

Yuzo KOJIMA

National Laboratory for High Energy Physics

Abstract

Following to the continuous fundamental research on the superconducting cavities during these twenty years, there has been substantial improvement in the performance of the superconducting cavities in these two or three years. For example, accelerating field gradient of superconducting cavity has been upgraded by a factor of two in these two years. Also the reliability of the SC-cavity has been much improved. The reasons for these improvements are; improvement of diagnostics as the temperature measurement of cavity wall, improved cavity fabrication techniques as electron beam welding, progress of surface treatment techniques, development of pure niobium with high thermal conductivity.

Development of cavities with other material than niobium is also noteworthy,  $Nb_3Sn$  and  $CuNb$  cavities have just started in recent years to compete with bulk niobium cavity. Especially  $CuNb$  cavity seems to be promising.

(I) 加速電場の向上

1960年代に始まった超伝導高周波空洞の研究は、その後約20年の間にいろいろな変遷があったが、その間の基礎的な研究の積み重ねの結果、ここ2~3年の間に注目すべき進歩があった。例えば現在電子の加速に超伝導空洞を使う計画として、Wuppertal-Darmstadtの130 Mev Recyclotronや、CERNのLEP、DESYのHERA、KEKのTRISTANの三つのストレージリングがあるが、これらの計画に使われる周波数350 MHzから3 GHzまでの空洞の加速電場の強さを、現在と2年前とを比較したのがFig. 1である。各々の研究所で何れも2年間に約2倍の加速電場の向上がみられる。Fig. 1はsingle-cellで得られた値であるが、実際にmulti-cellの構造を使って電子の加速を行った場合に得られた電場を年次毎に示したのがFig. 2である。1983年迄は約10年間以上にわたって2~3 MV/mに止まっていた加速電場の強さが2年前から5~6 MV/mの値が得られるようになった。

(II) 空洞の信頼性の向上

例えば1972~1973年にStanford大学のHEPLで測定されたS-band single-cellの $Q_0$ 値と表面での磁場 $H_{peak}$ をFig. 3に示す。殆ど同じ手法で製作、表面処理をしたにもかかわらず、 $Q_0$ 値は2桁以上、 $H_{peak}$ はfactor 6の広い範囲にばらついている。それに対し1980~1984年にKEKで測定された500 MHz single-cellの $Q_0$ 値と $H_{peak}$ をFig. 4に示した。 $Q_0$ 値でfactor 1.5、 $H_{peak}$ でfactor 2.2の範囲に入っている。このように近年では一定の方法で空洞を製作した時の性能の信頼性が良くなったと言える。

(III) 空洞の性能向上の理由

空洞の性能や信頼性が近年向上した理由をあげると次のように考えられる。

(A) 空洞診断法の進歩

例えば空洞内の電場を上げて、空洞がbreak downした場合に、空洞内で何が起きているかを知る方法が従来は殆ど無かったが、最近では各種の診断方法が発達して多くの情報が得られるようになった。その良い例が空洞壁の温度測定である。1972年にStanford大学でS-band空洞のbreak down時の温度測定が初めて行われてから、空洞壁の一部が局所的に発熱することが知られていたが、この方法を改良して(感温素子と空洞壁の熱伝達の改善、sub-cooled He中での測定による感度の向上、エレクト

トロニクスの進歩など) 1980年以後感度のよい温度分布図が得られるようになった。その結果単に break down の原因となる局所的欠陥の場所を知るだけでなく、電界放出電子の軌跡、汚れや外部磁界などにより低い電場で既に見られる発熱など豊富な情報が得られる。

#### (B) 空洞製作、表面処理技術の進歩

##### a. Nb の電子ビーム溶接

空洞の溶接部に欠陥があり break down の原因となることが多いが、近年電子ビーム溶接法の改善により、欠陥の少ない滑らかな溶接シームが得られるようになった。その方法は例えば i) defocused beam ii) inner gun iii) rhombic raster などによる溶接である。

##### b. Nb の表面処理

特別に新しい表面処理法が開発された訳ではないが、表面研磨条件の適切な設定方法や、研磨後の洗浄、組立方法に次のような進歩が見られる。

###### i) 化学研磨

従来の研磨液、弗酸：硝酸 = 4 : 6 の代わりに弗酸：硝酸：磷酸 = 1 : 1 : 1 又は 1 : 1 : 2 の液を使い、研磨速度を遅くして発熱を減らし、研磨のコントロールが容易になった (CERN, Wuppertal など)。

###### ii) 電解研磨

研磨液の化学組成や温度、電流密度の影響が詳しく研究され、特に研磨液の化学組成を適正值に保つ方法が見い出されたことは大きな進歩である (KEK)。

###### iii) 洗浄、組立

化学処理の後の洗浄に使う水やメタノールのフィルターによるゴミの除去、又組立をゴミの少ない環境 (例えばクラス100のクリーンルーム中) で行うことの重要性が認識され、半導体工業で使われる手法が用いられるようになった。

#### (C) Nb の熱伝導度の向上

空洞内電場の上限の制約は殆どの場合所謂 Thermal instability と呼ばれる現象による。局所的に小さな欠陥があると高周波の損失がその部分に集中し、その発熱によって欠陥周辺の Nb の温度が上がり、遂には臨界温度を越えて break down を生ずる。発熱は Nb の空洞壁を通じて液体ヘリウムにより冷却されるので、Nb の熱伝導が良くなければ同じ欠陥があったとしても電場の上限は更に上がる筈である。Cornell 大学の H. Padamsee はこの仮定に基づき simulation による計算を行った。Fig. 5 に彼の計算と実験値との比較を示す。Nb の低温での熱伝導度は精密な測定が厄介なので、それと正比例する量 RRR (常温と 4.2 K との電気抵抗の比) をパラメータとしている。

Nb の RRR 値に大きな影響を及ぼすのは Nb 中の不純物、特に O、H、N、C、などであることが知られているので、不純物の少ない Nb の開発が進み、1983年には従来より数倍高い RRR 値を持つ Nb が市販されるようになった。製作法の主な相違は真空度の良い溶解炉で、溶解を繰り返す点である。Fig. 6 に多次溶解による RRR 値の向上を示した。又 H. Padamsee の提案した方法としてイツトリウムやチタンなど、酸素に対しゲッター作用をもつ物質で Nb を包み、真空中で加熱して RRR 値を上げるやり方もある。Fig. 7 にその方法による RRR 値の改善を示した。

Nb の熱伝導の改善により、加速電場が向上したが、Nb の純度が上がることによる demerit もある。その一つは高周波表面抵抗の増加である。表面抵抗  $R_s$  は周波数、温度、エネルギーギャップの関数であるが、又 electron mean free path, London penetration depth, coherence length にも関係があり、mean free path が大きくなると 4.2 K での Nb の  $R_s$  は増大する傾向にあり、即ち RRR 値の改善は空洞の Q 値の低下をもたらす。又 Nb の純度が上がると機械的には軟らかくなり、また耐力が下がるので空洞の機械的設計に考慮を必要とする。

#### (I-V) Nb 以外の空洞、Low $\beta$ の空洞

Nb 以外例えば Nb<sub>3</sub>Sn や CuNb 空洞の性能も Nb 空洞と競争出来る水準に達した。例えば Wuppertal 大学の 3 GHz の Nb<sub>3</sub>Sn 空洞は加速電場 7.2 MV/m に達している。又 CERN の Cu に Nb 薄膜を sputter した 500 MHz 空洞では 8.6 MV/m を得ており、Cu の低温での熱伝導は Nb より遥かに良いので、CuNb 空洞では未だ break down が観測されたことはない。まだ Nb の表面状態に問題があるので空洞の Q 値はそれ程良くないが、将来 CuNb 空洞の発展により、例えば現在の Nb 空洞のような bath cooling の冷却法に代って、CuNb 空洞に直接取り付けられた Cu パイプに液体ヘリウムを流す冷却方式がとれる可能性がある。

位相速度の小さい low  $\beta$  の空洞については特に米国で研究が盛んであり、アルゴン国立研究所における数年間にわたる重イオン加速用空洞の歴史はその良い例である。

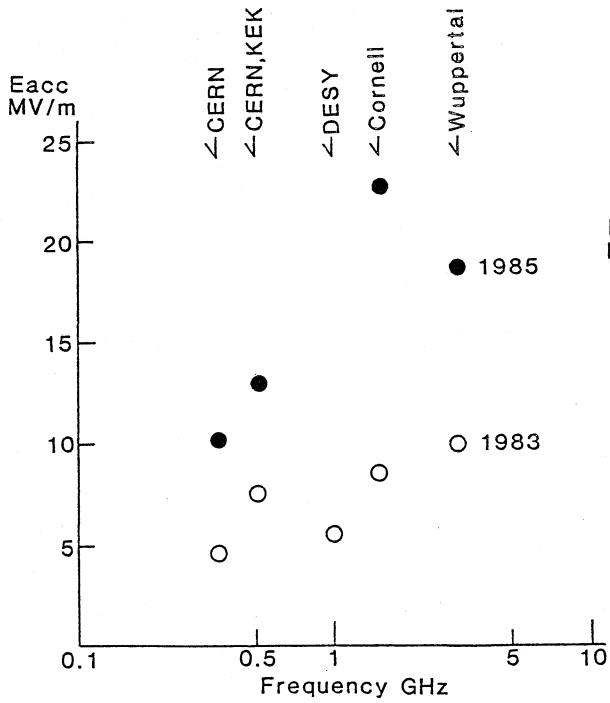


Fig. 1 Accelerating field gradient of Nb single cell (best value).

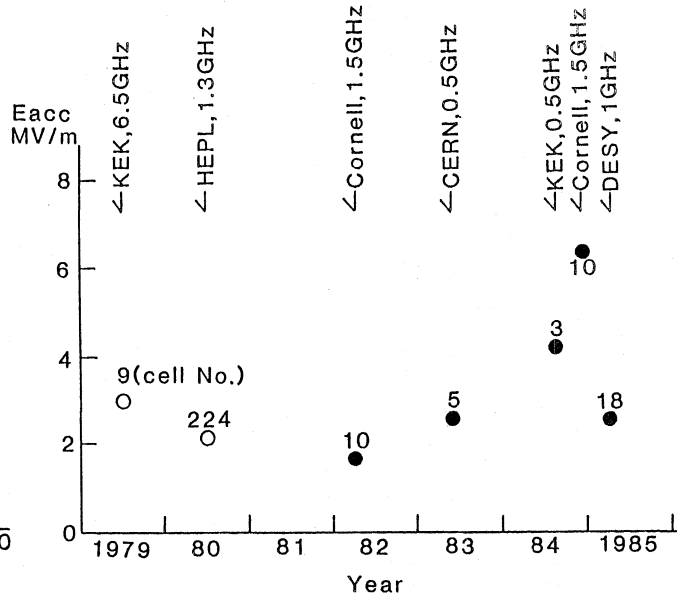


Fig. 2 Accelerating field gradient of multi-cell in beam test.  $\odot$  Linac  $\bullet$  storage ring

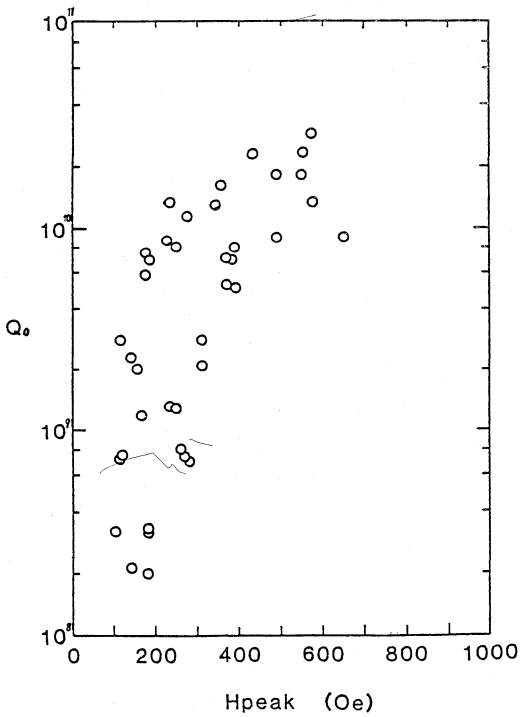


Fig. 3  $Q_0$  and  $H$  peak of S-band cavity (1972 ~ '73, HEPL).

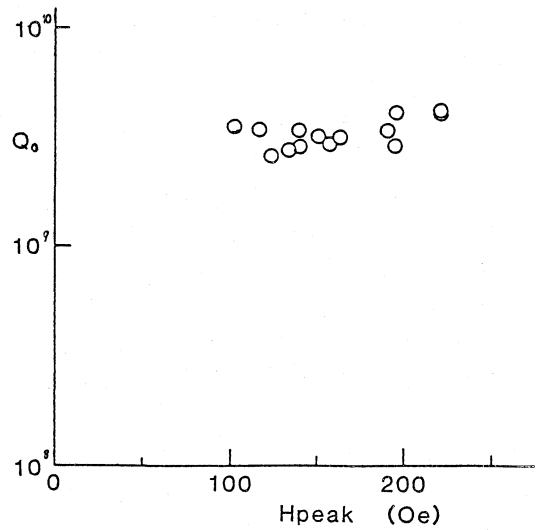


Fig. 4  $Q_0$  and  $H$  peak of 500 MHz cavity (1980 ~ '84, KEK).

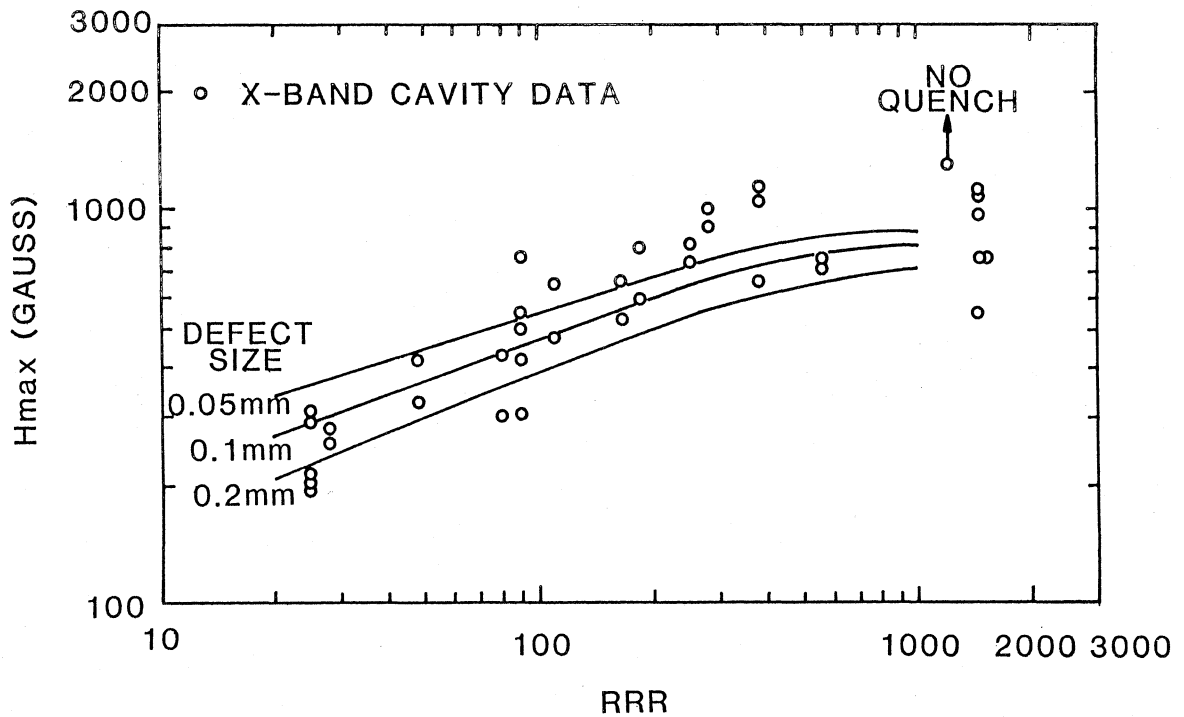


Fig. 5 Measured and calculated  $H_{MAX}$  with increasing RRR (Cornell).

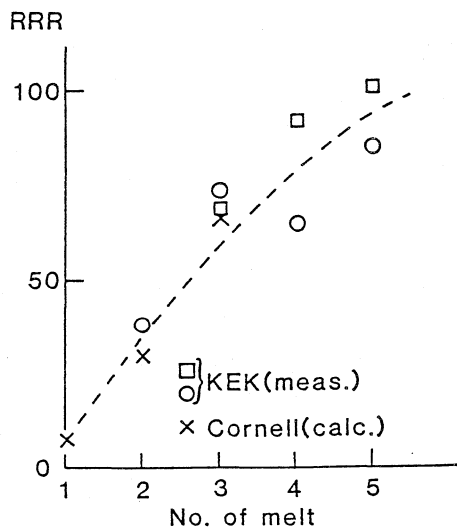


Fig. 6 Improvement of RRR by multi melting of Nb (KEK & Cornell).

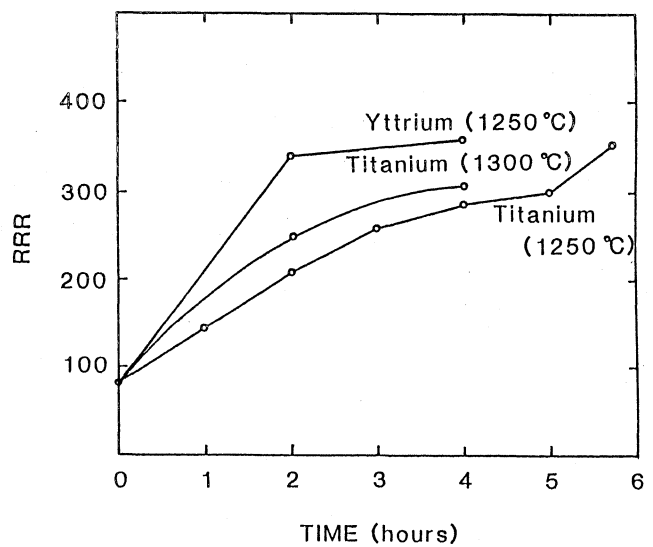


Fig. 7 Improvement of RRR by annealing with Yt or Ti (Cornell).