

SuperKEKB 用ビームダクトの窒化チタンコーティング及びベーキング TiN COATING AND PRE-BAKING OF BEAM DUCTS FOR SuperKEKB

柴田恭[#], 白井満, 久松広美, 照井真司, 石橋拓弥, 末次祐介, 金澤健一
Kyo Shibata[#], Mitsuru Shirai, Hiromi Hisamatsu, Shinji Terui, Takuya Ishibashi,
Yusuke Suetsugu, Ken-ichi Kanazawa
High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

More than 1200 beam ducts in the SuperKEKB project required TiN coating on the internal surface to mitigate electron cloud effects and pre-baking before installation. To perform baking and TiN coating of many ducts, dedicated facilities were constructed at the KEKB Oho Laboratory. The coating facility has 5 vertical coating equipment systems for straight ducts and 3 horizontal systems for bent ducts. The thickness of TiN coating is about 200 nm by Ti sputtering in Argon and Nitrogen gases. The baking facility has 4 baking equipment systems and a hot-air heating method is employed. The targeted pressure after baking is below 1×10^{-7} Pa. Since the fall of 2012, these facilities have been in full-scale operation. A 10-person team is assigned for this task, and about 740 beam ducts were coated and baked so far.

1. はじめに

現在建設が進められている SuperKEKB 加速器^[1,2]においては、周長約 3 km の陽電子リング (Low Energy Ring, LER) のほぼ全てと電子リング (High Energy Ring, HER) の一部のビームダクトが新しいものに交換される^[3-5]。新たに製造されるビームダクトはアルミ合金または銅製であり、本数は約 1200 本、多くのは長さが 2~5 m である。SuperKEKB では、ビームダクト内部を 10^{-7} Pa の超高真空にすることが求められており、ダクトは加速器に設置する前にベーキングによる脱ガス処理が施される。更に LER においては、電子雲不安定性によるビーム特性の劣化を防ぐために、ダクト内面に窒化チタン (TiN) コーティングを施し、ダクト内面の 2 次電子放出率を低減させる必要がある^[6,7]。約 2 年間で 1200 本以上のビームダクトを処理するために、KEK つくばキャンパス内の大穂実験棟に 4 台のベーキング装置と 8 台のコーティング装置が設置された (Figure 1)。

ビームダクトを加速器に設置する前に行う「インストール前作業」のフローチャートを Figure 2 に示す。新しいビームダクトは、つくばキャンパス内にある 3 つの倉庫内に保管されている。処理が施されるビームダクトはトラックで大穂実験棟に搬入され、実験棟内のクリーンルームで内部の目視検査が行われる。その後、LER 用ビームダクトには TiN コーティングが行われるが、HER 用ビームダクト及び特殊な LER 用ビームダクト (電子雲除去電極付きビームダクト^[8]など) には TiN コーティングは行われない。その後、ビームダクトには NEG ポンプ^[9]や BPM 電極が取り付けられ、ベーキングが施される。ベーキング後のビームダクト内部には乾燥窒素が封入され、再び倉庫内で保管される。

インストール前作業は、2012 年 4 月から開始され

た。本格的な作業は 2012 年 9 月から行われており、2014 年度半ばまで続く予定である。以下に、ベーキング装置とコーティング装置、及び各作業について詳しく説明する。

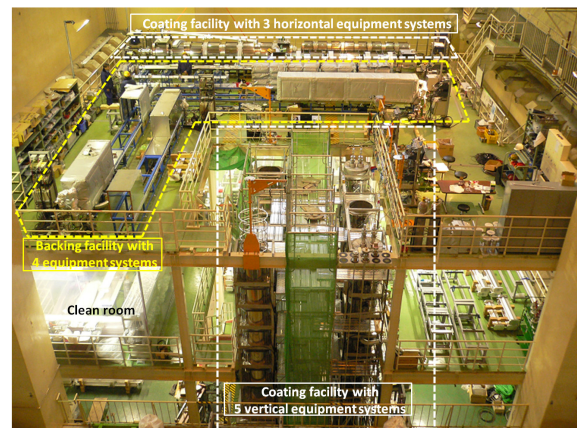


Figure 1: Baking and coating facilities.

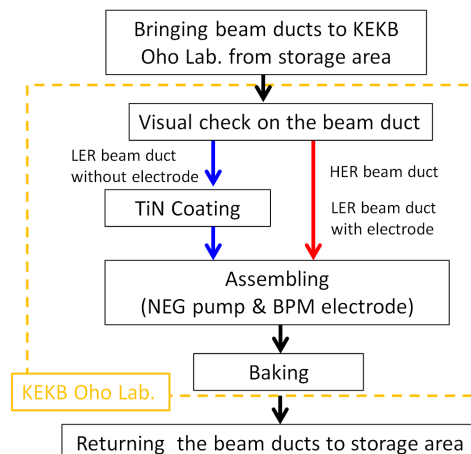


Figure 2: Flow chart of pre-installation work.

[#]kyo.shibata@kek.jp

2. TiN コーティング装置

TiN コーティング装置の仕組みを示した概略図を Figure 3 に示す。コーティングは、ダクト中心軸上にチタン陰極 (-400 V) を設置し、アルゴン (窒素換算値で ~ 2 Pa) 及び窒素 (~ 2 Pa) 雰囲気中でマグネトロン放電を起こすことで行われる (DC マグネトロンスパッタリング法)。ビームダクト (典型的な断面形状は Fig. 3 を参照) はソレノイドコイル (内径 $\phi 800$ mm、巻線部の幅 500 mm のものを 250 mm 間隔で 8 台使用) 内に設置され、一端は真空排気系 (排気速度 $0.3\text{m}^3\text{s}^{-1}$ のターボ分子ポンプとスクロールポンプを使用) に、もう一端はガス導入系に接続される。ガスはパイプ状のチタン電極 (外径 $\phi 27.2$ mm、長さ 5~6 m) を介してビームダクト内にはほぼ均等に供給され、導入ガスの分圧は排気系のオリフィスとガス導入系のマスフローコントローラ (フルスケール流量 20~100 sccm) で制御される。ソレノイド磁場は約 16 mT であり、放電電流 6.3 A で約 70 分間放電を行うことでダクト内面に厚さ約 200 nm の TiN 薄膜がコーティングされる^[7]。

1 台のコーティング装置には、ビームダクトを 2 列まで設置することができる。コーティングが可能なビームダクトの長さは 5.5 m 程度である。長さ 1~2 m 程度の短いビームダクトをコーティングする場合は、2~3 本のビームダクトを連結することで、同時に複数本のコーティングを行うことができる。

コーティング装置には熱風によるベーキング機構 (詳しくは次章「3. ベーキング装置」を参照) が備わっており、ビームダクトはコーティング前に 150°C で 24 時間以上ベーキングされる。コーティング前のダクト内圧力は、ダクト温度 150°C で 10^{-5} Pa 前半以下である。コーティング作業は、まずアルゴンガスだけを用いた Ti コーティングを約 5 分間

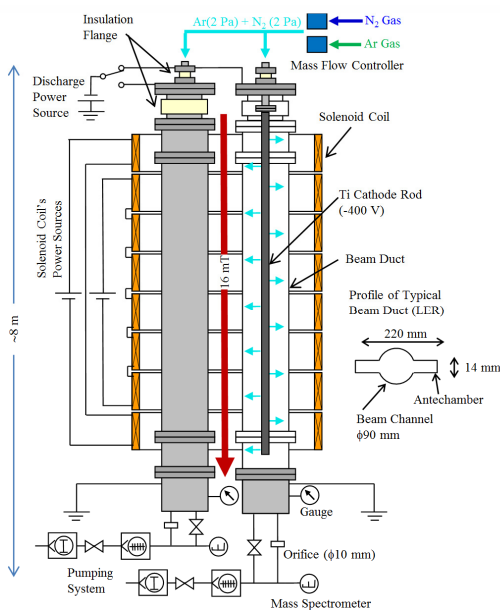


Figure 3: Schematic view of TiN coating equipment.



Figure 4: Vertical coating equipment.

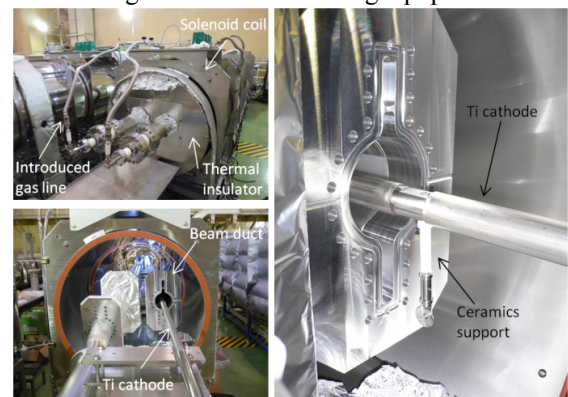


Figure 5: Horizontal coating equipment.

行い、その後アルゴンと窒素ガスを用いた TiN コーティングを行う。なお、コーティング中には、ビームダクトの温度が 150°C 程度になるよう温度調整が行われる^[7]。1 台の装置でコーティングに要する時間は、ダクトの設置から取り外しまでで約 4 日である。

コーティング装置は、縦置き型 (Fig. 4) と横置き型 (Fig. 5) の 2 つのタイプがあり、それぞれ真っ直ぐなビームダクト用と曲がったビームダクト (偏向電磁石用ビームダクト、曲率半径 74.68 m) 用として使用される。縦置き型では、ビームダクトは真空排気系の上に垂直に立てられ、チタン電極は上からダクト中心軸上に吊るされる。縦置き型の高さは約 8 m であり、ビームダクトやチタン電極の設置には大徳実験棟の天井クレーンが用いられる。また、装置の周りには作業用足場が組まれており、装置上部での作業も可能となっている。一方、横置き型では、ビームダクトは水平に置かれ、チタン電極はセラミックスのサポートを用いてダクト中心軸上に設置される。ビームダクト用架台も含めた装置の長さは 10 m 程度である。大徳実験棟には現在、縦置き型 5 台 (1 台は予備機) と横置き型 3 台 (1 台は準備中) が設置されている。

この装置でコーティングされた SuperKEKB 用銅製ビームダクトと TiN 膜の電子顕微鏡画像を Figure 6 に示す。ダクトのビームチャンネル内表面は一様に黒く変色しており、TiN 膜がビームチャンネル全面にコーティングされていることが分かる。Figure 7 に、この装置でアルミ合金サンプル上にコーティン

グされた厚さ 200 nm の TiN 膜の 2 次電子放出率測定の結果を示す。アルミ合金サンプルは、表面形状が「平らなもの (flat)」と偏向電磁石用ビームダクトで採用される「グループ構造付きのもの (groove) [10]」の 2 種類で測定を行った。Fig. 7(a)は、入射エネルギー 250 eV、照射面積 25 mm² の電子ビームをサンプルに照射し続けた場合の SEY とドーズ量の関係であり、Fig. 7(b)は SEY スペクトルである。この装置で作製した TiN 膜の SEY はどちらの表面形状でも 1 以下に減少しており、2 次電子放出率の低減効果が十分であることが確認されている。

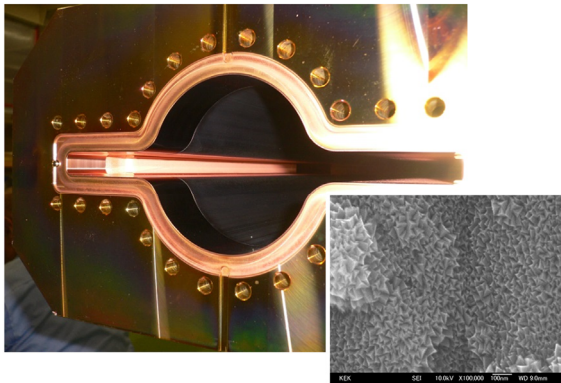


Figure 6: Inside view of Cu beam duct coated with TiN and electron microscopic image of TiN coating.

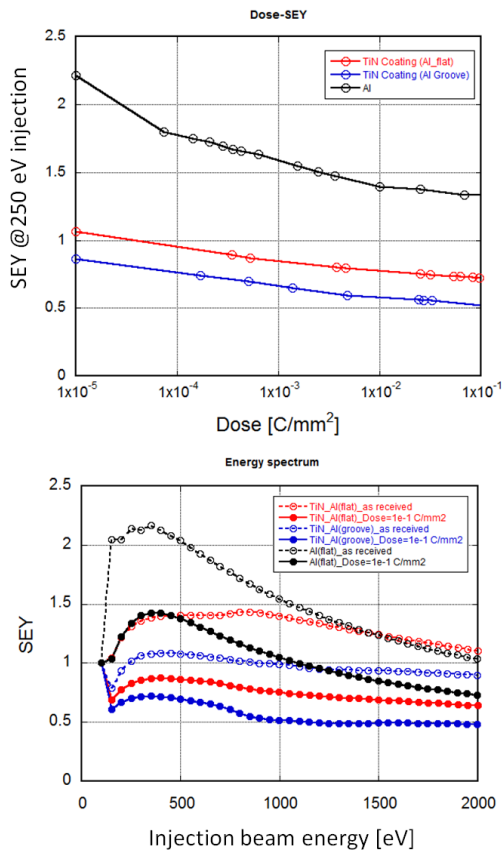


Figure 7: (a) SEY of TiN films as a function of electron dose. (b) SEY spectrums of TiN films.

3. ベーキング装置

Figure 8 にベーキング装置の写真を示す。ベーキングはビームダクトを断熱オープンの中に入れ、オープン内に熱風を循環させることで行われる。断熱オープンは、断熱架台と断熱壁からなっており、断熱壁は架台のレール上を容易に動かすことが可能である。断熱オープンの幅と高さはそれぞれ約 600 mm と 800 mm であり、長さは 3000 mm のものと 5000 mm のものの 2 種類が作製された。長短どちらのタイプにも 7.5 kW の熱風発生器が 2 台設置されており、ビームダクトを約 2 時間で 150°C まで昇温することができる。真空排気系 (排気速度 0.3 m³s⁻¹ のターボ分子ポンプとスクロールポンプを使用) はオープンの外に設置されており、リボンヒーターを用いてベーキングが施される。真空排気系には真空計 (エクストラクターゲージと冷陰極電離真空計) が付いており、ベーキング後の到達圧力を測定することができる。また、一部のベーキング装置には質量分析計が設置されており、ベーキング後の残留ガス成分を調べることも可能である。なお、コーティング装置にも同様の断熱材と熱風発生器が使用されており、150°C でのベーキングが可能である。

ビームダクトは、断熱架台上に上下 2 列に設置され、それぞれ真空排気系に接続される。その後、断熱壁を閉め断熱オープンを密閉し、熱風発生器の運転を開始する。ベーキングの温度は約 150°C でベーキング期間は 26 時間である。ビームダクトに NEG ポンプが設置されている場合は、ベーキングと同時

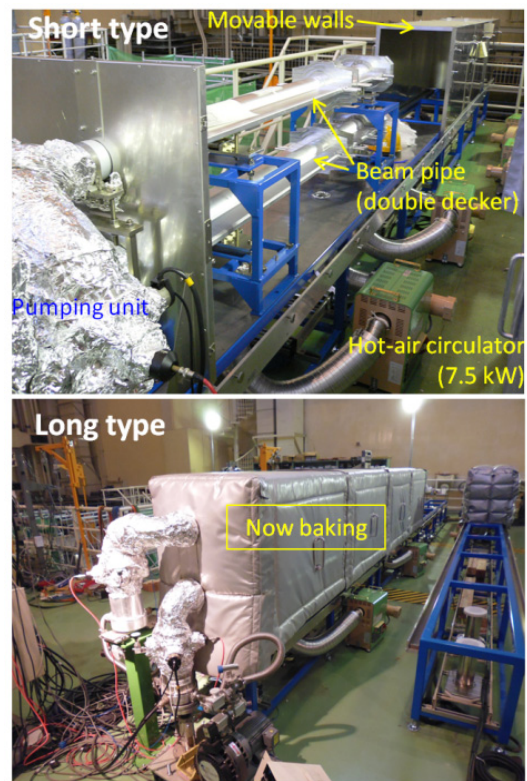


Figure 8: Baking equipment. Short type (above, open) and long type (below, closed).

に NEG ポンプの活性化が行われる。ベーキング終了時の目標到達圧力は 1×10^{-7} Pa 以下である。ビームダクトは、ベーキング終了後に乾燥窒素ガスでパージされ、ブランクフランジで蓋をした状態で保管される。

1 回のベーキングに要する時間は、ビームダクトの設置から取り外しまで約 3 日であるが、その他に NEG ポンプや BPM 電極の取付けなどの準備作業に約 1 日を要する。シースヒータやリボンヒータを用いたベーキング方法と比較すると、この装置によるベーキングでは作業時間と手間が大幅に短縮することが可能である。

4. これまでの作業結果と今後の予定

上記のコーティング装置とベーキング装置を用いたインストール前作業は、2012 年 4 月から開始された。これまでにコーティングとベーキングを行ったビームダクトの本数と一週間の処理本数を Figure 9 と 10 にそれぞれ示す。当初はコーティングを必要としない HER 用ビームダクトのベーキングが、2 台のベーキング装置を用いて行われており、一週間の処理本数は 4~8 本程度であった。コーティング作業は 7 月から始められたが、初めは縦型コーティング装置が 1 台しか稼働しておらず、こちらも一週間の処理本数は 6 本程度であった。その後、9 月上旬までにベーキング装置 4 台と縦型コーティング装置 4 台が稼働可能な状態になり、9 月中旬から作業員 10 人による本格的なインストール前作業が始められた。2012 年度は、真っ直ぐなビームダクトの処理が進められ、9 月以降の一週間当たりの平均処理本数は、コーティングとベーキング共に 14 本程度であった。

2013 年 4 月からは、2 台の横置き型コーティング装置の運転が開始され、偏向電磁石用ビームダクトの処理も行われるようになった。稼働できるコーティング装置の台数は増えたが、ビームダクトが長くなり、連結しての同時処理ができなくなったことで作業ペースは若干落ちている。2013 年 4 月 1 日から 7 月 15 日までの期間の一週間当たりの平均処理本数は、コーティングで約 13 本、ベーキングで約 11 本である。なお、これまでに処理されたビームダクトは約 740 本であり、このうち約 450 本がすでにリングに設置されている。

Figure 11 に、ベーキング後の到達圧力の分布を示す。ほぼ全数が目標値の 1×10^{-7} Pa 以下となっている。目標値を達成できていない 1 件においては、地震によりベーキング後に真空ポンプが止まってしまったことが原因であり、ポンプが動いているときには 1×10^{-7} Pa 以下が達成されていたことが確認されている。これまでに発生したその他の主なトラブルと対処法を下記に示す。これらは全て解決されており、現在は問題なく作業が進められている。

- ビームダクトや排気系配管の溶接部またはフランジからの真空リーク。溶接部の補修やフランジシール面の磨きなどで対応。
- ビームダクト TIG 溶接部の割れ。ビームダクト

の取り扱い方を改善することで対応。

- BPM 電極設置部の傷やバリ、取付け用ネジ穴の不具合など。不具合個所の修正で対応。
- NEG ヒーターからのバーチャルリークと思われる到達圧力悪化。NEG ヒーターの交換で対応。
- NEG の溶解、短絡、断線など。電気配線を改善することで対応。
- チタン電極の変形。変形を修正して再使用。
- チタン電極のセラミックスサポートの損傷。セラミックスサポートの形状とチタン電極の設置方法を改善することで対応。
- コーティング装置ガス導入部での異常放電。ガス導入部の構造を修正することで対応。

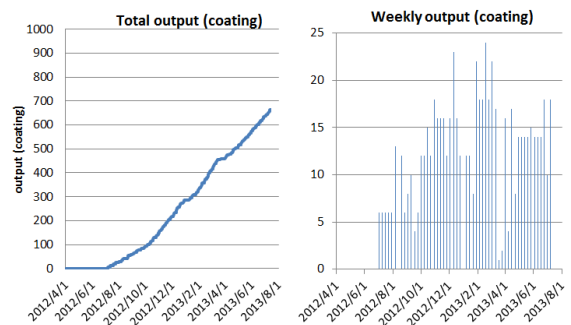


Figure 9: Total output and weekly output of coating work.

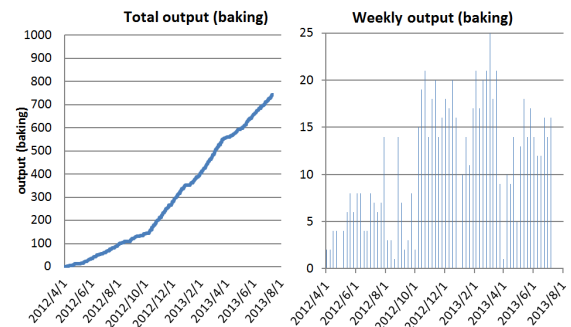


Figure 10: Total output and weekly output of baking work.

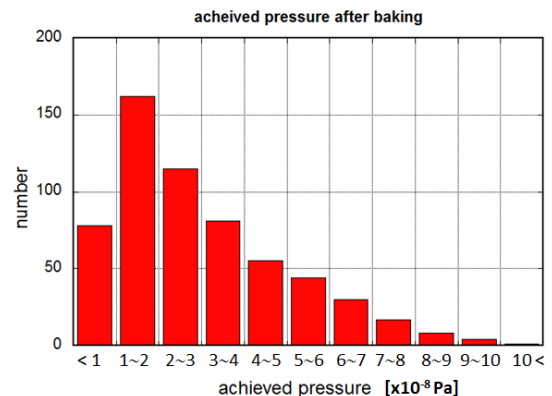


Figure 11: Achieved pressure after baking.

Figure 12 に今後のインストール前作業の予定を示す。2013 年度は、年内にまず SuperKEKB 主リング用ビームダクトの処理を約 190 本行い、その後はダンピングリング用ビームダクト約 80 本の処理を行う予定である。2014 年度は、残り約 250 本のビームダクトの処理をできるだけ早く終わらせることを予定している。

4. まとめ

約 2 年間で 1200 本以上のビームダクトの TiN コーティング及びベーキング処理を行うために、KEK つくばキャンパス内に専用の施設が建設された。コーティング装置は、縦型のものが 5 台と、横型のものが 3 台、ベーキング装置は長さ 5 m と 3 m のものがそれぞれ 2 台ずつである。この施設は 2012 年の 4 月から稼働しており、2012 年 9 月からは 10 人の作業員による本格的な作業が開始された。2013 年 7 月 15 日現在で処理が終了したビームダクトの本数は約 740 本であり、約 450 本のビームダクトがすでにリングに設置されている。ベーキング及びコーティング作業は 2014 年度半ばまで続く予定である。

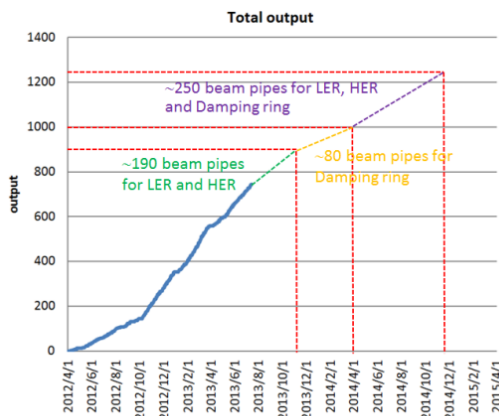


Figure 12: Expected output of pre-installation work.

謝辞

三菱電機システムサービス株式会社には、現場作業を請け負っていただいております。ほぼ計画通りに作業を進めていただいております。また、KEKB 加速器の各グループには、作業にご協力をいただいております。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- [1] SuperKEKB WWW pages; <http://www-superkekb.kek.jp/>
- [2] T. Abe, et al., "Belle II Technical Design Report"; <http://belle2.kek.jp/index.html>
- [3] Y. Suetsugu, et al., "Design and construction of the SuperKEKB vacuum system", J. Vac. Sci. Technol. A 30(3), p.031602 (2012).
- [4] Y. Suetsugu, et al., "CONSTRUCTION OF THE SuperKEKB VACUUM SYSTEM - I", Proceedings of the 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Osaka, Aug. 8-11, p.335 (2012)
- [5] Y. Suetsugu, et al., "Construction of the SuperKEKB Vacuum System - II", SUP102, in these proceedings.
- [6] Y. Suetsugu, et al., "Continuing study on the photoelectron and secondary electron yield of TiN coating and NEG (Ti-Zr-V) coating under intense photon irradiation at the KEKB positron ring", NIM-PR-A 556, p.399 (2006).
- [7] K. Shibata, et al., "DEVELOPMENT OF TiN COATING SYSTEM FOR BEAM DUCTS OF KEK B-FACTORY", EPAC'08, Genoa, Italy, 23-27 Jun 2008, TUPP071, p.1700 (2008).
- [8] Y. Suetsugu, et al., "Demonstration of electron clearing effect by means of a clearing electrode in high-intensity positron ring", MIN-PR-A 598, p.372 (2009).
- [9] Y. Suetsugu, et al., "Design study of distributed pumping system using multilayer NEG strips for particle accelerators", MIN-PR-A 597, p.153 (2008).
- [10] Y. Suetsugu, et al., "Continuing study on electron-cloud clearing techniques in high-intensity positron ring: Mitigation by using groove surface in vertical magnetic field", MIN-PR-A 604, p.449 (2009).