

cERL 9セル空洞のマイクロフォニクス原因調査 INVESTIGATION ABOUT CAUSE OF MICROPHONICS ON CERL 9-CELL CAVITY

江木昌史 ^{*A)}、梅森健成 ^{A)}、江並和宏 ^{A)}、阪井寛志 ^{A)}、沢村勝 ^{B)}、古屋貴章 ^{A)}、
Masato Egi ^{*A)}、Kensei Umemori ^{A)}、Kazuhiro Enami ^{A)}、Hiroshi Sakai ^{A)}、Masaru Sawamura ^{B)}、Takaaki Furuya ^{A)}

^{A)}High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

^{B)}National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology

Abstract

Since the accelerating voltage and the RF phase tend to fluctuate under the condition in which superconducting accelerating cavities have high Q-value, LLRF system suppresses these fluctuations. In CW(Continuous Wave) operation on cERL in KEK, the fluctuations are actually observed on 15Hz and 50Hz. Assuming further higher Q-value operation in the future, the cause of these fluctuations were investigated.

1. はじめに

高エネルギー加速器研究機構 (KEK) ではエネルギー回収ライナック (ERL: Energy Recovery Linac) の実証加速器としてコンパクト ERL(cERL) が建設されビーム運転も行われた [1]。主線形加速器 (Main Linac) にはジュール損失の少ない超伝導空洞を用い、ビームの加減速を行う。超伝導空洞は高い Q 値を持つために RF 共振周波数の揺らぎに敏感であり、cERL 加速器運転中に RF 共振周波数は実際に 15Hz と 50Hz で揺らいでいることが観測されている。今後、更に高い Q 値で運転することを想定し、これらの揺らぎの原因を調査した。

2. マイクロフォニクスと LLRF

cERL の Main Linac には L バンド 9 セル超伝導加速空洞 (以下、9 セル空洞) が 2 台使用されている [2]。9 セル空洞の個々のセルは厚さ約 3mm のニオブ板をプレス加工し楕円空洞の要素部品を作り、それらの要素部品を電子ビーム溶接により繋ぎ合わせて 9 セル形状を形成する [3]。

RF 共振空洞は形状により RF 共振周波数が決定される。9 セル空洞はニオブ板をプレス加工して作るので変形は比較的容易であり、各セルを個別に伸縮させ、最終的に 9 セル空洞全体の RF 共振周波数が 2K の低温状態で 1300MHz になるように調整される [4]。9 セル空洞の全長 1m に対し 1 μ m の伸縮を与えると約 300Hz の周波数変化が生じる。また実際の加速器運転では 9 セル空洞の Q_L は 2×10^7 に調整され、RF 共振周波数 1300MHz に対し 32.5Hz の周波数変化が変形により発生すると加速電界で $1/\sqrt{2}$ 、RF 位相で 45deg の変化を引き起こす。9 セル空洞に機械的振動が加わり変形が生じると、RF 共振周波数が揺らぎ、加速電圧と RF 位相も揺らぐことになる。この現象をマイクロフォニクスと呼んでいる。

低電力 RF(LLRF) システムは空洞の加速電圧と RF 位相を一定に維持する他、RF システムに異常が発生した時に RF 出力を落とすなど安全を担う制御システムである。マイクロフォニクスが発生していれば、LLRF はこれによる加速電圧と RF 位相の揺らぎを抑制しようと

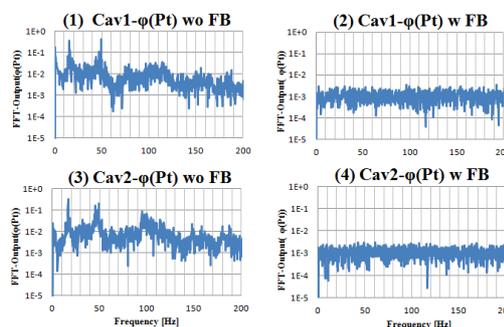


Figure 1: Microphonics on 9-cell cavities. There are 15.4Hz and 49.3Hz as the components in Cavity#1, and 16.9Hz, 45.6Hz, 49.3Hz as well as 100Hz in Cavity#2. When the feedback function on LLRF system is turned on, the fluctuations of the the RF phases and the accelerating voltages are suppressed.

する。Main Linac の 2 台の 9 セル空洞からの RF 信号 (P_i) を LLRF システムを通し実際に観察すると、共通して 15Hz 付近と 50Hz で RF 位相が揺らいでいることが分かる (Figure 1)。加速電界も同様に揺らいでいる。これらはマイクロフォニクスの可能性がある。現在は LLRF システムのフィードバック機能によりこれらの揺らぎは RF 位相で 0.015[deg] 以下、加速電界で 0.012% 以下に抑制されているが、今後、更に高い Q_L で運転しようとする、LLRF システムの負担は更に大きくなる。LLRF システムの負担軽減にはマイクロフォニクスの原因調査が必要である。

3. 振動測定

3.1 9セル空洞単体試験

9 セル空洞は周期構造を持つ弾性体と考えることもでき、最初に 9 セル空洞単体の固有振動を調査した (Figure 2)。9 セル空洞を定盤に載せ、 piezoelectric 素子によりビーム軸方向 (縦波) と鉛直方向 (横波) の強制振動をかけて周波数を掃引する。共振状態に入ると各セル赤道部の振幅を調べた。共振時の各セル振動状況を Figure 3 に示す。58Hz、147Hz、260Hz は横波の基本波、2 倍波、3

*masato.egi@kek.jp

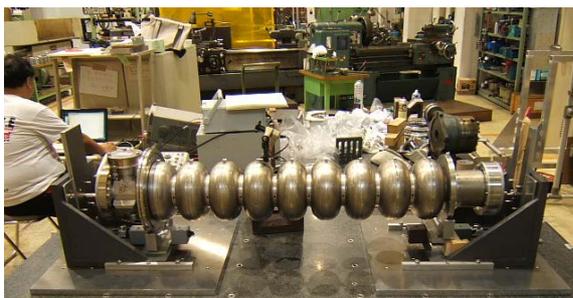


Figure 2: 9-cell cavity on testing. The eigen frequencies of a 9-cell cavity was investigated by forced oscillation technique. Aluminum cubes were put on the top of the equator of each cells, and the amplitudes of X, Y and Z were measured by a capacitive distance meter(MicroSense4830).

倍波であり、124Hzは縦波の基本波である。縦波の2倍波と3倍波は存在しないのではなく、時間的制約があり確認作業をしていない。

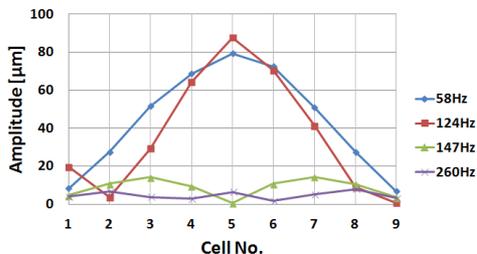


Figure 3: Resonant mode of 9-cell cavity. It shows the eigen vibration of the 9-cell cavity. 58Hz, 147Hz and 260Hz are the fundamental wave, the two times and the three times wave of the transverse wave, 124Hz is the fundamental wave of the longitudinal wave.

3.2 Piezo to Piezo 試験

cERLのMain Linacでは、9セル空洞はHeジャケットが被せられ、5Kフレームにマウントされた後に断熱真空槽内に格納される (Figure 4)。5Kフレームは冷却ラインを兼ねた構造物であり、断熱材を介して別の構造物により支持されている。RF共振周波数を調整するためのチューナーが各空洞に組み込まれており、粗調用のモーターチューナーと微調用のピエゾチューナーから構成される。ピエゾチューナーは強制振動試験の駆動用振動子と振動センサーとして使用することが可能であり、駆動ピエゾとセンサーピエゾによる強制振動試験をPiezo to Piezo試験と呼んでいる。

Main Linacが2Kに冷却され、Figure 4のPiezo1で強制振動をかけPiezo2をセンサーとして振動を拾い出すとFigure 5のような共鳴曲線が得られる。周波数掃引をかけ、Piezo1の振動がPiezo2にどう伝搬するかを観察している。

強制振動法では周波数掃引を低い方から高い方かけると駆動用振動子と被試験体の位相関係は同位相(位

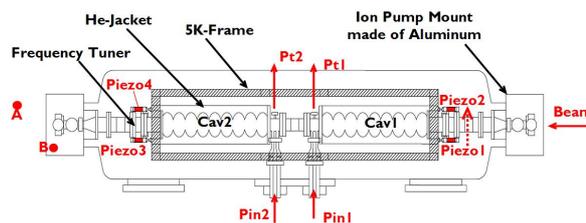


Figure 4: Composition of main linac on cERL. The cryomodule of Main Linac includes two 9-cell cavities mounted on the 5K-frame. Each cavity has two piezo elements as frequency tuner, and using these piezo elements, forced oscillation technique was carried out.

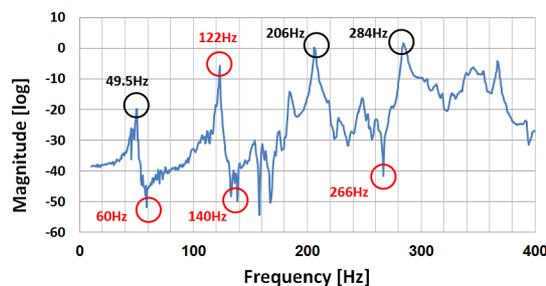


Figure 5: Result of piezo to piezo test. The resonances with red circle are as same as Figure 3.

相差 0deg) から逆位相 (位相差 -180deg) に変化する。Figure 5の丸で囲んだ上に凸の4つの共振はこれに従っており、縦波であると考えられる。丸で囲んだ下に凸の3つの谷は逆位相から同位相に変化しており横波と考えられる。この結果の60Hz、122Hz、140Hz、266HzはFigure 3の結果に対応するものと考えられ、これらは9セル空洞固有の振動であると考えられる。固有振動数が若干異なるのは、Main Linacに格納され、他の構造物の共振周波数の影響を受けたり、温度変化で弾性定数が変化するためと考えている。

別の測定では206Hzと284Hzで強制振動をかけると412Hzと568Hzの高調波を励起しており、これらは9セル空洞固有の縦波の2倍波と3倍波であると考えられる。縦波の基本波122Hzでも同様の現象が観測されている。

49.5Hzはこの結果から振動モードを確認することはできていないが、後にPiezo to Piezo試験を発展させることで振動モードを確認することに成功した。

3.3 RF位相のFFT

2Kの低温状態で9セル空洞の入力RF信号と出力RF信号の位相差を読み取れば、LLRFシステムと同じRF位相の揺らぎを確認することが可能であり、2K低温時にcERL加速器室内にFigure 6に示す機材を持ち込みRF位相の揺らぎを観察してみた。Signal Generatorからの1300MHzのRF信号を入力し(Pin)、ピックアップポートからの出力(Pt)との位相差を読み取る。1MHzへ周波数変換し位相検出器の出力はFFTアナライザーにより処理された。結果をFigure 7に示す。FFT出力は見や

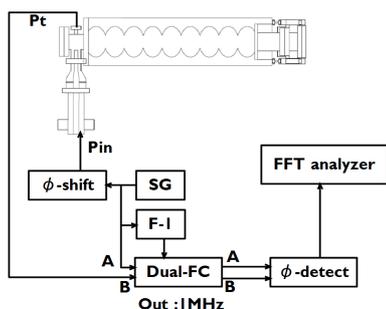


Figure 6: Setup of RF measurement. When Main Linac was cooled down at 2K, the RF fluctuations of two 9-cell cavities were measured by phase difference between Pin and Pt.

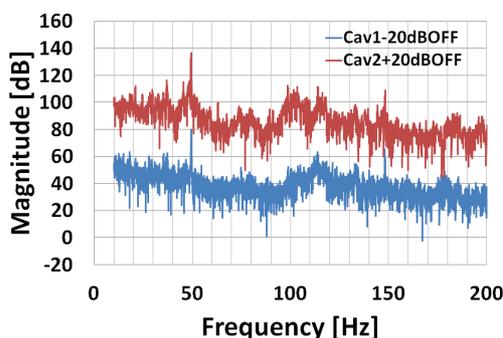


Figure 7: Fluctuation of RF signal. It shows only the 50Hz fluctuation seen in LLRF. It is unknown why the 15Hz peak does not appear.

すくするために Cav1 については -20dB、Cav2 は +20dB のオフセットをかけている。Cav1 と Cav2 共に 50Hz のピークがあるのに対し 15Hz 付近は明瞭なピークが存在しないところが LLRF と異なる。この時、Piezo1 の電圧出力を同じ FFT アナライザーに入力し、9 セル空洞の振動状態を直接調べると Figure 8 のようになるが、ここでも 15Hz 付近の明瞭なピークはなかった。

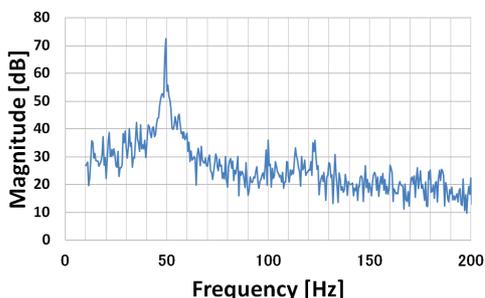


Figure 8: Results of RF free run. The output signal of piezo element was directly input to FFT analyzer. It shows only 50Hz resonant as same as previous RF measurement.

3.4 断熱真空槽と床の振動状況

Figure 4 の Main Linac 下流部の床 “A” 部と断熱真空槽上の “B” 部に前出の容量型の距離計を当て、その電圧出力を FFT アナライザーに入力し、床と断熱真空槽の振動状態を測定すると Figure 9 と Figure 10 のようになる。

Figure 9 では断熱真空槽の下に置かれたロータリーポンプを OFF から ON にすると 50Hz の成分が大きくなる。Piezo to Piezo 試験の 49.5Hz のピークは共振するものの存在を示しており、振動源の存在を意味するものではない。

Figure 10 では断熱真空槽の水平方向 (X 方向) と鉛直方向 (Y 方向) に容量型距離計をセットした。ハンマーなしのフリー状態と断熱真空槽の固有振動を励起する目的のハンマーありの 2 つの状態が測定された。ハンマーありの状態では 5Hz~50Hz の低周波成分が多く励起されており、マイクロフォニクスの 15Hz 付近と 50Hz に寄与している可能性があるが、この二つの周波数の明瞭なピークは見られない。

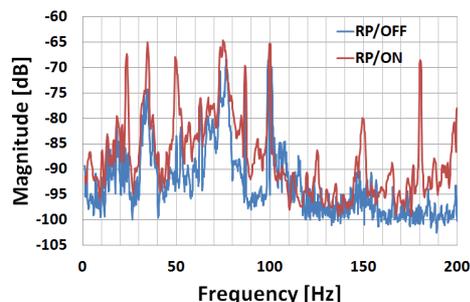


Figure 9: Vibrational state of floor around Main Linac. When the rotary pump turn on, 50Hz component is excited.

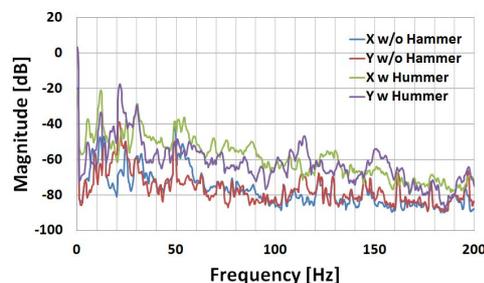


Figure 10: Vibrational state of cryomodule. Using hammer in order to excite the eigen vibrations of the cryomodule, vibration of frequency range less than 50Hz was excited. This vibration is possible to contribute the microphonics, 15Hz and 50Hz.

4. PIEZO TO PIEZO の再試験

Piezo to Piezo 試験では上流空洞から下流空洞への振動の伝搬状況も測定していた。モード確認はできていない 49.5Hz は 2 空洞間で良く伝搬する振動である。そこで、4 個の Piezo 素子の一つを駆動させ、残り 3 個の Piezo

ゾ素子の信号出力を観察することにした。Figure 11 は多チャンネル FFT アナライザー (ONO SOKKI DS2000) を使用し、Piezo1 により強制振動を加え、残りの 3 個の Piezo 出力の位相関係を測定する様子を示している。駆動用の Piezo 素子を順番に変えながら測定した結果を Figure 12 に示す。どの測定でも 3 個のセンサー Piezo の位相は 49Hz で同位相のもと逆位相のものがあり、49.5Hz を過ぎて 51Hz になると同位相と逆位相の関係に変化が見られる。これは 49Hz の振動モードと 51Hz の振動モードが異なり、モード変換があるためと考えるのが自然である。Piezo 素子の位相関係から Piezo 素子に加えられる荷重の方向を知ることが可能であり、これをまとめると Figure 13 のようになる。これより 49.5Hz の共振現象は 5K フレームと 2 台の空洞から構成されるシステムの共振であることが分かる。また、49Hz のモードから 51Hz のモードに変換される現象であることも分かる。

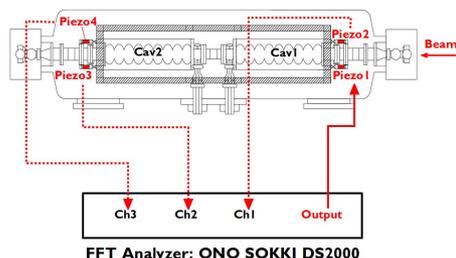


Figure 11: Phase measurements among 4 piezos. A multi-channel FFT analyzer is used. One piezo was used as the drive oscillator of forced oscillation technique, and the phase relations among three piezos were confirmed. The drive piezo was cyclically changed.

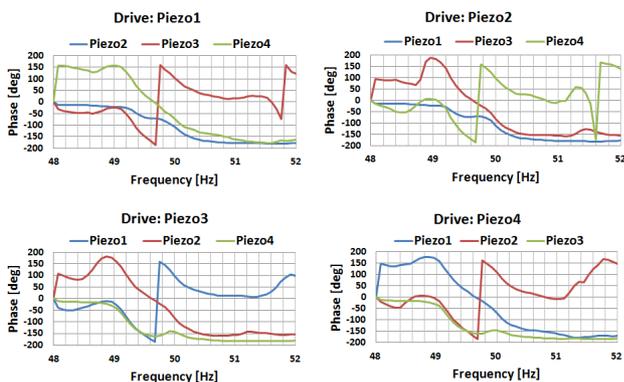


Figure 12: 4 piezos. There are same phase and opposite phase among three piezos for 49Hz and 51Hz for either measurement. When the resonance transits from 49Hz to 51Hz, those phase condition changes, too. It is thought that 49Hz and 51Hz are different vibration modes.

5. まとめ

ERL の場合、高い Q_L で RF 運転することを想定し、15Hz と 50Hz のマイクロフォニックスの原因調査を行っ

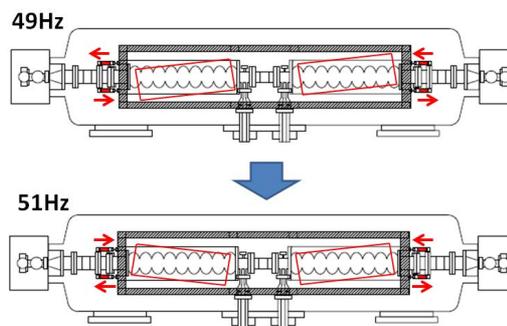


Figure 13: Vibration mode of 49.5Hz. The phase relation among the three piezos can be summarized to the phase relation among the four piezos, we can know the directions of the force on the four piezos.

た。Piezo to Piezo 試験により 50Hz は 2 台の空洞がマウントされた 5K フレームの共振であることが分かった。15Hz については今回は RF 信号による測定でも Piezo 素子による振動測定でも、15Hz の共振を確認することは出来なかった。断熱真空槽の振動成分は 50Hz 以下のものが強く、15Hz のマイクロフォニックスに寄与している可能性がある。

参考文献

- [1] S. Sakanaka *et al.*, “Recent Progress and Operational Status of The Compact ERL at KEK”, Proceedings of IPAC2015, Richmond, VA, USA.
- [2] H. Sakai *et al.*, “Development of A 1.3GHz 9-cell Superconducting Cavity for The Energy Recovery Linac”, Proceedings of ERL07, Daresbury, UK.
- [3] T. Saeki *et al.*, “Studies of Fabrication Procedure of 9-cell SRF Cavity for ILC Mass-production at KEK”, Proceedings of IPAC2014, Dresden, Germany.
- [4] T. Shishido *et al.*, “Frequency Tuning of An Accelerating Mode in STF Baseline SC Cavities”, Proceedings of the Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sendai Japan.