

Review of the KEK's R&D for Essential Technologies with Large Scale Superconducting Cavities Applications

斎藤健治

高エネルギー加速器研究機構 (KEK) 加速器研究施設

1. はじめに

超伝導加速空洞の将来的大規模応用として超伝導リニアコライダ (TESLA) や ERL (Energy Recovery Linac) 等が期待される。その実現のためには加速電界 20~35MV/m の高電界超伝導空洞の開発が必須である。我々の基礎研究では、1) そうした高電界超伝導空洞を如何に製作するか、2) その高性能性を実際の加速器の中でフルに発揮するために、途中のクライオモジュール組立での性能劣化を如何に防ぐか、また空洞製作コスト削減のために、3) 高性能性を保証しながらコストダウンに繋がる新しい空洞製作法の開発、さらに4) 表面処理のシンプル化の研究を行った。本ポスターは、これらの基礎研究の概要である。個別の開発についてはそれぞれ別のポスターで詳細を紹介する。

2. 高電界超伝導空洞の開発

高純度ニオブ材の開発、表面処理技術の開発の組合せによりニオブの理論的限界値の 40MV/m の加速電界を達成することに成功した。特に、トリスタン超伝導空洞用に開発した KEK オリジナルな電解研磨法で空洞内面を滑らかに仕上げる方法は、他の研究所で採用している化学研磨に比べ、高電界の優位性を持つことを発見した。最近、DESY との共同研究で、その優位性を TTF 9-セル空洞で確認し、TESLA-800GeV のために必要な 35MV/m の高電界超伝導空洞の開発に目処を付けた。

3. 超伝導空洞の最終組立法の研究

トリスタン超伝導空洞で経験した横クライオモジュールの空洞組立で起きる性能劣化は、空洞の性能を高精度で評価する縦測定の後、純窒素ガスを使って空洞の真空を破ったことによることが分かった。アルゴンガスを使うことにより、その問題が防げることが分かった。

4. ニオブ・銅クラッドシームレス空洞の開発

薄肉ニオブパイプの外面に厚肉銅パイプを接合したニオブ・銅クラッドパイプを液圧成形法で一体成形することでシームレス超伝導空洞を製作する方法を開発した。この方法で、従来のバルク空洞に匹敵する十分な性能が得られることを確認した。また、その方法による空洞製作では、従来の溶接バルク空洞より 1/2~1/3 にコスト削減出来ることを明らかにした。

5. 表面処理の高速化とコスト削減の研究

従来の表面処理法は、煩雑高コストである。特にニオブ空洞内面の機械研磨が煩雑、高コストである。また、電解研磨中にニオブ空洞が水素を吸蔵することによって超伝導空洞の Q 値が著しく低下する「水素病」の問題がある。この研究では、非常に効率的な機械研磨法：遠心バレル研磨を開発した。また、水素病を克服した新しい表面処理法を開発した。これらの方法により、表面処理時間が従来の 1/10 に短縮されると同時に処理コストが 1/2.5 に削減された。

6. まとめ

これらの基礎研究の成果を 1300MHz 9-セル空洞に実用化すれば、TESLA や ERL では超伝導空洞の高性能性を確保しながら大きなコストダウンが可能となる。

Development of High Gradient 1300MHz Niobium Superconducting RF Cavities

斎藤健治、加古永治、穴戸寿朗、井上均*、藤野武夫*

高エネルギー加速器研究機構 (KEK) 加速器研究施設 / * 工作センター

1. 概要

超伝導加速空洞の将来的大規模応用として超伝導リニアコライダー (TESLA) が期待される。その実現のためには 25MV/m 以上の加速電界発生可能な高電界超伝導空洞の開発が必須である。我々の基礎研究では 1300MHz の二オブ単セル空洞にトリスタン超伝導空洞の表面処理技術を適用し、さらに超純水高圧洗浄技術など新しい技術を開発し、35~40MV/m の高電界超伝導空洞を世界に先駆けて開発することに成功した。

2. 超純水高圧洗浄によるフィールドエミッションの克服

従来、超伝導空洞で深刻な問題であったフィールドエミッションの問題を超純水を使って空洞内表面をジェット洗浄することで克服した。フィールドエミッションの種は、空洞内表面に存在するゴミが主要原因である。85~100kg/cm² の超純水洗浄で従来の水洗法に比べてゴミの量 1/10 に減らすことが出来た。

3. 電解研磨の高電界の優位性の発見

フィールドエミッションの問題が解決されると、従来はつきりしなかったことがよく分かるようになって来た。電解研磨の高電界性に対する優位性の発見がその一つである。電解研磨では、化学研磨にくらべて仕上げ面が滑らかであり、マイクロ波の粒界ステップ等の局所的集中 (エンハスメント) が少なく、その結果 Hc で予想される 40MV/m の理論的限界値を達成できる。一方、化学研磨では赤道部の電子ビーム溶接部の粒界ステップで磁場にファクター 2 程度のエンハスメントが起こる結果、20MV/m を越えると局部的に常伝導になり、Q 値が急激に低下して電界が制限される。

4. ベーキング効果

電解研磨の高電界性の優位性は、処理の後空洞を真空引きする際に行う 100~120°C 程度のベーキングよることが発見された。ベーキングを行わない場合、電解研磨面に存在する酸素リッチな部分で発熱し、電界とともに Q 値が急激に低下して電界が制限される。ベーキングすることによって、酸素が二オブバルク中に拡散し、発熱が起こらなくなり高電界が達成される。

5. DESY-TTF 9-セル空洞による高電界性の確認

1300MHz の二オブ単セル超伝導空洞で発見された電解研磨の高電界性優位性を 1300MHz の DESY-TTF 用 9—セル超伝導実機空洞でも実証できた。新しく製作した空洞を KEK で電解研磨処理し、真空封じで DESY に送り返して性能試験し、8 台の空洞の内 4 台の空洞で 35MV/m を達成した。これはこれまで DESY で 1400°C 高温真空熱処理と化学研磨を組み合わせた処理で得られる性能の範囲を十分に超えるものであり、TESLA-800GeV への道が開かれた。

6. まとめ

これまでの基礎研究によれば、ERL で運転される 20MV/m の高電界超伝導空洞については製作技術の面からは問題ないと言える。

Investigation of Final Clean Cavity Assembly Method

齋藤健治

高エネルギー加速器研究機構 (KEK)・加速器研究施設

1. 概要

KEK では、1300MHz 超伝導空洞で加速電界 40MV/m 発生可能 (縦測定) な高電界超伝導空洞の開発に世界に先駆けて成功した。しかし、超伝導空洞は縦測定による空洞性能の精密評価の後、加速器に装着するための横クライオモジュールに組立てる工程 (空洞最終組立) があり、その組立作業で性能劣化を来すことがトリスタン超伝導空洞で経験されている。本研究では、空洞の潜在的性能を加速器の中でいかに発揮するために、性能劣化を起こさない空洞最終組立を研究し、40MV/m の高電界空洞でも性能劣化を起こさない方法に糸口が見つけた。

2. トリスタンで経験した空洞最終組立での性能劣化

トリスタン超伝導空洞の経験では、縦測定の結果と横性能試験 (横クライオモジュールでの空洞性能試験) 結果を比べると、加速電界は 10MV/m から 7MV/m (マルチパクタリングのレベル) に低下し、Q 値も低下し、大きくばらついた。ただ、加速器の中での性能は横性能試験結果と殆どかわらず、加速器の中で空洞の潜在能力を発揮するためには、横組立での性能劣化の解決が必要である。

3. 空気曝気の空洞性能への影響

縦測定した後、空洞内表面を空気に曝すと一週間程度の曝気時間ののち加速電界は 34MV/m から 27MV/m に低下し、残留表面抵抗は約 10nΩ 増加した。その後、曝気二ヶ月でも性能に変化は見られない。また、その後、超純水高圧洗浄を施しても性能の回復が得られなかった。

4. 窒素ガス曝気の空洞性能への影響

縦測定した後、空洞を純窒素ガスに一日曝し、ベーキングしないで再測定すると著しい性能劣化を来す場合がある。その場合、特にマルチパクタリングの発生が顕著である。窒素ガスに 1 日間曝した後、70°C 以上の温度で 2 日間ベーキングしながら真空排気を行った場合には、性能劣化は小さい。縦測定の後、窒素ガスに曝し、十分なベーキングしなかった (ベーキング温度 60°C 程度) ために、トリスタン超伝導空洞では空洞内表面に吸着したガスがマルチパクタリングを助長して、性能劣化を招いたと考えられる。

5. アルゴンガス曝気の空洞性能への影響

一方、純アルゴンガス (99.9999%) に縦測定の後、空洞内表面を曝した場合、10 日間の曝気時間の後にも一切性能劣化が見られなかった。この場合、曝気後の真空排気でベーキングを行わなくても性能劣化が無かった。空洞最終組立に窒素ガスの代わりにアルゴンガスを用いることで、最終組立での性能劣化を防止できることを発見した。

6. まとめ

純アルゴンガスを使うことで 40MV/m の高電界超伝導空洞の性能を損なうことなく横クライオモジュールに組込むことが可能である。

Development of Nb/Cu Clad Seamless Superconducting RF Cavities

斎藤健治、藤野武夫*、人見宜輝*、井上均*

高エネルギー加速器研究機構 (KEK) 加速器研究施設 / * 工作センター

1. 概要

超伝導空洞の大規模応用に対して、超伝導空洞の製作コスト削減もまた必須課題である。現状の製作法では、煩雑な電子ビーム溶接の多用と高価なニオブ材料費にコスト高の原因がある。ニオブ材の消費量を減らすと同時に溶接のないシームレス空洞の製作がその目的に叶うものである。シームレス銅空洞の内面に数ミクロンのニオブ薄膜を成膜したニオブ薄膜空洞はすでにセルンの LEP-II で実用化されているが、その方法では加速電界とともに Q 値が急激に減少し、10MV/m 以上の高電界での運転では冷凍負荷の問題がある。我々は、厚肉銅パイプの内側に薄肉ニオブパイプを接合した Nb/Cu クラッドパイプを液圧成形で一体成形する方法を提案し、開発している。この方法ではニオブバルク性を保持しているのでこれまで我々が開発した表面処理技術がそのまま適用できるために、電解研磨に因る 40MV/m の高電界性が保証される。

2. 国際共同研究による Nb/Cu クラッド超伝導空洞のフィージビリティ試験結果

Nb/Cu クラッドシームレス超伝導空洞の可能性を速く見定めるために、国際共同研究を行った。イタリ INFN-LNL 研究所では、スピニング法により、平板からシームレス空洞を製作する技術を持っているので、KEK から Nb/Cu 爆着クラッドを送り、1300MHz 単セル空洞を成形してもらった。また、DESY では液圧成形によるシームレス空洞の製作技術を持っているので、Nb/Cu 爆着クラッドパイプからシームレスクラッド空洞を成形してもらった。それらの空洞の性能評価は、KEK では電解研磨を施し、Jlab では化学研磨を施して行った。どちらの製作ほうでも 25MV/m を超える加速電界が得られた。とくに Jlab で測定した DESY 成形の空洞では 40MV/m が達成され、Nb/Cu クラッドシームレス空洞の有望性が示された。

3. 9-セル空洞用長尺 Nb/Cu クラッド管の製作法

TESLA 空洞のような 9-セル空洞では内径 132mm、肉厚 3~4 mm、長さ 2000mm の長尺クラッドパイプが必要となる。KEK ではニオブパイプを銅パイプの間に HIP 技術で接合し、それをパイプ引き抜き技術で伸管する方法を開発した。700mm の素管を 3000mm 以上まで伸管することに成功した。

4. KEK での液圧成形法の独自開発

長尺クラッドパイプの成形性を調べるために、KEK でも空洞の液圧成形法を独自開発した。その技術で長尺クラッドパイプから 1300MHz シームレス単セル空洞を成形し、パイプの加工性を実証した。

4. 製作コストダウンの評価

こうした一連の経験から、Nb/Cu クラッド法による TESLA タイプの 9-セル空洞の製作コストを評価した。従来の電子ビーム構造のニオブバルク空洞の 1/2~1/3 にコストダウン (量産効果抜き) できると期待される。

5. まとめ

Nb/Cu クラッド法を 9-セル空洞用に実用化すれば、ERL 計画でもコスト面で多いに有効である。

R&D for Reliable and Simplified Surface Treatment Method for Superconducting RF Niobium Cavities

樋口玉緒*、斎藤健治

* 総合大学院大学 / 高エネルギー加速器研究機構 (KEK) · 加速器研究施設

1. 概要

超伝導空洞の大規模応用に対して、超伝導空洞の製作コスト削減が必須課題である。その一つとして、現状の二オブ超伝導空洞の煩雑な表面処理法をシンプルにし、時間短縮と同時にコスト削減を図る必要がある。我々は、水素フリーな表面処理技術の開発に成功し、現状処理を機械研磨と電解研磨のみにシンプル化した。

2. 従来の表面処理法

トリスタンで確立した表面処理法は、1) 機械研磨：空洞内表面の欠陥を信頼性良く除去するために機械研磨をおこなう。2) プレ電解研磨：機械研磨で埋め込まれた砥粒が電解研磨システムを汚染するので、多量電解研磨の前に空洞内に閉じ込めた研磨液で表面数ミクロン除去した後その研磨液を捨てる。3) 多量電解研磨 (80 ミクロン) : 滑らかで欠陥のない表面を製作する、4) 真空アニール：電解研磨プロセスで二オブ空洞が水素を吸蔵し、そのまま空洞を性能測定すると著しい Q 値の低下を来す。それを防ぐために水素脱ガスを行う。4) 仕上げ電解研磨：通常空洞の真空アニールでは工業用真空炉を使うので空洞表面が汚染される。そのために少量電解研磨 (5~20 ミクロン) により汚染層を除去する。

3. 電解研磨での二オブ空洞の水素吸蔵の再検討

従来考えられていた電解研磨での二オブの水素吸蔵を再検討し、表面ダメージのない (機械研磨を施さない) 場合、多量電解研磨でも二オブは水素を吸蔵しないことを発見した。

4. 水素フリー遠心バレル研磨 (機械研磨) の開発

機械研磨は、表面欠陥を高い信頼度で除去する反面、表面にダメージ層を形成し水素の吸蔵の原因になることが分かった。トリスタン超伝導空洞で採用した非効率的なバフ研磨の代わりに非常に簡便且つ高速研磨である遠心バレル研磨を開発し、その研磨中に起こる二オブの水素吸蔵を防ぐ方法を発明し、水素フリーの遠心バレル研磨を開発した。

5. 水素フリー電解研磨の開発

二オブ空洞に水素フリーの遠心バレル研磨を施した後プレ電解研磨すると、研磨液の液温上昇によりダメージ層を介して二オブバルク中に水素が吸蔵されることが分かった。電解研磨液に少量硝酸添加がその対策に有効であることを発見した。この少量硝酸添加した電解研磨液でプレ電解研磨した後、従来の多量電解研磨でも水素吸蔵が起こらず、そのために真空アニールを省くことができ、その結果、仕上げ電解研磨も不要になった。この水素フリー遠心バレル研磨と電解研磨の組合せでは、従来の表面処理時間を 1/10 に、またコストを 1/2.5 (量産効果を含まず) に削減出来る。

6. まとめ

この簡便な表面処理法を ERL に適用することで、量産に必要な処理ラインの数を押さえることが出来、また、処理自体のコスト削減ができ、空洞製作コスト削減に大きな効果が期待できる。