

## SuperKEKB 真空システムの建設-I

### CONSTRUCTION OF THE SuperKEKB VACUUM SYSTEM – II

末次祐介<sup>#</sup>, 金澤健一, 柴田恭, 石橋拓弥, 久松広美, 白井満, 照井真司  
Yusuke Suetsugu<sup>#</sup>, 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. Approximately 75% of the main vacuum components, such as beam pipes and bellows chambers, out of the total ones required for the upgrade of the main ring had been delivered. The assembling, the pre-baking and the TiN coating of the beam pipes are going on. The installation of the components into the main ring has started beginning with the beam pipes for wiggler sections and quadrupole/sextupole magnets in arc sections. The remained components, for the local chromaticity regions, the beam injection regions and so on, will be produced in 2013. The upgrading of the monitoring and the control system are also in progress. The more realistic evaluation of the electron cloud effect taking into account the local beta function is proceeding in parallel to the construction.

## SuperKEKB 真空システムの建設-II

### 1. はじめに

2010 年から建設が始まった SuperKEKB は、4 GeV 陽電子リング(Low Energy Ring, LER)と 7 GeV 電子リング(High Energy Ring, HER)からなる非対称エネルギー電子陽電子衝突型加速器である<sup>[1]</sup>。設計ルミノシティーは  $8 \times 10^{35} \text{ s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$  と、KEKB の達成値より約 40 倍大きい。この高いルミノシティーを得るため、大電流(それぞれ 3.6 A、2.4 A)を蓄積すると同時に、低いビームエミッタンス ( $\epsilon_x/\epsilon_y = 3.2/8.64$  [LER], 4.6/11.5 [HER] nm/pm)を実現する。

真空システムは LER を中心に大幅に改造される<sup>[2]</sup>。改造の基本指針は、KEKB の真空システムをベースに、低エミッタンスビームを実現するためにビームインピーダンスを抑えること、LER での電子雲不安定性を抑制すること、また、大電流を安定に蓄積できること、である。周長約 3 km の主リングの真空コンポーネントの改造範囲を Fig. 1 (a)LER と (b)HER に示している。LER では、アーク部などリングの大部分が改造される。改造領域は約 2630m、ビームパイプの本数は約 1040 本である。HER は、それぞれ、約 490m、約 220 本である。ここでは、主リングの真空コンポーネントの設計・製作状況、およびトンネル内への設置作業など建設状況について報告する。また、最近進められている LER の電子雲不安定性のより現実的な評価についても触れる。

### 2. 真空コンポーネントの製作

ビームパイプは、ビームインピーダンスを低減でき、後述する電子雲効果も緩和できる、アンテチェンバー付きのパイプを基本的に採用する<sup>[3]</sup>。LER

アーク部では、ビームが通る中心部(ビームチャンネル)内径 90 mm、アンテチェンバー部を含めた全幅 220 mm、アンテチェンバー部の高さ(幅)14 mm である。ビームパイプは、四極電磁石用(ビーム位置モニター付き)、偏向電磁石用(曲率あり)、およびストレート部(ドリフト部)用の 3 種類に大きく分けられる。アーク部のビームパイプは、アルミ合金(A6063-T6)の押し出し法で冷却水路を含め成型される。ビームパイプ両端のフランジもビームパイプと同じ断面のアルミ合金製(A2219-T851)で、アンテチェンバー形状に適合でき、かつ内面に段差・ギャップのない MO 型を採用している<sup>[4]</sup>。ただし、回転機構を持つ六極電磁石部では、外形 108 mm の円に納まる断面となっている。また、測定器のある衝突点上流側では、測定器へのバックグラウンドを低減するために無酸素銅(C1011 電子管用)で製作される。

一方、HER は主に衝突点部両側など部分的な改造となる。基本的な形状は、ビームチャンネル内径 80 mm、全幅 220 mm、アンテチェンバー高さ 14 mm である。KEKB の偏向電磁石を再利用する部分では、ビームチャンネル部の高さが制限されるため、内径 50mm (正確にはコヒーレントなチューンシフトを避けるために楕円)、全幅 190 mm である。HER のビームパイプは基本的に無酸素銅製である。フランジはクロム銅製の MO 型である。

LER、HER とも、ビームエミッタンスの低減のため、直線部に新たにウィグラー部が設けられる。ウィグラー部の長さは約 350 m (LER 約 270 m、HER 約 80 m)、ビームパイプは約 130 本(同 88 本、24 本)である。ウィグラー部およびその下流部では、放射光強度が非常に強いために、LER、HER ともビームパイプは無酸素銅で製作される。

<sup>#</sup>yusuke.suetsugu@kek.jp

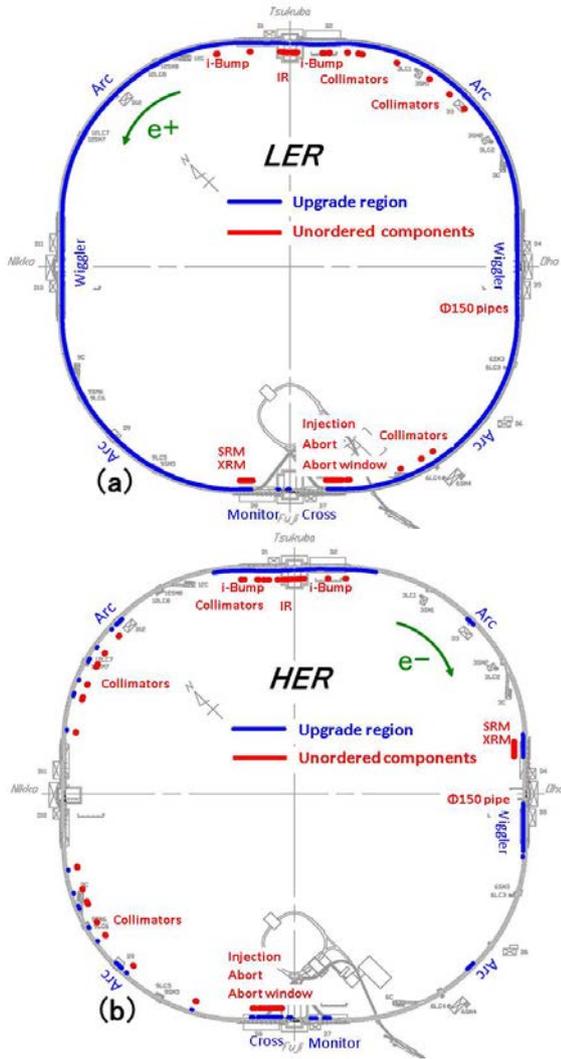


Figure 1: Upgrade regions and unordered components for (a) LER and (b) HER vacuum system of the SuperKEKB MR (July, 2013).

2011年度には、アーク部およびウィグラー部のコンポーネントを製作した。2012年度には、衝突点近傍の局所色収差補正部、ビーム入射・アボート部等の設計を固め、2013年度それらの真空コンポーネントを製作している。図1に示すように、改造が必要な部分の約95パーセントの部分の製作・発注は終了している。製作されたウィグラー部用のビームパイプ(銅製)とアーク部用のビームパイプ(アルミ合金製)をFig. 2に示す。

真空ポンプは、主ポンプとしてNEG (Non-evaporable getter, ST707)を使用する<sup>[5]</sup>。アーク部では、幅30mmのストリップを3層重ねた構造で、活性化用のマイクロヒータと共にリング内側のアンテチェンバー内に端部から挿入される。ビームチャンネルとNEGポンプは、直径4mmの穴が多数あったスクリーンで隔てられている。平均排気速度は一酸化炭素に対して約 $0.14 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-1}$ と見積もられる(NEG活性化直後)。光脱離係数を $1 \times 10^{-6} \text{ molecules photon}^{-1}$ とすると、設計ビーム電流で平均圧力

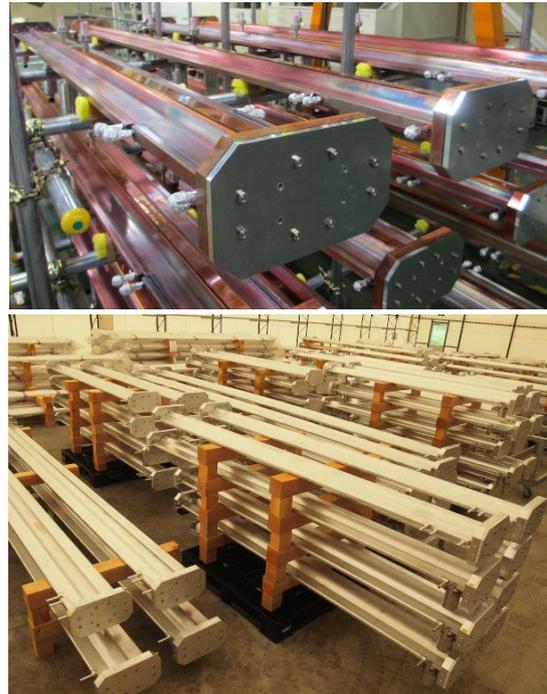


Figure 2: Copper beam pipes for wiggler sections and aluminum beam pipes for LER arc sections waiting for the installation into MR tunnel.



Figure 3: NEG pumps (NEG strips and micro-heaters for activation) integrated in a beam pipe with antechambers.

$10^{-7} \text{ Pa}$  台が得られる。直線部では、KEKBで使用していた $0.2 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ のNEGモジュールやGP50 NEGモジュール等が使用される。真空排気直後の粗排気用、および希ガス排気用に、約10mに一個の割合でスパッターイオンポンプ( $0.4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ )が設置される。Fig. 3にビームパイプに挿入されるNEGポンプを示す。

ベローズチェンバーやゲートバルブも、ビームパイプと同じ断面を持っている。内部のRFシールドには、熱的に強い楕円型を採用している<sup>[6]</sup>。隣接するビームパイプは、基本的にベローズチェンバーを挟んで接続される。LERアーク部のベローズチェンバーはアルミ合金製である。HERの新規製作部分のベローズチェンバーは銅合金製である。ただし、

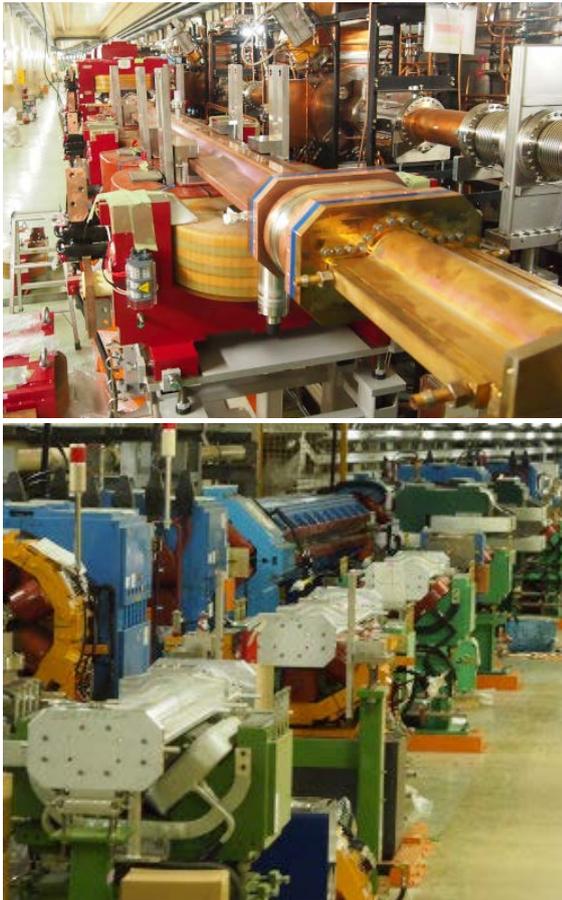


Figure 4: Beam pipes installed to wiggler sections and arc sections. The magnets are cut in half for the installation.

両方ともベローズ自身(ひだの部分)はステンレス製(SUS316L)である。ベローズチェンバーはそれ自身で冷却水路を持つ。ゲートバルブはステンレス製であるが、RF シールド部分は無酸素銅で、ビームに曝される他のステンレス表面には銀メッキを施している。

### 3. トンネル内への設置作業

製作されたビームパイプは、トンネル内に設置する前に、クリーンルームにて真空ポンプを組み込み、ベーキング(プリベーキング)し、各ビームパイプの真空特性が確認される。また、LER のビームパイプには、後述する電子雲効果を抑制するために窒化チタン(TiN)コーティングが施される<sup>[7]</sup>。プリベーキングおよび TiN コーティングは KEK 内にて行われる。詳細は[8]を参照されたい。

トンネル内への設置作業は、2012 年度後半、ウィグラー部のビームパイプから開始された。マグネット内に置かれたビームパイプはベローズチェンバーで接続され、続いて排気された。現在ウィグラー部はイオンポンプと NEG ポンプで真空に維持されている。圧力は約  $1 \times 10^{-7}$  Pa である。

2013 年度からアーク部の四極電磁石用のビームパイプの設置を開始した。四極および六極電磁石は



Figure 5: Beam pipes for bending magnets and for drift spaces, and gate valves installed in the LER arc section for test.

半割され、ビームパイプ設置後復元される。ウィグラー部およびアーク部への設置の様子を Fig. 4 に示す。ビーム位置測定用ブロックは四極電磁石に固定される。偏向電磁石用ビームパイプとストレート部ビームパイプは、上述した TiN コーティングやプリベーキング作業が終了次第設置を行う予定である。一部試験的に設置したこれらビームパイプ、およびゲートバルブを Fig. 5 に示す。ベローズチェンバーとの繋ぎこみは、電磁石の精密アラインメント終了後(2013 年度後半)に行う予定である。

ビームパイプの設置作業に関して最も大きな問題は、ビームパイプと六極電磁石コイルとの干渉であった。アンテチェンバー部の両端とコイルの一部が接触した。原因は、コイルの製作寸法誤差よりもビームパイプとコイル間の余裕が少なかったためである。ビームパイプの一部を削ることで対処した。

真空制御系は基本的に KEKB のものを再利用するが、一部は最新のシステムに置き換えられる予定で順次購入・配備されている。並行して制御用ソフトウェアの開発も進めている。トンネル内機器制御用のケーブル配線は 2013 年度から開始している。新規ウィグラー部については終了しており、当該区間の NEG ポンプの活性化、イオンポンプのベーキング等の試験が行われた。ゲートバルブ駆動用の圧搾空気配管作業も現在行われている。

#### 4. 電子雲不安定性対策について

LER では、電子雲不安定性対策がこれまでになく重要となる<sup>[9, 10]</sup>。KEKB での実験から、設計電流での各領域の電子密度は Table 1 のように推定される<sup>[11]</sup>。ビームパイプを KEKB と同じ内径 94 mm の単純な円断面を持つ銅製ビームパイプと仮定すると、リングの平均電子密度は約  $5 \times 10^{12} \text{ e}^- \text{ m}^{-3}$  と予想される。一方、リング全体に一定の  $\beta$  関数を仮定した単

Table 1: Expected electron density assuming a circular copper beam pipe at the design beam current estimated from the experiments at KEKB LER.

Regions	Expected electron density [ $\text{e}^- \text{ m}^{-3}$ ]
Drift region in arc	$8 \times 10^{12}$
In steering magnets	$8 \times 10^{12}$
In bending magnets	$1 \times 10^{12}$
Wiggler section	$4 \times 10^{12}$
In quadrupole/sextupole magnets in arc	$6 \times 10^{10} / 4 \times 10^{10}$
Straight section (Acc. cavities)	$1 \times 10^{11}$
In quadrupole magnets in straight section	$1 \times 10^{10}$
Interaction (collision) region	$5 \times 10^{11}$

Table 2: Various countermeasures against the electron cloud effect, their reduction rate compared to a circular copper pipe, and their applied regions in the SuperKEKB LER.

Counter-measures	Reduction rate	Applied regions
Solenoid	1/50	Drift region, in steering magnets, bellows chambers
TiN coating	3/5	Most of new beam pipes (all of aluminum alloy beam pipe)
Antechamber structure	1/5	Most of new beam pipes
Groove structure	1/10	In dipole-type magnets
Clearing electrode	1/100	Wiggler magnets
(Aluminum-alloy pipe)	(20)	(Reusable regions)

純な計算では、電子雲不安定性は約  $4 \times 10^{11} \text{ e}^- \text{ m}^{-3}$  で励起されると推定され、電子密度を減らす対策は必須なものとなる<sup>[10]</sup>。SuperKEKB LER では、電子密度  $1 \times 10^{11} \text{ e}^- \text{ m}^{-3}$  を達成目標値とした。

KEKB では、様々な電子密度低減方法について開発、実験が行われた。それらの結果を Table 2 にまとめている<sup>[11]</sup>。今回採用しているアンテチェンバー付ビームパイプは、放射光によって放出される光電子の影響を小さくするのに有効である<sup>[3]</sup>。また、ビームチャンネル部内面には、厚み約 200 nm の TiN コーティングを行う。これは、二次電子放出率の低減に有効である<sup>[7]</sup>。偏向電磁石用ビームパイプには、そのビームチャンネル部の上下にグループ構造を持たせている<sup>[12, 13]</sup>。このグループ構造も二次電子放出率を抑えるのに有効である。なお、このグループ部分にも TiN コーティングが施される。ウィグラー部のウィグラー電磁石用ビームパイプには、クリアリング電極が組み込まれている<sup>[14]</sup>。これは、ビームパイプ内部の電極に正の電位を印可し、ビーム近傍の電子を除去するものである。このほか、ドリフト部や補正電磁石内では、ビームパイプ外側にソレノイドを巻き、約 50 ガウス程度のソレノイド磁場を作り、電子雲の形成を抑える<sup>[15]</sup>。Table 2 には、それぞれの対策の、単純な銅ビームパイプに対する低減効果を記している。なお、アルミ合金製のビームパイプでは、銅製のパイプに比べて 20 倍程度高い電子密度となる<sup>[11]</sup>。

SuperKEKB LER では、これらの対策を表右欄に示した場所で採用する。その結果、リングの平均電子密度は約  $2 \times 10^{10} \text{ e}^- \text{ m}^{-3}$  となり、目標値を下回ると期待される。Figure 7(a)は、対策前(KEKB で使用していた銅の  $\phi 94 \text{ mm}$  丸パイプを仮定)と対策後のリングに沿った電子密度分布を示す。図中、 $s = 0$  と 3016m が衝突点である。 $s = 1500 \text{ m}$  付近で電子密度が高いのは KEKB の時と同じアルミ合金のビームパイプが再使用されるからである。

上述した閾値は  $\beta$  関数がリング内で一定と単純な場合を仮定している。より正確な評価をするために、D. Zhou ら(KEK)は、リング内の  $\beta$  関数の分布を含めた考察を行った。これは、不安定性を引き起こす電子密度の閾値が  $\beta$  関数の逆数に比例し、 $\beta$  関数の大きな場所での電子密度が不安定性励起により効くからである。SuperKEKB では、Fig. 6(b)に示すように、衝突点でビームを小さく絞るためその外側には  $\beta$  の大きい場所がある。また、局所的色収差補正区間にも大きくなる場所がある。そこで、実際の  $\beta$  関数の分布と、その場所で推定される電子密度を用い、"PEHTS2"コードを使ってビームサイズのシミュレーション(ビームトラッキング)が行われた。Fig. 6(b)に、上述した対策後の電子密度とその場所の  $\beta$  関数の積を平均  $\beta$  関数値(50m)で割った値も示している。Fig. 6(a)の電子密度と比べ、 $\beta$  関数の大きいところ(特に衝突点に近い  $s = 50 \text{ m}$  と 3000 m 付近)での実効的な電子密度が高いことがわかる。シミュレーションでは、リングを 129 区間に分けて行われた。その結果、垂直方向ビームサイズの増大に

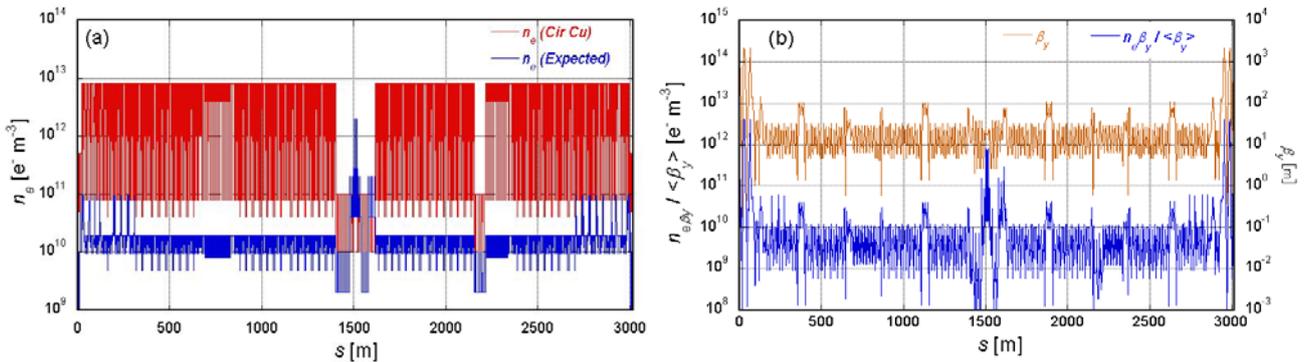


Figure 6: (a) Expected electron density without (circular copper pipe as in the case of KEKB) and with countermeasures listed in Table 2, and (b) the vertical beta-function ( $\beta_y$ ) and the product of  $\beta_y$  and the electron density ( $n_e$ ) normalized by the average  $\beta_y$  ( $\langle \beta_y \rangle$ ) along the ring.

関して、 $\beta$  関数の大きい場所での寄与は大きいものの、不安定性が生じる閾値はほぼ同じであることが示された。結果の一例を Fig.7 に示す。さらに詳細な検討が継続中である。

### 5. 今後の予定

今年度、主なものとして、

- LER/HER の衝突点付近および局所色収差補正区間のビームパイプ、ペローズチェンバー。
- 放射光および X 線によるビームサイズモニター部のビームパイプ、ペローズチェンバー。
- HER/LER ビームアポート部、ビーム入射部のビームパイプ、ペローズチェンバー。
- 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(試験機)。詳細は[16]を参照。量産は 2014 年度。

の製作を予定している(Fig.1 参照)。

既に製作したビームパイプについては、TiN コーティング作業、ベーキング作業を行っている。作業を終了したビームパイプは、窒素置換後実験室あるいは敷地内テントハウスに保管されている。トンネル内の電磁石設置作業等と並行して設置作業を行う予定である。2013 年度中にアーク部のビームパイプ、ペローズチェンバーの設置を行う予定である。電磁石のアラインメント、施設冷却水システムの増強工事などが終了後、ビームパイプとペローズチェンバーの繋ぎこみ、冷却水管の配管などを進める予定である。

### 謝辞

真空システムの設計・製作、および建設作業において、KEKB 加速器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] Y. Ohnishi et al., Proc. of IPAC2011, San Sebastián, Spain, 4-9 September, 2011, p.3693.
- [2] Y. Suetsugu et al., J. Vac. Sci. Technol. A 30, 031602 (2012).
- [3] Y. Suetsugu et al., Vacuum, 84, 694 (2010).

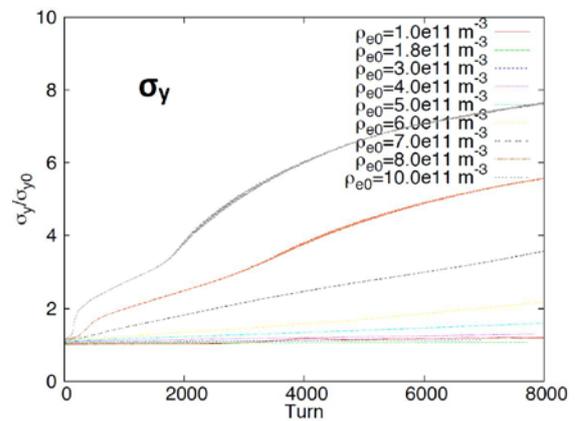


Figure 7: Typical simulation result for vertical beam-size blow up for several average electron densities ( $\rho_{e0}$ ) (curtesy of D. Zhou).

- [4] Y. Suetsugu et al., J. Vac. Sci. Technol. A 27, 1303 (2009).
- [5] Y. Suetsugu et al., Nucl. Instrum. Meth. A 597, 153 (2008).
- [6] Y. Suetsugu et al., Rev. Sci. Instrum. 78, 043302. (2007).
- [7] K. Shibata et al., Proc. of EPAC2008, Genoa, 23-27 June, 2008, p.1700.
- [8] K. Shibata et al., this proceedings [SUP097]
- [9] K. Ohmi and F. Zimmermann, Phys. Rev. Lett. 85, 3821 (2000).
- [10] Y. Susaki et al., Proc. of IPAC2010, Kyoto, 23-28 June, 2010, p.1545.
- [11] Y. Suetsugu et al., Presented in the workshop LER2010, CERN, 12-15 January, 2010 (<http://ler2010.web.cern.ch/ler2010/>), Presented in the workshop ELOUD10, Cornell Univ., 8-12 October, 2010. (<http://www.lepp.cornell.edu/Events/ELOUD10/>)
- [12] L. F. Wang et al., Phys. Rev. Spec. Top. - Acc. Beam. 7, 034401 (2004).
- [13] Y. Suetsugu et al., Nucl. Instrum. Meth. A 604, 449 (2009).
- [14] Y. Suetsugu et al., Nucl. Instrum. Meth. A 598, 372 (2009).
- [15] K. Kanazawa et al. Proceedings of PAC2005, Knoxville, 16-20 May, 2005, p.1054.
- [16] T. Ishibashi et al., this proceedings [SUP103]