

HL-LHC 向け超伝導磁石 D1 のクエンチ保護システム安定性評価と 超伝導挿入光源への展開

EVALUATION OF QUENCH PROTECTION SYSTEM FOR THE HL-LHC D1 MAGNET WITH AN ADVANCED SIMULATION AND ITS EXTENSIVE APPLICATION TO NEW SUPERCONDUCTING INSERTION DEVICES

西 将汰 ^{*,1)}, 鈴木 研人 ^{2,4)}, 菅野 未知央 ^{2,4)}, 中本 建志 ^{2,4)}, 荻津 透 ^{2,4)}, 山崎 祐司 ³⁾,
満田 史織 ^{2,5,1)}, 篠原 智史 ^{2,5)}, 齊藤 寛峻 ^{2,5)}

Shota Nishi ^{*,1)}, Kento Suzuki ²⁾, Michinaka Sugano ²⁾, Tatsushi Nakamoto ²⁾, Toru Ogitsu ²⁾, Yuji Yamazaki ³⁾,
Chikaori Mitsuda ^{1,4)}, Satoshi Shinohara ⁴⁾, Saito Hirotochi ⁴⁾

¹⁾ SOKENDAI

²⁾ KEK ARL Cryogenic Science Center, ³⁾ Kobe University, ⁴⁾ KEK ACCL Accelerator Division

Abstract

For the HL-LHC upgrade, testing of beam separation dipole D1 is being conducted in High Energy Accelerator Research Organization (KEK) during the series production. The D1 magnet is a NbTi Superconducting magnet and it has an aperture of 150 mm. A dipole field strength of 5.6 T is generated in the aperture at the nominal operating current (12110 A) at which a stored energy of the magnet reaches 2.1 MJ. One of the difficulties in operating superconducting magnets is to protect them from “quench” which is an irreversible phenomenon of superconductor leading to transition to normal conductor. As a result of the quench, a superconducting magnet would be subjected to a risk of a burnout because of joule heating. Therefore, the current must be shut off as soon as possible. For the purpose, a nonlinear resistance, varistor, is adopted for the quench protection circuit of the KEK test stand; the five units of the varistors are connected in parallel. However, due to unit-to-unit variations and temperature dependence, their nonlinear IV properties may change. This may result in quench protection failure or surpass the withstand voltage of the circuit breaker. Thus, we improve the quench simulation through including precise varistor model. As a result, we confirmed that the quench protection system can safely protect the magnet from quench events within the range of IV property variations in quench events that occurred in the test of D1 Unit1, 2, and 5. Now, we are applying this simulation to the the Nb₃Sn superconducting insertion device (SC-MPW) for the next generation KEK PF light source ring.

1 はじめに

Large Hadron Collider (LHC) はスイスのジュネーブ郊外にある CERN の地下 100 m に設置された周長 26.7 km の陽子陽子衝突型大型円形加速器で、ヒッグス粒子の発見など、新粒子探索や標準理論の精密測定に幅広い物理の成果をあげてきた。高輝度 LHC は、LHC 実験のアップグレード計画であり 2030 年から 2041 年まで運用される予定である。特に、ATLAS 実験、CMS 実験においてどれほど多くの衝突データを得られるかの指標として用いられる積分ルミノシティを約 10 倍の 3000 fb⁻¹ に増加する。これによって、発見されたヒッグス粒子に関するヒッグス場の理解の深化や、標準理論の妥当性を調べ、標準理論を超えた理論の発見を目指す。このアップグレードでは ATLAS、CMS 検出器の衝突点周りにある最終収束磁石群を既存の LHC から大幅に変更し、これに含まれるビーム分離双極磁石 (通称 D1) もこれまでの常伝導磁石から超伝導磁石へ更新する。D1 は衝突点から抜けたビームを再びリングにガイドする役割を担っている。この磁石は、CERN との国際協力として KEK が開発、製作、試験を行い、7 m 長実証機 1 台と実機 6 台の現物貢献を行う。現物納入で HL-LHC 計画の貢献の一部を担う。D1 の主要パラメータを Table 1 に示す。D1 は口径 150 mm の NbTi 製超伝導電磁石で定格 12110 A で

積分磁場長 35 T·m、蓄積エネルギー 2.1 MJ である [1]。

Table 1: D1 Magnet Parameters

Nominal current	12110 A
Maximum nominal current	13231 A
Coil aperture	150 mm
Field integral	35 T·m (Series)
Field	5.60 T (nominal)
Peak Field	6.58 T (nominal)
Operating temperature	1.9 K
Strand material	NbTi
Stored energy	340 kJ/m
Magnetic length	6.26 m (Series)
Mechanical length	6.72 m
load line ratio	76.5% (normal)

2 D1 磁石のクエンチ保護システム

2.1 クエンチ保護

加速器用超伝導電磁石のクエンチとは、熱擾乱により臨界温度以上にコイル温度が上昇し常伝導部が発生することである。これにより、磁石に蓄積されたエネルギー

* snishi@post.kek.jp

がジュール熱に変換され急激な温度上昇を招き焼損に至る恐れがある。そのため、クエンチ発生後、電流を可能な限り高速で遮断し、コイル温度上昇を最小限に抑える必要がある。また磁石保護に加え、超伝導磁石を含む励磁回路・ヘリウムガス回収システムを保護する必要があり、この一連の流れをクエンチ保護という [2]。

2.2 クエンチ保護システム

D1 磁石のクエンチ保護システムは、Fig. 1 のようになっており、クエンチ発生後、そのクエンチ電圧を検出し、クエンチ判定を行う。その後、Quench Protection Heater (QPH) を作動させ、電源から外部抵抗にスイッチングする。

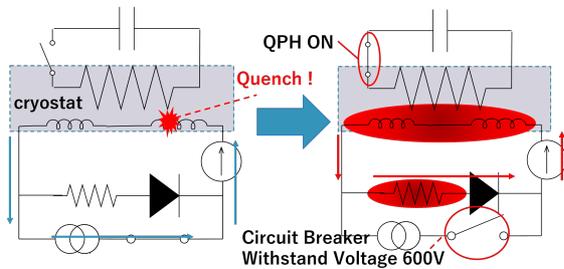


Figure 1: Quench protection circuit.

遮断時は、LR 回路となり、時定数 τ は L/R で与えられるので、外部抵抗が大きいくほど、電流遮断を高速化できる。そのため、QPH はコイル全体を常伝導に移させ R を増大し、さらに、コイルが局所的に温度上昇することを防ぐ。外部抵抗を大きくすることも R の増大につながるが、電流遮断機には耐電圧 600 V があるため、外部抵抗の抵抗値には上限が存在する。この時、問題となるのが、散逸エネルギーである。散逸エネルギーは、式 (1) で与えられる。

$$E_{disp} = \frac{1}{2} LI_0^2 - \int I(t)V(t) dt \quad (1)$$

これは、蓄積エネルギーのうちコイルに散逸されるエネルギーを表している。D1 実証機試験では、外部抵抗として 25 mΩ の固定抵抗を採用していたが、定格電流値付近で発生するクエンチでは外部へのエネルギー回収が不十分で、蒸発ガス量がガスバッグ容量を上回りヘリウム緊急放出に繋がった。その経緯から実機 1 号機試験においては非線形抵抗器である SiC 製バリスタ (Metrosil[®] 製、Fig. 2 参照) を保護回路として導入して、遮断時の発生電圧の抑制とエネルギー回収の増加を図った [3,4]。

3 外部抵抗へのバリスタの導入

バリスタとは、式 (2) の電流-電圧特性 (IV 特性) をもつ非線形抵抗器である。

$$V = C \times I^\beta, \quad 0 < \beta < 1 \quad (2)$$

β は非線形度を表すパラメータであり $0 < \beta < 1$ で与えられる。バリスタと固定抵抗の IV 特性を Fig. 3 に示す。



Figure 2: One unit of the Varistor.

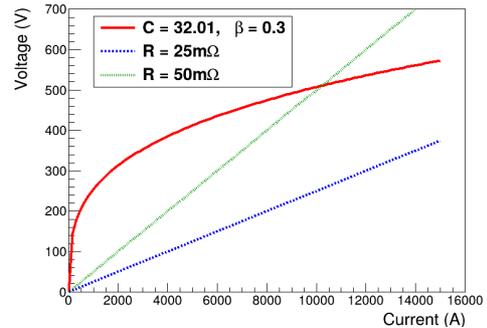


Figure 3: IV property of Varistor and fixed resistances.

この非線形性のため、低電流部で高抵抗となるためエネルギー回収率が良く、高電流部で低電圧となるため耐電圧仕様を満たすことができる。定格電流付近では、50 mΩ 相当のエネルギー回収率を可能にしながら、耐電圧仕様を満たすことができる。本研究では、バリスタ 5 機の並列回路を構成してクエンチ保護回路に組み込んで用いる。バリスタの主要なパラメータを Table 2 に示す。また、バリスタには温度依存性があり、温度上昇に伴い抵抗値が減少することが分かっている [5,6]。

Table 2: Varistor Parameters

Rated current	3000 A
Maximum rated current	3500 A
SiC disc mass	860 g
Number of disks of the Varistor	14 disks

4 バリスタ導入に伴う懸念と本研究の目的

並列回路の構成に伴い、その温度依存性や個体差から一機または複数に電流が過剰に流れる可能性が懸念された。そこで、バリスタの個々の IV 特性の違いや温度依存性を考慮しても磁石の保護が安定して行われることを確かめるため、クエンチシミュレーションを用いて以下の内容を確認した。

- 5 機のバリスタの IV 特性のばらつきが小さいこと。
- 電流遮断機の耐電圧仕様 (600 V) を満たすこと。
- 磁石保護の基準 MIITs が MIITs < 32 MAAs を満たすこと。

ここで、MITTsとは、式(3a)、(3b)でかける。

$$\text{MITTs} = \int_{t_{\text{quench}}}^{t_{\text{end}}} I^2 dt \quad (3a)$$

$$= \int_{T_{\text{He}}}^{T_{\text{max}}} \frac{C(T)}{\rho(T, B, RRR)} dT \quad (3b)$$

この式は、断熱条件下でのクエンチ発生箇所を仮定した、以下のエネルギーバランスの式(4)から導かれる。

$$C \frac{dT}{dt} = \rho \left(\frac{I}{A} \right)^2 \quad (4)$$

ここで、それぞれの変数の定義は次のとおりである。ここで、 C は体積熱容量、 ρ は抵抗率、 A はコイル断面積である。式(3b)のパラメータは、ケーブルの物性値にのみ依存するのであらかじめ計算できる。また、式(3a)は、遮断電流波形(測定値)から求めることができる。

5 クエンチシミュレーションの概要

ここでは、D1向けに製作したクエンチシミュレーションについて述べる。まず、遮断電流は式(5)でかける。

$$I(t) = I_0 \exp \left\{ - \int_0^t \frac{R_{\text{mag}}(T, B) + R_{\text{var}}(T)}{L(I)} d\tau \right\}. \quad (5)$$

ここで、 R_{mag} は磁石の抵抗、 R_{var} はバリスタの抵抗を表す。 R_{mag} はコイルのクエンチ伝搬や温度上昇の時間発展を式(6)とFig.4の有有限差分法を用いて計算する[7]。

$$T_i^{p+1} = \frac{\Delta t}{C_i} \left(q_i + \sum_j \frac{T_j^p}{\theta_{ij}} \right) + \left(1 - \frac{\Delta t}{C_i} \sum_j \frac{1}{\theta_{ij}} \right) T_i^p \quad (6)$$

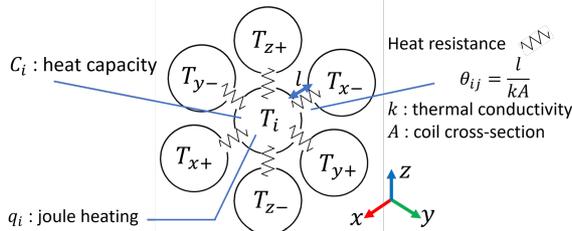


Figure 4: The FDM model of the heat conduction.

また、バリスタ抵抗の温度依存性については、

$$R_{\text{varistor}}(T) = R_{\text{varistor}}(T_0) (1 + \alpha(T - T_0)) \quad (7)$$

で書くことができる。 $\alpha = -0.0009$ である。

6 シミュレーション結果とまとめ

6.1 バリスタのIV特性の導出

励磁試験で発生したクエンチイベントの電流波形と電圧波形を再現するため、測定値をもとにバリスタのIV特性を導出した。その際、全クエンチイベントの遮断開始直後の電流と電圧を式(2)で最小二乗法でフィットすることで求めた。D1実機一号機のデータをもとに行った fitting の結果を式(8)に示す。

$$\begin{aligned} (\beta_1, C_1) &= (0.462, 13.74) \\ (\beta_2, C_2) &= (0.465, 13.11) \\ (\beta_3, C_3) &= (0.459, 13.82) \\ (\beta_4, C_4) &= (0.464, 13.41) \\ (\beta_5, C_5) &= (0.469, 13.02) \end{aligned} \quad (8)$$

6.2 シミュレーション結果

これをもとに、5章のシミュレーションを実行すると、Fig.5、Fig.6のようになる。

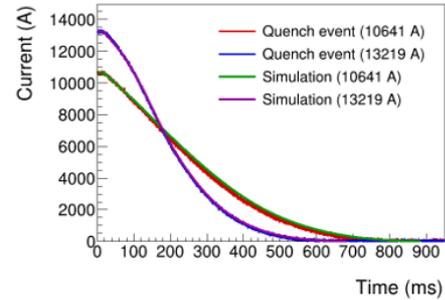


Figure 5: Simulation result of the shutoff current.

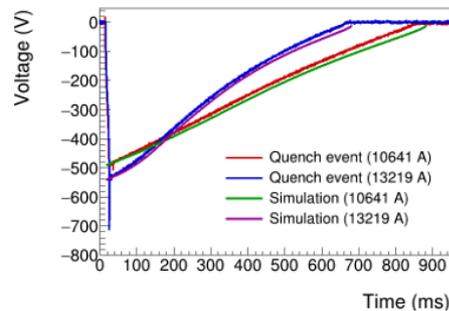


Figure 6: Simulation result of the shutoff voltage.

また、このときの各バリスタの温度上昇は、Fig.7となった。バリスタの温度上昇はバリスタごとに大きければならずは抵抗値の減少も2%程度と小さい。

シミュレーションで電流、電圧を再現できたので、これまでのクエンチイベントを fitting して得られた下記の β 、 C のばらつき範囲でシミュレーションを行い、

$$\begin{aligned} \beta_{\text{mean}} &= 0.494 & C_{\text{mean}} &= 4.764 \\ &(+2\% \sim -1.5\%) & &(+10\% \sim -7.5\%) \end{aligned}$$

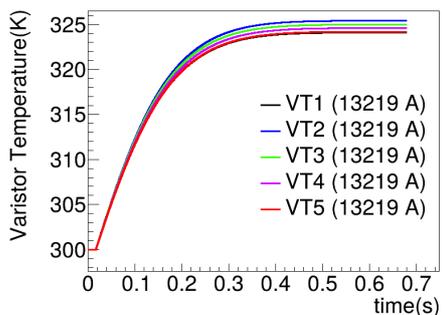


Figure 7: Simulation result of varistor temperature development.

MIITs、耐電圧への影響を調べた。その結果を Fig. 8、Fig. 9 に示す。耐電圧や MIITs は基準を満たし、安全にクエンチ保護ができることが確かめられた。一般的な超伝導線材である NbTi 線材におけるクエンチ保護システムは最新の Nb₃Sn 線材において適用展開が可能か、Nb₃Sn 線材を利用した新たな開発プロジェクトの検証を開始している。次節にその事前準備について報告する。

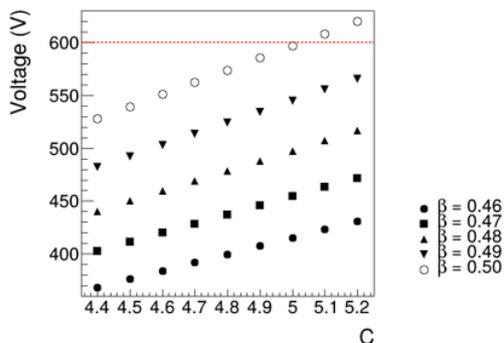


Figure 8: Simulation results of withstand voltage within the range of IV property variations in previous quench events.

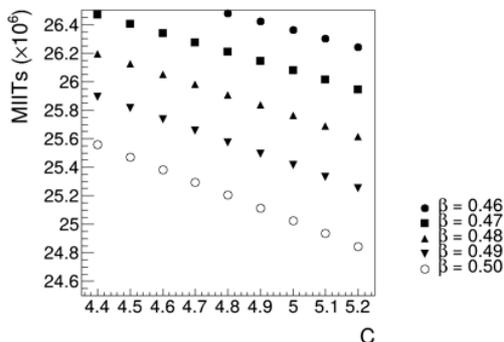


Figure 9: Simulation results of MIITs within the range of IV property variations in previous quench events.

7 超伝導マルチポールウィグラーへの展開

KEK PF は 2.5 GeV の電子ビームを用いたシンクロトロン放射光施設であり、極紫外光から硬 X 線までの波長領域の放射光で、物質科学、生命科学の発展に貢献してきた。PF では 2030 年以降の次世代光源建設計画に向けて超伝導マルチポールウィグラー (SC-MPW) の基盤技術開発を行っている。これまでにテストコイルユニット 2 機の製作を終え、1 号機については外部施設で 300 A 以下の低電流励磁に成功している。現在 2 号機の低電流励磁試験、さらに、4.2 K 下の NbTi に比べて 10 倍の臨界電流密度で、1000 A 大電流試験に向けて準備を進めている。PF テストコイルユニットの写真を Fig. 10 に、その主要なパラメータを Table 3 に示す [8]。



Figure 10: The test coil unit of SC-MPW.

Table 3: SC-MPW Test Coil Parameters

Number of coils	3 coils
Current	792 A
Peak magnetic field	2 T
Target current	1000 A/mm ²
Number of turns	493 turns
Coil Current	390 kA·turns
Period length	80 mm
Gap	30 mm

研究開発の SC-MPW には Nb₃Sn 線材を採用している。次世代光源に求められる SC-MPW の性能には、1、2 が求められるためである [9]。Figure 11 に SC-MPW の模式図を示す。

1. 硬 X 線フラックスの増大 (多極化)
2. 放射励起によるエミッタンス増大の抑制 (短周期化と高磁場化の両立)

しかしながら Nb₃Sn は、NbTi より高い臨界特性を持っているが機械的に脆い性質のためわずかなワイヤーモーションなどで超伝導破壊が生じやすく、NbTi 線材の場合と比べてクエンチ伝搬が大きく広がる前にエネルギー供給を中断する、より即断性のあるクエンチ保護システムが必要である。そこで、どの程度の時間を遮断にかけることができるか見通しを立てるためその上限値を

MIITs 計算で求めた。

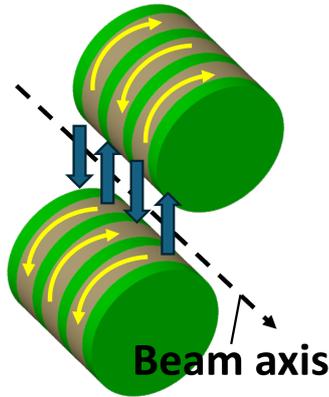


Figure 11: 3D model of the SC-MPW. Yellow arrows represent current direction. Blue arrows indicates the direction of the magnetic field.

8 Nb₃Sn に対する MIITs 計算の結果と今後

8.1 ANSYS 磁場計算

MIITs 計算の準備として、ANSYS を用いた 3 次元磁場計算でコイル内最大磁場を計算した。超伝導状態の維持を左右するパラメータとして臨界電流密度以外に臨界磁場が関与するため、コイル内最大磁場がクエンチ伝搬を左右する。その結果を Fig. 12 に示す。コイル内最大磁場は約 6.8 T であり、コイルボビン (Fig. 11 の緑色部) とコイル (Fig. 11 の茶色部) の境目にあたる。

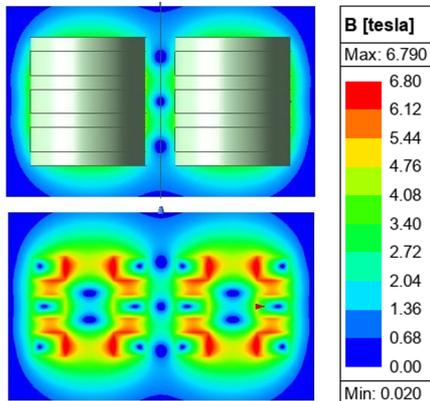


Figure 12: Field distribution of the SC-MPW calculated with ANSYS.

8.2 MIITs 計算

792 A の運用を仮定し、磁場は最高磁場に近しい 7 T を仮定する。式 (3b) に従って、MIITs 計算を行った。その結果を Fig. 13 に示す。MIITs は LR 回路を仮定した時、

$$\begin{aligned} \text{MIITs(MAAs)} &= \int_{t_{\text{quench}}}^{t_{\text{switch}}} I_0^2 dt + \int_{t_{\text{switch}}}^{\infty} (I_0 e^{-t/\tau})^2 dt \\ &= I_0^2 \left(T + \frac{\tau}{2} \right), \end{aligned} \quad (9)$$

$$T = t_{\text{switch}} - t_{\text{quench}}. \quad (10)$$

で書ける。Fig. 13 と式 (9) から、遮断にかけられる時間の上限は、300 K をリミットとすると、式 (11) となる。

$$T + \frac{\tau}{2} < 78 \text{ ms} \quad (11)$$

今回、テストコイルユニットのエネルギーを吸収するための電源エネルギーダンパーシステムの回路定数を $\tau = L/R \sim 100 \text{ ms}$ とすると、クエンチ検出と電流遮断機のスイッチングを約 30 ms で行う必要がある。しかし機械式の電流遮断機の場合、切り替えに、20 ~ 30 ms 要し、クエンチ検出の時間が非常に短くなってしまふ。そこで半導体式に切り替えることで ns オーダーまで短縮見込みである。これにより遮断スピードは確保できるが残された時間は 30 ms でクエンチ保護システムを組む必要がある。大電流化する Nb₃Sn では、これまで D1 磁石試験に携わった経験を活かしてクエンチ検出の高速化、クエンチ保護回路のアップデートにつなげる。加えて、ANSYS 磁場計算の結果から、コイル応力計算に繋げ、300 A 低電流試験に向けた応力センサー取付位置決定へとつなげる予定である。

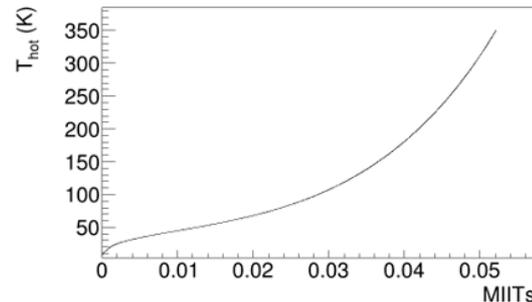


Figure 13: Relationship of the MIITs and the hotspot temperature.

謝辞

本研究のうち、第 7 節以降の内容につきましては、JST 次世代研究者挑戦的プログラム JPMJSP2104 の支援を受けたものです。

参考文献

- [1] Sugano *et al.*, “Test result of a full-scale prototype of beam separation dipole magnet for the high-luminosity LHC upgrade”, IEEE Trans. Appl. Supercond. 32, Sep. 2022, 4003407.
- [2] 高エネルギー加速器セミナー OHO’22, 「超伝導電磁石技術」.

- [3] K. Suzuki *et al.*, “Test Results of the First Series Magnet of Beam Separation Dipole for the HL-LHC Upgrade”, *Trans. Appl. Supercond.* 34, Aug. 2024, 4001805.
- [4] K. Suzuki *et al.*, “Performance of the quench protection heater for the HL-LHC beam separation dipole”, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 30, Jun. 2020, 4701206.
- [5] T. Galvin *et al.*, “Experimental Examples of Quench Protection With Varistors to Reduce Quench Voltages and Hot-Spot Peak Temperatures”, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 32, Sep. 2022, 4702505.
- [6] T. Galvin *et al.*, “Characterisation of SiC Varistor Quench Protection Operating at 4 Kelvin for Use With Superconducting Magnets”, *IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY*, VOL. 33, NO. 5, AUGUST 2023, 4701005.
- [7] J.P. ホールマン著；平田賢監訳（理工学海外名著シリーズ, 37-38）ブレイン図書出版，丸善（発売），1982.3.
- [8] C. Mitsuda *et al.*, “Test coil-unit fabrication of Nb3Sn superconducting multipole wiggler for next generation light source in KEK-PF”, in *Proc. IPAC’25*, Taipei, Taiwan, Jun. 2025, pp. 1851-1854. doi:10.18429/JACoW-IPAC25-WEPB050
- [9] H. Saito *et al.*, “Proposal of a vertically polarized superconducting multipole wiggler using Nb3Sn coils”, *J. Synchrotron Rad.*, vol. 32, pp. 934-941, 2025. doi:10.1107/S1600577525004382