

SuperKEKB 陽電子ダンピングリング真空システムのコミッショニング

COMMISSIONING OF VACUUM SYSTEM OF POSITRON DAMPING RING FOR SUPERKEKB

柴田恭^{#, A, B)}, 末次祐介^{A, B)}, 石橋拓弥^{A, B)}, 白井満^{A)}, 照井真司^{A)}, 金澤健一^{A)}, 久松広美^{A)}
Kyo Shibata^{#, A, B)}, Yusuke Suetsugu^{A, B)}, Takuya Ishibashi^{A, B)}, Mitsuru Shirai^{A)}, Shinji Terui^{A)}, Ken-ichi Kanazawa^{A)},
Hiromi Hisamatsu^{A)}

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

^{B)} The Graduate University for Advanced Science (SOKENDAI)

Abstract

A new damping ring (DR) was constructed in an upgraded injector system for SuperKEKB. The commissioning of the DR commenced in February and ended in July, 2018. Vacuum scrubbing in the arc sections progressed smoothly, and a beam lifetime of 1000 s was obtained with a stored beam current of 10 mA, when the beam dose was 0.7 Ah. The residual gas composition during the beam operation was typical of that expected for a vacuum system pumped by non-evaporable getter (NEG) pumps. The photon stimulated desorption (PSD) rates of the beam pipe, which were roughly estimated using Molfow+, decreased to 2.2×10^{-4} molec.·photon⁻¹ for H₂ and 2.3×10^{-5} molec.·photon⁻¹ for CO when the beam dose was 1.9 Ah which corresponds to a photon dose of 9.9×10^{22} photons·m⁻¹.

1. はじめに

KEK つくばキャンパス内にある SuperKEKB 加速器[1]は、KEKB B ファクトリー (KEKB、1998 年から 2010 年まで運転) を高度化改造した高ルミノシティ電子・陽電子コライダーである。SuperKEKB プロジェクトの目的は、ルミノシティを KEKB 実績値の約 40 倍 (8.0×10^{35} cm²·s⁻¹) に増強し、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・ビーム方式と呼ばれる衝突方式が採用されている。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、その影響で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り、陽電子に関しては入射器の途中に新設されたダンピングリング

(DR)[2]によりビームの低エミッタンス化が計られる。DR の主なパラメータを Table 1 に、外観を Figure 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 70.8 mA、最大蓄積バンチ数は 4、バンチ長は約 7 mm、ビーム滞在時間は 40 ms 以上である。

DR の建設は 2018 年 1 月末に完了した。DR のコミッショニングは、まずは DR 単独運転で 2 月 8 日から開始され、3 月 27 日からは SuperKEKB 陽電子リングへのビーム供給が行われた。その後、DR の運転は SuperKEKB の Phase-2 運転[3]終了と共に 7 月 17 日に一旦終了した。ここでは、このコミッショニング期間中の DR 真空システムの状況について報告する。

2. 真空システムの概要[4]

DR の真空システムはゲート弁によって 5 つの区間に分けられている。以下に各区間の名称と長さ、及びその区間に設置されている主な機器を示す。

Table 1: Design 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 synchrotron radiation power	7.2	kW

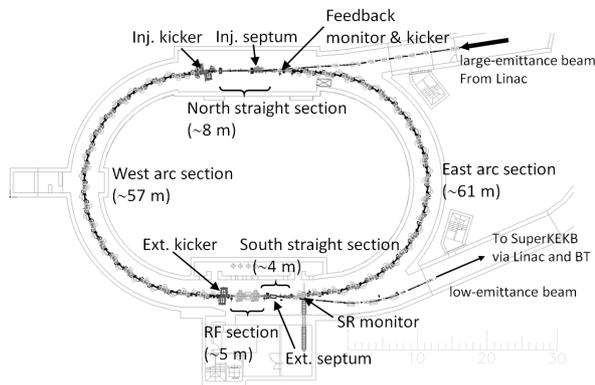


Figure 1: Racetrack-shaped positron DR. The vacuum system was divided into 5 sections by gate valves.

[#] kyo.shibata@kek.jp

- 東アーク部(約 61 m):放射光モニタ、電流モニタ、フィードバックモニタ及びキッカー
- 西アーク部(約 57 m):入射キッカー、出射キッカー
- 北直線部(約 8 m):入射セプタム
- 南直線部(約 4 m):出射セプタム
- RF 空洞部(約 5 m):RF 加速空洞

なお、RF 空洞部の真空システムは RF 空洞グループにより管理されており、この報告には含めない。

DR の大部分を占めているのは東西の 2 つのアーク部であり、その割合は全体の約 87 % である。アーク部のビームパイプにはシンクロtron放射光 (SR、臨界エネルギー:0.8~0.9 keV、設計電流蓄積時のリング一周あたりの放射光パワー:7.2 kW) が照射される。ビーム運転中の圧力上昇の主な原因は、SR 照射による光刺激脱離がもたらすガス放出である。アーク部では Reverse-bend FODO ラティスが採用されており、SR はリング外側だけではなく内側にも照射される。ラティスの 1 セルには 2 種類のアルミ合金製ビームパイプ (Type-I と II) が使用されている。Figure 2 にアーク部 1 セルのビームパイプとその断面形状を示す。アーク部のビームパイプは、放射光の熱負荷軽減や電子雲不安定性抑制の対策として有効なアンテナチャンバーをビームチャンネルの両側に有している。一方、SR の直接照射のない直線部では、ビームパイプはアンテナチャンバーを有していない。

ビームパイプの排気には、主ポンプとして非蒸発型ゲッターポンプ (NEG ポンプ) を、副ポンプとしてイオンポンプ (IP) を使用している。アーク部の Type-I ビームパイプには 2 台の NEG ポンプ (C50-ST707、SAES GETTERS Co. Ltd.、活性化直後の一酸化炭素 (CO) に対する実効排気速度 $0.014 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) が設置される。一方、Type-II ビームパイプには 1 台の NEG ポンプまたは 1 台の IP (CO に対する実効排気速度 $0.008 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) が交互に設置される。なお、IP はビームパイプにマニホールドを介して接続されており、大気圧から排気を行う際にはこのマニホールドにターボ分子ポンプとスクロールポンプから成る粗排気セットが L 型弁を介して接続される。圧力は、約 6 m 毎に設置されている IP の放電電流を用いて測定する。また、それぞれの区間には、各 1 台ずつの冷陰極電離真空計 (CCG) も IP 用のマニホールドに設置さ

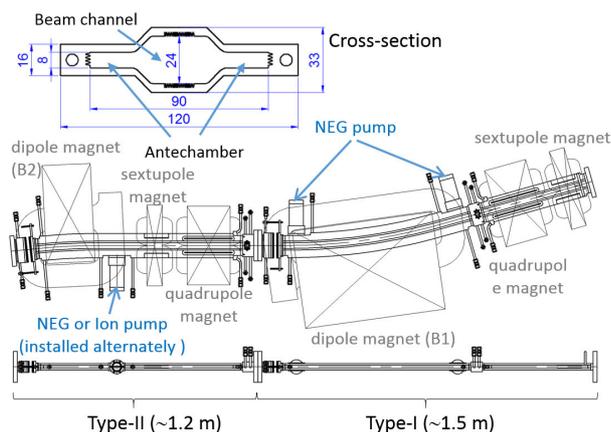


Figure 2: Two types of beam pipes (Type-I and Type-II) in one cell of the arc sections and their cross-section.

れている。東アーク部には、四極子形質量分析計 (QMA) が設置されており、残留ガスの成分分析が可能である。

3. 建設と真空立ち上げ

3.1 ビームパイプ据付

DR トンネル内へのビームパイプ据付作業は 2016 年 5 月から断続的に行われ、2018 年 1 月上旬に終了した。ほぼ全てのビームパイプには、電子雲によるビーム不安定性の対策として窒化チタン (TiN) コーティング (200 nm) が施され、ビームパイプ内面の 2 次電子放出率低減が図られている。また、ビームパイプはトンネル内に設置する前に実験室でベーキング (150 °C、24 時間) による脱ガス処理が施された。なお、ビームパイプ設置後にトンネル内でのベーキングは行っていない。

3.2 真空立ち上げ

真空立ち上げ作業は、ビームパイプ設置作業が終了した区間ごとに順次行われた。真空立ち上げは、「粗排気セットによる大気圧からの粗引き」から始まり、次いで「イオンポンプによる排気」、「NEG ポンプの活性化」という順番で行われる。例として Figure 3 に粗引き開始から NEG ポンプ活性化終了までの東アーク部における排気過程を示す。青い点は粗排気セットに設置された真空計で計測した圧力、赤い点は IP で計測した圧力 (IP 圧力) の平均値、緑の点は NEG 活性化のためにヒーターに通電した電流をそれぞれ示している。圧力が $1 \times 10^{-4} \text{ Pa}$ 以下になった時点でイオンポンプによる排気を開始し、更に圧力が $2 \times 10^{-5} \text{ Pa}$ 程度まで下がった時点で NEG 活性化を開始した。NEG 活性化の終了後に、粗排気セットとビームパイプの間にある L 型弁を閉め、粗排気セットは取り外される。ビームパイプのコンダクタンスが小さいため、NEG 活性化を開始できる圧力まで排気するには 2~3 日を要する。NEG 活性化は、活性化中の圧力が $\sim 2 \times 10^{-4} \text{ Pa}$ を超えないようにヒーターへの投入パワーを制御しながら行われており、活性化開始から終了まで約 2 週間を要した。活性化終了後は、IP 圧力は 10^{-8} Pa 台に到達している。

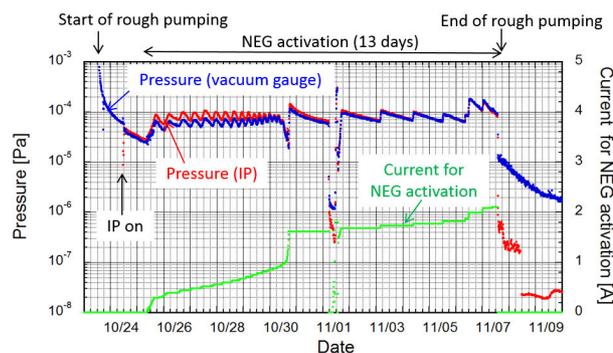


Figure 3: History of pressures obtained by vacuum gauge and IP and the current of heaters for NEG activation from the start of the evacuation process until the end of NEG activation in the east arc section.

4. コミッショニング状況

4.1 ビーム蓄積時の圧力

DR のコミッショニングは2018年2月8日に開始され、3月26日までは SuperKEKB への入射を行わない DR 単独運転によるビーム調整が行われた。引き続き3月27日からは SuperKEKB 陽電子リングへのビーム供給が開始され、DR の運転は SuperKEKB の Phase-2 運転と共に7月17日に一旦終了した。Figure 4 にこの期間の DR 蓄積ビーム電流と各区間の IP 平均圧力、及び RF 空洞部を除く全周の IP の平均圧力(全周平均 IP 圧力)を、Figure 5 に積分蓄積電流(ビームドーズ)をそれぞれ示す。3月26日までの DR 単独運転では、装置や施設の不具合による2度の大きな運転中断があったが、コミッショニングは概ね順調に進んだ。コミッショニング開始当初は、蓄積電流が ~ 1.5 mA で全周平均 IP 圧力は 1×10^{-5} Pa を超えた。しかし、圧力は急速に減少し、全周平均 IP 圧力はすぐに 1×10^{-6} Pa 以下となった。その後、コミッショニングが進むにつれてビーム電流は徐々に増大していったが、圧力は徐々に減少しており、ビームによる真空焼き出しが進行していることが確認できる。2月28日にはビームドーズは約0.7 Ah に達した。なお、この時点では蓄積電流11 mA における全周平均 IP 圧力は約 1.5×10^{-6} Pa であった。

その後の SuperKEKB へのビーム供給を伴う運転では、DR の蓄積電流、蓄積バンチ数、ビーム滞在時間、ビーム繰り返し周期などの運転条件は SuperKEKB の運転状

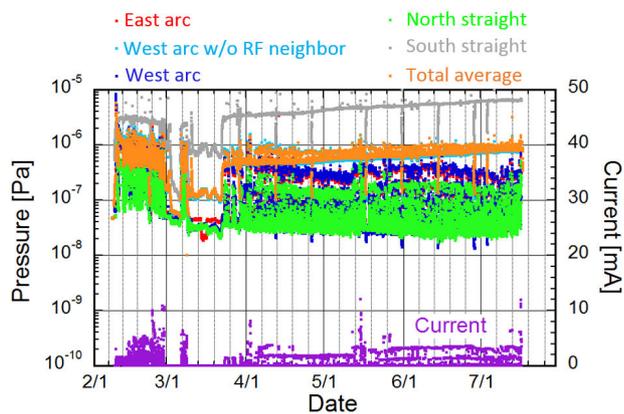


Figure 4: History of the average pressures measured by IPs of each section and the stored beam current.

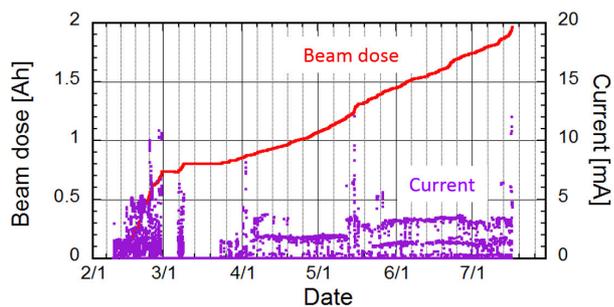


Figure 5: History of the beam dose and the stored beam current.

況により制限される。そのため、ビームドーズの増加率は大きく減少し、運転が停止した7月17日9時におけるビームドーズは1.97 Ah であった。この期間に全周平均 IP 圧力と西アーク部、及び南直線部の平均 IP 圧力が徐々に上昇しているが、これは RF 空洞部の圧力上昇が原因と考えられる。RF 空洞部は西アーク部と南直線部の間にあり、RF 空洞部の圧力が上昇するとその周辺の圧力も上昇する。その結果、全周平均 IP 圧力も上昇する。実際、RF 空洞部に一番近い IP を除いた西アーク部の平均 IP 圧力は、東アーク部と同様にこの期間中も減少している。なお、運転停止間際のビームドーズ1.9 Ah の時点では、蓄積電流11 mA における全周平均 IP 圧力は約 1.4×10^{-6} Pa であった。なお、今季の運転の最大蓄積電流は運転停止前日に記録された12 mA であったが、このときも真空システムに特に異常は見られなかった。

4.2 真空焼き出し状況

よく知られているように、ビームパイプ内表面の光刺激脱離係数 η [molecules \cdot photon $^{-1}$]は、ビームパイプに照射された SR の光子ドーズ(単位長さ当たり照射された光子数の積分値 [photons \cdot m $^{-1}$])の増加と共に減少する。従って、ビームパイプ内の圧力は、ビームドーズと共に減少する。(いわゆる「ビームによる真空焼き出し」。) Figure 6 にアーク部の平均 IP 圧力をビーム電流で規格化した p/I [Pa \cdot mA $^{-1}$]のビームドーズに対する変化の様子を示す。SR による真空焼き出しはアーク部で顕著であるため、ここでは2つのアーク部のデータのみを示している。ただし、西アークでは、RF 区間に隣接している IP を抜いた10台の IP の平均値を使用して求めた p/I を表示している。これは、西アーク部の RF 空洞部に隣接している IP 圧力は RF 空洞圧力の影響で他と比較して桁以上高い圧力を示しており、この IP を平均に含めると焼き出しの効果が見え難くなるためである。なお、図の上側横軸には光子ドーズ(1 Ah が 5.2×10^{22} photons \cdot m $^{-1}$ に相当)を示している。この図から、アーク部の真空焼き出しはこれまで順調に進行していることが分かる。0.7 Ah と1.

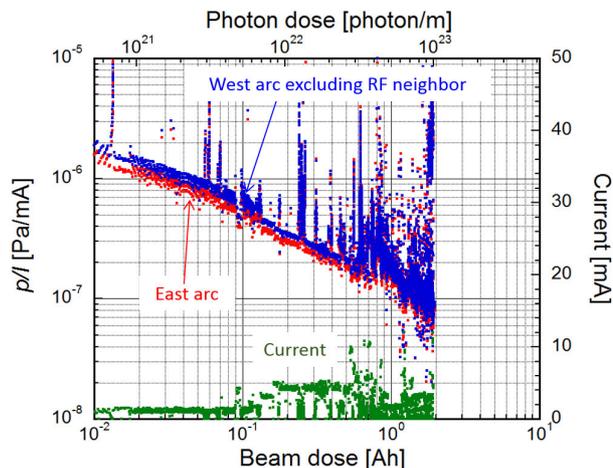


Figure 6: Average pressures normalized by a unit beam current (p/I [Pa \cdot mA $^{-1}$]) for two arc sections (East and West) and the stored beam current as a function of the beam dose (lower axis) and the photon dose (upper axis).

3 Ah あたりで一旦 p/I が増加しているのは、以下に示すように、ここでビームの最大滞在時間が変わったためであると考えられる。LER 入射が始まる 0.7 Ah 以前の DR 単独運転時には、最大滞在時間を 1 s 以上で運転することが多かった。しかし、LER 入射が始まった 0.7 Ah 以降では、LER 入射時の DR 最大滞在時間は 200 ms と設定されており、その後 1.3 Ah の時に最大滞在時間は更に 80 ms に狭められた。DR では滞在中にビームサイズが急激に小さくなる。そのため、最大滞在時間が長いと、サイズが小さいビームが滞在している時間の割合が大きくなり、SR が狭い範囲に照射される時間の割合が大きくなる。一方、最大滞在時間が短くなると、サイズが大きいビームが滞在している時間の割合が大きくなるため、SR が広い範囲に照射されている時間の割合が大きくなる。そのため、最大滞在時間を短くすると P/I は一旦増加するが、真空焼き出しが進行するにつれて再び減少すると考えられる。

4.3 ビーム寿命

Figure 7 にビームドーズ 0.7 Ah (DR 単独運転終了直前) と 1.2 Ah のときのビーム寿命と蓄積電流の相関を示す。どちらの場合も 10 mA 蓄積時のビーム寿命は目標値である約 1000 s となっており、アーク部の焼き出しが進行したことによるビーム寿命の増加は見られなかった。

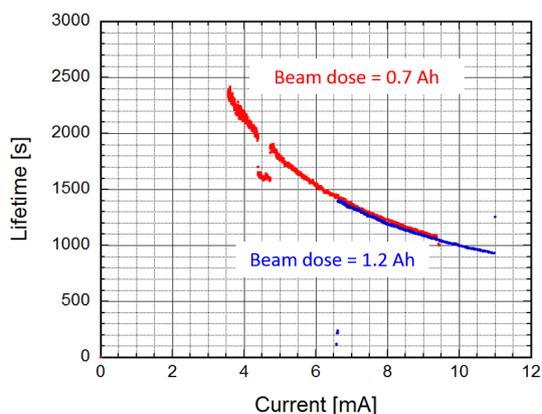


Figure 7: Beam lifetime as a function of the stored beam current at the beam doses of 0.7 Ah and 1.2 Ah.

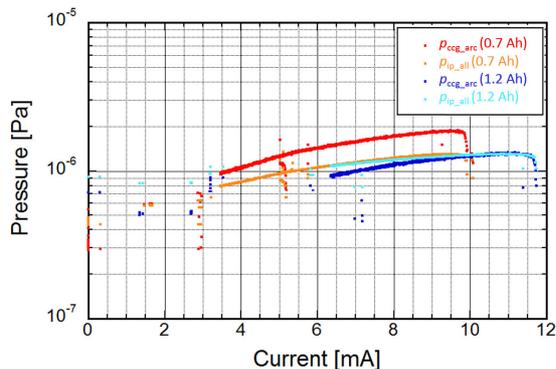


Figure 8: Average pressures measured by CCGs of the arc sections ($p_{\text{ccg_arc}}$) and those measured by IPs of whole ring ($p_{\text{ip_all}}$) as a function of the stored beam current at the beam doses of 0.7 Ah and 1.2 Ah.

Figure 8 に Figure 7 のデータを取った時の圧力とビーム電流の相関を示す。なお、ここでは圧力として、両アーク部の CCG 圧力の平均値 ($P_{\text{ccg_arc}}$) と全周平均 IP 圧力 ($P_{\text{ip_all}}$) を示した。なお、アーク部の CCG は RF 区間から十分離れており、RF 区間の圧力の影響は CCG 圧力には見られない。これより、アーク部では真空焼き出しが進行しているが、全周平均 IP 圧力では真空焼き出しによる圧力減少が見られないことが分かる。これは、全周平均 IP 圧力は、RF 区間両側の IP 圧力の寄与が大きく、RF 空洞部の圧力悪化の効果とアーク部の真空焼き出しの効果と相殺しているためだと考えられる。これより、アーク部の焼き出しが進む前はビーム寿命に対するアーク部の圧力の寄与が大きかったが、焼き出しがある程度進行した後は、ビーム寿命に対する RF 空洞部の圧力の寄与が大きくなってきていると考えられる。

4.4 残留ガス

コミッション中の残留ガス成分は、東アーク部に設置した QMA により観測された。Figure 9 にビームドーズが 0.7 Ah と 1.2 Ah のときのマススペクトルを示す。ビーム蓄積中の主な残留ガス成分は、水素 (H_2)、メタン (CH_4)、CO、二酸化炭素 (CO_2) となっており、NEG を主ポンプとして使用した場合の典型的なパターンとなっている。

残留ガスのマススペクトルと CCG 圧力から、東アーク部におけるビームパイプ中の H_2 分圧と CO 分圧を評価した。なお、ここでは残留ガスは H_2 、 CH_4 、水 (H_2O)、CO、 CO_2 でのみ構成されていると仮定し、各気体に対する CCG の比感度係数はそれぞれ 0.4 (H_2)、1.5 (CH_4)、1.0 (H_2O)、1.0 (CO)、1.4 (CO_2) とした。各ビームドーズ、蓄積ビーム電流における CCG 圧力、 H_2 分圧、及び CO 分圧を Table 2 に示す。

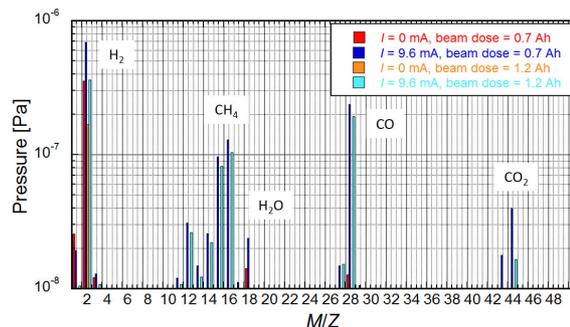


Figure 9: The mass spectra of the residual gases with beam (9.6 mA) and without beam (0 A) at the beam doses of about 0.7 Ah and 1.2 Ah.

4.5 光刺激脱離係数 η の評価

ビームパイプの光刺激脱離係数 η を評価するために、ビームパイプ内の圧力分布を圧力分布計算ソフトウェア Molflow+[5] を用いて計算した。計算モデルの特徴と計算条件を以下に示す。

- Type-I と Type-II を連結したモデルを作成し、アーク部 1 セル分の圧力分布を計算
- ビームパイプの曲げ部分は、真つすぐに簡略化してモデルを作成

Table 2: Pressures of H₂ and CO Estimated Using the Mass Spectrum and the Total Pressure Measured by CCG

Beam dose [Ah]	Photon dose [photons·m ⁻¹]	Current [mA]	Pressure at CCG [×10 ⁻⁶ Pa]		
			<i>p</i> _{ccg}	<i>p</i> _{H2}	<i>p</i> _{CO}
0.6	3.1×10 ²²	5.9	1.7	1.2	0.34
0.7	3.6×10 ²²	8.9	1.9	1.4	0.46
1.2	6.3×10 ²²	6.0	1.1	0.67	0.28
1.3	6.5×10 ²²	8.9	1.3	0.69	0.36
1.9	9.9×10 ²²	6.1	0.86	0.48	0.25

- Type-I には 2 台の NEG ポンプ (0.05 m³·s⁻¹) を、Type-II には 1 台の IP (0.04 m³·s⁻¹) を設置
- SR をビームパイプの両側面に均等に照射
- 残留ガスの分子数: 2 (H₂) または 28 (CO)
- 熱的ガス放出速度: 1×10⁻⁹ Pa·m³·s⁻¹·m⁻²
- ビームパイプの温度: 25 °C
- 蓄積電流: 6.0 または 8.9 mA
- η : 1×10⁻⁵ ~ 1×10⁻³ molec.·photon⁻¹
- ビームチャンネル部、IP ポート、CCG ポートの平均圧力を計算

計算で求めた CCG ポートにおける圧力(縦軸)と η (横軸) の関係を Figure 10 に示す。この図を用いて、Table 2 に示したビームドーズと蓄積電流におけるビームパイプの水素及び一酸化炭素に対する η を見積もった。その結果を Figure 11 に示す。どちらの気体に対しても、 η はビームドーズと共に減少しており、運転停止直前(ビームドーズ 1.9 Ah)における η は、蓄積電流 8.9 mA で 2.2×10⁻⁴ molec.·photon⁻¹ (H₂) と 2.3×10⁻⁵ molec.·photon⁻¹ (CO) であった。

5. まとめ

SuperKEKB LER へ低エミッタンスビームを入射するために、入射器の途中に DR が新設された。DR ではビームパイプのコンダクタンスが小さいため、NEG ポンプの活性化を含めた真空の立ち上げに 2 週間以上を要した。DR の最初のコミッショニングは 2018 年 2 月から 7 月にかけて行われ、真空システムには特に問題がないことが確認された。なお、今期の運転における最終的なビームドーズは 1.97 Ah、最大蓄積電流は 12 mA であった。ビーム蓄積時のアーク部の残留ガス成分は、NEG を主ポンプとして使用した場合の典型的なもの (H₂, CH₄, CO) であった。コミッショニング中にアーク部の真空焼き出しは順調に進行し、ビームドーズ 1.9 Ah (光子ドーズ 9.9×10²² photons·m⁻¹) での η は、H₂ に対しては 2.2×10⁻⁴ molec.·photon⁻¹ まで、CO に対しては 2.3×10⁻⁵ molec.·photon⁻¹ まで減少していた。ビーム寿命は、ビームドーズ 0.7 Ah の時点で 10 mA 蓄積時に目標値である約 1000 s が得られた。しかし、その後ビームドーズが増えても、ビーム寿命は延びなかった。この間、アーク部の圧力は減少しているので、ビーム寿命は RF 空洞部とそ

の周辺の圧力に大きく依存していると考えられる。これまでのところビーム寿命 1000 s は運転上支障のない値であるが、今後蓄積電流を増やしたときにどうなるかについては引き続き注意が必要である。

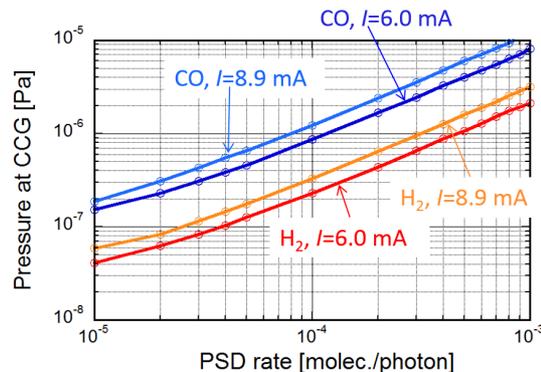


Figure 10: Pressures of H₂ and CO at the CCG location calculated by Molflow+ for two cases of beam currents (6.0 mA and 8.9 mA) as a function of assumed PSD rate.

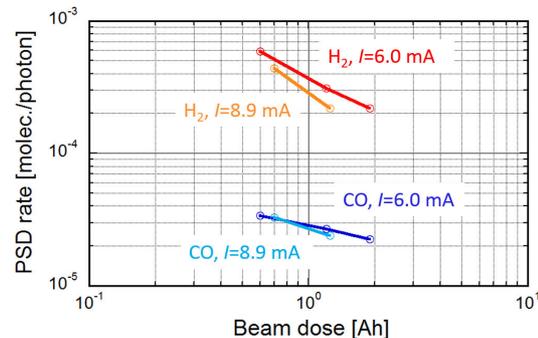


Figure 11: Estimated PSD rate for H₂ and CO for two cases of beam currents (6.0 mA and 8.9 mA) as a function of the beam dose.

謝辞

DR の RF 空洞部の圧力に関しては、KEKB RF グループの阿部哲郎氏に情報を提供していただきました。また、DR 真空システムについては、KEKB 加速器グループ、SuperKEKB コミッショニンググループの皆様によくの助言とご協力をいただきました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- [1] <http://www-superkekb.kek.jp>
- [2] M. Kikuchi *et al.*, "DESIGN OF POSITRON DAMPING RING FOR SUPER-KEKB" in Proceedings of IPAC'10, Kyoto, Japan, May 2016, pp. 1641-1643.
- [3] Y. Ohnishi, "SuperKEKB フェーズ2におけるコミッショニングの成果", Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagaoka, Aug. 7-10, 2018, WEOLP01.
- [4] K. Shibata *et al.*, "Vacuum system of positron damping ring for SuperKEKB", J. Vac. Sci. Technol., A 35, p. 03E106, 2017.; doi:10.1116/1.4979009
- [5] <https://molflow.web.cern.ch>