

CONSTRUCTION OF THE SuperKEKB VACUUM SYSTEM - I

Yusuke Suetsugu^{#,A)}, Ken-ichi Kanazawa^{A)}, Kyo Shibata^{A)}, Takuya Ishibashi^{A)},
Hiromi Hisamatsu^{A)}, Mitsuru Shirai^{A)}, Shinji Terui^{A)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

1-1 Oho, Tsukuba-shi, Ibaraki, 305-0801

Abstract

The construction of the SuperKEKB, that is, the upgrade of KEKB, has been in progress since 2010. The main vacuum components, such as beam pipes and bellows chambers, for the arc section and the wiggler section had been produced last year, 2011. The assembling and the pre-baking of the beam pipes before the installation have just started. The remained components for the local chromaticity regions and the beam injection regions etc. will be produced mainly in 2013. The installation of the components into the ring will start from the end of 2012, and the start of the beam commissioning is scheduled for the end of 2014.

SuperKEKB 真空システムの建設-I

1. はじめに

KEKB のアップグレードとなる SuperKEKB の建設が 2010 年から始まっている^[1]。SuperKEKB は、標準理論を超える新しい物理を探求することを目的とした、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ある。設計ルミノシティは $8 \times 10^{35} \text{ s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ である。この高いルミノシティを得るため、大電流(HER、LER、それぞれ、2.4 A、3.6 A)を蓄積すると同時に、低いビームエミッタンス (衝突点で垂直方向 60 nm)を実現する必要がある。

真空システムも、陽電子リングを中心に大幅な改造が予定されている^[2]。真空システムの基本設計指針は、実績のある 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、大電流を安定に蓄積できること、である。SuperKEKB 主リングのレイアウトと真空システム改造範囲を図 1 に示している。特に LER では、リングの殆どの部分が改造されることになる。2011 年度には、アーク部およびウィグラー部のビームパイプ、ベローズチャンバー、ゲートバルブ等の真空コンポーネントを新規製作した。2012 年度には、衝突点部、局所色収差補正部、ビーム入射・アボート部の設計を固め、2013 年度にそれらの真空コンポーネントを製作する予定である。これらの製作と平行して、インストール前に行うビームパイプのプリベーキング、および LER 用ビームパイプの TiN (窒化チタン) コーティング(後述)を行う装置の設置が KEK 内で進められており、最近稼働し始めた。圧力や温度のモニター等のコントロールシステムの整備も別途行われている。また、ここでは述べないが、ライナックと主リングの陽電子ビームラインには、エミッタンスを低減するための

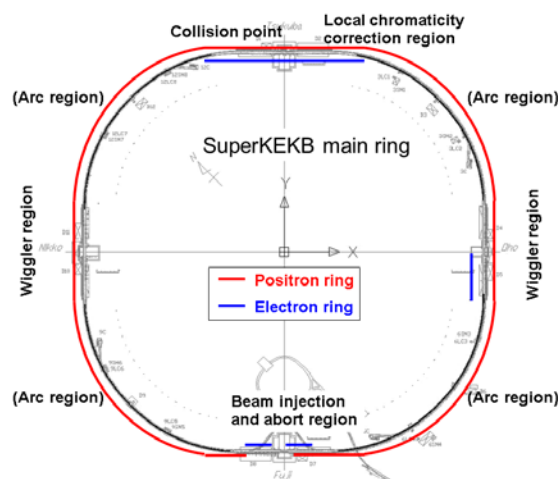


図 1 : SuperKEKB 主リングのレイアウトおよびビームパイプ改造範囲(赤 : LER、青 : HER)

ダンピングリングが建設される^[3]。真空機器の主リングトンネル内への設置作業は 2012 年度後半から順次行う。ビーム運転は 2014 年度後半開始を予定している。

ここでは、主に SuperKEKB 主リングの真空コンポーネントの製作状況および建設状況について報告する。

2. アーク部コンポーネントの製作

LER のアーク部ビームパイプはすべて新規製作される。アーク部の長さは約 2200 m、ビームパイプは約 700 本である。LER では、エミッタンスを小さくするために偏向電磁石部の軌道の曲率半径が 76 m と大きく、放射光のエネルギーが小さいことから、アルミ合金製のビームパイプが使用可能である。ビームパイプは、インピーダンスが低減でき、後述する電子雲効果も緩和できる、アンテナチャンバー付きの断面を持つ。ビームが通る中心部(ビームチャン

[#]yusuke.suetsugu@kek.jp

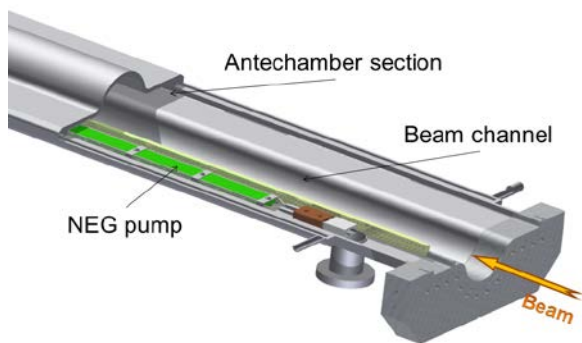


図 2 : LER アーク部ビームパイプの基本構造

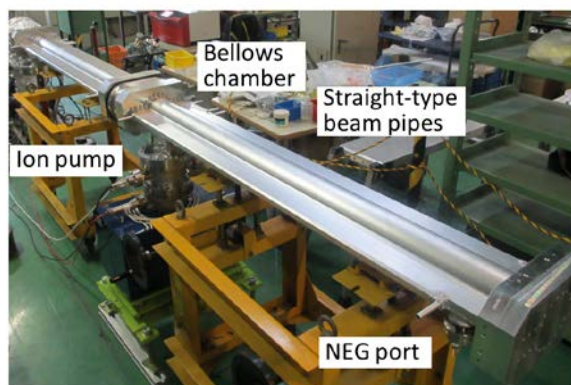


図 3 : LER アーク部用アルミ合金製ストレートビームパイプおよびベローズチェンバー

ネル)は内径 90 mm、アンテチェンバー部を含めた全幅は 220 mm である。アンテチェンバー部の高さ(幅)は 14 mm である。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た。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用(ドリフト部)の 3 種類に大きく分けられる。アーク部ビームパイプの基本構造を図 2 に、ベローズチェンバーと接続されたビームパイプの例を図 3 に示す。ビーム位置モニターは、アルミ合金(A5083)のブロックから削り出している。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、インピーダンスを小さくできる MO 型を採用している^[4]。

真空ポンプは、主ポンプとして NEG (Non-evaporable getter, ST707)を使用している[4]。幅 30 mm のストリップを 3 層重ねた構造で、活性化用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 は、直径 4 mm の穴が多数あい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、平均圧力 10^{-7} Pa 台が得られる。真空排気直後の粗排気用、および希ガス排気用に、約 10 m 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。

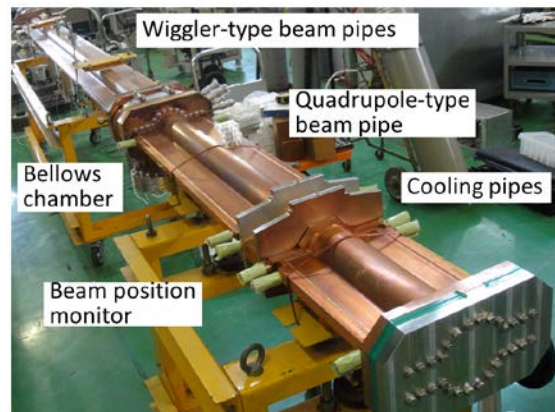


図 4 : LER ウィグラー部用銅合金製ビームパイプとベローズチェンバー

アーク部の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、熱的に強い楕歯型を採用している^[6]。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。アーク部のベローズチェンバーは、ステンレス製のゲートバルブ部分を除き、アルミ合金製である。ただし、ベローズ自身(ひだの部分)はステンレス製(SUS316L)である。

HER のビームパイプおよび各種コンポーネント、真空ポンプ等は、基本的に KEKB のものを再利用する。しかし、2011 年の東日本大震災後、一部のベローズチェンバーの内部 RF シールド構造に破損があることが、X 線撮影検査等により判明した^[7]。これらのベローズチェンバーは、運転開始までに新規のものと交換される予定である。

3. ウィグラー部コンポーネントの製作

LER・HER とも、ビームエミッタンスの低減のために、直線部分に新たなウィグラー部が設けられる。ウィグラー部は約 400 m、ビームパイプは約 130 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、ビームパイプは銅合金で製作される。ビームパイプ自身は無酸素銅、放射光マスクは主にクロム銅である。ウィグラー部では、四極電磁石用(ビーム位置モニター付き)、ウィグラー電磁石用、およびストレート部用の 3 種類に分けられる。フランジは同じく MO 型であるが、クロム銅で製作される。ベローズチェンバーも銅製である。ウィグラー部用四極電磁石用ビームパイプとベローズチェンバーを図 4 に示す。ウィグラー部の下流部分は、放射光が特に集中するため、複雑な冷却構造を持っている。排気ポンプには、カートリッジ型の NEG ポンプ($0.2 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$)およびスパッターイオンポンプを使用している。

3. 電子雲不安定性対策

SuperKEKB 陽電子リングでは、電子雲不安定性対策がこれまでになく重要となる^[8]。今回製作して

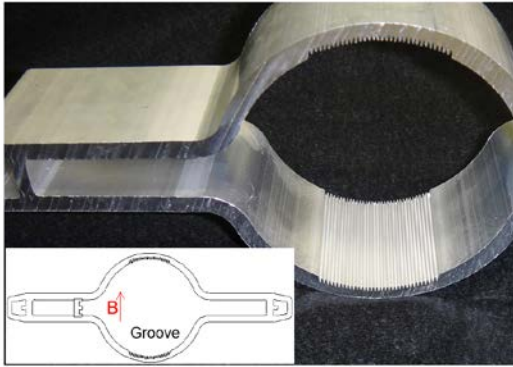


図 5 : LER アーク部偏向電磁石用ビームパイプ内面のグループ構造

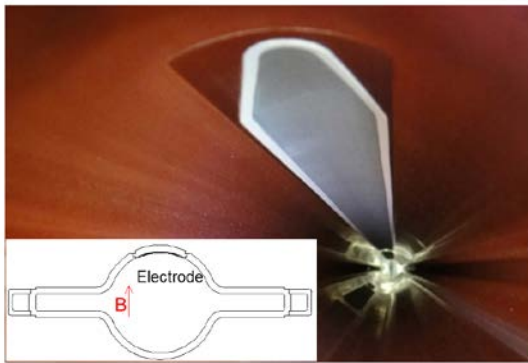


図 6 : LER ウィグラー電磁石用ビームパイプ内の電子クリアリング電極

いるようなビームチャンネル部の横にアンテチェンバーを持つビームパイプは、放射光による光電子放出の影響を小さくするのに有効である。また、放射光が直接照射されるアンテチェンバー部の側面（真空側）や放射光マスク部表面は、Ra \sim 10 程度に荒くしており、放射光の反射の低減を図っている。また、ビームチャンネル部内面には、厚み約 200 nm の窒化チタン(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^[9]。

アーク部のアルミ合金製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^[10]。ビーム進行方向と平行に深さ約 2.5 mm、先端角度約 20 度の三角型の溝を押し出し過程で成形している。ビームパイプ内のグループの様子を図 5 に示している。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、このグループ部にも TiN コーティングが施される。また、直線部でも、2 極型電磁石内のビームパイプにはこのグループ構造が採用されている。

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^[11]。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。溶射という技法を用いて成型した非常に薄い(約 0.3 mm)電極を採用している。ビームパイプ内の電極を図 6 に示す。

このほか、ドリフト部等では、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。

3. モニターおよび制御システムの整備

モニターおよび制御システムは、基本的に KEKB のものが引き続き使用される。リングの圧力は、約 10 m に一個の割合で設置された冷陰極型真空計 (Cold Cathode Gauge, CCG) でモニターされる。イオンポンプの放電電流も圧力の指針として使用される。ゲートバルブで仕切られた区間には、大気圧か真空かを判断する真空スイッチが組み込まれる。ベローズチェンバーやビームパイプの温度は白金抵抗体によって常時監視される。冷却水の流量は、水車型のフローメーターで監視される。放射光強度が高いウィグラー部およびその下流では、温度および冷却水のモニター点が KEKB の時より大幅に増える予定である。

コントロールシステムは、EPICS (Experimental Physics Industrial Control System) を基本的に採用される。NEG ポンプの活性化や、可動マスクの位置制御はリモートで操作される。従来用いられてきた CAMAC ベースのデータ収集システムや、GPIB を用いた通信システムは撤廃され、イーサネットプロトコルをベースにした新規のものに入れ替わる予定である。また、信頼性の高いインターロックシステムが準備される。例えば、異常な圧力上昇や温度上昇は素早く感知され、ビームアバート信号を発する。

3. トンネル内設置前作業

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、陽電子リング用のビームパイプには、プリベーキング前に、上述した TiN コーティングが施される。

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。そのため、KEK の実験室に、プリベーキング装置 4 セット、TiN コーティング装置

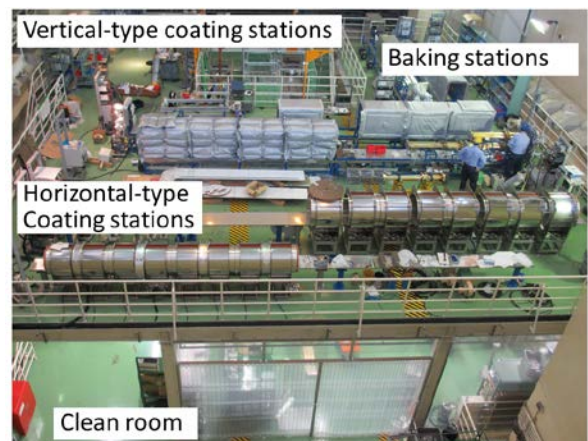


図 7 : KEK に整備されたクリーンルームおよびプリベーキング・TiN コーティング施設

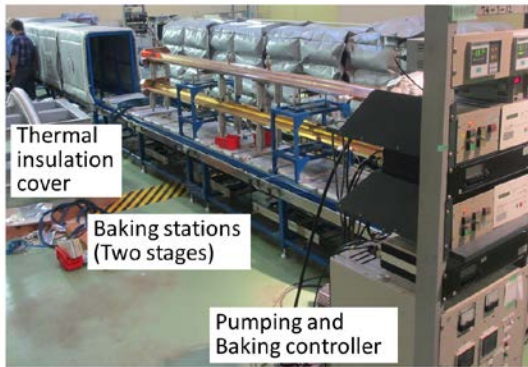


図8：ベーキング装置にセットされたビームパイプ



図9：縦型コーティング装置に組み込まれるビームパイプ(3本連結)

7セット(縦型5セット、横型2セット)が整備される。実験室の現状を図7に示す。プリベーキングは、原則として150°Cにて24時間行い、同時にNEGの活性化も行う。ベーキング中の排気は、 $0.3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ のターボポンプおよびスクロールポンプで行われる。各種のビームパイプに容易に対応できるよう、ベーキングは断熱カバー内の温風で行われる。ベーキング後、到達圧 10^{-8} Pa 台を確認する。場合により、四重極質量分析器により残留ガスを分析する。ベーキング後のビームパイプは乾燥窒素置換後インストールまで保管される。ベーキング装置にセットされたビームパイプの様子を図8に示す。

TiNコーティングは、チタンを陰極とした窒素・アルゴン雰囲気中のマグネトロンスパッタリングで

行われる。約7mのビームパイプまでは対応可能である。ソレノイド磁場はビームパイプ全体に印可され、約1時間でパイプ全体をコーティング可能である。ストレートのビームパイプは縦型の装置で、偏向電磁石用の曲率のあるビームパイプは横型の装置でコーティングされる。縦型装置にビームパイプを設置する様子を図9に示している。

3. 現状および今後の予定

アーク部のアルミ合金製ビームパイプ(特殊部分を除く)、およびウィグラー部、直線部の銅合金製ビームパイプの製作は2011年度に終了した。現在、上述した設置前作業を順次行っている。ベーキング装置はほぼ完成し、縦型コーティング装置も順次稼働を始めている。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。偏向電磁石用ビームパイプにコーティングする横型は本年度後半に完成する予定である。約1.5年でコーティングを終了する予定である。

LER・HERの衝突点付近および局所色収差補正区間(約300m)の光学系設計は最終段階にある。仕様が固まり次第真空コンポーネントの設計を始め、主に2013年度に製作する予定である。また、HERでは、損傷が認められたベローズチェンバーの交換も随時行う。

ビーム入射部、ビームアポート部およびビームサイズモニター部の詳細設計も進んでおり、これらの真空コンポーネントやバックグラウンドを低減するための可動マスク(コリメータ)も2013年度および2014年度に製作する予定である。

真空コンポーネントのトンネル内設置は、架台等一部始まっているが、トンネル内の冷却水配管工事および新規マグネットの据え付け作業の進捗状況に合わせ、2012年度後半から本格的に始まる予定である。

謝辞

真空システム的设计・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. Funakoshi et al., Proc. of IPAC2010, Kyoto, 23–28 June, 2010, p.2372.
- [2] Y. Suetsugu et al., J. Vac. Sci. Technol. A 30, 031602 (2012).
- [3] K. Shibata et al., this proceedings.
- [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] S. Terui et al., this proceedings.
- [8] K. Ohmi and F. Zimmermann, Phys. Rev. Lett. 85, 3821 (2000).
- [9] K. Shibata et al., Proc. of EPAC2008, Genoa, 23–27 June, 2008, p.1700.
- [10] L. F. Wang et al., Phys. Rev. Spec. Top. – Acc. Beam. 7, 034401 (2004).
- [11] Y. Suetsugu et al., Nucl. Instrum. Meth. A 598, 372 (2008).