

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

Toshihiro Matsumoto[#], Mitsuo Akemmoto, Dai Arakawa, Hiroaki Katagiri, Tetsuo Shidara, Tateru Takenaka, Katsumi Nakao, Hiromitsu Nakajima, Hiroyuki Honma, Hideki Matsushita, Shuji Matsumoto, Takako Miura, Shinichiro Michizono, Yoshiharu Yano, Mitsuhiro Yoshida, Shigeki Fukuda
Accelerator Laboratory, KEK
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801, Japan

Abstract

S1-Global project is an international collaborative research for International Linear Collider (ILC). For this project, eight superconducting cavities were installed into a cryostat at Super-conducting RF Test Facility (STF) in KEK. The goal of the S1-Global project is to operate these cavities with one klystron under condition of requirement for the ILC. Finally, seven cavities were operated under vector-sum feedback control with an addition of suitable feed-forward. At the flattop area, the stabilities of 0.0067%rms in amplitude and 0.017deg.rms in phase were achieved with an average accelerating gradient of 26 MV/m. Monitoring system of cavity's QI value and detune and piezo control system were installed for stable operation and performed successfully.

At the latter of the test period, Distributed RF System (DRFS) was demonstrated. The RF system was configured with circulator-less waveguide system and operated with various conditions. It was evaluated that the performance of the DRFS with circulator-less waveguide system satisfied the requirement of RF stability for the ILC.

KEK 超伝導 RF 試験施設 (STF) における S1 Global 計画での RF 源

1. はじめに

S1 Global 計画は、国際リニアコライダー(ILC)のための Global Design Effort (GDE)の一環として KEK をはじめとした世界の研究所で構成される国際研究協力によるプロジェクトであり、共通の冷凍機設備で ILC 用に開発された超伝導空洞の運転を行い、要求されている平均加速勾配 31.5 MV/m の実証を目指すものである。このため KEK の超伝導 RF 試験施設 (STF) において、KEK(4 台)、FNAL(2 台)、DESY(2 台)の計 8 台の超伝導空洞が組み込まれた 2 台のクライオモジュール(CM-A, KEK, CM-C, INFN)が準備され、2010 年夏から 2011 年 2 月末に渡り個々の空洞の加速勾配等の性能評価を行うとともに、加速ユニットとしての実証試験が行われた^[1]。

この S1 Global 計画では、時期を分けて 2 つの異なる RF システムを運転して評価した。S1 Global 計画の前半では、1 台の大電力クライストロンで多数の空洞を励振する構成の Reference Design Report (RDR)のベースラインに従った。このため 8 台の超伝導空洞に対して 1 台の大電力 5MW クライストロンと各空洞へ接続する導波管系で構成する高周波源の準備を行った。最終的には 7 台の空洞を励振、ベクターサムによるフィードバック(FB)制御での運転をして、全体としての加速電場の振幅と位相安定度等の高周波源の性能評価を行った (RDR 試験)。

S1 Global 計画の後半には、ILC での RF 源として KEK で提案した分布型 RF システム(DRFS)^[2]の実証試験を行った(DRFS 試験)。この DRFS は、ILC のコスト削減のために検討された単一トンネル案で

の候補の一つであり、中電力の 850kW クライストロンをトンネル内に分布的に多数配置する構成である。高周波源の基本案は、各クライストロンが 2 台の空洞を励振するものであり、複数台のクライストロンが共通の DC 電源と変調アノード(MA)変調器でドライブする構成である^[3]。このため ILC 全体では 8000 台以上のクライストロンと 600 台以上の電源が必要となる。

今回の DRFS 試験は、2 台のクライストロン構成で行った。これは複数台駆動するという観点からの最小単位のためである。また導波管系はサーキュレーターを用いない構成(サーキュレーターレス導波管系)で運転し、システムとしての評価を行った。

2. S1 Global 計画での RDR 試験

S1 Global 計画では、2010 年 9 月から RDR 構成の高周波源による大電流試験を開始した。最初に行う各空洞とカプラーのコンディショニング期間短縮のため、2 台の各クライオモジュールに 2 台の高周波源(運転周波数 1.3 GHz, パルス幅 1.5ms, 繰り返し 5Hz)が独立に運転を行い、電力を供給した(Stage 1)。高周波源は、大電力クライストロンとパルストランス、バウンサー回路付パルス電源で構成された。各クライストロン出力は、それぞれ異なる導波管系により空洞までパワーが供給された(図 1)。KEK の空洞が入る CM-A へはリニア型電力分配系、FNAL と DESY の空洞が入る CM-C にはトーナメント型電力分配系の構成であった。これらの電力分配系は、KEK が開発した分配比が調整可能なハイブリッド^[4]を通過して、各空洞へ RF パワーを供給する導波管系構成となっている。更にトーナメント型導波管系

[#] toshihiro.matsumoto@kek.jp

には SLAC で開発した分配比が調整できるバリアブルタップオフ^[5]も組み込まれている。

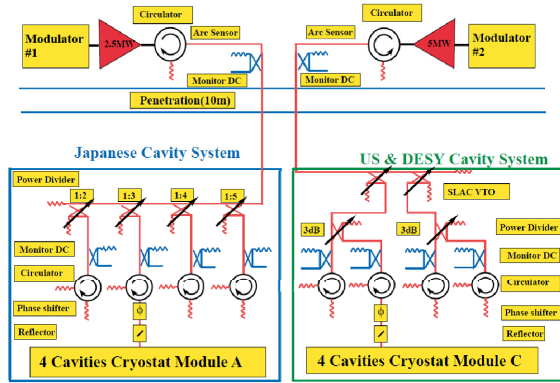


図 1 : S1 Global 計画 Stage 1 での高周波源の構成、リニア型電力分配系(左側); トーナメント型電力分配系(右側)

RDR 試験における低電力 RF(LLRF)系は、STF Phase-1 と同じ基本構成であり、ILC で要求される振幅安定度(0.07%rms)、位相安定度(0.24 度 rms)を満たすために開発した FPGA ボードを使ったデジタル LLRF 制御系^[6]である。この FPGA ボードの 2 チャンネルの DAC 出力は、IQ 変調器により運転周波数の RF 信号へ周波数変換される。この RF 信号は半導体増幅器 (500W 出力)、大電力クライストロンを経由して超伝導空洞を励振する。空洞からのピックアップ信号は LLRF 系が設置された 19 インチラックまで同軸ケーブルで伝送され、ミキサーにより中間周波数(IF)へ変換後、FPGA ボードの ADC の入力となる。検出した信号は I/Q 成分に分離され、FPGA 内において FB 制御やフィードフォワード (FF)制御を行う。STF Phase-I では、4 台の空洞を空洞電場に対してベクターサムを一定にする FB 制御と適切な FF 制御を行うことで、振幅 0.007rms、位相 0.018 度 rms の安定度を達成している。S1 Global 計画の RDR 試験では、最大 8 台の超伝導空洞でのベクターサムによる FB 制御を行う必要があるが、開発した FPGA ボードは 10 チャンネルの 16 ビット ADC を搭載しているため、そのまま用いた。

また LLRF 系では、1 イベントでの 8 台の空洞全部の入力 RF、反射 RF、空洞ピックアップの波形データが測定可能なモニター系を用意してある^[7]。このモニター系は 2 種類のシステムから成り立つ。一つは 3 つの異なる周波数を持つ IF の合成信号を、前述の FPGA ボードの ADC へ入力、FPGA 内でのデジタル信号処理で分離をおこなうものであり、もう一つは Octal 14 ビット ADC を 8 台搭載、32 チャンネル入力可能な FPGA ボードによるものである。さらに運転時に運転周波数の信号を直接パワーメーターで測定するモニター系があり、2 チャンネルのパワーメーター 6 台の構成である。このパワーメーター系は、クライストロン出力や空洞ピックアップのモニターの他にデジタル系のパワー校正にも用いられる。

高圧運転時における高周波源や超伝導空洞の保護のため、クライストロンやカプラーのセラミック窓での放電の有無をモニターするアーク検出器や VSWR メータで異常を検出した場合、RF 出力を停止させるファーストインターロック系が組み込まれている。これらのインターロック系、LLRF 系、変調器の制御系の設定パラメーター、モニター系の波形信号や測定値は、EPICS のレコードとして管理している。また EPICS を経由してのリモート制御用 GUI 環境の整備も行った。

Stage 1 において、カ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]の終了後、導波管系、インターロック系の切り替えを行い、12 月から 1 台の 5MW クライストロンで全数の空洞を励振させる構成へと変更した(Stage 2)。実際には機械チューナーが不備の 1 台を除いた 7 台の空洞を用いてベクターサムによる比例制御での FB 運転を行った。クエンチリミットは各空洞により異なっているが、可変ハイブリッドの結合比の調整をして、7 台の平均加速電場を最大にする入力 RF の分配比へと最適化を行った。

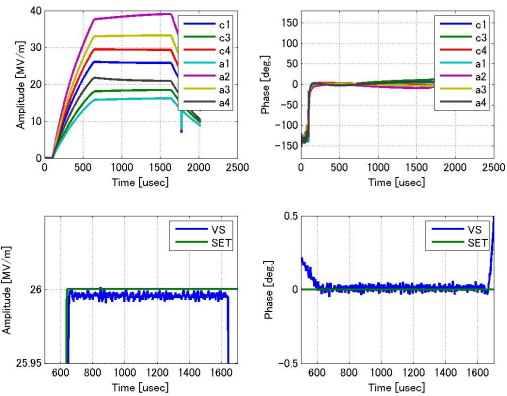


図 2 : 7 空洞運転での各空洞の振幅(左上)、位相(右上); ベクターサムの振幅(左下)、位相(右下)

フラットトップでの平均の加速電場は 26 MV/m 程度が最大であった。このときの FB 運転による振幅と位相波形を図 2 に示す。7 台の空洞単独でのクエンチリミットの平均は 26.7MV/m であった。しかし各空洞の負荷 Q(QI)値や空洞離調のばらつきなどによりフラットトップ部分での電界に傾きが現れる。これにより 7 台空洞運転の場合には単独空洞運転時と比べて加速電界が下がったと考えられる。フラットトップでの安定度の向上のためには、FB 制御に FF 制御を加えることが有効である。図 2 の波形は、適切な FF を設定、FB 運転したものである。このときフラットトップで振幅安定度 0.0067%rms、位相安定度 0.017 度 rms の結果が得られた。これは ILC での要求 (振幅 0.07%rms、位相 0.24 度 rms) を満たし、STF Phase 1 での 4 空洞運転での安定度 (振幅 0.007%rms、位相 0.018 度 rms) と同程度の結果である。

2.1 QI 値 モニターによるインターロック

RF が OFF した後の空洞電場の時間変化より空洞の QI 値が計算できる。空洞がクエンチ直前になった場合には QI 値の低下が認められる^[9]が、全空洞の QI 値を常時測定し、ある設定値以下になった場合に RF 停止の動作を行うソフトウェアを準備し、ファーストインターロックとして機能させた(図 3)。この結果、運転中の冷凍機の負荷低減に寄与し、STF Phase 1 の時にたびたび起きた空洞クエンチによる液体 He 蒸発、その後の再冷却に伴う長時間の運転停止という事態を大幅に減らすことができた。

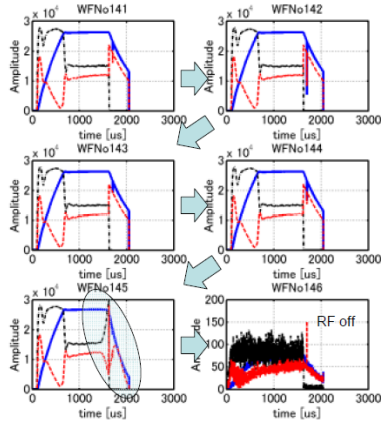


図 3 : QI 値モニターによるインターロック動作の様子

2.2 ピエゾコントローラーと離調モニター

超伝導空洞内にパワーが投入された時、励振した電磁場のローレンツ応力により共振周波数のシフト (Lorentz Force Detuning; LFD) が起きる。この効果は電場が高電界になるほど大きくなる。このずれに対して、圧電(ピエゾ)素子を用いて空洞の変形を行い、フラットトップでは共振周波数付近で励振するように補正を行う。今回の試験では、市販の DA ボード (NI 製 PCI-6733) を用いてピエゾ素子に印加する電圧をコントロールする制御系及び GUI(図 2)を製作、運転に用いた。

空洞の離調量は、通常では RF OFF 直後の空洞電場の位相変化を測定し、計算により求める。しかし、この方法が適用できるのは RF OFF 直後の一点だけであり、パルス全体の離調量を評価するためにはパルス幅を変えて運転する必要がある。空洞内の電場と空洞入力、空洞の離調量 $\Delta\omega$ と QI 値の半値幅 $\omega_{1/2}$ には、以下の式が成り立つ^[10]。

$$r\dot{\varphi} - r\Delta\omega = \omega_{1/2}\rho\sin(\theta - \varphi) \quad (1)$$

ここで r と ρ は空洞及び空洞入力の振幅、 φ と θ は空洞及び空洞入力の位相である。STF Phase 1 において、この計算式により求めた離調量と RF パルスカットによる離調量の比較を行い、良い一致が得られていた^[11]。今回の運転では、リアルタイムの離調モニターとして導入し、ピエゾや機械チューナーを使った LFD による空洞離調の補正に用いられた。

3. S1 Global 計画での DRFS 試験

RDR 試験終了後、2011 年 1 月から DRFS 高周波

源を地下トンネルへ移設して、2 月の一ヶ月間に DRFS の実証試験を行った(Stage 3)。この DRFS 試験では、DC 電源、MA 変調器が 2 台のクライストロンに高電圧を印加する構成で、トンネル内に設置した LLRF 系により FB 制御を含めた RF 制御が行われた^[7,12]。この DRFS 試験では、KEK/cERL で開発中の μ TCA 規格のデジタル LLRF 系の動作試験とともにサーキュレーターレス導波管系による DRFS の評価試験を行った。

3.1 DRFS でのサーキュレーターレス導波管系

超伝導空洞は定在波型空洞であるため、パルス電力を投入した際、パルスの両端で必ず反射が存在する。このため RF 源の保護の観点からサーキュレーターを入れるのが常道である。DRFS の場合は、2 空洞に電力を供給するので、導波管系の配置を工夫することで反射波を相殺できる可能性がある。DRFS では、クライストロンと電源の大量生産、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ため、サーキュレーターの除去も重要な要素となる。

一般的にサーキュレーターの役割は、クライストロンへの反射により生ずる不安定動作や発振を抑制し、生じた定在波の高電界による高周波窓の破損防止、または反射波が再び各ポートに戻り生じるクロストークの除去等が挙げられる。それにより高周波源の安定な FB 動作や各空洞の離調、QI 値の測定による診断が可能になる。DRFS でのサーキュレーターを省略した導波管系においても同様なクライストロンの安定運転や FB 制御、空洞診断等が実現可能かは試験をして確認する必要がある。

3.2 S1 Global 計画でのサーキュレーターレス導波管系の実証試験

DRFS 試験におけるサーキュレーターレス導波管系は、各クライストロンから空洞までマジック T を用いた構成である(図 4)。空洞からの反射 RF がマジック T で相殺されてクライストロンへの反射にならないように、片側に導波管の位相長が 90 度長くなる 80 mm 直管を入れてある。また導波管や空洞間の設置精度による位相長のズレによるシステムの影響を評価するため、実機では予定していないが、マジック T から空洞までの間に移相器を挿入した。

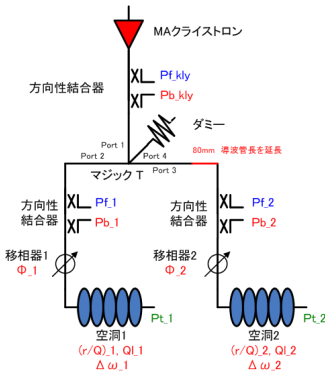


図 4 : サーキュレーターレス導波管系の構成図

今回の DRFS 試験では、移相器による空洞間の相對位相とチューナーを用いた空洞離調量を変化させて以下の項目を調べた。

- 反射 RF によるクライストロン動作の変化
- FF 運転での導波管の位相差や空洞間の離調差による反射 RF、VSWR の相関
- FB 運転での反射 RF や VSWR と空洞の振幅・位相安定度への影響

反射 RF によるクライストロン動作の影響を見るため、空洞の代わりに端板で導波管を短絡、各ポートの移相器の位相長を変化させた。反射 RF の大きさやその位相の影響を受けて、クライストロン出力が大きく変化することをクライストロン直後に置かれた方向性結合器で測定した。その VSWR については、計算と一致することを確認した。反射最小のポジションから±20 度の範囲内では、その VSWR が 2 以下に収まり、正常な動作となる(図 5)。これは導波管系や超伝導空洞を含んだシステム全体で見込まれている電気長の誤差 (5 度程度) から考え、十分広いと評価できる。

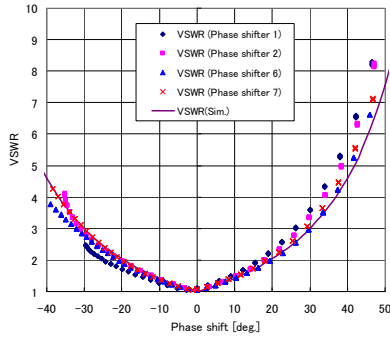


図 5 : 導波管位相差と VSWR

入力 RF(Pf)の位相に対して、空洞電場(Pt)の位相や反射 RF(Pb)の位相は、空洞離調量に影響を受ける。ビーム無しでの運転において、フラットトップでの Pb と Pf の位相差は、Pt と Pf の (空洞離調による) 位相差の 2 倍になる。各空洞の離調量に差がある場合、クライストロンへの反射 RF として戻ってくる。サーキュレーターレス導波管系では、方向性結合器の方向性(20~25dB)による Pb が混じった Pf をモニターしている。このためこれらの方向性を考慮して補正した後、式(1)により空洞離調量を算出した。

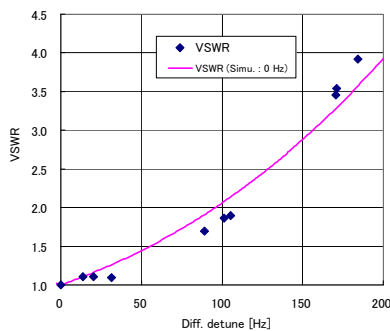


図 6 : 空洞間離調差と VSWR

空洞電場のフラットトップにおける 2 空洞間の離調差とその時の VSWR の相関について、実験値と計算値を図 6 に示す。計算結果と一致をしていることから、サーキュレーターが無くても正しく離調量が求められることができたと評価できる。実際の運転では、VSWR を 2 以下に抑えることが望ましいと考えるが、QI 値が 2.4×10^6 の場合に実現するには、フラットトップでの空洞間の離調差を 100Hz 以下に制御できればよいことがわかった。ILC では RF 源の余裕度からも、フラットトップでの空洞の離調は 50Hz 以下に抑えることが必須であるので、十分カバーしていると評価できる。

次にサーキュレーターレス導波管系での FB 制御運転時におけるフラットトップ振幅・位相安定性の測定を行った。FB 制御は、2 つの空洞のベクターサムによる比例制御で行う。サーキュレーターが無い場合、各空洞の離調量の違い等により生じた反射波が相殺されずクライストロンの出力空洞に戻ることになる。このことによりクライストロン出力が影響を受け、結果としてベクターサムの波形を歪めていることになり、ベクターサムをフラットにしようとする FB 制御が正常に動作しない可能性がある。これについて空洞離調量や移相器を変えて FB 制御が正常に動作する範囲を評価した。

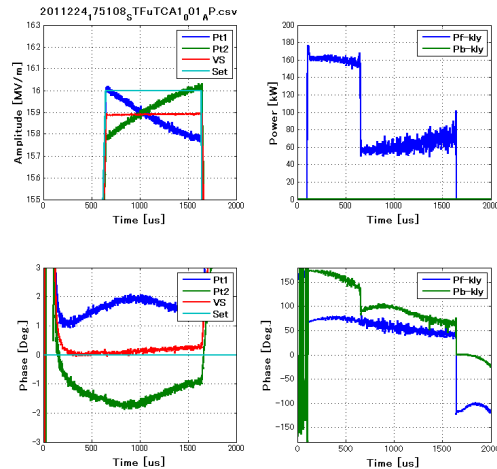


図 7 : FB 運転時での空洞波形(左側)とクライストロン出力(右側)

フラットトップ 10 MV/m、比例ゲイン 145 での FB 運転時における空洞電場を図 7 に示す。離調量を変化させた場合の空洞安定度について図 8 に示す。その結果、フラットトップでの離調差が 200 Hz 程度に広がった場合でも振幅安定度 1.3×10^{-4} rms 及び位相安定度 0.04 度 rms の FB 制御ができ、その安定度は変わらないことを確認した。さらに移相器に±20 度程度動かした場合にも FB 制御が正常に働き、振幅安定度 1.3×10^{-4} rms 及び位相安定度 0.04 度 rms が実現でした。しかし VSWR 最小になる移相器のポジションが端板で調整した時と比べて、5 度程度シフトした。これは WR650 導波管で 4.4 mm に相当する。カプラーや空洞の設置精度により 2 mm 程度

のズレが起こりうると見込まれており、今回のシフトも設置精度に起因すると考えている。

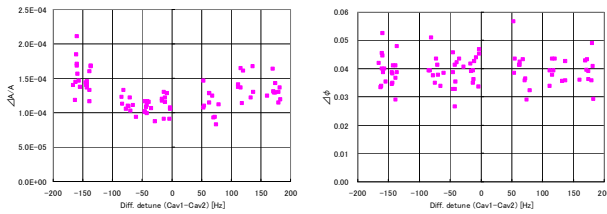


図 8 : FB 運転時の空洞間離調差と振幅安定度(左)、位相安定度(右)

今回の DRFS 試験では、ビームが無い状況でのシステムの安定度について評価を行い、サーキュレーターレスの DRFS でも、ILC に要求される振幅位相安定度を FB 制御により達成できることを確認した。ビーム運転時、フラットトップでの反射 RF は、ビームの効果を受けて減少することになる。今回の評価では VSWR が 2 以下を目安としたが、ビーム運転時には、更に安定な方向へ進むと見込まれる。

3.3 今後の DRFS 実証試験の計画

STF では量子ビーム実験(2012 年 1 月ビーム運転開始)に向けて建設が始まっている。量子ビーム実験では、RF 電子銃を出た RF パルス幅 1 ms、6.15 ns バンチ間隔、バンチ当り 62 pC(平均電流 10 mA)のビームを 2 台の超伝導空洞により 40 MeV 程度に加速する^[13]。これらの空洞の高周波システムとして DRFS を用いる予定である。量子ビームの平均ビーム電流は ILC のビームパラメータ(平均電流 9 mA)と同程度であり、ILC 相当でのビーム運転時の DRFS の評価試験を量子ビーム実験で行う。また導波管系については、各空洞への入力 RF を調整可能にする可変ハイブリッドを用いた構成の検討を始めている。また変調器ではスパークギャップスイッチによるクローバ回路の検討^[14]等を進めている。これらの一部は量子ビーム試験時に評価が行われる。

4. まとめ

KEK/STF では、国際研究協力により S1 Global 計画を進め、その前半において RDR 試験を成功裏に終えた。2 種類の電力分配システムの評価を行い、可変ハイブリッドを導入して異なる空洞電界を持つ超伝導空洞に最適化した入力分配比で電力を供給できた。その結果 7 台のベクターサムによるフィードバック制御運転で平均 26 MV/m (振幅安定度 6.7e-5 ; 位相安定度 0.017 deg.) を達成できた。また QI 値モニター、離調モニター等は安定な運転に貢献できた。

S1 Global 計画の後半には、クライストロン 2 台を用いた DRFS の実証試験を行い、サーキュレーターレス導波管系での運転の評価をして、ILC で要求される性能を達成できることを示した。超伝導空洞のような定在波空洞をサーキュレーターレスで運転したのは初めてであり、この成功は ILC のコスト削減に大きく寄与する。

STF 棟では、2012 年 1 月からの量子ビーム実験に向けて準備が進められている。このときの 2 台の超伝導空洞の高周波システムとして DRFS を用いて、ビーム運転時での評価試験を行う予定である。

謝辞

S1 Global 計画の実験期間での高周波源の運転にあたって、御協力いただきました関東情報サービス株式会社の早川厚様、プラスワークスの皆様には、この場を借りてお礼を申し上げます。

参考文献

- [1] 早野仁司, “STF の開発状況”, TUPS023, 本研究会
- [2] S. Fukuda, “Distributed RF Scheme (DRFS) – Newly Proposed HLRF Scheme for ILC”, Proceeding of LINAC2010, Tsukuba, Japan, MOP027.
福田茂樹, “ILC の日本スキーム : DRFS(分布型 RF システム)”, TUPS019, 本研究会.
- [3] 明本光生 他, “ILC 計画における分布型 RF 源用電源開発の現状”, MOMH01, 本研究会.
- [4] S. Kazakov, et al., “L-band Waveguide Elements for SRF Application”, Proceeding of Particle Accelerator Society Meeting, Tokai, 2009, FPAC22.
- [5] C. D. Nantista, et al., “Progress in L-band Power Distribution System R&D at SLAC”, Proceedings of LINAC08, Victoria, BC, Canada, 2008.
- [6] STF Group, “STF Phase-1 Activity Report”, KEK Report 2009-3, April, 2009.
- [7] 片桐広明 他, “STF での S1 グローバルのための低電力高周波源の構成”, MOPS108, 本研究会
- [8] Y. Yamamoto, et al., “Test Results of the International S1-Global Cryomodule”, SCRF.
- [9] S. Michizono, et al., “Performance of Digital LLRF System for STF in KEK”, Proceeding of LINAC08, Victoria, BC, Canada, 2008, THP108.
- [10] A. Brandt, “Development of a Finite State Machine for the Automated Operation of the LLRF Control at FLASH”, DESY-THESIS-2007-024, July 2007.
- [11] S. Michizono, et al., “Vector-sum Control of Superconducting RF Cavities at STF”, Proceeding of PAC09, Vancouver, BC, Canada, 2009, WE5FP083.
- [12] 三浦孝子 他, “DRFS での μ TCA を使ったデジタルフィードバック系”, MOPS110, 本研究会
- [13] 早野仁司, 量子ビーム beam line meeting 資料, <http://kocbeam.kek.jp/researchers/stfqb.html>
- [14] 中島啓光 他, “クローバ回路用スパークギャップスイッチの検討と試験”, TUPS152, 本研究会