

自己遮蔽型高温超伝導スケルトン・サイクロトロン設計と軌道計算

DESIGN AND ORBIT CALCULATION OF THE HIGH-TEMPERATURE SUPERCONDUCTING SELF-SHIELDING TYPE SKELETON CYCLOTRON

松井昇大朗^{#, A)}, 福田光宏^{A)}, 依田哲彦^{A)}, 神田浩樹^{A)}, 齋藤高嶺^{A)}, 田村仁志^{A)}, 安田裕介^{A)}, 長屋重夫^{A)}, 原隆文^{A)}, 荘浚謙^{A)}, ZHAO HANG^{A)}, 橋高正樹^{A)}, 井村友紀^{A)}, 渡辺薫^{A)}, 石山敦士^{B)}, 野口聡^{C)}, 植田浩史^{D)}, 福井聡^{E)}, 松原雄二^{F)}, 三上行雄^{F)}, 吉田潤^{F)}, 平山貴士^{F)}, 渡辺智則^{G)}
Shotaro Matsui^{#, A)}, Mitsuhiro Fukuda^{A)}, Tetsuhiko Yorita^{A)}, Hiroki Kanda^{A)}, Takane Saito^{A)}, Hitoshi Tamura^{A)}, Yusuke Yasuda^{A)}, Shigeo Nagaya^{A)}, Takafumi Hara^{A)}, Tsun Him Chong^{A)}, Hang Zhao^{A)}, Masaki Kittaka^{A)}, Tomoki Imura^{A)}, Kaoru Watanabe^{A)}, Atsushi Ishiyama^{B)}, So Noguchi^{C)}, Hiroshi Ueda^{D)}, Satoshi Fukui^{E)}, Yuji Matsubara^{F)}, Yukio Mikami^{F)}, Jun Yoshida^{F)}, Takashi Hirayama^{F)}, Tomonori Watanabe^{G)}

^{A)} Research Center for Nuclear Physics, Osaka University

^{B)} Waseda University

^{C)} Hokkaido University

^{D)} Okayama University

^{E)} Niigata University

^{F)} Sumitomo Heavy Industries, Ltd

^{G)} Chubu Electric Power Co., Inc

Abstract

We have started the design and development of a high-temperature superconducting skeleton cyclotron to perform various radiological diagnostics and treatments, including Boron Neutron Capture Therapy (BNCT) and Targeted Alpha Therapy (TAT), in a single cyclotron. Therefore, to install an HTS-SC that can also perform radiotherapy in the several hundred PET facilities in Japan, it is necessary to make it a self-shielded skeleton cyclotron that combines radiation and magnetic shielding. In this presentation, I will present the coil design and single-particle calculations of a self-shielded skeleton cyclotron.

1. はじめに

現在、大部分の医療用サイクロトロンは、PET 用や RI 製造用など、単目的に特化した仕様で設計をなされている。これは、加速粒子を変更するときに、従来のサイクロトロンでは鉄心を用いるため、磁気ヒステリシスによる運転の調整に専門のオペレータが必要になるためである。さらに、従来のがん治療の常識を覆すと言われているホウ素中性子捕捉療法(BNCT)や α 線核医学治療(TAT)に必要な加速粒子は中規模以上の施設でしか加速されていない。そこで、これら様々な放射線診断・治療を1台で行う高温超伝導スケルトンサイクロトロン(HTS-SC)が提案された[1]。HTS-SC は冷凍機を用いた伝導冷却を用いることで、ヘリウムフリーで運用することができ、さらに、鉄を一切使わないことでヒステリシスを考慮することなく加速磁場を形成できることが最大の特徴である。しかし、現有の PET 施設で、治療用 RI 製造が可能な HTS-SC に置き換えられるようにするためには放射線と磁気遮蔽を備える自己遮蔽型が望ましい。そこで、リターンヨークを備えた自己遮蔽型 HTS-SC の設計を着手した。昨年、外側である放射線遮蔽と漏洩磁場の計算結果を報告した[2]。本研究では、自己遮蔽型 HTS-SC のコイルの設計を行い、単粒子の平衡軌道計算結果の報告を行う。

2. 自己遮蔽型スケルトン・サイクロトロン

自己遮蔽型 HTS-SC は、空芯型のコイルを使用しているが、リターンヨークで囲っている。これにより、完全空芯型 HTS-SC と比べて、磁気ヒステリシスの考慮が必要となるが、等時性磁場を構成する HTS コイルには、鉄心が使用されていないため、従来型のサイクロトロンより運転が容易になると予想される。また、リターンヨークの厚さは、昨年の放射線・磁気遮蔽計算により重量と遮蔽効果により半径 60 cm、鉛直方向に 40 cm と定めた。モデル設計と磁場計算は OPERA-3D/TOSCA を用いて行った[3]。本研究の自己遮蔽型 HTS-SC の OPERA-3D によるモデルを Fig. 1 に示す。

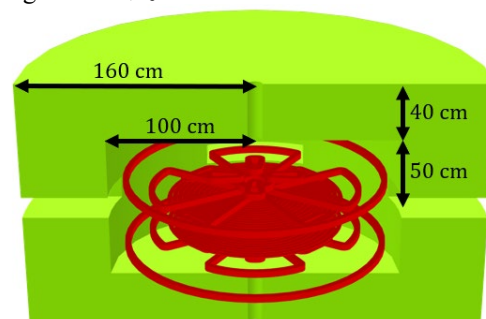


Figure 1: model HTS-SC-K80-R50-SS.

[#] smatsui@rcnp.osaka-u.ac.jp

3. HTS-SC のコイル設計

3.1 HTS-SC の構成磁場

先行研究である完全空芯型スケルトン・サイクロトロン HTS-SC-K80-R40-AC では、トリムコイルを含めたすべてのコイルに HTS 線材を使用して等時性磁場を形成している[4]。自己遮蔽型 HTS-SC は、医療・産業用を想定しているため、高価な HTS コイルの構成を可能な限り少なくしたい。そのため、トリムコイルには銅ホローコンダクターを使用し、少ない HTS コイルのみで等時性磁場を構成する。

そこで、HTS-SC が形成する等時性磁場を Fig. 2 のように 4 分割し、それぞれの役割に対応したコイルを設計することで、HTS-SC のコイル配置を最適化した。以下がそれぞれコイルの名称と役割である。

1. センターメインコイル(CMC)
中心領域における磁場バンプと弱集束を形成
2. ベースメインコイル(BMC)
等時性磁場全体の磁場バンプ
3. センターセクターコイル(CSC)
中心領域の強収束と CMC で補いきれない磁場バンプの補助
4. メインセクターコイル(MSC)
引出し領域までの強収束と、磁場バンプ

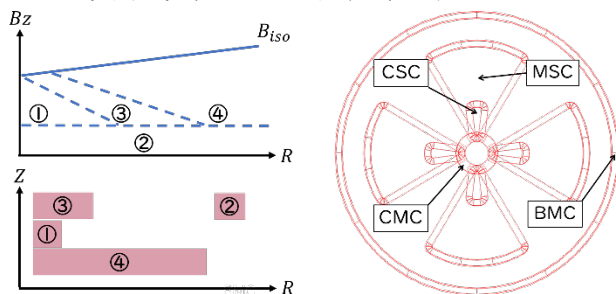


Figure 2: Isochronous magnetic field is divided into four parts and each coil is arranged.

スケルトン・サイクロトロンはセクター型コイルを使用するため、リングサイクロトロンと同様、セクター軌道上の磁場バンプが存在する。従来 AVF のセクターや鉄心があるリング型セクターは、軌道上の磁場強度はセクターの円周に依存するが、空芯型セクターコイルは、セクターの頂点に向けて磁場強度が低くなるため、中心領域でフラッターを効かすことが難しく、形状や位置によって磁場強度が負になってしまう。そのため、等時性磁場を作るための CMC の磁場勾配や強度が重要になってくる。そこで、CSC を追加することで、中心領域にフラッターを効かしながら、補助的に中心磁場をバンプすることができる。さらに、MSC と CMC の磁場を接合させる役割もあるため、MSC によるフラッターを可変にできるなど、等時性磁場をより自由に形成することができる。これらのコイル設計において、等時性磁場を 4 分割したときに、CMC と BMC は円形コイルであるため、簡単に設計することができるが、MSC と CSC による磁場が BMC との接合部で平行にするセクターコイルを設計する必要がある。

3.2 HTS-SC のための Gordon's method への追加

粒子の軌道上で、セクターコイルによる磁場の寄与が等時性磁場と平行になっているか確認するために、Gordon's method を利用した[5]。Gordon's method は、等時性磁場とフラッターによる半径方向の軌道上の磁場との差を求めることができる。HTS-SC はセクターコイルとしてフラッター成分を分割することができるので、式(1)のように Gordon's method による磁場分布の差からセクターコイルによる磁場バンプを引くことで、セクターコイルによる等時性磁場の寄与 $B'_G(r)$ を知ることができる。

$$B'_G(r) = B_G(r) - A_0(r) \quad (1)$$

$$A_0(r) = B(r, \theta) - \sum_{1 > n} [A_n(r) \cos(n\theta) + B_n(r) \sin(n\theta)]$$

ここで、 $B_G(r)$ は Gordon's method による等時性磁場と軌道上による磁場分布との差である。自己遮蔽型 HTS-SC では最も高い磁場が必要になる重陽子 40 MeV 加速における Gordon's method の結果を使用した。

3.3 ベイズ最適化を利用した設計

本研究の自己遮蔽型 HTS-SC において想定している断熱層やイオン入射口の設計条件より、電流密度 45000 A/cm^2 の時、中心軸で 1.5 T 以上の磁場と磁気勾配が高くなる CMC の位置にベイズ最適化を利用して設計した。この時、CMC の磁場分布は半径 25 cm 程度まで伸びた。これより、CSC コイルと MSC コイルによる磁場分布の寄与が半径 25 cm から引出半径 50 cm の間で平行になるように設計を行えばよい。ベイズ最適化では、複数の入力パラメータを1つのスカラー値で表せるとき、データ間の不確かさを獲得関数という形で表し、次に評価すべき入力パラメータを教えてくれる。これにより、少ない試行回数で最適な入力パラメータを得ることができる手法の一つである。セクターコイルでは、長さ L 、角度 θ 、中心の曲率半径 ρ の 3 パラメータでベイズ最適化を行い、そのセクターコイルによる寄与 $B'_G(R)$ が半径 25 cm から 50 cm までを評価関数として標準偏差が小さくなるように設定し各 3 パラメータを求めた。結果として $B'_G(R)$ では Fig. 3、ベイズ最適化による試行回数と評価値が Fig. 4 のようになった。

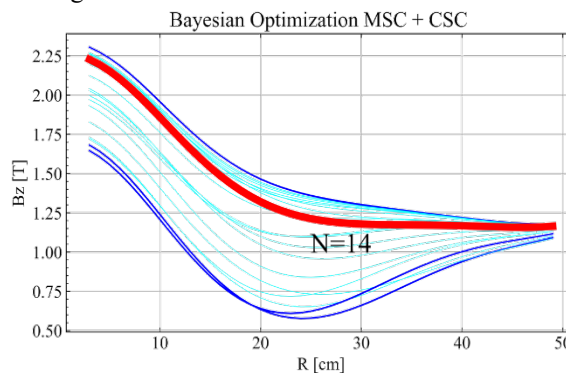


Figure 3: Bayesian Optimization MSC+CSC's B_z Field.

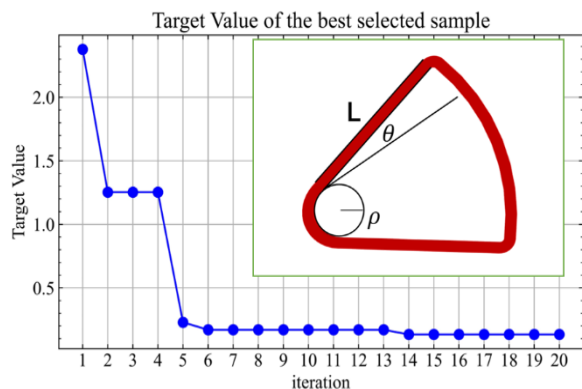


Figure 4: Convergence of Bayesian optimization and iteration.

Fig. 3 では赤線が 14 回目の試行結果を示しており、Fig. 4 では 14 回目で収束することが見て取れる。これより、HTS-SC の構成する磁場分布を分割し、それらの役割に応じたコイルにベイズ最適化を用いることで、等時性磁場分布を形成するコイルを短時間で設計することができた。また、MSC では、 $B'_G(45\sim 50\text{ cm})$ の標準偏差を減らし、かつ磁場強度が 90° のセクターコイルの半分になるようなパラメータを求めたり、BMC では磁場の平坦さかつ、引出し時では、必ず磁場強度のピークがくるようなパラメータを求めたりと、評価関数を自分で自由に決めてやることで、様々な要望に応え、かつ短時間で設計することができる。

3.4 HTS-SC-K80-R50-SS を構成する磁場分布

本研究において、HTS コイルの最大電流密度を 45000 A/cm^2 とした。また、トリムコイルは想定しているアース板の位置に銅ホローコンダクタートリムコイルを等間隔に 16 対置き、最大電流密度を 1100 A/cm^2 とした。HTS コイルと銅ホローコンダクタートリムコイルそれぞれに最大電流を流した時の HTS コイルの磁場分布が Fig. 5 となり、トリムコイルの磁場分布 Fig. 6 となる。

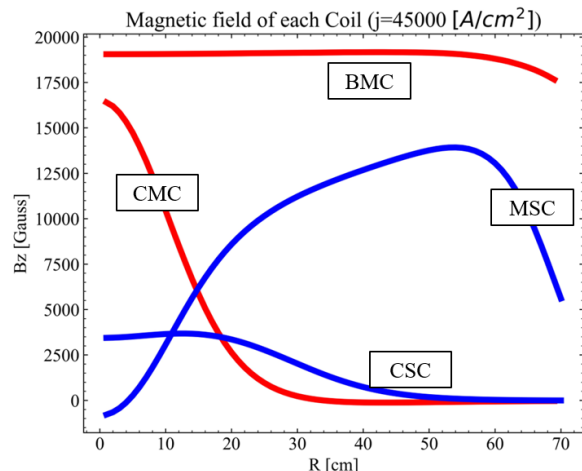


Figure 5: Magnetic field distribution for each HTS coil.

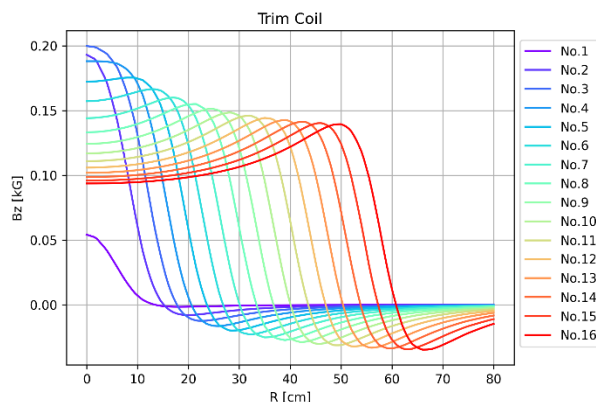


Figure 6: Magnetic field distribution for Trim coil.

4. 平衡軌道計算

設計した4種のコイルで等時性磁場を構成し、OPAL の closed orbit finder を用いて平衡軌道計算を行った[6]。その後、等時性磁場と平衡軌道上の磁場の差に最小二乗法を用いて、トリムコイルで補い、等時性磁場を最適化した。また、平衡軌道計算を行ったときのフラッターとチューン計算を考慮して、半径 7 cm まで弱集束させるように磁場を調整した。Fig. 7 は、重陽子 40 MeV、アルファ 30 MeV、陽子 50 MeV 加速について、等時性磁場を最適化した結果である。また、それぞれのチューンを Fig. 8 に示した。ここで、等時性磁場との差を Error とした。

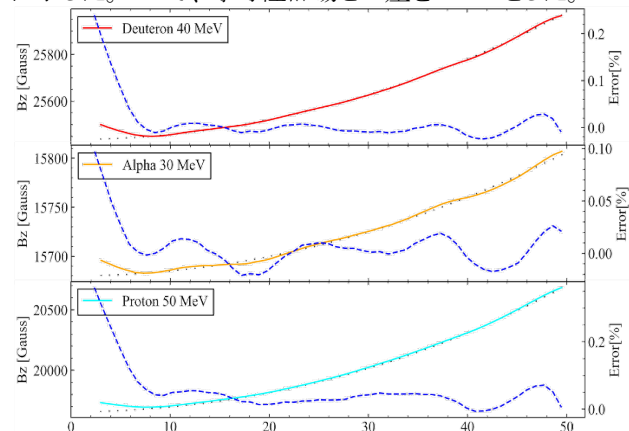


Figure 7: Magnetic field on each SEO.

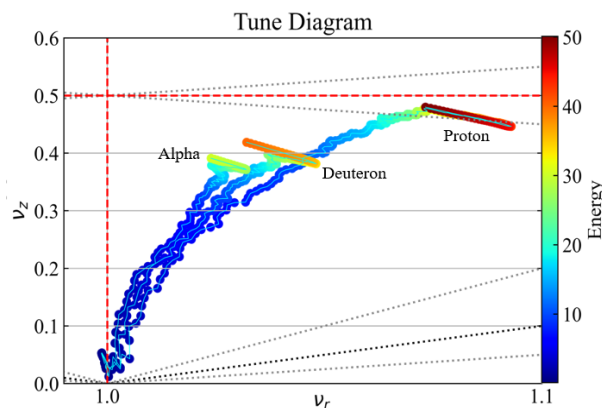


Figure 8: Tune Diagram on each SEO.

弱集束以降の磁場の Error が 0.03 %程度であることから、十分等時性磁場になっていることが確認できた。また、チューンダイアグラムでは陽子が引出し付近で3次の共鳴線に近づいているので、次に空間電荷効果を考慮した多粒子計算を行い、詳しくビーム評価をしていく必要がある。

5. まとめ

本発表では、自己遮蔽型スケルトン・サイクロトロン of HTS コイルの最適化設計と平衡軌道計算を行った。コイル設計では、等時性磁場を4つに分割し、役割に応じてコイルを設計した。特に、非円形空芯型コイルの設計でも、ベイズ最適化を用いて、評価関数を自分で自由に設計を行えることで、設計にかかる時間の短縮と設計の簡易化を行うことができた。また、平衡軌道計算結果から、本研究の HTS-SC の等時性磁場の分割とコイル設計手法が妥当であることを確認した。

参考文献

- [1] H. Ueda, M. Fukuda, K. Hatanaka *et al.*, “Conceptual design of next generation HTS cyclotron”, IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 23, No. 3, 2013, 4100205.
- [2] S. Matsui *et al.*, “自己遮蔽型高温超伝導スケルトンサイクロトロン of の概念設計”, Proc. PASJ2022, THP005.
- [3] <https://operafea.com>
- [4] H.W. Koay, M. Fukuda, H. Kanda, T. Yorita, “Beam dynamics and characterization of a new high-intensity compact air-core high temperature superconducting skeleton cyclotron (HTSSC)”, Results in Physics, 33, 2022, 105090.
- [5] Gordon MM., “Calculation of isochronous fields for sector Focused cyclotrons”, Part. Accel., vol. 13, 1983, pp. 67-84.
- [6] A. Adelman *et al.*, “OPAL a Versatile Tool for Charged Particle Accelerator Simulations”, preprint arXiv: 1905.06654, May 2019.