

20-P34

Development of L-band Niobium Superconducting RF Cavities with High Accelerating Field

Kenji SAITO, Shuichi NOGUCHI, Masaaki ONO, Eiji KAKO, Toshio SHISHIDO,
Masanori MATSUOKA*, Takafusa SUZUKI** and Tamawo HIGUCHI**

KEK: National Laboratory for High Energy Physics
1-1 Oho, Tsukuba-shi, Ibaraki-ken, 305 Japan

Abstract

Superconducting RF cavity is a candidate for the TeV energy e^+/e^- liner collider of next generation if the accelerating field is improved to 25 - 30 MV/m and much cost down is achieved in cavity fabrication. Since 1990, KEK has continued R&D of L-band niobium superconducting cavities focusing on the high field issue. A serious problem like Q-degradation due to vacuum discharge came out on the way, however, it has been overcome and presently all of cavities which were annealed at 1400°C achieved the accelerating field of > 25 MV/m with enough Q_0 value. Recent results on single cell cavities are described in this paper.

高加速電界のL-バンドニオブ超伝導空洞の開発

1. はじめに

高エネ研では、TRISTAN超伝導空洞の開発で培われたニオブ製超伝導空洞の製作技術をベースに、1990年よりL-バンド空洞の開発を精力的に進めている。我々の開発目的は超伝導空洞のリニアコライダーへの応用 (TESLA: TeV Energy Superconducting Linear Accelerator) である。この際、空洞について問題になるのは、1) 25-30 MV/mの高加速電界が達成されるか、2) コストダウン化がどれだけ進むかである。我々はこれまで特に、高加速電界の問題を解決するために表面処理法の改善[1]、温度マッピングシステムによる空洞性能診断法の採用[2]、高純度ニオブ材の開発[3]、超伝導単セル空洞のKEK in-house 製作[4]、超高クリーンルーム (Class 1) の建設等を行ってきた。昨年の本研究会で報告した真空放電によるQ値の劣化問題にも解決の糸口が見つかり、最近では単セル空洞で30 MV/m以上の高加速電界が得られ始めている。本研究会では、最近の単セル空洞で得られた実験結果について報告する。

2. 空洞の製作および表面処理

成型および電子ビーム溶接

L-バンド空洞は、セル径が200 mm程度であり、ハーフセルの成型法は至って簡単である。残留抵抗比 RRR = 200 以上の2.5 ϕ , 280 ϕ の高純度ニオブ円板をアルミ超合金で作った型を使ってプレス成型する[4]。この時ニオブ材には20%以上の伸びが必要である。成型したハーフセルの赤道部の真円度の精度は100 μ m程度である。ビームパイプは平板をロールした後、電子ビーム溶接して作る。そして、アルミ超合金の通し棒を通してパイプの真

円度を出す。成型されたハーフセルはトリム治具を使って、正寸カットされる。セルは滑らかな溶接シームを得るために、ハーフセルのアイリス部の穴から電子ビームで赤道部内面を斜め打ち溶接して作られる。この時、ビームは外面まで貫通しない熱伝導ビーム溶接法を採用している。その典型的な溶接条件は、ニオブの板厚 2.5 mm の時、加速電圧=115 kV、溶接ビーム電流=28 mA、溶接回転速度=380 mm/min、真空度= $\sim 10^{-5}$ Torrである。ビームパイプ、ビームパイプとフランジ、セルとビームパイプ等の溶接には貫通ビーム溶接が使われている。こうした製法で、単セル空洞は15時間余りの実製作時間で完成される。

表面処理および組立

超伝導空洞の表面抵抗は常伝導空洞に比べて5-6桁小さく、表面状態が性能に大きく作用する。したがって、表面処理によって表面欠陥の少ない且つ、清浄な表面を作ることが重要である。表面処理法には、電解研磨や化学研磨が使われている。我々のL-バンド空洞では、100 μ m程度の多量研磨には滑らかな研磨面が期待される電解研磨を使い、数10 μ mの仕上げ研磨には、容易な化学研磨を併用している。どちらの研磨法でも多量研磨の際には、化学処理中に高純度ニオブ材が水素を吸蔵し、その影響で空洞のQ値が著しく低下する[5]。高いQ値を得るには、水素を脱ガスするための700°C以上の真空熱処理が大切である。

空洞の性能を向上させる上でニオブ材の高純度化、均一化が重要であり、1400°C程度の高真空熱処理が効果的である[6]。その場合、通常の真空炉を使用するとニオブは酸化性の強い材料なので、炉内の残留ガスを吸収して返って純度を低下させる。それを防ぐために、チタンゲッターを利用することが非常に有効である[7]。チタンはニオブ以上に活性であり、空洞の周りをチタンで取り

* : 三菱重工株式会社 神戸造船所

** : 野村メッキ株式会社 鹿沼工場

困むことで残留ガスがチタンに吸収される。また、こうした温度ではチタンの蒸気圧が高く、チタンペーパーが空洞表面に付着してチタン膜を形成する。そして、ニオブ中の酸素が、酸化性の差からこのチタン膜に移動する結果ニオブが高純度化される。ニオブ材の高純度化は、ニオブの極低温での熱伝導度を改善し、表面欠陥などでの熱的不安定性の問題を押さえるので空洞の加速電界が向上する[8]。図1に我々の1400℃の高温真空熱処理法を示す。そうした方法でニオブのRRRは200から400に向上する[3]。

今の我々の表面処理工程では、700℃、1400℃いずれの真空熱処理でも、熱処理中にチタンのペーパーなどによって空洞内表面が汚染される。その表面汚染層を除去するために熱処理後、数10μmの仕上げ研磨（最近では化学研磨が主であるが、電解研磨の場合もある）を施す。この仕上げ研磨で最も重要なことは、化学処理の後の水洗である。化学的残留物、ゴミなどが空洞内表面に残留しないように比抵抗17MΩcm以上の超純水を使って、注意深く洗浄する必要がある。また、最近では空洞内表面に残留するゴミを積極的に除去するために超純水高圧洗浄（85kg/cm²）を採用している[1]。

仕上げ研磨された空洞には、空洞性能測定に必要なRF input coupler、RF pick-up monitor や真空排気用ポート等が取付けられる。この作業は、空洞内へのゴミの侵入を防ぐためにクリーンルームの中で行われる。現在、我々はUSA規格でClass 1（最近できた日本のJIS規格ではClass 2相当）の超高クリーンルームを使用している。図2にその清浄度（New Clean Room）を示す。TRISTAN超伝導空洞の組立で使用したクリーンルーム（TRISTAN Clean Room）[9]より二桁清浄度が改善されている。

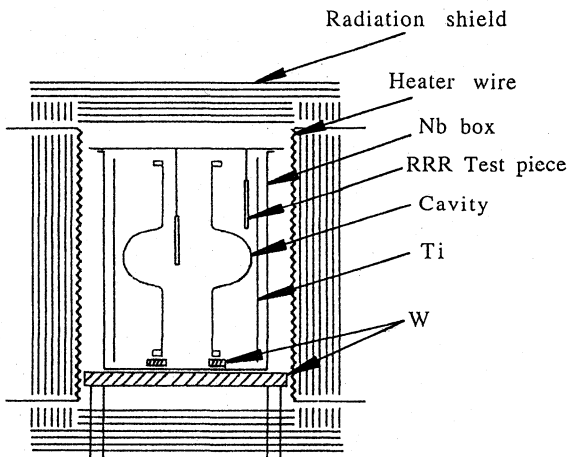


図1. チタンゲッターを利用した高温真空熱処理法

3. 空洞の性能測定結果

クリーンルームでの組立後、空洞は $\sim 10^{-9}$ Torrまで真空排気された後、縦型クライオスタットにセットされ、液体ヘリウムを減圧して2~1.7Kの極低温で性能測定される。

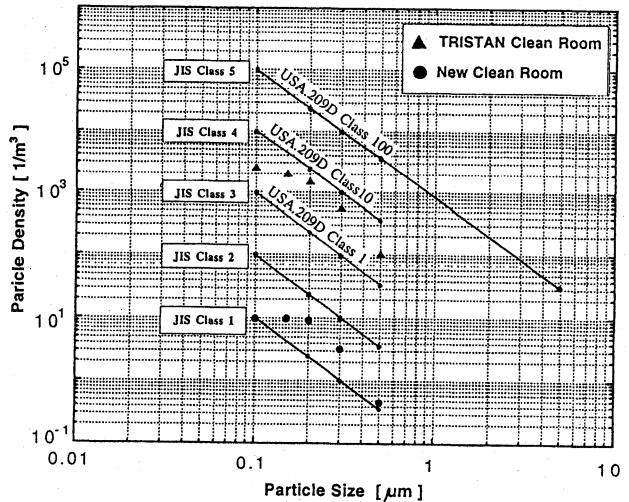


図2. 新設された超高クリーンルームの清浄度測定結果

高加速電界

図3に最近の結果を示す。これらは、すべて1400℃で真空熱処理を施した空洞の結果である。フィールドエミッション無しに28.6~31.5MV/mの高加速電界が得られている。昨年、本研究会で報告した真空放電によるQ値の劣化現象は、Input couplerのアンテナの芯ぶれを押さえる固定セラミックを取り外すことでC1空洞（TRISTAN超伝導タイプの円形形状）では現われなくなった。しかし、K1空洞（CEBAF1.5GHzの楕円相似形状）ではそうしても尚、小さな劣化現象が現われた（図4、●印）。この現象について、CEBAFではC1と同じ空洞を製作して調べた[10]。30MV/m以上（因にその空洞は43MV/mの最大加速電界を発生している）の高加速電界で1~2時間運転してもQ値の劣化現象が起きず、安定に運転できたと報告されている。また、最近のDCフィールドエミッションの研究によれば、超純水高圧洗浄されたニオブの清浄表面では、100MV/mの表面電界（この値は、加速電界で50MV/mに相当する）でも、フィールドエミッションは見つからないとの報告がある[11]。我々の空洞は超純水高圧洗浄されており、K1での現象の原因は空洞以外にある可能性もある。現在、この問題に関してニオブサンプルを使ったDC放電試験 [12]、CEBAFタイプの縦測定スタンドの製作等、空洞内部の問題と測定システムの両面から検討されている。

二点マルチバクタリング

円形空洞の赤道部の二点マルチバクタリングの存在がCERNの500、350MHzのニオブ超伝導空洞で確認されている[13]。CERNの結果から、我々の空洞では加速電界17MV/m辺りにfirst orderの二点マルチバクタリングが予想される。図4に示すように、楕円形状のK1空洞では、16.5-20 MV/mの間にRFエージングで克服されるレベル領域が観測された（図4で、○印はRFエージング中の測定結果、+印はエージング後の測定結果である）。一方、円

形形状のC1空洞では、17 MV/mに簡単にプロセスされるレベルが局在するのが観測された。他の円形空洞でも15-20 MV/mの間に同様のレベルが局在する。これらのレベルはマルチバクティングであるとの最終確認はまだ出来ていないが、その可能性が高いと思われる。K1の測定の際、温度マッピングを取ることで確認されるのではないかと期待される。15-20MV/mのプロセッシングのレベルは、円形空洞ではさほど問題にならないが、楕円空洞では深刻な問題になるかも知れない。

Q値

低いフィールドでのQ値は $7 \times 10^9 \sim 2.5 \times 10^{10}$ 、CWの測定で30 MV/m辺りで $3 \times 10^9 \sim 1 \times 10^{10}$ である(図3参照)。但し、最近の測定では高いQ値に収束しつつあり、超伝導リニアコライダーで要求されるQ値= 8×10^9 (at 25 MV/m)は達成できることが分かった。

4. 今後の研究方向

単セル空洞では目標性能 $E_{acc}=25-30$ MV/m, $Q_0=8 \times 10^9$ は達成された。それらの空洞はすべて1400℃でアニールされたものであり、高温真空熱処理が高電界発生のための必要条件であることが確認された。しかし、空洞の機械的強度、コストの面からアニール温度が低い方が製作上有利と考えられる。真空放電によるQ値の劣化問題が改善された今、700℃程度のアニールで25MV/m以上の高加速電界が信頼性高く達成されるかどうかを見極めた上で、1400℃の高温アニールの採用を判断しなければならない。単セル空洞を使ってその試験を近々行う予定である。

もう一つのテーマは、単セル空洞での性能が実機サイズの9セル空洞(1m管)で達成できるかと言うことである。ニオブ9セル空洞を既に2台作製し、性能測定を何度か行っているが、1台は表面欠陥により、もう1台はフィールドエミッションにより加速電界が10MV/m程度に制限されている。9セル空洞の1400℃アニールを検討しているが、われわれの条件を満たす高真空炉が国内に見つからず、独自製作が必要である。一方、DESYでは、すでにそうした真空炉の建設が進んでおり、DESYとの国際協力でアニールを試みるのが早道と考えられる。また、

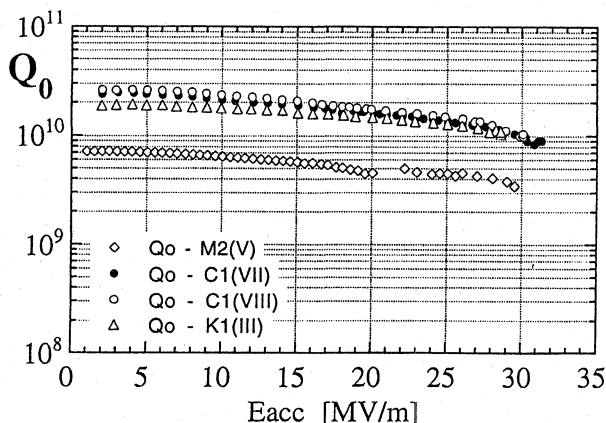


図3. 1400℃アニールされた単セル空洞の性能測定結果

フィールドエミッション対策では、現在の表面処理設備では、清浄環境に関して9セル空洞の処理に問題があるため、その改善を検討している。

5. まとめ

L-バンド単セルニオブ超伝導空洞では、トリスタン超伝導空洞で開発した表面処理法と1400℃真空熱処理、および超純水高圧洗浄を組み合わせた表面処理により、TESLAの目標とする性能($E_{acc}=25-30$ MV/m, $Q_0=8 \times 10^9$ at 25MV/m)が達成された。今後は、1400℃アニールが高加速電界の必要十分条件であるかどうかの検討、9セル空洞でのTESLA性能の実現に向けた研究を行う予定である。

参考文献

- [1] K.Saito et. al., "Study of Ultra-clean Surface for Niobium SC Cavities", KEK Preprint 94-5, April, 1994, A.
- [2] E.Kako et. al., "High Field Tests of 1.3GHz Niobium Superconducting Cavities", Proc. of the 18th Linear Accelerator Meeting in Japan, KEK, Tsukuba, July 21-23, 1993, P.327.
- [3] H.Umezawa et. al. "Development of High Purity Niobium Material for Superconducting Cavities", ibid. in ref. [2], P.318.
- [4] H.Inoue et. al., "In-house L-band Niobium Single Cell Cavities at KEK", ibid. in ref. [2], P.304.
- [5] K.Saito and P.Kneisel, "Qo-Degradation due to Hydrogen in High Pure Niobium Cavities", ibid. in ref. [2], P.299.
- [6] P.Kneisel and K.Saito, "Superconducting Niobium Cavities with High Gradients", Proc. of the 16th International Linac Conference, Ottawa, Ontario, Canada, August, 1992, P.160.
- [7] P.Kneisel, "Use of the Titanium Solid State Gettering Process for the Improvement of the Performance of Superconducting RF Cavities", Jour. of the Less-Common Metals, 1988, P.139.
- [8] H.Padamsee, "Influence of Thermal Conductivity on the Breakdown Field of Niobium Cavities", CLNS-85/642 (1985)
- [9] T.Tajima et. al., "Evaluation on Dust Particles in the KEK Clean Room and Cleaning Methods Used for SC Cavity Assembly, KEK Preprint 93-150, November 1993, A
- [10] Private communication with P.Kneisel.
- [11] E.Mahner, "Understanding and Suppressing Field Emission using DC", Proc. of the 6th Workshop on RF Superconductivity, CEBAF, Newport News, U.S.A., 4-8 October, 1993, to be published.
- [12] E.Kako et. al., "DC Breakdown Experiment on Niobium Electrodes", in this meeting.
- [13] W.Weingarten, "Electron Loading", Proc. of the 2nd Workshop on RF Superconductivity, CERN, Geneva, Switzerland, July 23-27, 1984, P.551.

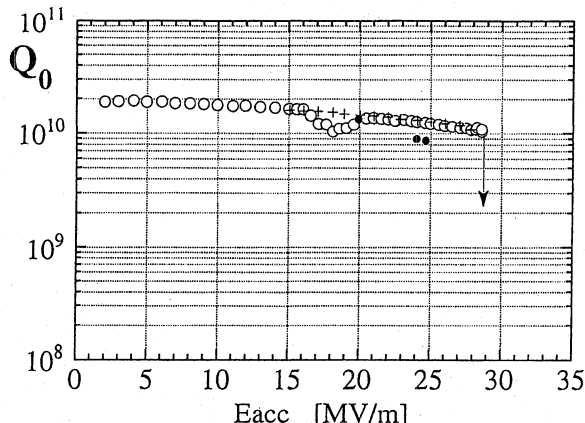


図4. 加速電界15-20 MV/mでのRFエージングレベル