

# Present Technology Status of Superconducting Cavities for TESLA

Kenji Saito

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

## Abstract

A TeV region electron positron linear collider is considered as the next energy frontier particle physics. KEK has decided the JLC project as a future plan and R & D has been started for the normal conducting linear collider. The similar machine with superconducting cavities (TESLA) has been proposed also in the superconducting accelerator field. The superconducting version has many merits with beam requirement due to the extremely low energy dissipation. If the accelerating field gradient is improved to 25 - 30 MV/m and the fabrication cost is reduced much more, TESLA can be a promising future machine. This paper describes the current technology status with the high field of superconducting cavities.

## TESLA に向けての超伝導空洞の開発状況

### 1. はじめに

超伝導空洞の加速器への応用は、ストレージリングでの大規模実用化 (TRISTAN, DESY) を契機に、今後、ますます増加する傾向にある。その用途はストレージリングのみならず、原子核の精密実験用の線形加速器 (CEBAF)、自由電子レーザー (INFN, JAERI) や B-Factory 用の大電流加速器へと幅を広げつつある。また、現在の技術のもとで、高い信頼度で得られている 10 MV/m の加速電界が、さらに、25-30 MV/m まで向上されるなら、KEK の将来計画とされている TeV 領域での電子・陽電子衝突型線形加速器 (JLC) の超伝導版とすべき TESLA (TeV Energy Superconducting Linear Collider) もまた、エネルギーフロンティアの加速器候補と成り得る。こうしたことから、最近、超伝導加速器の研究者は、超伝導加速空洞の発生電界をいつそう向上しようと精力的に研究を行っている。ここでは、Cornell 大学、CEBAF、KEK、Saclay での開発研究の状況をレビューし、超伝導加速空洞での高加速電界の現状を明らかにしたいと思う。

### 2. 超伝導加速空洞での発生電界の制限

まず、超伝導加速空洞の加速電界には理論及び、技術上、どのような限界があるかを簡単に述べる。

#### 理論的限界

理想的なニオブ表面では、空洞内のマイクロ波が作る磁場の強さが、ニオブの臨界磁場 ( $H_c = 2000 \text{ Gauss}$ ) を越えると超伝導破壊 (クエンチ) が起きる。一方、空洞中心軸上の加速電界の強さ ( $E_{acc}$ ) と、空洞表面最大磁場 ( $H_{sp}$ ) の比は、超伝導空洞の場合、おおよそ  $40 ( \text{Gauss/MV/m} )$  である。従って、理論的限界値を与える式は以下ようになる。ニオブ空洞では、50 MV/m 程度が理論的限界である。

$$2000 (\text{Gauss}) = H_{sp} = 40 \times E_{acc} (\text{MV/m}) \dots (1)$$

#### 技術的限界

空洞の内表面は、表面処理がなされ、かなりクリーンな面に仕上げられていると言え、理想的な表面状態とはかなり異なっている。異種金属の混入、表面欠陥、表面処理での化学的残留物、ゴミ、ホコリなどの表面汚染物が存在する。例えば、表面欠陥部での発熱によりクエンチを起こす場合もある。しかし、この種のクエンチは、極低温でのニオブ材の熱伝導率を向上させることでかなり緩和される。近年、加速電界が、10 MV/m まで向上した一つの理由はここにある。

現在、空洞の加速電界を制限しているのは、Field emission と Multipacting であると考えられる。前者は、マイクロ波による表面電場の作用で量子トンネル効果により、表面汚染物やゴミから放出された電子が空洞内に蓄積されたマイクロ波で加速され、最後には空洞壁に衝突してエネルギーを消費する現象である。後者は、そのような種から出た電子が、マイクロ波の周期と同期して再び同じ場所あ

るいは、面対象な別の場所に何度も衝突し、二次電子を発生させ、もし衝突場所の二次電子放出係数が1より大きい場合、電子の数が増殖される。そして、その電子が空洞内の電磁エネルギーを消費する現象である。Multipacting は、空洞の形状をうまく選べば押さえることが出来る。今日、超伝導空洞の断面が丸い形をしているのは、そうすることで one-point multipacting が避けられるからである。但し、two-point multipacting のような高次のモードに対しては、この形状では不十分である。しかし、何れにしても、これらの対策にはゴミの無い清浄な表面にすることが本質的であり、表面処理技術が重要である。また、ゴミ対策として超純水や、クリーンルーム組立のような半導体技術が導入されている。

### 3. 高加速電界の研究

ここでは、加速電界を向上させるためにL-バンドのRF-周波数(1.3 - 1.5 GHz)を使って研究している研究所を紹介する。

#### 3.1 Cornell 大学

Cornell 大学では、主に 1.5 GHz のニオブ単空洞を使って精力的に研究されている。彼らの考え方は、現在、一般に使われている表面処理(化学研磨、電解研磨)では、超純水洗浄やクリーンルーム組立を導入しても field emission や multipacting は避けきれないとして、その対策を捜す方法を取っている。最近見つかった方法は、次の二つである。

##### 1) 超高真空高温熱処理

空洞を化学研磨(BCP)した後、超高真空炉の中で1500°Cの高温で焼鈍する方法である。その際、空洞の外側には、焼鈍中、炉内の残留ガスをニオブが吸収して材料の劣化を起こさないように、ゲッター作用材料としてチタンでくるみ、更に、チタンのペーパーが焼鈍中、空洞の内面を汚染しないように、その内外面を隔離する[1]。第1図に示すように、この方法で 23 - 30 MV/m の加速電界が信頼性よく得られる。

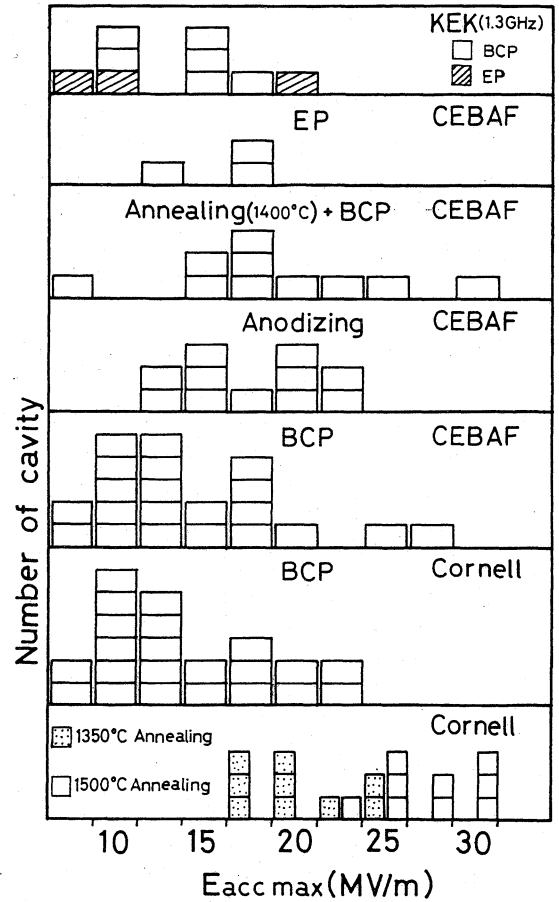
##### 2) 高電力パルスエージング

空洞性能測定時に 2-200 Kwatts x 100 μm - 1 msec(pulse width) のパワーで RF-パルス・エージングをする方法である。クライストロンの制約から、この研究は S-バンドのニオブ空洞を使って行われている。単空洞では 17 - 29 MV/m、9-セル空洞では統計的に 15 - 20 MV/m の加速電界が得られている。また、つい最近では 35 MV/m の加速電界が達成されたと言う報告もある[2]。

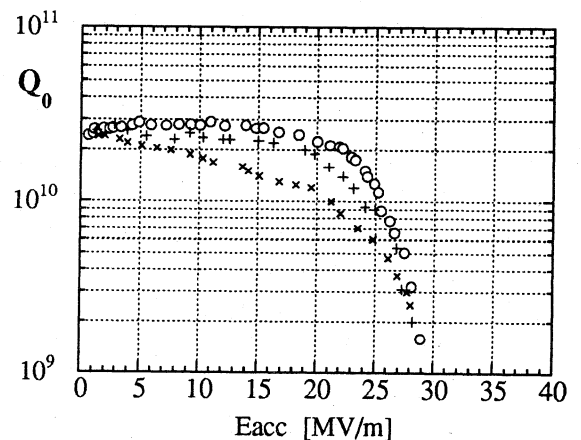
1) の方法は、ニオブ材が柔らかく成るので、機械的強度に問題が発生すると懸念されるが、2) は、それ用のインプットカプラーを付けて於けば、空洞を実際の加速器に並べた後でもできる点で非常に注目される方法である。

#### 3.2 CEBAF

CEBAF は、今や常識となっている a) 高純度ニオブ材の使用(RRR>250)、b) 超純水洗浄や、c) クリーンルーム組立のテクノロジーのもとで、これまで知られている色々な化学的表面処理法(化学研磨、電解研磨、陽極酸化)、超高真空高温熱処理法によって得られる空洞性能の比較及び、表面処理方法の改良を行っている。この研究では、Cornell 大学と同じ周波数、同じ形状のニオブ単空洞が使われている。第1図は、表面処理法に対する空洞性能の比較を示す。超高真空高温熱処理法に関しては、その処理後、再び化学研磨が成されている点が Cornell 大学と異なっている。第1図から分かるように、化学研磨では Cornell の結果と同じように、統計的に 10-15 MV/m で加速電界が制限される。1400°Cの熱処理した後、化学研磨をすると加速電界は 15-17 MV/m に向上する。第3図は、CEBAF での単空洞のベスト記録である。何れも処理工程(X:化学研磨のみ、+:半分割セルの1400°C熱処理 → 電子ビーム溶接 → 化学研磨、o:1400°C熱処理 → 化学研磨)



第1図 化学研磨 (CP)、電解研磨 (EP)、陽極酸化法及び、超高真空高温熱処理法を施して得られたL-バンド・ニオブ空洞の最大加速電界の比較。横軸は、それぞれの空洞の最大加速電界を、縦軸は、空洞の個数を表している。



第2図 CEBAFの1.5 GHz ニオブ・単セル空洞で達成されたベスト記録。x印は化学研磨のみを施した場合の結果を、+印は空洞製作時、半割セルで1400°Cでの超高真空熱処理した後、電子ビーム溶接で接合した空洞に化学研磨を施した場合を、o印は1400°Cでの超高真空熱処理後、化学研磨を施した場合に得られたものである。

は異なっているが、最後は化学研磨されている。このように、空洞によっては化学研磨でも 28 - 29 MV/m の加速電界が得られることもある。陽極酸化法 (Anodizing) では、化学研磨に比べて加速電界が少し向上する(第1図)。また、電解研磨 (EP) に関しては、統計性に欠けるが、18 MV/m 程度まで向上する傾向が見える。これは、電解研磨では表面がなめらかなために、表面処理時の水洗工程で化学的残留物が少ないためと考えられる。

### 3.3 KEK

KEKでは、TESLAの加速器パラメータのプロポーザール [3] にもとずき、1.3 GHz のニオブ空洞を使って高加速電界の研究を一昨年度より開始した。まず、TRISTAN で養われた空洞製作技術と RRR>300 の高純度ニオブ材を使ってどこまでフィールドが上がるかを調べている。また、表面処理法に関して、化学研磨と電解研磨による空洞の性能比較が成されている。第1図にその結果が示されている。第3図には、最近の性能測定結果が示されている。その図の中で、C-2 は 1400°C で真空熱処理され、さらに電解研磨で軽く仕上げ研磨 (20 μm) された空洞である。そうした方法により、2Kで 2-3 x E10 の非常に高いQ値と 20 MV/m を越える加速電界が得られた。M-2, C-1 は化学研磨 (熱処理なし) された空洞である。それらのQ値が低い理由は化学研磨中ニオブが吸収した水素の影響と考えられる。KEK では、化学研磨、電解研磨のいずれにも Field emission は観測されない (Field emission が起こると加速電界の増加と共にQ値が指数関数的に低下するのが観測される)。しかし、最高加速電界でクエンチした後、Q値が低いフィールドでも下がり、その後のRF-エージングでは、益々劣化する現象が見られる [4]。現在、この原因解明を急いでいる。その原因の一つとして Multipacting (空洞の赤道部で起こる) が疑われ、その種を無くするために高圧水洗も試みられている [5]。

### 3.4 Saclay

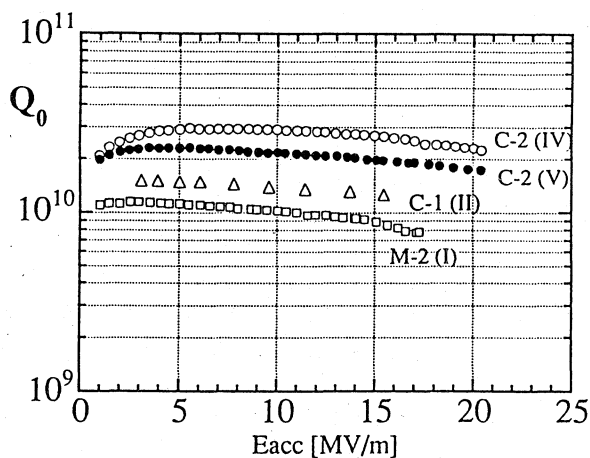
Saclay では、Field emission 対策として、表面処理中に空洞内に持ち込まれるゴミを減らす研究を行っている [6]。特に、アルカリ脱脂工程でたくさんのゴミが持ち込まれる事が指摘されている。また、外界からのゴミの侵入を防ぐために、化学研磨とその後の水洗工程をクリーンな隔離された部屋で行い、更に、その全処理工程で一度も空洞内表面を外に曝すことの無いように空洞内面のみを処理する方法を取っている。1.5 GHz のニオブ単空洞で、その方法で Field emission を伴うことなく 22 MV/m の加速電界を達成している。

## 4. 結論

以上に述べたように、TESLA で有望視されているRF-周波数帯(L-バンド)でのニオブ超伝導空洞では、現在の表面処理技術の改良、あるいは、新しい方法の導入と言った両面からの研究がなされ、20 MV/m の加速電界はほぼ手中に納められつつある。更に、ここ2-3年で急激な発展が期待でき、TESLA の目標とする 25-30 MV/m の加速電界の達成も夢では無くなっている。

## 参考文献

- [1] H.Padamsee et. al. ;Proc. of the 4th Workshop on RF Superconductivity,KEK,Tsukuba,Japan,August,1989,P.207
- [2] H.Padamsee ;To be published in the 3rd European Particle Accelerator Conference,Berlin,March,1992
- [3] S.Noguch ;Proc. of the 2nd European Particle Accelerator Conference,Nice,June,1990,P.303
- [4] E.Kako et. al. ;Proc. of this meeting
- [5] H.Miwa et. al. ;Proc. of this meeting
- [6] C.Z.Antoine et. al. ;Proc of the 3rd European Particle Accelerator Conference,Berlin,March,1992



第3図 KEK 1.3 GHz ニオブ・単セル空洞の最近の結果。横軸は加速電界を、縦軸はQ値を表している。□印は RRR=200 のニオブ材を使った空洞に化学研磨した場合を、△印は RRR=370 の空洞に化学研磨した結果を、○印は RRR=370 の空洞を1400°Cの超高真空熱処理後、20 μm の電解研磨した場合の結果を、●印は○印の空洞をさらに 30 μm 電解研磨した場合の結果である。