

## SuperKEKB 陽電子ダンピングリングの真空システム

### VACUUM SYSTEM OF POSITRON DAMPING RING FOR SuperKEKB

柴田恭<sup>#</sup>, 末次祐介, 石橋拓弥, 白井満, 照井真司, 金澤健一, 久松広美

Kyo Shibata <sup>#</sup>, Yusuke Suetsugu, Takuya Ishibashi, Mitsuru Shirai, Shinji Terui, Ken-ichi Kanazawa,

Hiromi Hisamatsu

High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

#### Abstract

Vacuum system of the positron damping ring (DR) for SuperKEKB is now under construction. To cope with the SR (synchrotron radiation) irradiation and the electron cloud issue, the beam ducts in the arc sections have antechambers on both sides of a beam channel, which are also effective in reduction of the impedance. To remove the heat by the SR irradiation, a water cooling system is also required in the arc sections. In the straight sections, on the other hand, an antechamber structure and a water cooling system are not necessary. The beam ducts are evacuated by NEG and ion pumps, and the target pressure during operation is lower than  $1 \times 10^{-5}$  Pa. Almost all beam ducts were baked and coated with TiN film before installation into the DR tunnel. Installation of beam ducts has started in May 2016, and the installation into the arc sections has been completed by two months.

#### 1. はじめに

SuperKEKB は、KEKB B ファクトリー (KEKB) の後継機である高ルミノシティ電子・陽電子衝突加速器であり、2016 年 2 月から 6 月にかけて試運転が行われた[1]。SuperKEKB プロジェクトの目的は、ルミノシティを KEKB の約 40 倍 ( $8 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) に増強し、標準理論を越えた新しい物理を探索することである。この高いルミノシティを実現するために、SuperKEKB ではナノ・ビーム方式[2, 3]と呼ばれる衝突方式が採用される。この方式では、衝突点でのビームサイズを垂直方向:60 nm、水平方向:10  $\mu\text{m}$  まで絞り込む必要があり、光学口径とビーム寿命の減少は避けられない。そのため、入射ビームとしても低エミッタンスかつ強度の高いビームを供給する必要がある。陽電子ビームに関しては、入射ビームのエミッタンスを下げるためにダンピングリング (DR) [4] が入射器の途中に新設される。DR の主なパラメーターを Table 1 に示す。

Table 1: Parameters of DR

Beam energy	1.1	GeV
Bunch number	4	
Circumference	135.5	m
Maximum stored beam current	70.8	mA
Maximum bunch charge	8	nC
Bunch length	6.53	mm
Bending radius	2632/2967	mm
Critical energy	0.93/0.82	keV
Total SR* power	7.2	kW

\*Synchrotron Radiation

DR はレーストラック形の蓄積リングで、ビームエネルギーは 1.1 GeV、最大蓄積電流は約 70 mA、バンチ数は 4、バンチ長は約 7 mm である。アーク部で使用される主な偏向電磁石の曲率半径は 2632 mm と 2967 mm であり、放射光の臨界エネルギーはそれぞれ 0.93 keV と 0.82 keV、リング一周あたりの放射光のパワーは 7.2 kW である。

現在 SuperKEKB では本格的な物理実験を行うための改造作業が行われており、DR 建設もその一環である。(2016 年 2 月から 6 月まで行われた SuperKEKB の試運転では、DR を用いたビーム入射は行われていない。) DR のビームダクトの設置作業は 2016 年 5 月から開始され、2016 年 7 月末現在までにアーク部のほぼ全てのビームダクトの設置が終了している。その他の真空機器の設置作業や制御システムの開発などは、2016 年度中に終わらせる予定である。なお、DR は 2017 年秋の運転開始を予定している。

#### 2. 真空システムの概要

DR の全体像を Figure 1 に示す。DR は 2 つのアー

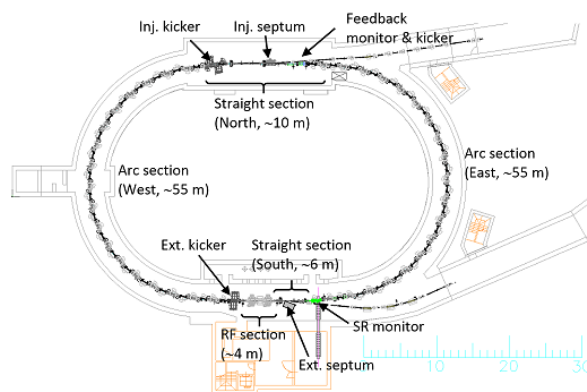


Figure 1: Overall view of DR.

<sup>#</sup> kyo.shibata@kek.jp

ク部(約 110 m)と2つの直線部(約 20 m)からなっており、ビームダクトはゲート弁で5つの区間に分割される。ビームダクトの形状は、直線部とアーク部で大きく異なる。アーク部では、"Reverse-bend FODO"ラティス[5]が採用されるため、放射光がリング外側にだけでなく内側にも照射される。そのため、光マスクと冷却水チャンネルがビームダクトの両サイドに必要となる。更に、電子雲[6]の発生と光マスクのインピーダンスを低減するために、ダクトの両サイドにはアンテチェンバー[7, 8]が設けられる。電子雲対策としては、アンテチェンバーに加えてグループ構造[9]と窒化チタン(TiN)コーティング[10]も用いられる。直線部には、加速空洞やフィードバックシステム、入射システムなどの特殊なコンポーネントが設置される。本稿ではこれら特殊コンポーネントについては言及せず、直線部としてはそれら特殊コンポーネント以外のビームダクト(合計で約7 m)についてのみ扱う。直線部のビームダクトの断面形状は、隣接する特殊コンポーネントに合わせて正八角形や円形、四角形など様々である。直線部には放射光はほとんど当たらないため、アンテチェンバーは必要ない。また、直線部では水冷も行われない。ほぼ全てのビームダクトはアルミ合金製で、本数は約110本である。加速器に設置される前に、ビームダクトにはTiNコーティングとベーキングが施される[11,12,13]。排気はNEGポンプとイオンポンプ(IP)によって行われ、平均到達圧力の目標値は $1 \times 10^{-5}$  Pa以下である。

### 3. ビームダクト

#### 3.1 アーク部用ビームダクト

Reversed-bend FODO ラティスの1セルの磁石構成は、

- 向きと長さ、曲率の異なる偏向電磁石:2台
- 四極電磁石:2台
- 六極電磁石:2台

の計6台である。アーク部のビームダクトは、タイプの異なる偏向電磁石毎に2種類(Type IとType II)あり、それぞれのビームダクトは、各一台ずつの偏向電磁石、四極電磁石、六極電磁石内に設置される。アーク部用ビームダクトをFigure 2に、1セル分のレイアウトをFigure 3にそれぞれ示す。アーク部では各電磁石の間のスペースは限られており、ビームダクトはその狭いスペースに収められるよう設計された。ビームダクトは、曲線部と直線部からなっており、曲線部の曲率半径(2684 mmと2966 mm)は設置される偏向電磁石と同じである。なお、ダクトはアルミ合金製であり、素管は押し出し加工で製作され、曲線部は素管を曲げて成形される[14]。

ビームダクトはBPM電極を設置するためのBPMブロック[14]と排気ポート[14]を有する。アーク部で使用するBPM電極はDR用として開発されたもので、1枚のレーストラック形フランジで2個の電極がBPMブロックにマウントされる[15]。アーク部では隣り合う電磁石の間に十分なスペースがないため、ビームダクト間に独立したベローズチェンバーをフランジで接続することが困難である。そのため、ビームダクトにはRFシールド付ベローズ[14]が溶接される。なお、ベローズはステンレス製であるため、ベローズはアルミ-ステンレス変換材を介してビームダクトに溶接される。ビームダクト同士の接続にはICF152の特殊なフランジ[14]が用いられる。ダクト接続

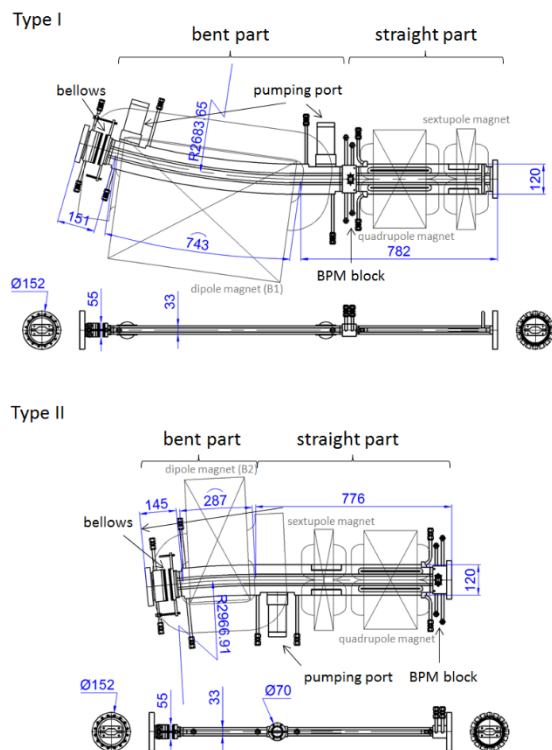


Figure 2: Beam ducts for the arc sections.

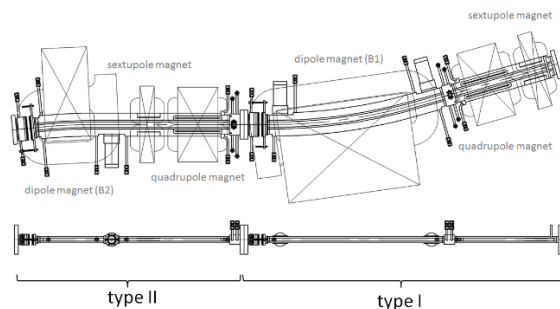


Figure 3: Layout of the beam ducts in one cell of the reverse-bend FODO lattice.

部には電磁石が密に設置されているため、通常のICF152フランジで使用される首下52 mm程度のネジを使用するスペースが残されていない。そこで、片側のフランジはネジ穴切欠き構造とし、反対側のフランジではネジ穴にタップ加工を施すことで、首下30 mm程度の短いネジでフランジを締結することが可能となっている。また、フランジの間には、溝を埋めるためのRFコンタクトが入れられる。

アーク部のビームダクトの断面形状をFigure 4示す。アーク部用ビームダクトには、ビームの質の低下の原因となる電子雲の発生を低減するため、アンテチェンバーが設けられている。放射光がリング外側にだけでなく、リング内側にも照射されるため、アンテチェンバーはダクトの両サイドに必要である。ベローズのRFシールドを放射

光から保護するための光マスクもダクトの両サイドに必要となるが、アンテチェンバー内部に設置することで、そのインピーダンスはアンテチェンバーがない場合と比較すると大幅に低減される。アンテチェンバーの高さは電磁石のアパーチャーで制限されているが、8 mm あれば 5 eV 以上のエネルギーを持つ放射光は 90 %以上がアンテチェンバー内に照射される[14]。また、放射光の反射を減らすために、アンテチェンバーの側壁は溝を有している。一方、ビームチャンネルの高さは、コヒーレントシンクロトロン光によるビーム不安定性を抑えるために 24 mm とした[16]。また、電子雲の発生を抑えるために上下面にはグループ構造を持たせており、2 次電子放出率を低減させている[17]。グループ構造は偏向電磁石内部で効果を発揮するが、ダクト素材を押し出し加工で製作する際にグループも形成されるため、ダクトの直線部もグループ構造を有している。

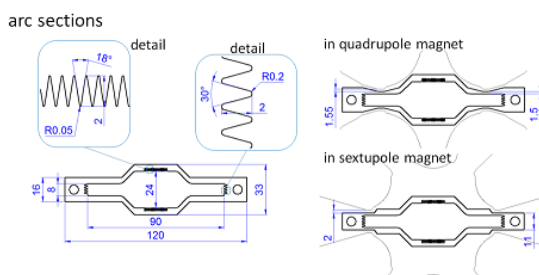


Figure 4: Cross-sections of the beam duct in the arc sections.

### 3.2 直線部用ビームダクト

直線部、及び直線部とアーク部の境界付近にはRF加速空洞、DCCT、フィードバックモニター&キッカー、入射キッカー、出射キッカーなどの特殊なコンポーネントが設置される。それぞれのビームダクトの断面形状は

- RF 区間: 円形 ( $\phi 150$  mm)
- DCCT、フィードバックモニター: 正八角形(内接円の直径 46 mm)
- フィードバックキッカー: 正八角形(内接円の直径 62.8 mm)
- 入出射キッカー: 四角形(42 mm×37 mm)
- 入出射セプタム: 円形 ( $\phi 41.2$  mm)

である。直線部の大部分はこれら特殊なコンポーネントで占められており、それぞれのコンポーネントに隣接するビームダクトで断面形状が滑らかに変換される。Figure 5 に直線部で使用するビームダクトの一例を示す。アーク部用のビームダクトと同様に、ビームダクトは排気ポートを有し、ビームダクト同士の接続はRFコンタクト付ICFフランジで行われる。ビームダクトが4極電磁石内に設置される場合はBPMブロックが設けられるが、一部のビームパイプではアーク部とは異なりSuperKEKB用のBPM電極[18]が使用される。なお、直線部では隣り合う電磁石の間に十分なスペースがあるため、独立したベローズチェンバーのフランジによる接続が可能である。また、直線部では放射光の照射はほとんどないため、ビームダクトにアンテチェンバーと冷却水チャンネルは必要ない。

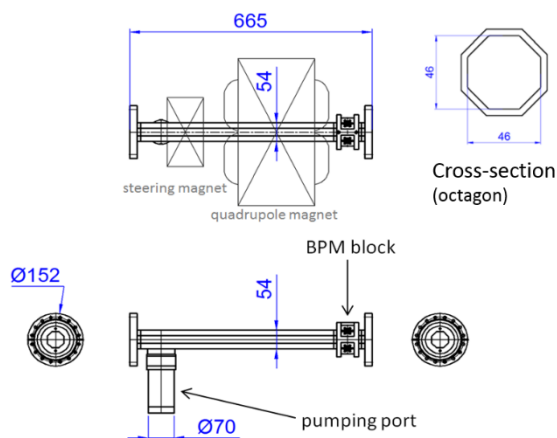


Figure 5: Example of beam duct for the straight section.

## 4. 平均圧力の評価

DRでは残留気体分子(COを仮定)との散乱で決まるビーム寿命が1000 s以上になるように、ビーム蓄積時の圧力の目標値を $1 \times 10^{-5}$  Pa以下としている。DRのガス放出は主に放射光による光刺激脱離によるものであり、このため直線部よりアーク部のほうが排気速度を大きくする必要はある。ここではビームダクト内の残留気体をCOとし、アーク部におけるビーム蓄積時の平均圧力の評価を行う。ビームダクトの排気には、主ポンプとしてNEGポンプ(活性化直後の排気速度 $0.2 \text{ m}^3\text{s}^{-1}(\text{H}_2)$ 、 $0.1 \text{ m}^3\text{s}^{-1}(\text{CO})$ )、副ポンプとしてイオンポンプ(IP、排気速度 $0.03 \text{ m}^3\text{s}^{-1}(\text{N}_2)$ )が用いられる。排気ポートのCOに対するコンダクタンスはNEG: $0.09 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ 、IP: $0.02 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ 程度であり、実効的な排気速度はNEG(活性化直後): $0.05 \text{ m}^3\text{s}^{-1}(\text{CO})$ 、IP: $0.01 \text{ m}^3\text{s}^{-1}(\text{CO})$  (COに対しても $\text{N}_2$ と同じ排気速度を持つと仮定)程度である。アーク部では2セル(ビームダクト4本)に対しNEGが5台、IPが1台設置される。そのため、ポンプ一台辺りの平均実行排気速度は活性化直後で $0.04 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ 、NEGの排気速度が半分まで落ちた場合には $0.03$

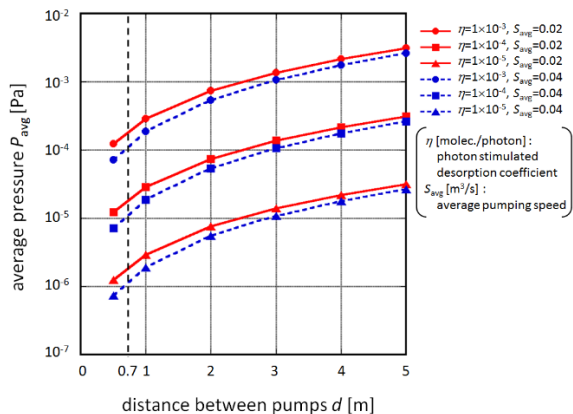


Figure 6: Expected average pressure in the arc sections for different photon stimulated desorption coefficient  $\eta$  and average pumping speed  $S_{\text{avg}}$ .

$\text{m}^3\text{s}^{-1}$  以上となる。ダクト内表面の光刺激脱離係数  $\eta$  [ $\text{molecules photon}^{-1}$ ]と平均実行排気速度  $S$  [ $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ ]、ポンプ間距離  $d$  [m]を変えて計算したリング平均圧力を Figure 6 に示す。ただし、この計算では、ビームダクトは断面積が同程度となる  $\phi 32$  mm の円形パイプ、蓄積電流は 70.8 mA と仮定した。ポンプ間平均距離は約 0.7 m であるので、ポンプの排気速度が  $0.02 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  まで低下したとしても、真空焼き出しが十分進み  $\eta$  が  $1 \times 10^4 \text{ molecules photon}^{-1}$  以下まで下がれば、平均圧力として目標値の  $1 \times 10^{-5}$  Pa が達成される見込みである。一方、ビームがない状態では、平均圧力は  $1 \times 10^{-7}$  Pa 以下になると予想される。

## 5. 冷却水システムと制御システム

アーク部ではビームダクトが放射光により加熱されるため、ビームダクトの水冷が必要である[14]。最大電流蓄積時の放射光のパワーはリング一周りで 7.2 kW であり、冷却水システムはそのときのビームダクトの温度上昇が 10 度以下になるように冷却水の全流量を  $15 \text{ L min}^{-1}$  として設計された。冷却水はまずアーク部ごとに 2 系統に分けられ、各アーク部は更に 5 系統(1 系統は 4 セル、ビームダクト 8 本に相当)に分けられる。ビームダクトには両サイドに冷却水チャンネル ( $\phi 6$  mm) があり、各系統は更に 2 分割されるため、結果的に 1 冷却水チャンネルあたりの冷却水流量は  $0.75 \text{ L min}^{-1}$ 、流速は  $1.2 \text{ ms}^{-1}$  となる。また、このときの一系統あたりのビームダクトにおける圧力損失は 0.02 MPa 程度になると予想される。なお、冷却水システムの構築は来年度に行われる予定であり、チラーやポンプ、冷却水路の詳細については今年度中に決定する予定である。

制御システムは、SuperKEKB と同様なものになる予定である。ただし、圧力や温度、流量などのデータの数は、SuperKEKB と比較するとはるかに少ない。ビームダクトはゲート弁によって 5 区間に分けられ、NEG 活性化などの制御は区間ごとに独立に行う予定である。圧力は IP の放電電流で測定するが、校正や確認のため SuperKEKB で使用実績のある冷陰極電離真空計が各区間に 1 台ずつ設置される。制御システムは現在開発中であり、今年度中の完成を目指している。

## 6. 建設状況

DR のビームダクトの製作は、放射光モニター用チェンバーを除き全て終了しており、放射光モニター用チェンバーも今年中に納品される予定である。ほぼ全てのビームダクトは加速器に設置される前に実験室でベーキングと TiN コーティングが施されるが[11-13]、この処理もほとんど終了している。なお、ビームダクトのベーキングは実験室でのみ行い、設置後のトンネル内でのベーキングは行わない。

ビームダクトのインストールは 2016 年の 5 月に東アーク部から開始された。インストール手順は以下の通りである。

- BPM サポートとビームダクトサポートを設置する。
- 四極電磁石と六極電磁石を半割する。
- 偏向電磁石内をジャッキアップし、横からビームダクトを挿入する。(ただし、Type II のビームダクトで

は偏向電磁石のジャッキアップは必要ない。)

- 偏向電磁石を正規の位置まで下げる。(BPM ブロックとビームダクトはサポートの上に乗る。)
- 四極電磁石と六極電磁石を復旧し、ビームダクトのフランジを締結する。
- ビームダクトを約 8 本設置するごとに、リークテストを行う。

Figure 7 にビームダクト設置作業の様子を示す。2016 年 7 月末現在で両アーク部のインストール作業はほぼ終了しており、その他の真空機器の設置作業も今年度中に完了する予定である。また、トンネル内のケーブルの敷設作業なども現在進行中であり、こちらも今年度中に完了する予定である。それと平行して、実験室では NEG 活性化法を確立するための排気試験が行われている。トンネル内での本格的な真空立ち上げは、これらの作業と試験が終了してから行われる予定である。



Figure 7: Installation of the beam duct into the arc section.

## 7. まとめ

SuperKEKB 陽電子 DR の建設が現在進行中である。DR のアーク部では、放射光と電子雲、及びインピーダンス対策としてアンテナチェンバー付ビームダクトが使用され、ビームダクトの水冷も行われる。電子雲対策としては、その他にもグループ表面と TiN コーティングが用いられる。アーク部では電磁石が密に設置されており、ビームダクトはその狭いスペースに収められるように設計された。一方、直線部ではアンテナチェンバーの必要はなく、水冷も

行われない。DR で使用するビームダクトはアルミ合金製で、数は約 110 本である。2016 年 7 月末現在、ほぼ全てのビームダクトのベーキングと TiN コーティングは終了している。ビームダクトのインストール作業は 2016 年 5 月から開始され、7 月末までに両アーク部のインストールまで終了している。残るビームダクトのインストールや、制御システムの開発、ケーブル敷設作業を 2016 年度中に完了させ、その後は 2017 年秋の DR 運転開始を目指し真空立ち上げや冷却水システムの構築が行われる予定である。

## 参考文献

- [1] Y. Funakoshi *et al.*, “BEAM COMMISSIONING OF SuperKEKB”, Proceedings of IPAC2016, Busan, Korea, May 8-13, 2016, p. 1019;  
<http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/ipac2016/papers/tuoba01.pdf>
- [2] P. Raimondi, “NEW DEVELOPMENTS IN SUPER B-FACTORIES” Proceedings of PAC07, Albuquerque, New Mexico, NMZAKI02, USA, 25-29 June, 2007, p.32;  
<http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/p07/PAPERS/MOZAKI02.PDF>
- [3] Y. Ohnishi *et al.*, “SuperKEKB ビーム光学系の設計”, Proceedings of the 8<sup>th</sup> Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, TUPS020, Tsukuba, Japan, 1-3 Aug, 2011, p.880;  
[http://www.pasj.jp/web\\_publish/pasj8/proceedings/poster/TUPS020.pdf](http://www.pasj.jp/web_publish/pasj8/proceedings/poster/TUPS020.pdf)
- [4] M. Kikuchi *et al.*, “DESIGN OF POSITRON DAMPING RING FOR SUPER-KEKB”, Proceedings of IPAC’10, TUPEB0540, Kyoto, Japan, 23-28 May, 2010, p.1641;  
<http://epaper.kek.jp/IPAC10/papers/tupeb054.pdf>
- [5] M. Kikuchi, “Reverse-bend FODO lattice applied to damping ring for SuperKEKB”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 556, 2006, p.13.
- [6] K. Ohmi *et al.*, “Head-Tail Instability Caused by Electron Clouds in Positron Storage Rings”, Phys. Rev. Lett. 85 (2000) p.3821.
- [7] Y. Suetsugu *et al.*, “Development of copper beam ducts with antechambers for advanced high-current particle storage rings”, Vacuum 84, p.694 (2010).
- [8] Y. Suetsugu *et al.*, “Design and construction of the SuperKEKB vacuum system”, J. Vac. Sci. Technol. A 30(3), p.031602 (2012).
- [9] 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”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 604, p.449 (2009).
- [10] 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);  
<http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/e08/papers/tupp071.pdf>
- [11] K. Shibata *et al.*, “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”, Proceedings of the 10<sup>th</sup> Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, SUP097, Nagoya, Japan, 3-5 Aug, 2013, p.1168;  
[http://www.pasj.jp/web\\_publish/pasj10/proceedings/PDF/SUP0/SUP097.pdf](http://www.pasj.jp/web_publish/pasj10/proceedings/PDF/SUP0/SUP097.pdf)
- [12] K. Shibata *et al.*, “偏向電磁石用ビームパイプ(曲げパイプ)への窒化チタンコーティング”, Proceedings of the 11<sup>th</sup> Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, SUP115, Aomori, Japan, 9-11, Aug, 2014, p.1347;  
[http://www.pasj.jp/web\\_publish/pasj2014/proceedings/PDF/SUP1/SUP115.pdf](http://www.pasj.jp/web_publish/pasj2014/proceedings/PDF/SUP1/SUP115.pdf)
- [13] K. Shibata *et al.*, “SuperKEKB 真空システム建設の現状”, J. Vac. Soc. Jpn. 56 (2014) p.136;  
[https://www.jstage.jst.go.jp/article/jvsj2/57/4/57\\_13-PR-097/\\_pdf](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jvsj2/57/4/57_13-PR-097/_pdf)
- [14] K. Shibata *et al.*, “SuperKEKB 陽電子ダンピングリングのアーク部用ビームダクトの設計”, Proceedings of the 9<sup>th</sup> Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, WEPS129, Osaka, Japan, 8-11 Aug, 2012, p.790;  
[http://www.pasj.jp/web\\_publish/pasj9/proceedings/PDF/WEPS/WEPS129.pdf](http://www.pasj.jp/web_publish/pasj9/proceedings/PDF/WEPS/WEPS129.pdf)
- [15] M. Tobiyama *et al.*, “SuperKEKB ダンピングリング用ビーム位置モニタ”, Proceedings of the 8<sup>th</sup> Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, MOPS080, Tsukuba, Japan, 1-3 Aug, 2011, p.507;  
[http://www.pasj.jp/web\\_publish/pasj8/proceedings/poster/MOPS080.pdf](http://www.pasj.jp/web_publish/pasj8/proceedings/poster/MOPS080.pdf)
- [16] H. Ikeda *et al.*, “EFFECT OF COHERENT SYNCHROTRON RADIATION AT THE SUPERKEKB DAMPING RING”, Proceedings of IPAC’11, THPZ021, San Sebastián, Spain, 4-9 September, 2010, p.3732;  
<https://accelconf.web.cern.ch/accelconf/IPAC2011/papers/thp2021.pdf>
- [17] Y. Suetsugu, “Continuing study on electron-cloud clearing techniques in high-intensity positron ring: Mitigation by using groove surface in vertical magnetic field”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 604, 2009, p.449.
- [18] M. Tobiyama *et al.*, “DEVELOPMENT OF BUTTON ELECTRODES FOR SUPERKEKB RINGS”, Proceedings of BIW’10, TUPSSM041, Santa Fe, New Mexico, USA, May 2-6, 2010, p.223;  
<http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/BIW2010/papers/tupsm041.pdf>