KEKB 大型衝突リング真空システムの運転経験*
—大電流蓄積に関連して—金澤 健一*¹・加藤 茂樹*¹・末次 祐介*¹
久松 広美*¹・嶋本 真幸*¹・白井 満*¹

(受理2001年11月28日, 掲載決定2002年2月2日)

Experience of Operating the Large Vacuum System of the KEKB Collider
—High Stored Current Issues—Ken-ichi KANAZAWA*¹, Shigeki KATO*¹, Yusuke SUETSUGU*¹,
Hiromi HISAMATSU*¹, Masayuki SHIMAMOTO*¹ and Mitsuru SHRAI*¹*¹High Energy Accelerator Research Organization Oho 1-1, Tsukuba, 305-0801 Ibaraki

(Received November 28, 2001, Accepted February 2, 2002)

For the KEK B-factory, an electron-positron collider which consists of two storage rings intersecting at the collision point has been running in operation since December 1998. The ring has a circumference of 3016 m, and its vacuum chambers are mainly made of copper. Until July 2001, a fill with the initial current of 940 mA positron and 730 mA electron was established and the world record luminosity was achieved. Before the goal currents of 2.6 A positron and 1.1 A electron are achieved, the effect of high beam current has been emerging. The effect of electron cloud became evident especially in the LER. Some bellows were found to be warmed by the TE mode of beam induced fields. Direct damage by beam is seen at the surface of the movable mask. An indirect effect of the high beam current passing close to a vacuum seal is also observed.

1. はじめに

KEKBの電子—陽電子衝突リングは、衝突点で交差する二つの周長3016 mの蓄積リングから構成されている。大部分の真空チェンバーは無酸素銅で作られている¹⁾。衝突リングは1998年12月に運転を開始した。2001年7月の時点で、陽電子940 mA (3.5 GeV)、電子730 mA (8 GeV)を蓄積し、衝突リングの性能の目安であるルミノシティの世界記録を樹立している。蓄積電流の最終目標は、陽電子2.6 A、電子1.1 Aである。シンクロトロン放射による圧力上昇は順調に枯れているが、蓄積電流が増えるにつれてこれまで経験していなかった現象

がいろいろと起こっている。たとえば陽電子リングでは、Electron Cloud Instability (ECI) とよばれる、ダクト内の電子雲の影響でビームサイズが増大する現象が発生している²⁾。これに関連して、圧力が、ビーム強度にたいして非線形に変化する現象が観測されている。これはelectron multipactoringによるものと考えられている³⁾。

KEKBで使用しているベローズは、スプリングフィンガーで接触圧を確保したコンタクトフィンガーを使用してチェンバー断面をスムーズにつないでおり、コンタクトフィンガーを使用したデザインとしては非常に信頼性の高いものである。しかし、蓄積電流が増えるにつれて、チェンバーが非対称な部分や、オフセンターな軌道によってビームから発生する電磁場がコンタクトフィンガー間のすき間を通してベローズとフィンガーの間の(同軸)空洞部に入り、発熱を引き起こす現象が顕著に

* 平成13年10月18日 第42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 The history of the pressure rise per beam current. The pressure rise is the average for the HER (8 GeV electron ring) arc. The pressure reading of CCG is multiplied by a factor 3 to approximate an actual CO equivalent pressure in the ring. Photo-desorption coefficient is estimated assuming the pumping speed of NEG to be $30 \text{ l s}^{-1} \text{ m}^{-1}$.

Fig. 2 The history of the pressure rise per beam current. The pressure rise is the average for the LER (3.5 GeV positron ring) arc. The pressure reading of CCG is multiplied by a factor 3 to approximate an actual CO equivalent pressure in the ring. Photo-desorption coefficient is estimated assuming the pumping speed of NEG to be $30 \text{ l s}^{-1} \text{ m}^{-1}$.

見られるようになった。しかしこれはまだ深刻な状況ではない。

KEKB では、ビームサイズが小さく、蓄積電流が多いため、ビームが直接チェンバーなどに当たると損傷を引き起こす。その被害を直接被っているのは、リング内でいちばん狭い場所となっている可動マスクであるが⁴⁾、最近、大電流ビームが真空シール（アルミ被覆のヘリコフレックス）の極めて近くを通過すると、シール面にくぼみが発生し、リークを引き起こすことがわかった。本報告では、これらの話題の中から、ビームによる圧力上昇の変化の様子、陽電子リングにおけるダクト内電子の計測、ビームによる真空シールの損傷について報告する。

2. 圧 力

Fig. 1 および **Fig. 2** に各リングの圧力上昇の変化を示す。運転時の目標圧力は、設計電流に対して $1.3 \times 10^{-7} \text{ Pa}$ であるから、両リングともほぼ目標に近い。同じ図にチェンバーの光脱離係数の推定値を示してある。推定値と言っているのは、NEG の排気速度がガスの吸蔵量とともに変化するので、分布排気速度 $0.3 \text{ m}^3 \text{ sec}^{-1} \text{ m}^{-1}$ を仮定して計算しているからである。すでに光脱離係数は設計時に前提とした 10^{-6} に達していると考えられる。ビーム無しのベース圧力は 10^{-8} Pa 台を想定していたが、現場でのチェンバーベーキングは行わず、粗排気、イオンポンプのベーキング、NEG の活性化の順

番で真空を立ち上げ、1 ヶ月弱で、 10^{-8} Pa 台のベース圧力を実現している。真空作業時も、液体窒素からの蒸発窒素によるパージから始まって同じ手順で真空を立ち上げている。粗排気開始から約 6~8 時間で圧力は 10^{-7} Pa に達し、運転が再開できる。一連の作業の中で、イオンポンプのベーキングをきちんと行い、排気速度を確保していることが重要なポイントと考えている。

3. ダクト内の電子

陽電子リング内の電子雲は、2 つの過程で供給される電子によって生じる。一つはシンクロトロン放射による 2 次電子放出である。もう一つは、ダクト内に存在した電子が、陽電子ビームで加速されチェンバー壁に当たり、発生した 2 次電子がまた加速されてチェンバー壁から 2 次電子を放出するという過程を繰り返し、電子が増幅されることによる（マルチパクタリング⁵⁾）。陽電子ビームによる電子の加速は、ビームが間隔を置いた陽電子の塊（バンチ）から構成されている（バンチ化したビーム）ことに特有の現象で、連続的なビームでは起こらない。放射光による 2 次電子は全蓄積電流に比例するが、マルチパクタリングによる電子は、バンチの繰り返しパターンに依存し、全電流とともに急激に増加する。**Fig. 3** はチェンバー内の電子を排気ポートから計測したものである。電圧をかけて電子雲から電子を集めているわけではないので、電子雲の中で壁に衝突するものの一部をはかっていることになる。**Fig. 3** は偏向電磁石の下流の

Fig. 3 Electron current from a beam duct measured at a pumping port. Two detectors are located at the downstream of a bending magnet.

Fig. 4 The ratio of the electron currents shown in Fig. 3. The ratio approaches to the ratio of the incident photon number at the zero current limit.

2 個所で測定したもので、測定場所の放射光の強度に応じて電流に差がある。しかしそれぞれの電流の比は、放射光の強度の比とは大きく異なっており (Fig. 4)、特に下流の測定位置ではマルチバクタリングが優勢であると考えられる。また、上流側でも電子電流は蓄積電流に比例してはならず、非線形の部分はマルチバクタリングによると考えられる。Fig. 5 に放射光が全く無いと考えられる場所で測った結果を示す。電子電流は、蓄積電流の増大とともに急激に増えており、典型的なマルチ

Fig. 5 Electron current from a beam duct measured at a location with negligible synchrotron radiation. Two short lines between 0.1 and 0.2 A correspond to different bunch patterns. Also, two slightly different patterns over 0.4 A reflects the difference of the bunch pattern.

Fig. 6 Pressure variation at the same position as the detector used for Fig. 5. The effect of the difference of the bunch pattern over 0.4 A is not so clear as the electron current.

バクタリングと考えられる。Fig. 5 と同じ場所で同時に測定した圧力を Fig. 6 に示す。パターンが全く同じであることが見て取れる。Fig. 5 と Fig. 6 には Fig. 7 に示すように完全な相関がある。このような電子雲をチェンバー壁面付近に局在化させビームとの相互作用を小さくするために、チェンバーにソレノイドコイルを巻く対策が行われ、効果を上げている。

4. 大電流ビームによる損傷

KEKB では、ビームが不要になったときや不安定になったときに、真空部品への損傷を避けるため、またト

Fig. 7 Correlation between pressure (Fig. 6) and electron current (Fig. 5).

ンネル内の全周にわたる放射線量の増加を避けるために、ビームをチェンバーから取出しビームダンプに捨てる。ビームが取出し窓を通るときにビームは真空シール(アルミ被覆のヘリコフレックス)のすぐ近くを通過する。最近、大電流(陽電子、約1 A)を取り出すと、真空シールの表面に凹みが生じリークを引き起こすことがわかった。Fig. 8 にビームとシールの位置関係を示す。リークが発生した部分のフランジのシール溝には放電痕が見られる。パンチ化したビームでは、ビームが通るチェンバーの壁面に、総量でビーム電流と等しい壁電流が流れる。ビームがダクトの中心にあるときは、ダクト断面(LERは直径94 mmの円)の周上に壁電流は一様に分布するが、ビームが壁に近づくにしたがって壁電流はビームに近い部分に集中し、ビームが壁から d という距離まで近づくと、ビームに近い点から $\pm d$ の範囲の中に半分の壁電流が集中する。この事実がリークの原因と考えているが、具体的な現象の理解にはまだ至っていない。取出し窓はペローズと接続するフランジについているので、ペローズを短管に置き換え、フランジに直接溶接して真空シールが無い構造にすることによって、この問題に対処している。

Fig. 8 Relative positions between the beam and a Helicoflex near the abort window. After the beam is shifted horizontally to the position A, the beam starts passing through the window. Then the beam is moved from A to B during passing. Hollows are observed at the position indicated as 'Leak' on both sides of a Helicoflex.

5. ま と め

KEKBの衝突リングは着実に性能を延ばしているが、一方ではパンチ化したビームの大電流効果が顕著になり、適宜対策が必要になっている。中には全く予期していない効果もあり、最終の蓄積電流を達成するまでに、まだまだ未知の現象が控えていると思われる。

【文 献】

- 1) K. Kanazawa, S. Kato, Y. Suetsugu, H. Hisamatsu, M. Shimamoto, M. Sato and M. Shirai: Appl. Surf. Sci., 169-170 (2001) 715.
- 2) 加藤茂樹: KECB コミッショニング・グループ: 第42回真空に関する連合講演会, 東京 (2001).
- 3) 末次祐介: 第42回真空に関する連合講演会, 東京 (2001).
- 4) 末次祐介, 影山達也, 竹内保直, 金澤健一, 佐藤康太郎, 左波俊哉, 平山英夫: 第42回真空に関する連合講演会, 東京 (2001).
- 5) O. Gröbner: Proc. 10th Int. Conf. on High Energy Accelerators, Protvino, July (1977) p. 277.