

SPring-8-II 真空システム設計の現状

STATUS OF SPring-8-II VACUUM SYSTEM DESIGN

田村和宏^{#, A, B)}, 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)}, 谷内友希子^{A)}, 上田庸資^{A)}, 渡部貴宏^{A, B)},
Kazuhiro Tamura^{#, A, B)}, Hideki Dewa^{A)}, Mitsuhiro Masaki^{A)}, Takemasa Masuda^{A)}, Masaya Oishi^{A, B)},
Masazumi Shoji^{A, B)}, Shinji Suzuki^{A)}, Shiro Takano^{A, B)}, Yukiko Taniuchi^{A)}, Yosuke Ueda^{A)}, Takahiro Watanabe^{A, B)}

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

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

Abstract

The design of the vacuum system for SPring-8-II, an upgrade project of SPring-8, is vigorously underway in consideration with reduction of energy/resources and cost during construction, and high operational reliability. To accommodate the narrower bore diameter of the magnets while providing sufficient clearance to the electron beam and synchrotron radiation, a compact vacuum system that employs stainless steel chambers with a thickness of 2 mm and discrete small photon absorbers was adopted for the SPring-8-II vacuum system. For cost reduction and high operational reliability, a vacuum chamber with a new cross sectional shape with low resistive wall impedance and a flange-integrated structure of a photon absorber made of CuCrZr were adopted. To shorten the installation period, the vacuum chamber is planned to be pre-baked outside the tunnel and only the NEG is going to be reactivated without baking once installed in the tunnel. In this paper, current status of the SPring-8-II vacuum system design and planned installation process of the vacuum system will be presented.

1. はじめに

省エネルギー化/省資源化など、環境負荷の低減を図ると共に、Multi-bend achromat ラティスの採用による約 2 桁の大幅な放射光輝度の向上を目指して、大型放射光施設 SPring-8 を更新する SPring-8-II 計画[1]が進められている。

狭小化、狭隘化する多極電磁石、偏向磁石に対応しつつ、電子ビームの寿命確保に必要な超高真空を実現する真空システムとして、小口径・薄肉のステンレス製チェンバと分散配置の小型光吸収体、および光吸収体直近に配置したカートリッジ型 NEG (Non Evaporable Getter) ポンプによりビーム運転時の光刺激脱離 (PSD: Photon Stimulated Desorption) ガスを効率よく排気する真空システムの設計を進めている。製作コスト、製作期間の削減および更新作業の効率化のため、従来設計[2, 3]から主に以下の点を変更した。1)直線部チェンバの電子ビーム室の断面形状を菱形に変更。チェンバ壁を電子ビームから遠ざけ、壁抵抗性インピーダンスを低減させたことにより、銅メッキ不要の設計とした。2)CuCrZr 製フランジ一体型光吸収体の採用。材料の入手性向上や低コスト化につながり、またフランジ一体型の構造とすることでリークの恐れのない信頼性の高い光吸収体の製作が可能となった。3)チェンバ構成および真空立上げ手順の変更。約 26 m の 1 セルを長さ 2~3 m の 11 本のチェンバ構成に変更し、プリバークとトンネル内据付後の粗排気、NEG 活性化のみで真空立上げを実施することとした。

SPring-8-II には入射部上下流セル、長直線部セルおよびマッチングセルなど特殊なセルが存在するが、本発表ではリングの大部分を占める標準セルの設計に的を絞り、上記変更点を中心に、SPring-8-II 真空システム設

計の現状を報告する。

2. チェンバ構成および機器配置

Figure 1 に SPring-8-II 標準セルの真空チェンバ構成を示す。セルの両端には真空保守時およびインターロック動作時に真空保護のための仕切りとなる圧空駆動式のセクターゲート弁 (SGV1, SGV2) が取り付けられる。SGV を含む 1 セルの長さは 25.7 m である。セル下流端の SGV2 と次セル上流端の SGV1 の間の直線部に挿入光源 (ID) や高周波加速空洞、入射部などが設置される。従来設計では 1 セルを 2 本の 12 m チェンバと約 1 m の 3 本の接続チェンバで構成していたが、プリバーク後に 12 m チェンバを超高真空状態に保つための輸送用 GV のコスト、12 m チェンバの取扱性、プリバーク後のチェンバの保管性を考慮し、1 セルを 11 本のチェンバで構成する設計に変更した。

1 セルは 5 ヶ所の偏向部 (BS: Bending Section)、6 ヶ所の直線部 (SS: Straight Section) で構成される。5 ヶ所の偏向部の内 4 ヶ所 (BS1, 2, 4, 5) は、ビーム軸方向に磁場が変化する LGB (Longitudinal Gradient Bend) 部 (永久磁石) と横方向の磁場勾配を持つ BQ combined (偏向-四極複合) 部 (電磁石) が 250 mm の間隔を空けて配置されて 1 つの偏向部を構成している。偏向部の真空チェンバは LGB 部と BQ combined 部の間にフランジを設けて別チェンバとしている。残り 1 ヶ所 (BS3) は通常タイプの偏向磁石部 (永久磁石) で、単独の偏向部チェンバとしている。各チェンバは概ね直線部と偏向部のチェンバが組み合わせられた構成となっている。将来の磁石の再アライメントを見越し、磁石群が設置される共通架台の切れ目にはベローズを配置している。

[#] tamura@spring8.or.jp

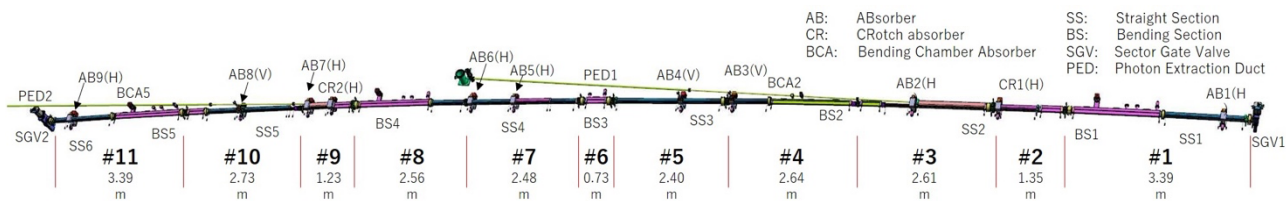


Figure 1: Layout of vacuum chambers of SPring-8-II normal cell.

真空チェンバ外側面への放射光の照射を防ぎ、またチェンバの水平寸法を極力小さくし磁石寸法の増大を抑えるため、合計 13 台の小型光吸収体 (Fig. 1 の AB1~9, CR1, CR2, BCA2, BCA5) を配置している。CR は光取出用の開口を設けた光吸収体である。AB/CR につけた H および V は光吸収体の挿入方向を示す。AB/CR は水平方向外側から挿入する横挿入型 (H) を基本とし、光取出管との干渉を回避する必要がある場所については鉛直方向上側から挿入する縦挿入型 (V) としている。BCA は 5ヶ所の偏向部チェンバの内 2ヶ所の偏向部チェンバの下流端に直接取り付けられた補助的な光吸収体である。SPring-8-II のエネルギー 6 GeV、ビーム電流 200 mA の条件下では、光吸収体が受光する最大パワーは 2.25 kW、最大入熱密度は 224 W/mm² である。各光吸収体の直近に配置したカートリッジ型 NEG ポンプでビーム運転時に光吸収体周辺で発生する PSD ガスを局所排気することにより、ビーム寿命に影響を及ぼさない圧力の実現を目指す。

SPring-8-II では、ID の光軸が SPring-8 の ID の光軸に一致するようにラティス設計がなされている。また SPring-8 の 2 つの偏向電磁石からの放射光を利用するビームライン (B1 ライン、B2 ライン) に対しても、下流のビームライン機器の最小限の再配置により放射光の継続利用が可能となるよう、SPring-8-II 偏向磁石における光源点が選択されている。Figure 1 の光取出管 (PED1, 2) は B1, B2 ラインへの放射光を輸送する真空ダクトが描かれている。なお、B2 ラインの光源点はセル中央の偏向磁石 3 内にある。偏向磁石 3 は磁場が 0.953 T と他の偏向磁石に比べて高いため、SPring-8-II の B2 ラインでは SPring-8 の B2 ラインにほぼ匹敵するスペクトルの放射光を得ることができる。

標準セルには、各偏向部下流の光吸収体直近に、セル当たり 5 台の真空計を設置する。真空計には、保守性を考慮して、フィラメント焼損の恐れがなく、また内部電極のクリーニング機能を有する冷陰極型真空計 (CCG: Cold Cathode Gauge) を使用する。

3. 真空システム

3.1 真空チェンバ

直線部チェンバ (SSC: Straight Section Chamber) および偏向部チェンバ (BSC: Bending Section Chamber) の代表的な断面 (SSCa, SSCd, BSC1) を Fig. 2 に示す。直線部、偏向部のチェンバとも、厚さ 2 mm あるいは 3 mm のチェンバ上下板と内側、外側の側板を溶接によりダクト化する。直線部チェンバの上下板は冷間ロール成形、偏向部チェンバの上下板はベンダー加工で製作することを計画している。溶接には入熱の少ないレーザービ-

ーム溶接 (LBW) を用い、溶接による変形、比透磁率の上昇を抑制する。LBW 後に製品長に切り出されたダクトに対して約 900°C の真空炉で熱処理を行い、加工、溶接で上昇した比透磁率を下げる。真空熱処理は脱ガスの促進も期待できる。

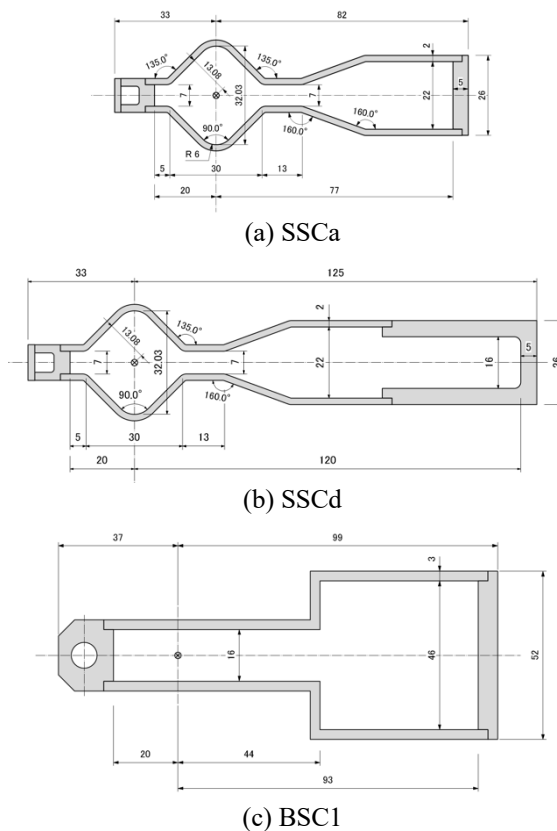


Figure 2: Typical cross sections of straight and bending section chamber.

直線部チェンバのビーム室断面は従来設計の偏平な八角形から菱形に変更した。これにより電子ビームからチェンバ壁までの距離が 8 mm から約 13 mm に広がり、直線部チェンバの横方向壁抵抗性インピーダンスを 1/4 程度に下げることができた。従来設計では必須であったインピーダンス低減のためのリング全周に渡る内面銅メッキを一切施工しなかった場合のインピーダンス上昇分を考慮しても、Bunch-by-Bunch Feedback によるビーム不安定性抑制により SPring-8-II における蓄積電流 200 mA は実現できると判断した。

光取出し構造との関係上、直線部チェンバは水平方向の幅が異なる 4 種類のチェンバ (SSCa, SSCb, SSCc, SSCd) を製作する。最も幅の狭い SSCb を除き、SSCa、

SSCc、SSCd は外側の側板の構造を変更することでチェンバ上下板を共通化し製作コストの低減を図る。最も幅の広い SSCd について有限要素法による構造解析を行ったところ、チェンバ上下板の厚さ 2 mm の条件では 150°Cバーク時の発生応力が SUS316L の 0.2%耐力 130 MPa を越える箇所があることが分かった。JIS の許容差の上限に近い厚さ 2.1 mm では応力に問題のないことが確認できたため[4]、実際のチェンバ上下板は厚さ 2.1 mm で製作することとした。

偏向部チェンバは、長手方向にストレートな構造とする代わりに水平方向外側に十分な空間を確保し、電子ビームがチェンバ内を円弧を描きながら通過する際の十分な開口を担保している。また、上述の通り、偏向部チェンバの銅メッキも行わないこととした。チェンバのすぐ外側を光取出管 1 (PED1) が通る偏向部 2 は、外側内寸法を 93 mm から 60 mm に狭めてクリアランスを確保する。

直線部チェンバ、偏向部チェンバとも電子ビーム起因および放射光起因の入熱があるため、周辺雰囲気への放熱だけではなく水冷による除熱が欠かせない。磁極との干渉を避けつつ極力単純な配管経路を採ろうとすると、水冷チャンネルはビーム室内側に 1 系統のみとせざるを得ず、その効果を確認するため、有限要素法による熱構造解析を行った[4]。どちらのチェンバも、水冷が無い場合は最高温度が 90°C以上に達していたが、水冷を設けることにより 40°C以下に抑えられ、安定な運転の継続が可能であることを確認した。

3.2 光吸収体

高熱負荷の光吸収体の素材として、アルミナ酸化物の微粒子で分散強化された銅合金 GLIDCOP が広く用いられてきた。しかしながら、近年ではその入手性の悪さとコスト高が懸念されているため、SPring-8-II 真空機器の量産に向けて、新たな材料である銅合金 CuCrZr[5]を用いた光吸収体の検討、試作を行った。CuCrZr 製光吸収体では、受光部の加工性に加え、フランジ部と受光部との一体化が可能かどうかに着目して検証を行った。フランジ部と受光部との一体化が可能になると、GLIDCOP 製光吸収体の製作では必須だった異材接合部の真空リークの恐れがなくなり、高信頼性の光吸収体の実現が可能となる。

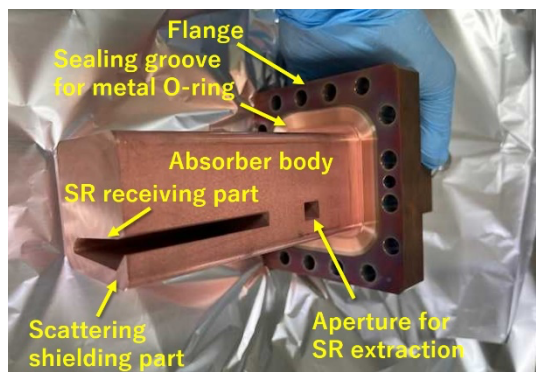


Figure 3: Prototype of a photon absorber made of CuCrZr.

Figure 3 に角型フランジとの一体構造で製作した CuCrZr 製横挿入型光吸収体の試作機を示す。横挿入型にするの長所は、内部に設けた水冷チャンネルの

冷却面を最大限に利用できることである。縦挿入型では二重管構造の水冷管の底面付近だけが冷却に寄与することになるため、水冷管が 4 本必要であったが、横挿入型にすることにより水冷管を 2 本に減らすことが可能となった。受光部は上部の斜入射構造の受光面と、受光面からの散乱放射線を遮蔽する下部の遮蔽体で構成される。この散乱遮蔽構造により、放射光受光時の PSD ガスの発生源を受光部内部に局在化させるとともに、周辺機器への散乱放射線の照射を抑制し、長期間にわたり機器の健全性を担保することを企図している。真空シールには金属製 O リングを用いる。試作した光吸収体を試験チェンバに取り付け、最高温度 150°C (保持時間 2 時間) のバークを 3 回繰り返し、シール性能に問題のないことを確認した。なお、本試作機では角型フランジとしたが、加工性、シール材のコストなどを考慮し、量産時には丸型フランジへの変更を計画している。

3.3 真空立上げ手順

SPring-8-II 計画では、SPring-8 のシャットダウンから、既存機器の撤去、SPring-8-II 機器の設置を約 1 年という短期間に終えなければならないため、真空システムの据付、立上をいかに短時間で実施できるかが重要な課題である。この課題への対策として、トンネル内への真空チェンバ据付後のベーキングは行わず、トンネル外でのプリバークと、据付後の NEG 活性化のみで真空を立ち上げる方式を検討した。

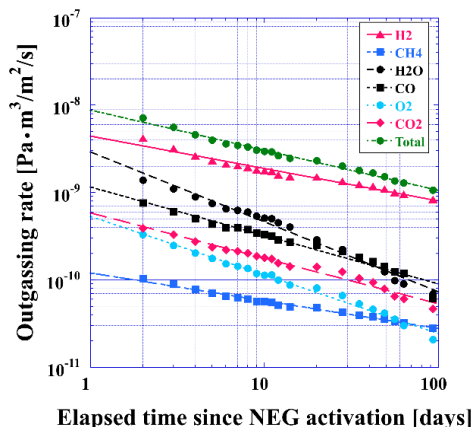


Figure 4: Outgassing rate of the test chamber with prebake, N2 purge and atmospheric exposure followed by rough exhaust and NEG activation.

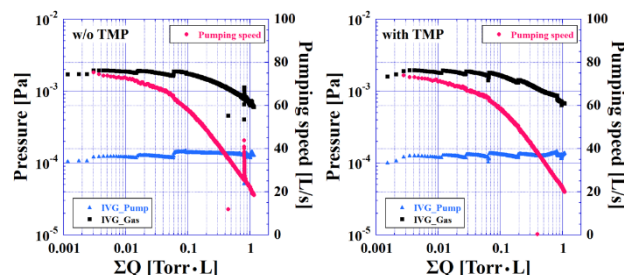


Figure 5: Pumping characteristics of NEG reactivated without TMP (left) and with TMP (right) for CO gas.

この方式の妥当性を検証するため、量産の真空チェンバとほぼ同条件で製作し、中央付近にカートリッジ型 NEG ポンプを取り付けた試験チェンバ(長さ約 1.7 m)を用いて真空立上げの試験を行った。事前に 150°C のプリベークを行った試験チェンバを、窒素パージ後に 2 日間大気に曝し(据付に要する時間を模擬)、その後、粗排気、NEG の活性化を行い、NEG 活性化以降の残留ガスのガス放出速度を計測した。結果を Fig. 4 に示す。NEG 活性化以降、各ガスのガス放出速度が順調に下がっていく様子から、据付後のベーキングは不要と判断した。また、SAES Getters 社のカートリッジ型 NEG ポンプ、NEX Torr Z500 を用いて、大気開放を伴わない NEG の再活性化では、外付けのターボ分子ポンプ(TMP)などを必要としないことを確認した。Figure 5 に TMP なし、ありで再活性化を行った NEG の CO に対する排気特性を示す。再活性化時の TMP の有無に関わらず、同様の排気性能が得られていることが分かる。この知見を活かし、SPRING-8-II においては、プリベーク済みの真空チェンバを据え付け、粗排気後に速やかに NEG の活性化を行って NEG による排気に切り替え、真空立上げを行う。また、運転開始前の状況を見て、必要に応じて外部ポンプを使用しない NEG の再活性化を実施する方針とした。

4. 圧力分布

ビーム運転時の真空性能を検証するため、モンテカルロシミュレーションソフト SynRad および MolFlow[6]を用いて、現時点での機器配置に基づいた PSD ガスによる圧力分布の計算を進めている[7]。一例として、Fig. 6 にビームドーズ 10 Ah、蓄積電流 100 mA 時の圧力分布

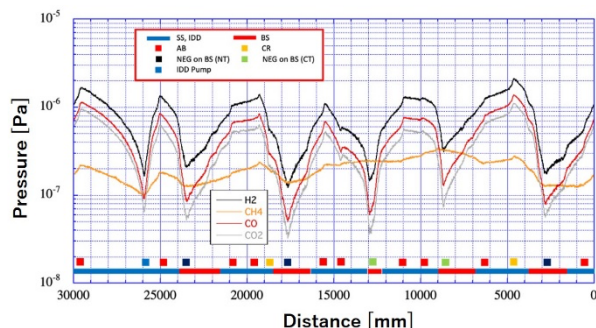


Figure 6: Pressure distribution simulated with MolFlow at beam dose of 10 Ah and beam current of 100 mA.

を示す。横軸は標準セルに ID 部用ダミーチェンバを加えた長さ(約 30 m)を示している。引き続き、ビームドーズ、蓄積電流、排気速度などの条件を変えたシミュレーションを行い、ビーム寿命等、真空性能の評価、コミッショニングにおける真空焼き出しシナリオの検討を進める。

5. まとめ

磁石等、他機器との干渉を確認しつつ、真空チェンバ構成、光吸収体や真空ポンプなどの機器配置の検討を進め、SPRING-8-II 標準セル真空システム的设计をほぼ完了した。実際の更新作業においては、試験チェンバを用いた検証に基づき、プリベーク済みの真空チェンバを据え付けて粗排気を行った後、NEG 活性化のみで真空を立ち上げる方針とした。また、現時点での機器配置での圧力分布シミュレーションを開始した。引き続き、各種条件下でのシミュレーションを行い、真空性能の評価、コミッショニングにおける真空焼き出しシナリオの検討を進める。

謝辞

本発表に関わる開発研究は理化学研究所による研究費助成を受けたものである。

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] M. Oishi *et al.*, in Proc. of IPAC'16, Busan, Korea, pp. 3651-3653. doi: 10.18429/JACoW-IPAC2016-THPMY001
- [3] K. Tamura *et al.*, in Proc. of IPAC'19, Melbourne, Australia, pp. 1272-1275. doi:10.18429/JACoW-IPAC2019-TUPMP018
- [4] S. Suzuki *et al.*, "SPRING-8-II 用真空機器の熱解析及び構造解析", Proc. PASJ2024, Yamagata, Japan, Jul.-Aug. 2024, WEP083, this meeting.
- [5] http://www.yamatogokin.co.jp/?page_id=66
- [6] <https://molflow.web.cern.ch/>
- [7] 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, this meeting.