

## STF-2 クライオモジュール内の残留磁場測定

### THE RESIDUAL MAGNETIC FIELD MEASUREMENT OF STF-2 CRYOMODULE

植木竜一<sup>#,A)</sup>, 山田智宏<sup>A)</sup>, 山本康史<sup>A)</sup>

Ryuichi Ueki<sup>#,A)</sup>, Tomohiro Yamada<sup>A)</sup>, Yasuchika Yamamoto<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> KEK

#### Abstract

It is known that the residual magnetic field around a superconducting cavity has a significant effect on the Q-value of the cavity. The cryomodule made of steel serves as the first stage magnetic shield. However, the residual magnetic field in the module magnetized during the manufacturing and transportation process is very high. We have demagnetized magnetized cryomodules to reduce the residual magnetic field. In addition, it is also important to understand the residual magnetic field during accelerator operation. In this study, we measured the residual magnetic fields in the STF-2 cryomodules CM1 and CM2a during the cooling of the cryomodules and during beam operation. In this paper, we report the results of the residual field measurements in the cryomodule during cooling and beam operation.

#### 1. はじめに

近年の研究において超伝導加速空洞周辺の残留磁場が空洞の Q 値に大きな影響を与えることがわかってきた[1-3]。そのため、クライオモジュールに超伝導空洞を組み込む際、空洞周辺の残留磁場をできる限り小さくすることが要求される。ILC 用超伝導空洞で要求される残留磁場は 10 mG 以下である。クライオモジュールは、低コストや加工が容易という理由から鉄製のモジュールが使われることが多い。しかし、製造過程や輸送過程で鉄が磁化した場合、クライオモジュール内の残留磁場が地磁気よりも高くなることがわかっている。我々は、2007 年と 2020 年に実際のクライオモジュールを使い消磁方法の検討を行ってきた。この際、モジュール内の残留磁場は 150 mG 以下まで下げられたものの、消磁用コイル電源の容量不足から、十分なコイル電流が確保できなかった。数十アンペアの電流を印加し、50 mG 程度までクライオモジュール内の磁場を下げる試みもなされており、コイルの巻き方や最大電流など消磁条件のさらなる検討が必要であると考えられる。

STF では、STF-1 や S1-Global、量子ビーム、STF-2 のプロジェクトを通じてクライオモジュールの製造・組立、据え付け、運転技術確立のため多くのテストを行ってきた。しかし、組立・据え付け作業中におけるモジュールやその他の機器、部品の磁化の有無や加速器運転中のモジュール内の残留磁場の変動など残留磁場に関するデータの取得はほとんど行われてこなかった。そこで、超伝導空洞入れ替えの際に消磁を行った CM2a モジュールが再び組立てられ、STF 地下トンネルに据え付けられた後にクライオモジュール内の磁場測定を行った。また、クライオモジュール内に 3 軸フラックスゲートを設置し、2022 年 10 月～2023 年 1 月に行われたビーム運転期間のクライオモジュール内の残留磁場の変動をモニターした。本発表ではこれらの結果を報告する。さらに、現在進められている ITN (ILC Technology Network) 内で計画されている磁気シールド関係の取り組みについても説明する。

#### 2. CM2a クライオモジュールの消磁

鉄は高い透磁率を有しており、地磁気に対する磁気遮蔽効果が期待できる。そのため、クライオモジュールは第一の磁気シールドとしての役割を果たしており、地磁気を数分の 1 に減少させる。これに加え、第二の磁気シールドとして低磁場で高い透磁率を有するパーマロイで製作磁気シールドを配置することにより、空洞周辺の残留磁場を数十 mG 以下に落とすことができる[4]。しかし、クライオモジュールの製作過程や輸送過程においてモジュール自体が磁化し、場合によってはモジュール内の残留磁場が地磁気よりも高くなる場合がある。このような場合は、クライオモジュールの消磁が必要となる。2020 年、STF-2 用クライオモジュール CM2a 内の超伝導空洞入れ替えが行われ、その際クライオモジュールの消磁を行った[5]。Figure 1 に示すように消磁用コイル 720 ターンをモジュールに胴巻きに設置し、最大電流 8A で消磁を行った。その結果、Fig. 2 に示すようにクライオモジュール内の残留磁場は 150 mG 以下に減少した。この時のクライオモジュール内の残留磁場の目標は 100 mG 以下であったが、電源の容量の限界でコイルに印加する最大電流が 8A に制限されたため、これ以上の消磁が行えなかった。今回我々が行った消磁の条件で、クライオモジュールの鉄内に励起された磁場を OPERA で計算すると約 4 kG 程度であった。消磁コイルの巻き方によっては、より効率よく鉄の中に磁場を励磁することができるため、今後は消磁の際の鉄材内の印加磁場と残留磁場

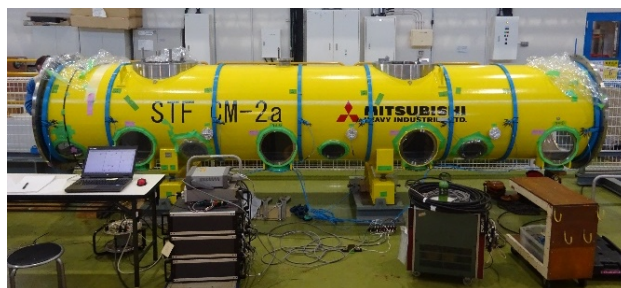


Figure 1: The set up of CM2a module demagnetization.

<sup>#</sup> uekiryu@post.kek.jp

の関係性を明らかにし、より効率的にクライオモジュールの消磁が行える条件を検討し、モジュール内の残留磁場をさらに低減させることが可能であると思われる。

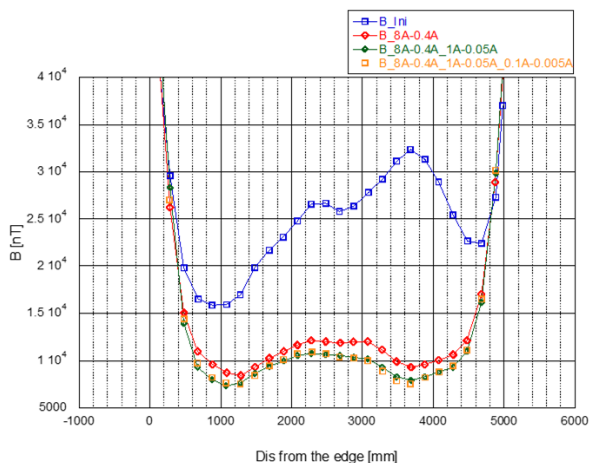


Figure 2: The residual magnetic field in CM2a after demagnetization.

### 3. STF-2 クライオモジュール内の残留磁場測定

CM2a モジュールの消磁を行った後、超伝導空洞をはじめとする各コンポーネントがインストールされ、2022 年までに再び STF 地下トンネルに設置された。組立作業中や地下トンネルへの据え付け作業中にクライオモジュールや部品、また他のコンポーネント自身が磁化していないか、また他の加速器コンポーネントからの漏れ磁場などで残留磁場が増加していないかを確認するため、トンネル設置後 CM2a 内の残留磁場測定を行った。その際、消磁を行っていない CM1 内の残留磁場の測定も行い、両者の比較を行った。測定は、以前 wire position monitor の測定で使用されていたポートから 3 軸のフラックスゲート(CryoMag: Bartington)を差し込み(Fig. 3)、100 mm 間隔で測定を行った。Figure 4 および Fig. 5 は CM1、CM2a の測定結果である。横軸はクライオモジュールのフランジからの距離を示している。ビーム軸に対して水平方向を X、垂直方向を Y、ビーム軸方向を Z としてグラフをプロットした。消磁を行っていない CM1 内の残留磁場は全体的に高い値を示し、場所によっては

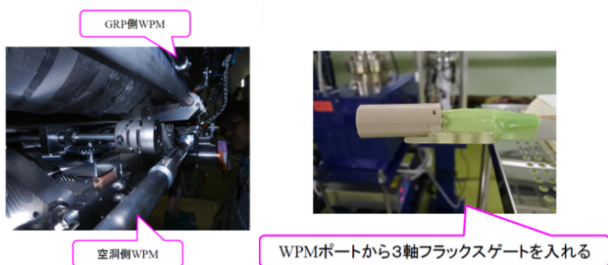


Figure 3: The port of wire position monitor(left). 3-axis fluxgate(right).

1 G を超えており、CM1 モジュールが磁化していることがわかった。一方、CM2a は、フランジ付近以外は 150 mG 以下となっており、モジュールの消磁を行ったときに測定した値と同程度の残留磁場であった。このことから、クライオモジュールの組み立て作業や据え付け作業においてクライオモジュールや部品などが磁化させるような作業はないことがわかった。

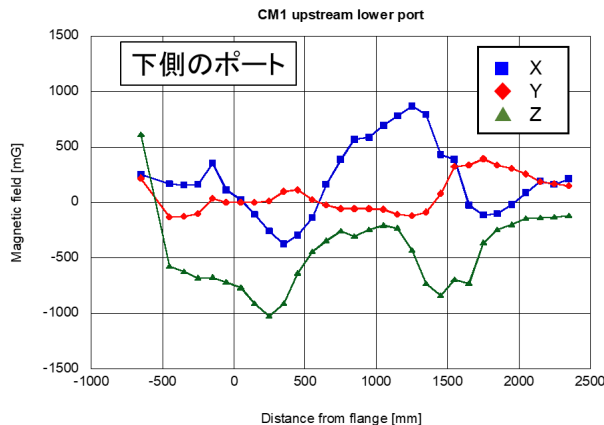


Figure 4: The residual magnetic field in CM1.

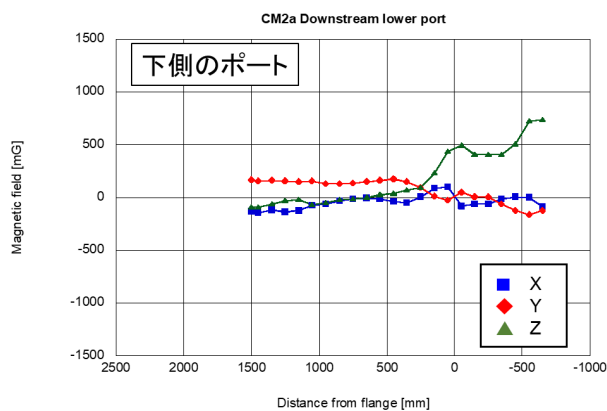


Figure 5: The residual magnetic field in CM2a.

### 4. 加速器運転中の残留磁場の変動

これまでクライオモジュール単体や加速器運転が停止している際のクライオモジュール内の残留磁場測定を行ってきたが、一番重要なのは加速器運転中の残留磁場である。しかし、加速器運転中の磁場をモニターすることがないため、加速空洞やその他の加速器機器が実際に動作した際、残留磁場にどのような影響を与えるか明らかになっていない。これを調べるため、各モジュール内に低温用3軸フラックスゲートを1つずつ設置し、2022年10月～2023年1月に行われたビーム運転中のクライオモジュール内の残留磁場の変化をモニターした。Figure 6 は、2022年11月21日0:00～11月27日0:00までの1週間のCM2aモジュール内の残留磁場の変動を示したグラフである。週初め(月曜日朝)と週終わり(金曜日夜)に10 mG程度の磁場のステップが見られた。月

曜日から金曜日と土日で冷凍機の運転モードが変わるため、この変化は冷凍機の運転に関係していると考えられるが、今のところ詳細は明らかになっていない。また、1日の運転開始と終了時にも数ミリガウスのステップが見られた。23日の休日にはこのような磁場ステップが見られないことから、こちらも加速器の運転と関連していると考えられる。このように、地磁気のような外部磁場のほかに加速器運転に伴い周辺機器から発生する磁場も存在することが明らかとなった。磁場の発生源としては、空洞周波数を調整するためのチューナーのモーターやクライオモジュールの中心に配置される超伝導電磁石の漏れ磁場などが考えられる。今後は、このような機器からの影響がどの程度あるかをシミュレーションや実測によって確かめる必要がある。また、今回見られた磁場ステップの大きさはフラックスゲートを設置した場所のものであり、違う場所では、もっと大きく変化する可能性もある。今回は、既存のポートを使用してフラックスゲートを設置したため、ジャケットの外側の残留磁場の測定となったが、今後はQ値に最も敏感な超伝導空洞周辺の磁場変動を正確にモニターする必要がある。

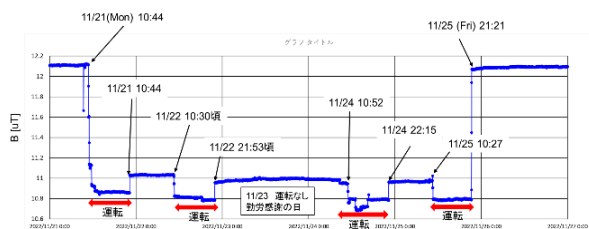


Figure 6: The trend graph of the residual magnetic field in CM2a.

## 5. 今後の取り組み

KEKでは、2023年からILC Technology Network(ITN)が開始された。これは、2023年から2027年の5年間でILC仕様のクライオモジュール1基を製作し、テスト運転を行いクライオモジュールの性能評価を行う実証実験である。この中で、空洞周辺の残留磁場を10 mG以下に抑えるという目標を掲げており、磁気シールド関係の仕事は、大きく以下の3つとなる。

- 1、クライオモジュールの消磁
- 2、8連空洞用の磁気シールドの製作
- 3、運転中の磁場モニターシステムの構築

### 5.1 クライオモジュールの消磁

クライオモジュールの消磁に関しては、消磁用コイルの巻き方やコイルへの印加電流によって消磁の効率や消磁後の残留磁場の大きさに違いがあることがわかっているため、消磁条件のさらなる検討を行う予定である。また、以前はコイルの端末処理をすべて手作業で行っていたため、準備に多くの時間を費やしていた。少しでも時間を短縮するため、ワンタッチでコイルを接続できるようコネクタ接続にするなどコイルのモジュール化を行う予定である。さらに、消磁前後のモジュール内の磁場マッピング測定を行う際も磁場センサーを手動で動かし測定

を行っていたため、こちらも測定の効率化を目指して現在は自動三次元マッピング測定装置の開発を進めている。これによって、これまで1週間ほどかかっていた消磁作業を数日に短縮できれば、ILC建設時のクライオモジュールのマスプロダクション時の時間短縮やコストダウンにつながると思われる。

### 5.2 8連空洞用磁気シールド

ITNでは、磁気シールドをヘリウムジャケット外側に設置することが決まっている。STF-2までの8連空洞用の磁気シールドはヘリウムジャケットの中に装着してきたため、今回は大幅な形状の変更が必要となる。KEKでは2022年にヘリウムジャケットの外側に装着する超伝導空洞単体用の磁気シールドの製作を行い、高いシールド率を達成している。これを参考に空洞間のつなぎ目や超伝導電磁石との境目などの図面の再考を行い、8連空洞用の磁気シールド製作を進めていく予定である。ただし、ILCのTDRでは明確に磁気シールドの仕様は決められておらず、磁気遮蔽性能やほかの機器との干渉、コスト、メンテナンスのしやすさなど総合的な観点から議論を行い、最終的な仕様を決める必要がある。現在のILCのデザインでは、エンド部分におけるヘリウムジャケットと空洞の間が2 mm程度の隙間しかなく、今まで使用していたパーマロイ系の磁気シールドの装着が難しいと考えられる。そのため、材料の厚さや形状、さらには新規材料を用いたシールドも視野に入れて検討を進め、磁気シールドの仕様を決めるために必要な基礎的なデータの取得を進めていく予定である。

### 5.3 磁場モニターシステムの構築

4章で述べたように加速器運転中の磁場変動のモニターは非常に重要である。そこでITNで製作するモジュールには、超伝導空洞近くの残留磁場を測定するための磁場センサーの設置を検討している。できるだけ多くのセンサーを設置し、加速器運転中に起こる磁場変動をモニターするため、安価で小型の磁場センサーの選定[6, 7]を進め、システムの構築を行う予定である。得られたデータを元に磁場変動の原因を理解し、空洞性能に影響をおよぼす原因がある場合はその対処方法も検討する。

## 6. まとめ

2020年に消磁を行ったクライオモジュールCM2aは、2022年秋までに組み立てが終了し、STF地下トンネルに設置され、2022年10月～2023年の1月までビーム運転が行われた。運転前に消磁を行ったCM2aモジュール内の残留磁場測定を行った結果、残留磁場は150 mG以下であり、組み立てやトンネル据え付け作業等でモジュールが磁化するという事はなかった。一方、消磁を行っていないCM1モジュールの残留磁場は、場所によっては1Gを超えており、現在のクライオモジュールの製作、輸送方法では、モジュールの磁化が避けられない状況であることが分かった。今後は、製作後のクライオモジュールのより効率的な消磁の方法や条件の検討を行い、できる限りクライオモジュール内の残留磁場を低減させる方法の確立を目指す。

また、加速器運転中に残留磁場が変動することが分



かった。これは、地磁気などの定常磁場に加え、加速器運転中に各機器から発生する磁場が残留磁場を変動させている可能性があることを示唆している。そのため、残留磁場に影響を及ぼす可能性がある機器を調べ、どのような影響があるか調査を行う予定である。

KEK では、今年度から 5 年間で ILC 仕様のクライオモジュール1基を製作し、モジュールテストを行う予定である。磁気シールド関係として、クライオモジュールの消磁、8 連空洞用の磁気シールドの製作、モジュールおよび超伝導空洞周辺の残留磁場変動モニターシステムの構築と試験を行う予定である。加えて、TDR で明確とされていない磁気シールドの仕様を決めるための材料となる様々なデータの取得を進める予定である。

## 参考文献

- [1] T. Kubo, “Physics and Challenges of Superconducting Cavities for Particle Accelerators and Theoretical Implication towards Higher Performance,” Invitation to the world of superconducting cavities”, 低温工学 54 巻 4 号、2019.
- [2] E. Kako, “Technologies for Superconducting RF Cavities”, 「加速器」Vol.13, No.1&2, 2016.
- [3] T. Okada *et al.*, “Observation of quenching-induced magnetic flux trapping using a magnetic field and temperature mapping system”, Phys. Rev. Accel. Beams 25 (2022) 8, 082002.
- [4] M. Masuzawa *et al.*, “Magnetic shielding for superconducting RF cavities”, Supercond. Sci. Technol. 30 034009, 2017.
- [5] M. Masuzawa *et al.*, “加速空洞用真空容器の消磁手法の検討”, Proceedings of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, September 2 - 4, 2020, Online, pp. 163-167.
- [6] R. Ueki *et al.*, “Development of Magnetic Field Mapping Measurement System Using Magneto-Resistive (MR) Sensor”, Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, July31-August 3, 2019.
- [7] T. Okada *et al.*, “Development of a Temperature and Magnetic Field Mapping Apparatus for Superconducting Cavities at KEK”, Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, July31-August 3, 2019.