

## Fast Extraction of Electron-Cooled Ion Beam at HIMAC

Toshiyuki Shirai<sup>1,A)</sup>, Kouta Mizushima<sup>A)</sup>, Satoshi Ojima<sup>A)</sup>, Takuji Furukawa<sup>A)</sup>, Yoshiyuki Iwata<sup>A)</sup>  
Mitsutaka Kanazawa<sup>A)</sup>, Kouji Noda<sup>A)</sup>, Shinji Shibuya<sup>B)</sup>, Kota Torikai<sup>C)</sup>  
Kazuo Kobayashi<sup>D)</sup>, Takeshi Nakamura<sup>D)</sup>

<sup>A)</sup> National Institute of Radiological Sciences, 4-9-1 Anagawa, Inage, Chiba 263-8555, Japan

<sup>B)</sup> Accelerator Engineering Corporation, 2-12-1 Konakadai, Inage, Chiba 263-8555, Japan

<sup>C)</sup> Gunma University, Heavy Ion Medical Center, Maebashi 371-8511, Japan

<sup>D)</sup> Japan Synchrotron Radiation Research Institute, 1-1-1 Kouto, Sayo-cho, Hyogo, 679-5198, Japan

### Abstract

The fast beam extraction has been studied at HIMAC synchrotron for the short bunch ion beam generation. The electron cooling is used for the emittance reduction due to the small aperture of the extraction line. The beam of  $C^{6+}$ , 170 MeV/n was successfully extracted and transported to the experimental room. The measured pulse length and the extraction efficiency were 20 nsec ( $1\sigma$ ) and 80 %, respectively. The extracted particle number was  $10^9$ , which was limited by the cooled beam instability. It was found that the transverse feedback was effective to increase the cooled beam intensity.

## HIMACにおける電子ビーム冷却されたイオン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、1994年の開始以来<sup>[1]</sup>、2007年段階で登録患者数が3000名を超え、良好な治療成果が得られている。その結果を受け近年では、重粒子線によるがん治療の普及も進みつつある。こうした治療と平行して、HIMACでは、重粒子照射の高精度化を目指し、3次元スキニングなどの照射技術の開発もおこなわれている<sup>[2]</sup>。加速器側から見ると、こうした治療照射は、シンクロトロンからの遅いビーム取り出し技術にもとづいているが、HIMACでは速いビーム取り出しをもちいた、短バンチビームの照射系への供給にも取り組んでいる。

短バンチビームの生物照射への応用には、大きく分けて2つの目的がある。1つは、粒子線によるパルスラジオリシスである。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る間接作用にわけられる。そのため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粒子線がん治療に対して重要なことであり、パルスラジオリシスは、その有力な手段になる可能性がある。

2つめは、短バンチビームの生物学的効果である。KEKにおける粒子線治療が終了して以降、現在、国内のほとんどの粒子線がん治療用加速器は、サイクロトロンまたはシンクロトロンからの連続ビームを利用している。しかし、将来的には、装置の小型化のために、早い繰り返しのシンクロトロン<sup>[3]</sup>や、レーザー加速<sup>[4]</sup>などの新しい加速器技術が利用される可能性がある。こうした加速器からは、連続ビ-

ームではなく、繰り返しが10 Hz~1 kHzのバンチビームが供給されるため、その生物学的効果を調べるものが求められている。

HIMACではこれまで、電子ビーム冷却と位相回転をもちいた短バンチビームの生成や<sup>[5]</sup>、Fast Kickerをもちいた速い取り出し<sup>[6]</sup>など基礎技術の開発をおこなってきたが、今年度からは、照射に向けて、 $C^{6+}$ , 170 MeV/n の速い取り出しの試験を開始したので、ここで報告する。

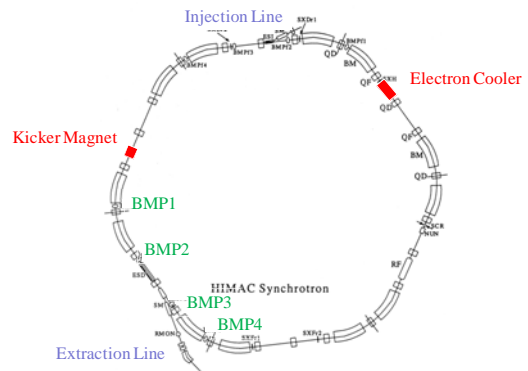


図1 HIMAC下シンクロトロン

### 2. HIMACにおける速い取り出し

HIMAC下シンクロトロンのレイアウトを図1に示す。現在の取り出しビームラインは、遅い取り出しを想定したものであり、取り出し用静電セプタムのギャップも通常13 mmである。このままでは、マルチターン入射したビームをすべて取り出すことは困難であるため、図2の取り出しシーケンスにあるよ

<sup>1</sup> E-mail: t\_shirai@nirs.go.jp

うに、入射ビームを、電子ビーム冷却装置をもちいて冷却し、横方向エミッタンスを小さくした後に加速して、キッカー電磁石で取り出している。また、イオン種によって、入射ビーム強度が足りない場合は、最初の過程で冷却蓄積(Cooling Stacking)をおこなって、ビーム強度の増大をはかる予定である。それぞれの機器のシンクロトロン内での位置は、図1に示しているとおりで、シンクロトロンおよびキッカー電磁石のパラメータは、表1に示されている。

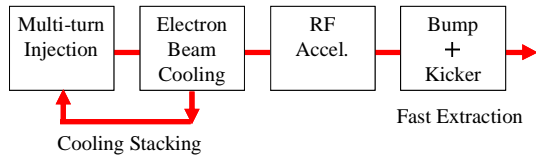


図2 速い取り出しシーケンス

表1 シンクロトロンとキッカー電磁石の速い取り出し実験時のパラメータ

Synchrotron	
Ion species	$^{12}\text{C}^{6+}$
Circumference	129 m
Tune ( $\nu_x/\nu_y$ )	3.73/3.11
Revolution Frequency	0.26 MHz (6 MeV/n)
RF Harmonics	1.23 MHz (170 MeV/n)
Fast Kicker Magnet	
Length	0.548 m
Duration / Rise time	2 $\mu\text{sec}$ / 80 nsec
Charging Voltage	50 kV
BL	$6.5 \times 10^{-3}$ Tm
Kick for 170 MeV/n	1.7 mrad

MAD8で計算した取り出しOpticsは、図3の通りである。キッカーの蹴り角は、 $\text{C}^{6+}$ , 170 MeV/n を想定している。キッカー電磁石だけでは、1.7 mradしか蹴れないため、遅い取り出し同様に、速い取り出しでもバンプ軌道を形成している。電子ビーム冷却によって、入射時の横方向エミッタンスを減少させているため、静電セプトラム近くまで、ビームロスなくバンプ軌道を寄せることが可能となり、比較的小型のキッカー電磁石でも200 MeV/n 程度のビームを取り出すことが可能となっている。

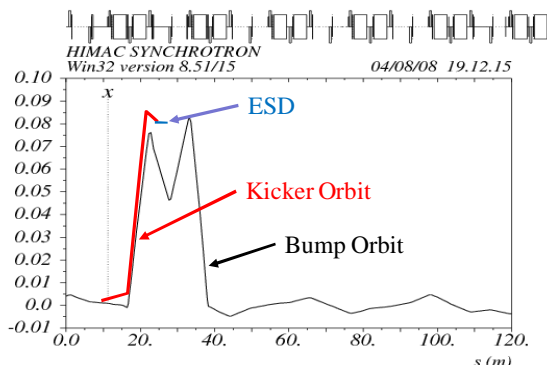


図3 ビーム取り出しのオプティクス

### 3. 入射ビームの電子ビーム冷却

炭素ビームの入射エネルギーは、6 MeV/nであり、それに対応する電子ビーム冷却装置のパラメータを表2に示す。電子ビーム電流は50 mA、断熱膨張係数は3.3で実験をおこなっている。この条件で、横方向冷却時間を測定した結果が図4である。縦軸は、水平・鉛直方向のビームサイズ ( $1\sigma$ ) を示している。この結果は、BETACOOOLによるシミュレーション結果とも、ほぼ一致している。この結果から冷却時間は8秒間程度であることがわかる。この時間が、入射から加速開始、または冷却蓄積のための再入射までの時間を決めている。

表2 電子ビーム冷却パラメータ

Electron energy	3.324 keV
Electron current	50 mA
Expansion factor	3.3
Electron-beam diameter	64 mm
Effective cooler length	1 m
Field strength at gun section	0.167 T
Field strength at cooling section	0.05 T

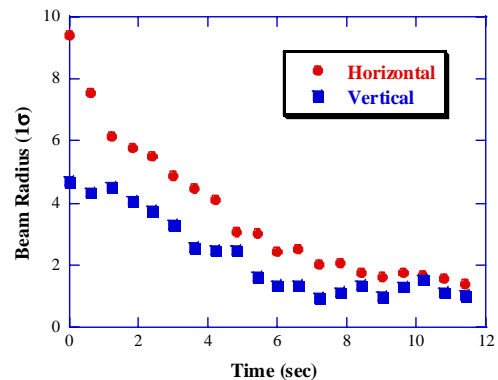


図4 電子ビーム冷却中の横方向ビームサイズ

### 4. 速いビーム取り出し実験

速い取り出しのビーム計測をおこなうために、3つのビームモニターを使用した。

- DC-CT : 周回ビームの粒子数の計測
- 静電電極 : 周回ビームの波形計測
- Fast CT : 取り出しビームの波形・粒子数計測

このFast CTは、Bergoz Fast CT (In-flange type) [7] であり、ビームライン下流の物理汎用実験室に設置して、計測をおこなった。

図5は、一連のビーム入射・冷却・加速・取り出しのシーケンスを示したDC-CT波形である。入射後、17秒間冷却した後に、170 MeV/n まで加速して、取り出しをおこなっている。このときの条件は、表1、表2で示したとおりである。入射粒子数は、 $1 \times 10^{10}$  個程度であるが、ビーム冷却中にその大部分が失われ、加速後に残った粒子数は、 $1 \times 10^9$  個程度であった。バンプ電磁石は加速終了後にONとなっているが、その際にはビームが失われず、キッカー電

磁石がONになった瞬間に、蓄積ビーム電流がほぼ0になっているのがわかる。

次に、シンクロトロン内部の静電ピックアップ電極で計測した周回ビームのビーム波形と、物理汎用実験室のFast CTで計測した取り出しビームの波形を比較したのが図6である。上がFCT出力、下がリングの静電ピックアップ電極の出力である。両者の測定は、よく一致しており、パルス幅は25 nsec ( $1\sigma$ )であった。

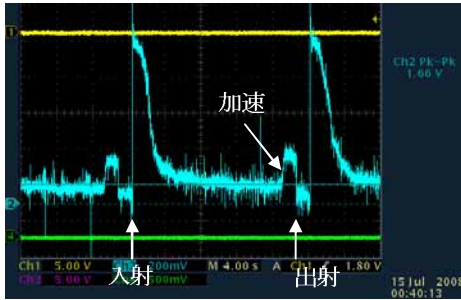


図5 ビーム入射・冷却・加速・取り出しを示したDC-CT波形

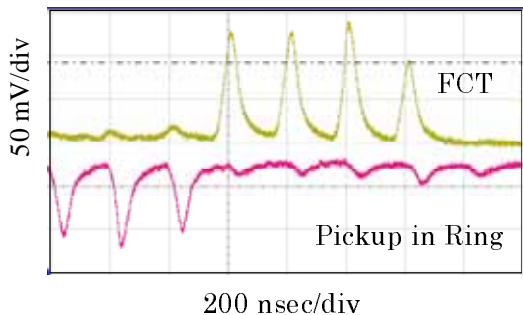


図6 取り出されたビーム波形

図7は、RF電圧を変化させたときの、FCTで計測した取り出しビームのパルス幅と、取り出し効率を示している。取り出し効率は、FCTの出力とDC-CTの出力の比から計算している。パルス幅は、20 nsec ~ 25 nsec ( $1\sigma$ )、取り出し効率は80% ~ 90% が得られた。ただし、RF電圧に対する明確な依存性は見られなかった。

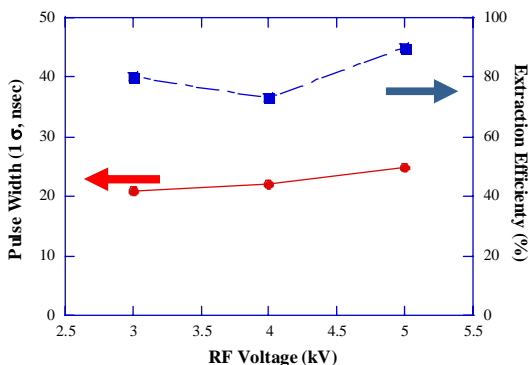


図7 取り出しビームのパルス幅と取り出し効率のRF電圧依存性

## 5. まとめと今後

今回の実験で、HIMACシンクロトロンから、170MeV/nの $C^{6+}$ ビームをキッカーによって取り出して、物理汎用実験室まで輸送することに成功した。Fast CTによる計測により、4バンチでパルス幅20 nsec、取り出し効率80%を得た。今後は、取出し効率の改善や、4バンチ取り出しから1バンチ取り出しへの変更、加速後の位相回転などに取り組む予定である。

さらに重要な課題として、冷却時の粒子数減少と冷却時間の短縮化に取り組む必要がある。後者については、少なくともHIMACの1サイクルである3.3秒以下にする必要があり、冷却電子電流を増加させることを検討している。前者については、ビーム不安定性が主要因と考えられ、Transverse Beam Feedbackを冷却と併用する試験を始めている<sup>[8]</sup>。図8はフィードバックをOFFにしたときと(a)、ONにしたとき(b)の冷却蓄積中のDC-CT出力を示したものである。フィードバックOFFでは、 $1 \times 10^9$ 個だった蓄積粒子数が、フィードバックによって、 $8 \times 10^9$ 個まで増加することがわかった。

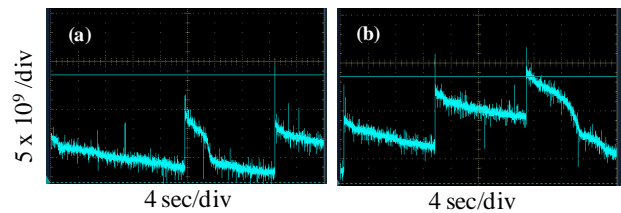


図8 Transverse Beam Feedback がOFF (a) / ON (b) の場合の冷却蓄積の状況。信号はDC-CTの出力。

## 参考文献

- [1] Y. Hirao et al., "Heavy ion synchrotron for medical use - HIMAC project at NIRS-JAPAN", Nucl. Phys. A, 538 (1992) 541.
- [2] K. Noda et al., "New Treatment Facility for Heavy-Ion Cancer Therapy at HIMAC", Nucl. Instr. and Meth. B, 266 (2008) 2182.
- [3] K. Endo et al., "Magnet and RF System of Small Pulse Synchrotron for Radiotherapy", Proc. of EPAC2004, Lucerne, (2004) 2661.
- [4] E. L. Clark et al., "Measurements of Energetic Proton Transport through Magnetized Plasma from Intense Laser Interactions with Solids", Phys. Rev. Lett., 84 (2000) 670.
- [5] K. Noda et al., "Production of short-pulsed beam for ion-beam pulse radiolysis", Nucl. Instr. and Meth. B, 240 (2005) 18.
- [6] K. Torikai et al., "Manipulation of a Cooled Beam for Future Heavy Ion Therapy", Nucl. Instr. and Meth. B, 266 (2008) 2190.
- [7] Bergoz, URL: <http://www.bergoz.com/products/FCT/d-fct.html>.
- [8] T. Nakamura, K. Kobayashi, "FPGA Based Bunch-by-bunch Feedback Signal Processor", Proc. of ICALEPCS, (2005) P3\_022.