

STF における ILC 建設に向けた大電力 RF 分配系構築の現状

STATUS OF RF POWER DISTRIBUTION SYSTEM CONSTRUCTION FOR ILC IN STF

花香 宣彦^{#, A)}, 石本 和也^{A)}, 沼田 直人^{A)}, 安 和彦^{A)}, 明本 光生^{B)}, 荒川 大^{B)}, 江木 昌史^{B)}, 片桐 広明^{B)},
竹中 たてる^{B)}, 中島 啓光^{B)}, 福田 茂樹^{B)}, 松下 英樹^{B)}, 松本 利広^{B)}, 三浦 孝子^{B)}, 道園 真一郎^{B)}
Norihiko Hanaka^{#, A)}, Kazuya Ishimoto^{A)}, Naoto Numata^{A)}, Kazuhiko Yasu^{A)}, Mitsuo Akemoto^{B)}, Dai Arakawa^{B)},
Masato Egi^{B)}, Hiroaki Katagiri^{B)}, Tateru Takenaka^{B)}, Hiromitsu Nakajima^{B)}, Shigeki Fukuda^{B)}, Hideki Matsushita^{B)},
Toshihiro Matsumoto^{B)}, Takako Miura^{B)}, Shinichiro Michizono^{B)}

^{A)} Nippon Advanced Technology Co. Ltd.

^{B)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

STF2 accelerator has been constructed to develop and demonstrate accelerator technology for International Linear Collider (ILC) at Superconducting rf Test Facility (STF) in KEK. The STF2 accelerator is a test accelerator that consists of the L-band photocathode RF-gun (normal-conducting cavity), two superconducting cavities for pre-acceleration of electron beam and 12 superconducting cavities for beam acceleration. The construction of high power distribution system for STF2 accelerator has finished and all superconducting cavities will be operated from October 2016. This high power distribution system has been designed in compliance with the local power distribution system (LPDS) for ILC. In the LPDS, RF power to each cavity can be supplied to 20% spread of gradient performance cavities effectively by a variable hybrid. Also, a phase of RF input can be controlled by a phase shifter in each of cavity input line. In this report, the status and the process of the LPDS construction for STF2 accelerator are explained.

1. はじめに

高エネルギー加速器研究機構(KEK)超伝導 RF 試験施設(STF)では、国際リニアコライダー(ILC)の加速器技術確立を目指し、STF2 加速器の建設が進められている[1]。2016年9月からは超伝導空洞の試験運転を予定しており、大電力 RF 分配系システムの構築も終了した。STF2 加速器(Figure 1)は、ビーム上流より常伝導空洞をもつフォトカソード RF 電子銃、超伝導空洞をもつキャプチャークライオモジュール、CM1 クライオモジュール、CM2a クライオモジュールとなる。これらの空洞へは 1.3GHz 高周波パルス(幅 1.5ms、繰り返し 5Hz)をインプットしてビームを加速する。この高周波源は地上階に置かれたクライストロン 3 基により、各クライストロンからの高周波パルスを L バンド導波管(WR650)で地下加速器室の各空洞にインプットされる。クライオモジュール直前には、ILC の技術報告書(TDR) [2]に準拠した局所電力分配系(LPDS)を構築し、各空洞まで高周波を導入する構成を採用した。STF2 加速器の大電力 RF 分配系構築作業は、LPDS の配列とメンテナンス性が重要である。本論文では構築技術の紹介と ILC に向けた現状について報告する。

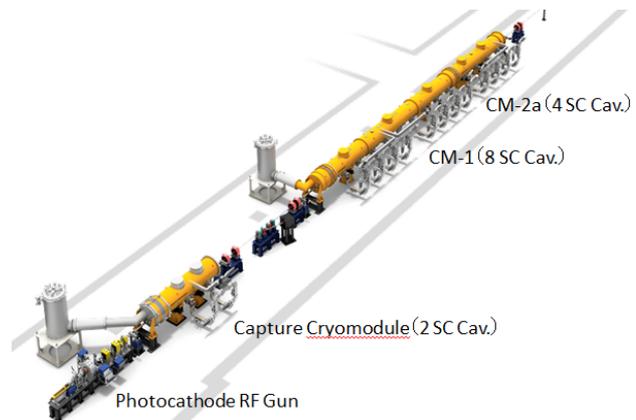


Figure 1: STF2 accelerator.

2. ILC と STF2 加速器の立体回路系

2.1 ILC の立体回路系

ILC の立体回路系は、LPDS を採用する(Figure 2)。LPDS は、クライオモジュール 1.5 基の超伝導空洞 13 台へ RF を供給する導波管系である。平均 31.5MV/m \pm 20%の加速勾配分布を持つ超伝導空洞に対し、加速ユニットあたりの平均加速電場を最大化するために、個々の空洞の入力と位相がリモートで調整可能であること。また、建設コストを抑えることが要求される。ILC では、この LPDS を利用して 10MW マルチビームクライストロン 1 台から超伝導空洞 39 台(クライオモジュール 4.5 台)へ RF を分配する基本ユニットが全体で 378 ユニット必要となる(Figure 3)。

[#] nat-hana@post.kek.jp

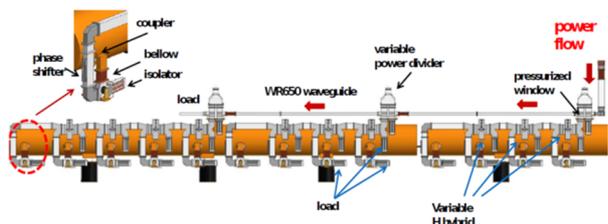


Figure 2: Local Power Distribution System (LPDS).

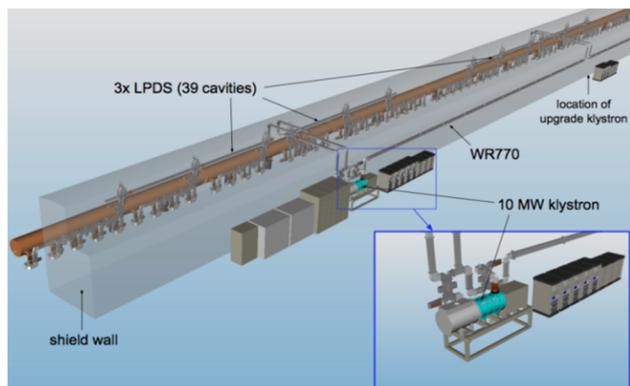


Figure 3: Layout of ILC.

2.2 STF2 加速器の立体回路系

STF2 加速器における立体回路系は、ILC と同様の LPDS を用いた基本ユニットに準拠し、10MW マルチビームクライストロン 1 台から超伝導空洞 12 台へ RF を分配する方向で考えていた。しかし、現在のクライオモジュールでは ILC で考慮されている LPDS を直接保持できる構造ではないこと。また、超伝導加速空洞 12 台の大電力 RF 試験結果[3]により、空洞 8 台は ILC スペック 31.5MV/m を超える性能を達成したものの、4 台については性能の劣化が見られた。このことから 2016 年 9 月から予定している試験は、空洞 8 台による同時運転を行う予定である。このことにより、RF 分配系の構成も変更した (Figure 4)。

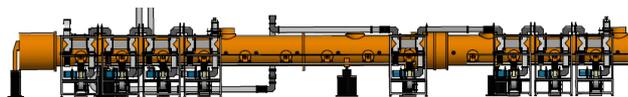


Figure 4: LPDS for STF2 (After change).

3. STF2 大電力 RF 分配系の構築

3.1 大電力 RF 分配系システムの全体像

STF2 加速器の大電力 RF 分配系について、高周波源から各空洞まで構築した (Figure 5)。

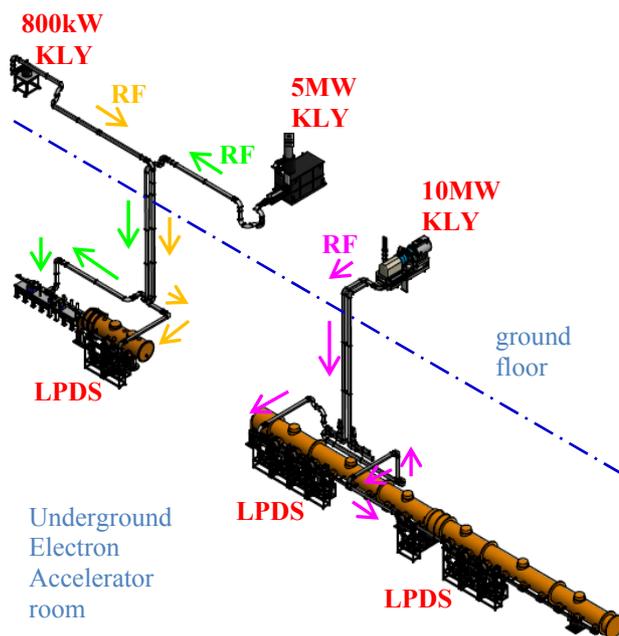


Figure 5: The waveguide composition whole.

3.2 フォトカソード RF 電子銃の RF 分配系

地上階にある 5MW クライストロン (ターレス社製 TH2104C) から地下加速器室内のフォトカソード RF 電子銃までの RF 分配システム (Figure 5) は、L バンド導波管等を連結し、地上 19m、地下 16m、全長 35m で構築した。この導波管システムは最大 5MW の電力で運転することから、導波管内部の放電防止策として、以前から行っている 0.03MPa 程度の絶縁ガスで加圧する構造を施した。また、放電後は導波管の解体と再接続等のメンテナンスを行う必要がある為、作業前に導波管内部に残留する放電ガスを一括ブローできるシステムを考案し、安全対策を施した。なお、放電ガスを一括ブローできるシステムは、今回構築した導波管システムの全てに設置した。

3.3 キャプチャークライオモジュールの RF 分配系

地上階にある 800kW クライストロン (TOSHIBA 社製 VT-68950) から地下加速器室内のキャプチャークライオモジュールまでの RF 分配システム (Figure 5) は、L バンド導波管等を連結し、地上 16m、地下 13m、全長 29m で構築した。空洞直前には、LPDS を小ユニット化した 2 台を配列し、1 台目で空洞へのインプット系統と、2 台目への RF 移相系統に振り分ける。この導波管システムは、最大 800kW の電力で運転する。過去の運転実績を踏まえると、この電力での放電発生は比較的少ないことから、この導波管システムについては、放電防止策を施さない構成とした。

3.4 CM1 及び CM2 クライオモジュールの分配系

地上階にある 10MW マルチビームクライストロン (TOSHIBA 社製 E3736H) から地下加速器室内の CM1 及び CM2 クライオモジュールの RF 分配システム (Figure 6) は、L バンド導波管等 18m を連結して地下の分配器 (3dB ハイブリッド) に入り、2 系統に分配される。分配後の 1 系統は、導波管を 8m 連結して CM1 空洞

(#1、#2、#3、#4)のLPDSに入る。もう1系統は、導波管を18m連結してCM1空洞(#8)とCM2空洞(#10、#11、#12)のLPDSに入る。この導波管システムは、10MWマルチビームクライストロンから地下の分配器まで最大5MWの電力で運転する。この区間は新たな試みとして、窒素ガス0.3MPa程度を加圧して放電を防止する構成とした。なお、ここで使用した導波管等は、加圧試験により溶接部やフランジ結合面等から漏れが無いことを確認した。

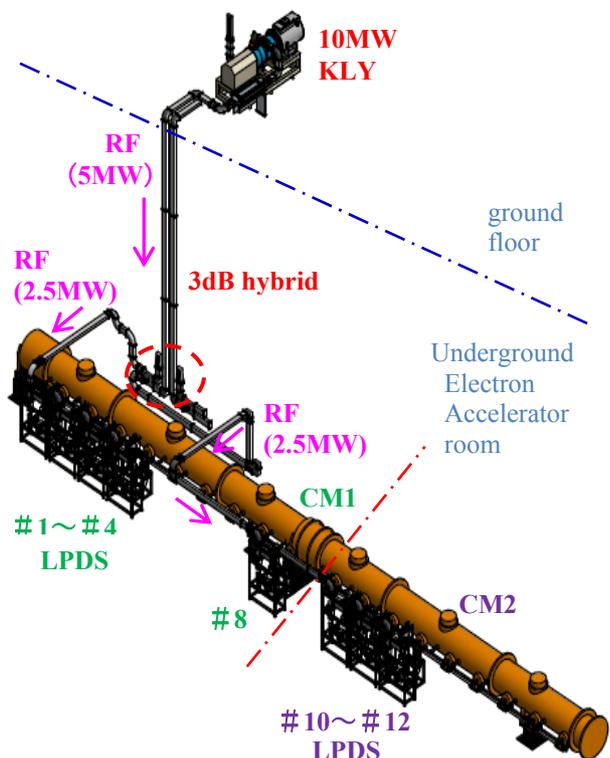


Figure 6: CM1 and CM2a Cryomodule waveguide construction.

3.5 LPDS の構成

STF2 加速器で構築する LPDS は ILC と同様の構成を目指したが、前にも述べたように現在のクライオモジュールは LPDS 全体を直接保持できる構造ではない。そのため、導波管コンポーネントをアルミ枠に組込み、空洞毎に小ユニット化したものを連結することで LPDS 全体を構築した。なお、LPDS には、電力分配器(可変 H ハイブリッド)[4]、移相器、アイソレータ、ダミーロード等を組み合わせて構成している。

3.6 LPDS 小ユニットの構築

各クライオモジュール直前に配置する LPDS 小ユニットは、地上で10台組み上げ、ユニット毎にRF入力試験[5]を行い、最終的に地下へ配列した。なお、連結する導波管は内面確認と清掃を行いながら構築を行った。LPDS 小ユニット(Figure 7)、作業工程と所要時間を Table 1 に示す。



Figure 7: LPDS The small unit.

Table 1: Process of Operation and the Required Time (LPDS The Small Unit)

作業工程	必要人数/所要時間
①アルミ枠設置床へ墨入れ (1台目のみ)	1人 / 3時間
②アルミ枠固定	1人 / 1時間
③導波管サポート材取付け	1人 / 4時間
④サーキュレータ組込	2人 / 3時間
⑤ハイブリッド組込	2人 / 2時間
⑥フェーズシフター組込	2人 / 2時間
⑦ダミーロード組込	2人 / 1時間
⑧導波管の最終接続	2人 / 3時間
⑨RF入力試験	1人 / 10時間
LPDS 小ユニット 1台 合計	1~2人 / 26時間
LPDS 小ユニット 10台 合計	1~2人 / 260時間

3.7 LPDS の配列

地上で組上げた LPDS 小ユニットを、地下に移動後(Figure 8.a)に配列した。作業の要点は、小ユニット内の導波管コンポーネントがアルミ枠に対して正確に組込まれていること。また、墨入れを行った床面の基準線に対して導波管センターが一直線に揃うことである(Figure 8.b)。不揃いの場合、結合する導波管のフランジ面に隙間、傾き、段差が生じて結合できない。結合箇所は、並列方向に隣接する LPDS 小ユニットと、直角方向の空洞入力カップラーの2~3ヶ所あることから、全ての接続面に対してフランジ面同士の平行度と距離を確認しながら完成した(Figure 8.c)。作業工程と所要時間を Table 2

に示す。

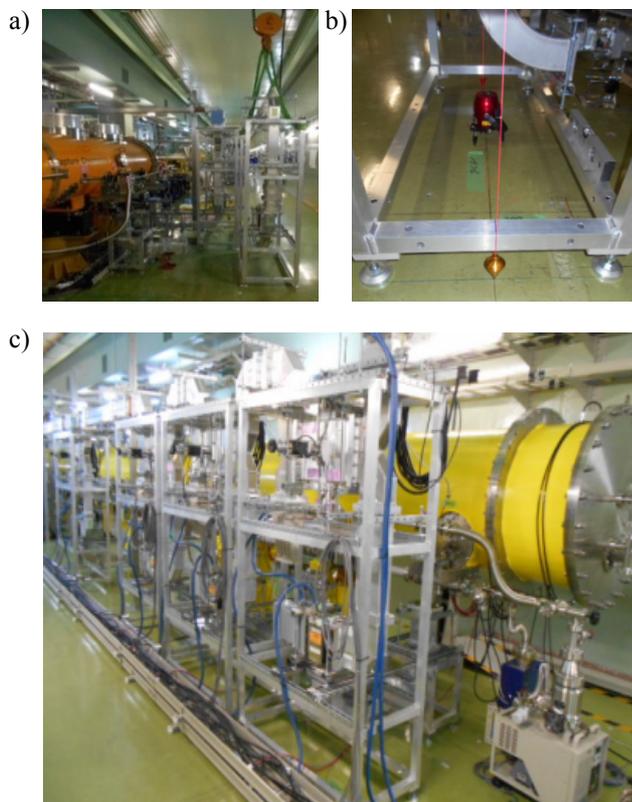


Figure 8: Arrangement process of LPDS. a) Movement of the LPDS small unit. b) Arrangement of the LPDS small unit. c) Connection of the LPDS small unit.

Table 2: Process of Operation and the Required Time (LPDS)

作業工程	必要人数／所要時間
①設置位置床へ墨入れ (初回のみ)	1人 / 20時間
②LPDS 小ユニットの移動	2人 / 1時間
③LPDS 小ユニットの配列	2人 / 4時間
④LPDS 小ユニットの連結	1人 / 3時間
LPDS 小ユニット 1台 合計	1~2人 / 8時間
LPDS 小ユニット 10台 合計	1~2人 / 80時間

4. ILC に向けての成果

- LPDS を小ユニット毎に正確に配列し、空洞と連結する要領を得る事ができた。また、ILC スペックが達成できない空洞が生じた場合でも、LPDS の配列が可能であることも確認できた。
- LPDS の作業工程と所要時間が把握できたことは、ILC 建設のコスト評価に反映できる。また、今後の建設過程の見直しにも役立つと考える。
- LPDS に使用する導波管のコンポーネントに改良すべき点が見つかったが、構築には影響が無いことが判った。改良点については、導波管コンポーネ

ント毎に改善を進めることが望ましいと考える。

- 新たに試みた窒素ガス加圧法による放電防止対策について、使用可能な導波管の基準が把握できた。また、関連するフランジパッキン、ガス導入ポート等についても現在の設計で適用可能であることが実証できた。
- ILC では、クライオモジュールで LPDS を直接保持できる一体型の構想で進んでいる。今回の作業により、LPDS の導波管コンポーネントに対して、主要なサポート位置を把握することができた。また、メンテナンスを考慮し、補助的にサポートする位置が必要であることも判った。

5. まとめ

2016 年 9 月から予定されている STF2 加速器試験の大電力 RF 分配系の構築については一段落した。今回行った LPDS の構築作業は有効であると考えられる。現在は、RF 源が安定に動作するよう、試験設備の環境を整えている。今回の経験から、ILC に向けた建設過程への反映や見直しについて、今後も検討が必要である。

参考文献

- [1] H. Hayano, "Progress of STF Accelerator development for ILC", MOOL06, in these proceedings.
- [2] <http://www.linearcollider.org/ILC/Publications/Technical-Design-Report>
- [3] S. Imada *et al.*, "High Power RF tests of STF2 Cryomodule", TUP019, in these proceedings.
- [4] S. Kazakov *et al.*, "L-band Waveguide Elements for SRF Application", p. 980, Proceedings Particle Accelerator Society Meeting 2009, Tokai, Ibaraki.
- [5] M. Egi *et al.*, "RF Power Distribution System for STF2 at KEK", TUP037, in these proceedings.