

Characteristics of the Results of Measurement on 1.3 GHz High Gradient Superconducting Cavities

E. Kako, S. Noguchi, M. Ono, K. Saito, T. Shishido, T. Fujino, Y. Funahashi, H. Inoue, M. Matsuoka*, T. Higuchi**, T. Suzuki** and H. Umezawa***

National Laboratory for High Energy Physics (KEK)
1-1, Oho, Tsukuba, Ibaraki 305, Japan

ABSTRACT

The single-cell cavities with various RRR values (100, 200 and 350) were fabricated at CEBAF, KEK and MHI. These cavities were prepared by similar surface treatment; heavy first polishing of $>160 \mu\text{m}$, heat treatment at 760°C or 1400°C , and HPR with 85 kg/cm^2 . The maximum accelerating gradients ($E_{\text{acc,max}}$) of more than 25 MV/m have been reproducibly achieved in these cavities. The highest $E_{\text{acc,max}}$ of 35 MV/m was attained, and the lowest residual surface resistance of $6.2 \text{ n}\Omega$ was obtained. In this paper, the recent experimental results on the high gradient performance are reported.

1.3 GHz-高電界超伝導空洞における性能測定の結果

1. はじめに

高電界超伝導空洞は、電子陽電子衝突型線形加速器 (TESLA, TeV Energy Superconducting Linear Accelerator) をはじめとし、自由電子レーザーへの入射用電子線形加速器や核破砕用中性子源としての陽子線形加速器など広範囲な応用が考えられる。高エネ研では、この研究開発に1991年より着手し、これまでに単セルおよび9セルニオブ製超伝導空洞の作製、表面処理および真空熱処理技術の改善、低温測定における空洞性能評価などを行ってきた。これまでに行われた実験結果

(図1、参照) において、 25 MV/m 以上の高加速電界が再現性よく達成されるようになってきている。この領域では、超伝導空洞の加速電界は、空洞内表面に存在する表面欠陥などでのマイクロ波損失により制限されると思われる、より高い加速電界を達成するためには表面処理技術の向上とともに、この最大加速電界を制限する熱的超伝導破壊現象の理解も重要である。ここでは、異なる残留抵抗比 (RRR) のニオブ材料から製作された8個の単セル空洞に同様な表面処理を行い、その低温性能試験での高電界特性についての報告がされる。

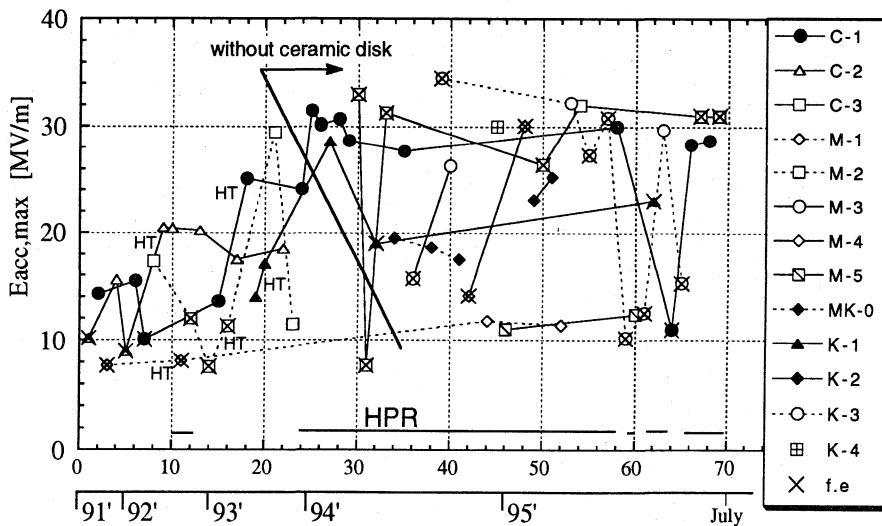


図1、達成された最大加速電界のまとめ (1991年~1995年7月)

*; Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. (MHI) **; Nomura Plating Co., Ltd. ***; Tokyo Denkai Co., Ltd.

2. 空洞および表面処理

製作された8個のニオブ単セル空洞の詳細が表1に要約されている。ニオブ材は、ヘラウス社(独)、東京電解(日)およびファンスチール社(米)より供給され、RRR値はそれぞれ100, 200, 350である。空洞は、ニオブ円板を金型による深絞り成形でハーフセル形状とし、電子ビーム溶接で接合することにより、CEBAF(米)、三菱重工業(MHI)および高エネ研で作製された。

これらの空洞について、次の様な表面処理が行われた。最初に160~300 μm の多量な表面研磨が電解研磨(C-1のみ化学研磨)により行われた。4空洞(MK-0, K-3, C-3, M-1)については、その前処理としてパレル研磨[1]が行われている。その後、水素脱ガスのための760 $^{\circ}\text{C}$ での真空熱処理(5時間)あるいはニオブの高純度化のための1400 $^{\circ}\text{C}$ での真空熱処理(6時間)が行われた。化学研磨による10~50 μm の最終研磨後、空洞は超純水により丹念に水洗された。どの空洞についても、圧力85kg/cm²の超純水高圧水洗(HPR)が1時間適用された[2]。

表面処理後、クラス10のクリーンルーム内で空洞は組み立てられ、真空引き、1夜の80 $^{\circ}\text{C}$ ベーキングに引き続き、低温性能試験が行われる。

3. 空洞性能の測定結果

3-a. 最大加速電界

空洞の低温性能試験の結果が、それぞれのRRR値ごとに図2に示されている。測定温度は、1.8 Kである。いずれの空洞においても、低加速電界での電界放出電子による Q_0 値の低下は見られない。これらの測定における最大加速電界はすべてクエンチ(熱的超伝導破壊)によって制限されている。以前みられたクエンチ後の著しい Q_0 値の悪化現象[3]は、入力結合器を支持していたセラミックの除去後、観測されなくなり改善された。通常、最大加速電界においては、超伝導破壊と冷却による自然復帰を繰り返す自己パルス化状態となる。クエンチ時の空洞の蓄積エネルギーの減衰時定数は、最大加速電界が高いほど短くなり、30MV/mのとき約150 μsec となる。表面温度計測により、半径約4 cm (~50cm²)の範囲がクエンチ時に常伝導状態になっているのが観測された(C-1)。これらの空洞は繰り返し測定を行っており、達成された最大加速電界がRRR値の関数として図3に示される。RRR値が200の空洞でも350の空洞と

表1、ニオブ単セル空洞

cavity	niobium sheet			fabrication forming / EBW	heat treatment
	RRR	t [mm]	maker		
MK-0	100	2.5	Heraeus	MHI/KEK	760 $^{\circ}\text{C}$, 5h
M-3	200	2.0	Tokyo Denkai	MHI	760 $^{\circ}\text{C}$, 5h
M-4	200	2.5	Tokyo Denkai	MHI	760 $^{\circ}\text{C}$, 5h
K-3	200	2.5	Tokyo Denkai	KEK	760 $^{\circ}\text{C}$, 5h
C-3	350	3.2	Fansteel	CEBAF	760 $^{\circ}\text{C}$, 5h (at Nomura Plating)
M-1	100	2.5	Heraeus	MHI	1400 $^{\circ}\text{C}$, 4h (at CEBAF)
K-1	200	2.5	Tokyo Denkai	KEK	1400 $^{\circ}\text{C}$, 6h (at Tokyo Denkai)
C-1	350	3.2	Fansteel	CEBAF	1400 $^{\circ}\text{C}$, 6h (at Tokyo Denkai)

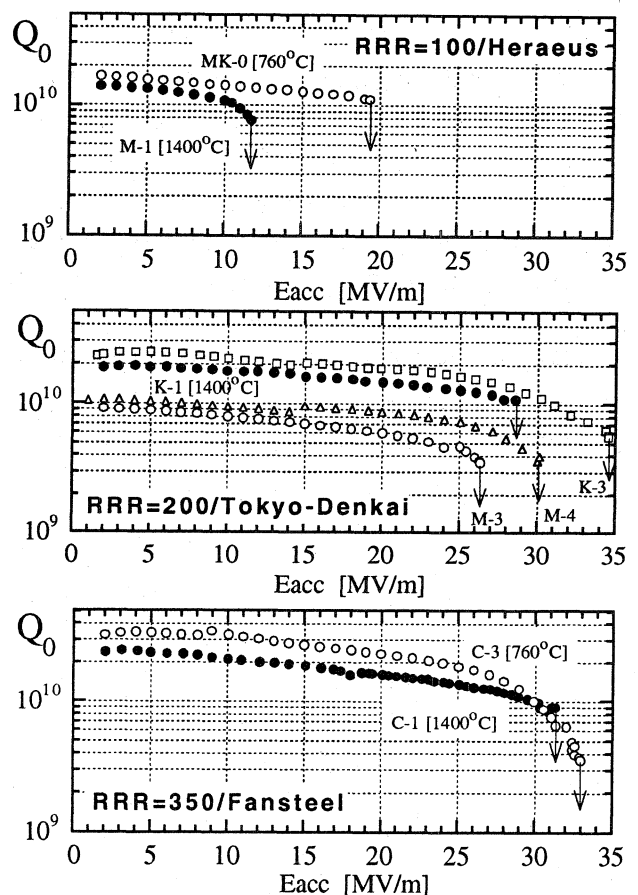


図2、 Q_0 - Eacc 曲線

同様に、25MV/m以上の高加速電界が再現性よく達成されており、特にK-3空洞では35MV/mの最大加速電界が得られている。また、熱処理の温度による空洞性能の差はみられない。RRR=100の

M-1空洞の性能が低い原因として、赤道部付近での著しい発熱が観測されていることから、電子ビーム溶接の不完全が考えられる。

3-b. 残留表面抵抗

残留抵抗の主な原因として、端板などの常伝導部品による損失、残留磁束のトラップ、表面欠陥および汚染酸化膜などが考えられる。計算により見積られる端板での損失は約 $0.5\text{n}\Omega$ であり、クライオスタット内の残留磁束は、 15mG である。各空洞測定における低電界 ($2\sim 4\text{MV/m}$) での残留抵抗値が図4に示されている。この図において、RRR値が大きくなるほど残留抵抗値は小さくなる傾向、および 1400°C での熱処理をした空洞の方が残留抵抗値が大きくなる傾向がみえる。また、表面計測装置 (Temp. map.) を取り付けただけの場合には、磁性体部品 (スプリング) を多数使用しているために残留磁束が増え、残留抵抗値が増加している。この場合には、残留磁束のトラップが残留抵抗の主成分となり、 $(1/\text{RRR})^{0.5}$ の依存性 (図中の実線) がみられる。

3-c. 最大加速電界の温度依存性

最大加速電界を制限している熱的超伝導破壊現象を理解するために、最大加速電界の温度依存性が調べられ、図5に示されている。 λ -pointの前後で大きな変化が起こるのは、常流動ヘリウム (He-I) と超流動ヘリウム (He-II) とで冷却のメカニズムが異なることに起因する。また、 λ -pointの前後でクエンチの起こる場所が移動することが、表面温度計測により観測された。一度室温まで昇温後、冷却して再測定を行った時にも、クエンチの場所が変化することが確認された。このように 30MV/m 以上の高電界では、空洞内表面の温度分布が非常に微妙な熱平衡状態にあると考えられる。

4. まとめ

$\text{RRR} > 500$ のような高純度ニオブ材料や 1400°C の高温高真空熱処理を用いなくても、 $\text{RRR} = 200, 350$ のニオブ空洞において 30MV/m 以上の高加速電界が達成できることが単セル空洞について示された。実機サイズの9セル空洞においても同様な性能を達成することが、今後の課題である。

「参考文献」

[1] 樋口玉緒ほか, "パレル研磨によるニオブ超伝導空洞の性能", 本研究会において。

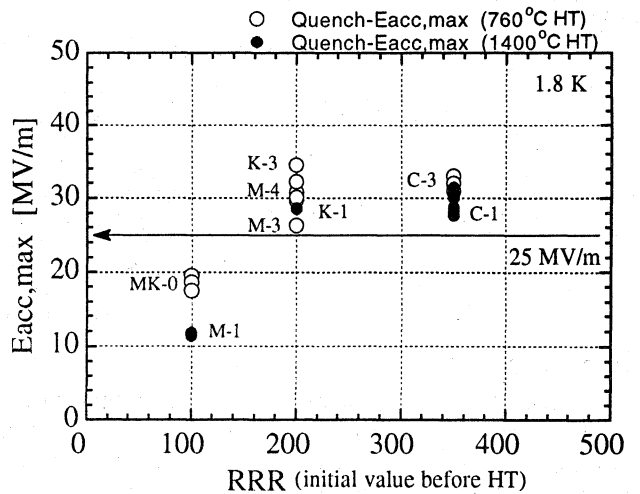


図3、最大加速電界 ($E_{\text{acc,max}}$)

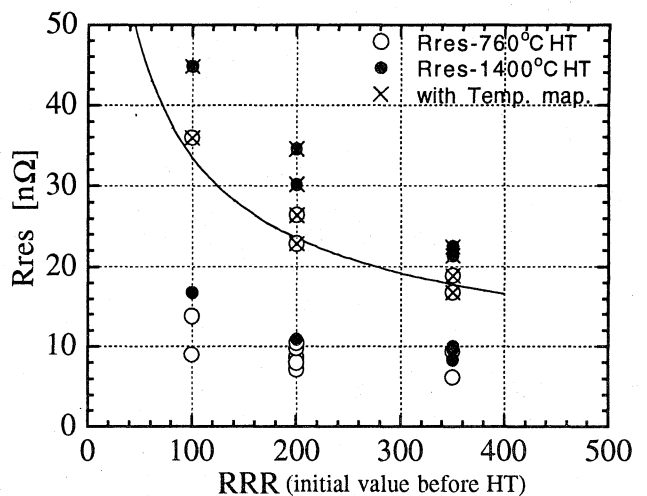


図4、残留表面抵抗 (R_{res})

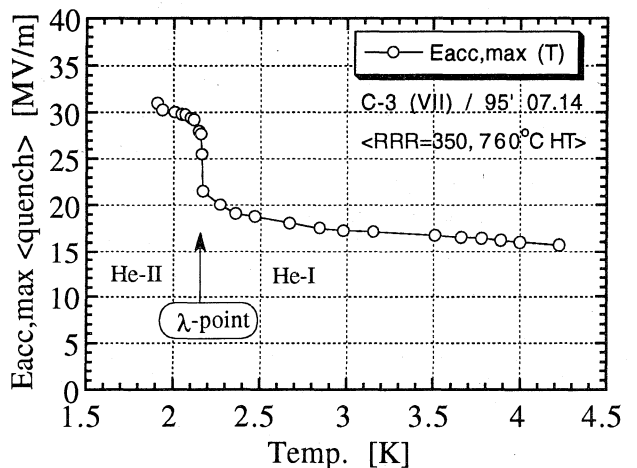


図5、最大加速電界の温度依存性

- [2] 斎藤健治ほか, "汚染されたニオブ超伝導空洞表面に対する高圧水洗の空洞性能効果", 本研究会において。
- [3] 加古永治ほか, "1.3 GHz, ニオブ超伝導空洞の高電界性能", 第18回リニアック技術研究会 (1993) p327-331。