

2008年4月24日

独立行政法人 理化学研究所

不安定原子核の陽子分布を精密測定する心臓部の開発に 世界で初めて成功

- 不可能とされた不安定原子核の陽子分布の測定が可能に -

加速器などを用いて、自然界には存在しない不安定な原子核「不安定核」を生成することができます。不安定核は、その名の通り、一瞬に生まれ、消滅してしまいうため、大きさやその構造を解明するために、様々な工夫が必要になっています。

理研仁科加速器研究センターのRI・電子散乱装置開発チームは、不安定核の大きさや陽子分布を調べることができる「電子散乱法による不安定核の陽子分布測定法（SCRIT法）」の開発に世界で初めて成功しました。

この手法は、電子を加速した蓄積リングと理研が独自に開発した精密イオン捕獲電場発生装置などを組み込んだ「RI 標的捕獲装置」を使って、不安定核（RI）を捕獲・固定して電子ビームに衝突させ、原子核の大きさや形、構成している陽子や中性子などの分布を測定する手法です。蓄積リングの中では大電流電子ビームを非常に細く絞り込むことができ、電子の通り道の狭い空間にだけ必要最小限のイオンを集中させることができます。これにより、電子散乱に必要な原子核数を13桁も少なくし、わずか1,000万個で鮮明な原子核を“見る”ことを可能にする技術を確認しました。

具体的には、京都大学化学研究所の電子蓄積リングKSRにプロトタイプのRI標的捕獲装置を組み込み、不安定核に見立てた「セシウム」イオンを電子ビームに沿うように流し込み、セシウムを捕獲・固定し、十分に電子の衝突と散乱が起きることを確認しました。未知の不安定核の観察を可能にする技術が確立することになったと注目されます。

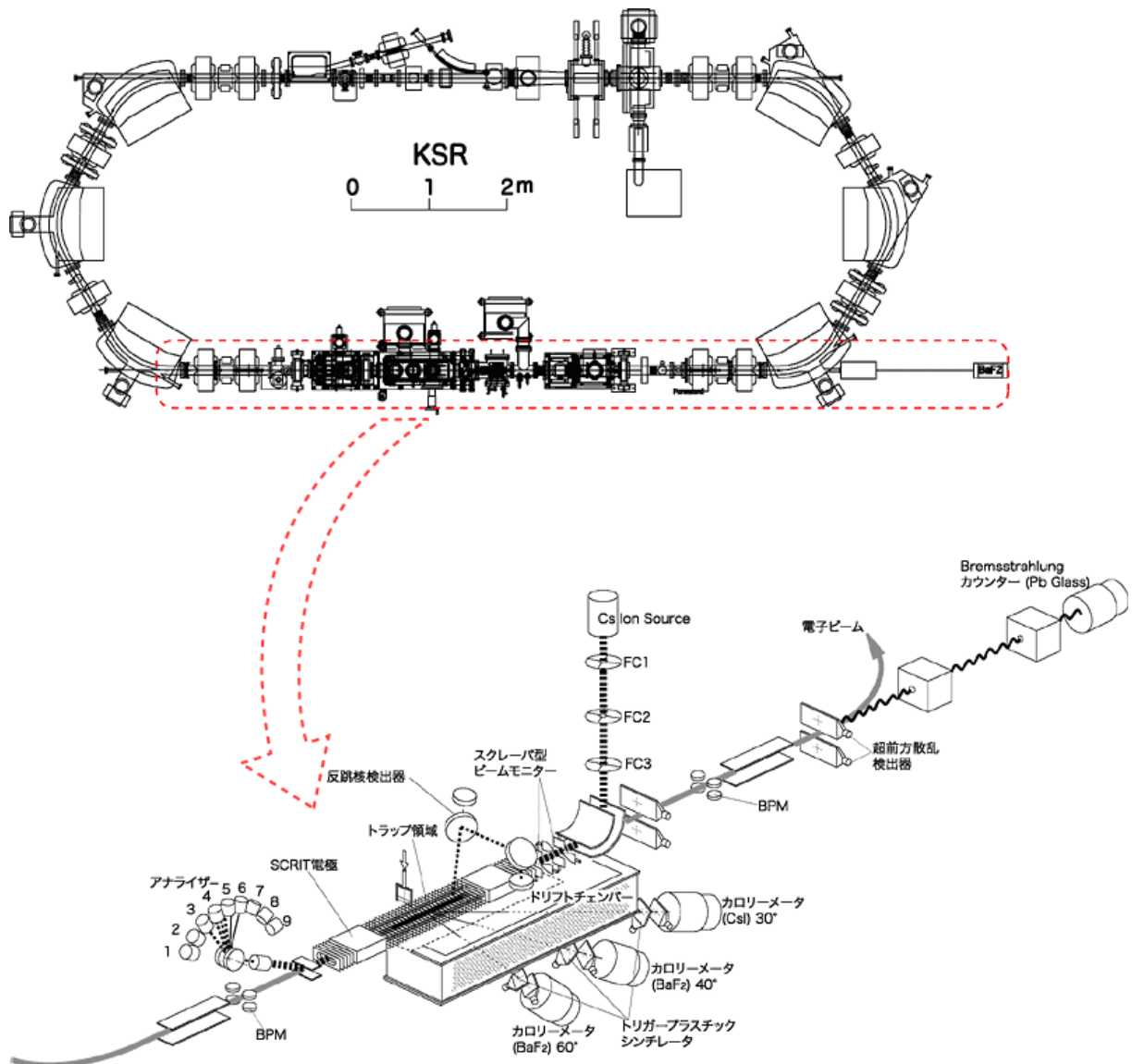


図 京都大学・化学研究所の電子蓄積リング KSR と RI 標的捕獲装置のプロトタイプ機と実験装置の概要。

2008年4月24日
独立行政法人 理化学研究所

不安定原子核の陽子分布を精密測定する心臓部の開発に 世界で初めて成功

- 不可能とされた不安定原子核の陽子分布の測定が可能に -

◇ポイント◇

- ・ 従来より 13 桁も少ない原子核数で電子衝突させることに成功
- ・ RI ビームファクトリー計画で整備予定の「RI・電子散乱実験装置」に新技術
- ・ 中性子ハローなど異常な原子核像を包括する「究極の原子核モデル」構築へ第一歩

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)が推進しているRIビームファクトリー(RIBF)^{*1}計画に整備予定の基幹実験設備「RI・電子散乱実験装置」の心臓部となる基幹技術「不安定原子核^{*2}(RI)の陽子分布測定法(SCRIT法=Self-Confining RI Ion Target法)」の開発に世界で初めて成功しました。仁科加速器研究センター実験装置開発グループRI・電子散乱実験装置開発チームの若杉昌徳副チームリーダーらの成果です。

原子核は 1mmの 1 兆分の 1(フェムトサイズ)程度の大きさしかありません。この原子核の大きさや形、構成している陽子の分布を“見る”ための顕微鏡(フェムトスコープ)は、1961 年度のノーベル物理学賞を受賞したロバート・ホフスタッター (R.Hofstadter)らが開発した電子散乱という測定手法を利用します。しかし、従来のフェムトスコープで原子核を“見る”ためには、電子散乱に必要な原子核数は 10^{20} 個以上と膨大であり、加速器などで人工的に生成する寿命が短い不安定核では生成数が少なく、電子散乱を起こさせることは不可能でした。

SCRIT法は、電子蓄積リング^{*3}と理研が独自開発した「RI標的捕獲装置」(「陽イオントラップ装置」技術を利用)を組み合わせ、イオンを電子ビームに捕獲・固定すると同時に、イオンによる電子散乱を起こさせる技術です。電子蓄積リングの中では大電流電子ビームを非常に細く絞り込むことができ、その電子の通道の狭い空間にだけ、必要最小限のイオンを集中させることができます。これにより、電子散乱に必要な原子核数を 13 桁も少なくし、わずか 1,000 万個で鮮明な原子核を“見る”ことを可能にします。

2007 年 4 月、京都大学化学研究所の電子蓄積リングKSR (Kaken Storage Ring)に設置した「RI標的捕獲装置」のプロトタイプにCs(セシウム)イオンを注入し、電子ビームに約 700 万個のセシウムイオンを捕獲・固定して電子と衝突させ、電子散乱事象の発生に成功しました。約 700 万個という極めて少ない原子核数でも高い頻度で電子散乱事象を発生し、原子核を“見る”ことに成功したことは、生成数の少ない不安定核を“見る”ことができることを意味します。こうして、SCRIT法が不安定核の陽子分布を見ることのできるフェムトスコープとして実用できることを証明しました。

加速器技術の発展により、1950 年代に構築した「原子核モデル」では説明することができない中性子ハローや中性子スキンなどの異常な原子核が発見されています。これら異常な原子核の構造^{*4}を包括する「究極の原子核モデル」の構築は、世界の原子核物理学の主要テーマの 1 つです。SCRIT法の開発の成功は、これら未知の世界を観察するフェムトスコープの開発に成功したことを意味し、「究極の原子核モデル」の構築にわが国が先鞭をつけたこととなります。

なお、本研究成果は、米国の科学雑誌『Physical Review Letter』(4月25日号)に掲載されます。

1. 背景

(1) 電子散乱について

高エネルギーに加速した電子ビームを原子核に衝突させると衝突した電子が方々に飛散します。この電子散乱は、標的の原子核の「大きさ」、「形状」、「陽子分布」に応じて電子の飛散する角度が変わります。飛散状況を精密に測定することで、原子核の構造を正確に調べることができます (図 1)。

(2) 電子ビームによるイオン粒子の捕獲・固定について

電子蓄積リングを周回する電子ビームは、周回軌道上に存在する残留ガスを構成する原子に衝突し、その原子が持つ電子を弾き飛ばして陽イオンを作り出します。同時に、この陽イオン粒子は、電子ビームそのものの負電荷に引き寄せられて電子ビーム軸上に滞留します。この現象を「イオントラッピング現象^{*5}」と呼びます。

イオントラッピング現象が発生すると、滞留する陽イオン粒子は電子ビームと衝突して一部の電子を跳ね飛ばし、周回軌道を逸脱させてしまうため、電子ビームの強度が劣化します。つまり、イオントラッピング現象では、電子ビームが原子核を捕獲するだけでなく、捕獲した原子核を標的とする電子散乱事象が発生していることとなります。

(3) SCRIT 法について

理研仁科加速器研究センター実験装置開発グループ RI・電子散乱実験装置開発チーム若杉昌徳副チームリーダーらは、このイオントラッピング現象を活用し、不安定核イオンを電子ビームに捕獲し電子散乱事象を起こさせ、原子核の構造を測定する新たな実験法として SCRIT 法を開発しました。

具体的には、「RI 標的捕獲装置」(図 2) を用いて、1) 不安定核イオンをビーム状に加速し、電子蓄積リングを周回する電子ビーム軸に集中するように外部から流し込みます。2) 次に流し込んだ不安定核イオンビームを急速減速させて停止させ、不安定核イオンを電子ビーム軸上に 3 次元的に捕獲・固定させて、周回する電子と衝突させ、電子散乱事象を実現します (図 3)。

なお、この高エネルギー電子ビームを用いてイオンを捕獲・固定し、同時に電子散乱事象を起こさせる技術は、2002 年に開発し、特許を取得しています (特許第 3656993 号/若杉昌徳、矢野安重)。

2. 研究手法と成果

SCRIT法で捕獲した測定対象となる不安定核イオンが、電子と十分な衝突頻度をもつ標的となりうるかどうかを検証するために、RI標的捕獲装置のプロトタイプ機を製作し、京都大学化学研究所・先端ビームナノ科学センターにある小型電子蓄積リングKSR (Kaken Storage Ring) に設置して、実験を行いました (図 4)。

実験では、安定な原子核である¹³³Cs (セシウム) イオンを「RI標的捕獲装置」プロトタイプ機を通して小型電子蓄積リングKSRに注入して、エネルギー120MeV、電流 75~80mAの電子ビームにセシウムイオンを捕獲・固定させました。

電子ビームに捕獲したセシウムイオンの数を数えると、電流の強さ (電子ビーム

の増強)と比例して捕獲したイオン粒子数が増加し、電流 75mAでは約 700 万個のイオン粒子の捕獲が確認できました (図 5)。

次に、電子とイオンとの衝突頻度を、以下の 2 通りの方法で測定しました。

(1) 価数変化の測定による衝突頻度測定

捕獲したセシウムイオン (1 価 (1+) の陽イオン) と電子が衝突すると、セシウムイオン自身が持つ電子が剥ぎ取られ、2 価 (2+) 以上の多価イオンに変化します。この価数変化の速度を調べることで、電子とイオンとの衝突頻度が分かれます。

セシウムイオンを小型電子蓄積リングKSRに注入した後、2 価 (2+) 以上のセシウムイオン数が急速に増加していきました (図 6)。この多価イオンの増加速度をもとに算定した衝突頻度を表すルミノシティー^{*6)}は、電子散乱に必要な不可欠な $10^{26}/(\text{cm}^2\text{s})$ の 25%となる $2.5 \times 10^{25}/(\text{cm}^2\text{s})$ を示しました。

(2) 弾性散乱した電子数の測定による衝突頻度測定

衝突散乱実験で原子核の「大きさ」、「形状」、「陽子分布」を決定するには、弾性散乱^{*7)}である必要があります。この弾性散乱した電子数を確認するため、セシウムイオンと衝突して一定の角度に散乱した電子のうち、蓄積リングを周回する電子ビームと同じエネルギー120MeVを持つ電子数を測定しました (図 7)。また、電子がセシウムイオンに衝突した場所、すなわち散乱点の分布を調べた結果、RI標的捕獲装置プロトタイプ機中央部で捕獲・固定したセシウムイオンと電子ビームとの散乱が確実に発生したことが確認できました (図 8)。これらの測定から、弾性散乱した電子数をもとに算定したルミノシティーは、(1) の測定とほぼ同じ $2.4 \times 10^{25}/(\text{cm}^2\text{s})$ であることを示しました。

今回の実験の結果から、電子ビームが 75mAで、700 万個のイオン粒子を捕獲し、電子散乱実験に必要なルミノシティーの 25%程度を達成して、電子散乱事象を確認することができました。このことは電子ビームの電流を数倍にするだけで、必要な衝突ルミノシティーを実現できることを示します。つまり電流 300mA程度の高電流電子蓄積リングでSCRIT法を用いると、原子核の「大きさ」、「形状」、「陽子分布」を高精度で決定するために必要な原子核数はわずか 1,000 万個 (10^7 個) 程度と少なくてもよいことになります。

電子散乱の標的として必要な原子核数は、通常の場合には、 10^{20} 個以上と膨大な量の原子核数を必要とします。SCRIT法により、標的として必要な原子核数が 13 桁も少なくなったことから、加速器で人工的に生成された、寿命が短く生成量の少ない不安定原子核でも、その「大きさ」、「形状」、「陽子分布」の測定が世界で初めて実現可能となります。

3. 今後の期待

1980 年代半ばに日本人研究者によりRIビームの発生技術が開発され、不安定原子核の構造を探る研究が急速に発展しました。その結果、「原子核の飽和性」を破る中性子ハローや中性子スキンの発見、「殻モデル」が予言する魔法数^{*8)}の消失や新魔法

数の出現など、これまでの原子核像の常識を覆す原子核の存在が明らかになってきました。これらの異常な構造を持つ原子核までも包括して説明することのできる「究極の原子核モデル」の構築は原子核物理学が成すべき主要テーマの1つです。

今回、SCRIT法の開発に成功したことは、不安定原子核の構造を観察できる世界初の手法を発明したことになり、人類未踏の研究領域へ一歩踏み出すツールを入手したことを意味します。

RIビームファクトリー計画（図9）では、SCRIT法を用いた世界初の陽子分布測定装置「RI・電子散乱装置」の建設を予定しています。建設計画が順調に進めば、数年内には原子核に関する新たな知見を世界に先駆けて発信することが期待されています。

（問い合わせ先）

独立行政法人理化学研究所

実験装置開発グループ RI・電子散乱装置開発チーム

副チームリーダー 若杉 昌徳（わかすぎまさのり）

Tel : 048-467-9711 / Fax : 048-461-5301

基礎基盤研究推進部 加速器研究推進室

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、基礎から応用にわた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「RIビーム発生系施設」と生成されたRIビームの多角的な解析・利用を行う「基幹実験設備」で構成する。RIビーム発生系施設は2007年3月に完成し、2007年6月には新同位元素 ^{125}Pd （パラジウム125）の生成に成功。（2007年6月6日プレス発表：RIビームファクトリーで新同位元素の発見に成功）

2012年度の全施設完成を目指し、現在、基幹実験設備の整備・開発を進めている。RIビームは原子核の構成メカニズム及び元素の起源の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が期待され、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次世代加速器施設の整備が計画され、国際的にも熾烈な開発競争を展開している。

※2 不安定原子核

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不安定原子核と呼ぶ。放射性同位元素、放射性同位体、不安定同位体、不安定核、ラジオアイソトープ (RI) と同義語。

※3 蓄積リング

電子やイオンなどの荷電粒子をリング状の加速器の中で周回させ、長時間溜め込んでおく装置。

※4 異常な原子核の構造

「陽子と中性子が均一に混ざり合って存在する」(メイヤー・イェンゼン)、「陽子の占める体積と中性子の占める体積はほぼ等しい」(ホフスタッター) など現在の「原子核モデル」は、天然に存在する安定な原子核を研究対象として 1950 年代に確立され、それぞれノーベル賞を獲得している。

しかし、昨今の加速器技術の進捗により、多様な不安定原子核の生成が可能となり、現在、標準とされている「原子核モデル」では説明できない異常な構造を持つ原子核が発見されている。特に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原子核「中性子ハロー」や、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原子核「中性子スキン」が知られており、これら異常な原子核をも包括する「究極の原子核モデル」の構築が原子核物理学の主要テーマの 1 つとなっている。

※5 イオントラッピング現象

蓄積リングを周回する電子ビームがリング内に漂う残留ガスに衝突し、残留ガスを構成する原子の電子を弾き飛ばし大量の陽イオンを作り出す。この陽イオンが電子の負電荷に引き寄せられて、周回する電子ビーム軸上に溜まる現象。

※6 ルミノシティ(明度)

電子やイオン等との衝突頻度を示す指標。電子ビームと標的の間の衝突事象を考える場合、1 秒間に標的に入射するビームの数 N_b (個/s)、ビームの断面積を a (cm^2) とし、このサイズの範囲内に存在するターゲットの数を N_t (個) としたとき、ルミノシティ L を $L = N_b \times N_t / a$ と表現する。このルミノシティにの散乱断面積を掛けると、1 秒間に発生する散乱事象の数を計算することができる。

※7 弾性散乱

粒子同士が衝突散乱する際に、相手の大きさや形を測定するためには、衝突の瞬間それらを変化させてはならない。つまり衝突に際して相手の状態を乱すことなく、衝突散乱することが必要で、このような散乱現象を弾性散乱と呼ぶ。弾性散乱では、お互いの状態を掻き乱さない。言い換えればエネルギーのやり取りが起きない。したがって散乱した粒子は運動の方向は変化しても衝突前と同じエネルギーをもって散乱する。この弾性散乱の起きやすさを表す量として断面積が用いられる。弾性散乱断面積は弾性散乱する粒子が相手粒子に接近する最短距離を半径とする円の

面積に当たる量であり、断面積が大きければ事象が起きやすく、小さければ起きにくい。

※8 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原子核が安定な状態になる。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。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持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。

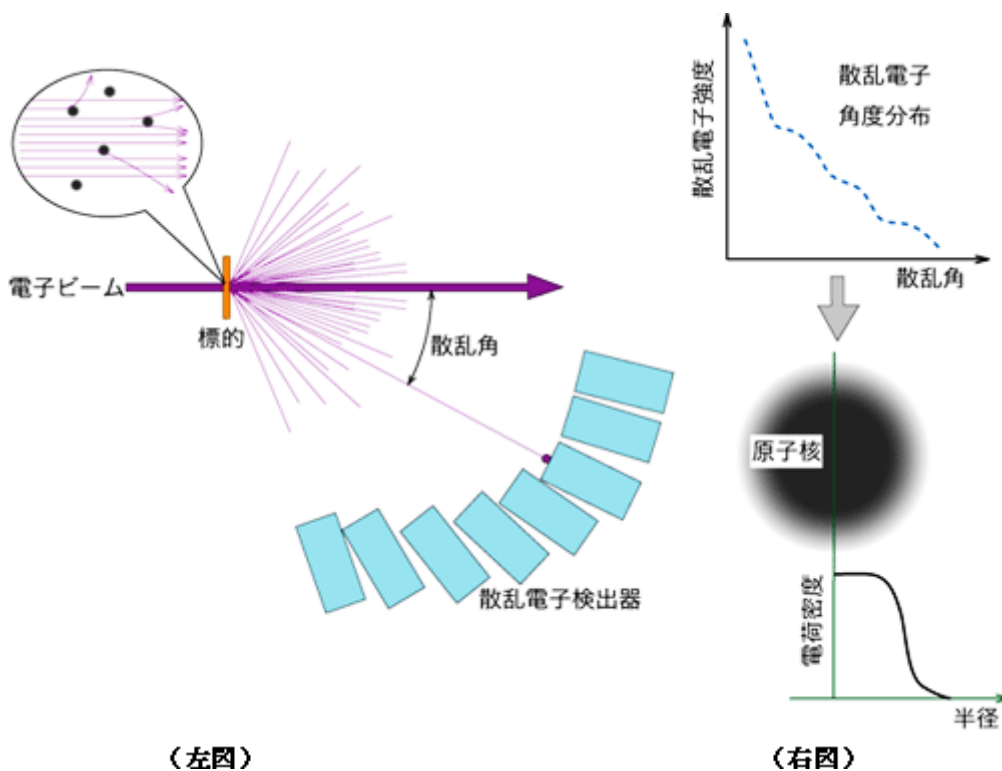


図1 原子核を標的とした電子散乱

電子を原子核に衝突させ、散乱電子検出器で散乱した電子の角度分布を測定 (左図)。標的となる原子核の「大きさ」、「形状」、「陽子分布」に応じて電子が飛散する角度が変わるため、飛散した電子を検出器で測定することにより、原子核の構造を理解するために必要な情報を詳細に調べることができる (右図)。

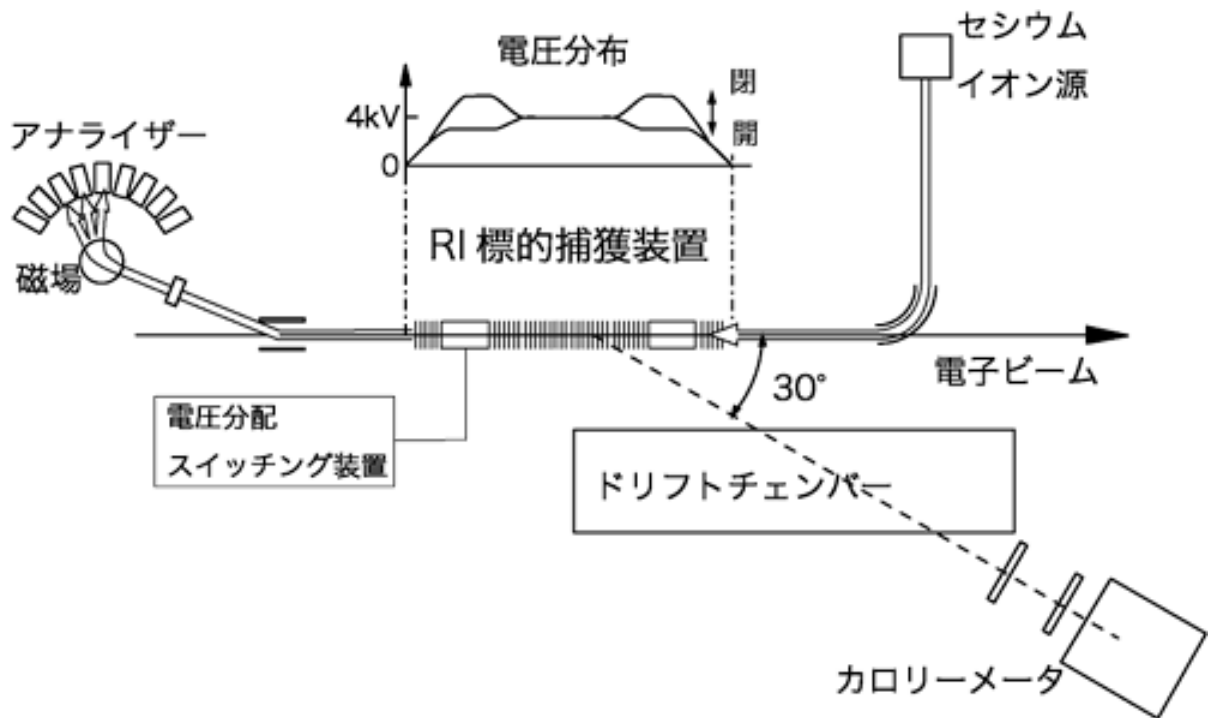


図2 RI 標的捕獲装置

イオンを加速し、電子蓄積リングへ入射するための「イオン源」、捕獲したイオンの数とイオン価数分布状態を分析するための「アナライザー」、電子ビームによるイオン捕獲を補助するために電子ビームと平行方向にイオンを固定するためのミラー電場を供給する「電圧分配スイッチング装置」、イオンと衝突し散乱する電子を検出するため、ドリフトチェンバーとカロリメータを用いた「電子検出器」等から構成している。

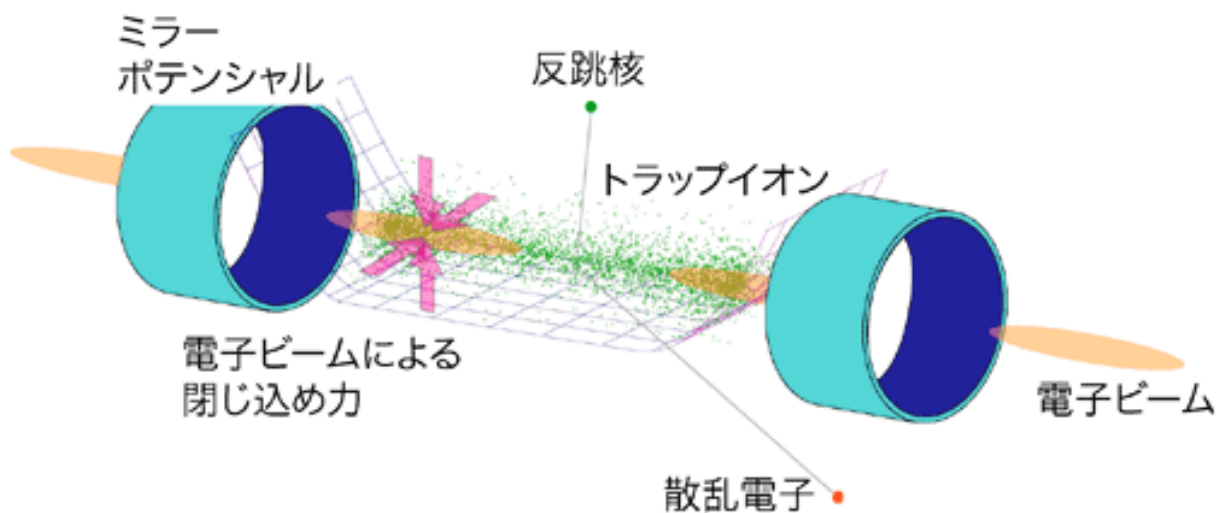


図3 電子ビームでイオンを捕獲・固定する原理

高エネルギー電子ビームを蓄積した電子リングでは、直径 1mm 以下、長さ 2~3cm の縫い針ほどのサイズの中に約 100 億個の電子が詰まった固まりが光と同じ速さで

周回する。この固まりが通過した瞬間、周囲にあるイオンには電子ビーム軸に向かって強く引く付けられる力（収束力）が働く。これがイオンを捕獲するための垂直方向の閉じ込め力となる。この力に加えて電子ビームの進行方向、つまり平行方向の閉じ込め力を加えて、電子ビーム軸上にイオンを3次的に閉じ込める。

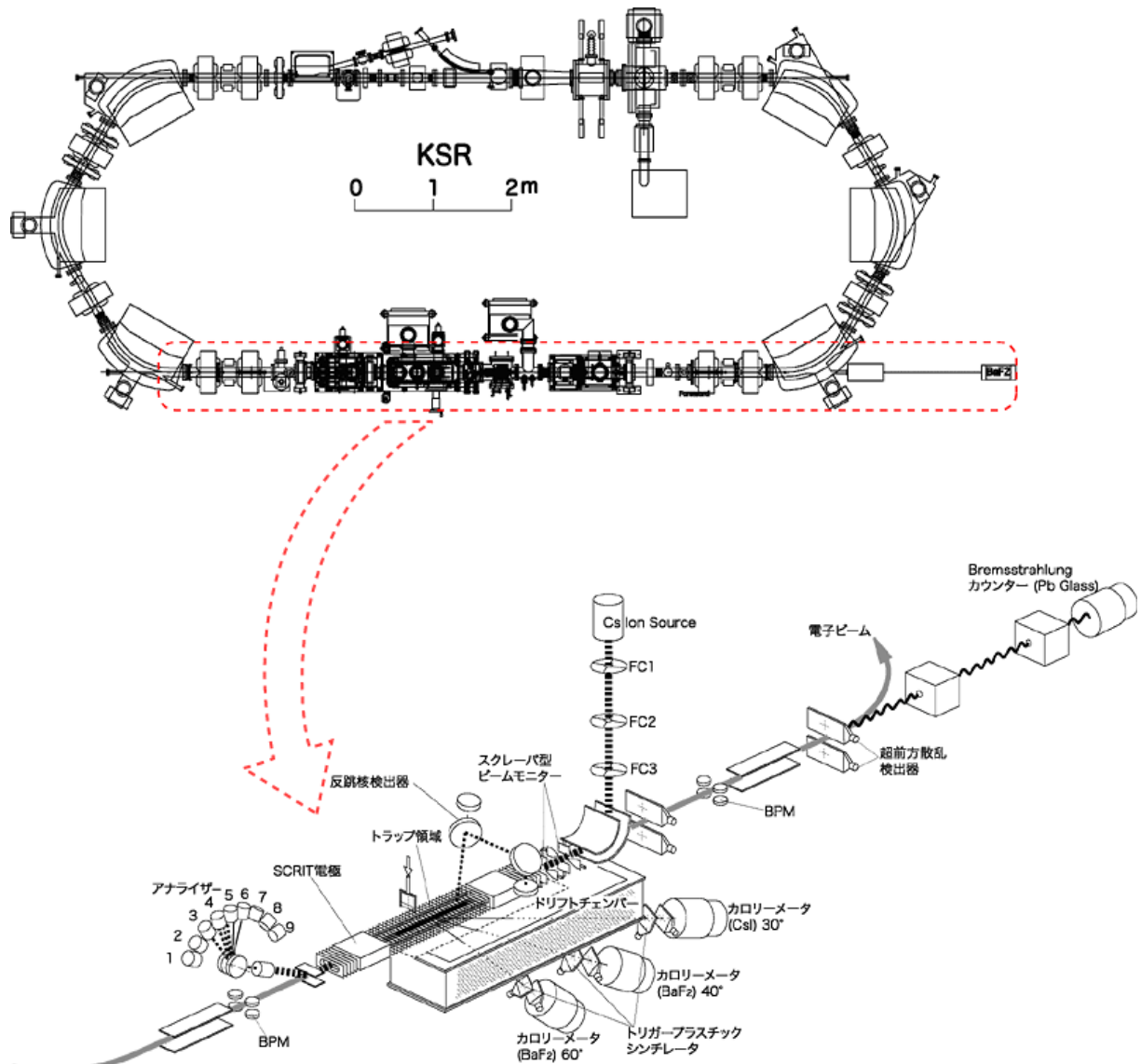


図4 京都大学・化学研究所の電子蓄積リング KSR (Kaken Storage Ring) と「RI 標的捕獲装置」プロトタイプ機

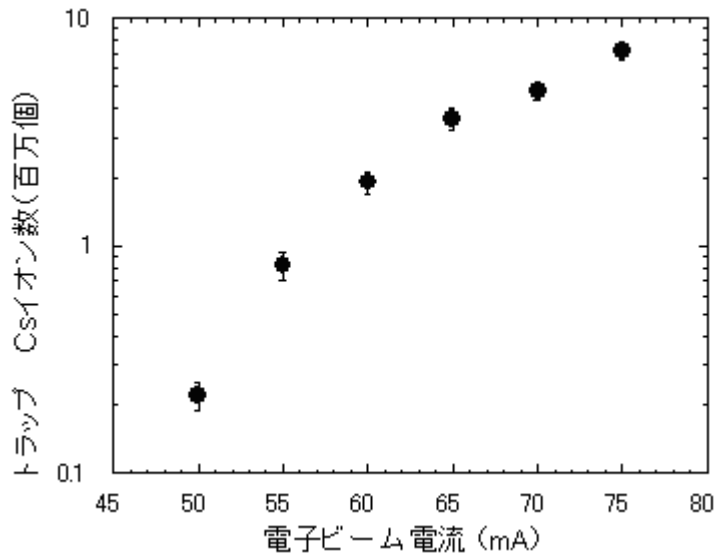


図5 SCRIT法により捕獲・固定したセシウムイオン数の電子ビーム電流依存性

電子ビームの強度（電流）と比例し、捕獲・固定できたセシウムイオンが増加。

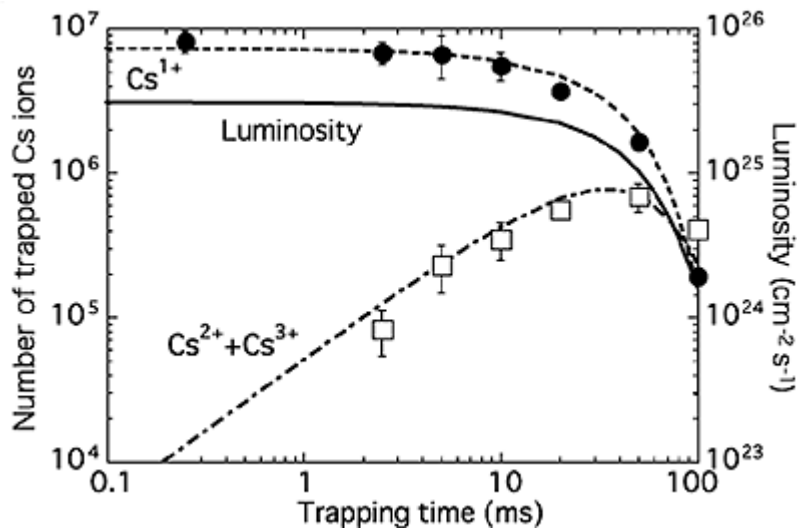


図6 セシウムイオンの価数の時間的变化

●は1価 (+1)、□は多価イオン数の時間的变化を表示。実線はその変化から計算された衝突頻度「ルミノシティ」の時間的变化を表示。電子ビームがセシウムイオンの電子を弾き飛ばし、多価のセシウムイオンが増加している。

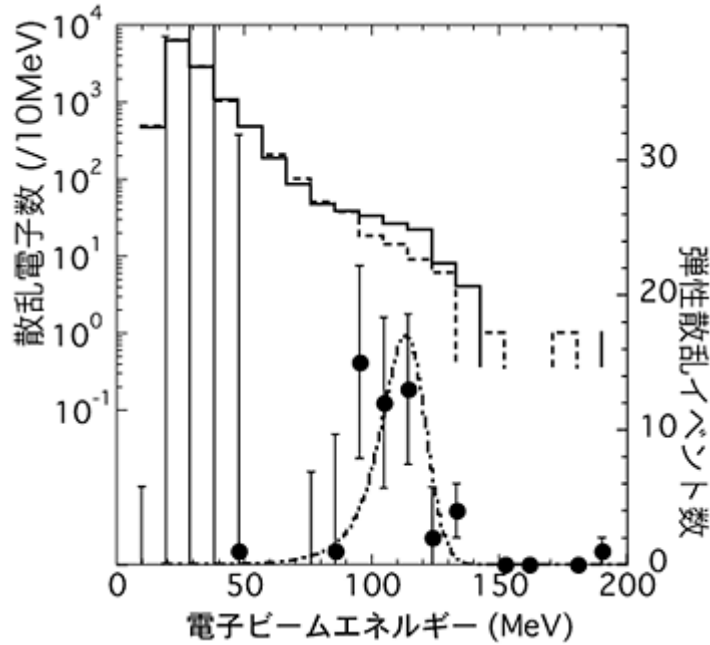


図7 捕獲・固定したセシウムイオンからの弾性散乱電子のエネルギースペクトル

セシウムの存在する領域から散乱した電子のエネルギースペクトル。セシウムイオンが電子に捕獲された状態でのデータが実線、セシウムイオンが捕獲されていない時のデータが破線で示されている。●はその差を表わしたもの。蓄積リングを周回する電子エネルギーと同じエネルギー120MeV付近にピークを持つので、これらは捕獲したセシウムイオンに衝突して弾性散乱された電子であることがわかる。

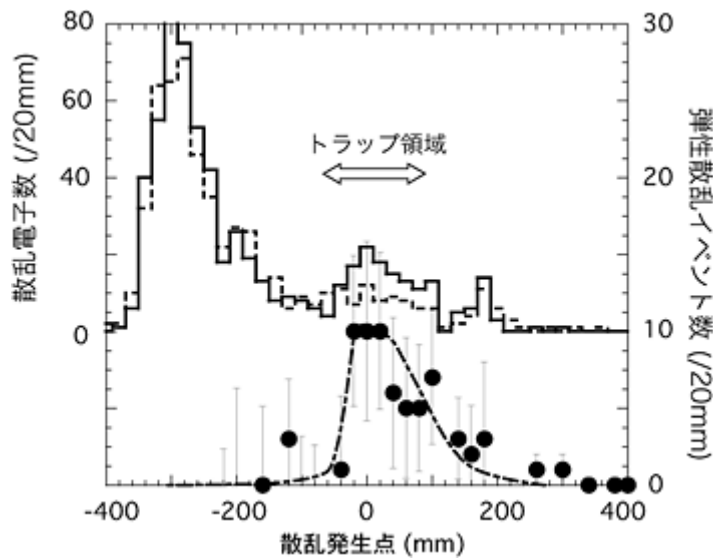


図8 弾性散乱電子の発生点分布

セシウムイオンが電子に捕獲された状態でのデータが実線、セシウムイオンが捕獲されていない時のデータが破線で示されている。●はその差を表わしたもの。RI 標的

捕獲装置プロトタイプ機の中心付近約20cm幅の捕獲領域でセシウムイオン捕獲による電子散乱事象が頻繁に発生していることがわかる。

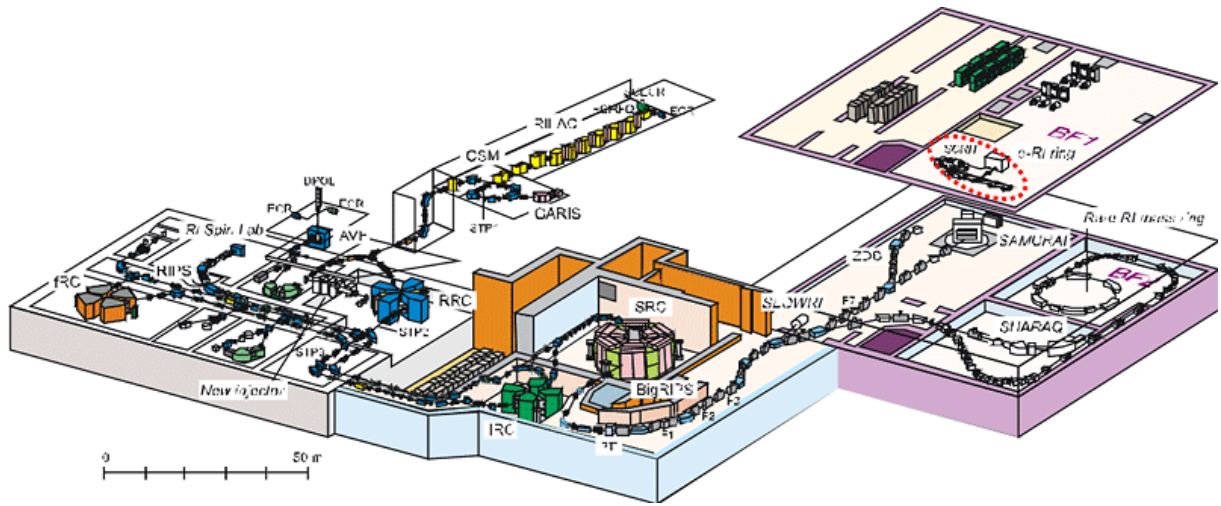


図9 RI ビームファクトリー全容と「RI・電子散乱装置」整備予定位置