

ILC TDR における HLRF の追加的な仕様及び今後の KEK における技術的な 取り組みについて

ADDITIONAL SPECIFICATION OF HLRF FOR ILC TDR AND TECHNICAL TASK TO BE SOLVED IN KEK

福田茂樹^{#, A)} 及び ILC-GDE チーム¹⁾
Shigeki Fukuda ^{#, A)}, and ILC-GDE Team¹⁾

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

Abstract

ILC TDR was published in 2013 completing the 6 years designing after the ILC RDR. This paper describes the additional specification of HLRF for ILC TDR and the technical task to be solved in KEK. One of important issues which was not included in TDR was phasing issue when the cavity variation of plus-minus 20 % is accepted. This demand forced HLRF to introduce the variable tap-offs for the local power distribution system (PDS) and Kazakov type tap-offs shift the output phase when power dividing ratio is changed. In order to achieve the proper phasing to the beam, local PDS needs the fixed phase shifter. Pk-QL control for the ILC operation needs frequent operation of variable system. This paper considered this case. Japanese prototype rectangular waveguide window to separate from the pressurizing system is reported. Marx modulator is the baseline for the ILC modulator, and Japan takes a plan to have a technical transfer of this modulator from USA.

1. はじめに

TDR が上梓されそこで HLRF 関係のベースラインの基本設計がまとめられた^[1]。この TDR では 250GeV の電子と 250GeV の陽電子を衝突させることを Baseline としており、合計 378 台の 10MW クライストロンを使用する。1 本の 10MW クライストロンから 39 本の超伝導空洞(加速勾配 31.5MV/m)に電力を供給する。超伝導空洞は約 31m のクライオモジュールに 8 または 9 台設置されている。従って 1 本のクライストロンは 4.5 本のクライオモジュールに設置された超伝導空洞に電力を供給することになる。この数値が半端であるのは、将来 500GeV(電子) × 500GeV (陽電子) に増強した場合には RF 源 (クライストロンと電源) を倍にすることを前提にしているからである。超伝導空洞に電力を分配する導波管系は Local PDS(Power Distribution System)と呼ばれるがこれは空洞と PDS の対応するポートが 1 対 1 にリンクしていて増強の際もそのまま使用できるようになっている。

HLRF に関しては TDR の他に、加速器学会での報告がなされている^[2]。本論文ではまずこの TDR や文献 [2] で記述出来なかった Local PDS に関する仕様の追加について補足する。この PDS の追加補足は固定の移相器の追加についてであるが、Local PDS の Install Model を考慮して PDS のレイアウトを

変更した際に TDR で記述が漏れたものである。まず第 2 章で PDS の Installation Model と PDS の変遷について述べる。何故 PDS の Pre-install が必要かについてもここで述べる。

第 3 章でこの PDS に対する追加仕様について述べる。又追加された電力分割器と移相器は遠隔操作で制御可能としているが、これの操作が実際想定される運転のモードでどの程度頻繁に必要とされるかについてもここで考察する。ILC の基本設計は 250GeV × 250GeV を念頭に行われているが実際に運転開始する際は 125GeV × 125GeV から開始され、それぞれ RF のみの運転、ビーム加速アリの運転の順に Pk-QL 制御で LLRF のフィードバック制御が行われる。操作の頻度はこの LLRF 制御とも関連する。PDS は上流のピーク電力が高い部分は加圧雰囲気での運転される。下流は加圧が必要ないがそれを区切る導波管窓についてコストを含めた製作法の検討が行われている。KEK の試みについてもこの章で述べる。

HLRF の電源関係は Marx 電源を Baseline としているがこれに関する KEK の試みについて第 4 章に述べる。最後に KEK における近未来の Action Plan について触れる。

2. Local PDS のインストールモデル

Fig.1 に ILC-TDR に記載された Local PDS を示す。このシステムを ILC トンネル内でどのように組み込

[#] shigeki.fukuda @kek.jp

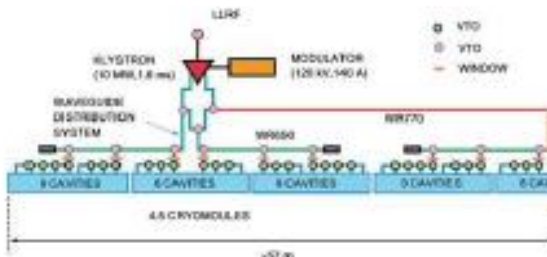


Figure 1: Local Power Distribution System

むかを検討した。ILC ではクライオモジュール内に組み込まれた超伝導空洞を連結しているビームダクトの接続と冷媒配管を現場で溶接など行って結合する。この作業は人×時間的な作業として大きなコストがかかる。現場で同時並行的に導波管系を組み込み、必要な測定や調整を行うのは現実的ではない。ILC-GDE で参考にしたのはユーロ XFEL における例である。彼らはクライオモジュールに PDS を固定し一体化してクレーンなどで運んでいる。XFEL の PDS は ILC よりも PDS が単純で後述のような可変電力分割器や移相器はないが、この方法の採用で時間とコストの短縮が期待できる。Fig. 2 にその写真を示した。

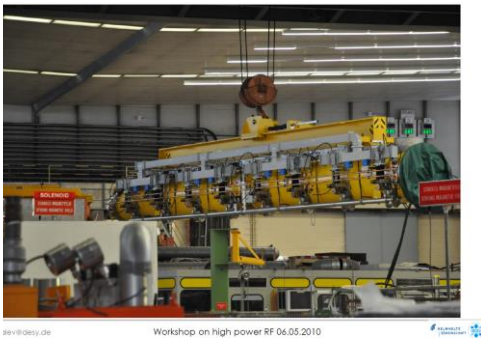


Figure 2: PDS assembled with cryomodule which is used in Euro-XFEL.

ILC-TDR ではかまぼこトンネルと称されるトンネルへクライオモジュールや PDS を設置する必要があるが、XFEL と同様の概念でクライオモジュールへ

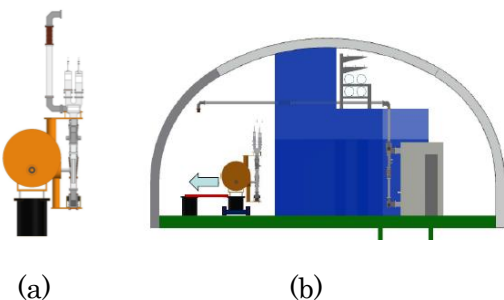


Figure 3: (a) shows the concept of PDS assembled with cryomodule in ILC. (b) shows concept of installation of PDS and cryomodule in ILC Kamaboko tunnel.

Local PDS を固定したものを一体として搬送台車で運搬し現地へ据え付ける方法を提案している。現在検討しているのは、クライオモジュールから支持用プレートを出して、1クライオモジュールあたり8乃至9個のサーキュレータを下側から、2個の変可2重Uバンド型電力分配器を上から抱きかかえる方式である。これを ILC のかまぼこ型トンネル内を搬送台車で移動しビームラインに据え置く。ビームライン側は簡易クリーンボックスを設置してフランジ止め作業を、その他の配管は溶接作業等を行うが、PDS 側は数か所の導波管フランジを接続する作業で済む。

超伝導空洞は全数縦測定で Q 値等を測定し、±20%に収まったものは適当に Q 値のばらつきを分散させてクライオモジュールに組み込む。PDS はこの第 0 次の空洞に必要な電力に合わせて、プリインストールされたシステムで調整を行い、それによって必要な移相器の 0 次の設定をあらかじめ別の測定室で行うことが出来る。又 VSWR の測定はフランジ接続の不具合を防ぐうえで有効である。現場にセットする前に大筋の調整等を済ませることはインストールとその後の調整に大きなメリットが期待できる。Fig. 3 にかまぼこトンネルへインストールする概念図を示す。

3. Local PDS の追加仕様と必要な R&D

3.1 Local PDS での電力と位相の可変機構の導入

Local PDS は極力安く製作することを念頭に置き最小限機能のみ有するシステムとして設計された。よって当初は電力分配器も固定比であった。一方で超伝導空洞の製造経験が蓄積されると、加速電界に関する製作上のばらつき、製作後の性能の劣化等が無視できなくなり、仕様値 (32.5MV/m) に対して ±20%の幅を許容することになった。このばらつきの範囲で最大限の加速効率を得るためには個々の空洞にあった電力を供給する必要がある。これは必然的に可変電力分配器の導入を必要とし、またその可変電力分配器の分配比変更に伴う位相変化に対して補正が必要となり、移相器の導入が必須となった。

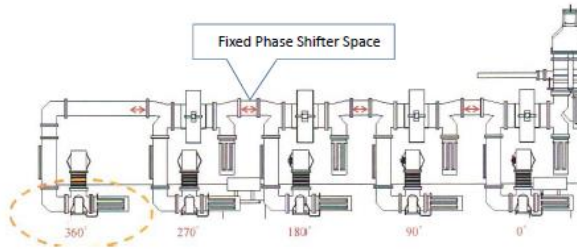


Figure 4: Example of linear power distribution system to divide the power to 5 branches. Distance among the cavities are determined by the beam accelerating phase (red number). Insertion place for fixed phase shifter is indicated by red arrow Variable phase shifter is set in the vertical line.

その概要は述べよう^[2]。まず Local PDS を 2 段階に分ける。電力の大きい部分は乾燥室素等の加圧した導波管系を用いる。ここには可変 2 重 U ベンド型電力分割器を使用する。この分割器は電力は可変しても位相は変わらない。電力の小さい部分は導波管窓で加圧系から遮断してから、4 段または 5 段のリニア電力分配系で各空洞に電力を分配する。空洞の性能が等しければ、4:1、3:1、…と分配されていく。この部分の分配器は Kazakov 型と称されるハイブリッドに 2 個のポート状のベインが挿入されたものである。大電力部の 2 重ベンド電力分割器と比べて構造がシンプルで製造コストが安くあげられる。一方で電力を可変にすると可変された RF は位相もシフトする。ビームを正しく Phasing するためにはこの位相シフト分を補正するための移相器が必要となる。この移相器は移相範囲が決まっているために全電力分割器及び全位相器の可動範囲中点に対して PDS がビームに対して正しい位相関係が成り立つように各空洞までの電気帳を合わせる必要がある。そこから分割器の動作に対し移相器が位相補償を行うことになる。

当初設計された PDS は U ベンド構造で折り返して空洞のカプラーに接続されていたのでこの U リンクへ位相調整用直管を導入することで 0 次の電気長調整をすることが出来た。インストールを考慮した PDS は Fig. 3 の (a) で示したように一平面上に導波管系がレイアウトされているため位相調整用の直管の挿入空間はない。一方でビーム進行方向には空洞の位置はビームの位相関係から決まる寸法に配置されている。直管の挿入空間がないために、固定位相器の導入が必要となった。5 分割するリニア電力分配系

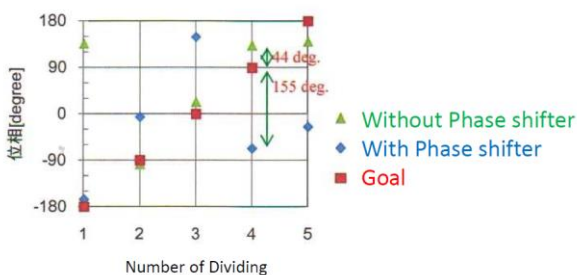


Figure 5: Phase for the beam with and without the fixed phase shifter.

の場合の様子を Fig.4 に示した。

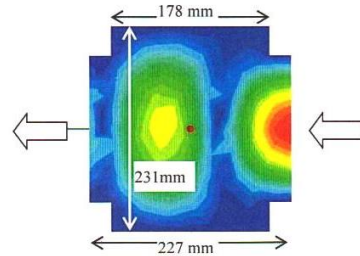


Figure 6: RF field pattern calculated by HFSS at the fixed waveguide phase shifter.

3.2 固定移相器

Fig.4 からわかるように許される挿入可能な空間は赤い矢印で示される直管部分のみである。この部分の固定位相を決める条件としてすべての空洞は Nominal な電力 (31.5MV/mの加速勾配) でかつ Fig. 4 の垂直部に挿入される可変位相器の位相可変範囲の中点にある場合を考える。まず固定移相器がない場合、すなわちそのまま WR650 の直管がある場合の各空洞でのビーム位相は Figure 5 における青マルで示した。これからわかるように Figure 4 における矢印部分は長すぎて位相が進み過ぎることが分かる。これを解決する一案として ILC の PDS の日本サイドで協力をお願いしている古河 C&B は導波管の長手方向の寸法を広げた固定移相器を提案した。この部分の HFSS による RF の様子を Figure 6 に示す。この固定移相器とポストによる整合で VSWR を概ね 1.08 以下にしたものを挿入した場合のビームに対する RF の位相を Figure 5 の緑三角で示した。赤四角が目標値である。これから Nominal な場合に概ね正しいビームに対する位相関係が得られた。

この固定移相器は幅が広い導波管構造を有しており、その部分をどのように製作するか、フランジ留めを考えた場合は規格外のものが become 必要になる。別案として通常の WR650 でリッジ型の導波管を導入する手も検討する価値はあるかもしれない。更に今後の検討課題として空洞のばらつきをカバーするときどこまで電力分割器の位相を可変移相器が追従できるかを調べる必要がある。これは 3.4 節で述べる将来の運転モードとの関係で重要なものである。

3.3 可変電力分割器、移相器の可変機構

ILC の PDS における可変機構の導入とそれに伴う遠隔操作はコスト的な上昇要因を含んでいる。いかに安くかつ故障頻度の少ない可変機構を導入するかは重要な検討課題である。特に Local PDS で導入する可変電力分割器と可変位相器はその RF 的な相互作用部分が共通であり、同じような駆動機構が必要である。現在いろいろと検討試作を行っているが重要な課題は両方向から等しく挿入するメカニズム、

及び RF の漏えいのない駆動軸の設計である。駆動軸はどうしても同軸構造に近い形状となり漏えいを完全になくすることは難しい。漏えいを認めて外部でそれを吸収するのも一つの方法である。

3.4 ILC の想定される運転モードと可変機構の操作

1 台のクライストロンから 39 台の空洞に電力を供給するので、それらを最適化するために、Vector Sum のデジタルフィードバック制御を行う。すでに述べたように各空洞の性能がばらつくためにそれぞれの空洞のクエンチリミットも異なる。これをカバーするために LLRF では PkQL 制御を行う^[3]。個々の空洞に合わせた電力供給（目標は平坦な勾配がクエンチリミットの 5% 下）する Pk 制御と負荷 Q 値の制御（QL 制御）である。この PkQL 制御では可変電力分割器と移相器の遠隔操作が必要となる。

ILC は 250GeV(e-)×250GeV(e+)を主たる実験のターゲットとしている。それが実現し必要な実験が終えたら更に倍のエネルギーへのアップグレードすることも考えている。しかし現実的にはまず 125GeV×125GeV から徐々にエネルギーを上げながらコミショニングと実験を繰り返していくことになろう。陽電子の生成率をある値以上に保つ必要性から 125GeV×125GeV は電子加速器が陽電子発生用のために 150GeV 電子加速と衝突用の 125GeV 電子加速の併用で 10 Hz 運転（他のエネルギーでは全て 5 Hz 運転）という変則的な形になっている。すべての段階で想定されるコミショニングの運転モードは、RF だけの運転、低電流加速（たとえば 1mA 以下）、徐々に電流を上げて仕様値である 6mA 迄の運転という手順になる。この場合はそれぞれの空洞に必要とされる最適な電力は異なるために上で述べた可変電力分割器を操作させて最適化させることが望ましい。個々でも可変電力分割器の遠隔操作で個々の空洞の電界の上限に近いところに動作点を持っていくことが必要である。基本的にこの部分でずれた位相を移相器で元に戻してやる必要がある。

以上のことから、ILC の運転に関する RF の役割としては超伝導空洞の個々の性能になるべく合わせた動作点を選ぶために可変電力分割器と移相器を操作させること、及び LLRF の PkOL 制御を行った電力供給をすることが重要であることが分かる。第 2 章で述べたプリインストール時の時の調整は、設置時に判っている空洞のばらつきに合わせた PkQL の出発点の設定をあらかじめ行うことを意味する。

3.5 導波管窓の検討

高電力伝送部と低電力伝送部の間には導波管窓が必要である。TDR では SLAC の Nantista が考案試作したものをを使用することを前提としている。これは (1/4) λ_g の厚さを持つ角形セラミック (39.4 mm 厚) を 10mm 強の電鍍による銅メッキを行いそれをアルミのフランジにロー付けするものである。実際に SLAC 内の工場ですべてを製作し使用した。一方日本

では厚い電鍍メッキを行うのは容易ではなくコスト的にも高くつくことが分かった。日立パワーデバイス社に同等の導波管窓の検討を依頼した。セラミック厚が厚いので技術的には難易度が高いものである。日立では、アルミナ側面に通常の Mo-Mn のメタライズを行いセラミックと膨張率がほぼ同じ純チタンに

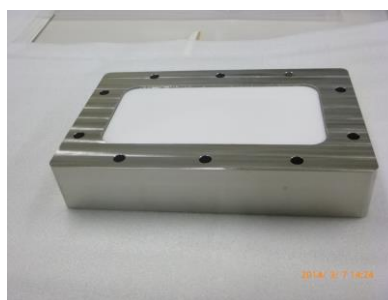


Figure 7: Rectangular waveguide window

直接ロー付けを行った。又ロー付け温度管理は比較的長い時間を使った。Figure 7 に試作品を示す。今後この方向で良好な結果を与えるものと期待している。コスト的にもそう高くないということでこの方法を主に試作検討するつもりである

3.6 PDS におけるその他の検討課題

TDR 執筆前の検討で PDS のコストは重要な要素であった。導波管コンポーネントが非常に多くあるために一つ一つの単価が大きくコストに跳ね返るからである。このコスト推定の日本における検討は古河 C&B で製造のコストモデルを作り算出した。この過程で明らかになったのはフランジのコストが無視できないということである。これは同時に組み立て時の人×時間的な積算にも無視できない部分を占める。具体的な構想はまだ明確になっていないが、極力フランジを減らした PDS を構築する必要がある。

大電力伝送系は乾燥窒素での加圧を念頭に置いているが、これに対する確実な評価がまだ（KEK では出来ていないのでこれも課題である。ここでは気密用フランジの規格の確認、O リングの規格及びアルミ溶接の確実性等の要素技術を含む。

今まで KEK において STF 試験装置で各コンポーネントの評価を行って来た。中でもサーキュレータ及び乾式ダミーロードでは、コスト競争力のある国内製品を模索してきた。しかしながら現状では XFEL など使われているロシア製のものに及ばない。日本の高周波関係の会社の奮起を望むところである。

4. マルクス電源

ILC における HLRF の TDR ではクライストロン用パルス電源のベースラインはマルクス電源である。従来は DESY/TESLA で開発されたバウンサー型 IGBT SW を用いたパルス電源が ILC-RDR で記載

されてからは KEK/STF ではこのバウンサー型電源を使ってきた。旧型も含め計3台のパル背電源が製作された。一方で TDR までの間に SLAC ではマルクス電源の開発を精力的に行い、非常に性能の良いマルクス電源 (P2) が完成した^[4]。KEK 及び日本ではこの大電力マルクス電源に対する技術的基盤がない。独自の開発計画を立てつつあるが、同時に SLAC からの技術移転を検討し、日本のメーカーとこの試みを進行中である。ただキーとなる IGBT が製造中止になったりマルクスモジュール内で使われているキャパシタの寿命が短いなどの問題があり、克服すべき課題が多くある。

KEK ではその他に、米国 DOE の SBIR ファンド (中小企業育成ファンド) で作られた DTI 社のマルクス電源も SLAC から譲り受けて評価試験を行った。最大定格を確認したがその後すぐ故障してしまった。これらを総合するとマルクス電源は性能的には期待できる技術ではあるがまだ完成された技術とは言えない段階で、もう少しじっくりと取り組むべきものではないかという印象である。

5. KEK-STF と今後の課題

KEK-STF では継続して試験が行われている。現在はビームを使った試験が進行中でありこれについての報告が本学会でも報告される^{[5][6]}。一方で将来の ILC 建設に向けた課題にも取り組む必要がある。Earth Cleaner 計画と称されるプロジェクトで超伝導空洞を量産する建屋が建設中であるが、そこに HLRF のワークステーションも一部作られる。ここでは Fig.2 のかまぼこトンネル内のレイアウトを模擬した HLRF の構築を目指す。又なるべく早く TDR の Local PDS と同じレイアウトを製作し、その使い勝手や問題点の洗い出しと、量産に向けた検討に着手したい。そこでは 3.6 節で述べた検討課題を中心に検討を重ねることになる。

参考文献

- [1] <http://www.linearcollider.org/ILC/Publications/Technical-Design-Report>
- [2] S.Fukuda, "HLRF Scheme in ILC-Toward the TDR (Technical Design Report)", Proc. of 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, THPS033, pp. 945-949, 2012.
- [3] M. Omet, H. Hayano, A. Kuramoto, T. Matsumoto, S. Michizono, T. Miura, and F. Qiu, "High-gradient near-quenched-limit operation of superconducting Tesla-type cavities in scope of the International Linear Collider", Phys. Rev. ST Accel. Beams *17*, 072003, 2014.
- [4] M. A. Kemp, A. Benwell, C. Burkhardt, D. MacNair and M. Nguyen, "The SLAC P2 Marx", Proc. of 2012 Int. Power Modulator and High Voltage Conference, San Diego, CA, June 3-7, 2012.
- [5] H. Hayano, "Superconducting Accelerator Development for ILC", presented in this Meeting, SUOM03, 2014.
- [6] T. Matsumoto et. al., "RF system for Quantum beam experiment and STF-2 in KEK-STF", presented in this Meeting, SUP051, 2014.