

HIGH POWER DISTRIBUTION SYSTEM FOR KEK STF

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

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

Nihon Koshuha Co.,LTD^{B)} 1119,Nakayama-cho,Midoriku,Yokohama,Kanagawa,226-0011,Japan

Furukawa C&B Co.,LTD^{C)} 3-1-47,Nishi,Fukami,Yamato,Kanagawa,242-0018,Japan

Abstract

Various high power tests were carried out at KEK-STF. One of the most important evaluations is that of rf power distribution system (PDS). We examined two types of PDS (one is linear-type and another is tournament type) and both works well under the 4 cavity-vector sum control. We demonstrated 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 waveguide production and a tunable hybrid.

導波管の電力分配システム(KEK STF)

1. はじめに

KEK-STFにおいては、昨年末に空洞を使った大電力試験^[1,2]が行われた。

ここでは、2種類の導波管システム(PDS)が評価された。一つは、リニア方式で、一つの導波管から各空洞に結合度の異なるハイブリッドで分配するものである。もうひとつは、トーナメント方式で、合計3つの3dBハイブリッドを利用して4空洞に分配するものである。前者はDESYのFLASHにおいて利用されているもので、後者はILCの設計段階で検討されていて最終的には空洞前に置かれているサーキュレータを除くことも視野に入れたものである(2空洞間の反射が相互に打ち消し3dBハイブリッドより上流には伝送されないようにする)。高周波制御の観点からは、空洞負荷のQ値(負荷Q値)がそろっていることが望ましい。この負荷Q値はこれまで空洞カプラあるいはスタブチューナーによって可変としていたが、空洞カプラの場合はカプラの構造が複雑になること、スタブチューナーの場合は負荷Q値と同時に空洞位相も変わるため独立な変更には複雑な調整が必要であった。今回、移相器とリフレクタを利用して負荷Q値を変更する試みを大電力試験ではじめて行った。この結果についても報告する。

現在のシステム設計では、500kWサーキュレータを導波管システムに組み入れる予定である。これまでの空洞評価試験で500kWサーキュレータが放電を起こすことがあり、その分解調査をして放電対策を行った。

現在、稼働できる高周波電源1号機と2号機を用

いてS1-Globalの計画が来年春には実施される。これはクライオモジュール2台に日本製の空洞4台と外国製空洞4台を設置し同時運転を行なうものである。S1-Global計画のPDSにはリニア方式とトーナメント方式を採用し、電力を分配するハイブリッドは可変範囲が0~30dB^[3]の自動可変型を用いる。

1号機電源では、クライストロンの定格出力である5MWを出力するための高電圧を印加することができなかったが、S1-Globalのために2号機電源^[4]を用いて5MWまでの出力を確認した。

STF2計画に向けて超伝導リニアック棟のクライストロンギャラリーではRF3号機を設置する準備している。3号機はILC用に開発した横置き型10MWのマルチビームクライストロンで2出力になっている。導波管システムも2系統になるができるだけコンパクト化を計ることを考えている。コンパクト化したPDSを用いてクライオモジュール3台に9,8,9個と合計26台の空洞に同時に高周波電力を供給せねばならない。これはILCの雛形になるので出来るだけ最小化を進めると同時に各パーツの大電力評価も大事になる。

2. PDSの現状

昨年は4台の超伝導空洞を据えつけたクライオモジュールに対してトーナメント方式とリニア方式[図1]を採用して交互に空洞評価試験を行った。

¹ E-mail:tateru.takenaka@kek.jp



図1：リニア方式のPDSと空洞

各空洞は入力できる電力に差があり同時運転は行わず、ひとつひとつの空洞評価が行われた。同時にPDSもサーキュレータの有無に対して評価を行った。

トーナメント方式ではサーキュレータを個々に外し可変型3dBハイブリッドで電力の分配比を多少(0.5dB以内)変えたが高いアイソレーションを持たないと、空洞間の干渉が生じることが確かめられた。空洞のベクターサム制御による電界安定度はサーキュレータの有無で違いはなかったが、個々の空洞の特性を評価するためには、より高いアイソレーションをもつハイブリッド系が必要となる。当面の空洞の評価のためにはサーキュレータを利用することが望ましいことがわかった。

リニア方式のPDSにはリフレクタとベーン型電動移相器をサーキュレータと空洞間に挿入し Q_L ^[5]を揃えるのに非常に有効であった。また、サーキュレータの前にこれを挿入すると個々の空洞への供給電力を減らすことには使用出来そうである。

この空洞評価試験で500kWサーキュレータが空洞からの全反射で放電を起したのでそれについては後述する。

3. PDSのコンポーネント

昨年はベーン型移相器とリフレクタを電動化してPDSに用いて有効性を確認した。高周波窓などを試作し電力透過試験を行った。鋳型製のHバンド、Eバンド、0.3mm厚のフレキシブル導波管、そして現在0~30dB可変型のハイブリッドの製造に着手しておりS1-Globalでは使用する予定である。直管のアルミ溶接をKEK近辺で行うこともやっており、手短なものになった。400kWサーキュレータを500kWの仕様に全てを改修した。

3.1 500kWサーキュレータ

ピーク電力500kWのサーキュレータの試験は負荷条件として直管の長さはHFSSを用いたシミュレーションから、アイソレータに対して耐電力的に一番厳しくなる電気長を求め短絡板の前に245mmの直管を取り付けて試験した。放電はスタ

ブとサーキュレータ本体[図2]の2箇所を確認され370kW程度で放電を起した。本体は製造過程で多数穴が残り、それをネジで埋めるなど行っているためネジや穴の加工が適切でないため電界が集中し放電につながる。また、本体のアルミ板が薄いので厚くして貫通ネジにしなければ電界の集中もなく放電は防げる。突起を無くし再改修して直ぐに電力試験を行ったが300kW程度で放電が起きた。

この電力試験では放電が本体なのかダミーなのか判断するために本体からダミーを外し代わりに水負荷を取り付けて電力試験を行って見たら500kW電力での放電はなくrfパルス波形のふらつきもなく正常であった。逆に外したダミーを直に電力試験を行ったら低いレベルからrfの反射波形はふらついており300kW前後で放電が起った。その後、ダミーについてHFSSでシミュレーションを行ったらダミーのフェライト入力側の端に電界の高い部分が存在し 2×10^6 V/mであった。これを半分以下に抑えればダミーの放電[図2]は防げる。



図2：ダミーの放電（500kWサーキュレータ）

3.2 リフレクタの透過電力試験

リフレクタ[図3]は240mmの直管の真中にアルミ製の回転羽がついており、0~90度に調整できる。透過電力試験は0,45,90度に分けて行われ45,90度は2MWを超えて放電が起った。実際に空洞の使用電力は400kW程度なので十分に使用できる。そして、リフレクタで空洞のQ値をそろえることが出来た。電動化したリフレクタはS1-GlobalやSTF2でも使用する予定である。



図：3 リフレクタ

3.3 直管の加圧特性[図4]

3種類の直管に窒素ガスを0~3kgまで封入し位相の変化を測定した。2種類はアルミの厚さ3mmで冷却パイプ付の板材の溶接仕上げ、長さ1800mm程度である。1種類はアルミの厚さ5mmで冷却パイプ付の引き抜きもので、長さは850mmである。3mm厚の物は0.5kg/cm²の加圧で10度の位相ずれが生じ1.5kg/cm²になると37°のずれになった。その後0kg/cm²に戻したが7°程度の位相ずれが生じたままである。目視でも膨らみが確認できた。

5mm厚の引き抜きものは3kg/cm²加圧しても位相ずれは5°程度で0kg/cm²に戻してもずれは0.5°程度であった。

今後、放電対策に加圧する場合は5mm厚の引き抜き物を使用する予定である。

測定は導波管の両側を気密にするため高周波窓を使用し、その両側に導波管同軸変換器を用いてネットワークアナライザーで測定した。窓2個のみを結合して加圧したが位相変化は無かった。



図：4 直管を2個の窓で挟んで窒素ガス封入

3.4 高周波窓の透過電力試験[図5]

5MW出力の2号機を用いて今後使用される高周波窓の評価試験を行った。方法は窓の上流、下流にビューポート付の直管にアークセンサーと目視できる窓を設けrfパルス幅を徐々に広げ、透過電力を5MWまで徐々にあげていった。この窓の試験はアークセンサーによるインターロックの稼動もなく非常に短時間で終わった。



図：5 高周波窓の透過電力試験

4. STF-RF2号機の5MWエージング

今後はS1-Global計画による8空洞運転（各国の空洞を持ち寄って試験）等が予定されており、2号機のクライストロン出力は5MWが要求される。

STF2号機の電源とクライストロンのトラブルについては昨年記述しているが今春、修理を終え5MWの出力を得ることができた。5MW確保のためにシフトを組み10日間55時間のエージングを行ったので少し記述しておきます。最終目標5MW時のパラメータは以下のとおりです。パルサー幅1700μs、Es9.6kV、Kly.電圧126kV、Kly.電流85.6A、ヒータ電圧72.5V、ヒータ電流6.6A、1.91μP、rfパルス幅1500μs、入力169W、出力5MW、効率46.3%、集束磁石電流53A・電圧112V、Kly.真空0.1μAである。

最初はrfのパルス幅を本来の1/30（50μs）に設定し5ppsで行い、その後1ppsにして1日で目標の5MWに到達した。最終目標にはrfパルス幅を500μs、1000μs、1500μsと設定し最初の5時間で500μs、後の数時間で1000μsの5MWを記録した。その間何度かKly.からガスがでてイオンポンプのインターロックが稼動し低電力からとまった。

rfパルス幅を1500μsにしてからイオンポンプのインターロックが1日に数回稼動し、電源の過電流がしばしば起こり最終目標5MW出力に手間取った。

エージングは途中で一旦止めて再開するより連続運転の方が良いので午後に集中して行うことにした。入力rfも出力にあわせ過電流などで落ちにくい運転を行い55時間かけて最終目標に到達した。

5. おわりに

昨年のSTF1でのPDSはトーナメント方式とリニア方式を用いて4空洞評価を行った。来年からのS1-Global、将来のSTF2計画にはリニア方式とトーナメント方式の併用を考えている。今後、導波管コンポーネントは多種多様になるので大電力試験がますます大事になる。同時にコンパクト化も進めねばならない。

参考文献

- [1] S. Fukuda,他, “KEK超伝導RF試験装置(STF)のRF源の開発”, 本研究会
- [2] T.Matsumoto,他, “STF Phase-1におけるデジタル低電力高周波制御”, 本研究会.
- [3] KAZAKOV Sergey,他, “L-band waveguide elements for SRF application”, 本研究会.
- [4] M.Akemoto,他, “KEK超伝導加速器施設(STF)に於ける10MWクライストロン用長パルスモジュールの開発”, 本研究会.
- [5] M.Yoshida,他, “STFにおける導波管コンポーネントによる超伝導空洞のQ調整