

[30 p – 5]

ACHIEVEMENT OF HIGH ACCELERATION FIELD (40MV/m) IN L-BAND SUPER CONDUCTING CAVITY AT KEK

Ono M., Noguchi S., Saito K., Kako E., Shishido T., Inoue H., Funahashi Y., Fujino T., Koizumi S.,
Higuchi T.*, Suzuki T.*, Umezawa H.** and Takeuchi K.**

National Laboratory for High Energy Physics (KEK)

1-1, Oho, Tsukuba, Ibaraki 305, Japan

ABSTRACT

High accelerating field of 40 MV/m has been achieved in a L-band (1.3GHz) single-cell niobium super conducting cavity at KEK. The Q₀-value was $\sim 8 \times 10^9$ at 1.8 K He-bath temperature. No Q₀ degradation due to field emission were observed. The maximum field was limited by a thermal quench. The noticeable surface preparation carried out in this cavity were as follows, (1) 1400 °C annealing at half-cell, (2) mechanical polishing (tumbling; 10 μm), (3) electrical polishing (EP; 120 μm) and (4) high pressure rinsing (HPR; 80 kgf/cm², pure water). The tumbling, HPR and EP (occasionally chemical polishing was used; CP) have been already shown as good enough preparations for achievement 25 - 30 MV/m acceleration field as indicated in series of cavity tests at KEK since 1991. The heat treatment (1400 °C annealing) at half-cell (before welding to form a single-cell cavity) was a first trial, and good result may indicate that this treatment effective for making defect-free surface. It is too early to conclude that 1400 °C annealing is necessarily treatment for achievement of 40 MV/m, because our old heat treated cavities (1400 °C annealing even though at the single-cell and the following preparation conditions were different) showed no remarkable effects and one cavity measured at CEBAF achieved 43 MV/m without heat treatment.

In the HPR and the final rinsing, only the demineralized water ($\sim 1 \mu S$; pure water) were used. No need to use an ultra-pure water (demineralized, filtered and ultraviolet-sterilized water) for up to 40 MV/m (~ 72 MV/m at surface) is good feature for cost reduction when we consider the mass production of the cavity.

1. はじめに

高エネルギー物理学研究所に於て、主に線形加速器に対する応用を念頭においたL-バンド (1.3 GHz) の高電界超伝導加速空洞の開発が進められてきた [1]。これらの開発研究の一つの成果として、加速電界 (Eacc) で 40 MV/m が達成された。既に報告されているように、単空洞では 25 MV/m 以上の加速電界を出す空洞の製作方法はほぼ確立されたと言えるが、それ以上の電界では 35 MV/m を最大とし、それも Field Emission による Q-値の劣化を伴うことも少なくなく、Field Emission が無い時は 30 ~ 32 MV/m で制限 (放電又は熱的クエンチと思われる) されていた。理論的に予想される最大値 (~ 50 MV/m?) や外国 (CEBAF, L-バンド単空洞) で達成された 43 MV/m と比較するまでもなく我々の 30 MV/m の壁を破る努力は常に種々の試みの中でも意識として持ち続けてきた。周知のように超伝導空洞の表面状態が空洞性能を決定する。このため可能な限り Defect-Free でクリーンな表面を実現する

ため種々の処理工程を経て低温測定が行われる。一方において空洞製作コストも実際に加速器を建設する際には大きな要因となりその削減を模索することを含めての種々の試みである。ニオブ材から始まり各処理工程を完全に把握することは不可能である現状では同一処理を施しても性能はある程度バラツク。このことを考慮した上で 25 MV/m の製作技術は手中にあると言え、今までの処理では 30 MV/m 付近に上限が有ると感じられてきた。従って、40 MV/m 一例で技術の確立とは言えないが少なくとも今回初めて採用したハーフセル状態での 1400 °C アニリングは性能向上のための一つの重要な処理である可能性が示唆される。従来の処理 (必ずしも一通りではないが) と対比し新しい点、異なる点等を重点的に以下述べる。

2. 空洞性能：測定結果

空洞 (K-14) の測定結果 (温度: 1.7 K ~ 2.1 K) を図-1 に示す。Eacc の増加に伴い RF 損失が増え

* Nomura Plating Co., Ltd. ** Tokyo Denkai Co., Ltd.

He - bath の温度上昇による Q - 値の劣化は見られるが Field Emission による急激な劣化は無い。電子発生に対する F - N プロット⁽¹⁾ から求めた Enhancement factor, β からも $\beta \sim 60$ 程度で Field Emission が有ったとしても小さい。表面抵抗⁽²⁾ を $R = R_{bcs} + R_{res}$ とした場合の残留抵抗値, $R_{res} = 4.3 \text{ n}\Omega$ で従来の比較的性能の良い空洞と比べて特別小さいわけではなく (図-2 参), R_{bcs} より求めたエネルギーギャップ $\Delta = 19.5 \text{ K}$ も大差無い。表面抵抗は温度を変化 (4.2 K \rightarrow 1.7 K) させながら $E_{acc} = 4 \text{ MV/m}$ 付近で測定していることより加速電界が小さい範囲では従来の良い空洞と比べ Q - 値 ($Q_0 \sim 4.7 \times 10^{10}$) が若干良いことを除いて性能に大差は無い。 $E_{acc} = 40 \text{ MV/m}$ ($Q_0 \sim 7.6 \times 10^9$) に近づくにつれ X-ray の発生 ($> 26 \text{ MV/m}$) や Electron Yield ($> 34 \text{ MV/m}$) が測定されたが既に述べたように β は小さく 40 MV/m 以下では field の break down は起こらなかった。最後は break down が見られるがその Decay time = 450 μs より熱的なクエンチが起こっていると推測され, 実際空洞外側に取付けたカーボン抵抗による温度測定からも電流密度が高く又熔接 (EBW) 箇所でもある赤道部付近に発熱箇所が同定された。

ちなみに, アイリス部で表面電界は最大で $E_{acc} = 40 \text{ MV/m}$ の時 $E_{sp} = 75.6 \text{ MV/m}$ に達し, 赤道部の表面磁界は $H_{sp} = 1728 \text{ Oe}$ となる; ($E_{sp} / E_{acc} = 1.89$, $H_{sp} / E_{acc} = 43.2$)。

これらの結果は空洞内を真空に保ったままで 3 回測定を繰り返して得られた, 各測定の間には冷却と加熱 (室温まで) を繰り返しかつ $E_{acc} = 40 \text{ MV/m}$ のクエンチも度々起こしたが性能の変化は認められなかった。

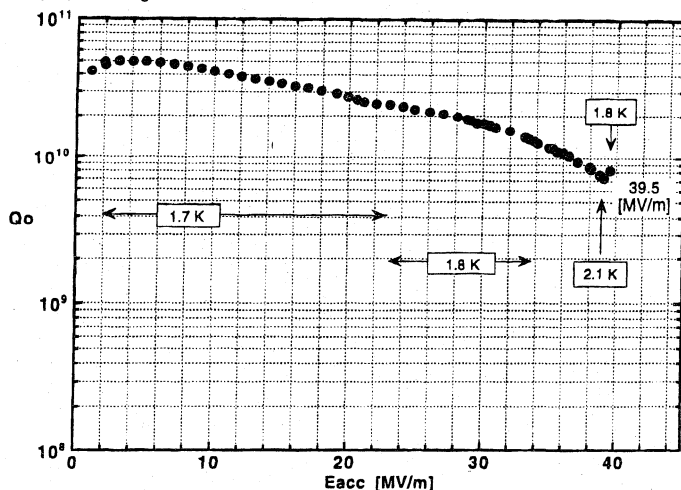


図-1. Q - E プロット

加速電場の測定精度は $\pm 5\%$ 程度と見積られる, これは主にケーブルでの損失を空洞端で全反射させることで測定されるがその際に用いられるサーキュレータの方向性の不完全性による。

3. 空洞製作: ニオブ材, 表面処理

同一ロットのニオブ板材 (東京電解製; RRR = 200, 2.5 t) より 10 個以上の単空洞が製作され性能測定まで行われている。又数種類の形状の空洞を製作し性能の比較も行われているが現状では差異は判然としない。40 MV/m を達成した空洞 (K-14) 以外は同一材料, 同形状でもこの性能を出しておらず処理工程が性能の成否を決定していると思われる。

この空洞は次の順で処理が行われた。(1) ハーフセルをプレス成型しこの段階で 1400 $^{\circ}\text{C}$ アニーリング (5 時間以上), (2) トリム加工後電子ビーム熔接 (EBW), ビームパイプも熔接し単セル空洞となる, (3) タンブリング (パレル) で機械研磨; $\sim 10 \mu\text{m}$, (4) 電界研磨; $\sim 120 \mu\text{m}$, (5) 脱ガス (主に水素の); 800 $^{\circ}\text{C}$ アニーリング (5 時間), (6) 高圧水洗; $\sim 80 \text{ kgf/cm}^2$, 純水 (0.2 μ filter), 10 l/min, 1hr, (7) 最終洗浄, 純水 (0.1 μ filter)。処理後 (8) クリーンルーム内にてトランスミット, インพุットカプラー, 真空排気系ダクト等を取付け, (9) ベイキング (到達真空度 $\sim 10^{-9}$ torr) し, (10) クライオスタットへ組み込み測定に入る。He - bath を減圧することで温度を下げながら温度依存性を測り 2 K 以下で高電界の測定が行われる。

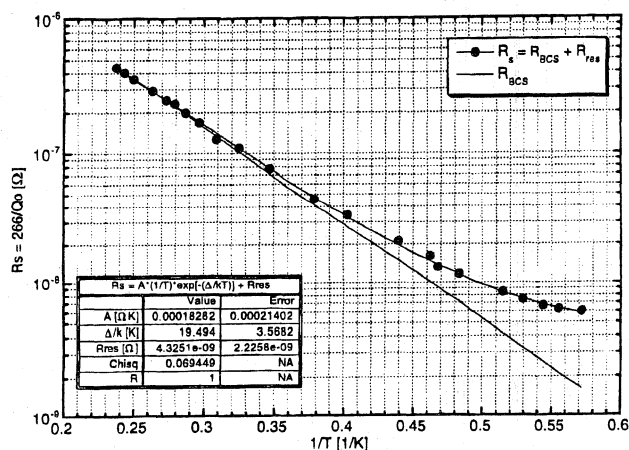


図-2. 表面抵抗の温度依存性: $R_s = R_{bcs} + R_{res}$

他の空洞の処理と比較して特徴的なことを列挙すると, (1) の 1400 $^{\circ}\text{C}$ アニーリングをハーフセルで行ったこと, (2) タンブリングでの研磨量が $\sim 10 \mu\text{m}$ と少ないこと, (通常では数十 μm 以上であるが

- (1) 高周波電界での Fowler-Nordheim: $I_e \sim (\beta E)^{2.5} / \Phi^{1.75} \exp(-\Phi^{1.5} a) / (\beta E)$; E = 表面電界, a = 定数
 (2) 表面抵抗: $R = R_{bcs} + R_{res}$; $R_{bcs} = A/T \exp(-\Delta/kT)$; T = 温度, A, Rres = 定数, k = Boltzmann 定数

研磨材の量が多すぎたためか、又は上記アニーリングの影響が小さい機械研磨で終わっている）、そして（3）高圧水洗、最終洗浄では超純水ではなく、イオン交換しただけの純水をフィルターを通して用いたことである、但し伝導率 = $0.08 \mu \text{ S/cm}$ で通常よりは良い状態であった。最後の点は条件さえ整えば純水での洗浄で十分であることを示し、コスト削減の観点より好ましい結果である。各処理の詳細は別の報告に譲り [2]、この空洞特有の処理であった 1400°C アニールについて述べる。期待される効果としてニオブ材のストレス応力の開放、再結晶化、水素の脱ガス等により一様な表面が得られると考えられおり既に開発の初期の段階で5個の空洞（C1等）に対して試みられている。但しこの時は単セルの状態で且つ空洞外側にのみチタンの有る状態でアニーリングが行われ、空洞性能を向上させる効果は判然とせず $E_{acc} = -30 \text{ MV/m}$ の壁を越えることは出来なかった[1]。今回はチタンもハーフセル状にプレス加工しこれとニオブのハーフセルをサンドイッチ状に積み重ねニオブ両面がチタンと等距離で向き合う状況でアニールを行った。今回の K-14 と以前の C1 とを比較すると、チタンの蒸発量は夫々 24 g と 20 g で大差は無いがニオブ材への付着量は 17 g と 7 g であり今回は両面にしっかり付着していることを窺わせる。図-3 にアウトガス (total, mass No. = 2) の様子を示す。 1000°C を越えて水素が認められ、その他 (mass No. = 18, 28, 44) は 10^{-6} torr 以下で大まかな傾向は C1 と同じで若干の差異が意味を持つかは明かではない。

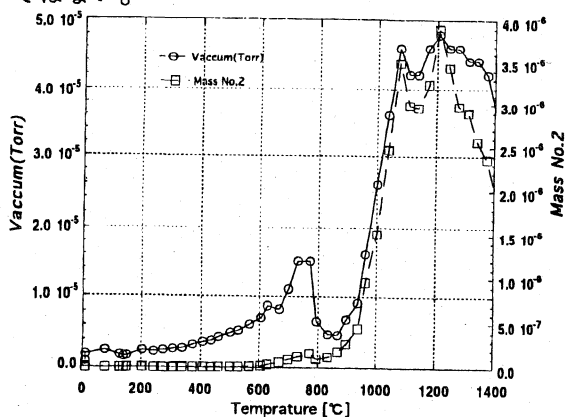


図-3. K-14 の 1400°C アニール

4. 議論：結論に換えて

$E_{acc} = 40 \text{ MV/m}$ を達成するための条件を現状での処理に伴う不確実性のため一例のみでは確定的なことは言えないが既に述べた様に、ハーフセルでの

1400°C アニールをし $100 \mu \text{ m}$ 程度の電界研磨で達成出来る可能性が示された。更に、高圧水洗及び最終洗浄が純水で十分であることが明かとなった。タンブリングによる研磨量は今回は少なかったがこの工程が必要かどうか又、一方でCEBAFでは化学研磨のみで 43 MV/m を達成[3]しており高温アニールの効果等についてさらなる検討が必要である。その後本空洞（K-14）を新高圧水洗装置の性能評価のため水洗のみの再処理を行った。結果は装置による純水の汚染（装置内でのサビ？）で空洞表面に異物が付着したと思われ $E_{acc} = 11 \text{ MV/m}$ から Field Emission が出現し性能は悪化した。その後従来の高圧水洗でかつ超純水を用いたり、再び純水で処理したり、最後は純水で手直した新高圧洗浄で処理し各工程後測定を繰り返した。到達加速電場は $E_{acc} = 32, 34, 36 \text{ MV/m}$ と順調に回復しているように見えるが、依然 Field Emission が見られ（X-ray も、 $> 27 \text{ MV/m}$ で）又 Q-値（又は R_{res} の値）に関しては単純に回復傾向を示さず表面状態は回復していない。表面汚染の原因は洗浄水の他にも組立時の異物の混入（真空シールド材のインジウム等）も否定できないが一旦汚染されると $E_{acc} = 40 \text{ MV/m}$ を回復するのは、もし現在の洗浄水に問題が無いとすると現行の高圧水洗は不十分であることを示している。但し、 $E_{acc} = 25 \text{ MV/m}$ は十分回復しており、現行の高圧水洗はこの範囲の性能には十分である。もし性能悪化が新高圧水洗装置での最初の処理で表面にキズも付けられたためとすると電界/化学研磨も回復のためには必要となってくるかも知れない。いずれにせよ新しい空洞を同処理で製作/測定しその性能を評価すると共に、本空洞の性能を回復させる努力；高圧水洗の条件を探す（圧力、洗浄時間等）ことや、必要なら電界/化学研磨をしその研磨量との相関等を調べる、等続けることで $E_{acc} = 40 \text{ MV/m}$ を達成する条件等が明かになると期待している。そのための重要な足掛かりが得られたと理解している。

[1]Kako E., et al. " Characteristics of the Results of Measurement on 1.3 Ghz High Gradient Superconducting Cavities" 95年度の本研究会報告。及び本年度の一連の報告。

[2]Saito K., et al. 今までの本研究会報告。タンブリング（パレル）研磨, Higuchi T., et al., 高温アニール, Umezawa H., et al., 等。

[3]P. Kneisel, 7th SRF workshop, Saclay, 1995.