

## ULTRA SLOW ELECTRON BEAM EXTRACTION AT KSR

T. Shirai<sup>1</sup>, H. Tongu, S. Fujimoto, A. Noda

Advanced Research Center for Beam Science, Institute for Chemical Research, Kyoto University  
Gokasho, Uji, Kyoto 611-0011, Japan

### Abstract

KSR is an electron storage/stretcher ring, which is operated in ICR, Kyoto University. As a stretcher, the normal repetition of the slow extraction is 1 Hz. For the detector development of the high energy physics, we developed the ultra slow extraction of the electron beam. The stored electrons are scattered with the residual gas atoms and some of them get high transverse momentum, which is typically 1mrad. They are guided to the extraction channel. The typical electron beam rate is  $10^4$  e-/sec and the extraction time is 1000 sec in this mode. The beam rate is variable using the weak transverse RF kicker.

## 電子リングKSRにおける非常にゆっくりとした電子ビームの取出し

### 1. はじめに

京都大学化学研究所では入射ビームエネルギー60-100 MeV、最大加速エネルギー300 MeVの電子リングKSR (Kaken Storage Ring) が稼動している。KSRは電子蓄積リングであるとともに、遅い取出しのためのデバイスとビームラインをもち、ストレッチャーリングとしての機能をもっている[1]。表1には、KSRの主要なパラメータを、図1にはKSRのレイアウトを示している。下側のストレート部分に、取り出しのための静電セパタムとセパタム電磁石が設置されている。電子ビームは、同じストレートセクションに設置された高周波キッカーによって、水平方向のベータatron振動の振幅が増大され、六極電磁石によって制御されたセパトラックスに沿って取り出しラインに導かれる。

通常の遅い取り出しは、入射・取出しの周期が1 Hzであるが、高エネルギー実験の検出器開発などの目的では、検出器に直接取り出した電子ビームを照射するため、1 Hzの取出しでは、電子数が多すぎ、格段に減らさないと実験をおこなえない。また、こうした実験では、十分なデータ量を同じ条件で収集するために、1秒のような短時間ではなく、長時間にわたって、一定のビームレートで照射することがもとめられる。

KSRでは、このリングが蓄積リングとストレッチャーリングの両方の機能を持つことを利用して、入射ビームをすぐに取り出すのではなく、いったん、リングに蓄積し、そこから残留ガスとの散乱によって蹴りだされた、本来なら真空壁で失われるはずのビームを、効率的に取り出しラインに導くことによって、非常にゆっくりとした電子ビームの取出しを実現している。この方法では、ビーム寿命の長さだけ、入射することなく電子ビームを取り出し続けることができる。また、蓄積された電子ビームはシンクロトロン放射減衰によって、エネルギー広が

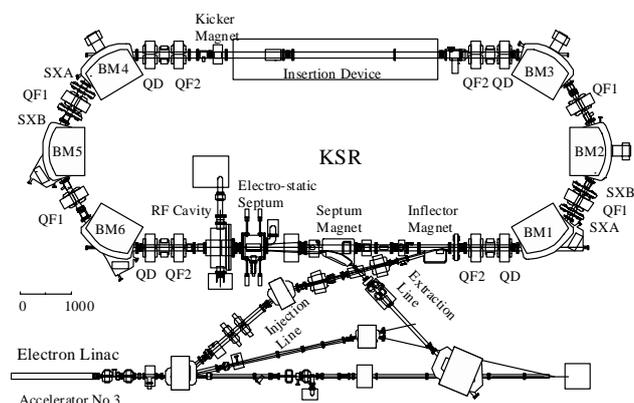


図1 : KSRのレイアウト

表1 : KSRの主要パラメータ

最大エネルギー	300 MeV
入射エネルギー	60-100 MeV
周長	25.689 m
Lattice	TBA
周期数	2
BM 回転半径	0.835 m
長直線部長さ	5.619 m
RF 周波数	116.724 MHz
RF 電圧	20 kV

りが0.1%以下になっているため、入射ビームと異なり、エネルギーのそろった、質のよいビームを供給することができる。

### 2. ビーム取り出し原理

この取り出し方法では、KSRのビーム寿命を決めている主要因である残留ガスとの散乱を利用する。

<sup>1</sup> E-mail: shirai@kyticr.kuicr.kyoto-u.ac.jp

通常なら散乱されて、真空チェンバー壁面に衝突して失われる電子を、六極電磁石などによって形成したセパトリックスに導き、取り出しをおこなう。ビーム寿命を $\tau$ とすると、この取り出されるビームのレート $N_{ext}$ は、

$$N_{ext}(t) = -\alpha \frac{dN(t)}{dt} = \alpha \frac{N(t)}{\tau} \quad (1)$$

であらわされる。 $N(t)$ は周回電子数で、 $\alpha$ は取り出し効率である。 $N$ を $10^9$ とすると、一般的な蓄積条件では、 $\alpha$ が0.4、 $\tau$ が2000秒程度である。この $\alpha$ は取り出しのターンセパレーションとセパタム厚みで決まっている。式(1)から、この条件での、取り出しビームレートは、 $2 \times 10^5$  e/sec となることが予想される。

図2は、KSRに100 MeVでビームを蓄積したときの、蓄積ビーム電流と時間との関係である。このときの平均真空度は $5 \times 10^{-10}$  Torrである。これからもわかるように、30 mA付近になると、イオンとラッピング現象がおき、ビーム寿命がビーム電流に依存するようになるが、それ以下ではビーム寿命は一定である。このときの寿命は、2000秒で、計算から予想される寿命とほぼ一致する。図2は、リングの各場所での垂直方向のアクセタンス角を示している。これから、場所にもよるが1-2 mrad以上蹴られると、ビームが失われることがわかる。通常は、水平方向のアーチャーはこれよりはるかに大きいので、このように電子はすべて垂直方向の真空チェンバー壁面で失われている。

散乱の断面積は、散乱角の4乗に比例するため、水平方向セパトリックスをこれよりも小さくすれば、効率よくビームの取り出しをおこなうことができるはずである。図4は、水平方向のベータトロンチューンを2.338にしたときの、水平方向セパトリックスを示している。この場合、1 mradのキックが与えられると、セパトリックスの位置にビームが捕捉され、ビームが取出しチャンネルへ導かれることがわかる。取り出しの効率を向上させるためには、このセパトリックスをより小さくして、垂直方向のアクセタンス角の最小値である0.5 mradより小さくすることが望ましいが、これ以上にセパトリックスを小さくすることは、入射効率の悪化につながり、十分な電子が入射できなくなる。

### 3. ビーム取り出し実験

ビーム取り出し実験は、60 MeVの入射ビームを用いて、加速せずにそのままのエネルギーで取出しをおこなった。その際の主なパラメータは、表2に挙げられている。取り出されたビームは、厚さ50  $\mu\text{m}$ のBeフォイルを通して、空気中に取り出し、プラスチックシンチレータとマルチチャンネルスケーラーをもちいて電子数を計測した。

図5は、その一例を示している。この場合、スケーラーは1秒毎に電子数を計測し表示をおこなっている。横軸は時間で、縦軸は1秒あたりの計数率である。これから、入射直後の計数率が非常に高い

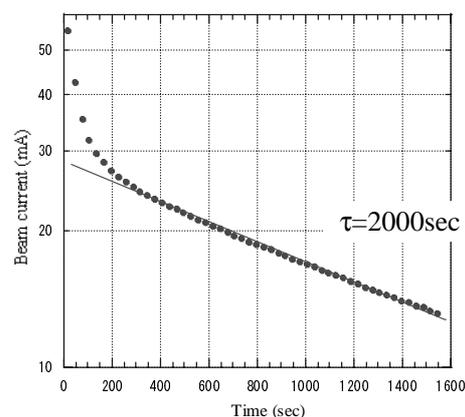


図2：KSRの蓄積電流の時間変化。  
平均真空度は $5 \times 10^{-10}$  Torrである。

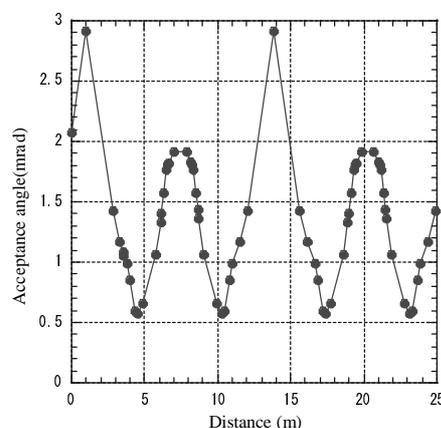


図3：KSRの垂直方向のアクセタンス角。横軸はリング内の位置を示す。

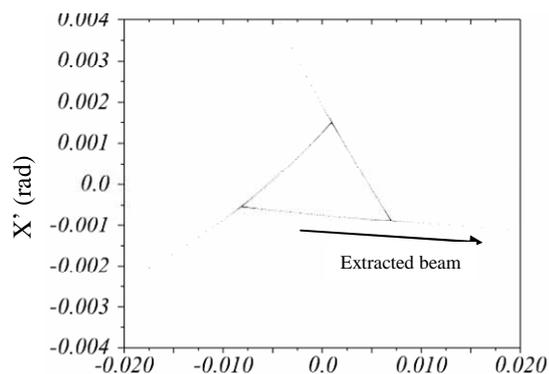


図4：ビーム取り出し時の水平方向セパトリックス。チューンは2.338。

部分を除くと、 $2 \times 10^4$  e/secから $4 \times 10^3$  e/secまで変化しながら、900秒間ビームが取り出されていることがわかる。このときの入射直後の蓄積電子数は $1 \times 10^8$ である。取り出される電子ビーム数が時間とともに変化するの、式(1)からも明らかのように蓄積電子ビームが時間とともに変化しているためである。これから、ビーム寿命は、500秒に

なる。この寿命はDC-CTの電流値の変化から測定した値と一致している。

蓄積状態にくらべてビーム寿命が約1/4になっているのは、ビームエネルギーを100 MeVから60 MeVへ下げたことや、静電セプトなど取り出しデバイスの影響で、真空度が1.6倍悪化していること、水平方向のセパトリックスを小さくしたために、入射アクセプタンスが制限されているなどの条件によっている。図5のケースでは、1000秒ごとに再入射をおこなっている。

また、式(1)にあてはめると、実際の取り出し効率 $\alpha$ は10%程度である。通常に取り出しに比べて $\alpha$ が低いのは、水平方向と垂直方向のアクセプタンス角が接近しているため、依然かなりのビームが真空チェンバーの上下面で失われているためと考えられる。ただし、ビームが失われる場所は主に $\beta$ 関数が大きい場所であり、取り出し点とは離れているので、実験のバックグラウンドにはなっていない。

図5には突然ビームレートがスパイク的に上昇する点が見られる(図中矢印参照)。これは縦方向のビーム不安定性が発生し、縦方向にビームがダイポール振動を始めたタイミングに一致する。こうした不安定性は、この蓄積電流ではすぐに収まるが、取り出しビームのスパイルに明瞭に現れる。この抑制は、今後の課題である。

実験に合わせて取り出しビームレートを可変することも重要である。ビームレートを落とすことは、入射電流を低下させることで、容易に対応できる。それに対し、ビームレートを高めるためには、水平方向の高周波キッカーを併用する。水平方向のベータatron振動の振幅をあらかじめ大きくしておくことで、より残留ガスとの散乱によってセパトリックスに飛び込む電子の数を増やすことができる。図6は、その1例を示している。この例では、ビームレートは、 $8 \times 10^5$  e/secまで高められている。このときの入力高周波電力は1 W以下であり、わずかなキックを与えているだけである。

#### 4. まとめ

KSRでは、蓄積電子ビームと残留ガスとの散乱を積極的に利用したビーム取出しをおこない、高エネルギー実験用の検出器の開発に利用している。実際の実験では、検出器やそのデータ収集システムの特性に合わせて、取出したビームレートを調整することが不可欠であるので、入射ビーム量の制御と水平方向高周波キッカーの併用によって対応している。このような低いビームレートでは、リップルなどはあまり問題にならないが、間欠的におきる不安定性に起因する、ビームレートの変動が存在する。この対策が今後の課題である。

表2：取出し実験時のパラメータ

入射エネルギー	60 MeV
取出しエネルギー	60 MeV
水平チューン	2.336
平均真空度	$8 \times 10^{-10}$ Torr
ビーム寿命	500 sec
蓄積電子数	$1 \times 10^8$ e <sup>-</sup>

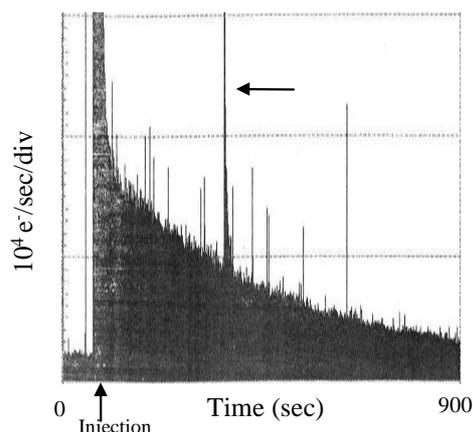


図5：表2の条件下での取出しビームスパイル。

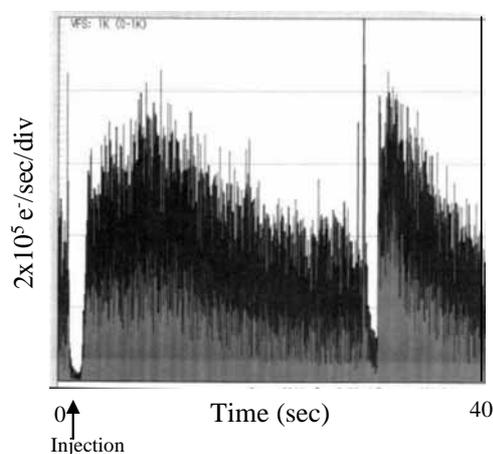


図6：水平方向高周波キッカーを併用したときの取出しビームスパイル

#### 参考文献

- [1] T. Sugimura, et al., "A Pulse Stretcher by Slow Extraction Utilizing the Third-Order Resonance with the RF Knockout Method", Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 41 (2002) pp.2276-2284