

## The Present Status of the Waveguide for Phase 0.5 and Phase 1(KEK STF)

Tateru Takenaka<sup>1, A)</sup>, Katsumi Nakao<sup>A)</sup>, Hiromitsu Nakajima<sup>A)</sup>, Mitsuo Akemoto<sup>A)</sup>, Toshihiro Matsumoto<sup>A)</sup>,  
Yoshiharu Yano<sup>A)</sup>, Shinichiro Michizono<sup>A)</sup>, Hiroaki Katagiri<sup>A)</sup>, Hiroyuki Honma<sup>A)</sup>, Takako Miura<sup>A)</sup>,  
Hideki Matsushita<sup>A)</sup>, Shuji Matsumoto<sup>A)</sup>, Mitsuhiro Yoshida<sup>A)</sup>, Tetsuo Shidara<sup>A)</sup>, Shigeki Fukuda<sup>A)</sup>,  
Sergey Kazakov<sup>A)</sup>, Shuichi Aizawa<sup>B)</sup>, Yusuke Kawane<sup>B)</sup>, Nobuharu Okamoto<sup>C)</sup>

<sup>A)</sup>High Energy Accelerator Research Organization(KEK)

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

<sup>B)</sup>Nihon Koshuha Co., LTD

1119, Nakayama-cho, Midoriku, Yokohama, Kanagawa, 226-0011, Japan

<sup>C)</sup>Broad Wireless Co., LTD

2-5-1, Okano, Nisiku, Yokohama, Kanagawa, 220-0073, Japan

### Abstract

Status of the power distribution system (PDS) of STF in KEK is reported. The PDS of the STF-Phase-0.5, which comprises of a 35MV/m cavity and a 45 MV/m cavity, are completed construction and performed the power test. For the PDS of Phase-1 are assembled in klystron gallery in STF building and waiting for the full rating test. Construction and testing status are described in detail in this paper.

## Phase 0.5とPhase 1における導波管系組み立ての現状(KEK STF)

### 1. はじめに

昨年は超電導RFテスト装置(STF)のRF源1号機テストスタンドのWR-650導波管系の放電およびサーキュレータ、ウォータロードなどの特性と電力分配系の電力試験について報告した<sup>[1]</sup>。

今年はSTFの計画<sup>[2]</sup>としてSTF Phase 0.5とPhase 1が進められている。この計画ではクライストロンギャラリに設置してあるRF源から地下のビームライントンネルに設置してある超伝導空洞にハイパワーを給電し、ビームを加速する。Phase 0.5は公称35MeV/m超伝導9連空洞1台が装着されたクライオモジュール(タンクA)と45MeV/m超伝導9連空洞1台が装着されたクライオモジュール(タンクB)からなり、Aの空洞には350kW、Bの空洞には450kWを給電し運転する。Phase 1はAタンクに空洞4式、Bタンクに空洞4式装着しそれぞれの空洞へカップラを通じて所定の電力(A:300kW/空洞、B:450kW/空洞)を投入する<sup>[3]</sup>。

Phase 0.5に用いる導波管系は全長25mほどあり、クライストロンギャラリから地下のビームラインにあるA,B空洞まで配管されている。RF1号機のテストスタンドから高周波電力を3dBハイブリッド(調整機能付き)で分配する。空洞入り口で350kWと500kW相当になるように分岐し、サーキュレータを通して給電する。導波管系の組み立て後のチェックは空洞カップラの代わりにウォータロードを配置して透過試験を、その後反射板に取り替え空洞からの全反射に対応する試験を500kW迄行った。

Phase 1の導波管系組み立てはビームライントンネルで行う予定であったが空洞・タンク関係の工事が立

て込み、クライストロンギャラリで行った。A空洞用導波管系は3dBハイブリッドをトーナメント方式に配列し、B空洞用導波管系は比例配分方式で組み立ててある。それぞれの導波管系は1MWの電力透過試験を行った。今後A,B空洞に必要とされる最大定格の試運転を行い、終了後(今年度秋ごろ)地下に移動する。

現在稼動しているRF1号機高周波電源の仕様は周波数1300MHz、最大出力3MW、パルス幅1.5ms、繰り返し5Hzである。ここの導波管試験ベンチでは空洞カップラのテストおよび導波管系に用いるサーキュレータ、3dB分割器、Phase 0.5、Phase 1の導波管系の電力試験等を行った。本稿ではブロードワイヤレス(株)が本工事を実施したときの試験の状況やRF1号機で行った導波管系パーツの試験も報告する。又現在、STF-RF2号機(Phase 1用の10MW高周波電源)を準備中である<sup>[4][5]</sup>。

### 2. Phase 0.5の導波管系組み立て [図1]

STF-1に於ける前段階のPhase 0.5導波管系の組み立ては全長約25mで高周波電源のクライストロンを含めると35m近くになる。導波管系の組み立てはクライストロン直後に5MWサーキュレータと高周波窓があり、電力分配用3dBハイブリッド(可変範囲2.5-3.5dB)でA空洞に350kW、B空洞に500kWに振り分け地下へ給電する。振り分け後、方向性結合器(60dB)、サーキュレータ(400kW、500kW)、U型Eバンド、フレキシブル導波管を経て空洞カップラに結合する。空洞カップラ迄の位相調整はこのU型Eバンドの両側に適宜スペーサを挿入し行う予定である。

<sup>1</sup> E-mail: Tateru.Takenaka@kek.jp

STFで用いるために今回製造したフレキシブル導



図1:STF Phase1空洞とWR-650導波管系

波管は可とう性を持たすための工夫をした。空洞カップラに間違っても導波管側から力を加えないことが要求されたからである。素管は無酸素銅の平板(0.2t)2枚を丸めてティグ溶接で突合せて接合した。重ね部分がなく可とう性が増した。それを1山ずつ幅6.5mm、深さ6.3mmで成型加工してフレキシブル導波管としたので、かなりの伸縮性と柔軟性があるものとなった。

U型Eバンドの製造は張り合わせでなく鋳造して製造した(所謂ロストワックス法)。内面は若干梨地に見えるが500kWの全反射電力試験では問題なく使用できると評価された。

昨年の試運転時にフランジの結合面で放電が多発した経験から足場も悪く保守が困難である地下に貫通する部分のフランジ結合には気をつけた。そのフランジの結合力をチェックするために富士フィルムの圧力判定シート(プレシート)を用いて圧接状況を確認した。この検査ではフラットフランジの締め付け力が15N・mでは周囲に亘って圧接面に斑があり、一様でなく、20N・mではかなり改善されるという結果を得た。それらをもとに導波管設置工事を進めた。ターレス社製のゴムのOリング付きアルミガスケット(TH20748)は表面にローレットが施されRF接触が保証されており、プレシートにも同様の圧接痕が一様に付き充分使用できることが確認された。

1階から地下への貫通部にはメンテナンスフリーにするため実績のあるターレス社製のアルミガスケットを用いた。導波管内の雰囲気は、電力の大きいクライストロンから5MWサーキュレータを通して窓まで空気をSF<sub>6</sub>ガスに置換している。また、冷却水は窓、およびウォータロードに使用しているが、導波管系はロスが小さいので冷却は必要でない。

導波管系の高周波特性としては工事終了後、クライストロンギャラリにある電力分割用3dBハイブリッドから空洞カップラ直前までのVSWRとロスを測定した。3dBハイブリッドからA,B空洞の2方向

を同時に測定したときのVSWRは1.138でA空洞側は1.18、B空洞側は1.17であった。A空洞(15m)導波管系のロス0.3dBである。

電力試験は500kWまでの透過試験と全反射試験を行った。途中で水負荷に対する流量不足で放電があったがそれ以外では問題が無く15分間のランニング試験を終了した。



図2:STF Phase1の導波管系

### 3. Phase1の導波管系組み立て〔図2〕

Phase1の導波管系に必要な電力はA空洞1.4MW、B空洞2MWで、合計3.4MWがクライストロン出力として必要であるが、分岐電力が異なるので3dBハイブリッドのボタンの挿入量を変化させて分岐比を変えられるようにした。中心値が3dBで、2.5~3.5 dB可変である。このハイブリッドのアイソレーションは22dBから19dBである。

導波管の電力分配方式については2通りを用いている。A空洞に使用する導波管系はトーナメント方式を採用しB空洞は比例配分方式とした。これは両者の違い、及びサーキュレータを省略した時の効果等を調べるためである<sup>[3]</sup>。トーナメント方式の場合、最初の3dBハイブリッドで透過電力を2分割し、またその電力を2分割することによって入力1.4MWの1/4を確保する。空洞に給電する4つの導波管系には60dB方向性結合器、400kWサーキュレータ(NKK製)、U型Eバンド、フレキシブル導波管を使用している。分配率は測定結果では目論み通りであった。

電力試験はクライストロンギャラリにて1MWを投入し空洞カップラ入口では約250kWであることを確認した。今回はサーキュレータの冷却が不十分で温度が50度近くに上昇したのでパルス幅は250μs迄に留めた。1.4MWのフル定格電力試験は追って行う。

比例配分方式は2MWの電力を1/4ずつ配分し1空洞

あたり500KWになる。導波管系は最初に6dBハイブリッドを使用し次に4.7dB、3dBとハイブリッドを順に組み合わせる。分配後は500kWサーキュレータ(ロシア製)、U型Eベンド、フレキシブル導波管の順に用いている。使用している6dB、4.7dBハイブリッド(NKK製)は新規製作であり、フランジ間のサイズは動燃からの移管品の3dBハイブリッドに合わせて507mmにしてある。試験は1MWの透過試験では不十分なので2MWのまで行う予定である。

これらの導波管系は今後、Phase 0.5のテストが終わり次第Phase 1用として地下に持ち込む。

#### 4. RF1号機による電力試験〔図3〕

このRF1号機テストスタンドは空洞カップラテストラインが2系統用意されA及びBのカップラのテストを行っている。また、サーキュレータ(ロシアフェライト社製とNKK製)、3dBハイブリッド、ウォータロードなどの透過試験も行ってきた。放電場所の同定には音響センサが有用であった。ここでの成果を列挙すると以下の通りである。

①A及びBの空洞カップラ評価テストが終了した。

②500kWサーキュレータ(ロシア製)のテストでは電力500kW、パルス幅1.5ms、繰り返し5Hzの反射試験、透過試験で放電がないことを確認した。

③400kWサーキュレータ(NKK製)の試作品は全反射試験において400kWに到達せず放電を起こした。放電はスタブのところで、損失もロシア製の1%に較べ5%と大きく、フェライトのギャップ間隔等を狭くする改修が行われた。改修後は500kW、パルス幅1.3ms、5Hzで放電は無かったがパルス幅1.5msになるとサーキュレータのダミーロードで放電が起きた。A,B空洞の導波管系で共通に使用できるように500kW、1.5ms、5Hzの仕様迄アップを求めダミーロードの改修が進行中である。

④3dBハイブリッドの電力試験は2MWまで空気雰囲気中で放電もなく透過したが、2.2MW以上で放電があり、A,B空洞に電力を分割する時はガスの封入が必要であることが判明した。この時の試験は短絡版を使用し全反射の条件で行った。また、使用していたウォータロードで放電した可能性もあるので3dBハイブリッド、ウォータロードなどの電力透過試験を行い評価の整理が必要である。

⑤ウォータロードは現在あるものは全数動燃からの移管品であるが、複数個のものは2.2MW負荷電力試験まで使用できることを確認した。一方で1.7MWで放電したものもあり、それは冷却水遮蔽のセラミックに放電痕があった。今後、全数の使用電力試験が必要と思われる。

⑥導波管系における放電場所の同定は音響センサが利用された。これはXバンドR&Dで実績のあったものを使用した。サーキュレータの評価試験ではINPUT、OUTPUT、ダミー側、の三箇所に音響セン

サを設置し音波信号の立ち上がりの早い所を調べて放電源とし、比較検討することによって場所を特定

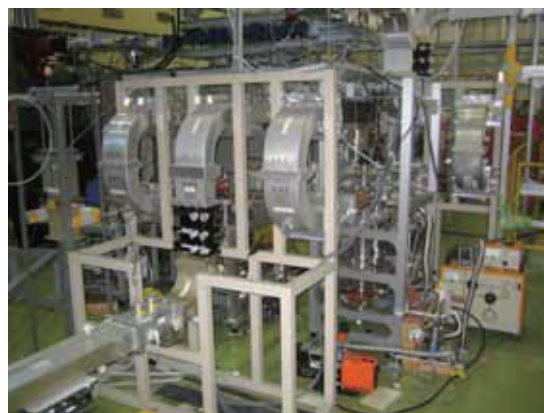


図3:STF-RF-1号機

した。Phase 0.5における導波管設置後の電力透過試験でもサーキュレータの負荷側のダミーロードで放電の同定は音響センサが有用であった。このとき用いた音響センサは使用周波数数が数10kHz程度のもので3,4個用いた。

#### 5. おわりに

Phase1に使用する導波管系は組み立てが終了し地下のビームラインに設置すればよい状態になっている。今後、使用する電力の透過試験を行う予定である。また、3dBハイブリッド、ウォータロード、500kWサーキュレータ(NKK後続機)など一部導波管系部品の電力透過試験を行う。大電力透過を維持するため導波管フランジはゴム製ガスケットを用いガス封入が出来る構造にしてある。

STF-Phase1に使用するRF2号機は現在モジュレータ電源が設置され、クライストロン、集束磁石、導波管系を配置し運転をする予定である。

#### 参考文献

- [1] T. Takenaka, 他, “超電導テスト装置における電力分配系の電力試験(KEK STF)”, 第3回加速器学会, pp.856-858(2006).
- [2] H. Hayano, 他, “超伝導RF試験設備(STF)の現状”, 本研究会.
- [3] S. Fukuda, 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).
- [4] M. Akemoto, 他, “KEK超伝導試験設備(STF)に於ける10MWクライストロンモジュレータの開発”, 本研究会
- [5] S. Fukuda, 他, “KEK超伝導RF試験装置(STF)のRF源の開発”, 本研究会