

CONCEPTUAL DESIGN OF COMPACT SYNCHROTRON FOR CARBON ION THERAPY

Fumiaki Noda #, Takahiro Yamada, Kazuo Hiramoto
 Hitachi, Ltd., Hitachi Research Laboratory
 7-2-1 Omika-cho, Hitachi-shi, Ibaraki, 319-1221

Abstract

Hitachi has been developing the proton beam therapy system using scanning irradiation method. On the other hand, recently, the needs of carbon therapy system have been rising with its dose concentration and biological effect. Hence, we have carried out the conceptual design of compact carbon synchrotron based on the technologies of proton therapy system. The circumference of this synchrotron is about 50 m but this synchrotron is applicable to the maximum energy of 430 MeV/u because of realization of 30 cm range in water. In this paper, the overview of optics design of this synchrotron is described.

炭素線治療用小型シンクロトロンの概念設計

1. はじめに

近年、線量集中性や高い生物学的効果から炭素線治療への期待が高まっている[1]。日立では陽子線治療においてスポットスキニング実用化のため様々な技術を開発してきた。一方、炭素線に関しては、陽子線で培った技術を活用したシンクロトロンの設計を進めてきた[2,3]。今回、シンクロトロンの小型化を図り、周長 50m、430MeV/u 対応のシンクロトロンの設計をした。以下では本シンクロトロンの光学設計を中心に説明する。

2. シンクロトン基本光学系

新設計シンクロトロンの主要パラメータ、主要機器の配置を表 1、図 1 に示す。本シンクロトロンの特徴は二回対称型の光学系としている点である。これにより対称性によって生じるデッドスペースをなくし、小型化を図っている。二番目の特徴は出射用静電デフレクタ ESD と出射用セプタム電磁石 ESM1 間に収束用四極電磁石 QF を配置しないことで出射ビームに不要な蹴り戻しが発生しないように設計している点である。これにより ESD、ESM1 の負荷を低減し、シンクロトン小型化と 430MeV/u 対応の両立を図っている。三番目の特徴として出射用バン

プ電磁石 EBMP と軌道補正用電磁石 HST、共鳴励起用六極電磁石と水平方向クロマティシティ補正用六極の共用化による機器数の削減により小型化を図っている点あげられる。

以上の施策により本シンクロトロンは周長を 50m に抑えつつ、C⁶⁺を 430MeV/u まで加速可能とした。

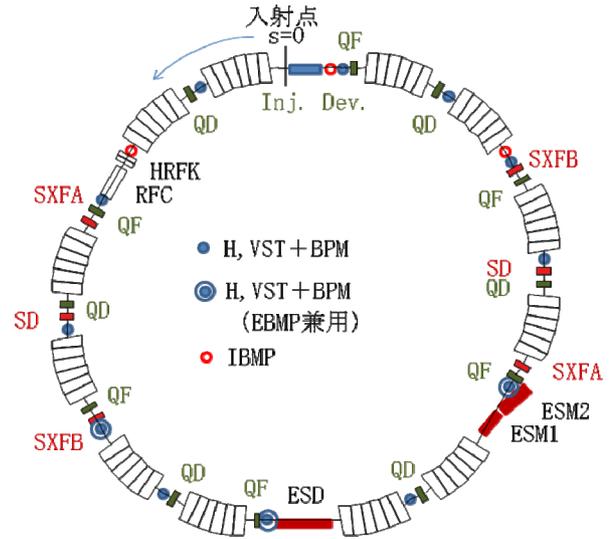


表 1：シンクロトン主要パラメータ

項目	単位	値
周長	m	50
入射エネルギー	MeV/u	4
出射エネルギー	MeV/u	140~430
偏向電磁石強度	T	~1.65
アクセプタンス	π .mm.mrad	水平：250, 垂直 30
		$\Delta p/p = \pm 0.4\%$

BM：偏向電磁石
 QF, QD：収束・発散用四極電磁石
 IBMP：入射用バンブ電磁石
 H, VST：水平・垂直軌道補正用電磁石
 RFC：高周波加速空洞
 INJ. DeV：入射用機器
 HRFK：出射用高周波キッカ
 SXFA, B, SD：六極電磁石
 EBMP：出射用バンブ電磁石
 ESD：出射用静電デフレクタ
 ESM：出射用セプタム電磁石

図 1：シンクロトン機器配置

シンクロトロンの主要光学パラメータを表 2 に、ベータ関数、分散関数を図 2 に示す。基本光学系は FODO 型で構成されており、入射・加速時のチュー

fumiaki.noda.uz@hitachi.com

ン動作点は $(\nu_x, \nu_y) = (1.72, 1.43)$ を想定している。四極電磁石 QF, QD はベータ関数、分散関数を極力抑えるため、偏向電磁石 (BM) を 12 分割し、各 BM 間に配置する。また入出射、高周波加速に必要なスペースを確保するため長直線部を四か所に設けている。超周期は 2 とすることでビーム出射用機器の負担軽減に適した機器配置を実現するとともに、分散関数に変調をかけ、遷移ガンマ γ_t を 1.7 以上 (430MeV/u 時の γ は 1.4) とし、誤差磁場、運動量誤差等に対する出射ビーム位置変動の安定性を高めた。クロマチシティ ξ は表 2 に示す通りで十分に ξ 補正可能な範囲である。

表 2 : 光学系主要パラメータ

項目	値	
	入射時	出射時
動作チューン (ν_x, ν_y)	1.72, 1.43	1.685, 1.43
遷移ガンマ γ_t	1.75	1.7
クロマチシティ (ξ_x, ξ_y)	-0.79, -1.06	-0.69, -1.01

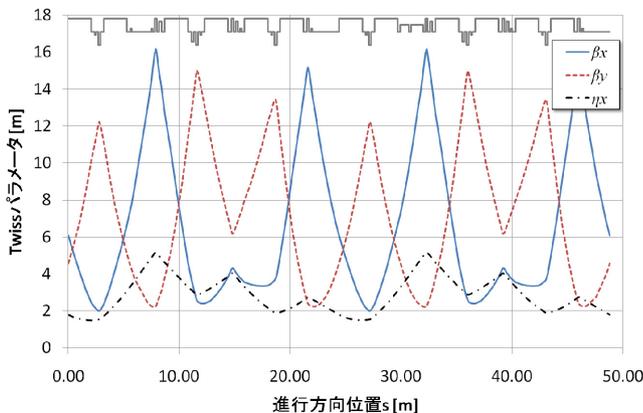


図 2 : シンクロトロン 1 周のベータ関数 分散関数 (入射時)

3. ビーム入射

ライナックで 4MeV/u まで加速した C^{4+} ビームは低エネルギー輸送系で C^{6+} に変換し、シンクロトロンに入射する。入射は多重回転入射法を用いて行う。入射に用いる機器は図 1 に示す IBMP と INJ. Dev. と示した静電インフレクタならびに入射用セプタム電磁石である。

入射終了時点における目標蓄積粒子数は 5×10^9 particles/pulse とした。リニアックのピーク電流を 200 μ A とした場合、必要な実効入射ターン数は 13.8 ターンとなる。図 3 に入射終了後の水平方向エミッタンス ϵ_x に対する実効入射ターン数を示す。ここで入射ビームの水平・垂直エミッタンスは 4.8π mm.mrad (非規格化、ガウス分布 1σ)、運動量分散は $\pm 0.12\%$ (ガウス分布 1σ) とした。図 3 より目標とする実効入射ターン数を達成するため ϵ_x は 230π .mm.mrad とした。なお垂直方向チューンシ

フト量は RF 捕獲時のバンチングファクタ 0.4 を考慮しても -0.095 に抑えられている。

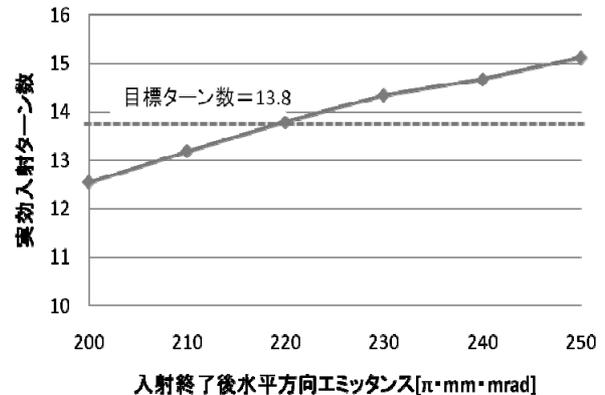


図 3 : 実効入射ターン数の水平方向エミッタンス依存性

4. ビーム取り出し

ビームの取り出しは $\nu_x=5/3$ を用いた三次共鳴出射により行う。目標とする出射効率は 90% とした。出射に用いる機器は図 1 に示す静電デフレクタ ESD、出射用パンプ電磁石 EBMP、出射用セプタム電磁石 ESM1,2、共鳴励起用六極電磁石 SXFA、SXFB ならびにビーム拡散用高周波キッカ HRFK である。ESD と ESM1 間には出射ビームに四極電磁石による蹴り戻しが発生しないように収束用四極電磁石を配置しない機器配置とすることで HRFK, ESD, ESM の負荷を下げ、シンクロトロン小型化と 430MeV/u 対応を両立させた。また、本シンクロトロンでは出射中 SXFA、SXFB、QF、QD、EBMP を固定したまま、HRFK によって周回ビームを広げビームを取り出す [4]。そのため制御が単純で出射ビームの位置、傾きの変動を抑えられる点も特徴の一つである。

共鳴励起用六極電磁石 SXFA、SXFB はクロマチシティ補正にも使用できる配置とし、機器スペースを削減している。また出射用パンプの形成に 3 台の電磁石 EBMP を使用するが、いずれも水平方向軌道補正用電磁石 HST と共用とした。

出射用静電デフレクタ入口での水平方向位相空間における周回ビーム分布の一例を図 4 に示す。周回ビームの水平エミッタンスは 50π mm.mrad とした。出射時のチューンは $(\nu_x, \nu_y) = (1.685, 1.42)$ とし、ESD 入口での周回ビームと出射ビームのセパレーションを 10mm となるように SXFA、SXFB を調整することで出射効率 90% を達成できる見通しを得た。出射時エミッタンスは出射時チューン、もしくは SXFA、SXFB および EBMP の調整で $20 \sim 100 \pi$ mm.mrad に対応可能である。最終 3 ターン軌道は図 5 に示す。いずれも周回ビーム通過領域に収まるように設計した。ESD 以降の出射ビームの軌道は図 6 に示す。BM の大型化を避けるため BM 領域での変位を抑えるよう考慮して設計している。ESD, ESM の主要設計値は図 6 中に示した通りである。

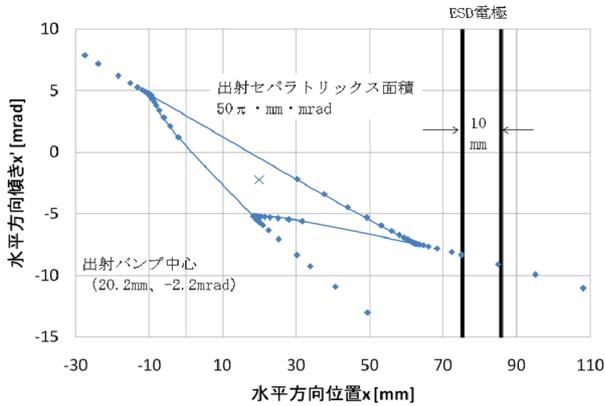


図4：ビーム位相空間分布（出射時・水平方向）

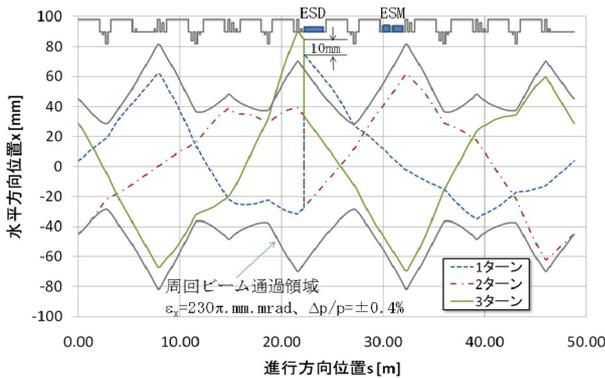


図5：最終3ターン軌道

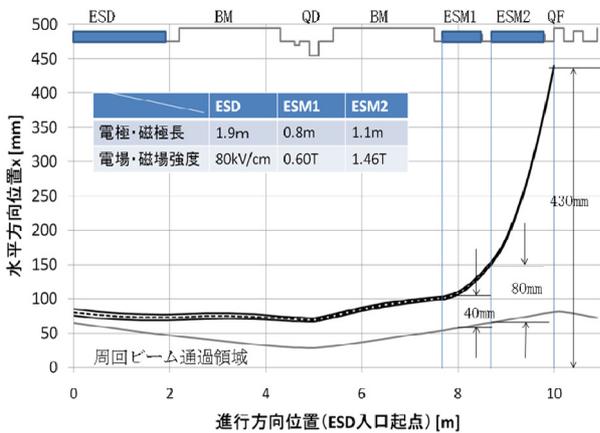


図6：出射軌道

5. ダイナミックアパーチャ (DA)

一般的に低対称化に伴い構造共鳴密度が高まるためビーム不安定性が増す。ここでは光学系の違いによる共鳴構造の違いを調べるため、影響の大きな共鳴源の代表として渦電流が作る六極成分に着目する。

図7に(a)六回対称と(b)二回対称シンクロトロンでのDAサーベイの結果を示す。ダクトは3mm厚のInconelを想定し、ビームへの影響が最大となる加速開始後約40msでのDAを示している。対称性を低くしたことで共鳴構造が大きく変わるが運転領域に問題となる共鳴は発生しないことが分かった。実設計ではクロマティシティξを抑えるため渦電流起因の六極成分強度を抑える必要がある。ダクト厚を1mm以下とすることで十分なDAを確保できるとともに、 $|\xi_{x,y}|$ を5以下に抑えられ、DAを確保しつつξ補正も可能となることを確認した。従来法では渦電流自体を低減するため薄肉ダクトを用いるが、より構造が簡単な渦電流補正ダクトの検討も併せて進めている[5]。

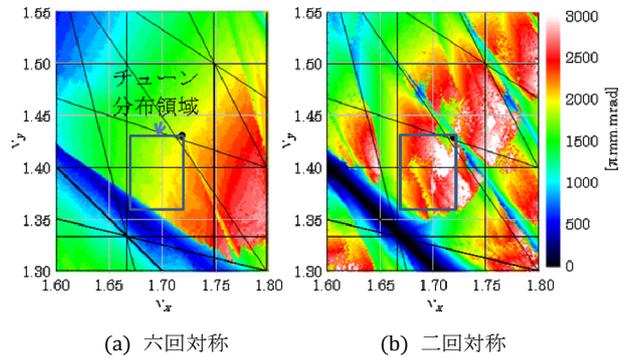


図7：ダイナミックアパーチャ（加速開始後約40ms後）

6. まとめ

低対称化、機器共用化等により周長50mで430MeV/u対応可能なシンクロトロンの光学設計を行い、入出射解析により目標とした蓄積粒子数ならびに出射効率が達成できることを確認した。また低対称化による共鳴構造の違いを確認するため六回対称と二回対称シンクロトロンについてダイナミックアパーチャの比較を行い、従来通り薄肉ダクトを用いれば問題のないことを確認した。

以上により基本光学設計段階での成立性が示された。今後、引き続き詳細設計を進める予定である。

参考文献

- [1] H. Tsujii, et al., "Clinical advantages of carbon-ion radiotherapy", New Journal of Physics 10, 2008
- [2] F.Noda, et al., "炭素・陽子併用シンクロトロンの概念設計", Proceedings of the 97th Scientific Meeting of JSMP, 154-155, April. 17-19, 200
- [3] F.Noda, et al., "CONCEPTUAL DESIGN OF CARBON /PROTON SYNCHROTRON FOR PARTICLE BEAM THERAPY", Proceedings of PAC, 1300-1303, May. 4-8, 2009, <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/PAC2009/papers/tu6pfp006.pdf>
- [4] K. Hiramoto, et al, Nucl. Instr. Meth., A322, p.154, 1992
- [5] T.Yamada, et al., "シンクロトロンにおけるビームダクト渦電流の補正手法の開発", 第8回日本加速器学会年会(TUMH08)