

# 国際リニアコライダ（ILC）施設の土木工事に 関するガイドラインの策定

土木学会 岩盤力学委員会・トンネル工学委員会  
国際リニアコライダ施設の土木工事に係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ようとするものである。3年間の活動の中で、2年目に当たる平成23年度は、1年目の活動成果である今後の活動の方向性や方針を基にして、計画調査・大空洞・水平坑・特殊坑・防災に分けて、各テーマ毎にまとめる作業を行っている。

パネルディスカッションでは、ILC計画の最近の動向紹介、土木技術に関する課題や問題点とガイドライン策定に向けた各作業部会の活動について報告するとともに、各作業部会間の意見調整や広く土木学会員からの幅広い意見聴衆を実施し、今後の活動に役立てていきたい。

**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

土木学会では、研究主体である高エネルギー加速器研究機構（KEK）の要請に応じて、平成22年度に岩盤力学委員会とトンネル工学委員会に標記小委員会を設立して、ガイドラインの策定に向けて調査研究を開始している。そして、国際リニアコライダー計画の技術課題を検討しているGlobal Design Effort（GDE）の活動が、技術検討書（TDR: Technical Design Report）を策定する段階に入ったのを受けて、ILC施設の土木工事に係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まとめる。本委員会では、ILC施設を日本サイトで施工することを前提にガイドラインの策定をする。その成果が成果が多様化が始まった日本の地下空間利用施設や海外における地下空間を利用した加速器の建設にも役立つことを期待している。

## 2. 委員会

### (1) 活動目的

本小委員会は、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。

### (2) 委員構成

本委員の構成を下記に示す。平成23年度は、表-1のような部会を設置し、活動を行っている。

表-1 小委員会の委員構成

部会、氏名	幹事、委員、氏名
委員長、企画運営部会 主査：近久博志（山口大学）	顧問：京谷孝史（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）
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（大塚組）、委員：淡路動太（清水建設）、金井和彦（八千代エンジニアリング）、倉持秀明（パシフィックコンサルタンツ）、津崎高志（開発設計コンサルタンツ）、羽鳥明満（東北電力）、平川芳明（ニュージェック）、松下典史（応用地質）、松田武（大塚組）、安原英明（愛媛大学）
大空洞部会 主査：西本吉伸（電源開発）	顧問：清水則一（山口大学）、幹事：西村毅（ハザマ）、委員：池田博嗣（九州電力）、関根一郎（戸田建設）、松元和伸（飛鳥建設）
水平坑部会 主査：中野清人（高速度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（鉄建建設）、委員：蛭子清二（大塚組）、岡井崇彦（西松建設）、久慈雅栄（前田建設工業）、小山倫史（京都大学）、松戸直人（竹中土木）、宮沢一雄（東日本高速道路）、領家邦泰（大成建設）
特殊坑部会 主査：深沢成年（運輸施設整備支援機構）	顧問：芥川真一（神戸大学）、幹事：坂口秀一（西松建設）、委員：長沼諭（大塚組）、升元一彦（鹿島建設）、舟橋孝仁（鉄建建設）、森崎泰隆（熊谷組）、山地宏志（三井住友建設）
防災部会 主査：岡部治正（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（ロード・エンジニアリング）、幹事：小林薫（飛鳥建設）、委員：砂金伸治（独）土木研究所、菊本智樹（エコプラン）、下河内隆文（竹中工務店）、西田幸夫（東京理科大学）

### 3. 国際リニアコライダー計画の現状

#### (1) 計画概要

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が組織され、図-1～3に示す3つの研究機関を中心に活動されてきた。ここでは、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学研究者が参加し、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。

1) 図-1に示す欧州の中核となっているCERN（欧州合同素粒子原子核研究機構）は、当時の西ヨーロッパ諸国の協力によって1954年に設立された高エネルギー物理学の研究所で、スイスのジュネーブの郊外にあり、素粒子や原子核といった基礎物理学分野におけるヨーロッパの中心的研究拠点として、欧州19ヶ国が参加、出資して運営されている。数多くある粒子加速器の中でもLEPと呼ばれる電子・陽電子衝突型加速器は直径約10 km、周長27 kmの施設で、レマン湖とジュラ山脈の間の平地の地下100mの箇所に掘削されたトンネルの中に設置されている。また、WWW (World Wide Web) の発祥の地としても有名である。



図-1 ヨーロッパ合同原子核研究機構（CERN：European Organization for Nuclear Research）

2) 図-2に示す北米シカゴにあるフェルミ国立加速器研究所は、アメリカ合衆国イリノイ州シカゴ近郊バタヴィアにある米国エネルギー省の国立高エネルギー物理学研究所である。この研究所は、超伝導磁石を用いた大型（直径約2km、磁場の最大強さ2テスラ）の陽子・反陽子衝突型加速器（Tevatron）を有し、トップクォークの検出に成功したことで有名である。また、研究所の名前は、「原子炉の父」こと原子物理学者エンリコ・フェルミに由来している。



図-2 フェルミ国立加速器研究所（FNAL：Fermi National Accelerator Laboratory）

3) アジアの中核を成している高エネルギー加速器研究機構（KEK）は、茨城県つくば市に位置し、高エネルギー物理学・加速器科学・物質構造科学などに関する総合研究機関であり、つぎの組織からなっている（図-3）。

- ① 素粒子原子核研究所：素粒子物理学および原子核物理学を研究する基礎物理研究所
- ② 物質構造科学研究所：フォトンファクトリー（PFリング）、中性子、ミュオンを活用して、物質構造を研究する応用物理研究所
- ③ 加速器研究施設：電子や陽子を光速近くまで加速する実験装置「加速器」を開発・運用するKEKの研究活動の根幹をなす組織
- ④ 共通基盤研究施設：加速器を用いた研究を、高度な技術開発などにより支援する組織



図-3 高エネルギー加速器研究機構（KEK：High Energy Accelerator Research Organization）

#### (2) ILCの施設計画

ILCが国際プロジェクトとして統合されてからの成果として、GDEは2007年8月に基本計画書(RDR: Reference Design Report)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、図-4に示すように、全長約30km（将来50kmに延伸予定）の加速器トンネルで構成される。中央部には衝突点となる実験ホール空洞とダンピングリング等が配置される。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。

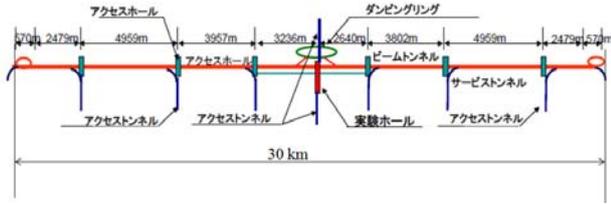


図-4 ILC施設の全体レイアウト (SB2009)

RDRでは、加速器トンネルは加速器本体を設置するビームトンネル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の、二本のトンネルを平行配置するダブルトンネル計画としていた。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。

図-5に示す欧州のサンプル・サイトは、スイス中央部のアルプスとジュラ山脈の間につながるCERN周辺の平地を選定している。当該地域の地質は、ジュラ紀の基盤岩の上位にある難透水性の堆積岩であるMokasse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。ジュネーブの南西部に位置するAllondon川の渓谷部の断層や溺れ谷を通り、トンネル掘削中の異常出水に懸念されている。

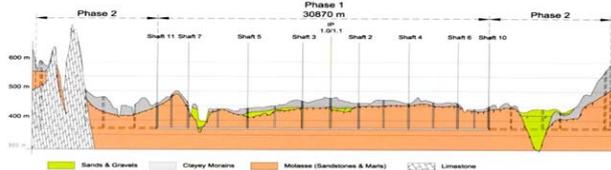


図-5 ILC施設の欧州のサンプルサイト

図-6に示す北米サンプル・サイトは、イリノイ州シカゴのFNAL周辺地域を選定としており、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。特に、加速器トンネルは、中粒径のドロマイトであるGalena Platteville 層に計画され、上位に、15～20m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。対象地質は、シカゴの灌漑施設事業（TARP:Tunnel and Reservoir Plan）として直径2～10.75mのトンネルを162km掘削したときに調査されされており、地質性状だけでなく、TBM施工や空洞掘削の経験が多くある。

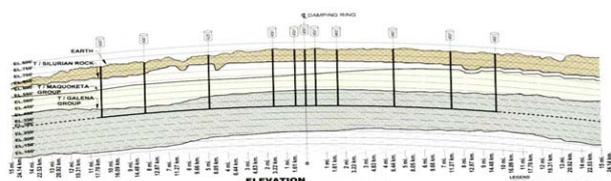


図-6 ILC施設の北米のサンプルサイト

これに対して、アジア地区では、図-7に示すように日本の堅固な花崗岩帯が分布する2地点がサン

ル・サイトとして選定されている。

- ・北上サイト・・・岩手県の北上山地に属する白亜紀に貫入した花崗閃緑岩からなる人首岩帯と千厩岩帯を選定している。人首岩帯が分布する北部サイトは、標高400～800m程度の山が緩やかに連なっており、千厩岩帯が分布する南部は、標高300mクラスの山が散在している。
- ・脊振サイト・・・北部九州で、脊振山を始めとして標高900～1000mクラスの山が連なった地形を成している。地質は、白亜紀後期に貫入した早良・佐賀花崗岩、平尾・朝倉・鞠手花崗閃緑岩、糸島花崗閃緑岩からなっている。

図-8のように起伏の多い里山地形であるため、立坑や斜坑トンネル方式によるアプローチを計画している。



図-7 ILC施設に対する日本のサンプルサイト

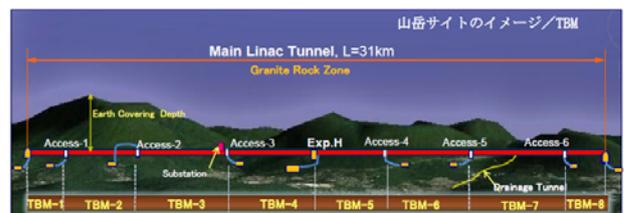


図-8 ILC施設のアジアのサンプルサイト

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年度末までにTDRを策定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-4に示す全体レイアウト（SB-2009）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地下のビームライントンネルに高周波や冷却水、ヘリウムガス及び電源等を供給するシステムである。これに対し、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（図-9～12）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

システムを前提に、全ての加速器装置を集約したメイントンネル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サブトンネルを隔壁で仕切った1本のトンネル内に配置する

- ② 吹付けロックボルト工法によって掘削された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

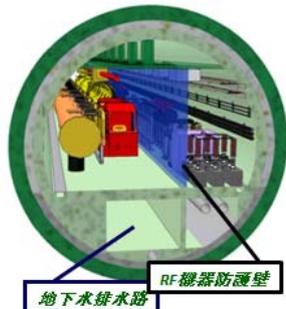


図-9 シングルトンネル型の加速器トンネルの断面図

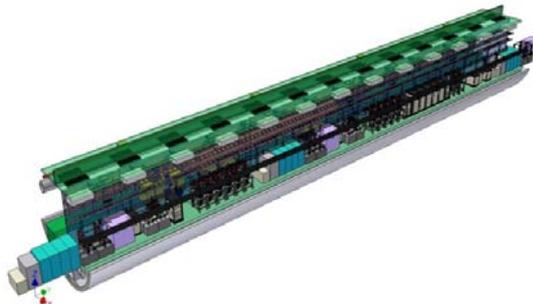


図-10 シングルトンネル型の加速器トンネルの鳥瞰図

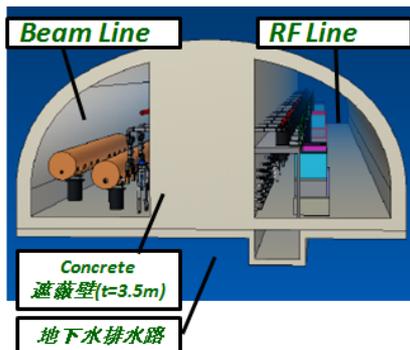


図-11 山岳トンネル型の加速器トンネルの断面図



図-12 山岳トンネル型の加速器トンネルの断面図

ILC加速器としての高い要求性能を満たすと同時

に、より柔軟で合理的な施設計画・設計を進めていく必要があるが、現段階では技術的に克服すべき課題が山積している。ILCは、文字通り国際的な最先端研究施設であり世界に誇れる計画として取りまとめていく必要がある。そのため、本計画施設が長大トンネルや大空洞といった土木工学に深く係わる地下構造物であることに留意し、土木工学の最新の知見を計画・設計に反映させていくことが極めて重要なことと考えている。

#### 4. ILC施設が日本サイトで建設されるとき土木分野での課題

##### (1) 計画調査

計画立案上の課題は、大きくはトンネルの設置サイトに関わるものと施設の配置計画に関わるものが挙げられる。設置サイトに関しては、地山が安定して施設の機能が確保されること、建設工事や維持管理が容易であること、安全性が確保できること、周辺環境への影響が小さい位置に計画する必要がある。施設の配置に関しては、加速器トンネルと実験ホール空洞およびダンピングリングの交差部の配置計画、資機材や実験用機器の搬入・搬出のために使用されるアクセストンネルの配置計画が課題として挙げられる。特に、アクセストンネルについては、設備計画との整合を図った立坑と斜坑の選定、内空断面の大きさ、配置などの検討が重要となる。また、施設使用時の防災設備、作業環境を確保するために必要な換気・照明設備・冷却設備などの配置計画も課題となる。

調査については、一般的なトンネルと同様に地山条件調査と立地条件調査が必要となるが、特にILC実験施設の運転には安定な地盤、自然振動、人工振動が少ないことが必要であるため、地震・断層に関する調査が課題となる。また、長大トンネルの掘削、長期にわたる維持管理の面からは地下水・水質環境に関する調査も課題となる。さらに、衝突実験ホールでは、設備設置箇所の変位が十分に小さいことが要求されるため、地殻変動に伴う変位や岩盤のクリープ変形の有無に関する調査も課題となる。また、ILC実験施設は、延長が約30kmにおよぶ直線状のトンネルおよび地下発電所に匹敵する大空洞からなる大規模な岩盤内構造物であることを考えると、効率的な調査方法、環境アセスメントの進め方なども課題となる。

##### (2) 大空洞

ILC実験施設には、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、幅30m×高さ40m×長さ120mの規模とされており、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。(図-13~15)

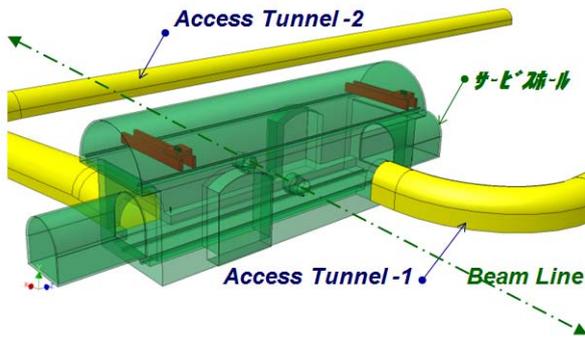


図-13 衝突実験ホールの鳥瞰図(イメージ図)

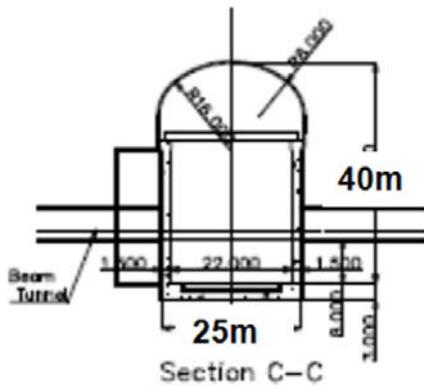


図-14 衝突実験ホールの断面図

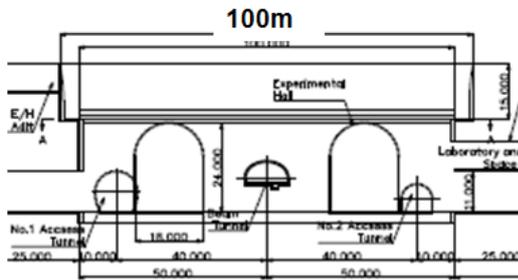


図-15 衝突実験ホールの縦断面図

また実験ホール以外にも、加速器附属設備や、加速器を運転のためのインフラ設備（電源、冷却水、極低温ヘリウム供給設備等）を設置するアクセスホールと言われる中規模の空洞も必要となる。

これらの大空洞に要求されることは、①長期にわたる力学的安定性、②精密な物理実験を行なうための長期的な環境維持（湧水の処理や湿度管理）が必要と思われる。

既に、日本国内においては、地下発電所等の大空洞の開発経験は豊富であることから、所要の地質調査に基づき、良好な地点を選定することにより、大空洞の掘削は可能であると考えられる。

ただし、国内において、この実験設備がどの法規制下で開発されるのか、現時点では明確ではなく今後の検討事項となる。特に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の考え方も明確にする必要が有ろうと思われる。

また、ナノビームを扱う本実験施設においては、

重量のある検出器の設置による周辺岩盤の変形、有害となる振動源の対処等、特有の課題もあることからそれらに対してもどのように有るべきかについて整理しておく必要が有ろうと思われる。

以上のような視点に基づきガイドラインの取りまとめをする予定である。

### (3) 水平坑

2012年策定予定のTDRには日本版山岳トンネル案が記述される予定である。ILCにおける山岳トンネル工法での施工に関する課題は、TBMと同様、高速掘進を阻害する要素の排除と不良地山の予測、不良地山区間での対策工の選定である。全体として堅固な岩盤を高速掘削することになるが、一部で切羽の崩壊を伴う風化部、熱水変質を受けた岩体、さらに大量湧水区間などトラブルに遭遇することを前提として対策を事前に用意しておくことが重要である。

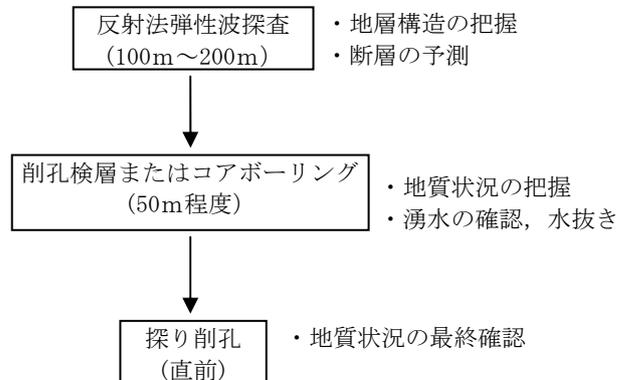


図-16 システムチックな切羽前方探査

具体的には高速掘進については、特に施工中の切羽前方探査によって地質不良部を予測し、対策の検討を早期に行うことにより実現性が高まる。施工中の切羽前方探査として中・長距離（100～200m）を対象にしたTSP等波動を媒体とする方法がある。この手法を用いて切羽前方の地質構造を調査することにより、掘削トラブルの要因となる脆弱部の存在の有無が三次元的に判定できる。しかしながら、この手法では脆弱の程度や地下水の状況を判断することは難しい。そのためこの調査で不良地山が想定された区間で脆弱部の数十m手前で削孔検層またはコアボーリングを行うことにより、切羽到達前の地山強度や地下水の状況を把握した上で、地山補強や地下水対策などの補助工法の必要性の判定が可能となる。これらを繰り返すことにより、掘削を順調に進めることができる(図-16)。

この他、ジオイドで掘進するため、湧水の自然流下が困難であることから、突発湧水に対する対策方法について事前に十分に検討しておく必要があると考えられる。また、工程管理上はアクセストンネルの掘削や変圧器室等の付随空洞の掘削との工程調整により全体で最適となる工程を設定する必要がある。

一方で、近年、計画されるようになってきた吹き

つけロックボルト工法による加速器トンネルの計画に対しても課題と対策をを検討していく必要がある。

#### (4) 特殊坑

計画されているILC施設は、図-4のような施設配置となっており、本図から次のことが分かる。

- ① 日本の起伏の大きい里山地形では、地上から加速器トンネルへのアプローチ方法や施工法が、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 アプローチが、立坑だけでなく斜坑になる可能性が大きく、加速器トンネルやサブトンネルなどとの交差点部（図-17）が多様になる
- ③ ダンピングリング部（図-18）や衝突実験ホール（図-19）付近では、トンネルの近接、交差、拡張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 トンネル間や空洞間の連絡トンネルの設置が必要となる

こうした多様なトンネル形状と配置が考えられるが、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。さらに、これに並行して、地山安定化のための補強方法や地下水処理方法など、従来の構造物では考えなかったような対策工の採用が必要になる場合も想定されている。

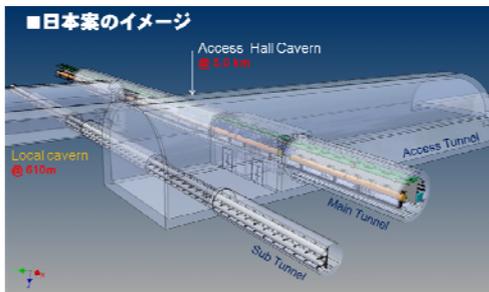


図-17 アクセストンネルと加速器トンネルの交差点部

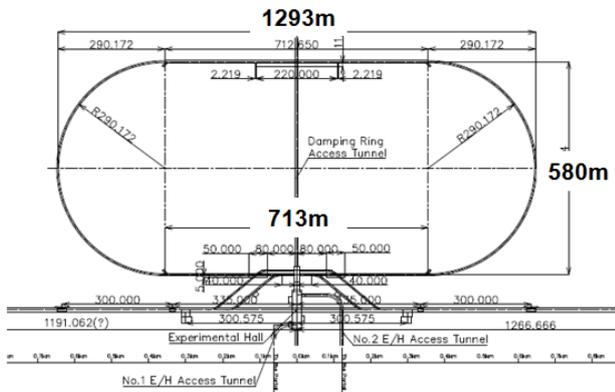


図-18 ダンピングリング部の平面図（全周32km）

#### (5) 防災

ILCは通常の類似土木構造物（道路トンネル、鉄道トンネル等）とは空間の利用方法が大きく異なるため、防災に関する考え方も独自の考え方が求めら

れる。一方、既存のKEKB加速器やJ-PARCとは規模（長さ）や設置レベルは異なるものの、空間の利用方法はほぼ同一である。

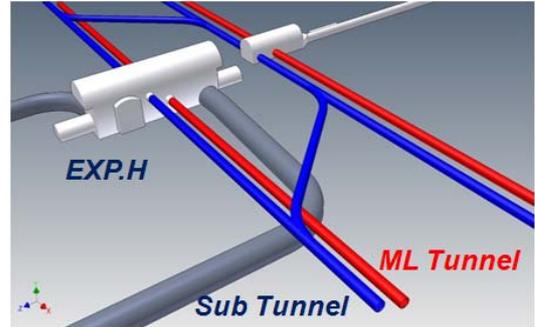


図-19 衝突実験ホール付近の加速器トンネルの鳥瞰図

そこでこれら既存加速器施設の防災の考え方をベースに、長さ約30km、深さ数百mという長大構造物であることを加味して防災の方針を検討する必要がある。加えて、東北大震災の教訓を踏まえ、停電や漏水などの対策も重要である。

ILCで想定される主な災害としては、火災、ヘリウムリークであるが、つぎのことが主たるテーマとなる。

- 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」

このうち②の人の避難については、「計画上の工夫・対策」が検討されつつあるが、現時点で想定される主な工夫と対策はつぎのようである。

- ・メイントンネルとサブトンネルとに分離——火災、ヘリウムリークの原因となりえる設備をメイントンネルに設置し、サブトンネルを避難に使えるようにする。
- ・メイントンネルとサブトンネルは約600mごとの接続し、避難路を確保する。
- ・5,000m毎に設置されたアクセストンネルによって、サブトンネルから地上への避難路を確保する。

#### 5. おわりに

本小委員会は、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ようとするものである。今回のパネルディスカッションでは、今後の委員会活動に関して、作業部会間の情報交換だけでなく、ILC施設や学会の関係者から幅広い意見を頂き、今後の委員会活動に役立てていきたいと考えている。

ILC計画の実現に向けた積極的な意見と今後の部会活動へのご協力をよろしくお願い致します。