

[P 30–29]

# Quick Vertical Test System for L-band Superconducting RF Cavities

Kenji SAITO, Takeo FUJINO, Tamao HIGUCHI\*, Shuichi NOGUCHI,  
Masaaki ONO, Eiji KAKO and Toshio SHISHIDO

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

\* Nomura Plating Co. Ltd. : 5, Satsuki-cho, Kanuma-shi, Tochigi-ken, 322, Japan

## Abstract

Generally saying, the experimental inertia of the superconducting RF cavities is very large due to cryogenics. In order to increase frequency of the cold test and promote the activity, we need a quick vertical test system. We built such a system for L-band cavities so that we could make experiment three times in a week. In this paper, we describe the system and report some results from this system.

## Ｌ－バンド超伝導空洞用簡易縦測定システム

### 1. はじめに

超伝導空洞の低温測定は多くの準備作業があり、一般に実験慣性が大きい。KEKの伝統的測定方法では以下の手順が必要である。1) 空洞の表面処理、2) 空洞のクリーン・ルーム内組立、3) 真空排気、4) 縦測定用空洞吊り下げスタンドへの取付け、5) 縦測定スタンドの真空排気系と空洞の真空接続、6) 吊り下げスタンドのクライオスタットへのマウント、7) 液体窒素予冷、8) 液体ヘリウムのトランスファー、9) 空洞測定 (4.2K : He-I)、10) L-バンドの場合は、減圧クーリングして測定 (2-1.7K : He-II)。これらの全工程を通して、測定結果が得られまでに一週間かかる。我々は、L-バンド超伝導空洞のアクティビティを上げるために、上記のような作業工程の内4) – 7) を省くことにより、最短で二日モードの測定が可能な新システムを作った。このシステムと旧システムを併用することにより、週三回の測定が出来るようになり、空洞性能に関して統計性に基く議論が可能になった。また、新システムでは、1.3Kまで冷却できるため  $1 \times 10^{11}$  台の非常に高い  $Q_0$  値 (unloaded Q value) が得られ、高感度で空洞性能を評価できるようになった。本論文では、新システムの構造、特徴、得られた空洞測定結果等を報告する。

### 2. 新システムの設計思想

#### 1) 空洞封じ切り測定

上記の作業工程では、空洞の吊り下げから予冷の間で全作業時間の半分を費している。超伝導空洞は、低温に冷却されるとそれ自体クライオポンプとなり、空洞内表面に真空システム内の残留ガスを吸着する。このガス吸着のことを考えれば、空洞を真空排気した後、封じ切りで測定する方が良いかも知れない。そうすれば、上記の4)、5)の作業が省け、作業が大幅に簡略化される。

#### 2) 液体窒素予冷の省略と fast cooldown

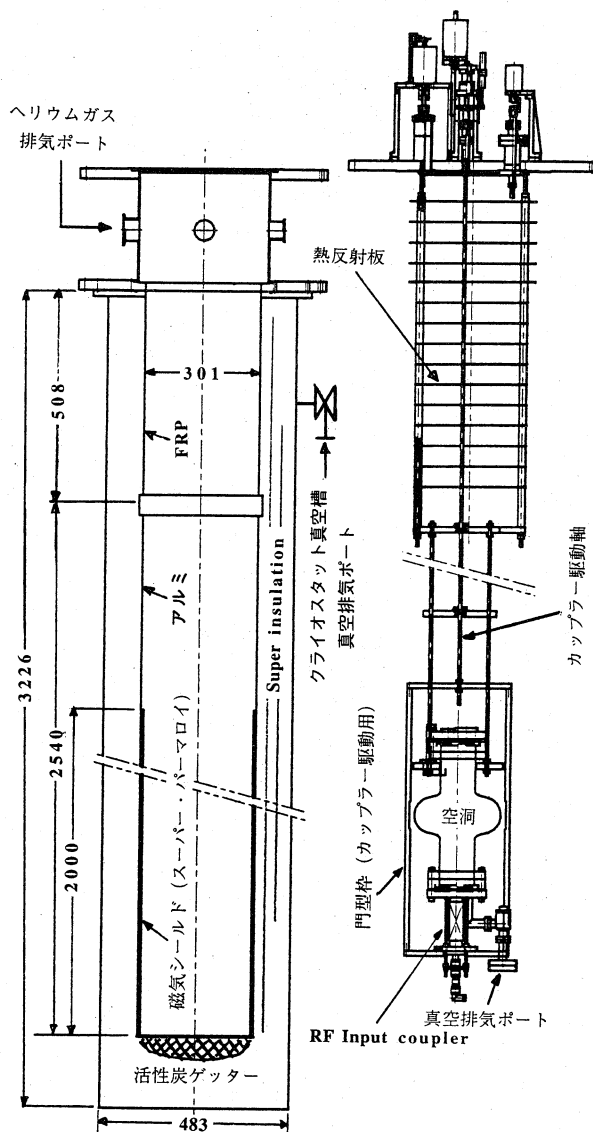


図1、クライオスタットと空洞吊り下げスタンド。

クーリングに際して、日本ではヘリウムの値段が高いのでその負荷を極力減らすために、KEKでは伝統的に液体窒素予冷を行っている。この工程は夜間行われるために作業時間はさほど問題にならないが、測定作業全体のスケジュールに大きな影響を及ぼす。ヘリウム槽やその中に入る空洞吊り下げスタンドの熱容量を極力小さくして、それらの熱負荷が液体ヘリウム冷却でも問題にならないようにして、この工程を省くことが望ましい。また、クライオスタットの熱容量を小さくすればfast cooldownが可能になり、Qo-disease（水素病）の問題[1]にも対処できる。

### 3) 小熱侵入化と9セル空洞対応

クライオスタット内への熱侵入量を小さくすることは、液体ヘリウムの消費量を減し、長時間実験を可能にする点で重要である。しかし、この問題はHe-II（超流動ヘリウム）下での空洞性能測定で特に重要である。He-II温度で能測定する際、液体ヘリウムを減圧してヘリウム温度を下げる。この時、液体ヘリウムの量は熱侵入を考慮に入れなくても、4.2KのHe-Iの半分程になる。性能測定中、空洞が液体ヘリウムから顔を出さないように液面高さを十分確保しなければならない。熱侵入が多いと減圧時に著しく液面が低下し、9セル空洞のように1.3mもある空洞への対処が難しい。新システムでは、9セル空洞でも十分高い液面を確保できるように、熱侵入を小さくし、さらに、ヘリウム槽の断面積を小さく、深くした。

### 3. システムの構造と性能

**Blue Cryostat の構造：**上記の設計思想の下に、我々はヘリウム槽の内径を300Φ、深さを3mとした。これらの仕様を満たすクライオスタットを東理社を介してアメリカのPrecision Cryogenic Systems Inc. から購入した。図1にその構造を示す。クライオスタット外径483mm、全長3226mm、クライオ槽内径301mm、深さ3048mmである。ヘリウム槽は熱侵入を小さくするために上から508mmまではFRPできており、そこから下は軽量化のためアルミ製である。真空断熱槽の中にはスーパーインシュレーションと活性炭ゲッターが取り付けられているのみで、液体窒素シールドの無い簡単な構造になっている。また、真空断熱槽はバルブ封じであり、必要に応じて真空排気するようになっている。液体窒素シールドが無いので取扱が非常に容易であることは、強調されるべきであろう。このクライオスタットの外観が青色なのでBlue Cryo.と呼んでいる。

**縦吊り下げスタンド：**1図に示す空洞吊り下げスタンドを製作した。空洞は上部のフランジを頸にして吊り下げられる。ゴミが空洞内部に落下するのを避けるために、RFのインプット・カップラーを空洞の下部側に取付けた。クライオスタットの天盤外側に取付けたパルス・モーターで、シャフト、門型枠を介してカップラーのアンテナを上下駆動する構造となっている。

**インプット・カップラー：**インプット・カップラーは同軸タイプである。コネクター付ベロー中にアンテナを取付け、液体ヘリウム中でもアンテナを空洞に出し入れできるようにしている。ベローは、フランジに立てた4本の棒をガイドにテフロン・ブッシュを介してパルス・モーターで上下駆動される。L-バンド空洞では、He-IからHe-IIの測定で空洞のQoは $10^8$ 台から $10^{11}$ まで変わり、それに合わせてアンテナを出し入れする必要がある。最低20mmのストロークが必要である。しかし、アンテナの長さを実験的に決める必要があるため40mm程度のストロークがあった方がよい。

**磁気シールド：**浮遊磁場の存在下で空洞を冷却して超伝導状態にすると磁場がニオブにトラップされ、表面抵抗が発生する。浮遊磁場をシールドするためには、磁気シールドを付けるのが常套手段となっている。このシステムでは、ヘリウム槽内に東北金属（株）のスーパー・パラマロイ製の肉厚1mm、内径295Φ、長さ2mの一層の円筒形（底付き）磁気シールドを挿入している。図2にこのシールドを入れた時のヘリウム槽内の常温での磁場分布を示す。測定には、F.W.BELL社製のModel 9200ホール素子磁場測定器（測定感度0.1mGauss）を使用した。垂直成分は、シールドすぐ内側で90°置きに4箇所とシールドの中心軸上の計5箇所測定した。一方、浮遊磁場の主成分が地磁気であり、水平成分はセンサーの向きによって強さが変わるので、中心軸上でセンサーを水平面内で回転させピークホールドによる最大値を取った。シールドの上部が開口のため垂直成分がシールドの直径程度侵入し、底から1.6m程しか有効でないことが分かる。有効範囲では、垂直残留磁場は6mGauss、水平残留磁場は4.5mGaussである。

**Cooldown speed：**実際にクライオスタット内にL-バンド単セル空洞を吊り下げた状態でシステムを冷却試験した。Qo-diseaseに影響しない温度領域（液体窒素温度77K以下）まで冷却するのに、65Qの液体ヘリウムを消費して25分、さらに、そこからヘリウムが溜まり始めるまでに39Qの液を消費し、35分要した。液が溜まり始め

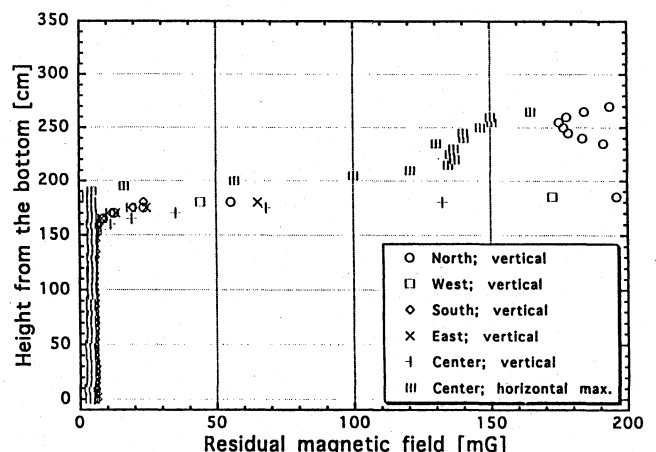


図2. ヘリウム槽磁気シールド内の残留磁場の強さ。

るまでトータルで104 Qの液体ヘリウムを消費し、55分要した。また、液面2mまで溜めるのに136 Qの液体ヘリウムが必要であった。したがって、一回の実験で240 Qの液体ヘリウムが必要である。しかし、最近ではヘリウムによる冷却を注意深くやることで、ヘリウムの全消費量を200 Qまで減らせた。

**熱侵入量：**液体ヘリウムをヘリウム槽の底から2m程溜めた後、4.2Kで一晩放置して液面下降率から熱侵入量を測定した。液面1815mmで1.14W、1587mmで1.01Wと液面が下がるにしたがって熱侵入量が減少する傾向があるが、全体として1.1Wである。

**到達温度：**超伝導空洞の表面抵抗はよく知られているように、冷却温度に対して指数関数的に減少するBCS表面抵抗と温度に依らない残留表面抵抗の和で表わされる。残留表面抵抗が非常に小さい場合には、空洞の冷却温度を1.5K以下まで下げないと正確な値が求まらない。このシステムで液体ヘリウムを減圧してどこまで冷やせるか試験した結果、1時間半のポンピングで1.22Torr すなわち、1.24K まで冷やせることが分かった。

#### 4. 新システムで測定した空洞性能

**表面抵抗：**新システムを使って測定した空洞の表面抵抗の温度依存性 ( $T=4.2-1.4K$ ) を図3に示す。このデータをフィットして求めたニオブの超伝導換算ギャップ・エネルギーは、 $\Delta/k_B=18.4$  (ここで、 $k_B$  はボルツマン定数) であり、これまでのデータと矛盾しない。残留表面抵抗の大きさは、 $3.2n\Omega$ である。残留表面抵抗がこれ程小さくなると、図3のようにデータ・フィッティングで求めるには、十分低い温度まで測定しなければならない。幸い、このシステムでは熱侵入が小さいので低い温度まで下げられ、誤差の少ないデータを提供できることがわかる。

文献 [2] によれば、残留磁場の空洞のビームパイプ軸に平行な成分と垂直成分の表面抵抗への寄与は、 $0.25 n\Omega/mGauss$  (parallel),  $0.22 n\Omega/mGauss$  (perpendicular) である。スーパー・パーマロイのシールド特性が極低温で変わらないとしてこれらの値を使うと、残留磁場が原

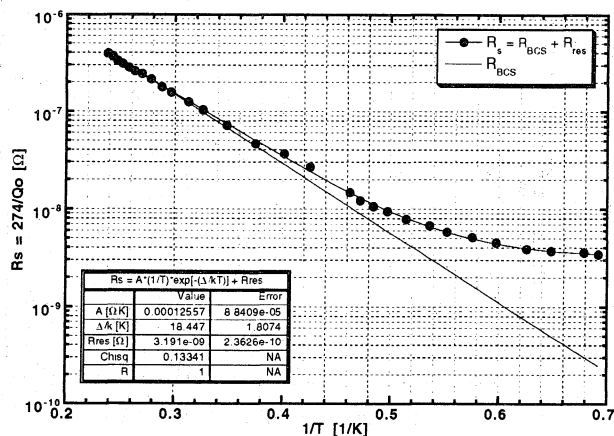


図3. 表面抵抗の温度依存性。

因となる残留表面抵抗は、 $R_{res}(\text{parallel}) = 1.5 n\Omega$ 、 $R_{res}(\text{perpendicular}) = 0.99 n\Omega$ 、トータルで  $R_{res} = 2.5 n\Omega$  と見積もられ、測定結果を説明する。残留表面抵抗の主要原因は残留磁場によるもので、空洞表面自体に起因するものは極わずか ( $1n\Omega$ 程度) であることが示唆される。

**Qo-Eacc カーブ：**このシステムで測定された加速電界 (Eacc) とQo値の関係を図4に示す。残留表面抵抗が小さく、且つ、低い温度 (1.3-1.5K) で測定しているので  $Qo=10^{11}$  の非常に高いQ値が得られている。マルチパケタリングが起き、プロセッシングする必要があったので、同じ試験で三回測定されている (Qo1st - Qo3rd)。加速電界は、熱的クエンチ (self pulsing) により31MV/mに制限された。また、4.2Kでも測定されが、RFパワー不足により、17MV/mまでしか測れなかった。マルチパケタリングは、このシステムに限らず、別のシステムでも観測されている。このシステムでは真空封じで空洞を測定する方法を採用したので、高電界の測定にその影響が出ないか不安ではあったが、30MV/m以上の高電界の測定ができた。また、同じ空洞に高压水洗のみを施し、新旧両システムで測定して性能を比較した結果、同様な結果が得られた。したがって、現状では、新システムに測定上の問題は無いと考えている。

#### 5. まとめ

新システムでは、真空封じで空洞を測定することで、実験準備作業を大幅に簡略化でき、表面処理を含め最短二日で測定結果を出すことができる。クライオスタットの熱侵入が小さく1.3Kまでの低い温度まで冷却でき、また、ヘリウム槽内の残留磁場が小さいために非常に高いQ値が得られる。30MV/m以上の加速電界も問題なく測定できることがわかった。

#### 参考文献

- [1] K.SAITO et. al., " Qo-Degradation due to Hydrogen in High Pure Niobium Cavities ", Proc. of the 18th Linear Accelerator Meeting in Japan, Tsukuba, 21-23, July, 1993. P.299.
- [2] P.Kneise and B.Lewis, CEBAF TechNote #94-028.

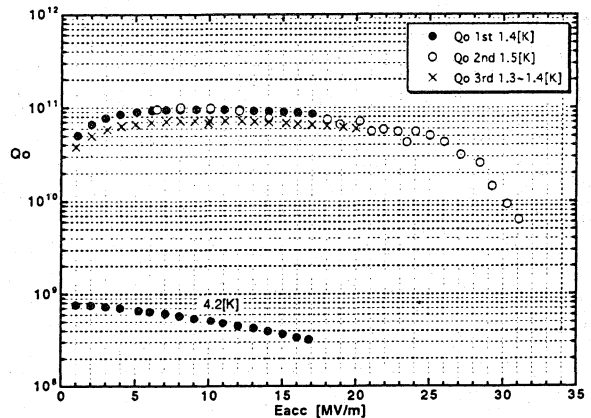


図4. Qo vs. Eacc カーブ。