

国立国会図書館 調査及び立法考査局

Research and Legislative Reference Bureau
National Diet Library

論題 Title	次世代大型衝突型加速器の国際計画動向—ヒッグスファクトリー実現へ向けて—
他言語論題 Title in other language	International Planning for a New Collider: For Realization of the Higgs Factory
著者 / 所属 Author(s)	福田 一貴 (FUKUDA Kazuki) / 国立国会図書館調査及び立法考査局 文教科学技術課
雑誌名 Journal	レファレンス (The Reference)
編集 Editor	国立国会図書館 調査及び立法考査局
発行 Publisher	国立国会図書館
通号 Number	853
刊行日 Issue Date	2022-1-20
ページ Pages	77-103
ISSN	0034-2912
本文の言語 Language	日本語 (Japanese)
摘要 Abstract	2012 年に発見されたヒッグス粒子の性質を研究するために、研究者により国際リニアコライダーを含む 4 つの大型衝突型加速器が計画されており、これらの国際的な計画動向を紹介する。

* この記事は、調査及び立法考査局内において、国政審議に係る有用性、記述の中立性、客観性及び正確性、論旨の明晰（めいせき）性等の観点からの審査を経たものです。

* 本文中の意見にわたる部分は、筆者の個人的見解です。

次世代大型衝突型加速器の国際計画動向

—ヒッグスファクトリー実現へ向けて—

国立国会図書館 調査及び立法考査局
文教科学技術課 福田 一貴

目 次

はじめに

I 素粒子物理学の基礎

- 1 原子の構造と素粒子
- 2 自然界で作用する4つの力
- 3 標準模型

II 衝突型加速器の概要

- 1 加速器実験の概要
- 2 円形衝突型加速器と直線形衝突型加速器
- 3 陽子・(反)陽子衝突型加速器と電子・陽電子衝突型加速器

III 衝突型加速器による研究成果及び今後の展望

- 1 衝突型加速器による過去の研究成果
- 2 次世代の大型衝突型加速器として提案されている4つのヒッグスファクトリー計画

IV 国際リニアコライダー (ILC)

- 1 計画の経緯
- 2 建設・実験計画

V コンパクト・リニアコライダー (CLIC)

- 1 計画の経緯
- 2 建設・実験計画

VI 将来円形衝突型加速器 (FCC)

- 1 計画の経緯
- 2 FCC-ee の建設・実験計画
- 3 FCC-hh の建設・実験計画

VII 円形電子・陽電子衝突型加速器 (CEPC)

- 1 計画の経緯
- 2 建設・実験計画

おわりに

別表 研究者によって計画中の4つの大型衝突型加速器 (電子・陽電子衝突型のみ)

キーワード：衝突型加速器、素粒子物理学、ヒッグス粒子、国際リニアコライダー (ILC)

要 旨

- ① 物質を細分化し、それ以上分割できない最も基本的な構成要素が素粒子であり、その様々な性質等を研究する学問が素粒子物理学である。素粒子物理学の研究により、17種類の素粒子を含む標準模型という理論が構築され、ミクロの世界の多くの現象を説明することが可能になった。しかし、まだ不完全な部分もあり、拡張した新しい理論の構築が目標となっている。
- ② 素粒子物理学の実験では人為的に高エネルギー状態をつくる必要があり、2つの加速した粒子が正面衝突する衝突型加速器（コライダー）が利用されてきた。衝突型加速器には、円形及び直線形のものがあり、衝突させる粒子として、陽子・（反）陽子を用いる場合及び電子・陽電子を用いる場合がある。サイズの大きな衝突型加速器を利用することでより高エネルギーが実現でき、標準模型に含まれる最後の素粒子であるヒッグス粒子を発見した円形の衝突型加速器は、全周約 27km という巨大な装置であった。
- ③ ヒッグス粒子は、素粒子に質量を与える機構に関わる全く新しい素粒子であり、その精密測定が行われることによって、標準模型を拡張した新しい理論が構築されることが期待される。そのため、ヒッグス粒子を大量生産する「ヒッグスファクトリー」として機能する新たな大型の衝突型加速器として、国際リニアコライダー（ILC）、コンパクト・リニアコライダー（CLIC）、将来円形衝突型加速器（FCC）、円形電子・陽電子衝突型加速器（CEPC）の4つの計画が、世界中の素粒子物理学の研究者によって提案されている。ILCとCLICは直線形で全長10km以上、FCCとCEPCは円形で全周約100kmと、非常に巨大な装置である。
- ④ 4つの計画のいずれかがヒッグスファクトリーとして実現した場合には、ヒッグス粒子の精密測定が達成され、標準模型を拡張した新しい理論を構築できる可能性がある。また、次世代の大型衝突型加速器は、全世界が協力して運営する国際的な研究拠点となり、研究者間の協働と各国の行政間の協力関係を促進させる役割を果たすことが期待される。一方で、いずれの計画も研究者によって推進されている状況で、各国政府が公式に承認したり、推進したりしている段階ではない。その背景には、巨額の投資が必要であり、一国のみで計画を実現することが困難な状況がある。大型衝突型加速器の建設を実現するためには、ホスト国がリーダーシップを発揮して、国際的な経費分担を取り決めることが必要不可欠である。国民及び科学コミュニティの理解を得ながら、慎重に検討を進めていくことが求められる。

はじめに

自然界の物質を細分していき、それ以上分割することができない最も基本的な構成要素が素粒子である。この素粒子の性質や構造、素粒子間の相互作用を研究する学問が素粒子物理学である。この学問の研究は、ミクロの世界の現象だけではなく、宇宙の誕生直後の歴史を解明することにつながるため、現代物理学を構成する重要な研究分野の1つである。

素粒子物理学は、1897年にジョセフ・ジョン・トムソン (Joseph John Thomson) が電子を発見して以来、理論と実験を両輪として研究成果が積み重ねられ、発展を続けてきた⁽¹⁾。素粒子の中には、ミュー粒子⁽²⁾のように実験で発見された後に理論上の位置付けを与えられたものもあれば、3種類のニュートリノ⁽³⁾のように理論で提唱された後に実験で発見されたものもある。

日本出身の研究者の貢献も大きく、原子核を構成する陽子及び中性子⁽⁴⁾を結び付ける力に関わる中間子の理論を提唱した湯川秀樹博士から、ニュートリノに質量があることを示す現象を発見した梶田隆章東京大学教授まで、素粒子物理学に関連する分野でノーベル物理学賞を受賞した日本出身者は7名⁽⁵⁾を数える。

なお、素粒子物理学は基礎科学であるため、短期的に何に役立つのかを明言するのは困難であるが、長期的な観点で欠かせない技術に発展している事例がある。1932年に発見された素粒子である陽電子は、1970年代以降に医療現場で使われる陽電子放射断層撮影法 (Positron Emission Tomography: PET) として実用化された⁽⁶⁾。この撮影法により、中枢神経系の疾患 (認知症、てんかん、脳腫瘍等) やがん等の診断が可能である⁽⁷⁾。1936年に発見されたミュー粒子は、1955年以降に遺跡や火山、原子炉等の内部の撮影 (ミュオグラフィと呼ばれる) に利用されている⁽⁸⁾。2011年の東日本大震災の後に、福島第一原子力発電所の原子炉内部の圧力容器内から核燃料が溶け落ちていることを可視化するためにも、ミュオグラフィが使用された⁽⁹⁾。

*本稿におけるインターネット情報の最終アクセス日は、令和3 (2021) 年 11 月 25 日である。日本円換算は令和3 (2021) 年 12 月分報告省令レートに基づき、1 スイスフラン = 122.0 円、1 人民元 = 17.6 円として行い、適宜四捨五入した。

- (1) David J. Griffiths (花垣和則・波場直之訳) 『グリフィス素粒子物理学』丸善出版, 2019, pp.13-56. (原書名: David J. Griffiths, *Introduction to Elementary Particles*, Second Edition, Weinheim: Wiley-VCH, 2008.)
- (2) 1936年に発見された当初は、湯川秀樹が1934年に理論上で予測した中間子であると考えられたが、1940年代後半に別種の新しい素粒子であることが判明した。同上, pp.19-21.
- (3) 後述するβ崩壊の研究において、変化前後のエネルギー保存則が成立しないように見えることが判明した。この現象は、未知の素粒子がエネルギーを持ち逃げしているためであるとの仮説が1930年に出され、1950年代に実験でこの素粒子が発見されて仮説の正しさが確かめられた。この素粒子が電子ニュートリノである。他の2種類のニュートリノも、理論で提唱された後に実験で発見に至っている。同上, pp.24-31.
- (4) 陽子 (1910年代に発見) 及び中性子 (1932年に発見) は、どちらも複数の素粒子から構成される複合粒子であるが、発見当初は内部の構造について解明されておらず、1960年代以降にクォークの概念が導入されるまでそれ自身が素粒子であると考えられていた。同上, pp.13-15, 40-46.
- (5) 湯川秀樹 (1949年受賞)、朝永振一郎 (1965年受賞)、小柴昌俊 (2002年受賞)、南部陽一郎、小林誠及び益川敏英 (3名とも2008年受賞)、梶田隆章 (2015年受賞) の7名。"All Nobel Prizes in Physics." The Nobel Prize Website <<https://www.nobelprize.org/prizes/lists/all-nobel-prizes-in-physics/>>
- (6) Gerd Muehlehner and Joel S. Karp, "Positron emission tomography," *Physics in Medicine & Biology*, Vol.51 No.13, 7 July 2006, pp.R119-R120. <<http://dx.doi.org/10.1088/0031-9155/51/13/R08>>
- (7) 『PET 検査 Q&A 改訂4版』日本核医学会・日本アイソトープ協会, 2015, pp.6, 13. <https://www.jrias.or.jp/pet/pdf/petkensa_q_and_a_2019.pdf>
- (8) P. Checchia, "Review of possible applications of cosmic muon tomography," *Journal of Instrumentation*, Vol.11 No.12, December 2016, C12072. <<http://dx.doi.org/10.1088/1748-0221/11/12/C12072>>
- (9) 「核燃料、ほぼ全て溶融」福島第1の1号機を透視『日本経済新聞』2015.3.20, p.46.

素粒子物理学の研究で用いられる実験装置が、粒子同士を人為的に加速して衝突させる衝突型加速器（コライダー）である。多くの発見に貢献してきた衝突型加速器は、2012年にヒッグス粒子の発見に至った⁽¹⁰⁾。ヒッグス粒子は、素粒子に質量を与える機構に関わる全く新しい素粒子であり、更なる詳細な研究を行うことによって素粒子物理学の進歩が期待される。そのため、世界では新たな大型の衝突型加速器として、国際リニアコライダー（International Linear Collider: ILC）、コンパクト・リニアコライダー（Compact Linear Collider: CLIC）、将来円形衝突型加速器（Future Circular Collider: FCC）、円形電子・陽電子衝突型加速器（Circular Electron Positron Collider: CEPC）の4つの計画が、研究者によって提案されている。

本稿では、素粒子物理学や衝突型加速器の基礎について説明するとともに、4つの次世代大型衝突型加速器について、これまでの計画動向及び今後の予定について紹介する。また、末尾にこれら4つの概要一覧を別表に取りまとめて掲載した。

I 素粒子物理学の基礎

本章では、素粒子物理学の基礎知識を概観する。まず第1節で、原子とその内部に存在する素粒子について解説する。第2節では、自然界で作用する4つの力が存在し、それらの力と素粒子の間には密接な関わりがあることを説明する。第3節では、4つの力のうち3つを統合的に説明する標準模型という理論及びその理論で扱われる素粒子17種類を紹介する。

1 原子の構造と素粒子

身の回りの物質は、原子から構成されている。原子は、化学的性質を示すための最小単位であり、正の電荷を持つ1つの原子核と、その周囲に存在する負の電荷を持つ電子（electron: e^- ）から構成される（図1）。電子は素粒子であるが、原子核は複数の素粒子から成る複合粒子である。原子の大きさは1000万分の1ミリメートル程度と非常に小さいが、原子核は1兆分の1～1000億分の1ミリメートル程度であり、更に小さい。原子核の大きさを野球場程度まで拡大すると、原子の大きさは地球サイズに相当し、原子は非常に隙間の多い構造を持つ⁽¹¹⁾。

原子核は核子から構成され、核子には陽子（proton: p）と中性子（neutron: n）の2種類がある。陽子は正の電荷を持つ一方で、中性子は電荷を持たない。陽子1個が持つ電荷と電子1個が持つ電荷は、符号が逆で大きさが等しい。原子核中に含まれる陽子数が原子内の電子数に等しくなることで、原子全体が電氣的に中性になっている。陽子の質量は電子の質量の約1,836倍、中性子の質量は約1,839倍であり、原子全体の質量の大部分を原子核が占めている。

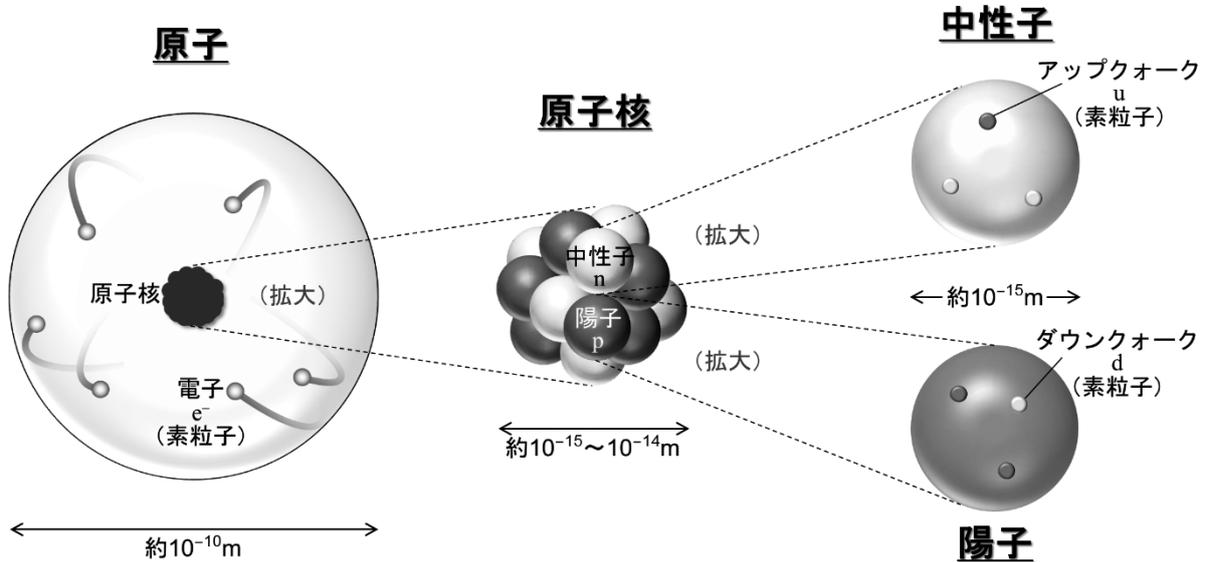
陽子と中性子の内部には、更に小さなクォーク（quark）と呼ばれる素粒子が存在する。クォークには6種類が存在し、その中でもアップクォーク（up: u）とダウンクォーク（down: d）が陽子と中性子の構成要素である。陽子は2個のアップクォークと1個のダウンクォークから、中性子は1個のアップクォークと2個のダウンクォークから構成されている。クォークから構

(10) ATLAS Collaboration, "Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC," *Physics Letters B*, Vol.716 No.1, 17 September 2012, pp.1-29. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.physletb.2012.08.020>>; CMS Collaboration, "Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC," *Physics Letters B*, Vol.716 No.1, 17 September 2012, pp.30-61. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.physletb.2012.08.021>>

(11) 「素粒子とは何か」『Newton』32巻8号, 2012.7, pp.20-21, 26-27; 「物質の素粒子」の仲間」同, pp.28-35.

成される複合粒子は、ハドロン (hadron) と総称される。クォークは6種類もあるため、ハドロンには陽子と中性子以外にも様々なものがある。クォークという非常に小さい素粒子の存在やその種類までが明らかになったのは、後述する衝突型加速器を用いた研究の成果である。

図1 原子・原子核・核子の構造



(出典) 浅井祥仁『LHCの物理—ヒッグス粒子発見とその後の展開—』(基本法則から読み解く物理学最前線 7) 共立出版, 2016, pp.1-3等を基に筆者作成。

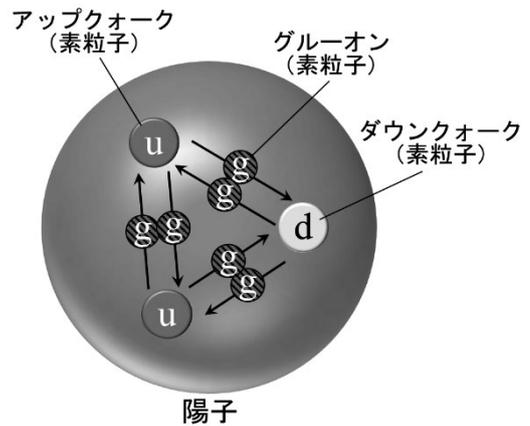
2 自然界で作用する4つの力

物理学の研究により、自然界で作用する力には4種類が存在することが明らかにされている。それは、強い順に、強い相互作用、電磁相互作用、弱い相互作用、重力相互作用の4つである⁽¹²⁾。

強い相互作用は、陽子や中性子等のハドロン内部でクォーク間を結び付ける力であり、クォークがグルーオンという素粒子をやり取りすることで作用する(図2)。グルーオンのようにやり取りされて力を媒介する素粒子は、ゲージ粒子と呼ばれる。強い相互作用は、他の3つの力よりも強いが、原子核内の小さな領域でのみ作用する。

電磁相互作用は、電気と磁気の力である。電気の場合、正電荷と負電荷の間に引力が、正電荷同士及び負電荷同士の間に斥力が働く。磁力の場合、N極とS極の間に引力が、N極同士及びS極同士の間に斥力が働く。電磁相互作用を媒介する素粒子は、光子(光を一種の粒子と見なしたもの)である。こ

図2 陽子内で作用する強い相互作用

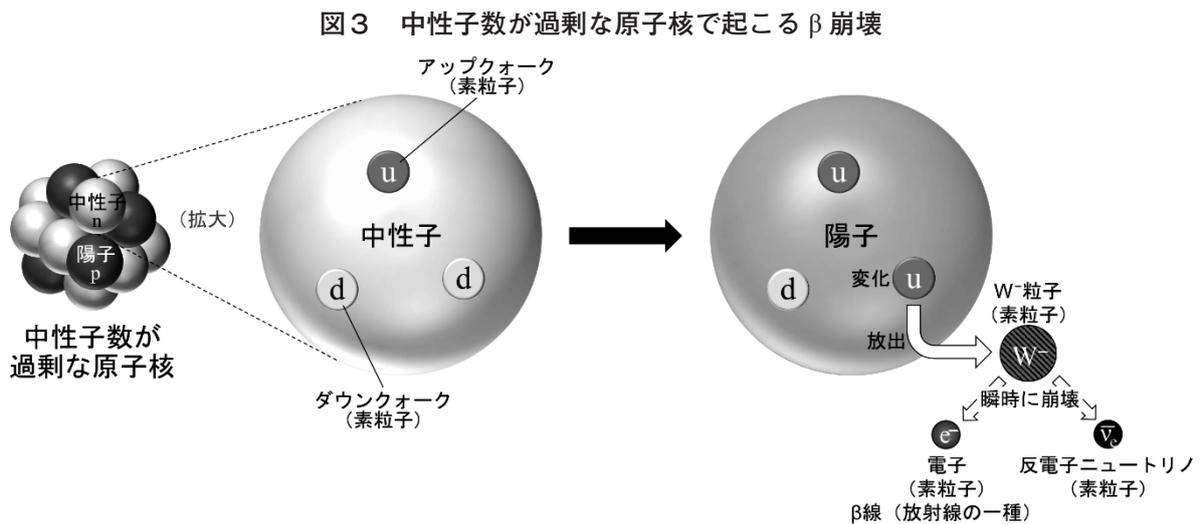


(出典) 「力の素粒子」の仲間『Newton』32巻8号, 2012.7, pp.52-53等を基に筆者作成。

(12) Griffiths 前掲注(1), pp.63-64.

の力は強い相互作用とは異なり、遠方まで作用する。

弱い相互作用は、強い相互作用と同様に原子核内の小さな領域のみで作用する力で、W粒子とZ粒子により媒介される。4つの力の中で、唯一クォークの種類を変化させることが可能である。作用の結果で起こる代表的な現象として、原子核のβ崩壊がある。原子核が安定的に存在するためには陽子数と中性子数のバランスが重要であるが、原子核内の陽子数が過剰又は中性子数が過剰の場合に、他の原子核に変化する過程がβ崩壊である。中性子数が過剰の場合、原子核内の1つの中性子において、内部のダウンクォークからW⁻粒子が放出される。同時に、当該ダウンクォークがアップクォークに変化するため、中性子は陽子に変化する。W⁻粒子は、瞬時に崩壊して電子（放射線の一種のβ線）と反電子ニュートリノを放出する（図3）。この変化を起こす代表的な原子核がトリチウム（陽子1個と中性子2個から構成される原子核を持つ原子）である。また、陽子数が過剰の場合は、原子核内の1つの陽子において、内部のアップクォークからW⁺粒子が放出される。同時に、当該アップクォークがダウンクォークに変化するため、陽子は中性子に変化する。W⁺粒子は、瞬時に崩壊して陽電子と電子ニュートリノを放出する。



(出典) David J. Griffiths (花垣和則・波場直之訳)『グリフィス素粒子物理学』丸善出版, 2019, pp.80-83. (原書名: David J. Griffiths, *Introduction to Elementary Particles*, Second Edition, Weinheim: Wiley-VCH, 2008.)等を基に筆者作成。

重力相互作用は、いわゆる万有引力であり、電磁相互作用と同様に非常に遠方まで作用するという特徴がある。重力は他の力と比較して非常に小さいため、ミクロの世界における理論は解明されていない。媒介する素粒子として重力子（グラビトン）の存在が予言されているが、未発見である。

3 標準模型

4種類の力のうち、重力相互作用以外の3つの相互作用が関わる様々な実験結果を適切に説明するために数式で表した理論として、1970年代以降に構築されてきたのが、標準模型(Standard Model)である。標準模型には計17種類の素粒子が含まれ、6種類のクォーク、6種類のレプトン、4種類のゲージ粒子、1種類のヒッグス粒子から成る(図4)。質量の小さな素粒子は安定であるが、質量の大きな素粒子は不安定であり、短時間で崩壊して質量のより小さ

い別の粒子に変化するという共通した性質がある⁽¹³⁾。

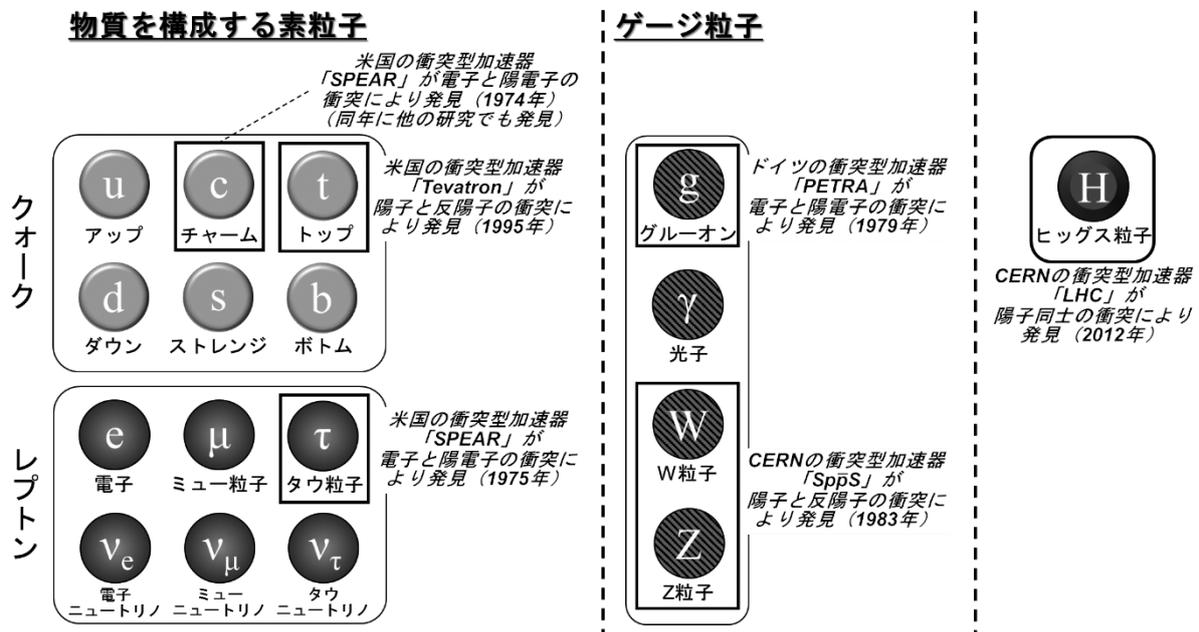
クォークはハドロンを構成し、強い相互作用に関わる素粒子のグループである。質量の小さなアップ・ダウンの2種類は、安定して存在することができる。一方、チャーム・ストレンジ・トップ・ボトムの4種類は、アップ・ダウンの2種類よりも質量が大きく、短時間で崩壊する。

レプトンは、強い相互作用をしない素粒子のグループで、電子、ミュー粒子、タウ粒子、3種類のニュートリノから成る。電子は質量が小さく、安定である。一方、ミュー粒子とタウ粒子は電子よりも質量が大きく、短時間で崩壊する。3種類のニュートリノについては、従来質量が0と考えられていたが、1998年に初めて質量があることが明らかになった段階であり、性質の多くが未解明である⁽¹⁴⁾。以上のクォークとレプトンが物質を構成する素粒子である。

ゲージ粒子は、素粒子間の相互作用を媒介する素粒子である。強い相互作用に関わるグルーオン、電磁相互作用に関わる光子、弱い相互作用に関わるW粒子とZ粒子がある。質量が0のグルーオンと光子は安定である。W粒子とZ粒子は質量が大きく、瞬時に崩壊する。W粒子については、中性子及び陽子のβ崩壊の過程で説明したとおりである。

そして、2012年に発見されたヒッグス粒子は、物質を構成する素粒子やゲージ粒子に含まれない全く別の種類の素粒子であり、クォークやレプトン、W粒子とZ粒子に質量を与える機構に関わる。ヒッグス粒子は質量が大きく、短時間で崩壊して質量のより小さな粒子に変化する。変化後の粒子が検出・測定されることで、発見につながった。

図4 標準模型に含まれる素粒子及び発見に関わった衝突型加速器



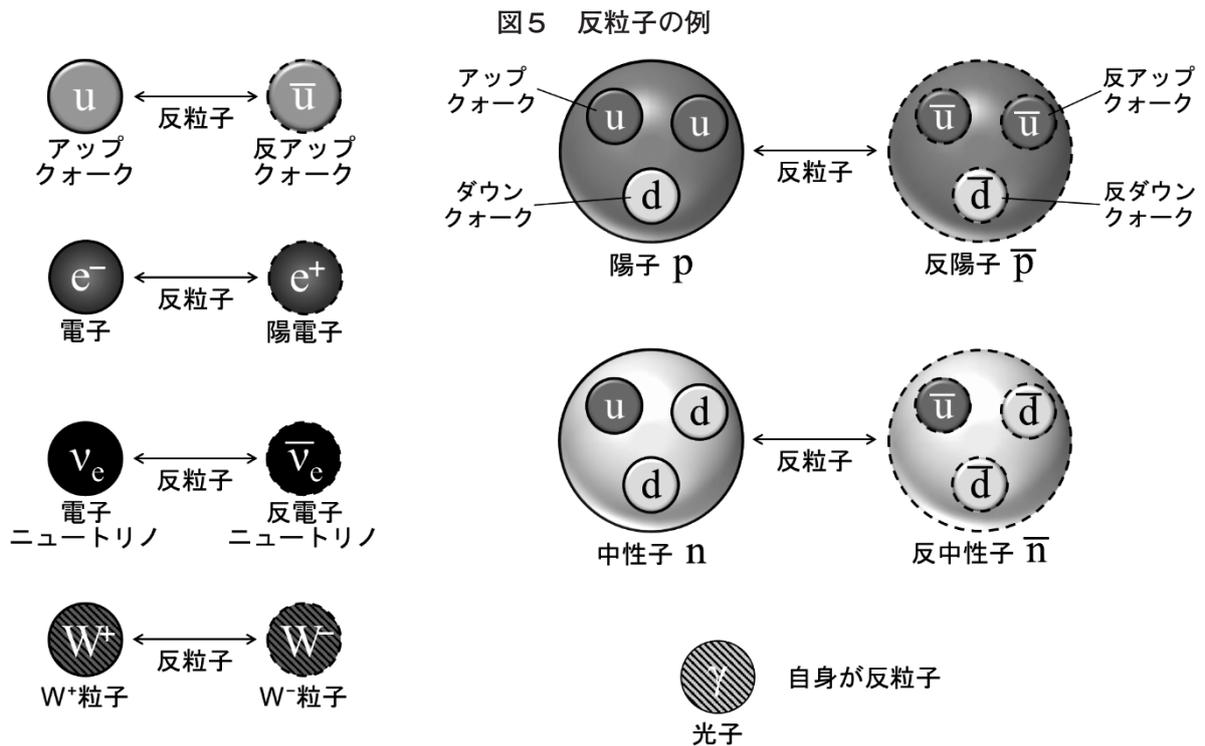
(注) この図では、反粒子が存在する場合でも区別していない。例えば、この図中の電子 (e) は、互いに反粒子の関係である電子 (e⁻) と陽電子 (e⁺) の両者を意味している。

(出典) “The Standard Model.” CERN Website <<https://home.cern/science/physics/standard-model>>; 各素粒子の発見を報告する論文等を基に筆者作成。

(13) 同上, pp.51-56.

(14) ニュートリノに質量があることに由来する現象は、岐阜県飛騨市神岡町のスーパーカミオカンデという大型実験装置で発見された。この成果により、梶田隆章東京大学教授がノーベル物理学賞を受賞した。ニュートリノ研究を更に進めるために、ハイパーカミオカンデというより大型の実験装置が同地に建設中であり、2027年の実験開始を目指している。「日本における大型ニュートリノ実験装置」ハイパーカミオカンデウェブサイト <<http://www.hyper-k.org/neutrino-detectors.html>>

なお、図4ではまとめて示しているが（図4の（注）を参照）、全ての粒子には、質量が等しく、電荷の符号等が逆である反粒子が存在する（図5）。負電荷を持つ電子の反粒子は、正電荷を持つ陽電子である。W粒子には、互いに反粒子の関係にある W^+ 粒子と W^- 粒子がある。素粒子だけではなく、陽子や中性子のような複合粒子にも反粒子が存在する。互いに反粒子の関係にある複合粒子は、内部の素粒子が互いに反粒子である。ただし、電荷がない粒子については、光子のように反粒子が存在しない（自身が反粒子である）ものもある⁽¹⁵⁾。互いに反粒子である粒子同士が衝突すると対消滅という現象が起こり、その粒子同士がともに消滅して大きなエネルギーが発生する。



(出典) ブライアン・R. マーティン, グレアム・ショー (駒宮幸男・川越清以監訳, 吉岡瑞樹ほか訳) 『マーティン/ショー 素粒子物理学』 講談社, 2020, pp.2-8. (原書名: Brian R. Martin and Graham Shaw, *Particle Physics*, Fourth edition, Chichester: John Wiley & Sons, 2017.) 等を基に筆者作成。

標準模型は、3つの相互作用（強い相互作用、電磁相互作用、弱い相互作用）だけではなく、高エネルギー状態で起こる電磁相互作用と弱い相互作用が区別できなくなる現象（力の統一）等を非常に正確に説明することが可能である。しかし、究極の理論というわけではなく、標準模型では説明できない事実もある。約138億年前の宇宙の誕生直後には、電子・陽子・中性子から構成される物質と、陽電子・反陽子・反中性子から構成される反物質の双方が、等量生成したと考えられている。しかし、現在宇宙を観測する限り、物質の量が反物質と比較して圧倒的に多い。身の回りに存在するのは、ほぼ物質のみである。また、同じく宇宙を観測すると、光を放出しない正体不明の暗黒物質（ダークマター）の方が、光を放出する通常物質よりも多く存在することが示唆される。それ以外にも、発見されたヒッグス粒子の質量は、他の素粒

(15) ブライアン・R. マーティン, グレアム・ショー (駒宮幸男・川越清以監訳, 吉岡瑞樹ほか訳) 『マーティン/ショー 素粒子物理学』 講談社, 2020, pp.2-8. (原書名: Brian R. Martin and Graham Shaw, *Particle Physics*, Fourth edition, Chichester: John Wiley & Sons, 2017.)

子に比べると大きいものの、理論上不自然に小さいとされる⁽¹⁶⁾。これらの事実を説明するために、標準模型を拡張した新しい理論の構築と、その実験的な裏付けが期待されている。

II 衝突型加速器の概要

前章で概観した素粒子物理学の研究で用いられる実験装置が加速器である。加速器実験の中でも、特に衝突型加速器による貢献が大きい。本章では、まず第1節で、加速器実験の概要を説明する。続いて第2節及び第3節では、衝突型加速器の種類について解説する。

1 加速器実験の概要

素粒子物理学が対象とするミクロの世界では、粒子同士が光速近くの速度⁽¹⁷⁾で衝突することにより、元々存在していなかった粒子が新たに生成するという現象が起こる。衝突させる粒子の質量や速度がより大きくなる（＝高エネルギー状態である）と、より質量が大きくて高エネルギーの粒子を新たに生成させることができる。前述のとおり、質量の大きな素粒子は不安定ゆえに短時間で崩壊してしまい、自然界にほとんど存在しない。実験的に多数生成させることで質量の大きな素粒子の詳細な性質の解明が初めて可能となり、標準模型の拡張等の素粒子物理学の進歩に寄与する。また、誕生直後の宇宙はサイズが小さく、非常に高エネルギーの状態だったと考えられており、粒子同士が高速で衝突して再現される高エネルギー状態の現象の解明は、宇宙初期の歴史を明らかにすることにつながる⁽¹⁸⁾。

1950年代までの素粒子物理学では、宇宙線と総称される宇宙から飛来する粒子（一次宇宙線）や、一次宇宙線が地球大気分子と衝突して生成した粒子（二次宇宙線）を対象に研究が行われた。陽電子の発見等の成果につながったが、研究者が粒子をコントロールできないという欠点があった。そこで導入されたのが、人為的に粒子を加速する加速器という装置である。加速器を使った実験では、粒子の反応を検出器⁽¹⁹⁾の位置する場所において高頻度で起こすことが可能であり、扱う粒子の種類及びそのエネルギーを単一に揃えることも可能であるという利点があった⁽²⁰⁾。

加速器実験には、固定標的実験とビーム標的実験の2種類がある。前者は加速した粒子が固定した標的に衝突する実験であり、大きな標的を用いることで反応率が大きくなるという長所がある一方で、加速した粒子のエネルギー全てが反応に使われるわけではなく、一部のエネルギーが標的を弾き飛ばすのに使われてしまうという短所がある。後者は2つの加速した粒子が正面衝突する実験であり、加速された2つの粒子のエネルギーの大部分が反応に使われるという長所がある一方で、ビーム中の粒子密度が小さいために反応率が低くなってしまいう短所がある。後者の実験を行う装置が衝突型加速器（コライダー）であり、高エネルギーを追求するためには不可欠な存在である⁽²¹⁾。

(16) 兼村晋哉「ヒッグス粒子と標準模型を超える物理」『数理科学』56巻1号, 2018.1, pp.9-12; 川越清以「エネルギーフロンティア実験とこれからの素粒子像」同, pp.15-18.

(17) 真空中の光の速度は、秒速 299,792,458m である。質量を持つ物体は、この速度を超えることが不可能である。

(18) 浅井祥仁『LHCの物理—ヒッグス粒子発見とその後の展開—』（基本法則から読み解く物理学最前線 7）共立出版, 2016, pp.3-8.

(19) 加速器実験で用いられる検出器は層構造を持ち、通過する粒子のデータが各層で収集される。各層で収集されたデータが統合的に解析されることで、通過した粒子の正体やそのエネルギー等が判明する。同上, pp.59-61.

(20) マーティン, ショー 前掲注(15), p.73.

(21) 同上, pp.73-74.

2 円形衝突型加速器と直線形衝突型加速器

衝突型加速器の形状には、円形と直線形がある。円形衝突型加速器⁽²²⁾には、粒子が周回を繰り返して持続的に加速されることで、高エネルギーへの到達が可能という長所があるが、周回に伴って強い電磁波が放出される（シンクロトロン放射と呼ばれる。）ことによるエネルギーの損失という短所がある。エネルギーの損失量は、粒子のエネルギーの4乗に比例し、粒子の質量の4乗及び加速器の半径に反比例するため、損失を抑えつつ高エネルギーに到達させるためには、加速する粒子を質量の大きなものに代えるか、加速器の半径を大きくする必要がある。ただし、質量の大きな粒子の進む方向を円周に沿って曲げるには、非常に強力な磁石が求められる⁽²³⁾。円形衝突型加速器は、後述の陽子・（反）陽子衝突と電子・陽電子衝突の両方の実験に利用されてきた実績がある。

一方、直線形の衝突型加速器（リニアコライダー）には、シンクロトロン放射によるエネルギーの損失がなく、事後に加速器を延長することで衝突エネルギーが拡張できるという長所がある。一方、1回限りの加速で目標のエネルギーに到達させるために、円形の場合と比較して短距離で急激に加速することが可能な高勾配の装置が必要になるという短所がある。また、質量の大きな粒子を短距離で急激に加速するのは難しいため、質量の小さな電子・陽電子の衝突実験に利用された実績がある一方で、陽子や反陽子を衝突させる実験には向かない。

3 陽子・（反）陽子衝突型加速器と電子・陽電子衝突型加速器

衝突型加速器は、形状による分類以外に、衝突させる粒子の種類によって分類することも可能である。後者の分類では、陽子・（反）陽子衝突型加速器と電子・陽電子衝突型加速器がある。

陽子・（反）陽子衝突型加速器は、ハドロンコライダーとも呼ばれ、陽子同士又は陽子と反陽子を衝突させる装置である。1回しか加速できない直線形の加速器では、陽子や反陽子の質量の大きさゆえに高エネルギーに到達させるのが難しいため、主に円形加速器で実現されてきた。陽子及び反陽子の質量は、電子及び陽電子の約1,836倍であるため、円形加速器におけるシンクロトロン放射によるエネルギー損失は、陽子及び反陽子を用いる方が電子及び陽電子を用いるより小さくなる。したがって、陽子・（反）陽子衝突型加速器は、電子・陽電子衝突型加速器よりも粒子を加速して高エネルギーに到達させやすいという長所がある。実際に、高エネルギー領域を新たに開拓する衝突実験は、円形の陽子・（反）陽子衝突型加速器で実現されてきた。一方で、陽子及び反陽子が複合粒子（ハドロン）であるため、内部の各素粒子の衝突による反応が複雑に発生して精密測定が難しいという短所がある⁽²⁴⁾。

電子・陽電子衝突型加速器は、レプトンコライダーとも呼ばれ、電子と陽電子を衝突させる装置である。電子と陽電子が素粒子であるため、衝突反応がシンプルで、精密測定が可能という長所がある。一方で、陽子・（反）陽子衝突型加速器ほどの高エネルギーに到達させることは難しいという短所がある。

²² 円形衝突型加速器（circular collider）は、リニアコライダーと表記される直線形衝突型加速器（linear collider）とは異なり、サーキュラーコライダーと表記されることは少ない。そのため、本稿ではそのまま円形衝突型加速器と記載する。

²³ 川越 前掲注(16), pp.13-14; 浅井 前掲注(18), pp.43-47.

²⁴ 川越 同上, p.14; 浅井 同上

Ⅲ 衝突型加速器による研究成果及び今後の展望

前章では、衝突型加速器の種類について概観した。本章では、まず第1節で、衝突型加速器の大型化を進めながら積み重ねてきた過去の研究実績を解説する。続いて第2節で、次世代の大型衝突型加速器に求められている研究内容及び提案されている4つの計画を紹介する。

1 衝突型加速器による過去の研究成果

リニアコライダーよりも円形衝突型加速器の方が先に実用化されてきた経緯⁽²⁵⁾があり、過去の研究でも円形衝突型加速器の活用が中心であった。標準模型に含まれる素粒子には、電子のように質量が小さいものから、トップクォークやW粒子、Z粒子、ヒッグス粒子のように質量の大きなものまで存在する。短寿命で自然界にほとんど存在しない質量が大きな素粒子を発見・研究するためには、より高エネルギーでの衝突実験が必要である。そのため、高エネルギーでの衝突実験が可能になる半径の大きな円形衝突型加速器が次々に建設され、研究が続けられてきた(図4)。

1970年代以降、衝突型加速器は7種類の素粒子の発見に貢献した。1974年、バートン・リヒター(Burton Richter)が率いるグループは、米国のスタンフォード線形加速器センター(SLAC国立加速器研究所の前身)の円形衝突型加速器Stanford Positron Electron Accelerating Ring(SPEAR)を利用して電子と陽電子を衝突させる研究を行い、チャームクォークと反チャームクォークから構成されるハドロンである J/ψ (ジェイ・プサイ)粒子を発見した⁽²⁶⁾。チャームクォークを含むハドロンの発見は初であった。 J/ψ 粒子の質量は、電子の約6,060倍⁽²⁷⁾である。SPEARは、全周0.234kmの大きさであった⁽²⁸⁾。同年、サミュエル・ティン(Samuel Chao Chung Ting)が率いる別の研究グループも、固定した金属ベリリウムに加速した陽子を衝突させる固定標的実験で J/ψ 粒子を発見している⁽²⁹⁾。この新発見に貢献したりヒターとティンの両氏に対して、1976年のノーベル物理学賞が授与された⁽³⁰⁾。

1975年、同じくSPEARを利用した電子と陽電子を衝突させる研究で、タウ粒子が発見された⁽³¹⁾。タウ粒子の質量は、電子の約3,477倍である。直接タウ粒子が検出されたのではなく、タウ粒子の崩壊後の生成物から間接的に存在が示された。この新発見に貢献したマーティン・パール(Martin L. Perl)に対して、1995年のノーベル物理学賞が授与された⁽³²⁾。

(25) 衝突型加速器の開発当初は、2粒子のビームが正確に衝突するように照準を合わせる技術が未熟であった。そのため、衝突の機会が1回に限られるリニアコライダーではなく、衝突に失敗しても次の周回で再度衝突機会のある円形衝突型加速器の実用化が先に進んだ。Griffiths 前掲注(1), p.6.

(26) J.-E. Augustin et al., "Discovery of a Narrow Resonance in e^+e^- Annihilation," *Physical Review Letters*, Vol.33 No.23, 2 December 1974, pp.1406-1408. <<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.33.1406>>

(27) 次の文献に掲載されている各粒子の質量のデータを基に計算した。タウ粒子やW粒子、Z粒子、トップクォーク、ヒッグス粒子についても同様である。Particle Data Group, "Review of Particle Physics," *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, Vol.2020 No.8, August 2020, 083C01. <<https://doi.org/10.1093/ptep/ptaa104>>

(28) N. Sunilkumar et al., "Characterization of Slow Orbit Motion in SPEAR3." SLAC National Accelerator Laboratory Website <<https://www.slac.stanford.edu/pubs/slacpubs/15000/slac-pub-15176.pdf>>

(29) J. J. Aubert et al., "Experimental Observation of a Heavy Particle J ," *Physical Review Letters*, Vol.33 No.23, 2 December 1974, pp.1404-1406. <<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.33.1404>>

(30) "The Nobel Prize in Physics 1976." The Nobel Prize Website <<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1976/summary/>>

(31) M. L. Perl et al., "Evidence for Anomalous Lepton Production in e^+e^- Annihilation," *Physical Review Letters*, Vol.35 No.22, 1 December 1975, pp.1489-1492. <<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.35.1489>>

(32) "The Nobel Prize in Physics 1995." The Nobel Prize Website <<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1995/summary/>>

1979年、ドイツ電子シンクロトロン研究所（Deutsches Elektronen-Synchrotron: DESY）の円形衝突型加速器 Positron-Electron Tandem Ring Accelerator（PETRA）を利用した電子と陽電子を衝突させる研究で、グルーオンが存在することに由来する特徴的な3本のジェット（クォークやグルーオンが破碎することによって生成する多数の粒子の集まり）が観測され、グルーオンの存在が証明された⁽³³⁾。PETRAは全周2.304kmであり⁽³⁴⁾、SPEARの約10倍であった。グルーオンの質量は理論上0であるが、3本のジェットを観測するためには高エネルギーが必要であった。

1983年、欧州合同原子核研究機構（CERN）の衝突型加速器 Super Proton Synchrotron Proton-Antiproton Collider（Sp̄pS）を利用した陽子と反陽子を衝突させる研究で、W粒子⁽³⁵⁾とZ粒子⁽³⁶⁾が発見された。W粒子については、互いに反粒子であるW⁺粒子とW⁻粒子が同時に生成した。W粒子、Z粒子の質量は、それぞれ電子の約157,000倍、約178,000倍である。Sp̄pSは全周6.911kmであり⁽³⁷⁾、PETRAの約3倍の規模であった。この新発見に貢献したカルロ・ルビア（Carlo Rubbia）、シモン・ファン・デル・メール（Simon van der Meer）の両氏に対して、1984年のノーベル物理学賞が授与された⁽³⁸⁾。

1995年、米国のフェルミ国立加速器研究所（Fermi National Accelerator Laboratory: FNAL）の衝突型加速器テバトロン（Tevatron）を利用した陽子と反陽子を衝突させる研究で、トップクォークと反トップクォークが発見された⁽³⁹⁾。両素粒子は同時に生成し、ハドロンを形成する前に崩壊した。トップクォークと反トップクォークの質量は、電子の約338,000倍である。テバトロンは全周6.283kmの大きさであり⁽⁴⁰⁾、Sp̄pSよりやや小さかったものの、粒子を加速する性能は向上していた。

⁽³³⁾ TASSO Collaboration, “Evidence for Planar Events in e⁺e⁻ Annihilation at High Energies,” *Physics Letters B*, Vol.86 No.2, 24 September 1979, pp.243-249. <[https://doi.org/10.1016/0370-2693\(79\)90830-X](https://doi.org/10.1016/0370-2693(79)90830-X)>; D. P. Barber et al., “Discovery of Three-Jet Events and a Test of Quantum Chromodynamics at PETRA,” *Physical Review Letters*, Vol.43 No.12, 17 September 1979, pp.830-833. <<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.43.830>>; PLUTO Collaboration, “Evidence for Gluon Bremsstrahlung in e⁺e⁻ Annihilations at High Energies,” *Physics Letters B*, Vol.86 No.3-4, 8 October 1979, pp.418-425. <[https://doi.org/10.1016/0370-2693\(79\)90869-4](https://doi.org/10.1016/0370-2693(79)90869-4)>; JADE Collaboration, “Observation of Planar Three-jet Events in e⁺e⁻ Annihilation and Evidence for Gluon Bremsstrahlung,” *Physics Letters B*, Vol.91 No.1, 24 March 1980, pp.142-147. <[https://doi.org/10.1016/0370-2693\(80\)90680-2](https://doi.org/10.1016/0370-2693(80)90680-2)>

⁽³⁴⁾ “PETRA III.” Deutsches Elektronen-Synchrotron Website <https://petra3.desy.de/index_eng.html>

⁽³⁵⁾ UA1 Collaboration, “Experimental Observation of Isolated Large Transverse Energy Electrons with Associated Missing Energy at $\sqrt{s} = 540$ GeV,” *Physics Letters B*, Vol.122 No.1, 24 February 1983, pp.103-116. <[https://doi.org/10.1016/0370-2693\(83\)91177-2](https://doi.org/10.1016/0370-2693(83)91177-2)>; UA2 Collaboration, “Observation of Single Isolated Electrons of High Transverse Momentum in Events with Missing Transverse Energy at the CERN $\bar{p}p$ Collider,” *Physics Letters B*, Vol.122 No.5-6, 17 March 1983, pp.476-485. <[https://doi.org/10.1016/0370-2693\(83\)91605-2](https://doi.org/10.1016/0370-2693(83)91605-2)>

⁽³⁶⁾ UA1 Collaboration, “Experimental Observation of Lepton Pairs of Invariant Mass around 95 GeV/c² at the CERN SPS Collider,” *Physics Letters B*, Vol.126 No.5, 7 July 1983, pp.398-410. <[https://doi.org/10.1016/0370-2693\(83\)90188-0](https://doi.org/10.1016/0370-2693(83)90188-0)>; UA2 Collaboration, “Evidence for Z⁰ → e⁺e⁻ at the CERN $\bar{p}p$ Collider,” *Physics Letters B*, Vol.129 No.1-2, 15 September 1983, pp.130-140. <[https://doi.org/10.1016/0370-2693\(83\)90744-X](https://doi.org/10.1016/0370-2693(83)90744-X)>

⁽³⁷⁾ Rudiger Schmidt, “The CERN SPS proton-antiproton collider,” Oliver Brüning and Stephen Myers, eds., *Challenges and Goals for Accelerators in the XXI Century*, Singapore: World Scientific, 2016, p.153. <https://doi.org/10.1142/9789814436403_0010>

⁽³⁸⁾ “The Nobel Prize in Physics 1984.” The Nobel Prize Website <<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1984/summary/>>

⁽³⁹⁾ F. Abe et al., “Observation of Top Quark Production in $\bar{p}p$ Collisions with the Collider Detector at Fermilab,” *Physical Review Letters*, Vol.74 No.14, 3 April 1995, pp.2626-2631. <<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.74.2626>>; S. Abachi et al., “Observation of the Top Quark,” *Physical Review Letters*, Vol.74 No.14, 3 April 1995, pp.2632-2637. <<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.74.2632>>

⁽⁴⁰⁾ “Accelerator Concepts,” version 3.6, January 6, 2010, p.52. Fermi National Accelerator Laboratory Website <https://operations.fnal.gov/rookie_books/Concepts_v3.6.pdf>

そして2012年、CERNの大型ハドロン衝突型加速器（Large Hadron Collider: LHC）を利用した陽子同士を衝突させる研究で、標準模型に含まれる素粒子で最後まで残されていたヒッグス粒子が発見された⁽⁴¹⁾。ヒッグス粒子の質量は、電子の約245,000倍である。ヒッグス粒子は、前述のとおり素粒子に質量を与える機構に関わる全く新しい素粒子であり、この機構の理論を提唱したフランソワ・アングレール（François Englert）、ピーター・ヒッグス（Peter W. Higgs）の両氏に対して2013年のノーベル物理学賞が授与された⁽⁴²⁾。衝突型加速器による素粒子発見を対象とするものとしては、4回目の快挙であった。LHCの大きさは、テバトロン⁽⁴³⁾の4倍以上にも及ぶ全周26.659kmである⁽⁴³⁾。全周34.5kmのJR山手線と比較すると、非常に巨大な装置であることが分かる。改良を重ねながら、2030年代半ばまで稼働を続ける予定である⁽⁴⁴⁾。

2 次世代の大型衝突型加速器として提案されている4つのヒッグスファクトリー計画

標準模型に含まれる素粒子の中で最後のヒッグス粒子が発見されて以来、素粒子物理学の進歩のために最優先で求められているのが、ヒッグス粒子の質量や他の素粒子との結合の強さ、珍しい崩壊の探索等の精密測定である。これにより、物質と反物質の量の非対称性や暗黒物質の正体、ヒッグス粒子の質量の不自然な小ささ等の、標準模型では説明できなかった事実の背景が実験的に明らかになり、標準模型を拡張した新しい理論の構築に貢献できる可能性がある。この精密測定のためには、LHCのような陽子・陽子衝突型加速器ではなく、電子・陽電子衝突型加速器を用いて、ヒッグス粒子が量産される「ヒッグスファクトリー」として稼働させる必要がある。あわせて、W粒子とZ粒子、トップクォークといった短寿命で質量の大きな素粒子の精密測定も期待されている。しかし、ヒッグス粒子を生成可能な高エネルギーでの衝突が実現できる電子・陽電子衝突型加速器は、過去に存在しなかった。そのため、次世代の大型衝突型加速器として、国際リニアコライダー（ILC）、コンパクト・リニアコライダー（CLIC）、将来円形衝突型加速器（FCC）、円形電子・陽電子衝突型加速器（CEPC）の4つの計画が、研究者によって提案されている⁽⁴⁵⁾。

ILCとCLICは、直線形衝突型加速器（リニアコライダー）である。ヒッグスファクトリーとして機能させるためには、衝突のエネルギーを240～250GeV⁽⁴⁶⁾程度にする必要があるが、従来の円形衝突型加速器では、シンクロトロン放射によるエネルギー損失を考慮すると非常に巨大な装置になることが想定されるため、リニアコライダーとして計画されたものである。ただし、どちらも全長10kmを超える大きさである。

一方、FCCとCEPCは、従来と同様の円形衝突型加速器として計画されたものであり、全周が約100kmと非常に巨大である。円形衝突型加速器としての強みをいかして、ヒッグスファ

(41) ATLAS Collaboration, *op.cit.*(10); CMS Collaboration, *op.cit.*(10)

(42) “The Nobel Prize in Physics 2013.” The Nobel Prize Website <<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2013/summary/>>

(43) “LHC Season 2: facts & figures.” CERN Website <https://home.cern/sites/home.web.cern.ch/files/2018-07/factsandfigures-en_0.pdf>

(44) “Longer term LHC schedule.” LHC Commissioning with Beam Website <<https://lhc-commissioning.web.cern.ch/schedule/LHC-long-term.htm>>

(45) V. Shiltsev and F. Zimmermann, “Modern and future colliders,” *Reviews of Modern Physics*, Vol.93 No.1, January-March 2021, 015006, p.24. <<https://doi.org/10.1103/RevModPhys.93.015006>>

(46) 1eV（電子ボルト）は、1個の電子が真空中で電位差1Vの電極の間で加速される時に得るエネルギーである。GeV（ギガ電子ボルト）、TeV（テラ電子ボルト）は、それぞれeVの10億倍、1兆倍を意味する。衝突型加速器の衝突に関する性能は、eVを単位として表記され、衝突させる粒子の質量及び速度が増加すると大きくなる。

クトリーとして稼働した後に陽子・陽子衝突型加速器に転換し、前例のない 100TeV という高エネルギー領域での衝突実験が行われる構想もある。このような高エネルギー領域は、ILC と CLIC では到達できないもので、より質量が大きくて標準模型には含まれなかった新しい素粒子が発見される可能性がある。

次章以降では、本節で紹介した 4 つの計画の詳細について説明する。

IV 国際リニアコライダー (ILC)

1 計画の経緯

(1) 計画の黎明期から技術設計報告書の公開まで

1965 年にリニアコライダーが提案⁽⁴⁷⁾されて以来、各国で基礎研究が進められてきた。1980 年代以降、日本の高エネルギー物理学研究所（高エネルギー加速器研究機構（KEK）の前身）が中心の Japan Linear Collider (JLC)⁽⁴⁸⁾（後に Global Linear Collider (GLC) に改称）、米国のスタンフォード線形加速器センターが中心の Next Linear Collider (NLC)⁽⁴⁹⁾、ドイツの DESY が中心の TeV-Energy Superconducting Linear Accelerator (TESLA)⁽⁵⁰⁾ など、大型のリニアコライダーを実際に建設するための研究が行われた。その過程で、各地で計画されるリニアコライダーの規模の大きさや建設費用等の観点から、世界に複数建設するのは不可能であると考えられるようになった。2004 年 8 月、世界各地の専門家から構成される国際将来加速器委員会 (International Committee for Future Accelerators: ICFA) の会合では、リニアコライダーの粒子加速技術⁽⁵¹⁾として、日米が推進する常伝導方式ではなく、ドイツによる超伝導方式を採用することが発表され、計画が ILC に一本化されることになった⁽⁵²⁾。

CERN は、加盟国や各国の関連研究所等の研究者から構成される検討グループを設置し、内容を詳細に審議した上で、国際的に注目される欧州素粒子物理戦略 (European Strategy for Particle Physics) を理事会において 7 年ごとに採択している⁽⁵³⁾。2006 年に採択された最初の欧州素粒子物理戦略の第 5 項では、「0.5 ~ 1TeV のエネルギー範囲で、ILC は精密測定の前線において独自の科学的機会を提供するものである」と言及された⁽⁵⁴⁾。

(47) M. Tigner, "A Possible Apparatus for Electron Clashing-Beam Experiments," *Il Nuovo Cimento*, Vol.37 No.3, June 1965, pp.1228-1231. <<https://doi.org/10.1007/BF02773204>>

(48) JLC group, *JLC-I* (KEK Report 92-16), December 1992, pp.1-3. <<https://www-jlc.kek.jp/general/DOC/JLC-I/JLC-I.pdf>>

(49) NLC Collaboration, *2001 Report on the Next Linear Collider: A Report Submitted to Snowmass '01*, June 2001, pp.1-3. <<https://www-project.slac.stanford.edu/lc/wkshp/snowmass2001/snow/Ch1.pdf>>

(50) F. Richard et al., eds., *TESLA Technical Design Report*, Part I: Executive Summary, March 2001, p.i. <<https://arxiv.org/pdf/hep-ph/0106314.pdf>>

(51) 加速器では、「加速空洞」という管に交流の高周波の電磁場を発生させることで、内部を通過する電荷を持つ粒子を加速する。この加速空洞を液体ヘリウムで極低温まで冷却して超伝導状態（電気抵抗が 0 である状態）にするのが超伝導方式、超伝導状態にしないのが常伝導方式である。超伝導方式が選択されたのは、既に試験機が数年間安定して運転していたこと、加速空洞の設置位置の許容誤差が大きいこと、電力効率が良いこと等の理由があった。この超伝導方式における周波数は 1.3GHz であり、日本で利用される交流電源の周波数（東日本は 50Hz、西日本は 60Hz）の 2 千万倍以上である。横谷馨「リニアコライダー」『加速器』1 巻 3 号, 2004.12, pp.194-196. <<https://www.pasj.jp/kaishi/cgi-bin/kasokuki.cgi?articles%2F1%2Fp193.pdf>>

(52) "International Panel Recommends "Cold" Technology for Future Particle Accelerator," 19 August 2004. Interactions.org Website <<https://www.interactions.org/node/12243>>

(53) "European Strategy for Particle Physics." European Strategy for Particle Physics Website <<https://europeanstrategy.cern/european-strategy-for-particle-physics>>

(54) CERN Council, "The European strategy for particle physics," 24 July 2006, p.36. <http://council-strategygroup.web.cern.ch/council-strategygroup/Strategy_Brochure.pdf>

2005年に発足したILCの国際設計チーム（Global Design Effort: GDE）の下で検討が進み、2007年に基準設計報告書が公開された⁽⁵⁵⁾。この段階では、日本だけではなく、米国のイリノイ州北部のFNAL付近、スイスのジュネーブ北西部のCERN付近、ドイツのハンブルクのDESY付近、ロシアのドブナ合同原子核研究所付近が建設候補地とされていた⁽⁵⁶⁾。しかし、2008年の米国におけるILCへの予算削減⁽⁵⁷⁾を始めとして、積極的に誘致を考える候補地が減少し、素粒子物理学の研究者が積極的に誘致⁽⁵⁸⁾を続ける日本のみが有力な候補地として残ることになった⁽⁵⁹⁾。2013年5月に採択された欧州素粒子物理戦略2013年改訂版においても、「優先度の高い大規模な科学的活動」の3番目の目標項目（第e項）において、「日本の素粒子物理学コミュニティからのILCを主催するというイニシアティブは大歓迎であり、欧州は参加を熱望する」という内容が記載された⁽⁶⁰⁾。

2013年2月、ILCと後述のCLICを国際的に推進するために、素粒子物理学分野を中心とする世界中の研究者から構成されるリニアコライダー・コラボレーションが設立され⁽⁶¹⁾、同年6月に具体的な技術設計報告書が公開された⁽⁶²⁾。当時の計画では衝突型加速器の全長が30.5kmで、衝突のエネルギーの上限が500GeVであった⁽⁶³⁾。

(2) 計画の具体化と日本における動向

この後の計画については、日本が検討の中心となった。2013年5月、文部科学省は、日本学術会議に対してILCの国内誘致について国内の学術界の意見をまとめることを要請した。これを受けて日本学術会議は「国際リニアコライダー計画に関する検討委員会」を設置し、国内誘致の是非について検討した。同年9月、同委員会は現時点では時期尚早であり、2～3年をかけて計画を精査し判断すべきとの回答を文部科学省に提出した⁽⁶⁴⁾。なお、この検討が行われている同年8月に、ILCを推進する国内の研究者から構成される立地評価会議が建設候補地の評価を行った。その結果、国内の候補地である北上山地（岩手県・宮城県）と脊振山地（福岡県・佐賀県）のうち、活断層や大型ダム等の人工物との位置関係、地形によるアクセス用トンネルの長さ、停電等の非常時に重要となる排水等の観点から、前者が最適であると評価し

⁽⁵⁵⁾ “ICFA Releases GDE Reference Design Report for the International Linear Collider,” 7 February 2007. Interactions.org Website <<https://www.interactions.org/press-release/icfa-releases-gde-reference-design-report-international>>

⁽⁵⁶⁾ Nan Phinney et al., eds., *International Linear Collider Reference Design Report*, Volume 3: Accelerator, August 2007, pp.243-253. CERN Document Server Website <https://cds.cern.ch/record/1061261/files/CERN-2007-006_v3.pdf>

⁽⁵⁷⁾ Eric Hand and Geoff Brumfiel, “Accelerator plans stalled after US and UK cuts,” *Nature*, Vol.451 No.7175, 10 January 2008, p.112. <<https://doi.org/10.1038/451112a>>

⁽⁵⁸⁾ 2012年10月、日本の素粒子物理学の研究者から構成される高エネルギー物理学研究者会議が声明を出し、ILCを日本に建設するという提案を発表した。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」2012.10. <http://www.jahep.org/office/doc/201210_ILC_staging_c.pdf>

⁽⁵⁹⁾ Geoff Brumfiel, “Japan in pole position to host particle smasher,” *Nature*, 14 December 2012. <<https://doi.org/10.1038/nature.2012.12047>>

⁽⁶⁰⁾ James Gillies et al., eds., “Accelerating science and innovation: Societal benefits of European research in particle physics,” May 2013, p.21. CERN Document Server Website <https://cds.cern.ch/record/1551933/files/Strategy_Report_LR.pdf>

⁽⁶¹⁾ “Press release: Colliders colliding,” 21 February 2013. International Linear Collider Website <<http://newline.linearcollider.org/2013/02/21/press-release-colliders-colliding/>>

⁽⁶²⁾ “ILC Technical Design Report.” ILC International Development Team Website <<https://linearcollider.org/technical-design-report/>>

⁽⁶³⁾ Chris Adolphsen et al., eds., *The International Linear Collider: Technical Design Report*, Vol.3.II: Accelerator Baseline Design, June 2013, p.8. *ibid.* <<https://linearcollider.org/files/images/pdf/Acceleratorpart2.pdf>>

⁽⁶⁴⁾ 日本学術会議「回答 国際リニアコライダー計画に関する所見」2013.9.30, pp.1-2, 10-11. <<http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-22-k178-1.pdf>>

た⁽⁶⁵⁾。

2014年5月、文部科学省は、日本学術会議が指摘した課題等を中心に議論するため、「国際リニアコライダー（ILC）に関する有識者会議」を新設した。2015年6月、同会議は、ヒッグス粒子等の精密測定のみならず新粒子発見の可能性についても見通しを得るべき、CERNのLHCの動向を注視して分析・評価すべき、技術面での課題の解決やコスト面でのリスクの低減について明確にすることが必要、国民及び科学コミュニティの理解を得ることが必要との提言をまとめた⁽⁶⁶⁾。2017年11月、トンネルの長さを33.5kmから20.5kmに縮小する（衝突のエネルギーの上限も500GeVから250GeVに縮小する）⁽⁶⁷⁾ことにより、設置費用を最大40%削減してILCが建設されることを奨励する声明をICFAが出したことを受け⁽⁶⁸⁾、有識者会議は2018年7月に、縮小したILC計画についての議論をまとめている⁽⁶⁹⁾。

2018年7月、文部科学省は日本学術会議に対して、誘致の妥当性について再検討を依頼した。日本学術会議は「国際リニアコライダー計画の見直し案に関する検討委員会」を設置して再検討し、同年12月に「ILCの国内誘致を支持するには至らない」との回答を文部科学省に提出した⁽⁷⁰⁾。これを踏まえ、2019年3月に東京都内で開催されたICFAの会合において、文部科学省は初めてILC計画について公式に見解を示した。その内容は、現時点で日本誘致の表明には至らない、ILC計画に関心を持って国際的な意見交換を継続するというものであった⁽⁷¹⁾。

日本学術会議の回答と文部科学省の見解は、学術研究の大型プロジェクトの選定にも反映された。文部科学省が予算を措置する大型プロジェクトの選定は、日本学術会議による「学術の大型研究計画に関するマスタープラン」の選出、文部科学省による「学術研究の大型プロジェクトの推進に関する基本構想ロードマップ」の選出を基に行われる。2020年1月、日本学術会議は「マスタープラン2020」を策定し、ILC計画は「学術大型研究計画」の1つとなったが、優先度の高い「重点大型研究計画」には選出されなかった⁽⁷²⁾。ILC計画を推進するKEKは、文部科学省のロードマップへの申請を取り下げたため、ILC計画がロードマップにも記載され

(65) 「プレスリリース 国際リニアコライダー国内候補地の立地評価会議の結果について」2013.8.23. ILC 戦略会議ウェブサイト <<http://ilc-str.jp/topics/2013/08231145/>> ILC 戦略会議は、日本国内でILCを推進する高エネルギー物理学の研究者から構成される組織である。立地評価会議は、ILC 戦略会議が設置したものであり、同じく高エネルギー物理学の研究者8名で構成されていた。

(66) 国際リニアコライダー（ILC）に関する有識者会議「国際リニアコライダー（ILC）に関する有識者会議 これまでの議論のまとめ」2015.6.25, pp.1-2, 6-7. 文部科学省ウェブサイト <https://www.mext.go.jp/component/b_menu/shingi/toushin/_icsFiles/afieldfile/2015/08/05/1360596_1.pdf>

(67) 技術設計報告書の公開時点ではトンネルの長さが30.5kmであったが、その後の詳細な検討において、衝突のタイミングを調整する目的により、33.5kmに延長されていた。Lyn Evans and Shinichiro Michizono, eds., “The International Linear Collider Machine Staging Report 2017,” October 2017, pp.2-3, 7-9. <<https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1711/1711.00568.pdf>>

(68) “ICFA Statement on the ILC Operating at 250 GeV as a Higgs Boson Factory,” November 2017. International Committee for Future Accelerators Website <<https://icfa.hep.net/wp-content/uploads/ICFA-Statement-Nov2017.pdf>> この声明が出された背景には、LHCでのヒッグス粒子の研究から、縮小したILC（最大の衝突のエネルギーが250GeV）の規模でも、ヒッグス粒子の精密測定が十分に行えることが判明したことがある。

(69) 国際リニアコライダー（ILC）に関する有識者会議「国際リニアコライダー（ILC）に関する有識者会議 ILC計画の見直しを受けたこれまでの議論のまとめ」2018.7.4, pp.12-15. 文部科学省ウェブサイト <https://www.mext.go.jp/component/b_menu/shingi/toushin/_icsFiles/afieldfile/2018/09/20/1409220_1_1.pdf>

(70) 日本学術会議「回答 国際リニアコライダー計画の見直し案に関する所見」2018.12.19, pp.1-2, 14-15. <<http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-24-k273.pdf>>

(71) 「ICFA 会合を開催 ILCに関する国際的な意見交換を継続」2019.3.13. 高エネルギー加速器研究機構ウェブサイト <<https://www.kek.jp/ja/newsroom/2019/03/13/1830/>>

(72) 日本学術会議科学者委員会研究計画・研究資金検討分科会「提言 第24期学術の大型研究計画に関するマスタープラン（マスタープラン2020）」2020.1.30, pp.10, 18-19. <<http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-24-t286-1.pdf>>

ないこととなった⁽⁷³⁾。

2020年2月、米国で開催されたICFAの会合において、2回目の文部科学省の見解が示された。当該見解では、現時点でILC計画に参加する資金的な余力はないというドイツ・フランス・英国の回答が説明され、関心を持って米欧との意見交換を実施するとしつつも、前年と同様に具体的な判断には踏み込むことはなかった⁽⁷⁴⁾。ただし、ICFAはこの会合において、日本でのILC建設に改めて期待を示し、国際推進チームの設置を提言する声明を採択している⁽⁷⁵⁾。

2020年6月に採択された欧州素粒子物理戦略2020年改訂版には、「3. 優先度の高い将来の取組」の第A項において「日本でのILCの時宜にかなった実現は、この戦略と両立するものであり、欧州の素粒子物理学コミュニティは協力することを望む」ことが記された⁽⁷⁶⁾。

2020年8月、ICFAの声明を受けて、計画を主導する国際推進チームが発足した⁽⁷⁷⁾。国際推進チームは、CERNや米国等の国際的な素粒子物理学研究者から構成され、日本のKEKがホスト研究所となる。2021年6月、国際推進チームは、ILC準備研究所の提案書を公開した。ILC準備研究所は、ILCの建設開始に向けて、必要な技術開発等を完了させるとともに、情報を提供して政府間交渉を補助する組織である⁽⁷⁸⁾。同準備研究所による活動期間は、2022年の開始から2026～27年頃までで、後に設立されるILC研究所の下で2027年からの建設開始が想定されている⁽⁷⁹⁾。

2 建設・実験計画

(1) 建設計画

ILC建設を推進する世界中の研究者から構成されるリニアコライダー・コラボレーションが2019年に公開した計画によると、全長20.5495kmの直線形のトンネルが建設される⁽⁸⁰⁾。全長のうち主に半分は電子の加速器で、残りの半分は陽電子の加速器であり、両者が向かい合う構造である。衝突地点では、14ミリラジアン（約0.80°）の角度で2粒子のビームが交差する⁽⁸¹⁾。トンネル断面は、幅9.5m、高さ5.5mのかまぼこ型である⁽⁸²⁾。日本政府が正式に決定したわけではないが、岩手・宮城両県にまたがる北上山地が研究者により建設地として最適と評価されている⁽⁸³⁾。なお、将来的に延長して1TeVまで衝突エネルギーが拡張される構想があり、北上

(73) 「ILC計画の文部科学省ロードマップ申請取り下げについて」2020.9.11. 高エネルギー加速器研究機構ウェブサイト <<https://www.kek.jp/ja/topics/topic20200911/>>

(74) 「ILC経費 独仏英が難色 文科省 米会議で判断踏み込まず」『読売新聞』（岩手版）2020.2.22, p.27.

(75) International Committee for Future Accelerators, “ICFA Statement on the ILC Project,” February 22, 2020. <https://icfa.hep.net/wp-content/uploads/ICFA_Statement_22Feb2020.pdf>

(76) European Strategy Group, “2020 Update of the European Strategy for Particle Physics,” 2020.6, p.8. CERN Website <<https://home.cern/sites/home.web.cern.ch/files/2020-06/2020%20Update%20European%20Strategy.pdf>>

(77) “ICFA ILC International Development Team,” August 20, 2020. International Committee for Future Accelerators Website <https://icfa.hep.net/wp-content/uploads/ICFA_IDT_Structure.pdf>

(78) International Linear Collider International Development Team, “Proposal for the ILC Preparatory Laboratory (Pre-lab),” 1 June 2021, pp.6-8. <<https://arxiv.org/pdf/2106.00602.pdf>>

(79) *ibid.*, pp.32-33.

(80) Philip Bambade et al., “The International Linear Collider: A Global Project,” March 2019, pp.7, 19. <<https://arxiv.org/pdf/1903.01629.pdf>>

(81) *ibid.*, p.20.

(82) 東北ILC事業推進センター「東北ILC施設計画」2020.10, pp.10-11. <https://tipdc.org/assets/uploads/2020/12/Tohoku_ILC_shisetsu.pdf>

(83) 「プレスリリース 国際リニアコライダー国内候補地の立地評価会議の結果について」前掲注(65)

山地ではそれに必要な全長 50km が確保可能である⁽⁸⁴⁾。山岳の地形で地表標高が高いため、トンネルは海拔 110m 程度に位置する予定であり、地上から最も浅い部位（砂鉄川横断箇所）は深さ 19m 程度、検出器の部位は深さ 100m 程度である⁽⁸⁵⁾。加速器を設置するメインのトンネル以外にも、地上からのアクセストンネルや検出器ホール等も掘削される⁽⁸⁶⁾。

この計画の立脚する見通しによれば、日本政府が前向きな姿勢を示すことを前提として、約 4 年間で国際的な合意や建設の準備、国際的な ILC 研究所やその運営機関の設立等が行われる見込みとされている。その後、9 年間で実際の土木工事や装置の設置が行われ、1 年かけて試運転が行われる⁽⁸⁷⁾。

(2) 実験計画

衝突型加速器として稼働する時は、生成源から出た電子と陽電子がそれぞれ 1 周 3.2km のダンプリングリングを周回し、平行性の高いビームに整えられる。その後、2 粒子のビームは、それぞれ超伝導加速空洞を通過しながら光速近くまで加速され、検出器のある中央部分で衝突する。超伝導加速空洞は金属ニオブ製で、液体ヘリウムで -271.15°C （絶対温度表示で 2K）まで冷却することで、超伝導状態に保持されている⁽⁸⁸⁾。

実際の実験は、22 年又は 26 年かけて実施することが提案されている⁽⁸⁹⁾。最初に、設計の上限である 250GeV で衝突実験が行われる。このエネルギー領域では、ヒッグス粒子が Z 粒子と同時に効率良く生成することが知られており、ヒッグス粒子の質量や他の素粒子との結合の強さ、珍しい崩壊の探索等の精密測定が行われる⁽⁹⁰⁾。250GeV での衝突実験終了後については、衝突のエネルギーを 500GeV に拡張して行うことが提案されている。約 304GeV までは、装置の追加のみで拡張することが可能であるが、それ以上では加速器を設置するトンネルの延長が必要である⁽⁹¹⁾。500GeV では、ヒッグス粒子だけではなく、トップクォークの性質等についても精密なデータ収集が可能である⁽⁹²⁾。

(3) 費用の見通し

250GeV での衝突実験終了後のトンネル延長によるエネルギー拡張を考慮しない場合、本体建設費（土木建築、加速器本体、労務費）が 6350 ～ 7028 億円、検出器関係経費（検出器本体、労務費）が 1005 億円であり、さらにこの合計金額の約 25% の不定性相当経費⁽⁹³⁾がかかる可能性があるとする。また、年間運転経費（光熱水料・保守、労務費）は、366 ～ 392 億円と推計されている。技術設計報告書では言及されていなかった準備経費（設計費用や研究開発、環境調査、人材養成、技術移転、管理・事務の関連経費等）としての 233 億円や、予備費の必要

⁽⁸⁴⁾ Bambade et al., *op.cit.*(80), p.22.

⁽⁸⁵⁾ 東北 ILC 事業推進センター 前掲注(82), pp.37-38, 67.

⁽⁸⁶⁾ 同上, pp.5-15.

⁽⁸⁷⁾ Bambade et al., *op.cit.*(80), pp.5, 23.

⁽⁸⁸⁾ *ibid.*, pp.8, 15-21.

⁽⁸⁹⁾ *ibid.*, pp.26-28.

⁽⁹⁰⁾ *ibid.*, pp.28-35.

⁽⁹¹⁾ *ibid.*, p.21.

⁽⁹²⁾ *ibid.*, pp.35-38.

⁽⁹³⁾ コスト見積りの精度に関して発生し得る追加的な経費。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。

性も指摘されている⁽⁹⁴⁾。

なお、日本には全周 3.016315km の電子・陽電子衝突型加速器 SuperKEKB が茨城県つくば市にあり⁽⁹⁵⁾、その建設費は約 378 億円（既存のトンネルを利用したもので、労務費を含まない。）であった⁽⁹⁶⁾。日本にある他の大型施設については、衝突型ではない陽子加速器が 3 台ある大強度陽子加速器施設 J-PARC（茨城県那珂郡東海村）の建設費が約 1500 億円（建設時に設置されてその後撤去された設備も含み、労務費を含まない。）⁽⁹⁷⁾、スーパーコンピュータ「富岳」（兵庫県神戸市）の事業費が約 1300 億円（国費分が約 1100 億円、関係企業負担分が約 200 億円）⁽⁹⁸⁾であった。海外の施設にも目を向けると、CERN の LHC の建設費が約 5000 億円（既存のトンネルを利用したもので、労務費を含まない。）である⁽⁹⁹⁾。ILC の建設費はこれらを大きく超えており、日本が国際宇宙ステーション（International Space Station: ISS）に投じてきた金額（1兆円超）に迫るものである⁽¹⁰⁰⁾。

V コンパクト・リニアコライダー（CLIC）

1 計画の経緯

CLIC は、LHC 建設前段階における将来の衝突型加速器の構想として、1985 年に発足した CERN 内の研究チームが 1988 年から設計等を開始したものである⁽¹⁰¹⁾。1991 年、CERN 内に CLIC 試験施設が、1996 年には第 2 試験施設が設置され、検討のための実験が行われた。その後、第 3 試験施設が設置され、2001～16 年にかけて実験を重ねた⁽¹⁰²⁾。

なお、この時期に並行して、前述の ILC 計画の国際的な一本化が進行した。ILC 以上に短距離で急激に加速することが可能な CLIC は、ILC よりも後の世代の加速器であるとみなされていた⁽¹⁰³⁾。CLIC の特徴は、メインの加速器に平行するドライブビームの存在である⁽¹⁰⁴⁾。ドライブビームはメインの加速器とは独立していて、加速した電子から構成される。ドライブビームからメインの加速器内の電子及び陽電子にエネルギーが伝達される。この 2 ビーム加速と呼ばれる技術によって、ILC 以上に短距離で急激に加速することが可能になるため、全体の長さが ILC よりも短いという長所がある。ただし、ドライブビーム関連の電力消費が非常に大きいという短所もある⁽¹⁰⁵⁾。

⁽⁹⁴⁾ 国際リニアコライダー（ILC）に関する有識者会議 前掲注(69), pp.38-40, 46.

⁽⁹⁵⁾ Kazunori Akai et al., “SuperKEKB collider,” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Vol.907, 1 November 2018, p.190. <<https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.08.017>>

⁽⁹⁶⁾ 国際リニアコライダー（ILC）に関する有識者会議 前掲注(69), p.10.

⁽⁹⁷⁾ 同上

⁽⁹⁸⁾ 「スーパーコンピュータ「富岳」神戸市ウェブサイト <<https://www.city.kobe.lg.jp/a38834/shise/kekaku/kikakuchosekyoku/supercomputer/nscproj.html>>

⁽⁹⁹⁾ 国際リニアコライダー（ILC）に関する有識者会議 前掲注(69), p.10.

⁽¹⁰⁰⁾ 「ISS「きぼう」10年の軌跡 1兆円投じた実験棟費用対効果は」『朝日新聞』2019.7.18, p.26.

⁽¹⁰¹⁾ “Archives of Compact Linear Collider, CLIC.” CERN Scientific Information Service Website <https://scientific-info.cern/archives/CERN_archive/guide/experimental_physics/CLIC/isaclac>

⁽¹⁰²⁾ G. Geschonke and A. Ghigo, eds., “CTF3 Design Report,” 24 May 2002, p.1-1. <<https://clic-study.web.cern.ch/sites/clic-study.web.cern.ch/files/pdfs/CTF3DesignReport.pdf>>; “CTF3 CLIC Test Facility.” Compact Linear Collider Website <<https://clic-study.web.cern.ch/organization/ctf3>>

⁽¹⁰³⁾ 横谷 前掲注(51), pp.194-195.

⁽¹⁰⁴⁾ Markus Aicheler et al., eds., *The Compact Linear Collider (CLIC): Project Implementation Plan* (CERN Yellow Reports: Monographs, Vol.4/2018), Geneva: CERN, 2018, pp.19-27. <<https://doi.org/10.23731/CYRM-2018-004>>

⁽¹⁰⁵⁾ *ibid.*, pp.198-199.

第3 試験施設での実験が進む中、欧州素粒子物理戦略 2006 年版の第4 項では、CLIC の技術を開発するために連携したプログラムを強化すべきと明記された⁽¹⁰⁶⁾。2011 年から2012 年にかけて概念設計報告書が公開され⁽¹⁰⁷⁾、2013 年2 月には、CLIC と ILC を国際的に推進するために、世界中の研究者によりリニアコライダー・コラボレーションが設立された。しかし、欧州素粒子物理戦略 2013 年改訂版では ILC が言及される一方で、CLIC については明示されなかった。欧州素粒子物理戦略 2020 年改訂版においても同様であるが、「3. 優先度の高い将来の取組」の第 A 項に記載された最も優先度の高い「電子と陽電子を衝突させることによるヒッグスファクトリー」については、策定の会議において CLIC は後述の FCC とともに候補であるとされた⁽¹⁰⁸⁾。ただし、同項において、ヒッグスファクトリーの次に記載された「長期的な観点で、達成可能な最高エネルギーで陽子・陽子衝突型加速器を運転すること」については、FCC とは異なり、CLIC では達成することが不可能である。

CERN 内では CLIC と FCC の両者の計画が存在するが、上述の長期的な観点で CLIC よりも FCC の建設を目指す意見が多数派であるとされる⁽¹⁰⁹⁾。概念設計報告書の公開から10 年近くが経過した2021 年現在でも、技術設計報告書は未公開である。

2 建設・実験計画

CERN が2018 年に公開した計画によると、長さ11.4km のメインの衝突型加速器を設置するために、全長12.070km の直線形のトンネルが建設される⁽¹¹⁰⁾。全長のうち半分は電子の加速器で、もう半分は陽電子の加速器であり、両者が向かい合う構造である。各加速器を通過した両粒子のビームが検出器のある中央で衝突する。衝突地点では、16.5 ミリラジアン（約0.95°）の角度で2 粒子のビームが交差する⁽¹¹¹⁾。トンネル断面は内径5.6m の円形であり、建設地として予定されているのは、LHC と同様にジュネーブ付近で、スイスとフランスの両国にまたがる⁽¹¹²⁾。これは、LHC をほぼ横断する位置である。なお、将来的に延長して3TeV までエネルギーを拡張する構想があり、ジュネーブ近郊ではそのために必要な全長50.712km が確保可能である。トンネルの地上からの深さは一定しないが、ほぼ100m 程度となる。加速器を設置するメインのトンネル以外にも、地上からアクセスするための立坑等も建設される。

実際の建設（トンネル掘削や装置の設置等）については、5 年を少し超える期間で実施し、稼働前に2 年弱の期間で試運転等を行うことが計画されている⁽¹¹³⁾。計画が最速で進む場合は、2025 年までが準備段階で、2026～34 年为建设・試運転段階であり、2035 年から実験開始となる⁽¹¹⁴⁾。実験開始後は、途中で装置を拡張しながら（380GeV → 1.5TeV → 3TeV）、27 年間か

⁽¹⁰⁶⁾ CERN Council, *op.cit.*(54)

⁽¹⁰⁷⁾ “Conceptual Design Report.” Compact Linear Collider Website <<https://clic-study.web.cern.ch/content/conceptual-design-report>>

⁽¹⁰⁸⁾ European Strategy Group, “Deliberation Document on the 2020 update of the European Strategy for Particle Physics,” 5 March 2020, pp.7-8. <<http://dx.doi.org/10.17181/ESU2020Deliberation>>

⁽¹⁰⁹⁾ 高橋真理子「巨大加速器 ILC とセルンの次期加速器の行方—中田達也・スイス連邦工科大学ローザンヌ校教授に聞く—」『論座』（電子版）2019.7.18. <<https://webronza.asahi.com/science/articles/2019071000008.html>>

⁽¹¹⁰⁾ Aicheler et al., eds., *op.cit.*(104), pp.3-4, 150.

⁽¹¹¹⁾ *ibid.*, pp.13-14.

⁽¹¹²⁾ *ibid.*, pp.149-153.

⁽¹¹³⁾ *ibid.*, pp.190-191.

⁽¹¹⁴⁾ *ibid.*, pp.203-204.

けてデータ取得を進めることが提案されている⁽¹¹⁵⁾。完成直後の衝突エネルギーは最大 380GeV であり、ヒッグス粒子やトップクォークの研究が可能である⁽¹¹⁶⁾。

トンネル延長によるエネルギー拡張を考慮しない場合、建設費は 58 億 9000 万スイスフラン (7186 億円) と推計されている⁽¹¹⁷⁾。土木工事や装置の設置等の費用を含み、労務費を含まない。

VI 将来円形衝突型加速器 (FCC)

1 計画の経緯

欧州素粒子物理戦略 2013 年改訂版では、「優先度の高い大規模な科学的活動」の 2 番目の目標項目 (第 d 項) に、素粒子物理学の最前線に留まるために、次の戦略の改訂までに、欧州は CERN における野心的なポスト LHC の加速器計画を提案する立場である必要があるとされた⁽¹¹⁸⁾。その上で、CERN は、全世界的な枠組みでの加速器計画、特に陽子と陽子、電子と陽電子による高エネルギー最前線の装置に重点を置いて設計研究に着手するべきであること、この設計研究は、世界中の国立研究機関、研究所、大学と協力して、高磁場磁石や高勾配加速構造を含む精力的な加速器研究開発プログラムと関わるものであるべきであることが記された。この目標項目を達成するために立案されたのが、FCC 計画である。

2014 年 2 月には FCC という名称が登場し、全周 80 ~ 100km 規模の円形衝突型加速器の設計研究を議論するために、計画発足の会議がスイスのジュネーブにおいて開催された⁽¹¹⁹⁾。

2015 年から、FCC の設計研究についての年次総会が行われることになった。2015 年 3 月には米国のワシントン D.C. で⁽¹²⁰⁾、2016 年 4 月にはイタリアのローマで⁽¹²¹⁾、2017 年 6 月にはドイツのベルリンで⁽¹²²⁾、2018 年 4 月にはオランダのアムステルダムで⁽¹²³⁾開催された。そして、2019 年 1 月には、それまでの設計研究の成果を基に、概念設計報告書が公表された⁽¹²⁴⁾。電子 (e^-) と陽電子 (e^+) を衝突させる FCC-ee、陽子同士を衝突させる FCC-hh (“h” はハドロンを意味する。) の 2 種類が計画の中心である⁽¹²⁵⁾。

最新の欧州素粒子物理戦略 2020 年改訂版でも、「3. 優先度の高い将来の取組」の第 A 項に FCC に関連する戦略が記載された。電子と陽電子を衝突させることによるヒッグスファクトリー (FCC-ee が該当する。) が最も優先度の高い次世代衝突型加速器であり、長期的には達成

⁽¹¹⁵⁾ *ibid.*, p.193.

⁽¹¹⁶⁾ R. Franceschini et al., eds., “The Compact Linear e^+e^- Collider (CLIC): Physics Potential,” 18 December 2018, pp.2-4. <<https://arxiv.org/pdf/1812.07986.pdf>>

⁽¹¹⁷⁾ Aicheler et al., eds., *op.cit.*⁽¹⁰⁴⁾, pp.193-198.

⁽¹¹⁸⁾ Gillies et al., eds., *op.cit.*⁽⁶⁰⁾

⁽¹¹⁹⁾ “Future Circular Collider Study Kickoff Meeting,” CERN Website <<https://indico.cern.ch/event/282344/>>

⁽¹²⁰⁾ Cristina Martin Perez, “A successful week for the Future Circular Collider Study,” 7 April 2015. *ibid.* <<https://home.cern/news/news/accelerators/successful-week-future-circular-collider-study>>

⁽¹²¹⁾ Panagiotis Charitos, “Preparing for the future,” 26 April 2016. *ibid.* <<https://home.cern/news/news/accelerators/preparing-future>>

⁽¹²²⁾ Panagiotis Charitos, “FCC week 2017: Diversity fuels progress,” 3 July 2017. *ibid.* <<https://home.cern/news/news/accelerators/fcc-week-2017-diversity-fuels-progress>>

⁽¹²³⁾ Panagiotis Charitos, “Discussing future colliders at FCC Week 2018,” 2 May 2018. *ibid.* <<https://home.cern/news/news/accelerators/discussing-future-colliders-fcc-week-2018>>

⁽¹²⁴⁾ “International collaboration publishes concept design for a post-LHC future circular collider at CERN,” 15 January 2019. *ibid.* <<https://home.cern/news/press-release/accelerators/international-collaboration-publishes-concept-design-post-lhc>>

⁽¹²⁵⁾ A. Abada et al., “FCC Physics Opportunities: Future Circular Collider Conceptual Design Report Volume 1,” *European Physical Journal C*, Vol.79 No.6, June 2019, 474, p.15. <<https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-019-6904-3>>

可能な最高エネルギーで陽子・陽子衝突型加速器（FCC-hh が該当する。）を運転することが示された。次の欧州素粒子物理戦略の改訂（2027年頃）までに、欧州の素粒子物理学研究者らは、国際的なパートナーとともに技術的・財政的な実現可能性を調査することになっている⁽¹²⁶⁾。

2 FCC-ee の建設・実験計画

概念設計報告書によると、全長 97.756km のおおむね円形のトンネルが建設され、互いに逆回りの電子加速器及び陽電子加速器が同じトンネル内に設置される⁽¹²⁷⁾。完全な円形ではないのは、直線部位と円弧の部位が組み合わさった設計であるためである。2つの加速器は2か所で交差し（4か所にする構想もある。）、どちらも電子と陽電子の衝突地点となる⁽¹²⁸⁾。トンネル断面は、内径 5.5m の円形である。建設予定地は、LHC と同様にジュネーブ付近で、スイスとフランスの両国にまたがる⁽¹²⁹⁾。起伏のある地形のため、トンネルの部位によって地上からの深さが異なるが、地上につながる立坑は、1か所を除いて深さ 300m 未満の地点に設置される。1か所のみ南東側のプレアルプスに近接しており、地上からの深さが 558m にも達するため、鉛直方向の立坑ではなく傾斜したトンネルで地上に接続する予定である⁽¹³⁰⁾。

衝突型加速器が完成するまでに、18年間かかる見込みである⁽¹³¹⁾。このうち、8年間は準備段階で、行政上の手続（建設許可の取得等）や資金調達、入札・建設契約等が含まれる。その後の10年間は建設段階で、トンネル掘削や加速器・検出器の設置、試運転等が含まれる。概念設計報告書上では、2020年に準備段階を開始した場合、実際の稼働は2039年となることが例示されている。ただし、CERNはLHCでの実験終了後に建設工事を始める予定で、建設工事の実際の開始時期は2038年と想定されており⁽¹³²⁾、その場合の実際の稼働開始は2048年頃である。

完成後、15年かけて衝突のエネルギーを変化させながら実験が行われる⁽¹³³⁾。最初の4年間は、88～94GeVのZポールと呼ばれる領域で衝突させ、Z粒子の性質を研究するためのデータが収集される。次の2年間は、W粒子対生成（互いに反粒子の関係にある W^+ 粒子と W^- 粒子が生成する。）の閾値付近である157.5～162.5GeVのエネルギーで衝突させ、W粒子の性質が研究される。7～9年目の3年間は、ヒッグスファクトリーとして稼働する期間である。この期間では、240GeVのエネルギーで衝突させることにより、ヒッグス粒子がZ粒子とともに生成する。更なる高エネルギーのための1年間の停止・準備を経た後に、5年間の稼働期間で340～365GeVのエネルギーでの衝突により、トップクォークの性質が研究される。以上の15年間は標準の研究計画であるが、追加で125GeV付近の衝突実験を行って、ヒッグス粒子と電子の相互作用について詳細に調べる提案もある。

建設費は、計105億スイスフラン（1兆2810億円）と見積もられており、10年目の休止・

⁽¹²⁶⁾ European Strategy Group, *op.cit.*⁽¹⁰⁸⁾

⁽¹²⁷⁾ A. Abada et al., “FCC-ee: The Lepton Collider: Future Circular Collider Conceptual Design Report Volume 2,” *European Physical Journal Special Topics*, Vol.228 No.2, June 2019, pp.332, 439-440. <<https://doi.org/10.1140/epjst/e2019-900045-4>>

⁽¹²⁸⁾ *ibid.*, pp.284, 322.

⁽¹²⁹⁾ *ibid.*, pp.439-442.

⁽¹³⁰⁾ *ibid.*, pp.442, 445-446.

⁽¹³¹⁾ *ibid.*, p.570.

⁽¹³²⁾ Davide Castelvecchi and Elizabeth Gibney, “CERN makes bold push to build €21-billion supercollider,” *Nature*, 19 June 2020. <<https://doi.org/10.1038/d41586-020-01866-9>>

⁽¹³³⁾ Abada et al., *op.cit.*⁽¹²⁷⁾, pp.292, 320-322.

増強期間にかかる費用として別途 11 億スイスフラン（1342 億円）がかかる見込みである⁽¹³⁴⁾。

3 FCC-hh の建設・実験計画

FCC を推進する研究者らが発表した概念設計報告書において、最初から FCC-hh のみを建設する場合と、前述の FCC-ee の設置跡地に FCC-hh を設置する場合の両者が併記される形になっている。トンネルの形状や建設地等は、FCC-ee とほぼ同様である⁽¹³⁵⁾。

FCC-hh のみを建設する場合、完成するまでに 23 年間かかる見込みである。このうち、8 年間は準備段階、15 年間は建設段階であり、各内容は FCC-ee とほぼ共通である。2020 年に開始した場合、衝突型加速器としての稼働は 2040 年代半ばからとなる⁽¹³⁶⁾。

FCC-ee の跡地に建設する場合は、既存の設備の多くが再利用され、2 つの地下実験室等が追加される。FCC-ee の稼働中に準備が行われ、FCC-ee の運用終了後に 10 年ほどで建設が行われる。建設の工程は、FCC-ee の装置の撤去、土木工事、新たな装置の設置や試運転等を含む。2020 年に FCC-ee の準備を開始した場合、FCC-hh の稼働は、2060 年代半ばからとなる⁽¹³⁷⁾。

完成後は、25 年間かけて、最大 100TeV のエネルギーで陽子同士の衝突実験が行われる⁽¹³⁸⁾。粒子同士の衝突地点は、4 か所設定される⁽¹³⁹⁾。ヒッグス粒子の性質が研究される⁽¹⁴⁰⁾とともに、標準模型では説明できない現象の探求が計画されている。また、陽子と電子を衝突させる実験⁽¹⁴¹⁾や、重イオン（鉛イオン等）を衝突させる実験⁽¹⁴²⁾も提案されている。

最初から FCC-hh のみを建設する場合の建設費は、計 240 億スイスフラン（2 兆 9280 億円）と見積もられている。FCC-ee よりも高額なのは、強力な超伝導電磁石として、ニオブ・スズ合金（Nb₃Sn）を導入する必要があるため、建設費総額の約 4 割に相当する 94 億スイスフラン（1 兆 1468 億円）を占める。また、FCC-ee の跡地に FCC-hh を設置する場合の建設費は、計 170 億スイスフラン（2 兆 740 億円）とされている⁽¹⁴³⁾。

Ⅶ 円形電子・陽電子衝突型加速器（CEPC）

1 計画の経緯

CEPC は、中国科学院高能物理研究所（Institute of High Energy Physics: IHEP）が計画中の、電子と陽電子を衝突させる円形の大型衝突型加速器である。ヒッグス粒子の発見が発表された直後の 2012 年 9 月に、ヒッグス粒子の研究を目的として構想が提案され、同年 11 月に開催された ICFA のワークショップで発表された⁽¹⁴⁴⁾。2013 年 9 月、CEPC の計画発足の会議が北京

⁽¹³⁴⁾ *ibid.*, pp.571-572.

⁽¹³⁵⁾ A. Abada et al, "FCC-hh: The Hadron Collider: Future Circular Collider Conceptual Design Report Volume 3," *European Physical Journal Special Topics*, Vol.228 No.4, July 2019, pp.888-895. <<https://doi.org/10.1140/epjst/e2019-900087-0>>

⁽¹³⁶⁾ *ibid.*, pp.1055-1056.

⁽¹³⁷⁾ *ibid.*, pp.1056-1057.

⁽¹³⁸⁾ *ibid.*, pp.787-788, 822-825.

⁽¹³⁹⁾ *ibid.*, pp.776, 952.

⁽¹⁴⁰⁾ *ibid.*, pp.790-791.

⁽¹⁴¹⁾ *ibid.*, pp.794-796.

⁽¹⁴²⁾ *ibid.*, pp.796-799.

⁽¹⁴³⁾ *ibid.*, pp.1057-1059.

⁽¹⁴⁴⁾ CEPC Study Group, *CEPC Conceptual Design Report*, Volume I - Accelerator, August 2018, pp.17, 20. <<https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1809/1809.00285.pdf>>

で開催され⁽¹⁴⁵⁾、主に中国国内で検討が進み、2015年3月に準備段階の概念設計報告書が公表された。この時点では、加速器の大きさとして、全周 54.374km が想定されていた⁽¹⁴⁶⁾。

その後、CEPCの研究を目的とする会議が中国で開催され、外国の研究者を招いた国際諮問委員会での検討も行われた。2017年4月に進捗報告書⁽¹⁴⁷⁾が発行され、2018年には概念設計報告書が公表された。この報告書では、大きさが全周 100km に変更されている⁽¹⁴⁸⁾。

CEPCの計画は、CERNのFCCに極めて類似しており、互いに競合するものである。IHEPの王貽芳所長は、欧州素粒子物理戦略2020年改訂版にCEPCが記載されることを希望していたが⁽¹⁴⁹⁾、採択された戦略には不記載であった。

2 建設・実験計画

概念設計報告書によると、地下 100m に全周 100km のおおむね円形のトンネルが建設され、互いに逆回りの電子加速器及び陽電子加速器が設置される⁽¹⁵⁰⁾。粒子同士の衝突地点は、2か所設定される⁽¹⁵¹⁾。トンネル断面はFCCと同様の円形ではなく、幅が6m、高さが5mのかまぼこ型である⁽¹⁵²⁾。建設地は、良質な岩盤であって起伏が少ないこと、アクセスしやすいこと、自然保護区・公園・軍事区域・湿地等がないこと等の条件を満たす場所が候補となる⁽¹⁵³⁾。候補地として、河北省秦皇島市、浙江省湖州市、吉林省長春市、湖南省長沙市、広東省深汕特別合作区、陝西省黄陵県、河北省保定市の7か所が紹介されており⁽¹⁵⁴⁾、特に秦皇島市、湖州市、長春市、長沙市が有力とされる⁽¹⁵⁵⁾。

2022年までに研究開発及び技術設計報告書の作成が行われ、2022～30年が加速器の建設期間と予定されている⁽¹⁵⁶⁾。完成後は、2040年まで10年間の実験が行われる見込みである。10年間のうち7年間は、ヒッグスファクトリーとして稼働する期間である。この期間では、240GeVのエネルギーで衝突させることにより、ヒッグス粒子の研究が行われる。それ以外に、2年間かけて91.2GeV付近で衝突させることによりZ粒子の性質が、1年間かけて158～172GeVで衝突させることによりW粒子の性質が、それぞれ研究される⁽¹⁵⁷⁾。以上の研究内容は、FCC-eeの内容と重複する。

⁽¹⁴⁵⁾ “Events in the Past.” CEPC Website <<http://cepc.ihep.ac.cn/event-s-p2.html>>

⁽¹⁴⁶⁾ CEPC-SPPC Study Group, *CEPC-SPPC Preliminary Conceptual Design Report*, Volume II - Accelerator, March 2015, p.301. <http://cepc.ihep.ac.cn/preCDR/Pre-CDR_final_20150317.pdf>

⁽¹⁴⁷⁾ CEPC-SPPC Study Group, *CEPC-SPPC Progress Report (2015-2016): Accelerator*, April 2017. <<http://cepc.ihep.ac.cn/preCDR/Progress%20Report.pdf>>

⁽¹⁴⁸⁾ 概念設計報告書の本文では全周が99.666km、別表では100.0164kmとなっている。CEPC Study Group, *op.cit.*⁽¹⁴⁴⁾, pp.340-341, 440.

⁽¹⁴⁹⁾ Elizabeth Gibney, “Inside the plans for Chinese mega-collider that will dwarf the LHC,” *Nature*, 23 November 2018. <<https://doi.org/10.1038/d41586-018-07492-w>>

⁽¹⁵⁰⁾ CEPC Study Group, *op.cit.*⁽¹⁴⁴⁾, pp.334-335, 340-341, 440.

⁽¹⁵¹⁾ *ibid.*, pp.24-25.

⁽¹⁵²⁾ *ibid.*, pp.166-170.

⁽¹⁵³⁾ *ibid.*, p.335.

⁽¹⁵⁴⁾ “The CEPC Project.” CEPC Website <<http://cepc.ihep.ac.cn/intro.html>>

⁽¹⁵⁵⁾ Xinchou Lou, “A circular electron-positron Higgs factory for the world,” *Innovation Platform*, Vol.6, June 2021, pp.24-25. <<https://edition.pagesuite-professional.co.uk/html5/reader/production/default.aspx?pubname=&edid=e3d49584-51a4-4ec2-a99d-98a0800a4de7&pnum=24>>

⁽¹⁵⁶⁾ CEPC Study Group, *op.cit.*⁽¹⁴⁴⁾, pp.437-438.

⁽¹⁵⁷⁾ CEPC Study Group, *CEPC Conceptual Design Report*, Volume II - Physics & Detector, October 2018, pp.3-4. <<https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1811/1811.10545.pdf>>

FCCと同様に、CEPCも電子と陽電子の衝突実験後に、陽子同士を衝突させる加速器を設置する構想があり、Super Proton-Proton Collider (SPPC)と呼ばれている。SPPCでは、最大125～150TeVで衝突させることにより、標準模型を超える物理学研究が目的となる⁽¹⁵⁸⁾。

建設費は、過去のCERNの衝突型加速器建設にかかった費用を基に検討されていて、その上で中国の物価が安いこと等を踏まえて、CERNが建設するより半額未満になると概算されている。全費用の49%が加速器に、30%が土木工事に、12%が検出器にかかる見込みである⁽¹⁵⁹⁾。実際の金額は、300億元（5280億円）程度であるとされている⁽¹⁶⁰⁾。

おわりに

世界中の素粒子物理学の研究者によって提案されている4つの大型衝突型加速器計画は、科学的及び社会的な側面で大きなインパクトがある。

科学的な側面としては、4つの計画のいずれかがヒッグスファクトリーとして実現した場合には、ヒッグス粒子の質量や他の素粒子との結合の強さ、珍しい崩壊の探索等の精密測定は達成されよう。これにより、物質と反物質の量の非対称性や暗黒物質の正体、ヒッグス粒子の質量の不自然な小ささ等の標準模型では説明できなかった事実の理由を実験的に明らかにし、標準模型を拡張した新しい理論を構築できる可能性がある。

その一方で、CERNのLHCでは、7～8TeVのエネルギーでの衝突実験でヒッグス粒子が発見された後も、更に強化して13TeVでの実験が続けてられてきたが、2021年現在で新粒子の発見や標準模型を超える現象の発見には至っていないこともあり⁽¹⁶¹⁾、新たな大型衝突型加速器で重大な発見につながることに懐疑的な見方もある⁽¹⁶²⁾。

社会的な側面としては、次世代の衝突型加速器は全世界が協力して運営する国際的な研究拠点となり、CERNと同様に研究者間の協働と各国の行政間の協力関係を促進させる役割を果たすことが期待される。実際に科学施設が民族的差異やナショナリズムを中和して、国際平和に貢献してきたことが指摘されてきた。それ以外にも、国際的な技術供与や教育の場の提供といった効果もある⁽¹⁶³⁾。

一方で、いずれの計画も研究者によって推進されている状況であり、各国政府が公式に承認したり、推進したりしている段階ではない。その背景には、巨額の投資が必要であり、一国のみで実現することが困難な状況がある。過去には、米国がほぼ独力で建設を開始したものの、1993年に断念した円形で全周87.1kmの超伝導超大型衝突型加速器（Superconducting Super Collider: SSC）の事例もある。経費が見積り時よりも大幅に増加したことや、従来の研究所と

⁽¹⁵⁸⁾ CEPC Study Group, *op.cit.*(144), pp.302-303.

⁽¹⁵⁹⁾ *ibid.*, pp.433-436.

⁽¹⁶⁰⁾ Gibney, *op.cit.*(149)

⁽¹⁶¹⁾ ATLAS Collaboration, "Search for squarks and gluinos in final states with one isolated lepton, jets, and missing transverse momentum at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector," *European Physical Journal C*, Vol.81 No.7, July 2021, 600. <<https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-021-09344-w>>; *idem*, "Search for phenomena beyond the Standard Model in events with large b -jet multiplicity using the ATLAS detector at the LHC," *European Physical Journal C*, Vol.81 No.1, January 2021, 11. <<https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-020-08730-0>>

⁽¹⁶²⁾ 「ILCの実像（1）建設費8000億見合うか」『読売新聞』（岩手版）2020.10.3, p.23.

⁽¹⁶³⁾ 栗木雅夫「国際科学プロジェクトの社会的意義」『加速器』14巻4号, 2017, pp.205-206. <<https://www.pasj.jp/kaishi/cgi-bin/kasokuki.cgi?articles%2F14%2Fp201-207.pdf>>

は異なる全く何もない場所を建設地として選択してしまったこと等がその理由であった⁽¹⁶⁴⁾。4つの計画のいずれかの建設を実現するためには、ホスト国がリーダーシップを発揮して、国際的な経費分担を取り決めることが必要不可欠であり、国際協力を前提とした人材の育成・確保、求められる新技術の開発、建設工事における環境への配慮等も必要である。

ILC計画は、技術設計報告書が既に公開されており、概念設計報告書の公開段階である他の3つの計画よりも一歩進んだ段階にある。近年の先端科学分野における中国の台頭への危機感により、日本がILC計画を積極的に進めるべきであるとの海外からの声もある⁽¹⁶⁵⁾。いずれの計画においても、国民及び科学コミュニティの理解を得ながら、慎重に検討を進めていくことが求められる。

(ふくだ かずき)

(164) David Appell, "The Supercollider That Never Was," *Scientific American*, October 15, 2013. <<https://www.scientificamerican.com/article/the-supercollider-that-never-was/>>

(165) 「欧米「日本で次世代加速器建設を」 先端科学 中国先行に危惧 8000億円、日本は負担懸念」『日本経済新聞』2020.7.16, p.2.

別表 研究者によって計画中の4つの大型衝突型加速器（電子・陽電子衝突型のみ）

名称	ILC	CLIC	FCC	CEPC
建設候補地	日本	スイスのジュネーブ付近（フランスにまたがる）	スイスのジュネーブ付近（フランスにまたがる）	中国
形状	直線形	直線形	円形	円形
メイン加速器のトンネルの全長（全周） ^(注1)	20.5495km	12.070km （メイン加速器の全長は11.4km）	97.756km	100km （概念設計報告書では、99.666km及び100.0164kmの両者が記載されている）
計画の経緯	1980年代各国で大型化の研究開始 2004年計画一本化 2008年以降各国が撤退 2017年縮小計画の公開	1985年研究チーム発足 1988年設計開始 1991年以降試験施設で実験	2014年計画発足の会議 -2027年頃技術的・財政的な実現可能性の調査	2012年計画提案 2013年計画発足の会議
設計報告書の公開	2007年基準設計報告書（概念設計報告書と同等） 2013年技術設計報告書	2011-12年概念設計報告書	2019年概念設計報告書	2015年準備段階の概念設計報告書 2018年概念設計報告書
欧州素粒子物理戦略における言及	2006年版：あり 2013年版：あり 2020年版：あり	2006年版：あり 2013年版：なし 2020年版：なしであるが、戦略内容の一部を達成可能	2006年版：なし 2013年版：計画立案のきっかけとなる 2020年版：あり	2006年版：なし 2013年版：なし 2020年版：なし
準備から実験開始までの見通し	【2019年公開の計画文書及び2021年公開のILC準備研究所の提案書の記載に従う場合】 2022-27年準備 2027-36年頃建設 2037年頃試運転 2038年頃実験開始	【概念設計報告書の記載に従う場合】 -2025年準備 2026-34年建設・試運転 2035年実験開始	FCC-eeについて 【LHC稼働終了後に建設開始と想定する場合】 -2038年頃準備（LHC稼働中） 2038-48年頃建設 2048年頃実験開始 【概念設計報告書の記載に従う場合】 -2028年準備 2028-38年建設・試運転 2039年運転開始	【概念設計報告書の記載に従う場合】 -2022年準備 2022-30年建設 2030年実験開始
建設費用 ^(注2)	本体建設費 6350-7028億円 検出器関係経費 1005億円 （本体建設費・検出器関係経費の不定性相当経費（約25%）が追加でかかる可能性あり） 準備経費 233億円	7186億円 （労務費を含まない）	FCC-eeのみの場合 建設費 1兆2810億円 稼働後10年目の休止・増強期間の費用 1342億円	5280億円程度 （SPPCを含まない）

(注1) メイン加速器用のトンネルのみを対象とし、他の設備（ダンピングリング等）用のトンネルを含まない。

(注2) CLIC、FCC、CEPCについては、比較のために円換算した値を示した。ただし、対象として含む範囲が異なり、単純比較が難しいことに注意。

(出典) 各計画の設計報告書や計画を推進する研究所のウェブサイト等を基に筆者作成。