

次世代放射光施設 NanoTerasu 蓄積リング真空チェンバの製作及び設置 FABRICATION AND INSTALLATION OF VACUUM CHAMBER FOR NanoTerasu STORAGE RING

保坂 勇志^{#, A)}, 西森 信行^{A)}, 大石 真也^{B, C, A)}, 小路 正純^{B, C, A)}, 高野 史郎^{B, C, A)}, 田村 和宏^{B, C, A)},
渡部 貴宏^{B, C, A)}, 上田 庸資^{B, A)}, 谷内 友希子^{B, A)}, 正木 満博^{B, A)}, 高橋 直^{C, B)}, 平岩 聡彦^{C)}, 住友 博史^{D)},
足立 昌啓^{E)}, 奥野 祐介^{E)}, 田中 宏樹^{E)}, 永井 和広^{E)}, 藤本 浩太郎^{E)}

Yuji Hosaka^{#, A)}, Nobuyuki Nishimori^{A)}, Masaya Oishi^{B, C, A)}, Masazumi Shoji^{B, C, A)}, Shiro Takano^{B, C, A)},
Kazuhiro Tamura^{B, C, A)}, Takahiro Watanabe^{B, C, A)}, Yosuke Ueda^{B, A)}, Yukiko Taniuchi^{B, A)}, Mitsuhiko Masaki^{B, A)},
Sunao Takahashi^{C, B)}, Toshihiko Hiraiwa^{C)}, Hiroshi Sumitomo^{D)}, Masahiro Adachi^{E)}, Yusuke Okuno^{E)},
Hiroki Tanaka^{E)}, Kazuhiro Nagai^{E)}, Kotaro Fujimoto^{E)}

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

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

^{C)} RIKEN SPring-8 Center

^{D)} SPring-8 Service Co., Ltd.

^{E)} Hitachi Zosen Corporation

Abstract

Beam commissioning of the synchrotron radiation facility “NanoTerasu” is progressing at the Aobayama New Campus of Tohoku University. The successful storage of a 3 GeV electron beam has been confirmed. In order to achieve the stable storage of electron beam with a horizontal emittance of 1.1 nrad, NanoTerasu storage ring vacuum chamber is designed with various innovations, such as thin stainless-steel chambers, copper plating on the chamber inner surface to improve impedance, and a localized pumping system that places a pump near the gas source. In this paper, we report the events that occurred in manufacturing the vacuum chamber, the installation of the vacuum chamber on site, and the vacuum performance during the beam commissioning.

1. はじめに

次世代放射光施設 NanoTerasu は、軟 X 線から tender X 線領域の高輝度放射光源として、東北大学青葉山新キャンパスにて整備中の放射光施設である[1-3]。2024 年 4 月からのユーザー利用運転開始に向け、加速空洞、電磁石、真空チェンバ、ビームモニタ等の主要コンポーネントの設置を完了し、現在はビームコミッショニングを実施している段階である。

周長約 350 m の NanoTerasu 蓄積リングは 16 のセルで構成されており、1 セルあたり 4 台の偏向電磁石をもつラティス設計である[4]。目標であるエネルギー 3 GeV、蓄積電流 400 mA、水平エミッタンス 1.1 nrad の電子ビーム蓄積を実現するため電子ビームに強い磁場勾配を与える必要があり、電磁石は SPring-8 と比較して 1/3 程度の磁極間隔となっている。電磁石の小ボア径化に伴い真空チェンバにも小口径化が求められるが、小口径化は電子ビームとチェンバ壁の接近を意味し、インピーダンスを増大させ電子ビームの不安定性を引き起こす。NanoTerasu 蓄積リング真空チェンバは、SPring-8 アップグレードに向けて研究開発が行われたステンレス製チェンバによる薄肉化、チェンバ内面銅メッキによるインピーダンス改善、ガス源の直近にポンプを配置する局所的な排気システム[5]などを採用して設計された[6]。また、ビーム廃棄時のチェンバ損傷防止のため、チェンバ内周側の内面にグラファイト製の電子ビームアブソーバーを

設置していることも特徴の一つである[6]。

蓄積リング真空チェンバの製作・設置および真空立上げは 2023 年 3 月までに完了しており、ビームコミッショニングも順調に進展している。蓄積リングへの 3 GeV 電子ビームの蓄積を達成し、現在はビーム調整と焼き出し運転を実施している。本原稿では NanoTerasu 蓄積リング真空システムの概要について簡単に説明した上で、真空チェンバ製作や、現地での据付・真空立上げの状況、ビームコミッショニング中に確認した真空性能について報告する。

2. NanoTerasu 蓄積リング真空システム

蓄積リングを周回する電子ビームは真空チェンバ内のガス分子との相互作用により散乱され、これが蓄積電流を徐々に減少させる要因の一つとなる。長寿命の電子ビームを実現するため蓄積リングでは超高真空が要求される。

一方で、電子ビームは偏向電磁石により曲げられると制動放射により進行方向に放射光を放つ。この放射光は光吸収体で受け止めた上で排熱するが、光吸収体に放射光が照射されると光刺激脱離によりガスが脱離しチェンバ内の圧力が上昇する。NanoTerasu 蓄積リングでは 1 セルに 12 台の光吸収体と 4 台の補助の吸収体を設置している。光吸収体の材質は高温での特性に優れたアルミナ分散強化銅 GLIDCOP [7]とした。ビーム運転時は光吸収体がガス源となるため光吸収体の直近に真空ポンプを設置することで局所排気し、全体の圧力を効

[#] hosaka.yuji@qst.go.jp

率的に低く保つデザインとなっている。

真空ポンプは小型で排気速度の大きい非蒸発型ゲッター(NEG)ポンプと、スパッタイオンポンプ(SIP)が一体化されたコンパクトな真空ポンプ NextTorr D シリーズ(SAES Getters S.p.A.) [8]を採用した。真空計はフィラメント切断の心配がないコールドカソードゲージとし、クリーニング機能を有する CCTG110S (ミラプロ) [9]を採用した。

真空チェンバの小口径化に伴い電子ビームとチェンバ壁が接近するため、インピーダンスが増大し電子ビーム不安定性が誘起されてしまう。真空チェンバを非磁性のオーステナイト系ステンレス SUS316L 製とし厚さ 2 mm 程度まで薄肉化することで、挿入光源を設置する部分を除いてビームとチェンバ壁の距離を 8 mm 程度確保した。また、ステンレスはアルミ・銅と比べ電気抵抗率が高いため、チェンバ内面の主要な部分を銅メッキし表面抵抗率を下げインピーダンスを低減した。銅メッキ後は電解研磨による表面処理を行うため、メッキの厚さは電解研磨後に 100–150 μm となるよう調整した。

加工・溶接時に局所的な透磁率上昇や残留応力が生じるため、溶接後に摂氏 900 度 10 分間保持の真空熱処理を行い、比透磁率を 1.05 以下とした。

真空チェンバは搬入・設置時の取り回しの利便性を考慮し、挿入光源用チェンバを除いて 1 セルあたり 9 式の短尺チェンバで構成しており、各チェンバは ICF フランジで接続する。ビーム軸上のフランジ締結部では、チェンバ内部を滑らかに接続するための RF コンタクトを設けた。

3. 真空チェンバの製作

3.1 事前検証

製作にあたっていくつかの検証を事前に実施した。

3.1.1 銅メッキ

銅メッキについて、各チェンバの形状の試験片を準備し、電解研磨後の厚さや、表面粗さ、密着性、表面抵抗率に問題ないことを検証した。また、銅メッキ・電解研磨時に用いるマスキングテープについて、処理後に粘着成分の残留があるか FT-IR や電子プローブマイクロアナライザーによる元素分析を行い、電解研磨後に粘着成分が検出されないことを確認した。

3.1.2 各種溶接

レーザー溶接・TIG 溶接・電子ビーム溶接について、模擬部材及びモックアップを準備し事前検証を実施した。断面マクロ観察により、溶け込み深さが各部材の狙い深さとなる入熱・速度の条件を検証した(Fig. 1)。また、溶接後の寸法・内面段差・透磁率・真空シール性能に問題ないことを確認し、直線部のチェンバなど高い真直度が必要なチェンバについては溶接時の変形・反りを矯正加熱により修正する際の加熱条件も検証した。

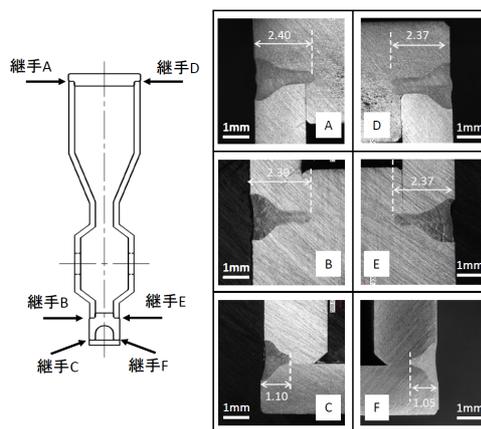


Figure 1: Example of pre-verification for welding: Depth of penetration for laser beam welding of straight section chambers.

3.1.3 異種接合

GLIDCOP 製の光吸収体とステンレス間の異種接合(ロウ付け)について検証を行った。検証段階において金ロウ(Au-Cu)が回り込まず接合不良が連続したが、中腹にロウ材セット溝を追加、化学研磨による接合面の粗さ改善、部材の熱膨張係数差を考慮した接合面クリアランス管理を行うよう改善し、ロウ付けによる GLIDCOP とステンレス間の異種接合手順を確立した(Fig. 2)。

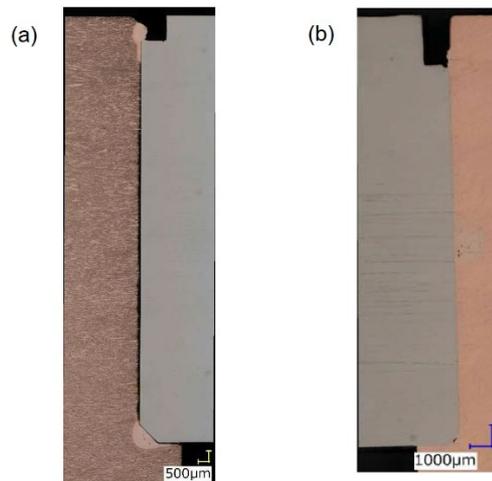


Figure 2: Pre-verification for brazing between GLIDCOP photon absorber and SUS316L flange, (a) before and (b) after improvement of brazing process.

3.2 試験セルチェンバ

先行して 1 セル分の試験真空チェンバと支持装置を製作し、SPring-8 にて設置及び真空立上げの試験を実施した[6]。この試験では現地での据付手順を確認するため真空チェンバだけでなく電磁石や冷却水ヘッダーなどの他機器を設置し、他機器の干渉や作業性などの確認を行った。電磁石とのクリアランスは設計上 1 mm 強であるが、大きな干渉はなく真空チェンバの製作精度・据付精度に問題無いことが確認できた。設置した状態で真空立上げ及びベークを行い、圧力が CCG の測定下

限である $1e-8$ Pa まで到達できることを確認した。また、ベーキング時に電磁石の磁極温度が摂氏 40 度を超えないことを確認できた。

3.3 その他製作時の発生事象

3.3.1 銅メッキ剥離

真空チェンバ内面の銅メッキが剥離する事象があった。原因は銅メッキ直前の洗浄不足であり、前工程での処理液の残留が端部のマスキング境界で染み出たためであった。洗浄の時間・水量・かけ流し方法を管理することで、その後銅メッキの剥離は発生しなくなった(Fig. 3)。

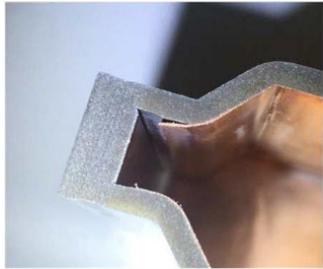


Figure 3: Removal of copper plating at the edge of the straight section chamber.

3.3.2 真空熱処理後の銅メッキ白濁

試験セルを製作する段階で、銅メッキ表面の白濁が発生した(Fig. 4)。エネルギー分散型 X 線分光法(EDX)により白濁を解析すると、母材のステンレス及び有機物由来の元素だとわかった。白濁の原因は、真空熱処理前の洗浄が不十分で、残存していたステンレス及び有機物成分が真空熱処理後に白色異物として銅メッキ面に現れたためであった。異物付着対策として、ワイヤカット時の冷却方法改善並びにワイヤカット後に冷却水が乾燥する前の洗浄を徹底した。真空熱処理時間についても 2 時間から 10 分に短縮する対応を行い、解決した。

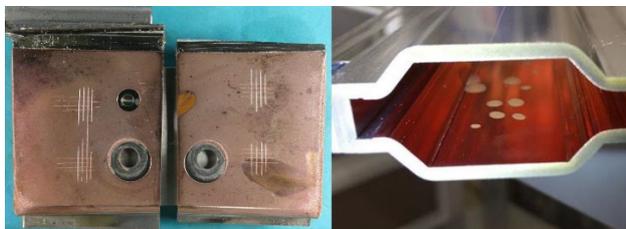


Figure 4: White powder and spots on copper plated surface after vacuum annealing.

3.3.3 TIG 溶接

TIG 溶接に関しては、溶接の熱によるチェンバの変形や、チェンバ内面の溶接焼け、内面銅メッキの熔融など、様々な問題が発生した。熱による変形については溶接電流を低くし入熱を抑える他、チェンバにヒートシンクを追加するなどの対策を行った。チェンバ内面の溶接焼けについてはシールドガス(Ar)の雰囲気置換を徹底し、酸素濃度計を用いて確認する手順とした。内面銅メッキの熔融については、溶接線の後半で温度が上昇するため、ビーム室の銅メッキ近傍が溶接線の前半となるよう溶接方向を工夫するなどの対策を行った。

4. 真空チェンバの設置

NanoTerasu 現地での真空チェンバ設置及び真空立上げは、2022 年 6 月から 2023 年 2 月にかけて行った。

まず真空チェンバの支持装置を共通架台上に設置し、高さや位置を調整した。共通架台には事前に固定用のタップ穴を施工しておき、支持装置を共通架台に皿ビスで対角 2 箇所仮固定し、タップ穴を基準に支持装置の位置出しを行った。

次に真空チェンバを支持装置に据付けた。真空チェンバは、専用の吊り治具に固定したうえでチェーンブロックを用いて吊り上げ、水準器を用いて水平を出した。支持装置に真空チェンバを載せる際は、他の機器に衝突しないよう確認しつつチェーンブロックを用いて手動で静かに下ろした。Figure 5 に設置時の様子を示す。支持装置にチェンバを固定した後はベローズを締め、次の真空チェンバの据付へと移った。



Figure 5: Installation of vacuum chamber.

チェンバ据付後にラフアライメントを実施した。Y 方向に関しては光学マイクロメータ付きオートレベルの視準線をビーム軸から 100 mm の高さに合わせ、チェンバに取り付けたターゲット治具が正しい高さとなるよう調整した。X 方向に関しては、上下分割した状態の電磁石の半割面に据付治具を設置し、その上にレーザー墨出器を置き、チェンバに彫ったビーム軸野書がレーザーと合うよう調整した。Rolling と Pitching に関しては水準器をチェンバに載せて調整した。

ラフアライメント完了後、フランジの締結及び CCG, SIP の取り付けを行った。これらは真空作業であるため、真空チェンバ内を汚染しないよう移動式のクリーンブース内で実施した。

その後、レーザートラッカーを用いた一度目のアライメントを行った。レーザートラッカーは AT403 (Leica Geosystems AG)を用いた[10]。このアライメントの時点では ± 0.5 mm 以内の設置精度を目標とした。真空チェンバの光吸収体・フランジなど主要な部品にはレーザートラッカーのターゲットを取り付けるための $\phi 4$ のピン穴を事前に施工しており、再現性の高い位置測定が可能である。チェンバ設置時はチェンバ設置場所近辺の複数の床基準点・壁基準点の位置を測定し三次元座標を作り、その座標を元に設置すべき位置を割り出した。

一度目のレーザートラッカーアライメント後に粗排気を行い、続いてベーキングを行った。真空立上げ及びベーキングについては次の章で述べる。

ベーキング後、レーザートラッカーを用いた再アライメ

ントを行った。この再アライメントでは要求される設置精度は、光吸収体では ± 0.1 mm、電子ビームアブソーバーでは ± 0.05 mm となり、これが最終的な設置目標となる。Table 1 に主要機器の最終的な据付公差を示す。一部の例外を除く全ての機器をこの公差内に据え付けることができた。

Table 1: Tolerance of Installation for Each Component of Vacuum Chamber

Component	X [mm]	Y [mm]	S [mm]	Roll [mrad]	Pitch [mrad]	Yaw [mrad]
Flange	± 0.5	± 0.5	± 1.0	± 7.7	None	None
Beam position monitor	± 0.5	± 0.5	± 1.0	± 10	± 17	± 17
Photon absorber	± 0.1	± 0.1	± 1.0	± 8.0	± 5.5	± 9.0
Sub photon absorber	± 0.3	± 0.5	± 1.0	None	None	None
Electron beam absorber	± 0.05	± 0.5	± 1.0	None	None	None

最後に真空チェンバ・光吸収体の冷却水配管およびゲートバルブの圧搾空気配管を施工し、真空チェンバの据付を完了した。

5. 真空チェンバの真空性能

5.1 真空立上げ・ベーキング

真空立上げ時には、スクロールポンプ及びターボ分子ポンプを組み合わせた粗排気ユニットを用いて真空粗排気を行った。1 セルあたり 4 台の粗排気ユニットを真空チェンバに取り付け、そのうち 1 台にヘリウムリークディテクタを接続した。ヘリウムリーク試験では、締結したフランジにヘリウムを吹きかけ個別にリーク試験を行った後、真空チェンバ全体にフードをかけヘリウムを充填し、リークレート $1e-11$ Pa \cdot m³/s 以下を 5 分間維持することを確認した。

圧力が $1e-6$ Pa 程度になった段階でベーキングを行った。ベーキング時のチェンバの熱延び吸収のため、全てのベローズのタイロッドを外し、支持装置のビーム軸方向を固定するボルトを緩めた。リボンヒーターを真空チェンバに巻き付け、断熱材としてアルミホイルで覆い、耐炎フェルトをチェンバ上に敷いた。チェンバ下面に半割電磁石がある場所については上面、側面にのみリボンヒーターを取り付けた。

K 熱電対を用いて真空チェンバ温度を測定し、コントローラで温度フィードバック行いつつ昇温・保持・降温を行った。設定温度は真空チェンバでは摂氏 150 度、SIP では摂氏 220 度とし、ベーキング時間については昇温 6 時間、保持 20 時間、降温 6 時間とした。

ベーキング降温開始 1 時間前に、NEG ポンプのコンディショニングとして設定温度摂氏 250 度、30 分の通電を行った。その後、ベーキング降温中に、NEG ポンプ活性化として設定温度摂氏 550 度、計 120 分の通電を行った。NEG ポンプ活性化後に SIP に高電圧を印加し、デ

ガスによる変動が落ち着いたタイミングで粗排気弁を閉め粗排気ユニットを切り離れた。ベーキング後、到達圧力を確認し、一部の特殊なチェンバを除き圧力が $3e-8$ Pa 以下になることを確認した。

5.2 ビームコミッショニング時点の真空性能

NanoTerasu は現在ビームコミッショニングを実施している最中である。ビームコミッショニングは順調に進展しており、2023 年 6 月 16 日に蓄積リングにおいて 3 GeV 電子ビーム蓄積を確認した。電子ビームが蓄積リング周囲を始めると進行方向の放射光が常に発生し、放射光を受け止める光吸収体表面からの光刺激脱離によりチェンバ内の圧力が悪化する。特に蓄積リング立上げ時は光刺激脱離により発生するガスが多く、蓄積可能な電流を制限してしまう。照射された放射光の積算量が増加するほど光刺激脱離によるガス発生量は減少していくため、焼き出し運転を行い、なるべく長時間大電流を蓄積し発生するガスをからしていくことが必要となる。

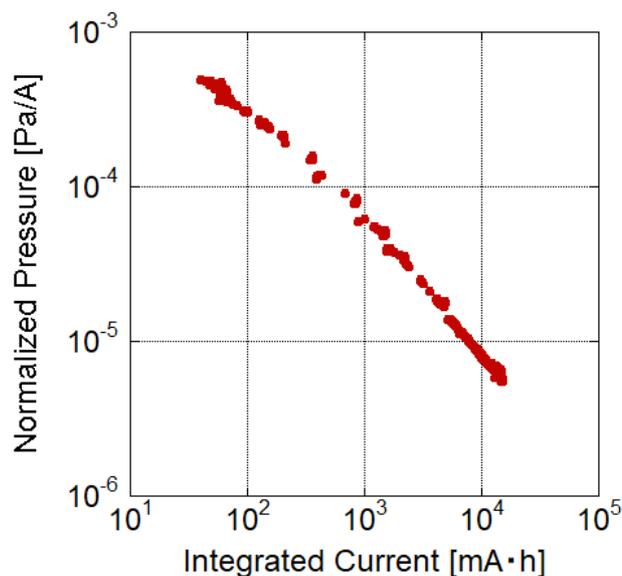


Figure 6: Reduction in normalized pressure with increasing integrated current.

Figure 6 に執筆時点での NanoTerasu の圧力推移を示す。横軸に積算電流[mA \cdot h]、縦軸に規格化圧力 $\Delta P/I$ [Pa/A]をとっている。ビーム蓄積による圧力変化 ΔP を蓄積電流で割った規格化圧力 $\Delta P/I$ は、短期的な蓄積電流の変化に対しほぼ一定の値となるため、光刺激によるガス脱離の減少を評価する指標となる。Figure 6 の規格化圧力は減衰傾向にあり、順調に焼き出しが進んでいることがわかる。蓄積を初確認した当日は 0.05 mA の蓄積でもチェンバ内の圧力は $1e-6$ Pa 程度まで悪化していたが、執筆時点では 100 mA 以上蓄積して圧力は $1e-6$ Pa 程度である。ユーザー利用運転開始の 2024 年 4 月までにさらに 1 桁強、規格化圧力を改善する予定である。

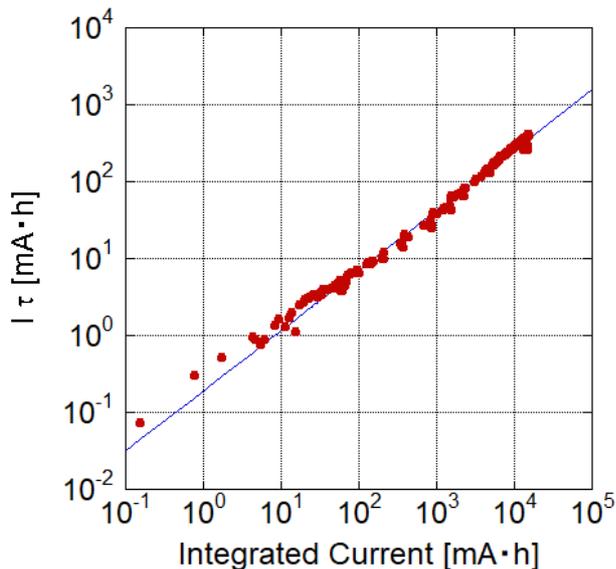


Figure 7: Increase of electron beam lifetime with increasing integrated current.

Figure 7 に執筆時点での NanoTerasu のビーム寿命推移を示す。横軸に積算電流[mA・h]、縦軸に蓄積電流とビーム寿命の積 $I\tau$ [mA・h]をとっている。ビーム寿命 τ は電子ビーム電流が $1/e$ になる時間にあたるパラメータであり、ガス分子との散乱や、電子と電子同士の散乱など、いくつかのビームロス要因の複合的な結果として得られる。焼き出し運転前及びその最中においてはチェンバ内の残留ガスとの散乱がビームロスの主要な要因であり、規格化圧力(Fig. 6)の減少に対応して、ビームは長寿命化されていく。蓄積電流とビーム寿命の積 $I\tau$ は、規格化圧力と同様に短期的な蓄積電流の変化に対しほぼ一定の値となるため、ガス散乱に起因する寿命の改善を評価する指標となる。ビーム寿命の改善は順調であり、真空設計時の見積もりでは積算電流 40 A・h のときにガス散乱寿命による $I\tau$ が 0.95 A・h という見積もりであったが、Fig. 7 に青実線で描かれている最小二乗法による外挿では、積算電流 40 A・h のときに $I\tau$ は 0.76 A・h になると算出され、設計時の見積もりと矛盾しない結果となっている。

6. まとめ

次世代放射光施設 NanoTerasu は、2024 年 4 月からの運用開始に向け電磁石、真空チェンバ、加速空洞等の主要コンポーネントの設置を完了し、現在はビームコミッションングを実施している段階である。蓄積電流 400 mA、水平エミッタンス 1.1 nmrad の電子ビーム蓄積を実現するため、NanoTerasu 蓄積リング真空チェンバは、ステンレス製チェンバ採用による薄肉化、チェンバ内面銅メッキによるインピーダンス改善、ガス源の直近にポンプを配置する局所的な排気システムなど、様々な工夫を施した設計となっている。

真空チェンバの製作では、まず技術的な課題となりえる銅メッキ、各種溶接、異種接合などについて事前検証を行った。さらに、先行して試験セルを製作し SPring-8 で設置の試験を行うことで、他の機器との干渉がないこと、

据付手順や精度に問題がないことが確認できた。

NanoTerasu 現地での真空チェンバの設置は 2022 年 6 月から 2023 年 2 月までの期間に実施した。手順としては、支持装置設置、真空チェンバ据付、ラフアライメント、フランジ締結・機器取付、レーザートラッカーによるアライメント、真空立上げ・ベーキング、レーザートラッカーによる再アライメント、冷却水配管施工という順で行った。光吸収体で ± 0.1 mm、電子ビームアプソーパーで ± 0.05 mm という最終的な目標公差に対し、ほぼ全ての機器を公差内に据え付けることができた。

真空性能に関して、現地でベーキングを実施することで、ビーム運転開始前の到達圧力は $3e-8$ Pa 以下とすることができた。ビーム運転開始後の圧力に関しては焼き出しが順調に進んでおり、規格化圧力の減少やガス散乱寿命の長寿命化が確認できている。長寿命化のペースについても設計段階のシミュレーションと比較しても矛盾ない結果となっており、運用開始に向け着実にビームコミッションングが進んでいる。

参考文献

- [1] N. Nishimori, "A New Compact 3 GeV Light Source in Japan", Proc. IPAC2023, Bangkok, Thailand, Jun. 2022, pp. 2402–2406.
- [2] N. Nishimori *et al.*, "A highly brilliant compact 3 GeV light source project in Japan", Proc. IPAC2019, Melbourne, Australia, May. 2019, pp. 1478–1481.
- [3] N. Nishimori *et al.*, "Accelerator System for Highly Brilliant 3GeV Light Source Project", Proc. PASJ2019, Kyoto, Japan, Jul.–Aug. 2019, pp. 153–156.
- [4] QST, "3GeV 次世代放射光施設加速器デザインレポート", Sep. 2020.
<https://www.qst.go.jp/site/3gev/41162.html>
- [5] K. Tamura *et al.*, "Feasibility tests of a vacuum system for SPring-8-II", Proc. IPAC2019, Melbourne, Australia, May 2019, pp. 1272–1275.
- [6] K. Tamura *et al.*, "Storage ring vacuum system for 3-GeV next-generation synchrotron radiation facility", Proc. PASJ2021, Takasaki, Japan, Aug. 2021, pp. 432–435.
- [7] <https://www.hoganas.com/en/powder-technologies/glidcop/>
- [8] <https://www.saesgetters.com/products/nextorr-pumps>
- [9] <https://www.mirapro.co.jp/mpcweb/wp-content/themes/mirapro/pdf/catalog-5.pdf>
- [10] <https://leica-geosystems.com/products/laser-tracker-systems>