

J-PARC リニアック高周波基準信号分配システム

小林鉄也1、A)、千代悦司A)、穴見昌三B)、山口誠哉B)、道園真一郎 B)

A) 日本原子力研究所 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2-4

B) 高エネルギー加速器研究機構 〒305-0801 茨城県つくば市大穂1-1

概要

J-PARC 陽子リニアックでは、RF 基準信号12MHzを光伝送によって各クライストロン駆動ステーションへと分配する。加速電場（324MHz、972MHz）の位相、振幅変動はそれぞれ $\pm 1^\circ$ 、 $\pm 1\%$ 以内が要求され、それゆえ、基準信号に求められる安定度は非常に厳しく、リニアック300m間、約60ヶ所にも及ぶステーション間の位相変動は $\pm 0.3^\circ$ （972MHzで約 $\pm 0.9\text{ps}$ ）以下を目標としている。そのために新たに光コンポーネント（E/O、O/E）の開発を行い製作した。その性能特性評価および基準信号分配システムの安定性試験を行い、その結果、ほぼ期待する特性が得られた。

1. はじめに

大強度陽子加速器J-PARCの建設が現在進められている[1]。全長約300mのJ-PARCリニアックでは、その高周波基準信号を光伝送によって分配する。これについて前回の研究会では、一般的な光コンポーネント（E/O、O/E等）の特性を評価・測定し、その結果から要求される基準信号分配システムについて検討内容を報告した。今回は、その要求を実現するため新たに実機用のE/O、O/Eを開発・製造し、伝送システムの性能評価を行ったので、その結果を報告する。

リニアック高周波加速では、前半（ $<180\text{MeV}$ ）324MHzのクライストロン20台（RFQ、DTL、SDTL用）、後半（ $<400\text{MeV}$ ）972MHzのクライストロン21台（ACS用）により加速電力が供給される（図1参照）。加速電場の安定性はビーム品質を決め、ビームロスを最小限に抑えるために最も重要な要素の一つである。そのため加速電場の位相誤差、振幅誤差はそれぞれ $\pm 1^\circ$ 、 $\pm 1\%$ 以内が要求されている。従って、RF基準信号は更に高安定であることは必須であり、その位相変動 $\pm 0.3^\circ$ （972MHzで約 $\pm 0.9\text{ps}$ ）以下を目標としている。ここで、光ケーブルのみによる位相変動を $\pm 0.1^\circ/300\text{m}$ 、E/O、O/E単体での位相変動はそれぞれ $\pm 0.1^\circ$ 以内を目指す。クライストロンギャラリーの温度は $27\pm 2^\circ\text{C}$ に制御される。

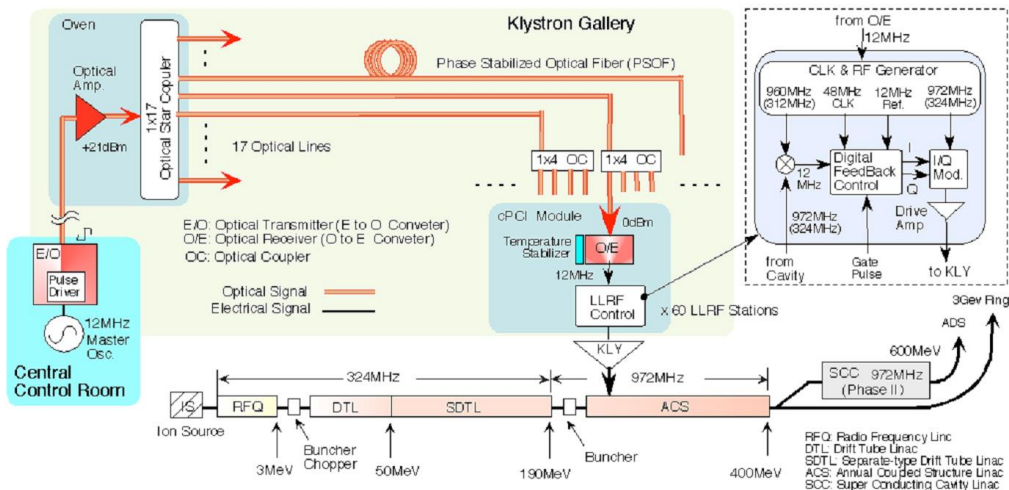


図1：基準信号分配システム・レイアウト

2. 高周波基準信号分配システム

図1にRF基準信号の分配システム構成図を示す。高安定なRF基準信号12MHzは中央制御室（CCR）から光ケーブルによりリニアックへ伝送される。CCRにおける光変換に今回開発された専用のE/Oを用いる。リニアック最上流部において、CCRより伝送された基準信号を直接光アンプにより増幅し（Max:+21dBm）、光カプラを用い、ローレベルRF制御（LLRF）ステーション約60ヶ所へ分配する。光アンプ利用のため波長1550nmを選択した。クライストロン4台分（高圧DC電源1台に対応）に対して1本の光ケーブルで伝送し、計17系統必要になる。1本の伝送先では5分岐し（図1では4分岐カプラとなっているが）、1つを位相モニターのため上流へ戻す。残り4つの信号を各LLRFステーションへ分配する。光信号を受け取った各LLRFステーションでは、この12MHzを基準に位相ロックをかけ、純度の高い加速信号324MHzを発生させる（図2(下)を参照）。ここでのPLLのループフィルタにより基準信号12MHzの速い（1kHz程度以上の）繰り返しジッターは吸収することができる。

空洞の位相変動およびビームローディングに対しては、デジタルフィードバック制御を行い、I/Q変調器を用いて振幅・位相の安定化を図る[2]。これら信号の発生およびフィードバック制御システムはcPCIのモジュールとして製作する。

基準信号の光伝送には、位相安定化光ファイバ（Phase Stabilized Optical Fiber, PSOF）を使用する。PSOFは、心線の2次被覆に負の膨張係数を持たせることで優れた温度係数を実現している。現在、古河電工のみがPSOFの製造を行っている。その温度特性を評価した結果では

ギャラリーの空調 $27\pm 2^\circ\text{C}$ に対し、必要な位相安定性を達成するには、更に光ケーブルの恒温化を図る必要がある[3]。そのため、この光ケーブルは断熱ダクトに敷設する（図8参照）。ダクト内は $\pm 0.1^\circ\text{C}$ に制御された冷却水パイプを通す。古河電工製PSOFの温度係数の測定結果は $0.2^\circ/300\text{m}/^\circ\text{C}$ （972MHz）で、光ケーブルのみの位相変動を300mで $\pm 0.1^\circ$ 以内とすると、光ケーブルの温度を $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 以内に維持しなければならない。

3. E/O、O/E性能評価

今回、RF基準信号に要求される安定性を実現するため、伝送ジッター1ps（rms）以下を目標としたE/O（1台）、O/E（2台）が開発された。図2にその写真を示す。いずれもGraviton社[4]によって製作されたものである。図2上が波長1550nmのE/Oコンバータで2GHzの帯域を持つ。200ps以下の速い立ち上がりに矩形波整形を行いジッターを小さくしている。設計当初は光アンプを使わない予定で、高出力（+8dBm）で16分岐のカプラを内蔵した形となっているが、今回の評価は16分岐カプラを外して行っている。図2の下が、O/EをRF&CLK発生器（cPCIボード、キャンドクックス社製）に取り付けた写真である。O/Eは、LLRFステーション全60ヶ所において必要で且つcPCIボードに内蔵させるので、コンパクト化を図りO/Eモジュール単体の温度制御を行っている。O/Eも同様に帯域2GHzである。今回開発したE/O、O/Eの光伝送ジッターをサンプリングオシロ（テクトロTDS8000）を用いて測定した。その結果を図3に示す。実測値1.2ps（rms）で、計測システムによるジッターを $0.8\sim 1.0\text{ps}$ 程度あるので、伝送ジッターは目標である1ps以下を得ることができたと見える。

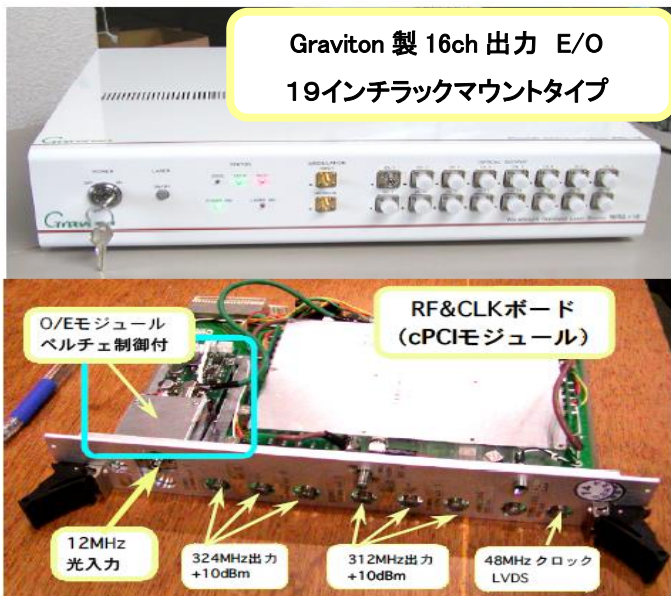


図2：(上)パルスドライバ内蔵広帯域E/O。
(下)温度制御付O/E (cPCIボードに内蔵)。

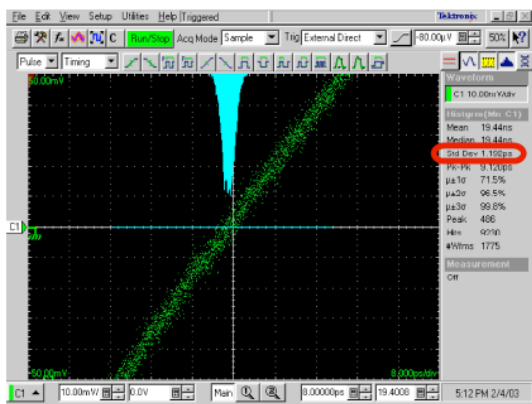


図3：E/O - O/E 光伝送ジッター測定結果。

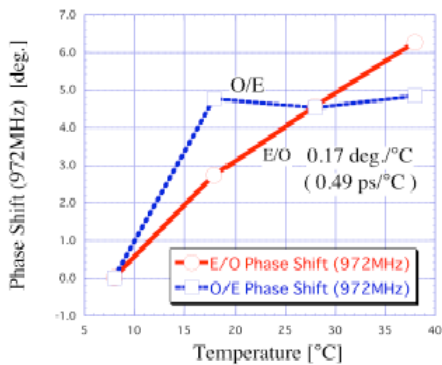


図4：E/O, O/E 温度特性。

E/O, O/Eの温度特性を測定した結果を図4に示す。
E/O については前回にも報告した試作機と同様、温度係数が0.5ps/°Cで、一般に使われるOrtel社製に比べても良い特性が得られた。この結果から、目標となるE/Oの位相変動を±0.1°(972MHz)以内とするならば、E/Oを±0.5°C以内の環境下にする必要があるが、送信元に1台だけなので十分制御可能である。図4のO/Eについては20~40°Cにおいてほとんど位相変化がなく、期待通りの結果が得られた。

4. 相互同期安定性

この高周波基準信号分配システムにおいて、本質的には各ステーション間の位相同期性・安定性が重要である。そこで、図5に示すように、2系統の光伝送とRF&CLKボードにより、相互の位相安定度を測定した。基準12MHz光信号を4分岐カプラで分け、2つの出力を光伝送しRF&CLK発生器で受ける。それにより生成された2つの324MHzの位相を(一方を基準にして)測定し安定性を評価した。2つのうち一方の伝送路は位相安定化光ケーブルで300m伝送している。現状では972MHzのRF&CLK発生器の開発は進んでいないので324MHzで測定を行った。

2つの324MHz発振器の相互ジッターは1ps (rms)以下の測定結果を得た。また、長期的な位相の安定性を測定した結果を図6に示す。縦軸は、一方の信号を基準にした324MHzの位相で、12時間プロットしたものである。ある間隔で不連続に多く変動しているのが見られるが、これは一方のO/Eの不良が原因であることが分かっている。この不連続な変動を除けば、ほぼ±0.1°の安定性を得ることができたとと言える。

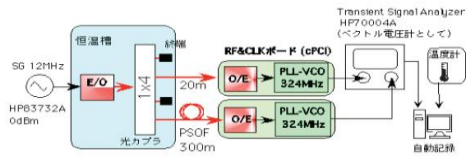


図5：ステーション間の相互安定性評価。

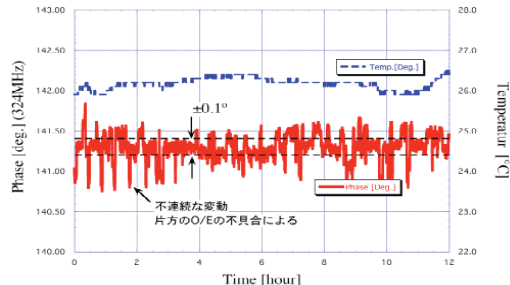


図6：2系統伝送間の相互安定性

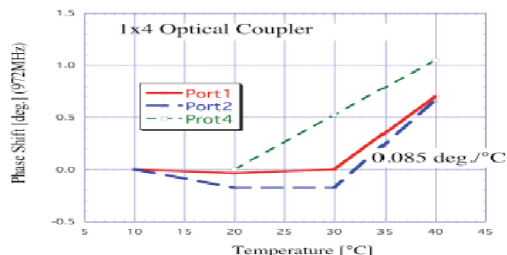


図7：4分岐光カプラ温度特性。

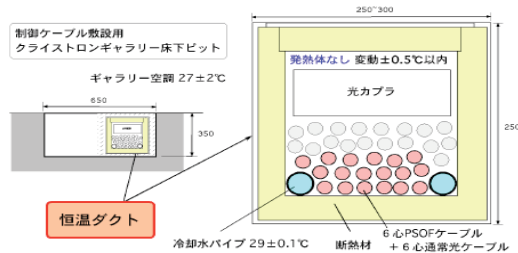


図8：光ケーブル敷設用恒温ダクト。
クライストロンギャラリ-床下ピット内に設置。

最後に、光カプラの温度特性について述べる。光カプラによる変動は、ステーション間の位相のズレに直接影響するので注意する必要がある。4分岐光カプラの温度特性を測定した結果を図7に示す。入力に対する各ポート出力の位相の変化(972MHzに換算)をプロットしたものである。Port1、2の測定は同時に行っているがPort4については別測定で(O/Eが2台しかなかったため)やや信頼性に欠けるが、この結果から、±2°Cの温度変化に対して±0.1°~0.2°の位相変化が生じる可能性があると言える。基準信号の位相変動±0.3°以内が目標であることを考えると、この値は無視できない。従って、伝送先の光カプラも、光ケーブルと共に恒温ダクト内に設置する必要があると判断した(図8参照)。

5. まとめと今後の課題

基準信号の位相変動を目標である±0.3°(972MHzで約±0.9ps)程度以内にするため、新たにE/O,O/Eが開発され、伝送ジッターおよび温度特性において期待通りの性能を得る事ができた。ステーション間の相互位相の安定性についても良好な結果を得る事ができた。光カプラの温度特性についても注意が必要で、光ケーブルと共に恒温ダクト内にいれる。

今後の課題として、光ケーブルを敷設する恒温ダクトを試作し温度安定性を評価する予定である。その他、RF&CLK発生器の外部振動に対する位相変動の問題があり、水晶発振器の振動対策が課題となる。

参考文献

- [1] URL: <http://www.j-parc.jp/>
- [2] S. Michizon, et al., Proc. of the LINAC2002, MO462, 2002.
- [3] T. Kobayashi, et al., Proc. of the LINAC2002, MO463, 2002.
- [4] URL: <http://www.graviton.co.jp/> TEL:042-966-0816