

SuperKEKB 陽電子ダンピングリングの真空制御システム

VACUUM CONTROL SYSTEM OF POSITRON DAMPING RING FOR SUPERKEKB

照井真司^{#, A)}, 石橋拓弥^{A)}, 柴田恭^{A)}, 末次祐介^{A)}, 白井満^{A)}, 金澤健一^{A)}, 久松広美^{A)}, 芳藤直樹^{B)},
中村達郎^{A)}, 小田切淳一^{A)}

Shinji Terui^{#, A)}, Takuya Ishibashi^{A)}, Kyo Shibata^{A)}, Yusuke Suetsugu^{A)}, Mitsuru Shirai^{A)}, Ken-ichi Kanazawa^{A)},
Hiromi Hisamatsu^{A)}, Naoki Yoshifuji^{B)}, Tatsuro Nakamura^{A)}, Jun-ichi Odagiri^{A)}

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

^{B)} East Japan Institute of Technology Co., Ltd.

Abstract

The vacuum system of the positron damping ring (DR) for SuperKEKB is now under construction. The aluminum-alloy beam ducts have antechambers on both sides of a beam channel, but the aperture is limited by the small bore-sizes of magnets. The main pumps are cartridge-type non-evaporable getters (NEG) and ion pumps, of which locations are optimized for evacuating the small-conductance beam duct. The target pressure is less than 1×10^{-5} Pa at a nominal beam current. For the vacuum control system, the F3RP61 CPU of FA-M3 Programmable Logic Controller (PLC) are used as an Input Output Controller (IOC) running on the Experimental Physics and Industrial Control System (EPICS). After a preliminary test using the two cells of beam ducts in the laboratory, the interlock logic and the NEG-activation program was tested at the DR arc sections and successfully functioned. The control system will be completed by this fall, 2017.

1. はじめに

SuperKEKBはKEKB Bファクトリー(KEKB)の後継機となる高ルミノシティの電子・陽電子衝突型加速器であり、2016年2月から6月にかけて試運転が行われた[1]。SuperKEKBプロジェクトの目的は、ルミノシティをKEKBでの達成値の約40倍($8 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)に上げ、標準理論を越えた新しい物理を探索することである。この高いルミノシティを実現するために、SuperKEKBではナノ・ビーム方式[2, 3]と呼ばれる衝突方式が採用された。この方式では、衝突点でのビームサイズを垂直方向:60 nm、水平方向:10 μm まで絞り込む必要があり、光学口径とビーム寿命の減少は避けられない。そのため、入射ビームとしても低エミッタンスかつ強度の高いビームを供給する必要がある。陽電子ビームに関しては、入射ビームのエミッタンスを下げるためにダンピングリング(DR)[4]が入射器の

途中に新設される。DRの主なパラメーターをTable 1に示す。DRはレーストラック形の蓄積リングで、ビームエネルギーは1.1 GeV、最大蓄積電流は約70 mA、バンチ数は4、バンチ長は約7 mmである。アーク部で使用される主な偏向電磁石は曲率半径2632 mmと2967 mmであり、放射光の臨界エネルギーはそれぞれ0.93 keVと0.82 keV、リング一周あたりの放射光のパワーは7.2 kWである。

SuperKEKBでは現在2017年度末から予定されている本格的な物理実験を行うための改造作業が行われており、DR建設もその一環である。DRの運転開始は、2017年冬が予定されているためDRの真空システムの建設は、2017年冬に終わらせる。ここでは、DR真空システム、特にその制御システムの構成、準備状況と、ビームダクト排気試験の結果等を報告する。

2. 真空システムの概要

DRの全体構成をFig. 1に示す。DRは2つのアーク部(約110 m)と2つの直線部(約20 m)からなっており、

Table 1: Parameters of DR

Beam energy	1.1	GeV
Bunch number	4	
Circumference	135.5	m
Maximum stored beam current	70.8	mA
Maximum bunch charge	8	nC
Bunch length	6.53	mm
Bending radius	2632/2967	mm
Critical energy	0.93/0.82	keV
Total SR* power	7.2	kW

*Synchrotron Radiation

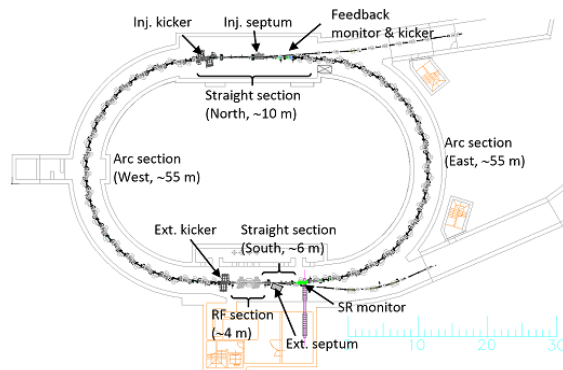


Figure 1: Overall view of DR.

[#] sterui@mail.kek.jp

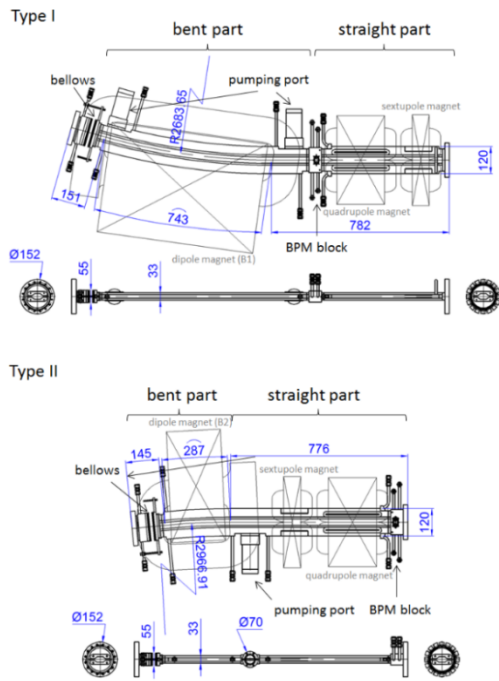


Figure 2: Beam ducts for the arc sections.

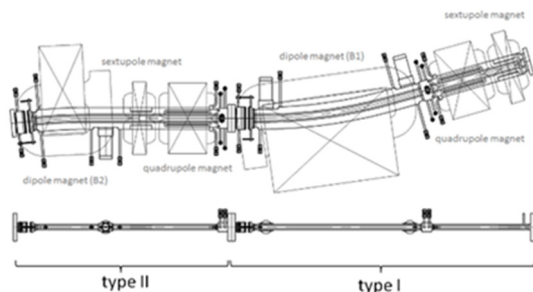


Figure 3: Layout of the DR beam ducts in one cell of the reverse-bend FODO lattice[4].

ビームダクトはゲート弁 (GV)で5つの領域に分割される。アーク部のビームダクトは、タイプの異なる偏向電磁石毎に2種類 (Type Iと Type II)あり、それぞれのビームダクトは、各一台ずつの偏向電磁石、四極電磁石、六極電磁石内に設置される。各タイプのアーク部用ビームダクトを Fig. 2に、1セル分のレイアウトを Fig. 3にそれぞれ示す[5]。2セルで6つのポンピングポートがあり、そのうちの1つのポンピングポートに、イオンポンプ [45 l/sec]と L型弁が取り付けられている。L型弁には、粗排気 (ターボポンプとスクロールポンプ) セットが取り付け可能になっている。粗排気は、加速器運転中には取り外す。その他の5つのポンピングポートにはカートリッジ型の NEG ポンプ C50-ST707 が取り付けられている。排気はこの NEG ポンプとイオンポンプによって行われ、加速器運転中の平均到達圧力の目標値は 1×10^{-5} Pa 以下である。

3. 真空制御システムの構成

制御すべき真空機器は、GV、真空スイッチ (VSW)、イオンポンプ電源、NEG ポンプ活性化電源、CCG、温度計、冷却水流量計、残留ガス分析計、ターボポンプ等である。

SuperKEKB 全体が EPICS [6]をベースにした制御システムを構築しているので、真空制御でも EPICS を用いたシステム設計を行った。Operator Interface (OPI) と IOC、IOC と IOC の間の通信には、EPICS の通信プロトコル Channel Access (CA)を使用している。DR 真空制御システムの構成を Fig. 4 に示す。SuperKEKB のメイン・リングと同様に[7, 8]、IOC として、横河電機社製の FA-M3 PLC の CPU モジュールである F3RP61 を採用した[9]。F3RP61 は OS として Linux を採用しているため、簡単なデバイスドライバサポートを作成するだけで IOC として利用可能である。各種真空制御アプリケーションはこの IOC 上で実行している。また F3RP61 は従来型のシーケンス CPU とマルチ CPU 構成を採ることが可能であり、その場合、両者はベース・モジュール (バックレーン) を介して通信する。本真空制御システムでのインターロック・ロジックについてはシーケンス CPU 上で堅牢性が高いラダープログラムで実装されている。

Figure 5 に、DR の制御室ラックに設置した PLC の写真を示す。インターロック・ロジックでは、イオンポンプ電源と NEG ポンプ活性化電源と Cold cathode gauge (CCG)電源の印加許可、GV 開閉等を行っている。

アナログ信号については、粗排気セットからのチャンネル数が多いため、高密度の入出力モジュールが必要となる。このため 32 チャンネル/モジュールの Analog to Digital Converter (ADC)を持つ National Instruments 社の CompactRIO (cRIO)を採用した。cRIO には Channel Access Server と呼ばれる機能があり、Device/Driver Support を作成することなく Channel Access Client (IOC 側)との通信が可能となる。

DR では、ほとんど真空計を用いず、イオンポンプの放電電流から真空値を計算する。この電源では 1×10^{-7} Pa 程度までの低い圧力を測定可能であることが求められる (放電電流の測定精度は 10 nA)。イオンポンプ電源は、上の条件を満たす Gamma 社製の QPCe を採用した。この電源は、1台で最大 4 チャンネルを制御できるので、ラック内のスペースが節約できることと、シャーシの数を少なくできるため費用が抑えられることがメリットである。QPCe の外部との通信インターフェースは RS232C が安定であったため、制御用のネットワークから MOXA 社のイーサネット・シリアル変換機 NPort5610-16 を介して FA-M3 コントローラと接続した。

DR 真空制御システムのユーザインターフェースについては、Control System Studio (CSS)を使用して開発を行った。Figure 6 に、DR での OPI の一部を示す。

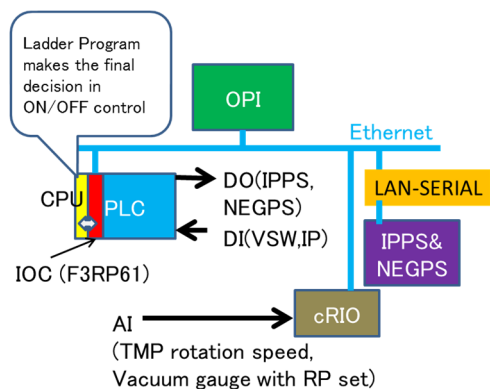


Figure 4: Configuration of DR vacuum control system.

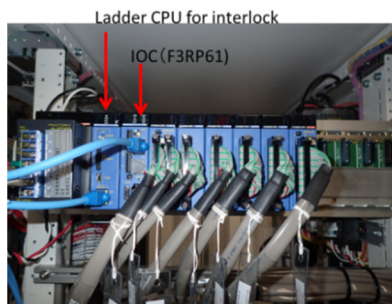


Figure 5: PLC of DR vacuum control system.

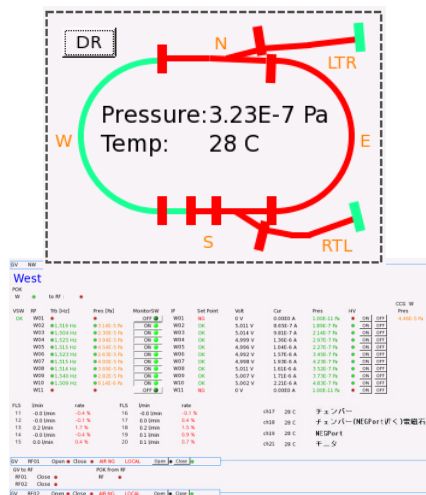


Figure 6: Control panel for various vacuum components of DR.

4. 排気試験

4.1 DRでのNEGポンプ活性化時のインターロック

DRではマグネットのボア半径の狭さから、ビームダクトのコンダクタンスが小さくなっている。また、スペースの問題等から、カートリッジ型NEGポンプC50-ST707を使用している。コンダクタンスが小さいので、NEGポンプ活性化中、NEGポンプ付近の圧力が高くないように制御しつつ、放出されるガスを粗排気装置で排気するためには、活性化時間を長くせざるを得ない。実際、活性化時間は、5日間以上にも及ぶ。そのため、NEGポンプ活性

化電源は、シーケンス制御を行い、ガスが短時間で大量に出てこないようにしている。また、ガス放出量が想定以上となり圧力が閾値より悪化した場合は、ガス放出量の増加を抑えるため、その時点での電圧出力状態を自動的に維持するポーズ機能も実装している。これに併せて、ターボポンプの情報も監視しておき、エラー情報が来た場合は、NEGヒータ活性化電源の出力を止める機能も実装している。Figure 7に、インターロック・ロジックダイアグラムを示す。

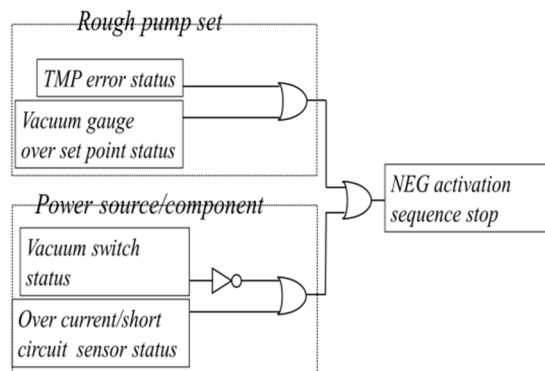


Figure 7: Interlock logic diagram for NEG activation.

4.2 2セルでの排気試験

NEGポンプ活性化時のシーケンスパターンの確立や活性化時のNEGポンプがついているポンピングポートの温度の確認等のために、実験室で2セルでの排気試験を行った。Figure 8に、2セルでの排気試験のシステム図と実験時の写真を示す。Figure 9に、最初にNEGポンプ活性化を行った時の圧力の時間変化を示す。青線は、ビームチャンネル部の圧力である。緑線は、ポンピングポートの温度である。最初の試験時、高い圧力で活性化した結果、Fig. 10に示すようにNEGポンプが変色した。この原因は、NEGポンプ位置ではなく、粗排気装置近くのビームチャンネル部の圧力値を基準に活性化をしたことにある。Figure 9中の赤丸の場所で、ポンピングポート内の圧力がNEGポンプの許容圧力範囲である 1×10^{-1} Paを超えてしまったと推測している。Figure 11に示す圧力モニターチャンバーを用いて圧力を測定したところ、NEGポンプ活性化中には、NEGポンプから出てくるガスにより、TMP上流の圧力よりも、ポンピングポートの圧力は20~30倍になることがわかった。この結果から、ポンピングポートの圧力が 1×10^{-3} Paを超えないように電源を制御するように、4.1節で述べた自動的にポーズがされる機能を加えた。この試験により、NEGポンプ活性化電源出力パターンを確立した。活性化時のポンピングポートの温度が近接しているマグネットのコア部に影響を及ぼさないことも確認した。また、ビームチャンネル部の圧力とイオンポンプで測っている圧力の差を測定できたので、運転中のビームチャンネル部の圧力を精度よく予測することが可能になった。

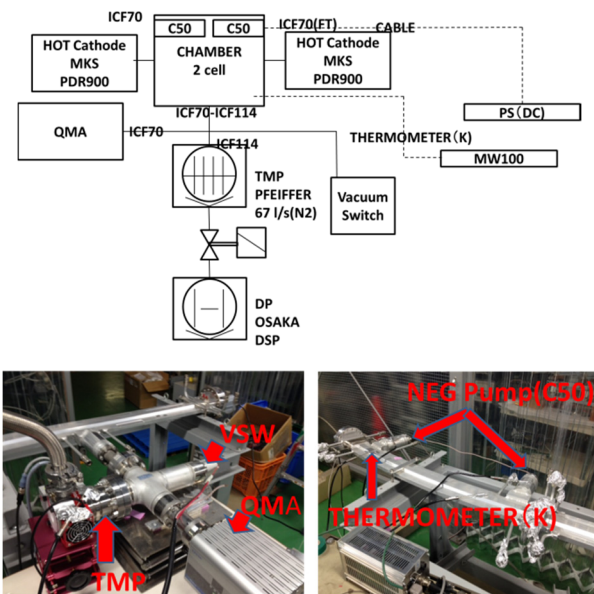


Figure 8: System layout and photograph of the pumping test using 2 cells of the DR beam ducts.

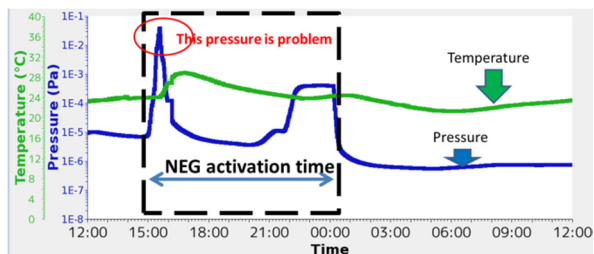


Figure 9: Pattern of NEG activation sequence when the NEG elements were damaged.

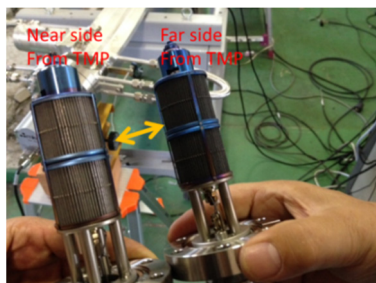


Figure 10: Discoloration of NEG pump after activation under high pressure.

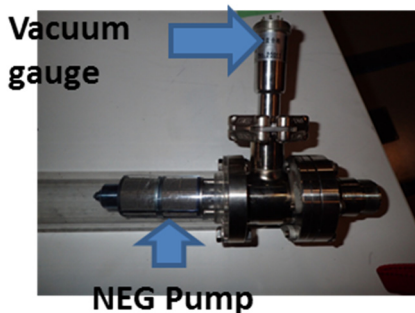


Figure 11: Special chamber measuring the pressure at NEG pumping port.

5. 真空立ち上げ試験

2017 年初めから、西アーク部で真空立ち上げ試験を行った。真空立ち上げ試験時には、一部ビームパイプがまだつながっていない状態で行われた。このためイオンポンプは、ビーム運転時には11台ある予定であるが、試験時は9台で行っている。立ち上げには、十分に時間をかけて粗排気装置で圧力を低くした後に、1週間位かけて NEG ポンプのガス出しを行い、1週間以上かけて NEG ポンプ活性化を終えた。ガス出しとは、活性化に先立ち、NEG ポンプの表面についているガスを活性化温度以下で温めて放出させることである。ガス出しをすることで、活性化時に NEG ポンプ自身から出てくるガスが減り、よりポンプの性能を生かすことができる。Figure 12 に、立ち上げ試験時の圧力のトレンドを示す(1 台イオンポンプの電流測定が不調であったため、トレンドでは8台分をプロットした)。また、活性化後のガスは、主に水素と水になっていることが残留ガス分析計からわかった。

この試験で、イオンポンプで測っている圧力は 1×10^{-7} Pa 以下を実現した。

6. まとめ

SuperKEKB 陽電子 DR の建設が現在進行中である。今回我々は、DR の真空制御システムを構築するために 2 セルのビームダクトを使って予備試験等を行い、その経験を活かして安全なインターロックシステムや運用しやすいプログラムを実装した。また、構築した真空制御システムを用いて、DR 西アーク部で真空立ち上げ試験を行い、成功した。

今後、真空冷却水制御システムの開発などを行うと共に、2017 年冬の DR 運転開始を目指し DR 全体の真空立ち上げを行う予定である。

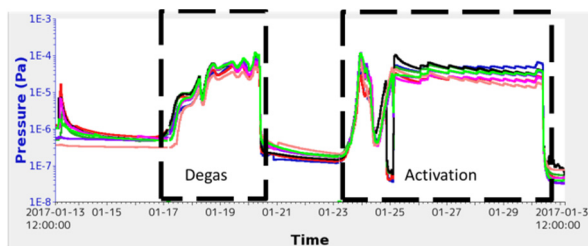


Figure 12: Trends of measured pressures during the NEG activation test at DR arc section.

謝辞

本報告にあたり、KEKB の BT グループ、モニターグループ、RF グループの皆様には、多くの支援を頂きました。また、ユーサと秀和電気の皆様にも支えていただきました。感謝いたします。

参考文献

[1] Y. Funakoshi *et al.*, "BEAM COMMISSIONING OF SuperKEKB", Proceedings of IPAC2016, Busan, Korea, May 8-13, 2016, p. 1019;
<http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/ipac2016/papers/tu>

oba01.pdf

- [2] P. Raimondi, “NEW DEVELOPMENTS IN SUPER B-FACTORIES” Proceedings of PAC07, Albuquerque, New Mexico, NMZAKI02, USA, 25-29 June, 2007, p.32;
<http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/p07/PAPERS/MOZAKI02.PDF>
- [3] Y. Ohnishi *et al.*, “SuperKEKB ビーム光学系の設計”, Proceedings of the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, TUPS020, Tsukuba, Japan, 1-3 Aug, 2011, p.880;
http://www.pasj.jp/web_publish/pasj8/proceedings/poster/TUPS020.pdf
- [4] M. Kikuchi *et al.*, “DESIGN OF POSITRON DAMPING RING FOR SUPER-KEKB”, Proceedings of IPAC’10, TUPEB0540, Kyoto, Japan, 23-28 May, 2010, p.1641;
<http://epaper.kek.jp/IPAC10/papers/tupeb054.pdf>
- [5] K. Shibata *et al.*, “Vacuum system of positron damping ring for SuperKEKB”, Journal of Vacuum Science & Technology A: 35, 03E106 (2017)
- [6] <http://www.aps.anl.gov/epics/>
- [7] N. Yoshifuji *et al.*, “SuperKEKB での真空制御ソフトウェアの現状”, Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, TUP090, Chiba, Japan, 8-10 Aug, 2016.
- [8] T. Ishibashi *et al.*, “SuperKEKB 真空機器制御システムと立ち上げ試験”, J.VAC. Soc. Jpn., 58(2015) 126.
- [9] J. Odagiri *et al.*, “EPICS ON F3RP61 FOR SUPERKEKB ACCELERATOR CONTROL”, Proceedings of PASJ’14, Aomori, Japan, 9-11 Aug, 2014.