

Developments of superconducting cavity at KEK

K. Saito, Y. Kojima, T. Furuya, S. Mitsunobu,
S. Noguchi, T. Tajima, T. Nakazato*, K. Asano

National Laboratory for High Energy Physics
*Laboratory of Nuclear Science, Tohoku University

Abstract

The R & D of 500MHz superconducting cavity has been continued at KEK since 1979. The TRISTAN energy upgrading program started in 1987 and now we are constructing thirty-two 5-cell SC-cavities. The first 16 SC-cavities have been completed and measured their performances. They passed sufficiently the target values ($E_{acc}=5MV/m$, $Q_0=2 \times 10^9$). These results are based on our trials and errors in our efforts of developments. This report shows some of our experience examples and some points to get good performances for SC-cavity.

KEKにおける超伝導空洞の開発

[1] はじめに

MR用超伝導空洞の製作は、順調に進み、今秋のオペレーションに向け、組み込み作業が始まっている。本研究会で報告したように、空洞性能は目標値を十分クリアしている。中でも6割以上の空洞が加速電界10 MV/mに達し、世界的注目を集めている。この様な状況は我々の過去の経験と、それに基づく開発によるものである。ここでは、うまくいった開発例よりも、経験例を示し、性能確保のために注意すべき点を紹介する。

[2] 空洞性能低下の要因

超伝導空洞の性能は、非常にデリケートである。空洞の性能測定までには、多くの工程を経ており、以下に述べる性能低下の要因は、必ずしもそれだけとは限らないかも知れない。しかし、現在、我々が性能低下の主要な原因と考えているものを紹介する。

(1) 多量電解研磨後、真空アニーリングを省いた例 (第1図)

我々の製法では、空洞は80 μ m電解研磨された後、真空アニーリング(700~900 $^{\circ}$ C \times 1.5hr)され、仕上げ電解研磨される。この工程でアニールを省いたときの空洞性能を第1図に示す。500MHzのシングル空洞ではQ値が2桁落ちる。このことは、C Bandで諫川氏らによって既に報告されている。電解研磨したサンプルのガス放出を調べると、電解研磨では、水素の吸収が多いことがわかる(第2図)。一方多量研磨では100 \AA 程度の厚いコンタミ層が形成される(第3図)。また、最近、電解研磨中、研磨液が還元されて、イオウが析出することがわかった。今の処、どれが主要原因であるという決め手はないが、この種の性能低下は、700 $^{\circ}$ C程度の真空アニーリングで容易に克服できる。

(2) 放電が発生した例 (第4図)

7.6 MV/mまで、加速電界が得られた空洞を、その一部が液体ヘリウムから出た状態で測定中、性能低下が起り、回復不能になった。一度、Warm upし、再び低温測定した結果が第4図である。Warm up後、空洞内面を検査したところ、放電跡が見つかった。その部分をグラインドし、20 μ mの電解研磨をした。そして、低温測定をしたが、(3)に述べるトラブルが発生し、放電跡ダメージがその方法で回復するかどうか確認できなかった。これまでの経験からは、グラインドと仕上げ電解研磨で性能回復すると思われる。

(3) 空洞内表面に塩化ビニールホースの可塑剤が付着した例 (第5図)

空洞をアルコール洗浄したとき、塩化ビニールホースの可塑剤が空洞内表面に付着したと思われる例を第5図に示す。赤外線吸収スペクトル分析で、洗浄アルコールから、塩化ビニールホースの可塑剤として用いられるフタル酸ジオクチル及び、充てん剤、安定化剤と考えられる無機物が検出された。可塑剤の量はわからないが、その誘電損失により、Q値が1桁下がったと考えられる。20 μ mの電解研磨を施したが全く回復せず、真空アニールした後、仕上げ電解研磨を施すことで回復した。

(4) 半硬質塩化ビニールライニング材の溶出による汚染研磨液で電解研磨した例 (第6図)

当時、電解研磨槽は、メッキ工場によく使用される半硬質塩化ビニールライニングのものを使用しており、電解研磨液の液再生の研究のために長期にわたって、研磨液をため込んでいた。この時、ライニング材の一部が研磨液に溶出したもので、それを知らずに仕上げ研磨液に使用した。研磨液に四塩化炭素を混ぜ、それ

に可溶成分を抽出したところ、ライニング材の可塑剤（ジヘキシルフタレート 8.0×10^{-3} 、ジヘプチルフタレート 50×10^{-3} 、ジオクチルフタレート $71 \times 10^{-3} \text{ mg/l}$ ）が検出された。この場合、空洞内表面はRF的に不安定であり、RF、Heプロセスにより安定化される。しかし、field emissionはまぬがれない。

(5) 熱交換器の純アルミ溶出による汚染研磨液を使用した例（第7図）

電解槽に内装される熱交換器に、純アルミを使用したことがある。ニオブの電解研磨液（HF : $\text{H}_2\text{SO}_4 = 10 : 85 \text{ v/v}$ ）中では、純アルミは不動態被膜のために腐食されない。しかし、フッ酸、硫酸の単独液には、腐食される。研磨液の建浴の際、電解槽に硫酸をいれ（純アルミは、濃硫酸では不動態被膜を作って腐食されないと思いついて）一晩おいて、翌日フッ酸をいれたところ、既にアルミが溶出し、白く濁っていた。液の汚染物は、電解研磨の後の水洗で落ちることを期待して、その研磨液で処理した結果が第7図である。Q値は、本来より2桁落ちているが、これは(1)に述べた効果によるものである。問題は、第1図と比べてわかるように、 1 MV/m からQ値の低下がみられることである。アルミ塩（ AlSO_4 ）が空洞内表面に残っていて、それによる発熱と考えられる。

(6) 測定中リークが発生した例（第8図）

超伝導空洞は冷媒に液体ヘリウムを使うので、セラミックコネクタの破損、フランジの熱変形などにより、冷やしたときにリークすることがある。第8図は、液体ヘリウムトランスファーの直前にリーク（リーク率 $\sim 1 \times 10^{-6} \text{ atom cc/sec}$ ）が発生し、そのまま液体ヘリウムで冷却し、測定した場合である。この時、空洞の真空度はゲージ圧で、 10^{-6} Torr 台であった。液体ヘリウムといえどもその中には圧縮ポンプからのオイル成分や、水成分があり、リークした時、一緒にそれが空洞の中にはいる。また、内面には、ヘリウムがコンデンスする。またゴミも持ち込まれる可能性がある。このような場合、field emissionが多く、低い加速電界でブレークダウンを起こしている。

(7) 空気にさらした例（第9図）

10 MV/m の加速電界が得られた空洞の中に、常温でフィルター（ $0.2 \mu\text{m}$ ）を通して空気をいれ、一日放置し、再排気して低温測定した例を第9図に示す。 5 MV/m からfield emissionが増し、 7 MV/m でブレークダウンした。これはRFプロセスでも回復しなかった。別の空洞を使った同様の試験結果をも示す。これは、大気にさらした後、超純水洗浄して再排気した例である。この場合にも 5 MV/m からfield emissionが顕著である。この空洞は、Heプロセスで前の状態に回復した。空気にさらすと 5 MV/m くらいからfield emissionが顕著になるのが特徴的である。

(8) 3連縦型電解研磨（第10図）

シングル空洞の試作で採用した縦型電解研磨を3連空洞に適用した場合の空洞性能を第10図に示す。この方法では、電解反応で発生する水素ガスが下部から上部へ行くほど加算される。そして、水素ガスがシールド効果を来し、上部ほど電流密度が低下し、研磨むらが起こる。また、水素拡散防止のカソードバックの目の間から水素ガスが抜け出し、空洞内表面に水素ガスが直接当たる。また、ガスによって液流ができ研磨面に筋が発生した。3連空洞の性能は、それぞれのシングルセルの性能に比べてQ値が $1/6$ に悪くなった。しかし、加速電界はほとんど変わらなかった。この結果は、水素ガスの影響の少ない横型電解研磨開発の動機となった。

(9) 不適正電流密度下で電解研磨して全面にエッチングを発生させた例（第11図）

(8)で従来の電解研磨法に限界を感じ、それに変わる方法として横型回転式電解研磨法の開発にとりかかった。これは、この開発中に会ったトラブルである。ニオブの電解研磨には、適正電流密度があり、 $I_s = 30 \sim 100 \text{ mA/cm}^2$ が適当である。横型回転電解研磨で初めて5連空洞を処理したとき、水素ガス拡散防止用カソードバックの切込み不足で、電流密度が 25 mA/cm^2 しか確保できなかった。空洞内面全体にエッチングが発生した。この時の空洞性能を第11図に示す。Q値は、多連空洞でもシングル空洞並の値になり、(8)に比べて大きく改善された。しかし、図に示していないが、 1 MV/m 以下の低いレベルで、マルチバクタリングと思われる現象が起こった。また、 2 MV/m の低いレベルからfield emissionが出始めている。これらの問題は、研磨面がエッチング済みであることその他に、今から考えると水洗不足ではなかったかと考えられる。

(10) バフかす、イオウで汚染された研磨液で電解研磨した例（第12、13図）

トリスタンMR用超伝導空洞用の表面処理設備は(3)～(5)の経験及び、サンプル試験を行って設備材の選定には注意が配られた。その結果、すべてテフロン系の材質が使用された。設備材等による汚染に対して、信頼できるこの設備で一度多量研磨した液を、再度仕上げ研磨に用いたときの空洞性能を第12図に示す。面が不安定で、さらに 4 MV/m からfield emissionが顕著になった。 5 MV/m 程度の高いfieldでのRFプロセスで性能が突然悪くなり、回復しない(Qswitching)現象が起こった。この問題があるの

でMRの量産では、仕上げ研磨に新液を使用することにした。しかし、量産で、6~10台の処理にかかったとき、field emissionが顕著になる状況が発生した。電解研磨ラインを分解するとラインの中に、バフかす、イオウが蓄積されていた。リザーバタンク内からは、9.4gのバフかす、イオウが採集された。バフかすは、半割セルのバフ研磨の時、ニオブ表面に残っているものであり、イオウは、電解反応で発生する水素により研磨液中の硫酸、あるいはフルオロ硫酸が還元されて析出することがわかった。ライン分解後、field emissionの多い空洞を再処理すると10MV/mまでfieldが伸び、no field emissionとなった(第13図)。

(11) 表面欠陥 (第14図)

MR用超伝導空洞前半16台の内、1台表面欠陥があり、fieldが2.8MV/mに制限された。51Ωのアレーンブラッドレーのカーボン抵抗を空洞外表面に付け、その抵抗変化から欠陥場所を見つけ、その部分をグラインドした。内視鏡で欠陥部を観察すると、マクロな凹状欠陥であった。その領域を240~370μmグラインド研磨し、電解研磨で再処理した結果、7.6MV/mまでfieldが上がった。しかし、その場所で発熱があり、それ以上fieldは上がらなかった。5連空洞16台では、160枚のセル材が使われているが、その内の1枚に表面欠陥があったことになる。ニオブ材については、高純度ニオブ材の開発により信頼度を強めていたが、今後、材料の検査の強化が必要である。

参考文献

- 1) S. Isagawa Doctor's thesis Tokyo University

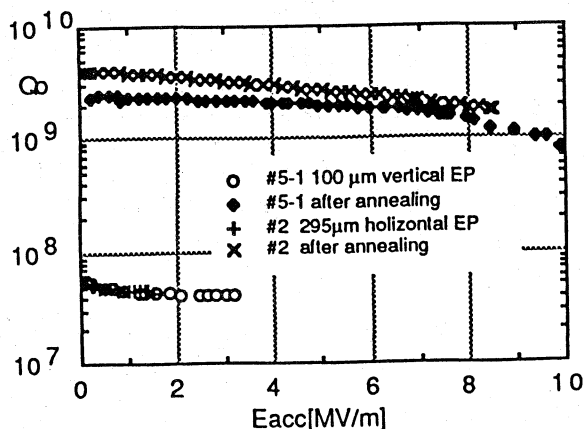


Fig 1. Heavy EP effect

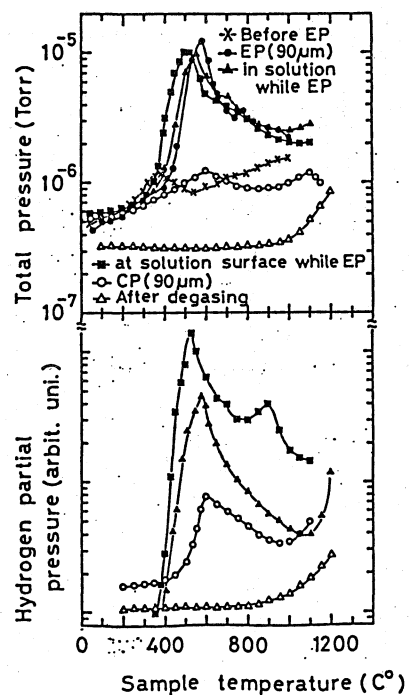


Fig 2.

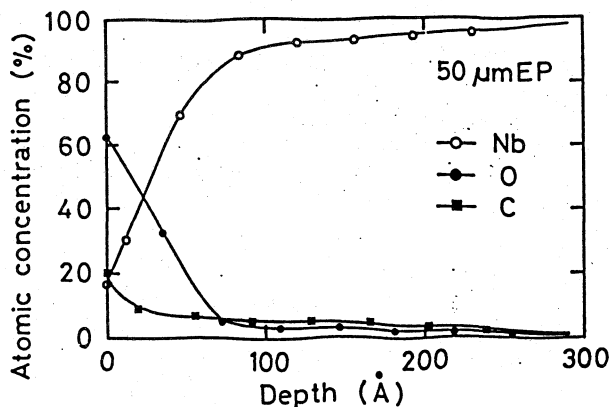


Fig 3. Horizontal rotational electropolished Nb with continuous current

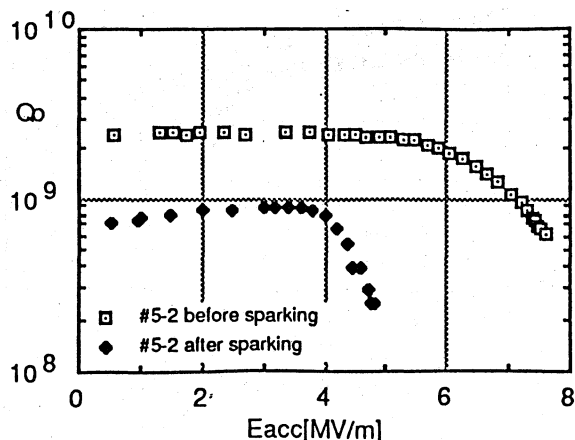


Fig 4. Sparking effect

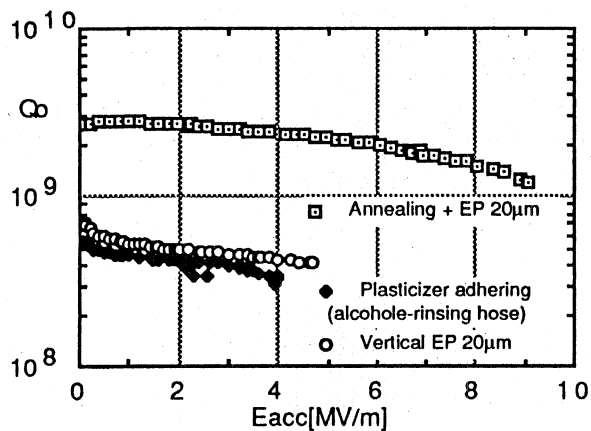


Fig 5. Plasticizer adhering of the alcohol-rinsing hose

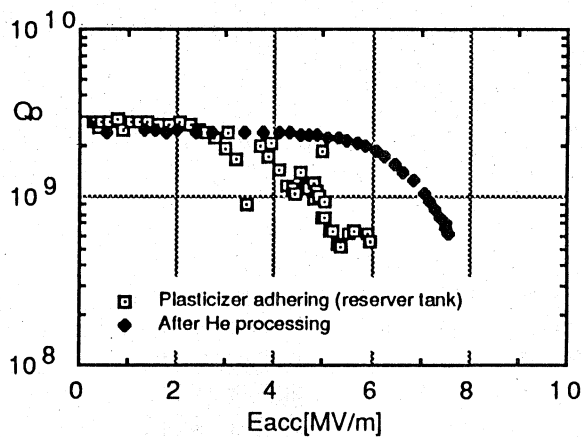


Fig 6. Plasticizer adhering of the reserver tank

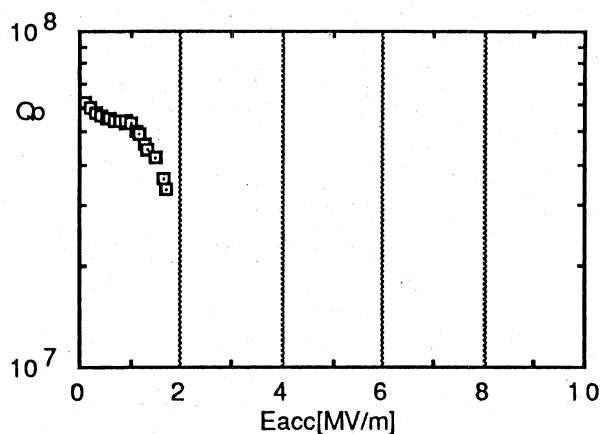


Fig 7. Al resolving effect

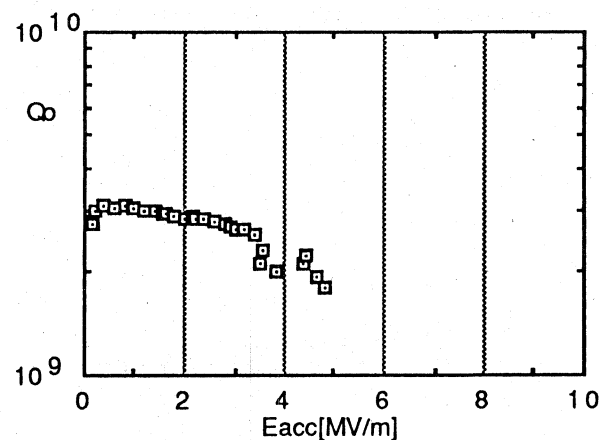


Fig 8. Vacuum leak effect

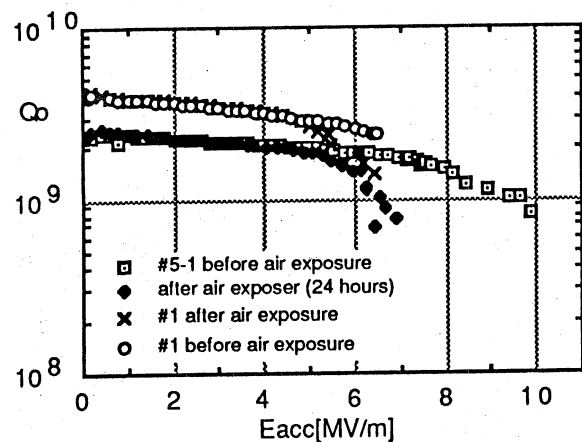


Fig 9. Air exposure effect

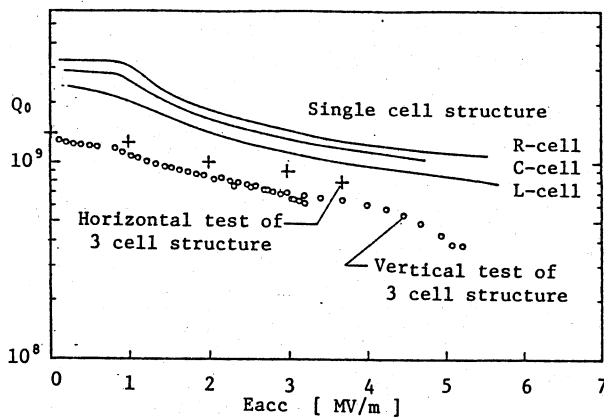


Fig 10.

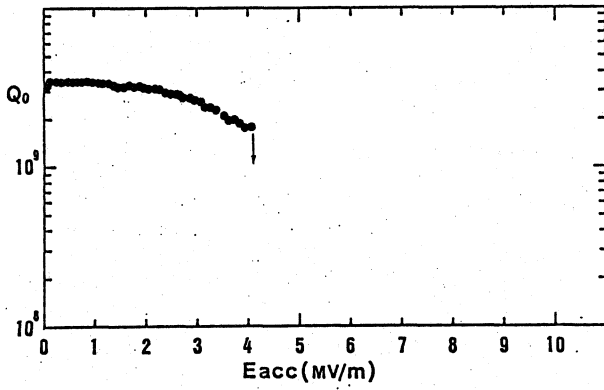


Fig 11.

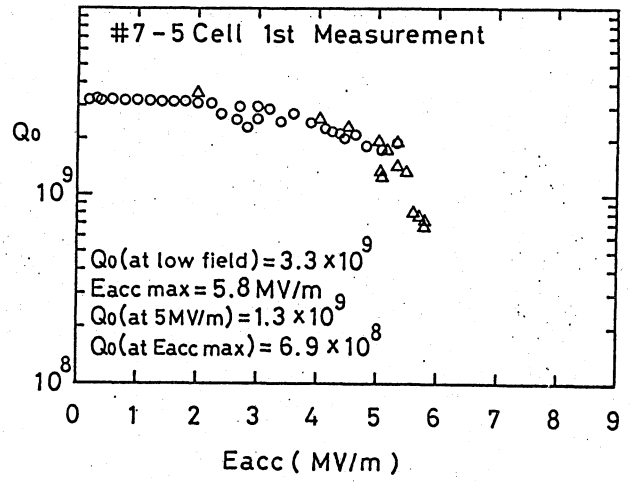


Fig 12.

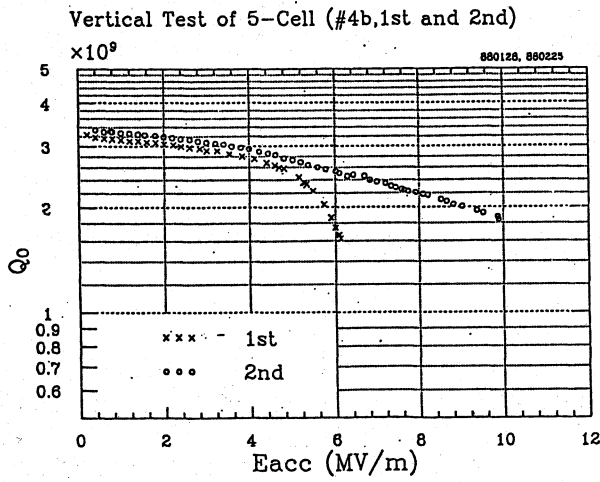


Fig 13.

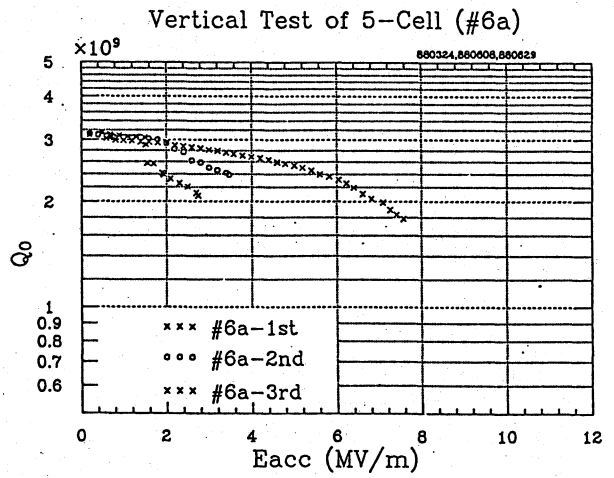


Fig 14.