

FREQUENCY TUNING OF AN ACCELERATING MODE AND VERTICAL TESTS IN THE STF BASELINE SC CAVITIES

Toshio Shishido^{1,A)}, Kensei Umemori^{A)}, Eiji Kako^{A)}, Shuichi Noguchi^{A)}, Hitoshi Hayano^{A)},
Yasuchika Yamamoto^{A)}, Hiroshi Sakai^{B)}, Kenji Shinoe^{B)}, Ken Watanabe^{C)}

^{A)} KEK, High Energy Accelerator Organization

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

^{B)} Institute for Solid State Physics, University of Tokyo

5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba, 277-8581, Japan

^{C)} The Graduate University for Advanced studies

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

Abstract

Pre-tuning was carried out for four STF baseline superconducting cavities. Pre-tuning is performed to match a resonant frequency of a cavity with an operating frequency at 2 K and to adjust the electric field strength in each cell equally. The resonant frequency was adjusted to 1297.5 MHz at room temperature, and the electric field flatness of more than 97% was achieved. Fourteen vertical tests at 1.8 K were performed on four 9-cell cavities. The average of Eacc,max in three cavities (#1, #3, #4) was 20 MV/m with no field emission. The #2 cavity was achieved the Eacc,max of 29.4 MV/m on the fifth vertical test. This value is the Japanese best record of 1.3 GHz 9-cell superconducting cavity.

STFベースライン超伝導空洞における加速モードの周波数調整と性能測定

1. はじめに

現在KEKにおいて建設が進行中であるSTF (Superconducting RF Test Facility) に設置されるクライオモジュール用9セルベースライン超伝導空洞4台が製作された^[1]。製作直後のSTFベースライン超伝導空洞の加速モード周波数は各種要因により目標とする運転周波数からずれており、また各セルでの電場強度が一樣ではない。空洞の共振周波数を2 Kでの運転周波数に合わせ、かつ各セルの電場強度を一樣にするために行うのがプリチューニングである。プリチューニングで電場平坦度98%、室温での共振周波数1297.5MHzに調整された超伝導空洞は、仕上げ電解研磨を経て空洞単体性能試験である縦測定が行われる。4台のSTFベースライン超伝導空洞に対し計14回の縦測定を行った^[2]。#1, #3, #4空洞での最大加速電場の平均値は20MV/m、#2空洞では29.4MV/mが得られた。この値はビーム加速が可能な9セル超伝導空洞の国内最高記録である。

2. 空洞処理工程

2.1 表面処理

9セル超伝導空洞の製作後に行われる表面処理工程は次の通りである。遠心バレル研磨 CBP→電解研磨 EP-I 100 μ m (超純水高圧洗浄等を含む) →アニール処理 (750 $^{\circ}$ C, 3時間) →プリチューニング→仕

上げ電解研磨 EP-II 20 μ m (超純水高圧洗浄 8MPa, 16時間, HF リンス 15分もしくはH₂O₂ リンス 60分を含む) を経て空洞単体性能試験である縦測定へ向う^[3]。遠心バレル研磨はTKX社製研磨メディアGC-Tを使い、公転周期75~100rpm, 6時間を3~5回行う。1回あたりの研磨量は約20 μ m、赤道部電子ビーム溶接(EBW)部の欠陥除去が主目的である。HFリンスもしくはH₂O₂リンスは電界放出電子やマルチパクターリングなどの抑制を期待して加えられた処理である。縦測定で要求される性能が得られない場合仕上げ電解研磨 EP-II、場合によってはバレル研磨に戻る。遠心バレル研磨及び仕上げ電解研磨 EP-IIでの研磨量は空洞の電子ビーム溶接部の出来具合によって臨機応変に変更される。

2.2 プリチューニング

超伝導空洞では空洞の共振周波数を加速器の運転周波数に一致させ、かつビームを効率よく加速するために各セルに立つ電場の強さを一樣に揃える必要がある。このために行われるのがプリチューニングで^[4]、仕上げ電解研磨 EP-II の前に行われる。2Kでの運転周波数は1300MHz、クライオモジュールでの運転時にはチューナーで500kHz引張るので目標周波数は1299.5MHzである。EP-II及び300Kから2Kへの冷却における周波数変化を考慮して常温大気圧下での目標周波数を1297.5MHzに定めた。図1にプリチューニング装置を、表1に各空洞の受

¹ E-mail: shishido@post.kek.jp

け入れ時、1回目及び2回目のCBP、EP-I終了後、最終縦測定前の共振周波数、空洞長、電場平坦度を示す。

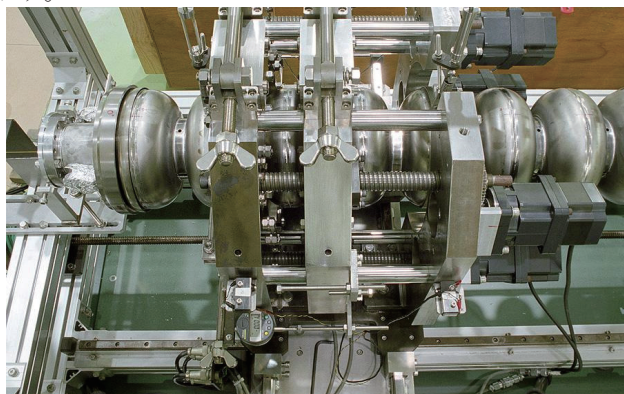


図1: STF ベースライン超伝導空洞用プリチューニング装置

表1: 共振周波数、空洞長、電場平坦度の履歴

Initial state of the Cavities			
	Frequency (MHz)	Length (mm)	Field Flatness (%)
Design	1298.00	1259.0	99
#1	1295.48	1251.0	60
#2	1295.74	1250.5	25
#3	1295.50	1250.5	69
#4	1297.21	1254.5	63
Pre-tuned Cavity after 1st. CBP and EP (100 μ m)			
#1	1297.63	1263.9	97
#2	1297.57	1261.5	98
#3	1297.46	1262.0	98
#4	1297.51	1261.8	98
Pre-tuned Cavity after 2nd. CBP and EP (100 μ m)			
#1	1297.38	1270.5	97
#2	1297.35	1269.0	98
#3	1297.64	1270.5	96
#4	1297.37	1268.5	99
Final state of the Cavities			
	Freq. at 2K V.T.	Length (mm)	Qt (*10 ¹¹)
Design	1299.40	1259.0	1.50
#1	1299.30	1270.5	1.18
#2	1299.20	1269.0	2.05
#3	1299.72	1270.5	2.35
#4	1299.27	1268.5	1.10

2.3 電場平坦度の劣化

プリチューニングが終了した空洞には仕上げ電解研磨 EP-II が施され空洞単体性能試験である縦測定が行われる。縦測定終了後に電場平坦度を測定した所、全ての空洞で電場平坦度の劣化が観測された。図2左には#2空洞の縦測定前後の電場平坦度を、右には#1, #2, #4空洞の、EP-II後の各セル毎の周波数変化分布を示す。この図からエンドセルはセンターセルよりも削れている事が分かる。その後、各セルに供給される電解研磨液量が様でない事が分かり改良した結果、電場平坦度の劣化は1%程度まで改善された。

2007年2月9日、4回目の縦測定後の#2空洞の電場平坦度を測定した所、75%にまで劣化していた(図3)。今迄で最も酷い劣化であり、取り扱い方法に不備があった様だが原因は特定出来ていない。正

確な最大加速電場の値を得るためには縦測定終了後には必ず電場平坦度を測定し、必要ならプリチューニングを行う事が必須である。

現状では電解研磨の際、空洞サポート治具を取り外して装置に設置し処理しているが、この時空洞が変形している可能性がある。今後は空洞サポート治具を付けたまま電解研磨が行える様、電解研磨装置の改造やプリチューニング後の空洞の取り扱い方法にさらなる注意が必要である。

線形加速器として使用する場合、電場平坦度は約98%が要求される。STF ベースライン空洞の場合、プリチューニングの前後にパスバンド ($\pi/9 \sim 8\pi/9$ までの8つのモード)の電場分布も測定しているが、その過程も含め現状では98%平坦度を得るまで2人がかりで2日を要する。95%平坦度を得るのは比較的容易であるが、その後は0.01mm単位で空洞を変形させる必要があり、しかもセル毎に個性があるため完全オートメーション化は容易ではない。しかしながらILC計画では9セル空洞を16000台必要とするためオートメーション化は必須であり、今後の重要な課題である。

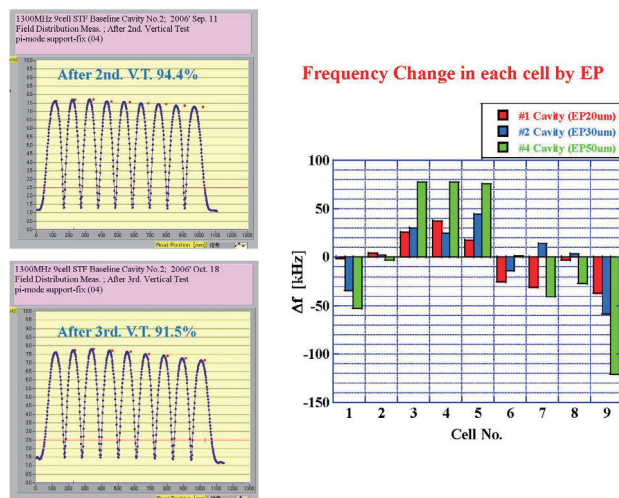


図2: 左; #2空洞の縦測定前後の電場平坦度 右; EP-II後の各セル毎の周波数分布

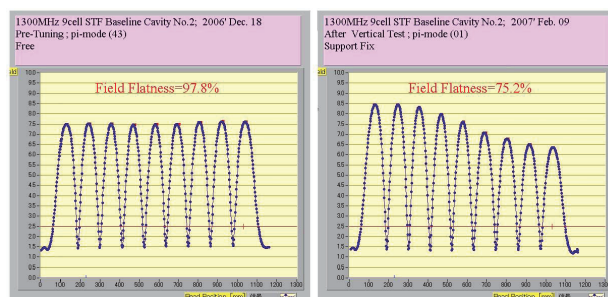


図3: #2空洞4回目の縦測定前後の電場平坦度 左; 縦測定前 97.8% 右; 縦測定後 75.2%

3. 縦測定

仕上げ電解研磨EP-IIが終了した9セル空洞には、クリーンルーム内で各種カップラーポートが取り付けられ、リークテスト後に120°Cでのベーキングが行われる。その後、空洞外面に温度測定用カーボン抵抗やX線測定用PINダイオードが設置され、縦型クライオスタットへ移動し、超流動ヘリウムを使った2Kでの高周波測定が行われる^[5]。この測定を縦測定と呼び、空洞単体での各種性能が加速器として使用可能か判断するために行われる。空洞を縦型クライオスタットへ移動している様子を図4に示す。



図4：STF ベースライン超伝導空洞縦測定準備風景

3.1 残留表面抵抗測定

図5に#2空洞5回目、4.2Kから1.8Kへの冷却過程での測定結果を示す。通常超伝導空洞の表面抵抗は

$$R_{\text{surface}} = R_{\text{BCS}} + R_{\text{res}} \quad (3-1)$$

と表される。ここで R_{BCS} はBCS理論値、 R_{res} は残留表面抵抗である。 $T < T_c$ ($=9.2\text{K}$)では近似的に次の様に書ける。

$$R_{\text{surface}} = A \cdot (1/T) \cdot \exp(-\Delta/kT) + R_{\text{res}} \quad (3-2)$$

ここで A は超伝導体によって決まる定数、 T は超伝導体の温度、 Δ はギャップエネルギー、 k はボルツマン定数である。得られた残留抵抗は約 $7.4\text{n}\Omega$ である。表2に各空洞、各測定での残量表面抵抗値を示す。

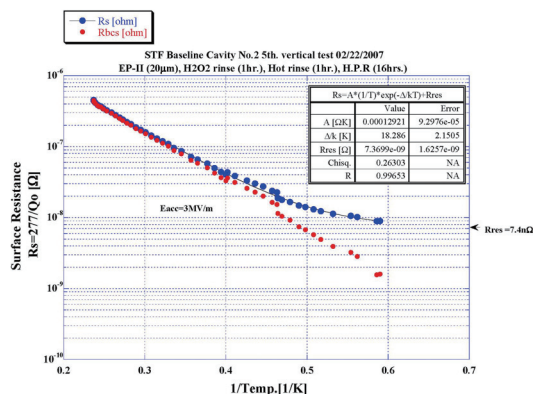


図5：#2空洞5回目の表面抵抗測定

表2：各空洞の残留表面抵抗値(計14回測定結果)

	#1 Cavity	#2 Cavity	#3 Cavity	#4 Cavity
1st. V.T.	11.5nΩ	9.2nΩ	9.8nΩ	16.0nΩ
2nd. V.T.	10.2	12.2	11.4	7.6
3rd. V.T.	12.5	9.3	—	8.5
4th. V.T.	8.3	8.5	—	—
5th. V.T.	—	7.4	—	—

3.2 HOMカップラーの発熱

図6は空洞クエンチ後、非常にゆっくりとした時定数(~10秒)でモニターしている高周波信号が減衰した場合のQo-Eaccカーブである。その時定数から熱伝導の悪い箇所の発熱が疑われた。同軸型HOMカップラーに使用されるノッチフィルターの構造上、加速モードの負荷がある場合、ピックアッププローブ周辺の磁場強度が最大になる^[6](図7左)。したがって、その磁場による誘導電流でプローブ先端が発熱したものと考えられる。ピックアップに使用しているフィードスルーは熱伝導が悪いため、常伝導へ転移すると回復に1時間程度かかる。この状態では空洞の最大性能を評価できないため、対策としてプローブ形状を短くし磁場による影響を減らした(図7右)。その結果、低電場におけるプローブの発熱は起こらなくなった。しかし、我々の空洞は35MV/mを目標としているため、最終的にはHOMカップラーのポートをメクラにして縦測定を行った。

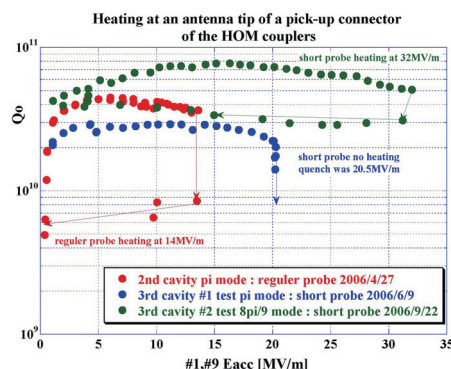


図6：上：プローブ先端での発熱によるQo値悪化の様子
下：#1,#9セルの位置

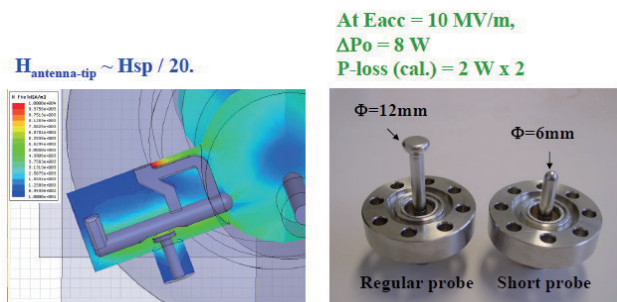


図7：左；HOMカプラー内の磁場強度分布
右；ニオブプローブ形状(左；交換前 Regular type
Φ=12mm 右；交換後 short type Φ=6mm)

3.3 パスバンドモードの励起

図8に#1空洞4回目の縦測定結果を示す。加速電場が17MV/mの所からQ₀値が上昇しているのが分かる。この現象が起きている時、空洞入力(Pin)は一定にも関わらず、反射出力(Pref)及び透過出力(Ptrans)は数10秒の時定数でゆっくりと増大する。透過出力をスペクトラムアナライザーで調べた所、8π/9モードや、8π/9モードより下ではあるが7π/9モードとは異なるモードが励起されていた。同様の現象はドイツ DESY でも観測されているが DESY では7π/9モードが励起されている。空洞内での電界放出電子がきっかけとなってこの様な現象が励起されているかもしれない^[2]。

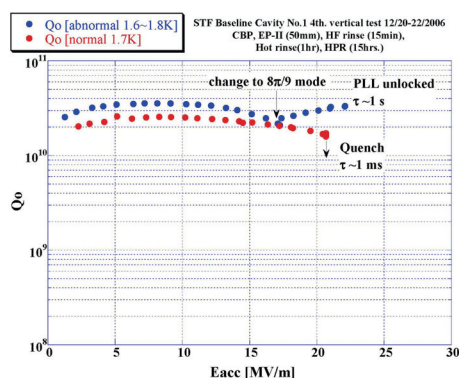


図8：ベースライン空洞 #1 8π/9 モードの励起現象

3.4 高電場測定

ベースライン空洞#1、#3、#4の最終縦測定結果を図9に示す。各空洞の測定回数は#1空洞4回、#2空洞5回、#3空洞2回、#4空洞3回の計14回である。

#3空洞は2回目の縦測定で最大加速電場21MV/mを達成し STF クライオモジュールに組み込まれた。

#1空洞も4回目の測定で21MV/mを、#4空洞は17MV/mで制限されていたが再度 EP-II を20μm行い、3回目の測定で20MV/mを達成した。しかし

7π/9モード測定中にリークしている事に気づき測定を中止した。真空シールはインジウムメッキを施したヘリコフレックスを使用しているが、2K超流動状態でリークしたのは14回の測定でこの1回のみである。

これら3台の空洞では最大加速電場が約20MV/mで頭打ちになっている。しかし#3空洞2回目の縦測定では、パスバンドモードでの測定結果から9セル空洞全体としての性能が5番セルただ1つによって制限されている事が分かる。(図10)実際にクエンチが起こった時、5番セル表面に設置されたカーボン抵抗で数ケルビンの温度上昇が観測された。この事からも、空洞製作段階から表面処理、組み立てに至るまでのあらゆる工程において、十分な品質管理技術の確立が ILC を実現させるためには必要不可欠である。

図11に#2空洞の5回目の縦測定結果を示す。この空洞は4回目の測定まで最大加速電場20MV/mであったが(1回目の最大加速電場13.6MV/mはHOMカプラーの発熱に因る制限)、さらに EP-II 20μm、電界放出電子やマルチパクターリング抑制などを期待して H₂O₂ リンス1時間の処理を行った結果、最大加速電場29.4MV/mを達成出来た。これはビーム加速可能な1.3GHz 9セル超伝導空洞の国内最高記録である。表3に各空洞、各測定での最大加速電場とその時のQ₀の値を示す。

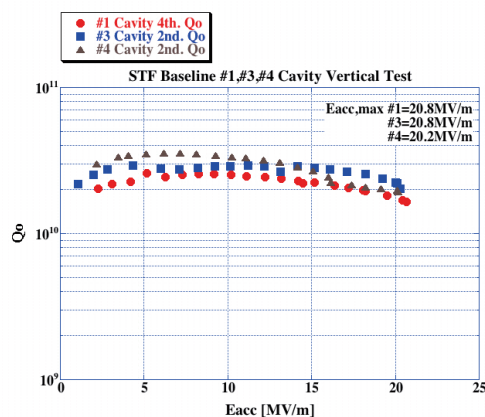


図9：ベースライン空洞 #1, #3, #4 最終縦測定結果

表3：各測定での最大加速電場[MV/m]とQ₀[*10¹⁰]

	#1 Cavity		#2 Cavity		#3 Cavity		#4 Cavity	
	Eacc,max	Q ₀	Eacc,max	Q ₀	Eacc,max	Q ₀	Eacc,max	Q ₀
1st. V.T.	19.1	0.47	13.6	3.65	20.4	1.66	16.5	2.06
2nd. V.T.	19.2	0.77	21.5	1.46	20.8	2.58	17.1	0.90
3rd. V.T.	19.2	0.50	19.1	0.93	—	—	20.2	1.93
4th. V.T.	20.8	1.59	20.5	0.69	—	—	—	—
5th. V.T.	—	—	29.4	1.98	—	—	—	—

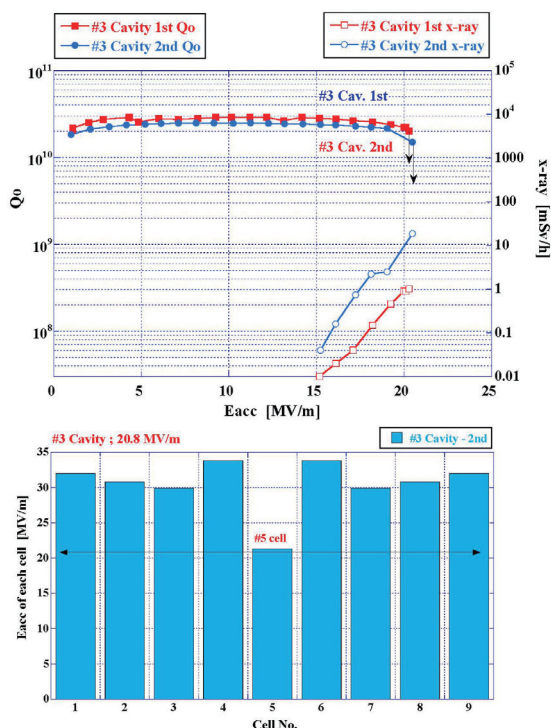


図10：上；#3空洞の縦測定結果
下；各セル毎の最大加速電場

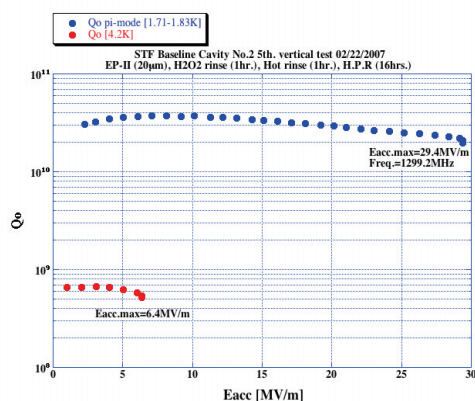


図 11：ベースライン空洞 #2 最終縦測定結果

まとめ

STF ベースライン超伝導空洞4台のプリチューニングを行い各空洞について電場平坦度 97%以上に調整した。仕上げ電解研磨、縦測定後には電場平坦度が劣化してしまう事が分かった。プリチューニング後の空洞の扱いには細心の注意を払う必要がある。

電場平坦度が調整された空洞は仕上げ電解研磨を施し、液体Heを用いた高周波性能測定を行った。4空洞で計14回の測定を行い、最終的に全ての空洞で最大加速電場20MV/m以上を達成した。#2空洞で得られた最大加速電場29.4MV/mは現時点での国内最

高記録である。

参考文献

- [1] S. Noguchi, et al., "Development of STF Baseline Superconducting Cavity System", 第2回日本加速器学会年会, 第30回リニアック技術研究会, 鳥栖 (2005) p194.
- [2] E.Kako, et al., "Construction of the Baseline SC Cavity System for STF at KEK", PAC'07, Albuquerque, New Mexico, U.S.A. (2007)
- [3] 古屋貴章, "超伝導空洞の基礎"; 加古永治, "超伝導空洞の高周波設計"; 佐伯学行, "超伝導空洞の製作技術", OHO '06 高エネルギー加速器セミナー
- [4] T.Shishido, et al., "Frequency Tuning of an Accelerating Mode in STF Baseline Cavities", 第3回日本加速器学会年会, 第31回リニアック技術研究会, 仙台 (2006) p865
- [5] T.Shishido, et al., "J-PARC 用 972MHz 超伝導加速空洞測定制御システム", 平成16年度大阪大学総合技術研究会, 大阪 (2005) p2-11
- [6] K.Watanabe, et al., "Higher Order Mode Study of Superconducting Cavity for ILC Baseline", 第3回日本加速器学会年会, 第31回リニアック技術研究会, 仙台 (2006) p877