

# KEK PFにおける次世代光源適用を目指す超伝導マルチポールウィグラー開発

## DEVELOPMENT OF SUPERCONDUCTING MULTI-POLE WIGGLER FOR APPLICATION OF NEXT-GENERATION LIGHT SOURCE IN KEK PF

満田史織<sup>#A)</sup>, 齊藤寛峻<sup>A)</sup>, 鈴木研人<sup>B)</sup>, 野上隆史<sup>A)</sup>, 江口柊<sup>A)</sup>, 篠原智史<sup>A)</sup>, 土屋公央<sup>A)</sup>, 荻津透<sup>B)</sup>,  
帯名崇<sup>A)</sup>, 西将汰<sup>C)</sup>, 齊藤一功<sup>D)</sup>, 横山彰一<sup>D)</sup>, 伊藤聡<sup>D)</sup>, 吉川正敏<sup>D)</sup>  
Chikaori Mitsuda<sup>#A)</sup>, Hirotooshi Saito<sup>A)</sup>, Kento Suzuki<sup>B)</sup>, Takashi Nogami<sup>A)</sup>, Shu Eguchi<sup>A)</sup>, Satoshi Shinohara<sup>A)</sup>,  
Kimichika Tsuchiya<sup>A)</sup>, Toru Ogitsu<sup>B)</sup>, Takashi Obina<sup>A)</sup>, Shota Nishi<sup>C)</sup>,  
Kazuyoshi Saito<sup>D)</sup>, Shoichi Yokoyama<sup>D)</sup>, Satoshi Ito<sup>D)</sup>, Masatoshi Yoshikawa<sup>D)</sup>

<sup>A)</sup> High Energy Accelerator Research Organization (KEK), Accelerator Laboratory, Accelerator Division VI

<sup>B)</sup> High Energy Accelerator Research Organization (KEK), Applied Research Laboratory, Cryogenics Science Center

<sup>C)</sup> The Graduate University for Advanced Studies, SOKENDAI, Accelerator Program

<sup>D)</sup> Japan Superconductor Technology Ink. (JASTEC)

### Abstract

We have started the development of a superconducting multi-pole wiggler (SC-MPW) that aims to be applied to next-generation light sources in KEK-PF. Compared to the widely used superconducting wigglers, the SC-MPW has a relatively short period, and is expected to be a key light source device for the generation of a hard X-ray while maintaining a low stored beam energy of 2.5~3.0 GeV. To obtain a high peak magnetic field of about 3 T in the center orbit of a wide gap with a beam orbital region of about 30 mm, as to apply it as the vertical SC-MPW too, it is essential to use Nb<sub>3</sub>Sn wire, which can achieve a higher critical magnetic field and current density than NbTi wires, for short periodization of the MPW. Currently, we have completed the first prototype of the basic coil unit consisting of three poles to obtain basic performance data of the Nb<sub>3</sub>Sn coil. Now, we have succeeded in an excitation test in the low current of 300 A. We will report on the overall conceptual design, the production of the prototype coil unit, the excitation test results, the preparation status of the test bench system for the high current test of 800 A or more, and the annual schedule.

### 1. はじめに

高エネルギー加速器研究機構 (KEK) の放射光施設 フォトンファクトリー (PF)、KEK-PF は放射光専用利用施設として今年で42年の長い歴史を有する。同様に、1983年に世界で最早挿入光源アンジュレーターを導入した光源リングとしての運用が42年となる。PF-ARでは世界初の真空封止アンジュレーターの導入[1]などPFは挿入光源利用の先駆的な研究施設である。また、世界で唯一の垂直偏光型超伝導ウィグラーを運用するなどPFの放射光利用を特色づけている[2]。

超伝導ウィグラー (SCW) は極低エミッタンスを目指すような先端放射光源において避けられる傾向がある。しかしながら、PFが目指す次世代光源リング[3, 4]の検討では、PFの歴史的な背景を踏まえ挿入光源による特色ある光生成を目指すことが検討の指針の一つとして示され、超伝導マルチポールウィグラー (SC-MPW) 導入のあらたな取り組みが開始されている。SC-MPWを導入すれば周長の短い小型の次世代光源リングの低い蓄積ビームエネルギーであっても、2.5~3.0 GeVの蓄積電子ビームから20 keV以上の高輝度な高次光の利用が可能となることから、広い波長領域の光利用の鍵となる光源装置として期待されている。また、ウィグラーの短周期長化は放射光の角度広がりを低く抑え、ビームライン側で受容する有効なフラックス量を増加させるだけでなく、ウィグラー

一内でのビーム軌道振幅を低減することでエミッタンス増大の抑制に効果がある[5]。このことから、SC-MPWは低エミッタンスリングで低い蓄積電子エネルギーでありながらも高輝度で高エネルギーな光利用を目指す次世代挿入光源として有望である。さらに、PF SC-MPWの実現の先には、より短周期長化を目指した超伝導アンジュレーターへの応用も考えられている。超伝導アンジュレーターはXFEL-EUV光源を半導体リソグラフィに利用する加速器応用の展開が視野に入れられている[6]。

### 2. 高臨界性能の Nb<sub>3</sub>Sn 超伝導線適用

現行リングにおけるKEK垂直偏光型SCWのポール数は磁極長が1050 mmに対し5極からなり中心3極のみが現在利用されている[7]。ビーム軸上でのピーク磁場は66 mmのギャップに対して5 Tとなる。周期長が200 mmと長いことがコイルのターン数を必要十分に増やすことを可能にし、NbTi超伝導線上記のピーク磁場を実現している。しかしながら、次世代光源用の超伝導マルチポールウィグラーでは、80 mm以下の短周期化と垂直偏光用への適用も見据え30 mm以上のギャップの確保を目指している。この状態で中心軌道での3 T程度の高い磁場を達成するには、電流密度を高く出来る超伝導材の利用が不可欠であり、NbTi線材よりも高い臨界磁場 ( $B_{c1}$ ) と高い臨界電流密度 ( $J_c$ ) の特性を有するNb<sub>3</sub>Sn線材の適用が必須である。本研究で求められるような10 T近くの高磁場下では、NbTiとNb<sub>3</sub>Snとの臨界電流密度の差が標準的な線材同志と比較するとおおよ

# chikaori.mitsuda@kek.jp

そ 10 倍に達する。

世界では Nb<sub>3</sub>Sn 超伝導線の臨界電流密度の高さに注目し、短周期長の超伝導アンジュレーターへの適用が早く盛んに進められてきたが、導入普及にはいたっていない[8]。短周期化にともない化合物線材を高密度に巻くことの巻き線技術の難しさにあると考えられる。PF では、SC-MPW で定義されるウィグラー磁場の周期長であれば、磁極間距離が十分に確保できるため Nb<sub>3</sub>Sn ワイヤを用いることで本開発が求めるビーム軸上のピーク磁場を達成することが十分可能と考えている。必要なピーク磁場に対して、巻き線技術の難しさを克服できる巻き線数密度となることを想定しており、大ギャップでマルチポールウィグラーを目指すことの付加価値の高さと共に、技術的成立性が高く Nb<sub>3</sub>Sn ワイヤの利用価値を高めた開発ととらえている。新たに見いだされた光利用の価値の高さからも費用対効果の高い挿入光源となると考えられる。

### 3. 実機展開へ向けたテストコイルユニット

NbTi 線材は合金超伝導線材であるが、対して Nb<sub>3</sub>Sn 線材は A15 化合物超伝導線材である。合金線材と化合物線材には臨界温度、臨界磁場の超伝導性能に差があるだけでなく、超伝導電磁石コイルとしての成立性を左右する機械特性に大きな相違がある。合金線材である NbTi ワイヤでは超伝導線として銅線同様にコイル状に巻くことが可能であるが、Nb<sub>3</sub>Sn 線材は巻き線後に熱処理による化合物化がなされる。これを Wind and React と謂う。熱処理による超伝導化後のワイヤは引っ張り歪率が -0.3% と極めて小さく、熱処理後の巻き線が不可能なためである。化合物化された Nb<sub>3</sub>Sn 線材は機械強度が小さく、外的な応力により容易に超伝導状態が破壊される。このことから、Nb<sub>3</sub>Sn 線材の SC-MPW への適用では以下の 3 点の開発課題が存在する。

1. 超伝導破壊に耐性のある超伝導状態の安定性の高い線材構造と安定化銅量の決定(実装形態に即した最適線材の選定)
2. 磁場平坦度の確保と Wind and React による超伝導化プロセスの高い成立性を図るための巻き線形状の最適化
3. ローレンツ応力に対応するコイルの動的安定性を確保するための含浸材の決定(放射線耐性も加味した実装形態に即した含浸材の選定)

これらの課題に対し、同時並行的に開発を推進するため、PF では各課題項目の選択候補を組み合わせる実装させ、実寸大のテストコイルユニットを製作する試みを進めている。特に、Wind プロセスでは、空芯コイル形状が磁場分布性能に直結するため、テストコイルユニットの製作を通じた寸法精度の高い均一な巻き線技術の獲得が課題となっている。React プロセス後の動的安定性を左右する含浸材の適材選択に関しては、選択された含浸材が放射線耐性を有することも課題であるため、テストコイルユニットへの実装と並行して放射線耐性評価のためのサンプル材料への放射線照射試験を進めている。含浸材料の動的安定性への評価は実装したものを励磁試験することで確認し、放射線耐性は放射線暴露試験で確認することで双方の要求に適合するものを見出す。

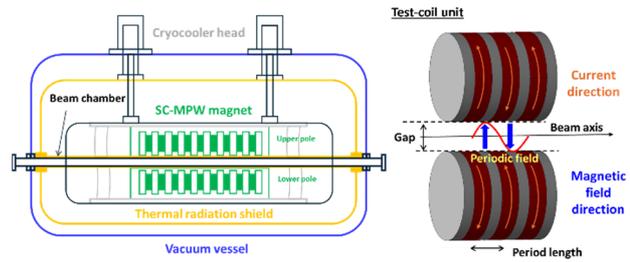


Figure 1: Test-coil unit in conceptual design.

テストコイルユニットは、全体設計で目指す総周期数を 7 周期程度と設定したうえで、1.5 周期の磁場の周期構造を生む 3 つのポールで構成される基本コイルユニットである。Figure 1 に SC-MPW の想定されるクライオスタット込みの全体像とその一部のコイル構成となるテストコイルユニットの概念図を示す。この 2 つのテストコイルユニットを用意し、互いの磁場の向きを逆とすることで対向させれば、実装に近い形で 1 周期のウィグラー磁場構造を作ることができる。また、それらのユニットを長手方向に 4 ユニットの連結することで最終的には SC-MPW の全体構造を形成させることが出来る。テストコイルユニットは、最低限のポール数で実際の磁場構造の最小ユニットを作ることが出来、磁場強度、磁場応力、磁場精度を実寸モデルで模擬した中で、励磁試験を通じて開発課題の洗い出しを進めるためにつくられる。テストコイルユニットの安定性、成立性が高められれば、それらを連結することで任意の周期の最終的な構造に容易に展開できる。

テストコイルユニットの基本設計仕様は、放射光に要求されるエネルギー及び輝度とビームライン側で許容できる光パワーが 10 kW 以下であることを条件に決定された[9]。現行リングにおける蓄積電子ビームの運用条件として 450 mA の総蓄積電流値、2.5 GeV の蓄積ビームエネルギーを仮定し、生成されるハード X 線のフォトフラックス密度が 10 keV あたりで最大値の 10<sup>15</sup> となることを目指している。Table 1 にそのターゲット値と基本設計パラメーターを示す。括弧内は実コイル製作後数値である。

Table 1: Target Values and Parameters of the Test Coil

Parameter	Target values	Simulation
Gap	>30 mm	32 mm
Length for two poles	<80 mm	80 mm
Magnetic field period	<80 mm	64 mm
Peak magnetic field	3.0 T	2.0 T
Total periodic #	8	1.5
Total pole #	18	3
Total magnet length	<700 mm	135 mm (137)
J <sub>c@7.5 T, 4.2K</sub>	>1100 A/mm <sup>2</sup>	1000 A/mm <sup>2</sup>
Turn # of wire/pole	220	235 (492)

Figure 2 にシミュレーションで具体化した SC-MPW の形状を示し、設計上必要となる断面構造パラメーターを示す。PF の SC-MPW では、真円形に巻いたコイルに電

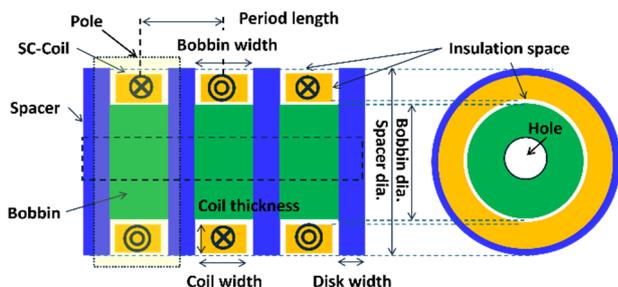


Figure 2: Simulation model of the test-coil unit.

流向きをポール毎に変えながら長手方向に重ね N 極と S 極の磁場を交互に生成する垂直巻を採用する。Nb<sub>3</sub>Sn コイルが巻き線時に損傷することを避け、励磁状態におけるローレンツ応力下においてもコイルへの応力を均等に分散させるためである。巻き芯は非磁性で低温下での機械強度の高い SUS ボビンとし、コイルは巻き芯の周りに一層毎に巻かれる。テストコイルユニットのシミュレーション設計では、ビーム軸中心磁場を目標値に近づけられることを優先し、その中でギャップ長を出来る限り大きくしつつ、周期長を 80 mm 以下に抑えることが求められた。ターン数を増加させることで磁場の強度を上げることは可能であるが、ターン数を増加させるために巻き幅を増やすことは周期長を長くすることになる。逆に、コイル巻き厚み(巻層数)を増やすことは実行的なビーム軸上の磁場の寄与を増やすこととならないため、ここにボビン径及びポール間距離とコイル巻き線幅との間に最適な条件がある。

磁場設計上では、Nb<sub>3</sub>Sn コイルで流せる電流密度を実際に使われる超伝導線材の臨界電流密度に準ずるものとし、ただし、シミュレーションにてコイル内を貫通する最大磁場(最大経験磁場)が Nb<sub>3</sub>Sn の臨界磁場を超えないように 1000 A/mm<sup>2</sup> を想定した。ポール(磁極)中心とポール中心との中心間距離を 80 mm とし、ギャップを 32 mm とした場合、ビーム軸上のピーク磁場は 2.0 T となり、ギャップ中心でのピーク磁場とピーク磁場との距離である磁場周期長は 64 mm となる。この時のコイルの巻きスペースは幅 25 mm、高さ 35 mm としており、このスペースの内の 30% (パッキングファクター) をボビン及びスペ

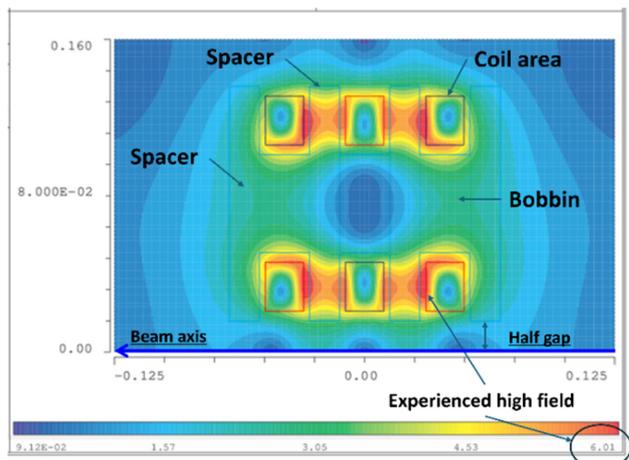


Figure 3: Magnetic field distribution by 2D simulation.

ーサとコイルとの間の絶縁領域として確保する。ボビン直径を 50 mm とすることで、コイル磁場がギャップ中心軸へ効率的に寄与する。このコイル巻きスペースに、各層に丸の断面形状のワイヤーを並べて積層させると 235 ターンの巻き数を実現できる。この時のワイヤーあたりの電流値は 791 A/wire (~1000 A/mm<sup>2</sup>) である。コイル内最大経験磁場は 6.0 T に達する。

Figure 3 に 2 次元平面上でボビン円筒の中心断面の磁場分布を MAFIA シミュレーションで見た結果を示す。

#### 4. テストコイルユニット 1 号機製作と完成

Figure 4 にテストコイルユニットで使用する Nb<sub>3</sub>Sn ワイヤーの断面写真と Table 2 にその諸元を示す。Nb<sub>3</sub>Sn ワイヤーはブロンズ法で JASTEC (株) により製作された。テストコイルユニットの製作も JASTEC によるものである。

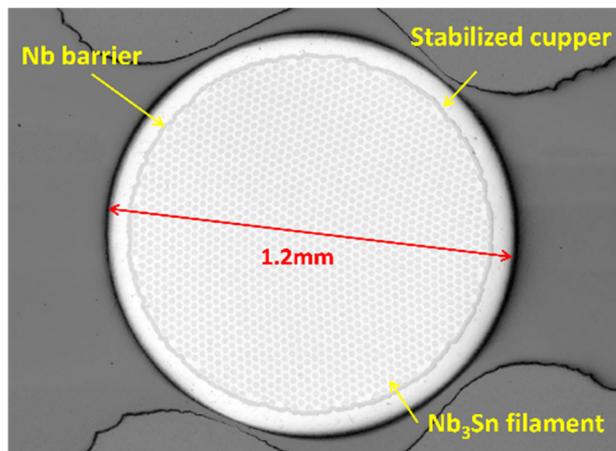


Figure 4: Cross-section of actual Nb<sub>3</sub>Sn wire.

Table 2: Nb<sub>3</sub>Sn Wire Specifications

Item	Values
Wire dia. w/o insulation (w/)	1.2 mm (1.36)
Cu ratio (Cu/Cu+Non-Cu)	0.3±0.1
RRR	349
Barrier material, Filament #	Nb, 28177
I <sub>c</sub> @7.5 T, 4.2K(average)	1040 A
Turn # of wire/pole	220

磁場設計においては、ワイヤー当たりの電流値が 791 A/wire で、コイル内最大経験磁場が 6.0 T であることから、ワイヤー諸元と比較し、超伝導臨界点に対してお

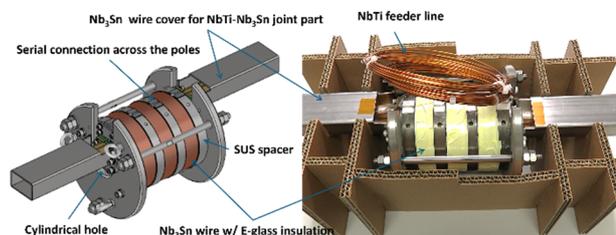


Figure 5: A completed test-coil unit.

よそ 60%程度の運転点(40%の裕度のある)にて運用を想定することとなる。Non-Copper J<sub>c</sub> においては、単純に銅比から Nb<sub>3</sub>Sn 導体を仮定すると 1314 A/mm<sup>2</sup>(7.5 T、4.2 K 条件下)の電流密度の能力を期待平均値として得られる。Figure 5 に製作が完了したテストコイルユニットの写真を示す。Wind and React による製作で作られている。ワイヤーを SUS ボビンに巻き、巻き終わり後熱処理にて Nb<sub>3</sub>Sn 化合物化させる。その後、真空含浸で完成する。各層のワイヤー巻き線作業は厳密に管理されており、各層のターン数は 17 ターンずつである。最終的な層数は 29 層、その結果の巻き厚み(最外直径)は 119.6 mm、巻き幅は 24.3 mm で、ポール間にてその差は 0.2 mm 以内の高い位置精度で巻かれた結果となっている。巻き方としては単純な積層でなく俵積みとした結果、設計よりも大幅に巻き数の増加が可能となりほぼ倍の巻き数に到達している。そのため、設計上のビーム軸上のピーク磁場は単純に 2 倍の 4.0 T に到達する見込みである。ポール毎に正転巻、逆転巻き、正転巻と巻方向が変わるが、すべてのポールは一本のワイヤーでシリーズに接続されている。Nb<sub>3</sub>Sn ワイヤーの電流リード部引き抜き部は NbTi 線材が半田付けされており、電流リードのブスバーへの引き回し時の応力負荷が Nb<sub>3</sub>Sn へかかることを未然に防ぎ、ワイヤーの損傷を避けるように考慮されている。

## 5. 300 A 低電流励磁試験の成功

PF では製作が完了したテストコイルユニットの 800 A の大電流励磁試験に向けたテストベンチシステムの構築が進められている。そのシステムの完成は 2026 年度後半を予定しており、先行して製作が進むプロトタイプ機の初期製作不良がないことを確認するために、予備試験として JASTEC 工場にて 300 A の励磁試験が実施された (Fig. 6 を参照)。常温状態では見極めきれない製作途上の不具合として、Nb<sub>3</sub>Sn 化合物化プロセスの不良、絶縁不良、含浸材の気密不全の洗い出しを進めるためである。クエンチ保護システムは CERN LHC ルミノシティアップグレード計画用に開発が進む衝突点超伝導電磁石 D1 電磁石用[10]のプログラムシーケンスとクエンチ検出ロジック[11]を電流値監視のためのシャント抵抗器、ローレンツ応力によるワイヤーモーションの誘導起電力磁場を検知するピックアップコイル、クエンチ時発生電圧を検知するためのテストコイルユニット両端電圧信号のそ

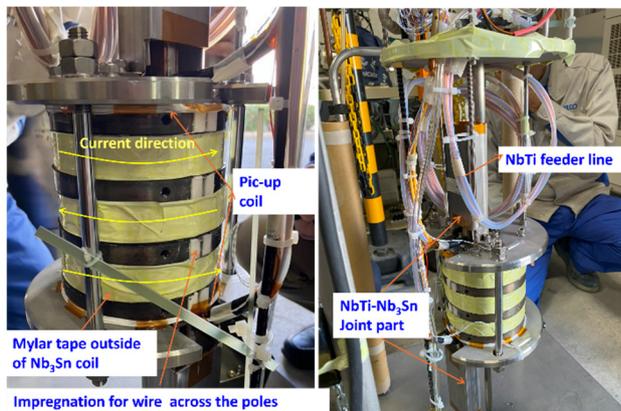


Figure 6: Setup of low current excitation test.

れぞれを、デジタルマルチメーターを介して接続している。今回の試験では遮断機はコールドダイオードを使用する。20 mV のクエンチ信号は 10 ms の保持時間で遮断判定し、電源停止信号を励磁電源の外部停止信号接点へ送信する。励磁電源側では、50 ms の保持時間後に正常な電源停止信号と判定し電源の通電停止を行う。今回の励磁試験ではワイヤーモーションによる微小電圧を検知するためにテストコイルユニットの両端にコイル最外径と同じ径で 10 ターンの巻き数でピックアップコイルを設置した。液体窒素の予冷に 1 日かけ、液体 He による本冷の 4 時間経過後に励磁試験を行った。電流リードの銅線の常伝導部による電圧発生を防ぐため電流ランプアップ速度は 0.5 A/s 以下とし、電源投入後の突入電流によるクエンチ信号の誤検知を防ぐため、0.1 A/s で 1 A まで励磁しその後目標電流までの励磁試験を実施した。0.2 A/s のランプアップ速度により 50 A ステップで各ステップでは 2 分程度の励磁状態の保持を行い、最終的に 300 A まで到達した。またランプアップ速度を上げた誘導成分の発生しやすい状態となる 0.3 A/s のランプアップ速度で、300 A までの直接の励磁、0.5 A/s のランプアップ速度での 300 A までの直接励磁を行い、クエンチすることなく励磁試験を完了した。途中のワイヤーモーションもピックアップコイルで検知することはなかった。Figure 7 に励磁試験の励磁電流およびコイル両端電圧の履歴を示す。インダクティブ電圧の実測で得られたコイルインダクタンスは平均 33.7 mH となっており、設計計算による 37 mH とおおむね同等である。

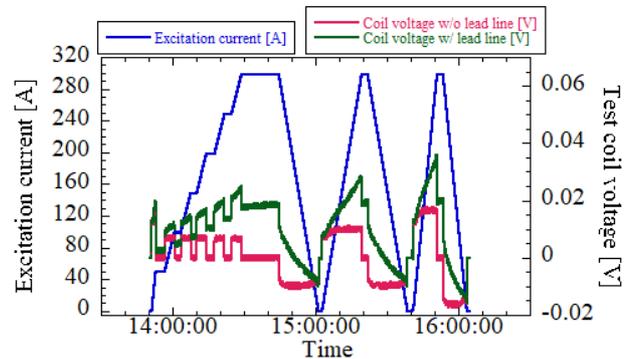


Figure 7: Results of low-current excitation test. Plots show the histories of excitation current and test-coil voltages with lead line and without lead line, respectively.

## 6. 今後の計画と展望

第 1 試作テストコイルユニットの低電流励磁試験が無事に成功し、コイルの健全性が確認されたことから、PF において 2026 年度の大電流励磁試験へ向けたテストベンチシステムの構築が進められている。同時に、含浸材の異なる第 2 試作コイルの製作も進められており、第 1 試作コイルと同様に 2025 年度に JASTEC における低電流励磁試験を実施しコイルの健全性が確認されたのち大電流励磁試験が実施される。巻き数がシミュレーション上の 2 倍となっており、コイル内部経験磁場も 2 倍を想定する必要があり、800 A 最大定格電流を目標としながら線材の臨界電流値を見極めた中で 600 A 以上のどこ

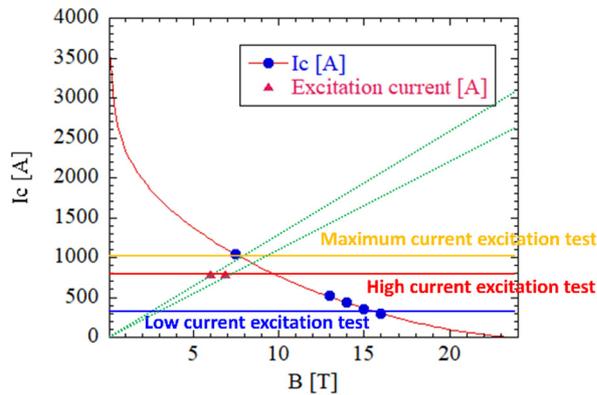


Figure 8:  $I_c$ -B curve for JASTEC Nb<sub>3</sub>Sn wire. The triangle plots show the magnetic field simulation results.

まで安定的に運転できる電流値を高められるかせるかが重要な課題となる。Figure 8 に現線材の平均値  $I_c$  カーブに 791 A 励磁時の最大経験磁場計算結果 (▲点) で示す。2 点はシミュレーションモデルの違いによる相違を示し、直線状でかつ  $I_c$  曲線内側下方に運転点を置く必要がある。

第 2 試作コイルは含浸材が異なる他、クエンチ保護システムの高度化をねらったクエンチ保護の予兆検知の可能性を模索する温度センサーのとりつけ及び歪ゲージのとりつけを進めている。これらの基本動作についても低電流励磁試験にて確認がなされる。ここに最新の情報として第 2 試作コイルの完成写真を Fig. 9 に示す。

第 1 試作コイル、第 2 試作コイルはそれぞれ 1 台ずつシングルコイルユニット試験として大電流励磁試験が行われるが、加えて 2027 年にはこれらを対向させて設置させることで対向磁場のある条件で励磁試験を行うツインコイルユニット試験が計画されている。ツインコイルユニット試験ではビーム軸中心磁場を確認する極低温下での縦型磁場測定も計画されており、励磁電流性能、磁場性能のいずれの側面からも SC-MPW の実用可能性について判断がなされる。

含浸材の放射線耐性評価は、放射光加速器での利用に向けて安定運用の鍵となっており、一早くその評価方法の開発を開始している。2027 年には評価方法の方

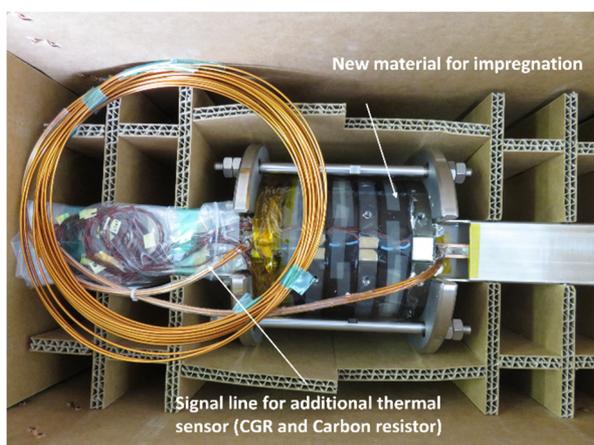


Figure 9: A completed secondary prototype.

向性を確立し、含浸材の材質の選択の方向性を見出す計画としている。PF の加速器施設の地の利を生かし、実ビームによる評価を進めており[12]、含浸材の性能が放射線環境下で保持される裏付けを得ることが重要である。

大電流励磁試験では、クエンチ検知・保護システムの Nb<sub>3</sub>Sn 線材対応が成功の鍵を握っており、新たな新技術の導入が図られる。特にクエンチ伝搬速度の速さから即遮断能力を必要としており、クエンチ予兆検知のロジックの高速化と、遮断機の高速化が図られる[13]。遮断機は、機械式遮断機の限界である 30 ms 以下の遮断速度の高速化を実現するために半導体スイッチによる遮断器システムの開発が進行中である。ロジックの高速化では FPGA 回路とマルチ DAQ を組み合わせたシステムの導入が図られ遮断機及び電源遮断システムへのロジック信号の送受信システムに光送受信を導入する計画である。

テストコイルユニットでは、第 3、第 4 試作コイルの製作が計画されており、Nb<sub>3</sub>Sn 線材の銅比の改善、DT 法線材の試用、ポビン形状を円形から楕円形状とした応力分散と磁場平坦度の確保のための最適化、ポビン形状の影響に対する適材の含浸材との組み合わせによる動的安定性の評価などが進められていく計画である。

## 謝辞

本研究は、高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所による放射光実験機能強化の一環として光源 Research and Development により実施された。

## 参考文献

- [1] S. Yamamoto, "Construction of an in - vacuum type undulator for production of undulator x rays in the 5-25 keV region", Rev. Sci. Instrum. 63 (1991) 400.
- [2] T. Yamakawa *et al.*, "A CONSTRUCTION OF THE SUPERCONDUCTING VERTICAL WIGGLER AND ITS OPERATION IN THE PHOTON FACTORY", Nucl. Instrum. Meth. A 246 (1986) pp. 32-36.
- [3] K. Harada *et al.*, "Conceptual design of the Hybrid Ring with superconducting linac", J. Synchrotron Radiat., vol. 29, pp. 118-124, 2021.
- [4] Photon Factory Hybrid Light Source, KEK, Sep. 2023, [https://www2.kek.jp/imss/pf/pf-hls/library/pf\\_hls\\_cdr\\_ver1\\_English.pdf](https://www2.kek.jp/imss/pf/pf-hls/library/pf_hls_cdr_ver1_English.pdf)
- [5] H. Saito *et al.*, "Proposal of a vertically polarized superconducting multipole wiggler using Nb<sub>3</sub>Sn coils", J. Synchrotron Rad. (2025). 32, pp. 934-941.
- [6] N. Nakamura *et al.*, "High-power EUV free-electron laser for future lithography", Jpn. J. Appl. Phys., vol. 62, 2023.
- [7] K. Ohmi *et al.*, "Design and construction of a superconducting vertical wiggler", Part. Accel. 33 (1990) 129-134.
- [8] K. Zhang and M. Calvi, "Review and prospects of worldwide superconducting undulator development for synchrotrons and FELs", Supercond. Sci. Technol., vol. 35, no. 9, p. 93001, 2022.
- [9] M. Ando *et al.*, "Design of beamline 14 for the PF vertical wiggler and its operation", Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A, vol. 246, no. 1, pp. 144-148, 1986.
- [10] 菅野未知央, "LHC 高輝度化アップグレードのためのビーム分離超伝導双極磁石開発", 2017 年 52 巻 3 号, pp. 149-156.

**PASJ2025 WEP041**

- [11] K Suzuki *et al.*, “Test Results of the First Series Magnet of Beam Separation Dipole for the HL-LHC Upgrade”, IEEE Trans. Appl. Supercond., pp. 1-6, Aug. 2024.
- [12] H. Saito, *et al.*, “Evaluation of radiation tolerance of impregnation resin for Nb<sub>3</sub>Sn superconducting multipole wigglers”, PASJ2025, Tokyo, Japan, Aug. 2025, FRP036, in this meeting.
- [13] S. Nishi *et al.*, “Evaluation of quench protection system for the HL-LHC D1 magnet with an advanced simulation and its extensive application to new superconducting insertion devices”, PASJ2025, Tokyo, Japan, Aug. 2025, THP060, in this meeting.