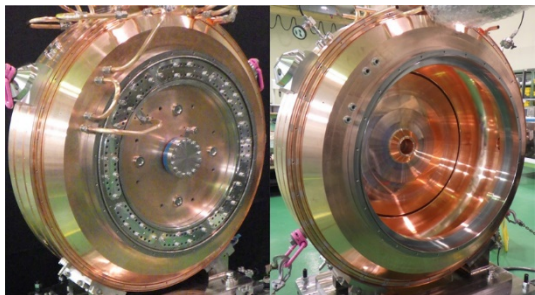


3GeV 高輝度放射光施設 NanoTerasu の電子加速器を支える 加速空洞製造技術

Manufacturing Technology of Electron Accelerator
for the 3GeV Synchrotron Radiation Facility NanoTerasu.



原 博史*1
Hiroshi Hara

比嘉 究作*2
Kiyusaku Higa

重岡 伸之*3
Nobuyuki Shigeoka

2024年4月より運用が開始された3GeV高輝度放射光施設 NanoTerasu は、最新の加速器技術を取り入れた設備であり、三菱重工機械システム株式会社(以下、当社)が製造した加速空洞が導入されている。加速空洞は精密機器であり、加工・組立・調整を通じて高い精度が要求される。当社は長年にわたり加速器施設の建設においてコンポーネントの提供で貢献し、製造技術の研鑽を続けてきた。本報では、当社のその製造技術に焦点を当てて述べる。

1. はじめに

1.1 NanoTerasu の概要⁽¹⁾

2024年4月より運用が開始された3GeV高輝度放射光施設 NanoTerasu は、世界最高水準の分析機能をもつ施設である。光速近くまで加速された電子の軌道を曲げた時に発生する光を“放射光”と呼び、NanoTerasu では太陽光の10億倍以上の明るさ(輝度)を持つ放射光を発生させ、物質の構造や機能をナノ(10億分の1)レベルで可視化することができる。その応用範囲は、材料科学(新しいエネルギー材料の開発や物質の性質の解明)、生命科学(タンパク質や生体分子の構造や相互作用の解析)、医学(新しい治療法や新薬開発における分析やイメージング)などの多岐に及び、SDGs に代表される社会課題の解決に向けた研究開発支援の役割も期待されている。

1.2 NanoTerasu 用加速空洞

NanoTerasu は、放射光源となる蓄積リング(Storage ring)と、蓄積リングへの電子ビームの入射源となる入射線型加速器(Injector linac)で構成される(図1⁽²⁾)。限られたリソースの中で完成すべく国内加速器研究所の成果・開発技術が積極的に取り入れられ、徹底的なコンパクトネスによる施設設計がなされた。

電子源で発生した電子を3GeVまで加速する線型加速器には理化学研究所のX線自由電子レーザー施設 SACLA (SPring-8 Angstrom Compact Free Electron Laser)で実績のあるシステムが採用され、238MHz 加速空洞、476MHz 加速空洞及び 5712MHz ディスクロード型 C バンド加速管が導入された。

蓄積リングには限られた周長で高輝度を得るために多数の電磁石が配置されており、エネルギー損失を補填する加速空洞の設置スペースは約 5mに限られた。そのため、従来構造の加速空洞では必要な加速電圧と安定したビームの確保を果たすことができず、世界初実装となる新型 HOM(Higher-order mode, 高次共振モード)減衰型高周波加速空洞が導入された。

図2に NanoTerasu に据え付けられた当社製の加速空洞を示す。尚、上記“加速空洞”、“加速

*1 三菱重工機械システム株式会社 設備インフラ事業本部 機械技術部 技術士(機械部門)

*2 三菱重工機械システム株式会社 設備インフラ事業本部 機械技術部

*3 三菱重工機械システム株式会社 設備インフラ事業本部 機械技術部 主席部員 理学博士

空洞”と“加速管”について専門的には区別されているものであるが、いずれも電子を加速する機能を有する装置である。

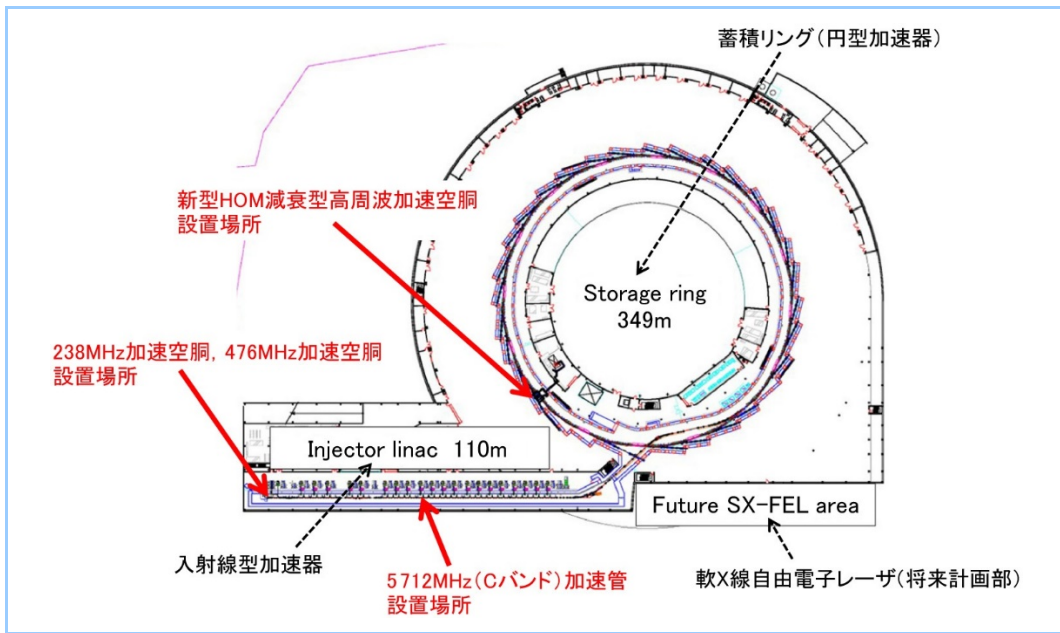


図1 NanoTerasu 加速器

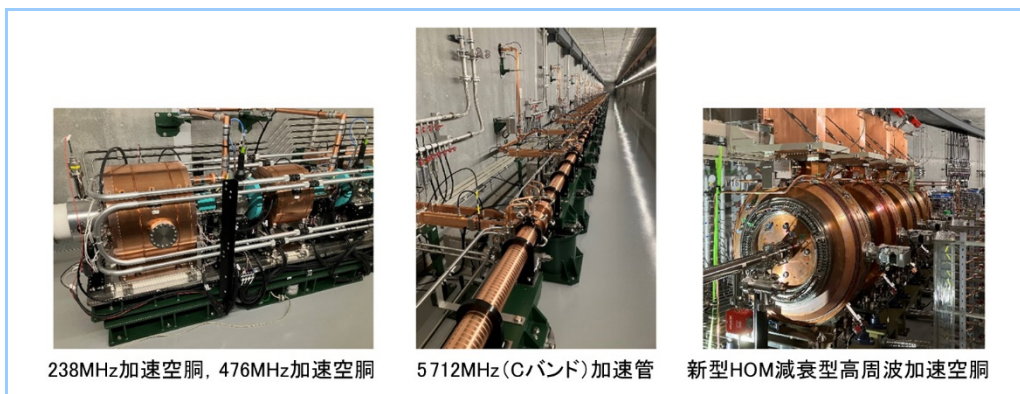


図2 当社製加速空洞の設置状況

2. 加速空洞製造技術

本章では、新型 HOM 減衰型高周波加速空洞を例にとり、当社の加速空洞製造技術について述べる。238MHz 加速空洞、476MHz 加速空洞及びディスクロード型 C バンド加速管の製造技術については、既報を参照されたい⁽³⁾⁽⁴⁾。

2.1 新型 HOM 減衰型高周波加速空洞の概要

新型 HOM 減衰型高周波加速空洞は、理化学研究所によって基本設計されたものである⁽⁵⁾⁽⁶⁾。従来の加速空洞とは異なる共振モード（電磁場の配置・振動を特徴づけるもの）をビーム加速に利用することにより、短い空洞長でのビーム加速とビーム不安定性対策の両立を可能とするものである。一方で加速空洞の内径は大きくなり、製造に際しては精密な表面加工や組立接合技術及び周波数調整技術が求められた。

本加速空洞の構成を図3に示す。中央内径約 1000mm、全長（ビームポート端面距離）約 450mm、ビームポート内径約 70mm のリエントラント型である。空洞本体の材料には電子管用無酸素銅（結晶粒判定は ASTM F68 CLASS1 に適合）を用いた。フランジには、JIS 規格 SUS316L を用いた。

中心軸から一定距離の位置の壁面には空間を設け、加速電子に有害振動を与える高次共振モード (HOM) を減衰するための HOM 吸収体を内蔵することで電子ビームの不安定性を解消す

る。HOM 吸収体本体は UHF 帯高周波吸収用フェライトであり、HOM はフェライトブロックに吸収されて熱に変換され、冷却水により除熱される。

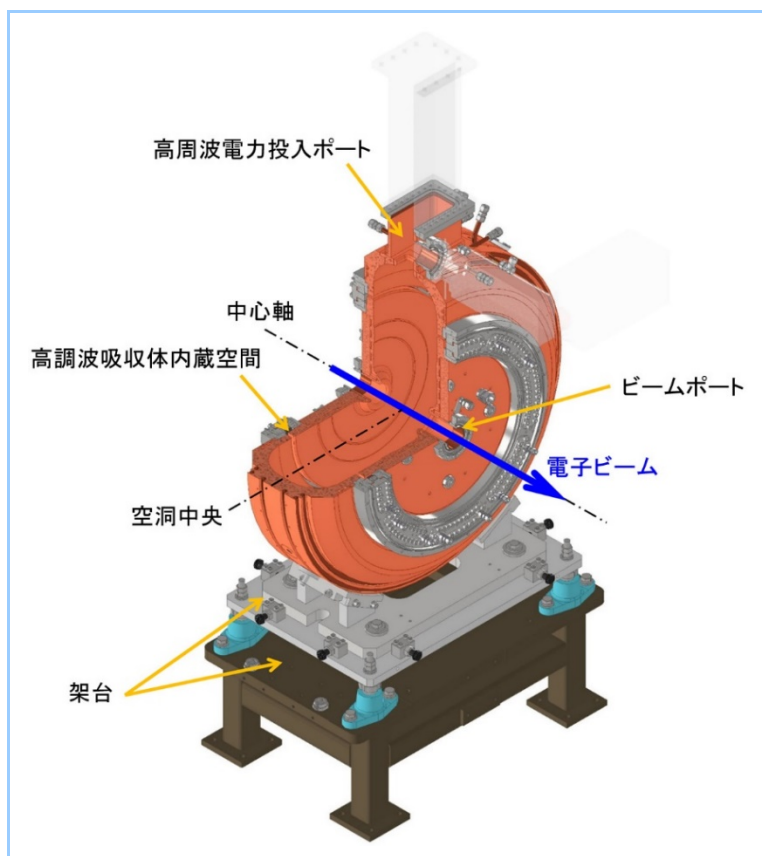


図3 本加速空洞の構成

2.2 加工

空洞本体の加工には、高い共振周波数精度及び高い Q 値(空洞の高周波損失に関する性能指標であって、高いほど高周波損失が小さい)が求められるため、旋削加工(高速回転させた素材に切削工具を当てる加工方法)により、寸法誤差 $\pm 0.05\text{mm}$ 以下、表面粗さ $Ra0.8\mu\text{m}$ 以下の精密加工を行った。

銅の加工の際には、温度管理(線膨張係数が大きく寸法の温度換算が必要である)、切削工具刃先管理(切削抵抗が大きくむしれを生じやすい)、防錆管理(もらい錆や切削液による腐食が発生する)が重要である。

機械加工完了後は、希硫酸で洗浄し、防錆のためクロメート液に浸漬して表面を保護した。

2.3 組立

無酸素銅部品の接合には、[図4](#)に示す自社保有の大型真空熱処理炉によるロウ付け組立てを用いた。溶融したロウが接合面全体に均一に広がることで隙間なく強固な接合となるとともに、良好な電気伝導性・熱伝導性を得ることができる。

ロウ付け組立ての際には、ロウ材選定(ロウ流れやステップロウ付け温度を考慮)、ロウ材配置(ロウ流れやロウ量を考慮)、隙間管理(ロウ流れやフレット形成を考慮)、温度管理が重要である。

空洞本体のロウ付け組立てでは部材温度が均一になるように約 24 時間かけて昇温し、真空中での自然放熱による冷却には約 48 時間を要した。ロウ付け接合面の気密性は、ヘリウム漏れ試験にてリークレート $1 \times 10^{-10}\text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{sec}$ 以下の検出感度で漏れがないことを確認した。

[図5](#)に示す HOM 吸収体の組立てにもロウ付け組立てを用いた。HOM 吸収体 1 体当たり、長さ 25.5mm ×幅 10.26mm ×高さ 4mm のフェライトブロック 12 枚を 1 回のロウ付け組立てで接合した。

フェライトブロックが十分な強度を持って接合されていることを確認するため、フェライトブロック

の側面から4~5kgfの荷重を加えたが、割れ・剥離は生じなかった。加速空洞への取付け前に行った脱ガスのための150℃真空ベーキング後の確認においても割れ・剥離は生じなかった。



図4 大型真空熱処理炉

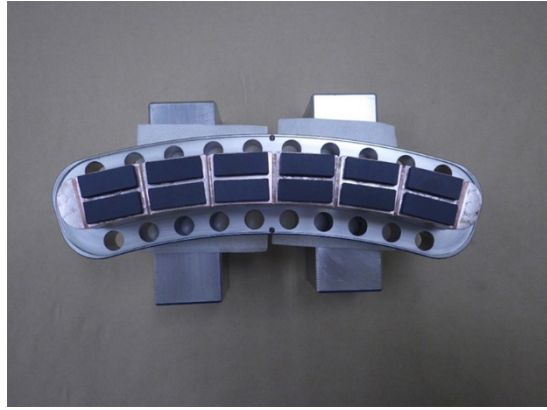


図5 HOM 吸収体

2.4 周波数調整

加速空洞の共振周波数は内部寸法によって決まり、周波数の調整方法としては、内壁面の全体または一部を変形させる方法や別部品を挿入して空間の容積を変える方法が一般的である。本空洞の周波数調整では、内壁面の特定の箇所を機械加工で削ることにより高精度で調整する手法をとった。機械加工量と周波数変化量の相関は予め2次元電磁場解析プログラムSUPERFISHを用いた計算によって確認した。

図6に内壁面調整加工による周波数調整履歴を示す。周波数調整における計算値と調整結果のプロットの傾斜はほぼ一致しており、加工量を予測して目標周波数に調整した。

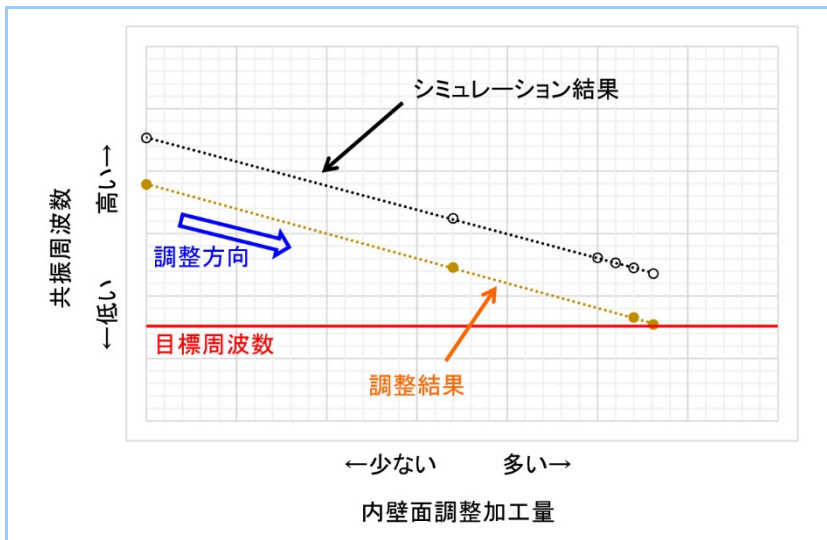


図6 周波数調整履歴

2.5 低電力高周波試験

ネットワークアナライザーを用いて、共振周波数、無負荷Q値、カップラー結合度、シャントインピーダンスを測定した。図7に低電力高周波試験体系を示す。

無負荷Q値及びカップラー結合度はスミスチャートを用いて算出した⁽⁷⁾。

シャントインピーダンスの測定は、ビーズ摂動法を用いた。空洞の中心軸上に糸を張り、金属球体を通して一定の速さで動かして共振周波数を測定することで、周波数変化からシャントインピーダンスを算出した。

表1に低電力高周波試験の結果を示す。

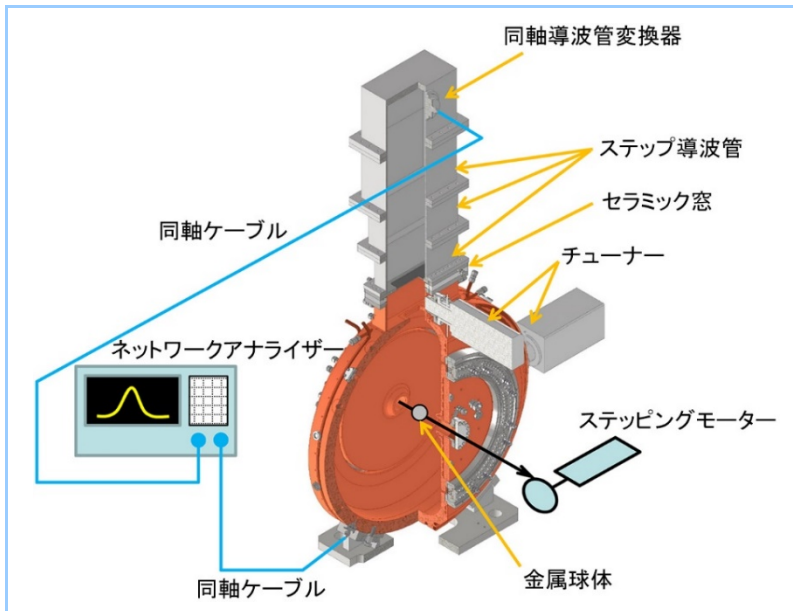


図7 低電力高周波試験体系

表1 低電力高周波試験結果

	仕様値	測定値(10014-5号機)
共振周波数(25℃, 真空)	508.759±0.1MHz	508.827MHz
無負荷 Q 値	57000 以上	59934
カップラー結合度	1.1 程度	1.09
シャントインピーダンス	6.6MΩ以上	6.709MΩ

3. まとめ

当社における最新の加速空洞生産活動として NanoTerasu 用加速空洞を取り上げ、その製造技術について述べた。NanoTerasu は 2023 年 4 月にコミッショニングを開始⁽⁸⁾し、2023 年 12 月 7 日には、ファーストビーム(円型加速器内に設置された挿入光源からの放射光 X 線を実験ホールに初めて導入し観測すること)が達成された⁽⁹⁾。そして 2024 年 4 月 1 日より予定通り稼働が開始された⁽¹⁰⁾。これにより、238MHz 加速空洞・476MHz 加速空洞・5712MHz(C バンド)加速管の実用化実績が更新されると共に、初期の開発から携わってきた新型 HOM 減衰型高周波加速空洞の実用化が初めて果たされることとなった。今後の新しい加速器施設計画に貢献するために、技術の研鑽を続けていく所存である。

参考文献

- (1) https://nanoterasu.jp/nanoterasu_online_poster4/index.html
- (2) 西森信行ほか, 3GeV 高輝度放射光施設(NanoTerasu), 表面と真空 Vol.65 No.12 (2022) p.560~565
- (3) 沖平和則ほか, “X 線自由電子レーザー”を支える C バンド加速器, 三菱重工技報 Vol.49 No.2 (2012) p.38~42
- (4) K. Higa et al., 次世代放射光リングのための入射器加速空洞の製造, Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Kyoto, Jul. 31-Aug.3, 2019, WEPI005.
- (5) H. Ego et al., SPring-8-II 高次モード減衰型高周波加速空洞の開発, Proceedings of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aomori, Aug. 9-11, 2014, MOOL14.
- (6) H. Ego et al., SPring-8-II 高次モード減衰型高周波加速空洞プロトタイプの大電力試験, Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Kyoto, Jul. 31-Aug.3, 2019, WEOH03.
- (7) 吉田光宏, 高周波デバイスの設計・製作・試験, 高エネルギー加速器セミナー OHO'08, (2008) <http://accwww2.kek.jp/oho/oho08/txt08/02%20yoshida3.080825p.pdf>
- (8) N. Nishimori et al., NanoTerasu 加速器コミッショニング, Proceedings of the 20th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Funabashi, Aug.29-Sep.1, 2023, TUOP02
- (9) <https://www.qst.go.jp/soshiki/152/20231212.html>
- (10) <https://www.qst.go.jp/site/press/20240401.html>