

2007年6月6日

独立行政法人 理化学研究所

## RI ビームファクトリーで新同位元素の発見に成功

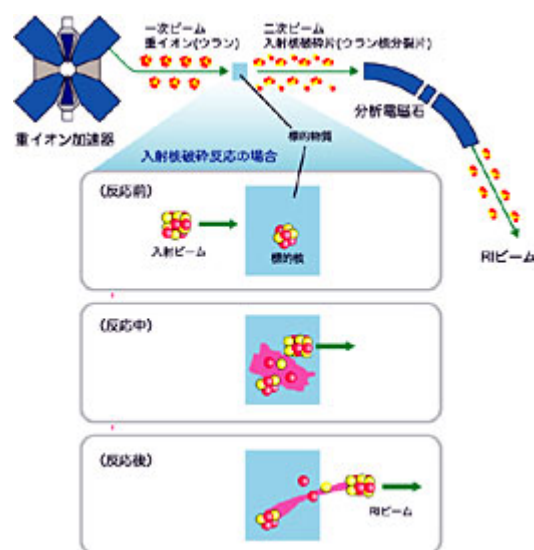
- 世界に冠絶する次世代加速器施設の RI 生成能力の高さを証明 -

私たちの体や身のまわりに存在しているあらゆる物質は、陽子と中性子が結びついた原子核と電子からなる元素でできています。陽子の数が同じで、中性子の数が異なる元素を同位体と呼びます。同位体は、それぞれ違った性質を持ち、新たな元素といえます。例えば、自然界で最も軽い元素の水素は、陽子が1個で、中性子はありますが、中性子が1つ付くと2重水素となり中性子の減速材などに活用され、2つ付いた3重水素は核融合の燃料として期待されています。

地球上に天然に存在する安定な原子核は、約300個ですが、理論的に10,000個の原子核が存在すると言われていています。しかしながら、その実態はなぞのままでした。

理研仁科加速器研究センターは、水素からウランまでのすべての元素のRIビームを世界最多の4,000種類発生できる、世界で唯一の次世代加速器施設「RIビームファクトリー」を開発しました。稼動開始直後で早くも、未知の新同位体元素、パラジウム-125を生成しました。

この元素は、既知の安定同位体に比べて中性子の数が異常に多い中性子過剰の $^{125}\text{Pd}$ です。引き続き新同位体を生成し、さらに生成した新同位体を詳細かつ多角的に解析していくことにより、原子核物理の根源的な研究に挑み、世界に先駆けて元素をめぐる謎解きに大きく貢献して行きます。



2007年6月6日  
独立行政法人 理化学研究所

## RI ビームファクトリーで新同位元素の発見に成功

- 世界に冠絶する次世代加速器施設の RI 生成能力の高さを証明 -

### ◇ポイント◇

- ・ウランイオンを光速の70%まで加速、ベリリウムと衝突させ、新同位元素を発見
- ・最終目標値の1/100,000程度のビームで、早くも中性子過剰な新同位元素の発見に成功
- ・元素の起源解明など原子核物理の根源となる研究がスタート

独立行政法人理化学研究所(野依良治理事長)は、仁科加速器研究センター(矢野安重センター長)が推進している次世代加速器施設「RIビームファクトリー(RIBF)<sup>\*1</sup>」で、中性子過剰領域に存在する未知の放射性同位元素<sup>\*2</sup> (RI) を生成することによって、新同位元素の発見に成功しました。今回見つかった新同位元素は、パラジウム(元素番号46) -125(質量数)です。パラジウムの安定な同位元素で中性子過剰なものは、質量数110の同位元素であることから、15個も中性子が過剰な未知の同位体です。

この新同位元素は天然に存在する最も重い元素であるウランを、超伝導リングサイクロトロン(SRC)等の加速器システムで光速の70%まで段階的に加速した後、生成標的であるベリリウムに衝突させ、ウラン特有の核分裂反応<sup>\*3</sup>を用いて生成しました。さらに、生成したRIを超伝導RIビーム分離生成装置(BigRIPS)で収集・分析し、中性子過剰な新同位元素として特定しました。

RIBFの心臓部であるRIビーム発生系施設は平成19年3月に完成し、現在、各装置の初期調整を行っている段階です。今回の実験で得られたウランビームの強度は稼動開始直後のため、最終目標値の約10万分の1で、1秒あたり約1億個でした。新同位元素の発見には、ウランのような重い元素を従来の世界水準を越えるビーム強度で加速し、さらに生成したRIを効率的に収集することが必要となります。今回、新同位元素の発見に成功したことは、SRC、BigRIPS等から構成したRIビームファクトリー発生系施設が、中重核<sup>\*4</sup>領域のRI生成能力において世界最高性能であることを証明したことになります。

RIビームファクトリー計画では、水素からウランまでのすべての元素のRIビームを世界最多の4,000種類発生できる唯一の研究施設を建設し、この施設から創出される多くの新しい原子核をも包含する「新たな原子核モデルの構築」、さらに「元素の起源の解明」といった原子核物理の根源的な研究に挑戦することを目指しています。

今回、新同位元素の発見に成功したことは、世界に冠絶する施設として期待される人類未踏の研究成果の序章として、国際的に熾烈な開発競争を続けているRIビーム発生施設の開発で日本が先鞭をつけたことになります。

今後は、引き続き未知の放射性同位元素(RI)生成実験を行うとともに、RIビーム発生系施設で生成されるRIを詳細かつ多角的に解析する装置を平成24年度までに順次整備し、RIビームを活用した世界初となる本格実験に挑戦していきます。

今回の新同位元素の発見の成果は、開催中の原子核物理国際会議INPC2007で6月6日、緊急報告しました。

## 1. 背景

原子核は陽子と中性子で構成され、原子核の性質は陽子数と中性子数で決まります。原子核を陽子数と中性子数で分類した図表を核図表と呼び、今回見つかった原子核は図1の核図表上に位置しています。パラジウム-125の陽子数は46で中性子数は79です。

この新しい原子核が見つかった領域は、陽子数50、中性子数82といった魔法数<sup>\*5</sup>近傍の原子核であり、原子核物理学者が注目している領域です。魔法数を持った原子核は一般的に安定で堅く丸い形状をしていると考えられていますが、魔法数近傍の領域ではどのような形状となっているのか注目を集めています。また、この領域の原子核は鉄からウランまでの元素生成に関わる原子核だと考えられています。今回の新同位元素の発見は、この原子核物理学者が長年抱えてきた問いを解くための第一歩を踏み出すことに成功したと言えます。

地球上に天然に存在する安定な原子核は約300個ですが、理論的には10,000個の原子核が存在するといわれ、その殆どが放射線同位元素 (RI) で不安定な原子核です。

原子核物理学は、約100年前、放射性同位元素 (RI) の発見とともに始まりました。まずは天然に存在する安定な原子核や半減期 (寿命) の長い不安定核の研究が行われ、様々な理解が進みました。その後、加速器を用いて人工的に放射性同位元素 (RI) を生成することができるようになると、原子核物理学は加速器技術・RI分離技術の向上とともに段階的に発展し、現在では、半減期 (寿命) が極端に短い不安定核の研究ができるようになってきました。

理研では1937年に仁科芳雄博士が日本初、世界で2番目の加速器を建造して以来、世界最先端の加速器研究施設としての地位を保持し、既存の加速器施設では1990年以来、安定原子核では見られない不安定原子核に特有の「中性子ハロー<sup>\*6</sup>」や「魔法数の喪失と新魔法数の出現」の研究などで実績を上げています (2000年5月29日プレス発表: 新しい魔法数 (マジックナンバー) の発見など)。

今回、未知の放射性同位元素 (RI) の生成に成功したことは、従来の世界水準と比し加速器技術・RI分離技術が飛躍的に向上したことを意味し、原子核物理学の新たな歴史が、理研の施設でつくられようとしています。

## 2. 研究手法

### (1) RI ビームファクトリーの装置群

RIビームファクトリーは、既存の加速器 (RILAC、RRC) を増設する形で3基の新たなリングサイクロトロン (fRC、IRC、SRC) と超伝導RIビーム分離生成装置 (BigRIPS) から構成されるRIビーム発生系施設を整備し、重イオン<sup>\*7</sup>の加速能力とRIビーム生成能力を飛躍的に高め、既存施設では軽い元素に限られているRIビームをウランまでの全元素にわたって世界最大強度で発生させ、さらに、独創的な実験設備群を整備し生成したRIを多角的に解析・利用することを目指しています (図2)。

RIビームは、安定な原子核のイオンビーム (重イオンビーム) を高いエネルギーまで加速し、それを生成標的 (ターゲット) に照射して、「入射核破碎反応<sup>\*8</sup>」または「ウラン-238の核分裂反応」を利用することによって発生させます (図3)。

特にウラン-238の核分裂反応は、質量数50から140に至る広い範囲で中性子過剰なRIを生成する能力がとて高いと考えられています。例えば、ニッケル（陽子数28）-78を生成する能力は従来型の入射核破碎反応に比べ約1,000倍です。

RIビームファクトリーでは、既存の重イオン加速システムと3基の新しいリングサイクロトロンで段階的にエネルギーを上げていく「多段式」の加速方式（図4）を採用して、ウランまでのすべての元素の大強度イオンビームを核子当り345MeV（水素から質量数40までのイオンビームは核子当り400~440MeV）まで加速できるように設計されています。今回のウランビームの加速も、この「多段式」の加速方式で行いました。

超伝導RIビーム分離生成装置（BigRIPS）は、核分裂反応によって生成したRIを磁石（磁場）の力で効率良く収集・分離するように設計されています（図5）。ウランが標的要素と衝突して生ずる核分裂で解放されるエネルギーは大きく、生成された核分裂片はビームの進行方向に沿って大きな角度に広がって生成されますが、BigRIPSは超伝導四重極電磁石を擁し、この大きく広がった分裂片の約半分をも集める能力を誇ります。

BigRIPSは、世界初のタンデム（直列）型のRIビーム生成装置であり、2つのステージで構成されています。第1ステージはRIの収集と分離の機能を持ち、第2ステージではRIの特定を行います。この設計思想の原点は、理研の既存施設で行われているRIビーム実験での実績・経験から生まれたもので、タンデム型を採用したことにより、ビーム強度を損わずに生成されたRIを特定することが実現しました。

## (2) 新同位元素の特定

今回の新同位元素の発見は次のように行いました（図5）。

- 1) SRCを含む加速システムで加速したウランビームを生成標的であるベリリウムに衝突、核分裂反応を起こしRIを生成。
- 2) 生成したRIを、BigRIPS第1ステージへ通過させ、中性子過剰なRIのみ選別し分離。
- 3) 分離した中性子過剰なRIをBigRIPS第2ステージに通過させ粒子識別を実施

原子核を特定するためには、RIの元素番号Z、質量数A、電荷量Qを決定する必要があります。重い原子核では分裂片に電子がつくことがあり、電荷量は例えば電子が一つ付くと $Q=Z-1$ になります。従って、電荷量も測定する必要があります。これらの量を決定するために生成したRIの飛行時間、エネルギー損失量、運動量、運動エネルギーを測定しました。これらの測定量から元素番号Z、質量数A、電荷量Qを導出し、横軸A/Qと縦軸Zの粒子識別の図をつくります（図6）。図の1点が分裂片1個に相当しています。Zが46の同位体だけを選び、A/Qのヒストグラムをつくることによって、パラジウムの新しい同位体を発見しました。

今回、発見したパラジウムの新同位体 $^{125}\text{Pd}$ は59個生成できました。安定同位体 $^{110}\text{Pd}$ より15個も中性子過剰で、パラジウムの同位体では1997年に $^{124}\text{Pd}$

が発見されて以来のことです。

今回生成した放射性同位元素 (RI)  $^{125}\text{Pd}$  の陽子数は 46 で、中性子数 79 で中性子の魔法数との違いは 3 だけです。この周辺の原子核の性質を今後調べることによって、この領域での魔法数喪失現象の有無について研究を行うことができます。また、これらの放射性同位元素 (RI) は鉄からウランまでの元素生成過程に関与する原子核だと考えられています。今後、ウランビームの強度を向上させると、半減期や精密な質量を測ることができるようになり、宇宙における元素合成過程の理解へ挑戦することができるようになります。

### 3. 今後の展望

RIビームの発生利用技術は、日本人研究者の手により 1980 年代半ばに発明され、安定線<sup>\*9</sup>から遠く離れて存在するエキゾチックな不安定原子核の構造を探る、唯一の研究手段として世界中で積極的に用いられてきました。その結果、極端に中性子や陽子が多い不安定原子核には、これまで原子核の基本的性質と考えられてきた「原子核の飽和性 (密度一定)」を破る中性子ハローや中性子スキン構造を持つものがあることや、「殻モデル」が予言する従来の魔法数が魔法性を失い新たに別の魔法数が出現するなど、これまでの「原子核像の常識」を覆す核構造の存在が随所に発見されつつあります。これらの異常な核構造までも包括して説明する「究極の原子核モデル」の構築が求められています。そのためには、いまだ発見されていない安定線から遠く離れた原子核を可能なかぎり多種生成しそれらの特性を調べ、多様な原子核構造の全貌を明らかにする必要があります。

RIビームファクトリーでは約 4,000 種類の不安定核を生成することができます (図 7)。その内約 1,000 種類は、人類未踏の不安定核です。今後、加速器システムを着実に高度化し、この未踏の不安定核生成へ挑戦していきます。

RIビームファクトリーの完成によって、主要テーマである「究極の原子核モデルの構築」だけにとどまらず、そもそも元素はどのようにして生まれたのかという「元素の起源解明」といったさらに根源的な研究が可能となります。また、RIビームファクトリーで得られる成果は、物理学、天文学、化学といった基礎科学分野だけにとどまらず、医療、環境、園芸産業、農業、食糧、工業、IT、考古学などの応用分野にも及ぶことが期待されています。RIビームファクトリーは、今年度より、独創的な基幹実験設備を順次整備し、生成されたRIビームを多角的に解析し、精細な物理現象の解明という目的の達成を図るとともに、新しいRI技術による新産業の創出に貢献していきます。

RIビームファクトリーは、次世代加速器施設として世界の研究者が注目しています。今回の実験は、ドイツ・米国の研究者も参加し、国際共同研究チームによって行いました。

今年 2 月に開催した国際実験課題採択委員会では、向こう 2 年分の実験課題を公募したところ、国内外から 19 課題、延べ 265 日分もの実験課題申請があり、そのうち約 7 割が国際共同研究です。RIビームファクトリーは本年度から本格的な実験を開始し、世界の最先端研究施設として国際的な共用を開始します。

(問い合わせ先)

独立行政法人理化学研究所

仁科加速器研究センター・原子核研究部門

部門長 櫻井 博儀 (さくらい ひろよし)

同センター・実験装置運転・維持管理グループ

グループディレクター 久保 敏幸 (くぼ としゆき)

Tel : 048-467-9696 / Fax : 048-461-5301

(報道担当)

独立行政法人理化学研究所 広報室 報道担当

Tel : 048-467-9272 / Fax : 048-462-4715

Mail : koho@riken.jp

## <補足説明>

### ※1 RI ビームファクトリー (RIBF)

水素からウランまでの全元素の RI を世界最大強度でビームとして発生させ、それを多角的に解析・利用することにより、基礎から応用につながる幅広い研究と産業技術の飛躍的発展に貢献することを目的とする次世代加速器施設。

施設は RI ビームを生成するために必要な加速器システム (fRC、IRC、SRC など)、RI ビーム分離生成装置 (BigRIPS) で構成される「RI ビーム発生系施設」と発生系施設で生成された RI ビームの多角的な解析・利用を行う「基幹実験設備」で構成される。RI ビームは原子核の構成メカニズムの解明、元素の起源解明に有用であるとともに、RI 利用による産業発展に寄与することも期待され、ドイツ、アメリカなど世界の主だった重イオン加速器施設でも計画が進められる等、国際的にも熾烈な開発競争を展開している。

### ※2 放射性同位元素 (RI)

物質を構成する原子核には、構造が不安定なため時間とともに原子核が崩壊していくものがある。このような原子核を放射性同位元素と呼ぶ。放射性同位体、不安定同位体、不安定原子核、不安定核、ラジオアイソトープ (RI) と同義語。同じ元素であっても中性子の数が相違する原子同士を同位体と呼ぶが、同位体は安定なものと不安定なものに分類される。不安定なものは崩壊の際に放射線を放出するため、このように区別して呼んでいる。

### ※3 ウラン 238 の核分裂反応

ウラン 238 などの重い原子核が同程度の質量をもつ二つの核に分かれることを核分裂という。ウラン 238 は天然に安定に存在する原子核で寿命は約 44 億年ある。ウラン 238 に粒子をぶつけ、励起させると核分裂が起こる。核分裂で生成された原子核は一般に中性子過剰な原子核となる。

#### ※4 中重核

100 個前後の核子（陽子・中性子）が集まった、重量的に中間に位置する原子核をいう。質量数が小さな原子核は「軽核」と呼び、質量数が大きな原子核は「重核」と呼ばれる。

#### ※5 魔法数

原子核は、陽子数と中性子がある決められた数を満たすと特に安定核となる。この数を「魔法数（マジックナンバー）」と呼び、今までに「2」「8」「20」「28」「50」「82」「126」が知られている。最近、理研を中心とする研究チームは、陽子に比べて中性子の多い不安定核で新しい魔法数「16」を発見した。これまで安定核の魔法数は調べ尽くされており、不安定核も同じ魔法数をもつと考えられてきたが、その定説を覆す成果であり、新しい魔法数の発見は、原子核に新しい規則性があることを示している。

#### ※6 中性子ハロー

これまでの原子核物理の常識では、通常安定な原子核では、陽子と中性子が均一に混ざり合って存在し、陽子の占める体積と中性子の占める体積はほぼ等しいと言われていた。ところが、RIビームを用いた昨今の実験で、中性子の過剰な軽い元素（ $^8\text{He}$ や $^{11}\text{Li}$ ）の不安定原子核構造を詳しく見てみると、核子の分布は通常のコアの部分と、遠方まで広がる過剰な中性子の部分に分かれていることがわかった。この過剰な中性子が異常に大きな半径をもってコアとなる原子核のまわりに薄く広がっている状態を「中性子ハロー」という。また、過剰な中性子が異常な半径をもってコアとなる原子核の周りを“皮”となって取り囲んでいる状態を「中性子スキン」という。

#### ※7 重イオン

原子が電子を失う、または得ることにより電荷を持ったものをイオンといい、このうち、リチウムもしくは炭素より重い元素のイオンを重イオンという。イオン源により原子から電子を剥ぎ取ると原子核の陽子数に比べて電子の数が少なくなり、全体としてプラスの電荷を持つことにより、加速器で電氣的に加速することが可能となる。

#### ※8 入射核破碎反応

加速した原子核が標的原子核にあたったとき複数の破砕片に崩壊するような反応。破砕片には不安定原子核である中性子過剰核や陽子過剰核などの天然に存在しない極めて短寿命な核種（いわゆるエキゾチック原子核）が含まれる。

#### ※9 安定線

原子核は陽子と中性子で構成されるが、安定な原子核でのその比はおおよそ 1 : 1 である。核図表中、この安定核の存在するラインを安定線という。安定線を離れ、陽子数が多い原子核を陽子過剰核と呼び、中性子数が多い原子核を中性子過剰核と呼ぶ。

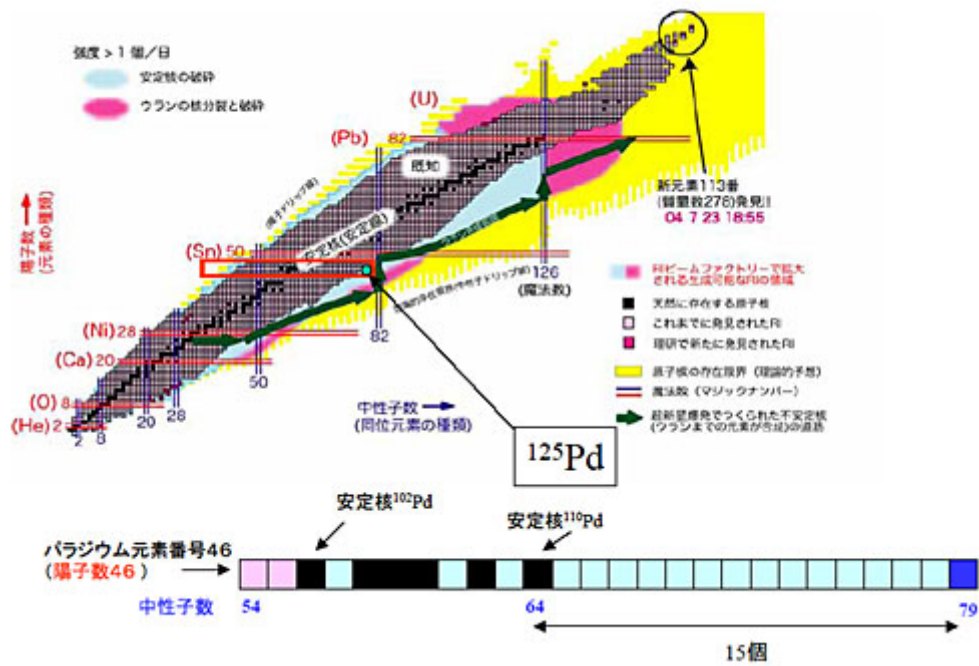


図1 今回発見した新しい同位元素

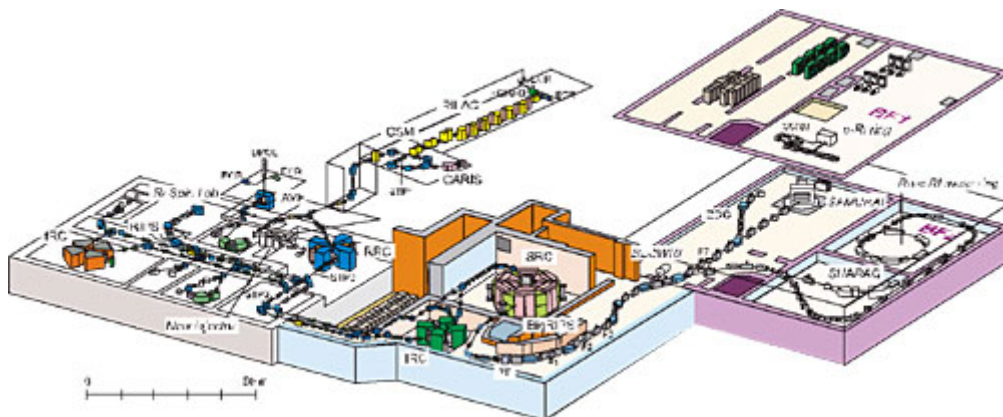


図2 RI ビームファクトリーの全容



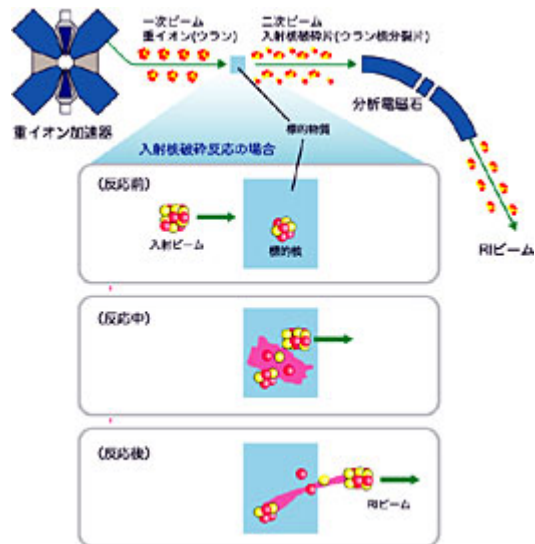


図3 RI ビームの生成方法

高エネルギー重イオン（入射核）を標的中の原子核と衝突させると、その一部が削りとられて種々の RI が生成される。その中から一種類の RI を電磁分離し、ビームとして利用する。この反応を用いて効率よく RI ビームを生成するには、重イオンビームは核子あたり 100MeV（光速の約 40%以上）のエネルギーを持つ必要がある。ウランの核分裂反応では、ウラン 238 が標的中の原子核の強い電場や核力によって質量数 80 と 130 近傍の原子核に効率よく分裂する現象を利用する。この反応を用いるには、ウランビームは核子あたり約 350MeV（光速の約 70%）のエネルギーが必要となる。

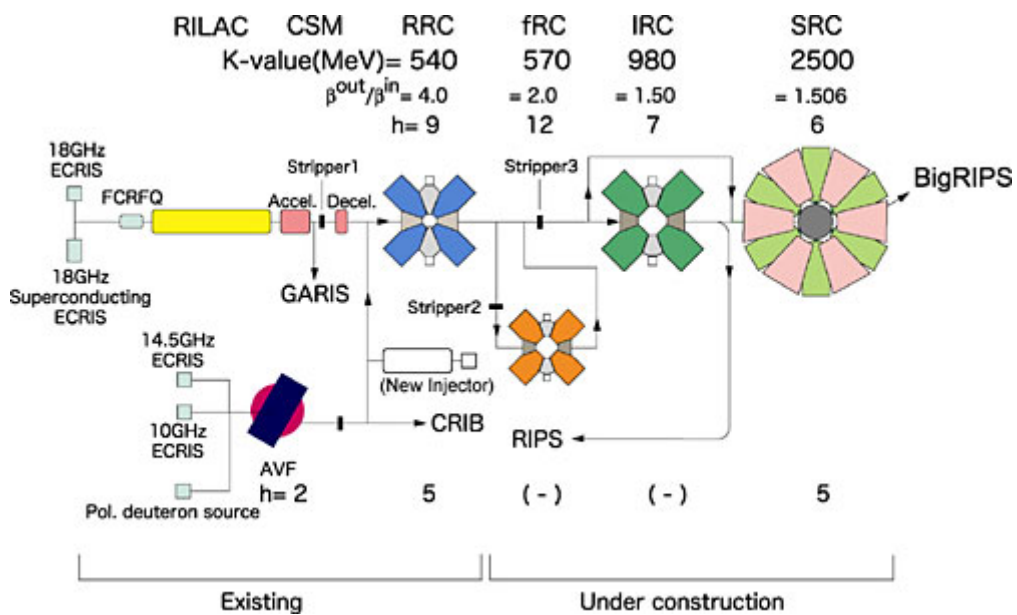


図4 加速器群の構成

ウランを核子あたり 345MeV まで加速する場合は、理研リングサイクロトロン (RRC)

と中間段リングサイクロトロン (IRC) の間に固定周波型リングサイクロトロン (fRC) を使用する。これによって 80kW という史上最強の重イオンパワーが得られる。

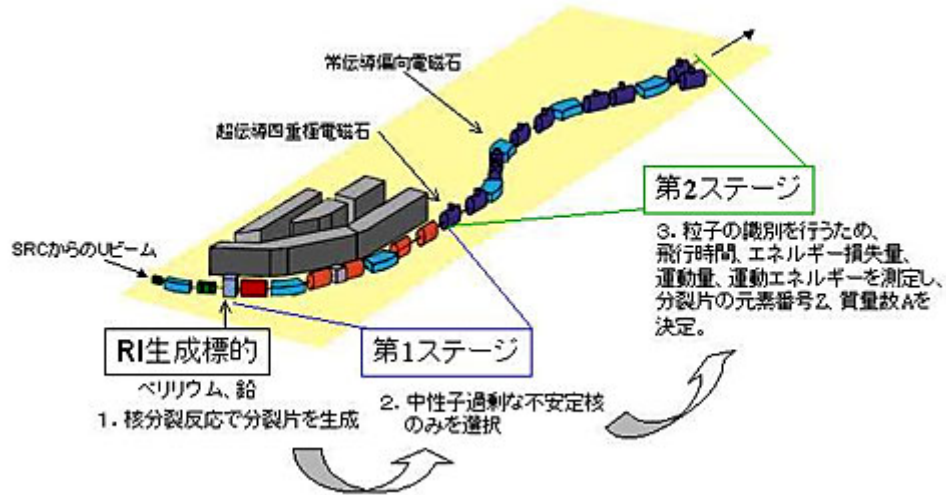
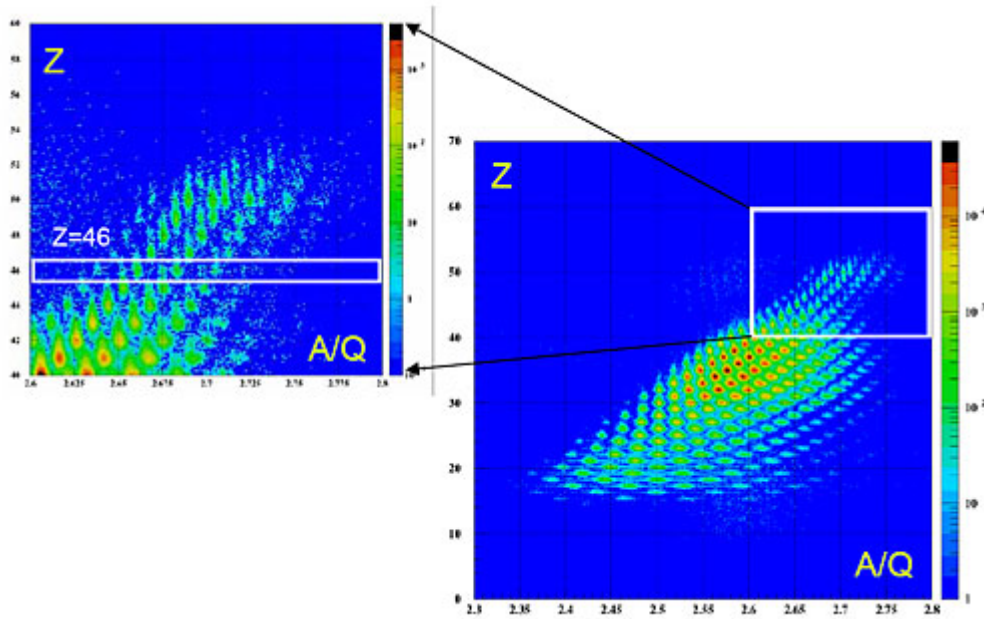
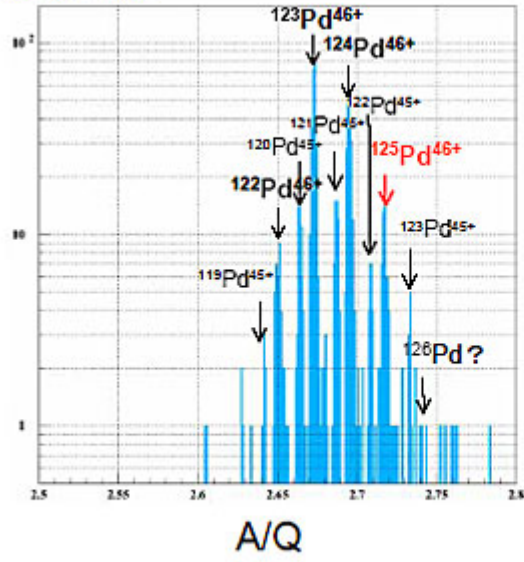


図5 超伝導 RI ビーム分離生成装置 (BigRIPS) と今回の実験手法での粒子識別の方法

BigRIPS は常伝導偏向電磁石と超伝導四重極電磁石により構成され、第1ステージでは、RI 生成標的で生成された RI を収集・分離し、第2ステージでは RI の識別を行うことができる。



カウント数



Q=Z=46の同位体

A/Q 予想値(実測値)		
$^{122}\text{Pd}$	2.6521(2.6506)	38 個
$^{123}\text{Pd}$	2.6739(2.6728)	245 個
$^{124}\text{Pd}$	2.6956(2.6952)	173 個
$^{125}\text{Pd}$	2.7174(2.7171)	59 個

Q=Z-1=45の同位体

電子が一つ付いた同位体		
A/Q 予想値(実測値)		
$^{120}\text{Pd}^{45+}$	2.6666(2.6648)	41 個
$^{121}\text{Pd}^{45+}$	2.6888(2.6871)	55 個
$^{122}\text{Pd}^{45+}$	2.7111(2.708)	16 個
$^{123}\text{Pd}^{45+}$	2.7333(2.7321)	15 個

97年・ドイツ  $^{124}\text{Pd}$  19個

図6 新しい同位元素の発見を示すデータ

BigRIPS第2ステージで得られた元素番号Z、質量数A、電荷量QからZとA/Qの2次元の図をつくる。図中のひとかたまりが1種の同位元素に対応する。Z=46の元素を選び出し、A/Qのヒストグラムをつくり、 $A/Q=125/46=2.7114$ の場所に59個の $^{125}\text{Pd}$ を確認した。電子が一つ付いたQ=45の同位体も観測されている。A/Qの分解能は0.07%で高精度の同位元素決定が可能。

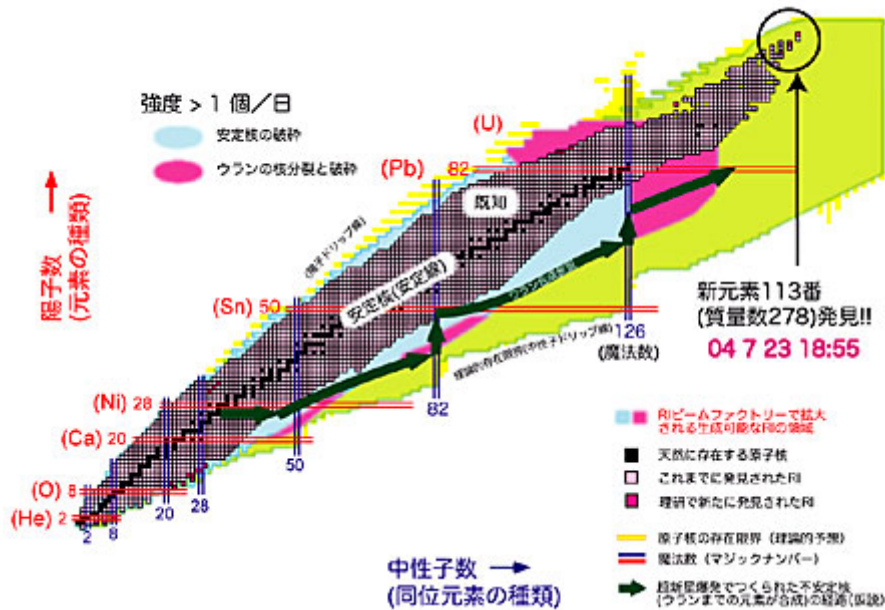


図7 RIビームファクトリーで生成できるRIビーム

現在、人工的に生成された原子核を含め 2,900 種類もの原子核が知られている。しかし、理論的にはおよそ 10,000 種類の原子核の存在が予測されている。RIビームファクトリーでは上図の水色(安定核ビームから入射核破砕反応で生成)及びピンク色(ウランビームから核分裂反応で生成)を合わせ、1,000 種類以上の人類がまだ見ぬ原子核を生成することが可能になる。また、現在のウラン合成仮説では超新星爆発のときに上図の緑色の矢印上の原子核が瞬時に合成され、それらがベータ崩壊してウランまでの重元素ができたとされているが、それらはすべて未知の原子核である。RIビームファクトリー発生系施設始動の暁には、これら原子核の生成が可能となり、世界に先駆けて、この仮説の検証が実験的に可能となる。