

セラミックチェンバー一体型パルスマグネットの開発

DEVELOPMENT OF THE CERMIC CHAMBER INTEGRATED PULSED MAGNET

満田史織^{#, A)}, 笹川敦司^{B)}, 本井傳晃^{A)}, 佐々木茂樹^{A)}, 熊谷教孝^{A)}, 中西辰郎^{C)}
Chikaori Mitsuda^{#, A)}, Atsushi Sasagawa^{B)}, Teruo Honiden^{A)}, Shigeki Sasaki^{A)}, Noritaka Kumagai^{A)},
Tatsuro Nakanishi^{C)}

^{A)} JASRI/Spring-8, Hyogo 679-5198, Japan,

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

^{C)} Spring-8 Service Co. Ltd. (SES)

Abstract

We are developing of the narrow gap pulsed magnet as the application at the future accelerator ring. For the small circumstance and high compaction array of the accelerator device in the future, pulsed magnet must achieve a short pulse width according to a revolution time and the high-field output performance in a narrow setting space. The narrow gap makes the magnetic field stronger, which is for shorter length, and as a result the small size magnet makes the low inductance load for shorter pulse. The structure we are developing is that one turn air-coil is implanted in the cylindrical ceramic chamber thickness of 5 mm along longitudinal axis and integrally molded with ceramic. By this structure, magnet pole edges can be close to the chamber inside diameter. We achieved the continuous current-excitation examination over more than 200 days of 20 kV/7kA with succeeding in the production of the dipole type prototype whose a bore radius and magnetic length is 30 mm and 0.3 m respectively, and maintaining vacuum degree less than 10^{-6} Pa.

1. はじめに

加速器において求められるパルスマグネットシステムの性能要求は共通して、高速性、高磁場出力性能、高繰り返し性の3つである。これらを同時に満たすことは技術的に大変難しいが、実現するために考える方法としては、1つには、高速、高繰り返し性能を有する大電流出力パルス電源の開発であり、2つには、パルス電源負荷の低減である。これら2つの方法において、電源開発のみで性能目標を達成する場合、電源規模は巨大化し、電源設置のための専用の電源室の確保などが必要となり、パルスマグネットシステムの設置柔軟性が失われる。そのため、電源規模を拡大させずに、性能要求を実現するには、電源負荷の低減につながる、パルスマグネット自身の改善が極めて重要な課題である。

その改善策として、Spring-8では極限までパルスマグネットのギャップを狭小化する技術の開発を進めている。パルスマグネットのギャップを狭小化することは、ギャップ中心での磁場出力強度を増加させることにつながり、磁場強度と磁極長により決まるビーム蹴り角を維持したまま、磁極長を短長化することが可能となる。磁極長の短長化はコイルインダクタンスの低減へとつながるため、パルス電源の負荷低減へとつながることとなる。結果として、パルス電源負荷が軽減したことにより、パルス電源の出力性能である、高速性及び高繰り返し性の追求が可能になる。同時に、電源規模の縮小化も可能となるため、短磁極長のコンパクトなパルスマグネット

[#] mitsuda@spring8.or.jp

とともに、パルスマグネットシステムの設置柔軟性が生まれ、 β 関数の最適点にパルスマグネットシステムを設置することが容易になる。

このギャップ狭小化により実現されるコンパクトなパルスマグネットは、将来の第4世代光源加速器リングとして位置づけられる極低エミッタンスリング^[1]、中型エネルギー光源としてエミッタンスの低減を目指す中型高輝度光源リング^[2]などへの展開が適している。いずれのリングにおいても、エミッタンス低減のための磁場勾配強度を高める必要性から、電磁石ボア径が狭小化することが必然であって、より強い収束を目指す光学関数の実現のため、リング全周に渡り配置される多極電磁石の台数が増加し、パルスマグネット設置の磁石間スペースが極めて短長化する。これらの状況に対して、狭小ギャップでかつ短磁極長であるパルスマグネットは、いずれも展開に適していて、パルスマグネットの挿入が許される必要最小限の設置スペースでシステムの設置が可能となる。

他に望める波及効果として、電源負荷の低減による、電源規模の縮小は、サイラトロン方式によるパルス電源製作から半導体スイッチング素子方式によるパルス電源への製作を容易にする。高寿命、高速性、高繰り返し性に魅力のある半導体スイッチング素子は、耐圧性能の低さがネックであったが、電源負荷の低減が進めば、電源出力の低電圧化へとつながり半導体スイッチング素子による高出力パルス電源の製作が容易になる。

2. セラミックチェンバー一体型デザイン

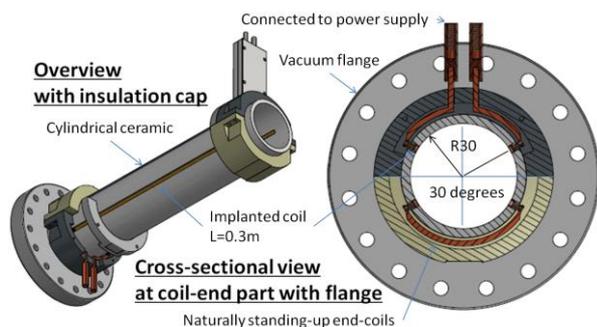


Figure 1: Design of dipole type CCIPM for the fabrication.

通常セラミックチェンバーは、パルス磁場強度の渦電流による減衰を防ぐために金属製真空ビームダクトに代わって用いられる。鉄芯型コイルの場合、このセラミックチェンバーの外側に鉄芯またはフェライトコアによるパルスマグネットが設置されるが、この場合、マグネットギャップはチェンバー径とチェンバー厚みに加え、マグネットの磁極端とチェンバーとのアライメント用の 1 mm 以上のクリアランスの総和がギャップ（磁極間距離）となる。つまり、この総和以下にギャップを狭めることは難しい。空芯型コイルの場合、空芯コイルをセラミックチェンバーに治具により密着させて設置するか、チェンバー内にコイルを吊り下げるストリップラインキッカーのような設置方法がある。前者の場合、ギャップはアライメント用の磁極とのクリアランス分だけが、ギャップの狭小化に寄与する。後者においては、コイルを支持する複雑で、強固なサポートが必要で、コイルがチェンバー内に突出しているため、ビーム壁電流のインピーダンスの不整合が生じやすい構造となる。このため、セラミックチェンバーのボア径は必要以上に大きく設定されなければならない。鉄芯型、空芯型いずれのタイプでもギャップを狭小化するのに不十分な側面があり、我々はそれらを同時に解決する方法としてセラミックチェンバー一体型パルスマグネットを提案している。

Figure 1 にはセラミックチェンバー一体型パルスマグネット(Ceramic Chamber Integrated Pulsed-Magnet, CCIPM)のダイポール型デザインを示している。CCIPM は空芯コイルを円筒セラミックチェンバーのセラミック厚さ 5 mm に長手方向に渡り掘られた円筒内外を貫通している溝にコイルを埋め込んで出来ており、コイルは円筒内外を分ける真空隔壁の一部として働いている。ダイポール型では 4 本のコイルが埋め込まれ、片端はアーク状のバーでショートされ、1 ターンのコイルが 2 つ上下に作られる。デザイン寸法のコイル長及び円筒セラミックボア半径は SPring-8 蓄積リング入射バンブの磁極長 320 mm、ギャップ 56 mm になった。

コイルは円筒円周上に沿って 30° の角度で配置することにより、チェンバー中心での磁場強度を最大化し、±4 mm の水平領域で、0.1%の磁場平坦度を確保している。Figure 2 に磁場分布計算結果を示す。コイル端部同志をショートさせるアーク状のバーは

円筒セラミック円周に沿って自然とコイルエンド部が立ち上がる構造となっており、エンド部の不整磁場が 30%減少できている。コイルショート側と反対側は電源を接続するリード線としての役目を果たす。

この CCIPM 構造を採用することにより、2つの技術的な効果が得られる。1 つ目はコイル自身が真空隔壁としての役割を担うことにより、コイルは円筒内表面より突出することなく滑らかな表面構造を保ったまま、コイルを円筒内径までビームに近づけることができる。また、セラミックは構造上コイルの機械的な支持治具、電気絶縁体の 2 つの役目同時に担っている。2 つ目は、コイルを円周上の最適な位置に配置し、磁場強度及び磁場平坦度を最適化出来ることである。以上の 2 つの効果を踏まえて、セラミックチェンバーの外装、内装ともに、極めて簡潔かつコンパクトな構造のパルスマグネットを実現できる。

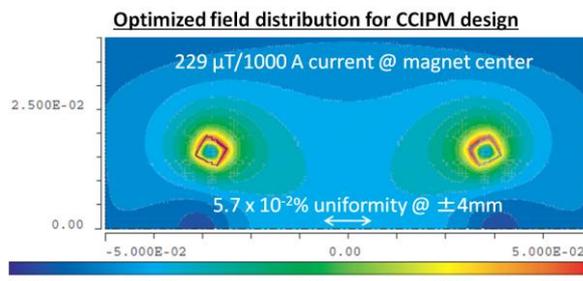


Figure 2: The distribution of a magnetic field strength with DC 1000A exciting current for the CCIPM design of Fig. 1.

3. セラミック・コイル一体化

コイルとセラミックを一体化するためには、無酸素銅でできたコイルをセラミック厚みに掘り込んだ溝に落とし込んだ後、800°Cの温度により銀ろう付けする方法がとられる。その上で技術的な重要な課題は下記の 5 項が挙げられる。

- 1) 0.3 m の長手方向にわたり複数のコイルを同時に埋め込む技術
- 2) 埋め込み後の超高真空気密度 $1.3 \times 10^{-11} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ で達成する技術
- 3) コイルに印可する 5 kA 以上の電流による磁場応力と 0.1 MPa の大気圧に絶える構造強度
- 4) コイルを 10 μm の位置精度で埋め込む技術
- 5) 埋め込み後、内面コーティング時の 800°C の昇温に対する真空気密度の維持

ここで鍵となる技術は 0.3 m の長さに渡りセラミックと銅の熱伸縮差を制御することである。この技術開発には、熱伸縮差による残留応力の低減を図るような、コイル形状、銀ろう付け量、銀ろう付け温度プロシージャー、コイル抑え込み治具の最適化が重要であって、実際にその技術開発段階での、平板試験片におけるセラミック表裏に生じた、ヘアークラックの典型例を Figure 3 に示す。平板試験片で構築したろう付け技術は、真空気密度を維持することが可能で、ろう付け埋め込み後の 800°Cの再昇温においても気密度が失われることがないことを確認

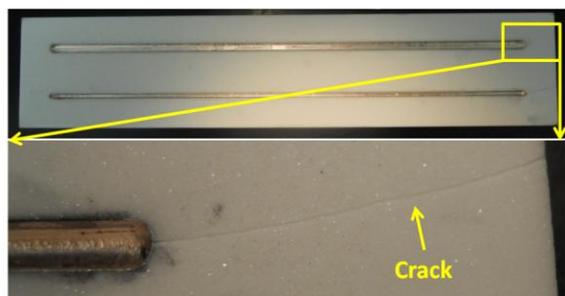


Figure 3: A typical broken sample ceramic plate with hair crack.

し、円筒型セラミックへと展開された。試作機 2 本を製作した円筒型セラミックでは、真空気密度を失う破損は起きることがなく、試作機の完全な製作に成功した。Figure 4 に製作工程の流れを示す。

Developing step

1st step: Coil shape and material, silver brazing volume, curing procedure and jig were optimized by using ceramic plate test piece

2nd step: Implanting techniques developed by ceramic test plate was expanded to the cylindrical ceramic

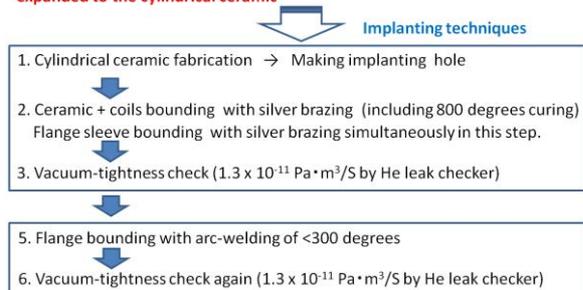


Figure 4: The CCIPM fabrication procedure.

最終的にフランジ付ダイポール型 CCIPM の試作機の製作に成功し、 $1.3 \times 10^{-11} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 以下の真空気密度を達成した。Figure 5 にフランジ取り付け前の CCIPM の内面の様子を示す。本論で報告する試作機においてはセラミックチェンバー内表面のコーティングは実装していない。

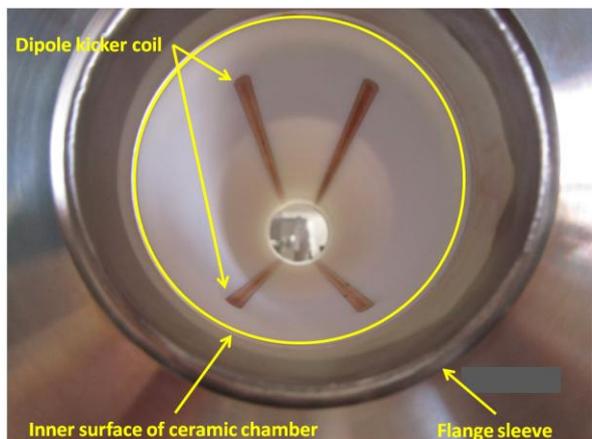


Figure 5: The inner surface view of complicated CCIPM without flange.

フランジ取付完了の CCIPM 試作機は、磁場性能及び電気特性の検証と加速器実装に向けた信頼性の検証を実施した。その結果を次節にて報告する。

4. 性能評価と長期励磁試験

4.1 磁場出力性能評価

完成した試作機磁場出力性能を確認するため、ホール素子 3 次元磁場測定機により磁場測定を行っている。励磁電流 DC 30 A にて、ボア半径 30 mm における磁石中心磁場強度は計算では $6.78 \mu\text{T}$ 、メディアムプレーン上の中心から $\pm 4 \text{ mm}$ の領域での磁場平坦度は $5.7 \times 10^{-2}\%$ であった。同様に、励磁電流 30 A での磁場測定結果では、磁石中心磁場強度は $6.85 \mu\text{T}$ 、磁場平坦度は $8.2 \times 10^{-2}\%$ であった。

磁場平坦度測定では、コイル配置の最適化により、メディアムプレーン上の磁石中心から $\pm 10 \text{ mm}$ まで、1.5%を維持することが出来ており、また、磁場中心から高さ方向に $\pm 5 \text{ mm}$ シフトした場合の水平磁場平坦度は、磁場中心から水平 $\pm 4 \text{ mm}$ の範囲にて 1%が維持されている。Figure 6 に磁場水平分布測定結果を示す。

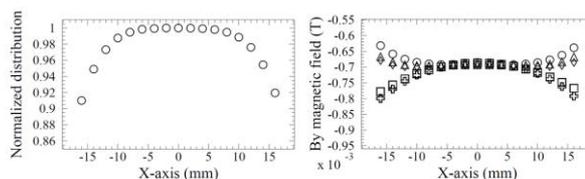


Figure 6: Left; The normalized magnetic field distribution on horizontal axis at the magnet center. Right; The magnetic field strength distribution on horizontal axis at $\pm 5 \text{ mm}$ vertical shift from magnet center.

長手方向にわたる磁場分布では、有効磁場長は磁極長 0.3 m に対して -1.0% の減長で、コイルエンド部の不整磁場は磁場中心強度の 1% 以下まで低減がされている。積分磁場は、 $204.2 \pm 1.6 \mu\text{T} \cdot \text{m}/30 \text{ A}$ となっており、 3000 A 励磁電流に対して SPring-8 における 8 GeV 電子ビームに対して $765 \pm 6.1 \mu\text{rad}$ の蹴り角に達する。従来の SPring-8 で使用している鉄芯型バンパ電磁石と比較しておよそ $1/2.2$ の蹴り角である。上述の測定結果に対する誤差は、磁場測定の再現性より見積もって付している。

積分磁場での均一度は、水平方向に磁場中心から $\pm 5 \text{ mm}$ シフトした場合、磁場中心での積分磁場との差は 0.7% となっており、垂直方向に磁場中心から $\pm 4 \text{ mm}$ シフトした場合には 0.8% の積分磁場の差となっている。Figure 7 に磁場ビーム軸分布測定結果を示す。

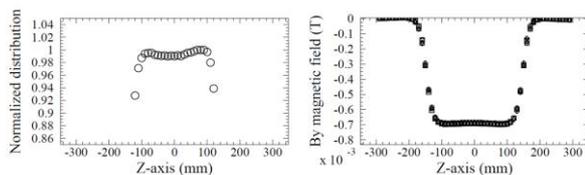


Figure 7: Left; The normalized magnetic field distribution on beam axis at the magnet center. Right; The magnetic field strength distribution on beam axis at $\pm 5 \text{ mm}$ horizontal shift from magnet center.

以上の結果から、期待通りの磁場平坦度、積分磁

場均一度を確保ができており、計算結果との相違も微小であるため、コイル埋め込みの位置精度がおよそ $10\ \mu\text{m}$ の高い水準で実現できたと判断している。

4.2 電源に対する負荷低減効果の評価

磁場出力性能に続き、性能目標である負荷低減効果を検証するため、CCIPM と同寸法規模の SPring-8 蓄積リング入射部で使用している 1 ターンコイル鉄芯型バンブ電磁石との電源に対する負荷低減効果を比較した。磁極長は $320\ \text{m}$ 、セラミックチェンバーのボア半径に該当する磁極間ギャップは $28\ \text{mm}$ で構造寸法はほぼ同等である (Figure 8 参照)。同一のバンブ電磁石用電源に接続を入れ替えながら既定の電圧に応じたパルス電流出力を電磁石に印可し、高速 CT プロープにより、パルス出力波形と電流量を測定した。CCIPM の試作機にはコーティングを内装していないため、バンブ電磁石のギャップ間にセラミックチェンバーを内挿せずに試験を行った。また、CCIPM の上下コイルは直列で電源に接続している。

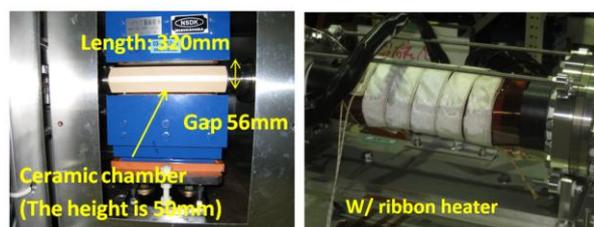


Figure 8: Injection bump magnet at SPring-8 storage ring and complicate CCIPM with ribbon heater.

結果であるが、CCIPM は従来型のバンブに比べ 20% の電流値の改善があり、 $6.1\ \mu\text{s}$ の正弦半波出力が $4.5\ \mu\text{s}$ まで短パルス化となった。Table 1 に負荷低減の根拠となるそれぞれのマグネットの電気的特性 ($125\ \text{kHz}$, $4\ \mu\text{s}$ パルス幅) の比較を示す。バンブ電磁石のギャップにコーティングを施したセラミックチェンバーを内挿した場合、セラミックの誘電率とコーティングによる容量が加味されるため、電気特性の差は更に広がると思われる。

Table 1: Mechanical dimensions and electrical properties comparison. About CCIPM, the properties are for a coil.

Magnet	Gap (mm)	Length (m)	L (μH)	C (nF)	R ($\text{m}\Omega$)
Iron-core	56	0.32	4.5	357	385
CCIPM	$\phi 60$	0.30	0.8	2019	22

4.3 長期耐久試験

試作機の構造的耐久性及び真空気密度の信頼性を確認するため、長期コンディショニング試験を 2013 年から 2014 年にかけて実施している。Figure 9 に励磁試験セットアップの様子を示す。

コンディショニングは SPring-8 にて使用している蓄積リング入射バンブ用電源を使用した。最大

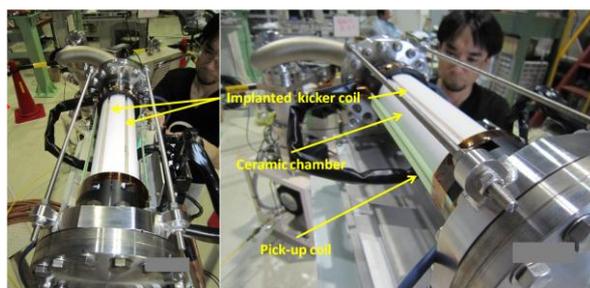


Figure 9: Conditioning setup.

$7.7\ \text{kA}/20\ \text{kV}$ をパルス幅 $4\ \mu\text{s}$ のパルス電流を $1\ \text{Hz}$ の繰り返しにてコイルに印可し行っている。コンディショニング中は、高圧印加と同時に、セラミックチェンバーは粗排気真空ポンプに接続され $1 \times 10^{-6}\ \text{Pa}$ まで真空引きし、大気圧荷重をかけている。またチェンバーにリボンヒーターを巻き (Figure 8 参照)、サーマルサイクルを与えてビームヒートロードによるチェンバーへの熱負荷を模擬した。サーマルサイクルのパラメーターは SPring-8 蓄積リングでのビーム電流 $100\ \text{mA}$ マルチフィリング時のセラミックチェンバーの表面温度実測値をもとに決定している。サーマルサイクルのプロシーチャーは室温 30°C からセラミック外表面温度を 80°C まで自然速度で上昇させ、 80°C を 4 時間維持したのち、自然速度で自然空冷させ室温まで冷却する温度過程を 1 サイクルとし、1 日あたり 3 サイクル実施している。このような加速器実装に近い条件下での耐久試験で、252 日の連続運転終了後、He リークディテクターによる真空気密度試験において、 $1.3 \times 10^{-11}\ \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 以下の規定値を維持していることを確認した。表 2 にコンディショニングパラメーターと運転日数についてのまとめを示す。

Table 2: Conditioning Parameters and Experiences

Supplied current/voltage	Condition	Elapsed days
$3.9\ \text{kA}/10\ \text{kV}$	w/o thermal cycle	10
$5.8\ \text{kA}/15\ \text{kV}$	w/o thermal cycle	24
$5.8\ \text{kA}/15\ \text{kV}$	w/ thermal cycle	83
$7.7\ \text{kA}/20\ \text{kV}$	w/ thermal cycle	135
Total	w/ thermal cycle, for all	218, 252

今回開発した CCIPM 試作機は加速器実装にも耐えうる構造強度性能を有していることが確認された。また、応力負荷、熱応力変化にたいしても十分に真空気密度を維持できることを実証した。

5. 開発の今後の展望

2012 年より CCIPM の製作技術開発を京セラ (株) と開始し、セラミックに長手方向に渡り銅コイル埋め込み銀ろう付けする技術を確認した。本論文では長手方向コイル埋め込み技術の確立とその基本性能の達成と検証に主眼を置いて報告を行った。

今後の開発は、CCIPM を加速器装置として実装する際に必要となる装備の実装を目指さなければならない。第一に、セラミックチェンバー内へのビーム壁電流を通すための金属コーティングである。

PASJ2015 WEP072

CCIPM はマグネットコイルがセラミック内表面に露出しているため、コイルを避けてコーティングを実装させなければならない。第二に、マグネットコイルと電源を結ぶリード線の機械的接続である。リード線とコイルの接続部には磁場応力負荷に耐える強度と、高圧・高電流の確実な導通が必要である。試作機においてはリード線とコイルの接続は銀ろう付けの後付が不可能であったため導電性エポキシによる含浸で取り付けを行った。これをより強固にする必要がある。

今後、上記技術課題の克服とともに、当初の目標である $\phi 30\text{mm}$ 以下の磁石ギャップ狭小化、コイルの埋め込み極数の拡大への展開を目指していく予定である。

参考文献

- [1] R. Hettel, et al., proc. of PAC2013, Pasadena, CA USA, (2013), p19.
- [2] <http://www.lns.tohoku.ac.jp/slitj/design.html>