

# Superconducting Cavities for TRISTAN Main Ring

K. Saito, K. Ara, M. Arinaga, K. Asano, T. Furuya, K. Hara, K. Hosoyama, E. Kako, Y. Kojima, Y. Kojima, A. Kabe, K. Kubo, S. Mitsunobu, H. Nakai, S. Noguchi, T. Ogitsu, T. Tajima, H. Sakamoto, T. Suzuki  
K. Akai

National Laboratory for High Energy Physics

## Abstract

At KEK the TRISTAN energy upgrading program has started in 1987. Now the mass production of thirty-two 5-cell superconducting cavities is going on. The first 16 cavities should be installed in MR in this summer and the next 16 cavities in the next year. We have just now completed 16 cavities and measured their performances. They are enough over our specification (5MV/m,  $Q_0=2 \times 10^9$ ). Especially 10 cavities got accelerating field gradient of 10 MV/m. This note reports the present status of the mass production, mainly the fabrication and performances of the cavities.

## トリスタン主リング超伝導空洞

### [1] はじめに

トリスタン主リングのエネルギー増強計画として、昭和64年までに32台の5連超伝導空洞が、日光衝突エリアの両直線部に設置される。空洞は、今年夏に16台、来年に16台設置される。現在、空洞の量産が進行中であり、前半16台分が完成し、MRへの組込みが始まっている。空洞性能は、目標値(5MV/m  $Q_0=2 \times 10^9$ )を十分クリアし、10MV/mに達するものが16台中10台製作された。ここでは、空洞の製作工程、空洞性能を中心に現状を報告する。

### [2] 空洞製作工程

第1図にKEKのMR用5連超伝導空洞の寸法、形状を示す。第2図に製作工程から最終性能確認試験に至る一連の工程を示す。

#### 2-1 材料

空洞はすべてニオブ材で製作される。材料は、セル材、ビームパイプ材、ポート材、フランジ材に分類され、すべて東京電解(株)から供給されている。これらの材料の中で、高い電磁界に晒されるセル材が重要である。高い加速電界を得るためには、Thermal instabilityを抑える必要がある。そのために高い熱伝導度を持つ材料、すなわち高純度ニオブ材が要求される。セル材に対して、複雑な熱伝導度の測定の代わりに、それに正比例する残留抵抗比( $RRR = \rho_{300K} / \rho_{4.2K}$ )の測定により品質管理(KEK)が行われる。10MV/m以上の加速電界を得るには、少なくとも $RRR=100$ は必要である。KEKとメーカーとの協力によって、従来( $RRR=20 \sim 40$ )よりも5倍ほど熱伝導度の高い材料が開発された。第3図にMR用32台分のセル材のRRRを示す。

#### 2-2 成型、溶接

KEKの試作研究では、スピニングで半割セルを作っていたが、高熱伝導度ニオブ材の開発の結果、伸びのある材料が手に入り、液圧成型が可能になった。MR用空洞では、液圧成型法が採用され、720φ、2.35mm厚のニオブ円板から半割セルが成型されている。成型後、内面にキズや面の荒れが発生する。キズ取り、電解研磨の前処理として、半割セルは、内面をバフ研磨される。バフ研磨された半割セルは、正寸にカットされ、2個の半割セルの胴部で電子ビーム溶接(EBW)され、シングルセル化される。そして、溶接表面欠陥、スパッターの除去のために溶接シームをグラインドする。さらに、シングルセルのアイリス部で溶接し、両端セルにビームパイプをEBWする。最後に、それらの溶接シームをグラインドし、5連化が完了する。EBWは、defocus beamあるいは、beamを振動させながら溶接を進めていくRhombic raster法が使われている。これらの溶接法の開発により、従来見られた溶接部でのブレイクダウンが見られなくなっている。

#### 2-3 表面処理

5連空洞は、まず80μmの内面電解研磨が施される。ニオブの表面処理には、化学研磨(フッ酸:硝酸:リン酸=1:1:1)と電解研磨(フッ酸:硫酸=10:85)がある。処理が簡単という理由で、多くの研究所では化学研磨(CP)が使われている。KEKでは、研磨面のなめらかさ、電解反応のコントロールの容易さから電解研磨(EP)を採用している。しかし、構造の複雑な高調波カップラー(HOM)などは、CPを使っている。いづれにしても、研磨液にフッ酸を使用するので危険な作業である。KEKとメーカー

の協力で量産に適した横型回転式電解研磨法が開発された。第4図にそのレイアウトを示す。熱交換器が内装されたリザーバーから、冷たい研磨液が空洞内の陰極より注入される。一方、両ビームパイプにオーバーフローポート付の回転スリーブがジョイントされ、空洞の半分のレベルよりあふれた液は、リザーバーに戻される。電解研磨中、連続通電され、空洞はゆっくり回転される。空洞内液温とリザーバー液温のコントロールにより、電解反応熱が除去される。この方法では、研磨面積に対して陰極面積が大きく取れ、空洞内のどの場所でも適性電流密度が確保され、エッチング、研磨むらがなくなり、多連結空洞の多量研磨が可能である。その結果、半割セルを溶接前に1枚ごと部品電解研磨した従来の方法に比べ、処理が簡単になった。研磨性能に関するパラメーターは、電流密度と、液温だけで、コントロールが容易であり、研磨性能が安定している。研磨液の内部循環はフッ酸の臭いなど、作業環境、安全性に大幅な改善をもたらした。

#### 2-4 真空アニール

80 $\mu\text{m}$ 内面研磨された空洞は、電解研磨中に吸収する水素ガスの脱ガス対策、溶接歪み取りのために真空アニール(700 $^{\circ}\text{C}\times 90\text{min}$ )が施される。工業用大型真空炉の真空度は $1\times 10^{-5}\text{Torr}$ 程度であり、アニール中、炉内の残留ガスをニオブが吸収して、純度が低下する恐れがある。その対策としてチタン箱の中に空洞を入れてアニールする。チタンのゲッター作用により、空洞が炉内の残留ガスを吸収するのを抑えている。

#### 2-5 プリチューニング

アニール後、プリチューニングが施される。TM<sub>1010</sub> $\pi$ モードのフィールド分布をビーズ法で測定し、各セルを機械的に伸縮させ、各セルに一樣なフィールドが立つようにする。そして、全体に伸縮を与え、空洞の共鳴周波数を目標周波数に合わせる。この手順を繰り返して、フィールドアンバランス1%以内、目標周波数(508.16MHz)に対して、10kHz以内の精度でチューニングされる。

#### 2-6 仕上げ研磨

真空アニールによる表面酸化層、大気開放による表面汚染物の除去のために、5 $\mu\text{m}$ の仕上げ電解研磨が施される。空洞性能はLondon penetration depth( $\sim 1000\text{\AA}$ )の表面状態で決まる。性能上、仕上げ研磨は最も重要である。バフカス等によって汚染された研磨液の使用は、field emissionの増大を来すので、ここでは新液が使用される。また、化学的残留物なども、field emissionの大敵であるので、ていねいな水洗が施される。電解研磨終了後、空洞は垂直に立てられ、研磨液が抜かれる。陰極から、7~10M $\Omega\text{cm}$ の純水を注入し、空洞内の残留酸濃度をPH>3にした後、陰極を抜き、回転スリーブがはずされる。シャワー洗浄でPH>5に残留酸濃度を薄めた後、10%の過酸化水素水が注入され、空洞を水平にし、回転洗浄(40分)される。さらに、過酸化水素水をつめたままで40~50 $^{\circ}\text{C}$ のbathの中に入れ、超音波洗浄(40分)される。過酸化水素水を抜き、軽く洗い流した後、再び40~50 $^{\circ}\text{C}$ のbathの中で、空洞内に純水を注入し、オーバーフローさせる。オーバーフロー水の電気伝導度をモニターすると、オーバーフロー時間に対して電気伝導度は指数関数的に小さくなる。そのカーブを指数関数フィットして、空洞内の残留酸濃度、洗浄率が把握される。これまでの経験では、加速電界10MV/mまで、no field emissionにするためには、98%以上の洗浄率が必要である。最後に超純水洗浄が行われる。これは、10~0.2 $\mu\text{m}$ のparticleや、バクテリア等の有機物を除去するのが目的である。17M $\Omega\text{cm}$ の超純水を空洞内に注入し、オーバーフロー水抜きを2回繰り返す。最後に空洞内に加圧気味に窒素ガスを満たす。そして、2時間のトラック輸送でKEKに運び込まれる。

#### 2-7 組立、真空排気

KEKに運び込まれた空洞は、すぐにダウンフロー式クラス100の大型クリーンルームの中で組み立てられる。縦低温性能測定用のインプットプローブ、排気ポート、RFモニター等の付いたフランジが、両ビームパイプに取り付けられる。また、インプット、HOMポートはメクラフランジが付けられる。これらのシールはすべてインジウムシールである。インジウムシールのための治工具が整備されており、シール信頼度は非常に高い。組立が終ると、準クリーンルーム室で、真空排気系に接続される。排気系は、排気能力50 $\ell/\text{sec}$ のターボ分子ポンプとその粗引きロータリーポンプ(210 $\ell/\text{sec}$ )、160 $\ell/\text{sec}$ のイオンポンプから構成され、真空度に応じて、切り換えられる。空洞は、水でぬれているので、60 $^{\circ}\text{C}$ のベーキングしながら排気し、約2時間で $10^{-6}\text{Torr}$ 台に達する。リークテストを行い、リークがなければ、110 $^{\circ}\text{C}\times 10\text{hr}$ の本格的なベーキングに移る。インジウムシール部分があるので、その部分の温度が80 $^{\circ}\text{C}$ 以上にならないようにプリセットされている。ベーキング後、約6時間で $10^{-9}\text{Torr}$ 台に達する。

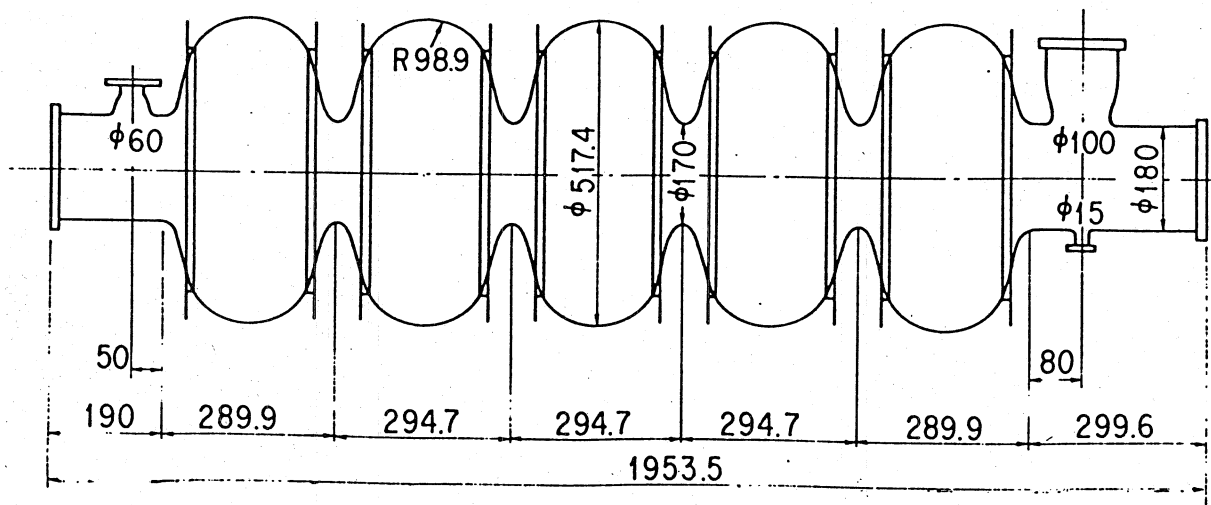
### [3] 縦低温性能測定

空洞がMR用のクライオスタットに組み込まれると、インプットポートにhigh power用インプットカップラー( $\beta\sim 1000$ )が付けられる。これは、カップリングが可変でないので、正確な性能測定が困難である。そのため、横組み込みの前に空洞を縦型のクライオスタットの中で、液体ヘリウムに全面浸漬して、精度を上げた性能測定が行われる。2-7の排気系から切り離され、縦クライオの吊り下げ架台にマウントされる。そ

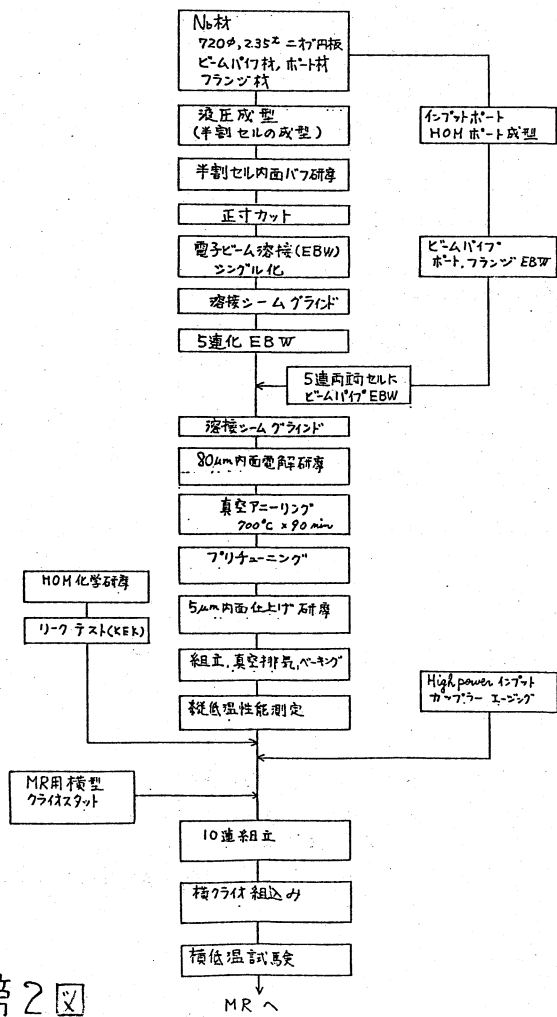
れに装備された排気系で真空排気される（構成は2-7と同じ。イオンポンプは60 l/sec）。RF同軸ケーブルの接触、カップラー駆動機構の作動、温度センサーの応答等がチェックされた後、クライオスタットに挿入される。液体窒素で約1.5日かけ、予冷した後、1500lの液体ヘリウムが注入される。3.5 l/min程度の早いtransfer ratioで、500lデュー（3本）からtransferされる。予冷の液体窒素のパーキングから性能測定が終るまで12時間かかる。測定中、空洞の真空度はゲージ圧で $10^{-9} \sim 10^{-10}$  Torr台である。測定後、クライオスタットから500l程度の液体ヘリウムが回収される。測定では、ケーブルの伝送ロスを求め、空洞入口及び、出口でのRFパワーの換算係数が計算される。次に、インプットカップラーの結合を $\beta \sim 1$ にして、低いフィールドレベルで、パルス法により、空洞からの放出パワーのdecayカーブの減衰時間（ $T_{1/2}$ ）を測定して、loaded Qを求める。CWに切り換え、入射、反射、各モニターポートからの放出パワーを測定し、各ポートの $Q_{ext}$ を求める。以後、カップリングを固定して、入射パワーを上げながらそれらのパワー測定を行い、 $Q_0$ 、加速電界（ $E_{acc}$ ）を測定していく。オシレーターには、たえず空洞共鳴周波数に一致するようにPhase locked loopによるフィードバックがかけられている。クライオスタットのヘリウムガス回収系の能力により、 $E_{acc} > 10 \text{ MV/m}$ では測定困難である。第5図に測定の完了した16台分の $Q_0 - E_{acc}$ 性能カーブを示す。また、第6図に最大加速電界、 $E_{acc} = 5 \text{ MV/m}$ でのQ値のヒストグラムを示す。MRの冷凍システムは、空洞1台当り90Wを想定して設計されている。これは、 $E_{acc} = 5 \text{ MV/m}$ で $Q_0 = 1 \times 10^9$ に相当する。使用電界の5 MV/mを十分クリアし、16台中10台が10 MV/mに達している。Q値についても、5 MV/mで $2.5 \times 10^9$ より大きい。後の10連化組み込み工程で、多少の性能ダウンが起こったとしても、使用性能は、十分確保されるものと思われる。

#### [4] 横低温試験

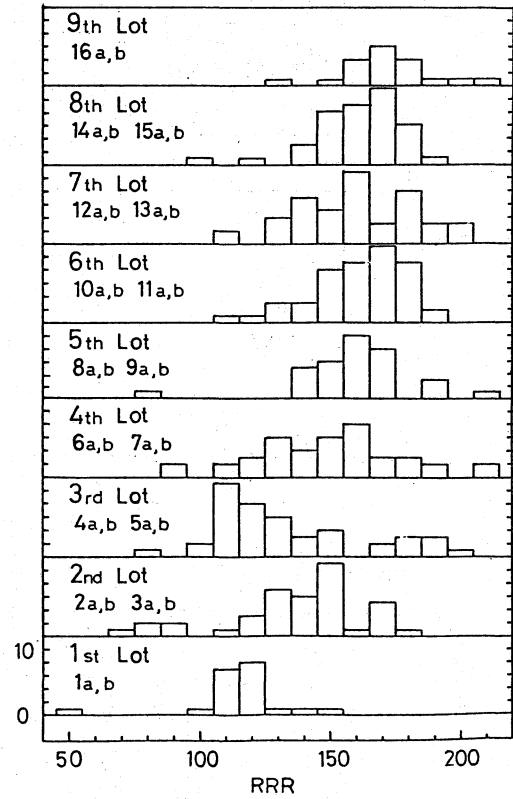
第7図に示すように、空洞は最終的に10連化され、MR用の横型クライオスタットに組み込まれる。大型クリーンルームの中で空洞が結合され、HOMカップラーが付けられる。これらのシールはインジウムシールである。high powerインプットカップラーは、10連空洞がクライオスタットに挿入された後、取り付けられる。組み込み作業が終ると、液体ヘリウムを満ち、横低温試験が行われる。low powerで $Q_L$ 、フィールドモニター用の $Q_{ext}$ 、空洞のHOM特性、HOMカップラーのフィルター特性、システムの機械的振動特性、ピエゾチューナ特性などが調べられる。そして、high powerテストとして、 $E_{acc \text{ max}}$ 、 $Q_0$ （at 5~7 MV/m）が測定される。第1表に、横低温測定での $E_{acc \text{ max}}$ 、 $Q_0$ 値を示す。ほとんどの空洞は、大きな性能低下を来していない。ただ、理由が今の処はっきりしないが、1台（7a）は大きな劣化を起こしている。それは、主として組み立て時のゴミの侵入によるものと考えられ、今後よりクリーンな作業環境の整備が必要と考えられる。



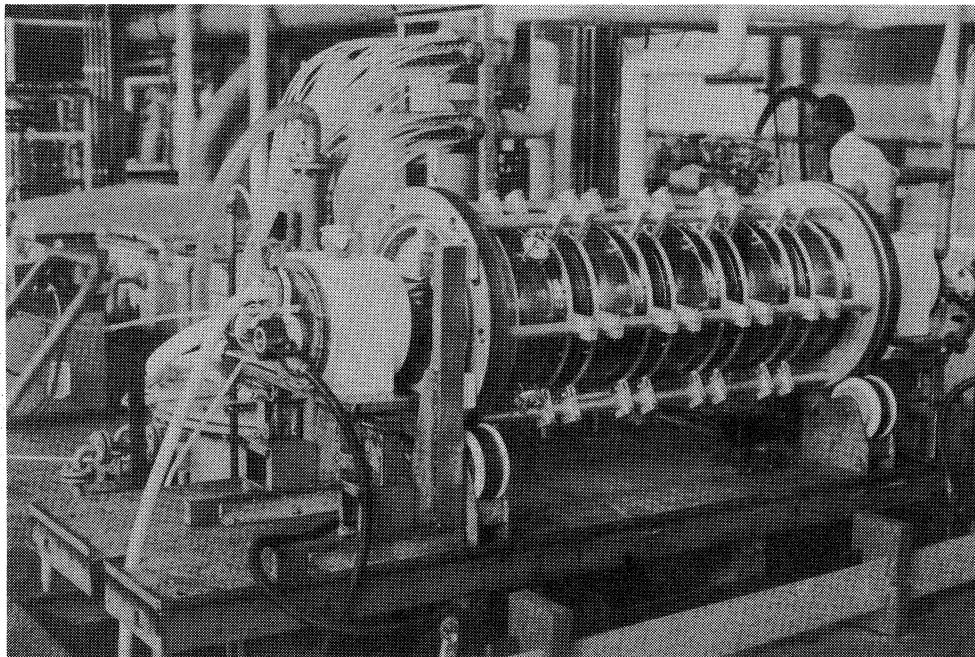
第1図 MR用5連超伝導空洞の寸法、形状



第2図

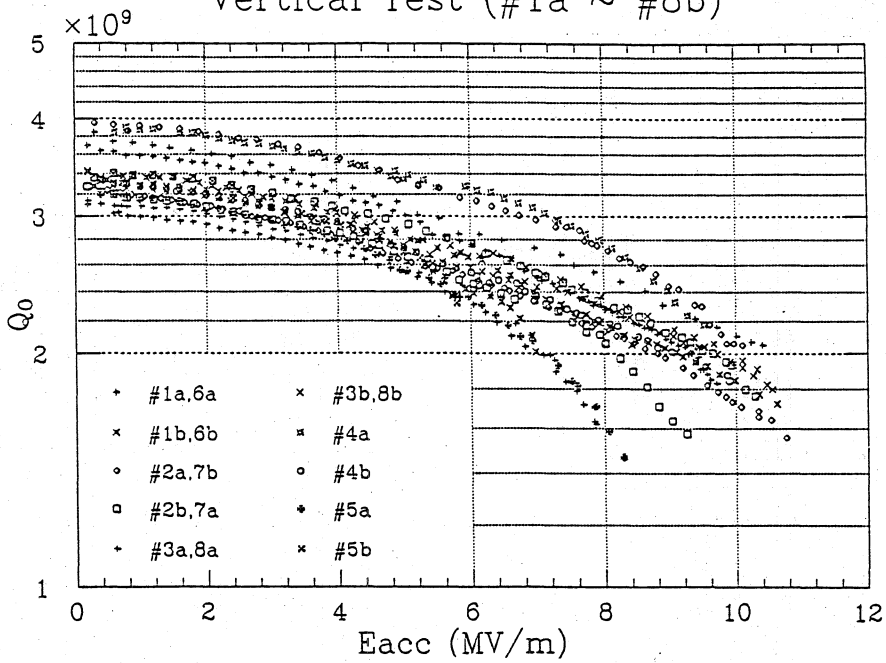


第3図 セル材の RRR

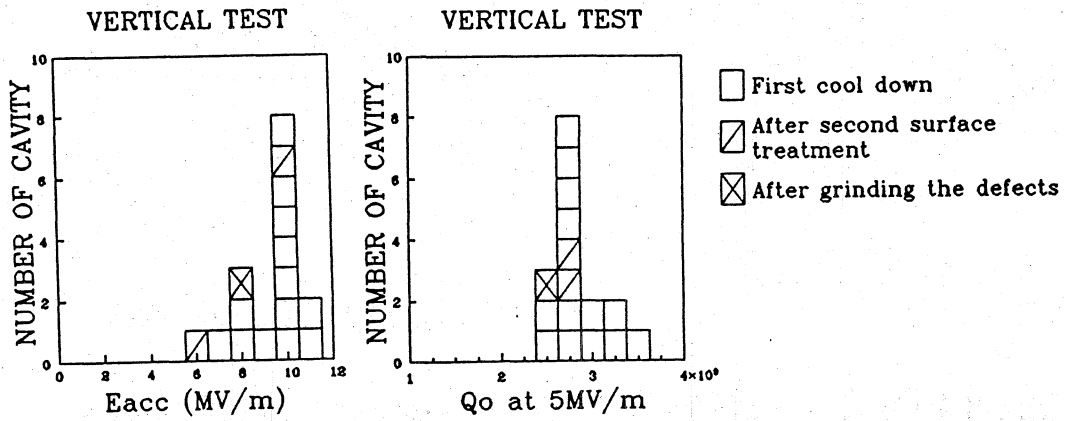


第4図 横型回転式電解研磨システム

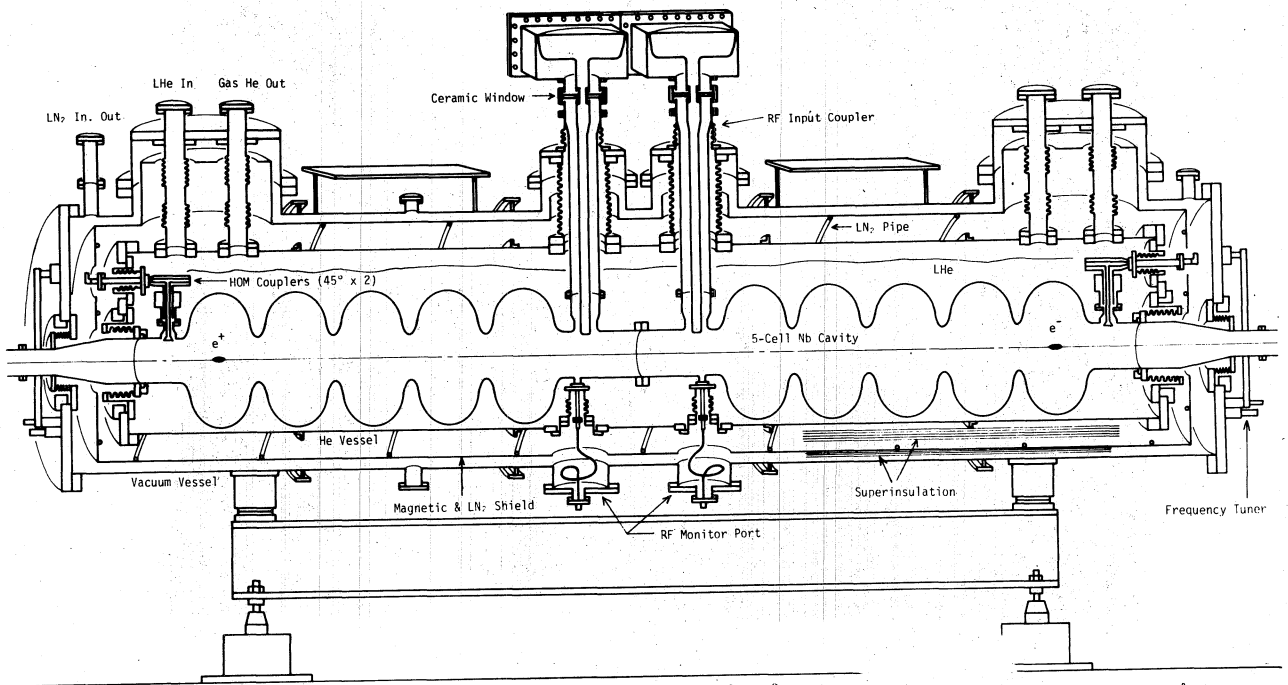
### Vertical Test (#1a ~ #8b)



第5回



第6回



第7回

Cav. NO.	縦測定		横測定		Eaccmax(横)	Qo(横)
	Eaccmax (MV/m)	Qo×10 <sup>9</sup> (Eacc)	Eaccmax (MV/m)	Qo×10 <sup>9</sup> (Eacc)	Eaccmax(縦)	Qo(縦)
1 a	9.7	2.7 (6.3)	7.3	1.8 (6.3)	0.75	0.67
1 b	7.0	2.7 (5.0)	6.5	1.4 (5.0)	0.93	0.52
2 a	10.2	3.0 (6.3)	7.0	1.9 (6.3)	0.69	0.63
2 b	10.3	2.6 (6.5)	6.7	1.4 (6.5)	0.65	0.54
3 a	10.4	2.8 (6.0)	7.1	1.6 (6.0)	0.68	0.57
3 b	10.3	2.5 (7.0)	7.0	1.7 (7.0)	0.68	0.68
4 a	9.5	2.7 (6.9)	8.0	2.2 (6.9)	0.79	0.84
4 b	9.9	2.3 (6.8)	7.8	2.4 (6.8)	0.79	1.0
5 a	8.3	2.1 (5.9)	6.0	1.2 (5.9)	0.72	0.57
5 b	5.8	2.6 (5.3)	5.6	2.1 (5.3)	0.97	0.81
6 a	7.6	2.3 2.0 6.0 7.0	7.4	2.0 1.8 6.0 7.0	0.97	0.87
6 b	10.6	2.6 2.4 6.0 7.0	7.0	2.1 6.0	0.66	0.81
7 a	9.5	2.8 (4.1)	4.6	1.3 (4.1)	0.48	0.46
7 b	10.8	2.3 (6.8)	7.4	1.1 (6.8)	0.69	0.48
8 a	7.9	2.5 (5.3)	6.4	1.7 (5.3)	0.81	0.68
8 b	10.5	2.3 (7.8)	9.2	1.9 (7.8)	0.88	0.83

第1表 空洞性能