

# 中性子小角散乱用 1 T 電磁石の実験システム構築と ユーティリティ開発

総合科学研究機構(CROSS) 中性子科学センター,<sup>A</sup> 日本原子力開発機構 J-PARC センター  
森川利明, 大内啓一, 大石一城, 河村幸彦, 廣井孝介<sup>A</sup>

## Development of 1 T electromagnet and its utilities for small angle neutron scattering

Neutron Science and Technology Center, Comprehensive Research Organization for Science and Society  
(CROSS),

<sup>A</sup>J-PARC Center, Japan Atomic Energy Agency

Toshiaki Morikawa, Kei-ichi Ohuchi, Kazuki Ohishi, Yukihiro Kawamura, Kosuke Hiroi<sup>A</sup>

e-mail: [t\\_morikawa@cross.or.jp](mailto:t_morikawa@cross.or.jp)

Published online: 20 December 2024

### 要約

大強度陽子加速器施設 (J-PARC) 物質・生命科学実験施設 (MLF) 内のビームラインである中性子小角・広角散乱装置 (BL15 大観) と偏極中性子反射率計 (BL17 写楽) では、従来 1 T 電磁石を共用していた。しかし、各々のビームラインで 1 T 電磁石を利用するユーザーが増えてきたことから、個別に 1 T 電磁石を準備する必要性が生じた。また、各々のビームラインで電磁石設置方向 (縦置き、横置き) が異なることから、利用時のクレーン作業の面でも問題を抱えていた。このことから、BL15 専用の 1 T 電磁石を導入し、専用バイポーラ電源及び、インターロックシステムから成る実験システムを構築した。1 T 電磁石に専用架台、4 K 冷凍機取付け治具、バックグラウンドノイズ除去板を取り付け、BL15 での実験に適した形に整備後、ユーザーへの供用を開始した。更に、4 K 冷凍機用試料交換器、自動試料交換機などのユーティリティを開発することによって、かねてからのユーザーからの要望に応えるとともに実験の効率性を向上させた。今後は、レーザー加熱炉との組み合わせも含め、更に利便性の高い装置への改善を図る。

### Abstract

A 1 T electromagnet was shared by the small- and wide-angle neutron scattering instrument (BL15 TAIKAN) and the polarized neutron reflectometer (BL17 SHARAKU) in the Materials and Life Science Experimental Facility (MLF) of the Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC). Due to the increasing number of experiments using the 1 T electromagnet, it has become necessary to prepare 1 T electromagnets for each beamline. To solve these issues, we have developed a new 1 T electromagnet system for BL15. The new system includes a dedicated bipolar power supply with interlock system for safety, attachment for a 4K refrigerator, and a plate to remove background signals of scattered neutrons. Furthermore, we have developed a sample exchange equipment for the 4K refrigerator that enables us to change samples without a crane operation of MLF, and an automatic sample exchanger that can automatically and continuously perform measurement up to seven samples which make user experiments more efficient. We plan to improve the system to use a combination with a laser heating furnace in the future.

## Keywords

1 T 電磁石、インターロック、自動試料交換機、中性子小角散乱

1 T electromagnet, interlock system, automatic sample changer, neutron small angle scattering

## 1. 1 T 電磁石導入の背景

中性子小角・広角散乱装置 (BL15 大観) [1,2]では、金属、磁性体、超伝導体などの様々な試料を磁場中で測定するため各種の電磁石や超伝導磁石が用意されている。中でも、1 T 電磁石に関しては、同じ MLF 内に設置されている偏極中性子反射率計 (BL17 写楽) と 1 台の 1 T 電磁石 (玉川製作所製) (以下、1 T-Mag-BL17) を共用していた (図 1)。しかし、BL15 及び BL17 の各々のビームラインにおいて、1 T 電磁石の利用を希望するユーザーが増えてきたことから、個別に 1 T 電磁石を準備する必要性が生じた。また 1 T-Mag-BL17 は、BL15 で使用する場合には縦置き (磁場方向は水平方向)、BL17 では横置き (磁場方向は垂直方向) で使用するニーズが多い。このため、クレーンを使用して電磁石を 90° 回転させる作業が必要となり (図 2)、多くの労力と時間を要していた。

このような背景から、2021 年度に BL15 専用の 1 T 電磁石 (NEC トーキン製) (以下、1 T-Mag-BL15) を導入し、ユーザー実験供用に向けて整備を行った。



図 1. BL15 と BL17 で共用していた 1 T-Mag-BL17 (玉川製作所製)。



図 2. 1 T-Mag-BL17 をクレーンで立て起こしている様子。

本レポートは、第 2 章で導入した電磁石の整備についてまとめている。また、第 3 章では電磁石の高度化についてまとめ、第 4 章で全体をまとめている。

## 2. 電磁石の整備

### 2.1 電磁石の主な仕様

1 T-Mag-BL17 及び 1 T-Mag-BL15 の主な仕様の比較を表 1 に示す。また、図 3 に導入した 1 T-Mag-BL15 の外観写真を示す。

表 1. 1 T 電磁石仕様比較

電磁石	磁場	開口角		印加電流	冷却方式	重量
		水平方向	垂直方向			
1 T-Mag-BL17 (従来品)	-1 T ~ +1 T	$\pm 20.4^\circ$	$\pm 45.6^\circ$	-30 A ~ +30 A	直接水冷	約500 kg
1 T-Mag-BL15 (新規導入品)	-1 T ~ +1 T	$\pm 26.3^\circ$	$\pm 64.2^\circ$	-100 A ~ +100 A	直接水冷	約456 kg

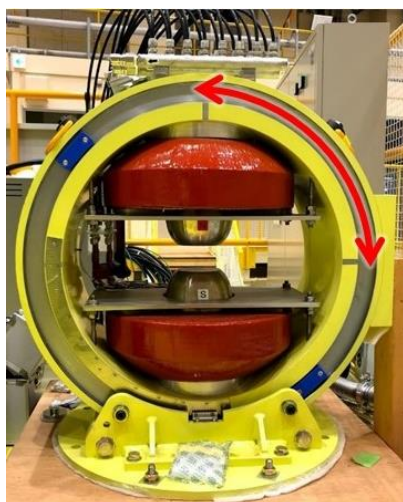


図 3. 1 T-Mag-BL15  
(NEC トーキン製)



図 4. 導入したバイポーラ直流電源  
(菊水電子工業製 PBZ40-110BP)

1 T-Mag-BL15 は、1 T-Mag-BL17 と比較して同等の磁場を印加するための電流値は大きくなるが、1 T-Mag-BL17 以上の開口角が得られ、広い立体角が要求される BL15 のユーザー実験に有利である。また、図 3 の矢印で示すようにクレーン不要で人力で磁場方向を  $90^\circ$  回転することができる。図 3 の向きで電磁石を使用する場合は、水平方向に広く開口角を取ることができるため、主に背面バンク検出器でデータ取得したい場合に適している。図 3 の向きから  $90^\circ$  回転した場合は、単結晶試料を鉛直軸回りに回転することができ、任意の散乱を検出する場合に適している。このように、実験条件や観測したい内容に合わせて電磁石の向きを選択することができる点も BL15 のユーザー実験に有利である。

1 T-Mag-BL15 で最大磁場の 1 T を印加するためには、100 A-40 V を出力できる直流電源が必要となる。更には、実験中に磁場の向きを反転できる（極性を変えることのできる）バイポーラ電源であることも必要条件となる。1 T-Mag-BL15 導入時、100 A-40 V という大きな直流電流と電圧を印加できるバイポーラ電源は、MLF で実績のある菊水電子工業から単体ユニットとして販売されていなかった。このため、菊水電子工業のバイポーラ電源 PBZ40-10 (40 V-10 A 仕様) を 11 台並列接続して 40 V-110 A を出力可能とした特別仕様の PBZ40-110BP を購入した (図 4)。

## 2.2 インターロックシステムの構築

BL15 ではユーザーの要望する実験環境に対応するべく、電磁石を含む種々の試料環境機器を保有しており、これらの機器を試料ステージに設置して実験を行う[2]。

1 T-Mag-BL15 は最大 100 A の大電流を通電させることから、安全に実験を行うため、異常発生時に電流を遮断するインターロックシステムが必要である。

MLF 機器安全チームと相談の上、バイポーラ電源からの電源供給を遮断するためのインターロックは、以下の場合に作動する仕様にした。

①電磁石の温度上昇

本電磁石には温度スイッチ（ウチヤサーモ製：UP82, 80°C, N.C.）が取り付けられており、電磁石の温度が 80°C以上になると温度スイッチ接点が「開」の状態になる。

②電磁石冷却水量の低下

電磁石の冷却水経路に取り付けたフロースイッチ（日本精器製：BN-1321L.10A）の冷却水流量が設定流量以下になるとフロースイッチ接点が「開」の状態になる。

バイポーラ電源には外部接点接続用のコネクタが設けられており、外部接点が「閉」になった場合にブレーカーがトリップすることによって、バイポーラ電源はシャットダウンする。上記のインターロックが作動すると外部接点は「開」の状態になるため、外部接点とバイポーラ電源の間に接点「開」→「閉」に変換するリレーボックスが必要となり、これを製作した。

設計したリレーボックスの回路図を図 5、外観写真を図 6 に示す。電磁石の温度上昇、又は電磁石冷却水の流量低下によって外部接点が「開」となった場合、バイポーラ電源に対しては外部接点を「閉」とする回路となっている。また、このリレーボックスを含めたインターロックシステム全体の構成図については、図 7 に示す通りである。

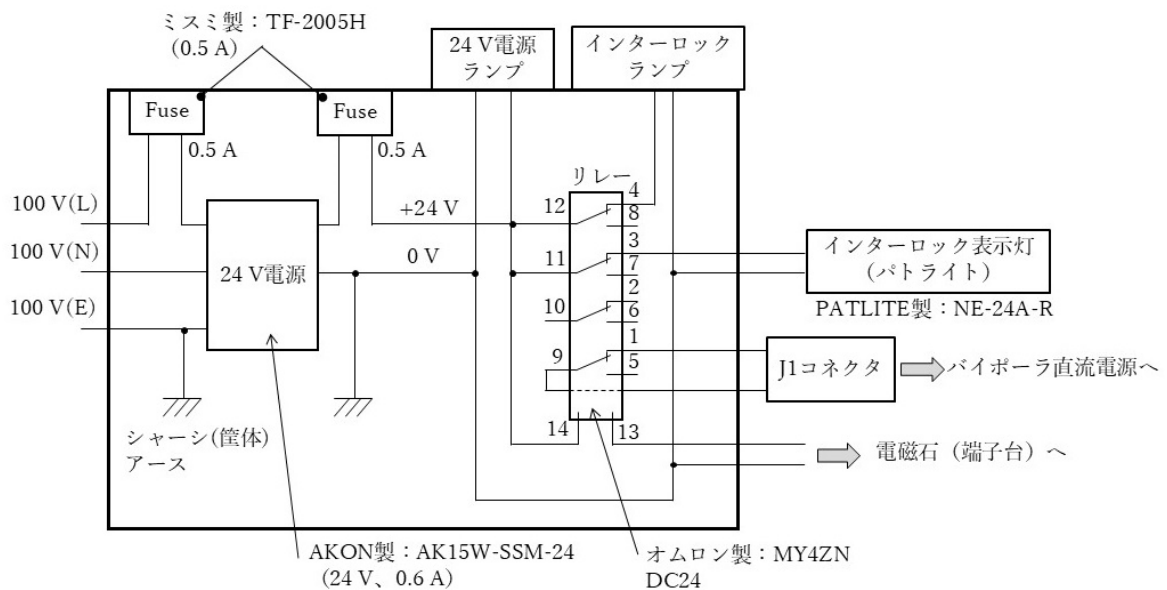


図 5. 製作したリレーボックスの回路図



図 6. 製作したリレーボックスの外観

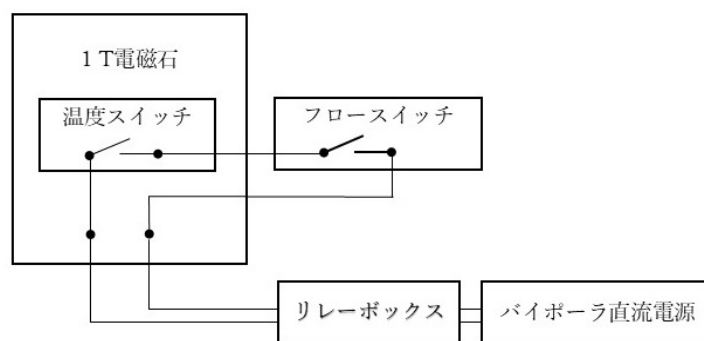


図 7. 1 T 電磁石インターロックシステム全体の構成図

### 2.3 専用架台の製作

電磁石は木箱に梱包されて納品されたため、当初、木製パレットに積載された状態で保管していた。BL15 で保有している試料環境機器はビームライン遮蔽体上に保管しており、実験スケジュールに合わせて機器の置き場所を変える必要があるため、専用架台の設計、製作を行った。

架台プレートの幅×奥行の寸法は、電磁石外形が架台からはみ出さないように 700 mm×800 mm とし、幅 700 mm に対するキャスター間の距離は 697 mm と設計した。架台のたわみ量 ( $\delta$ ) については、両端支持ばりで中央に任意の幅で等分布荷重が加えられた場合の計算式[3]、

$$\delta = P \cdot \frac{L^3}{\left(48 + 29 \frac{m}{L}\right) \cdot E \cdot I}$$

を用いて材質（アルミニウム、鉄）と架台板厚について検討を行った。ここで、

$P$ : 荷重…電磁石(465 kg)+4 K 冷凍機(約 30 kg)+冷凍機取付け治具(約 5 kg)≒500 kg

$L$ : はりの長さ=キャスター間の距離 (697 mm)

$m$ : 等分布荷重のかかる長さ=電磁石設置部直径 (500 mm)

$I$ : 断面 2 次モーメント= $bh^3/12$

$b$ : 架台幅 (700 mm)

$h$ : 架台板厚

$E$ : ヤング率…アルミニウム (7200 kg/mm<sup>2</sup>)、鉄 (21,000 kg/mm<sup>2</sup>)

として計算を行った。



表 2. たわみ量 ( $\delta$ ) の計算結果

	材質					
	アルミニウム				鉄	
板厚 [mm]	25	20	15	12	20	15
$E$ [kg/mm <sup>2</sup> ]	7,200	7,200	7,200	7,200	21,000	21,000
$I$ [mm <sup>4</sup> ]	911,458	466,667	196,875	100,800	466,667	196,875
$\delta$ [mm]	0.5	1.0	2.5	4.8	0.4	0.9
$\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	2.69	2.69	2.69	7.85	7.85	7.85
架台重量 [kg]	38	30	23	53	88	66

たわみ量 ( $\delta$ ) の判断基準は 1 mm 以下と設定し、取扱いの面からできる限り軽量化することを考えた。表 2 の結果から、架台の材質はアルミニウム、板厚は 25 mm で設計することにし、キャスターには許容荷重 300 kg のキャスター（ミスミ製：CSHNB-S75-U…自在、ストッパー付き、車輪径： $\phi$  75 mm、車輪材質：アルミホイールウレタン）を選択した。キャスター自体にもストッパーが付いているものを選択しているが、電磁石が重量物であることから、更に接地性を高めるためにラバーベースアジャスタ（ミスミ製：FJSNS20-100）も付け加えた（図 8）。

## 2.4 4 K 冷凍機取付け治具の製作

磁場中かつ低温条件で測定を行う場合、4 K 冷凍機と組み合わせて実験を行う。BL15 で保有している 4 K 冷凍機は、固定用フランジ部分下面から、試料中心位置までの寸法を 400 mm で設計している。本電磁石も冷凍機を挿入することが想定されており、 $\phi$  145 mm の開口部が設けられているが、この開口部上面から電磁石中心（＝試料中心位置）までは 345 mm であった。このため、寸法差を埋めるための 4 K 冷凍機取付け治具を製作した。単純に 55 mm のブロック材に 4 K 冷凍機固定用のねじ穴を空けたものでは重くなり取扱い性が悪くなるため、プレートを組み合わせた構造にして軽量化した（図 8）。

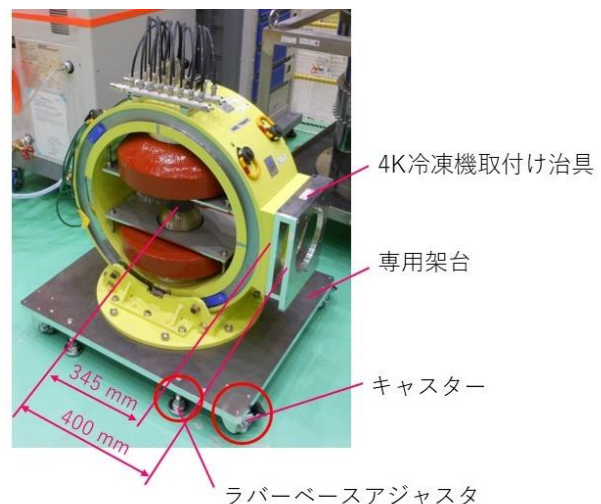


図 8. 製作した 4 K 冷凍機取付け治具と専用架台

## 2.5 4 K 冷凍機 OVC、ラジエーションシールド、試料セル取付けロッドの延長

電磁石と 4 K 冷凍機を組み合わせた測定において、中性子入射方向に対する磁場の向きは変えずに試料だけを回転したい場合には、電磁石と 4 K 冷凍機の上に回転ゴニオ（Huber 製 Goniometer420）を挿入する。回転ゴニオを挿入した場合、4 K 冷凍機の固定用フランジ部分下面から試料中心までの距離は 485 mm となる。固定用フランジ部分下面から試料中心までの距離を 85 mm 延長する必要があることから、回転ゴニオを用いた実験で使用する 4 K 冷凍機の OVC、ラジエーションシールド及び、試料セル取付けロッドの延長品を製作した。電磁石、4 K 冷凍機、回転ゴニオを組み合わせた様子を図 9 に示す。

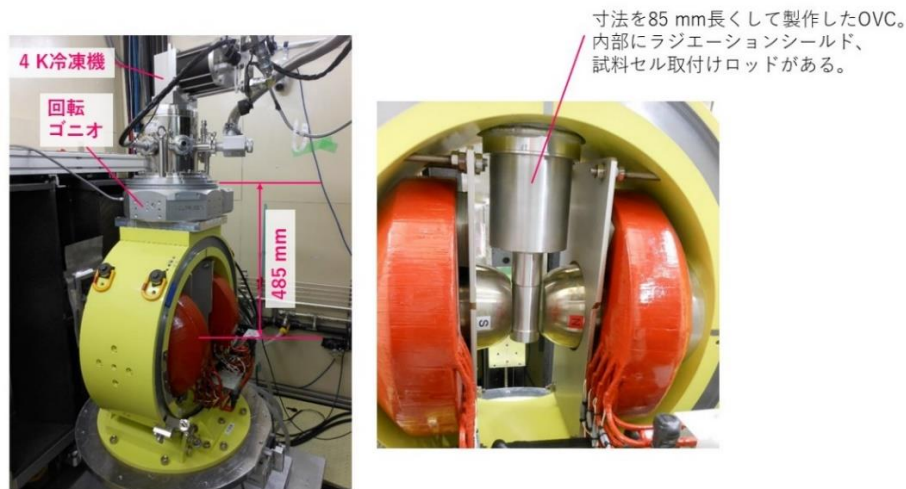


図 9. 回転ゴニオ、4 K 冷凍機との組み合わせ

## 2.6 バックグラウンドノイズ除去板の製作

1 T-Mag-BL15 を使用して実験を行ったところ、図 10(a)に示すように小角バンク検出器でバックグラウンドノイズ起因のシグナルが検出された。これは試料から上流側に散乱した中性子が図 10(b)のように二次散乱し、電磁石の隙間を通過して小角バンク検出器に入射するためと推測された。二次散乱の原因として、検出器に用いられているステンレス管等の部材が考えられている。このため二次散乱した中性子を遮るバックグラウンドノイズ除去板（以下、除去板）を製作して対策した。

除去板取付け後の測定結果を図 10(c)に示す。除去板を取り付けたことによって、背面バンク方向からの二次散乱中性子が除去されていることが分かる。

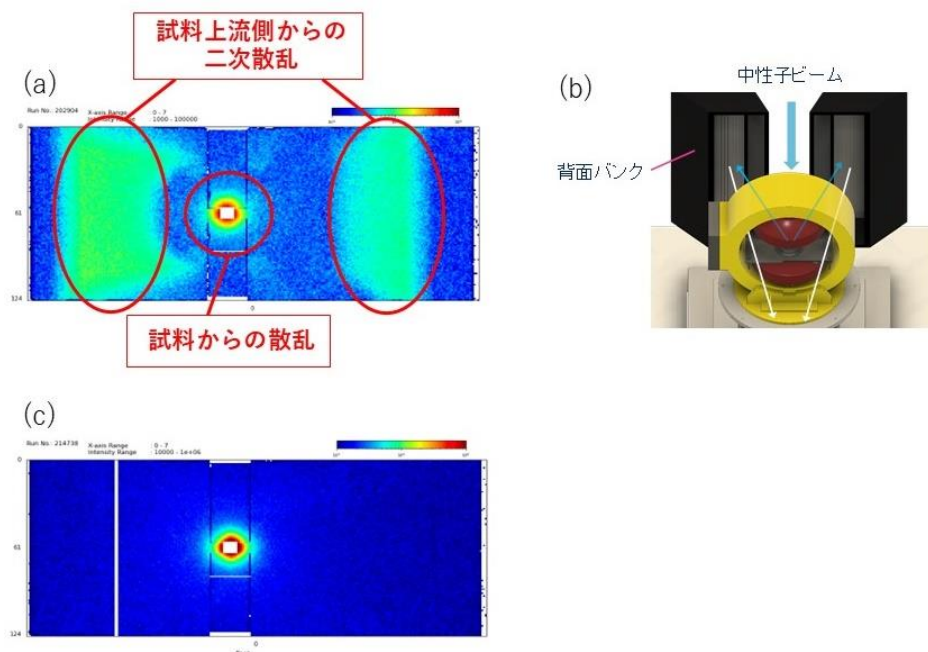


図 10. (a)小角バンク検出器で検出された試料上流側からの二次散乱起因シグナル

(b)背面バンク検出器で二次散乱した中性子が小角バンク検出器に入射するイメージ図

(c)除去板取付け後の小角バンク検出シグナル

製作した除去板は、試料位置の上流側に取り付けてある（図 11）。除去板のベースはアルミニウム板で作製し、その上に中性子の吸収材であるカドミウム板を貼り付けた。

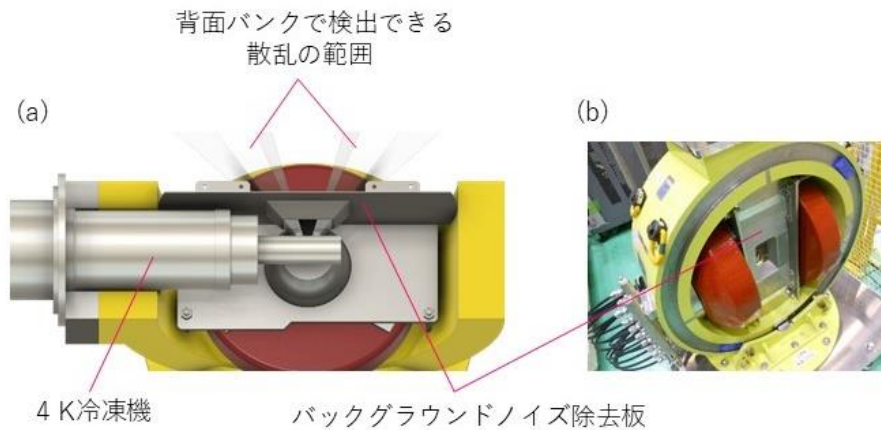


図 11. バックグラウンドノイズ除去板の、  
(a)取付けイメージ (※分かりやすいように電磁石上半分はカットしてある。)  
(b)実際の取付け写真。

## 2.7 電磁石の整備についてのまとめ

1 T-Mag-BL17 を BL17 と BL15 で利用していた際に抱えていたユーザー利用に係る懸案は、1 T-Mag-BL15 を整備したことにより解消された。また、付帯治具などを製作したことでバックグラウンドノイズの除去など、既存の電磁石でも抱えていた問題点が解消できた。本機器は、2021 年度から BL15 ユーザーへの供用を開始している。

## 3. 1 T 電磁石用試料環境機器の高度化

前章で述べたように、1 T-Mag-BL15 を用いて BL17 と同時に BL15 で 1 T 電磁石を利用した実験を実施することが可能となった。一方、1 T-Mag-BL17 を使用していた際と同様、BL15 にて 1 T 電磁石と 4 K 冷凍機を組み合わせる実験の際、試料交換には MLF 建屋の天井クレーンを用いて冷凍機を電磁石から取り出す作業が必要となる。クレーン作業には、ビームラインスタッフの他、クレーン操作免許を持つクレーンオペレーターが別途必要となるため、実験の進捗状況によって試料交換の予定時間が変更となる場合には、クレーン作業時間の再調整が必要となる。また、クレーンオペレーターが就業していない時間帯には試料交換が行うことができず、ユーザーから改善を望む声が挙がっていた。一方、冷凍機を使用せずに室温磁場中で測定する際は、試料交換を一つずつ手動で行っている。このため、その都度分光器室に入出する必要がある、こちらもユーザーから改善を望む声が挙がっていた。

前章で導入した 1 T-Mag-BL15 は、図 3 に示したように本体を人力で 90° 回転できる特徴を有する。この特徴を活かし、上記 2 点の問題の改善、試料環境機器の高度化に取り組んだ。その詳細を以下にまとめる。

### 3.1 4 K 冷凍機用試料交換器の製作

MLF 建屋の天井クレーンを使用せずに 4 K 冷凍機の試料交換を実現するため、4 K 冷凍機用試料交換器を製作した。



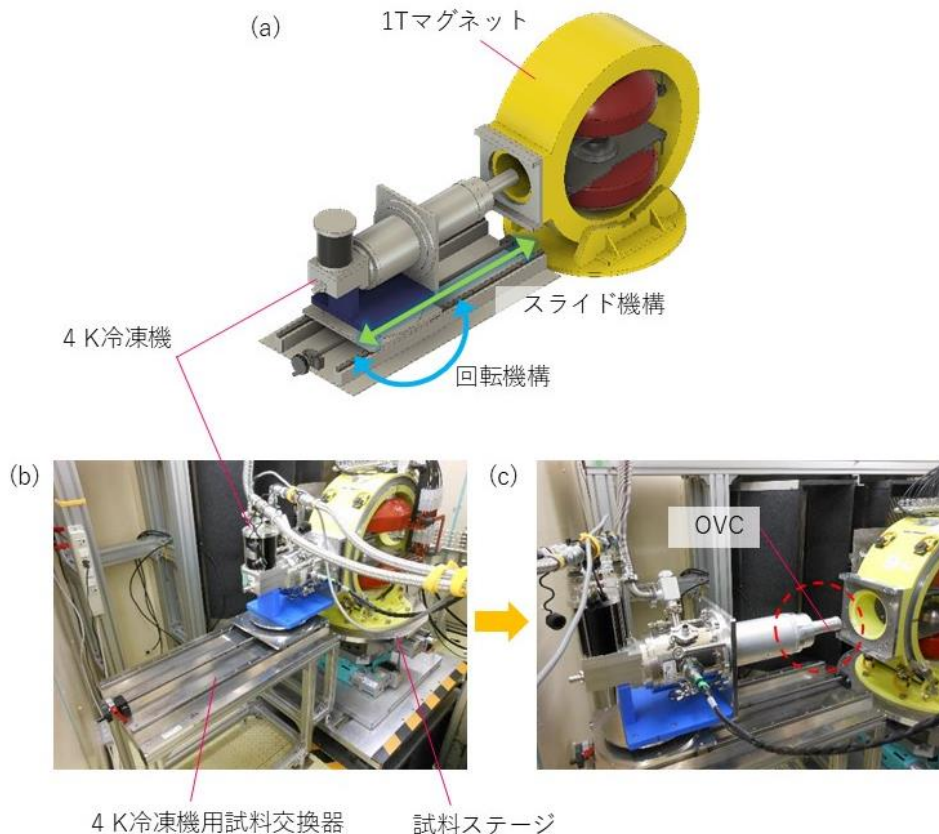


図 12. (a) 4 K 冷凍機用試料交換器の可動部概要、(b) 4 K 冷凍機引き抜き前の状態  
(c) 4 K 冷凍機引き抜き後の状態

図 12(b)に示すように、BL15 分光器室内の試料ステージ周辺は広くない。また、分光器室内通路の一番狭い場所は幅約 470 mm となっている。これらを踏まえ、4 K 冷凍機用試料交換器は以下の条件を満たす仕様に設計した。

- ・ 架台の幅寸法は、分光器室内の一番狭い箇所を通れるよう 400 mm とする。
- ・ 試料ステージの脇に置けるように、架台の長手方向の寸法は 875 mm とする。
- ・ 手動ハンドルを回せば水平方向に 4 K 冷凍機を引き抜くことができる構造とする。また、4 K 冷凍機が載る部分は回転可能とする。

図 12(c)は、4 K 冷凍機をスライドさせて電磁石から分離したときの様子である。この状態で冷凍機の OVC を取り外して試料交換を行うことができるので、クレーン作業とそれに係る調整が不要となった。ビームラインスタッフとユーザーが実験スケジュールに合わせたタイミングで、試料交換を行うことができる。

### 3.2 自動試料交換機の開発

手動で行っていた試料交換を、自動で複数個の試料を連続して測定できる自動試料交換機を開発を行った。この自動試料交換機は、一軸電動スライダのステッピングモーターをパルス値制御することによって試料セル位置を制御する構造であり、その繰り返し位置決め精度は $\pm 0.02$  mm が見込まれる。測定に用いる試料セルは丸型セル ( $\phi 36$  mm) を準備した。また、BL15 の分光器室内で取り扱える長さを考慮して、最大 7 個のセル搭載数で設計を行った。セル直近の上流側にはカドミウム製マスクを設置してある (図 13)。図 14 に駆動システム概略図を示す。制御用 PC でデバイス制御プログラムに、磁場

の大きさ、測定試料 No.をあらかじめ設定しておくことにより、長時間無人で最大 7 個の試料を連続して測定することが可能である。図 15 には、自動試料交換機を電磁石に取り付けた写真を示す。当然ながら、電磁石のホールピース間に挿入される部分の材質には非磁性金属（アルミニウム、真鍮、カドミウム）を用いている。

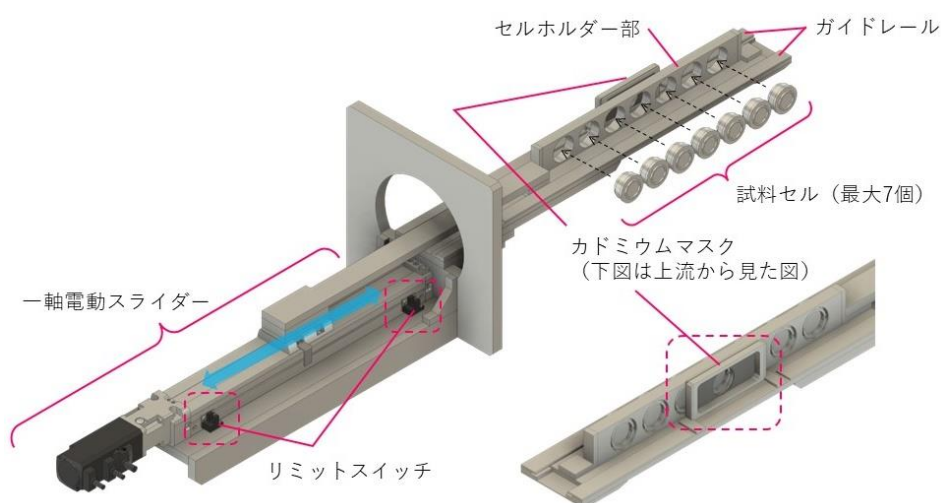


図 13. 自動試料交換機の構造概要図

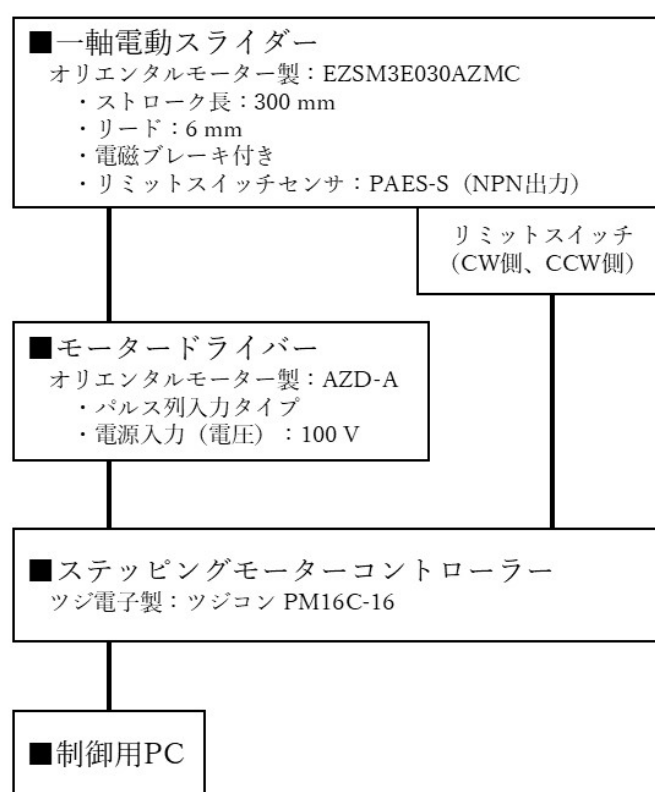


図 14. 自動試料交換機の駆動システム概略図

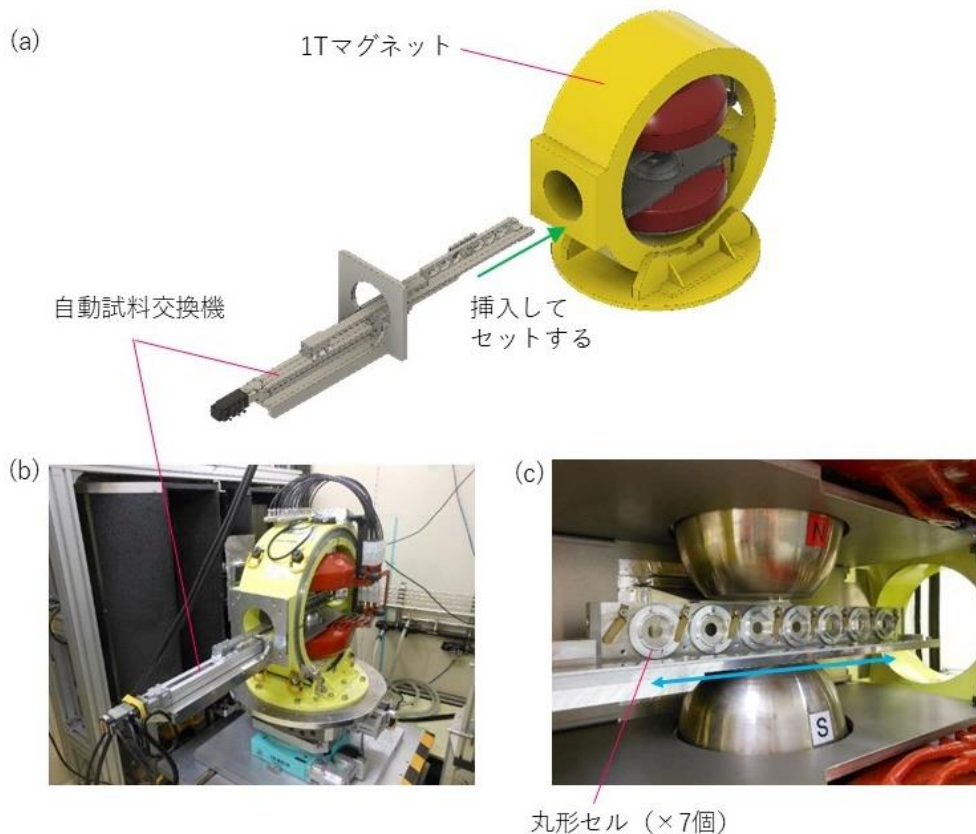


図 15. (a) 自動試料交換機の取付け方、(b)試料ステージ上に設置した様子、  
(c)試料セル搭載部 ( $\phi 36$  mm の丸型セルが最大 7 個セットされる。)

#### 4. まとめと今後の展開

BL17 と共通機器として利用してきた 1 T 電磁石に関し、BL15 での利便性向上のため NEC トーキン製の 1 T-Mag-BL15 を新たに導入した。導入にあたり、磁場印加用バイポーラ電源とのインターロックにも配慮し、安全に BL15 で実験が行える試料環境機器を製作した。また、電磁石の付属治具、バックグラウンドノイズ除去板等を製作して整備したことに加え、従来の 1 T 電磁石では実現できなかった 4 K 冷凍機用試料交換機、自動試料交換機などのユーティリティも開発した。これらの開発により、ユーザーからの要望に対応できたとともに、実験の効率性を拡充することができた。

今後の展開としては、電磁石専用架台のキャスターの初動時負荷が高いため、現状の  $\phi 75$  mm よりも車輪径の大きなキャスターへ変更することを検討している。また、バックグラウンドノイズ除去板については、設計時に考慮していなかった試料環境機器（レーザー加熱装置）と組み合わせて実験する場合に干渉することが分かっているため、形状修正を検討している。

#### 謝辞

このレポート作成にあたり日本原子力研究開発機構 高田慎一氏には、貴重な助言及び協力をいただきました。深く感謝いたします。

## References

- [1] S. Takata, J. Suzuki, T. Shinohara, T. Oku, T. Tominaga, K. Ohishi, H. Iwase, T. Nakatani, Y. Inamura, T. Ito, K. Suzuya, K. Aizawa, M. Arai, T. Otomo, and M. Sugiyama, JPS Conf. Proc. **8**, 036020 (2015)
- [2] J-PARC MLF, BL15 大観 試料環境・機器詳細情報,  
[https://mlfinfo.jp/doc/bl15/BL15\\_sample\\_environment.pdf](https://mlfinfo.jp/doc/bl15/BL15_sample_environment.pdf)
- [3] MiSUMi たわみ算出計算式, <https://jp.misumi-ec.com/special/alumiframe/tech/capacity/>