

## ILC 施設設計の現状

### STATUS OF THE ILC CONVENTIONAL FACILITY DESIGN

宮原正信<sup>#, A)</sup>, 山本明<sup>A)</sup>, 佐貫智之<sup>B)</sup>

Masanobu Miyahara<sup>#, A)</sup>, Akira Yamamoto<sup>A)</sup>, Tomoyuki Sanuki<sup>B)</sup>

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

<sup>B)</sup> Tohoku University

#### Abstract

As for the ILC project, an engineering design is progressing on the development of the final plan after Technical Design Report (TDR) publication of 2012. Especially review work about the design of the main underground structures such as an accelerator tunnel and the experiment hall cavern is mainly developed. That is because of the indispensable requirement to adopt these designs to the topography and geological conditions of the potential site. Especially, the revision work of the facility design which linked the modification of the installation method of the detector has been pushed forward in the experiment hall design. The extension plan of the ML tunnel is examined to prepare for future extensibility in the design of the accelerator tunnel. This report also describes the review work for optimization of the Shielding wall of Main tunnel and the equipment layout study of the helium cooling system.

#### 1. はじめに

国際リニアコライダー (International Linear Collider:以下 ILC) 計画は、国際設計チームによって 2007 年に発行された概念設計書 (Reference Design Report: RDR) に続き、2013 年春に新たな技術設計書 (Technical Design Report: 以下 TDR) が発行されている。これは RDR をベースに展開された、より詳細な技術開発と技術設計の成果を取りまとめたものである。現在、TDR の成果を基に、最終計画案の策定に向けて様々な分野で、より詳細な技術検討・工学設計 (Engineering Design) が進捗中である。

本編は、TDR における ILC 施設設計 (Conventional Facility Design) の全体像を紹介するとともに、TDR 後に進展中の主な技術検討 (変更設計など) について、その概要を報告するものである。本報告では、主として加速器トンネルや実験ホール空洞などの ILC 加速器の中核施設となる地下構造物に絞って、その計画概要を紹介する。ILC の建設プロジェクトは、設計期間と建設期間を合わせ、延べ 13 年間の建

設スケジュールが想定されている。現在、本プロジェクトの開始に向けた最終準備段階と位置づけられるが、本編で報告する技術検討課題は、いずれも最終設計にあたって必須の基本設計条件となる重要課題である。

#### 2. ILC 施設の全体レイアウト

ILC の主要な加速器施設は、Figure 1、Table 1 に示す通り、I 期計画で全長約 31km に及ぶ直線状の加速器トンネル (メインライナック/Main Linac とビームデリバリーシステム/Beam Delivery System で構成) と、中央部の衝突実験ホールおよび周長約 3.2km のリング状加速器トンネル (ダンピングリング: Damping Ring) で構成される。これらの施設は、その主要部が地下 100m 以上の大深度に設置される長大トンネルおよび地下空洞などからなる大規模な地下構造物である。また、これらの地下施設へのアクセスは、平均約 5km 間隔で設置される最寄りの地上アクセス基地 (約 10 箇所) からアクセストンネルや立坑などを経由して行なわれる。

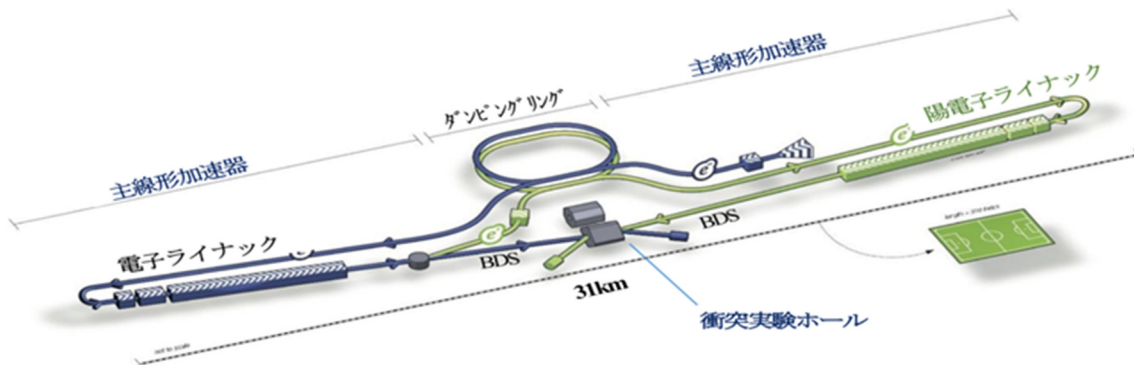


Figure 1: Overview of ILC Underground Facilities.

<sup>#</sup> masanobu@mail.kek.jp

Table 2: Main Underground Facilities (TDR)

電子ライナック部	中央部	陽電子ライナック部
<ul style="list-style-type: none"> <li>主線形加速器トンネル (約 11km)</li> <li>RTML トンネル (約 2km)</li> <li>アクセスホール (4 箇所)</li> <li>アクセストンネル (4 本)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>衝突実験ホール空洞 (L=142m)</li> <li>BDS トンネル (約 5km)</li> <li>DR トンネル (周長約 3.2km)</li> <li>アクセストンネル (2 本)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>主線形加速器トンネル (約 11km)</li> <li>RTML トンネル (約 2km)</li> <li>アクセスホール (4 箇所)</li> <li>アクセストンネル (4 本)</li> </ul>

### 3. 加速器施設の概要

#### 3.1 主線形加速器

主線形加速器(Main Linac:以下 ML)は、電子ライナックと陽電子ライナックの二つの線形加速器で構成される。これらの加速器トンネルは、ビーム軸方向上での直線性を厳密に要求される。中でも、電子・陽電子の二つの ML トンネルは、地球のジオイド面に沿った水平性が求められる。これは、ビームライン全長に渡って設置されるクライオモジュールに内蔵する冷却用ヘリウム配管内の液面の水平性を確保するためである。また、ML から衝突点に向かうトンネル部 (BDS) は、平面的にも縦断的にも厳密な直線性 (レーザーストレート) が要求される。

ML トンネルの標準断面は、Figure 2 に示すとおり、断面中央部に 3.5m 厚のコンクリート隔壁を設置し、ビームライン部と高周波装置部の二つの空間に区画される。この隔壁は、ビーム運転に伴う放射線の遮へいを目的とするほか、火災やヘリウムガス漏洩などの非常時には、空気の遮断によって片側のトンネルが避難路となり防災上の冗長性を確保することができる。また、底盤コンクリート (床版) の下部には、周辺からの地下水 (湧水) を集めて坑外に排出するための導・排水用トレンチが付設される。

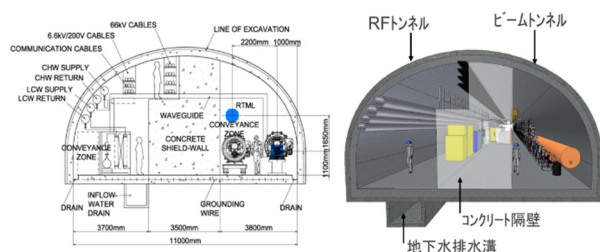


Figure 2: Main Linac Tunnel.

#### 3.2 ダンピングリング

ダンピングリング(Damping Ring:以下 DR)は、ML から入射された電子と陽電子ビームを極限サイズまで絞込んで生成した低エミッタンスの電子・陽電子ビームを ML に送り込むための重要な機能を担っている。DR 施設は、Figure 3 に示すようにレールトラック型の平面形状で、電子リングと陽電子リングが同じトンネル内に 2 層に設置され、電子ビームと陽電子ビームが反対方向に周回するシステムである。なお、リング部のトンネル断面は比較的小さな断面であるが、高周波機器・電源が設置される直線部は ML と同じ大断面トンネルで計画されている。

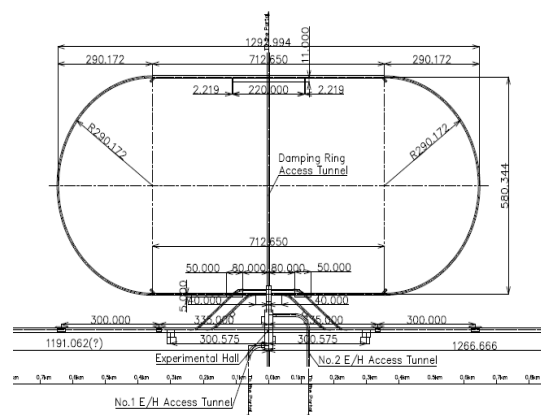


Figure 3: Damping Ring Tunnel.

#### 3.3 ビームデリバリーシステム

ビームデリバリーシステム(Beam Delivery System:以下 BDS)は、ILC 施設の中央部に位置し、ML から受け継いだ電子ビームと陽電子ビームを DR や衝突点まで輸送する全長約 6km の区間である。この BDS 区間には、単にビームを輸送する機能だけではなく、電子源、陽電子源、ビームダンプが配置される他、ビーム診断セクション、ビームコリメーション、最終収束ビームライン等の多岐に渡るビームラインが配置される。このように、BDS は極めて多種多様な機能や機器群が配置されるため、TDR 日本案では各々内空幅 8.0m および 4.5m の二つのトンネルが並行するツイントンネル構造で計画されている。

#### 3.4 実験ホール

実験ホールは、電子と陽電子ビームラインの交点 (ビーム衝突点) を中心点とし、ビームライン軸と直行方向に配置される地下空洞である。空洞は幅 25 m 高さ 42m の弾頭型 (アーチ+垂直壁) 断面を有し、全長 142m に及ぶ大空洞である。この実験ホールには、二つの測定器(ILD, SiD)が配置され、プッシュプル方式で交互にビームライン上に移動して衝突実験に供用する計画である。実験ホール空洞の平面、断面及び鳥瞰イメージを Figure 4、Figure 5 に示す。

二つの測定器は、いずれも重量が 1 万トンを超える巨大な装置で、測定器の搬入・据付は重要課題となる。TDR においては、地上のアセンブリー施設で仮組みされた測定器は所定のサイズに分割され、特殊な大型搬送車両でアクセストンネルを経由して地下に搬送され、実験ホール内で最終的な組み立て・調整を行なう計画とされた。この測定器の搬送に使われるアクセストンネルは、Figure 6 に示すとおり大断面のトンネル構造が必要とされている。

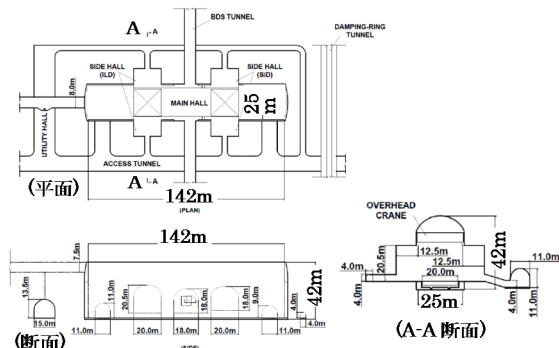


Figure 4 Experimental Hall.

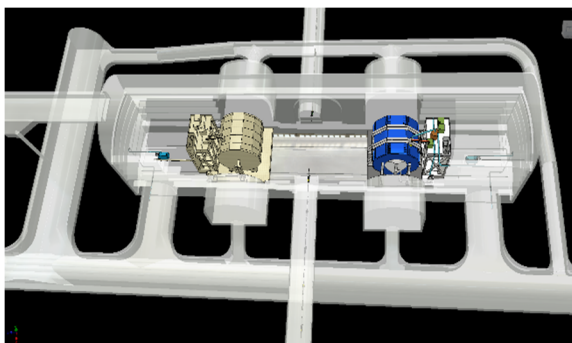


Figure 5: Bird's eye View /Detector Hall Cavern.

### 3.5 アクセス用トンネル

加速器トンネルや実験ホールに主要機器を搬送するためのアクセストンネルは、Figure 6 に示すとおり、搬送機器のサイズに応じて加速器用と実験ホール用の2種の断面で計画されている。また加速器用アクセストンネルはクライオモジュールの搬送条件からトンネルの最大勾配は10%以下に制限される。また、実験ホール用アクセストンネルは、大型測定器の搬送条件から7%以下と想定されている。

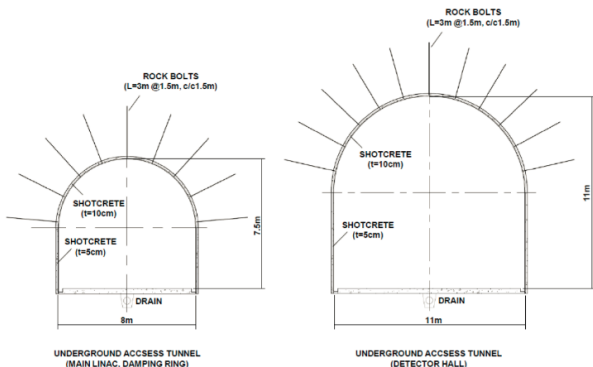


Figure 6: Access Tunnel /Cross-section.

## 4. TDR後の技術検討

ILC は、史上最大の規模を誇る直線型加速器を目指しているが、加速器を構成する実験機器は最先端のハイテク装置ぞろいである。そのためTDR発行後も基礎研究・開発実験が継続して展開されている。こ

これらの機器開発の進展や配置計画の進捗に伴い、装置を収納するトンネルや実験ホール等の施設計画も、当然ながら装置のレイアウトに連動した計画が求められる。現在LCCの国際設計チームによって活発な議論と技術検討が進められているところであるが、本節では議論の背景と施設計画上の主な変更点について、その概要を紹介する。

### 4.1 MLトンネルの全長(約3km延伸)

TDR では、ML を主とする ILC 加速器トンネルは、全長約 31km で計画されている。その後のビーム制御システムの詳細検討により、電子と陽電子のタイミング問題の解決を図ると共に、将来的に目標とされるビームエネルギー到達を確実にするため、電子・陽電子ライナックをそれぞれ 1.5km 延伸する案が浮上している。CFS グループでは、現在、この要求に対応して ML 終端と BDS 始端の境界部に各々 1.5km の空トンネルを挿入し、ML トンネル全長を約 3km 延伸する案を想定した検討を進めている。

### 4.2 MLトンネル断面(遮へい壁厚の見直し)

ML トンネルは、Figure 2 に示すとおり、内空寸法で幅 11m\*高さ 5.5m の断面で計画され、断面中央部には壁厚 3.5m のコンクリート遮へい壁を有している。TDR では、ビームロスによって発生する放射線の高周波電源装置などへの影響を考慮すると共に、ビーム運転中の RF 部でのメンテナンス要員の被曝を抑制するために必要な遮へい断面が検討された。さらに、TDR 発行後、ビーム運転シナリオと連動した放射化シミュレーションや、供用時の運転管理方針などに関する議論が活発に展開されている。現時点では未だ最終結論に達していないが、CFS グループでは、建設的な議論に資するため、建設スケジュールや工事費を含めた比較検討を先行して行なっている。その一例を Table 3 に示す。

Table 3: Comparison Study /Example

Baseline: SW3.5m	Option: SW1.5m
Original B/T 62.73m <sup>2</sup>	Revised 9m x 5.5m 51.92m <sup>2</sup>
Schedule: 65 ヶ月	Schedule: 60 ヶ月
Total Cost: 100%	Total Cost: 87%

### 4.3 ヘリウム冷却システム(Cryogenics)

ILC の主線形加速器は約 15,000 台の超伝導加速空洞ユニットを内蔵する 1,680 台のクライオモジュールで構成される。超伝導加速空洞は液体ヘリウムを充填したジャケットで覆われ、運転中は絶対温度 2 度 (2K=-271°C) に維持される。TDR までの技術検討では、日本の山岳地域の特性を考慮し、冷却塔を除くほぼ全てのクライオジェニクス施設を地下トンネル内に配置する計画とされた。これは、景観の保全や環境負荷を可能な限り軽減することを目指した

ものである。その後、国際的なクライオジェニクス専門家チームでの議論の中で、大量の液体ヘリウムを地下に貯蔵することの危険性が指摘され、2K冷凍機を除くクライオジェニクス設備を地上配置する案が浮上した。また同時に、大型コンプレッサーを地下に設置した際のリスク要因として、コンプレッサーの振動が超精密なビーム安定性に影響を及ぼす可能性も懸念された。現在、最終計画案の策定に向けた検討が行なわれているが、4.5K 冷凍機やヘリウム圧縮機および液体ヘリウム貯槽などを地上配置とする変更案が有力視されている。TDR におけるヘリウム冷却機器の配置案を Figure 7 に、新たなシステム配置についての基本概念を Figure8 に示す。

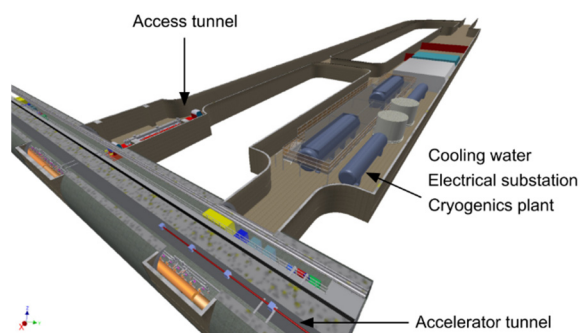


Figure 7: Cryogenics Plant (TDR).

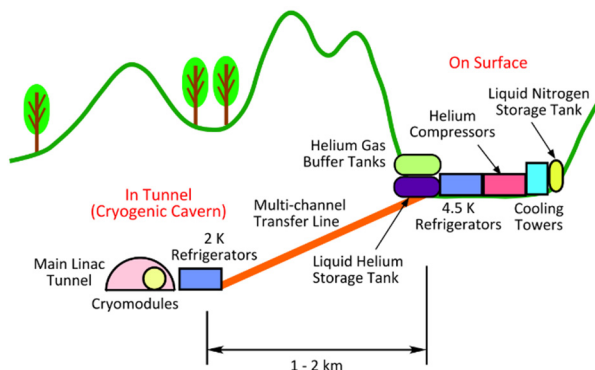


Figure 8: He Cooling System Layout.

#### 4.4 BDS トンネル計画 (トンネル構造見直し)

BDS トンネルは、ILC 施設の中央部に位置し、主リニアックから受け継いだ電子ビームと陽電子ビームをダンピングリングや衝突点まで輸送する全長約6kmの区間である。この区間には、単にビームを輸送する機能だけではなく、電子源、陽電子源、ビームダンプ等の重要施設が配置される他、ビーム診断セクション、ビームコリメーション、最終収束ビームライン等の多様なビームラインが配置されるなど、極めて多岐にわたる重要な機能が含まれている。

TDR 後の詳細検討の中で、BDS 区間のトンネル構造について、TDR で計画されたツイントンネル案からシングルトンネル案への変更を求める要望が出され、加速器チームと CFS グループによる議論と技術検討が継続されている。

#### 4.5 実験ホールへのアクセス施設 (立坑導入)

衝突実験ホールに設置される超大型の二つの測定器(ILD/約 15,000t, SiD/約 10,000t)を、地下実験ホールに設置するための搬送経路や手法は、測定器グループにとって極めて重要な課題の一つである。TDR の日本案では、山岳トンネルの建設で一般的に計画されるアクセストンネルを構築し、工事完了後は測定器の搬送用に活用することを前提として計画された。搬送手段は、所定の規模に分割した測定器を特殊な大型トレーラに載せて搬送する方式である。

このアクセストンネル方式に対し、欧米の測定器グループから、トレーラによる搬送では搬送ピースを 200 t 程度に細分割しなければならないため、地下実験ホールでの組立て調整期間の長期化への懸念が強まり、立坑方式の可能性を模索することが強く求められた。そこで、CFS チームは計画ルート上での立坑建設の可能性を探る調査と共に、建設コストやスケジュールについての比較検討を実施した。その結果、衝突点を移動することによって、立坑方式の導入の可能性および計画上の問題点を検証し、立坑導入を前提にした変更計画案を提示するに至った。この変更案は、既に LCC 内での多くの議論や審査を経て正式に承認されている。今後は、新たな地質調査結果などを反映した衝突点位置の設定、および地質調査データを反映した詳細な基本計画案の策定が求められている。

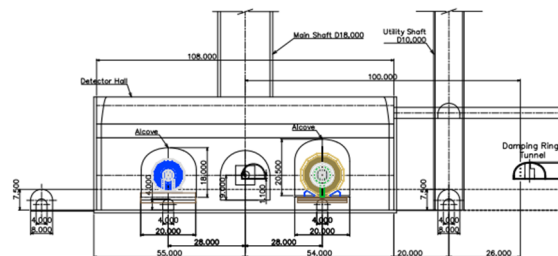


Figure 9: Detector Hall (Cross section).

## 5 最後に

ILC 計画は、現在、技術設計書(TDR)をベースに TDR で残された検討項目や新たに必要となった技術課題を含めた工学設計(Engineering Design)を展開している。施設設計に関しても、これらの検討結果を踏まえながら、来るべき設計段階に備えて、計画サイトの条件に立脚したより合理的な最終計画案の策定に向け鋭意技術検討を進めているところである。

## 参考文献

- [1] ILC-GDE, "International Linear collider: Technical Design Report", Jun, 2013.
- [2] 土木学会・岩盤力学委員会・ILC の土木工事に関する示方書策定小委員会, "国際リニアコライダー施設(ILC)の土木工事に関するガイドライン", Mar, 2014.