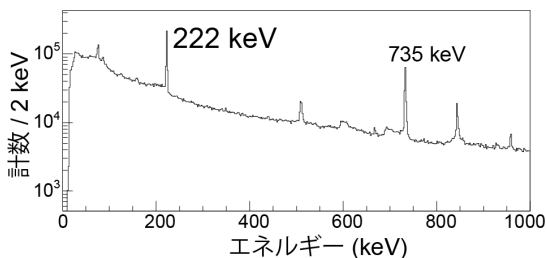


図 3. 得られたエネルギースペクトル。 $^{32}\text{Al}$  の核異性体励起状態からの二つの脱励起ガンマ線 (222 keV、735 keV) を観測した。

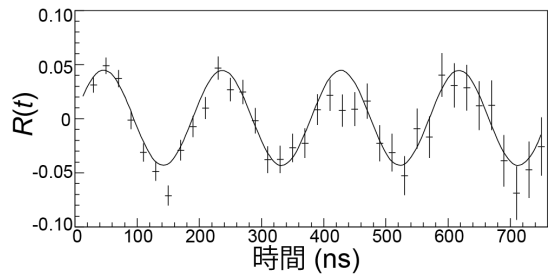


図 4. 222 keV のガンマ線に対する  $R(t)$  プロット。 $R(t)$  関数の振幅からスピン整列度、周期から核磁気モーメントを決定した。

#### 4. 研究成果

理化学研究所 RIBF において行った実験では、一次ビーム  $^{48}\text{Ca}$  から  $^{33}\text{Al}$  を経由することにより、8(1) % のスピン整列度をもつ  $^{32}\text{Al}$  の RI ビームを生成することに成功した。今回の  $^{32}\text{Al}$  ビーム生成の場合に関しては、分散整合二回散乱法によりスピン整列を生成することで、従来行われてきた一回散乱法に比べて 50 倍以上の効率向上が達成された。

本実験では生成したスピン偏極  $^{32}\text{Al}$  ビームに対して TDPAD 法を適用し、核異性体励起状態の核磁気モーメントを初めて決定した。本実験で得られたガンマ線スペクトルを図 3 に、222 keV の脱励起ガンマ線に対して作成した  $R(t)$  関数と呼ばれるガンマ線強度の非等方性を表すプロットを図 4 にそれぞれ示す。得られた実験値をいくつかの理論値と比較したところ、実験値を再現するいずれの理論計算においてもスピン・パリティが  $4^+$  であることから  $^{32}\text{Al}$  の核異性体のスピン・パリティが  $4^+$  であることが確定した。上述のように  $^{32}\text{Al}$  は “island of inversion” 近傍に位置するため、その励起状態に “island of inversion” としての性質が現れている、すなわち核配位の逆転現象が起きているのではないかという議論が起きていた。そして本実験により確定した  $^{32}\text{Al}$  の準位構造は  $^{32}\text{Al}$  において配位逆転が起きていないと仮定した場合の殻模型計算による準位構造と逆転していた。そこで、通常核配位を取る  $^{30}\text{Al}$  の準位構造を基にして粒子-空孔置換により  $^{32}\text{Al}$  の準位構造を再構成するという計算を独自に行った。その結果、必ずしも配位逆転が起きていなくても  $^{32}\text{Al}$  の準位構造が再現できることを示した。これは準位構造の逆転現象が直接配位逆転に起因しない例を示したことになり、“island of inversion” 現象の解明に向けた意義深い貢献といえる。

さらに本研究で開発した分散整合二回散乱法は、次世代加速器施設 RIBF の BigRIPS ビームラインの特性を有効利用したものであり、従来の一回散乱法では大きなスピン整

列度を得ることができないような核図表のあらゆる領域に対して普遍的に有効な手法である。今後この手法を用いることで、RIBFで続々と発見されつつある数多くの新核異性体励起状態に対して核磁気モーメントの測定、そしてそれを通じた広範な領域の核構造研究が可能になると期待される。

#### 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 22 件)

1. Y. Ichikawa *et al.*, “Production of spin-aligned RI beam via two-step fragmentation with dispersion matching”, *Journal of Physics: Conference Series* (2012) (in print) 査読無.
2. R. Chevrier, J. M. Daugas, L. Gaudefroy, Y. Ichikawa *et al.*, “Is the  $7/2_1^-$  Isomer State of  $^{43}\text{S}$  Spherical?”, *Physical Review Letters* 108, 162501 (2012) 査読有.
3. Y. Ichikawa *et al.*, “Proton-rich nuclear structure and mirror asymmetry investigated by  $\beta$ -decay spectroscopy of  $^{24}\text{Si}$ ”, *Journal of Physics: Conference Series*, 312, 092031 (2011) 査読有.
4. H. Ueno, Y. Ichikawa *et al.*, “Production of spin-aligned RI beams via the two-step fragmentation reaction”, *Proceedings of “French-Japanese Symposium on Nuclear Structure Problems”*(2011) 査読無.
5. R. Chevrier, ..., Y. Ichikawa(9 番目) *et al.*, “Nuclear moments of  $\mu$ -second isomeric fragments at BigRIPS”, *Proceedings of “French-Japanese Symposium on Nuclear Structure Problems”*(2011) 査読無.
6. A. Yoshimi, ..., Y. Ichikawa(12 番目) *et al.*, “Low-frequency nuclear spin oscillator of  $^{129}\text{Xe}$  with optical spin detection”, *Physics Letters A*, (2012) (accepted) 査読有.
7. N. Imai, ..., Y. Ichikawa(7 番目) *et al.*, “Isobaric analog resonances of the  $N=21$  nucleus  $^{35}\text{Si}$ ” *Physical Review C* 85, 034313 (2012) 査読有.
8. S. Sakaguchi, ..., Y. Ichikawa(10 番目) *et al.*, “Analyzing power in elastic scattering of 6He from polarized proton target at 70 MeV/nucleon”, *Physical Review C* 84, 024604 (2011) 査読有.
9. Y. Ichikawa *et al.*, “Production of spin-aligned RI beam via two-step fragmentation”, *RIKEN Accelerator Progress Report*, vol.44, 21 (2011) 査読無.
10. Y. Ichikawa *et al.*, “Gamow-Teller transition of proton-rich nucleus  $^{24}\text{Si}$ ”, *AIP Conference Proceedings*, 1235, 265-269 (2010) 査読無.
11. Y. Ichikawa *et al.*, “Mirror asymmetry for  $B(\text{GT})$  of  $^{24}\text{Si}$  induced by Thomas-Ehrman shift”, *AIP Conference Proceedings*, 1238, 290-293 (2010) 査読無.
12. Y. Ichikawa *et al.*, “Mirror asymmetry investigated by  $\beta$ -decay of proton-rich  $^{24}\text{Si}$ ”, *Modern Physics Letters A*, Vol.25, Nos.21-23, 1895-1898 (2010) 査読無.
13. 市川 雄一, 「陽子過剰核  $^{24}\text{Si}$  のベータ崩壊とその鏡映対称性」, *原子核研究*, 第 55 巻第 1 号, 第 33—42 頁 (2010 年出版) 査読無.
14. Y. Ichikawa *et al.*, Beta decay of the proton-rich nucleus  $^{24}\text{Si}$  and its mirror asymmetry, *RIKEN Accelerator Progress Report*, vol.43, 11 (2010) 査読無.
15. D. Suzuki, ..., Y. Ichikawa(6 番目) *et al.*, “Resonant neutrino scattering: An impossible experiment?”, *Physics Letters B* 687, 144-148 (2010) 査読有.
16. T. Uesaka, ..., Y. Ichikawa(10 番目) *et al.*, Analyzing power for proton elastic scattering from the neutron-rich  $^6\text{He}$  nucleus”, *Physical Review C* 82, 021602(R) (2010) 査読有.
17. T. Nagatomo, ..., Y. Ichikawa(6 番目) *et al.*, “Precise nuclear moments of extremely proton-rich nucleus  $^{23}\text{Al}$ ”, *Hyperfine Interactions*, 198, 103-107 (2010) 査読無.

18. M. Mihara, ..., Y. Ichikawa(14 番目) *et al.*, “Beta-NMR measurement of  $^{58}\text{Cu}$  in Si”, *Hyperfine Interactions*, 197, 143-147 (2010) 査読無.
  19. Y. Ichikawa *et al.*, “ $\beta$  decay of the proton-rich nucleus  $^{24}\text{Si}$  and its mirror asymmetry”, *Physical Review C* 80, 044302 (2009) 査読有.
  20. Y. Ichikawa *et al.*, “Beta-decay study of  $T_z=-2$  proton-rich nucleus  $^{24}\text{Si}$ ”, *European Physical Journal A* 42, 375-378 (2009) 査読有.
  21. Y. Ichikawa *et al.*, “Investigation into behavior of weakly-bound proton via  $B(\text{GT})$  measurement for the  $\beta$  decay of  $^{24}\text{Si}$ ”, *AIP Conference Proceedings*, 1165, 98-101 (2009) 査読無.
  22. M. De Rydt, ..., Y. Ichikawa(10 番目) *et al.*, “Precision measurement of the electric quadrupole moment of  $^{31}\text{Al}$  and determination of the effective proton charge in the sd-shell”, *Physics Letters B*, 678, 344-349 (2009) 査読有.
- [学会発表] (計 23 件)
1. 石井 裕司, G. Georgiev, 市川 雄一 他, 「一核子抜き取り反応によるスピン整列  $^{69m}\text{Cu}$  の生成とその核モーメント測定」, 日本物理学会第 67 回年次大会, 関西学院大学 (西宮市), 2012 年 3 月 24-27 日.
  2. Y. Ichikawa *et al.*, “Spin-aligned RI beam produced by two-step projectile fragmentation”, *The International Symposium on Physics of Unstable Nuclei (ISPUN11)*, Hanoi, Vietnam, November 23-28 (2011).
  3. 市川 雄一 他, 「分散整合二回散乱法による核スピン整列 RI ビームの生成 III」, 日本物理学会 2011 年秋季大会, 弘前大学 (弘前市), 2011 年 9 月 16-19 日.
  4. R. Chevrier, J. M. Daugas, L. Gaudefroy, Y. Ichikawa *et al.*, “Quadrupole moment measurement of the  $N=27$  nucleus  $^{43m}\text{S}$ ”, *Colloque GANIL 2011*, Corsica, France, September 25-30 (2011).
  5. Y. Ichikawa *et al.*, “Production of spin-aligned RI beam via two-step fragmentation with dispersion matching”, *Rutherford Centennial Conference on Nuclear Physics 2011*, Manchester, UK, August 8-12 (2011).
  6. Y. Ichikawa *et al.*, “ $g$ -factor measurement for highly spin-aligned isomeric state of  $^{32}\text{Al}$ ”, *International Symposium on Frontier of Gamma-ray Spectroscopy (Gamma11)*, Saitama, Japan, June 30 – July 2 (2011).
  7. Y. Ichikawa *et al.*, “Production of spin-aligned RI beam via two-step fragmentation with dispersion matching”, *Advances in Radioactive Isotope Science – ARIS 2011*, Leuven, Belgium, May 28 - June 3 (2011).
  8. R. Chevrier, J. M. Daugas, L. Gaudefroy, Y. Ichikawa *et al.*, “Quadrupole moment measurement of the  $N=27$  nucleus  $^{43m}\text{S}$ ”, *Advances in Radioactive Isotope Science – ARIS 2011*, Leuven, Belgium, May 28 - June 3 (2011).
  9. Y. Ichikawa *et al.*, “ $g$ -factor measurements for highly spin-aligned isomeric states”, *E(U)RICA International Workshop*, Saitama, Japan, May 23-24 (2011).
  10. 市川 雄一 他, 「分散整合二回散乱法による各スピン整列 RI ビームの生成 II」, 日本物理学会第 66 回年次大会, 新潟大学 (新潟市), 2011 年 3 月 (震災のため大会は中止、ウェブ上にて発表) .
  11. H. Ueno, Y. Ichikawa *et al.*, “Production of spin-aligned RI beams via the two-step fragmentation reaction”, *French-Japanese Symposium on Nuclear Structure Problems*, Saitama, Japan, January 5-8 (2011).
  12. Y. Ichikawa *et al.*, “Production of spin-aligned RI beam via two-step fragmentation with dispersion matching”, *University of Aizu-JUSTIPEN-EFES Symposium on “Cutting-Edge Physics on Unstable Nuclei”*, Fukushima, Japan, November 10-13 (2010).

13. Y. Ichikawa et al., “*g*-factor measurement for isomeric state of  $^{32}\text{Al}$  using two-step projectile fragmentation reaction with dispersion matching”, GCOE International Summer School, Hadrons and Nuclei under Extreme Conditions, Tokyo, Japan, September 16-17 (2010).
14. 市川 雄一 他, 「分散整合二回散乱法による核スピン整列 RI ビームの生成」, 日本物理学会 2010 年秋季大会, 九州工業大学 (北九州市), 2010 年 9 月 11-14 日.
15. 市川 雄一 他, 「陽子過剰核  $^{24}\text{Si}$  の  $\beta$  崩壊とその鏡映対称性」(企画講演), 日本物理学会 2010 年秋季大会, 九州工業大学 (北九州市), 2010 年 9 月 11-14 日.
16. 石井 裕司, 市川 雄一 他, 「TDPAD 法を用いた  $^{32}\text{Al}$  アイソマーの磁気モーメント測定」, 日本物理学会 2010 年秋季大会, 九州工業大学 (北九州市), 2010 年 9 月 11-14 日.
17. Y. Ichikawa et al., “Proton-rich nuclear structure and mirror asymmetry investigated by  $\beta$ -decay spectroscopy of  $^{24}\text{Si}$ ”, The 24th International Conference (INPC) 2010, Vancouver, Canada, July 4-9 (2010).
18. Y. Ichikawa et al., “Mirror asymmetry investigated by  $\beta$  decay of proton-rich  $^{24}\text{Si}$ ”, Forefronts of Researches in Exotic Nuclear Structures, Niigata, Japan, March 1-4 (2010).
19. Y. Ichikawa et al., “Proton-rich nuclear structure investigated by  $\beta$ -decay of  $^{24}\text{Si}$ ”, ICHOR-EFES International Symposium on New Facet of Spin-Isospin Responses, Tokyo, Japan, February 18-21 (2010).
20. Y. Ichikawa et al., “Mirror asymmetry for  $B(GT)$  of  $^{24}\text{Si}$  induced by Thomas-Ehrman shift”, Tours Symposium on Nuclear Physics and Astrophysics VII, Kobe, Japan, November 16-20 (2009).
21. Y. Ichikawa et al., “Gamow-Teller transition of proton-rich nucleus  $^{24}\text{Si}$ ”, 7th Japan-China Joint Nuclear Physics Symposium, Ibaraki, Japan, November 9-13 (2009).

22. Y. Ichikawa et al., “Beta decay of  $^{24}\text{Si}$  and mirror asymmetry of Gamow-Teller transition strength”, Third Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of the APS and JPS, Hawaii, USA, October 13-17 (2009).

23. Y. Ichikawa et al., “Investigation into behavior of weakly-bound proton via  $B(GT)$  measurement for the  $\beta$  decay of  $^{24}\text{Si}$ ”, Nuclear Structure and Dynamics, Dubrovnik, Croatia, May 4-8 (2009).

〔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

6. 研究組織  
(1) 研究代表者  
市川 雄一 (ICHIKAWA YUICHI)  
独立行政法人理化学研究所・偏極 RI ビーム  
生成装置開発チーム・客員研究員  
研究者番号：20532089