

Present status of HIMAC

^AKen Katagiri, ^AKota Mizushima, ^AShinji Suzuki, ^ATakuji Furukawa, ^AShinji Sato, ^AMasayuki Muramatsu,

^AYoshiyuki Iwata, ^AToshiyuki Shirai, ^AEiichi Takada, ^AKoji Noda,

^BYuhsei Kageyama, ^BMasahiro Kawashima, ^BIzumi Kobayashi, ^BYoshinobu Sano

^A National Institute of Radiological Sciences

4-9-1 Anagawa, Inage-ku, Chiba 263-8555, Japan

^B Accelerator Engineering Corporation, Ltd.

3-8-5 Konakadai, Inage, Chiba 263-0043, Japan

Abstract

We started the heavy ion cancer therapy using a 3-D scanning irradiation system in May 2011, at New Particle Therapy Research Facility in NIRS. In order to enhance the treatment quality by achieving a precise dose control, we have continued some R&Ds on HIMAC synchrotron and its irradiation system, such as a multiple-energy synchrotron operation with stepwise flattops and development of an isocentric superconducting rotating-gantry. This paper outlines those R&Ds as well as the present status of HIMAC accelerator facility.

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 19 年目を迎え、8000 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(Fig. 1)に新設された E 室において、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た。2012 年にはさらに新設された F 室のコミッシュニングが行われ、9 月より治療供給が開始された。

現在、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て、超伝導回転ガントリー[1]の設計開発が行われている。また、この照射システムの高精

度化に合わせて、可変エネルギー運転の高度化に関する R&D 等、HIMAC 加速器に関連した研究開発も行われている。本発表では、これら HIMAC での 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: 可変エネルギー運転の高度化

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、理想的な分布と比べて横方向に広がった線量分布が形成される。この問題を改善するために、放医研における 3 次元スキャンニング照射[2]では、ハイブリッドスキャンニング法[3]による照射を行っている。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(Fig. 2(a)), 照射野の形成を行う[4]。

より高い精度での線量分布の形成を目指して、シンクロトロンでビームのエネルギーを直接調整し、レンジシフターを用いずに照射する方法が現在検討されている。この方法の実現を目指して、これまで 11 段階であった可変エネルギー運転をより高度化する為の開発が行われている[5]。この高度化では、選択可能なエネルギーは 201 段階にまで増やされる。この 201 段階可変エネルギー運転に用いられるリング内偏向電磁石電源の電流パターンを Fig. 2(b)に示す。11 段階の電流パターンである Fig. 2(a)と比べると、電流の変化幅が非常に細かい事が分かる。この 201 段階の可変エネルギー運転では、最上段のエネルギーは 430 MeV/u, 最低段のエネルギーは 56 MeV/u であり、隣り合う 2 段から出射されたビーム

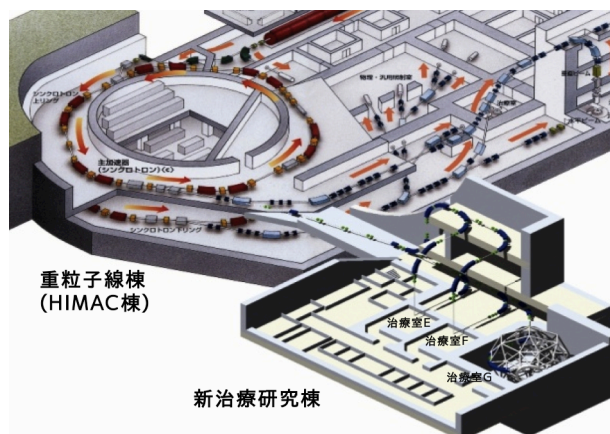


FIG. 1: HIMAC accelerator and New Particle Therapy Research Facility. We are planning to construct a superconducting gantry in the room "G".

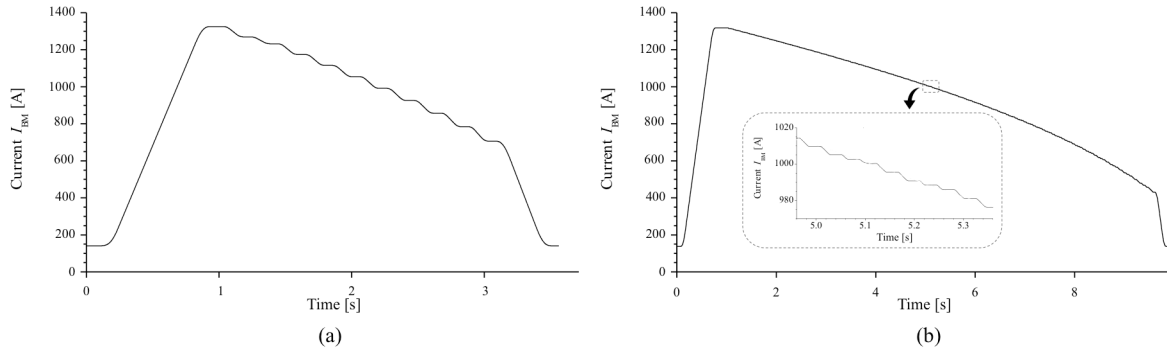


FIG. 2: Current patterns for a bending-magnet power supply. The current pattern used for (a) 11-step multiple energy operation, and (b) 201-step multiple energy operation.

のエネルギー差は水中飛程で 1 mm あるいは 2 mm に相当するように設計されている。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、この可変エネルギー運転ではフラットトップ区間が拡張される。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。

これまでに、この 201 段階可変エネルギー運転のコミッションが行われている。このコミッションにより、ビーム取り出し効率の向上のための出射バンパ軌道調整、ビームスピルの安定化のための RFKO 周波数の調整、ビームロスの低減のためのベータトロンチューンの調整 (Fig. 3) 等、細かなチューニングが行われ、さらには新治療研究棟の治療室における治療を模擬した照射試験も行われた。Fig. 4 に 201 段階可変エネルギー運転の様子を示す。加速から最高段の 430 MeV/u、そして減速されて 56 MeV/u の最低段に移るまで、大きなロス無く安定したビームの周回が行えていることが分かる [5]。

3. 回転ガントリー用超伝導磁石の設計及び磁場測定

腫瘍近傍の被爆をさらに低減し、より正確な線量分布の形成を可能とする為に、3 次元スキヤニング照射が可能なアイソセントリック型回転ガントリーの開発が進められている。このガントリーの鳥瞰図を Fig. 5 に示す。この回転ガントリーにより、430 MeV/u までの炭素ビームを、患者の位置するアイソセンター (回転軸上, Fig. 6) へ向けて 0 度から 360 度のいずれの方向からも照射することが出来る。これまでに、ドイツのハイデルベルクにて、炭素専用回転ガントリーが唯一建設された。この炭素線用ガントリーは陽子線の物に比べると非常に大きく、その重さは 600 トンを超えると報告されている。放医研で新たに設計された回転ガントリーは、小型化・軽量化のために、2 極成分及び 4 極成分の独立した励磁が可能な機能結合型超伝導偏向電磁石を採用している。その結果として、全長約 13 m、半径約 5.5 m、

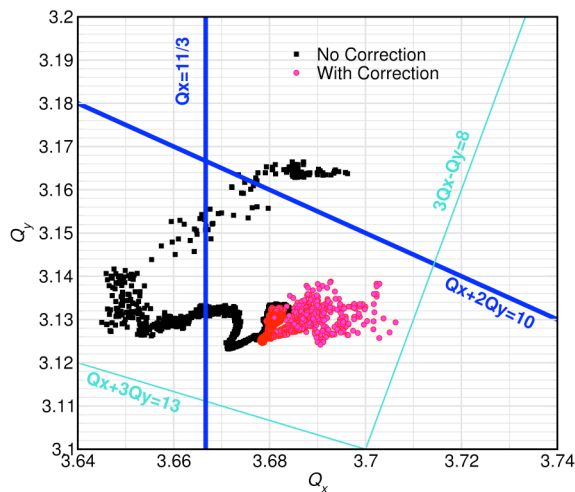


FIG. 3: Working points in the acceleration period. The tune variation without correction is so large that the working points crossed the 3rd order resonance lines. The variation could be successfully suppressed by the correction [6].

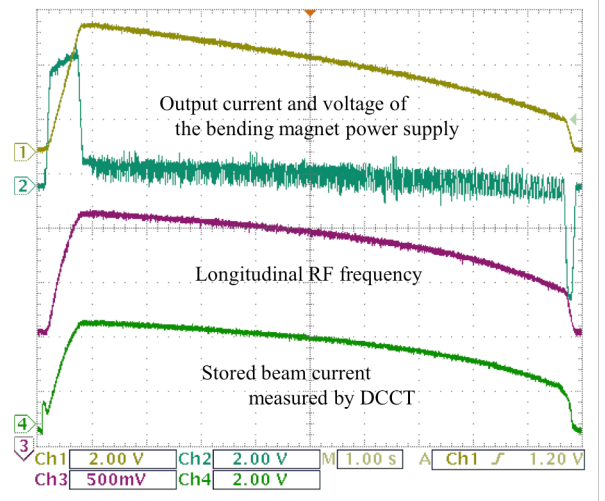


FIG. 4: Multiple-energy synchrotron operation with 201 flattops.

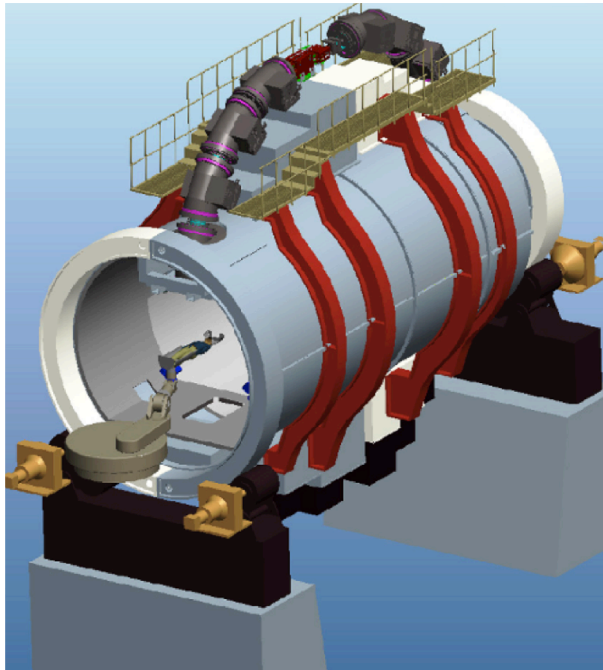


FIG. 5: Schematic diagram of the isocentric superconducting rotating-gantry.

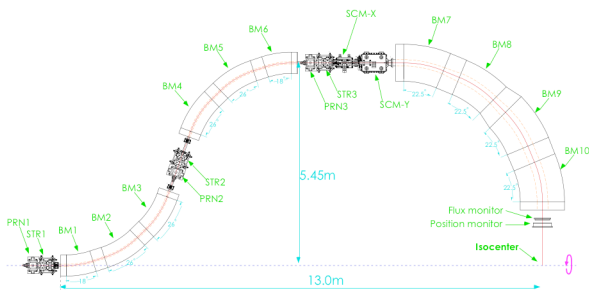


FIG. 6: Schematic drawing of the elements in the rotating gantry.

重さは 200 トン程度に抑えることができると見込まれている。この大きさは陽子線用のガントリーと同程度である。

この機能結合型超伝導偏向電磁石の製作が開始され、幾つかの完成した電磁石についてビーム軸上の磁場分布の測定が行われている[7]。

3. HIMAC 加速器の運転の状況

2012 年度の運転スケジュールは、夏季における電力削減し、かつビーム供給時間を増やす為に、夏季定期点検期間を延長して冬季定期点検期間を短縮させた。全体として定期点検期間を短縮でき、ビーム供給時間を増やす事ができた。ビーム供給は、重粒子線がん治療に 3875 時間、共同利用研究に 5456 時間のビーム供給を行った。加速器系の運転時間実績を Fig. 7 に示す。定期点検期間の短縮により供給時

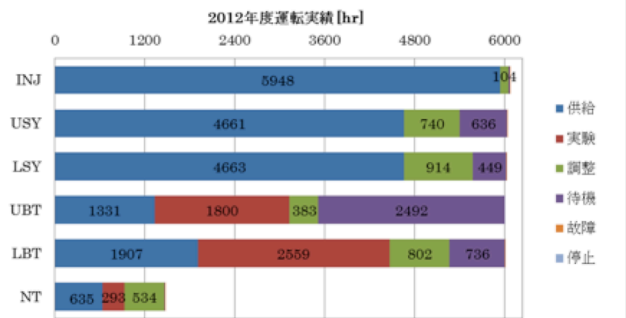


図 7: 2012 年度加速器系運転実績; 入射系:INJ, 上リングシンクロトロン:USY, 下リングシンクロトロン:LSY, 上リングビーム輸送系:UBT, 下リングビーム輸送系:LBT, 新治療研究棟系:NT.

間は例年より増加している。障害によってビーム供給が止まった時間は、運転時間の 0.2% 程度であった。治療照射に大きな支障の出たトラブルは無く、概ね順調な運転であった。これまでに、老朽化対策としてシンクロトロン BQ 電源, 出射系及び HEFT 系電磁石電源を更新するため、それらの仕様を検討した。次年度以降更新の予定である。

4. まとめ

HIMAC シンクロトロンでは、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て、超伝導回転ガントリーの設計開発が行われている。また、この照射システムの高精度化に合わせて、可変エネルギー運転の高度化に関する R&D 等、HIMAC 加速器に関連した研究開発も行われている。

2012 年度は、HIMAC シンクロトロンの障害によってビーム供給が止まった時間は、全運転時間の 0.2% 程度であった。治療照射に大きな支障の出たトラブルは無く、概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] Mizushima *et al.*, Proceedings of the 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Osaka, Japan, 2012, 228.
- [5] K. Mizushima *et al.*, in these proceedings.
- [6] K. Katagiri *et al.*, Proceedings of IPAC2011, San Sebastian, Spain, 2011, 2037.
- [7] S. Suzuki *et al.*, in these proceedings.