

国際リニアコライダー（ILC）施設の土木工事 に関するガイドライン（抄録）

土木学会 岩盤力学委員会
国際リニアコライダー施設の土木工事に関する標準示方書策定小委員会

本小委員会は、ILC施設の土木技術に関する課題や問題点を整理して、現時点で考えられる対応策を検討し、その成果をガイドラインとしてとりまとめている。これに対して、本書は、策定したガイドラインの公知を目的にして、本文の重要事項だけを抜粋して抄録としてまとめたものである。このため、詳細の検討を目的とされる場合は、ガイドラインの本文を参照されたい。

Key Words : *International linear collider, Collaboration between particle accelerator science and civil engineering, Underground openings, Guideline for civil works of ILC*

1. はじめに

土木学会の岩盤力学委員会は、岩盤工学の活性化に関する特別小委員会（西脇委員長、2004年4月）の答申を受けて、2006年、土木学会の岩盤力学委員会にリニアコライダー土木技術研究小委員会を設置して、岩盤力学とトンネル工学の活性化、ILC計画の実現および日本誘致に向けた技術的支援を開始した。これまで、高エネルギー加速器研究機構(KEK)と協働して、下記のような活動を実施してきた。

- ①（日本における）長大衝突型加速器計画の建設サイトに関する調査研究報告書（2009年）
- ②（日本における）加速器建設の土木技術に関する調査研究報告書（2009年）
- ③ ILC計画に関する技術検討会への参画（2007年以降）

2010年には、国際リニアコライダーの土木技術に関する示方書策定小委員会を立ち上げた。この委員会では、国内外のILC関連施設や建設予定サイトの現地調査、計画・調査の担当者へのヒヤリングを実施した。さらに、既往の同種の構造物の関連資料（大規模な地下空間利用施設の事例、建設時の指針や示方書など）を収集分析した。そして、日本におけるILC計画の推進に手戻りや重複作業が少なく、さらに、経済的で、高品質な建設が可能になるようにガイドラインを策定してきた。本書は、日本におけるILC施設の土木工事（主に、地下空間）に関するガイドラインであり、日本国内におけるILC計画に資することを目指している。しかし、一方で、海外での建設に対しても有効的に活用できるだけでなく、将来における大規模地下空間建設にも有効に活用されることが期待されている。

表-1 小委員会の部会と委員構成(2014年2月)

部 会	幹事, 委員
委員長, 企画運営 部会主査: 近久 博志 (株式会社システム 研究所)	顧問:坂口清敏(東北大学), 清木隆文(宇都宮大学), 三谷泰浩(九州大学), 幹事長:宮原正信(高エネルギー加速器研究機構), 来山尚義(復建調査設計(株)), 作業部会主査
計画調査部会 主査:真下 英人 (土木研究所)	顧問:市川康明(岡山大学), 幹事:武内邦文(株大林組), 委員:金井和彦(八千代エンジニアリング(株)), 倉持秀明(パシフィックコンサルタンツ(株)), 津崎高志(株開発設計コンサルタント), 西琢郎(清水建設(株)), 平川芳明(株ニュージェック), 藤原正雄(東北電力(株)), 松下典史(応用地質(株)), 松田武(株大林組), 安原英明(愛媛大学)
大空洞部会 主査:西本 吉伸 (電源開発(株))	顧問:清水則一(山口大学), 幹事:西村毅(株安藤ハザマ), 委員:池田博嗣(九州電力(株)), 関根一郎(戸田建設(株)), 松元和伸(飛鳥建設(株))
水平坑部会 主査:岩尾 哲也 (株高速道路 総合技術研究所)	顧問:西村和夫(首都大学東京), 幹事:笹尾春夫((公財)深田地質研究所), 委員:宇田誠(鉄建建設(株)), 蛭子清二(株奥村組), 岡井崇彦(西松建設(株)), 久慈雅栄(前田建設工業(株)), 小山倫史(京都大学), 松戸直人(株竹中土木), 宮沢一雄(東日本高速道路(株)), 寺本哲(大成建設(株))
特殊坑部会 主査:秋田 勝次 (鉄道運輸機構)	顧問:芥川真一(神戸大学), 幹事:坂口秀一(西松建設(株)), 委員:片山政弘(株熊谷組), 佐藤稔紀(日本原子力研究開発機構), 長沼諭(株鴻池組), 升元一彦(鹿島建設(株)), 舟橋孝仁(鉄建建設(株)), 山地宏志(三井住友建設(株))
防災部会 主査:岡部 治正 (株日建設計)	顧問:川端信義(金沢大学), 辻本誠(東京理科大学), 堀内浩三郎(株ロード・エンジニアリング), 幹事:小林薫(神戸高専), 委員:砂金伸治((独)土木研究所), 菊本智樹(株エコプラン), 下河内隆文(株竹中工務店), 西田幸夫(東京理科大学)

2013年に、IUPAP(International Union of Pure & Applied Physics)の下部組織であるGDE(Global Design Effort)が技術設計書(Technical Design Report: 以下TDR)を作成した。これに合わせて、本委員会では、ガイドラインの第一草稿を仕上げた。その後、広く関係者への説明会や討論会を実施し、多方面からの意見や要請を聞きながら、より現実的な内容に高めてきた。さらに、今後も、このガイドラインを基にして、いろいろな場を活用したILC施設の地下空間建設に関連して、活発に議論されることを望んでいる。そして、こうした議論やガイドラインによって、ILC施設が、より経済的で、高品質で、安全に建設されることを期待している。

本ガイドラインは、日々進化するGDEが作成するTDRの作業に並行して、策定したものであり、できる限り新しい情報を得て、検討を加えた。そして、本文をまとめるに際して、活用している情報の新旧にかかわらず、本文の目的や意図に沿って重要な項目に関しては、文中に残すこととした。このため、最新の計画にそぐわない記載が残っていることを含み置きいただきたい。

2. 委員会

(1) 活動目的

本委員会は、ILC施設が日本に建設される場合を想定して、トンネルや地下空洞の建設に関する課題や問題点を整理し、現時点におけるガイドラインを策定するものである。

(2) 委員構成

本委員会の委員構成を表-1に示す。

3. ILCの計画概要

(1) ILC計画の概要と経緯

国際リニアコライダー(International Linear Collider: 以下ILC)計画は、全長約31km(将来的には50kmに延伸)に及ぶ直線状の加速器をつくり、電子と陽電子の衝突実験を行うという超大型の研究プロジェクトである。本計画は、超伝導技術をはじめとする多岐にわたる分野での先端的研究成果と技術を駆使した加速器を建設し、超高エネルギーの反応をつくり出すことによって、未知の粒子発見と共に質量の起源や宇宙創生の謎を突きとめる世界最先端の素粒子実験を行うものである。図-1と図-2に、ILC計画の進展と施設建設のロードマップを示す。

ILC計画は、2004年に開催されたIUPAPで、世界で一つの電子陽電子衝突型加速器計画として推進することが決定された国際プロジェクトである。この計画を実現するために、翌2005年に、国際設計チームとしてGDEが組織された。以来、100を超える研究機関や大学が参加し、ILCに関する研究開発や建設に向けた様々な技術検討が展開されてきた。その最初の大きな成果として、2007年にILC概念設計書

(Reference Design Report: 以下RDR)が発行された。また、RDRに引き続き、より詳細な技術開発や技術設計の成果を取りまとめた新たなTDRが、2013年春に発行された。これを機に、ICFA(International Committee for Future Accelerator)の下部組織として、これまでのGDEに変わる新たな国際設計組織となるLCC(Linear Collider Collaboration)が発足し、ILCの早期の実現を目指して始動している。

折しも、素粒子物理学の分野においては、2012年にCERN(European Organization for Nuclear Research)のLHC(Large Hadron Collider)実験によって、「神の粒子」とされてきたヒッグス粒子が発見され世界的なニュースとなった。この実験結果により、2013年度のノーベル物理学賞がヒッグス粒子の存在を理論的に予言したヒッグス博士等に授与された。そして、このヒッグス粒子の物理的な性質を解明するための実験としてILC計画が注目され、早期建設への国際的な期待が高まっている。全ての物質に質量を与える起源とされるヒッグス粒子の解明に加え、宇宙を構成する物質の大半を占めると考えられている暗黒物質の謎や宇宙創生の謎の解明、さらには新たな超対称性粒子の発見など、全く新しい素粒子論や宇宙論を生み出す可能性に満ちたILC実験を切望する声が国際的に高まっている。

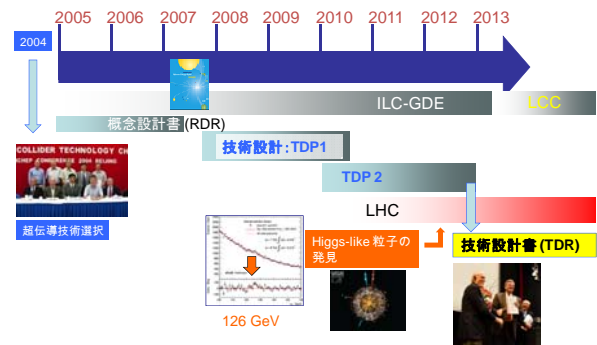


図-1 ILC計画の進展



図-2 ILC施設建設のロードマップ

一方、国際的な枠組みによる研究・技術開発の傍ら、国内的には日本の山岳サイトでのILC施設の建設を目指し、国内候補地の選定に向けた取り組みも展開されている。また、2012年から、国内の二つの候補サイトにおける地質調査が開始されると共に、国内でのILC立地を想定したプロジェクト推進上の課題抽出並びに中央キャンパスの創設に必要な基本

プッシュプル方式による検知器の移動に伴う床面（岩盤と一体構造）の許容変位量は±1mm程度以内という高い精度が要求されている。さらに、検知器の組立て・インストール手順及び実験ホールの詳細な構造設計は、ILC建設サイトの地形・地質条件に依存されることになる。しかし、ここでは、日本の二つの候補サイト共有の条件である花崗岩体が分布する山岳地域に建設される約1km程度の斜坑トンネルを使ってアクセスすることを基本条件にして、本書を策定することとする。実験サイドから要求されている実験ホールの仕様を表-3に、その断面と配置イメージとアクセストンネルの断面を図-4～図-9に示す。

表-3 実験ホールとアクセストンネルの仕様

1) 実験ホール
・空洞規模：幅 25.0 m, 高さ42.0 m, 長さ142 m
・空洞形状：弾頭形（アーチ+垂直壁）
・地盤性状：B~Ch級の岩盤（花崗岩など）
・内装仕上：吹付けコンクリート覆工
2) アクセストンネル
・断面規模：幅 11.0 m, 高さ11.0 m
・断面形状：馬蹄形（山岳トンネル工法）
・内装仕上：吹付けコンクリート覆工

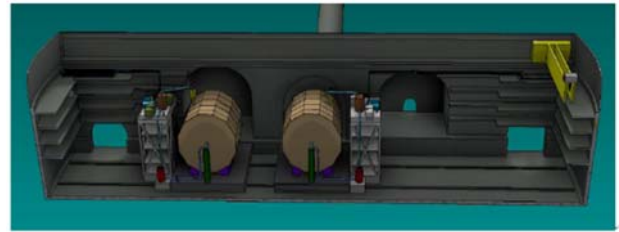


図-7 実験ホールの縦断面イメージ

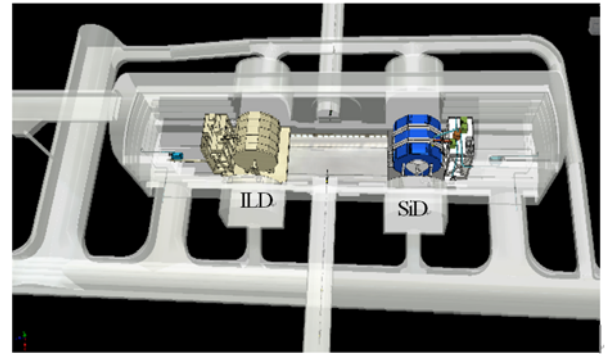


図-8 実験ホールエリアの鳥瞰イメージ

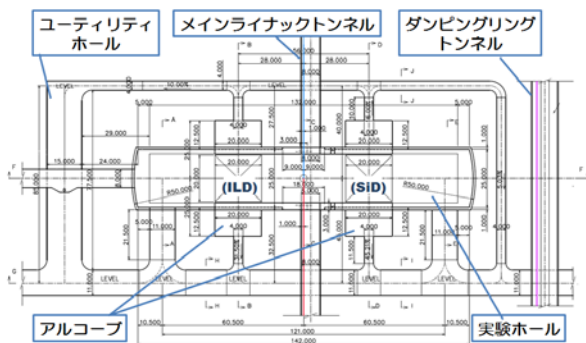


図-4 実験ホール平面図

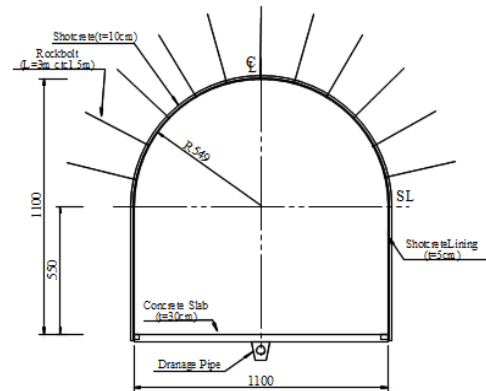


図-9 実験ホールへのアクセストンネルの断面図

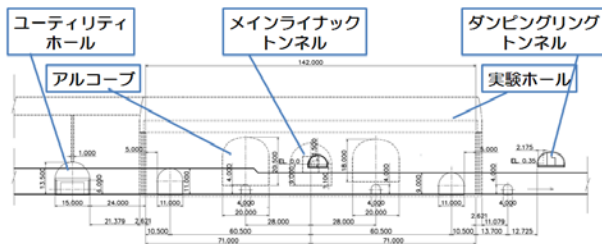


図-5 実験ホール縦断面図

b) メインライナック トンネル

図-10に、計画されているビームラインの全体レイアウトを示す。

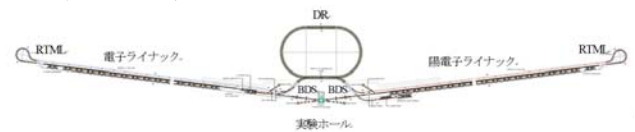


図-10 ILCビームラインのレイアウトイメージ

メインライナックトンネルの最大の特徴は、軸方向上の直線性を厳格に要求されていることである。図-10に示したように、電子ライナックと陽電子ライナックの二つのビームラインは、衝突点で微小な角度（14mrad）で折曲るが、平面線形は15kmに渡って厳格な直線性が保持されなければならない。また、縦断的には中央部のBDS区間ではレーザーシート直線性が求められる。一方、両サイドにある二つのライナックは、ジオイド面に沿った水平性が厳密に求められる。これは、ライナック全長にわたって設置されるクライオモジュールに内蔵され

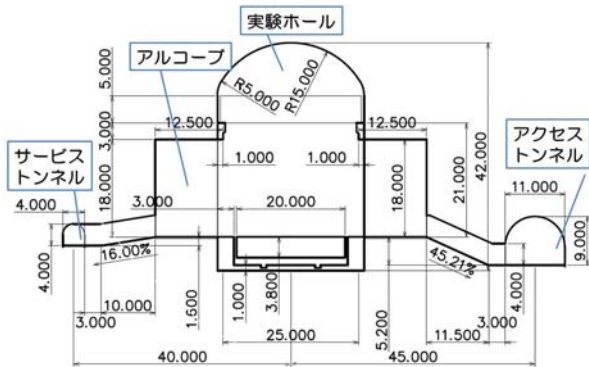


図-6 実験ホール断面図

る冷却用ヘリウム配管内の液面の水平性確保という加速器装置からの要求条件によるものである。しかし、メインライナックトンネルの工事費や工期などに大きなメリットがある場合、例外的な措置として、所定の配管断面サイズの中でヘリウム液面の水平性が確保できる0.5%まで、トンネル勾配を許容しても良いとされている。

表-4と図-11～図-14に、トンネルの仕様、メインライナックトンネル（電子・陽電子ライナック共に同断面）の断面図、イメージ図およびアクセストンネルの断面図を示す。

表-4 メインライナックトンネルとアクセストンネルの仕様

1) メインライナックトンネル
・断面規模：幅 11.0 m、高さ5.5 m
・断面形状：かまぼこ形(山岳トンネル工法)
・内面仕上：覆工コンクリート(内部流入をなくすための覆工背面での導水処理)
・付帯構造：中央隔壁、排水用トレンチ
2) アクセストンネル
・断面規模：幅 8 m、高さ 7.5 m
・断面形状：馬蹄形(山岳トンネル工法)
・内面仕上：吹き付けコンクリート仕上げ

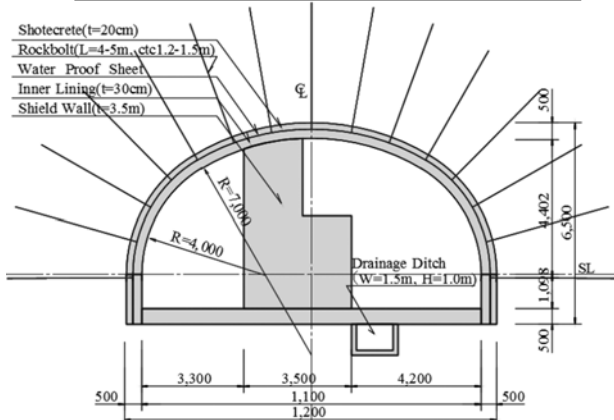


図-11 メインライナックトンネルの断面図

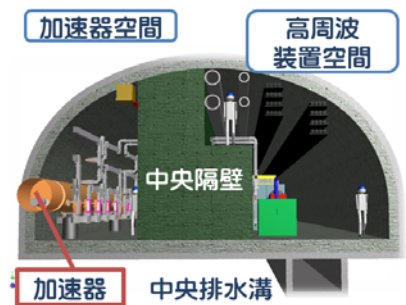


図-12 メインライナックトンネルの概念図

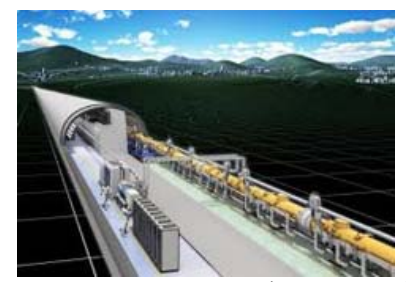


図-13 メインライナックトンネルのイメージ

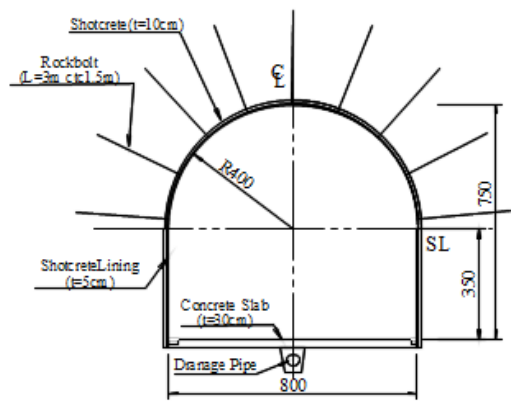


図-14 メインライナックへのアクセストンネルの断面図

日本が提案するメインライナックトンネルは、断面の中央に設置する厚さ3.5mのコンクリート製の隔壁によって、つぎのような二つの空間に区画されている。

- ①加速器空間・・・超伝導加速器（クライオモジュール）を設置
- ②高周波装置空間・・・加速器へ高周波を供給するクライストロンや電源機器などを設置

中央に設置するコンクリート製の隔壁は、ビーム運転によって発生する放射線を遮蔽することを主目的とする。また、ビーム運転中でも高周波機器のメンテナンスのために人が立ち入ることができるという大きなメリットを有している。さらに、万が一の火災やヘリウムガスリーク等の災害時には、この隔壁によって、片方の空間が避難路となり、施設の冗長性を確保することが可能となる。このトンネル構造は、大深度地下空間となるILC施設にとって宿命的な課題とも言える防災機能の向上に大きく寄与するものと位置づけられる。

トンネルは、掘削面に防水シートが設置され、周辺地山からの湧水がトンネル内部空間に流れ込まないように導水処置が施される。その後、厚さ30cm程度の覆工コンクリートが打設される。この防水シートの背面に流れる湧水は、覆工コンクリートの脚部背面に設置されるドレーンに、一旦、集められ、その後、トンネルの底盤コンクリートの下側に設置される中央排水溝を通じて坑外へ排水される。この導・排水システムを採用することによって、周辺地山からの湧水は、覆工や底盤の背面に設置されたドレーンや排水溝を通じて、トンネル内部に流れ込むことなく、直接、坑外に排水されることになるため、トンネル内部への湧水は極端に少なくなる。そして、減量化されたトンネル内部への湧水は、管理排水として全て排水槽に一時貯留され、厳格にモニタリングした上で処理される。一方、大部分の湧水は、覆工や底盤のコンクリートで遮蔽された状態のまま坑外に排水されることになるため、自然水として取り扱うことができるようになる。さらに、山岳地形の特徴をうまく活用すれば、現地の地形条件によっては、トンネルの覆工コンクリート背面で導水処理される湧水（想定平均湧水量0.6 t/min/km）は、ポ

ンプアップすることなく自然排水によって既存河川に放流することが可能性となるため、現在、現地調査と並行して計画予定サイトでの自然排水可能地点の探索も実施されている。

c) ダンピングリングトンネル

表-5、図-15および図-16に、ダンピングリングトンネルの仕様、平面図、断面図を示す。図-16は曲線部のものであり、直線部は、メインライナックトンネルと同じ断面である。また、ダンピングリングへのアクセストンネルは、メインライナックへのアクセスと同じ断面（図-14）である。

表-5 ダンピングリングトンネルとアクセストンネルの仕様

1) ダンピングリングトンネル	
・断面規模:	幅 5.5 m, 高さ 4.7 m
・断面形状:	馬蹄形(山岳トンネル工法)
・内面仕上:	覆工コンクリート(内部流入をなくすための覆工背面での導水処理)
2) アクセストンネル	
・断面規模:	幅 8 m, 高さ 7.5 m
・断面形状:	馬蹄形(山岳トンネル工法)
・内面仕上:	吹き付けコンクリート仕上げ

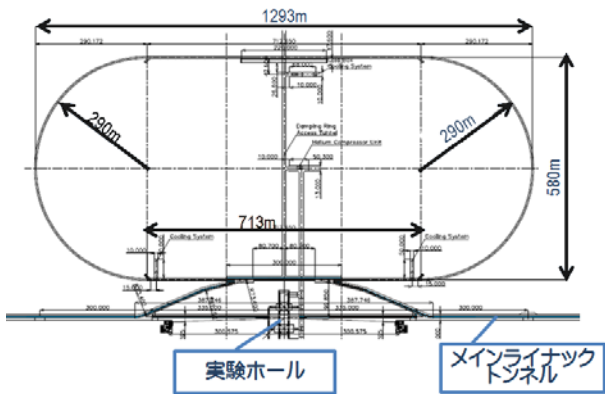


図-15 ダンピングリングトンネルの平面図

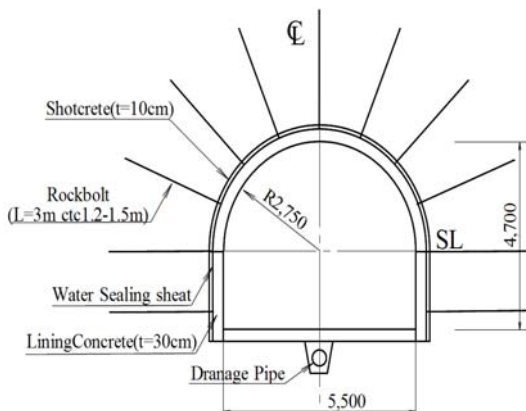


図-16 ダンピングリングトンネルの断面図

ダンピングリングは、ILCで要求される高いルミノシティを得るために不可欠の加速器である。このダンピングリングは、電子と陽電子のジェネレーターから入射された電子と陽電子を極限まで絞りで生成した低エミッタンスのビームを、電子と陽電

子のそれぞれのライナックへ送り込むための極めて重要な機能を担っている。ダンピングリングは、図-15に示すようにレーストラック形の平面形状で、電子リングと陽電子リングが一つのトンネル内に2層に設置され、ビームは反対方向に周回するシステムである。

d) RTML (Ring to Main Linac)

RTMLは、電子ビームと陽電子ビームをダンピングリングからメインライナックまで運ぶシステムで、ILC施設の中では最も長い15kmのビーム輸送ラインである。ダンピングリングから取り出された電子と陽電子のビームは、電子ライナックと陽電子ライナック内のビームパイプによって、ライナックの上流端部まで運ばれ、180度旋回して衝突実験用のビームとして供用される。RTMLは、大部分がメインライナックトンネル内に設置されるビームパイプであり、終端部の旋回部のみが独自のトンネル構造物（ループトンネル）となる。本ガイドラインでは、RTMLをメインライナックトンネルに準じて取り扱うものとする。

e) ビームデリバリーシステム (BDS)

BDSは、メインライナックの終端部から受け継いだ電子と陽電子ビームを、ILC計画の目標ルミノシティが要求するビームサイズに収束させて衝突点に送り込む、最終段階の重要な加速器である。また、ビームを輸送する機能以外にも、リニアックからのビームハローを除去して検知器のバックグラウンドを最小限にする役割と衝突前後のビームパラメータを精密に測定する役割など、多岐に渡る重要な機能を有している。現在、BDS区間における実験機器の試験開発が精力的に行われており、今後、トンネル規模や構造についても新たな要求課題が提起される可能性があるが、現時点ではTDRに向けて国際的に示されている標準設計案をベースに検討を進めることとする。

f) ILC施設建設スケジュールの概要

TDRにおけるマイルストーンとして、山岳サイトでの施工計画案に基づいた建設スケジュールを検討した結果、土木工事着手から実験機器の据付・調整完了後のビーム運転開始までの所要期間を約9年間と想定している。このうち、当初の約6年間はアクセストンネルや加速器トンネルおよび実験ホール等、主要な地下構造物・附属設備（電気設備・機械設備・防災設備）の建設工事期間とし、7年目から本格的な実験機器・実験附属設備のインストール作業を開始することが、基本スキームとして国際的に確認されている。

本ガイドラインの策定に際して、施工計画の立案や建設工期の検討は含まないが、設計と施工の指針として活用されることを想定し、上記の建設スケジュールを前提条件とした。

4. ガイドラインの概要

4.1 計画および調査

ILC施設の基本計画を策定するためには、まず初めに加速器が設置される長距離トンネルと検出器が設置される実験ホールのような大規模地下空洞の計画、調査、設計、施工を合理的に進めるための基本方針を定める必要がある。次に、ILC施設を構成するメインライナックトンネル、ダンピングリングトンネル、アクセスホール、アクセストンネルなどのトンネルや実験ホールの基本的な線形・断面・仕様は、平面・縦断線形に関する実験装置側からの要求性能を満足した上で、重量機材の搬入、湧水処理、換気・防災計画などを考慮して定める必要がある。さらに、地震時の施設設計として、加速器トンネルや実験ホールなどの地下構造物に要求される耐震性能を定める必要がある。

トンネルや実験ホールなどの地下空洞に関わる調査は、大きくは地山条件と立地条件の調査に分けられる。地山条件調査は、調査・計画、設計、施工、維持管理の各段階で行われる。計画・調査段階で実施する地山条件の調査としては、一般的な調査（既存資料調査、空中写真判読、地表地質踏査、水文調査、活断層調査など）とILC施設の独自調査（地殻変動、常時微動調査など）に分けられる。設計・施工段階で実施する地山条件の調査は、トンネルや実験ホールなどの地下空洞の地山条件の全容を把握し、設計および施工計画に必要な基礎資料を得ることを目的に段階的に精度を高めていく必要がある。また、トンネルや実験ホールの掘削に伴って発生する湧水は、施工の難易度だけでなく、周辺環境へも大きな影響を及ぼすため、適切な時期に必要なに応じて水文調査を行い、湧水量と周辺への影響の予測、評価を行わなければならない。一方、立地条件の調査は、環境調査（自然環境、社会環境、生活環境）、工事を規制する法規の調査、補償対象調査、既存インフラとの接続に関する調査から構成される。

4.2 大空洞

(1) ILCにおける大空洞

ILC施設における大空洞としては、実験ホールとアクセスホールがある。図-17に実験ホールの形状は示す。

実験ホールは、加速された素粒子を衝突させた時のデータを取るための検出器を設置する大空洞である。幅25m×高さ42m×長さ142mのメイン空洞に、アルコープと呼ばれる付属大空洞が付いた形状である。メイン空洞の規模は、大規模な地下発電所の規模に匹敵するものとなっている。

アクセスホールは、加速器を稼働させるために必要な、電気設備、換気冷却設備、超伝導のための液体ヘリウム製造設備等を設置するものである。このホールは、幅20m×高さ20m×長さ180mの空洞になり、メインライナックトンネルに直交して配置され

る計画となっている。また、メインライナックトンネルの5km弱の距離に1箇所ずつ設けられ、電子側、陽電子側それぞれ3箇所設置される。

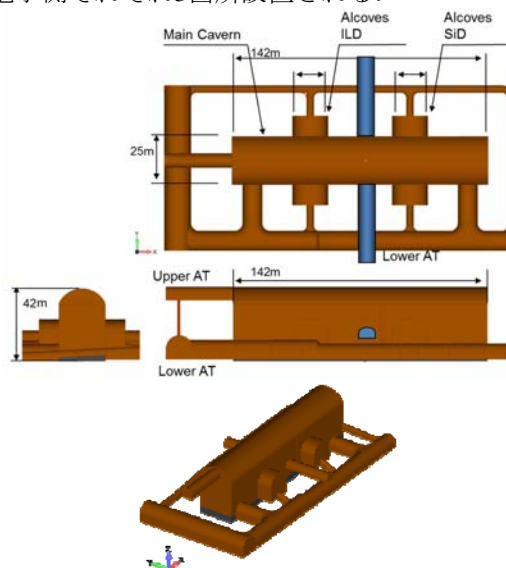


図-17 実験ホールの概略形状

(2) 技術的な課題

実験ホールは、大規模な地下空洞となる。そして、その中で精密な素粒子物理実験が行われるということ念頭に置き、以下の5項目を技術的課題として挙げる。

- ① 大空洞の静力学的安定性
- ② 大空洞の耐震時の動力学的安定性
- ③ 検出器の移動に伴う空洞周辺地盤の変位評価
- ④ 振動の影響の抑制
- ⑤ 実験ホールの環境保持

(3) 空洞の安定設計

非常に大きな空洞を掘削することから、空洞の安定設計上における阻害要因を少なくするための、配置計画の検討や空洞形状の選定を行うことが重要である。そして、配置や空洞形状が確定した後に、適切な支保部材によって、短期的にも、長期的にも空洞の安定が保つように設計されなければならない。

a) 配置計画や空洞形状

実験ホールなどの大空洞は、できる限り良好な地質の箇所に配置しなければならない。そして、初期地圧に異方性がある場合には、できる限り安定性が高まる方向に空洞を向けることが望ましい。しかし、非常に長いメインライナックトンネルの配置上の制約も重要であるため、個々の施設の自由度が少なく、実験ホールの設置位置や空洞の軸方向も施設の全体配置の中で決まってしまうことになるが、可能な範囲で最適化を図ることが望ましい。

掘削される空洞形状は、日本の地下発電所の事例から概ね図-18に示す形状に分類されている。初期の地下発電所ではアーチ部をコンクリートで支保するきのこ型断面が多かったが、最近では、吹き付けコンクリート・ロックボルト工法の考え方を適用し、

卵型断面や弾頭型断面の形状が多い。岩盤自体地質が良好な場合には無駄な空間が少なくなる弾頭型断面が経済的であるが、地質条件によっては側壁部のゆるみ域の進展を抑制することができる卵型断面の適用も考慮する必要がある。

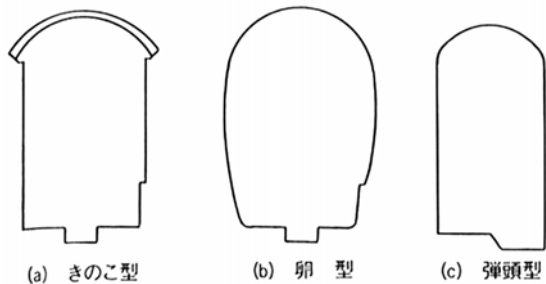


図-18 地下発電所に代表される大空洞断面の形状

b) 空洞支保設計

ILC施設は、長期間にわたり供用される施設であることから、長期的に安定性が確保できるようなものでなければならない。

大空洞の施工実績としては、国内外に地下発電所や地下備蓄空洞等の例が多くある。そして、その空洞は、吹付けコンクリート、ロックボルトおよびPSアンカーといった支保部材の特性を考慮して、力学的安定性が保たれるように設計されている。これらの地下空洞は、結果として、長期間に渡って安全に運転供用されている。こうした設計実績から判断して、実験ホールなどの大空洞の安定設計は、既往の地下空洞の設計手法が参考となる。また、工事期間中のみならず長期的に空洞安定性のモニタリングを継続し安定性の継続監視を行うことが重要である。図-19に地下発電所の長期変位モニタリングの事例を示す。



図-19 地下発電所の長期変位モニタリング例

(4) 地震時の空洞安定性について

ILC実験ホールにおいては長期間に渡って供用され、多くの研究者や技術者の立入りや、精密な機器装置が多数設置されているため、適切な耐震設計を実施することが望ましい。

一般に地下空間については地震の影響が少ないとされているため地下空洞設計において耐震設計が導入される例は少ないものの、高山祭りミュージアム（建築基準法）、原油地下備蓄基地（消防法）、石油ガス地下備蓄基地（高圧ガス保安法）においては、法令に定められた耐震設計が導入されており、既にいくつかの大きな地震に見舞われているものの耐震設計上の問題は生じていない。

耐震設計の一般的な手法としては、①静的震度法、

②応答変位法、③応答震度法、④動的解析法などがある。堅硬な岩盤の中に設置される構造物においては、地震波の伝播速度が早く波長が長くなる。そして、実験ホールの大きさでは、地震時には、空洞は位相差が生じることなく、ほぼ同一方向に揺れることになる。このため、原油地下備蓄空洞等の事例では静的震度を作用させる方法で耐震設計を行っており、合理的な設計手法であると考えられる。

応答変位法、応答震度法および動的解析法はより高度な設計手法となるが、深度が深く、堅硬な岩盤内部の空洞安定性を評価する上では大きな相違は発生しないものと考えられる。設置する岩盤の性状や深度を評価して、合理的な設計手法を適用しなければならない。

(5) 検出器移動と岩盤変位

実験ホールに設置される検出器は、ILDとSiDの2種類があり、定期的にビームライン上にプッシュプル方式で入れ替えを行い、実験に供せられる。それぞれの検出器は図-20に示すような約20m四方のコンクリート製のパレット上に置かれる。通常、これらの移動により支持する岩盤に変形が生じる。岩盤変形が生じると、検出器の底面のみならず、ビームラインやダンピングリング周辺まで影響を及ぼす可能性がある。ビームラインをはじめとして実験設備はナノレベルのビームコントロールが必要となるため、実験に有害な変位発生は排除しなければならない。図-21に、有限要素法による弾性変形解析の結果の一例を示す。岩盤の変形はある程度避けられないが、弾性変形やクリープ変形についてはあらかじめ把握し、検出器移動に伴う実験への影響が生じないようにしなければならない。

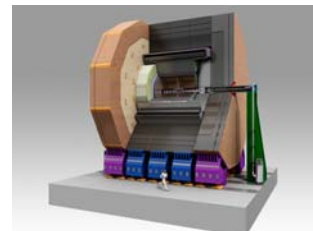


図-20 ILD検出器とパレット

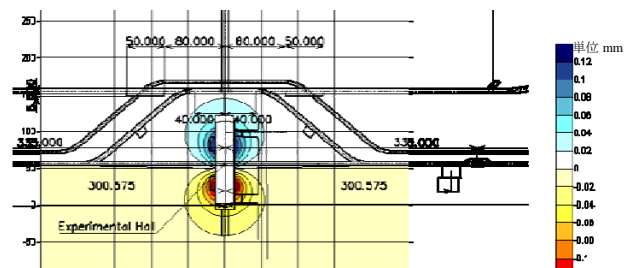


図-21 検出器移動に伴う周辺地山の変位挙動弾性変形解析の結果の一例

(6) 振動の影響

前項のような岩盤変位だけでなく、地盤振動によるビームラインへの影響も排除しなければならない。

現在の計画では、下記のような振動が予想される。

- ① 実験ホールや周辺に設置される機器類が発する振動
- ② 地上の生活圏にある車両の通行、工場やプラントの機器類が発する振動
- ③ 自然界から発生する地震動
- ④ 常時微動等の振動

例えば、実験ホール内に設置される装置の中で、検出器内にビームを導く最終収束マグネット（QD0：図-22参照）の部分が最も振動に敏感であり、5Hz / 50nmが目標許容レベルとされている。こうした装置に対して、周囲から伝わってくる振動の影響を調べて、許容レベル以下になるようにしなければならない。

具体的な対処方法としては、まず、問題を引き起こす可能性のある振動源となる設備や機器類を調査する。そして、振動に敏感な実験装置に対して、それらの振動が問題になりそうな場合、両者の離間を離すことによって、対象機器の振動が許容レベルにまで低減できるかどうかを検討する。震動源を離れた設備や機器の配置計画の変更だけでは、十分に振動レベルを低減させることが出来ない場合には、震動源や対象装置に防振対策を講じることになる。

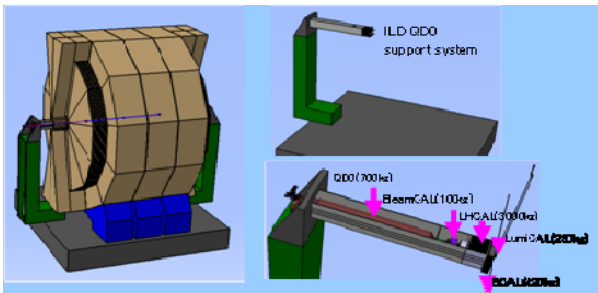


図-22 検出器のQD0の部分

(7) 空洞内環境

実験ホール内には、精密な実験装置を配置しているため、実験装置等に悪影響を及ぼすことがないように、温度や湿度を適切に保持しなければならない。トンネル温度は、25℃～30℃前後、湿度は50%以下前後、粉塵は人体や装置に影響を与えない程度にしなければならないが、特別な要件はない。温度・湿度は換気システムによって管理することができるが、空洞内への直接的な滴水や湧水はできるだけ排除しなければならない。実験ホールは地下水水面下に構築することとなり、地下水の湧出を完全に防止することは困難である。このために、実験ホール内へ浸入する湧水を削減し、特に、実験装置に滴水があたらないようにしなければならない。現在、図-23に示すような3つの方策が考えられているが、湧水の状況に応じて、いずれかの方策を適切に適用して、湧水処理を行わなければならない。

- ① 実験ホールに向かう地下水を周辺部で集水し排水する水抜き処理
- ② 実験ホール周辺の岩盤の高透水性の領域をグラウト注入によって低透水性にする湧水抑制

処理

- ③ 実験ホールに滲出しようとする湧水を実験ホール内に流出させないための裏面排水などによる漏水処理

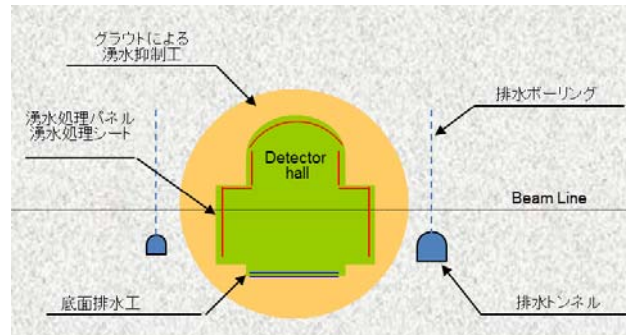


図-23 実験ホール周囲の湧水処理の概念

4.3 水平坑

ここでは、主として加速器トンネルの設計・施工上の課題を検討する。

(1) 設計

a) 設計手法

水平坑を設計するにあたっては、建設される地山の調査結果を十分吟味し、地山の有する支保機能を有効に活用するようにしなければならない。このとき、使用目的、使用形態、その他必要な条件を満たし、経済性、安全性、周辺への影響の程度、施工性、さらには、供用後の経済性、保守性等の保全業務に求められる条件を総合的に勘案して、支保部材等の設計しなければならない。

日本における山岳トンネルの設計手法には、以下のものがある。

- ① 標準設計の適用
- ② 類似条件での設計の適用
- ③ 解析的手法の適用

b) 海外の岩盤分類、支保パターンとの対比

2003年に、ISO14689-1:2003 “Geotechnical engineering – Identification and classification of rock – Part 1 Identification and description”（岩の判別と記載）が岩盤と地質に対する調査・試験技術に関する国際規格の一つが制定された。ボーリングコアサンプルや岩盤の露頭などを対象にして、地質構造、成因、不連続面の状態、風化の状態、鉱物組成、粒径、岩盤強度など岩の判別および記載に関わる岩盤分類のための基本的な分類の要素の抽出とその区分の基準を示している。そして、今後、世界の岩盤分類が、ISOに準拠する方向へと進むものと考えられている。

こうした動きの中で、ILC施設の事前地質調査に関しては、海外技術者との共通認識と理解を得やすくするためにISO14689-1:2003に即した調査項目と試験方法の採用、データ整理を行うことが肝要である。しかし、現状の国内外で活用されてきた地山分類は、上記のISOには対応していない。また、日本

の道路や鉄道の地山分類は弾性波速度を主な指標としている。しかし、海外の地山分類においては弾性波速度を指標とするものがほとんどないことから、両者の単純な対比は困難な状況にある。一方、海外において国際的に広く採用されている岩盤分類には RMR(Rock Mass Rating, Bieniawski, 1973)と Q-system (Barton, 1974)がある。こうした現状を踏まえて、本ガイドラインには、国内と海外の岩盤分類の比較ができるように、RMR によるパラメータと配点表、RMR 値とトンネル施工法および支保の選定表を示した。そして、Q-system による分類パラメータ、配点表、支保区分の選定図を示した。

c) 隔壁

メインライナックトンネルの中央部に設置する隔壁の構築は、一般的には型枠を設置して、コンクリートを打設する方法が考えられる。しかし、トンネル断面形状・大きさを考慮するとコンクリート打設作業は、掘削完了後の実施となり、工程が長くなる。さらに、マスコンクリートの施工方法、養生方法および覆工コンクリートのアーチ部と接触する上部隔壁部の分割施工などを検討する必要がある。

工程を短縮するためには、プレキャスト化が考えられる。このとき、プレキャスト部材製作ヤードと公道運搬方法、坑内搬入方法、組立方法などを考慮して、部材の大きさ・重さを検討しなければならない。継ぎ目構造としては、ほぞ継手のような簡易なものとする事で、組立精度とずれ止め効果が期待できる。

ここでは、一例として、プレキャスト方式の施工法を紹介する。プレキャストの1ブロックの寸法を、幅 1.75m×高さ 1.75m×奥行 1.3mとした場合、ブロックの重量は 10ton となり、移動重量の関係から隔壁下半部は4分割となる。プレキャスト部材の配筋は、製作・運搬・組立時のハンドリング時の状況に合わせた荷重のかかり方を考慮して決定しなければならない。また、一方で、つぎのような箇所は、場所打ちコンクリート仕上げを検討が望ましい。

- ① 覆工のアーチ部に接合する隔壁上段部は、プレキャスト部材による設置が困難である。このため、隔壁コンクリートと覆工コンクリートとを密着が必要な場合には、隔壁頂部は空隙を残した状態で打設を止めて、空隙部にはエア抜きを設置した状態で無収縮モルタルを注入する。
- ② 隔壁には導波管と電源ケーブル等のために、10～15m間隔でφ300mm程度の貫通孔が必要となっている。ここには、高周波高圧の電源管、電線が通るので、管内はドライ状態に保たれなければならない。このため、貫通孔については、コンクリート打設前に、所定の位置にパイプを設置しておくことが望ましい。
- ③ 連絡通路部(500m程度間隔に設置)については、通路の形状をプレキャスト化あるいは事前に設置した捨て型枠に場所打ちコンクリートを施工

する方法も考えられる。

d) 排水工

ILC 施設は、メインライナックトンネルの縦断勾配が、セントラル区間(実験ホールを中心とした5km程度の区間)ではレーザーストレート、それ以外では、原則としてジオイド面に沿って建設される予定である。さらに、加速器トンネルには、直接、外部と繋がっている坑口がなく、地表面からは、立坑や斜坑を通してアクセスする計画となっている。このため、加速器トンネル内の湧水(坑内水)は、一旦、アクセスホール(加速器トンネルとアクセストンネルとの交差点部に設置)に集められ、ポンプアップ方式によって、アクセス通路となる斜坑や立坑から坑外に排出されることになる。加速器トンネル内には、実験装置や各種機器類など、水分を嫌う電子装置や精密機器が設置されているだけでなく、研究者や技術者など、多くの人が常時立ち入って作業や維持管理を続けることになる。こうした精密機器や入坑者の水没事故を避けるためにも、設置する排水設備は常時稼働できるようにしておかなければならない。そして、この排水設備のために非常用電源を設置しておくことは、重要な停電対策となる。これに加えて、可能であれば、加速器トンネルに自然流下方式の排水トンネルを接合することが重要である。自然流下方式の排水トンネルとは、坑内水が、地上の河川まで極力自然流下するように設置する施設であり、加速器トンネルとの接合部は、坑内水が放流される河川より高い位置に設置されなければならない。このため、ILC 施設が建設される現地の地形に大きく依存し、限定された場所にしか設置できない。一方、前記した加速器トンネルの縦断勾配の制約のため、この排水トンネルを加速器トンネルのどの位置に接続できるかが、効果的な坑内排水システムを計画する上で重要な鍵となる。現地の地形と排水機能という条件を全て満足することは、難しいことである。しかし、自然流下方式の排水トンネル設置の可能性を探ることは、設置する排水ポンプとその稼働経費、非常用電源などの停電対策設備費の削減、さらに、加速器トンネルの安全性の向上につながるようになるため、非常に重要なこととなる。

坑内水は、レーザーストレートとなるセントラル区間の坑内水では、標高が低い中央部に集まる。一方、両側のメインライナックトンネルでは、縦断勾配がジオイド面の場合、溜まり水となる。また、0.5%程度の縦断勾配が設定できる場合には、延長上のいろいろな箇所に、坑内水を集めることが出来るようになる。縦断勾配が無い、もしくは小さくて、坑内水が自然流下しない区間では、通常、揚水のための軸流ポンプを設置した排水ピットを500m程度の間隔に設置し、水が自然流下する程度に縦断勾配を付けた排水溝でピット間を結ぶことによって、坑内水は導水されることになる。しかし、坑内水は、できる限りポンプアップを少なくする排水方式を採用することが望ましい。このため、メインライナッ

クトンネルやダンピングトンネルおよび実験ホールなど、施設全体の高低差を考慮して、坑内水は、効率的に導水し、坑外へ排出しなければならない。このとき、現地での坑内湧水量を基にして、つぎのことを検討することになる。

- ① 排水施設の縦断勾配
- ② 坑内水の導水方式（ポンプ方式、自然流下方式など）と集積箇所
- ③ 排水溝（路）の構造形式（暗渠、開渠）、構造寸法（断面形状、断面積）その補強方法（作用水圧、地山荷重、耐震性など）
- ④ 坑外への排出方式（ポンプリレー方式、自然流下方式など）
- ⑤ ポンプや配管などの使用資機材の取り替えや維持管理の方法
- ⑥ 沈砂・沈泥の量と処理方法（排水の清濁分離が出来ない場合や濁水が混じる可能性がある場合）

これらは、平常時や補修時だけでなく、電源停止や喪失などによる排水や揚水ポンプの停止時の滞留、湛水および沈砂・沈泥の影響とその対応も入念に検討しなければならない。また、停電事故などを含んで濁水が混じる可能性がある場合、排水溝や排水管の内部に貯まる砂泥の処置や流れる砂泥による管路の摩耗の可能性についても検討しなければならない。

(2) 施 工

a) 施工一般

施工に先立ち、工事規模、工期、地山条件、立地条件および周辺環境等を考慮して適切な施工方法、工事機械、設備等を検討し、安全で経済的な施工計画を立てなければならない。

メインライナックトンネル、ダンピングリングトンネルのみならず、プロジェクト全体の施工計画を立案し、他の地下構造物（アクセストンネル、実験ホール等）との整合性の良い施工計画を立てることが重要である。施工中においても地山および周辺環境条件の変化、地山の挙動等に注意し、適切な施工ができるよう必要な調査および計測を行わなければならない。

特に ILC 施設が計画されている地域に分布する花崗岩は、新鮮部は堅硬・緻密で安定した硬岩であるが、時に風化作用を受けてマサ化し、その影響が深部まで及ぶことがある。また、花崗岩は亀裂の発達した岩盤であり、ときに熱水変質や断層破碎による弱層が分布することもある。さらに、玢岩等の貫入、断層破碎帯や開口亀裂等を透水経路として突発・大量湧水が発生することもある。これらを念頭に調査、計測等を行わなければならない。施工中の現場の状況から、その施工方法が不適当と認められる場合には、安全確保を優先して臨機応変の処置を取るとともに、遅滞なく施工方法を変更しなければならない。また、隣接工区等との情報交換を行い、各工区が連携して対応を行うことが望ましい。

b) 環境保全

施工にあたっては、関係諸法規等を遵守し、騒音、振動、低周波空気振動、濁水、地表面沈下、構造物等の変状、汚濁排水、坑外の運搬作業による交通障害等の抑制、有害鉱物等による汚染防止および自然環境の保全に努めなければならない。特に、ILC 施設が計画されている花崗岩地帯では、ズリおよび湧水に自然由来の重金属（フッ素、ホウ素等）が含まれる場合があり、その場合のズリおよび湧水（濁水）処理については、十分に留意する必要がある。

c) 測 量

ILC 施設では設置される実験設備の関係から、床版面に要求されるレベル精度が非常に厳しいことに留意しなければならない。また、加速器トンネルにおいては、ジオイド面に沿った区間とレーザーストレート区間ではそのレベル管理が異なるため、必要な精度を確保できるように慎重に計画しなければならない。また、ILC 施設ではトンネル延長が30km以上にもなる長大トンネルであるにも拘わらず、加速器トンネルや実験ホールには、5km程度の間隔毎に設けられた横坑斜坑方式のアクセストンネルから取り付くことになる。しかも、メインライナックトンネルを始めとする加速器トンネルは、一般の構造物に比べて、その線形を保持するための要求精度が極めて高い。このため、坑外基準点の配置とその相互の位置関係を明確にすることは、ILC 施設の施工精度を担保する最初のステップとなり、極めて重要なポイントとなる。

d) 支 保

メインライナックトンネルの断面形状は、一般の山岳トンネルに比べて扁平であり、施工時には天端付近の安定性が乏しいため、吹付けコンクリートのじん性増加を目的として、繊維補強吹付けコンクリートや高強度吹付けコンクリートの必要性を検討することが望ましい。特に、ILC 施設は、運用開始後の補修は非常に困難であり、路盤沈下を含む変位挙動が生じると運用に大きな支障が生じることになる。このため施工時に十分な支保剛性を確保することが望ましい。

さらに、加速器トンネルは、アクセストンネルを通して坑外に繋がることになるため、トンネル施工中の換気距離が長くなるため、坑内の換気や粉塵対策は入念に行わなければならない。特に、吹付けコンクリートによって発生する粉じんは、抑制する必要がある。粉塵抑制剤の使用や大型集じん設備の設置等を検討しなければならない。

(3) その他のトンネル(ダンピングリング)

ダンピングリングトンネル拡幅断面区間はメインライナックトンネルと同一断面なので、中央隔壁コンクリート等も含めてメインライナックトンネルと同じ施工方法、施工管理方法を適用する。

ダンピングリングトンネルの標準断面は、最初に

掘削する拡幅断面よりも小さいので、施工機械や設備を小断面に適応したものを採用しなければならない。ここで、ズリ出しの方法として、レール方式と連続ベルコンの2種類が考えられる。プロジェクト全体の中での工程上の制約条件やアクセストンネル使用上の競合条件等を考慮して、合理的なズリ出し方法とそれに見合った施工機械、設備を選定しなければならない。また、ダンピングリングトンネルの標準断面区間には最大4箇所の切羽を設けて工期短縮を図ることができる。しかし、切羽数についても、プロジェクト全体の中での工程上の制約条件や設備のコストパフォーマンスを考慮して選定しなければならない。

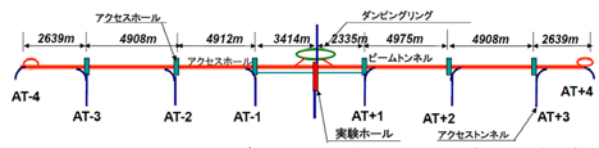


図-24 アクセストンネルの取り付け位置図 (I期計画)

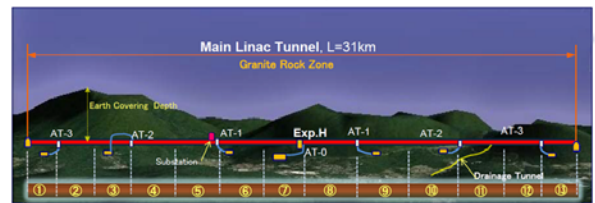


図-25 アクセストンネルの取り付けイメージ図 (I期計画)

(4) TBM

一般に長大トンネル掘削の場合、TBM (Tunnel Boring Machine) 工法による急速施工、安全性向上、地山の緩み低減およびTBM先進導坑による地質確認、水抜き、事前補強、換気効果等多くのメリットがあり、山岳トンネル工法の選択肢の一つとして検討されることが多い。このため、本ガイドラインの巻末資料には、かまぼこ形断面の採用を予定しているダンピングリングトンネルとメインライナックトンネルの先進導坑として径4~6m程度のTBM工法が適用されることを想定して、計画・調査・機械仕様・支保設計・施工管理等の手法について記載する。なお、ここでのTBMとは、グリッパーにより推進反力を確保し、ローラーカッターのくさび作用により岩盤を圧砕しながら掘削する軟硬岩対応型全断面トンネル掘進機をいい、ライナーのみに反力をとり、ティースカッター等で地山を切削しながら掘削するシールドマシンとは区別している。

4.4 特殊坑

4.4.1 特殊坑一般

ILC施設における特殊坑は、地上施設と地下の主要施設を連結し、施工時から供用時において動脈となる斜坑、立坑等を指す。以下に、アクセストンネル、排水トンネル、換気・測量用立坑やこれらの交差部・接続部を対象に、設計、施工、設備計画、周辺環境対策、維持管理について取りまとめる。

4.4.2 斜坑

(1) 一般

アクセストンネルは、実験ホール、メインライナック、ダンピングリング等の地下の主要施設へのアプローチのために活用されることになる。

現在の計画では、図-24 と図-25 のようにアクセストンネルが計画されている。

- ①メインライナックやアクセスホールへのアクセストンネル：8本
- ②実験ホールへのアクセストンネル：1本
- ③ダンピングリングへのアクセストンネル：1本

(2) 設計

アクセストンネルの各坑口には、以下の敷地面積が確保できるヤードが必要となる (表-6)。

表-6 坑口における主要地上設備 (I期計画)

項目	箇所	敷地面積
メインライナックトンネル用坑口	8	4,000m ²
実験ホール用坑口	1	20,000m ²
ダンピングリングトンネル用坑口	1	3,000m ²
中央受電施設	1	8,000m ²

平面線形はできる限り直線が望ましいが、曲線がある場合には、掘削時の資機材や供用時の最大実験装置の搬入が可能であるかを考えて線形を決定しなければならない。

縦断勾配は、掘削時のズリ運搬方法や供用時の実験装置の搬入により制限される。ズリ運搬のベルトコンベア方式は14°程度、タイヤ方式は7~8°を最大としている例が多い。搬入用の低床トレーラー (225t積×2台) の登坂能力は4°程度である。また、ヘリウム低温システムのコールドボックスや液体ヘリウム貯槽等は10°までしか許容されない。

トンネルの断面形状は、掘削時はズリ運搬方式や搬入機械の最大寸法から、供用時は実験装置の最大寸法から決定する。現計画では、実験ホールへのアクセストンネルは幅11m×高さ11m (図-9)、メインライナックへのアクセストンネルは幅8m×高さ7.5mとなっている (図-14)。

青函トンネルでの実績では、吹付けコンクリートの長期強度としての一軸圧縮強度等は、37年経過しても低下していない。このことから、アクセストンネルの覆工は、吹付けコンクリート仕上げを基本としても問題ないと判断できる。

(3) 施工

アクセストンネルは下り勾配の施工となるため、掘削中の湧水は切羽に溜まる状況となる。先進ボーリング、削孔検層等により切羽前方の地質や地下水を確認し、必要に応じて、水抜き工法、止水注入工法等の湧水対策を実施ことが望まれる。そして、吹付面からの滴水は導水措置 (モノドレーン、樋等)

により処理する。

(4) 設 備

地上設備は、ズリ仮置き設備、火薬関係設備、資材置場、コンクリート製造設備、電力設備、諸建物等があり、特に、ILC施設は多量の電力が必要なため、電力設備の増強や新設が必要となる。また、施工中の停電を想定して、非常用電源を準備しておかなければならない。坑内付帯設備は、下り勾配における排水設備が重要となる。一般的には、釜場で集水しポンプで坑口まで揚水する。

(5) 環 境

地下空間の施工が、周辺環境に悪い影響を与える可能性がある場合、適切な対応を実施しなければならない。施工時の周辺への影響は、一般論として、発破騒音・振動、工事用車両の騒音・振動や交通障害、重金属の溶出や工事排水による水質汚濁、坑内湧水による河川水や地下水の濁水や地盤沈下、薬液注入による地下水の汚染や地盤隆起、掘削時の緩みによる地表面沈下や近接構造物に対する影響等が挙げられる。また、完成後は、地下水の流出による河川や井戸の濁水、地山の緩みや地下水位低下による地表面沈下や陥没、薬液注入による地表水や地下水の水質変化が挙げられる。

(6) 維持管理計画

ILC施設は30年以上の期間にわたって使用されるため、維持管理を効率的に行うために初期点検を詳細に実施し、施工時の地質や変位状況をデータベース化しておくことが望ましい。例えば、初期点検には走行型計測車両による方法があり、吹付けコンクリート表面の画像および形状が記録できる。

4.4.3 排水トンネル

(1) 一 般

供用時はトンネル総延長が80kmとなり、坑内湧水量も多くなると想定される。鉄道トンネルの実績（表-7）を基にして見積もると、予想湧水量は50t/min程度（0.6t/min/km）になる。

表-7 トンネル延長と湧水量の実績

トンネル名称	線区	延長 (m)	実貫通時期(年月)	工事中の湧水量 (t/min)	完成時の湧水量 (t/min)	恒常湧水量 (t/min)
青函トンネル	津軽海峡線	53,850	S60.03	50.0	30.0	20.0
八甲田トンネル	東北新幹線 (八戸・新青森間)	26,455	H17.02	44.1	20.1	15.9
岩手ー戸トンネル	東北新幹線 (盛岡・八戸間)	25,808	H12.06	15.1	6.3	6.3
飯山トンネル	北陸新幹線 (長野・金沢間)	22,251	H19.12	25.5	19.0	13.7

計画段階では、この予想量を基本にして、排水計画を立案することになるが、できる限り周囲の地形を利用した自然流下方式の排水トンネルの採用の可能性を検討することが望ましい。

(2) 設計・施工・設備

排水トンネルの位置は、湧水が自然に集水することになる実験ホール付近の最深部が望ましい。また、メインライナックトンネル内にも設置する場合、坑内水は、底板下の排水溝に0.5%程度の縦断勾配を付けて自然流下させ、約500mおきにポンプで揚水して順送りする方法が考えられる。排水量、排水勾配、長さを検討した上で、有効な排水断面を決定しなければならない。

施工方法・設備は、「4.4.2 斜坑」に準じる。

4.4.4 立 坑

(1) 一 般

立坑の用途は、斜坑と同様に、人員の入出坑、資機材の搬出入、換気、施工時のズリ搬出を主とする。また、メインライナックトンネルの非常時には避難経路として役割を担う。立坑の特徴は、地上と地下を最短距離でアクセスできることにある。斜坑と比較して、深度200m程度を境に工期や経済性で有利になることが多いとされている。国内での代表例として、恵那山トンネル換気立坑（621mと571m）、第二阪奈トンネル（481m）、安房換気立坑（450m）等がある。

(2) 設 計

立坑の断面は、特殊な要件が無い限り空洞安定性の観点から円形とされ、寸法は施工時あるいは供用時の用途に応じて設定しなければならない。

例えば、超大深度立坑の標準工法であるショートステップ工法では、ズリ搬出後、数十分以内にコンクリートの打設が可能になるため、覆工だけでも十分な支保能力があるとされている。通常、良好な岩盤の場合は40cm程度の巻厚を採用することが多い。一方、地山不良部では掘削径を大きくして覆工厚を増大させたり、鉄筋を配置するなどの処置が施される。

大深度地下は地震に対して安定であるが、坑口や地表付近の地盤が軟弱な場合は、立坑の耐震性についても、慎重に検討しなければならない。

(3) 施 工

立坑掘削工法は、図-26のように分類できる。

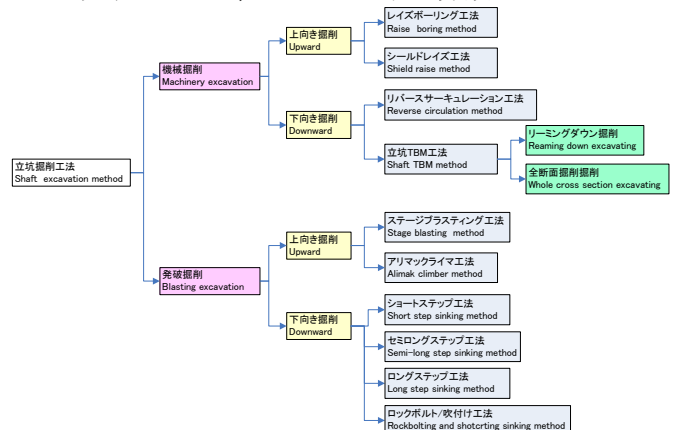


図-26 わが国の主な立坑掘削工法

わが国では、上向き掘削のレイズボーリング工法、下向き掘削のショートステップ工法が主体である。

(4) 環境

「4.4.2 斜坑 (5)環境」に準じる。

(5) 維持管理計画

「4.4.2 斜坑 (6)維持管理計画」に準じる。

4.4.5 交差部・接続部

(1) 一般

メインライナックトンネル、アクセストンネル、実験ホールおよびアクセスホール等が交差・接続する特殊箇所における設計と施工の考え方を示す。ここでは、つぎのように定義する

- ① 交差部とはトンネルとトンネルがある角度をもって接続する箇所 (図-27)
- ② 接続部とはトンネルが大空洞に接続する箇所 (図-28)

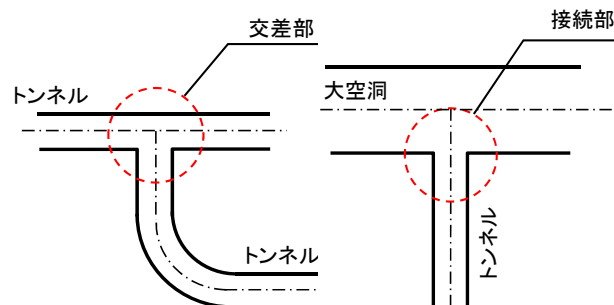


図-27 交差部の例

図-28 接続部の例

(2) 設計

交差部と接続部は、施工時と供用時、常に周辺地山が安定するように、支保部材、覆工、補強方法等を検討しなければならない。特に、設置箇所、地山条件および交差角度は重要であり、地山の良好な箇所を選び、かつ直角に交差するように配置することが望ましい。

交差部と接続部の覆工は、吹付けコンクリート仕上げを基本とする。しかし、下記のような場合には、覆工補強の必要性についても検討し、適宜、実施することが望ましい。

- ① 極端に悪い地質に遭遇
- ② 耐震性能が必要
- ③ 大断面かつ扁平で、局所的に大きな曲げモーメントが発生
- ④ 掘削後の変位挙動が未収束
- ⑤ 掘削中に大きな変状が発生
- ⑥ 多量の湧水に遭遇

補強範囲は、過去の事例 (図-29) や数値解析結果から定めることが望ましい。そして、補強は、ロックボルト、鋼製支保工および吹付けコンクリート等によって行われ、先受けや鏡補強等の補助工法も採用される。

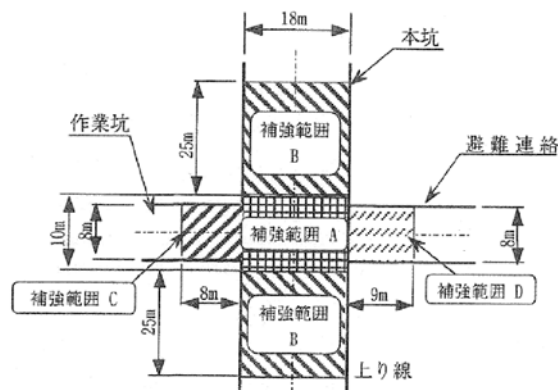


図-29 補強範囲設定の例

(3) 施工

交差部や接続部の施工は、先行トンネルの覆工完了後に後行トンネルを接続する場合と、先行トンネルが覆工未施工の状態の後行トンネルを接続する方法がある。前者は、先行トンネルの支保部材と覆工が一体となった剛な構造で地山荷重を負担する。一方、後者は比較的柔な構造で、地山荷重を負担することになる。

交差部や接続部の施工時の留意点としては、つぎのような事項が挙げられる。

- ① 効率的で、経済的な施工手順
- ② 地山条件
- ③ 計測管理
- ④ 掘削方法等

本文中には、過去の交差部・接続部の施工事例として、八風山トンネル、豊浜トンネル、関越トンネル、新日本坂トンネルを示す。

4.5 防災

下記の事象を想定し、防災計画を立てなければならない。

- ① 火災…漏電、スパーク、接触不良およびモーターコイルの埃による出火が想定される。可燃物としてはケーブル、コンデンサーおよびトランスのオイルの燃焼が考えられる。
- ② 浸水…雨水や地下水の浸入および配管からの漏洩が考えられる。
- ③ 停電…我が国においては商用電源が停電することは少なくなったが、安全性をさらに高めるために、停電時でも確保すべき非常用電源について検討しなければならない。
- ④ ヘリウムリーク…クライオモジュール冷却用の液体ヘリウムの漏洩が考えられる。
- ⑤ 地震…地震時の施設や設備の安全確保、ライフラインの断絶に対しての安全確保が求められる。

(1) 火災

既往の地上施設と同様に、人的被害の防止を目的に、施設・設備面だけでなくその管理や運用面に関しても安全対策を確立しなければならない。特に、

過去の地下施設での大きな被害は火災によるものが多く、安全の確保を検討する上で火災対策は特に重要な分野である。

火災は、出火、延焼等の段階を経て重大な災害に進展していくことになる。このため、まず、施設の不燃化や可燃物の減量化等により火災の発生や被害を極力抑えなければならない。そして、火災の初期の段階において適切な対策を実施することが重要である。また、加速器トンネルのような線的施設での施設の不燃化、可燃物の減量化等の火災発生抑止は、長大トンネルや高層建築等の類似する施設の安全対策の考え方を参考にした対策が必要である。実験ホール等の点的施設では、安全度の高い防火防煙区画の採用、入坑者や坑外関係者への情報伝達の適切な実施、防火防煙対策がなされた消防用進入路の適切な配置、状況確認のためのセンサーおよび非常用の通信施設の設置等の対策を実施しなければならない。

ILC 施設での点的施設については、高層建築の安全対策の考え方を参考としながらも、つぎのような事柄に留意して、高層建築とは違った対策を検討しなければならない。

- ①重力に逆らって地上方向に避難することによる避難時間の長時間化
- ②煙の流れと同方向への避難
- ③煙の流れる方向と逆行する消防隊の進入方向
- ④施設外部からの情報収集の困難さ

いずれの場合においても、火災発生時には、既存の類似施設において対策が講じられているように、火災の早期発見、火煙の拡大抑制、入坑者等の安全な避難、消防・救助活動の阻害要因の除去、防災施設と機器の日常の管理・運用を実施しなければならない。さらに、発生した火災が、他の施設に影響を与えさせないようにしなければならない。

a) 火災発生の抑制

地下空間となる本施設では、できる限り可燃物の使用や持ち込みを減らし、使用が避けられられないガス工作物などに関しては、可能な限り火災抑制対策を実施しなくてはならない。このために、実施すべき項目としては、つぎのような事項が挙げられる。

- ①不燃化対策
- ②可燃物の持ち込みの抑制
- ③火災の発生原因の排除
- ④ガス工作物の漏えい、火災、爆発の防止対策

b) 火災の検知、報知

発生した火災の拡大を防ぎ、入坑者の安全な避難を可能とするために、つぎのような火災の検知と報知のシステムを構築しなければならない。

- ①発生火災の早期発見のための検知システム
- ②火災発生時の火勢、延焼および火煙の制圧、拡大防止に関する意志決定に必要な情報の収集・伝達システム
- ③火災発生時の入坑者の避難誘導等に必要な情報の収集・提供システム

c) 避難

火災発生時、入坑者が無事に、安全な場所へ避難できるように対策を講じなければならない。このとき、入坑者の安全が確保されるように、必要な情報が確実に伝達され、避難誘導が迅速かつ円滑に行えるような情報伝達や避難誘導のための設備やシステム等を構築しなければならない。特に、大深度で長大な地下空間という施設特性を勘案して、安全性の高い防火防煙区画を適切に配置し、火災時に入坑者が、なるべく水平移動によってスムーズにその区画へ避難できるような工夫を施すことが望ましい。

d) 消防活動

火災発生時、火煙を制御し、その拡大を極力抑制する対策を迅速に講じなければならない。このために、円滑な消防活動が実施できるように、施設、設備、管理および運営に関して安全対策を講じなければならない。また、施設特性に応じて、防火防煙対策が施された消防用進入路の適切な配置、状況確認のための各種センサーや非常用の通信設備の設置等の対策を講じなければならない。

e) 防災設備の日常点検と定期的な防災訓練

火災の早期発見、早期制圧、拡大抑制および入坑者の安全確保のための設備や装置等が、火災時にも確実に作動するように日常点検を実施しなければならない。さらに、定期的な避難訓練を実施して、関係者間の円滑な情報交換や協力が行える体制を構築しなければならない。

f) 周辺施設への影響防止

火災発生時、周辺の住民や施設に被害を与えないように、構造物の延焼拡大・倒壊の防止対策を講じなければならない。ガス工作物については、漏えいにより、火災・爆発・中毒等が生じないように対策を講じなければならない。さらに、施設周辺住民等に対し、火傷・中毒等の影響を及ぼさないように対策を講じなければならない。

(2) 浸水

施設内に浸入してきた水は、一番低いところに集まることになる。この侵入水は、自然流下排水ができない大深度地下空間では、永年的に継続して、最も高い位置にある坑口までポンプアップして、坑外に排水されなければならない。大深度地下空間では、この排水システムが停止したり、排水能力以上の水が浸入すると、浸水空間の拡大や浸水被害の拡大に繋がりがやすい。また、もし浸水すると、入坑者の安全に支障を来すだけでなく、施設の運用も困難になる。さらに、施設内に設置されている実験装置が水に浸かり、その後の使用が不可能になる。このため、ILC施設の特性と現地の環境を勘案して、湧水、浸水および排水に関して入念で、十分な対策を実施しなければならない。特に、雨水や地表面水は、地下空間内部に侵入しないようにしなければならない。

そして、万一、集中豪雨や洪水時に、地上から流入する雨水などによって、突発的な浸水災害が予想される場合には、入坑者への情報伝達や避難誘導を迅速かつ適切に実施しなければならない。

a) 湧水、浸水および排水に関する対策

大深度地下空間となるILC施設で想定されている侵入水は次のようなものが挙げられる。

- ①洪水や集中豪雨時に坑口やその付近から流入してくる雨水などの地表面水
- ②地表付近の透水層に貯まっている、もしくは、流れている地下水
- ③空洞の周辺地山内に貯まっている地下水
- ④断層破碎帯や熱水変質帯などによる胚胎水
- ⑤開口性割れ目に沿って流れる地下水
- ⑥配管漏洩する冷却水

このうち②から⑤は、地山の湧水として大別されて、計画時点では、施設全体で50t/min (0.6t/min/km) 程度の量が想定されている。これらの湧水は、覆工コンクリートで止水しようとする、水圧が高くなり、分厚い巻厚と膨大な鉄筋補強が必要となる。このため、湧水は、通常、覆工背面の導水工とトンネルの中央排水溝とアクセス用トンネルやホール内の排水ポンプからなる排水システムによって、施設の内部空間に流入することなく、坑外に排水される。このとき、覆工コンクリートには、水圧が作用しないように処理がなされる。

通常、覆工背面の湧水は、トンネル内部に流入すると実験中に放射化することになるために、管理水として処置をしなければならなくなる。このため、防水シートや止水板などを適切に設置して、トンネル内部への流出を防がなければならない。また、排水システムが機能不全に陥ったり、排水能力以上の坑内水が発生した場合、実験空間が水没することになり、入坑者の安全性が確保できなくなったり、実験施設が運用不能になる。このため、補修時だけでなく、停電時や故障時の代替装置や予備電源装置などを含めて、余裕を持った排水システムを構築しなければならない。一方で、アクセス用のトンネルやホールに設置される排水ポンプは、メインライナックトンネル内にある坑内水をアクセストンネルの入口まで揚げ続けることになり、施設を閉鎖するまで停電時でも停止させることが出来ない。このため、排水設備の運転や維持管理の費用の節約にも繋がるので、地下空間内部への水の流入は、できる限り少なくなるようにしなければならない。例えば、“①坑口やその付近から侵入してくる雨水”に関しては、坑内の研究者、技術者および実験装置にも多大な影響を与えることになるため、十分な流入防止の対策を講じなければならない。また、上記の③～⑤のように湧水箇所が限定されている場合、可能であれば、トンネル掘削時にグラウト注入などの湧水の低減処置の可能を検討することが望ましい。

b) 避難

ILC施設では、浸水が生じた場合、大深度地下という特性から水の流れる方向に逆らって長い距離を避難せざるを得ない。このため、入坑者の避難に困難が生じるおそれがあり、現地の状況を勘案した適切な情報伝達と避難誘導を行わなければならない。そして、浸水の可能性が高い場合、周辺の水位の変化に対する早期の警戒を行わなければならない。また、浸水が発生した場合、その情報を迅速かつ正確に伝達し、入坑者を安全に避難誘導できるように、非常用設備の設置等の対策を講じなければならない。浸水時の避難や救助活動については、地下空間の被害事例や研究事例を参考に、安全なシステムを構築しなければならない。

(3) 停電

地下の実験施設は、移動手段、照明、空間設備等に電力が供給されることによって機能する空間であり、停電は、各種設備の停止だけに留まらず、これに伴うパニックなども含めて入坑者の危険性に繋がる重大な事態が発生する恐れがある。このため、万一、通常受電システムが停電した場合であっても、照明や換気等が継続して機能するようなシステムを構築しなければならない。さらに、エネルギー供給の安定性や信頼性を高めるため、複数系統の受配電システムを採用しなければならない。そして、電気供給側の事故等に備えて、十分な容量と稼働時間を持つ非常用電源装置を設置して、システム機能に著しい障害が生じないように対策を講じなければならない。特に、地震、火災、浸水等の災害に対しても、受配電システムや非常用電源は、耐震や耐火などの対策を行い、システムとしての信頼性に向上に努めなければならない。

(4) ヘリウムリーク

a) ヘリウムリークの対策

ILC施設では、既往の施設でも使用したことがない大量の液体ヘリウムが使用される。このため、設計段階で液体ヘリウムの特性、ヘリウムリークの可能性がある場所の特定、事故事例等を調査し、入坑者の安全確保のために、入念な対策を講じなければならない。

b) 避難

ヘリウムリーク発生時には、火災時と同様、入坑者を安全に坑外に避難させるための方策を講じなければならない。

(5) 地震

地下は、地上よりも地震動による影響を受けにくいとされているが、内部空間から外部空間に出る避難通路が、アクセトンネルなど限られている。このため、地震に対する安全対策としては、地震に対する坑内の設備や機器の補強、空気、水、エネルギーの供給ライン等の機能の低下防止など、入念に対策

しなければならない。

(6) 救急・救助活動

ILC施設の大部分が地下空間であり、出入口が限定されるだけでなく、上下方向の移動距離が長くなる。こうした特徴を考慮に入れて、救急・救助活動が速やかに行えるように、次の対策を講じなければならない。

- ① 消防隊員の救助活動や負傷者の搬送が円滑に実施するための安全な進入・退出路の確保とその情報提供
- ② 災害状況確認のための各種センサー等の設置
- ③ 救急センターの位置表示や連絡方法等の情報提供
- ④ 施設管理者と救急・救助関係者の協力体制の構築

5. おわりに

本小委員会では、日本におけるILC施設の土木工事に関する課題や問題点に対して、現時点で考えられる対応策をガイドラインとしてとりまとめた。これは、ILC計画では、これまで経験したことのないような地下の研究施設を計画している。しかし、一方、日本では、国道、高速道路、地下鉄、新幹線、上下水道を目的とした数々のトンネル、地下発電所、石油・液化天然ガスの岩盤備蓄基地などの大規模地下空洞の建設を続けてきている。こうした背景を勘案して、土木学会では、日本でのILC施設の地下空間が、経済的で、高品質な施設建設が可能にすることを目的に、これまでの施工経験を通じて培ってきた地下空間構築のノウハウや知見を集約させて、ガイドラインとしてまとめることとした。特に、道路、鉄道、エネルギー基地など、さまざまな目的で建設されてきた地下空間の構築技術の一つを集約させるという作業は初めての試みである。また、それぞれの技術を施工目的の違う地下構造物に適用しようとするのも初めての試みである。最終的には、同じような地下空洞を建設する場合であっても、設計・建設思想、用語や定義の違いなど、多くの差異や課題に遭遇することになる。このため、例えば、トンネル設計の基礎となる岩盤分類や地山評価などは、既存資料の並記と比較に留めざるを得なかった。しかしながら、3年という短い期間であったにも拘わらず、主査や幹事を始めとする参加委員の尽力により、多くの項目で、実務内容にまで踏み込んだものにまでまとめ上げることができたと考えている。このガイドラインは、今後、ILC計画の実務で、有効に活用して頂ける、さらには、本書を基にしてさらなる技術向上のための議論をして頂けることと信じている。そして、本書が、ILC施設の建設に際して、品質や安全性の向上、さらに、経済性の確保に役立つことを切に望んでいる。

一方、本書は、国内外における今後の大規模地下空間の建設にも役立てられ、さらに、今後の施工を通じて、内容の充実につなげて頂ければ、参加委員

一同、法外の喜びとするところである。また、これまで散見していた優れた技術やノウハウが一つになることによって、既往の技術がさらにスパイラルアップすることも大きな成果になると考えている。

最後に、本委員会は、ILC計画の実現というテーマを選び、社会ニーズに応えるために実施したニーズ駆動型の委員会活動である。この実験的な委員会活動が、土木学会の今後の他のテーマでも応用されて、新しいシナジーが創生されること、そして、結果として、学会活動の活性化に繋がることを心から期待している。

謝 辞

このガイドラインは、国際純粋・応用物理学連合（IUPAP）の将来加速器委員会（ICFA）が設置した国際設計グループ（GDE）が策定する技術図書（TDR）に合わせて策定することとした。このため、作業期間が3年という短くならざるを得なかったにも拘わらず、計画通りに無事完成させることができた。これは、主査や幹事を始めとする参加委員の懸命の尽力、さらには、土木学会岩盤力学委員会とトンネル工学委員会からの大きな協力の賜物である。また、委員会に参加している委員は、地下空洞建設の専門家であり、長年、培ってきた技術やノウハウに基づいて、真剣に検討して、ガイドラインをまとめた。そして、これまで建設されてきた国の道路や高速道路や新幹線や地下発電所やエネルギーの岩盤備蓄基地などの経験を通じて積み上げられてきた関係諸機関の基準類や示方書なども組み入れさせてもらえたことが、このガイドラインの充実と手際良い策定作業につながったと考えている。これに加えて、年2回の頻度で開催した研究討論会やパネルディスカッションでは、個別に作業してきた部会間の意見交換や調整、さらには、この策定作業には直接参加していない加速器土木の関係者や土木学会会員からの幅広い意見を拝聴する良い機会を与えていただいた。また、ここでは記載しきれない多くの方々から、重要な情報や貴重な示唆をいただいた。こうした多くの方々からの助言と指導に対して、この紙面をお借りして、あたらめてお礼を述べたい。