

KEK/JAERI 統合計画 400MeV 陽子リニアック用 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

KEK/JAERI 統合計画の陽子リニアックでは、加速電場 (324MHz および 972MHz) の位相、振幅変動をそれぞれ $\pm 1^\circ$ 、 $\pm 1\%$ 以内に抑えなければならない。ゆえに、その基準信号の分配においても高安定なものが要求される。12MHz の基準信号は光伝送によって約 50 台の各クライストロン駆動システムへと分配される。このため光コンポーネント (位相安定化光ファイバ、E/O、O/E 等) の特性は非常に重要で性能評価・検討を行った。既製のものでは要求される性能に対して不十分であり、E/O、O/E に関しては新たに開発を行っている。その性能評価結果と、提案される高周波基準信号分配システムを報告する。

1. はじめに

高エネルギー加速器研究機構 (KEK) と日本原子力研究所 (JAERI) の共同による大強度陽子加速器建設の建設が進められている[1]。線形加速器の高周波加速については、前半 (<191MeV) 324MHz のクライストロン 20 台 (RFQ,DTL,SDTL 用)、後半

(<400MeV) 972MHz のクライストロン 23 台 (ACS 用) により加速電力が供給される (図 1 参照)。高周波加速電場の安定性はビーム品質を決める最も重要な要素の 1 つと言える。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て、各空洞間の位相関係を決定する絶対基準が十分に高安定であることが必要となる。近年における他の加速器同様、この基準信号は位相安定化光ファイバを用いた光伝送によって分配される。クライストロンギャラリーの温度が $27\pm 2^\circ\text{C}$ に制御される中で、基準信号安定度として位相変動 $\pm 0.3^\circ$ ($\pm 1\text{ps}@972\text{MHz}$) 以内を目標値とする。厳しい要求のため光伝送コンポーネント (E/O、O/E、光ケーブル) においても詳しい評価が必要である。

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。周波数は 12MHz を使い、マスターオシレータの信号は各ローレベル RF 制御 (LLRF) ステーションへ光伝送によって分配される。光信号にするメリットには、(1) 伝送損失が非常に小さい、(2) 電磁的

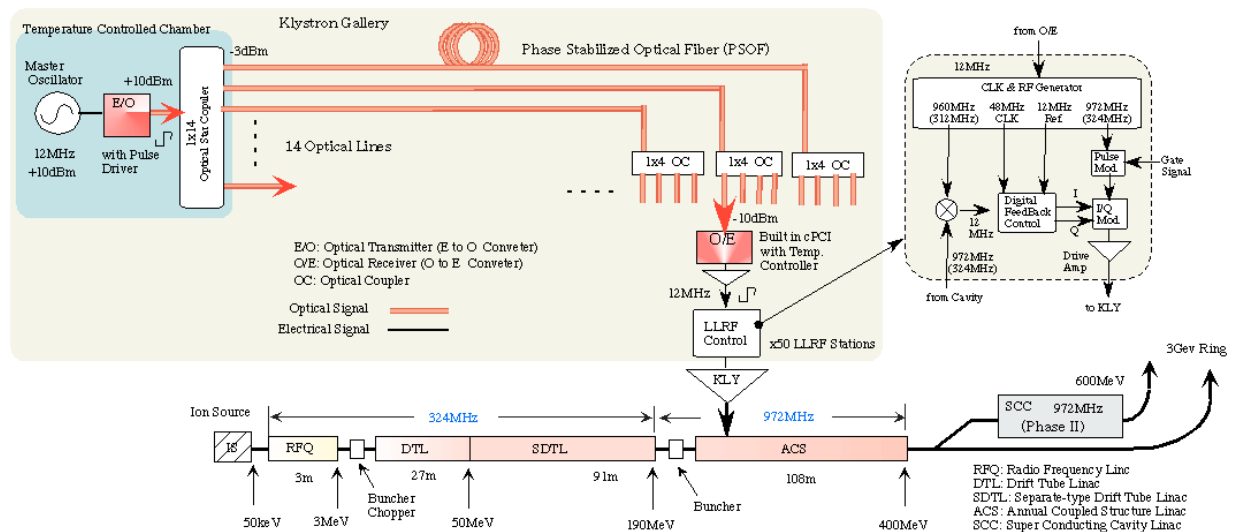


図 1 : 基準信号分配システム・レイアウト

¹ E-mail: koba@linac.tokai.jaeri.go.jp

ノイズの影響がない、(3)位相安定化同軸ケーブルと比較して1桁以上温度係数が小さい、などがあり、特に(3)の特徴が重要となる。

およそ50ヶ所あるLLRFステーションへの分配については、クライストロン4台分(高压DC電源1台分)に対して1本の光ケーブルで伝送し、計14本の光ケーブルにより分配することにした。マスターオシレータの基準信号はO/Eにより光信号(波長1550nmとする)に変換され、直後に光スターカップラにより14分岐される。それぞれの伝送先において更に4分岐され、すべてのLLRFステーションが基準信号を光信号で受け取る。12MHzの光変調は、安定化のため速い立ち上がりを持った方形波とする。将来的にはマスターオシレータの代わりに、リングから12MHzの信号をもらい、それを基準にPLL発振させる。

各LLRF制御ステーションでは、この12MHzを基準として位相ロックをかけ加速RF等の必要な信号を発生させる。また空洞の位相変動およびビームローディングに対して、I/Q変調器を用いデジタルフィードバック制御を行い振幅・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。

3. 位相安定化光ケーブル

位相安定化光ファイバ(Phase Stabilized Optical Fiber, PSOF)は、その名の通り温度変化に対する伝送遅延時間の変化を小さくしたもの(1ppm/°C ≦ 5ps/km/°C以下)で、その温度特性は通常の光ファイバより6倍以上優れている。心線の2次被覆に負の膨張係数を持った材質を用いることでファイバ自身による温度係数をキャンセルさせている[3]。

現在PSOFは、住友電工製と古河電工製の2社によるものだけである。Spring-8等で住友電工製が使用されており、KEKBでは古河電工製のものが採用されている。文献[4,5]などで、その特性が報告されているが、住友電工製のPSOFは25°C付近から温度係数が急激に悪くなる特徴を持つのにに対し、より高い温度でも小さな温度係数を保つように改良されたものが古河電工製である。ただし現在では、住友電工は撤退し、世界的に見ても古河電工のみが製造している。

温度係数が1ppm/°Cの場合、972MHzでは、空調±2°Cの変化に対して300m伝送において約±1°の位相変動になる。基準信号の位相変動±0.3°以内を目標とするとケーブルの温度係数を0.3ppm/°C程度にしなければならない。

今回我々は住友電工製PSOFを入手し特性を測定することができた。6心ケーブル(約300m)をドラムに巻き恒温室に入れて測定を行った。結果を図2に示す。空調範囲27±2°Cにおいて、温度係数が約1ppm/°Cである。6心中3心について測定し一致した結果を得た。波長(1.310nmと1550nm)による違いは見られなかった。また、測定方法としてI/Q復調器による位相検出法と、サンプリングオシロ

(TDS8000)を用いて直接遅延時間を測定する2種類の方法で行い、どちらもほぼ同じ結果を得た。

この結果では目標(位相変動±0.3°以内)を達成できない。ただし現在は、住友電工はPSOFの製造を中止しており、実機で使用するのは古河電工製のものである。古河電工製については温度係数0.4ppm/°Cなどが報告されている[4]。しかし、メーカーが保証するのは1ppm/°C以内であり使用温度によっても異なる。またケーブルの敷設の仕方によっては期待通りの特性が得られないこともある。

以上のことから、必要な0.3ppm/°Cを得るのは非常に困難と判断し(時間的にも予算的にも新たに開発する余裕はない)、今回は、水冷により光ケーブルの温度を±0.1°Cに制御することにした。これにより光ケーブルにおける位相変動を±0.05°程度に抑える。光ケーブルは床下ピットに敷設される予定で、断熱加工された専用のケースを用意し冷却水配管と共にその中に入れる。

現在、古河電工製PSOFの特性評価を行っている。

4. 光トランスミッタ/レシーバ

光トランスミッタ(E/O)およびレシーバ(O/E)の安定性も非常に重要となる。要求される性能を満たすE/O、O/Eとして、Spring-8など幅広く使われ長い実績もあるAgereSystems(旧オーテル)社製のものが第1候補として考えられる。しかし周波数帯域が10MHz以上である。12MHzではその下限に近く、安定性等が心配される。また整った方形波が得られない。その他、1)非常に高価、2)O/Eは約50台必要で、かつcPCIボードに内蔵させる必要がある、3)今後の市場の展望、光アンプの使用等を考慮し、波長を1550nmとしたい(AgereSystemsの波長1550nmは更に高価)などの理由により、今回新たに最適なE/O、O/Eを開発することにした。そこで、グラビトン社[6]に対応してもらい、波長1550nmのE/Oを試作した。現在実機用を製作中である。

ところで、今日の光通信技術は目紛しく発展しているが、SDH/SONET等のデジタル通信規格に限られ、高安定かつ任意の波形で変調できる光伝送機器を扱う所はAgereSystems以外にほとんど見当たらないと言って良いのが現状である。

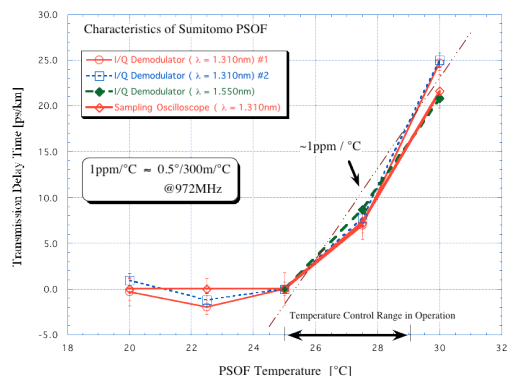


図2：住友製PSOF温度特性

波長 1550nm での光ケーブルにおける伝送損失、分散は、300m 程度の距離であれば無視できる (1.310nm の方が低分散)。ただし光源 (E/O) として分布帰還型 (DFB) レーザー等、波長 (縦モード) の選択性がありスペクトルが十分狭いことが必要である。

今回グラビトン社が試作した E/O (波長 1550nm)、および オーテル製の E/O (3540A)、O/E (4511A) について特性評価を行った。12 時間の位相変動、および温度特性の測定結果を、それぞれ図 3、図 4 に示す。O/E はオーテル製 4511A で共通に用い、E/O だけを変更して比較した。図 3 から、長期の安定性についてはグラビトン製の E/O を使用した場合の方がやや良い結果となり、安定なところで変動が $\pm 0.04^\circ$ (972MHz で $\pm 0.12^\circ$) と目標達成が期待できる。温度特性においてもグラビトン製の E/O が良い結果で、温度係数 $0.5\text{ps}/^\circ\text{C}$ である。しかし空調 $\pm 2^\circ\text{C}$ に対しては不十分で、E/O、O/E それぞれ温度制御が必要となる。E/O は恒温槽に入れて運転する。

基準信号 12MHz (クロック) は位相安定化のため速い立ち上がり時間 ($<200\text{ps}$) が要求されるので、現在実機用に新たに開発している E/O ではパルスドライバを内蔵させ光信号をパルス変調させる (入力は 12MHz の sin 波とする)。

O/E については各 LLRF システムで受けるため約 50 台必要で、実機用に cPCI モジュール内蔵型の温度制御付のシステムを製作中である。O/E の変換はトランスインピーダンスアンプ及びリミッティング

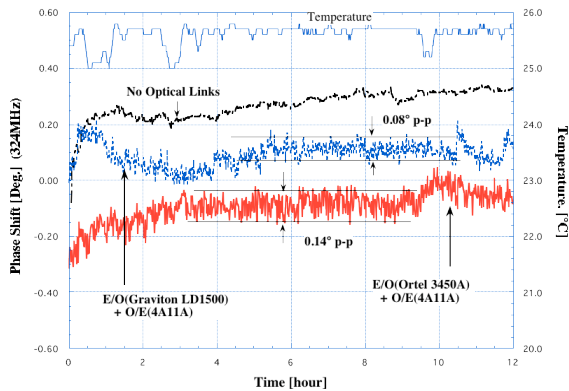


図 3 ・ 光リンク長期安定性

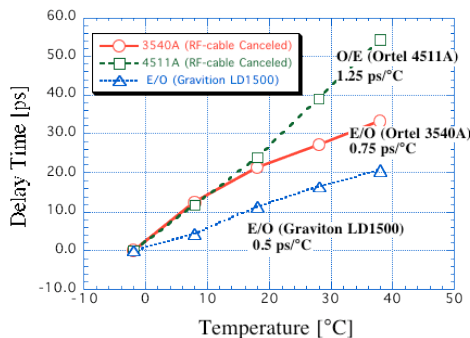


図 4 : 光リンク温度特性

E/O	Opt Link Jitter (rms) [ps]
Graviton (100kHz~2GHz)	5.5
3510A (0.01~3GHz)	7.6
3540A (0.1~3GHz)	11.0

表 1 : E/O の相対的ジッタ評価. サンプルングオシロ (TDS8000) による測定. 信号源として 12MHz パルス (立ち上がり時間 500ps) を用いて測定した. 測定系のジッタ (約 7ps) を差し引いた値である。

アンプによる 2 値検出方式で低ジッター化を図る。将来的に光アンプ導入によるジッター増加を考慮し、できるだけ E/O、O/E は低ジッターにしておきたい。

性能比較のためジッター評価の結果を表 1 に示す。時間ジッターの絶対的な値はパルスの立ち上がり時間等の条件によって変わるので、ここでは問題にしない。現在グラビトン社によって製作を進めている E/O、O/E では 1ps 以下のジッターを目差す。

5. まとめと今後の課題

本陽子リニアックの高周波加速では、12MHz の RF 基準信号を光伝送によって分配し、位相変動 $\pm 0.3^\circ$ 以内を目標とする。光コンポーネントの性能評価を行った結果、位相安定化光ケーブルは温度制御が必要であることが分かり、水冷により $\pm 0.1^\circ\text{C}$ に制御する。E/O、O/E においても既製品のものでは十分に要求を満たしているとは言えず、新たに開発を進めている。E/O ではパルスドライバ内蔵によるパルス変調でジッター 1ps 以下を目差す。O/E は温度制御付の cPCI モジュール内蔵型を製作中である。

今後の予定として、古河電工 PSOF の特性試験を行う。また、現在グラビトン社により製作中の E/O、O/E の性能評価を行う。研究会当日では結果を報告する予定である。さらに、分配システム全体の安定性を確認する必要がある。また、光伝送以外の変動が大きな問題になるであろう。場合によってはフィードバックによる位相の制御が必要になることが考えられ、光移相器を用いたフィードバックシステムも検討している。また E/O の出力強度が不十分で S/N が悪い場合は光アンプの導入を考えている。その場合のジッター等の評価が必要となる。

謝辞

システムに関する多くの質問・要求に対して快く対応して下さった KEK の内藤孝氏、海老原清一、末武聖明氏に深く感謝致します。

参考文献

- [1] URL: <http://jkj.tokai.jaeri.go.jp/>
- [2] S. Michizon, et al., Proc. of the 26th Linear Accelerator Meeting in Japan, pp.85-87, 2001.
- [3] T. Kakuta, S.Tanaka, Proc. of International Wire & Cable Symp., pp.234-240, 1987.
- [4] T. Naito, et al., Proc of PAC2001, pp.791-793, 2001.
- [5] H. Suzuki, et al., Nucl. Ins. and Meth. A431, pp.294-305, 1999
- [6] URL: <http://www.graviton.co.jp/>