

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（案） 【概要版】

## 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）

### ○素粒子物理学の歴史と現状

- ・素粒子物理学は加速器、特に近年は衝突型加速器の進歩と共に大きな発展を遂げた。
- ・20 世紀中には素粒子の標準理論の正しさは、ほぼ確固たるものとなった。
- ・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た。
- ・標準理論が究極の理論でないことも広く認識されるようになった。
- ・素粒子物理学の次の大きな流れは標準理論を超える物理の探求。

### ○国際リニアコライダー（ILC）計画は以下の事項について実験、探索を行う施設

- ①ヒッグス粒子の全容詳細解明とトップクォークの詳細測定
- ②新粒子（超対称性粒子等）の探索
- ③その他（ダークマターや余剰次元）

○上記の検証は素粒子物理学の将来的な課題として重要な科学的な意義がある

## 2. 必要経費（技術設計報告書（TDR）検証作業部会から転載）

- 加速器本体及びそれを設置するトンネルの整備：8,300 億円程度  
（上記の他、実験の観測を行う測定器や建設等に係る労務費が必要）
- 加速器施設建設費総計：1 兆 1 千億円程度（労務費を含む）
- 運転経費：400 億円程度／年
- 経費負担は国際分担

## 3. 過去の加速器整備での建設費の実例

### ①国内の実例

- ・これまでの加速器関連の施設は一番大きな施設でも 1,500 億円程度

### ②海外の実例

- ・世界最大の加速器：欧州合同原子核研究機関（CERN）・LHC 加速器（加速器整備費約 5,000 億円+既存の施設とトンネル+人件費のコスト約 5,000 億円、ただしトンネル工事は除く）
- ・LHC は欧州 20 カ国（当時）の国際機関である CERN が建設整備（他日米露等が協力参加）
- ・LHC は建設開始時に過去の実験データと標準理論に基づいた場合に基づき、ヒッグス粒子発見について明確な見通しあり。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。

## 4. 技術設計報告書（TDR）で示された ILC で実施できる研究

○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；

- ・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を探索
- ・超対称性粒子（SUSY）の探索も重要な候補（ただし、エネルギー増強後のLHCにおいて強い相互作用をするSUSYの探索を実施予定（主に2015～17年））
- ・ダークマターや、余剰次元等 ~~SUSY以外の新粒子~~の探索も候補

## 5. 投資に見合うかの判断の留意点

~~○ILCの性能等、研究の最適な戦略見通しについて、LHCにおける強い相互作用をするSUSY等の探索結果研究の最適な戦略見通しについては、高度化後のLHC(13 TeV LHC)における強い相互作用をするSUSY等の探索結果を踏まえて明確化検討すべき。~~

~~○実施の可否についても、上記の検討を踏まえて判断すべき~~

~~○既存の加速器を用いた実験により探索領域がある程度絞り込まれている場合、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の検証すべき~~

○ILCは巨額の経費を要する国際計画であることから、我が国の財政状況に鑑み、国際協力による応分の経費分担を前提とすべきが**必要不可欠**

○ILC計画の投資額の規模に鑑みると、~~本プロジェクトを優先すべきとの~~他の科学分野コミュニティの理解・協力を得ることが**重要を前提とすべき**

○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、判断の遅延を招かないよう体制の整備が**重要**

## 6. 高度化後のLHC（13 TeV LHC）の成果を踏まえたILC等のシナリオ

- （1）13 TeV LHCで新粒子（超対称性粒子の可能性のある粒子）が発見された場合  
方針：ILCにより、ヒッグス粒子等の精密測定から、新粒子の背後にある物理現象を**解明する**。ILCのエネルギーが十分であれば、LHCでの発見に関連する新粒子の発見が期待される。
- （2）上記以外の新現象（暗黒物質等）と思われる事象の兆候を観測（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。
- （3）13 TeV LHCで新粒子や新現象が観測されない場合  
方針：ヒッグス粒子等の精密測定により、標準理論を超える物理を探索**する**。LHCでは**検出が困難なタイプの新粒子も探索**。13 TeV LHCでの未発見原因を精査し、将来のエネルギーアップグレードが**必要か検討の必要性を検討**。

~~※いずれの場合も、ILC計画の実施の可否判断において、必要な加速器のエネルギーなど~~

~~の性能を考慮の上、期待される成果が投資に見合うと広く認識されるかの検証が必要で、  
上記シナリオはこれらの検証を経て、ILC計画を実施することとした場合の方針である~~



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（案） 【詳細版】

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（別紙参照）。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（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

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）

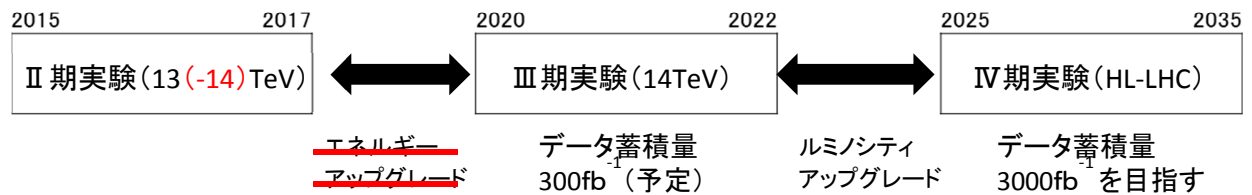
○素粒子物理学の歴史と現状

20 世紀の後半以降素粒子物理学は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。それと共に、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、~~重力以外の~~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。

○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<sup>\*</sup>。それと共に、大強度を目指した加速器である KEKB や 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



注 fb<sup>-1</sup>(インバースフェムトバーン): 衝突量を表す単位。現状の LHC では 1fb<sup>-1</sup> は約 70 兆回の衝突に匹敵する、

○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 の目指す研究は基本的に素粒子の標準理論を超える新物理探索と解明で、**非常に重要であり**、その内容は以下の通りである。

- (1) ヒッグス粒子の全容解明やトップクォークの詳細研究から標準理論を超える物理の証拠を探索する
- (2) 超対称性粒子 (SUSY) などの新物理の探索、及び発見された場合その詳細研究※
- (3) その他 (**ダークマターや余剰次元**)

※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**どの程度まで解明到達**し得るか**等の点**にも留意が必要

## 2. 必要経費 (技術設計報告書 (TDR) 検証作業部会から転載)

○加速器本体及びそれを設置するトンネルの整備 : 8,300 億円程度 (1 ドル=100 円、1 ユーロ=115 円と設定)

(上記の他、**実験の観測を行う**測定器や建設等に係る労務費が必要)

○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)

○運転経費 : 400 億円程度/年

○経費負担は国際分担

## 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。

※大強度陽子加速器（J-PARC）施設 1,524 億円

この他、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

### ○LHC（大型陽子加速器）

- ・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 ~~加速器~~（CERN での既存加速器に追加し、LEP（大型電子・陽電子衝突型加速器）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 ~~トンネル工事は除く~~）。
- ・LHC は ~~欧州 20 カ国（当時）~~ 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 ~~協力参加~~。
- ・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、ヒッグス粒子発見について ~~明確な~~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（発見あるなしにかかわらず）標準理論に根幹に大きな影響を与えたと考えられていた。

### ○SSC（超伝導超大型衝突型加速器）

- ・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（超伝導超大型衝突型加速器）がある。
- ・本計画では、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、以下のような理由があげられる等により ~~中止に追い込まれた~~。
  - A) ~~米国内の予算が緊縮財政に転換されたこと~~ ~~建設地の選定が妥当でなかったこと~~
  - B) ~~設計変更等による経費の増加により巨額の経費がかかることが判明~~（45 億ドル → 110 億ドル）
  - C) ~~SSC の波及効果~~ ~~実験成果~~が誇張されており、反発を招いたこと
  - D) ~~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

○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 ~~全容~~ ~~説明~~ 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（SUSY）」等の新粒子探索も重要な課題候補（ただし、強い相互作用をする SUSY 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）
- ・ダークマターや、余剰次元等 ~~SUSY 以外の新粒子~~ の探索も候補

## 5. 投資に見合うかの判断の留意点

○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、高度化後の LHC（13 TeV LHC）における強い相互作用をする SUSY 等の探索結果を踏まえて明確化すべき ~~ILC の性能を検討すべき~~

~~○実施の可否についても、その結果を踏まえて判断すべき~~

○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、~~既存の加速器を用いた実験により探索領域がある程度絞り込まれている場合、~~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、~~ることから、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、ILC にかかる経費について我が国がホスト国として負担をする範囲には二とは~~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が ~~必要不可欠~~

○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 ~~予算~~ を含む他の学問分野の研究 ~~予算~~ 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。~~ことは免れない可能性があり、その場合は、本プロジェクトを優先すべきとの他の科学分野コミュニティの理解・協力を得ることを前提とすべき~~

○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. 高度化後の LHC（13 TeV LHC）の成果を踏まえた ILC 等のシナリオ

高度化後の LHC（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通り。

- （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のある粒子）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。~~エネルギーが十分であれば、LHCでの発見に関連する新粒子が~~ ILCで直接見える可能性が高い場合は、新粒子の発見が期待される。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。

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を観測（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を観測し、大きな発見と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粒子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）を探索する。またILCはLHでは検出が困難なタイプの新粒子にも感度があるため、これらの新粒子探索も行う。13 TeV LHCでの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。

~~※いずれの場合も、ILC計画の実施の可否判断において、必要な加速器のエネルギーなどの性能を考慮の上、期待される成果が投資に見合うと広く認識されるかの検証が必要で、上記シナリオはこれらの検証を経て、ILC計画を実施することとした場合の方針である~~

素粒子原子核物理作業部会 開催実績

第1回 (平成26年6月24日)

- ・ 作業部会の議論の進め方について
- ・ 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)

- ・ これまでの議論のとりまとめ

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)
- ・ 今後の進め方について

第7回 (平成27年2月17日)

- ・ 科学的意義の整理
- ・ 投資に見合うかの判断の留意点について
- ・ これまでの議論のとりまとめ

第8回 (平成27年3月30日)

- ・ これまでの議論のとりまとめ