

# INCREASE OF STORAGE BEAM INTENSITY BY VERTICAL FEEDBACK DAMPING IN HIMAC

Kota Torikai, Koji Noda, Shinji Shibuya  
National Institute of Radiological Sciences  
4-9-1 Anakawa, Inage, Chiba, 263-8555

## Abstract

6MeV/u Argon beam stacking experiment using electron cooling (EC) has been executing in Heavy Ion Medical Accelerator in Chiba (HIMAC), in order to enhance beam quality, intensity and expand application. Beam loss has been observed at certain intensity due to rapid growth of vertical oscillation. Technique of analog feedback-damping (FBD) is introduced for suppressing the vertical oscillation and for increasing storage beam intensity.

## 垂直方向のフィードバック・ダンピングによる HIMACでのビーム蓄積量の増加

### 1. はじめに

放医研では、重イオン加速器HIMACによる重粒子線がん治療が1994年より開始され、治療患者数は2600名を超える。重粒子線はX線や電子線と異なり、ブラッグピークにより体内での飛程終端で最も多くのエネルギーを放出する。また重粒子線は明確な終端飛程が存在し、飛程以降の領域にほとんどエネルギー付与を行わない。この性質を生かし、健常組織へのダメージを従来方式より抑えた体内深部のがんに対する放射線治療が重粒子線によって行われており、その高い治療成績を受け重粒子治療施設のさらなる普及が期待されている。現在までの重粒子治療においては、治療計画システムによって設定された照射野に対し、ビームをワブラー電磁石で拡大し、多葉コリメータおよび真鍮製コリメータでビームを整形する。また深度方向の飛程はポリエチレン製ボラスで調節する。重粒子治療に際し作成に時間がかかるボラスおよびコリメータに代わり、スポット状ビームを3次元的に走査して照射野を形成する試みが為されている。ビーム蓄積量の増大は単位時間当たりの照射量を増加させ、治療時間の減少に寄与する。また高精度のビーム位置決めを実現するためには運動量偏差の小さいビームが不可欠である。高品質・大強度ビームの供給と応用を目標とし、電子冷却装置 (Electron Cooler :EC) が2000年にHIMAC下段リングに設置され[1]、現在まで研究が継続的に進められている。また放医研では達成目標とされる中期計画以降、高度な加速器・取り出し制御を複合させ、より多くの患者により高精度の重粒子線治療を行うため、次世代照射システムに関する研究が始められた。

ためには多数回の入射によるスタッキングが必要である。位相空間での衝突を避けるため、入射されたビームは次の入射までに十分な冷却を受けている必要がある。ビームロスを引き起こす原因としてはECソレノイド部における残留イオンの存在、真空度不良、イオンビーム軸と電子ビーム軸のずれ、ビームサイズおよび粒子密度に起因するtuneの変動などが挙げられる[2]。一度入射されたビームはECの電子ビームによって冷却を受け続ける。冷却によってビームの粒子密度がある一定以上の閾値に達すると特にvertical方向で不安定性振動が成長し大きなビームロスを生じる。大強度ビームを目標とするJ-PARC等でも共通の問題が生じている。振動の発生に対し、逆位相のキック力をリングの一点で与え制振する方法をフィードバック・ダンピング(FBD)と呼ぶ。先に行われた京都大学L-LSRでの陽子ビーム蓄積における実験の成功[3,4]を受け、HIMACにおけるビーム蓄積量の増加を目標としFBD試験を行った。

表1 実験パラメータ

項目	HIMAC
Charged Particle	Argon(40, 18+)
Z / A	0.45
Beam Kinetic Energy	6MeV / u
Revolution Frequency	260kHz
$\gamma / \beta$	1.00639659 / 0.1125676
Circumference	129.796m
Horizontal Tune	3.70
Vertical Tune	3.13

### 2. フィードバック・ダンピング (FBD)

限られたビーム入射強度でビーム強度を増大する

## 2. 単バンチによる振動抑制の確認

まずFBDの効果を1バンチビーム強度およびビーム振動について比較した。実験は6MeV Arビーム入射とし、単バンチでvertical振動を励起するため電子ビーム電流 $I_c=200\text{mA}$ 、電子ビーム径:イオンビーム径=3:1の条件で実験を行った。使用した信号の流れを図1に示す。ビームは6.6sec間隔で主リングに入射される。結果を図2に示す。FBDにより振動の発生が抑制されていることが確認された。

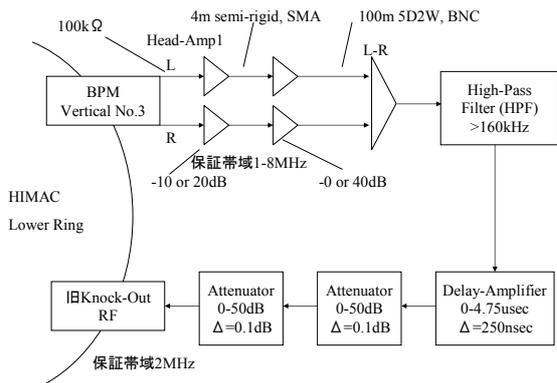


図1 FBD回路信号図

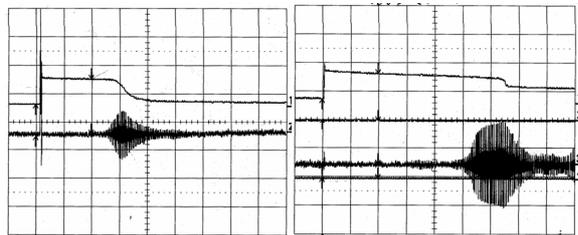


図2 単バンチ入射におけるビーム強度 (上) および垂直方向振動 (下) 左図/右図: FBD無/有  
0.5sec / div

## 3. FBDによるビーム蓄積量増加

電子ビーム電流 $I_c=100\text{mA}$ としFBDの有無によるビーム蓄積量の比較を行った。図3にビーム蓄積結果を示す。FBDのない状態ではビーム強度1.2mA付近で振動しビームロスを起こしていたが、FBD追加により安定してビームを保持できた。

## 3. FBD周波数帯域の増加

遅延回路の帯域が1MHzであったことを受け、BNCケーブルとDC-10MHz帯域補償アンプによって遅延回路を構成しビーム蓄積量の更なる増加を試みた。図4に帯域を改善したFBDにおけるビーム蓄積実験の結果を示す。このときビームの瞬間最大強度は0.12mAであり、帯域補償アンプの効果が十分に現れなかった。また帯域改善後に垂直方向振動の周波数成分を測定した結果、図5に示す通り16MHzを

基本周波数とする高調波成分が新たに発生していることがわかった。この高調波成分の発生原因については現在調査中である。

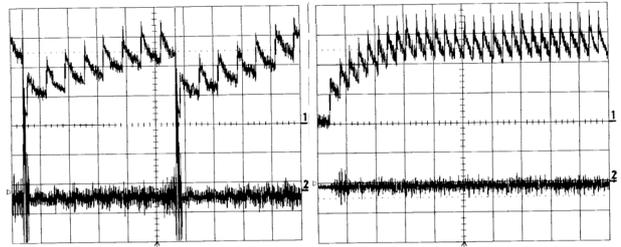


図3 FBDを用いない場合のビーム強度 (左上、5sec/div) およびFBDを用いた場合のビーム強度 (右上、10sec/div) (ビーム強度: 0.05mA/div) 下段: 垂直方向振動

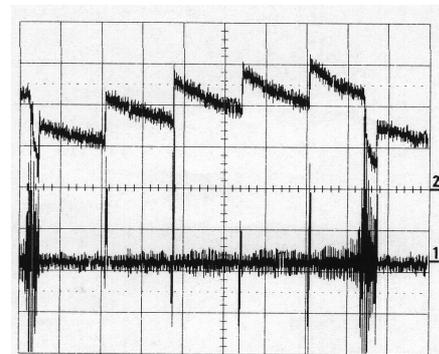


図4 帯域改善後のビーム強度 (上) および垂直方向振動 (下) 0.5sec / div、0.05mA/div

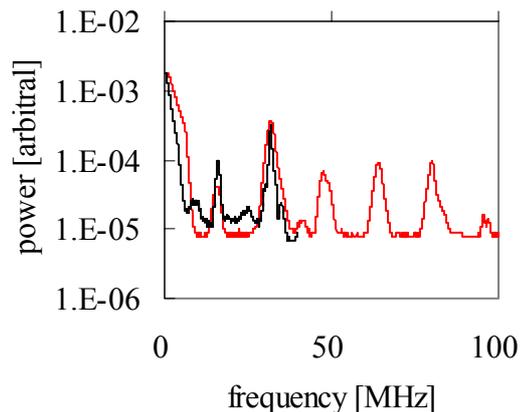


図5 ビーム振動時の振動周波数成分

## 参考文献

- [1] K. Noda, et al., "Electron cooler for medical and other application at HIMAC", NIM A441 (2000)159-166.
- [2] T. Uesugi, K. Noda, E. Syresin, I. Meshkov and S. Shibuya, NIM A 545 pp.45-56 (2005).
- [3] 藤本慎司, WO22, in this proceedings.
- [4] 中村剛, TP56, in this proceedings.