

## Higher Order Mode study of superconducting cavity for ILC baseline

Ken Watanabe<sup>1,A)</sup>, Hitoshi Hayano<sup>B)</sup>, Shuichi Noguchi<sup>B)</sup>, Eiji Kako<sup>B)</sup>, Toshiro Shishido<sup>B)</sup>  
A) GUAS/AS

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

B) KEK

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

### Abstract

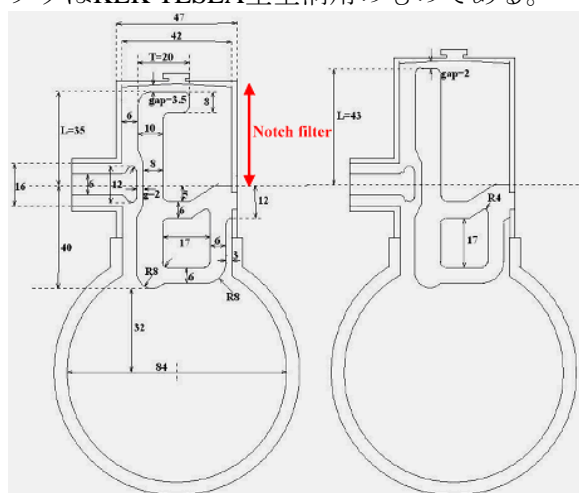
The development of superconducting cavities for ILC is under way at STF (Superconducting RF Test Facility)[1] in KEK. This paper summarize the higher order mode (HOM) study on KEK TESLA-shape 1.3GHz 9-cell superconducting cavities. The purpose of the study is aiming further optimization of TESLA-style HOM couplers, study of HOM field distribution and polarization characterization of major dipole modes for possible use as BPM. The improvement of TESLA-style HOM coupler by downsizing and the removal of 2nd stopband more carried out.

After checking by the Cu model, the Nb HOM couplers were made, and their filter characteristics were measured. Then the HOM couplers were welded to the 9-cell SC cavity, Qext of the fundamental mode and the each higher order mode of the couplers, each field distribution of HOM and polarization of dipole mode were measured by the network analyzer. After adjustment of notch frequency, the measurement of HOM coupler properties at 4 K was carried out during vertical dewar tests. The results are presented in this paper.

## ILCベースラインのための超伝導空洞の高調波モードに関する研究

### 1. はじめに

KEKではSTFの建設が進められている。STFのphase1ではTESLA型空洞とlow loss型空洞を4台ずつ作製し、合計8台の空洞をクライオモジュールに入れる予定である[1]。今回デザインしたHOMカプラはKEK TESLA型空洞用のものである。



(a) KEK L-type (b) KEK I-type

図1 HOMカプラの形状

KEK空洞[2],[3]の特徴を以下に示す。高電界、パルス運転で問題となるローレンツ・デチューニング対策のため、空洞のエンドプレートを厚くした。そのため、HOMカプラが空洞のエンドセル

から遠くなり、HOMのカップリングが弱くなった。HOMの染み出しを良くするため、ビームパイプの径をTESLAモデルの78mmから84mmに広げた。また、ジャケットを装着する際に、TESLAモデルのHOMカプラでは構造上邪魔になるという問題が出てきた。この問題を解決するため、どちらか一方のHOMカプラの長さをTESLAモデルより6mm以上短くする必要がある。また、我々の作製したTESLA型HOMカプラを測定した結果、4GHz周辺に2nd stopbandが確認されたため、その改善も試みた。本研究の目的はKEK TESLA型空洞にフィットするHOMカプラの設計、作製、評価を行うことである。

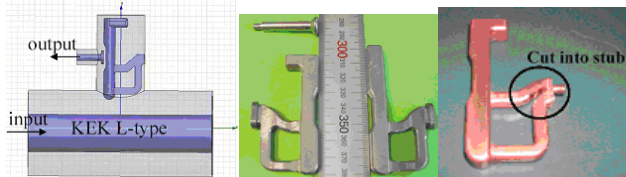
### 2. HOMカプラの設計

HOMカプラの目的はビームによって誘起されたHOMパワーを可能な限り吸収することにある。また、空洞内に蓄積されている加速モードのパワーの吸収は最小限になる構造になっている。

今回改良したHOMカプラの基本デザインは同軸型HOMカプラである[4]。デザインした形状を図1に示す。同軸型HOMカプラの動作原理は、図1中のフィルター部の内導体のインダクタンスと先端ギャップのキャパシタンスで決まるLC共振回路になっている[4]。したがって、LC共振回路の周波数（ノッチ周波数）を空洞の加速モードに

<sup>1</sup> E-mail: kenw@post.kek.jp

合わせればよい。また、ピックアップ・プローブの形状とギャップもノッチ周波数に影響を及ぼすのでその考慮も必要である。上記条件からLを短くした場合(インダクタンスが小さくなる)、先端のキャパシタンスを増加させる必要がある。先端のキャパシタンスを増加させるには、gapを狭める、先端面積を大きくする方法が考えられる。ギャップを縮めた場合、チューニング感度が高くなりすぎ、また先端の電界が高くなるため、放電の心配もある。このため、先端面積を広げてギャップを確保する方法をとった。図1のフィルターの構造はそれぞれL-typeがL=35mm、T=20mm、gap=3.5mm、I-typeがL=43mm、gap=2mmである。両カプラで使用しているプローブはΦ12mm、アンテナギャップ2mmである。また、ビーム軸から見たときのカプラの位置を出来る限り低くするため、溶接箇所を一箇所にまとめた。



(a)計算モデル(b)ニオブモデル(c)L-type2モデル  
図2 計算モデル、実機モデル

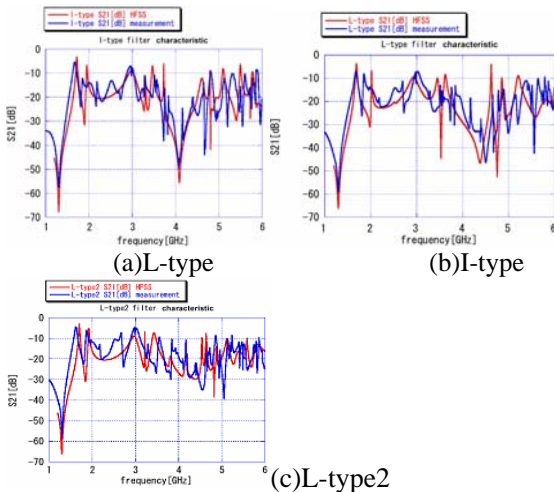


図3 HOMカプラの周波数特性の比較

電氣的設計にはHFSSを用いた。図2(a)に計算モデルを示す。同軸管上にHOMカプラを配置し、TEM波を検出し透過特性(S21)からフィルター性能を評価した。計算結果をもとに実機モデルでプロトタイプを作製し、同軸管測定装置を用いた。図2(b)に作製した実機モデルを示す。図3はフィルター特性の計算結果と実測の比較である。I-typeは4GHz付近にL-typeは4.5GHz付近に2nd stopbandがあった。L-typeは若干ではあるがフィルター特性が改善している。I-typeとL-typeはそれぞれstopband特性が異なるため、この組み合わせ

せは互いのstopbandをカバーできる。しかし、両カプラともに2nd stopbandが改善されていないため、L-typeに図2(c)のような切込みを加えた。図3(c)に改良した結果を示す。2nd stopbandが抑えられ、よりフラットな周波数特性になっていることが分かる。実機はNb製でI-typeとL-typeを各3台作製した。実機加工後、単体で化学研磨を行い、空洞に溶接される。Nbモデル単体の測定は加工直後、化学研磨後に行った。表1に化学研磨後のノッチ周波数の変化量を示す。化学研磨により高周波側にシフトすることが分かる。ニューニングは最終電界研磨(20um)の前に行うので、電界研磨による周波数変化(20umだと<10MHz程度)を見越して周波数を合わせておく必要がある。

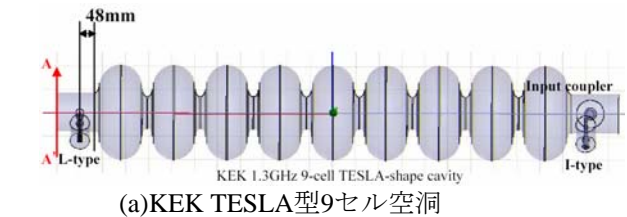
表1 化学研磨前後のノッチ周波数  
KEK I-type KEK L-type

No	Before surface treatment	After CP	No	Before surface treatment	After CP
1	1.317 GHz	-	1	1.320 GHz	-
2	1.291 GHz	1.305 GHz	2	1.273 GHz	1.291 GHz
3	1.299 GHz	1.309 GHz	3	1.259 GHz	1.267 GHz
4	1.307 GHz	1.321 GHz	4	1.274 GHz	1.286 GHz

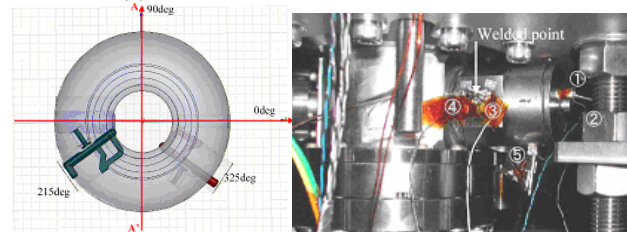
※CP:chemical polishing = 30 to 50um

### 3. 空洞のHOMの測定

HOMカプラの配置を図4に示す。HOMカプラの中心は双方とも空洞のエンドセルから48mmの位置にある。カプラのループアンテナの向きはビーム軸に対して垂直である。各カプラの傾きは110°である。測定時のfield flatnessは98%である[5]。測定にはNWAを用いた。



(a)KEK TESLA型9セル空洞



(b)HOMカプラの配置 (c)温度センサーの配置

図4 HOMカプラの配置

#### 3.1 HOMのパスバンドとQextの測定

4KにおけるTE111、TM110、TM011モードのパスバンド(表2)とQextの測定結果を以下に示す。測定に使用したプローブは図1に示す形状でアンテナギャップは2mmである。TE111のQextは $3 \times 10^3 \sim 3 \times 10^5$ 、TM110のQextは $1 \times 10^4 \sim 1 \times 10^6$ 、

TM011のQextは $5 \times 10^5 \sim 5 \times 10^6$ であった。

表2 HOMのパスバンド一覧

mode	Frequency[GHz]	mode	Frequency[GHz]	mode	Frequency[GHz]
TE111-1 R/Q=22.4	1.5956	TM110-1 R/Q=119	1.7971	TM011-1 R/Q=0.33	2.3186
	1.5963		1.7981		
TE111-2 R/Q=23.6	1.5977	TM110-2 R/Q=89.1	1.8260	TM011-2 R/Q=0.11	2.3213
	1.5981		1.8266		
TE111-3 R/Q=43	1.6091	TM110-3 R/Q=52	1.8469	TM011-3 R/Q=3.31	2.3292
	1.6100		1.8474		
TE111-4 R/Q=58.7	1.6276	TM110-4 R/Q=86.4	1.8627	TM011-4 R/Q=0.84	2.3383
	1.6283		1.8631		
TE111-5 R/Q=46.1	1.6501	TM110-5 R/Q=127.0	1.8750	TM011-5 R/Q=8.65	2.3516
	1.6508		1.8754		
TE111-6 R/Q=54.9	1.6774	TM110-6 R/Q=39.4	1.8845	TM011-6 R/Q=6.26	2.3642
	1.6780		1.8847		
TE111-7 R/Q=210.0	1.7063	TM110-7 R/Q=28	1.8898	TM011-7 R/Q=37.8	2.3801
	1.7112		1.8899		
TE111-8 R/Q=79.3	1.7410	TM110-8 R/Q=20	1.8946	TM011-8 R/Q=188	2.3906
	1.7422		1.8948		
TE111-9 R/Q=43.2	1.7723	TM110-9 R/Q=0.005	1.8966	TM011-9 R/Q=96.8	2.3998
	1.7733		1.8968		

### 3.2 ダイポールモードの偏極の測定

空洞はその製法と各カプラの配置から非対称である。セルごとの製作精度にばらつきが大きければ、ダイポールモードの偏極はセルごとに異なり、円偏向のようになると考えられる。セルの歪み具合等を評価するため、ダイポールモードの偏極を測定した。測定にはビーズ摂動法（使用ビーズ：セラミックボール、直径6mm）を用いた。ビーズはビーム軸から30mm±0.4mm離れたところを通した。測定角度は90°～270°で30°間隔である。角度ごとのfieldパターンをプロットし、各セルのアイリス部におけるΔfから偏極方向を評価した。

表3 ダイポールモードの偏極方向

measured mode	polarize direction		other
	Low peak	High peak	
TE111-1,-2	330 deg	60 deg	Seem to doublet
TE111-5,-6,-7	5 deg	95deg	Seem to 1 peak :very strong coupling
TM110-1,-2,-3,-4,-5,-6	310 deg	40 deg	Seem to doublet

空洞は各カプラの位置やその製法から非対称であるため、ダイポールモードのスペクトルは表2のように2ピーク存在する。また、HOMカプラとのカップリングが強いモードは分離せず1ピークに見える。前者のモードの偏極はHOMカプラの位置に依存した方向を向いており、図4(b)の定義を用いると高いピークでは約135°、低いピークでは約225°の方向を向いていた。後者の場合、高いピークでは約95°、低いピークでは5°の方向を向いていた。また、セルごとの偏極方向に差はほとんど見られなかった。表3に結果をまとめる。

### 3.3 縦測定

実際の運転ではHOMカプラの内導体には空洞から染み出した加速モードのパワーによる負荷がかかるため、HOMカプラのアンテナ形状によっては発熱、放電等の問題が生じる。そのため、縦測定での試験が必要である。一般に縦測定はCWで行うことが多い。その場合、ピックアップ・プローブの発熱が問題となる[6][7]。図1の形状で

は14MV/mまで耐えられることをこれまでの測定で確認した。Pulse運転であれば、dutyが非常に小さくなるため、高電界運転でも問題にならないが、CWの場合、発熱を抑える工夫が必要である。今回、我々はアンテナギャップを2mmから6mmへ広げ、アンテナ形状Φ6mmに変更して測定を行った。HOMカプラのプロセシングを観測するため、カーボン抵抗を用いた温度センサー、パワーメーター、放射線モニターを用いた。温度計は図5(c)に示すようにカプラの先端と溶接部に設置した。放射線モニターはクライオスタットの外に設置した。HOMカプラのプロセスレベルは双方とも3,5,8,10,12,13,16MV/mにあった。このとき温度センサーには～500msのスパイク状の応答が観測され、又、それに合わせて放射線が検出された。縦測定の結果、加速電界が26.2MV/mまで安定に動作することを確認した。

## 4. まとめ

今回、KEK空洞用のHOMカプラの設計、評価を行い、stopbandの異なるものとstopbandの改善されたものが得られた。HOMカプラのQextを測定した結果、TESLA designよりダンピング能力が一桁足りないことが分かった。この対策としてはプローブのカップリングを強める、カプラの位置の最適化といった対策が考えられる。ダイポールモードの偏極方向を測定した結果、セルごとの偏極はほぼ同方向を向いていることが分かった。また、ダイポールモードの偏極方向はHOMカプラの位置に依存している傾向が観測された。HOMカプラの縦測定の結果、I-type、L-type双方とも26.2MV/mまで問題無く動作した。

## 参考文献

- [1] H. Hayano, "Status of STF for ILC", in this meeting.
- [2] S. Noguchi, et al, "Development of STF Baseline Superconducting Cavity System", Proc. of the 2<sup>nd</sup> Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tosu Japan 2005 p194
- [3] S. Noguchi, et al "Development of STF Baseline SC Cavity System", in this meeting.
- [4] TESLA design report
- [5] T. Shishido, "Frequency tuning of an accelerating mode in STF", in this meeting.
- [6] P. Kneisel, "Testing of HOM coupler designs on a single cell niobium cavity" PAC'05, Knoxville, May 2005, p. 4012, <http://www.jacow.org>.
- [7] C. E. Reece, "High thermal conductivity cryogenic RF feedthroughs for higher order mode couplers", PAC'05, Knoxville, May 2005, p. 4108, <http://www.jacow.org>