

RF SOURCE OF SUPERCONDUCTING RF TEST FACILITY (STF) IN KEK

Shigeki Fukuda¹⁾, Mitsuo Akemoto, Hiroaki Katagiri, Tesuo Shidara, Tateru Takenaka, Hiromitsu Nakajima, Katsumi Nakao, Hiroyuki Honma, Syuji Matsumoto, Toshihiro Matsumoto, Shinichiro Michizono, Yoshiharu Yano, Mitsuhiro Yoshida, Sergey Kazakov, Hitoshi Hayano, High Energy Accelerator Research Organization (KEK)
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

Abstract

Phase-I of the Superconducting RF Test Facility (STF) has been developed since 2005 in KEK. We have completed the first high power modulator modified from the PNC modulator using the L-band klystron. We obtained the good result of Bouncer circuit performance. The sag of the voltage pulse of 1.7 ms pulse width was improved from 12% to $\pm 0.8\%$, and the sag of rf pulse from 70% to $\pm 4\%$ by using the Bouncer circuit. After the evaluation of total performance of the rf source, high power tests of the couplers were conducted. We are preparing the waveguide system to deliver the required power to eight superconducting cavities in the cryomodule in the end of this fiscal year. The current status of the rf source in the KEK-STF is reported in this paper.

KEK超電導RF試験装置(STF)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Phase-Iは2005年から2年程度をめどに開始された[1] (STF計画に関しては図1参照)。RF源としては第1号機の電源を、旧動燃の電源[2]をILC (国際リニア子ライダー)のRF源の仕様に合うように改造し、又使用するクライストロンは、JHP計画[3] (J-PARCの前身の計画)で使用していたものを倉庫から出して使用した。導波管系も過去の両計画の資産を用いた。2005年度末に改造電源の試験を開始し、長パルスの垂下特性を補正するためのBouncer回路の動作を成功させた。その後、超伝導空洞に用いられるカップラーの試験等に利用され現在に至っている。2006年度末には、6~8台の超伝導空洞を取り付けたクライオモジュールにRFを供給しビーム加速試験も行うので、その準備が進行中である。昨年に引き続き[4]、本稿ではこのSTFにおけるRF源の進展状況について報告する。

2. 大電力STF長パルス電源 [5]

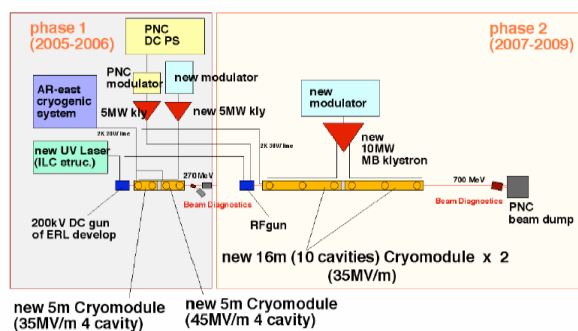


図1 STFレイアウト

第1章でも述べた通り、第1号パルス電源は旧動燃から移管した電源を改造した。これは予算の節約と同時に製造期間を短縮する目的もあった。ただ改造のためには、Modulated Anode電源を通常のDiode変調回路に変更し、1.5msのパルス長に対応するために、電荷を貯め込む蓄積コンデンサーの容量を増強する必要があった。この量はパルスの垂下特性を決めるので大きいほうがよいが、サイズとコストに響く。後述のBouncer回路で補正できることを考えて追加量を決めた。長パルスであるためにパルストランスも増強する必要がある。パルストランスはJHPで使用していたパルス幅600 μ s用のものを改造した。鉄芯の量を24個から39個に増加し大型のパルストランスを製作した。パルス平坦部の垂下特性を改善するためのBouncer回路は、DESYにおいては技術が確立しているが、我々にとっては新しい試みであった。この回路の採用により比較的小さい蓄積コンデンサーで $\pm 1\%$ 程度の平坦度が長パルスでも得られるようになった。図2に改造電源の回路図を示す。赤と青の部分が変更した部分である。

FY2005末から新年度にかけて改造電源の試験を開始し特性を確かめた後、Bouncer回路を追加してその効果を調べた。これについては図3に示した。Bouncer回路は電圧の垂下分を、Bouncer共振回路の

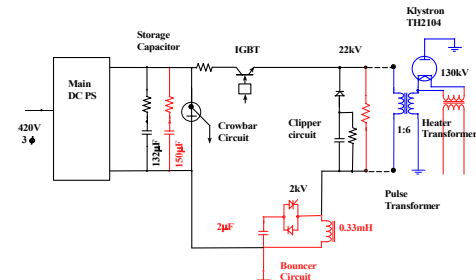


図2 改造モジュレータ・ブロック図

¹⁾ Shigeki.fukuda@kek.jp

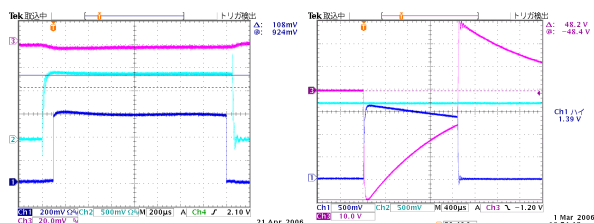


図3 左図はBouncer回路On。右図はBouncer回路なしの場合。両図とも青がパルス電流波形を示す。平坦度が12%から±0.8%に改善された。

電圧で補正するものであり、注意深く共振周波数を選ぶと後はそのタイミングで平坦度を調整できる。但し指数関数的な変化を正弦関数で補正するのでおのずと限界がある。図4にタイミングと平坦度の変化を示した。

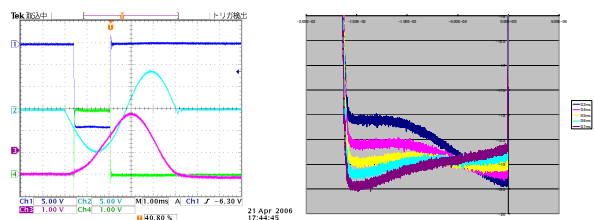


図4 左図はパルス波形(青)、共振電圧波形(水色)と共振電流波形(赤)。右図はタイミングを変えた時の平坦度変化

長パルス電源で重要なことは負荷(クライストロン)が短絡した時に、蓄積エネルギーが負荷で消費されないように、速やかに回路を遮断することである。通常はCrawbar回路を設置するのが普通であるが、STFでは後述の通り、クライストロンのエージングも行う可能性があるため、IGBTの高速遮断も導入した。従って、負荷で過電流が生じた時には、まず閾値Aでまず、IGBTをすぐにOFFする。これが間に合わず次の閾値Bを超えた場合にCrawbar回路が動作する2段階である。時間タイミングはクライストロンに許容される消費エネルギーが30J以下という要請から決めた。この保護回路は設定通り動いているが、印加可能な電圧のうちの一部は、閾値AとBを設定する分に使われてしまうために、36段のIGBTでは120kVまでしかかけられず、TH2104クライストロンの出力は3.5MW以下であった。現在IGBTを更に4段増強することを検討中である。

電源の試験中に種々のトラブルを経験した。一つは古い電源を改造したために、シーケンス上の変更ミスや老朽部品の故障が分からない等に起因するトラブルである。IGBTの全損というトラブルも2回あった。またPLCを含め部品が古く、製造中止または補修に難があることも経験した。クライストロン5MWのレベルでの運転はIGBT増設以降になると思われる。

Phase-1の第2号機電源は、DESYで製作されたような1筐体に収めたものを考え、仕様を定めて入札を行った。ニチコンが現在製造中である。この電源

は現在ILCで進めている基本設計と若干異なり、パルストランスの昇圧比を1:15に選んでいる。またこの電源はILCの基本設計で採用されている10MWマルチビームクライストロン(MBK)も駆動できる仕様である。

3. 大電力クライストロン

昨年度報告したとおり[4]、JHPで使用していたTH2104Aは古いことと、動作周波数が4MHzほど低いので、短パルスでの評価試験を行い、使用可能であることを確認した。トムソン社(現ターレス社)では設備の関係からパルス幅500μsまでしかエージングを行っていないので、パルス電源運転開始後120kVでパルス幅1.7msまでエージングを行った。前節で述べたようにRFのエージングとしてはパルス幅1.5msでは2.5MW程度までしかエージングが出来ていない。当面はこのレベルで良いが、FY2006末までには定格に近づきたい。バックアップとしてTH2104C(1.3GHz用)を1本購入した。DESYでされている10MW MBKに関しては、東芝、CPIとターレス社で独立に開発されているが、東芝のMBKについて日米共同で購入する動きもある。

4. 大電力立体回路系

大電力立体回路系を含めた試験装置の様子を図5に示す。クライストロンからの出力は5MW大電力サーキュレータ、窓を介して導波管切り替え系に入る。この部分はカップラー試験に2グループが参加し、独立に1導波管ラインずつ使うほかに、直接水負荷へいくラインと、地下のクライオモジュールへいくラインが必要で、それらをベンド2個で組み合わせたU字導波管で切り替えるために作った。その使用例を図6に示す。導波管系はSF6ガスで加圧している。当初、導波管フランジでの放電やフランジからの電波漏洩に悩まされた。JHPから引き継いだ導波管はCPR650Fというフラットなフランジであり、トムソンの平型ガスケットを用いるはさむものであった。一方旧動燃からの導波管はCPRE650FとCPR650Gの組合せでゴムリングシールを用いて挿入

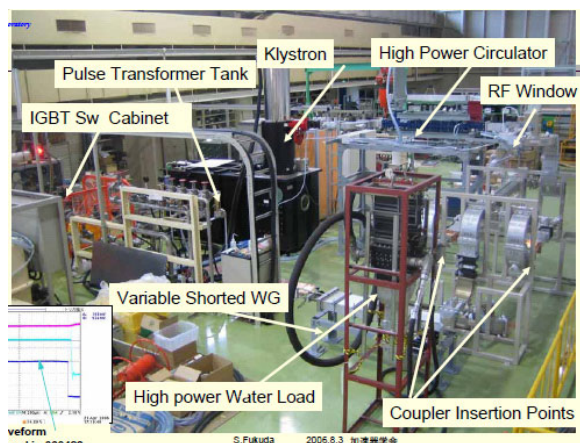


図5 STF RF源の現場

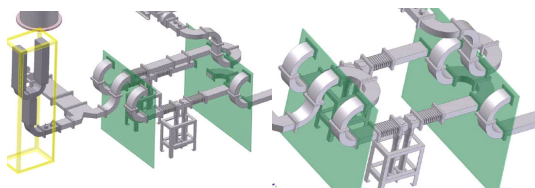


図6 導波管切り替え部の組み立て例。左図は電力が水負荷へ、右図は電力が手前のカップラーへ供給される。他の組み合わせも可能。

できる構造のものであった。放電は、ここにサイズ上問題がある固いゴムリングを使用したことが原因の一つであった(現在ゴムリングは使用していない)[6]。

2つのグループのカップラー試験が2006年の春から夏に行われた。一方は300kWレベルの透過試験、もう一方は2MWの透過試験と500kWの全反射試験を行った。この試験の途中でクライストロンの出力調整中、内部真空度の悪化やRFのドリフト等の問題があった。これは電圧が低いために利得が悪くて前段アンプでのドライブが不足したこと、およびLLRFのフィードバックがまだ出来ていないことに起因している。2006年度後半から、地下室までの導波管組み立てに入る。地下までは15mほどあるのでWR650の素管を購入し溶接で地下まで敷設する。各空洞の前に取り付ける500kWのサーキュレータは4台は低損失が特徴のロシア・フェライト社製であるが、残り4台は同様の性能を目指して、日本高周波に発注した。このレイアウトは図7に示す。

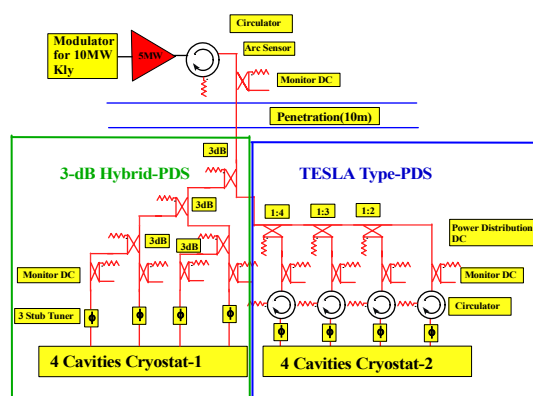


図7 クライオモジュール電力分配系ブロック図

図7では2種類の分配系(3dBハイブリッドを用いた分配系とTESLA同様の線形分配系)を併用する。どちらかの系でサーキュレータを使用しない場合のクロストーク等の影響を調べたいが、当面はすべてにサーキュレータを取り付ける。超電導空洞ではパルスの上りと下りでrfが全反射され、更に空洞をOvercoupleで動作させると常時一定の反射が存在するのでこの問題は重要である。その他3スタブチューナ型の移相器の使い勝手や、分配電力の可変性デバイスの必要性も調査する必要がある。

6. LLRF [7]

LLRFのアナログ系は完成し、以上で述べた各種試験で使用されている。問題としてはクライストロンを低い電圧で動作させているために利得が低く、励振用の半導体アンプの出力が不足気味なことである。これは正規の電圧で運転すれば解決されるはずである。

LLRFのデジタル系は、空洞シミュレータのハードウェアはすでに完成し、ソフトは中国IHEPから来たMr. Geng氏によりほぼ完成された。cPCI関係(図8)は、Control I/O、RF&CLK、Mixer、IQ mod、FPGAボード、DSPなどのハードウェアはほぼ完成し、ソフト関係の仕事を進めている。これらは2006年度末に予定されている超伝導空洞への電力供給試験とビーム試験に間に合わせる予定で進めている。このシステムでの目標は振幅及び位相の安定度がそれぞれ±0.1%及び±1度である。

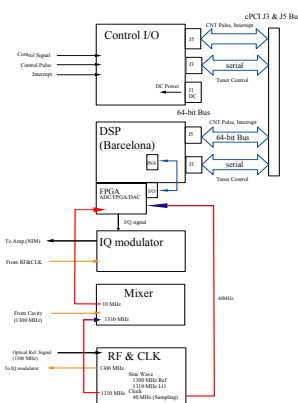


図8 cPCIのブロック図

6. まとめ

KEKにおけるSTF計画Phase-Iは2005年度から始まり2年間で4つの35MV/m空洞と4つの45MV/m空洞を持ったクライオモジュールを開発しビーム試験を行う計画である。現在まではほぼ順調に進行中である。今後の大きな仕事はクライオモジュールまでの立体回路系の構築である。これは2006年末に予定されている。

参考文献

- [1] H. Hayano, "Superconducting RF Test Facility (STF) for ILC", 本会報告.
- [2] T. Emoto et al., "PNC high power CW electron linac status", Linac1994, KEK, Tsukuba, Japan, pp.181-183, (1994).
- [3] JHP Design Report, JHP-10/KEK Internal 88-8(1988)
- [4] S. Fukuda, et. al., "RF Source Development of Superconducting RF test Facility (STR) in KEK", Proc. of 2nd Accelerator Meeting in Japan, Saga, Japan (2005).
- [5] M. Akemoto, et al., "Pulse Modulator Development for L-band Klystron in the Superconducting RF test Facility (STR) at KEK", "Pulse Modulator Development for L-band Klystron in the Superconducting RF test Facility (STR) at KEK", 本会報告.
- [6] T. Takenaka, et al., "Plan of the Power Distribution System for KEK Superconducting RF Test Facility(STF)", ibid
- [7] T. Matsumoto, et al., "Low Level RF System in KEK-STF", ibid.