作 業 部 会 報 告

○　素粒子原子核物理作業部会報告（平成２７年３月）・・・・・・・・・・１８

○　技術設計報告書（ＴＤＲ）検証作業部会報告（平成２７年３月）・・・２６

国際リニアコライダー（ILC）に関する有識者会議
素粒子原子核物理作業部会報告

当作業部会は、国際リニアコライダー（ILC）計画の目指す研究内容と、その内容が巨額の投資に見合った科学的意義を有するかについて検証を行い、その意義を整理するため、平成 26 年 6 月以降、8 回に渡り議論を行った。この議論においては、主に以下の３つの観点を中心に議論を行った。これらの議論の結果について、主要事項を以下に示す。

（１）素粒子原子核物理学分野における将来の目標と ILC の位置付け
（２）上記のうち、既存加速器（大型陽子加速器（LHC）等）で見通せる成果
（３）上記のうち、ILC が目指す成果及びその際の性能

なお、当作業部会では、ILC について衝突エネルギー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い、必要に応じてエネルギーアップグレードされた ILC についても議論を行った。

１．科学的意義（将来の素粒子物理学（高エネルギー分野）の目標に対しての ILC の役割）

〇素粒子物理学の歴史と現状
素粒子物理学は物質の内部構造とそこに働く根源的な力の法則を研究する学問である。その発展により、近年では宇宙の誕生や進化などの理解においても素粒子物理学の重要性が認識されるようになった。

〇素粒子物理学は 20 世紀の後半以降加速器の進歩と共に新たな粒子や現象が発見され、それを手がかりに理論的研究と更なる実験を重ねることで大きな発展を遂げた。特に 1970 年代以降、陽子・（反）陽子衝突型加速器と電子・陽電子衝突型加速器によって多くの発見と測定がなされてきた。20 世紀中には物質を構成するクォークとレプトン及びそれらの間に働く強い力、弱い力、電磁力を媒介するゲージ粒子からなる素粒子の標準理論の枠組みの正しさはほぼ確固たるものとなり、そして 2012 年には素粒子に質量を与えるヒッグス粒子が発見されて標準理論の枠組みを構成する全ての要素が実験的に確認された。

〇ヒッグス粒子は今まで知られていたクォークやレプトン、及び相互作用を媒介するゲージ粒子とは全く違う粒子であり、今後ヒッグス粒子の全容を解明していく必要がある。それと共に、宇宙の暗黒物質の存在や様々な理論的研究から、標準理論が素粒子の世界を記述する究極の理論でないことも広く認識されるようになった。従って現在の素粒子物理学の大きな流れは標準理論を超える物理がどのようなものであるかを探ることで

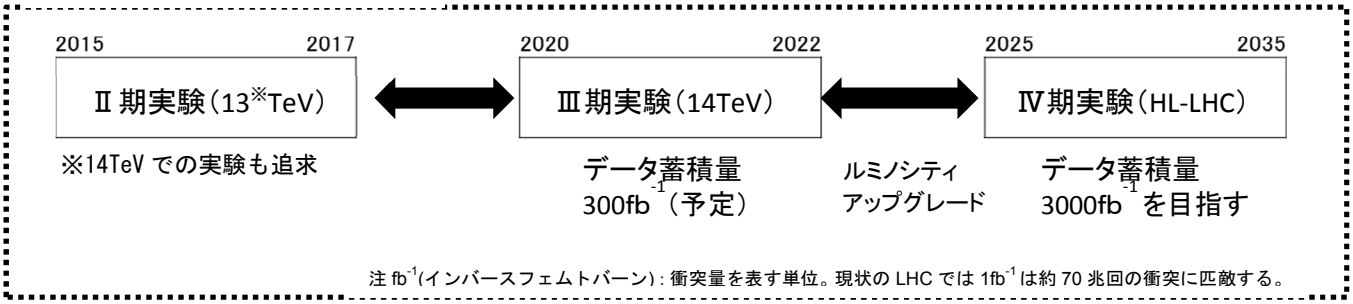
[1] 電子ボルト（eV）：エネルギーの単位。電子ひとつが 1 ボルトの電圧で加速されたときに得るエネルギーの量。$1eV=1.6\times10^{-19}J$

ある。

○素粒子物理学における究極の目標は、素粒子・宇宙を支配する自然法則の統一的理解である。この理解に至るまでには、力の統一や、超対称性、あるいはこれら以外の新たな物理について実験的に研究していくことが重要と考えられている。

○特に、電弱相互作用のエネルギースケール（数百 GeV）と、これより 10 桁以上高いと推定されていて、素粒子間に働く強い力、弱い力、電磁力が統一されると期待される大統一のエネルギースケール、あるいは重力が重要になるプランクスケールという非常に大きなエネルギースケールとの違いを無理なく理解するには TeV（TeV=1 兆電子ボルト）のエネルギースケールに超対称性などの新たな物理が必要であると広く認識されている。また暗黒物質もこの新たな物理と関連した粒子である可能性が広く議論されている。これらを研究するために、エネルギーフロンティア加速器 LHC により超対称性粒子などを直接観測する方法が取り組まれてきている※。それと共に、大強度を目指した加速器である電子・陽電子衝突型加速器（KEKB）や大強度陽子加速器施設（J-PARC）などでの間接的な探索や非加速器実験を含む様々な研究が進められている。

※LHCの実験スケジュール



○現在 LHC において探索が進められている新しい物理現象が発見されるか否かにかかわらず、電子・陽電子衝突型加速器の次世代計画として提案されている ILC は、その特徴であるバックグラウンドの少ないクリーンな実験環境において LHC での実験の限界を超える研究能力のある実験施設であり、精密測定や新粒子・新現象の探索により新しい物理の全容解明に貢献し得る点で重要である。

○ILC の目指す研究は超対称性など、TeV のエネルギースケールにあると予想される素粒子の標準理論を超える新物理の探索と解明で、非常に重要である。その内容は以下のとおりである。

（１）ヒッグス粒子やトップクォークの詳細研究によるヒッグス機構の全容解明で標準理論を超える物理を探索

（２）超対称性粒子などの新物理の探索、及び発見された場合その詳細研究[2]

[2] LHC で新たな物理が発見される場合、それが ILC のエネルギー範囲や測定精度でどの程度まで解明し得るか等の点にも留意が必要。

（３）その他（暗黒物質や余剰次元）

２．必要経費（技術設計報告書（TDR）検証作業部会報告から転載）

〇加速器施設建設費総計：1 兆 1 千億円程度（労務費を含む、その他付随経費や不定性相当経費は除く）

・本体建設費　9,907 億円（TDR 記載項目）

（内訳）

土木建築　1,600 億円（工事費）
加速器本体　6,709 億円（超伝導加速空洞・設備費等）
} 8,309 億円

労務費　1,598 億円（＝22,892 千人時相当）

・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 千人時相当）

〇年間運転経費　491 億円（TDR 記載項目）

（内訳）

光熱水料、保守　390 億円
労務費　101 億円（＝850 人／年相当）

〇TDR では国際協力によるコストシェアリングを行うこととされている。

３．過去の加速器整備での建設費の実例

①国内の実例

・過去に整備された加速器関連の施設において、最も経費を要した施設でも 1,500 億円程度であった。

※J-PARC　1,524 億円

この他、大型放射光施設（SPring-8）　1,100 億円
KEKB　378 億円（トンネル工事は除く）　等

②海外の実例

〇大型陽子加速器（LHC）

・現時点での世界最大の加速器：欧州合同原子核研究機関（CERN）の LHC（CERN での既存加速器に追加し、大型電子・陽電子衝突型加速器（LEP）のトンネルを利用する形で設置。LHC のために追加で必要となった費用は、加速器および実験装置の建設費として約 5,000 億円、ただし人件費は除く）。

・LHC は欧州の国際機関である CERN が整備。なお、整備の際に、日本からは 138.5 億円を拠出。日本以外では、米国、ロシア、カナダ、インド等が協力。

・LHC は建設開始時に過去の加速器実験（欧州・LEP 等）における実験データと標準理論（あるいは超対称性理論）に基づき、ヒッグス粒子発見能力について見通しをもって実験が開始された。ただし実験開始前に他の実験で発見される可能性はあった。また LHC のヒッグス粒子探索の結果が（発見のあるなしにかかわらず）標準理論の根幹に大きな影響を与えると考えられていた。

〇超伝導超大型衝突型加速器（SSC）

・LHC より少し前に米国で計画された大型加速器施設として、SSC がある。

・本計画は、米国の国家事業として開始されたが、その後中止に追い込まれた。部会において聴取したところでは、様々な要因がある中で、以下のような点を挙げる意見があった。

A)　米国内の予算が緊縮財政に転換されたこと

B)　国際プロジェクトでなかったこと

C)　設計変更等による経費の増加（45 億ドル→110 億ドル）

D)　SSC の波及効果が誇張されており、反発を招いたこと

E)　建設地の選定が後に様々な問題を生じさせたこと

４．技術設計報告書（TDR）で示された ILC で実施できる研究

〇ヒッグス粒子が発見された今、素粒子物理学の次なる目標は「標準理論を超える新たな現象」の発見。ILC では以下の研究が実施できる。

・ヒッグス粒子の崩壊分岐比の詳細測定や３点結合の測定等を通して真空の相転移の起源をはじめとするヒッグス粒子・ヒッグス機構の全容解明やトップクォークも含めた精密測定から標準理論を超える物理を探索

・エネルギーフロンティアの加速器として、「超対称性粒子」等の新粒子探索も重要な課題（ただし、強い相互作用をする超対称性粒子の探索はエネルギー増強後の LHC でも実施予定であり、発見が期待されるのは主に 2015～17 年頃）

・暗黒物質や、余剰次元等の探索

５．投資に見合うかの判断の留意点

〇日本学術会議も指摘している ILC での研究の最適な戦略の見通しについては、ILC で期待される成果を最大化する観点から、2015 年から始まる LHC の衝突エネルギー13TeV の実験（13 TeV LHC）における強い相互作用をする超対称性粒子等の探索結果を踏まえて明確化すべき。

〇４．に掲げられた実験内容について、最適な戦略見通しに沿った研究計画を遂行するにあたり、現在、ILC の設計書として示されている技術設計報告書（TDR）で規定されている性能で過不足がないか検証すべき。

○ILCは巨額の経費を要する国際計画であり、国際協力を前提に立案がなされてきたこと、また我が国の財政状況も鑑みると我が国がホスト国として負担をする範囲には限度があることから、ILCにかかる経費について、国際協力による応分の経費分担を前提とすべき。

○ILC計画の投資額の規模に鑑みると、実施の可否を判断する際には、他の学問分野コミュニティの理解・協力を得ることが重要であり、計画推進の判断がなされた場合は、建設期のみならず運用期においても大型科学プロジェクトを含む他の学問分野の研究に影響を及ぼすことがないような特別な予算措置が望まれる。

○ILC計画実施について、時宜を得た判断が行われない場合には、国際的な求心力が失われる可能性があるため、不必要な判断の遅延を招かないように、体制の整備や事前の準備が重要。

○計画実施の可否は、上記の留意点を踏まえて判断すべきである。

６．13 TeV LHCの成果を踏まえたILC等のシナリオ

13 TeV LHCでの成果を踏まえたシナリオに応じてILC計画で実施する場合の今後の戦略方針は以下のとおり。

（１）13 TeV LHCで新粒子（強い相互作用をする超対称性粒子の可能性がある粒子）が発見された場合

方針：ILCにより、ヒッグス粒子やトップクォークの精密測定から、新粒子の背後にある物理現象を解明する。LHCにおいて、強い相互作用をする新粒子が割合軽い[3]場合や250GeV以下の質量をもつ新粒子に崩壊しているらしいとの示唆がある場合には、ILCにおいてこの新粒子を発見し、詳細解明を行うことが期待される。そうでない場合は、エネルギーアップグレードがゆくゆくは必要となる。

効果：超対称性の存在の証明、あるいは複合ヒッグス粒子の確認などにつながり、大きな発見や研究の進展が期待される。ILCで新粒子が発見された場合にも、大きな研究の進展が期待される。

（２）上記以外の新現象（暗黒物質や余剰次元）と思われる事象の兆候が観測（発見）された場合

方針：LHCで発見された新現象の性質をILCで精査し、ヒッグス粒子やトップクォークの精密測定とあわせて、標準理論を超える物理を研究する。

効果：暗黒物質の初観測や余剰次元の探索の足がかりの観測により、大きな発見と

[3] ILCで発見される可能性がある最も軽い新粒子の質量は、典型的な超対称性理論では強い相互作用をする超対称性粒子の概ね1/7以下とされている。ただし、理論的には不定性が大きいという意見もあることに留意が必要。

研究の進展が期待される。

（３）13 TeV LHC で新粒子や新現象が観測されない場合

方針：ヒッグス粒子やトップクォークの精密測定から標準理論を超える物理（超対称性理論、複合ヒッグス理論等）を探索する。また ILC は LHC では検出が困難なタイプの新粒子にも感度があるため、これらの新粒子の探索も行う。LHC で未発見の原因を精査し、ILC で発見できる新粒子を探索するとともに、将来のエネルギーアップグレードの必要性を検討する。

効果：標準理論からのズレが観測された場合は、そのズレの大きさとパターンから、標準理論を超える物理の方向性と関連する新物理のエネルギースケールが明らかになる。新粒子が発見された場合にも、大きな研究の進展が期待される。

LHCの13TeV運転の成果に応じた500GeV ILCのビジョン

13TeV LHCでの実験結果を踏まえた500GeV ILCでの研究の科学的意義及び国際的な求心力の変化	13TeV LHCの実験結果による変化						備考
	ILCの科学的意義			ILCの国際的な求心力			
	上がる	変わらない	下がる	上がる	変わらない	下がる	
1. ヒッグス粒子やトップクォークの精密測定から標準理論を超える物理の探索							
LHCで新粒子の発見があった場合	◆	◆	いずれかの組合せ		◆		LHCで発見がある場合、精密測定で如何なる物理かを特定する必要があり、標準理論からのズレが見えないリスクも下がるため、意義は変わらない、または更に高まるとの両論がある。求心力はLHCと2分。
LHCで新粒子の発見がない場合	◆	◆		◆			LHCで発見がない場合、ILCしか他に手段がないとして、科学的意義は更に高まる、または変わらないとの両論がある。LHCへの求心力が低下した場合は、標準理論を超える物理へのアプローチで、ILCでの精密測定に対する求心力が高まる。
2. 超対称性粒子などの標準理論を超える新粒子の直接探索による新物理の研究							
LHCで新粒子の発見があったが、対応する新粒子が ILCで直接見える可能性が低い場合			◆		↔	↔	ILCで見える可能性が低い場合は、エネルギーアップグレードがゆくゆくは必要となる。エネルギーアップグレードによって新粒子が直接見える可能性が高い場合は、ILCが一定程度の求心力を有するとの意見もある。
LHCで新粒子の発見があり、対応する新粒子が ILCで直接見える可能性が高い場合	◆			◆			新粒子の素性を解明する上で、非常に大きな科学的意義があり、国際的な求心力も高まる。
LHCで新粒子の発見がない場合			◆	↔	↔		ILCで探索可能な新粒子が存在する質量領域が現在より狭まる。しかし、ILCにおける新粒子の探索については手がかりがほとんどないことから、ILCでも新粒子の発見が可能との意見があるほか、ILCがLHCとは異なるタイプの新粒子に敏感であるため、相対的に求心力がある、または高まるとの両論がある。

（1）LHCで発見された新粒子が強い相互作用をする超対称性粒子の場合、ILCで発見される可能性がある最も軽い新粒子の質量は、典型的な超対称性理論では強い相互作用をする超対称性粒子の概ね1/7以下とされている。ただし、理論的には不定性が大きいという意見もあることに留意が必要。

（2）LHCで探索可能な新粒子の質量の上限は、2 TeV (2000 GeV)。500 GeV ILCで直接探索可能な新粒子の質量の上限は250 GeV。（8TeV LHCでの実験の結果、1 TeV以下では強い相互作用をする新粒子の発見なし。）

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、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を行い、その課題を抽出するため、平成 26 年 5 月以降、6 回に渡り議論を行った。この議論においては、TDR が現時点における参加極で見積られたコストを取りまとめて作成されたものであること、また、人材の確保は予測で組み立てられていること等を前提としている。これらの議論の結果について、主要事項を以下に示す。

１．本部会で聴取した ILC 計画の見積りの概要

（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。

また、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。

（１）本体建設費　9,907 億円（TDR 記載項目）

（内訳）

土木建築　1,600 億円（工事費）
加速器本体　6,709 億円（超伝導加速空洞・設備費等）
} 8,309 億円

労務費　1,598 億円(＝22,892 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）その他付随経費　（TDR 未記載項目）

・準備経費（設計費用のほか、人材養成・技術移転関連経費等）
・土地取得経費
・上記の他、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、計算機センター等の経費

（４）不定性相当経費　建設経費の約 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。

（５）年間運転経費　　491 億円（TDR 記載項目）

（内訳）

光熱水料、保守　390 億円

労務費　　101 億円（＝850 人／年（TDR では金額換算はされていない））

なお、実験終了後の解体経費に関しては、現時点で算定されていない。

（参考）

TDR に記載された性能をアップグレードした場合の追加コストは以下のとおり。

・シナリオＡ（500GeV（GeV=10 億電子ボルト[1]）のエネルギーは変えず高輝度化）　590 億円

・シナリオＢ（1TeV（TeV=1 兆電子ボルト）へエネルギー増強：現行の技術）　7,543 億円

・シナリオＣ（1TeV へエネルギー増強：技術的進歩のある場合）　6,148 億円

◆TDR のコスト見積りでは、加速空洞や高周波加速装置などの大量調達が必要なコンポーネントに関する性能保証について、製作を請け負った企業ではなく、発注者である中核研究所がその責任を負うという「構造仕様」による発注を前提としている。これは、一般に、品質保証について、受注者側が責任を負う「性能仕様」による場合に比して、見積額が抑えられる。そのため、準備段階から発注者側に優れた技術者・研究者を確保・育成する取り組みが不可欠となる。

２．技術設計報告書上のコストのリスク要因や技術上の課題

ILC 計画の検討に際しての前提は以下のとおり（TDR 及び本部会でのヒアリングによる）

① 国際協力によるコストシェアリングを行うこと

② 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

この前提を踏まえ、本作業部会においてこれまでに指摘されたコスト面でのリスク要因や技術上の主な課題は以下の通り。

（１）コスト面でのリスクに関する課題

① 豊富な実績を有する海外企業の見積りが多く採用されるなど、現時点での最適な状況を選択した見積りとなっており、国内企業での調達を考慮した場合、実際にかかる費用が TDR の見積りを超過する恐れがあるなど、結果として見積に余裕が少ないことに留意が必要。

[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。$1eV=1.6\times10^{-19}J$

② 本計画では大量の加速空洞が必要である。加速空洞の製作には、高純度・高品位のニオブが必要となるが、その供給元が限られること、及び、目標加速勾配が達成できない場合には大きなコストアップにつながるおそれがあり、留意が必要。超伝導加速空洞・クライオモジュールの一式のコスト予想では、欧州X線自由電子レーザー(EXFEL)の実績製作コストと比較して72%と低く見積もられているが、今後、各地域での状況を踏まえつつ、量産化に伴うさらなる製作コストの低減、システム技術の検証が必要。

③ TDR の見積りの前提とは異なって、参加国がそれぞれ自国で構成品等の製作を分担する場合のコスト増（複数メーカーに製作が分散される）を考慮すべきである。また、海外メーカーから調達した機器に関するメンテナンス保守を我が国で実施できない場合、保守費用が増大するおそれがあり、留意が必要。

④ トンネル工事等、建設前の地盤等を含めた立地条件に関する調査やトンネルへの環境水の流入などインフラ工事における不測の事態発生のリスク検討、対応策、現在の見積りから漏れている項目、および想定外項目のリストアップとコスト増への対応策の検討が必要。

⑤国際的な枠組みを構築する上では、その枠組みに応じた事務管理コストが必要となってくる。特に新たな国際研究機関を設置する場合、研究機関で技術者等の人材の雇用を行う（海外の研究機関の多くは建設に関する人材の多くを機関が雇用）等により、追加の費用が必要となるため、実際に必要な人件費がTDRで試算された人件費（全体建設コストの1/5）を超過するおそれがあり、留意が必要。

（２）技術面での実現可能性に関する課題

① TDRで示された、過去の実績値における性能が実機量産品でも達成されるという前提での設計となっており、設計に尤度が少ない。また、輸送時においては衝撃や温度変化による性能劣化及び輸送手段の事故等による不測の損害の発生が問題となるので、製作個数に余裕が欲しい。建設開始までの準備期間で、目標性能を安定に実現させること（歩留りの改善を含めて）、製造技術の確立、メーカーへの製造技術移転及び量産体制の確保の他、日本における技術蓄積等が重要。

② 小規模なシステムでの技術蓄積実績があったとしても、スケールの異なる大規模システムを検討する際は技術面、コスト面での不確実性が大きくなることから、ILCにつながる技術を駆使して実施される EXFEL の進捗状況及び蓄積された実績を踏まえた技術的成立性に関する見通しが重要。

③ 建設を分担する複数の拠点間の品質保証等の協調方策の検討。特に国際的に統一した品質管理など、複数の拠点で分散して同じ品質のコンポーネントを製作するための性能再現化技術の確立について見通しを得ることが必要。一般に、異なる機関で製作された部品を組み上げて一つの構成品に組み上げる際には取り合いでの課題が増加するため、各国が部品製作を分担する場合は、システムとして組み上げる際の整合性などに関する技術的検証が必要。

④ 運転の信頼性確保や要求性能の定常的維持の観点から、性能実証が不十分な構成機器、例えば、ビームダンプや電子源、陽電子源などが見受けられる。これらの構成機器に関し、所期の目標性能を明確化すると共に、目標達成に向けた現実的な研究開発・性能実証の工程表を策定することが必要。

（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

① 建設時に必要となる技術者の確保方策について見通しを得ることが必要。特に大規模な精密機器の製造では、製作や搬入された個々の部品に多少の不具合があったとしても、中核研究所において適切に対応して所定の性能を有する装置に組み上げることができる高いレベルの技術力を有した人材を多数確保することが必要。

② 短期間での要素機器製作プロセスの大規模化に伴う人的・技術的課題の検証が必要。具体的には、加速空洞等の構成品の大量製造に対応可能な多くの人材を確保する見通し（約 1 万 6 千個の加速空洞を 6～7 年で組立てることが必要）、及び建設監督を行う日本の研究者の確保及び育成方策に関する見通しを得ることが必要。

③ 調達やシステム組み上げ時に必要な体制が確立できるかについて、十分に明確な見通しが必要。特に各極分担で加速器を製作する際に、中核となる研究所の役割が重要になる。技術開発などの準備段階においても、事務的な協力体制を構築することが必要。

④ ILC を加速器システムとして熟知し、実現に向けた研究開発を的確に推進できるプロジェクトリーダーを置くことが必要。国際研究機関の少ない我が国において、国際機関の組織構成や、マネジメント人材をどのように確保するのかの検証が必要。国際機関の組織の在り方を踏まえたマネジメントを行う人材の登用の仕組みについて検討が必要。

３．実施の可否判断における留意点

（１）国際協力のあり方

① In Kind による貢献の際、ホスト国の企業が受注できない場合の対応について、検討が必要。

② 国際協力の在り方としては、安全面での法規をはじめ、調達の際に遵守する法令や関税の取扱いをホスト国に合わせることについてあらかじめ合意することが必要。その際、条約による法的枠組みを構築するか、機関間の協定による枠組みを構築するか、さらには国際研究機関を設置するかで必要となる組織が大きく異なることに留意が必要。

（２）その他

① 我が国においては他の学術分野への影響を最小限に抑える観点から我が国の負担額には限度があることに留意するべき。ことに、巨額の経費が必要な長期計画であることに鑑み、現在試算されている総コストがさらに膨らんだ場合の対応に関する枠組みの検討が必要。

②国際的なコミュニティから協力が得られるか、また、ILC を重要課題として積極的に取り組んでいるかに関する各国の動向を見定めることが必要。

③ 加速器性能の高度化につながる技術開発の成果を最大限取り入れる努力を継続し、全体システムの合理化を図るとともに、機器の信頼性、安定性を高めることが肝要。

参 考 資 料

○　国際リニアコライダー（ＩＬＣ）に関する有識者会議委員名簿・・・・・３４

○　素粒子原子核物理作業部会委員名簿・・・・・・・・・・・・・・・・・・・３５

○　技術設計報告書（ＴＤＲ）検証作業部会委員名簿・・・・・・・・・・・・３６

○　検討経緯・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・３７

国際リニアコライダー（ＩＬＣ）に関する有識者会議委員名簿

○平野　眞一	上海交通大学 講席教授、平野材料創新研究所長 名古屋大学 名誉教授
伊地知寛博	成城大学 社会イノベーション学部 教授
大町　達夫	（一財）ダム技術センター 顧問 東京工業大学 名誉教授
岡村　定矩	法政大学 理工学部 教授 東京大学 名誉教授
梶田　隆章	東京大学 宇宙線研究所長
京藤　倫久	日本学術振興会 監事
熊谷　教孝	（公財）高輝度光科学研究センター 研究顧問
神余　隆博	関西学院大学 副学長
徳宿　克夫	高エネルギー加速器研究機構素粒子原子核研究所長
中野　貴志	大阪大学　核物理研究センター長
観山　正見	広島大学 学長室 特任教授
森　　俊介	東京理科大学 理工学部 教授
山内　正則	高エネルギー加速器研究機構素粒子原子核研究所長（平成２７年３月まで）
横山　広美	東京大学 大学院理学系研究科 准教授

○は座長

（平成２７年６月現在）

国際リニアコライダー（ＩＬＣ）に関する有識者会議
素粒子原子核物理作業部会委員名簿

	岡村　定矩	法政大学　理工学部　教授 東京大学　名誉教授
○	梶田　隆章	東京大学　宇宙線研究所　所長
	小磯　晴代	高エネルギー加速器研究機構　加速器研究施設　教授
	駒宮　幸男	東京大学　素粒子物理国際センター　センター長
	酒井　英行	理化学研究所　仁科加速器センター　共用促進・産業連携部部長
	清水　　肇	東北大学　電子光理学研究センター　教授
	棚橋　誠治	名古屋大学　素粒子宇宙起源研究機構　教授
	徳宿　克夫	高エネルギー加速器研究機構　素粒子原子核研究所　副所長
	中野　貴志	大阪大学　核物理研究センター長
	中家　　剛	京都大学　大学院理学研究科　教授
	初田　哲男	理化学研究所　仁科加速器研究センター　主任研究員
	松本　重貴	東京大学　国際高等研究所カブリ数物理連携宇宙研究機構 特任准教授
	山内　正則	高エネルギー加速器研究機構　素粒子原子核研究所　所長
	山中　　卓	大阪大学　大学院理学研究科　教授
	横山　広美	東京大学　大学院理学系研究科　准教授

○は座長

（平成２７年３月現在）

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）検証作業部会委員名簿

小関　　忠	高エネルギー加速器研究機構　加速器研究施設　教授
加藤　　崇	日本原子力研究開発機構　Ｊ－ＰＡＲＣセンター 副センター長
上垣外修一	理化学研究所　仁科加速器研究センター　加速器基盤研究部長
熊谷　教孝	(公財)高輝度光科学研究センター　専務理事
小磯　晴代	高エネルギー加速器研究機構　加速器研究施設　教授
佐々木茂美	広島大学　放射光科学研究センター　教授
田中　　均	理化学研究所　放射光科学総合研究センター XFEL 研究開発部門長
内藤富士雄	高エネルギー加速器研究機構　加速器研究施設　教授
野田　耕司	放射線医学総合研究所　重粒子医科学センター 物理工学部長
○横溝　英明	(一財)総合科学研究機構　東海事業センター長

○は座長

（平成２７年３月現在）

検討経緯

〇国際リニアコライダー（ＩＬＣ）に関する有識者会議

第１回　平成２６年５月８日

・今後の進め方、作業部会の設置について

・ＩＬＣ計画に関する動向について

第２回　平成２６年１１月１４日

・作業部会からの進捗報告

・今後の検討の論点

第３回　平成２７年４月２１日

・作業部会からの審議経過報告

・技術的波及効果等の委託調査について

第４回　平成２７年６月２５日

・これまでの議論のまとめ

・人材の確保・育成方策検証作業部会（仮称）の設置について

〇素粒子原子核物理作業部会

第１回　平成２６年６月２４日

・素粒子物理分野の動向について

・ＩＬＣ計画に関する概要・目指す物理等について

第２回　平成２６年７月２９日

・欧米における将来計画（Ｐ５レポート、欧州戦略）について

・ＩＬＣの科学的意義・役割について

第３回　平成２６年８月２７日

・関連分野の動向について（宇宙線、天文学）

・ＩＬＣの科学的意義・役割について

第４回　平成２６年９月２２日

・関連分野の動向について（フレーバー物理、ニュートリノ）

・ＩＬＣの科学的意義・役割について（ＬＨＣ実験との関係）

第５回　平成２６年１０月２１日

・これまでの議論の取りまとめ

第６回　平成２７年１月８日
・有識者会議での指摘事項について
・過去に検討がなされた大型計画について（ＳＳＣ計画）

第７回　平成２７年２月１７日
・投資に見合う科学的意義の整理
・これまでの議論の取りまとめ

第８回　平成２７年３月３０日
・これまでの議論の取りまとめ

〇技術設計報告書（ＴＤＲ）検証作業部会
第１回　平成２６年６月３０日
・今後の進め方、技術設計報告書の概要、コスト見積り概要について

第２回　平成２６年７月２８日
・超伝導加速空洞システム、主線形加速器、高周波電力について

第３回　平成２６年９月８日
・前回の続き（超伝導加速空洞システムのコスト等）
・施設関係について

第４回　平成２６年１１月４日
・ＩＬＣ計画全体のコストについて（プロジェクトマネージメントを含む）

第５回　平成２７年１月２６日
・電子・陽電子源、減衰リング、ビームライン等について
・測定器について

第６回　平成２７年３月２日
・これまでの議論の取りまとめ

国際リニアコライダー（ILC）計画に関する技術的・経済的波及効果及び世界各国における素粒子・原子核物理学分野における技術面を含む研究動向に関する調査分析

概要版

平成 27 年 3 月

株式会社 野村総合研究所

はじめに

文部科学省では高エネルギー物理学分野の研究者から提案のなされている「国際リニアコライダー（ILC）計画」について、平成２５年５月に日本学術会議に実現可能性に関する審査を依頼した。平成２５年９月末に文部科学省へ提出のあった回答書の中で、「重要事項に関して不確定要素やリスク要因があり、本格実施を現時点において認めることは時期尚早」とされた。

文部科学省では、日本学術会議の回答を踏まえ、今後２～３年をかけて ILC 計画の実施の可否判断に資する調査検討を行っていくところであり、平成２６年度においては、重要事項として指摘のあった、「技術的・経済的波及効果」「世界各国における素粒子･原子核物理学分野の将来構想等」について、調査・分析を実施する。

具体的には、ILC 計画において用いられる加速器の製作技術が、過去の技術の波及も踏まえ、今後の社会でどのような形で利活用され、また、どのような効果が期待されるか、技術的な展開・波及事例などの有益な情報について調査・分析するとともに、それによる経済波及効果をまとめることとする。

また、併せて、素粒子・原子核物理学分野において、現在及び今後２０年での米欧亜主要各国の目指そうとする研究計画を調査し、研究計画及びその期待する成果をどのように各国の政策に位置付けているか等について調査・分析することとする。

なお、本調査・分析の実施に際しては、加速器、素粒子･原子核物理学、経済分析等の分野の研究者や有識者による「国際リニアコライダー計画に関する調査分析検討委員会」を設置し、調査・分析結果や報告書の内容についてご検討いただいた。

熊谷委員長を始め委員の皆様には、活発なご議論、貴重なご意見をいただきましたことを、深く感謝申し上げます。

また、国内外のインタビュー調査には、素粒子物理学、加速器の専門家の方々にご同行いただいた。

専門家の皆様には、インタビュー調査へのご支援をいただきましたことを、深く感謝申し上げます。

「国際リニアコライダー計画に関する調査分析検討委員会」 委員名簿

（五十音順）

	氏名 （敬称略）	所属・役職
委員	大井川　宏之	日本原子力研究開発機構　戦略企画室　次長
委員	上垣外　修一	理化学研究所加速器基盤研究部　部長
委員	川越　清以	九州大学先端素粒子物理研究センター　センター長
委員長	熊谷　教孝	高輝度光科学研究センター　専務理事
委員	熊田　幸生	住友重機械工業株式会社　執行役員
委員	多田　栄介	日本原子力研究開発機構 那珂核融合研究所　副所長
委員	野田　耕司	放射線医学総合研究所 重粒子医科学センター・物理工学部　部長
委員	早見　均	慶應義塾大学商学部　教授
委員	福嶋　健二	東京大学理学部物理学科　准教授
委員	三和田　靖彦	トヨタ自動車株式会社　計測技術部　主査
委員	森　俊介	東京理科大学理工学部経営工学科　教授

国内外インタビュー調査同行専門家名簿

（五十音順）

	氏名 （敬称略）	所属・役職
専門家	鎌田 進	高エネルギー加速器研究機構　名誉教授
専門家	久野 良孝	大阪大学大学院理学研究科物理学専攻　教授
専門家	三原 智	高エネルギー加速器研究機構　素粒子原子核研究所 教授

インタビュー調査ご協力への謝辞

本調査・分析の一環として現地訪問インタビュー調査を実施しました際には、各国の政府関係機関、研究機関、民間企業の方々から、多くの貴重なご意見やご助言をいただきました。訪問先は、以下に掲げさせていただきます。

それらを踏まえて、この調査報告書を纏めることができましたこと、ご協力いただいた全ての皆様に深く感謝申し上げます。

【政府機関】

国名	政府機関名
ドイツ	■連邦教育科学研究技術省 BMBF: Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie
フランス	■CNRS/IN2P3 国立科学研究センター/国立原子核・素粒子物理研究所 CNRS：Centre national de la recherche scientifique IN2P3：National institute of nuclear and particle physics
	■CEA/IRFU 原子力・代替エネルギー庁/宇宙基礎科学研究所 CEA: Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives
英国	■科学技術施設庁 STFC（Science and Technology Facilities Council）
米国	■エネルギー省科学局 DOE：U.S. Department of Energy　Office of High Energy Physics
カナダ	■カナダ自然科学・工学研究会議 NSERC: Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada

【主要研究機関】

国名	研究機関名
ドイツ	■ドイツ電子シンクロトロン研究所 DESY（Deutsches Elektronen-Synchrotron）
スイス	■欧州合同原子核研究機関 CERN（European Organization for Nuclear Research）
フランス	■線形加速器研究所 LAL（Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire）
	■宇宙基礎科学研究所 IRFU（Institute of Research into the Fundamental Laws of the Universe）
英国	■コッククロフト研究所+ジョンアダムス研究所 Cockcroft Institute, John Adams Institute
米国	■フェルミ国立加速器研究所 FNAL(Fermi National Accelerator Laboratory <Fermilab>)
	■SLAC国立加速器研究所 SLAC National Accelerator Laboratory
	■アルゴンヌ国立研究所 ANL(Argonne National Laboratory)
カナダ	■TRIUMF国立研究所 TRIUMF（Canada's national laboratory for particle and nuclear physics）
中国	■中国科学院高能物理研究所 IHEP (Institute of High Energy Physics)
日本	■高エネルギー加速器研究機構 KEK (High Energy Accelerator Research Organization)

【加速器関連企業】

国名	企業名
ドイツ	RI Research Instruments GmbH
	Babcock Noell GmbH
フランス	Thales Electron Devices
	Air Liquide
	ALSYMEX
米国・カナダ	Communications & Power Industries, LLC
	Pavac Industries Inc.
日本	三菱重工業株式会社
	三菱電機株式会社
	日本高周波株式会社
	株式会社アルバック

目　次

Ⅰ．技術的・経済的波及効果の検討 1
１．ILC の技術的波及効果の検討 1
１）ILC 計画の概要 1
２）ILC 技術の概要と特徴 1
３）ILC の技術・機器体系 3
４）ILC の技術・機器等の現状と今後の開発課題 5
５）ILC の実現のために開発（新規・改善）される技術・製品分野 9
６）ILC 実現がもたらす次世代の産業向け加速器の方向 11
２．ILC の経済波及効果の検討 13
１）経済波及効果推計の枠組み 13
２）ILC の「建設・活動による経済波及効果」の推計 16
３）ILC の「技術開発による経済波及効果」の推計 22
４）ILC の経済波及効果推計結果のまとめ 26
Ⅱ．世界各国における素粒子･原子核物理学分野の将来構想等の調査・分析 27
１．各国の素粒子・原子核物理分野の将来構想等の取りまとめ 27
１）欧州の動向 27
２）北米の動向 28
３）中国の動向 28
２．各国政府・研究機関へのインタビュー調査から得られる ILC への示唆 29

Ⅰ．技術的・経済的波及効果の検討

１．ILC の技術的波及効果の検討

１）ILC 計画の概要

2004 年夏、世界の高エネルギー物理学研究者・加速器研究者は、ICFA（将来加速器国際委員会）において、国際協力による「リニアコライダー（衝突型線形加速器）」を超伝導技術に基づいて建設することについて合意した。これは「ILC（International Linear Collider）計画」と呼ばれている。

ILC 計画は、現在欧州の CERN（欧州合同原子核共同機関）で稼動している LHC（Large Hadron Collider：大型ハドロン衝突型加速器）の次に実現するべき有力な大型基幹計画として位置づけられ、全長約 30km の（および将来の拡張性をとして 50km までを見込む）直線状の加速器をつくり、現在達成しうる最高のエネルギー領域（TeV：１兆電子ボルトまでの）で、電子と陽電子の衝突実験の実現を目指すものである。

ILC 計画の目的は、実験装置にビックバン直後の超高エネルギー状態を作り出すことによって、CERN で発見されたヒッグス粒子の精密研究、トップクォークの対生成に関する研究、超対称性粒子の探索等を通して、質量の起源、時間と空間の謎、さらには宇宙創成の謎を突きとめようとするものである。

ILC 計画を進めるために、アジア・欧州・米国などの 3 地域から素粒子物理・加速器科学研究者による国際共同研究チームが作られ、日本の研究者も世界中の研究者と密接に協力しながら研究を進めている。また、ILC の建設候補地の選考も進められつつあり、日本は有力な候補地の一つとなっている。

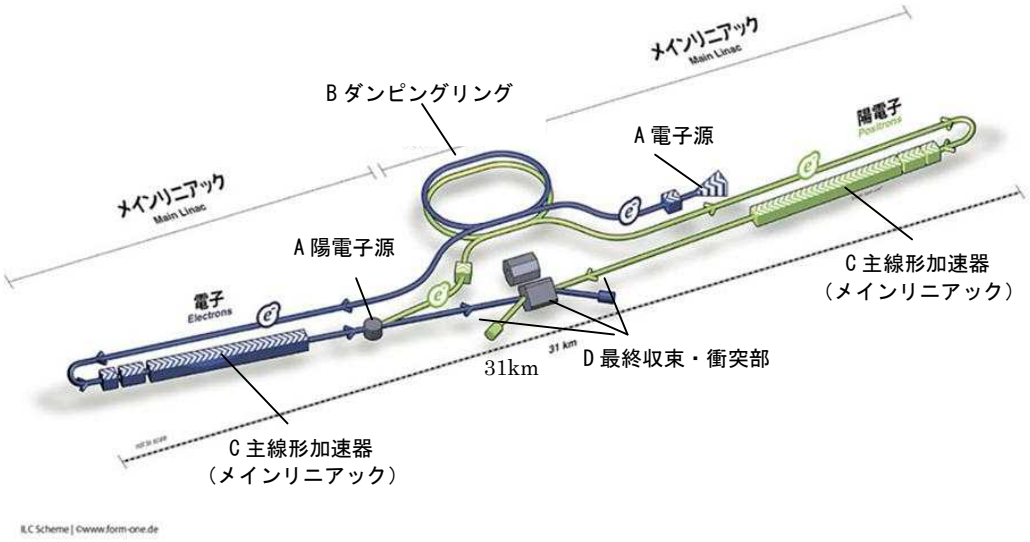
２）ILC 技術の概要と特徴

①ILC 技術の全体像

巨大な電子・陽電子衝突実験装置である ILC は、大きく次の４つの部分から構成されている。

A.「電子・陽電子源」：電子と陽電子のビームをつくる部分
B.「ダンピングリング」：加速装置に質の高いビームを送り込むための部分
C.「主線形加速器（メインリニアック）」：電子と陽電子のビームを加速する直線加速装置の部分
D.「最終収束・衝突部」：電子と陽電子のビームを最終収束し衝突させる部分（ビームダンプ部分含む）

図表１　ILC の全体イメージと主要部分の構成



また、ILC の技術開発上の鍵技術（キーテクノロジー）は、次の２つとされている。

■超伝導高周波加速技術（SCRF　：Superconducting Radio Frequency）

・超伝導高周波加速空洞を使って粒子ビーム（電子と陽電子）を加速する技術。ILC では長さ約 1m、直径約 20cm の 9 連加速空洞が使用される。500GeV での運用時には、加速空洞が ILC 全体で 16,000 台必要とされる。9 連加速空洞を 8～9 台まとめてワンセットとして、断熱した真空容器内に組み込む。これを「クライオモジュール（Cryomodule）」という。500GeV での運用時には、クライオモジュールが ILC 全体で 1,850 台必要とされる。

・2004 年に ILC には超伝導加速空洞の技術を採用することが決定された。以来、日本（KEK）、ドイツ（DESY）、米国（FNAL、SLAC）が中心となり超伝導加速空洞の技術開発を推進してきた。2014 年末現在で ILC に求められる性能（加速勾配 31.5MV/m）を 90% 以上の成功率で達成し、概ね実用化段階まで到達している。

■ナノ・ビーム制御技術（Nano-beam handling）

・粒子の衝突の精度を上げるために、粒子ビームをナノレベルの大きさに絞り込む技術。ILC では、高安定な超低エミッタンスビームの生成とその位置制御、電磁石でビームを極小サイズに絞り込む技術等の開発が必要とされている。

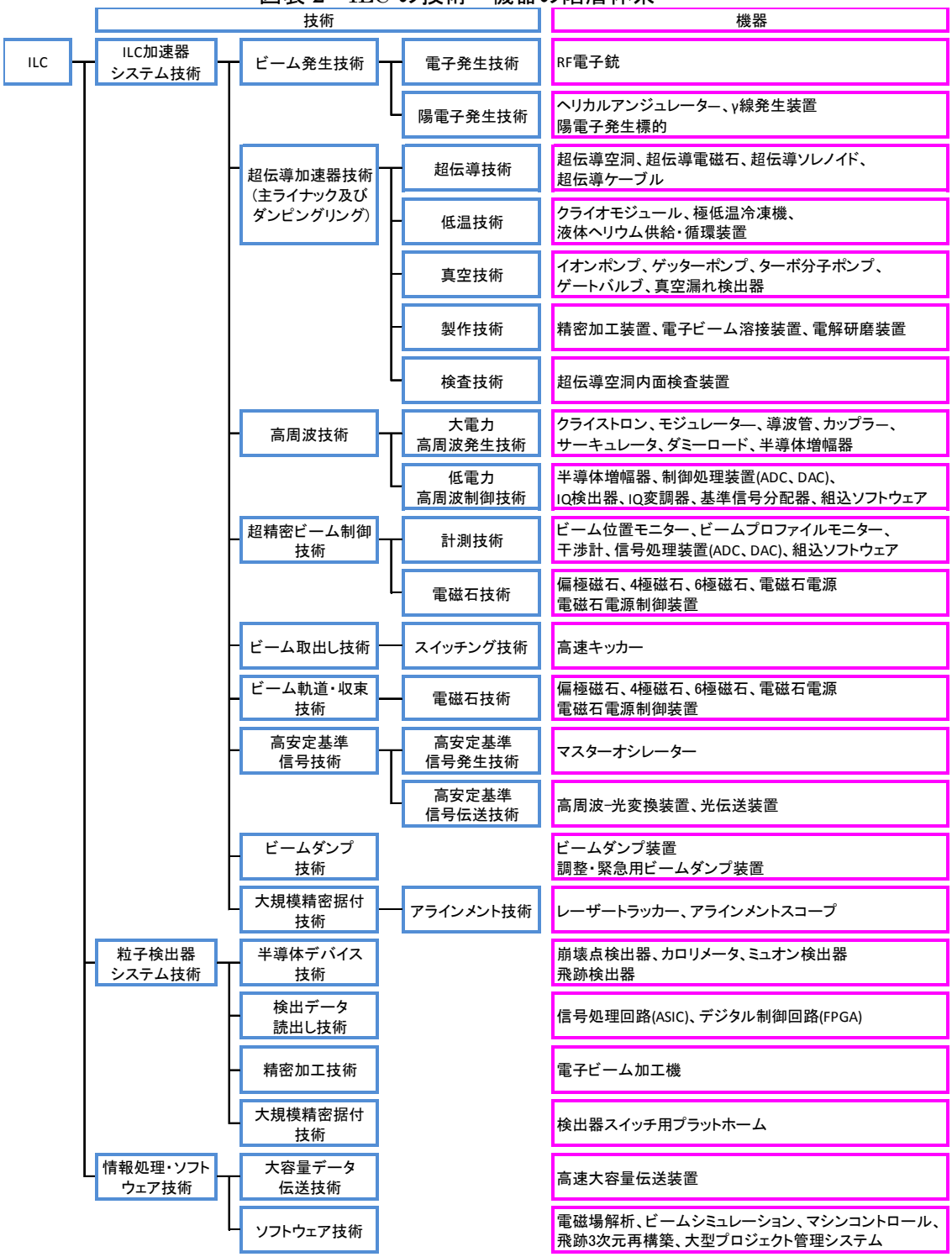
・ナノ・ビーム制御技術については、日本の KEK－ATF（先端加速器試験施設）が国際的にユニークな開発拠点である。

・ATF ではこれまでに超平行ビーム（低エミッタンスビーム）を達成。現在は ATF のエネルギーで求められるナノ・ビームサイズの目標 37nm（ILC のエネルギーでは 5.9 nm に相当）の達成に向けて研究開発中である（2014 年 6 月時点で 44nm 達成。ILC のエネルギーに換算すると 7nm）。

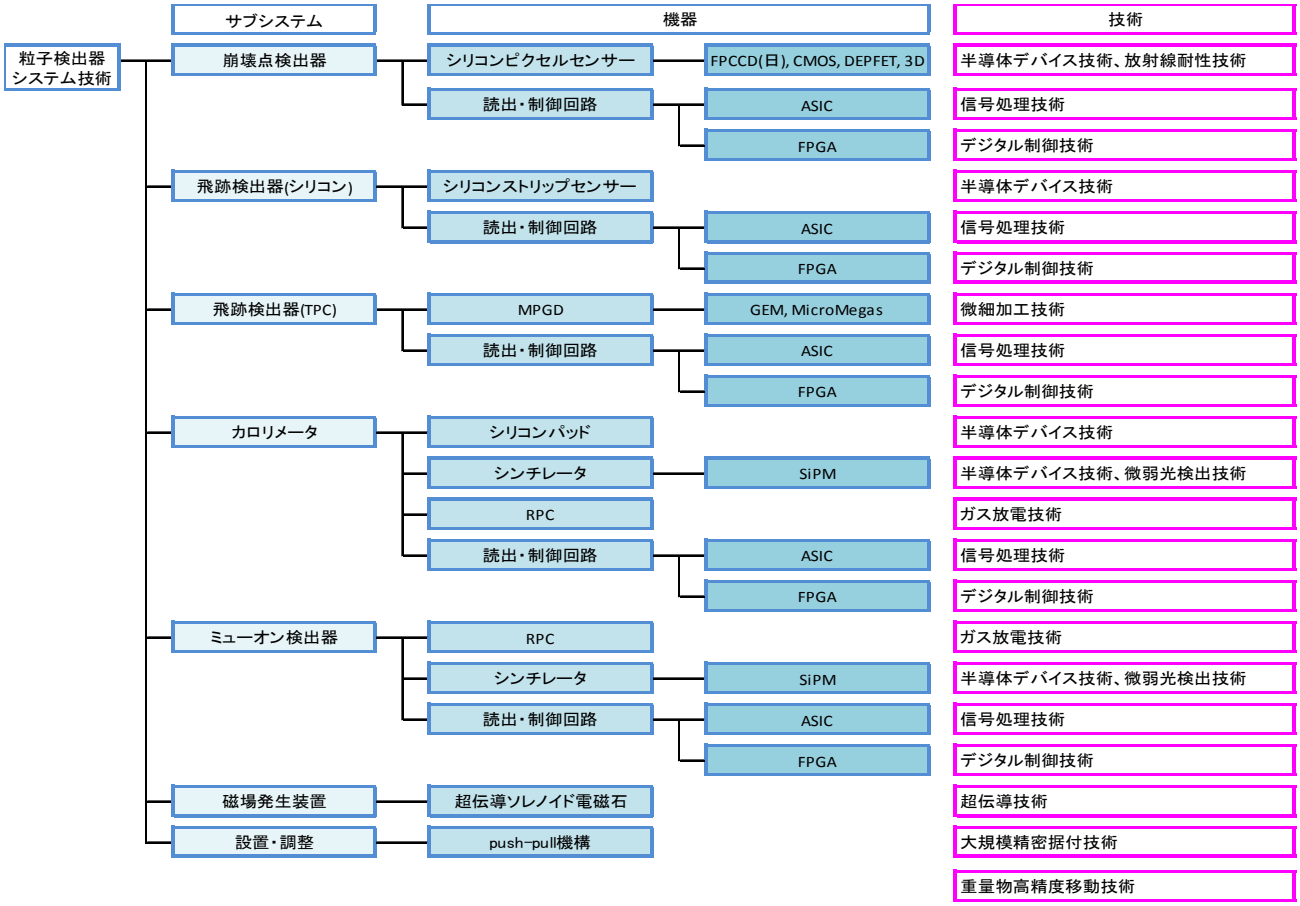
３）ILC の技術・機器体系

ILC の製作に必要とされている技術及び機器の階層体系を、主要な構成部分に沿って示すと下図表のとおりとなる。ビーム発生・制御・収束技術、超伝導加速器技術、高周波技術、検出技術、ソフトウエア技術等が、ILC を構成する主要技術となっている。

図表 2　ILC の技術・機器の階層体系



図表 3　ILC の検出器の技術・機器の階層体系



FPCCD	Fine Pixel CCD
ASIC	Application Specific Integrated Circuit
TPC	Time Projection Chamber
MPGD	Micro Pattern Gas Detector
GEM	Gas Electron Multiplier
MicroMegas	Micro-Mesh Gaseous Structure
RPC	Resistive Plate Chamber
SiPM	Silicon Photo Multiplier

４）ILC の技術・機器等の現状と今後の開発課題

国内外の主要な研究機関及び関連企業へのインタビュー結果等をもとに、ILC の製作に必要とされる技術・機器等の現状及び今後の開発課題について取りまとめると、以下のとおりである。

（１）ILC の技術についての現状認識

ILC の技術設計報告書（TDR）に示される ILC の設計思想は、技術的な実現可能性を重視し「概ね完成された技術で建設する」としていることである。

したがって、ILC の主要技術であるビーム発生技術、超伝導加速空洞技術、高周波技術、クライオジェニック技術等については、基本的にこれまでに開発・実証された技術を使うことが前提となっている。

このため、欧米の主要研究機関や企業へのインタビュー調査では、ILC の準備・建設段階において、これまでにない新しい技術開発が必要になる余地は少ないとの認識が多く示された。

しかし一方で、ILC の仕様（将来の拡張計画を含む）を満たすためには、特に工業化（量産・低コスト化）に向けた技術開発、個々の装置・機器の性能水準向上のための技術開発（ナノ・ビーム制御等）の要素は多く残されており、それら分野における要素技術の更なる成熟やイノベーションは必要になると指摘されている。

さらに、構造仕様を前提に計画されているため専門的な知識と経験を持つスタッフの充実が不可欠であることも指摘されている。

（２）ILC の主要な技術・機器等の今後の開発課題

①量産化（工業化）のための技術開発

＜量産化の対象＞

超伝導加速空洞、クライオモジュール、電磁石、クライストロン、カプラー、導波管、導波管素子(ダミーロード、サーキュレーター等)など

＜技術開発課題＞

・生産工程の自動化・ロボット化技術
・検査・試験・改良のフィードバックループの効率化技術
・生産・アセンブル拠点のグローバルロジスティクスとサプライチェーンマネジメント技術

②装置・機器の性能水準向上のための技術開発

・超伝導加速空洞の電界性能向上
　⇒加速空洞の表面処理の高度化、加速空洞の素材改善、加速空洞形状の改善等
・クライオモジュール単位の電界性能の向上
・陽電子ビーム発生技術
　⇒アンジュレータ方式による偏極陽電子生成技術の確立　　等

・ナノ・ビーム制御技術
　⇒粒子ビームの絞込み技術、ビームをナノメートル精度で制御する技術　等
・モジュレータ（パルス電源）の小型化・安定化
　⇒マルクス型電源の信頼性向上　等
・クライストロンの性能向上
　⇒電力エネルギー変換効率の向上、RF コンディショニング時間短縮技術　等
・カプラーの高出力化

③インテグレーションのための技術開発

・（in-kind 方式による ILC 建設を前提とした場合）インテグレーション技術の開発
　⇒機器・システム、ノウハウ、共同ワークのインテグレーション技術
　（特に、日本が中心となる場合、欧米システムとの調整を如何に適切に行うか）

④全体マシンコントロール(制御)システムの開発

・大規模精密機器・システム全体のコントロール技術

⑤大規模データ処理・管理ソフトウエアの開発

・ILC 建設・製作のためのエンジニアリング・データマネジメント用のソフト開発
　⇒ILC 固有の EDMS（Engineering Data Management System）の開発　等
・電子－陽電子衝突実験による大量データ処理技術・ソフト開発
　⇒CERN の LHC で開発・活用されたコンピュータ・グリッドのような技術

図表 4　ILC の超伝導加速器、高周波関連機器の技術開発の現状・課題
（主にインタビュー調査結果より）

技術	装置・機器	想定数 (TDR)	技術開発の現状	技術開発の課題
超伝導技術	超伝導高周波加速空洞 (SCRF 空洞)	16,000	・ILC 用 SCRF 空洞の原型は DESY の TESLA キャビティ。EXFEL で使用＜全 800 台(23.6 MV/m)、RI400 台、Zanon400 台供給。工業化・実装段階、2015 年末供給完了。2016 年中に運転開始予定＞ ・ILC 用国産 SCRF 空洞は、KEK において実証段階。三菱重工(30 台)、日立、東芝等が空洞を供給。平均 35 MV/m 以上達成。	■ILC 加速空洞そのものの革新的技術革新は起らないとの認識多い(EXFEL のプロトタイプでほぼ確立済) ■ILC 加速空洞の量産化(工業化)技術の開発が必須 ⇒参画企業の空洞生産能力を数倍拡大必要 （国際協調による製造を前提） ⇒空洞の生産工程の革新必要(ロボット化等) ⇒空洞生産拠点とクライオモジュール組立拠点のグローバル配置の検討、サプライチェーンマネジメント導入が必要 ■in-kind 方式を前提とした場合、機器・システムのインテグレーション技術、インテグレーションワーク体制確立が重要
	超伝導電磁石	150	・ILC の最終収束点用の超伝導マグネットは米国で開発済み ・KEK にて ILC 最終収束モデル化・ナノビーム技術検証中(KEK-ATF2) ・ATF で 2014 年 6 月に実証されたビームサイズは 44 nm（ILC のエネルギーに換算すると 7nm）。目標は、ATF で 37nm.（ILC のエネルギーで 5.9nm）	■ILC 超伝導磁石(数百個)を所定のコスト内で量産するための技術開発必要⇒人の手間をかけない新製法(自動生産技術等)の R&D ■ILC では RF 空洞と超伝導磁石の混在による磁場の影響等が問題になる可能性あり ■ナノ・ビームの制御技術開発と実証（ほぼ実証済み） ⇒最終収束ポイントでの目標ビームサイズ(37nm)をほぼ達成（44nm） ⇒ダンピングリングでの超低エミッタンス(4pm)の達成
低温技術	クライオモジュール	1,850 （全体として）	・ILC 用クライオモジュールのプロトタイプは EXFEL 用のモジュール＜EXFEL：全 100 台。工業化・実装段階。2016 年中に運転開始予定＞ ・ILC 用国産クライオモジュールは KEK において実証段階(KEK-STF)。S1 グローバルでは、ドイツ、米国、日本の 7 台の超伝導加速空洞によるストリング・協調運転に成功（2010 年）	■クライオモジュール単位での電界性能向上(空洞単体に比較して連携の性能はやや劣るが目標性能はほぼ達成) ■ILC 用モジュールの量産化(工業化)の技術・システム開発が必須 ⇒モジュールの生産能力を数倍に拡大必要 ⇒世界 3 拠点程度のモジュール組立拠点必要 （1 カ所では投資莫大になる） ■国際協力による建設方式を前提とした場合、機器・システムのインテグレーション技術、インテグレーションワーク体制確立が重要
	低温冷凍機	90	・低温冷凍機の技術は既に確立 ・ヘリウム資源の調達をスムーズに行うため供給先の複数化が重要との認識	■冷凍機心臓部は海外に依存せざるを得ない状況にあり、国産化が期待されるが、長期的に安定した市場規模に限界
製作技術	電子ビーム溶接装置		・ILC の 9 連加速空洞製作には必須の技術。試作空洞単体ベースでは技術確立	■ILC 加速空洞の量産段階では、電子ビーム溶接の設備・技術のレベル向上が必要 ■溶接不用の一体成形型のシームレス空洞の開発(ILC 1 TeV フェーズ)

	電解研磨装置		・ILC 用超伝導空洞の電界性能を出すために必須の技術。装置は開発・実装済み ・EXFEL では、電解研磨装置は企業(RI)が保有し運用 ・日本では KEK が保有し運用(企業保有無し)	■ILC 加速空洞の量産段階での効率的検査システム・体制づくりが不可欠 ⇒量産化に対応した、大量空洞の内面検査・表面処理・性能試験のフィードバックループのプロセスづくり及び製造工程の簡略化 ⇒量産化段階では、生産現場(企業)に近い場所に電解研磨装置が必要 ■危険なフッ酸を使用しない電解研磨装置の開発
検査技術	超伝導空洞内面検査装置		ILC では加速空洞の内部表面検査用の「京都・KEK カメラ」が開発・運用済み。ミクロン単位で表面検査可、ハレーションを起こさない等高性能な日本発先端技術 ・現在、「京都・KEK カメラ」は、日本発の先端技術として世界の研究所に提供されている（CESY, Fermilab, JLab 等）	■ILC 加速空洞の量産化段階では、生産者(企業)側で「京都・KEK カメラ」を保有・運用することが必要
	超伝導加速空洞チューニングマシン		・DESY が開発・製作し、現在世界に 4 台しかない。日本では KEK が保有。 ・ドイツの RI 社はチューニングマシンを保有	■ILC 加速空洞の量産化段階では、空洞チューニングマシンを生産者（企業）側で持つことが必要
大電力高周波技術	クライストロン	380	・東芝電子管ディバイスと THALES(仏)は、ILC 用のクライストロンの開発に成功 ・THALES は、EXFEL へ 23 台のマルチビームクライストロン(5.2MW)を供給し、L バンド(1.3GHz)10MW ピークまで対応可能。 ・ただし、現在のクライストロンは ILC の仕様は満たすが、電力エネルギー変換効率は 6 割程度にとどまる。	■ILC 用のクライストロンには 2 つのボトルネックの技術的解消が課題 ⇒バキュームポンピング(高電圧下の超真空技術) ⇒RF コンディショニング時間短縮技術 ■クライストロンの電力変換効率の向上が課題 ⇒効率を上げると省エネに効果。ILC 仕様を満たすクライストロンをさらに性能向上させることが、省電力化に向けて望まれる。 ■クライストロンの生産能力の向上が課題 ⇒ILC 世界のクライストロン供給能力は、ILC の需要(80 ユニット/年)の半分以下。企業の生産能力を高める必要あり
	モジュレータ	380	・マルクスジェネレータ方式による製造実績製造実績は米国の SLAC のみ。国内開発中	■技術移転による工業化と国産技術確立
	カプラー		・EXFEL 向けの超伝導 RF カプラーは、LAL(仏)により開発済み。ILC においてもその技術が使用可能	■カプラーの高出力化、RF コンディショニング時間の短縮化が課題
	導波管		・ILC の導波管は、成熟した技術を使ったものを想定	■機器設置のための配置設計が必要 ⇒設置作業の効率化と機器間接続部材の仕様明確化で購入コストの削減を図る。 ■導波管及び導波管素子(ダミーロード、サーキュレータ等)の量産化への対応が必要 ⇒短期間量産のため大幅な生産性向上(製造用のロボット開発、溶接ではなく鋳物で製造等) ⇒コスト低減の要求に対する構造簡略化及び無調整化 ⇒ダミーロードのコストダウンには電波吸収体の量を減らす必要あり
	ダミーロード	※27,200	・KEK の STF や C-ERL 向けの L バンドのダミーロードは、日本高周波によって開発納入済み	
	サーキュレータ	※13,600	・KEK の STF や C-ERL 向けの L バンドのダミーロードは、日本高周波によって開発納入済み	

５）ILC の実現のために開発（新規・改善）される技術・製品分野

前述した ILC の技術・機器等の今後の開発課題に対応して、ILC の実現のために新たに開発されると予想される技術・製品分野を抽出した。結果は、次頁の図表に示す通りである。抽出にあたっては、主に国内外の主要研究機関及び加速器関連企業へのインタビュー調査の結果を重視した。

技術・製品分野を概観すると、以下の特徴がある。

①全体として、加速空洞の「超伝導技術」及び「製作技術」、「大電力高周波技術」、「ビーム発生・制御・収束技術」、「検出技術」、「ソフトウエア技術」において、新たに開発される工業化（量産化）技術・製品要素が多くなっている。

②超伝導加速器技術では、ILC の超伝導加速空洞の電界（加速勾配）性能向上、及び量産化（生産工程効率化に向けたロボット導入等）に関わる分野の技術開発が今後中心となる。

③上記②を達成するために、超伝導加速空洞の製作技術、特に空洞の溶接や表面処理技術（電解研磨、ドーピング、コーティング等）において、新たな技術開発の要素が多い。

④大電力高周波技術では、クライストロンの性能向上（電力変換効率改善、RF コンディショニングの時間短縮、超高真空技術等）及び量産化技術の開発テーマが多くなっている。また、カプラー、導波管、導波管素子（ダミーロード、サーキュレーター等）の性能向上と量産化技術の開発も必要とされる。

⑤ビーム発生・制御・収束技術では、陽電子・電子ビーム発生技術、ILC 固有のナノ・ビームの制御・安定化、高精度タイミング技術、精密計測に関わる技術開発が主要な分野となっている。

⑥以上の他、検出器（測定器）の高性能化に関わる技術、大量に発生する粒子衝突情報の処理技術、ILC 全体の高精度のマシンコントロールとフィードバックシステム、エンジニアリング・データマネジメントシステムなどのソフトウエア技術の開発も、新たな技術開発の分野として挙げられている。

図表 5　ILC 実現のために開発（新規・改善）される技術・製品分野＜主にインタビュー調査結果より＞

技術分野			ILC製作のために開発（新規・改善）されると考えられる技術・製品分野 （主に国内外研究所・企業へのインタビュー調査より）	想定応用分野例 （同左）
ILC加速器システム技術	超伝導加速器技術	超伝導技術	費用効率の高い超伝導高周波加速技術（全般）	医療分野での応用
			超伝導加速空洞の工業化（量産化）技術　（低コスト化、一部工程ロボット化等）	他の精密機器等の製造ラインへの応用
			超伝導加速空洞の電界性能向上技術（高加速勾配空洞等）	加速器の小型化→工場製造ラインの溶接検査、 港湾施設等のX線非破壊検査、企業内放射光施設（光を利用する分析装置）等
			超伝導加速空洞製作技術	ニオブおよび他の非鉄金属の製造技術、短波長光源技術への波及
			加速勾配計測技術の工業化	
			超伝導磁石の低コスト量産技術（自動生産技術等）	
			電磁石技術	磁気共鳴トモグラフィー
		低温技術	クライオジェニックの高効率化技術（冷却装置技術等）	ガス精製、ガス液化技術、超伝導磁石冷却
			クライオモジュールの工業化（量産化、コストダウン、インテグレーション）技術	インテグレーション技術→宇宙物理学（テレスコープ）
		製作技術	電子ビーム溶接技術（施設、技術のレベルアップ）	産業への応用可能
			レーザー溶接技術	他分野で応用の可能性あり
			チタン溶接技術・検査技術（ヘリウムタンクの溶接）	
			空洞表面処理技術（全般）	産業への応用可能
			電解研磨技術・装置　（危険なフッ酸を使用しない技術等）	
			空洞ドーピング技術（窒素ドーピング等）	
			空洞コーティング技術（多層薄膜、Nb3Sn膜、磁場シールド表面膜等）	薄膜技術はイノベーティブな技術であり産業への応用範囲広い
			高純度ニオブインゴッド、シームレスパイプ製造技術　（超伝導加速空洞用）	超純度金属製品の大量生産技術
		検査技術	空洞内面検査装置（京都カメラ）	航空機分野、ロケット分野への若干の応用可能性
			内面検査・表面処理・試験のフィードバックループ技術	
	高周波技術	大電力高周波技術	クラストロンの量産化技術　（脱ガス熱処理技術、耐久性テスト技術等）	
			クライストロンの電力変換効率の向上技術（省電力型クライストロン）	
			クライストロンのRFコンディショニング時間短縮技術	
			クライストロンの高電圧超真空技術	
			クライストロンのマルチビーム化技術	レーダー分野への応用可能性大
			RFエレクトロニクス技術	
			高周波発生装置	レーダー、衛星、通信、特殊設備建設、機械工学
			高周波分配装置	医療用設備、電子管
			高出力RF技術　（クライストロン、高出力カプラー、マルチディメンジョナルソース等）	産業、医療、通信分野での展開
			導波管・導波管素子（ダミーロード、サーキュレーター等）の量産化技術	通信機器、無線機器用の導波管の低価格化実現
			絶縁部品の絶縁性能向上技術（フィードスルー、電磁波窓、セラミック加速管等）	絶縁部品の絶縁性向上と小型化の実現→加速器・電子銃の小型化進展→卓上電子顕微鏡、CTやMRI、重粒子線施設の小型化・低価格化実現
		低電力高周波技術	低電力高周波制御技術	NMR、高周波工学
	ビーム発生・輸送技術	ビーム発生技術	陽電子ビーム発生（陽電子源）技術	大強度陽子源及び入射器のエネルギー分野への応用
			偏極RF電子銃によるビーム生成技術	
		ビーム輸送技術	トンネル内におけるビーム輸送システム	
	ビーム制御・収束技術	ビーム制御技術	ビーム安定化システム	ナノビーム制御技術の産業への応用可能性大 （例：粒子線治療装置等の病巣照射精度の飛躍的向上）
			ビーム制御技術（エミッタンス、ルミノシティの制御）	
			高速キッカー技術	
			ダンピングリングのSCアンジュレータ技術	
			高出力ビーム制御の安全手順確立（10 MWビームダンプ、ビーム収束等）	
		ビーム計測技術	ミクロン分解能のビーム位置モニター（絶対温度2度で動作）	
			ナノメートル分解能のビーム位置測定装置	
粒子検出器システム技術	半導体デバイス技術		高精度測定器システム	原子構造解析 PET等の医療機器の性能向上・低価格化・小型化実現
	検出データ読出し技術		新たな光量子および粒子のイメージング検出器システム	先端レーザー光の応用
			マイクロパターンガス検出器（MPGD）※DESYがILC測定器に応用	人間・貨物を対象とした大型検査装置
情報処理・ソフトウエア技術	大容量データ処理技術		粒子衝突情報の高度な情報処理技術	高度情報処理技術・計算技術の社会への転用可能性大
	ソフトウエア技術		高精度コントロール及びフィードバックシステム	大規模データ処理、巨大データ解析 安全性の高い遠隔操作技術
			大規模な多層・連結フィードバック制御ループ	大規模計算機制御システム
			全体マシンコントロールシステム	マシンコントロールシステムの他分野への応用可能性あり
			エンジニアリング・データマネジメントシステム（EDMS）	EDMSの他分野への応用可能性あり

６）ILC 実現がもたらす次世代の産業向け加速器の方向

（１）ILC 実現がもたらす次世代産業向け加速器の見通し

ILC の実現に伴う技術開発の波及効果として、新しく開発されると考えられる次世代加速器の実現見通しについて、ILC 製作技術に関連する機器・装置の例とともに下図表に示す。

ILC の技術に基づくものとして以下を判断基準とした。

①ILC の超伝導空洞などを流用した加速器:(例)9 セル超伝導空洞など

②ILC の超伝導空洞などの設計技術を活用して製造された加速器:(例)シングルセル～5・7 セル超伝導空洞など

③ILC の製造及び検査プロセスを使用した加速器:(例)QWR(Quarter Wave Resonator:1/4 波長空洞共振器)、スポーク超伝導空洞など

図表 6　新しい加速器関連機器・装置の実現見通し概要(■研究用、■産業／学術用)

	技術																				ILC製作技術に関連する機器・装置の例と実現見通し		
	超伝導技術	低温技術	真空技術	大規模精密据付技術	大電力高周波発生技術	高周波加速安定化技術	信号処理ソフトウェア技術	高安定基準信号発生技術	高安定基準信号伝送技術	電子発生技術	陽電子発生技術	計測技術	超精密ビーム制御技術	ビームダンプ技術	半導体デバイス技術	検出データ読出し技術	大容量データ伝送技術	ソフトウェア技術	加工技術	検査技術			
1	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		○	○	○	○	○	○	○	○	○	ERL、NGLS	(次世代放射光自由電子レーザー施設)	2020年代初め頃
2	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		○	○	○	○	○	○	○	○	○	LCLSⅡ	(既存Linacへの超伝導Linac増設)	2010年代終わり
3	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		○	○	○	○		○	FCC,CEPC	(超大型円形衝突型加速器)	2020年代終わり～2040年台
4	○	○	○	○	○	○						○			○	○					eRHIC	(電子-重イオン衝突型加速器)	2020年代半ば
1	○	○	○		○	○	○	○	○	○		○		○				○	○	○	半導体製造用露光装置光源	(EUV光源)	2020年代初め頃
2	○	○	○		○	○	○	○	○	○		○		○				○	○	○	ADS	(核変換施設)	2030年代に実証施設
3	○	○	○		○	○			○			○			○			○			レーザーコンプトンγ線発生装置	(核セキュリティー)	開発中
4	○	○	○		○	○			○						○			○			レーザーコンプトンγ線派生装置	(非破壊検査)	開発中
5			○				○			○											スピン偏極走査型トンネル顕微鏡	(先端デバイス構造解析装置)	既流通(独Omicron他)
6			○				○			○											偏極低エネルギー電子顕微鏡	(先端材料解析装置)	既流通(独ELMITEC他)
7	○	○	○		○	○	○			○					○	○		○	○	○	小型放射光装置	(Lab用放射光装置)	?2020年頃
8	○	○	○		○	○	○								○			○	○	○	RI製造装置など	(小型多用途超伝導電子加速器)	2010年代後半

○:技術的関連性に該当するもの

ERL　Energy Recovery Linac
NGLS　Next Generation Light Source
EUV　Extreme Ultra Violet
ADS　Accelerator Driven System
NMR　Nuclear Magetic Resonance
MRI　Magnetic Resonance Imaging
Mu2e　Muon to Electron
LCLS　Linac Coherent Light Source
SPLEEM　Spin-Polarized Low-Energy Electron Microscopy
FCC　Future Circular Collider
CEPC　Circular Electron Positron Collider
eRHIC　electron Relativstic Heavy Ion Collider

（２）ILC 製作がもたらす新しい検出装置・機器の見通し

ILC の製作によって、加速器以外の関連した機器・装置、とりわけ電子・陽電子の衝突反応を観測するための検出器に由来する新しい機器・装置の実現見通しについて、ILC 製作技術に関連する機器・装置の例とともに下図表に概要を示す。

図表 7　新しい加速器関連機器・装置の実現見通し概要(■研究用、■産業用)

○:技術的関連性に該当するもの

	技術									ILC製作技術に関連する機器・装置の例と実現見通し		
	信号処理ソフトウェア技術	高安定基準信号発生技術	高安定基準信号伝送技術	計測技術	半導体デバイス技術	検出データ読出し技術	大容量データ伝送技術	加工技術	検査技術			
1	○				○	○		○		火山監視装置、原子炉の透視	(小型Muon検出装置)	?2020年頃
2	○			○	○	○				Mu2e、COMET	(ミューオン電子転換過程探索装置)	2010年代終わり、2016年～
3	○	○	○	○	○	○	○			JEM EUSO、CTA	(宇宙線観測装置)	2017年打上予定、2020年～
1	○			○	○	○				TOF-PET内視鏡治療装置、γカメラ	(小型γ線検出装置)	?2010年代末～2020年頃
2	○			○	○	○				高分解能PET、高分解能γカメラ	(高分解能γ線検出装置)	?2010年代末頃
3	○			○	○	○				高分解能陽子CT	(高分解能陽子検出器)	?2010年代末頃
4	○			○	○	○				高感度PET	(高感度γ線検出装置)	?2010年代末頃
5	○			○	○	○				コンテナ検査装置、橋梁検査装置	(大型X線/中性子線検出装置)	?2020年頃

TOF Time of Flight
COMET Coherent Muon to Electron Transition
CTA Cherenkov Telescope Array
PET Positron Emission Tomography
CT Computer Tomography
JEM EUSO Extreme Univeers Space Observatory onboard Japanese Experiment Module

２．ILC の経済波及効果の検討

１）経済波及効果推計の枠組み

（１）経済波及効果推計の前提

①ILC を効果発生源とする ILC 固有の経済波及効果を算出する。

②ILC 建設の日本負担額（本調査で想定）を前提とした、日本国内（産業）へ及ぶ経済波及効果を算出する。

③ILC の効果発生源となる支出額は、原則、TDR に示される数字を前提とする。
ただし、ある程度の確度をもって、定量的に推計が可能な支出は一部対象とする。

④ILC 経済波及効果（発生額）の計測期間は、建設期間 10 年＋運用期間 10 年の 20 年間とする。

⑤ILC の「建設」の経済波及効果については、TDR に未掲載、かつ ILC 固有に発生するものの現時点で前提条件が未確定な以下の経費（投資的支出）は、効果発生源の中に含めない。

■準備経費：
詳細設計、量産技術検証、公的 R&D 支出、人材育成・技術移転関連経費等

■共通基盤経費：
土地取得費、アクセス道路・ライフライン等のインフラ整備費、計算機環境整備、安全整備等に関わる経費

■主要研究施設建設費：
「ILC 国際研究所（仮称）」の研究棟・実験施設等の建設費
（世界各国研究機関等の ILC への出先オフィス等の施設含む）

⑥ILC の「活動」の経済波及効果については、TDR に未掲載、かつ ILC 固有の支出として発生するものの現時点で前提条件が未確定な以下の支出は、効果発生源の中に含めない。

■参加立地研究機関の運営費支出：
「ILC 国際研究所（仮称）」以外に ILC への立地が想定される、世界各国研究機関（出先オフィス）の運営支出

■ILC 関係の来訪者・会議参加者による消費支出：
ILC 施設の見学者、ILC 関連の国際会議（素粒子物理、加速器等）への参加者の消費支出

（２）経済波及効果推計の対象と項目

①ILC の「建設・活動による経済波及効果」

ILC の推進母体（「ILC 国際研究所（仮称）」）が、ILC の建設・活動にともなって外部に支出する金銭（調達発注、職員給与支払等）を源泉として、産業へ波及する経済効果（生産額や所得額の増加）のことである。

②ILC の「技術開発による経済波及効果」

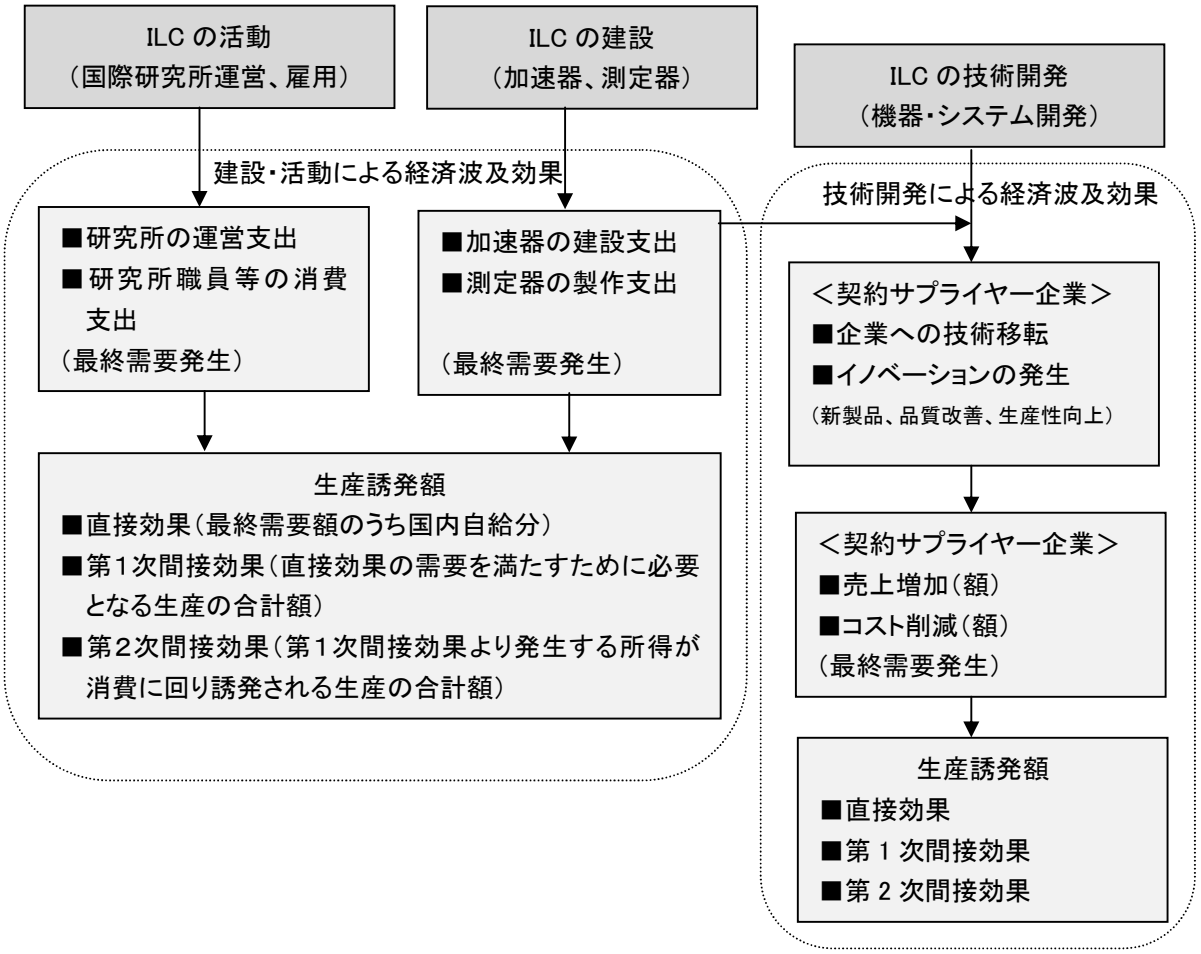
「ILC 国際研究所（仮称）」や研究機関（KEK 等）が、ILC の事前研究実証及び建設段階で実施する技術開発（新規・改善）を源泉として、ILC 国際研究所（仮称）の「契約サプライヤー産業」に技術面・製品面でのイノベーションが起こり、売上（収入）の拡大がもたらされる経済効果のことである。

③経済波及効果の推計項目

経済波及効果は、上記①及び②の支出額を「最終需要額」として、そこから発生する「生産誘発額」を次の３つの効果の合計として推計する。

■直接効果（最終需要額のうち国内自給分）
■第１次間接効果（直接効果の需要を満たすために必要となる生産の合計額）
■第 2 次間接効果（第 1 次間接効果より発生する所得が消費に回り誘発される生産の合計額）

図表 8　ILC 経済波及効果の推計の対象と項目



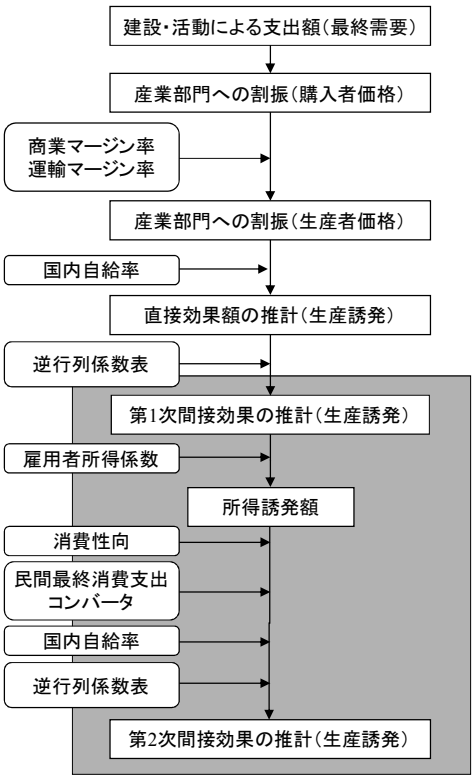
図表 9　経済波及効果の推計項目の説明

■最終需要：ある産業に追加的に新たな需要が生じた場合の需要の合計額
■生産誘発額：以下の「直接効果」と「間接効果（第 1 次間接効果＋第 2 次間接効果）」の合計額
■直接効果：最終需要額から海外消費分を除いた金額。なお、最終需要額（総消費額）は、購入者価格からマージン分（商業マージン＋運輸マージン）を差し引いて、生産者価格に相当する部分を当該部門に配分し、マージン分は商業部門と運輸部門に配分
■間接効果:「第 1 次間接効果」(直接効果の需要を満たすために必要となる生産の合計)、及び「第 2 次間接効果」（第 1 次間接効果によって誘発される所得の一定割合が消費に回ることで喚起される需要を賄うために発生する生産の合計）の総合計

（出所）野村総合研究所作成

④経済波及効果の推計方法

■建設：ILC 建設期間 10 年における、ILC 装置・施設の製作及び建設投資による経済波及効果を推計
■活動：ILC 運用期間 10 年＋建設期間 10 年（一部活動）における、「ILC 国際研究所（仮称）」の運営支出、研究者・技術者等の消費支出による経済波及効果を推計
■平成 17 年（2005 年）産業連関表＜全国：34 部門＞を使用（確定値として最新）。
逆行列係数は、$[I-(I-\hat{M})A]^{-1}$ を使用



２）ILC の「建設・活動による経済波及効果」の推計

（１）ILC の「建設」に伴う支出額

ILC の「技術設計報告書（TDR）」によれば[1]、ILC の加速器建設費は、約 8,309 億円と見積もられている。その内訳は、加速器本体建設費（超伝導加速空洞、加速器要素等）が 5,708 億円、土木・建築工事費が 1,600 億円、施設整備費が 1,001 億円（基幹部整備費 370 億円、加速器付帯部整備費 631 億円）となっている。。

また、測定器建設費は、２つの国際的研究グループで合せて２台の建設が提案されており、総額 766 億円と見積もられている。

以上を合計すると、ILC の建設投資額は 9,075 億円（加速器＋測定器建設）となる。そのうち、日本における定量的な経済波及効果の対象となる建設投資額は、土木・建設工事は日本国内への発注、加速器本体建設費、加速器付帯部整備費、測定器建設費は、日本・米国・欧州で等分に発注（ILC 建設投資額の負担割合を各 33%と想定）と想定すると、全体で約 4,315 億円になると推計される。

図表 10　ILC 建設投資額の想定

（単位：億円）

	ILC建設費【TDR見積】	日本負担額【想定】	日本負担割合【想定】（注3）
■加速器建設費	8,309	4,062	
●土木・建築工事費	1,600	1,600	100%
●施設整備費	1,001	578	
－基幹部整備費	370	370	100%
－加速器付帯部整備費	631	208	33%
●加速器本体建設費（注1）	5,708	1,884	33%
■測定器建設費（注2）	766	253	33%
合計	9,075	4,315	

（注1）超伝導加速空洞、加速器要素等
（注2）測定器2台 （SiD、ILD）
（注3）土木・建築工事、基幹部整備費は、日本が全負担（100%）と想定
加速器本体建設費、加速器付帯部整備費、測定器建設費は、日・米・欧で等分に負担する（各33%）と想定

（出所）文部科学省「技術設計報告書（TDR）検証作業部会」の「国際リニアコライダー（ILC）に関する有識者会議」への進捗報告資料等に示される経費額をもとに想定

[1] 文部科学省に設置されている「技術設計報告書（TDR）検証作業部会」の「国際リニアコライダー（ILC）に関する有識者会議」への進捗報告資料等に示される経費額を参照

（２）ILC の「活動」に伴う支出額

①研究機関等の運営費支出

ILC 国際研究所（仮称）の運営費用（職員人件費除く）は、「技術設計報告書（TDR）」において年間約 390 億円（電気代、メンテナンス・保守代、委託費等）と見積もられている。したがって、運用期間 10 年の累積では、3,900 億円になる。

また、建設期間において ILC 国際研究所（仮称）は設置され、ILC 建設に向けた運営を一部行なうことが想定される（建設期間の運営支出は、運用期間の 50%と想定）。その支出を加えた、ILC の建設期間＋運用期間 20 年間の累積運営費支出額は、約 5,850 億円になると推計される。

図表 11　ILC の研究機関等の運営費支出額の推計結果

分　野		建設期間（10年）		運用期間（10年）		建設+運用	算出の方法
		年間支出額	10年間累計額	年間支出額	10年間累計額	20年間累積額	
		（億円）	（億円）	（億円）	（億円）	（億円）	
研究機関運営費支出	■ILC国際研究所（仮称）運営費（水道光熱費、維持管理費、調達費等）	195	1,950	390	3,900	5,850	●ILCのTDRに示される年間運転経費額、390億円を前提。なお、運転経費には職員人件費は含まれない。 ●建設期間の活動支出は、運用期間の50%（注1）を想定

（注 1）ILC 国際研究所の運用期間の年平均職員数（1,200 人）に対する建設期間の年平均職員数（914 人）の比率 76%。運用期間の運転経費から、機器等除く支出割合は 69%（機器調達は建設投資に含まれる）。　⇒76%×69%≒50%と想定

②ILC 関連研究者・技術者等の消費支出

別途推計されている ILC 関連の研究者・技術者、事務職員（ILC 国際研究所職員＋実験参加研究者等＋支援者等）は、建設期間から運用期間にかけて消費支出を発生させる。また建設期間では建設関連従業者による消費支出、さらに運用期間では ILC 国際研究所から委託される保守運用外部委託サービス従業者による消費支出も発生する。これらを合算した、建設期間+運用期間 20 年間の研究者等の累計消費支出額は約 2,775 億円（1,666 億円＋1,109 億円）になると推計される。

なお、ILC の TDR では、金額換算はしていないが「労務費」が積算されている。文部科学省「技術設計報告書（TDR）検証作業部会」の検討資料等では、建設期間の労務費として 1,837 億円（加速器 1.598 億円、検出器 239 億円）、運用期間の労務費として 101 億円／年（加速器関連の運用のみ）と想定されている。

これらの労務費の額と、ここで推計した ILC 研究者・技術者等の消費支出額は、数字の意味が異なるため一致しておらず[2]、また、推計プロセスの中で直接的には連動していない。ただし、消費支出算出の基礎となっている関連人口（ILC 国際研究所職員数等）の想定は、TDR の前提に概ね合致している。

[2]労務費には、職員への給与、福利厚生費等が含まれると推測される（内訳、額は不明）。一方、本調査で推計の対象としている消費支出は、職員への給与のうち、消費に回される分のみである。

図表 12　ILC 研究者・技術者等の消費支出

分 野		建設期間（10年）		運用期間（10年）		建設+運用	算出の方法
		年間支出額	10年間累計額	年間支出額	10年間累計額	20年間累積額	
		（億円）	（億円）	（億円）	（億円）	（億円）	
研究者等消費支出	■研究者・職員等消費支出（ILC関連研究者、技術者、事務職員の世帯消費支出）	70	703	96	963	1,666	●ILC国際研究所職員（建設期間年平均914人、運用期間年平均1,200人）の平均年収（注2）×平均消費性向（注3）により算出 ●実験参加研究者等＋支援者等のうち家族附帯者（建設期間年平均58人、運用期間年平均151人）の平均年収（注4）×平均消費性向（注5）により算出
	■工事・保守運用従事者消費支出（建設工事従業者、保守運用従業者の世帯消費支出）	97	970	14	139	1,109	●建設工事従事者（建設期間年平均2,491人）の平均年収（注6）×平均消費性向（注7）により算出 ●保守運用従業者（建設期間年平均274人、運用期間年平均360人）の平均年収（注8）×平均消費性向（注9）により算出
合 計		167	1,673	110	1,102	2,775	

（注2）ILC国際研究所職員（研究者、技術者、事務職員等）の平均年収は、CERNの2013年の俸給額実績をもとに、1,080万円／人・年と想定

（注3）ILC国際研究所職員の平均消費性向は、0.681。2009年「全国消費実態調査」より、年間所得階級1000～1250万円の2人以上勤労者世帯の消費支出を勤め先収入で除した数字

（注4）実験参加研究者等の平均年収は、KEKの2013年度の役職員給与額の実態をもとに690万円／人・年と想定

（注5）実験参加研究者等の平均消費性向は、0.771。2009年「全国消費実態調査」より、年間所得階級650～700万円の2人以上勤労者世帯の消費支出を勤め先収入で除した数字

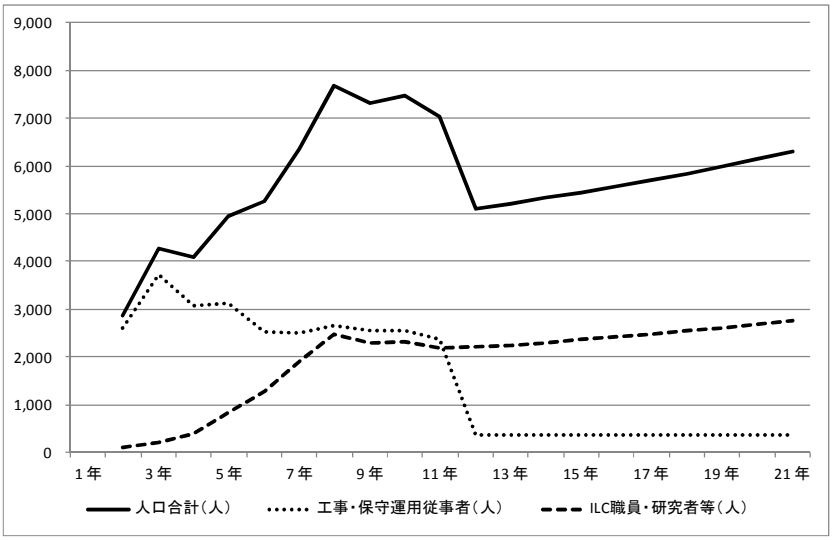
（注6）建設工事従事者の平均年収は、「賃金構造基本統計調査報告」（H25年度）より、410万円／人・年と想定
金属・建築塗装工、機械製図工、建設機械運転工、電気工、配管工、土工の給与＋賞与の平均額

（注7）建設工事従事者の平均消費性向は、0.846。2009年「全国消費実態調査」より、年間所得階級400～450万円の2人以上勤労者世帯の消費支出を勤め先収入で除した数字

（注8）保守運用従事者の平均年収は、「賃金構造基本統計調査報告」（H25年度）より、470万円／人・年と想定
機械検査工、機械修理工の給与＋賞与の平均額

（注9）保守運用従事者の平均消費性向は、0.822。2009年「全国消費実態調査」より、年間所得階級450～500万円の2人以上勤労者世帯の消費支出を勤め先収入で除した数字

＜参考図表＞　ILC の日本サイトにおける関連人口の推移（推計）



（出所）「国際リニアコライダープロジェクト立地に関わる調査検討報告書」（高エネルギー加速器研究機構、2014 年 2 月）

③ILC の「活動」に伴う支出額の合計（まとめ）

以上を合計すると、ILC の「活動」により発生する関連支出額は、建設期間（10 年間）と運用期間（10 年間）の総合計で約 8,625 億円になると推計される。

図表 13　ILC の「活動」に伴う関連支出額の推計

分　野		建設期間（10年）		運用期間（10年）		建設+運用
		年間支出額	10年間累計額	年間支出額	10年間累計額	20年間累積額
		（億円）	（億円）	（億円）	（億円）	（億円）
研究機関運営費支出	■ILC国際研究所（仮称）運営費（水道光熱費、維持管理費、調達費等）	195	1,950	390	3,900	5,850
研究者等消費支出	■研究者・職員等消費支出（ILC関連研究者、技術者、事務職員の世帯消費支出）	70	703	96	963	1,666
	■工事・保守運用従事者消費支出（建設工事従業者、保守運用従業者の世帯消費支出）	97	970	14	139	1,109
合　計		362	3,623	500	5,002	8,625

（出所）野村総合研究所推計・作成

（３）ILC の「建設」及び「活動」による経済波及効果の推計

前記の ILC の「建設」及び「活動」による経済波及効果を、全国産業連関表を用いて推計すると以下のとおりとなる。

■ILC の建設期間（10 年）における「建設」に係る最終需要（購入者価格ベース建設額）は、合計で 4,315 億円である。

■建設期間（10 年）及び運用期間（10 年）を通じた、「活動」による最終需要（購入者価格ベース消費支出額）は、8,625 億円である。

■以上の最終需要 1 兆 2,940 億円(4,315 億円＋8,625 億円)の発生により誘発される生産誘発額は、約 2 兆 8,100 億円になると推計される。

■ILC から発生する最終需要金額 12,940 億円に対して、経済波及によって誘発される国内生産額 28,136 億円は、2.17 倍（乗数）となる＜ILC 建設は 2.41 倍、ILC 活動は 2.06 倍＞。

なお、ILC による乗数 2.17 倍を他の最終需要項目と比較すると、「国内総資固定資本形成（公的）」は 1.90 倍、「輸出」は 2.17 倍となっており、数値的には ILC がそれら以上になっているが、ILC の生産誘発額には第 2 次間接効果分も入っていること（乗数 2.17 倍は産業連関表上の生産誘発係数とは意味が異なっているため）、また今回用いた産業連関表の部門分類が粗く評価に限度があることなどから、単純な比較はできない。

【最終需要項目別生産誘発係数（34 部門）：2005 年産業連関表】
- ・民間最終消費　1.53
- ・国内総固定資本形成（民間）　1.84
- ・国内総資固定資本形成（公的）1.90
- ・輸出　2.17

図表 14　ILC の「建設」及び「活動」による経済波及効果（全国ベース）

		ILC建設	ILC活動	合計
最終需要	（億円）	4,315	8,625	12,940
生産誘発額	（億円）	10,389	17,747	**28,136**
直接効果		4,012	8,172	12,184
第1次間接効果		4,090	5,798	9,888
第2次間接効果		2,287	3,777	6,064
（内）粗付加価値誘発額	（億円）	4,620	9,431	14,051
（内）雇用者所得誘発額	（億円）	2,672	4,721	7,393
誘発雇用者数　＜総数＞	（千人）	54.7	104.4	159.1
誘発雇用者数　＜年平均＞	（千人・年）	5.5	5.2	5.3

（出所）野村総合研究所推計・作成

図表 15　経済波及効果の推計項目の説明

■最終需要：
　ある産業に追加的に新たな需要が生じた場合の需要の合計額
■生産誘発額：
　以下の「直接効果」と「間接効果（第 1 次間接効果＋第 2 次間接効果）」の合計額
■直接効果：
　最終需要額から海外消費分を除いた金額。なお、最終需要額（総消費額）は、購入者価格からマージン分（商業マージン＋運輸マージン）を差し引いて、生産者価格に相当する部分を当該部門に配分し、マージン分は商業部門と運輸部門に配分
■間接効果：
　「第 1 次間接効果」（直接効果の需要を満たすために必要となる生産の合計）、及び「第 2 次間接効果」（第 1 次間接効果によって誘発される所得の一定割合が消費に回ることで喚起される需要を賄うために発生する生産の合計）の総合計
■粗付加価値誘発額：
　ある産業が生産する財サービスから、当該産業の生産に必要な財やサービスの購入分を差し引いた残りの分。粗付加価値を構成する主な項目は、「雇用者所得」「営業余剰」「資本減耗引当金（減価償却費）」
■雇用者所得誘発額：
　上記の粗付加価値誘発額の構成要素。直接効果、第 1 次間接効果、第 2 次間接効果の発生に伴い誘発される雇用者所得額
■誘発雇用者数：
　直接効果・間接効果を通じて増加する雇用者所得で賄うことができる新規の雇用者数と、直接効果・間接効果を通じて増加する営業余剰に応じて増加する個人事業主等の合計。なお、雇用者は、有給役員、常用雇用者、臨時・日雇からなり、個人事業主等は、個人事業主、家族従業者を指す。誘発雇用者数＝雇用者所得誘発額×雇用者係数

（出所）野村総合研究所作成

３）ILC の「技術開発による経済波及効果」の推計

（１）ILC の技術開発により創造される技術・製品の市場規模の推計方法

１章で整理した「ILC 製作のために開発（新規・改善）される技術・製品分野」の市場規模（ビジネス規模）を以下の考え方と方法によって推計する。

①推計対象とする市場規模（ビジネス規模）

設立が想定される「ILC 国際研究所（仮称）」と調達契約を結び、ILC 実験に関連する機器等（ソフトウエア含む）を供給する企業（ここでは、契約サプライヤー企業と呼ぶ）の、調達から派生する「新製品開発販売、品質改善、生産性の向上」による「売上増加及びコスト削減」の総額とする。

②市場規模（ビジネス規模）の推計方法

CERN の実施した経済効果調査（“Particle physics, a key driver for innovation Facing Europe's socio-economic challenges” CERN,2011）において報告されている次の効果をベースに ILC の効果を推計する[3]

> 「CERN の直接経済効果を定量化する調査によれば、CERN（機関）との契約の結果として発生する売上増加及びコスト削減による経済効果として、企業への発注額１ユーロは３ユーロ分の付加的ビジネスを発生させたことが示されている」

こうしたビジネス拡大は、契約サプライヤー企業における新製品開発（イノベーション）等が主な要因となっており、CERN や DESY での実態（以下、再掲）を踏まえると、契約サプライヤー企業（ハイテク系）の概ね４割弱がそうしたイノベーションを展開すると予想される。

> ＜参考＞
> ■CERN－LHC プロジェクトのハイテク産業へのインパクト調査
> 【アンケート調査対象：154 社（CERN と契約した技術集約的企業）】
> ○38%が、サプライヤー（供給者側）の直接成果として新製品を開発した。
>
> ■DESY－TTF の供給効果についての調査結果
> 【アンケート調査対象：57 社（DESY と契約した TTF への機器供給事業者）】
> ○38%：X 線レーザーの建設に協力することによって、少なくとも１つの製品範囲において「重要な」または「非常に重要な」イノベーションがあったと回答

[3] ここで報告されている効果は、1973 年～1987 年の期間（SPS 建設期間）に CERN と調達契約を結び、ハイテク機器を納入した 519 企業のうち、160 企業への経済的利益に関するインタビュー調査の結果に基づいている。詳しくは、調査報告書 p21 に記載の “The impact of CERN on high tech industry developments　Focus:The construction of the LHC”の結果を参照のこと。

（２）ILC 建設に伴う契約サプライヤー企業の推計結果

CERN の LHC の実態を参考に、ILC 建設に伴う契約サプライヤー企業数を推計すると、日本負担分については約 5,650 社（うちハイテク企業約 520 社）になると推計される。また、日本負担分 4,315 億円の調達によって、何らかの新製品開発等のイノベーションが起こる企業は、CERN の LHC と同程度のインパクトと考えると 200 社程度になる（522×38%）。

図表 16　ILC における契約サプライヤー企業数の推計

項目	計算式	単位	LHC	ILC	
				全体	日本負担分（想定）
全体調達額（建設費）	①	億円	5,198	9,075	**4,315**
LHCサプライヤー数（実績1）	②	社	6,364		
LHCサプライヤー数（実績2）	③	社	6,806		
うち技術集約的企業	④	社	629		
技術集約的企業の割合	⑤＝④/③	%	9.2%		
1サプライヤー当り調達額	⑥＝①/③	億円	0.76		
ILCサプライヤー数（推計）	⑦＝①/⑥	社		11,881	**5,649**
ILC技術集約的企業（推計）	⑧＝⑦×⑤	社		1,098	**522**

（注1）為替レート：1CHF（スイスフラン）＝120円で計算
（注2）LHC建設の全体調達額　　4,332 （百万CHF）
（注3）LHCサプライヤー数（実績1）：
“The Large Hadron Collider: A Marvel of Technology”Lyndon R. Evans 編集 より
（注4）LHCサプライヤー数（実績2）：
“The impact of CERN on high tech industry developments Focus:The construction of the LHC”より

（３）ILC の技術開発により創造される技術・製品の市場規模及び経済波及効果

上記の CERN での調査結果を用いて、ILC による契約サプライヤー産業の技術革新を通した、単位受注額当りの市場（ビジネス）拡大係数を「3」と想定する。この係数を用いて、ILC の市場拡大額を推計すると、建設期間（10 年間）の調達総額 2,715 億円（4,315 億円のうち土木・建築工事費 1,600 億円を除く加速器建設費及び測定器建設費の合計額）に対して、約 8,145 億円の付加的ビジネス（生産コスト削減含む）が発生すると推計される。また、これらの ILC からの付加ビジネス発生額がもたらす、経済波及効果は生産誘発額で約 1 兆 6,470 億円程度になると推計される。

図表 17　ILC 契約サプライヤー産業のビジネス拡大額及び経済波及効果

		ILC建設	ILCによる付加ビジネス発生額
最終需要	（億円）	4,315	8,145
生産誘発額	（億円）	10,389	16,470
直接効果		4,012	6,966
第1次間接効果		4,090	5,978
第2次間接効果		2,287	3,526
（内）粗付加価値誘発額	（億円）	4,620	7,975
（内）雇用者所得誘発額	（億円）	2,672	4,535
誘発雇用者数　＜総数＞	（千人）	54.7	95.6
誘発雇用者数　＜年平均＞	（千人・年）	5.5	

（注）ILC の総建設費（日本負担分）4,315 億円のうち、工事費（1,600 億円）を除く加速器建設費及び測定器建設費の合計額（2,715 億円）を、CERN での付加ビジネス拡大係数（＝3）を乗ずる対象とした（CERN の付加ビジネス拡大係数には土木建設工事は含まれていないため）。

なお、以上のような CERN のビジネス拡大係数「3」を採用する基本的な考え方と前提は、次のとおりである。

■CERN の付加ビジネス拡大係数は、次の前提のもとに観測され、実現されている。

(a)CERN との調達契約の結果としてもたらされた、企業の「新製品開発販売、品質改善、生産性の向上」による「売上増加額」と「コスト削減額」の合計金額を、２次的経済インパクト（the “secondary” economic impact of CERN）として定義し、その額を捉えたものである（CERN へ加速器関連のハイテク機器を納入した企業へのインタビュー調査により把握）。

(b)CERN は LHC の建設が始まった 1990 年代後半より以前の SPS の建設段階から以上のような契約企業によるビジネス拡大が確認されるとともに、LHC の建設過程においてはそれ以上に活発な技術移転とそれによるイノベーションの加速が起こったと報告されている。例えば、ある調査では「大規模な物理研究プログラム＜LHC＞は、イノベーションを加速する」「LHC は、多様性に富んだ技術・ノウハウを育成してきた」などの知見が示されている。こうした報告をもとに類推すると、CERN においては、一貫してビジネス拡大係数３は維持されていると推測される。

(c)このようなイノベーションを創出する源となった、CERN から民間への技術移転の主要分野は、「IT &ソフトウェア」（31%）、「加速器」（29%）、「検出器」（20%）、「エレクトロニクス」（20%）であり、これらの分野で新しい装置や製品が多数生みだされていった。例えば、LHC の真空を作る断熱技術は、高性能太陽光パネルの生産につながった。また、精密測定技術は、物体内部の３D 構造を画像化する測定装置（Medipix）の開発に結びついた。LHC では、こうした重要な技術移転

が、LHC の建設時期には年間 15～20 件程度発生した。

(d)以上のように、CERN の技術移転によってビジネス拡大がもたらされた大きな要因としては、CERN の技術・ノウハウの大部分が特許要件を備えていなかったことが指摘されている。すなわち、民間企業は、CERN の開発した技術を自由に利用でき、それを活用した企業独自の技術・製品開発が促進されたということである。

■CERN のビジネス拡大係数「3」を ILC に適用する妥当性、必要条件及び限界は、次の通りである。

(a)CERN の LHC と ILC では、加速器の基本構造や導入される技術体系は異なっている部分があるものの、本調査で明らかになったように ILC においても超伝導加速技術、ナノ・ビーム発生・制御・収束技術、高周波／ハイパワー技術等を中心とした新規の技術開発や既存技術の改善は、ILC 建設前の開発実証段階から建設段階に至る過程において不可欠となっている。したがって、設立が想定される ILC 国際研究所（仮称）による技術開発（新規・改善）の成果が、民間へ技術移転されるというシステムが整っていれば、CERN の LHC と同様な「大規模な物理研究プログラムによるイノベーション」が ILC においても、いくつかの条件を満たせば、起こる可能性が高いと考えられる。

(b)民間企業への技術移転による付加ビジネスの拡大（イノベーション）を、ILC において現実のものとしていくためには（＝ビジネス拡大係数 3 を実現するためには）、以下の条件を満たしていることが望ましいと考えられる。これらの条件は、CERN の実態を参考に類推したものである。

○ILC 国際研究所（仮称）自らが、技術開発（新規・改善）を行い、契約サプライヤー企業に技術移転する体制が整っていること

○ILC 国際研究所が、技術移転を行いつつ製品調達をするための契約サプライヤー企業への発注を多く行うこと。

○ILC 国際研究所の契約サプライヤー企業の中に、技術集約的企業が多く含まれること（CERN を参考にすると全契約企業数の 10%程度以上）。

○ILC 国際研究所から民間企業への価値の高い技術移転が、建設期間 10 年間で年平均 15～20 件程度発生すること（CERN の LHC での実績と同レベルを想定）

○ILC 国際研究所からの技術移転には特許がなく、民間企業が自由に当該技術を活用できること。

○ILC 関連の R&D からビジネスへのブリッジに対する支援体制が充実していること。

しかしながら、CERN の技術移転によるビジネス拡大係数 3 の根拠や達成条件（必要条件や十分条件）は、正確には把握できないことから、ILC が上記の条件を満たしたとしても、必ずしもビジネス拡大係数「3」を達できるとは限らないことに留意する必要がある。

４）ILC の経済波及効果推計結果のまとめ

「建設・活動による経済波及効果」及び「技術開発による経済波及効果」を合せた、ILC による経済波及効果（建設期間 10 年＋運用期間 10 年の 20 年間に発生すると推測される ILC 固有の効果）は、最終需要額約 2 兆 1,000 億円の発生に対して、生産誘発額約 4 兆 4,600 億円であり、乗数は 2.12 倍となる。

なお、ILC による乗数 2.12 倍を他の最終需要項目と比較すると、「国内総固定資本形成（民間）」は 1.84、「国内総資固定資本形成（公的）」は 1.90 倍となっており、数値的には ILC が上回っているが、ILC の生産誘発額には第 2 次間接効果分も入っていること（乗数 2.12 倍は産業連関表上の生産誘発係数とは意味が異なっているため）、また今回用いた産業連関表の部門分類が粗く評価に限度があることなどから、単純な比較はできない。

【最終需要項目別生産誘発係数（34 部門）：2005 年産業連関表】
- 民間最終消費　1.53
- 国内総固定資本形成（民間）　1.84
- 国内総資固定資本形成（公的）1.90
- 輸出　2.17

図表 18　ILC の経済波及効果（まとめ）

		ILC建設	ILC活動	ILCによる付加ビジネス発生額	合計
最終需要	（億円）	4,315	8,625	8,145	21,085
生産誘発額	（億円）	10,389	17,747	16,470	44,606
直接効果		4,012	8,172	6,966	19,150
第1次間接効果		4,090	5,798	5,978	15,866
第2次間接効果		2,287	3,777	3,526	9,590
（内）粗付加価値誘発額	（億円）	4,620	9,431	7,975	22,026
（内）雇用者所得誘発額	（億円）	2,672	4,721	4,535	11,928
誘発雇用者数 ＜総数＞	（千人）	55	104	96	255
誘発雇用者数 ＜年平均＞	（千人・年）	5.5	5.2		

Ⅱ．世界各国における素粒子･原子核物理学分野の将来構想等の調査・分析

１．各国の素粒子・原子核物理分野の将来構想等の取りまとめ

欧州（ドイツ、フランス、スイス、英国）、北米（米国、カナダ）、中国における、素粒子・原子核物理分野の将来構想等の概要を取りまとめるとともに、ILC との関係性を整理し示唆とする。

１）欧州の動向

欧州調査対象国における計画のベースには、「The European Strategy for Particle Physics　Update 2013」（欧州の素粒子物理学戦略　2013 年改訂版）がある。

本戦略は、2006 年に制定され、今回改訂が行われ、2013 年 5 月に CERN 理事会の欧州戦略のための特別会合で承認されたものである。3 ページ程度の短い文章にまとめられており、その中で最優先事項（High priority large-scale scientific activities）として以下の 4 つが示されている。

①High Luminosity Large Hadron Collider (LHC が最優先事項。HL-LHC 計画（2030 年頃迄に加速器及び検出器の高輝度化により 10 倍のデータを集める事を目指す）

②次世代の大規模加速器実験の計画（ポスト LHC 計画の必要性。欧州の次の計画を出すために R&D を実施。CLIC（Compact Linear Collider）や Future Circular Collider (FCC)を想定）

③ILC 計画への参加（日本主導による ILC 計画を最も歓迎）

④アメリカや日本が主催する国際的な長基線ニュートリノ実験への参加

欧州調査対象国は、基本的に上記の欧州戦略に従い、LHC での研究を重視した計画や取組みを策定・実行している。各国別に動向をみると、次のような特徴がみられる。

・ドイツでは、BMBF（連邦教育科学研究技術省）が、政府の大規模研究施設への支援の全体像を示したロードマップ“Roadmap for research infrastructures”を作成し、掲載プロジェクト（FAIR、ESS、EXFEL、CTA 等全 27 プロジェクト）への補助を行なっている。なお、ドイツ政府の ILC への支援は、ロードマップへの掲載が前提となる。

・フランスでは、CEA（原子力・代替エネルギー庁）、CNRS（国立科学研究センター）が連携して、優先度の高い計画プロジェクト（LHC アップグレード、重イオン加速器施設 GANIL、EXFEL、FAIR、VIRGO＜欧州重力波観測所 EGO＞）等）へ予算配分している。次の重要大規模プロジェクトとして CTA（Chenrenkov Telescope Array）が位置づけられている。

・イギリスでは、STFC（科学技術施設庁）が素粒子物理や核物理分野の研究開発項目を示した基本方針を示している。素粒子物理分野では、LHC を最大限活かすことが最優先事項となっている。また、ILC については英国研究者の研究再参入への予算がついた（2025 年より 3 カ年）。基本方針は 4 年毎に行われる計画評価プロセスの結果にもとづいて決定される。

２）北米の動向

米国における計画のベースには、「Report of the Particle Physics Project Prioritization Panel (P5)（2014 年 5 月、DOE)」がある。

P5 は米国の素粒子物理学コミュニティが検討したものを DOE と NSF が High Energy Physics Advisory Panel (HEPAP) に P5 を最新の戦略計画として取りまとめるよう指示し作成した、20 年先のグローバルな視点に立った、10 年計画である。

P5 では 5 つの“science drivers”を設定しており、これらが今後の米国の研究計画の骨格を作ることになっている。

①ヒッグス粒子を新発見の新しいツールにする研究
②ニュートリノ振動に関する物理学の探究
③暗黒物質に関する新しい物理学の確立
④宇宙の加速膨張の究明: 暗黒エネルギーと宇宙膨張
⑤未解明の新物理の探究：新粒子、新しい相互作用、新しい物理原則

P5 の中には、「日本が ILC のホスト国になることに対する関心を示していることは、胸を踊らせるような進展である」という記載がある。

米国が ILC 計画に関わるかどうかは様々な要因によって決まるが、予算の想定シナリオは今後の見通しを決める要因の一つである。P5 では、どの予算シナリオも今後 5 年の間のどこかで ILC へのサポートをある程度のレベルで組み込む想定をしている。

P5 に示された予算シナリオは 10 年間のタイムスパンで想定され、大きく 3 種類に分かれる。

・シナリオ A：最も予算が少ないシナリオ
・シナリオ B：やや予算が多いシナリオ
・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）

シナリオ C は DOE がカバーできる予算を大きく超過している予算を使う想定のシナリオであり、ILC 計画が進んだ際に米国が積極的に世界のリーダー役を担う想定がされている。

カナダでは、NSERC が The Subatomic Universe: Canada in the Age of Discovery という 2011-2016 年の計画を策定している。これは現状の素粒子物理分野ではカナダで最も有力な計画であり、CFI や NRC にも強い影響を与えているため、基本的にはこれを押さえていればカナダの方針を捉えていると言える。この中では以下の研究テーマが素粒子物理の柱となっており、ILC は挙がっていない。

①ATLAS（ヒッグス粒子）
②SNO、T2K（ニュートリノ）
③加速器全般
④TRIUMF（アイソトープ）
⑤Snolab（暗黒物質）

３）中国の動向

中国における素粒子・原子核物理学研究のベースには、中国科学院高能物理研究所「一三五」戦略計画があり、三つの重要突破目標が設定されている。

①素粒子物理研究で重要な成果を獲得
②国の重要な設備を完成
③研究成果の産業化において重要な進展を獲得

中国の加速器実験施設は、1980 年代後半より、電子・陽電子衝突実験施設 BEPC、電子陽電子衝突スペクトロメーターBES、放射光施設 BSRF を中心に発展。今後、2018 年前後稼働予定の中国核破砕中性子源 CSNS、2020 年稼働開始のニュートリノ実験施設 JUNO、四川省稲城地域に第二期の大型高高度空気シャワー観測施設 LHAASO 建設予定と加速器及び加速器以外の実験施設の建設が進みつつあり、「一三五」戦略計画が実行されていることが分かる。

一方、BEPCII の後継版として円形電子・陽電子衝突型加速器（Circular Electron Positron Collider）+プロトン衝突型加速器 CEPC-SppC に関する研究が始動しており、同じトンネルにおいて、フェーズ 1 で電子･陽電子衝突、フェーズ 2 でプロトン・プロトン衝突実現を目指そうとする構想がある。

中国が ILC 計画に関わるかどうかに関する点は、中国科学院高能物理研究所の王所長に対するインタビューでは、「中国も役割を果たしたいと思うが、現時点では明確な目標は持っていない」と回答を得ている。

２．各国政府・研究機関へのインタビュー調査から得られる ILC への示唆

各国政府機関及び主要研究機関へのインタビュー調査にて、ILC プロジェクトの位置づけに対する評価、各国による貢献等について把握した。その結果から浮かび上がる ILC プロジェクトの特徴について示すと以下のとおりとなる。

①円形加速器ではシンクロトロン軌道放射による粒子エネルギーの損失があり、より一層の学術研究の推進のためには線形加速器（ILC）が必要であること、また、ILC の実現に必要な技術はこれまでの R&D の成果によって既に高い水準に達していることが、高エネルギー物理学分野の研究者の世界的コミュニティにおいて認識されている。。

欧州は、現在世界でトップレベルにある LHC（CERN）の、2025 年以降に向けたアップグレードを最優先事項として注力するという方向にある。その流れの中で、高エネルギー分野の素粒子物理研究者の世界的コミュニティ（以下、研究者コミュニティ）においては、電子・陽電子衝突型の線形加速器という特長をもつ ILC が、より高エネルギーに到達する LHC で発見された新粒子の精密測定ができるという点において、LHC と双璧をなしながら高エネルギー分野での学術研究を牽引していくという認識、及びそれが早期に実現していくことへの期待が高まっていることが分かった。

欧州調査の対象であるスイスの CERN やフランスの LAL では、ILC は当初から国際連携によって R&D が進み、その進捗は極めて高水準に達しており、TDR（Technical Design Report）で設定したベースライン通りに ILC の建設を実施するなら、特に技術的な問題はないと見解が示された。

米国の素粒子物理分野では、米国内の研究として、ニュートリノ質量とそのＣＰ対称性の破れの起源の発見が 2 大テーマとなっている。ILC との関係では、米国で最大の加速器を有していた FNAL では、ILC が電子陽電子衝突というクリーンな実験環境下で実

現できるヒッグス粒子の精密測定などの学術的価値を強調している。FNAL、SLAC、ANL ともに ILC 用設備の研究開発を進めており、技術的には実現可能な水準まで来ているという認識である。SLAC においては、ILC 向けの研究開発で得た空洞技術を、LCLS-II に転用している。

カナダの TRIUMF においてもその点について同様であり、既に ILC 向けの研究開発に従事している。

②大規模加速器建設に伴う悩みは「巨額な投資の一方で確実な成果を予測しきれない」点にあるが、LHC がヒッグス粒子を発見した今、ILC はヒッグス粒子の研究を深められるという点で一つの大きな成果は約束されていると認識されている。

LHC を所有する CERN の見解では、陽子・陽子衝突型加速器 LHC でカバーできない物理研究を電子・陽電子衝突型加速器 ILC で相補していく事が期待されている。すなわち、ヒッグス粒子を発見した LHC を受け、ILC では、ヒッグス粒子の精密測定（崩壊分岐比や自己結合の測定等）で確実に成果を出し、更に超対称性粒子の探索、標準理論を超える新物理の発見等の研究が実施できると指摘している。

③以上のように ILC の必要性や効果、技術的実現可能性は研究者コミュニティで認識されているが、各国の現行の計画や予算は、自国（地域）の大規模研究施設の利用・更新・新設や、海外の既存大規模研究プロジェクトへの参加に対してのものであり、ILC については明確な位置づけはまだほとんどなされていない。

欧州調査対象国においては、①ドイツ：ILC は大規模研究施設であり、ロードマッププロセスを経て実施の意思決定がされる必要があるが、現時点では、ILC はロードマップに記述がない。②フランス：ILC については計画の具体的な提案が無いため、ロードマップに含まれていない。ILC 測定器の研究開発に助成金が出ているが、建設が現実となるまでは、必要最低限の予算しか拠出されない。③イギリス：2007 年 LHC 計画の遅延に対応し ILC から撤退したが、ILC 建設の機運が高まってきている中で、2015 年 1 月に英国の ILC コミュニティに対するサポートが再開された。ただし、英国研究者が研究に再参入する準備のための予算（主に旅費）に限定されている。

米国の P5 レポートにおいては ILC について言及されており、今後の計画に組み込まれている。DOE によれば、米国の素粒子物理コミュニティの中では米国政府に対して ILC に予算を付けて欲しいという意向は未だに強い。研究者としては、ILC の R&D 費用を獲得する方策を模索しつつも、今は政府とは距離を置いて ILC 関連の活動を続けている状況である。

カナダにおいては NSERC の The Subatomic Universe: Canada in the Age of Discovery が国の素粒子物理分野の指針となっているが、前述の通り、2011 年に策定された計画には、柱となる大方針の中に ILC の記述はない。一方で、TRIUMF においては、余剰金は LHC 参加に充てられている。SCRF の開発は NRC の予算で行われ、ILC の設備開発に充てられている。

④欧州及び米国の主要研究機関では、ILC プロジェクトは日本が牽引するものと期待されており、現在、日本からの能動的な提案がなされていない点を疑問視する、あるいは提案や意思決定を早期に求めるという見方が多い。また、日本からの提案が無いため、現時点で各国の関係政府機関は、計画や予算に明確に反映できないという状況を指摘している。

欧州調査対象国では、①CERN では、ILC の実施の決定が下されるのかを各国が様子を見ている現在の状態が長く続くのは望ましいことではなく、日本がそれを破る役割を早期に果たせることを期待しているとしている。また、日本が担う意義は、学術的な価値だけでなく、日本が大規模な国際協力プロジェクトを遂行できるということをアピールできるという点で重要とコメントしている。②フランス CEA/Irfu では、技術的には ILC 計画に確たるイメージがある反面、日本からの計画の具体的な提案がないため予算分担状況やガバナンスに関する不透明さがあるとコメントしている。

米国内においても同様の受け止め方をしており、DOE や FNAL 等においても、基本的なスタンスは日本の意思決定を待つ、というものである。ただし、研究者や関係者の中には米国政府の翻意による積極的参画を未だに強く望み、日本政府に対して自国政府に働きかけて欲しいという声も複数聞かれた。

また、CERN のような研究者や研究施設が集約する環境を ILC が作ることができれば、日本のみならず世界中の原子核・素粒子物理分野の研究者、特に若手研究者や学生にとって良質な教育、人材育成の場を提供できる効果に FNAL は着目している。一方、TRIUMF では本調査の背景を説明したところ、日本が ILC に能動的な提案をしない理由についてはじめて納得のいく説明を受けたとの反応があった。日本から情報発信がないという印象を持っているようである。

⑤ILC プロジェクトの実現に向けた超伝導加速空洞技術等の基本的な技術の研究開発や実証、ILC の実現につながる EXFEL（欧州 X 線自由電子レーザー）等のプロジェクトは先行実施されており、これらの研究開発の成果を活用して、ILC プロジェクトに参画し貢献することは可能であると多くの研究機関は認識している。

欧州では、①ドイツ DESY を中心に国際プロジェクトとして進められている EXFEL では、ILC と同じ超伝導加速技術が用いられており、使用される超伝導加速空洞（TESLA キャビティと呼ばれる）は ILC のプロトタイプとして位置づけられている。②フランスの CEA－Saclay や LAL では、EXFEL 向けのクライオモジュールやカプラーを製作・供給しており、そうした技術蓄積によって ILC に貢献できるとしている。③イギリスには ILC 関連技術としてビーム輸送、最終収束系、フィードバック制御等の技術蓄積があり、これら分野での ILC への貢献が可能であるとしている。

米国 FNAL では ILC 向けの超伝導空洞やクライオモジュール、測定器の開発を行っている。LCLS-II 向けの設備開発と並行して行い、双方の間で技術移転をしながら開発を続けている。SLAC では LCLS-II の建設を進めている。ここに利用されている超伝導 RF 空洞とクライストロンの技術は、ILC の技術開発から派生したものである。SLAC の強みは高出力 RF 関連技術であり、自らの ILC への貢献度が高くなることを自負している。かねてから、SLAC 主導で 9 連セルのニオブ超伝導キャビティの開発を、米国内の他の研究機関や、日本企業を含む世界中の民間企業と行ってきており、技術的には ILC を実

現するに足る水準まで高まってきているという実感を持っている。

⑥ILC プロジェクトは国際協調プロジェクトであり、特定の国、研究機関、企業だけで実施する性格のものではない、また日本もその一構成員であることは間違いないと認識されている。しかし、仮に日本で ILC を実現するとなれば、ILC をイニシアティブを持って推進する立場に立ち、大規模プロジェクトマネジメント、組織設計・管理、資金管理、リスク管理等をリードしていく必要性が生じてくるが、その十分な実施能力の獲得は日本にとって大きな課題であるとの声が多い。

※本考察は、国内企業インタビューも踏まえたものである。

「ILC 計画に関する技術的波及効果等調査分析」報告書に関する留意点

1．経済波及効果推計の前提（P.13）

（1） ILC を効果発生源とする ILC 固有の経済波及効果を算出する。

（2） ILC 建設の日本負担額（本調査で想定）を前提とした、日本国内（産業）へ及ぶ経済波及効果を算出する。

（3） ILC の効果発生源となる支出額は、原則、TDR に示される数字を前提とする。ただし、ある程度の確度をもって、定量的に推計が可能な支出は一部対象とする。

（4） ILC 経済波及効果(発生額)の計測期間は、建設期間 10 年＋運用期間 10 年の 20 年間とする。

（5） ILC の「建設」の経済波及効果については、TDR に未掲載、かつ ILC 固有に発生するものの現時点で前提条件が未確定な以下の経費（投資的支出）は、効果発生源の中に含めない。

■ 準備経費、共通基盤経費、主要研究施設建設費

（6） ILC の「活動」の経済波及効果については、TDR に未掲載、かつ ILC 固有の支出として発生するものの現時点で前提条件が未確定な以下の支出は、効果発生源の中に含めない。

■ 参加立地研究機関の運営費支出、ILC 関係の来訪者・会議参加者による消費支出

2．CERN のビジネス拡大係数「３」を適用する妥当性、必要条件及び限界（P.25）

（1） ILC を効果発生源とする ILC 固有の経済波及効果を算出する。

○ ILC 国際研究所（仮称）自らが、技術開発（新規・改善）を行い、契約サプライヤー企業に技術移転する体制が整っていること

○ ILC 国際研究所が、技術移転を行いつつ製品調達をするための契約サプライヤー企業への発注を多く行うこと

○ ILC 国際研究所の契約サプライヤー企業の中に、技術集約的企業が多く含まれること（CERN を参考にすると全契約企業数の 10%程度以上）

○ ILC 国際研究所から民間企業への価値の高い技術移転が、建設期間 10 年間で年平均 15～20 件程度発生すること（CERN の LHC での実績と同レベルを想定）

○ ILC 国際研究所からの技術移転には特許がなく、民間企業が自由に当該技術を活用できること

（2） CERN の技術移転によるビジネス拡大係数 3 の根拠や達成条件（必要条件や十分条件）は、正確には把握できないことから、ILC が上記の条件を満たしたとしても、必ずしもビジネス拡大係数「3」を達できるとは限らないことに留意する必要がある。

3．ILC の経済波及効果推計結果のまとめ及び乗数「2.12」の解釈（P.26）

（1） 「建設・活動による経済波及効果」及び「技術開発による経済波及効果」を合せた、ILC による経済波及効果（建設期間 10 年＋運用期間 10 年の 20 年間に発生すると推測される ILC 固有の効果）は、最終需要額約 2 兆 1,000 億円の発生に対して、生産誘発額約 4 兆 4,600 億円であり、乗数は 2.12 倍となる。

（2） ILC による乗数 2.12 倍を他の最終需要項目と比較すると、「国内総固定資本形成（民間）」は 1.84、「国内総資固定資本形成（公的）」は 1.90 倍となっており、数値的には ILC が上回っているが、ILC の生産誘発額には第 2 次間接効果分も入っていること（乗数 2.12 倍は産業連関表上の生産誘発係数とは意味が異なっているため）、また今回用いた産業連関表の部門分類が粗く評価に限度があることなどから、単純な比較はできない。

【最終需要項目別生産誘発係数（34 部門）：2005 年産業連関表】

・民間最終消費　1.53
・国内総固定資本形成（民間）　1.84
・国内総資固定資本形成（公的）1.90
・輸出　2.17

図表 1　ILC の経済波及効果（まとめ）

		ILC建設	ILC活動	ILCによる付加ビジネス発生額	合計
最終需要	（億円）	4,315	8,625	8,145	21,085
生産誘発額	（億円）	10,389	17,747	16,470	44,606
直接効果		4,012	8,172	6,966	19,150
第1次間接効果		4,090	5,798	5,978	15,866
第2次間接効果		2,287	3,777	3,526	9,590
（内）粗付加価値誘発額	（億円）	4,620	9,431	7,975	22,026
（内）雇用者所得誘発額	（億円）	2,672	4,721	4,535	11,928
誘発雇用者数 ＜総数＞	（千人）	55	104	96	255
誘発雇用者数 ＜年平均＞	（千人・年）	5.5	5.2		

（3） 乗数「2.12」は ILC による最終需要額の発生に対する生産誘発額の比であり、産業連関表における各部門の生産誘発係数と同様に、ILC の建設・運営等により投入された費用に対する正味の便益を意味しているわけではない点に留意が必要である。

（※参考）：「国際リニアコライダー計画に関する所見」（抄）（平成 25 年 9 月、日本学術会議）

2　審議依頼を受けた各事項に関する検討

（3）ILC 計画を我が国で実施することの国民及び社会に対する意義

② 波及効果

技術波及効果： 加速器関連技術をはじめとして ILC に関わる技術開発が、関連分野に一定程度の波及効果を生むことは期待できる。しかしながら、高度に特殊化された ILC 関連技術が直ちに一般民生用の技術に応用されたり、製品開発に直結したりするとは考えにくい。

（略）

技術開発にせよ経済活動にせよ、波及効果の議論は副次的であり、巨額の予算を要する ILC 計画を正当化する主たる論拠にはならない。