

High Power Test Result on STF LL 9-Cell Cavity

Kenji Saito¹, Takayuki Saeki, Yasuo Higashi, Fumio Furuta, Masato Sato, Toshiyasu Higoi, Yuichi Morozumi, Hiroshi Matsumoto, Sergei Kazakov, Toshihiro Matsumoto, Shinichiro Michizono, Takako Mura, Yoshiharu Yano, Hiroaki Katagiri, Takeru Takenaka, Mitsuo Akemoto, Shigeki Fukuda, Norihito Ouchi, Kiyosumi Tsuchiya, Hirotaka Nakai, Yuji Kojima, Kazufumi Hara, Kota Nakanishi, Atsushi Kabe, Kenji Hosoyama, Takayuki Kanekiyo*, Yasuo Ajima, and Hiromi Hisamatsu

High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

1-1 Oho, Tsukuba-shi, Ibaragi-ken, 305-0801, Japan

* Hitach Technologies and Services Co. Ltd., Kandatsu, Tsuchiura, Ibaragi-ken, Japan

Abstract

我々はILC超伝導空洞の開発としてLow loss形状の高電界超伝導空洞を開発している。2008年1月終わりにから3月終わりにかけて2ヶ月間、KEK STFで一台のLL空洞の大電力試験を行った。空洞の加速電界は18MV/mレベルではあるが、LL-9セル空洞に必要な大電力RF入力カップラーやLorentz detuning補正用のピエゾチューナーは旨く機能することが確認できた。

LL 9セル空洞のSTF大電力試験結果

1. はじめに

KEKのILCの超伝導空洞の開発は、ILCのベースラインとなっているTESLA (like)形状とalternativeとされるLL(Low loss)形状の二つの開発グループで行われている。我々は、後者のグループである。ILCのLL空洞スペックは、空洞受け入れ性能として $E_{acc} > 40 \text{ MV/m}$ 、 $Q_0 > 1 \times 10^{10}$ @ 40 MV/m 、運転加速電界は 36 MV/m である。この高電界での運転では、Lorentz detuning(LD)が大きくなるので広帯域のLDを補償できるチューナーや500kWをハンドリングできる大電力入力カップラーが必要になる。高電界空洞だけでなく、広帯域LD補正チューナーやRF大電力入力カップラーを独自に開発する必要に迫られ、現在この三つ(Cavity package)を平行開発している。空洞の開発は、LL単セル空洞では $47 \pm 2 \text{ MV/m}$ のレベルを統計的(ばらつき4%、歩留まり100%)に達成しているが[1]、9-セルでは 20 MV/m レベルで尚一層の努力が必要である。一方、チューナーと大電力入力カップラーは常温試験ではその仕様を満たすものが開発されている。

空洞を加速器で運転するためには、空洞へのチューナーやRF入力カップラーの装着、さらには10台のcavity packageを接続して、一台のストリングにして、クライオモジュールに組み込まなければならない。クライオモジュールに組み込まれたCavity packageは冷却された後、スペック性能が出ることを確認しなければならない。今回はLD補正チューナーやRF入力結合器の低温性能や空洞組立における問題の洗い出しのために、 20 MV/m レベルの空洞を使ってSTFで大電力試験を行った。その結果について報告する。

2. CCカップラーの性能

2.1 CCカップラーの構造と常温性能

我々は図1に示すように、極低温で同軸RF入力カップラーの内導体からの空洞への熱侵入を抑えるためまた、カップラーをハイテク・ローテク部の4つにモジュール化して、量産時の製作コスト削減を狙って、同軸タイプのcapacitive結合のRF入力カップラー(CCカップラー)を開発した[2]。その暫

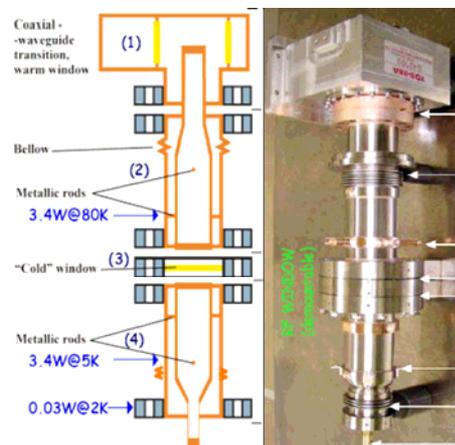


図1: Capacitive Coupling Coaxial Input Couplerの構造

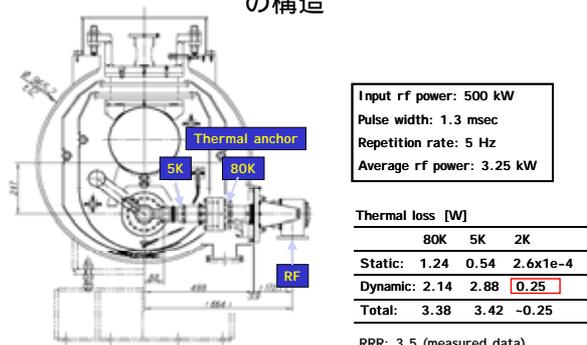


図2: Capacitive Coupling Coaxial Input Couplerの暫定目標性能

¹ E-mail: kenji.saito@kek.jp

定的目標性能を図2に示す。このカップラーは、常温テストベンチでの15時間程度のエージング試験で2MWのパワーを通すことに成功している[3]。今回の試験では、それをテストベンチから取り外して空洞に装着し、クライオモジュールに組み込んだ後、常温エージングを行った。

2.2 モジュールでの性能

今回のSTF試験では、ビームがないことや空洞加速電界20MV/m程度までしか出ないことが分かっているため、また大電力でのカップラーの破損事故を避けるために、ILCベースラインのスペックの350kW(常温)までエージングした。このカップラーはテストスタンドでのエージング試験の後スケジュールの都合で4ヶ月間、クラス10のクリーンルームの空気に晒された。今回、27時間のエージングで特に問題なく350kWが達成できたのは驚くべき事である。その安定性能の理由は、カップラーの内・外導体にチタンコーティングがされているためと考えられる。

モジュール冷却後、4Kで250kWまでパワーが入ることを確認した。2Kで空洞全反射モードでカップラーにパワーを入れ、冷凍機側のヘリウムガスの蒸発量から2Kの空洞へのカップラーのダイナミックロス測定した。結果を表1に示す。空洞へのダイナミックロスの目標値0.25W@500kWに対して、0.75W@250kWであった。ダイナミックロスの低減が今後の課題であることが分かった。

表1：CCカップラーの2Kへのダイナミックロス

Input power [kW]	Dynamic loss [W]
25	No detected
100	0.35 ± 0.22
170	0.34 ± 0.16
250	0.72 ± 0.025

3. チューナーの低温性能

3.1 Lorentz Detuning補正

超伝導空洞は、運転中に空洞周波数調整やデチューンしたりする必要があり、パルスモーターで空洞を機械的に伸縮させる機構(スローチューナー)が必要である。また、ILC超伝導空洞は2.8mm厚の薄板ニオブ材から製作されているので、空洞内にマイクロ波による強い電磁マックスウエル応力により空洞周波数がデチューン(Lorentz detuning: LD)されるので、これを補償する機構が必要である。LD効果は加速電界の二乗に比例して大きくなる。 piezo素子などで空洞に変形を与えて、このLDによる周波数変化を補償する方法が一般的である。図3にそのLD補正原理を示す。piezoに250Hz程度のサイン波電圧を掛けて空洞を叩き、空洞機械振動を通して空洞を変形させ、RFパルス1.5msの中で周波数の変化を補正する。

3.2 Coaxial ball tunerのチューニング機構

我々は、LL空洞での高電界運転用に図4に示すCoaxial ball tunerを開発した[4]。このチューナーの駆動機構を図5に示す。ウォームギヤを介してパルスモーターで両端に逆ネジを切ったパイプを回転し、ヘリウムジャケットに溶接したベローズを伸縮させる。空洞とジャケットは溶接一体構造になっているので、ジャケットの伸縮は空洞長を変え、空洞周波数が変わる。パイプの回転摩擦を低減するためにボールベアリングを使用している。piezoチューナーは、piezo素子がパルスモーターシャフトを叩くことで空洞に変形を与える。このCoaxial ball tunerの特徴は、1) 空洞の可変周波数領域が広いこと、2) パルスモーターやpiezo素子を80Kシールド領域に設置し、故障の際修理が容易であること、現在はクライオモジュールの中に設置しているが、クライオモジュールの外にも置くことができる、3) チューナー自身が強い剛性を持っているので空洞ストリング組立が容易である。

図6は、piezoに251Hzの1周期のサイン波電圧でpiezoを励起してLL空洞を励振させた時の空洞位相応答を示す。少し遅れて最大位相変化のピーク

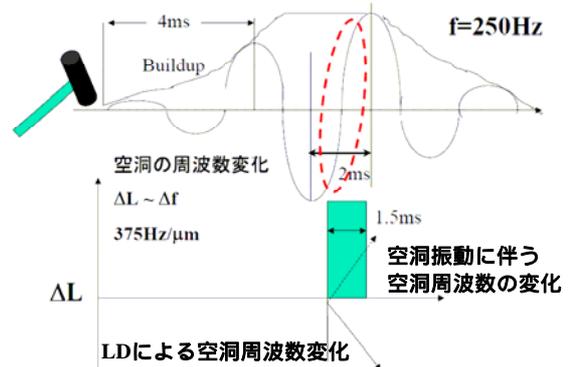


図3：piezoによるLD補正原理

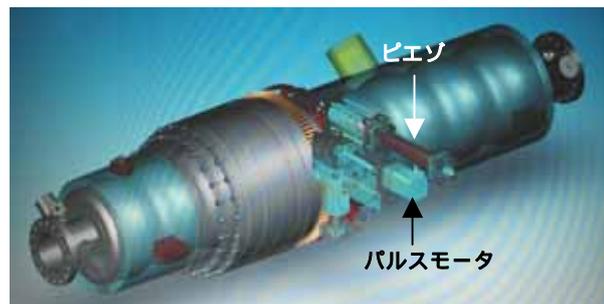


図4：LL空洞用Coaxial Ballチューナー

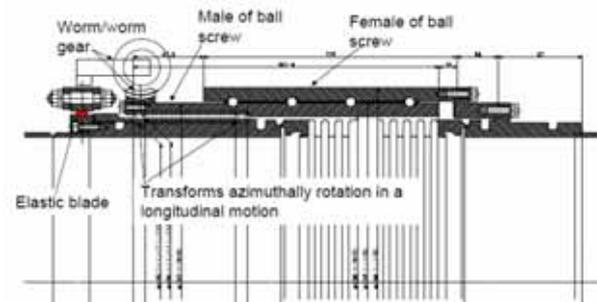


図5：Coaxial Ball チューナーの駆動メカニズム

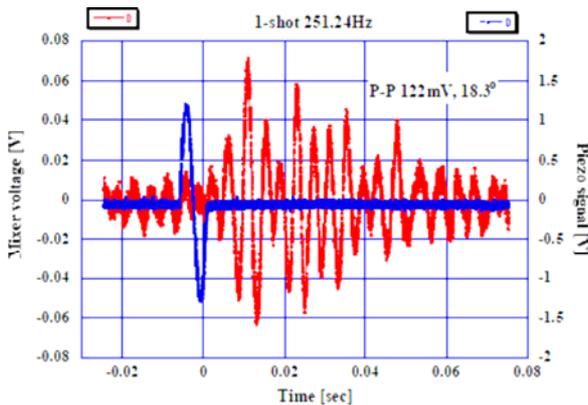


図6：ピエゾで1ショットのサイン波でLL空洞を機械的に励振した時の空洞の位相変化

が現れる。空洞に大きなチューニングを与えるためには、RFパルスよりこの遅れ分だけ早くピエゾを励起する必要がある。

3.3 ピエゾチューナーのLD補正幅

図7は空洞温度2Kで、パルスモータで空洞のプリロードを変えながら、ピエゾチューナーで空洞に241~252.42Hzのサイン波を1ショットから4ショット打って、空洞位相の変化量を調べた結果である。1ショットでは20度の空洞位相、周波数変化にして133Hz、4ショットで最大470Hz (pre-load 130kHz)までコントロール出来ることが分かった。

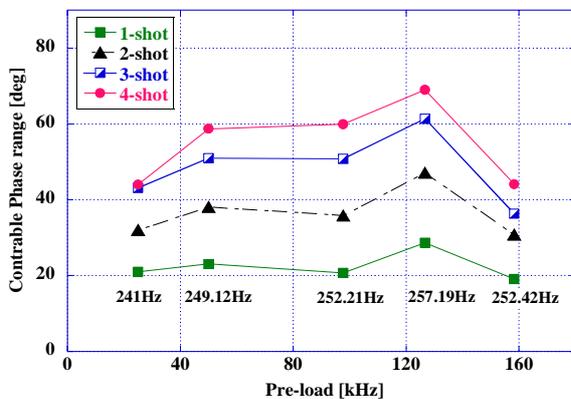


図7：ピエゾショット数と空洞の位相変化

3.4 LD効果とピエゾチューナーによるLD補正

図8は、空洞を加速電界17MV/m, 1.5ms, 5Hzのパルス運転中、ピエゾによるLD補正"ON"/"OFF"の場合の空洞位相変化を示す。図中上部のパルス波形は空洞電圧である。空洞電圧にはクライストロン出力のフィードバックコントロールは掛けられていない。図中下部の波形は、クライストロン出力と空洞ピックアップパワーのミキサー出力である。直線的に下がっているのが、ピエゾ"OFF"の場合である。ピエゾを"ON"するとLD効果が補正されて位相は一定になる(青あるいは赤のシグナル)。ピエゾは252.4Hzで2ショット励起された。さらに条件を追求することで17.4MV/mで1ショットで空洞位相をコ

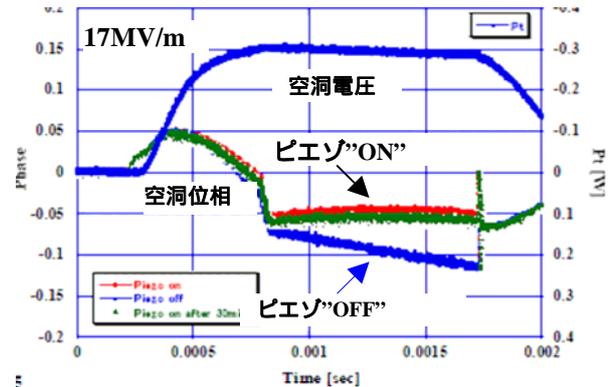


図8：ピエゾによる空洞位相コントロール

ントロールすることにも成功した。今回の試験で18.6MV/m(空洞性能の限界)までピエゾチューナーは旨く作動することが確認できた。これは、今回の試験の大きな成果である。

3.4 チューナーの今後の課題

残された課題は、ピエゾチューナーの運転により空洞周波数が多少変わってしまうこと、スローチューナーに大きなヒステリシスがあることである。これらは、ウォームギヤの遊びによるものと考えられるが、今後の対策が必要である。また、今回の試験ではピエゾチューナーのLD補正レンジは470Hzと目標の半分に留まっている。77Kでの要素開発では2kHzまで達成されているので、今回の結果との食い違いについてより詳細な解析・実験が必要である。

4. 空洞試験結果

4.1 Nb/SUS異材接合のリークタイト性の実証

当初、STFでの大電力試験は、KEKベースライングループ、LLグループ用の夫々の横クライオスタット(各々に4台の空洞を収納できる)に1台の空洞を入れ、STFトンネル内でこの二つをジョイントして冷却する予定であった。しかし、最初の冷却試験時にLL空洞側のコールドマスに常温リークが発生した。LL空洞は、ヘリウムジャケットの材質をステンレスにするために、図9に示すようにジャケットのベースプレートの付け根部で、HIPによるNb/SUSの異材接合を使っている。勿論その部分の要素試験では超流動ヘリウム下でリークタイトであ

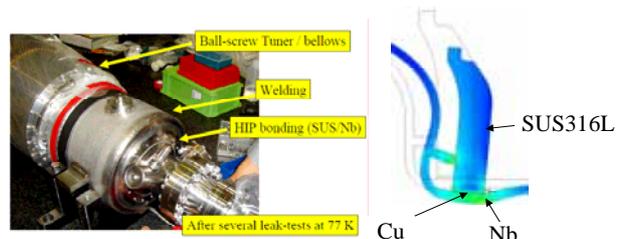


図9：LL空洞のヘリウムジャケット付け根部のHIPによるNb/SUS異材接合(右図は、この異材接合での熱応力による端版の歪のシミュレーション結果を示す)

ることが確認されているが[5]、空洞での確認は今回が初めてであり、実績のないこの接合部が疑われた。LL空洞をクライオモジュールから取り出して、詳細なリーク試験を行った。また、液体窒素による4回のコールドショックを追加したが、リークタイトであった。空洞を再度クライオモジュールに組み込み、今回の一連の大電力試験では2Kでリークタイトであった。今回の試験の一つの大きな成果は、この異材接合法がヘリウムIIでリークタイトであることを空洞で確認出来たことである。先に起こった常温リークの原因は今も定かでない。このハプニングのためにSTF大電力試験は、両方のグループが独立に行うことになり、ベースライングループが先行し、我々は後追いになった。

4.2 LL9セル空洞の性能

今回の大電力試験で使ったLL空洞の縦性能試験結果を図10に示す。13MV/m辺りからフィールドエミッションが発生し、最大加速電界は19MV/mに制限された。空洞性能はそれ程良いものではない。先に述べたリークハンティングの後、クライオモジュール組立前に、この空洞をアルコール洗浄・脱脂洗浄・超純水高圧洗浄した。

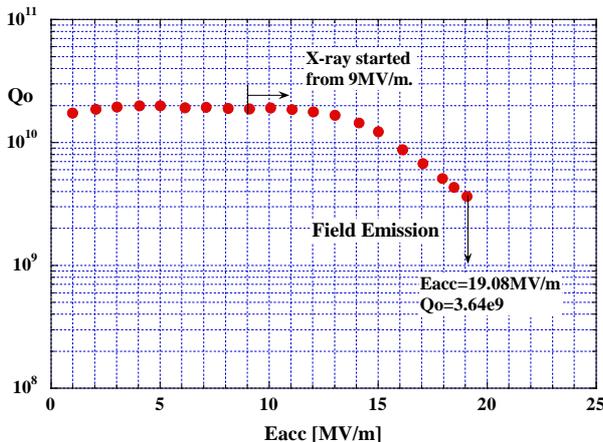


図10：今回の大電力試験に使ったLL空洞の縦性能試験結果

4.2 2K冷却でのRFパラメーター

2Kに空洞を冷却した時のRF入力結合器の結合定数は、予定値 $Q_L=2.2E6$ に対して、 $1.70E6$ であった。空洞電圧測定用のピックアップ結合器の Q_t は $1.03E+12$ であった。これは、縦測定の結果と一致した。空洞周波数は、常温で $f=1297.6546\text{MHz}$ 、84Kで 1299.6293MHz @ 2.0mm Pre-loaded、4.2Kで 1300.000496MHz 、2Kで 1299.975158MHz (目標 1300.000000MHz)であった。

4.3 STF大電力パルス試験での電界性能

図11に示すように、STFでの空洞のエージングは2時間で1.5msのフルパルス幅で22MV/mまで達し、その後パルス幅を700 μs に狭めて25MV/mまで到達した。この空洞エージングでは、10~20/MV/mの間でクライオモジュール下流約1mの所で最大5 $\mu\text{S/hr}$

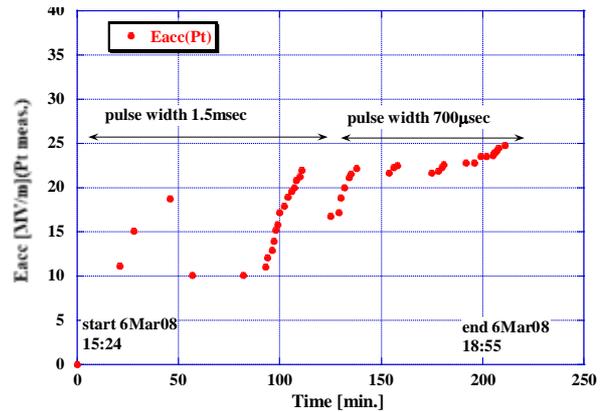


図11：空洞のエージングと到達加速電界

の極僅かなX線を観測した。これは、空洞の横組立に問題がないことを示唆する。

4.4 LD効果の確認

LD効果は10MV/m以下の加速電界では、観察できなかった。図12は、加速電界18MV/mでクライストロン周波数を空洞同調周波数の周りで振った時の空洞電圧(Pt)のクライストロン周波数(f)依存性、空洞位相変化である。LD効果がない場合、f-Ptカーブは上に凸のパラボラになるが、LD効果のために歪んでいることが分かる。図13は空洞同調周波数でのRFパルス内の空洞電圧(~18MV/m)の時間変化である。LDによる空洞周波数のずれによってパルスのフラットトップ内で電圧が下がって行くのが観察され

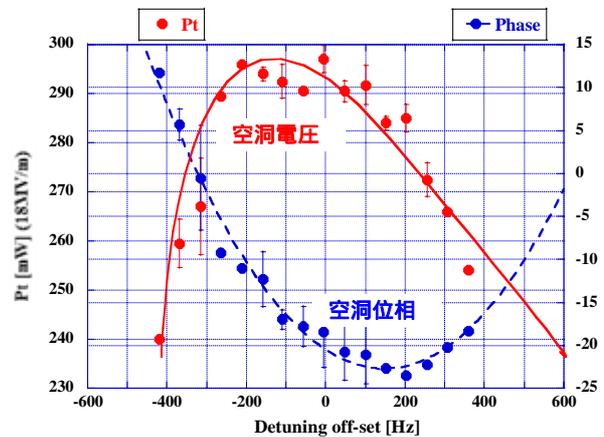


図12：加速電界18MV/mでのLD効果

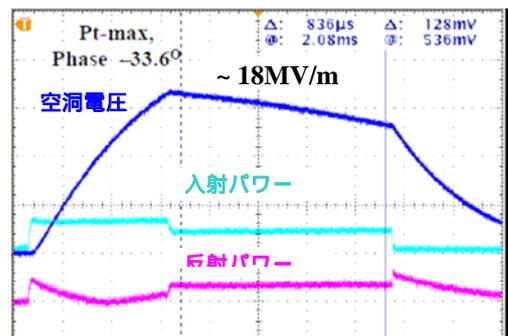


図13：LD効果による空洞電圧の歪み

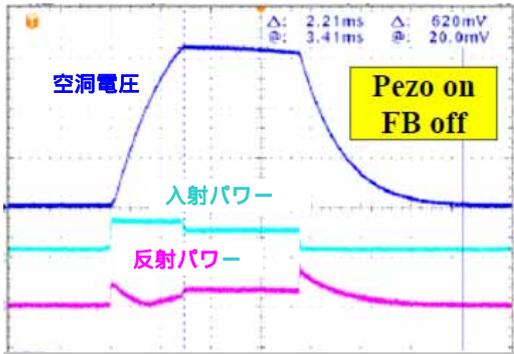


図14：ピエゾチューナーを”ON”した時の空腔電圧波形

る。図14はピエゾチューナーを”ON”した場合の空腔電圧を示す。この時、クライストロン出力のフィードバックは掛けていない。ピエゾによりLD効果が旨く補正されてフラットトップで空腔電圧をほぼ一定に出来ていることが分かる。

4.5 LL空腔のLorentz detuning量の測定

今回の空腔試験課題の1つは、パルス運転でのLL空腔のLorentz detuning(LD)量を測定することである。TESLA空腔との比較を行うために、15MV/mでのパルス(1.5ms)内で100 μ s毎のLD量を調べた。方法は、文献[2]と同じである。クライストロンのRFパルス幅を100 μ sづつ伸ばしながら、RF-OFFの所での空腔位相の傾きから空腔detuning量を求めた。結果を図11に示す。TESLA空腔は、パルス長1.3msで測定され、全LD量は-122Hz@15MV/mと報告されている[2]。我々の結果は、1.5msのパルス幅で全-138Hzであった。パルス幅の違いを考慮すれば、TESLA空腔と同じである。空腔電圧が一定になるフラットトップでもLD量を調べた。フラットトップ内でのLD感度係数 k_L ($\Delta f = \kappa_L \cdot Eacc^2$)は、空腔に掛けるpre-loadによって異なり、-0.6 ~ -1.1Hz/(MV/m)²であった。

LL空腔の全LD量の定常解析の結果は、-281Hz@15MV/m、-1240Hz@31.5MV/m、-2000Hz@40MV/mである[6]。今回の15MV/mでのパルス運転の結果をスケールすれば、1.5msで-600Hz @ 31.5MV/m、-1000Hz@40MV/mと予想される。

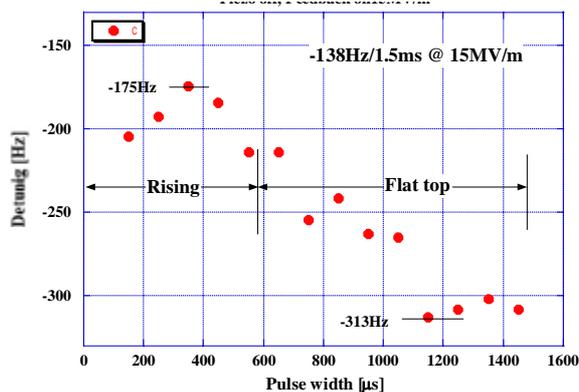


図15：1.5msのパルス内でのLorentz detuning量

4.6 空腔のQ値の測定と17MV/mでの安定運転

9、11、13、15、17MV/mの各加速電界で空腔を1.5ms、5ppsで運転して、液体ヘリウムの蒸発量からQ値の測定をした。この時、クライストロン出力のフィードバックはOFFである。結果を図16に示す。Q値の加速電界依存性の傾向は、縦測定の場合によく似ている。しかし、Q値の低下は10MV/m以上で縦測定よりも甚だしい。

17MV/mでピエゾチューナーを運転(ピエゾ電圧のフィードバックコントロールなし)して、30分の連続運転を試みた。その途中で空腔位相を測定して、安定度を調べた。結果を図17に示す。特別なフィードバックがないにも関わらず、 ± 2 度の安定度が得られている。

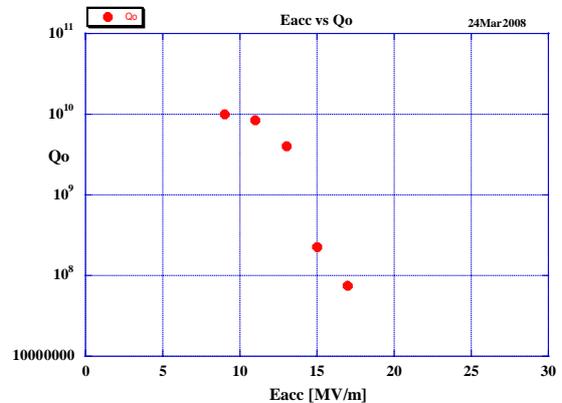


図16：STF大電力試験でのLL空腔のQ値の測定結果

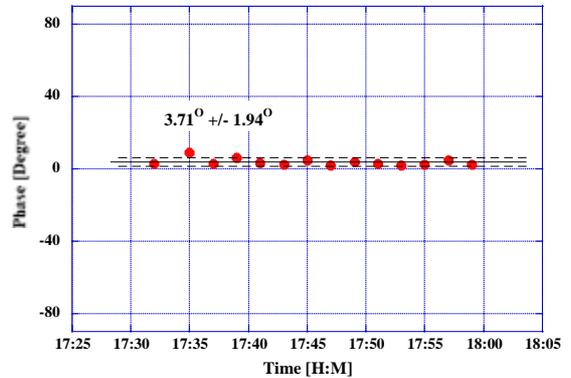


図17：17MV/mでの連続運転中の空腔位相変化

4.7 デジタルフィードバック運転

RF low levelコントロールグループが、この空腔を18.6MV/mでデジタルフィードバック運転した。1.5ms 5pps、ピエゾ”ON”での運転である。また、空腔電圧にクライストロン出力フィードバックが掛けられた。この時の空腔RF波形を図18に示す。このフィードバックにより、空腔電圧は一定にコントロールされた。この時のフラット・トップ内での電圧のふらつきは $3.1E-4$ (rms)以下、位相のふらつきは $5.0E-2$ (rms)以下であった。

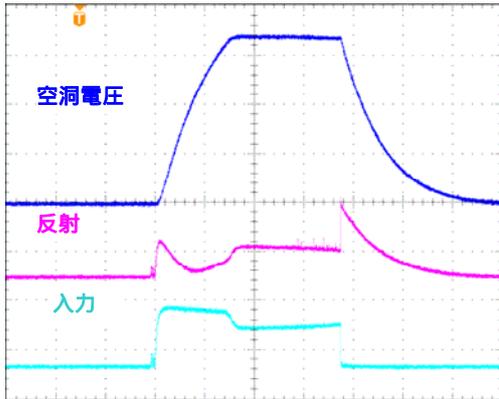


図18：RFフィードバックした場合のRFシグナル

4.8 空洞の機械振動モード、microphonicsの測定

2KでLL空洞の機械的固有振動数を測定した。結果を図19に示す。ピエゾで周波数0Hzから1kHzまでスキャンしたときの空洞位相の出力である。140Hzと270Hzに強い共振固有モードが存在する。ピエゾチューナーのLD補正では、270Hz辺りの固有モードを励振した。これらの固有振動モードの機械的Q値の測定を試みた、あまりきれいなデータが取れなかった。図20にその一例を示す。270Hzの振動のQ値はおおよそ300と推定される。機械的Q値はLD効果のパルス応答で重要なパラメーターである。そのより正確な測定は今後の課題である。

環境攪乱による機械的ノイズから発生する空洞位相振動（microphonics）の測定を4Kで行った。空洞位相のふらつきは ± 0.5 度で、周波数のふらつきに換算して ± 3 Hzであった。

5. まとめ

- 1) LL空洞パッケージの初めての電力総合試験に成功した。加速電界が18MV/mレベルでは、LL空洞、CCRF電力入力カップラー、ピエゾチューナーの全てが旨く作動することが確かめられた。
- 2) LL空洞のLorentz detuning量はTESLA空洞と同等であることも確認できた。
- 3) ヘリウムジャケット付け根のHIP接合法によるNb/SUS異材接合は超流動ヘリウム下でもリークタイトであることが実証できた。

今後の課題は、30MV/m以上の高電界での実証である。高電界LL 9セル空洞の開発が急務である。

参考文献

- [1] F.Furuta et al., in this meeting
- [2] H.Matsumoto, S.Kazakov et al., "A New Design for Superconducting Cavity Input Coupler", Proceedings of the 30th Linear Accelerator Meeting in Japan.
- [3] H. Matsumoto, S. Kazakov et al., "High Power Test of Coupler with Capacitive Window", Proc. of PAC 2007, Albuquerque, New Mexico, U.S.A., June 2007.
- [4] Y.Higashi et al., WG5 bi-weekly report <http://lcdev.kek.jp/ILC-AsiaWG/WG5notes/14th->

meeting/Tuner050422.pdf

[5] F.Furuta, WG5 bi-weekly report

<http://lcdev.kek.jp/ILC-AsiaWG/WG5notes/15th-meeting/050506furuta.pdf>

[6] Y.Morozumi, private communication

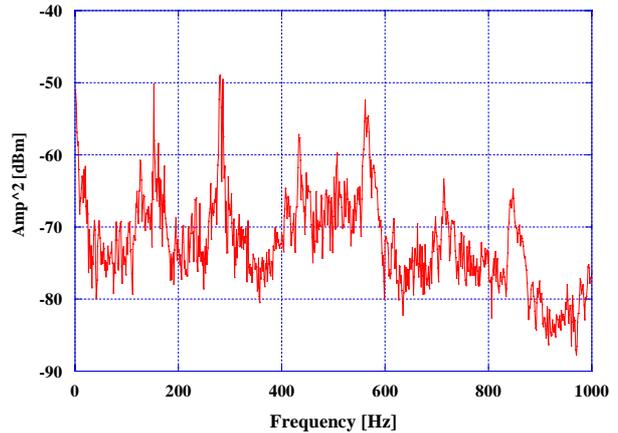


図19：LL空洞の振動モードの固有振動数

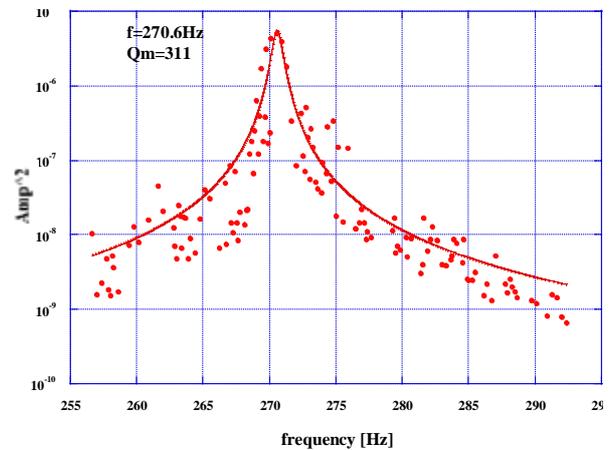


図20：機械的Q値($f=270.6$ Hz)の測定例