

STUDY OF BEAM-LOSS DUE TO CHARACTERISTICS OF INJECTED BEAM AT HIMAC SYNCHROTRON

Takehiro Uesugi^{1,A), B)}, Takuji Furukawa^{A)}, Shinji Shibuya^{C)}, Katsuhisa Yoshida^{A)} and Koji Noda^{A)}

^{A)} National Institute of Radiological Sciences

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

^{B)} Graduate School of Science and Technology, Chiba Univ.

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

^{C)} Accelerator Engineering Corporation

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

Abstract

At the HIMAC synchrotron, a multiturn-injection was optimized in order to obtain the high intensity. The stored intensity was increased by the factor of around two. On the other hand, we have carried out the tune survey in order to investigate the beam-loss due to resonance with the space charge effect. Furthermore, sextupole-field error that brings the beam-loss was successfully corrected by existing sextupole magnets. We will describe the experimental result.

HIMACシンクロトロンにおける入射ビーム特性による ビームロスに関する研究

1. はじめに

放射線医学総合研究所では、1994年にHIMAC (Heavy Ion Medical Accelerator in Chiba) [1]で臨床試験が開始されて以来、現在まで2000人以上の患者の治療が行われている。さらに、我が研究所では炭素線普及型がん治療施設の設計が現在進められている [2,3]。がん治療用加速器の普及において重要な点の一つに、コストダウンなどを目的とした小型化がある。この場合、小型化に伴い周長が短くなる分、ビーム強度が減少する事が予想される。この強度減少を抑えるために (1)蓄積ビーム強度の増加、(2)入射後のライフタイムを長くすることが必要である。本研究では、HIMACシンクロトロンにて多重回転入射の最適化を行った。これにより、入射後に高いビーム強度を得ることが出来た。一方で、共鳴によるビームロスを調べるためにチューンサーベイを行った。既存の六極電磁石を用いてビームへの影響の強い三次共鳴の補正を行い、ライフタイムを長くすることに成功した。以下に実験とシミュレーションの結果を示す。

2. 多重回転入射の最適化

蓄積強度増加を目的として、多重回転入射の最適化を行った。改善のための主なパラメータとしては (1) リングの水平方向動作点 Q_x 、(2) 入射点での入射ビームのツイスパラメータ (特に水平方向のベータ関数 β_x) が挙げられる。まずは、シミュレーションにより水平方向動作点と入射点における入射ビームの水平方向ベータ関数の最適

値を決定した。図1に入射ゲインの水平方向動作点と入射点における入射ビームの水平方向ベータ関数依存性を示す。

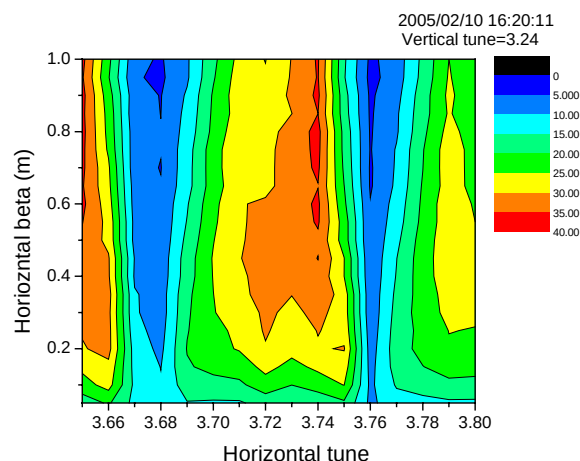


図1 入射ゲインの水平方向動作点と入射点における入射ビームの水平方向ベータ関数依存性

この結果から、水平方向動作点 $Q_x=3.74$ 、入射点の入射ビームのベータ関数 $\beta_x=0.75m$ で高い入射ゲインが得られた。実験では、入射点でこの値になるように入射ビーム輸送系のパラメータを変更した。この最適化の結果、入射ゲインを22から31に増加することに成功した。この最適化の際に、輸送系内のビームエンベロップを全体的に小さくした結果、透過効率が15%ほど上昇し100%に近い効率が得られた。以上の結果、入射後の周回ビーム強度

¹ E-mail: uesugit@nirs.go.jp

では $4.6 \cdot 10^{10}$ (ppp)から $8.2 \cdot 10^{10}$ (ppp)と2倍近くの増加に成功した。最適化前後のゲインとシミュレーションによる値を図2に示す。

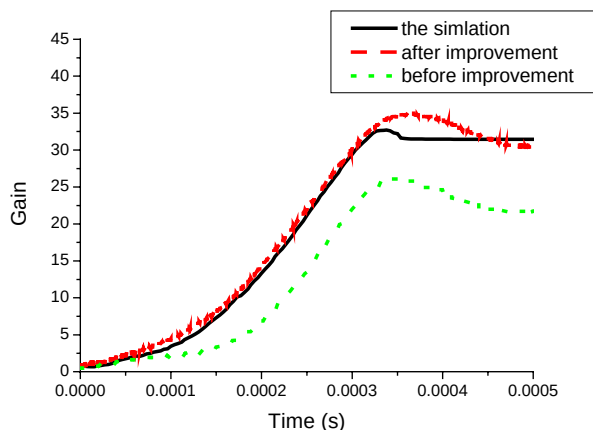


図2 最適化前後とシミュレーションによる入射ゲインの比較（実線：シミュレーションによる入射ゲイン、破線：最適化後の入射ゲイン、点線：最適化前の入射ゲイン）

3. 共鳴による強度減少の測定

HIMACの動作点 $(Q_x, Q_y)=(3.68, 3.13)$ 付近で、共鳴のビームへの影響を調べるためにチューンサーベイを行った。図3にチューンダイアグラム上でのチューンサーベイの測定線と四次以下の共鳴線、図4にバンチビームでのチューンサーベイの結果を示す。

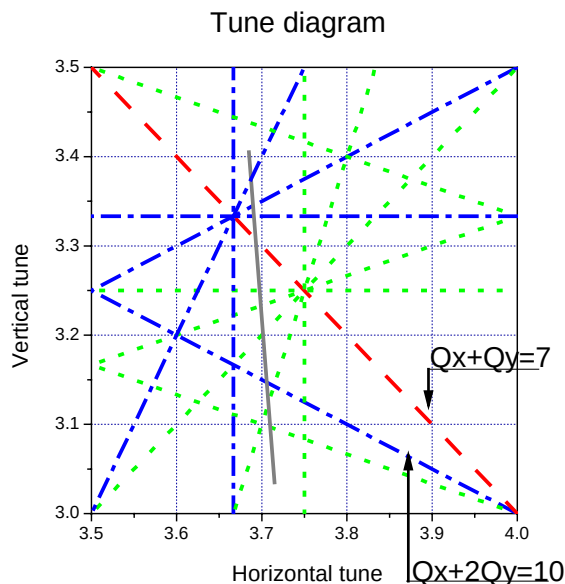


図3 チューンダイアグラムとチューンサーベイの測定線（実線：チューンサーベイの測定線、破線：二次共鳴線、一点鎖線：三次共鳴線、点線：四次共鳴線）

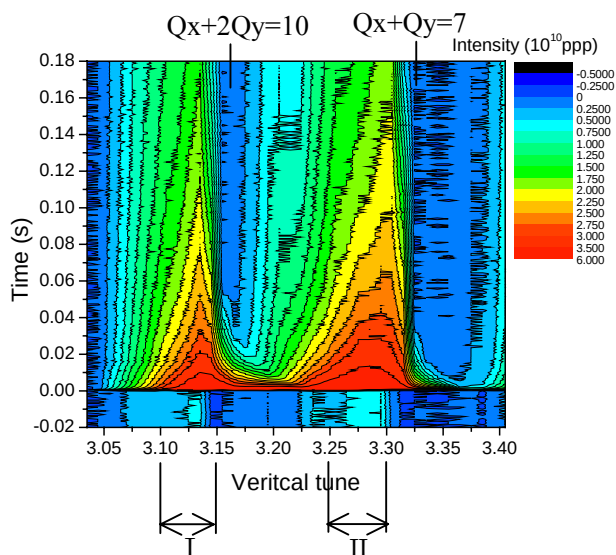


図4 バンチビームのときのチューンサーベイによる強度の時間経過および垂直方向動作点依存性

表1に示す条件下では、バンチビームのときのLaslett tune shift [4]の大きさは $\Delta Q_y > 0.1$ となる。 $Q_y \leq 3.06$ では、整数共鳴のためビームはほとんど入らない。この整数共鳴を避けるために垂直方向動作点を高くすると三次共鳴線 $Q_x + 2Q_y = 10$ の影響を受けてしまう。共鳴線 $Q_x + 2Q_y = 10$ より高い垂直方向動作点を選択した場合でも、より動作点を高い値にとると二次共鳴線 $Q_x + Q_y = 7$ により強度減少を引き起こす。この二次共鳴線 $Q_x + Q_y = 7$ より高い動作点では $3Q_y = 10$, $-Q_x + 2Q_y = 3$, $2Q_x - Q_y = 4$ と三次共鳴線が密集している。結果として、垂直方向動作点はこの $Q_x + 2Q_y = 10$ をはさみ、図4のエリアI、IIで選択される。エリアIの整数共鳴線と三次共鳴線の間では $3.10 \leq Q_y \leq 3.15$ でビームロスが少なかった。HIMACの動作点もこの範囲に含まれる。三次共鳴線 $Q_x + 2Q_y = 10$ の上部、エリアIIで選択できる垂直方向動作点はおよそ $3.25 \leq Q_y \leq 3.31$ であった。

表1 チューンシフト計算に使用したHIMACシンクロトロンのパラメータ

イオン種	C^{6+}
入射ビームエネルギー (MeV/u)	6
周回ビーム強度 (particle per pulse)	6×10^{10}
水平方向エミッタンス ($\pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$)	400
垂直方向エミッタンス ($\pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$)	20
バンチングファクター	0.5

4. 六極磁場による共鳴補正

チューンサーベイの結果から、六極磁場誤差により励起される三次共鳴線 $Q_x + 2Q_y = 10$ の補正が来ればライフタイムが長くなることが予想される。この共鳴の励起項 κ は以下で与えられ[5] $\kappa=0$ となるように六極磁場を与えることでこの共鳴を補正できる。

$$\kappa = \frac{1}{2\pi(2R)^{(N/2)}|n_x||n_y|} \int_0^{2\pi} d\theta \beta_x^{n_x/2} \beta_y^{n_y/2} e^{i\varphi} \cdot \begin{cases} (-1)^{(|n_y|+2)/2} K_y^{(N-1)} & \text{for } n_y \text{ even} \\ (-1)^{(|n_y|-1)/2} K_x^{(N-1)} & \text{for } n_y \text{ odd} \end{cases}$$

$$\varphi = n_x \mu_x + n_y \mu_y - (n_x Q_x + n_y Q_y - p)\theta$$

n_x ：共鳴線の水平方向係数
 n_y ：共鳴線の垂直方向係数
 p ：共鳴線のharmonic number
 N ：共鳴の次数
 R (m)：synchrotronの平均半径
 θ ：基準点からのリングの位相

二組のビーム取り出し用六極電磁石の磁場の強さと、極性を切り替えることで、 κ の振幅を一定に保ちながら位相 φ を変えることが出来る。動作点を共鳴線 $Q_x+2Q_y=10$ 付近の $(Q_x, Q_y)=(3.715, 3.158)$ に設定し、各組の補正六極電磁石による磁場の強さを変えながらビーム強度の時間変化を測定した。その結果を図5に示す。この実験はコースティングビームで行った。

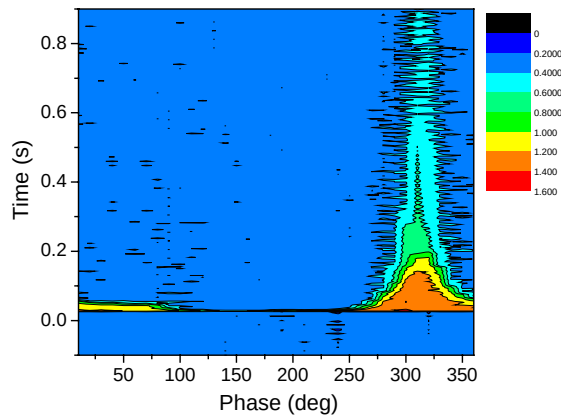


図5 補正六極電磁石による補正の位相を変えたときの周回ビーム強度の時間変化（入射点： $\theta=0$ ）

この結果から、基準点からの位相 φ が 310° のときに補正されていることが分かる。補正によるビーム強度への影響を調べるために、共鳴補正後のチューンサーベイを補正前のときと同様に行った。この結果を図6に示す。図4の共鳴補正前では、 $Q_y=3.15$ 付近に大きなビームロスの谷ができていた。これが補正後では、共鳴線 $Q_x+2Q_y=10$ による強度減少はほとんど目立たなくなった。共鳴線付近での強度が半減するまでの時間は、補正前では3msec程度だったのに対し、補正後では30msecと10倍の長さを得ることが出来た。さらに $Q_y=3.23$ のところでも高い強度を維持したままライフタイムを長くすることに成功した。

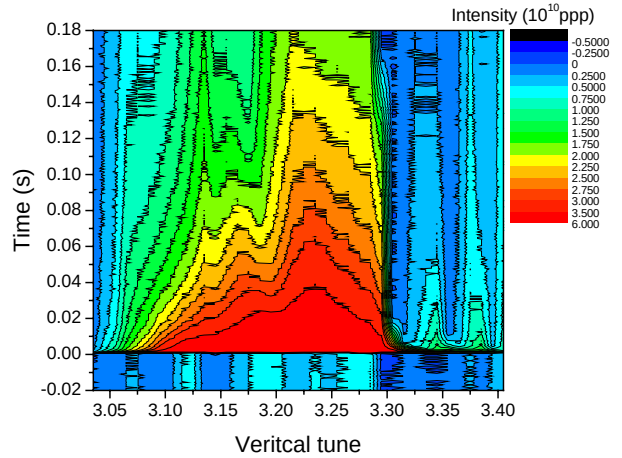


図6 六極磁場誤差補正後でのバンチビームのチューンサーベイによる強度の時間経過および垂直方向動作点依存性

5. 結論

本研究では、周回ビームの強度増加を目的として実験を行った。蓄積ビーム強度の増加は、シミュレーションにより最適な入射条件を求め、これを満たすように入射ビーム輸送系のパラメータを変更することにより達成した。これにより、蓄積ビーム強度は最適化前後で二倍近くの増加に成功した。一方で、ライフタイムを長くするためにチューンサーベイを行い、共鳴によるビームロスを測定した。この結果、三次共鳴線 $Q_x+2Q_y=10$ の共鳴補正を行うことでライフタイムが長くなることが分かった。この三次共鳴の影響を緩和するために、既存の六極電磁石を使い共鳴補正を行った。この結果、三次共鳴線 $Q_x+2Q_y=10$ によるビームロスを抑えることに成功した。

6. 謝辞

本研究を行うにあたり、協力をしてくださった加速器物理工学部の方々に感謝します。さらに、実験時に多大なる協力を受けた加速器エンジニアリングの方々にも同様に感謝します。

参考文献

- [1] Y. Hirao *et al.*, Nucl. Phys. A 538 (1992) 541.
- [2] K. Noda, *et al.*, Proc. EPAC2004, pp.2631.
- [3] T. Furukawa, *et al.*, in these proceedings.
- [4] L. J. Laslett, Proc. 1963 Summer Study on Storage Rings, BNL-7534, pp. 324-367 (1963)
- [5] G. Guignard, CERN report No. 78-11, 1978.