

SuperKEKB 真空システムの建設-III

CONSTRUCTION OF THE SUPERKEKB VACUUM SYSTEM – III

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. Almost all of the vacuum components, such as beam pipes, bellows chambers and pumps, of the main ring had been delivered. The special beam pipes, for beam injections, beam aborts and beam size monitors etc., were fabricated last year. Two horizontal beam collimators are in production. The assembling, the pre-baking and the TiN coating of beam pipes are steadily in progress. Approximately 85 % of the beam pipes have been already installed into the tunnel. The bellows chambers are connected to the beam pipes, and then the section between gate valves are roughly pumped out for leak tests. The welding lines in several aluminum beam pipes cracked at the beginning stage of the connection, and those beam pipes were welded again. In parallel to the installation of remained components, the *in-situ* baking of ion pumps and the activation of NEG pumps in the tunnel will start soon.

1. はじめに

2010 年から建設中の 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ある^[1]。設計ルミノシティーは $8 \times 10^{35} \text{ s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ と KEKB の達成値の約 40 倍である。この高いルミノシティーを得るため、大電流(HER と LER、それぞれ、2.6 A と 3.6 A)を蓄積すると同時に、ビームエミッタンスを低く保ち、垂直方向ビームサイズを衝突点で約 60 nm まで絞る。

SuperKEKB 主リングの真空システムは、LER を中心に大幅に改造される^[2]。改造の基本指針は、低エミッタンスビームを実現・維持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。LER では、アーク部などリングの約 93 %が新規に改造される。一方 HER では、大部分が KEKB の物を再利用で、新規製作はリングの約 13 %である。建設は最終段階に近づいており、主リングのアーク部等主要な部分のトンネル内設置は終了している。以下、真空コンポーネントの準備状況、トンネル内への設置状況、真空立ち上げ状況などを中心に、主リング真空システムの現状を報告する。

2. 真空コンポーネントの準備状況

LER の新規ビームパイプは、ビームインピーダンスを低減でき、電子雲効果も緩和できる、アンテチャンバー付きのパイプを基本的に採用している^[2]。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、アンテチャンバー部を含めた全幅 220 mm、アンテチャンバー部の高さ 14 mm である。基本的な構造を Figure 1 上に示す。アーク部の

ビームパイプは、アルミ合金(A6063-T6)である。ビームパイプ両端のフランジはアルミ合金製(A2219-T851)で、MO型を採用している^[3]。ただし衝突点近くのビーム上流側は、測定器のバックグラウンド低減のため無酸素銅(C1011)製である。LER アーク部のビームパイプは、基本的に、二次電子放出率を低減するため内面に厚さ 200 nm の TiN 膜がコーティングされる。さらに、偏向電磁石内のビームパイプの上下にはグループ構造を持たせ、さらなる電子雲抑制を図っている^[4]。LER の新規ビームパイプ製作数は約 1010 本である。

HER は主に衝突点両側の部分的な改造となる。新規のビームパイプやベローズチャンバーの形状は、

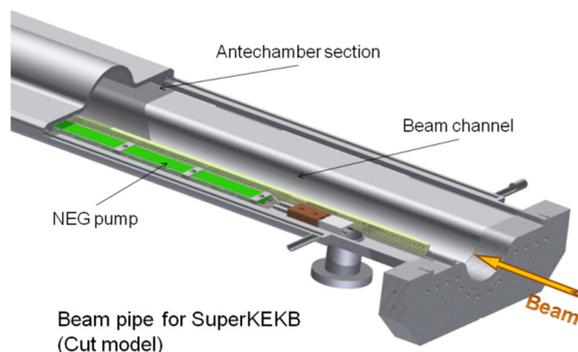


Figure 1: Typical structures of a beam pipe (up) and a bellows chamber for LER arc section (down).

[#] yusuke.suetsugu@kek.jp



Figure 2: Vacuum chamber for a beam size monitor using the synchrotron radiation from a bending magnet. The mirror is located in an antechamber.

やはり基本的にアンテチェンバーを持ち、ビームチャンネル内径 80 mm、全幅 220 mm である。KEKB の偏向電磁石を再利用する部分では 50×44 mm の楕円(高さ 50 mm)で、全幅 190 mm である。KEKB アーク部のビームパイプは大部分 KEBK の再利用となり、104×50 mm のレーストラック形状である。HER のビームパイプは基本的に無酸素銅製で、新規ビームパイプ製作数は約 230 本である。

LER、HER とも、ビームエミッタンスを低減するために主リング直線部に新たにウィグラー部が設けられる。ウィグラー部およびその下流部では、放射光強度が強いため、ビームパイプは無酸素銅で製作される。ビームパイプは、LER アーク部と同じくアンテチェンバーを持つ。LER のウィグラー電磁石内のビームパイプには、電子密度を低減するため、クリアリング電極が備えられている^[5]。

ビームパイプ間を接続するベローズチェンバーの RF シールドは基本的に熱的に強い楕歯型である^[6]。断面および材質は接続されるビームパイプと同一である。Figure 1 下にベローズチェンバーの構造を示している(アルミ合金)。ゲートバルブの RF シールドは銅製の楕歯型である。ゲートバルブ本体はステンレス製であるが、真空内面には厚さ 10 μm の銀メッキが施されている。ベローズチェンバーやゲートバルブもほぼ全数が既に製作済みである。

2013 年度は、ビーム入射部、ビームアポート部、放射光や X 線を用いたビームサイズモニター部等に用いる特殊なビームパイプを製作した。多くはアルミ合金製であるが、放射光強度の強い場所は銅製である。ビームアポート窓は厚さ 1 mm の純チタンである。Figure 2 に、放射光を用いるビームサイズモニター用の真空チェンバーを示す。アンテチェンバーを持ち、放射光を反射して外に取り出すためのミラーはそのアンテチェンバー部に置かれ、インピーダンスの低減が図られている^[7]。

その他、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の試作機が製作された。試作機を Figure 3 に示す。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

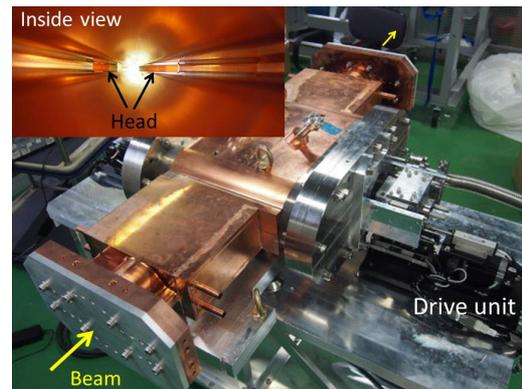


Figure 3: A test model of horizontal-type beam collimator. Two collimator heads are both inside and outside of the ring and are driven by remote control.

タングステンである。また、ヘッドはアンテチェンバー部から挿入され、さらにチェンバー内部をテーパー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。ヘッドとアンテチェンバー内壁間の摺動部分には RF シールドフィンガー(インコネル+10 μm 銀コーティング)を設けている。最終的には LER に 13 台が新規に設置されるが、運転当初は、水平方向用のコリメータ 2 台がアーク部に設置される予定である^[8]。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んでいる^[9]。

真空ポンプは、主ポンプとして NEG (Non-evaporable getter, ST707)を使用する。アーク部では、幅 30 mm の NEG ストリップを 3 層重ねた構造を持ち、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(Figure 1 参照)^[10]。再利用されるビームパイプ等では KEBK で使用していた NEG モジュール等が使用される^[11]。真空排気直後の粗排気用、および希ガス排気用に、スパッターイオンポンプが設置される。NEG ストリップ、およびその活性化用のヒータ、電流導入端子もほぼ購入済みである。真空計(CCG)はほぼすべて KEBK のものを再利用する。

真空機器のコントロールシステムは、やはり基本的には KEBK のものを踏襲するが、CAMAC 等を使用する古い機器は最新式のものに変更される。機器はほぼ購入済みで、順次交換が進んでいる。同時に、新規の制御ソフトエアの開発も進められている。

主リングの真空コンポーネント以外に、陽電子ダンピングリングのビームパイプ等も大部分が 2013 年度に製作された。ダンピングリングの新設トンネルは完成しており、現在マグネット据え付け準備が始まっている。ビームパイプ等の設置は来年度以降の予定である。

2. 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 内の施設にて真空ポンプ(NEG ポンプ)を組み込み、150°Cでのベーキング(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



Figure 4: Copper beam pipes installed into wiggler magnets.



Figure 6: Connection of bellows chamber between beam pipes.



Figure 5: Aluminum-alloy beam pipe installed into the quadrupole and sextupole magnets in arc section.



Figure 7: Installed HER and LER beam pipes in arc section.

認される^[12]。また、LER のビームパイプ内面には、プリベーキング前に、表面からの二次電子放出率を低減するため厚み 200 nm の TiN 膜がコーティングされる。新たに製作された 7 台のコーティング装置、4 台のベーキング装置によって、1 週間あたり 10~15 本の処理が可能である。150 °C 約 27 時間のベーキング後、到達圧はすべて 1×10^{-7} Pa 台となっている。処理後、ビームパイプ内部は乾燥窒素で満たされ、所定の場所に保管される。これらの処理での排気・ベーキング時にはメタルガスケットを用いるが、アルミ合金製の MO フランジでも百回近い繰り返し利用が可能であった。

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]。ウィグラー部へ設置された銅製ビームパイプを Figure 4 に示す。2013 年度からはアーク部のビームパイプの設置が始まった。四極および六極電磁石は半割され、ビームパイプ設置後復元される。アーク部へ設置されたアルミ製ビームパイプを Figure 5 に示す。四極電磁石内のビームパイプは、BPM のブロックを通して電磁石に固定される。偏向電磁石内のビームパイプは、電磁石の両端に固定された架台で、また磁石間のドリフト部のビームパイプは、床に固定された架台でそれぞれ支えられる。イオンポンプは別個の架台に載せられる。基本的に、ビームパイプはフランジ部分で架台によって支えられ、その架台はベローズチェンバーの架台を兼ねて

いる。

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。ベローズチェンバー接続の様子を Figure 6 に示す。ベローズチェンバー接続後、He リークテストのために、ゲートバルブで区切られた区間は一旦粗排気ポンプ(ターボ分子ポンプ+スクロールポンプ)で排気される。アンテチェンバーを持つような複雑な断面の MO フランジを多数使用するのは今回が初めてであるが、リークが発生する割合は数%であった。接続するフランジ間の位置合わせおよびシール面の状態(傷等の有無)が重要であることが改めてわかった。リングのアーク部に設置された LER、HER のビームパイプおよびベローズチェンバーの様子を Figure 7 に示す。

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。ビームパイプ設置およびベローズチェンバー接続が終わった区間(ゲートバルブで区切られた区間)から、真空の立ち上げ、すなわち、イオンポンプの現地でのベーキング、NEG ポンプの活性化、粗排気ポンプ切り離しを、コントロールシステムの試験を兼ねて開始している。NEG 活性化時には粗排気ポンプを区間あたり数台取り付け、終了後リングからは切り離す。NEG コンディショニング中はイオンポンプのみで排気する予定である。NEG 活性化用の電源は地上にあり、活性化用ヒータの電流値、電流制御は端末から監視および制御可能である。マグネット内の NEG については、マグネット通電中

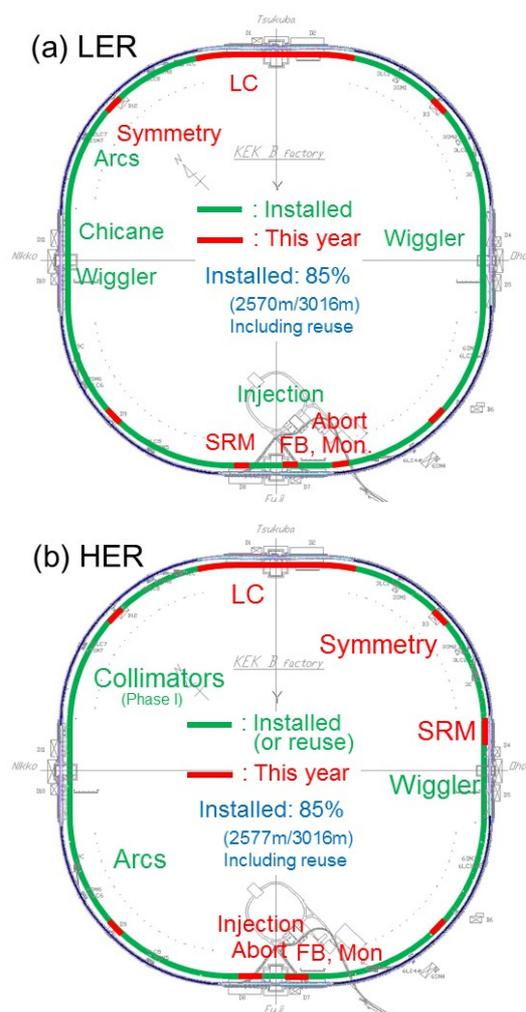


Figure 8: Installation status of (a) LER and (b) HER (July, 2013).

でも NEG 活性化ができるように直流電流でヒータを加熱できるように準備を進めている。リング内の圧力、温度も順次端末から監視・制御できるようにハード・ソフト両面から整備を進めている。ウィグラー部については既に立ち上げは終了しており、平均して 10^{-8} Pa 台の真空となっている。2014 年度からアーク部の一部から真空の立ち上げを順次進めている。

真空機器の設置と並行して、ビームパイプの冷却水配管作業も進んでいる。基本的に KEKB の設備を再利用するが、放射光パワーの増大のため冷却能力の増強が必要となり、4 機の新規冷却塔が建設された。ウィグラー部の熱負荷が大きくなることから、ウィグラー部ではヘッダーを用いた冷却路となっており、水路の流量を稼いでいる。アーク部では基本的に入口から出口まで一筆書きで配管される。また、ゲートバルブ駆動用の圧搾空気配管の復元も現在行われている。

Figure 8 は、LER および HER の 2014 年 7 月現在のトンネル内設置状況である。アーク部の大部分が設置済みであることがわかる。衝突点部付近の直線部、局所的クロマチシティー補正(LC)区間、およ

び入射部、ビームアポート部の設置は今年度を予定している。

3. アルミ製ビームパイプでの問題

2013 年度末、トンネル内に設置したアーク部アルミ製ビームパイプ間のベローズ接続作業を開始した当初、四極電磁石用ビームパイプ 3 本において、ビーム位置モニター(BPM)ブロック隣の溶接部で割れが生じた(Figure 9)。これらのビームパイプは、トンネル内設置前のベッキングおよび TiN コーティング作業等では問題はなかった。割れは作業区間の排気を開始した直後に発生し、3 本とも同じ部位にある溶接線で、かつ、上面側で生じた。問題発生直後から、トンネル内での作業手順上の問題および溶接部の問題の観点から調査を行った。

作業手順については、割れ発生時、ビームパイプ端に接続したベローズチェンバーを架台に十分固定せず排気を開始したことがわかった。ベローズチェンバーの重量は約 20 kg であり、そのモーメントが固定された BPM ブロック隣の溶接部に加わった可能性が高い。Figure 10 は、問題のビームパイプのモデルを使った垂直方向変位解析結果を示す。Figure 10(b)は、大気中でビームパイプ端(BPM ブロックから遠い側)にベローズチェンバーの重さを加えた場合、(c)はその排気中の場合の結果である。排気中では大気圧が加わり、アンテナチェンバー付きのためビームパイプ上下面がつぶれ、特に上側溶接線(図中矢印部)のが増大することがわかった。Figure 11 は溶接部の厚み(t)を変えた場合の、溶接部に加わる最大応力(相当応力)を示している。ただし、溶接部の残留応力は考慮していない。A6063 の溶接部の強度は 100 ~ 150 N 程度と考えられる(A60603-T6 の引っ張り強度 240 N の約 40%程度)。したがって、排気前の大気圧状態では、溶接部の厚み(溶け込み深さ+余盛り高さ)が 1 mm 程度でも問題の無い範囲である。しかし、排気中では大気圧が加わると、溶接部の厚みが 2 mm 程度以下の場合、上側溶接部の応力が 150 N を超える。つまり、排気時には溶接部の強度は危険な領域になることがわかった。これらの解析結果は、クレーンによる釣り上げ作業中や組立作業中に発生した溶接部割れ時の解析結果とも矛盾しない。

一方、溶接部については、割れた部分を切断して

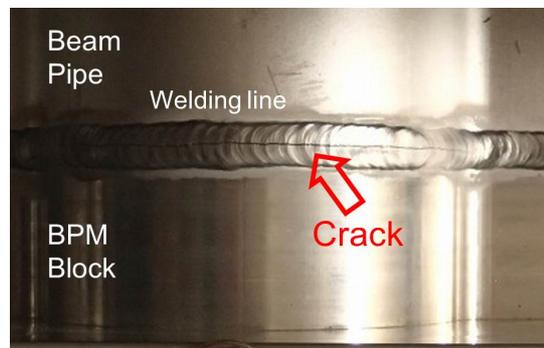


Figure 9: Cracking at the welding line near BPM block of aluminum beam pipe.

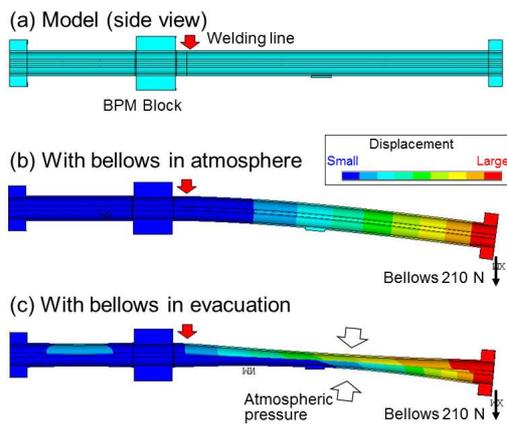


Figure 10: (a) A model for structural analysis and the vertical displacements with a bellows chamber at an end (b) in atmosphere and (c) in evacuation (with atmospheric pressure). Red arrows indicate the location of welding line in question.

断面を観察した。また、溶接部の X 線撮影を使って溶接厚みを調べた。設計では、開先の V 字カット深さは 2.5 mm であるが、調査の結果、溶接の溶け込み深さは 1.5~2 mm であることがわかった。つまり、開先の先端まで溶け込んでいないものが多かった。また、溶接部の余盛りの高さを測定したところ、多くのビームパイプで 0.5~1.5 mm であった。結局、実際の溶接部の厚みは、2~3.5 mm と推定された。また、タングステン片の巻き込みも一部観測され、溶接部の強度が落ちている可能性も判明した。

これらの検討結果から、割れの直接的な原因は、ベローズチャンバーを固定せずに排気したため、大気圧と合わせて溶接部に応力が集中したこと、と考えられる。単純な丸いビームパイプに比べ、アンテナチャンバー付のような断面では、上下に応力が集中し易い。さらに、間接的な原因としては、溶接部の厚みが設計よりも薄く、強度的に弱いことが挙げられる。

原因調査以降、ベローズチャンバー接続作業後の排気開始前にベローズチャンバーを必ず架台で固定するよう徹底し、また、高さ方向のアラインメント時にビーム位置モニター部の溶接部に応力ができただけかからないようにした。その結果、その後割れは発生していない。また、ビーム位置モニターを持つアルミ製ビームパイプ全数について BPM 溶接部の余盛り高さを測定し、今後のビームパイプ位置調整時に加わる応力を考え、余盛り高さが 0.5 mm 以下のビームパイプについては、再度溶接を行うこととした。今回のアンテナチャンバー付きのような一様断面ではないビームパイプでは、大気圧の影響を考え、溶接構造や溶接厚みを設定すべきである。

4. 今後の予定

今年度は、主リングアーク部以外の衝突点に近い直線部や、ビーム入射部、アポート部、およびビームサイズモニター部のビームパイプを順次設置する。

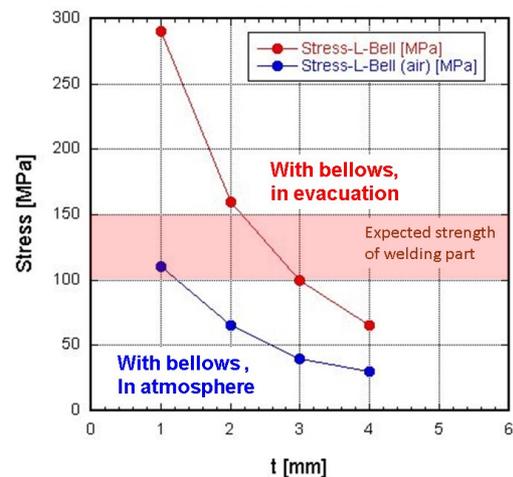


Figure 11: Dependence of equivalent stress at the welding line on the thickness of welding (t) with bellows at an end of beam pipe in atmosphere and in evacuation.

それらのビームパイプのベーキングおよび TiN コーティングは現在進行中である。ベローズが接続された区間では、順次イオンポンプのベーキングや NEG 活性化を行い、超高真空状態にしていく。冷却水配管も設置された部分から順次行い注水試験を行う。真空機器の配線に引き続き、温度計や流量計の配線を進める。今年度中に両リングともほぼ全周が真空状態になる予定である。

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] 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] Y. Suetsugu et al., J. Vac. Sci. Technol. A 27, 1303 (2009).
- [4] Y. Suetsugu et al., Nucl. Instrum. Meth. A 604, 449 (2009).
- [5] Y. Suetsugu et al., Nucl. Instrum. Meth. A 598, 372 (2008).
- [6] Y. Suetsugu et al., Rev. Sci. Instrum. 78, 043302. (2007).
- [7] J. W. Flanagan et al., Proc. PAC2003, Portland, May 12-16, 2003, p.2503.
- [8] T. Ishibashi et al., Proc. of the 10th Annual Meeting of Particle Acc. Soc. of Japan, Nagoya Univ., 3-5 August, 2010, p.1191.
- [9] S. Terui et al., this proceedings.
- [10] Y. Suetsugu et al., Nucl. Instrum. Meth. A 597, 153 (2008).
- [11] K. Kanazawa et al., Nucl. Instrum. Meth. A 499, 66 (2003).
- [12] K. Shibata et al., Proc. of the 10th Annual Meeting of Particle Acc. Soc. of Japan, Nagoya Univ., 3-5 August, 2013, p.1168.
- [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.