

RF SOURCES FOR S1-GLOBAL AT SUPER-CONDUCTING RF TEST FACILITY (STF) IN KEK

T. Matsumoto¹⁾, M. Akemoto, D. Arakawa, H. Katagiri, T. Shidara, T. Takenaka, K. Nakao, H. Nakajima, H. Honma, H. Matsushita, S. Matsumoto, T. Miura, S. Michizono, Y. Yano, M. Yoshida and S. Fukuda
Accelerator Laboratory, KEK
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801, Japan

Abstract

S1-Global project as the international research collaboration is in progress at Super-conducting rf Test Facility (STF) in KEK. Eight 9-cell sc cavities will be operated with one klystron to achieve an accelerating gradient of 31.5 MV/m, which is required as the specification of International Linear Collider (ILC). At the end of the S1-Global test period, demonstrative operation of newly proposed ILC HRF scheme so called distributed RF system (DRFS) is scheduled. DRFS RF source in this test consists of a common dc power supply, a modulation-anode modulator, and two modulation-anode klystrons. In this paper, current preparation status of RF sources for S1-Global is presented.

KEK 超伝導 RF 試験施設 (STF) での S1 Global のための高周波源

1. はじめに

KEK の STF では、ILC の実証のために 2005 年から運転が始まった。その Phase I では 4 台の超伝導空洞をインストールしたクライオモジュールの運転を行い、2008 年末に終了した。

その後、国際研究協力による S1 Global 計画が進められており、2010 年夏から年末にかけて試験が行われる。この S1 Global では、KEK、FNAL、DESY で作られた計 8 台の 9 セル超伝導空洞が 2 台のクライオモジュールに組み込まれ、試験が行われる。最終的には、この 8 台の空洞を用いて ILC のデザインである平均 31.5 MV/m の加速勾配、0.07% の振幅安定度、0.24° の位相安定度の達成を目指す^[1]。

また、この S1 Global の試験期間中に ILC に向けて KEK で提案された新しい分布型 RF システム (DRFS)^[2]の 2 台の RF ユニットの建設、4 台の空洞による運転を計画しており、DRFS の実機を用いた実証を行うべく準備を進めている。本報告では、S1 Global のための高周波源の現状について報告を行う。

2. S1 Global

S1 Global では、KEK(4 台)、FNAL(2 台)、DESY(2 台)の 9 セル超伝導空洞、合計 8 台が 2 台の 6-m クライオモジュールに 4 台ずつ組み込まれる。2010 年 6 月から冷却を開始、超伝導空洞の特性評価が始まった。7 月末に一度常温に戻した後、9 月から再度冷却を行い、本格的にクライストロンから空洞へパワーの供給を行う。その後、カップラーや空洞のコンディショニング、各空洞のローレンツ力による共振周波数の離調測定、8 台の空洞による平均加速勾配 31.5MV/m を目指した運転、そして DRFS の実証試験と 12 月末まで運転が行われる。

2.1 S1 Global での高周波源

9 月からの S1 Global 試験では、各空洞とカプ

ラーのコンディショニングを 1 組ずつ行うが、コンディショニング期間短縮のため、高周波源の運転では、2 台の高周波源(運転周波数 1.3 GHz, パルス幅 1.5 ms, 繰返し 5 Hz) が独立に各クライオモジュールへ電力を供給する(Stage 1)。各高周波源はバウンサー回路付 IGBT パルス電源とパルストランス、クライストロンで構成され、各々の最大出力は 2.5 MW (TH2104C, Thomson)、5 MW (TH2104A, Thales) である。各クライストロン出力は、それぞれに異なる導波管系により空洞へパワーが供給される(図 1)。KEK の空洞が入るクライオモジュール-A(CM-A、KEK 製)へは、KEK が開発した分配比の調整が可能なハイブリッド^[3]を用いたリニア電力分配システム、FNAL と DESY の空洞が入るクライオモジュール-C(CM-C、INFN 製)にはトーナメント型(3dB 電力分配システム)の導波管系で構成されている。トーナメント型導波管系には、SLAC で開発された分配比を調整できるバリエブルタップオフ(VTO)^[4]が組み込まれている。導波管系の構成要素は、個別にパワー通過試験が行われており、導波管系全体での稼動試験の準備を進めている^[5]。

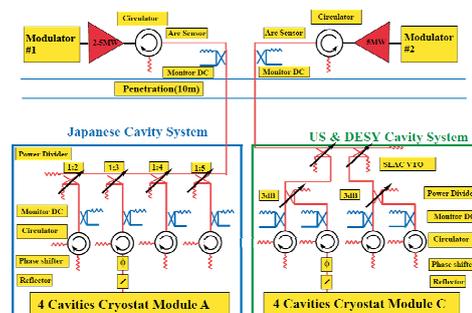


図 1 : S1 Global Stage 1 での高周波源の構成

2.2 S1 Global での低電力高周波制御系

ILC で要求される空洞電場の振幅安定度(0.07 %)

¹ toshihiro.matsumoto@kek.jp

位相安定度(0.24°)を満たすためには、高周波源のフィードバック(FB)やフィードフォワード(FF)制御を利用した運転が必要となる。このためデジタル信号処理を利用する低電力高周波(LLRF)系の開発を進め、10個の16ビットADC(LTC2208)、2個の14ビットDAC(AD9764)、FPGA(Vertex2Pro)を持ち、市販DSPボード(Barcelona, Spectrum Inc.)のドーターカードとして動作するFPGAボードを製作した。このLLRF制御系では、空洞のピックアップ等の信号はダウンコンバーターにより中間周波数へ周波数変換後にADCへの入力となる。FPGAでデジタル信号処理とFB/FF制御を行い、DACからの出力はIQ変調器によってRF信号に変調をかける。このRF信号はクライストロンにより増幅され、空洞に送られることとなる。STF Phase Iでは、4台の空洞電場のベクターサムを一定にするFB制御と適切なFF制御を行うことにより、振幅0.007%rms、位相0.018°rmsの安定度を達成した^[6]。この低電力RF制御系は、EPICSを用いたリモート制御により運転が行われるべくソフトウェア開発を進めている。

S1 Globalでは、1イベントでの8台の空洞全部の入力RF、反射RF、空洞ピックアップが測定可能なモニター系を準備している。このモニター系は、異なる2種類のシステムから成り立つ。一つ目は、これまでに開発したFPGAボードを使い、3つの中間周波数の異なる信号の合成信号をADCへ入力、FPGA内でのデジタル信号処理により分離を行うものである^[7]。この技術により最大30チャンネルの波形モニターが可能となる。また開発中のFPGAボードを二つ目のモニター系として用いるべく準備をしている。このボードは、FPGA(Vertex5FX)、4台のOctal 14ビットADC(AD9252)が使われており、32チャンネル入力が可能なものである(図2)。現在、評価試験を行っており、評価終了後にモニター用ボードとして組み込まれる。



図2：評価中のFPGAボード

高圧運転時における高周波源の安全のためにアーク検出器やVSWRメータで異常を感知した場合にはRF出力を止めるファーストインターロック系が組み込まれている。さらにRFオフ後の空洞波形の減衰率から空洞の負荷Q値を常時測定し、クエンチ直前にある設定値以下までQ値の減少が認められた場合にはRF停止の動作を行うソフトウェアによるインターロックを準備している。

2.3 8空洞での高周波源の運転

Stage 1での個々の空洞のコンディショニングと

特性の測定の終了後、導波管系やインターロック系の切り替え(図3)、測定結果から各空洞のRF入力比が最適になるように可変ハイブリッドの結合度の調整をする。その後、1台のクライストロンで全数の空洞を励振させ、平均31.5 MV/mの加速勾配を目指した運転を行う(Stage 2)。さらに8台の空洞電場のベクターサムを一定にするFB制御を行い、加速電場の振幅・位相安定度等の性能評価を行う。

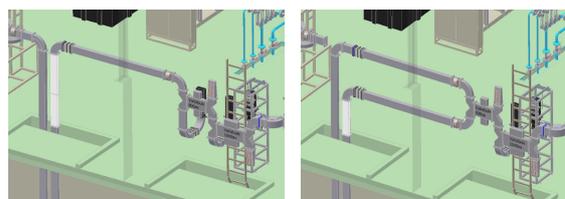


図3：S1 Global Stage 1(左)と Stage 2(右)での地上部での導波管系の配置図

ILCのデザインでは、10MWクライストロンを配置した高周波源が26台の空洞を励振する構成となっている。ILCでの運転パラメータ(平均空洞電場31.5 MV/m、平均ビーム電流9 mA)の条件下、FB制御で運転することができるクライストロンRF出力のオーバーヘッドは10%である。クライストロンの入出力特性の飽和点近くでFB制御を行った場合、そのFB利得は相対的に減少し、空洞電場の振幅・位相安定度が悪化することとなる。Stage 2では、クライストロンの下流に配置した可変ハイブリッドにより出力の調整を行い、オーバーヘッドと空洞電場の安定度の相関についての測定を計画している。

3. S1 GlobalでのDRFS試験

3.1 分布型RFシステム(DRFS)

ILCではコスト削減のため、新しく1トンネル案を検討している。そのRFシステムとしてKEKでは、分布型RFシステム(DRFS)という小電力のクライストロンを多数使用するシステムを提案している。その基本構成は、複数台の750kW変調アノード付(MA)クライストロンを共通のDC電源と変調アノード(MA)変調器でドライブするものである。基本案は各クライストロンで2台の空洞の励振をする。現在検討中のDRFSは、2トンネル案のBCD(基本デザイン)の延長として、1台のDC電源とMA変調器が13台のクライストロンへ電圧供給を行う構成である。この場合、8000台以上のクライストロンと600台以上の電源が全体として必要になる

このDRFSは、クライストロンと電源の大量生産と適切な製造上の工夫でコスト削減を図ることを前提としている。また2台の空洞からの反射波を相殺する配置に導波管系を構成することにより、導波管系からサーキュレータを除去する。検討すべき点としては、DRFSでは1トンネルに多数の高周波源を設置するため、小型化、低価格化が必須であること。また修理や交換がシャットダウン期間に限られるため、個々の構成要素に高信頼性が求められること、機器の対放射線耐性が十分あるか等である。

DRFSによる高周波運転上の利点としては、

1. 1台のクライストロンで2もしくは4台の空洞をドライブするが、特性の揃った空洞で運転することにより、ビーム負荷の有無で生じる空洞電場の傾きが減少する。これにより空洞のQuenchingによるRF出力の制限が緩和され、空洞の利用効率が上がる。
 2. 高周波源と空洞間距離が短くなったことにより高フィードバックゲインでの運転が可能となる。
 3. 高周波源1台当たりのビームへのエネルギー寄与は大体60MeV程度。RF源の故障時におけるエネルギー変動は、ILCで要求されるエネルギー安定度以下である。
- 等があげられる。

3.2 S1 GlobalでのDRFS試験計画

S1 GlobalではDRFSの実証試験を計画しており、2 DRFSユニットの構築とDC電源とMA変調器の開発が進行中である^[8]。電源とMA変調器は、2台のクライストロン負荷を用いた動作試験が10月から始まる。Stage 2での8空洞による動作試験が終了後(11月末)、MA変調器と2台のクライストロンアセンブリ、LLRF系は地下トンネルへ移動、CM-Aの4台の空洞を用いたDRFSの実証試験が12月末まで行われる(Stage 3)。

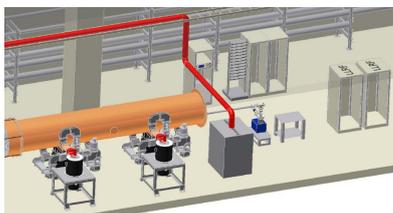


図4 : S1 Global Stage 3(DRFS実証試験)での高周波源の構成図

STF Phase Iでの測定から、RFオフ後の波形カーブから空洞の負荷Q値や離調の測定を行うにはサーキュレータが必要との結論を得ている^[6]。これは導波管系のハイブリッドのアイソレーションが低いことによるものである。今回の実証試験では、高アイソレーション(約40dB)のマジックTを用いて導波管系の構築を行う。導波管系に要求されることとして、ビーム加速の際に各空洞間で加速位相になっていること、空洞で反射されたRFがマジックTで相殺されクライストロンに反射波が伝播しないことである。そのためにマジックTの片側に導波管の位相長が90°長くなるように直管を挿入している。

3.3 DRFSでのデジタルLLRF系

DRFSにおいてデジタルLLRF系は、トンネル内に設置されるものである。このデジタルLLRF系としてKEK-cERLで開発中の μ TCA規格のデジタルLLRF系^[9]で構築する準備を進めている。開発中のFPGAボードには4台の16ビットADC(LTC2208)、4台の16ビットDAC(AD9783)、FPGA(Vertex5FX)が搭載されている。またファーストインターロック

系には、J-PARCのMRとcERLで開発されたシステム^[9]を用いる。

今回のDRFS実証試験において、電源ではバウンサー回路による電圧降下補償は行われず、クライストロン印加電圧にサグが現れることになる。これにより電圧のサグが5~10%程度あった場合、電気長の変化から40°~80°の回転になると見積ることができる。この位相変動に対して、フィードバックゲインを下げる事が無いようにデジタル信号処理で補正を行う。また高圧サグの影響下でRFパワーを効率的に利用するため、空洞へのフィリング時間ではFB制御をせずに最大出力で運転、フラットトップ近くでFB制御を開始する運転の検討をしている^[10]。

3.4 S1 Global以降のDRFS

S1 Globalは2010年末に終了となるが、STFでは量子ビーム実験(2012年1月ビーム運転開始)が計画されている。RF電子銃で出たビームは2台の超伝導空洞により40MeV程度に加速されるが、この空洞の高周波源はDRFSで運転することを検討している。また量子ビーム実験終了(2012年7月末)後、8台の超伝導空洞を12mクライオモジュールに組み込んでビーム運転を行うSTF2が計画されている。このSTF2において、DRFSによる高周波源が採用される予定である。

4. まとめ

KEK-STFでは国際研究協力によりS1 Globalが進められ、8台の超伝導空洞でILCデザインの加速勾配(平均31.5 MV/m)の達成を目標としている。このS1 Globalで高周波源は、空洞やカプラーコンディショニング(Stage 1)、8空洞運転(Stage 2)、DRFS実証試験(Stage 3)に向けた準備を進めている。

参考文献

- [1] H. Hayano, et al., "STFの状況", 本研究会.
- [2] S. Fukuda "ILCの新提案-分布型RFシステム(DRFS)", Proceeding of Particle Accelerator Society Meeting, Tokai, 2009, TOACC01.
- [3] S. Kazakov, et al., "L-band Waveguide Elements for SRF Application", Proceeding of Particle Accelerator Society Meeting, Tokai, 2009, FPACA22.
- [4] C. D. Nantista, et al., "Progress in L-band Power Distribution System R&D at SLAC", Proceedings of LINAC08, Victoria, BC, Canada, 2008.
- [5] T. Takenaka, et al., "S1-Globalの導波管分配システム(KEK ILC)", 本研究会.
- [6] S. Michizono, et al., "Vector-sum Control of Superconducting RF Cavities at STF", PAC'09, Vancouver, Canada, WE5PFP083.
- [7] T. Matsumoto, et al., "Digital Low-Level RF Control System with Four Intermediate Frequencies at STF", PAC'09, Vancouver, Canada, WE5PFP086.
- [8] M. Akemoto, et al., "ILC計画における分布型RF源用電源の開発", 本研究会.
- [9] T. Miura, et al., "Low Level RF System for cERL", IPAC10, Kyoto, May 2010, TUPEA048.
- [10] S. Michizono, et al., "Digital LLRF System for STF S1-Global", IPAC10, Kyoto, May 2010, TUPEA047.