

ILC Main Linac のための伝導冷却による機能結合型超伝導四極磁石の研究 STUDY OF CONDUCTION-COOLED SUPERCONDUCTING QUADRUPOLE MAGNETS COMBINED WITH DIPOLE CORRECTORS FOR THE ILC MAIN LINAC

有本靖^{*A)}, 青木和之^{A)}, 梅森健成^{A)}, 大内徳人^{A)}, 大木俊征^{A)}, 清水洋孝^{A)},
宗占国^{A)}, 道園真一郎^{A)}, 森川祐^{A)}, 山本明^{A)}, 王旭東^{A)}, Kashikhin Vladimir^{B)}

Yasushi Arimoto^{*A)}, Kazuyuki Aoki^{A)}, Kensei Umemori^{A)}, Norihito Ohuchi^{A)}, Toshiyuki Oki^{A)}, Hiroataka Shimizu^{A)},
Zhanguo Zong^{A)}, Shinichiro Michizono^{A)}, Yu Morikawa^{A)}, Akira Yamamoto^{A)}, Xudong Wang^{A)},
Vladimir Kashikhin^{B)},

^{A)}High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

^{B)}Fermi National Accelerator Laboratory (FNAL)

Abstract

A main linac cryomodule for International Linear Collider (ILC) equips a superconducting (SC) quadrupole magnet combined with two corrector dipole magnets. This quadrupole magnet is superferric type and has four SC racetrack coils. The SC coils are cooled by heat transfer to a two-phase helium pipe of the cryomodule. A magnetic field gradient of the quadrupole magnet and the dipole field of the corrector magnets are 40 T/m, 0.1 T, respectively. A magnetic length and an aperture radius of iron poles are 1 m and 0.045 m, respectively. An issue on stable operation of this magnet is heating by dark current (electron emission due to electric field emission) generated in superconducting RF (SRF) cavities. The dark current is accelerated by subsequent electric field in the SRF cavities. When the accelerated-dark-current electrons reach quadrupole-magnetic-field region, they are bent by the magnetic field and enter the SC coils. At this time, energy of the electrons is deposited on the SC coils. The energy deposit is expected to reach more than few watts, and the temperature of the SC coil rises locally, it becomes a risk of quench. Therefore, we aim to realize an SC magnet not reaching quench even with this dark current heating. An R&D has started. Test coils made of three types of SC materials, NbTi, Nb₃Sn, and MgB₂, will be produced, and a short model magnet will be developed based on the results. Here, we will introduce the R&D plan.

1. はじめに

ILC Main Linac のクライオモジュール (CM) は 8-9 台の超伝導高周波 (SRF) 加速空洞から構成されている。超伝導四極磁石 (SQM) パッケージは、3 台の CM 毎に 1 台インストールされ、Main Linac の FODO ラティスを構成する。SQM パッケージには、水平/垂直ビームステアリング用に 2 種類の二極磁石が組み込まれる。この磁石に必要なパラメータを Table 1 に示す。

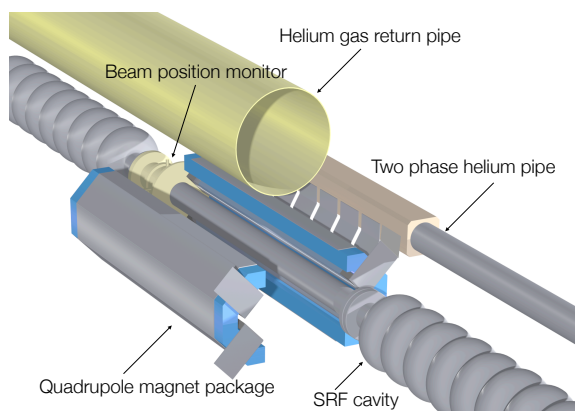


Figure 1: Splittable quadrupole package in CM.

Table 1: Specifications of SQM package. L.E. type and H.E. type are SQM packages used at less than beam energy of 25 GeV and more than 25 GeV, respectively. B_0 is a strength of dipole field generated by dipole corrector magnets. G and B_0 integral are values which are integrated G and B_0 along axial direction of magnet, respectively.

Parameters	L.E. type	H.E. type
Beam energy	≤ 25 GeV	≥ 25 GeV
Physical length	0.25 m	1 m
Magnetic length	0.20 m	0.95 m
Radius of inner pole	0.045 m	
Field gradient (G)	19 T/m	40 T/m
G integral	3.8 T	38 T
B_0	0.05 T	0.11 T
B_0 integral	0.01 Tm	0.10 Tm
Max. field in quad. coil	~ 1.5 T	~ 3 T
Operation temperature	2 K	

SQM パッケージはクリーンルームでの SRF キャビティストリングの組み立て後にクライオモジュールに組み込まれる (Fig. 1)。このため、SQM パッケージは、鉛直面で 2 分割出来る構造となっている。さらに、SC コイルは液体ヘリウムの浸漬冷却でなく、2 相流ヘリウムパイプからの熱伝達で冷却される必要がある。これまでに実物大のモデル磁石が Fermilab [1, 2] で開発された。また液体ヘリウム浸漬冷却とパルス

* yasushi.arimoto@kek.jp

管冷凍機を使った伝導冷却試験も行われた [1, 3, 4]. さらに KEK の超伝導試験施設 (STF) の CM にショートモデルマグネットを設置し, 冷却試験を実施した. これらのモデルマグネットを使用したコールドテストは, 期待される性能を示した.

2. 暗電流の影響

SRF 空洞内では, 高電界放出により電子が空洞表面から放出され, SRF 空洞によってビームとともに加速される. これは暗電流と呼ばれ, 主に SQM の磁場によって偏向され, SQM に入射してエネルギーを落とす. これまで, トンネル内の放射線量の見積りのために, 暗電流が発生させる放射線量のモンテカルロシミュレーションが行われてきた [5]. Sukhanov らによるシミュレーションによると, SQM パッケージ領域での平衡損失は 125 GeV のビームエネルギーで 1.35 W, 250 GeV で 1.7 W である [5].

将来のアップグレードのための安全率を含めて, 暗電流電子の Energy deposit が 5 W と仮定すると, 1 秒間での暗電流による磁石の温度上昇 (ΔT) は, およそ 5 K となる [6]. この温度上昇, ΔT と運転温度 2 K を合わせると, SC コイルの温度は一秒間で 7 K となる. これは, SC コイルの線材として NbTi を使用した場合, 1 秒以内の暗電流の入熱で磁場強度が 3 T での臨界温度に到達することを示している (Table 2).

Table 2: Parameters of SC Wires. T_c^* : Critical temperature at $B = 0$ T, and $I = 0$ A. T_c^\dagger : Critical temperature at $B = 3$ T, and $I = 100$ A.

	Unit	NbTi	Nb ₃ Sn	MgB ₂
Bare wire diameter	mm	0.50	0.65	0.55
Insulated diameter	mm	0.55	0.8	0.7
Filament diameter	μm	3-10	2-3	<~150
Cu to SC ratio		2	1	0.8
T_c^*	K	9	18	39
T_c^\dagger	K	7	13	15

3. SQM パッケージの R&D 概要

これまでの開発ではこの暗電流による入熱の影響を考慮しておらず, SC コイルの線材は NbTi で検討されていた. 本研究では, 暗電流の入熱に対し尤度を持つ伝導冷却方式による SQM パッケージの開発を目指す. このため, NbTi よりも高い臨界温度を持つ Nb₃Sn または MgB₂ を SC コイル線材の候補として性能評価を行う. また, 伝導冷却性能についても暗電流による入熱を考慮した設計, 性能評価を行う.

第 1 段階として, NbTi, Nb₃Sn, 及び MgB₂ で作られた試験用コイルを試作する. コールドテストを実行し, クエンチを引き起こすまでの熱特性を評価する. 試作コイルはクライオスタットに格納されて, 液体ヘリウムポットからの伝導冷却によって冷却される. 各コイルには, 暗電流加熱をシミュレートするためのヒーターが取り付けられる.

第 2 段階ではこの試験コイルの結果に基づき, 適切な超伝導線材を選択し, ショートモデル磁石 (長さ ~300 mm) を作成する. モデル磁石の熱特性, 及び磁場性能を評価する. この研究を通じて, 実用的な磁石を開発するためのデータを取得する. Table 2 に, 試作コイルに使用する超伝導線材の特性を示す.

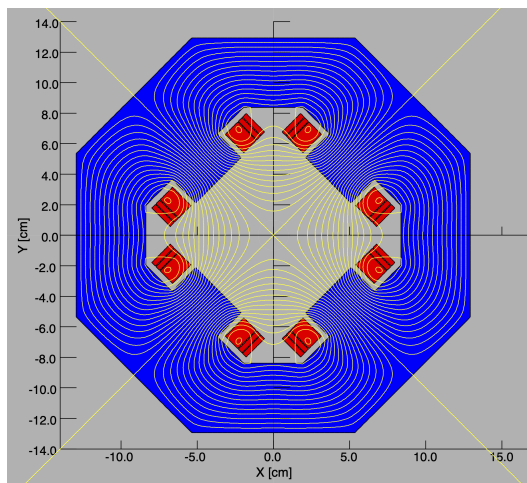


Figure 2: 2D calculation model and flux line at $I_q = 82$ A.

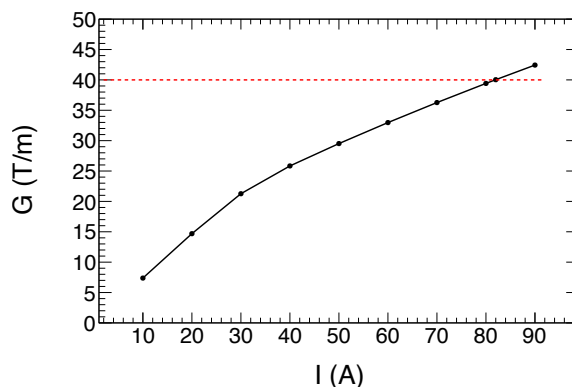


Figure 3: Magnetic field gradient as a function of quadrupole coil current. Horizontal broken line is specification value of the field gradient.

4. 2D 磁場計算

Magnet の負荷曲線を求めるために, Opera2D を使用して 2D 磁界解析をした. ヨークの設計は, Kashikhin らの論文 [1] に基づいている. コイルの断面積は, Table 2 に示されている NbTi ワイヤの絶縁被覆付き直径から決定した. 4 極用の SC コイルの巻き数は 744 で, 断面積は $17.1 \text{ mm} \times 11.5 \text{ mm} = 196 \text{ mm}^2$ である. 2 つのダイポールコイルは両方とも 217 ターンで, 断面積は $17.1 \times 3.4 \text{ mm} = 58 \text{ mm}^2$ である.

計算モデルの断面形状は, Fig. 2 に磁力線とともに示した. ヨークは鉄製で, ヨーク形状はアラインメント基準を平面から取ることも考慮して八角形としている.

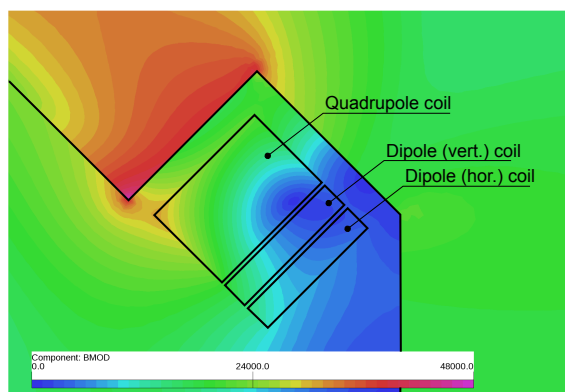


Figure 4: The color contour of the B-field strength around the coils. The current of the quadrupole coil is $I_q = 82$ A, and the current of the both dipole coil is $I_d = 35$ A.

計算で得られた励磁曲線を (Fig. 3) に示す。磁場勾配は電流の関数として直線的に増加するが、30 A を超えると鉄の飽和により磁場勾配の増加率は減少している。この結果、H.E. 型磁石に必要とされる磁場勾配 (Table 1) は四極磁石の電流値 (I_q) が 82 A で達成されることが分かる。

コイル周辺の B 磁場強度のカラーコンタープロットを Fig. 4 に示す。この計算では、 I_q は 82 A に設定されている。2つの二極磁石の電流、 I_d は 35 A に設定される。この時の各二極磁石で生成される二極磁場成分は 0.11 T となる。このプロットより、四極コイル内での最大磁場は 3.1 T であることがわかる。

NbTi、Nb₃Sn、および MgB₂ の臨界磁場の関数として取得されたロードラインと臨界磁場・臨界電流特性を Fig. 5 に示す。ロードラインは実線 (青) と逆三角形形で示され、計算の外挿は破線 (青) で示されている。 $I_c(B_c)$ の曲線は、いくつかの温度でプロットされている。プロット内の各線材の臨界磁場・臨界電流特性の対応については Fig. 5 の凡例を参照のこと。 $T_c = 4.2$ K で、82 A の動作電流は NbTi のロードラインの 47%、MgB₂ の 59%、Nb₃Sn の 30% にある。

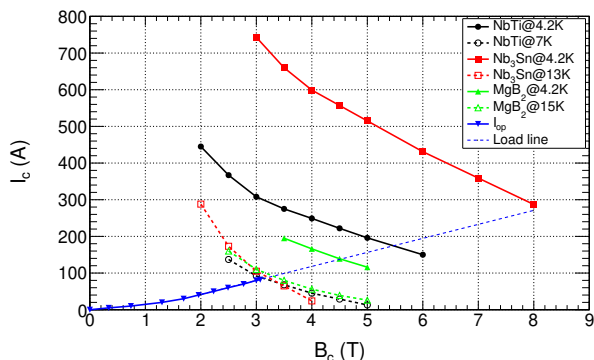


Figure 5: Critical current as a function of critical B -field for NbTi, Nb₃Sn, and MgB₂ and load line of the quadrupole magnet package. Refer to a legend for detail.

5. まとめ

ILC の Main Linac に設置される SQM パッケージにおいて、SRF 空洞で生成される暗電流の入熱が無視出来ないことが認識されてきた。これまで SC コイルの線材として NbTi で設計されてきたが、暗電流に対してより尤度を持つ線材の可能性を検討する必要がある。今後、3 種類の超伝導体、NbTi、Nb₃Sn、および MgB₂ を使用して試験コイルを試作し、それぞれの材料での低温での熱特性を評価する。その後、選択した SC 材料でモデル磁石を作成し、伝導冷却性能、磁場特性等を調べて、暗電流に対して尤度のある SC マグネットパッケージの実現を目指す。

謝辞

この研究は、KEK の応用超伝導加速器センター (CASA) によって支援されています。

参考文献

- [1] V. S. Kashikhin, N. Andreev, J. Kerby, Y. Orlov, N. Solyak, M. Tartaglia, and G. Velez, "Superconducting Splittable Quadrupole Magnet for Linear Accelerators," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 22, no. 3, p. 4002904, 2012.
- [2] V. Kashikhin, N. Andreev, S. Cheban, J. DiMarco, N. Kimura, A. Makarov, Y. Orlov, V. Poloubotko, M. Tartaglia, and A. Yamamoto, "Performance of conduction cooled splittable superconducting magnet package for linear accelerators," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 26, no. 4, pp. 1-5, 2016.
- [3] N. Andreev, V. S. Kashikhin, J. Kerby, N. Kimura, M. Takahashi, M. A. Tartaglia, T. Tosaka, and A. Yamamoto, "Conduction cooling test of a splittable quadrupole for ILC cryomodels," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 23, no. 3, p. 3500305, 2013.
- [4] N. Kimura, N. Andreev, V. S. Kashikhin, J. Kerby, M. Takahashi, M. A. Tartaglia, T. Tosaka, and A. Yamamoto, "Cryogenic performance of a conduction-cooling splittable quadrupole magnet for ILC cryomodels," *AIP Conference Proceedings*, vol. 1573, no. 1, pp. 407-415, 2014; <https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.4860730>
- [5] A. Sukhanov, I. Rakhno, N. Solyak, and I. Tropin, "Dark Current Studies in ILC Main Linac," in *Proc. of Linear Accelerator Conference (LINAC'16), East Lansing, MI, USA, 25-30 September 2016*, ser. Linear Accelerator Conference, no. 28. Geneva, Switzerland: JACoW, May 2017, paper THPLR007, pp. 855-857; <https://doi.org/10.18429/JACoW-LINAC2016-THPLR007>
- [6] A. Yamamoto and N. Solyak, "Dark current electrons and irradiation heating of superconducting magnets for high-gradient SRF linacs," in *TTC 2021, TESLA Technology Collaboration*. DESY, 2021; <https://indico.desy.de/event/27572/contributions/94179/attachments/63571/77787/TTC2021-DESY-WG1-ay-210120aa.pdf>