

# SuperKEKB 用フラックスコンセンレータの開発

## DEVELOPMENT OF A FLUX CONCENTRATOR FOR SUPERKEKB

榎本嘉範<sup>#, A)</sup>, 紙谷琢哉<sup>A)</sup>, 横山和枝<sup>A)</sup>, 田中窓香<sup>A)</sup>, 柿原和久<sup>A)</sup>, 高富俊和<sup>B)</sup>, 岡田尚起<sup>B)</sup>, 肥後寿泰<sup>A)</sup>, 牛本信二<sup>C)</sup>

Yoshinori Enomoto<sup>#, A)</sup>, Takuya Kamitani<sup>A)</sup>, Kazue Yokoyama<sup>A)</sup>, Madoka Tanaka<sup>A)</sup>, Kazuhisa Kakihara<sup>A)</sup>, Toshikazu Takatomi<sup>B)</sup>, Naoki Okada<sup>B)</sup>, Toshiyasu Higo<sup>A)</sup>, Shinji Ushimoto<sup>C)</sup>

<sup>A)</sup> Accelerator Division, KEK

<sup>B)</sup> Mechanical Engineering Center, KEK

<sup>C)</sup> Mitsubishi Electric System & Service Co. Ltd.

### Abstract

We have been developing a flux concentrator (FC) type positron focusing solenoid for SuperKEKB. Due to a serious damage in the present FC by discharge, we have to limit the operation current to less than half of the specification. It is presumed that the yield strength of the FC head made of OFC was not sufficient against magnetic force under a static magnetic field generated by the bridge coils surrounding the FC. We have manufactured a new FC and applied a work hardening process to the head to increase the yield strength. This paper reports on a status of the new FC and a test bench to evaluate the performance of the FC under the magnetic field of the bridge coils.

## 1. はじめに

2016年2月よりコミッショニング始まった SuperKEKB 加速器では、KEKB に比べベルミノシティーを約 40 倍に増強することを目的として、様々な開発が行われている。陽電子に関しては、KEKB ではバンチ当たりの電荷量が 1 nC であったが SuperKEKB では 4 nC が要求されている [1]。しかも DR (ダンピングリング) への入射エネルギーを確保するために陽電子生成ターゲットの位置をこれまでより上流へ移動せざるをえず、ターゲット位置での入射電子エネルギーが低下し、1 電子あたりの陽電子生成量が低下することが避けられない。

これを補い要求性能である 4 nC の陽電子を確保するために、これまでよりも数倍効率のよい陽電子捕獲系の開発が進められている [2, 3, 4]。その中で中心となる装置がフラックスコンセンレータ (FC) と呼ばれるパルス電磁石である。FC は SLAC, IHEP での使用実績があり、KEK ではこれらの設計を参考に改良を加えながら開発を行っている。本論文ではその開発状況について、紹介する。

## 2. FC による陽電子の高効率捕獲

### 2.1 陽電子生成捕獲部の概要

Figure 1 に陽電子生成部の構成を示す。図左側からやってきた電子はタングステン製陽電子生成ターゲットに衝突し、対生成により陽電子を発生させる。できた陽電子はエネルギー、角度ともに大きな広がりを持つため、広いアクセプタンスを持った装置で捕獲し、後段の加速管のアクセプタンスに合わせてマッチングをとる必要がある。ターゲット直後の陽電子収束系は Figure 1 に示す bridge coil, リターンヨーク, FC head の組み合わせからな

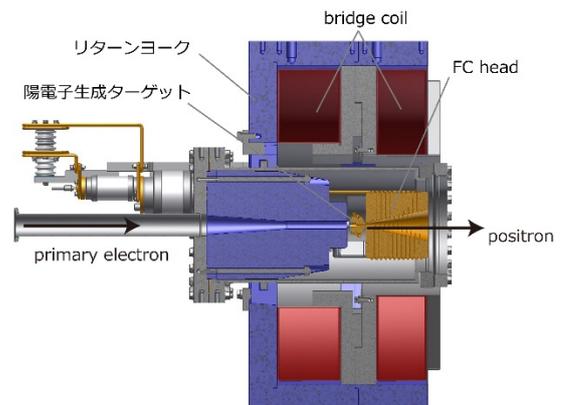


Figure 1: A cross sectional view of positron generation system.

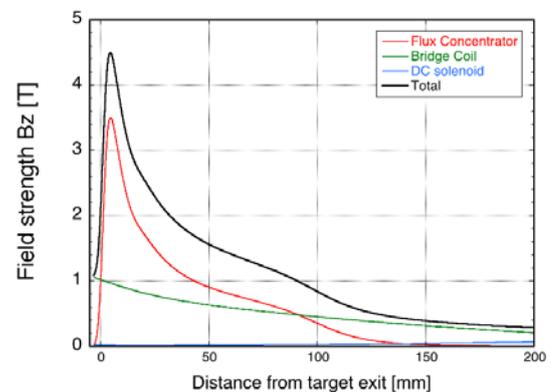


Figure 2: Magnetic field strength in the direction of the beam axis as a function of distance from the positron generation target.

<sup>#</sup> yoshinori.enomoto@kek.jp

り、bridge coilとリターンヨークがつくる1 T級の静磁場と、FC が作る、Figure 2 に示すような形のパルス強磁場との重ねあわせにより、ターゲット下流側でなだらかに弱くなっていく磁場を作り、断熱的に陽電子を輸送することによって、角度広がりを径方向の位置広がりへに転換しマッチングをとる装置といえることができる。

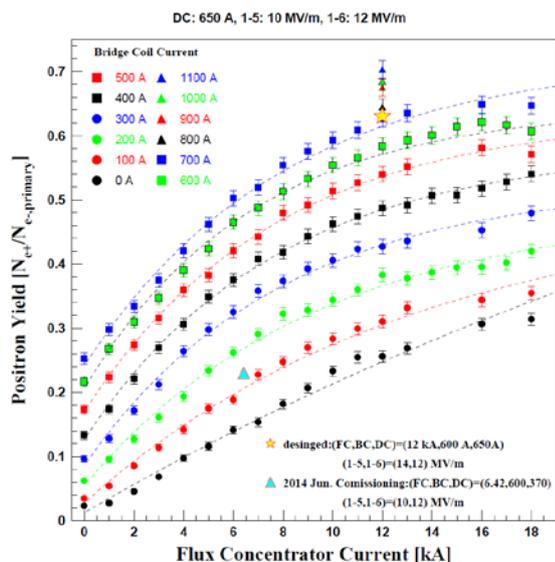


Figure 3: Capture efficiency of positron as a function of the FC current and the bridge coil current.

Figure 3 に FC head 及び、bridge coil の電流値に対する陽電子の捕獲効率を示す。横軸はFCの電流値、縦軸は入射電子あたりの陽電子捕獲効率、マーカーの違いは bridge coil の電流値を示している。図からわかるように FC、bridge coil いずれに対しても電流値を増加させ磁場を強くするのに伴い、陽電子捕獲効率は上昇していくが、徐々に増加率はなだらかになっていく。我々の設計では FC 電流値 12kA、bridge coil 電流値 750A を目標として開発を進めている

## 2.2 FC head の製作

Figure 4 に FC head の写真を示す。FC head は外径 108 mm、長さ 100 mm の無酸素銅の円柱に対し

- (1) 内周をテーパ状に加工する
- (2) 外周に 1 次コイル用銅パイプを取り付けるための溝を加工する
- (3) 1 次コイルとなる銅パイプを巻き付け、本体とろう付けする
- (4) 放電加工によってスパイラル状にスリットを入れ 2 次コイルを形成する (Figure 5)
- (5) ターゲットやフィードスルーなどと共に真空フランジにマウントする事によって作られる。

前述のように FC head には 12 kA の大電流が流れるためコイルには大きな力が働く、またコイルのインダクタンスによる電圧降下は電源のパルス幅が 4  $\mu$ s 程度の場合、約 17 kV となる。一方で(4)の放電加工による 2 次コイルの整形において、線間のギャップは狭いほうが、径方向の磁場が抑えられ、陽電子の捕獲効率が上がると



Figure 4: A photo of the FC head.

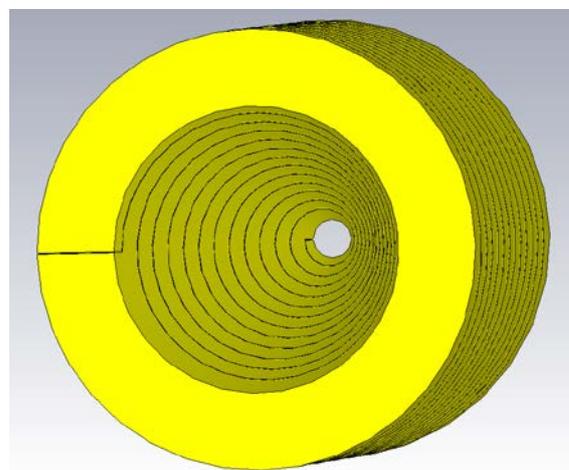


Figure 5: A schematic view of the FC head and its slits.

考えられている。現在の設計ではこのギャップは 0.2 mm に設定されており、コイルのターン数が 12 ターンであることから各ギャップには 1~2 kV 程度の電圧がかかることになる。これは電界強度にすると 5~10 MV/m にもなり、加速管の電界強度に匹敵するオーダーとなるため加工面の表面粗さやエッジ部の処理には十分な注意が必要と考えられる。

このスリット加工においては、KEK 機械工学センターにおいて、スパイラル状の溝を切るために、放電加工機のワイヤーをクランクさせる専用のジグ (Figure 6) を作っ

た上で、入念な条件だしを行い加工している。加工の詳細については参考文献[5]に詳細が記載されている。



Figure 6: A photo showing slit cutting process. The slits were made by wirecut electrical discharge machining. A dedicated jig to crank the wire was attached to the lower side of the wire guide.

### 2.3 FC head の加工硬化処理

2.2 節で述べたように 2 次コイルのギャップは 0.2 mm と狭くここに 1~2kV の電圧がかかる。加えて1次コイルを(3)でつける際、ろう付けにより、温度が上がるため、本体の無酸素銅はアニール状態となり、耐力が大きく低下する。これに大電流に伴う力がかかると FC head が変形し、場合によってはスリットの間隔が狭くなり、放電を引き起こす可能性が高まる懸念される。そこで、(4)で放電加工により、スリットを形成した後、FC head に力を加えて圧縮、スリットにシムプレートを挿入しギャップを広げるという操作を繰り返し、加工硬化により、耐力を上昇させる処理が必要になる[6]。我々が1号機を製作した時点では、加工硬化処理の重要性に対する認識が不十分だったため、この処理を行わなかった。その結果、テストスタンドにおいて、bridge coil の磁場なしの状態では 12 kA で安定運転できていたにもかかわらず、加速器トンネル内に設置し、bridge coil の磁場をかけた状態では、約半分の 5.5 kA~6 kA でしか安定運転を維持することができない状態となった。その後 bridge coil の電流を 0 A にした状態で FC head のみ通電する試験も試みたが、6 kA 程度までしか電流をかけることができなかった。おそらく、bridge coil の作る磁場によって、FC head にかかる力がより大きくなり、ギャップが減少、放電が発生し、FC head に不可逆的な変化が生じてしまったのではないかと考えている。

そこで 2 号機の製作においては

- Figure 7 に示すようにプレス機と治具を用いて FC head の圧縮を行う。
- Figure 8 に示すように圧力を解放後 0.2 mm または 0.3 mm 厚の鉄製シムプレートをスリットに挿入し隙間を広げる。

という作業を繰り返し行った。

隙間の測定は Figure 9 に示すようにズームレンズ (hozan L-815) とデジタルカメラ (hozan L-835) を用いてス



Figure 7: The FC head was pressed by a hand press machine.



Figure 8: Sim plates of 0.2mm or 0.3mm thickness were inserted into the slits to expand their gap.

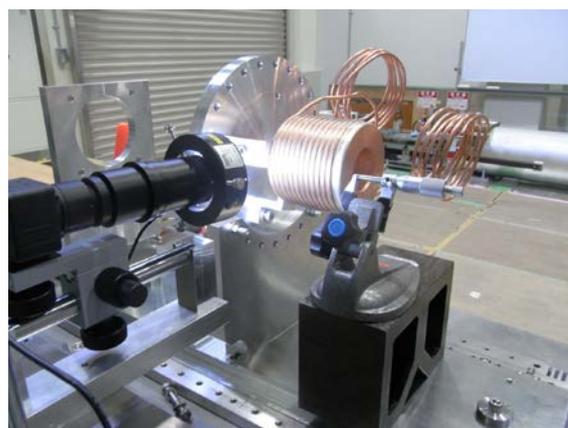


Figure 9: Each slit was recorded by a digital camera with zoom lens. Gaps of the slits were evaluated by image processing.

リットを撮影し、画像解析により間隔を評価した。

Figure 10 に典型的なスリットの写真を示す。図中右側の銀色の板は比較用に置いた鋼制定規で、水平方向に見える黒い線の間隔は 1 mm である。

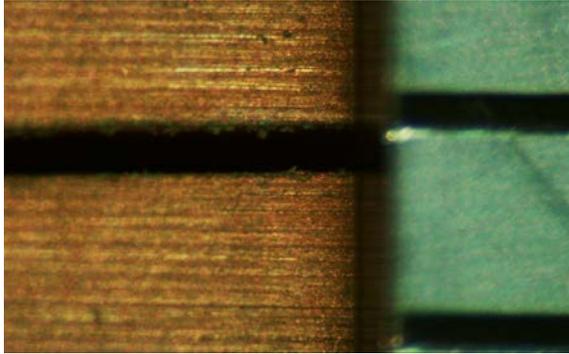


Figure 10: A typical image of the slit. Silver plate in the right side is a steel scale for reference.

Figure 11 は上記作業を 20 回行った後、プレス機で一度圧縮 (21 回目の圧縮) し、圧力を開放した状態でのスリット間隔の測定結果である (水色)。横軸は下流側から数えた各スリットの番号を表しており、コイルは 12 ターンであるから、1 番から 11 番までの全部で 11 個のスリットが存在する。全スリットが密着するまで圧縮しても圧力を開放すれば 0.2mm 程度まで隙間が回復することから、FC head の加工硬化作業は完了したと判断した。最後に 0.3mm のスペーサーを挿入し (オレンジ色) この状態で head をフランジへ取り付けることとした。

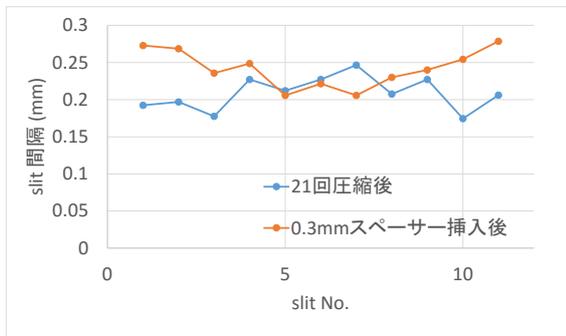


Figure 11: Slit gap of each slit.

### 3. FC2 号機アセンブリ、テストスタンドの準備と今後の計画

加工硬化を施した、新たな head の性能を評価するためのテストスタンドの整備も並行して行っている。特に bridge coil による静磁場の存在の有無が、2.3 で述べたように影響すると考えられるため、これを含めたフルセットのアセンブリを用いたテストを行うことを目標とし、環境整備を行ってきた。計測系に関しては、head に放電現象が発生した際に、場所を特定し対策を効率的に行うために下流側 (Figure 1 では右側) のフランジはビューポートとし、トリガーカメラを設置している。また放電の際は一部隙間が短絡状態になり、インダクタンスが変化し、head に流れる電流波形が変わるものと予想される。これを捉えるために、CT とデジタルタイザーを用いて、head に流れる電流波形

をモニターしている。いずれも 50 Hz の繰り返し運転に対応しており、各パルス毎のデータ収集が可能となっている。

これらを用いたテストは 2016 年夏より進める予定であり、性能評価が順調に進めば、2016 年度後半から末にかけて、2 号機をビームラインに設置し運転に投入する予定である。

### 4. まとめ

SuperKEKB で要求される 4 nC の陽電子を供給するために開発を進めている、フラックスコンセントレータ (FC) に関して進捗と今後の計画を報告した。特に FC head の製作にあたっては加工硬化作業が重要と考えられ、その手法に関して、0.2 mm という狭い隙間の評価方法と合わせて紹介した。今後は定格運転を目指して、製作した FC head の評価試験を進める予定である。

### 5. 謝辞

SLAC の John Sheppard 氏, Eric. Bong 氏を中心に多くの方から SLAC での FC 製作、運用に関する総合的な情報を頂いた [7]。ここに深く感謝いたします。

### 参考文献

- [1] 肥後寿泰, 他 “SuperKEKB のための入射器アップグレード”, 第 9 回日本加速器学会, 大阪, 2012.
- [2] 紙谷琢哉, 他 “SuperKEKB に向けた陽電子源の増強の現状”, 第 9 回日本加速器学会, 大阪, 2012.
- [3] 紙谷琢哉, 他, “SuperKEKB 陽電子源の初期コミッションの現状”, 第 11 回日本加速器学会, 青森, 2014.
- [4] 紙谷琢哉, 他, “SuperKEKB 陽電子増強の現状”, 第 12 回日本加速器学会, 福井, 2015.
- [5] 岡田尚起, 高富俊和, 小林芳治, “フラックスコンセントレータの螺旋加工の開発”, 第 14 回高エネ研メカ・ワークショップ報告集, p99-101, 2013.
- [6] A. V. Kulikov, S. D. Eclund and E.M. Reuter, “SLC POSITRON SOURCE PULSED FLUX CONCENTRATOR”, SLAC-PB-5473, 1991.
- [7] Eric L. Bong, SLAC, Private communication.