

RF基準信号分配用ケーブルの電気長安定化

永井 良治¹、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2-4

概要

原研超伝導リニアック駆動型自由電子レーザーの安定性向上のために、RF基準信号分配用ケーブルの電気長を、同軸ケーブルに温調を施すことにより安定化した。RF基準信号分配用ケーブルとして、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）を用いた。同軸ケーブルと温度制御した水を流した銅パイプをアルミホイルおよび断熱材で覆うことにより温調を行った。この温調付RF基準信号分配用ケーブルを使うことにより、すべてのRF回路間の電気長の温度変化を $\pm 0.1\text{deg}$.以下にすることが出来る。

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RF電場の非常に高い安定性が要求される。このRF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RF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RF基準信号により保証される。このRF基準信号と加速空洞からのRF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温度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、RF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RF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]。

原研自由電子レーザー超伝導加速器では安定な自由電子レーザーの出力を得るためには年間を通じて $\pm 1\text{deg}$.以下の位相安定度が要求されている^[7]。しかし、長時間での位相ドリフトがあったために、運転の度に位相の再調整が必要であった。この長時間での位相ドリフトの一因は、ローレベル制御回路に用いているミキサー、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、同軸ケーブルの温度による電気長の変化である。本報告においては、同軸ケーブルの電気長の安定化について報告する。現在使用しているケーブルの温度による電気長の変化を計測し、

その結果、原研自由電子レーザー用超伝導加速器の様な比較的小型の加速器であっても、同軸ケーブルの温度による電気長の変化が長時間位相ドリフトの一因になることが分かった。そこで、RF基準信号分配用ケーブルの電気長の安定化を行った。温度による電気長の変動の少ない同軸ケーブルに温度調節を施すことにより、すべてのRF回路間の電気長の温度変化を $\pm 0.1\text{deg}$.以下にすることが出来ることが分かった。

2. 同軸ケーブル電気長の温度特性

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、電気長の温度係数は -100ppm/ 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（Heliax-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ppm/ 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。

実際の加速器室内の環境でケーブル電気長の変化がどの程度であるかを調べるために、原研自由電子レーザー超伝導加速器で現在使用している同軸ケーブルRG-217/Uと電気長の温度特性が良いとされるHeliax-FSJ1について計測を行った。加速器室内に実際と近い状態で試験ケーブル（13.7m）を敷設して、加速器室内の室温の変動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気温とDBMの出力を記録した。

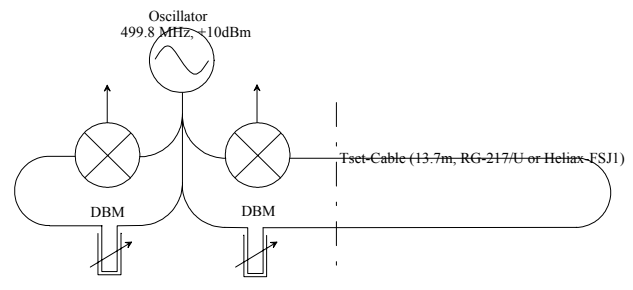


図1：ケーブル電気長の計測

測定は図1に示すように、発振器からの出力を分岐して、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

¹ E-mail: r_nagai@popsvr.tokai.jaeri.go.jp

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ボーンで調整した。DBMの温度特性

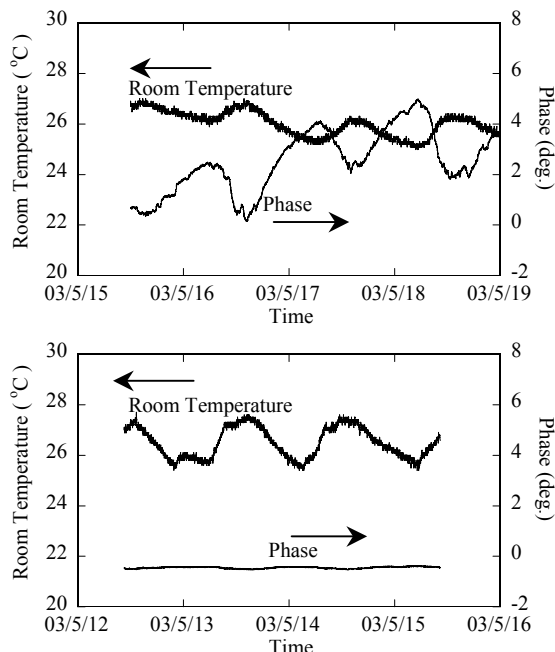


図2：気温と位相の変化
(上：RG-217/U、下：Heliac-FSJ1)

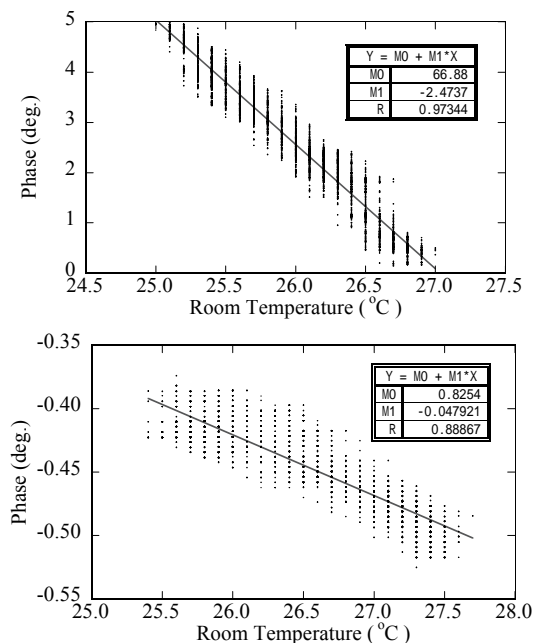


図3：気温と位相の相関
(上：RG-217/U、下：Heliac-FSJ1)

補正用のDBMは出力が最大になるように位相を調整した。トロンボーンは長さ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16.2ppm/°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+10dBmで行った。

図2にRG-217/UとHeliac-FSJ1それぞれの計測の結果

を示す。RG-217/Uでは気温の変化に伴い位相が数度変化しているのに対してHeliac-FSJ1は非常に安定している。図3に示すように、気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。図中に示してあるそれぞれの温度係数は13.7mのケーブルのものであり、RG-217/UとHeliac-FSJ1の試験ケーブルの499.8MHzに対する位相の温度係数はそれぞれ $-1.90 \times 10^{-1} \text{deg/m}$ と $-3.69 \times 10^{-3} \text{deg/m}$ である。RG-217/UとHeliac-FSJ1それぞれの波長短縮率は67%と84%であるので電気長の温度係数はそれぞれ-212ppm/°C と -5ppm/°C である。

3. ケーブル電気長の安定化

基準発振器で作られた基準信号に対して加速空洞内の位相がある一定値になるようにローレベル制御回路で制御を行う際にケーブルの電気長の変化が問題になるのは、基準発振器からローレベル制御回路へのケーブルおよび加速空洞からローレベル制御回路へのケーブルである。ケーブルの電気長の温度変化を考慮するならば、これらのケーブルは可能な限り短い方が良い。原研自由電子レーザーではローレベル制御回路と基準発振器を制御室に設置しているために、最長で約40mとなっている。また、超伝導加速器の加速周波数は499.8MHzであるので、超伝導加速器、SHB、グリッドパルサーへのケーブルの電気長安定度は499.8MHzに対して十分に小さい位相差（目標は±0.1deg.以下）であることが要求される。

室温の変動を±3°Cとして、それぞれの加速空洞およびグリッドパルサーでの位相変動を、計測したケーブル電気長の温度係数から求めた結果を表1に示す。敷設されている全てのケーブルが同じような温度変化をするとするならば位相差はケーブル長の差の分だけで生じる。そこで、SCA#3を基準とした場合の位相の変化を表1の括弧内に示す。実際には各ケーブルは違う経路を通して敷設されているので、この括弧の値は最良の場合の位相変動である。

表1：実際の位相変化量

機器	ケーブル長	位相変化量 (± deg.)	
		RG-217/U	Heliac-FSJ1
電子銃	42m	23.9 (0.5)	0.5 (0.0)
SHB	42m	23.9 (0.5)	0.5 (0.0)
SCA#1	34m	19.4 (4.0)	0.4 (0.1)
SCA#2	27m	15.4 (8.0)	0.3 (0.2)
SCA#3	41m	23.4 (0.0)	0.5 (0.0)
SCA#4	46m	26.2 (2.8)	0.5 (0.0)

更に安定度を増し、位相の温度変化を±0.1deg.以下にするために、Heliac-FSJ1に温調を付けて電気長を安定化した。RF基準信号分配ケーブルおよび空洞内電場モニタ用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、これらのケーブルに温調を施す。ケーブルの温調は図4に示すように、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ものである。

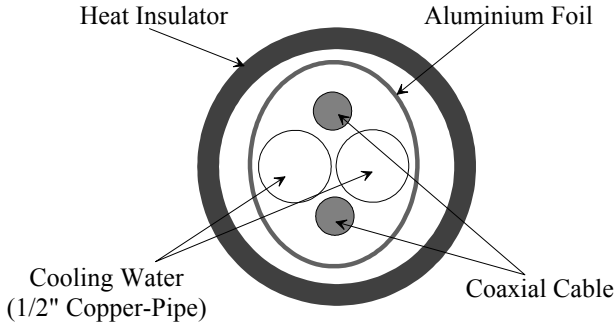


図4：同軸ケーブル温度調節機構

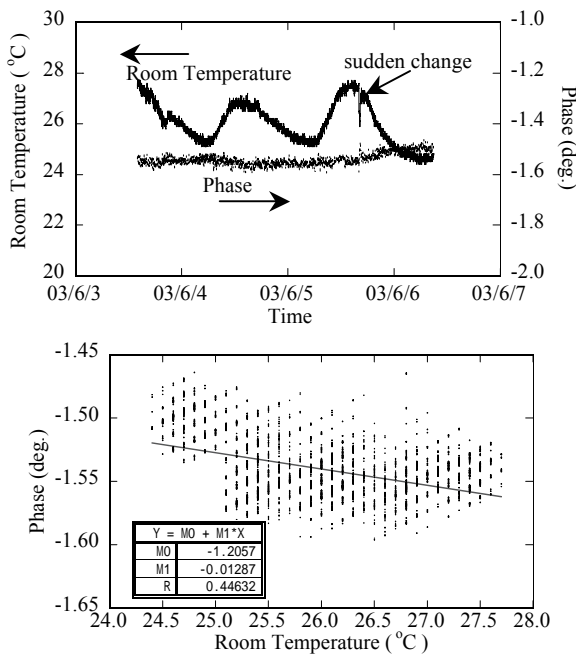


図5：温度調節したHeliac-FSJ1の安定度
(上：時間変化の様子、下：気温と位相の相関)

温度調節した試験ケーブルの測定結果を図5に示す。試験ケーブルの気温変動に対する位相温度係数は $-9.90 \times 10^{-4} \text{deg/m}$ であった。加速器室の搬入口が開かれるなどして気温が急に変動すると位相も変化してしまっている。これは断熱が不十分であるためと考えられる。また、気温と位相の相関図からは気温との相関が十分でないことから気温以外の原因があると考えられる。この原因については気圧の変動などが考えられるが詳しくは調査中である。

室温の変動を ± 3 として、それぞれの加速空洞およびグリッドパルサーでの位相変動と各ケーブルの長さを表2に示す。ただし、括弧内は温調が施されない部分のケーブル長である。このようにHeliac-FSJ1に図4のような簡易な温調を施すことで、すべてのRF回路間の位相温度変化を $\pm 0.1 \text{deg}$ 以下にすることが出来る。

表2：安定化後の位相変化量

機器	ケーブル長 (m)	位相変化量 ($\pm \text{deg}$)
電子銃	12 (2)	0.05 (0.03)
SHB	12 (2)	0.05 (0.03)
SCA#1	6 (2)	0.03 (0.05)
SCA#2	6 (2)	0.03 (0.05)
SCA#3	23 (2)	0.08 (0.00)
SCA#4	23 (2)	0.08 (0.00)

5. まとめ

原研自由電子レーザー用超伝導加速器の様な比較的小型の加速器であっても、同軸ケーブル電気長の温度による変化が長時間位相ドリフトの一因になることが分かった。そこで、すべてのRF回路間の位相温度変化を $\pm 0.1 \text{deg}$ 以下にすることが出来る様に同軸ケーブルの安定化を行った。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目標とする安定度が達成できた。

今回得られたケーブルの安定度は原研自由電子レーザー超伝導加速器では十分なものであったが、同軸ケーブルが現在以上に長くなった場合（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