

## KEK-PF リングビーム輸送路ダンプラインにおけるセラミックスチェンバー一体型 パルスマグネットビーム性能試験

### BEAM PERFORMANCE TEST OF CERAMICS CHAMBER WITH INTEGRATED PULSED MAGNET IN BEAM TRANSPORT-DUMP LINE FOR KEK PF-RING

満田史織<sup>#, A)</sup>, 上田明<sup>A)</sup>, 内山隆司<sup>A)</sup>, 帯名崇<sup>A)</sup>, 小林幸則<sup>A)</sup>, 高井良太<sup>A)</sup>, 高木宏之<sup>A)</sup>, 長橋進也<sup>A)</sup>,  
野上隆史<sup>A)</sup>, 原田健太郎<sup>A)</sup>, 笹川敦司<sup>B)</sup>, 横山篤志<sup>B)</sup>, 横山高也<sup>B)</sup>  
Chikaori Mitsuda<sup>#, A)</sup>, Akira Ueda<sup>A)</sup>, Takashi Uchiyama<sup>A)</sup>, Takashi Obina<sup>A)</sup>, Yukinori Kobayashi<sup>A)</sup>,  
Ryota Takai<sup>A)</sup>, Hiroyuki Takaki<sup>A)</sup>, Shinya Nagahashi<sup>A)</sup>, Takashi Nogami<sup>A)</sup>, Kentaro Harada<sup>A)</sup>  
Atsushi Sasagawa<sup>B)</sup>, Atsushi Yokoyama<sup>B)</sup>, Takaya Yokoyama<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> High Energy Research Organization (KEK)

<sup>B)</sup> KYOCERA Co. Ltd.

#### Abstract

We are proceeding the development of air-core type Ceramics Chamber with integrated Pulsed Magnet (CCiPM) aiming at the multi applications to future light source accelerator of ultra-low emittance ring with a narrow bore and a short circumference ring. As one of the special purposes, the CCiPM is planned to be utilized as the pulsed multi-pole injection kicker used at the beam injection to the ring. Pulsed multipole injection kicker is a candidate of achieving the transparent top-up injection in future light source ring. The accelerator implementation model of CCiPM is now under beam performance and durability testing in the beam transport-dump line to PF-ring. We report the test line construction about the details and very preliminary results about beam performances.

#### 1. はじめに

将来放射光源加速器において多目的に利用が可能なキッカー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 (Ceramics Chamber with integrated Pulsed Magnet: CCiPM) の開発を進めている[1]。空芯型コイルを円筒セラミックスの厚み部分に設けられる貫通溝に銀ロウ付けにより埋め込み接合し、円筒内径まで磁極をビームに近づけた構造となっている。セラミックはビームダクト、コイル治具としての役割を同時に担う。セラミックと電磁石コイルが完全に一体化することで、外装は簡潔でありながらも、耐真空応力、耐磁場応力、耐熱応力のある強固な構造強度、高い耐電圧、絶縁強度を可能にしている。円筒セラミックスの口径の縮小と共に磁場強度を増加させることが出来、空芯型であるため、鉄心型に比べインピーダンスが低く、磁場飽和、高繰り返しパルスに対する損失がない。更に、鉄心型と比べた極めて特徴的な優位性として、口径が縮小化しても、コイル自身が磁極でもあるため、少ないコイル数で、電流を流す向きとコイル配置により、任意の高次の複雑な磁場形状を生成できる。それに対して、鉄心型では、口径の縮小と共に磁極を配置する空間が狭くなるため、磁極数を増やした磁場形状の高次化に困難さを伴う。CCiPM では磁場が飽和することなく、高次の磁場強度の増強を進めることが出来、セラミックス一体型構造がそれらを保証している。

KEK-PF では、この CCiPM の優位性を最大限に引き出す利用の一つとして、次世代放射光源加速器の計画である KEK-LS[2]での多極入射キッカーへの適用開発を進めている。次世代放射光源リング[3]では、物質構造

科学の構造分解能を飛躍的に高めるため、回折限界に迫る極低エミッタンスを目指している。このリングでは、光学的電磁石が高密度に配置され、ダイナミックアパーチャー (DA) が大変小さくなるのが特徴である。この 2 点の特徴は、蓄積リングへビームを入射する入射技術に 2 点の制約をもたらす。1 つ目は複数の入射用キッカー電磁石を配置する十分なスペースの確保が難しい。2 つ目は、DA が小さいため蓄積ビームの DA 内に入射ビームを取り込めるように、ビーム間の合流距離をできる限り近づける必要がある。これらの制約に対して、多極キッカーによる入射技術は、1 台のキッカーしか必要とせず、入射ビームを蓄積ビームへ直接合流させるため、既存のバンプ入射技術のような制約がない。将来光源リングの新たな入射手法として大変有用な技術の一つである。KEK-PF は世界に先駆けパルス 4 極、6 極電磁石を用いた技術開発を開拓的に進めてきており[4]、今日、世界では、より高次の多極キッカーを用いた入射技術へと高度に発展した開発が進んでいる[5][6]。

KEK-PF で進める CCiPM は、この世界的な入射技術開発の潮流に対して、多極キッカー入射技術の開拓的な先駆者として改めて、鉄心型に変わる空芯型高次多極キッカーの開発を推進するものである。

#### 2. 技術開発と加速器実装試験

CCiPM の製造には、以下の 3 点の特殊技術が開発され応用されている。

- Slender Metal Brazing Technology (SMBT): セラミックス円筒壁長手方向コイル埋め込み技術
- High Current Base Technology (HCBT): 埋め込みコイルに高電流を導入するための接続口金構築技術

<sup>#</sup> chikaori.mitsuda@kek.jp

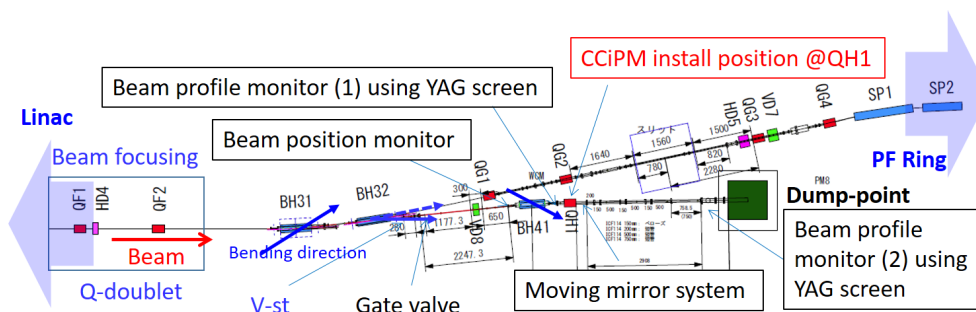


Figure 1: Overview of beam transport-dump line from KEK Linac to PF ring for CCiPM beam test.

- Fine Line Coating Process (FLiP): 円筒セラミックス内面の精密ラインパターンコーティング技術

SMBT はコイル自身が真空隔壁を担い銅コイルとセラミックが完全一体構造となる世界初の技術である。HCBT は、埋め込まれたコイルを電氣的に接続する口金を、埋め込みコイルとの同時ロウ付けにて構築するための新技術である。埋め込みコイルはセラミックス円筒内表面に露呈するため、ビーム壁電流を通過させるための導電体のコーティングにはコイルを避けるような精密なコーティングが必要である。このコーティング技術を応用展開し、ビーム壁電流の長手方向の導電性を確保しつつ、パルス磁場に対する渦電流の生成を抑制するようなパルス磁場の透過性を確保した楕円パターンコーティングを実現した技術が FLiP である。これら 3 つの技術を実装したセラミックス円筒口径 60 mm の加速器実装用 2 極型 CCiPM の開発 (D60) に成功した。長期に渡り進められてきた、テストベンチでのその磁場性能、構造的・熱的耐久性、真空的・電氣的信頼性の検証が完了し[7]、現在、このモデルを加速器に実装しビーム性能実証試験を行う段階に移行している。同時に、次世代光源リングの 30 mm 以下の真空ダクト口径と整合し、磁場強度の向上にも貢献する口径 30 mm となる CCiPM の超小口径化開発 (D30) も進められている。更には、主要な課題である高次磁場形成のための埋め込みコイル数の増加に対応する開発も進行しており、CCiPM の優位性を生かした開発が着実に進行している。

本論文では、現在進行する開発のうち、加速器実装ビーム性能実証試験について報告をする。ビーム性能実証試験では、1. 磁場性能がビーム蹴り角として再現できること、2. セラミックス円筒内面コーティングのビーム暴露に対する耐久性の評価の 2 点が重要な実証目的である。いずれも CCiPM のキッカーとしての特殊構造に対して、総合的試験と言えるビーム性能実証試験をすることで、想定外に潜んでいる問題現象を未然に察知し、キッカーとしての技術完成度を高めるために欠かすことが出来ないプロセスである。

ビーム性能実証試験の試験路 (Test Line: TL) として、Linac から KEK-PF までの直接ビーム輸送路 (Beam Transport line: BT) のリングと分岐する PF-BT の末端のダンプライン (BT Dump-line: BT-DL) が採用された (Fig. 1)。Linac から PF へのビーム繰り返し周波数は 10 Hz が最大であるため、最終的な加速器実装の場であるリングビーム周回周波数によるビーム暴露耐久試験とは比にはならないが、PF リングがユーザーマシンであることを

考慮すると、CCiPM に真空破壊、絶縁破壊などの不測の損傷が起きた場合には、取り返しのつかない事態となるため慎重を期すこととし、輸送ラインでの試験、リングでの試験と段階的に試験を重ねていく計画としている。BT と BT-DL は分岐点のダンプライン側のゲートバルブで真空を切り離すことが出来、絶縁破壊に対しては、CCiPM キッカー点と直近のリング内機器装置と真空ダクトの距離で 30 m 以上離れており、CCiPM の破損事故がリング機器まで大きく波及しない。

### 3. ビーム輸送ダンプライン試験路の構築

#### 3.1 試験路に具備すべき要素と設計

試験路には、前述の 2 項のビーム性能試験の目的を検証可能とする機器装置の配置、設置が必要である。

まず、磁場性能をビーム蹴り角で再現するためには、磁場の水平分布をビーム蹴り角の水平分布で評価することが必要である。そのためには、キッカーに平行なビームを水平に掃引しなければならない。つまり、キッカーを設置する点より上流には、2 台の偏向電磁石が設置されていなければならない。BT-DL には幸いなことに BT からダンプ点へビームを振り分けるため、分岐点に振り分け偏向電磁石 (Fig. 1 中 BH32)、その後ダンプ点へビーム方向を振り戻す偏向電磁石 (Fig. 1 中 BH41) の既設の 2 台がある。いずれもバックレグに補正コイルが巻かれており偏向角 0.01 mrad の微細な調整が可能で、精密な平行ビームの掃引に使うことが出来る。更に分岐点の直上流 BT には 4 極電磁石のダブレットがあり、ビームサイズの調整が可能である。BH32 直下流には垂直ステアリングもありビーム垂直位置の調整も可能な、試験路とし

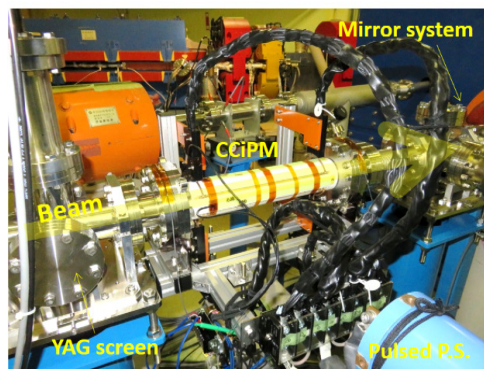


Figure 2: CCiPM set-up view in TL.



で大変恵まれた環境である。

ビーム蹴り角を正確に評価するためにはキッカー一点のビーム通過位置を知り、キッカーより下流でキッカーオンとオフのビーム位置の変化量を計測する必要がある。キッカーの蹴り角をビーム位置の変化として精度よく測定するためには、電源の最大励磁電流に応じた蹴り角に対して、キッカー一点と測定点の間の十分な距離とビームに同期した測定が可能な高い位置分解能の確保が必要である。キッカーのオンとオフの測定は同時には行えないため、その測定の間キッカー一点でのビーム位置が変化していないことを保証するため、キッカーから近い上流点で Linac からのビーム位置を常時監視するシステムも必要である。更に、キッカー一点でのビーム通過位置は、磁場分布点の位置となるためキッカー直上流にはキッカー下流でのビーム位置変化量測定の測定精度と同程度の測定システムが必要となる。

次に、セラミックス円筒内のコーティングのビーム暴露の結果を観察するためには、円筒内を必要に応じてのぞき込むようなシステムが必要であり、ビーム通過時の状態を監視するためにはビーム非破壊で円筒内を観察することも重要である。

### 3.2 試験路のシステム構築

TL を 2019 年 1 月に構築することを目標に、2018 年度より設計検討が開始された。Figure 1 内に TL のシステム配置を示す。BT-DL の最下流のダンプ点では既設のビームスクリーンモニター (2) ( Beam Screen Monitor:SCM(2)) を利用することが可能で、キッカー一点のビーム通過位置を知るための SCM(1) が新たにキッカー直上流キッカー一点から 367 mm に設置された。SCM はビーム掃引幅をカバーできるように 50 (W) × 30 (H) mm の大きさで、発光分解能の高い 0.1 mm 厚みの YAG プレートとビーム同期で撮像が可能な CMOS デジタルカメラで構成されている。CCiPM はダンプ点の SCM(2) から 3360 mm の距離のドリフトスペース (Fig. 1 中 QH1) に設置された。設置時のアライメントはローリング、ピッチング、ヨーイングをそれぞれ N3、精密水準器、レーザー墨出し器を用いて行い、10  $\mu$ rad、40  $\mu$ rad の精度で設置している。位置精度としてはレーザートラッカーを用い 30  $\mu$ m 以内で所定の位置に設置がなされた。BH32 からキッカー一点は 5 m 以上離れるので、1.5 mrad/A の偏向角で十分に幅広くキッカー内をビーム掃引出来る。Linac からのビーム位置を常時監視するビーム位置モニター (Beam Position Monitor:BPM) については、BH41 直上流に新たにストリップライン型のものが設置された。

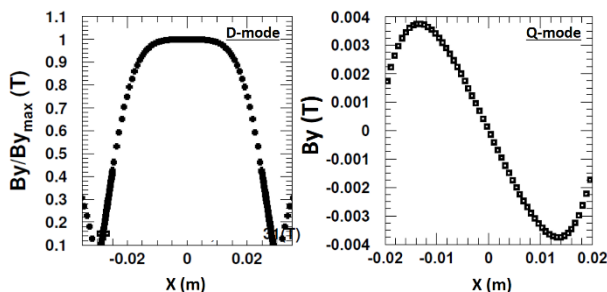


Figure 3: D-mode and Q-mode field distribution.

セラミックス円筒内を適時観察することが出来るビーム軸への出し入れが可能な駆動型内視鏡が CCiPM 下流側キッカー一点から 517 mm に導入された。これにより円筒内面のコーティングの状況がアナログビデオカメラで必要に応じて大気開放せずとも観察できる。

Figure 2 には実際に CCiPM の BT-DL への設置が完了した様子を写した写真を示す。CCiPM は外装に磁石コアを持たないため、一見セラミックスのダクトにしか見えない。簡潔な構造による空間有効利用の目的を十分に果たした結果となっている。

## 4. 磁場モードの形成とビーム試験

Table 1: Kicker Performance and Expectation

Item	Dipole mode	Quadrupole mode
Pulse width [ $\mu$ s]	3.2	6.4
Maximum curr. [A]	2669	1810
Maximum HV to CCiPM [kV]	6.9	9.2
Expected kick angle	1.69 mrad (x=0)	0.022 mrad/mm
Expected kick angle	$7.4 \times 10^{-4}$ mrad/A	$1.2 \times 10^{-5}$ mrad/mm/A

### 4.1 磁場モードの形成

CCiPM は空芯型コイルであり、電流導入の構造的特徴から電流導入口を機械的に接続替えが出来るため、CCiPM では電流の流す向きを変えることで任意の磁場モードを形成することが出来る。加速器実装モデルである 2 極型 D60-CCiPM では、4 本のコイルが水平面から 30 度の位置に対称に配置されており、コイル位置は磁石中心から 30 mm に配置されている。その向かい合う対となる 2 つでコイルを形成し、それぞれに同方向の電流を流せば、2 極磁場 (Dipole field) を生成することが出来る。これを D モードと呼ぶ。逆に、4 つのコイル全てに平行電流を流す場合、磁場中心からある水平範囲まで 4 極磁場 (Quadrupole field) が生成され、その範囲を超えると高次の非線形磁場が生成される磁場分布となる。これを Q モードと呼ぶ。Figure 3 に磁場計算ソフト MAFIA による磁場分布計算結果を示す。D モードの磁場分布は磁石中心磁場で規格化しており、Q モードの磁場分布は電流値 1000 A 励磁のものである。D60-CCiPM はコイル配置角度から D モードに最適化された磁場分布であるが、Q モードは磁場中心の磁場ゼロ領域に蓄積ビームを通過させ、磁場ピーク位置に入射ビームを合わせることで入射ビームを蓄積ビームに合流させる多極入射キッカーの一つ、パルス 4 極入射キッカーを模擬した磁場分布として見る事が出来る。

ビームテストの主要な目的である磁場分布のビームによる再現確認は、ビームを水平方向に掃引し Fig. 3 に示す磁場分布を再現することにある。D モードでは磁場の平坦度が 8% 変化する  $\pm 15$  mm の水平領域、Q モードでは磁場強度のピークがある  $\pm 13$  mm の水平領域を掃引する。Table 1 に、CCiPM で与えられる 2.5 GeV 電子ビームに対する蹴り角とパルス電源定格出力での最大蹴り角を示す。値には磁場測定による実効長が考慮されている。キッカーによるビーム位置の変化量の測定精度は YAG

スクリーンの分解能に強く依存する。YAG スクリーンの分解能は 1 ピクセル当たり 0.025 mrad/pixel で、D モードでの磁場分布の再現を見るには十分である。Q モードに対しては、磁場中心付近 1 mm 以下には感度がなく、1 mm 以上から測定が可能となる。

#### 4.2 ビーム試験方法と測定誤差

Linac からのビーム周波数は 1Hz とし、1 点の測定には 60 回のデータセットを取得し平均値を用いる。D モード、Q モードの磁場分布再現測定に加え、励磁電流に対応する蹴り角の励磁直線も測定している。蹴り角は SCM(2)におけるキッカーオン・オフ結果の差分を測定点とキッカー点との距離で割ることにより算出し、さらに励磁電流の出力安定度に起因する蹴り角の相違を考慮し、電流値で規格化する。キッカー点でのビーム位置は SCM(1)と SCM(2)の測定値から計算が可能である。

60 回毎の SCM のビーム位置の測定結果の r.m.s は Linac ビームジッターや計測システムの再現性などから来る測定誤差となる。CCiPM には、Fast-CT による励磁電流、熱電対により CCiPM セラミクス本体温度、磁場ピックアップコイルによる磁場強度の監視システムが整備されている。磁場ピックアップコイルはキッカー内を通過する際のビームノイズから励磁タイミングとの同期にも使用される。励磁電流はショットバイショットの電流安定度が誤差として、最終的に蹴り角に反映されるため重要な監視値となる。60 回毎の SCM によるビーム位置の測定誤差には同時に計測する電流値の r.m.s の誤差が蹴り角の誤差として反映される。偏向電磁石の直上流の BPM は Linac ビームの位置のジッターを監視し、SCM の測定と同時に測定結果の r.m.s はビーム位置の変化量の誤差として、キッカー点ビーム通過位置の磁場分布を再現する際の水平分布の誤差として利用される。磁場ピックアップコイルや熱電対は CCiPM の異常な発熱や放電を監視する役割も担う。

Linac からのビームプロファイルは、 $1\sigma$  ビームサイズの水平広がりに対して 0.5 mm で、水平位置のジッターは SCM、BPM の計測結果からそれぞれ  $\pm 150 \mu\text{m}$ 、エネルギージッターは 0.1~0.16%と判断している。

### 5. ビーム試験暫定結果

#### 5.1 励磁電流及び磁場波形

D モード試験における典型的な 1 Hz 低電圧充電時、10 Hz 高電圧充電時の励磁波形を Fig. 4 に示す。いずれの画像もオシロスコープで取得した励磁波形画像である。パルス電源はかつて KEK-PF リング入射部用入射キッカー電源として利用していたもので、サイクロンスイッチの共振充電+PFN 回路方式を採用している。過去の入射キッカーとの整合が取れた回路となっているが、CCiPM との接続時には特別な整合処置は取っていない。しかしながら、出力波形はピークの位置を基準にわずかな非対称性が見られるものの、比較的整形された正弦半波波形を出力出来ている。アンダーシュートはピーク値に対して 2.5%程度で電源との整合がよくとれている。Q モード試験では、配線が変り負荷インピーダンスが増加する為パルス幅の広がり Table 1 に示すようになるが、波形は D モードのものと相似性が保たれている。

CCiPM のセラミクス円筒天頂と側面には、ピックアップコイルを貼り付けており、印可電圧の挙動、電流値の校正・微分波形の監視をする。天頂部のピックアップコイル

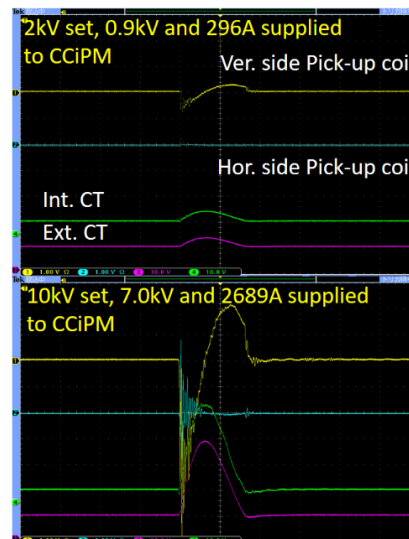


Figure 4: Pulsed current wave form of CCiPM.

は垂直方向の偏向磁場の計測を主とし、側面部のピックアップコイルは、上下対コイルの水平磁場を計測する。上下コイルが正しく配置され、上下コイルの磁場強度が完全一致していればここに磁場の発生は見られない。Figure 4 からは想定した磁場生成の結果が得られていると判断できる。

#### 5.2 ビーム位置変位の初観測

キックタイミングの粗調整が終了後、D モードの CCiPM を励磁電流 722 A、繰り返し 1 Hz のパルス励磁で得た初のビーム位置変位の観測結果を Fig. 5 に示す。SCM(2)で観測したビームプロファイルの輝度の最大点となる水平 x、垂直 y の位置をキッカーオン・オフのデータで 2 次元プロットしている。ビームプロファイルからは、キッカーオンによるビーム形状の特別な変化なく水平左方向にシフトしているのが分かり、2 次元プロットからは水平方向に 22.5 ピクセル、垂直方向に 0.3 ピクセルのシフトが観測された。このビーム位置変位量は SCM の分解能から、水平方向に 0.56 mrad、垂直方向に 7.5  $\mu\text{rad}$  の蹴り角に相当する。1.3%程度の水平垂直カップリングがあることが分かる。この原因ははっきりとしていないが、わずか 1 度未満の傾きであるため、CCiPM 自体の傾きと SCM カメラの傾きの合わせた系統誤差となっていると思

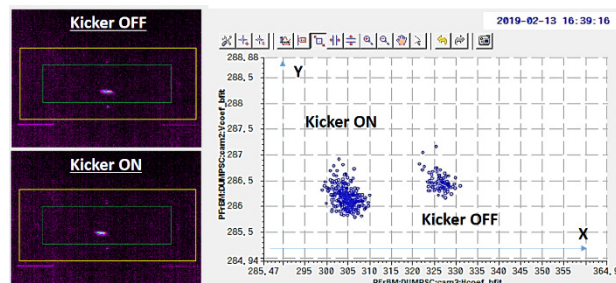


Figure 5: First observation of beam shift in D-mode.



われる。SCM の YAG プレート の設置時の傾きの誤差は無視できない。今後、キッカーオフの状態 でビームを水平掃引するなどの誤差の切り分けの追求を行う予定である。蹴り角をこの時の電流値で規格化すると、 $7.7 \times 10^{-4}$  mrad/A となり、当初、磁場測定から評価されている期待値 (Table 1) と 4% 程度で一致することが分かる。相違の元となる誤差には、この時点でのキックタイミングの粗調整からくるものが主に含まれていると考えている。

### 5.3 ビーム性能試験暫定結果

ビーム性能試験の結果の一例として、D モード試験における励磁直線の検証結果を示す。Figure 6, 7 はそれぞれ水平、垂直方向の計測された蹴り角を励磁電流を横軸にプロットしたものである。誤差は 4.2 節で前述したものを反映している。図中青色の直線は、1 次関数でフィットした結果を示している。水平方向の蹴り角では、誤差の範囲でばらつきはあるが直線性の高い結果を得ることが出来た。最尤推定値と見られる傾きは  $6.8 \times 10^{-4}$  mrad/A となり、期待値 (Table 1) と -7.9% の相違である。誤差を  $\pm 5.3\%$  有していることから  $1.5\sigma$  以内で合致し、概ね良好な結果が得られた。垂直方向の蹴り角では、低電流領域では、蹴り角が SCM の分解能の中に埋もれ誤差の範囲で平坦に見えるが、最尤推定値の傾きは、 $1.2 \times 10^{-5}$  mrad/A となり誤差は  $\pm 2.4 \times 10^{-6}$  mrad/A であるので

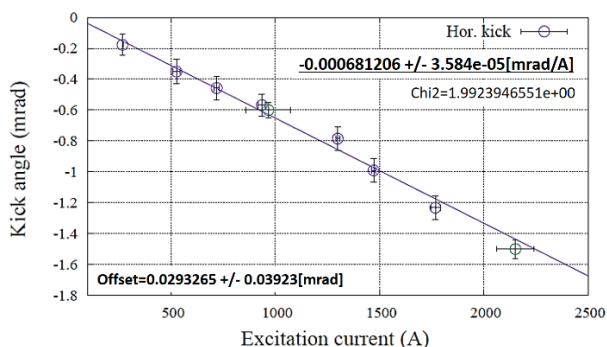


Figure 6: Horizontal kick angle for current excitation.

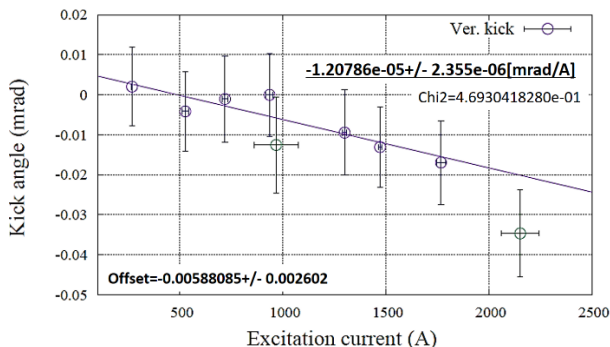


Figure 7: Vertical kick angle for current excitation.

有意な値である。この蹴り角は水平の蹴り角に対して、1.8% となっており、5.2 節で触れた初観測でのカップリング値ともほぼ合致する。

### 5.4 CCIpM の試験時及び試験後の状況

CCIpM の真空状況は試験前後、期間を含め、 $1.7 \times$

$10^{-6}$  Pa の状態を維持し、ビーム暴露されることによる異常なデガスまた、真空悪化も生じることはなかった。10 Hz での励磁試験では、CCIpM に投入された電力は 1 kW であったが室温 24°C に対し、セラミック本体の温度上昇は 25°C で飽和し、試験期間他を含め異常な発熱は観測されていない。内面コーティングについて試験前後、その後のユーザー運転後 (おおよそ 1 ヶ月超の運転) に内視鏡による状態の確認を行った。Figure 8 に撮影した画像を示す。画像は鮮明ではないが、コーティングの焼損、剥離などは起きていないと判断できる。

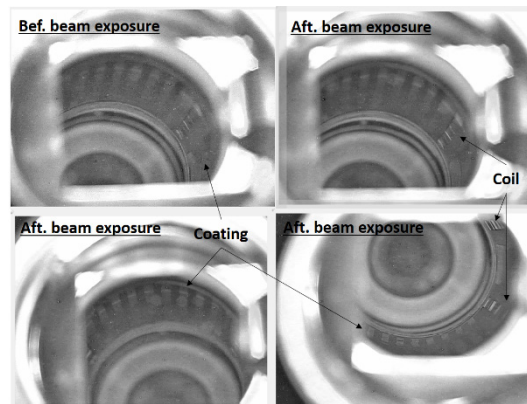


Figure 8: Coating condition after long operation.

## 6. 今後の計画

TL を整備し多角的にビーム性能を検証できるシステムが構築されたことで、CCIpM の加速器実装に向けた開発は大きく進展した。加速器実装モデルの D60-CCIpM のビーム性能試験では、誤差を低減した試験を進め最終的な性能評価をまとめていく予定である。また同時に、将来光源加速器への実装を見据えた PF リングでのビーム性能試験の準備が進んでおり、1 年以内にリングへの導入を図り、より高精度に高度な性能評価を実施していく予定である。その後の TL は、引き続き、超小口径モデル D30-CCIpM の評価システムとして活用が進められる。

## 参考文献

- [1] C. Mitsuda *et al.*, Proceedings of the 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tsuruga, Japan, Aug. 5-7, 2015, pp660.
- [2] [http://www2.kek.jp/imss/notice/assets/2017/05/22/KEKLS\\_CDR\\_170522.pdf](http://www2.kek.jp/imss/notice/assets/2017/05/22/KEKLS_CDR_170522.pdf)
- [3] M. Borland, "Progress Toward an Ultimate Storage Ring Light Source", J. Phys. Conf. Ser. 425 (2013) 042016.
- [4] H. Takaki *et al.*, Phys. Rev. ST Accel. Beams 13, 020705 (2010).
- [5] T. Atkinson *et al.* "Development of Non-Linear Kicker System to Facilitate a New Injection Scheme for the BESSY II Storage Ring", Proceedings of IPAC2011, San Sebastian, 2011, p. 3394.
- [6] S.C. Leeman *et al.* "Pulsed Multipole Injection for the MAX IV Storage Rings", Proceedings of PAC2011, New York, 2011, p. 2522.
- [7] C. Mitsuda *et al.*, Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagaoka, Japan, Aug. 7-10, 2018, pp1018.