

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

HIGH POWER TESTS OF THE PROTOTYPE HOM-DAMPED RF CAVITY FOR THE SPring-8-II STORAGE RING

惠郷博文^{#, A, B)}, 稲垣隆宏^{A)}, 大島隆^{A)}, 重岡伸之^{C)}, 菅野東明^{C)}, 原博史^{C)}, 三浦禎雄^{C, D)}
Hiroyasu Ego^{#, A, B)}, Takahiro Inagaki^{A)}, Takashi Oshima^{A)}, Nobuyuki Shigeoka^{C)},
Tomei Sugano^{C)}, Hiroshi Hara^{C)}, Sadao Miura^{C, D)}
^{A)}RIKEN, ^{B)}KEK, ^{C)}MHI-MS, ^{D)}Tohoku University

Abstract

A beam-accelerating RF cavity with a new HOM-damping structure was designed in order to suppress coupled-bunch instabilities in the SPring-8-II storage ring which is planned to have ultra-low emittance and supply X-rays approaching diffraction limit. The TM₀₂₀ mode is selected as a beam-accelerating mode in the cavity. The mode has a high Q -value and a shunt impedance sufficient for beam acceleration and brings a compact HOM-damping structure to the cavity. A prototype cavity of OFHC copper was fabricated to be fit with RF absorbers and to have a high power of 120 kW generating an accelerating voltage of 900 kV in the cavity. The cavity was successful in operation up to 135 kW and the feasibility of both the high-power operation and the damping structure was proved.

1. はじめに

X線回折限界光源を目指して SPring-8 蓄積リングを極低エミッタンスリングに改造することが SPring-8-II 次期計画として検討されている[1]。蓄積ビーム電流は 100mA で現在の蓄積リング[2]と同じであるが、ビームエネルギーは 8GeV から 6GeV へ下げられる。蓄積リングの低エネルギー化やラティスの変更に伴い、高周波加速空洞の高次共振モード (higher-order mode; HOM) の結合インピーダンスに起因するバンチ間不安定性 (Coupled-bunch instability; CBI) が問題となる。そこで CBI を抑制するため、結合インピーダンスの高い HOM を減衰させる高周波加速空洞の開発が進められている。次期計画蓄積リングにおいて 4 カ所の加速空洞収納スペースは各約 4 m に制限されるため、シンプルかつコンパクトな構造で効率的に HOM 減衰を行う新型加速空洞が設計され、アルミモデル空洞による高周波特性の確認試験が行われた[3]。この空洞のビーム加速共振モードは TM₀₂₀ モードである。加速モード以外の寄生共振モードを減衰させる機構として、加速空洞内に 2 つのスロットが TM₀₂₀ モードの軸対称磁場の節に沿って設けられ、スロット内に高周波吸収体が収納される。これにより専用の導波管やパイプを用いることなく、コンパクトな収納長で寄生共振モードの減衰を達成させる。設計した高周波性能がアルミモデル空洞にて確認されたので、この減衰機構を持ち、120kW 内壁損失の規定大電力運転を可能にするプロトタイプ空洞の製作と大電力実証試験を行った。

本論文では、第 2 章で空洞の構造と加速性能、寄生共振モード減衰機構について述べ、第 3 章でプロトタイプ空洞の設計と製作、第 4 章で高周波特性と大電力試験の結果について報告する。

2. 空洞構造と寄生モード減衰機構

空洞の基本構造と加速モードの高周波性能、寄生共振モードの減衰機構の概要を以下に示す。詳細は文献[3]を参照されたい。

2.1 空洞構造

Figure 1 に空洞の内面構造を示す。空洞は ϕ 1040.4mm、長さ 276mm、ビームポート部にノーズコーンを持つリエントラント型である。加速空洞内部には TM₀₂₀ モードの軸対称磁場の節に沿って幅 10mm の L 字型 (40mm×40mm) スロットが設けられており、各スロット内にはフェライト製高周波吸収体が収納される。また、大電力運転時の空洞膨張による加速モードの周波数変化や加速ビームのリアクタンス成分を補正するために周波数

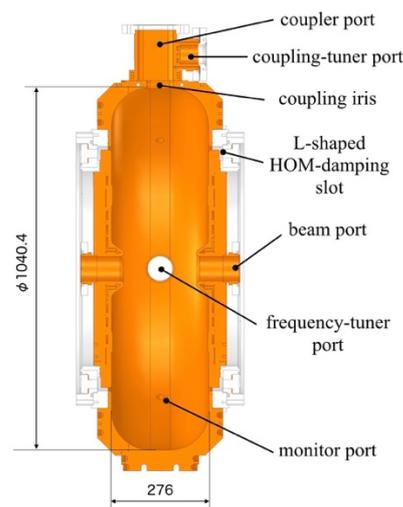


Figure 1: Structure of the HOM-damped cavity.

[#] ego@post.kek.jp

チューナー（ ϕ 70mm 無酸素銅製可動プランジャー）を設置するチューナーポートがある。

カプラーポートは高さを 100mm に矮小化した WR-1500 タイプで、真空封止には SPring-8 で開発した、導波管締結型セラミックス窓を用いる (Fig. 2) [4]。コンパクト化と透過帯域を広げるために導波管の高さを 100mm に矮小化している。カプラーポートと空洞は、臨界結合となる R 付矩形アイリス (100mm \times 75mm) で接続される。



Figure 2: Ceramics window.

2.2 TM020 加速モードと減衰機構

シミュレーションコード SUPERFISH [5]、MAFIA、CST STUDIO [6] 及び ANSYS HFSS [7] を用いて空洞の高周波特性を解析し、内面形状を最適化した。プロトタイプ設計時、共振周波数は現行の RF システムに合わせて 508.58MHz としたが、新光源ラティスの最適化により 508.762MHz に変更される予定である。Figure 3 に TM020 加速モードの電磁場分布を示す。青矢印が電場を表し、赤矢印が磁場を表す。円周状スロットは磁場の節の位置にあるため、スロット付近及び内部に磁場はない。電場がスロット入口に存在しているが、スロットと電場は平行であるため、電場はスロットへ侵入することができない。よって、高周波吸収体をスロット内に収蔵しても TM020 モードは減衰されない。Table 1 に高周波特性の計算値を示す。想定する最大加速電圧は 900kV である。一方、ビームとの結合インピーダンスが高く、CBI を引き起こすモノポールやダイポールモード (Fig. 3 の TM011、TM110 モード参照) の磁場は TM020 モードと異なり、スロットへ侵入するため、内蔵した高周波吸収体により大きく減衰する[3]。

Table 1: Estimated RF Properties of the TM020 Mode

Shunt impedance (R_a) [$M\Omega$]	6.8
Unloaded Q (Q_a)	60,300
R_a/Q_a	113
Maximum accelerating voltage [kV]	900

3. プロトタイプ構造設計・製作

3.1 空洞本体

Figure 4 に製作したプロトタイプ空洞の写真、Fig. 5 に組立図を示す。空洞は、電気伝導率が良く、高真空が期待できる class1 無酸素銅 (ASTMF68

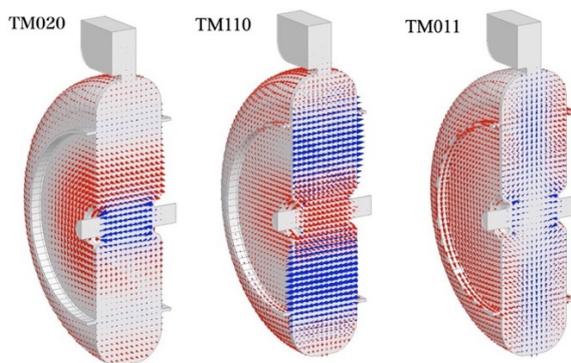


Figure 3: Field distributions of the TM020, TM110 and TM011 modes. Blue and red arrows show electric and magnetic fields, respectively.

class1) 製である。本体と端板 2 台の 3 分割構造体となっている。内面加工した部品や水路用パイプなどをろう付けして本体を組み立てた。ノーズコーンとビームポートを持つ端板には SUS316L 製フランジが TIG で接合され、64 本の M12 ボルトにて空洞本体に着脱できるようになっている。接続部の真空封止はアルミ製ヘリコフレックスを使用する。加速モードの電磁場侵入がないスロット部での分割のため、端板をボルト締結構造にしても加速モードの高周波性能への影響はほとんどない (シミュレーションによるスロットへの高周波漏れは -50dB 未満)。この分割端板構造には下記の利点がある。

- 端板内面の加工により加速モード共振周波数の調整が容易である。これにより、大径である本体は一度の加工で済む。
- 端板フランジ部に高周波吸収体を着脱できる構造を設ける。これにより高周波吸収体の実装が容易となる。また、吸収体の接合不良などが生じた場合にも対応可能となる。

空洞本体内面の加工表面粗さは Ra0.6 以下である。大電力投入時、空洞の共振周波数を調整する周波数チューナー (ϕ 70mm 無酸素銅製可動プランジャー) を取り付けた。また、4 カ所に ϕ 18mm のピックアップポートを設けており、1 カ所にはループアン



Figure 4: Prototype cavity.

テナを設置し、空洞内の高周波モニターとして使用している。他のポートにはコールドカソードゲージやリークバルブなどを取り付けた。

各端板には 8 カ所、A-DESY 型の真空シール面を持つバナナ形状の slots が設けられており、空洞の HOM 減衰用 slots にアクセスすることができる。

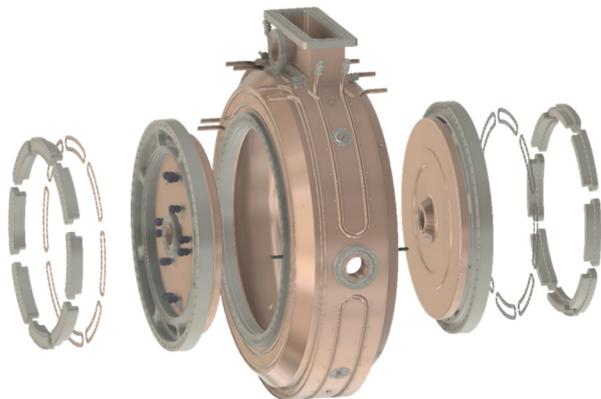


Figure 5: Fabrication of the prototype cavity.

3.2 高周波吸収体

この空洞用に開発した高周波吸収体を Fig. 6 に示す。端板のバナナ型 slots に合わせたフランジの先端に TDK 社製の Ni-Zn 系フェライト HF70 (25.5 mm×10.26 mm×4 mm) [8] を 12 枚ろう付けしている。この吸収体を取り付けると slots 内にフェライトが晒されて、漏れ込んだ寄生モードの磁場を吸収する。フランジには水路が設けられており、高周波を吸収して発熱したフェライトは間接冷却される。量産試作を行い、同時ろう付けで製作した 8 台にはフェライトの割れや剥離などは生じなかった。

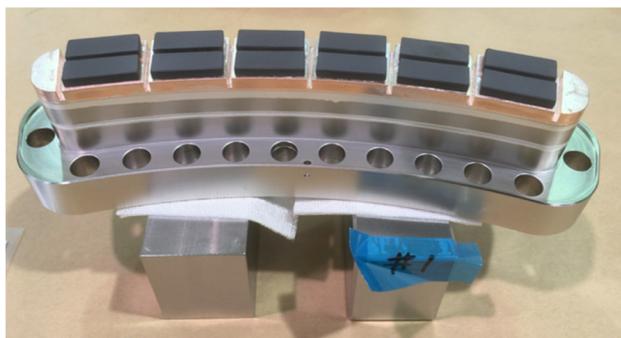


Figure 6: RF absorbers with ferrites.

3.3 結合度可変カップラー

本空洞は真空封止状態を維持し、ビーム負荷の変化に応じて結合度を変えることができる結合度可変機構を採用する。無酸素銅製 φ70mm 可動プランジャーがカップリングチューナーとして、この空洞の導波管型カップラーポートに設置される (Fig. 1)。チューナー突き出し長が 0mm の場合に臨界結合する。

プロトタイプ空洞の大電力試験では結合度可変は不要のため、突き出し長が 0mm となる固定長プランジャー (class1 無酸素銅製) を装着した。

3.4 熱構造解析

最大加速電圧として 900kV の運転を想定しているため、約 120kW の高周波電力を空洞へ投入する必要がある。この電力で空洞が健全に運転できるようにシミュレーションコード ANSYS [7] を用いて水路の設計を行った。Figure 7 は安全余裕を考慮して 130kW 運転での熱構造解析結果である。30°C の冷却水を各水路に 8L/min 流した時の空洞本体の温度と相当応力の分布を表す。空洞内部は真空、外部は大気として大気圧の影響も考慮しているが、HOM 吸収電力による熱負荷は含んでいない。解析の結果、最大上昇温度は約 47°C、ポートのエッジ付近を除いた相当応力は無酸素銅 0.2% 耐力に対して 1/10 程度である。よって 900kV 加速運転は構造強度に関して問題ないと考えられる。また、熱変形による周波数変化は -215kHz と評価された。これは周波数チューナーの調整範囲内である。

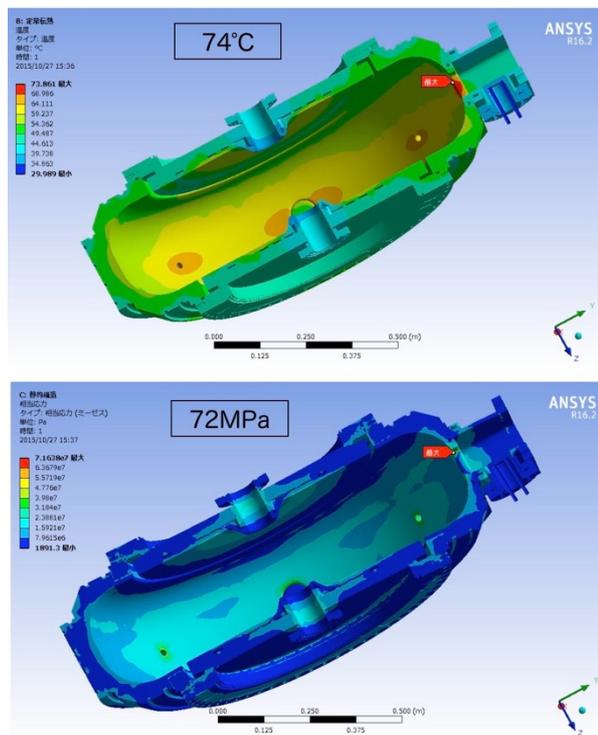


Figure 7: Distributions of (a) temperature and (b) von Mises stress in operation at an RF power of 130 kW.

4. 性能試験

4.1 加速モード

製作したプロトタイプ空洞の TM020 加速モードの高周波特性を Table 2 に示す。ただし、高周波吸収体は装着していない。共振周波数は本体温度 30°C、空洞内真空状態での換算値である。端板の調整加工に

より、周波数チューナーが空洞内面位置での共振周波数を 508.550MHz まで追い込んだ。試験運転周波数 (508.58MHz) にはチューナーで容易に調整可能である。また、ほぼ計算値の無負荷 Q が得られた。

Table 2: RF properties of the TM020 mode in the prototype cavity

Resonant frequency [MHz]	508.550
Unloaded Q (Q_u)	59,960
External Q (Q_{ext})	54,150
Coupling β	1.11

4.2 高周波吸収体の装着

実機では各スロットに高周波吸収体を装着する予定であるが、今回は 3.2 で記した量産試作品 8 台を使用してプロトタイプ機の各端板に 4 台ずつ装着した。参考として、TM020 加速モードとインピーダンスの高い寄生モードの高周波特性 (共振周波数 [MHz]/ Q の順) を測定し、その結果を Table 3 に示す。加速モード Q 値の劣化は小さい。一方、寄生モード Q 値は大きく減少している。よって有効な寄生モード減衰機構を実装ができた。全スロットに装着した場合、更なる減衰が見込まれる。

Table 3: RF properties (frequency [MHz] / unloaded Q) of some resonant modes with high impedances in the prototype cavity with ferrite RF absorbers.

mode	Measured RF properties with RF absorbers
TM020	508.3 / 59,100
TM010	222.4 / 420
TM110	363.6 / 760

4.3 大電力試験

空洞に大電力高周波を投入する前に空洞の水路へ温水を流し、ベーキングを行った。150°Cまで温度を上げる予定であったが、温水ユニットの不調により、80°Cで保持、ガス放出が低下して真空値が一定となった時点 (15 時間経過) でベーキングを終了した。ベーキング後、高周波吸収体フランジの一部締結部から 3.5×10^{-11} Pa m³/s の微小真空リークが発生していたが、フランジの増締にて止めることができた。

ベーキングを終えた空洞をコンクリートシールド内に設置して大電力試験を行った。Figure 8 に空洞の設置状態を示す。空洞には扁平 WR1500 E ベンド真空導波管、導波管締結型セラミックス窓が取り付けられ、真空を封止する。セラミックス窓は空洞から全反射が生じた時に電場の節となる位置に設定した。その先は変成器を介して通常の WR-1500 立体回路に接続した。E ベンドには 2 つのポートが設けられており、セラミックス窓用アークセンサーと小型ターボ分子ポンプが接続されている。



Figure 8: Setup of the prototype cavity for operation of high RF power.

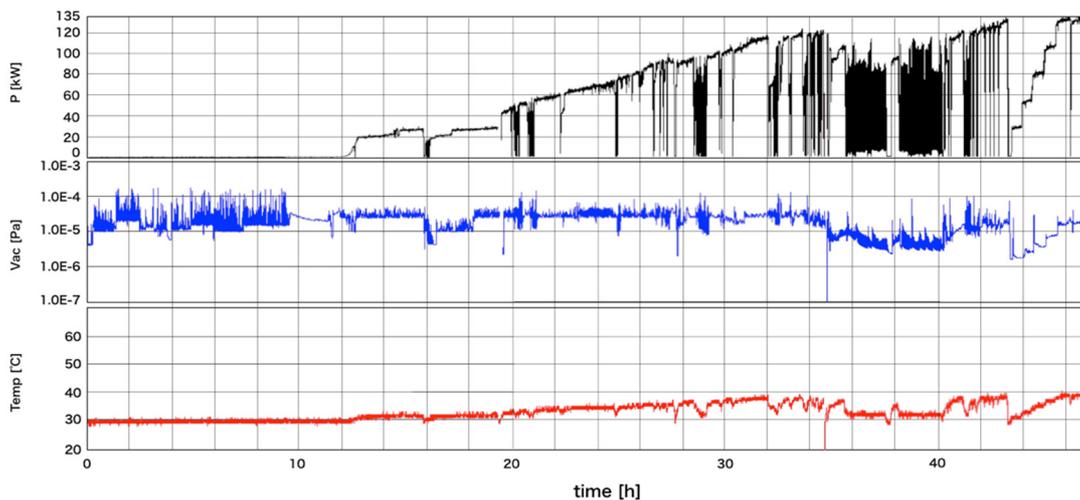


Figure 9: Trend graphs of the high-power test up to 135 kW. The black and blue lines show the input RF power and vacuum of the prototype cavity, respectively. The red line shows the temperature of the ceramics window.

最初にフェライトの無いダミーバナナ型フランジを取り付けて大電力試験を行った。Figure 9 に入力電力、空洞内真空度、セラミックス窓のセラミックス温度のチャートを示す。試験は 8 日間行い、高周波の投入を行った実時間での様子を示している。1kW 未満で約 12 時間、真空悪化を繰り返した。20kW、70kW、100kW 付近で反射電力が多かったが、コンディショニングで改善し、50 時間で 135kW の連続運転に到達した。必要運転電力は 120kW であるが、高めのパワーまでコンディショニングを行うと規定運転が安定するので 135kW までパワーを投入した。120kW 運転時の空洞変形による共振周波数低下は、-192kHz でほぼ予想通りであった。ただし、この試験中に空洞の共振周波数が約 100kHz 程度低下した。試験終了後のローレベル測定では無負荷 Q 値の変化はなかった。また、セラミックス窓は事前に単体エージングを行っており、試験中、アーク放電やセラミックスの異常な温度上昇などは無かった。

ダミーフランジにて安定に大電力運転できるようになったので、高周波吸収体を各端板の 4 スロット、計 8 カ所に装着して 135kW 大電力試験を行った。高周波吸収体を装着しても約 58 時間のコンディショニングにて 135kW まで安定に投入できることを確認した。ダミーフランジ時の初期に見られた 1kW 未満の長引く真空悪化は発生しなかった。70kW、100kW 前後では、先行試験同様、反射、真空悪化を生じたがコンディショニングで改善された。

高周波吸収体への冷却水温度変化の観察から、入力電力に対して最大 0.2% 程度の高周波パワー漏れが見受けられた。120kW の運転には支障のない量ではあるが、予想値よりも大きい。ただし、漏れはスロット位置に依存しており、先の加速モードの周波数低下なども勘案すると空洞の変形やチューナー、カプラーによる電磁場の歪みの影響が考えられる。今後、空洞の分解調査とシミュレーションによる評価を進める予定である。

5. まとめ

ビーム加速モードとして TM020 モードを用いる HOM 減衰型加速空洞を設計し、プロトタイプ機を製作して大電力運転の実証試験を行った。フェライトをろう付けした高周波吸収体の量産試作品を空洞に装着し、900kV 最大定格運転に必要な 120kW を超える 135kW での連続安定運転ができた。また、寄生共振モードの Q 値が高周波吸収体により大きく減衰することも確認した。これにより新設計のコンパクト HOM 減衰機構を持つ空洞は有効に動作することが確認できた。この空洞は 3GeV 次世代放射光施設の蓄積リングにも採用される予定である[9]。

謝辞

この研究開発は、国立研究開発法人理化学研究所及び公益財団法人高輝度光科学研究センターによる SPring-8 高度化計画の一環として行われました。関係各位に感謝いたします。プロトタイプ機の各試験にてご支援いただいたスプリングエイトサービス

(株)の早賀紀久男氏、山本浩司氏に感謝いたします。

参考文献

- [1] T. Watanabe *et al.*, Proceedings of the 9th International Particle Accelerator Conference, Vancouver, BC, Canada, Apr. 29-May 4, 2018, p.4209.
- [2] M. Takao, Proceedings of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagoya, Aug. 3-5, 2013, p.302.
- [3] H. Ego *et al.*, Proceedings of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aomori, Aug. 9-11, 2014, p.237.
- [4] H. Ego *et al.*, Proceedings of the 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Toyonaka, Aug. 8-11, 2012, p.154.
- [5] https://laacg.lanl.gov/laacg/services/download_sf.phtml
- [6] https://www.aetjapan.com/software/CST_Overview.php
- [7] <https://ansys.com/ja-jp/>
- [8] http://www.tdk.co.jp/emc_guide/jemc_basic_06.pdf
- [9] N. Nishimori *et al.*, Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Kyoto, Jul. 31-Aug. 3, 2019, THOI09.