

国際リニアコライダー（ILC）に関する有識者会議
技術設計報告書（TDR）検証作業部会報告

当作業部会は、平成 26 年 6 月以降 6 回にわたり、国際リニアコライダー（ILC）計画の技術設計報告書（TDR）におけるコストの算出方法や技術的成立性などについて検証・議論し、平成 27 年 3 月に報告（以下、「前回報告」という）をまとめた。同報告を踏まえて、国際リニアコライダー（ILC）に関する有識者会議（以下、「有識者会議」という）は、平成 27 年 6 月に「これまでの議論のまとめ」を公表した。その際は、ILC は衝突エネルギー 500GeV（GeV=10 億電子ボルト¹）の電子・陽電子衝突型加速器と想定して議論を行った。

その後、ILC に関する国際的な研究者組織の一つであるリニアコライダー・コラボレーション（以下、「LCC」という）でまとめられた ILC 計画の見直し案^{2・3}が、リニアコライダー国際推進委員会（以下、「LCB」という）における審議⁴を経て、国際将来加速器委員会（以下、「ICFA」という）において承認⁵され、平成 29 年 11 月に公表された。この見直しは、欧州合同原子核研究機関（CERN）における LHC 実験の結果及び LCC における ILC に関するコスト削減への取組を踏まえて実施され、衝突エネルギーを 250GeV とする提案（以下、「250GeV ILC」という）に変更された。この公表を受けて平成 29 年 12 月に開催された有識者会議において、ILC 計画の見直しについて、特にコストの算出方法や技術的成立性などについて検証し、留意すべき点について専門的見地から検討を行うため、当作業部会が再度設置された。今回の当作業部会では、特に前回報告において再度検証が必要となった部分について、平成 30 年 1 月以降 5 回にわたり議論し、検証を行った。本報告は、その結果について示すものである。

1. 当作業部会で聴取した ILC 計画の見直しの概要

（1）国際研究者コミュニティによる見直し案について

- LCC が作成したマシンステージングレポート²では、段階的实施を可能とするものとして再定義し、その第一段階を 250GeV ILC の加速器とそのためのトンネルとした。これが同レポートにおける Option A（今回の検証の対象）とされている。

¹ 電子ボルト（eV）：エネルギーの単位。電子ひとつが 1 ボルトの電圧で加速されたときに得るエネルギーの量。1eV は、質量 1.782×10^{-33} g に相当する。

² 「The International Linear Collider Machine Staging Report 2017」(Linear Collider Collaboration / October, 2017)

³ 「Physics Case for the 250 GeV Stage of the International Linear Collider」(LCC Physics Working Group / October, 2017)

⁴ 「Conclusions on the 250 GeV ILC as a Higgs Factory proposed by the Japanese HEP community」(Linear Collider Board, 8 November 2017, Rev 1)

⁵ 「ICFA Statement on the ILC Operating at 250 GeV as a Higgs Boson Factory」(Ottawa, November 2017)

○ 同レポートでは、この他に 250GeV ILC の加速器を将来的に 350GeV まで拡張するための簡素化トンネルから構成されるのが Option B、同様に 500GeV までの簡素化トンネルから構成されるのが Option C とされているが、LCB 及び ICFA の声明ではヒッグスファクトリーとしての 250GeV ILC を提案しているため、Option B 及び Option C は今回の検証の対象外である。

(2) 研究開発を踏まえたコスト削減について

○ ILC 計画の見直しにおけるコスト計算では、現在実施されている、あるいは将来実施予定のコスト削減に向けた研究開発（以下、「コスト削減 R&D」という）の成果について、最大限の効果を見込んだものが Option A' とされている。

(3) 土木・建築等について

○ トンネルの長さが 33.5km (500GeV) から 20.5km (250GeV、Option A・A') となる。トンネル断面は幅 11m から 9.5m に縮小され、加速器の運転中はトンネル内に立ち入らない等のアクセス制限を高めることにより、中央遮蔽壁を厚さ 3.5m から 1.5m として、トンネルに係る建設コストを抑制した、とされている。

○ 今回の見直しでは、加速器本体のほかに土木・建築等も対象となっている。大きな変更点は、TDR では地上から地下へはアクセストンネル経由であったが、見直し後は、衝突点での物理実験・測定器の組み込みが立坑経由とされている。これにより、クレーンによる測定器・機器の地下トンネルへの垂直搬入が可能となり作業効率が向上する、とされている。

(4) 労務費について

○ 装置全体が縮小されることにより、建設における必要人員も見直された。TDR では建設期に 22,892 千人時が必要とされたのに対し、見直し後は 17,165 千人時とされている。

2. 当作業部会で聴取した見直し後の ILC 計画 (250GeV ILC) の見積りの概要

○ 見直し後の ILC 計画 (250GeV ILC) のコストについて、本体及び測定器建設経費は 7,355~8,033 億円 (本体建設費 6,350~7,028 億円、測定器関係経費 1,005 億円) と算定され、これに加えて不定性相当経費及び 3. で述べるコストのリスク要因や技術上の課題等による追加的な経費が発生する可能性がある。

○ 不定性相当経費は、本体及び測定器建設経費の約 25%が見込まれているが、これはコスト見積りの精度に関するもののみが対象であり、技術リスク、工事期間の延長リスク、市場リスク等に伴うコスト増加分は含まれないことに留意が必要である。

- 年間運転経費は 366～392 億円と算定された。また、その他付随経費として、準備経費 233 億円が新たに算定されたが、具体的に算定されておらず新たに計上が必要となる経費（具体的な立地に関わる経費等）が存在している。
- さらに、コンティンジェンシー（予期せぬ出費のための予備費：プロジェクト経費（本体及び測定器建設経費＋運転経費）の約 10%）及び実験終了後の解体経費（年間運転経費の 2 年分程度）が新たに項目として追加された。

今回、当作業部会で聴取した見直し後の ILC 計画の見積りの内訳は以下のとおり。

（前提条件）

仮想通貨「ILCU」を置いて設定。ILCU は 2012 年 1 月現在の購買力平価を基に、1ILCU = 1 米ドルを基準としている。

国際入札を考慮して「1 ユーロ = 115 円、1 ドル = 100 円」を仮定して日本円へ換算した金額は以下の通り。

算出に当たり、前回報告から大きな物価変動はなかったが、土木・建築に係る工事費については、震災復旧・復興や東京五輪開催に向けた準備の関係等から近年高騰傾向にあり、TDR ベースでの見積額と近年の状況を反映し、幅のある見積額として表記した。また、加速器本体及び運転経費についても、コスト削減 R&D の成否により変動するため、幅のある見積額として表記した。為替変動については、比較を容易にするため前回報告と同じレートを用いた。労務費は TDR 上では人時で換算されているものを金額へ換算している。

※500GeV ILC（当初計画）と 250GeV ILC（見直し後）のコストの比較については別紙参照。

（1）本体建設費 6,350～7,028 億円（TDR 記載項目）

（内訳）

土木建築	1,110～1,290 億円（工事費）	}	5,152～
加速器本体	4,042～4,540 億円（超伝導加速空洞・設備費等）		5,830 億円
労務費	1,198 億円（=17,165 千人時（TDR では金額換算はされていない））		

（2）測定器関係経費 1,005 億円（TDR 記載項目）

（内訳）

測定器本体	766 億円
労務費	239 億円（=3,651 千人時（TDR では金額換算はされていない））

（3）不定性相当経費 （1）＋（2）の約 25%（TDR 記載項目）

※不定性：コスト見積りの精度に関するもののみを指し、技術リスク、工事期間の延長リスク、市場リスク等に伴うコスト増加分は含まれない。

- (4) 年間運転経費 366～392 億円 (TDR 記載項目)
(内訳)
光熱水料、保守 290～316 億円
労務費 76 億円 (=638 人／年 (TDR では金額換算はされていない))

- (5) その他付随経費 (TDR 未記載項目)
・ 準備経費 233 億円 (設計費用のほか、研究開発、環境調査、人材養成、技術移転、管理・事務の関連経費等)
・ TDR で具体的な経費が算定されていないものは、土地取得経費、海外研究者の生活環境の整備、アクセス道路、建設廃棄物処理、湧水処理設備、電力引込みや受変電設備の ES 事業⁶化、低圧電源設備、ライフライン等のインフラ、計算機センター等の経費

- (6) コンティンジェンシー プロジェクト経費 (本体及び測定器建設経費+運転経費⁷) の約 10% (PIP⁸ 記載項目)

※予期せぬ出費のための予備費。

- (7) 実験終了後の解体経費 年間運転経費の 2 年分程度 (TDR 未記載項目)

※建設時に組み込み・据付けしたものを解体するための経費。加速器機器は再利用を前提とする。地上に保管用建物確保、又は新たに整備し、再利用の可能性を保持する。

上記 (1) ～ (7) は、研究者コミュニティにより見込まれている経費を取りまとめたものであるが、これに加えて、3. で述べるコストのリスク要因や技術上の課題等による追加的な経費が発生するリスクに十分な留意が必要である。

3. コストのリスク要因や技術上の課題

前回報告においては、「建設開始までには準備期間 (4 年程度) を設け、技術的課題の解決及び必要な人材を養成することが必要であること」を前提として、諸課題を指摘した。

これを受けて、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) は準備期間における技術課題、組織・体制、人材及びその育成プラン策定のベースとなる KEK-ILC アクションプラン (2016 年 1 月) を策定し、同プランに基づき、本準備期間⁹ (4 年程度) に本格的な精査、技術

⁶ エネルギーサービス事業。施設が必要とする電力等のエネルギーについて、施設整備及びその後の運転管理を外部委託する事業。初期導入費用の低減、所要経費の平準化を図ることができる。

⁷ 「(4) 年間運転経費」×運転年数の額 (PIP では 20 年以上の運転が想定されている)。

⁸ 「プロジェクト実施計画 (Revised ILC Project Implementation Planning, Revision C)」(2015 年 7 月 LCB)

⁹ KEK-ILC アクションプランでは「予備準備期間」、「本準備期間」、「本建設期間」の 3 つの段階を想定して

実証を進めることとされており、そのために必要となる準備経費（一部国際協力を含む）は 233 億円と見積もられている。

また、以下に示す加速器の技術、トンネル建設、地震対策などに関する諸課題は、準備期間中の実証や実地でのトンネル建設等が開始されてから、その状況を踏まえて改めて仕様等を見直し、最適化を図る必要があるものも多い。それによる当初の費用の見積りからの増加を抑えるため、これまで研究者コミュニティにおいては様々な検討がなされ、また本作業部会においても議論が深められてきたところであるが、その性格上事前に具体的に算定することは難しい。そのため、以下においてはそれらにより見込まれる費用を基本的に明示せず記述しているが、状況によっては大きな費用の増加につながる可能性も否定できないことに留意が必要である。

（1）前回報告で指摘した課題への対応状況及び追加の指摘事項

前回報告で指摘した課題のうち、幾つかの課題では検討が進捗しているものの、多くの課題については、引き続き本準備期間に本格的な検討を行うとされている。今回の本作業部会で聴取した主な対応状況及びそれらに関連する新たな指摘事項は以下のとおり。

①コスト面でのリスクに関する課題

○ 超伝導加速空洞のコスト削減に向けて、日米共同研究により「低コスト・ニオブ材料の活用による超伝導高周波空洞材料の低価格化」¹⁰及び「低損失・高電界実現のための超伝導高周波空洞の表面処理」¹¹のコスト削減 R&D を進めている。

○ 前回報告で指摘した大量の高純度・高品位のニオブの必要性については、今回の見直しで加速空洞が 1 万 8,000 台から 9,000 台に変更されたことに加え、コスト削減 R&D によりニオブ材料をインゴットから直接スライスする工法を検討しており、これにより生産効率が向上した場合には、ILC で必要とする品質及び調達規模に見通しが得られる可能性が高まる。

○ 前回報告で指摘した見積りから漏れている項目のリストアップについては、「2.（5）その他付随経費」に「具体的な経費が算定されていないもの」として、新たに建設廃棄物処理、湧水処理設備、電力引込みや受変電設備の ES 事業化、低圧電源設備の経費を追加した。

おり、「本準備期間」は ILC 準備のための相当額の予算が措置されて進める準備期間とされている。

¹⁰ 超伝導加速空洞のニオブ材料精錬過程における純度及び残留抵抗比を最適化することにより、精錬コストを低減させる。また、インゴットから空洞用ディスク材を直接スライスして、従来の鍛造、圧延、機械研磨工程を省くことにより、コスト削減に資する。これにより 250GeV ILC では 1~2%の削減効果が期待できる。

¹¹ 米国フェルミ国立加速器研究所で開発された手法。超伝導加速空洞を熱処理する工程で一定圧力の窒素を導入し、加速勾配を向上させ、低損失を実現することで、空洞等の台数削減や空洞を冷却する冷凍機コストの削減に資する。これにより 250GeV ILC では 2~5%の削減効果が期待できる。

- 前回報告で指摘した不測の事態発生やコスト増への対応策については、LCB がまとめた PIP において想定されているコンティンジェンシー（予期せぬ出費のための予備費：プロジェクト経費（本体及び測定器建設経費＋運転経費）の約 10%）を 2.（6）に追加した。
- また、実験終了後の解体経費についても、今回新たに 2.（7）に追加した。KEK による検討では、年間運転経費の 2 年分程度と見積もられているが、今後さらに精度を高めるとともに、見積りを超過した場合も含め、この費用の国際分担の在り方についても検討すべきである。

②技術面での実現可能性に関する課題

- 前回報告以降、2017 年 9 月から ILC の 10 分の 1 規模の欧州 X 線自由電子レーザー（E-XFEL）がユーザー運転を開始したことにより、ILC が求める超伝導加速技術は技術的成立性が見通しが向上したが、一方で、コストが E-XFEL の TDR での計画に対し、完成時の本体建設費（準備及びコミッションングは除く）は約 10%増加している。コストアップの要因を検証し、本準備期間での ILC のコスト精査に反映させるべきである。
- 前回報告で指摘した性能実証が不十分な構成機器であるビームダンプや陽電子源、電子源、ビーム制御、ダンピングリングの入出射システム等については、いまだ課題が多い。
- 特に、ビームダンプについては、衝突エネルギーが 500GeV から 250GeV になったことで、設計の尤度は増加したものの、ハイパワーのビームを定常的かつ高い信頼性をもって受け続けられる窓の耐久性や窓の定期的な交換作業技術、耐震性能等を含め、本準備期間においてダンプシステムとして技術を完成させる必要がある。
- また、陽電子源で想定されているヘリカルアンジュレータ方式では、アンジュレータから放射されたガンマ線を照射して陽電子を生成するターゲットの熱負荷対策や、不具合の生じた放射化しているターゲットの交換方式などがまだ開発途上の技術であり、開発コストも含めて技術の選択を行うべきである。
- ILC は、巨大かつ複雑な加速器システムであり、長期間の安定な運転に耐えうる性能が求められていることを踏まえ、本準備期間において技術実証のめどをつけることが肝要である。

③建設・運転・マネジメントにおける人材確保に関する課題

人材確保に関する課題については、前回報告以降、本作業部会とは別に専門の作業部会を設置して更に検討を深め、国際リニアコライダー（ILC）に関する有識者会議において、平成 28 年 7 月に「人材の確保・育成方策の検証に関する報告書」を取りまとめている。

(2) 今回の当作業部会において特に抽出して検証した事項

前回報告で指摘された課題に対する検証に加え、今回の当作業部会においては以下の事項を抽出して検証を行った。その際、仮に国内に ILC を建設・運用する際に検討すべき法的な規制や過去の事例を参照しつつ想定される様々なリスク等について、外部委託により実施した調査分析結果も活用した^{1 2}。

①土木・建築（地下空間全般、衝突実験ホール、アクセストンネル・立坑）

○ 掘削工事においては、大量の掘削残土が発生することになるため、早い段階でその有効利用を含めた処理方法や処理場所の確保をしておく必要がある。特に、掘削残土に重金属等が含まれる場合には、その処理方法等についても検討し、関連機関との事前協議を進めておく必要がある。

○ 坑口部は地表部分に造ることになるため、工事中や運用中に周辺環境に与える影響は大きい。そのため、工事対象となる坑口周辺や掘削残土の捨場等において、事前の環境調査を適切に行い、法面崩壊や土砂災害の対策を行う必要がある。

○ トンネルの中央遮蔽壁の厚さを 3.5m から 1.5m に縮小したことにより、加速器ビーム運転中にはメンテナンス等のために高周波電源サイドに立ち入ることはできなくなったため、運営上の支障にならない工夫が必要である。

②放射線防護

○ トンネル周辺の土壌や地下水に、ビームラインからの放射化の影響を与えないために、ビーム損失は小さいという前提でトンネル壁は厚さ 30cm のコンクリートで覆うことでよいとしているが、この場合には、ビーム損失が前提を超えないように加速器機器や制御システムの信頼性をあげることで、信頼性の高いビーム損失モニタを装備するなどの配慮が重要である。

○ 現時点では、実験終了時の施設の取扱いについての検討が深まっていないが、今後、ビームダンプをはじめとする放射化された実験装置や空洞等について、実験終了後も含めた長期にわたる維持管理方法の検討が必要である。

^{1 2} 「国際リニアコライダー（ILC）計画に関する規制・リスク等調査分析」（平成 30 年 2 月 株式会社野村総合研究所）

③地震対策

- 地下構造物の耐震設計に関して、明確に規定されている法・規制等は存在しない。しかし、衝突実験ホールとその周辺は、一般見学者も出入りする可能性があることから、地上建築構造物に適用されている建築基準法等に即した耐震設計が求められる可能性がある。また、適用されない場合においても、管轄自治体との協議結果によっては、同様な耐震に関する基準類が準用される可能性があることに留意が必要である。
- 他方、施設設備については、土木学会により示されたガイドライン¹³を踏まえた耐震性能の確保を基本方針として位置付けている。また、近年の大規模地震によるトンネルの損傷事例も鑑み、覆工コンクリートの損傷・剝落などを防止する観点から、耐震補強の導入を想定しており、これらの対策を確実に行うことが重要である。
- ILC 施設はトンネル全長が長大であるため、個々の施設・設備が設置される地盤は均質堅固な岩盤とは限らず、部分的に断層・弱層等に近接する場合や、地震で湧水量が急増する可能性なども否定できないため、現地の詳細な調査・試験を行い、その結果を踏まえた地下構造物の設計を行う必要がある。
- 特にメインライナックトンネルにおいては、全長にわたり所要の性能レベルの地震時安定性が確保されるとともに、排水、給排気、照明、通行、通信等の基本的機能が常に維持されるよう設計を行う必要がある。
- いまだ耐震性能の具体的な検討に至っていない一部の施設設備については、詳細な検討が必要である。

④湧水対策

- 空洞掘削時に遭遇する地山状況は事前の調査では把握しきれないことも多い。このため、施工中に岩盤剝落や大量湧水などの変状現象に遭遇した場合は、建設工事の費用や工期に大きく影響するリスクがある。
- 特に、湧水に重金属等が混じっている場合には、そのまま流すことはできないので、当該区間を特定して他の湧水とは分離し、個別に処理する設備及びコストがかかることに留意が必要である。
- 現在の見積りは、地下水が一様に染み出す前提での設計に基づいているが、花こう岩地盤における地下水の流れ方は一様ではなく、局所に偏在しているため、水量が局

¹³ 「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」（2014年3月 土木学会 岩盤力学委員会 国際リニアコライダー施設（ILC）の土木工事に関する標準示方書策定小委員会）

所的に増える可能性がある。それに対応するために新たな処理システムと設置工事費が必要となるリスクがある。

⑤環境影響

- ILC 施設は、大部分が地下空間に設置されるため、地上施設に比べて、環境影響評価法に規定されている環境アセスメントの適用範囲が狭くなる可能性がある。他方で、ILC 施設は、建設や運用面で環境に与える影響が大きいことから、法令を遵守するだけでなく、十分な環境アセスメントの実施や社会への説明責任を果たすことが重要である。

- 地下空間の建設に伴い、周辺の地下水が集まることもあり、地質条件次第では、広範囲にわたって地下水位が低下する現象が生じる可能性がある。このため、建設工事の前後や途中段階において、植生や生態系、小川・沢等の水量などを入念に調査して、工事の影響を把握することも必要である。

- 環境アセスメントは通常3～5年程度は必要であるが、想定していなかった問題に遭遇することも多々あるため、さらに長い期間を要する可能性にも留意する必要がある。

本部署で聴取したILC計画の見積りの概要 (500GeV ILC / 250GeV ILC比較表)

別紙

項目	250GeV ILC (見直し後)	
	Option A (ヒッグスファクトリーとしての250GeV ILC)	Option A' (左記にコスト削減R & Dの効果を最大限見込んだもの)
500GeV ILC (当初計画)	本部署で聴取した見積り額	

(※) (1) ~ (7) は、研究者コミュニティにより見込まれている経費を取りまとめたものであるが、これに対して、本部署における検証の結果、報告書において、「コストのリスク要因や技術上の課題」を指摘しており、今後、追加的な経費が発生するリスクに十分な留意が必要である。

本体及び測定器建設経費	1兆912億円	7,355~8,033億円	7,853億円~8,033億円	7,355億円~7,535億円
(1) 本体建設費 (TDR記載項目) 【見直し】	9,907億円	6,350~7,028億円	6,848億円~7,028億円	6,350億円~6,530億円
土木建築	8,309億円	5,152~5,830億円	1,110億円~1,290億円	1,110億円~1,290億円
加速器本体	6,709億円	4,042~4,540億円	4,540億円	4,042億円
労務費	1,598億円	1,198億円	1,198億円	1,198億円
(2) 測定器関係経費 (TDR記載項目) 【変更なし】	1,005億円	1,005億円	1,005億円	1,005億円
測定器本体	766億円	766億円	766億円	766億円
労務費	239億円	239億円	239億円	239億円
(3) 不定性相当経費 (TDR記載項目) 【変更なし】	(1)+(2)の約25%	(1)+(2)の約25%	(1)+(2)の約25%	(1)+(2)の約25%
* 不定性：コスト見積りの精度に關するもののみを指し、技術リスク、工事期間の延長リスク、市場リスク等に伴うコスト増加分は含まれない。				

(3) 不定性相当経費及び上記(※)の「コストのリスク要因や技術上の課題」による追加的な経費が発生する可能性あり

(4) 年間運転経費 (TDR記載項目) 【見直し】	491億円	366~392億円	392億円	366億円
光熱水料、保守	390億円	290~316億円	316億円	290億円
労務費	101億円	76億円	76億円	76億円
(5) その他付随経費 (TDR未記載項目)				
準備経費 (設計費用のほか、研究開発、環境調査、人材養成、技術移転、管理・事務の関連経費(労務費含む)等)	算定なし	233億円	233億円	233億円
具体的に算定されていないものの計上が必要となる経費 土地取得経費、海外研究者の生活環境の整備、アクセス ： 道路、ライフライン等のインフラ、計算機センター等	算定なし	算定なし	算定なし	算定なし
(6) コンテナエンジニア プロジェクト経費(本体及び測定器建設経費 + 運転経費*)の約10% (PIP記載項目)				
【新たに追加】	予期せぬ出費のための予備費。			* 年間運転経費 × 運転年数の額。
(7) 実験終了後の解体経費 年間運転経費の2年分程度				
【新たに追加】	加速器機器は再利用を前提とし、地上に原管井建物確保、又は新たに整備し、再利用の可能性を保持			