

VERY RARE Q-SLOPE NONE OVERCOME BY ELECTROPOLISHING AND BAKING

Fumiaki Yasuda ^{#A)}, Taro Konomi ^{B)}, Fumio Furuta ^{C)}, Kenji Saito ^{D)}

^{B)} The Graduate School of University of Tokyo, 7-3-1 Hongou, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8654

^{A)} The Graduate University for Advanced Studies, 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

^{C)} Cornell University, 330 Newman Lab., Garden Ave., Ithaca, NY 14850

^{D)} KEK; High Energy Accelerator Research Organization, 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

Abstract

We discovered the very rare Q-slope none overcome by electropolishing and baking at 120°C for 48 hours. The Q-slope is not related to “Hydrogen disease”. The Q-slope is not improved by the wiping and steam so that we recognize that the Q-slope is not caused by some cohesion things of the cavity’s surface. The rare Q-slope is categorized a low, medium and high rare Q-slope. In this paper, we report the Rare Q-slope and the categorized rare Q-slope.

電解研磨とベーキングで克服できない非常に稀な Q-slope

1 はじめに

我々は ILC-ACD に向けて、Low Loss (LL) 形状による運転加速電界 40 ~ 45 MV/m が可能な高電界ニオブ超伝導空洞を開発している。

ニオブ超伝導空洞の高電界性については、電解研磨が化学研磨よりも優れている[1]。図 1 はそれを世界で最初に指摘した実験結果である。化学研磨 (●) で空洞内表面を 20 ミクロンから 250 ミクロンまで研磨しながら、個々の研磨量毎に空洞性能を評価した結果である。120 ミクロン以上の研磨量で加速電界が 23±3 MV/m に saturation を起こす。一方、この saturation した状態の後、電解研磨(△, □)を施すと更に加速電界が向上する。

この電解研磨の高電界の優位性の背後には次の章で述べる Q-slope の問題があることが分かった。Q-slope は 20 MV/m の加速電界以上で Q 値が指数関数的に急激に低下する現象で、純粋なものは X 線の発生がなく、発熱が生じる。この Q-slope は電解研磨、化学研磨のどちらの場合においても発生する。しかし、電解研磨の場合、約 120 °C で 48 時間程度のベーキングで完全に消え、欠陥のない空洞では、最大加速電界が理論限界まで達する。一方、化学研磨した空洞ではベーキングの効果が不完全で、電解研磨ほど高電界に達しない。現在、そのメカニズムについては、諸説が提案されている。1)ニオブ超伝導空洞の RF 最表面の酸素汚染による“超伝導特性の劣化による発熱現象”, 2)RF 最表面の“ニオブ酸化物のもつ磁性と RF の相互作用による発熱現象”, 3)最表面での RF 磁場による磁束のトラップの発熱(フラックスコアは常伝導)などが提案されているが、決定的なものはない。

これまで、電解研磨した空洞がベーキングで十分に回復すると考えてきたが、最近、非常に稀ではあるが、ベーキングによって Q-slope が殆ど回復しない現象が発見された。発生確率は、我々の測定回数を全事象とすると、1/300 程度である。16000 台を生

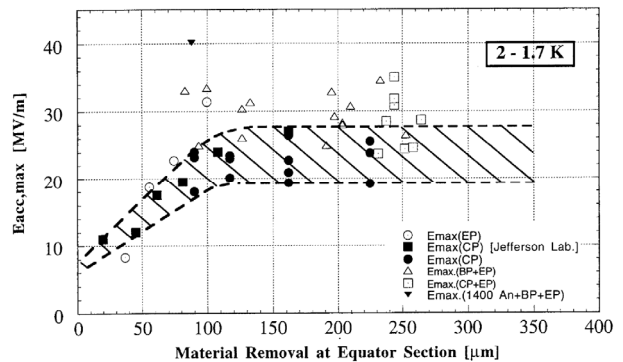


図 1: 電解研磨の優位性

産するような ILC では、50 台規模で発生する可能性があり、無視できない。また、この現象の研究は、化学研磨での Q-slope 克服困難性を理解するうえで重要である。

2 研究背景

2.1 電解研磨のベーキング効果による Q-slope の回復

化学研磨を行った空洞と電解研磨を行った空洞の加速電界を比較すると、電解研磨を行った空洞の方が高電界を得ることができる。これらは参考文献[1]に端を発し、今では周知の事実となった。しかし、Q-slope は化学研磨した空洞ではベーキング効果が顕著に現れず、高電界が得られにくい。一方、電解研磨した空洞は、約 120°C で 48 時間程度のベーキングを行うと Q-slope が消え、高電界が得られる。これらを図 2 に示す。

2.2 ベーキング効果による Q-slope 回復のメカニズム

電解研磨を行った空洞のベーキング効果のメカニ

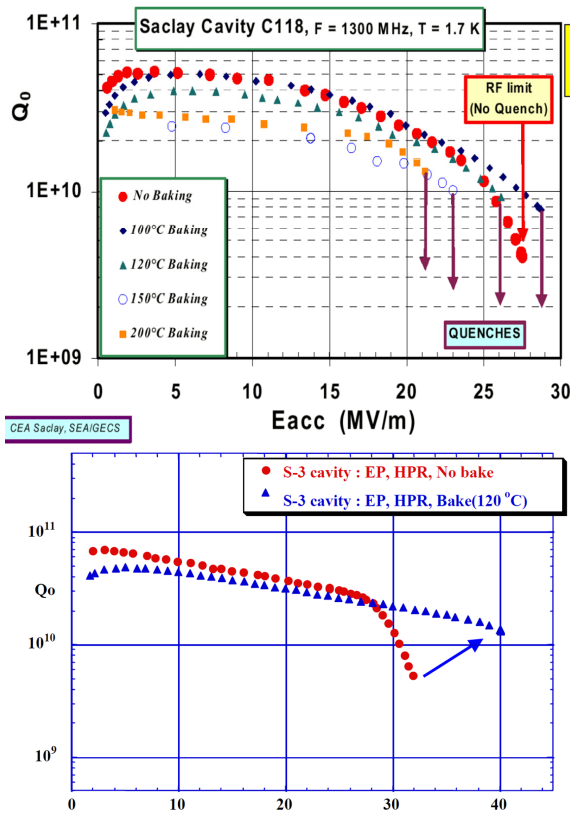


図 2: 化学研磨と電解研磨のベーキング効果

表 1: 超伝導空洞 Nb 材の酸素含有率における臨界温度と臨界磁場[2]

Alloy (at.%O)	T_C [K]	H_C [Oe]
0.024	9.23 ± 0.01	1910
0.139	9.03 ± 0.02	1854
0.555	8.50 ± 0.08	1717
0.922	8.10 ± 0.05	1613
1.32	6.13 ± 0.10	1528
2.00	7.33 ± 0.12	1399
3.50	6.13 ± 0.13	1102

ズムとして、特に、酸素汚染層モデルとフラックストラッピングモデルが提案されている。

酸素汚染層モデルでは、ベーキングによる Q-slope の克服を次のように説明している。ニオブ空洞の表面に酸素リッチな酸素汚染層が研磨することによって生じる。そこではニオブが不飽和酸化物になり臨界磁場 H_C と臨界温度 T_C が下がる。表 1 に超伝導空洞 Nb 材の酸素含有率に伴う臨界磁場 H_C と臨界温度 T_C を示す。酸素含有率が上がると、下部臨界磁場が下がり磁束量子が低い加速電界から侵入し、表面抵抗値を増加させる。こうして発熱量が増加し、Q-slope が生じる。しかし、約 120 °C で 48 時間程度のベーキングをすると、酸素をバルク中に約

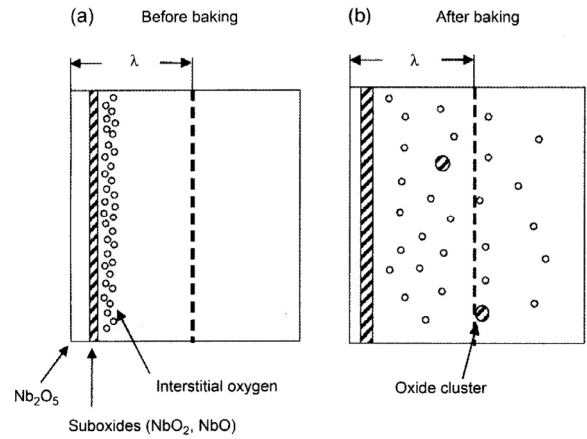


図 3: 酸素汚染層モデル

100 nm[3]拡散し、RF 表面のニオブの純度が向上し、超伝導特性を取り戻す。そのため、Q-slope が回復する。このことを図 3 に模式的に示す。図 3 の中の λ は RF 磁場の侵入長さを示す。通常の電解研磨面では Nb_2O_5 の下に、 NbO_2 と NbO の層ができている。さらに、ベーキングを行う前、その下には、細胞状の酸素層がある。ベーキングを行うと細胞状の酸素層の酸素が RF 磁場侵入長 λ より深いところに拡散し、Q-slope が回復するとされている。

一方、化学研磨でも酸素の拡散は電解研磨と同様に起こる。酸素による Q-slope の問題は消えるはずである。しかし、化学研磨の場合は表面粗さが粗いために、マグネティックエンハンスメントが起こる。低い RF 磁場でも下部臨界磁場を超えて、磁束量子が超伝導体内に侵入する。侵入した磁束量子がマイクロ波と相互作用してフラックスが揺さぶられ、誘導起電力が発生する。こうしたメカニズムによって Q-slope が残ると考えられる。これらは表面粗さに依存するから化学研磨で滑らかであれば Q-slope は軽減される。

3 空洞試験

HOM の付かない Ichiro のエンド単セル空洞#4' (以下、ISE#4') に多量の化学研磨を施した後、何度も測定を繰り返し、化学研磨による空洞性能限界を調べた(図 4)。

その後、電解研磨の効果を確認するため電解研磨とスタンダードな洗浄法を施した。具体的には、電解研磨 30 μm 、超音波脱脂 (脱脂剤は micro90-2%、100 kHz と 37 kHz の同時使用、30 分)、純水超音波洗浄 (970 kHz、30 分)、高压洗浄 (HPR、9 MPa で 1 時間、空洞の上下 2 往復) を施した。その後、8 時間程度 class10 のクリーンルームで乾燥し、組立てた。MO トップフランジ、Al-In ガasket、SUS ボルトを使用し、15 Nm のトルクで締めた。インポットカップラーは In シール、SUS ボルトを使用し、15 Nm のトルクで締めた。真空排気中、約 120 °C、48 時間程度でベーキングを行った。

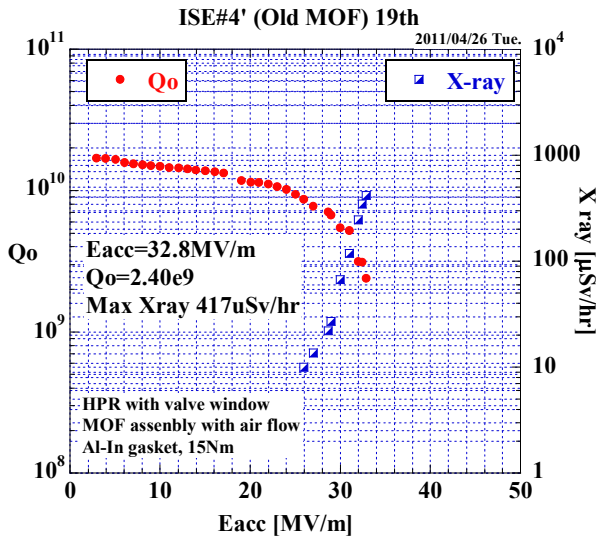


図 4: 化学研磨の限界制度 (ISE#4' 19th VT)

空洞の測定では、まず 300 K から 4.2 K に 1 時間程度で冷却して、その後 2 K で性能試験した (fast cooling). その結果が図 5 (a) である. X-ray を伴うことなく、加速電界は 12 MV/m 程度から指数関数的に急激に低下した. 結果が異常に悪いので、水素病を疑い、それを確認するために温度 100 K 程度で 1 日放置し、再測定を行った. その結果が図 5 (b) である. 図 5 (a) と図 5 (b) の比較から分かるように、100K に長時間晒しても性能の変化が見られない.

この異常な性能の原因が、空洞表面にあるらしいことが分かった. 電解研磨での硫黄やフッ素の表面残留物を疑って、一度分解して空洞内表面をワイピング (空洞内を脱脂剤 micro90-2% で湿したマイクロファイバークロスを用い、手でゴシゴシと擦った)

(図 6 (a)), スティーム洗浄 (図 6 (b)), そして HPR (1 時間) を施し、前に述べた要領で空洞を組立、真空排気して fast cool down で測定した. その結果が図 5 (c) である. 表面を機械的に擦っても性能がなら変わらないことが分かった.

4 Rare Q-slope の発見と議論

4.1 Rare Q-slope の発見

上に述べたように ISE#4' は、12 MV/m の低い加速電界から X-ray の発生を伴わない Q 値の指数関数的に低下する現象、これは、これまでに報告されたことのない現象である. ここでは、この現象を "Rare Q-slope" と呼ぶことにする. Rare Q-slope は水素病とは無関係であること、ワイピングで取れるような表面の付着物ではないことが分かった. 一方、化学研磨の残留効果が考えられるが、RF ニオブ表面の化学組成は、電解研磨 30 μ m で完全に置き換えられている. また、電解研磨で化学研磨した面より滑らかになっているはずで、図 1 に示した化学研磨の結果 (表面粗さによる限界: magnetic field enhancement と考えている) より悪い効果が起こるはずもない. 以上のことから RF 表面の何らかの化合物 (酸化物が疑わ

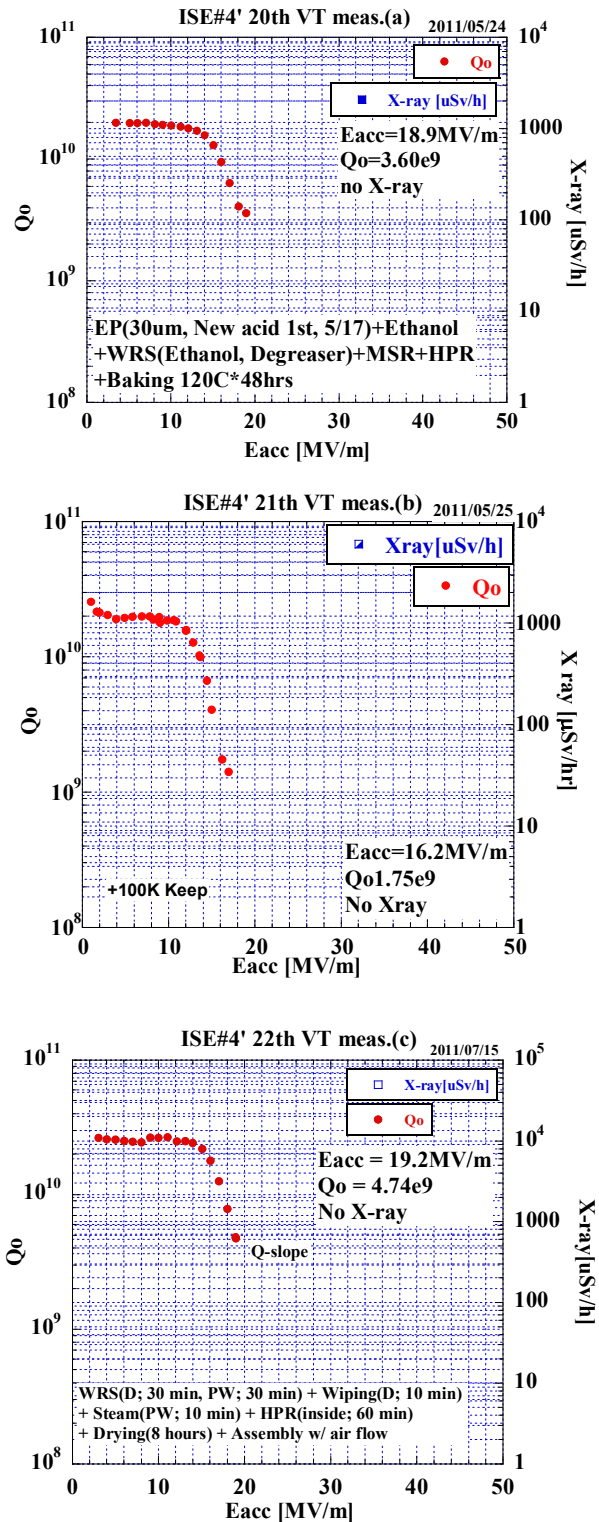


図 5: Rare Q-slope の発見

れる) がこの Q-slope を発現させているのではないかと考えている. この結果に端を発し、過去の 600 の例の縦測定結果を見直した. この調査では、電解研磨とベーキングの両方を施した空洞で、加速電界の向上に連れて X-ray を伴うことなく Q 値が指数関数的に低下する現象が発生した例を整理した. その



(a) ワイピング



(b) スティーム

図 6: ワイピング(a)とスティーム(b)

結果, 幾つかの Rare Q-slope が再発見された. 結果を図 7 にまとめる. 加速電界 E_{acc} が 10 ~ 20 MV/m での Rare Q-slope をここでは Low Rare Q-slope, 20 ~ 30 MV/m を Medium Rare Q-slope, 40 ~ 50 MV/m を High Q-slope(これは, ISE 空洞シリーズで頻繁に見られるので Rare は省く)と呼ぶことにする. この一連の Q-slope が同一メカニズムで説明されると期待されるが, この論文では現象整理で, 現象論的段階に留まっている.

しかし, 本質的段階に進むのに Medium Rare Q-slope が大きなヒントを与えるものとする. 加速電界 20 MV/m 辺りから赤道で 2 点 multipacting が始まる. 40 MV/m 以上の高電界を達成する空洞では, この領域を比較的簡単な RF プロセッシングで通り抜ける. しかし, 非常に深刻な multipacting の場合, 通り過ぎることができず, 図 5 のような結果や, クエンチ(magnetic flux trapping)に至ったりする. multipacting の電子衝突による flux trapping が発熱メカニズムの種となり得る. トラップされた flux の芯は少なくともコヒーレントレングスと程度の大きさを持ち, $\pi\xi^2$ 程度の面積の常伝導状態部を形成し発熱する.

4.2 Flux Trapping モデルによる評価

測定された空洞の Q 値の変化から単位面積辺り何本の flux が trap されているか評価してみる. 空洞の赤道で, ある面積 S の領域を考える. この領域で, 表面磁場 H_S , 表面抵抗 R_S である. 単位磁束量子の磁束 ϕ_0 は

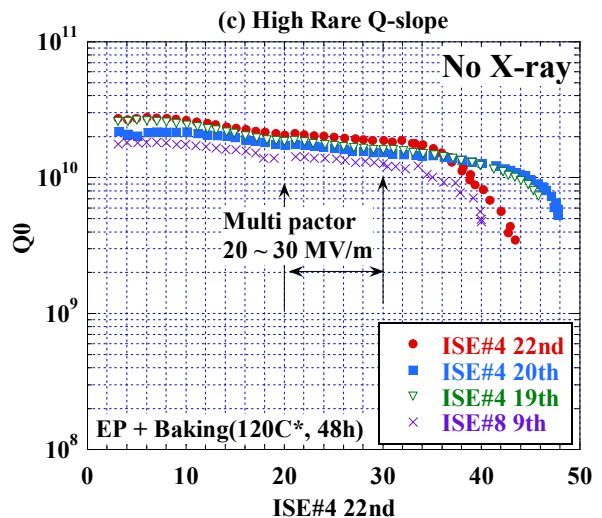
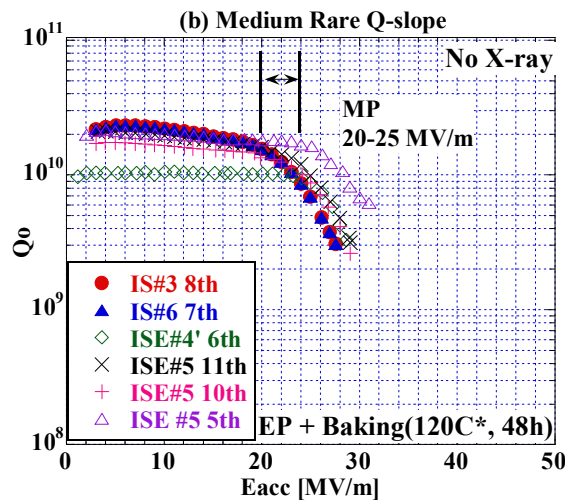
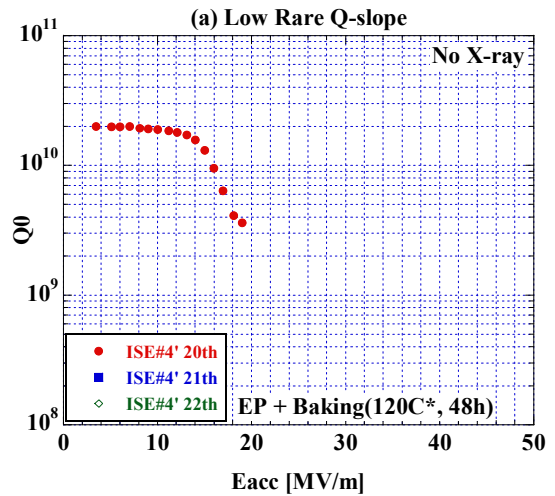


図 7: Rare Q-slope の分類

$$\phi_0 = 2.0678 \times 10^{-15} \text{ [Wb]} \quad (1)$$

であり, これをコアの面積で割ることから, 磁場 h_0

が得られる。磁束量子 1 本あたりの表面発熱 p_T は

$$p_T = \frac{1}{2} R_S(\text{normal}) \times h_0^2 \times \pi \xi^2 \quad [\text{W}] \quad (2)$$

具体的に数値を入れると磁束量子 1 本あたりの発熱量は、

$$p_T = 7.32 \times 10^{-6} \quad [\text{W}] \quad (3)$$

となる。ただし、 $\xi \approx 30 \text{ nm}$,

$R_S(\text{normal}) \approx 1.68 \times 10^{-3} \Omega$, $h_0 \approx 0.0175 \text{ Wb/A m}$ である。図 5(a)の結果から、Flux trapping で Q-slope が起こり、 Q_0 が 2×10^{10} から 5×10^9 になるとすると、その発熱は $P = 6 \text{ W}$ 程度である。これから、トラップさせている flux の数 N を計算すると、

$$N = \frac{P}{p_T} \approx 8.20 \times 10^5 \quad (4)$$

ここから常伝導に成っている面積を計算すると

$$S = \pi \xi^2 N \approx 2.32 \times 10^{-3} \quad [\text{mm}^2] \quad (5)$$

である。従って、発熱部は表面の粗い部分によるものと考えられる。Flux trapping モデルは現実的であるように思われる。

5 まとめ

本報告では、Q-slope の本質的理解のための現象として、Rare Q-slope (電解研磨、ベーキング及び No X-ray で Q-slope が発生する現象) を示した。これは水素病とは無関係で、ワイピングなどによる表面の付着物にも影響が無い。また、過去のデータを見なおしてみると Rare Q-slope は、Low, Medium 及び High Rare Q-slope に分類できることがわかった。

今回、これらの現象に対する具体的なアプローチを示すことが出来なかった。しかし、これらの現象は Q-slope の本質を理解するために非常に有意義であり、化学研磨でのベーキングによる Q-slope の回復困難の問題に対する解決を与えるものだと考えている。

参考文献

- [1] K. Saito, et al., "Superiority of Electropolishing over Chemical Polishing on High Gradients", 9th Workshop on RF Superconductivity. 795 - 813, 1999.
- [2] Hasan Padamsee, "RF Superconductivity", WILEY-VCH, P160, 2009.
- [3] K. Saito and P. Kneisel, "Temperature Dependence of the Surface Resistance of Niobium at 1300 MHz", 9th Workshop on RF Superconductivity. 277 - 282, 1999.