

氏名	たなべよしお 田辺義雄
授与学位	博士(工学)
学位授与年月日	平成11年2月10日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第2項
最終学歴	昭和46年3月 東北大学大学院工学研究科電気及通信工学 専攻博士課程前期2年課程修了
学位論文題目	大型フェライトリングの高周波特性評価と加速器用キャビティ への適用に関する研究
論文審査委員	主査 東北大学教授 高橋 研 東北大学教授 荒井 賢一 東北大学教授 一ノ倉 理

論文内容要旨

陽子加速器の高周波キャビティは、陽子を加速する心臓部に当たる重要な機器であり、最近の陽子加速器の高エネルギー化に伴って、キャビティの単位長さ当たりの加速電圧が10 kV/mと従来の2倍以上の限界設計が必要となっている。この高周波キャビティにはフェライトリングを装荷した同軸型キャビティが採用されており、高電圧化のためフェライトリングの大型化と低損失化が要求されている。大型フェライトリングは直径が500 mm程度であり、焼成前のプレス加圧の不均一性や圧力不足など種々の要因のため、小型サンプルより性能が劣化する。しかし、その劣化の程度を理論的に評価することは難しく、同リングを実負荷の大電力で試験・評価できる装置が求められているが、国内外には存在しないのが現状である。

このため本研究では、加速器用キャビティ設計に不可欠な大電力入力時の高周波特性データを得るため、大型フェライトリングを実機と同一条件で試験できる高周波特性評価装置を開発した。キャビティは直流および交流の両バイアス磁界下で運転され、フェライトの高周波特性は両バイアスで異なるが、両バイアス下でのデータは皆無である。このため、候補と考えられる数種の既存のNi-Zn系フェライトに両バイアス磁界を印加し、本研究で初めて高周波特性を体系的に評価した。また、より加速器用高周波キャビティに適した材料を得るために、酸化コバルト(CoO)添加量を最適化して既存フェライトの改良を試み、従来より低損失のNi-Zn-Coフェライトが得られた。さらに、本改良フェライトリングをキャビティへ適用することを検討し、従来より大幅に小さい高周波電力で目標の10 kV/mが発生できることを示した。以下、本論文の研究内容を各章毎に総括する。

[第1章]

序論であり、本研究の背景、高周波加速キャビティの原理、大型フェライトリングの技術的問題点、研究目的および論文全体の構成を述べた。

[第2章]

本章ではフェライトの誘導磁気異方性および高周波損失機構を論じた。まず、Ni-Znに微量の酸化コバルト(CoO)を添加したNi-Zn-Coフェライトは高周波損失が小さいが、これはCoイオンによる誘導磁気異方性に起因することを示した。また、本研究の2~3MHzの周波数範囲では主たる高周波損失源は残留損失であり、本損失の原因である磁気余効および各種磁気共鳴について述べた。さらに、ある高周波電力以上で突然出力が増加しなくなる高損失効果がNi-Zn-Coで発生したので、本損失についても論じた。

[第3章]

フェライト装荷型キャビティと大型フェライトリング高周波特性評価装置は同じ動作原理であり、本章では、この原理および評価装置の詳細をまとめた。まず、複素比透磁率を用いてフェライトリングの等価インダクタンスおよび等価抵抗を表し、共振時にこれらの値を測定することにより、高周波損失が求められることを示した。

大型フェライトリング評価装置は、被試験体であるフェライトリングを入れてキャビティを形成する装置本体、高周波電源、バイアス電源、測定およびデータ処理システムから構成される。装置本体は大型化して直径700mmのフェライトリングまで試験が可能とし、かつ共振周波数の設定が容易で再現性のある構造とした。5MHz~1kWまでの高周波電力入力、および最大1000Aのバイアス電流通電に成功し、高精度自動測定システムによりデータを取得した。特に、従来、直流から交流バイアスまでの体系的なデータは皆無のため、直流から任意周波数(最大100Hz)の交流バイアスまで試験可能な測定システムを考案し、本評価装置に適用した。

[第4章]

本章では、上記装置を用いた評価結果についてまとめた。既存の純粋なNi-ZnフェライトおよびNi-Zn-Coフェライトの大型リングに、直流および交流のバイアス電流を印加して高周波を入力し、実負荷条件下での高周波特性を測定した。その結果、交流バイアス下ではNi-Zn-Coフェライトが有望であることが判明したので、本フェライトの性能改良を行い、同様に両バイアスでの評価を行った。主な結果を要約すると以下の通りである。

直流バイアス試験

直流バイアスでは、すべてのフェライト共高周波入力が増大すると損失が増大する。高周波入力小さいうちはNi-Zn-CoがNi-Znより低損失であるが、ある高周波入力以上で損失が急増し、発生電圧が低下する高損失効果(HLE)をNi-Zn-Coで初めて観測した(図1)。この現象は本研究の周波数範囲ではNi-Zn-Coのみに観測された。このHLE

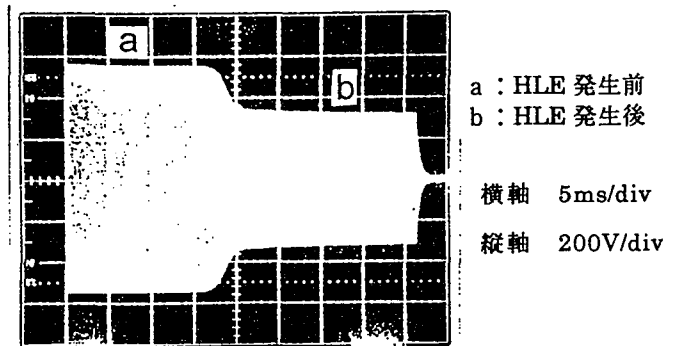


図1 HLEの電圧写真

のため、既存のNi-Zn-Coは直流バイアスには適さず、損失は大きいHLEの発生しないNi-Znを用いざるを得ないことがわかった。

交流バイアス試験

最大75Hzまで試験を行い、本研究で初めて、フェライトの高周波特性が直流から交流バイアスまで体系的に得られた。その結果、すべてのフェライト共、交流バイアス周波数が上がると損失が直流バイアスよりさらに大きくなる、特にNi-Zn-Coの損失が大幅に増大することがわかった。しかし、この大幅な損失増加があっても、Ni-Zn-Coの損失はNi-Znのそれより小さく、約1/2である。また、直流バイアスで問題となったNi-Zn-CoのHLEは、交流バイアスでは発生せず、大電力を入力することが可能である。したがって、交流バイアスにはNi-Zn-Coが適していることがわかった。

Ni-Zn-Coフェライトの改良

Ni-Zn-Coをさらに低損失化するためにCoO添加量の最適化を行い、直径50mmの大型改良フェライトリングを試作した。この改良フェライトは、直流および交流バイアス共、既存のNi-Zn-Coより低損失である。また、既存のNi-Zn-Coとの最も大きな違いは、改良フェライトはHLEが発生しづらい点である。このため、交流バイアスのみでなく、直流バイアスにも適用可能な低損失フェライトが実現できた(図2)。図2で $\mu_p'Qf$ が大きい程低損失である(μ_p' :比透磁率、 Q :フェライトQ値、 f :周波数)。

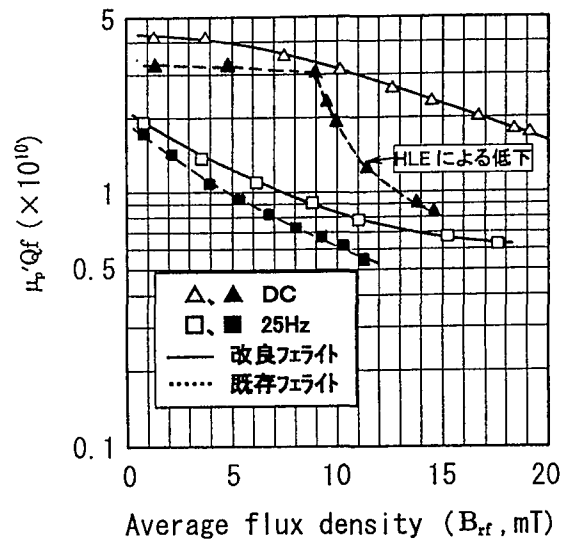


図2 改良Ni-Zn-Coフェライトの特性

[第5章]

第4章で得られた各フェライトリングの高周波特性を基に試設計を行い、実際の加速器用キャビティへの適用の可能性について検討を加えた。キャビティの単位長さ当たり10kV/mの加速電圧はフェライト1枚当たり500Vの発生電圧に相当するため、この値を判断基準とした。検討の結果、従来フェライトの場合、交流バイアスでは約450V/枚、直流バイアスでは約300V/枚と低く目標達成は困難であり、改良フェライトのみが両バイアス共500V/枚を達成した。このように改良フェライトの有用性が定量的に明らかとなり、低損失・高電圧キャビティ実現の目処が得られた。

[第6章]

本論文全体の総括を行った。

以上のように本論文では、大型フェライトリングの高周波特性取得のために実負荷試験装置を開発し、既存のフェライトおよび試作した改良フェライトを加速器用キャ

ビティ材料の観点から評価した。特に改良フェライトは直流および交流の両バイアスに優れた特性を有しており、この特性を損なうことなく量産化技術が確立できれば、有望なフェライトとなりうると考えられる。

また、大型フェライトリング高周波特性評価装置はフェライトに限らず、新しい材料開発にも当然適用が可能である。現に、筆者は本装置を用いて、キャビティ用磁性材料としてアモルファス合金などの開発および試験・評価を開始している。このように本評価装置が加速器用キャビティの新しい磁性材料の開発の一助となれば幸いである。そして、これらの磁性材料の進歩が、今後の加速器の高性能化、さらには広く材料分野の技術革新を生み出していくことを希望する。

論文審査の結果の要旨

最近の陽子加速器の高エネルギー化に伴い、陽子を加速する高周波キャビティでは、キャビティ 1 m 当たり 10 kV の加速電圧が必要とされている。この高周波キャビティには外径 50 cm のフェライトリングが装荷されており、この高電圧化のため大型リングの製造技術と低損失化がキャビティの重要な技術課題となっている。著者は大型フェライトリングの高周波特性評価のための実負荷装置を開発し、本装置を用い、キャビティに適したフェライトを得るための製造プロセスに関する研究を行った。本論文はこの研究成果についてまとめたもので、全文 6 章よりなる。

第 1 章は序論であり、本研究の背景及び目的を述べている。

第 2 章では、フェライトの高周波損失機構について考察し、Ni-Zn-Co フェライトに特徴的な誘導磁気異方性と高損失効果との関連性について述べている。

第 3 章では、大型フェライトリング対応の、新たに開発した高周波特性評価装置の原理および構成機器の詳細を述べている。キャビティの設計上、直流および交流の両バイアス磁界でのフェライトの高周波損失評価が重要であるため、直流から 100 Hz までのバイアス磁界での評価が可能な装置を開発した。本装置は最大 5 MHz、3 kW までの高周波電力の入力により、実負荷状態での特性評価が可能となっている。

第 4 章では、第 3 章で開発した装置を用い、大型フェライトリングの高周波損失評価を行った結果を述べている。直流バイアス磁界を印加した場合には、高周波入力のしきい値約 200 W 以上で、突然高周波損失が増大する高損失効果 (HLE) を Ni-Zn-Co で初めて観測した。交流バイアス磁界を印加した場合には、直流バイアス磁界印加時より大幅に損失が増大するものの、HLE は発生しないことを明らかにした。これは極めて重要な知見である。これらの結果に基づき、酸化コバルト (CoO) 添加量を最適化することにより、直流バイアス磁界印加時でも HLE が発生しにくい低損失な Ni-Zn-Co フェライトの開発に成功している。

第 5 章では、前章の結果を用いて大型フェライトリングのキャビティへの適用の可能性を検討している。その結果、最適化された Ni-Zn-Co フェライトでは、2 MHz において従来不可能であった単位長さ当たり 10 kV の電圧発生が可能であることを明らかにした。これは、低損失・高電圧キャビティ実現のために、極めて有用な成果である。

第 6 章は結論である。

以上要するに本論文は、大型フェライトリングの高周波特性評価手法を確立し、本手法を用いてキャビティ用低損失 Ni-Zn-Co フェライトの開発に成功したものであり、磁気工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士 (工学) の学位論文として合格と認める。