

APPLICATION OF CLEARING ELECTRODES AND GROOVED SURFACES FOR THE MITIGATION OF ELECTRON CLOUD EFFECT

Yusuke Suetsugu[#], Hitoshi Fukuma, Kyo Shibata
High Energy Accelerator Research Organization (KEK)
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

Abstract

In order to mitigate the electron cloud effect in an intense positron ring, an electron clearing electrode and a grooved surface on a beam pipe have been studied. They have been tested at first using a positron beam of the KEKB B-factory (KEKB) in a wiggler magnet with a dipole-type magnetic field of 0.78 T. They showed a clear reduction in the electron density compared to the case of a flat surface with a TiN coating. The clearing electrode was then applied to a copper beam pipe assuming an application to the wiggler section in Super-KEKB. The beam pipe was then installed in the KEKB ring and tested with beam. No extra heating of the electrodes and feed-throughs were observed. For grooved surfaces, aiming for an application in the bending magnets of Super-KEKB, aluminum-alloy beam pipes with the grooved surfaces were manufactured for test by a machining method and by an extrusion method. Although further improvement is required, a promising result was obtained for the extrusion method.

電子雲効果を緩和するクリアリング電極とグループ表面の実用化

1. はじめに

陽電子・陽子蓄積リングで問題となる電子雲効果(電子雲不安定性^{[1])の電磁石中の対策として、ビームパイプ内にクリアリング電極を挿入する方法、および、ビームパイプ内表面にグループ(縦溝)構造を持たせる方法が最近注目を集めている^[2-4]。我々は、KEKB B-factory (KEKB) 陽電子リングを用いてそれらの特性試験を行っており、これまでのところ良好な結果が得られている^[5, 6]。その結果を踏まえ、KEKB のアップグレード計画である Super-KEKB での実用に向けて検討を開始した。}

クリアリング電極は、周長約 3 km のリングの内、約 160 m を占めるウィグラー電磁石部に設置する予定である。銅製のアンテナチャンバー付きビームパイプに長さ約 1 m の電極を 2 本取り付け、KEKB リングに設置してビーム試験を行った。さらに、実機の電磁石配置に合わせ、長さ約 1.7 m の電極を備えたビームパイプを試作し製作性を評価した。

一方グループ表面は、リングの内約 540 m を占める偏向電磁石部に適用する予定である。グループ表面では、グループの角度、先端部・底部の丸みがそ

の特性に大きく影響することが分かっており、実機製作上はいかに必要とする形状を実現するかが課題である。今回、機械加工で製作したグループ表面を持つブロックをビームパイプに溶接していく方法と、アルミ製ビームパイプの押し出し時にグループ表面を形成する方法の二つの手法について検討を行った。

2. クリアリング電極

2.1 試験用電極でのビームテスト

試験電極の特性試験は、KEKB 陽電子リングのウィグラー電磁石内(0.78 T)に設置されたテストチャンバーで行った^[5, 6]。陽電子ビームのエネルギーは 3.5 GeV、最大ビーム電流は 1.6 A (1585 バンチ、バンチ電荷~10 nC/bunch、バンチ間隔~6 ns)、バンチ長は約 6 mm である。

KEK で開発された電極は、図 1 に示すように非常に薄いストリップライン構造を持つ。絶縁体となるアルミナ層は厚み 0.2 mm、その上にある電極となるタングステン層は厚み 0.1 mm である。これらの層は溶射で形成され、ビームパイプに密着している。電極の幅は 40 mm、長さは 440 mm である。試験用では電極の裏に冷却水を流していたが、実際電極の温度上昇は小さかった。電極の一端は同軸構造の導入端子に接続されている(図 1)。接続部は極力平坦になるように設計されている。この導入端子を通して電極には DC ± 1 kV までの電圧が印加された。

図 2 には、試験電極の対抗面にある電子モニターで測定した、テストチャンバー内ビーム軌道付近の電子数を積分ビーム電流に対してプロットしている(ビーム電流=1450-1550mA)。電極に+300 V 以上の電圧(V_{elec})を加えた場合、印加電圧 0V の場合、そして TiN コーティングされた平面の場合を比較している。測定は 2 個の電極について 2 回行った。図から

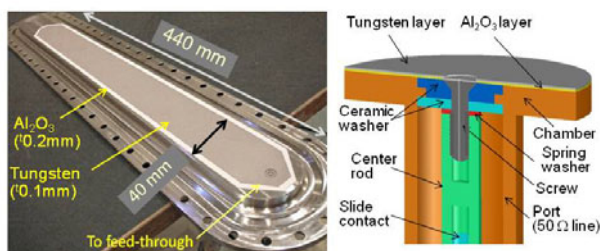


図 1 : 試験用のクリアリング電極(左)と導入端子への接続部構造(右)。

[#] yusuke.suetsugu@kek.jp

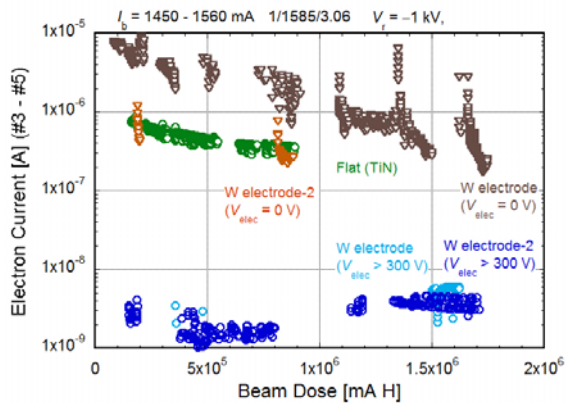


図 2 : 電子モニターで測定したビーム軌道近傍の電子数の積分ビーム電流に対する変化。電極への印加電圧(V_{elec}) ≥ 300 V、0 V の場合と TiN コーティングした平面の場合を示している。

わかるように、 $V_{elec} > 300$ V での電子電流は TiN コーティングされた平面の場合に比べ約 2 桁近く小さい。この結果は電極が磁場中で電子密度低減に大きな効果があることを示している。導入端子との接続部で放電や異常な発熱は観測されなかった。接続ケーブルの発熱も無かった。

2.2 実機ビームパイプへの適用

上記試験の結果を踏まえ、電極を Super-KEKB のウィグラー部用のビームパイプに適用すべく試験用ビームパイプを試作した。製作したビームパイプの内部を図 3 に示す。ビームチャンネルの内径は 90

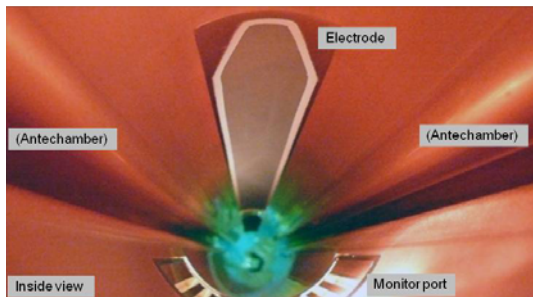


図 3 : 実機アンテチェンバー付きビームパイプ内のクリアリング電極。

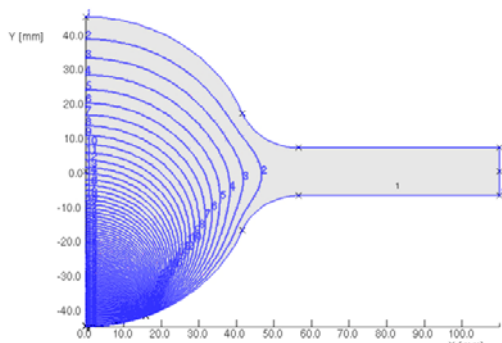


図 4 : 実機ビームパイプ内で電極が形成する電界分布(等電位線)。

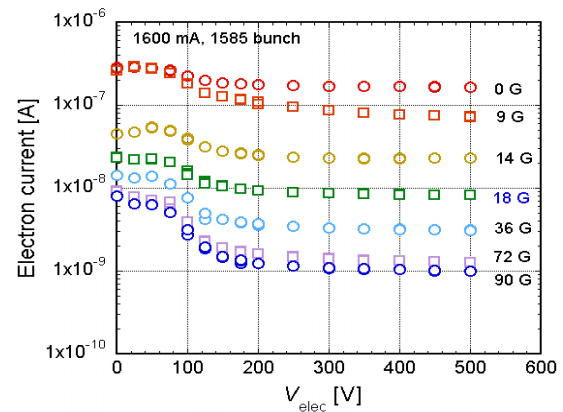


図 5 : ビーム軌道近くの電子数の印加電圧(V_{elec})依存性。電子モニター部には外部ソレノイドによって 90 G までの垂直磁場を加えた。



図 6 : 実機ビームパイプに電子ビーム溶接で装着された長さ 1.7m のクリアリング電極。端に同軸導入端子が接続される。

mm である。アンテチェンバー部の高さは 14 mm、全幅は 220 mm である。このテストチェンバーには電極部長さ 950 mm、幅 32 mm の電極が 2 本電子ビームで溶接されている。ビームパイプ内の等電位線を図 4 に示す。電極の直ぐ裏側の温度は常時測定されていた。運転中の温度は約 40°C であった。電極が無い部分との差は約 3°C であった。

本試験チェンバーは電磁石の外に設置されたが、外部からソレノイドで弱い磁場を加え電極の効果を調べた。図 5 は、 $B = 0 \sim 90$ G の時の測定電子電流の印加電圧(V_{elec})依存性である。電子密度は $B = 0$ G でも減少するがその割合は先のウィグラー電磁石内($B = 0.78$ T)の場合に比べると小さい。一つの違いはビームパイプの断面形状であるが、主な原因では磁場の有無であろう。実際、印加磁場を強くするにつれ電子数減少率は大きくなる。磁場が無い時は電極の電場は電極付近のみに有効であるためと考えられる。ビームテスト後、電圧を 1.4 kV まで印加したが電極の絶縁に問題は無かった。

2009 年から、クリアリング電極付きのビームパイプを本格的に製作している。実機では電極の長さは約 1.7 m となっている。試作ビームパイプを図 6 に示す。電極が長い穴加工時のビームパイプの変形が大きくなったが、電子ビーム溶接に問題は生じなかった。

2.3 インピーダンスの問題

ビーム試験と並行してインピーダンスの評価を行った。電極構造を薄くすることで、従来のストリップライン型の電極に比べてインピーダンスは大きく下がる。Super-KEKB のウィグラー部で使用されるとした場合、電極部の長さは一周 3016 m のリングの内約 160 m となる。全電極のロスファクターは約 $1.7 \times 10^{11} \text{ VC}^{-1}$ である(タングステン層の抵抗損込み)。一方、リングの全ロスファクターは約 $1.8 \times 10^{13} \text{ VC}^{-1}$ 、と見つめられた。この中には $\phi 90 \text{ mm}$ ビームパイプの抵抗損、各種真空コンポーネントや加速空洞が含まれている。結局、電極のリング全ロスファクターへの寄与は約 1% となる。マイクロウェーブ不安定性への影響も小さいと見積もられた。一方、垂直方向のキックファクターは合計で $1.6 \times 10^{13} \text{ VC}^{-1} \text{ m}^{-1}$ であった。横方向モードカップリング不安定性の閾値は 430 mA/bunch であり^[7]、これは設計値 ($\sim 1.44 \text{ mA/bunch}$) よりも十分大きい。

3. グループ表面

3.1 試験用グループ表面でのビーム試験

グループ表面についても、クリアリング電極の場合と同じテストチャンバーを用い、ウィグラー電磁石内でビーム試験をまず行った。ここでは、磁場中での使用を想定しているため、断面が三角形のグループ(図7)について評価した。試験に用いたグループの形状は、頂角(β) = 20–30°、深さ(d) = 2.5–5.0 mm、頂点(底点)の丸み(R) = 0.05–0.2 mm であった。材質はアルミ合金(A5052、A6063)、銅(C1020)、そしてステンレス(SS304)である。それらは機械加工で形成され脱脂洗浄された。幾つかのグループ表面には TiN コーティングが施された。

図9(a)(b)は、ビーム軌道付近の電子数の積分ビーム電流に対する変化を示している。試験チャンバーは2つあり、それぞれ異なる電子モニターで測定された。したがって絶対値は異なる。2つの図中にある、TiN コーティングされた平面は、測定時期は異なるが(図9(a)の方が早い)同一の表面である。ビーム電流は図9(a)では 1450–1560 mA、(b)で

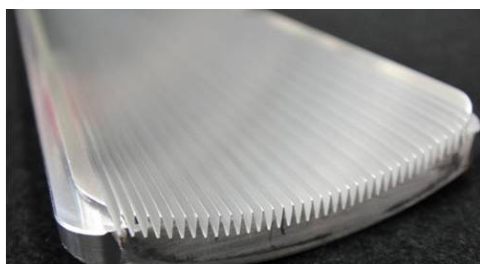
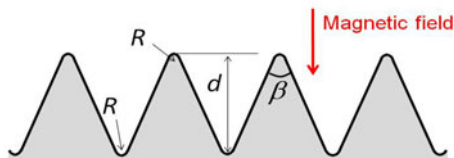


図7：試験用の三角型のグループ表面をもつブロック。上図はグループ構造のパラメータ。

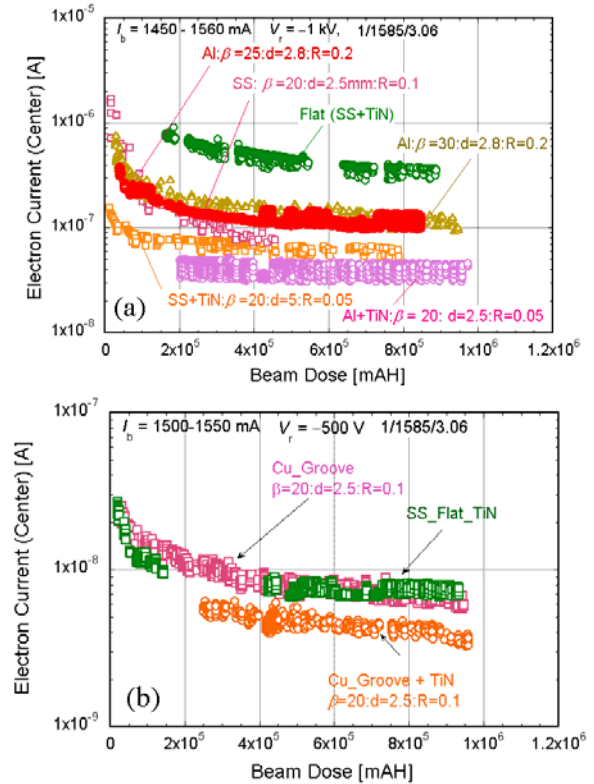


図9：各種グループ構造を持つグループ表面の場合および TiN コーティングした平面の場合でのビーム軌道付近の電子数の積分ビーム電流依存性。(a)と(b)ではテストチャンバーおよび電子モニターは異なる。

は 1500–1550 mA である。図9(a)では、アルミ合金を含めすべてのグループ表面で TiN コーティングされた平面以下の電子数となった。一方(b)でも、銅のグループ表面では TiN コーティングされた平面以下の電子数となった。表面のエージングが進むと差は広がりそうである。両測定とも、グループに TiN コーティングを施すとさらに有効となった。また、頂点の角度や頂点部(低部)の丸みが小さい方が効果は大きいようであった。磁場の無い実験室での二次電子放出率測定でも同様の結果が得られた。ただ、グループ表面の効果は磁場中の場合がより大きいようである。

3.2 実機ビームパイプへの適用

上記試験の結果を基に Super-KEKB の偏向電磁石のビームパイプにグループ表面を応用すべく検討を開始した。実機においては必要な形状を持つグループ表面をビームパイプに形成できるかどうか重要なポイントである。一つの方法は、グループ表面を機械加工で形成したブロック(例えば長さ 0.5 m)を幾つかビームチャンネルの上下に溶接する方法である。ビームパイプには予めブロック用の孔を開けておく。この方法では銅ビームパイプにもアルミビームパイプにも適用可能で、希望する鋭いグループ形状も得られる。しかし、ビームに沿って多くの溶接が必要でパイプの歪も大きく、また、ビームパイプの曲げ

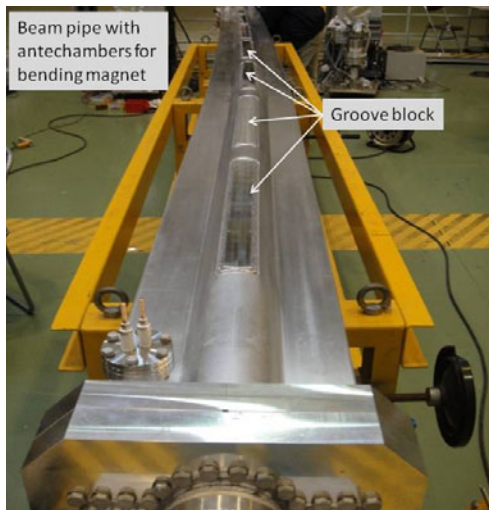


図 10 : グループ表面を機械加工で形成したブロックを溶接したアルミビームパイプ。

加工時の真空リークの危険性も高い。図 10 はこの方法で製作したアルミビームパイプである。一応製作は完了したが、実際幾つかのブロックの溶接部で曲げ加工後リークが見つかった。また、ブロック溶接部の強度が弱く曲げる際に断面が変形しやすいことも分かった。

もう一つの方法は、アルミビームパイプの場合に可能なもので、ビームパイプの押し出し時にグループ形状を形成する方法である。この手法では溶接は不要であるが、押し出し用の型の強度的問題で鋭いグループが製作できるかが課題であった。図 11 は 2009 年に最初に試作したグループ表面付き押し出しビームパイプで、グループの形状は $\beta = 25^\circ$ 、 $R = 0.2 \text{ mm}$ であった。これまでの試験から考えると未だ不十分である。この経験を基に、2010 年 $\beta = 20^\circ$ 、 $R = 0.1 \text{ mm}$ を目標に再度試作を行っている。

3.3 インピーダンスの問題

グループ表面の場合もインピーダンスが問題となる。グループ表面は、リングの内 520 m を占める偏向電磁石内で使用する予定である。縦方向インピーダンスは、グループがビーム方向に沿っているため非常に小さい。グループ表面のロスファクターのリング全ロスファクターへの寄与は約 0.5% である。なお、ロスファクターはグループ部両端部からの寄与が大きい。ここで、グループ表面の幅は 40 mm、ビームチャンネルの上下に施工するとした。また、グループ自体の抵抗損は 50% 増と仮定している。マイクロウェーブ不安定性への寄与は小さかった。一方、横方向インピーダンスに関しては。例えば、500 個の $\beta = 20^\circ$ 、 $d = 3 \text{ mm}$ のグループが 5 mrad 回転しているとすると、全キックファクターは $8.5 \times 10^{12} \text{ VC}^{-1}\text{m}^{-1}$ となる。この時でも横方向モードカップリング不安定性の閾値は 800 mA/bunch と設計値よりも十分大きい。

4. 今後の予定

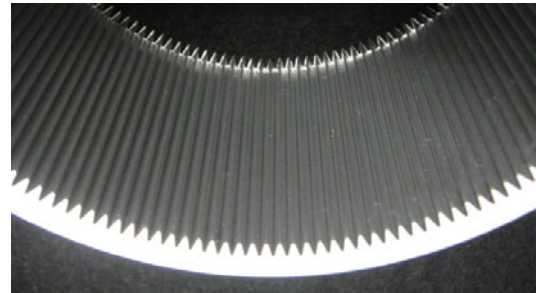


図 11 : 引き抜き時に型を使ってビームパイプ内面に形成したグループ表面。

KEK で開発された極薄クリアリング電極は磁場中での非常に有効な電子雲効果緩和策であり、Super-KEKB 陽電子リングではウィグラー部で採用される予定である。一方グループ表面も大きな効果があり、同リングの偏向電磁石部に応用すべく検討を進めている。製作方法としては、アルミビームパイプ押し出し時にグループを形成する方向が有望である。ただし、その場合には TiN コーティングを施す。両方法とも技術的には実用段階に入ったと考える。今回予定している領域ではインピーダンス的には問題もない。今後適用範囲が広がるものと期待される。

参考文献

- [1] e. g., K. Ohmi and F. Zimmermann, Phys. Rev. Lett. 85 (2000) 3821.
- [2] e. g., Reports presented in the conferences of ECLLOUD'07 (Daegu, April 9 – 12, 2007), and ECL2 Workshop (CERN, February 28 – March 2, 2007).
- [3] M. Pivi, F. K. King, R. E. Kirby, T. O. Raubenheimer, G. Stupakov and F. Le Pmpec, J. Appl. Phys., 104, 104904 (2008).
- [4] L. F. Wang, D. Raparia, J. Wei and S. Y. Zhang, Phys. Rev. Special Topics – Acc. Beams 7 (2004) 034401.
- [5] Y. Suetsugu, H. Fukuma, L. Wang, M. T. F. Pivi, A. Morishige, Y. Suzuki and M. Tsukamoto, Nucl. Instrum. Methods A598 (2008) 372.
- [6] Y. Suetsugu, H. Fukuma, M. Pivi and L. Wang, NIM-PR-A, 604, 449 (2009).
- [7] A. W. Chao and M. Tigner, “Handbook of Accelerator Physics and Engineering”, World Scientific, p.119 (1999).