

日本における国際リニアコライダ（ILC）の地下空洞の計画の現状

高エネルギー加速器研究機構 榎本 収志
 高エネルギー加速器研究機構 宮原 正信
 山口大学 近久 博志

1. はじめに

国際リニアコライダー計画（ILC: International Linear Collider）は、世界で一つの計画として推進することが2004年に国際的に合意された電子陽電子衝突型の将来加速器計画である。日本では1990年代初めから"Japan Linear Collider"として世界に先駆けて研究が進められ、その後、アジア各国物理学者の参加を得て"Global Linear Collider"へと展開して、開発研究が進められてきた。2005年以来、ILCの加速器設計のための国際設計チームとしてGDE(Global Design Effort)が組織され、世界の100以上の研究所や大学から、数百名の加速器専門家や技術者及び高エネルギー物理研究者が参加し、ILC加速器の要素技術開発から加速器トンネルや実験施設を含む様々な分野の設計・開発作業が進められている。そして、ここでは、図-1に示したILC計画の全体スケジュールに沿って、GDEが2012年末にまとめる予定であるTDR(Technical Design Report)に対して、アジア地区から提案されている日本の2つのサイトに対する地下空洞の現状の計画を説明する。その後、土木学会委員会を組織して実施しているガイドラインの策定について論じる。

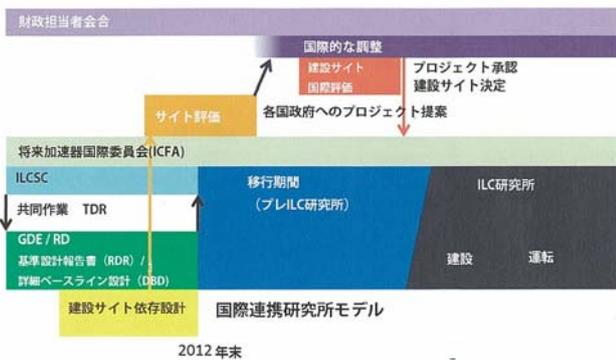


図-1 ILC計画の全体スケジュール

2. サンプルサイト

ILCの候補地は、つぎのような条件が整っている必要があるとされている。

- ①電力（特高送電線・電力潮流安定性）..
- ②地質（特に活断層がないこと、振動が小さいこと等）..
- ③アクセス・輸送が便利

これに対して、つぎのような5機関から6地点の提案があり、TDRのサンプルサイトとして提案機関が中心になって、

ILCの基本設計がなされている。

- ①フェルミ国立加速器研究所（FNAL：Fermi National Accelerator Laboratory）、アメリカ
- ②欧州合同素粒子原子核研究機構（CERN：European Organization for Nuclear Research）、フランスとスイス
- ③ドイツ・シンクロトロン研究センター（DESY：Deutsches Elektronen-Synchrotron）、ドイツ
- ④ロシア・ドゥブナ合同原子核研究所（Dubna JINR：Joint Institute for Nuclear Research）、ロシア
- ⑤高エネルギー加速器研究機構（KEK：High Energy Accelerator Research Organization）日本

この提案の中で、欧州の高エネルギー物理研究の中核となっているCERNは、スイスのジュネーブの郊外の既存の実験施設の近くの地点をサンプルサイトとして提案している。ここでは、図-2に示すように、土被り180～250m（一部50m程度）の地点にILCの加速器トンネルを建設予定である。この地域の地質は、ジュラ紀の基盤岩の上に広がっている難透水性堆積岩であるMolasse層（長石質の砂岩が石灰質で膠結された岩石、第三期堆積岩）である。また、加速器トンネルは、ジュネーブの南西部に位置するAllondon川の溪谷部のおぼれ谷を通り、トンネル掘削中に異常出水の遭遇することが懸念されている。1TeVの加速エネルギーを得るための2期工事では、ジュネーブの北東に位置するGland溪谷まで延伸され、ジュラ紀の石灰岩層を掘削することになる。一方、北米イリノイ州シカゴあるFNALは、現施設の周辺地域をサンプルサイトとして提案している。図-3に示すように、この地域の地質は、ドロマイト（苦灰岩）。ドロマイト質の頁岩、石灰岩および砂岩からなっている。加速器トンネルは、土頭り120～150mの地点に建設する予定である。掘削地点の地質は、中粒径のドロマイトであるGalena Platteville層であり、上位に、15～30m厚の透水性の低いMaquoketa頁岩が覆っており、地表面からの地下水を遮断しているとされている。この地域では、ILC施設に問題となるような地震は発生して居らず、当該地区での断層は1本しか確認されていない。

いずれのサイトも比較的平坦な地形をしており、均質な軟岩地山を掘削することを計画している。また、現地では、すでに加速器トンネルや灌漑用トンネルをTBMで掘削した経験を持っており、ILCの施工計画や見積もりが実施し易いという環境にある。

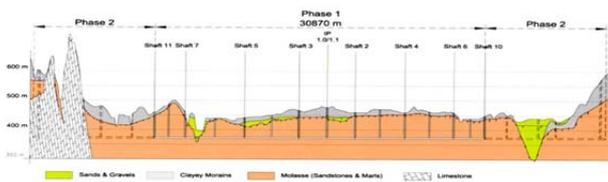


図-2 欧州のサンプルサイトの地質断面図(CERN)

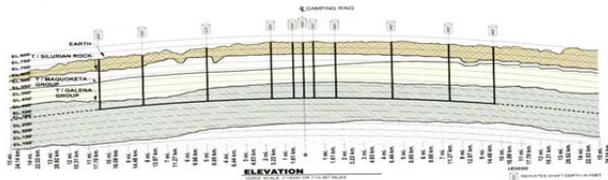


図-3 北米のサンプルサイトの地質断面図(FNAL)

これに対して、アジアの高エネルギー物理研究の中核を成している KEK は、図-4 のように、里山と呼ばれている日本の2つの山岳地域をサンプルサイトとして選んだ。

- ・北上サイト・・・岩手県北上山地南部に分布する白亜紀に貫入した花崗岩体からなる人首岩体と千厩岩体に南北方向に施工する計画である。加速器トンネルの施工位置は、全体的に白亜紀の新鮮な花崗閃緑岩が広がっており、既往の地質調査では顕著な断層破碎帯は確認されていない。各岩体は、南北 55km、東西 5～10km と細長く分布しており、その接合部の岩体は、東西幅が数 100m と狭く、石炭紀の粘板岩に挟まれるように分布している。土被りは、図-5(a)に示すように、北と南で 50～60m 程度になるが、衝突点付近では 650m 程度になっている。
- ・脊振サイト・・・北部九州で最も広く花崗岩体が分布する脊振山地に位置し、福岡県と佐賀県にまたがっている。東西方向に計画している加速器トンネルの土被りは、図-5(b)に示すように、東部は 200m 程度の丘陵地、中央部は 500～1000m の山地、西部は 100m 以下の丘陵地になっており、西部の丘陵地に最低土被りが 50m になる松浦川がある。最大土被りは 900m であり、衝突点付近では 650m 程度になる。最小土被りになる松浦川付近も含めて、加速器トンネルの施工位置は、新鮮で健全な白亜紀の花崗岩類が分布している。しかし、2 方向に伸びる断層破碎帯が存在し、構造面、実験に影響はない程度の規模であるが、トンネル掘削時に大量の湧水に遭遇することが懸念されている。

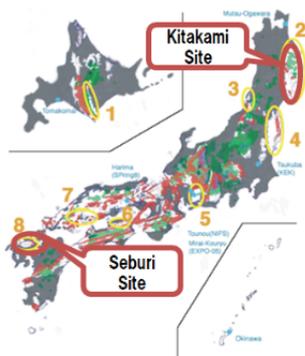


図-4 日本におけるサンプルサイト(KEK)

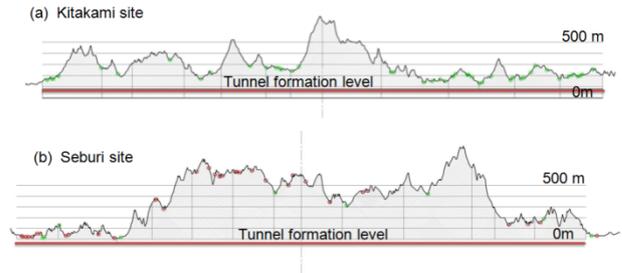


図-5 日本におけるサンプルサイトの地質縦断(KEK)

3. ILC の施設計画

3.1 GDE の RDR (Reference Design Report)

GDE は 2007 年 8 月に基本計画書(RDR)を発表した。RDR は、ILC が目指す物理の指標や実験装置の素案、加速器の基本パラメータから主要加速器施設の規模や一般構造・設備計画及び建設コスト概算に至るまでのプロジェクトの全体計画を網羅し、文字通り ILC 計画のベースラインと位置付けられている。ILC の主要施設となる線形加速器は、全長約 30km (将来 50km に延伸予定) の加速器トンネルと中央部に配置される衝突点となる実験ホールとダンピングリング等によって構成される。メインライナックとしては、中央部を挟み電子加速器用と陽電子加速器用のビームトンネルが配置される。RDR では、加速器トンネルは加速器本体を設置するビームラインと加速器用電源設備等(クライストロン等)を収納するサービストンネルを平行配置するダブルトンネルが計画されていた。これに対して、比較的平坦な海外サイト案では、トンネルは地下約 100m 程度の深度に設置され、約 2.5km 毎に配置する立坑により地上施設と連結するとされている。

3.2 GDE の TDR (Technical Design Report) に向けた施設計画

(1) ILC 施設の全体レイアウトと加速器トンネル

現在 GDE では、大幅なコスト削減を図る観点から計画全体の合理化を目指し RDR の見直し作業に着手しており、2012 年末までに技術設計書(TDR)を作成する予定になっている。地下施設面での最大の見直しポイントは、RDR のダブルトンネル方式からシングルトンネル方式への転換である。図-6 に示す全体レイアウトは、大型のクライストロンや高周波電源設備等を地上施設内に設置し、大口径の立坑を利用して、一本のトンネル内に、加速器装置、高周波、冷却水、ヘリウムガス及び電源等を配置する計画である。このレイアウトに対して、山岳地域の複雑な地形条件を考慮してアジアでは、つぎの 2 案が提案されている。

- ① クライストロンを小型化し分散配置する DRFS (Distributed Radical Frequency System) を前提に、TBM で施工された 1 本の円形トンネルを、全ての加速器装置を集約した区画と避難誘導や冷却水、地下水排

水の輸送機能等を果たすための区画とに隔壁で仕切る(図-7)

② 吹付けロックボルト工法によって掘削されたカマボコ型空洞にビームラインとRFラインを3.5m厚のコンクリート壁で仕切ることによって、実験と並行してメンテナンス作業が実施できるようにする(図-8)

(2) 衝突実験ホール

ILC 施設には、加速した電子と陽電子を衝突させ、その物理現象を観察する大きな実験ホールが必要である。実験ホールには2種類の検出器が設置される予定であり、現在、図-9と図-10に示すように、幅30m×高さ40m×長さ110m程度の空洞が必要とされている。

(3) ダンピング・トンネル

中央部に周長6.7kmのダンピング・リング部を設けて、生成された電子群や陽電子群のビームの運動方向を平行に揃える。整えられたビームは、一旦ILCの両端に送られた後、超伝導加速器によって、再度、中央部に向かって加速され、衝突ホールで衝突し、ビッグバンの時と同じ素粒子の世界をつくりだすことになる。ダンピングリングの施設配置(図-11)と断面(図-12)を示す。

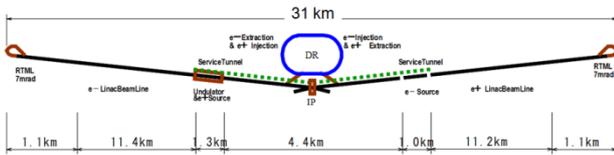


図-6 ILC 施設の全体レイアウト(SB2009)

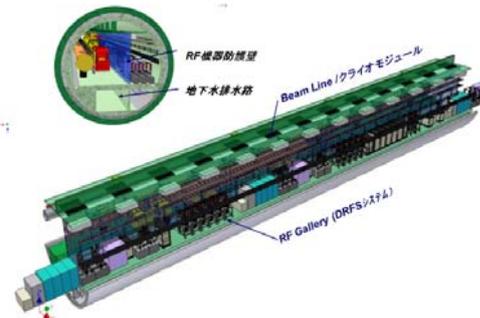


図-7 シングルトンネル(TBM工法)

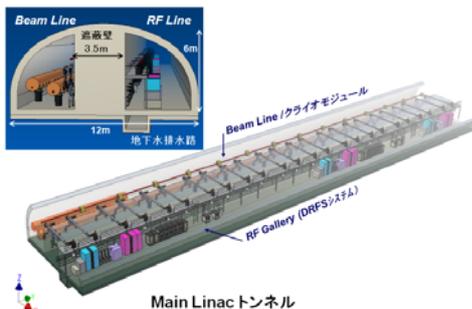


図-8 かまぼこ型山岳トンネル(吹付けロックボルト工法)

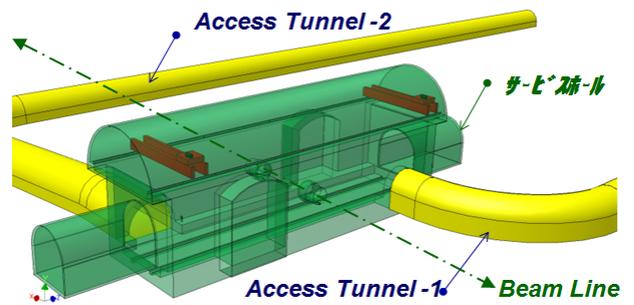


図-9 衝突ホールの鳥瞰図

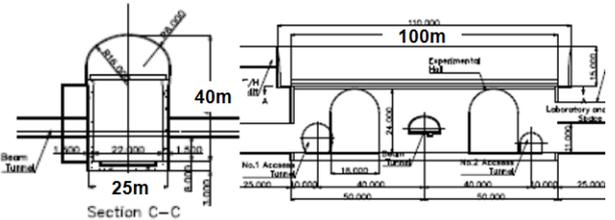


図-a 断面図

図-b 縦断面図

図-10 衝突ホールの断面図

4. ILC 施設が日本サイトで建設される際の土木分野での検討課題

土木学会では、ILCの地下空洞に関して、現状での課題と対応策を整理して、ガイドラインとしてまとめようとしている。ここでは、これまで整理されてきた課題の概要について述べる。まず、全体に関係する課題としては、本施設の建設に関連して、適用する法規制が明確ではないことがあげられる。このため、計画が進められる前に、基準類と法規制の早急な整備が必要になる。また、掘削後の修正が難しい環境にあるため、計画時におけるILC施設の計画者と岩盤空洞の計画や施工に携わる土木技術者との情報や課題の共有が重要となる。

4.1 計画調査部会(主査:真下英人[土木研究所])

下記の課題を考慮して、建設だけでなく、運転や維持管理まで含めた実験機器、防災設備、換気設備、照明設備、空調設備の設置計画を実施し、これに応じた空洞の断面形状や配置計画を立てることになる。

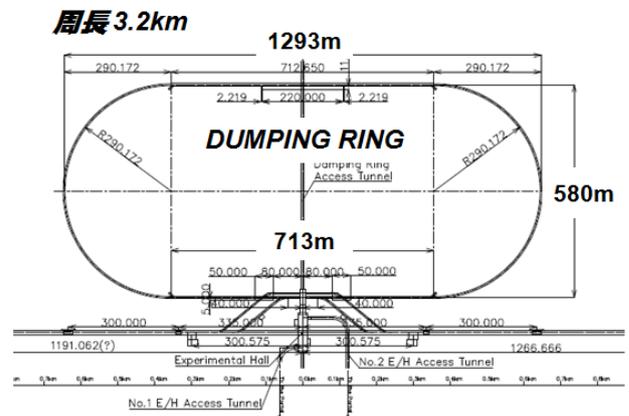


図-11 ダンピング・リング・トンネルの平面配置図

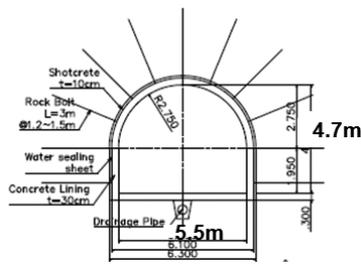


図-12 ダンプリング・リング・トンネルの断面図

- ①安全で、安定した実験環境の確保
- ②安全で、経済的な空洞の配置計画と掘削工法
- ③空洞周辺の地山の安定性の確保
- ④入坑する科学者やエンジニア等への安全性
- ⑤地下施設の周辺環境への影響の低減

特に、通常のトンネルや大空洞建設時の調査に加えて、実験時には安定な地盤、自然振動、人工振動が少ないことが必要であるため、地震・断層だけでなく道路や鉄道などの人工構造物に関する調査が必要となる。また、長大トンネルの掘削と長期にわたる維持管理に関連して、水文、地下水、水質などの環境調査も必要となる。

4.2 大空洞部会（主査：西本吉伸[電源開発株]）

日本国内における良好な地点を選定すれば、大空洞の掘削に関しては大きな問題はないと判断されている。特に、地下発電所や岩盤備蓄などの岩盤空洞の建設時に実施される検討項目に加えて、地震の多いわが国においては、地下空洞の耐震安定性についても検討する必要がある。また、重量物となる検出器の設置や移動に伴う周辺岩盤の変形、実験に影響を与える振動の対処等、特有の検討課題もある。

4.3 水平坑部会（主査：中野清人[NEXCO 総研]）

加速器やユーティリティを設置する水平坑は、大部分が、良好な花崗岩体の中に建設する予定であるため、空洞の安定性に関しては大きな問題はなく、如何に経済的で、短期間に施工するかということが、重要な検討課題となる。このため、水平坑に関しては、掘削工法、支保構造、高速掘進を阻害する要素の排除、不良地山の予測および不良地山区間での対策工の選定を検討することになる。また、トンネルの縦断勾配が無く、ジオイドで掘進することが予想されているため、坑内湧水は、トンネル方向に流れず、溜まった状態になる。このため、掘削工事中に遭遇するであろう突発湧水やトンネル完成後の常時湧水の処理方法についても、事前に十分に検討しておく必要がある。

4.4 特殊坑部会（主査：深沢成年[鉄道運輸機構]）

- 特殊坑として次のような特徴があると考えられている。
- ① 日本の起伏の大きい山岳地形では、地上から加速器トンネルへのアプローチ方法や工法が、工事の工程

や施工費に大きく影響を与えることになる

- ② 立坑や斜坑となるアプローチ・トンネルは、加速器トンネルやサブトンネルなどの交点部が多い
- ③ 施設中央部に計画されているダンプリング部や衝突ホール付近では、トンネルの近接、交差、拡幅および擦り付けなど様々な空洞形式が生じる
- ④ 加速器トンネルなどが、複雑に、衝突実験ホールや電源室空洞へ接続されることになる。
- ⑤ トンネルや空洞間に多様な連絡坑が設置される

このような多様なトンネル形状、配置、連結が想定されるが、安全で経済的な空洞形式や施工方法を検討する必要がある。特に、アクセス坑に集中することになるズリ（トンネル掘削で発生する岩）搬出や資機材の搬出入を考慮して、空洞の掘削順序を調整し、無理の無い工程を計画することが重要となる。さらに、アクセス坑では、大部分が下り勾配の掘削になり、地山安定化のための補強方法や地下水処理方法や路盤補強など、入念な処置が必要となる。

4.5 防災部会（主査：岡部治正[株日建設計]）

防災に関しては、つぎのことを検討することになる。

- ①災害が起こらないような工夫
- ②災害が起こったときの人の避難
- ③災害の沈静化

既存の加速器実験施設での防災計画に、大深度長大地下構造物であることを勘案して、防災計画を策定する必要がある。想定される災害としては、火災やヘリウムリークがあるが、これに加えて、停電や漏水などの対策も重要となる。

5. おわりに

日本土木学会では、日本で計画されている ILC 施設の土木工事に関する課題や問題点に対して、4 章で紹介した作業部会主査が中心になって、地下空間に関係する 50 有余の研究者や技術者が集まって、現時点で考えられる課題と対応策をガイドラインとしてとりまとめようとしている。現在、今後の活動の方向性が決まり、本格的な活動が開始されたばかりである。このため、今後の策定作業によって、内容は大きく変わることになるが、現状を整理するために、現在進めている活動の中間報告として本書をまとめた。できあがったガイドラインは、当面、日本における ILC 施設を対象として策定するが、基本的な考え方は他地域における計画に関しても、活用できるようにしたいと考えている。

この委員会活動は、学会活動の活性化に向けて、土木学会の新しい取り組みとして、ニーズ駆動型の研究活動を試行している。この意味で、土木学会の年次講演会や岩盤力学に関するシンポジウムでの研究討論会を通じて、広く一般の方からも意見をお聴きしたいと考えている。この委員会活動が、国内の岩盤工学やトンネル工学の活性化の一助になれば幸甚です。