

KEK-PF における超小口径セラミックスチェンバー一体型パルスマグネットの 将来光源適合開発

ADAPTIVE DEVELOPMENT OF CERAMICS CHAMBER WITH INTEGRATED PULSED MAGNET FOR FUTURE LIGHT SOURCE IN KEK-PF

満田史織^{#, A, B)}, Yao Lu^{B)}, 小林幸則^{A, B)}, 高木宏之^{A, B)}, 原田健太郎^{A, B)}, 帯名崇^{A, B)}, 高井良太^{A, B)},
野上隆史^{A)}, 内山隆司^{A)}, 上田明^{A)}, 長橋真也^{A)}, 横山篤志^{C)}, 岩本晃一^{C)}, 笹川敦司^{C)}, 濱地健吾^{C)}
Chikaori Mitsuda^{#, A, B)}, Yao Lu^{B)}, Yukinori Kobayashi^{A, B)}, Hiroyuki Takaki^{A, B)}, Kentaro Harada^{A, B)},
Takashi Obina^{A, B)}, Ryota Takai^{A, B)}, Takashi Nogami^{A)}, Takashi Uchiyama^{A)}, Ueda Akira^{A)}, Shinya Nagahashi^{A)},
Atsushi Yokoyama^{C)}, Kouichi Iwamoto^{C)}, Atsushi Sasagawa^{C)}, Kengo Hamaji^{C)}

^{A)} High Energy Research Organization (KEK), 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801, Japan

^{B)} The Graduate University for Advanced Studies (SOKENDAI), 240-0193, Hayama, Japan

^{C)} KYOCERA Co. Ltd., Higashitomi-city, Shiga 529-5195, Japan

Abstract

The CCiPM (Ceramics chamber with integrated pulsed magnet) is a new air-core magnet with no existing technology, which is planned to be used as a magnet for pulsed multipole injection, an injection bump kicker, and a fast correction kicker in the next generation light sources. The magnetic pole coils are completely implanted in the thickness of the cylindrical ceramic and are structurally integrated with the ceramics. The first CCiPM was developed with an inner diameter of 60 mm as the magnet bore to establish the basic production technology, and then the technology was developed over the next four years to finally achieve the completion of CCiPM with inner diameters of 40 mm and 30 mm. These ultra-small bore diameters are expected to be compatible with the vacuum beam duct sizes envisioned for the future synchrotron radiation source ring. Through the beam test at the test beamline and off-line tests, the durability and magnet performance of the CCiPM have been demonstrated, and the technology is now being upgraded to increase the number of implanted coils.

1. 概要

2010年に電場型ストリップライン高速キッカーに代わる、高磁場強度の高速キッカーとしての備えるべき構造課題として「ビームインピーダンスに影響を与えないような限界までパルスマグネットの磁極をビームに近づける方法」が提案され、2011年にその課題に応える構造としてセラミックスチェンバー一体型パルスマグネット(CCiPM)が発案された。この構造の基本的な特徴は、マグネットコイルが、パルス磁場の透過性を補償する円筒のセラミックス製真空ダクトの円筒壁に埋め込まれ完全に一体化されている点にある。コイルは、円筒壁の長手方向に掘られた外表面から内表面に貫通させられた溝穴に銀ロウ付けで接合されており、セラミックスとマグネットコイルは構造的にも電氣的にも完全に一体化している。円筒の内壁面の表面より突出することなく、円筒の内壁面の表面と同じ位置に置かれたコイルは、円筒のセラミックスとともに溝穴を塞ぐ真空隔壁の一部として機能し、それにより真空ダクト中心を通過するビームに最近接化している。2012年よりプロトタイプとして円筒の内径が60 mm、円筒の壁厚みが5 mm、円筒全長が300 mmのCCiPM(D60-30)の製作が製造の基礎技術開発のために開始され、2014年に製作に成功した[1]。このモデルのD60-30の略称は、円筒内径と円筒半割平面からのコイル配置角度を示しており、ダイポール磁場の生成に最適化されて

いることを示している。この時点で、CCiPMの製造を構成する3つの技術要素の基礎が確立した。①円筒セラミックスの壁面にコイルを埋め込みながらロウ付け接合をする技術(SMBT)、②埋め込みコイルに電流供給のためのリード線を接続するための口金の構築技術(HCBT)

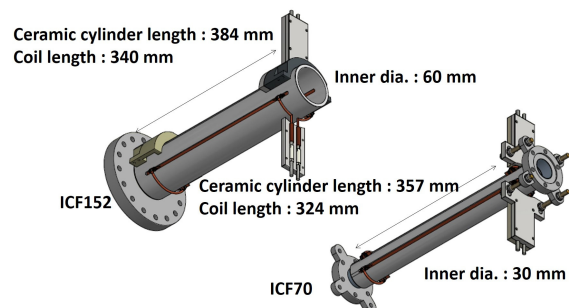


Figure 1: The design of D30 and D60 CCiPM.

が完成した。同時に、③円筒の内表面に露出するコイルを避けて、円筒内表面に薄膜5 μmのチタンコーティングを実装するパターンコーティング技術(FLiP)の開発も完成した[2]。

このパターンコーティング技術を発展させることで、円筒の内壁面の表面に任意の形状の精密パターンコーティングが可能となり、その実践として楕円形状のコーティングが実装された。楕円形状のコーティングは、コイルが生成する主磁場に対する渦電流磁場が生成される表面積を極小化、渦電流の局在化させるような円筒の上

[#] chikaori.mitsuda@kek.jp

下流と絶縁されたストリップライン構造となり、主磁場の減衰を防ぐことが出来る。ただし、内表面コーティングが単純な上下流絶縁されたストリップライン型である場合、本来の内面コーティングの役割であるビーム壁電流の導通性は損なわれる。そこで、櫛歯形状が円筒の上下流より対面で噛み合わせることで、櫛歯間にはキャパシタンス形状が生むことが可能となる。この特殊なパターン形状により高周波のビーム壁電流の導通性能が確保されることになる。もちろん、この形状決定には主磁場形状に対する渦電流磁場の抑制と、ビーム壁電流の導通させる周波数帯域の選択の双方のバランスを鑑みた最適化が必要とされる。

2. CCiPM の見据える応用とその適合開発

セラミックス円筒内径が 60 mm で確立された製作技術は、2015 年からは超小口径化、コイルの配置の自由度を高める技術開発へと展開がされた。これは、次世代放射光光源加速器における蓄積リングダクトが 30 mm 以下の超小口径化すること[3]、高速キッカーの利用が八次以上の高次磁場形状に拡張されることを見据えた適合開発である。長きにわたる開発の結果、2018 年にセラミック円筒の内径 30 mm の超小口径のダイポール型 CCiPM (D30-30) の製作技術の確立に成功し、2019 年には、セラミックス円筒の内径 40 mm の同じく超小口径でかつコイル配置角度をオクタポール型とした CCiPM (D40-45) の製作への展開を成功させた (Fig. 1)。

CCiPM は空芯型の弱点である磁場強度の弱さを補強するために極限まで磁極をビームに近接させる構造として提案され、ダイポール型の高速キッカーとしての利用を開発の起点としている。ボア径に応じて磁場の強度を増加させることが出来るため、超小口径化は磁場の増強による強い蹴り角の実現をもたらすだけでなく、同時に、電源から見える負荷としてはインダクタンスが軽減するため、高速性能の向上と電流出力の増強がもたらされる。高繰り返し性も含む高速性能を有するキッカーは、磁場出力によるバンチバイバンチビーム制御への利用が考えられる[4]。CCiPM はインダクタンスであるコイルと誘電体であるセラミックスのキャパシタンスが完全に一体化された集中定数として見えるため、一体化形状の精密な製作精度は均質なキッカーの製作に向いており、複数のキッカー間で磁場形状の高相似性を補償する必要があるような高速性能の必要な低エネルギー短周長のリングにおけるバンチキッカーへの適用も考えられる[5]。

近年、バンチ軌道生成によるリング入射技術から、パルス多極電磁石を利用した蓄積リング入射技術の開発が進んでいる。KEK-PF はその先駆的な開発を進めた研究施設であるが、近年の研究で、鉄芯型六極パルスマグネットは、磁極の鉄芯及びセラミックス内面コーティングの渦電流磁場による不正磁場のために、本来のパルス多極マグネットの有効性を生かし切れない実情がある[6]。また、鉄芯型では、六極以上の高次の磁場を生成するためのポール数の増加は、磁場を増強させるボア径の小口径化の足枷となり、同様の理由でその狭小空間でのポール数密度の増加が磁場飽和により磁場増強に限界を与える。これら全ての鉄芯型の短所は、空芯型 CCiPM で可能なコイル配置とコイルに流す電流向きの

自由度、内面パターンコーティングにより完全に克服される。そのため、CCiPM の重要な応用ターゲットとし、次世代放射光光源加速器におけるパルス多極マグネットとしての利用がまた一つの開発目的である。これらのターゲットに応じた技術開発として、超小口径化のダイポール型 CCiPM と多極型コイル配置の CCiPM の製作が進められた。

3. 超小口径化へ向けた埋め込み技術開発

セラミックス円筒内径が大口徑の 60 mm の CCiPM の基礎技術開発に比べ、超小口径化に長期の開発時間を要したのは、円筒セラミックスの内径が縮小することにより円筒円周上に配置されるコイル間距離が小さくなり、それまで大きな円周で広く応力分散をさせられていたコイル埋め込みで生じる破壊応力が増大することによる。また、電流密度を増加させることがないように、コイル断面積は大口徑モデルと超小口径モデルで同じ値を採用しており、この構造も破壊応力を増大させる要因となっている。セラミックス耐応力は 200 MPa を想定しているが、埋め込みコイルのロウ付け時のセラミックスとコイル間の熱膨張差は 2.6 mm に達するため、最大熱膨張時には、貫通溝の突端は容易に 200 MPa 以上の応力が生じる。特に、電流リード線を接続するために構築する口金は、この応力の集中する突端部に同時ロウ付けされるため、この口金の体積も加味された熱膨張による応力を考慮せねばならない。

開発当初、円筒口径が 60 mm と同様の製作技術ではこの課題を克服することが難しいと考えられ、超小口径化に対応するため、熱膨張時の応力を緩和する埋め込みコイル形状の様々なモデルが考案され、そのうちの 4 モデルの実際の製作を通じて製作技術が改めて構築された。課題解決のために導入された技術は以下の 4 点である。1. 口金部形状は、円筒口径が 60 mm の大口徑



Figure 2: Complicated D30-30 and D40-45 CCiPM.

モデルと同様のブレード型とする。2. コイル断面形状は、

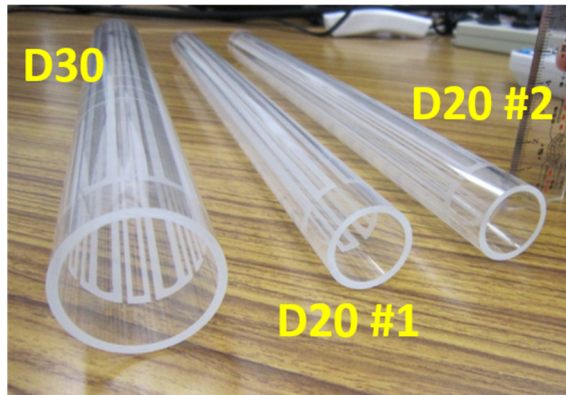


Figure 3: Demonstration of precise pattern coating.

台形形状から角型形状へと変更する。3. セラミックス素材を耐応力の高いファインセラミック(京セラ製 A-479 から A-479M)へと変更する。4. 円筒セラミックス厚みを大口径モデルの 5 mm から 10 mm へと増加させる。ただし、埋め込みコイル位置は円筒内表面のままで維持されるため磁場強度の低下はない。5. 分割コイル埋め込みにより熱膨張時の応力を緩和する。

1. の口金形状は開発要素の要となる技術であるが、大口径モデルで採用されたものが口径に依らずもつとも応力緩和に最適化されていることが判明している。2. のコイル断面形状は、応力の分散から扇形が望ましいと考えられているが、超小口径の円筒への溝加工技術に現時点での限界があり溝上部は扇形、コイル接合部は角型形状とした折衷案が採用されている。3. 及び 4 項はセラミックス対破壊応力の増強であり、5. は新機軸となる埋め込みコイル数増加や製作歩留まりを改善する応力緩和技術である。これらの CCI_{PM} の超小口径化へ向けた製作技術は、そのまま八極型コイル配置で採用された円筒口径 40 mm の CCI_{PM} にも踏襲されている。ダイポールに特化した平坦な磁場分布を生成するために、ダイポール型 CCI_{PM} のコイルは円筒の水平半割面から 30 度の位置に配置され、八極型 CCI_{PM} では、コイルは 45 度の位置に配置される。八極型では、コイル配置が変更されることにより、円周上のコイル間距離は等間隔になり、応力の分散が変化することが予想されるが、超小口径化のために開発された製作技術により CCI_{PM} 構造を完成させることに成功している (Fig. 2)。

円筒セラミックスの超小口径化で、別に問題となる要素として、セラミックス円筒のたわみが挙げられる。超小口径化により円筒セラミックは細長くなるため、構造強度が低下し円筒セラミックスを焼結製作する際に、自重により 300 mm の長さで 2.6 mm 程度たわむことが分かっている。このたわみは、磁場精度を補償するコイルの埋め込み位置精度を低下させる直接的原因となるため、焼結時の技術改善により 0.2 mm 以下の磁器反りに抑えるまで改善がなされた。結果、コイル位置精度は劇的に改善し、コイル位置精度は 0.01 mm まで補償されるようになった。セラミックス円筒の長さは 357 mm、コイル長さは 310 mm での結果である。現在のダイポール型モデル (D30-30)

及び多極型モデル (D40-45) ではセラミックス円筒の長さは 357 mm、コイル長さは 324 mm で統一されている。

4. 内面コーティングの超小口径化対応

CCI_{PM} の超小口径化はセラミックス円筒内面の表面積も減少させ、開口も小さくなるため、精密なパターンコーティングの実装が困難となる。この課題の克服のための開発は一早く取り組み、コーティング形状が分かりやすい透明な塩化ビニール管によるデモンストレーション



Figure 4: Implemented pattern coating to CCI_{PM}.

ンにより 2015 年には技術的な確立がなされた (Fig. 3)。D30 モデルでは、コイル周縁部の絶縁距離が 3 mm、歯幅を 3 mm、D20-#1、D20-#2 モデルでは同様にそれぞれ、3.4 mm と 2.0 mm の絶縁距離、3.0 mm と 2.0 mm の歯幅を試行している。

円筒口径が 20 mm、円筒長さ 300 mm までは歯形状のパターンコーティングを歯幅 1 mm、歯間隔 1 mm で実装することが可能であることを実証した。この技術をもとに、D30-30 CCI_{PM} では歯幅 3 mm、歯間隔 3 mm の構造で歯型コーティングが実装され、D40-45 CCI_{PM} では歯幅 4 mm、歯間隔 1 mm の構造で歯型コーティングが実装されている (Fig. 4)。

このパターンコーティングの技術は、KEK-PF で運用されたビーム入射用パルス六極マグネットのコーティングからの渦電流磁場の抑制に生かされている [6]。これは歯型コーティングを使ってビーム不安定性を引き起こすことなく、渦電流磁場を抑制することに成功した初めての事例である。コーティングコイル間の放電のリスクがあるため、実測に基づく沿面放電距離の評価値として周波数 102 kHz において 1.17 kV/mm を採用し、コイル周

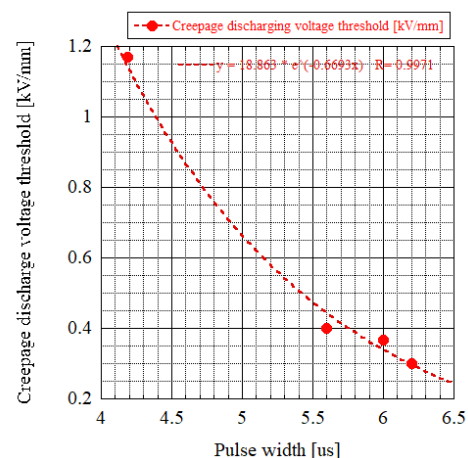


Figure 5: Creepage discharge voltage of CCI_{PM}.

縁部はコーティングとの間にコーティングの無いスペースを設けている。周波数が増加すると沿面放電距離が短くなることが実験的に理解されているため、短周長放射光リングで想定される 2 周回時間に相当する $1\ \mu\text{s}$ 程度のパルス幅の領域においては、放電のリスクが緩和されることが想定されている。Figure 5 は横軸をパルス幅とし、実際に真空中で計測された沿面放電距離の閾値(放電を開始する電圧を $1\ \text{mm}$ の沿面距離で換算したもの)をプロットしたものである。相関に対するメカニズムの理解は進んではないが、仮にフィッティング関数を指数関数で採用すると、 $1\ \mu\text{s}$ 程度のパルス幅では沿面放電距離は $9.7\ \text{kV/mm}$ まで改善が期待できる。

5. モデルごとの CCIpM 性能仕様

Table 1 に大口径モデル D60-30 CCIpM、多極型モデル D40-45 CCIpM、そして超小口径モデル D30-30 CCIpM の性能仕様の比較を示す。磁石磁極径となるボア径はコイル位置で決まるため、円筒内径と同一である。円筒セラミックス長さ、コイル長さはいずれも大口径モデルから短くなっているが、電流供給のための口金から口金までの長さは積分磁場の確保のため伸長されている。セラミックス円筒が短く設計されている理由は、超小口径化によるたわみを出来る限り低く抑えるためである。電気的特性とし、同一のリード線の寄与を含む、インピーダンスとインダクタンスを示した。セラミックス円筒の口径が小さくなることでインダクタンスは大口径モデルに比べ小さくなっているが、D40-45 と D30-30 では相違がない。これは、D30-30 において相対するダイポールコイルのコイル間の距離が縮まり相互インダクタンスの寄与が大きくなっているためである。インピーダンスでも同様の傾向となっており、超小口径化によりコイル面積の減少がもたらされるが、相互インダクタンスの増加によりインピーダンスの減少に歯止めがかかる。超小口径化によるインピーダンスの減少は表に示される値が限界と考えられる。この電気的特性は、同じ電源を用いた電流出力の自然パルス幅にも表れている。コイルとコーティング間の絶縁抵抗は、櫛歯コーティングの櫛歯間のスペースの仕上がり状態に強く依存しており、決められた洗浄レシピにより、必要とされる絶縁抵抗値を実現している。2.5 GeV エネルギーの電子ビームを想定した、 $1\ \text{kA}$ あたりの電流に対する期待されるダイポール磁場による蹴り角が示されている。D60-30 及び D60-30 CCIpM は磁場測定による計測値より算出され、D40-45 CCIpM はシミュレーションに基づいた期待値である。D40-45 を八極型で運用した場合、磁場中心から $15\ \text{mm}$ のところでは、 $0.38\ \text{mrad}$ の蹴り角が期待される。

6. 耐久性能とビーム性能

CCIpM は斬新な構造的な特徴を有するが、その実現のためにこれまでに試みられたことがない製作技術が取り入れられており、厳格な耐久試験が行われている。耐久試験項目は下記の通りである。1. $200\ ^\circ\text{C}$ 再昇温試験:製作完了後 1 度だけ $200\ ^\circ\text{C}$ の高温の熱負荷を加える、2. 大気圧負荷試験: $10^{-6}\ \text{Pa}$ 以下の真空状態を長期間に渡り維持する、3. 到達真空度確認試験: $160\ ^\circ\text{C}$ ベーキングにより到達可能真空度の確認を行い CCIpM の清浄度を

Table 1: Specification of CCIpM Models

*Including cable impedance of $1.68[\Omega]$ at $500\ \text{kHz}$			
Parameter	D30-30	D40-45	D60-60
Inner dia.[mm]	30	40	60
Outer dia.[mm]	50	60	70
Cylinder len.[mm]	357	357	384
Coil len.[mm]	324	324	340
Effect. coil len.[mm]	290	290	268
Expect. kick angle [mrad]	1.49	0.88/0.38 @15.0 mm	0.74
Experienced curr. repetition [Hz]	10	10	10
Experienced max. voltage[kV]	5.1	5.5	6.7
Supplied current[A]	3316	3257	3265
Imp. $[\Omega]$ @ $500\ \text{kHz}$ *	4.26	4.29	4.98
Induc. $[\mu\text{H}]$ @ $500\ \text{kHz}$	1.35	1.36	1.59
Nat. pulse wid. $[\mu\text{s}]$	2.8	2.8	3.2
Insula. resistance $[\Omega]$	$>1.0\times 10^{13}$	$>1.5\times 10^{13}$	$>1.0\times 10^{12}$
Withstanding voltage [kV]@ $102\ \text{kHz}$	14.0	14.0	14.0
Weight w/ flange[kg]	1.7	3.3	5.5

確認する、4. $120\ ^\circ\text{C}$ ヒートサイクル熱負荷試験、5. 高繰り返し大電流励磁試験: $10\ \text{Hz}$ での $3000\ \text{A}$ 以上の通電による耐磁場応力の確認、6. 高圧印加放電試験である。ヒートサイクル試験は、1 日に 3 回、 $120\ ^\circ\text{C}$ まで加温することで行われる。加温時は 30 分程度で昇温され、3 時間 $120\ ^\circ\text{C}$ の温度が維持されたのち、3 時間かけ自然空冷される。このサイクルを 1 日 3 回繰り返すことで、加速器リングで起こりうる熱負荷を模擬した過酷な加速試験となっている。D30-30 CCIpM ではヒートサイクルを与えられた日数は 44 日、D40-45 CCIpM では 38 日である。D30-30 CCIpM、D40-45 CCIpM のいずれもこれらすべ

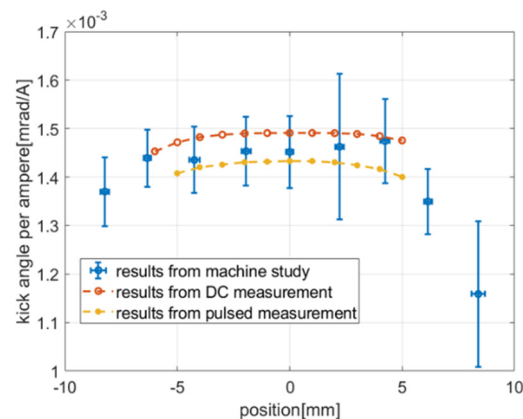


Figure 6: Horizontal survey results of D-mode.

での耐久試験後も真空気密度 $1 \times 10^{-11} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ が維持されていることを確認し、耐久性能を実証している。D30-30 CCiPM と D40-45 CCiPM のそれぞれの真空到達度は、 $2.5 \times 10^{-8} \text{ Pa}$ 、 $7.6 \times 10^{-8} \text{ Pa}$ であり、十分に放射光源加速器に実装することが可能な清浄度である。

磁場測定を通じて磁場性能が確認された CCiPM は、加速器リングに導入し取り返しのつかない重大事故が起きることがないように Linac から PF へのダンプラインの輸送路に新設されたビーム試験設備を用いたビーム試験により磁場性能がビームを使ってあらためて確認される段取りとなっている。D60-30 CCiPM の試験路での試験が 2019 年より開始され[7]、磁場測定で得られた積分磁場が、ビーム診断による蹴り角と 1 % 以内に一致することが確認された。Figure 6 は D30-30 CCiPM のパルス磁場、DC 磁場それぞれの磁場測定結果とテストビームラインでダイポール磁場分布 (Dipole mode: D-mode) のビーム蹴り角による再現を重ね合わせた結果である。ダイポール型として製作された D30-30 CCiPM であるが、コイル配置角度はダイポール型に最適化されているも電流方向の自由度が残されており、4 つの全てのコイルに

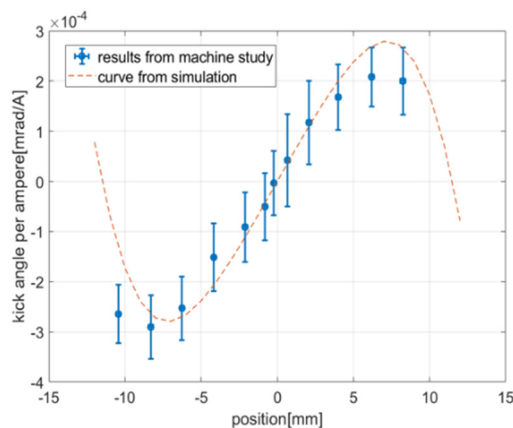


Figure 7: Horizontal survey results of Q-mode.

平行電流を流すことで磁石中心に四極磁場分布を形成することが出来る。Figure 7 は、磁石中心で四極磁場分布 (Quadrupole-like mode: Q-mode) を形成するシミュレーションの結果と、それをビーム蹴り角で再現した結果を示している。

D30-30 CCiPM も同様の過程を経てビーム輸送路でのビーム試験が行われており、その結果でも 3 % 以内での合致を見た[8]。この高いビーム性能の磁場再現性は、CCiPM のオフラインテストでの検証が十分にビーム性能の補償となることを示しており、CCiPM の非線形キッカーとしての有用性についても明らかにした。

7. 新たな技術開発の展開

CCiPM は新たなキッカーの構造として提案され、長期にわたる技術開発の結果、超小口径化に成功している。当初目的であった磁場強度の増強が超小口径化により実現し、高速性と強磁場強度の両立が可能となった。この特徴を生かし様々な応用用途が考えられており、そのうちの八極型 CCiPM は間もなく KEK-PF リングにインス

トールされパルス多極入射技術の実証試験が開始される[9]。現在、磁場次数をより高次にするために、また磁場形状の生成の自由度を上げるため、円筒セラミックスに埋め込むコイル本数を 4 本から 6 本へ増加させた 6 コイル型 CCiPM の開発が開始されている。さらに、同様の理由で、現状の単管への埋め込みコイル数を増加させる構想からさらに発展させ、2 重管構想による磁場形状の複雑さを追求する開発も並行して進められている。他に、KEK-PF で運用する渦電流低減コーティングを実装したパルス六極用セラミックスダクトのパターンコーティングの有効性から更にビームインピーダンスを低減するコーティング材、厚み改善の検討が開始されており、コーティングにおける発熱問題の解決が進められる。より多くの応用展開が今後図られていく予定である。

謝辞

本研究は、科学研究費補助金 (19K2649, 代表: 満田史織) の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] C. Mitsuda *et al.*, “Development of the Ceramic Chamber Integrated Pulsed Magnet Fitting for a Narrow Gap”, in Proc. 6th Int. Particle Accelerator Conf. (IPAC’15), Richmond, VA, USA, May 2015, pp. 2879-2882; doi:10.18429/JACoW-IPAC2015-WEPMA049
- [2] C. Mitsuda *et al.*, “Accelerator Implementing Development of Ceramics Chamber with Integrated Pulsed Magnet for Beam Test”, in Proc. 10th Int. Particle Accelerator Conf. (IPAC’19), Melbourne, Australia, May 2019, pp. 4164-4166; doi:10.18429/JACoW-IPAC2019-THPTS027
- [3] C. Benabderrahmane *et al.*, “Status of the ESRF-EBS Magnets”, in Proc. 9th Int. Particle Accelerator Conf. (IPAC’18), Vancouver, Canada, Apr.-May 2018, pp. 2648-2651; doi: 10.18429/JACoW-IPAC2018-WEPMK009
- [4] K. Holldack *et al.*, “Single bunch X-ray pulses on demand from a multi-bunch synchrotron radiation source”, Nat. Commun., vol. 5, p. 4010, 2014. 10.1038/ncomms5010.
- [5] T. Ohshima *et al.*, “Suppression of Stored Beam Oscillation Excited by Beam Injection”, in Proc. 9th European Particle Accelerator Conf. (EPAC’04), Lucerne, Switzerland, Jul. 2004, paper MOPKF047, p. 414.
- [6] H. Takaki *et al.*, “Beam injection with a pulsed sextupole magnet in an electron storage ring”, Phys. Rev. ST Accel. Beams, vol. 13, p. 020705; doi: 10.1103/PhysRevSTAB.13.020705
- [7] H. Takaki *et al.*, “Eddy Current Effects on the Stored Beam Generated by the Pulsed Sextupole Magnet at KEK-PF”, presented at the 12th Int. Particle Accelerator Conf. (IPAC’21), Campinas, Brazil, May 2021, paper WEXC06.
- [8] Y. Lu *et al.*, “Magnetic Field Measurement and Beam Performance Test of Ceramics Chamber with Integrated Pulsed Magnet at KEK-PF”, presented at the 12th Int. Particle Accelerator Conf. (IPAC’21), Campinas, Brazil, May 2021, paper TUPAB359.
- [9] Y. Lu *et al.*, “New development of Ceramics Chamber with integrated Pulsed Magnet for pulsed multipole injection at KEK-PF”, MOOB03, presented at the PASJ2021.