

Detuning Property of the JAERI ERL-FEL Superconducting Linac

Masaru Sawamura, Ryoji Nagai, Ryoichi Hajima, Nobuhiro Kikuzawa,
Hokuto Iijima, Tomohiro Nishitani, Eisuke Minehara
Free-Electron Laser Laboratory, Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI)
Tokai, Ibaraki 139-1195, Japan

Abstract

The detuning property of the JAERI ERL-FEL superconducting cavities was calculated and measured. The calculated frequency shifts due to Lorentz force were from 31Hz to 133Hz for the single-cell cavity and from 18Hz to 67Hz for the 5-cell cavity according to the boundary conditions. The detuning was measured by the phase shift in the cavity by detecting the phase signal from the pickup coupler. The measured frequency shift was within the calculated results. The measured detuning included frequency shifts due to the Lorentz force and vibration of the liquid Helium refrigerator.

原研ERL-FEL超伝導加速器のディチューニング特性

1. はじめに

超伝導リニアック駆動型自由電子レーザーにおいてエネルギー回収は、空洞での高周波損失がほとんどないという超伝導の特徴を最大に生かす方法であり、主加速部分においては、わずかな高周波電力で、より大電流のビーム加速が可能になる。

エネルギー回収を行う主加速器において少ない高周波電力で駆動していく場合、必要な電界を得るためには高周波電力を供給する入力カップラーの結合度を小さくすることが必要になる。しかしこの場合超伝導空洞の負荷Q値が大きくなり、共振周波数幅が小さくなる。このため様々な周波数変動により、超伝導空洞がより大きな影響を受けることが予想される。

周波数の変動要因として原研エネルギー回収型自由電子レーザー(ERL-FEL)ではパルス運転にともなうローレンス力による空洞形状の変形や、無蒸発型組込み式ヘリウム冷凍機搭載による機械振動などがある。これらによる超伝導空洞のディチューニング特性の計算および測定を行った。

2. ローレンツ力

高周波電磁界により空洞内面は圧力を受け、空洞形状が変形し、共振周波数が変化する。この力はセル赤道付近では外側に、口径付近では内側への力が働く。この力は次式で表される[1]。

$$P_s = \frac{1}{4}(\mu_0 H^2 - \epsilon_0 E^2) \quad (1)$$

まず、原研ERL-FEL用超伝導空洞に関して、ローレンツ力による周波数変化を計算コードを用いて評価した。計算手順は以下のとおりである。

- ① 電磁界計算コードSUPERFISHを用いて、共振周波数での空洞表面の電磁界分布を求める。
- ② 式(1)により、空洞表面での圧力分布を求める。
- ③ 応力変形解析コードABAQUSを用いて、圧力によ

る空洞の変形量を求める。

- ④ 空洞の変形量は微小で、電磁界分布が変わらないとすると、空洞の変形による空洞共振周波数の変化は次式により求められる。

$$\frac{\Delta f}{f} = \int_{\Delta V} \frac{1}{2}(\mu_0 H^2 - \epsilon_0 E^2) dV / U \quad (2)$$

ここで、Uは空洞に蓄えられているエネルギー、 ΔV は空洞の変形による体積変化である。

ニオブの物性値として、ヤング率105GPa、ポアソン比0.4を用いた[2]。

計算に使った空洞の形状と変形の様子を図1に示す。周波数変化は境界条件によって異なる。ビームパイプの端を自由端と仮定すると5セルで135Hz、単セルで265Hzの変化となった。またビームパイプの端をビーム軸方向にのみ固定と仮定すると5セルで

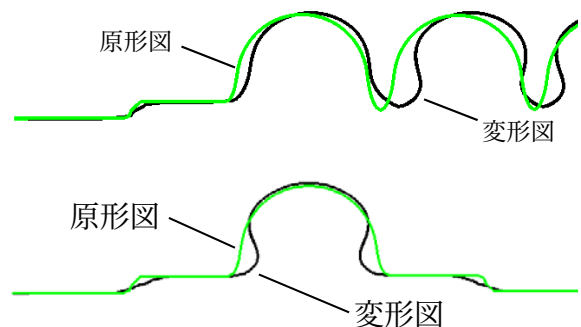


図1：ローレンツ力による変形のABAQUSを用いた計算結果。ビームパイプの端をビーム軸方向に固定という境界条件の場合の例。5セル空洞、変位を 10^6 倍に拡大(上)、単セル空洞、変位を 3×10^6 倍に拡大(下)

37Hz、単セルで62Hzの変化となった。ビームパイプはピエゾチューナ等で固定されており、それらの弾性度で変動するものと考えられるので、実際の周波数変化は自由端と固定端の間と考えられる。

3. ディチューニング測定

3.1 パルス内変動

原研超伝導ERL-FELの加速空洞は、フィードバック系によって振幅、位相の安定化が図られている[3]。そのため空洞の共振周波数が変動しても、フィードバックがうまく働く限り、空洞内の振幅、位相は一定に保たれる。しかし、パルス運転で高周波の供給が止まり、フィードバックがはずれると、空洞のディチューンにより位相が変化する。この位相変化は空洞に取り付けられているピックアップカップラーからの高周波信号を用いて調べることができる。このときの高周波信号の位相を ϕ とすると、ディチューン Δf は

$$\Delta f = \frac{1}{2\pi} \frac{d\phi}{dt} \quad (3)$$

によって計算することができる。

単セル空洞と5セル空洞のピックアップカップラーからの位相信号の時間変化の様子を図2に示す。時間軸のゼロのところで高周波パルスが終了している。この位相の時間変化を計算したものを図3に示す。高周波がオフになった点から周波数が変化している。単セル空洞で、約79Hz、5セル空洞で約37Hzの周波数が変化している。この周波数変化は、高周波パルスがオフになり、空洞内の高周波電磁界が減衰することによって、ローレンツ力が弱まり、ローレンツ力によって変形していた空洞が元に戻ろうとすることによるものと考えられる。

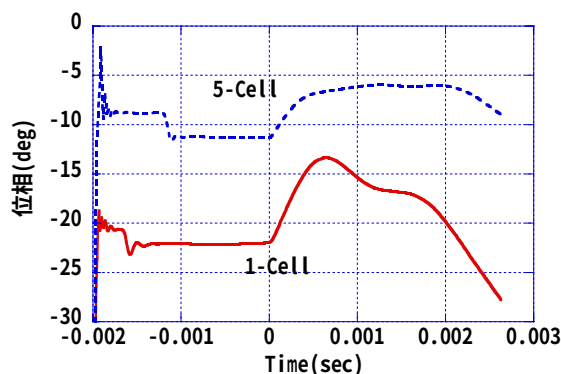


図2：ピックアップカップラーからの位相信号の時間変化。時間ゼロで高周波パルスがオフになっている。

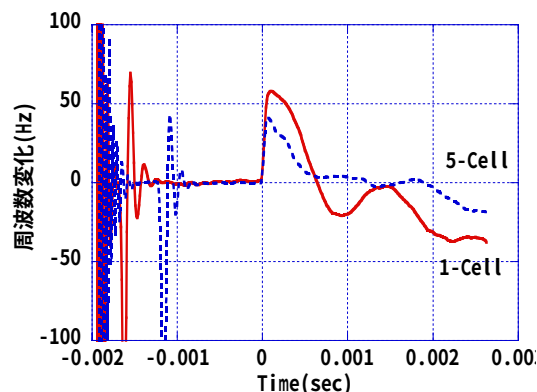


図3：高周波パルスによる周波数変化。時間ゼロで高周波パルスがオフになっている。

3.2 パルス毎の変動

図3の周波数変化は100パルス(約10秒間)の平均値をもとに計算したものであり、実際の信号波形は高周波パルスがオフの部分に関しては、波形をほぼ保ちながらパルスごとに上下に振動していた。パルス終了から2msec経ったところでのパルスごとの周

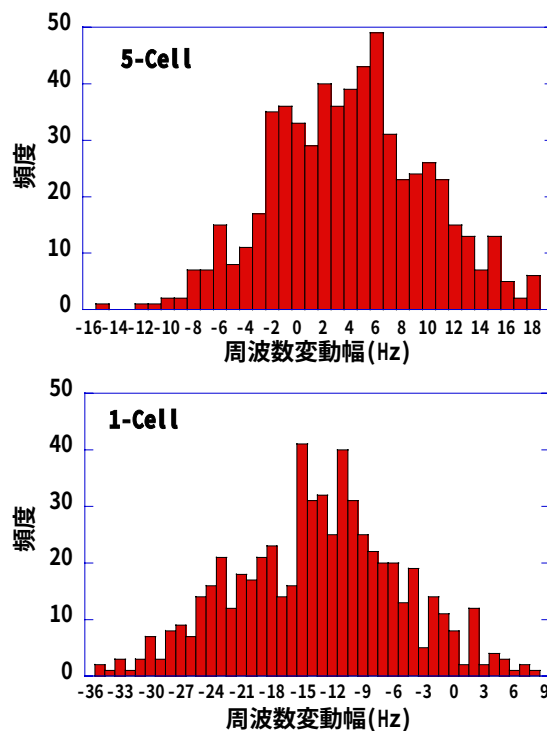


図4：パルス内の時間を固定したときのパルスごとの周波数変動分布。5セル空洞(上)、単セル空洞(下)

波数変化を600パルス計測したときの周波数変動の分布を図4に示す。周波数変動の分散は単セル空洞で8.2Hz、5セル空洞で5.8Hzとなっている。

時間ごとの周波数変化の変動をフーリエ変換したものを図5に示す。単セル、5セル空洞とも2.5Hz近辺にピークが見える。

しかし今回の測定は10Hzのパルスごとにパルス波形をファイルに保存する方法をとったため、測定系が10Hzごとの信号に完全に同期して記録できている訳ではなく、2割程度データの取りこぼしがあった。今回は簡単化のため、保存データの間隔を0.1秒として計算を行ったが、実際には保存データの時間間隔が不正確な部分がある。そのためフーリエ変換したときの共振周波数位置、大きさがずれている可能性がある。

4. まとめ

周波数変化の内、パルスの平均値から求めたものは主にローレンツ力による共振周波数のディチューンと考えられる。さらにパルスごとの周波数変化は、冷凍機の機械振動によるものと考えられる。

ローレンツ力による周波数変化の計算値と測定値を比較すると、5セル、単セル空洞とも固定端にした場合の計算値に近い値を測定値が示している。これは高周波電磁界によるローレンツ力のビーム軸方向の成分に比べて、 piezoチューナの弾性が十分大きく、ビームパイプ端点をほぼ固定と見なしていいものと考えられる。

またヘリウム冷凍機は約1Hzでピストンが振動しているが、振動のフーリエ変換では2Hz近辺に振動のピークが見られる。この違いが空洞の機械振動の共振点によるものか、または高周波入力用の同軸カップラーの振動によるものかはさらに詳しく調べる必要がある。

参考文献

- [1] R.Mitchell, et al., “Lorentz Force Detuning Analysis of the Spallation Neutron Source (SNS) Accelerating Cavities”, Proceedings of the 10th Workshop on RF Superconductivity, Tsukuba, Sep 6-11, 2001
- [2] <http://www.webelements.com/webelements/>
- [3] 永井良治 他. “原研ERL-FEL用RFローレベル制御装置の改良”, Proceedings of the 1st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Funabashi, Aug. 4-6, 2004

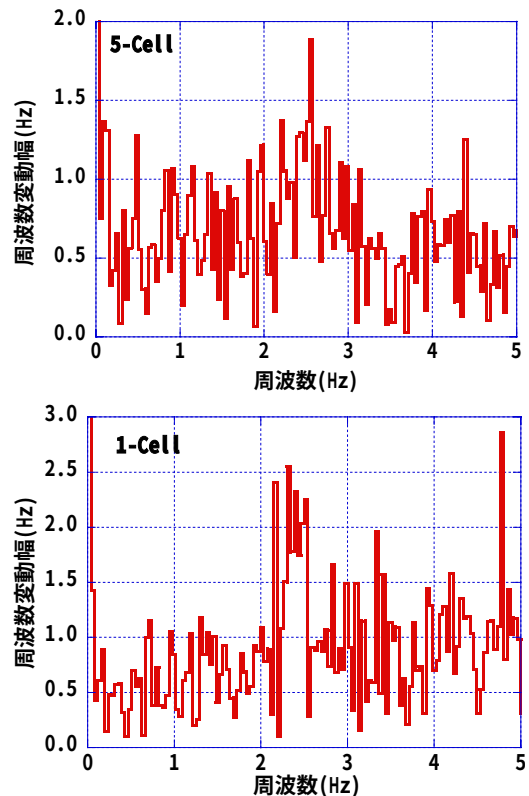


図5：パルス内の時間を固定したときのパルスごとの周波数変動のフーリエ変換スペクトラム。5セル空洞(上)、単セル空洞(下)