

セラミックスチェンバー一体型パルスマグネットの加速器実装開発

DEVELOPMENT OF THE CERAMICS CHAMBER INTEGRATED PULSED MAGNET FOR AN ACCELERATOR IMPLEMENTATION

満田史織^{#, A)}, 佐々木茂樹^{B)}, 本井傳晃^{C)}, 鍛冶本和幸^{C)}, 中西辰郎^{C)},
笹川敦司^{D)}, 横山篤志^{D)}, 横山高也^{D)}, 富本寛一^{D)}

Chikaori Mitsuda^{#, A)}, Shigeki Sasaki^{B)}, Teruo Honiden^{C)}, Kazuyuki Kajimoto^{C)}, Tatsuro Nakanishi^{C)},
Atsushi Sasagawa^{D)}, Atsushi Yokoyama^{D)}, Takaya Yokoyama^{D)}, Kakuichi Tomimoto^{D)}

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

^{B)} Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI), 1-1-1 Kouto, Sayo, Hyogo 679-5198, Japan

^{C)} SPring-8 Service Co. Ltd. (SES), Shingu, Tatsuno, Hyogo 679-5165, Japan

^{D)} KYOCERA Co. Ltd., Higashiomi-city, Shiga 529-5195, Japan

Abstract

We are proceeding the development of air-core type Ceramics Chamber Integrated Pulsed Magnet (CCIPM) aiming at the application to future light source accelerator on low emittance ring with a narrow bore and a short circumference ring. The dipole-type CCIPM is composed of ceramics cylinder and four copper coils which are implanted into the ditch penetrated on the cylinder body along length 30 cm by silver brazing. In addition to this structure, we succeeded in the implementations of the cable clasps that mechanically connect the coils and power supply with feeder lines and the precise pattern shape coating inside the ceramic cylinder. Improved brazing technique made it possible to braze the coil implantation and the base metal grafting on the coils at the same time. And newly developed pattern coating can coat the inside surface avoiding the coil parts, reduce the eddy current caused by main magnetic field, and passes the beam wall current by capacitance structure. We report the details about the approach to new technical development and an evaluation of the reliability from the viewpoint of vacuum, magnetic field, insulation performance on the accelerator implementation.

1. はじめに

セラミックスチェンバー一体型パルスマグネット (Ceramics Chamber Integrated Pulsed Magnet: CCIPM) は将来光源加速器におけるパルス電磁石のいくつかの課題を同時に克服する新たな手段として開発が継続されている[1]。将来放射光源加速器では、電子ビームエネルギーが 3 GeV 程度の中規模に抑えられた周長の短い小型加速器で、かつ低エミッタンスを目指す高度化が主流になると考えられている[2]。同時に、放射光加速器技術は、科学技術先進国のみならず世界各国で産業科学の進歩に不可欠な基幹科学技術としてとらえられており、今後ますますの世界的な普及と発展がみられると考えられる[3]。その上で、加速器を構成する装置には、高機能でありながらも標準化され低コストで汎用性のあるものが求められている。加速器構成装置であるパルス電磁石についても同様である。

CCIPM は磁石コイルとセラミックスがセラミックス長手方向にコイルが埋め込まれることで一体化した空芯型パルス電磁石である。磁極間距離となるボア径はセラミックス口径とともに狭小化が可能で、狭小化とともにパルス高速度性能と中心磁場強度増強を同時に実現する。これにより、空芯型でも中規模加速エネルギーで必要とされる磁場強度を比較的容易に実現でき、低エミッタンスリングのボア径狭小化とビーム周回時間が短い短周長小型リングで必要な高速性のいずれにも対応が可能である。

さらに、簡潔な構造的特徴は、パルス電磁石の低コスト化とパルス磁石利用の汎用化、小型リングに挿入の際の省スペース化を実現する。これらの特性は前述の次世代放射光源加速器で求められる高度化と汎用化の両側面の要求に応えられる可能性がある。高度化においては、CCIPM が低エミッタンスリング特有の狭小なダイナミックアパーチャーへの多極入射スキーム[4]の導入や、従来型バンブ式入射スキームの改善[5-6]、高度な Turn-by-Turn・Bunch-by-Bunch ビーム制御などへの適用を想定している。汎用化では、パルス電磁石の新たな標準型として普及を目指している。

これらの目的の下、2012 年からのこれまでの開発でセラミックスへの長手方向コイル埋め込みの基幹技術開発は完了し、加速器実装に向けた具備すべき技術要素の開発に取り組んできている。それらはコイルと電源を接続するための口金構造の構築と、埋め込むことでセラミックス円筒内表面に露出したコイルを避けたビーム壁電流通過のためのパターンコーティングの実装である。本論文では、加速器実装課題であった、口金構造の構築とパターンコーティング実装の課題解決へ向けた技術開発、全ての実装を終えた 2 極型開発機の加速器運用上の信頼性の評価について報告をする。

2. CCIPM の基本構造と実装上の課題

Figure 1 に CCIPM の基本構造としての磁石断面構造を示す。2 極型となる開発機では電極となるコイル 4 本が、ビームダクトである円筒セラミックスのビーム中心位置から角度 30 度の位置に配置されている。配置角度はビー

[#] chikaori.mitsuda@kek.jp

ム中心での磁場平坦度を高めるように最適化されている。コイル幅 4 mm、断面厚み 2 mm のコイルの材質は無酸素銅で、セラミックス材質は京セラ製 A-479 超高真空対応セラミックスである。円筒壁 5 mm の厚みに掘られた貫通溝に銅コイルが長手方向 30 mm に渡り銀ロウ付けで

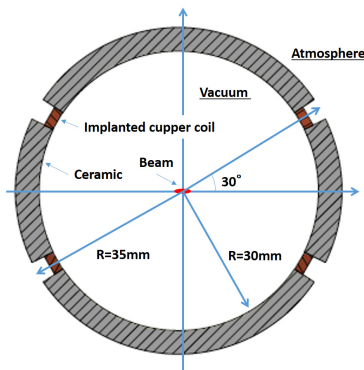


Figure 1: The cross section of CCIPM.

埋め込まれており、円筒外の大気圧と円筒内真空を隔てる真空隔壁として働いている。この銀ロウ付けは 800 度の熔融温度が接合に必要なため、熱膨張率が大きく異なるセラミックスと銅を使い、長手方向に渡り気密度を有するような銀ロウ付けの技術は、世界でも類がない根幹技術である。4 本のコイルは長手方向、上下流のいずれかでリターンコイルと接続し、リターンコイルの反対側で電流の導入を行い、2 極磁場を生成するように 2 対の空芯コイルを上下で形成する。4 本のコイルの接続方法には自由度があるためコイル接続の仕方により任意の磁場・電場を形成できる。

この CCIPM を加速器実装に展開を図るうえで 2 つの重要な課題である口金構造の構築図と内面パターンコーティングの概念図を Fig. 2、Fig. 3 に示す。

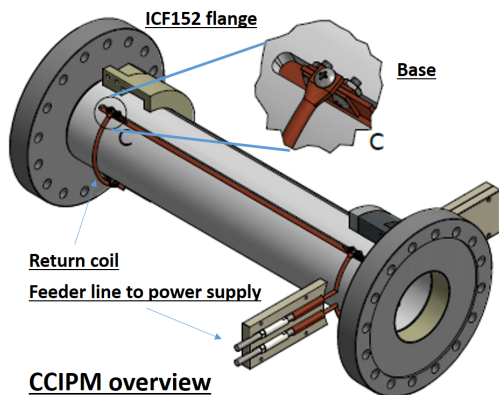


Figure 2: The overview of CCIPM and base block.

まず口金構造の構築について、口金はコイルに電流を導入するために必要不可欠であるが、いくつかの重要な条件を満たす必要がある。1. 10 kA、数 μ s オーダーのパルス大電流を流す接触面の確保、2. 励磁応力に対する十分な強度の確保、3. 電流導入端の自由度を得るため脱着が可能な機械的装着の 3 点である。Figure 2 図中に示される口金は最終的に実装が完了したものであるが、これらの条件を満たしたものとなっている。口金構造の構築には、当初コイルの銀ロウ付け後に口金となる金

具の半田での取り付けなどを試みたが、半田接合時に熱拡散が大きく強固な取り付けが困難であった。そこで、口金金具をコイルの埋め込み銀ロウ付けと同時にロウ付けすることが検討された。4 mm のコイル幅のコイル両端部 2 か所の口金取り付けは、銀ロウ付けの際の熱膨張時の応力集中点に取り付けを行う難しい試みである。これは、コイル両端にブロック状の口金に取り付けられることで、全体として両端に膨張体積が集中し長手方向全体で不均一な膨張差が生まれ、同時に、ロウ付け接合後口金部がコイル全体の熱収縮時に固定点として働くためである。口金構造の構築にはこの 2 点の実装上の課題、「不均一な応力集中の緩和」と「固定点として機能させない」新たな銀ロウ付け手法の開発が必要であった。

次に、内面パターンコーティングについても、いくつかの重要な形状条件がある。1. 沿面放電距離を確保し内面露出コイルを避ける形状、2. 同時に出力磁場を減衰させる渦電流を低減させる形状、3. ビーム壁電流をスムーズに通過させる形状の 3 点である。これら 3 条件を同時に満たす形状として楕円形のコーティングを上下流から噛み合わせるように実装させるパターンコーティングが

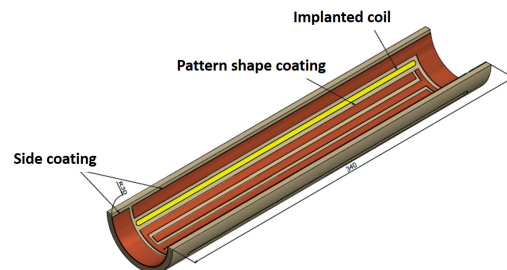


Figure 3: Pattern shape coating inside the CCIPM.

検討された (Fig. 3 参照、最終実装形状ではない)。楕円形状であるため、大きく閉じた渦電流の生成は低減されると同時に楕歯噛み合わせ部分が静電容量の構造となりビーム壁電流の高周波成分を通過させることが可能である。均一または均一コーティングの一部を剥ぎ取るコーティング形状の実装はなされてきたが、複雑なパターンコーティングが円筒内面に実装されたことはなく新たな試みである。コーティングの形状が機能を有するため、「沿面放電距離の確保」と「楕歯間距離」を精密に実現することが実装上の課題で、新たなコーティング技術の開発が必要であった。

3. 口金構造構築のロウ付け技術開発

まず、口金をコイル両端部に接合する手法では、ロウ溜まりと応力集中が原因で想定通り気密度を保てない結果となった。口金材質は無酸素銅である。この試験事実と、応力解析で得られた、コイル両端部の 250 MPa 以上の膨張応力と口金を接合することで更に 120 MPa 以上の応力の加算が生じるとの結果を踏まえ、口金を両端部から長手方向 15 mm 内側に離し接合する「捨て寸」を行うことで解決を図ったのが初期段階である。これにより全体で 10% の積分磁場の損失が生まれるが、良好な接合結果を得て、真空気密度も 1×10^{-11} Pa $\cdot$ m³/s に到達した。しかしながら、その後のフランジ溶接、内部蒸着コーティングの再昇温で気密が破壊され、気密度は 1×10^{-5} Pa $\cdot$ m³/s まで悪化し、原因は浸透深傷でようやく見つかるよう

な深部のクラックであると判明した。この問題は、口金がない場合には生じないため、「再昇温問題」と改めて名付けている。再昇温問題は、ビームヒートロードによる昇温にさらされる加速器運用では非常に大きな問題となる。

再昇温問題の境界温度を決定するため、試験片により昇温破壊サーベイを行い、結果その温度は 200 度であった。この温度は銅の弾性変形と塑性変形の境界温度と合致しており、断面 SEM 構造解析などを踏まえて、定性的に以下のようなメカニズムで気密破壊を起こすクラック生成が起きていると判断された。

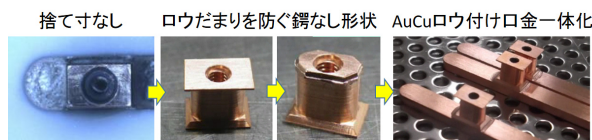


Figure 4: A sample of various prototype base block.

1. 銀ロウ付け温度で、銅コイルはセラミックとの膨張差で全体にわたり塑性変形を起こす。口金は接合時には拘束されておらず塑性変形にはいたらない
2. ロウ付け温度から常温状態へ遷移する際に、コイル本体は剥離応力を内在させ、口金は接合による拘束で金具体積に応じた剥離応力を加算する
3. この時点で応力がセラミックの耐応力を上回る場合にはクラックが生成するが、そうでない場合リークは発生しない
4. 再昇温による膨張応力は剥離応力と相殺する有利な応力方向となるが、口金部は拘束条件下で新たな塑性変形要素として剥離応力をさらに加算する
5. 結果、再冷却時にシェルクラックを生じさせる

口金部はプロセス 2 項の時点では熱収縮による剥離応力のみであるが、プロセス 4 項の時点で塑性変形要素による剥離応力が加味されることが問題である。この定性的な考察から、口金形状、ロウ付け技術の改善を行った。Figure 4 にその途中改善サンプルを示す。剥離応力を増大させるロウ溜まり要因を緩和するための口金形状の改善から、口金を事前に拘束する口金とコイル一体化

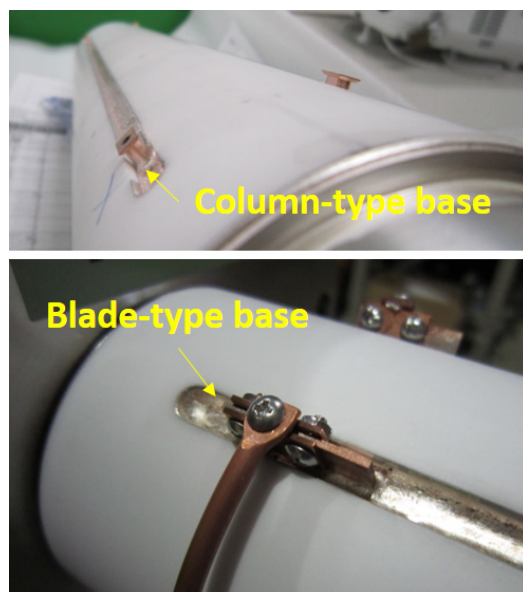


Figure 5: Original base and finally implemented base.

構造の試作など様々に試作を進めたが、口金一体化ではロウ付け後の常温状態ですでに気密破壊しており、円柱型口金では再昇温問題を解決できなかった。最終的に気密保持を達成し実装を済ませた口金構造を Fig. 5 に示す。図中上図は円柱型口金の実装試作で、下図が最終的なブレード型口金構造実装である。

口金構造の構築を成功させた技術的な要素は以下の通りで、1. 口金をブレード形状にすることで口金体積を長手方向に分散し、同時にロウ付け構造を改善しロウ溜まりの解消、2. それにより、口金部の円筒断面で、口金断面積は 20%まで低減、3. セラミックに対する口金金具による剥離応力への寄与がコイル寄与の 13%まで減少の 3 点である。技術開発により口金の剥離応力への寄与を低減、ロウ溜まりを改善できたことが、重要な点である。この技術開発で電流導入端子の実装が可能になり、セラミックス一体型パルスマグネットとしての基本構造が完成した。

4. 円筒内面パターンコーティング技術開発

4.1 渦電流低減型パターン形状の最適化

パターン形状の狙いはパルス磁場による渦電流の低減と高周波ビーム壁電流の通過である。この両立を実現するため、渦電流低減効果についてはパルス磁場の透過性を実測評価し、ビーム壁電流通過性については SONET を用いた電磁界高周波シミュレーションで検討を行った。形状による渦電流の低減効果は 8 μ s パルス磁場を伴うバンプ電磁石または 400 ns~4 μ s までのパルス幅可変出力の空芯型高速パルス電磁石のギャップに、回路基板にパターン形状を描いたプリント基板、均一にパターン塗布したプリント基板を挿入し、ピックアップコイルで基板の有無による磁場の透過性を相対的に評価した。均一コーティングに対する、形状とパルス幅の時間応答をパラメータとする磁場透過性の評価である。使用したパルス幅は、小型リング周長~大型リング周長の周回時間に相当するものを仮定している。基板上の銅箔プリントは厚み 18 μ m とし、パルス幅に対応する表皮深さに比べ十分に薄くしている。

Table 1: Summary of Magnetic Field Reduction for Pattern Coating Shapes

Coating shape	Line-width/gap	M.F.R. @400ns	M.F.R. @4 μ s	M.F.R. @8 μ s
Uniform	-	58 $\pm$ 2.7%	56 $\pm$ 2.7%	61 $\pm$ 2.7%
Stripe 1	4mm/2mm	-	-	0.7 $\pm$ 0.5%
Stripe 2	6mm/3mm	3.0 $\pm$ 0.5%	1.1 $\pm$ 0.5%	2.0 $\pm$ 0.5%
Comb 1	4mm/2mm	-	-	0.9 $\pm$ 0.3%
Comb 2	6mm/3mm	-	-	2.3 $\pm$ 0.3%

結果の一例を Table 1 にまとめた。測定には数%の誤差があることを前提に評価すると、表皮深さがプリント厚みより厚いことからパルス幅の異存はなく、均一コーティングは渦電流減衰(Magnetic Field Reduction: M.F.R.)が 50%~60%あるが、長手方向ストライプや楕円形状では線幅、線間幅によらず数%の減衰に抑制することができる。

4.2 高周波電流通過特性の評価

実測で楕円形状の効果が確かめられたことから、楕円形状でのビーム壁電流通過性を簡易的に電磁界シミュレーションで評価した。線幅 6mm・線間距離 3mm の楕円形状のシミュレーション結果の一例を Fig. 6 に示す。パターン形状が静電容量型となっているため、均一コー

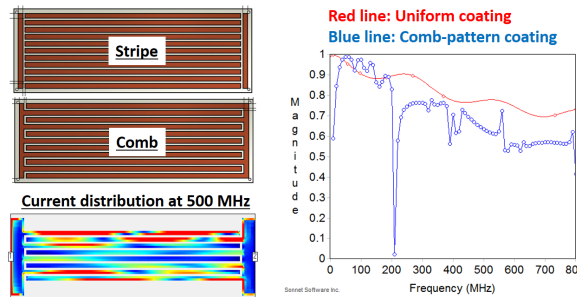


Figure 6: Pattern shape sample and results of magnetic and electric field simulation for comb-pattern coating.

ティングと同様幅広い領域で高周波特性がよいことが分かる。200MHz に大きな特異点があるが、一般的な加速器のバンチ構造である RF 周波数 500MHz 領域では通過性を確保している。ビーム壁電流に対するインピーダンスの整合性は今後詳細にビーム試験などを通じて評価をする必要があるが、まずは、目的を満たすパターンコーティング形状の目安ができたと判断できる。

4.3 マスクブラスト法による内面パターンコーティング

通常、セラミックスの内面コーティングは、高真空度実現の観点から多孔質のセラミックス内面を覆う役割と、ビーム壁電流を通過させる機能、パルス磁場を渦電流により低減させないための機能を同時に実現するため、導電率が低い TiMo や TiN などを均一にかつ 2~3 μm の薄さで蒸着により実装される[7]。これに対して本開発ではパターン形状を描かなければならないため、最初に、マスク蒸着法が提案された。700 度の蒸着温度に耐えられるようパターン形状をかたどったステンレス製マスクで覆い、マスクで隠されていない部分に蒸着を施す方法である。実際にこの手法が試されたが、マスク材が蒸着時の高温で歪、露出コイルを避けて精密なパターンを描くことは不可能であった。

このマスク蒸着法の発想を逆転し、均一コーティング後に、改めてマスク材で覆いブラストによりパターンを抜き出すマスクブラスト法が考案された。マスクブラスト法でもマスク材として SUS マスクが採用されたが、SUS 材を円筒内にアールをつけて装着する場合、その弾性力で円筒表面と密着させることが困難で、隙間から入るブラスト材によりやはり精密なパターンコーティングを実装することができなかった。この浮きをなくしたマスクを施すことができれば手法は確立すると判断し、常温で出来る作業である利点を生かしシールマスクを張り付けブラストを吹き付けることを新たに検討し、TiMo を使った厚み 3 μm の精密パターンコーティングに成功した。Figure 7 に塩化ビニール管へ試験実装した様子、及びセラミックスへの試作実装を実施した写真を示す。パターンコーティングの実装技術も確立し、セラミックス一体型パルスマグネットの加速器実装へ向けた準備が整った。



Figure 7: A precise pattern coating on the PVC pipe and the ceramics chamber by masked-blast technique.

5. 加速器運用へ向けた総合実装試験

5.1 高電圧印可試験と放電問題

セラミックス内面コーティングで留意すべき実装上の課題は、露出コイルとの短絡である。セラミックス円筒の沿面放電距離については理解がされていないため、実際に試験による計測が必要であった[8]。パターンコーティングの線間距離は大気中放電の目安となる 3 kV/mm を目安とし設計している。CCIPM の 4 μs パルス入力に対するインピーダンスは、2 対のコイルを直列接続しコーティングが実装された状態で 1.43 Ω であり、中心磁場で 8 GeV 電子ビームに 1.6 mrad 以上の蹴り角を与えるためには 7 kA 以上の電流が必要である。このことから、セラミックスに印可される電圧は裕度を考慮し最大で 15 kV を想定している。

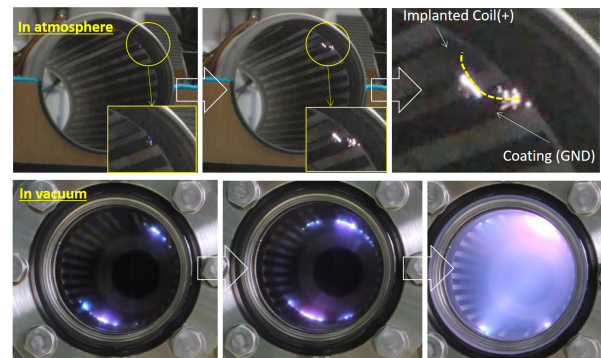


Figure 8: Discharging test of CCIPM

高電圧印可試験では電源はパルス幅 4.9 μs の正弦半端出力のものを使った。当初試験結果では、大気下で 4.5 kV、真空下でも 6.3kV までの耐電圧しかなく、コイル・コーティング間で非常に激しい放電を経験した (Fig. 8 参照)。原因はコーティングとコイル間の沿面放電距離の不確定性からくる距離の不足とコーティングエッジ、セラミックス内に残るコーティング材のブラスト残渣によるものであった。この放電事象への改善レシピは以下の通りである。1. 放電試験を繰り返すことで、真空下でのセラミックス円筒沿面放電距離を 1.17 kV/mm と把握、2. 正確な沿面放電距離を使ったコイル・コーティング間のみの沿面距離を 3 mm→6 mm へ拡大しコーティングエッジをなくしフルアール形状に改善、3. セラミックス円筒内のテックスワイプでの内面乾拭き+エアブロー、そしてチーム洗浄+エアブローによる洗浄でコイル・コーティング間の絶縁抵抗を $10^{11} \Omega$ から $10^{13} \Omega$ に改善の 3 点の対策を行った。その結果、耐電圧は 11.5 kV 以上に改善がなされた。これ以上の印可試験は電源定格を超えるため

実施していないが、7.3 kA のパルス電流が流れていることから目標十分な性能である。

5.2 CCIPM の最終実装形態と総合耐久試験

Figure 9 は加速器実装用開発機 CCIPM である。真空気密度は $1.13 \times 10^{-11} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 以下である。この CCIPM を粗排気ポンプで $2.6 \times 10^{-6} \text{ Pa}$ まで排気しながら、1Hz 繰り返しで 6.3 kA/10kV で励磁し、さらにリボンヒーターを巻くことで、1 サイクル当たり 4 時間の常温と 120 度 4 時間のサーマルサイクルを連日 3 サイクル与え、真空応力、励磁応力、熱応力を加えた、総合耐久試験を実施した。耐久試験は通算日数、180 日の試験を無事に完了している。さらに磁場測定では、コーティングの有無、パルス磁場・DC 磁場の比較から 2% の誤差の範囲で渦電流による磁場の減衰がないと判断している。

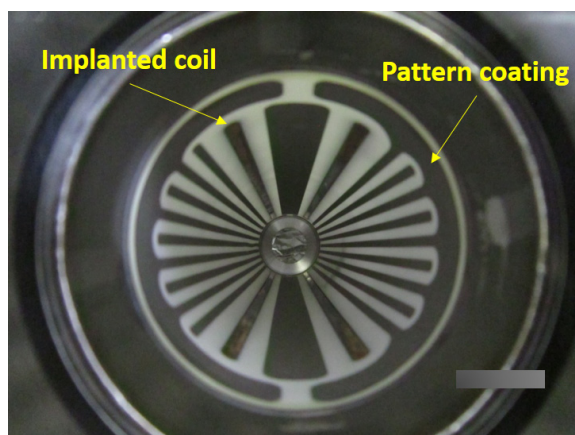


Figure 9: Finally completed CCIPM.

6. 今後の開発の展望

CCIPM の加速器実装の準備が整った。今後ビーム実績を蓄積し、実用性の議論を進める必要がある。特に、ビーム壁電流とコーティング形状のインピーダンスの整合性、ビームの露出コイルへの影響を定量的、実験的に評価が必要である。基本構造が、構造的な弱点となる可能性がある。また、本報告で扱った CCIPM は口径が 60 mm であるが、将来加速器に向けて 30 mm 口径の開発も進んでいる。開発が済んだ技術が口径の縮小とともに破綻せずに展開できるかどうか重要な課題である。今後実用性の議論に加え小口径化へ向けた開発を進めて行く予定である。

小口径化とともに、先を見据えた展開として電極の埋め込み数を増やす磁場多極化の展開も重要である。2 極磁場だけでなく、多極磁場の生成が可能となれば、よりキッカー応用の幅が広がる。埋め込み磁極数の増加を実現する開発についても今後の重要な課題である。

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
- [3] http://www.mext.go.jp/component/b_menu/shingi/toushin/_icsFiles/afieldfile/2015/05/12/1357455_01.pdf

- [4] H. Takaki *et al.*, Proceedings of the 7th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Himeji, Japan, Aug. 4-6, 2010, pp773.
- [5] T. Ohshima, Proceedings of the 14th Symposium on Accelerator Science and Technology, Tsukuba, Japan, November 2003, pp773.
- [6] SON, Y. G. *et al.*, Physical Review Accelerators and Beams, 2017, 20.8: 082803.
- [7] Z. Kabeya *et al.*, Proceedings of the 6th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tokai, Japan, Aug. 5-7, 2009, pp1174.
- [8] S. Mihara *et al.*, Proceedings of the 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Osaka, Japan, Aug. 8-11, 2012, pp269.