

2007年3月24日
独立行政法人 理化学研究所

RI ビームファクトリーでウランイオン加速に成功

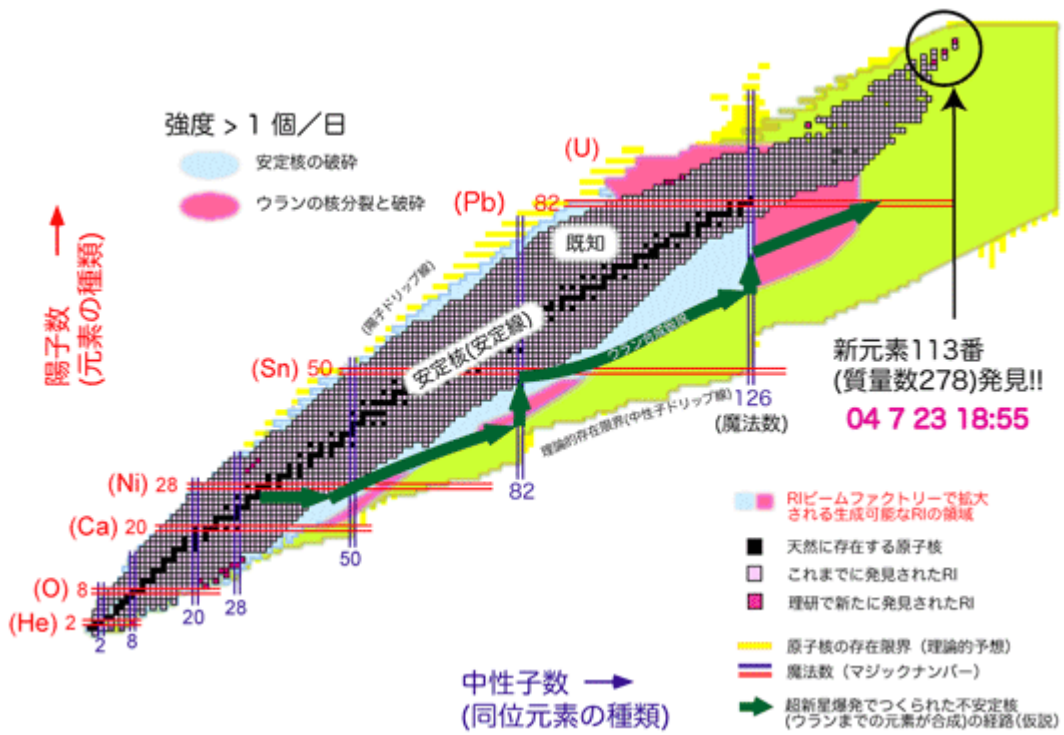
- 日本の加速器史上初、リングサイクロトロン4基の多段式加速では世界初 -

私たちの身の回りのものはすべて原子から成っています。原子は、原子核と電子でできており、原子核は陽子と中性子からできています。原子核の研究では、“核図表”という陽子と中性子で表される表があります。この表の“安定線”と呼ばれる斜めに走る線上にある安定核についての研究は進んできましたが、安定線からはずれたところにある、陽子の数と中性子の数に大きな差がある不安定な原子核（放射性同位体）については、まだまだわかっていないことは多いのです。

一方、天然に存在する元素の中で、最も原子番号が大きく重い元素である「ウラン」が、ビッグバンから始まったと言われる宇宙の歴史の中でどうやって出来たのかも依然としてナゾのままです。「こういうようにできたんじゃないかな？」と、核図表上でウランができた道筋を示す仮説はありますが、これまでの装置ではその詳細を実証することはできませんでした。

理研仁科加速器研究センターのイオン加速器施設「RI ビームファクトリー」では、この仮説を実証するため、世界最先端の加速器群を開発し、3月23日午後9時にウランイオンを加速することに成功しました。「ウランイオンなどを加速させて生成できる大量かつ多様な同位体のデータから、ウラン合成のナゾときのヒントを手に入れる準備ができた」ということです。加速器を使ってウランイオンを加速したのは日本では初めてのことです。

RI ビームファクトリーは日本の加速器史を塗り替えただけでなく、原子核そのもののナゾや元素誕生のナゾの解明にもその威力を発揮するとともに、放射性同位体を使った新たな研究の創出やイノベーションへの起爆剤となることが期待されます。



(図)核図表とウラン合成仮説

2007年3月24日
独立行政法人 理化学研究所

RI ビームファクトリーでウランイオン加速に成功

- 日本の加速器史上初、リングサイクロトロン 4 基の多段式加速では世界初 -

◇ポイント◇

- ・天然に存在する最も重い元素「ウラン」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へ新たな一歩

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）の「RIビームファクトリー*1」において、3月23日（金）21時00分、ウランイオンを加速することに成功しました。ウランイオンを加速したのは日本では初めてのことであり、また、4基ものリングサイクロトロン*1を使った多段式加速としては、世界で初めての成果です。

ウランは、地球上で産出される元素のうち、最も原子番号の大きいものですが、その合成過程は謎のままです。一方、ウランイオンの加速により多種多様な元素を生成することで、ウラン自身の謎を解き、さらに元素誕生の謎を知ることができます。しかし、これまでの技術では、ウランのような重い元素を加速するのは難しいものでありました。

今回、既存の加速器施設のイオン源（ECRIS）*1からウランイオンを発生させ、線形加速器（RILAC）*1、理研リングサイクロトロン（RRC）*1で加速した後、RIビームファクトリー計画で新たに建設した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）*1、中間段リングサイクロトロン（IRC）*1、超伝導リングサイクロトロン（SRC）*1】で順次加速し、重イオン*2ビームとして取り出すことに成功しました。ビームエネルギーは核子当り 345 MeV*3（光速の 70%の速さに相当）を達成しました。今回、ウランイオン加速に成功したことは、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るとともに、原子核物理の根源的な研究へ新たな一歩を踏み出し、元素誕生の謎へ一歩近づいたことを意味します。

今後、加速したウランイオンビームを生成標的（ターゲット）に照射してRIビームを生成し、未知の新同位元素発見に取り組みます。さらに来年度からは、生成した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。

なお、RIビームファクトリーでは、平成18年12月28日に施設の心臓部にあたる世界初の超伝導リングサイクロトロン（SRC）からアルミニウムイオンでのファーストビームを取り出すことに成功し、さらに平成19年3月13日には、クリプトンイオンを使ってRIビームの発生にすでに成功しています。

1. ウランイオン加速の意義

ウラン（U）は、原子番号が 92 で、天然に存在する元素のうち最も原子番号が

大きく重い元素です。しかし、宇宙の開闢と言われるビッグバンから始まった 137 億年の歴史の中で、ウラン元素がどのように生み出されたのかはわかっていません。このウラン合成には、およそ 1,000 種類の未発見の放射性同位元素が鍵を握ると言われています。

放射性同位元素は、簡単に崩壊してしまうので“不安定核”と呼ばれますが、ウランを生み出す為には重要な役割を果たしたと考えられています。ウランそのものをビームにして加速し、そこから大量に発生する不安定核を調べることが、ウラン合成に至る過程を理解するために最も有効な手段です

ウラン合成に関する仮説はありますが、これを実証することはこれまでの実験装置では不可能でした。RI ビームファクトリー計画では、この仮説を実験的に再現するために、必要不可欠な未発見の放射線同位元素生成を目的として既存の加速器施設に新たに 3 基のリングサイクロトロンを建設し、すでにアルミニウムイオンやクリプトンイオンを使った多段式加速には成功していました。今回、計画の目標である、天然に存在する一番原子番号の大きい元素であるウランの加速に挑戦しました。

2. ウランイオンビームの加速実験方法と結果

今回のウランイオンの加速は、次のようにして行いました (図 1)。

- 1) ECR イオン源 (ECRIS) で、ロッド状の金属ウランから取り出したウラン原子をプラズマ状態にして、ウラン-238 の 35 価のイオンを生成
- 2) 生成したイオンを線形加速器 (RILAC) で核子当り 0.67 MeV (光速の 4%程度) まで加速
- 3) 理研リングサイクロトロン (RRC) でさらに核子当り 11 MeV (光速の 15%) 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 71 価に変換
- 4) 71 価になったイオンを固定加速周波数型リングサイクロトロン (fRC) で核子当り 50 MeV (光速の 30%) まで加速した後、また炭素薄膜を通過させてイオンの電子の一部をさらに剥ぎ取り 86 価に変換
- 5) 86 価のイオンを中間段リングサイクロトロン (IRC) で核子当り 114 MeV (光速の 45%) まで加速
- 6) 世界最大の超伝導リングサイクロトロン (SRC) で核子当り 345 MeV (光速の 70%) まで加速
- 7) ビーム発生を SRC の直後に設置したビーム電流値及びビームの断面形状を計測する検出器で確認

加速エネルギーは、目標値を達成しましたが、ビーム強度は初めての挑戦ということもあって、最終目標に比べてまだまだ微弱なものでした。今後、さらに調整を

進め、世界一のビーム強度を誇るビームを出すよう取り組みます。世界では、ドイツ重イオン国立研究所（GSI）のシンクロトロン加速器において、ウランイオンビーム加速の実績がありますが、4基のリングサイクロトロンで多段式にウランイオンビームを加速したのは、今回が初めてのことです。

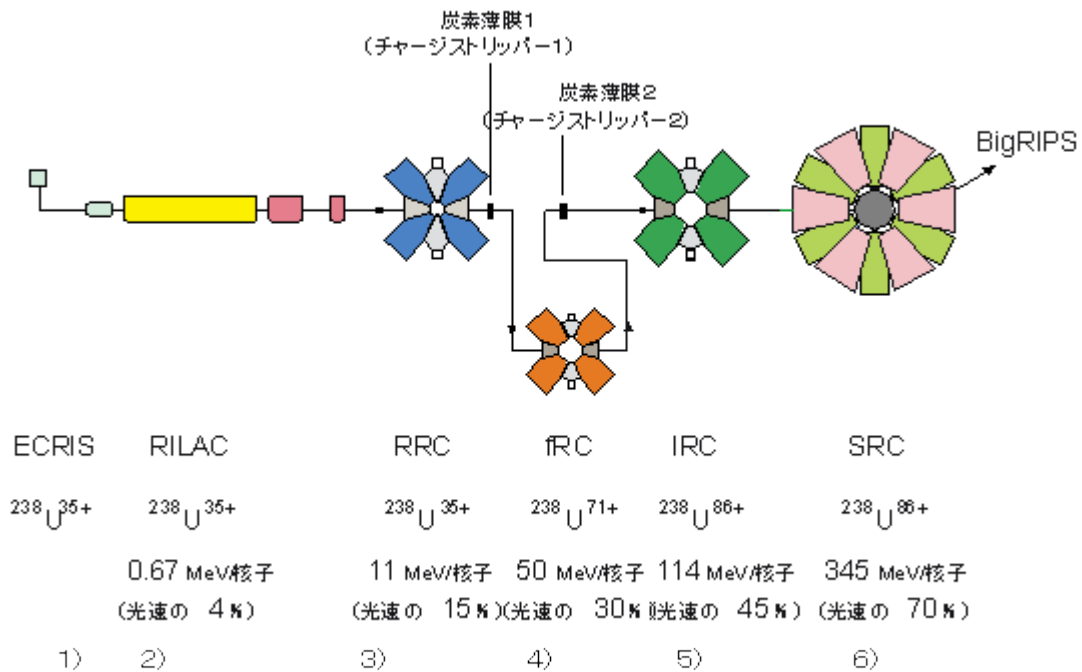


図1 ウランイオンの加速

3. 今後の期待

ウランイオンビームは、RIビームファクトリーにとって最も重要なビームの一つで、これにより大きく原子核の世界を広げることができます。

RIビームを生成する反応は、主に2種類あります。一つは、世界の研究所で従来から利用されている「入射核破砕反応^{*4}」で、もう一つは、ウランビームを用いた「核分裂反応^{*5}」です。核分裂反応を用いると、元素番号20（カルシウム：Ca）から60（ネオジウム：Nd）に至る元素の原子核で中性子が過剰な放射性同位元素（RI）を大量に生成することができるようになります。例えば、ニッケル-78原子核の生成能力は、核分裂反応と入射核破砕反応で比較すると、約1,000倍も核分裂反応が優れています。

ウランイオンビームを用いてRIビームを生成すると、核分裂反応と入射核破砕反応が同時に起きるため、特に元素番号20から90（トリウム：Th）までの広い範囲のRIビームを効率良く生成することができます。このウランビームの有効性に着目して、ドイツやアメリカなどで次世代のRIビーム施設の建設計画が進んでいますが、理研のRIビームファクトリーはこの次世代RIビーム施設の先鞭をつけたこととなります。

ウランイオンビームにより、核図表^{*6}が大幅に拡大されるだけでなく、強力かつ豊富なRIビーム生成が可能となり、ウランまでの元素が超新星爆発時にどのように創られたのか、そのメカニズムにも密接に関係する中性子過剰なRIの特異な現象・

性質の解明など、世界の研究者が切望するさまざまな研究を展開することができます。

このように、ウランイオンビームは原子核研究の可能性・将来性を格段に広げる重要なツールであり、今後、その中心的役割を日本のRIビームファクトリーが担うこととなります。

(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

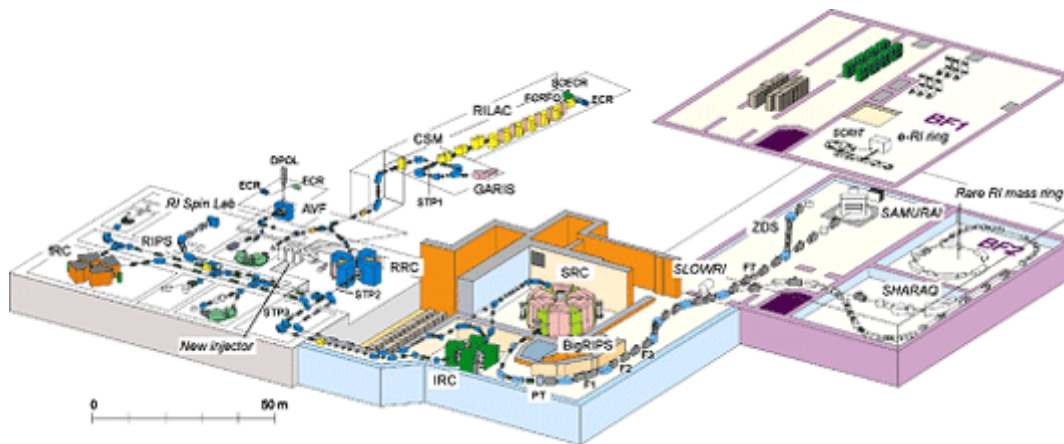
Mail : koho@riken.jp

<補足説明>

※1 RIビームファクトリー

RI (ラジオアイソトープ) 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る。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ある。RIビームは、加速器を用いて安定な原子核(重イオン)を光速の40%以上の速度に加速した後、標的原子核と衝突させ、その破砕片を収集して生成される人工的に作られた天然には存在しない不安定原子核ビームのこと。RIビームファクトリーは、RIビーム発生系施設と独創的な基幹実験設備で構成される次世代重イオン加速器施設。RIビーム発生系施設は、現有施設の加速エネルギーを大幅に増強するために配備される3基のリングサイクロトロンと、超伝導RIビーム分離生成装置(BigRIPS)から構成される。

この施設では、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つ。この発生するRIビームを多角的に利用し、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くのがRIビームファクトリーの目的である。



<RI ビームファクトリーの装置群>

○ECR イオン源 (ECRIS : 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。

ウランイオンを加速する場合、本装置で光速の 4%程度まで加速する。

○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。1981 年完成。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。

○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。リングサイクロトロンとは、イオンを曲げる電磁石部分をセクターに分けることによって高いエネルギーまで効率良く加速できるようにしたサイクロトロンのこと。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の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。

ウランイオンを加速する場合、本装置で光速の 15%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たり 100 MeV 程度にとどまる。

ウラン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。

○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。
ウラン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。
ウラン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。

※2 重イオン

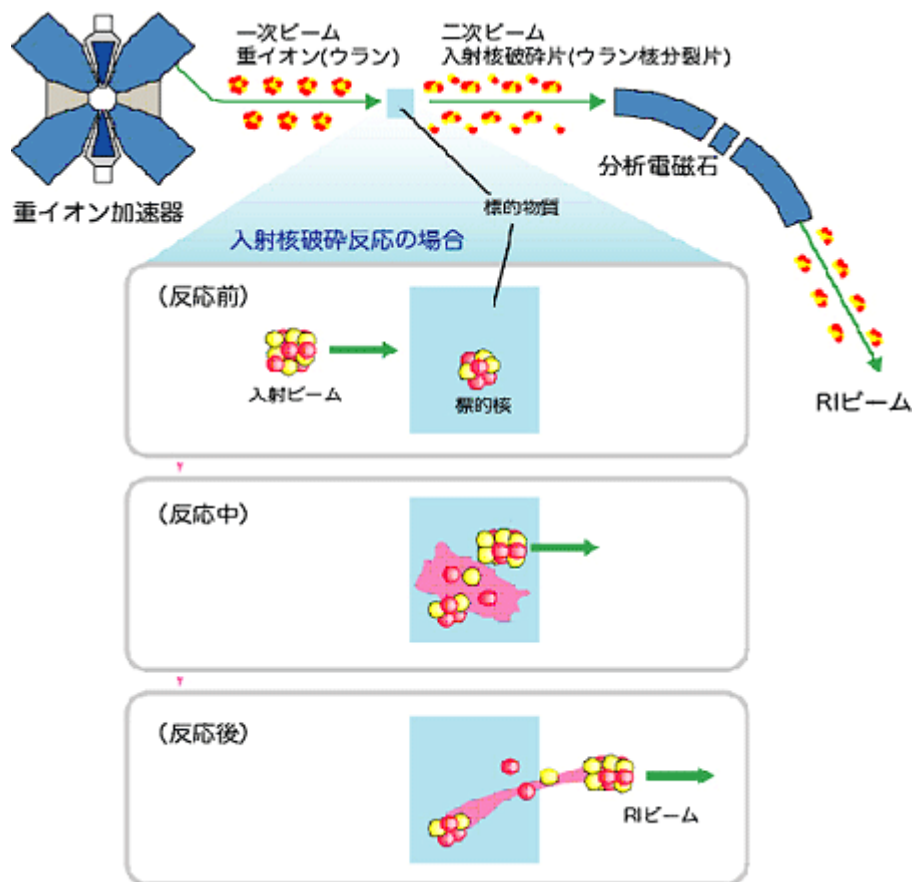
原子が電子を失う、または得ることにより電荷を持ったものをイオンといい、このうち、リチウムもしくは炭素より重い元素のイオンを重イオンという。イオン源により原子から電子を剥ぎ取ると原子核の陽子数に比べて電子の数が少なくなり、全体としてプラスの電荷を持つことにより、加速器で電氣的に加速することが可能となる。

※3 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= 1.60×10^{-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。

※4 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。



図は RI ビーム生成法を説明したものである。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、ビームとして利用している。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。

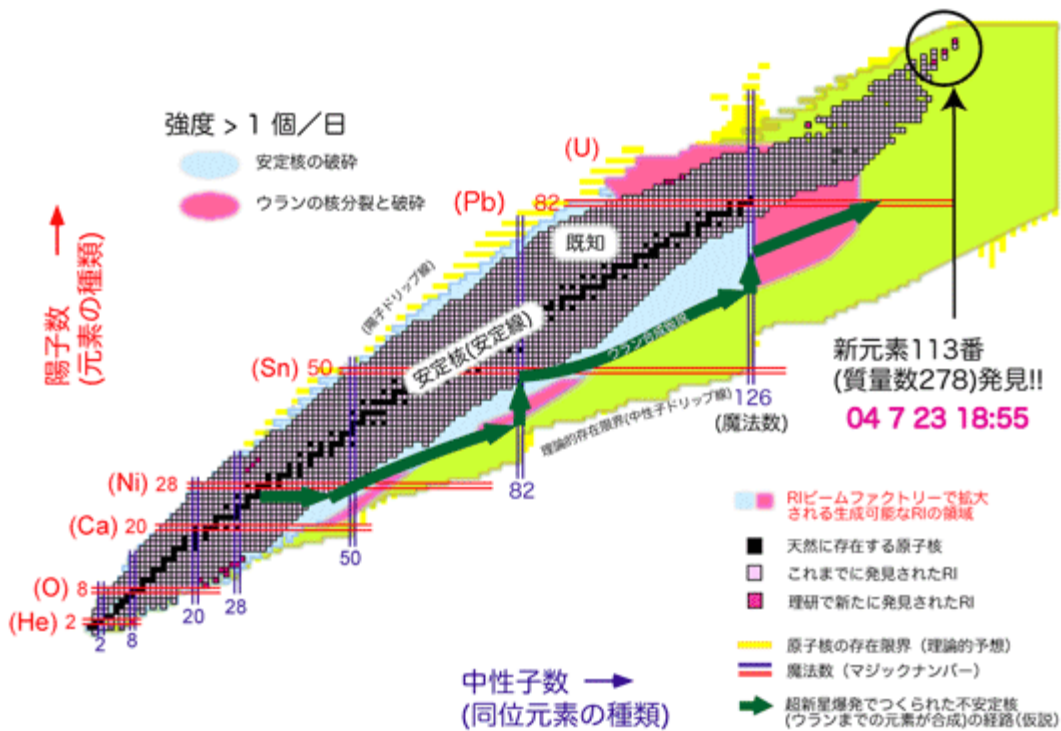
ウランの核分裂反応では、ウラン 238 が標的中の原子核の強い電場や核力によって質量数 80 と 130 近傍の原子核に効率よく分裂する現象を利用する。この反応を用いるには、ウランビームは核子あたり約 350MeV (光速の約 70%) のエネルギーが必要である。

※5 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。

※6 核図表

原子核を陽子数、中性子数に並べた図。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。



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、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の始動により、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。