

DEVELOPMENT OF RF SOURCES IN SUPER-CONDUCTING RF TEST FACILITY (STF) AT KEK

S. Fukuda¹, T. Miura, M. Akemoto, H. Katagiri, T. Shidara, T. Takenaka, H. Nakajima, K. Nakao, H. Honma, S. Matsumoto, T. Matsumoto, H. Matsushita, S. Michizono, Y. Yano, M. Yoshida, S. Kazakov, H. Hayano, KEK, Ibaraki, 305-0801, Japan

Abstract

The super-conducting RF test facility (STF) at KEK has been functional since 2005, and the STF phase-I, which involves the testing of a cryomodule with four superconducting cavities, was successfully performed in the end of 2008. During the STF phase-I testing, evaluation of the two power distribution system (PDS), the 3-dB hybrid PDS and the TESLA type PDS, was conducted. Study of eliminating circulators in the tree-like PDS was performed with LLRF digital feedback. In the linear PDS, we inserted a reflector and a phase shifter between the cavity coupler and circulator to change the loaded Q of the cavity. Third RF source with a 10MW horizontal multi-beam klystron (MBK) and a bouncer type modulator is to be constructed in FY2009. KEK will conduct the S1-global test and the STF-II project in the future and the preparations are under way. This report covers the recent development of the RF source in KEK STF.

KEK 超電導 RF 試験装置 (STF) の RF 源の開発

1. はじめに

KEK の超電導 RF 試験装置(STF)は 2005 年から運用され 2 つのフェーズ (Phase-1 と Phase-2) からなる。(図 1 参照)[1]。STF Phase-I は加速勾配 35 MV/m(公称)の 4 台の空洞を装荷したクライオモジュールからなる装置の試験で 2008 年末に成功裏に終了した。Phase-I では 2 つの PDS の評価試験と関連した R&D を試験した。低電力 RF (LLRF) グループは 2 つの PDS に対してベクターサム制御によるデジタルフィードバックを試験した。STF-I における RF 関係の最も興味あるテーマは、サーキュレータを省いた PDS の評価であった。これは ILC 計画でコスト低減のために重要な課題であった。STF-I 後の次の重要な予定は S1 global 試験で 2010 年に予定されているが、これは日本及び国際チームから供給された超電導空洞、計 8 台を KEK で評価するものである。その後には Phase-II 試験が予定されている。STF Phase-II では ILC baseline configuration design (BCD)で示された 1 RF 単位のシステム (3 クライオモジュール、26 超電導空洞) を

2012 年から試験するものである。2009 年度には第 3 番目の RF 源：横置き型のマルチビーム 10MW クライストロン (MBK) とバウンサー型電源を導入する予定である。KEK では最近 ILC GDE へ KEK から提案された新しい分布型 RF システム (DRFS) の 1RF ユニットの建設も検討している。

2. HLRF

2.1 パルス電源及びクライストロン

現在の STF RF源としては2つのステーションがある。第1ステーションは1:6の昇圧比を持つパルストランスに繋がるバウンサー回路付き IGBTパルス電源であり、負荷は5-MW トムソン社クライストロン TH2104Cである。このステーションはSTF-0.5、STF-1及びカプラー試験 (LALとの国際協力を含む)において、2MW 程度の出力で運転された。通常プログラムのSTF-I試験の後、PDSの評価と種々のカップラーのコンディショニングを行った。第2ステーションは1:15の昇圧比を持つパルストラン

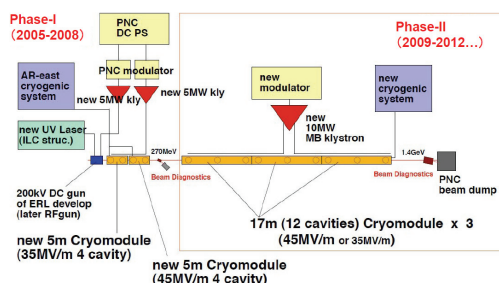


図1: STF レイアウト

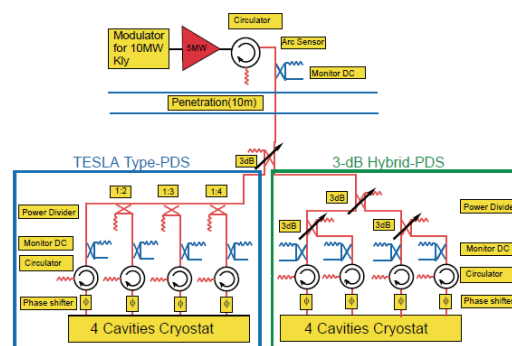


図 2: STFにおける2つのPDS

¹shigeki.fukuda@kek.jp

スに繋がるバウンサー回路付きIGBTパルス電源であるが、立上試験時に負荷からの水漏れで生じた負荷での重放電で破損し、長らく修理作業に入っていた。2009年初頭にターレス社のクライストロンのエイジングと評価試験が行われ、パルス幅1.5ms、繰返し5Hz の条件で出力 5 MW の定格試験を終了した。このステーションはS1 global試験に使用される予定である。

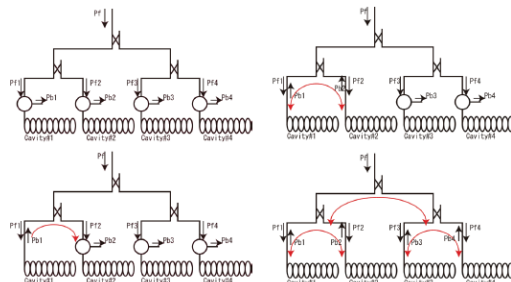


図3: 3-dB ハイブリッド PDSでサーキュレータを省いた試験の手順

2.2 STF-IにおけるPDS

文献[1]に述べた通り、我々は2つのPDS、即ち 3-dBハイブリッド PDS(又はツリー型 PDS)とTESLA型線形分配型PDSを有する。これらを用いたKEKのレイアウトを図2に示す。通常STF-I における1クライオモジュール4空洞システム試験は3-dBハイブリッド PDS で行われた。LLRFのベクターサム制御は成功裏に終了し、振幅安定度0.007%rmsと位相安定度 0.018° が達成された。この試験の後、サーキュレータを省略した系の評価試験を行った。サーキュレータはコスト的に高価であるのでILCでのコスト削減の要請上重要なテーマである。我々の3-dB ハイブリッドは分岐比を決める調整ボタンが可変できる機能を持ち、分岐比が2.5 dB ~3.5 dB可能で、この範囲で個々の空洞への入力電力を調整できる。同時にこの調整ボタンは2つの分岐ポート間のアイソレーションを25 dB~ 40 dB の範囲で変化させる。ポート間のクロストークの影響を調べるのに便利でありこの機能を利用した。

ハイブリッド PDSでサーキュレータを省いた試験の手順は図3に示した。サーキュレータを取り除いた効果は取り除かなかった場合のLLRFのベクターサム制御との比較で判断した。先ずフルシステムでベクターサム制御での安定度を測定後、図3に示したように、先ず1台のサーキュレータをはずし測定、次に2台のサーキュレータをはずして測定、そして4台のサーキュレータをはずして測定と進めた。ベクターサム制御の結果は図4に示した。加速電界(パルスの平坦部分)の安定度はいずれの場合も同等の結果を得た。サーキュレータ有りの場合のPDSにおける振幅安定度と位相安定度はそれぞれ0.038%(rms)と 0.022° であり、サーキュレータが無

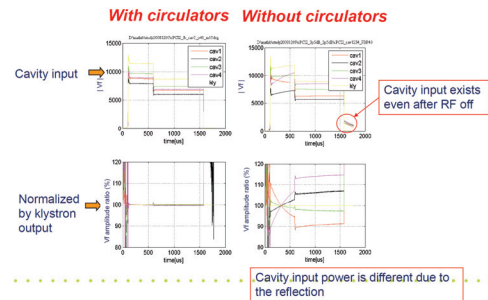


図4: サーキュレータを除く前(左)と後(右)の空洞入力振幅

いPDSでの安定度は0.037% (rms)と 0.025° であった。従ってビーム加速に対する安定度としてはサーキュレータを取り除いても問題が無いことが分かった。しかしながらRFの反射波があるパルスの立ち上がり、立下り部分では大きな違いが測定された。図4に示した通り空洞の入力電力は反射により変化する。サーキュレータが無い場合は電力がオフされた後も入力電力が存在する。空洞1の負荷Qの測定では図4に示したように10%以上の違いが見られた。この理由は上流からの電力の反射の影響で説明出来るかもしれない。このような反射はハイブリッドのダミーロードから生じ、またハイブリッドの不完全なアイソレーションも関係する。最もアイソレーションが悪い25 dBの場合はこの差異は大きくなった。空洞からの反射が互いに干渉しあった結果である。しかしながら個々のコンポーネントのモード測定の結果を考慮しても未だ完全に定量的な説明は出来てはいない。大電力投入時に別の要因が入った可能性もある。もし、空洞診断をILC運転の間にLLRFで行おうとすれば、サーキュレータ無しの場合には個々の導波管のコンポーネントの反射を出来るだけ小さくする必要がある。より詳細な説明は文献[2]を参照されたい。サーキュレータのアイソレーションについては、同様の試みが他にもなされ、ハイブリッドのアイソレーションは40 dB 必要であるとしている[3]。

TESLA型 PDSについてもSTF-Iで試験された。このPDSでは2つの導波管コンポーネント;リフレクターと位相器がサーキュレータの下流に導入された[4]。この機器により空洞の外部Qを変えることが可能である。この原理は文献[4]に示されている。この機器を用いて負荷Qは 1.3×10^6 から 1.5×10^6 とばら

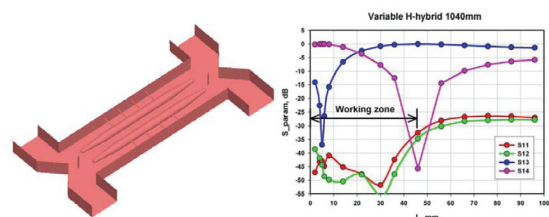


図5: Variable hybrid

っていたものを 3.0×10^6 に調整出来良いベクターサ

ムの結果を得た。このような試みは2010年に国際協力
で空洞評価を行うS1 global試験の際、負荷Qを揃
えるのに使用するつもりである。

2.3 導波管コンポーネントの開発

文献[4]に示されたように我々は多くの導波管コン
ポーネントを開発している。多くのものは空気中の
雰囲気です数MWレベル迄の電力で良好な性能を示し
ている。日本製のサーキュレータはロシアSTP社製
と比べて若干挿入損失が大きいことを除いては満足
いく性能を示している。最近 S. Kazakov が大気中
でも大電力にもつ可変ハイブリッドを提案した。こ
のコンポーネントは3dB ハイブリッドPDSに採用す
ることで電力の分岐の可変性を性能よく実現出来る。
可変ハイブリッドの概略と計算結果を図6に示した。

3. LLRF

LLRFに関しては4空洞のベクターサム制御結果に
ついては既に前の節で述べた。2つのタイプの PDS
及びサーキュレータを除いたPDSについてLLRFの
フィードバック制御の結果は良好であった。4空洞
ベクターサム制御の結果は振幅安定度0.007%rms と
位相安定度0.018° を達成した。これらの結果はILC
の仕様を満たすものである[2]。中間周波数IFの混合
技術を用いたデジタルLLRFはSTF-Iで4つの空洞シ
ステムで動いている。IF混合技術で得られた信号は
直接のIQ検出した場合と同等であった[5]。他のパス
バント例えば8/9 π モード等による不安定効果につ
いても調べられた。高いフィードバック (FB) 利
得ではベクターサムFBはループディレーの全ての
領域で不安定になった。一方低いFB利得ではベク
ターサムFB制御は個々のFB制御よりも帯域が広く
なった。フィードフォワード (FF) 制御による準
ビーム状態の運転がフィードバックと一緒に行われ
、ビームがあるフラットトップの安定度はFF (beam)
のタイミングを調整するとILCの要求する仕様を満足
した [6]。

4. 2009年度の計画

2009年度、STFのRF源としては新しいバウンサー
回路付きIEGTモジュレータと10MW横置き型マルチ
ビームクライストロンを導入する予定である。又補
正予算でSTF Phase-II の導波管コンポーネントを揃
える予定である。このシステムでVTO(電力可変機
構)と空洞の負荷Qを変える導波管コンポーネントを
導入すべきかどうかは検討の余地がある。

KEK ではILCに対してコスト削減につながる新し
いRFのシステムを提唱している。これは新たに検
討されている1トンネル案に沿ったものでLCWS08
とTILC09で提唱された [7]。これは分布型RFシ
ステム(DRFS)と言い、小さなクライストロンが2つの空
洞へ電力を供給する。12台以上の750 kW変調ア
ノード付きクライストロンが 共通の直流電源と変
調アノード変調器で運転される。8000台以上のク
ライストロンと600台以上の電源からなるが適切な工

夫でコスト削減が期待できる。システムが単純で運
転上の利点大きい。KEKでは2009年度にこの提案
の実用性を検証するために1 RFユニットの製作を
考えている。図7に大雑把なRFユニットの概略を示
した。

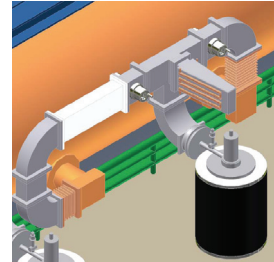


図6 DRFSにおけるクライストロンと電力分配系
の一例。直流電源と変調アノードの変調器はシ
ールドの下に設置される。

5. まとめ

KEKにおけるSTFは2005年以来運転されている。
現在STF-Iと称される、4台の超電導空洞を装荷した
クライオモジュールの試験が終了した。ほぼ当初の
性能を満足した。2つの異なるPDSがLLRFのベク
ターサム制御で試験され、振幅の安定度0.007%rm
と位相安定度0.018° を達成した。3-dB ハイブリ
ッドPDSではサーキュレータを取り除いた場合の性能
試験が行われ、ビーム加速に使われるパルスフラ
ットトップ部ではサーキュレータが有る無しにかかわ
らず安定な性能を得ることが出来た。しかし、ハイ
ブリッドのアイソレーションが低い場合はサーキュ
レータが無い時に空洞間の干渉が見られた。これら
の試験はILCのPDSに対する仕様を決める上で貴重
な知見を与えたと評価できる。

参考文献

- [1] S. Fukuda, et al., "RF sources of Super-conducting Test Facility (STF) at KEK", PAC05, Knoxville, TN, USA, pp. 796-798, 2005.
- [2] S. Michizono, et al., "Vector-sum Control of Superconducting RF Cavities at STF", presented in PAC09, Vancouver, BC, 2009.
- [3] C. Nantista, et al., "Progress in L-band power Distribution System R&D at SLAC", LINAC08, Vancouver, BC, Canada, pp.946-948, 2008.
- [4] S. Fukuda, et al., "Status of RF Sources in Super-conducting RF Test Facility (STF) at KEK", LINAC08, Vancouver, BC, Canada, pp. 895-897, 2008.
- [5] T. Matsumoto et al., "Digital Low-level RF Control System with Four Intermediate Frequencies at STF", presented in PAC09, Vancouver, BC, 2009.
- [6] M. Miura, et al., "LLRF Feedback Control Stability at STF", presented in PAC09, Vancouver, BC, 2009.
- [7] <http://ilcagenda.linearcollider.org/contributionDisplay.py?contribId=219&sessionId=45&confId=3154>