

STF における超伝導電磁石開発の取り組み

R&D ACTIVITIES REPORT ON SUPERCONDUCTING MAGNET IN STF

清水 洋孝[#], 宗 占國, 木村 誠宏, 山本 明

Hiroataka Shimizu[#], Zhanguo Zong, Nobuhiro Kimura, and Akira Yamamoto

KEK High Energy Accelerator Research Organization

Abstract

In the main linac of the International Linear Collider (ILC), superconducting magnets for beam focusing and steering will be periodically located in cryomodules where strings of superconducting RF (SRF) cavities are installed for beam acceleration. The cavity string assembly is carried out under ultra-clean environment. To avoid contaminations of inner surface of cavities, it is required to integrate the superconducting magnet after the string assembly is completed. To answer requests for the superconducting magnet, a concept of conduction cooling with splittable structure has been proposed and developed. According to the concept, KEK and FNAL collaboration has fabricated several prototypes of the superconducting magnet. One model magnet has been installed in a cryomodule of Superconducting RF Test Facility (STF). We confirmed the model magnet is cooled through the conduction cooling scheme, and safely operated during accelerator operation period of STF. It is important to integrate lessons learned from a model magnet development and operation trial, and to accumulate our experience. In this report, we report the R&D progress in study of the conduction cooling of the superconducting magnet at KEK STF.

1. はじめに

超伝導加速技術を用いた加速器計画では、ニオブで作られた超伝導加速空洞は全て、クライオモジュールの中に収められる。そして、もう一つの主要な加速器要素として、ビームの収束および軌道の制御に用いられる 4 極超伝導磁石、2 極超伝導磁石も、やはりニオブチタン (NbTi) の様な超伝導線材からなるコイルを構成要素としており、冷却が必要となることから、クライオモジュールの中に収められる。

転移温度を下回るための冷却方法として、例えば直接浸漬の方法が挙げられる。この方法では、電磁石全体が液体ヘリウムの熱浴に浸かる事になり、磁石本体からの発熱に対して、非常に安定した冷却と運転環境を得る事が出来る。しかしこの反面、寒冷である液体ヘリウムを超伝導加速空洞と共有出来る装置の構成が必要となる。具体的には、超伝導電磁石の周りに、液体ヘリウムを保有する為のヘリウムジャケットが必要となり、ストリングアセンブリと呼ばれる空洞の連結作業の工程で、クリーンルーム内に電磁石本体を持ち込む必要が生じるが、結果として、空洞内面の汚染リスクが高まると言う欠点が指摘されている。

この空洞に対する汚染の問題の解決に向けて、ILC に向けた電磁石開発の一つの取り組みとしては、左右にヨークを分割する事が出来る、2 分割可能 (splittable) な構造の 4 極電磁石の提案と開発が行われてきた[1,2]。この方式では、空洞のストリングアセンブリが終了したビームパイプに、分割した電磁石を後から取り付ける事が出来ることから、クリーンルーム作業時の空洞の性能劣化の可能性を大きく引き下げる利点がある。電磁石の冷却に関しては、超伝導加速空洞に液体ヘリウムを供給する配

管に熱アンカーをとり、高純度に精製されたアルミなどで熱の輸送路を取った、伝導冷却の方式で行われる。この方法を採用する事によって、電磁石本体を同軸・円筒状に覆う液体ヘリウム容器が必要無くなり、ビームパイプに対する電磁石本体、及び電磁石に取り付けられるビームポジションモニタ(BPM)の取り付け精度が格段に向上する事から、ビーム輸送に対しても良い影響を及ぼす事が期待出来る。

これまでに KEK では、FNAL との共同研究を通して、分割可能な構造を持ち、伝導冷却の方式を取り入れた超伝導電磁石の試作機を複数台作製し、それらの性能評価を行ってきた[3,4]。特にこの内の一台を、KEK の超伝導リニアック試験施設 (STF) に設置されたクライオモジュール内に導入する事で、実際の加速器の運転環境中での冷却試験と通電試験を行ってきた。このレポートでは、STF に導入された ILC 型の試作 4 極超伝導磁石のこれまでの冷却試験の結果と改良の履歴を振り返り、最新の通電試験の結果について報告を行う。

2. STF 超伝導磁石についての概要

最初に STF 超伝導磁石の概要について説明を行う。クライオモジュールに収められた超伝導磁石は、4 極磁石成分に加え、縦方向と横方向のビーム操作を行う 2 極磁石成分が励磁出来るパッケージになっている。4 極用コイルと 2 極用のコイル 2 種類の合計 3 つのコイルが一つのコイルケースに収められており、このレーストラック型のコイルケース 4 本が、鉄製ヨークに内蔵されている。電磁石の各成分はそれぞれ独立に励磁出来、クライオモジュールに取り付けられたマグネット専用ポートには、6 本の電流リードへと続く電極が装備されている。表 1 に、STF に導入された電磁石の主要なパラメータについて纏める。

[#]hirotaka@post.kek.jp

Table 1: Magnet Package Parameters

Parameter	Unit	Value
Magnet physical length	mm	340
Magnet width	mm	322
Magnet height	mm	220
Effective length	mm	230
Magnet-pole aperture	mm	90
Beam-pipe bore aperture	mm	78
Integrated peak gradient	T	2.0
Peak quadrupole gradient	T/m	8.7
Quadrupole magnet inductance	H	0.66
Operation current	A	30
NbTi superconductor diameter	mm	0.5

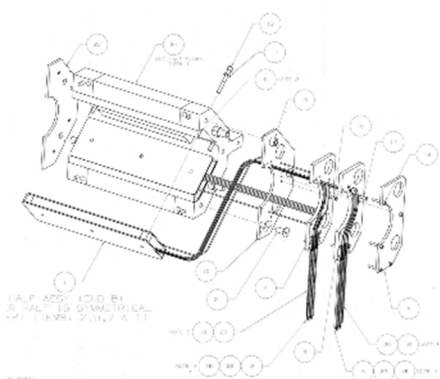


Figure 1: Design concept of the splittable superconducting quadrupole magnet.

超伝導磁石本体は、FNAL によって製作された。図 1 にその構造の特徴を示す。先に述べた通り、鉄ヨーク部分が縦方向に左右 2 つの部品に分かれる構造になっており、この特徴を実装する為に、コイルケースへと続くニオブチタン製の超伝導線(カレントリード)は、一度全てが磁石底部のスプライスと呼ばれる締結部分に集約され、各磁極において励磁されるべき磁場を発生出来るように接続される。最終的にカレントリードは、窒化アルミ製の絶縁板に沿ってスプライス部分からモジュール外側に続くマグネット用作業ポートへと導かれる。図 2 に、FNAL で磁石の製作時の写真を載せる。写真では判り難いが、鉄ヨーク両端の固定治具の間に、積層された鉄ヨークが保持されており、その磁極部分を囲い込む様に、レーストラック型のアルミ製のコイルケースが嵌め込まれる構造になっている。コイルケース内に収められたニオブチタン製の線材を伝導冷却によって冷やす為に、磁極とコイルケースを覆う様に、高純度アルミの薄い板が被せられる。アルミ材の純度は 5N8 の圧延材を利用しており、厚みは 0.5 mm で、極低温環境での使用実績のある接着剤を用いて固定されている。写真に写っている、コイルケースか

らはみ出したアルミ材は、鉄ヨーク外側に巻き付けられ、鉄心そのものの排熱にも寄与する。最終的には、空洞に 2 K 超流動ヘリウムを分配する、供給配管と呼ばれる液体ヘリウムの通り道に設けられた銅のアンカーに固定され、そこを熱浴として磁石での熱負荷を排熱する構成になっている。



Figure 2: Pure Al strips glued on coil cases at FNAL.

3. STF でのこれまでの活動について

3.1 超伝導磁石の導入と冷却試験の履歴

STF 超伝導磁石のこれまでの活動の履歴を表 2 に纏める。2013 年に FNAL において製作が開始された磁石本体は、同年の 11 月に、STF のクライオモジュールへの取り付けが開始された。CM1 と呼ばれるこのクライオモジュールには、超伝導加速空洞が磁石の前後に 4 本導入されている。2014 年の 11 月の STF 冷却試験の期間を利用して、最初の通電(励磁)試験が行われている。その後順次必要と思われる改良を加えながら、磁石本体を出来るだけ低い温度に保つ工夫が重ねられて来た。特に重要であった改良点について、以下に説明を加える。図 3 に、磁石導入時からのコイルケースに取り付けられた温度計の記録の履歴を載せる。第 1 回目の励磁試験

Table 2: STF SC Magnet R&D History

2013/3/1	FNAL において磁石の製作開始
2013/9/20	KEK に向けて出荷
2013/11/12	STF CM1 に取り付け開始
2014/11/14	第1回励磁試験 (9.8A で quench)
2015/5~	高温超伝導体製電流リードの追加
2015/11/1	第 2 回励磁試験 (25.6A で quench)
2016/11/14	2 極磁石励磁試験 (50A 通電成功)
2017~2019	電流リード取り外し状態での入熱試験
2020/1~	伝導冷却用 Al 板追加の改造
2021/2~	第3回励磁試験 (4 極磁石)

が行われた 2014 年では、全体的に電磁石の温度が高く、NbTi の転移温度までの余裕が充分に取れなかった事が見て取れる。実際の通電試験においても、9.8 A の通電時にクエンチが発生して励磁が中断された。

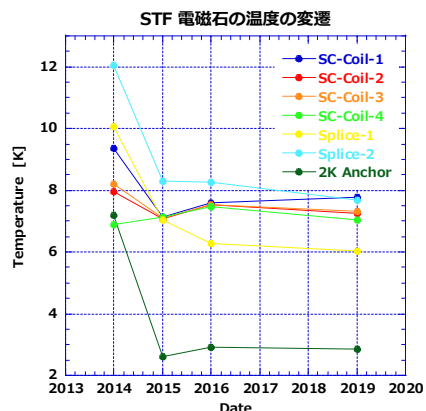


Figure 3: Temperature history of the SC magnet.

この問題を解決するために、まず最初に行われた改良が、2015 年に行われた高温超伝導体(HTS)の電流リードの導入である。図 4 にマグネットポートの覆いを取り外し、電流リードが室温側(300 K)から 2 K 側に移行する際に通過する熱アンカーの様子を写した写真を載せる。

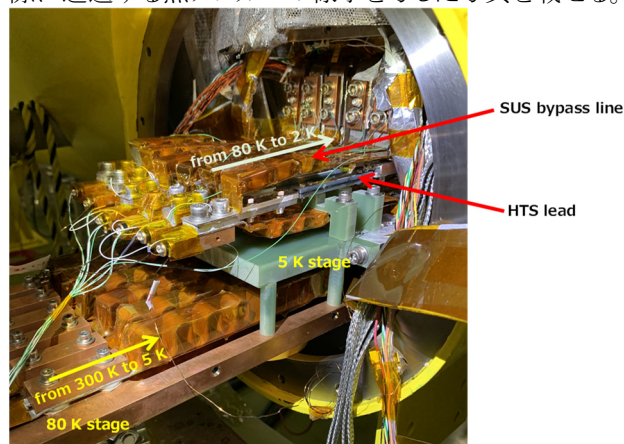


Figure 4: Thermal anchors of current lead lines.

室温側から導入された銅製の電流リードは、最初にクライオモジュールの 80 K シールドに熱アンカーをとった銅製の 80 K ステージによって液体窒素温度にまで冷やされる。この後クライオモジュールの 5 K シールドに熱アンカーをとった 5 K ステージ(ステージ自体は G10 製)で冷やされた後、2 K 供給配管に触れる最も冷えた領域へと導かれるが、導入初期の構造では、カレントリードを伝って侵入して来る熱が大きく、電磁石本体が充分冷える事を阻害していた。そこでカレントリードの 5 K ステージと 2 K アンカーの間に、熱スイッチとしても働く、高温超伝導体製のリードを挟み込む事で、常温側からの熱侵入をほぼ完全に遮断する事に成功した。この HTS 製電流リードの導入後に行われた第 2 回目の励磁試験では、通電量が 25.6 A に到達し、目標の 30 A での励磁まで、もう少しのところまで迫る事が出来た。しかし磁石本体の温度は、全体的に転移温度の極近傍の 8 K 前後を示しており、安定な励磁試験を行うには、まだ充分な冷却とは

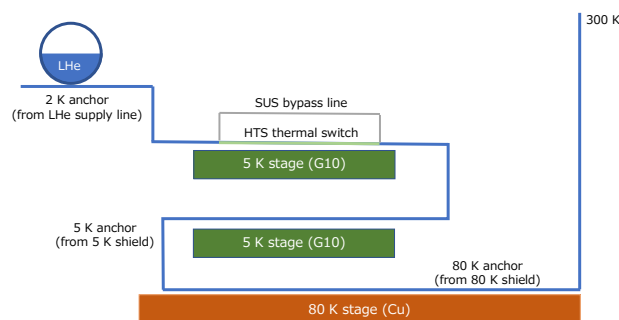


Figure 5: A conceptual diagram of current lead and thermal anchor points.

言えない状態にあった。翌年(2016)の冷却試験時には、4 極電磁石よりコイルの巻き数が少ない 2 極磁石の励磁試験が行われ、手持ちの電流源の最大出力である 50 A での安定した励磁に成功したが、依然として電磁石本体が高い温度で平衡しているのは、電流リードからの熱伝導成分の寄与が未だ大きく残っている事が原因であると疑われた。この点を検証する為に、2017 年からは、電磁石への通電試験を一時的に中止して、室温側と 2 K 側を結ぶ電流リード 6 本と、関連する熱アンカーステージ類を全て取り外し、電磁石本体を熱的に孤立させた断熱状態に近付ける為の変更が行われた。図 5 にカレントリードと各熱アンカーの配置図を示すが、この図に示される全てのステージとカレントリードが一時撤去された。この後に行われた 2019 年の冷却試験では、電流リード撤去前の 2016 年の温度分布と差が無い結果が得られた。この検証を通じて、電流リードからの伝導成分は充分無視出来る事が確認され、電磁石の温度が転移温度付近に留まっているのは、何か他に原因があるという理解に至った。

3.2 問題点の検討と改造について

安定した励磁試験を行う為に、磁石本体の温度が高い状態に留まっている原因について考察を行った。

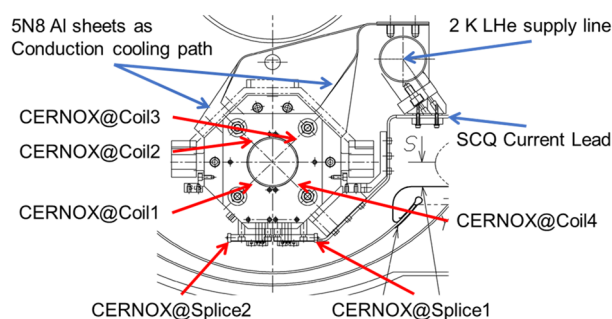


Figure 6: Conduction cooling thermal path.

図 6 に、ビーム下流側から見た磁石と熱浴として働く 2 K 供給配管の位置関係が判る図面を載せる。この接続図から解る様に、常温側からの伝導成分を運ぶと考えられた電流リードが供給配管の下側に、磁石本体の冷却を担う高純度アルミの薄板が供給配管の上側にそれぞれ銀蝋で接合された銅ブロックに取り付けられている。これまでの検討から、磁石の温度を高く保つ原因として恐れていた電流リードからの伝導成分は、既に HTS リード

によって遮断に成功している事が判るが、もし仮に他の熱源との接触によって、熱の流入がある場合、次の問題が考えられる。即ち、磁石本体の排熱を行う高純度アルミ薄板は、供給配管の上側のアンカー受けに固定されており、直接は超流動ヘリウムと熱接触していない。この為、熱の通り道として、厚さ 3 mm のステンレス製の供給配管の壁面周方向(配管側面の上下方向)を経由した排熱を行う必要が生じる。極低温環境でのステンレスの熱伝導率は、例えば 2.0 K では 0.1 W/m-K と非常に小さいため、大きな温度勾配が残ってしまい、結果として磁石本体の温度が高い状態で平衡している可能性がある。これは、超流動 He 2 相流冷却管内では、液面上部の気相部分は、飽和蒸気圧が 3 kPa となり、ほぼ真空断熱状態にあることから起きると理解される。この可能性の検証を行う為に、最初に銅のアンカー部分がステンレスの壁面を通じて超流動ヘリウムに熱接触するモデルを考え、解析的に解く事で、排熱されている熱量が何 W 程度であるかの検討を行った。銅のアンカー受けが実際に測定されている 8 K 程度の温度を保つには、約 1.2 W の熱がステンレス壁面を通して排熱されている事が解析計算から判った。次にこの結果を更に検証する為に、ANSYS を使った数値計算を行い、より現実的な物の構成と寸法に修正した後、1.2 W の熱の流入があった場合、銅部分の温度が何度になるかを計算した。

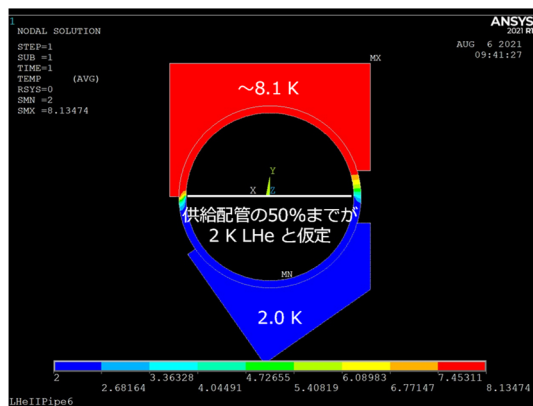


Figure 7: Numerical calculation of thermal gradient.

図 7 に数値計算での結果を示す。1.2 W 程度の小さな熱を考える事で、実際に測定されている温度分布に近い結果が再現されている事が判る。ここでは 1.2 W の熱を電磁石に与える熱源についてはまだ特定が為されていないが、熱アンカーの配置から、ステンレスパイプが熱伝導を律速しており、この結果アンカー及び磁石本体の温度が冷え難い状態にある事が理解された。

上の理解に基づき、排熱の律速を緩和する為に、供給配管の下側に取り付けられている銅アンカー受けに、高純度アルミ薄板を追加して、直接電磁石本体と結ぶ改善を行った。モジュールに用意された電磁石ポートは、基本的には電流リードを外側から取り付ける為の作業ポートであり、それより内側にある銅アンカー受けや磁石本体には触る事が出来ない構造になっている。この為、充分な量のバイパス材の取り付けが出来なかったが、手が届く範囲で出来るだけ高純度アルミ薄板を取り付けた。この改良によって、スプライスを含む電磁石本体の温度

が 6 K にまで下がり NbTi の転移温度に対して、熱的に余裕を持って以降の励磁試験が行える様になった。

4. 今回の冷却における通電試験結果

以下では 2021 年の STF クライオモジュール冷却時に行われた、最新の通電試験の結果について報告を行う。

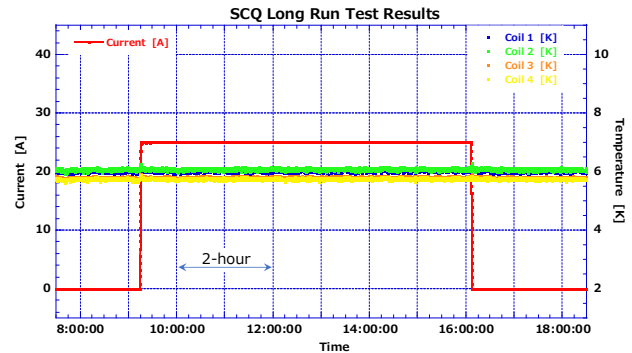


Figure 8: Long run test result of SC magnet.

図 8 に、長時間運転時の磁石の温度の記録を示す。4 極磁石に対して 25 A の励磁を行い、7 時間以上の運転を行った。温度記録から、励磁の前後で各コイルの温度が変化して居らず、また通電中の温度上昇も無く、安定した励磁状態が保っている事が判る。

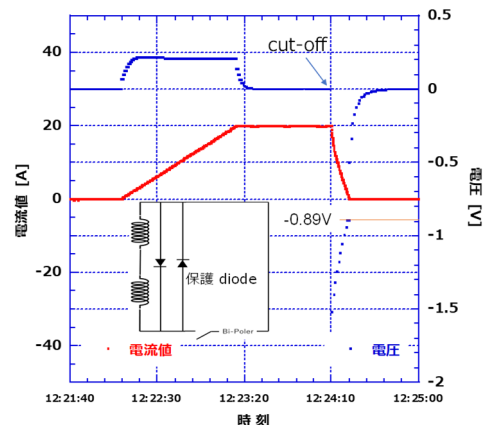


Figure 9: Cut-off test result of SC magnet.

図 9 に、電源を用いた遮断試験の結果を示す。図中の回路図に示す様に、コイル(4 極磁石)と極性の反転が出来るバイポーラ電源が接続されており、磁石のクエンチ若しくは電源の故障による遮断が起きた際に、コイルに蓄えられたエネルギーをジュール熱として消費して、コイルの焼損を防ぐための保護ダイオードが組み込まれている。通常ランプレートを十分に低く抑え、コイルに誘起される電圧を小さく保つ操作が為されるが、遮断が行われた時点で、保護ダイオードの順方向電圧(今の場合約 0.9 V)を越える大きな電位差が電磁石の両端に発生し、ダイオードに電流が流れている。やがてダイオードの順方向電圧以下の電位差に戻ると、回路には電流が流れる事が出来なくなるが、残った電位差が引き続き異なっ

た時定数に従って減少していく様子が記録されている。これはコイルケースからの排熱の為に貼り付けた、高純度アルミ薄板に誘起された渦電流によって励磁される磁場成分の減少を、コイル側が感受した結果が、電位差の減少として記録されたものと理解する事が出来る。また、他の可能性として、電源出力端に付加されている平滑用コンデンサに蓄積されたエネルギーの放電からの影響も考えられる。渦電流による磁場の誘起の影響を取り除く為には、アルミ薄板に予め切り込みを与えて、電流の流れを阻害すれば良いが、この渦電流からの寄与に関しては、クエンチ時の有効な対策としても利用出来る可能性が在る為、引き続き検討が必要である。

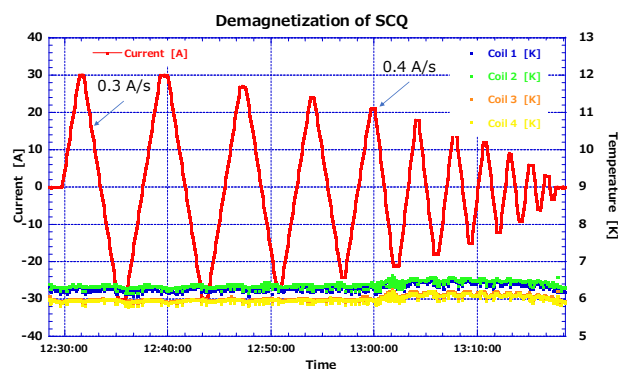


Figure 10: Demagnetization of SC magnet.

今回の STF 電磁石の励磁試験には、定格 30 A での励磁の確認の他に、もう一つの目的があった。STF のビーム運転の結果から、超伝導電磁石が収められているクライオモジュールの前後で、ビームのエミッタンスが悪化している事が確認された。この原因の可能性の一つとして、4 極電磁石の残留磁場が挙げられた。2015 年に行われた 4 極電磁石の励磁試験の際に、クエンチで終了した事で、残留磁場が鉄ヨークに残り、この効果によって、超伝導加速空洞で加速途中の電子線が影響を受けていると言う指摘であった。この問題の解決の為に、定格 30 A での励磁から開始して、極性を反転させながら通電量を減らしていき、最終的に通電を 0 A にする消磁の操作を行う事が、超伝導磁石としての課題であった。図 10 に消磁操作の履歴を示す。この操作の後にエミッタンス測定が行われたが、CM 系入射前 $X:1.81 \pm 0.04$ [mm mrad] が CM 系通過後 $X:18.4 \pm 1.2$ [mm mrad], CM 系入射前 $Y:1.36 \pm 0.06$ [mm mrad] が CM 系通過後 $Y:25.5 \pm 1.5$ [mm mrad] と特に改善する傾向は見られなかった[5]。CM 系通過に伴うエミッタンスの増加に関しては、今後も引き続き検討が行われる予定である。

5. まとめと今後の研究開発

STF 加速器に導入された超伝導磁石に関して、これまでに行われてきた研究開発を振り返り、2021 年の冷却試験で得られた最新の励磁試験の結果を報告した。これまでの冷却試験では、磁石本体の温度が十分に冷え切らない問題に悩まされていたが、新たな冷却用導体を付け

加える改良を行った後、非常に安定に励磁試験が行えるようになった。FNAL との共同開発の結果を示す為にも、またエミッタンス悪化の原因の特定の為にも、今回の冷却試験期間中に定格 30 A での励磁を成功させる事が重要であった。また、今回得られた超伝導磁石の試験結果を踏まえ、現在次の電磁石の開発研究が開始されている[6]。超伝導線材を、より転移温度の高い Nb_3Sn や MgB_2 に変更し、高い加速勾配を有する空洞からのフィールドエミッションがもたらす、暗電流による電磁石の発熱の問題に取り組む研究である[7,8]。直接浸漬法ではなく、供給配管からの伝導冷却のみで、暗電流による磁石コイル部分での発熱に打ち勝ち、クエンチを発生させない高効率な排熱機構を実装する必要がある。この実現の為には、今回得られた STF での冷却試験の結果が、非常に重要な検討材料として利用出来る。

謝辞

本研究を進めるにあたって、Vladimir S. Kashikhin 氏 (FNAL) からは、非常に貴重な意見や指摘を頂きました。また、測定結果の検討段階において、岩下芳久氏 (京都大学) から、非常に参考になる計算結果を提示して頂きました。また、この研究を行う上で、KEK の大内徳人氏、有本靖氏、王旭東氏からは非常に有益な指摘や助言を頂き、また実験の遂行に必要な機器の提供をして頂きました。また、KEK 超伝導低温工学センターからも、実験に必要な機器を提供して頂きました。ここに感謝を述べたいと思います。

本研究の一部は JSPS 科研費 JP18K04951 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] V. Kashikhin *et al.*, "Superconducting Splitable Quadrupole Magnet for Linear Accelerator", IEEE trans. Appl. Supercond., vol. 22, no.3, pp.4002904, 2012.
- [2] V. Kashikhin *et al.*, "Performance of conduction cooled splitable superconducting magnet package for linear accelerators", IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 26, no.4, pp.1-5, 2016.
- [3] N. Andreev *et al.*, "Conduction cooling test of a splitable quadrupole for ILC cryomodules", IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 23, no.3, pp.3500305, 2013.
- [4] N. Kimura *et al.*, "Cryogenic performance of a conduction-cooling splitable quadrupole magnet for ILC cryomodules", AIP Conference Proceedings, vol.1573, no.1, pp.407, 2014.
- [5] Y. Yamamoto *et al.*, "Demonstration of electron beam acceleration at 33 MV/m by STF-2 cryomodules for ILC", Proceedings of the 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (to be published).
- [6] Y. Arimoto *et al.*, "ILC Main Linac のための伝導冷却による機能結合型超伝導4極磁石の研究", Proceedings of the 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (to be published).
- [7] A. Sukhanov *et al.*, "Dark current studies in ILC main linac", Proc. of LINAC'16, East Lansing, MI, USA, September 25-30, 2016.
- [8] A. Yamamoto *et al.*, "Dark current electrons and irradiation heating of superconducting magnets for high-gradient STF linacs", in TESLA Technology Collaboration Meeting, DESY, 2021.