

[13B-03]

Baking Effect on Niobium Superconducting RF Cavities and Its Physical Interpretation

K.Saito and P.Kneisel*

High Energy Accelerator Research Organization (KEK)
1-1 Oho, Tsukuba-shi, Ibaraki-ken, 305-0801 Japan

*Thomas Jefferson Accelerator Facility (JLab)
12000 Jefferson Avenue, VA 23606, USA

Abstract

Recently a very surprising phenomenon has been discovered at JLab and Saclay with chemically polished niobium cavities, which the baking during vacuum evacuation has benefits to improve the cavity performance: high Q and high gradient. We have confirmed the same effect on the electropolished niobium cavities. We have analyzed the temperature dependence of the surface resistance in order to understand this effect in the frame of BCS theory. In this paper these results will be presented.

ニオブ製超伝導空洞におけるベーキング効果とその物理的解釈

1. はじめに

最近、ニオブ超伝導加速空洞の性能に関して、意外な実験事実が発見された。その現象について後で詳しく述べるが、要するに 90 ~ 140 °C のベーキングで空洞の Q 値が 2 倍上がり、さらに高電界性が改善するということである。このベーキング効果に関する研究の背景には、3 年前に本研究会で報告したニオブ超伝導空洞の高電界性における電解研磨の優位性がある。ニオブ製超伝導加速空洞の内表面の処理では電解研磨の方が化学研磨より高電界性に優位であることを KEK が発表する^[1]と、化学研磨を採用している海外の研究所ではその真偽を確かめる実験を開始した。電解研磨以外で KEK と彼等との相違点にその優位性の結果を探る実験が行われた。KEK では表面処理の後、空洞の真空排気で到達真空度をよくする目的で伝統的に 100°C 前後の温度で一昼夜以上のベーキングを施してきた。一方、他の研究所ではベーキングを行っていなかった。Saclay はそこに注目し、ベーキング効果の試験を行った。その結果、電解研磨で達成されるほどではないが、化学研磨でも高電界性の部分的改善がみられた^[2]。一方、JLab でも筆者の一人 P.Kneisel がベーキング効果の試験を系統的に行い、化学研磨した空洞で BCS 表面抵抗が約半分になることを突き止めた^[3]。

筆者が文部省在研で JLab に滞在の折、こうした状況から電解研磨した空洞でベーキング効果を調べようということになった。幸い KEK から JLab に電解研磨した Lバンドの単セル空洞を 2 個送ってあったのでそれを使って実験した。その結果、電解研磨においても著しいベーキン

グ効果を確認した。また、その滞在中、このベーキングによる表面抵抗の減少を理解するために表面抵抗の測定結果を BCS 理論による計算と比較し、その物理的解釈を試みた。ここではそれらの結果について報告する。

2. ニオブ超伝導空洞におけるベーキング効果

ベーキングの意外な効果について説明する。最初、化学研磨した空洞で見つかったものであるが、今回、電解研磨でも同様の効果が確認されたのでそれで代用して説明する。

BCS 表面抵抗を低下させる効果

図 1 に電解研磨した 1300MHz の Lバンドニオブ超伝導空洞をクライオスタットの中でヘリウムガス環境下で 140°C で 40 時間ベーキングした場合の BCS 表面抵抗の温度依存性を示す。BCS 表面抵抗は、空洞の表面抵抗の温度依存性 ($R_s(T)$) の測定から残留表面抵抗 (R_{res}) を差し引いた値である。

$$R_{BCS}(T) = R_s(T) - R_{res}$$

$$= Af^2/T \cdot \exp(-\Delta/k_B T) \quad \text{for } T \ll T_c/2 \quad (1)$$

図 1 より電解研磨した場合でもベーキング後では、どの温度でも BCS 表面抵抗はベーキング前の約半分になっていることが分かる。また、ベーキング後、BCS 表面抵抗の温度依存性ではその傾きが若干きつくなり、バンドギャップ (Δ/k_B) が少しではあるが大きくなる傾向が見られる。

高電界における Q-Slope の問題を改善する効果

図 2 にはベーキング効果の高電界性に対する効果を示

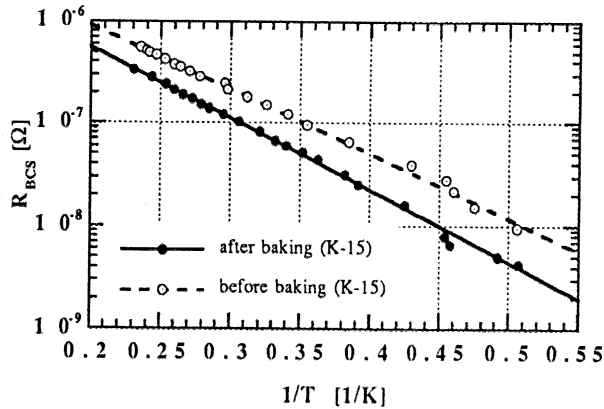


図1. 電解研磨したニオブ空洞での表面抵抗におけるベーキング効果

す。ベーキング前後での Q_0 - E_{acc} カーブの測定結果である。どちらも2Kでの測定である。ベーキング後では $E_{acc} > 30$ MV/mの高電界性が得られることが分かる。 Q 値に関して、図1でベーキング後では、表面抵抗が半分になったと言ったが、その効果が図2に現われていない。それは2Kでは、BCS表面抵抗が十分小さくなり、残留抵抗によって Q 値が決まるからである。

ベーキングをしない場合、 $E_{acc} \sim 24$ MV/m辺りから Q 値が指数関数的に減少するのが観察される。これは一見、フィールドエミッションかと思われるが、ベーキング後それが回復することを考え合わせるとゴミのような単純な原因ではない。化学研磨でよく観察される Q -Slopeの現象^[1]と考えられる。そうだとすれば、電解研磨でもベーキングを施さないと化学研磨同様 Q -Slopeの問題が生じるが、ベーキングで大きく改善される結果、電解研磨の高電界性に対する優位性が見えたことになる。図2の測定では、空洞内表面が長い期間あまり良くない真空度(約30 Torr)に曝されていたこともあり、こうした解釈には自信が持てなかったが、その後、KEK、Saclay/DESYで調べた結果^[4,5]、上記の解釈が正しいことが分かった。しかし、ベーキングによる Q -Slope改善は、電解研磨面では

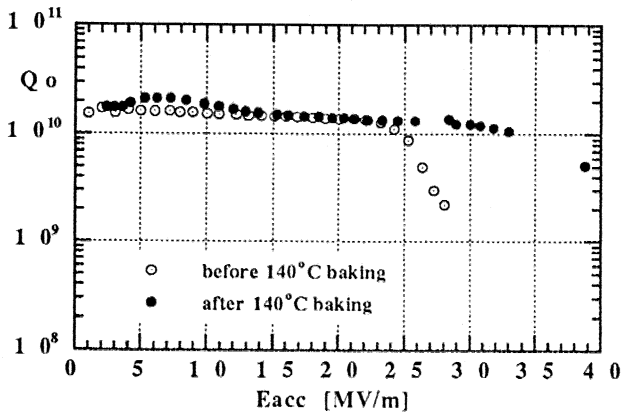


図2. 電解研磨したニオブ空洞での高電界性におけるベーキング効果

著しく、化学研磨面ではさほど大きくないことも分かった。これらの結果から、電解研磨の優位性は、電解研磨とベーキングの併用で得られると言い改めなければならない。

3. ベーキング効果の解釈

3-1. BCSパラメーターフィッティング

こうしたベーキング効果を説明するためにHalbritterによるBCS表面抵抗の計算コード^[6]を使って実験で測定したニオブ超伝導空洞の表面抵抗の温度依存性のデータをフィットして、超伝導物質パラメーターを評価した。超伝導表面抵抗は、(1)式の如く表わされるが、その定数 A は超伝導臨界温度(T_c)、ロンドン侵入長(λ_L)、クーパーペアの換算バンドギャップ($\alpha = \Delta/k_B T_c$)、コヒーレンス長(ξ_0)、常伝導電子の平均自由行程(Λ)の関数である。つまり、BCS表面抵抗は(1')式となる。

$$R_{BCS}(T) = A(T_c, \lambda_L, \alpha, \xi_0, \Lambda) \rho^2 / T \cdot \exp(-\Delta/k_B T) \quad (1')$$

HalbritterのコードはBCS理論を使って(1')を計算する。計算コードを使ってベーキング後のニオブ超伝導空洞の表面抵抗をフィットした結果の例を図3、4に示す。それぞれの超伝導物質パラメーターをニオブの典型的な値 $T_c=9.25$ K, $\lambda_L=360$ Å, $\alpha=1.86$, $\xi_0=360$ Å, $\Lambda=1000$ Åに対

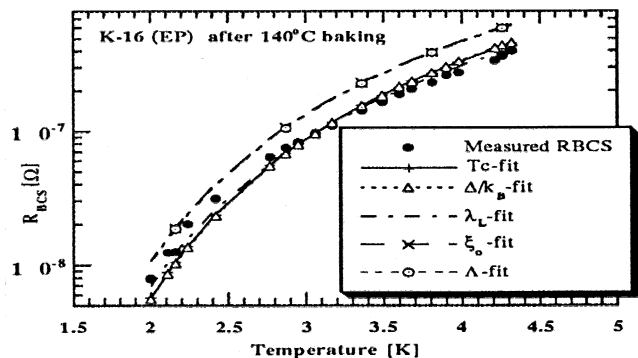


図3. 表面抵抗のBCSフィッティング
(1-パラメーターフィッティング)

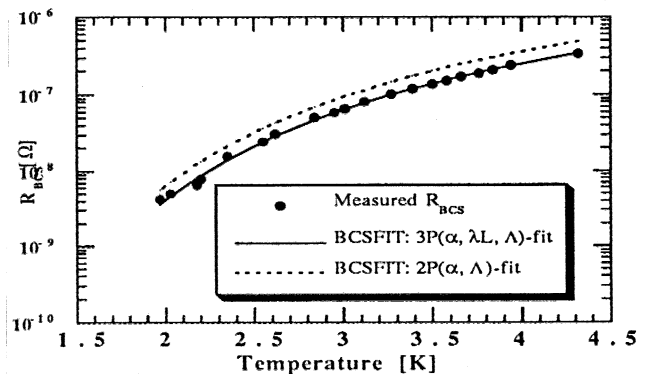


図4. 表面抵抗のBCSフィッティング
(2-パラメーターフィッティングと3-パラメーターフィッティングの比較)

して、その内の一つを自由パラメータとしてフィッティングしたのが図3である。それぞれ α, λ_L を自由パラメータとした場合、かなり良いフィッティングが得られるが、4Kと2K領域で合いが悪い。次に、2-パラメータ、3-パラメータフィッティングしたのが図4の結果である。色々フィットした結果、 $\alpha, \lambda_L, \Lambda$ の三つを自由パラメータとした場合、すべての温度領域で良いフィッティングが得られることが分かった。このBCSフィッティングの結果をもとに他の空洞の表面抵抗をもフィットした。結果を表1に示す。

3-2. ベーキング効果の物理的解釈

表1の結果から、超伝導体の性質を特徴付ける上で便利なGinzburg-Landauパラメータ： κ を計算してみる。それは次式で定義される。

$$\kappa = \lambda_{eff} / \xi \quad (2)$$

ここで λ_{eff} は、マイクロ波の実効的侵入深さであり、フィッティングから求めた λ_L と ξ_0 から次式で計算される。

$$\lambda_{eff} = \lambda_L \cdot \sqrt{\frac{\xi_0}{\xi}} \quad (3)$$

$$\frac{1}{\xi} = \frac{1}{\xi_0} + \frac{1}{\Lambda} \quad (4)$$

ここで ξ は平均自由行程 Λ を持つニオブの実効的なコヒーレンス長である。 κ の値により超伝導体は、第1種と第2種に次のように分類される。

$\kappa < 1$ 第1種超伝導体

$\kappa \gg 1$ 第2種超伝導体

表1に示された κ の値を見ると化学研磨および電解研磨のみの場合、 $\kappa = 0.41 \sim 1.2$ で比較的小さい値である。特に、電解研磨のみの場合は $\kappa \ll 1$ である。一方、140°Cでベー

表1. BCSFITによるニオブ超伝導体の物質パラメータ

Cavity treatment	f [MHz]	Tc [K]	α	λ_L [Å]	ξ_0 [Å]	Λ [Å]	CHISQ	λ_{eff} [Å]	κ
K-15 CP	1298.751	9.25	2.01	360	640	4520	4.970E2	385	0.69
K-15 EP	1298.233	9.25	1.73	206	640	3670	1.960E2	223	0.41
K-15 EP, 140°C baking	1297.124	9.25	1.96	197	640	42	3.058E2	794	20.1
K-16 CP	1298.894	9.25	1.81	333	640	850	3.709E2	441	1.21
K-16 EP	1298.37	9.25	1.68	182	640	5170	2.181E2	165	0.29
K-16 EP, 140°C baking	1298.16	9.25	1.71	156	640	100	1.421E2	424	4.90
JL-1 CP, 85°C baking	1298.3	9.25	1.87	338	640	800	5.047E2	453	1.28
JL-1 EP, 85°C baking	1292.081	9.25	1.80	175	640	1850	7.896E1	203	0.43
K-11 CP, 85°C baking	1300.2	9.25	1.82	298	640	240	1.835E2	571	3.27
K-11 EP, 85°C baking	1296.106	9.25	1.79	182	640	5550	2.632E2	192	0.34
P-6 CP	1488.43	9.25	1.76	360	640	825	1.115E2	259	0.72
P-6 CP, 140°C baking	1488.34	9.25	1.83	194	640	42	1.165E2	782	19.8
P-3 R-grade, CP	1496.3	9.25	1.79	280	640	248	9.438E1	530	2.97

キングした後では $\kappa \gg 1$ となっている。ニオブは第2種超伝導体と言われているが、そのふるまいは第1種に極めて近い。すなわち、140°Cのベーキングの前では第1種であったニオブの超伝導体特性がベーキングにより完全に第2種的に変化すると解釈できる。化学研磨した表面ではベーキング温度が85°C程度の低い場合でも $\kappa > 1$ となり、その変化が始まりかけている。

一方、空洞内表面では何が起きているのだろうか。ベーキングにより表面吸着ガスや酸化膜から格子間不純物がニオブバルク中に拡散することが考えられる。400K程度の温度領域の水素、窒素、酸素のニオブ中の拡散速度(D)からそれらの原子の拡散距離(r : $T=140^\circ\text{C}$, $t_0=40$ 時間)を次式を使って評価してみると水素で21mm、窒素で1.6Å、酸素で1300Åとなる。

$$D = D_0 \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{k_B T}\right) \quad (5)$$

$$r \sim \sqrt{D \cdot t_0} \quad (6)$$

表1から分かるようにマイクロ波の実効的侵入深さは200~800Åであり、ベーキング中に酸素がマイクロ波の侵入深さ程度の範囲に拡散して、第1種超伝導状態を第2種の超伝導状態に変化させると考えられる。超伝導物性では、第1種超伝導体には純金属が多く、その純度を下げることで第2種超伝導体に変換することがよく知られており、今回の解釈はそれと矛盾しない。

参考文献

- [1] K.Saito et al., Particle Accelerator, Vol. 60, pp. 193-217.
- [2] B. Visentini et al., in the Proc. of the EPAC '98.
- [3] P. Kneisel, in the proc. of the 9th Workshop on Superconductivity, to be published.
- [4] E. Kako et al., in this meeting.
- [5] L. Lilje, private communication
- [6] J. Halbritter, Z.HYS. 238, pp. 446 ff(1970).