

2019年8月2日
第16回加速器学会年会
講演番号 FROH11

シンクロトロンからの 取り出しビーム軸の安定化

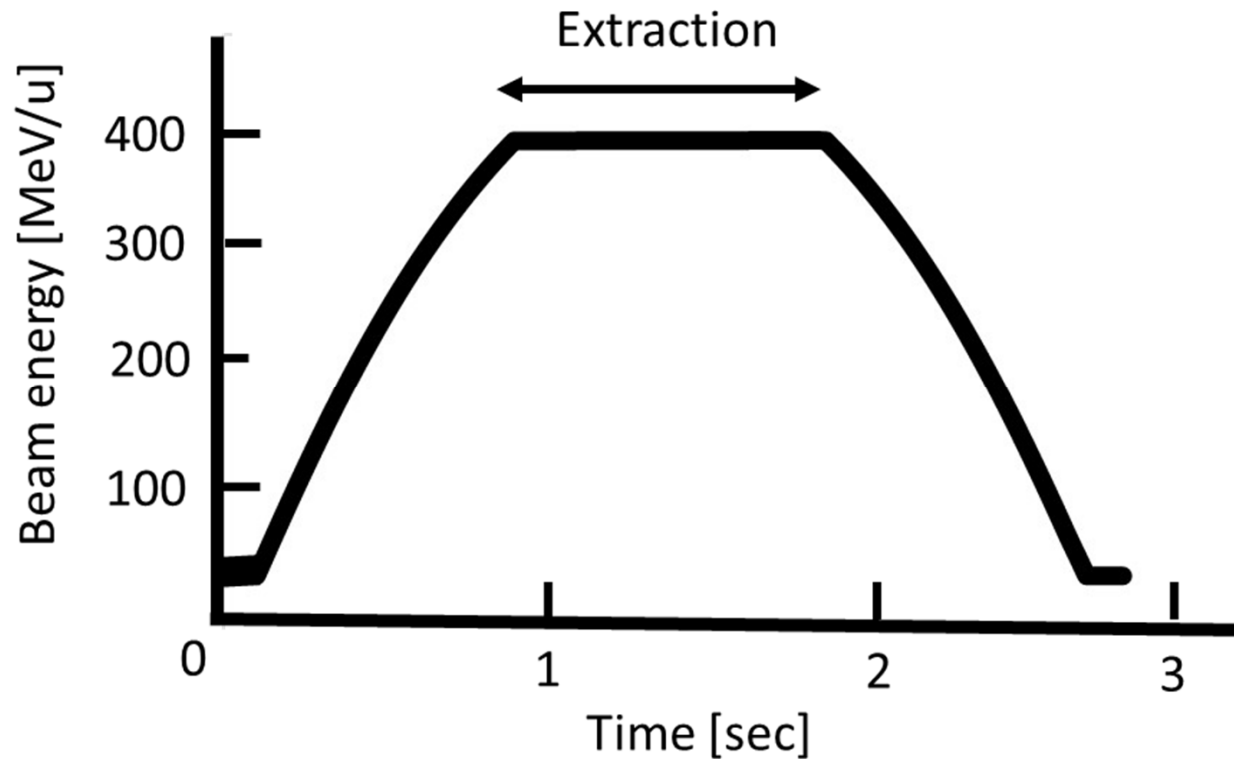
友亮人^{A)} 想田光^{A),B)} 遊佐顕^{A)} 田代睦 ^{A)}

A) 群馬大学 重粒子線医学研究センター

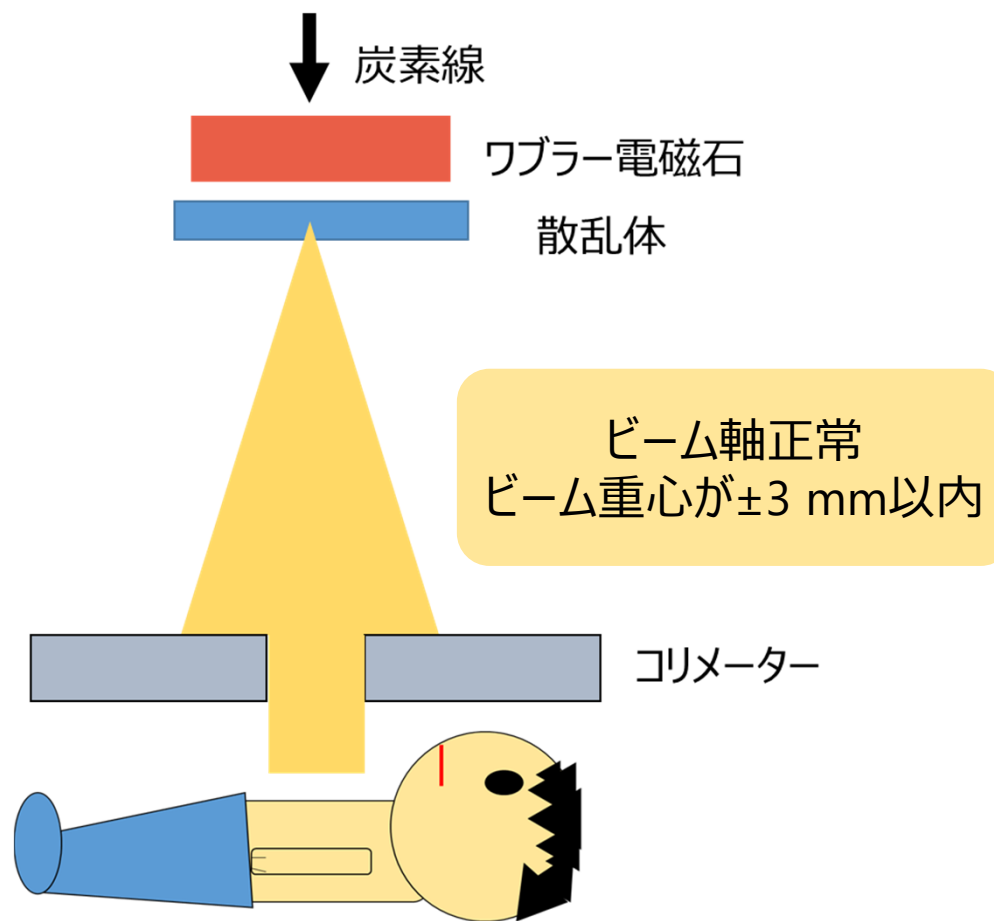
B) 山形大学

群馬大学重粒子線医学センターでは最大エネルギー
400MeV/uの炭素ビームを用いて悪性腫瘍治療を行っている

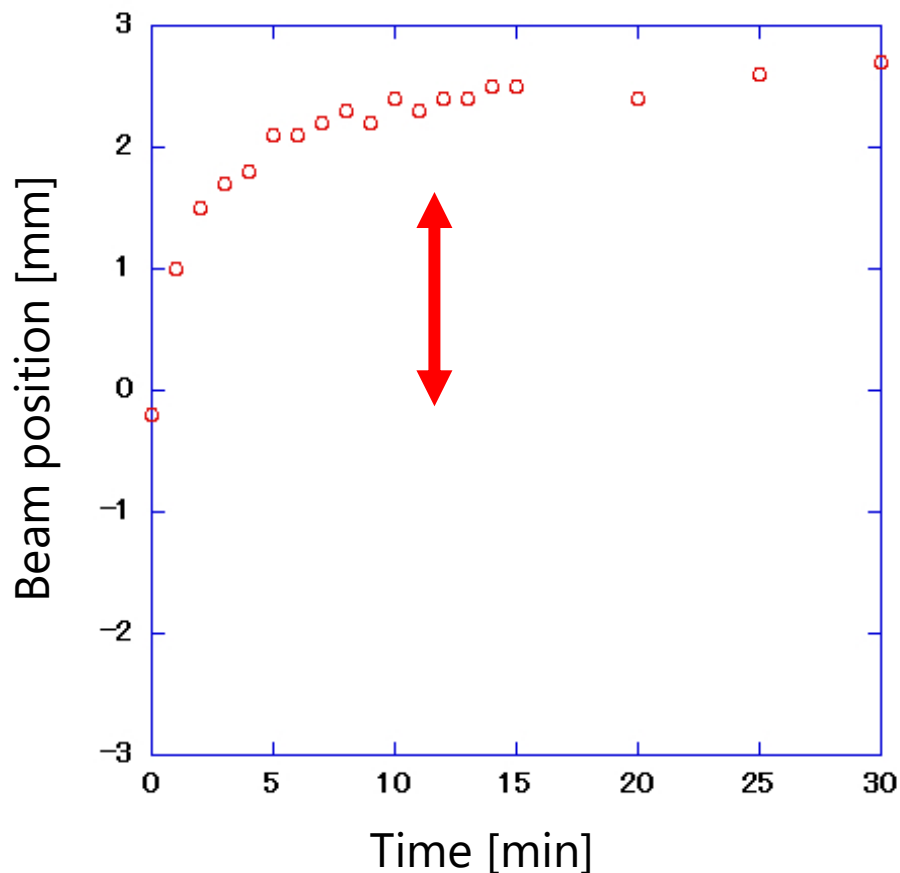
約 3 秒周期のパターンを繰り返して運転している



粒子線治療において、ビーム軸の安定性は
治療計画時と実際の照射のパラメータを一致させるための
重要な要素である



現状、シンクロトロンの初期化から数分間で
ビーム軸に変動が生じている



偏向磁石が初期化時よりも低い電流を
繰り返すことによる、ヒステリシスによる
Closed Orbit Distortion(COD)の影響と考
えられる*

* H. Souda et al. Jpn. J. Med. Phys. 36, 184, 2016.

治療運用では、 ± 2 mmを越えた際、
マシンタイムを用いて、ビーム軸調整を
行っている

さらに安定した治療条件の実現、
ビーム軸調整を行う時間短縮のため

ビーム軸の時間変動を抑制した光学系の設計を検討した

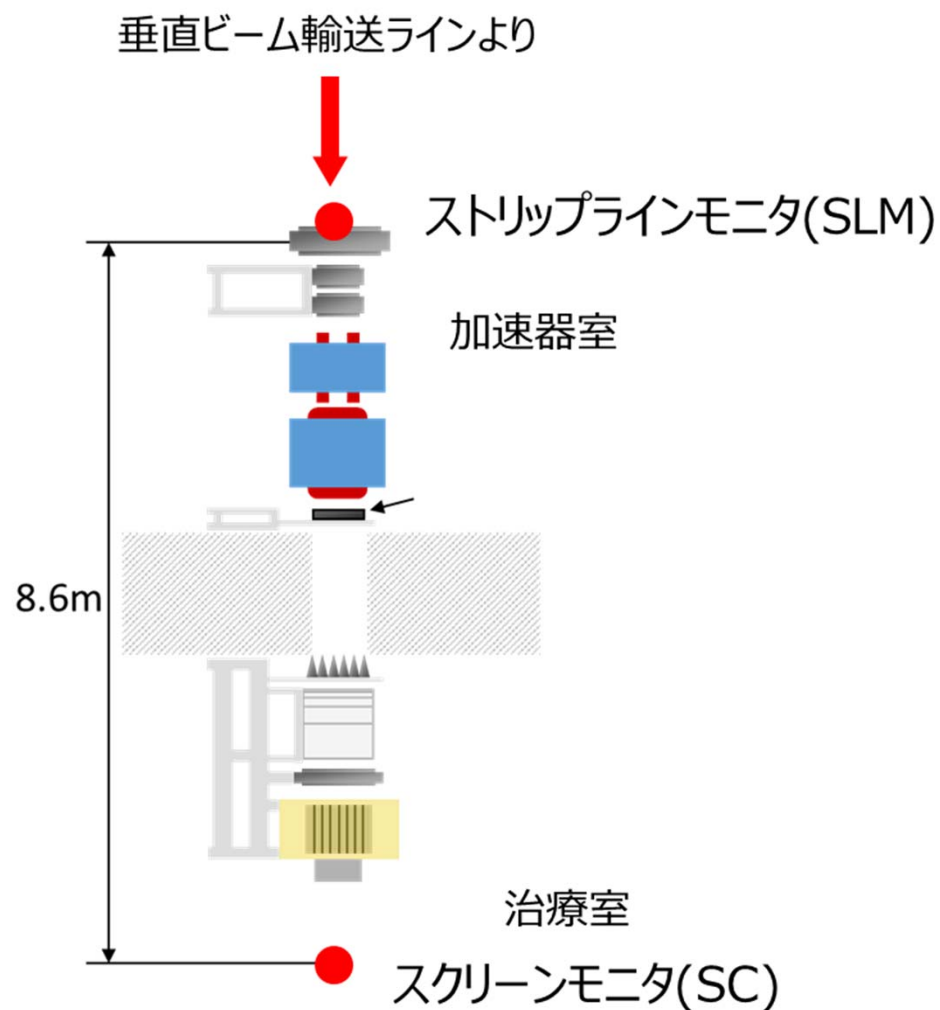
【条件】

- 薬機法に抵触しないため、ビームパラメータの変更のみを行なう
- 現在の治療用データとビーム形状等を一致させる

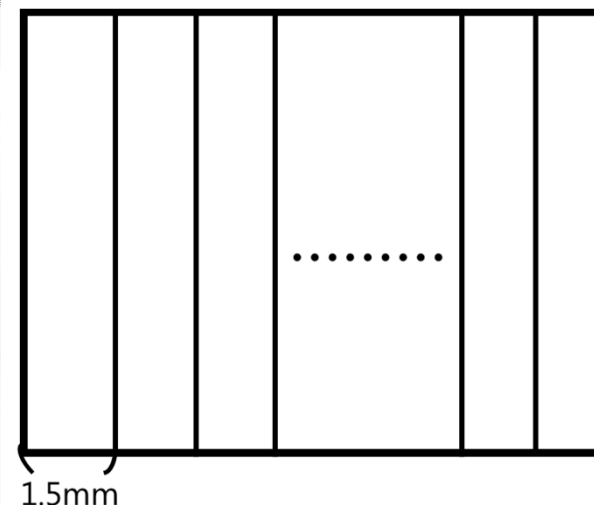
ビーム軸変動を抑えるために、

- 現在のビーム軸変動量の調査
- ビーム軸変動の原因と思われるCOD、Dispersionからの影響調査
- 新規光学系の設計と検討

治療室C垂直コースにおいて290MeV/uビームを用いて
0-30分間の長時間ビーム軸計測を行った

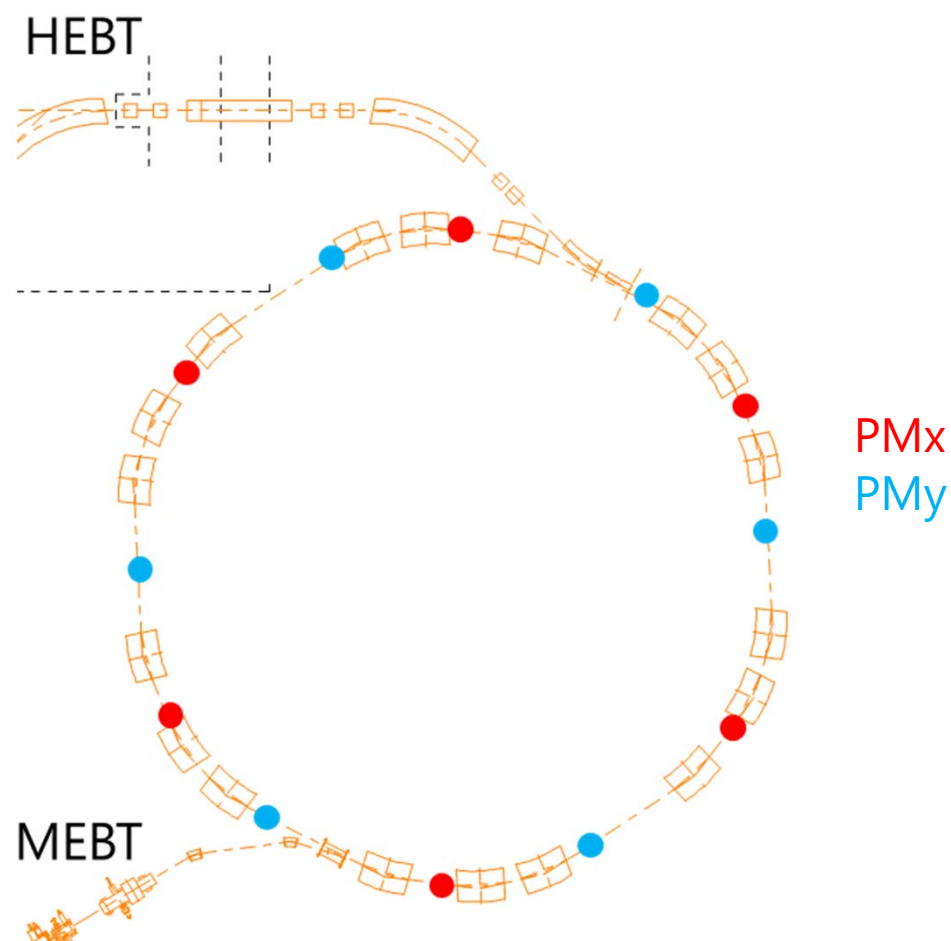


スクリーンモニタ(SC)
X線増感度紙
(FUJIFILM)



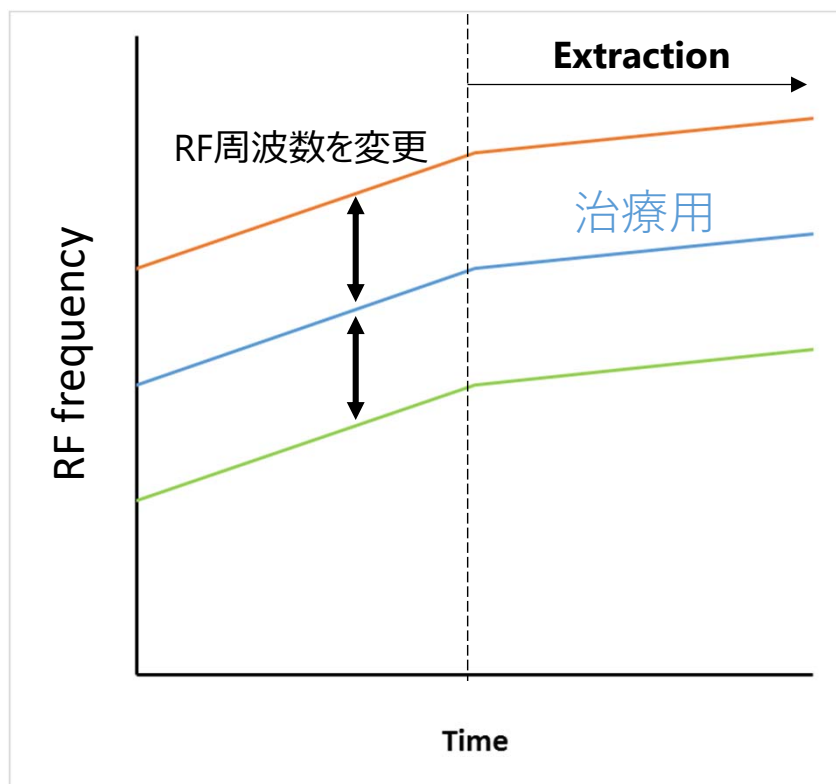
ストリップラインモニタ(SLM)
電極数 30本
電極間隔 1.5mm

シンクロトロン内の静電ビームポジションモニタ(PM)を用いて、
0-30分間の長時間COD測定を行った

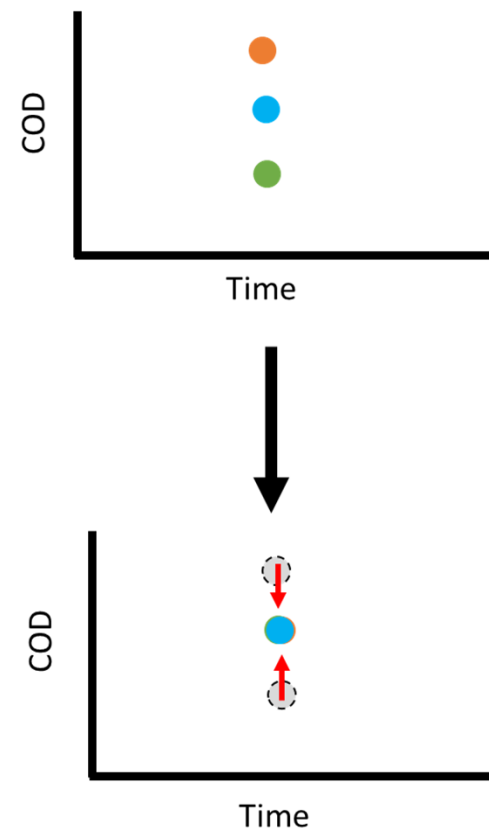


GHMCではビーム加速による遅い取り出し法を採用している*
 →取り出し時のエネルギー変化によって
 ビーム軸変動が生じない条件が可能な検討を行った

* T. Fujimoto et al. Nucl. Instrum. Meth. A812 68-72, 2016.

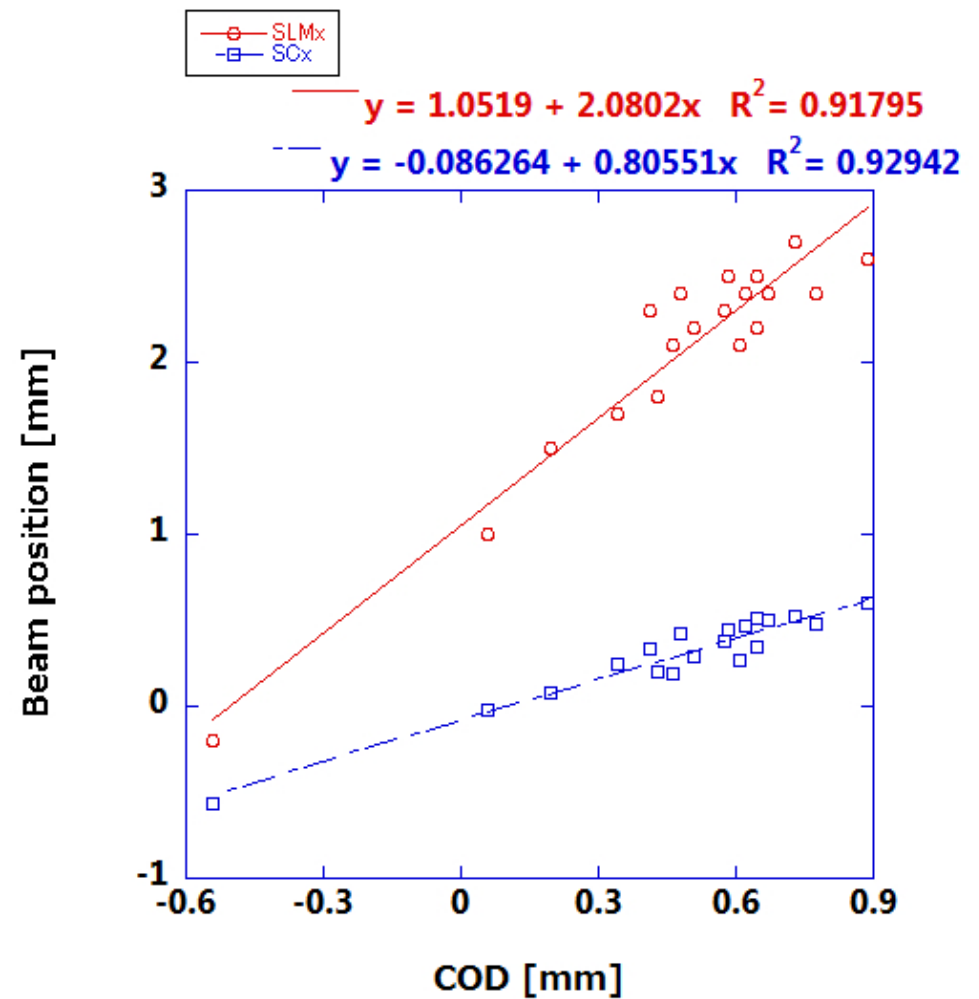
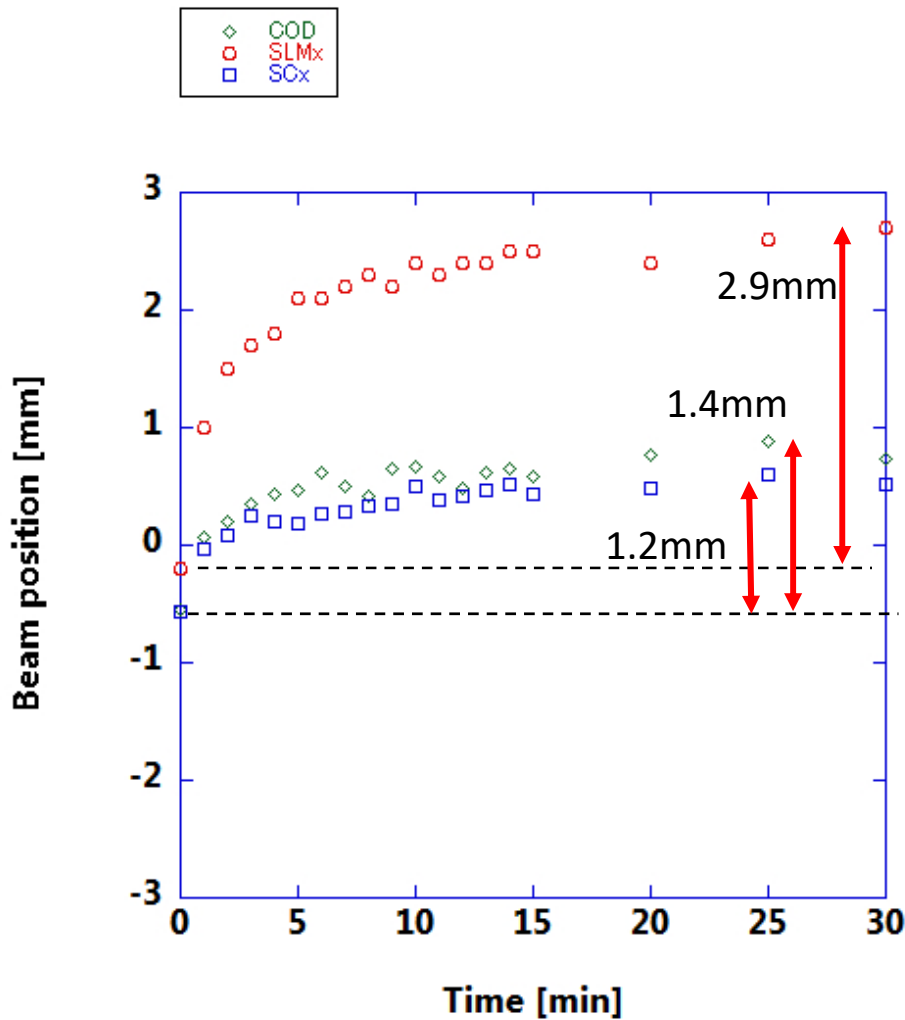


加速完了時のRF周波数を変更し、
 エネルギーを変更した

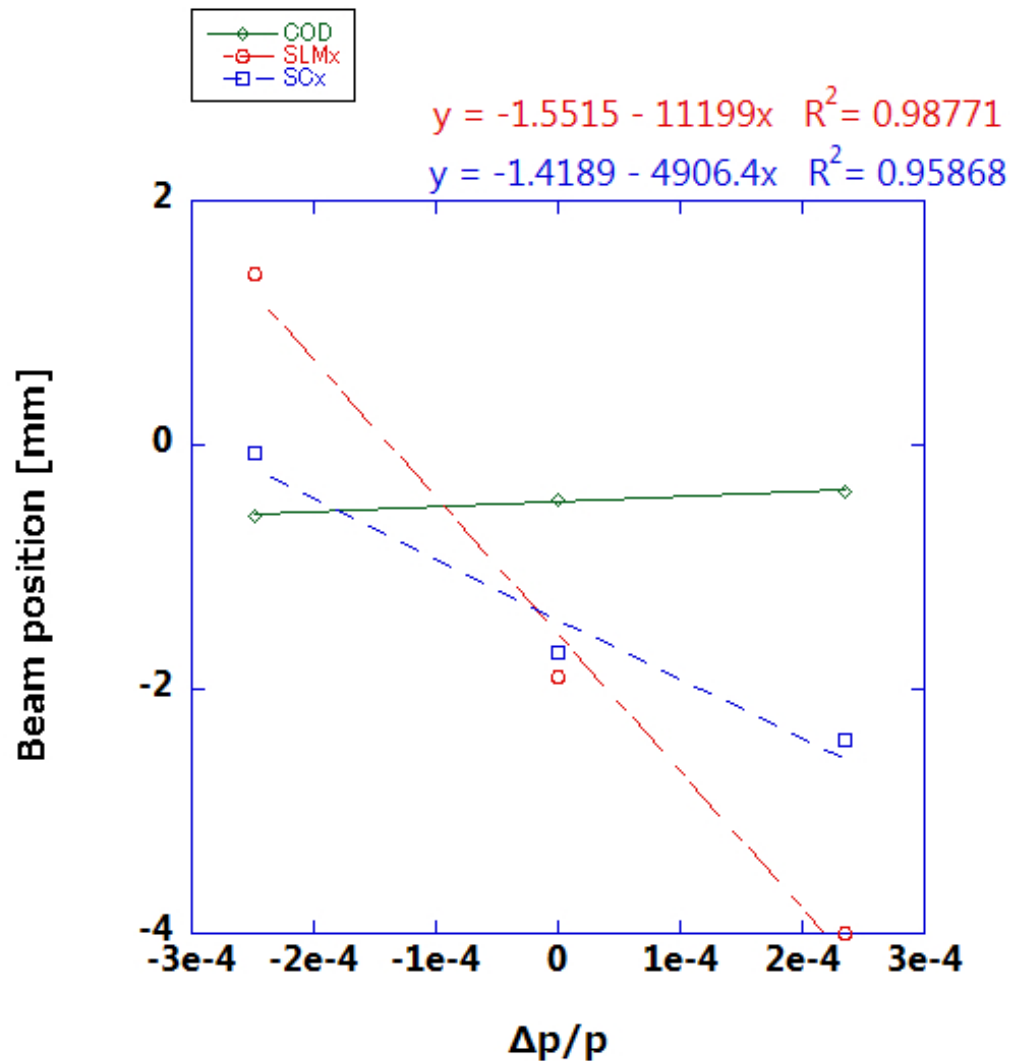


ステアリング電磁石を用いて、
 CODを基準値に戻した

COD変動とビーム軸変動に線形関係が確認された



COD変化を打ち消しても、 $\Delta p/p$ の変化によって
ビーム軸変動が生じていることが確認された



SLM、SCは起動1分後計測
CODは起動3分後計測

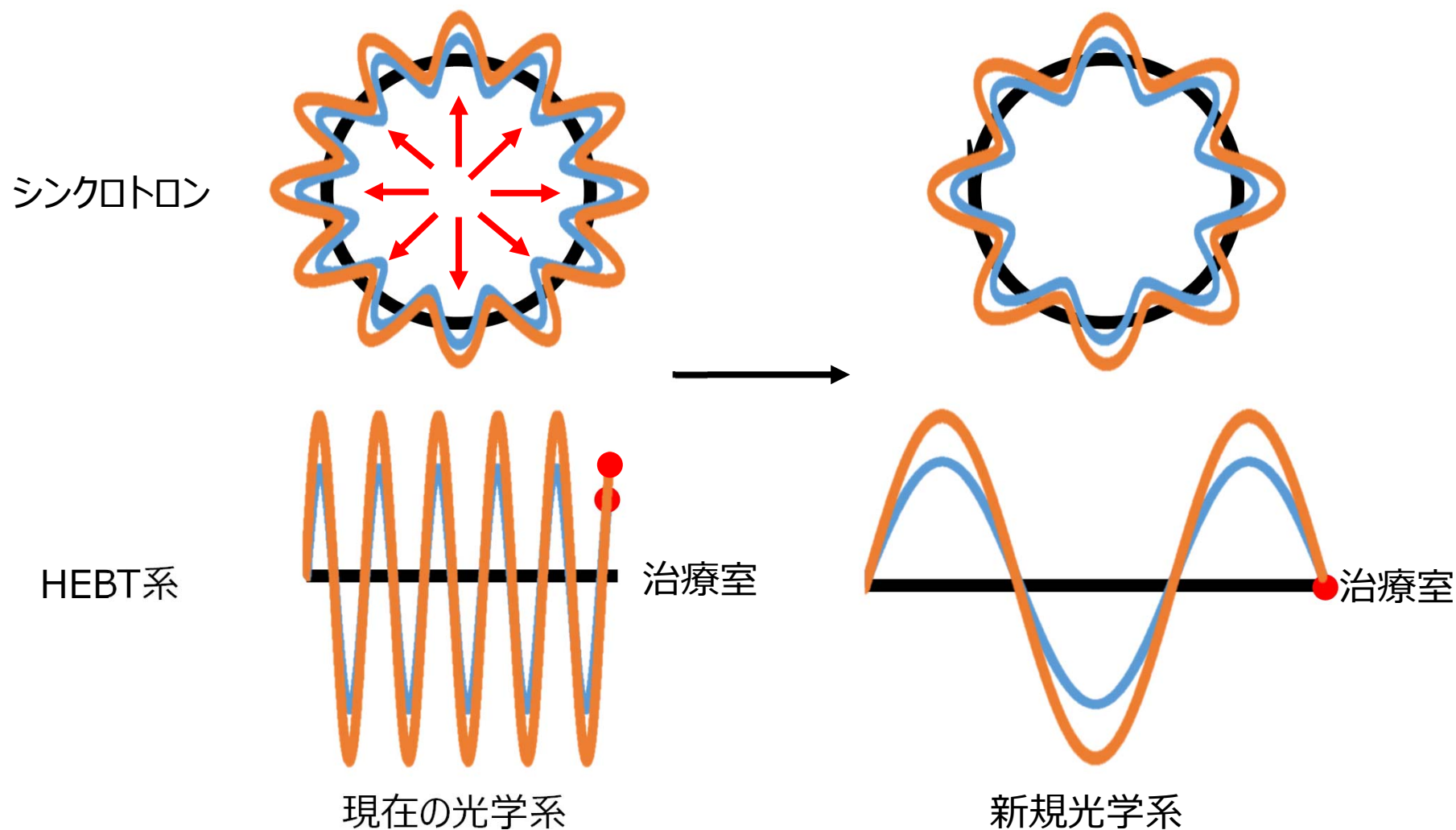
ビーム軸が $\Delta p/p$ と線形関係



CODのみでなく、 $\Delta p/p$ も
ビーム軸変動に影響を与えている

新規光学系設計

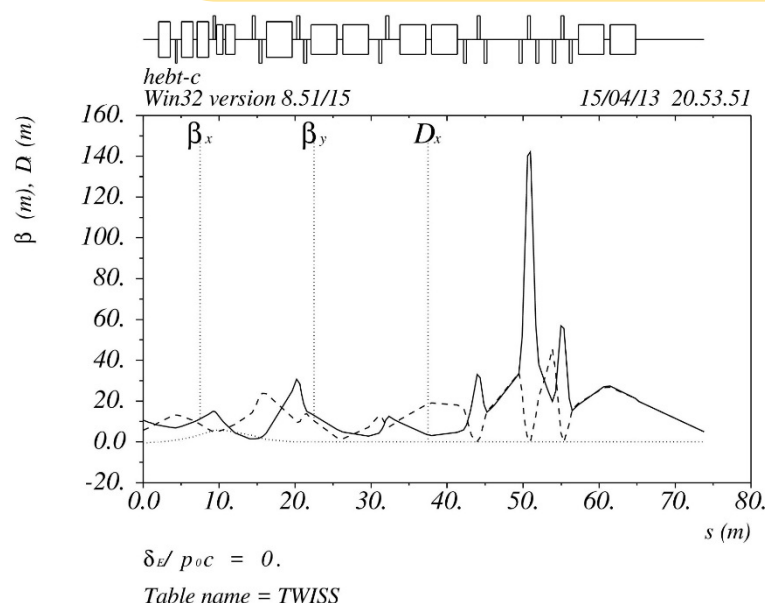
ベータatron位相の調整によるビーム軸変動の抑制



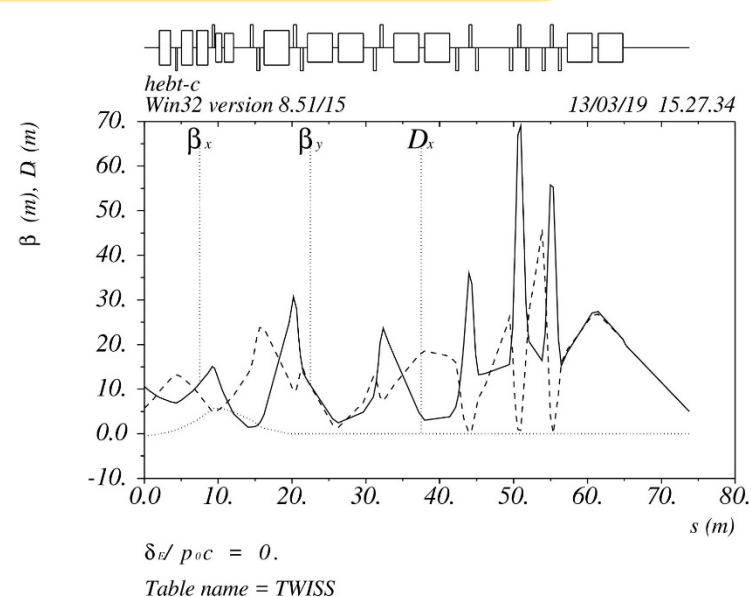
MAD8を用いたシミュレーションにより、
ベータatron位相を適切な位置に調整した

【条件】

- 治療用データと一致させるために治療室で、
 $\alpha = 0, \beta = 5[m], D_x = 0 [m], D_{x'} = 0$
- HEBT全体で、 $\beta_x < 100$
- SLM、SCでのビーム位置変動を小さくする

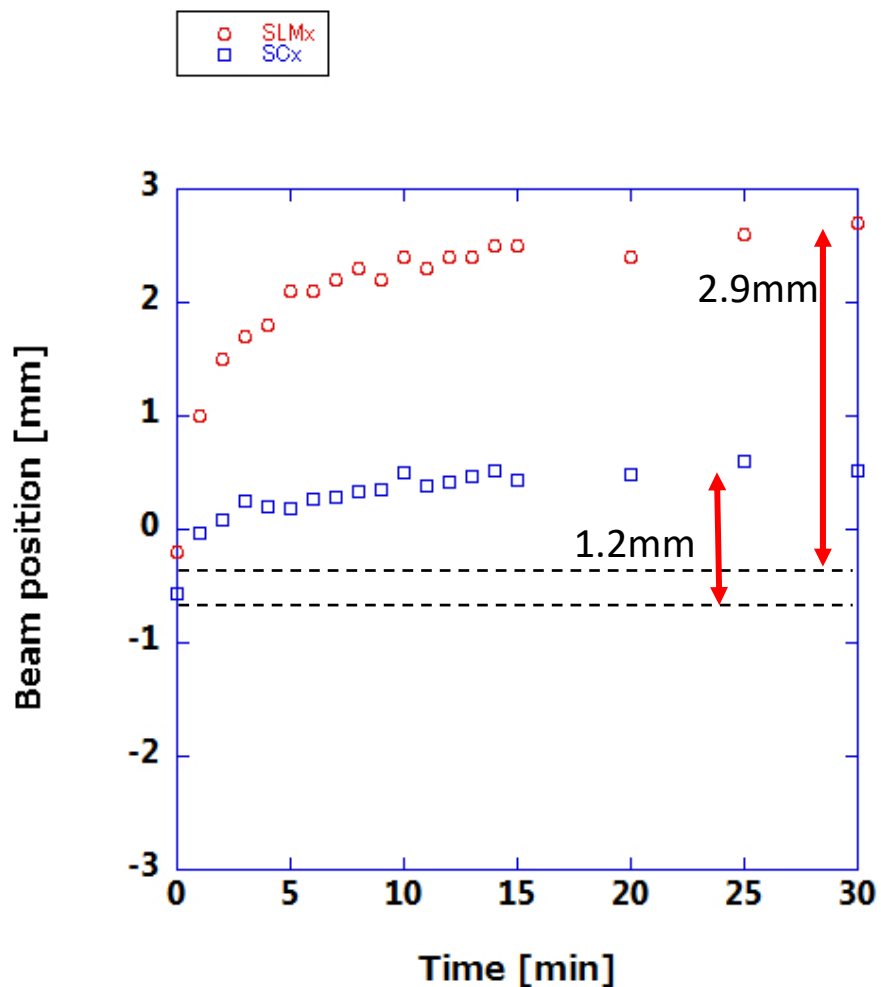


現在の光学系

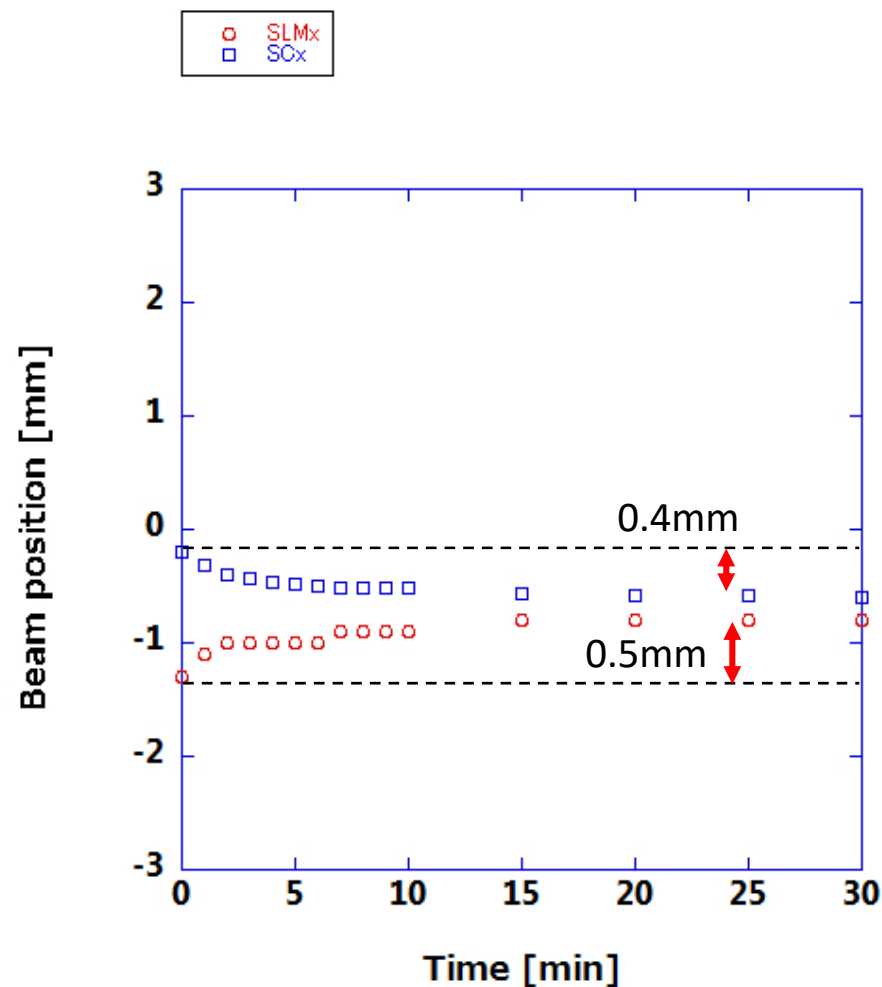


新規光学系

ベータatron位相の調整により、ビーム軸変動を抑えることに成功した



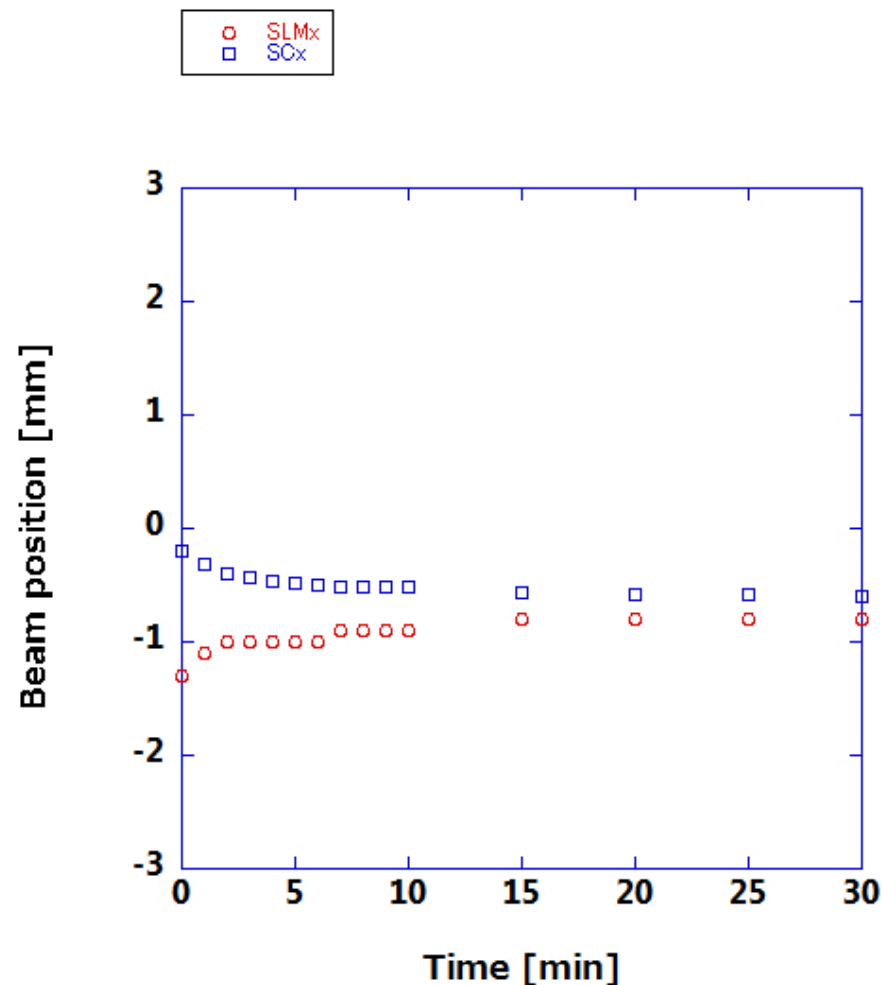
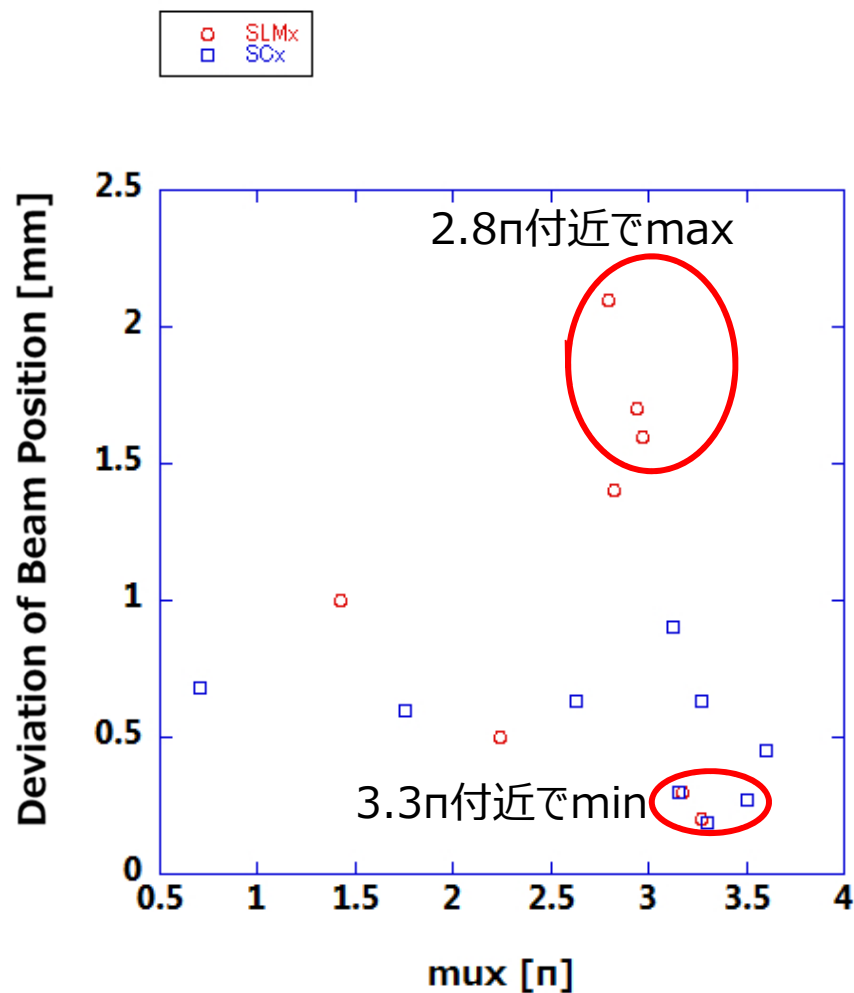
現在の光学系



新規光学系

S-QF3から、
 $\mu_{ux} = 3.174\pi$ (SLM), 3.506π (SC)

ベータatron位相の調整により、ビーム軸変動を抑えることに成功した



新規光学系

S-QF3から、

$\text{mux} = 3.174\pi$ (SLM), 3.506π (SC)

- 長時間のビーム軸変動の測定を行った
- COD、出射時運動量変化の両方がビーム軸変動に影響を与えている
- ビーム軸変動を抑えるために、新規光学系の設計を行った
その結果、最大0.5mmの変動量に抑えることができた
- ベータatron位相が 3.3π 付近で変動量最小、
 2.8π 付近で変動量最大となった

今後

- ベータatron位相とビーム軸変動量の関係性の更なる調査
- 治療に用いる更に良い条件の調査

本研究はGHMCのマシントイム利用の一環として行われました。

実験からデータ取得において、日立製作所の運転技術員の皆様と
加速器エンジニアリング株式会社の皆様には多くのご協力をいただきました。