

## Present status of HIMAC

<sup>A</sup>Ken Katagiri, <sup>A</sup>Kota Mizushima, <sup>A</sup>Takuji Furukawa, <sup>A</sup>Shinji Sato, <sup>A</sup>Masayuki Muramatsu, <sup>A</sup>Yoshiyuki Iwata,  
<sup>A</sup>Toshiyuki, Shirai, <sup>A</sup>Eiichi Takada, <sup>A</sup>Koji Noda,  
<sup>B</sup>Yuhsei Kageyama, <sup>B</sup>Masahiro <sup>B</sup>Kawashima, <sup>B</sup>Izumi Kobayashi, <sup>B</sup>Yoshinobu Sano  
<sup>A</sup> National Institute of Radiological Sciences  
4-9-1 Anagawa, Inage-ku, Chiba 263-8555, Japan  
<sup>B</sup> Accelerator Engineering Corporation, Ltd.  
3-8-5 Konakadai, Inage, Chiba 263-0043, Japan

### Abstract

We started the heavy ion therapy using the 3-D scanning irradiation system in May 2011, at New Particle Therapy Research Facility in NIRS. In order to establish new irradiation methods, such as the phase-controlled rescanning method and the hybrid scanning method, we have continued some R&Ds on HIMAC synchrotron, such as beam-intensity control system and the variable-energy beam extraction.

## HIMAC 加速器の現状報告

### 1. はじめに

放射線医学総合研究所での HIMAC 加速器による重粒子線がん治療は、1994 年の開始から今年で 18 年目を迎え、6000 人以上もの患者に治療が適用されてきた。これまでの拡大ビーム法による治療に加えて、複雑な腫瘍形状や治療期間中における腫瘍患部の形状・大きさの変化にアダプティブな対応が可能となる、3 次元スキャンニング照射法による臨床治療が 2011 年 5 月に開始された。2011 年度中には、新治療研究棟に新設された E 室(図 1)において、この 3 次元スキャンニング法による治療が十数名の患者に適用され、2012 年にはさらに新設された F 室のコミッション、ハイブリッドスキャンニング照射法の試験が開始された。また、この 3 次元スキャンニング照射法のさらなる高度化を目的とした、呼吸同期システムの開発、超伝導回転ガントリー[1] の設計開発も同時に行われている。これらの新たな照射技術に対応するための HIMAC 加速器の R&D として、可変エネルギービーム取り出し法の開発、ビーム強度変調制御システムの開発、ビーム安定化のための研究等が行われている。本発表では、これらの

HIMAC 加速器に関連した R&D を紹介すると共に、運用の現状を報告する。

### 2. HIMAC シンクロトロンにおける R&D

#### 2.1 可変エネルギービーム取り出し法の開発

照射野形成のために、厚いレンジシフター(飛程調整用 PMMA 板)を用いた場合には、レンジシフター内での多重散乱によりビーム径は増大し、また、標的との核反応の結果生じるフラグメント粒子も増加する。これらの結果として、形成される 3 次元線量分布は計画と比べて悪化する。放医研における 3 次元スキャンニング照射[2]では、この問題を改善するためにハイブリッドスキャンニング法[3]の適用を開始する。この方法では 20 mm までの薄いレンジシフターを使うと共に、シンクロトロンから 11 段階の異なるエネルギーのビームを供給することで、照射野の形成を行う。

このビームエネルギー多段化と、ビーム供給のデューティー比向上のために、HIMAC シンクロトロン運転制御システムの改良が行われた[4]。この新しい制御法では、一度のビーム加速に対して複数回の減速を行い、11 段階のエネルギー(140 - 430 MeV/u)変更を行う。この様子を図 2 の(a)に示す。従来の HIMAC シンクロトロンでは、1 サイクル 3.3 秒の固定周期で運転が行われていたが、この制御法を用いた運転モードではフラットトップ領域が拡張される。このフラットトップ拡張は、任意のエネルギーにおいて治療終了まで、或はリング内のビームが無くなるまで、持続させることができる。

この新しい制御システムにて、1 度のシンクロトロンへのビーム入射に対して 11 段階のエネルギーで連続的にビームを取り出す方法(可変エネルギービーム取り出し法)の開発が行われている。図 2(e)にビーム取り出し装置(RFKO)の高周波電圧振幅、(f)に

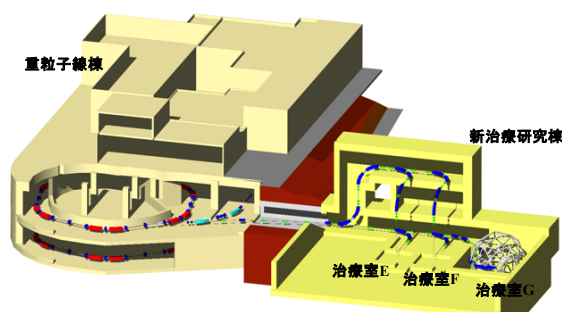


図 1: HIMAC 加速器のある重粒子線棟と新たに建設された新治療棟。E 室・F 室には水平/垂直のポートが有り、G 室には超伝導回転ガントリーが設置される予定である。

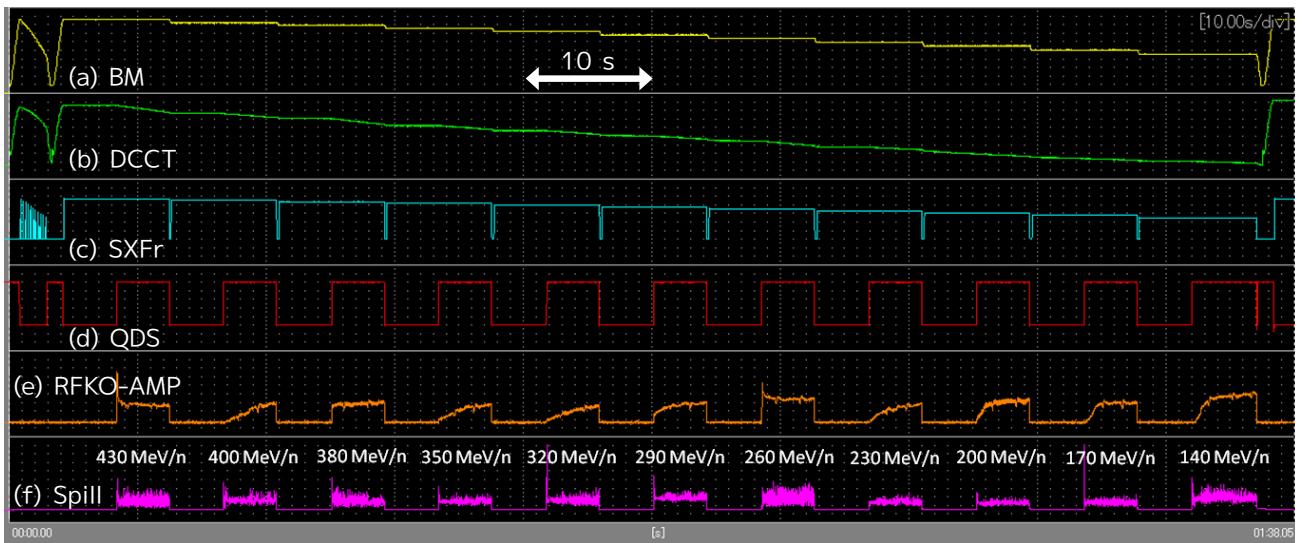


図 2: HIMAC シンクロトロンでの拡張フラットトップ/可変エネルギー運転と可変エネルギービーム取り出し. (a) 偏向電磁石電流値, (b) リング内周回ビームの電流値(DCCT 測定値), (c) セパトリクス生成用 6 極電磁石電流, (d) 高速 4 極電磁石(QDS)電流, (e) RFKO 法によるビーム取り出し装置の高周波電圧振幅, (f) ビームのスパイル波形.

取り出されたビームのスパイル波形を示す. 11 段各々で, ビームの取り出しに成功している事が分かる[5].

## 2.2 ビーム強度変調制御システムの開発

これまでの拡大ビーム法で行われた呼吸同期照射を 3 次元スキャニング照射でも実現するために, 呼吸位相同期リペインティング法 (PCR, Phase Controlled Repainting) が提案されている [6]. この PCR 法では, 1 つの呼吸ゲート内に, 1 スライス(深さ方向に分割された平面状の照射領域. スライス単位で照射が行われる)に対して複数回重ね塗りを行う. 同じスライスに対して同じ呼吸位相で何度も重ね塗りを行う事で, 線量分布のムラが平均化され, 均一な分布が得られる事が期待される.

照射ビーム量は, このスライス毎に異なるため, 一定の呼吸ゲート内で照射を完了させるためには, ビーム強度をスライス毎に変化させる必要が有る.

このような理由から, RFKO による遅い取り出し法を改良した, ビーム強度変調制御システムの開発が行われている. 図 3 に, このシステムを用いて強度変調取り出しを行った結果を示す. 30 倍の強度比(最大/最小)で強度の変調が可能である事が確認された[5].

## 2.3 ビーム安定化のための R&D

シンクロトロンでの加速区間中において, 偏向/4 極電磁石電源の加速周波数に対するトラッキングエラーから, ベータatronチューンの変動が生じていた. このベータatronチューンの変動が大きい場合には, 動作点が高次の共鳴線に重なる可能性もあり, その場合にはエミッタンスの増加やビームロスが生じる. スキャニング照射法を用いた治療照射では, シンクロトロンへのビーム再供給の原因となるビームロスは, 治療時間短縮を考慮すると好ましくない.

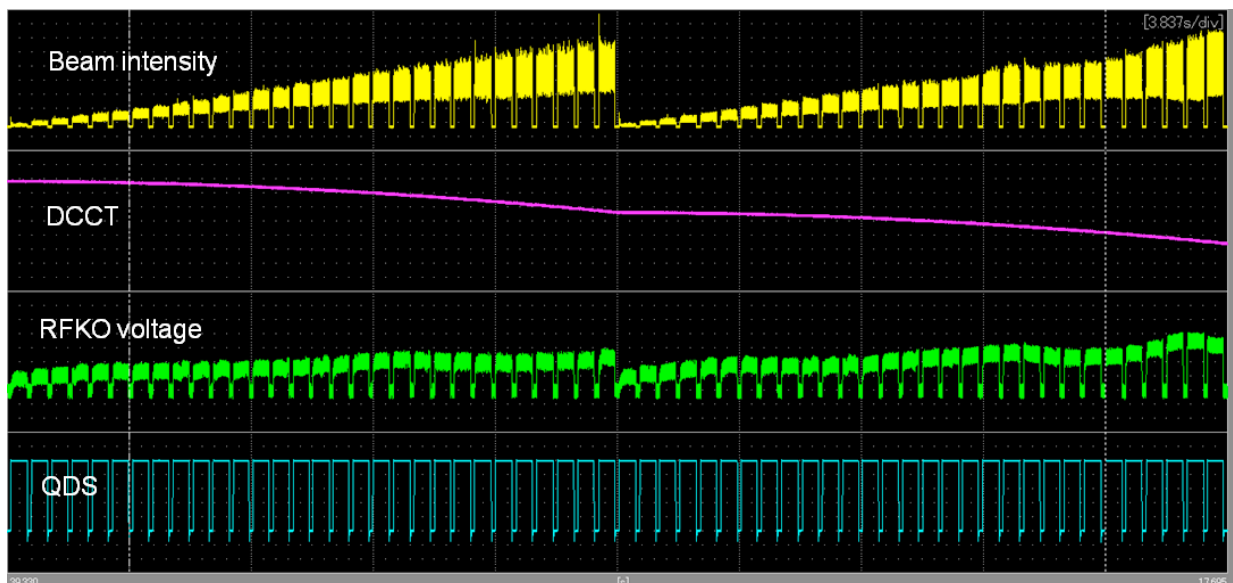


図 3: ビーム強度変調制御による取り出し. ビームは 350 MeV/u の炭素イオンビーム.

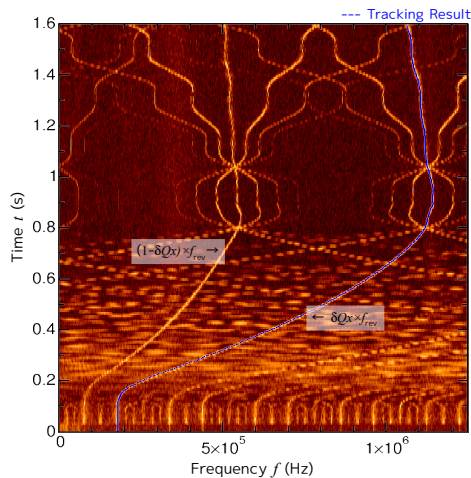


図 5: ビームポジションモニタによる測定データのフーリエ変換結果

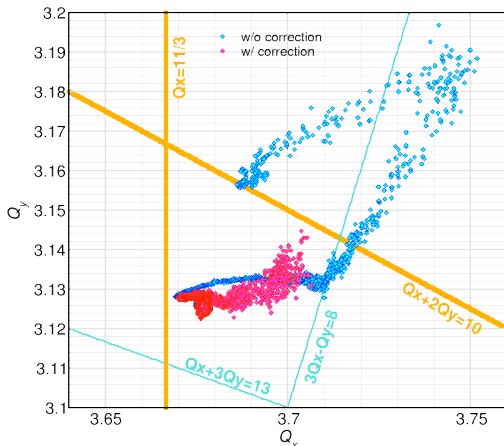


図 5: ベータトロンチェーンの補正結果.

そこで、加速区間における電磁石電源のトラッキングエラーを改善するための補正法を検討した。この方法では、ビームポジションモニターでの測定結果を解析後、ベータトロンチェーンの変動を時間の関数として導出し(図 4)、その結果を元に電磁石電源のパターンの補正を行う。図 5 に補正前後の動作点を記したチューンダイアグラムを示す。補正前は 3 次/4 次の共鳴線を通してしているが、補正後には改善されていることが分かる[7]。

### 3. HIMAC 加速器の運転の状況

東日本大震災による被害は、HIMAC 加速器にはほぼ生じなかった。しかし、その後に行われた電力規制により、2011 年 4 月末までは日中の電力ピーク時間帯を待機状態とする運転を行った。この間、治療を夜間行い日中は待機する運用を行った。HIMAC 加速器は、重粒子線がん治療だけでなく共同利用研究のためにも用いられている。この間の共同利用研究のためのビーム供給は中止となった。5 月からは

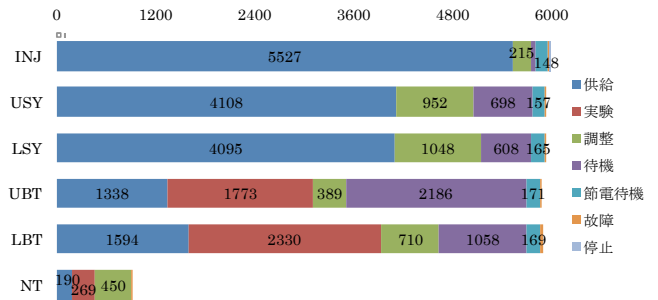


図 6: 2011 年度加速器系運転実績; 入射系:INJ, 上リングシンクロトロン:USY, 下リングシンクロトロン:LSY, 上リングビーム輸送系:UBT, 下リングビーム輸送系:LBT, 新治療研究棟系:NT

ほぼ平常通りの運転を行った。

今年度のビーム供給は、重粒子線がん治療に 3124 時間、共同利用研究に 5061 時間のビーム供給を行った。加速器系の運転時間実績を図 6 に示す。震災の影響により 4 月の運転に待機時間が多く発生しており、供給時間は例年より短くなっている。障害によって供給が止まった時間は、運転時間の 1%程度であった。幸いにも治療照射に大きな支障の出たトラブルは無く、今年度も概ね順調な運転であった。

今年度は、年間 625 人の新規登録患者の治療照射が行われた。震災の影響により 4 月の新規患者の受け入れが停止となったため、前年の治療人数(691 人)に比べ少なくなっている。

### 4. まとめ

HIMAC シンクロトロンでは、スキャニング照射システムでの呼吸同期照射法やハイブリッドスキャニング法等の、より高度な新しい治療照射法に対応するために R&D が行われている。

2011 年度は東日本大震災が発生したが、HIMAC 加速器では大きなトラブルも無く、おおむね順調な運転であった。

### 参考文献

- [1] Y. Iwata *et al.*, Phys. Rev. ST Accel. Beams **15** (2012) 044701.
- [2] T. Furukawa *et al.*, Med. Phys. **37** (2010) 5672.
- [3] T. Inaniwa *et al.*, Am. Assoc. Phys. Med. **39** (2012) 2820.
- [4] Y. Iwata *et al.*, Nucl. Instr. and Meth. A **624** (2010) 33.
- [5] K. Mizushima *et al.*, in these proceedings.
- [6] T. Furukawa *et al.*, Med. Phys. **34** (2007) 1085.
- [7] K. Katagiri *et al.*, Proc. of IPAC'11, San Sebastián, Spain, 2011, pp. 2037.