

## STATUS REPORT OF ELECTRON STORAGE RING SR2 AT RIKEN

Masanori Wakasugi<sup>A)</sup>, Yuji Miyashita<sup>A)</sup>, Tetsuya Ohnishi<sup>A)</sup>, Masahiro Hara<sup>A)</sup>, and Tishitada Hori<sup>A)</sup>,  
Shin-ichi Ichikawa<sup>A)</sup>, Mamoru Togasaki<sup>B)</sup>, Seiichi Tamaki<sup>B)</sup>, Koji Koizumi<sup>B)</sup>, Ryo Ogawara<sup>B)</sup>, Kazuyoshi Kurita<sup>B)</sup>,  
Hiroki Takehara<sup>C)</sup>, Ryoya Kitazawa<sup>D)</sup>, Niklas Lundkvist<sup>D)</sup>, Wang Shuo<sup>D)</sup>, Tatsuya Adachi<sup>D)</sup>,  
Tadaaki Tamae<sup>D)</sup>, and Toshimi Suda<sup>D)</sup>

<sup>A)</sup> RIKEN Nishina Center, Hirosawa 2-1, Wako, Saitama, 351-0198

<sup>B)</sup> Department of Physics, Rikkyo University, Nishiikebukuro 3-34-1, Toshima-ku, Tokyo 171-8501

<sup>C)</sup> Department of Electrical Engineering, Nagaoka University of Technology,  
Kamitomiokamachi 1603-1, Nagaoka, Niigata 940-2188

<sup>D)</sup> Research Center for Electron Photon Science, Tohoku University,  
Mikamine 1-2-1, Taihaku-ku, Sendai 982-0826

### Abstract

SR2 is SCRIT-equipped RIKEN Storage Ring constructed in 2009 at RIKEN Nishina Center for Accelerator based science aiming at electron scattering off short-lived unstable nuclei. In 2010, the SCRIT device was installed at straight section of SR2, and the test experiment has been started at the beginning of this fiscal year. We have already succeeded in measurement of elastic scattering from stable Cs ions trapped in SCRIT, and the luminosity exceeding  $10^{26} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  has been obtained. In this paper, we report status of SR2 and test experiment of SCRIT electron scattering system.

## 理研電子蓄積リング SR2 の現状

### 1. はじめに

理研仁科加速器研究センターでは、RIBF の基幹実験装置と位置づけて、短寿命不安定核の電子散乱実験施設を建設している。不安定核研究が世界中で押し進められる中で、陽子波動関数を直接測定できる電子散乱法は核構造研究のための強力なツールとなると目されている。不安定核の生成率の小ささと寿命の短さのために、この種の実験は短寿命核に対して行われたことはない。我々は、世界で初めて短寿命不安定核の電子散乱実験を実現させるために、全く新しい不安定核標的生成法（SCRIT : Self-Confining RI Ion Target）を開発した<sup>[1-3]</sup>。電子蓄積リングにおけるイオントラッピング現象を利用して、標的核イオンを電子ビーム軸上に集中させることによって、限られた数の不安定核であっても散乱実験に十分なルミノシティを得ることができる。この仕組みを組み込んだ電子蓄積リング SR2（SCRIT-equipped Riken Storage Ring）を 2009 年に理化学研究所・仁科加速器研究センターに建設した。2010 年夏までに加速器コミッショニングを終了し、同年 9 月より SCRIT 装置を SR2 直線部にインストールした<sup>[4]</sup>。現在、電子散乱実験に対応できる性能を引き出すための SR2 の調整運転、および安定核を用いた SCRIT 装置の性能評価試験を実施している。ここでは、最近の SR2 の状況と、SCRIT 試験実験におけるこれまでの結果、および今後の進展について報告する。

### 2. SR2 この一年

図 1 に理研電子加速器施設の概要を示す。150MeV マイクロトロン(RTM)と蓄積リング(SR2)を図のように配置し、RTM が入射器として SR2 に電子ビームを供給する。入射時以外 RTM は、<sup>238</sup>U 光核分裂を用いた RI 生成イオン源に電子ビームを供給する。生成した RI は ISOL によって分離され、SR2 に挿入した SCRIT 装置へと送られ、RI の電子散乱実験を行う仕組みである。

図 2 にこの一年間の SR2 の蓄積電流の履歴を示す。SCRIT インストールが始まる前の 2010 年 8 月までは、主に枯らし運転を目的に、より多くの電流を最大エネルギー 700MeV にて蓄積してきた。真空度およびビーム蓄積寿命が次第に向上してきたことで、

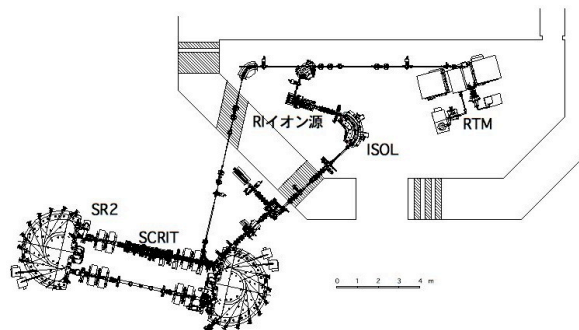


図 1：理研電子加速器施設概要

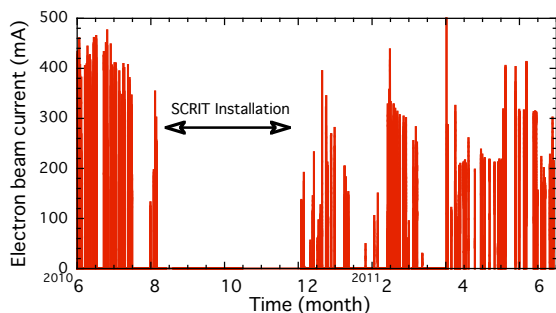


図 2: SR2 この一年間の蓄積電流の履歴

9月より SCRIT 装置の SR2 西直線部への挿入作業を開始した。挿入作業、ベーキングを含めた真空排気、および SCRIT 単体動作試験等を含めて約 3 ヶ月を要した。その後 SR2 運転を再開したが、再開後は SCRIT 実験のための調整運転に目的が変更されたため、蓄積エネルギーは 150MeV~300MeV である。より多くの電流を蓄積することが望ましいが、現在のところ、このエネルギーで安定した蓄積ができる電流値は 350mA までである。これを超えて入射はできるものの、真空度の悪化によって制限されている。これはリング光学系と RF キャビティの HOM 起源によるビーム振動が原因と考えられることから、キャビティ条件の調整と、リング動作点の調整が必要である。SCRIT 電子散乱実験にとって重要なリング性能は、大電流、蓄積安定性（長寿命）、そして超高真空度の維持である。これらの目標値はそれぞれ 500mA、2.5AH、そして蓄積時  $10^{-8}$ Pa である。現状の到達値は、350mA、1.5AH、 $10^{-7}$ Pa であり、十分とは言えない。特に真空度については一桁向上させる必要があり、さらなる枯らし運転を要すると同時に、SCRIT の局所的真空度を向上させる工夫が必要である。

また、後に述べる SCRIT 性能評価試験実験において明らかになるが、ルミノシティーは、電子ビームの振動によるビームサイズのわずかな増減に大きく影響される。そこで、正確なビームサイズをモニターするために放射光 2 次元干渉モニターを導入し、電子ビーム状態の再現性の向上を図った。

### 3. SCRIT 装置性能評価試験

図 3 にインストールした SCRIT 装置の概念図を示す。SCRIT 電極をビーム軸上に設置し、試験用の外部イオン源（Cs イオン源）からのイオン入射ラインを接続する。イオンビームラインは全て静電輸送系で構成されており、各収束点には、SCRIT 用に開発した CsI シンチレータを用いた高感度低速イオンビームプロファイルモニターおよびファラデーカップを装備した。電子ビームと入射イオンビームの軸合わせのために、SCRIT 電極直前にスクレーパ型モニターを 2 台設置している。イオンビームは、加速エネルギー 6.05keV で、グリッド動作によってパルス長 200  $\mu$ s のパルスビームとして SCRIT へ入射さ

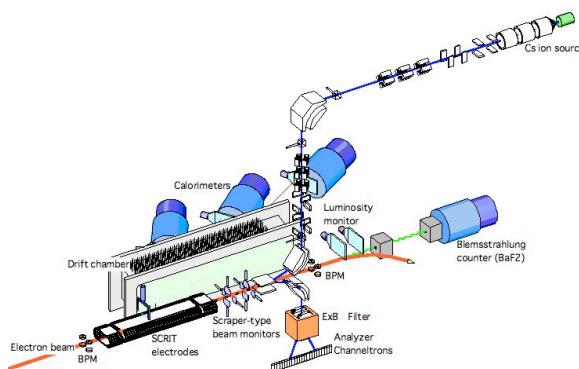


図 3: SCRIT 装置概要

れる。SCRIT 電極には 6.106kV（電子ビーム電流 200mA の場合）電位が与えられており、軸方向の閉じ込めポテンシャルの高速スイッチングによってパルスビームを取り込み、ほぼゼロエネルギーで蓄積する仕組みである。イオンエネルギーよりも SCRIT 電極ポテンシャルが高いのは、電子ビームによって約 -60 V の負のポテンシャルが加算されているためである。

SCRIT 中のイオンは、一定時間蓄積された後ポテンシャルゲートを開き、E×B アナライザーに導かれ価数と質量が分析される。

#### 3.1 Cs イオン蓄積試験

蓄積されたイオンが SCRIT 中でどのような時間変動をするか、どの程度の蓄積イオン数でどれだけのルミノシティーが得られるか、等 SCRIT の性能評価のために Cs イオンの蓄積試験を行った。図 4 は蓄積後取り出した Cs イオンを E×B フィルターを通して測定した典型的な価数分布スペクトルである。電子ビーム電流 200mA の場合の蓄積時間 10ms、100ms、200ms の例を示した。急速に多価イオン化してゆく様子が理解できる。200ms 後にはすでに 10 価を超える多価イオンが生成されている。

この価数ごとの時間変動をまとめたのが図 5 である。図では、4 価以上のイオンについては分離が困難であることから価数をグループ分けしてグループごとの和としてまとめた。この測定では、入射した

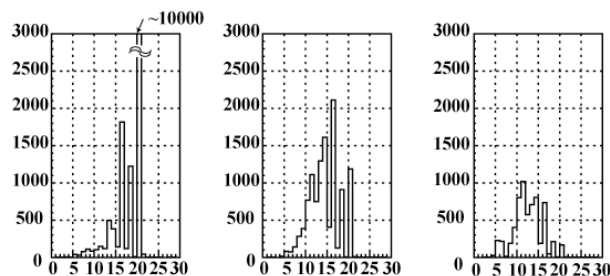


図 4: 蓄積された Cs イオン価数分布スペクトル。左から蓄積時間 10ms、100ms、200ms の場合で、21ch に Cs<sup>1+</sup>、19ch に Cs<sup>2+</sup>、17ch に Cs<sup>3+</sup>、5~16ch にそれ以上の多価イオンが分布する。

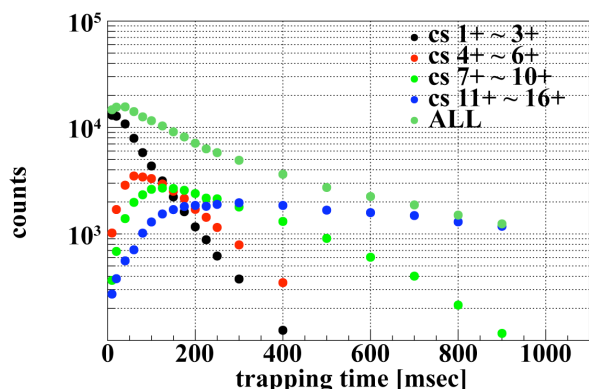


図 5: SCRIT に蓄積した Cs イオン数の時間変化

Cs イオン数は約  $5 \times 10^7$  個であるが、急速な多価化に起因する自らのスペースチャージ効果によってイオンの減少を引き起していると考えられる。したがって 1 秒後の Cs イオン数は一桁落ち程度であるが、総電荷数は入射初期時点とそれほど変わらない。さらに、残留ガスイオンが時間とともに増加してくることによってスペースチャージ効果はさらに促進することとなる。したがって、標的として維持するためには、超高真空を維持し、適量のイオン数を適切な正確さで電子ビーム軸内に入射する調整が必要であることを示している。

### 3.2 ルミノシティー測定

SCRIT 実験においては、必要なルミノシティーが 1 秒間程度維持されていることが望まれる。蓄積イオン数とルミノシティーとは異なった時間変動を考えると考えられるので、ルミノシティーを蓄積イオン分析とは独立に測定するために、SCRIT 直下流にモニターを設置した (図 3 参照)。これは 2 台のプラスチックシンチレータを約 100mm 離してビームダクト直近に設置したもので、SCRIT に蓄積したイオンからの超前方散乱成分と、直線部どこかでロスした電子を起源とするシャワーを、2 台の同時計数にて測定する。例えば電流 200mA 時には通常同時計数率は約 1200cps であるが、Cs 蓄積時には最大約 2500cps となる。このときのルミノシティーは  $2 \sim 4 \times 10^{26}(\text{cm}^2\text{s})$  であった。絶対値校正はまだ不十分であるが、多少の改良をして計数率をさらに上げることによってオンラインルミノシティーモニターとして利用することは十分可能である。

図 6 は Cs イオン蓄積中における Cs イオン起源のルミノシティーモニター計数率の時間変化である。イオン入射後約 0.5 秒程度でルミノシティーは一桁減少している。ルミノシティーの減少速度は Cs イオン蓄積数の減少速度よりも少し速いと測定された。ルミノシティーは明らかに電流値に依存しており、300mA の場合には 0.5 秒以降はほぼ一定値になる。これはイオン価数が平衡になり、スペースチャージ効果によるイオンのロスが止まってしまうのではないかと考えられるが、現在これらの現象についての詳細な解析を行っている。

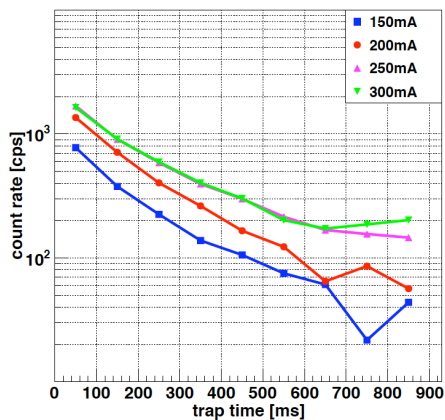


図 6: ルミノシティーモニターの計数率。

### 3.3 弾性散乱の測定

イオン蓄積試験において  $10^7$  個以上のイオンを蓄積できることが検証されたことから、散乱電子計測試験を始めた。散乱電子計測には、図 3 に示すようにドリフトチェンバーとカロリメータを組み合わせた検出器を用いた。カロリメータは散乱角 30 度方向と、45 度方向に一台ずつ設置した。SCRIT 中心付近に挿入できるワイヤー標的からの弾性散乱と、宇宙線を用いて検出器の校正を行った。測定はイオン蓄積時間 45ms、225ms および 900ms の場合について行った。イオン入射→蓄積 (測定) →取出し (分析) →蓄積 (残留ガスイオンのみ) →取出し (分析)、というサイクルを繰り返して、Cs イオンを蓄積した場合と、残留ガスのみの場合とで比較測定を行った。全測定時間に対する Cs イオン蓄積状態のデューティー係数は 0.45 である。図 7 に得られた散乱電子のエネルギースペクトルと、図 8 に散乱点の vertex 分布を示す。エネルギースペクトルは、vertex データを用いて SCRIT トラップ領域でゲートを掛けたものであり、vertex 分布は、電子エネルギーに 80MeV 以上というゲートを掛けたものである。それぞれ、赤色で示しものが Cs 蓄積状態であ

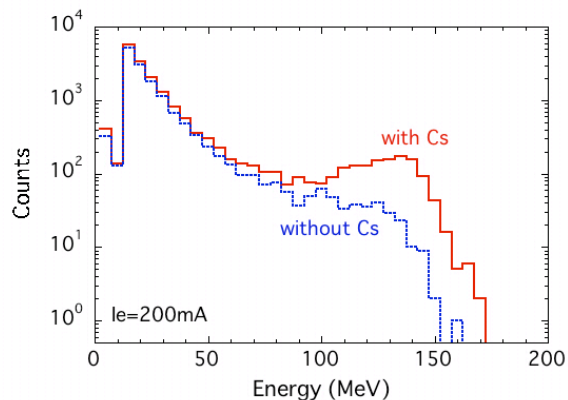


図 7: トラップ領域の vertex ゲートが掛かった散乱電子のエネルギースペクトル



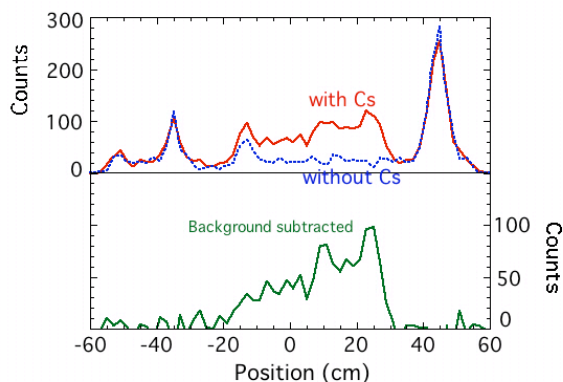


図 8: 80MeV 以上のエネルギーゲートを掛けた散乱電子の vertex 分布。下図は Ce イオンを蓄積した場合と、残留ガスのみの場合の差。右方向が電子ビーム上流側。

り、青色は残留ガスのみの状態でのデータである。非常に明瞭に Cs イオンからの弾性散乱が、SCRIT 中のトラップ領域から発生していることがわかる。30 度方向のカロリーメータによって検出された弾性散乱イベント数は 1005 個/120 分であり、およそのルミノシティーは  $2\sim 4 \times 10^{26}/(\text{cm}^2\text{s})$  と推定された。また、vertex 分布における非一様な分布は、Cs 蓄積領域が約 500mm の長さを持ち、30 度方向のカロリーメータから見た散乱角が、上流から下流にかけて 24 度～37 度程度まで変化することで、この間の散乱断面積の変化が反映されている。

ルミノシティーは、電子ビームの蓄積寿命の変化からも推測できる。今回の散乱電子検出器には捕らえられないが、蓄積電子数の減少は、通常の寿命を与えるロス成分に加えて、Cs イオンからの散乱によってリングアクセプタンスを超えて前方散乱して喪失される成分とで与えられる。Cs を入射した場合と、通常の場合とで電子蓄積寿命の差を測定すると明瞭な差が観測された。例えば 103 分だった寿命が 45% デューティーで Cs イオンを蓄積することによって 96 分に減少する。これはルミノシティーが約  $4.6 \times 10^{26}/(\text{cm}^2\text{s})$  であることを示しており、弾性散乱イベント数から導いたルミノシティーとほぼ一致する。ルミノシティーを正確に測定することは SCRIT 実験にとって非常に重要であるので、我々は、もう一つのオンラインルミノシティーモニターとして現在 SR2 直線部延長線上に Bremsstrahlung- $\gamma$  線検出器を準備中である。

#### 4. 今後の展開

SR2 にインストールした SCRIT 装置は健全に動作することが、評価試験によって明らかになった。いくつかの改良点も見つかり、SR2 の動作点の見直しの必要性も明らかになった。SCRIT 装置については、真空度の向上が最重要課題となる。また、SR2 調整については、SCRIT 位置でのビームサイズをより小さくすることによってルミノシティーのさらなる向

上を目指す。

SCRIT 電子散乱実験においても一つの重要な要素は RI 生成分離装置である。RTM 電子ビームをドライバーとして  $^{238}\text{U}$  光核分裂反応を誘起することによって、不安定核を生成する。それをイオン源から引き出し、質量分離するための ISOL を整備しなければならない。現在 RI イオン源と ISOL を、図 1 に示した厚さ 2m の遮蔽壁に囲まれた部屋の中にインストールして、機器本体の基礎的な試験を実施している最中である。今年度末までには、イオン源および ISOL システムの建設と試験を完了し、Xe 安定核を用いた性能評価を行う予定である。

実際にこのイオン源内で  $^{238}\text{U}$  を標的として実験に十分な量の RI を製造するためには、ドライバーとなる RTM の出力が現状では不足している。そこで、来年度 RTM のアップグレードを計画している。現在 10W 程度の出力を 1kW 以上にすることを目標にしている。主として、RF 系の改造（高出力化、高繰返し）と、冷却能力の向上が課題となる。

来年度後半には、RTM の高出力コミッションング、RI 生成試験を行う予定であり、平成 25 年度の実験開始を目指した準備を進めている。

#### 参考文献

- [1] M. Wakasugi, T. Suda, and Y. Yano, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A532, 216 (2004).
- [2] M. Wakasugi et al., Phys. Rev. Lett., 100, 164801 (2008).
- [3] T. Suda et al., Phys. Rev. Lett., 102, 102501 (2009).
- [4] M. Wakasugi et al., 加速器学会誌, 7 巻 4 号, 271 (2011).