

ILC 計画に関する主な課題について

高エネルギー物理学研究者会議、高エネルギー加速器研究機構

2021.6.2

序文

2019 年以降、高エネルギー物理学研究者会議 (JAHEP) 並びに高エネルギー加速器研究機構 (KEK) は、国際リニアコライダー (ILC) 計画に関する残された課題の解決のための分析・対応を国内および国際協力によって行ってきた。本文書は、ILC 計画に関する主な課題について、課題解決に向けた取り組みの現状、今後の方策と見通しを、ILC 計画提案者の立場でまとめたものである。

ILC 計画に関する 2019 年以降の主な進展を時系列に列挙すると以下の通りである。

- 2019.10 ILC プロジェクト実施に関する提言[1]公表：建設・運転経費の国際分担についての考え方、ILC 実施組織のあり方、技術的課題に取り組むための国際協力について提言。
- 2019.11 以降 米国政府が ILC への支持を国際会議等で公表。
- 2020.1 日本学術会議マスタープラン [2]。
- 2020.2 国際将来加速器委員会 (International Committee for Future Accelerators: ICFA) ILC に関する声明[3]：日本での ILC 建設にあらためて期待を示し、ILC 建設のための本格準備を行う ILC 準備研究所設立に向け、KEK をホストとして ICFA の下に ILC 国際推進チーム (International Development Team: IDT) を設置することを提言。
- 2020.6 欧州素粒子物理戦略 2020[4](3 章)：「次期最優先コライダーは電子陽電子ヒッグスファクトリー」と提言。日本で ILC がタイムリーに実現する場合には、欧州の素粒子物理コミュニティは協働して ILC 計画に取り組む意向を提示。
- 2020.8 ILC 国際推進チーム (IDT) 始動[5]。
- 2020.8 東北 ILC 事業推進センター発足[6]。
- 2020.10 高エネルギー物理学研究者会議 ILC 推進パネル設置[7]。

ILC 計画に関する残された課題については、その多くが解決のため相応の人的物的資源を必要とすることから、ICFA は、2020 年 2 月、日本をホストとし各国の参加研究機関が正式に覚書を交わした上で資源を持ち寄り ILC 準備研究所を設置して、その枠組みの中で最終的に課題をクリアすることを推奨した。そして 1 年半程度をかけ ILC 準備研究所設立の準備を行う国際推進チーム (IDT) を 2020 年 8 月に設置した。

以下、文部科学省 ILC に関する有識者会議「ILC 計画見直しを受けたこれまでの議論のまとめ」[8]、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所見」[9]で指摘された課題について、囲み枠の中で、取り組みの現状、今後の方策と見通しに関する要点を ILC 提案者側の視点で回答する。

1. 国際的な研究協力及び費用分担の見通し

(ア) 非ホスト国の十分な貢献を含む現実的かつ持続可能な国際費用分担【有】¹

国際費用分担は、最終的には政府間での協議により決定される事項である。コスト精査と人的・技術的観点からの分担可能性を提供する等、政府間の国際費用分担協議に必要な研究者側からのサポートは ILC 準備研究所本部の主要任務であり、ILC 準備研究所の参画研究機関から各国政府への情報提供とともに、政府間分担協議に必要な研究者側の体制は ILC 準備研究所設立により整う見通しである。

これに先立ち KEK は ILC 国際ワーキンググループを設置し、経費の国際分担や国際機関となる ILC 国際研究所の組織・運営体制の在り方について基本的な考え方をまとめ、2019 年 10 月に ILC プロジェクト実施に関する提言[1]を公表した。そこには、加速器施設建設費の内、土木建築費はホスト国の責任とし、加速器物品は、ILC 研究所に参加するメンバー国で分担、電気機械設備等のインフラに関してはホスト国負担の割合が大きいことが期待されること、運転経費についても事前に分担合意しておくべきこと等の提言がなされている。こうした国際分担のシナリオ案をもとに分担額の概算が可能となった。国際費用分担の見通しに関わる欧米の特記事項を以下に挙げる。

- ・2019 年秋以降、米国政府（エネルギー省・国務省等）から日本に立地する ILC 実現への米国政府としての支持が表明され、さらに米国政府高官等から日本政府に伝えられていることが国際会議等で公表された。
- ・2018 年から欧州の素粒子物理学研究者コミュニティ（約 5,000 人）において、将来計画についての議論「欧州素粒子物理戦略の更新」が始まり、2020 年 6 月、CERN 理事会が承認した。「次期最優先コライダーは電子・陽電子ヒッグスファクトリー」と提言し、これを円形の加速器で将来的に欧州で展開する可能性の検討を開始するとともに、直線型の電子・陽電子ヒッグスファクトリーとして開始される ILC に関して「ILC がタイムリーに実現する場合には、欧州の方針と適合しており、欧州の素粒子物理コミュニティは協働して取り組みたい」との意向を示した[4](3 章)。それと同時にグローバルプロジェクトへの欧州の対応として、CERN が欧州からの参加の協議のハブとなる道に加えて、欧州各国政府がホスト国と二カ国間協議を行う道の 2 つの道筋が明記された[4](6 章)。

今後、各国の研究者と連携して、各国政府や資金配分機関へ情報を提供し、国際分担の議論を始める環境を整える補佐をする。

¹ 以下、【学】は日本学術会議所見（2018 年 12 月）、【有】は文科省有識者会議（2018 年 7 月）で指摘された課題

(イ) 諸外国のサイエンスカウンシル等におけるプロジェクトの承認と各国政府の資金確保に向けた議論の進展【有】

米国では、当該分野の研究プログラムは米国エネルギー省（DOE）によって決定されており、サイエンスカウンシルの役割は Snowmass プロセス²とそれに続く政府諮問での素粒子物理分野専門家による P5³での実施計画の優先順位提言である。P5 では、予算シナリオを仮定した上で米国の当該分野の実施計画が議論され、政府および議会における重要な指針となっている。Snowmass 2013、P5 2014 [10]では、ヒッグス粒子の研究を5つの最重要サイエンスドライバーの筆頭に掲げている。また、P5 では「あらゆる予算シナリオ⁴において ILC をサポートする」と ILC への参加意欲を明記しており、現在もこの方針が継続している。

2020年4月に開始された Snowmass プロセスは2022年7月に報告書完成予定、2024年の早い時期に P5 報告が公表される予定である。

欧州では欧州素粒子物理戦略[4](6章)にグローバル規模でのプロジェクトへの欧州の参加協議の形態が提言された。CERN が欧州からの参加協議のハブとしての機能を果たすことに加え、ホスト国と欧州各国との二カ国間協議を、並行するプロセスとして明記している。CERN の理事会は、各国政府代表と研究者代表の対で構成されており、CERN 理事会を通じた政府との調整が行われる。二カ国間協議に関しては、当該国でのサイエンスカウンシル等でのプロセスが必要な場合があり得る。

² Snowmass プロセスとは、米国において、素粒子物理の将来研究計画を広く研究者コミュニティ（米国素粒子物理コミュニティ約3,000人と世界の研究者が参加）で検討し合意を形成するための、グラスルーツのボトムアップ・プロセスのこと。

³ P5 とは Particle Physics Project Prioritization Panel の略で、DOE と米国国立科学財団（NSF）が諮問する高エネルギー物理学諮問団の下に設置される素粒子物理学プロジェクト優先順位決定委員会のこと。ボトムアップ・プロセスである Snowmass プロセスの結果を踏まえ、予算枠を想定した上でプロジェクトの優先順位を議論し答申する。

⁴ P5 2014 報告では10年間のタイムスパンでの予算シナリオとして以下3種類を想定している。

- ・シナリオ A：最も予算が少ないシナリオ（3年間は一定の予算水準とし、その後は2013年度の素粒子物理分野の予算に対して年率2%の増額を行う）
- ・シナリオ B：やや予算が多いシナリオ（3年間は一定の予算水準とし、その後は2014年度の大統領予算要求に対して年率3%の増額を行う）
- ・シナリオ C：予算のキャップがない自由なシナリオ（ただし、無限ではない）

近年の米国での素粒子物理学研究予算状況を見ると議会での DOE 予算措置は増加しており、2015年時点での約700MUS\$[11]から2019年には1BUS\$に達し[12]、さらに増加中である。これは、2014年 P5 記載のシナリオ B での想定を超える規模の増加である。

(ウ) 国際協力を前提とした人材の育成・確保等の明確な見通し【有】

ILC では建設期平均で管理局部門を含めて 830 名程度の人員を想定しており、海外主要研究所の人員が ILC 建設に参加する。世界には多くの加速器人材がおり⁵、大型プロジェクトのスケジュールからも ILC 建設に係る人材確保の見通しがより明確となってきた。

最近の大型加速器プロジェクト（European XFEL⁶、LCLS-II⁷、ESS⁸、SHINE⁹等）では、参画する各研究所が物納貢献として建設に貢献することが一般的となっている。海外における供給可能な人材の潜在的な量としてヨーロッパには 70 か所程度の加速器関連の研究機関があり 3,700 人程度の加速器関連の人材がいる [13](1 章)。アメリカにもフェルミ国立加速器研究所（FNAL）や SLAC 国立加速器研究所等の大型加速器研究所があり、超伝導高周波技術を使った加速器開発が行われている。アジアには日本以外にも、中国の高能物理研究所（IHEP）、インドのラジャラマンナ先端技術センター（RRCAT）、韓国の基礎科学研究院（IBS）等、加速器関連の研究所が多数ある。これらの加速器研究所の規模については、p.5 の表を参照のこと。

p.6 の図にあるように、海外の大型プロジェクトの建設完了までのスケジュール¹⁰からも ILC 建設に係る人材確保の見通しがより明確となっている。

ILC 準備研究所期間・建設期間を通じて ILC を支える若手人材の育成が重要となるが、ILC 準備研究所期間における国際共同技術準備作業、および最終設計をまとめた詳細技術設計書作成作業等により ILC に精通した人材を育成し、建設期間の ILC 研究所の中核人材とする。

必要な全ての人材の確実な確保には、ILC 準備研究所期間に政府レベルで行う国際交渉が必要である。

⁵ 欧州では特に European XFEL、ESS、米国ではフェルミ国立加速器研究所の超伝導加速器の開発センターや LCLS-II プロジェクトで経験を積んだ人材が豊富である。

⁶ ドイツ・ハンブルグに建設された X 線自由電子レーザー施設。ヨーロッパを中心に 12 か国の協力により建設された。ILC と同じ周波数帯の超伝導加速空洞が 800 台設置されている。2017 年より運転を開始。

⁷ 米国 SLAC 国立加速器研究所に建設中の X 線自由電子レーザー施設。LCLS-II-HE アップグレードを含めると 400 台以上の ILC と同じ周波数帯の超伝導加速空洞を設置する。米国フェルミ国立加速器研究所、トーマス・ジェファソン国立加速器施設で超伝導加速空洞をクライオモジュールに組み込み移送している。

⁸ スウェーデンのルントに建設中の欧州核破砕中性子源（European Spallation Source）。ヨーロッパ 13 か国の協力により建設中。陽子ビームを 100 台以上の超伝導空洞（ILC とは異なる周波数帯）を使用して加速し、最大 5MW の陽子ビームが中性子生成用ターゲットに照射される。

⁹ 中国の上海に建設中の X 線自由電子レーザー施設。2018 年に建設を開始し 600 台程度の ILC と同じ周波数帯の超伝導空洞が設置される。

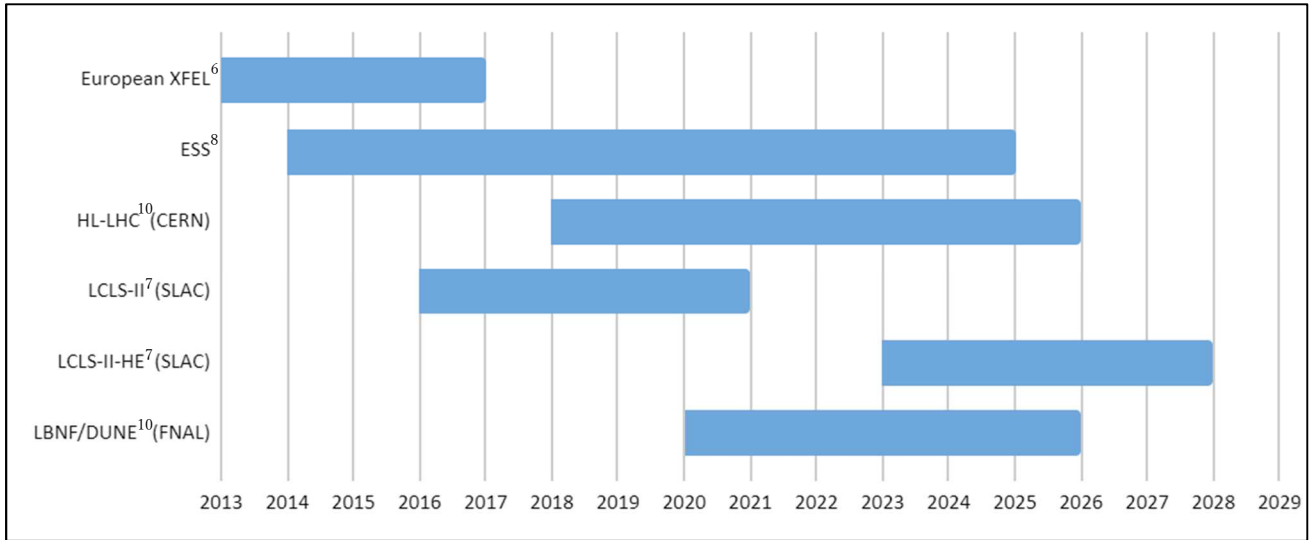
¹⁰ 2020 年時点での状況およびその後のスケジュールでは、欧州においては、European XFEL は 2017 年にすでに建設が完了、運用が始まっており、現在建設中の ESS は 2025 年後半、CERN の HL-LHC は 2026 年に建設完了のスケジュールで進められている。また米国において、SLAC 国立加速器研究所の LCLS-II については 2021 年に建設完了、2022 年の運用開始承認、LCLS-II-HE については 2023 年の建設開始、2028 年の運用開始承認となっており、米国フェルミ国立加速器研究所の長基線ニュートリノ実験施設（LBNF/DUNE）については 2026 年に加速器の建設完了、2029 年の運用開始承認が目指されているところである。

<加速器主体の研究機関> [14]

機関	雇用者数等（記載方法は公表データに準拠）
高エネルギー加速器研究機構 (KEK)	役員・職員 672（うち研究者 347、技術者 152、事務職員等 165） その他有期雇用職員 417（うち研究者 152、技術者 72、事務職員等 179）
フェルミ国立加速器研究所 (FNAL)	1,810 full-time equivalent (FTE) employees
トーマス・ジェファークソン国立加速器施設 (JLab)	693 FTE employees
SLAC 国立加速器研究所 (SLAC)	1,620 FTE employees
欧州合同原子核研究機関 (CERN)	2,660 people (1,196 Engineers and applied scientists/864 Technicians/463 Administrators and office staff/83 Research physicists/54 Manual workers and craftspeople)
ドイツ電子シンクロトロン研究所 (DESY)	Employees: approximately 2,700, including 1,180 scientists
フランス宇宙基礎科学研究所 (CEA/Irfu)	1,100 employees (200 physicists/300 engineers/190 technicians etc.)
高能物理研究所 (IHEP)	over 1,400 full-time staff, as well as over 500 postdocs and graduate students

<多目的研究機関>

機関	雇用者数等（記載方法は公表データに準拠）
ブルックヘブン国立研究所 (BNL)	2,421 FTE employees
イタリア国立核物理研究所 (INFN)	Permanent staff Total: 1,991 (Researchers 663/Technologist 353/Technicians 657/Administrative staff 316/Administrative manager 2)
ラジャラマンナ先端技術センター (RRCAT)	about 1,500 employees
韓国 基礎科学研究院 (IBS)	more than 900 employees are working



(図) 海外主要プロジェクトの建設スケジュール[15]
 (プロジェクト名の右肩の数字は対応する脚注番号)

2. 学術的意義や国民及び科学コミュニティの理解

(ア) 欧州の将来円形加速器への参加と比較した、ILC 誘致の意義の整理【学】

この課題に関する 2019 年以降の進展で特筆されるのは、2020 年 6 月に公表された欧州素粒子物理戦略の更新[4]である。「次期最優先コライダーは電子・陽電子ヒッグスファクトリー」と提言され、欧州に将来円形加速器 (Future Circular Collider: FCC) を展開する可能性の検討を開始するとともに、「ILC がタイムリーに実現する場合には、欧州の方針と適合しており、欧州の素粒子物理コミュニティは協働して取り組みたい」との意向が示された[4](3 章)。欧州素粒子物理戦略の更新に際し、ILC、FCC を含むヒッグスファクトリー計画について学術的観点からの検討が進んだ。それによると、FCC と ILC とは、電子・陽電子ヒッグスファクトリーとしての性能は同等である¹¹。FCC はまだ概念設計が終わった段階、ILC は既に技術設計が完成した段階であり、比較には注意が必要だが、加速器施設の建設費は、ILC 約 5,800 億円、電子型 FCC 約 10,500MCHF (現在のレートで約 1.2 兆円) である。ILC によりヒッグスファクトリー実験を早期に開始できる¹²。電子型 FCC のトンネルは将来陽子型へ転用可能だが、その場合、電子型加速器を撤去して陽子型加速器を設置することになる。また、円形の FCC ではシンクロトロン放射によるエネルギー損失がビームエネルギーの 4 乗に比例するため、供給可能電力の制限により到達可能な最高エネルギーに限界がある¹³。これに対して、線形の ILC では、シンクロトロン放射による制限がなく、加速器の延長、あるいは将来的な加速技術の向上等により、TeV 領域へのエネルギー増強が可能で、電子型としてさらに衝突エネルギーを上げる道が担保される。陽子型 FCC の実施が技術的に可能となる時期も電子型を ILC が担う方が早まる¹⁴。以上のことから、日本の高エネルギー物理学コミュニティは欧州素粒子物理戦略の更新プロセスへの入力として、電子型は ILC の実現、陽子型に関しては FCC に向けた技術開発への参加を望むとの意向を伝えた[16]¹⁵。ILC 誘致によりベストのシナリオを実現できる。

また、マスタープラン 2020 の提案書には学術的観点以外の誘致の意義として以下を記載した。ILC はアジア初の大型国際研究機関、世界に誇る知の拠点となる。若者に夢と希望を与え、教育的効果が大きい。ILC 誘致により、多分野における高い素養を備えた人材の育成が行われ、我が国、アジア、世界の加速器科学の振興、持続的発展の力となる。CERN の例にあるように、真理の探究という国家や宗教を超えたテーマに取り組む国際研究所そのものが世界平和に貢献する意義も大きい。

¹¹ ヒッグスファクトリーである ILC (総データ量 $2ab^{-1}$ 、電子ビーム偏極あり) と電子型 FCC (2 衝突点の合計で $5ab^{-1}$ 、電子ビーム偏極なし) は新物理に対して同等の感度を持つとの分析がなされている[17](1.2 節)。ヒッグスファクトリー運転での衝突頻度 (luminosity) および消費電力については、ILC は 1.35×10^{34} (baseline)、 2.7×10^{34} (luminosity upgrade) $cm^{-2}s^{-1}$ [17](10.2 節、表 10.2)、消費電力はそれぞれ 111 MW (baseline)、138 MW (luminosity upgrade) [18](3 章)、電子型 FCC は $1.7 \times 10^{35} cm^{-2}s^{-1}$ (2 衝突点の合計)、282 MW [17](10.3 節、表 10.3) である。

¹² ILC によるヒッグスファクトリー実験開始は最速で 2030 年代後半、電子型 FCC によるヒッグスファクトリー実験は提案者による最速スケジュールで 2040 年代後半 (ここで言う最速スケジュールでは、2039 年から 6 年間の Z/WW 運転を先行させるため、ヒッグスファクトリー運転は実験開始 6 年後の 2040 年代後半 [19](6.2 節)) である。

¹³ 電子型 FCC 計画提案者の計画では、ヒッグスファクトリー実験の後 1,100MCHF (現在のレートで約 1,300 億円) の追加予算をかけエネルギーを増強し、電子・陽電子衝突で 5 年間のトップクォーク対生成実験を行うこととしているが、その際の最高衝突エネルギーは 365 GeV である。

¹⁴ 電子型 FCC と陽子型 FCC の組み合わせでは、陽子型 FCC 運用開始は提案者による最速スケジュールで 2060 年代半ばになる[20](5.2 節)。

¹⁵ 米国政府も ILC への支持と陽子型 FCC に向けた技術開発への参加意向を表明した (DOE 科学局長の 2020 年 2 月の ICFA での発言)。

(イ) 素粒子物理学分野における人材配置や予算配分を含めた議論や諸学問分野の大型計画も含めた ILC の位置づけに関する議論【学】

高エネルギー物理学研究者会議 (JAHEP) では、ILC を最優先新規プロジェクトと位置付けて、その実現に向けて必要な人材や予算等の調査を行い、議論を継続して行っている。国際推進チーム (IDT) での検討を経て ILC 準備研究所で人材・予算の課題を国際的に解決していくという ICFA の方針を JAHEP は全面的にサポートしており、新たに ILC 推進パネルを設置して ILC 準備研究所に向けた議論を集中的に行なっている。

国際的には、ICFA において国際的に必要とされる人材・予算等を含めた議論が続けられている。また欧州および米国で、ILC を含めた将来計画の議論が研究者コミュニティの中で行われている。さらに IDT の主導のもと原子核物理学等、他分野の研究や応用研究に ILC 施設を活用できないか議論が始まっている¹⁶。

また学術会議のマスタープラン 2020 において、ILC について学術分野を横断した議論が行われた¹⁷。

今後 ILC 準備研究所提案書 [21] をもとに、素粒子物理学分野を超えた ILC の意義を深めるため、広く他分野の研究者と議論を重ね、ILC への理解を広げていく。

¹⁶ ヒッグスファクトリーでの研究に加えて、ビームダンプや途中のビーム引き出しラインを活用した軽いダークマター探索実験や核物理実験等の新しい研究の検討が行われている。

¹⁷ 学術会議のマスタープラン 2020[2]において、ILC はヒアリングに進んだが重点プロジェクトには選ばれなかった。検討されたプロジェクト 150 件の中からヒアリングに進んだのは 59 件 (うち素粒子物理学分野 5 件) であり、その中から重点大型研究計画に選ばれたのは 16 件 (うち素粒子物理学分野は J-PARC と SuperKEKB の 2 件) となっている。

(ウ) 成果等についての国民及び科学コミュニティの広い理解・支持【有】

国民の理解促進に向けた取り組みとして、2015年以降、一般向け講演会や見学等を開催し、のべ約19万人（2019～2020年は約3万人：以下カッコ内は2018年10月以降の数字）が参加している。これには、海外からノーベル賞受賞者が出演した講演会2回（2018年8月：参加者約1,000名[22]¹⁸、2020年2月：参加者約600名[23]¹⁹）が含まれる。科学コミュニティ向けには、2016年以降、国立天文台や理化学研究所、量子科学技術研究開発機構、東京大学物性研究所、分子科学研究所、産業技術総合研究所等で19回のべ約2,700人（11回のべ約800人）、大学・研究所巡り95回のべ約2,250人（14回のべ約250人）、2014年以降、物理学会シンポジウム等15回のべ約2,350人（4回のべ約450人）を実施している。さらに、2020年10月に設置されたILC推進パネルでは、国内コミュニティの情報共有と協働促進に力を入れており、2020年12月から2021年4月までに6回、国内の大学および研究グループとの懇談会を実施している[24]。

しかし、他分野や国民の理解を得る努力はまだ十分ではない。今後、同様の活動をさらに発展させるとともに、メディアへの説明会開催、SNSや動画配信等を活用した情報発信にもこれまで以上に力を入れていく。アウトリーチとコミュニケーションはILC準備研究所本部の重要任務の一つに位置付けられており[21]、国際コミュニティと連携しながら、さらなる理解促進に努める。

¹⁸ 2018年8月：ILC推進国際シンポジウム「ノーベル賞受賞者に聞く『ILCが開く科学の未来』」（共催：お茶の水女子大学、KEK、岩手県立大学、東京大学素粒子物理国際研究センター、多摩六都科学館ほか計17機関、団体）、会場：お茶の水女子大学、参加者：約1,000人。講演者は米国のノーベル物理学賞受賞者バリー・バリッシュ博士とシェルドン・グラショウ博士の2名で、バリッシュ博士からは「多くの素粒子物理研究者は将来加速器が必要であると考えており、それがILCだ」、グラショウ博士からは「人材や新技術の開発等でも、ILCは素粒子物理学に留まらず、広く日本の科学全般を促進し、多くのスピノフを引き起こす」との発言があった[22]。

¹⁹ 2020年2月：ILC推進国際シンポジウム「ピーター・ヒッグス博士が語る ヒッグス粒子とILC」（主催：KEK、共催：東京大学、多摩六都科学館、岩手大学、広島大学、九州大学、早稲田大学、岩手県立大学、お茶の水女子大学、リニアコライダーコラボレーション、先端加速器科学技術推進協議会、東北ILC推進協議会）、メイン会場：東京大学・伊藤国際学術センター伊藤謝恩ホール、サテライト会場：盛岡市・広島市・福岡市に置かれた3会場、参加者：約600人。同シンポジウムでは、英エジンバラ大学名誉教授でノーベル賞受賞者ピーター・ヒッグス博士がビデオ出演により講演し、ILCについて「早期に建設する必要がある。経済的な負担となるかもしれないが、経済にもたらす影響はそうした負担を越えるものだ」との発言を行った[23]。

3. 技術的成立性の明確化

[1] ILC 加速器等

(ア) ビームダンプ、電子源・陽電子源、ビーム制御、ダンピングリング、測定器等の目標性能の明確化と工程表の検討【有・学】

加速器の目標性能は技術設計書 (TDR)等で明確化されており、また技術についても European XFEL 等で実用段階となっている。これまでにシステムの技術設計は終了し、建設の基礎的な工程表もまとめられている。建設のために残されているのは、一部の技術的課題の解決を経た最終設計である。

国際推進チーム (IDT)の加速器部門 (IDT-WG2) は、残された技術的課題を解決するために ILC 準備研究所での活動をワークパッケージとして整理し技術課題提案書[26]にまとめた²⁰。ワークパッケージが国際分担でき実施されれば技術課題が解決される見通しを持っている。

国際協力により技術課題を解決し、最終設計に取りまとめることで、コストおよび技術的成立性を確実にする。技術課題提案書をもとにして、分担の議論がまもなく各極 (アメリカ、ヨーロッパ、アジア) で始まる予定である。

ILC 準備研究所の下で国際協力で行う技術開発、最終設計をまとめた詳細技術設計書の作成、コスト確認作業等を通して、工期延長等を含めた追加経費リスクに関する精査を行なうことで、建設計画の不確実性の低減を図るとともに、工程表についての検討を進めていく。

測定器については、目標性能は明確化されており原理実証も完了している[25](1章、10章)。現在、最終設計完成に向け準備が進んでいる[25](1章、10章)。実機における目標性能達成を保証する測定器要素の最終モデルの製作等は、ILC 準備研究所期間に実験グループが資金を得て行うことが想定されており、国際研究者組織で議論が行われている。測定器の実験提案審査および採択タイムラインについては ILC 準備研究所提案書[21]に暫定案が示されている。

²⁰ IDT-WG2 では世界 9 か国 19 研究機関から約 50 名の加速器研究者が参加しており、「技術課題提案書」として ILC 準備研究所期間に取り組む技術課題の内容がまとめられ、別冊として、必要とされる予算や員数および分担候補となる研究機関が記されている。技術課題提案書は Tor Raubenheimer 氏 (SLAC 国立加速器研究所、加速器部門・加速器研究系研究主幹) を委員長とするレビュー委員会で審議された。

(イ) 超伝導加速空洞の歩留まりや性能の向上、コスト検証、品質管理等【有・学】

国際推進チーム (IDT)の加速器部門 (WG2) は、残された技術的課題を解決するために ILC 準備研究所での活動をワークパッケージとしてまとめた[26] (Executive summary)。ワークパッケージが国際分担でき実施されれば技術課題が解決される見通しを持っている。

ILC 準備研究所期間に、全体で 120 台の超伝導加速空洞 (世界の 3 領域で各 40 台) とその約半数を組み込んだ 6 台の超伝導加速モジュール (クライオモジュール: CM) (各領域で 2 台の CM) を、費用対効果の高い生産方法を用いて製造し、コスト検証や品質管理等を実証する。

ILC と同じ周波数帯の加速空洞を採用した大型超伝導高周波加速器として、欧州では European XFEL が完成して運用を開始、米国では LCLS-II が建設中であり、世界的に加速器建設の経験が蓄積されてきている。日米ディスカッション・グループのもと、2018 年度から日米協力による性能向上・コストダウンの開発が進められ、ニオブ材料の低価格化および高電界・低損失の空洞表面処理について成果があげられている。日独・日仏協力による性能向上・コストダウンの開発についても 2020 年度より開始された。

(ウ) 計画通り進まなかった場合の上昇コストとその対策の検討【学】

ILC の加速器システムはこれまでの国内外の加速器の技術を踏まえて建設される。それぞれの加速器部品は独立化・モジュール化され、その多くは実用に供されており、LHC や SuperKEKB をはじめこれまでの大型加速器での経験も豊富にある。ILC の中核となる超伝導高周波加速器については、European XFEL では ILC で使う 10%に相当する数の加速空洞が実装され、加速器の運用が開始されており、コストの分析も進んでいる。技術設計書 (TDR) でのコスト見積もりの精度は 25%程度であるが、ILC 準備研究所でも引き続きコスト精査を続け、毎年コストに関するレビューを行い、コスト上昇に迅速に対応する。

計画通り進まなかった場合についても大型加速器でのこれまでの経験を活かす。ILC では特に物納貢献 (インカインド) により調達される加速器部品が多いため、一部部品の遅延の全体計画への波及 (工期の延長) を抑えることが重要であり、ILC 準備研究所の段階でバックアッププランを準備する。ILC 準備研究所の下で、守秘が求められる詳細情報を含めて世界の大型プロジェクトの事例研究を行なう。これらの活動を通じて、技術開発や製造工程が計画どおりに進まないときの対応を建設の国際合意の中に組み込む。

有識者会議で議論されたコンティンジェンシー (予期せぬ出費のための予備費) に関しては、2019 年 10 月の ILC プロジェクト実施に関する提言[1](2.2 節)においても国際合意により設定する必要性が提言されている。

[2] 土木工事及び環境・安全対策

(ア) 様々な場合を想定した地下水浸水対策、耐震設計を含めた地震や火災などの不測の事態への対策についての経費算定も含めた計画【有・学】

ILC 準備研究所において、地下水浸水対策、耐震設計、火災対策の詳細な経費算定も含め設計を完了する。

なお、地下水浸水対策の実装計画については、東北 ILC 事業推進センターが公表した『東北 ILC 施設計画（2020）²¹』[27](10.2 節)の中で示されており、その「施設計画」は土木学会 岩盤力学委員会 ILC 施設計画評価小委員会によって技術的成立性・コスト・工期の面から適切な計画であると評価された。

耐震設計については、2017 年度に（一社）先端加速器科学技術推進協議会 CIVIL 部会において、ILC 施設の中で注意深い検討が必要である主な箇所として、地下への入り口（坑口）付近や地下空間の形状が急変する部分（地表からのトンネルと実験ホールの接続部分）が指摘された。坑口付近については、ILC 準備研究所において調査と設計を実施する。トンネルと実験ホールの接続部分については、2019 年度および 2020 年度に、（一社）先端加速器科学技術推進協議会 プロジェクト推進部会 安全・防災 WG にて、類似の既存土木施設の事例調査を実施し、一般的な耐震設計にて対応可能であるとの見解を得た。

(イ) 大量の掘削残土の処理方法や処分場所の確保【有】

掘削残土の扱いについては建設地に強く依存することから、ILC 準備研究所で掘削残土の処理方法と処分場所を確定する。

東北地域では、大学および自治体を中心となって掘削残土の活用について検討し、コンクリートの材料や造成に使用することを提案している。

これまで掘削残土の仮置き場に関する調査を実施し、複数の有望な候補地を挙げる事ができた。また、坑口から仮置き場までの平均的な距離を用いた施工計画を立案し、コスト・工期とともに『東北 ILC 施設計画（2020）』[27](7.2 節)に示した。

2021 年度は、これらの調査を継続し、掘削残土の具体的な仮置き場候補と運搬経路を調査し、概算費用を算定する予定である。

²¹ 東北地域では、周辺自治体および大学を中心に 2011 年度より地質調査や水文調査を実施した。2014 年より、地盤工学会の協力のもと、現地の状況に合わせた土木施設の検討を進め、地質調査の結果に基づき安定な地質条件を期待できるトンネルルートを選定した。自然流下による排水トンネルをオプションとして計画している。土木施設の施工計画に関しては平成 26 年度版国土交通省土木工事積算基準に準拠することとし、積算基準を適応できない大断面空洞については既存の施工事例を参考にした。

(ウ) 大量湧水があった場合の工事費用や工期への影響の検討と対策【有】

大量湧水があった場合の工事費用や工期への影響の具体的な算定は、ILC 準備研究所期間において実施する。

東北地域において実施した地質調査、水文調査²²、および ILC の建設を検討している花崗岩体で施工されたトンネルの施工実績²³から施工中の湧水量を推定し、通常の地下トンネルと同様の対処が可能であるとの見通しを得ている。

ILC 準備研究所期間において、通常の地下トンネル設計と同様に、ボーリング調査等で地下水の存在を評価した上で施工計画を策定し、費用や工期への影響を算定する。

また、施工中においても、通常の地下トンネル掘削と同様に、前方探査によって前方の状況を確認するとともに、必要に応じて先進水抜きボーリングや止水注入等を実施し、大量湧水がトンネル施工に支障をきたさない対策を講じたうえで掘削を進める。

(エ) 坑口周辺や掘削残土の捨て場など環境調査や土砂災害対策【有】

ILC 準備研究所において、環境調査や土砂災害への対策を検討の上で適切な坑口や掘削残土仮置き場を確定し、環境や安全に配慮した実施設計を行う。

『東北 ILC 施設計画（2020）』[27](6.1 節、7.1 節)では坑口候補地も含めて施設配置案を検討した。その際、自然環境を考慮するとともに、土砂災害対策として地滑り防止区域、急傾斜地崩壊危険区域、および砂防指定地を避けている。また、掘削残土の保管方法については、通常の残土対策に倣った計画を立案する。

(オ) 放射線防護対策、放射化物の長期維持管理の検討及び地域住民の理解【有・学】

ILC 準備研究所期間に、施設・設備の詳細設計を完了させ、放射線防護対策、放射化物の長期維持管理についての対応を確立する。また、地域住民の理解を得るため、継続して説明会を実施する。

²² 水文調査の主な項目は、既存文献の収集整理、気象・河川水量調査、観測坑調査、現地踏査、および水収支解析である。

²³ ILC の建設を検討している人首花崗岩体で 2017 年から 2019 年に施工された梁川トンネル、および千厩花崗岩体で 2020 年に施工された洪民トンネルでは、施工中の地下湧水は極めて少なかった。

ILC の放射線防護²⁴と放射化物の長期維持管理²⁵の方策は、KEK および世界の大型加速器での実績を踏まえて立案している。特に放射化が強いビームダンプや陽電子標的は、国内外の大強度ビームの運用実績に基づいて設計されており、放射線遮蔽の構造、ビームダンプの保守方法、ビームダンプ内の循環水²⁶の長期維持管理と漏洩対策等、安全を追求した最終設計を KEK を中心に国際協力で進めている。

国内では 2019 年度に（一社）先端加速器科学技術推進協議会の下にプロジェクト推進部会 安全・防災 WG を設置し、排水・地震・放射線の対応について、実務経験豊富な民間企業とともに安全と実現可能性の両面から施設の設計・検討を深めている。

地域住民の理解促進のため、ILC の安全管理・環境影響対策についての説明会を、KEK と東北の大学および自治体との共同で、2019 年からこれまでに計 11 回開催した。説明会での質問や、地域住民から寄せられた疑問や不安に対する回答を取りまとめ、東北 ILC 推進協議会および東北 ILC 事業推進センターのホームページ[28]（Q&A 等）で公表している。今後もより一層の理解を得るために継続して取り組む。

(カ) 広範な地下水位低下の可能性も考慮した環境影響評価方針の明確化【有・学】

ILC 準備研究所期間の前半で、自然環境のみならず、社会的・経済的影響を含めた「戦略的環境アセスメント」、後半に「実施段階アセスメント」を実施することで、ILC 建設開始前の環境影響評価を完了させることを想定している。

東北地域においては、自治体と大学が協力し、2013 年度および 2014 年度に ILC トンネル計画ルート（50 km）の周辺約 500 m 範囲の自然環境調査を行い、①自然環境に係る既存文献の収集整理、②現地踏査の実施と植生図の作成、③ILC トンネル建設にあたり配慮すべき事項の整理と自然環境情報マップの作成、④現地踏査を含む猛禽類調査を行った。学識者のヒアリングを経て、事業特性、環境影響評価の項目に係る調査、予測および評価の手法等を整理している。さらに、2016 年度には ILC トンネル計画ルート（50 km）の周辺水系の状況を把握することを目的とした水文調査を実施した。

KEK では、ILC の環境アセスメントについて外部専門家からの助言を得るため、2019 年に ILC 推進準備室の下に「ILC 環境アセスメント評価アドバイザリーボード」を設置した。ここでは東北地域が実施した自然環境調査の内容も得て検討を進め、アセスメントの実施体制、プロセス、手法や評価対象等を調査・整理し、2021 年 2 月に議論のまとめとしてホームページ上に公開した [29]。

²⁴ 地下の加速器トンネルは放射線管理区域とし、地上施設との間を段階的に区切り、冷却水や空気の管理を行う。加速器トンネル内の放射線が発生する場所には必要な厚みの遮蔽体を設置して空間線量を低減する設計としている。

²⁵ 加速器の放射化で生じる核種と量は、国内外の加速器の実績に基づく計算コードにより評価している。ほとんどの装置や遮蔽体は長期の維持管理が必要な放射化物にはならず再利用も可能であるが、一部、長期の維持管理が必要となる特別な装置が存在する。その代表がビームダンプおよび陽電子標的である。

²⁶ 2 台のビームダンプの循環水（100 トン）は長期維持管理の期間にわたり排水せずに管理する。万が一の漏水があっても、トンネル外にビームダンプの循環水が漏洩しないよう、ビームダンプを格納する地下施設はコンクリートの床を金属で覆う等の多重化対策を行う。

4. コスト見積もりの妥当性

(ア) 現時点での未計上の経費の算定や経費負担の在り方【学】

建設地および施設配置に依存する経費については、東北 ILC 事業推進センターと周辺自治体によって概算経費が試算された。物理解析用計算機については、物理・測定器の国際コラボレーションの中で分担される。具体的な経費分担は、ILC 準備研究所期間において決定される。

日本学術会議から公表された『国際リニアコライダー計画の見直し案に関する所見（2018）』[9]の中で、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が指摘された。具体的な建設地に大きく依存する経費については、東北地域において東北 ILC 事業推進センターと周辺自治体が協力し、概略の経費を試算した。そこには、ILC 加速器の配置計画案（『東北 ILC 施設計画（2020）』[27](6.1 節)）および想定するキャンパス候補地案をもとに検討し、土地取得、造成、取付道路整備、上下水道、電力引込み線・受変電設備（ES 事業化）、トンネル掘削土の対処経費、および環境保全の経費が含まれている。これらの経費負担の在り方はまだ決まっていない。

(イ) 追加経費発生リスク（技術、工期延長、市場等）への十分な留意【有】

ILC の加速器システムはこれまでの国内外の加速器の技術を踏まえて建設される。それぞれの加速器部品は独立化・モジュール化され、その多くは実用に供されており、LHC や SuperKEKB をはじめこれまでの大型加速器での経験も豊富にある。ILC の中核となる超伝導高周波加速器部分については、European XFEL では ILC で使う 10%に相当する数の加速空洞が実装され、加速器の運用が開始された。建設のために残されているのは、一部の技術的な課題の解決を経た最終設計である。

市場リスクへの対策としては、超伝導空洞で使うニオブ材料やヘリウム等の国際的な供給量・供給元・需要変動とそれによる価格変動の可能性等について、守秘が求められる詳細情報を含めて ILC 準備研究所を中心として関連する研究機関と精査を進める。

ILC では特に物納貢献（インカインド）により調達される加速器部品が多いため一部部品の遅延の全体計画への波及（工期の延長）を抑えることが重要であり、ILC 準備研究所の段階でバックアッププランを準備する。

これらの活動を通じて、技術開発や製造工程が計画どおりに進まないときの対応を建設の国際合意の中に組み込む。

土木における技術リスク要因を特定するために、土木学会 岩盤力学委員会 ILC 施設計画評価小委員会の評価を受けた。詳細な地質調査と設計検討が必要な箇所として、河川横断部や坑口付近、およびトンネルと実験ホールの接続部分が指摘された。ILC 準備研究所において詳細な調査検討を実施し、リスク軽減策を設計に反映する。工期に大きな影響を及ぼし得る大量湧水への対応策、掘削残土の処理方法等は、前述したように ILC 準備研究所期間に方策を確定する。

5. 人材の育成・確保の見通し

(ア) 全体調整を担う指導的人材や総合指揮を執る加速器研究者【学・有】

ILC 建設での指導的人材・総合指揮を執る人材は、ILC 準備研究所で技術課題を指揮する人材と、これまでの大型加速器のプロジェクトを担ってきた人材が担う見通しである。

国際推進チーム (IDT) において ILC 準備研究所に向けた技術開発計画を検討している加速器部門 (WG2) は、世界 9 か国 19 研究機関から約 50 名の加速器研究者が参加しており、KEK の道園が部会長となり全体を統括運営し、サブグループにおいても日本/KEK が中核的な役割を担っている。ILC 準備研究所では、技術課題としてまとめられたワークパッケージの多くに日本が参画する予定であり、ワークパッケージの遂行を通じてさらに指導的人材が育成される。

加速器システムに必要な人材について、国際協力による ILC 建設をリードする人材は、LHC や European XFEL、LCLS-II 等で経験を積んだ人材からも国際的に確保される。海外の大型加速器プロジェクトのスケジュールが具体的になり、海外からの人材確保の見通しがより明確になった (項目 1- (ウ) 参照)。国内においては、ILC で特に重要となる超伝導空洞の研究者・技術者を KEK 応用超伝導加速器センターにて育成しており、J-PARC、SuperKEKB 等の他実験の経験を積む研究者・技術者と合わせて必要な指導的人員が確保される。

(イ) 国内の人材の所在の把握や人材育成計画の検討【学・有】

人材育成も含む具体的な人員計画は、ILC 準備研究所と KEK が連携して国際的に協力して実行する予定である。

加速器人材は、ILC 準備研究所期間中に、必要な人材確保・人材育成を進めていく計画であり、これは研究所間の協定により、国際的にインカインドによる貢献で賄う。国内では、J-PARC や SuperKEKB 等の経験を積む研究者・技術者と合わせて人員確保を行っていく。2019 年に KEK に発足した応用超伝導加速器センターでは、超伝導関係等の人材育成を始めている。加速器建設は、加速器と直接関係ない機械工学や電気工学等技術者が担うことができる部分も多くあり、より広い分野からの人材確保が期待されている。幅広い分野の若手人材が J-PARC、SuperKEKB 等の他のプロジェクトで経験を積みつつ、これらのプロジェクトで経験を積んだ研究者・技術者が ILC 建設に加わると期待される。これによって、KEK が持つ加速器開発経験を若手に伝え、人材育成と ILC 準備を進める。

物理研究者については、現在進行中の SuperKEKB/Belle II や LHC/HL-LHC の建設・運転スケジュール²⁷に合わせて人員計画の議論を行なっている。Belle II では研究者の 4/5 以上が国外の研究者となっている等、国内で実施される国際共同の素粒子物理学プロジェクトへの国外研究者の参加は大きく増加しており、ILC においても国外研究者も含めた全体的な人材の把握と人材育成計画が議論されている。ILC 準備研究所期間には実験コラボレーションが形成され測定器の工学設計が行われる予定であり、研究者育成の絶好の機会となる。

²⁷ 現在進行中の SuperKEKB/Belle II は、2031 年まで続く計画である。HL-LHC の建設は 2026 年に終了し、その運転は 2038 年まで続く予定となっている。

(ウ) 供給可能な人材の量や時期を踏まえた国際分担【有】

ILC の基幹技術である超伝導加速器は 2019 年以降も大きく発展しており、アメリカでは LCLS-II や PIP-II、ヨーロッパでは European XFEL に続き ESS が建設中、アジアでもインドや中国等で技術とともに多くの人材が育成されている。(項目 1- (ウ) 参照)

IDT が提案した技術課題提案書のワークパッケージ[26] (Executive summary) を ILC 準備研究所において国際分担することにより、参画する海外研究機関で ILC の中核となれる人材の供給可能性を十分高くできる見通しである。

海外の大型プロジェクトの建設完了までのスケジュールがより具体的になり(項目 1- (ウ) 参照)、ILC 建設に係る人材確保の見通しがより明確になった。各領域での大型加速器の建設計画の多くは 2026 年前後に建設が完了する予定であり、海外の供給可能な人材の観点からも ILC の建設時期と整合する状況となっている。一方、新型コロナウイルスによる各建設計画の遅延等の状況およびその影響分析は今後の課題である。

2019 年、KEK に設置された ILC 国際ワーキンググループが人材の国際分担のあり方を検討した [1](2.2.4、2.2.5、2.5 節)。海外からの人的貢献(海外研究機関の予算と責任による雇用)は、国際合意の中心課題の一つとされている。管理人員の一部は ILC 研究所の予算(共有予算)により雇用されるが、それに加えて、CERN のプロジェクト・アソシエイトのように海外研究所の責任による雇用も検討されている。

(エ) 外国人のための、住環境や家族の生活支援等を含めた環境整備の検討【有】

(一社) 先端加速器科学技術推進協議会 プロジェクト推進部会において ILC 契機地方創生・まちづくり WG が発足し、ILC 立地地域の環境整備について検討を開始した。

東北地域の周辺自治体においては、外国人へのサポート体制の充実・強化に努めており、様々な取り組みを継続的に進めている²⁸。また、2020 年度に発足した東北 ILC 事業推進センターでは、外国人のための住環境や家族の生活支援等を含めた環境整備について検討を進めるために、まちづくり・多文化共生検討部会を設置することとしている。

当該地域ではさまざまな取り組みが確実に進展していることから、ILC に関わる多くの外国人が来日するまでには、外国人を支援する十分な環境が整備されると見込まれる。

²⁸ 例として、多言語対応相談窓口の設置、行政書士会と連携した相談日の設定、多言語サポーター育成のための研修、外国人子育て支援、日本語学習支援、多言語によるホームページ・情報誌・地域 FM ラジオ放送、「指さし対話集」の作成・配布、外国語対応医療機関に関する情報のホームページ掲載、「多言語問診票」の公開等、様々な取り組みを継続している。ILC 立地が決定した後は、前述の様々な活動をさらに推し進めるとともに、外国人の来日決定から帰国までの生活全般に関わるワンストップ支援サービスの運用に取り組むこととしている。

6. その他

(ア) 準備研究所にかかる体制等（現行の研究計画からリソースを移行する時期と範囲についての KEK や国内外の関連研究者との議論など）【有】

研究所間の協定による ILC 準備研究所発足を目指している。その時期が各研究機関のリソース移行の開始となる。ILC 準備研究所は、KEK を含めた参加する研究機関により人および装置を持ち寄り国際分担する。準備研究所発足に向けての準備状況は以下のとおりである。

2020 年 8 月に設立された ILC 国際推進チーム (IDT) で ILC 準備研究所についての必要なリソース、技術課題および組織構成の検討が深められており、ILC 準備研究所提案書 [21] (5 章) にまとめられている。ILC 準備研究所の本部の運営は日本国内で行われるが、技術課題への取り組みは、その資金調達も含めて、協定を締結した各研究機関が責任を持ち管理する。技術課題はアメリカ、アジア (主に日本)、ヨーロッパの 3 つの領域でほぼ均等に分担することが想定されている。土木関連の準備作業は、装置が設置される日本が責任を負う。

KEK では、2019 年に設立された応用超伝導加速器センターにて、特に重要となる超伝導加速技術の研究者・技術者を育成しているところである。また、2016 年にまとめた ILC アクションプラン [30] での ILC 準備研究所期間の人材育成と移行計画を 2018 年に更新し、今年度には IDT の提案に合わせ改訂する予定である。

(イ) 技術的・経済的波及効果【学】

2019 年以降も、様々な分野の有識者、産業界、および地方自治体等との間で、技術的・経済的波及効果に関する議論・検討を深めている。その中でも我々が重要と考えるのは以下の 5 点である。

- ・ ILC はアジア初的大型国際研究機関、世界に誇る知の拠点となる。
- ・ 若者に夢と希望を与え、教育的効果が大きい。多分野における高度人材育成が行われ、我が国、アジア、世界の加速器科学の振興、持続的発展の力となる。
- ・ CERN の例にあるように、真理の探究という国家や宗教を超えたテーマに取り組む国際研究所そのものが世界平和に貢献する意義も大きい。
- ・ 大型加速器科学は総合科学であり、様々な知見や技術が集積し融合する機会にあふれ、技術の発展²⁹、イノベーションの発生³⁰等多様な波及効果が期待できる。CERN において医療応用や情報通信 (例: WWW) 等の多様な波及効果が発生したように、ILC でも超伝導加速、高速制御、ビッグデータ解析、高性能センサー等、先端技術の融合におけるイノベーション発生の可能性が高い。その予見は困難だが、技術革新のニーズがあるところに新しいアイデアが生まれる。イノベーションが発生した場合には WWW のように世界を一変する極めて大きな産業・経済的な価値を生じる。

²⁹ 例えば超伝導技術においては、2018 年以降、将来の性能向上につながる大きな進展が続いている。加速勾配や安定性はさらに伸びる余地があり、特に米国エネルギー省では予算を投じて大規模な研究開発体制を敷いている。

³⁰ イノベーションを生み出すのは、技術開発時点によるものだけでなく、むしろ技術確立後の運用期に起こるものが多い。そこで、東北 ILC 事業推進センターの加速器関連産業振興部会では、公益財団法人いわて産業振興センター、東経連ビジネスセンターと協力して、地場企業での ILC 製造技術開発を促進している。

・ ILC は環境負荷の低い超伝導加速を採用し、ILC を核としたエコシティ構想＝グリーン ILC プロジェクトを SDGs の取り組み³¹として推進している。

以上は、マスタープラン 2020 申請書にも記載した。

今後、経済学・経営学の専門家の協力を得て、ILC 計画の技術的・経済的波及効果や分析方法に関する検討を進める。

³¹ 2019 年以降の取り組みとして、（一社）先端加速器科学技術推進協議会・プロジェクト推進部会では、ILC 契機地方創生・まちづくりワーキンググループを設置、周辺の農業・街での排熱利用、熱輸送等、スマートシティのモデルの可能性も検討している。