

# COMET 実験用ミュオン輸送超伝導ソレノイド磁石のための ホール素子磁場測定装置の設計と製作

## DESIGN AND FABRICATION OF MAGNETIC MEASUREMENT SYSTEM WITH HALL ELEMENTS FOR MUON TRANSPORT SOLENOID OF COMET EXPERIMENT

青木 和之<sup>#</sup>, 大内 徳人, 有本 靖, 吉田 誠, 佐々木 憲一, 飯尾 雅実, 楨田 康博, 角 直幸, 岡田 尚起  
Kazuyuki Aoki<sup>#</sup>, Norihito Ohuchi, Yasushi Arimoto, Makoto Yoshida, Ken-ichi Sasaki, Masami Iio, Yasuhiro Makida,  
Naoyuki Sumi, Naoki Okada  
High Energy Accelerator Research Organization

### Abstract

COMET is the experiment, which is currently under construction at J-PARC, to search for muon-to-electron conversion process using intense pulsed proton beam produced in J-PARC main ring as the primary beam. The COMET superconducting magnet system in Phase-1 consists of a pion capture solenoid, a muon transport solenoid, and a detector solenoid. A 90-degree-curved muon transport path consists of 18 superconducting solenoid magnets with a magnetic field at 3 T and 16 superconducting dipole magnet coils for orbit correction with a magnetic field at 0.06 T. To measure the magnetic field distribution generated by these superconducting magnets, we have designed a magnetic field measurement system consisting of two 3-axis Hall probes. In this paper, we report the design and construction of the magnetic field measurement system.

### 1. はじめに

COMET[1]は、J-PARC 主リングで生成される大強度パルス化陽子を一次ビームに利用し、パルスミュオンを生成し、ミュオンから電子に転換する事象を探索する実験であり、現在 J-PARC で建設中である。

COMET Phase-1 実験では、試験装置は図 1 に示すようにパイオン捕獲ソレノイド、ミュオン輸送ソレノイド、検出器ソレノイドの 3 タイプの超伝導ソレノイドで構成されている。特に 90 度の湾曲を持つミュオン輸送路は、定格磁場 3 T の 18 個の超伝導ソレノイド磁石と定格磁

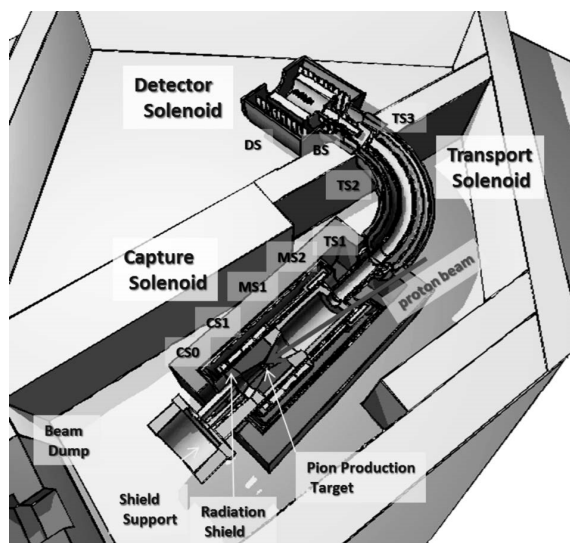


Figure 1: Layout of COMET Phase-1 experiment.

場 0.06 T の 16 コイルの軌道補正用超伝導 2 極電磁石で総数 34 台の超伝導電磁石で構成されている。

ミュオンビーム軌道を精度よく制御するために、ビームラインに沿った超伝導電磁石の発生する磁場分布を測定することを計画している。磁場測定装置は、0.1%以下の精度を持つように設計され、測定プローブは 3 軸のホール素子 2 台で構成されている。今回の発表会では、ミュオン輸送路用に開発された磁場測定システムについて報告する。

### 2. 磁場測定システムの設計

#### 2.1 ミュオン輸送ソレノイドと 2 極電磁石

ミュオン輸送路に設置されている電磁石は TS2、TS3 と呼ばれるソレノイド磁石から構成されており、TS2 は 17 個の短尺ソレノイド磁石が 90 度の弧に沿って並べられて、湾曲ソレノイドを形成している。TS2 磁石の短尺ソレノイド磁石のうち 16 個には鉛直方向の 2 極磁場を発生する 2 極コイルを併設しており、曲率半径 3000 mm の湾曲したビーム軸に沿って 6 度ずつ等配した位置にある。表 1 に磁石のパラメーターを示す。

Table 1: Magnet Parameters

湾曲ビームライン長さ	約 5.6 m
ソレノイド磁石	18 台
ソレノイド中心磁場, 電流	3.0 T, 210 A
2 極磁石	16 台
2 極磁場, 電流	0.06 T, 165 A

図 2 ではミュオン輸送路に沿ったソレノイド磁石の軸方向磁場プロファイルを示しており、捕獲ソレノイド側 90

<sup>#</sup> a-aoki@post.kek.jp

度湾曲し始める所を 0 基準点としている。

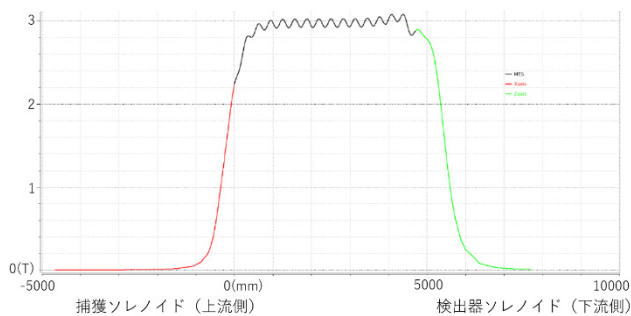


Figure 2: Magnetic field profile along the solenoid axis.

## 2.2 磁場測定システムの概要と装置設計

輸送ソレノイド磁場測定は、パイオン捕獲ソレノイドと検出器ソレノイドが設置されていない状態で行われる。超伝導電磁石内筒部はミュオンを輸送する為、実験時には真空状態となる。また、超伝導電磁石と輸送路の間には超伝導電磁石への熱負荷を低減するための液体窒素温度に冷却された円筒の断熱遮蔽板が設置されているだけである。超伝導電磁石のビームラインに沿った磁場測定を行う為には、断熱遮蔽板の内部に磁場測定プローブを挿入し、ビームラインに沿って走査することが必要となる。このような状況下で磁場測定を行う為、断熱遮蔽板の内筒に GFRP パイプで作られた磁場測定プローブの湾曲した走査路を作り、その内筒部をガイドとしてプローブを移動させ磁場測定を行うシステムを設計した。GFRP ガイドパイプを真空壁と兼ねることができ、GFRP ガイドパイプは断熱遮蔽板により支持される。GFRP パイプを組込んだミュオン輸送路の水平断面図を図 3 に示した。

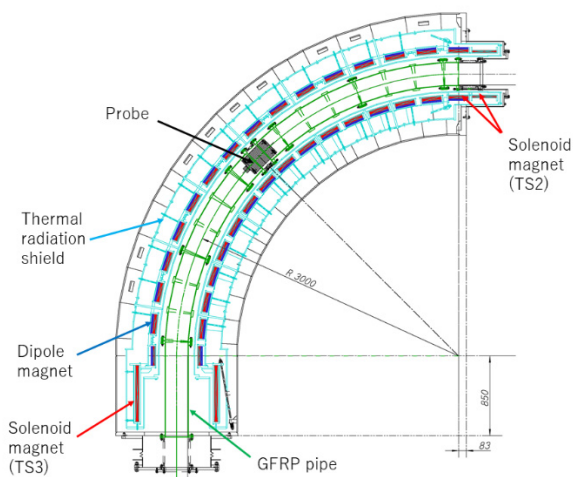


Figure 3: Cross section of muon transport section with GFRP guide pipe.

磁場測定プローブは、図 4 に示すように、GFRP ガイドパイプにプローブを支持しビームラインに沿って移動を可能にする外径  $\phi 200$  mm 円筒部とホールセンサーが組み込まれたプローブ本体部で構成されている。プローブ

本体部には、プローブ中心軸上に 3 軸のホールプローブ(Lakeshore, MMZ-2502-UH)が組み込まれ、中心軸から半径 76 mm の位置に円周方向の磁場分布を測定するための 3 軸ホールプローブ(Lakeshore, HGCA-3020, HGCT-3020)が付けられている。プローブ本体部は、円筒支持部に固定された超音波モーターにより円筒軸を中心軸として周方向に回転する。輸送路磁場は超伝導ソレノイド電磁石と軌道補正用超伝導 2 極電磁石で構成されるので、このプローブをビームラインに沿って移動することによりソレノイド磁場の分布を測定することが出来る。プローブを回転することにより得られる磁場の周方向の分布から 2 極磁場の強さを測定することが出来る。半径 76 mm の位置に設置されたホールプローブも中心軸上のプローブと同じように回転するため、ソレノイド磁場の周方向の分布、2 極磁場と高次の多極磁場成分を測定することが可能となる。

磁場測定は 3 T のソレノイド磁場中で行われる為、非磁性で、高トルク・高い位置制御機能をもつ超音波モーターを選択した。モーターには角度エンコーダが組み込まれており、プローブの回転角度を精度よく測定することが出来る。エンコーダの分解能は 1000 パルス/回転である。磁場測定プローブ支持円筒部には傾斜計(Seika, NA2-05)が取り付けられ、プローブ全体の角度位置を重力に対して測定できる。

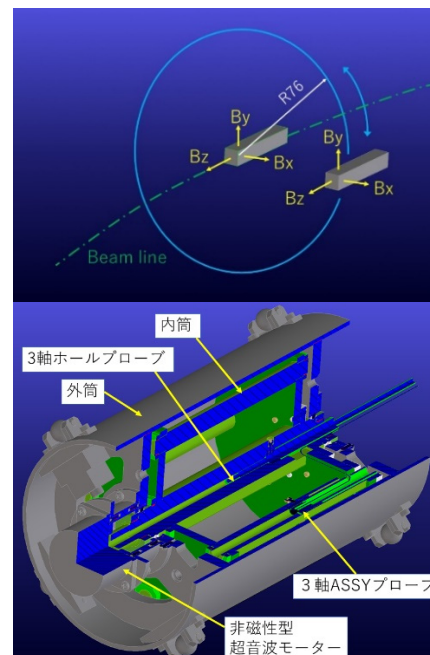


Figure 4: Positions and motion directions of the Hall probes (upper) and a 3D cut view of the magnetic measurement apparatus (lower).

以上のことから磁場測定器は GFRP パイプ内径を軸方向に移動し、3 軸の磁場を測るホールプローブをセンター軸に 1 台と半径 76 mm の位置に 1 台を組み込み、回転させる機構をもつ。回転させることでビームライン内の磁場分布が広範囲に測定でき、中心に設置した 3 軸プローブの測定値も含めてビームライン上での磁場分布を構築できる。また製作モデルから計算されている磁場分布結果との比較も行う。

### 3. 磁場測定装置の製作

#### 3.1 磁場測定器本体部内筒及び3軸センサーの製作

磁場測定器本体部内筒部品は、3Dプリンターで製作した半透明の亚克力系樹脂パーツで構成しており、 $\pm 0.1$  mmの精度で製作されている。図5には製作した測定器本体部と、その中心軸に挿入前の3軸ホールプローブを示した。

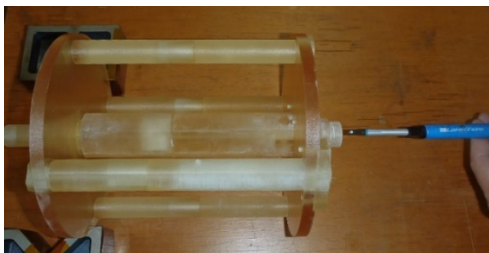


Figure 5: The 3-axis Hall probe and the rotating probe fixture made by a 3D printer.

図6に示したのは、測定器中心軸半径76 mmの位置に設置する3軸のプローブである。プローブ軸方向をz軸とすると、z方向には円筒型のアキシャルプローブ(Lakeshore, HGCA-3020)、x軸、y軸方向には長方形の形のトランスバースプローブ(Lakeshore, HGCT-3020)を2個組付けた。組付けには3軸の角度精度が重要なので、亚克力系樹脂より加工精度を出すことができるアルミにて切削加工し部品製作精度を20  $\mu$ m以下とした。



Figure 6: Assembling Hall elements.

#### 3.2 測定器の外筒

測定器外筒は、非磁性材で剛性があり、重量が軽いアルミ合金を選択している。磁場測定器はビーム輸送路内を軸方向に前後移動する為、輸送路両端開口部から磁場測定器をワイヤーで張り、ワイヤーを巻き取り送り出

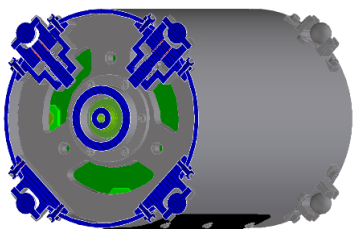


Figure 7: Outer shield slide mechanism.

しすることで前後移動する。図7に示すように測定器の前後には移動時のGFRPパイプとの摩擦を低減するために、各4つのローラーを設置し、下2つは固定、上2つはバネ式にしてGFRPパイプに対して反力をかけることで移動時も常に中心軸に軌道を合わせる構造とした。バネの材質も非磁性材であるチタンを使用している。

#### 3.3 磁場測定装置の組み立て

内筒の樹脂パーツは接着剤で固定されることから各部品の組合せ部はインロー構造とし、接着時の組立精度を高めた。測定器本体の回転部には摩擦抵抗がないようにモーターとの接続軸部にセラミックベアリングが使用されている。測定器のビーム軸方向移動時に測定器全体が回転しないよう外筒底部に鉛板を取付け重りとしている。

図8は組み上げた測定器を実機に使用するGFRP単管に通したもので、3.2で述べたGFRPパイプへのバネ反力による測定器の固定とローラーによるパイプ内移動性の確認を行ったものである。直線単管による移動試験であったのでパイプとの干渉及び摩擦抵抗については問題なく測定器を走行させることが出来た。実機では、パイプの接続による湾曲構造となっているが、CAD上では接続部との干渉は無いように設計されている。

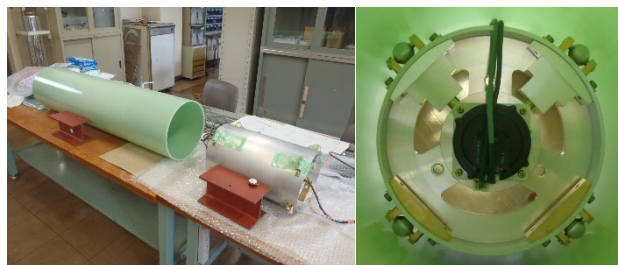


Figure 8: Pictures of magnetic measurement system. Test-GFRP-guide pipe and magnetic measurement apparatus (left). The apparatus inserted into the test pipe (right).

### 4. まとめ

本報告会では、輸送ソレノイドに配列された18個の超伝導ソレノイド電磁石と16個の超伝導2極電磁石の磁場分布を計測する為の測定器の設計と製作について報告した。

磁場測定器は2個の3軸ホールプローブから構成され、ホールプローブに回転機能を付けることによりソレノイド磁場と2極磁場を測定できる設計とした。また、測定器は、ミュオンビーム軸に沿って移動することによりソレノイド磁場と2極磁場の分布を測定する。

湾曲ビームラインの磁場測定は、まず超伝導電磁石が室温状態で実施し測定器の測定精度、機能の確認を行う。磁場測定装置に問題がない事を確認後、湾曲ビームライン超伝導電磁石システムの冷却・励磁スケジュールに合わせ、超伝導状態の運転磁場にて磁場測定を行う予定である。

### 参考文献

[1] M.Yoshida, J. Particle Accelerator Society of Japan Vol.16 No.4, 2019 pp.303-309.