

SuperKEKB 真空システムの建設-IV

CONSTRUCTION OF THE SUPERKEKB VACUUM SYSTEM – IV

末次祐介[#], 金澤健一, 柴田恭, 石橋拓弥, 久松広美, 白井満, 照井真司

Yusuke Suetsugu[#], Ken-ichi Kanazawa, Kyo Shibata, Takuya Ishibashi,

Hiromi Hisamatsu, Mitsuru Shirai, Shinji Terui

High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

The construction of the SuperKEKB has been ongoing since 2010. Most of the vacuum components required for the first (i. e., Phase-1) beam operation of the main ring have been already delivered. Following the pre-baking and/or the TiN coating, approximately 99 % of the new beam pipes have been installed into the KEKB tunnel, including the special beam pipes for beam injection/abort sections, beam collimators, and so on. The *in-situ* baking of ion pumps and the activation of NEG pumps have finished at approximately 73 % of the ring. The vacuum system will be almost ready until the end of this year, 2015.

1. はじめに

SuperKEKB は、7 GeV 電子リング(High Energy Ring, HER)と 4 GeV 陽電子リング(Low Energy Ring, LER)からなる周長約 3 km の電子・陽電子衝突型加速器で、2010 年から建設が進められている^[1]。主リングの真空システムでは、主にビームパイプ、ベローズチェンバーや真空ポンプ等各種真空機器の新規製作、制御システムの刷新、電源系・冷却水系等の更新等が進められている^[2-4]。第一段階(すなわち Phase-1)のビーム運転に必要な真空機器は、ほぼすべて購入あるいは製作済みである。2015 年 7 月の時点で、約 99%のビームパイプが既にトンネル内へ設置された。Figure 1 は主リングトンネル内に設置されたビームパイプの様子である。最終的な真空立ち上げ作業、すなわちイオンポンプのベーキングや NEG 活性化は、リングの約 80%が終了した。冷却水・圧空系の更新作業もほぼ終了した。ここでは、Phase-1 運転に向けて建設の最終段階に入った SuperKEKB 主リング真空システムの現状を報告する。

2. 真空機器の準備状況

新規ビームパイプは、基本的に、ビームが通るビームチャンネルの両側にアンテチェンバーを持つ構造である^[2]。場所により、アルミ合金(主に放射光パワーが弱い区間)や無酸素銅(HER およびウイグラー部等主に放射光パワーが強い区間)を用いている。LER の新規ビームパイプ内面には、電子雲不安定性対策として、二次電子放出率が小さい TiN 膜を原則としてコーティングする^[5,6]。さらに、ウイグラー電磁石内のビームパイプにはクリアリング電極が、偏向電磁石内にはグループ構造が採用されている^[2,7,8]。ビームパイプ間を接続するベローズチェンバーや、リングを区切るゲートバルブもビームパイプと同じ断面を持ち、また、それらの RF シールド

には基本的に熱的に強い楕円型を採用している^[9]。新規ビームパイプ等の接続フランジには、内面の段差やギャップが小さい MO 型を使用している^[10]。新規ビームパイプおよびベローズチェンバーの製作総数はそれぞれ約 1200 本である。

真空ポンプは、主ポンプとしてストリップ型 NEG (Non-evaporable getter, ST707)を使用する^[11,12]。NEG ポンプは基本的に片側のアンテチェンバー内に挿入され、分布型排気システムを構築している。粗排気後など高い圧力領域での排気用、および希ガスの排気用に、スパッターイオンポンプも約 10 m おきに設置された。ターボポンプとスクロールポンプからなる粗排気装置は可搬式で、粗排気中や NEG 活性化時等に、約 40 m おきにある粗排気ポートに取り付けて使用される。NEG 活性化終了後は取り外される。真空計(Cold Cathode Gauge, CCG)はほぼすべて KEKB のものを再利用する。CCG とイオンポンプの総数はそれぞれ約 600 個である。リングには質量分析計を 2 個取り付け、残留気体成分を測定する。また、数か所に熱陰極型真空計を取りつけ、CCG による測定値と比較する。

真空機器の制御システムは、基本的に KEKB のものを踏襲するが、古い機器は最新式のものに変更される。例えば、主にデータロガーとして使用していた CAMAC を全撤去し、NI の cRIO に置き換えた。

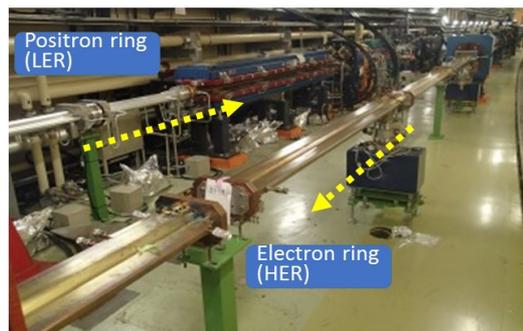


Figure 1: New beam pipes installed in the main ring.

[#] yusuke.suetsugu@kek.jp

同時に、新規制御ソフトウェアの開発も進めている。主リングの真空機器以外に、陽電子ダンピングリングのビームパイプ等も大部分が既に製作されている。真空機器のトンネルへの設置は来年度の予定である。ここでの報告は割愛する。

3. トンネル内への設置状況

製作されたビームパイプは、トンネル内に設置する前に、KEK 内の施設にて NEG ポンプを組み込み、プリベーキングを行い、各ビームパイプの真空特性(到達圧力)が確認される^[5]。また、LER のビームパイプ内面には、前述したように TiN がコーティングされる。これらのインストール前作業については別途報告されている^[5,6]。

トンネル内へのビームパイプ設置は2012年度から始まり、まずはウィグラー部のビームパイプが設置された^[13]。2013年度からはアーク部のビームパイプの設置が始まり、2014年度には、ビームアポート部や偏向電磁石からのシンクロトロン放射光(Synchrotron Radiation, SR)や X 線を使用したビームサイズ測定用のビームパイプ、ビームコリメータ等特殊な部分のビームパイプが設置された。2015年7月の段階で約99%のビームパイプが設置された。これまでのプリベーキング、トンネル内設置作業の実績を Figure 2 に示す。

ビームパイプ設置後、その間にベローズチェンバーを接続する。ゲートバルブで区切られた区間のローズチェンバー接続後、He リークテストのために、その区間は粗排気装置で一旦排気される。

トンネル内の NEG 活性化ヒータ用や機器制御用の配線、流量計(約1000個)や温度計(約4000個)など監視機器の配線はほぼ終了した。ビームパイプやベローズチェンバーの冷却水配管作業も進んでいる。ウィグラー部では、冷却水流量を稼ぐためにヘッダー方式を用いた。ゲートバルブ駆動用の圧空配管の復元も現在行われている。

以下、いくつか特徴的な機器の設置状況等を述べる。

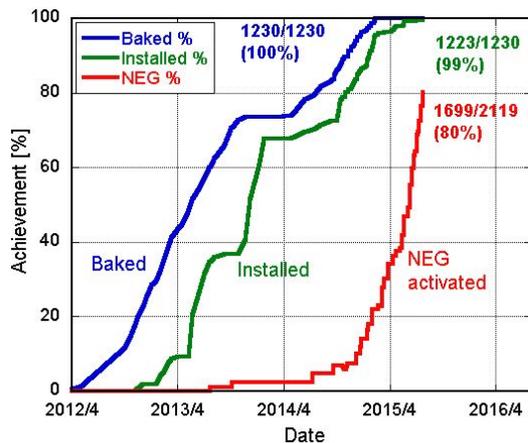


Figure 2: Achievements of installation processes, that is, pre-baking, installation and NEG activation, until 2015/7/24.

Table 1: Types, Materials, Cross Sections and Production Number of MO-type Flanges

Type	Material	Cross section	Production number
f90x220	Al	Antechamber	3328
f90x220	Cu	Antechamber	760
f90x220H24	Al	Antechamber	64
f80x220	Cu	Antechamber	320
f50x190	Cu	Antechamber	140
122x50	Al	Racetrack	16
f90	Al	Circular	24
f90	Cu, SUS	Circular	52
f80	Cu	Circular	100
Total			4804

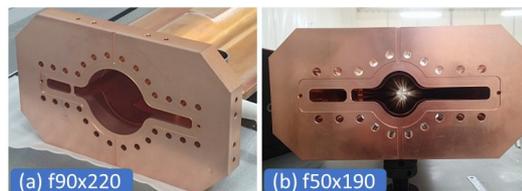


Figure 3: Typical MO-type flanges with antechambers. (a) f90x220 and (b) f50x190, here f90 and 220, for example, mean the diameter of central beam channel and the total width, respectively.

3.1 MO型フランジ

アンテチェンバーがあるような複雑な断面の MO 型フランジを大規模に使用するのは今回が初めてである^[10, 14]。Table 1 に使用するフランジの個数を、Figure 3 に典型的なフランジ断面を示す。f90x220 型(これはφ90 mm のビームチャンネル、全幅 220 mm を意味する)を中心として、計約 4800 個を使用した。フランジの締め付け力は各ボルトのトルクで管理した。初回締め付け時の標準トルクは、銅合金製フランジでは約 15 Nm, アルミ合金製フランジでは約 13 Nm とした。

トンネル設置前のプリベーキング・コーティング作業では、1 回目の締め付け(増し締めを含む)でリークが止まらなかったものは平均して全体の 2~3% であった。当初リークが頻発することがあったが、作業前にフランジシール面を検査し、必要であれば手入れ(つまり磨き)を行うことで、リークの頻度は減った。増し締めでもリークが止まらなかった場合は一旦フランジを緩め、フランジシール面やガスケット面を調査し、必要ならシール面の手入れを行い、ガスケットを交換した。

一方、トンネル内据付後のビームパイプ、ベローズチェンバー接続作業では、作業開始当初は増し締めを含む 1 回目の締め付けでリークが発生する割合は約 10% と、設置前作業での締め付け時より高かった。しかし、ビームパイプとベローズチェンバーの位置合わせを容易にする治具を使用する、また、接続前のベローズチェンバーのシール面検査を強化し、必要であれば手入れする、という方策を取り、リー

ク発生率は平均して 5%未満となった。

3.2 ビームコリメータ

リング内には、素粒子測定器のバックグラウンドを低減するためのビームコリメータが設置される^[15]。Phase-1 運転では、LER に水平方向型が 2 機設置され、実際にビーム運転に供して発熱の有無、動作特性や制御システムの確認等が行われる。ビームハローを削るヘッドはリングの内側と外側に装備され、位置精度 0.05 mm でリモート制御される。ヘッド先端部は熱的に強いタングステン、ヘッド本体は無酸素銅である。また、ヘッド周囲には RF シールドフィンガーが取り付けられている。コリメータもアンテナチャンバーを持つ。ヘッドをアンテナチャンバー部から挿入し、さらにチャンバー内部をテーパ状にすることでインピーダンスを低減し、捕捉モードの発生を避けている。リング内に設置された水平方向型コリメータとその内部、ヘッドを Figure 4 に示している。コリメータの全長は 800 mm である。コリメータに関連して、高次高周波(HOM)アブソーバの開発も進めている^[16, 17]。

3.3 ビームアポート部用ビームパイプ

周回するビームを捨てる(アポートする)際には、キッカーマグネットによってビームを横方向および垂直方向に蹴り、ビームアポート窓からビームを取り出し、ダンパー(コンクリートと鉛のシールドで囲まれた鉄のブロック)で吸収する^[18]。Figure 5 に電子

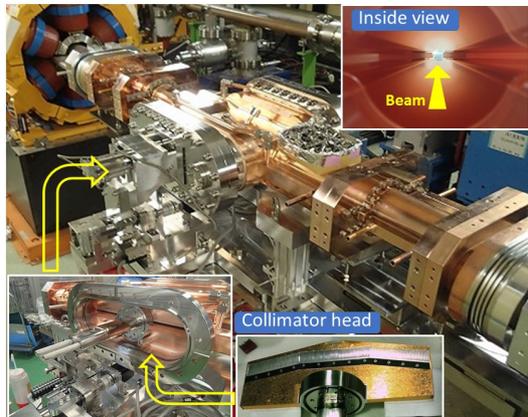


Figure 4: Horizontal-type beam collimator.

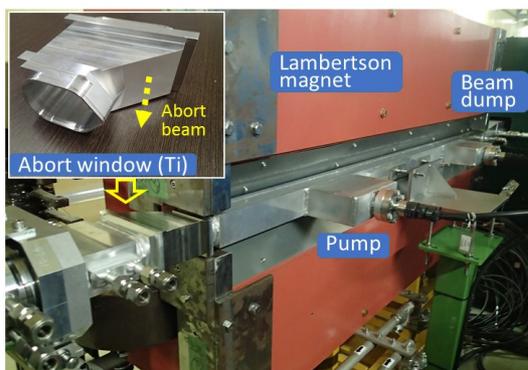


Figure 5: Beam pipe with abort window.

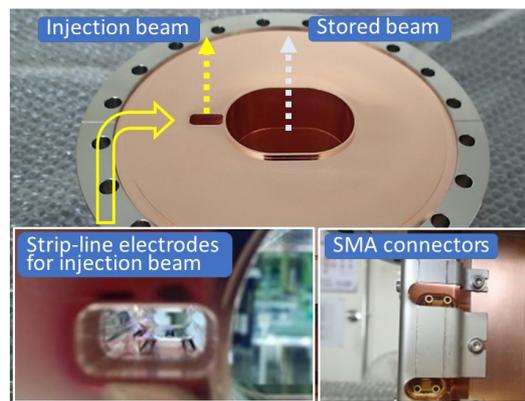


Figure 6: Beam pipe for beam injection point. The small channel for the injection beam has four strip-line type beam position monitor inside.

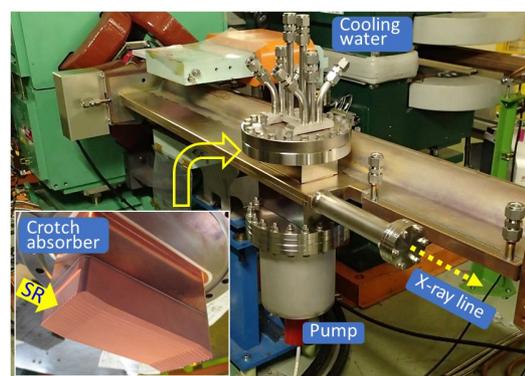


Figure 7: Beam pipe for X-ray extraction with a crotch absorber.

リングに設置されたビームアポート部用のビームパイプを示す。ビームが大気側に出てくる部分(アポート窓)は厚さ 1 mm の純チタンである。アポート時にビームサイズを大きくし、さらに垂直方向にスイープさせることで、チタン窓の溶融を避けている。大気側に取り出されたビームは、アポート窓下流のランバートソンマグネットによって大きく下方方向に蹴られ、ダンパーに飛び込む。その部分のビームパイプ断面はランバートソンマグネットの形状に合わせた形状となっている。

3.4 ビーム入射部用ビームパイプ

入射ビームが周回するビーム軌道に入る部分のビームパイプを Figure 6 に示す。図中左の小さいレールトラック断面の孔(12×5 mm)が入射ビームが、右の大きい開口(65×48 mm)が周回するビームが通るチャンネルである。構造は KEKB のものと基本的に同じであるが、今回はその入射ビームのチャンネル内に、入射ビーム位置を測定するビーム位置モニター(BPM)が備えられている。予想される信号強度が弱いので、感度の良いストリップライン型電極を用いている。ストリップライン電極の幅は 1.2 mm、長さは 30 mm である。水平方向の位置測定感度を上げるため、ビーム軸に対して非対称に配置されている。BPM の活用により入射の安定性向上が期待される。

3.5 X線取り出し用ビームパイプ

SuperKEKB では、小さいビームサイズを測定するために、ビームから発生する X 線を使ったビームサイズモニターが設置される^[19]。偏向電磁石内から放射される X 線を取り出すためのビームパイプが LER、HER にそれぞれ 1 台必要となる。リングに設置された X 線取り出し用ビームパイプを Figure 7 に示す。X 線ラインとリング周回ビームラインとの間、いわゆるクロッチ部(二股部)には、直上流の偏向電磁石から強烈な SR が照射されるため、複数の水路を持つアブソーバが取り付けられている。アブソーバ表面には、ビームラインに平行にグループがあり、SR パワーの面密度の低減を図っている。ビームパイプはアンテチェンバーを持ち、アブソーバはリング外側のアンテチェンバー部にある。アブソーバの直下には NEG ポンプが備えられている。

3.6 SR 取り出し用ビームパイプ

SuperKEKB では KEKB の時と同様、SR を用いたビームサイズモニターも設置される。リングに設置された SR 取り出し用ビームパイプを Figure 8 に示す。ビームパイプはやはりアンテチェンバーを持つ。SR を反射させるミラーは金メッキされたダイヤモンド製である。ミラーはリング外側のアンテチェンバー内にあり、インピーダンスの低減が図られている。ミラーはビームパイプ下から挿入され、その角度、位置は微調可能である。また、ミラーは冷却水路が組み込まれたサポートに固定されている。ビームパイプ側面にある窓から取り出された SR は遮光された円筒によってトンネル内から地上の測定系まで導かれる。

3.7 電子除去電極への電圧印加

LER のウィグラー部には、電雲不安定対策として、ビームパイプ内に電子除去電極(クリアリング電極)が組み込まれている。電極は、銅ブロックにアルミナとタングステンを溶射して形成され、ビームチャンネル内径 90 mm に対して厚み 0.3 mm と非常に薄くビームへの影響が少ない^[7, 8]。SuperKEKB では、56 本のビームパイプに計 112 本の電極が装備された。Figure 9 はウィグラー電磁石内に設置された電極付ビームパイプである。電極用の電源は 1 kV 100 mA

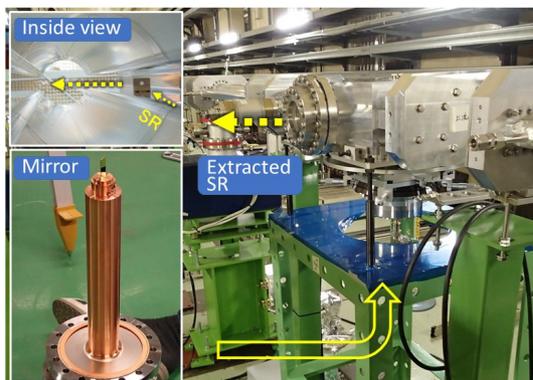


Figure 8: Beam pipe for SR extraction. A diamond mirror is set in an antechamber to reflect SR.



Figure 9: Beam pipe with clearing electrode inside for LER wiggler magnets.

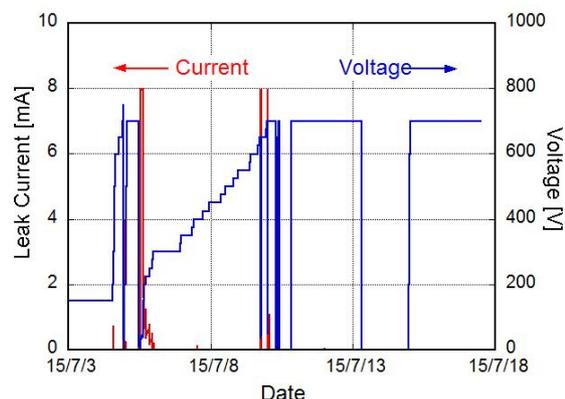


Figure 10: Example of the conditioning process of a clearing electrode.

の直流電源で、2015 年 7 月までに電源の設置、ケーブル敷設が終了した。N 型導入端子への接続後、電圧印加試験を行った。圧力は $10^{-6} \sim 10^{-8}$ Pa 台であった。設置時の絶縁抵抗は 1 M Ω 以上であった。112 本の内 110 本は問題無く 700V 印加できたが、2 本については数百 V で数 mA のリーク電流が流れることがあった。これらは電圧を徐々にあげ、コンディショニングによって最終的に 700V を維持することができた。コンディショニング時の電圧、電流の一例を Figure 10 に示す。

4. 真空立ち上げ作業

ビームパイプ設置およびベローズチェンバー接続、リークテストが完了した区間から、真空の立ち上げ、すなわち、イオンポンプのトンネル内でのベーキング、NEG ポンプの活性化、粗排気装置切り離しを 2014 年度から開始している^[2, 20]。

真空の立ち上げは Figure 11 に示すような操作パターンで行われる。この作業では、区間内のすべての粗排気用ポートに粗排気装置が取り付けられる。大気にさらされた後では、まず大量に気体を吸着している NEG 素子から気体を脱離させるために、約 50% の電圧で NEG を加熱する。温度は約 150 $^{\circ}$ C 程度と推定される。ガス出し時間は約 8 時間である。このガス出しは次の NEG 活性化時の圧力を低減し、活性化の効率を上げるためである。ガス出し後、イオンポンプのベーキングを約 1 日行い、その後半から

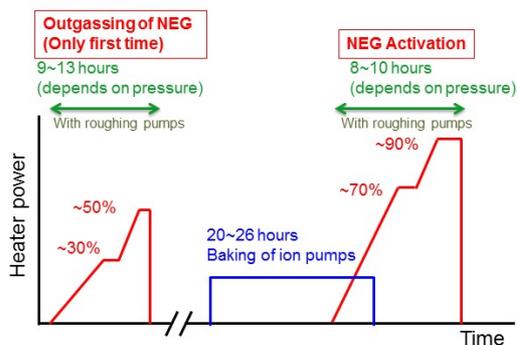


Figure 11: Basic operation patterns of NEG activation and *in-situ* ion pump baking.

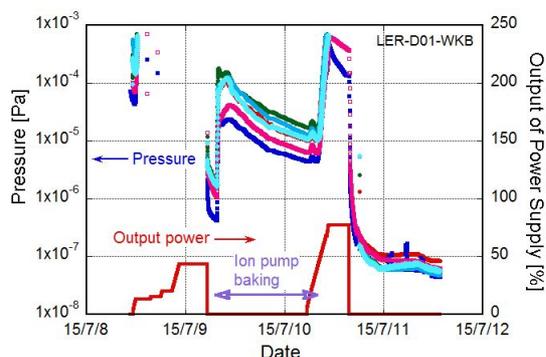


Figure 12: Typical trends of measured pressures during NEG activation and *in-situ* ion pump baking.

NEGの活性化を始める。最終的には約80~90%の電圧で5時間程維持する。NEGの温度は400~500°Cである。ただし、活性化に必要な時間は、その時の圧力に依存する。活性化終了後、粗排気ポートのL型弁を閉め、粗排気装置とビームパイプを切り離す。Figure 12は実際の活性化時々の圧力変化の例である。ガス出し作業前の圧力は $10^{-4} \sim 10^{-5}$ Paであるが、NEGのガス出しを行うことで $10^{-6} \sim 10^{-7}$ Pa台になる。さらにイオンポンプベーキングおよびNEGの活性化後、圧力は 10^{-8} Pa台になる。ただし、特殊なビームパイプでポンプの配置が疎となっている部分やゲートバルブの近くでは 10^{-7} Pa台となる場合がある。Figure 2には、これまでのNEG活性化終了区間の実績も示している。トンネル内でのビームパイプのベーキングは行わない。NEGのコンディショニング時は、イオンポンプのみで区間を排気する。

5. 今後の予定

Phase-1 運転は2016年早々にも始まる予定である。真空システムの今後の作業として、残っているHERビーム入射部・アポート部ビームパイプの設置、真空立ち上げ、冷却水量調整、コリメータの動作確認、などがある。また、マグネットの最終アラインメントの後、ビームパイプの再アラインメントを行う予定である。平行して、制御システムの確認(温度計等のモニター、アラーム、インターロックシステム、データロギングなど)を行う。Figure 13は、製作中の真空機器制御用パネルの一例(トップパネル)である。

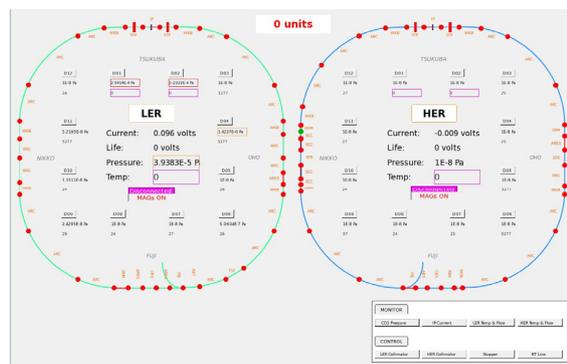


Figure 13: Top control panel for various vacuum components of LER (left) and HER (right).

LER、HER 両リングの状態(平均圧力、最高温度、ゲートバルブの状態、など)が一目で監視できるようになっている。2015年末には、Phase-1に向けた準備をほぼ終える予定である。

謝辞

真空システムの建設作業において、KEKB 加速器マグネットグループをはじめ、各グループの多くの方々にご協力いただいております。ここに深謝いたします

参考文献

- [1] N. Ohuchi et al., Proc. IPAC2014, Dresden, une 15–20, 2014, p.1877.
- [2] Y. Suetsugu et al, Vacuum, in press, doi:10.1016/j.vacuum.2014.12.010 (2014)
- [3] Y. Suetsugu et al, J. Vac. Sci. Technol. A 30, 031602 (2012).
- [4] Y. Suetsugu et al., Proc. of the 11th Annual Meeting of Particle Acc. Soc. of Japan, Aomori, 9–11 August, 2014, p.1342.
- [5] K. Shibata et al., Proc. of the 10th Annual Meeting of Particle Acc. Soc. of Japan, Nagoya Univ., 3–5 August, 2010, p.1168.
- [6] K. Shibata et al., Proc. of the 11th Annual Meeting of Particle Acc. Soc. of Japan, Aomori, 9–11 August, 2014, p.1347.
- [7] Y. Suetsugu et al., Nucl. Instrum. Meth. A 598, 372 (2008).
- [8] Y. Suetsugu et al., Nucl. Instrum. Meth. A 604, 449 (2009).
- [9] Y. Suetsugu et al., Rev. Sci. Instrum. 78, 043302 (2007).
- [10] Y. Suetsugu et al., J. Vac. Sci. Technol. A 27, 1303 (2009).
- [11] Y. Suetsugu et al., Nucl. Instrum. Meth. A 597, 153 (2008).
- [12] K. Kanazawa et al., Nucl. Instrum. Meth. A 499, 66 (2003).
- [13] Y. Suetsugu et al., Proc. of the 10th Annual Meeting of Particle Acc. Soc. of Japan, Nagoya Univ., 3–5 August, 2013, p.1186.
- [14] Y. Suetsugu et al., J. Vac. Soc. Jpn. 58, 150 (2015).
- [15] T. Ishibashi et al., Proc. of the 10th Annual Meeting of Particle Acc. Soc. of Japan, Nagoya Univ., 3–5 August, 2010, p.1191.
- [16] S. Terui et al., Proc. of the 11th Annual Meeting of Particle Acc. Soc. of Japan, Aomori, 9–11 August, 2014, p.1351.
- [17] S. Terui et al., this proceedings.
- [18] T. Mimashi et al., Proc. Of IPAC2014, Dresden, June 15–20 p.116.
- [19] J. W. Flanagan et al, Proceedings of DIPAC2011, Hamburg, May 16–18, p.561.
- [20] T. Ishibashi et al., J. Vac. Soc. Jpn. 58, 126 (2015).