

DESIGN WORK OF BEAM DUCTS

FOR SuperKEKB DAMPING RING ARC SECTION

Kyo Shibata[#], Ken-ichi Kanazawa, Yusuke Suetsugu, Hiromi Hisamatsu, Mitsuru Shirai,
Takuya Ishibashi, Shinji Terui
High Energy Accelerator Research Organization (KEK)
1-1 Oho, Tsukuba-shi, Ibaraki-ken, 305-0801

Abstract

Design work of beam ducts for SuperKEKB damping arc section is in the final stage now. The beam ducts are made of aluminum alloy. There are two types of beam ducts which consist of a combination of a straight part with a bending part for bending magnets. To reduce the impedance of photon masks and cope with the electron cloud issue, the beam ducts have antechambers with a height of 8 mm on both sides. As an additional countermeasure against the electron cloud issue, the beam channel with a height of 24 mm has groove structures on the top and bottom and is coated with TiN to reduce the secondary electron yield. Each duct has a bellows, BPM block, pumping ports and water cooling channels, and an ICF152 flange with an RF contact is adopted as a connection flange. The trial models were made and data from tests with them were fed back to their designs.

SuperKEKB 陽電子ダンピングリングのアーカ部用ビームダクトの設計

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、2014 年度中の運転開始を目指して現在建設作業が進められている。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、標準理論を超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^[1,2]と呼ばれる衝突方法が採用される。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 μm まで絞り込む必要があり、低エミッタンスビームが必須となるが、そのために力学口径とビーム寿命が減少してしまうことは避けられない。それ故、入射ビームとして低エ

表 1. DR のパラメーター

エネルギー	1.1	GeV
バンチ数	4	
周長	135.5	m
最大蓄積電流	70.8	mA
最大バンチ電荷	8	nC
バンチ長	6.53	mm
入射ビームエミッタンス	1700	nm
取り出しエミッタンス(h/v)	41.4/2.07	nm
アーカ部電磁石曲率半径	2632	mm
取り出し時間	40	ms

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)^[3]が新設される。

DR の主なパラメーターを表 1 に示す。DR は、2 つのアーカ部と 2 つ直線部からなる周長 135 m のレーストラック型蓄積リングで、ビームのエネルギーは 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。アーカ部のビームダクトは今年度 (2012 年度) 製作される予定であり、設計は現在最終段階に入っている。ここでは、アーカ部ビームダクトの設計や試作品によるテスト結果について報告する。

2. ビームダクト設計

2.1 基本設計

図 1 に DR アーク部用ビームダクト案を示す。DR では、ラティスとして偏向電磁石の向きが交互に入れ替わる”Reverse-bend FODO”^[4]が採用されており、1 セルに 2 種類の偏向電磁石が使用される。ビームダクトは偏向電磁石ごとに 2 種類用意され、それぞれ偏向電磁石内に入る曲線部 (曲率半径 2632 mm) と、偏向電磁石外部の直線部から成る。各ビームダクトは、ビーム位置モニタ (BPM) 電極用ポートと排気ポート、ベローズを有しており、ビームダクトの接続には ICF152 の特殊フランジが用いられる。

ビームダクトはアルミ合金製 (ベローズのみステンレス製) であり、排気は NEG ポンプ^[5]とイオンポンプで行われる。ダクト表面の光刺激脱離係数 η [molec./photon] と排気速度 S [m^3/s]、ポンプ間距離 d

[#]kyo.shibata@kek.jp

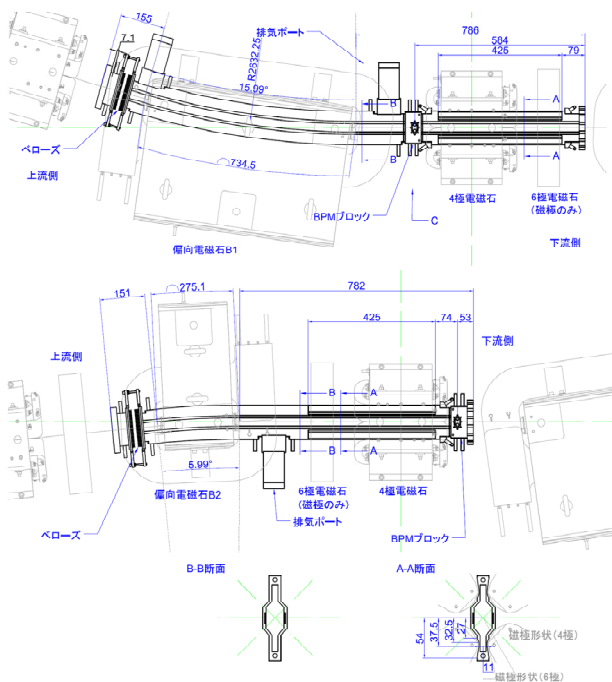


図1：ダンピングリングアーク部用ビームダクト案

[m]を変化させたときの、リング内平均圧力の計算結果を図2に示す。ただし、ダクトは直径32mmの単管と仮定した。実際のポンプ間距離は0.8m程度となるので、ポンプの排気速度が0.02 m³/sまで低下しても、放射光による真空焼き出しが十分進み η が-4乗台に入れば、ダクトは平均圧力で-5乗台まで排気できると予想される。

DRアーク部では、リング一周あたり最大で約7.2 kWの放射光がリング外側にだけでなく、内側にも照射される。ダクト壁での放射光パワー線密度は最大で0.13 W/mmになり、水冷しない場合はダクトが100°C以上になる。そこで、ビームダクト両サイドには冷却水チャンネルを設置した。冷却水チャ

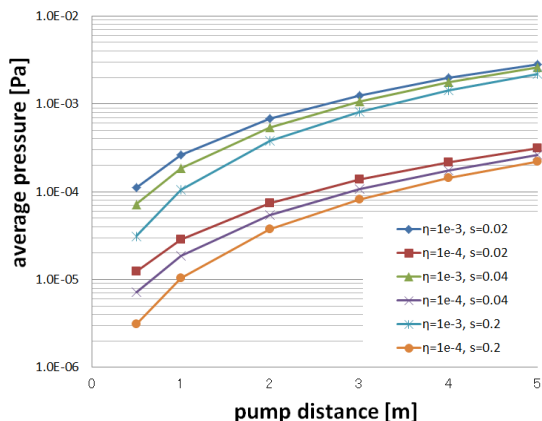


図2：ビームダクト内平均圧力。直径32mmの単管を仮定して計算したビームダクト内平均圧力

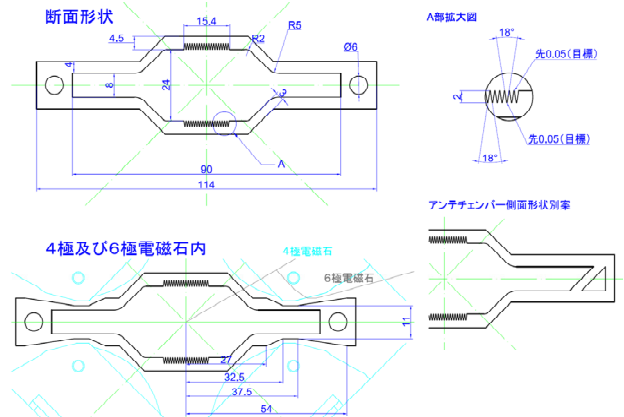


図3：ビームダクトの断面形状

ネルの熱伝達係数を $1 \times 10^{-3} \text{ W/mm}^2\text{K}$ とした場合、ダクト温度は 45°C 以下に抑えられると予想される。

電子雲不安定性^[6]対策としては、グループ表面、窒化チタンコーティング、アンテチェンバー、ソレノイドコイルが採用される予定である。

以下に、各パーツの設計について詳しく説明する。

2.2 断面形状

ビームダクトの断面形状を図3に示す。前述したように、アーク部用ビームダクトには、電子雲不安定性によるビームの質の低下を防ぐため、アンテチェンバータイプ^[7]を採用した。放射光がリング外側にだけでなく、内側にも照射されるため、アンテチェンバーはダクト両サイドに設置される。ベローズのRFコンタクトを放射光から保護するための光マスクもダクト両サイドに必要となるが、アンテチェンバー内部に設置できるため、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して大幅に低減される。アンテチェンバーの高さは、電磁石の磁極間距離とダクト肉厚で制限されており、8mm以上は確保できない。しかし、アンテチェンバーの高さを8mmにすれば、5eV以上のエネルギーを持つ放射光は90%以上アンテチェンバー内部に照射されるため、アンテチェンバーとしての役割は十分果たすことができると考えられる。なお、アンテチェンバー側壁による光の反射の影響を低減させるため、アンテチェンバーの形状を図に示した別案のように変更することも現在検討されている。

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24mmとした^[8]。また、電子雲対策として、上下の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^[9]。このグループ構造は偏向電磁石内部で効果を発揮するが、ダクト押し出し材製作の都合上、直線部もグループ構造となる可能性がある。

2.3 接続フランジ

接続フランジを図4に示す。真空シールにはICF152のアルミガasketを使用するが、接続部に生じる隙間がビームから見えないようにするため、

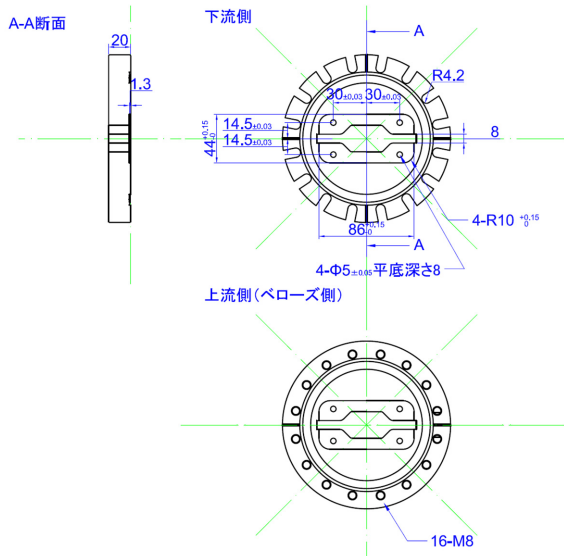


図 4：接続フランジ

接続面に RF コンタクトを挟み込む構造とする。
 (RF コンタクトの固定はノックピンで行う。) フランジはアルミ合金製で、ナイフエッジ部にはイオンプレーティングなどの硬化処理が施される。
 ダクト接続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 程度のネジが使用できるようにした。

2.4 BPM ブロック

BPM ブロックを図 5 に示す。BPM ブロックは上下に BPM 電極^[10]を取り付けるためのポートを有する。BPM 電極はフランジ (1 枚のフランジに 2 個の電極を設置) で接続されるが、真空シールにはヘリコフレックスデルタが使用される。

BPM ブロックは、フランジ付きのものとフラン

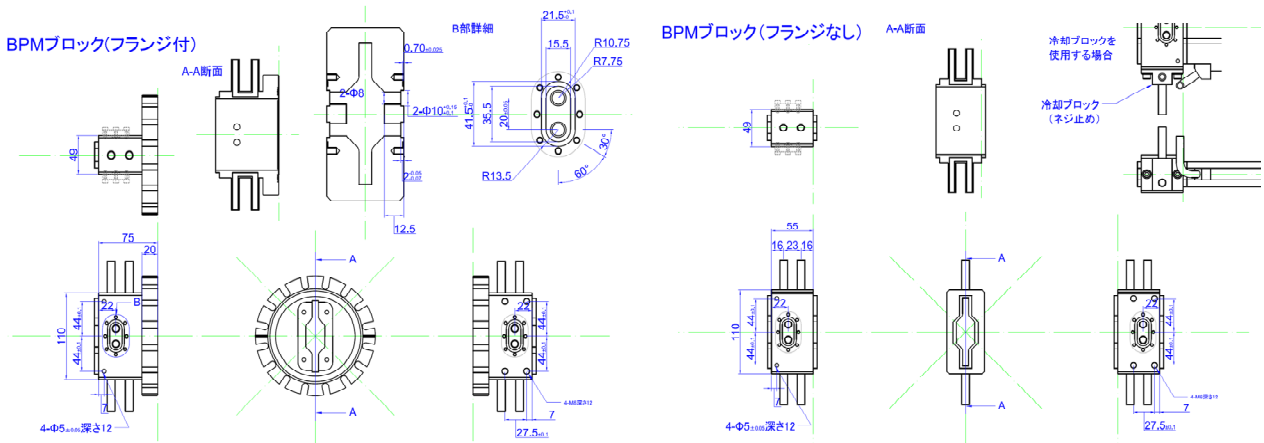


図 5：BPM ブロック

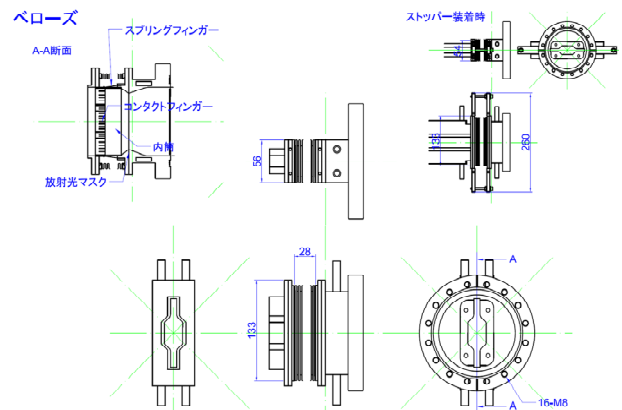


図 6：ベローズ

ジになしのものがあるが、BPM ブロック部の基本構造は同じである。ブロック下面にはサポート固定用のネジ穴を、上面には測量機を設置するためのノックピン用穴を設ける。BPM ブロックの材料はアルミ合金である。放射光マスクはないが、水冷により放射光による温度上昇を抑えている。

2.5 ベローズ

ベローズを図 6 に示す。ベローズは偏向電磁石のコイル内に設置されるため、高さが 56 mm 以下に制限される。内部にはフィンガー型の RF シールドを有しており、伸縮量は約±4 mm である。ビーム上流側のフランジとベローズの間には、ベローズの RF シールドを放射光から守るための放射光マスクを設置する。放射光マスクはアンテチェンバー内に設置され、その高さは 8 mm 程度であり、水冷機構を有する。なお、ベローズの材料はステンレスとするため、アルミダクトとの間にアルミ-ステンレスの変換材が必要である。

2.5 排気ポート

排気ポートはアンテチェンバー側壁にあり、ICF70 フランジで NEG ポンプやイオンポンプが設置される。ポンプとビームダクトの間には、RF シールドは設けない。粗排気用のターボ分子ポンプもこのポートを介して接続される。なお、ビームダ



図7：BPMブロック（左側）とフランジ（右上）、ベローズ（右下）の試作品

ダクトの真空度はイオンポンプの放電電流で測定し、その他の真空計は設置しない。

3. 試作

3.1 ダクト押し出し材

押し出しによるビームダクト素材の製造試験を行った。材料は A6063S-T6 である。当初の設計では、グループ先端部と谷底部を R0.1 mm、グループの角度を 20 度としていたが、これらの値は 1 回目の試験で達成された。そこで 2 回目以降の試験では、グループの効果を更に高めるために、設計値を R0.05(目標)とした。これまでのところ、R0.05 の達成は難しいが、R0.1 以下は達成できている。また角度も 18 度に変更された。グループ以外の寸法に関しても特に問題はなく、この試験でビームダクトの素材がアルミ押し出し材で製作可能であることが確認された。

3.2 フランジ、BPM ブロック

フランジや RF コンタクト、BPM ブロックの試作では、フランジ同士の締め付けや BPM 電極の取付けテストなどが行われた。試作品の写真を図 7 に示す。BPM ブロックの材料は A5083 であり、フランジには A2219-T852、RF コンタクトにはベリリウム銅が使用されている。

BPM 電極取付け試験の結果、BPM フランジと BPM ブロック間の隙間を所定の値にするためには、ボルトの締め付けトルクが 5 Nm 以上必要であることが分かった。これは使用している M4 のボルトに対して非常に大きな値であり、BPM ブロックのネジ穴を損傷してしまう可能性がある。そのため、実機では、締め付けトルクを 3 Nm 程度にするため、ヘリコフレックス用溝が 0.2 mm 深くなるよう設計に変更を施した。

フランジ接合時の RF コンタクトのずれ、フランジ間隙の有無については、アクリル製フランジを用いた目視検査によって問題がないことが確認された。また、排気試験も行われ、真空シールについても特に問題がないことが確認された。



図8：曲げ加工されたビームダクト

3.3 ベローズ

図 7 にベローズの試作品の写真を示す。ベローズはレーストラック型であり、ビーム軸方向以外にはほとんど動かないことが確認された。ダクト据え付けの際には、垂直・水平方向のずれをどこかで吸収する必要があるが、その役割をこのベローズが担うことは難しいと思われる。そこで、垂直・水平方向のずれはフランジ結合部で吸収することにした。今後は RF コンタクト設置用ノックピンの大きさなど、フランジの設計に若干修正を施す予定である。RF シールドに関しては、組み立ては困難であるが不可能ではないことが確認されたため、実機でも基本的には同じデザインを採用する。

3.5 曲げ加工試験

ビームダクトを偏向電磁石内のビーム軌道に沿って曲げるための曲げ加工試験を行った。ビームダクトの曲率半径は 2632 mm であり、ダクト中心部での弧の長さは約 728.6 mm、及び約 254.7 mm である。曲げ加工試験は、2 つの会社により独立に行われた。どちらの場合でも、曲げ加工用の専用治具が製作され、プレス機を用いて曲げ加工が行われた。曲げ加工後のビームダクトの写真を図 8 に示す。曲げ加工による断面形状の変形としては、特にアンテナチェーンの潰れが心配されたが、どちらの試験でも変形量を 0.5 mm 以内に抑えることができる可能性があることが分かった。この結果を踏まえて、実機の曲げ加工による断面形状変形量の許容値を 0.5 mm とした。

3.5 ビームダクト試験機

図 2 左上に示した断面形状の押し出し材では、4 極や 6 極電磁石の磁極と干渉してしまうため、そのままでは使用することができない。そのため、4 極や 6 極磁石内に入るところでは、一部ダクトを削る必要がある（図 2 左下）。また、電磁石が非常に密に設置されているため、冷却水配管の取り出しにも注意が必要である。ダクトの削り量や冷却水配管の取り回しを試験するため、図 9 に示したビームダク

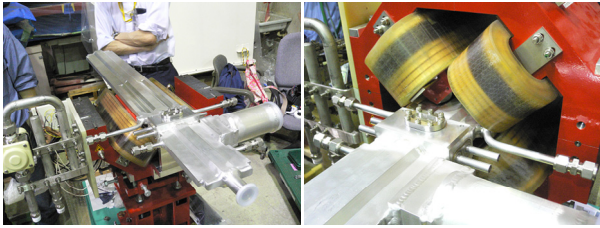


図9：4極電磁石に設置されたビームダクト試験機

ト試験機が製造された。試験機は実際の4極電磁石にインストールされ、ダクトや冷却水配管と電磁石との干渉の有無などがチェックされた。また、ビームダクトをインストールする際の手順についても、この試験機を用いて検討された。

4. まとめと今後の予定

SuperKEKB 陽電子ビーム DR のアーク部用ビームダクトの設計が現在進行中である。これまでにフランジや BPM ブロック、ベローズなどの試験機が製作されており、実機の設計にはこれらの試験結果が反映されている。実機の製作は今年度中に完了する予定であり、2013 年度中に窒化チタンコーティングなどの設置前準備作業を、2014 年度前半に据え付け作業が行われる予定である。

謝辞

高輝度光科学センター(JASRI/Spring-8)の大石信也氏と大熊春夫氏には、RF コンタクトに関する貴重な資料を提供していただきました。また、ビームダクトの設計に関しては KEKB 加速器各グループの多くの方々に、試験機のインストール試験には KEK PF の原田健太郎氏にご協力いただきました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- [1] P. Raimondi, "NEW DEVELOPMENTS IN SUPER B-FACTORIES" Proceedings of PAC07, Albuquerque, New Mexico, NMZAKI02, USA, 25-29 June, 2007, p.32.
- [2] Y. Ohnishi, et. al, "SuperKEKB ビーム光学系の設計", Proceedings of the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, TUPS020, Tsukuba, Japan, 1-3 Aug, 2011, p.880.
- [3] 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.
- [4] M. Kikuchi, "Reverse-bend FODO lattice applied to damping ring for SuperKEKB", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 556, 2006, p.13.
- [5] <http://www.saesgetters.com>
- [6] K. Ohmi, et. al, "Head-Tail Instability Caused by Electron Clouds in Positron Storage Rings", Physical Review Letters 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, 2010, p.694.
- [8] 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.

- [9] 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.
- [10] M. Tobiya, et. al, "SuperKEKB ダンピングリング用ビーム位置モニタ", Proceedings of the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, MOPS080, Tsukuba, Japan, 1-3 Aug, 2011, p.507.