

超伝導 RF 電子銃のエネルギー測定のための 90 度偏向電磁石の製作と 磁場測定

MANUFACTURE AND MAGNETIC FIELD MEASUREMENT OF 90 DEGREES BENDING MAGNET FOR SUPERCONDUCTING RF GUN EMITTANCE MEASUREMENT

植木 竜一^{#, A)}, 大澤 康伸^{A)}, 土屋 清澄^{A)}, 増澤 美佳^{A)}, 寺島 昭男^{A)}, 王 旭東^{A)}, 許斐 太郎^{B)}
Ryuichi Ueki^{#, A)}, Yasunobu Ohsawa^{A)}, Kiyosumi Tsuchiya^{A)}, Mika Masuzawa^{A)}, Akio Terashima^{A)}, Xudong Wang^{A)},
Taro Konomi^{B)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization, ^{B)} Michigan State University/FRIB

Abstract

The superconducting RF (SRF) electron gun is capable of both high field acceleration and high repetition rate operation. At KEK, a SRF electron gun consisting of a 1.3 GHz, 1.5-cell superconducting cavity and a K_2CsSb photocathode is being developed for ERL applications. In the vertical test, the SRF gun was achieving a maximum surface electric field of 75 MV/m and a maximum surface magnetic field of 170 mT. Each component is currently being prepared for horizontal beam performance test of the SRF gun. The 90-degree bending magnet for energy measurement was required a radius curvature of 100 mm and a magnetic field accuracy of 1%. The fabrication and field measurements completed by March 2022. In this paper, we report the details of the design, fabrication, and magnetic field measurement of the 90-degree bending magnet.

1. はじめに

超伝導 RF 電子銃は高電界加速および高繰り返し運転の両方が実現可能な電子銃であり、CW-FEL への応用など世界的に開発が進められている。KEK では、ERL への応用を目指して 1.3 GHz、1.5 セルの超伝導空洞と K_2CsSb フォトカソードから構成される超伝導 RF 電子銃の開発が行われている。2021 年までに超伝導 RF 電子銃 2 号機の製造および電子銃単体での性能試験が行われ、最大表面電場 75 MV/m、最大表面磁場 170 mT という高い値を実現した[1]。現在、電子銃のビーム性能試験のための各コンポーネントの整備が進められている。ビーム試験の一つとして、電子ビームのエネルギー測定が予定されており、電子ビーム収束用の超伝導ソレノイド磁石を通過した電子ビームを 90 度偏向させ、ビームモニターを使ってビームサイズを測定することでエネルギー測定を行う。測定に使用される 90 度偏向電磁石は、曲率半径 100 mm とし、磁極の中心から水平方向に ± 10 mm における磁場精度は 1%以内であることが要求された。また 500 keV および 2 MeV のビームエネルギーでの試験が予定されているため、両方のエネルギー領域に対応でき、要求される磁場精度を実現するための偏向電磁石の製作を行った。2022 年 3 月までに製作および磁場測定が終了した。本発表では、90 度偏向電磁石の設計と製作、磁場測定の詳細を報告する。

2. 90 度偏向電磁石

ERL 用に開発されている超伝導 RF 電子銃のパラメータを Table 1 に示す。電子銃で生成される電子ビームの最大エネルギーは、2 MeV で要求されるエネルギー広がり率は 0.09%である。現在、実際に製作された電子銃の性能を確認する総合的なビーム試験に向けて各要素の製作が行われている。テストラインのデザイン図を Fig. 1 に示す。電子銃の下流に生成された電子を収束するための超伝導ソレノイド磁石が設置されており、その下流には電子ビームを 90 度偏向するための偏向電磁石、最下流にはビームダンプを兼ねたファラデーカップが設置される。

実験スペースなどの制約から、偏向電磁石の曲率半径は 100 mm、また使用する ICF70 のチェンバーがおさまるよう磁極間ギャップは 45 mm に設定された。この条件から決まるおおよその磁場の大きさは 81.9 mT となり、これから計算されるアンペアターンは 1 コイル当たり 1470A・turns であった。今回の電磁石は空冷となるため、コイルの電流密度が 1.3 A/mm² 以下になるように制約を設け、確保可能なコイルのスロットサイズと必要なアンペアターンを考慮した結果、コイルに使用する銅線は 2 mm \times 3.5 mm のノーメックス紙平角銅線、最大電流は 9 A、ターン数は 1 層当たり 15 ターンを 12 層としてトータル 180 ターンとした。Table 2 に偏向電磁石のパラメータを示す。また、今回製作にあたり、鉄ヨークの製作からコイル巻き、組み立てを全て KEK 内で行うこととした。

[#]ryuichi.ueki@kek.jp

Table 1: Parameter of SRF

Parameter	Value
RF frequency	1.3 GHz
Beam energy	2 MeV
Projected emittance	0.6 mm.mrad
Projected energy spread	0.09%(1.84 keV)
Peak electric field	41.9 MV/m
Peak magnetic field	95.2 mT
RF phase	55°
Geometrical factor	135.6 Ω
Target surface resistance	30 nΩ
Target Q value	4.5 × 10 ⁹
Target cavity loss	8 W

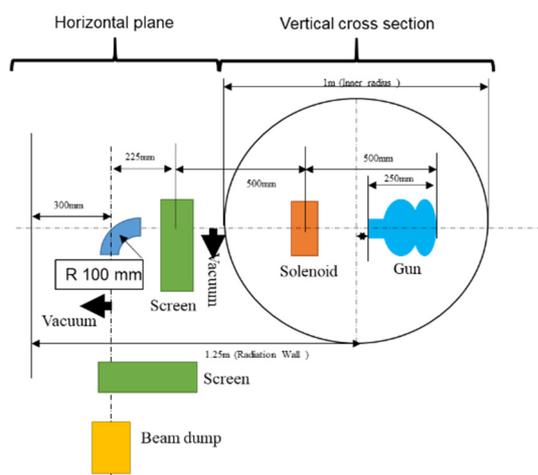


Figure 1: The layout for beam test.

Table 2: Parameter of bending magnet

Parameter	Value
Total energy	2.511 MeV (1.011 MeV)
Angle	90 degree
Radius	100 mm
Pole gap	45 mm
Magnetic field	0.0819 T(0.0291 T)
Cross section of coil	2 mm × 3.5 mm
Current	9 A
Current density	≤ 1.3 A/mm ²
Turn of coil	360 turns/2 coil

*()内は0.5 MeV時のパラメータ

3. 偏向電磁石の製作

3.1 鉄ヨーク

実験スペースが限られているため、電磁石をその場で組み立てられるように鉄ヨークを 5 分割にして製作した (Fig. 2)。ベースに上下の天板を取り付け、その天板に上下の磁極をそれぞれ取り付ける仕組みとした。各部品にはピン穴が開けられており、これにより組み立て時の位置精度を担保した。材質はSS400を使用し、積層構造ではなく、ブロック構造とした。偏向電磁石によって励起される磁場の大きさは、磁極間ギャップに反比例するため、ギャップ間の距離を一定時維持することは重要である。今回、真空チャンバーの出し入れを容易に行えるように磁石外側にはリターンヨークがない。そのため、磁石の自重や磁極間に働く電磁力によって磁極間ギャップが変わる可能性がある。計算により見積もった天板 (上側) と磁極 (上側)、上コイルの合計の重量は、約 28.4 kg であった。また、磁石を励磁した場合に各磁極に働く電磁力は以下の式で表わされる。

$$F = \frac{1}{4\pi\mu_0} \frac{(B * S)^2}{g^2} \quad (1)$$

これから計算される磁極間の電磁力は、約 19 N と計算された。自重と電磁力より磁極間ギャップの変化を防ぐため、また各パーツを固定しているボルトが緩むなどのトラブルに対応するため、上下の天板の間に直径 12 mm のステンレス製ロッドを 3 本挿入した。

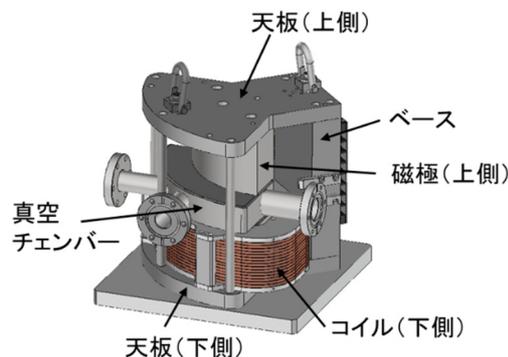


Figure 2: 3D drawing of bending magnet.

3.2 シムの設計

電子ビームは漏れ磁場の影響で電磁石の端よりも前からローレンツ力を受けて曲がり始め、R=100 mm の軌道から外れた軌道を通る可能性がある。そのため、R=100 mm から ±10 mm の範囲で磁場の分布が 1% に収まるように磁極の内側と外側にそれぞれ高さの違うシムを追加した。シムの幅を 5 mm に固定し、内側と外側のシムの高さを変えたときの磁場分布を磁場計算ソフト OPERA により計算した。Figure 3 は、シムの高さを変えたときの半径方向の磁場分布を R=100 mm の磁場強度を基準としてプロットしたものである。内側のシムを 1.5

mm、外側のシムの高さを 2 mm としたときに $R=100 \pm 10$ mm で磁場の均一度が一番良かった。さらに、磁石の中心とそこから 30° 、 45° 回転した場所でも同じように計算を行った結果、どの角度においても磁場の変化は 1% 以内に収まっていたため (Fig. 4)、シムの高さを内側 1.5 mm、外側 2 mm に決定した。通常シムは磁極面と滑らかにつながるように設計するが、今回は加工のしやすさを優先し、形状は四角とした。

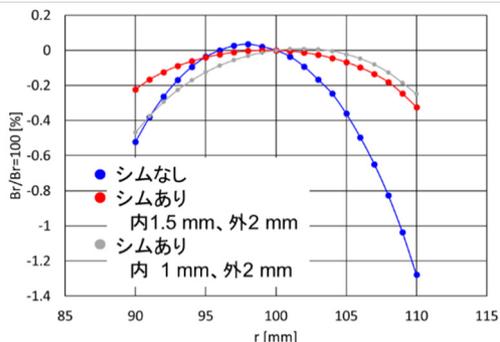


Figure 3: The magnetic field distribution in the radial direction at magnet center.

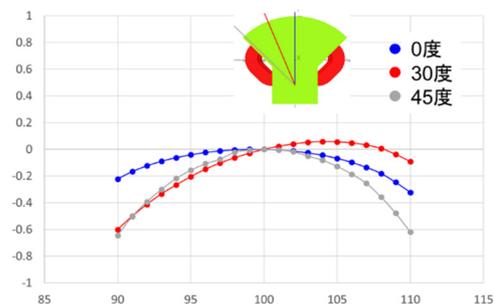


Figure 4: The magnetic field distribution in the radial direction at magnet center, 30 degree and 45 degree.

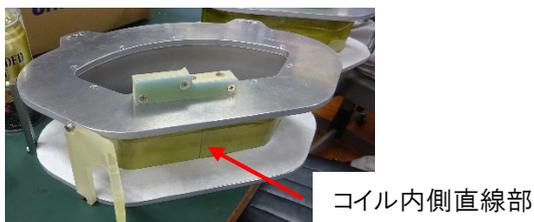


Figure 5: A coil bobbin.

3.3 コイル

コイルに使用する銅線は、出来るだけ大きな断面積が確保でき、ターン数が一番稼げるものとして市販品の中のノーメックス紙平角銅線 $2 \text{ mm} \times 3.5 \text{ mm}$ を用いた。Fig. 5 に示すようなコイルボビンを用意し、1 層あたり 15 ターン、これを 12 層、1 コイルあたり 180 ターン巻く設計とした。通常電磁石のコイルを巻くときは、巻いた銅線の緩み防止や銅線間の隙間を出来る限り少なくするため、銅線にある一定の引張り応力を与えながら巻いていく。し

かし、KEK に平角銅線用の巻線機がなかったため、今回は人の手で引っ張りながら平角銅線に応力をかけながらコイルを巻いた。実際に巻き始めると 1 層あたり 16 ターン巻くことができた。しかし、コイル内側の直線部において銅線間の隙間が大きくなり全体的にコイルが膨らみ 11 層しか巻くことができなかった。最終的なターン数は 176 で当初の予定より 4 ターン少ないが実験に必要な磁場が得られると判断した。

4. 磁場測定の結果

製作された偏向電磁石の磁場測定結果を示す。励磁曲線を測定するために、磁極中央にガウスメーター (F71:Lakeshore) を設置し、コイルに流す電流を変化させながら、各電流における磁場強度を測定した。電流のは 0 A から 0.4 A ステップで 8.8 A まで増加させ、同様のステップで 0 A まで減少させた。これを 5 ループ行った。Figure 6 に結果を示す。電流に対して磁場強度は線形に変化しており、鉄の飽和はみられていない。この結果から、81.9 mT (2 MeV) の磁場を励磁するために必要な電流は 7.92 A であった。Figure 7 は、Fig. 6 で求めた近似曲線から各測定値の差をプロットしたものである。電流の上げ下げによるヒステリシスは約 4~5 A の付近で最大となり、5%程度であった。

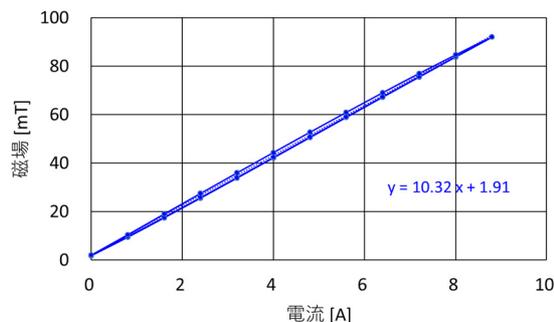


Figure 6: Excitation curve of bending magnet.

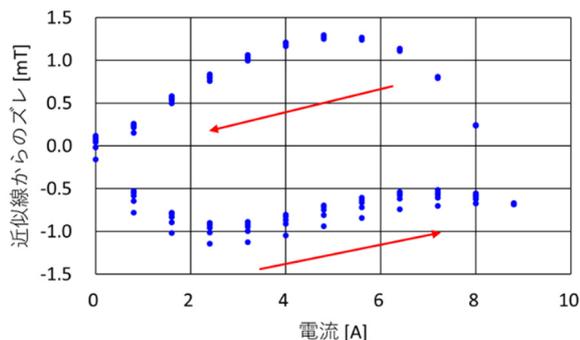


Figure 7: Hysteresis of bending magnet.

Figure 8 は磁石中心における半径方向の磁場分布の計算値と測定値を示している。R=90, 110 mm における磁場は R=100 mm における磁場に比べどちらも

0.5%以内であった。また、測定値と計算値は0.1%以内で一致しており、設計通りに磁石が製作できていたことが分かる。また、コイルに流す電流を変化させ、同様に $R=90, 110$ mm における磁場強度を測定したところ、どの電流においても $R=100$ mm における磁場強度に比べて 0.5%以内であることがわかった (Fig. 9)。これにより、0.5 MeV と 2 MeV 両方のエネルギー試験に対して要求された磁場精度を満たしていることを確認した。

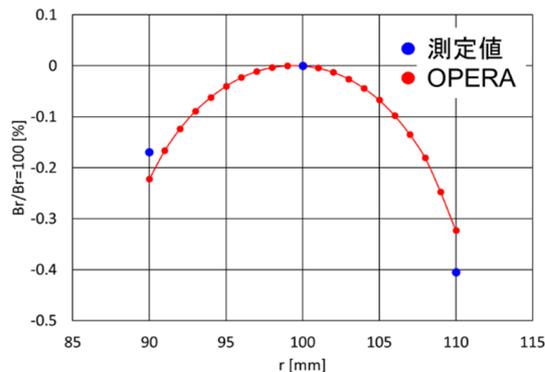


Figure 8: Measurement of magnetic field uniformity at magnet center.

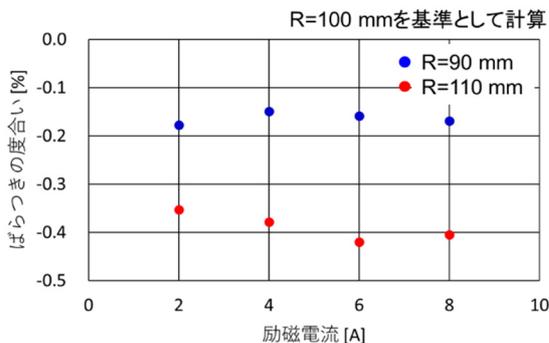


Figure 9: Measurement of magnetic field uniformity at each current.

5. ビーム軌道のシミュレーション

OPERA のトラッキング機能を使い、ビーム軌道のシミュレーションを行った。 $R=100$ mm の方向にビームを入射すると漏れ磁場の影響でビームは磁石手前からローレンツ力を受け、磁石の内側を通過する。そのため、BL が短くなり 90° より浅い角度でビームが出てきてしまう (Fig. 10 黒)。出来るだけ漏れ磁場影響を小さくするため、通常は磁石の入り口側と出口側で鉄ヨークを削りエッジ付近の磁場を弱くすることで対処するが、今回は加工のしやすさを優先したため、特に磁石のエッジの加工は行わなかった。励起磁場を強くして曲げ角を強くする方法

もあるが、磁石手前でさらにビームが曲げられ $R=90$ mm より内側をビームが通過してしまう可能性があるため、BL が大きくなるように入射位置を 5 mm 外側にずらして入射すると磁石内を通過するビームは $R=90 \sim 110$ mm 内を通り、さらにビームは 90° 偏向可能であることが分かった (Fig. 10 緑)。



Figure 10: The simulation of beam orbit at different injection position.

6. まとめ

SRF 電子銃のビーム性能試験のための 90° 偏向電磁石を製作した。磁石の製作に当たり、設計や製作、磁場測定まですべてを KEK 内で行った。半径方向の磁場分布を測定したところ、磁場強度は $R=100 \pm 10$ mm の範囲で1%以内に収まっており、要求を満たしていることが確認された。各電流における磁場の精度は要求を満たしていた。2022 年初めには横測定試験も行われた[2]。今後はビームを使った性能試験も予定されている。

謝辞

本研究の遂行にあたり、KEK 工作センターには磁石の製作に関してご協力頂き深く感謝いたします。

参考文献

- [1] T. Konomi *et al.*, “Development of High Intensity, High Brightness, CW SRF Gun with Bi-alkali photocathode”, in Proc. 19th Int. Conf. on RF Superconductivity (SRF2019), Dresden, Germany, Jun.-Jul. 2019, paper FRCAB4, pp. 1219-1222.
- [2] T. Konomi *et al.*, “Horizontal test of Superconducting RF gun #2 at KEK”, presented at the 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2022), Oct. 2022, WEP054.