

[F17p33]

Recent Outcomes and A Future R&D Strategy of The KEK L-band Superconducting RF Cavity Group

Kenji SAITO, Shuichi NOGUCHI, Masaaki ONO, Eiji KAKO, Toshio SHISHIDO,
Takeo FUJINO, Hitoshi INOUE and Yoshishige YAMAZAKI

High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

1-1, Oho, Tsukuba-shi, Ibaraki-ken, 305-0801, Japan

Abstract

Our group is continuing the basic R&D of niobium superconducting rf cavities after the TRISTAN project for its future large scale applications : like a superconducting proton linear accelerator proposed at JAERI, or an electron/positron linear superconducting collider (TESLA). Recently we have close collaborations between JAERI and many companies which have an interest in superconducting rf technology. In this paper we report our recent outcomes from the basic study, and present a R&D strategy for our future.

KEK L-バンド超伝導空洞グループの最近の研究成果と 今後の開発戦略

1. はじめに

私のグループは、大強度陽子超伝導リニアックやリニアコライダ(TESLA)のような将来の超伝導加速空洞の大規模応用に備え、その製作技術に関する基礎研究を積み上げている。最近では、日本原子力研究所や民間企業との共同研究が活発に行われている。ここでは、平成9年度の我々の研究成果、さらにそれらの研究結果を踏まえ、将来の超伝導加速空洞の開発研究戦略について述べる。

2. 研究目的

現在、超伝導空洞は、TESLAに見られるような電子/陽電子リニアコライダ(DESYを中心に開発が進んでいる) や、日本原子力研究所の計画のような nuclear waste transmutation や中性子科学のための強力な中性子源としての大強度陽子リニアックへの応用が期待されている。我がグループは、トリスタンMRでの超伝導空洞の世界最初の実用化の実績をベースにトリスタン建設以後、そうした将来的大規模応用に応えるために次のような目的で基礎研究を続けている。

- (1) 30MV/m以上の加速電界が発生できる高電界超伝導空洞の開発。
- (2) 製作法の徹底的合理化を行い、超伝導空洞(クライオモジュールを含む)の大幅コストダウン化を図る。
- (3) 実験室レベルの高性能性が、加速器の中でも安定に実現するようなシステム設計、およびそれを実証する。

これらの基礎研究には、ハンドリングが容易で実験経

費が安くなお且つ、適当な面積(超伝導空洞では表面の研究が重要であり、その研究結果が現実性を持たなければならぬ)を有するL-バンド(1296MHz)を選定した。その後、この周波数はTESLAの周波数となった。現在、KEKのグループ内の研究については、研究費の節約のこともあり、工作センターでの所内製作を中心に基礎研究を続けている。

3. 研究の現状および成果

(1) European Headache

ヨーロッパやアメリカの研究所では、高純度のニオブ材(RRR=350)から空洞を製作し、表面処理では高圧洗浄等、超伝導加速空洞の分野で性能向上に有効な手段として認知される色々な方法を使っているにもかかわらず、30 MV/m (CW運転) 以上の高電界を信頼性よく達成できない状況にある。一方、KEKでは、RRR=200程度の標準的純度のニオブ材を使っているにもかかわらず、30MV/m以上(複数個の空洞で40 MV/m)の高電界が多数の空洞で得られている。他の研究所とKEKとのこの相違を我々は"European Headache"と名付けている。この違いは、一体どうしてか? 空洞材料か、製法か、表面処理法か? 1995年、Saclayで行われた第7回目のWorkshop on RF Superconductivityの国際会議でこのことが話題になって以後、我々の基礎研究のデータの蓄積によりやっと最近、その原因が明らかとなった。要するに、空洞の表面処理にKEKは電解研磨を他の研究所では化学研磨を使っているためである。ここにトリスタン以後、自問して来た超伝導空洞性能確保に対する電解研磨の有効性が実証された。

(2) 高電界での電解研磨の優位性の発見

European Headacheの原因がどこにあるかを突き止めるために我がグループは基礎研究に集中して来た[1]。その結果を図1に示す。研究結果を要約すると次のようになる。

- 1) E_{acc} (加速電界) > 25 MV/mの高電界の発生には電解研磨が重要である。化学研磨では加速電界の上昇と共にQ値が著しく劣化し、加速電界が制限される[1, 2]。そのために E_{acc} > 25 MV/mは殆ど期待できない。電解研磨では、高電界におけるQの落ちが少ない。European Headacheの原因が化学研磨であり、材料、空洞製法ではない。
- 2) 特に、表面を仕上げる際に、最後の仕上げを電解研磨で行うことが重要であり、その前工程ではパレル研磨、化学研磨、電解研磨、ECB (複合電解研磨) [3]等、何で研磨してもよい。例えば、図1では化学研磨した空洞では研磨量120 μ m程度で最大加速電界がサチルが、それに電解研磨を施せばその研磨量と共に急速に加速電界が向上する。
- 3) また、化学研磨によって性能限界が確認された他の研究所の空洞をKEKで電解研磨し、測定すれば30 MV/m以上の電界が達成される (図1にはその結果が記載されていない)。
- 4) KEKで東京電解とは別のメカー (Heraeus) の材料で製作した空洞でも、電解研磨によって30MV/m以上の最大加速電界が達成される[4]。
- 5) $E_{acc} = 30$ MV/mの加速電界に対して、RRR=200程度の標準的な純度のニオブ材で十分である。

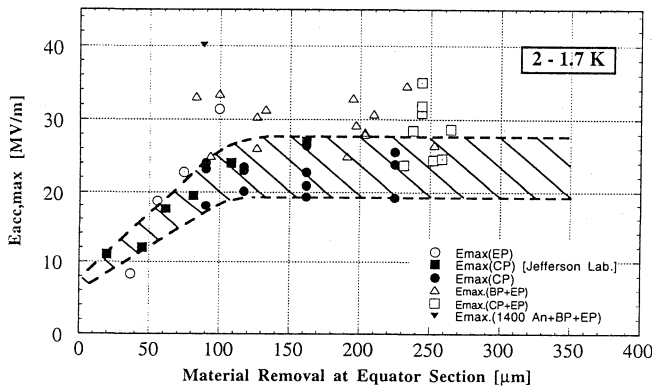


図1. 高電界超伝導空洞に対する電解研磨の優位性。
 図の説明: 斜線領域が化学研磨の研磨量に対して期待できる空洞の最大加速電界である。化学研磨 (●、■) ではばらつきがあるものの、研磨量が120 μ m以上で最大加速電界がサチルことが分かる。一方、電解研磨だけ (○) では、100 μ m程度の研磨量で30MV/mを達成することが可能である。また、化学研磨で加速電界にサチリが見えた空洞に電解研磨を施すとその研磨量の増加に伴って加速電界が向上することが分かる (□)。パレル研磨と電解研磨を組合せた場合 (△) でも、パレル研磨の後30 μ m程度の電解研磨を施せば高い確率で30MV/mの最大加速電界を達成できる。同様に化学研磨と電解研磨の組合せた場合 (□) でも、化学研磨の後、30 μ m程度の電解研磨を施せば30MV/mが得られる。

(3) Nb/Cuクラッド超伝導加速空洞の開発

我々が確立を目指すもう一つのオリジナルな技術は、空洞の製作費のコスト削減に関するものである。これは、工作センターと共同で研究している。TESLAのような大規模応用では、Lバンド9-セル空洞 (1m管) を低コストで製作することは予算上非常に重要なことである。空洞製作費ではニオブの材料費、電子ビーム溶接費が大部分を占めている。ニオブ材の消費量を減らすこと、電子ビーム溶接をなくすることが、コスト削減の本質的対策である。その可能性の一つは、銅空洞の内表面にニオブ薄膜をスパッター法で張り付ける方法であり、CERNですでに開発され、LEP-IIの超伝導空洞に実用化されている。しかし、その方法ではニオブ薄膜の結晶性が起因する問題 (weak link) のために加速電界の上昇に供うQ値の低下が大きく、問題である。膜の結晶性の改善が色々研究されているが、基盤となるのが銅であり、高温での熱処理が困難なために見通しは明るくない。

一方、空洞の性能を保証するためには上に述べたように電解研磨を適用することが重要である。しかし、そのためにはニオブバルク空洞でなければならない。薄肉のニオブ板を銅パイプの内側に張り付けたクラッド・パイプから、液圧成型法で膨らまし成型してシームレス空洞を作る方法がその要求を満たす。既にKEKと東芝 (株) の共同研究で液圧成型法で銅パイプからL-バンドシームレス単セル空洞を成型することに成功している。厚さが0.5 - 0.3 mmのニオブ材を肉厚2 mm程度の銅板に張り付けたNb/Cuクラッド材の成型性は銅と全く同じであり、つまり、成型ではニオブのことを無視してよいことが分かっている[5]。したがって、そのようなクラッドパイプを液圧成型するのに何の問題もないはずである。

イタリアのINFN-LNL研究所では、スピニング法により一枚板から空洞を一体成型する技術を有している。我々の経験では、この方法は余にも大きな塑性変形を持ち込むので、果たして十分な空洞の性能が得られるかどうか疑問である。しかし、TJNAF (Dr. P. Kneisel) の報告によれば、その方法で作られたニオブ空洞で意外にも25 MV/mの最大加速電界が得られている。ニオブクラッド空洞に関する我々のアイディアの見通しを速く得るために、クラッド超伝導空洞の製作に関してINFN-LNLと共同研究を開始した。この共同研究により、スピニング法で3個のL-バンド単セル空洞を製作し、現在、その性能評価を行っている[5]。しかし、その空洞にはニオブ側の表面に250 μ m程度の深さのクラックが多数あり、今のところQ値、最大加速電界共に良い結果が得られていない。冷却時に空洞が一様に冷やされない場合、クラッド材では熱起電力が発生し、超伝導状態でその電流がトラップされて空洞性能に悪影響を及ぼすことが予想される。さらに確認作業が必要ではあるが、そのような現象と思われる実験結果が得られている[5]。これはさらに研究を深めるべき非常に面白い現象である。

このように速く見通しが得られると考えて始めた共同研究からは、期待される結果が得られていないので、今後、独自に液圧成型でシームレスNb/Cuクラッド超伝導空洞を製作することに迫られている。現在、その第1段としてNb/Cuシームレスパイプの製作法の基礎研究を開始している。

(4) 陽子超伝導リニアック用 low β 空洞の開発

日本原子力研究所の提案する陽子超伝導リニアックでは100 MeV以上のエネルギーセクションに超伝導空洞を採用する予定である。100 MeVセクションでは $\beta=0.5$ の非常につぶれた構造の空洞が必要になる。これまでそのような構造を経験したことがないので、マルチパクターリングなど色々懸念される問題があり、Lバンドの単セル空洞 ($\beta=0.45$) を作り、テストした。図2に示すように $E_p=53$ MV/mまで問題なく達成され、そのような構造でも問題がないことが実証された[6]。

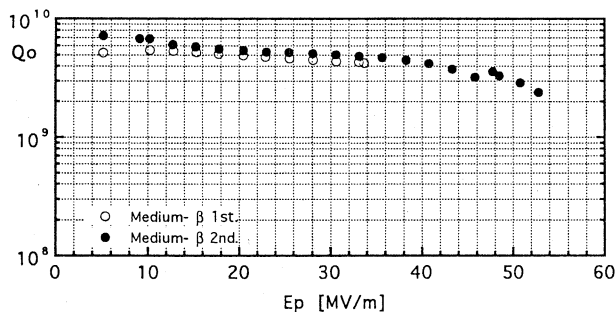


図2. L-バンド low β ($\beta=0.45$) 超伝導空洞の性能。

図の説明：最初バレル研磨で46g (平均研磨量で35 μ m)研磨し、砥粒などの表面汚染物除去の目的で化学研磨を25 μ m施し、水素脱ガスアニール (760°Cx5hr) し、電解研磨30 μ m、高圧洗浄を施して第1回目の性能測定を行った。Ep (最大表面電界) = 34 MV/mで制限された。次に赤道部の研磨量を十分確保するために化学研磨50 μ mを施し、さらに30 μ mの電解研磨仕上げ、高圧洗浄を行い、第2回目の測定を行った。Ep=53MV/mまで向上した。電界の制限はクエンチであった。原研の超伝導空洞の仕様ではEp=16MV/mであり、十分なマージンがある。この空洞ではEp/Eacc=5.1、Hp/Eacc=133、形状因子 $\Gamma=112.3$ であり、これまでの $\beta=1$ の電子/陽電子用の空洞と大きく異なる。Q値が低いのは形状因子が小さいためである。Ep=53 MV/mは $\beta=1$ の空洞ではEacc=30MV/m級である。

4. グループの今後の開発研究戦略

これまでの研究成果に立って、今後の研究の取り組み、開発研究戦略に触れる。

1) マルチセル空洞での30MV/mの達成、

多数の単セル空洞で30-40MV/mが達成されているが、マルチセル空洞では、まだ1個の3-セル空洞でしかそれを達成していない[7]。手持ちのマルチセル空洞、DESYから送られて来ている空洞を使って早期にこの研究に取りかかる。また、共同研究で製作している3連空洞をもこの研究に当てる。

2) DESY, TJNAF, Saclay, INFN-LNLとの共同研究

海外の研究所が KEK の電解研磨の結果に興味を持ち、

KEKに空洞を送りこんで電解研磨の効果を再確認するための共同研究の要請がDESY, TJNAF (CEBAF), Saclay 等から来ている。また、INFN-LNLとはスピニング成型法によるNb/Cuクラッド超伝導空洞の共同研究を推進する。

3) 空洞の横組立法の研究

高電界 (30MV/m) 超伝導空洞の一つの目処があったが、実際には、縦測定で得られた空洞性能がクライオモジュールに組み込んだ後でも保証されなければならない。この研究は、2Kで運転する超伝導空洞にとって特に重要である。この研究のためには、L-バンド空洞はハンドリングが容易で、研究費用が少なく済むので統計性にもとずいた議論が可能となる。

4) Nb/Cuクラッドシームレス空洞の製作

工作センターとの共同研究を中心に現在進行中であり、早期にニオブクラッドパイプを製作し、液圧成型を試みる。また、INFN-LNLとの共同研究では、スピニング法によるNb/Cuクラッドシームレス空洞の研究を推進する。

5) 陽子超伝導リニアックの研究として新しい形状への挑戦

今後、電力消費等のことを考えれば $\beta=0.5$ よりもさらに低いエネルギー領域での超伝導化が期待される。SDTLやRFQの超伝導化、また、ビームのより安定加速を考えた $\pi/2$ -mode structure等、新しい構造にチャレンジする必要がある。

6) 陽子超伝導空洞のビームテスト

超伝導空洞を陽子リニアックに応用した例はなく、その実用化にはビームテストが不可欠である。幸い、KEKのJHF計画の入射器を利用してそのようなテスト装置を作ることが現実見をおび出している。今後その方向に努力したい。

参考文献

- [1] K.Saito et. al., " Superiority of electropolishing over chemical polishing on high gradients ", KEK Preprint 98-4, April 1998, A.
- [2] E.Kako et. al., in this meeting.
- [3] H.Kitamura et al., " Application of electro-chemical buffing to L-band superconducting niobium cavity ", Proc. of the 8th Workshop on RF Superconductivity, Padova, Italy, 6-10 October, 1997, to be published.
- [4] M.Kawamoto et. al., " Fabrication of L-band SC cavity made of Heraeus Nb ", in this meeting.
- [5] T.Fujino et al., in this meeting.
- [6] K.Saito et. al., " Development of 1.3 GHz medium- β structure with high gradient ", KEK Preprint 98-2, April 1998, A.
- [7] T.Ota et. al., " Development of high field three-cell superconducting cavities ', in this meeting.