

## FAST EXTRACTION OF COOLED BEAM AT S-LSR

Tetsuya Fujimoto<sup>1,A)</sup>, Soma Iwata<sup>A)</sup>, Shinji Shibuya<sup>A)</sup>, Akira Noda<sup>B)</sup>, Toshiyuki Shirai<sup>B)</sup>, Koji Noda<sup>C)</sup>

A) Accelerator Engineering Corporation, 2-13-1 Konakadai, Inage-ku, Chiba, 263-0043

B) Institute for Chemical Research, Kyoto University gokasyo, Uji, Kyoto, 611-0011

C) National Institute of Radiological Sciences 4-9-1 Anagawa, Inageku, Chiba, 263-8555

### Abstract

Formation and fast extraction of the short-bunched proton beam, which was obtained through combining an RF field with an electron cooler (EC), was carried out at S-LSR. S-LSR is the ion storage ring, which has an electron cooler and an un-tuned RF cavity, and it can extract the 7-MeV proton beam by the fast extraction method utilizing a fast kicker magnet. There are two methods to produce short-bunched beam, one is the phase rotation method and the other is that applying an RF field along with electron cooling. As a result, we succeeded to obtain the short-bunched beam of 8.4-ns by phase rotation method and 11-ns by another method.

## S-LSRにおける冷却ビームの速い取り出し

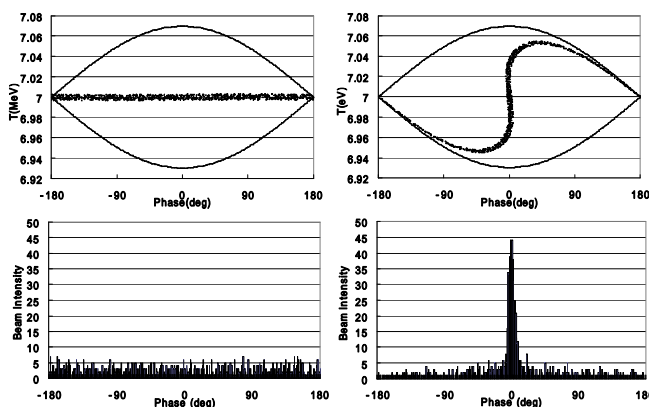
### 1. はじめに

HIMACにおける重粒子線がん治療は開始から12年が経過しこれまで良好な結果が得られている。その結果を受け近年重粒子線によるがん治療の普及が進められている。重粒子線によるがん細胞の破壊は粒子が直接がん細胞を破壊する直接作用とがん細胞周辺の構成分子に衝突しそのとき生じるラジカルによってがん細胞の遺伝子が切断される間接作用によって行われる。そのため重粒子線によるラジカルの生成消滅のメカニズムを知ることは重粒子線がん治療に対して非常に重要なことであり、そのための方法としてパルスラジオリシス法<sup>[1]</sup>が挙げられる。そのためには $10^{-6}$ -s以下の短バンチの形成が不可欠であるが、重粒子線による短バンチの形成および取り出しの報告は少ない。京都大学化学研究所に設置されたS-LSRではElectron Cooler(EC)により7MeVのプロトンビームを  $p/p = 0.026\%$  ( $2 \times 30 \mu A$ ) 程度まで冷却することが可能である<sup>[2]</sup>。この冷却されたビームにRF電圧を印加することで短バンチビームを形成し、Fast Extraction法によりビームを取り出す試験を行ったので報告する。

### 2. ショートバンチビームの形成

短バンチの形成法として1) 位相回転法、2) 冷却平衡法が挙げられる<sup>[3]</sup>。位相回転法はECにより運動量の分散を小さくした後RFを印加する方法である。RFを印加すると粒子は -E空間上でシンクロトロン振動を起し始めるが、その位相が90deg回ったとき軸方向のバンチサイズが最も短くなる。図1はそのときの様子をシミュレーションしたもので、RF電圧273V、 $f_{RF} = f_{ev}$ の条件で計算している。この方法ではバンチサイズは  $p/p$ に大きく依存するが、ECにより  $p/p = 0.026\%$  ( $2 \times 30 \mu A$ )まで冷却できるS-LSRで

はシミュレーションの結果(図2)RF電圧273V以上で10ns(2)以下の短バンチが期待できる。冷却平衡法はRFおよびECを同時に印加する方法である。リングをDC的に周回するビームにRFを印加すると同期位相の粒子を中心にシンクロトロン振動を行い、これにECによる冷却効果を加えることですべての粒子は同期位相の粒子付近に集まり、その結果短バ



(a) RF印加直後 (b)位相回転90deg  
図1: 位相回転法による短バンチの形成の様子

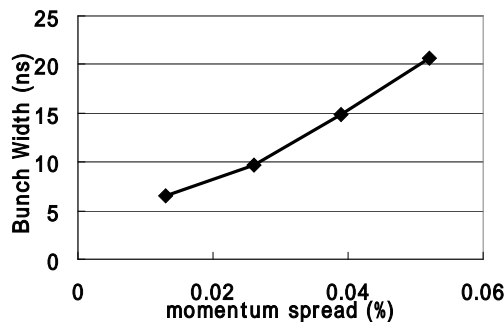


図2: バンチサイズ  $p/p$ 依存性 (RF\_V=273V一定計算)

<sup>1</sup> E-mail: fujimoto@aec-beam.co.jp

ンチのビームが得られる。この方法では冷却と Intra-Beam Scattering (IBS) が平衡するところでパンチサイズが決まるためビーム強度に強く依存すると考えられる。

### 3. 出射実験

#### 3.1 ビーム出射機器構成

図3にS-LSR出射機器構成を示す。S-LSRでは入射、出射がひとつのリングストレートセクションで行われる<sup>[4]</sup>ため2台あるバンパ電磁石は入出射共用で使用される。ビーム取り出しは短パンチ形成後バンパ電磁石でローカルバンパ軌道を形成し、そのピークでキッカー電磁石を励磁、静電セプタムを通して取り出す。取り出したビームはファラデーカップ (FC3) でモニターした。なお位相回転法においては90deg位相回転したタイミングでビームを取り出す必要があるが、そのタイミングはリングバンチモニターを利用することとした。S-LSRには12台のQMがあり、その真空ダクト内部に位置モニター用電極が組み込まれている。この内の1つの電極(出射静電セプタム手前)をバンチモニターとして使用している。図4に取り出しビーム波形を示す。リングバンチモニターの波高が最も大きくなるタイミングでキッカー電磁石を励磁、フラットトップ部分でビームを蹴り出している。

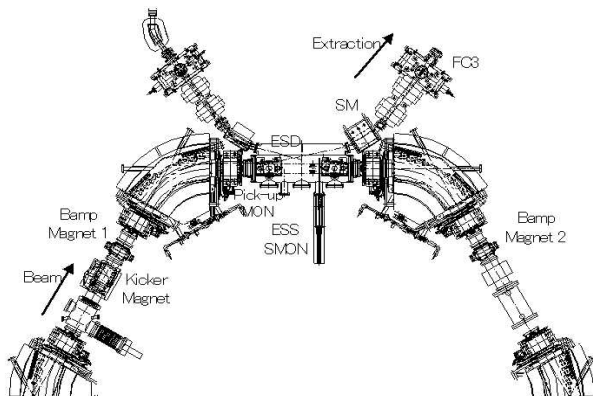


図3：S-LSR出射機器構成

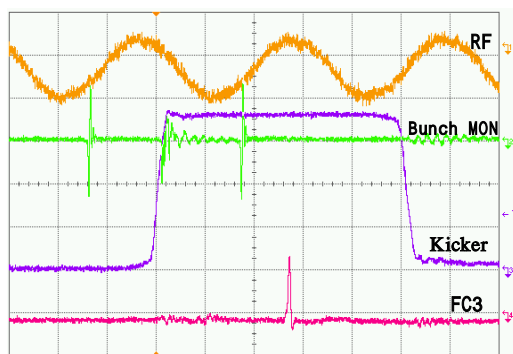


図4：短パンチビーム取り出し波形 (200ns/div)

#### 3.2 ビーム条件

短パンチビームの形成、取り出し実験の条件を表1に示す。今回は初めての実験ということもあり、まずは位相回転法、冷却平衡法ともに蓄積ビーム電流30μA一定の条件で試験を行った。ECによる冷却後の p/pはビーム強度に依存するが30μAの条件では0.026% (2 )である。

表1：実験条件

Ion species	proton
Tune (Qx, Qy)	(1.64, 1.21)
Beam Current	30μA
Number of Particles	1.16E+08
Revolution Frequency	1.61MHz
Momentum Spread	0.026%
Phase Slip Factor	0.482
RF Wave Form	sine
Electron Beam Current	107mA

#### 3.3 測定装置

短パンチビームの測定はFC3で行ったが、パンチ幅が10ns程度と短いため測定系内での反射等を考慮する必要があった。今回の測定はFCに50 受けアンプ (~100MHz、gain46dB) を取り付け、その出力をオシロスコープ (50 受け) で読み取る方法を取った。なおFCサプレッサー電圧給電線にキッカーノイズが大きく乗ってしまう現象があったが、これについては配線の取り回し等でノイズを落とすことができた。

### 4. 結果

#### 4.1 位相回転法

まず位相回転法による結果について述べる。リングにビーム入射後ECによる冷却を開始すると約15sで運動量の分散は0.026%に収束する。ここで急激にRFを印加して90deg位相回転したところでビームを取り出すが、位相回転90degのとき単位時間当たりの電流密度が増すためバンチモニターの信号が大きくなる。このタイミングでキッカー電磁石を励磁し

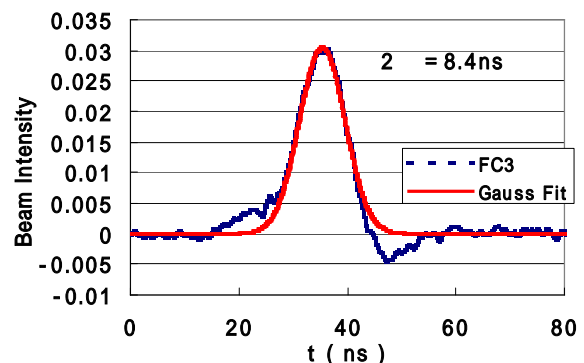


図5 位相回転法によるバンチ波形(RF500V)

てビームを取り出した。図5はRFギャップ電圧500Vの時の結果である。取り出されたビームはほぼガウス分布をしており、 $2\sigma$ のバンチサイズは8.4nsであった。位相回転法によるバンチサイズは  $p/p$ だけでなくRFバケットheightにも依存する。図6はバンチ幅のRF電圧依存性を見たものである。計算ではRF電圧を高くするほどバンチ幅は短くなるがRF電圧が高くなると計算と実測の誤差が生じている。これは今回使用したRFキャビティの特性で電圧が高くなると波形が歪むためと考えられ、歪みのない波形を印加できれば8ns以下の短バンチ生成も可能であると考えられる。

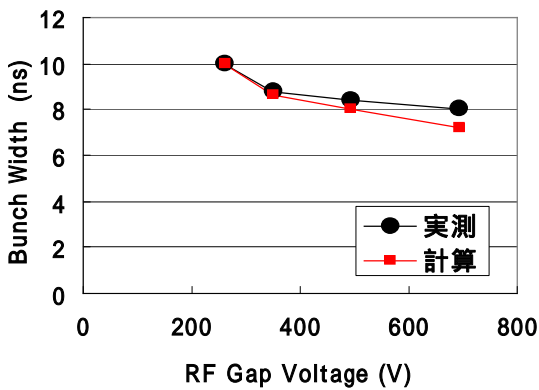


図6：位相回転法バンチ幅のRF電圧依存性

#### 4.2 冷却平衡法

次に冷却平衡法についての取り出し実験を行った。この方法ではショットキーモニターで  $p/p$ を見てECによる冷却とIBSの平衡が確認できた時点でキッカー電磁石を励磁してビームを取り出す。図7は冷却平衡法による短バンチ取り出しのFC波形である。このときのRF電圧は700Vであるが、 $2\sigma$ で11nsのバンチ幅が達成できている。

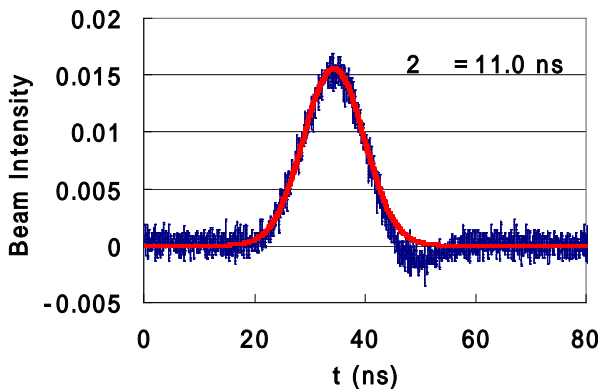


図7：冷却平衡法による短バンチ波形

図8は冷却平衡法によるバンチ幅の電圧依存性を見たものである。冷却平衡法に於いても電圧依存性があり電圧が高いほどバンチ幅も短くなっているのが分かる。

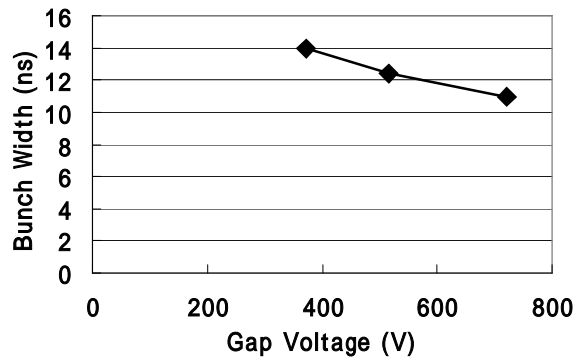


図8：冷却平衡法バンチ幅のRF電圧依存性

#### 5. まとめ

S-LSRにおいて7MeVプロトンビームの短バンチ形成および速い取り出しの試験を位相回転法、冷却平衡法の2通りで行った。その結果位相回転法で8.4ns、冷却平衡法で11nsの短バンチビームの形成および取り出しに成功した。今回の試験ではビーム強度は30  $\mu$ A一定で行った。しかし冷却平衡法ではバンチ幅はビーム強度に強く依存し、ECによる  $p/p$ の冷却もビーム強度に依存するため位相回転法においてもバンチ幅はビーム強度に依存することが予想される。よって今後ビーム強度依存性の測定も行い、より高いクオリティーのビーム生成を進める予定である。

#### 参考文献

- [1] Y.Katsumura, et al., Radiation Chemistry of Aqueous Solution Studied by Ion Beam Pulse Radiolysis, NIRS-M-133, HIMAC-023, 226-227, 1999
- [2] T.Shirai, et al., Beam Science and Technology Vol10, p36-38
- [3] K.Noda, D.Tann, T.Uesugi, S.Shibuya, T.Honma, Y.Hashimoto, Production of Short-Pulsed Beam Radiolysis; Nucl. Instrum. Meth. B240 (2005) 18-21
- [4] T.Fujimoto, et al., Beam Science and Technology Vol10, p33-35