

## HTS SECTOR MAGNET FOR THE RCNP NEW INJECTOR

Kichiji Hatanaka <sup>#A)</sup>, Mitsuhiro Fukuda<sup>A)</sup>, Tetsuhiko Yorita<sup>A)</sup>, Hiroshi Ueda<sup>A)</sup>, Hitoshi Tamura<sup>A)</sup>, Mitsuru Kibayashi<sup>A)</sup>, Keichi Nagayama<sup>A)</sup>, Yuusuke Yasuda<sup>A)</sup>, Takane Saito<sup>A)</sup>, Shunpei Morinobu<sup>A)</sup>, Nobuhiko Izumi<sup>A)</sup>, Takeo Kawaguchi<sup>B)</sup>,

<sup>A)</sup> Research Center for Nuclear Physics, Osaka University  
10-1 Mihogaoka, Ibaraki, Osaka, 567-0047

<sup>B)</sup> KT-Science  
1470-1-803, Fujie, Akashi, Hyogo, 673-0044

### Abstract

At the Research Center for Nuclear Physics (RCNP) of Osaka University, we started to design a Separated Sector Cyclotron (SSC) as a new injector to increase beam currents from the cyclotron cascade system. We plan to apply High Temperature Superconducting (HTS) wires for main coils of sector magnets. A design of the magnet is described as well as recent results of the development of HTS magnets at RCNP.

### 高温超伝導線材を用いた RCNP 新入射器のセクター磁石

#### 1. はじめに

大阪大学核物理研究センター (RCNP) サイクロトロンカスケード装置は原子核物理研究、基礎物理研究を始め核化学、医学・生物物理等の応用を含む多くの実験研究に利用されている。加速粒子は陽子からゼノンまでにわたり、ビームエネルギーは核子当たり 5-400MeV である。最近、超冷中性子源やミュオン原が設置され、従来からのビームの高品質化とともに高強度化の要望が強くなっている。応用面でも、医療用放射性同位元素生成の基礎研究が進められており、ビーム増強が求められている。

カスケード装置の入射器である AVF サイクロトロンは 1973 年の完成以来 38 年が経過しており、2004 年に高周波加速系を含む一部更新、重イオンビーム増強が行われたが利用者の要求を十分満たすこと困難になっている。このような状況を踏まえ、RCNP では新入射器の検討を進めるなかで、分離セクター型サイクロトロン (SSC) が提案された。セクター磁石の設計においては、RCNP で 10 年来磁石応用開発に取り組んできた高温超伝導線材を利用することとした。本発表では、RCNP での高温超伝導磁石開発の現状とともに、SSC セクター磁石の基本設計について紹介する。

#### 2. 高温超伝導磁石の開発

高温超伝導 (HTS) 材が発見されてから 25 年になるが<sup>[1]</sup>、その加速器関連機器への応用は限られている。RCNP では、機器の小型化、消費電力の軽減を目的としてヘリウム温度までの冷却が不要となる HTS 線材を利用した磁石の開発、性能評価を行ってきた<sup>[2,3]</sup>。電磁石コイルへの利用が研究もしくは検討されている HTS 線材としては、現在 2 種類ある。第一世代線材と称される Bi 系線材は 1 km を超える

長尺のコイルが製作、市販されている<sup>[4,5]</sup>。一方、第二世代の YBCO 線材はより高磁場、高温での使用が可能とされ、将来的には低価格での供給が期待されている。しかし、現在は線材の開発研究が進められている段階である。

RCNP での開発では、磁極を有する磁石<sup>[2]</sup>および空芯コイル<sup>[3]</sup>を製作し、それらの熱特性、機械特性、磁気特性を評価した。特に後者では、実用的なコイルの交流損失を調べた。それまでの HTS の交流損失研究は短いテープや簡単な構造のコイルに限られていた。その結果の一部を図 1 に示す。黒塗りのデータ点は全交流損失 (左軸)、白抜きの記号はサイクル当たりの交流損失 (右軸) である。後者が励磁電流の周波数に依存しないことから、主な交流損失は HTS 線材でのヒステリシス損失に起因することが明らかになった<sup>[2]</sup>。一方、交流損失は励磁電流

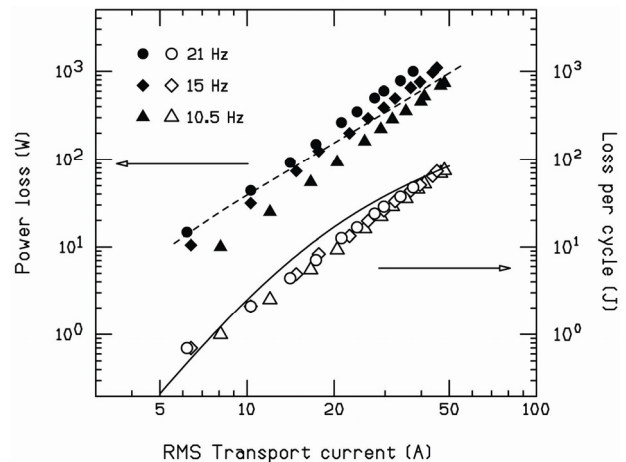


図 1 : 空芯コイルの交流損失の測定値。破線はシミュレーション計算結果。実線は理論値を実験値で規格化したもの。詳細は本文を参照。

<sup>#</sup> hatanaka@rcnp.osaka-u.ac.jp

50 A で 1 kW 程度であった。定格電流 200 A で GM (Gifford-McMahon) 冷凍機による伝導冷却を利用するためには、ヒステリシス損失の少ない HTS 線材の開発が求められる。

RCNP では、HTS 磁石研究の継続として 3T 双極磁石を製作し、性能テストを進めている。磁石の設計仕様を表 1 に示す。線材は住友電工製のビスマス系超伝導線 (DI-BSCCO Type HT (SS20))<sup>[6]</sup> を用いた。線材の臨界電流は 160 A 以上 (77 K、自己磁場) である。上下コイルは各々 3 台のダブルパンケーキを積層して、コイル表面での磁場を軽減するため磁気シールド板で挟まれている。積層前のダブルパンケーキの写真を図 2 に示す。巻線後の臨界電流は全てのダブルパンケーキについて 60-70 A、積層後の上下コイルでは約 50A であった。コイル製作過程で線材の性能劣化が発生しなかったことがわかる。

表 1 : 偏向磁石の設計仕様

磁石	中心軌道半径 偏向角度 磁極間隙	400 mm 60 ° 30 mm
コイル	巻数 構成 動作温度 定格電流	600x2 3 ダブルパンケーキ/コイル 20 K 300 A

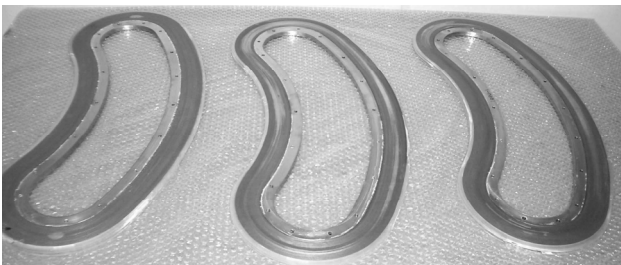


図 2 : ダブルパンケーキの写真

コイルはバナナ形状をしており、内側は負の曲率を持っている。コイルには拡張方向に電磁力が働く。有限要素法による数値解析の結果、コイルに働く単位長さ当たりの拡張力は約 112 kN/m と評価される。大きな拡張力に抗するため、コイルを磁極に固定し、磁極もコイル温度に冷却する (コールド・ポール) 方式を採用した。シンクロトロン用磁石への応用を想定し、ヨークと磁極は鉄板の積層構造を有している。今秋から冷却、通電試験および磁場測定を行う予定である。

### 3. セクター磁石の設計

検討している新入射器 (SSC) の基本仕様を表 2 にまとめる。主加速器リングサイクロトロンは平均入射半径は各々 2 m、3 m であり加速電圧の周波

数範囲は 30-52MHz、ハーモニック数は 6、10 である。SSC への最高入射電圧を 900 kV とすると、平

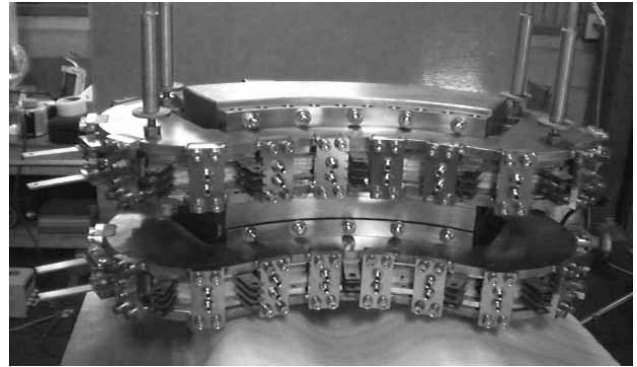


図 3 : コールド・ポールに固定された上下コイル

表 2 : 入射器 SSC の基本仕様

セクター数	4
K-値	120 MeV
最大入射電圧	900 kV
平均入射半径	371 mm
平均出射半径	3,000 mm
加速電圧周波数	30-52 MHz
ハーモックス数	9,15
磁極幅	33°
ヨーク幅	50°
セクター磁石高さ	2,800 mm

均入射半径はそれぞれ 371 mm、3 m となる。SSC の高周波数範囲はリングサイクロトロンと同じとし、ハーモニック数 9、15 を採用する。ディー電極の開き角を 17° とすると、数値計算の結果、実質的 RF 角度は 134°、224° となり 90 % 以上の実効加速電圧が得られる。

当面、HTS 線材としてはビスマス系を想定して磁場解析を進めている。セクター磁石の平面断面および率面、コイル断面図を図 4、5、6 に示す。

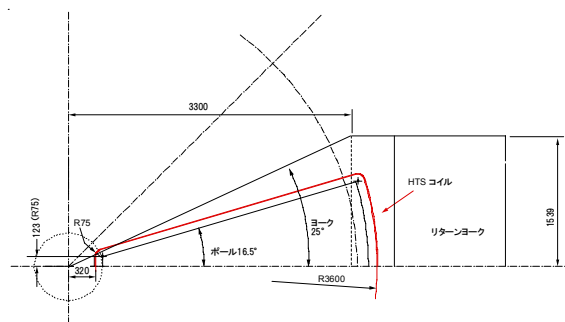


図 4 : セクター磁石の断面図 (1/2)

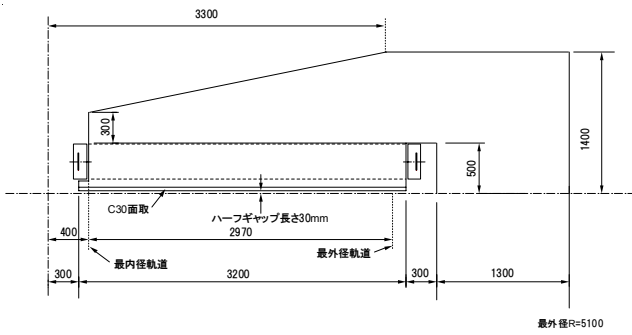


図 5 : セクター磁石の立面図 (1/2)

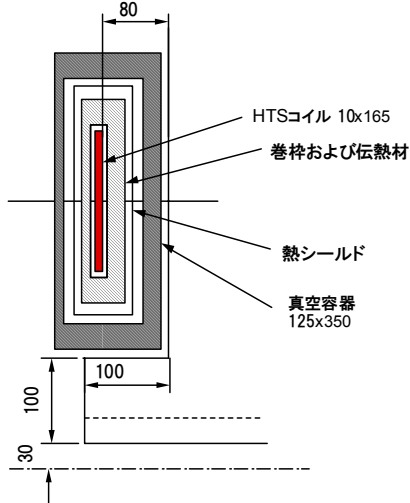


図 6 : HTS コイル、クライオスタット断面図

TOSCA による、コイル電流 50 kA での円形軌道上での磁場計算結果を表 3 にまとめる。表から、 $K=120$  に必要な磁場強度が得られていることがわかる。現在、高周波加速系の設計が行われており、結果は本プロシーディングに報告されている<sup>[7]</sup>。

なお、本研究の一部は科学研究費補助金 (18390334、20249056) を受けて実施された。

表 3 : 50 kA 通電時の円形軌道上の磁場強度

半径 (m)	Bz 積分値 (Tm)	軌道長 (m)	平均磁場 (T)
0.4	0.178	0.314	0.568
1.885	0.793	1.48	0.536
3.37	1.39	2.65	0.526

## 参考文献

- [1] J.G. Bednorz and K.A. Müller, Physical B 64 (1986) 189.
- [2] K. Hatanaka, S. Ninomiya, Y. Sakemi, T. Wakasa, T. Kawaguchi, N. Takahashi, Nucl. Instr. Meth. in Phys. Res. A 571 (2007) 583-587.
- [3] K. Hatanaka, J. Nakagawa, M. Fukuda, T. Yorita T..Saito, Y. Sakemi, T. Kawaguchi, K. Noda, Nucl. Instr. Meth. in Phys. Res. A 616 (2010) 16-20.
- [4] K. Sato, K. Hayashi, K. Ohkura, K. Ohmatsu, Proc. of MT-15, Beijing (1997) 24-29.
- [5] L.J. Masur, J. Kellers, F. Li, S. Fleshler, E.R. Podtburg, Proc. of MT-17, Geneva (2001) 1-5.
- [6] [http://www.sei.co.jp/super/hts/type\\_ht.html](http://www.sei.co.jp/super/hts/type_ht.html)
- [7] Y. Yasuda, et al., TUPS119 in these proceedings.