

理研 「RIビームファクトリー」 計画

—21世紀の重イオン科学フロンティアをめざして—



理化学研究所

RIビーム -21世紀の粒子線-

RI(ラジオアイソトープ)は、それ自身が出す放射線を測定することによって極く微量でも検出できます。このような優れた性質をもっているため、トレーサーやマーカーとして、物理・化学・生物などの基礎研究分野から医療・農業・工業・環境などの応用分野にわたり幅広く利用されています。RIはいまや、現代の科学技術を支えさらに発展させるための必需品と言えます。

これまでRIは、陽子・重陽子の加速器や原子炉で製造され、化学的分離によってその単体や化合物が生産されてきました。

近年、高エネルギーの重イオン加速器を用いた物理的な方法によって、RIを高速の「ビーム」として発生させる技術が開発されました。この新しい粒子線「RIビーム」を多種類・大強度で利用することができるになれば、次世代のRI科学技術フロンティアを開拓することができます。

たとえば、未知の不安定核(RI)を多種・大量にうみだしその性質を調べることによって、「元素はどのようにして誕生してきたか」、「中性子星はどのような仕組みになっているのか」など、現代科学においていまだに謎となっている諸現象を解明することができます。また、RIビームを物質や生体内の任意の深さに打ち込む手法(RIインプランテーション)を用いた新しい応用研究が、物性・材料・化学・生物などの幅広い分野で可能になります。

このように、RIビームは「21世紀の粒子線」として期待されています。

RIとは

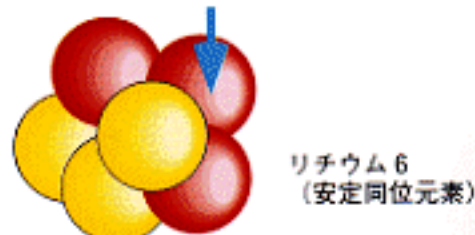
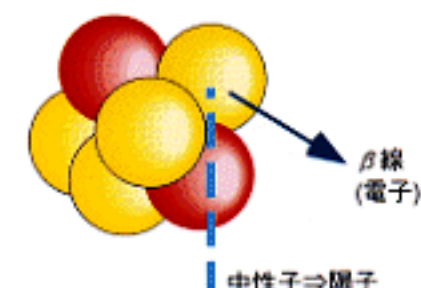
原子核の核種のうち、原子番号Z(陽子数)が等しく、質量数A(陽子数+中性子数)が異なるものを同位元素と言います。このうち放射線を出さない、すなわち崩壊しないものを安定同位元素、放射線を出して崩壊するものを放射性同位元素(ラジオアイソトープ:RI)と言います。

例) ヘリウム元素の場合

ヘリウム6
(放射性同位元素)

ヘリウム4
(安定同位元素)

ヘリウム3
(安定同位元素)

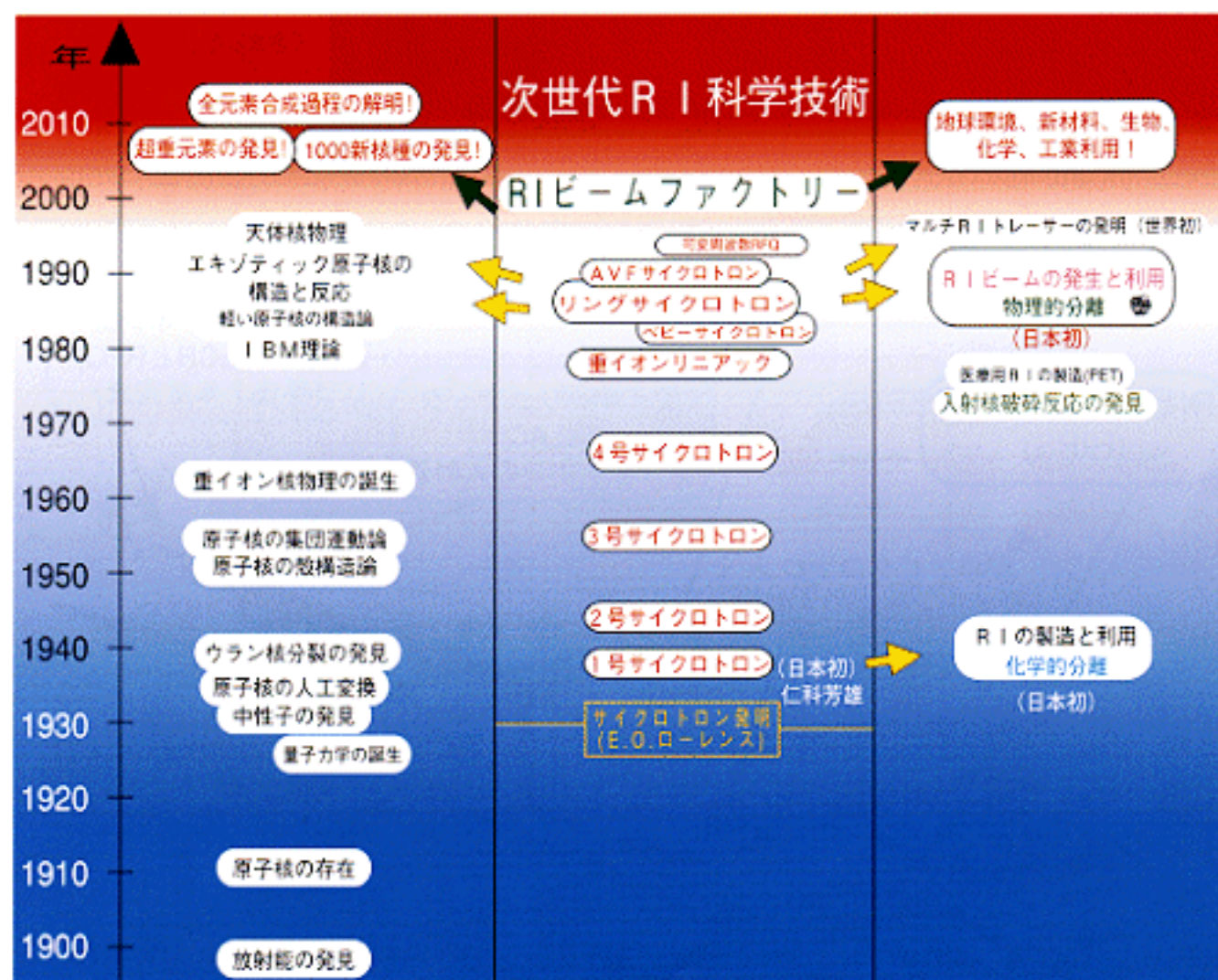


加速器の歴史とRI利用の発展

RIを人工的に製造できるようになったのは、1930年代のことです。これを可能にしたのはサイクロトロン、バンデグラフなどの加速器の発明で、その製造法は低エネルギーの陽子・重陽子ビームを物質に照射し、生成したRIを化学的に分離する方法によるものです。その後、加速器技術の進歩にともなって大強度・高エネルギーの重イオンを加速できるようになり、1980年代には入射核破砕反応で生成したRIを物理的な方法で分離してビームにする「RIビーム」発生技術が開発されました。RIビームには革新的な応用分野があるため、これを利用した研究が今や世界的な潮流となって発展しつつあります。



ラジオアイソトープ利用
50周年記念切手 (1990)

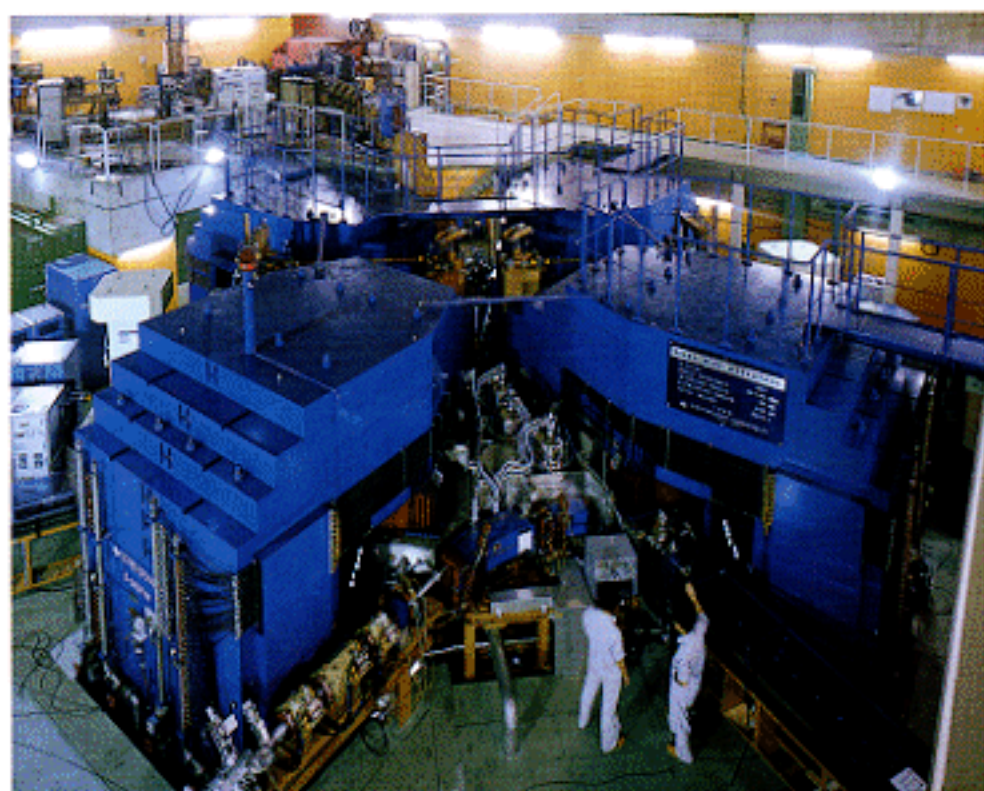


原子核物理学
の発展

理研
サイクロトロン

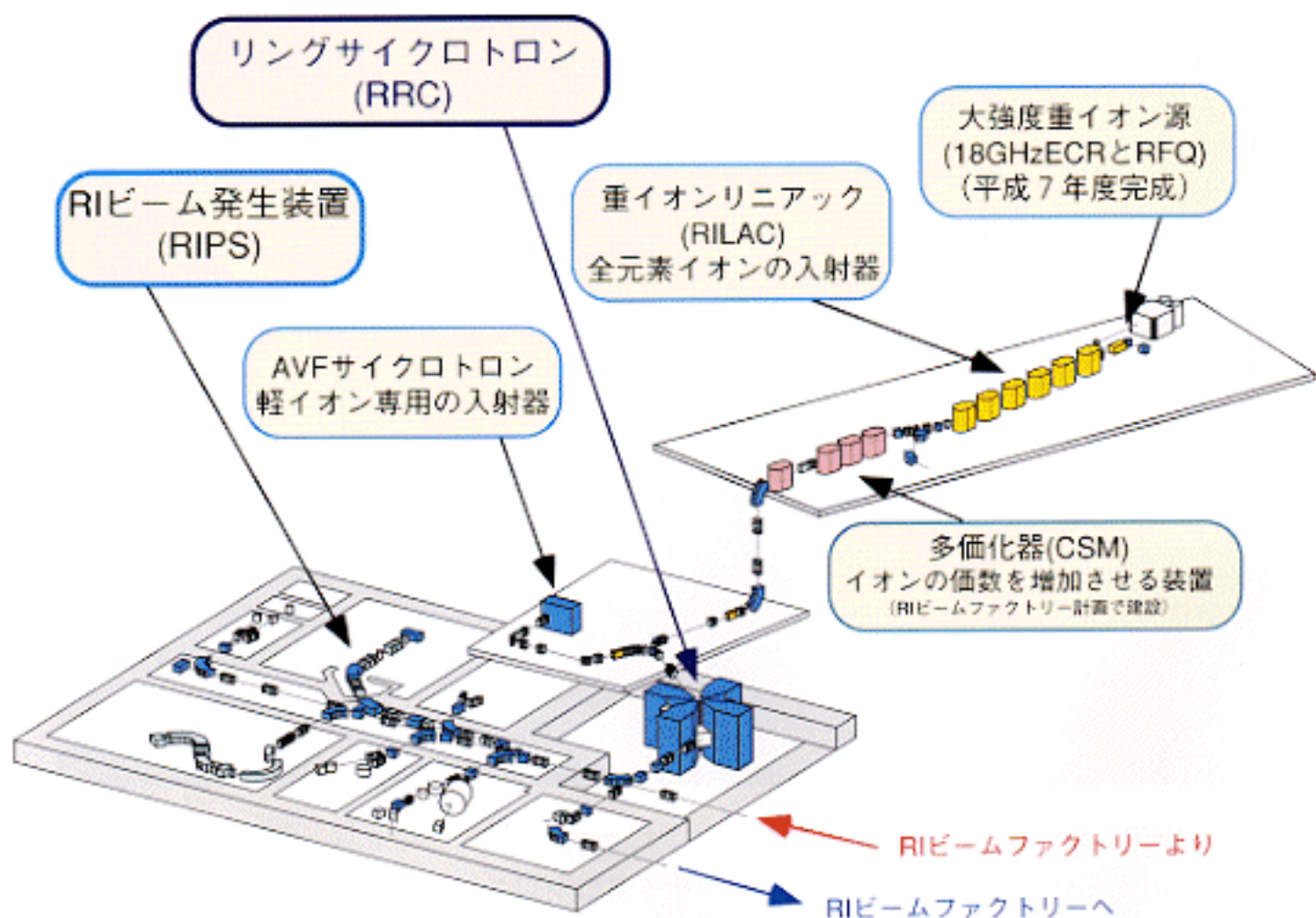
RIの利用

理研加速器研究施設



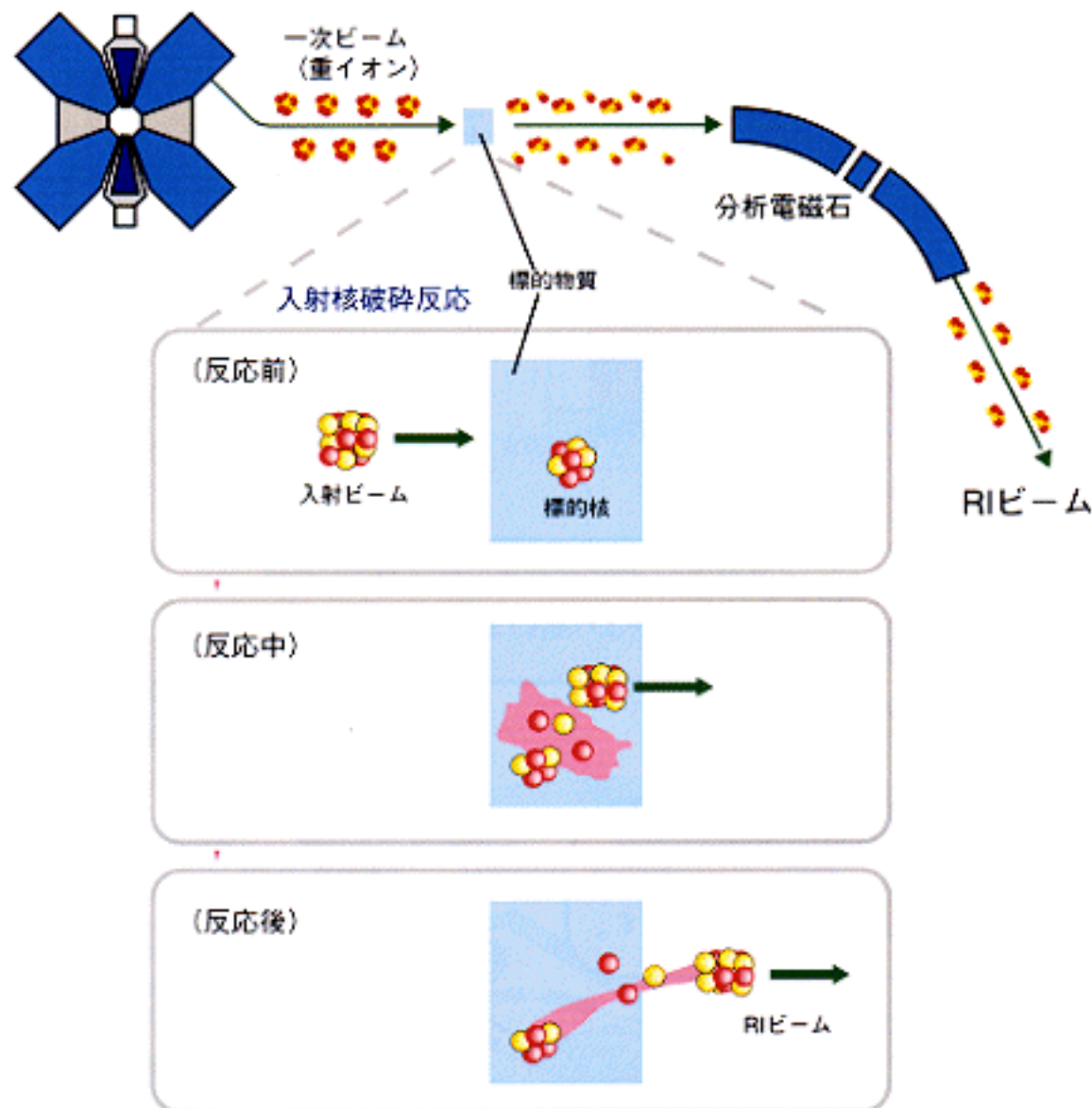
理研加速器研究施設は重イオン科学の国際的な研究センターとして国内外の研究者に広く解放されています。

当施設では、高エネルギー重イオン加速器リングサイクロトロン(RRC)とRIビーム発生装置(RIPS)を用いて質量数60以下の軽い元素のRIビームをつくりだし、世界最先端のRIビーム利用研究を推進してきました。



RIビームをつくる

RIビームは、高エネルギー重イオンビームから「入射核破砕反応」によって発生します。



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、その一部が削り取られて種々のRIが生成されます。そのなかから一種類のRIを電磁分離しビームとして利用します。

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100 MeV (光速の約40%) 以上のエネルギーをもつ必要があります。**

ことば

- ・重イオンとは、水素より重い元素のイオンのことです。
- ・MeVというのは、百万電子ボルトというエネルギーの単位で、1 MeVは一価のイオンが百万ボルト(MV)の電圧で加速されたときのエネルギーに相当します。また1 GeV=1000 MeVです。
- ・RI (Radioactive Isotope) を、原子核物理学の分野では不安定原子核または不安定核と呼びます。

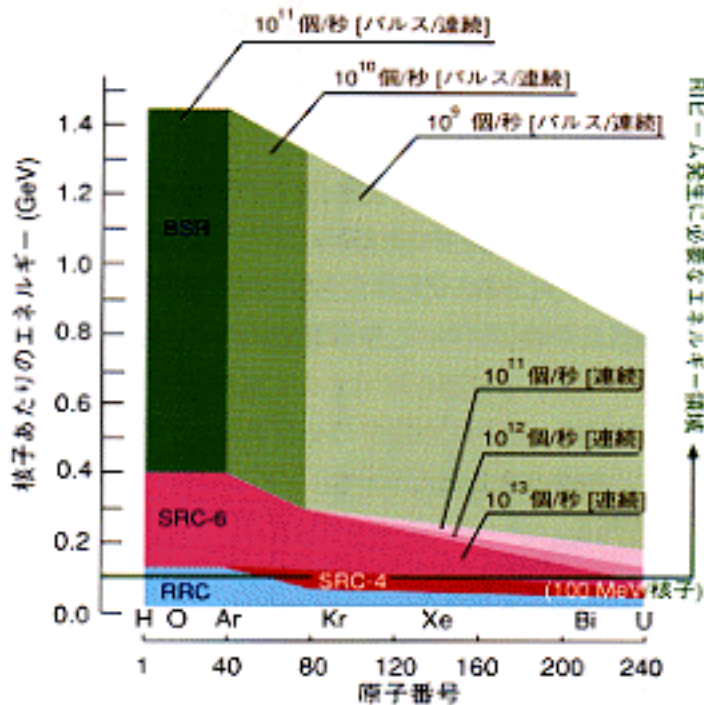
RIビームファクトリー 計画

—— 夢の粒子線工場 ——

この計画は、現在の加速器研究施設に2基の超伝導リングサイクロトロン (SRC-4、SRC-6) と RIビーム発生装置 (Big RIPS) を新設し、これまで軽い元素に限られていた RI ビームを全元素にわたって世界最大強度で発生させようというものです。さらに、多目的リング (MUSES) で RI ビームを高品質化 (エネルギー幅を小さく極細にすること)・高エネルギー化し、基礎から応用にわたる先端的研究に利用します。

RIビームファクトリーが 目指すエネルギーと強度

右の図はRRC(既存施設)、SRC-4、SRC-6及びBSR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強度を表しています。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ります。



ブースターシンクロトロン (BSR)

RIビームをより高いエネルギーまで加速します。

RIビーム発生装置 (Big RIPS)

SRC-6のビームから全元素にわたる大強度のRIビームを発生します。

現施設へ
より

Big RIPS

SRC-6

SRC-4

超電導リングサイクロトロン (SRC-4・SRC-6)

RRCのビームを全元素にわたるRIビームを発生可能なエネルギーまで加速します。

蓄積・冷却リング (ACR)

RIビームを高品質化します。

電子リニアック

電子を300MeVまで加速します。

ACR

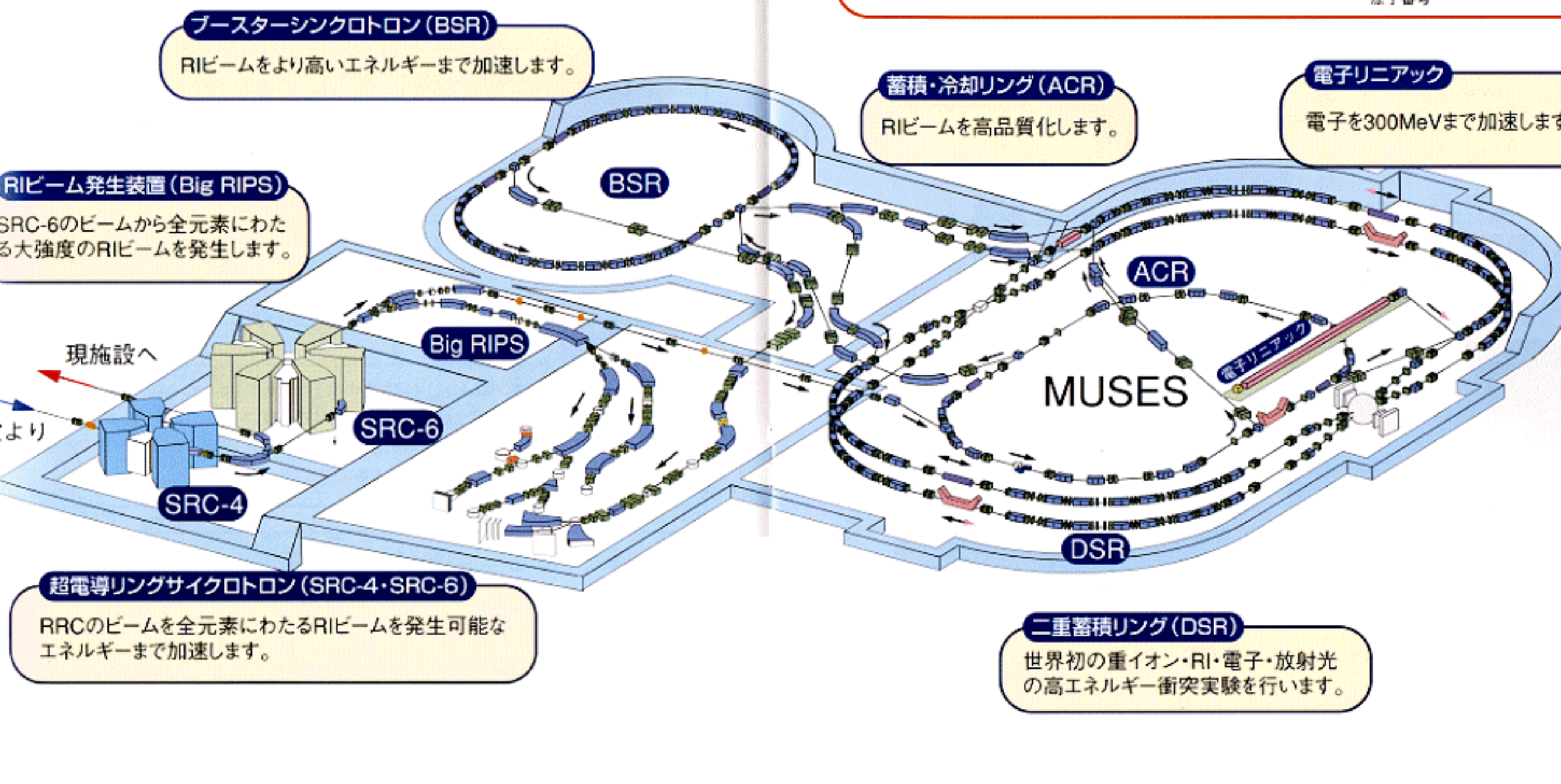
MUSES

電子リニアック

DSR

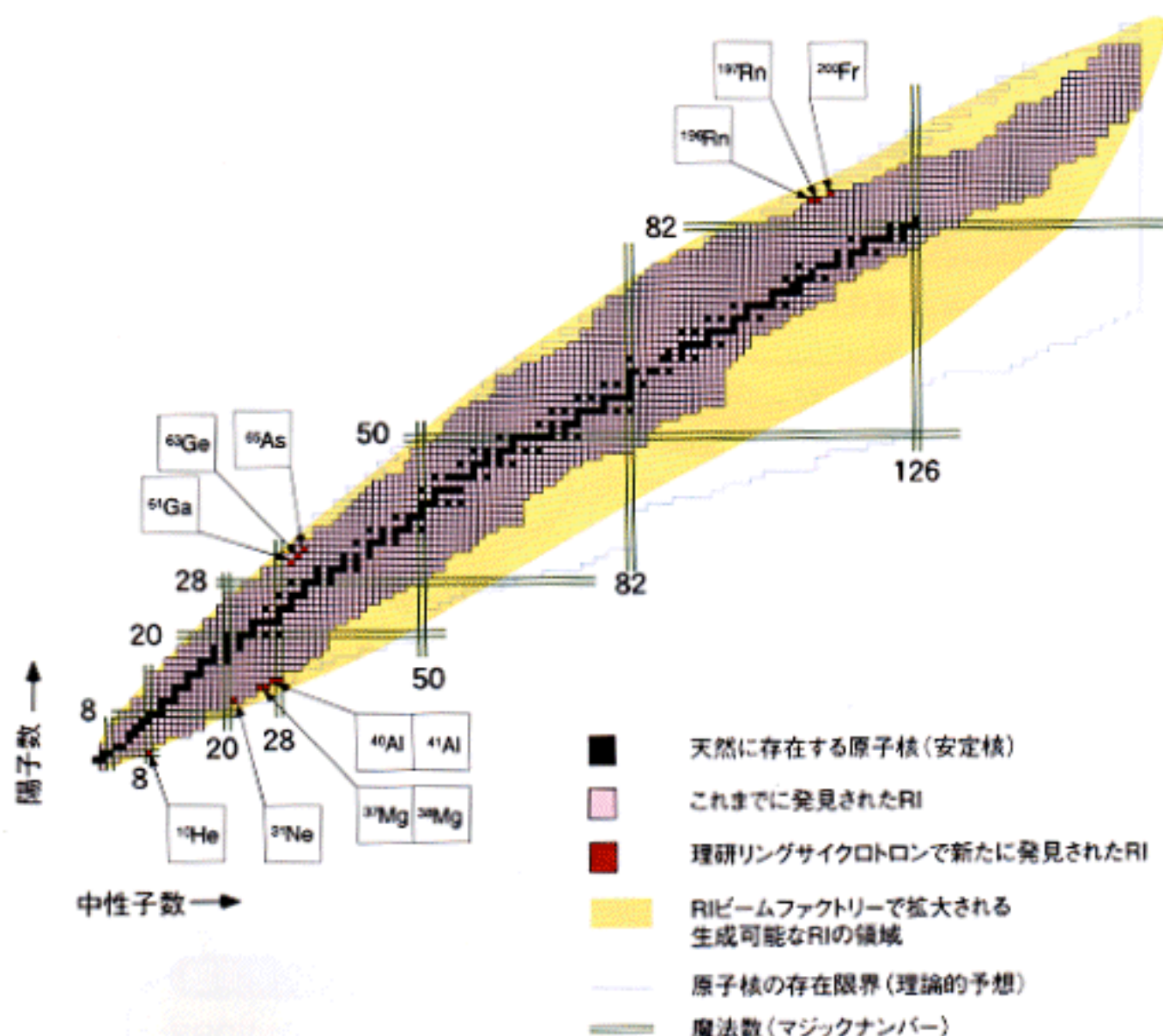
二重蓄積リング (DSR)

世界初の重イオン・RI・電子・放射光の高エネルギー衝突実験を行います。



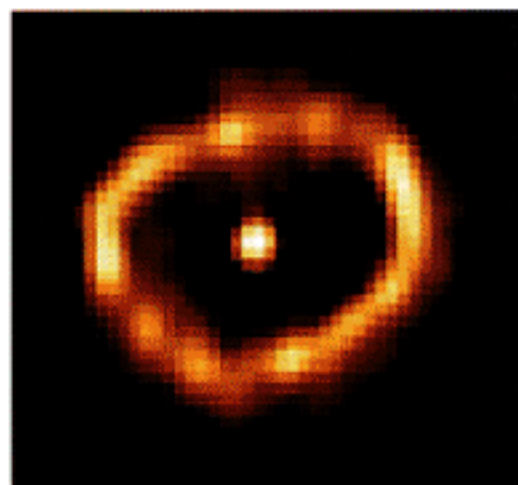
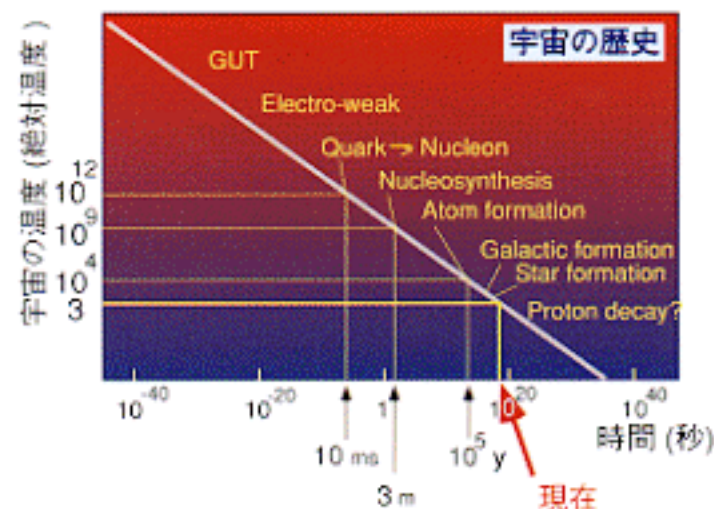
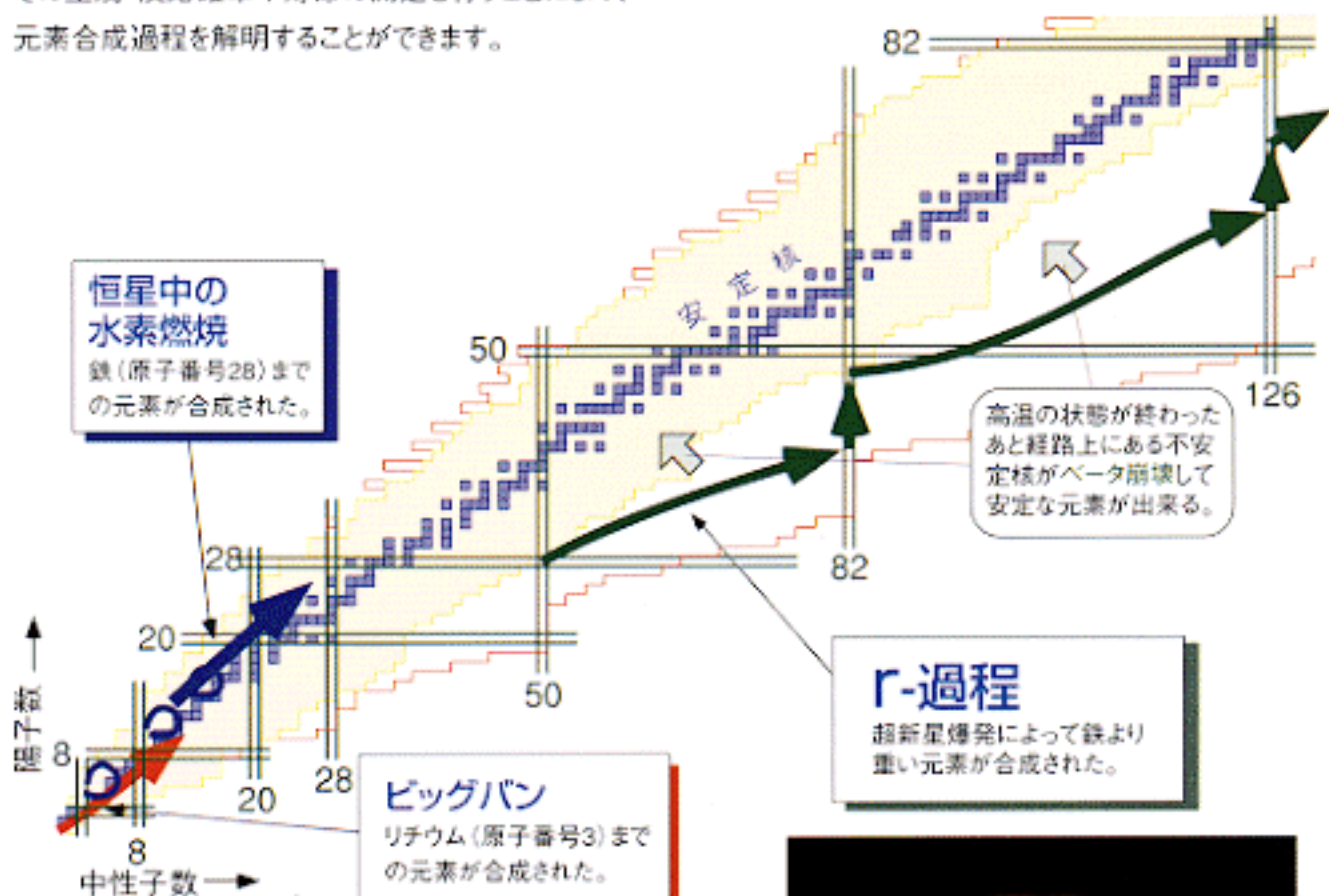
1000個に及ぶ新RIの発見

RIビームファクトリーで得られる重イオン(1次ビーム)エネルギーは、あらゆる核種についてRIビーム発生に必要なエネルギー(核子あたり100 MeV以上)を大幅に上回ります。その結果、現在世界トップクラスの性能を誇る理研リングサイクロトロン(RI)のビームをもってしても十数個程度しか発見できなかった新RIの種類が飛躍的に増大し、その数は、千個にも及ぶと予想されます。これらの新RIの性質を系統的かつ詳細に調べることが、宇宙の元素合成のメカニズムの謎を解明する手掛かりとなります。更には、実験に利用可能な強度が得られるRIの種類も大幅に増加し、原子核物理学の分野のみならず基礎物理学から生物・医学の分野にわたって新たなプローブを提供することもできます。



元素誕生の謎にせまる

宇宙の開びゃくは約150億年前のビッグバンであったと考えられています。そして現在の仮説では、ビッグバンの後下図の様にウランウムまでの元素が合成されたと言われています。すなわち、**わたしたちの世界を形作っている元素は、宇宙での不安定核の生成を経由して創られました。**この仮説を立証するためには、特にr-過程で生成された不安定核の反応の研究が不可欠です。ところが、それらの不安定核は、その存在すらまだ確認されていません。RIビームファクトリーではこれらの不安定核をつくってその生成・反応確率や寿命の測定を行うことにより、元素合成過程を解明することができます。



超新星 Nova Cygni 1992

エキゾチックな原子核

安定核では、たとえ陽子の数と中性子の数が大きく異なっても（例： ^{208}Pb 、陽子数82、中性子数126）陽子の占める体積と中性子の占める体積はほぼ同じです。

ところが、RIビームを用いた最近の実験で、軽い不安定核の領域に右図のように明らかに中性子の占める体積の方が大きい中性子スキン核（ ^8He など）や中性子ハロー核（ ^{11}Li など）が発見されました。この発見は、安定核にかざられたこれまでの原子核研究での常識を破るものであるため、陽子数と中性子数の比率が安定核と大きく異なる不安定核の研究が一躍脚光を浴びるようになりました。

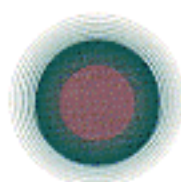
しかしながら、利用できるRIビームの強度が十分でないため、このような特異な状態の構造が研究された不安定核は数えるほどしかありません。

RIビームファクトリーでは、約2000種類の不安定核について、それが可能になります。

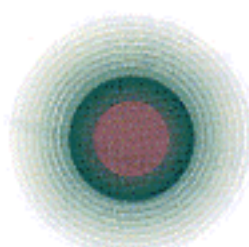
安定核



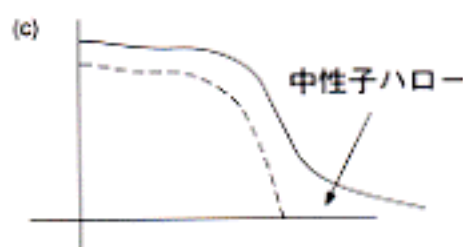
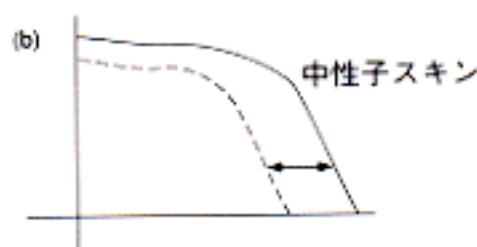
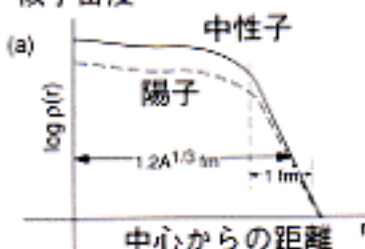
中性子スキン



中性子ハロー



核子密度

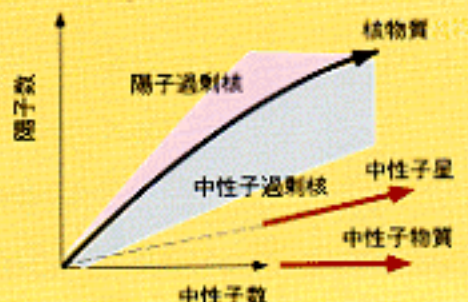


(1 fm とは 10^{-15} m のことです。)

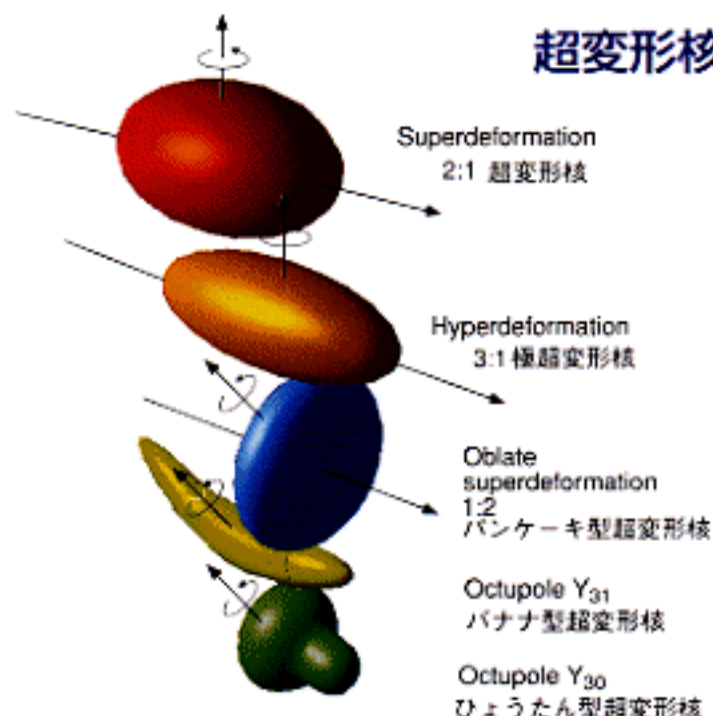
特に、中性子過剰な重い不安定核の中性子スキンの形状の研究は中性子物質研究という新しい分野を創り出します。

核物質の新しい研究方向

これまでは右の図にある黒い線上の研究だけが可能でしたが、RIビームを用いればその他の興味深い方向への発展が可能になります。その方向の一つが中性子星であり、もう一つが中性子物質です。



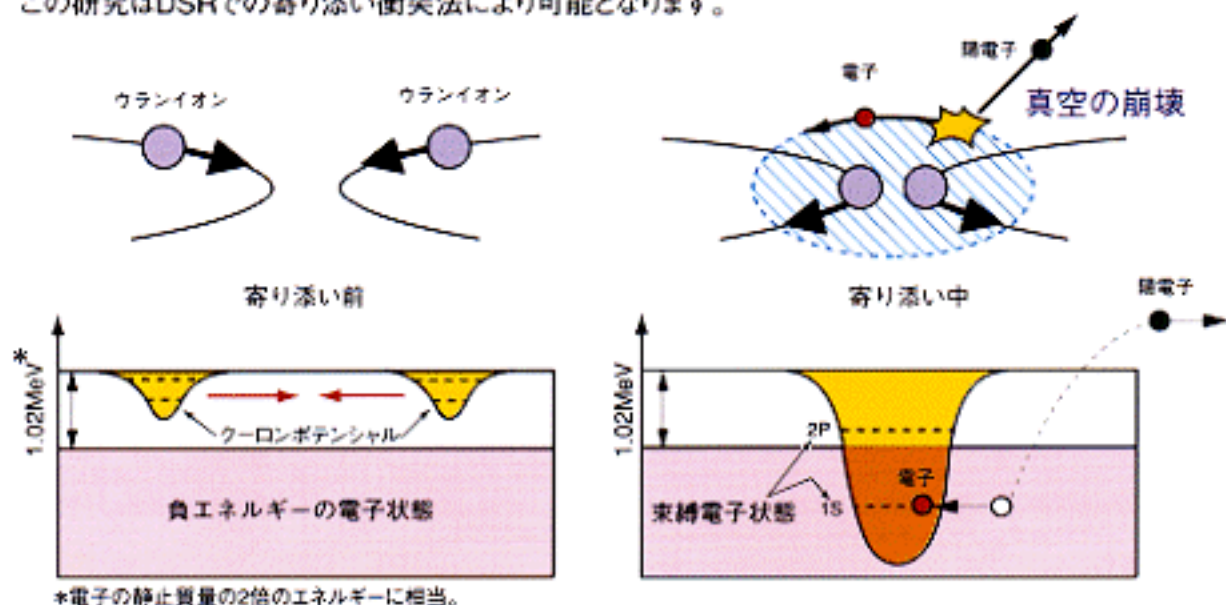
超変形核



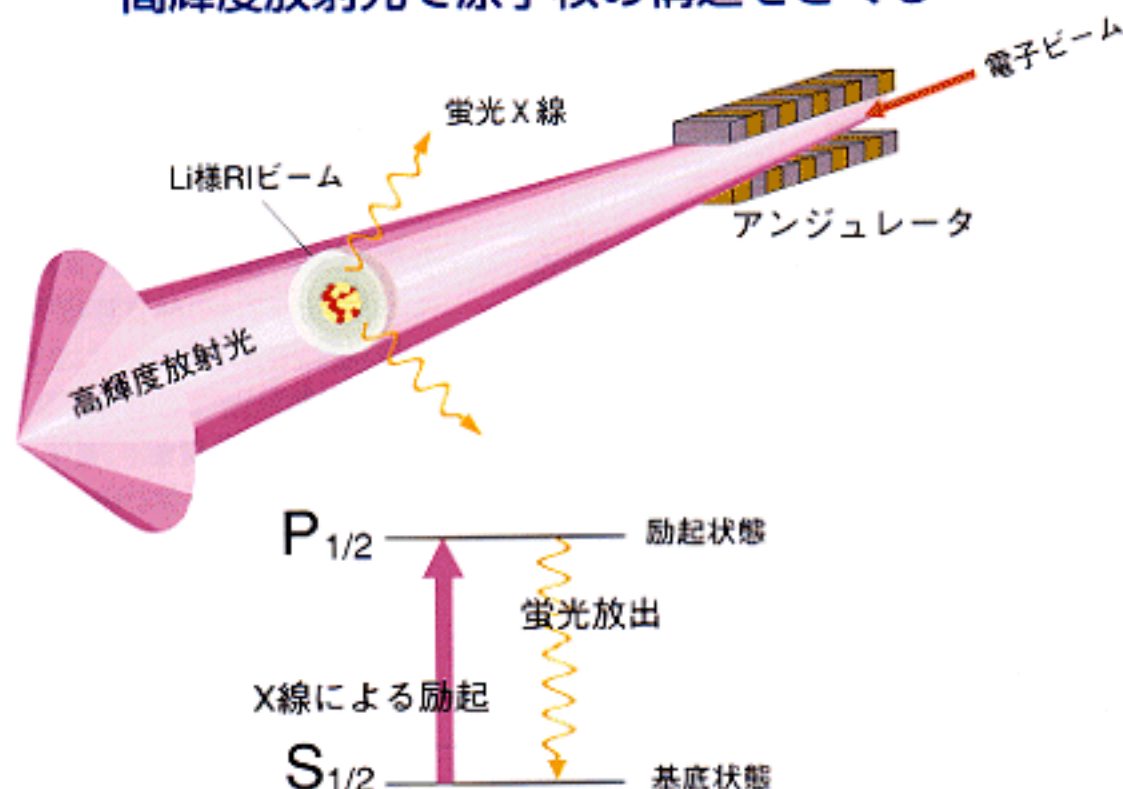
エキゾチック核には通常の原子核には見られない様々な変形がありえると予想されています。たとえば、左図のような、長軸と短軸の比が2:1の超変形核や3:1の極超変形核などです。これらは、孤立した有限多体系である原子核に特有な現象で、量子力学的に非常に興味深い研究対象であると考えられています。

超重原子形成による真空の崩壊

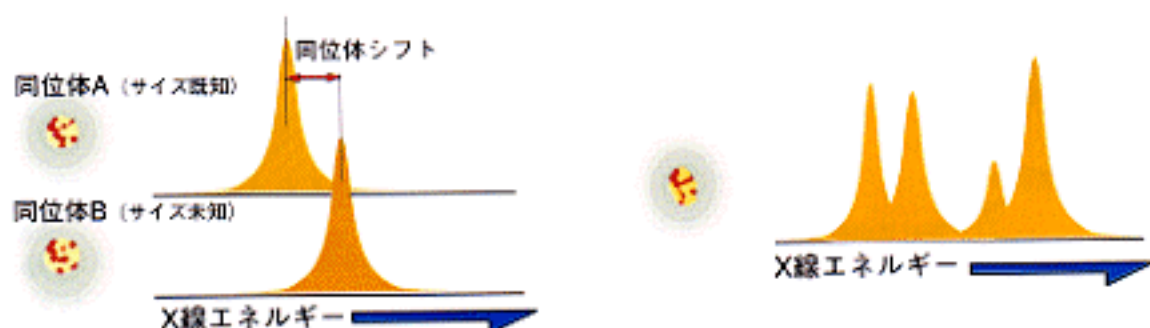
もし原子番号 (Z) 92のウランとウランを衝突させると一時的に電荷数184の原子が生まれることになります。このようなZの極端に大きい原子は、通常の原子とは全く異なった性質をもつと期待されています。理論的計算によると、Zが173より大きい原子では、一番内側の電子のエネルギー状態が負のエネルギー状態になり陽電子が発生することになります。この現象は真空の崩壊と呼ばれています。しかし、未だ実験的検証は得られておらず、量子電磁気学の重要な課題となっています。この研究はDSRでの寄り添い衝突法により可能となります。



高輝度放射光で原子核の構造をさぐる



MUSESでは、DSRの片方のリングに最高2500 MeVの電子ビームを蓄積し、その直線部に挿入したアンジュレータと呼ばれる装置から指向性と単色性に優れた高輝度X線を発生させることができます。このX線を、DSRのもう一つのリングを周回中のLi様（電子を三個もった）RIイオンに衝突させます。その際、X線のエネルギーを連続的に変化させていくと、イオンはある固有のエネルギーのX線を共鳴吸収し励起されます。励起状態は直ちに蛍光X線を放出して基底状態に戻ります。このときの蛍光X線を観測することによって、共鳴エネルギーを正確に測定します。この手法は、**不安定核の新しいX線核分光学**をもたらすものと期待されています。

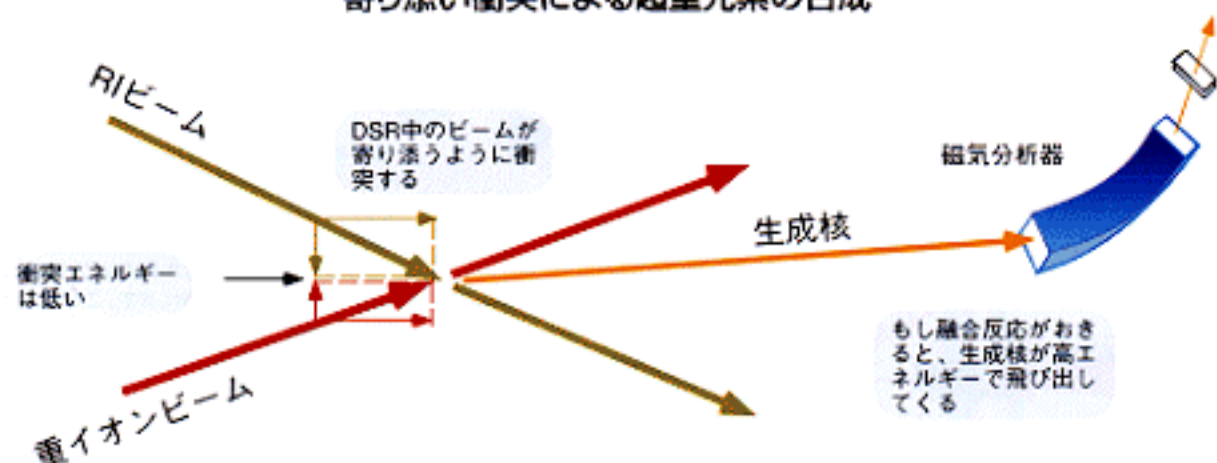


同一元素（陽子数が等しい）でも中性子数が異なると、共鳴エネルギーにわずかに差が生じます。これは同位体シフトと呼ばれ、核の大きさや変形度の違いに起因しています。したがって、同位体シフトの測定によって、不安定核のサイズを知ることができます。

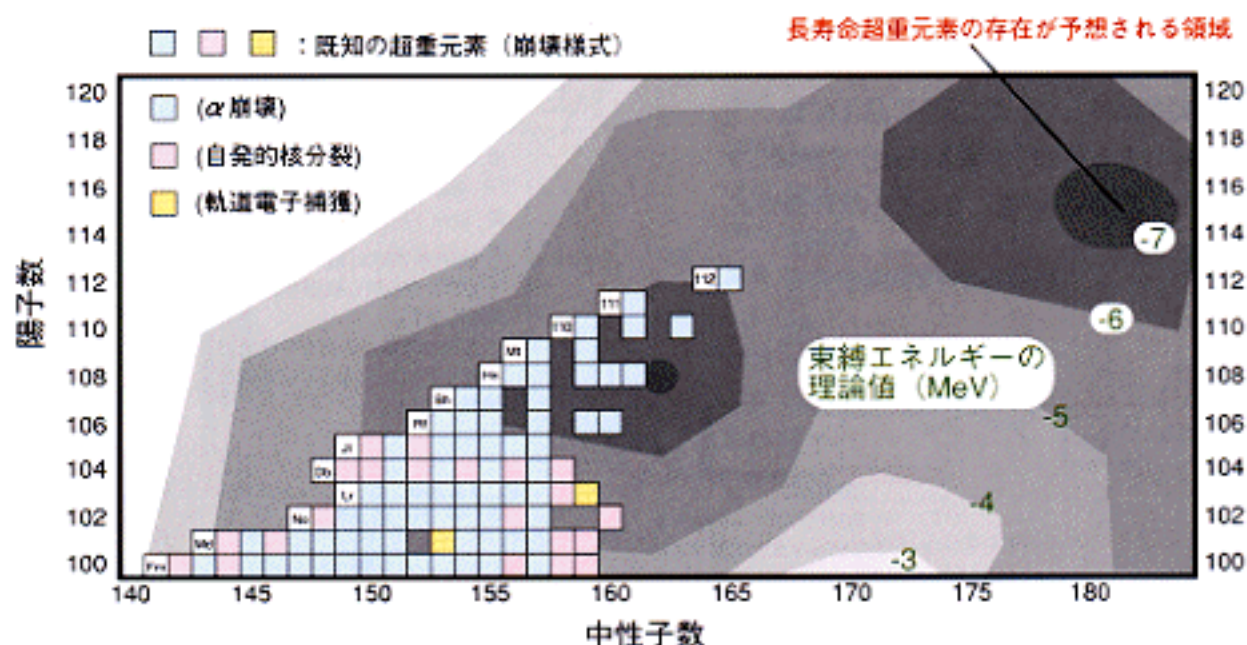
核が変形したり、スピンをもっていると左上図の基底状態と励起状態が分裂します。この分裂によってX線の共鳴線は図の様に分岐し、その分岐幅から不安定核の電磁モーメントを知ることができます。

超重元素の創成

寄り添い衝突による超重元素の合成

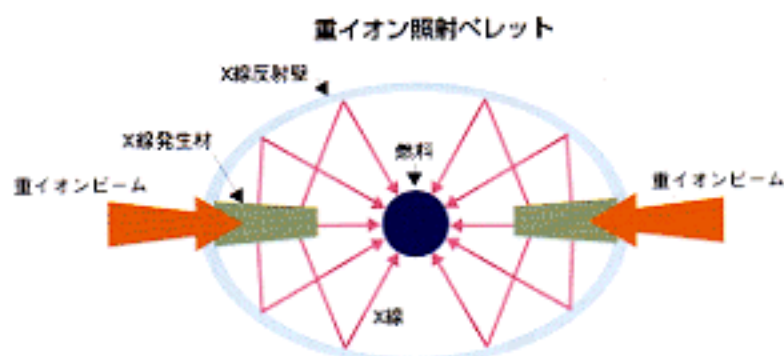


原子番号 114、質量数 296 近傍の超重元素のなかには、比較的長寿命の(崩壊頻度の小さい)ものが存在するのではないかと予想されています。この超重元素の合成は原子核物理学の重要課題のひとつになっています。これまで超重元素は低エネルギー核融合反応で合成しその崩壊様式を逆にたどって同定してきましたが、この方法は崩壊頻度の小さい超重元素の同定には適用できません。そこでたとえば MUSES の DSR で原子番号 22 以上の高エネルギー中性子過剰核ビームと ^{238}U ビームを寄り添い衝突させれば、両者は低エネルギーで効率よく融合し、生成核は高エネルギーで前方に飛び出してくるので、それを質量分析して検出することができます。

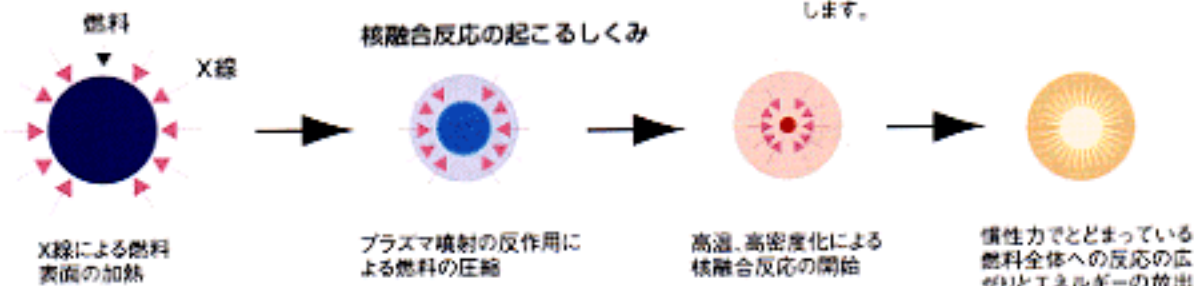


重イオン慣性核融合

核融合は未来のエネルギーとして注目をあびていますが、高エネルギー重イオンビームの正面衝突を利用して、核融合を起こさせるのが重イオン慣性核融合です。MUSESでは、DSRを用いて慣性核融合のテスト実験を行います。



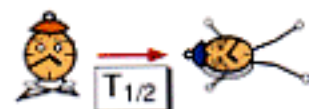
重イオンビームが照射ペレットに打ち込まれると、その大部分のエネルギーはX線発生材に吸収され、そこで大量のX線が発生します。発生したX線は、直接またはX線反射壁により反射され、重水素および三重水素からなる燃料を照射します。このX線は燃料表面をプラズマ化し、プラズマ噴射の反作用で、内部の燃料を圧縮します。内部は、通常の固体の数千倍もの密度に圧縮され、中心部は一億度の温度に達し核融合反応が始まります。圧縮された燃料が慣性力でとどまっている間に反応は燃料全体に爆発的に広がり、照射エネルギーの数百倍のエネルギーを放出します。



相対論の検証

相対論によると高速で走っている粒子の時間はゆっくり進むように見えます。

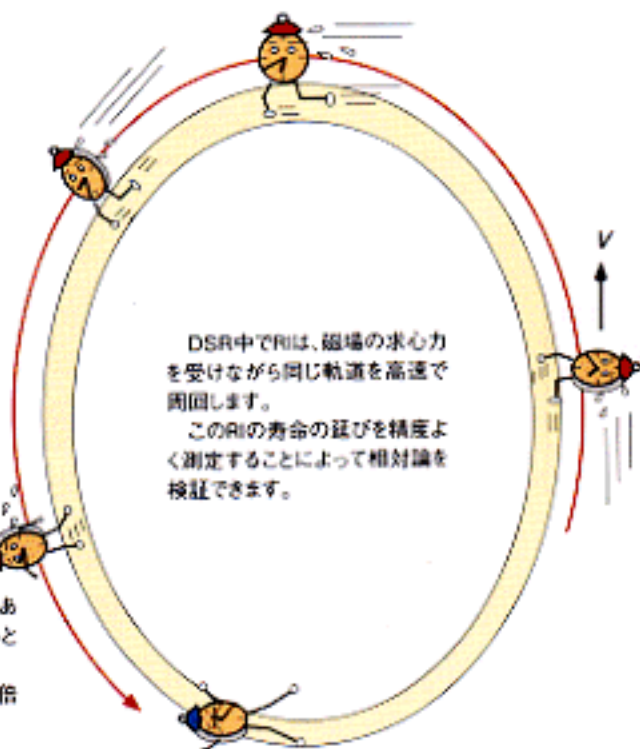
RIはある寿命(半減期 $T_{1/2}$)で崩壊しますが(下図)、高速になるとその寿命がのびます(右図)。



$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad c: \text{光速}$$

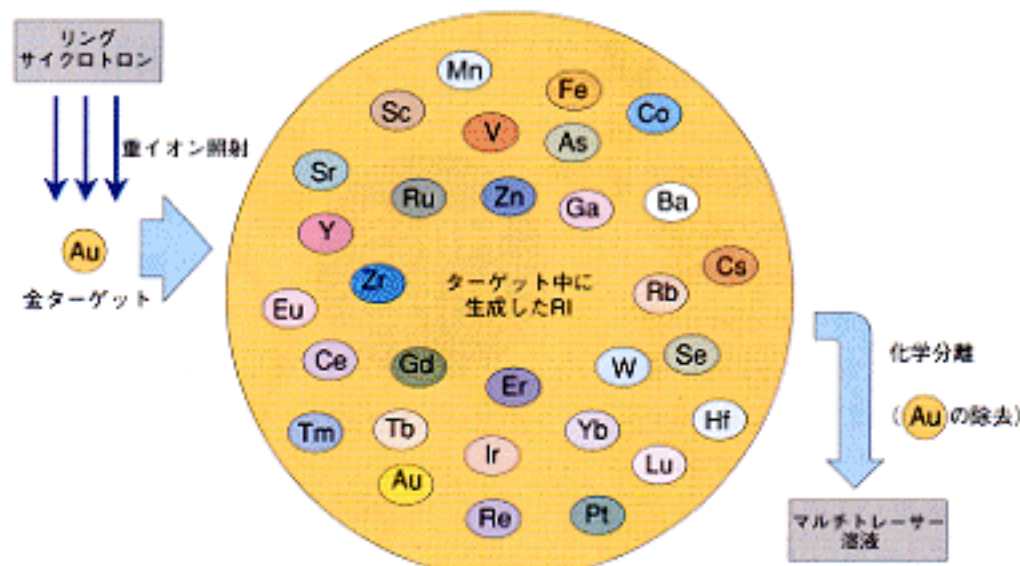
$$\gamma T_{1/2} ?$$

BSRでRIビームを核子あたり1 GeVまで加速するとその γ は約2になります。すなわちRIの寿命が約2倍延びることになります。



DSR中でRIは、磁場の求心力を受けながら同じ軌道を高速で周囲します。このRIの寿命の延びを精度よく測定することによって相対論を検証できます。

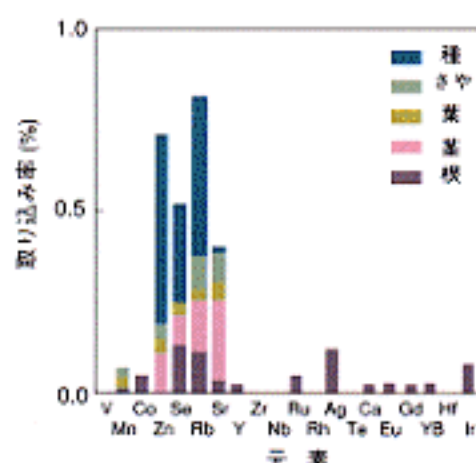
マルチトレーサーの応用



高エネルギー重イオンビームで金などのターゲットを照射すると、ターゲット中に種々の元素のRIが生成されます。これらを化学的に分離して、多数の元素のRIを含むトレーサー（マルチトレーサー）をつくります。マルチトレーサーは同一条件下で多数の元素の挙動を同時追跡できるので、この例に示すような広範な応用が開かれます。RIビームファクトリーではマルチトレーサーを大量に製造することができます。



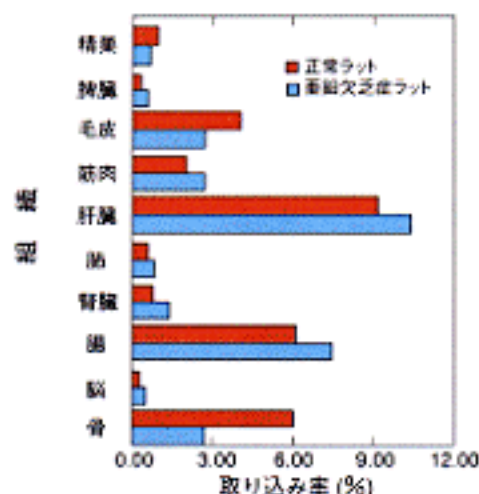
大豆



大豆の各部分での各種元素の分布
(マルチトレーサーを含む土で2ヶ月間育成)



ラット



正常ラットと亜鉛欠乏症ラットの臓器での鉛の分布
(静脈注射の場合、一回の実験で約20種の元素について同様のデータが得られる)

RI ビームによる新しいがん治療法の開発

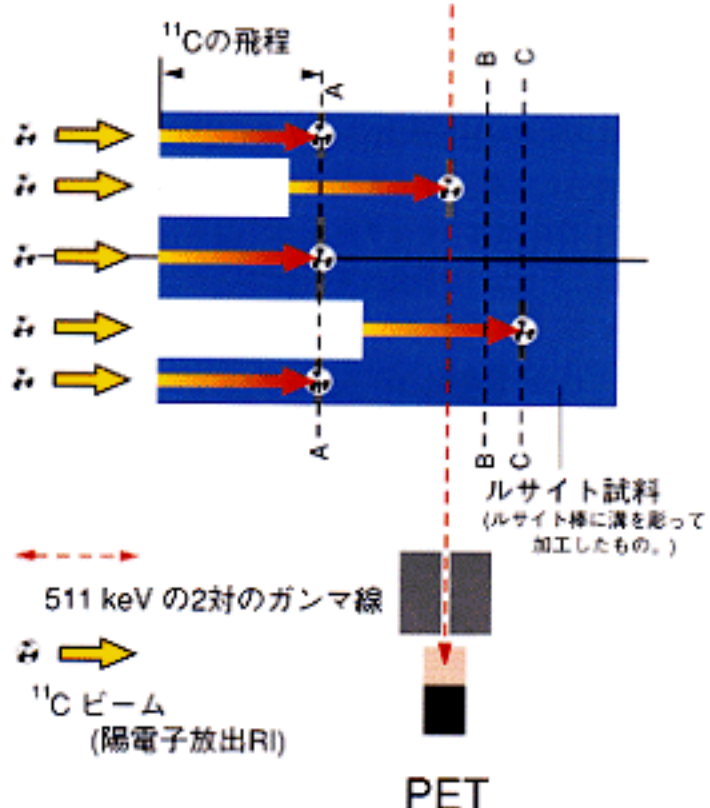
[RIビームと陽電子トモグラフィーの利用]

現在の重粒子線がん治療は安定核のビームを用いていますが、より利点のある陽電子放出RIビームとPET (Positron Emission Tomography: 陽電子CT) を組み合わせた新しい治療法の開発を進めます。図はRIPSで発生させた核子あたり95 MeVの陽電子放出核(炭素11)ビームをプラスチックの厚板に照射し、炭素11が停止した位置をPETにより観測したものです。この方法は、照射位置をリアルタイムで確認しつつ治療できるという利点をもち、これまで放射線の適用が困難であった小さながんの放射線治療までも可能にすると期待されています。

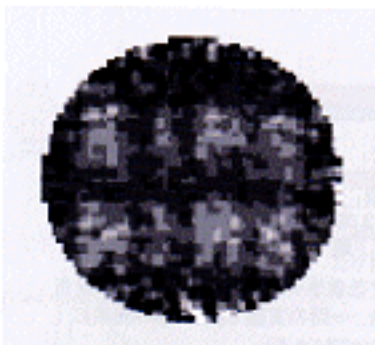
実験: 右の概全図のように、「RIPS」と「NIRS」の2つの文字パターン(各々線幅2mm、深さ4mm、5mm)を刻印した厚いルサイト丸棒にRI発生装置で発生した核子あたりのエネルギーが約100 MeVの炭素11ビーム(陽電子放出RI)を平面に照射し、炭素11がエネルギーを失って止まった点の2次元分布を陽電子放出により発生する2対のガンマ線を同時検出することによりその2次元分布を測定し、断層写真を得た。



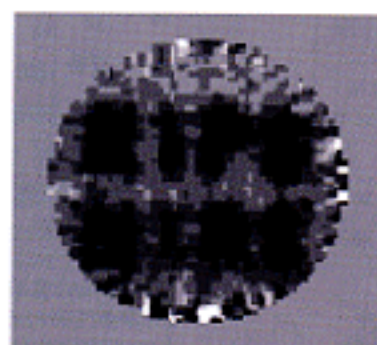
正面から見た図



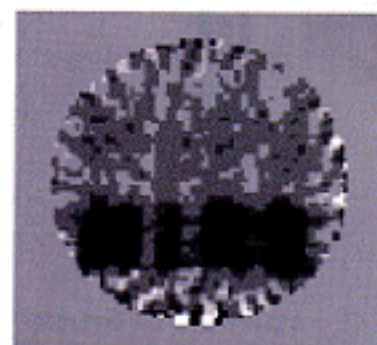
A. の位置では、「RIPS NIRS」の文字が白抜きになって見える。



B. の位置では、「RIPS NIRS」の文字がぼんやりして見える。

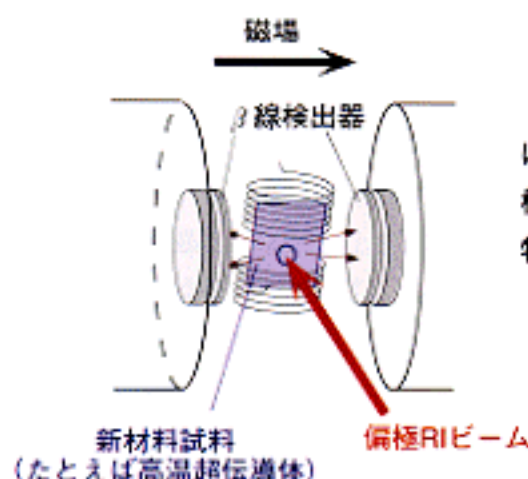


C. の位置では、「RIPS NIRS」の「NIRS」の文字だけが見える。

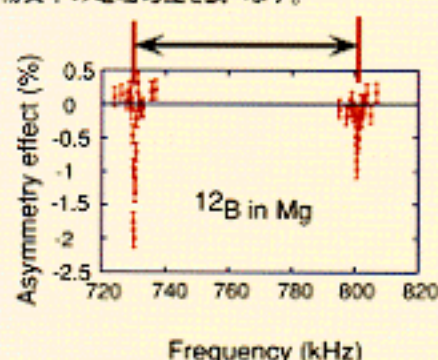


新材料の内部電磁構造の研究

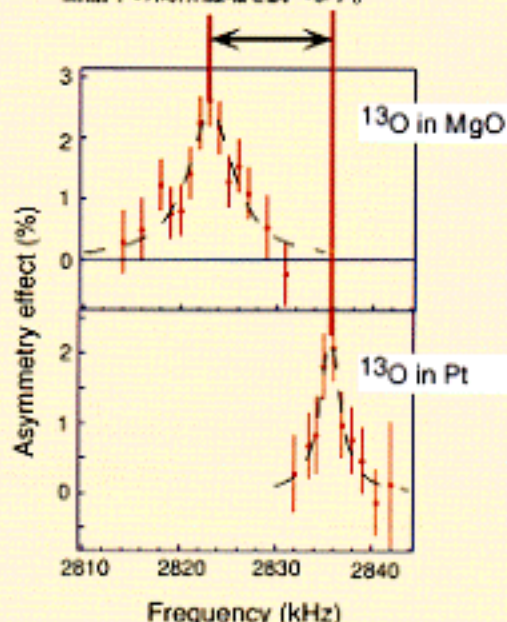
特殊な方法でスピン偏極させたRIビームを物質中に打ち込み、核磁気共鳴法（NMR）によって偏極RIが放出するベータ（ β ）線の非対称度を測定すると、物質中の局所磁場や電場勾配を知ることができます。



電気四重極相互作用による遷移の分離を用いて、物質中の電場勾配を調べます。



共鳴周波数のナイトシフトを用いて、結晶中の局所磁場を調べます。



工業技術、その他への利用

RIビームは工業的にも広い応用が考えられています。RIビームは、RIの一般的な特長である

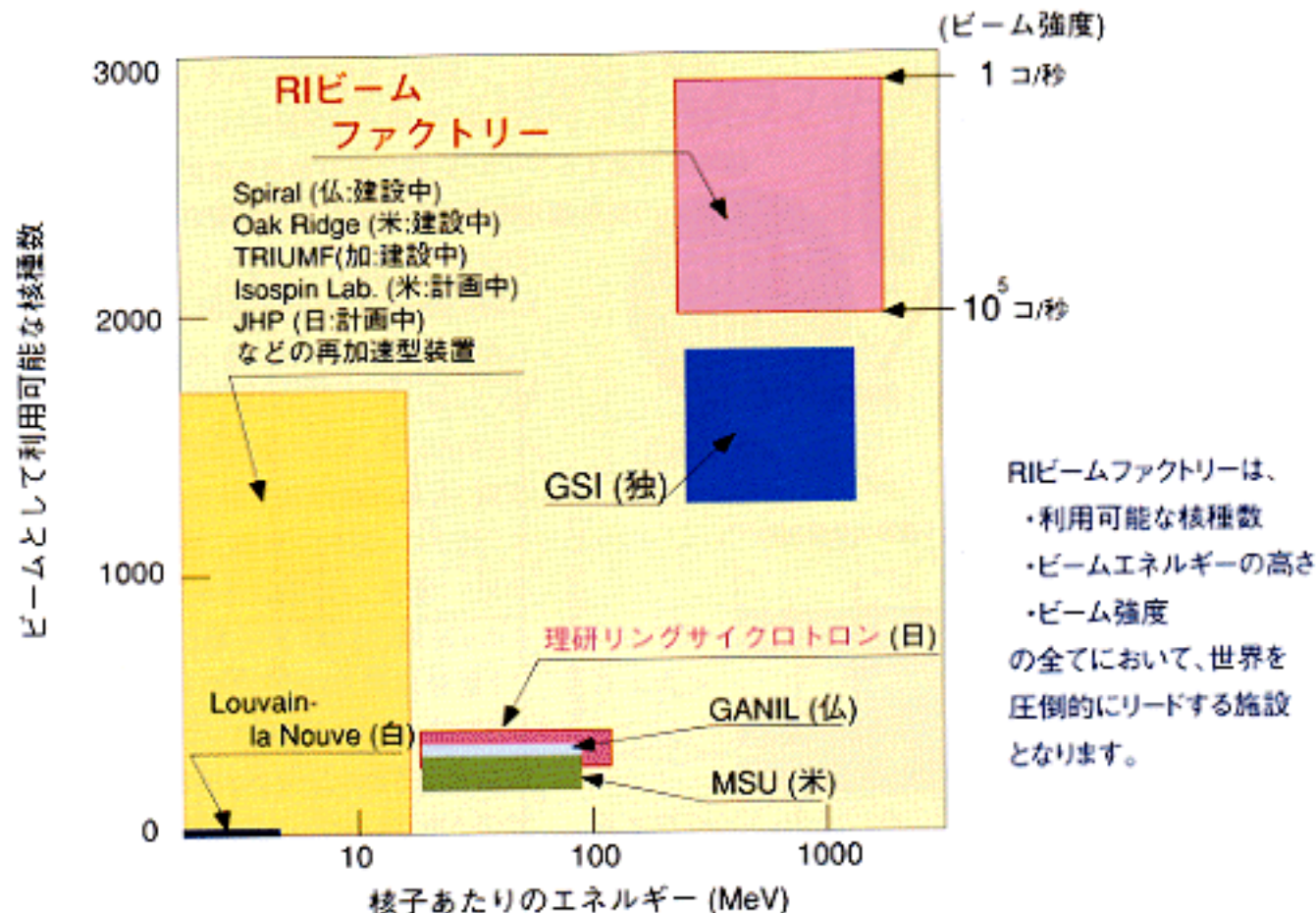
1. 数千種にわたって核種を選択ができる。
2. 現象の時間スケールに応じて、プローブとして最適な寿命を広範囲（マイクロ秒から数億年）に選択できる。
3. 研究対象の物質の調べたい性質に応じて、プローブとして最適なスピン（核磁気モーメント）を選択できる。
4. 放射性があるため検出感度が極めて高い。

という性質に加え、高エネルギー重イオンビームの特長である

5. RIを位置と深さを精度よくコントロールして物質中にインプラントできる。

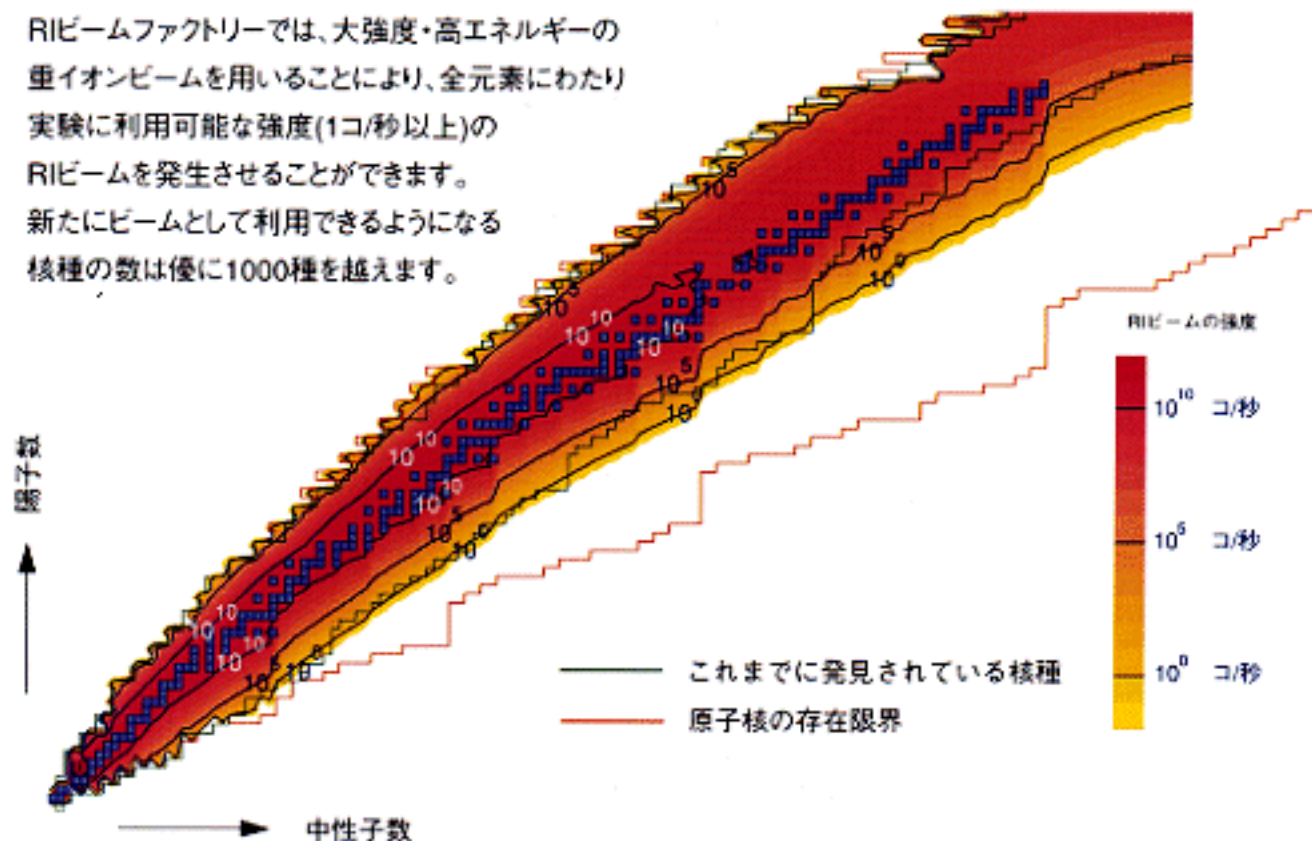
という性質を合わせもっています。これらの特性を利用すると、これまで解明が非常に困難であった現象の分析に役立ちます。たとえば、エンジンの機械部品の精密な磨耗診断や劣化診断など、工業分野においても新たな技術を提供すると期待されます。

世界のRIビーム施設との比較



RIビームファクトリーによって 利用可能になるRIビームの種類と強度

RIビームファクトリーでは、大強度・高エネルギーの
重イオンビームを用いることにより、全元素にわたり
実験に利用可能な強度(1コ/秒以上)の
RIビームを発生させることができます。
新たにビームとして利用できるようになる
核種の数には優に1000種を越えます。



年次計画

2002年
新RIビーム発生を
目指します。

事項 \ 年度	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
RIビーム発生・利用研究							開発・研究								
超伝導リングサイクロトロン				製作					RIビーム発生						
二重蓄積リング系									製作 蓄積・冷却リング、二重蓄積リング、電子リニアック			製作 ブースターシンクロトロン			
ビーム輸送系							製作				製作		製作		
共通設備系								製作				製作			製作
建屋			地質調査 基本設計	建設					建設			建設			



1996年11月
理化学研究所

〒351-01 埼玉県和光市広沢2-1
TEL048(462)1111(代表)
加速器研究施設

書庫(Museum)

科学の発展の歴史の宝庫たち。

ゼウスとムネモシネの間に生まれ、音楽、文芸、美術、哲学、天文などをつつがとる。

多くはトラキアのピュリアやボイオチアのヘリコン山で養育されたので、ヒエリダス、ヘリコニダスともよばれる。

神話の数は諸説があるが、ヘシオダスによる9人が一般に知られている。