

SuperKEKB 電子リングのビームアポートシステム用水冷セラミックチェンバー WATER-COOLED CERAMIC CHAMBER FOR SUPERKEKB HER BEAM ABORT SYSTEM

三増俊広^{#,A)}, 飯田直子^{A)}, 菊池光男^{A)}, 森隆^{A)}, 小玉恒太^{A)}, 阿部和彦^{B)}

^{A)} KEK, Tsukuba Ibaraki Japan

^{B)} Hitachi Power Semiconductor Device, Ltd., Hitachi, Ibaraki Japan

Abstract

The design beam current of SuperKEKB High Energy Ring (HER) is 2.6A with the 2500 bunches operation. The design bunch length is 5mm. The power dissipation due to the image currents is measured in SuperKEKB Phase I operation. About 870mA beam current has been stored in HER at the Phase I operation. [1] The water cooled ceramic chamber is chosen for SuperKEKB abort kicker systems. It has a thin Ti conducting layer deposited on the inner wall of ceramic. Total 9 pieces of 500mm long ceramic tubes are used for the beam abort kicker magnets. These chambers show enough cooling power.

1. はじめに

SuperKEKB の主リングには、多くのキッカー電磁石が設置されている。SuperKEKB でのビーム電流の設計値は大変大きく、ビームのイメージ電流が作り出す発熱を抑えるために、水冷式のセラミックチェンバーを採用した。SuperKEKB 電子リングの水平方向ビームアポートキッカー電磁石は、早い立ち上がり、大きな電流が必要とされており、電源への負担を少しでも減らすためにキッカー電磁石の Gap を出来るだけ小さくするために、さらにコンパクトな水冷式セラミックチェンバーを開発し Phase I で使用した。[2]

2. セラミックチェンバー

2.1 概略

SuperKEKB で水冷式セラミックチェンバーは、入射キッカー電磁石ビームアポートキッカー電磁石、ビーム診断用垂直方向キッカー電磁石で、使用されている。これらのセラミックチェンバーは、電磁石が作るパルス磁場をチェンバー内部通すように設計されている。チェンバー内壁には、ビームのイメージ電流を流し、ビームが作る電磁場がチェンバー外部の機器に影響を及ぼさないように薄いチタン膜が蒸着されている。

セラミックチェンバーでの発熱の原因は、2つの誘起電流による。一つがビームと並行してチェンバー内壁に誘起されるビームのイメージ電流で、もう一つは、パルス電磁石の磁場によって誘起される渦電流である。SuperKEKB では、ビームのイメージ電流による発熱がほとんどで、キッカー電磁石が誘起する渦電流による発熱は小さい。KEKB での測定を外挿すると、SuperKEKB 電子リングの設計電流でのセラミックあたりの発熱は、1.8kW 程度と予想される。Table 1 に SuperKEKB 電子リングのアポートシステム使用されるセラミックチェンバーの大きさを示す。セラミックチェンバーは、内径がレーストラックの形をしたもので、アルミナセラミックを用いた真空チェンバーである。アルミナセラミックは、その機械的な

強さとロウ付けする際に行うメタライズの容易さにより、真空チェンバーとしてよく用いられている。

Table 1: Dimension of The Abort System Ceramic Chamber.

	Type I	Type II
Length (mm)	580	1128.3
Height of ceramic (mm)		67.5
Width of ceramic (mm)		87.5
Length of ceramic (mm)	500	500x2
Ceramic inner wall size (mm)		40 x 60
Number of used	8	1
Coating		Ti
Ti coating thickness (μ m)		5
Ceramic structure		Straw
Braze Metallization		Ti
Braze		Ag-Cu
Ceramic		Almina ceramic

コバールは、熱膨張率がアルミナセラミックと近いことから、ロウ付け時にセラミックに与えるストレスが小さく、フランジとセラミックをつなぐスリーブとして用いられている。

ロウ付け時に、真空を封止する部分と、冷却水を封止する部分は切り離されてロウ付けされている。これは、冷却水路、あるいは、真空シールのロウ付けの部が破損した時に、冷却水が、真空部に侵入すること防ぐためである。フランジは、ビームのイメージ電流による発熱を最小にするため、銅で製作されている。銅のフランジがアニールされて、柔らかくならないようにスリーブと銅フランジは、電子ビーム溶接によって接続されている。セラミックチューブの工作精度は、チェンバーの内側で、10mm 正方形内での凹凸が、0.1mm 以下であることを要求してい

[#] toshihiro.mimashi@kek.jp

る。セラミックチューブとスリーブの接合部での段差は $200\ \mu\text{m}$ 以下になるようにセラミックチューブの両端の内壁はテーパ構造を取っている。

2.2 セラミックチェンバーの構造

2種類のセラミックチェンバーがビームアポートシステムのために開発された。一つは、垂直方向アポートキッカー電磁石用で、もう一つが水平方向アポートキッカー電磁石用である。垂直方向アポートキッカー電磁石用セラミックチェンバーは、長さが 580mm で、内壁にチタンコーティングを施した 500mm のセラミックチューブとスリーブ、フランジからなる。スリーブは、コバルドで製作され、銅で出来たフランジとセラミックチューブをつないでいる。(Figure 1 参照)

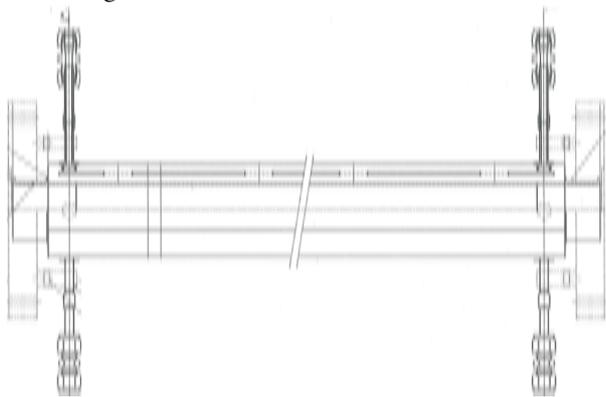


Figure 1: Structure of the ceramic chamber of HER Injection kicker.

水平方向アポートキッカー電磁石用セラミックチェンバーは、内壁にチタンコーティングを施した 500mm のセラミックチューブを連結したもので、チェンバー全体の長さが、 1128.3mm になる。Figure 2 は、製作された電子リング用セラミックチェンバーである。

500mm の冷却水路が一体となったセラミックチューブの構造を Figure 1 に示す。セラミックチェンバーの内径は、レーストラック型で、水平方向に 60mm 垂直方向に 40mm となっている。冷却水は、片端の上下に取り付けられた冷却水パイプを通して流れ込み、もう一端の冷却水パイプを通して排出される。冷却水路と真空部分が一体となったセラミックチューブの開発に成功したことで、製作上の構造が簡単になり、組み立てが容易になった。これらのことにより、ビーム軸方向にも、ビームと直角方向にも、セラミックチェンバーをコンパクトになり、水平方向アポートキッカー電磁石の Gap は、 90mm から 70mm に縮められ、電源に対する負担が緩和できた。

2.3 ロウ付け方法

通常のセラミックのロウ付けでは、セラミックのメタライズには、 Mn-Mo が使用されるが、 Mn-Mo は、水に弱いいため、このチェンバーでは、チタン活性化法によるメタライズを行っている。この方法で製作された水冷式セラミックチェンバーは、10年以上続いた KEKB 加速器運転時に一度もトラブルを起こしていない。

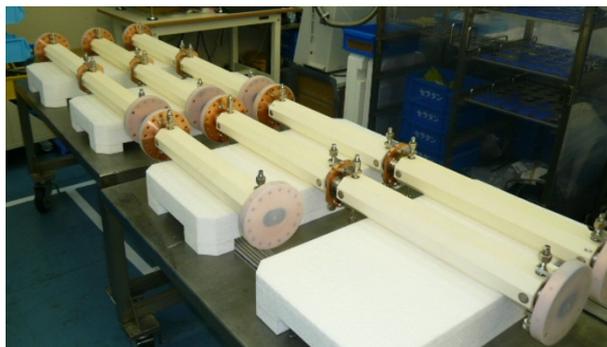


Figure 2: Ceramic chamber for abort kicker magnets.

2.4 セラミックチューブ内部のチタン蒸着

チタン膜のセラミックチューブ内壁への生成は、直流マグネトロンスパッタリングによって行われた。アルゴンガスは、チタンで作られたカソードとステンレスのアノードスクリーン間にプラズマを生成するために使用された。

チタン膜の厚さは、 $5\ \mu\text{m}$ を目標値として設定した。Figure 3 にビーム軸方向のチタン膜の均一性を示す。チタン膜の厚さは、チューブ中央で厚く、チューブ両端で薄い傾向があるが、少なくとも $1\ \mu\text{m}$ 以上のチタン膜が付いていることが確認されている。Figure 4 にスパッタリング装置を示す。

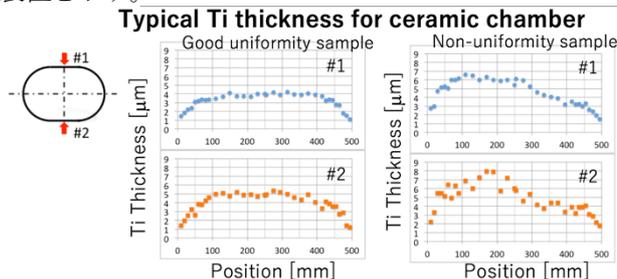


Figure 3: Ti coating thickness distribution inner wall of the ceramic along the beam longitudinal direction.

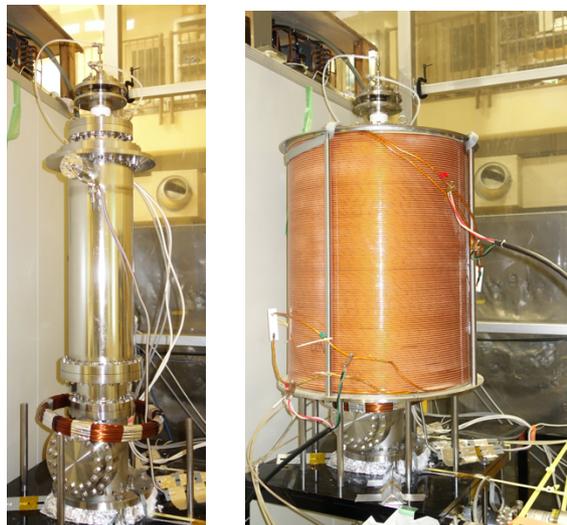


Figure 4: Sputtering machine for Ti coating.

2.5 コバルト内壁の銅膜生成

KEKB では、コバルトで製作された、セラミックとフランジをつなぐスリーブでの発熱が問題になったので、SuperKEKB では、コバルトの内壁に $100\ \mu\text{m}$ の銅の電鍍を施した。(Figure 5 参照) これにより、ビームのイメージ電流による発熱を抑える。

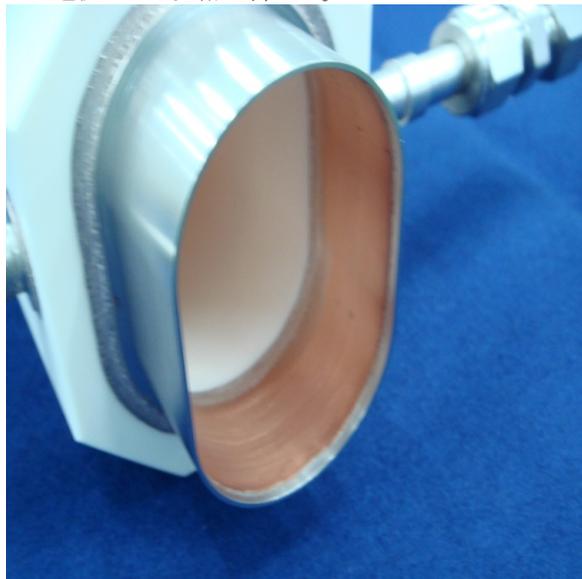
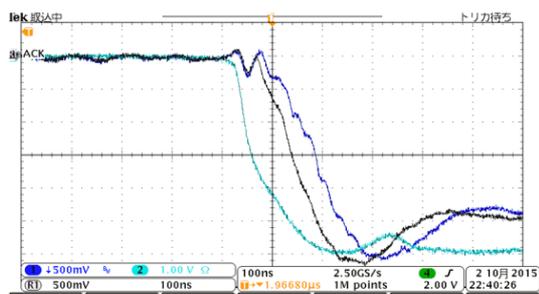


Figure 5: Cu conducting layer inner wall of Kovar sleeve.

2.6 セラミックチェンバーのベンチテスト

キッカー磁場がセラミックチェンバーの中に入っていくことの確認と冷却能力の確認をテストベンチにて行った。水平方向アポートキッカー電磁石の磁場の立ち上がり時間は、チェンバー内部に挿入した pick up コイルからの信号を積分することによって測定した。Figure 6 に、キッカー電磁石電源の出力電流、セラミックチェンバーがある場合とない場合での pick up コイルからの信号を示す。これより、 $6\ \mu\text{m}$ のチタン膜がある場合に、要求される 200ns 以下の磁場の立ち上がりを満足することを確認した。



- : CT
- : Magnetic field with chamber
- : Magnetic field w/o chamber

Figure 6: Kicker field penetration test.

冷却能力の確認は、チェンバー内部にヒーターを挿入し、 5kW まで発熱させながらセラミック表面、と水路出口の冷却水温度を測定しながら行った。冷却水の溜まりによる局所的な温度上昇は見られず、セラミック全体が満遍なく冷やされていることが確認された。(Figure 7 参照)

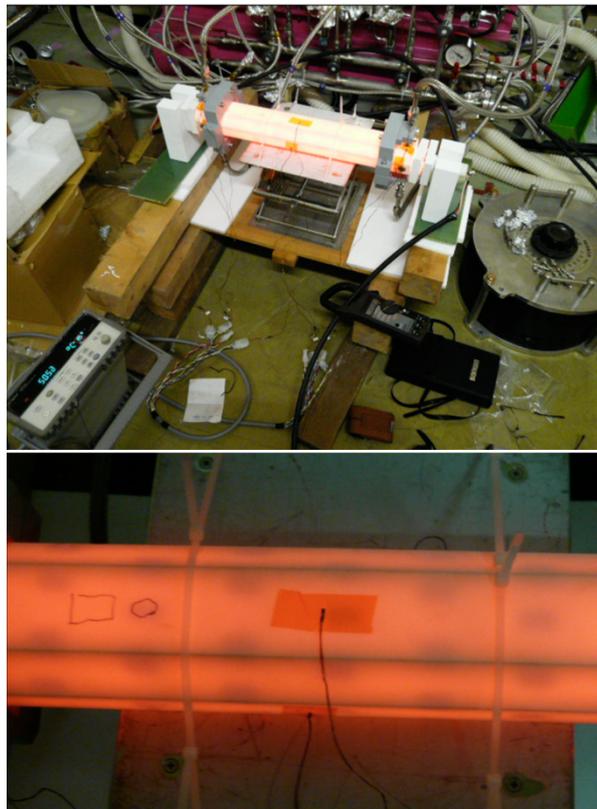


Figure 7: Ceramic chamber heat test.

3. SuperKEKB Phase I 運転時の性能

4台の水平方向アポートキッカー電磁石と垂直方向アポートキッカー電磁石が電子リングのアポートシステムの中に組み込まれた。(Figure 8 参照)

2016 年に行われた、Phase I 運転では、ビーム電流は、 1576 バンチに最大 870mA まで蓄積された。ベンチ長の設計値は 5mm で、セラミック表面での温度上昇は、セラミックあたり 3L/分 の冷却水で冷やした状態で、 1.5°C 程度であった。これより、ビームのイメージ電流による発熱は、 290W 程度と予想される。ビームのイメージ電流による発熱は、バンチ数とバンチ電流の二乗に比例すると仮定すると、SuperKEKB の設計値である 2.6A 、 2500 バンチ運転時には、 8.4°C の温度上昇、 1.8kW の発熱が予想される。採用された水冷式セラミックチェンバーは、十分な冷却能力を保持している。コバルトスリーブでの温度も測定された。 870mA のビーム電流運転時の温度上昇は、 3°C で、同様に SuperKEKB が設計電流で、運転された時の温度上昇は、 18°C 程度と予想され、これに対しても問題はない。

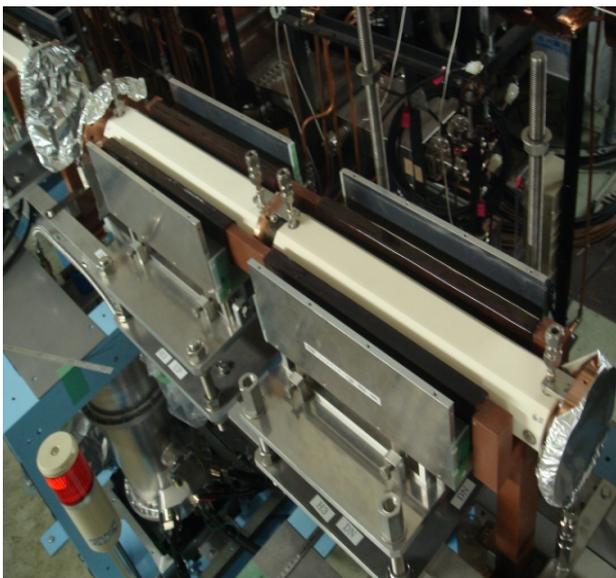


Figure 8: Installation of the ceramic chamber for the horizontal abort kicker magnet.

磁場が早く立ち上がる水平方向アボートキッカー電磁石の磁場が、チェンバー内に入っているかどうかは実際

のビームを使用して確認された。単バンチをアボートしながら、アボートされたビームが、取り出し窓を通ったかをスクリーンモニターで確認した。トリガー信号のタイミングをずらすことによって、相対的なバンチの位置を変えて、測定を行った。アボートギャップは、約 160nsec 程度まで縮められることが確認されたが、これはアボートシステムへの要求 (200nsec 以下) を満たしている。

4. 結論

2種類の水冷式セラミックチェンバーが開発、製作され SuperKEKB 電子リングのビームアボートシステムに組み込まれた。Phase I 運転では、870mA のビームが蓄積されたが、水冷式セラミックチェンバーは、十分な冷却能力を示し、アボートキッカー電磁石のパルス磁場も問題なくビームを蹴り出し、立ち上がり時間も 160nsec 程度であることが確認された。

参考文献

- [1] Y.Funakoshi *et al*, "Beam Commissioning of SuperKEKB", IPAC'2016, Busan, Korea, May 2016, TUOBA01, p.1019.
- [2] T. Mimashi *et al*, "SuperKEKB Beam Abort System", IPAC'2014, Dresden, Germany, June 2014, MOPRO023, p.2444.