

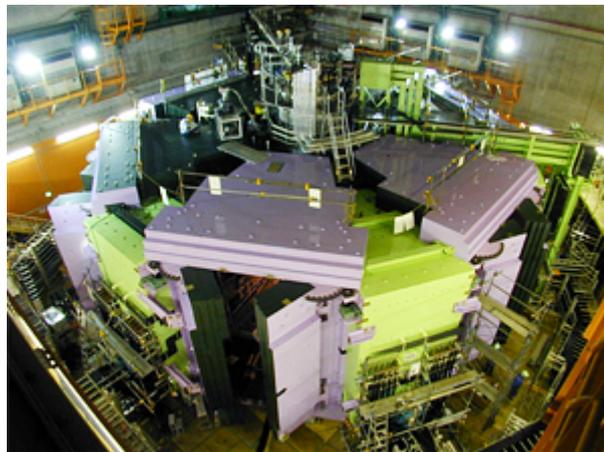
2006年12月28日
独立行政法人 理化学研究所

世界唯一の超伝導リングサイクロトロン - RI ビームファクトリーの心臓部でファーストビーム -

粒子を渦巻き状に走らせて加速するユニークな円形加速器「サイクロトロン」を発明したのは、米国の物理学者のアーネスト・O・ローレンスです。1930年代のことで、その後、さまざまな加速器が登場し、物理学とくに原子核物理学が発展しました。日本でも理研の仁科芳雄主任研究員らが小型サイクロトロンと、200トンもある電磁石をそなえた大サイクロトロンを開発し、世界に肩を並べる力を発揮しました。その後も続いたサイクロトロンの開発が、現在の理研の屋台骨の一つとして期待されています。

サイクロトロンは、物質を構成している原子核の謎を解くためのツールとなるものです。その究極ともいえる超伝導を利用した世界で唯一のリングサイクロトロンが完成し、12月28日「重イオンビーム」の取り出しに成功しました。

この成功は、世界で初めての超伝導リングサイクロトロンを使ってビームを取り出した偉業となり、国際的に熾烈な競争が続く RI ビームを活用する研究に確かな足がかりを得ることとなりました。



(写真) ファーストビームの取り出しに成功した
超伝導リングサイクロトロン

2006年12月28日
独立行政法人 理化学研究所

世界唯一の超伝導リングサイクロトロン¹の完成

- 「RIビームファクトリー」の心臓部でファーストビーム² -

◇ポイント◇

- ・世界初の超伝導リングサイクロトロンで重イオンを光速の70%まで加速
- ・リングサイクロトロン群による多段加速システムの確かさを実証
- ・元素の起源解明など原子核物理の根元的な研究に挑戦するツール

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「RIビームファクトリー（RIBF）計画」の心臓部となる加速器システムを完成させ、12月28日16時、世界初の「超伝導リングサイクロトロン（SRC）」からファーストビームを取り出すことに成功しました。ファーストビームは、アルミニウムイオンを線形加速器（RILAC）で加速し、さらに3基のリングサイクロトロン〔理研リングサイクロトロン（RRC）、中間段リングサイクロトロン（IRC）、SRC〕で順次加速し、重イオン¹ビームとして取り出しました。このような多段式のリングサイクロトロンを使った重イオンの加速は世界で初めてです。ビームエネルギーは核子当り345 MeV²（光速の70%の速さに相当）を達成しました。

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約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や、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。今回、システムの心臓部SRCで重イオンビーム加速が成功したことは、国際的に熾烈な開発競争を続けているRIビーム発生用加速器の開発に日本が先鞭をつけ、世界に冠絶する加速器が完成したことを意味します。

今後は、天然に存在する最も重い元素であるウランの加速を行うとともに、加速した重イオンビームを生成標的（ターゲット）にぶつけてRIビームを生成します。さらに来年度からは、生成されたRIを詳細に解析する装置を順次整備し、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。

1. RIビームファクトリーとは

RI（ラジオアイソトープ）ビームは、天然に存在しない人工的に作られた不安定原子核ビームです。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、ドイツを初めとする主要国の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ます。

日本では、理研の現有施設の拡充を図り、新たに3基のリングサイクロトロン〔固定加速周波数型リングサイクロトロン（fRC）、IRC、SRC〕及び超伝導RIビーム分

離生成装置（BigRIPS）の建設に平成9年度から取り組んできました。平成18年度中にさらにRIビーム分離生成装置（BigRIPS）を完成させ、多種多様なRIビームの発生を目指しています。

理研は、すでに現有の加速器施設において、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、中性子スキン^{*3}」といった研究や「新たな魔法数^{*4}」の発見などで実績を上げています。RIビームファクトリーは、これまで生成が不可能であったRIも生成でき、世界最多となる約4,000種のRIを創出できる性能を持ちます。RIは検出感度が高いため、トレーサーやマーカーとして物理、化学、生物などの基礎科学分野をはじめ医療や農業、環境など広い分野ですでに活用されています。まさに、これからの科学技術を支え、さらに発展させるイノベーションのキーテクノロジーです。

RIビームファクトリー計画では、平成18年度に完成するRIビーム発生系施設に加え、平成19年度より独創的な基幹実験設備を順次整備（平成22年度完成予定）し、発生するRIビームを多角的に利用して精細な物理現象の解明に着手するとともに新しいRI技術による新産業の創出に貢献していきます。

2. 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、現在稼働中の重イオン加速システム（RILAC、RRCなど）に新たに3基の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）を付加してRIビーム発生能力を飛躍的に高め、現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ることを目指しています（図1）。RIビームの発生は、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、「入射核破砕反応」^{*5}または「ウラン238の核分裂反応」^{*6}を利用することによって発生させます（図2）。

そのために、RIビームファクトリーでは、現有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3）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たり345 MeV（水素から質量数40までのイオンビームは核子当たり400～440 MeV）まで加速できるように設計しました（図4）。特に大強度ウランビームを核子当たり345 MeVまで加速できることがRIビームファクトリーを世界に冠絶した施設にする決定的な要因になっています。

3. ファーストビーム

(1) 加速性能

今回のアルミニウムビームの加速は、次のようにして行いました（図5）。1) まずECRイオン源でアルミニウム-27の6価のイオンを生成し、2) それを現有の線形加速器（RILAC）で核子当たり2.7 MeV（光速の8%程度）まで加速した後、炭素薄膜を通過させてイオンの電子の一部を剥ぎ取り10価に変換し、3) それを現有の理研リングサイクロトロン（RRC）で核子当たり45 MeV（光速の30%）まで加速、4) さらに新たに建設した中間段リングサイクロトロン（IRC）および5) 世界最大の超伝導リングサイクロトロン（SRC）でそれぞれ核子当

り 114 MeV（光速の 45%）および核子当り 345 MeV（光速の 70%）まで加速しました。なお、今回の加速では新たに建設した固定加速周波数型リングサイクロトロン（fRC）を使用しない加速モードを選びましたが、ウランを加速する場合はfRCも用いて最終エネルギーを同じく核子当り 345 MeVにします。このアルミニウムビームの質量電荷比^{*7}がウランビームのものと同ほぼ等しいため、今回の加速試験によってSRCが核子当り 345 MeVのウランビームを加速する能力を有することが確認されたこととなります。

(2) SRC

SRC は世界初の超伝導方式のリングサイクロトロンです。サイクロトロンとしては史上最強のビーム偏向能力（8 Tm：テスラメートル）を有しています（図 6）。この能力は、SRC の 6 台の超伝導セクター電磁石（図 7）を純鉄で覆い漏洩磁場を遮蔽することによって実現しました。そのため総重量は 8,300 トンになります。超伝導コイルには純アルミ導体の中に NbTi（ニオブチタン）合金超伝導線が埋め込まれたものが用いられ、それらは約 4,000 リットルの液体ヘリウムによって 4.5 ケルビンで超伝導状態に保たれています。ちなみに、このセクター電磁石コイルを室温から 4.5 ケルビンまで冷却するのに約 3 週間を要します。ビーム偏向能力 8 Tm を発生させるときのセクター電磁石の磁極間隙の磁場強度は 3.8 T です。SRC の建設は、これまでに先例がないことに加え、技術的な難しさ、構造の複雑さ等のため、設計期間も含めると完成までに 12 年を要しました。

4. 今後の展開

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^{*8}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精力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）」を破るハローやスキン構造を持つものがあることや、ノーベル賞の受賞対象^{*9}でもあった「原子核の殻模型」が预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破る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るところですが、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量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 種類の不安定原子核を生成することができます（図 8）。そのうち約 1,000 種類は人類がまだ見たことのない不安定原子核です。

RIビームファクトリーでは、主要テーマである究極の原子核モデルの構築だけでなく、そもそも元素はどのようにして生まれたのかという「元素の起源の解明」といったさらに根源的な研究が可能となります。さらに、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。

今後引き続き加速器の運転調整を行い、平成18年度中に超伝導RIビーム分離生成装置（BigRIPS）を完成させ、RIビームを発生させる予定です。そして、平成19年度からRIビームファクトリーの国内外に開かれた本格的な共用を開始する予定です。

（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加速器技術開発グループ

グループディレクター 後藤 彰（ごとう あきら）

基礎基盤・フロンティア研究推進部

加速器研究推進室

田野 晃

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 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。

※2 MeV(メガ電子ボルト)

エネルギーの単位。1MeV(メガ電子ボルト) $=10^6$ eV $=1.60\times 10^{-13}$ J(ジュール)。1eV(電子ボルト)は真空中において1ボルトの電位差の間を移動することによって電子が得るエネルギー。

※3 中性子ハロー、中性子スキン

これまでの原子核物理の常識では、通常安定な原子核には、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(^8He や ^{11}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」、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。

※4 魔法数

原子核は、陽子あるいは中性子の数がある特定の値をとると、特に安定になる。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。近年、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 ([2000/5/29 プレスリリース](#)：新しい魔法数 (マジックナンバー) の発見)。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。

※5 入射核破砕反応

加速した原子核が標的原子核に衝突し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。

※6 ウラン 238 の核分裂反応

ウラン 238 が標的中の原子核をかすめると安定性を失い、例えば質量数 80 と 130 近傍の原子核に分裂する現象。この反応により安定線から離れた中性子過剰核を効率よく生成することができる。

※7 質量電荷比

質量数を電荷の数で割った値。リングサイクロトロンは質量電荷比が同じであれば元素の種類に関わらず、同じように磁場により偏向させ加速することができる。アルミニウムの質量電荷比は、RI ビームファクトリーで発出を目指すウランビームの質量電荷比とほぼ等しい。

今回の運転では、加速器完成後のまさに初稼動であるため、既存加速器で十分加速実績があり、質量電荷比がウランとほぼ等しいアルミニウムをファーストビームとして選択した。

※8 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。

※9 原子核物理関連のノーベル賞

1949 年、メイヤーとイェンゼンは当時発見されていた原子核の殻構造を説明する

ことに独立に成功し、1963年にノーベル物理学賞を共同で受賞した。原子核物理に関する分野については、現在までに、「放射能の発見」、「中性子の発見」、「新放射性元素の発見」、「サイクロトロンの開発」、「核力の研究と中間子の存在の予想」、「星と核反応の研究」、「対称性の基本原理の発見」、「集団運動模型の提唱」など、20を超えるノーベル賞が授与されており、基礎および応用研究を通じ、現代の科学技術の基盤として役立っている。

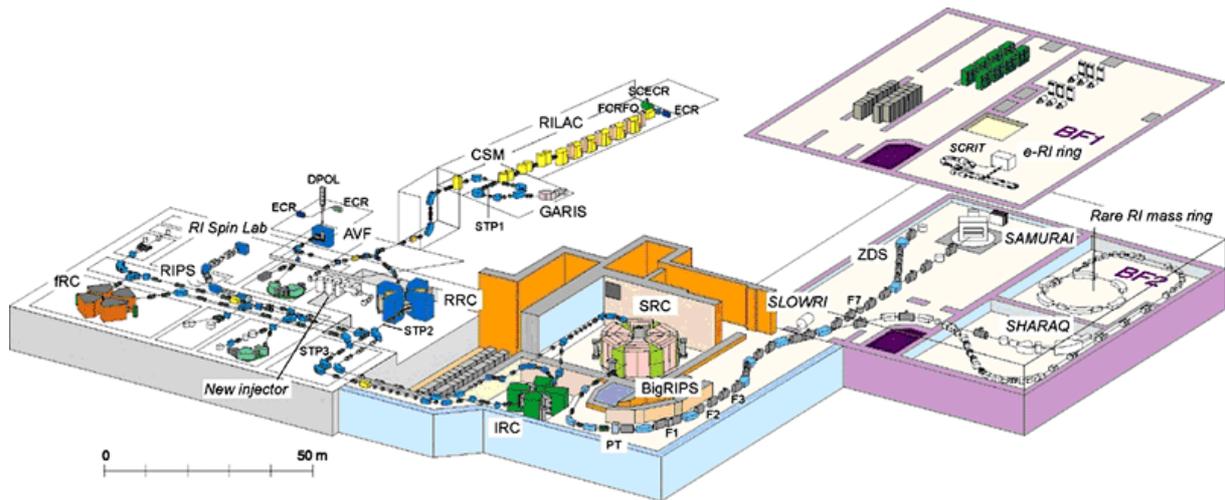


図1 RI ビームファクトリーの全容

○ECR イオン源 (電子サイクロトロン共鳴イオン源) <既存施設>

加速する元素の電子を剥ぎ取りイオン化し、加速器に供給する装置。
 プラズマを閉じ込める磁場の強さとマイクロ波の周波数がある共鳴条件を満たすように
 選び、共鳴加速によってエネルギーを付与された電子を元素に衝突させて次々とその
 元素の電子を剥ぎ取る。そうすることによって多価のイオンを生成することができる。

○線形加速器 (RILAC) <既存施設>

高周波電場を用いて、重イオン加速を直線的に加速する加速器。
 RI ビーム生成のために重イオンビームの初段加速に用いられるとともに、超重元素生
 成装置 (GARIS) を使った超重元素実験にも用いられる。
 アルミニウムイオンを加速する場合、本装置で光速の 8%程度まで加速する。

○理研リングサイクロトロン (RRC) <既存施設>

1986年に完成したリングサイクロトロン。本装置を用いて、新同位元素発見や中性子ハ
 ロー等原子核の安定状態に関する従来定説と異なる新しい規則を発見。
 現在でも世界最強のビーム強度で重イオンを加速できるものの、加速エネルギーの限
 界から本装置単体での加速で生成できる RI ビームは質量数 60 以下 (Fe 位) の軽い元
 素に限られている。
 アルミニウムイオンを加速する場合、本装置で光速の 30%程度まで加速する。

○固定加速周波数型リングサイクロトロン (fRC)

ウランのような重いイオンを、核子あたり 345MeV まで加速する場合に必須の装置で、中間段リングサイクロトロンの前段加速器として使用。

fRC を用いない加速モードでは、ウランビームの最大エネルギーは核子当り 100 MeV 程度にとどまる。

○中間段リングサイクロトロン (IRC)

超伝導リングサイクロトロン (SRC) の前段加速器として使用。

アルミニウムイオンを加速する場合、本装置で光速の 45%程度まで加速する。

○超伝導リングサイクロトロン (SRC)

世界初の超伝導リングサイクロトロン。

アルミニウムイオンを加速する場合、本装置で光速の 70%程度まで加速する。

○超伝導 RI ビーム分離生成装置 (BigRIPS)

SRC で加速された高エネルギーの重イオンビームを生成標的である安定原子核と衝突させ、得られた高エネルギーの破砕片および核分裂片核種を分離し RI ビームを生成するとともに、ビームを収束し実験設備に送り出す装置。

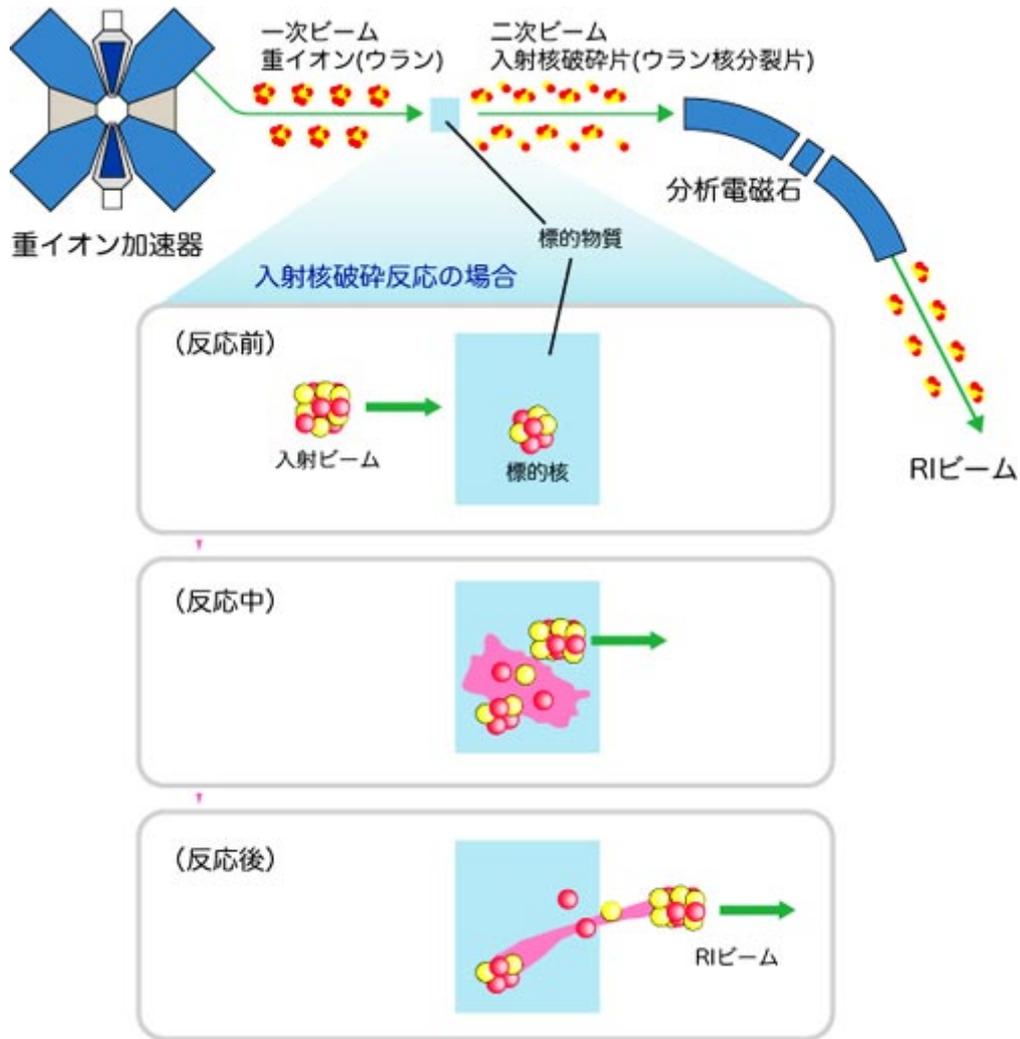


図2 RI ビームの生成方法

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である。

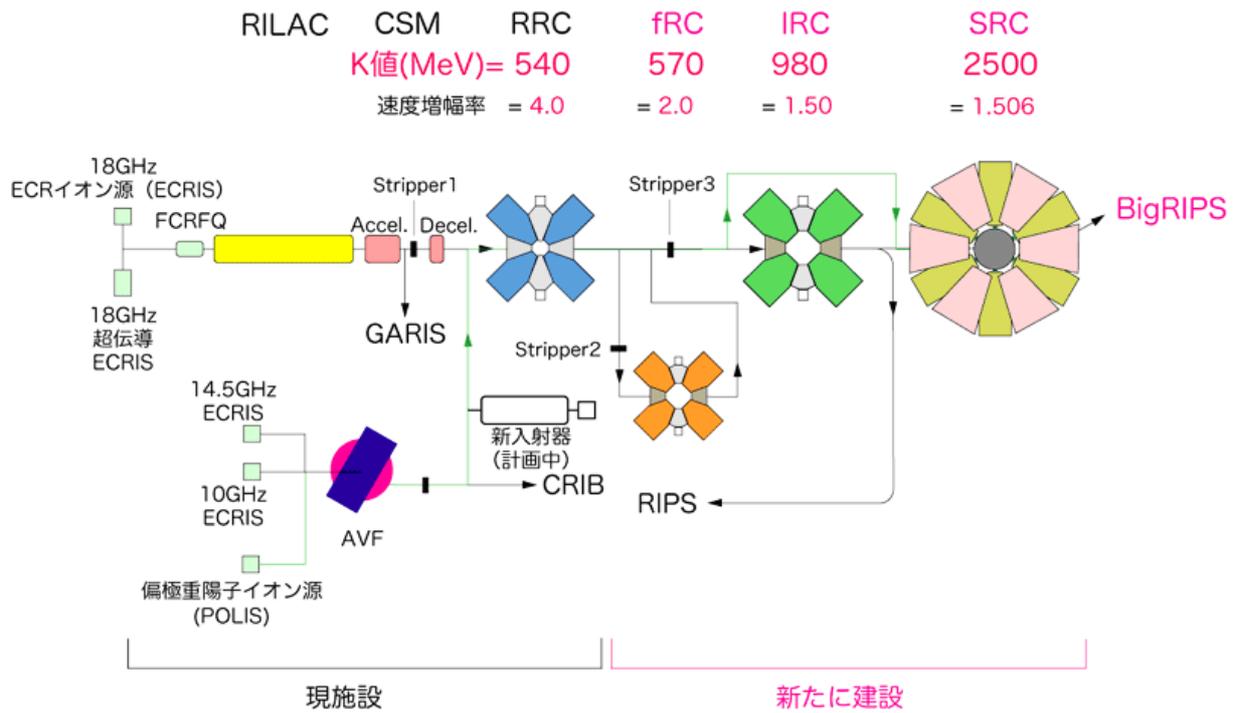


図3 加速器群の構成

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) の間に固定加速周波数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。

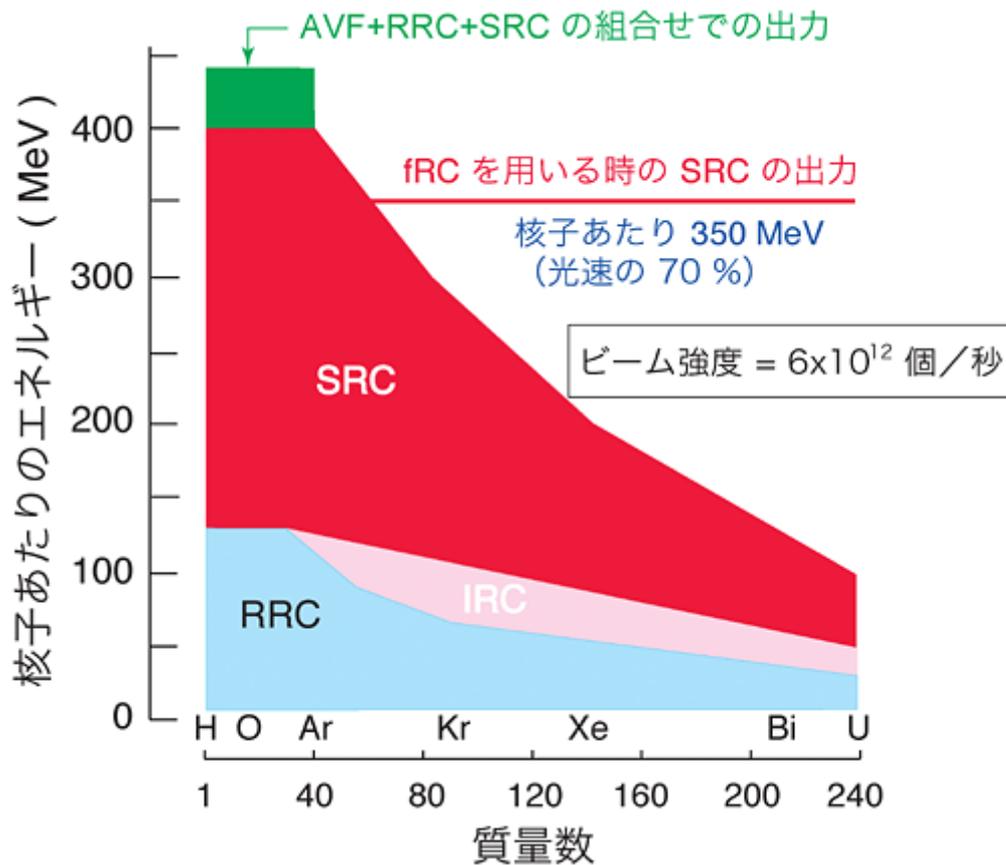


図4 加速性能

上図は理研リングサイクロトロン (RRC) と、固定加速周波数型リングサイクロトロン (fRC)、中間段リングサイクロトロン (IRC)、超伝導リングサイクロトロン (SRC) の各加速器で実現されるビームの種類とそのエネルギー及びビーム強度を表す。新たな加速器群の完成によるビームの大強度化と高エネルギー化により、生成される RI ビームの種類と強度が飛躍的に増加し、これまで強度やエネルギーが低かったために実現できなかった実験や、新しい種類の RI ビームを利用した様々な実験が実現可能となる。

特に大強度のウランビームを核子あたり 345MeV まで加速する能力を有したことは、新同位元素発見による核図表の拡大や、超新星爆発による元素合成の研究に決定的な意味を持つ。

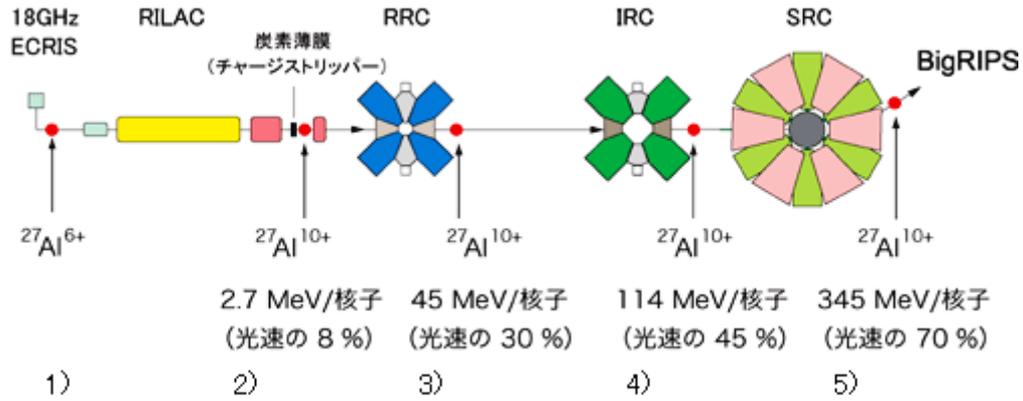


図5 アルミニウムビームの加速

アルミニウムビームを加速するときは、理研リングサイクロトロン (RRC) で加速後は固定加速周波数型リングサイクロトロン (fRC) を用いず、直接、中間段リングサイクロトロン (IRC) へ輸送する。

1) まず ECR イオン源でアルミニウム-27 の 6 価のイオンを生成し、2) それを RILAC で核子当り 2.7 MeV (光速の 8%程度) まで加速した後、炭素薄膜を通過させてイオンの電子の一部を剥ぎ取り 10 価に変換し、3) それを RRC で核子当り 45 MeV (光速の 30%) まで加速し、4) さらに IRC および 5) SRC でそれぞれ核子当り 114 MeV (光速の 45%) および核子当り 345 MeV (光速の 70%) まで加速する。

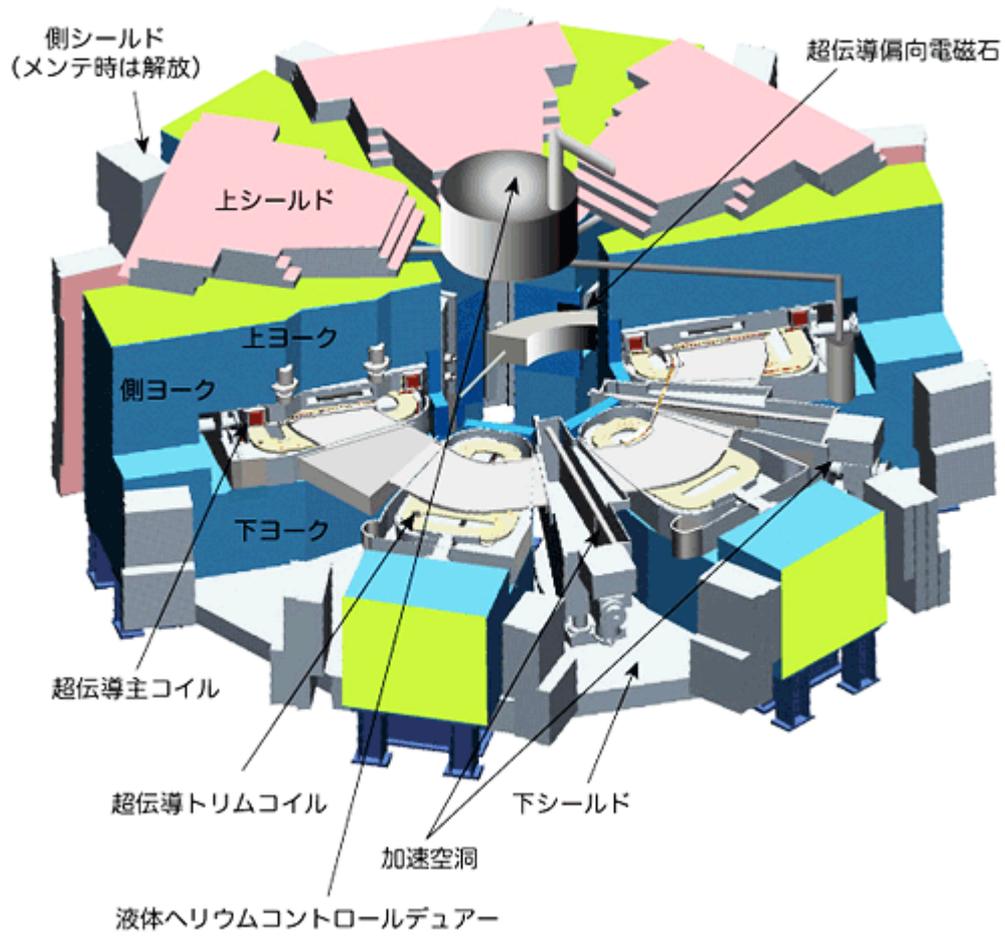


図6 超伝導リングサイクロトロン (SRC)

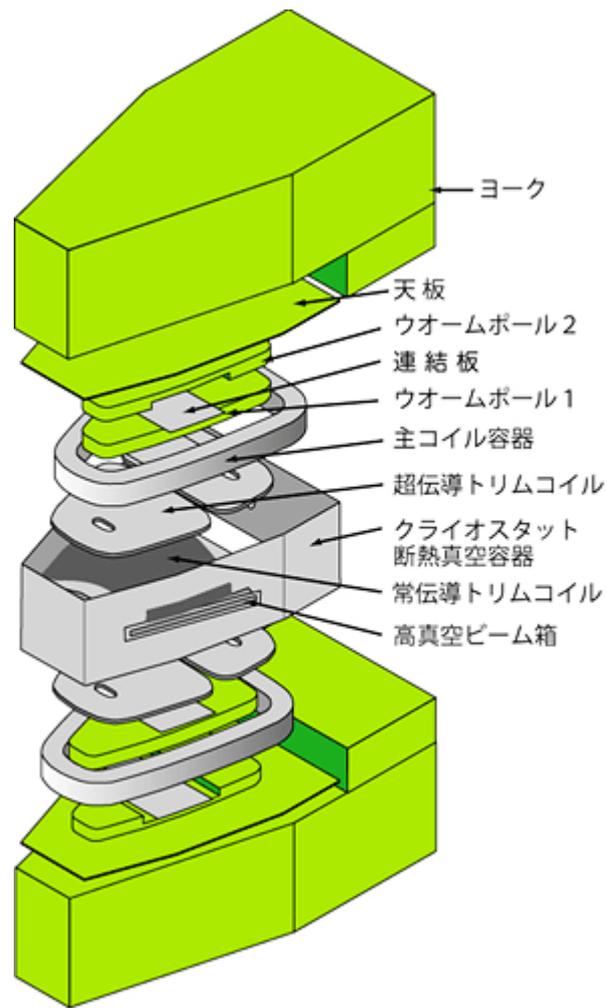


図7 セクター電磁石 (展開図)

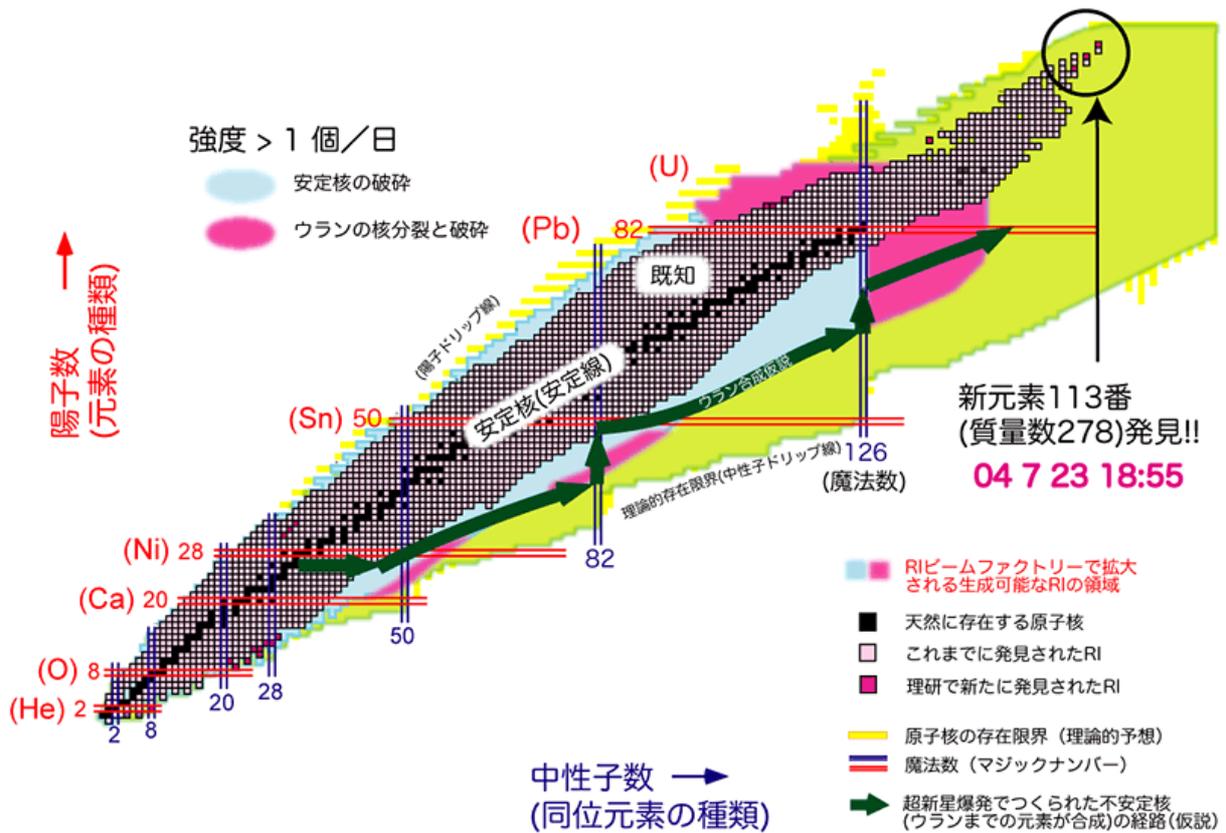


図8 RIビームファクトリーで生成できるRIビーム

現在、人工的に生成された原子核を含め約 3,000 種類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碎反応で生成）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、約 1,000 種類の人類がまだ見ぬ原子核を生成することが可能となる。

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が始動すると、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。