

## PF 入射部更新用新セプタム電磁石の特性評価

### CHARACTERISTIC EVALUATION OF THE NEW SEPTUM MAGNET FOR PF INJECTION SECTION UPGRADE

上田 明<sup>#</sup>, 原田 健太郎, 東 直, 本田 融, 小林 幸則, 満田 史織, 宮内 洋司, 中村 典雄, 長橋 進也,  
野上 隆史, 帯名 崇, 多田野 幹人, 高井 良太, 高木 宏之, 谷本 育律, 内山 隆司  
Akira Ueda <sup>#</sup>, Kentaro Harada, Nao Higashi, Tohru Honda, Yukinori Kobayashi, Chikaori Mitsuda, Hiroshi Miyauchi,  
Norio Nakamura, Shinya Nagahashi, Takashi Nogami, Takashi Obina, Mikito Tadano, Ryota Takai, Hiroyuki Takaki,  
Yasunori Tanimoto, Takashi Uchiyama  
High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

#### Abstract

In summer 2020, we upgraded the injection section at the Photon Factory (PF), and the new septum 2 magnet was constructed for this upgrade. The former septum 2 magnet was installed in the septum vacuum vessel, but the new septum 2 magnet was made to use it in the atmosphere with Inconel duct in the gap of the magnet, and the septum plate was extended for reducing leakage field just like the septum 2 magnet at the Photon Factory advanced ring (PF-AR). We decided the present septum magnet power supply was used after this upgrade, so the magnetic field decreasing by the Inconel thin duct was compensated to decrease the magnet Gap height. We measured several characteristics of the septum 2 magnet without thin duct, with 0.3mm SUS thin duct and 0.3mm Inconel thin duct. And we adopted the Inconel duct based on the result of the characteristics measurement.

#### 1. はじめに

KEK-Photon Factory では、2020 年の夏季停止期間に入射部更新作業を行った[1]。この更新に伴い、新規にセプタム 2 電磁石を製作した。従来のセプタム電磁石は真空槽内に設置されていたが、今回製作したセプタム電磁石は、PF-AR のセプタム 2 電磁石[2, 3]と同様に薄肉ダクトを GAP 内に挟んだアウトバキューム型に変更した。電磁石電源部は従来の物を使用するため、薄肉ダクトの渦電流効果による減磁分を GAP の高さを変更することにより補っている。また、セプタム板を延長することにより蓄積リング側に漏れる磁場を押さええている。

更新前の真空ダクトは Beam transport (BT) 側セプタム真空槽とリング側の真空ダクトが一体構造となっていた。今回の更新では、BT 側とリング側の真空ダクトを分割した構造にしている[4]。同時にプロフィールモニターも更新された[5]。セプタム壁の位置は中心軌道から 5 mm 寄せて 16 mm とし入射のスキームも改善している。入射軌道は、BT の測量結果より設計され、精密なアライメントを行い設置した[6]。

ここでは新規に製作されたセプタム 2 電磁石の概要と特性評価結果を報告する。

#### 2. PF 入射部更新

更新前の PF 入射部は BT 側にセプタム電磁石が入った真空槽とリング側の真空ダクトが一体となっていた。今回の更新では、真空ダクトを BT 側は Inconel 製薄肉ダクトを主体としたダクトとアルミ製のリング側真空ダクトの 2 分割構造としリング側ダクトの冷却水チャンネルをダクトの上下に配置して真空内での冷却水漏れの恐れのない

構造としている。Figure 1 に更新後の PF 入射部を示す。

上部の緑色の部分が BT 側ダクトであり、下部の青い部分が蓄積リング側真空ダクトである。

また、蓄積リングへの入射は、BT 側ダクト先端部の 0.2 mm SUS 窓と同じく蓄積リング側の 0.2 mm SUS 窓を通して行われる。BT 側の SUS 窓は 45 度に傾斜していて、入射ビームが通過した時の OTR 光を観測する常時観測プロフィールモニターになっている。またこれとは別に精密なプロフィール観測用に YAG シンチレータを用いたプロフィールモニターも設置された。

この更新のためにセプタム壁の位置を中心軌道から 21 mm より 5 mm 近づけ 16 mm とし入射スキームの改善をしている。電磁石の設置は BT ラインからの測量結果

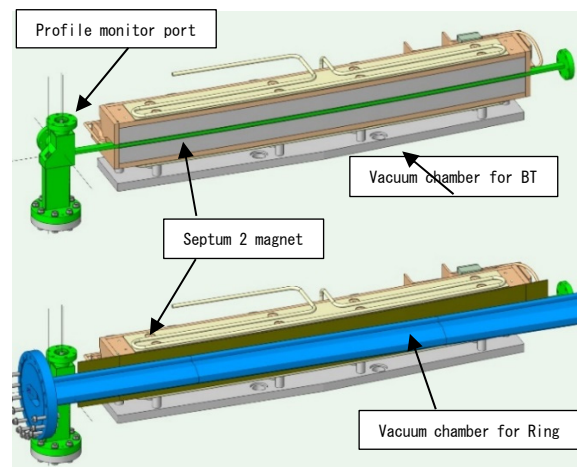


Figure 1: the upgraded injection section. Upper picture is the septum 2 magnet with vacuum chamber for BT line, and lower picture is the whole injection section with the vacuum chamber for the storage ring.

<sup>#</sup> akira.ueda@kek.jp

により入射軌道を設計し、精密なアライメントをして設置した。

### 3. PF 新セプタム2電磁石

PF セプタム電磁石は、渦電流セプタム板を持ったパッシブ型セプタム電磁石である。Figure 2 に断面図とセプタム2電磁石の写真を示す。

今回の更新は、電磁石部のみ新規に製作され、電源部は既設の物を使用する。その為、薄肉ダクトによる磁場の減少分を電磁石の Gap の高さを 9.5 mm から 8.6 mm に狭めることにより補った。また、また電源から見た時の電磁石のインダクタンスが変化しないように、Gap の幅  $w$  も電磁石のインダクタンスの式

$$L = \mu_0 N^2 w l / h$$

を使って 21.5 mm から 19 mm とした。ここで  $L$  はインダクタンス、 $\mu_0$  は真空の透磁率、 $N$  はコイルの巻き数、 $w$  は、Gap の幅、 $l$  は電磁石の長さ、 $h$  は Gap の高さである。

PF セプタム2電磁石のセプタム板は、2 mm の銅製渦電流シールド及び 0.35 mm のケイ素鋼板の磁気シールドにより構成されている。このセプタム板により蓄積リング側への磁場の漏れを防いでいる。

また、PF-AR のセプタム2電磁石と同様にセプタム板を入射電子の出口方向に 100 mm 延長し、電磁石の Gap からの漏れ磁場も効果的に抑制する構造とした。

電磁石の長さは 1 m で偏向角は 5 度、電磁石自身も曲率を持っている。

Table1 にセプタム2電磁石のパラメータを示す。

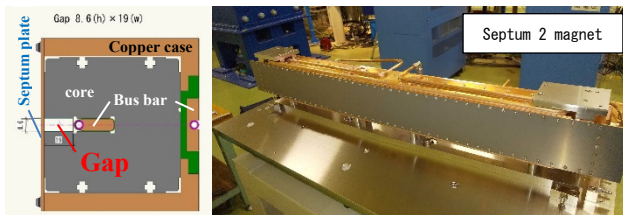


Figure 2: PF septum 2 magnet. Left side picture is a cross section of the magnet. Silicon steels are packed in the copper case.

PF セプタム電磁石は、以下の順番で製作された。

- i. 銅製のケースにケイ素鋼板を敷き詰める (Fig. 2 左の断面図を参照)。この銅ケースはセプタムの偏向角と同じく曲率を持っているために、特別な治具を使用してケイ素鋼板を一樣な圧力かけながら作業を行った。
- ii. GAP 内に冷却水配管を施した Bus Bar 設置し、その固定と全体の絶縁のためにポリイミドで真空含浸を行う。
- iii. 電磁石背面に絶縁材を固定し背面の Bus Bar を設置及び銅ケースの上下に冷却水配管を設置。
- iv. 銅製 (2 mm) 及びケイ素鋼板製 (0.35 mm) のセプタム板を銅ケースに設置。
- v. 電磁石下部にベースプレート及び銅ケースの上面の左右の位置にアライメント座を設置。

Table 1: Parameters of the Septum 2 Magnet

Maximum peak current	6000 [A]
Maximum peak magnetic field	8000 [Gauss]
Maximum DC voltage	1.5 [kV]
Pulse width	100 [µsec]
Maximum repetition rate	12.5 [p.p.s]
Number of coil turns	1 [turn]
Magnet gap height	8.6 [mm]
Magnet length	1.0 [m]
Magnet gap width	19 [mm]
Inductance of the magnet	3.7 [µH]
Material of the septum plate	Cu[2mm] + silicon steel[0.35mm]
Material of the magnet core	silicon steel:35H600 NSSMC

### 4. セプタム2電磁石の特性評価

#### 4.1 磁場測定

電磁石の Gap 内に薄肉ダクトを設置すると Gap 内に発生するパルス磁場により渦電流が発生する。この渦電流により磁場の減衰や電源対する Loss が生じる。

この特性を評価するために薄肉ダクトなし、0.3 mm SUS 製薄肉ダクト、および 0.3 mm Inconel 製薄肉ダクトが設置された状態で磁場測定を行った。Inconel 材は、SUS 材よりも約 1.7 倍抵抗値が高く渦電流を抑える効果を期待し選定された。

磁場測定は、狭いセプタム電磁石の GAP に挿入するため 2 mm のボビンに 50 ts 巻いたサーチコイルを使用した。コイルの面積は標準コイルと比較する事により校正され校正値は  $2.505 \times 10^{-4} \text{ m}^2$  である。

Figure 3 に励磁曲線 (上部) と電源電圧に対するパルス電流 (下部) のグラフを示す。励磁曲線により薄肉ダクトの影響による磁場の減少は、SUS 製薄肉ダクトの場合は -1.56%、Inconel 製薄肉ダクトの場合は、-0.67% とわかる。

また、薄肉ダクトの Loss により電源電圧に対する電流値も減少しその値は、SUS 製薄肉ダクト場合は、-6.18%、Inconel 薄肉ダクト場合は -3.78% である。この二つの効果を足し合わせると、電源電圧に対する磁場の減衰は、それぞれ -7.74% と -4.45% となり、Inconel 製薄肉ダクトの方がより Loss が少ないことが分かった。

次に、ビーム進行方向にサーチコイルを動かす事により進行方向の磁場分布を測定した。測定は、Gap の中心位置、ビーム進行方向にコアエッジを  $Z=0$  として 50 mm から 100 mm まで行った。Figure 4 にビーム進行方向の磁場分布を示す。磁場は、コアエッジの直前で急激に減少を始める事が分かる。また、減少の様子は、薄肉ダクトの種類に寄らない事が分かる。この磁場分布を積分した値より effective length は、1009.35 mm と計算された。

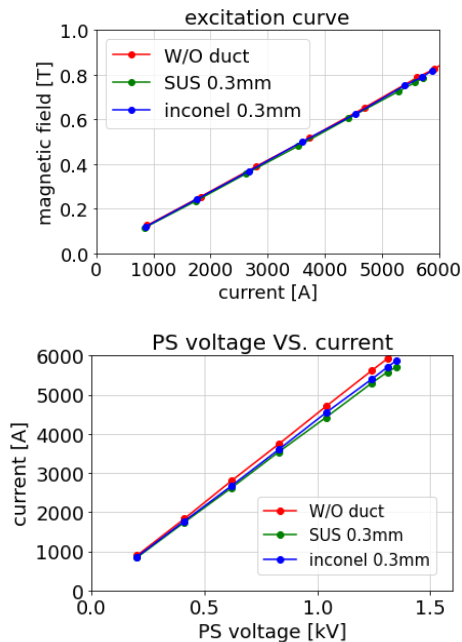


Figure 3: The excitation curve of the septum 2 magnet (upper) and the pulsed current value for the power supply voltage (lower).

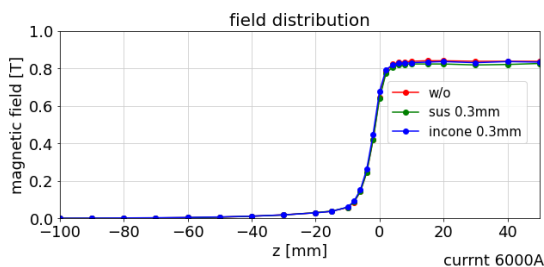


Figure 4: The magnetic field distribution along the beam line. Magnet core edge is at Z=0 point. The magnetic field suddenly decreases when over the core edge of the magnet.

PFセプタム2電磁石では、上記のように銅製及びケイ素鋼板製のセプタム板により効果的に蓄積リング側への漏れ磁場を防いでいる。しかし、更新前のセプタム2電磁石では、セプタム板が電磁石の端板位置で終わっているため、Gapからの漏れ磁場が蓄積リング側にかかりビームを振動させていた。

このGapからの漏れ磁場を抑制するために、PF-ARのセプタム2電磁石と同じように、セプタム板を延長している。セプタム板を40mm延長したPF-ARでは、bumpの高さの位置で、最大25 Gauss程度の漏れ磁場を観測された[2, 3]。その為、PFセプタム2電磁石では、これを100mm延長する事にした。

セプタム板を延長した場合としない場合の蓄積ビームへの影響を見るために蓄積リング側のbumpの高さの位置とダクト中心の位置での漏れ磁場を測定した。

Figure 5に漏れ磁場測定時のセットアップを示す。測定は、Inconel製薄肉ダクトをセットし蓄積リング側にも真空ダクトを模擬するようにセプタム側に1mm、上下と背面に4mmのアルミ板をセットした状態で行った。

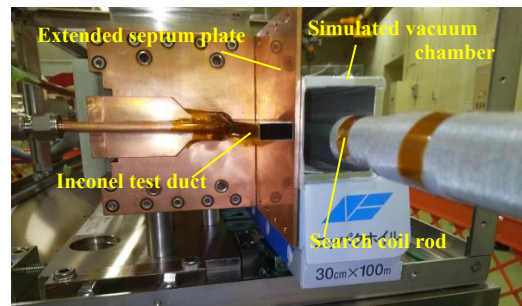


Figure 5: the setup of the magnetic field measurement for the leakage field with the septum plate extension. The search coil was covered with the simulated vacuum duct.

Figure 6にセプタム板を延長しない場合とセプタム板を100mm延長した場合の漏れ磁場の測定結果を示す。ここでZ=0の位置が電磁石コアのエッジの位置である。

セプタム板を延長しない場合は、蓄積電子のbumpの位置で300 Gauss以上、蓄積ビームダクトの中心でも100 Gauss程度の漏れ磁場があることが分かる。これを、100mmセプタム板を延長した場合は、どの位置でも数 Gauss程度の漏れ磁場となる事が分かった。

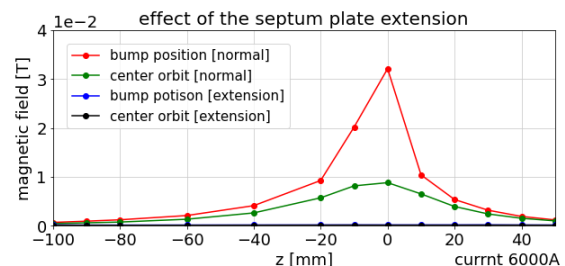


Figure 6: the leakage field from the magnet gap. The leakage field from the magnet Gap is reduced by the extended septum plate.

#### 4.2 薄肉ダクトの電源への影響

薄肉ダクトによるLossは、電磁石の磁場に影響するだけでなく、電源の再充電時間にも影響を与える。

Figure 7に電源部の充電波形を示す。上段の黄色の波形がコンデンサー部の電圧波形である。下段は放電付近(上段の白棒)の拡大図(LTSpiceでのシミュレーション結果)である。

セプタム電磁石電源のコンデンサーに充電された電荷は、サイリスタスイッチがONされると放電し、ハーフサイン形状のパルス電流を発生させる。その後コンデンサー電圧は、一旦マイナスに振れるが、その後、エネルギー回生回路が働きrecovery pointまで再充電される。

その後、不足分をインバータにより補われる。このrecovery pointが薄肉ダクトのLossにより下がり、再充電時間が伸びる。

この再充電時間(Fig. 5(上部)のrecharging time)が電源電圧を変化させた時に薄肉ダクトなし、SUS製薄肉ダクト及びInconel製薄肉ダクトありの場合で、どのように変化するかを測定した。

Figure 8に測定結果を示す。薄肉ダクトなしの場合に比べて、薄肉ダクトありの場合は、再充電時間が伸びる

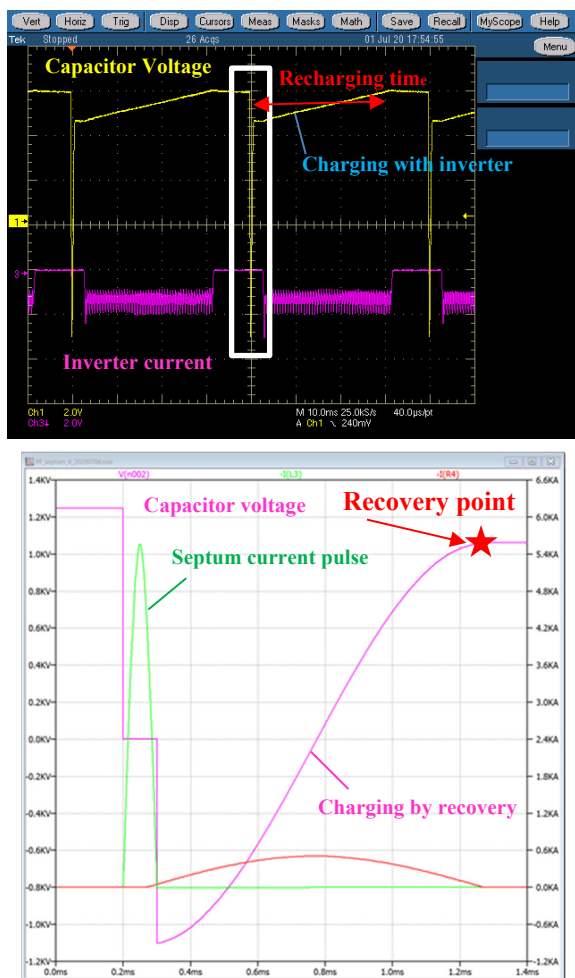


Figure 7: Charging wave form of the septum 2 power supply. The lower figure is an enlarged picture in the white frame of the upper figure.

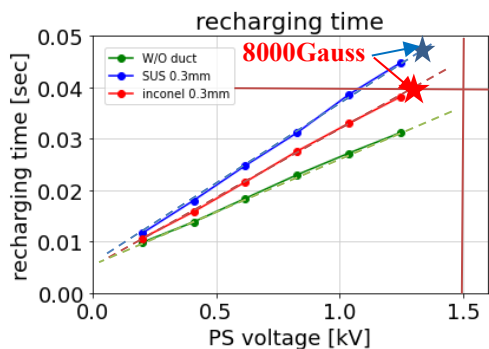


Figure 8: recharging time for the voltage of the power supply. The recharge time becomes long by the loss of the thin duct.

事がわかる。セプタム電源の仕様は 25 pulse per second (p.p.s)であるが、SUS 製薄肉ダクトの場合は、定格の 8000 Gauss の時に再充電時間が大きく 40 msec を超えるため、25 p.p.s では充電が間に合わない事が分かる。Inconel 製薄肉ダクトの場合では、SUS 製薄肉ダクトよりも

Loss が少ないため再充電時間の伸びる割合も少ないが、8000 Gauss 時にちょうど 40 msec の結果となった。

このため、現在の PF の入射の繰り返しは、最大でも 5 p.p.s であることも考慮して、実用上の最大繰り返しを 12.5 p.p.s に落とすことにした。

## 5. まとめ

2020 年の夏季停止期間に行われた PF リング入射部更新に伴い、新規にセプタム2電磁石を更新した。セプタム 2 電磁石は、Inconel 薄肉ダクトを Gap に挟む事により、従来のインバキューム型からアウトバキューム型に変更した。また、入射スキームの改善、真空ダクト、スクリーンモニタなどを更新し、セプタム電磁石は、BT-Line より精密なアライメントの後、設置された。

今回の更新では、セプタム電磁石のみ製作し電源部は既設の物を使用するため薄肉ダクトによる減磁を電磁石の Gap を 9.5 mm から 8.6 mm 縮めることにより補った。

薄肉ダクトによる減磁・Loss の効果を SUS 及び Inconel の test duct により評価し、より特性の優れた Inconel 製の薄肉ダクトを採用した。

Gap からの漏れ磁場を抑制するために、セプタム板を 100 mm 延長した。これにより延長なしの場合は最大 350 Gauss 程度あった漏れ磁場を、～数 Gauss まで抑制した。

薄肉ダクトの Loss のため、電源の充電時間が長くなる。SUSダクトの場合は、40 msec をオーバーしてしまうため、仕様の 25 p.p.s を満たさない事が分かった。Inconel ダクトでも 8000 Gauss でちょうど 40 msec であるため運用は最大 12.5 p.p.s とした。

## 参考文献

- [1] C. Mitsuda *et al.*, “INJECTION SECTION UPGRADING WITH THE SEPTUM-MAGNET REPLACEMENT IN KEK-PF RING”, Proceedings of IPAC2021, MOPAB091.
- [2] A. Ueda *et al.*, “CONSTRUCTION OF THE NEW SEPTUM MAGNET SYSTEMS FOR PF-ADVANCED RING”, Proceedings of IPAC2017, Copenhagen, Denmark, p3398.
- [3] A. Ueda *et al.*, “PF-AR 用新キッカー及びセプタム電磁石の磁場測定”, Proc. of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Chiba Japan, p.1222 (2016).
- [4] Y. Tanimoto *et al.*, “PF リング入射部高度化改造における真空システム更新”, MOP011, in these proceedings.
- [5] R. Takai *et al.*, “セプタム壁近傍における入射ビームプロファイルモニターとエアギャップ用金属窓を利用した常時プロファイルモニターの開発”, MOP026, in these proceedings.
- [6] S. Nagahashi *et al.*, “PF 入射部更新改造にともなう入射ビーム軌道の設計とアライメント”, THP008, in these proceedings.