

SuperKEKB 高度化のための Nb₃Sn 最終集束超伝導四極電磁石の開発 DEVELOPMENT OF Nb₃SN FINAL FOCUSING SUPERCONDUCTING QUADRUPOLE MAGNET FOR SuperKEKB UPGRADING

有本 靖^{*A)}, 青木 和之^{A)}, 植木 竜一^{A)}, 大内 徳人^{A)}, 大木 俊征^{A)}, 荻津 透^{A)}, 柴田 恭^{A)}, 鈴木 研人^{A)},
飛山 真理^{A)}, 中村 衆^{A)}, 増澤 美佳^{A)}, 王 旭東^{A)}, 金子 和宏^{B)}, 星野 壮太^{B)}, 谷貝 剛^{B)},
杉本 昌弘^{C)}, 谷口 諒^{C)}, 中尾 健吾^{C)}, 原 英和^{C)}, マン カケイ^{C)},
Ambrosio Giorgio^{D)}, Kashikhin Vadim^{D)}, Stoynev Stoyan^{D)}, Velev Gueorgui^{D)}, Xu Xingchen^{D)}
Yasushi Arimoto^{*A)}, Kazuyuki Aoki^{A)}, Ryuichi Ueki^{A)}, Norihito Ohuchi^{A)}, Toshiyuki Oki^{A)}, Toru Ogitsu^{A)},
Kyo Shibata^{A)}, Kento Suzuki^{A)}, Makoto Tobiyama^{A)}, Shu Nakamura^{A)}, Mika Masuzawa^{A)}, Xudong Wang^{A)},
Kazuhiro Kaneko^{B)}, Sohta Hoshino^{B)}, Tsuyoshi Yagai^{B)},
Masahiro Sugimoto^{C)}, Ryo Taniguchi^{C)}, Kengo Nakao^{C)}, Hidekazu Hara^{C)}, Ka Kei Mun^{C)},
Giorgio Ambrosio^{D)}, Vadim Kashikhin^{D)}, Stoyan Stoynev^{D)}, Gueorgui Velev^{D)}, Xingchen Xu^{D)}
^{A)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)
^{B)} Faculty of Science and Technology, Sophia University
^{C)} Furukawa Electric Co., Ltd.
^{D)} Fermi National Accelerator Laboratory (FNAL)

Abstract

For the SuperKEKB accelerator, an upgrade of the superconducting final focusing quadrupole magnet (QC1P) is proposed for the next long shutdown period. Simulation studies indicate that moving QC1P by 100 mm closer to the interaction point (IP) increases the dynamic aperture and extends the beam lifetime. Moving QC1P closer to the IP reduces its distance to the high-energy ring (HER), as the IP is the intersection point of the HER and the low-energy ring (LER). Therefore, reducing the outer diameter of QC1P while maintaining its inner aperture is required when moving it closer to the IP. This design requires approximately double the current density of the current design. To meet this requirement, we develop a quadrupole magnet using Nb₃Sn superconducting wires, which exhibit superior critical properties compared to the NbTi conductors currently used in QC1P. We report the development status of QC1P.

1. 背景と目的

1.1 SuperKEKB 加速器の概要と位置づけ

SuperKEKB は、7 GeV の電子ビームリング (HER) と 4 GeV の陽電子ビームリング (LER) から構成される非対称エネルギー型衝突加速器である [1]。目標ルミノシティは $6 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ であり、相互作用領域 (IR) に設置された Belle II 検出器 [2] とともに、素粒子物理学の標準模型を超える新物理の探索を目的として運用されている。2025 年現在、 $5.1 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ のルミノシティを達成しており、2032 年までに積分ルミノシティ 10 ab^{-1} に到達する見込みである。しかし、最終目標である 50 ab^{-1} を達成するためには、さらなるルミノシティ向上が不可欠であり、その実現には SuperKEKB 本体の改造が必要となる。この改造の鍵となるのが、衝突点領域 (IR) における超伝導最終集束光学系 (QCS) の最適化である。QCS は、IR に配置された超伝導電磁石群から構成され、衝突点におけるビームサイズを最小化する役割を担っている。

1.2 IR 最終集束磁石 QC1P の役割

図 1 に、現行の IR における QCS のレイアウトを示す。IR には、各加速器リングごとに 2 対の超伝導四極

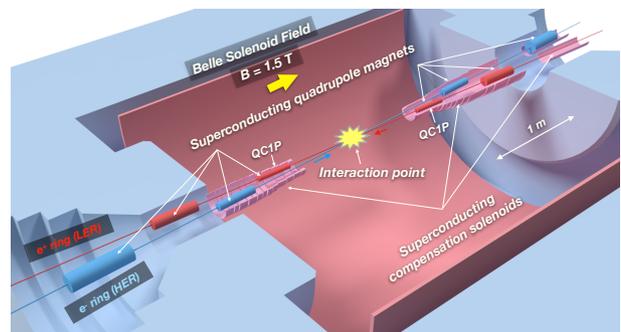


Figure 1: The current layout of the QCS at the IR.

電磁石ダブレットが設置されている [3]。これらの磁石は電子ビームおよび陽電子ビームを衝突点 (IP) へ集束させる役割を担っている。SuperKEKB ではナノビームスキームを採用しており、IP におけるビームサイズをサブ 100 nm にまで絞ることでルミノシティを向上させている。

このうち QC1P は陽電子ビームに対応する最終集束四極電磁石であり、IP に最も近い位置に配置されている。そのため、ビーム光学設計上、最も厳しい要求が課される磁石である。現行の QC1P は NbTi 超伝導線材を用いて製作され、高い磁場性能を達成している [3]。

* yasushi.arimoto@kek.jp

1.3 IR 改造による光学的メリット

提案されている IR 改造の主な内容は、QC1P を IP 方向へ 100mm 移動させることである (図 2)。ビームシミュレーションの結果、この改造によりダイナミックアパーチャが拡大し、ビーム寿命が延伸することが示されている [4, 5]。これにより、ルミノシティの向上が期待される。

さらに、補償ソレノイドを QC1P 前方に配置することで、QC1P の四極磁場とソレノイド磁場の重なりを回避でき、IR 軌道の複雑な曲がりやを解消し、ほぼ直線的な軌道を実現する。これにより、 x - y 結合の低減とエミッタンス増大の抑制を実現する [4, 5]。

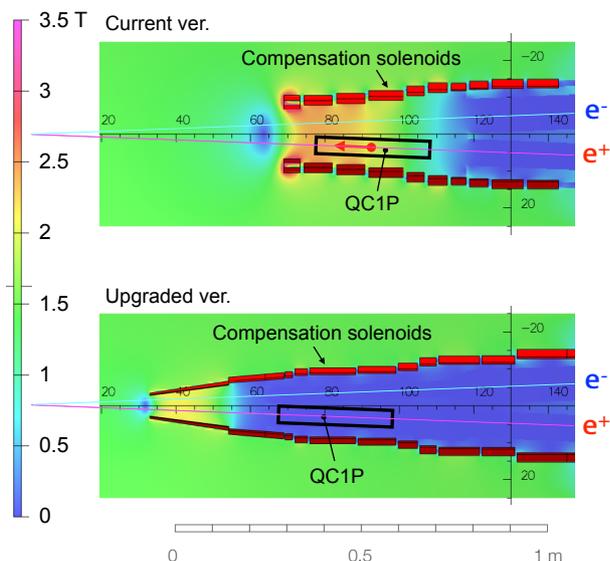


Figure 2: A proposal for the modification of the QC1P and compensation solenoid setup. Upper: Current setup. Lower: Upgraded setup. The color contour shows the superimposed B_z component of the Belle II solenoid and the compensation solenoid. The z axis corresponds to the horizontal axis in all plots.

1.4 Nb₃Sn の採用背景

QC1P を IP に近づけるには、磁石の内径を維持しつつ外径を縮小する必要がある。このためコイルは薄型化され、従来の 2 倍の電流密度が要求される。超伝導体の特性上、電流密度の増加により臨界温度は低下し、劣化ビームを起因とするコイル加熱によりクエンチが誘発されるリスクも高まる。

この課題に対し、高い臨界特性を持つ Nb₃Sn 線材の採用が検討されている。Nb₃Sn は NbTi より高い臨界温度を示し、高磁場、高電流密度での運転が可能である。これにより、QC1P の薄型化とクエンチリスクの低減を同時に実現できると期待される。

図 3 に、NbTi および Nb₃Sn の典型的な臨界温度等高線を、電流密度 (Non copper J_c) と磁束密度の関数として示す。実線 (赤) および破線 (黒) は、それぞれ Nb₃Sn

および NbTi の臨界温度曲線を表し、丸印 (黄) と三角印 (黒) はそれぞれ改良型および現行 QC1P の運転点を示している。電磁石の運転温度はいずれも 4.7 K である。この図から、温度マージンは現行 QC1P で 1 K、改良型 QC1P で 4 K となり、Nb₃Sn を用いることで約 4 倍に拡大することがわかる。

現在、SuperKEKB では月数回の頻度で劣化ビームを起因とするクエンチが発生している [6, 7]。クエンチ発生後には液体ヘリウムの再安定化、磁石の再励磁、ビーム光学の再調整が必要であり、運転状態が完全に回復するまでに数時間を要する。この間に失われる積分ルミノシティは無視できない。Nb₃Sn の導入はクエンチ耐性を高め、発生頻度を低減することが期待される。

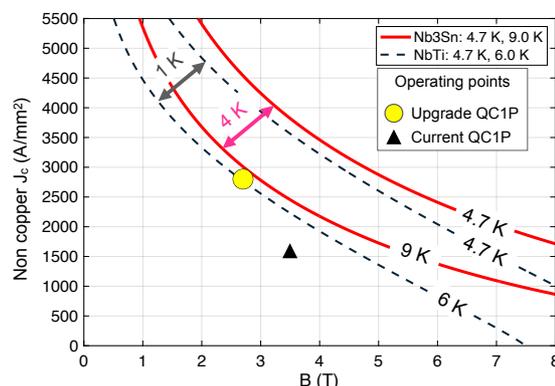


Figure 3: Critical surfaces of NbTi and Nb₃Sn and the operation points of the current/upgraded QC1P. x axis: Magnetic flux density, y axis: Current density of the coils (non-copper J_c). Solid curve (red): Critical surface of Nb₃Sn wire, Dashed curve (Black): NbTi. Circle symbol: Operation point of the upgraded QC1P. Triangle symbol: Current QC1P [8, 9].

1.5 Nb₃Sn 採用に伴う技術課題

Nb₃Sn 線材は優れた臨界特性を有する一方で、機械的に脆弱であり、取り扱いには高度な製造技術を要する。特に、Wind&React 工法²においては、熱処理時の寸法制御や、冷却時に生じる熱収縮応力の制御など、複数の技術的課題が存在する。

2. 設計要件と仕様

2.1 磁場設計とビーム光学的要件

QC1P の断面形状を図 4 に、主な電磁石および Nb₃Sn ワイヤの仕様をそれぞれ表 1、2 に示す。

新たに開発する QC1P 磁石には、SuperKEKB の光学設計に適合する高い磁場勾配と高精度の磁場均一性が求められる。磁場勾配 (G) は 80 T m^{-1} で、現行 QC1P に比べて約 16% 増加している。さらに、四極磁場成分に対する高次多極成分の相対誤差は、参照半径 (R_{ref}) 10 mm において 1 unit 以下に抑える必要がある。

¹ 位: A mm^{-2} 。銅部分 (安定化材) を除外し、超伝導体の純粋な電流伝導能力を示す。

² コイルを巻線した後に熱処理を施し、超伝導化合物を生成させる製作法

¹ 超伝導線材の非銅部分の断面積に対する臨界電流密度 (単

多極磁場成分は、磁石内の磁場を次式で展開したときの b_n 、 a_n と定義される:

$$B_y + iB_x = B_2 10^{-4} \sum_{n=1}^{\infty} (b_n + ia_n) \left(\frac{x + iy}{R_{\text{ref}}} \right)^{n-1}. \quad (1)$$

ここで、 B_x 、 B_y は直交座標における磁場成分、 b_n 、 a_n はそれぞれ $2n$ 極のノーマルおよびスキュー成分であり、単位は“units”である。

コイルの巻線充填率向上のため、断面形状が長方形のモノリスワイヤーを採用した。さらに、超伝導線特有の磁束クリープおよび磁束ジャンプを抑制するため、 Nb_3Sn ワイヤーのフィラメント径は $5 \mu\text{m}$ 以下で製作する必要がある。この要件を満たすため、本研究ではブロンズ法によるワイヤーを採用した [10]。この値は、HL-LHC 用に開発された Nb_3Sn マグネットで採用されている RRP 製法によるラザフォードケーブルのフィラメント径と比べておよそ 1 桁小さい [11]。

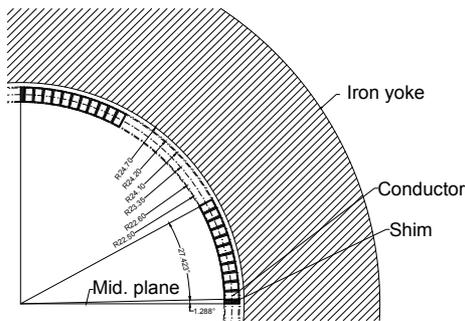


Figure 4: The cross section of the QC1P magnet.

Table 1: Main Specifications of the Upgraded QC1P Magnet

Parameters	Values	Units
G: B-Field Gradient	80	T m^{-1}
L: Effective length	334	mm
GL	26.7	T
Physical length	< 400	mm
Nominal current	1680	A
Inner radius of coil*	22.5	mm
Outer radius of coil*	24.2	mm
Number of turns	11	
Multipoles@ $R_{\text{ref}} = 10 \text{ mm}$	< 1	unit

* Including a wire insulation.

2.2 ヨーク構造とコイル形状

Belle II ソレノイドの遮蔽および HER への漏れ磁場抑制のために鉄ヨークを配置した。四極磁場を発生する導体配置は $\cos 2\theta$ 型の 1 層構造である。導体位置の微小なずれは多極磁場成分の大きさに影響する。これを 1 unit 以下に抑えるには、コイルの位置決め精度を $\pm 10 \mu\text{m}$ 以内とする必要がある。

Table 2: Main Specifications of Nb_3Sn Wire for the QC1P Magnet

Parameters	Values	Units
Cross section	Rectangular	
Bare wire	0.8×1.5	mm
Insulated wire	1.0×1.7	mm
J_c (Non-Cu)@8.7 K and 2.7 T	> 2800	A mm^{-2}
$T_c@B = 2.5 \text{ T}$	> 8.7	K
Filament diameter	< 5	μm
Operation temperature	4.7	K
Temperature margin	> 4	K

3. 磁場計算結果

図 5 に、Belle II ソレノイド軸に垂直な断面における磁場強度のカラーコンターマップを示す (Opera2D [12] による計算結果)。

鉄ヨーク内部には、QC1P マグネットを取めるための円形空隙が設けられており、ここには LER 用ビームパイプとともに円筒型の QC1P が配置される。加えて、HER 用ビームパイプを通すための空隙も別途設けられている。

鉄ヨーク内の磁場は最大で約 1.5 T であり、磁気飽和の問題は生じていない。また、HER 軸への漏れ磁場は 1 Gauss 以下に抑制されていることが確認された。

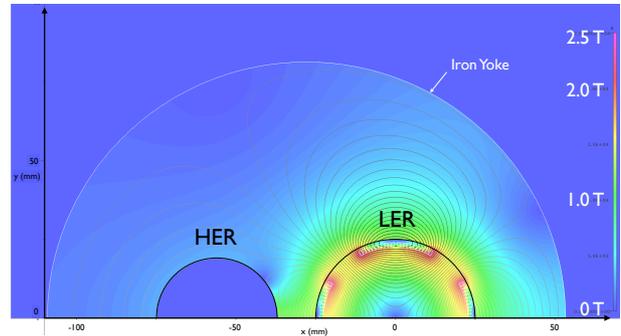


Figure 5: Calculated Contour map of the magnetic flux density. Calculated by Opera [12].

図 6 に 8 極成分 (b_4)、12 極成分 (b_6)、20 極成分 (b_{10}) の軸方向分布を、図 7 にそれらの多極磁場成分を軸方向に積分した値を示す (Opera3D [12] による計算結果)。コイルの機械的配置を長方形 (赤) で示しており、その右側がリードエンドに対応する。

8 極成分はリードエンド部で顕著に現れるが、QC1P の反 IP 側に設置される補正用磁石によって補正可能である。一方、20 極成分は直線部で発生し、その値は 1 unit を超えている。これはスペース制約によりコイル配置の自由度が制限されているためである。しかし、ビーム光学シミュレーションの結果、この影響がビームダイナミクスに及ぼす効果は十分に小さいことが確認されている。

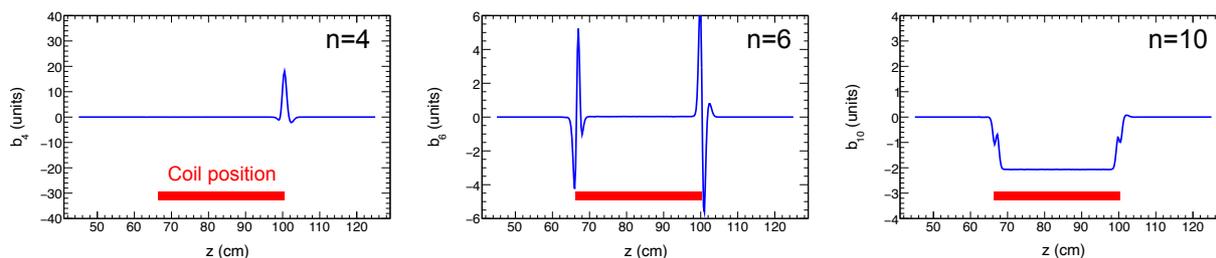


Figure 6: Axial profiles of the higher order multipole components. The right-hand side corresponds to the lead end of the coils.

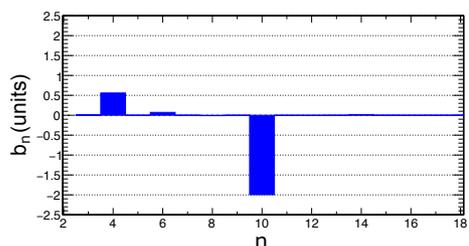


Figure 7: Calculated integrated multipole components.

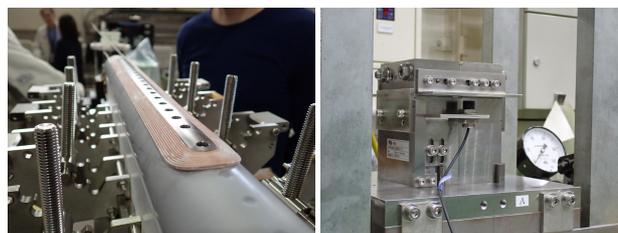


Figure 8: Left: Test winding of Nb₃Sn coil; right: Measurement device for the Young's modulus of Nb₃Sn wire.

4. 進捗状況

Nb₃Sn 線材を用いた開発の進捗は以下のとおりである。

- Nb₃Sn 線材の調達を完了。
- KEK にて巻線試験を繰り返し、巻線治具の改良によりコイルを十分な寸法精度で製作可能となった (図 8)。
- プリストレスの精度向上のため、22 本のワイヤをスタックした試料でヤング率を測定中 (図 8)。
- 熱処理後の寸法変化およびコイル間のはんだ接続試験を実施中。
- 巻線後のコイル加工手順を確立し、治具設計を完了し、治具製作を実施中。
- ROXIE [13] を用いて、励磁電流の印加方向による各次数の磁場成分のヒステリシス計算を実施中。現行の QCIP システムよりヒステリシスが小さいことを確認。
- 実効フィラメント径と磁化の時間変動を評価するため、試料振動型磁力計による Nb₃Sn 線材の磁化測定を計画。
- クエンチ保護シミュレーションコードを開発。ワイヤ軸方向およびターン間の熱伝達を考慮し、現行のクエンチ保護システムの流用可能性を確認 [14]。

5. ミラー磁石試験

本開発の第一段階として、ミラー磁石試験を計画している。

ミラー磁石は、単一コイルを鉄ヨークと組み合わせ、磁場の鏡像効果を利用することで、単一コイルでフルコイルと同等の磁場環境およびローレンツ力を再現できる [15]。

図 9 にミラー磁石の概念断面図を示す。磁場分布は Opera [12] を用いて計算した結果であり、扇形の領域が

空隙、その外側が鉄ヨークに対応している。今後、工学設計を進める予定である。本試験では、機械的特性、熱的特性、およびクエンチ保護性能を評価する。

現時点では、巻線および熱処理を KEK にて実施し、その後 FNAL にてコイル・ヨークの含浸および組立を行い、KEK にてミラー磁石の低温試験を実施予定である。

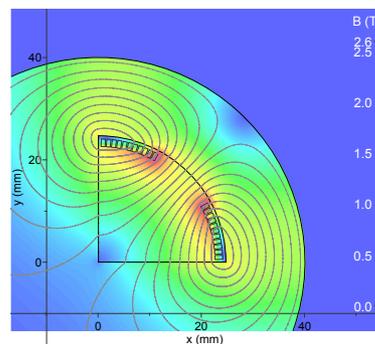


Figure 9: Conceptual cross-sectional design of the mirror magnet. The magnetic field distribution is calculated using Opera [12].

6. まとめ

SuperKEKB では、さらなる高ルミノシティの実現を目指して、IR の改良が提案されている。特に、QCIP を IP に対して約 100 mm 近づけることで、ルミノシティの向上が期待される。この改造には高い電流密度の達成が不可欠であり、そのため Nb₃Sn 線材を用いた QCIP の開発を進めている。2025 年度にはミラー磁石を製作し、その機械的特性およびクエンチ保護性能を評価する予定である。さらに、2026~2027 年度にはフルコイル磁石を製作し、磁場性能試験を通じて実機適用に向

けた検証を進める計画である。

謝辞

この研究は、日米科学技術協力事業（高エネルギー物理学）、高エネルギー加速器研究機構加速器研究施設、および科学研究費助成事業（国際共同研究加速基金：22K21347）の助成を受けて遂行している。あわせて、三菱システムサービスの白石氏には技術的なご助力をいただき、ここに感謝の意を表す。

参考文献

- [1] Y. Ohnishi *et al.*, “Accelerator design at SuperKEKB,” *Prog. Theor. Exp. Phys.*, vol. 2013, no. 3, 03A011, Mar. 2013. doi:10.1093/ptep/pts083
- [2] T. Abe *et al.*, “Belle II technical design report,” *arXiv e-prints*, arXiv:1011.0352, arXiv:1011.0352, Nov. 2010. doi:10.48550/arXiv.1011.0352
- [3] N. Ohuchi *et al.*, “SuperKEKB beam final focus superconducting magnet system,” *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res., Sect. A*, vol. 1021, p. 165 930, 2022. doi:10.1016/j.nima.2021.165930
- [4] H. Aihara *et al.*, “The Belle II Detector Upgrades Framework Conceptual Design Report,” Jun. 2024.
- [5] M. Masuzawa *et al.*, “SuperKEKB IR upgrade idea with Nb₃Sn quadrupole magnets,” *JACoW*, vol. IPAC2024, WEPS74, 2024. doi:10.18429/JACoW-IPAC2024-WEPS74
- [6] N. Ohuchi and Y. Arimoto, “Thermal studies of the magnet quenches of the SuperKEKB beam final focus system,” *JACoW*, vol. IPAC2024, WEPS72, 2024. doi:10.18429/JACoW-IPAC2024-WEPS72
- [7] Y. Arimoto *et al.*, “Lessons Learned From Operational Experience of SuperKEKB IR Magnets and Upgrade and Plans for the Future,” in *Proc. eeFACT’22*, (Frascati, Italy), ser. ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop on High Luminosity Circular e+e- Colliders, JACoW Publishing, Geneva, Switzerland, Feb. 2022, WEZAT0202, pp. 188–194. doi:10.18429/JACoW-eeFACT2022-WEZAT0202
- [8] L. Bottura, “A practical fit for the critical surface of NbTi,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 10, no. 1, pp. 1054–1057, 2000. doi:10.1109/77.828413
- [9] K. Suzuki and X. Xu, Presentation at internal meeting (unpublished).
- [10] M. Sugimoto *et al.*, “Development of Cu-Nb reinforced Nb₃Sn wires,” Furukawa Electric, Tech. Rep. 55, 2024.
- [11] E. Todesco *et al.*, “The high luminosity LHC interaction region magnets towards series production,” *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 34, no. 5, p. 053 001, Mar. 2021. doi:10.1088/1361-6668/abdba4
- [12] Dassault Systèmes Simulia, *Opera simulation software*, 2025.
- [13] S. Russenschuck, “ROXIE: A computer code for the integrated design of accelerator magnets,” 1998.
- [14] K. Suzuki, “Quench simulation for Nb₃Sn QC1P,” Presentation at internal meeting (unpublished), May 2025.
- [15] N. Andreev *et al.*, “Magnetic mirror structure for testing shell-type quadrupole coils,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 20, no. 3, pp. 288–291, 2010. doi:10.1109/TASC.2009.2039704