

## OPTIMIZATION OF MULTITURN INJECTION AT HIMAC SYNCHROTRON

T. H. Uesugi <sup>A) B)</sup>, T. Furukawa <sup>A) B)</sup>, S. Sibuya <sup>C)</sup>, T. Naruse <sup>B) D)</sup>, T. Fujimoto <sup>C)</sup> and K. Noda <sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> Graduate School of Science and Technology, Chiba Univ.

Yayoi-chou 1-33, Inage-ku, Chiba-shi, Chiba, 263-8522, JAPAN

<sup>B)</sup> National Institute of Radiological Sciences

Anagawa 4-9-1, Inage-ku, Chiba-shi, Chiba 263-8555, JAPAN

<sup>C)</sup> Accelerator Engineering Corporation

Konakadai 2-13-1, Inage-ku, Chiba-shi, Chiba, 263-0043, JAPAN

<sup>D)</sup> Graduate School of Engineering, Seikei Univ.

Kichijojikitamachi 3-3-1, Musashino-shi, 180-0001, Tokyo-to, JAPAN

### Abstract

In order to obtain high intensity at HIMAC synchrotron, multiturn injection was optimized. We chose effective working point, and determined optimum parameters of injection. Injection beam transport line was optimized by optimum parameters. On the other hand, Closed Orbit Distortion correction and optimization of bump orbit was carried out. As the result, beam intensity was increased by optimization.

## HIMACシンクロトロンにおける多重周回入射の最適化

### 1. はじめに

1993年にがん治療用重粒子線加速器として作られた放射線医学総合研究所（放医研）のHIMAC（Heavy Ion Medical Accelerator in Chiba）では、1994年から臨床実験が始まり、現在までに1800名以上の患者の治療が行われてきた。また、がん治療のみならず、イオン核反応などの基礎物理や、放射線に対する生物学的特性などさまざまな分野の実験・研究が行われている。ビームの大強度化は、医療用であれば治療時間の短縮に、実験用であれば今まで必要な強度が得られなかった粒子での実験と両方面において、非常に有用となる。

本研究では、高い強度を得るために入射の最適化を行った。現在のHIMACシンクロトロンの動作点は $(Q_x, Q_y)=(3.69, 3.13)$ である。この動作点では強度が増加した場合、空間電荷効果の影響により、垂直方向の動作点は整数値に向かって広がる。この整数共鳴を避けるため、整数値よりも低い値、2.9以下を選んだ。一方、水平方向の動作点は、多重周回ビーム入射法で入射効率の良い整数値 $\pm 1/4$ に近づけた。この動作点のもとで、入射ビーム輸送系とバンブ軌道の最適化を行った。HIMACシンクロトロン入射ビーム輸送系およびバンブ電磁石の電流値は、入射ビームのエミッタンス $26\pi\text{-mm-mrad}$ を基に設計された。しかし、エミッタンスモニターによる測定の結果、入射ビームのエミッタンスは $10\pi\text{-mm-mrad}$ 程度ということがわかった。そのため、 $10\pi\text{-mm-mrad}$ での最適化を行った。本研究では以上の最適化と、その結果について報告する。

### 2. シミュレーションによる最適化

多重周回ビーム入射の最適化をするために、HIMACシンクロトロン入射のシミュレーションを行った。

#### 2.1 動作点の選択

現在のHIMACの動作点は $(Q_x, Q_y)=(3.69, 3.13)$ である。1)高い強度を得る、2)整数共鳴を避けるために動作点の変更を行った。

水平方向の動作点は多重周回入射において入射効率の良いところが選ばれた。図1に動作点 $Q_x=3.68, 3.72, 3.75$ におけるGainの入射ビーム $\beta_x$ 依存性を示す。

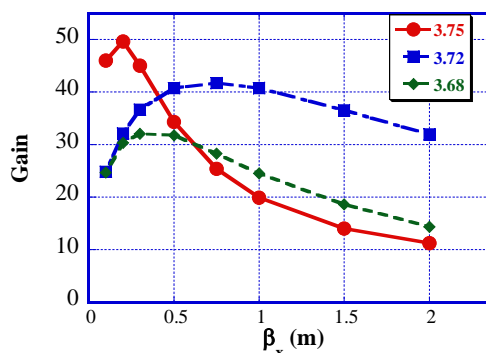


図1：Gainの入射ビーム $\beta_x$ 依存性による動作点の比較

(Gain: 1ターン毎にリングに入ってくる粒子数を1とした量)このシミュレーションにおいて、入射ビームエミッタンスは $10\pi\text{-mm-mrad}$ とした。 $Q_x=3.75$ のとき、最大Gainは50と高い値が得られた。しかし、そのときの $\beta_x$ は0.2m以下の低い値である。入射点で $\beta$ が小さいとき、入射ビーム輸送系内での $\beta$ 関数の振幅は大きいものとなり、ビーム損失の可能性がでてくる。さらに $\beta_x$ が最適な値からずれてしまった場合、Gainは $Q_x=3.68$ のときの値よりも低くなってしまふ。 $Q_x=3.72$ では、最大Gainは $Q_x=3.75$ のときよりは低いものの、安定して $Q_x=3.68$ のとき以上のGainが保たれる。 $\beta_x$ の最適値は0.63mと $Q_x=3.75$ のときより高く、ビーム輸送系内の振幅の点でも扱いやすい。以上のことから、 $Q_x=3.72$ に決定した。

HIMACの垂直方向動作点は $Q_y=3.13$ である。この動作点で強度が増加した場合、空間電荷効果の影響によりチューンシフトは整数値3に向かう。この整数共鳴とストップバンドの影響を避けるために垂直方向の動作点を2.88とした。本研究は動作点( $Q_x, Q_y$ )=(3.72, 2.88)のもとで行った。

## 2.2 入射ビーム輸送系の最適化

エミッタンスモニターから入射ビームエミッタンス $10\pi\text{-mm-mrad}$ 得られた。このエミッタンスのもとで、入射ビーム輸送系の最適化を行った。

入射点におけるtwiss parametersは、水平方向であれば多重周回入射法において効率の良い値、垂直方向はリングとのマッチングから決定された。多重周回ビーム入射法において、 $\alpha_x$ が0のときに、入射の効率が最もよい。水平方向の $\beta$ は、バンブ軌道の潰れる時間によって、最適な値が決定される[1]。図1から $\beta$ の最適値0.63mが得られた。

ビーム輸送系においてビーム損失の原因は、大きい振幅のベータ関数と、ビーム輸送系内の軌道のずれである。この二点から、軌道が数mmずれてもビーム損失が起きないように、入射ビーム輸送系における $\beta$ 関数の振幅を抑えた。

## 2.3 バンブ軌道の最適化

図2にGainとバンブ軌道のサイズの関係を示す。

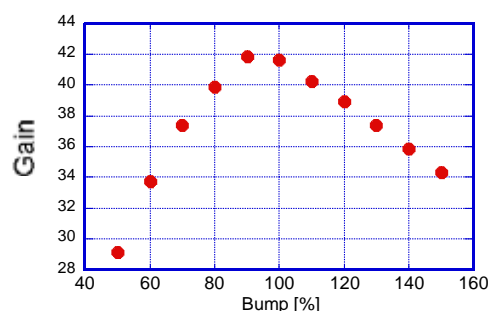


図2: Gainとバンブ軌道のサイズとの関係

ここでは、入射点におけるバンブ軌道とESIセプタムが一致するところを100%とした。この図から、およそ100%のところではGainが高く、そこからのバンブ軌道の増減でGainの減少を招くことがわかる。リングにはClosed Orbit Distortion (COD)があるため、その影響により入射点でバンブ軌道の位置および角度がずれる可能性がある。これを防ぐため、バンブ軌道を作成するときにはCOD込みで作るか、CODを補正した後にバンブ軌道を形成する必要がある。

## 3. 実験結果と議論

シミュレーションにより求めた値から、HIMACの入射最適化を行った。

### 3.1 入射ビーム輸送系の最適化

シミュレーションにより求めた四極電磁石のパラメータから、実際の入射ビーム輸送系の最適化を行った。その結果、透過率は85%から95%に増加した。図3に非破壊型プロファイルモニター[2]による、周回ビームの垂直方向分布を示す。最適化により入射点でのtwiss parametersの整合が向上した事がわかる。

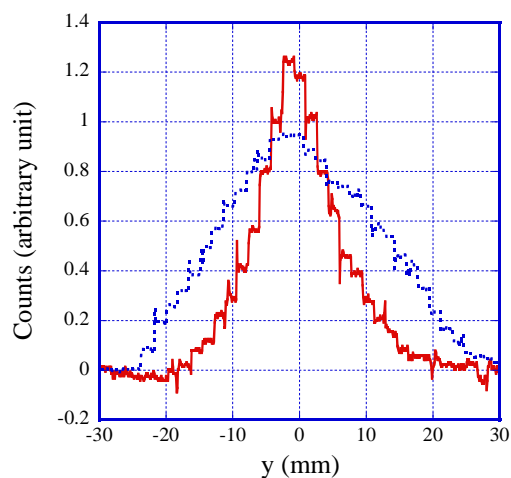


図3: 非破壊型プロファイルモニターによる周回ビームの垂直方向分布。点線が最適化前、実線が最適化後である。

最適化前の周回ビームは半幅が約22mm、エミッタンスでは $40\pi\text{-mm-mrad}$ であった。最適化後では、半幅はおよそ13mmとなり、エミッタンスでは $19\pi\text{-mm-mrad}$ と半分以下にすることに成功した。このことから、完全なマッチングが出来たとまではいえないが、入射点のtwiss parametersは改善できたと考えられる。

### 3.2 バンブ軌道の最適化

COD補正の後、バンブ軌道の最適化を行った。最適化を確認するために、最適化前後で時間ごとの入

射ビームの残存率を比較した。HIMACの入射時間は350 $\mu$ sであるが、これを50 $\mu$ sずつ区切って入射した。図4に、このときの入射1ms後に残っているビームの値を示す。

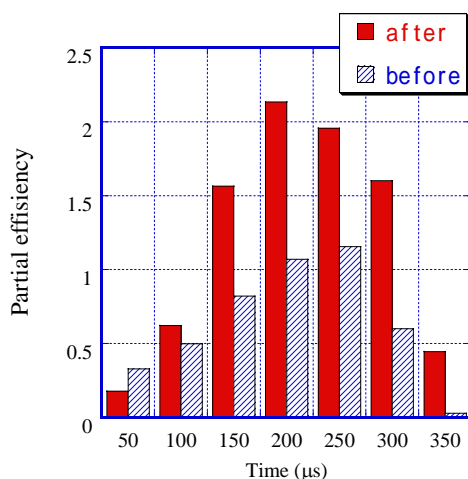


図4：50 $\mu$ sごとに入射したビームの1ms後の残存率

マッチングのとれている入射では、入射直後のビームはESIのセプタムに当たってしまうため、そのときの効率は悪く1ms後にはほとんど残らない。最適化前では、最適化後に比べて全体のビームの値は少ない。しかし、最初の50 $\mu$ sの入射では最適化後のときよりも多い。これは、バンブ軌道がESIのセプタムの位置に届いていないためと考えられる。最適化前ではビームの運動量に比べて、偏向電磁石の曲げ角が強かったため、リングの平衡軌道がダクトの中心よりも内側にあった。入射開始直後からバンブ軌道とセプタムに距離があるため、その隙間の分のビームはセプタムにぶつかることなくリングを周回することができる。なお、このときのリングビームを水平方向の位相空間平面上で表すと、中心に穴があいた状態になっている。その穴の分、強度の上昇は望めない。さらに、300から350 $\mu$ sに入射されたビームは最適化前では残っていなかった。これはCODによるアクセプタンスの減少のためと考えられる。最適化後では、入射開始直後のビームはほとんど残っていないが、入射途中で高い値が得られている。さらに、COD補正が行われているため、300から350 $\mu$ sに入射されたビームの一部は、ダクトに当たることなくリングを周回することができる。

### 3.3 Gain比較

最適化後のGainを最適化前の値[3]と計算値と比較した。図5に入射後のGainの比較を示す。最適化前ではビームの運動量に比べて、偏向電磁石の曲げ角が強かった。このため、平衡軌道はリングの内側に

なり、アクセプタンスを大きくとることができた。最適化では、偏向電磁石磁場と入射ビーム運動量を整合させ、平衡軌道をリング中心に移動させた。これにより、アクセプタンスは最適化前に比べ減少した。それにもかかわらず、Gainは20から32と50%以上増加し、強度では透過効率の上昇にもより、 $4.6 \cdot 10^{10}$ から $8.6 \cdot 10^{10}$ pppに増加した。しかし、計算結果のGain42と比べると75%しか得られていない。この原因として以下のことが考えられる。1)ファラデーカップまではビームの透過率は上昇したが、その後のセプタムまたはESIでビーム損失が起きている、2)入射位置および角度のずれにより、入射効率が減少している、3)補正しきれなかったCODによるアクセプタンスの減少がある。原稿

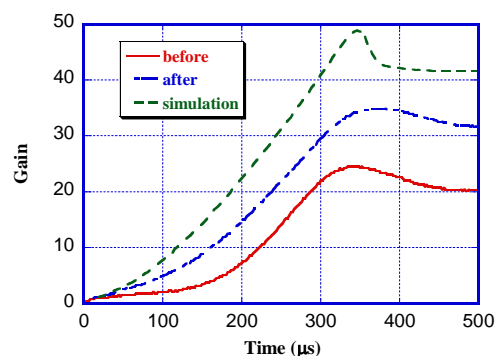


図6：最適化前後とシミュレーションにおけるgainの比較

## 4. 結論

高い強度を得るために、多重周回入射の最適化を行った。入射効率と整数共鳴から動作点を決定し、そのもとで入射ビーム輸送系とバンブ軌道の最適化を行った。その結果、周回ビームの垂直方向エミッタンスは40から $19\pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$ と改善された。これにより、強度は $4.6 \cdot 10^{10}$ から $8.6 \cdot 10^{10}$ pppに増加させることに成功した。

## 参考文献

- [1] S. Yamada and T. Katayama, Injection and Accumulation Method in the TARN, INS-NUMA-12.
- [2] T. Honma et al., Ionization beam-profile monitor at HIMAC, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 459 (2001) 390-397
- [3] S. Shibuya et al., A BEAM INTENSITY CONTROL METHOD FOR ION THERAPY, Proceedings of the 8<sup>th</sup> EPAC, Paris, France, 2002, pp.2757-2759