

RF Source of Superconducting RF Test Facility(STF) in KEK

S. Fukuda¹, M. Akemoto, H. Katagiri, T. Shidara, T. Takenaka, H. Nakajima, K. Nakao, H. Honma, S. Matsumoto, T. Matsumoto, H. Matsushita, T. Miura, S. Michizono, Y. Yano, M. Yoshida, S. Kazakov, H. Hayano

High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801, Japan

Abstract

Phase-0.5 and Phase-1.0 of the Superconducting RF Test Facility (STF) have been developed since 2005 in KEK. We have completed the first RF-source and it has been used for the evaluation for the components of power distribution system (PDS) and couplers which were installed in the 5m-cryomodules. In FY2006, the second high power pulse modulator was manufactured. This was an all-in-one-cabinet modulator which mated to the basic design configuration of the international linear collider. Another R&D modulator with IEGT was also successfully operated. This report describes the recent status of the RF source of STF in KEK including the modulator, PDS and LLRF.

KEK超電導RF試験装置 (STR)のRF源の開発

1. はじめに

KEKで進めている超電導RF試験装置(STF)の開発が進行中である。当初の計画と異なりPhase-0.5というPhase-1.0の前段階に相当するステップが挿入されることになった。これは先ず2台の5mクライオモジュールにそれぞれ35MV/m 空洞、45MV/m 空洞をそれぞれ1台ずつ装着して冷却試験を行うものである。続いてそれぞれ4台ずつ設置するPhase-1.0に移行する。その後ILC (国際リニアコライダー計画)の1ユニット相当を試験するPhase-2.0が計画されている。最近はやその先にILCの前段階の相当するPhase-3.0計画も提案されている[1]。(STF計画に関しては図1参照)。RF源としては過去の資産を利用した第1号機が稼動し始め各種の試験に利用されている[2]。2006年から2007年夏にかけてPhase-0.5及び1.0計画に対する開発が進んだのでこれらに関して本稿で報告する。

2. 大電力STF長パルス電源 [3]

FY2006ではRF源No1の電源が稼動し、導波管のコンポーネントの開発、カップラーの試験等に利用され

た。今年に入ってからSTF-0.5用に据え付けられたクライオモジュール内のカップラーへもRF電力を供給した。この電源では負荷短絡時のIGBT SW保護等の為に、①負荷短絡等の過電流を検知してすぐSW遮断する②それが働かない時はCrawbar回路を動作させるという保護回路の二重化を取り入れた。その結果、閾値設定に電圧が食われて所定の電圧がクライストロンにかけられなくなった。これを解決する為には更にIGBTを10段近く増強する必要がある。これに対し費用が膨大にかかるという計上が製造会社から示され結局増強は諦めた。この結果クライストロンからの出力は3.5MV迄出すことが難しく将来想定されるRF電子銃用では電力を下げる必要がある。

FY2006にRF源の2台目の電源の入札が行われニチコン社が落札した。この電源は1号機と異なりILCのBCD (基礎設計基準)に合致した1筐体に全てが収納された電源である。ニチコン社はパルストランスの入札も落札したので一体とした製造と試験が可能であり現在それらの総合試験が進行中である。この電源の仕様を表1のNo. 2 PS部(黄色)に示した。パルストランスの昇圧比は1:15である為には厳密にはBCD(1:12)に合致していない。現在一次側単体の試

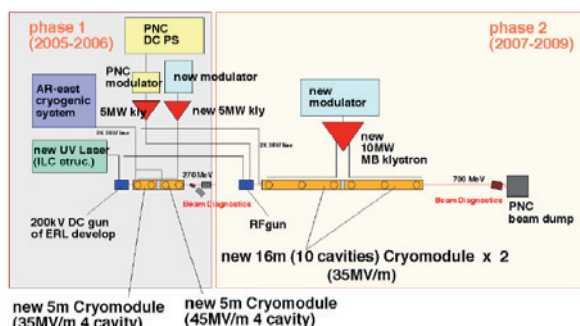


図1 STFレイアウト

表1 Specification of Modulator

Item	Unit	No.2 PS		
		No.1 PS	TH2104C	MBK
Modulator No		TH2104A		
Klystron				
Klystron applied voltage	kV	140	130	115
Klystron beam current	A	107	96	132
Pulse width(70%-70%)	ms	1700	1700	1700
Rise time	ms	200	200	200
Pulse flat top(90%-90%)	ms	1370	1370	1370
Flatness within pulse duration	%	0.5	0.5	0.5
Repetition	Hz	5	5	5
duty		0.0085	0.0085	0.0085
Step-up Ratio of PT		1:6	1:15	1:15
Primary Voltage	kV	23.3	8.7	7.7
Primary Current	A	642	1440	1980
Primary Impedance	Ω	36	6.04	3.9
Peak Power of Modulator	MW	15	12.5	15.2
Average Power of Modulator	kW	128	106	129

¹ E-mail: shigeki.fukuda@kek.jp

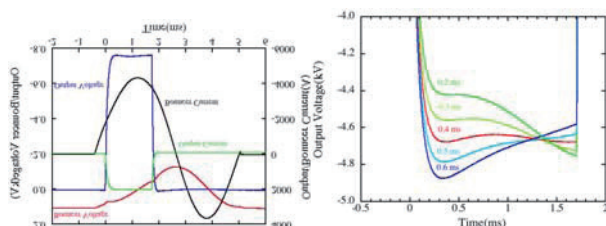


図2: 左図: 出力パルス波形(青;電圧、緑;電流)及びバウンサー回路の電圧(黒)、電流(赤)。右図:バウンサー回路タイミング変更とパルス平坦度の関係

験を行っており、水負荷にて最大定格まで試験が終わった。負荷を短絡させた時の過電流に対する速い遮断試験等も終了した。又、バウンサー回路を動作させた時のパルスサグ補償も良好であった。この時の波形を図2に示す。

以上とは独立にTMEIC社(三菱東芝)がIEGTを用いたパルス電源をKEKと共同研究で開発し、STF2号ステーションで試験を行った[4]。パルス性能、負荷短絡時の過電流に対する高速遮断回路の動作等満足すべき結果を得た。従って半導体SWを用いた大電力長パルス電源は3台が稼動したことになり、その技術は確立したと評価できる。

3. 電力分配系

(PDS: Power Distribution System)

FY2006から2007にかけてSTF-0.5計画の為にSF等のクライストロンギャラリーから地下のトンネルま

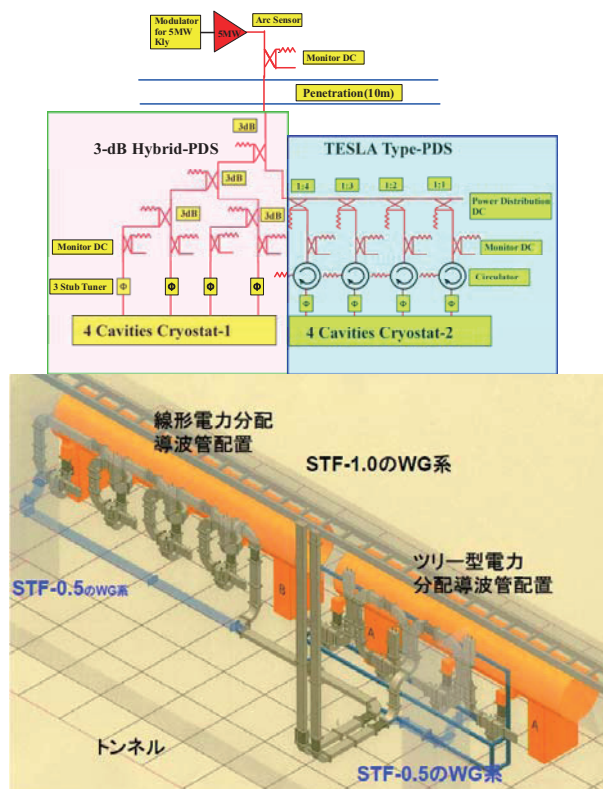


図3: 上: 信号分配系の模式図。下: トンネル内の鳥瞰図



図4 現在の状況写真。上左図:45MV/m空洞側のPDS。上右図:35MV/m空洞側のPDS。下左図:ツリー型PDS。下右図:比例分配型PDS。

での導波管の敷設を行った。図3の上図にあるような配置を下図のようなレイアウトで行うことを最終的に決めた。このPDSを地下部に設置した場合、この評価作業と、クライオモジュール・空洞の各種試験とが干渉するので、まずはSTF-0.5に必要なもの1式ずつを地下に設置した。残りのセットは独立に地上部に組み立て、必要な評価試験を行うこととした。現状の様子は図4の写真に示した。これらのセットと試験については別報告を参照のこと[5]。

図3のレイアウトにあるように空洞への電力分配は3dBハイブリッドで分配するツリー型電力分配系(3dB Hybrid PDS)と分配比を順番に変えていく線形電力分配系(TESLA-Type PDS)を併用している。最初はすべての空洞入り口に空洞からの反射をRF供給系から分離するためにサーキュレータを取り付けるが将来価格の高いサーキュレータを省略するためのR&Dに備えるためである。又図中では位相器も入ることになっているが現在は検討中で固定の直管とUベンダの組合せで代用している。両方式のPDSの先には35MV/m 空洞と45MV/m 空洞という異なるタイプの空洞が入るために所要電力が異なる。従って最初の3dB電力分配器にはHybridのボタンの挿入長を変えることで2.5~3.5dBの調整が可能にした。WR650導波管内では2.5MWぐらいを境目に1気圧空気の内部雰囲気では放電の可能性があるために乾燥窒素または空気の加圧を考えている。加圧部とカップラーを区切る安価なRF窓も開発する必要がある。

2007年度では動燃やJHPの資産の導波管系を活用する以外に、導波管コンポーネントとして、ロシア製と性能価格ともに拮抗できる500kWクラスのサーキュレータの国産化、可とう性の優れたフレキシブル導波管、ダミー、RF窓、位相器等を開発した。更にILCのコスト要求を満たす規格を実現すべく努力する必要がある。

4. LLRF

Phase-1.0に向けた空洞制御のLLRF系はほぼ完成した。STF-0.5を念頭に置いた2空洞のベクターサムに対するデジタルフィードバックの結果を図5に示

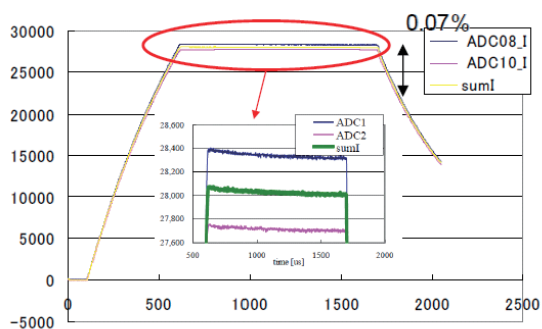


図5: 2空洞に対するデジタルフィードバックの結果

す。この結果は、クライストロンが無かったり空洞模擬器がMixerの後に入るなど実空洞の場合と異なるが基本的な構成要素をすべて使った総合試験の結果である。ベクターサム制御はPI制御のもとで行った(FI無し)。セットポイントは28000点で、最初はサグがあったが適切なFIテーブルを用いたフィードバックでサグを消すことが出来た。振幅と位相における各々のノイズは $\pm 0.05\%$ 、 $\pm 0.03^\circ$ であった。

インターロック系では現在のPLCの代わりにFPGAが組み込まれた商業Linux(SUZAKU-V/Atmark Techno)を用いた簡単なインターロックシステムが開発された。FPGAチップ内では入力信号を使って幾つかの簡単な論理計算をしてインターロック信号を作る。uClinuxというOSを持つPowerPCが走り信号のステータスはUARTというトランシーバとuClinuxで行き来する。GUIパネルを通してユーザは操作したり、ステータスを見ることが出来る[6]。その他、高周波計測、制御関係でもFPGAの応用が進められている[7]。

新しい試みとして、複数の中間周波数を用いたIF混合法によるデジタルフィードバックが進展中である。普通はベクターサムをとって制御する場合空洞の数だけADCを必要とするが、例えば2つの中間周波数を用いてやるとADCは半分に減らすことが出来る。図6にIF混合法の概念を示した。この例では2つのIFでdown-converted信号は合成器(IF1+IF2)で混合され、この信号は適切なフィルターでデジタル的にIF1とIF2へ分離される。2台の空洞シミュレータを用いたFB運転時におけるI/Q成分及び振幅・位相の測定結果を見ると良い結果が得られた[8]。

導波管内の放電はアークディテクターで検出してインターロックをかけるが今までの比較的径の太い光ファイバーを用いたフォトカップラーによる検出から高電圧が不要で高感度を有するコンパクトな光センサーモジュール(H5784/Hamamatsu Photonics)に変更した。高い感度を有する為に小さい径のより安価な光ファイバーが使えるようになった[9]。

5. 国際リニアコライダー計画との関係

本STFの計画と平行して、国際リニアコライダー(ILC)の為に国際設計作業が平行して進められている。従ってSTFのいろいろな仕様やR&Dは勝手にKEK

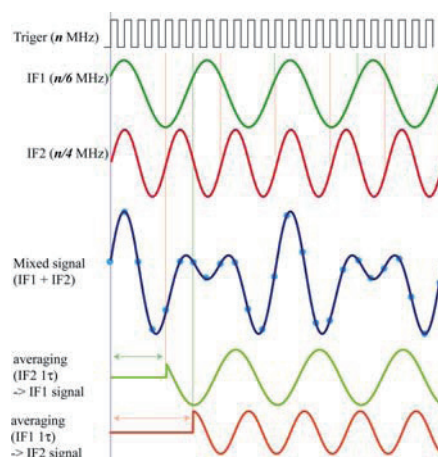


図6 IF混合法の概念図

で行って良い訳ではない。電源やPDSは試験ではILCのBCDに沿った基準でコンポーネント等を製作している。本論分ではクライストロンについて触れていないが、BCDでは6~7ビームを用いた10MWマルチビームクライストロンが基準となっている。従ってPhase-2.0ではこのクライストロンを購入する予定であるが、2007年度に日米共同で1本東芝のマルチビームクライストロンを購入した。パルス電源ではACD(代用可能な技術基準)としてマルクス電源が提唱され、アメリカでは稼動し始めた。この技術も近く日本で確かめる必要があると思われる。

6. まとめ

現在KEKで進められているSTF-0.5及びSTF-1.0に対するRF源の現状について報告した。全体計画は遅れ気味に進んでいるが、RF源に関しては順調に進んでいる。今後はILC計画の設計スケジュールと歩調を合わせて進める必要がある。

参考文献

- [1] 早野「超伝導RF試験設備の現状報告」本発表会。
- [2] 福田, 他「KEK超電導RF試験装置(STF)のRF源の開発」第3回加速器学会, pp. 130-132(2006)。
- [3] 明本, 他「STFに於ける10MWクライストロン用パルスモジュレータの開発」本発表会。
- [4] 左右田, 他「長パルスモジュレータ用 IEGTスイッチの開発」、本発表会。
- [5] 竹中, 他「ILC計画のSTF0.5およびSTF1における導波管の現状」本発表会。
- [6] 三浦, 他「FPGAを用いたファーストインターロックシステム高周波源;制御」本発表会。
- [7] 片桐, 他「高周波計測・制御用FPGAボードの評価」本発表会。
- [8] 松本, 他「複数の中間周波数を用いたデジタル低電力RF制御系の開発」、本発表会。
- [9] 矢野, 他「光電子増倍管を利用したアークディテクターの開発加速器運転」本発表会。