

## あいち SR 超電導偏向電磁石の現状

### PRESENT STATUS OF SUPER-CONDUCTIVE BENDING MAGNETS AT AICHI SR

保坂将人<sup>#A)</sup>、山本尚人<sup>A)</sup>、高野啄<sup>A)</sup>、真野篤志<sup>A)</sup>、高嶋圭史<sup>A)</sup>、加藤政博<sup>A),B)</sup>  
 Masahito Hosaka<sup>#,A)</sup>, Naoto Yamamoto<sup>A)</sup>, Takumi Takano<sup>A)</sup>, Atsushi Mano<sup>A)</sup>, Yoshifumi Takasima<sup>A)</sup>,  
 Masahiro Kato<sup>A),B)</sup>

<sup>A)</sup> Synchrotron Radiation Research Center, Nagoya University

<sup>B)</sup> UVSOR Facility, Institute for Molecular Science, National Institutes of Natural Sciences

#### Abstract

The accelerator complex of Aichi SR has been successfully constructed and commissioned in 2012. The storage ring has four 5T-super-conductive bending magnets<sup>[1]</sup> which can produce hard X-ray synchrotron radiation. The optical property of the super-conductive bending magnets was investigated based on electron beam measurement and is found to be consistent with simulation calculations with RADIA<sup>[2]</sup>. In January 2013, the first maintenance of the refrigerators of the super-conductive bending magnets was successfully carried out.

#### 1. はじめに

あいちシンクロトロン光利用施設（あいち SR、旧称中部シンクロトロン利用施設）の電子蓄積リングは世界で初めて、設計段階からから 4 台の超電導偏向電磁石組み込んだリングである。超電導偏向電磁石を初めて導入したのは LBL の ALS である<sup>[1]</sup>。ALS では既存の電子蓄積リングの偏向角度 10 度、磁場強度 1.3 T の常電導偏向電磁石を 5 T の超電導偏向電磁石に置き換えた。それに対し、我々は設計当初から 4 台の偏向角度 12 度の 5 T 超電導電磁石を導入し、コミッションングを行った。超電導偏向電磁石の導入により、エネルギーは 1.2 GeV と比較的低エネルギーながら臨界エネルギー 4.8 keV の放射光が発生し、最大 20 keV までの硬エックス線が利用可能としている。

本稿ではこの超電導偏向電磁石に関して現在まで行われた、設計と軌道計算、コミッションングさらに 2003 年 1 月に行われた冷凍機メンテナンスについて報告する。なお、加速器の詳細については文献 [3]を参照されたい。

#### 2. 超電導電磁石の概要

あいち SR の超電導偏向電磁石は名古屋大学の基本設計をもとに（株）東芝が詳細設計を行った。超電導偏向電磁石の設計諸元を Table 1 に示す。また、コイルおよび磁極形状を Figure 1 に示す。この図では見え易さのために漏れ磁場を抑制するフィールドクランプは省かれている。あいち SR の超電導偏向電磁石の超電導コイルの冷却は液体 He を用いずに冷凍機による直接冷却を採用している。コイルは鉄芯を介して冷却され、現在では 3.6 K 以下の温度に達している。冷凍機のコンプレッサーは各冷凍機につき 1 台使用し、加速器遮断壁の外に設置されている。

<sup>#</sup> m-hosaka@nusr.nagoya-u.ac.jp

Table 1: Basic parameters of super-conductive bending magnet.

Item	Value	Unit
Max. Magnetic Field	5.1	T
Coil	NbTi-Cu	
Bending Angle	12	deg.
Bending Radius	800	mm
Max. Current Density	111	A/mm <sup>2</sup>
Max. Electric Current	100	A
Refrigerator		
Number per magnet	1	
Type	Sumitomo	
Cooling Method	Gifford-McMahon (GM)	
Capacity (1st stage)	45	W
Capacity (2nd stage)	1.5	W
Attained temperature	< 3.6	K

#### 3. 超電導偏向電磁石の軌道計算

2010 年の加速器全体の詳細設計の期間中に（株）東芝の詳細設計をもとに超電導偏向電磁石における電子ビームの軌道計算を行った。3 次元磁場分布は計算コード RADIA<sup>[2]</sup>で計算し、電子ビームの運動方程式をルンゲクッタ法によって数値的に解いた。Figure 2 に計算された水平面上の軌道と曲率半径 800 mm の軌道との比較を表す。図で示されている

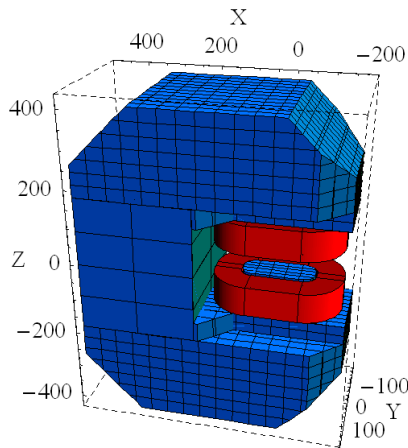


Figure 1: Drawing of core (blue) and coil (red) of Superbend.

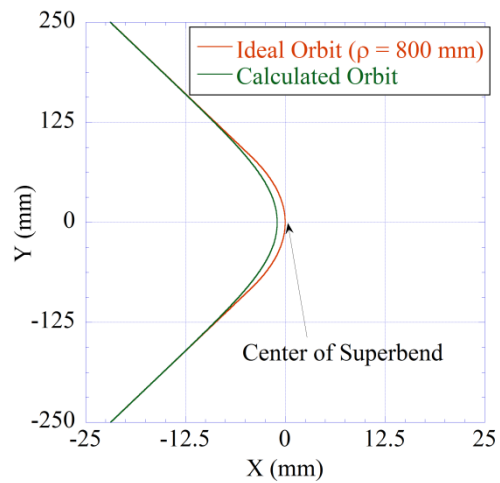


Figure 2: Calculated orbit in Superbend. The beam enters from lower left and is deflected by 12 deg.

ように発光点が約 1 mm 内側に移動している。これは超電導偏向電磁石の漏れ磁場の影響で、曲率半径が大きくなるのが原因である。フィールドクランプによって漏れ磁場の大部分は抑制してはいるが、完全に抑えることは困難である。発光点の移動については、ビームライン担当者と協議の上で支障がないことを確認した。曲率半径の変化は軌道長にも影響を与え、0.12 mm だけ軌道長が短くなる。超電導偏向電磁石は 4 台あるので、合計で軌道は 0.48 mm だけ短くなる。この軌道長の変化は周長 72 m の電子蓄積リングの 500 MHz の rf 周波数にして、3.5 kHz に対応する。これも十分の調整の範囲内であった。

Figure 3 に超電導偏向電磁石の多極成分についての計算を示す。超電導偏向電磁石への入射水平位置の関数として出射時の水平角度変化をプロットした。図から明らかなように超電導偏向電磁石には 6 極磁場成分があり、積分された強さは 1.2 GeV 電子ビームに対して  $7.0 \text{ m}^2$  である。6 極磁場が生じることは超電導偏向電磁石の磁場空間分布が平坦でないことに起因する。Figure 2 で示したように、ビーム軌道は超電導偏向電磁石の中心から内側を通るので、ビームは 4 極磁場を感じる。これについては後述する。6 極磁場は超電導偏向電磁石に前後に 6 極電磁石を設置して補正を行うことにした。

#### 4. 超電導偏向電磁石のコミッショニング

2011 年～2012 年にかけての加速器建設時に超電導偏向電磁石は予め冷却した状態で東芝の工場から出荷され、あいち SR 加速器室に設置された。約 5 日間冷凍機を稼働させることで超電導偏向電磁石は 3.6 K まで冷却することができた。

超電導偏向電磁石の電流調整を含む電子蓄積リングのコミッショニングは 2012 年 6 月後半から始められた。当初は磁場測定データをもとに偏向電磁石および各超伝導偏向電磁石の設定電流値を決めたが、

電子を蓄積することはできなかった。そこで各電磁石のパラメータを個別に振る調整を行い、最終的に約 3 週間を要して、最初の蓄積に成功した。ただし、この期間を要した原因には立ち上げ当初の加速器コンポーネントのトラブルも挙げられる。

電子ビーム蓄積成功直後に各超電導偏向電磁石の再調整を行った。それにはビーム位置モニター (BPM) を用いることが最適と考えられるが、あいち SR の建設スケジュールおよびコストの問題で蓄積リングの BPM の校正をすることができなかった。そこで BPM の位置絶対値を用いず、相対値を用いる分散関数の測定によって各超電導偏向電磁石の調整を行った。まず、各超伝導偏向電磁石のバランスが悪い場合は大きな COD が発生する。前に述べたようにこの COD によって超電導偏向電磁石中の軌道がずれることで電子ビームは 4 極磁場を感じ、リング 1 周の光学関数の対称性が崩れる。その影響は水平方向分散関数に現われるので、水平方向の分散関数を測定し、その対称性が悪い場合は超電導偏向電磁石を調整する。これを繰り返し行い、対称性の高い分散関数が得られるまで調整を行った。

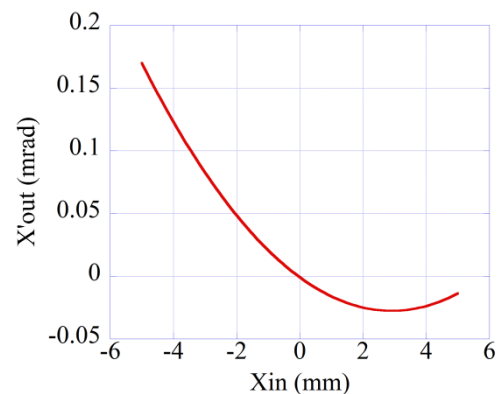


Figure 3: Calculated sextuple component of Superbend.

### 5. 超電導偏向電磁石に関するスタディ

コミッションングによって 2012 年 9 月に蓄積電流が目標である 300 mA に達した。また、モニター系の整備により精密な加速器調整が可能になった。これまで校正されていなかった BPM は Beam Based Alignment<sup>[4]</sup>により絶対位置校正を行った。モニター系の充実とともに、超電導偏向電磁石に関するスタディを進めた。

Figure 4 に超電導偏向電磁石の電流値を変化させたときの軌道変化とその計算の比較を示す。3 章で説明した計算により超電導偏向電磁石の転送行列および励起電流値を変えることにより分散を求め、それらをもとに閉軌道の計算を行った。Figure 4 は励磁電流を 0.05 A 変えた測定でおよび計算で、それらは良く一致することがわかる。

また、超電導偏向電磁石の励磁電流のさらなる調整を行った。それにはまず、電子蓄積リングの全ての水平方向ステアリング電磁石を切った状態でビーム軌道の測定を行った。さらに Figure 4 で示した測定値をもとに軌道が全ての BPM の中心にもっとも近づく 4 台の超電導偏向電磁石の励磁電流値を最小二乗法で計算した。電流調整の結果、得られた軌道を Figure 5 に示す。軌道の BPM 中心からのずれの RMS 値は 1.0 mm となった。実際この軌道は蓄積リングの各コンポーネントのアライメントのエラーなどの影響を受けていると考えられるものの、現状で可能な超電導偏向電磁石および偏向電磁石の励磁電流調整が達成できたものと考えられる。

超電導偏向電磁石の 6 極成分に関しては自然クロマチシティの測定によって調べた。実測のおよび光学関数の計算で求めた自然クロマチシティの比較を Table 2: に示す。ここでわかるように実測された自然クロマチシティは超電導偏向電磁石の 6 極成分を考慮に入れた計算結果とよく一致し、且、6 極成分を考慮に入れない計算結果とは大きな不一致が見られる。このことから第 3 章で求めた超電導偏向電磁石の 6 極成分が妥当であるといえる。

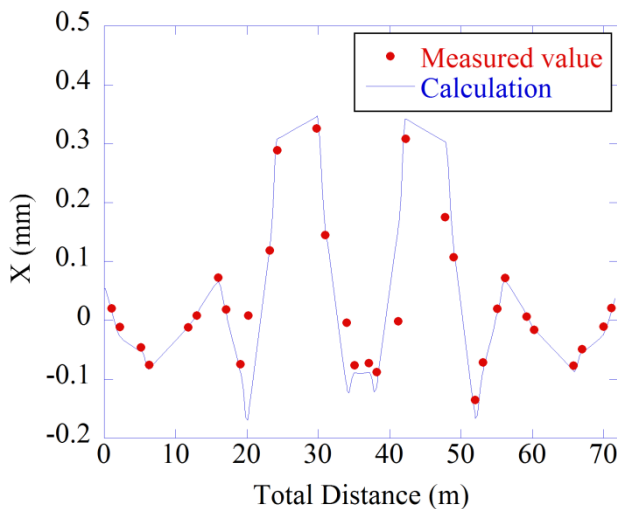


Figure 4: Closed orbit distortion due to Superbend.

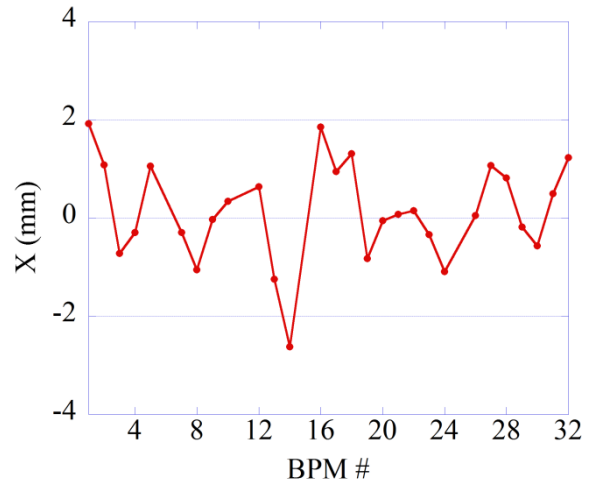


Figure 5: Beam orbit with all stirring magnet turned off.

Table 2: Comparison of measured and calculated natural chromaticity

	Horizontal	Vertical
Measured Value	-12.0	-5.1
Calculated Value	-12.1	-4.9
Calculated Value (without sextupole-field of Superbend)	-11.6	-6.9

### 6. 冷凍機のメンテナンス

超電導偏向電磁石を低温に保つ冷凍機ヘッドは常時運動しており、一部部品の摩耗などが起こることなどから年 1 回のメンテナンスが必要である。あいち

SR では鉄心およびコイルを低温に保ったまま冷凍機ヘッドを交換する方式を採用している。冷凍機

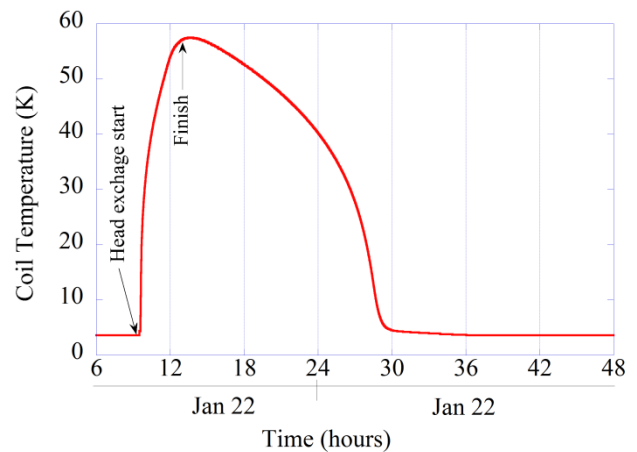


Figure 5: Temperature of super conductive coil before, during and after exchange of refrigerator head.

の最初のメンテナンスは 2013 年 1 月 21 日～25 日、2 月 4 日～8 日の 2 回にわたって行われた。1 回目で 2 台の超電導偏向電磁石の冷凍機ヘッドを新品に交換し、1 回目で取り出した冷凍機ヘッドをオーバーホールし、2 回目に残る 2 台の超電導偏向電磁石の冷凍機ヘッドと交換した。Figure 6 に交換作業の前後のコイル温度の変化を示す。交換には一部昇温が作業に伴うために、最大で 58 K までの温度上昇があった。作業後に冷凍機を働かせることで、作業時間も含めて 27 時間でもとの 3.6 K に再到達した。以上のように最初の冷凍機のメンテナンスは順調に行われ、今後の冷凍機長期安定稼働の見通しもついた。

## 7. まとめ

あいち SR の電子蓄積リングは世界で初めて、設計段階からから 4 台の超電導偏向電磁石組み込んだリングである。超電導偏向電磁石の調整を含むコミッションは磁場測定データの不足に起因する困難もあったものの、比較的短期間に成し遂げることができた。また、電子蓄積リングの電子ビームに関するスタディから超電導偏向電磁石の光学特性は予め行ったシミュレーション計算とよく一致した。さらの最初のメンテナンスにおいて冷凍機ヘッドの交換が順調に行われた。

あいち SR では 2013 年 3 月よりユーザー利用が開始され、超電導偏向電磁石からの放射光を利用する 4 本の硬エックス線ビームラインが立ち上がり稼働をしている。さらに今年度中に新たな硬エックス線ビームラインが建設予定である。

## 参考文献

- [1] D.Robin, et al., Superbend upgrade on the Advanced Light Source”, NIMA, vol.538, pp.65-92, 2005.
- [2] P. Elleaume et. al., Proceedings of 1997 Particle Accelerator Conference, Vancouver, B.C., Canada, May 12-16,1997,pp.3509-35.  
<http://www.esrf.eu/Accelerators/Groups/InsertionDevices/Software/Radia/>
- [3] N. Yamamoto, et al., Beam commissioning of central japan synchrotron radiation facility. 加速器, 9(4):223-228, 2012.
- [4] R. Brinkmann, M. Böge, Beam based alignment and polarization optimization in the HERA electron ring, Proc. EPAC’94, London, DESY Print M-94-03, 1994.