

SERIES TESTS OF HIGH GRADIENT SINGLE-CELL SUPERCONDUCTING RF CAVITIES

Fumio Furuta¹, Kenji Saito, Takayuki Saeki, Hitoshi Inoue, Yuichi Morozumi
KEK, High Energy Accelerator Research Organization
1-1 Oho, Tsukuba 305-0801, Japan

Abstract

KEKでは単セル超伝導空洞を用いたシリーズテストを行ってきた。これは空洞性能40MV/m以上を95%以上の歩留まりで補償できる表面処理方法の確立を目指したものである。この試験にはKEK-LL(ICHIRO)形状の単セル空洞6台が用いられた。最初の試験では45MV/m達成に対する歩留まりは50%であった。我々はこの歩留まりを上げるべく表面処理レシピの改善を行った。KEKの標準的な表面処理は遠心バレル研磨、化学研磨、真空アニール処理、電解研磨(EP)、高圧超純水洗浄、そしてベーキングである。我々はこれらにフッ酸洗浄、脱脂洗浄、過酸化水素洗浄、仕上げ電解研磨などを組み合わせたいくつかのレシピを試験した。本論文ではシリーズテストとして試験した複数のレシピについて性能結果と歩留まりを報告する。

50MV/m単セル超伝導空洞のシリーズテスト

1. はじめに

KEKでは、ニオブ超伝導空洞が空洞形状の新設計により電界性能50MV/m超まで到達できることを単セル空洞で原理実証した [1]。その後、J. Sekutowicz設計のLL形状[2]をベースにKEKで新設計したKEK-LL形状の単セル空洞(IS空洞)6台を新たに製作し、性能歩留まり試験を行った。表面処理としては後で記述する当時のKEK-WG5-レシピと呼ぶものを採用した。結果、電界性能45MV/mに対し50%の歩留まりを得た。結果を、電界強度とQ値の関係、及びヒストグラムをガウシアンフィットしたもの(赤いラインが実験データ)と合わせて図1に示す。我々は空洞性能を制限している要因とメカニズムを理解し、歩留まりを改善することを目的にパイロットスタディとして様々な表面処理を行った。我々の目標とする性能歩留まりは、ILCのACDで性能受け入れ基準とされている40MV/mでQ値 $0.8e10$ を95%以上で達成するもので、性能分布にすると45MV/m \pm 5%、図1で青いラインで示したものである。

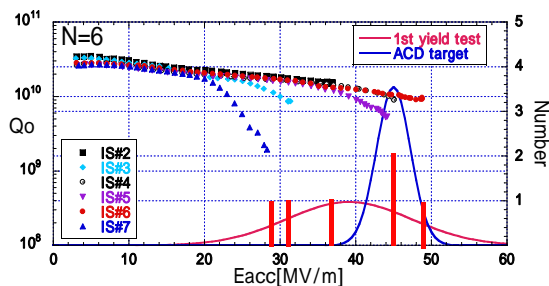


図1: 歩留まり試験の結果

2. 空洞表面処理

空洞はNb板をプレス、トリム加工したハーフカップを二つ向かい合わせて電子ビーム溶接(EBW)し、そこにビームパイプとフランジをEBWして製作される。その後、空洞内表面処理として、まず 砥石と水を入れた空

洞を機械で回し遠心力を利用して研磨する機械研磨、遠心バレル研磨(CBP)、を行う。これは空洞表面の大きな表面欠陥を除去し、かつ溶接シームを滑らかにすることを目的とする。次に 化学研磨(CP)を約10 μ m施し、CBP時の砥粒による汚染表面を除去する。さらにCBPやCP工程でニオブ中に吸蔵した水素を脱ガスするために 真空熱処理(AN)、750 で3時間、を行う。次に 電解研磨(EP)で80 μ m研磨して滑らかなRF表面を作る。最後に 高圧超純水洗浄(HPR)、7MPaで1時間、を施して清浄表面を得る。その後 ベーキング(Baking)、120 で48時間、及び真空排気をして空洞性能試験に移る。このCBPからベーキングまでの空洞表面処理をKEK-WG5レシピと呼ぶ。

3. パイロットスタディ

最初の歩留まり試験では6台中3台の空洞がクエンチやフィールドエミッション(FE)によって30~37MV/m付近で制限された。その原因として考えられるのは、HPRまたは組み立て時の単純なミスによるゴミの混入によるFEの発生。これは再HPRで改善できる。次に EP中に発生する硫黄や酸化膜の汚染によるもので、FEやQ-slope、ローフィールドでのクエンチを引き起こす可能性がある。これは軽いCP(~10 μ m)やEP(20 μ m)、flash EP(新液を使い3 μ m研磨、液循環なし)による改善が期待できる。さらに 内表面の傷や溶接シームの粗さが原因となるもので、FEやクエンチを起こすと考えられる。これを改善するにはCBP等による多量研磨が必要である。

これらの分類を元に、性能制限の要因が表面もしくは表面からどの程度の深さ領域にあるのかを理解するため、次のような追加表面処理によるパイロットスタディを行った。まず、再HPR、これはNb表面を除去しない、を行った。その後、フッ酸洗浄(20分)による自然酸化膜程度の研磨(~100)を行った。結果、FEの改善や、Q値の回復などが見られたが、電界強度の改善はほとんどなかった。次に、1台の空洞に軽いCP(10 μ m)を、他の空

¹ E-mail: fumio.furuta@kek.jp

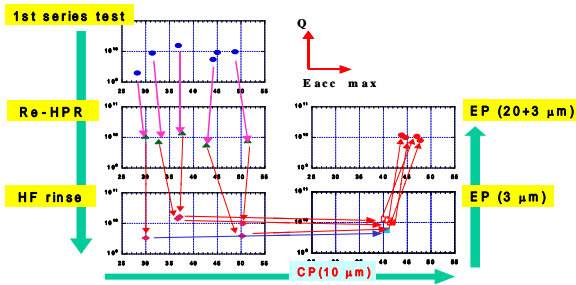


図2:パイロットスタディ結果

洞にはflash EPを追加した。この処理によって性能のばらつきは小さくなったが、性能は40MV/m付近に制限された。また、CPではQ-slopeが起きた。最後に通常のEP (20~30 μ m)とflash EP (3 μ m)を組み合わせた追処理を行った。結果、残りの空洞でも45MV/m級の性能に到達した。この時いくつかの空洞にはフッ酸洗浄を組み合わせているがフッ酸洗浄の有無で性能の差異は無かった。パイロットスタディの結果を図2にまとめる。

これらの結果より性能制限とばらつきの原因は先に挙げた要因に起因することが示唆された。この汚染はEP中に形成され、EPプロセス時間が長いほどニオブ内部に侵入し、EP後の真空排気中も進行・拡散すると思われる。flash EPのみの場合に、ばらつきは小さくなり、性能は40MV/mに制限されたことから、ばらつきの原因は表面から深さ3 μ mの領域に存在し、性能制限の源は3 μ m以上深くへ拡散した汚染が原因、と考えられる。追加EP(20 μ m)で汚染の除去が出来、性能の改善が図れるが、このEP(20 μ m)中も再汚染のリスクはあり、ばらつきが生じる可能性が高い。従って、EP(20 μ m)とflash EPを組み合わせることで最も効率よく性能の改善とばらつきの抑制ができると考えられる。

4. シリーズテスト

最初の歩留まり試験、及びパイロットスタディから、空洞性能のばらつきはHPRやフッ酸洗浄では除去できない汚染によるものと分かった。EPプロセス中の汚染としては硫黄がよく知られており、我々は汚染の大部分を硫黄とみなし、その対策を考えた。我々は6台の空洞の表面をCBPでリセットした後、まずflash EPを加えた新レシピで空洞を再処理して歩留まり試験を行った。さらに硫黄の汚染を除去するような積極的な洗浄をEP後に加えることにした。それには硫黄を溶解することのできる過酸化水素水洗浄(H₂O₂ rinse)と脱脂洗浄(Degreasing)を選んだ。歩留まり試験、及びこれらの洗浄方法の組み合わせによる以下のシリーズテストを行った。

4.1 CBP+CP+AN+EP (80 μ m)+flash EP+HPR+Baking

flash EPを加えた新レシピに対する試験結果は41.7 \pm 4.4MV/m、ばらつきは11%、ACD目標に対する歩留まりは67%であった。結果を図3にまとめる。パイロットスタディから予想されたように、最初の試験に比べてばらつきを抑える結果は得られた。しかし、歩留まりの改善、平均の性能は低かった。flash EP(3 μ m)はEP(80 μ m)のような多量研磨中に深くまで拡散した汚染を完全に除去するには不十分と言える。

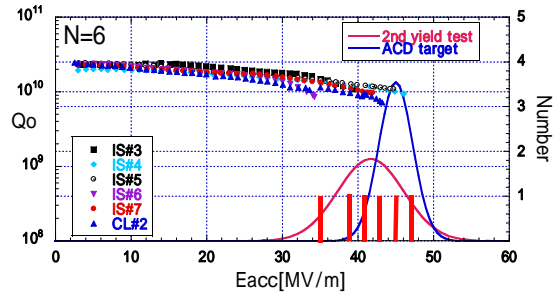


図3:再歩留まり試験の結果

4.2 +EP (20 μ m)+HPR+Baking

新レシピによる歩留まり試験の後に、洗浄強化を行う前のベースデータとして試験した。結果は46.5 \pm 8.0MV/m、ばらつきは17%、ACD目標に対する歩留まりは83%であった。結果を図4にまとめる。ACD目標に対しばらつきが大きい、また平均値は上がったものの高電界領域でのQ値のばらつきが大きい。+EP(20 μ m)は先の多量EP(80 μ m)時の汚染を除去できるが、+EP(20 μ m)自身の間での再汚染の可能性もある。

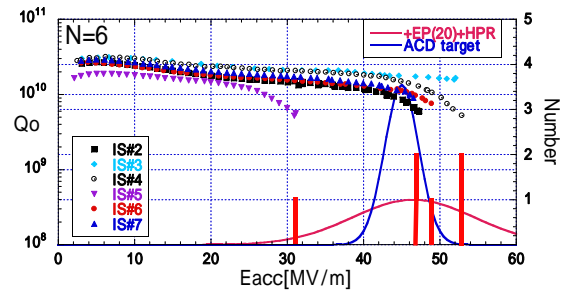


図4: +EP(20 μ m)+HPR+Bakingの結果

4.3 +EP (20 μ m)+H₂O₂ rinse+HPR+Baking

4台の空洞に対しH₂O₂ rinseを組み合わせたレシピを施した。結果は42.6 \pm 7.6MV/m、ばらつきは18%、ACD目標に対する歩留まりは50%であった。結果を図5にまとめる。もう2つのテストを行い統計性を上げる予定である。このレシピではばらつきの改善は無かったもののマルチパクタ(MP)によるRFプロセッシング時間の短縮やフィールドエミッション(FE)の減少が見られた。

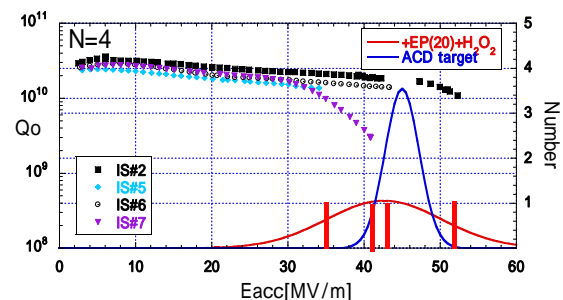


図5: +EP(20)+H₂O₂ rinse+HPR+Bakingの結果

4.4 +EP (20 μ m)+Degreasing+HPR+Baking

5台の空洞に対し脱脂剤を試験した。脱脂剤の濃度

は0.2%とし、既に脱脂洗浄を取り入れているJ-labと同じとした[3]。結果は 44.2 ± 6.4 MV/m、ばらつきは14%、ACD目標に対する歩留まりは60%であった。結果を図6にまとめる。このレシピもばらつきの改善は無いもののMPやFEの減少が見られた。

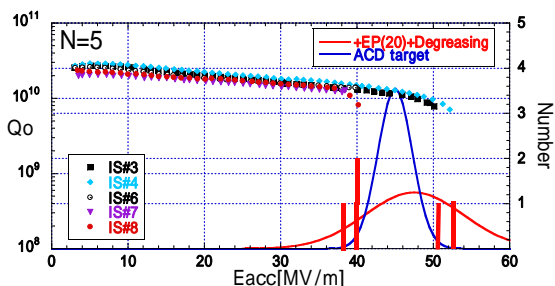


図6: +EP(20)+Degreasing+HPR+Bakingの結果

4.5 +EP (20 μ m)+flash EP(3 μ m)+HPR+Baking

6台の空洞に対し試験した。結果は 46.7 ± 1.9 MV/m、ばらつきは4%、ACD目標に対する歩留まりは100%であった。結果を図7にまとめる。性能の改善とばらつきの抑制を両立できている。

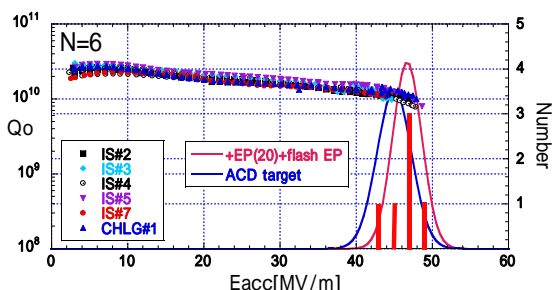


図7: +EP(20)+flash EP+HPR+Bakingの結果

5. 考察

図8にEP研磨量とばらつきの比較を示す。flash EPによる汚染除去で明らかにばらつきが減少する。また研磨量が増えるに従ってばらつきが大きくなる理由は、EP中の汚染拡散が研磨量(時間)に比例して多くなりflash EPでは完全に除去出来ないためと言える。また、flash EPではMPの減少は見られなかった。従ってMPの源とばらつきの源は異なると言える。

図9に2つのレシピ、EP(20 μ m) + flash EP と EP(20 μ m) + Degreasing、におけるMPの発生確率を電界強度でプロットする。脱脂剤の効果で発生確率が減少していることがわかる。よって洗浄の強化は、MPの減少、すなわちMPの源を除去する効果、が期待できる。これらの結果から我々はばらつきのメカニズム、MPの源に対する一つのモデルを立てた[4]。

まずEP中に発生する硫黄汚染の一部がニオブ表面に付着・反応し硫化ニオブ(Nb_xS_y)が形成される。これがばらつきの要因であり、洗浄の強化では除去できず、EPなどの研磨が必要になる。Nb_xS_yはEP中に内部に拡散し多量研磨の後では深くまで拡散し、flash EPでは取りきれない場合もあると考えられる。またニオブと反応しないような硫黄粒子の付着がMPの原因となると言

える。付着した硫黄はHPRでは完全には除去されず、H₂O₂洗浄や脱脂洗浄で積極的に溶解することで除去でき、MPの減少に効果が得られる。

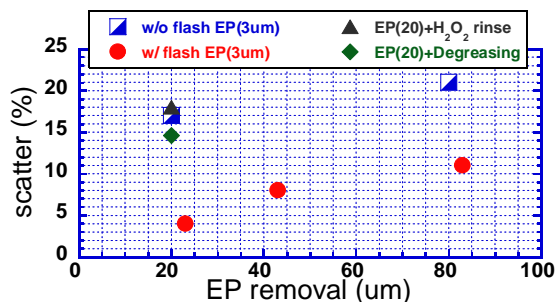


図8: 電解研磨と性能のばらつきの関係

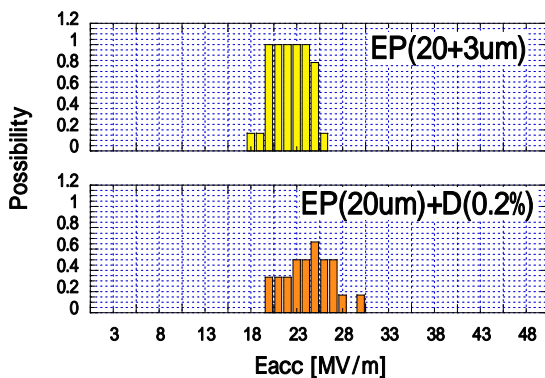


図9: MPの発生確率

6. 最後に

我々は単セル空洞による50MV/mの原理実証の後、性能のばらつきを改善することに取り組んできた。ばらつきの原因はEP中に発生する硫黄汚染にあると推測し、我々はニオブ表面での硫化ニオブ(Nb_xS_y)の形成と拡散というモデルを立てた。この汚染除去はHPRや他の洗浄強化ではできず、flash EPが最も効果的である。ただし汚染量は初期EP量に依存し、多量研磨の後ではflash EPのみでの汚染除去は不完全である。現在ILCのACD目標を達成できる新KEKレシピはCBP+CP+AN+EP(80 μ m)+EP(20 μ m)+Flash EP(3 μ m) + Degreasing+HPR+Bakingである。またMPの源はばらつきの源とは異なるもののやはり硫黄が関係しており、H₂O₂洗浄や脱脂洗浄などで積極的に硫黄を溶解することがMPの減少に効果が高い。

参考文献

- [1] F. Furuta et al., Proc. 10th Eur. Part. Acc. Conf. (EPAC2006), Edinburgh, June 2006, p.750
- [2] J. Sekutowicz et al., JLAB-TN-02-023, June 2002.
- [3] J. Mammosser et al., "ILC Cavity Qualifications - Americas", TTC meeting in FNAL, April 23-26, 2007
- [4] K. Saito, Proc. of 13th International Workshop on RF Superconductivity, Peking University, Beijing, China 2007, <http://www.pku.edu.cn/academic/srf2007/download/proceedings/TU202.pdf>