

## JAERI ERL-FEL のための高周波基準信号ケーブルの安定化

永井良治、沢村勝、菊澤信宏、羽島良一、西森信行、峰原英介

日本原子力研究所 光量子科学研究センター 自由電子レーザー研究グループ

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

### 概要

原研エネルギー回収型リニアック駆動自由電子レーザー (JAERI ERL-FEL) の安定性向上のために、高周波基準信号分配用ケーブルの電気長を室温および大気圧の変動に対して安定化した。室温の変動に対しては、一般的に電気長温度安定性の高いことが知られている同軸ケーブル (絶縁体に高発泡ポリエチレンを使用したケーブル) に温調を施すことにより安定化を行った。大気圧の変動に対しては、温調の設定温度を適当に選ぶことで、その影響を小さく出来ることが分かった。その結果、当初の目標通りにすべての高周波回路間の位相の変化を  $\pm 0.1\text{deg}$  以下に出来ることが分かった。

### 1 はじめに

近年の高輝度ビーム用加速器では、加速空洞内の高周波電場の非常に高い安定性が要求される。この高周波電場の安定性は短時間のみならず年間を通しての安定性・再現性が要求される。加速空洞の高周波電場はそれぞれのローレベル制御回路により制御されているので、加速空洞間の位相の相関は各ローレベル制御回路に分配される高周波基準信号により保証される。この高周波基準信号と加速空洞からの高周波電場モニタ信号は同軸ケーブルによりローレベル制御回路へ導かれているので、同軸ケーブルの電気長の変化の影響で各空洞間の位相の相関にずれを生じてしまう。大きな加速器であればこれらのケーブル長は数 km に及ぶので、高周波基準信号の分配方法については十分に配慮しなければならず、安定化した同軸ケーブルや光ファイバーを用いた高周波基準信号の分配方法についての研究がなされている[1-6]。

JAERI ERL-FEL では安定な自由電子レーザーの出力を得るためには、加速器の位相安定度は年間を通じて少なくとも  $\pm 1\text{deg}$  以下の値が要求されており[7]、FEL 光の利用実験ではより高い安定度が求められることから  $\pm 0.1\text{deg}$  以下の位相安定度を目標としている。しかし、長時間での位相ドリフトのために、運転の度に位相の再調整が必要であるのが実状であった。この長時間での位相ドリフトの要因は、ローレベル制御回路に用いているミキサ、検波器および位相器の温度依存性であることが既に分かっている[8]。この対策として、すべての素子を恒温槽内に収めたローレベル制御回路を現在試作中である。長時間位相ドリフトのもうひとつの原因が、環境の変化による高周波基準信号用同軸ケーブルの電気長の変化である。本報告においては、室温および大気圧の変動に対しての同軸ケーブルの電気長の安定化について報告する。

### 2 ケーブル電気長の変化の計測

実際の加速器室内の環境でのケーブルの安定度を試験するために、加速器室内に実際と近い状態で試験ケーブル (Helix-FSJ1, 13.7m) を敷設して、加速器室内の環境の変化による同軸ケーブルの 499.8MHz に対する位相の変化を Double-Balanced Mixer (DBM) で測定し、汎用レコーダを用いて室温、大気圧、DBM の出力を記録した。測定は図 1 に示すように、発振器からの出力を分岐して二つの DBM でより行った。一方の DBM ではケーブルの電気長の変化による位相の変化を計測し、もう一方の DBM は DBM 自身の温度特性の補正に用いた。ケーブルの温度特性を測定する方の DBM では、位相の測定精度を高くするために、出力が 0V 付近になるように位相をトロンポンで調整した。DBM の温度特性補正用の DBM は出力が最大になるように位相を調整した。トロンポンは長さ 1m 程度の中空の同軸管であるので影響は少ないが、その温度係数として銅の線膨張率  $16.2\text{ppm}/\text{C}$  を用いて測定結果から差し引いた。発振器からの出力は実際の使用状況を模擬するよう  $+10\text{dBm}$  で行った。

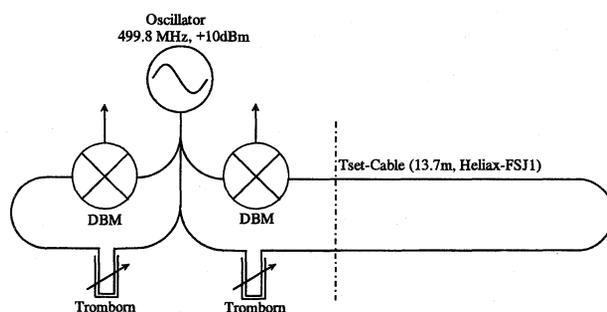


図 1 : DBM によるケーブル電気長の計測

### 3 室温変動による電気長の変化

一般的な同軸ケーブル (RG-217/U など) では絶縁体の誘電率は負の温度係数を持ち、導体の線膨張係数より 1 桁以上大きいために、電気長の温度係数は  $-100\text{ppm}/\text{C}$  程度であることが知られている。また、絶縁体として高発泡ポリエチレンを使用したケーブル (Helix-FSJ1 など) では導体の温度係数と絶縁体の誘電率の温度係数が正負反対で同程度となるために数  $\text{ppm}/\text{C}$  程度以下の電気長温度安定性が得られることが知られている。図 2 に Helix-FSJ1 に温調を施さずに加速器室内に敷設した場合の計測結果を示す。室温に対する位相の変化の様子をプロットし、ケーブル電気長の温度係数を求めた結果、Helix-FSJ1 の 499.8MHz に対する位相の温度係数は  $-3.69 \times 10^{-3}\text{deg}/\text{mC}$  であった。Helix-FSJ1 の波長短縮率は 84% であるので電気長の温度係数は  $-5\text{ppm}/\text{C}$  である。

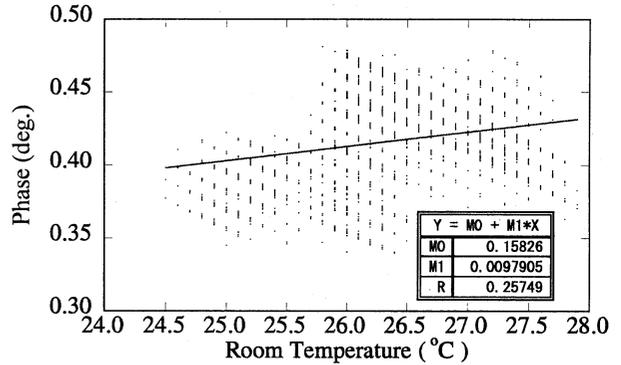
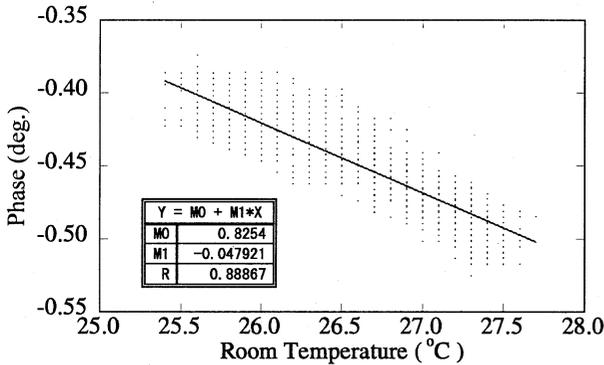
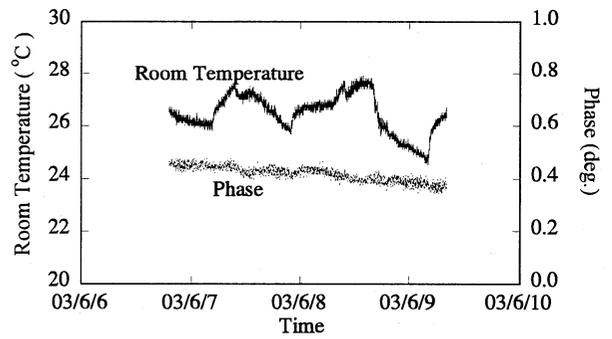
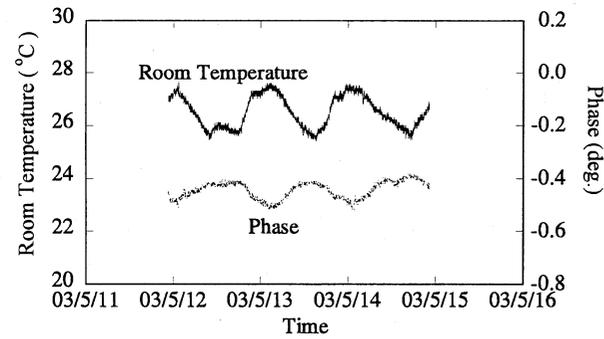


図 2 : Heliax-FSJ1 の安定度

(上 : 時間変化の様子、下 : 室温と位相の相関)

図 4 : 温度調節した Heliax-FSJ1 の安定度

(上 : 時間変化の様子、下 : 室温と位相の相関)

室温の変動にたいする安定度を向上するために Heliax-FSJ1 に図 3 に示すような温調を施した。この温調機構は冷却水の通った銅パイプとケーブルをアルミホイルと断熱材で覆い、冷却水は恒温循環水槽により温度調節するという非常に安価で簡単なものである。アルミホイルは輻射による熱の出入りを最小にし銅パイプと同軸ケーブルを同じ温度に保つために巻かれている。また、断熱材は冷却水管の結露防止に用いられている安価なものをこれにより伝熱による熱の出入りを抑えている。

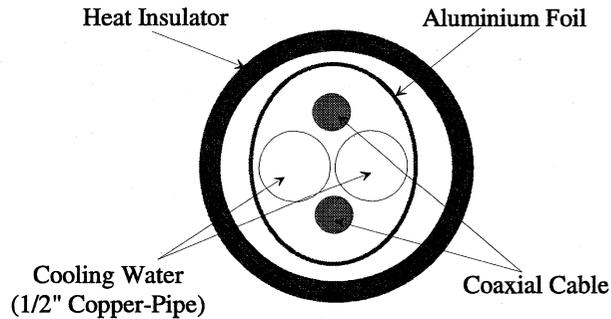


図 3 : 同軸ケーブル温度調節機構

温調機構の設定温度を 20°C にした場合の温調試験ケーブルの測定結果を図 4 に示す。室温の変動が位相に与える影響は非常に少ないことが分かる。試験ケーブルの室温変動に対する 499.8MHz の高周波に対する位相温度係数は相関図より  $7.15 \times 10^{-4} \text{deg./}^\circ\text{Cm}$  (1.0ppm/°C) であった。しかし、相関図において相関係数が 0.26 であることから位相の変化に室温以外の要因が強く寄与していると考えられ、正確な温度係数を得るためには、室温変動以外の要因の寄与についても考慮する必要がある。

#### 4 大気圧変動による電気長の変化

室温以外にケーブルの電気長に影響を与える環境要因としては大気圧の変動が考えられる。即ち大気圧によりケーブルの外導体に変形しケーブルの電気長が変化することが考えられる。図 4 の測定を行った時の大気圧と位相の時間変化の様子を図 5 に示す。この図から、位相の変化と大気圧の変動には相関があるように見える。そこで、室温と大気圧の位相変化に与える影響をみるために、重回帰分析によりそれぞれの偏回帰係数を求めた。室温と大気圧のそれぞれの偏回帰係数は  $-1.39 \times 10^{-4} \text{deg./}^\circ\text{Cm}$  (-0.2ppm/°C) と  $-6.86 \times 10^{-4} \text{deg./hPa m}$  (-0.96ppm/hPa) である。即ち、ケーブルに温調を施すことで、室温の変動に対する安定度は向上されたが、室温変動の影響の影に隠れて見えなかった大気圧変動の影響が顕著になってきたということである。

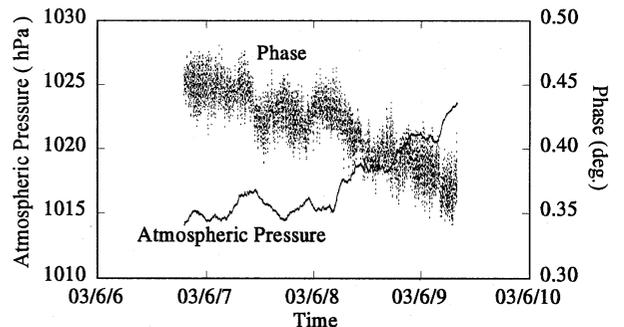


図 5 : 大気圧と位相の変化 (設定温度 : 20°C)

大気圧の年間の変動を  $\pm 30 \text{hPa}$  とすると JAERI ERL-FEL で使用する最長のケーブルは 23m であるので、大気圧変動による位相の変化は  $\pm 0.5 \text{deg.}$  になってしまう

ので $\pm 0.1\text{deg.}$ の安定度を達成するためにはケーブルにかかる大気圧の影響を何らかの方法で緩和する必要がある。

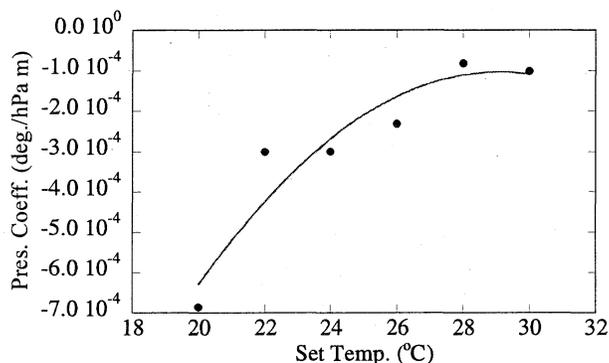


図6：設定温度による大気圧の影響の変化

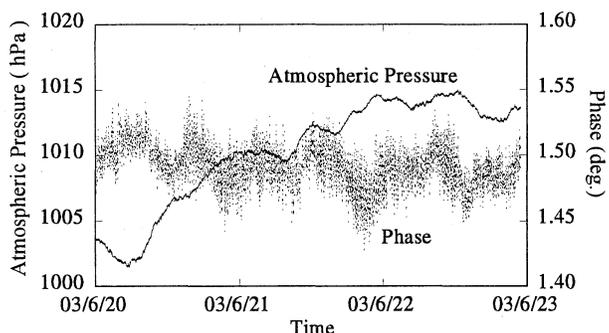


図7：大気圧と位相の変化（設定温度：30°C）

そこで、ケーブルの温調機構の設定温度を変えて、大気圧の影響を調べてみた結果を図6に示すように、設定温度を30°C程度にすることで大気圧の影響を緩和することが出来ることが分かった。30°Cに設定した時の大気圧と位相の変化の様子を図7に示す。大気圧の変動の影響が図5と比べて小さくなっていることが分かる。また、この時の室温と大気圧のそれぞれの偏回帰係数は $-1.86 \times 10^{-4}\text{deg./}^\circ\text{C m}$  ( $-0.3\text{ppm/}^\circ\text{C}$ )と $-1.02 \times 10^{-4}\text{deg./hPa m}$  ( $-0.14\text{ppm/hPa}$ )であった。この結果から室温の変動を $\pm 3^\circ\text{C}$ 、大気圧の変動を $\pm 30\text{hPa}$ とした場合の各高周波機器間での位相変化量を表1にまとめて示す。ただし、機器間の接続のために温調をかけられない部分があるので、この長さを2mとして全体の位相変化量を見積もった。

表1：高周波基準信号ケーブルの安定度

| 機器    | ケーブル長 (m) | 位相変化量 ( $\pm\text{deg.}$ ) |
|-------|-----------|----------------------------|
| 電子銃   | 12        | 0.06                       |
| SHB   | 12        | 0.06                       |
| SCA#1 | 6         | 0.04                       |
| SCA#2 | 6         | 0.04                       |
| SCA#3 | 23        | 0.10                       |
| SCA#4 | 23        | 0.10                       |

## 5 まとめ

高周波基準信号分配ケーブルおよび空洞内電場モニターケーブルを出来るだけ短くするよう考慮して、基準発振

器およびローレベル制御回路を加速器近傍に配置し、一般的に電気長温度安定性の高いことが知られている同軸ケーブル（ここでは Heliac-FSJ1 を使用した）を用い、簡易な温度調節を施すことで各高周波機器間での位相変動を $\pm 0.1\text{deg.}$ 以下にすることが出来ることが分かった。また、温調により室温の変動の影響を小さくしていくと、大気圧の変動による影響が見え出すが、温調の設定温度を適当に選択することで、大気圧の変動の影響を緩和できることが分かった。

今回得られたケーブルの安定度は JAERI ERL-FEL では十分なものであったが、同軸ケーブルがより長くなった場合（数100m程度）であっても、断熱材や恒温循環水槽を強化し、気圧変動などの要因を排除することで十分な安定度が得られるものと考えられる。

## 参考文献

- [1] H. Hayano and E. Ezura, Proc. of the 1987 Part. Accel. Conf. (1987) 1663-1665.
- [2] A. Krycuk, et al., Proc. of the 1991 Part. Accel. Conf. (1991) 1470-1472.
- [3] K. Crawford, et al., "The CEBAF Fiber Optic Phase Reference System", Proc. of the 1995 Part. Accel. Conf. (1995).
- [4] A. Gamp, et al., Proc. of the 1998 Linear Accel. Conf. (1998) 204-206.
- [5] T. Naito, et al., Proc. of the 2001 Part. Accel. Conf. (2001) 791-793.
- [6] 小林鉄也、他、Proc. of the 27th Linear Accelerator Meeting in Japan (2002) 302-304.
- [7] T. Shizuma, et al., Nucl. Instr. and Meth. A 475 (2001) 569-573.
- [8] 沢村勝、他、Proc. of the 25th Linear Accelerator Meeting in Japan (2000) 201-203.