

cERL 主空洞の機械的振動測定

MECHANICAL OSCILLATION MEASUREMENT OF cERL MAIN CAVITY

佐藤昌史^{*A)}、梅森健成^{A)}、江並和宏^{A)}、阪井寛志^{A)}、篠江憲治^{A)}、古屋貴章^{A)}、沢村勝^{B)}、Enrico Cenni^{C)}

Masato Satoh^{*A)}, Kensei Umemori^{A)}, Kazuhiro Enami^{A)}, Hiroshi Sakai^{A)}

Kenji Shinoe^{A)}, Takaaki Furuya^{A)}, Masaru Sawamura^{B)}, Cenni Enrico^{C)}

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

^{B)}Japan Atomic Energy Agency(JAEA)

^{C)}The Graduate University for Advanced Studies(SOUKENDAI)

Abstract

Compact ERL(cERL) has been constructed from 2012 to 2013. The main linac of cERL has two superconducting cavities, for which high power test at low temperature were carried out in December 2012. In general, the RF resonant frequency of accelerating cavity is determined by the geometrical shape. Q value of superconducting cavity is so high that the instability of RF operation could be happened when mechanical oscillation make superconducting cavity deform. Mechanical oscillation mode of superconducting cavity was investigated in the term of the cERL construction in 2012.

1. cERL メインライナックと主空洞

2012年から2013年にかけて ERL 開発棟(旧東カウターホール)において cERL の建設工事が進められている。2012年11月までにメインライナックの組立て、及び設置作業が完了し、2012年12月にメインライナック単体による低温大電力試験が実施された。cERL では入射部で電子ビームを 5MeV に加速し、その後メインライナックで 35MeV に加速する。周回部を回り再びメインライナックに戻って来た時に電子ビームは減速され、発生する起電力によりエネルギーを回収する。このエネルギー回収を効率的に行うために超伝導加速空洞が不可欠である。

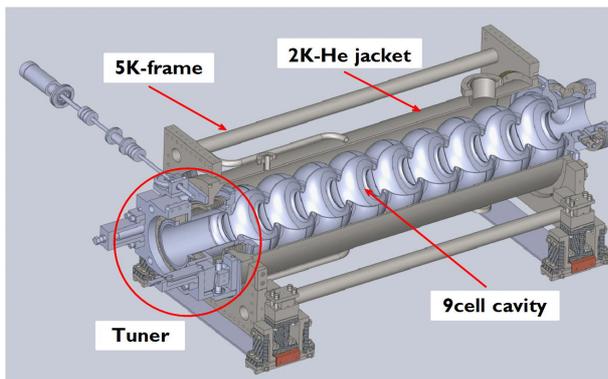


Figure 1: Sectional view of cERL 9cell cavity

cERL メインライナックで使用される 9セル空洞(以下、主空洞)を Figure 1 に示す。RF 共振周波数は 1.3GHz(L バンド)であり、メインライナックにはこの空洞が 2 台設置される。図中の 9セル部の周期構造は 2mm~3mm 厚のニオブ板をプレスして作られており、全体としてバネのように弾力を有する。cERL 主空洞の場合、9セル全体の軸方向のバネ定数は室温で約 300kgf/mm である。2K ジャケット内の 9セル空洞は一方が 2K ヘリウムジャケットに直接に溶接され、他方はペローズによる伸縮機能を持つ RF 周波数チューナーを介し 2K ヘリウ

ムジャケットにボルト固定される。後述の機械振動測定では、2K ヘリウムジャケット内の主空洞の拘束条件を模擬する。

2. 機械振動と RF 不安定性

一般的に RF 共振空洞の共振周波数は空洞の幾何学形状により決定する。空洞の誘導 L と容量 C は空洞内の電磁場分布とそれを積分する空間領域により定義され、RF 共振周波数は $f_0 = 1/(2\pi\sqrt{LC})$ である。前述のとおり主空洞はバネのような弾力を持つために機械的な振動などが加わると、各セルが変形し f_0 も変化する。cERL 主空洞の場合、全長 1m の 9セル部に対して $1\mu\text{m}$ の伸び縮みがあると RF 共振周波数は 300Hz ほど変化する。

また、RF 共振空洞は Figure 2 のような共振曲線を描くことが知られている。内部抵抗 0Ω の理想的 RF 源が電圧 V を空洞へ出力し、この時に空洞に流れる電流を I とする。空洞が失う電力は表皮抵抗 R_S によるものと、アンテナ等により空洞から漏れ出す電力があり、アンテナから漏れ出す寄与を便宜的に R_1, R_2, \dots と表す。すると、空洞の損失は合計で $R_L = R_S + R_1 + R_2 + \dots$ となり、空洞のインピーダンスは $Z_C = R_L + j(\omega L - 1/\omega C)$ と表せる。従って、空洞の蓄積電力 U は、

$$\begin{aligned} U &= LI^2 \\ &= L \frac{V^2}{R_L^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2} \\ &\simeq \frac{U_0}{1 + (2Q_L \Delta f / f_0)^2} \end{aligned} \quad (1)$$

となる。ただし、

$$\begin{aligned} \omega &= 2\pi f \\ f_0 &= 1/(2\pi\sqrt{LC}) \\ U_0 &= LV^2/R_L^2 \\ Q_L &= \omega L/R_L \end{aligned}$$

である。また $\Delta f \ll f_0$ と近似している。空洞内に生じる加速電圧は $V_C = \omega LI$ なので、 $U \propto V_C^2$ である。この

* masato.satoh@kek.jp

(1) 式によれば、空洞に一定電力 U_0 を常に入力する場合はマッチングが取れているならば $U = U_0$ と蓄積電力は最大になり、マッチングが外れると蓄積電力が低下する。蓄積電力が低下した時の余分な電力は RF 源側に反射される。cERL 主空洞は Q_L が 2×10^7 となるように調整されており、これを (1) 式に代入することにより共振線の FWHM=65Hz が導き出される。Figure 2 のように $f_0 = 1.3\text{GHz}$ から 16Hz ほどチューニングがずれると蓄積電力 U は 80% に低下し、加速電圧 V_C は 90% に低下することになる。このように機械振動によりマッチング条件が揺らぐと RF の共振状態が不安定になることがあると考えられている。

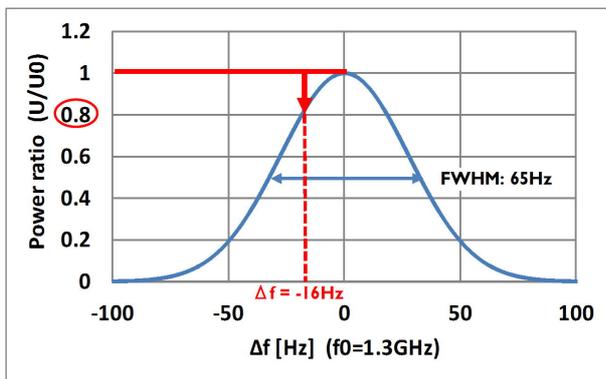


Figure 2: Resonant curve of cERL 9cell cavity

3. 機械振動測定

3.1 振動測定時の条件

振動測定の目標の一つは、実際の cERL 加速器内の主空洞がどのように振動するかを理解することである。従って、2K ヘリウムジャケット内を模擬して機械振動測定を実施することが重要である。具体的には 9 セル部の両端を固定し、9 セル部を自然長、もしくは少し張力を加えた二つの状態で測定を行う必要がある。

9 セル部の各セルは振動子と考えられ、9 個の振動子が周期的に並べば 9 個の基本波 (f_1, f_2, \dots, f_9) が存在する。機械振動には横波と縦波があるので、主空洞には合計 18 個の基本波があると考えられる。本来ならば全ての振動モードについて確認を行いたい、両端を固定しながら縦振動を起すことは困難であり、周波数の低い振動モードにより多くのエネルギーが分配されること等を考え、今回の測定は横波の 10Hz~300Hz 領域の振動に限定して測定を行った。

3.2 振動モードの測定方法

振動モードの確認は強制振動法により行った。 piezo 素子により主空洞を強制振動させ、共振状態の各セルの振幅を測定することで振動モードを判定した。振幅の測定には静電容量タイプのセンサー (MicroSense4830: 以下、MicroSense) を使用した。MicroSense は $0 \mu\text{m}$ をセンサーが測定物に接触した状態とすると $250 \mu\text{m} \sim 450 \mu\text{m}$ のすき間を測定することが可能であり、この時 -10V~+10V の電圧出力がある。電圧出力の最少桁は 1mV であり、空間分解能で 10nm である。piezo 素子は

500V で $150 \mu\text{m}$ のタイプを使用した。実際には +3V ($1 \mu\text{m}$) を中心に $\pm 1\text{V}$ ($\pm 0.3 \mu\text{m}$ の振幅) の正弦波を主空洞に与えて強制振動させた。

3.3 測定システム

機械振動の実験装置を Figure 3 に示す。 $\phi 34\text{mm}$ のチタン製ロッドと SUS プレートにより主空洞の 9 セル部両端をボルト固定し、石定盤の上に載せている。定盤と空洞の間に piezo 素子を置き、piezo 素子は印加電圧が 0V の状態で先端の M6 ボルトを 12kgf の荷重で空洞に押し当てる。各セルには 10mm 角のアルミ製のキューブが固形ワックスで固定されており、ここに MicroSense を当てることにより、各セルの振幅を観測する。piezo 素子が振動する方向は鉛直方向 (y 方向) であり、y 方向の振幅のみを測定する。x,y,z の 3 方向の振動状態を調べると、軸方向 (Z 方向) と水平方向 (x 方向) 共に観測される共振周波数は y 方向とほぼ同じであり、MicroSense 信号出力は微弱であった。

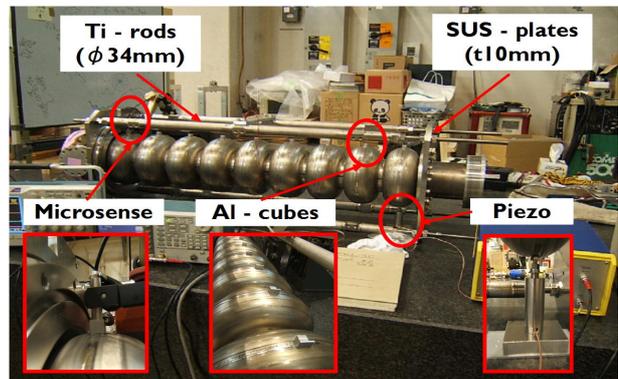


Figure 3: 9-cells cavity on test bench

測定は主に FFT アナライザーを使用して行った。(Figure 4) FFT アナライザーは piezo 駆動用に振幅 (Vout) が一定のサイン波を出力し、9 セル空洞が強制振動させられた時の各セルの振幅を MicroSense により観測する。MicroSense の応答信号を FFT アナライザーに入力し (Vin)、FFT アナライザーの波形出力が 10Hz~300Hz の掃引をかける時にどの周波数がどう応答するかを Vin/Vout により評価する。この後に出て来るマグニチュードという数値は FFT アナライザーの入出力電圧の比 Vin/Vout である。

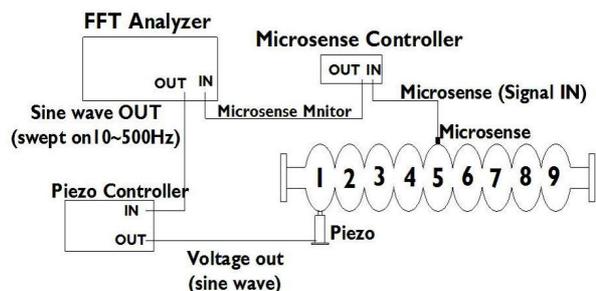


Figure 4: Mechanical Oscillation measurement system with FFT analyzer

3.4 横波の基本波

最初に第9セルにピエゾ素子を押し当てて強制振動させた結果を Figure 5 に示す。このグラフは 10Hz~300Hz 間の強制振動で、全てのセルの共振分布を重ね合わせて描いている。40Hz、58Hz、147Hz、257Hz、264Hz の共振は全てのセルに共通している。個々の共振周波数において各セルの振幅の分布を示したのが Figure 6 であり、58Hz、147Hz、260Hz が f1、f2、f3 であることが分かる。f3 が二つの共振に分離しているのは、第5セルを中心にした時に9セル部の周期性に何らかの左右非対称があるためと考えられる。40Hz は9セルの周期構造から生じるものではなく、基本波ではない。チタンフレームに何種類かの重りを載せると f1、f2、f3 の周波数は変化しないのに対し、40Hz の共振だけが変動した。

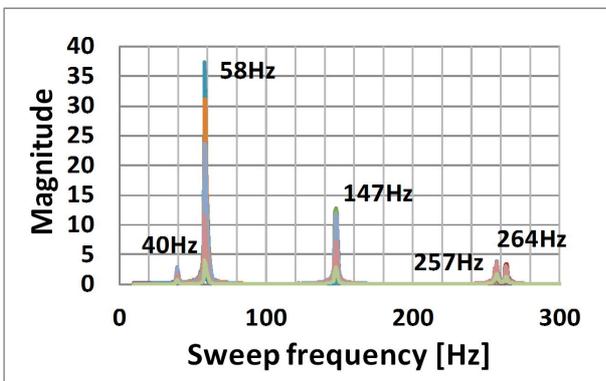


Figure 5: Mechanical resonant frequencies of each cell when the 9th cell is forced to oscillate with piezo

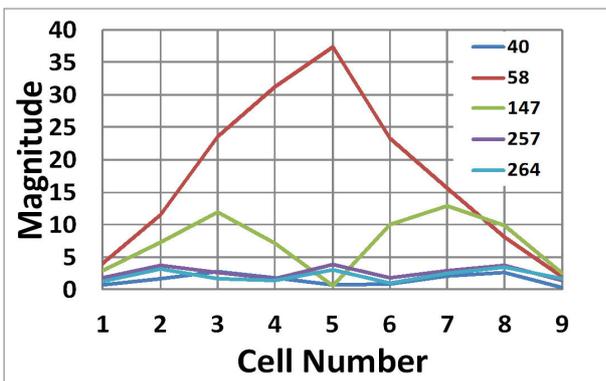
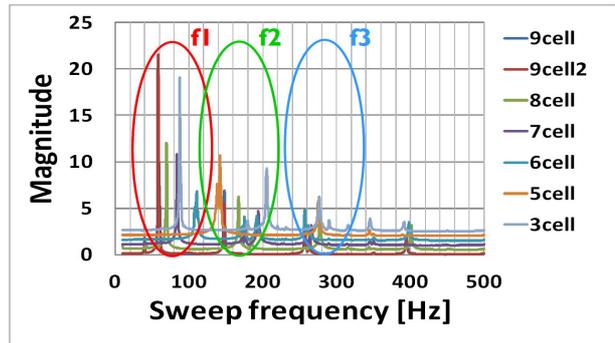


Figure 6: Amplitude distributions of each cell for mechanical oscillation frequencies

3.5 強制振動のピエゾ位置依存性

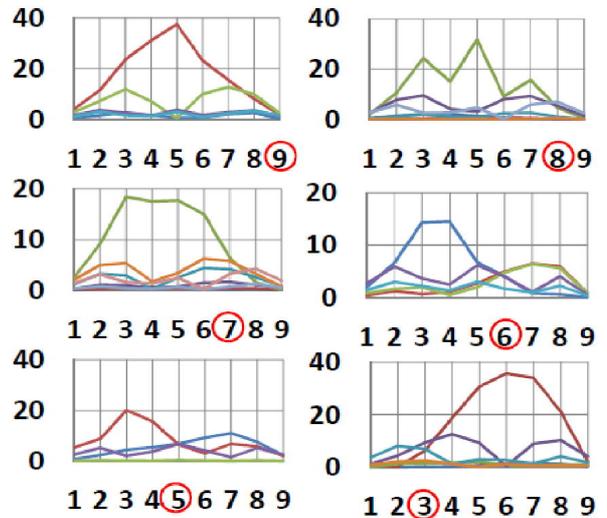
強制振動法で第9セルをピエゾ素子により押すということは第9セルを拘束している可能性がある。そこでピエゾ素子で押すセルを変えると共振がどのように変化するかを調べた。9セル部は第5セルを中心にして左右対称の構造であるので、第9セルから第5セルの片側半分と対称性を確認するために第3セルにピエゾ素子をセットした。10Hz~500Hz の掃引を掛けた時の共振状態を全部重ね合わせると、Figure 7(a) のようになる。一



(a) All resonance for piezo position change

Piezo position	9cell	8cell	7cell	6cell	5cell	3cell
f1[Hz]	58	57	62	110		87
		69	84			
f2[Hz]	147	167	176	175	138	179
		184	193	192	142	205
f3[Hz]	257	259	258	256	259	276
	264	278	266	262	275	290

(b) Summary of resonance for f1,f2,f3



(c) Amplitude distributions of each cell for different piezo position. red circle indicates the cell where piezo is attached.

Figure 7: Mechanical resonance change due to piezo position

つ一つのグラフは第 n セルにピエゾを置いた時の共振状態であり、第9セルでは同じ測定を2回行っている。便宜的に f1、f2、f3 という周波数領域により分類してみると、ピエゾ素子で押す位置を変えると Figure 5 に現れる基本波が変化して行く様子が分かる。Figure 7(b) は f1、f2、f3 の周波数変化をまとめたものである。周波数が2段になっているものは近くに2つの共振周波数が存在していることを表している。基準振動の f1 に注目すると第9セルから第5セルに近づくに従い周波数が上昇

して行き、第5セルをピエゾで押した時は最低次の振動モードが消滅する。Figure 7(a)の各共振の振動モードをピエゾ位置ごとにまとめるとFigure 7(c)のようになる。Figure 7(c)の横軸はセル番号であり、ピエゾ素子をセットしたセルを丸で囲った。縦軸はマグニチュードである。f1に該当する最低次の共振周波数に注目すると、ピエゾ位置により振動モードが大きく変化していることが分かる。f1ではいずれのピエゾ位置でも定在波の節になっており、ピエゾ素子自体が9セル空洞を拘束していることが分かる。第8セルをピエゾ素子で押した時のf1が乱れているのは、9セル空洞が共振の定常状態に到る前にFFTアナライザーが自動計測することが原因であると考えられる。

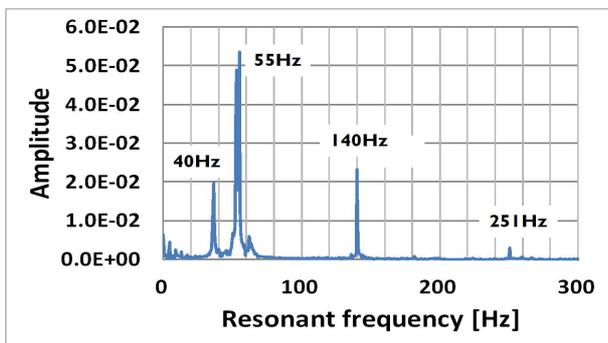


Figure 8: Resonant curve in no restriction

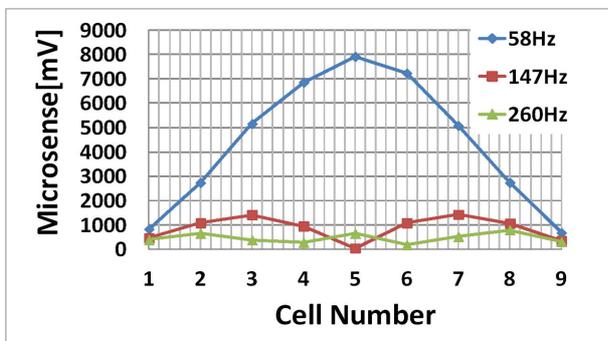


Figure 9: Resonant mode with tension

3.6 完全フリーと張力のある場合の比較

ピエゾ素子により強制振動を掛けると新たな拘束条件が発生することが分かった。強制振動を掛ける限り、本来の9セル空洞の振動モードは分からない。従って、ピエゾ素子による強制振動法ではなく、ハンマー応答試験によりピエゾ素子の影響を排除し様子を観察することにした。ハンマーで空洞を叩き、その応答信号をFFTにかければピエゾ素子による影響を除外できる。Figure 8横軸はFFT演算の周波数領域であり、縦軸はフーリエ係数である。Figure 8のフーリエ成分を見ると、第9セルをピエゾ素子で強制振動させたFigure 5の分布とほぼ同じである。各共振周波数がFigure 8ではFigure 5よりも低下しており、ピエゾ素子の拘束が無くなったためと考えられる。また、フーリエ係数の比率もFigure 5とほぼ同じであるので、Figure 8の55Hz、140Hz、251Hz

がf1、f2、f3に対応すると考えられる。従って、第9セルに強制振動を掛ける場合は、ピエゾ拘束のない本来の共振状態とほぼ見なすことができる。実際の主空洞はクライオモジュール内で周波数チューナーにより自然長(0mm)から最大で3mm引っ張られた状態で使用される。それを模擬するために拘束用の9セル部両端のSUSプレートを自然長から1mm引っ張り、張力を掛けた状態で共振状態を確認した。第9セルにピエゾ素子を置き強制振動を加えるとFigure 9のような結果になった。この測定ではFFTアナライザーの代わりにファンクションジェネレーターとオシロスコープを使用している。縦軸はMicroSenseの出力を直接与えたもので1Vで10μmである。張力を掛けない時のFigure 6とf1、f2、f3の周波数に違いが見られない。

4. まとめ

機械振動は超伝導空洞のRF共振周波数に影響を与える。9セル空洞の機械振動の共振状態を確認した結果はTable 1のとおりであった。ただし横波の10Hz~300Hz領域の共振であり、二つのモードに分離しているものは平均値を示した。空洞が自然長の場合(張力なし)でも1mm引っ張った場合(張力あり)でも振動モードに大きな変化は現れていない。実際に加速器内に設置された場合にもRF周波数チューナーを操作して主空洞に張力を与えても機械的振動モードは大きく変わらないと考えている。

今後はcERLの加速器運転やベンチテストにより縦波の基本波を調べ、RF共振周波数がどの程度影響を受けるかを確認する予定である。

Table 1: Resonant Frequency for Each Constraint

Tension	Piezo	f1	f2	f3
Without	Without	55Hz	140Hz	251Hz
Without	With	58Hz	147Hz	260Hz
With	With	58Hz	147Hz	260Hz

参考文献

- [1] K.Umemori, et al., "Development of ERL Main Linac Superconducting Cavities", Proceedings of The 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagoya, Aug. 3-5, 2013.
- [2] H.Sakai, et al., "High Power Test of Main Linac Cryomodule for Compact ERL", Proceedings of The 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagoya, Aug. 3-5, 2013.
- [3] K.Enamii, et al., "Performance Evaluation of KEK ERL Main Linac Tuner", Proceedings of The 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagoya, Aug. 3-5, 2013.