

ODYSSEY FOR SYNTHESIS OF ELEMENTS VIA MODERN ALCHEMY

Hiroyoshi Sakurai¹

RIKEN Nishina Center for Accelerator-Based Science

2-1 Hirosawa, Wako, Saitama, 351-0198

Abstract

Experimental programs on nuclear science at RIBF are introduced to the general public. Special emphasis is given to an unanswered question of physics: How were the heavy elements from iron to uranium made? The heavy elements are assumed to be made in supernova explosions, but the specifics of how this happens are unknown. RIBF would contribute to solve the question.

現代の錬金術で元素創成の旅へ

1. はじめに

我々の周りにある物質はどこでどのように造られたのだろうか？鉄より軽い元素はビッグバンや恒星内で造られる。では、鉄からウランにいたる重い元素は？重い元素は宇宙で繰り返される爆発的な営み「超新星爆発」で造られたという仮説がある。考えられている。超新星爆発は、太陽よりも約10倍以上重い星が終焉する時の大爆発である。その爆発時に一瞬だけ存在する元素が、重い元素の祖先であると考えられており、この仮説を実証するための鍵は、一瞬だけ存在した元素の性質だ。理化学研究所の和光キャンパスに世界に冠絶する研究施設「RIビームファクトリー」が完成した。宇宙に一瞬だけ存在した元素を現代の錬金術で地上に作り出し、その性質を調べることができる施設である。元素の中心にある「原子核」や宇宙での元素合成の話を通じて、「RIビームファクトリー」の施設について紹介しよう。

2. 原子核と宇宙での元素合成

2.1 錬金術と元素

鉄からウランにいたる重い元素のなかから金元素をとりあげよう。金元素は誰でも知っている元素であり、文明が登場するや王様は金をかき集め、権力を誇示し、戦前までは金本位制がしかれ、金は経済の中心でもあった。金は今もその価値を落とすことなく、指輪などの装飾品、万年筆などで利用されている。

19世紀後半まで、金の崇高な美しさに対する憧憬と崇拝から欧州で錬金術が発展した。錬金術は卑しい水銀や鉛の金属を金のような貴金属に変えようとする試みである。物理学者の大先輩、アイザック・ニュートンも晩年錬金術に傾倒したことが知られている。

20世紀の始めに元素・原子は原子核と電子で、ま

た原子核は陽子と中性子で構成されていることがわかった。原子核中の陽子はプラスの電気、電子はマイナスの電気をもっていて、原子は電氣的に中性だから、陽子の数が決まると電子の数も陽子の数と同じになる。原子の化学的性質は、電子の数で決まるので、元素の性質は、結局のところ陽子の数で決まる。中学校や高校で学んだ元素の周期律表は、原子核の陽子の数で分類されている。元素番号も陽子の数そのものである。金の元素番号は79で、金原子核での陽子の数も同じである。

原子は原子核と電子で構成されていると考えると元素の変換を行うためには原子核内の陽子の数を人工的に変えなければならない。陽子の数を変えるためには、100億度程度の温度を与える必要がある。錬金術は化学にとってかわり、元素同士を化学反応させて様々な物質を作り出している。しかし、元素を変換することはできない。なぜなら反応温度は高々数千度で100億度には手が届かないからである。

最初に人工的に元素変換を行ったのはラザフォードで、放射性同位元素から放出されたアルファ線を窒素に照射し、酸素を生成した。1919年のこの業績から元素変換を行う錬金術は物理学の分野となる。

2.2 同位元素と原子核

再び金の話に戻ろう。金の元素番号は79で、電子の数は79個、原子核中の陽子の数も79個であった。次に中性子の数について考えよう。

金元素で安定な元素は、中性子の数は118個である。この元素内の原子核は安定なので、安定核と呼ばれている。原子核が安定なお陰で、身の回りの金が他の元素に変わることはない。

金元素には安定元素のほかにも放射性同位元素がある。この場合は中性子の数が90から128個までの数多くの不安定な原子核が元素を構成している。中性子数が118よりも多い中性子が過剰な原子核は電子を放出して水銀の原子核（陽子数80）に変わる。半減期は中性子の過剰度とともに減り、中性子数

¹ E-mail: sakurai@ribf.riken.jp

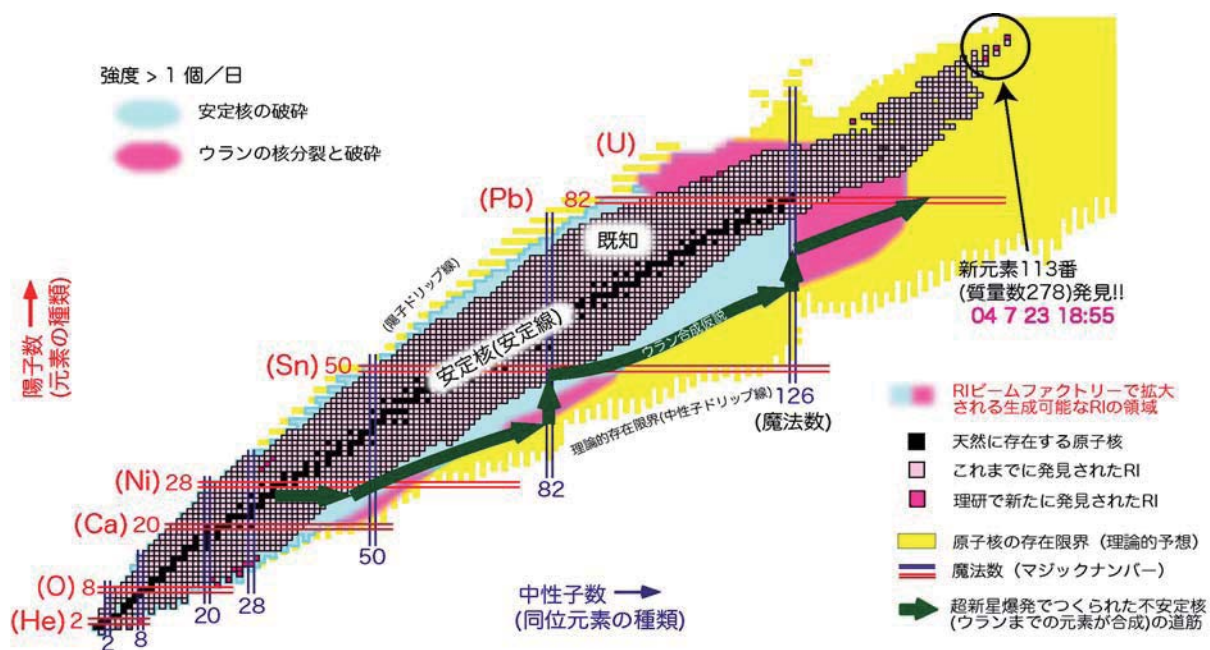


図1 核図表。縦軸には陽子数（元素番号）、横軸には中性子数を取り、原子核を分類した図表。黒い四角は安定な原子核で身の周りの元素をつくっている。ピンク色の原子核は今までに発見された寿命の短い不安定核。理研で開発された、現代の錬金術を利用すると、青と赤の領域の原子核を人工的に造り、超新星爆発でつくられた緑色の原子核の性質を調べることが可能となる。

126の原子核の半減期は30秒である。逆に118よりも中性子数の少ない原子核は陽電子を放出してプラチナ（陽子数78）やアルファ線を放出してイリジウム（陽子数77）になる。

金元素に限らず、全ての元素には同位元素があり、原子核が安定であれば安定同位元素、不安定であれば放射性同位元素に分類される。どの元素が安定か否かは、原子核の陽子の数と中性子の数の組み合わせで決まっている。図1は核図表で原子核を陽子数Zと中性子Nで分類した図表である。図の黒い四角が安定核を示し、その他のピンク色の原子核は不安定核である。安定核の総数は約300個あり、原子核の存在限界に挟まれた領域には約10000種の原子核の存在が予想され、存在が確認されている原子核の数は約3000個である。

2.3 宇宙での元素合成

さて、次に金の原子核が宇宙のどこでつくられたのかについて話をすすめよう。

宇宙初期のビッグバンで電子、陽子、中性子が造られたと考えられている。陽子と中性子が結合して重陽子に、直ちに重陽子同士がヘリウム-4（4は質量数）原子核ができる。このような過程を繰り返して、ビッグバン直後にはリチウムまでの元素が生成されたと考えられている。

ビッグバンで生成された水素やヘリウムが集まり、やがて恒星を形成する。恒星の中では太陽のように核融合反応が起こり、核反応で解放されたエネルギーで星が燃え、光り輝く。融合反応が進むにつれ、

ヘリウム、炭素といった元素が生成されていく。

太陽よりも約8倍以上重い星の場合には、星の内部に鉄までの重い元素が生成する。鉄の原子核は特別で他の原子核よりも安定で、鉄よりも重い元素は融合反応では生成することができない。この星の最後に「超新星爆発」が起こる。

超新星爆発は、星の内部の温度上昇、密度上昇によって、鉄原子核の分解が起こり、また、電子が原子核に吸収される過程がすすんで、鉄のコアが壊れていくとそれとともに外層から物質が中心部に流れ込み、重力崩壊して爆発する。この全過程は高々10秒程度の時間で起こり、その内のわずかな数秒で元素合成が進むと考えられている。

爆発時には大量の中性子やニュートリノが放出されると考えられており、この中性子が元素合成を起こす引き金である。この過程で生成される原子核は図のように非常に中性子が過剰な原子核であると予想されている。星内部の原子核が中性子を次々と捕獲していく。中性子を捕獲するたびに原子核の半減期が短くなると、やがて中性子を捕獲する前に崩壊して陽子数一つ多い原子核になる。このような中性子の捕獲と崩壊とを繰り返して、図1の緑色の原子核が生成することになる。このような過程をr-過程と呼んでいる。rはrapid（速い）の略で、r-過程はわずかな数秒間で終わる。r-過程で生成した原子核は崩壊してやがて安定な原子核になる。

金元素の起源は、この仮説が本当であれば、宇宙に一瞬だけ存在した、中性子がとても過剰な放射性同位元素だったということになる。

2.4 なぞ解きへの原子核物理学者の挑戦

r-過程で生成される原子核は人類がまだ造ったことのない原子核でその性質は未知である。未知原子核の半減期や質量などの性質は、r-過程仮説の検証にはとても重要で、現在、理論研究者がその性質を予想している。

では、理論予想はどれだけ確かなものなのだろうか？現在、軽い核の領域で中性子過剰な原子核を生成し調べてみると、原子核物理学の「常識」を覆す様々な性質、現象が次々に見出されてきた。安定核で知られている「魔法数」は、中性子過剰核では喪失しており、新たに別の魔法数が出現することがわかってきた。また、「飽和性」を破る中性子ハローや中性子スキンといった新たな核物質の形態も見出されている。最近になって、「一様な液滴」としての原子核の性質が破れ、原子核内の陽子と中性子が共同歩調をとらない現象も見つかった。

これまでの「常識」は安定核とその近傍の不安定核の性質を調べて得られたもので、次々と現れる新データによって、現代の原子核物理学は「秩序」から「無秩序」状態へと移行しており、いわば「無秩序」から新しい「秩序」を形成することができる極めてエキサイティングかつチャレンジングな時代を迎えている。安定核で得られた理論的枠組みが中性子過剰な原子核では通用しなくなっており、実験研究としては、r-過程に関与する中性子過剰な原子核を人工的に生成し、質量や寿命といった性質を調べあげることが新秩序形成のための重要な課題となっている。

金元素生成の謎解きにとって、もう一つ重要な課題がある。超新星の出現は、古文書にも記録があるほど、天体現象として実際に観測され、起こっていることである。しかし、現在の知見を採用した理論モデルでは爆発を起こすことに成功していない。超新星爆発直前には、星内部で中性子過剰な原子核が生成し、原子核同士が接するほどの密度になると、最後には原子核同士が反発して、爆発が起これらとされている。この問題に挑戦するためには、中性子過剰な核物質の状態方程式、すなわち密度や温度を変化させたときに物質がどう振舞うかを調べる必要がある。また、この状態方程式は、中性子星の内部構造にも関わっており、極めて興味深いテーマである。

超新星爆発時のウラン合成過程、r-過程、および超新星爆発機構を我々人類が理解するために、原子核物理学者は様々な角度から原子核の研究を行い、統一的な理解を得ることを目指している。まずは、現状の「無秩序」状態に則して、r-過程に関わる未知の原子核を次々と生成して、その性質を調べ、同時に、原子核同士を衝突させるなどして状態方程式に関する新たな知見を見出したい。まさに、このような夢の世界が理化学研究所のRIビームファクト

リーで実現される。

3. RIビームファクトリー

3.1 RIビーム新時代

RIビームファクトリーは水素からウランに至る不安定核 (RI) を工場のように大量生産し、これらをビームとして取り出すことを目指している。RIビームの歴史は1960年代にさかのぼり、この時点では高エネルギー陽子ビームを標的に入射し、標的核が壊れて出来た破砕片をかき集め、イオン化し、加速する手法が取られていた。この場合の欠点は、イオン化する際に元素の化学的性質に支配されるため、例えば、初期の段階ではアルカリ金属元素のみビームとして取り出すことが可能であった。また、破砕片の収集・イオン化に必要な時間が比較的長いことも安定核から遠い不安定核を取り出す際の欠点である。安定核領域から遠く離れば離れるほど、不安定核の寿命はどんどんと短くなるので、寿命が収集・イオン化時間よりも短くなると、ビームの取り出し効率がどんどんと低くなってしまふ。

このような欠点を克服する新しい手法が1980年第に生まれた。図2のように、この方法は、安定核を重イオン加速器で十分なエネルギーまで加速し、このビームを標的に入射させ、反応によって生じた入射核の破砕片をビームとして取り出す手法である。この反応は、入射核を破砕するので、入射核破砕反応とよばれている。この手法の優れた点は、化学的性質によらず誰でも簡単に不安定核をビームとして取り出せる点と、ビームとして取り出すスピードが圧倒的に速く、寿命の短い不安定核でも収集効率が落ちない点である。

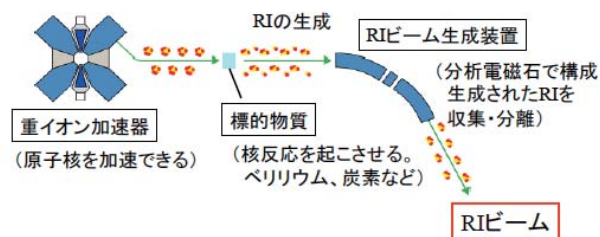


図2 RIビームの生成方法 (概念図)

理化学研究所ではこのRIビームの可能性に着目し、1990年代初頭に理研入射核破砕片分離装置RIPSを建設し、RIビームを用いた研究を開始した。このRIPSの特徴は、理研リングサイクロトロンRRCのビームエネルギー、強度を最大限生かしたRIビーム生成が可能で、完成当時のRIビーム強度は、軽い核の領域では世界の他の施設と比べ100倍以上であった。この大強度RIビームに触発され、様々な研究手法が理

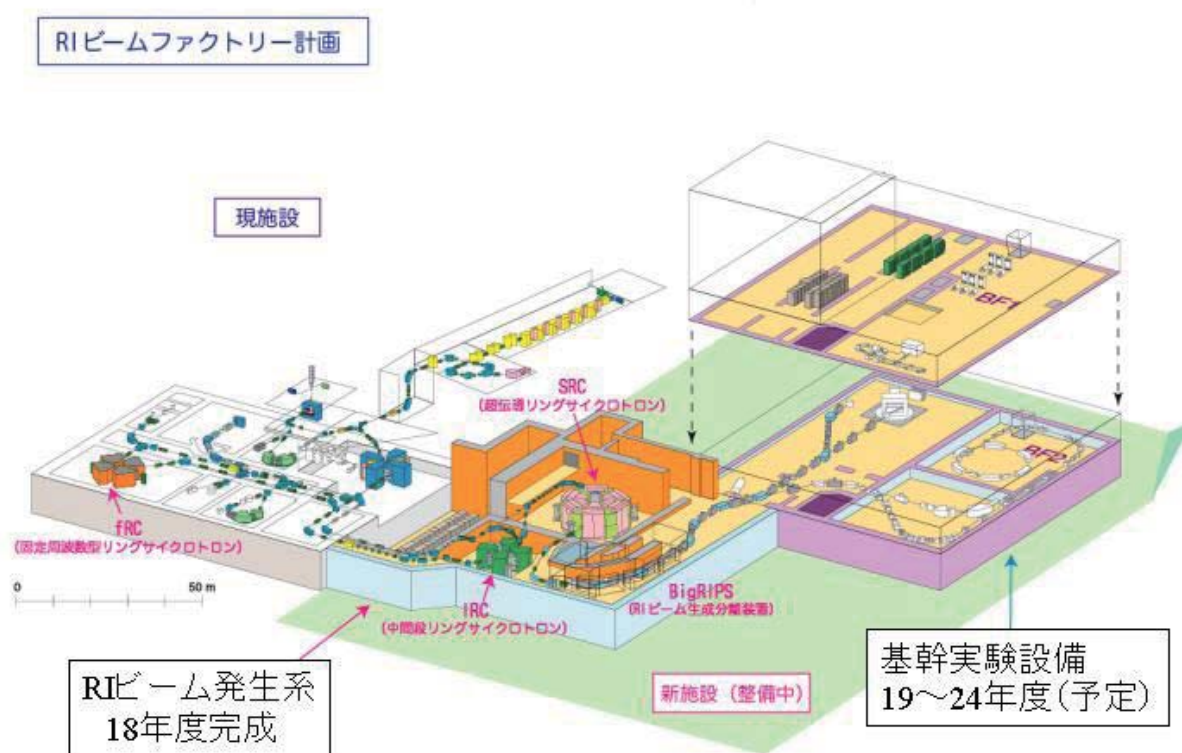


図3 RIビームファクトリー計画。平成18年度までにRIビーム発生系の建設が終了。現在、基幹実験設備を行っている。

研で開発され、軽い中性子過剰核の領域で「常識」を覆す新しい現象が次々と見出された。従来、RIの生成のみに着目し、寿命や崩壊様式を調べる実験が主なものであったが、この大強度化によって二次反応を起こさせ、様々な新しい情報が得られるようになったことが大きい。実際、理研で開発された手法は、国外に輸出され、世界の様々な研究所で利用されている。現在の加速器ではRRCの加速エネルギーの限界から利用できるRIビームは質量数60以下の軽い元素に限られてしまっており、10年以上前から、この分野の次なる展開が理研内で議論され始めていた。

一方で、90年代半ばにドイツGSI研究所ではSISシンクロトロンでウランを加速し、核分裂反応を起こさせ、破砕片の中から多くの新同位元素の発見に成功し、不安定核を生成する反応として、入射核破砕反応に加え、核分裂反応も重要であることを示した。GSIではエネルギーとしては十分なエネルギーを得ることができたものの、強度という観点では十分な性能を有していない。

以上のようなRIビーム発展の歴史の中で、理化学研究所の進めているRIビームファクトリーは、第三世代の施設であり、ウランを十分なエネルギーまで加速し、核分裂反応で生じた不安定核を大強度ビームとして供給することが可能となる。

3.2 RIビームファクトリー施設

RIビームファクトリー施設は主にRIビーム発生系と基幹実験設備に分かれている(図3)。RIビーム発生系として、まず、現施設の加速器群に加え、新たに固定周波数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3基のリングサイクロトロンが建設された。また、破砕片を効率良く収集・分離するための、超伝導RIビーム生成分離装置(BigRIPS)も建設された。

RIビーム発生系のご本尊とも言える装置は、SRCであり、総重量8300トンの「鉄の塊」である(図4)。SRCは6基のセクター電磁石で構成され、セクター間の空間はコの字形の鉄シールドが覆っている。この構造により、「史上最強のイオンビーム偏向能力」を実現するとともに、自己漏洩磁気遮蔽、自己漏洩放射線遮蔽の二つの機能も備えている。現施設の加速器群および新しい3基のリングサイクロトロンを用いて、ウランを核子あたり350 MeVまで加速することができる。

BigRIPSにも超伝導電磁石が使われている。ウランが分裂した後に生じる核分裂片は、大きく広がって飛んでくる。この分裂片の約半分を収集してビームとするために、超伝導四重極電磁石が採用されて

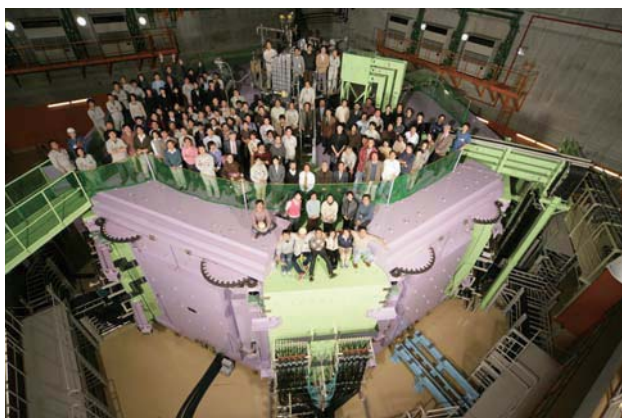


図4 「RIビームファクトリー」のご本尊、超伝導リングサイクロトロン

いる(図5。土管のような筒の中に3台の超伝導四重極電磁石が格納されている)。これら3基のリングサイクロトロン、およびBigRIPSの建設は順調に進み、平成18年度末に完成した。

2006年12月28日のSRCからの初ビームの出射から試験運転が順次行われ、2007年6月には、SRCから繰り出されるウランビームを用いて新しい同位元素、パラジウム-125を発見することができた。この成果は同時期に東京で開催されていた国際原子核会議で発表され、世界にこの施設の底力を示したと言える。

BigRIPSから供給されるRIビームの潜在能力を余すことなく引き出すための、基幹実験設備が提案されており、金元素の起源を探る研究が行われる。この起源を探るためには、核構造と核物質の二種の研究が欠かせない。前者に関係する測定量は、不安定核の質量、寿命、変形、励起状態と崩壊様式などであり、 r -過程に関わる不安定核の性質を調べる必要がある。後者については、陽子・中性子分布、高励起共鳴状態、原子核衝突などのデータから中性子過剰な核物質の状態方程式に関わるデータを取得する。測定量によって実験のスタイルが異なる点に配慮し、理研オリジナルの独創的な実験設備群が提案されており(図6)、5年計画(平成18年度~24年度)で順次、基幹実験設備を開発・整備する予定である。

整備の計画されている装置群は以下の通りである。

(1) 「ゼロ度スペクトロメータ」：核反応を利用して、新同位元素の基本的性質(寿命、励起状態、形状等)を測定するための多機能ビームライン、

(2) 「新入射器システム」：既存の入射用線形加速器RILACを超重元素生成実験に専用化し、新施設の入射器として大強度RIビームの発生を可能とする高性能小型重イオン線形加速器、(3) 「多種粒子測定装置」：高エネルギー重イオン反応で生じる多

種多様な粒子を同時に測定することができる大立体



図5 超伝導RIビーム生成分離装置 (BigRIPS)

角超伝導スペクトロメータ、(4) 「偏極RIビーム生成装置」：原子核の電磁気モーメントの測定や物質内部電磁場の測定を行い、原子核研究と物質科学の研究を行うために必要な、スピン偏極したRIビームを生成する装置、(5) 「超低速RIビーム生成装置」：高速RIビームを減速、停止させ、不安定核の電荷半径や質量などの基本量の測定などが可能な、超低速なRIビームを生成する装置、(6) 「稀少RIリング」：短寿命な不安定核の質量を精密に測定が可能な装置、(7) 「RI・電子散乱装置」：電子蓄積リング内に不安定核を閉じ込め、標的とすることで、電子とRIとの散乱から陽子分布を測定する装置、(8) 「高分解能RIビームスペクトロメータ」：東京大学大学院理学系研究科附属原子核科学研究センターが計画している、新奇共鳴現象を探るための高運動量分解能スペクトロメータ、(9) 「分散整合ビームライン」：RIビームの運動量を高分解能で測定するために運動量分散を調節する機能をもった専用のビームライン、である。

これらの実験装置群は、多くのユーザーに研究の場を提供できる共通的设备と一つの目的に特化したユニークな設備によって構成されている。

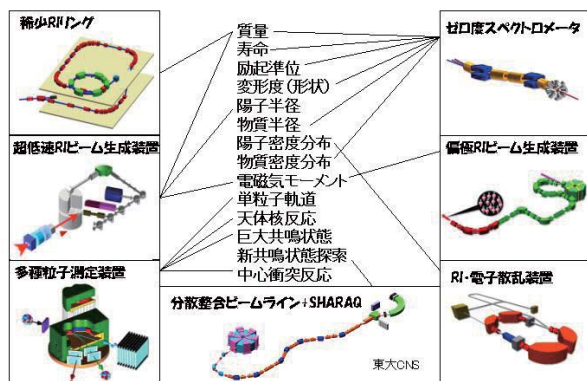


図6 基幹実験装置群

4. おわりに

RIビームファクトリーでは、天然に存在するウランをイオン化し、ビームとすることでRIビームを製造し、金やウラン元素の起源をさぐる研究が今年から始まった。このRIビームを用いた不安定核研究の分野の重要性は、世界的にも認識されており、10年前に理化学研究所がRIビームファクトリー計画を打ち出してから、欧米の原子核研究施設も理研の計画に追随し新計画の提案を行っている。ドイツのGSIではFAIR計画を打ち出し、来年度から建設をスタートする予定である。各国の研究者とも世界で先鋒を務めるRIビームファクトリーに注目しており、既に複数のグループが理研で実験したい、と表明している。

この講演では、金元素の起源を探る研究を中心にRIビームファクトリーの紹介を行ったが、これ以外にも物理法則の対称性や物質の質量起源に関わる研究、2体の相互作用を超えた3体力の研究など、基礎物理学の研究計画が目白押しである。2004年7月に理化学研究所で113番元素の発見に成功したが、この超重元素科学の推進も理研での主要なテーマの一つである。これら基礎研究以外にもRIを利用した応用研究も展開されていくだろう。

昨年4月に、理化学研究所の大先輩、仁科芳雄先生の名を冠した仁科加速器研究センターが理研内に生まれた。仁科加速器研究センターでは、RIビームファクトリーを国際共用に供することを謳っており、世界の叡智が集まる、新しい飛躍を生む大舞台を提供することになる。