

X-RAY INSPECTION OF BELLOWS CHAMBERS IN THE KEKB MAIN RING

Shinji Terui^{#,A)}, Yusuke Suetsugu^{A)}, Takuya Ishibashi^{A)}, Shigeki Kato^{A)}, Ken-ichi Kanazawa^{A)},
Mitsuru Shirai^{A)}, Kyo Shibata^{#,A)}, Hiromi Hisamatsu^{A)}, Mitsuru Ito^{B)}, Masahiko Takita^{B)}

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

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

^{B)} IHI Inspection & Instrumentation CO.,LTD(IIC)

1-22-13 Oi, Shinagawa, Tokyo, 140-0014

Abstract

KEKB completed its very successful operation on June 30, 2010. The dismantling of the KEKB main ring started just after that for the next project, called SuperKEKB. The East Japan Earthquake hit Tsukuba area in the middle of construction on March 11, 2011. The vacuum components, which will be reused for SuperKEKB, received various types of damage from the earthquake. The damage of bellows chambers in the KEKB main ring was inspected utilizing a X-ray-photography without exposing the beam-pipe to air. The damages of RF-shield finger inside were found for 23 out of 869 bellows chambers in a short time. The inspection method was found to very useful.

SuperKEKB メインリングにおける ベローズチェンバーの X 線検査の報告

1. はじめに

KEKB B ファクトリー加速器 (KEKB) は、電子ビーム (8 GeV) と陽電子ビーム (3.5 GeV) の 2 リング衝突加速器であり、これまで B 中間子崩壊における CP 対称性の破れの検証に大きく貢献してきた。そのピークルミノシティの最高値は $2.1 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ であり、積分ルミノシティでは目標値である 1000 fb^{-1} を 2009 年 11 月 29 日に突破した。しかし、新しい物理が重いフレーバーの崩壊にもたらす影響を高い精度で調べるためには、その性能を飛躍的に向上させる必要がある。KEKB のアップグレード計画は SuperKEKB 計画と呼ばれ、目標とされるルミノシティは KEKB の約 40 倍 ($8 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$) である。このルミノシティ増強のための高度化作業を行うために、2010 年 6 月 30 日に KEKB の運転は停止された^[1]。

このアップグレード作業途中の 2011 年 3 月 11 日に東日本大震災は起こり、KEKB 真空システムにも大きな被害をもたらした。トンネル内に設置されていた電子リングでは、地震後、作業のため取り外した一部のベローズチェンバーにて内部のフィンガー型 RF シールドの損傷が発見された。電子リングのベローズチェンバーは SuperKEKB でもほとんど再利用される予定であり、損傷したものをそのまま使用することは運転時に発熱等の問題を引き起こすことになるため、運転再開までにすべてのベローズチェンバー内部を調査する必要性が生じた。しかしながら、ベローズチェンバーの数はリング全体で約 900 個におよび、すべてを大気解放して調べるには膨大な労力を要すると同時に、真空チェンバーの真

空面が大気に曝されるという問題もある。そこで、今回、外部から X 線を照射し、大気に解放することなく内部を調査する方法を採用することにした。

以下に X 線検査の調査方法、結果を報告する。

2. 調査方法

調査は X 線源から照射を行い、ベローズチェンバーを透過させてイメージングプレートに焼き付ける方法を採用した。

図 1 の左に、今回調査する SuperKEKB メインリングトンネルの写真を、図 1 の右に、レイアウトを示す。リングの周長は 3016m である。図の中で、赤く縁どられている部分が、X 線検査を行なった場所である。縁どられていない北側の部分は、衝突点付近であり、SuperKEKB アップグレードに伴い、解体されていたために調査を行っていない。

図 2 に、今回調査するフィンガー型ベローズチェンバーとその構造を示す。

図 3 の左に、ベローズチェンバーに設置したイメージングプレートを示す。イメージングプレートの大きさは、 $80\text{mm} \times 300\text{mm}$ である。図 3 の右に、イメージングプレート読み取り機を示す。

図 4 の左は X 線源とイメージングプレートの配置である。図 4 の右は X 線源である。X 線源の大きさは、約 $\phi 200\text{mm} \times 800\text{mm}$ である。赤矢印が指している部分が出射口である。X 線源は、トンネル内を、運びやすいようにポータブルタイプを選択した。

撮影されたベローズの材料は、ダクトが厚さ 0.8mm のステンレス製 (銀メッキ $10\mu\text{m}$)、ベローズのひだが厚さ 0.15mm のステンレス製、コンタクトフィンガーが厚さ 0.2mm のベリリウム銅製、スプリングフィンガーが厚さ 0.4mm のインコネル製

[#] sterui@mail.kek.jp

(銀メッキ 10 μ m) である。撮影条件は、X 線源とベローズチェンバーの距離が約 700mm、X 線出力は 170~200keV 3mA、露出時間が 4~6sec とした。X 線出力や露出時間にばらつきがある理由は、ベローズチェンバーの大きさにより最適な撮影条件が異なること、ある部分では支障物が多く X 線源とベローズチェンバーの距離を正確に 700mm とできなかったからである。電子リングのチェンバーの主な断面を図 5 に示す。撮影は基本的に図 6 に示すように、下向き照射 (X 方向) と横向き照射 (Y 方向) の 2 方向にて行ない内部の状態を確認した。

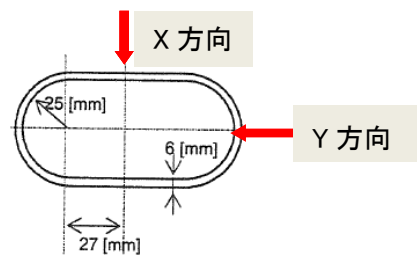


図 5：電子リングチェンバーの断面^[2]。

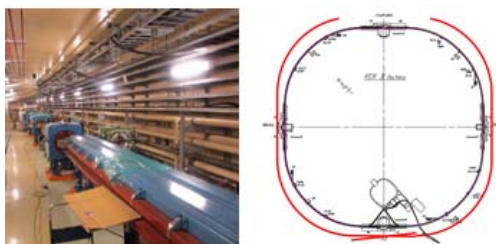


図 1：Super-KEKB メインリングトンネルの写真とレイアウト。

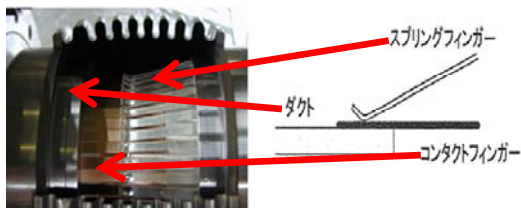


図 2：今回調査するフィンガー型ベローズチェンバーの写真と構造^[2]。

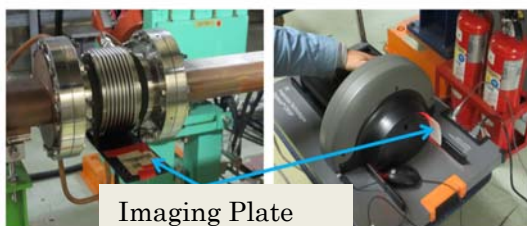


図 3：左はベローズチェンバーに設置したイメージングプレート。右はイメージングプレート読み取り機。

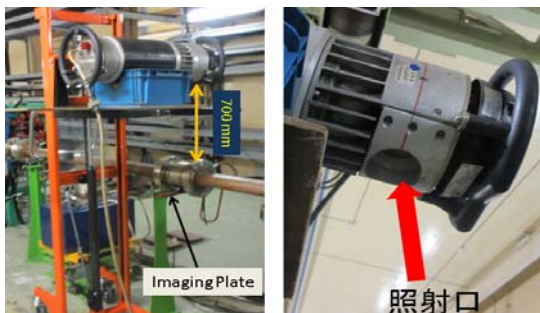


図 4：左は X 線源とイメージングプレートを設置した様子、右は X 線源。



図 6：左側は下向き照射 (X 方向)、右側は横向き照射 (Y 方向) を行う配置。

3. 撮影結果

まず、図 7 に、検査するきっかけになった損傷があるベローズチェンバーの写真を示す。赤丸に示す部分でコンタクトフィンガーが曲がってしまっていることがわかる。

次に、図 8 と図 9 に、X 線検査で撮影した映像を示す。図 8 が、正常な状態のベローズチェンバーである。左が下向き照射で、右が横向き照射である。図 9 が、損傷があるベローズチェンバーである。赤丸に示す部分でフィンガーが曲がってしまっていることがわかる。

図 10 に損傷が見つかった撮影場所を示す。外見上問題があるようには見えず、また、トンネルのエクспанションジョイントの近くでもなかった。このことから、目視や場所から、変形してしまったベローズを見つけるのは、極めて困難だということがわかった。

ここで、このベローズの損傷が地震の影響によるものかどうかを考えてみる。参考資料として図 11 に、損傷が見つかった場所での、KEKB 運転中のベローズの温度変化を示す。図 11 の横軸は時間で、2010 年 6 月 1 日 0 時から 6 月 2 日 0 時までを示し、縦軸は温度摂氏を示している。図 11 の赤色プロットが、図 9 の右上と左上の場所での温度であり、他の色が、近傍の正常なベローズ部分の温度である。ベローズに異常な状態のまま、加速器を運転していたとしたら、放電や発熱が起こり、正常な部分に比べ高い温度になると予想される。よって、温度変化から運転中から、そのベローズが異常であったかを、推測できる。地震前の運転中に異常でなかったとしたら、地震の影響の可能性が高いと考えられる。図 11 からは、近傍の場所より、温度が高いところと、温度が変わらないところがあるのがわかる。前者は、地震前から損傷があったと推測できる。後者は、地震の影響の可能性が高いと考えられる。このことから、ベローズが損傷した原因は、地震の影響

だけではないと考えられる。

X線検査の結果、損傷が確認されたベローズは869個中23個である。また、今回の検査は、3人1グループにて行い、41日間要した。つまり、平均1日約21個調査を行えたということである。大気開放して調査する場合、調査前に冷却水配管を外し、窒素パージを行い、調査後に、冷却水配管の再接続、真空引き、リークテストを行う等の労力を要するため、1日8個位と予想されるので、大幅な時間短縮ができたと考えられる。また、図12の場所のような、大気開放して調査するには支障が多い場所でも、撮影することができた。図12は、加速空洞やキッカーマグネット等が設置されているFUJI直線部の写真である。

まとめとして、今回ベローズ損傷のX線検査にてわかったことは、トンネルに設置されている支障物が多い状態でも内部状態を充分確認できること、検査時間を大幅に短くすることができることの2つである。この2つのことから、ベローズが損傷しているかを大気解放せずに、確認するのにX線検査が有用であると考えられる。



図10：損傷が見つかった撮影場所。



図7：損傷があるベローズチェンバーの内部写真。

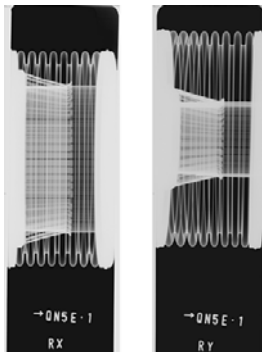


図8：正常な状態のベローズチェンバーの写真。左が下向き照射で、右が横向き照射である。

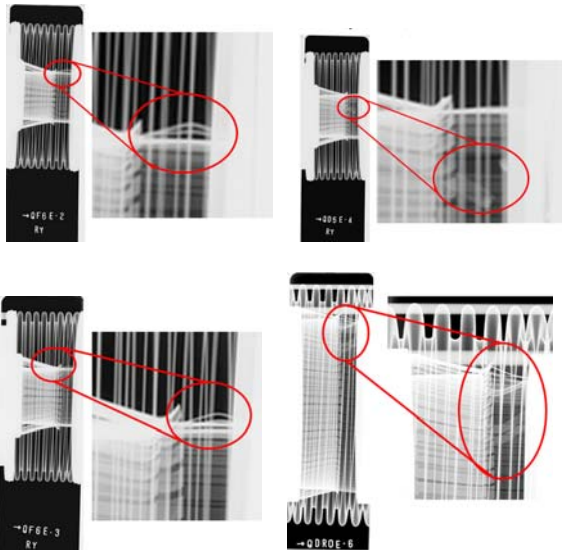


図9：損傷があるベローズチェンバーの写真。

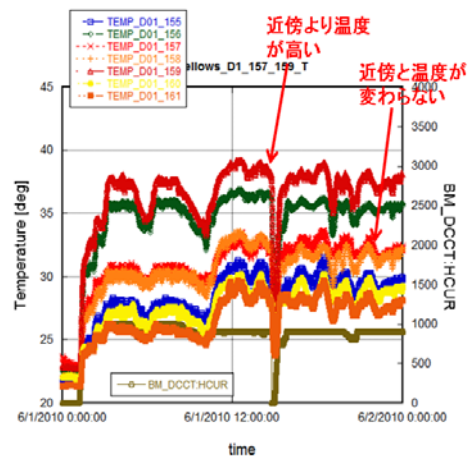


図11：2010年6月1日運転時の温度変化。(赤色のプロットが、損傷が確認された場所の温度)



図12：FUJI直線部の写真。

4. 謝辞

今回調査に協力していただいた KEKB 加速器研究施設の各グループ、特にマグネットグループ・RFグループ・モニターグループに、感謝します。

参考文献

- [1] K. Shibata, et al. "ESTIMATION OF IMPEDANCE AND LOSS FACTOR OF SUPER-KEKB POSITRON RING", Proceedings of Particle Accelerator Society Meeting (2010)
- [2] K. Shibata. "加速器のための超高真空", 3-14, 3-16, OHO(2004)