

DEVELOPEMENT OF THE SCRIT AT THE KSR

Masanori Wakasugi^{1,A)}, Sachiko Ito^{A)}, Takashi Emoto^{A)}, Tetsuya Ohnishi^{A)}, Kazuyoshi Kurita^{B)}, Tadashi Koseki^{A)}, Toshiyuki Shirai^{C)}, Toshimi Suda^{A)}, Hiroyuki Takeda^{A)}, Masato Nakamura^{A)}, Yasushige Yano^{A)}

^{A)} RIKEN, Hirosawa 2-1, Wako, Saitama 351-0198

^{B)} Rikkyo University, Ikebukuro 3-34-1, Toshima-ku, Tokyo 171-8501

^{C)} Kyoto University, Gokasho, Uji, Kyoto 611-0011

Abstract

Elastic electron scattering is the best way for precision measurement of nuclear charge distribution. We develop the SCRIT technology, which extends the electron scattering method to unstable nuclei for the first time, at the KSR in Kyoto University. The SCRIT is novel method to create internal target in the electron storage ring. In the R&D experiment at the KSR, we succeeded in trapping ^{133}Cs ions in the SCRIT with the number of about 10^7 and confirmed that the SCRIT can provide the useful target for electron scattering experiment.

KSRにおける不安定核電子散乱実験のためのSCRIT開発

1. はじめに

原子核の電子散乱、特に弾性散乱は核電荷分布、すなわち核内の陽子分布を直接測定できる唯一の方法と言える。電磁相互作用だけが寄与しモデルに依存しないことから非常に信頼性の高いデータを与える。安定核に対する数多くの測定は^[1]、核構造理論構築に多大な功績を残した。近年の不安定核構造研究は核構造理論の修正を要求している。そこで再び電子散乱実験が不安定核に適用されることが待望されてきた。

電子散乱実験を不安定核に拡張することは今日まで誰もなしえなかった。それはマクロなターゲットが作れなかったためである。このため、不安定核ビームが利用できる今、電子散乱実験を行うためにコライダー建設が提案されてきた^[2]。しかしこの方法は十分なルミノシティを得るために巨大な費用が必要になる。

我々が提案しているSCRIT法は、衝突させる電子ビームを蓄積した小型電子リング中に内部ターゲット

を形成する技術である。電子蓄積リングで見られるイオントラッピング現象に着目し、従来邪魔者であったイオントラッピング現象を逆に積極的に利用することでリング中に特定の不安定核イオンをトラップできることを発想した^[3]。トラップされたイオンは、まさに電子散乱のターゲットとなる。低エネルギーの電子ビーム（数百keV以下）中の特定イオンを蓄積するEBIT技術が既に実用されており^[4-6]、同様の原理によって、衝突させたい高エネルギー電子ビーム（数百MeV）自身にターゲットイオンを捕獲させるのである。

SCRITを用いた電子散乱実験装置は、コライダー方式のほぼ1/10以下の費用で、より高い精度の測定が可能となる。また、装置の構成は、小型の（500MeV程度）電子蓄積リングと入射器、不安定核イオンを分離入射するための同位体分離器、そして散乱電子および反跳核イオン等検出器である。我々の数値計算によると、500mAの蓄積電流で、 10^7 - 10^8 個の重イオンを秒オーダー蓄積することが可能であり、平均ルミノシティ $10^{27} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 以上を得ることは難しくない^[3]。このルミノシティが得られれば中重核領域で核表面付近の分布を精密に測定できる^[7]。

このSCRIT技術のターゲット生成法としての有効性を実証するために、SCRIT装置のプロトタイプを京大化研KSRに挿入し、R&D実験を行っている^[8]。これまでの実験結果として、電子ビーム100MeV/80mAにおいて約 10^7 個の ^{133}Cs イオンを約2秒の寿命でSCRIT中に蓄積できることを確認している。

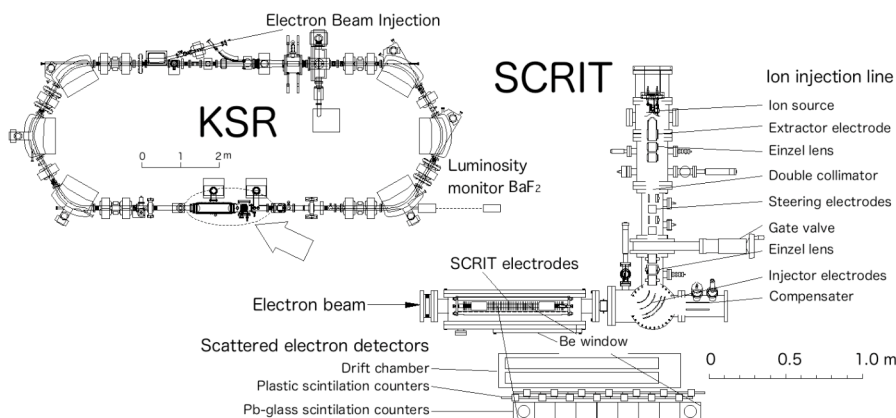


図1：KSRにおけるSCRIT・R&D装置概形

¹ E-mail: wakasugi@riken.jp

2. SCRIT・R&D装置

SCRITのR&D装置は、イオンをトラップするSCRIT本体とそれに接続するイオン源およびイオン入射のための静電輸送系からできている（図1）。SCRIT本体部は、ビーム軸方向のトラップポテンシャルを形成するための電極群である。イオンは、横方向には電子ビーム自身による収束力によってトラップされ、SCRIT電極が形成する縦方向のトラッピングポテンシャルはトラップ領域、すなわちターゲットの長さを定義する。電極には、散乱電子および反跳核イオンを取り出すためにメッシュ構造を用いている。散乱電子測定のためにBe窓を備え、プラスチックシンチレータ、ドリフトチェンバー、およびカロリメータを備えている。また、ルミノシティーをモニターするために、CsイオンからのBremsstrahlung X線検出器としてBaF2シンチレータ、Cs特性X線測定のためのGe検出器を用意した。

イオン源にはグリッド動作によるパルス型の表面電離イオン源を用いている。イオン源で生成された $^{133}\text{Cs}^+$ イオンを、10keVに加速して、100 μs のパルスとして取り出し、90° 静電デフレクターで電子ビーム軸に乗せる。イオン入射のタイミングでSCRITポテンシャルゲートを解放し、イオンをSCRIT内に入射する。その後直ちにゲートを閉めイオンをSCRIT内に蓄積する。蓄積されたイオンを、一定の蓄積時間を経た後に再びポテンシャルゲートを開けて取り出し、入射ラインを逆走させ、コリメータに設置した電極で検出する。測定は、KSR中で、電子ビームエネルギー100MeV、蓄積電流80mAで行った。

3. イオン蓄積実験

3.1 ^{133}Cs イオン蓄積とその寿命

^{133}Cs イオンの蓄積後、取り出されたイオン信号を図2に示す。異なる蓄積時間での信号を同時にプロットしている。蓄積時間に依ってその量が大きく変動する。これは、蓄積中に電子ビーム衝突に依ってイオン化され、時間とともにイオン価数が増加すること、イオンがSCRITから失われていくことを反映している。蓄積時間1ms以下の領域では、ほとんどのイオンはまだ1価の状態であるので、校正した検出効

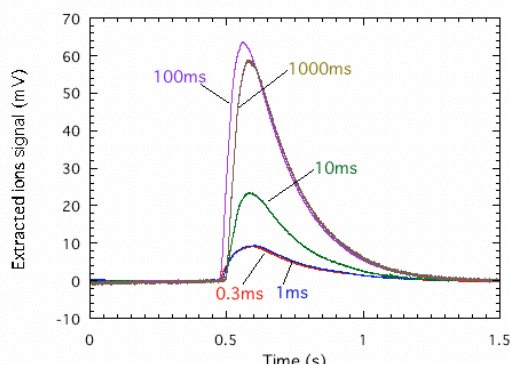


図2：蓄積イオンの取り出し信号

率からSCRIT中に約 10^7 個のCsイオンが蓄積されていることがわかった。この検出電荷量を蓄積時間の関数としてプロットしたのが図3である。図中には、イオン化断面積の計算から予測される検出電荷量を実線で示している。蓄積時間数百msまではこの曲線と測定値はよく一致しているが、その後測定値は減少する。これは、Csイオンが次第にSCRITから失われていくことを示している。図中の白丸（点線はガイド）は価数増加を考慮して計算された検出イオン数を示している。これからSCRITイオン蓄積の寿命は約2秒であることがわかった。この2秒間の電子とイオンの衝突ルミノシティーは、イオンが電子ビーム軸上に分布していると仮定すると約 $10^{26} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ である。

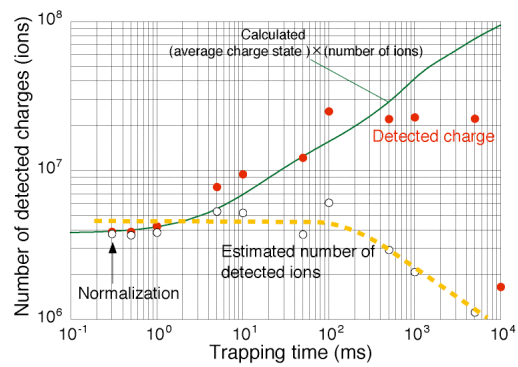


図3：取り出しイオンの蓄積時間依存性

3.2 蓄積イオン数の電子電流依存性

蓄積時間を1秒に固定し、取り出されたCsイオン数の電子ビーム電流に対する変化を図4（closed circles）に示している。電子ビーム電流の減少はトラッピングのアクセプタンスを小さくし、トラップイオン数を減少させる。通常の残留ガスイオンの場合この量はほぼ電子電流に比例する。しかし、図4の測定値は非常に大きな依存性を示している。これは、Csイオンの場合、電子電流の減少によってトラッピング寿命が短くなるためと理解されている。残留ガスイオンならば常にイオンが供給されるためにアクセプタンスに比例する量が蓄積されるが、Csは供給がないので、蓄積時間1秒に設定している状態ではその寿命の変化が大きく影響する。イオン入射時にSCRITにアクセプトされるイオン数が電子ビーム電流に比例すると仮定すると、各電流値での取り出しイオン数 $N(I_e)$ は、SCRIT寿命を $\tau(I_e)$ として、

$$N(I_e) = N_0 \left(\frac{I_e}{80} \right) \exp \left(-\frac{t}{\tau(I_e)} \right)$$

で計算できる。ここで、 N_0 は $I_e=80\text{mA}$ でのアクセプトされたイオン数である。得られたSCRIT寿命の電子ビーム電流依存性を図4（open circles）に示す。電子電流が半分になるとSCRIT寿命は一桁短くなる。

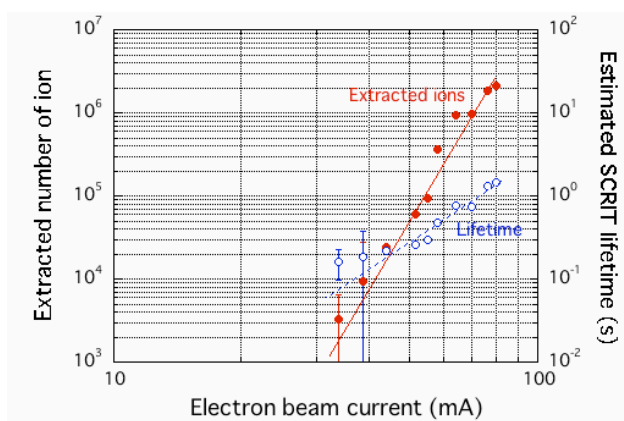


図4：検出イオン数とSCRIT寿命の電流依存性

4. 今後の展開

これまでの実験では、CsイオンがSCRITに蓄積され、その量および寿命が我々の予測と大きくはずれていないことが確認できた。しかし、ルミノシティーの直接測定などは、電子リング周辺の電子ビームロス起源および軌道上の残留ガストラップイオン起源の大量のノイズに埋もれて、明確な測定ができていなかった。この測定は、散乱電子計測時のルミノシティーモニターとしての重要性の他に、蓄積されたイオンがどのような空間分布で電子ビーム軸付近に存在しているのかを推定するデータを与える。

ルミノシティー測定のためにKSRの真空ダクトを少し改造するほか、イオンクリアーを増強する計画である。この改造によってノイズレベルを1〜2桁落とせると予想している。また、取り出したCsイオンの価数分布と残留ガスイオンの含有量などを分析するための新たなデバイスを挿入する。ルミノシティーが測定できれば、散乱電子の測定を行い、実際にSCRITを用いて電子散乱実験が可能であることを実証する。

理研RIBFにおいて図5の概念図に示す SCRIT電子散乱実験システムの建設が計画されている。主要要素は、小型（300MeV）電子蓄積リングとその入射

器、低エネルギーRI製造器とISOL、そして検出器である。SCRITの最大の特徴はターゲット核が自由空間にほぼゼロエネルギーで浮遊していることであり、散乱の運動学を決定するのに反跳核を計測できることにある。これは、散乱電子計測にアクセプタンス制限の強いスペクトロメータを必要とせず 4π を囲むテレスコピック検出器を可能にするばかりでなく、目的核と残留ガスとの分離を可能にし、さらに β - γ 計測を組み合わせることによって同重核（娘核）分離の可能性も持っている。すなわち新しい技術が新しい電子散乱実験スキームを作り出すのである。

5. まとめ

我々は不安定核の電子散乱実験のための新しいターゲット生成技術SCRIT法を開発している。KSRにおけるR&D研究で、約 10^7 個の ^{133}Cs イオンを約2秒の寿命で蓄積することに成功した。推定ルミノシティーは $\sim 10^{26} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ であり、SCRIT法は我々の目指すルミノシティーを達成する能力があると判断できる。今後1〜2年でKSRにおいて ^{133}Cs の電子弾性散乱実験を行い、そこで得られた技術を、現在設計中のRIBFにおけるSCRIT電子散乱実験装置に導入する。

参考文献

- [1] H.de Vries, C.W. de Jager, and C. de Vries, *Atom. Data Nucl. Data Tables* **36**, 495 (1987).
- [2] T.Katayama, T.Suda, and I.Tanihata, *Phys. Scripta* **T104**, 129 (2003).
- [3] M.Wakasugi, T.Suda, and Y.Yano, *Nucl. Instrum. Meth.* **A532**, 216 (2004).
- [4] E.D.Donets, *IEEE Trans. Nulc. Sci.* **NS-23**, 897 (1976).
- [5] J.Arianer, and C.Goldstein, *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **NS-23**, 979 (1976).
- [6] B.M.Penetrante, J.N.Bardsley, D.Dewitt, M.Clark, and D.Schneider, *Phys. Rev.* **A43**, 4861 (1991).
- [7] T.Suda and M.Wakasugi, *Prog. Part. Nucl. Phys.* in press.
- [8] 若杉昌徳、須田利美、矢野安重、第14回加速器科学研究発表会報告集、17、(2003).

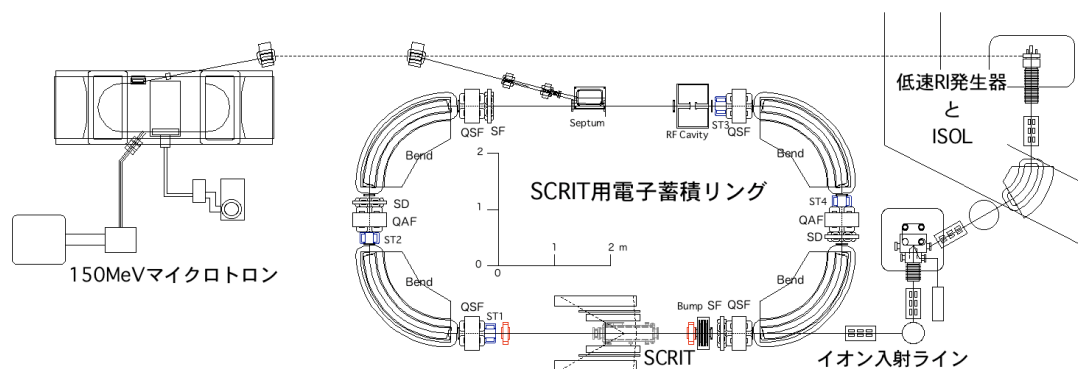


図5：理研RIBFにおけるSCRIT電子散乱実験装置概念図