

# 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<sup>#</sup>, 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<sup>#</sup>, 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  $1 \times 10^{-7}$  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<sup>[1,2]</sup>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<sup>[3-5]</sup>。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、多くのものは長さが 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<sup>[6,7]</sup>。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<sup>[8]</sup>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<sup>[9]</sup>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。

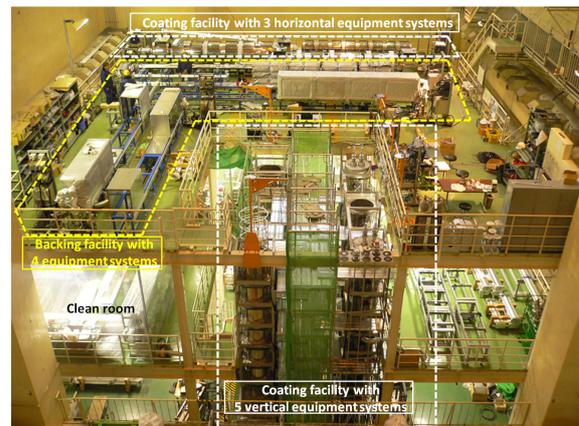


Figure 1: Baking and coating facilities.

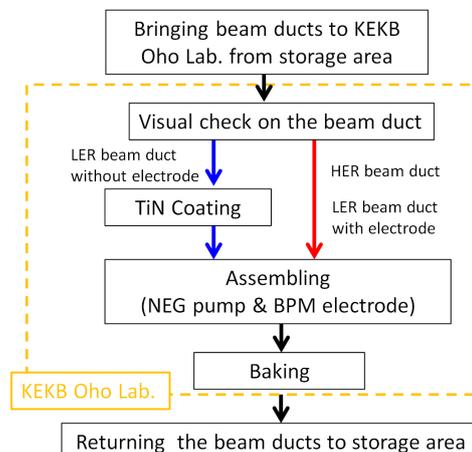


Figure 2: Flow chart of pre-installation work.

<sup>#</sup>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 $\sim 2$  Pa) 及び窒素 ( $\sim 2$  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<sup>[7]</sup>。

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  $150^\circ\text{C}$  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  $150^\circ\text{C}$  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

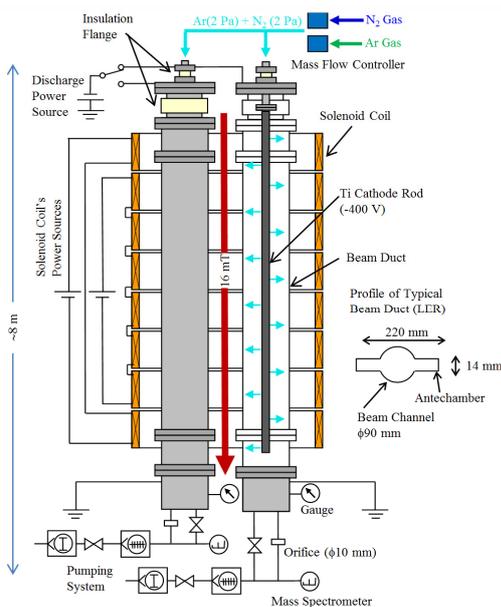


Figure 3: Schematic view of TiN coating equipment.



Figure 4: Vertical coating equipment.

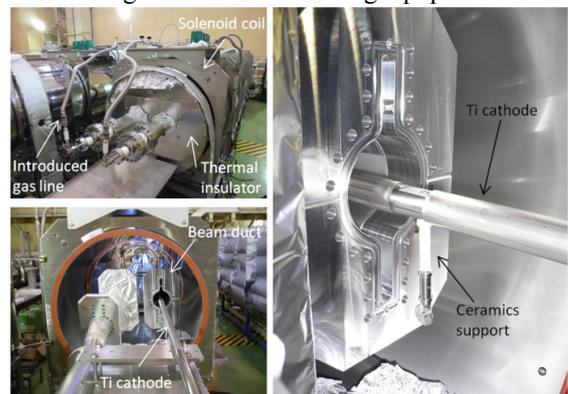


Figure 5: Horizontal coating equipment.

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  $150^\circ\text{C}$  程度になるよう温度調整が行われる<sup>[7]</sup>。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 mm<sup>2</sup> 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。

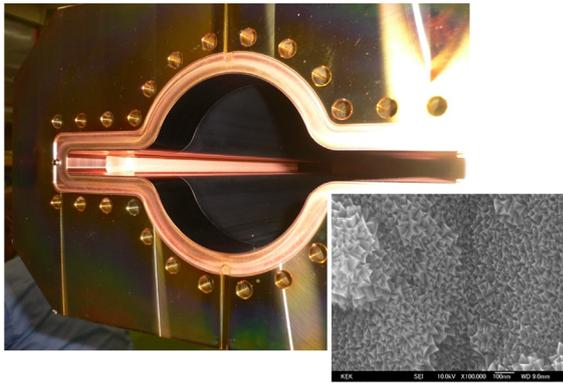


Figure 6: Inside view of Cu beam duct coated with TiN and electron microscopic image of TiN coating.

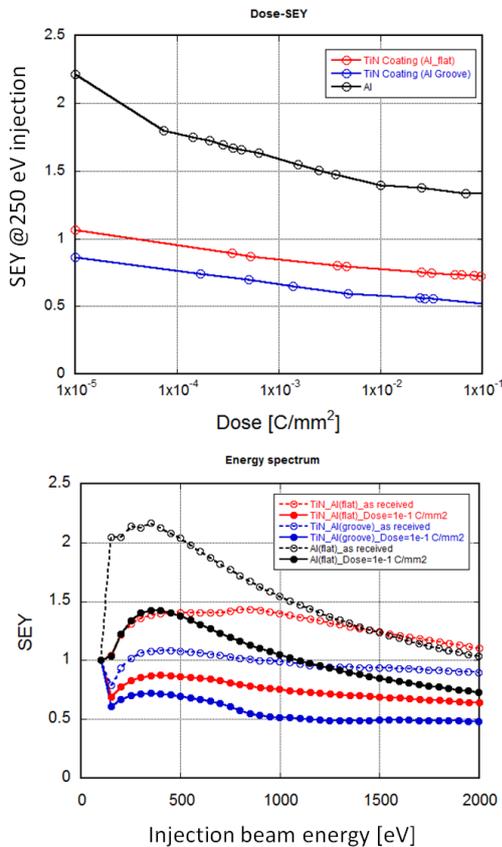


Figure 7: (a) SEY of TiN films as a function of electron dose. (b) SEY spectrums of TiN films.

### 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 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> 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

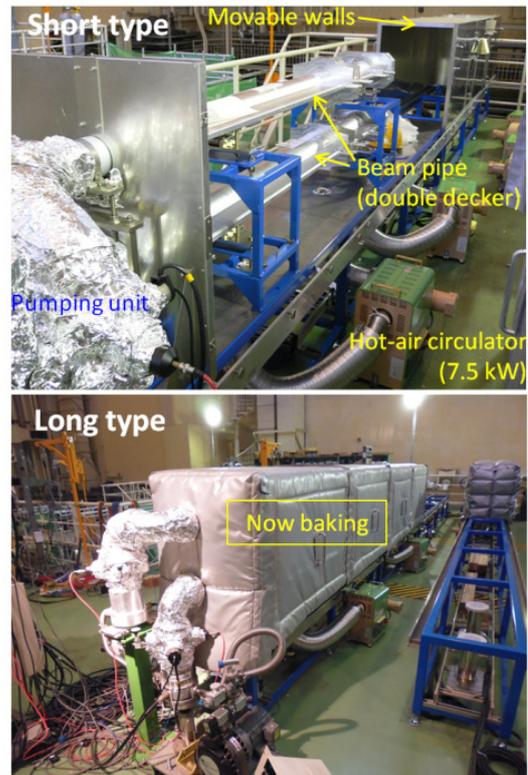


Figure 8: Baking equipment. Short type (above, open) and long type (below, closed).

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  $1 \times 10^{-7}$  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  $1 \times 10^{-7}$  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  $1 \times 10^{-7}$  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。

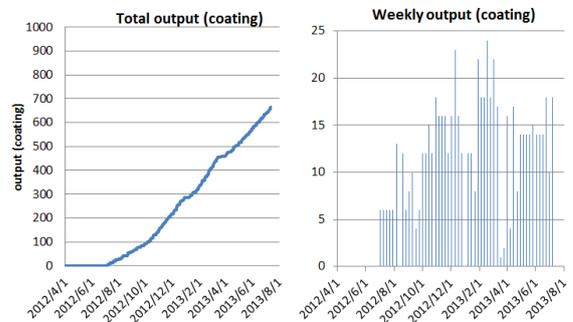


Figure 9: Total output and weekly output of coating work.

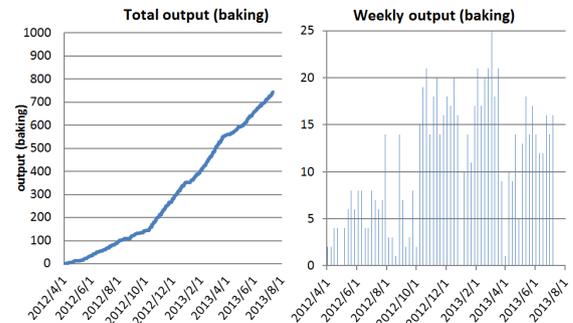


Figure 10: Total output and weekly output of baking work.

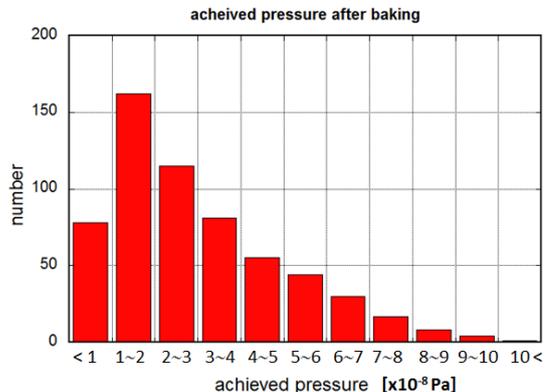


Figure 11: Achieved pressure after baking.

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。

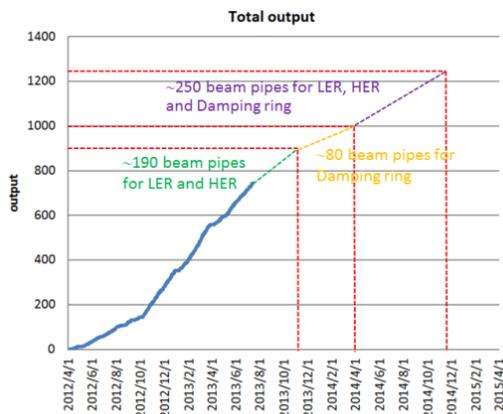


Figure 12: Expected output of pre-installation work.

#### 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-FACILITY", 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).