

# KEK-PF リングトップアップビーム入射用パルス六極電磁石のための渦電流抑制セラミックダクトの新たな導入

## NEW INSTALLATION OF EDDY-CURRENT SUPPRESSED CERAMICS DUCT TO THE PULSED SEXTUPOLE MAGNET FOR TOP-UP BEAM INJECTION IN KEK-PF RING

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

<sup>A)</sup> High Energy Research Organization (KEK), 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801, Japan

<sup>B)</sup> The Graduate University for Advanced Studies (SOKENDAI), 240-0193, Hayama, Japan

<sup>C)</sup> KYOCERA Co. Ltd., Higashiomi-city, Shiga 529-5195, Japan

### Abstract

In KEK-PF ring, the top-up injection had been operated by using pulsed sextupole magnet for the first time in the world. This new injection scheme was introduced to UVSOR and AichiSR in Japan, and was developed to the injection scheme by the non-linear kicker in the world. However, the use of pulsed sextupole magnet (PSM) is not continued in KEK-PF ring now because the eddy current field which caused horizontally large stored-beam oscillation was found in the center of magnet. We developed the new ceramics duct with new pattern coating to suppress the eddy current field generated on the coating of ceramics duct. The pattern shape is optimized from a point of view of the suppression of eddy current field and the reduction of the resistive wall impedance. The pattern coating technology of FLiP, which is developed for CCIpM [1], is modified for the sextupole magnet's duct newly. The details of historical background and development process will be shown in this proceedings.

### 1. はじめに

KEK-PF では、放射光源加速器において放射光の安定供給のために必要不可欠となった Top-Up 運転の新たな入射技術の開発を不断に進めてきている。世界に先駆けて開発を行った六極パルス電磁石入射による蓄積ビームの無摂動入射技術は、国内放射光施設においては UVSOR[2]、あいち SR[3]において試験導入され、世界では非線形磁場キッカーによる多極パルス電磁石無摂動入射技術[4]へと昇華されて、極低エミッタンスを目指す次世代放射光源加速器における有力な次世代 Top-Up 入射技術の候補の一つとなっている。

多極パルス電磁石を使った入射技術は、従来のバン

プ軌道生成による入射技術と異なり、蓄積ビーム軌道を入射ビーム軌道へ寄せる軌道変更を必要としないため、蓄積ビーム軌道の錯乱がなく入射を行うことが出来る。別の表現によれば、光源側からは蓄積ビーム軌道は「無摂動」な状態を維持し、ユーザーから見れば Top-Up 入射中も放射光軸が安定しているため、Top-Up 入射が行われていることを感じない「透明」な入射となる。また、加速器技術としては、バンブ軌道の精密な閉軌道化、入射用電磁石が 1 台で済まされ直線部を占有しない入射部の省スペース化や、狭小ダイナミックアパーチャーへの入射ビームの容易な合流など波及的な効果が多く望まれる (Fig. 1)。

### 2. PF リングにおける PSM 運用実績と課題

KEK-PF における多極パルス電磁石入射技術の開発は、歴史を遡れば 2005 年に KEK PF-AR においてパルス四極電磁石による 3GeV ビームエネルギーでのビーム入射実証試験の成功を皮切りとし[5]、蓄積ビーム軌道となる磁石中心におけるゼロ近似磁場領域のより広いパルス六極電磁石の入射利用を進める開発を 2006 年に開始した。同様の理由で、世界的な多極パルス電磁石入射技術では、八極以上のより高次のパルス電磁石の利用が進められていることから、KEK-PF の開発はその先鞭をつけたものである。2008 年には世界で初めてパルス六極電磁石による Top-Up 入射の実証が行われ[6]、2010 年から 2014 年まで東北大震災の中断を挟みながら、長期に渡り本格的にユーザー運転へ適用された。その後 2014 年にパルス六極電磁石システムは、電源と電

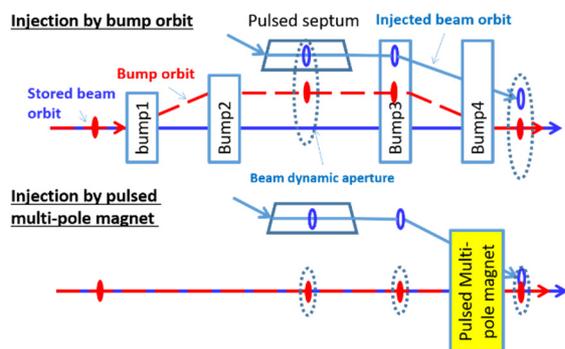


Figure 1: Comparison of injection scheme.

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

磁石のいずれも運転上の課題を解決するためにアップグレードされた。2014年以前のシステムをPSM1、それ以降のシステムをPSM2と呼ぶ。PSM1では、ボア形状は真円の丸型となっていたが、入射ビームが通過する磁石オフセンターでの蹴り角を増加させるために、ギャップを狭小化させ、水平方向の物理口径を確保するための横広がり角型へと変更した(Fig. 2)。それまで電源はリサイクルされた電源を用いていたため、出力電流幅が $2.4\mu\text{s}$ と2ターン分のビーム周回時間( $625\text{ns/turn}$ )よりも大きくなっていましたが、 $1.2\mu\text{s}$ に高速化された。また、磁場強度の増強を図るために定格電圧の増強( $33\text{kV}\rightarrow 35\text{kV}$ )も図られた。

しかしながらこの新たなPSM2システムは2014年に導入後、蓄積ビームの水平振動を大きく誘起し、入射効率を悪化させる結果となったため運用を中止している。本研究は、このPSM2システムの抱える課題解決を目指すものである。

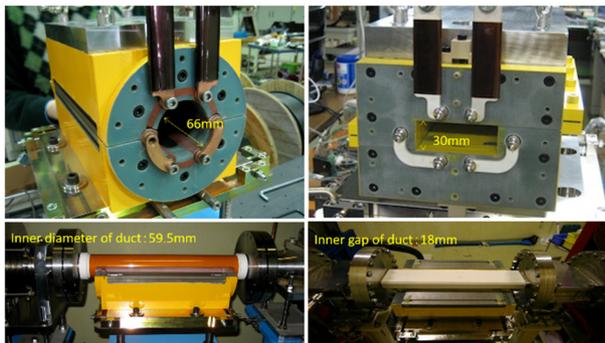


Figure 2: The magnets and ceramics ducts of PSM1 and PSM2 respectively.

### 3. 高度化 PSM2 システムの問題点

#### 3.1 磁石中心における不整磁場の存在

六極電磁石の磁場分布はパラボリックな2次曲線となるため、磁石中心の磁場中心では磁場がゼロとなる点とゼロ近似領域が存在する。この磁場中心点を蓄積ビーム軌道と合わせれば蓄積ビームには磁場の影響を与えずに、2次曲線磁場上の軌道にある入射ビームにのみ磁場を作用させ入射ビームを蓄積ビームに合流させることが可能である。しかしながら、この原理に反し磁場中心に置かれた蓄積ビーム軌道上のビームが水平に振動していたことが運用から見て来た大きな課題である。

この振動はPSM1運用期間中においてもすでに僅かながら観測されていたが、パルス四極電磁石による入射と比較し、四極磁場がないことによるビームの「瞬き」や「傾き」が改善され、多極化の効果を十分に示すものであった。しかしながら、PSM2システムでは、振動はより顕著なものとなり、実証機として使用した真円型ボア形状のPSM1の9倍の振動振幅を生成する結果となった。Table 1にその磁石緒元の比較、入射時水平振動の最大振幅、磁石中心におけるセラミックスダクトがある状態でのパルス磁場計測の結果を示す。磁石長はいずれも300mmである。PSM1、PSM2のそれぞれのビーム試験

時の励磁電流3000A、2500Aによる残留積分磁場を示している。15mmの2.5GeV入射ビームに12mTmの積分磁場が与えられる励磁電流となっている。励磁電流が異なるのはギャップ狭小化により磁場強度が増強されているため、電磁石のギャップ形状と寸法が異なる以外の電磁石の緒元に相違はない。

Table 1: The Horizontal Oscillation Amplitude at Injection for PSM1 and PSM2 with their Specification

Specification/Magnet	PSM1	PSM2
Bore/gap [mm]	66	30
Inner dia. of duct [mm]	59.5	18
Coating thickness of inside of duct [ $\mu\text{m}$ ]	5	
Thickness of lamination steel [mm]	0.15	
Maximum oscillation amplitude [mm]	$\pm 0.57$	$\pm 5$
Residual field at center of magnet [mTm]	0.44	4.2

角型ボア形状は水平方向のアーチャーを確保しつつ、ギャップを狭小化し磁場強度を増強するために採用されており、垂直方向のギャップ寸法は真円型ボア形状から1/3.3まで縮小している。振動振幅の増大の理由を単純に考えた場合、ギャップ寸法の縮小率の2乗が蓄積ビームの振動振幅の増大をもたらしていると説明できる。このことからギャップ寸法の縮小に伴い蓄積ビーム軌道に近づいた不整磁場の存在が予想できる。実際に、2014年のPFリングへのインストール前のPSM2磁場計測のデータを変更して見直した結果、また、PSM2の課題の発覚を受け、PSM1の磁場分布を今回あらためて調査・解析した結果、磁場中心に存在するはずのない主磁場とは逆向きの、かつ主磁場に対して遅延のあるようなパルス磁場がPSM1とPSM2のいずれにも存在することが分かった。これらを総合的に解釈すると、PSM2に生じた不可解な事象は、ギャップ狭小化による、磁石中心の不整磁場の増加によるものと説明できる。

#### 3.2 不整磁場の正体とその生成

この不整磁場の正体は、磁石中心における磁場測定の実験データ解析から理解できる。Figure 3はPSM2電磁石にセラミックスダクトを挿入した状態でギャップ内の中間平面を水平軸に沿って磁場測定をした際のオシロスコープで得られた磁場波形である。磁石中心から遠く外れたオフセンターにおいては励磁電流波形と同等の磁場波形が見られているが、磁石中心に向かうに従い、徐々に、振幅が減衰し、そのまま磁場強度がゼロにならずに、正弦波に近い波形が現れる。図中には、入射ビームをキックするタイミングを赤矢印で示し

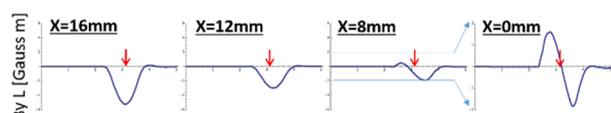


Figure 3: The field shape of each position in magnet gap along horizontal axis with ceramics duct.

ている。Figure 4 は、セラミックスダクトが磁石ギャップに挿入されていない状態と挿入された状態での、磁石中心から 16mm 離れたオフセンターでの磁場波形を示している。セラミックスダクトの挿入があることで、磁場が減衰し、さらに磁場波形が遅延していることが理解できる。

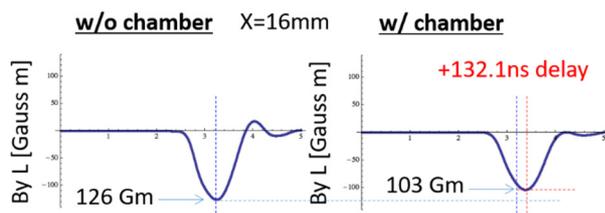


Figure 4: Eddy current effect in main field.

Figure 3 から分かる正弦半波波形の主磁場に対する正弦波波形の不整磁場の形状と、Fig. 4 から得られた主磁場に対するセラミックスダクトにより生じた遅延は、渦電流により生成された磁場の典型的な結果である。磁石中心では、主磁場である六極磁場が存在しないためより顕著に渦電流による磁場が見えており、オフセンターでは、その六極磁場との混在した領域から六極磁場が主となる領域へ遷移していく様子が見てわかる。渦電流による主磁場を妨げる逆磁場は、主磁場の遅延と減衰をもたらす。これは、入射ビームの蹴り角の目減りへと影響する。

Figure 3 で示されている入射ビームをキックするタイミングの矢印は、磁石中心にある蓄積ビームがシングルバンチである場合には、丁度、正弦波波形の節に合致する為、渦電流による磁場の影響を受けにくい。マルチバンチフィルにおいては、この波形上のあらゆるタイミングに蓄積ビームが存在することになるため、Top-Up 入射時には蓄積ビームが水平に振動させられることになる。つまり、この正弦波波形の振幅の最大値が、Table 1 に

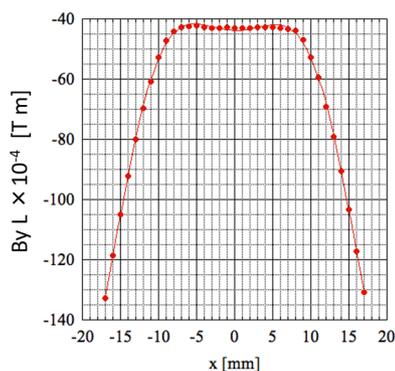


Figure 5: Integrated field distribution for horizontal axis with ceramics duct.

おける積分磁場強度の根拠となる磁場となっており、実際に磁石ボア径内の  $\pm 8\text{mm}$  の領域に幅広く均一に分布する (Fig. 5)。この結果はビーム試験運転時の励磁電流で行った磁場測定で取得している。この渦電流による磁場で想定されるビーム水平振動振幅は  $\pm 6.7\text{mm}$  であり、シングルバンチを使った入射試験での蓄積ビームの磁場上のタイミングが Fig. 3 の節に近いところにあると判断すると、実際の  $\pm 5\text{mm}$  のビーム水平振動の結果と計算上ほぼ合致する。ちなみに、別に注目すべき点として、

セラミックスダクトを挿入していない場合の磁場計測においても正弦波波形の渦電流による磁場波形が磁石中心で見られていることである。磁石中心での渦電流による磁場の強度は、セラミックスダクトが挿入されている場合と挿入されていない場合で、正弦波波形の振幅で比較すると、およそ 1:9 の比率となっている (Fig. 6)。このことは、セラミックスダクトで生成される渦電流による磁場が不整磁場の 90% を占め、残すところ 10% は、電磁石コアの積層ケイ素鋼板または磁石コイルで生成される渦電流による磁場と推察される。セラミックスダクトで渦電流を生成している要素は、内面のメタルコーティングと判断できる。

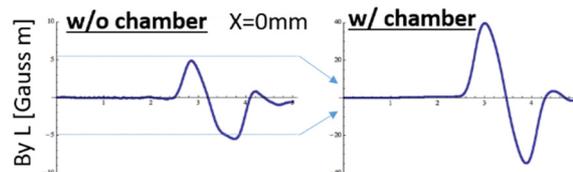


Figure 6: Observed eddy current effect by magnet.

PSM1 電磁石では、渦電流による不整磁場の効果を考慮することはなかったが、順調にビーム運転がなされた。これは、大変幸運なことに磁石ギャップが垂直方向に大きく開いていたため、ビームから見ると渦電流による磁場がセラミックスダクト内表面や電磁石コアで生成されても遠い距離にあり、PSM2 の渦電流の磁場強度の 1/10 程度に収まっていたからであった。この詳細な考察として、PSM1 の電磁石磁場測定による渦電流生成の評価については、別に、本学会で総研大 魯氏により「KEK-PF におけるパルス六極電磁石の精密磁場測定による渦電流効果の評価」(WEPP45) で報告がされるのでそちらを参考にされたい。

#### 4. PSM2 渦電流磁場の低減策の開発

磁場の透過性を確保するために使用する真空ダクトのセラミックスダクトにはビーム壁電流の導電性を確保し、渦電流を極力抑制するために  $3\sim 5\mu\text{m}$  の薄膜の Ti コーティングを実装させている。この厚みは、六極電磁石をパルス励磁するそのパルス幅で想定される表皮厚み  $411\mu\text{m}$  よりも十分に薄いため、渦電流の生成が抑制される。ただし、体積抵抗は壁電流に対しては大きくなっていて、渦電流生成の抑制を重視したコーティング厚みが適用されている。

磁場測定の結果とビーム試験の結果を合わせれば、この薄膜コーティングが主磁場を 8 割程度まで減衰させる無視できない強度の渦電流による磁場を引き起こしており、蓄積ビームを振動させている原因である。コーティング面がギャップの狭小化でビームに近接し、渦電流による磁場の効果を強くしたと考えられる。この角型ボア形状は KEK-PF の成功を受けてパルス六極電磁石入射技術を採用した UVSOR、あいち SR においてもほぼ同寸法で採用されており、いずれの施設でも本来、振動を有するはずのない蓄積ビームの振動を観測するに至って [7]、渦電流効果の抑制が多極パルス電磁石入射技術の確立に重要な課題であるとの認識で一致している。

この課題の原因を明らかにするために、2019 年度より

角型ボア形状のパルス六極電磁石のビームベースドによる渦電流効果の解明、PSM1 の詳細な磁場測定解析を開始し、不整磁場の主要因であるセラミックスダクトのコーティング起源による渦電流の生成を抑制するため、新たなコーティングの開発を進めた。見積もりによると、内面コーティングの改善が図られれば 90%以上の渦電流の抑制が可能である。全面コーティングに代わる、渦電流の抑制とビーム壁電流の通過性を同時に満足するような新たなコーティングの実装技術が必要である。

KEK-PF では、八極以上の高次な多極パルス入射技術の開発を目指し空芯型の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[8]を並行して進めており、この開発では、磁極がセラミックスダクトに埋め込まれている構造的な制約と一早く渦電流効果の弊害を認識した内面コーティング形状の改善の必要性から、新たなセラミックスダクト内面コーティング技術の開発が進められて来た。ここで開発された技術は FLiP (Fine Line pattern coating Process) と名付けられ、CCiPM 開発の基幹技術の一つとなっている。FLiP は  $\phi$  30mm 円筒内径の超小口径セラミックス内面にも長手方向に渦電流ループを阻害するスリット形状とビーム壁電流を通過させる容量性能の形状を同時に満たす櫛歯型の微細な形状のコーティングの実装可能とする。この技術の応用を 18mm ギャップの角型ボア形状のパルス六極電磁石のセラミックスダクトに展開させたことが本開発の重要な起点である。

## 5. ダクト内面コーティング形状の最適化

### 5.1 渦電流抑制のための最適化

櫛歯形状の最適化には、以下の形状寸法に変更のノブがある。1. 隣り合う櫛歯の間隔、2. 櫛歯の幅、3. 櫛歯が向かい合う突端での間隔である。渦電流抑制の要請からは、櫛歯型コーティングの櫛歯幅は渦電流を生成するような大面積とならないようにある太さよりも細くするような境界条件があり、櫛歯間の隙間は、パルス励磁電流の周波数からはカップリングすることはないため、mm 単位のレベルで隙間があれば渦電流の大ループが出来ない絶縁が確保される。ただし、渦電流の生成は、微視的な描像からそれらが統合的に巨視的な描像へと遷移するため、巨視的な現象を抑制しても微視的な現象が残存しているため生成メカニズムの考察には注意が必要である。これらの観点から、櫛歯型コーティング形状の最適化が行われた。この最適化やその議論の詳細については、別に、本学会で KEK 高木氏により「パルス六極で発生する渦電流の影響を抑えるセラミックダクトのコーティングパターンについての評価」(WEPP46) で報告がされるのでそちらを参考にされたい。

有限積分法シミュレーションコード Elfmagic による最適化の結果、櫛歯幅は 10mm 以下に抑えることが要請されている。この条件以下の櫛歯幅の構造では、シミュレーションの結果を踏まえると渦電流による主磁場の損失は 0.1%以下まで低減されている。つまり、渦電流による磁場の生成は 99.9%以上低減できる。

### 5.2 ビームインピーダンス低減のための最適化

渦電流抑制の観点から要請されるパラメーターは上限

値であり、ビーム壁電流の導電性を向上するためのパラメーターは下限値となることは容易に想像がつく。つまり、Beam coupling impedance (ビームインピーダンス) を低く抑えるためには、内面コーティングの面覆率を高くする必要のあることを意味する。しかしながら、面覆率 100%となる均一コーティングは渦電流効果の抑制の観点から望ましい実装ではないため、櫛歯構造による面覆率の低下を、容量性構造の結合を使いインピーダンスを改善し補完できるかが最適化の課題である。

ビームインピーダンスの増加はセラミックスダクトの発熱に直接につながる。セラミックスダクトは電磁石とのクリアランス 0.5mm で電磁石に覆われているため、セラミックダクトで発生した熱は、こもりやすい。その発熱が電磁石の積層ケイ素鋼板の絶縁接着剤の耐熱温度 120°C を越えた場合、縫いボルトで固結されている電磁石が崩壊することはないが、ケイ素鋼板間の絶縁が取れ大きな渦電流生成要素となるため、問題となる。また、ビームインピーダンスの増加はビーム不安定性を誘起する加速器運転上の不安材料でもある。そのため、ビームインピーダンスは出来る限り低く与えるよう最適化を進めた。その境界条件を、放熱条件も考慮し、発熱条件を自然空冷下で 70W 以下、強制空冷下で 120W 以下であるとした。

パワーロスは、蓄積リングに蓄積されるビームの蓄積電流値とバンチ電荷そしてロスファクターの積で、決定される。最適化においては、PF リングでの標準的なバンチ長 (自然長  $1\sigma = 10\text{mm}$ 、ガウシアン分布を仮定) として、シミュレーションコードでロスファクターを計算し、PF リングで運用されている 250 バンチマルチフィリング (MB)、130 バンチマルチフィル 400mA と 50mA シングルバンチのハイブリッドフィリング (HB) 2 つのフィリングモードに対して、トータル 450mA の蓄積電流値となるよう発熱の総和を算出した。シミュレーションに使われたコードは有限差分法の GdfidL である。

ビームインピーダンスの観点から最適化された、櫛歯幅は、4mm 以下、櫛歯間の距離は 1mm 以下である。シミュレーション上では決定したこの基本パラメーターで規則的には対称に上下面に櫛歯を配置し、ロスファクターを計算している。実際のコーティングでは、上下面の櫛歯は、櫛歯が伸びる方向を上下面で逆にし、非対称に対面するようにしている。角型のセラミックスダクトの中心をビームが通過するため、ダクト側面のコーティング形状の影響はビームから遠く無視できるとシミュレーション上判断しているが、実際のコーティングでは、側面にも櫛歯構造が適用されており、左右で非対称に対面させ、かつ上下流いづれかを非対称に絶縁させ、ダクト側面のコーティングが垂直方向の主磁場に対して大きな環とならないように工夫された。全面コーティングに対するコーティングの面覆率は 95%を越えている。

このコーティング形状を PF リングのユーザー運転に適用した場合、MB と HB のフィリングモードによるそれぞれの発熱量は、15W、67W とそれぞれ見積もられる。実際の HB 運転では、不安定性の抑制のためマルチフィリング部が 420mA、シングルバンチ電流値が 30mA で運転されること、放熱効果及び強制空冷を考慮すると運転上の裕度があると判断できる。尚、シミュレーションの見積もりを形状の最適化に特化し単純化するため、シミュレー

ションではコーティングは完全導体  $500\mu\text{m}$  としており、コーティング材の抵抗値による発熱はこれに考慮されていない。今後ビーム試験を通じてビームインピーダンスに対する櫛歯構造の有用性について詳細な検証がなされる。

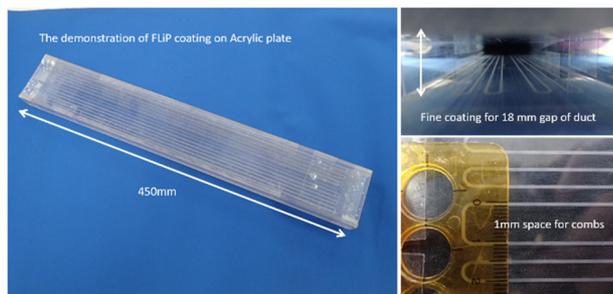


Figure 7: Coating test by using Acryl plate.

## 6. 櫛歯型パターンコーティングの実装

CCiPM 開発における FLiP コーティングでは、 $\phi 30\text{mm}$  の円筒内面に櫛歯幅 2.5mm、櫛歯間隔 3mm でのコーティングの実績があるが、PSM2 角型ダクトのギャップ 18mm の狭小スペースへの 1mm 以下の櫛歯間隔での実装は、当初、実装が困難と見られていた。そこで、インピーダンスの観点から要請される各パラメーターの許容最大値の実装の実現を目指すこととし、試作試験を行った。櫛歯間隔を狭めることを優先とし、1mm を目指すが、櫛歯幅は 4mm より狭めない。

Figure 7 に実装テストを行った結果を示す。FLiP コーティングプロセスと同じプロセスを経て試験を行っている。技術的な困難さを克服し、精密パターンコーティングに手ごたえを感じる結果となった。この試験実証の結果を受け、セラミックスダクトへの実装を行った。2019 年度に製作を開始した新ダクトは今春に製作と  $5\mu\text{m}$  厚みの Ti コーティングの FLiP 実装が無事に完了した (Fig. 8)。微細形状の実装の難しさから一部コーティングに剥離などの損傷はあるが 95%以上の面覆率に対して 0.3%以下であり問題はない。1mm 櫛歯間隔のクリアラインが描かれており、概、デザイン通りの形状の実装に成功した。

実装上で重要となるのは櫛歯間の導通の有無である。コーティング材の染み出しや、残渣がある場合、櫛歯間で導通を起し、渦電流抑制効果を失わせる結果となる。当初、得られた絶縁抵抗測定の結果では、 $0.3\Omega$  程度の抵抗値があり、導通が確認された。実際にも目視で確認できるレベルの導通点があり、これらを修正して、既定の洗浄レシピにより洗浄を行い、最終的には櫛歯間の絶縁抵抗は  $2.5 \times 10^{10}\text{M}\Omega$  以上を達成している。

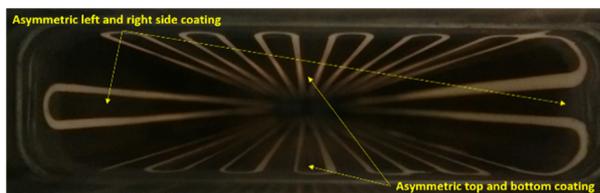


Figure 8: Comb pattern coating for PSM2 ceramics duct by using FLiP technology.

PF リング設置のための  $160^\circ\text{C}$  ベーキングが連続 4 日間行われ、到達真空度は、 $5 \times 10^{-8}\text{Pa}$  であった。真空リークレートも  $2 \times 10^{-11}\text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{sec}$  以下である。2020 年度 10 月からのユーザー運転適用を目指し、この夏に設置が完了する。今後、ユーザー運転にて、ビームベースドによる旧セラミックスダクトの調査の結果と本開発による蓄積ビーム振動の改善結果が比較され FLiP 技術による櫛歯コーティングの渦電流抑制の有効性について実証試験が進められる予定である。

## 参考文献

- [1] C. Mitsuda *et al.*, “ACCELERATOR IMPLEMENTING DEVELOPMENT OF CERAMICS DUCT WITH INTEGRATED PULSED MAGNET FOR BEAM TET”, Proceedings of IPAC2019, Melbourne, Australia, p. 4164 (2019).
- [2] Y. Hida *et al.*, “STUDY OF PULSED SEXTUPOLE MAGNET SYSTEM FOR BEAM INJECTION AT UVSOR”, Proceedings of the 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Osaka, Japan, Aug. 8-11, 2012, p. 546.
- [3] K. Ito *et al.*, “Development of Pulsed Multipole Magnet for Aichi SR Storage Ring”, Proceedings of IPAC’15, Richmond, USA, p. 1616(2015).
- [4] T. Atkinson, *et al.*, “DEVELOPMENT OF A NONLINEAR KICKER SYSTEM TO FACILITATE A NEW INJECTION SCHEME FOR THE BESSY II STORAGE RING”, in Proceedings of IPAC2011, San Sebastian, 2011, p. 3394.
- [5] Y. Kobayashi *et al.*, in Proceedings of the 10th European Particle Accelerator Conference, EPAC06, Edinburgh, Scotland, p. 3526(2006).
- [6] H. Takaki *et al.*, Phys. Rev. ST Accele. Beams 13, 020705 (2010).
- [7] A. Mochihashi *et al.*, “Perturbation to the stored beam by pulsed sextupole magnet”, Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sapporo, Japan, Aug. 1-3, 2017, p. 236.
- [8] C. Mitsuda *et al.*, “BEAM PERFORMANCE TEST OF CERAMICS DUCT WITH INTEGRATED PULSED MAGNET IN BEAM TRANSPORT-DUMP LINEE FOR KEK-PF-RING”, Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Kyoto, Japan, Jul. 31-Aug. 3, 2019, p. 376.