

HIGH POWER DISTRIBUTION SYSTEM FOR S1-GLOBAL(KEK ILC)

Tateru Takenaka^{1A)}, Hideki Matsushita^{A)}, Toshihiro Matsumoto^{A)}, Mitsuo Akemoto^{A)}, Hiroaki Katagiri^{A)}, Hiromitsu Nakajima^{A)}, Yoshiharu Yano^{A)}, Shinichiro Michizono^{A)}, Hiroyuki Honma^{A)}, Mitsuhiro Yoshida^{A)}, Tetsuo Shidara^{A)}, Shigeki Fukuda^{A)}, Kazakov Sergey^{B)}, Shuichi Aizawa^{C)}, Yusuke Kawane^{C)}

A) High Energy Accelerator Research Organization(KEK) 1-1, Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801, Japan,

B) Fermilab, C) Nihon Koshuha Co., LTD 1119, Nakayama-cho, Midoriku, Yokohama, Kanagawa, 226-0011, Japan,

Abstract

Various high power tests were carried out for S1-global test at KEK-STF. One of the most important evaluations is that of rf power distribution system (PDS). We examined two types of PDS, a linear-type and a 3dB hybrid type, and both systems are expected to work well under the 4 cavity-vector sum control at S1-global test. We will demonstrate that a combination of a phase-shifter and a reflector can manage the loaded Q of the cavity well. We also report the recent developments such as various waveguide components including a tunable hybrid.

S1-Globalの導波管分配システム(KEK ILC)

1. はじめに

KEK-STFではS1-Global^{[1][2]}という日米欧3極の超伝導空洞を評価する試験が9月から予定されている。ここでは2台のクライオモジュールを用い、クライオモジュールAには4台の日本製空洞が、クライオモジュールCには、ドイツDESYの空洞2台と米国FNALの空洞2台が組み込まれる。最終的に2台のクライオモジュールに組み込まれた8空洞が、1台のRF電源^[3]でフィードバック運転が行われ、平均加速電界31.5MV/m (ILCの目標値)が達成されることを目標とする。それに続いて現在新提案されているRFシステム、Distributed RF System(DRFS)^[4]のデモンストレーションが予定されている。

ここに使用される導波管システム(PDS)のうち、クライオモジュールCは国際協力の下で遂行されることもあり、RF電力可変分配器、Variable Tap - Off(VTO)もSLACから送られてきた2台を組み込む。このC系統のRFシステムは基本的に3dB電力分配器で電力を2分割して再分配する3dB電力分割器分配方式(トーナメント方式)(図1)を用いている。SLACの2台のVTOのうち最初のVTOは電力を2分割し2個目はその下流で微調に使用される。クライオモジュールAのRFシステムには最初の電力分配器から順に1/4、1/3、1/2と電力を分割して4空洞へ必要な電力が調整分配される所謂リニア電力分配方式又はTesla-Type方式(図1)を用いる。

一昨年のSTF-0.5テストはトーナメント方式でサーキュレータを省略したシステムの試験(ILCでCost Downのために要請されているテーマ)を行い、空洞からの反射が部分的に相殺されるシステム下でのLLRFフィードバック制御を試みた。ある程度電力分配器のアイソレーションが悪くてもパルス

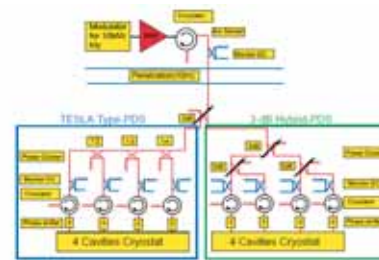


図1 電力分配系の系統図

平坦部分でのVector Sum制御は成功したが、パルス Teil部分を使用して空洞パラメータの診断をすることは出来なかった。Qの測定等は高いアイソレーションを持った電力分配器ではないと出来ないことが示されたといえる。今回は空洞の運転が主目的であるために全てのPDSにサーキュレータを挿入して試験をする予定である。

今回のS1-GlobalやDRFSの導波管システムには昨年から提案していた0から100%近く迄可変に分割出来るLバンド電力分配器、500kWサーキュレータ、1MW水負荷、150kW負荷、マジックT、E・H200mmコーナ、張合わせタイプであるが柔軟性のあるフレキシブル導波管、追加製造をした移相器、リフレクタや直導波管等を使用する。そして、全ての種類の導波管コンポーネントのうち最低1台は大電力テストをする方針で臨んでおり、実際それが完了している。SLACから送られてきたVTOは、最初の分割前に必要な1.4MWを透過した試験が済



図2: トーナメント方式のPDSと空洞(Cクライオモジュール)

¹ E-mail:tateru.takenaka@kek.jp

んでいる。

現在、S1-Globalで使用するトーナメント方式やリニア方式の導波管システムは組み上がり、9月からの試験に向け着々と準備が進められており、又12月に予定されているDRFS用導波管システムの組み上げとRF電源の準備も同時に進めている。ここではS1-GlobalやDRFSにおける導波管系と導波管コンポーネントの大電力テスト等について報告する。

2. S1-GlobalとDRFSのPDSの現状

S1-GlobalでクライオモジュールCの導波管系にはSLACのVTOを2個挿入したトーナメント方式が採用され1.2MW近くが給電される。その後2分割に調整したハイブリッドを2個用いて最初の電力が4分割にされ超伝導空洞に給電される。この電力分配器はモーター駆動で微調でき、それぞれの空洞に必要な電力を分配する。4空洞への分配後、サーキュレータを設置し又、 Q_L を揃える為にリフレクタ、移相器が挿入されている。図2のように組み上がり準備されている。クライオモジュールAも図3にあるように準備が出来ている。



図3: リニア方式のPDSと空洞(Aクライオモジュール)

S1-Globalの実験に引き続き行われるDRFSは初めてのデモンストレーションとして700kWクライストロン2台でAクライオモジュールの4空洞に給電を行う。この導波管系はマジックTで電力を分割しリフレクタ、移相器が用いられる。空洞間のPhasingが合うように導波管の片側に4cm長(位相で90°相当)の直管を挿入している。これにより電気長を調整し、マジックTでの反射を相殺しつつ光速度で走る電子に対しても位相が合うようにしている。



図4: Lバンド可変電力分配器

S1-Globalの実験後に短時間でクライオモジュールAのリニアPDSをDRFS導波管システムに組み替えて実験を行う必要がある。先ず最初にS1-Global試験の最中に地上部でDRFSの評価試験をクライストロン2台負荷で行う。その後地下のトンネルにはクライストロン2台、MA電源(モジュラー

ションアノード電源)、導波管系、LLRFが移動され、直流高電圧は地上部で実験していた電源から地下のMA電源まで高圧ケーブルで接続されることになる。当然インフラのAC電源や冷却水も地上部と地下で用意され、短期間で接続が要求される。

3. PDSのコンポーネント

今年は0.2~96%分配比可変なLバンド可変電力分配器、500kWサーキュレータ、1MW水負荷、150kW負荷、マジックT、E・H200mmコーナ、張り合わせタイプなから柔軟性のあるフレキシブル導波管、追加した移相器、リフレクタや直導波管等を製造しパワーテストを行い、PDSに組み込みつつある。

3.1 可変電力分配器の大電力試験

S1-Globalの全システムに8台用いる0.2~96%可変電力分配器(図4)はベーンを2枚使用しており、空洞に必要な電力を配分する目的を持ち、PDSの中でも重要なコンポーネントである。全体の長さにより可変範囲が異なる2種類を使用している。クライストロンからの4MWは1040mmタイプ電力分配器によりSF₆ガス雰囲気中で分配し、800mmタイプ電力分配器は大気圧雰囲気中で分配して4空洞に供給する。800mmタイプ電力分配器の大気圧下での高周波大電力透過試験では1MWで始め単発放電を起こしたが、フランジと導波管の溶接面での1mm程度の段差とバリ取り処理などで4MWの透過に成功した。1040mmのタイプは2MWの電力試験後SF₆のガスを空気と置換して4MWの試験を終了した。この8台の電力分配器全てのバリや切削油、切粉の除去を徹底して行った物をPDSに使用する。この電力分配器のアイソレーションは-28~-40dBの範囲にあり、分割は $S_{13}=96\%$ 、 $S_{14}=72\%$ である。

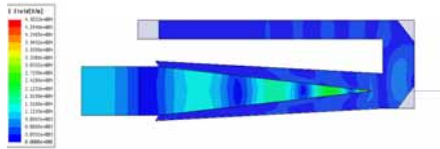
3.2 大電力サーキュレータとその無反射終端

前回のSTF-0.5で行われた試験で使用したサーキュレータが200~300kW前後で放電を起こし実験に使用出来ないものがあったので改造を試みた。サーキュレータ付属の個体無反射終端でのRF電力吸収不足による放電が原因と分り、設計をやり直すと電波吸収体の全長が32cm以上長くなりPDSに組み込むことが大きさの点から困難になった。結局電波吸収体を折り返し長くすることで解決した(図5参照)。従来のものに比べると重く大きな非対称だがPDSに組み込める形状となり500kWの透過試験で合格したので量産に至った。各空洞に1台ずつ用いるので8台が必要である。サーキュレータ本体



図5: 500kWサーキュレータ

での放電は無いのでロードに限定して改修を行った。無反射終端のHFSSの結果を(図6)に示す。改修前の無反射終端は最高電界が 2×10^6 V/mであるのに対して改修後は 4.2×10^4 V/mで2桁下がった。



図：6 500kW用無反射終端の電界(HFSS)

3.3 DRFS関係導波管コンポーネント

DRFSに使用するマジックT 2台は当初電力分配器を用いて電力を2分割する検討もしていたがコスト等も含めマジックTで検証することになった。既に試作マジックTは必要な電力の2倍の1.4MW電力透過試験は終了した。DRFSでは700kWクライストロンの出力が2分割され空洞へ供給される。合計クライストロン2台で4空洞の試験をする。DRFSの場合コンパクト化が重要なので従来の25cmのバンドに加えて20cmのコーナを製造し使用している。これも量産に入る前に電力試験を行い3.5MWは透過したが実際には5MW出力のクライストロンに使用するので5MW迄の試験をする必要がある。そこで導波管内接続部のエッジを除去し再度電力試験を実施したらRF2号機電源で4.7MWを確認することが出来た。

フレキシブル導波管は厚さ0.2mmの銅を用いて張合わせたタイプであり長さ200mm、300mmの2種を製造した。前回製造したシームレスタイプの物は製造上歩留まりが悪くこのタイプに替えてコストを下げる事が出来た。これは3.7MWで放電を起こしたが内部の仕上げを良くしエージングを行えば透過電力の向上は見込めるので合格とした。

その他に1MW水負荷、150kW固体負荷なども仕様の電力試験を行い合格している。

3.4 導波管コンポーネントの大電力試験

今回のS1-GlobalやDRFSでは用いるコンポーネントが多くあり、最初の1台を製造したら全数製造完成する前に電力試験を行い、結果を待って全数の製造に入った。それからPDSを組み上げる作業に入っている。既に記述したがハイブリッドはバリ取りやフランジの手直しがあり手間取った。モーター駆動部のメカニズムは良いのであるがギアの留めピンの取り付け精度が悪い、またベーンを駆動するギアのスライドが硬くモーター駆動は負荷がかかり過ぎまだ少々の手直しが必要である。500kWサーキュレータの無反射終端は前項で述べた通り、HFSSでシミュレーションを行い数度大電力試験を行ったが500kWに届かず放電を起こし、最終的には吸収体をPDSに組み上げられる形状で180度曲げて製造し直し500kWに合格した。これら

の結果は表1にまとめて示した。

表1.導波管コンポーネントの電力試験

部品名	耐電力	部品名	耐電力
VTO	1.4MW	フレキシブル導波管	3.8MW
Hybrid800mm	4.7MW	マジックT	1.4MW
Hybrid1040mm	2MW	1MWウォーターロード	1MW
500kWサーキュレータ	500kW	150kWダミー	150kW
E/HCコーナ200mm	4.7MW	5MWサーキュレータ	rf特性

3.5 導波管の真空時と大気圧時の位相変化を測定

WR650の導波管は800mmと1500mmの長さを使用。肉厚5mm相当で引き抜き管、真中に冷却パイプがついている。この位相の変化は表2で示すがロスの変化は殆どなく真空時も大気圧時も同じであった。

表2 導波管の位相変化

長さ	真空時の位相ズレ	大気時の位相ズレ
850mm	2°	0.5°
1500mm	4°	1°

3.6 RF源1及び2号機の稼動状況

昨年よりRF源2号機(電源+5MW クライストロン)が稼動したことで5MWの大電力試験が可能になり、RF窓、電力分配器、コーナ、フレキシブル導波管等はこの電源で試験を行い十分な評価が出来た。同時に、150kW負荷や1MW水負荷、500kWサーキュレータなどはRF源1号機の電源で大電力試験を行った。1号機では従来から行っている空洞カップラのテストを行い、今春にはRF電子銃に2MWの電力を給電し試験が行われた。3号機のマルチビームクライストロンの運転は準備中でありS1-GlobalやDRFSの実験が終了してから本格的準備に入る予定である。

4. おわりに

一昨年に続きS1-GlobalのPDSは2種類の方式(サーキュレータ付き)で8空洞評価を行う。DRFSの試験はマジックTを2個用いて4空洞へ電力を供給する。サーキュレータは使用しない。昨年より行ってきた導波管コンポーネントの大電力試験は主要コンポーネントの量産化のためには重要であることが確認された。又導波管コンポーネントのコンパクト化も意識的に進めた。

参考文献

- [1] H.Hayano,他,“STFの状況”,本研究会.
- [2] E.Kako,他,“S1-GlobalにおけるTESRA改良型超伝導空洞のクライオモジュール試験”,本研究会.
- [3] T.Matsumoto,他,“KEK超伝導RF試験装置のS1-Globalの為にRF源”,本研究会
- [4] S. Fukuda,“ILCの新提案-分布型RFシステム(DRFS)”, Proceedings of Particle Accelerator Society Meeting, Tokai, 2009.