

HIGH FIELD TESTS OF 1.3 GHz NIOBIUM SUPERCONDUCTING CAVITIES

Eiji KAKO, Shuichi NOGUCHI, Masaaki ONO, Kenji SAITO, Toshio SHISHIDO,
 Tsuyoshi TAJIMA, Masanori MATSUOKA*, Hajime MIWA**,
 Takafusa SUZUKI** and Hiroaki UMEZAWA***

KEK, National Laboratory for High Energy Physics
 1-1, Oho, Tsukuba-shi, Ibaraki-ken, 305, Japan

ABSTRACT

Four single-cell cavities prepared by various surface treatments have been tested repeatedly since 1991. A maximum accelerating gradient of 25.1 MV/m with a high Q_0 value of $\sim 10^{10}$ was successfully achieved after heat treatment at 1400°C. A temperature mapping system with a high thermal sensitivity under superfluid helium was developed to understand phenomena limiting a maximum accelerating gradient. The cavity performances and the phenomena at high fields are reported in this paper.

1.3 GHz ニオブ超伝導空洞の高電界性能

1、はじめに

1.3 GHz 超伝導加速空洞の開発の目的は、現在達成されている以上の高い加速電界 (> 25 MV/m) を実現し、将来のTeV領域での電子-陽電子衝突型線形加速器 (TESLA ; TeV Energy Superconducting Linear Accelerator) へ応用することである。より高い加速電界を実現するためには、現在の最大加速電界 ($E_{acc,max}$) の限界とそれを制限している現象を理解することが本質的に重要である。超伝導加速空洞の最大加速電界を制限する現象として、主に、マルチパクティング (multipucting)、熱的超伝導破壊 (thermal break-down)、電界放出電子 (field emission)、ニオブ中の水素の影響による Q_0 値悪化 (Q_0 -disease) などが知られている。その中で、現在、抑制するのが最も困難なのが、電界放出電子である。その原因として、空洞内表面上のゴミ、ホコリ、異物、表面処理時の化学的残留物、あるいは、溶接の不完全性やキズ、突起などによる表面の凹凸等が考えられる。これらの要因をできるかぎり排除することが、高加速電界達成のためのキーポ

イントである。我々は、1991年より空洞の低温性能測定を開始し[1,2]、4個のニオブ製シングルセル空洞について種々の表面処理法を適用し、その性能評価を行ってきた。また、最大加速電界を制限している現象を理解するために、空洞表面の発熱状態を観測する温度計測システムを開発した。最近の測定においては、TESLA への目標値である 25 MV/m の加速電界が電界放出電子による Q_0 値の悪化なしで達成された (図1)。ここでは、一連の測定における空洞性能の結果および高加速電界での現象について報告する。

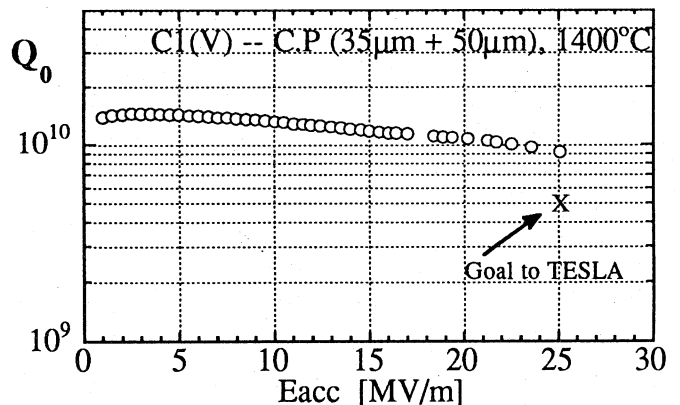


図1 Q_0 値と加速電界の関係
 (目標値を達成したC1空洞 (V) 測定において)

* ; 三菱重工業 (株) 神戸造船所
 ** ; 野村メッキ (株) 鹿沼工場
 *** ; 東京電解 (株)

2、性能測定の結果

これまでに、4個の空洞について18回の性能測定が行なわれた。測定は、通常、液体N₂での予冷を1晩かけて行なった後、4.2 Kの液体Heを減圧することにより1.8 K付近まで冷却し超流動状態において行なわれる。各測定における空洞の表面処理および達成された最大加速電界が表1にまとめられている。C1とC2空洞は、CEBAF（アメリカ）との研究協力で、M1とM2空洞は、MHI（三菱重工）との共同開発で製作された。空洞の表面処理は、電解研磨(E.P)あるいは化学研磨(C.P)によって行なわれ、超純水高圧洗浄(HPR)や陽極酸化(anodize)などが、時には試みられた。また、空洞の熱処理として、ニオブ中の水素ガスを放出するための760°Cアニール、ニオブの高純度化のための1400°Cアニールが行なわれた。

最大加速電界を制限する現象をField EmissionとQuenchに分類し、達成された最大加速電界の分布を図2に示す。Field EmissionとQuenchによる制限は、13 MV/mで明確に分けられる。ここにおけるQuenchは、空洞内での異常発熱あるいは放電などを原因とする瞬時の加速電界の消失を意味する。18回のうちの10性能測定において、13.6 MV/m以上の最大加速電界が電界放出電子によるQ₀値の悪化なく高いQ₀値で達成された。とくに、1400°Cアニール前におけるC1とC2空洞の最大加速電界が14~16 MV/mであったものが、1400°Cアニール後にはそれぞれ25.1 MV/mと20.5 MV/mへと著しく改善された。そして、それ以後、C2空洞については、20 MV/mの最大加速電界が表面処理法に依らずE.PでもC.Pでも再現性よく達成されている。一方、電界放出電子によるQ₀値の悪化が起こった空洞は、最大加速電界が12 MV/m以下に制限され、そのQ₀値も~10⁹以下に悪化する。ここでのその原因としては、表面の研磨不足、溶接不完全によるピットの存在、水洗(HPR)時の異物混入などが可能性のあるものとして考えられる。

電界放出なしで最大加速電界を達成した空洞測定におけるQ₀値と加速電界の関係を図3に示す(図1も参照)。最大加速電界を制限している現象は、これらの測定においてすべて同一であり、また、その後に見られるQ₀値の悪化も共通した現象である(詳細は、次章に記述)。図3において、C1(I)とC2(II)はクライオスタット内の残留磁場

表1 空洞の表面処理および測定結果

Cavity	Test	RRR	Surface Treatment	Annealing	Eacc,max
C-1	I	350	C.P (70μm)	no	14.3
	II		C.P (10μm+5μm)	760°C, 5 hours	15.5
	III		HNO ₃ , C.P (5μm)	no	x
	VI		C.P (25μm)	no	13.6
	V		C.P (35μm+50μm)	1400°C, 6 hours	25.1
C-2	I	350	E.P (120μm+5μm)	660°C, 24 hours	x
	II		C.P (30μm+5μm)	760°C, 5 hours	15.6
	III		no additional treatment		x
	IV		E.P (100μm+20μm)	1400°C, 4 hours	20.5
	V		E.P (30μm), HPR	no	20.4
	VI		C.P (35μm)	no	20.2
	VII		C.P (30μm), anodize	no	17.5
M-1	I	100	E.P (110μm+5μm)	750°C, 10 hours	x
	II		E.P (80μm), HPR	1400°C, 4 hours	x
M-2	I	200	C.P (100μm+5μm)	760°C, 5 hours	17.3
	II		E.P (100μm+30μm) Tumbling, HPR	765°C, 7 hours	x
	III		C.P (100μm+5μm)	760°C, 6 hours	x
	VI		E.P (100μm)+C.P (60μm)	1400°C, 6 hours	x

[x; limited by field emission] [Eacc,max; MV/m]

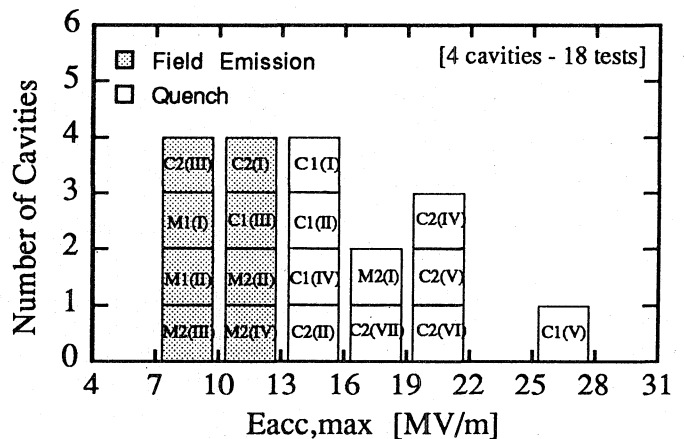


図2 最大加速電界の分布

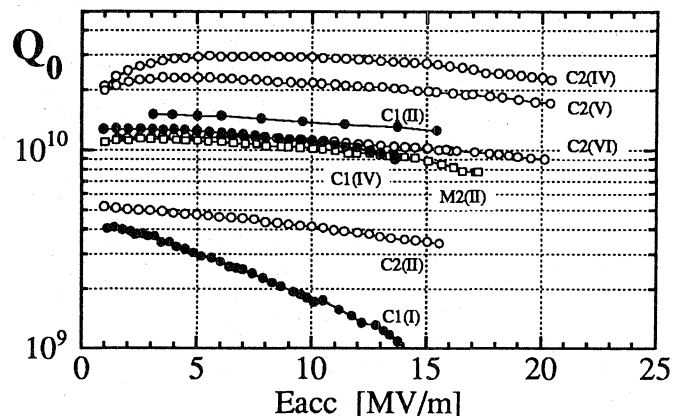


図3 Q₀値と加速電界の関係

が ~ 150 mGauss 存在していたために、その影響により残留抵抗値が $70 \sim 85$ n Ω と大きく、 Q_0 値が低い。磁気シールドを改善 (10 mGauss 以下) した結果、 10^{10} 以上の Q_0 値が得られるようになった。C1(I) は熱処理なしでの測定であり、加速電界の増加に対する Q_0 値の低下が著しいのは、ニオブ中に吸収されている水素の影響と考えられる。また、C2 空洞の 1400°C アニール後の測定 (IV, V, VI) において Q_0 値が段々と低下 (残留抵抗値が増加) しているのは、ニオブ中に吸収されている水素の量が引き続き表面処理により増加しているためと思われる。

3、表面温度計測システム

最大加速電界を制限している現象やその後に見られる Q_0 値の悪化現象をより詳細に調査するために表面温度計測システムを開発した。電界放出電子が空洞壁へ衝突することによる発熱や表面欠陥部での高周波損失による発熱は、空洞外表面に取り付けた多数の温度センサーにより観測することが可能である。

冷却能力の大きな超流動液体 He 中で、空洞の発熱による温度上昇を感度よく検出するために温度センサーとしては、次の2点が重要である。

1. ニオブ表面との熱接触をよくすること。
2. 周囲の液体 He に対する効率のよい熱絶縁。

温度センサーは、 51Ω のカーボン抵抗を熱絶縁のために STYCAST 中に埋め込み、ニオブ表面との接触面のみカーボンが剥き出しになるように削り取って製作され、低温での熱伝導率のよいワニスを用いてニオブ表面に接着される。この温度センサーの抵抗値の温度依存性を図4に示す。測定された個々の抵抗値 (R_n ; n 番め) は、 $\log R_n + K_n/\log R_n = A_n + B_n/T_n$ (A_n, B_n, K_n は、定数) により温度に換算され、液温との差を温度上昇とする。

2 K 以下の個々のセンサーの熱感度は、 $0.2 \sim 0.35$ mK/ Ω であるが、センサーの個性によるバラツキのために温度上昇を検出する相対的な感度は、 5 mK である。

1 子午線あたり 19 個の温度センサーを約 10 mm 間隔で図5に示すように固定基板を用いて配列し、方位角方向には 10° 毎にこの固定基板を取り付けた。総数で 684 個の温度センサーが空洞外表面に取り付けられている。表面温度の測定位置および空洞内の表面電界と表面磁界を 図5

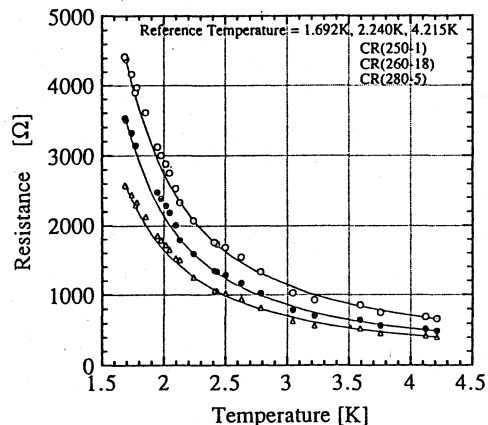


図4 カーボン抵抗の抵抗値の温度依存性

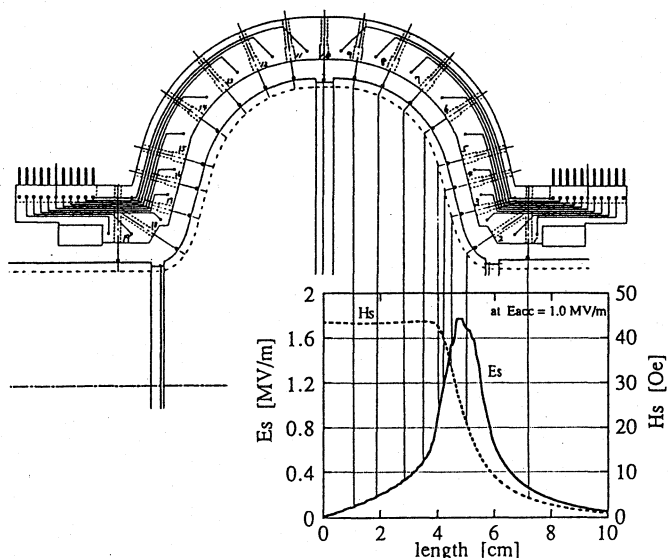


図5 表面温度の測定位置および空洞内の表面電界と表面磁界

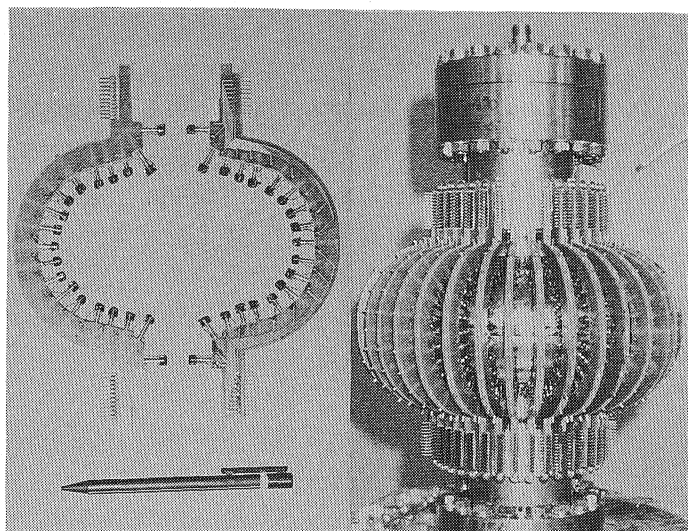


図6 (左) 温度センサー固定基板
(右) 温度計測装置を取り付けた空洞

に示し、図6には温度センサーおよび取り付け後の空洞の写真を示す。この表面温度計測装置のデータ処理システムは、参考文献[3]と同一であり、空洞全体の1スキャン時間は、約20秒である。

4、 Q_0 値悪化時の表面温度

最大加速電界を制限する Quench およびその後に見られる Q_0 値の悪化現象は、すべての測定において共通に観測されるものであり一般的に次のようにまとめられる。

- Quench の瞬間に空洞の周波数同調回路が共振周波数からはずれる。このとき、空洞の真空度の一時的な悪化および X線検出器の出力が観測される。現象が温度測定システムのスキャン時間より速いため温度上昇は観測されない。
- その後、 Q_0 値は徐々に悪化しはじめ、RF プロセスにより改善することはなく、 Q_0 値はさらに悪化する傾向がある。
- どの場合でも最終的には、8 ~ 10 MV/m の加速電界で 10^9 以下の Q_0 値にまで低下する。しかも低加速電界での Q_0 値も低下する。
- 測定後の空洞内面の目視点検では、表面状態の変化を発見することができない。空洞性能を回復するためには、15 μm 以上の研磨を要することが分かっている。

この現象における表面温度測定の代表例をそのときの Q_0 値と加速電界の関係と共に図7-a、b、c、に示す。いずれにおいても、 Q_0 値の悪化後にアイリス部での発熱が観測され、高周波電力の入力増加につれて、温度上昇も著しく増加し、発熱場所の数も増えていく。そして、最終的には、子午線に沿った尾根状の温度上昇が観測される。これらのことから、 Q_0 値の悪化の原因は電界放出電子であると思われる。したがって、最大加速電界において、空洞内のどこかで放電が発生し、電界放出電子の根源が産み出されたと考えられる。さらに、電界放出電子の空洞壁への衝突により表面汚染が成長していると思われる。この現象の正確な理解と解決が我々にとって緊急な課題である。

図7-d、e、には、電界放出電子により最大加速電界が制限されたときの表面の温度上昇を示す。ニオブの臨界温度程度までに達する非常に大きな温度上昇が図7-d、(D)(E)(F)に示されるように観測された。しかし、このとき発熱と冷却とが平衡にあり、安定な状態であった。

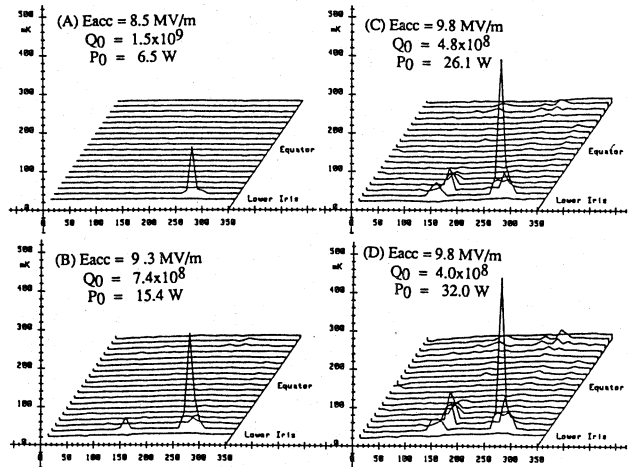
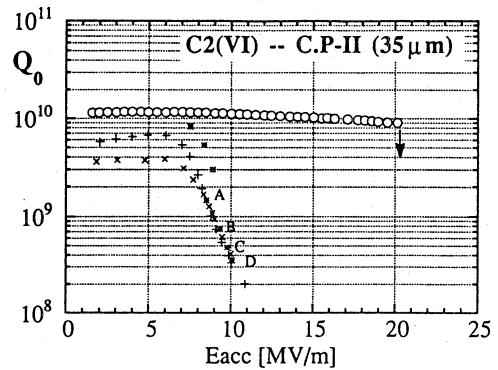


図7-a、C2空洞(VI)測定において

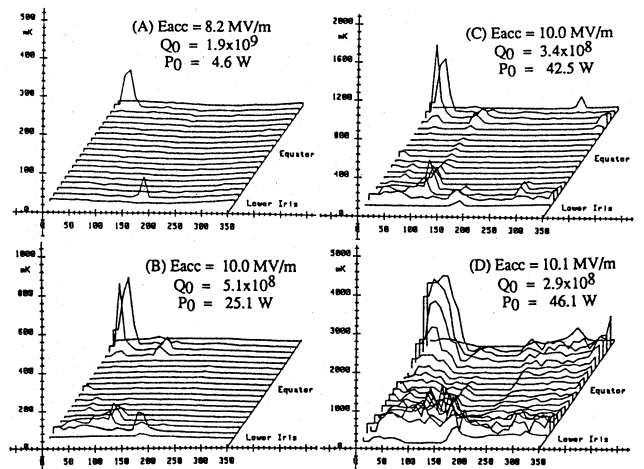
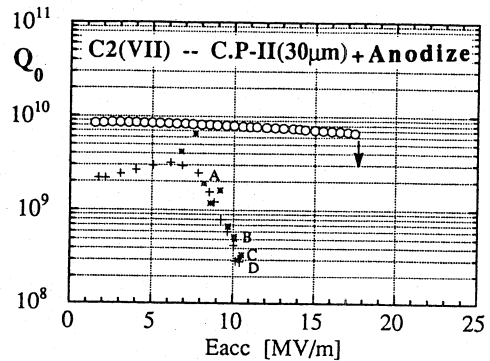


図7-b、C2空洞(VII)測定において

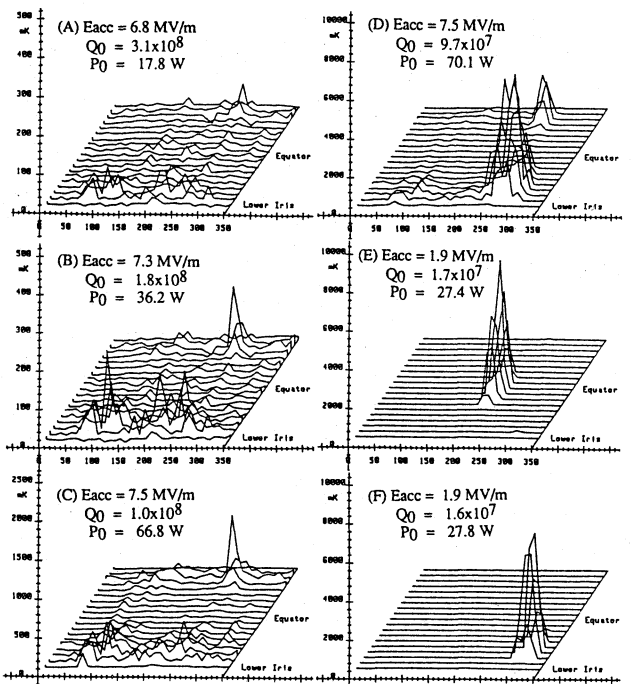
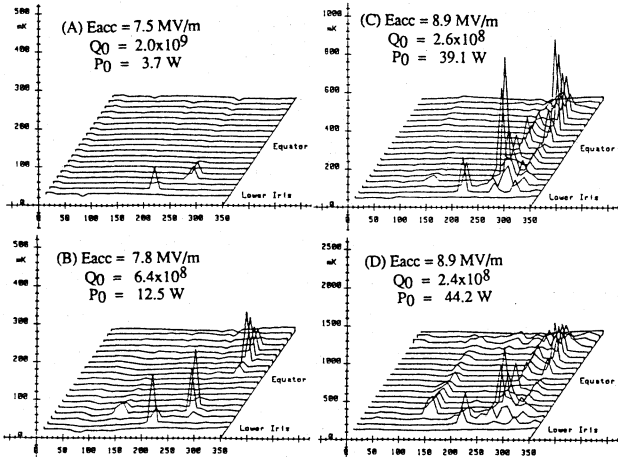
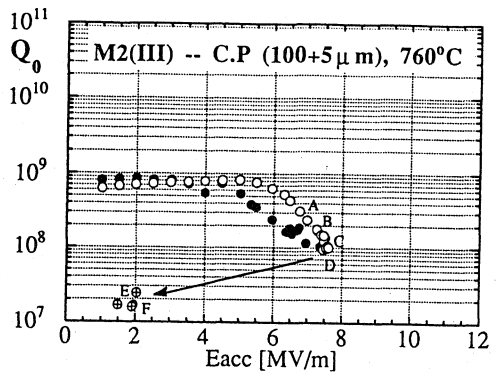
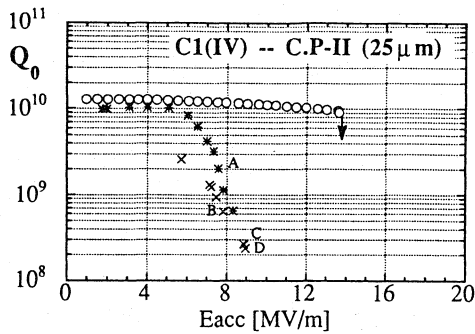


図7-c、C1空洞(IV)測定において

図7-d、M2空洞(III)測定において

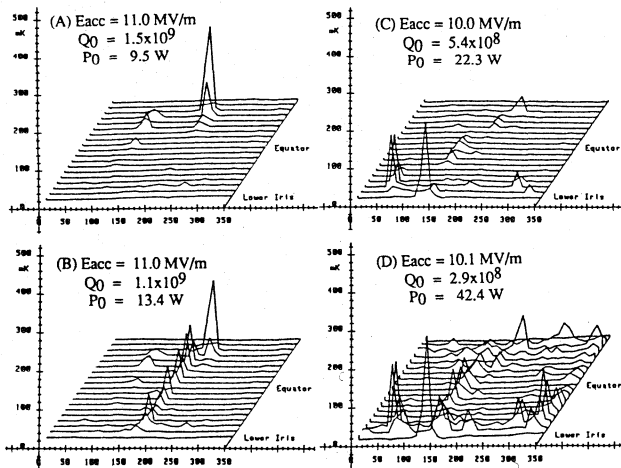
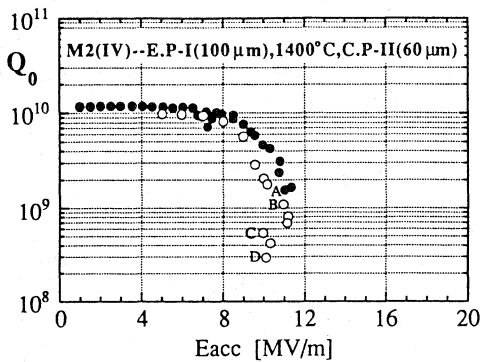


図7-e、M2空洞(IV)測定において

参考文献

- [1] E. Kako, et. al., "Development of L-band Superconducting Cavities at KEK", *Proc. of the 16th Linear Accelerator Meeting in Japan*, Sept. 1991, pp. 148-150.
- [2] E. Kako, et. al., "Test Results on L-band Superconducting Cavities for High Gradient Applications", *Proc. of the 17th Linear Accelerator Meeting in Japan*, Sept. 1992, pp. 79-81.
- [3] T. Tajima, et. al., "Temperature Mapping System Developed at KEK for Field Emission Studies on Superconducting Cavities", *Proc. of the 15th International Conference on High Energy Accelerators*, Hamburg, Germany, July 1992, pp.751-753.