

国際リニアコライダー

その展望とKEKの取組み

VOL

---

01 ILCの概要

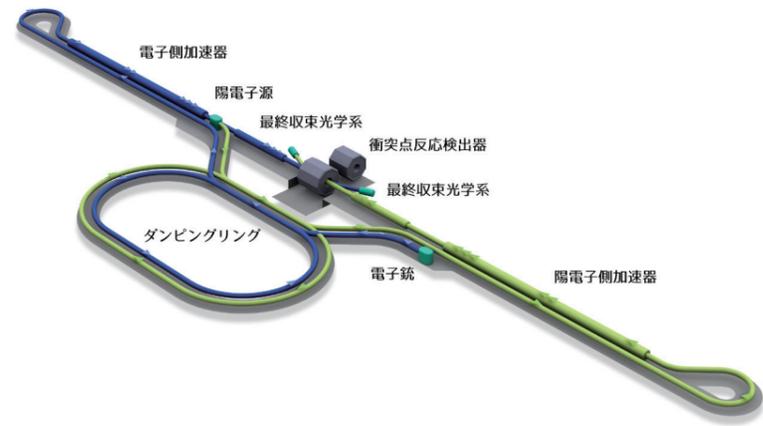
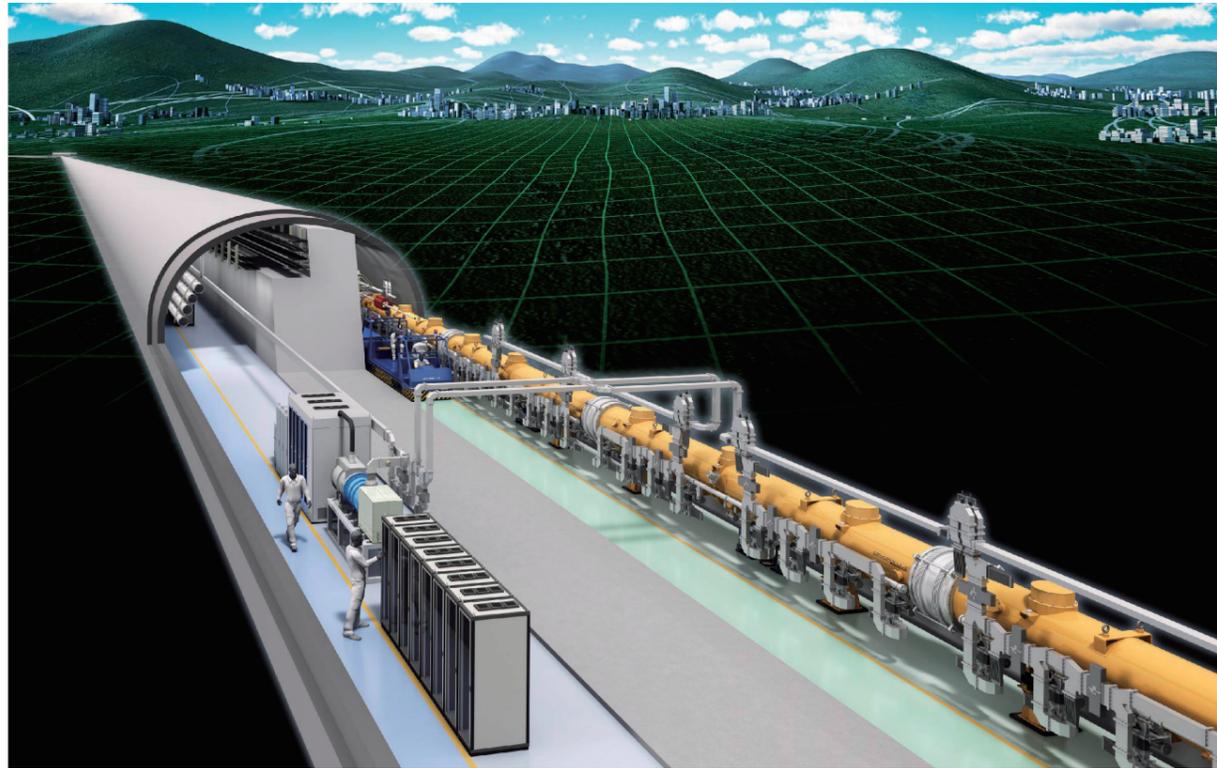
## この冊子について

この冊子は、高エネルギー加速器研究機構(KEK)で行っている活動を中心に、国際リニアコライダー(ILC)計画の概要とその意義を解説するものです。

4分冊構成になっており、第1分冊では全ての項目を網羅した概要を解説しており、第2～第4分冊では各項目をより深く解説しています。

## TABLE OF CONTENTS 目次

- 01 第一分冊 概要**  
 ILCがもたらす知の革命  
 ILC提案のこれまでの歩み  
 ILCのインパクト  
 ILC実現に向けて
- 02 第二分冊 ILCの物理**  
 素粒子物理学の目指すもの  
 加速器実験  
 標準理論:物質粒子・力の粒子・ヒッグス粒子からなる世界像  
 標準理論の成功と限界、残された深い謎  
 岐路に立つ素粒子物理学  
 三つの道と残された謎  
 ILCが探索するエネルギー領域  
 ILCがもたらす知の革命
- 03 第三分冊 ILCの加速器・測定器**  
 ILCの実験装置・概要  
 加速器  
 加速器を支える技術  
 衝突反応測定器  
 衝突反応測定器を支える技術
- 04 第四分冊 ILCの波及効果**  
 人類の知的資産への貢献  
 人材育成への貢献  
 産業への波及  
 イノベーションへの波及  
 ILC準備においてすでに表れている波及効果



上 / ILC完成予想図  
左 / ILC模式図 ©Rey. Hori

国際リニアコライダー (International Linear Collider、ILC) は、地下約100メートルのトンネルに設置する将来型電子・陽電子衝突加速器です。世界最高エネルギーまで「電子」とその反粒子「陽電子」を正反対の方向からそれぞれ直線状に加速して正面衝突させ、そこから引き起こされる素粒子反応を研究します。ILCは全長20キロメートル、重心系エネルギー250ギガeV電子ボルト(GeV)の加速器として開始する計画です

## 刊行にあたって

ILC: 第二加速器文明の入口



今、私たちは20世紀から21世紀にかけての科学技術真っ盛りの時代を生きています。この時代を可能にした発明の一つが加速器だと思います。初期の加速器の代表格は、1930年代に原子核のことを調べるために作られた小さなサイクロトロンでした。その後加速器は極めて大きな進歩を遂げ、周長が山手線と同じくらいのもまで作られています。これによって、1センチの十億分の一のさらに十億分の一くらいの素粒子の世界を支配する法則が良くわかるようになりました。

このことは同時に、宇宙の誕生のごく初期に何が起こったのか自信をもって説明できるようになったことを意味します。また、加速器からの光や中性子を使って実際に目に見える物質がどのような構造をしているかわかるようになり、さらに生命体のような非常に複雑な分子がなぜ多様な機能を持つかなどということも明らかになってきました。

加速器のもたらす恩恵は科学においてだけにとどまりません。工業的利用や医療への応用などもどんどん広がりを見せ、人間の生活にも現実的な貢献ができるようになってきました。これら加速器がもたらした成果を数百年後の子孫が振り返ったとすれば、20世紀から21世紀にかけては加速器の急速な進歩によって人類の自然理解が急速に深まり、そ

の応用によって人類に恩恵をもたらした、いわば加速器文明の時代だったということになると思います。この文明のけん引役を果たしてきたのが素粒子などの科学研究に使われてきた先端性の高い大型加速器です。

その大型加速器は今、絶頂にあります。円形の加速器、特に電子加速器においては限界が見えだしたのも事実です。ここに大きな希望となるのが直線型の大型加速器です。円形加速器が80年かけて挙げてきた大きな成果を、まっすぐな加速器が受け継いで次の100年でさらに大きく発展させ、いわば第二加速器文明の入り口となるのがこの冊子で説明する国際リニアコライダー (ILC) です。

ILCは素粒子物理学の発展に大きく寄与することが期待されますが、ここから始まる第二加速器文明によって我々の想像をはるかに超えた成果がもたらされるに違いありません。80年前にサイクロトロンを発明したローレンス博士は、加速器文明がここまで到達するとはおそらく想像していなかったと思います。これからの第二加速器文明についてもいったい何がおこるのか、全貌が見えるのは百年先かもしれません。後進に夢を託して走り始めることが、転換期にある文明を担う我々の使命ではないかと考えております。

山内 正則

高エネルギー加速器研究機構 機構長  
ILC推進準備室 室長

# 01 ILCの概要

巻頭言	.....3
ILCがもたらす知の革命	.....6
ILC提案のこれまでの歩み	....10
ILCのインパクト	....16
ILC実現に向けて	....18

## 第一分冊：はじめに

国際リニアコライダー（International Linear Collider, ILC）は、世界最高エネルギーまで、電子とその反粒子である陽電子を正反対の方向からそれぞれ直線状に加速して正面衝突させ、そこで起こる素粒子反応を研究する実験装置です。ILCの実験は、究極の自然法則と宇宙の始まりの謎の解明を目指します。次世代エネルギーフロンティア加速器実験施設として、電子・陽電子リニアコライダーが必要であるとして、世界の高エネルギー物理学研究者コミュニティは、国際的な枠組みで研究開発と設計作業を行ってきました。科学的意義と実験施設の技術的完成度から判断して、今、実現に向けて大きく踏み出す時期だと考えます。

高エネルギー加速器研究機構（KEK）は、日本の加速器科学の総合的発展の拠点として、新しいサイエンスや応用研究のフロンティアを推進してきました。5年間の具体的な研究計画「KEKロードマップ」を策定、ILC計画については、「日本がホストするILC計画を推進するために国際準備組織を立ち上げ、装置、施設・設備、研究所組織の詳細設計などに取り組み、国際協力の枠組みによる建設着手を目指す」と記載しました。KEKはILC推進準備室(室長：山内正則機構長)を設置し、機構内外と連携してILC計画実現に向けた活動をしています。今回はILC計画の理解増進活動の一環として、本冊子を編纂しました。

第一分冊では、ILC計画の全貌を俯瞰します。各章の詳しい内容については、第二～第四分冊をご覧ください。

# ILCがもたらす知の革命

宇宙はどのように始まり、これからどうなるのか？  
宇宙はどんな仕組みで、何で出来ているのか？  
私たちはなぜこの宇宙に存在するのか？

これらは神話の時代より人類が共通に抱えてきた疑問です。素粒子物理学は極微の世界を探求することでその答えを追っています。このための装置が高エネルギー加速器です。

宇宙は、今からおよそ138億年前に「ビッグバン」と呼ばれる大爆発で始まったと考えられています。ビッグバン直後の宇宙は、超高温・超高压の超高エネルギー状態で、様々な素粒子が無秩序に飛び交う世界でした。その後、宇宙が膨張して温度が下がるにつれ、素粒子がまとまって物質を構成し、現在の星々や銀河が織りなすパターンを形成するに至ったのです(図1)。

高エネルギー加速器は、この超高エネルギー状態を実験室内に再現する装置です。ビッグバン直後は、現在の宇宙には見当たらない多くの素粒子が存在していました。高エネルギー加速器の本格

的運用が開始されて、多くの素粒子が発見され詳細に調べられてきました。

そうした実験結果の背後にある素粒子の運動を支配する原理を解明し、まとめたものが「標準理論」です。これで、素粒子の性質やそれらが引き起こす現象を予測できるようになりました(図2)。これまでの実験結果は標準理論の予測と非常に高い精度で一致しています。標準理論で存在が予測され、唯一発見されていなかったヒッグス粒子も、2012年に欧州合同原子核研究機構(CERN)の大型ハドロンコライダー(LHC)加速器の実験で確認されました。ヒッグス粒子の発見で標準理論は一応の完成となりました(図3)。

しかし、実は標準理論で扱うことができない様々な問題があります。標準理論で説明できる通常物質は宇宙の全エネルギーの5%にすぎません。宇宙の大半は、通常物質の数倍におよぶ未知の見えない物質「暗黒物質(ダークマター)」と、残りの7割をしめる真空に蓄えられた謎のエネルギー「暗

図1 / ビッグバンからの宇宙の進化

誕生直後の宇宙はどのような姿だったのか、約138億年を経た現在の宇宙がどのようにできたのか、これらの自然法則を解明することが、高エネルギー加速器実験の究極の目的である

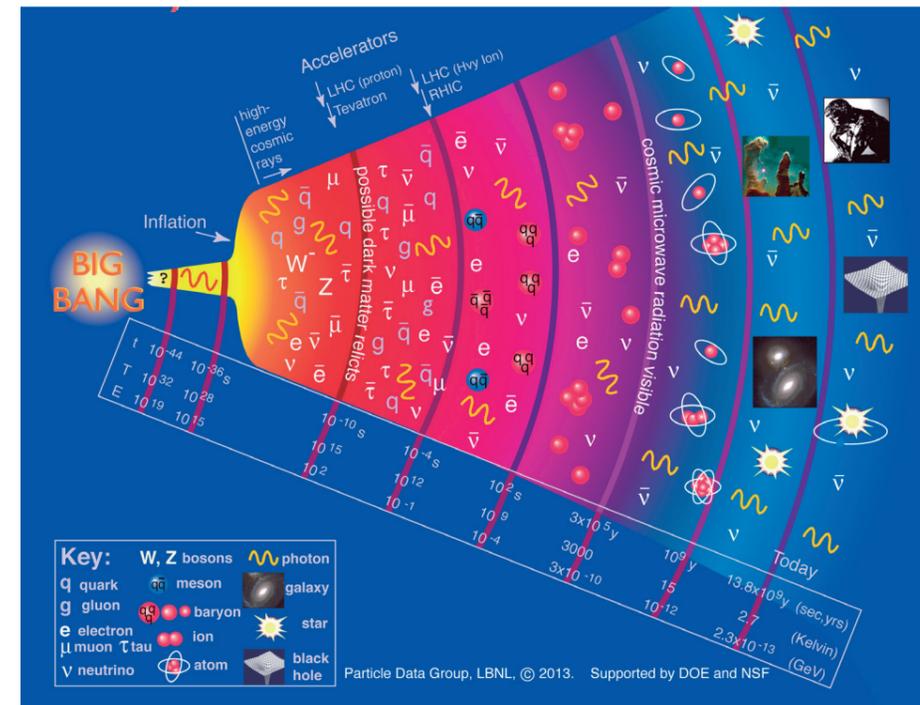


図2 / 標準理論表

標準理論とは、現代素粒子物理学の基本的な枠組みのことだ。1970年代半ばに体系化され、「20世紀の物理学の到達点」とも言われる



図3 / LHC加速器

世界最大の衝突型円型加速器。スイス・ジュネーブ郊外にフランスとの国境をまたいで設置されている ©CERN

	物質をつくる粒子 (フェルミ粒子)			力を伝える粒子 (ボース粒子)	
レプトン	$\nu_e$ 電子ニュートリノ	$\nu_\mu$ ミューニュートリノ	$\nu_\tau$ タウニュートリノ	$Z^0$ $Z^0$ ボソン	
	$e$ 電子	$\mu$ ミュー	$\tau$ タウ	$W^+$ $W^+$ ボソン	$\gamma$ 光子
クォーク	$u$ アップクォーク	$c$ チャームクォーク	$t$ トップクォーク	$W^-$ $W^-$ ボソン	
	$d$ ダウンクォーク	$s$ ストレンジクォーク	$b$ ボトムクォーク		
質量に関係	$H$ ヒッグス				

黒エネルギー（ダークエネルギー）」から構成されていることがわかっています（図4）。

そもそも、なぜ通常物質が5%存在するのかということもよくわかっていません。通常物質を形作る素粒子には、それぞれ質量が同じで電荷が正反対の素粒子である反粒子が存在します。ビッグバンのはじめには、物質と反物質は対で生成されるため、同じ数だけつくられると考えられています。ところが、標準理論の枠内では、つくられた物質と反物質は宇宙が冷えるにしたがって対で消滅し、物質のない世界に戻ってしまうという、現在の宇宙の姿とは矛盾する結論になってしまいます。私たちは、宇宙についてまだほとんど知らないままなのです。

これらの謎を解明するには、ビッグバンのもっと始まりに近い時期に成り立つ標準理論を超える理論が必要です。その解明の重要な鍵を握るのがヒッグス粒子です。

これらの謎に挑戦する標準理論を超える新しい理論がいくつか提唱されてきました。しかし、LHC加速器で発見されたヒッグス粒子の質量は、これらの理論のどれにもすんなりとは当ては

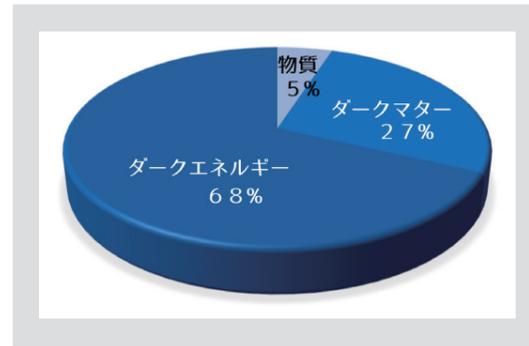


図4 / 宇宙の組成  
2013年に発表された天文衛星「プランク」の観測結果から算出した、物質、ダークマター、ダークエネルギーの割合

まらないものだったのです。そして、宇宙の仕組みとして三つの可能性が残りました。今、素粒子物理学は宇宙の認識を劇的に変革させるかもしれない分岐点に立っているのです。ILCではヒッグス粒子を徹底的に調べることで、これらの可能性のどれが正しいのかを明らかにします。

### 第一の道 「新たな次元」

第一の道は「新たな次元」の道です。アインシュタインの相対性理論の基礎となる時空（縦・横・高さの空間3次元と時間の1次元）の他に、隠された次元「余剰次元」が存在する可能性が提唱されています。また、物質粒子と力の粒子が入れ替わる「新しい種類の次元」が存在するとする理論（超対称性理論）も提唱されています。

いずれの場合でも、時空概念に革命が起き、科学者が追い求めている「究極理論」に向けた大きな一歩となるでしょう。ここで特徴的なのは、ヒッグス粒子には仲間の素粒子がたくさんあり、発見された粒子は最初の一つということになります。

### 第二の道 「より深い階層」

第二の道は「より深い階層」の道です。これは、ヒッグス粒子が素粒子ではなく、内部に構造を持つ複合粒子である可能性です。ヒッグス粒子が複合粒子である場合には、標準理論では想定されていない深い自然の階層があり、その階層を支配する新しい力が存在することになります。

この場合は、ヒッグス粒子はもはや素粒子ではなく、素粒の子リストからは消えてしまいます。新たなより深い階層への突破口が開けるのです。

### 第三の道 「複数宇宙、あるいは新しい原理の存在」

第三の道は、どこまで行ってもヒッグス粒子がただ一つの特別な素粒子として残る場合です。ILCでは、精密測定によってもヒッグス粒子の性質は標準理論の枠の中にきれいにあてはまり、新粒子も発見されないことになります。このようなことが起きるためには、宇宙の法則が信じられないくらい絶妙に調整されていることが必要です。この微調整が、全くの偶然であるのか、あるいは、究極理論の未知の原理によって決まっているのかということになります。

前者の場合、この偶然を合理的に説明する方法として、「複数宇宙の存在」があります。もし宇宙が一つではなく十分たくさんあれば、その中には絶妙に調整された宇宙も存在するはずですが、私たちは、この調整された宇宙にしか存在しないので、私たちが観測する宇宙は必然的に絶妙に調整された宇宙になるという理論です。このような考え方を「人間原理」といっていますが、第三の道では、そのような驚くべき考えが本当になるかもしれません。

これらの三つの可能性のどれが正しいのかを明らかにすることで、暗黒物質の正体は何か、宇宙がなぜ今のような姿になったのか、という標準理論を超えた問いに、ILCは答えようとしています。

一般に、エネルギーを高くしていけば、自然界のより微細な階層が見えてきます。しかし、ILCはそのた

めの単なる一歩ではありません。三つの道のどれをたどるにしても、人類の自然理解を新しい時代に導き、「宇宙の常識」を様変わりさせる可能性さえ秘めています。

ILCで展開される科学については、第2分冊でより詳しく紹介します。

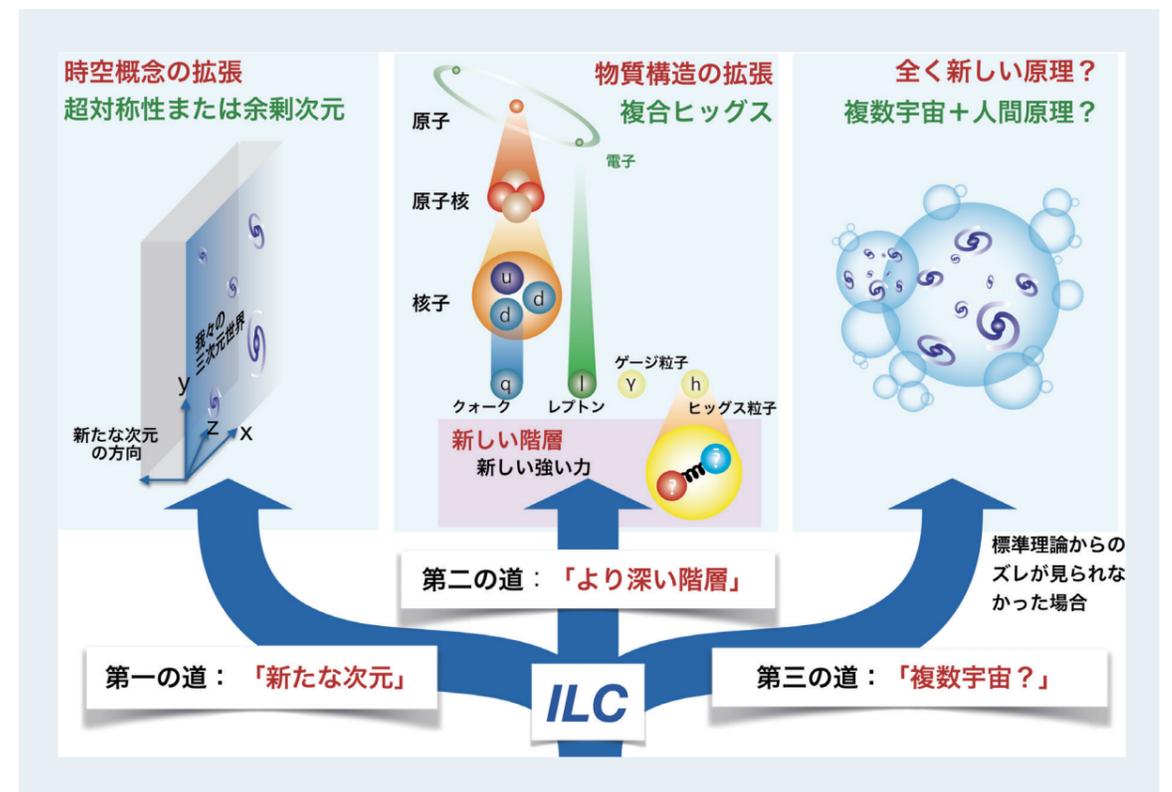


図5 / ILCが決める素粒子物理学の進路

ILCの実験結果は、これら3つから進むべき道を指し示す。人類の自然理解を新しい時代に導き、「宇宙の常識」を様変わりさせる可能性を秘めている



国際協力による計画の推進

日米欧それぞれが進めて来たリニアコライダー計画は、2004年に国際リニアコライダー(ILC)の名称に統一され、以降、国際協力による設計、研究が進められている

写真:2008年にドイツ ハンブルグのDESY研究所で行われた国際会議の様子。700名を超える研究者が集まった ©DESY

# ILC提案の これまでの歩み

電子・陽電子の高エネルギー衝突型加速器実験では、これまで一つの例外(後述するSLC)を除いて、円形の加速器が用いられてきました。これまで到達した最高のエネルギーは、1990年代にCERNで遂行された大型電子・陽電子衝突型加速器(LEP)実験で、周長27キロメートルの地下トンネルで、最終的な重心系エネルギーは209GeVまで到達しました(図6)。

円形加速器をでは、電子や陽電子はエネルギーを上げるにしたがって、放射光を発生してエネルギーを失うため、現実的に到達できるエネルギーに限界がきます。そこで、世界の加速器研究所では、将来の電子・陽電子コライダーとして、直線型の衝突型加速器の研究開発を始めました。

KEKの前身である高エネルギー物理学研究所が、日本の高エネルギー物理学研究者コミュニティの声明に基づきリニアコライダーの研究開発に着手したのは、1980年代の後半です。米スタンフォード

ド線形加速器センター(現SLAC国立加速器研究所)でLEP実験と同時期に実施したスタンフォード・リニアコライダー(SLC)実験は、将来のリニアコライダー実験の原理実証の意味もありました(図7)。

2000年代初頭までは、リニアコライダーの加速器の研究開発はアジア・欧州・北米の3領域でそれぞれ別に進められていました。このような状況のもとで、世界の高エネルギー物理学コミュニティは、次世代電子・陽電子コライダーを早期に実現することが重要な課題であるとの認識のもと、超伝導加速器技術を次期リニアコライダーの基礎技術として選択しました(図8)。

2005年には国際将来加速器委員会(ICFA)のもとに国際共同設計チーム(GDE)を設置して、国際的な枠組みでのILCの研究開発および設計を進めました。GDEは、2013年6月にはILC技術設計書(ILC-TDR)を出版しました(図9)[参考文献1]。ILC-TDR

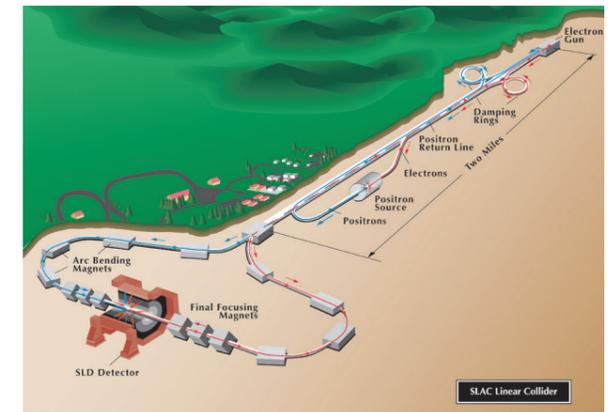
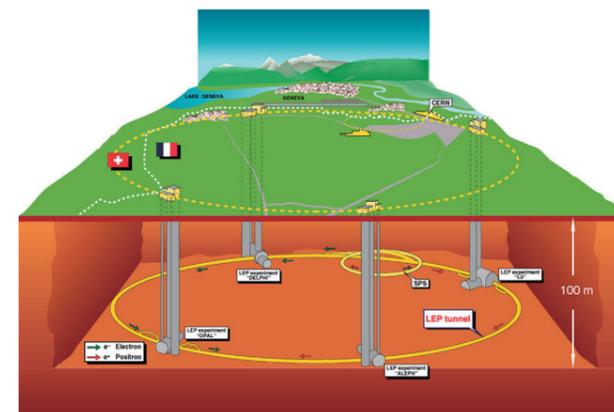


図6 / LEP実験模式図

1989年に開始されたLEPは、段階的にエネルギーを増強し2000年まで実験を続け、標準理論の完成に大きく貢献した ©CERN

図7 / SLC模式図

電子と陽電子を同じ方向から加速し、最後に半周曲げて正面衝突させた。現在のリニアコライダーのコンセプトの原型となっている ©SLAC



図8 / 超伝導加速器技術を選択

リニアコライダーの技術決定の記者会見に出席した世界の研究所の所長ら



図9 / ILC-TDR完成式典

2012年12月15日に東京秋葉原で行われたILC 設計報告書(TDR)完成発表会。バリー・バリッシュGDE ディレクター(左)から、ジョン・バガーILCSC議長(中央)にTDRの最終ドラフトが手渡された。右は山田作衛リサーチディレクター。バリッシュ氏は重力波観測の業績により、2017年ノーベル物理学賞を受賞した(上)

2013年6月12日に、日本、スイス、米国の3地域をリレーする形で行われた、TDR完成式典。日本の会場では、リン・エバンス氏から、駒宮幸男リニアコライダー国際推進委員会委員長へとTDRが手渡された(右)



には、ILC建設に必要な加速器設計・技術および経費と人的資源の見積もりが記載されています。

ILC-TDRでは、全長31キロメートルの地下トンネルに直線型加速器を設置し、電子と陽電子をそれぞれ250GeVのエネルギーまで加速して正面衝突させて実験を行う施設の設計を示しています。衝突の重心系のエネルギーは200GeVから500GeVまで変えて運転できる設計になっており、将来は1テラ電子ボルト( $\text{TeV}=1000\text{GeV}$ )領域へのエネルギー拡張可能性が保たれています。重心系500GeVのリニアコライダーについての加速器の建設経費は、2012年1月の1米ドルを1-ILCユニット(ILCU)と定義して、7,982百万ILCUとなっています。これに含まれない必要労働力は22,892千人時間と見積もられています。また、建設経費見積もりには25%の不定性を想定しています。KEKは、超伝導RF試験施設(STF)、先端加速器試験施設(ATF)を中心に、ILC-TDRの完成にも大きな貢献をしました(図10、11)。

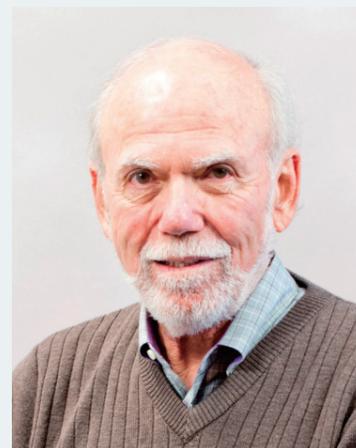
ICFAは、GDEを引き継ぐ組織として、2013年2月に、リニアコライダー国際推進委員会(LCB:Linear Collider Board)のもとにリニアコライダー・コラボレーション(LCC)を設置し、ILCプロジェクトの加速器詳細設計・技術開発を進めています。国内では、2012年10月に高エネルギー物理学研究者会議

が、その将来計画に基づき、ILCを日本がホストして実現することを提案しました[参考文献2]。この提案は、国際的に大きな反響を呼び、その時期に行われていた欧州及び米国の素粒子物理学研究の将来戦略のなかで支持が表明されました。また、ICFAおよびアジア地区の加速器科学と高エネルギー物理学分野の委員会から繰り返し支持の声明が出されています。

文部科学省は、2013年5月に日本学術会議に「ILC計画に関する学術的見地からの検討」を求める審議依頼を行い、それに応えて、日本学術会議は2013年9月に「国際リニアコライダー計画に関する所見」を発表しました。その後、2014年5月に、文部科学省では「国際リニアコライダー(ILC)に関する有識者会議」を設置し、日本学術会議からの提言における諸事項につき検討を行っています。

2017年7月に高エネルギー物理学研究者会議は、LHC実験の最新の結果を踏まえてILCの科学的意義について詳しい検討を行い、ILCを重心系エネルギー250GeVの「ヒッグスファクトリー」として早期に実現することをあらためて提案しました[参考文献3]。

2012年のヒッグス粒子の発見以降も、CERNのLHC実験では、標準理論をこえる新粒子、新現象の探索が続けられてきました。特に2015年からは衝



どのように自然界の質量が生まれ出されるのかを理解するためには道具が必要です。最良の道具は、電子と陽電子を衝突させる加速器で、その設計は私たちの手にあります。私はその加速器「国際リニアコライダー」の設計チームを指揮しました。

私たちは今、設計を本物の加速器へと変えたいと強く願っています。ILCはヒッグスの研究を行うことができ、現在予想することすらできない新しい物理が研究できる可能性もあります。新しい物理は、人類の知識を超越し、今は単なる理論に過ぎない、標準理論を超えた場所へと私たちを連れて行ってくれるでしょう。

バリー・バリッシュ博士(2017年ノーベル物理学賞)  
ILC応援メッセージより抜粋

突エネルギーを8TeVから13TeVに上げて実験を続けていますが、現在のところ、標準理論の範疇を超えることを示唆するようなシグナルは見つかっていません。この状況では、ヒッグス粒子に関する精密な測定により、これから先の素粒子物理学の方向を決めるというILCの重要性がますます増してきました。

ILCは重心系エネルギー250GeVでヒッグス粒子を大量生産し詳細に調べるヒッグスファクトリーとして優れた性能を示すため、電子・陽電子衝突エネルギーを250GeVとすることで、建設コストを大幅に削減することができます。LCCでは、ILC計画のこのようなシナリオについて、技術、科学、コストの面から詳細な検討を行いました。その検討結果を踏まえ、LCBでの議論を経て、2017年11月にICFAは、250GeVのILC加速器建設を支持しILC早期実現を奨励する声明を発表しました[参考文献4]。

そこでは、250GeVのILCはヒッグスファクトリーとして素晴らしい科学的成果をもたらすことが期待されること、加速器の建設コストがILC-TDRで見積もられた500GeV加速器に比べて最大40パーセント削減が可能であること、リニアコライダーのエ

ネルギー拡張性が重要であることが述べられています。リニアコライダーは直線型という特徴のため、円形加速器と異なり、エネルギー拡張性に秀でています。

ILCでは、最初に得られるヒッグスファクトリーの結果と、今後実施される高輝度LHC(HL-LHC)実験や現在KEKで進行中のBファクトリー実験結果と合わせて、その時点で、より効率的に新粒子・新現象を発見するための最適なエネルギー増強の道筋を決めることができます。トップクォークの精密測定、暗黒物質の探索、2つのヒッグス粒子の同時生成過程を通じたヒッグス粒子自身の相互作用の決定、あるいは新たに明らかになるであろう新粒子・新現象などに焦点を合わせて、ILCは長期間にわたり素粒子物理学にとってなくてはならない研究環境を提供することができるのです。

ILCの加速器、測定器については第3分冊で紹介します。



図10 / STF  
超伝導RF試験施設では、ILCの最重要技術である超伝導加速技術の開発研究が行われている。写真は加速器の構成要素を世界から持ち寄った試験の様子



図11 / ATF  
先端加速器試験施設(ATF)はILC実現に必要となる「ナノビームの生成、制御」技術の開発研究が行われている世界唯一の試験加速器。写真は最終収束系ビームラインATF-2



図12 / ILC計画のあゆみ  
リニアコライダーの概念が提唱されてから半世紀以上、実現に向けた取り組みが世界で行われ、現在に至っている



図13 / 未来に向けた人材育成  
KEKでは年間60件の出前授業を行い、次世代の科学者育成に貢献している。ILCが実現すれば、より多くの青少年が科学に触れる契機となることは間違いない

## ILCのインパクト

加速器科学や素粒子物理の研究推進には、非常に高度な技術が求められます。それらの要請に応えるために、これまで様々な技術が生み出され、それらが多岐にわたる分野に応用されることで、技術革新の源泉となってきました。ここでは、主としてKEKの加速器科学における実績や経験をもとに、科学的なインパクトだけでなく、人材育成への貢献や技術波及効果についてまとめます。

ILCの第一のインパクトは、重要な科学的成果です。究極の自然法則の解明を目指す素粒子物理学は、今、大きな岐路に立っています。

「ILCがもたらす知の革命」の項で述べたように、「新たな次元」の道、「より深い階層」の道、「複数字宙、あるいは新しい原理の存在」の道のどれが正しい道なのか、あるいは、今まで想像もできなかったような道が拓けるのか、ILC実験の結果により進むべき方向が決まります。

その実験結果によって、素粒子物理学の未解決の謎である、「強い力、弱い力、電磁気力、重力」という自然界の基本的な力が統一されるのか、「クォークやレプトンの多様な性質はどうして決まったのか」、「暗黒物質や暗黒エネルギーの正体は何か」といった問いへの解答が違ってきます。ビッグバンにより宇宙が誕生して次第に冷えていく過程で、どのように現在の姿になったかを解明するためには、素粒子物理学の正しい道を知る必要があるのです。

第二のインパクトは、人を引き付け、人を育

てることです。ILCは世界最先端の科学と技術を結集して初めて可能になる研究施設です。世界中の科学者、技術者がボーダーレスに協力します。実験施設の建設、実験の実施のためには、常時数千人の人々が、ある時はそれぞれの国の研究施設で、ある時はILC実験施設に集まって共同研究、共同作業を長期間にわたって続けることになります。

毎年多くの大学院生や若い研究者が世界中から参入します。プロジェクトで育つ人材は、次世代の素粒子実験分野を支える研究者だけではありません。高度な基礎科学プロジェクトを経験した人材は、他分野の科学や技術の世界、産業界、国際機関等で活躍の場を広げることができます。ILCはまさに世界の人材育成拠点となるのです。

日本がこのような高度な人材を世界に輩出する拠点を持つことは、大きな国際貢献といえます。ホスト国の責任を担う人材が日本から多く育成され、日本が科学の世界で国際社会をリード

する絶好の機会になります。

また、ILCは究極の自然法則の解明を目指す、世界で最も進んだ研究施設となります。このような施設が身近にあることは、子供たちに夢を与えることになるでしょう。その中から、素粒子物理学に限らず、次世代の科学者が育ってくれることを願います(図13)。

第三のインパクトは、ILCの技術的、経済的な波及効果です。加速器施設や実験施設のため

の測定器は様々な技術を集めて作られます。これまで、加速器技術、測定器技術、また実験解析のための情報技術は、医療、産業、情報通信など広い分野に応用されてきました。世界最先端の技術を集めて初めて可能になるILCは、さらなるイノベーションの源泉になることが可能です(図14)。これについては、第4分冊で詳しく紹介します。

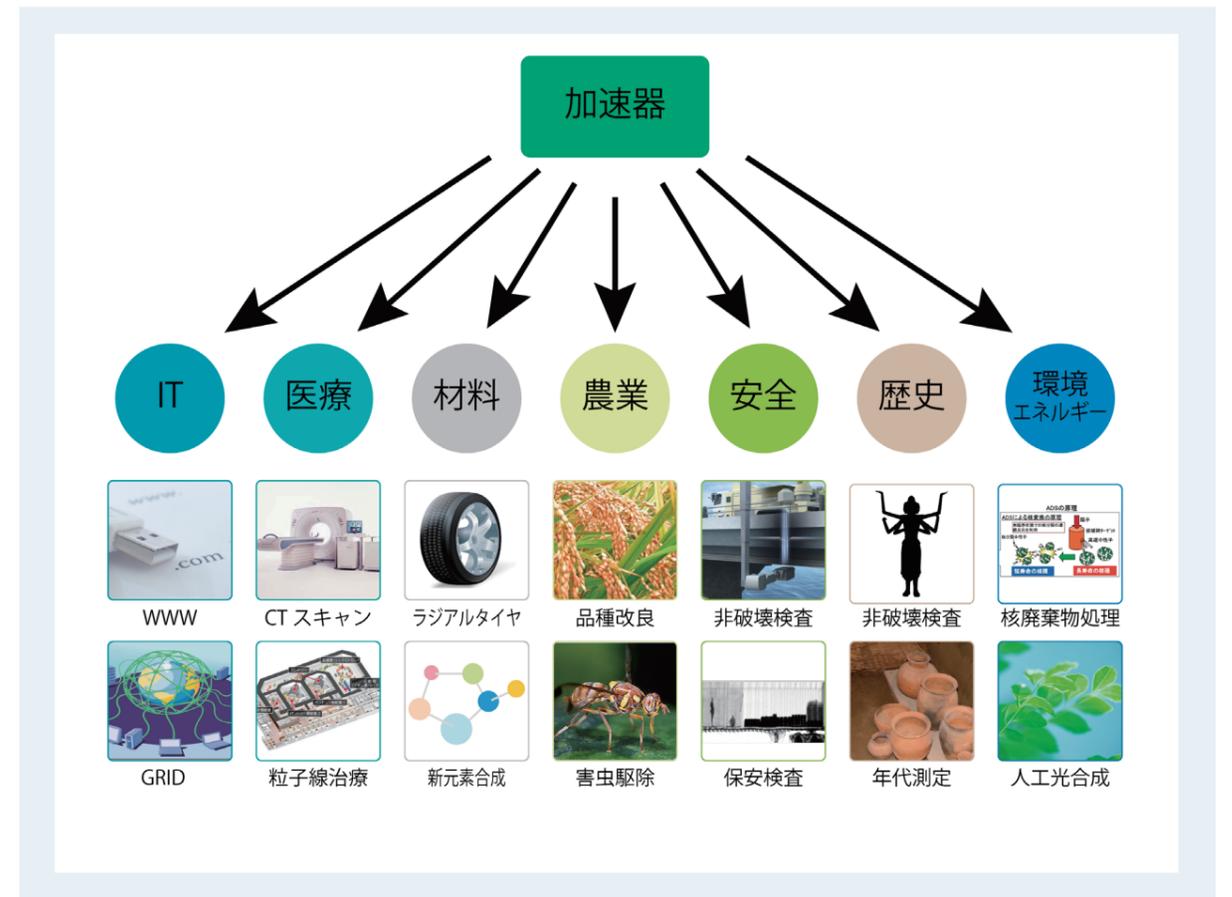


図14 / 加速器による技術波及効果

加速器は産業、医療から農業、セキュリティ分野まで、多岐にわたる分野で応用が可能



図15/ 2016年12月に日本で開催されたリニアコライダーに関する国際スクール。12ヶ国の50人の大学院生が富士山の麓に集った

## ILC実現に向けて

ILC計画は、世界の研究者コミュニティが初期段階から共同で設計、研究開発を行ってきました。中でもKEKは、これまで大きな役割を担ってきました。今後もILC実現に向けて世界の研究者とともに必要な準備を牽引していきます。

KEKは日本の加速器科学の総合的発展の拠点として、新しいサイエンスや応用研究のフロンティアを推進する駆動力となってきました。KEKの特徴は、世界の加速器科学の中核拠点として、国際的に開かれた環境で研究を進めている点です。2016年度の統計では、年間受入共同研究者約7,600人のうち約2割の1,699人が外国研究機関の研究者です(図16)。また、100以上の外国研究機関と国際学術交流協定を結んでいます。

KEKのBファクトリーにおける「B中間子によるCP対称性の破れの発見」は、2008年の小林誠、益川敏英両博士のノーベル物理学

賞受賞へとつながりました。これを遂行したのは、BELLE実験という約400人の国際共同実験チームです。現在は、Bファクトリーの高度化を進めており、その実験チームであるBELLE IIコラボレーションへの参加数は、すでに25か国、約750人に上ります。

日本のお家芸であるニュートリノ物理実験のT2K実験には、11か国、約500人の研究者が参加しています。外国の研究者にとっても、日本がホストする大型国際共同研究に参加する経験はすでに十分あると言えます。また、アジアの中核の加速器研究所として、KEKは様々な国際スクールを開催し、人材育成に努めています(図15)。

現在KEKでは、研究上の明確な位置付けを行ってILCの準備を進めています。2013年に、KEKの研究の指針を示す「KEKロードマップ2013」を策定しました。その中で、ILCについては「日本がホストするILC計画を

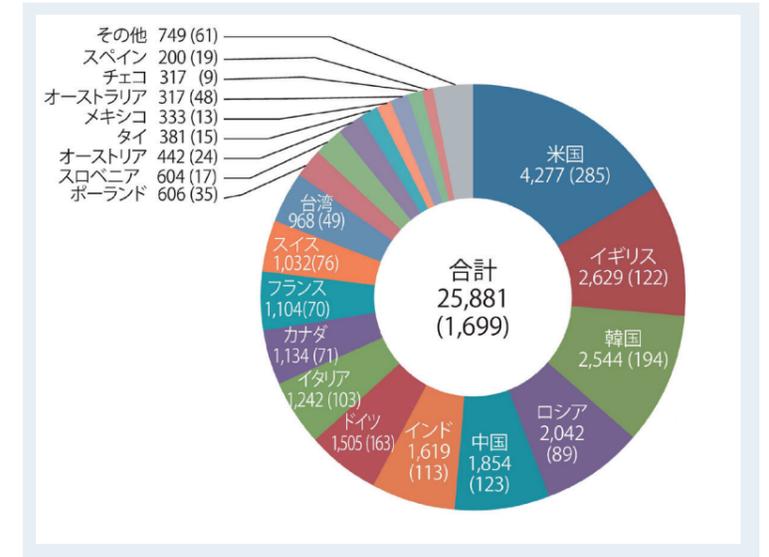


図16/ KEKの2016年度外国機関共同研究者受け入れ数。43の国と地域からの研究者を受け入れた  
単位:延人日(実人数)

推進するために国際準備組織を立ち上げ、装置、施設・設備、研究所組織の詳細設計などに取り組み、国際協力の枠組みによる建設着手を目指す」と記載しました[参考文献4]。

2014年、KEKはILC推進準備室を設置。機構長を室長として、機構内外の方々と連携して、ILC実現に向けた様々な活動を展開する体制を整えました。

世界中の高度で専門的な知識や技術を持つ人材の協力が必要です。このため、世界の科学者コミュニティは計画検討の初期から国際的に経費を分担して、世界に一つ建設することを目指してきました。ホスト国のみならず、主要な参加国、参加機関で、経費分担について合意をする必要があります。

今後は、「予備準備期間」「本準備期間」そして「本建設期間」の三つの段階を経る必要があります。現状は「予備準備期間」に相当し、リニアコライダー・コラボレーション(LCC)が中核となって、文部科学省有識者会議の提言で示された課題へ取り組み、加速器及び測定器のさらなる詳細な設計、建設計画の策定、ビーム加速試験、加速器建設とプロジェクト運営の母体となる国際組織の制度設計と国際準備組織からの移行計画の策定を行っています。

続く「本準備期間」は、日本政府が正式に国際パートナーとILCプロジェクト参加

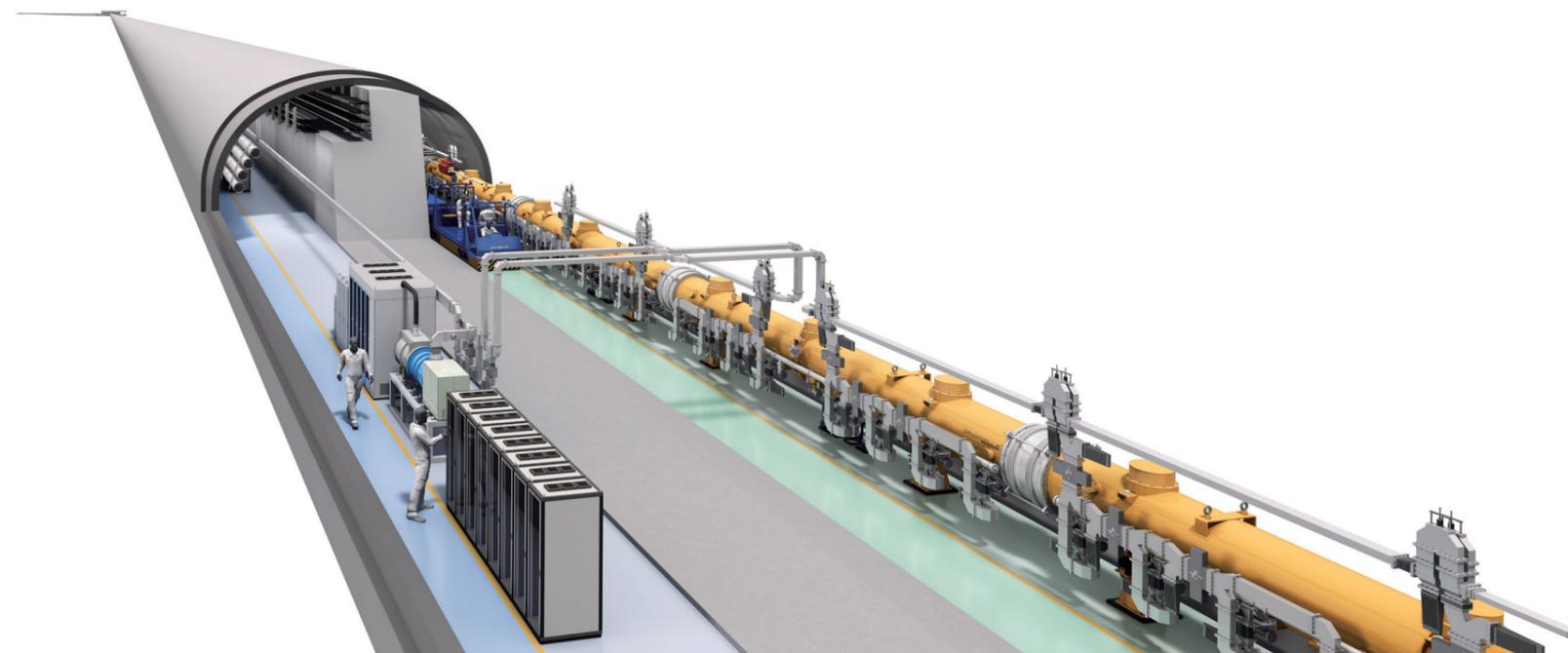
交渉を始める段階です。この期間にKEKは、CERN、DESY、米国フェルミ国立加速器研究所等の世界の主要加速器研究所と連携して、研究機関同士の合意に基づきILC準備組織を立ち上げ、加速器の工学設計、建設に向けた最終的な技術開発、調達及び量産体制整備等の準備を行います。また、準備組織は建設合意に向けた政府間交渉を補佐し、プロジェクト承認への活動を牽引します。

政府間合意が得られILC計画が正式承認された時点で「本建設期間」に入り、ILC研究所(仮称)を発足させプロジェクトを開始します。ILC研究所の組織や役割については、リニアコライダー国際推進委員会(LCB)で検討されてきました。KEKが準備期間に行うべきことは、「KEK-ILCアクションプラン」とし公表されています[参考文献5]。

ILC-TDRによると施設及び装置の建設を行う本建設期間には9年が必要です。本準備期間を4年間をとすると、本格的な衝突実験の開始は2030年代初頭になります。約10年間の実験遂行及び、その研究結果を踏まえてその時点で最適なアップグレード計画を立て実現させることを考えると、ILCは21世紀の素粒子物理学を牽引する実験施設となると期待されます。

## 参考文献

1. Linear Collider Collaboration (LCC), ILC technical design report, 2013  
<http://www.linearcollider.org/ILC/Publications/Technical-Design-Report>
2. 高エネルギー物理学研究者会議, 国際リニアコライダー計画の段階的実施案について, 2012  
[http://www.jahep.org/office/doc/201210\\_ILC\\_staging\\_c.pdf](http://www.jahep.org/office/doc/201210_ILC_staging_c.pdf)
3. 高エネルギー物理学研究者会議, LHC RunII のこれまでの結果を踏まえたILCの科学的意義と ILC早期実現の提案, 2017  
<http://www.jahep.org/files/JAHEP-ILCstatement-20170722.pdf>
4. 高エネルギー物理学研究機構 トピックス, ICFA 250GeVのILC加速器建設を支持しILC早期実現を奨励, 2017  
<http://www.kek.jp/ja/NewsRoom/Release/20171110020000/>
5. KEK ロードマップ 2013  
<http://www.kek.jp/ja/About/OrganizationOverview/Assessment/Roadmap/roadmap2013-J.pdf>
6. 高エネルギー加速器研究機構 トピックス, 国際リニアコライダーの「KEK-ILCアクションプラン」を策定, 2016  
<http://www.kek.jp/ja/NewsRoom/Release/20160106140000/>



# 国際リニアコライダー その展望とKEKの取組み

KEK PROGRESS REPORT 2017-13

© HIGH ENERGY ACCELERATOR RESEARCH ORGANIZATION (KEK), 2018

---

高エネルギー加速器研究機構  
ILC推進準備室  
〒305-0801  
茨城県つくば市大穂1-1

Email  
ilc-cu@ml-post.kek.jp  
Tel  
029-879-6291