

PF リング入射部高度化改造における真空システム更新

VACUUM SYSTEM RENEWAL FOR THE PF-RING INJECTION-SECTION UPGRADE

谷本 育律^{#, A,B)}, 野上 隆史^{A)}, 高井 良太^{A,B)}, 内山 隆司^{A)}, 上田 明^{A)}, 満田 史織^{A,B)}, 長橋 進也^{A)},
原田 健太郎^{A,B)}, 帯名 崇^{A,B)}, 本田 融^{A,B)}

Yasunori Tanimoto^{A,B)}, Takashi Nogami^{A)}, Ryota Takai^{A,B)}, Takashi Uchiyama^{A)}, Akira Ueda^{A)}, Chikaori Mitsuda^{A,B)},
Shinya Nagahashi^{A)}, Kentaro Harada^{A,B)}, Takashi Obina^{A,B)}, Tohru Honda^{A,B)}

^{A)}High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

^{B)}Graduate University for Advanced Studies (SOKENDAI)

Abstract

The KEK PF-ring underwent upgrade of the injection section in 2020, aiming at improving injection efficiency by replacing the aged Septum#2 (S2) magnet, neighboring vacuum chambers and beam profile monitors. The new vacuum system is designed to increase maintainability in two manners: 1) hiring an in-air type septum magnet, by which large outgassing from the magnet system can be eluded, and 2) forming an air gap between the beam transport line and the storage ring, by which the two vacua are completely separated and an induced current loop can be cut off. New technical challenges are also adopted: 1) a 0.3 mm thick Inconel vacuum chamber for the in-air S2 magnet are fabricated by fiber laser welding, by which the loss of the pulsed magnetic fields can be reduced, and 2) two 0.2 mm thick stainless steel beam windows are welded to form the air gap, one of which is used as a full-time OTR beam profile monitor. The new vacuum system of the injection section was successfully commissioned, providing optimized beam orbits and suppressing beam disturbance originated by the pulsed magnetic fields.

1. はじめに

KEK の 2.5 GeV PF リングでは、2020 年夏期停止期間中に入射効率の改善とメンテナンス性の向上を主目的とした入射部高度化改造を行い[1]、セプタム 2 (S2) 電磁石に加え[2]、周辺真空ダクトやビームモニタ[3]を更新した。本改造では電磁石やビームダクトの位置精度の向上も重要な課題となるため、長年の建物の変形による電磁石のずれを精密に測量し、その結果に基づいてビーム軌道の最適化とビームダクトの精密設計を行った[4]。

旧 S2 真空チェンバは 1988 年製で、in-vacuum 型パルス電磁石を格納する入射路真空槽にセプタム壁や SUS 箔ビーム窓を介して蓄積ビーム路が結合された一体型であった。2015 年以降は蓄積リング側のセ

プタム壁に沿った放射光吸収板の水冷配管から断続的に真空リークを起こしていた。この対処のため、2017 年以降は上流側に放射光アブソーバを増設し、放射光吸収板への熱負荷を低減させて運用してきたが、このアブソーバによる物理アパーチャの制限が入射調整を困難にする要因となっていた。また、入射路真空槽では、S2 電磁石からの放出ガスや大口径 O リングからの透過ガスによってイオンポンプが高負荷となり、停電後の真空立上げを困難にしてきた。

今回の入射部真空システム更新は、これらの問題を解消して、堅牢性やメンテナンス性、および位置精度を向上させることを目的としている。そして、入射スキームの新設計を可能して、入射効率の改善や入射時ビーム振動の抑制を目指す。入射部改造後の真空システム構成を Fig. 1 に示す。

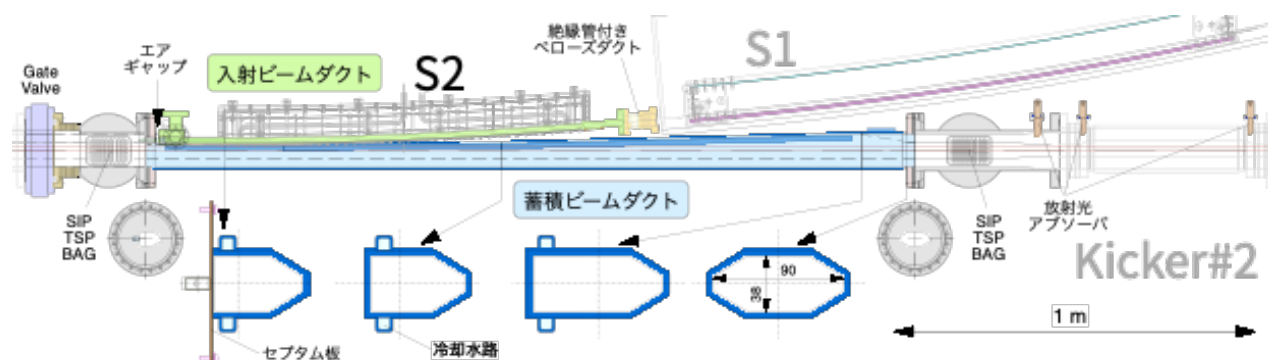


Figure 1: Layout of the new beam ducts in the PF-ring injection section.

[#]yasunori.tanimoto@kek.jp

2. 新入射スキーム

Figure 2 に入射点の断面図を示す。新入射スキームでは、キッカーバンプの高さを 12.5 mm (改造前 17.5 mm) とし、入射ビームをそのバンプ軌道から 9.85 mm (同 13.0 mm) まで近づけて初期振幅を改善させる設計となっている。

バンプビームと入射ビームの設計軌道では、ともに各ダクト壁まで 5σ のビーム拡がり (それぞれ 3.5 mm と 2.5 mm) が確保されている。蓄積ビーム軌道からダクト壁までの距離は 16 mm ($\beta_x = 9.5$ m) で、この入射点がリングのミニマムアパーチャとなる。

セパタム板を 2 mm 厚の銅と 0.35 mm 厚のケイ素鋼板で構成し、蓄積ビームダクトの厚さを 1 mm まで薄くした。入射ビーム側は、ダクト壁の厚さを 0.3 mm、絶縁用カプトンフィルムを 150 μm (75 μm \times 2 重)、設置隙間を 50 μm とした。

真空システムの設計や製作では、上記のような薄い板厚の加工技術に加え、ビームダクトに要求される材料特性 (熱伝導度や電気抵抗率など) をもたせることが重要な課題となる。

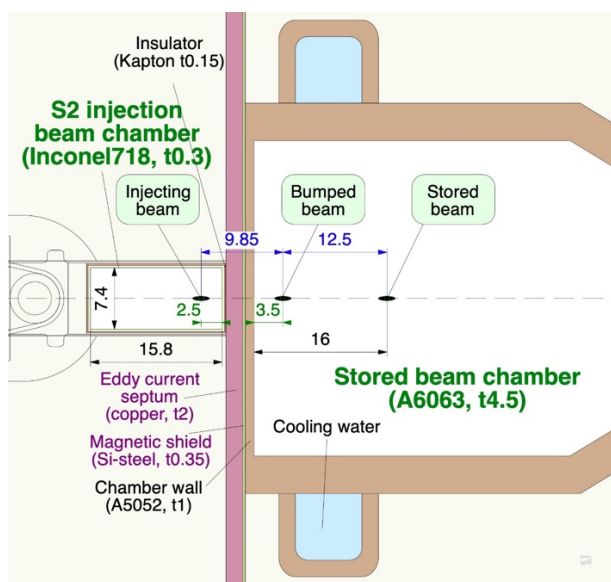


Figure 2: Cross-sectional view at the injection point.

3. 新入射部真空システムの設計

まず、入射路側のビームダクトの基本設計において、S2 電磁石を in-air 型とし、ビームダクトを磁極間に設置する方針とした。これにより S2 電磁石からのガス放出問題の解消と真空槽の簡素化が図られ、メンテナンス性を向上させることが可能になる。

さらに、入射ビーム路にエアギャップを設けて、入射路と蓄積リングの真空を完全に分離する方針とした。本構造は、NewSUBARU[5]や台湾 TPS[6]などで報告事例のある、パルス磁場によってダクトに誘起される渦電流が蓄積ビームの振動を引き起こす問題や、PF-AR でも懸案となっているループ電流によるパワー損失が電源の周波数を制限する問題の解決に有効である。新システムではエアギャップに加え、

絶縁管や絶縁固定治具を用いることで、蓄積リングに及ぶ広範囲なループ電流を遮断する。以下に入射路側と蓄積リング側の 2 本の新 S2 ビームダクトの設計方針を紹介する。

3.1 S2 入射ビームダクト

in-air 型セパタム電磁石の場合、ビームダクトにはパルス磁場に対する高い透過性が求められる。新ダクトでは、渦電流によるパルス磁場の減衰と遅延を低減させるため、電気抵抗率が SUS304 の約 1.7 倍のインコネル 718 を採用し、さらにダクト壁の厚さを 0.3 mm まで薄くした。これにより、8000 Gauss の目標パルス磁場条件において、渦電流による電流損失率が、同じ厚さの SUS ダクトが 6.18 % であるに対して 3.78 % まで向上する。さらに、電源の定格電圧 1.5 kV に対して 1.3 kV での余裕をもたせた運転が可能となる[2]。

新 S2 入射ビームダクトは全長約 1.3 m で、S2 電磁石の長さ 1 m、高さ 8.6 mm の磁極間に、インコネルパイプ部をカプトンフィルムで絶縁した状態で挿入される (Fig. 3)。

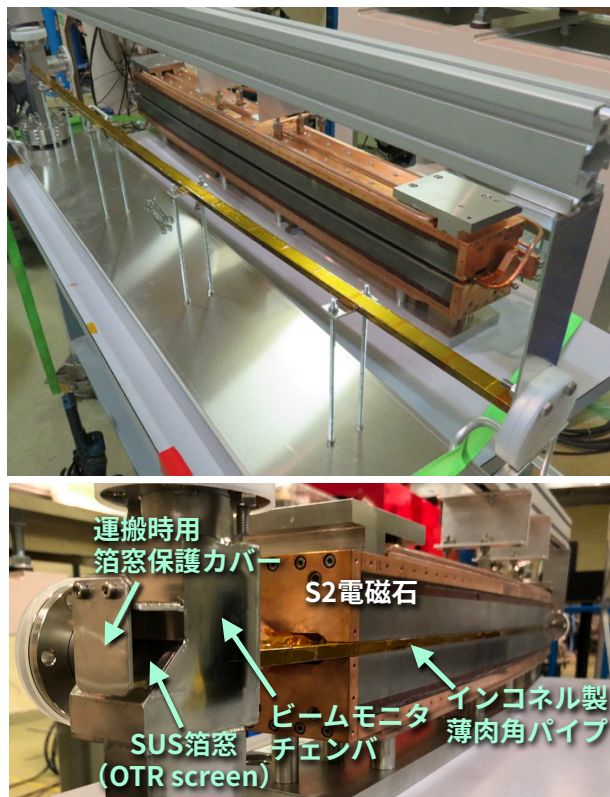


Figure 3: New injection beam duct and the S2 magnet.

インコネルパイプは曲率半径 12.3 m で緩やかに湾曲しており、高さ 7.4 mm \times 幅 15.8 mm の矩形開口を有する。0.3 mm 厚の SUS304 製角ダクトは PF-AR の入射ビームダクトで実績があるが[7]、さらに今回は SUS304 の約 2 倍の引張強度を有する固溶化処理を施したインコネル 718 の採用で堅牢性の向上を図っている。インコネル板材の接合には薄肉加工に適したファイバーレーザー溶接を利用した。溶接時の溶込み深さの調整を繰り返し、リークのない接合

を成功させた。本真空技術は、次世代光源での高速補正電磁石用ビームダクトなどへの応用にも役立つと考えられる。

インコネルパイプの直下流部には 2 種類のビームプロファイルモニター用 SUS 製チェンバが溶接される。1 つは格納可能な YAG スクリーンモニター、もう 1 つは常時観測型 OTR スクリーンモニターで、入射ビームが通過する 0.2 mm 厚の SUS304 窓の真空面をバフ研磨で鏡面加工して OTR を観測する[3]。

パルス磁場によってビームダクトに誘起される渦電流が広範囲にループ電流を形成すると交番浮遊磁場が生じ、蓄積ビームの振動を引き起こすことが知られている[5,6]。この問題への対処として、入射ビームダクトの下流側に長さ 47 mm のエアギャップを設け、蓄積ビームダクトと絶縁させている。また、S2 入射ビームダクト上流側の既存 S1 真空槽との接続には絶縁管付きベローズダクトを用い、さらに入射ビームダクトのすべての架台に G10 材を挿入して、蓄積リングに及ぶ広範囲なループ電流を遮断している。

3.2 S2 蓄積ビームダクト

PF リングはリング外側からの入射のため、セプタム壁に向けて放射光が照射される。SUS 製の旧 S2 ビームダクトは、2015 年より放射光熱除去用冷却水配管からの真空リークが断続的に発生しており、その対処のために増強した放射光アブソーバが入射パラメータの調整範囲を制限していた。

新 S2 蓄積ビームダクトでは、リングの他区間と同様に高い熱伝導度と機械的強度、低いガス放出特性を兼ね備えるアルミ合金 (A6063/A5052) を採用し、ダクト内壁に直接放射光を当てて、蓄積リング側超高真空内に放射光吸収板や冷却水配管を入れない構造とした。S2 蓄積ビームダクトの全長は約 2.1 m で、入射点に向けた緩やかなテーパ面で 322 W (450 mA 蓄積時) の放射光を受け、ビームダクトの大気側上下面に溶接した配管に冷却水を通して除熱する (Fig. 4)。

本アルミ合金製ビームダクトへの放射光照射による光刺激脱離ガスは、上下流の接続ダクトにそれぞれ設置したチタンサブリーメーションポンプとスパッタイオンポンプで排気する。

Figure 1 にも示したとおり、蓄積ビームダクトの上流側の開口形状はリング直線部の仕様に合わせて横幅 90 mm×高さ 38 mm の八角形であるが、入射点では蓄積ビーム軌道から 16 mm の位置までダクト壁を寄せる必要があるため、下流に進むにしたがって横幅が徐々に狭くなる構造となっている。また、ダクト壁の厚さも入射点では 1 mm まで薄くする必要があるので、標準の 4.5 mm から徐々に薄くなる部

分を設けてある。

アルミ合金製ダクトの上下流のフランジには Al-SUS 爆着接合のクラッド材を使用している。下流側フランジには、ビーム入射用の 0.2 mm 厚 SUS 箔窓をレーザー溶接で接合した。



Figure 4: New Al-alloy stored beam duct installed next to the S2 magnet. Cooling water channels are welded on top and bottom of the beam duct to remove the SR heat load along the tapered wall on the S2 magnet side.

4. ビームダクト構成とビーム軌道

Figure 5 は入射点近傍のビームダクト構成のカット図で、入射ビームダクトを緑色、蓄積ビームダクトを水色で示している。また、蓄積ビーム、バンブビーム、入射ビームの 3 種類の軌道も合わせて示している。

S2 電磁石とモニターチェンバを通過した入射ビームは、常時観測用 OTR スクリーンでもある 45°に傾いた 0.2 mm 厚の SUS 箔窓を出て、47 mm の空気中を通る。その後、蓄積ビームダクトのフランジ部にある 0.2 mm 厚の SUS 箔窓から蓄積リングに入る。

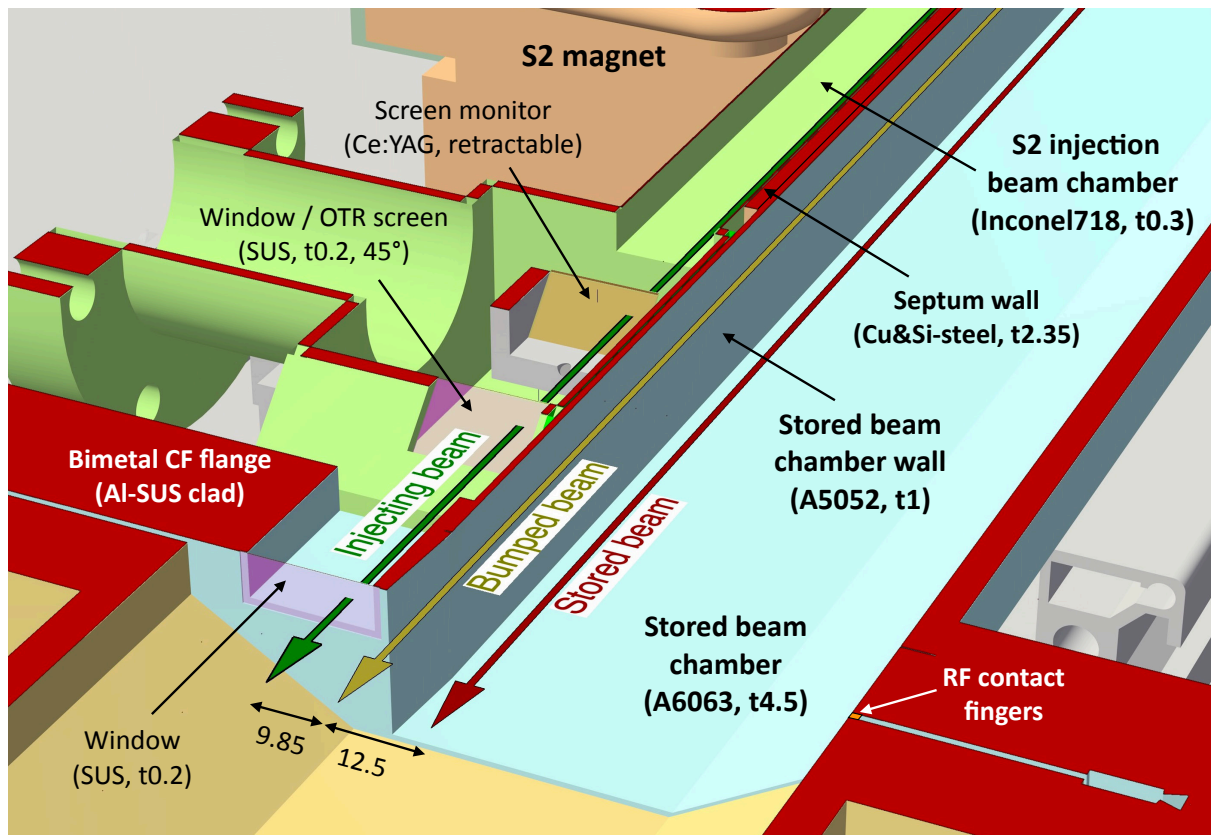


Figure 5: Vacuum chamber configuration in the injection region.

5. まとめと運転状況

2020年夏期に実施したPFリング入射部高度化改造において、老朽化したSUS製入射・蓄積ビームダクト一体型S2真空槽を更新し、真空システムのメンテナンス性と信頼性の向上を実現させた。また、電磁石の精密測量結果を基にしたビームダクト設計と、電磁石やビームダクトの精密アライメント設置を行い、入射ビーム軌道の最適化を実現させた。

真空システムの主要な設計方針は、入射路にエアギャップを設けて入射ビームダクトと蓄積ビームダクトを分離させることと、新S2電磁石用ビームダクトにパルス磁場の減衰を抑制させるために0.3mm厚のインコネル718を採用することであった。

新S2入射ビームダクトでは、薄肉インコネルパイプ部をファイバーレーザー溶接により製作した。設置後の真空立上げやその後のビーム運転においてリークなどのトラブルはなく、渦電流に起因する蓄積ビーム振動の問題も発生していない。

エアギャップ上流側の0.2mm厚SUS箔窓を鏡面加工し、常時OTRスクリーンモニターとして利用する試みも行った。しかしながら、溶接時の熱流入に起因すると考えられるSUS箔表面の残留歪みのため、ビームプロファイル像が変形して観測されるという結果となった。現在、この問題の改善に向けて、SUS箔の歪みを抑制する加工技術を開発中である。

新S2蓄積ビームダクトでは、放射光アブソーバ挿入による入射パラメータ制限の問題を解決させるため、熱伝導率と機械強度、および光刺激脱離ガス

放出特性に優れるアルミ合金製ビームダクトを採用した。テーパ壁での放射光パワーの吸収と入射点におけるダクト壁の薄肉化により、入射ビームとバンブ軌道の最適化を可能にした。

加速器立上げ時の光焼出しに関しては、上流側偏向電磁石内に設置している分布型イオンポンプの故障のため、周辺チタンサブリーメーションポンプを高い頻度でフラッシングする必要があったが、本アルミ合金製ビームダクト自体の枯れは順調であった。

参考文献

- [1] C. Mitsuda *et al.*, "Injection Section Upgrading with the Septum-Magnet Replacement in KEK-PF Ring", Proc. IPAC2021, MOPAB091.
- [2] 上田 明 他, "PF 入射部更新用新セプタム電磁石の特性評価", in these proceedings, WEP016.
- [3] 高井 良太 他, "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", in these proceedings, MOP026.
- [4] 長橋 進也 他, "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", in these proceedings, THP008.
- [5] Y. Shoji and K. Kumagai, "Stray Field of a Pulse Septum Induced by Eddy Currents", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 14 (2004) 441.
- [6] C.H. Chen *et al.*, "Preliminary study of injection transients in the TPS storage ring", IOP Conf. Series: Journal of Physics: 874 (2017) 012060.
- [7] A. Ueda *et al.*, "Construction of the New Septum Magnet Systems for PF-Advanced Ring", Proc. IPAC2017, WEPVA059.