SuperKEKB 新規ビームパイプ用 NEG ポンプ*

末次 祐介^{*1}・柴田 恭^{*1}・石橋 拓弥^{*1}
白井 満^{*1}・照井 真司^{*1}

NEG Pumps for SuperKEKB New Beam Pipes

Yusuke SUETSUGU^{*1}, Kyo SHIBATA^{*1}, Takuya ISHIBASHI^{*1},
Mitsuru SHIRAI^{*1} and Shinji TERUI^{*1}^{*1}High Energy Accelerator Research Organization (KEK), 1-1 Oho, Tsukuba-shi, Ibaraki 305-0801, Japan

(Received November 27, 2015, Accepted January 27, 2016)

The SuperKEKB, the upgrade of the KEKB, is an electron-positron collider with asymmetric energies, that is, 7.0 GeV electrons and 4.0 GeV positrons, aiming at a luminosity of $8 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. The construction of the new vacuum system for the SuperKEKB has been ongoing since 2010. The target vacuum pressure in the main ring is on the order of 10^{-7} Pa on average at the designed beam currents. The synchrotron radiation (SR) is received by the beam pipes along the ring. Therefore, the distributed pumping scheme is adopted to effectively evacuate the beam pipes. A linear pumping speed of approximately $0.1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-1}$ is required if we assume a photo-desorption coefficient (η) of $1 \times 10^{-6} \text{ molecules photon}^{-1}$. A new built-in pump assembly using the multi-layered non-evaporable getter (NEG) was designed for an antechamber space of the new beam pipes as a main pump at the arc sections. The linear pumping speed combined with an RF-screen is expected as approximately 0.1 and $0.18 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-1}$ for N_2 and CO, respectively. The measured effective pumping speed using a real beam pipe was reasonable one for N_2 . The NEG activation in the tunnel after installing the beam pipes are ongoing. The vacuum pressures on the order of 10^{-8} Pa on average are mostly achieved after the NEG activation.

1. はじめに

2010年からKEKで建設が進んでいるSuperKEKBは、電子・陽電子非対称エネルギー衝突型加速器である^{1,2)}。衝突実験を行う周長3 kmの主リングは、8.0 GeVの電子を2.6 A蓄積する電子リング(HER)と、4.0 GeVの陽電子を3.6 A蓄積する陽電子リング(LER)からなる。KEKB時の40倍のルミノシティ(衝突頻度を示すパラメータ)を目指すため、小さいエミッタンス(位相空間の広がり)を持つビームが必須である。そのため、特にLERを中心に大幅な光学系(電磁石配置)の変更が必要であった。その結果、リングの大部分のビームパイプ等真空機器が新規に製作された^{3,4)}。新規ビームパイプは、ビームが通るビームチャンネルの横に側室(アンテチェンバー)のある独特な断面を持つ(以下これをアンテチェンバー型と呼ぶ)⁵⁾。一方、蓄積されるビーム電流は大きく、シンクロトロン放射光(SR)に起因するビームパイプのガス負荷が大きい。そのため、ビームパイプに沿った効率の良い分布型の排気システムが必要となる。そこで、新規ビームパイプのアンテチェンバー(側室)部を利用した組み込みタイプのNEG(Non Evaporable Getter)ポンプを開発した⁶⁾。ここでは、SuperKEKBで新規に製作されたビームパイプ用のNEGポンプの構造や、R&D結果、量産状況、実機での特性等について報告する。以下、新規ビームパイプが多いLERに主眼を置いているが、HERの新規ビームパイプについてもほぼ同様である。

2. ポンプに要求される仕様

LERの主なガス負荷はシンクロトロン放射光による光刺激脱離である。Fig. 1(a)にリングの典型的な1セル(光学系の一単位)約80 mの放射光パワー線密度と光子数線密度を示す。各偏向電磁石(図中“B”で示す)の直ぐ下流側が最も高く、次の偏向電磁石までに徐々に小さくなる。ポンプの配置方法としては、(1)各偏向電磁石のすぐ後ろに大部分の放射光を受ける放射光マスクを置き、排気速度の大きいポンプを傍に設置する方法と、(2)各ビームパイプの下流端に隣のベローズチェンバー等を守るための小さな放射光マスクを置き、大部分の放射光をビームパイプに沿って受け、分布型のポンプを配置する方法の、大きく分けて二つの方法がある。(1)ではガス負荷の大きな部分に大きな排気速度のポンプを配置することで効率よく放出ガスを排気できる。近年の放射光リングでは通常この構成が採用される^{7,8)}。ただし、放射光マスクの熱負荷が大きくなり、また、ビームパイプが複雑になる。(2)では放射光が分散されるためマスクが受ける放射光のパワー密度は小さくなるが、分布型の排気をしなければ効率よく排気できない。一方、ビームパイプの形状は比較的単純になる。SuperKEKBでは、(1)偏向電磁石からの放射光を集中して受けるとそのパワー密度が非常に大きくなり、放射光マスクの熱設計が困難、(2)ビームパイプのインピーダンスが小さくなるように単純な断面形状のビームパイプが好ましい、等のことから、放射光を分布して受ける方法を採用した。

LERの目標圧力はビーム運転時で 10^{-7} Pa 台である。理由は、残留気体との衝突で決まるビームライフタイムを十分に確保する(10時間以上)ため、および、粒子測定器へのバックグラウンドノイズを低減するため、である。アーク部

* 平成27年12月3日 第56回真空に関する連合講演会で発表

^{*1} 高エネルギー加速器研究機構(〒305-0801 茨城県つくば市大穂1-1)

Fig. 1 (a) Synchrotron radiation power line density and photon line density, and (b) the pressure profile assuming an effective linear pumping speed of $0.12 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-1}$ along the ring for a typical cell in the arc section.

の平均光子密度は、 5×10^{18} photons $\text{s}^{-1} \text{m}^{-1}$ である。したがって、光子一個あたりに放出される気体分子数を表す光刺激脱離係数, η , を 1×10^{-6} molecules photon $^{-1}$ とすると、ガス負荷は 2×10^{-8} Pa $\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{m}^{-1}$ となる (25°C を仮定した)。したがって、ビームパイプに沿った単位長さの平均実効排気速度が $0.1 \text{ m}^3 \text{s}^{-1} \text{m}^{-1}$ であれば、平均圧力として 10^{-7} Pa 台を実現することができる。Fig. 1(b)には、(a)と同じ区間で、各ビームパイプに平均排気速度を $0.12 \text{ m}^3 \text{s}^{-1} \text{m}^{-1}$ のポンプを装着した時の圧力分布を示している (ビームパイプ間のベローズチェンバー部分にはポンプは無い)。偏向電磁石の直下流で圧力は大きくなっているが、平均して 2.3×10^{-7} Pa が得られている。

3. 新規ビームパイプ

LER の新規ビームパイプ概略構造を **Fig. 2(a)** に、その断面を **Fig. 2(b)** に示す。図中破線は四極電磁石のコアを示す。ビームが通るビームチャンネルの両側に側室（アンテチェンバー）を持つ断面である³⁻⁵⁾。典型的なビームパイプで

Fig. 2 (a) Schematic of a beam pipe with antechambers for arc section, and (b) its actual cross section.

は、中央のビームチャンネルの直径は90 mm、アンテチェンバー部を含めた全幅(内寸)は220 mm、アンテチェンバー部の高さは14 mmである。LER アーク部ではこの断面のビームパイプが約960本製作された。長さは0.6 m~6 mである。その内約140本は偏向電磁石用のビームパイプで、約75 mの曲率半径を持つ曲がったビームパイプである。また、約210本のビームパイプはアンテチェンバー部にイオンポンプポートを持つ。

分布型のポンプ構成とするには、リング内側のアンテナチャンバーをポンプ用のポンプチャンネルとするのが最も効率がよい。新たにポンプ用の部屋を設ける必要もなく、また、四極や六極電磁石の中にもポンプを置くことが可能となるためである (Fig. 2(b)参照)。ただし、ポンプとビームとの間には、ビームが誘起する電磁波によってポンプが発熱しないように、RF スクリーンと呼ばれる多数の穴が開いた板を挿入する必要がある。RF スクリーンは、厚み 5 mm で、 ϕ 4 mm の穴が多数あいており、1 m あたりのコンダクタンスは約 $0.2 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ と見積もられる。したがって、ポンプチャンネルの断面は幅 39 mm、高さ 14 mm となる。

4. 新規ポンプの開発

ポンプとしては、NEG (Non Evaporable Getter) ストリップ (ST707, SAES GETTERS Co. Ltd.) を用いることにした。以前は分布型イオンポンプも多く加速器で用いられていたが^{9,10)}、電磁石内のみで可能なためここでは採用しなかった。NEG ストリップは幅30 mm である。排気速度を大きくするためには、ストリップを何層か重ねれば良い。ただし、重ねて隙間が狭くなると、結局 NEG ストリップ間のコンダクタンスが制限されるため排気効率が悪い。そこで、ま

ずシミュレーションによって積層数を最適化し、最終的には3層とした。なお、近年では、ビームパイプ内面にNEGの材料をコーティング（NEGコーティングと呼ばれる）したビームパイプが断面の小さい放射光リングで採用されている^{11,12)}。しかし、SuperKEKBではガス負荷が大きくNEGコーティングでは排気容量が小さいこと、また、トンネル内でビームパイプ全体を活性化温度（150～200℃）までベーキングすることが困難なことから採用しなかった。

NEGポンプ（ST707）で正規の排気速度を得るためには、約400℃まで加熱して活性化する必要がある。従来は、NEGストリップに直接電流を流してジュール加熱する方法が通常であったが¹³⁾、今回はポンプチャンネルの高さが14 mmと低いため、加熱中にストリップがビームパイプと接触して短絡する可能性が高い。そこで、新規ポンプでは、マイクロヒータ（シースヒータ）を用いた間接加熱を用いることにした。ヒータの位置もシミュレーションで最適化した⁶⁾。最終的には、φ2.4 mmのシースヒータを波形に曲げて効率的に熱を伝えるようにして、3層のNEGストリップの間に挟んだ。また、一端で折り返し、もう一端に2本の導入端子を持ってくる構造とした。ヒータとNEGストリップを束ねるような簡単なステンレス板製の支持を約100 mm毎に置き、ビームパイプとはできるだけ熱的絶縁がとれるようにした。Fig. 3に、ビームパイプ内のNEGポンプ配置の概略とNEGポンプの構造を示す。

ポンプは様々な長さや曲率を持ったビームパイプに対応する必要がある。それぞれの長さ、形状に合わせたNEGポンプを量産するのは費用も手間もかかるので、長さ300 mmのモジュールを連結し、その数の調整で違った長さや曲率に対応することにした。また、この構造により活性化中のNEGの伸びも吸収できる。

Fig. 3 Schematic of a new built-in type NEG pump in a beam pipe for the arc sections and the structure of the NEG pump module.

試作した長さ1 m（300 mmのモジュール3個）について試験チャンバーを用いて排気速度を測定した⁶⁾。窒素（N₂）について活性化直後に約0.2 m³ s⁻¹ m⁻¹を得た。NEGのカタログによれば¹⁴⁾、これは、光刺激脱離で放出される主なガスである一酸化炭素（CO）に対しては約2.0 m³ s⁻¹ m⁻¹に相当する。結局、実機のRFスクリーン（1 mあたりのコンダクタンス約0.2 m³ s⁻¹）と合成した実効的排気速度は、窒素、一酸化炭素について、それぞれ0.1 m³ s⁻¹ m⁻¹、0.18 m³ s⁻¹ m⁻¹になると期待された。活性化に必要な電力は約200 W m⁻¹であった。

別途試作した長さ1.1～2.4 mのNEGポンプは、試験用アンテナチャンバー型ビームパイプに組み込まれ、KEKBリングを使って試験された。活性化は特に問題なく行うことができ、またポンプを装着したビームパイプ部の圧力も問題無かった。ただ、試作では、電流導入部をソケットで固定していたが、発熱が観測されたため、ネジ止め型に変更する必要があった。

5. 量産と設置

上記R&Dを基にNEGポンプを量産した。製作したNEGポンプの長さ、数をTable 1に示す。この表にはHER用のポンプも含めている。計1126本（+予備）を製作した。NEGストリップは市販のものを購入し、KEK内にて長さ300 mmに切断した。ヒータ、固定金具も別途製作し、ポンプはKEKのクリーンルーム内で組立てた。ヒータおよび固定金具は電界研磨している。組立の様子をFig. 4に示す。

組み立てたNEGポンプは、各ビームパイプ端面のフランジから挿入した。端部の電流端子には、ビームパイプ下面に

Table 1 Number of NEG pumps with various lengths.

Type	Length [mm]	Number		Total
		LER	HER	
Type-1	700	21	9	30
Type-2	1000	53	12	65
Type-3	1300	60	18	78
Type-4	1600	227	19	246
Type-5	1900	163	32	195
Type-6	2200	389	30	419
Type-7	2500	66	2	68
Type-8	2800	6	2	8
Type-9	3100	0	17	17
Total		985	141	1126

Fig. 4 Assembling and installation work of the new built-in NEG pumps in KEK site.

Fig. 5 Experimental setup for measuring the effective pumping speed of the NEG pumps installed in a real beam pipe.

ある ICF70 ボートに取り付けた電流導入端子とポンプチャンネル内でナットによって固定される。LER のビームパイプは電子雲不安定性対策として内面に TiN 薄膜がコーティングされるが、ポンプはこのコーティング後に挿入する¹⁵⁾。ポンプ挿入後、ビームパイプはトンネル設置前に 150 °C 26 時間ベーキングされる。このベーキングの際に NEG ポンプは一度活性化される。ベーキング後の到達圧力はほぼすべてのビームパイプについて 1×10^{-7} Pa 以下となった。ただし、ベーキング中の排気は排気速度 $0.2 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ のターボ分子ポンプで行った。

組み立て後、実機用ビームパイプを用いて、NEG ポンプの排気速度を測定した。Fig. 5 に排気速度測定装置の写真と構成を示す。ビームパイプの長さは 2.3 m である。ビームパイプの両側に圧力計、EXG-3 と EXG-2 を置いた (Extractor gauge, IONIVAC IM520 Lybold, Germany)。また、 $\phi 10 \text{ mm}$ のオリフィスを挟んで上流側 (粗排気側) のチェンバーにもう一つの圧力計 EXG-1 を置いた。装置は L 型弁を介して $0.2 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ のターボ分子ポンプで排気される。また、ガスを導入するための流量調整バルブも取り付けられている。

ビームパイプの単位長さのコンダクタンスを C ($=0.095 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}$), ビームパイプの長さを L ($=2.3 \text{ m}$) とすると、ガスを導入した時の EXG-2 と EXG-3 の圧力上昇を Δp_2 , Δp_3 とし、また NEG ポンプの排気速度を一樣と仮定すれば、圧力分布として下記式が得られる。

$$\Delta p_2 = \frac{\Delta p_3}{2} \left\{ \exp \left(-\sqrt{\frac{S}{C}} L \right) + \exp \left(\sqrt{\frac{S}{C}} L \right) \right\} \quad (1)$$

ここで、 $L=0$ を EXG-3 の位置としている。また、導入するガスがオリフィスを通してビームパイプ側に流れる量を Q_0 とすると、下記式が成り立つ。

Fig. 6 Measured pumping speeds estimated from the pressure difference (Eq.(1)) and the flow rate (Eq.(2)) for several pressures of Δp_2 .

$$Q_0 = \frac{\Delta p_3}{2} \sqrt{SC} \left\{ -\exp \left(-\sqrt{\frac{S}{C}} L \right) + \exp \left(\sqrt{\frac{S}{C}} L \right) \right\} \quad (2)$$

ここで、EXG-1 の圧力上昇を Δp_1 とした。したがって、ガスを導入し、各圧力計の圧力上昇がわかれば NEG ポンプの実効排気速度 S [$\text{m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-1}$] を式(1)または(2)から評価することができる。

実際のトンネル内の状況に合わせ、ビームパイプのベーキングは行わなかった。バルブから窒素 (N_2) を導入する前の各真空系の圧力は $5 \times 10^{-7} \sim 1 \times 10^{-6} \text{ Pa}$ であった。Fig. 6 に、幾つかの圧力上昇 Δp_2 に対して式(1)および(2)から見積もった排気速度を示している。ほぼ期待通りの $0.1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-1}$ が得られている。 Δp_2 が小さい時の値がやや大きい、これは圧力上昇が小さく測定誤差が含まれているためと考え

Fig. 7 Typical trends in the pressures during the NEG activation process in the tunnel.

られる。

6. トンネル内での NEG 活性化

ビームパイプは、加速器トンネル内に搬入・設置後、ベローズチェンバーを介してビームどうし接続される。主リングは周長約 3 km であるが、ゲートバルブによって約40の区間に分けられる。その区間の接続作業が終了されると、ターボ分子ポンプによって粗排気される。リークが無い事を確認後、最終的な真空立ち上げ作業として、イオンポンプのベーキングと NEG 活性化が各区間で行われる。

立ち上げ作業は2段階で行う。第一段階は、活性化用ヒータに最大電圧の約50%の電圧を印可し、100~120℃にてガス出しする。これは、次の本格的活性化時に NEG に余分なガスを吸収させないためである。この温度では NEG の排気速度はほとんど無く、放出されたガスは粗排気とイオンポンプで排気される。第二段階として、イオンポンプのベーキングを250℃にて20~26時間行う。このベーキングはイオンポンプから水分を追い出して正規の排気速度を得るためである。ベーキングの後半で NEG の活性化を開始する。活性化は最高電圧の約90%で行い、時間は8~10時間である。この途中でイオンポンプのベーキングを終える。活性化終了後、粗排気装置は撤去され、イオンポンプと NEG ポンプだけでビームパイプは排気されることになる。なお、トンネル内ではビームパイプ本体のベーキングは行わない。

Fig. 7 には、ある一つの区間の活性化時の圧力変化を一例として挙げている。圧力計は冷陰極真空計で、イオンポンプの上部に取り付けられている。図下端にはヒータへの出力電圧パターンも示している。活性化作業前の圧力は 10^{-5} Pa 台であったが、第一段階のガス出し終了後には 10^{-6} Pa 台となり、活性化終了後には 10^{-8} Pa となっている。他の区間でもほぼ同様の結果が得られている。

7. ま と め

SuperKEKB の新規ビームパイプ（アンテチェンバー型）用の NEG ポンプを開発した。ポンプは NEG ストリップ3層構造であり、シースヒータによる間接加熱で活性化される。アンテチェンバーを利用することにより、電磁石とは関係なく効率の良い分布排気システムを構築することができる。測定した実効排気速度は窒素に対して約 $0.1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-1}$ と、ほぼ期待通りの値が得られた。現在、トンネル内での活性化作業を実施中である。活性化後区間の平均圧力は 10^{-8} Pa 台が得られている。2015年末までに加速器トンネル内すべての NEG 活性化を終了する予定である。ビーム運転は2016年初頭開始が予定されており、その後は圧力、導入端子の温度等監視を続ける。また、運転中には光刺激脱離係数の評価も行う。ビーム電流増加に従い、KEKB 運転時と同様、必要に応じて NEG の再活性化（コンディショニング）を行っていくことになる¹⁶⁾。将来的には、NEG 活性化用ヒータの電流を直流化し、電磁石に通電したままでも NEG の活性化が可能とする予定である。

〔文 献〕

- 1) Y. Ohnishi et al.: Prog. Theor. Exp. Phys., (2013) 03A011.
- 2) T. Miura et al.: Proc. IPAC2015, Richmond, USA 2015 (2015) 1291.
- 3) Y. Suetsugu, K. Kanazawa, K. Shibata, T. Ishibashi, H. Hisamatsu, H. Shirai and S. Terui: J. Vac. Sci. Technol. A, **30** (2012) 31602.
- 4) Y. Suetsugu, K. Kanazawa, K. Shibata, T. Ishibashi, H. Hisamatsu, M. Shirai and S. Terui: Vacuum, **121** (2015) 238.
- 5) Y. Suetsugu, K. Shibata, H. Hisamatsu, M. Shirai and K. Kanazawa: Vacuum, **84** (2009) 694.
- 6) Y. Suetsugu, K. Shibata and M. Shirai: Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, **597** (2008) 153.
- 7) V. Avagyan, H. Gagiyan, S. Nagdalyan and A. Petrosyan: Proc. EPAC2002, Paris, 2002 (2002) 2532.
- 8) C. Hetzel et al.: Proc. IPAC2012, New Orleans, USA, 2012 (2012) 2558.
- 9) H. C. Hseuh, W. S. Jiang and M. Mapes: J. Vac. Sci. Technol. A, **13** (1995) 3.
- 10) Y. Li, R. Kersevan and N. Mistry: J. Vac. Sci. Technol. A, **15** (1997) 2413.
- 11) P. Chiggiato and R. Kersevan: Vacuum, **60** (2001) 67.
- 12) C. Benvenuti, P. Chiggiato, P. Costa Pinto, A. Escudeiro Santana, T. Heldley, A. Mongelluzzo, V. Ruzinov and I. Wevers: Vacuum, **60** (2001) 57.
- 13) C. Benvenuti and F. Francia: J. Vac. Sci. Technol. A, **8** (1990) 3864.
- 14) Technical specification of "ST707/CTAM/30D Strip (Doc. No. M.F140.0021.21, Rev.(0))", SAES Getters SpA., Italy (1994).
- 15) K. Shibata, Y. Suetsugu, K. Kanazawa, T. Ishibashi, H. Hisamatsu, M. Shirai and S. Terui: J. Vac. Soc. Jpn., **57** (2014) 136.
- 16) K. Kanazawa et al.: Prog. Theor. Exp. Phys., (2013) 03A005.