



5.7 原研 ERL-FEL の長パルス運転のための熱対策 Heat Treatment of Long Pulse Operation for the JAERI ERL-FEL

沢村 勝、永井 良治、菊澤 信宏、羽島 良一、峰原 英介

日本原子力研究所 関西研究所 光量子科学研究センター

〒319-1195 茨城県東海村白方白根 2-4

**Masaru SAWAMURA, Ryoji NAGAI, Nobuhiro KIKUZAWA, Ryoichi HAJIMA,
Eisuke MINEHARA**

Advanced Photon Research Center, Kansai Research Establishment,

Japan Atomic Energy Research Institute

2-4 Shirakata-Shirane, Tokai, Ibaraki 319-1195 Japan

RF power sources are replaced from all-solid-state amplifiers to IOT amplifiers for the superconducting accelerators (SCAs) and a vacuum tube amplifier for the SHB of the JAERI ERL-FEL. A long pulse operation increased the pressure in the cryostat of the SCA. The single-cell SCA can be operated in 9% duty according to the time constant of the pressure decay in the cryostat. SHB can be operated in 4% duty which is limited by the frequency range of the tuners. The result of the ABAQUS calculation shows the more duty operation.

Keywords : Free-Electron Laser, Energy Recovery, Heat Treatment

1. はじめに

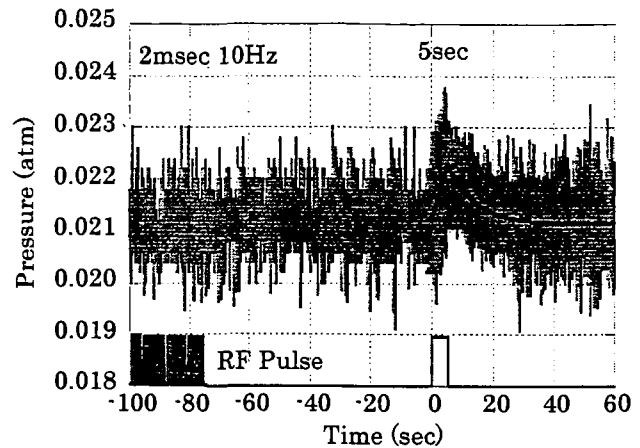
超伝導リアック駆動型自由電子レーザーにおいてエネルギー回収は、空洞での高周波損失がほとんどないという超伝導の特徴を最大に生かす方法であり、主加速部分においては、わずかな高周波電力で、より大電流のビーム加速が可能になる。原研 ERL-FEL では大出力 FEL のためのビーム電流増加の準備を進めているが、FEL 利用の観点から長パルス運転の要請があり、現在の 1msec、10Hz 運転を、同じ Duty のままでパルス時間を長くすること、さらに Duty を上げた運転を計画している。このため高周波系の更新を行うとともに、超伝導及び常伝導加速器系の長パルス特性の予備試験測定を行った。

2. 高周波系

現在の運転モードから長パルスまたは高 Duty の運転を行うためには高周波電源の変更が必要になる。現在はすべての加速器にパルス運転の全半導体アンプを用いているが、超伝導加速器の部分に関しては CW 運転可能な IOT 高周波電源を用意した。エネルギー回収を行わない前段加速器の部分に関しては、ビーム電流を増やすために高周波電力の増強が必要であることを考え、すべての超伝導加速器に 50kW IOT 高周波電源を設置した。SHB についても CW 運転可能な 3極管タイプの 10kW 高周波電源を設置した。

3. 超伝導加速器の圧力上昇

原研超伝導 ERL-FEL では、空洞の冷却に組込型ヘリウム冷凍機を用いている。現在の 2msec、10Hz の高周波電力の運転モードにおいては、十分な冷却能力を持っている。クライオスタット内の圧力は 0.02atm 程度の加圧になるように、クライオスタット内に挿入されたヒータによる発熱量を制御している。しかし長パルス運転の場合、たとえ同じ Duty での運転としてもパルス内での高周波による空洞壁での発熱と冷凍能力とのバランスがくずれ、クライオスタット内の圧力が上昇する。第1図に単セル空洞加速器クライオスタット内の圧力変化の様子を示す。



第1図 クライオスタット内の圧力変化

通常のパルス運転の時はヒータによる圧力制御により圧力がほぼ一定になっているが、5sec の長パルスを入力した場合は圧力上昇が起こっている。パルス後の圧力減衰の様子から圧力の立下り時定数は ~ 9 sec である。このことから単空洞加速器の場合は9%程度の Duty で運転できることがわかる。

4. 常伝導加速器の熱変化

原研 ERL-FEL では電子ビーム圧縮のためにサブハーモニックバンチャ(SHB)を用いている。この SHB は常伝導であるため、Duty を上げた運転の場合は空洞壁での温度上昇による周波数変化が問題になる。SHB には2つのチューナがある。1つは平板を回転させる構造の手動チューナと、もう1つは棒を抜き差しする構造の自動チューナである。手動チューナは ~ 200 kHz、自動チューナは7kHzの可変範囲があるが、中心周波数のずれのため、 $83.3\text{MHz} + 47.5\text{kHz} - 158.3\text{kHz}$ が可変範囲となる。Duty が上がり、空洞壁損失が増え、SHB の温度が上昇すると、周波数は低下する。そのため周波数を上げることのできる47.5kHzが可変範囲となる。

5. SHB の熱計算

SHB の温度上昇による周波数変化を ABAQUS を用いて調べた。ABAQUS は応力解析、熱応力解析、伝熱解析など行うことのできる3次元有限要素法プログラムである。計算手順は以下のとおりである。

- ①2次元電磁界解析プログラム SUPERFISH を用いて空洞壁での発熱量分布と電磁界分布を求める。
- ②SHB の冷却のための水配管の大きさ、冷却水流量等から水配管の熱伝達係数を求める。このとき単純化のために配管は直管と仮定し、熱伝達係数を求めた。
- ③初期の冷却水温度分布を仮定する。
- ④発熱分布、冷却水温度分布等を用いて ABAQUS で伝熱-変位問題を解く。
- ⑤冷却水への熱流入量を求め、熱流入による冷却水温度の分布変化を求める。
- ⑥冷却水温度の変化が大きい場合は、求めた冷却水温度分布を初期値に冷却水温度変化が収束するまで④からを繰り返す。

⑦SUPERFISH で求めた電磁界分布をもとに SHB の変位による Stored Energy の変化

$$\Delta W = \int \left(\frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 + \frac{1}{2} \mu_0 H^2 \right) dv$$

を求める。 ϵ_0 は誘電率、 μ_0 は透磁率、 E は電界分布、 H は磁界分布、 dv は変位による微小体積変化である。

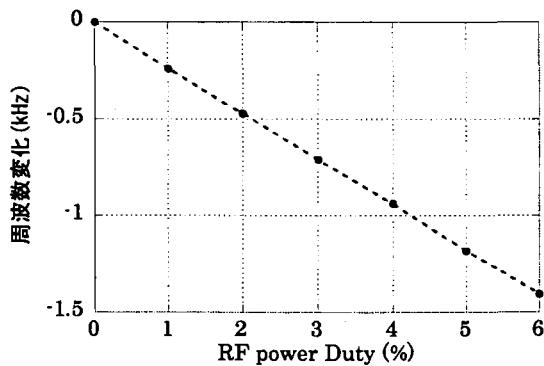
⑧周波数変化 Δf は SHB の Stored Energy を W 、共振周波数を f とすると、

$$\Delta f = f \frac{\Delta W}{W}$$

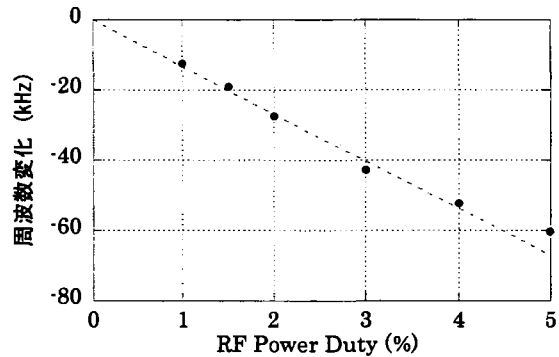
となる。

Duty の変化による共振周波数の変化の計算結果を第 2 図に、測定結果を第 3 図に示す。計算では Duty が 1% 増えると 0.24kHz の周波数低下となるが、測定では 13.4kHz の降下となった。この差の原因として以下の点が考えられる。

- 1) 手動チューナは冷却されていないため、平板部分での発熱は回転式の取り付け棒を通してしか伝わらないため、平板部分では十分な冷却が行われておらず、空洞壁に比べて高い温度になり、熱膨張により手動チューナが歪むことにより周波数がずれてしまう。
- 2) SHB 内軸の先端部分は周波数を変更できるようにねじ込み式になっている。そのため、ねじ込み部分では熱伝達が悪く、内軸先端部分の温度が高くなることによる熱膨張により周波数がずれてしまう。



第 2 図 SHB 周波数変化の計算結果



第 3 図 SHB 周波数変化の測定結果

6. まとめ

超伝導加速器に関しては、長パルスの運転をすると、パルス内でクライオスタット内の圧力上昇が起こるが、圧力の立下り時定数から単セル空洞加速器に関しては 9% 程度の Duty で運転が可能である。SHB に関しては測定からは 4% 程度の Duty での運転が可能であるが、計算結果ではもっと高い Duty での運転の可能性を示しており、実験と計算結果の違いの原因をさらに調べれば、もっと高い Duty での運転が可能と考えられる。