

SPring-8-II 真空システムにおける圧力分布シミュレーション SIMULATION OF PRESSURE DISTRIBUTION IN SPring-8-II VACUUM SYSTEM

上田庸資^{#, A)}, 出羽英紀^{A)}, 正木満博^{A)}, 増田剛正^{A)}, 大石真也^{A, B)}, 小路正純^{A, B)},
鈴木伸司^{A)}, 高野史郎^{A, B)}, 田村和宏^{A, B)}, 谷内友希子^{A)}, 渡部貴宏^{A, B)}
Yosuke Ueda^{#, A)}, Hideki Dewa^{A)}, Mitsuhiro Masaki^{A)}, Takemasa Masuda^{A)}, Masaya Oishi^{A, B)}, Masazumi Shoji^{A, B)},
Shinji Suzuki^{A)}, Shiro Takano^{A, B)}, Kazuhiro Tamura^{A, B)}, Yukiko Taniuchi^{A)}, Takahiro Watanabe^{A, B)}
^{A)} Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI)
^{B)} RIKEN SPring-8 Center (RSC)

Abstract

SPring-8-II, a major upgrade project of the third generation light source SPring-8, aims to achieve a couple of orders higher brightness and a reduction of power consumption of the light source machine. Such an extremely small emittance storage ring has been designed with a five bend achromat lattice where high magnetic field magnets are densely distributed[1]. From viewpoints of vacuum system, vacuum chambers need to be designed with narrow apertures all along the ring, which result in low conductance, and space for vacuum equipment such as photon absorbers, bellows, and pumps are limited. To meet these requirements, we employ small-diameter stainless steel chambers and distributed NEG pumps that are placed near compact absorbers to effectively evacuate photon stimulated desorption (PSD) gas. To optimize the layout of the vacuum components under these conditions, we estimated the pressure distribution of SPring-8-II unit cell using simulation software called SynRad and MolFlow. As a result, the vacuum lifetime under the pressure of the PSD gas at the 100 mA, 10 Ah dose is about 5.6 hour. We will study the aging strategy with simulation under other conditions.

1. はじめに

SPring-8-II は大型放射光施設 SPring-8 の次世代アップグレード計画である[1]。コミッションは 2028 年为目标としており、蓄積ビームエネルギー 6 GeV、蓄積電流 200 mA、最小エミッタンス 50 pmrad という世界最高レベルの性能と、消費エネルギー削減を含む施設のグリーン化を両立することを目指している。

SPring-8-II の多極磁石は高い磁場勾配を省電力で得られるよう磁極間隔を狭めているため、新規製作する真空チェンバの口径は小さくなり、排気コンダクタンスも低下する。加えて多数の磁石を密に配置するので、光吸収体等の真空機器の配置に利用可能な空間も減少する。これらの条件を満たすように、SPring-8-II 真空システムでは小口径のステンレス(SUS)製チェンバ及び分散配置の小型光吸収体を採用し、かつ光刺激脱離(Photon Stimulated Desorption: PSD)ガスの主な放出源である光吸収体の近傍に NEG(Non Evaporable Getter)ポンプを設置することで排気系を高効率化する。

また本計画では工期短縮とコスト削減のため、真空チェンバの現場ベークは行わない。プリベーク及び蓄積リングトンネル内へ据付後の粗排気、NEG 活性化のみで真空立上げを実施する。据付時にはチェンバは 2 日程度大気に曝されることが想定されるため、現場でのベーク無しはチェンバ内圧力分布へ影響を及ぼしうる。

上記の条件を考慮した新規真空システムの設計を現在進めている。真空機器配置の最適化を目的として、SPring-8-II 真空システムの標準セルにおける圧力分布計算を行った。計算手法として SynRad 及び MolFlow と呼ばれるモンテカルロシミュレーションを用いている。本

稿ではシミュレーション及びその検討結果について報告を行う。

2. チェンバ構成・真空システム

SPring-8-II の蓄積リングはセルと呼ばれる基本構造が 48 セル連なって構成される。セル数の大半を占める標準セルのチェンバ構成を Fig. 1 に示す。1 セルは 6 カ所の直線部(Straight Section: SS)と 5 カ所の偏向部(Bending Section: BS)から成り、3 番目の BS(BS3)を中心とした対称構造となっている。更にセル間には挿入光源(ID)を設置する直線部がある。挿入光源を設置しない場合は代わりに挿入光源ダミー(IDD)チェンバを設置する。偏向磁石からの放射光がチェンバに当たらないように、標準セルには 13 台の光吸収体を設置する。その内訳は、放射光をビームラインへ取り出すための窓を持つクロッチアブソーバ(CR)が 2 台、窓のないアブソーバ(AB)が 9 台、BS2 と BS5 にそれぞれ上流の偏向磁石 1 と偏向磁石 4 からの放射光を受けるための補助的なアブソーバ(Bending Chamber Absorber: BCA)が 2 台である。CR と AB は CuCrZr 製である[2]。光吸収体には強い放射光が照射されるので PSD によるガス放出量が多い。光吸収体近傍に NEG ポンプを配置することで高効率な排気の実現を図っている。AB・CR の受光部は上部の受光面と下部の散乱遮蔽で構成された顎型に設計しており、散乱光を光吸収体外部へ逃がさないようになっている(Fig. 2)。これによりチェンバからの PSD ガスを低減できる。BCA は AB・CR のような顎型ではなく単純に放射光を斜入射で受け止める構造である。また IDD は上下流に NEG ポンプを、下流のみに AB を設置する構造となっている。よって光吸収体は標準セルと IDD 部を合わせて総計 14 台となる。

[#] yueda@spring8.or.jp

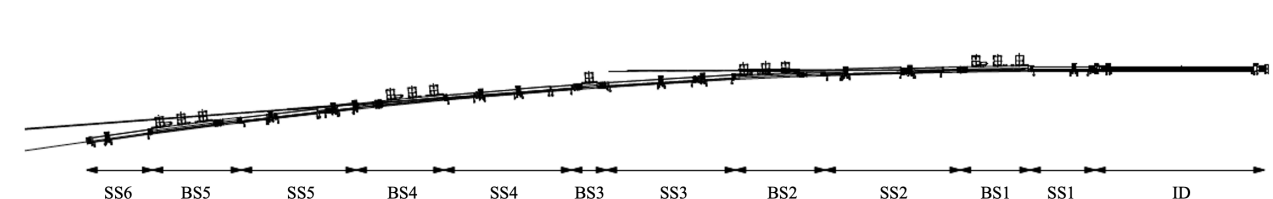


Figure 1: Layout of chamber of SPring-8-II normal cell and ID section.

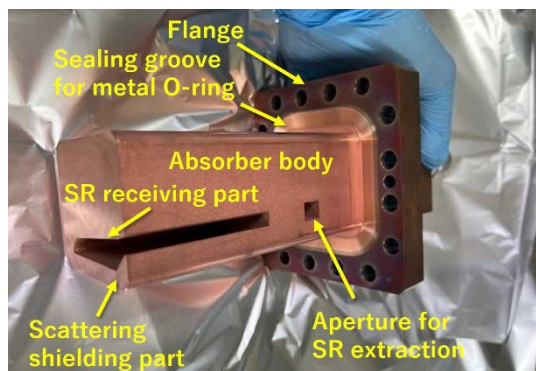


Figure 2: Prototype of a photon absorber (CR).

3. シミュレーション

3.1 シミュレーション概要

本稿では CERN により開発された MolFlow 及び SynRad[3]と呼ばれるモンテカルロシミュレーションソフトウェアを使用することで熱脱離(Thermal Desorption: TD)や PSD に起因するガスによる圧力分布をシミュレーションし、真空システムの最適化について検討している。

MolFlow はガス粒子の運動を 3 次元的にシミュレーションするソフトウェアである。MolFlow にセルの 3D データをインポートした後、シミュレーションするガス種(質量数)やチェンバからの TD ガス放出率、ポンプ排気速度を設定することで TD ガスによる圧力分布を計算・出力する。

SynRad はシンクロトロン放射による生成光子をシミュレーションする。ビームエネルギー、蓄積電流、偏向磁場分布等を設定することでビーム軌道を計算し、インポートしたセル 3D データのチェンバ面における放射光子の Flux 分布や Power 分布を出力する。

MolFlow と SynRad を組み合わせることで PSD 起因の圧力分布をシミュレーション可能になる。設定条件下におけるチェンバ面上の光子の Flux 分布を SynRad によりシミュレーションし、MolFlow にインポートする。1 光子が衝突した時に放出されるガス量を示すイールド係数 η をこの Flux 分布に適用することで PSD に起因するガス放出量が求められる。この値を用いて TD ガスと同様に MolFlow シミュレーションを行うことで PSD ガスによる圧力分布を得ることができる。

3.2. シミュレーション条件

3.2.1 TD ガスのシミュレーション

TD シミュレーションで使用するパラメータをまとめたものが Table 1 である。

TD ガスシミュレーションで使用するガスは、一般にガ

Table 1: Simulation Parameters of MolFlow

Gas Species	Outgassing Rate [Pa·m ³ /s/m ²]	Pumping Speed (NT) [m ³ /s]	Pumping Speed (CT) [m ³ /s]
H ₂	1e-9	0.34	0.20
CH ₄	4e-11	0.01	0.00
H ₂ O	2e-10	0.17	0.14
CO	2e-10	0.14	0.09
CO ₂	8e-11	0.13	0.09

ス放出率が高い H₂、不活性で NEG ポンプによる排気が困難な CH₄、質量数が大きくビーム寿命への影響が大きい CO と CO₂ の 4 種に加え、現場ベークを行わない影響を確認するための H₂O を含む計 5 種を選択した。

TD ガス放出率は SUS 製試験チェンバを用いた実測から得た。排気は NEG ポンプにより行なった。試験チェンバは 150℃でのプリベーク及び窒素パージの後に約 2 日大気開放し、再度粗排気、NEG 活性化を行なった。その後、試験チェンバ分圧にポンプ排気速度を掛け、チェンバ表面積で割ることでガス放出率を求めた。ガス放出率の時間変化を Fig. 3 に示す。測定精度を考慮して TD ガス放出率は指数の小数点以下を一律で切り上げている。NEG 活性化後からビームコミッションまでの最短日数を 60 日と想定し、それに相当するガス放出率を用いることとした。

排気速度は、使用ポンプとして SAES Getters 社のカートリッジ型 NEG ポンプである NEX Torr Z500(NT)を想定し、実機誤差等を考慮してカタログ排気速度[4]を 0.8 倍した。CO₂の排気速度は CO と同じ値としている。さ

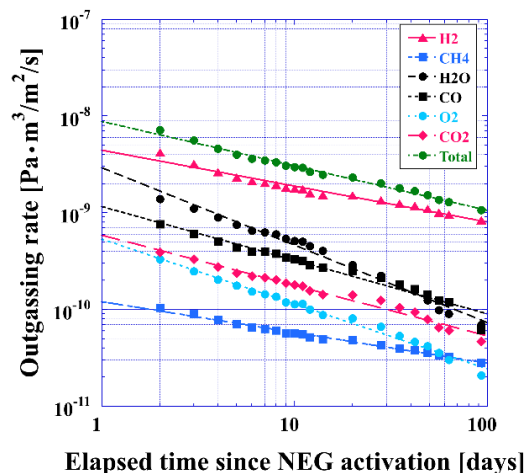


Figure 3: Thermal outgassing ratio of test chamber with prebake.

らに実際の NEG ポンプ位置とシミュレーション上で排気速度を設定する位置は異なっているのでコンダクタンス補正を加えた。Table 1 記載の排気速度はこの両者間の差を考慮した値である。

BS2, BS3 はスペースの都合により真空ポンプとして NEX Torr を設置できない可能性があるため、この 2 箇所のみ ICF70 取り合いの SAES Getters 社製小型 NEG ポンプである CapaciTorr Z200(CT)の使用を想定した。また実機における BS2, BS3 の NEG 取付位置の詳細構造は未決定で、正確なコンダクタンス計算ができない。従って Table 1 に記載している BS2, BS3 の真空ポンプの排気速度は CapaciTorr Z200 のカタログ排気速度[5]の 0.7 倍とした。

3.2.2 PSD ガスのシミュレーション

SynRad シミュレーションで使用するパラメータをまとめたものが Table 2 である。反射率はチェンバ相当部は SUS 材相当として Fe、光吸収体相当部は CuCrZr 材相当として銅(Cu)の SynRad 規定値を用いた。

Table 2: Simulation Parameters of SynRad

Parameters	Status
Stored Beam Energy	6 GeV
Stored Current	100 mA
Beam Parameters	Ideal Beam:
	Emittance 0 mm
	Coupling const. 100 %
	β (Betatron func.) 0 m
	η (Dispersion func.) 0 m
Reflection:	
Chamber Parts	Fe (as SUS)
Absorber Parts	Cu (as CuCrZr)

PSD イールド係数 η は Photon Dose の増加に伴い減少する。光吸収体やチェンバ内面に照射される Photon Dose は場所によって異なるため、PSD 圧力分布を計算するには Photon Dose に対するガス種及び材質毎の η 分布が必要である。本稿で使用する η 分布を Fig. 4 に示す。この分布は SPring-8 における測定値と文献値[6]から求めている。SPring-8 の測定値から外挿した η (η_1 : Fig. 4 中白抜き丸印)は Dose 量が $4.6e+23$ photons/cm² 時の値であり、文献値は Dose 量が $3.5e+18$ photons/cm² までの η (η_2 : Fig. 4 中丸印)しか記載されていないので、それ以外の値は η_1 と η_2 の 2 点を外挿することで推定した。低 Dose 時の η は材質によって異なる一方、高 Dose になるにつれて η の材質依存性は小さくなる。SPring-8 のチェンバ材はアルミニウムであるが、 $4.6e+23$ photons/cm² は十分大きい Dose 量であるので、SUS/Cu の高 Dose 時の共通の η として使用しても問題ないと判断した。光吸収体素材である CuCrZr の η は Cu と同等としている。またシミュレーションするガス種としては、データの無い H₂O を除く TD ガスシミュレーションで用いた 4 種を選択した。また運転初期の圧力分布を確認するため、まず蓄積電流を 100 mA、Photon Dose を 10 Ah としてシミュレーションを行った。

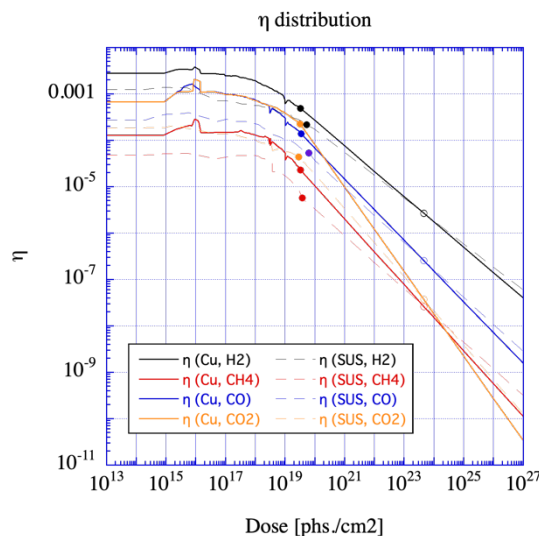


Figure 4: PSD yield coefficient (η) per Dose.

4. シミュレーション結果

4.1. TD ガスによる圧力分布

TD ガスによる圧力分布を Fig. 5 に示す。また 1 セル内のチェンバ及び真空ポンプ配置をアイコンで表す。アイコン中の IDD Pump は IDD 上流側に設置した AB が付近にない NEG ポンプを指す。また BS1, BS3, BS4 に BCA は設置しないが、圧力低減のため NEG ポンプを取り付けている。

圧力分布を見ると、真空ポンプ設置箇所で低く、非設置箇所で高くなる分布をしている。ただし極端に圧力が高くなっている箇所や、また極端に低くなっている箇所は無い。これは真空ポンプが必要箇所に必要量設置されており、適切なポンプ配置となっていることを示している。

セル全体の平均圧力を Table 3 に示す。平均の全圧は $3.1e-8$ Pa であり、超高真空を得られている。H₂O の圧力も $5.5e-9$ Pa と十分低く、現場でベークを行わないことによる影響は小さい。

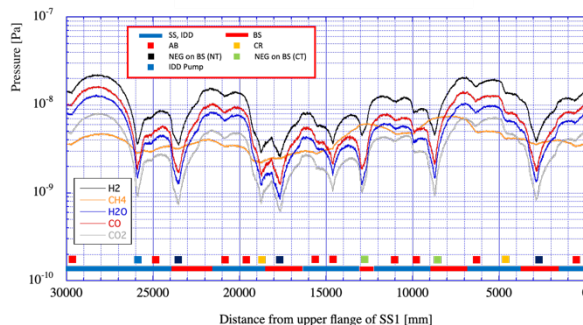


Figure 5: Pressure distribution of TD gas in normal cell.

Table 3: Average Pressure of TD Gas

Gas Species	Average Pressure [Pa]
H ₂	1.1e-8
CH ₄	4.2e-9
H ₂ O	5.5e-9
CO	7.0e-9
CO ₂	3.6e-9
Total Pressure	3.1e-8

4.2. PSD ガスによる圧力分布

次に PSD ガスによる圧力分布を示す(Fig. 6)。分布傾向は概ね TD ガス圧力と同様である。

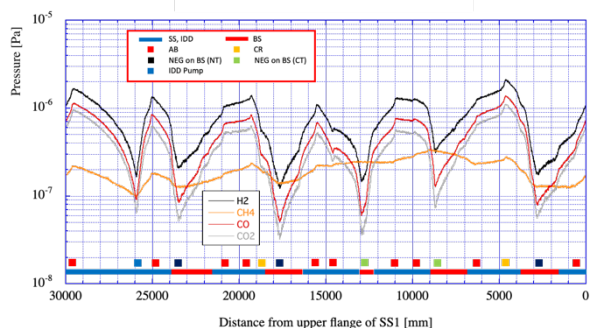


Figure 6: Pressure distribution of PSD gas at 100 mA, 10 Ah in normal cell.

Table 4: Average Pressure of PSD Gas

Gas Species	Ave. Pressure [Pa]	Vac. Lifetime [hr.]
H ₂	7.8e-7	214
CH ₄	2.0e-7	74
CO	4.8e-7	14
CO ₂	3.7e-7	11
Total	1.8e-6	5.6

Table 4 にセル全体の平均圧力とそこから計算した真空寿命を示す。参考として、SPring-8-II におけるタウシェク寿命は 1920 bunch, 100 mA で 20 時間程度である。PSD ガスの平均全圧は 1.8e-6 Pa となった。これを元に真空寿命を計算すると約 5.6 時間となる。

5. まとめ

SPring-8-II における真空機器の最適化を目的として 1 セル内の TD/PSD ガスによる圧力分布をシミュレーションした。真空機器配置に対する圧力分布を見ると、分布中に圧力が極端に高くなっている箇所はない。これは真空ポンプ配置に大きな問題が無いことを示していると考えられる。また 100 Ah, 10 Ah 時の PSD シミュレーション結果を見ると、圧力値は 1e-6 Pa 台になった。これを真空寿命に直すと約 5.6 時間となる。今後は今回実施した 100 mA, 10 Ah をベースとして、蓄積電流、Beam Dose、及びガス吸着量に応じた NEG ポンプの排気速度低下等を考慮したシミュレーションを行い、必要なビーム寿命を実現するための焼き出し運転計画やその効果、適切な NEG 再活性化タイミング等の検討を進める。

参考文献

- [1] T. Watanabe and H. Tanaka, “SPring-8 Upgrade Project: Accelerator Redesigned and Restarted”, Synchrotron Radiation News, Vol.36 (2023) Issue 1, pp.3-6. doi:10.1080/08940886.2023.2186117
- [2] K. Tamura *et al.*, “SPring-8-II 真空システムの現状”, Proc. PASJ2024, Yamagata, Japan, Jul.-Aug. 2024, THP075, this meeting.
- [3] <https://molflow.web.cern.ch/>
- [4] <https://www.saesgetters.com/highvacuum/solution/nextor-r-d-z-uhv/>
- [5] <https://www.saesgetters.com/highvacuum/solution/capacitor-d-z-uhv/>
- [6] A. G. Mathewson *et al.*, “Comparison of synchrotron radiation induced gas desorption from Al, stainless steel and Cu chambers”, AIP Conf. Proc. 236, pp.313-324 (1991). doi:10.1063/1.41124