

## STF2 加速器における RF 電力分配系 RF POWER DISTRIBUTION SYSTEM FOR STF2 AT KEK

江木 昌史 \*<sup>A)</sup>、明本 光生 <sup>A)</sup>、荒川 大 <sup>A)</sup>、石本 和也 <sup>B)</sup>、片桐 広明 <sup>A)</sup>、竹中 たてる <sup>A)</sup>、  
中島 啓光 <sup>A)</sup>、沼田 直人 <sup>B)</sup>、花香 宣彦 <sup>B)</sup>、福田 茂樹 <sup>A)</sup>、松下 英樹 <sup>A)</sup>、松本 利広 <sup>A)</sup>、  
三浦 孝子 <sup>A)</sup>、道園 真一郎 <sup>A)</sup>、安 和彦 <sup>B)</sup>

Masato Egi\*<sup>A)</sup>, Mitsuo Akemoto<sup>A)</sup>, Dai Arakawa<sup>A)</sup>, Shigeki Fukuda<sup>A)</sup>, Nobuhiko Hanaka<sup>B)</sup>,  
Kazuya Ishimoto<sup>B)</sup>, Hiroaki Katagiri<sup>A)</sup>, Toshihiro Matsumoto<sup>A)</sup>, Hideki Matsushita<sup>A)</sup>,  
Shinichiro Michizono<sup>A)</sup>, Takako Miura<sup>A)</sup>, Hiromitsu Nakajima<sup>A)</sup>, Naoto Numata<sup>B)</sup>,  
Tateru Takenaka<sup>A)</sup>, Kazuhiko Yasu<sup>B)</sup>

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

<sup>B)</sup>Nihon Advanced Technology(NAT)

### Abstract

The Technical Design Report (TDR) for ILC (International Linear Collider) was formulated in 2013 and the work for concretizing the plan of ILC is ongoing. TDR is designed the major components on ILC even though further feasibility are required by more detailed investigation and verification process. STF(Superconducting RF Test Facility) in KEK plans to demonstrate experiments which constructs the minimum basic component of ILC, and the goal of this plan is to establish SRF-system which consists of superconducting cavity system, cooling line, RF line and operation programs. It is important that SRF-system is based on ILC-TDR. This article will report the progress about the construction of the RF supply line in STF2.

### 1. 概要

国際リニアコライダー計画 (ILC: International Linear Collider) は 2013 年に TDR(Technical Design Report) が策定され、計画の具体化作業が現在も継続されている。高エネルギー加速器研究機構 (KEK) の STF(Superconducting RF Test Facility) では ILC の主線形加速器 (Main Linac) の基本要素 ML-Unit を構築し、TDR を実証する計画が進められている。この実験計画が STF Phase 2(STF2) である。本稿は STF2 の ML-Unit に構築された RF 電力供給ラインについて報告する。

### 2. ILC の LPDS

ILC は L バンド 9 セル超伝導加速空洞 (以下、空洞) ベースの大規模な加速器であり、Fig.1 に示す ML-Unit が繰り返し並べられることになる [1]。ML-Unit は Type-A の 2 台と Type-B の 1 台、計 3 台のクライオモジュールから構成され、Type-A は空洞 9 台が格納され、Type-B は空洞 8 台と 4 極電磁石 1 台が格納される。Fig.1 の通り、ML-Unit の RF 分配系は Type-B モジュールの中心で左右対称の構造になっており、ML-Unit 用のこの RF 分配系を LPDS(Local Power Distribution System) と呼ぶ。

空洞は 4 乃至 5 台を一組でブロック化され (以下、ブロック)、RF 源から送られてくる RF 電力を可変パワーディバイダーを用い、各ブロックの必要電力を分岐させる。LPDS の RF 伝送路は L バンド WR650 導波管が使用されている。各空洞には可変ハイブリッド、移相器、サーキュレーターの一組 (LPDS-Unit) が配置され、

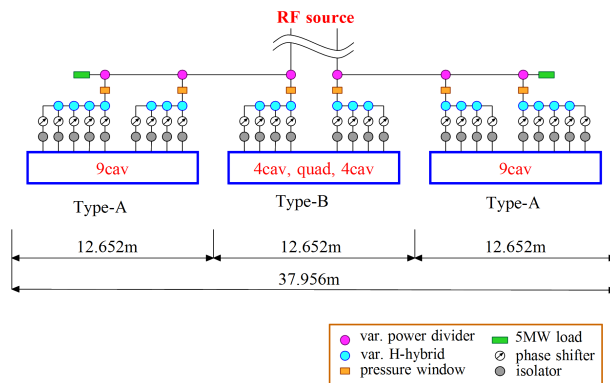


Figure 1: ML-Unit. ML-Unit is the basic component unit of Main Linac of ILC and will be repeated again and again. ML-Unit consists of two modules of Type-A and a module of Type-B. The RF distribution system is unitized as LPDS, too.

可変ハイブリッドにより各空洞の必要電力を更に分岐させる。仮に各空洞の性能が等しく、RF 電力を等分配するならば 4 空洞ブロックでは 3 台の可変ハイブリッドを 1/4, 1/3, 1/2 に設定し、各空洞に  $P_f/4$  の RF 電力が供給される。ここで  $P_f$  はパワーディバイダーからブロック側に分岐した RF 電力である。また、空洞からの反射波はサーキュレーターを介してダミーロードに吸収される。

\*masato.egi@kek.jp

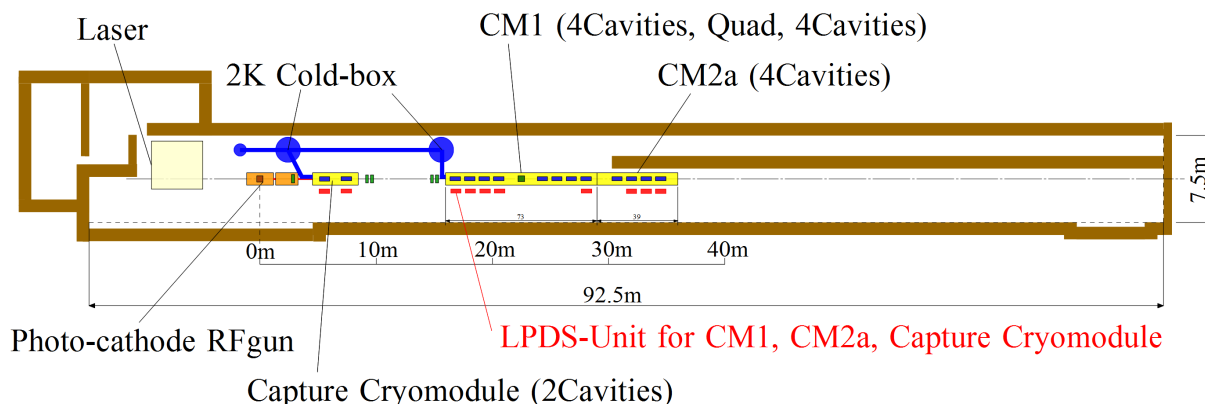


Figure 2: Tunnel Layout of STF2. STF2 accelerator is installed in STF tunnel. As of July 2016, the following components have been already installed in STF2; RFgun, Capture Cryomodule, CM-1 and CM-2a. The He-refrigerator and the klystrons are on ground of STF.

### 3. STF2

#### 3.1 STF2 のクライオモジュール

STF は超伝導加速空洞開発を行うための施設である。地上部には超伝導加速空洞の性能試験とその準備を行う設備、電解研磨施設、またクライストロンギャラリーが設けられている。地下トンネルは加速器室であり、STF2 が展開されている (Fig.2)。

STF2 は現在、Type-B のクライオモジュール CM-1 と二分割された Type-A クライオモジュールの片側一つの CM-2a が設置されており、これは本来の ML-Unit の大きさの半分である。STF2 では予備的な低温大電力試験が 2015 年 10 月～12 月に行われ、クライオモジュールに収められている 12 空洞の性能が評価された。その時の到達加速電界を Fig.3 の空洞上段に Eacc として表示した [2]。TDR は空洞の加速電界 (Eacc) の目標値を 31.5MV/m に定めることにより、線形加速器の距離、RF システム、冷凍機システムを設計しており、到達加速電界は ILC 設計の全ての基準になる。Fig.3 のとおり 31.5MV/m の目標値を超える空洞は 12 台中 8 台であり、ML-Unit 実証の最初の試みとして空洞 8 台と 4 極電磁石 1 台のシステムを構築することから始めることになった。

#### 3.2 STF2-LPDS の特徴

STF2 の LPDS は TDR に準拠している一方で、独自の特徴をいくつか持っている。特徴の一つは LPDS-Unit が Fig.4 の通りフレームに収められていることであり、他は Fig.3 のとおり、ブロック内末端の空洞にも可変ハイブリッドが配置されていることである。

TDR では LPDS はクライオモジュールに直接固定する方式で検討が進められているが決定に至っていない。CM-1 と CM-2a も直接固定する構造はなく、LPDS を床置きで自立させるためにフレームが必要であった。

また今回は可変パワーディバイダーの代替品として Fig.3 に示す -3dB (二分割) 固定ハイブリッドを使用している。仮に上流ブロックの空洞 4 台と下流ブロックの空洞 4 台の間で必要 RF 電力にアンバランスがある時に最高加速電界を出そうとすると到達加速電界の低いブ

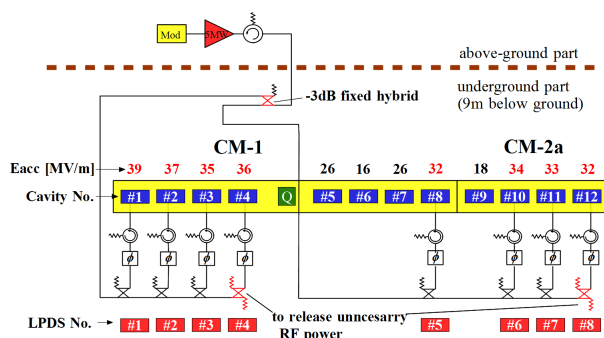


Figure 3: STF2 RF System. In Main Linac of STF2, the 8 cavities among the 12 cavities in the cryomodule reached 31.5MV/m specified in TDR, and the cryomodule consisted of 8 cavities and 1 quadrupole magnet as first step. A set of one variable hybrid, one phase shifter and one circulator is located a cavity.

ロックでは過負荷状態になりクエンチを起こす。従って不要な RF 電力を逃がす仕組みが必要である。TDR ではブロック内末端の空洞に可変ハイブリッドは不要であるが (Fig.1)、ここにも可変ハイブリッドを設けることにより、残りの不要な RF 電力をダミーロードに逃がすことを可能にした (Fig.3)。

### 4. LPDS の構築と動作試験

#### 4.1 LPDS-Unit 組立作業

2016 年 1 月から LPDS の組み立て作業が始まった。最初は 8 台の LPDS-Unit 構築から開始した。

LPDS-Unit の構成要素をまとめると Table 1 となる。可変ハイブリッドと移相器は S. Kazakov 氏設計のものを使用しており [3]、サーキュレーターは日本高周波製 WUG-014H を使用している。これらを幅 500mm 長さ 1200mm 高さ 1950mm のアルミフレームに組み込み固定する (Fig.4)。RF 伝送路にベローズは使われておらず、Fig.4 の各 RF 入出力ポートの位置決めはより正確に行

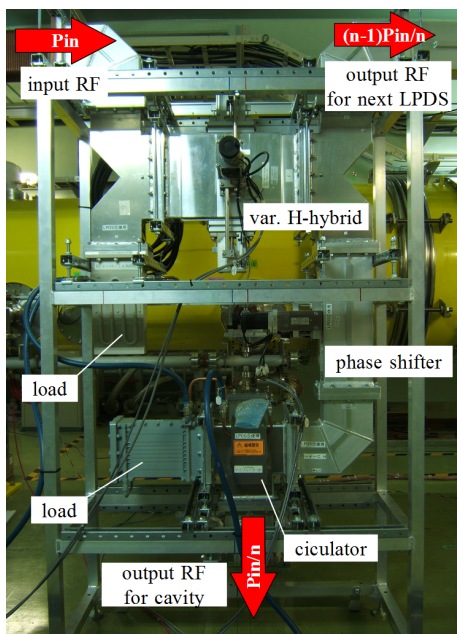


Figure 4: LPDS-Unit at STF2. The components of LPDS-Unit were fixed into Aluminum frame and located at the side of the cryomodule.

われた [4]. LPDS-Unit が構築されるとパルスモーターにより、可変ハイブリッドの分割比を $-7.0\text{dB}(=1/5)$ 、 $-6.0\text{dB}(=1/4)$ 、 $-4.7\text{dB}(=1/3)$ 、 $-3.0\text{dB}(=1/2)$  に調整される。調整後の分割比実測値を Table 2 に示す。

Table 1: LPDS Components at 1.3GHz

Hybrid	adjustable range: $-1.5\text{dB}\sim 15\text{dB}$ power limitation: $>3\text{MW}$
Phase Shifter	adjustable range: $\pm 35\text{deg}$ power limitation: $>3\text{MW}$
Circulator	power limitation: $>500\text{kW}$ isolation: $>20\text{dB}$

Table 2: Power Ratio[dB] of Cavity Package and (Goal)

#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8
-7.15	-6.19	-4.93	-3.19	-7.15	-6.18	-4.95	-3.19
(1/5)	(1/4)	(1/3)	(1/2)	(1/5)	(1/4)	(1/3)	(1/2)

## 4.2 大電力試験

組み上がった個々の LPDS-Unit は実際に大電力を入力し、安定度と耐久性を試験した (2016 年 2 月~3 月)。STF2 では RF 周波数 1300MHz、パルス幅  $1500\mu\text{s}$ 、繰り返し周波数 5Hz のパルス運転である。また、空洞への平均入力電力は概算で  $200\text{kW}$  である。一方で STF2 は 5MW の電力を $-3\text{dB}$  固定ハイブリッドで二分割するので #1 と #5 の LPDS-Unit へ最大で  $2.5\text{MW}$  入力される。従って、大電力試験は STF2 で投入し得る最大電力で実

施することにした。ここで各 LPDS-Unit に入力する電力はハイブリッド分割比により異なる。

大電力試験は STF 地上部のクライストロンギャラリーで行われた。テストスタンドの構成を Fig.5 に示す。2つの 5MW 出力ポートを持つ 10MW マルチビームクライストロン (Toshiba E3736H) の 1 ポートを使用し、5MW サーキュレーターを介して LPDS-Unit に RF 電力を導く。5MW サーキュレーターの前にはセラミック製の RF 窓が設けられており、絶縁ガスである SF6 ( $0.03\text{MPa}$ ) を封入することにより放電防止策を講じた。LPDS-Unit 末端の出力ポートはショート板で塞がれ、全反射した電力はサーキュレーターを介してダミーロードに吸収される。Fig.5 のとおり、アークセンサーを 2 箇所設け、放電が発生すると RF 出力が落ちるよう設定する。クライストロン出力は方向性結合器 “kly-Pf” でモニターし、LPDS-Unit 側出力は “cir-Pf” でモニターする。

大電力試験の電力入力状況を Fig.6 に示す。LPDS-Unit #4t~#1、#5~#8 の順に行われた。Fig.6 は RF 電力を入力していない時間を取り除き繋ぎ合わせている。一つの LPDS-Unit でパルス幅は  $100\mu\text{s}$ 、 $500\mu\text{s}$ 、 $1000\mu\text{s}$ 、 $1500\mu\text{s}$  で電力投入し、所定の電力に上げて行った。全ての大電力試験を通して、導波管をハンマーで叩いたような放電音が発生したが、2 個のアークセンサーでインターロックは落ちないので、放電の主なものは導波管で発生していると考えた。また、連続的な放電は発生していないので、大電力試験を続行している。

Fig.6 の “Kly-” と “Cir-” の各プロファイルを見るとその比率は Table 2 に良く一致している。フル幅  $1500\mu\text{s}$  のパワーライズでは最大電力に到達すると、30 分以上その状態を維持し、安定度を確認した。全ての LPDS-Unit について所定の電力試験は合格である。その後 2016 年 4 月~5 月に、STF 地下トンネル内に LPDS の構築がされた。

## 4.3 位相調整

LPDS-Unit 内の移相器の調整範囲は  $\pm 35\text{deg}$  と、必ずしも十分な調整域を持たない。WR650 の 1300MHz の管内波長は  $322\text{mm}$  であり、位相  $35\text{deg}$  は  $31.3\text{mm}$  に相当する。伝送路の寸法誤差、または RF 調整機器の操作により容易に移相器の調整範囲を超える恐れがあり、LPDS 構築後に各 LPDS-Unit 間の位相を確認し位相を

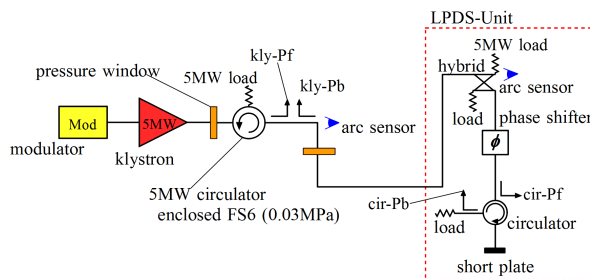


Figure 5: Power Test Setup. This is the system composition of high power test. Maximum input power in LPDS-Unit #1 and #5 are  $2.5\text{MW}$ . Through all power test, discharge arose in the wave guide on the test stand.

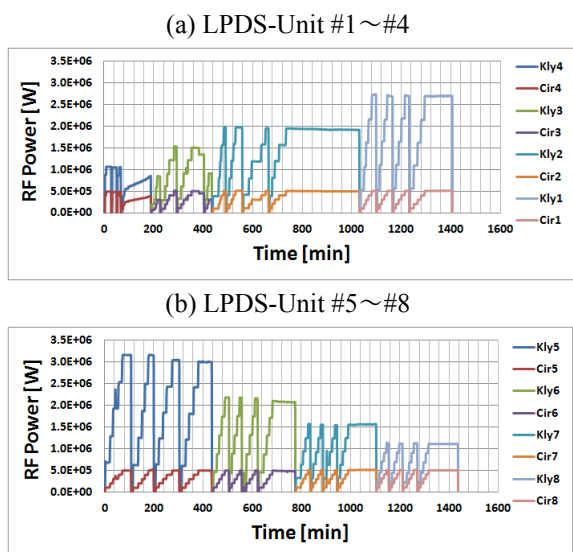


Figure 6: LPDS-Unit Power Test Result. The order of the exam was LPDS#4 ~ #1, and LPDS#5 ~ #8. The pulse width was changed 4 times of 100 $\mu$ s, 500 $\mu$ s, 1000 $\mu$ s and 1500 $\mu$ s, and the stability of LPDS was confirmed by more than 30 minute operation with the full width, 1500 $\mu$ s.

Table 3: Present Phase and Goal

LPDS No.	Present [deg]	Goal [deg]	Spacer [mm]
#1	-18.12	-18.12	0
#2	-142.0	-288.12	65.5
#3	-313.62	-198.12	44.1
#4	-137.92	-108.12	38.4
#5	-30.44	-30.44	0
#6	-338.5	-246.06	119.9
#7	-134.04	-156.06	51.3
#8	-311.56	-66.06	41.4

揃えるためのスペーサーを用意した。

Fig.7に上流ブロックの位相調整作業の様子を示す。ブロック最上流の“Port 1”にRF信号を入力し、各LPDS-Unit出力ポートからのRF信号によりS21パラメーターを調べ、Port1に対し各LPDS-Unitの現状位相を確認した。下流ブロックも同様である。次にFig.3の-3dB固定ハイブリッドの入力ポートとLPDS-Unit#1と#5の出力ポートの位相関係を調べ、8台全てのLPDSの位相を関係づけた(Table 3の“Present”)。

最終的な位相関係は空洞のインプットカップラー間の距離により計算することができ、Table 3の“Goal”に示すものになる。これら現在値と目標値により挿入すべきスペーサー量はTable 3の“Spacer”となり、Fig.7のa-a部、b-b部、c-c部に“Spacer”の半量を挿入することになる。

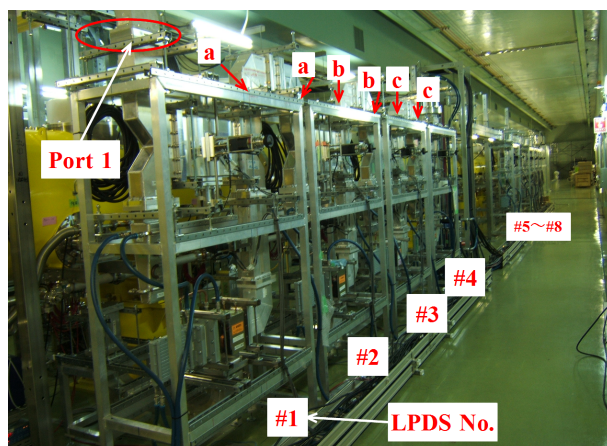


Figure 7: Phase Adjustment of LPDS on STF2. RF signal input to “Port 1”, and the RF phase can be known by the RF output of LPDS-Unit for cavity. The half of the calculated spacer will be inserted onto a-a section, b-b section and c-c section. The wave guide level alignment can be kept by the insertion of the half spacer.

## 5. STF2 8 空洞試験の準備

2016年9月末からSTF2は冷却され、10月に空洞エージング、本試験が始まる。現在はそれに向けて、冷凍機設備の点検、RF伝送路のエージング、インターロックシステムの構築作業が進められている。LPDS周辺ではRF信号ケーブルのケーブルコレクションが終了し、空洞側出力ポートにショート板が取り付けられ、LPDSシステム全体のエージング作業の準備を進めている。

## 6. まとめ

STF2はILC主線形加速部の最小単位ML-Unitを実証する実験計画である。ML-Unitに配置されるRF分配系がLPDSである。

STF2ではLPDSもTDRに準拠したものを実際に構築し、動作試験により目標RF電力供給が可能であることを確認した。2016年9月末からの低温大電力試験に向け、8空洞同時運転の準備を継続中である。

## 参考文献

- [1] <https://www.linearcollider.org/ILC/Publications/Technical-Design-Report>
- [2] S. Imada *et al.*, “High Power RF tests of STF2 Cryomodule”, Proceedings of Particle Accelerator Society of Japan Meeting, Japan, Chiba, August, 2016.
- [3] S. Kazakov *et al.*, “L-band Waveguide Elements for SRF Application”, Proceedings of Particle Accelerator Society Meeting 2009, JAEA, Tokai, Naka-gun, Ibaraki, Japan.
- [4] N. Hanaka *et al.*, “Status of RF Power Distribution System Construction for ILC in STF”, Proceedings of Particle Accelerator Society of Japan Meeting, Japan, Chiba, August, 2016.