

回答

国際リニアコライダー計画の見直し案
に関する所見



平成30年（2018年）12月19日

日本学術会議

この回答は、文部科学省研究振興局長からの審議依頼を受けて、日本学術会議に設置した国際リニアコライダー計画の見直し案に関する検討委員会及び同委員会技術検証分科会が中心となり審議を行ったものである。

日本学術会議 国際リニアコライダー計画の見直し案に関する検討委員会

委員長	家 泰弘	(連携会員)	日本学術振興会理事、東京大学名誉教授
副委員長	米田 雅子	(第三部会員)	慶応義塾大学先端研究センター特任教授
幹 事	西條 辰義	(第一部会員)	高知工科大学経済・マネジメント学群教授、 総合地球環境学研究所特任教授
幹 事	田村 裕和	(第三部会員)	東北大学大学院理学研究科教授
	小林 傳司	(第一部会員)	大阪大学教授・理事・副学長
	梶田 隆章	(第三部会員)	東京大学卓越教授、特別栄誉教授、 宇宙線研究所所長
	上坂 充	(連携会員)	東京大学大学院工学系研究科教授
	杉山 直	(連携会員)	名古屋大学大学院理学研究科教授
	永江 知文	(連携会員)	京都大学大学院理学研究科教授
	平野 俊夫	(連携会員)	国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構理事長

日本学術会議 国際リニアコライダー計画の見直し案に関する検討委員会 技術検証分科会

委員長	米田 雅子	(第三部会員)	慶応義塾大学先端研究センター特任教授
副委員長	嘉門 雅史	(連携会員)	一般社団法人環境地盤工学研究所理事長、京都大学名誉教授
幹 事	西條 辰義	(第一部会員)	高知工科大学経済・マネジメント学群教授、大学 共同利用機関法人総合地球環境学研究所特任教授
幹 事	中静 透	(連携会員)	大学共同利用機関総合地球環境学研究所プログラ ム・ディレクター・特任教授
	家 泰弘	(連携会員)	日本学術振興会理事、東京大学名誉教授
	望月 常好	(連携会員)	一般財団法人経済調査会理事長、公益社団法人日 本河川協会参与
	田中 均	(特任連携会員)	理化学研究所放射光科学研究センター副センター長

本回答の作成にあたり、以下の方々にご意見をいただいた。

千原 由幸	文部科学省大臣官房審議官（研究振興局担当）
中田 達也	スイス連邦工科大学ローザンヌ校教授

中野 貴志		大阪大学核物理研究センター長
藤井 恵介		大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構素粒子原子核研究所教授
道園真一郎		大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構加速器研究施設加速器第六研究系主幹
横溝 英明		一般財団法人総合科学研究機構理事長兼中性子科学センター長
近久 博志		株式会社地盤システム研究所所長
宮原 正信		大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構加速器研究施設研究支援員
矢島 大輔		株式会社野村総合研究所社会システムコンサルティング部上級コンサルタント
観山 正見	(連携会員)	広島大学学長室特任教授
山内 正則	(連携会員)	大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構長
神尾 文彦		株式会社野村総合研究所社会システムコンサルティング部部長
熊谷 教孝		公益財団法人高輝度光科学研究センター名誉フェロー
佐竹 繁春		株式会社野村総合研究所社会システムコンサルティング部上級コンサルタント
相原 博昭	(連携会員)	東京大学大学執行役・副学長、大学院理学系研究科教授
羽島 良一		国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構上席研究員、日本加速器学会会長
浅井 祥仁	(連携会員)	東京大学大学院理学系研究科教授
細谷 裕		大阪大学名誉教授
中家 剛		京都大学大学院理学研究科教授

なお、道園参考人の随行者として出席された、山本明 高エネルギー加速器研究機構名誉教授、山下了 素粒子物理国際研究センター特任教授、等からもご意見をいただいた。

本回答の作成にあたり、以下の職員が事務を担当した。

事務局	犬塚 隆志	参事官（審議第二担当）
	高橋 和也	参事官（審議第二担当）付参事官補佐
	小河原啓介	参事官（審議第二担当）付審議専門職
	大澤 祐騎	参事官（審議第二担当）付審議専門職付

1 作成の背景

国際リニアコライダー（International Linear Collider: ILC）計画は、高エネルギー電子・陽電子衝突実験のための直線状加速器（線形加速器）を建設してヒッグス粒子に関する研究等を進める、素粒子物理学分野の国際プロジェクトである。

平成30年7月20日付けで、文部科学省研究振興局長より日本学術会議会長宛てに「国際リニアコライダーに関する審議について（依頼）」が寄せられたことを受けて設置された「国際リニアコライダー計画の見直し案に関する検討委員会」及び「技術検証分科会」では、ILC計画が長期にわたる巨額の資金投下と国際協力を必須とする超大規模国際プロジェクトであるところから、その学術的意義や技術的实施可能性をはじめとする計画内容、及び、国内外の関連研究機関における推進体制や経費の国際分担に関する点も含む準備状況等に関して審議を行った。

2 回答の内容

● ILC 計画（見直し案）における研究の学術的意義、ILC 計画（見直し案）の素粒子物理学における位置づけについて

現在の素粒子物理学において、「標準模型を超える新物理」の追究が最重要課題であることに異論はない。そして「標準模型を超える新物理」の探索には加速器・非加速器ともに様々な実験的アプローチがある。その中で、ヒッグス結合の精密測定という研究課題が極めて重要なものであることについては高エネルギー素粒子物理学のコミュニティにおいて合意が得られている。しかしながら、素粒子物理学分野における諸研究プロジェクトへの人材配置や予算の配分にまで踏み込んだ議論の段階には至っていない。

● ILC 計画（見直し案）の学術全体における位置づけについて

ILC 計画は、学術会議のこれまでのマスタープラン策定において提案され検討された数々の大型研究施設計画と比べても所要経費が格段に大きく、かつ、建設開始から研究終了までの期間が 30 年という長期にわたる超大型計画である。こうした計画を国民に提案するには学術界における広い理解と支持が必要と思われる。素粒子物理学分野のみならず、他の諸学問分野の大型研究計画も含めた広い視野での ILC の位置づけに関しては、更に広範な議論が必要である。

● ILC 計画（見直し案）を我が国で実施することの国民及び社会に対する意義について

ILC 計画は他の多くの純学術的研究と同様、知の探究という意味で、国民の知的関心を喚起するものである。また、世界のトップクラスの科学者と切磋琢磨する環境において高度の研究人材が育成され、世界に輩出されていく拠点として発展するならば、その意義は大きい。

一方、純学術的意義以外の技術的・経済的波及効果については、ILC によるそれらの誘発効果は現状では不透明な部分があり、限定的と考えられる。ILC 計画に関して、学術的意義の説明に加えて、地域振興の文脈で語られている事項及び土木工事や放射化物

生成の環境への影響に関する事項等について、国民、特に建設候補地と目されている地域の住民に対して、科学者コミュニティからの正確な情報提供に基づいて一層充実した対話がなされることが肝要である。

● ILC 計画（見直し案）の実施に向けた準備状況と、建設及び運営に必要な予算及び人的資源の確保等の諸条件について

ILC 計画はその実施に必要な予算及び人的資源の規模からして、従来にない強固な国際協力によらなければ実施可能なものでないことは明白である。現時点では、資金面での適正な国際経費分担に関して明確な見通しは得られていない。また、ILC 加速器施設の建設に必要とされている人的資源の確保に関する見通しは明らかでない。特に加速器関係の研究者・技術者は日本の現状では不足しており、新たな人材育成や海外からの参画によって賄うと説明されているが、不確定要素が大きい。

総合所見

250 GeV ILC 計画は、建設及び運転に長期間にわたる巨額の予算投入を要するものである一方、想定される主要な成果は、ヒッグス粒子の結合定数の精密測定の結果、標準模型からのズレが見いだされれば、今後の素粒子物理学が進む方向性に示唆を与える可能性がある、というものである。検討委員会としては、将来の方向性に示唆を与える可能性がある、とされるところの想定される科学的成果が、それを達成するために要するとされる巨額の経費の主要部分を日本が負担することに十分に見合うものである、との認識には達しなかった。また、250 GeV ILC の技術的成立性に関しては、克服すべき諸課題が残されており、それらは準備期間において解決するとされているものの、本計画の実施には依然として懸念材料があると言わざるを得ない。さらに、30 年という長期にわたる本計画の実施に要する巨額の資金投下に関する適正な国際経費分担の見通しが明らかでない点も懸念材料である。

現状で提示されている計画内容や準備状況から判断して、250 GeV ILC 計画を日本に誘致することを日本学術会議として支持するには至らない。政府における、ILC の日本誘致の意思表示に関する判断は慎重になされるべきであると考ええる。

自然界の基本構成を追究する素粒子物理学は、これまで、理論研究と加速器を用いた実験研究の連携により素晴らしい成果を挙げ、「標準模型」という金字塔を打ち立てた。現今の重要課題は「標準模型を超える物理」の開拓であり、ILC 計画もそれを目指したものである。近未来における加速器ベースの高エネルギー素粒子実験の望ましい進め方として、エネルギー・フロンティアを追究するハドロンコライダー（現状では LHC 及びその将来計画）と、これと相補的な役割を担うハイ・ルミノシティのレプトンコライダーを世界のどこかに実現することが考えられている。一方では、人類が持つ有限のリソースに鑑みれば、高エネルギー物理学に限らず、実験施設の巨大化を前提とする研究スタイルは、いずれは持続性の限界に達するものと考えられる。ビッグサイエンスの将来の在り方は、学术界全体で考えなければならない課題である。

目 次

1	はじめに.....	1
(1)	審議の背景.....	1
(2)	審議に際しての基本的考え方.....	2
2	ILC が目指す物理	3
(1)	高エネルギー加速器実験の発展.....	3
(2)	13 TeV LHC の結果を踏まえた ILC 計画の見直し	4
(3)	250 GeV ILC 計画の目標	5
3	ILC 実験施設	6
(1)	ILC 加速器の構成	6
①	超伝導高周波加速管.....	6
②	陽電子源.....	7
③	ビーム収束と位置制御.....	7
④	検出器.....	7
⑤	ビームダンプ.....	7
⑥	総合システムとしての ILC	8
(2)	土木工事.....	8
(3)	人員・人材、運営体制、国際協力.....	9
(4)	安全性、環境への影響.....	10
(5)	技術的・経済的波及効果.....	10
(6)	必要経費、国際経費分担、予算の仕組み.....	11
(7)	「学術の大型研究計画に関するマスタープラン」との関係.....	12
4	所見.....	12
	＜用語の説明＞.....	16
	＜参考文献＞.....	19
	＜参考資料 1＞ 審議経過.....	21
	＜参考資料 2＞ 文部科学省研究振興局長からの審議依頼.....	23

1 はじめに

(1) 審議の背景

国際リニアコライダー（International Linear Collider: ILC）計画は、高エネルギー電子・陽電子衝突実験のための直線状加速器（線形加速器）を建設して素粒子の研究を進める、素粒子物理学分野の国際プロジェクトである。ILC 計画は、現在、欧州合同原子核研究機構（CERN）で稼働している大型ハドロンコライダー（Large Hadron Collider: LHC）と相補的な位置づけにあるレプトンコライダーの次期計画として構想されてきたものである。

国際将来加速器委員会（International Committee for Future Accelerator: ICFA）の下での国際共同設計チーム（Global Design Effort: GDE）によって2013年に取りまとめられ発表されたILCの技術設計報告書（Technical Design Report: TDR）[1]では、最高衝突エネルギー500 GeVで設計がなされていた。

国際リニアコライダー計画に関して、日本学術会議が文部科学省から審議依頼を受けて審議を行うのは今回が2度目である。前回の審議について簡単に復習しておく。平成25年5月27日付けで文部科学省研究振興局長から日本学術会議会長宛てに審議依頼が寄せられた。これを受けて「日本学術会議国際リニアコライダー計画に関する検討委員会」が設置された。7回の審議を経て取りまとめられた回答は、幹事会における承認手続きを経て、平成25年9月30日に会長から研究振興局長に手交された。

回答「国際リニアコライダー計画に関する所見」[2]（以下、「前回回答」）では、その時点で存在した多くの不確定要素について、可能な限り明確にしていくことが必要との観点から、「ILC 計画の実施の可否判断に向けた諸課題の検討を行うために必要な調査等の経費を政府においても措置し、2～3年をかけて、当該分野以外の有識者及び関係政府機関も含めて集中的な調査・検討を進めること」を提言した。特に検討すべき重要課題として以下の項目を挙げた。

- 1) 高度化されるLHCでの計画も見据えたILCでの素粒子物理学研究のより明確な方針
- 2) 国家的諸課題への取り組みや諸学術分野の進歩に停滞を招かない予算の枠組み
- 3) 国際的経費分担
- 4) 高エネルギー加速器研究機構（KEK）、大学等の関連研究者を中心とする国内体制の在り方
- 5) 建設期及び運転期に必要な人員・人材、特にリーダー格の人材

「前回回答」では結語として、「国際リニアコライダーを我が国に誘致することの是非を判断する上で、これらの課題について明確な見通しが得られることが必要である。」とした上で、「日本学術会議は、上記の調査・検討を踏まえて、改めて学術の立場からの見解を取りまとめることにより、政府における最終的判断に資する用意がある。」と表明したところである。

文部科学省においては、この「前回回答」を受けて、平成26年5月に「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」）を設置し、その下

に「素粒子原子核物理作業部会」、「技術設計報告書（TDR）検証作業部会」、「人材の確保・育成方策検証作業部会」、「体制及びマネジメントの在り方検証作業部会」の4つの作業部会を設けて審議を進めるとともに、関連事項に関する委託調査事業を実施した。

一方、その間に、欧州合同原子核研究機構（CERN）の大型ハドロン衝突型加速器（LHC）においては、2012年の「ヒッグス粒子発見」という画期的な成果に引き続き、衝突エネルギーを13 TeVに増強した実験が進められた。13 TeV LHCにおける実験結果を踏まえつつ、当該分野の国際的な研究者組織であるリニアコライダー・コラボレーション（LCC）において「ILC計画の見直し」が行われた。ILCの研究課題を「ヒッグス粒子の精密測定」に特化するという戦略が立てられ、その目的に最適化する観点からILCの衝突エネルギーを当初計画の 500 GeV から 250 GeV に変更するという選択がなされた。この方針変更は、リニアコライダー国際推進委員会（LCB）における審議を経て国際将来加速器委員会（ICFA）において承認された。

このILC計画の見直しを受けて、有識者会議における審議が改めて行われ、平成30年7月4日に、報告書「国際リニアコライダー（ILC）に関する有識者会議 ILC計画の見直しを受けたこれまでの議論のまとめ」[3]（以下、「これまでの議論のまとめ」）として取りまとめられた。

平成30年7月20日付けで、文部科学省研究振興局長より日本学術会議会長宛てに「国際リニアコライダーに関する審議について（依頼）」（参考資料2）が寄せられたことを受けて、「国際リニアコライダー計画の見直し案に関する検討委員会」（以下、「検討委員会」）及び「技術検証分科会」（以下、「分科会」）が設置された。

（2） 審議に際しての基本的考え方

日本学術会議は日本の科学者コミュニティの代表機関として、あらゆる学問分野における知の探究を奨励するとともに、学術の振興及び知の普及や成果の社会還元に資する施策を検討し、提言等を発出している。知のフロンティア開拓に挑戦する研究計画についてはその学術的意義や実施可能性が認められればそれを支持するのが基本的スタンスである。さらに、学術には人類共通の目標にむかって、国の枠を越え、多様性を活かした協同作業により世界平和に貢献できる力があることから、国際協力による学術研究の推進も奨励しているところである。

日本学術会議は、声明「日本の科学技術政策の要諦」（平成17年4月2日）[4]以降、多くの提言や報告等で、大型科学研究設備は、①計画を国際的に開かれた共同研究の場として提供することによって、人類の新しい知の創造に貢献するとともに世界の次世代人材育成に貢献するものであること、②そのことが国家の信頼を構築し、ひいては国家安全保障の根幹となり、国家基盤形成への「投資」という認識が重要であること、また、③透明で適切かつ公平な科学的評価と審査を経て着実に進めていくことが重要であること、を指摘してきた。

本件（国際リニアコライダー計画）のような巨大研究施設建設を伴う国際プロジェ

クトに関してはその学術的意義や技術的実現性はもとより、それを日本に誘致するに際して、建設及び維持・運転に要する経費とその負担の在り方、国際協力も含めた計画実施の見通し、関連学術コミュニティの広い理解や支持、設置候補サイト周辺への影響、等の諸条件を特に慎重に精査することが求められる。検討委員会及び分科会としては、現在提示されている 250 GeV ILC計画の計画内容や準備状況から判断して、多様な分野の研究者を代表する組織たる学術会議としての認識・見解を示すことによって「審議依頼」に対する「回答」とするという観点から審議を行った。

検討委員会においては主として、素粒子物理学及び関連分野におけるILC計画の位置づけ、ILCが目指す物理の学問的意義、ILC計画の実施可能性、運営体制及び人的資源、国際協力、等について審議を行った。分科会においては主として、ILC加速器の技術開発、土木工事、安全対策、環境影響、技術的・経済的波及効果、等について審議を行った。審議に際しては、TDR [1]、文部科学省ILCに関する有識者会議による「これまでの議論のまとめ」[3]及びその他のILC関連資料[5-16]を参照するとともに、適宜参考人の出席を求めてヒアリングを行うなどして、必要な情報の収集に努めた。また、審議期間中に、学術会議会長宛てないしは検討委員会委員長宛てとして、様々な意見書等が学術会議事務局に届けられた。それらの意見書等は、その都度、検討委員会・分科会の参考資料として委員間で共有して審議に役立てた[17]。

2 ILCが目指す物理

(1) 高エネルギー加速器実験の発展

素粒子物理学実験は、19世紀末の電子や放射線の発見に始まり、1930年代からの加速器の発達によって、より高エネルギー領域へと探索範囲を拡張してきた。この間、その時代における最高エネルギーを実現する加速器を用いることで、次々と新たな素粒子の発見がなされた。初期の加速器実験装置は、加速ビームを固定ターゲットに入射させる方式であったが、より高いエネルギー領域にアクセスするためには、加速粒子を正面衝突させる衝突型加速器のほうが、ビームエネルギーをより有効に利用できることから、最近では衝突型加速器が主流となっている。

加速器ベースの素粒子物理学実験は、その時点で到達し得る最高エネルギー領域での新現象を探究するエネルギー・フロンティアのアプローチと、事象の観測頻度を上げて統計的精度を増すことによってより精密な物理の議論を展開するインテンシティー・フロンティアのアプローチとがあいまって発展してきた。前者としては近年のヒッグス粒子の発見に至るまで多くの新粒子の発見がなされたことからその有効性は明らかである。後者としてはK中間子やB中間子の精密測定によるCPの非保存の研究などが良い例である。なお、加速器ベースの実験と並んで、非加速器実験も独自の発展を遂げて素粒子物理学の発展に貢献してきたことは、古くは宇宙線による陽電子やミュオンの発見、最近では地下でのニュートリノ研究などの事例が示すとおりである。

上述のように、近年のエネルギー・フロンティアの実験的探究には、加速ビームの

エネルギーが素粒子反応に最も有効に使われる衝突型の加速器（コライダー）が専ら用いられる。衝突型加速器はその形態によってリングコライダー（円形衝突加速器）とリニアコライダー（線形衝突加速器）とに大別される。また、衝突させる粒子の種類により、陽子などのハドロンを加速ビームとして用いるハドロンコライダーと、電子などのレプトンを用いるレプトンコライダーとがある。ハドロンコライダーの場合は、以下に述べるシンクロトロン放射によるエネルギー損失がほとんど問題とならないため高エネルギーまで加速可能であり、エネルギー・フロンティアの開拓に適している。一方、ハドロンコライダーでは複合粒子であるハドロン同士を衝突させるため、実際に起こるイベントの素過程は、それらを構成するクォークなどの素粒子の衝突であり、加速されたハドロンが持つエネルギーの一部分のみが素粒子反応に関与し、実効的な衝突エネルギーがイベントごとにまちまちである。また、バックグラウンド事象が非常に多い。これらの理由から、実験データの解析が複雑となる。それに対して、レプトンコライダーは、素粒子である電子と陽電子の衝突であることから、反応がクリーンで解析に曖昧さが少ないという特徴を有する。さらに、加速粒子のエネルギーのすべてが衝突時の反応に使われることや、バックグラウンド事象が少ないことなどの利点がある。

電子や陽電子をリング加速器で加速する場合、シンクロトロン放射によるエネルギー損失が大きな障害となる。1周回あたりの放射エネルギー損失は、ビームエネルギー E と加速粒子の質量 m の比 (E/m) の4乗に比例し、リングの半径 R に反比例する。レプトンコライダーのエネルギー・フロンティアとしては、CERNのLEP2において達成された 209 GeVがこれまでの最高である。LEP2のトンネル（周長27 km）は、実験終了後ハドロンコライダーに転用されてLHCとなった。LEP2の衝突エネルギーを大幅に超えるような電子・陽電子コライダーを実現するには、例えば周長100 kmといった巨大リングを作るか、リニアコライダー方式を採るかという選択になる。

ハドロンコライダーとレプトンコライダーの上記のような特性の違いに鑑み、エネルギー・フロンティアを追究しているLHC（及びその将来のアップグレード版）と相補的な役割を担うハイ・ルミノシティで素粒子の詳細な研究に適しているレプトンコライダーを実現することが構想されてきた。

(2) 13 TeV LHCの結果を踏まえた ILC 計画の見直し

8 TeV LHCにおける2012年のヒッグス粒子発見に引き続いて行われた13 TeV LHCにおける実験において新粒子の兆候が見いだされなかったことから、ILCの研究目標をヒッグス結合の精密測定に絞り、その目的に最適化するために、当初の500 GeV計画を見直して250 GeV計画としたことは妥当な戦略と考えられる。この選択により、当初の500 GeV ILC計画の中核をなしていた下記3つのシナリオのうち、2)と3)はスコープから外れることとなった。また、13 TeV LHCの実験結果を見ると、250 GeV ILCでの直接的な新粒子発見の可能性は低くなった。

- 1) 250 GeV における Zh 随伴生成過程の研究
- 2) 350 GeV 付近の tt 対生成及び WW 融合過程によるヒッグス生成の研究
- 3) 500 GeV でのヒッグス自己結合とトップ湯川結合の直接測定

見直し後の 250 GeV ILC 計画の主目的は、ヒッグス・ファクトリーとして、ヒッグス結合の精密測定を進めるというものである。想定される主要な成果は、「標準模型におけるヒッグス場の性質との差異を発見し、その背後にある物理像に対するヒントを得る。」

(高エネルギー物理学将来計画検討委員会答申) [6]、ないしは、「ヒッグス粒子の結合定数の精密測定の結果、標準模型からのズレが見出されれば、今後の素粒子物理学が進む方向性に示唆を与える可能性がある」(ILC に関する有識者会議「これまでの議論のまとめ」) [3]、と表現されている。検討委員会でも ILC で期待される学術成果に関して、これらと同じ認識を持ったところである。

なお、LHC では観測の死角にある事象、例えばヒッグスの暗黒物質への崩壊、暗黒物質の対生成、ヒッグシーノ等の質量差の小さい超対称性粒子の生成などが 250 GeV ILC において発見される可能性は排除されない。しかし、それらは上記の 250 GeV ILC の主目的に付加されるボーナスとしての可能性と位置づけられているものである。

電子・陽電子コライダーで 250 GeV というのは、リニアコライダーでも、リングコライダーでも実現可能という意味で微妙なエネルギー領域である。現時点での加速器技術を前提とするなら、前者としては ILC のような全長 20 km 程度の線形加速器、後者としては周長 100 km 程度の円形加速器が想定される。100 km リングコライダーの場合は、かつて CERN において LEP2 のトンネルが LHC に転換されたように、レプトンコライダーとしての実験終了後に、トンネルを再利用してハドロンコライダーに転換し、更なるエネルギー・フロンティア (例えば 100 TeV) を狙うというシナリオが描かれる。リニアコライダーはトンネルの延長もしくは高周波加速管の画期的性能向上によって、更なる高エネルギーのレプトンコライダーとするポテンシャルを有している。また、スピン偏極した電子ビームが (更には陽電子生成の方法によってはスピン偏極した陽電子ビームも) 得られることから、より情報量に富む精密測定が行えるという特徴を持っている。ただし、もしも 250 GeV までの電子・陽電子衝突実験や、今後 LHC をアップグレードして作られるハイ・ルミノシティ LHC (HL-LHC) における陽子・陽子衝突実験において、標準模型を超える新物理の兆候が見いだされない場合には、「新物理」のエネルギースケールが TeV スケールよりも更に高いところにあることが示唆されるため、現在想定できるレプトンコライダーの更なるエネルギー増強による探索エネルギー領域の拡大では、「新物理」の探究が困難であることを意味することになる。

(3) 250 GeV ILC 計画の目標

250 GeV ILC 計画における実験の主たる目標は、ヒッグス粒子と種々の素粒子との結合定数を精密に測定し、標準模型の予測からのズレの有無を検証することにある。標準模型は素粒子の世界で言う「低エネルギー領域」の事象を極めてよく記述する理論体系

として確立している。一方では、様々な実験・観測的証拠により標準模型を超える物理が必須であることが認識されている。標準模型ではヒッグス結合定数は各素粒子の質量に比例することになっているが、もしそこからのズレが見いだされれば、そのズレのパターンによって、標準模型を超える「新物理」の方向性が示唆されると考えられている。250 GeV ILC では、建設後コミッショニングを経て約 20 年間の運転で、積算ルミノシティ 2000 fb^{-1} を得ることを計画している。それだけのデータ量によって、1 パーセント・オーダーの精度（不確かさの数値の詳細はそれぞれの素粒子によって異なる）で結合定数が決定されると見込まれている。標準模型の予想からのズレのパターンとして想定されるシナリオのいくつかのものが提示されており、余剰次元を示唆するケースや、ヒッグス粒子が複合粒子であることが示唆されるケース、などが論じられている。

標準模型からのズレがどのような現れ方をするかは、当然ながら実際に測定をしてみなければわからない。仮に標準模型からのズレが見いだされない場合には、「新物理」が、TeV スケールよりも更に高いエネルギースケールにあることが示唆される。その場合には、「ナチュラリティ」の観点から謎が深まり、自然界の成り立ちに関して重大な理論的問題を提起することになる一方、更なる高エネルギー領域へと加速器をアップグレードすることによって、問題に実験的にアプローチすることが困難という状況になる。逆に、標準模型からのズレが予想よりもずっと大きい場合には、ILC よりも先に HL-LHC においてそれが見いだされる可能性もある。

3 ILC 実験施設

(1) ILC 加速器の構成

ILC 加速器の主要構成要素として、電子源、陽電子源、ダンピングリング、超伝導加速管と高周波電源、最終ビーム収束部、検出器、ビームダンプなどがある。それらの個別要素とともに、異常事態に対処するインターロックなど、事故を未然に防ぎ長期的にわたる安定的な運転を担保するためのハード・ソフト両面の総合システムが必須である。未踏領域への挑戦である ILC 計画のようなプロジェクトに不確実性が伴うことは十分に理解するものの、巨額の予算投入を前提とした計画である以上、計画段階において考えうる限りのシナリオを周到に描き、「積算ルミノシティ 2000 fb^{-1} のデータ蓄積」という実験目標の完遂を担保するように万全を期すべきである。しかしながら、TDR 及び今回の審議におけるヒアリングでは、個別機器の技術的課題やコスト削減への取組については説明があったが、技術開発や製造工程が計画どおりに進まないことによる全体工程の変更やコストの増加の可能性の検討とその対策、すなわち、プラン A（計画どおり）を補完するプラン B、プラン C の検討状況が見え難かった点が懸念されるところである。

以下、主要構成要素ごとに所見を述べる。

① 超伝導高周波加速管

全体経費の相当部分が、超伝導高周波加速管及びそれらを収めたクライオモジュール

ルの製作費である。超伝導高周波加速管の加速勾配の設計基準値は、現時点での達成可能な技術レベルに基づいて 35 MV/m とされている。これを確実に歩留まり良く実現することは必須であり、更なる性能向上も望まれるところである。また、数多くの超伝導高周波加速管が、参加各国の分担によりインカインド（現物）で供給されることが想定されていることから、それらの整合性の担保を含む品質管理は重要なポイントとなろう。

② 陽電子源

陽電子生成の方法として、ヘリカル・アンジュレータ方式と従来型ターゲット方式の2案が併記されている。前者は偏極陽電子ビームが得られるメリットがあるが、技術的に未経験で多くの開発要素を含んでいる。後者にしても所定のビーム強度を安定的に得ることは決して容易な達成目標ではない。現段階では、ベースラインとしてアンジュレータ型、バックアップとして電子駆動型が検討されており、両者に共通の要素である回転ターゲットについて研究開発が行われている。準備期間において、回転ターゲットのプロトタイプ作製と陽電子源直後の磁場による収束系の開発を進め、準備期間の2年目までにはどちらの方式を採用するか技術選択を行う必要があるとしているが、開発コストも考慮して方針を明確にすべきであろう。なお、250 GeV ILCの主目的であるヒッグス結合の精密測定には偏極陽電子ビームは必ずしも必須ではないとの説明であった。

③ ビーム収束と位置制御

衝突のルミノシティを上げるために、ダンピングリングで電子及び陽電子ビームのエミッタンスを十分に小さくし、それぞれを主加速管で加速した上で、ビーム径を絞ってナノメートル精度で正面衝突させることが想定されている。現在までに多くの技術開発がなされている。目標とするルミノシティを確実に達成するためには、ビーム収束及び位置合わせに関する制御・フィードバック系に関する技術の確立や、衝突点サイトにおける常時微細動の許容レベルに関する定量的評価などに関して、準備期間において十分な検討が進められなければならない。

④ 検出器

検出器については、シリコントラッカー方式のSiDと、タイムプロジェクション・チェンバー方式のILDの2種類が提案されている。LHCのようなリングコライダーでは複数の衝突点に設置された検出器で同時かつ互いに独立に実験を進行させることができるのに対して、リニアコライダーの場合、衝突点は1つなので、検出器をプッシュプル方式で入れ替えることが想定されている。2台の検出器のマシントime配分やデータ共有の在り方に関するマネジメントの工夫が必要となろう。

⑤ ビームダンプ

高エネルギーに加速された電子及び陽電子ビームは衝突点を通過した後、ビームダンプに入射する。ビームダンプは、沸騰抑制のために圧力を高めた水で満たされている。窓材や水ダンプへの局所的負荷を分散するためにビーム入射点を高速で回転掃引する設計となっている。ILCの運転に伴う放射化によって、ビームダンプにはトリチウム等の放射性物質が生成・蓄積される。窓材の健全性モニタリング、遠隔操作による交換作業システムの具体的設計、高エネルギービームと水との反応で起こる事象の詳細については、準備期間に十分な検討が進められなければならない。特に、窓材等の長期的消耗に対処する保守点検及び交換方法に関する事項や、放射性物質の（万が一の）漏出事故等に備えた安全対策を含む不測の事態に対する備えについて丁寧な説明が必要であろう。

⑥ 総合システムとしての ILC

250 GeV ILC は、システムを構成するすべての要素が長期にわたって安定的に稼働することによってはじめて、積算ルミノシティ 2000 fb^{-1} という実験目標を達成することができるものである。総合システムの信頼性は、その構成要素のうち最も脆弱な部分に支配される。TDR には、目指す物理や ILC 加速器の主要部分である超伝導高周波加速管、陽電子生成装置、ダンピングリング、ナノビーム制御などについて詳しい記述がある一方、それらを支える設備であるところのビームダンプや、安全装置、放射化物処理、万が一の事故対策等に関する記述が少ないことは懸念材料である。

(2) 土木工事

ILC 関連施設のほとんどが地下に設けられるトンネル空洞内に収納されることから、トンネル空洞の建設と、関連装置の搬入・設置には必然的に多大の経費を要することになる。今回の検討においては、具体の建設サイトが特定されていないという前提条件での議論であることから、一般論に終始せざるを得ないという大きな制約の下で、250 GeV ILC 計画に必要とされるトンネル空洞建設と装置搬入及び組上げ、運転管理など、多彩な工種ごとに計画内容の技術的検証を行った。

ヒアリング時に質問した事項や指摘した問題点については推進者側から回答が寄せられたものの、「今後準備期間に十分対応を検討する」「地元の自治体や市民との協議を深める」「課題遭遇時に十分に配慮する」といった回答が多かった。課題に対処して改善施策を実施するとすれば経費が増大する可能性があるが、経費算定を伴った対応案等は提出されなかったところから、経費についてどこまで具体的に見積もられているか、明確な情報は得られなかった。

250 GeV ILC 建設にあつては5本のアクセストンネルと2本の立坑の建設が計画されており、それらのアクセストンネルと立坑からは掘削によって発生する大量の掘削土砂が搬出される一方、建設資材及び加速器関連装置等が搬入されることになる。加速器関連装置の多くは、参加国からのインカインド・サプライ（現物供給）となることが想定されるが、それらの搬入のスケジュール調整や、トンネル内の狭い空間の中での据付け・

調整作業が円滑に進むよう十分に計画を詰めておく必要がある。

トンネル空洞への地下水の浸水については、道路などの一般的なトンネルとは異なり、加速器等の装置への冠水を防ぐことが重要である。トンネル空洞が水平であるという厳しい条件の下で一般的なトンネルと同様の裏面地下水の排水・減圧対策を講ずる場合においても、空洞内からの保守を伴うとともに故障等による不作動が生ずる恐れがある機械的な手段には頼らないなど、様々な場合を想定した検討・対策が求められる。地震や火災発生時など不測の事態への対処、安全策について、経費算定も含めた計画立案が必要である。

(3) 人員・人材、運営体制、国際協力

ILC計画を10年・20年スケールで担ってゆく人材が質・量ともに必要である。ILC加速器の建設に関する人材構想について、250 GeV ILCへの計画の見直し後のTDRでは、準備期間の4年間の後、建設期間9年間に必要となる人材（研究者および高度技術者）の数は、建設関係約830人、据付関係約380人（3～9年次の7年間の平均）とされている。それに対して、KEK-ILCアクションプラン（および、その補遺）[12]では、加速器研究者・技術者について現有の42名から徐々に増やして準備期間の4年目には122名にまで増員するとされている。この増加分のうち50～60名はKEKにおける現行の高エネルギー物理学研究プロジェクトの定年制職員から段階的に移行していくことが可能とされている。さらに、建設段階における日本国内からの加速器研究者・技術者の大幅な増員、及び海外からの参加の見通しについては、雇用形態、人件費の分担等々を準備期間のうちに国際協議によって決めるとしている。

そもそもILC計画は、その準備段階から建設を経て物理学的成果が創出されるまでの時間スケールが極めて長いため、若手・中堅の研究者・技術者にとっては、自らのプロフェッショナル・キャリアを賭ける上で、難しい判断を迫られる意味合いがあるものと推察される。現行のプロジェクトと将来プロジェクト、海外のプロジェクトと国内プロジェクトを並行して進めるなど、研究者・技術者のキャリアパスとのマッチングへの配慮が必要となろう。ただし、ILC建設に必要な人員に関する上記のTDRの試算がフルタイム当量（FTE：Full Time Equivalent）の数値であるとすれば、研究者がILCと他のプロジェクトの業務に同時に携わるような仕組みを作る場合、上記の必要人員の頭数（HC：Head Count）の数値はそれに応じて増加することになる。特に、加速器関連の人材に関しては、様々な加速器関連プロジェクトが現在及び将来実施される中で、ILC計画にコミットする人材を長期間にわたり十分な人数確保できるかが課題である。大学等及び産業界にどのような人材が居り、あるいは新たに育成しなければならないのか、具体的で実現可能な人材育成プランが必要である。

仮にILCを日本がホストする場合、大規模国際共同プロジェクトで建設・実験が進められるILC計画の全体をコーディネートする指導的人材、特に、巨大システムであるILC加速器の建設から運転までを通して、システムの設計性能を達成するように総合指揮を執る加速器研究者の具体的な存在が不可欠である。

(4) 安全性、環境への影響

レプトン加速器であるILCは、ハドロン加速器に比べれば加速粒子による放射化の問題は少ない。しかし、ビームダンプ等、高エネルギービームの照射を受けるところでは一定程度の放射化物生成が起こる。放射化物の影響と対策については、その発生源と核種及び量に関する点を明らかにすること並びに実験施設内の問題と周辺地域も含む外部環境に関する問題との区別を明確にして検討する必要がある。仮に、ビームダンプ内に生成されるトリチウム等の放射性物質が漏れることがあっても、地下であることから、周辺の生活環境にまで影響が及ぶ可能性は低いと考えられる。しかしながら、もしも実験施設内の放射能汚染が起これば、その程度によっては、保守点検作業員の活動に制約がかかることによって実験の遂行に大きな支障を来すことも考えられるので、万全の対策が必要である。また、放射性物質が環境の地下水系に混入する可能性とその対策については特に入念な調査と十分な配慮が必要である。

ILCは最先端科学の国際共同研究施設であり、計画によれば少なくとも2050年代まで稼働ということを考えると、その時点で想定される国際的環境基準を満たしていることが望まれる。例えば、地球温暖化への対策として2050年時点で二酸化炭素の排出量をゼロにすることが国際機関で議論されている。また、ヨーロッパなどでは、開発によって損なわれる生物多様性をオフセットする考え方が市民権を得つつある。したがって、ILC計画を進める上では、単に「現行の法アセスメントにかからない計画であるものの自主アセスをする」という程度にとどまらず、2050年時点における国際的な環境問題の観点からも誇れる施設として計画することが望ましい。環境アセスメントは具体的な建設候補地が特定されないと進まないが、現時点においてこうした基本的方向性を明確にすることは重要である。

建設候補地に関する議論が具体化する時点では、大規模トンネル工事の環境アセスメントを地域住民が納得する形で行う必要がある。その際の観点としては、生態系への影響、放射化物の生成とその処理ないしは保管方法、地下水の放射化の可能性とその対策、掘削に伴って発生する土砂（ズリ）の保管及び再利用法並びに掘削土砂に含まれる重金属類が基準値以上の場合の処理などが挙げられる。

ILCの運転に伴う放射性物質（トリチウムを含む）の生成に関する定量的評価及び万が一にも漏出事故を起こさない対策等に関する正確な情報を地元へ伝えた上で、地域住民との対話を進めることが必要不可欠である。今回、学術会議における公開審議やその報道等を契機として、推進者及び設置候補地の自治体から地域住民への説明の機会が持たれるようになったことは望ましい動きである。

(5) 技術的・経済的波及効果

加速器技術が多方面に応用されていることは事実であるが、ILC計画の実施に伴う技術波及効果を論ずる上では、「ILCプロパー」技術の応用と「加速器一般」の技術応用とを明確に区別した形で社会に伝えるべきである。後者は、ILC計画が実施されるか否

かに拘わらず、他の加速器施設の関連で相応の発展を遂げることが想定されるものである。ILC建設が開始される時点では、超伝導高周波加速管をはじめとして、ILC加速器に使用される技術は既に十分に成熟したものである必要があることから、ILC建設の過程で技術的飛躍を伴うイノベーションが多く創成されて一般民生分野に応用されるという想定には、現状では不透明な部分がある。

文部科学省からの調査委託によって実施された経済波及効果の評価報告書[11]では、「ILC 予算が純増で措置される」という前提に立って、2兆数千億円という数字が出されている。ILC 計画の実施に必要と想定される国家予算が ILC に投入された場合と他の事業に振り向けられた場合との比較で論ずるならば、経済波及効果の議論はまた別のものになるとも考えられる。その他にも、日本の予算で製作される物品をすべて国内メーカーが受注すると想定している点や、2次的波及効果の増強因子として CERN の場合の係数 3.0 をそのまま用いている点など、議論の余地のある算定になっている。

また、ILC 建設地に海外から多くの研究者とその家族が定住して国際科学都市が実現するというシナリオが描かれているようである。ILC の建設期間にはそれなりの作業人員が地域に常駐することが想定されるものの、稼働段階に入れば現地に必ず常駐するのは加速器の運転保守に携わる人員などが主となることが想定される。現在は情報通信ネットワークが発達し、リモートでもデータ解析ができることから、ILC 研究所では建設終了後に常駐人口が減少していく可能性があるとされている。

なお、審議過程で候補地の関係者から寄せられた意見等の中には、ILC 国際拠点を基盤に地域主体の立案・挑戦から生まれる「世界とつながる新たな地方創生」や、ILC 実現による地元への様々な効果、への期待が述べられているものがあつた。

(6) 必要経費、国際経費分担、予算の仕組み

250 GeV ILC 計画は巨額の経費を要するプロジェクトである。文部科学省有識者会議で聴取した本体建設費と測定器関係経費は 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)と算定されている。これに加えてコストの見積りの精度に関する不定性相当経費(約 25%)による追加的な経費が発生する可能性があるとされている。また、年間運転経費は 366～392 億円と算定され、その他付随経費として、準備経費 233 億円、その他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(具体的な立地に関わる経費等)、コンティンジェンシー経費(プロジェクト経費、すなわち、本体及び測定器関係経費+運転経費、の約 10%)、実験終了後の解体経費(年間運転経費の 2 年分程度)等が必要となる。

巨大プロジェクトにおいてすべてが予定どおりに進むことはむしろ例外的であり、過去には様々な原因により当初計画より進行が遅れ、経費も大幅に膨らむ結果となったケースは少なくない。建設開始から実験完遂まで 30 年間という長期間にわたって上記のような巨額の経費の投入を必要とする ILC 計画は、一国の経済では支えることのできないものであることは明白である。適正な国際経費分担の見通しなしに日本が誘致の決定に踏み切ることはなく、この点は推進者も認識を共通にしている。仮に、なんらかの意

思表明を行う際にも、諸要件が整わない場合には意思表明を撤回すべきである。

具体の建設サイトが特定されていない現時点において、建設費には計上されていない経費として、土地取得経費、海外研究者の生活環境の整備、アクセス道路や港湾の整備、トンネル掘削土処理、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、ライフライン等のインフラ、物理解析用計算機センター等の経費が想定される。それらの算定や経費負担の在り方については、建設に関して地域コミュニティの同意を得る上で、環境影響や安全性の問題と並ぶ重要課題である。

環境関連のコストの算定では、生物多様性オフセットやミチゲーションをどの程度行うかなど、どのような方針で環境問題に対処するかによって、建設及び維持コストに影響が及ぶ可能性がある。

なお、ILC 計画への予算投入が他の科学技術・学術分野に影響を及ぼさないように、「別枠の予算措置とする」との議論があると聞いている。ILC 計画全体（準備期間、建設期間、運転・実験期間、廃止措置等）に必要な経費を「別枠の予算として措置する」ということの詳細は今後とのことであるが、国家予算である以上、最終的には国民の税金が原資となることに変わりはない。仮にも「別枠予算」という位置づけが、より広い学術コミュニティにおける多角的な検討の機会をバイパスするようなことがないよう、配慮が必要であり、この点は推進者も認識を一にしているところである。

(7) 「学術の大型研究計画に関するマスタープラン」との関係

日本学術会議では第 21 期から期ごとに「学術の大型研究計画に関するマスタープラン」の策定を行ってきた[18-21]。「第 22 期学術の大型研究計画に関するマスタープラン（マスタープラン 2014）」（以下、「マスタープラン 2014」）では重点大型研究計画の評価の対象から ILC は除外された。それは当時「マスタープラン 2014」の検討と並行して、「国際リニアコライダー計画に関する検討委員会」において ILC 計画に関する検討が進められていたことなどに鑑み、「マスタープラン 2014」としての評価の対象とはしないという判断であった。また、「第 23 期学術の大型研究計画に関するマスタープラン（マスタープラン 2017）」検討の時点では、前回回答を踏まえて文部科学省の有識者会議における ILC 計画の検討が進行中であったこと、及び、前回回答に至った条件及び状況にその時点では変更がなかったことから、学術会議のマスタープランの検討対象からは外すこととされた。

今般、平成 30 年 7 月 20 日付けで、文部科学省研究振興局長より日本学術会議会長宛てに審議依頼が寄せられたことを受けて、検討委員会及び分科会での審議を経て本回答を手交することになる。大型計画について学術会議として更に検討するとすれば、マスタープランの枠組みで行うのが適切であろう。

4 所見

「1-(2) 審議に際しての基本的考え方」に記したごとく、学術会議は知の開拓への

挑戦を奨励し国際協力による学術研究を促進することを基本スタンスとしている。しかしながら、ILCのような長期にわたる巨額の資金投下と国際協力を必須とする超大規模国際プロジェクトに関しては、その計画内容及び国際協力も含む準備状況を踏まえて特に慎重な検討が求められる。検討委員会及び分科会は、250 GeV ILCが目指す物理の学術的意義や学術研究全体における位置づけ等について審議を行った。以下、審議依頼に記された4項目の各々に対する所見を述べた上で、総合所見を述べる。

● ILC 計画（見直し案）における研究の学術的意義、ILC 計画（見直し案）の素粒子物理学における位置づけについて

ILC 計画は素粒子物理学分野の先端的研究計画である。計画が 500 GeV から 250 GeV に見直されたことにより、ILC の目的はヒッグス結合の精密測定を通して、標準模型の予測からのズレの有無を検証することによって「標準模型を超える新物理」の方向性を探索することに絞られることとなった。現在の素粒子物理学において、「標準模型を超える新物理」の追究が最重要課題であることに異論はない。そして「標準模型を超える新物理」の探索には加速器・非加速器ともに様々な実験的アプローチがある。その中で、ヒッグス結合の精密測定という研究課題が極めて重要なものであることについては高エネルギー素粒子物理学のコミュニティにおいて合意が得られている。しかしながら、素粒子物理学分野における諸研究プロジェクトへの人材配置や予算の配分にまで踏み込んだ議論の段階には至っていない。

● ILC 計画（見直し案）の学術全体における位置づけについて

素粒子物理学は自然界の根源的構造を追究する学問であり、ILC 計画は素粒子物理学分野の純学術的な実験研究計画という位置づけである。ILC 加速器は高エネルギー素粒子実験に特化された設計となっており、他の用途と共有できるような施設ではない。学術会議のこれまでのマスタープラン策定において提案され検討された数々の大型研究施設計画と比べても所要経費が格段に大きく、かつ、建設開始から研究終了までの期間が 30 年という長期にわたる超大型計画である。こうした計画を国民に提案するには学術界における広い理解と支持が必要と思われる。しかしながら、ILC 計画について言えば、残念ながら、これまで隣接分野をはじめとする諸分野の学術コミュニティとの対話が不足していたことは否めない。素粒子物理学分野のみならず、他の諸学問分野の大型研究計画も含めた ILC の位置づけに関しては、更に広範な議論が必要である。

● ILC 計画（見直し案）を我が国で実施することの国民及び社会に対する意義について

ILC 計画は他の多くの純学術的研究と同様、知の探究という意味で、国民の知的関心を喚起するものである。また、世界のトップクラスの科学者と切磋琢磨する環境において高度の研究人材が育成され、世界に輩出されていく拠点として発展するならば、その意義は大きい。基礎科学分野の国際共同研究に日本が貢献をする必要性は高い。しかしながら、ILC のような巨大国際プロジェクトの場合には、日本がその経費の相当部分を

負担してホスト国となるべきかどうかは、持続可能性も含めた諸要件を勘案した上での判断ということになる。

一方、純学術的意義以外の技術的・経済的波及効果については、ILC によるそれらの誘発効果は現状では不透明な部分があり、限定的と考えられる。ILC 計画に関して、学術的意義の説明に加えて、地域振興の文脈で語られている事項及び土木工事や放射化物生成の環境への影響に関する事項等について、国民、特に建設候補地と目されている地域の住民に対して、科学者コミュニティからの正確な情報提供に基づいて一層充実した対話がなされることが肝要である。

● ILC 計画（見直し案）の実施に向けた準備状況と、建設及び運営に必要な予算及び人的資源の確保等の諸条件について

ILC 計画はその実施に必要な予算及び人的資源の規模からして、従来にない強固な国際協力によらなければ実施可能なものでないことは明白である。現時点では、資金面での適正な国際経費分担に関して明確な見通しは得られていない。また、ILC 加速器施設の建設に必要とされている人的資源の確保に関する見通しは明らかでない。特に加速器関係の研究者・技術者は日本の現状では不足しており、新たな人材育成や海外からの参画によって賄うと説明されているが、不確定要素が大きい。

総合所見

250 GeV ILC 計画は、建設及び運転に長期間にわたる巨額の予算投入を要するものである一方、想定される主要な成果は、ヒッグス粒子の結合定数の精密測定の結果、標準模型からのズレが見いだされれば、今後の素粒子物理学が進む方向性に示唆を与える可能性がある、というものである。本検討委員会としては、将来の方向性に示唆を与える可能性がある、とされるところの想定される科学的成果が、それを達成するために要するとされる巨額の経費の主要部分を日本が負担することに十分に見合うものである、との認識には達しなかった。また、250 GeV ILC の技術的成立性に関しては、克服すべき諸課題が残されており、それらは準備期間において解決するとされているものの、本計画の実施には依然として懸念材料があると言わざるを得ない。さらに、30 年という長期にわたる本計画の実施に要する巨額の資金投下に関する適正な国際経費分担の見通しが明らかでない点も懸念材料である。

現状で提示されている計画内容や準備状況から判断して、250 GeV ILC 計画を日本に誘致することを日本学術会議として支持するには至らない。政府における、ILC の日本誘致の意思表明に関する判断は慎重になされるべきであると考ええる。

自然界の基本構成を追究する素粒子物理学は、これまで、理論研究と加速器を用いた実験研究の連携により素晴らしい成果を挙げ、「標準模型」という金字塔を打ち立てた。現今の重要課題は「標準模型を超える物理」の開拓であり、ILC 計画もそれを目指したものである。近未来における加速器ベースの高エネルギー素粒子実験の望ましい進め方として、

エネルギー・フロンティアを追究するハドロンコライダー（現状ではLHC 及びその将来計画）と、これと相補的な役割を担うハイ・ルミノシティのレプトンコライダーを世界のどこかに実現することが考えられている。

一方では、人類が持つ有限のリソースに鑑みれば、高エネルギー物理学に限らず、実験施設の巨大化を前提とする研究スタイルは、いずれは持続性の限界に達するものと考えられる。ビッグサイエンスの将来の在り方は、学术界全体で考えなければならない課題である。

<用語の説明>

ILC： 国際リニアコライダー (International Linear Collider) の略。1980 年代後半から世界の素粒子物理学研究者が協力して開発を進めてきた、次世代電子・陽電子衝突型線形加速器。2004 年に超伝導加速技術を採用して以来、国際共同によってその詳細設計と技術開発を一本化してきた。国際将来加速器委員会 (International Committee for Future Accelerator : ICFA) のもとでの国際共同設計チーム (Global Design Effort: GDE) によって 2013 年に取りまとめられ発表された ILC の技術設計報告書 (Technical Design Report: TDR) では、最高衝突エネルギー 500 GeV で設計がなされた。13 TeV LHC における実験結果を踏まえつつ、当該分野の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 (LCC) において「ILC 計画の見直し」が行われた。ILC の初期研究課題を「ヒッグス粒子の精密測定」に特化するという戦略が立てられ、その目的に最適化する観点から ILC の衝突エネルギーを当初計画の 500 GeV から 250 GeV に変更するという選択がなされた。この方針変更は、リニアコライダー国際推進委員会 (Linear Collider Board: LCB) における審議を経て国際将来加速器委員会 (ICFA) において承認された。

LHC： 大型ハドロンコライダー (Large Hadron Collider) の略。欧州原子核研究機構 (CERN) にある加速した陽子と陽子を衝突させる周長 27 km の円形衝突型加速器。ヒッグス粒子の発見という画期的な成果に引き続き、衝突エネルギーを 13 TeV に増強した実験が進められ、現時点におけるエネルギーフロンティアの素粒子実験施設である。将来計画として、衝突エネルギーを 14 TeV に上げるとともに、ルミノシティを増強するアップグレードが予定されている。

電子ボルト (eV)： エネルギーの単位。1 電子ボルトは、ひとつの電子が電位差 (電圧) 1 ボルトの電極間で加速されたときに得るエネルギーの量。1 GeV (1 ギガ電子ボルト) は 10^9 電子ボルト、1 TeV (1 テラ電子ボルト) は 10^{12} 電子ボルトのことである。エネルギー (E) と質量 (M) の間には、アインシュタインの式 $E = Mc^2$ (c は光速) で表される関係がある。1 eV は、質量 1.782×10^{-33} g に相当する。

素粒子の標準模型： 物質を構成する最小要素である素粒子の種類と、素粒子の間に働く 3 種類の力 (強い力、電磁気力、弱い力) を説明する理論の総称。2008 年にノーベル物理学賞に輝いた小林・益川理論も、この素粒子の標準模型の重要な一部を成している。

クォーク： 物質を構成する素粒子はクォークとレプトンに大別される。クォークは強い力を感じ、結合状態を作る。レプトンは、電子やニュートリノ、及び、それらと類似の性質を持つ素粒子で強い力を感じない。

ハドロン： 「強い相互作用をする粒子」の意味で、複数の素粒子クォークが結合すること

によってできる複合粒子の総称。原子核を構成する陽子や中性子の仲間(バリオン)、及び、パイ中間子(湯川秀樹がその存在を予言した粒子)の仲間(メソン)がある。

ヒッグス粒子：素粒子の標準模型において、各素粒子がゼロでない質量を有することの原因を説明する理論である「ヒッグス機構」に関連した粒子。LHC における探索実験で 125 GeV にヒッグス粒子が発見された。ヒッグス機構の基礎には、2008 年のノーベル物理学賞を受賞した南部陽一郎の理論がある。

コライダー(衝突型加速器)：加速した粒子の束(ビーム)を正面衝突させて、高いエネルギー状態を作り出す加速器。同じエネルギーの素粒子とその反粒子を正面衝突させると、衝突エネルギーのすべてを無駄なく素粒子反応に利用することができる。

陽子・陽子衝突型加速器：陽子と陽子を正面衝突させる装置。陽子はクォークやグルーオンで構成される複合粒子であるため、陽子と陽子の衝突といっても、実際には陽子を構成する素粒子の衝突である。したがって、加速粒子のエネルギーのすべてが素粒子反応に使われるわけではない。また、反応に関与する素粒子の組み合わせは衝突イベントごとに様々であるため、その解析は複雑となる。

電子・陽電子衝突型加速器：電子と陽電子(電子の反粒子)を正面衝突させる装置。衝突によって生成できる粒子の質量の最大値は、電子と陽電子のエネルギー和に相当する質量である。一般に、陽子・陽子衝突型加速器で発見された粒子の性質を精密測定する他、陽子・陽子衝突型加速器では見えなかった粒子の探索も可能になる。

ルミノシティ：衝突型加速器の性能のひとつである輝度(強度)を表す量。高いルミノシティを持つ加速器は、観測したい粒子や反応をより多く生成することができ、ファクトリー(工場)と呼ばれることがある。

超伝導加速空洞：超伝導金属でできた空洞にマイクロ波を送り込んで強い電場を作り、粒子を加速する技術。ニオブ製の加速空洞を絶対温度 2 K (−271 °C) まで冷却して超伝導状態にすることによって、マイクロ波のエネルギーのうち空洞の壁で散逸される分を最小にし、より有効に粒子加速が行われるようにする。

エネルギー・フロンティアのアプローチ：加速器ベースの素粒子物理学実験において、その時点で技術的に到達し得る最高エネルギー領域での新現象を探究するアプローチ。

インテンシティー・フロンティアのアプローチ：加速器ベースの素粒子物理学実験において、事象の観測頻度を上げて統計的精度を増すことによってより精密な物理の議論を展開

するアプローチ。

500 GeV ILC 計画において主要とされていた 3 つの研究目標

(1) 250 GeV における Zh 随伴生成過程の研究：

電子・陽電子衝突によって、弱い相互作用の媒介粒子である Z とヒッグス粒子が生成される反応 ($e^- + e^+ \rightarrow Z + h$) であり、250 GeV 付近でその反応断面積が最大となるため、ヒッグス・ファクトリーとしての 250 GeV ILC の主たる反応となる。こうして生成されたヒッグス粒子は、様々な素粒子とその反粒子との対に崩壊し、それらの崩壊分岐比の精密測定によって各素粒子とヒッグスとの結合定数が実験的に決定される。

(2) 350 GeV 付近の tt 対生成及び WW 融合過程によるヒッグス生成の研究：

トップクォーク（質量 173 GeV）の対生成反応及び 2 つの W 粒子の融合によるヒッグス粒子の生成反応 ($e^- + e^+ \rightarrow W^+ + W^- \rightarrow h + \nu + \bar{\nu}$) は 350 GeV 程度の衝突エネルギーを必要とする。

(3) 500 GeV でのヒッグス自己結合とトップ湯川結合の直接測定：

ヒッグス 3 点結合（1 つのヒッグス粒子から 2 つのヒッグス粒子が生成される反応）の直接測定及びトップクォークとヒッグス粒子の結合定数の直接測定、であるが、3 つのヒッグス粒子（質量 125 GeV）が関与する反応や、トップクォーク（質量 173 GeV）とヒッグス粒子とが関与する反応であるため、アクセスには 500 GeV レベルのコライダーを必要とする。

トリチウム（三重水素）

陽子 1 個と中性子 2 個から構成される核種であり、半減期 12.32 年で ^3He へと β 崩壊する放射性同位体である。トリチウムが放出する β 線はエネルギーが 0.0186 MeV と低く、生体内での飛程は 0.01 mm 程度である。また、生物学的代謝による半減期も短いため、トリチウムは放射性物質として特別に危険というものではない。ただし、通常の水と化学的に分離することが難しいため、大量のトリチウム水を含んだ水の処置は重要な課題となる。

＜参考文献＞

- [1] 「技術設計報告書 (Technical Design Report: TDR)」国際リニアコライダー運営委員会 (International Linear Collider Steering Committee (ILCSC)) 国際共同設計チーム (Global Design Effort) (平成25年6月12日)
- [2] 回答「国際リニアコライダー計画に関する所見」日本学術会議 (平成25年9月30日)
- [3] 「国際リニアコライダー (ILC) に関する有識者会議 ILC 計画の見直しを受けたこれまでの議論のまとめ」文部科学省 国際リニアコライダー (ILC) に関する有識者会議 (平成30年7月4日)
- [4] 声明「日本の科学技術政策の要諦」日本学術会議 (平成17年4月2日)
- [5] 「将来計画の策定に向けた提言」高エネルギー物理学研究者会議 高エネルギー物理学将来計画検討小委員会 (平成23年3月)
- [6] 「高エネルギー物理学将来計画検討小委員会答申」高エネルギー物理学研究者会議 高エネルギー物理学将来計画検討小委員会 (平成24年2月11日)
- [7] 提案書「国際リニアコライダー計画の段階的实施案について」高エネルギー物理学研究者会議 (平成24年10月18日)
- [8] 「高エネルギー物理学将来計画検討委員会 答申」高エネルギー物理学将来計画検討委員会 (平成29年9月6日)
- [9] 「国際リニアコライダー その展望とKEKの取り組み」全4分冊 高エネルギー加速器研究機構 ILC構想推進室 (平成29年)
- [10] 「国際リニアコライダー (ILC) 計画に関する技術的実現可能性及び加速器製作における技術的課題等に関する調査分析」野村総合研究所 (平成28年2月)
- [11] 「国際リニアコライダー (ILC) 計画に関する経済的波及効果の再計算結果」野村総合研究所 (平成30年5月)
- [12] 「KEK-ILC アクションプラン」KEK-ILCアクションプラン・ワーキンググループ (平成28年1月6日) 補遺追加 (平成30年1月)
- [13] “The International Linear Collider Machine Staging Report 2017” Linear Collider Collaboration (October, 2017)
- [14] “Physics Case for the 250 GeV Stage of the International Linear Collider”, LCC Physics Working Group (October 2017)
- [15] “Conclusions on the 250 GeV ILC as a Higgs Factory proposed by the Japanese HEP community” Linear Collider Board (8, November, 2017) Rev. 1.
- [16] “ICFA Statement on the ILC Operating at 250 GeV as a Higgs Boson Factory” (Ottawa, November 2017)
- [17] 本回答の審議中に、学術会議会長宛て、ないしは、本検討委員会宛てに寄せられた意見書等のうち、その公開について当該意見発出者の承諾が得られたものについては、日本学術会議のホームページ上に、検討委員会の審議参考資料として掲載されて

いる。<http://www.scj.go.jp/ja/member/iinkai/ILC/ILC24.html>

- [18] 報告「学術の大型施設計画・大規模研究計画マスタープラン2011」（平成23年9月28日）日本学術会議 科学者委員会 学術の大型研究計画検討分科会。
- [19] 提言「学術の大型施設計画・大規模研究計画—企画・推進策の在り方とマスタープラン策定について—」日本学術会議 科学者委員会 学術の大型研究計画検討分科会（平成22年3月1日）
- [20] 提言「第22期学術の大型研究計画に関するマスタープラン（マスタープラン2014）」日本学術会議 科学者委員会 学術の大型研究計画検討分科会（平成26年2月28日）
- [21] 提言「第23期学術の大型研究計画に関するマスタープラン（マスタープラン2017）」日本学術会議 科学者委員会 学術の大型研究計画検討分科会（平成29年2月8日）

＜参考資料１＞ 審議経過

平成 30 年

- 7 月 20 日 文部科学省研究振興局長より日本学術会議会長宛てに審議依頼
- 7 月 26 日 日本学術会議幹事会（第 266 回）
 - 国際リニアコライダー計画の見直し案に関する検討委員会及び同委員会技術検証分科会の設置
 - 委員の決定
- 8 月 10 日 国際リニアコライダー計画の見直し案に関する検討委員会（第 1 回）・同委員会技術検証分科会（第 1 回）合同会議
 - 設置趣旨の確認、役員の選出、今後の議論の進め方について
 - 参考人ヒアリング（藤井恵介氏、道園真一郎氏、中田達也氏、千原由幸氏、中野貴志氏、横溝英明氏）
- 8 月 20 日 国際リニアコライダー計画の見直し案に関する検討委員会技術検証分科会（第 2 回）
 - 参考人ヒアリング（宮原正信氏、矢島大輔氏、近久博志氏、道園真一郎氏）
- 8 月 21 日 国際リニアコライダー計画の見直し案に関する検討委員会（第 2 回）
 - 参考人ヒアリング（山内正則氏、観山正見氏、千原由幸氏）
- 8 月 23 日 国際リニアコライダー計画の見直し案に関する検討委員会技術検証分科会（第 3 回）
 - 参考人ヒアリング（神尾文彦氏、矢島大輔氏、佐竹繁春氏、熊谷教孝氏、道園真一郎氏、宮原正信氏）
- 8 月 29 日 国際リニアコライダー計画の見直し案に関する検討委員会（第 3 回）
 - 参考人ヒアリング（山内正則氏、相原博昭氏、羽島良一氏）
- 9 月 11 日 国際リニアコライダー計画の見直し案に関する検討委員会（第 4 回）
 - 論点整理
- 9 月 13 日 国際リニアコライダー計画の見直し案に関する検討委員会技術検証分科会（第 4 回）
 - 参考人ヒアリング（道園真一郎氏、宮原正信氏）
 - 論点整理
- 9 月 18 日 国際リニアコライダー計画の見直し案に関する検討委員会（第 5 回）・同委員会技術検証分科会（第 5 回）合同会議
 - 論点整理
- 10 月 1 日 国際リニアコライダー計画の見直し案に関する検討委員会（第 6 回）
 - 参考人ヒアリング（浅井祥仁氏、山内正則氏）
- 10 月 2 日 国際リニアコライダー計画の見直し案に関する検討委員会技術検証分科会（第 6 回）

- 参考人ヒアリング（道園真一郎氏）
- 10 月 10 日 国際リニアコライダー計画の見直し案に関する検討委員会（第 7 回）・同
委員会技術検証分科会（第 7 回）合同会議
 - 参考人ヒアリング（細谷裕氏）
 - 「論点整理」に基づく議論
- 10 月 16 日 国際リニアコライダー計画の見直し案に関する検討委員会（第 8 回）・同
委員会技術検証分科会（第 8 回）合同会議
 - 参考人ヒアリング（中家剛氏）
 - 「論点整理」に基づく議論
- 10 月 31 日 国際リニアコライダー計画の見直し案に関する検討委員会（第 9 回）・同
委員会技術検証分科会（第 9 回）合同会議
 - 回答（案）の検討
- 11 月 14 日 国際リニアコライダー計画の見直し案に関する検討委員会（第 10 回）・同
委員会技術検証分科会（第 10 回）合同会議
 - 回答（案）の検討
- 11 月 21 日 国際リニアコライダー計画の見直し案に関する検討委員会（第 11 回）・同
委員会技術検証分科会（第 11 回）合同会議
 - 回答（案）の検討
- 12 月 19 日 日本学術会議幹事会（第 273 回）
 - 回答「国際リニアコライダー計画の見直し案に関する所見」を承認

＜参考資料２＞ 文部科学省研究振興局長からの審議依頼

30文科振第157号

平成30年7月20日

日本学術会議会長

山 極 壽 一 殿

文部科学省研究振興局長

磯 谷 桂 介



国際リニアコライダーに関する審議について（依頼）

国際リニアコライダー（ILC）については、平成25年5月の文部科学省からの貴会議への審議依頼への回答として、平成25年9月に貴会議より「国際リニアコライダー計画に関する所見」をまとめていただきました。

所見では、「本格実施を現時点において認めることは時機尚早」であり、「ILC計画の実施の可否判断に向けた諸課題の検討を行うために必要な調査等の経費を政府において措置し、2～3年をかけて当該分野以外の有識者及び関係政府機関を含めて集中的な調査・検討を進めること」と提言されていることから、平成26年5月より当省の下に「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。）を設置し、ILC計画の科学的意義やコスト等の検証を行い、平成27年6月に「これまでの議論のまとめ」を取りまとめるなど、調査検討を進めてきたところです。

このような状況下、ILC計画の見直し案が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（LCC）でまとめられ、リニアコライダー国際推進委員会（LCB）における審議を経て、国際将来加速器委員会（ICFA）において承認され、平成29年11月に公表されました。この見直しにおいては、欧州合同原子核研究機関（CERN）における大型ハドロン衝突型加速器（LHC）実験の結果を踏まえた上で建設に必要なコストを引き下げることとも考慮して、ILCの衝突エネルギーを500GeVから引き下げて250GeVのヒッグスファクトリーとする提案（以下「250GeV ILC」という。）に変更されました。

この見直しを受け、有識者会議においては、ILC計画（見直し後）の科学的意義やコスト等の再検証のために再度設置した作業部会における検討、さらに経済的波及効果等の再検証結果などを踏まえ、別添の通り平成30年7月4日に



「ILC 計画の見直しを受けたこれまでの議論のまとめ」を取りまとめたところです。

一方、貴会議における ILC 計画の取扱いについては、平成 25 年の所見以降、「第 22 期学術の大型研究計画に関するマスタープラン（マスタープラン 2014）」（平成 26 年 2 月）、「第 23 期学術の大型研究計画に関するマスタープラン（マスタープラン 2017）」（平成 29 年 2 月）が提言として取りまとめられ、学術大型研究計画として掲載されているものの、別紙 1 のとおり、課題別委員会として設立された「国際リニアコライダー計画に関する検討委員会」において別途所見がまとめられ、その後も所見時の条件及び状況に変更がないことから、重点大型研究計画の評価の対象としないとされています。

そのため、昨年貴会議によるマスタープラン 2017 の策定を受けて、当省の科学技術・学術審議会学術分科会研究環境基盤部会学術研究の大型プロジェクトに関する作業部会において審議が行われ策定される「学術研究の大型プロジェクトの推進に関する基本構想ロードマップ」については、ロードマップ 2017 が策定されているものの、別紙 2 のとおりロードマップでは主としてマスタープランにおける重点大型研究計画を選定対象としていることから、現在、ILC 計画についてはロードマップに掲載されていない状況です。

当省においては、学術の大型プロジェクトの推進方策として、推進対象をロードマップに掲載された優先度の高い計画とし、大規模学術フロンティア促進事業として推進する仕組みとしております。現在、厳しい財政環境下、これまでロードマップを踏まえ新規着手をした計画を含め 10 計画を進めており、これら既存事業に加え、今後はロードマップ 2017 を踏まえた計画の推進が必要と考えております。

現在、ILC 計画については、昨年 11 月の ILC 計画（見直し後）の公表に際し、国際的な研究者組織が、日本における高エネルギー物理学研究者会議（JAHEP）による 250GeV ILC を日本に建設するという提案を強く支持し、時宜を得た決定に向け、日本政府が当該提案を本格的に検討するよう推奨し、主要な費用負担を含め、日本がホスト国として明確に意思表示することを求める声明を発表しています。

当省としては、平成 25 年の所見以降、有識者会議における検討を進め、この度議論を取りまとめたところであり、さらに日本政府の判断を求められている ILC 計画を巡る動向を踏まえて、今後の政府の判断に資するものとして、貴会議

において改めて学術の立場から見解を取りまとめていただく時機にあると考えております。

現状においても ILC の建設及び運営には巨額の経費を要することから、特に我が国でこれを実施する場合には、マスタープラン及びロードマップの推進など学術研究全体に大きな影響を与えることも想定されます。

つきましては、国際協力の枠組みの中で ILC 計画に取り組む意義について速やかに判断することができるよう、学術に関する各分野の専門家で構成されている貴会議において、ILC 計画に関する下記の事項及びその他貴会議において必要と判断される事項について、広範な分野の研究者を交えて早期にご審議いただき、ご回答くださるようお願い申し上げます。

記

- ILC 計画(見直し後)における研究の学術的意義、ILC 計画(見直し後)の素粒子物理学における位置づけについて
- ILC 計画(見直し後)の学術研究全体における位置づけについて
- ILC 計画(見直し後)を我が国で実施することの国民及び社会に対する意義について
- ILC 計画(見直し後)の実施に向けた準備状況と、建設及び運営に必要な予算及び人的資源の確保等の諸条件について