ILC 誘致を円滑に推進するための AAA・CIVIL 部会における検討(その 4)

STUDY ON CIVIL-RELATED WORKS BY AAA・CIVIL SUBCOMMITTEE TO SMOOTHLY HOST ILC (NO.4)

武内邦文#, A), 大西有三 B), 吉岡正和 C), 福田和寛 D), 下河内隆文 E), 鈴木康正 F),
関根一郎 G), 大山寛夫 H), 川端康夫 I), 濱嶋博文 J), 俣野文孝 K), 福田和人 L)
Kunifumi Takeuchi #, A), Yuzo Ohnishi B), Masakazu Yoshioka C), Kazuhiro Fukuda D), Takafumi Shimogochi E), Yasumasa Suzuki F), Ichiro Sekine G), Hiroo Ohyama H), Yasuo Kawabata I), Hirofumi Hamajima J), Fumitaka Matano K), Kazuto Fukuda L)
A) Obayashi Corporation, B) Kyoto University,
C) Tohoku University・Iwate University・Iwate Prefectural University, D) Shimizu Corporation, E) Takenaka Corporation, F) Tokyo Electric Power Services Co.,Ltd., G) Toda Corporation, H) Kajima Corporation, I) Tobishima Corporation, J) Taisei Corporation, K) Penta-Ocean Construction Co., Ltd., L) Maeda Corporation

Abstract

AAA is the industry-government-academic incorporated association established in 2008 to enhance the development of the most advanced acceleration projects in Japan and the CIVIL subcommittee was set in 2015 to smoothly host ILC project in Japan. Regarding civil-related works for the ILC facilities, five WGs have been working (WG1: Planning, WG2: Preliminary design, WG3: Construction optimization, WG4: Eco-smart town, WG5: Safety and disaster prevention). This paper presents the latest outcomes of WG activities in fiscal year 2017, mainly focusing on the underground facility planning, cost-down design optimization, reasonable construction methodologies, waste heat utilization and research town planning, and safety countermeasures after completion.

1. はじめに

国際リニアコライダー（以下、ILC、International Linear Collider という）計画とは、線形加速器により高エネルギー状態で電子と陽電子の衝突実験を行うもので、質量の起源とされるヒッグス粒子の詳細な性質解明や標準理論を超える新たな粒子の発見により、宇宙創成の謎の解明につながると期待されている。この計画は、素粒子物理学や加速器分野の国際科学コミュニティーによりグローバルな設計活動が鋭意進められ、2013 年に技術設計報告書[1]（以下、TDR、Technical Design Report という）が発表された。その後、2013 年 8 月には、わが国に立地する場合のサイト候補地として岩手県の良好な花崗岩帯が分布する北上山地が科学技術的には最適であると科学コミュニティーが推薦した[2]。大規模地下施設である ILC の主な特徴は、Figure 1 に示すように、全長約 31km におよぶ線形加速器等を収容する加速器トンネル、その中央部分で粒子を衝突させ観測を行う大規模な衝突実験空洞、約 3km 延長のダンピングリングトンネル、そして、アクセスホールとアクセストンネル等からなる。なお、最新の情報によれば[4]、31km(500GeV)の加速器トンネルではなく、ヒッグスファクトリーとして半分の 250GeV 実験、すなわちこの場合には、約 20km 延長の加速器トンネルで十分な科学成果が期待でき、その場合には当初比で約 40%のコストダウンが見込めるとした。

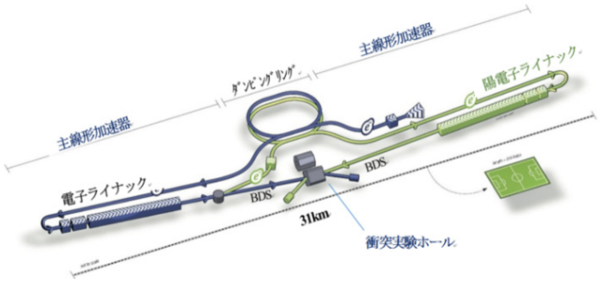

Figure 1: Concept of ILC main facility (Phase I) [3].

2008 年に設立された先端加速器科学技術推進協議会[5]（以下、AAA、Advanced Accelerator Association Promoting Science & Technology という）とは、政・官・産・学が連携して最先端の量子加速器開発により人類の知を広げると共に、医療・エネルギー・環境問題など世界規模の課題への新しい対応を目指すものである。AAA は 2014 年に一般社団法人として改組、その際 CIVIL 部会も設置され、参加募集を経て、部会長と 2 名のアドバイザーのもと、メーカー、ゼネコン等建設会社、コンサルタント、地質調査会社の 30 企業で実務的な調査検討を実施している。

平成 29 年度は、従来からの WG を以下に示す 5WG に再編し、地下施設等のコストダウンやリスク低減の観点からの具体的な検討を実施した。

WG1：構造合理化 WG（地下施設の計画合理化）
WG2：合理化設計 WG（合理化設計の可能性）
WG3：施工合理化 WG（施工の合理化可能性）
WG4：エコ・スマートタウン WG（エネルギー利用最適化、まちづくり等）
WG5：安全・防災 WG（火災等完成後の安全対策）

takeuchi.kunifumi@obayashi.co.jp

本稿では、AAA の CIVIL 部会で調査検討した平成 29 年度の成果を報告する。

2. ILC 施設の概要

Figure 2 は ILC 施設のうち地下に設置される加速器トンネルのイメージ図であり、Figure 3 は衝突実験空洞の概念図である。なお、衝突実験空洞は TDR では斜坑アクセスのみであったが、最新の検討としては斜坑アクセスとともに空洞天端部に内径約 18m の搬入立坑と 10m のユーティティー立坑が計画されている。わが国に立地する案では、地下施設は基本的に良好な花崗岩中に設置され、土被り 100m 程度の長大トンネルと大規模空洞となり、その建設に際しては調査、設計、施工を綿密に進めていくことが肝要である。その計画では Figure 4 に示す縦断線形図のように、欧米の案と比較して山岳地形案(Mountain Topography)と呼ばれており、したがって、その地形上の制約から、アクセストンネルは基本として重機が通行可能な斜度の斜坑案で、また、自然排水が可能な排水トンネルが必要と考えられている。

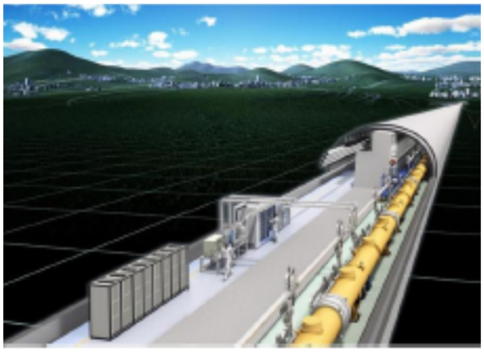

Figure 2: Concept of ILC acceleration tunnel [3].

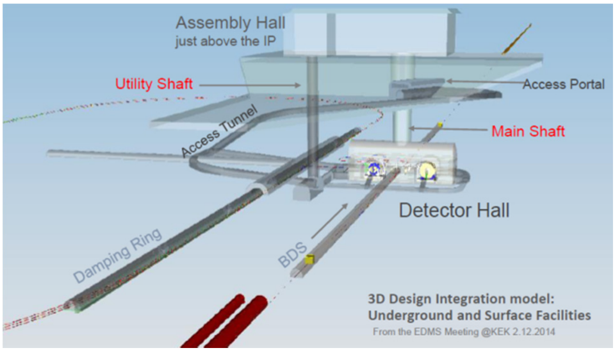

Figure 3: Concept of ILC detector hall cavern [6].

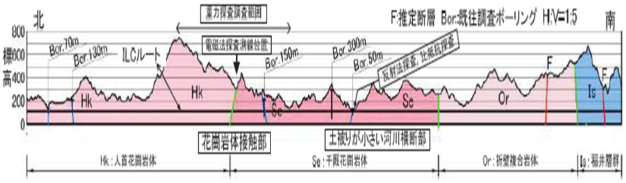

Figure 4: Longitudinal profile of mountain candidate site [7].

地上部には、アクセストンネル坑口部が建設中の基地となり地下へアクセスするヤードが設置され、これは建設完了後には地下での実験を支える各種の補助施設やエネルギー供給のための設備を設置するヤードになる。また、衝突実験空洞へのアクセストンネルの坑口の近傍には、実験の研究者や技術者等が働くためのサテライトキャンパスが、そして、交通のアクセスが良好な地点に3,000人程度の研究者や技術者が活動するメインキャンパスが建設される計画であり、その周辺には道路等のインフラ整備とともに、住居等の生活インフラ施設が必要となる。

3. 平成 29 年度の CIVIL 部会の検討成果

3.1 構造合理化 WG の検討成果(WG1)

平成 29 年度に実施した地下施設の構造合理化(計画)に関する検討事項は以下の 3 項目である。

① 深度と振動・トンネル深度が浅い場合の調査
② アクセストンネルの斜度に関する調査
③ 実験ホール立坑に関する調査

加速器トンネルの設置深度は、コスト的には浅いほうが有利であるが、地上の振動が実験の支障にならないように計画する必要がある。加速器トンネル床面の振動の許容値は 0.1Hz 以上の振動数で 100nm 以下の変位が目安となる。Figure 5 は地上をダンプトラックが走行した場合の深度 20m における振動試算結果である。振動変位は 44 nm となり、深度を 20m 程度確保すれば許容値内に収まるものと推定されるが、詳細には現地で直接計測することが重要である。また、北上候補地で土被りが小さい場所としては河川下が想定されるが、国内には同様の条件の河川下トンネルが数多くあり、最小離隔 2m 程度の事例も存在することから、土木工事的には対応可能である。

アクセスンネルの斜度に関する施工実績を整理した結果が Figure 6 である。国内事例としては 12.5%以下が多く、大型トレーラーによる搬入を考えると 10%以下が望ましい。ILC では多くの大型資材の搬入があることから勾配は 10%で計画することが妥当と考えられる。

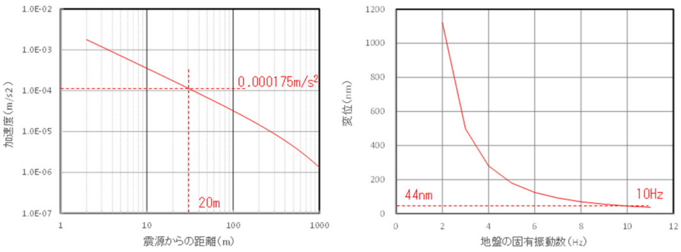

Figure 5: Estimation of ground vibration in 20m-depth.

山岳方式立坑工事のマクロ単価を調査し、立坑内径、掘削量、深さをパラメータに整理したものが Figure 7 である。ばらつきはあるものの平均的な㎥単価は 12 万円/㎥程度となった。この㎥単価の場合、斜坑アクセスに比較して土木工事費は同等であり、配管延長が立坑の方が短くなることを考慮すると、コストは立坑方式の方が有利となる可能性が考えられる。

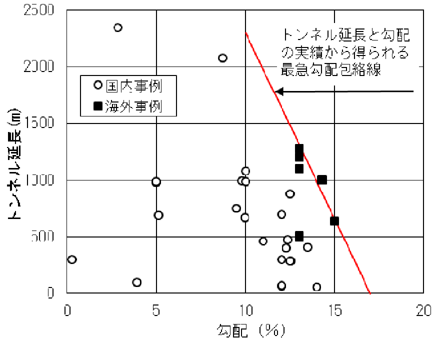

Figure 6: Relationship between tunnel length and slope.

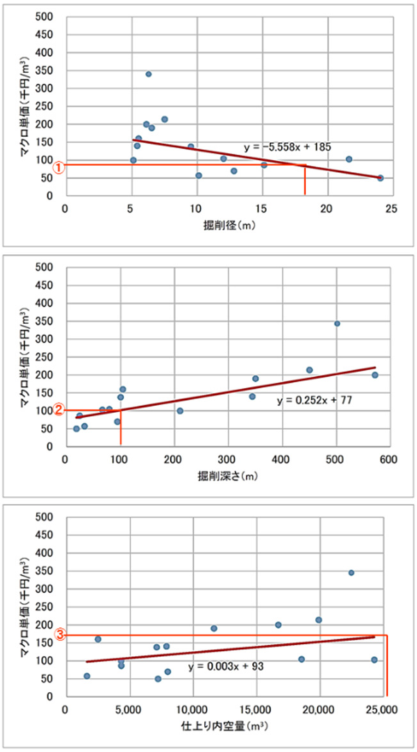

Figure 7: Unit macro cost of some vertical shafts.

3.2　合理化設計 WG の検討成果（WG2）

地下施設の合理化設計に関する検討事項は以下の 5 項目である。

①　トンネル支保設計の合理化
②　空洞支保設計の合理化
③　耐震設計
④　トンネル防排水工の設計
⑤　加速器アライメント技術

極めて良好な花崗岩体でのトンネル支保設計は標準支保パターンを適用すると合理的な設計とならない場合が考えられ、同様の岩盤条件下でのコスト縮減事例を調査した結果、縮減効果として約 10%程度は期待されることが判った。そこで ILC への提言としては、基本設計時には標準支保パターンで設計し、詳細設計時にはアクセストンネルでの掘削実績を考慮して、トンネル支保の合理化検討をすべきとした。

同じく良好な花崗岩中の空洞支保としては、PS 工を削減できる可能性について検討し、Figure 8 がその結果をまとめたものである。横軸は地山強度比、縦軸は PS 工導入力で、ILC の条件を考慮すると PS 工を削減できる可能性が高いことが判った。また、ILC の空洞直上の立坑の影響を概略評価するため、解析的検討を実施した結果が Figure 9 であり、その結果空洞安定には大きな影響がないと推定された。

耐震設計については、地震被害事例調査を踏まえて、ILC 施設で地震時に安定性が懸念される個所、および耐震設計フローと具備すべき耐震性能レベル等を取りまとめた。

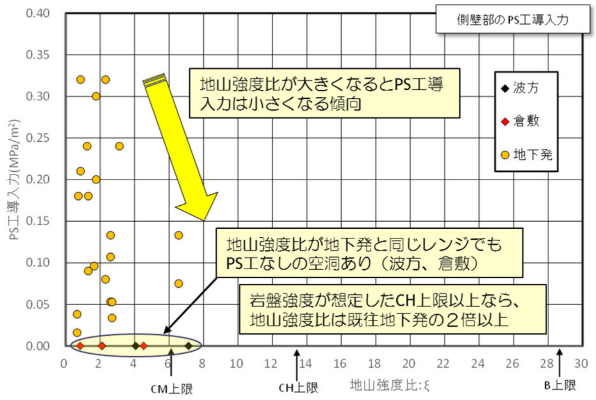

Figure 8: Possibility to cut off PS support system.

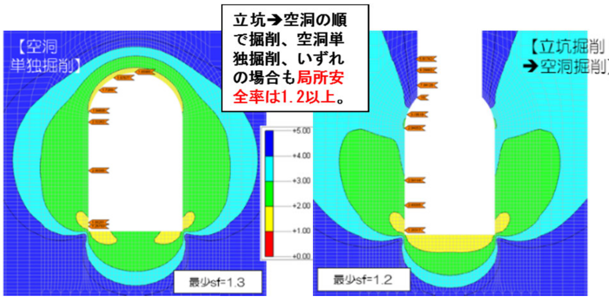

Figure 9: First evaluation of large-scale vertical shaft.

ILC 施設の排水設計については、その勾配がジオイドや中央の一部がレーザーストレイトという特殊な条件を考慮して、Figure 10 が常時と停電時の施設全体としての排水系統案である。そして、このような排水のために、Figure 11 が ILC トンネルでの中央排水工とともに縦断排水管を設置することで対応可能であると考え提案した。

そして、加速器アライメントについては、地下施設建設で利用する通常の公共座標系から加速器の設置必要な座標系に変換する技術があることを示した。

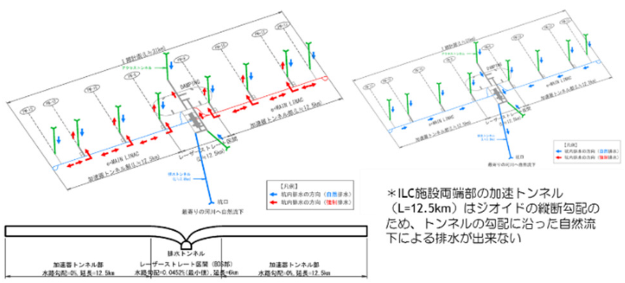

Figure 10: Water drain concept for ILC facility.

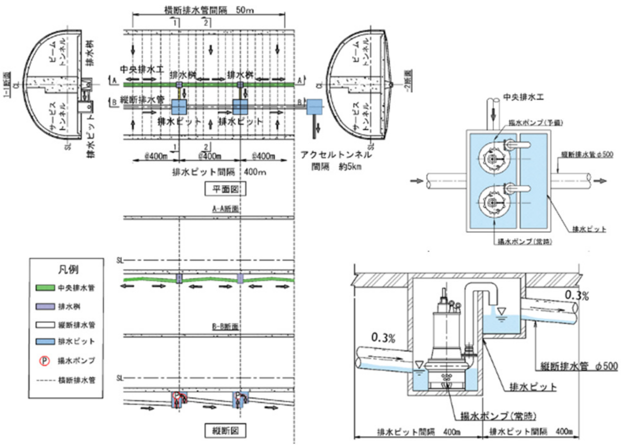

Figure 11: Preliminary design of ILC drain system.

3.3 施工合理化 WG の検討成果（WG3）

地下施設の施工合理化設計に関する検討事項は以下の 5 項目である。

① トンネル掘削
② トンネルズリ出し・覆工
③ 実験ホール・立坑
④ 合理的な遮蔽壁建設
⑤ 掘削ズリ処分と跡地利用

良好な岩盤条件でトンネル掘削を合理的に実施するには急速施工が必須で、それには切羽前方探査、せん孔自動化、長孔発破が効果的である。Figure 12 は急速施工に重要なせん孔自動化技術の実例であり、このような技術等は既に実用化されている。

Figure 13 は急速なズリ出しを可能にする連続ベルトコンベヤシステムであり、現時点では、国交書の積算基準では採用されていないが、長大トンネルにおいては安全性や環境影響低減、そして、急速施工が可能な工法として実用化されている。

そして、ILC の実験空洞と直上に計画されている大型立坑の合理的な施工手順としては、立坑＋実験空洞へのアクセストンネルを活用した併進工法が合理的である、この場合の立坑掘削工法としては、NATM の全断面発破掘進盤下り工法が適切であると評価した。

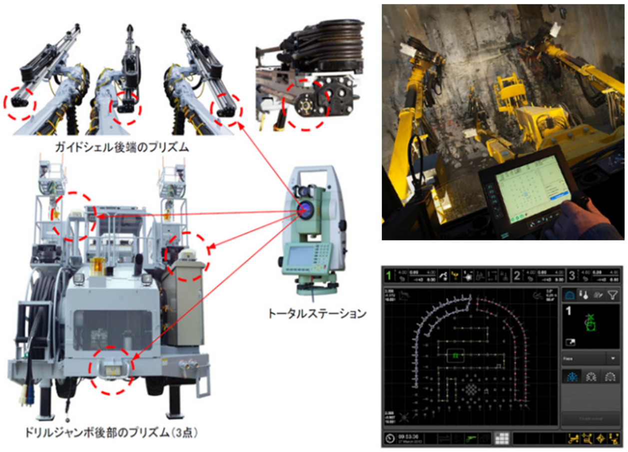

Figure 12: Automation of drilling by tunnel jumbo.

加速器トンネルの中央部に設置する予定の幅 1.5m の遮蔽壁の合理的な施工方法としては、Figure 14 に示すような、現地近くで製作したプレキャストブロックを構築する工法がコストや工程の観点から有利と評価された。また、掘削ズリの有効活用方法としては、坑口周辺での造成による利活用が最も現実的で合理的であると考えた。

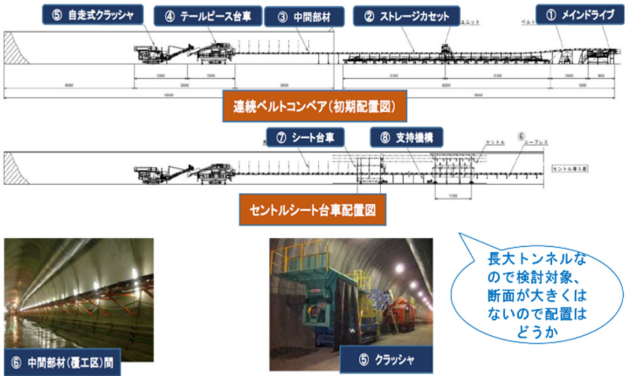

Figure 13: Continuous belt conveyer system for mucking.

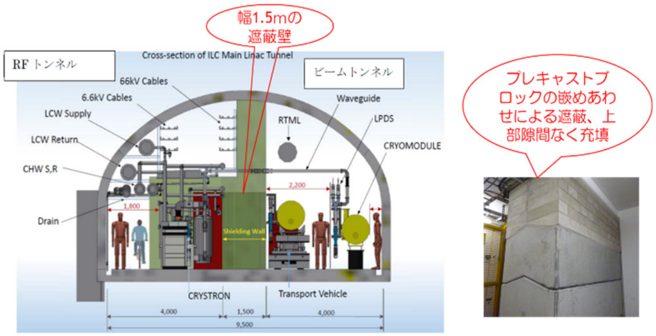

Figure 14: Precast block shielding construction.

3.4 エコ・スマートタウン WG の検討成果（WG4）

エコ・スマートタウンに関する検討事項は以下の 2 項目である。

① 地域交通問題の解決
② ILC の排熱を利用した熱供給事業

最近、世界レベルで技術開発が激化している車の自動運転技術の開発実用化を睨んで、ILC 候補地周辺での自動運転技術の導入実験を提案した地図が Figure 15 である。ILC 広域ではレベル 3 を、中域ではレベル 4 を、そして、ILC サテライトキャンパス周辺ではレベル 5 の自動運転技術を実験的に導入していくことを提案している。

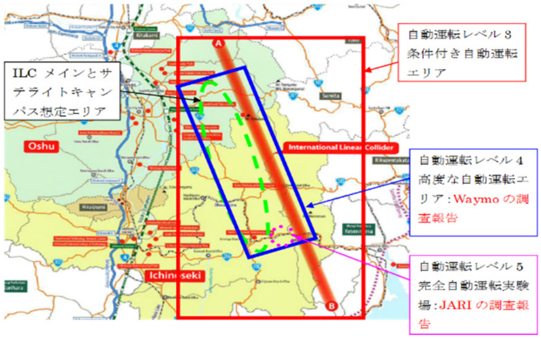

Figure 15: Areas of automatic driving Zones 3,4 and 5.

平成 30 年 6 月に排熱利用の先進事例を調査する目的等で、デンマーク、フランス、およびスイスの先行事例を CIVIL 部会調査団として送った。特に、デンマークでの先進事例では、第 4 世代として、50~60℃の低温水を積極的に利用しようとするプロジェクトが進行中で、非常に印象深く有益な結果を得た。Figure 16 は、ILC と地域の様々な施設の排熱を有効利用する「グリーン ILC シティ」として、AAA が地域と協力して今後推進していこうとしている提案構想である。

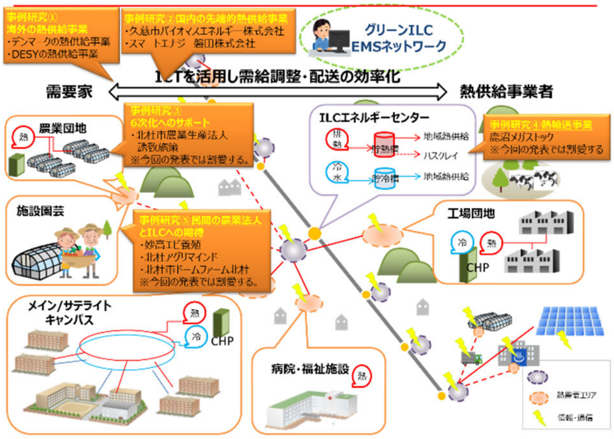

Figure 16: Concept of green ILC city.

3.5　安全・防災 WG の検討成果（WG5）

完成後の安全・防災に関する検討事項は以下の 3 項目である。

① 火災に関する安全防災
② ヘリウムリークに関する安全防災
③ 放射線に関する安全防災

安全・防災に関しては、平成 29 年 7 月に CIVIL 部会として海外の先行事例調査を目的とする調査を実施し、ドイツの DESY とスイス・フランスの CERN における安全・防災技術の先行事例を詳細に調査した。その代表的な事例調査の結果として、Figure 17 および 18 は J-PARC（日本）、DESY、および CERN における消化対策の概要をまとめたもので、それをもとに ILC 土木工事ガイドライン考慮した調査成果もまとめた。

Figure 17: Fire protection in J-PARC and DESY.

Figure 18: Fire protection in CERN and outputs.

そして、ヘリウムリーク対策については、海外では実証試験等での結果を受けて、漏洩対策を十分に実施するとともに、万一の漏洩時にも換気速度、避難ルートとその避難速度、そして、適切な対策を行えば酸欠状態等にはならないことがわかった。

4.　まとめ

ILC は、誘致が正式決定した後には円滑かつ迅速にプロジェクトを進める方策を考えておく必要があり、特に、施設の土木・建設に係る建設プロジェクトは最初に進めるため、その期間を可能な限り短縮するための方策が重要となる。

平成 27 年 1 月に活動開始した AAA の CIVIL 部会は、ILC のわが国への誘致を民間の立場から支援するため、ILC 施設建設に係る企業が参加し、その活動を 2 冊の報告書としてとりまとめた。本稿では、平成 29 年度の調査結果として得られた有用な調査結果や知見等を 5 つの WG 活動に沿ってまとめたものである。

謝辞：本稿を作成する際には AAA・CIVIL 部会の関係者の皆様はじめ、調査先関係者様、そして、東京大学の山下了様、東北大学の京谷孝史様、佐貫智行様に深く謝意を申し上げます。

参考文献

[1] Editors T.Behnke, *et al.*, The International Linear Collider Technical Design Report 2013, Volume 1 Executive Summary, ISBN 978-3-935702-74-4, 2013.
[2] ILC 戦略会議：国際リニアコライダー国内候補地の立地評価会議の結果について (2013); http://ilc-str.jp/topics/2013/08231145/
[3] 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，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），平成 26 年 3 月.
[4] Linear Collider Board: Conclusions on the 250GeV ILC as a Higgs Factory proposed by the Japanese HEP community -Short Summary-, 8 November 2017.
[5] 一般社団法人　先端加速器科学技術推進協議会 HP; http://aaa-sentan.org/index.html
[6] ILC PAC Meeting，LAL Orsay，2015.9.28; https://ilc.kek.jp/LCoffice/OfficeAdmin/ADIJ/20150928/Miyahara150928.pdfsearch'ILC+PAC+Meeting+LAL+Orsay'
[7] 坂下他：ILC 建設地点としての北上サイトの物理探査による岩盤特性，土木学会第 43 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集，2015 年 1 月.