

# 放射光源加速器のための 1.5GHz-TM020 高調波空洞の大電力モデル設計

## DESIGN OF HIGH POWER MODEL OF THE 1.5GHz-TM020 HARMONIC CAVITY FOR A SYNCHROTRON RING

山本尚人 <sup>\*,A)</sup>, 山口孝明 <sup>A)</sup>, 坂中章悟 <sup>A)</sup>, 高橋 毅 <sup>A)</sup>, 内藤大地 <sup>A)</sup>, 山田寛人 <sup>B)</sup>, 須山 寛 <sup>B)</sup>, 坂口香織 <sup>B)</sup>

Naoto Yamamoto <sup>\*,A)</sup>, Takaaki Yamaguchi <sup>A)</sup>, Shogo Sakanaka <sup>A)</sup>, Takeshi Takahashi <sup>A)</sup>, Daichi Naito <sup>A)</sup>,

Hiroto Yamada <sup>B)</sup>, Hiroshi Suyama <sup>B)</sup>, Kaori Sakaguchi <sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

<sup>B)</sup> Toshiba Energy Systems & Solutions Corporation

### Abstract

A normal-conduction (NC) 1.5 GHz TM020 cavity is being developed as a bunch lengthening harmonics cavity for PF-upgrade and future light sources. By the use of a higher TM020 mode for beam acceleration, a lower R/Q and higher unloaded Q as compared to those of conventional NC cavities can be expected. These features are advantageous in reducing the fluctuations in harmonic RF voltages when the bunch gaps are introduced. Harmful parasitic modes other than the TM020 mode can be heavily damped using coaxial slots located at the node of the TM020 mode. In this paper, the mechanical and vacuum designs of the radio-frequency absorber introduced the coaxial slots are described. The result of the thermal and structural analysis is also presented.

### 1. はじめに

高調波空洞を用いたバンチ伸張運転 [1] は高輝度放射光源リングにおいて、大電流蓄積時のエミッタンス増大・ビーム不安定性・真空機器発熱の抑制、十分なビーム寿命の確保を目的として用いられる。KEK では過渡的電圧変動に強い TM020 型の 1.5 GHz 空洞の開発設計が進んでおり [2]、これまでに高周波設計と低電力モデルによる性能確認が終わっている [3]。2024 年度は、本空洞の実機製作を見据え大電力モデルの検討を行った。具体的には、設計・組み立て精度を考慮した 3 次元空洞モデルの製作、実際の熱負荷と冷却水路を考慮した熱構造解析、保守性を考慮した高周波ダンパ部の真空フランジ設計が検討項目であり、これらについて一定の進捗を得た。本発表ではこれら検討項目の詳細と残された課題について議論したい。

### 2. 高調波空洞の開発

KEK PF では、PF 高輝度化及び PF 将来計画 [4] を見据え、主 RF 周波数の 3 倍となる 1.5 GHz 帯の高調波空洞の開発を進めている。空洞としては常伝導及び超伝導の両方式を検討しており、それぞれにメリットとデメリットがある [5, 6]。

常伝導方式の高調波空洞のデメリットは遷移的なビーム負荷変動 (Transient beam loading: TBL) に弱いことであり、これは超伝導空洞と比べ潜在的な Q 値の低さがその要因である。放射光源リングでビームを蓄積する際、ビームフィリングにバンチギャップ (電荷の存在しない連続したバケット) があると、空洞のビーム負荷がバンチトレインの周回に応じて遷移的に変化する。

遷移的なビーム負荷変動の空洞電圧への影響は主空洞と高調波空洞で異なり、この影響は周波数の高い高調波空洞の方が大きくなる。従って、主空洞電圧と高

調波空洞電圧の比がバンチトレイン内で遷移的に変化し、バンチ伸張効率が低下する。通常、放射光源リングの運転においては、ハイブリッド運転の要求など様々な理由からバンチフィルパターンへのギャップ導入が必要とされるため、この現象はバンチ伸張運転時に解決すべき問題となる。

我々は、特に常伝導の高調波空洞を用いた際に、この問題を緩和する手法として TM020 モードを用いた高調波空洞の導入と、さらにアクティブな TBL 補償技術の採用を提案している [2]。このうち、アクティブな TBL 補償については、PF にてデモンストレーションを行い技術的に大きな問題はないことを確かめている [7]。

一方、TM020 高調波空洞については、当初予定していたスペックを満たす RF 設計および寄生モード減衰性を実現できる見通しが立っている [3]。残された課題のうち、我々が重要視するのが寄生モードダンパ部の機械・真空設計であった。本研究では、この課題の解決を目的に検討を進めた。また検討の過程において、空洞の構造設計を文献 [3] から一部変更したため、改めて熱構造解析を行った。

参考に Table 1 に 1.5 GHz TM020 空洞のパラメータを示しておく。R/Q、及び無負荷 Q は、それぞれ 68 Ω、

Table 1: Parameter of 1.5 GHz TM020 Cavity[3]

Parameter	Value
Resonant frequency	1.500 GHz
R/Q	68 Ω
Unloaded Q	31 400
Shunt impedance	2.14 MΩ
RF Voltage	155.4 kV
Wall-loss power	11.3 kW
Max. wall-loss density	12.0 W/cm <sup>2</sup>
Max. electric field	6.7 MV/m

\* naotoy@post.kek.jp

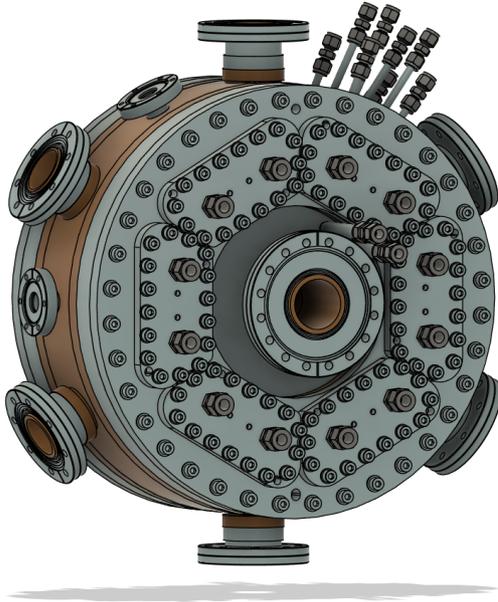


Figure 1: Schematic of 1.5 GHz TM020 cavity.

31400。従って、壁損失電力 11.3 kW にて電圧 155.4 kV となる。

### 3. 寄生モードダンパ部の真空設計

TM020 空洞は KEK の恵郷氏のアイデアにより開発された空洞であり、500 MHz 帯空洞が主 RF 空洞として NanoTerasu で既に運用されている [8]。注目すべき点は空洞本体と一体となって導入される寄生モードダンパであり、TM020 モード (加速モード) の特徴的な電磁場分布を利用することで、加速モードの電磁場とダンパ (間接水冷のフェライトを用いた RF 吸収体) を隔離している。我々の高調波空洞でも同様な構造を採用し、空洞両側の端板にダンパ導入用のポートを設けた。寄生モードダンパは本空洞で最もトラブルが起りやすい箇所と考えられるため、メンテナンス性に配慮し真空フランジ構造とした。

1.5 GHz TM020 空洞の 3 次元モデルを Fig. 1 に示す。外形は直径約 450 cm、ビームポート方向の長さはフランジ間で約 313 cm、ビームポート径は直径で 52 mm である。図中、茶色の部分が無酸素銅、灰色の部分がステンレス材を示す。

文献 [3] との違いは、真空排気用ポート 2 つ (内径 43 mm)、ピックアップ用ポート 2 つ (内径 18 mm) を新たに追加したことである。残りのポートは周波数調整用プランジャ (チューナ) 導入用のもの (3 箇所, 120 度対称) と入力ケーブル用 (1 箇所) である。また、冷却水配管の継ぎ手も露わに示した。冷却水配管は放射線劣化を避けるためリングの内側にまとめることにした。さらに、寄生モードダンパ導入用の真空フランジ (両端板に計 12 か所設置) は、可能な限り多くのフェライトを導入できるように開口を大きくした

寄生モードダンパは、銅材を用いた間接水冷方式で

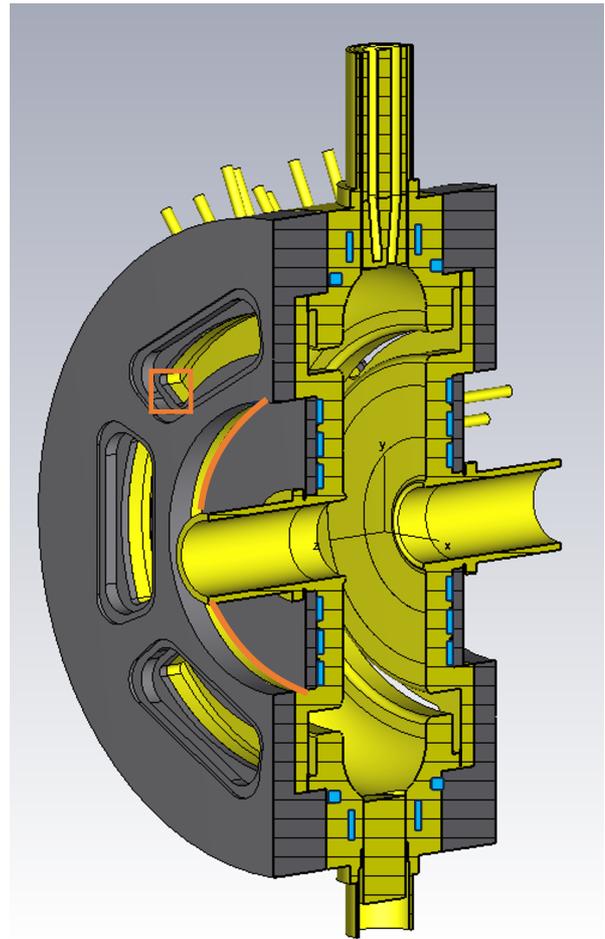


Figure 2: Schematic of 3D model for CST calculation.

あり、吸収体として用いるフェライト材のサイズは H4.5 mm, W25.5 mm, D10 mm のものを 1 フランジ当たり 6 個導入可能な構造となっている。フェライトと銅材の結合はろう付けを予定している。フランジの真空シールは端板側に溝を掘り、U-TIGHTSEAL® (白井国際産業, CS100) を用いて封止する。ボルトは M8 サイズの BUMAX をフランジ当たり 16 本使用し、締め付けトルクは 10~14 N m となる。PF では台形フランジと同規格の U-TIGHTSEAL® を用いた真空リーク試験及び 150 度以上のベーキング試験を実施しており、真空性能に問題がないことは確認済みである。

#### 3.1 熱構造解析

熱構造解析は CST Studio [9] を用いて行った。計算手順を下記に示す。1) Frequency-Domain (FD) solver で加速モードの電磁場発熱分布を計算、2) Conjugate Heat Transfer solver で水路の熱伝達係数を計算、3) Static Thermal solver で温度分布を計算、4) Mechanical solver で応力を計算。

Figure 2 に熱構造解析に用いた 3D モデルを示す。材料は無酸素銅 (黄色) とステンレス (灰色) を検討している。冷却水路は端板及び外周部にあり、水色で示してある。本 3D モデルでは、寄生モードダンパ部を省

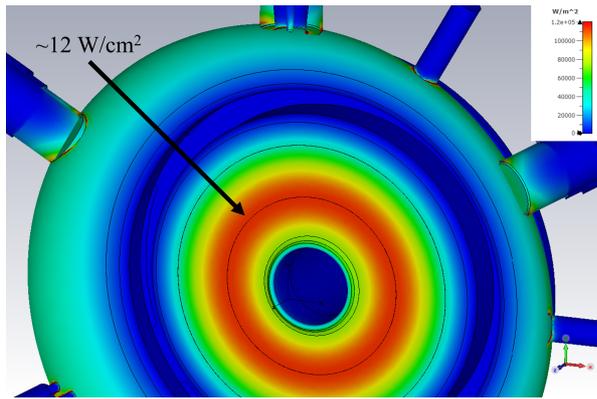


Figure 3: Power distribution with the dissipation 11.3 kW.

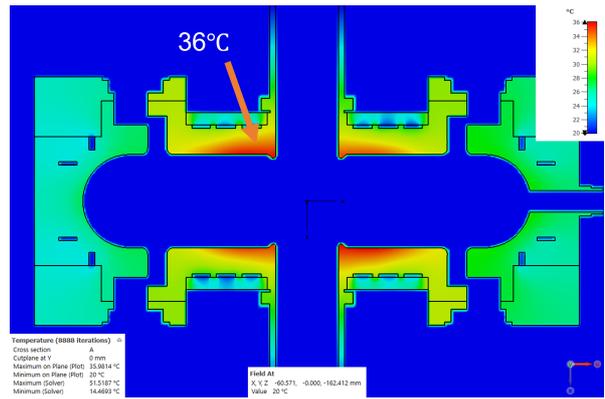


Figure 5: Calculation results of thermal distribution.

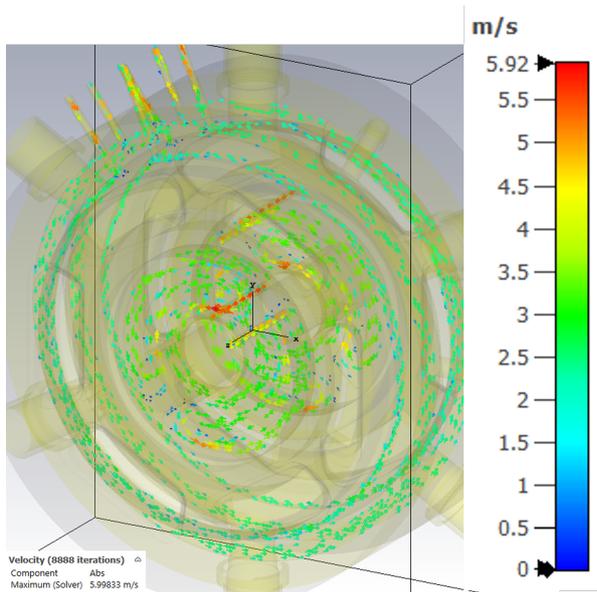


Figure 4: Calculation results of flow velocity.

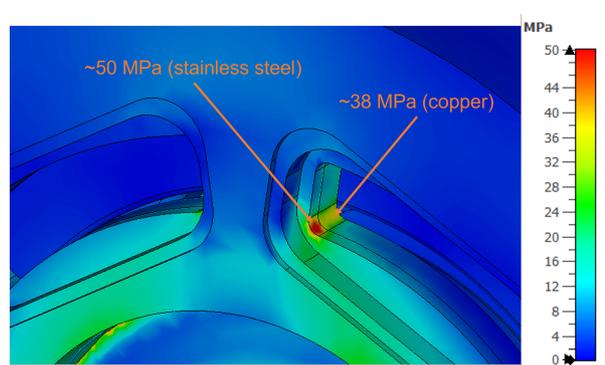


Figure 6: Calculation results of von Mises stress. Enlarged view of the area indicated by the orange square in Fig. 2.

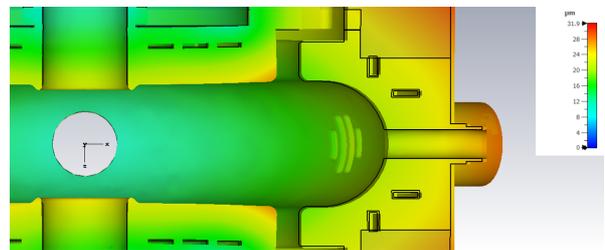


Figure 7: Calculation results of the deformation. Deformation amount is exaggerated by a factor of 100.

略するなど Fig. 1 のモデルを熱構造解析用に簡略化してある。1) FD solver を用いて得られた共振周波数は 1.500276 GHz であり、壁損失 11.3 kW における最大発熱箇所は端板部中央あたりで、発熱密度は  $12 \text{ W/cm}^2$  であった (Fig. 3 参照)。

2) において、冷却水の平均流速, 流量は空洞入口 (外側チューブ) で  $3.2 \text{ m/s}$ ,  $5.4 \text{ L/min}$  とした。計算では輻射による冷却は考慮せず、重力方向に加速度  $9.81 \text{ m/s}^2$ 、水路入口と雰囲気温度を  $20$  度と仮定した。

流速計算の結果 (Fig. 4)、空洞端板及びノーズコーン部では冷却水経路が蛇行しているため、流速が変化し外側は遅く内側は速くなる。平均流速は  $2.0 \text{ m/s}$  と予測される。熱伝達係数は  $1.2 \sim 1.7 \text{ W/cm}^2$  であり、入口から出口に向け徐々に低下していく。また、空洞端板部に設けた冷却水経路の一部において最大  $5.92 \text{ m/s}$  の流速となることが予測されるが、この部分については経路設計に余裕があるため、今後冷却水経路の構造を見直すことにて緩和可能だと考えている。

3) の Static Thermal solver の結果 (Fig. 5) から、発熱密度が大きい端板部及びノーズコーン部の温度は  $36$  度

(+16 度上昇) で抑えられることが確かめられた。

4) の応力解析では熱膨張と大気圧を考慮している。計算結果では、Fig. 2 にてオレンジの曲線及び四角で示した部分で大きい値が示されている。曲線で示した箇所は端板内側の銅-SUS 接合部であり、von Mises 相当応力は  $\sim 40 \text{ MPa}$  となった。四角で示した箇所は、端板と内側と円周部をつなぐ箇所であり、本空洞では構造的に一番弱い箇所であると思われる。Figure 6 に拡大図を示す。von Mises 相当圧力は、銅材部で  $\sim 38 \text{ MPa}$ 、ステンレス部で  $\sim 50 \text{ MPa}$  である。これら予測された相当応力は許容可能である。

最後に空洞の変形量であるが、ノーズコーン部分で  $\sim 23 \mu\text{m}$ 、外周部で  $\sim 20 \mu\text{m}$  となった (Fig. 7)。こちらも空洞性能及び周波数変化量としては許容可能である。

#### 4. まとめ

PF 高輝度化及び PF 将来計画を見据え、主 RF 周波数の 3 倍となる 1.5 GHz 帯の常伝導高調波空洞の詳細設計について報告した。本論文では、本空洞設計において鍵となる寄生モードダンパ部の構造・真空設計及び、これら詳細設計によって変更となった空洞構造の熱構造解析結果について報告した。

寄生モードダンパ部については、空洞内に導入する吸収体体積を最大とすべくフランジ・真空封止構造を最適化し、実現可能な解を見出した。真空封止構造に関してはモデルフランジを実際に製作し、U-TIGHTSEAL® を用いた試験で問題ないことを確認してある。

熱構造解析では、CST を用いた解析により、既定の電力下において熱変形・応力に問題ないことが確認された。冷却水路に関しては、一部流速の高い箇所があり最適化が必要ではあるが、緩和可能だと考えられる。

本空洞の今後の課題は、ダンパフランジのさらなる最適化; フランジ外周曲線部の単純化、真空排気ポートの寄生モードへの影響の調査、RF 入力カブラの詳細設計、上述した冷却水路の最適化、である。

また、常伝導空洞と平行して超伝導高調波空洞の検討も進んでいる。超伝導高調波空洞は高い Q 値が期待され TBL 緩和の観点からは優れているが、低温の冷却システム・保守性・大電力カブラの開発など課題がある。

さらに、低電力制御システムの設計も重要な課題である。

#### 謝辞

本研究は KEK-PF 研究施設光源 R&D 経費、及び JSPS 科研費 JP24K03210 の助成を受けたものです。

#### 参考文献

- [1] A. Hofmann and S. Myers, “Beam dynamics in a double RF system”, *11th Int. Conf. on High-Energy Accelerators*, Springer, 1980, pp. 610–614, CERN-ISR-TH-RF-80-26.
- [2] N. Yamamoto, T. Takahashi, and S. Sakanaka, “Reduction and compensation of the transient beam loading effect in a double rf system of synchrotron light sources”, *Phys. Rev. Accel. Beams* 21 (1 2018), p. 012001.  
doi:10.1103/PhysRevAccelBeams.21.012001

- [3] T. Yamaguchi *et al.*, “Design and low-power measurement of 1.5 GHz TM020-type harmonic cavity for KEK future synchrotron light source”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 1053 (2023), p. 168362.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900223003522>
- [4] PhotonFactory, 放射光マルチビーム実験施設計画 *Conceptual Design Report ver 1.2*, tech. rep., KEK, 2025.  
[https://www2.kek.jp/imss/pf/pf-hls/library/pfhls\\_cdr\\_ver1.2.pdf](https://www2.kek.jp/imss/pf/pf-hls/library/pfhls_cdr_ver1.2.pdf)
- [5] N. Yamamoto *et al.*, “FEASIBILITY STUDY OF AN ACTIVE HARMONIC CAVITY FOR BUNCH LENGTHENING IN AN ELECTRON STORAGE RING”, *Proc. of the 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, WEP059, 2022, pp. 698–702.  
[http://www.pasj.jp/web\\_publish/pasj2022/proceedings/PDF/WEP0/WEP059.pdf](http://www.pasj.jp/web_publish/pasj2022/proceedings/PDF/WEP0/WEP059.pdf)
- [6] N. Yamamoto *et al.*, “DESIGN STUDY OF THE BUNCH LENGTHENING SYSTEM FOR AN ENERGY SWITCHABLE SYNCHROTRON RING”, *Proc. of PASJ24*, WEP084, 2024, pp. 475–479.  
[https://www.pasj.jp/web\\_publish/pasj2024/proceedings/PDF/WEP0/WEP084.pdf](https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2024/proceedings/PDF/WEP0/WEP084.pdf)
- [7] D. Naito *et al.*, “Experimental demonstration of transient-beam-loading compensation using new digital LLRF system at the Photon Factory storage ring”, English, *Proc. IPAC’25* (Taipei, Taiwan), 16, JACoW Publishing, Geneva, Switzerland, 2025, pp. 1687–1690.  
<https://indico.jacow.org/event/81/contributions/7156>
- [8] H. Ego *et al.*, “Compact HOM-damping structure of a beam-accelerating TM020 mode rf cavity”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 1064 (2024), p. 169418.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900224003449>
- [9] D. Systèmes, “CST Microwave Studio”, <http://www.cst.com>