

SPring-8-II 蓄積リングにおけるビーム寿命の評価

BEAM LIFETIME EVALUATION BASED ON SIMULATION OF A VACUUM PRESSURE DISTRIBUTION FOR THE SPring-8-II STORAGE RING

上田庸資^{#, A)}, 出羽英紀^{A)}, 正木満博^{A)}, 増田剛正^{A)}, 太田紘志^{A)}, 谷内友希子^{A)},
大石真也^{A, B)}, 小路正純^{A, B)}, 高野史郎^{A, B)}, 田村和宏^{A, B)}, 渡部貴宏^{A, B)}

Yosuke Ueda^{#, A)}, Hideki Dewa^{A)}, Mitsuhiro Masaki^{A)}, Takemasa Masuda^{A)}, Hiroshi Ota^{A)}, Yukiko Taniuchi^{A)},
Masaya Oishi^{A, B)}, Masazumi Shoji^{A, B)}, Shiro Takano^{A, B)}, Kazuhiro Tamura^{A, B)}, Takahiro Watanabe^{A, B)}

^{A)} Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI)

^{B)} RIKEN SPring-8 Center (RSC)

Abstract

The SPring-8-II, a major upgrade project of the third generation light source SPring-8, aims to achieve low emittance below 100 pmrad and a reduction in the power consumption of the light source machine. High magnetic field gradient magnets for SPring-8-II are densely distributed. As a result, vacuum chambers along the entire storage ring are designed with narrow apertures, leading to low conductance, and space for vacuum equipment such as photon absorbers and vacuum pumps is limited. To meet these requirements, we employ small-diameter stainless steel chambers and discrete compact photon absorbers. Non-Evaporable Getter (NEG) pumps are placed near photon absorbers to effectively evacuate photon stimulated desorption (PSD) gas. A pumping speed of a NEG pump decreases as it absorbs gas. For stable user operation, reactivation of the NEG pumps is crucial to restore their capability. To evaluate the appropriate timing of the NEG reactivation, we estimated the pressure distribution of a SPring-8-II unit cell with an ID dummy chamber and the beam lifetime using simulation software called SynRad and MolFlow. We assume a sufficient beam lifetime is ensured at a beam dose of 365 Ah. As the result of simulation, the beam lifetime at 365 Ah is 7.2 hours before the NEG reactivation and 8.8 hours after the NEG reactivation. The NEG reactivation before reaching 365 Ah is necessary to ensure the beam lifetime is over 8 hours, which is the target beam lifetime. We will study the pressure transition and evaluate the beam lifetime at longer dose after the user operation begins.

1. はじめに

大型放射光施設 SPring-8 のアップグレードである SPring-8-II 計画が 2024 年度からスタートした[1]。SPring-8-II はビームエネルギー 6 GeV、最小ビームエミッタンス 100 pmrad 以下、蓄積電流値 200 mA となる設計である。同時に永久磁石型偏向電磁石の採用等によって電力消費量を SPring-8 の半分に抑え、施設のグリーン化を図っている。

SPring-8-II では、高い磁場勾配を発生させるための狭磁極間隔の多極磁石が高密度に配置されている。磁石と接触することなく真空チェンバおよび真空ポンプや光吸収体等の真空機器を設置するために、小口径のステンレス(SUS)製真空チェンバと小型光吸収体の分散配置構造を採用した[2]。小口径化によるコンダクタンスの低下を補うため、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真空ポンプを設置しガス排気効率を向上させている。

主ポンプである NEG(Non-Evaporable Getter)ポンプの排気速度はガス吸着量の増大に伴って低下する。これは加速器運転の進展と共に圧力の改善傾向が鈍化することを意味するため、安定な加速器運転を行うには適切なタイミングでの NEG 再活性化によって排気速度を回復させる必要がある。そこでモンテカルロシミュレーション

によりビーム Dose 量ごとの NEG 再活性化前後の圧力およびビーム寿命を求め、適切な NEG 再活性化タイミングについて検討を行なった。本稿ではシミュレーションおよびその検討結果について報告する。

2. チェンバ構成・真空システム

SPring-8-II はセルと呼ばれる基本構造が 48 個連なる構成となっている。その内の 34 セルを占める標準セルの概念図を Fig. 1, 2 に示す。標準セルは約 26 m であり、5 つの偏向部 (Bending Section: BS) と 6 つの直線部 (Straight Section: SS) で構成される。セル構造は BS3 を中心とした線対称になっている。上流セル最下流の SS6 とセル最上流の SS1 の間には挿入光源 (Insertion Device: ID) 等を設置するための直線部がある。

標準セルには 13 台の光吸収体が設置される。内訳は、アブソーバ (Absorber: AB) が 9 台、ビームラインへの放射光の取出開口を決定するクロッチアブソーバ (Crotch absorber: CR) が 2 台、BS2 と BS5 の最下流部に設けられる偏向部チェンバアブソーバ (Bending Chamber Absorber: BCA) が 2 台である。また ID 等が未設置の直線部には ID ダミーチェンバ (IDD) を設置するが、IDD の下流部にも AB (IDD_d) が 1 台設置される。

AB・CR の基本構造図を Fig. 3 に示す。AB の受光部は上部の受光面と下部の散乱遮蔽面で構成された顎型となっている。この構造は受光面に当たった放射光が光吸収体外部へ散乱することを防止するためのものである。

[#] yueda@spring8.or.jp

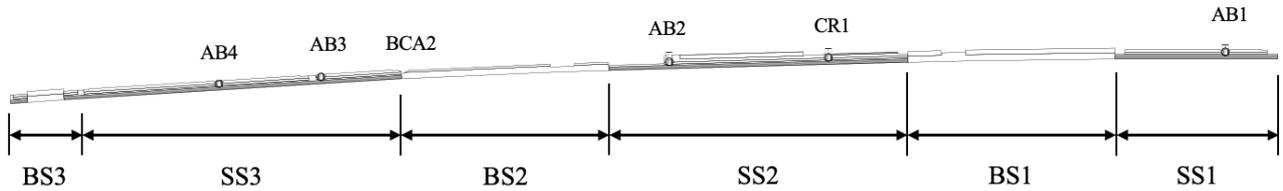


Figure 1: Conceptual layout of upper chamber of SPring-8-II normal cell.

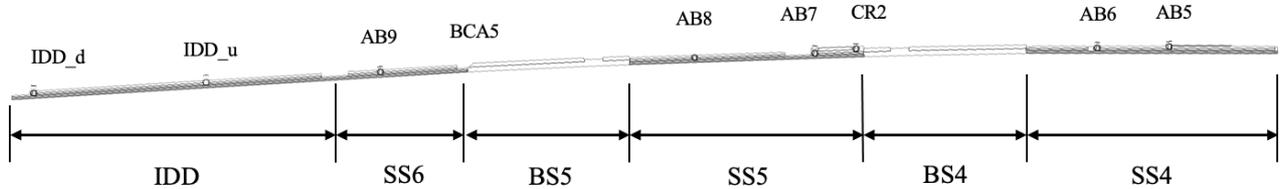


Figure 2: Conceptual layout of lower chamber of SPring-8-II normal cell and ID section.

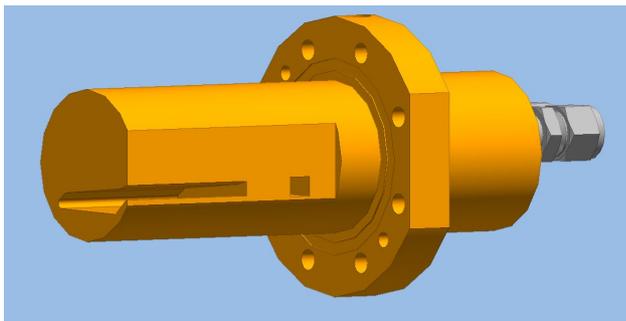


Figure 3: Geometry of a Crotch absorber (CR).

チェンバへの散乱光が低減されるため、PSD ガスの放出範囲が抑制される。一方、BCA は AB とは異なり、放射光を斜面で受ける構造である。高い熱負荷を受ける AB・CR には銅合金であるクロムジルコニウム銅(CuCrZr)を、チェンバと構造上一体化させる必要がある BCA には無酸素銅を素材として使用している。

前述した通り、光吸収体は PSD ガスの主要放出源であるので、排気効率向上を図って近傍に真空ポンプを設置する。加えて 5 箇所 BS 部には BCA の有無によらず真空ポンプを設置するため、標準セルには 16 台の真空ポンプが設けられる。また IDD は約 4 m と長距離であるので、AB(IDD_d)に加え、光吸収体を設置していない上流にも排気チェンバ(IDD_u)を設け真空ポンプを設置している。真空ポンプの構成は、水素(H₂)や一酸化炭素(CO)等の活性ガスを吸着する NEG ポンプと、メタン(CH₄)や貴ガス類等の NEG ポンプには吸着されないガスを排気するためのノーブルダイオード(ND)型スパッタイオンポンプ(SIP)を組み合わせたものとする予定である。

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 SynRad および MolFlow と呼ばれるソフトウェアを用いて PSD ガスによる圧力分布をシミュレーションしている[3]。これらは CERN によって開発されたモンテカルロシミュレーションソフトであり、3D ジオメトリ、ここで

は SPring-8-II 標準セルを構成する真空チェンバおよび IDD をインポートすることで、SPring-8-II における光子 Flux や圧力分布を計算することを可能とする。

SynRad は放射光放射時に生成される光子分布のシミュレーションを行うソフトウェアである。設定したビームエネルギー、蓄積電流値、偏向磁場分布等から電子ビーム軌道と生成光子数を計算し、インポートしたジオメトリ上の光子 Flux 分布や放射光の Power 分布を出力する。

MolFlow はガス粒子の運動の三次元シミュレーションを行うソフトウェアである。ガス種(質量数)やガス放出率、排気速度を設定することにより、インポートしたジオメトリ内の圧力分布を計算、出力する。このジオメトリに SynRad と同一のものを使用することで、SynRad によってシミュレーションされたジオメトリ上の光子 Flux 分布を取り込むことができる。同時に1光子の衝突時に放出される PSD イールド係数(η)と経過時間を適用することにより、あるビーム Dose における PSD ガス放出量のジオメトリ分布が算出される。これを用いてシミュレーションを行うことでビーム Dose 毎の圧力分布を求めることが可能となる。

3.2 シミュレーション条件

SynRad で使用するパラメータをまとめたものが Table 1 である。電子ビームはエミッタンス 0 の理想ビームとしている。反射率は真空機器の材質によって異なるため、チェンバ部は SUS 相当として鉄(Fe)、光吸収体部は CuCrZr および無酸素銅相当として銅(Cu)の反射率の SynRad 規定値を用いている。

シミュレーションするガスには、ガス放出率の高い H₂、NEG ポンプではなく SIP により排気される CH₄、質量数が大きいためビーム寿命への影響が強い CO と CO₂ の 4 種を選択した。Figure 4 は本稿で使用する各ガス種の η である。これは SPring-8 における測定値と文献値[4]から求めた値である[5]。シミュレーションするビーム Dose は、コミッショニングから 2 週間後を想定した 4 Ah、1 ヶ月後を想定した 10 Ah、4 ヶ月後を想定した 200 Ah、5 ヶ月後でありユーザー運転開始前後を想定した 400 Ah、の 4 つとしている。

真空ポンプの排気量には、NEG カートリッジと SIP を

組み合わせた SAES Getters 社製の NEXTorr Z500(NT-Z500)と Z200(NT-Z200)の値[6]を用いている。ガス放出量の大きな光吸収体(CR1, AB3, AB4, AB6, AB7, AB9, IDD_d)近傍には Z500-10ND を、それ以外の光吸収体近傍および BS 部には Z500-5ND を設置している。また BS2 にはスペースの都合により Z500 を設置できないため、より小型の Z200-5ND を設置している。

Table 1: Simulation Parameters of SynRad

Parameters	Status
Stored Beam Energy	6 GeV
Stored Current	50 ~ 200 mA
Generated photon Energy	4 ~ 1e+6 eV
Reflection:	
Chamber Parts	Fe (as SUS)
Absorber Parts	Cu (as CuCrZr and OFC)

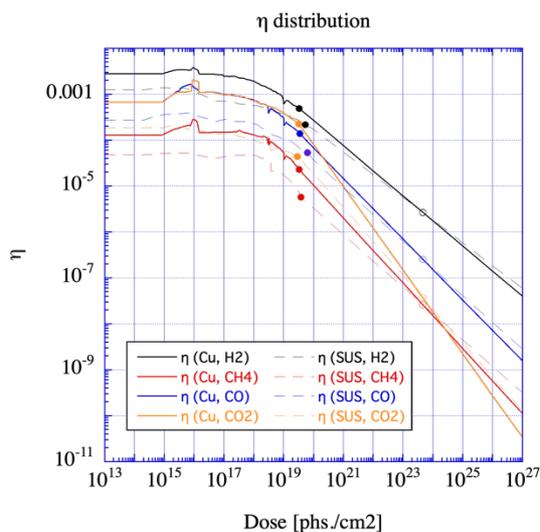


Figure 4: PSD yield coefficient (η) per Dose.

本シミュレーションにおいては、真空ポンプの排気速度を NEG ポンプ再活性化直後と同程度とした場合(「NEG 再活性化後」と呼称)と、真空ポンプの排気速度がガス吸着量に応じて低下する、即ち真空立ち上げ時の NEG 活性化以降、全く NEG ポンプを再活性化せずに使用した場合(「NEG 再活性化前」と呼称)の 2 パターンについて考えている。NEG 再活性化後の真空ポンプ排気速度を Table 2 に示す。これは排気速度の個体差等を考慮し、真空ポンプのカタログ排気速度を 0.8 倍したものである。CO と CO₂ の排気速度は同値としている。

排気速度のガス吸着量依存性はカタログに記載されているため、あるビーム Dose 量における排気速度を求めるにはそのビーム Dose 量に至るまでのガス放出量の積算を計算すれば良い。本稿では光吸収体から放出されたガスは直近の NEG ポンプに全て吸着されるとして、各光吸収体のガス放出量の積算を計算することにより、近傍の真空ポンプ排気速度を得ている。また光吸収体の

設置されていない箇所(BS1, BS3, BS4, IDD_u)に設置した真空ポンプにはガス吸着がないものとし、排気速度は NEG 再活性化後と同一としている。H₂ と CH₄ の排気速度はガス吸着量によらずほぼ低下しないため、これらにも NEG 再活性化後の排気速度を適用している。

Table 2: Pumping Speed After NEG Reactivation

Gas Species	Pump. Speed (Z200-5) [m ³ /s]	Pump. Speed (Z500-5) [m ³ /s]	Pump. Speed (Z500-10) [m ³ /s]
H ₂	0.232	0.464	0.464
CH ₄	0.012	0.012	0.026
CO	0.112	0.240	0.240
CO ₂	0.112	0.240	0.240

シミュレーションを簡略化するため、本シミュレーションで使用している 3D ジオメトリは真空ポンプ接続部までチェンバ形状を再現していない。つまりシミュレーション上の排気面と実際のチェンバにおける真空ポンプ位置は異なっている。この差異を解決するため、排気面と真空ポンプ間のコンダクタンスを別途計算し、上記の真空ポンプ排気速度にコンダクタンスを適用することでシミュレーション上の排気面における実効排気速度を算出、設定している。

4. シミュレーション結果

4.1 PSD ガスによる 1 セル内圧力分布

Figure 5 に PSD ガスによる 400 Ah 時 NEG 再活性化後の圧力分布を示す。全体的な傾向として、真空ポンプ設置箇所に近いほど低く、遠ざかるほど高い圧力となっている。また放出ガス量の多い H₂ が最も高い圧力値となり、CO、CO₂、CH₄ と続く。放出ガス量は低いが排気されにくい CH₄ は全体的になだらかな分布となっている。

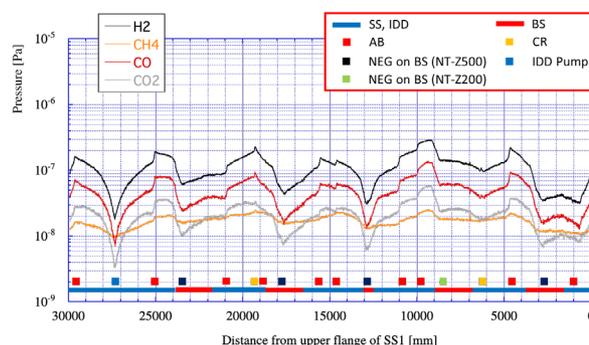


Figure 5: Pressure distribution of PSD gas at 400 Ah, 200 mA in normal cell after NEG reactivation.

Figure 6 に 400 Ah 時、NEG 再活性化前の圧力分布を示す。再活性化後とは異なり、排気速度の低下しない H₂ より CO が高い圧力値となり、CO₂ の圧力も上昇している。また真空ポンプ付近での圧力の下降も、CO、CO₂ は緩やかになっている。またセル全体の平均圧力を Table 3 に記載する。

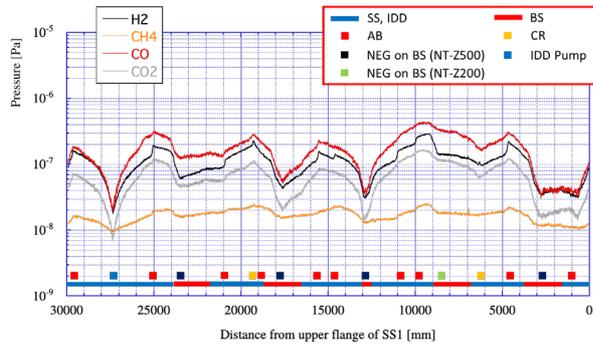


Figure 6: Pressure distribution of PSD gas at 400 Ah, 200 mA in normal cell before NEG reactivation.

Table 3: Average Pressure at 400 Ah, 200 mA After and Before NEG Reactivation

Gas Species	Ave. pressure [Pa]: After NEG reactivation	Ave. pressure [Pa]: Before NEG reactivation
H ₂	1.10e-7	1.10e-7
CH ₄	1.69e-8	1.69e-8
CO	4.79e-8	1.72e-7
CO ₂	2.15e-8	6.69e-8
Total	1.97e-7	3.66e-7

次にビーム Dose 量毎の圧力分布を示す。ここではビーム寿命への影響が比較的大きく、かつガス放出量も比較的多い CO の分布を載せる。Figure 7 は NEG 再活性化後の圧力分布であり、10 Ah、4 Ah、200 Ah、400 Ah の順に低い圧力となっている。圧力値は概ねビーム Dose 量の増加に伴って低下しているが、4 Ah と 10 Ah のみ傾向が逆転している。これはビーム Dose 量の増加に伴う η 減少よりも、蓄積電流値の増加に伴う光子 Flux 増加の方がガス放出量への影響が大きいためである。両者を考慮するとガス放出量は 10 Ah、100 mA 時の方が約 1 割増大する計算になり、圧力上昇量とほぼ一致する。

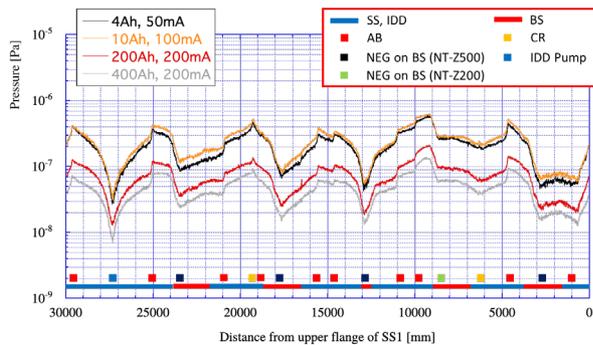


Figure 7: Pressure distribution of PSD gas per dose in normal cell after NEG reactivation.

Figure 8 は NEG 再活性化前の CO 圧力分布である。ビーム Dose 量と圧力の相関の傾向は NEG 再活性化後の分布と同様であるが、全体的に圧力値が高くなっている。また 200 Ah 以上の高 Dose の圧力は 10 Ah 以下の

低 Dose のものより多少低くなっているものの、その差は非常に小さくなっている。Figure 7 では見えていた 200 Ah と 400 Ah の圧力差もほぼ無くなっており、NEG 排気速度低下の影響が顕著に示されている。Table 4 はセル全体の平均圧力である。

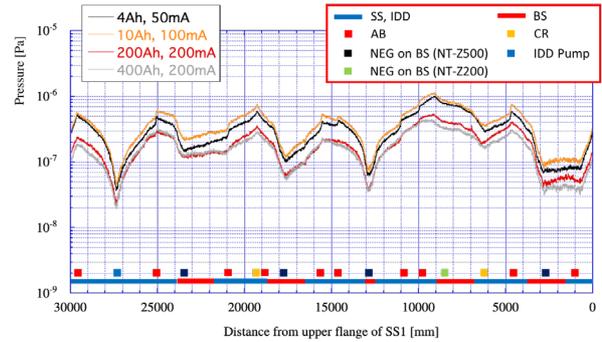


Figure 8: Pressure distribution of PSD gas per dose in normal cell before NEG reactivation.

Table 4: Average Pressure of CO Gas After and Before NEG Reactivation

Dose [Ah]	Ave. pressure [Pa]: After NEG reactivation	Ave. pressure [Pa]: Before NEG reactivation
4	2.08e-7	3.19e-7
10	2.39e-7	3.85e-7
200	7.38e-8	1.93e-7
400	4.79e-8	1.72e-7

4.2 焼き出し運転時のビーム寿命の推移と NEG 再活性化タイミングの検討

圧力分布シミュレーション結果から求めた、蓄積電流値とビーム寿命の積(Iτ)の NEG 再活性化前後の積分電流値依存性を示したものが Fig. 9 である。

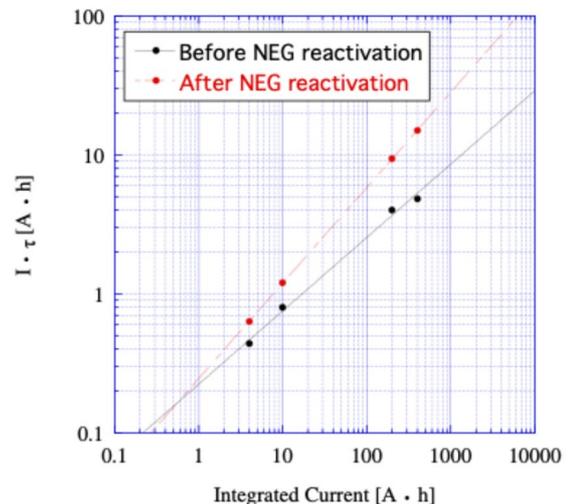


Figure 9: Comparison of Iτ distribution before and after NEG reactivation.

Table 5: Beam Lifetime Before NEG Reactivation

Day	Stored current [mA]	Scat. Lifetime [hr.]	Beam lifetime [hr.]
14	1→50	6.8	5.8
21	50→70	8.5	6.6
28	70→100	8.4	5.9
56	100→150	11.2	6.1
84	150→200	12.5	5.5
140	200	19.8	6.6
168	200	25.2	7.2

Table 6: Beam Lifetime After NEG Reactivation

Day	Stored current [mA]	Scat. Lifetime [hr.]	Beam lifetime [hr.]
14	1→50	8.4	7.0
21	50→70	12.6	8.7
28	70→100	13.7	8.1
56	100→150	22.7	8.4
84	150→200	28.3	7.4
140	200	51.5	8.4
168	200	70.6	8.8

ここでのビーム寿命はガス散乱寿命とタウシエク寿命の両方を考慮した値を指している。ガス散乱寿命はラザフォード散乱、メラー散乱、制動放射の影響を考慮した電子ビームの寿命である。タウシエク寿命は 200 mA 時に 10 時間としている。図中の黒点が NEG 再活性化前、赤点が NEG 再活性化後の τ を示す。黒線および赤点線は両者を累乗の関数で Fitting したものである。高 Dose になるほど両者の差は拡大し、400 Ah における τ の差は約 3 倍になる。ガス散乱寿命に換算すると、前者が 24 時間、後者が 75 時間である。

Fitting 値を元にして、コミッショニング開始時からのビーム寿命の推移を計算したものが Table 5, 6 である。コミッショニング開始から 24 週間(168 日目)までに十分なビーム寿命を確保することを目指す。蓄積電流値はコミッショニングから最初の二週間で 50 mA、次の一週間で 70 mA、その次の一週間で 100 mA に到達させ、その後は 200 mA に達するまで二週間毎に 50 mA ずつ上昇させていくとする。また真空焼き出し時間は、140 日目までは 1 日当たり 12 時間、それ以降は 24 時間と仮定する。この場合、168 日目のビーム Dose 量は 365 Ah となる。

365 Ah 時のガス散乱寿命は、NEG 再活性化前で 25.2 時間、再活性化後で 70.6 時間となり、ビーム寿命はそれぞれ 7.2 時間、8.8 時間となる。ガス散乱寿命に 3 倍の差があるのに対し、ビーム寿命が 2 割程度の差しかないのは、この圧力ではタウシエク寿命が支配的になるためである。

安定した加速器運転に必要なビーム寿命を 8 時間とすると、上記の結果より、365 Ah 到達前に NEG 再活性化を行う必要がある。具体的な NEG 再活性化タイミングおよび再活性化の手順については、実際の焼き出し運転におけるビーム寿命の伸び具合や、再活性化に要する時間と別作業との兼ね合い等、他の調整項目も考慮した上で適宜決定する。

5. まとめ

SPring-8-II におけるビーム寿命の推移を元に NEG 再活性化タイミングを検討するため、NEG 再活性化前後の 1 セル内圧力分布シミュレーションをビーム Dose 毎に行なった。その結果、365 Ah 時の NEG 再活性化前ビーム寿命は 7.2 時間、再活性化後ビーム寿命は 8.8 時間となった。よって、目標ビーム寿命である 8 時間を達成するには、365 Ah 到達前の NEG 再活性化が不可欠である。今後はより高 Dose 時のシミュレーションを行い、ユーザー運転開始後のビーム寿命の推移についても検証を行う。

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.
- [3] MolFlow+ and SynRad+, <https://molflow.docs.cern.ch>
- [4] 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
- [5] Y. Ueda *et al.*, "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", Proc. PASJ2024, Yamagata, Japan, Jul.-Aug. 2024, FRP080.
- [6] NEX Torr D/Z (UHV), <https://www.saesgetters.com/highvacuum/solution/nextorr-d-z-uhv>