

## SuperKEKB 真空制御システム構築と8年間の運転経験

○照井真司<sup>#A)</sup>, 石橋拓弥<sup>A)</sup>, 久松広美<sup>A)</sup>, 末次祐介<sup>A)</sup>, 芳藤直樹<sup>B)</sup>,  
柴田恭<sup>A)</sup>, 白井満<sup>A)</sup>, 中村達郎<sup>A)</sup>, 金澤健一<sup>A)</sup>, 姚慕蠡<sup>A)</sup>  
<sup>A)</sup>高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設  
<sup>B)</sup>株式会社東日本技術研究所

### 概要

SuperKEKB の真空コンポーネントや制御システムは、KEK からのアップグレードに対応するため制御点数の増加を行い、かつ、10年以上先の健全性を維持しなければならない。しかし、システムの入力点数や出力点数が非常に多く、TRISTAN や KEKB の運転時から使用している機器をすべて新しいものに置き換えることは、予算の制約もあり困難であった。SuperKEKB では、TRISTAN や KEKB で使用していた装置の再利用を優先し、装置の更新を行った。SuperKEKB の真空システムは8年間稼働しているが、この間、真空制御システムには多くのトラブルが発生したが、運転が致命的に停止するような事態には至っていない。

### 1. はじめに

SuperKEKB は KEKB のルミノシティ記録からの飛躍的向上を目指す電子・陽電子衝突型加速器である。その目的は標準理論を越えた新しい物理を探索することである。メインリング(Main Ring: MR)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))から成る[1]。ルミノシティを向上させるため SuperKEKB 建設時には、ビームパイプ入れ替えなどの真空システムの大幅な改造が行われた[2]。この改造に伴い、真空制御システムの更新も行われた[3]。SuperKEKB は、2016年のPhase-1 運転(試運転)からスタートして、2018年からのPhase-2 運転(衝突試運転)、2019年から2022年のlong shutdown 1(LS1)までの間にPhase-3 運転(物理運転)が行われた。2022年までに SuperKEKB は世界最高ルミノシティを更新し続け、KEKB での最高ルミノシティの2倍以上の値に記録した[4]。LS1 後には、検出器などをアップグレードさせ、より高いルミノシティを目指していく予定である。

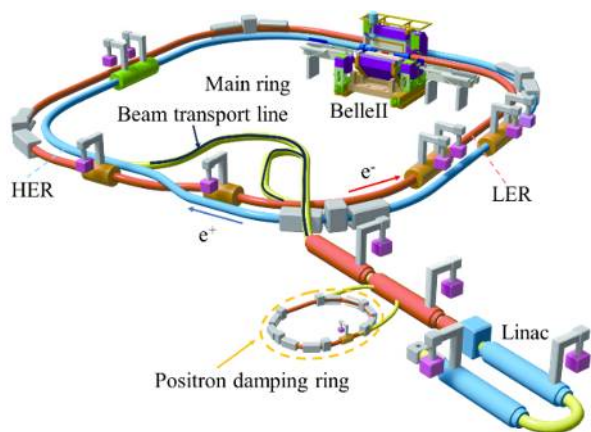


図 1. Overall SuperKEKB configuration.

LS1 前の最大ビーム電流は1.4 A を超えた。真空システムとしては、何度か真空リークなどのトラブルが起きたが、おおむね順調に稼働して、ビームパイプ内の圧力も予定通り下がってきている[5]。

### 2. SuperKEKB の真空制御システムの基本構成

最初に、SuperKEKB 全体の構成を図 1 に示す。我々のグループが担当しているのは、SuperKEKB の main ring(MR)と、beam transport (BT) line と positron damping ring (PDR)の区域の真空システムである。MR と BT line は、KEKB 時にも存在していたが、PDR は、SuperKEKB 開始前に新たに建設された。

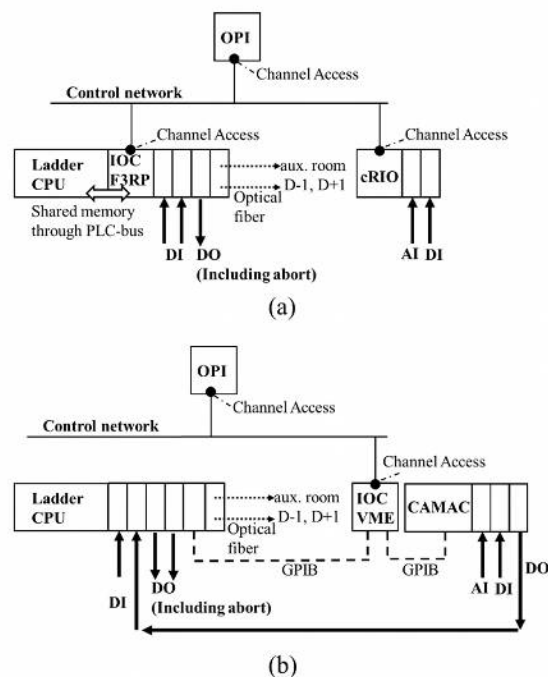


図 2. The configuration of vacuum control system for (a) KEKB and (b) SuperKEKB.

2012~2015 年までの間に、MR の真空制御システムが更新された。図 2 に、更新前後(更新前:(a)KEKB、更新後:(b)SuperKEKB)の MR 真空制御システムの基本構成について示す。PLC は Programmable Logic Controller の、OPI は Operator Interface の略である。真空制御システムの更新の主な理由は、CAMAC の ADC モジュールの入手が困難なためである。Input/Output Controller (IOC)を VME から、Yokogawa Electric Corporation の F3RP61(後に F3RP71 に更新した)[6, 7]に、アナログのデータロガーは、CAMAC から National Instruments Corporation の CompactRIO (cRIO) [8]に変更された。F3RP61 (71) は Linux を OS として採用しており、我々はその OS 上で EPICS を走らせている。Channel Access とは、EPICS [9] の基本的な通信プロトコルで、レコードの情報にネットワーク経由でアクセスする仕組みである。

### 3. SuperKEKB 真空制御でのトラブル事例

#### 3.1 Ion pump コネクタでの放電

SuperKEKB は、1980 年代初頭に建設された TRISTAN のトンネルを再利用して使っているため、設備が非常に古く、湿度に関しては管理することはできない状況である。この湿度管理できていないことが原因と想定されるトラブルとしては、ion pump (IP)コネクタの放電が挙げられる。図 3 は、IP コネクタでトラブルが起きた時のプロットである。図 3 は、横軸に時間をとって、縦軸に cold cathode gauge(CCG)で計測した圧力と、IP で計測した電流をとったものである。このグラフから、圧力が急激に上昇して、その後、圧力値は大きなふらつきが観測されていることがわかる。IP への印加電圧をオフしてから、圧力値のふらつきがなくなっていることがわかる。この IP のコネクタを印加オフ後に触れたところ、温かくなっていることがわかった。

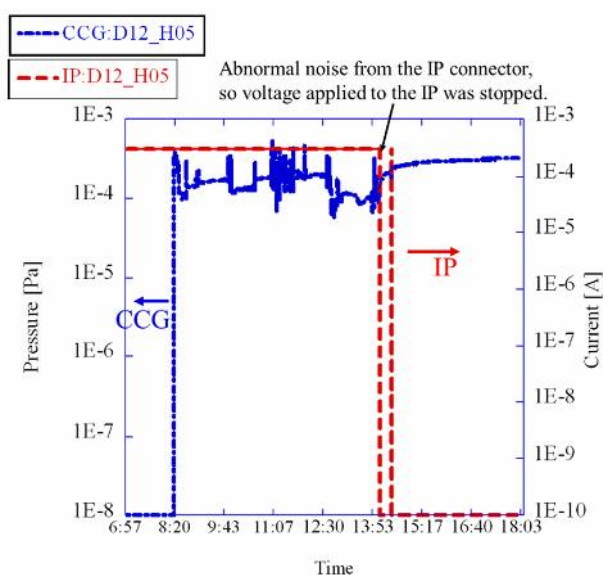


図 3. Pressure value and IP current at the event of air leakage at the IP connector.

この現象が確認されたケーブル側コネクタと IP 側コネクタを取り外した際に、撮影された写真を図 4(a), (b)に示す。この写真から、IP 側コネクタとケーブル側コネクタともに、碍子が黒くなっていることが分かった。また、その後のリーク試験で、IP 側コネクタのろう付け部でリークしていることが分かった。その後、IP 側コネクタを新品に取り換えた後の写真を図 4(c)に示す。この IP コネクタでの放電の原因が、湿度だと考えられる理由は、電気代節約のために空調を止め、湿度が上がっている区間で多発したためである。

この IP コネクタの放電対策として、熱収縮チューブと乾燥材を用いたカバーが有効ではないかと考え、現在試験している最中である。

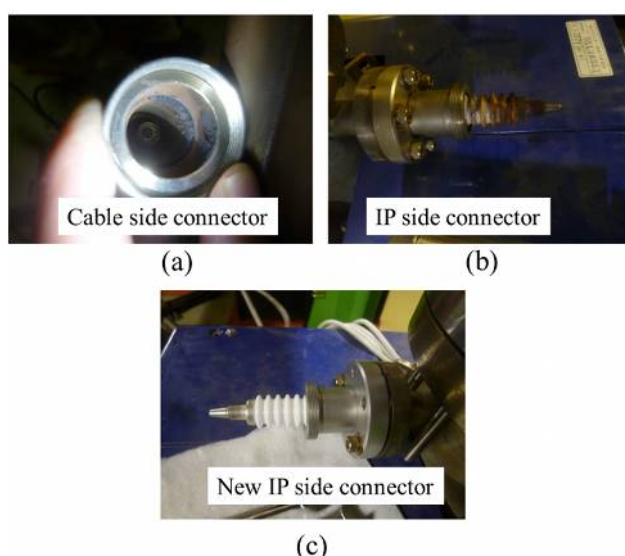


図 4. Photographs of (a) inside view of cable side IP connector and (b) IP side connector at the point of observation of the air leak at the IP connector. (c) New IP side connector replaced from a faulty one.

#### 3.2 真空系冷却水ポンプの停止

SuperKEKB の真空系冷却水は、地上部の機械棟内に、大型ポンプと冷却機構が設置されている。地上部で冷却された水がポンプでトンネル内のビームパイプへ圧送される。この地上部のポンプが、ビーム運転中に故障したことは KEKB 時代にはなかったが、SuperKEKB では起きた。このポンプが止まった区間は、残念ながら放射光強度が高い wiggler 部であったため、大きな被害がでた。その地上部のポンプの故障時の状況を、図 5 に示す。図 5 は、縦軸に LER のビーム電流、地上部の機械棟内で計測された流量、ビームパイプ表面を CCG で計測した圧力をプロットしたものである。17:17 分頃に、ポンプが故障して流量値が 0 になっていることがわかる。その後 6 分間程度、温度と圧力が上昇し、17:23 分頃にビームがアボートされ、温度と圧力が減少していくことがわかる。このときのビームアボートは、温度上昇が起因したものであった。このトラブル後の LER ビーム電流と圧力をプロットしたものを、図 6 に示す。この図から、ビーム電流がアボートされたとき

に圧力が上昇していることがわかる。これは、フランジ部分でリークしていると想定されるときに起きる現象である。メンテナンス日に、リークテストが行われ、9か所でリークが見つかった。

この後、トラブルに対応するために、ビームアポートロジックの変更を行った。変更内容は、トンネル内の流量計が通常時の30%以下になり、かつ、機械棟で計測した流量が1000 L/Min以下になった場合には、ビームアポートするというものである。

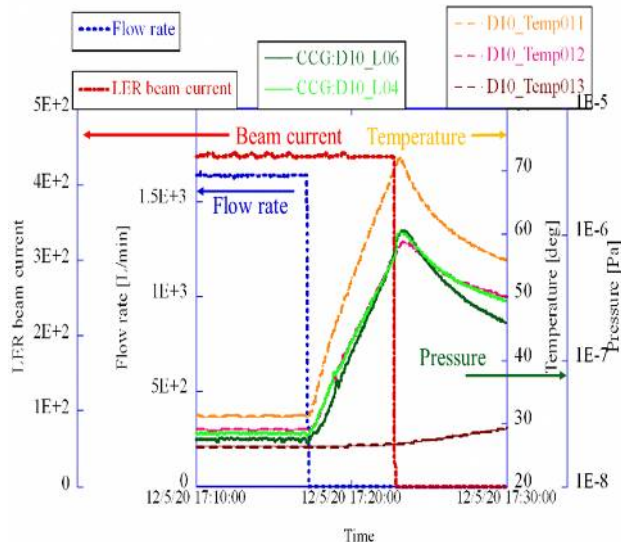


図5. The graph of beam current, flow rate, pressure, and temperature when cooling water pump is stopped.

### 3.3 セプタム部のスクロールポンプ故障

SuperKEKBの入射点では、in-vacuumのセプタムを使用している。セプタム内のケイ素鋼板は積層構造をしており、アウトガスが非常に多いため、セプタム部のみ、ビーム運転中でも turbomolecular pump (TMP) とスクロールポンプを使用して、排気している。このセクションで説明するのは、セプタム部のスクロールポンプが故障したトラブルである。

図7に、(a)セプタムの排気システム図と(b)セプタム部の写真を示す。セプタム電磁石直下には、IPが取り付けられていて、枝分かれした部分にはマニュアルアングルバルブとGVが設置されていて、その下にTMPとスクロールポンプが設置されている。TMPの回転数が閾値以下になると、TMP直上のGVが閉じるシステムに、トラブル前はなっていた。図8は、トラブル時の圧力値とGVの挙動を示したものである。スクロールポンプ故障時に、セプタム部直下のIPと同じ場所に取り付けられているCCG(D08\_H18)が閾値以上になったため、印加電圧がオフになった。その直後には、BTラインとMRを繋げているGVが閉まった。ストレージビームのみが通るビームパイプ内を計測している圧力値(CCG:D08\_16A)が上昇し、TMP直上のGVが閉じた後に、圧力値が下がったことがわかる。この時間差は、圧力が高くなってTMPの回転数が下がるまでに時間がかかることが要因である。このトラブル後には、図7(a)内で、赤線で示されている新たなロジックが追加された。これは、新たに圧力計を追加して、その圧力計で計測された圧力が閾値以上になった場合にも、TMP直上のGVが閉じるようにしたものである。

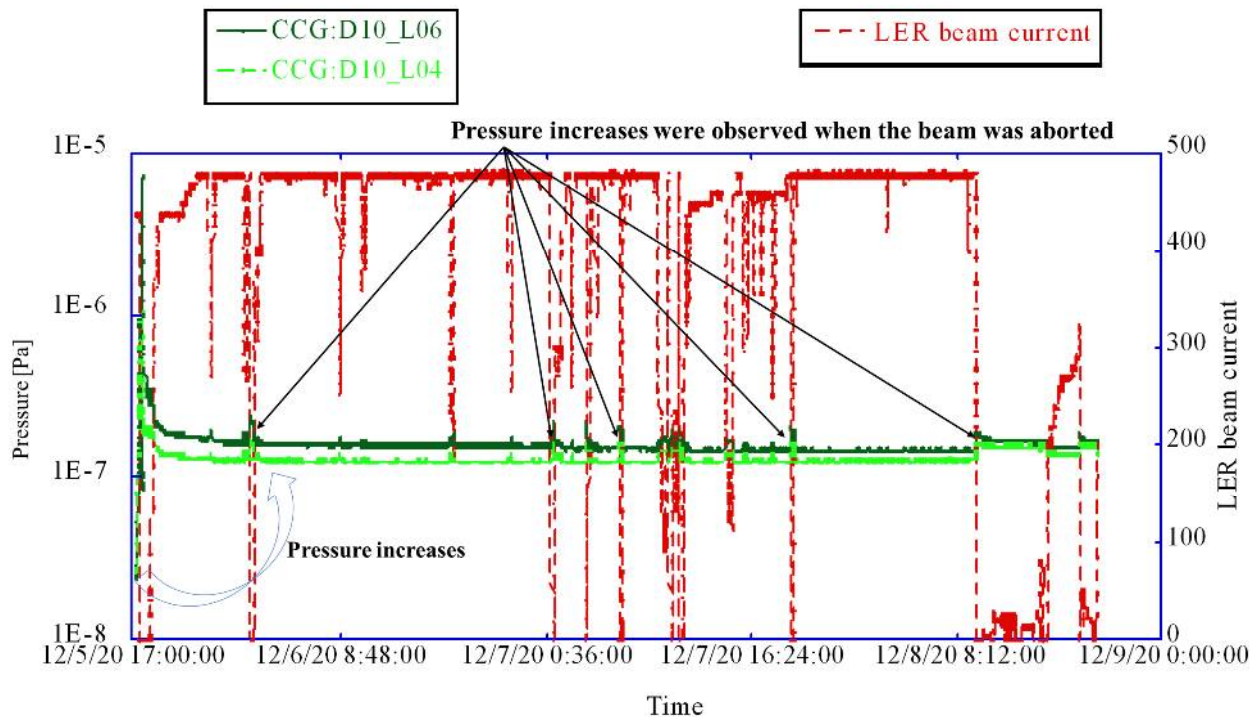
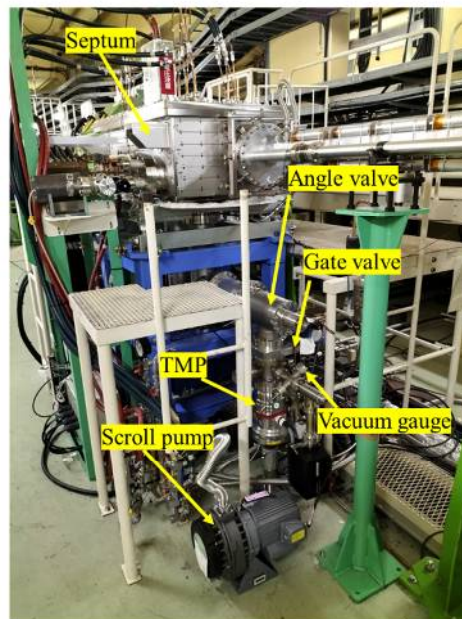
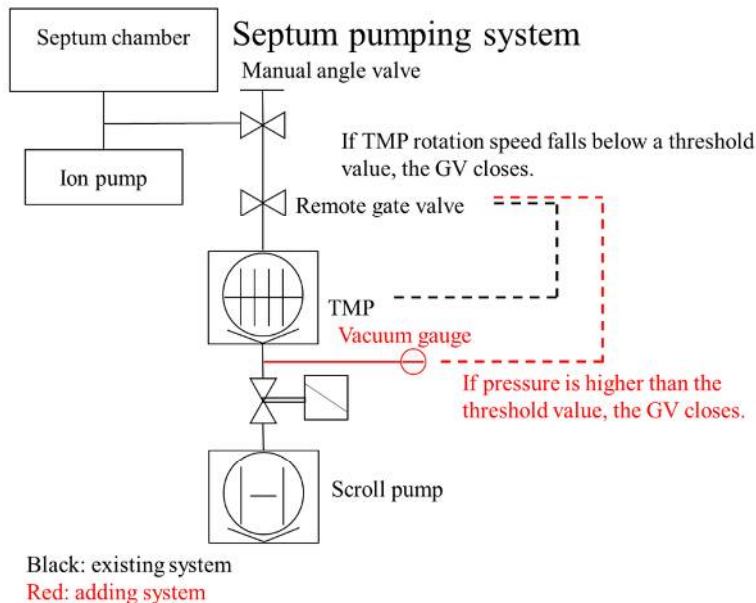


図6. The graph of long-term monitoring of changes in beam current and pressure after cooling water pump was stopped.



(a)

(b)

図7. (a) Drawing of septum pumping system, (b) photograph of overview of septum.

#### 4. まとめ

以下に箇条書きで、本論文のまとめを記述していく。

- SuperKEKBの真空制御システムの基本構成を示し、KEKB時と比べて、システム構成がシンプルになっていることを示した。
- SuperKEKB真空制御でのトラブル事例として、IPコネクタでの放電事象、真空系冷却水ポンプの停止事象、セプタム部のスクロールポンプ故障について紹介した。

#### 謝辞

SuperKEKB・Belleグループの方々には、支えられて本開発は進めていくことができました。また、故小田切淳一氏に、制御を一から教えていただいたことに、非常に感謝しています。

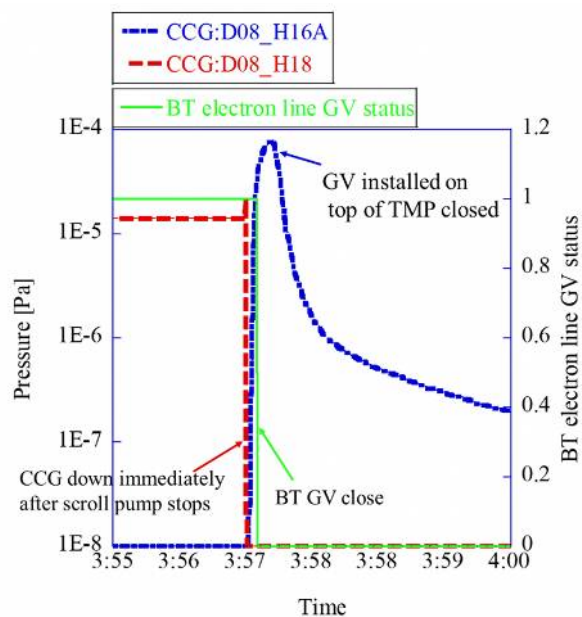


図8. Pressure and GV behavior when a scroll pump installed in the septum section fails.

#### 参考文献

- [1] Y. Ohnishi *et al.*, "Accelerator design at SuperKEKB". Progress of Theoretical and Experimental Physics, Volume 2013, Issue 3, March 2013, 03A011, <https://doi.org/10.1093/ptep/pts083>
- [2] Y. Suetsugu *et al.*, "Design and construction of the SuperKEKB vacuum system". Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films. 30. 031602-031602. 10.1116/1.3696683.

- [3] T. Ishibashi *et al.*, “Upgrade and Integrative Test of Control System for Vacuum Components in SuperKEKB”, journal of the Vacuum Society of Japan, 58-4 (2015).
- [4] Y. Funakoshi *et al.*, “The SuperKEKB Has Broken the World Record of the Luminosity”, JACoW IPAC 2022 (2022) 1-5, 13th International Particle Accelerator Conference (IPAC 2022), Bangkok, Thailand, 12 - 17 Jun 2022, pp.1-5, 10.18429/JACoW-IPAC2022-MOPLXGD1.
- [5] Y. Suetsugu *et al.*, “SuperKEKB vacuum system operation in the last 6 years operation”, Physical Review Accelerators and Beams. 26. 10.1103/PhysRevAccelBeams.26.013201.
- [6] <https://www.yokogawa.co.jp/solutions/products-and-services/control/control-devices/real-time-os-controller/rtos-cpu/rtos-linux-cpu/>
- [7] J. Odagiri *et al.*, “Application of EPICS on F3RP61 to accelerator control”, Proceedings of the 6th annual meeting of Particle Accelerator Society of Japan, (p. 1177). Japan, 2009.
- [8] <https://www.ni.com/ja/shop/compactrio.html>
- [9] <https://epics.anl.gov/>