

# J-PARC ミュオン科学実験施設 D-Line 用超伝導輸送ソレノイドの設計・製作

## DESIGN AND MANUFACTURE OF SUPERCONDUCTING TRANSPORT SOLENOID FOR D-LINE AT J-PARC MUON SCIENCE FACILITY

田中靖之<sup>A),#</sup>, 仙波智行<sup>A)</sup>, 中島翔太郎<sup>A)</sup>, 萩原好晃<sup>A)</sup>, 木戸修一<sup>A)</sup>, 佐々木憲一<sup>B)</sup>, 下村浩一郎<sup>B)</sup>, 河村成肇<sup>B)</sup>, ストラッサーパトリック<sup>B)</sup>, 槇田康博<sup>B)</sup>, 大島洋克<sup>B)</sup>, 黒澤宣之<sup>B)</sup>, 三宅康博<sup>B)</sup>

Yasuyuki Tanaka<sup>A)</sup>, Tomoyuki Semba<sup>A)</sup>, Shotaro Nakajima<sup>A)</sup>, Yoshiaki Hagiwara<sup>A)</sup>, Shuichi Kido<sup>A)</sup>, Ken-ichi Sasaki<sup>B)</sup>, Koichiro Shimomura<sup>B)</sup>, Naritoshi Kawamura<sup>B)</sup>, Patrick Strasser<sup>B)</sup>, Yasuhiro Makida<sup>B)</sup>, Hirokatsu Ohhata<sup>B)</sup>, Noriyuki Kurosawa<sup>B)</sup>, Yasuhiro Miyake<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> Hitachi, Ltd. Hitachi Works

<sup>B)</sup> High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

### Abstract

A superconducting transport solenoid for J-PARC muon facility was newly designed and manufactured. High Energy Accelerator Research Organization (KEK) has been operating the J-PARC Muon Science Establishment (MUSE) since 2008. Among its four muon beam lines, the decay muon line (D-Line) has been extracting and providing positive and negative muon beam with a momentum range from several to 120 MeV/c (fast/decay muon) as well as high intensity 30 MeV/c positive muon beam (slow/surface muon) for a variety of science programs, utilizing a superconducting transport solenoid. The D-Line as well as the other J-PARC facility suffered severe damages from the earth-quake on March 11, 2011. It necessitated rebuilding of the damaged superconducting solenoid. New design parameter of the solenoid is as follows: length of solenoid: 6 m, diameter of warm bore: 0.2 m, magnetic field of bore center: 3.5 T, rated current: 415 A, superconducting wire: NbTi/Cu, quench protection: quench back heaters. The six-meter-long solenoid consists of twelve pieces of 0.5-meter-long superconducting coils. The entire solenoid is forced-indirectly cooled by supercritical helium flow. This report describes the design and manufacturing process of the newly built superconducting transport solenoid for D-Line at J-PARC muon science facility.

## 1. 序論

東日本大震災により甚大な被害を受けた既設ソレノイドの更新を目的として、新たに設計・製作した超伝導輸送ソレノイドは J-PARC ミュオン科学実験施設の崩壊ミュオンライン (D-Line) に設置された。本ソレノイドは既設装置と同一の外形寸法、既設ヘリウム冷凍機及び電源との接続取合い[1][2][3]を持ち、比較的大きな領域(常温ボア直径 0.2m)に磁場を生成する装置である。本ソレノイドは伝導冷却技術を適用することで、既設装置と比較して冷却系を簡略化し、安定的に運用することが期待される。

本報では超伝導輸送ソレノイドの設計・製作と常温で実施した磁場測定の結果について報告する。

## 2. 装置概要

### 2.1 一般構造

本ソレノイドの主な仕様を Table 1 に示す。本ソレノイドは長さ 0.5m の超伝導コイル 12 個を電気的・構造的に直列接続した構成である。コイルは円筒状の断熱真空容器兼リターンヨークに格納され、ヘリウム冷凍機から供給される超臨界ヘリウムを流した冷却配管により強制間接冷却される。熱輻射シールド及び電流リードもガスヘリウムを流した冷却配管により強制間接冷却される。

### 2.2 磁場分布

Figure 1 にコイル、鉄ヨークの配置及び常温ボア中心における磁場分布を示す。本ソレノイドは常温ボア(長さ

6m、直径 0.2m)に 3.5T の磁場を生成し、上流から供給されるパイオンを閉じ込め輸送する。パイオンはソレノイド内を輸送される過程で寿命によりミュオンに崩壊し、ビームライン下流へ供給される。本ソレノイドを構成するコイルは離散的であるため、生成される磁場は最大±3%のリップルを持つが、本ソレノイドの使用目的に影響を与えない程度に充分小さい。

Table 1: The Solenoid Specifications

Parameter	Value
Magnetic Field	3.5 T
Diameter of Warm Bore	0.2 m
Length of Solenoid	6 m
Coil Shape	Solenoid
Wire of Coil	NbTi/Cu
Number of Coils	12
Total Weight	4.7 t

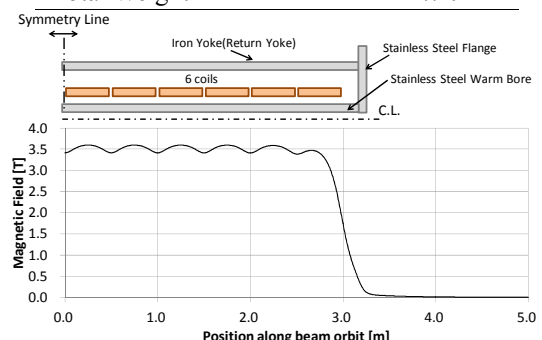


Figure 1: Schematic Diagram of Solenoid Design and Result of Magnetic Field Calculation.

# yasuyuki.tanaka.xj@hitachi.com

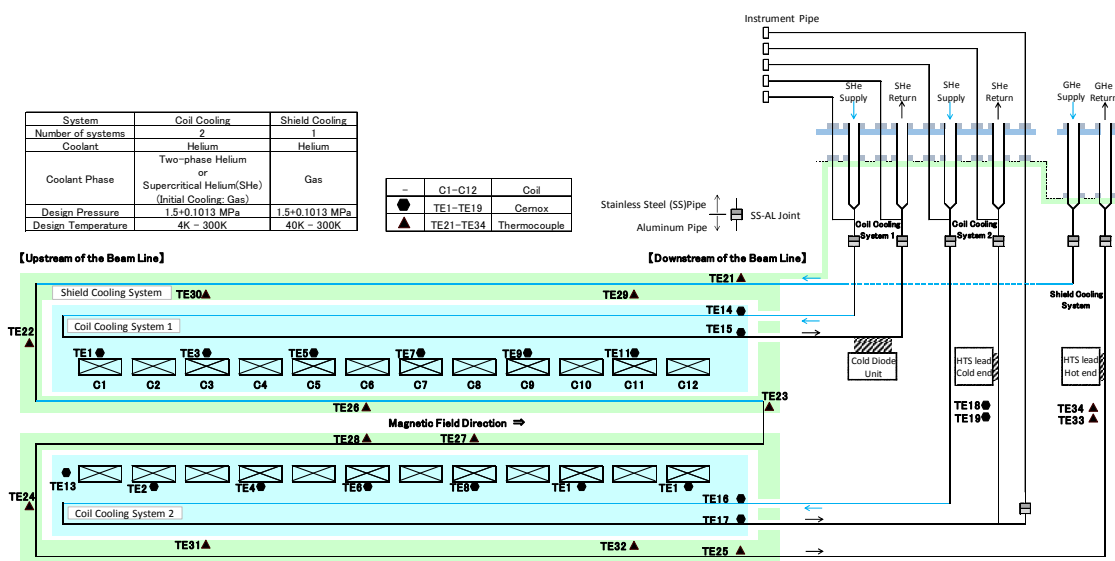


Figure 2: Schematic diagram of the superconducting solenoid cooling system.

### 3. 磁石設計

#### 3.1 コイル及び鉄ヨーク設計

本ソレノイドの設計諸元を Table 2 に示す。本ソレノイドは超伝導コイル 12 個を直列接続し、各超伝導コイルは NbTi/Cu 超伝導線を約 3400 ターン巻いて構成した。コイル支持円筒は機械強度と熱伝導特性を考慮しアルミニウム合金 A5056 を採用し、4K での寸法を基準とし構成材料の熱収縮量を考慮してコイルの常温寸法を決定した。

本ソレノイドの鉄ヨークは磁力線をリターンするために外径 0.6m、厚さ 30mm とし、鉄ヨーク材質として、容易に入手できる一般構造用圧延鋼材(SS400)を採用した。採用にあたっては鉄ヨークを純鉄、SS400 とした場合で磁場計算を実施し、結果を比較して本装置の使用目的に問題がないことを確認した。

#### 3.2 冷却方法

本ソレノイドにおける冷却システムの系統図を Figure 2 に示す。コイル支持円筒及び熱輻射シールドは各々ヘリウム冷凍機より供給される冷媒を流した冷却配管を備えており、超伝導コイルは超臨界ヘリウムにより強制間接冷却され、熱輻射シールドはガスヘリウムにより強制間接冷却される。冷却配管の材質は熱収縮特性をコイル支持円筒及び熱輻射シールドと整合させる為に、アルミニウム合金とした。配管の圧力損失を通常運転時の許容圧力損失(100kPa)以下とする為、冷却配管内径は 10mm とした。ヘリウム冷凍機の設計圧力及びコイルクエンチ時の圧力上昇を考慮し、冷却配管の厚さは 3mm とした。冷媒とコイル支持円筒との設計温度差は最大 0.25K とし、運転時における超伝導線の温度マージン 1.3K と比較し十分に小さい。

構成材料及び重量より概算したコールドマスの熱容量は約 160MJ である。ヘリウム冷凍機の冷却能力とソレノイド全体の熱容量より初期冷却時間を概算した結果、初期冷却時間は実際の運用上問題とならない約 1 週間と見積もられた。

Table 2: Parameters of the Superconducting Solenoid

Superconducting wire	
Type	Monolithic, NbTi/Cu
Cu/NbTi ratio	4.8
Dimensions(insulated)	φ1.56 mm
Magnet	
Number of Turns / Coil (design)	3,377
Rated current	415.7 A
Magnetomotive force / Coil(design)	1.4 MA
Central magnetic field	3.5 T
Peak field at conductor	3.56 T
Total stored magnetic energy	2.2 MJ
High-field inductance	25.5 H

#### 3.3 クエンチ保護

クエンチ保護のため、各コイル外表面にシート状のクエンチバックヒータを設置した。ヒータは抵抗率が温度によって急激に変化することのないステンレス鋼製とした。ヒータ回路はソレノイドと並列接続され、その一端にコールドダイオードを備えている。あるコイルで常伝導転移領域が生じるとコールドダイオードはターンオンし、コイルに流れる電流はヒータ回路に分流する。ヒータで生成された熱は全てのコイルをクエンチさせ、ソレノイド全体で蓄積エネルギーを消費する。これによりコイルの局所的な温度上昇を避け、ソレノイドを保護する。

#### 3.4 クライオスタット設計

コールドマスへの入熱を低減するため、ソレノイドの内側と外側にアルミニウム製熱輻射シールドを設置し、コイル表面及び熱輻射シールド表面に多層断熱材 (MLI) を

設置した。ソレノイド及び熱輻射シールドの合計重量は約 1,000kg であり、カーボン繊維強化プラスチック(CFRP)によりこの重量を支持した。電流供給部において、熱負荷を低減し既設装置と比較して冷却方法を簡略化するために高温超伝導リード[4]を 4K(コイル)系と 60K(シールド)系の間に設けた。設計熱負荷をまとめたものを Table 3 に示す。4K 系及び 60K 系において、設計熱負荷は冷却性能と比較し充分に小さく、安定的な運用が期待される。

ソレノイドの下流側に設けたチムニーによりヘリウム冷凍機及び電源と取り合い、チムニー部の断熱真空容器には非対称性磁場が生じることを防止するため、非磁性のステンレス鋼を採用した。ソレノイドの最内部に常温ボアを設け、ソレノイドの上流側にはピローシールフランジを設けると共に、上流側の MLI 及び計測線の一部には耐放射線性の観点からポリイミドを採用した。

Table 3: Summary of Design Heat Loads

Source	Heat Load to Shield System [W]	Heat Load to 4K System [W]
Current Leads	43.2	0.5
Thermal Radiation	42.1	4.1
Magnet Supports	25.5	0.6
Instrumentation Wires	10.5	2.1
Transfer Tubes	4.3	3.1
Total	125.6	10.4
Refrigeration Power	200	35

#### 4. 磁石の製作

Figure 3 に製作が完了した D-Line 用超伝導輸送ソレノイドの外観を示す。図中で手前側がビームライン上流側、奥側がビームライン下流側となる。

#### 5. 磁場測定

ソレノイド完成後、微小な電流を超伝導コイルに導入し、常温でビーム軸における磁場測定を実施した。電流値は耐電圧仕様とコイルの温度上昇等を考慮し、1A とした。測定結果及び磁場計算結果を Figure 4 に示す。測定値と計算値との偏差は  $\pm 0.5\%$  以下となり、測定値と設計値は良い一致を示した。



Figure 3: Completion of the superconducting solenoid.

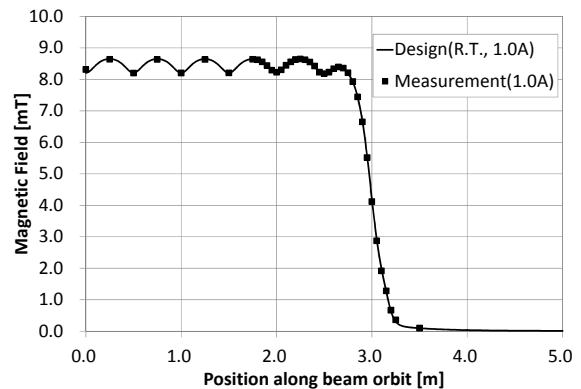


Figure 4: Magnetic field measurement of the downstream region at R.T. in comparison with calculation.

#### 6. 結論

東日本大震災により甚大な被害を受けた既設ソレノイドの更新を目的として、新たに J-PARC ミュオン科学実験施設 D-Line 用超伝導輸送ソレノイドを設計・製作した。製作完了後に実施した微小電流での磁場測定の結果は設計値と良い一致を示し、高い精度で製作されたことが示された。

#### 参考文献

- [1] K. Nagamine *et al.*, “Superconducting Solenoid and its Cooling System for Pulsed Muon Channel” IEEE Trans. Mag., vol. MAG-17, No.5, p.1882, Sept. 1981.
- [2] K. Nagamine, “Large Superconducting Solenoid and its Cooling System for Muon Channel” Teion Kou-gaku, vol. 20, no.4, p.187, 1985 (In Japanese).
- [3] K. Shimomura *et al.*, “Muon Beam Line at J-PARC MUSE - Reuse of a 30-year-old Superconducting Magnet- ” Teion Kougaku, vol. 45, no.4, p.174, 2010 (In Japanese).
- [4] H. Teshima *et al.*, “Recent Progress in Compact, Robust and Superior Field-tolerant QMG Current Leads using RE-Ba-Cu- Bulk Superconductors” IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 26, no.3, 4800204, April, 2016.