

## Superconducting magnets for Central Japan Synchrotron Radiation Research Facility Project

Mitsuhiro Yoshida<sup>A)</sup>, Yoshihumi Takashima<sup>A)</sup>, Masahiro Katoh<sup>A) B)</sup>  
Masato Hosaka<sup>A)</sup>, Naoto Yamamoto<sup>A)</sup>, Hiroyuki Morimoto<sup>A)</sup>, Masami Torikoshi<sup>C)</sup>

<sup>A)</sup> Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-8603 Japan

<sup>B)</sup> Institute for Molecular Science, 38 Saigounaka, Myoudaiji-chou, Okazaki-shi, Aichi 444-8585

<sup>C)</sup> National Institute of Radiological Sciences, 4-9-1 Anakawa, Inage-ku, Chiba-shi, Chiba 263-8555

### Abstract

We are planning to introduce 5T superconducting bending magnets and a 7T superconducting wiggler for emission of hard X-ray in Central Japan Synchrotron Radiation Research Facility. The conduction-cooled coils of the magnets will be refrigerated by 4K-GM cryocoolers without cryogenic liquids. National Institute of Radiological Sciences (NIRS) has a prototype of superconducting wiggler cooled by the same system, so that we transferred the prototype magnet to Nagoya University and performed long-time running test in order to confirm the stability of the temperature of the conduction-cooled coils. The temperature of the coil was almost constant at 5.4 K. We also measured the magnetic field. The results of the measurements were compared to simulations in order to evaluate the accuracy of the simulation program, and then we design the superconducting bending magnet for Central Japan Synchrotron Radiation Research Facility by using the program.

## 中部シンクロトロン光利用施設（仮称）計画のための 超伝導電磁石の検討

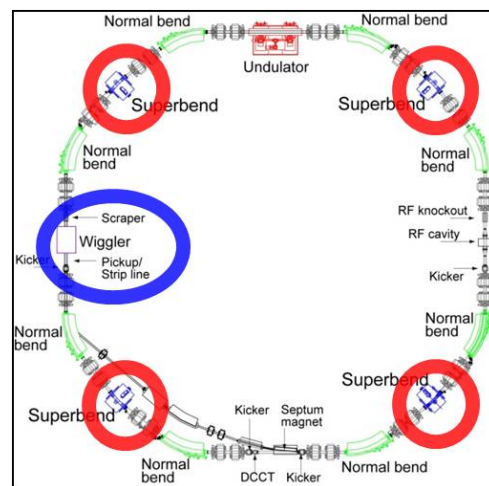
### 1. はじめに

名古屋大学の立案による小型シンクロトロン光施設を核とした「光科学ナノファクトリー計画」を基礎として、愛知県、産業界、大学、研究機関が一体となり、中部シンクロトロン光利用施設計画（中部SR計画）<sup>[1]</sup>が進行中である。

中部SR計画では、周長62.4m、電子エネルギー1.2GeVを持つ、電子蓄積リングが建設される予定であり、小型でありながらX線利用が可能な光源とするために、超伝導偏向電磁石や超伝導ウィグラーといった、高磁場を発生させる超伝導電磁石を導入する予定である。超伝導偏向電磁石は、ピーク磁場5T、偏向角 $12^\circ$ のものを4台導入し、それぞれから2~3本のビームラインを取り出すことで、合計10本程度のX線ビームラインが利用可能となる。電子蓄積リングの概略図を図1に示す。

中部SR計画では、超伝導電磁石には冷凍機による直接冷却方式を採用する予定であり、同様の方式を採用している超伝導ウィグラー試験機<sup>[2]</sup>を放射線医学総合研究所（放医研）より名古屋大学へ移設し、長時間運転試験を行った。

また、超伝導ウィグラーの磁場測定を行い、測定結果と磁場シミュレーションとの比較をした。このシミュレーションプログラムを用いて、中部SR計画に導入する超伝導電磁石のコイル・磁極形状の提案を行った。



○ : 超伝導偏向電磁石

○ : 超伝導ウィグラー

図1：中部SR施設 電子蓄積リング概略図（案）

## 2. 超伝導ウィグラ試験機

放医研より移設した超伝導ウィグラ試験機の外観を図2に、各パラメータを表1に示す。1つの主コイルと2つの補助コイルが、ステンレス外装で囲われた銅製の50K熱シールド内に存在し、主コイルとは逆向きの磁場を発生させる補助コイルが主コイルを挟むように配置されている。これら3つのコイルはいずれもレーストラック型のコイルである。コイルの内側には鉄製のコアが設置されている。



図2：超伝導ウィグラ試験機

表1：超伝導ウィグラ試験機パラメータ

寸法	840 (W) × 1184 (L) × 1150 (H) mm
コイル	主コイル (Nb3Sn) × 1 補助コイル (NbTi) × 2
最大磁場	主コイル：7 T 補助コイル：4 T
コイルギャップ	66 mm
主-補助コイル間距離	210 mm
定格電流値	208 A (for 7 T)
冷凍機	4K-GM Type 1. 3W at 4.2K, 40W at 4.5K

超伝導ウィグラを放医研にて、液体窒素と冷凍機を用いて常温から極低温まで冷却した後、低温を保持したまま名古屋大学まで搬送した。搬送の際は冷凍機を稼働させないため、コイルの温度は5Kから23.4Kまで上昇したが、設置後に冷凍機を稼働させることで、20時間後には5Kに到達した。その後の定格電流208Aでの通電試験でも問題なく動作した。

しかし、定格電流を通電するとコイル温度が徐々に上昇し、励磁開始から約24時間後にはクエンチ防止のためにインターロックを設定している温度(6K)付近まで上昇し、さらに上昇をつづけたため消磁した。この時点での冷凍機および冷凍機用コンプレッサの総運転時間は29104時間であり、定格電流通電時の温度上昇の原因が冷凍機能力の低下にあると考え、冷凍機の交換及びコンプレッサのメンテナンスを行った。冷凍機の交換は低温で実施した。冷凍機を停止してから、交換後に再稼働させるまでの時間は約1時間半であり、冷凍機の交換

によりコイル温度は約16.5Kまで上昇したが、約12時間後には5Kまで下がった。

図3がメンテナンス前、図4がメンテナンス後のコイル温度の時間経過を示している。メンテナンス後のコイル温度は、ほぼ5.4Kで一定となり、35日間の連続運転でもほぼこの値を保っている。

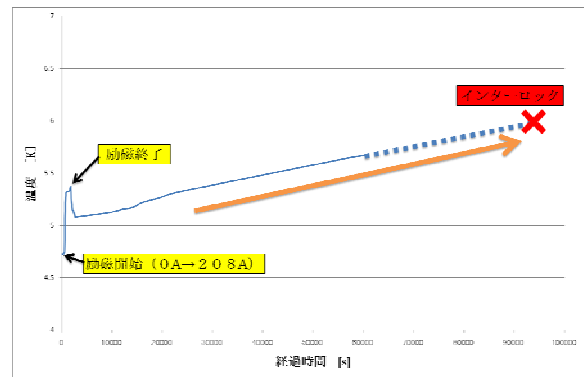


図3：コイル温度 (室温24℃、メンテナンス前)

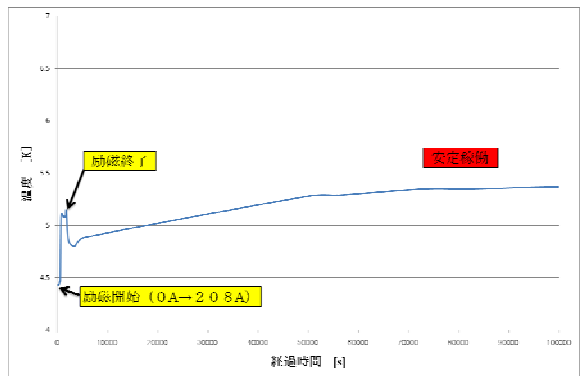


図4：コイル温度 (室温31℃、メンテナンス後)

## 3. 磁場測定

ウィグラ内部の鉛直方向磁場成分の測定を行い、シミュレーション結果と比較した。磁場測定には、ホール素子をプローブとしたガウスメータを使用し、シミュレーションには、MATHEMATICA上で動作する計算コードRADIA<sup>[3]</sup>を用いて磁場を計算した。

図5にシミュレーションを行ったモデル図と2次元磁場分布を示し、図6にはビームの進行方向における磁場分布の、実測値と計算値を示す。実測値と計算値では、ピーク磁場7Tが発生する場所において1.1%の差異であった。

また、ビーム軌道に沿った中心軸から水平面上で左右にそれぞれ8mmおよび20mmずらしたライン上での磁場測定も行い、計算値との比較を行った結果を図7に示す。実測値と計算値の差は最大で1.4%であった。

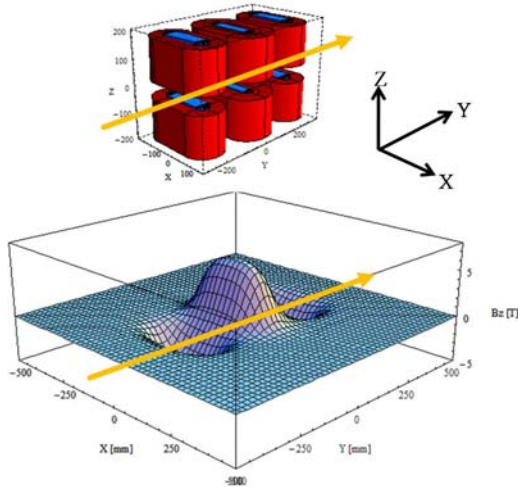


図 5 : モデル図と 3 次元磁場計算結果  
(矢印は電子ビームの進行方向)

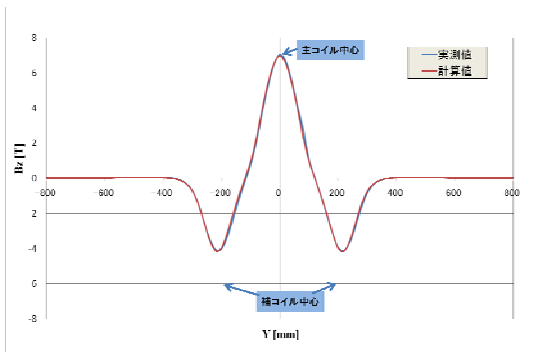


図 6 : ビームライン上 ( $X=Z=0$  mm) での磁場分布

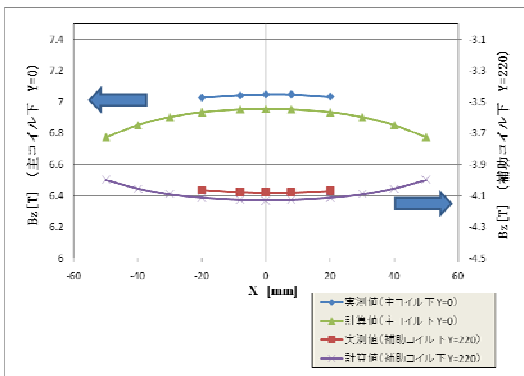


図 7 : 水平方向 ( $Z=0, Y=0, 220$  mm) の磁場分布

#### 4. 中部SR用超伝導偏向電磁石の磁場計算

中部SR施設に導入される超伝導偏向電磁石について検討した。1. 2 GeVのビームエネルギーにおいて、最大磁場5 Tを発生し、偏向角が $1^{\circ}$ となるようモデルを作成した。BL積は $0.84$  Tmである。この際、コイルはレーストラック型で検討した。鉄心はC型とし、材質は電磁軟鉄であるSU Yとした。コイル中心から200 mm離れた場所に設置したフィールドクランプの材質も同様にSU Yとした。今回計算に用いたモデルを図8に示し、ビームライン上での磁場分布を図9に示す。

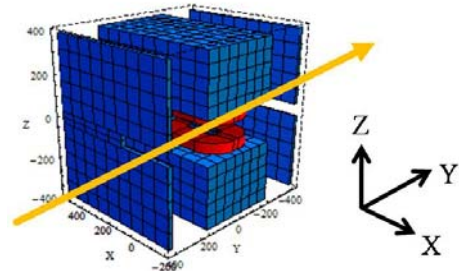


図 8 : 超伝導偏向電磁石モデル図  
(矢印は電子ビームの進行方向)

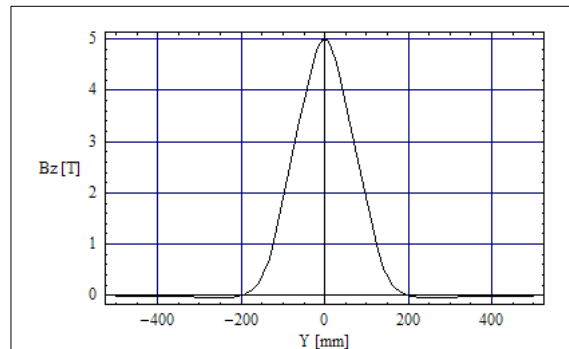


図 9 : ビームライン上 ( $X=Z=0$  mm) での磁場分布

#### 5. まとめ

放医研の所有する超伝導ウィグラー試験機を名古屋大学へ移設し、長時間運転試験を行った。定格電流を通電した状態で、1ヶ月に渡ってコイル温度はほぼ5.4Kで安定していた。

ウィグラーの磁場測定を行い、計算値との比較を行った。計算値はほぼ実験値を再現している。また、中部SR施設のための超伝導偏向電磁石のコイル、磁極形状を検討した。

今後は多極成分についての実測値、計算値の比較を行い、中部SR施設の超伝導電磁石における磁場分布、多極成分を予測し、電子ビームに対する影響を評価する。

#### 6. 謝辞

(株)東芝 電力システム社の和田司氏をはじめ、超伝導ウィグラー試験機の冷却・搬送の際ご協力いただいた皆様に、大変感謝しております。

#### 参考文献

- [1] 高嶋圭史, 加藤政博, 渡邊信久, 保坂将人, 竹田美和, 山根隆, 曾田一雄, “中部シンクロトロン光利用施設(仮称)計画”, 日本放射光学学会誌, Vol. 21. No. 1, 10 (2008).
- [2] M.Sasaki, M.Torikoshi, et al., “DEVELOPMENT OF SUPERCONDUCTING WIGGLER AT NIRS” Proceedings of EPAC (2002), 2442-2444
- [3] <http://www.esrf.eu/Accelerators/Groups/InsertionDevices/Software/Radia>