

次世代放射光源用加速器のための 1.5 GHz TM020 型高調波空洞の大電力実機 に向けた設計研究

HIGH-POWER MODEL DESIGN OF THE 1.5 GHz TM020-TYPE HARMONIC CAVITY FOR THE FUTURE SYNCHROTRON LIGHT SOURCES

山口孝明^{#, A)}, 坂中章悟^{B, A)}, 山本尚人^{B, A)}, 内藤大地^{B, A)}, 高橋毅^{B)}

Takaaki Yamaguchi^{#, A)}, Shogo Sakanaka^{B, A)}, Naoto Yamamoto^{B, A)}, Daichi Naito^{B, A)}, Takeshi Takahashi^{B)}

^{A)} Department of Accelerator Science, The Graduate University for Advanced Studies (SOKENDAI)

^{B)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

We have designed the 1.5 GHz TM020-type harmonic cavity for lengthening bunches in the future low-emittance synchrotron light sources. This cavity is advantageous to mitigate bunch-gap transient beam loading effects. Moreover, it can damp harmful parasitic modes with a compact damping structure. We finished the fundamental cavity design using electromagnetic simulations and the low-power measurement by the end of 2021. Proceeding to the high-power cavity design, we modified the damping structure and the input-coupler loop in order to mitigate the heat load on the ferrite blocks. In this paper, we present the design of the high-power cavity.

1. はじめに

TM020 型空洞[1,2]はビーム不安定性を誘起する寄生モードの減衰に優れ、且つバンチギャップによる過渡的電圧変動を抑制できる。我々はこの空洞方式を 100 pm-rad 級の低エミッタンス放射光源でバンチ伸長用 1.5 GHz (3 次) 高調波空洞として用いることを考え、設計研究を行っている。2020 年頃まで基本的な電磁場設計を行い [3]、2021 年春にアルミ合金製低電力モデルを製作して TM020 加速モードの共振周波数と Q 値、及び寄生モードの減衰性能を確認した[4]。その後本格的に大電力実機試作に向け設計検討を進めた。この検討過程で、寄生モード減衰機構と入力カップラーに関して、RF 吸収体の熱負荷を低減する目的で設計変更を行った。その後、熱応力解析を行い、大電力の負荷にも対応できる冷却水路・機械構造を検討した。こうした検討の結果、大電力実機の設計が概ね固まった。本発表では、これらの検討結果に基づく大電力実機の構造設計を提示する。まず第 2 章で、2021 年の本年会にて発表した低電力測定結果を、より詳細に電磁場シミュレーションと比較検討する。第 3 章では、低電力測定から判明したフェライトでの発熱の問題について述べる。第 4 章では、低電力モデルの設計を改良した大電力実機の設計案を示す。第 5 章では、大電力実機の熱・応力解析を行い、本設計がビーム運転に耐えうる構造かを確認する。第 6 章で、本論文のまとめと今後の展望について述べる。

2 低電力測定とシミュレーションの比較

2.1 低電力測定結果のまとめ

2021 年の本年会にて、アルミ合金製低電力モデル空洞の設計・製作、低電力測定の結果を発表した[4]。このときの測定結果を簡単にまとめる。Figure 1 に低電力モデルの内部構造を示す。寄生モード減衰用の RF 吸収

体としては、数 GHz 帯で電波吸収特性を有する TDK 社製の Ni-Zn 系フェライト HF70 [5]を使用した。測定結果としてまず、主要な寄生モード(TM010, TM110, TM120, TE121)の Q 値を測定したところ、フェライトにより強く減衰されていることを確認した。一方で、Q 値の測定値を電磁場シミュレーションソフトウェア CST MW Studio[6]による計算結果と比較すると、TM010 モードで 6 倍、TM110 モードで 2 倍程度測定値の方が高いことがわかった。

加速モードである TM020 モードに関しても共振周波数、無負荷 Q 値、カップラーにおける外部 Q 値を測定した。まず共振周波数のに関しては、測定値はシミュレーションによる計算値より約 640 kHz ほど低い結果であった。外部 Q 値においては、ループをビーム軸に対して 55 度回転させて測定した場合で 1.21×10^5 と測定され、計算値 1.22×10^5 とほぼ一致した。一方、無負荷 Q 値に関し

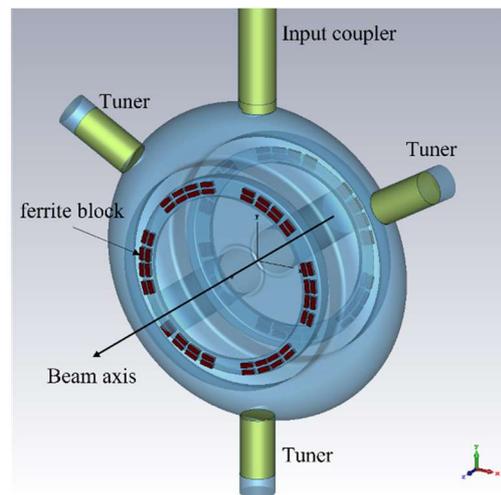


Figure 1: Configuration of the ferrite blocks, frequency tuners, and input coupler in the low-power model cavity.

[#] yamaguc@post.kek.jp

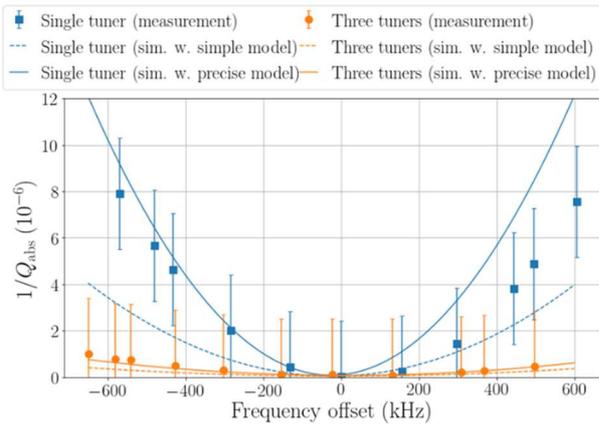


Figure 2: The inverse of Q factor ($1/Q_{\text{abs}}$) associated with loss on the ferrite blocks as the function of the resonant frequency offset. The close squares and circles indicate the measurement results. The solid and dashed lines show the simulation results with precise and simplified ferrite shapes, respectively. The blue and orange colors indicate the data with single and three tuners, respectively.

ては、測定値は計算値の 7 割程度であった。モデル空洞は胴体部が 2 分割の構造になっており、空洞赤道部にわずかな溝がある。TM020 モードの表面電流はその部分を横切るため、接触抵抗により損失が大きくなっている可能性が考えられる。実際、表面電流が溝に対して平行な TE011 モードを測定したところ、無負荷 Q 値は計算値と 3% 程度の誤差内で一致した。

さらに、TM020 モードのフェライトでの電力損失を測定した。共振周波数調整のため周波数チューナーを空洞内に突き出す又は引き抜くと、TM020 モードの磁場の一部が寄生モード減衰用同軸スロット内に浸入し、フェライトで電力損失が生じる[4]。本空洞ではこの効果を低減する目的で、Fig. 1 のようにチューナーを 3 台に増やし回転対称に配置している。低電力測定では、チューナーを動かしながらフェライトでの電力損失を表す Q 値(Q_{abs})を測定した。この値の逆数($1/Q_{\text{abs}}$)は、TM020 モードの共振周波数 ω_{res} 、及び空洞内蓄積エネルギー W を用いて $1/Q_{\text{abs}} = P_{\text{abs}}/(\omega_{\text{res}} W)$ と表される量でフェライトでの損失電力に比例する。周波数調整量に対する $1/Q_{\text{abs}}$ のプロットを Fig. 2 に示す。各点が測定結果を表している。チューナー 3 台を同じ挿入量で周波数調整した場合と 1 台で調整した場合で測定結果を比較すると、予測通り 3

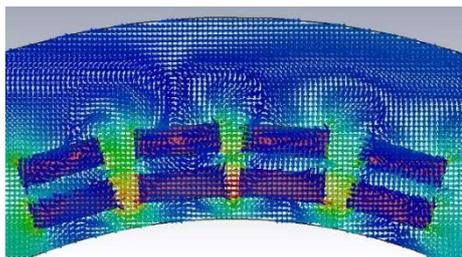


Figure 3: The magnetic field of the TM020 mode around the ferrite blocks when the frequency tuners are inserted.

Table 1: Measured and Calculated Unloaded Q Factors of Some Parasitic Modes

Mode	Frequency (GHz)	Q_0 (measured)	Q_0 (calculated)
TM010	0.59	34.0	38.2
TM110	0.97	23.8	30.0
TM120	1.88	40.1	67.1
TE121	2.33	3,040	4,270

台使用時の方が電力損失を低く抑えられることを確認した。一方、破線で示した当初のシミュレーションと比較すると、電力損失が 1.5 - 2 倍程度大きく測定された。

2.2 詳細な電磁場シミュレーションとの比較

当初のシミュレーション結果と低電力測定結果との間に一部差異が見られたが、これらについてより詳しい解析を進めた。最初に、TM020 モードの共振周波数の測定値と計算値との差について検討した。より精密に両者の差を測るため、測定時の湿度・気温を考慮した空気の誘電率の校正やオーム損による共振周波数の低下の見積もりを行った。さらにシミュレーションモデルでは、当初簡略化していたチューナーポートとプランジャとの隙間を簡略せずに計算した。その結果、共振周波数の測定値と計算値との差は 360 kHz 程度にまで縮まった。

次に、寄生モードの Q 値、及び TM020 モードの電力損失の測定結果と計算結果のずれについて検討した。当初のシミュレーションでは空洞片側のフェライトを、円環を 6 分割したような簡略化した形状で計算していた(文献[4]、Fig. 3)。一方、モデル空洞では Fig. 1 のように 15 mm × 5 mm × 4.5 mm の直方体ブロックを 1 つの吸収体モジュールにつき 8 個接着し、これを空洞片側に 6 モジュール、合計 12 モジュールを空洞に取り付けていた。そこで、モデル空洞の吸収体形状を取り入れてより精密なシミュレーションを実施した。

フェライト部分を精密化したシミュレーションの結果として、まず主要な寄生モードの無負荷 Q 値(Q_0)の計算値と測定値を Table 1 に示す。ここで、 Q_0 の値には壁損失電力とフェライトでの損失電力の両方を含んでいるものとする。当初数倍の開きがあった TM010, TM110 モードの Q 値に関しては、シミュレーションモデルの精密化により、測定値と計算値の差が数割程度の差に縮小した。

次に、TM020 モードの電力損失のシミュレーション結果を Fig. 2 に実線で示す。フェライトの形状を簡略化していたときと比べて精密化したシミュレーションでは、電力損失が増加する傾向となり、低電力測定の結果を比較的再現することがわかった。電力損失が大きくなる理由として、TM020 モードの磁場が吸収体付近に浸入すると、Fig. 3 に示すようにフェライトの磁性によってフェライトブロック間の磁場が強まり、結果的に電力損失が大きくなるようである。

3. フェライトでの発熱の問題

低電力測定と精密化したシミュレーションの結果、TM020 モードのフェライトでの電力損失が当初の見積もりよりも増加することがわかった。単位体積当たりの吸収電力が大きすぎると、大電力運転時にフェライトが熱膨

張により破損する可能性がある。フェライトの吸収電力の上限は 10 W/cm^3 程度[7]であり、これは前述のフェライトブロック当たり 3.38 W に相当する。ここで、大電力実機において最も厳しい運転状況を考える。共振周波数を中心周波数 1.5 GHz からチューナーによって $+500 \text{ kHz}$ だけずらし、KEK-LS[8]の平均ビーム電流 500 mA のビーム負荷がかかり、且つ加速モードの壁損失電力として設計値の 10 kW が発生している状況を仮定する。モデル空洞で使用したフェライトブロックの形状をそのまま大電力モデルで使用すると、TM020 モードは合計約 140 W フェライトで損失する。これは 1 ブロック当たり平均 1.45 W 吸収することに相当する。これに加えてビーム電流 500 mA のとき、寄生モードの電力は loss factor の計算からおおよそ 420 W である。ここで、RMS バンチ長は KEK-LS でバンチ伸長が行われていない場合に当たる 3.0 mm に設定し計算した。これを全てフェライトで吸収すると仮定すると単純計算で 1 ブロック当たり 4.36 W 吸収することになる。そのため、モデル空洞で搭載したフェライトの体積の場合、フェライトでの平均吸収電力が許容値を上回ることがわかった。

さらなる困難な課題として、TM020 モードによるフェライトの発熱が、局所的に大きくなる問題が挙げられる。これを示すため、共振周波数を $+500 \text{ kHz}$ 調整した場合における TM020 モードのフェライトでの電力損失の分布を Fig. 4 に示す。カップラーループは z 軸(ビーム軸)に対して 55 度回転している。赤い箇所が発熱が大きいことを示すが、カラーバーの値は相対値であり実際の数値ではない。カップラーループの特に後ろ側のフェライトブロックの発熱が大きく、最大で 6.4 W/block の発熱が発生している。

これらの課題を克服するため、本研究では大電力実機の設計に際してモデル空洞よりも多くのフェライトを搭載できるよう寄生モード減衰機構の部分の改良を行った。また、局所的に発熱が大きくなるようにカップラー

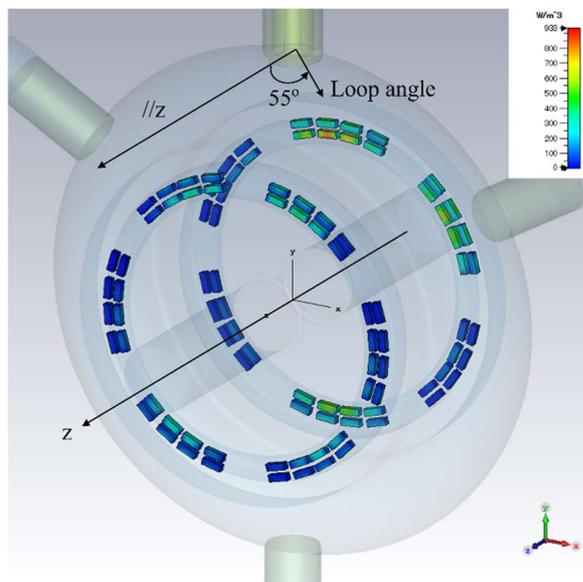


Figure 4: Power loss density on the ferrite blocks due to the TM020 mode. The colormap indicates relative values.

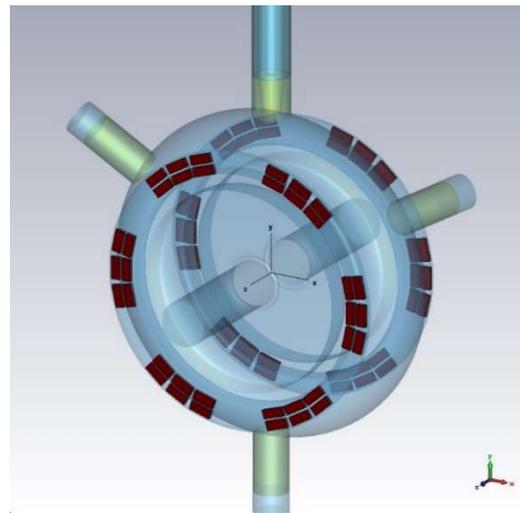


Figure 5: Modified Configuration of the ferrite blocks, frequency tuners, and input coupler for the high-power cavity.

ループ部分の設計変更を行った。

4. 大電力実機の設計

4.1 RF 吸収体の配置方法

大電力実機で検討しているフェライトブロックの配置を Fig. 5 に示す。モデル空洞の寄生モード減衰機構では、同軸スロットの終端を内側に折り畳み、空洞側から隠れた位置にフェライトを収納している。大電力実機でもフェライトが空洞側から隠れるように配置するが、同軸スロット終端を内側ではなく外側に折りたたむ設計に変更した。こうすることでフェライトを設置する半径方向の位置がより外側に配され、フェライトを搭載する空間をより多くとることができる。また、大電力実機では吸収体モジュールの導入部を真空封止する必要があるため、そのスペースを確保する点においてもこの設計は有用である。

また、フェライトの寸法についても変更を行った。大電力実機では $25.5 \text{ mm} \times 10.26 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ の寸法のフェライトブロックを 1 モジュール当たり 6 個接合して使用する予定である。このフェライトブロックの寸法は先行研究[2]で採用されたものと同じである。モデル空洞より大判のブロックを使用することで、1 ブロック当たりの吸収電力の許容値を 10.5 W に拡大することができる。このフェライトブロックの配置方法の変更で、フェライトの合計体積は低電力モデルに比べ 2.33 倍に増加した。この変更で寄生モード減衰性能に多少の変化はみられるものの、致命的な影響は見られない。

4.2 入力カップラー

モデル空洞で採用したカップラーでは、Fig. 6(a)のような先端のループ部分を扇状にした特殊な形状のループを採用した。この形状は結合度を弱める方向に働くが、バンチ伸長用の高調波空洞では最適結合度が 1 以下の小さい値となるため都合がよい。また空洞側から見て、同軸線路の穴が隠れる構造であるため、TM020 モードへの摂動が抑制される。最大結合度を 1 付近になるよう

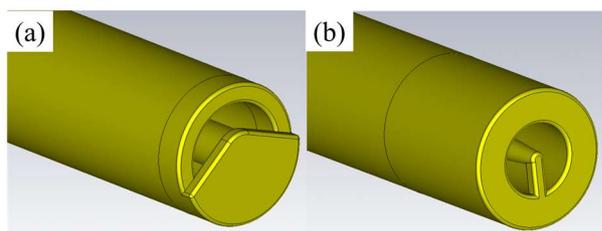


Figure 6: Designs of the coupler loops (a) for the low-power model cavity and (b) for the high-power cavity.

にループ形状を調整し、ビーム運転ではループをビーム軸に対し 55 度回転させて使用することが当初の予定であった。

大電力実機用に改良したループ形状を Fig. 6(b)に示す。同軸線路を途中からテーパ状にして細めていき、短いループで結合を行う。この構造でも、同軸線路の穴を隠すことができ、結合度も低くすることができる。最大結合度は 0.5 程度に調整し、ループを回転せずに運転することにした。以前のループ形状に比べループの前後に段差がない設計になっており、フェライトでの電力損失の偏りを低減することが期待できる。

4.3 新構造での TM020 モードのフェライトでの損失の見積もり

寄生モード減衰機構と入力カップラーを改良した場合の TM020 モードのフェライトでの損失を評価した。共振周波数を+500 kHz 調整したときの電力損失の分布を Fig. 7 に示す。カラーバーのスケールは Fig. 4 に合わせた。壁損失電力 10 kW のときの電力損失は、全フェライトブロック合計で 89 W (平均 1.24 W/block) となった。Figure 7 から、電力損失が全体的に小さくなったことに加え電力損失の偏りも低減されたことがわかる。実際 1 ブロック当たりの発熱の最大値は約 2.3 W/block である。なお、共振周波数を 500 kHz 下げた場合も同様の電力損失である。寄生モードの吸収電力が単純計算で 1 ブロッ

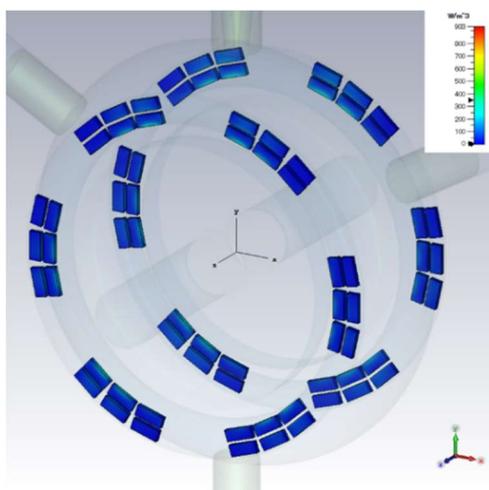


Figure 7: Power loss density on the ferrite blocks in the model shown in Fig. 5. The scale of the color map is the same as that of Fig. 4.

ク当たり 5.83 W であるため、これに TM020 モードでの損失を足し合わせても許容値を下回る。最終的に、熱・応力解析を行うことにより、この発熱量で問題がないかを検討した。

5. 機械設計及び熱・応力解析

Figure 5 で示したようなフェライトブロックの配置が構造的に可能であることを示すため、大電力実機の 3 次元 CAD 図を作成した。この構造を元に構造解析ソフトウェア ANSYS Mechanical[9]を使用して熱・応力解析を実施した。

5.1 空洞本体の熱・応力解析

大電力実機のイメージ図を Fig. 8 に示す。灰色の部分は SUS、茶色の部分は銅であることを示す。ノーズコーン形状のついた端板は、固定金具により空洞本体に取り付けられる構造で、基本的には低電力モデルと同様の構造である。端板の外側は SUS 製の板で補強されている。固定金具には片側 6 か所の吸収体モジュールを導入するための扇状のポートが配されている。

空洞本体の熱・応力解析では、空洞壁全体で 10 kW の電力を損失したと仮定し、このときの発熱と冷却水路による冷却を考慮し計算を行った。冷却水の温度は入口で 20°C、流量は空洞片側の経路で 8.1 L/min (流速 3 m/s) を仮定した。水温は PF 2.5 GeV 電子蓄積リングで使用している冷却水と同じ水温である。水温の上昇を近似するため、Fig. 9(a)の下に示すように水路(Ch. 1 → Ch. 5)ごとに水温を変えて計算を行った。

計算結果として、Fig. 9(a)に温度分布及び冷却水の順路と設定温度、Fig. 9(b)に相当応力を示す。応力計算では空洞内を真空引きした際に発生する大気圧による応力も含めた。温度は端板の部分が最大で 32°C 程度であった。相当応力は端板・外板の SUS の部分で 30 MPa 程度であり、構造的な問題は認められない。内面形状の変形量は、空洞赤道部で約 24 μm 膨張する一方で、ノーズコーンの先端部は約 10 μm 空洞内側に押される。これらの変形を考慮し TM020 モードの共振周波数の変

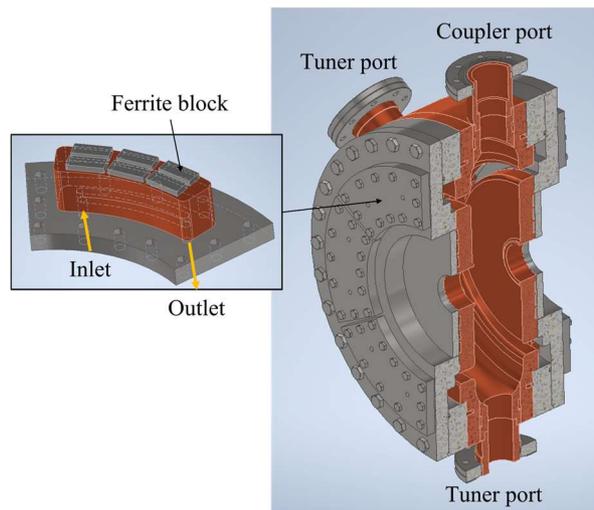


Figure 8: 3D-CAD image of the high-power model.

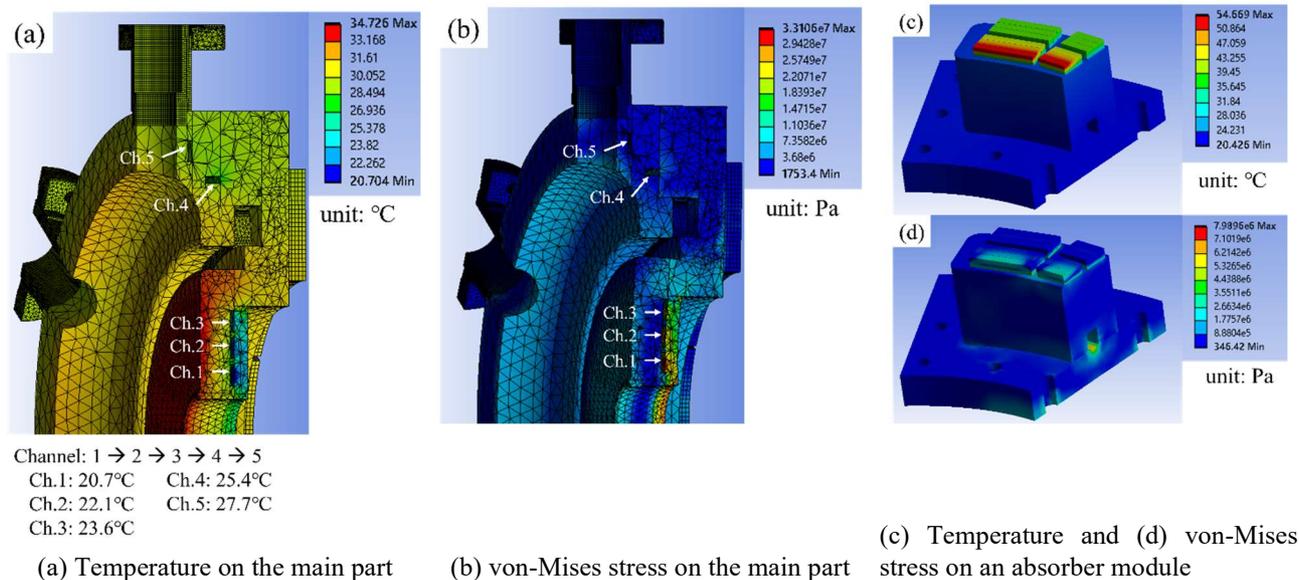


Figure 9: Simulated temperature and von-Mises stress distribution on the main part of the cavity and an absorber module.

化をシミュレートすると約-210 kHzであった。この変化量は周波数チューナーの可変量内に収まっている。

5.2 吸収体モジュール部分の熱・応力解析

吸収体モジュールについては単体で熱・応力解析を行った。電磁場計算の結果から、TM020 モードによる発熱が最も大きいモジュールの熱分布を熱解析に使用した。また、寄生モードの電力(5.83 W/block)も加えた。また、Fig. 8 に示した冷却水路に、水温 20°C、流量 8.1 L/min の冷却水を流した場合で計算を行った。

温度分布と熱膨張に伴う相当応力の計算結果を Fig. 9(c), (d) に示す。温度は最大で約 56°C であった。熱応力に関しては、フェライトと銅製の台座との接合部付近で約 6 MPa の熱応力がかかることがわかった。Ni-Zn 系フェライト典型的な引張強度は 20 - 50 MPa であるから[10]、フェライトにかかる応力は引張強度の 30% 以下である。

6. まとめと今後の展望

本論文では、1.5 GHz TM020 型高調波空洞の低電力測定結果の解析、大電力実機的设计、及び熱応力解析結果を示した。低電力測定の結果、TM020 モードの共振周波数は測定結果と計算結果で 360 kHz ほどの差異があった。要因としては、製作誤差やシミュレーション誤差が考えられるが、どちらが支配的かは今後検討していきたい。また、TM020 モードのフェライトでの電力損失が当初の見積もりより増加することが判明した。これを低減するため、フェライトの配置方法、カップラーループの改良をおこなったところ、電力損失を低減できることがわかった。また、大電力実機の空洞構造を検討し、構造解析を実施した。このシミュレーション結果から、ビーム運転で想定される大電力の熱負荷に十分耐えうることを確認した。吸収体モジュール単体の熱解析では、フェライトにかかる熱応力はフェライトの強度より低く見積もられた。

今後の方針としては、まず HF70 の高周波吸収特性をより精密に測定する予定である。また、HF70 に関しては、今後入手しにくくなる可能性が高まってきたため代替品

の検討も行っている。吸収体モジュールについても、実際に試作して大電力高周波試験を行いたいと考えている。また、吸収体導入部の真空シールについてもより詰めた検討を行う必要がある。

謝辞

HF70 に関するデータを KEK 加速器研究施設の照井真司氏から提供頂きました。本研究は JST 次世代研究者挑戦的研究プログラム JPMJSP2104 及び JSPS 科研費 JP17K05131、JP20H04459 の支援を受けたものです。

参考文献

- [1] H. Ego, J. Watanabe, S. Kimura, and K. Sato, in Proc. PASJ2014, 2014, pp. 237-241.
- [2] H. Ego, T. Inagaki, T. Oshima, N. Shigeoka, T. Sugano, H. Hara, and S. Miura, in Proc. PASJ2019, 2019, pp. 17-21.
- [3] T. Yamaguchi, S. Sakanaka, N. Yamamoto, D. Naito, and T. Takahashi, in Proc. IPAC2021 MOPAB343, pp. 1064 - 1067 (2021).
- [4] T. Yamaguchi, N. Yamamoto, D. Naito, T. Takahashi, T. Takatomi, and S. Sakanaka, in Proc. PASJ2021 WEOA03, pp. 125 - 129 (2021).
- [5] TDK Corporation; <https://product.tdk.com/en/products/emc/technote/guidebook/index.html>
- [6] CST Studio Suite; <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/cst-studio-suite/>
- [7] S. Terui, private communications.
- [8] KEK Light Source Conceptual Design Report ver. 1.1, 2017; <https://kekl.kok.jp/>
- [9] ANSYS, Engineering Simulation Software; <https://www.ansys.com/>
- [10] Hitachi Metals, Ltd.; <https://www.hitachi-metals.co.jp/>