

氏 名 中西 功太

学位（専攻分野） 博士（理学）

学位記番号 総研大甲第 940 号

学位授与の日付 平成 18 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 ニオブ内に吸蔵された水素の固相内拡散と電気特性に  
関する研究

論文審査委員	主 査 教授	黒川 眞一
	教授	細山 謙二
	教授	鎌田 進
	教授	土屋 清澄
	教授	古屋 貴章
	教授	光延 信二（高エネルギー加速器 研究機構）
	教授	中里 俊晴（高輝度光科学センター）

超伝導空洞は、常伝導空洞と比較して高周波損失が極めて小さく、内部に高い電場を連続して発生させることが可能である。このため、高エネルギー物理学の研究施設において超伝導加速空洞の実用化が始まり、今日では放射光施設や自由電子レーザーの施設においても利用されている。加えて、エネルギー回収型直線加速器では原理的に超伝導加速空洞の利用が不可欠であり、国際リニアコライダー計画でも採用が決定されるなど、今後ますます利用分野は広がりつつある。

通常、超伝導空洞の内表面は極めて滑らかな鏡面に仕上げられる。これは表面の微細な構造により電磁場が空洞表面で歪められて集中し、局所的に周辺より場の強度が高くなることを防ぐためである。電場が集中した場合には空洞表面からの放電を生じ、磁場が集中した場合には局所的に上伝導の部分が発生する。いずれの場合も空洞性能の劣化を引き起こす。また、放電に関しては表面に付着した外来粒子も放電源として同様に作用するものと考えられている。外来粒子の問題は、表面処理技術の発展により解決されつつある。

空洞の効率を定義した  $Q$  値は、超伝導空洞の性能を評価する最も基本的な値である。空洞形状を同一とした場合、 $Q$  値は表面抵抗に依存する。特に超伝導空洞は電流が表面近傍に集中しているため、空洞表面の状態が顕著に  $Q$  値に反映される特徴がある。具体的には空洞の表面状態はニオブの表面粗度、異物の付着に加えて、吸蔵水素による水素化物の生成が指摘されている。ニオブ製空洞の表面処理技術は、巨視的な表面磁場がニオブの上部臨界磁場に達する理論的限界を引き出せるまでに発展している。しかし、その再現性は現在のところ十分ではなく、空洞が所定の性能を示すまで、同じ処理を何度も繰り返し実施している。

空洞の表面粗度を向上させるためには、電解研磨(EP)または化学研磨(CP)の実施が有効である。しかし、これらの処理によりニオブ内に水素が吸蔵されると考えられており、処理後は表面粗度が向上する一方、吸蔵水素量が増加するという問題がある。また、空洞の分解組み立ては非常に煩雑な作業であり、空洞内表面に異物を持ち込む可能性がある。つまり、空洞を再表面処理した場合、空洞の表面粗度、水素吸蔵量、表面の清浄度のすべてが変化する。このため、水素吸蔵による  $Q$  値の劣化を研究する際にニオブへの水素の供給手段として空洞内面の電解研磨または科学研磨処理を用いると、吸蔵された水素による以外の影響が大きく、非常にノイズの大きなデータを扱う結果となる。

本研究では、ニオブ製超伝導空洞の  $Q$  値の変化の内、吸蔵された水素の影響のみを選択的に抽出することを試みた。

#### ( $Q$ 値劣化のメカニズム)

現在広く受け入れられているモデルを示す。

空洞に吸蔵された水素は、常温では水素は結晶中のニオブの抜けた箇所(vacancy)に治まった状態が安定である。常温においては水素を導入することで vacancy が形成されることも確認されている。100K 以下の低温では水素は水素化ニオブの化合物として存在するほうが安定である。超伝導空洞は液体ヘリウム(4.2K)で冷却されて使用されるため、水素化ニオブが安定である。しかし、相転移に必要なエネルギーは熱振動のエネルギー

から供給されるため、4.2Kの極低温下では相転移の速度は無視できる。従って、常温から液体ヘリウム温度まで急速に冷却した場合は水素はニオブの vacancy に捕らわれた状態が多くなり、水素化ニオブが安定な温度領域で比較的温度的の高い 100K 程度の温度を長く経験した後に液体ヘリウム温度に冷却した場合、ニオブ空洞には水素化ニオブが多く含まれた状態になる。水素化ニオブが超伝導性を示さないため、水素を多く吸蔵し、且つ、ゆっくりと冷却したニオブ製超伝導空洞は Q 値が劣化すると考えられている。

#### (クラブ空洞の場合)

クラブ空洞は電解研磨後吸蔵水素を除去するために真空中で 700°C の熱処理が施されている。このため、クラブ空洞本体は水素吸蔵による Q 値の変化を起こさないが、空洞に同軸部簡略モデルを組み込んで性能測定を行った際に Q 値の劣化が観測された。これは、空洞本体を液体ヘリウム温度に保ったまま同軸部簡略モデルのみを昇温後急冷すれば Q 値が回復することから直接的に確認された。クラブ空洞のケースでは、130nΩ であった表面抵抗が吸蔵水素の影響により 15μΩ まで増大することが確認された。

#### (水素吸蔵試験)

ニオブに効果的に水素を導入するためにステンレス陽極とニオブ陰極による希硫酸の電気分解を行った。電気分解実施後にニオブ陰極を取り出し、空洞の脱水素処理と同じく真空中で加熱することにより吸蔵水素を放出させ、四重極質量分析装置を用いて放出水素量の測定を試みた。結果、通電量を増やすことで水素吸蔵量が増加することが確認され、ニオブへの水素の導入方法として電気分解法が有効であることが確認された。

#### (同軸空洞による試験)

水素吸蔵試験用に共振周波数 1.5GHz の小型の空洞を開発した。この空洞は同軸線路の TEM モードで励振され、様々な計算が簡単であるだけでなく共振周波数が径によらないためコンパクトに設計することが可能である。この特性を利用し、クラブ空洞で Q 値の劣化を引き起こしたニオブ材と同じバルクから空洞製作することが出来た。同軸空洞は電場の非常に強い箇所接続部を持ったり、対称性を維持するため内導体内部から高周波を導入するなど特殊な構造であるが、最終的に  $7.8 \times 10^7$  の Q 値を得ることが出来た。

この空洞に希硫酸の電気分解による水素の導入を行い、Q 値の劣化を引き起こしてその影響を観察した。なお、水素の導入は空洞の内導体の内部、即ち空洞の外部より行っており、空洞の分解や内面の際研磨などを行っていないため、観測された Q 値の劣化はすべて水素吸蔵の影響である。このことは、急冷により Q 値が回復することからも確認されている。

## 論文の審査結果の要旨

超伝導空洞において、特に窒素温度付近における冷却速度が遅い場合、空洞のQ値が大幅に低下する現象がおこる。この現象は、Q-diseaseと呼ばれており、超伝導空洞のNb壁面に含まれている水素とNbの化合物が引き起こす現象であり、この化合物が持つ弱い超伝導特性の故に、空洞内面の高周波抵抗が大幅に増加してしまうためと考えられている。しかしながら、この水素によるQ-diseaseに関する制御された実験はこれまでほとんど行われておらず、この現象に関する定量的な実験が必要である。

中西 功太氏の研究は、Nb壁中に含まれている水素の量を制御したうえで、窒素温度においてゆっくり冷却を行い、Q-diseaseと含有水素量の相関を明らかにし、この現象の機構の解明の手がかりを得ようとするものである。

この目的のため、中西氏は、Nb壁面における水素含有量を制御でき、かつ、正確なQ値（表面抵抗を測定することと等価）を測定できる試験装置の開発を試行錯誤を重ねながら行い、斬新なアイデアにもとづく装置を開発することに成功した。この装置の本質は、同軸構造を持つNb空洞の中心軸中にコップ状の窪みをつくり、この中で、稀硫酸の電気分解を行って発生させた水素を空洞の外側から入れ拡散により空洞内面まで到達させることにある。この工夫により、空洞を分解せずに、水素を空洞壁面に導入することが可能となった。Nbの超伝導空洞のQ値は、微量の異物の混入により、大幅に変化してしまうため、空洞を分解せずに水素を導入することは、必須の条件である。

中西氏は、電気分解によって、水素がNb中にどのように導入されるかを、まず、ストリップ状のNb板を用いて調べ、電気分解における電流と時間の積を制御することにより、Nb中に導入する水素量を制御することができることを示した。ついで、中西氏考案の実験装置を用い、水素を空洞中に導入した結果、中西氏は、Nb表面の抵抗が、導入水素量に比例して大きくなるという結果を得た。中西氏のこの実験は、Q-diseaseと含有水素量の相関を明らかにした最初の実験である。

本審査委員会は、この実験で得られた結果を高く評価するとともに、この結果を得るために考案された、実験装置の開発を高く評価し、審査員全員が一致して、中西氏の論文は博士論文に値すると判定した。