

# KEK での ITN(ILC Technology Network)クライオモジュール試験用 高周波系の開発

## DEVELOPMENT OF RF SYSTEM FOR CRYOMODULE TESTING IN THE ILC TECHNOLOGY NETWORK AT KEK

松本利広<sup>#, A, B)</sup>, 明本光生<sup>A)</sup>, 荒川大<sup>A)</sup>, オメット マチュール<sup>A, B)</sup>, 片桐広明<sup>A)</sup>,  
ジョシ プラカシ<sup>B)</sup>, 中島啓光<sup>A)</sup>, 松本修二<sup>A, B)</sup>, 三浦孝子<sup>A, B)</sup>, 道園真一郎<sup>A, B)</sup>

Toshihiro Matsumoto<sup>#, A, B)</sup>, Mitsuo Akemoto<sup>A)</sup>, Dai Arakawa<sup>A)</sup>, Mathieu Omet<sup>A, B)</sup>, Hiroaki Katagiri<sup>A)</sup>,  
Prakash Joshi<sup>B)</sup>, Hiromitsu Nakajima<sup>A)</sup>, Shuji Matsumoto<sup>A, B)</sup>, Takako Miura<sup>A, B)</sup>, Shinichiro Michizono<sup>A, B)</sup>

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

<sup>B)</sup> The Graduate University for Advanced Studies (SOKENDAI)

### Abstract

The technological development of the International Linear Collider (ILC) using a superconducting cavity has been carried out in cooperation with the world. Since FY2023, the ILC Technology Network (ITN), under the ILC International Promotion Team (IDT), has been engaged in research and development activities in international collaboration. Specifically, a cryomodule with a superconducting cavity that meets the requirements of the ILC has been fabricated and will be tested for its evaluation in the KEK's COI building. In this paper, the development status of the RF system for the ITN cryomodule conditioning is reported.

### 1. はじめに

国際リニアコライダー(ILC) [1, 2] は、衝突エネルギー 250 GeV の電子・陽電子リニアコライダーである。この ILC には 2 つの Main LINAC (ML) があり、約 200 台の高周波源、約 8000 個の 1.3 GHz の 9 セル TESLA 型超伝導空洞(SC)で電子・陽電子の加速を実現する。ML に置かれる高周波源は、L-band 10 MW のマルチビームクライストロンで発生したパルス幅 1.65 ms、繰り返し周波数 5 Hz のマイクロ波電力を WR650 規格の導波管、導波管コンポーネントにより1ユニット辺り 39 台の SC へ供給する構成である(Fig. 1)。

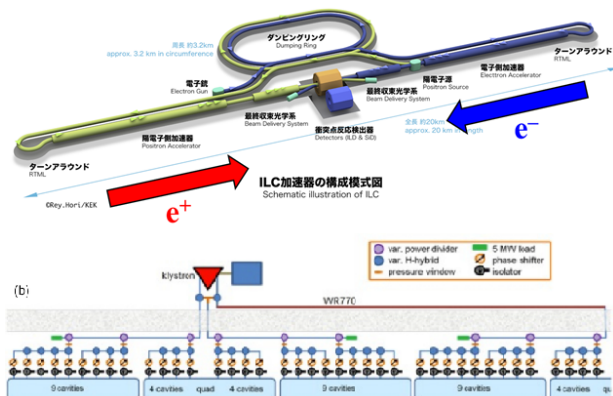


Figure 1: Schematic illustration of the ILC and RF system according to ILC-TDR.

ILC テクノロジーネットワーク(ITN) は、KEK と ILC の国際開発チーム(IDT) が共同で立ち上げたもので、ILC 準備段階において SRF、電子・陽電子源、ナノビームな

<sup>#</sup> toshihiro.matsumoto@kek.jp

どの優先度の高いワークパッケージを実施している[3]。現在、ITN ワークパッケージの一つとして、KEK の COI 棟で 8 台の SC を組み込んだクライオモジュール(CM)を製作、COI 棟内に設置したバンカー内でマイクロ波コンディショニングを行い、平均 31.5 MV/m の加速電場の到達、等の ILC 実現化に向けた実証試験を進めている。またこの実証試験では、ILC 加速トンネルの省スペース化に寄与する CM と空洞までの電力分配系を一体化した構成を検討、2027 年度内での運転を予定している。

### 2. ITN-CM の電力分配系

ILC の電力分配系には、平均加速勾配は 31.5 MV/m  $\pm$ 20%の製造ばらつきがある SC に対して、加速ユニットあたりの平均加速電場を最大化にする要求がある。このため、加速ユニットの 39 台の SC への入力電力とその位相を遠隔で調整する必要があり、複数の導波管可変ハイブリッド(VH)と導波管可変移相器(VPS)、固定移相器を直列に配置する ILC 用のコンパクト構成の局所電力分配システム(cLPDS)を開発した(Fig. 2)[4]。

cLPDS では、VH の結合比を調整して最適な空洞入力に設定する。その際、該当の VH から空洞入力並びに下流の分配系への位相が変化する。この位相変化に対して上流側の VPS で位相補正を行う。固定移相器は、隣接する下流側の空洞の入力位相が上流の空洞の入力位相に対して $+90^\circ$  に設定するために用いる(Fig. 3)。この cLPDS は STF2 加速器の 4 台の SC に対して組み込まれ、ビーム加速試験を行い、システムとして問題ないことを実証した[5]。

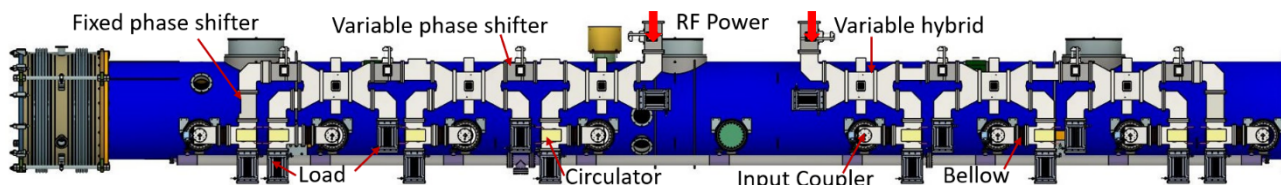


Figure 2: Layout of the compact LPDS (cLPDS) integrated with the ITN cryomodule (CM) for the eight cavities.

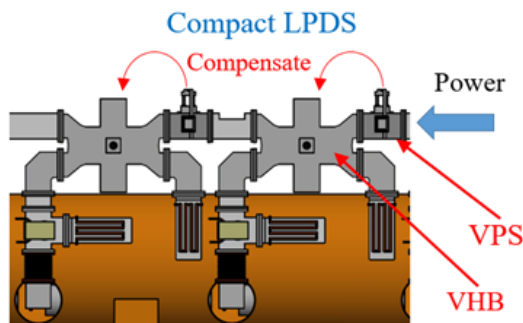


Figure 3: Layout of cLPDS concept.

ILC の加速トンネル内で CM 設置後に電力分配系の取り付け作業をするのは、トンネルでの作業スペースが制限されることにより費用と時間がかかり、更に危険性も伴う。そのため、すでに電力分配系を組み込んだ CM をトンネル内に設置する必要がある。これまでのところ、プロトタイプの実験システムを設計・製作を行い、最初の統合試験をおこなった[6]。Figure 4 は、2本の柱で支えられたフレームに組み込まれた電力分配系を示している。この試験では、ILC とは空洞間の長さが異なる CM の前に設置された。今後、CM への取り付けを容易にする支持システムの設計更新、並びに CM への取り付け機構や CM の補強リングと支持システム間に生じる干渉部を解決できるように検討を進めていく。

COI 棟で準備しているバンカーは設置スペースが限られているため、コンクリート遮蔽の厚さが十分でないことが判明した。このため ITN-CM 試験用の cLPDS について、高電界放出を抑制するために再設計をした (Fig. 5) [6]。STF での試験より、CM での電界放出は、複数の空

洞で電子が加速されることにより増幅される[7]。そのため、暗電流の加速を防ぐために、隣接するキャビティ間でマイクロ波入力位相差を 180° に設定してある。

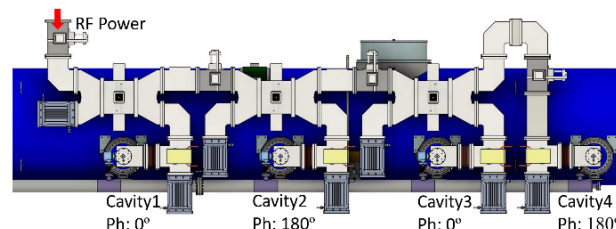


Figure 5: Layout of the cLPDS for ITN-CM to suppress the field emission.

### 3. 高周波系の構成

#### 3.1 大電力高周波系

当初 ITN-CM の高周波源は、COI 棟バンカーの側に 10 MW L-band マルチビームクライストロン (MBK)、新規開発の MARX 変調器、デジタル制御による LLRF 系を構築する計画であったが、COI 棟に隣接する STF 棟の 10 MW MBK からマイクロ波を供給する構成を採用した。この高周波源は、STF2 加速器の CM1/2a にある 12 台の SC にマイクロ波を供給するものである。この高周波源から COI 棟に建設予定のバンカーまで、導波管を敷設してコンディショニング用のマイクロ波を伝送する (Fig. 6)。伝送系は Al 製 WR650 規格 3 m の素管を基に構築する計画で、導波管の据付手順や支持治具の設計中であり、また導波管伝送系の一部は屋外に敷設するため、導波管カバー等の対策を調査中である。

この伝送路は総距離で約 200 m になり、導波管伝送

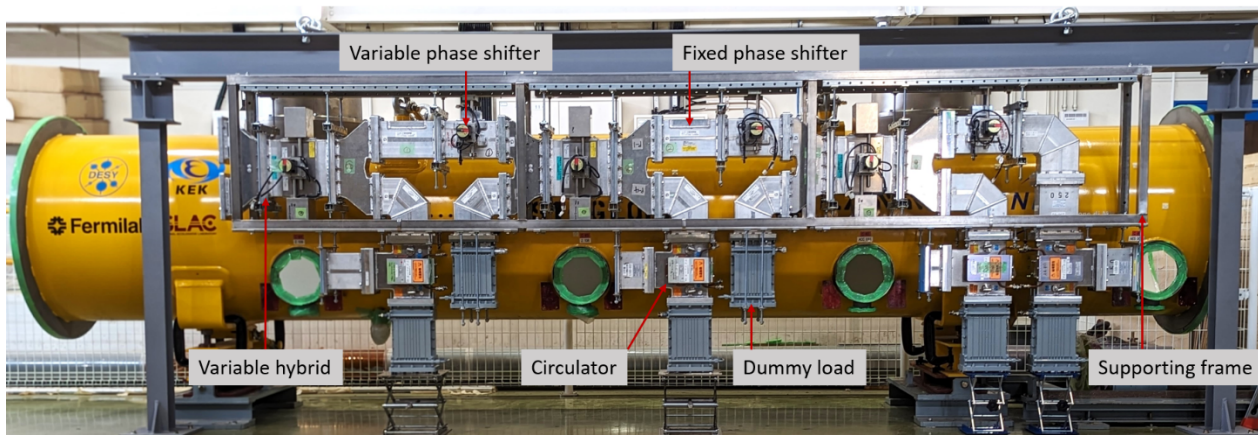


Figure 4: Demonstration of the cLPDS support system installation for integration with the CM.

系の電力透過率の計算結果は 72%である。ITN-CM の RF コンディショニング時に要求される最大電力は 2 MW 程度と見積られるため、STF 棟において 3 MW 程度のマイクロ波出力が必要となる。これは 10 MW MBK を用いる STF2 高周波系にとって、十分に達成可能なものである。

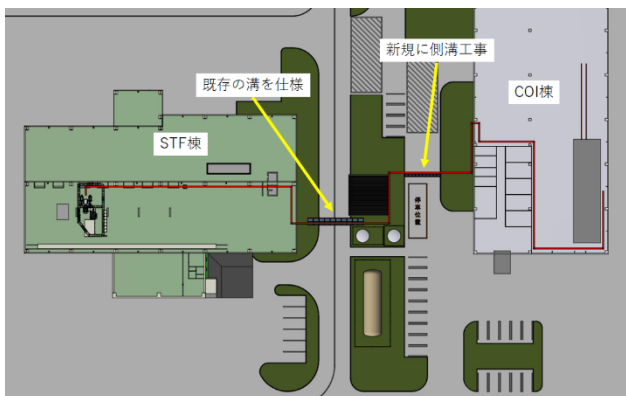


Figure 6: The proposed waveguide configuration layout between the STF and COI buildings.

### 3.2 低電力制御系

ITN-CM のマイクロ波コンディショニングでは、ビーム加速領域での 8 台の SC の振幅・位相のベクターサムが一定のフィードバック制御を行い、平均加速勾配が最大になる調整の後に最終的な評価を行う。また ITN-CM の安定な運転のため、チューナー制御により各空洞の離調を一定の範囲( $\pm 50$  Hz 程度)に抑える必要がある。これらの制御を行うため、STF2 加速器で同様の制御に実績のある ILC の LLRF 系での採用を視野に開発した 14 ch. の 16bit ADC、2ch. の 16bit DAC、2 つの光通信用 SFP モジュール、Zynq FPGA を搭載した MTCA.4 規格のデジタルボードを用いる。

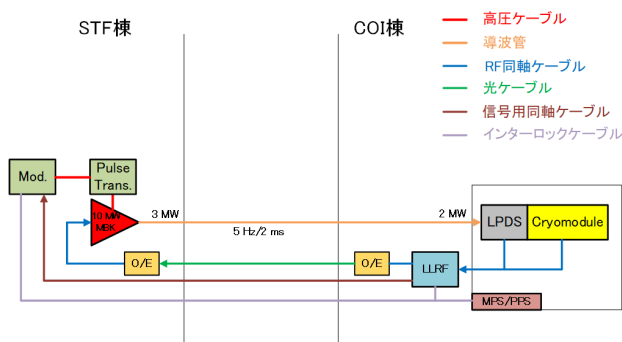


Figure 7: Layout of the RF system configuration for ITN-CM conditioning.

LLRF 系はバンカー近くに配置する予定であり、MBK への RF 入力、高周波源へのトリガー信号や MPS や PPS インターロック信号は COI 棟から STF 棟へ伝送する

(Fig. 7)。これら信号伝送については Ground loop 対策を十分に検討する必要があり、調査中である。

### 3.3 STF 高周波系を用いた導波管機器の開発

STF 棟から COI 棟までの導波管伝送系について、導波管接続にフランジを使わず溶接で延長する構成を検討している。この溶接の条件出しの試験を今年度に予定している。ここでは溶接で延長した導波管の接合面に対して、管内放電の有無を L バンドレゾナントリング[8]で確認する。

また、世界情勢により当初予定していた一部の導波管機器(ダミーロード、サーキュレーター)が入手困難な状況になっている。これらの導波管機器について、新規開発を進めており、STF 棟の高周波系を用いて大電力試験を進めていく。

## 4. まとめ

ITN が進めるワークパッケージの一つとして、8 台の超伝導空洞を組み込んだ CM とその試験設備の構築が KEK の COI 棟で進行中である。その一環として、ITN-CM のコンディショニングを行うための高周波系関連の開発が進めている。現在、CM と一体化した PDS 形状や高周波系の設計が決まり、2027 年度の運転に向けて準備を開始している。

## 謝辞

本研究は、文部科学省「将来加速器の性能向上に向けた重要要素技術開発」事業 JPMXP1423812204 の助成を受けたものです。

## 参考文献

- [1] The International Linear Collider Technical Design Report, Volume 3 II (2013), <https://linearcollider.org>
- [2] L. Evans and S. Michizono, “The International Linear Collider Machine Staging Report”, October 2017.
- [3] “Framework for the ILC Technology Network”, KEK and ILC International Development Team, June, 2023.
- [4] B. Du *et al.*, “Development of a compact Local Power Distribution System for the ILC”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A 2020.
- [5] 山本康史 他, “ILC に向けた STF-2 クライオモジュールによる 33 MV/m でのビーム加速実証”, 加速器, 2021 年 18 巻 3 号 p. 143-150.
- [6] P. Joshi *et al.*, “Waveguide System for an SRF Cryomodule in KEK”, IPAC2024, proceedings.
- [7] P. Joshi *et al.*, “Multi-cavity field emission at STF-2 accelerator in KEK”, 20th Annual Meeting of the Accelerator Society of Japan, Funabashi, 2023, pp. 572-576.
- [8] B. Du *et al.*, “High-power operation of an L-band resonant Ring”, 16th Annual Meeting of the Accelerator Society of Japan, Kyoto, 2019, pp. 884-886.