

陽子線がん治療システム用超伝導 AVF サイクロトロンの基本設計

BASIC DESIGN OF A SUPERCONDUCTING AVF CYCLOTRON FOR PROTON THERAPY SYSTEM

筒井裕士^{#,A)}, 密本俊典^{A)}, 戸内豊^{A)}, 上田隆正^{A)}, 宇野浩一^{A)}, 渡澤恵一^{A)}, 矢島暁^{A)},
橋本篤^{B)}, 三上行雄^{B)}, 三堀仁志^{B)}, 吉田潤^{B)}, 湯本健太^{B)}

Hiroshi Tsutsui^{#,A)}, Toshinori Mitsumoto^{A)}, Yutaka Touchi^{A)}, Takamasa Ueda^{A)}, Kouichi Uno^{A)}, Keiichi Watazawa^{A)},
Satoru Yajima^{A)}, Atsushi Hashimoto^{B)}, Yukio Mikami^{B)}, Hitoshi Mitsubori^{B)}, Jun Yoshida^{B)}, Kenta Yumoto^{B)}

^{A)} Industrial Equipment Division, Sumitomo Heavy Industries, Ltd.

^{B)} Technology Research Center, Sumitomo Heavy Industries, Ltd.

Abstract

We made design study of a 4 Tesla superconducting AVF cyclotron for proton therapy. Its yoke weight is 55 tons, which is about one fourth of our normal conducting 230 MeV cyclotron. In order to reduce the size and the weight without deteriorating the beam stability, the hill gap around the outer pole radius is made small. Calculated extraction efficiency is higher than 60%, by arranging the extraction elements properly. Liquid-helium free low temperature superconducting coil using NbTi wire is conduction-cooled by 4K GM cryocooler. Three dimensional electromagnetic finite element codes have been used during all phases of basic design.

1. はじめに

現在、陽子線がん治療用の商用サイクロトロンとしては、IBA 社と弊社が共同開発した 230MeV 常伝導 AVF サイクロトロン(C235 もしくは P235)^[1]、Varian 社の 250MeV 超伝導 AVF サイクロトロン^[2]がある。最近では加速器の小型化のために Mevion 社と IBA 社がそれぞれ超伝導シンクロサイクロトロンを開発中である^[3,4]。この用途の加速器として他にはシンクロトロンも考えられるが、最近さまざまな施設で開発されつつあるペンシルビームスキニング法を適用するには連続で安定なビームが得られる AVF サイクロトロンが最適である。弊社の常伝導 AVF サイクロトロン P235 は陽子ビームを安定に出力するが、直径が 4.4m、重量が 200 トンであるため、小型化、省電力化を目指し今回、超伝導 AVF サイクロトロンの基本設計を行った。

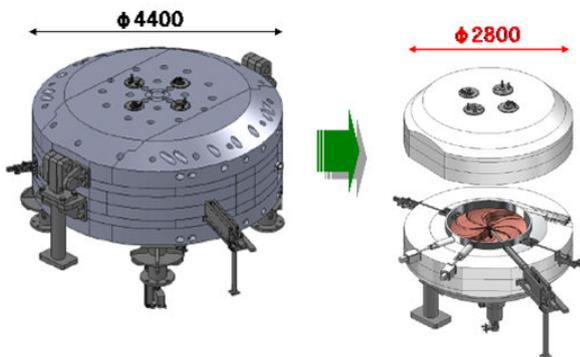


Figure 1: Schematic view of P235 and SC cyclotrons for proton therapy.

Figure 1 と Table 1 に P235 と超伝導 AVF サイクロ

トロンの概観図と比較表を示す。超伝導にすることによって総重量が軽くなり輸送や据付が容易になる。

Table 1: Comparison of P235 and SC cyclotrons

項目	P235 (NC)	SC cyclotron
加速器タイプ	常伝導 AVF	超伝導 AVF
外径	φ4.4m×2.1m(H)	φ2.8m×1.7m(H)
鉄重量	200 t	55 t
消費電力	440 kW	200 kW (RF) + 40 kW (冷却)
輸送方法	多数のブロックに分割	上下 2 分割

2. 基本パラメタ

超伝導 AVF サイクロトロンの設計コンセプトは、クライオスタットに入った超伝導コイルがあることなどを除けば基本的には P235 と同様である。いくつかの基本パラメタを Table 2 に示す。

ビームの引出半径を同目的の他の AVF サイクロトロンよりも小さい 0.6 m とした。すると、引出半径での平均磁束密度は約 4 T となる。加速時のビームの垂直方向チューンについてよく知られた近似式

$$v_z^2 \cong 1 - \gamma^2 + F^2(1 + 2 \tan^2 \xi) \quad (1)$$

ただし、 γ , F^2 , ξ はそれぞれローレンツ因子、フラッター、スパイラル角、において、フラッターが平均磁束密度の 2 乗にほぼ反比例することを考慮するとスパイラル角を P235 よりも大きく取らなくてはならない。各ビームエネルギーにおいて等時性と垂直方向ビーム安定性が得られるようにヒルのスパン角とスパイラル角を微調整しつつ 3 次元磁場計算と

[#]Hrs_Tsutsui@shi.co.jp

ビーム光学計算を繰り返して最終的に得られた磁石形状を Figure 2 に示す。フラッターを大きくするにはヒルのギャップは狭いほど良いので、P235 と同様に外周に行くほど狭く最外周では±6 mm になっている。

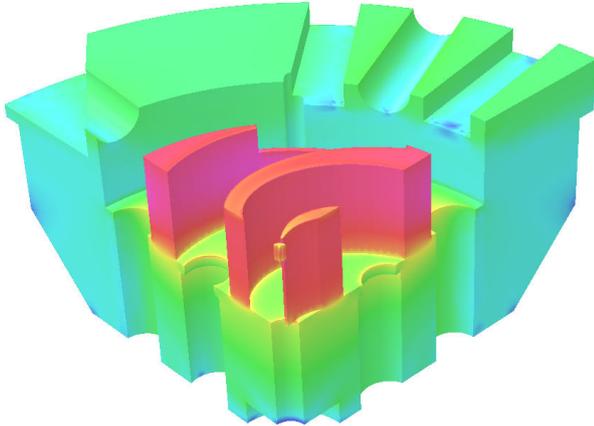


Figure 2: Magnetic field of SC cyclotron calculated by Opera-3d code^[5] (1/8 model).

計算で得られた磁場分布は等時性を 10^{-3} のオーダーで満たしているが、まだこの程度では軌道計算するとビームの RF 位相がずれてしまうので人工的に磁場分布の等時性化の微調整をする。その磁場分布を用いてチューンをプロットしたものを Figure 3 に示す。本図に示すように危険だとされている共鳴線 $v_r - v_z = 1, 3v_r = 4$ を避けるようにしている。念のために数ガウスの共鳴励起項 B_{1r} を入れて軌道計算をしてみたが、 $v_r - v_z = 1$ 共鳴によって垂直方向ビームサイズが増えることは無かった。

ビーム引出時の水平方向チューンをなるべく下げるほうがターンセパレーションが増えるため、約 1.2 まで下げている。

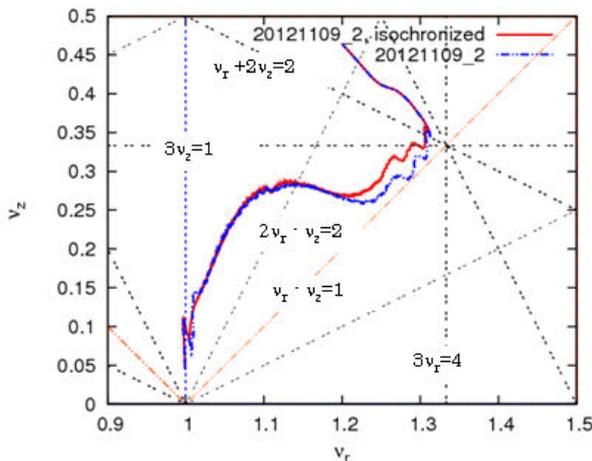


Figure 3: Tune diagram.

Table 2: Main specifications of SC cyclotron

項目	値
ビーム 加速粒子	proton
加速エネルギー	230 MeV
ビーム電流	300 nA 以上
エミッタンス	$\sim 3 \pi$ mm-mrad
運動量広がり	$\pm 0.2\%$
引出効率	60 %以上
周回周波数	48.15 MHz
磁石 外径	$\phi 2.8\text{m} \times 1.7\text{m(H)}$
鉄重量	55 t
線材	NbTi/Cu
蓄積エネルギー	4.6 MJ
平均磁束密度(引出部)	4 T
平均磁束密度(中心部)	3.2 T
セクター数	4
起磁力	10^6 AT/coil
定格電流	445 A
励磁時間	30 min
冷却時間	17 日
RF 加速電極(Dee)の数	2 + 1
周波数	96.3 MHz, 192.6 MHz
Dee 電圧	50-100 kV, 180 kV
壁損失合計	120 kW

3. 中心領域

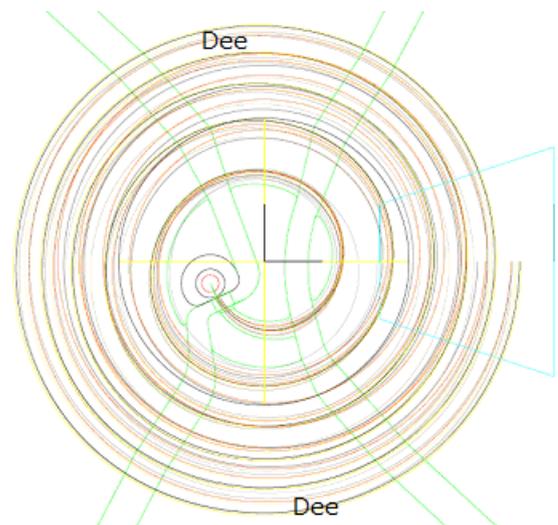


Figure 4: Beam orbit simulation in a center region.

中心領域の軌道計算結果を Figure 4 に示す。構造は P235 とほぼ同じく、内部イオン源を使っている。96.3 MHz, 50 kV の Dee 電極 2 台で加速している。Dee 電極の電場はビームの最初の数ターンの垂直方向の収束性に効いてくるため、Opera-3D で静電場を計算して軌道計算に使用している。図の右側にあるように、ビームを 50 μ sec 以下で遮断するためのチョッパー電極を用意する。

4. RF 加速

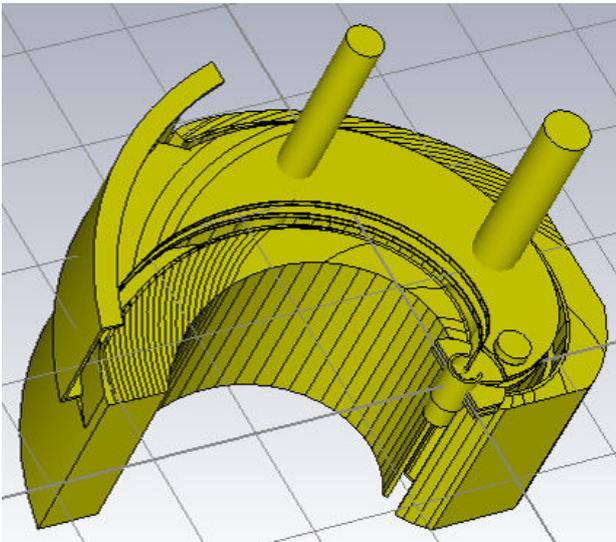


Figure 5: Electromagnetic field calculation of an RF cavity with Microwave studio code.

RF 加速空洞は、周波数を 96.3 MHz ($H=2$)、ギャップ電圧を中心 50 kV, 引出 100 kV として、Figure 5 に示すように 3 次元電磁場計算コード Microwave studio^[6]を用いて RF パラメタを計算した。その結果、80%Q を仮定して空洞 1 台あたりの壁損失が 40 kW と見積もられた。

ビーム引出効率を上げるためには 1 周あたりの加速電圧を上げる必要があるため、引出付近に RF 空洞を一台入れた。軌道計算ではこの空洞を入れることによってビームが横に蹴られて広がるといった問題は発生せず、壁損失も問題ない結果となった。

5. ビーム引出

230 MeV 以上に加速された陽子は静電デフレクタ (ESD) と受動的な磁気チャンネル (MC) でサイクロトロンの外に引き出される。空間が不足したため MC の一部分は加速空洞の中に入れた。周回軌道に悪影響を与えないために、MC と同様な構造を 180 度対称に入れて、磁場分布の 2 回対称性を保たせた。

イオン源から出発して ESD 位置で引き出されたビームの分布の例を Figure 6 に示す。エネルギーが低めの粒子もいるが、それらはイオン源を出るとき

の RF 位相が外れているので中心領域のスリットで取り除くことができる。取り除くと ESD 位置でエミッタンスは $\sim 3 \pi$ mm-mrad、運動量広がり $\pm 0.2\%$ となった。ビーム電流を犠牲にして中心領域でさらにビームサイズを削るとエミッタンスや運動量広がりを減らすことも出来る。引出効率は ESD のセプタムの厚さに依存するが、0.3~0.1mm とすると軌道計算上で 60~80% となった。

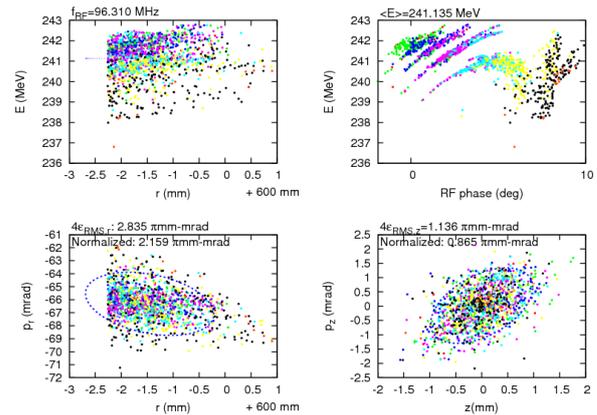


Figure 6: Extracted beam phase plot at ESD.

6. 超伝導コイル

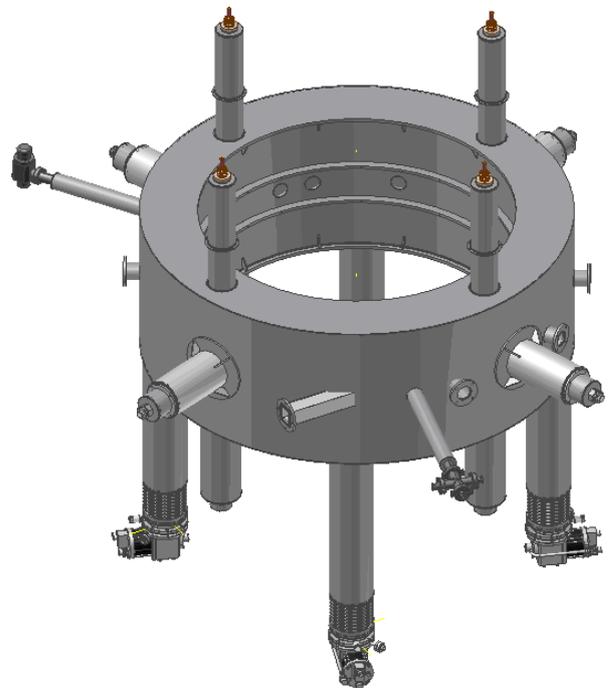


Figure 7: SC cryostat.

超伝導コイルのクライオスタットを Figure 7 に示す。線材はモノリス型の NbTi/Cu 線材で安定化材比は 2.4 とした。超伝導コイル上での最大磁束密度は

4.2T、定格運転時の電流密度は $59\text{A}/\text{mm}^2$ となる。電流は Bi2223 系の高温超電導体を用いた電流リードを介してコイルに供給される。超伝導コイルは最低到達温度が 4K 以下の 2 段 Gifford-McMahon 冷凍機を 4 台用いて、固体熱伝導によって冷却される。従って液体ヘリウムの注入が不要で高い信頼性が期待できる。コールドメンテナンス構造を採用することにより、2 日間でメンテナンスが完了する。励磁時間は 30 分である。

超伝導コイルとヨークの間には不平衡電磁力が発生するが、コイルの軸方向 4 本、水平方向 4 本の GFRP サポートで荷重を支持する。これら 8 本のサポートのバネ定数は不平衡電磁力係数(単位位置ずれ量あたりの力)よりも大きくなるように設計されている。また、これら 8 本のサポートは位置ずれによる誤差磁場を補正するために、コイルの位置を調整する機能も有している。

7. まとめ

今後世界的に需要が見込める陽子線治療用サイクロトロン的小型化、省電力化のために、同目的の世界最小の超伝導 AVF サイクロトロンの基本設計を行い、治療に必要な性能を達成できる見込みが得られたと共に従来技術の枠内で製作できる見込みも得られた。

8. 謝辞

超伝導 AVF サイクロトロンの設計にあたり、理化学研究所の奥野先生、山形大学の後藤先生、MSU の F. Marti 先生との議論を参考にさせていただきました。ここにお礼申し上げます。

参考文献

- [1] T. Tachikawa, et al., Radiat. Indust. 84, 48-53, 1999
- [2] http://www.varian.com/us/oncology/proton/cyclotron_and_ess.html#UdoLAG3g1aQ
- [3] <http://www.mevion.com/the-system>
- [4] <http://cas.web.cern.ch/cas/Greece-2011/PosterSession/Pearson.pdf>
- [5] <https://www.cobham.com/about-cobham/aerospace-and-security/about-us/antenna-systems/specialist-technical-services-and-software/products-and-services/design-simulation-software/opera/opera-3d.aspx>
- [6] <http://www.cst.com/Content/Products/MWS/Overview.aspx>