

## A STUDY OF TUNER SYSTEM FOR 9-CELL SUPERCONDUCTING CAVITY

Y. Morita <sup>A)</sup>, Y. Higashi <sup>B)</sup>, T. Higo <sup>B)</sup>, Y. Morozumi <sup>B)</sup>, H. Yamaoka <sup>B)</sup>, H. Hano <sup>A)</sup>, S. Yamashita <sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> International Center for Elementary Particle Physics (ICEPP), the University of Tokyo  
7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-0033

<sup>B)</sup> High Energy Accelerator Research Organization (KEK)  
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

### Abstract

A 9-cell superconducting cavity has been developed for ILC. It is necessary to fix the RF resonance frequency of the cavity to accelerate charged particle effectively. But the cavity is deformed by Maxwell stresses (Lorentz Force) and the value of RF resonance frequency changes (Lorentz Force Detuning). The RF resonance width is so small because cavities are operated under the superconducting state at 2K. So the Lorentz Force Detuning will have great influence on the efficiency of acceleration. Therefore the tuning system to stabilize the RF resonance frequency is needed. We developed a tuner called "the ball screw tuner" which compensates the Lorentz Force Detuning using the mechanical resonance of the cavity. For this study, we mechanically excited the cavity and monitored the associated frequency shift. Several mechanical resonance frequencies of the cavity were found below 3kHz and sufficient amplitude of tuning was obtained at 173Hz. It was also verified that the slope of 173Hz sine wave suits for that of Lorentz Force Detuning. This report shows the results of measurements and the discusses the performance evaluation of the ball screw tuner at liquid nitrogen temperature.

## ILCに向けた9セル超伝導空洞のためのチューナーに関する研究

### 1. はじめに

国際リニアコライダー計画(ILC)のために9セル超伝導加速空洞の開発が行われている。超伝導加速空洞はQ値が非常に高いので、効率よく荷電粒子を加速するためにはRF共振周波数の設計値からの変動に厳しい制約(250Hz以内)が課される。しかし、空洞内にマイクロ波を供給するとMaxwell応力(ローレンツ力)により空洞が機械的に変形し、RF共振周波数が許容範囲を超えてずれてしまう(Lorentz Force Detuning)。これを補償するためのシステムがチューナーである。我々はボールスクリュー型チューナーと呼ばれるチューナーを開発して、液体窒素温度において性能評価を行った。

### 2. 超伝導加速空洞

図1はILCのための超伝導加速空洞である。ニオブ材を用いた9連型の空洞で、液体ヘリウム(2K)で冷却して超伝導状態で運転する。ILCに約3万台インストールされ、電子及び陽電子の加速に用いられる。ILCが要求する加速勾配は31.5MV/mである。

### 3. Lorentz Force Detuning

空洞にマイクロ波を供給した際にMaxwell応力により空洞が変形し、RF共振周波数にずれが生じる現象をLorentz Force Detuningという。31.5MV/m運転時に生じる空洞の変形量のシミュレーション値を表1に示す<sup>[2]</sup>。Z方向はビーム軸方向、R方向はそれと

垂直な方向を表わす。31.5MV/m運転時の全detuning量のシミュレーション値は1270Hzであり、許容値250Hzを超えてしまう。よって、機械的変形を空洞に与えてLorentz Force Detuningを補償する必要があり、そのためのシステムがチューナーである。



図1. Low loss型超伝導加速空洞

	変形量
Z方向	0.94 $\mu$ m
R方向	0.10 $\mu$ m

表1. 31.5MV/m運転時の空洞の変形量

#### 4. ボールスクリュウ型チューナー

図2がボールスクリュウ型チューナーである。空洞が入るヘリウムベッセルの左右部分がチューナーを介して連結されており、図2中のA (a worm and worm gear)が回転すると空洞全長が伸縮する<sup>[3][4]</sup>。

その設計概念はステッピングモーターとピエゾ素子を交換しやすいように、外に突き出す形で取り付けられていること、及び放射線の影響や冷却によるピエゾのストロークの低下を防ぐためにピエゾを空洞から離して常温に近いところに取り付けていることである。また、ボールスクリュウは剛性が強く、非常に確立した技術であることも挙げられる。

ボールスクリュウ型チューナーの役割は2つある。1つは空洞をビームラインにインストールした後にRF共振周波数を設計値に一致させるために空洞全長を微調整すること (Slow tuning)。もうひとつは空洞運転中にLorentz Force Detuningを補償すること (Fast tuning)である。Slow tuningではステッピングモーターを用いてAを回転する。空洞は設計値よりも短くセットしてインストールしておき、Slow tuningにより空洞をビーム軸方向に引っ張って最適な長さに調整する。Fast tuningではピエゾアクチュエーターを用いてAを回転させ、全長を伸縮させる。本報告ではfast tuningの評価について述べる。

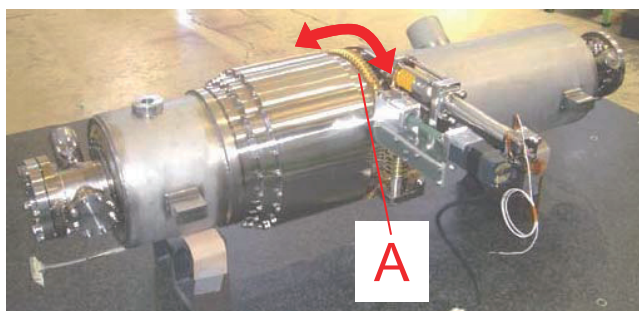


図2. ボールスクリュウ型チューナー

#### 5. 補償の方法

マイクロ波を空洞に供給したときのLorentz Force Detuningのシミュレーションは図3のようになる<sup>[2]</sup>。これを補償するためにチューナーを用いて空洞をZ軸方向に変形させるのであるが、ピエゾ素子に掛かる負荷を小さくするために、我々は空洞の機械的共振を利用することにした<sup>[1]</sup>。ピエゾを用いて空洞を機械的共振周波数で振動させ、そのスロープをマイクロ波の立ち上がりに合わせてやることで補償を行う (図4)。

また、空洞を叩き始めてから振幅が最大になるまでの時間を実験から知ることができるので、その時間を基に叩き始める時間を調整して、マイクロ波の立ち上がりと空洞励振のタイミングを合わせることができる<sup>[4]</sup>。

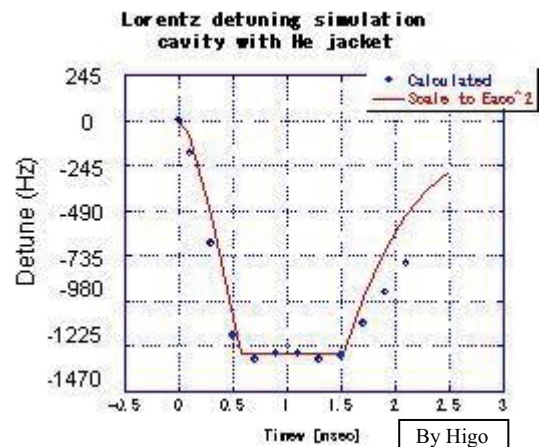


図3. Lorentz Force Detuningのシミュレーション。青点がシミュレーション値、赤線はマイクロ波のエネルギーを表わしている。

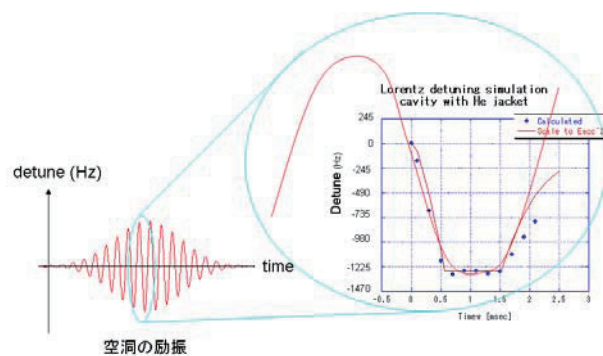


図4. 補償の方法。空洞の励振のスロープをマイクロ波の立ち上がりに合わせる。

#### 6. 測定結果

液体窒素温度下においてピエゾに350Vのサイン波を印加し、周波数を3kHz以下の範囲でスイープしたときの共振周波数のずれを記録した。結果を図5に示す。図から173Hzと245Hzに大きなピークがあることがわかる。そこで、ピエゾに173Hzの振動を連続で与えた場合及び1周期、5周期、10周期、15周期だけ与えた場合において空洞の周波数変化量を測定し、プロットした (図6)。245Hzについても同様にプロットした。図より173Hzの連続運転では周波数変化量が約1350Hzに達し、補償に必要な値1270Hzをカバーできることがわかる。

マイクロ波によるLorentz Force Detuningの図に173Hzのサイン波の図を重ねてみると図7のようになる。この図からMaxwell応力によるdetuningと空洞の励振による周波数変化 (sine wave) の差は0~1.5msにおいて250Hz以内に収まっており、補償が可能であることを示唆している。

また、ピエゾのストロークが印加電圧に比例すると仮定すると、図6左より15cyclesで950Hzに到達していることから、470V印加すれば1270Hzに到達できる。しかし、173Hzは運転繰り返し周波数(5Hz)の整数倍ではないため、ピエゾを連続駆動しては補償のタイミングを合わせられない。そこで、次の方法を採用。

173Hzで15cycles叩いたときの振動の様子を図8に示す。この図から、叩き始めからピークに達するまで約90msであるから、マイクロ波供給の約90ms前からチューナーを働かせ始めれば良いことになる。その後、逆位相で空洞を叩き、約90msで減衰して、次のパルスの約90ms前から再び励振を再開すればILCで予定されている5Hz運転に対応できる。

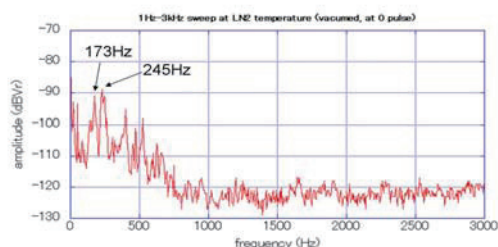


図5. ピエゾ素子を3kHz以下の範囲でスイープした。縦軸は共鳴周波数の変化を表わす。173Hz及び245Hzに大きなピークが見える。

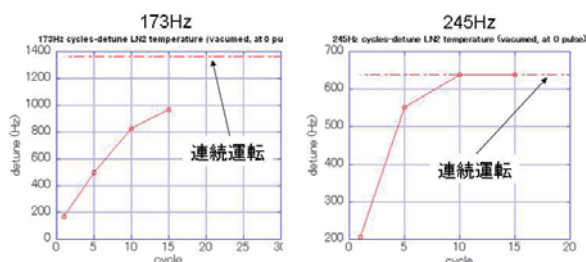


図6. 173Hz及び245Hzで叩くcycle数を変えたときの周波数変化量の変化。

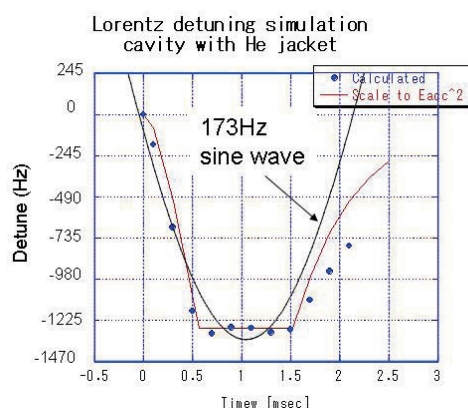


図7. Lorentz Force Detuningのシミュレーションと173Hzのサイン波（空洞励振によるdetuning）を重ねた図。0~1.5msにおいてサイン波とLorentz Force Detuningの差が250Hz以内に収まっている。

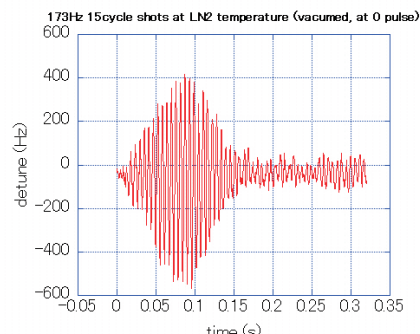


図8. 173Hzで15cycles叩いたときの空洞の励振の様子。叩き始めからピークに達するまで約90msである。

## 7. おわりに

シミュレーションによると、Lorentz Force Detuningの大きさは1270Hzである。図6から173Hzの空洞の励振によって十分な周波数変化量が得られることがわかった。さらに、マイクロ波立ち上がりの際のLorentz Force detuningも補償できることがわかった(図7)。今後の展望として、いくつかの機械的共振モードを足し合わせればより効率的な補償ができると考えている。

また、マイクロ波供給の約90ms前から空洞を励振し始めるとタイミングを合わせられることもわかった。

なお、77K以下では金属の線膨張係数及び機械的Q値の温度依存性はほとんどなくなるので本実験では液体ヘリウムの代わりに液体窒素を用いて試験を行ったが、超流動液体ヘリウムを用いると粘性の違いによる変化が現れる可能性がある。

## 参考文献

- [1] Y.Higashi, "Tuner study", 54th WG5-Asia meeting on 1st March 2007, URL:<http://lcdev.kek.jp/ILC-AsiaWG/WG5Notes/20070301WG5meeting/Tuner070224.pdf>.
- [2] T.Higo "Transient Lorentz Detuning", 47th WG5-Asia meeting on 20 October 2006, URL:<http://lcdev.kek.jp/ILC-AsiaWG/WG5notes/20061020WG5meeting/061020Higo/061020TransientLorentzDetuning.pdf>.
- [3] T.Higo, et al., "WIDE-RANGE FREQUENCY COMPENSATION BY COAXIAL BALL-SCREW TUNER (THP037)", Proceedings of LINAC 2006, Knoxville, Tennessee, USA, Aug. 21-25, 2006
- [4] T.Higo, et al., "Test Operation of Ball-Screw-Type Tuner for Low-Loss High-Gradient Superconducting Cavity in a Cryomodule (WEPMN026)", Proceedings of PAC07, Albuquerque, New Mexico, USA, Jun. 25-29, 2007