

次世代放射光施設 3GeV 蓄積リングの真空システム STORAGE RING VACUUM SYSTEM FOR 3-GeV NEXT-GENERATION SYNCHROTRON RADIATION FACILITY

田村和宏^{#, A, B, C)}, 大石真也^{A, B, C)}, 小路正純^{A, B, C)}, 高野史郎^{A, B, C)}, 渡部貴宏^{A, B, C)}, 正木満博^{A, C)},
高橋直^{B, A)}, 谷内友希子^{A)}, 上田庸資^{A)}, 西森信行^{C)}, 保坂勇志^{C)}

Kazuhiro Tamura^{#, A, B, C)}, Masaya Oishi^{A, B, C)}, Masazumi Shoji^{A, B, C)}, Shiro Takano^{A, B, C)}, Takahiro Watanabe^{A, B, C)},
Mitsuhiro Masaki^{A, C)}, Sunao Takahashi^{A, B)}, Yukiko Taniuchi^{A)}, Yosuke Ueda^{A)}, Nobuyuki Nishimori^{C)}, Yuji Hosaka^{C)}

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

^{B)} RIKEN SPring-8 Center

^{C)} National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology (QST)

Abstract

The 3-GeV next-generation synchrotron radiation facility is under construction in Sendai. The 3 GeV storage ring with a circumference of about 350 m has a 4-bend achromat lattice and consists of 16 cells, aiming at a natural horizontal emittance of 1.1 nmrad and a stored current of 400 mA. In order to cope with the smaller diameter and higher density arrangement of electromagnets to realize lower emittance, the vacuum component design of the 3 GeV storage ring was carried out by referring to the R&D and basic design implemented for the SPring-8-II project to solve similar issues. In this paper, an overview of the 3 GeV storage ring vacuum system is presented with recent results of assembly test of the unit cell vacuum system with the magnets on the common girders.

1. はじめに

次世代放射光施設[1, 2]は、軟 X 線からテンダー X 線領域の高コヒーレンス・高輝度放射光源として、2023 年度中のユーザーへの放射光提供を目指して東北大学青葉山新キャンパスで建設が進められている。周長約 350 m、エネルギー 3 GeV の蓄積リングは、セルあたり 4 台の偏向電磁石を有する 16 のセルで構成されており、自然水平エミッタンス 1.1 nmrad、蓄積電流 400 mA を目指している[3]。

MBA ラティスを採用する低エミッタンスの蓄積リングでは、高磁場勾配を実現する多極磁石のボア径の狭小化と多数の多極磁石及び偏向磁石から成る磁石配置の高密度化が避けられない。磁石ボア径の狭小化は、真空チェンバの断面寸法の減少により排気コンダクタンスを低下させ、一方ではビームとのカップリングインピーダンスを増大させる。磁石配置の高密度化は、不要な放射光を吸収し真空チェンバを保護する光吸収体の配置に利用可能な空間が減少することを意味する。そのため、低エミッタンスリングの真空システムでは、狭小な磁極とのクリアランスとコンダクタンス最大化とを両立させる断面形状を持つ真直度の高い真空チェンバを、インピーダンスを抑制して製作すること、ガス放出源となる光吸収体の構造・配置の最適化、並びに高効率の排気系の実現が重要となる。次世代放射光施設 3 GeV 蓄積リングの真空システムの検討に当たっては、同様の課題の解決に向けて SPring-8-II 計画のために実施された R&D、および基本設計[4, 5]を参考にして、インピーダンス対策の銅メッキを施した小口径ステンレス製真空チェンバ等の機械設計、ガス放出源となる分散配置の光吸収体の直近に NEG ポンプと SIP を組み合わせて配置した効率の良

い排気系の設計を行った。さらに、ビーム廃棄時に高輝度電子ビームから真空チェンバを保護するため、グラファイト製の電子ビーム吸収体を新たに設計してセルあたり 1 台ずつ設置することとした[6]。

本稿では詳細設計、実機製作が進められている次世代放射光施設 3 GeV 蓄積リング真空システムの概要と、先行製作した 1 セル分の真空システムを用いた真空性能の検証、および磁石等との干渉確認試験等の試験セル検証の結果を報告する。

2. 真空システム

2.1 全体設計

真空システムの設計は、電磁石の寸法や放射光の拡がり境界条件とした真空チェンバ・光吸収体・ベローズ等の機械設計と、ガス放出量に応じて最適化された排気系を配置して必要なビーム寿命の確保を可能とする真空設計の両面を反復的に行う必要がある。低エミッタンス化に必要な高磁場勾配を実現するため、3 GeV 蓄積リングの四極電磁石はボア径 34 mm と口径の小さな電磁石になっている。また偏向電磁石間の直線部に配置する多極磁石同士の間隔も 10 数 cm と高密度の配置になっている。3 GeV 蓄積リングと同様に横方向、長手方向の空間的制約が多い中で真空システムを成立させた SPring-8-II の真空システムを参考に、3 GeV 蓄積リング真空システムの検討を行った。

Figure 1 に単位セルの電磁石、真空チェンバおよび光吸収体の配置を示す。1 セルの真空チェンバは偏向部真空チェンバ 4 式と直線部真空チェンバ 5 式で構成され、各チェンバは ICF フランジで接続される。電子ビームが通過する ICF フランジ締結部にはインピーダンス対策の RF コンタクトを設けて電子ビーム室を滑らかに接続す

[#] tamura@spring8.or.jp

る。直線部 3 中央の短直線部にはマルチポールウィグラー (MPW) に対応したチェンバを設置する。直線部真空チェンバの水平方向寸法を多極電磁石のヨーク内に収まる寸法に抑えるため、直線部に 12 台の光吸収体 (CR1, 2 および AB1~10) と偏向部真空チェンバ最下流に 4 台の補助光吸収体 (SAB1~4) を分散配置し、偏向電磁石で発生する放射光を受光して真空チェンバを放射光の直撃から保護する設計とした。

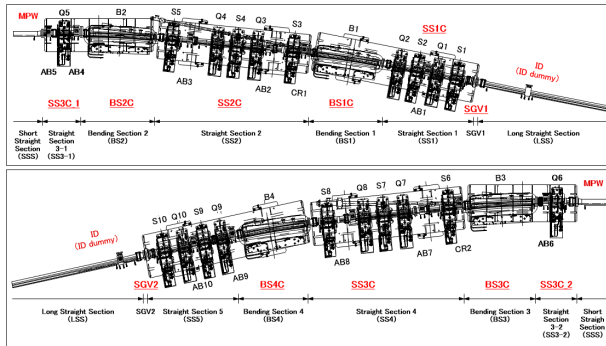


Figure 1: Equipment layout of unit cell.

光吸収体は斜入射で放射光を受ける構造とし、材質には繰り返し疲労強度に優れる Glidcop を用いる。Figure 2 に光吸収体の構造図および受光部の断面図を示す。受光面で発生する光電子、散乱X線による周辺のチェンバの温度上昇[7]やガス放出を低減し、また放射線遮蔽の効果を向上させるため、受光体下部に受光面に対向する形で光電子や散乱X線を防止する構造を持たせている。また光吸収体の冷却には、4 本の二重管式冷却構造を用いている。光吸収体の設計条件には最大受光パワー 2.1 kW、最大パワー密度 270 W/mm² を用いた。これらの値は蓄積電流 500 mA 時の最大入熱条件に相当し、より大電流での運転に対応できるように設計を行った。有限要素法を用いた熱構造解析に基づき、放射光軸上の受光部中心の傾きを 1/12 に決定した。

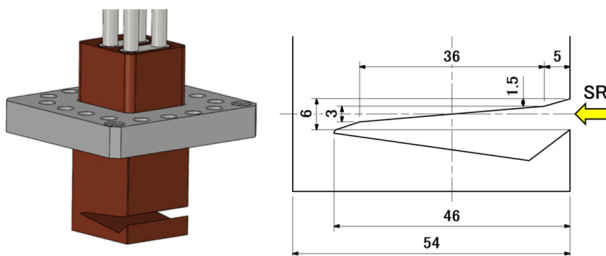


Figure 2: (left) Structural drawing and (right) cross-sectional view of photon absorber.

各光吸収体の直近には非蒸発型ゲッター (Non Evaporable Getter: NEG) ポンプとイオンポンプ (Sputter Ion Pump: SIP) を組み合わせた真空ポンプを集中的に配置した。放射光により発生した光刺激脱離 (Photon Stimulated Desorption: PSD) ガスを発生源で局所排気し、ビーム運転中に低い圧力を維持する設計としている。局所排気ポンプには SAES Getters 社製の SIP 組込型 NEG ポンプ、NEXTorr D500-5 (Diode 型 SIP) または NEXTorr

D500-StarCell を各光吸収体のガス放出量に応じて採用した。圧力計測には、フィラメント断等のトラブルの恐れのないコールドカソードゲージ (CCG) を用いることとし、カソード周辺のクリーニング機能を有するミラプロ社製の CCG、タフゲージ CCTG110S を採用した。

直線部の真空チェンバはステンレス製で、アンテチェンバ付きの構造とし、多極電磁石の磁極との干渉を避けつつ、電子ビーム室の断面積、放射光を通すためのスロットの高さを最大限確保する設計とした。Figure 3 に四極電磁石と直線部真空チェンバの断面を示す。電子ビーム室内側には高さ 6 mm、幅 5 mm の掘り込みを設けている。これは電子ビーム廃棄時に電子ビームが真空チェンバ内側壁に衝突することなく、後述の電子ビーム吸収体を設置した場所で選択的に散乱を起こさせるために設けたものである。

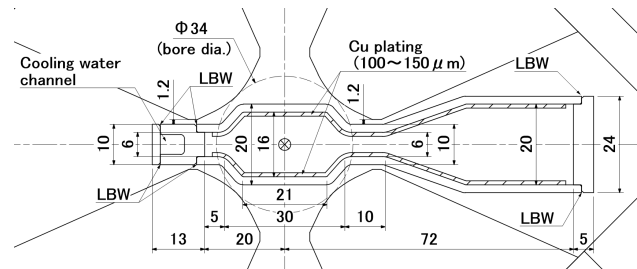


Figure 3: Cross-sectional view of quadrupole magnet and straight section chamber. Cu plated top and bottom plates are welded to side plates by laser beam welding (LBW).

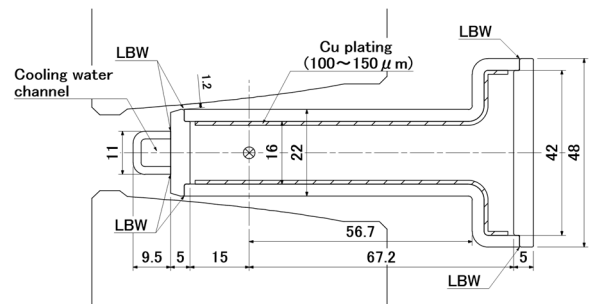
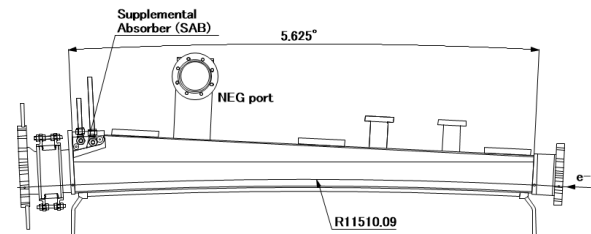


Figure 4: (upper) Plan view of bending section chamber, (lower) cross-sectional view of bending magnet and bending section chamber at upstream end.

低エミッタンス化のため、3 GeV 蓄積リングでは四極磁石の機能を持たせた機能複合型偏向電磁石を採用している。また 3 GeV 蓄積リング偏向電磁石の偏向半径は SPring-8-II と比べて小さいため、偏向電磁石の磁極との干渉を避けられるように、電子ビーム軌道に沿って円弧状に湾曲した構造の偏向部真空チェンバを新たに設計

した。直線部同様、チェンバ材質はステンレスである。Figure 4 に偏向部真空チェンバの平面図、および最上流部の断面図を示す。製作に当たっては、曲げ加工を施したステンレス鋼板を偏向半径で切断した上・下面材に内外の側板をレーザービーム溶接(LBW)してダクト形状に成形する方法を採った。

偏向部および直線部の真空チェンバはどちらもステンレス製で、鉛直方向のビーム室内寸法が 16 mm しかない。壁抵抗を抑えるため、ビーム室内面には厚さ 100 μm ~ 150 μm の純銅メッキを施している。また、加工、溶接等により上昇した透磁率の低減と内部応力の緩和、およびガス放出率の低減のため、LBW でダクト形状に仕上げた後に 900 $^{\circ}\text{C}$ $\times$ 10 min の真空熱処理を施す。

リングトンネル内に据え付けた真空システムは、各セルの両端にセクターゲート弁(SGV)を取り付けた後、150 $^{\circ}\text{C}$ のベーキング、NEG 活性化を実施し、超高真空への立ち上げを行う計画である。ビームコミッショニング期間を経て、ビーム電流 100 mA でユーザー運転を開始し、必要な焼き出し後(積分電流 1500 A $\cdot$ hr)に 400 mA まで増強することを想定しており、その時点でのビーム寿命 8 時間を確保することを目標に排気系の設計を行った。熱脱離(Thermal Desorption: TD)および PSD によるガス放出量とポンプの排気速度を基に圧力分布を計算し、圧力分布から算出した平均圧力でガス散乱寿命を求めた結果、積分電流 1500 A $\cdot$ hr 時のガス散乱寿命は 22.4 時間と見積もられた。400 mA 時のタウシェク寿命 15 時間を考慮したトータルのビーム寿命は 9 時間となり、目標とするビーム寿命が得られることを確認した。

2.2 電子ビーム吸収体

3 GeV 蓄積リングでは、電子ビームを廃棄する際に RF パワーを遮断して廃棄する方法を採用する。この方法では、エネルギー供給を止められた電子は放射損失によってエネルギーを失い続け、周回軌道がリング内側にシフトしていき、やがて真空チェンバ内側壁に衝突することになる。廃棄ビームの横方向サイズが共鳴などで広がらずに高密度状態のままステンレス製真空チェンバ内側壁に衝突した場合、非常に短時間に高いエネルギーが局所的に付与されることになり、チェンバが溶融し、最悪の場合、真空リークを引き起こす[8]。このような真空チェンバの損傷を防ぐため、3 GeV 蓄積リングではセル当たりに 1 箇所(リング全体で 16 箇所)、水平分散関数の大きな場所に、電子ビーム軸から 14 mm 内側に電子

ビーム吸収体を設けることにした。放射線遮蔽への影響を考慮し、トンネル壁との距離を最も大きく取ることができる AB8 を電子ビーム吸収体の設置位置に選んだ。Figure 3 に示すように他の直線部真空チェンバのビーム室内側壁は電子ビーム軸から 20 mm 内側にあるため、廃棄ビームは周回ごとに 16 箇所のうちのどこかの電子ビーム吸収体に衝突することになる。

電子ビーム吸収体の素材には電子の阻止能が低い軽元素で、かつ高耐熱素材であるグラファイトを選択した。廃棄ビームが広く薄く衝突するよう、また設置誤差の影響を抑えるため、グラファイトの表面形状は R 10 m の円弧形状とした。また発塵とガス放出低減のため、グラファイトの表面にはコーティング(CVI 処理)を施した。Figure 5 に取付フランジに取り付けた状態の電子ビーム吸収体を示す。なお、蓄積ビームを高密度状態のまま電子ビーム吸収体に当てた場合は、高耐熱のグラファイトであっても融点を超える高温にまで達してしまう。このため、実際のビーム廃棄時には、ビーム不安定性抑制用フィードバックに用いるキッカーで電子ビームを鉛直方向にキックしてビームを上下方向に拡げ、電子ビーム吸収体が溶融しない条件下でビームの廃棄を行う計画である。

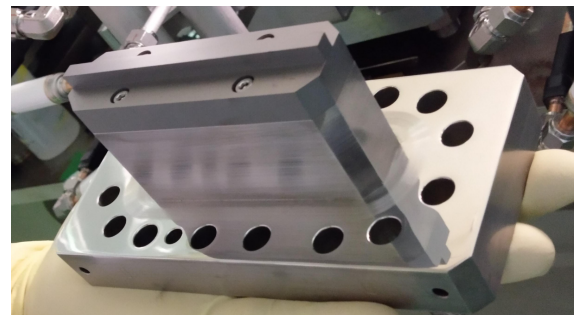


Figure 5: Graphite electron beam absorber assembled on mounting flange.

3. 試験セル検証

真空システム量産に先立ち、先行製作した 1 セル分の真空チェンバと支持装置を用いて、製作方法と製作精度、据付方法、他機器との干渉、真空性能等の検証を行い、量産に向けた問題点の洗い出しを行った。検証場所の広さ、製作工程を考慮して、試験セル検証は下流

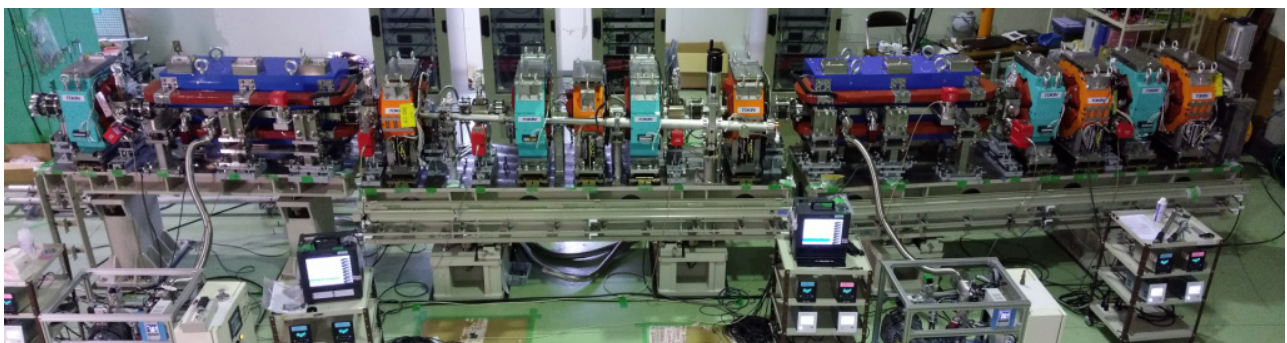


Figure 6: Test half-cell.

ハーフセルを用いた前半と、上流ハーフセルを用いた後半の 2 つに分けて行う計画とした。前半の検証では、真空チェンバと電磁石群とを組み合わせ下流ハーフセル全体を組み上げ、真空チェンバ、光吸収体等の据付精度確認、真空性能の検証、支持装置を含めた真空システムと他機器との干渉確認を実施した。

前半の検証では、半割にした電磁石群上に SS3C₂ から BS4C および SGV2 までの真空システムを据え付け (Fig. 1 の下図に相当)、フランジ締結、真空排気を行い、まずベーキング前の据付精度、電磁石群との干渉の確認を行った。据付が不可能となるような真空機器と磁石等との干渉はなく、機械設計に重大な問題はないことが確認できた。

半割磁石群の上で真空チェンバにヒーター、断熱材を取り付け、150℃×20 時間のベーキング、NEG 活性化を実施した。ベーキング時は、チェンバ下部の磁極が過大に加熱され磁石性能の劣化が起こるのを避ける必要があるため、チェンバ下面と磁極間に複数の断熱材と空気層を設けて磁極の温度上昇抑制に努めた。すべての磁石の磁極の温度監視を行い、ベーキング中の磁極温度が 40℃を超えることはないことを確認した。NEG 活性化はベーキングの降温時に実施した。到達圧力は 1 台を除き CCG の測定下限である 1E-8 Pa を下回る値を示し(残りの 1 台も 1.2E-8 Pa であった)、予想された TD ガスによる圧力分布と矛盾しない結果が得られることを確認した。

到達圧力確認、ベーキング後の機器の位置再現性確認を行った後、電磁石群の半割を復旧し、電磁石上部を含めた最終の干渉確認を行った。Figure 6 に半割を復旧して完成させた下流ハーフセルの全体を示す。多極電磁石の磁極と直線部真空チェンバとはいずれの場所でも 0.5 mm 以上の隙間が確保されており、チェンバの製作精度、据付方法に問題がないことを確認した。併せて、BPM ケーブルの付け外し、取り回し等の確認を行った。

後半の上流ハーフセル検証は 2021 年 8 月中を目処に実施する予定である。上流ハーフセルでは真空性能の確認は行わず、半割状態の電磁石群との干渉確認、BPM ケーブルの付け外し、取り回し等の確認のみを行う計画である。

4. まとめ

次世代放射光施設 3 GeV 蓄積リングの真空システムを設計した。偏向部真空チェンバ、光吸収体等、3 GeV 蓄積リング固有の機器の検討はあるものの、基本的な設計は SPring-8-II に向けた R&D により得られた知見と成果を活用した。熱脱離、光刺激脱離によるガス放出量と局所配置した排気系を用いた圧力分布計算を行い、所定のビーム寿命を達成しうる真空システムの設計を完了した。機械設計、真空設計、機器製作、据付方法に問題がないことを確認するために、真空機器の量産に入る前に 1 セル分の真空機器を先行製作し、磁石等の他機器との干渉確認、真空性能の検証を行った。下流ハーフセルを用いた検証により、機械設計、真空性能、機器製作、据付方法に大きな問題のないことが確認された。

謝辞

真空システムの詳細設計、機器製作において日立造船株式会社の方々にお世話になりました。また、理化学研究所放射光科学研究センター副センター長、田中均氏には有益なご助言をいただきました。心より感謝いたします。

参考文献

- [1] N. Nishimori *et al.*, “A highly brilliant compact 3 GeV light source project in Japan”, in Proc. of IPAC2019, Melbourne, Australia, pp. 1478-1481.
- [2] N. Nishimori *et al.*, “Accelerator system for highly brilliant 3GeV light source project”, Proceedings of the 16th Annual meeting of PASJ, Kyoto, Japan, July 31-August 3, 2019, pp. 153-156.
- [3] 量研: “3GeV 次世代放射光施設加速器デザインレポート”; <https://www.qst.go.jp/site/3gev/41162.html>
- [4] M. Oishi *et al.*, “Design and R&D for the SPring-8 upgrade project storage ring vacuum system”, in Proc. of IPAC2016, Busan, Korea, pp. 3651-3653.
- [5] K. Tamura *et al.*, “Feasibility tests of a vacuum system for SPring-8-II”, in Proc. of IPAC2019, Melbourne, Australia, pp. 1272-1275.
- [6] 西森信行 他: “3GeV 次世代放射光源加速器のための技術開発と建屋設計”, 加速器 Vol. 18, No. 1, 2021 (28-37).
- [7] K. Tamura *et al.*, “Development of a high-heat-load compact photon absorber for SPring-8 diagnostics beamline II”, Journal of Physics: Conference Series **425** (2013) 212005.
- [8] 依田哲彦 他: “SPring-8 電子蓄積リング真空チェンバーの 8GeV 蓄積電子廃棄時における損傷の調査”, J. Vac. Soc. Jpn. **48**, 103 (2005).