

TM020 型高調波空洞において寄生モード減衰機構が加速モードに与える影響 INFLUENCE OF THE PARASITIC-MODE DAMPER ON THE ACCELERATING MODE IN THE TM020-TYPE HARMONIC CAVITY

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

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

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

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

Abstract

In many next-generation synchrotron light sources, installations of bunch-lengthening harmonic cavities are considered in order to mitigate the influence of intrabeam scattering. We study the design of the TM020-type harmonic cavity which utilises not the fundamental TM010 resonant mode but the TM020 mode as the accelerating mode. This cavity has great advantages as a bunch-lengthening harmonic cavity such as (1) reduction of the bunch-gap transient beam loading, and (2) enabling to install compact parasitic-mode damper at the node of the magnetic field of the TM020 mode. In this paper, we report some problems which we have found in the design study, and present reasonable solutions.

1. はじめに

次世代の蓄積リング型放射光源では、放射光の輝度を高めるため、100 pm rad 級のビームエミッタンスを目指している。横方向のビームサイズが小さくなるとバンチ内の電子同士の散乱（バンチ内散乱）の効果が無視できなくなり、ビーム寿命の低下やエミッタンス増大などの問題を引き起こす。そこで、多くの 3 GeV クラスの次世代放射光源では、ビームの進行方向にバンチを伸長するための高調波空洞の導入を検討している。これにより、横方向エミッタンスを変えることなくバンチ内の電子密度を下げることができ、バンチ内散乱の影響を低減することができる。

高調波空洞を蓄積リングに導入した場合の問題として、以下の 2 点が挙げられる:

1. ビームのフィルパターンにバンチがない箇所（バンチギャップ）がある場合、高調波空洞の RF 電圧に過渡的電圧変化が生じ、バンチトレイン内にうまく伸長できないバンチが生じる [1]。
2. 高調波空洞の加速モード以外の共振モード（寄生モード）による結合バンチ型不安定性が発生する可能性がある（これについては、蓄積リング内にある主加速空洞と同様）。

上記の 1 番目の問題については、Q 値が高い超伝導空洞や、ARES 空洞等のエネルギー貯蔵空洞を用いることで過渡的電圧変化を低減することができる [1]。一方、超伝導空洞に関して運転コストが高く、または ARES 空洞については構造が複雑である、といった側面もある。

我々は、一般的な TM010 共振モードではなく TM020 モードを加速モードとして使用する、常伝導 TM020 空洞を高調波空洞として検討し、その設計研究を行っている。TM020 空洞は、SPring-8 の次期

計画である SPring-8-II で主加速空洞として使用することを目的とし、恵郷氏らにより提案された [2, 3]。この空洞の特長として

- TM010 空洞に比べ体積が大きく Q 値が高いため、バンチギャップによる過渡的電圧変化を低減できる。
- TM020 加速モードの磁場の節に寄生モード減衰機構を備えることで、加速モードに影響を与えずに多くの寄生モードを減衰できる [2]。

といった点が挙げられる。TM020 型高調波空洞の磁場分布を Fig. 1 に、空洞の基本パラメータを Table 1 に示す。円環状の寄生モード減衰用スロットを TM020 モードの磁場の節に設置し RF 吸収体（フェライト）で終端する。これにより TM020 モードには影響を与えない一方、多くの寄生モードはスロットと磁場的に結合するため、RF 吸収体で減衰される。

TM020 型高調波空洞に関する先行研究 [4] では寄生モードの減衰方式を比較検討した。この研究をさらに発展させ空洞設計の検討を進めたところ、いくつかの設計上の課題が明らかとなった。本論文では明らかになった本空洞の課題とその解決案を示す。第 2 節で本空洞の設計における主な問題点を挙げ、第 3 節でその解決法を提案する。

Table 1: Fundamental Parameters of the TM020-type Harmonic Cavity

Parameter	Value
Frequency	1.5 GHz
Harmonic	3
R/Q	66 Ω
Unloaded Q	32,000

2. TM020 型高調波空洞における課題

TM020 型高調波空洞の設計研究の中で判明した課題を以下に示す:

* yamaguc@post.kek.jp

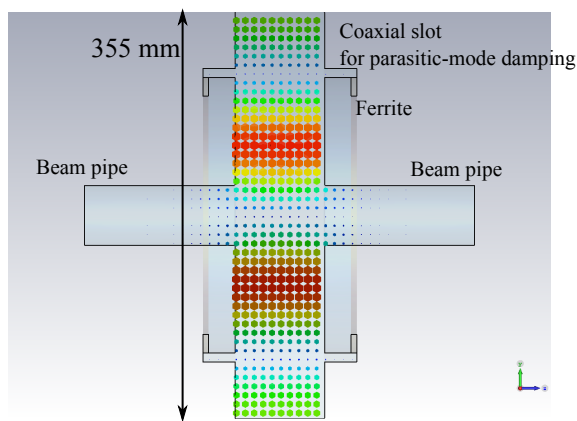


Figure 1: The magnetic field of the TM020 accelerating mode in the TM020-type harmonic cavity.

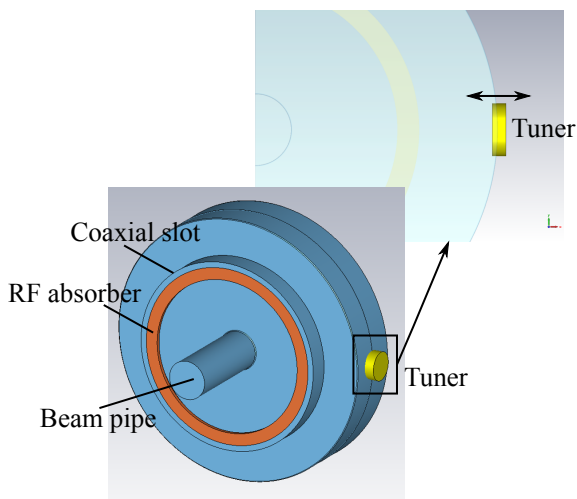


Figure 2: TM020-type harmonic cavity with a tuner.

1. 周波数チューナーや入力カップラーなどの機構を空洞に設置すると、TM020モードの磁場分布に歪みが生じ、TM020加速モードのQ値が低下してしまう。
2. TM020モードと近い位置に磁場の節を持つTM02n, TM12n ($n = 0, 1, \dots$)モードなどを減衰し難い。

この論文では、上記項目の1について議論する。

周波数チューナーは、空洞内にプランジヤーを突き出したり引き抜いたりすることで、空洞の共振周波数を調整するための装置である (Fig. 2)。チューナーを突き出すと、TM020加速モードの磁場の節が半径方向に僅かに移動し (Fig. 3 (a))、空洞のTM020モードが寄生モード減衰用スロット (同軸線路) のTEM伝搬モードと結合する。また、空洞の回転対称性が崩れることで、空洞のTM020モードに2極、4極成分などが混ざり (Fig. 3 (b), (c))、TM020モードがスロットのTE11, TE21モードなどと結合するようになる。TM020モードがスロットと結合すると、加速モードの電磁場がスロット内に浸入しRF吸収体で減衰されてしまう。この結果、加速モードのQ値の

低下やRF吸収体での発熱といった望ましくない現象を引き起こす。

本空洞では、周波数チューナーの性能として以下の2点を目標とした。

- 共振周波数の調整可能幅を1 MHz以上とする。
- TM020モードにおけるRF吸収体での損失電力 (P_{abs}) を壁損失電力 (P_{wall}) の1%以下に抑える。

周波数調整量については、空洞の製作誤差の補償 ($\sim \pm 300$ kHz)、熱膨張による周波数変化の補償 ($\sim +100$ kHz)、beam loading 補償のための detuning ($\sim +200$ kHz) を考慮し必要量を概算した。また、RF吸収体での損失電力については、空洞1台当たり10 kWの壁損失で使用することを想定し、RF吸収体の吸収可能電力 (文献 [5] のRF吸収体の高周波試験を参考にし約1.4 kWと概算した) を考慮して決めた。

まず、チューナーを1台使用した場合について、RF吸収体での損失電力をシミュレーションで求めた。シミュレーションには、CST MW Studio [6] のEigenmode Solverを用いた。シミュレーションでは、RF吸収体 (フェライト) としてTDK社製IB-004を仮定し、文献 [5] にある複素誘電率と複素透磁率の測定結果を使用した。計算結果を Fig. 4 に示す。この図から、チューナーを1台使用し、RF吸収体での損失を壁損失電力の1%以内に制限した場合、チューナーで可能な周波数調整量は450 kHz程度に留まり、必要な周波数調整量 (1 MHz) を確保できないことがわかった。もしチューナーを2台以上使用し、それらを対称な配置にすれば、チューナーによるTM020モードの歪みを回復でき、RF吸収体での損失を低減できると予想される。

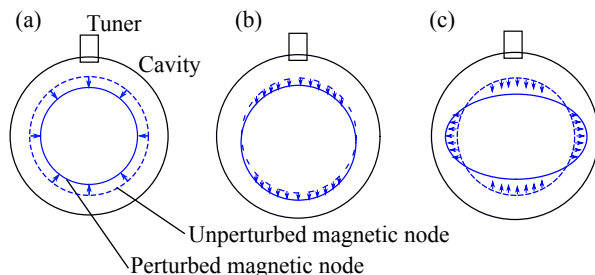


Figure 3: Schematic view of the influence of tuner insertion on the TM020-mode magnetic field. (a) The monopole-like, (b) dipole-like, and (c) quadrupole-like distortion of the node of the magnetic field.

3. 問題点の検討と解決法

周波数チューナーを2台以上使用した場合、RF吸収体での損失を低減できるかを定量的に評価した。Figure 5 に示すように、チューナーを1台から4台用いた場合を考え、チューナー2台の場合については、180度の角度をつけて配置した場合と90度の角度をつけて配置した場合の両方を検討した [7]。

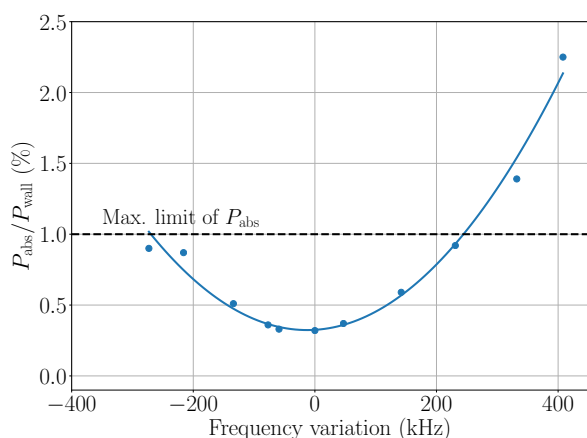


Figure 4: Ratio of the absorbed power P_{abs} by the RF absorbers to the wall loss power P_{wall} in the TM020 accelerating mode as the function of the detuning of the resonant frequency. The points show the simulation results in the case of using one tuner (calculated by CST MW Studio, Eigenmode Solver). The solid line shows the fitting by quadratic function.

3.1 シミュレーション方法

チューナー配置の検討で行った電磁場シミュレーションの方法を以下に示す（シミュレーションでは CST MW Studio, Frequency Domain Solver を用いた）。

1. TM020 空洞に取り付けた 2 つの寄生モード減衰用同軸型スロットを、無限長の同軸線路に置き換える。
2. 2 つの同軸線路の内、片方から加速モードの共振周波数 (1.5 GHz) 周辺の周波数で高周波を空洞の方へ伝搬させ、そのときの反射係数を計算 (Fig. 6)。
3. 2. で高周波を励振する伝搬モードとしては、1.5 GHz よりも遮断周波数が低い TEM, TE11, TE21, TE31 モードについて計算を実行。スロット内の各伝搬モードの磁場分布を Fig. 7 に、遮断周波数を Table 2 示す。
4. 反射係数の周波数依存性から、空洞の加速モードと導波管の各伝搬モードとの間の外部 Q 値を算出。

ここでチューナーの挿入量に関しては、チューナーがない状態の共振周波数から +900 kHz となるように挿入量を調整した。

同軸線路の伝搬モード p の外部 Q 値 $Q_{ext,p}$ は、空洞内の蓄積エネルギー W 、共振角周波数 ω_{res} を用いて

$$Q_{ext,p} = \omega_{res} \frac{W}{P_{ext,p}} \quad (1)$$

と定義される量である。ここで $P_{ext,p}$ は、伝搬モード p で空洞から同軸線路の方へ出ていく電力である。外部 Q 値は TM020 モードと各伝搬モードとの結合

度を表し、外部 Q 値が大きいほど結合度は小さく、TM020 モードにおける損失も少ない。

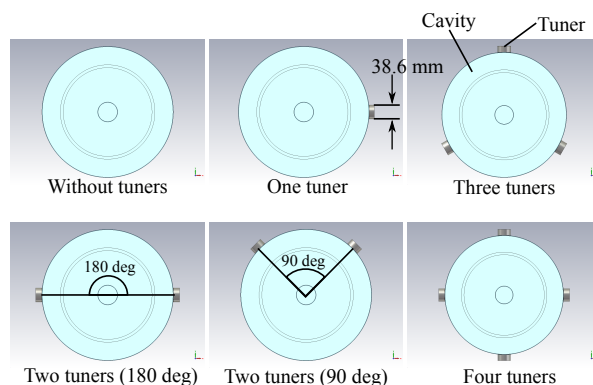


Figure 5: Layouts of tuners considered in this design study.

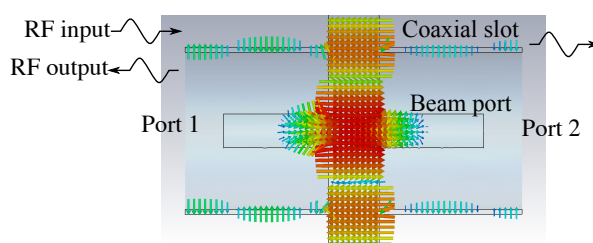


Figure 6: Configuration of frequency-domain simulation for the reflection coefficients.

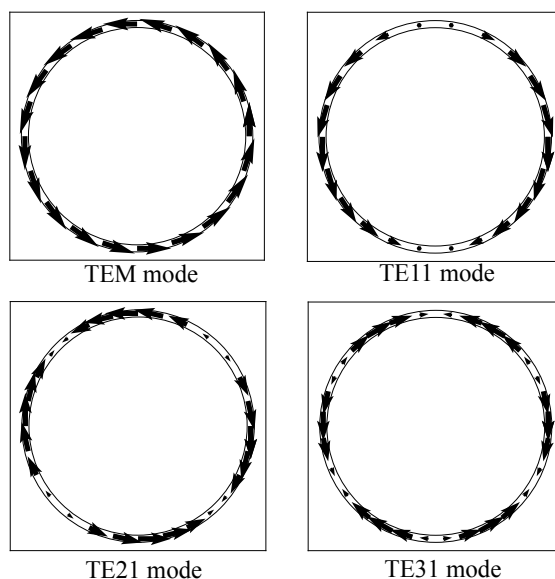


Figure 7: Magnetic fields of the propagating modes in the coaxial line (the parasitic-mode damper) whose cut-off frequencies are lower than 1.5 GHz.

Table 2: Cut-off Frequencies of the Propagating Modes in the Coaxial Slots

Mode	Cut-off frequency (GHz)
TEM	0
TE11	0.385
TE21	0.771
TE31	1.156

3.2 シミュレーション結果と考察

各伝搬モードの反射係数の計算結果を Fig. 8 に示す。Figure 8 では、反射係数を極座標で表示している。反射係数の描く円が大きい伝搬モードは、小さいモードに比べ TM020 モードとの結合が大きいことを示す（但し、チューナー配置が異なる 2 つの円の大きさを比べることはできない）。

Figure 8 の反射係数から算出した、TM020 モードと各伝搬モードとの外部 Q 値を Fig. 9 に示す（外部 Q 値の値は、2 つのスロットの寄与の合計である）。詳しい計算方法については文献 [7] で述べた。

反射係数及び外部 Q 値の計算結果から以下のことがわかった：

- どのチューナー配置においても、TEM モードとの外部 Q 値はほぼ同じであった。従って、合計の外部 Q 値としては、TM020 モードが TEM モード以外の伝搬モードと結合するかどうか重要となる。
- チューナー 1 台を使用した場合、回転対称性が最も悪く TM020 モードは全ての伝搬モードと結合する。そのため、合計の外部 Q 値は最も低い。
- チューナー 2 台を使用した場合 TM020 モードは、180 度の角度をつけて使用すると TE21 モードと、90 度の角度をつけて使用すると TE11 モードと主に結合する。180 度の場合には TE21 モードとの結合が大きくチューナー 1 台使用時からあまり改善しない一方、90 度の場合には TE11 モードとの結合度が比較的弱くチューナー 1 台に比べ 3 倍程度 Q 値が改善する。
- チューナーを 3 台または 4 台使用した場合、空洞の回転対称性が回復しほぼ TEM モードとの結合のみとなり、外部 Q 値はチューナー 1 台の場合と比べ約 5 倍上昇する。チューナー 3 台の場合には TE31 モードとの結合が見られるが、その結合度は弱く、さらに 4 台に増やしても大差はない。

チューナーを 2 台または 3 台使用した場合も含めた、周波数調整時の RF 吸収体における TM020 加速モードの損失電力のシミュレーション結果を Fig. 10 に示す。チューナーを 3 台使用した場合には、RF 吸収体での損失を 1% 以下に抑えつつ必要な周波数調整量 1 MHz を確保できることがわかる。現時点では、このチューナー 3 台の対称配置を採用する予定である。コストを下げるオプションとして、チューナー 2 台を 90 度の角度で配置することも許容でき

る解である。

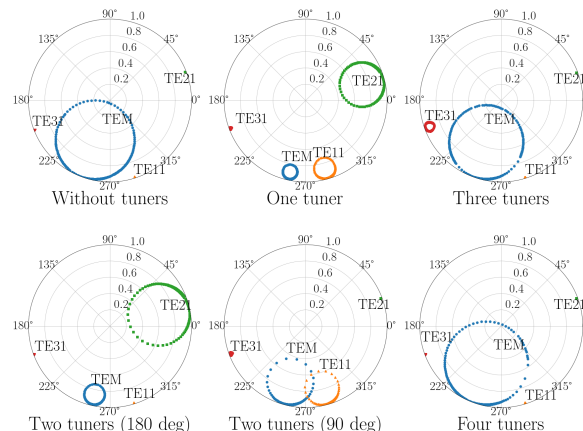


Figure 8: Traces of reflection coefficients at frequencies close to 1.5 GHz. The reflection coefficients in different propagating (TEM, TE11, TE21, TE31) modes are indicated by different colors (those are blue, orange, green, and red, respectively). The reflection coefficients are shown in the polar coordinates.

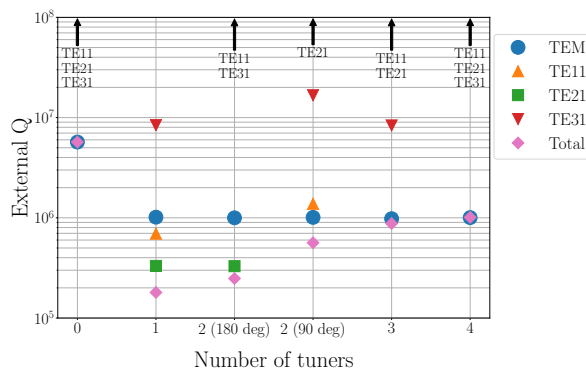
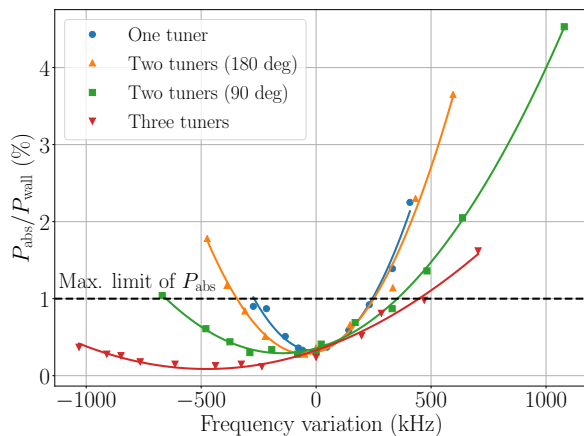


Figure 9: External Q values between the TM020 accelerating mode and the propagating modes of the coaxial slot. The external Q values are calculated from the reflection coefficients in Fig. 8. The external Q's greater than 1×10^8 are shown by the arrows.

4. まとめと今後の展望

この論文では、TM020 型高調波空洞の設計時の課題として、周波数チューナーを本空洞に搭載した際に TM020 モードが減衰されてしまう問題について議論した。これは、チューナーの導入により TM020 モードの電磁場分布の回転対称性が破れ、磁場の節に設置した寄生モード減衰機構で損失が発生してしまうことが原因であった。

この問題の解決法として我々は、チューナーを複数台設置して使用する方式を検討した。これにより、空洞の回転対称性を回復させることができ、TM020 モードの電磁場空間分布への影響を抑制できることを電磁場シミュレーションにより示した。計算結果



<https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/cst-studio-suite/>
[7] T. Yamaguchi, *Design Study on the 1.5 GHz TM020-mode Harmonic Cavity for Future Synchrotron Light Sources*, SO-KENDAI Master Qualifying Report (2019).

Figure 10: Ratio of the absorbed power P_{abs} by the RF absorbers to the wall loss power P_{wall} in the TM020 accelerating mode as the function of the detuning of the resonant frequency. The points show the simulation results in the cases of using one, two, and three tuners. The solid lines show the fittings by quadratic function.

では、チューナーを3台使用することで、目標としていた周波数調整量 1 MHz を上回る調整量を確保できることがわかった。

本論では取り上げなかったが、減衰しにくい TM02n, TM12n モード等の有害な寄生モードの減衰方法についても検討を進めている。空洞の内面形状を工夫し磁場の節の位置を寄生モード減衰用スロットからずらすことにより、大幅に減衰できる目処がついており、別の機会に発表したい。

次に、本空洞の低電力測定用空洞（コールドモデル）を製作し、加速モードの性能及び寄生モードの減衰性能を測定する予定である。

謝辞

本研究は、JSPS 科研費 JP17K05131, JP20H04459 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] J. M. Byrd, S. De Santis, J. Jacob, and V. Serriere, *Phys. Rev. ST Acc. Beams* **5**, 092001 (2002).
- [2] H. Ego, J. Watanabe, S. Kimura, and K. Sato, *Proc. of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, Aomori, Aug. 9-11, 2014, pp. 237-241.
- [3] H. Ego, T. Inagaki, T. Oshima, N. Shigeoka, T. Sugano, H. Hara, and S. Miura, *Proc. the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, Kyoto, Jul. 31-Aug. 3, 2019, pp. 17-21.
- [4] N. Yamamoto, S. Sakanaka, and T. Takahashi, *Proc. 9th International Particle Accelerator Conference*, Vancouver, BC, Canada, Apr. 29-May 4, 2018, pp. 2822-2824.
- [5] S. Terui, T. Ishibashi, Y. Suetsugu, Y. Takeuchi, K. Watanabe, H. Ishizaki, A. Kimura, and T. Sawahata, *Proc. the Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, Sapporo, Aug. 1-3, 2017, pp. 704-708.
- [6] CST Studio Suite, Website;