

氏 名 藤 野 武 夫

学位（専攻分野） 博士(工学)

学 位 記 番 号 総研大乙第110号

学位授与の日付 平成15年3月24日

学位授与の要件 学位規則第4条第2項該当

学 位 論 文 題 目 ニオブ・銅クラッドシームレス超伝導高周波加速空洞の研究

論 文 審 査 委 員

| | |
|--------|----------------------|
| 主 査 教授 | 絵面 栄二 |
| 教授 | 野口 修一 |
| 教授 | 高田 耕治 |
| 助教授 | 齋藤 健治 |
| 教授 | 加藤 正名（秋田県立大学） |
| 教授 | 人見 宣輝（高エネルギー加速器研究機構） |
| 主任研究員 | 山崎 良成（日本原子力研究所） |

ニオブ・銅クラッドシームレス超伝導高周波加速空洞の研究

超伝導空洞は高周波電流による表面発熱が少ないので大電力を供給して高加速電界が得られる。また連続運転が可能で効率の良い加速器利用ができる。1965年に初めてスタンフォード大学で超伝導空洞を作り電子を加速して以来、超伝導加速器に対する多くの研究がなされた。その結果、これまでに超伝導空洞は KEK の TRISTAN、CERN の LEP-II、DESY の HERA 等の大型ストレージリングに応用された。そして現在では大量の B 中間子を生成するために大電流のビームを加速してルミノシテーターを高めた装置の KEKB や新粒子探索のために 500Gev から Tev 領域の高エネルギー化を目指した線形加速器を建設する TESLA 計画のためのテストファシリティ等に超伝導空洞が採用されている。このうちの TESLA 計画は全長 33km の電子と陽電子の超伝導リニアコライダーで、25MV/m 以上の加速電界と 8×10^9 以上の Q 値が得られる高性能な 1.3GHz の 9セル空洞を 2万台以上使う大規模な加速器建設である。このような大計画に、ニオブ板を深絞りしてハーフセルを作り、電子ビーム溶接で組立てる従来の空洞製法では、多量のニオブ材消費と多くの煩雑な電子ビーム溶接工程により、材料費と製作費が高額になり莫大な建設費用を必要とする。TESLA のような大規模な加速器の建設計画を実現させるためには高性能で安価な空洞を開発することが課題となる。このような背景から、筆者は高性能を保証しながら、材料費と製作費の削減が可能な空洞として、ニオブ・銅クラッドシームレス空洞の実現を提案した。これは厚肉銅材に薄肉ニオブ材を接合したクラッド材を一体成型してシームレス空洞を作るもので、クラッド材とシームレス構造を組み合わせた新しい発想によるものである。本研究では、その製作方法として、1) 板状のクラッド材からスピニング法を用いてシームレス空洞を作る方法、2) 管状のクラッド材からドロフーム法でシームレス空洞を作る二つのアイデアを提唱し、その早期実現のためにスピニング成型についてはイタリアの INFN-LNL 研究所、またドロフームについてはドイツの DESY 研究所と共同研究を行った。そしてそれらの空洞の性能評価については米国 Jefferson Lab 研究所と共同研究を行った。KEK で測定したスピニング法によるクラッド空洞の加速電界は 30MV/m が達成された。またドロフーム法で製作したクラッド空洞は、KEK で測定した空洞が 32MV/m、Jefferson Lab で測定した空洞は 40MV/m の加速電界に達した。これらの性能は従来の溶接構造のニオブ・バルク空洞と同等なものであり、このように早期に高性能性が達成されたことは、本研究で提案したクラッド材からシームレス空洞を製作する方法は高性能性が保証されることを実証するものである。次に筆者は、空洞の量産に向けた新しいクラッド管の製法を提案し、製作実証試験を行った。TESLA タイプの 9セル・クラッドシームレス空洞の製作に必要な長尺クラッド管の製作方法として HIP 接合による Cu/Nb (溶接管) /Cu の厚肉サンドイッチ構造のクラッド素管を製作し、その素管を引き抜き技術を使って伸管するアイデアを実験した。この実験では、670mm 長さの素管を約 3000mm の長さまで伸管した。こうして 9セル空洞のドロフームに必要な 2000mm の長さのクラッド管を作ることに成功した。クラッド管の試作から管の製作コストを算定し、9セル空洞一台当り 94 万円以下の材料コストに抑えられることを示した。これは従来の溶接構造のニオブバルク空洞の製法に比べて、材料費を約 1/3 に低減でき、非常に画期的方法

と言える。更に、HIP 以外のクラッド方法の検討として爆発圧接法により溶接ニオブ管と銅管の爆着試験を試み、460mm 長の爆着クラッド管を試作した。これらの HIP 及び爆着クラッド管から 1.3GHz 単セル空洞をハイドロフォーム法で成型し、成型性の確認試験を行った。ここで提案したクラッド管の製法による材料品質については、このクラッド管から成型した空洞を低温性能試験をして評価する必要がある、HIP 引抜き管から成型した空洞を低温測定した。また比較として、引抜き工程を含まない HIP のみで作ったクラッド管及び爆着クラッド管から製作した各空洞を低温測定した。この結果、ニオブ管の溶接欠陥と表面欠陥が原因と思われる低い性能であった。先に示したように、シームレスなニオブ管を用いた爆着管から成型した空洞の性能が良いことと、同じ爆着管でも溶接ニオブ管を使用した場合に性能が悪いことから、性能向上に向けてニオブ管の溶接法を改善し、ニオブの肉厚を増量して十分な表面処理を行えるクラッド管を現在準備中である。しかしこの管を成型した空洞性能の評価は本論文提出時にはまだ結論を出せず、溶接ニオブ管を用いた HIP 引抜きクラッド管の品質については残された課題である。これら一連の研究成果は、TESLA のような将来の大規模な加速器建設に応用することで、性能を低下することなしに経済的な加速器建設を可能にする。本研究はこの点に意義がある。

以下に本論文の構成とその概要について述べる。本論文は 13 の章で構成し、第1章では TRISTAN 以降の超伝導高周波加速器の動向を述べ、時代とともに高性能化且つ大型化しつつある現状を紹介した。そして性能的にも、経済的にも大規模な加速器の建設に対処できる超伝導空洞として、筆者は銅とニオブのクラッド材から成るシームレス空洞を提案し、この空洞の正当性を早期に実証するために KEK、INFN-LNL、DESY、Jefferson Lab の4研究機関と国際共同研究を行ったことを述べた。また本研究の目的及び意義について述べた。

第2章では空洞を製作するに当り、重要な空洞のパラメータを理解するために、共振振動数が 1300MHz の場合の TM_{010} 波に於ける解析から、円筒空洞の半径を 8.83cm に、長さを 11.54cm に決定し、この形状に関する Q 値、表面抵抗 (R_s) 等、この形状に関するパラメータを計算して求めた。これらの値は SUPERFISH プログラムを用いた計算機による計算結果と良く一致することを確認した。また共振振動数について、解析値と測定値及び SUPERFISH で求めた値がほとんど一致することを確認した。SUPERFISH に関して、メッシュサイズを 0.3cm に選ぶと共振振動数の変動は、銅空洞の Q 値を求める際に測定する共振振動数の半値幅程度の量になることを調べた。また、Lバンドの単空洞の各パラメータの値を SUPERFISH で計算して示した。

第3章は空洞製作の立場からマイスナー効果や完全導電性超伝導等の一般知識をまとめた。また、超伝導高周波空洞の加速電界を制限する原因は臨界磁界であることを述べた。

第4章では空洞製作技術に欠かせない空洞の表面処理の方法について述べるとともに、空洞の性能を制限する現象を説明して、これを取り除くための表面処理の方法を示した。

第5章では超伝導空洞の性能測定法を説明し、空洞の低温試験方法について詳細に述べた。

第6章では筆者が提案した空洞の優位性を示するために、深絞りと電子ビーム溶接で製作する従来法、スパッタリング法、スピニング法、ハイドロフォーム法の各空洞の製法を紹介し、それらの製作上の問題点を指摘した。そして、これらの方法で製作したニオブバルク空洞(スパッタリング法を除く)の典型的な Q 値と加速電界の例を示した。なを本論文では空洞製作とその性能評価は不可分と位置付けており、この章で示したニオブ・バルク空洞の性能(スパッタリング法を除く)

は筆者が KEK で低温測定した。

第7章では KEK、INFN-LNL、DESY、Jefferson Lab の共同研究に於いて、ニオブと銅の爆着クラッド材からスピニング法及びハイドロフォーム法で製作したシームレス空洞の性能測定の結果を示した。爆着クラッド管をハイドロフォーム法で製作した空洞(1NC2)は加速電界が 40MV/m、Q 値が 2×10^{10} を得て、筆者の提案する空洞が高電界に達することを立証した。また、スピニング法によるクラッド空洞(KENZO-2)の外部磁場による影響は 1mGauss 当り 0.56nΩ の表面抵抗の増加であることを測定で求めた。

第8章は将来の9セル空洞に必要な長尺クラッド管の量産を目的として、HIP 接合による Cu/Nb/Cu の3層構造の厚肉クラッド素管を引抜き法で伸管して長尺のクラッド管を製作する方法を筆者は提案した。この章ではこの製作試験に関して詳細に述べた。そして、この方法の問題点や経済効果を示した。

第9章「爆着クラッド管の試作」この章ではクラッド法の比較検討の目的で行った HIP 接合とは別のクラッド法の爆着によるクラッド管の接合試験について説明した。

第10章では KEK が独自に開発したハイドロフォームによるクラッド空洞の製作について述べた。そして試作した空洞の低温測定の結果を示した。ニオブ管の溶接欠陥や表面欠陥が原因していると思われる低い性能であった。これに関して、性能向上のためのニオブ管の肉厚増量と溶接改善をしたクラッド管を現在準備中である。

第11章ではクラッド材の圧延性、機械的性質等を調査した結果について報告した。これにより、ニオブを銅で包むことにより銅の伸びに追従してニオブが伸びて、ニオブ単独よりも成型性が向上することが判った。

第12章ではニオブと銅のクラッド管をハイドロフォーム法で加工した場合の9セル空洞の製作コストは溶接構造の従来法の 1/3であることを示した。

第13章では本論文のまとめと今後の課題について述べた。

論文の審査結果の要旨

藤野武夫氏の論文の内容は、電子・陽電子リニアコライダーのためのLバンドのニオブ・銅クラッド・シームレス超伝導加速空洞の開発に関するものである。素粒子物理学のエネルギーフロンティア（0.5～1 TeV）を目指すリニアコライダー用の超伝導加速空洞として、ニオブ・バルク空洞の研究開発が進み、既に試作の段階ではリニアコライダー用として要求される性能（加速電界 > 25 MV/m、Q値 $> 8 \times 10^9$ ）が達成されている。しかし、ニオブ・バルク空洞には、ニオブそのものが高価であることと、電子ビーム溶接個所が多いため製作費用が増大するという大きな問題点がある。ニオブの使用量を削減する方法としては、銅空洞の内面にニオブをスパッタリングで成膜する方法もあるが、この空洞は高電界において性能が劣化するため、要求性能を満足することができない。したがって非常に多くの加速空洞台数を必要とするリニアコライダー計画においては、ニオブ・バルク空洞の性能を維持しつつ、空洞製作費用を大幅に削減することが必要とされる。そのため従来のニオブ・バルク空洞技術にとらわれない、新しい超伝導空洞の製作技術の開発が望まれている。

申請者はこの問題を解決するために、新たな発想に基づいてニオブ・銅クラッド・シームレス空洞を提案し、その性能の実証と空洞製作技術の開発研究を行った。厚い銅管の内面に薄いニオブのシームレス管をHIP（Hot Isostatic Press）、爆着（爆発圧接）などの方法により接合したクラッド管を用いて、ハイドロフォーム法、スピニング法などで空洞に成形するものである。これにより、ニオブ・バルク空洞の高性能を維持しつつ、ニオブの使用量をニオブ・バルク空洞の1/2.5程度に減らすことができる。また溶接工程を排除できるので、材料費を含めた空洞製作費用を、従来のニオブ・バルク空洞の製作費の約1/3に削減できるという画期的な提案である。

申請者が提案したニオブ・銅クラッド・シームレス空洞の性能を早期に実証するために、超伝導加速空洞で実績のある国外の3研究機関と国際共同研究を行った。まず、爆着によりニオブ・銅クラッド材を製作し、それを用いてハイドロフォーム法およびスピニング法でシームレス単セル空洞を製作した。これまで単一金属を用いたシームレス空洞の製作例はあるが、複合材であるニオブ・銅クラッド材からのシームレス空洞の製作に成功したのは世界で初めてである。ハイドロフォーム法およびスピニング法で製作した空洞の高周波特性を測定した結果、単セル空洞ではあるが、いずれの方法によってもリニアコライダー用として要求される性能が達成できることを確かめた。特にハイドロフォーム法によって製作した空洞の加速電界は理論的限界値に近い40 MV/mに達した。このように、ニオブ・バルク空洞が長い年月を要して到達した値を短期間で達成できたことは、このニオブ・銅クラッド・シームレス空洞の素性の良さの証しであると言える。申請者はこの国際共同研究において空洞製作についての国内のリーダーの役割を果たしている。

この空洞をリニアコライダーに応用するためには多セル構造（9セルを想定）にせねばならず、このためにはかつてない長尺（2m以上）のニオブ・銅クラッド管の大量生産技術の開発が必要とされる。申請者はこの問題にも挑戦し、HIP接合と引抜き伸管法を併用する方法を考案した。HIP時の高熱や伸管工程での熱処理によってニオブの性能が劣化するのを防ぐために、ニオブを銅で包んだCu/Nb/Cuの三層構造にする等の工夫と試行を重

ね、長尺クラッド管の開発に成功した。これは今までにない新しい長尺クラッド管の製作技術を確立したものと評価できる。

以上のように本研究は、独創的なニオブ・銅クラッド・シームレス超伝導加速空洞を試作して、空洞性能を実証し、さらにこの空洞の大量生産技術の基礎を与えるものである。この研究成果は、現在障碍になっているニオブ・バルク空洞の高価格の問題を解決し、超伝導空洞を用いるリニアコライダー実現への道を拓いたものと非常に高く評価できる。提出された論文には上記以外にも超伝導空洞の製作に関する新しい知見が含まれており、また論文は論理的にしっかりと構成されている。よって本審査委員会は、藤野武夫氏の学位申請論文は十分な学術的水準に達していると判断し、全員一致で合格と判定した。