

# AURORA INJECTOR: RACETRACK MICROTRON MAGNET SYSTEM

*Michiro Sugitani, Masahiro Miyabayashi, and Yasushi Sasaki*

Synchrotron Radiation Technology Department  
Sumitomo Heavy Industries, Ltd.

## ABSTRACT

A 150-MeV racetrack microtron as an injector of the AURORA system has been developed. The microtron has many kinds of magnet systems in itself, and some of them are designed with great creative developments. Especially, the main magnet provides a sufficiently uniform magnetic field, and the strengths of the quadrupoles using permanent magnets are designed to be adjustable. In this paper, the specifications of the magnetic system of the microtron are presented, and several magnetic fields measured are discussed.

## 1. はじめに

住友重機械工業(株) (SHI) では、X線リソグラフィ用単体超電導磁石を用いた世界最小のSRシステム、AURORAを新しく開発した<sup>1)</sup> AURORAは入射器としても、新規に開発された150 MeVのレーストラック型マイクロトロン<sup>2,3)</sup>を採用している。レーストラック型マイクロトロンがSRリングの入射器としては優れた性質を持っていることは良く知られている。ライナックに比べて、コンパクトにできること、RFパワーが小さくて済むこと、出力ビームが良質であることのほか、建設コストが安くすむことなどが特徴である。

それにもかかわらず、レーストラック型マイクロトロンの採用例が少なかった原因の1つに、主磁場に非常に高い精度が必要とことが挙げられる。S. P. Kapitza<sup>4)</sup>によれば、 $N$ 回加速のマイクロトロンの主磁場には $1/3N^2$ の均一度が必要になる。 $N = 25$ では約0.05%になる。これは1.2 Teslaの磁場に対して約6ガウスであり、有効磁場領域すべてにわたってこの精度を確保するには、磁石設計においてかなりの慎重さが要求される。レーストラック型では軌道修正要素を組み込むのでこの制限は若干緩和されるが、本質的には同じである。SHIではこの問題に対して、高精度の研磨技術と精密な磁場測定で対応し、レーストラック型マイクロトロンの実現を計った。

一方、横方向の収束力を自由にコントロールするために永久磁石を用いた4重極磁石を開発し、各ターンに組み込んだ。この4重極磁石は最大で6.8 kG/cmを実現し、ターンセパレーションがわずか3 cmでも十分な収束力を保証している。更に、この4重極磁石は簡単な構造で収束力が調整できるように設計されている。

本稿ではレーストラック型マイクロトロンで使用した磁石の設計仕様を掲載するとともに、上記の主電磁石と永久4重極磁石に関しては磁場測定の方法と、測定結果について論じていく。

## 2. 磁石の仕様

本マイクロトロンには多くの磁石が使用されている。入射系では収束用磁石として、20 keVのエネルギー領域においてソレノイド磁石を、120 keV領域では電磁石4重極を用いている。その他に4対のXYステアラを備えている。入射系からライナックに導くために、45°の偏向磁石を使用しているが、この磁石は12 MeV以上のビーム軌道を修正するために、3連の

偏向磁石で構成され、そのビーム軌道形状からシケーン(chicane)電磁石と呼ばれる。

主電磁石は  $1100 \times 530 \text{ mm}^2$  の磁極面を持ち、最大 1.5 Tesla の磁場を発生する。150 MeV の運転時には 1.23 Tesla に保たれる。磁石間距離は最小 10.00 mm である。垂直方向の集束力を持たせるために磁場勾配を付加するべく、磁石間距離に傾きを持たせてあり、最大距離は 10.56 mm になっている。この時、平均で 0.14 Tesla/m の磁場勾配が得られる。均一な磁場を得るためには磁極面を精密に仕上げる必要があるが、このマイクロトロンの場合 10 mm の磁極間距離に対して、その 0.05 % は  $5 \mu\text{m}$  に相当する。両磁極面の平坦度はその半分の  $2.5 \mu\text{m}$  の精度を持つ必要があるが、当社の超精密研磨機(工作機械製造用のマザーマシン)を用いて研磨したところ、 $\pm 1 \mu\text{m}$  の精度で仕上がった。この磁極をアルミ製のスペーサーで固定して均一な磁場を得られるようにした。6 MeV ビームの折り返しのために用いる逆磁場電磁石はヨークを主電磁石と共有している。磁極の大きさは各ターンとも  $15 \times 20 \text{ mm}^2$  (1 ターン目だけは  $40 \times 20 \text{ mm}^2$ ) で、各磁極に補正用のコイルを取り付けている。磁極間距離は 14 mm で、水平面内でビーム進行方向に垂直な方向の磁場の均一性を得るために、磁極面の両端に 0.5 mm 高のシムを付けている。逆磁場磁石の最大磁場は 2 k ガウスであり、補正量は  $\pm 100$  ガウスになっている。

軌道集束用に Q 磁石をダブレット構成にして用いているが、6 MeV ビームが通過する 1 ターン目だけは微妙な調整が必要なために電磁石を使用し、残りはすべてサマリウムコバルトの永久磁石で構成している。Q ダブレットは各ターンの両端に 1 組ずつ、24 ターンまで計 48 組取り付けている。Q 電磁石は磁極長が 20 mm で、ダブレットの磁極間距離はすべての Q 磁石で 20 mm になっている。Q 電磁石の磁場勾配は最大で 3 kG/cm である。永久磁石を用いたものは 3 種類の集束力に分類される。サマリウムコバルト片の表面起磁力はすべて同じで、 $B_s = 8.28 \text{ kG} \pm 30 \text{ G}$  のものを使用している。磁場勾配の強さは、Q 磁石の構成を 4 片のものとは 8 片のもので差を付けており、8 片構成のものは磁極長を 15 mm と 20 mm のものを用意して集束力の違いを得ている。4 片構成の Q 磁石の磁極長は 20 mm である。縦ステアは 1~6 ターンに 1 個ずつ配置され、各々それぞれのエネルギービームに対して  $\pm 10 \text{ mrad}$  の補正を保証している。

150 MeV のビームの引き出しには、24 ターン目のビームへの悪影響を与えないように、磁気シールドを十分に考慮した偏向電磁石を使用している。引き出し時の偏向角は  $10^\circ$  で、その時の磁場強度は 6.8 k ガウスである。最大磁場強度としては、7.0 k ガウスを観測している。

### 3. 主電磁石の磁場測定

主電磁石及び逆磁場電磁石と、永久 Q 磁石については精度の高い磁場測定を行なった。主電磁石及び逆磁場電磁石の磁場測定にはホール素子を用いた。ホール素子は、磁極間距離 10 mm という狭い間隙を測定するために温度コントローラを付加することが不可能なため、 $0.01^\circ \text{C}$  の精度で温度測定が可能なサーミスタを内蔵して、温度変化に対する較正も同時に行なった。その結果 10 k ガウス以上の磁場に対して、 $\pm 0.3$  ガウスの測定精度を得ることができた。低い磁場領域では  $\pm 0.6$  ガウスに収まっている。

測定中には電源の変動や室温の揺らぎによる全体磁場の変化を NMR でモニタし、補正を行なった。この NMR で観測された変動は 12 時間で最大 2 ガウスであった。測定の結果、主電磁石の入り口近傍、特に磁石の両端を除いては、ビーム軌道領域においては  $\pm 1$  ガウス程度の一様性を確保できた。入り口近傍の非一様性は磁石端における磁気飽和が原因と考えられる。この影響は磁場を所定の値より高くしてから下げると顕著になり、その時は両端と中央付近で約 40 ガウスの差が発生する。しかしながら、磁石を一度逆方向に励磁してから、再び所定の値に戻すと、この効果を和らげることができる。その結果最良の状態では  $\pm 5$  ガウス程度の歪みに押さえられ、所期の目標値をクリアできた。主電磁石単体では前述の手順で磁場を立ち上げれば内部磁場が再現できることを確認したが、マイクロトロンに組み上げた場合、励磁速度によって発生する渦電流の強度が変わり、入射系に残留する磁場に変化が見られることが発見された。これを回避する

ために主電磁石の励磁速度は、十分遅くなるようにコントロールしている。

逆磁場電磁石はビーム通過領域で全ターンが補正範囲であることを確認した。逆磁場に取り付けたステアラは互いに強く結合しているので、1つのステアラの強度を変更すると、他のステアラに影響を及ぼす。この効果はビーム調整に非常な困難をもたらすので、その結合係数をマトリックス形式で求め、制御系のソフトウェアで常に補正できるようにした。この操作の整合性もホール素子を用いて確認した。

#### 4. 永久Q磁石の磁場測定

永久磁石はその特性から各磁石片の磁場強度をそろえるのが難しい。また加工精度もあまり高くできないので、この2つの要因で4重極に組み上げたとき、機械中心と磁場中心が一致せず、多極成分の発生も押さえにくい。マイクロトロンの場合、幸いにも1個の電子は同じQ磁石を高々26回しか通過しないので、多極成分の影響はシンクロトロンなどに比べて深刻ではないが、小さいにこしたことはない。一方、磁場中心の変位は他のステアラなどに対する負担が大きくなるので、正確に求めたい。

そこで我々は回転サーチコイルの方法<sup>5)</sup>で中心を求め、その中心に合わせてQ磁石の外枠を削り取り、機械中心と磁場中心の一致を計った。サーチコイルは幅3.5mmで7mmφの領域について測定した。その結果、中心のずれは最大で0.3mm程度、多極成分は4極成分と比較して最大で2%程度であった。磁場中心の測定精度は約30μmと推定される。機械中心と磁場中心を合わせたQ磁石をダブレットに組み込んだ後、§3で述べたホール素子を使って、FDの確認と最大磁場勾配及び有効磁場領域の測定を行なった。結果的にはすべて設計仕様を満足していることを確認した。

#### 5. まとめ

X線リソグラフィー用のSR光源であるAURORAの入射器として、150MeVのレーストラック型マイクロトロンを開発した。その磁石系には高い精度が要求されるが、一部の漏洩磁場を除きほぼ設計仕様どおりに完成し、磁石系は非常に安定して動作している。RF系との連動試験もうまくいき、150MeVのビーム取り出しに成功した。

#### REFERENCES

- 1) N. Takahashi, Nucl. Instr. Meth. in Phys. Res. B24/25 (1987) 420
- 2) M. Sugitani et al., Proc. of 6th Sympo. on Accel. Sci. and Tech. Tokyo, Japan (1987) 186.
- 3) M. Sugitani et al., Proc. of European Particle Accel. Conf. '88, Rome, June (1989) 596.
- 4) S. P. Kapitza et al., The Microtron, Harwood Academic Publisher, Ltd.; London (1978)
- 5) H. Okamoto et al., Bull. of the Inst. of Chem. Res., Kyoto Univ., Vol. 64, #1 (1986)