

FREQUENCY TUNING OF AN ACCELERATING MODE IN STF BASELINE SC CAVITIES

Toshio Shishido^{1,A)}, Eiji Kako^{A)}, Shuichi Noguchi^{A)}, Hitoshi Hayano^{A)}, Ken Watanabe^{B)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

^{B)} The Graduate University for Advanced Studies
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

Abstract

An accelerating frequency of a superconducting cavity just after fabrication deviates from a target frequency due to various causes, like manufacturing errors, and the electric field strength in each cell is not same. Pre-tuning is performed to match a resonant frequency of a cavity with an operating frequency at 2K and to adjust the electric field strength in each cell equally. Pre-tuning was carried out for four STF baseline superconducting cavities. As a result, they were adjusted to the resonant frequency of 1297.5 MHz at room temperature, and the electric field flatness of more than 97% was achieved.

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

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)には8台の超伝導空洞を内蔵するクライオモジュールが設置され、その内の4台はベースライン超伝導空洞が組込まれる[1],[2]。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律ではない。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律にするためにプリチューニングを行った。4台のSTFベースライン超伝導空洞に対しプリチューニングを行い室温での共振周波数を1297.5 MHz、電場平坦度97%以上を達成した。

2. STFベースライン超伝導空洞



図1: STFベースライン超伝導空洞

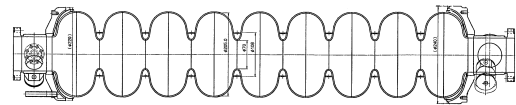


図2: 1.3 GHz ベースライン超伝導空洞断面図

図1に3台のベースライン超伝導空洞を、図2に断面図を示す。ベースライン超伝導空洞の製作目的は加速器モジュールとして完成させ、組み立て時の問題点の洗い出し、ビーム加速、クライオスタット冷却、チューナー動作等各種試験を行う事にある。

製作された空洞は受け入れ時、アニール前後、プリチューニング前後、縦測定が終了し次回表面処理前に、円周方向4箇所 の全長とセル間隔及び電場分布が測定される。測定後の空洞は治具で保護され固定される。

3. プリチューニング

受け入れ直後の空洞の電場分布は製作誤差等の各種要因により各セルの電場強度は一律ではなく、また共振周波数も目標とする周波数よりずれている。加速モードの周波数を2 Kでの運転周波数に合わせ、かつ各セルに立つ電場強度を一律にするために行うのがプリチューニングである。

3.1 プリチューニング装置

使用されたプリチューニング装置はJ-PARC用に開発された972 MHz超伝導加速空洞のプリチューニ

¹ E-mail: shishido@post.kek.jp

ングで使用された装置と基本的には同一である[3],[4]。周波数に依存する高周波モジュールと空洞を変形させるクランピングパッドをSTF1.3 GHz空洞の形状に合わせた物に交換して使用している。クランピングパッドは、センターセル(2~8セル)用は左右対称形をしているが、エンドセル(1,9セル)についてはビームパイプに付く各種カプラーポートの違いから専用設計されたパッドを使用している。プリチューニング装置を図3に示す。

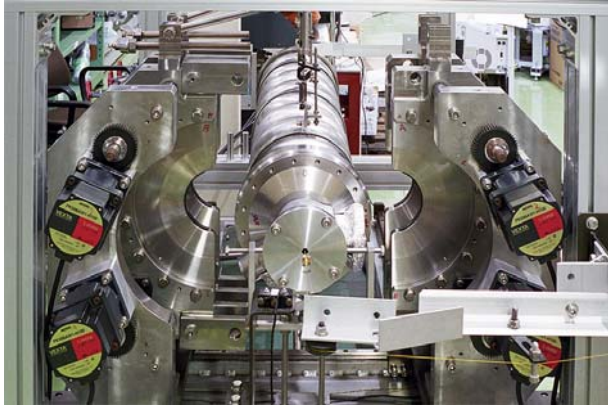


図3: STF ベースライン超伝導空洞用プリチューニング装置

3.2 プリチューニングの手順

プリチューニングの手順は以下の通りである。

- 1) PLLで空洞のチューニングを取り共振周波数Foを記録する。
- 2) 空洞軸上にアルミ製ビードを走らせ(4mm/sec)ビードの位置とビードがある場合の共振周波数Fを記録する。
- 3) 各セルの電場強度(E) と共振周波数変化(ΔF=Fo-F)にはE ∝ √ΔFなる関係がある事から各セルの電場分布が得られる。
- 4) 共振周波数Foと電場分布から、各セルの目標周波数からのずれを求める。
- 5) 4) で得られたずれを収束させるべく、クランピングパッドを各セルのアイリス部にセットし、アイリス部を縮める/伸ばす事でセルを永久変形させる。
- 6) 目標とする電場平坦度及び共振周波数が得られるまで 1)~5) を繰り返す。

3.3 9セル空洞の等価回路

9セル空洞の等価回路は図4の様になる。セル間の結合は弱く、結合定数C_kを通じて隣接するセルとのみ結合すると仮定して解くと以下の様になる[5]。

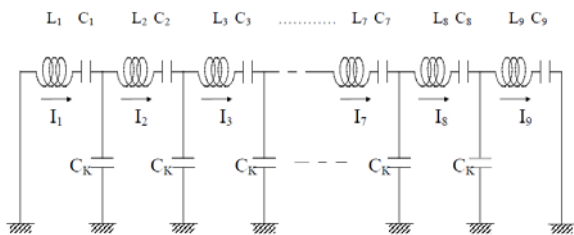


図4: 9セル空洞の等価回路

$$\frac{f'_{1,9}}{f'} = \frac{1}{\sqrt{1 - k \frac{I_{2,8}}{I_{1,9}}}} = \frac{1}{\sqrt{1 + k \frac{E_{2,8}}{E_{1,9}}}} \quad (i = 1,9)$$

$$\frac{f'_i}{f'} = \frac{1}{\sqrt{1 - k \frac{I_{i-1} + I_{i+1}}{I_i}}} = \frac{1}{\sqrt{1 + k \frac{E_{i-1} + E_{i+1}}{E_i}}} \quad (2 \leq i \leq 8)$$

f'_i : 9セル空洞の共振周波数が f' の時, i 番目のセルの共振周波数

f_{target} : 9セル空洞の目標周波数

I_i : i 番目のセルの電流密度

E_i : i 番目のセルの電場強度

$$I_i \propto E_i$$

$$k = \frac{f_\pi - f_0}{f_\pi + f_0} : \text{cell to cell coupling constant}$$

理想的な π mode(電場平坦度 100%) の場合

$$I_1 = -I_2 = I_3 = \dots = -I_8 = I_9 \quad \text{なので}$$

$$\frac{f'_{1,9}}{f_{target}} = \frac{1}{\sqrt{1 + k}} \quad (i = 1,9)$$

$$\frac{f'_i}{f_{target}} = \frac{1}{\sqrt{1 + 2k}} \quad (2 \leq i \leq 8)$$

修正すべき周波数は

$$\Delta f_{1,9} = \frac{f'}{\sqrt{1 + k \frac{E_{2,8}}{E_{1,9}}}} - \frac{f_{target}}{\sqrt{1 + k}} \quad (i = 1,9)$$

$$\Delta f_i = \frac{f'}{\sqrt{1 + k \frac{E_{i-1} + E_{i+1}}{E_i}}} - \frac{f_{target}}{\sqrt{1 + 2k}} \quad (2 \leq i \leq 8)$$

これが出来るだけ0に近い値になるまで繰り返しセルを変形させる。

4. 結果

4台のベースライン超伝導空洞の受け入れ時の加速モードの周波数、全長、電場平坦度を表1に、プリチューニング後のそれらを表2に示す。また#4空洞の加速モード分布を図5に、セル毎の周波数分布を図6に示す。#4空洞は受け入れ時の全長が他空洞に比べ4mm長い、これは#1~#3空洞の製作工程と比べ、アイリス部の溶接条件を改良したためである。

表 1：空洞受け入れ時の周波数、全長、電場平坦度

# 1空洞	1295.48 MHz	1251.0 mm	60 %
# 2空洞	1295.74 MHz	1250.5 mm	25 %
# 3空洞	1295.50 MHz	1250.5 mm	69 %
# 4空洞	1297.21 MHz	1254.5 mm	63 %

表 2：チューニング後の周波数、全長、電場平坦度

# 1空洞	1297.63 MHz	1263.9 mm	97 %
# 2空洞	1297.57 MHz	1261.5 mm	98 %
# 3空洞	1297.46 MHz	1262.0 mm	98 %
# 4空洞	1297.51 MHz	1262.0 mm	98 %

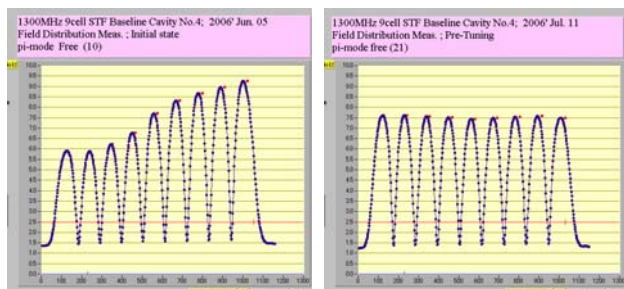


図 5：#4 空洞の加速モードの電場分布

左： 空洞受け入れ時 (63.5%)
右： プリチューニング完了時 (97.7%)

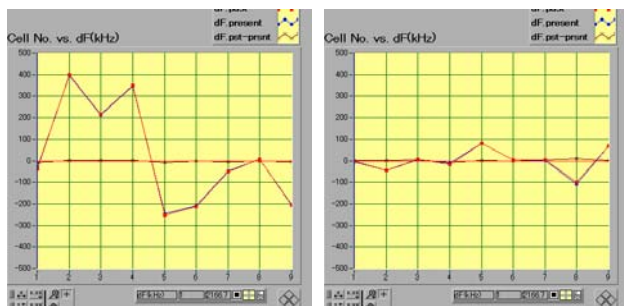


図 6：#4 空洞のセル毎の周波数分布

左： 空洞受け入れ時 ($\Delta f \leq \pm 400$ kHz)
右： プリチューニング完了時 ($\Delta f \leq \pm 100$ kHz)

2 Kでの運転周波数は1300 MHzである。クライオモジュールでの運転時には500 kHz、長さにして2mm弱チューナーで引っ張るテンションをかけるので目標周波数は1299.5 MHzとなる。仕上げ電解研磨50 μ mで-390 kHz、300 Kから2 Kへの冷却で+2300 kHz共振周波数が変わるので、常温、大気圧下での目標周波数を1297.5 MHzに置いてプリチューニングを行った。全長を約10mm(各セル約1mm) 伸ばす事で目標周波数を1297.5 MHz、電場平坦度97%以上を達成出来た。電場平坦度を98%以上にするには目標周波数からのセル間周波数のずれを ± 100 kHz以内に収める必要がある事が分かった。また各空洞共2 Kでの共振周波数は1299.5 MHzと目標値になっている事が確認された。表3に各空洞の共振周波数、全長、電場平坦度の履歴を表す。#1,2 空洞について

は液体ヘリウムで2 Kに冷却しての空洞単体性能試験(縦測定)後の電場平坦度も測定している。縦測定が終了した時点で電場平坦度が下がっているのは注目すべき点である。縦測定前には電解研磨、温水超音波洗浄、高圧水洗処理等を行うが、現状ではプリチューニング完了後に設置する空洞保護のための治具を外してこれらの処理を行っている。そのため一連の処理工程で空洞が変形、あるいは電解研磨に場所毎のムラがある可能性がある。前者については空洞治具を付けたまま表面処理工程を行える様にすることがある。後者は今後の研究課題である。

表 3：共振周波数、全長、電場平坦度の履歴

<<STF Baseline Cavity 履歴>>					
		B.L.C #1	B.L.C #2	B.L.C #3	B.L.C #4
As Received	fo (MHz)	1295.479	1295.742	1295.504	1297.215
	Length (mm)	1251	1250.5	1250.5	1254.5
	Flatness (%)	60	25.3	68.6	63.5
After CBP+EP 100 μ m	fo (MHz)	1294.128	1294.291	1294.044	1295.317
	Length (mm)	1251	1250.5	1251	1254.5
	Flatness (%)	71	30.4	77.1	69.1
After Anneal	fo (MHz)	1294.210	1294.381	1294.063	1295.417
	Length (mm)	1251	1250.5	1250.8	1254.5
	Flatness (%)	71.5	31.2	78.1	68.9
After 1st Pre-Tuning	fo (MHz)	1297.860	1297.567	1297.464	1297.512
	Length (mm)	1263.3	1261.5	1262	1262
	Flatness (%)	98.3	97.8	98.2	97.7
After 2nd Pre-Tuning	fo (MHz)	1298.072			
	Length (mm)	1263.8			
	Flatness (%)	98.1			
After 1st Vertical Test	fo (MHz)	1297.782	1297.182	1297.086	
	Δf (kHz) EP (μ m)	-390 [50]	-385 [50]	-380 [50]	
	Flatness (%)	94.2	95.2	94.7	
After 3rd Pre-Tuning	fo (MHz)	1297.633			
	Length (mm)	1263.9			
	Flatness (%)	96.7			
After 2nd Vertical Test	fo (MHz)	1297.436			
	Δf (kHz) EP (μ m)	-197 [30]			
	Flatness (%)	94.2			

5. まとめ

4台のSTFベースライン9セル超伝導空洞にプリチューニングを行い、加速モードの電場平坦度97%以上を達成し、2 Kでの共振周波数が1299.5 MHzになる事を確認出来た。縦測定後に電場平坦度が下がる事が見出され、表面処理から縦測定に至る工程での空洞の取り扱い方を改善する必要がある事が分かった。

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 2nd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tosu Japan (2005) p194.
- [3] 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, Japan, Osaka University, Mar. 3-4, 2005
- [4] T.Shishido, et al., "Development of pre-tuning system for 972 MHz 9-cell superconducting cavities", 11th Workshop on RF Superconductivity (SRF2003), Sept. 8-12, 2003 (Luebeck/Travemuende, Germany)(https://srf2003.desy.de/sl-srf/Registration?form=list&view=pap_pub Tup42).
- [5] T.Tajima, et al., "Pre-tuning of TRISTAN Superconducting RF Cavities", Proceedings of the 4th Workshop on RF Superconductivity, KEK, Aug. 14-18, 1989, p821