

氏 名 山口 孝明

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第 2398 号

学位授与の日付 2023 年 3 月 24 日

学位授与の要件 高エネルギー加速器科学研究科 加速器科学専攻
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 次世代放射光源のための 1.5 GHz TM020 型高調波空洞の
開発研究

論文審査委員 主 査 阿部 哲郎

加速器科学専攻 准教授

惠郷 博文

加速器科学専攻 教授

帯名 崇

加速器科学専攻 教授

小林 鉄也

加速器科学専攻 准教授

坂中 章悟

加速器科学専攻 教授

山本 尚人

加速器科学専攻 准教授

田村 文彦

日本原子力研究開発機構 原子力科学研究部門

J-PARC センター 研究主幹

博士論文の要旨

氏 名 山口孝明

論文題目 次世代放射光源のための 1.5 GHz TM020 型高調波空洞の開発研究

次世代の蓄積リング型放射光源では、電子ビームの極低エミッタンス化(~ 100 pm rad)により超高輝度放射光の発生を目指している。電子ビームの極低エミッタンス化において障壁となるのがバンチ内散乱の問題である。極低エミッタンス化によりバンチ内の電子密度が極度に上昇し、電子同士の Coulomb 散乱の頻度が増える。これにより自然エミッタンスの数倍に及ぶエミッタンス増大やビーム寿命の低下が懸念されている。バンチ内散乱の効果を抑制する為には、新たに高調波空洞を蓄積リングに導入し、電子バンチをビームの進行方向（縦方向）に引き延ばすことが不可欠である。高調波空洞とは、主加速空洞の運転周波数の整数倍（または半整数倍）の周波数で運転される空洞を指す。高調波の高周波 (RF) 電圧により電子が受ける縦方向ポテンシャルが平らになり、典型的に 2 – 5 倍程度にバンチを伸長できる。そのため、ほとんどの主要な次世代光源で高調波空洞の導入が予定されている。

本研究は、KEK 将来光源に向けた今までにない新方式の常伝導高調波空洞の開発研究である。それは、加速モードとして一般的に使用される最低次の TM010 共振モードではなく、高次の TM020 モードを使用する高調波空洞 (図 1) である。TM020 型空洞は元々 SPring-8 II 次期計画で主加速空洞として提案され、2023 年度以降運用開始予定の東北次世代放射光源 NanoTerasu でも採用された。従来の 1.5 GHz 帯の常伝導高調波空洞は体積が小さく、内部に蓄積される電磁場のエネルギーも小さい。するとバンチ配列にバンチギャップがあるとき高調波 RF 電圧が大きく変動し、バンチ伸長が十分に出来なくなる。本空洞は高次の TM020 モードを使用するため、一般的な空洞よりも体積が 4 倍程度大きく、これに伴って大きな電磁場エネルギーを蓄積できる。これにより高調波 RF 電圧の変動幅を従来の常伝導高調波空洞に比べて 1/4 程度に低減可能であり、バンチ伸長性能を大きく改善できる。

また、空洞共振器では加速に用いる共振モードとは異なる多数の共振モード（寄生モー

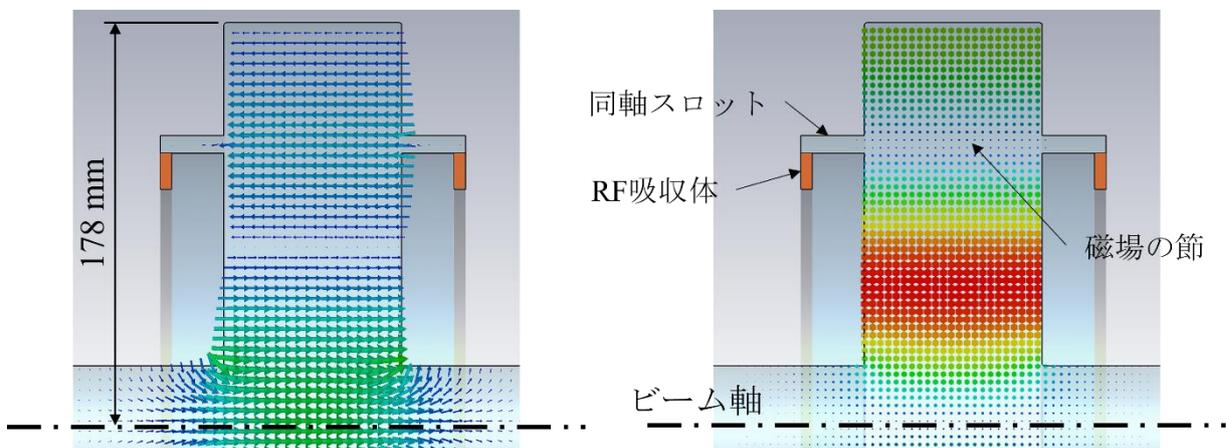


図 1: 1.5 GHz TM020 型高調波空洞の TM020 加速モードの電場分布 (左) と磁場分布 (右)

ド)が存在するが、これらの内蓄積リングにおいてビーム不安定性を引き起こす有害な共振モードは、そのQ値を落とす(減衰させる)ことが重要である。TM020型空洞には加速モードの電磁場分布をうまく利用したコンパクトな寄生モード減衰機構が搭載できる(これについては先行研究あり)。即ち、TM020モードの磁場の節の位置(磁場がゼロとなる径方向の位置)に寄生モードを取り出すための同軸型スロットを配し、RF吸収体で終端する。この機構により加速モードに影響を与えずに多くの寄生モードの減衰が可能である。

本研究では、TM020型高調波空洞の実用化に当たり、主に2つの課題があることを見いだした。1つ目の課題はTM020加速モードに関する課題である。空洞に周波数チューナーや入力カップラー等の構造物を取り付けると加速モードの磁場分布の軸対称性が崩れ、磁場の一部が同軸スロット内に浸入しRF吸収体で損失してしまう。本空洞の運転上必要な共振周波数の調整幅 ± 500 kHzを確保しようとする、最大で壁損失電力(約10 kW/cavity)の約26%もの電力がRF吸収体で吸収されることが電磁場計算で判明した。本研究では最初にこの問題の対策を周波数チューナー、入力カップラーそれぞれの機構について検討した。まず、周波数チューナーに関しては通常1台のプランジャーが空洞に取り付けられるが、本空洞では空洞内面の回転対称性を向上させる観点から3台のプランジャーを3回回転対称に搭載するという独自の設計を考案した。また入力カップラーについても、TM020モードの磁場分布への摂動を最小限に抑えた特殊な結合ループの形状を新たに考案した。こうした検討の結果、RF吸収体での損失を最も厳しい条件でも壁損失の1.5%程度にまで低減することができた。

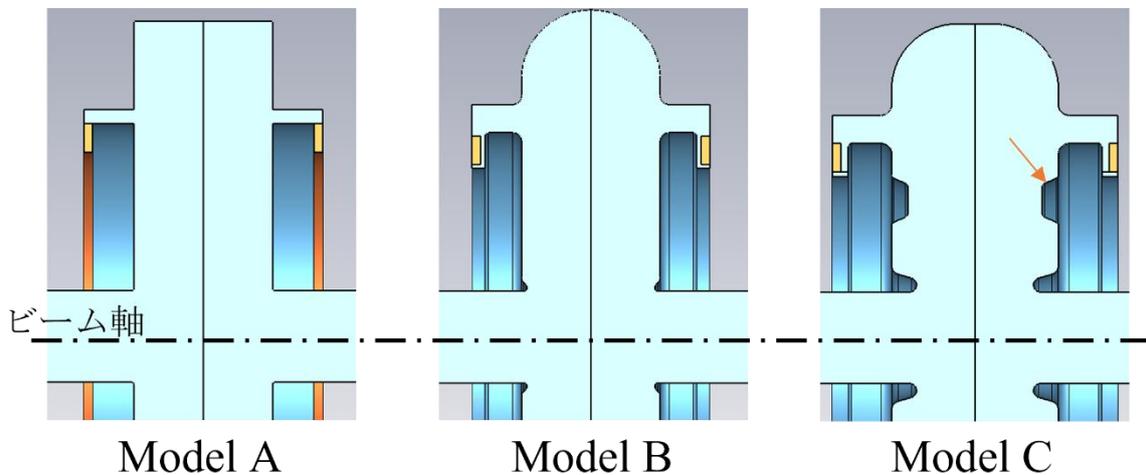


図 2: 最適化前の内面形状(Model A)と2つの最適化形状(Model B, Model C)。最終的に Model B 形状を採用した。

TM020型高調波空洞の2つ目の課題は、寄生モード減衰機構に関する課題である。KEK 将来光源として検討されていた KEK Light Source (KEK-LS)の設計パラメータでは、縦方向放射減衰時間が 22.6 ms と他の蓄積リングと比べて長い。これにより高調波空洞の寄生モード減衰性能への要求がとりわけ厳しく、縦方向結合インピーダンスの低減目標は1空洞当たり $f\text{Re}[Z(\omega)] < 2.4 \text{ GHz k}\Omega$ 、横方向は $\text{Re}[Z_T(\omega)] < 23 \text{ k}\Omega/\text{m}$ である。ところが、本空洞の寄生モード減衰機構では同軸スロット近くに磁場の節を持つ寄生モード(TM021, TM022, TM120モード等)の減衰がしにくいという欠点がある。そこで本研究では、空洞の内面形状を最適化することでこれらの寄生モードの磁場の節を移動させ減衰性能の向上を目指し

た。まず、空洞赤道部の曲率、ノーズコーン形状、同軸スロットの幅等の形状変化に対する、主要な寄生モードの Q 値や結合インピーダンスの変化を計算し、この結果に基づき最適化検討を行った (図 2)。最初の最適化案 (Model B) は縦方向インピーダンスの低減を優先した形状で、実際に縦方向に関しては目標の減衰性能を達成したが、横方向の減衰性能は不十分であった。これを踏まえ 2 つ目の最適化案 (Model C) では、寄生モード調整用バンブ (図 2 矢印) を内面形状に新たに導入し調整しるを増やすことで縦・横両方向の減衰性能の両立を目指した。この案では横方向インピーダンスの低減には成功したものの、縦方向の減衰は Model B に比べやや悪化した。さらに加速モードの性能は Model B 形状の方が良好であった。最終的に、縦方向の減衰性能と加速モードの性能に優れた Model B 形状を選択した。

これらの電磁場計算に基づく検討で、要求される加速モードの性能と寄生モード減衰性能を両立する電磁場設計を確立した。しかし、本空洞の同軸スロット方式の特殊な減衰機構の都合上、TM₀₂₀ 加速モードの共振周波数や RF 吸収体での損失が電磁場計算で正確に予測されている必要がある。また、寄生モード減衰性能もどれほど正確に計算されているか、という点も気がかりであった。そこで今までの検討結果を実測で検証するため、低電力測定用モデル空洞を製作した。電磁場計算と実測結果をできるだけ正確に比較するためモデル空洞の内面形状は $\pm 10 \mu\text{m}$ の高精度で製作し、また大電力実機でも採用予定の RF 吸収体 (NiZn 系フェライト) をモデル空洞に搭載した。ネットワークアナライザによる低電力測定の結果、加速モードの共振周波数の測定値は約 270 kHz の誤差で計算値と一致した。また、RF 吸収体での加速モードの損失を測定したところ、周波数チューナー 1 台で周波数調整するよりもチューナー 3 台で調整した方が、大幅に損失が低減されることがほぼシミュレーション通りに確認された。寄生モード減衰性能の確認のため主要な寄生モードの Q 値を測定したところ、10 - 40% の誤差で計算値と一致した。

低電力測定結果により電磁場計算が十分信頼できることを確認した後、大電力実機の設計検討を行った。ここで、搭載できる RF 吸収体を増やすことと、RF 吸収体の一部に加速モードの電力損失が集中してしまう問題を解決することを目的に、低電力モデルの設計が

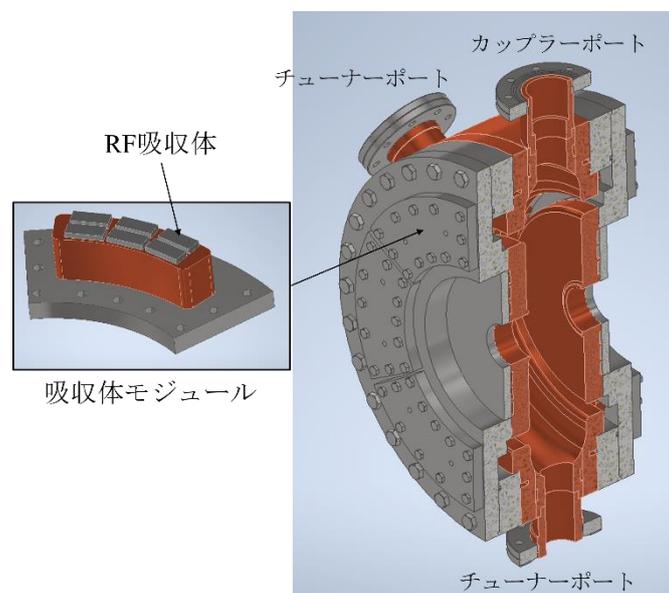


図 3: 大電力実機の機械設計

ら同軸スロット終端部と結合ループに設計改良を加えた。改良した内面形状を元に大電力実機の機械設計（図 3）を検討し、熱応力解析を行った。この結果、次世代光源で十分運用可能な TM020 型高調波空洞の電磁場設計、機械設計を確立した。

本研究により、次世代の放射光源でバンチを伸張するために用いる新しい TM020 型高調波空洞の設計を確立することが出来た。今後大電力実機を製作すれば、放射光源加速器の分野において重要な貢献ができるものと考えられる。

博士論文審査結果

Name in Full
氏 名 山口 孝明Title
論文題目 次世代放射光源のための 1.5 GHz TM020 型高調波空洞の開発研究

低エミッタンス・大電流ビームを蓄積する最先端リング型光源加速器（第 4 世代光源）では、ビームを構成する粒子バンチの内部電荷密度が高いため、バンチ内粒子散乱の効果でエミッタンスの増大やビーム寿命の低下が問題となる可能性が指摘されている。主加速空洞の他に、その整数倍の周波数を持つ高調波空洞を導入することで、バンチ内粒子にはたらくビーム進行方向のポテンシャルを平らにし、放射光の輝度に関係しないバンチ長を伸ばして粒子密度を下げるができる。これにより、バンチ内粒子散乱の効果を軽減できると期待されている。しかし、高調波空洞は周波数が高く空洞の体積が小さいため、一般的には貯蔵される電磁場エネルギーも少ない。そのため、ビームの過渡的電圧変動を受けやすく、バンチ伸長の効果の低下などの問題を引き起こす。

本研究は、上記問題を克服するため、貯蔵エネルギーのより多い高次の軸対称共振モード：TM020 を加速モードとして採用する新しい高調波空洞の開発に関するものである。出願者は、この TM020 型高調波空洞を KEK 将来光源に導入するという具体的な目的のための設計検討から開始した。大電流ビーム用の加速空洞では、ビーム不安定性の原因となる寄生モードの減衰が必須である。本研究の高調波空洞では、端板に軸対称な円形スロットをあけ、その中に RF 吸収体を設置して寄生モードを減衰させるコンパクトな減衰機構を採用している。TM020 モードは、電磁場分布の特性からその円形スロットに入り込めないため、空洞に軸対称性が保たれていれば、大きなエネルギーを持つ加速モードが RF 吸収体を加熱する問題は生じない。一方、寄生モードは当該スロットに入り込めるので、効率的に寄生モードのみを減衰できる仕組みになっている（この減衰機構については先行研究あり）。しかし、実際に加速空洞として機能するためには、筒を空洞内に出し入れする周波数チューナーや、空洞へ大電力高周波を投入するための入力カップラーを付ける必要があるが、その場合、軸対称性を破ってしまう。その影響で、加速モードに TM020 以外の非対称モードが混入し、それを通して RF 吸収体を加熱してしまう問題があった。

出願者は、周波数チューナーや入力カップラーを導入した際の軸対称性の破れを小さく抑える方法について、3次元電磁場解析ソフトウェアを駆使した研究を行った。まず、加速モードの RF 吸収体への漏れ量を、周波数チューナーの動きに対して定量的に計算し、それを低減させるための方法として、通常は 1 台のみ付けるのが常識である周波数チューナーを複数台導入するという斬新なアイデアを考案した。入念な計算の結果、3 台の周波数チューナーを 120° ごとに均等配置するという最良解を見出した。入力カップラーに関しても、軸対称性を保つ観点から、その先端部分の形状の改善にも取り組んだ。出願者は更に、寄生モードの減衰性能を結合インピーダンスから評価して、単純なピルボックス形状では十分な減衰性能が得られないことを示した。

その上で、より高い減衰性能を実現させるため、空洞内面形状をパラメータ化して、系統的な形状最適化を行った。その結果、現実的な状況を踏まえた最善の空洞形状を見出した。基本設計の完成後、その性能を確認するため、出願者は自ら低電力モデルを設計・製作し、ネットワークアナライザを用いた測定を行った。それまでの計算結果と測定結果を比較することにより、RF 吸収体の吸収量や寄生モードの減衰性能などが概ね設計通りであることを実証した。また、実機製作に向けて、大電力モデルの設計にも取り組んだ。その

際、寄生モード減衰機構や入力カップラーに関する更なる最適化を行った上で、熱・構造解析も行い、実際のビーム運転に使用できる実機向けの機械設計の主要部を完成させた。今後、大電力試験を通して実機を製作できるようになれば、本研究は放射光源加速器の分野の発展に貢献しうる重要な成果を出したと言える。また、本博士論文には本研究の基礎となる理論の説明も充実している。以上のことから、出願者は、高周波加速空洞の開発において要となるRF設計、及び機械設計を定量的、系統的、かつ包括的に行う能力を有していると判断する。

出願者は、本博士論文に関係した研究成果を国際会議において英語で発表しており、そのプロシーディングスも英語で執筆した。また、海外の著名な査読付き学術雑誌へ英語論文を投稿した。さらに、加速器関係の国際スクールへの参加経験もある。これらのことから、国際シーンで研究活動を行うに十分な英語能力を有していると判断する。

本博士論文の趣旨および内容は学位取得のための論文として十分であり、予備審査委員会での指摘を十分に反映している。博士論文審査委員会では、専門外の者にも研究内容がわかる明瞭かつ簡潔な発表ができ、数多くの質疑に対しても的確に返答できた。

以上のことから、審査委員全員一致で、出願者の博士論文の本審査を合格と判断した。

以上