

分離セクター型サイクロトロンのための高温超伝導電磁石開発 DEVELOPMENT OF HTS MAGNETS FOR SEPARATED SECTOR CYCLOTRONS

鎌倉恵太^{A)}、福田光宏^{A)}、畑中吉治^{A)}、依田哲彦^{A)}、神田浩樹^{A)}、中尾正夫^{A)}、
安田裕介^{A)}、原周平^{A)}、Koay Hui Wen^{A)}、武田圭次郎^{A)}、原隆文^{A)}、大本恭平^{A)}、
Keita Kamakura^{A)}、M. Fukuda^{A)}、K. Hatanaka^{A)}、T. Yorita^{A)}、H. Kanda^{A)}、M. Nakao^{A)}、
Y. Yasuda^{A)}、S. Hara^{A)}、H. W. Koay^{A)}、K. Takeda^{A)}、T. Hara^{A)}、K. Omoto^{A)}
^{A)}Research Center for Nuclear Physics (RCNP), Osaka University

Abstract

Usage of high energy and high intensity accelerators has been widely spread across industrial and medical fields. Accordingly, reliability and cost performance are vital factors for these applications. One of the most important features of cyclotron is its power efficiency. Utilizing high temperature superconductors (HTS) for magnets, a pinnacle of power efficient and stable high energy accelerator can be realized. Here, we propose a next generation cyclotron with HTS technology. As a first step, we are planning to develop an HTS cyclotron as an injector for K400 ring cyclotron at RCNP. It will be the first attempt in the world. This plan will improve beam intensity by factor of 10 in the existing facility. The most crucial challenge is the development of large-size HTS magnets that can be used in SSC. A one-meter-size HTS dipole magnet is designed and fabricated as a prototype. Evaluation for magnetic and thermal characteristics are carried out. As a result, excitation method to eliminate magnetic field drift due to flux creep is developed. The conceptual design of the SSC is completed under the demands of injecting beam to the ring cyclotron. Magnetic, thermal and mechanical analyses are performed to evaluate the integrity of the coil assembly of the magnet. Consequently, temperature margin is 32 K, and the critical current is 2.8 times of maximum current of excitation under the maximum field. Feasibility of the HTS injector cyclotron is confirmed.

1. 概要

高エネルギー・高強度な加速器の利用は、学術研究のみならず医療や産業での拡大しており、それに伴って高い信頼性と省電力化が求められている。本研究ではサイクロトロンの特長である高いエネルギー効率に着目し、少ない運転電力で安定したハイパワーのビーム出力を可能にする高温超伝導サイクロトロンを開発を目指している。

現在までに直径数～数十 cm 程度の小型高温超伝導コイルは限られた用途で実用化されているものの、サイクロトロン電磁石として必要とされる数 m を超える大型の高温超伝導電磁石は存在していない。そのため、まず 1 m サイズの高温超伝導電磁石を試作し、その性能評価を行った。プロトタイプ電磁石の励磁に伴うコイルの温度変化を測定し、熱構造解析に用いるパラメータを決定した。また高温超伝導線材特有の磁束クリープによる磁場のドリフトを迅速に収束させる励磁方法を見出し、短時間で磁場を安定化する手法を確立した。

次に分離セクター型サイクロトロン電磁石を設計し、高温超伝導メインコイルと補正コイルを用いて形成した等時性磁場により高強度ビームの加速と取り出しが可能であることを粒子軌道解析で立証した。さらにセクター電磁石のメインコイルアセンブリにプロトタイプ電磁石と同様の支持構造を適用しても実用に耐えうる熱特性と磁場性能が十分に実現可能であることを熱構造解析で示し、高温超伝導サイクロトロン電磁石の実用化の見通しを得た。

2. プロトタイプ電磁石

高温超伝導を用いたコイルは、現在までに直径数～数十センチメートル程度の小型のものが限られた用途で実用化されているものの、サイクロトロン電磁石として必要とされる数メートルを超える大型の高温超伝導電磁石は存在していない。

本センターでは、第一世代高温超伝導であるビスマス系超伝導体線材を用いた電磁石の開発が進められてきた。これまでに 3 基の試験用磁石と 1 基の実用磁石が製



Figure 1: Prototype HTS magnet: HTS-SW1.

作され、磁場特性や熱特性の研究が行われた。その結果をもとに、大型電磁石のプロトタイプとして迅速励磁可能な1メートルサイズの高温度超伝導電磁石を製作し、その性能評価を行った [1]。

Table 1: Parameters of HTS-SW1

コイル素材	DI-BSCCO Type HT-CA
巻き線構造	256 turns x 2 coils 2 double pancakes / coil
運転温度	7 K
最大電流	1.6 T
最大中心磁場	伝導冷却, GM 冷凍機
冷凍機性能	6.3 W at 10 K

プロトタイプ電磁石はレーストラック型コイル（内寸 1,170 mm ~ 610 mm）を備えた双極電磁石である。その外観を Fig. 1 に、諸元を Table 1 にまとめた。コイル線材は BSCCO を用い、1 コイルにつき 2 レイヤーのダブルパンケーキ構造となっている。上下それぞれの磁極に設置された上コイルアセンブリと下コイルアセンブリは同じ構造になっており、巻き数はそれぞれ 256 ターン、両コイルは直列に接続されている。最大電流は 200 A であり、起磁力は 102,400 AT、磁石の最大中心磁場は 1.6 T である。冷却は GM 冷凍機による伝導冷却で行われており、ヒーターによる積極的な温度制御は行っていない。運転温度は約 7 K である。

2.1 発生磁場の安定化

高温超伝導線材が高磁場に晒されると、磁束はピンングポテンシャルを越えて線材の表面から内部へと量子的に侵入していく。この磁束侵入の過程は長時間にわたるため、磁束クリープと呼ばれており、高温超伝導コイルにおいては発生磁場をドリフトさせる原因となる。そこで、励磁レベルをいったん目標電流の 120% まで上昇させることで線材内へ磁束を押し込み、磁束クリープを打ち消すようなパターン励磁方法を開発した。これにより発生磁場を短時間で安定化する手法を確立した。

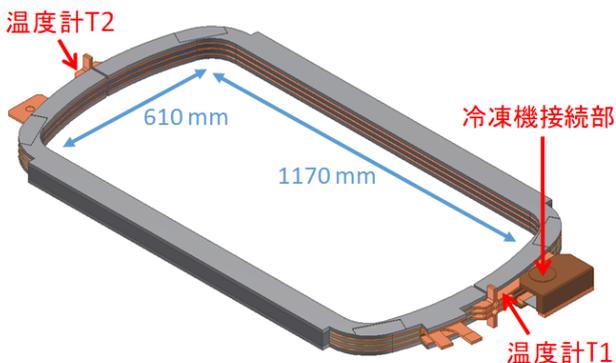


Figure 2: Coil assembly of HTS-SW1.

2.2 コイルアセンブリの熱構造解析

プロトタイプ電磁石コイルアセンブリには、Fig. 2 に示した通り、冷凍機接続部に 1 か所とコイル冷却板上の冷凍機から近い地点 T1 と遠い地点 T2 に温度センサーが設置されている。

励磁電流ゼロで定常状態に達した時のこれらの温度と、異なる励磁速度での温度推移から、設計段階での熱解析パラメータの妥当性を評価した。熱解析はコイルアセンブリの 3 次元モデルを用いて有限要素法計算を行った。次に計算結果を用いて測定値を再現するよう、設計段階で想定していた解析パラメータに修正を加えた。また高温超伝導線材に対して時間変化する電流を印加した場合の交流損失を見積もった。その結果、運用上問題ないことを確認し、またサイズの違うコイル設計に用いることのできる諸々のパラメータを取得した。

3. 高温超伝導サイクロトロン

核物理研究センターでは、K140 AVF サイクロトロンと K400 リングサイクロトロンによるカスケード加速が行われている。現在、陽子 400 MeV の最大ビーム電流は約 1 μ A であるが、原子核実験における統計量確保や

Table 2: Parameters of the New Injector

セクター磁石	
K 値	200 MeV
入射平均半径	1 m
取出平均半径	3 m
セクター数	4
磁極開き角	33°
最大セクター磁場	1.73 T
フラッター	1.23
コイルアセンブリ	
最大電流	160 A
電流安全率	2.8
運転温度	8 K
温度マージン	32 K
RF キャビティ	
キャビティ数	2
加速ギャップ数	2
ギャップ開き角	17°
ハーモニック数	9, 15 (RING: 6, 10)
加速周波数	30 ~ 52 MHz
最大加速電圧	300 kV
プリインジェクタ	
K 値	21 MeV

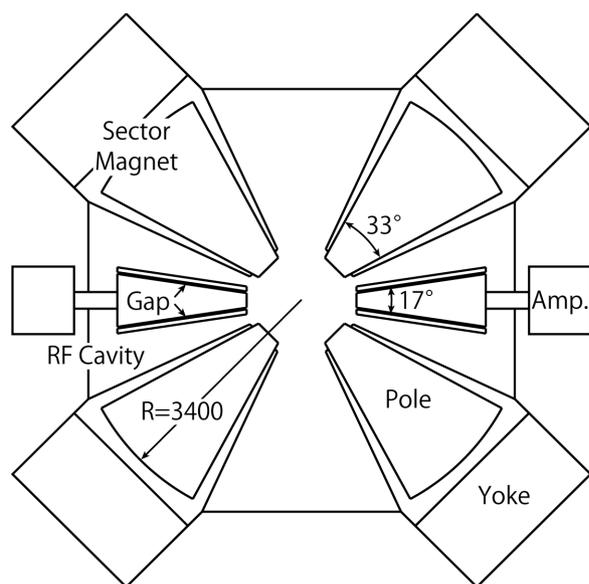


Figure 3: Outline of the new SSC injector.

ミューオン科学実験における2次粒子生成量向上等の要請から、ビームの大強度が計画されている [2]。陽子ビームを現状の1000倍の1 mAまで向上させることを目標としているが、ビーム透過効率の低い現行のAVFサイクロトロン入射器では、これを達成することができない。

この課題を解決するため、新たな入射器として、ターンセパレーションが大きく、また大きなフラッターによるビーム集束力が確保できる分離セクター型サイクロトロン(新入射器)の導入を検討している。新入射器ではイオン源で価数が上がらない重イオンを高い質量電荷比(M/q)のまま加速し、チャージストリップしてリングサイクロトロンへ入射するため、K値を200 MeVに設定した。このサイクロトロンの特色は、高い信頼性を持つ高温超伝導サイクロトロンの第一歩として、セクター電磁石主コイルに第一世代高温超伝導線材を用いている点にある。

新入射器の基本構成は大強度陽子サイクロトロンとして知られる、ポール・シェラー研究所のK72 Injector 2を参考にした。これをもとにK400サイクロトロンへの入射に要求される条件から概念設計を行った。次に粒

子軌道面で最大1.7 Tの目標磁場が達成されるように、FEM磁場解析を用いて、磁極、ヨーク、主コイルと補正コイルの詳細設計を行った。等時性条件を満たす磁場が発生するように、各コイル電流を最適化した。さらに粒子軌道計算を行い、形成した等時性磁場が2 cm程度のターンセパレーションを確保しており、高強度ビームのシングルターン取り出しが可能であることを立証した。Figure 3に新入射器の概略図を、Table 2にその諸元をまとめる。

次にプロトタイプ電磁石の性能評価で得られた熱解析パラメータを用いて、主コイルの超伝導コイルアセンブリの設計を進めた。

主コイルにプロトタイプ電磁石と同様の支持構造を想定してコイルアセンブリの構造をモデル化し、構造解析と磁場解析を行った。定常熱解析の結果、コイル温度は10 K以下にコントロールできることが示された。また線材にかかる磁場、応力を評価し、実用に耐えうる磁場性能が十分に実現可能であることを確認した。Figure 4に励磁時のコイルアセンブリ内の温度分布を示す。使用線材はプロトタイプ電磁石で用いたDI-BSCCO Type HT-CAである。1コイル256ターン、最大励磁電流160 Aのとき電流安全率は2.8、温度マージンは32 Kと信頼性の高い設計とした。

参考文献

- [1] K. Kamakura *et al.*, "DEVELOPMENTS OF HTS MAGNETS UTILIZING FIRST GENERATION WIRE", Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (August 2016, Chiba, Japan).
- [2] K. Kamakura *et al.*, "DESIGN OF A SECTOR MAGNET FOR HIGH TEMPERATURE SUPERCONDUCTING INJECTOR CYCLOTRON", Proceedings of the 13th International Conference on Heavy Ion Accelerator Technology (September, 2015, Yokohama, Japan).

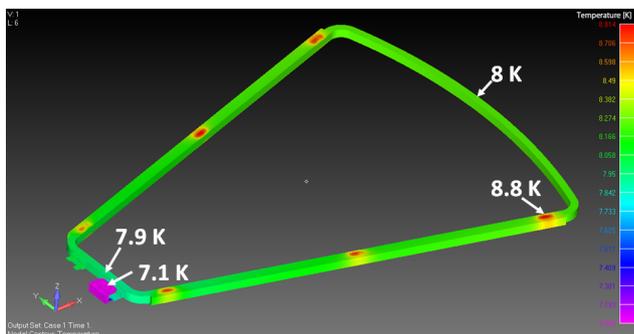


Figure 4: Thermal analysis of the sector magnet coil assembly.