

氏 名 岡田 貴文

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第 2229 号

学位授与の日付 2021年3月 24日

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

学位論文題目 高 Q 値超伝導空洞のための温度・磁場マッピングシステムの
開発研究

論文審査委員 主 査 増澤 美佳
加速器科学専攻 教授
梅森 健成
加速器科学専攻 教授
西脇 みちる
加速器科学専攻 准教授
植木 竜一
加速器科学専攻 助教
阪井 寛志
加速器科学専攻 准教授
加古 永治
高エネルギー加速器研究機構 加速器科学支援セン
ター シニアフェロー
坂本 成彦
理化学研究所 仁科加速器科学研究センター 加速
器基盤研究部 サイクロトロンチーム チームリーダー

(様式3)

博士論文の要旨

氏 名 岡田 貴文

論文題目 高 Q_0 値超伝導空洞のための温度・磁場マッピングシステムの開発研究

本研究は、超伝導空洞 Q_0 値の向上のため温度・磁場マッピングシステムを開発し、それを用いて超伝導空洞の性能測定試験中におけるクエンチによる磁場トラップに伴う外部磁場の変化と空洞の発熱の測定を行った。

超伝導空洞は、超伝導体を使用した高周波共振器であり、その表面抵抗が銅などの常伝導体を用いた空洞と比較し著しく低いことから高加速勾配と低損失を両立する加速デバイスとして、加速器に広く用いられる。近年、加速器の高エネルギー化や大電流化が求められており、多くの次世代の加速器において超伝導空洞の需要は伸びていくことが予想される。超伝導空洞は極低損失であることが特徴であるが、空洞全体を超伝導状態に保つ必要がある。ほとんどの超伝導空洞の材料に用いられる Nb の場合、液体ヘリウム温度である 4.2 K か 2 K での運用が主である。高周波損失による冷凍機負荷を減らすことは、超伝導空洞の運用コストの削減につながる。そのため、超伝導空洞の表面抵抗を減らし Q_0 値を向上することは多くの加速器に対してメリットとなる。超伝導空洞の性能は年々向上し、CW で Q_0 値が 10^{10} を超える空洞が出せるようになった。

さらなる高い Q_0 値を達成するためには磁束トラップの影響を考慮する必要がある。超伝導体は Meissner-Ochsenfelt 効果により、内部の磁場を排斥するが、実際の材料にはピンが存在し相転移前に印加されていた磁場の一部を内部にトラップする。超伝導空洞の場合、このトラップされた磁束が高周波の損失となる。超伝導空洞は、磁気シールドで覆われ外部磁場の大部分を遮蔽しているが、遮蔽は完全ではないため、ある程度の磁束トラップの影響が避けられない。超伝導空洞の発展に伴い、この磁束トラップによる Q_0 値の低下の影響が無視できなくなっていた。また、ニオブを超える性能を期待される Nb_3Sn を用いた空洞や新しい熱処理を施す手法など、より高性能な超伝導空洞の開発が進められているが、いずれの空洞に対しても磁束トラップによる影響は避けられず、高 Q_0 値超伝導空洞のためには磁束トラップの具体的な現象の理解が不可欠である。超伝導空洞の磁束トラップによる影響は、近年盛んに実験・理論ともに研究が行われているが原因・描像ともに明らかな答えは解明されていない。これらの先行研究において、超伝導空洞の磁束トラップの様子が空洞の大きさに対してごく一部しか測定されていないことが問題の一つとしてある。具体的には、単セル超伝導空洞に対して、数か所のみかつそれぞれで 1 方向のみの測定にとどまっている。そのため、空洞周辺の磁場分布の具体的変化をほとんど測定できていなかった。

本研究では、新たに開発した温度・磁場マッピングシステムを用いて空洞の磁束トラップの様子を詳細に測定した。温度・磁場マッピングシステムは、空洞の外表面の温度と周辺の磁場分布を測定するために、540 個の温度センサーと 108 個の磁気センサーを用いた測定システムであり、空洞の外表面の温度と赤道部外側の磁場分布を 10 度間隔で測定可

能とした。新たに開発した温度・磁場マッピングシステムは、現在の KEK における温度マッピングと比較し、10 倍以上の数の温度センサーを用いることで位置分解能を大きく向上させた。また、異方性磁気抵抗効果(AMR)を利用した小型で安価な AMR センサーを用いることで磁場分布の測定を従来の測定では難しかった 3 軸でのより詳細な測定を可能とした。

磁場センサーとして AMR センサーを用いたが、この AMR センサーの極低温での利用で超伝導空洞の研究に用いられたのは近年の HZB による先行研究が初めてであり、磁場マッピングシステムに用いるためにはより詳細な特性評価が必要であった。そのため、このセンサーの低温での特性や感度を校正するために、新たに低温テストスタンドを構築し、100 個以上の AMR センサーの低温での特性を詳細に測定した。その結果、4.2 K でのセンサーの感度が空洞周辺の磁場分布を測定するために十分な値を持ち、センサーごとの個体差が 1%程度である結果を得た。これにより、AMR センサーが磁場マッピングに用いる磁気センサーとして超伝導空洞分野において有効であることを示した。

また、開発した温度・磁場マッピングシステムを用いて、空洞の磁束トラップの様子の詳細を測定する実験を行った。具体的には、空洞性能試験において、この開発したマッピングシステムを利用し、全体が相転移する際の周辺磁場分布の変化、さらに空洞に磁場を印加した状態でクエンチを引き起こすことによって局所的な磁束トラップを引き起こし、それによる磁場分布の変化および磁束トラップによる発熱の測定、 Q_0 値への影響の測定を行った。その結果、開発した温度・磁場マッピングシステムは空洞外壁面の温度と赤道部外側の外部磁場の測定に成功した。具体的には、冷却時の相転移による磁場分布の変化について赤道部が一様に磁場を排斥することを向きを含めて高い位置分解能で確かめられた。また、クエンチによる発熱の分布を測定することでクエンチの場所の特定を行い、クエンチ前後の磁場分布の変化を測定することで、クエンチと局所的な磁場分布の変化との関係を明らかにし、クエンチ場所で磁束がトラップされていることを測定により示した。温度・磁場マッピングシステムの結果から、空洞のクエンチによる磁束トラップの具体的な描像を示した。また、この磁束トラップによる Q_0 値の低下を確認し、それが局所的な磁場分布の変化によるものであることを温度マッピングを用いた局所的な温度の上昇と Q_0 値の測定により明らかにした。

本研究は、詳細な空洞の外表面の温度と周辺の磁場分布が測定可能なマッピングシステムを開発し、 Q_0 値抑制の原因となる磁束トラップの影響を、空洞性能試験での発熱と磁場分布の変化をマッピングを用いて測定したことにより、従来では得られていない向きを含めた詳細な空洞周辺の磁場分布の変化を明らかにし、超伝導空洞の磁束トラップによる Q_0 値低下について実験的に示したことから、より具体的な超伝導空洞の磁束トラップの描像への理解へ貢献した。また、本研究により、新たに超伝導空洞の詳細な磁場分布の情報が得られるようになり、具体的なクエンチによる磁束トラップの様子を世界で初めて測定し、その分布を示したことは超伝導空洞の高 Q_0 値研究へ貢献したと考える。

博士論文審査結果

Name in Full
氏名 岡田 貴文

Title
論文題目 高 Q 値超伝導空洞のための温度・磁場マッピングシステムの開発研究

本研究の対象である超伝導加速空洞は、ニオブ等の超伝導材料で作られた容器（空洞）を極低温まで冷却し超伝導状態にして粒子を加速する装置である。この装置には超伝導であることから空洞表面でのエネルギー損失が小さく入力エネルギーを効率よく加速エネルギーとして利用することができるという特徴がある。超伝導空洞の性能は、最大加速電場と電磁場のエネルギーが発熱などによって失われていく割合を示す量（Q 値）で評価される。

Q 値の劣化の原因の一つに冷却中やクエンチ(超伝導破壊)時に発生する磁束トラップ（捕捉）がある。Q 値向上のためには磁束トラップが空洞のどこでどのように発生するか等のメカニズムの解明が必須であるが、空洞周辺の詳細な磁場分布の測定がなされていないことから磁束トラップのメカニズムの解明はあまり進んでいないというのが現状である。

岡田氏はこの現象を解明するために空洞周辺の詳細な磁場分布並びにクエンチ箇所の特定のための温度分布を測定する温度・磁場マッピングシステムをデザインし構築した。このシステムは強磁性体を用いて磁束密度の変化によって抵抗が変化する特性を持つ AMR センサーを利用して磁場分布を測定、炭素温度計により温度を同時測定するというものである。AMR センサーは磁気スイッチとして汎用性が高く安価であることから例えば開閉検知や回転検知などの工業製品の一部として常温で広く利用されている。

岡田氏はこの AMR センサーに着目し、まず常温及び低温での詳細な特性調査を行い、磁場分布測定の実現可能性の見極めを行った。これより AMR センサーは He 液体温度である 4.2K の低温環境下では、常温環境と比較して 3 倍以上の感度があるという結果を得た。また 110 個の AMR センサー全ての感度測定を行い、4.2K では平均値として $331 \mu V/\mu T$ 、統計分布として 1σ で 1%程度でそろっていることを明らかにした。この感度測定から、岡田氏は AMR センサーが超伝導空洞試験の磁束測定に非常に有用で、空洞試験に十分使用可能であると判断した。

次に具体的に、1.3GHz のシングルセル空洞を対象とした磁場・温度マッピングシステムを作り上げた。このシステムは感度校正を行なったうちの 108 個の AMR センサーと 540 個の炭素温度計からなるものである。センサー群は空洞周方向 10 度ごとに設置するボード上に取り付けられ、空洞軸方向に 15 個の温度センサー、AMR センサーは空洞の赤道部に 3 軸の磁場分布を測定可能とするようボード上に配列されている。このボードを 36 枚空洞回りに配置することで 10 度の角度分解能を有し局所的な磁場分布の測定を可能とした今までにない 3 次元の空洞磁場マッピング装置を構築した。

岡田氏は本測定装置のデザインとアセンブリ、読み出しソフトおよび解析ソフトの開発と実験データの解析、と全てのプロセスに於いて中心的な役割を果たしている。岡田氏は

まず本装置を用いて、空洞冷却中に起こるニオブへの磁束トラップの様子を詳細に理解するための磁場分布測定を行った。空洞測定ではまず、空洞を 4.2K まで冷却する。冷却過程で 9.2K の転移温度を超える際、空洞を貫く磁場がマイスナー効果により空洞の外に押し出される（磁束排斥）効果が見られる。冷却により空洞表面に温度勾配があるときに磁束排斥効果が大きくなるのが近年の研究から理解されてきたが、その磁束の排斥の詳細な磁場分布が不明であった。岡田氏は空洞冷却時の磁束排斥による空洞赤道部周辺での磁場分布の変化を、温度勾配を変えながら詳細に測定した。磁束排斥の効果を見るとともに、その磁束排斥が空洞周辺で一様に起きている様子を世界で初めて捉えた。

次に、シングルセル空洞を用いた空洞性能評価実験を行った。本実験では、クエンチによる磁束トラップおよび発熱の様子を捉えることに見事成功した。更に、クエンチによる発熱分布を同定するとともにその周辺のみで磁束がトラップされているという詳細な磁場分布を観測した。また空洞に電圧を印加した際に、クエンチにより磁束がトラップされた場所で局所的に発熱が生じている事を示した。クエンチ後の Q 値劣化の測定と合わせ、クエンチにより磁場が局所的にトラップされていることを観測しその影響で空洞性能劣化が起こっていることを世界で初めて観測した。特筆すべきは、今回の研究で、クエンチによって外側の磁束線が空洞内部側に引き込まれている描像を本マッピングシステムで 3次元の磁束ベクトルとして、世界に先駆けて詳細に捉えたことに成功しているという点である。

本研究による新たな磁場・温度マッピングシステムの開発により、今後、超伝導空洞の磁束トラップのメカニズムの解明を飛躍的に進め得る結果を示した。特に磁束トラップによる Q 値劣化に敏感な窒素ドープと呼ばれる空洞表面処理の超伝導空洞、さらにニオブより高い超伝導転移温度をもつ超伝導空洞である Nb₃Sn などの将来の高 Q 値超伝導空洞開発へ非常に有用な手がかりを与えたことは間違いないと考える。

本審査委員会では、岡田氏は研究内容を明瞭かつ簡潔に発表し、質疑に対しても的確に回答した。また翌日に行われた公開論文発表会では 20 数名の聴講者の中で質疑に対しても的確に回答し、丁寧にわかりやすい説明を行なった。聴講者の方々から大きな関心、興味を持って頂けたことは今後の岡田氏の研究生活を送る上での励みになるものと考えている。

岡田氏は現在までに、複数の国際ワークショップで口頭発表を行なっていること、修士時代の 2 ヶ月間のコーネル大学滞在にて現地研究者と英語での議論ができていたことなどから英語能力は研究開発を進めるにあたり十分であると判断する。また現在 AIP Review of Scientific Instruments (査読付き) に英文論文を投稿中である。

以上のことから、審査委員全員一致で岡田氏の博士論文の本審査を合格と判定した。