

国際リニアコライダー

その展望とKEKの取組み

VOL

03 ILCの実験装置

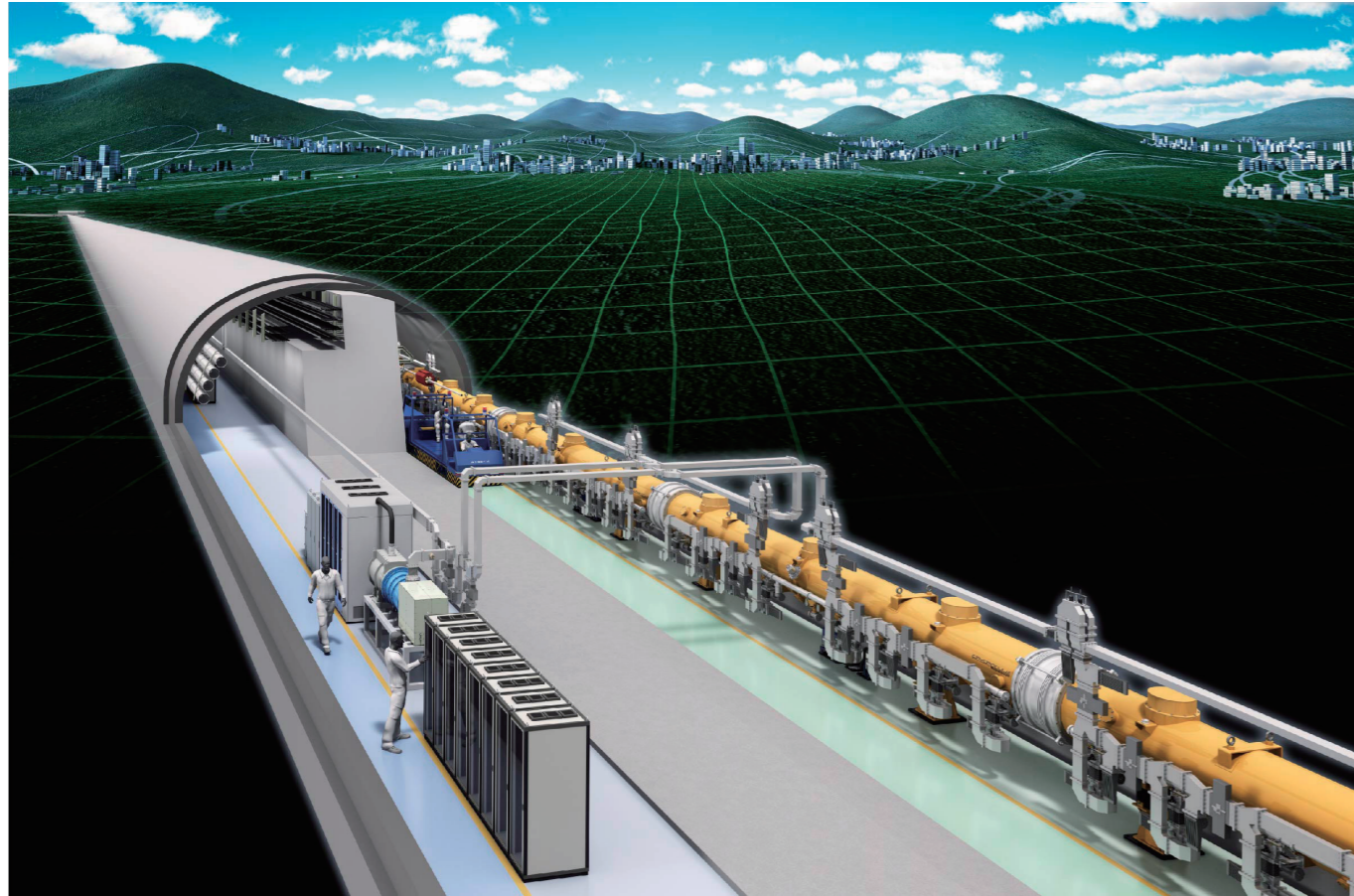
この冊子について

この冊子は、高エネルギー加速器研究機構(KEK)で行な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。

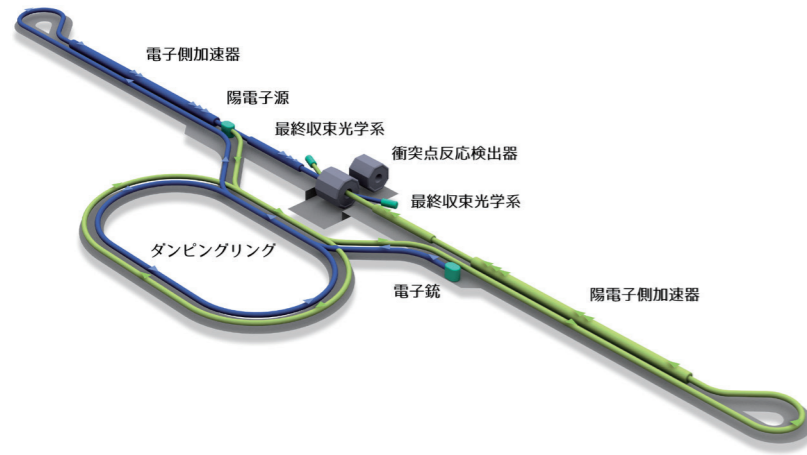
4分冊構成になっており、第1分冊では全ての項目を網羅した概要を解説しており、第2～第4分冊では各項目をより深く解説しています。

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が、この時代を可能にした発明の一つが加速器であろうと思います。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、大きさでいえば周長が山手線と同じくらいのもまで作られています。これによって非常に小さな極微の世界、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。また、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を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。

それだけではありません。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がわかるようになり、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ていて、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、さまざまな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。ここで開発された技術の波及によって多様な加速器が実現されてきたのが加速器文明の歴史であるといつてよいと思います。

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的大型加速器で、円形加速器が80年かかって挙げてきた大きな成果を、次に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、その波及によって新しい加速器の歴史が始まるという、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は重要な発見によって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大きな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ことはおそらく想像し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起きるか、全貌が見えるのは100年先かもしれませんが、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思っております。

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

03 ILCの実験装置

巻頭言3
ILCの実験装置・概要6
加速器8
加速器を支える技術	...16
衝突反応測定器	...26
衝突反応測定器を支える技術	...28

第三分冊：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3分冊では、加速器と物理実験が一体となった実験装置と、それらを支える先端技術を紹介します。第1章では、実験装置全体の概要、第2、3章では、加速器およびその基幹技術となる超伝導技術、ナノビーム技術、第4、5章では、物理実験のための測定器、そしてそれを支える測定器技術を紹介します。

1. ILC の実験装置・概要

国際リニアコライダー(ILC)では、電子とその反粒子である陽電子を世界最高のエネルギーまで加速し、正面衝突させる実験を行います。この衝突によって宇宙初期・ビッグバン直後に相当するエネルギー状態を作り出し、そこで生まれる素粒子の性質を調べます。そして素粒子により形作られる宇宙と、素粒子を支配する基本法則を探ります。

この衝突を起こすための装置がILC加速器です。全長20キロメートルの地下トンネルに、衝突エネルギー250ギガ電子ボルト(GeV)の実験装置を実現し、将来的には全長50キロメートル、衝突エネルギー1テラ電子ボルト(TeV=1,000GeV)を展望する壮大な計画です。この加速器では、電子・陽電子ビームの発生と予備加速、ビームに含まれる電子や陽電子の向きをばらつきを減衰させて良質なビームに整えるダンピングリング、直線的にビームを加速する主線形加速器、ビーム衝突点に向けたビームの絞り込みを行う最終収束光学系を経て、最高エネルギーでの電子と陽電子の正面衝突実験を実現します(図1)。

電子と陽電子を衝突させただけでは、何が起きているのかわかりません。それを調べ、目に見えるようにする装置が、衝突反応測定器(測定器)です。測定器は、電子と陽電子の衝突点をすっぽりと取

り囲むように設置され、衝突反応を記録するいわば巨大な超高速・高性能カメラのようなものです。加速器と測定器が一体となってILCの実験を行います。この測定器の中に一方から電子、反対側から陽電子が入射され、真ん中で正面衝突します。電子と陽電子は消滅して純粋なエネルギーの塊になり、そこから「重たい粒子(エネルギーが高くて質量が大きな粒子)」が生成されます。アインシュタインの述べた「エネルギーは物質の質量と同等である($E=mc^2$)」という式の通り、エネルギーの質量への転換が起きるのです。

重たい粒子は、すぐにより軽い粒子に変身(崩壊)し、それが四方八方に飛び散ります。これらの粒子をしっかりと捉えるために、様々な種類の観測装置を木の年輪のように幾重にも重ねあわせて巨大な測定器を構成します。異なる特色を持った測定器要素を芯となるビーム衝突点から外側に積み重ねることで、様々な粒子を逃さず観測できます。粒子群から得られる情報から、はじめに生成された重い粒子の性質や、従う物理法則を調べるのです。

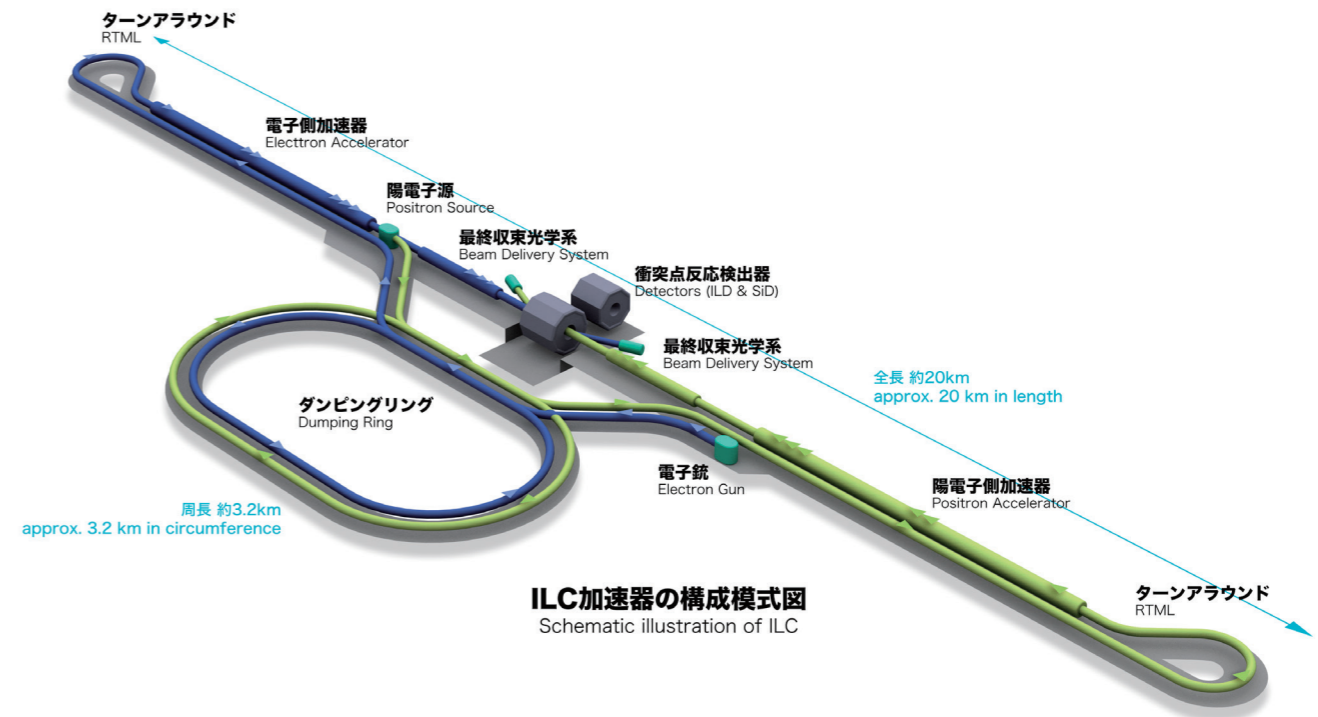


図1 / ILC加速器の構成・レイアウトの概要 ©Rey. Hori

電子ボルト

電子が電圧1ボルト(V)の電極間で加速された時、電子が得るエネルギーを1電子ボルト(eV)と呼びます。より大きな加速エネルギーを表すために、以下のように1000倍毎に呼び方が変わります。

- 1,000V = 1 KeV, (キロ電子ボルト)
- 1,000,000 eV = 1 MeV (メガ電子ボルト)
- 1,000,000,000 eV = GeV (ギガ電子ボルト)
- 1,000,000,000,000 eV = TeV (テラ電子ボルト)

2. 加速器

加速器の発展

「加速器」は粒子を加速し、エネルギーを高める装置の総称です。加速器は20世紀後半に飛躍的に発展し、宇宙の始まりにおける素粒子の誕生、構成、生い立ち、そしてそれらの性質を探る装置(プローブ)の役割を果たしてきました。

粒子の加速には電気力(電場)を用います。電気を帯びた粒子(荷電粒子)は、二つの電極板で作られ電場に入ると、反対の電荷の電極板に引き寄せられます。マイナスの電荷を持つ電子ならプラスの電極に、電荷がプラスの陽電子ならマイナスの電極に向かって引き寄せられます。このように荷電粒子は電場からエネルギーをもらって加速されます(図2)。このような電場を「加速電場」と呼びます。加速電場をたくさん繋げば、その距離が長いほど粒子が加速され、高いエネルギーの加速器を作ることができます。これが加速装置の基本的な原理です。

本格的な粒子加速器の実験は、1930年代にジョン・コッククロフトとアーネスト・ワルトンによって考案された直流高電圧による「静電場加速器(コッククロフト・ワルトン型加速器)」や、アーネスト・ローレンスによって考案された、高周波空洞技術を取り入れた円軌道加速器「サイクロトロン」などから始まりました。

これらの加速器は科学的に大きな役割を果たし、コッククロフトとワルトンは、静電型加速器を使った「人工的に加速した原子核粒子による原子核変換」で、ローレンスは「サイクロトロンの開発および人工放射性元素の研究」の功績でノーベル物理学賞を受賞しました。

1944年には「位相安定性の原理(特定の高周波位相の周囲には、エネルギーのばらついた粒子が集ま

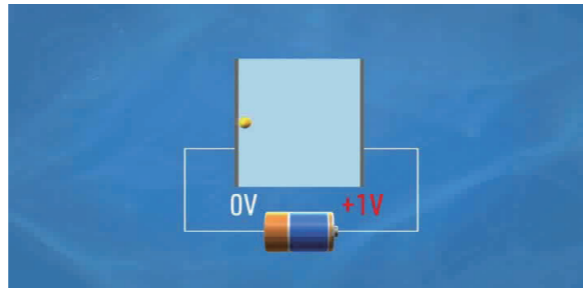


図2 / 電場で電子を加速
電子は、二つの電極間の電場によって加速される

り、安定に高エネルギーまで加速できる)」が発見され、この原理を加速に用いる加速器であるシンクロトロンが誕生しました。さらに1952年、四重極磁石などを用いた「強収束の原理(極性が交代する2種類の四重極磁石を周期的に並べると、垂直・水平方向が独立に収束する)」が発見され、粒子を加速するエネルギーはそれまでの1万倍から10万倍もの、飛躍的な進歩を遂げました。

一方、加速された粒子ビームを使った実験方法にも革命的な進歩がありました。当初は、粒子ビームを固定した標的に当て、どのような粒子が出てくるかを観測していました。この方式では、粒子ビームが持つエネルギーのごく一部が反応に用いられるだけですが、2つの粒子ビームを正面からぶつければビームのエネルギーが効率良く反応に使われます。そこで、加速した粒子同士を正面衝突させる衝突型加速器(コライダー)が開発され、衝突エネルギーが飛躍的に発展しました(図3)。現在では、最も効率の良い標準的な方式になっています。



私がまだ若かったころの話です。作者もタイトルも覚えていないのですが、あるSF小説の最初のページをよく覚えています。その最初のページには「高エネルギー物理と地上天文学の研究は、もはや行われていない。なぜなら、施設があまりに高価になり過ぎたからだ」と書かれていたのです。それはビーム衝突が発明される前の話でした。ビーム衝突技術のおかげで、私たちが今実現しているエネルギーの加速器が建設できるようになったのです。

電子コライダーは、注目されるべき価値あるものですが、まだ理解が進んでいないようです。

バートン・リヒター博士(1976年ノーベル物理学賞) ILC応援メッセージより抜粋

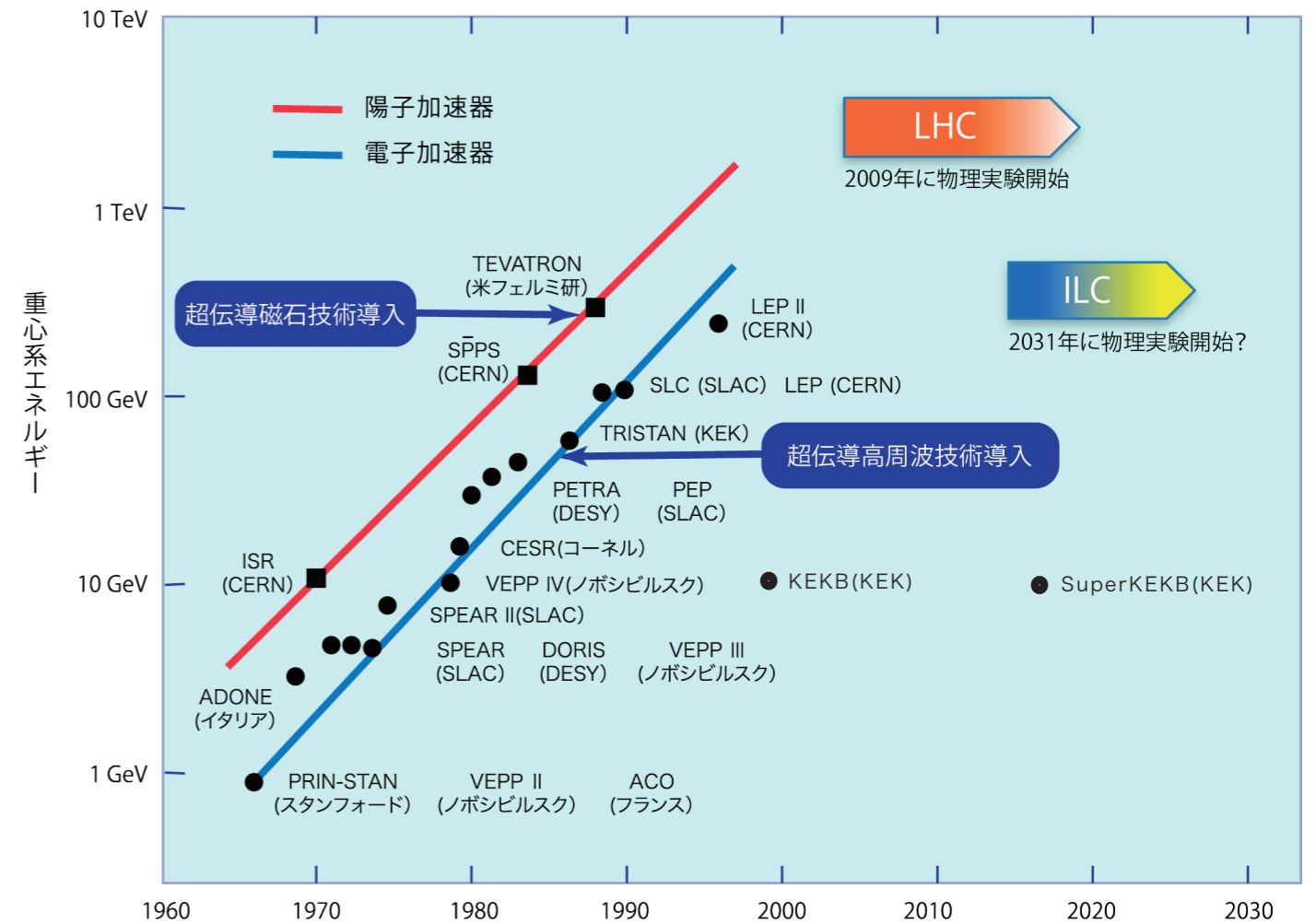


図3 / 加速器の発展
衝突型加速器における加速エネルギーの進展。陽子加速器では、超伝導磁石、電子加速器では、超伝導高周波技術の導入が、エネルギーフロンティアにおける鍵を握る

素粒子の衝突と複合粒子の衝突

現在加速器の標準となっている衝突型加速器は、衝突させる粒子の違いで分類されます。

すでに欧州で稼動している欧州合同原子核研究機関(CERN)の大型ハドロン衝突型加速器(LHC)は陽子同士を衝突させる加速器です。陽子は素粒子ではなく、3つのクォークからなる複合粒子です。陽子のような複合粒子同士を衝突させると、衝突エネルギーを大幅に高めることが可能になります。これまで探索できなかったエネルギー領域に到達することができ、新しい粒子の発見に力を発揮します。しかし、陽子の中の1対のクォーク同士がぶつくと、それ以外の陽子の中身の素粒子も一緒に飛び散ります。これが余分な反応(ノイズ)となり、その衝突の中心が見えづらいという欠点もあります。複合粒子同士を衝突させる加速器を総じて「ハドロン・コライダー」と呼びます。

ILCは電子とその反粒子である陽電子を衝突させます。電子も陽電子も、それ以上小さくできない素粒子です。素粒子には中身がないので、衝突したときに余分な反応がおきないことが大きな特徴で

す。ノイズの少ないクリーンな衝突現象を観測することができ、精密な観測に圧倒的な優位性を発揮します(図4)。また、衝突時の初期エネルギーが明確で、明解な実験を実現できることも大きな利点です。

ILCのような素粒子同士を衝突させる加速器は「レプトン・コライダー」と呼ばれます。

加速器による素粒子物理学は、ハドロン・コライダーとレプトン・コライダーの両者による相乗的な成果で発展してきました。ILCはLHCとの相乗的な役割が期待されています。LHCは、ヒッグス粒子の発見という目覚ましい成果をあげました。そこで、ヒッグス粒子の性質等の詳細を調べられるILCの早期実現に大きな期待が寄せられているのです。

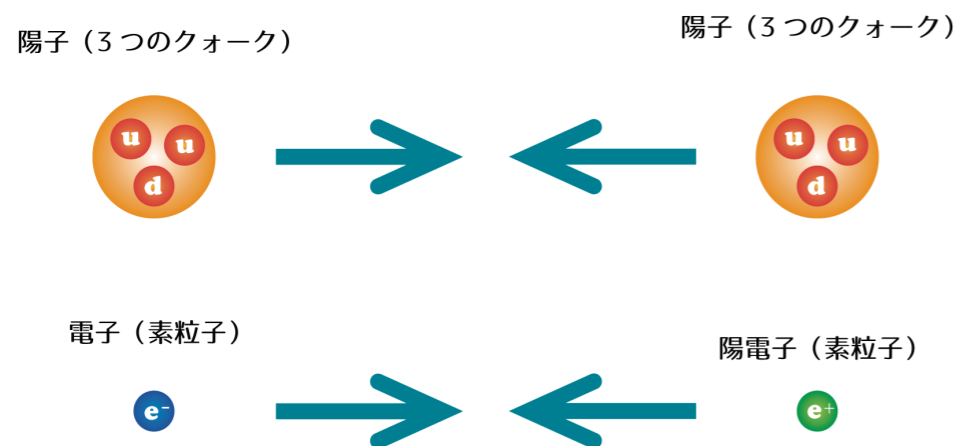


図4 / 陽子同士の衝突と、電子・陽電子衝突

クォーク複合体としての陽子・陽子衝突は衝突エネルギーを大幅に高めることができる一方で、衝突反応が複雑になり、解析が難しくなる。素粒子単体同士の衝突である電子・陽電子衝突は、クリーンな実験を実現することができる

円形加速器と直線(リニア)加速器

加速器は、大きく円形加速器と直線加速器に分類されます。電子と陽電子を衝突させる場合は、円形加速器だと円軌道を周回する電子が放射光を放出してエネルギーを失ってしまいます(シンクロトロン放射)。この損失を緩和するには円の半径を大きくする必要がありますことから、加速器は大型化してきました。しかし、この損失はエネルギーの4乗で増えるため、高エネルギー化につれて現実的な規模の限界を迎えています。

これまでの最大の電子円形加速器はCERNの大型電子・陽電子衝突型加速器(LEP)で、その周長は27キロメートルです。LEPでは円形加速器限界の衝突エネルギー210GeVに至りました。

研究者の間では、さらなる高エネルギー電子加速器を実現するために、放射光損失効果を受けない直線型加速器が不可欠と認識されています(図5)。しかし、直線型加速器の実績は、米国で実現されたスタンフォード線形衝突型加速器(SLC)しかありません。これまで直線加速器の実現が技術的に困難だった理由は、加速効率と衝突頻度にありました。

円形加速器では、円周部のごく一部が直線加速部で、最初は低いエネルギーの電子あるいは陽電子から加速を開始し、周回毎に加速部で加速しながらエネルギーを高めます。そして、最高エネルギーに到

達した後に、逆方向に回っている電子ビームと陽電子ビームを交差させます。円形加速器では、電子ビームと陽電子ビームを何度も交差させることで衝突頻度を高められます。

一方、直線加速器ではビームを周回させることができず、長い加速部を一度通過するだけです。このため、単位長さ当たりの加速量を大きくすること、また加速器の効率を高める必要があります。ILCでは「超伝導加速技術」を採用し、加速効率を飛躍的に高めました。また、電子・陽電子ビームは加速後に1回しか交差しないので、衝突頻度を高める技術も重要となります。ILCではビームを極小サイズに絞り込む「ナノビーム技術」で、衝突頻度を向上させます。ILCは、これら2つの技術を駆使することで、SLCを超える新たなリニアコライダーの扉を開きます。

超伝導技術とナノビーム技術については、第3章で詳述します。

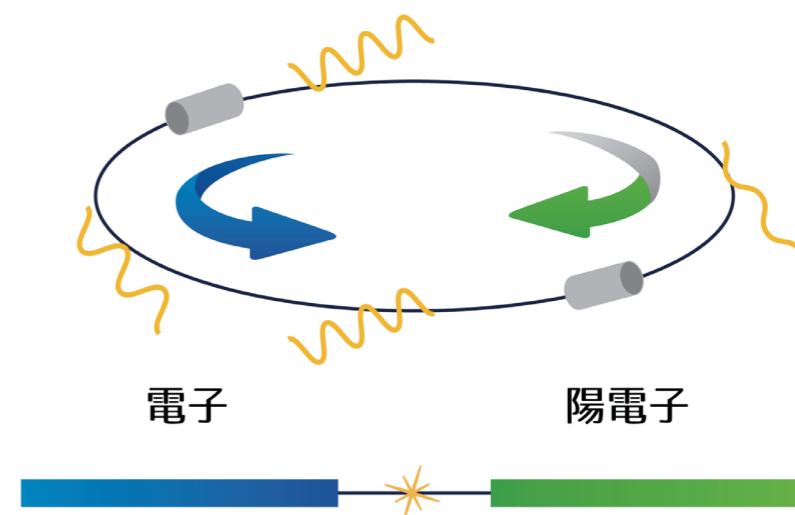


図5 / 円形加速器から線形加速器へ

電子線形加速器では、放射光損失の制約を受けず、加速エネルギーをあげることができる

ILC加速器の構成

ILC加速器は初期計画として、衝突エネルギー250ギガ電子ボルト(GeV)の加速器を想定しています。ヒッグス粒子を大量に作り、その性質を詳しく調べることができるので「ヒッグス・ファクトリー(ヒッグス工場)」とも呼ばれます。ヒッグス粒子研究の成果を踏まえて、直線型加速器の拡張性を生かし、将来的にエネルギー増強を図ることが期待されています。将来構想としては、衝突エネルギー500 GeVから1テラ電子ボルト(TeV)、全長30~50キロメートルの展望を持っています。

ILC加速器の主な構成は、(1)電子・陽電子源、(2)ダンピング(減衰)リング、(3)主線形加速器、(4)衝突点へのビーム供給システム(最終収束光学系)、(5)ビーム衝突点などです(図6)。

電子源で生成された電子ビームは、予備的な加速で速度を上げた後、ダンピングリングと呼ばれる周長3キロメー

トルの円形加速器に送られます。ここで、電子ビームの向きを進行方向と平行に揃え(向きのばらつきを減衰させ)、良質なビームを準備します。その後、電子ビームは主線形加速器の最上流端に送られて向きを変え、直線的に連続加速されます。陽電子も同様に段階的に加速されます。中央部から見て片側のトンネルには電子ビーム用の主線形加速器、反対側には陽電子ビーム用の主線形加速器が設置されます。ビームは、中央の衝突点の直近で強く絞り込まれて正面衝突します。ダンピングリングで超平行ビームに質を高めることで、主線形加速器での加速後、衝突点でビームをナノメートル(10億分の1メートル)レベルに絞りめず。

各加速段階を次ページに紹介します。

※ ILCは当初構想として、電子ビーム 250 GeV、陽電子ビーム 250 GeV、衝突エネルギー500 GeV の衝突型加速器として設計されました。

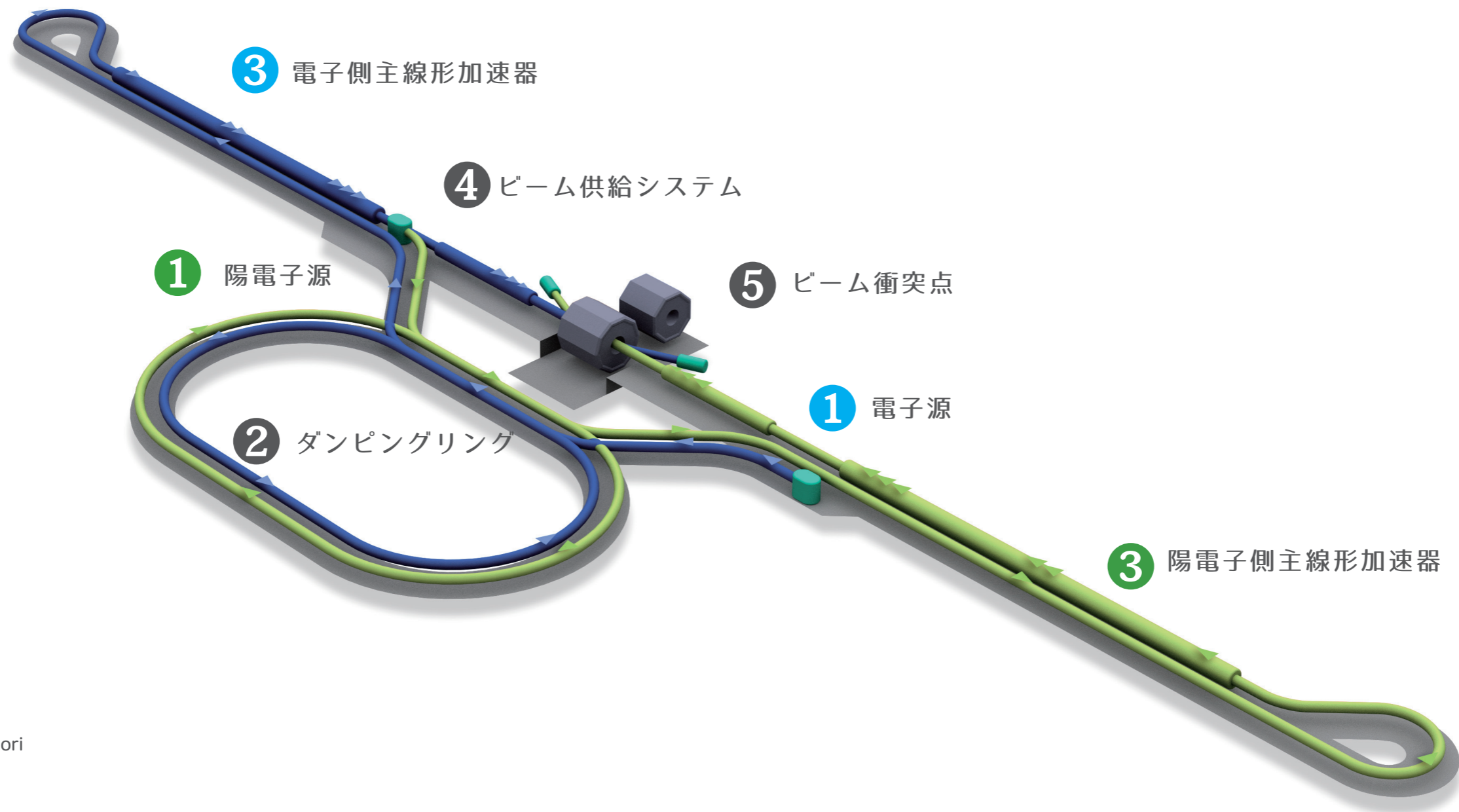


図 6 / ILC概念図 ©Rey. Hori

電子・陽電子の生成

素粒子は一般に「スピン」と呼ばれる自転するコマのような性質を持ち、スピンの向きには「上向き」「下向き」の2種類があります。スピンの向きが違えば同じ粒子でも性質が異なるため、スピンの向きを揃えると(偏極)、それぞれの向きの粒子を使って実験を行うことで、より多くの情報を引き出すことができます。

電圧をかけた電極にレーザー光線を当てると、電子が放出されます。レーザー光線を偏光(振動方向を一定にする)させると、放出される電子が偏極します。偏極した電子を約200億個の一塊(パンチ)としたものが電子ビームです。ILCでは、約1000分の1秒に1300パンチ、1秒間に5回(5ヘルツ)の頻度で電子ビームを打ち出します。

陽電子は、通常、自然には存在せず、作り出す必要

があります。ILCでは、陽電子の生成に電子加速器を用います。高エネルギーに加速した電子ビームを「アンジュレータ」と呼ばれる繰り返しの磁場の中を通し、蛇行させると放射光(ガンマ線)が発生します。そのガンマ線を金属標的に当てると、電子と陽電子の対が生まれます。そこから陽電子を選択して取り出して陽電子ビームを作ります(図7)。アンジュレータ内の偏向磁石の並べ方を工夫し、電子ビームを螺旋状に蛇行させると、出て来た光が偏光し、陽電子を偏極させることができます。スピンの向きは自在に変えることができ、精度の高い実験を行うことができます。

日本は偏極電子源技術で国際的にトップレベルの技術開発実績を上げています。

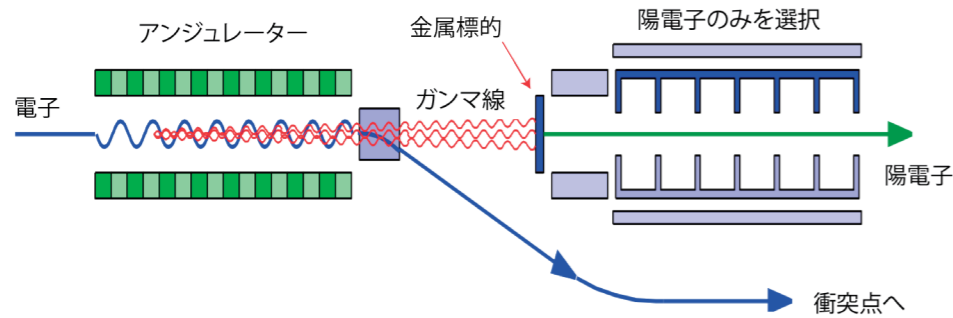


図7 / アンジュレータでのガンマ線の発生から陽電子の生成、加速の概念

ダンピングリング

電子や陽電子のビームの広がりを抑え、平行度を高めるための一周3キロメートルの円型加速器がダンピングリングです。電子や陽電子を5GeVまで予備的に加速した後リング内を周回させます。

ビームは衝突点の直前に、高さ6ナノメートル(10億分の1メートル)の極小サイズに絞り込むのですが、絞り込むためには平行度の高いビームにする必要があります。

ダンピングリングに入射される前の粒子は、様々

な方向を向いています。リングを周回させると、個々の粒子から放射光が放出されます。放出と加速を繰り返すことで、ビームは向きのばらつきが減衰し、平行度が高まります(図8)。向きの揃ったビームほど、細く絞れます。主線形加速器にビームを送り込む前に行うこの行程は、ILCの実験に必須となる極小サイズのビーム(ナノビーム)実現のために非常に重要です。

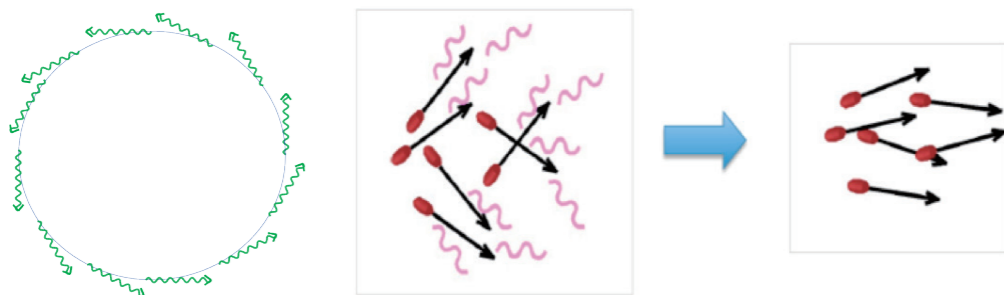


図8 / ビームの平行度が高まる仕組み

線形加速

平行度が高められた電子と陽電子のビームは、主線形加速器に送られて高エネルギーに加速されます。

7ページで述べた通り、ビームの加速には加速電場を使います。直流の電場では、電圧が高くなりすぎると、どこかで放電が起きてしまいます。そこで現代の大型加速器では、一定の電圧内で周期的に極性を反転しつつ電圧が変化する、交流の高周波の電磁場(マイクロ波)で加速電場を作ります。ILCでは、1秒間に13億回極性を変える(1.3ギガヘルツ)高周波を「加速空洞」に送り込んで電磁場を蓄積し、その電場で電子ビームを加速します。

加速空洞はその名の通り中空の装置で、ILCでは9つの膨らみがある空洞(9セル空洞)が採用されます(図9)。各セルの中に、ピンクとグリーンで示した反対向きの電場がありますが、これが1秒間に13億回振動します。空洞の左からタイミングを合わせて電子を入射すると、サーファーが波に乗るように、9つのセル内で右向きの電場の中を通過し、次々と加速された電子が右から出て行くのです。

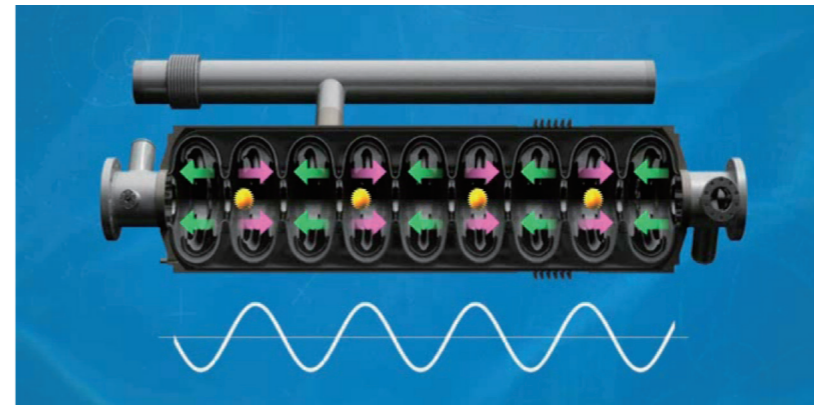


図9 / 9セル空洞でのビーム加速

ビームの絞り込み

主線形加速器で加速された電子と陽電子のビームは、衝突点の直前に極小サイズに絞り込まれます。電子や陽電子は、大きさが測れないほど小さな粒子なので、多くは衝突点で衝突せずにすれ違いますが、そこで、ビームサイズを小さくすることでビーム内の粒子の密度を高めて衝突頻度を高めます。

ナノメートルレベルに絞り込むレンズの役割を果たす数多くの四極磁石を、電子側と陽電子側の700メートルに渡って並べます。ダンピングリングで平行度が高められたビームは、より鮮明な焦点を結びます(図10)。

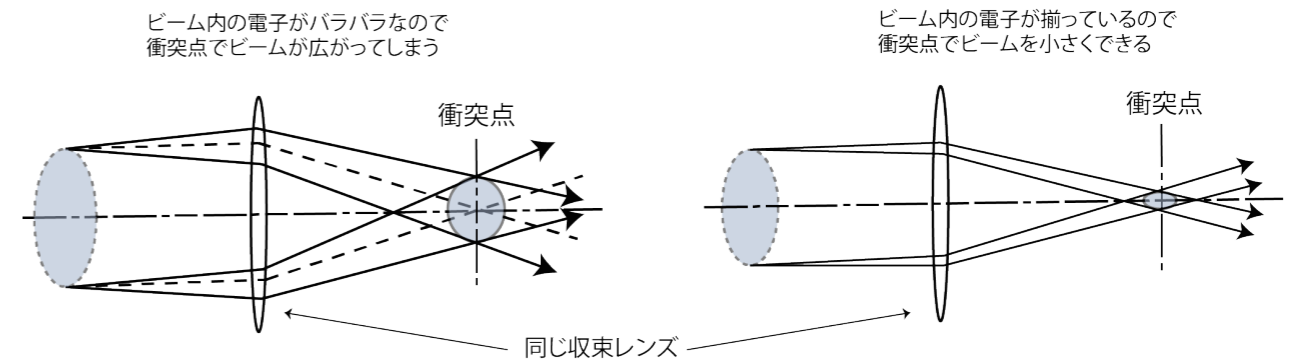


図10 / ビーム絞り込みのしくみ

3. 加速器を支える技術

超伝導加速技術

素粒子実験で加速器に求められる性能のひとつが、高いエネルギーでの衝突です。そのための重要な技術が「超伝導加速技術」です。前項で述べた通り、線形加速器では直線状に長く連結された加速空洞の中を粒子が通過することで連続的に加速されます。超伝導加速技術は、電力効率良くビームを加速するために不可欠な要素技術です。

これまでの加速器は常伝導加速技術による加速が主流でした。しかし、常伝導技術の場合、外部から与える高周波電力の約半分は加速空洞部分での電気抵抗による発熱となって消費され、残りの半分しかビームに伝達されません。超伝導加速器では、高周波電力に対する抵抗値を常伝導加速器より約5桁も低くできます。加速電場を発生する加速空洞部分に電気抵抗がないため、全ての高周波電力をビームに伝達することができ、非常に効率よくビームを加速することができます。

超伝導技術はビーム強度の向上にも利点があります。常伝導加速の場合、加速電場を高くするために加速空洞を小さく作る必要があります。典型的な常伝導加速空洞のビーム口径は約10ミリメー

トルです。口径が小さいほど、粒子ビームを通すのが技術的に難しくなります。超伝導加速技術を使うと、電力ロス(発熱)がないため大きな口径でも高い加速電場を実現できます。口径が大きくなると、ビーム強度(電流)を高めることができ、衝突頻度(ルミノシティ)の向上に有効です。ILCの超伝導加速空洞のビーム口径は約70ミリメートルです。

ルミノシティの向上とともに重要なのがビームパルスの長さです。ビームパルスが短いと、短い時間内に衝突反応が重なってしまうため、測定器で識別することが困難となり、いくらルミノシティを向上させても多くのデータ取得にはつながりません。超伝導技術はビームパルスの長さを約1ミリ秒にすることができます。これは常伝導に比べて1000倍以上長いものです。

ILCでは、高いルミノシティと長いビームパルスを実現することで、より多くの有効な実験データを取得することができるのです。

超伝導加速空洞とクライオモジュール

超伝導加速技術の心臓部が「超伝導加速空洞」です(図11)。ニオブという超伝導体の金属製で、極低温(摂氏マイナス271度)に冷却して、超伝導状態にします。加速空洞の性能は、1メートルごとにどれだけエネルギーが得られるかを示す「加速勾配」という数値で表されます。ILCでは、35メガボルト/メートル(MV/m)(運転時31.5MV/m)を目標にしています。欧米、日本を中心とした国際協力による研究の結果、ILCのための超伝導加速空洞の加速勾配の目標は達成されており、すでに実用化のレベルまで到達しています。性能を表すもう一つの指標が「Q値」です。共振の高さを示すもので、この目標も達成されており、現在、加速勾配とQ値を同時に向上させるための研究を進めています。

超伝導空洞の冷却には電力が必要となりますが、常伝導方式と比較すると、加速器の運転に必要な総電力は約半分に節約できます。

ILCで必要とされる超伝導加速空洞は約8000台です。これらは魔法瓶のような保冷容器(クライオモジュール：図12)に収納します。ILCのクライオモジュールは直径約1メートル、長さが約12メートルの円筒状で、その中に8台または9台の超伝導加速空洞が収納されます。クライオモジュール内部は、断熱のため真空になっており、さらに熱遮蔽シール板などで断熱性能を高めています。加速器トンネル全体で、約900台のクライオモジュールが必要となります。これらを世界で分担して製造します。



図11 / KEKで開発された超伝導加速空洞

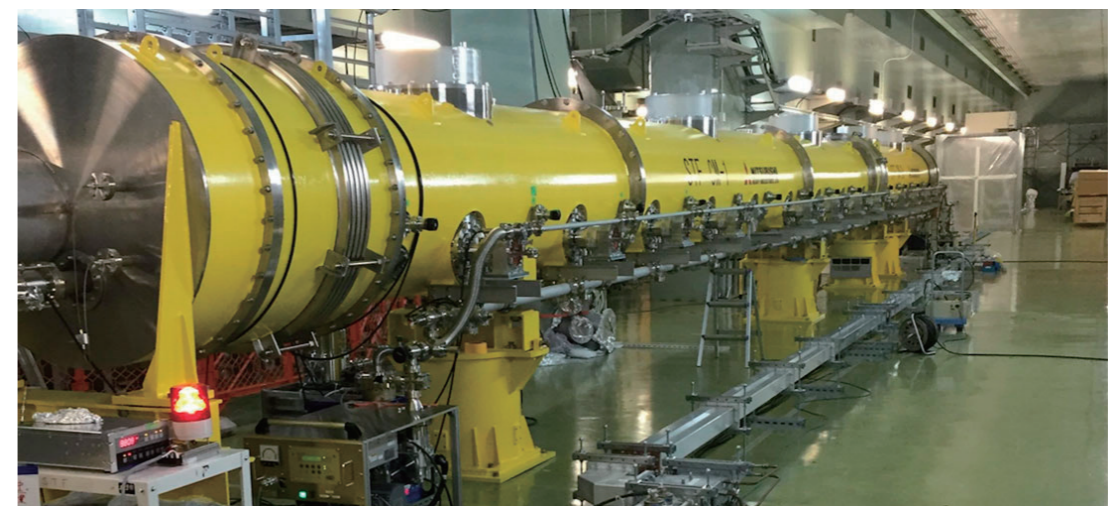


図12 / KEKで試験が行われているILC型クライオモジュール

KEKの超伝導加速器開発

1986年に完成した「TRISTAN計画」では、世界に先駆けて32台の5セル超伝導ニオブ空洞を加速器に採用しました。そして、加速勾配約5MV/mでの加速の実用化に成功し、超伝導加速器の国際的な歴史にマイルストーンを築きました(図13)。

1998年には、世界でも最高レベルの性能を持つKEKB加速器を完成させ、ここでも超伝導技術による電子と陽電子の加速を行いました(図14)。KEKB加速器と20万チャンネルものセンサーを備えた「Belle測定器」(図15)を使って行われた「Belle実験」は、小林誠KEK名誉教授と益川敏英京都産業大学教授、京都大学名誉教授、名古屋大学素粒子宇宙起源研究機構長が理論的に予測した「B中間子にお

けるCP対称性の破れ」の検証が目的でした。実験開始2年後にB中間子における大きなCP対称性の破れの観測に成功。小林・益川理論の検証に大きく貢献して、2008年の小林、益川両教授のノーベル賞受賞につながりました。KEKは超伝導加速技術による電子・陽電子加速器のパイオニアの役割を果たしています。

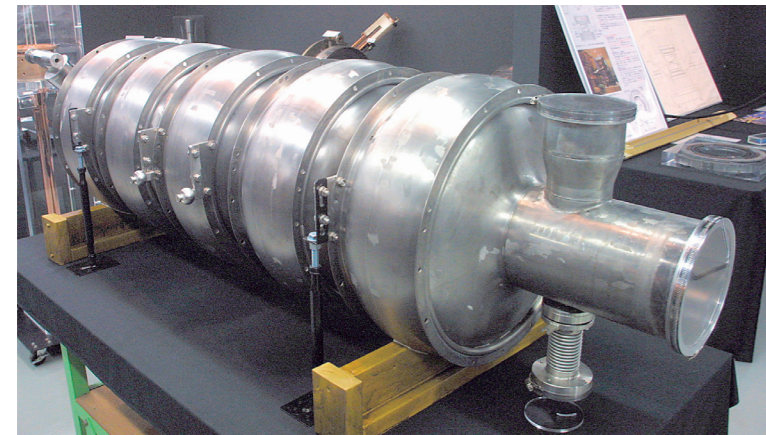
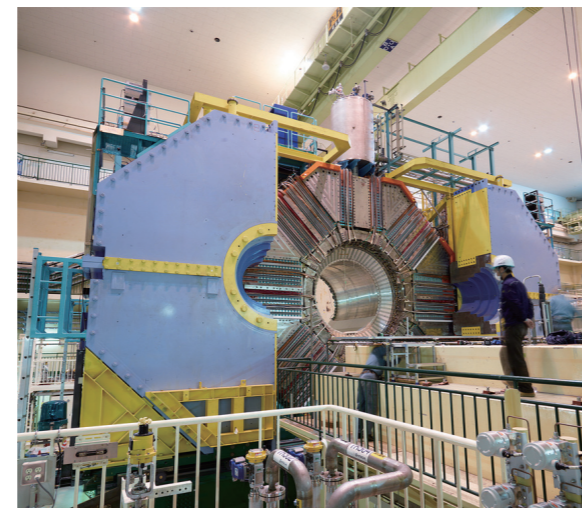
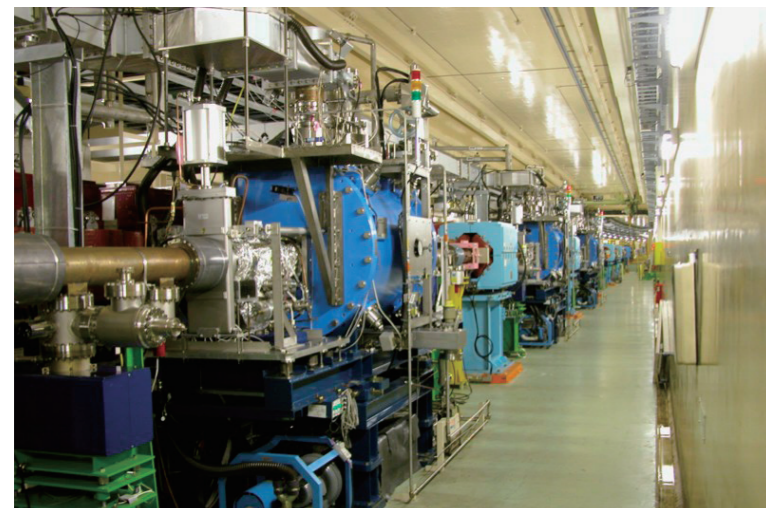


図13(左上) / TRISTAN実験で使用された超伝導加速空洞

図14(左下) / KEBK加速器

図15(右下) / Belle測定器



2004年から、世界の研究所が連携して超伝導技術を基礎としてILCを設計・実現するための研究活動が本格化。KEKでも、約10メートルの地下トンネルでILCと同様の超伝導線形加速器を運転する研究を開始しました。この施設は「超伝導高周波加速試験施設 (STF)」と呼ばれ、空洞表面処理・表面観察技術において国際的な開発を先導しています。産学協力での開発を推進し、ILCの超伝導加速空洞の加速電界要求である35MV/mを超える電界性能も達成しています。

STFでは欧州や米国の主要な研究所と協力して、国際的に持ち寄った超伝導高周波空洞システムを

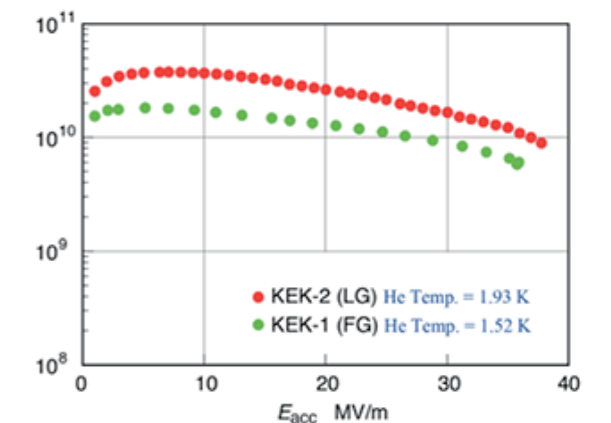
協調運転する「S1グローバルプログラム」を実施し成功しています。さらに、ビーム加速実証試験に向けて開発研究が重ねられています(図16)。

ILCの超伝導加速空洞は8000台必要で国際的に分担して量産することが想定されます。この工業化に向けた生産技術の最適化を図るため、KEKでは超伝導加速空洞製作施設(CFF)を設置し、超伝導空洞の基礎開発と量産技術の研究を行っています。CFFで開発した9セル超伝導加速空洞は、38MV/mを達成しました(図17, 18)。

図16(上) / STFで行われたS-1グローバル実験の様子。米、独、伊、日で製造された要素を組み込んで実証実験を行った。

図17(左下) / 38MV/mの加速電界を達成したCFF製造の超伝導加速空洞「KEK-2号機」

図18(右下) / 電界性能試験結果のグラフ。加速勾配とQ値のどちらも向上している



世界の超伝導加速器開発

国際的にも、超伝導加速空洞技術が大きく進展しています。欧州自由電子レーザー電子加速器(欧州XFEL)は、要求性能24MV/mの9セル超伝導加速空洞800台を約1キロメートルの直線トンネル内に設置して運転するものです(図19)。計画では、実機製造後の単体性能試験で、平均勾配が30MV/mに達しています。この計画は、加速器としての建設が完了し、2017年に電子ビーム加速が始まりました。加速器は、ほぼ ILC の主線形加速器技術に則したもので、規模はILCの約10分の1。ILCの大規模超伝導加速器のプロトタイプといえます。

米国では、約300台の9セル超伝導加速空洞を使用した「LCLS-II」と呼ばれる超伝導電子加速器

が、スラック国立加速器研究所(SLAC)、フェルミ国立加速器研究所(FNAL)、トーマス・ジェファソン国立加速器施設(JLab)などの協力で建設中で、2020年までに稼働する予定です(図20)。

近年、実験室レベルでの多連空洞の超伝導加速器の試験で、加速勾配が45MV/mまで到達し、超伝導加速器技術は国際的に大きく発展しています(図21, 22)。

このように超伝導加速空洞技術が成熟期を迎える中、国際リニアコライダー(ILC)計画の実現が期待されています。

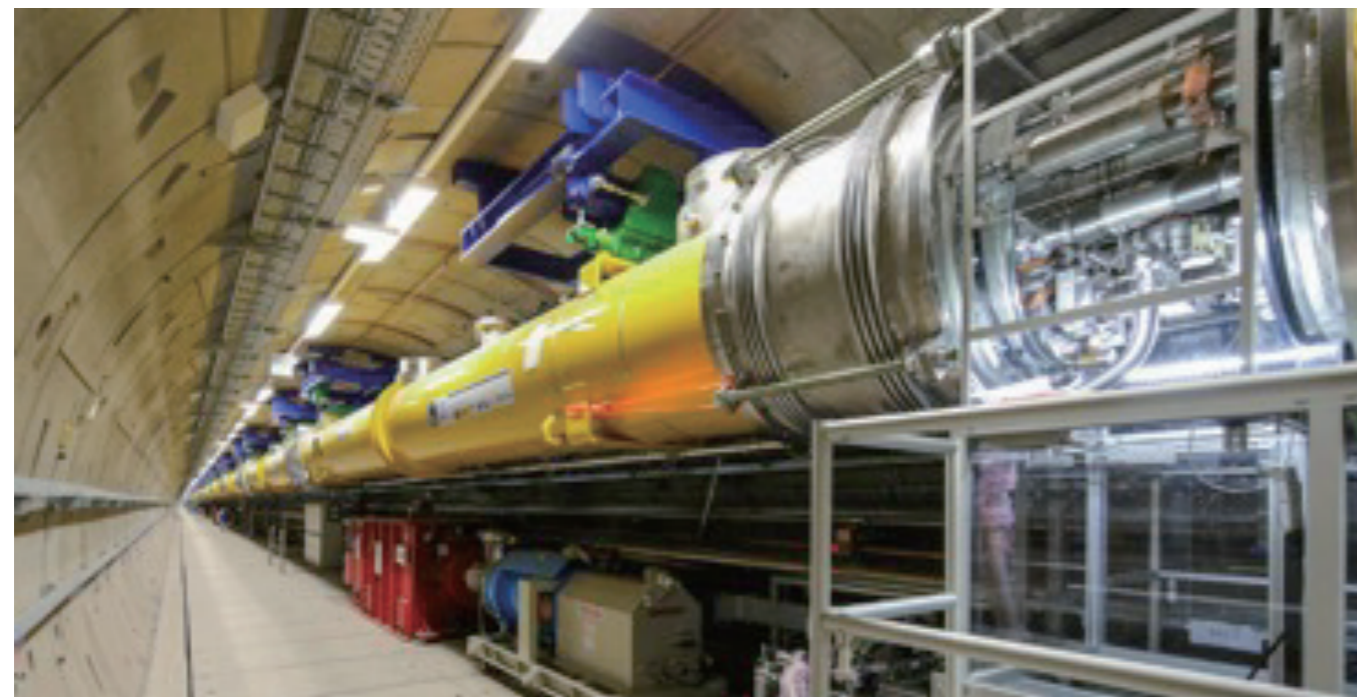


図19 / 欧州XFEL加速器

2017年に完成した欧州XFEL用超伝導高周波加速器。全長1 km 以上にわたる、約800台の超伝導加速空洞、100台のクライオモジュールが連続的にビームを加速する

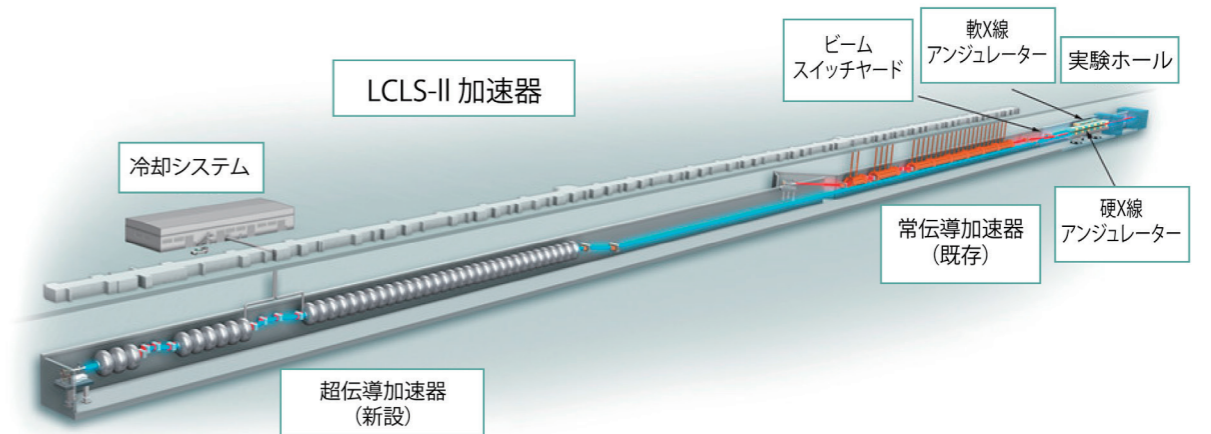


図20 (上) / LCLS-IIの完成予想図 ©SLAC

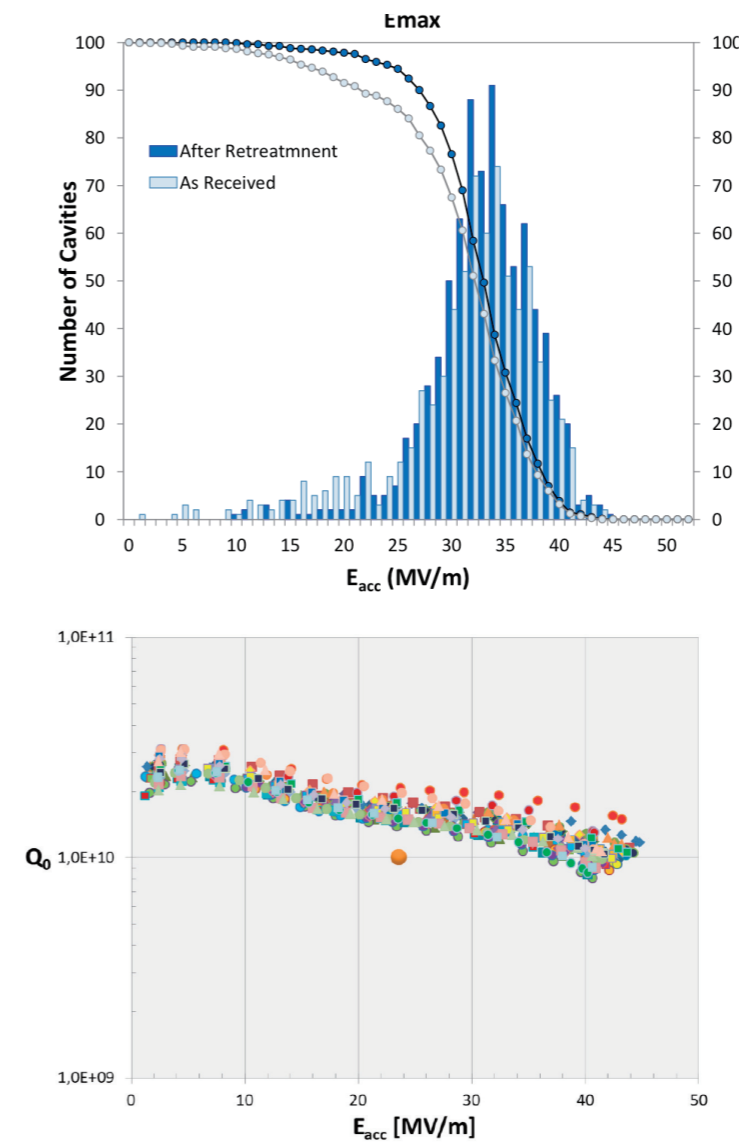


図21 (中) / 欧州XFEL 加速器における超伝導高周波加速空洞(800台)の電界性能分布。企業からの納入直後の性能が薄青、研究所で表面処理(洗浄)を加えた後の性能が青で示されている

図22 (下) / 欧州XFEL 超伝導加速空洞の電界とQ(共振)性能の相関。製造された加速空洞のうち、約10分の1の空洞が40MV/m を超える電界性能を達成していることを示している。中央下のオレンジの点は、欧州XFEL における要求性能値

ナノビーム技術

素粒子実験で加速器に求められるもうひとつの性能は、数多くの反応を起こすことです。そのため重要な技術が「ナノビーム技術」です。ビーム断面をナノメートルレベルまで絞りこむ技術のことです。

多く反応を起こさせるためには、時間あたりの衝突頻度を高くすることが必要です。「バンチ」と呼ばれる粒子群の状態に加速し、対向するバンチと衝突させます。その際、それぞれのバンチの中の全ての粒子が衝突するのではなく、多くの粒子はすれ違ってしまいます。LHCのような円形加速器では、衝突しなかった粒子をそのままリングの中で回し続けて衝突の機会を繰り返すことができますが、線形加速器では衝突しなかった粒子を再利用することができません。従って、お互いに反対方向から来た粒子同士が素通りせず、高い確率で衝突するよう工夫します。

このため必要なのが、ビームのサイズを小さく絞りこみ、粒子の密度を高めることです。衝突エネルギー250GeVのILCの場合、垂直方向を7.7ナノメートル、水平方向を516ナノメートルにまで絞り込みます。LHCのビームサイズは20マイクロメートル、ILCはLHCより3桁から4桁も小さく絞り込むことになります。

ビームを極小サイズに絞り込むには、2つのプロセスが重要です。まず、12ページで述べたように、ビームをダンピングリングで周回させ、ビームが放射光として失うエネルギーを、前方への加速によって補填することを繰り返し、平行度を揃えます。書類を束ねる時に、机の上で、トントンと叩きながら端を揃えますが、ダンピングリングでの作業もそれ

と似ています。書類の束を整える時は、持ち手をちょっと「緩める」とこと、机の上で叩くことを繰り返します。電子ビームもリング内をぐるぐる回りながら、エネルギーの損失と補填を繰り返すことできれいに整うのです。

このようにつくられたビームは、まだ絞り込まれていません。衝突点の手前の両側それぞれ700メートルの「最終収束系」と呼ばれる部分で、レンズの働きをする四極磁石でナノメートルレベルまで絞り込みます。絞り込みは、虫眼鏡で光線を絞るのと同じです。ナノメートルレベルまで絞り込むには、多数の電磁石を並べる必要があります。数を増やすだけではなく、精度を高めるためには、電磁石の並べ方の工夫も重要です。

こうして、ナノメートルサイズに絞り込んだビームも、きちんと衝突しなければ衝突回数を増やすことにはなりません。ビームが細くなればなるほど、ピッタリ当てるのが難しくなります。ビームを絞り込む技術だけでなく、高度なビーム位置制御技術も求められます。

ビームの位置を安定させて正面衝突させるためには、地盤の振動によるビームのズレにも対応する必要があります。地盤が揺れると電磁石が揺れ、ビームの通り道にある磁場も揺れるため、ビームの進む方向に影響を与えます。ILCでは、一度に1000から2600個のバンチが加速されますが、振動の影響を受けてバンチの位置がズレ、うまく衝突しません。そこで、先頭を走るバンチの位置のズレを測定し、後続のバンチの位置補正(フィードバック)を行います。バンチは光速に近い速さで進むので、フィードバックも短い時間で行います。これは極めて高度な精密



図23 / ATF2最終収束ビームライン。多くの磁石群、フィードバックシステムによって、最終収束点でのビームを安定に収束する

技術です。

ビームを絞り込み、制御する技術はKEKに建設された先端加速器試験施設(ATF)において、国際協力で技術開発研究が進んでいます。ATFは、電子銃部、直線型電子加速器、粒子の平行度を高めるダンピングリング(円形加速器)、ビーム取り出し計測ライン、電磁石でビームを極小に絞り込む最終収束ビームラインから構成されます。ATFのダンピングリングは、1997年にビーム運転を開始し、超平行ビームの実現に向けた研究開発を行ってきました。2003年には、従来の加速器の100倍もの平行度の「超平行ビーム」の実現に成功しています。「ATF2」と呼ばれる最終収束ビームラインによって、ビームの絞り込みに関してもほぼ開発目標が

達成されました(図23)。ATF2は長さ60メートルのテストビームラインで、ILCと同様のビーム光学系を採用しており、電磁石の配置も同じです。また、色収差(エネルギーが違った粒子の収差)の強さ、個々の電磁石の強さ、設置位置誤差、振動に対する許容値もILCと同程度になるように設計されています。ATFはILCよりビームエネルギーが低く、当初計画の500GeVの衝突エネルギーのILCのビームサイズの目標である6ナノメートルは、ATFでの37ナノメートルに相当するため、その達成に向けた研究開発が行われてきました。ATF2では、2016年までに41ナノメートルまでの絞り込みに成功しています。これは世界最小のビームサイズです(図24)。

フィードバック技術についても、技術実証が完了

しています。ILCで想定されている最小のバンチ間隔は336ナノ秒です。そのため、ビームのフィードバックはこれよりも早く行う必要があります。ATFでは、この要求よりもはるかに短い140ナノ秒でのフィードバックを実証しています。

ATFでは、この分野の世界中の研究者がビームの

良質化に向けて研究を進めています。また、ナノビーム研究の国際的な研究開発拠点としての役割を果たしており、先端加速器研究に基づく多くの博士号(58名)、修士号(66名)の取得者を輩出し国際的に活躍しています(図25、26)。

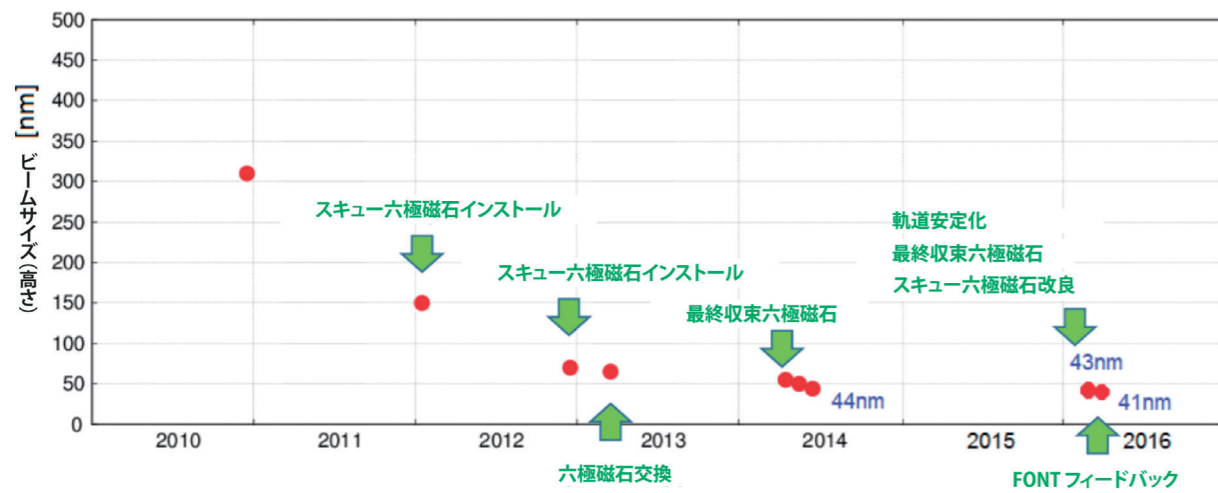


図24 / 計測ビームサイズの変遷

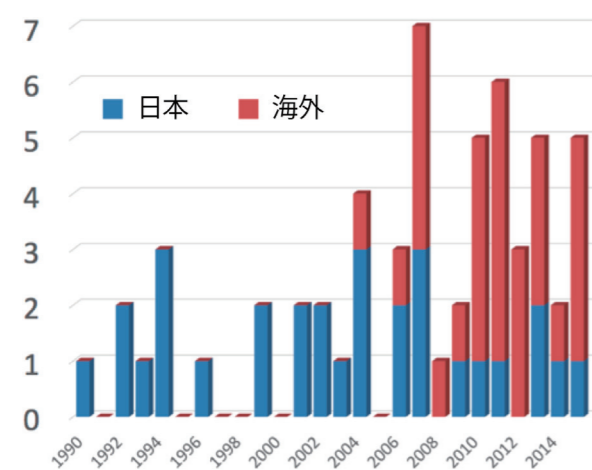


図25 / ATFでの国際協力国際協力による研究で輩出された年代別博士号取得者数

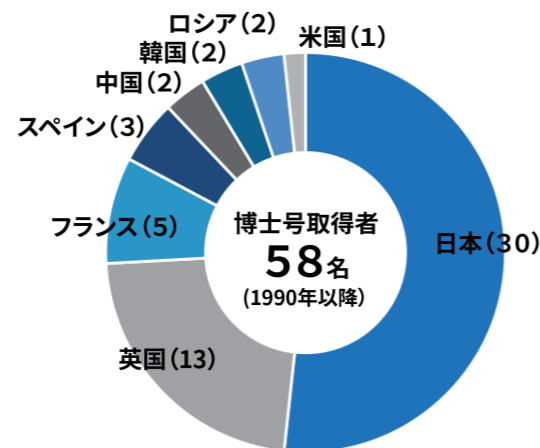


図26 / ATFでの博士号取得者数(国別分布)

加速器・精密土木技術

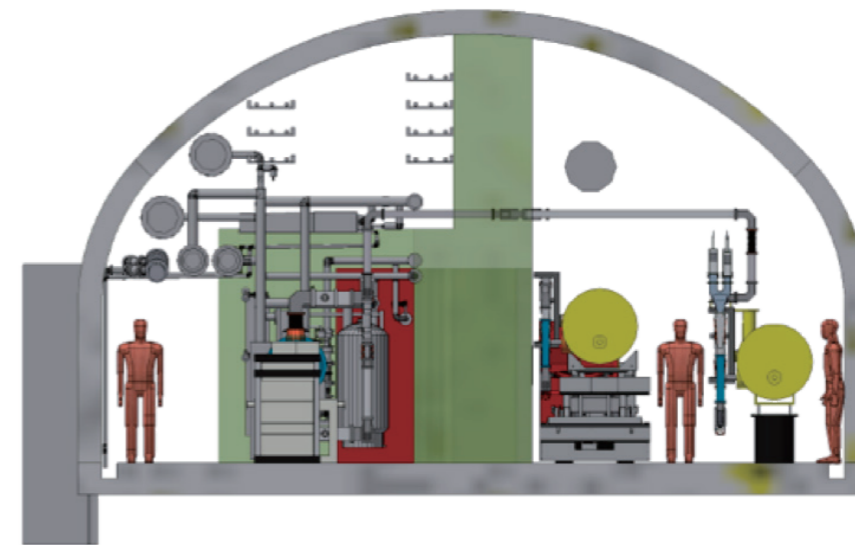


図27 / ILC加速器のトンネルの内部構造予想図

ILCでは、ナノメートルレベルのビーム制御が求められるため、主線形加速器を収納する加速器トンネルは、地盤振動条件を満たす堅固な岩盤帯に建設する必要があります。ビームライン中央部には、地下発電所に類似した大空洞の衝突実験ホールを構築し、大型で超精密な測定器が設置されます。加速器トンネルや実験ホール等の大規模な地中構造物の建設には、高度な土木技術が求められます(図27)。

日本のトンネル技術は世界的に高く評価されています。火山と断層が多い日本の厳しい地形・地質条件の下で培われたトンネル建設技術によるものです。中でも、昭和62年に完成した本州と北海道を結ぶ青函トンネルは、先進的な施工技術の開発で実現した世界最長の海底トンネルです。その後も、研究開発と実績を積み重ね、世界の長大トンネルのランキングには日本のトンネルが多数入っています(図28)。

ILCの加速器トンネルには、鉄道や道路等の交通トンネルとは異なる機能・性能が要求されます。トンネル掘削技術においては、大深度での地盤探査技術、高精度の測量技術、岩盤補強および地下水処理などの基盤技術に加え、先進的な情報技術を駆使した施工やモニタリングシステムの導入などが基本要件となります。加速器の運転を支えるインフラ設備の構築では、大容量の特別高圧電力や実験冷却水等の基幹エネルギー供給設備、地下空間における防災安

順位	トンネル名	所在地	長さ
1	ゴッタルドベーストンネル	スイス	57.1km
2	青函トンネル	日本	53.9km
3	英仏海峡トンネル	英仏	50.5km
4	レッチェバルクベーストンネル	スイス	34.6km
5	新関角隧道	中国	32.6km
6	グアダラマトンネル	スペイン	28.4km
7	太行山隧道	中国	27.8km
8	八甲田トンネル	日本	26.5km
9	岩手一戸トンネル	日本	25.8km
10	飯山トンネル	日本	22.2km

図28 / 世界の鉄道トンネルランキング(2018年1月現在)

全システム・放射線管理システム等の構築、さらに地球環境に配慮した新たな環境保全技術の創出などが期待されます。

4. 衝突反応測定器

加速器で精度の高い素粒子の衝突を実現させても、衝突現象を正確に捉えられなければ、新しい発見には結びつきません。ここでは、加速器とともに、素粒子物理研究を進めるための両輪となる「衝突反応測定器(測定器)」について解説します。

測定器は、粒子と粒子が衝突する時に起きる反応を調べる実験装置で、巨大な超高速・高性能カメラのようなものです。ILCの測定器は電子と陽電子の衝突点をすっぽり囲むように設置され、縦、横、高さがそれぞれ約20メートル、重さが10,000 トンを超える巨大な装置です。

測定器の中心で正面衝突すると、電子と陽電子は消滅し、純粋なエネルギーの塊になります。このエネルギーの塊から「重たい粒子」が生成されます。ILCで詳細に調べようとしているヒッグス粒子も、重たい粒子の一種です。重たい粒子は、ただちにより軽い粒子に崩壊し、四方八方に飛び散ります。これらの粒子がどれだけ生成され、どのように崩壊し、どのような方向に、どれだけのエネルギーを持って飛んでいくのか等を細かく調べることで、生まれた粒子の種類や性質、粒子が従う物理法則を調べることができます。そのために、中心のビーム衝突点から様々な観測

装置を重ねあわせた巨大な装置が測定器です。異なる特色を持った装置を積み重ねることで、様々な粒子を逃さずに観測することができるのです。

測定器からの各種の電気信号は、すべてデジタル化されコンピューターに送られます。ここで活躍するのが高速・先端エレクトロニクスとソフトウェア技術です。オンラインで信号が処理・整理され、国際的なネットワークシステム網(GRID)を通して参加機関に配信、解析されます。

大型粒子加速器を用いた国際共同実験では、各参加機関が、技術的な得意分野を持ち寄って、総合的な測定器システム開発を行い、実験の遂行・運営もします。独自の自主的な協力体制で推進します。

ILCでは2つの測定器を使った実験が計画されています。米国中心の「SiD(Silicon Detector)」と、日本と欧州を中心とする「ILD (International Large Detector)」という2つの実験グループが国際協力で測定器の設計を行なっています(図29)。陽子・陽子衝突反応を観測するLHC実験と比べて、電子・陽電子衝突反応を観測するILC物理実験では、ノイズとなる事象が少なく、個々の事象の観測精度が飛躍的に高まるのが特徴です。

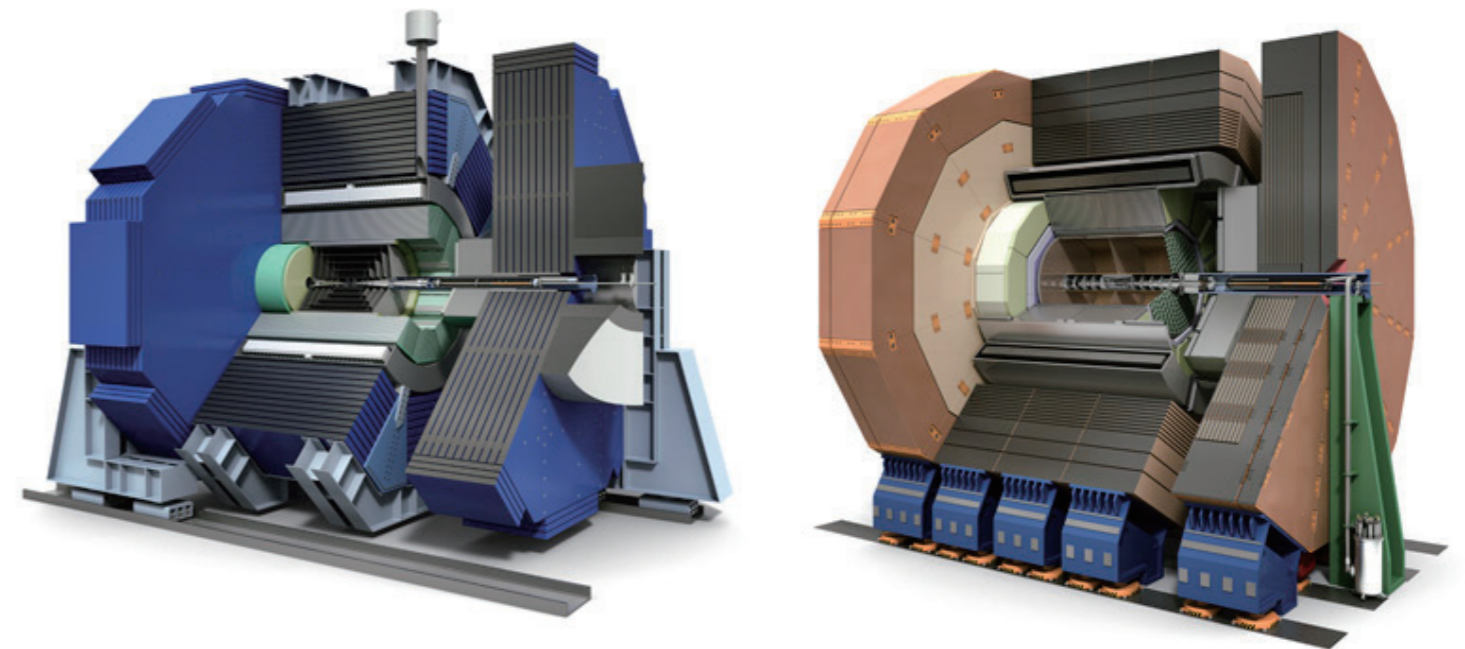


図29 / SiD測定器(左)とILD測定器(右) ©Rey. Hori

5. 衝突反応測定器を支える技術

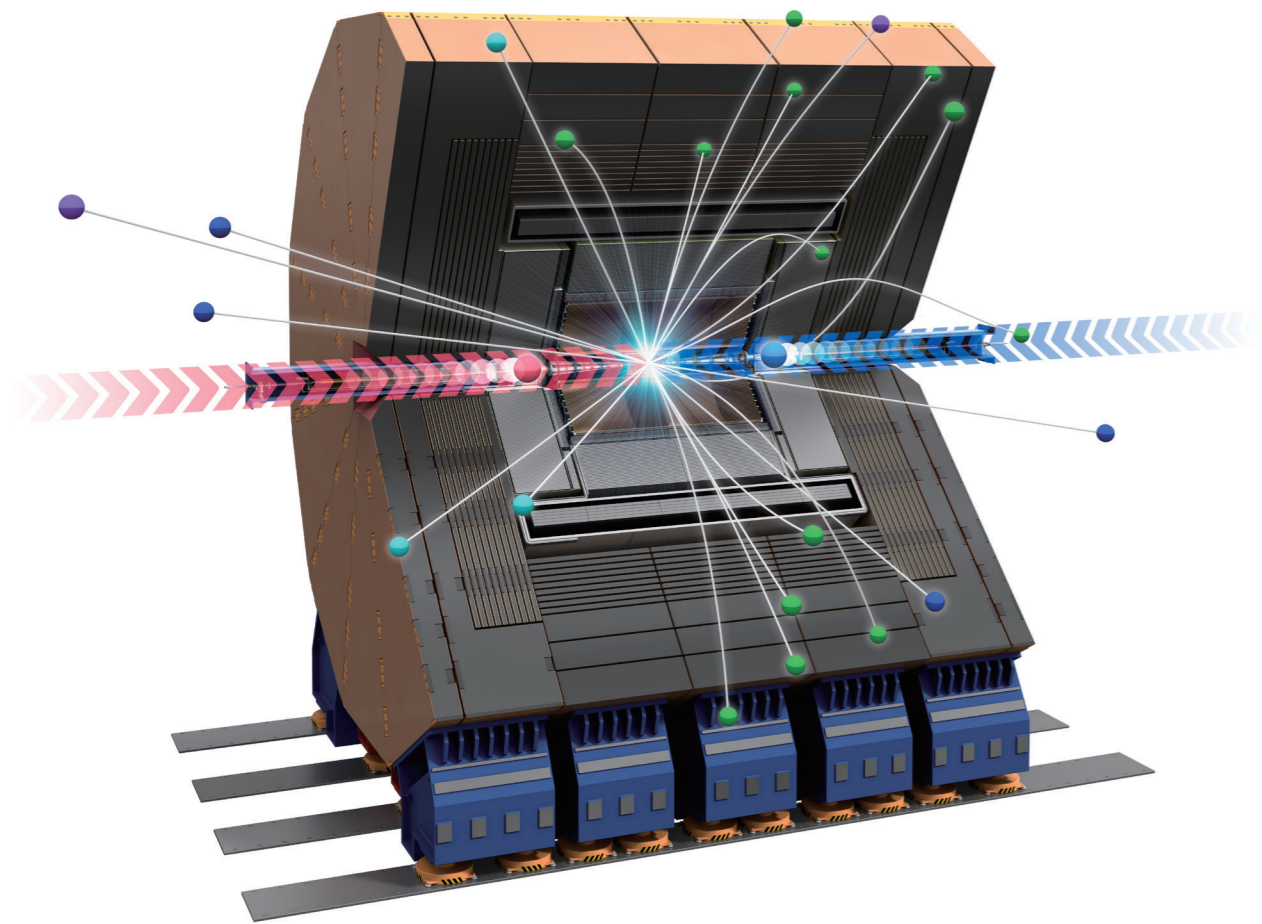


図30 / ILC測定器での素粒子の衝突反応の模式図 ©Rey. Hori

測定器は異なる特色の観測装置が層になって構成されています。ここでは、日本が主力を注いでいるILD測定器を構成する観測装置について説明します(図30)。

ILDシステムは衝突点の近くから順に「高精度飛跡測定器（パーテックス測定器）」「飛跡測定器」「カロリメータ」「超伝導磁石」「ミューオン測定器」という構成になっています(図31)。

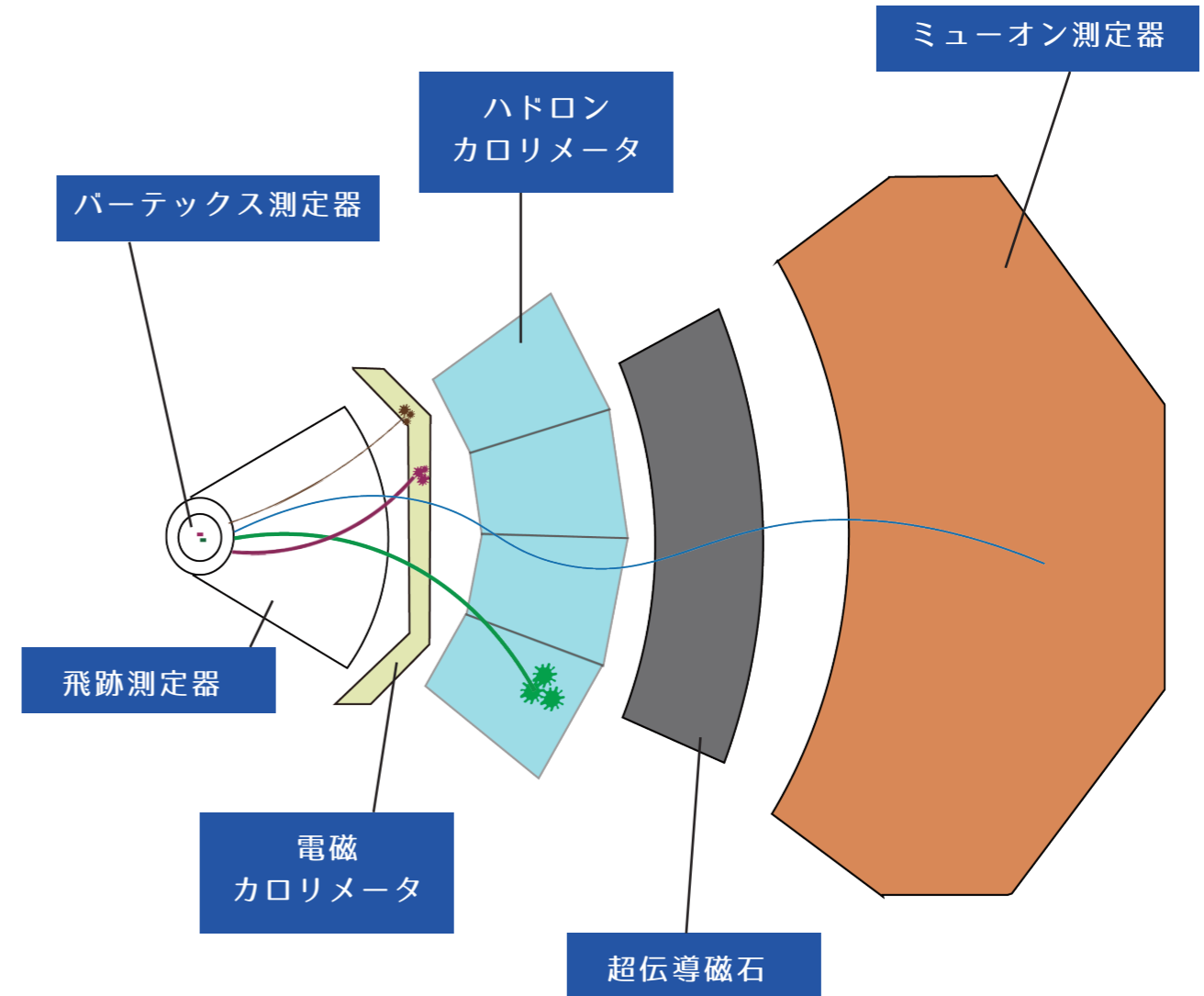


図31 / 衝突反応測定器の構成。中心部の衝突点(図の左)から外側に向かって粒子が飛んでいく様子を各測定器が捉える

高精度飛跡測定器(バーテックス測定器)

高精度飛跡測定器(バーテックス測定器)は、磁場中で粒子の飛跡を観測する装置で、最も衝突点近くに設置されます(図32)。できるだけ粒子の通過を妨げずにその通過点を測定するよう、非常に軽い物質で構成されます。

バーテックス測定器には、デジタルカメラと同じピクセル型の半導体センサーがびっしり敷き詰められています。粒子がセンサーを横切ると、素粒子がたどった軌跡を精度良く知ることができます。電子と陽電子の衝突によってヒッグス粒子が現れた場合、ヒッグス粒子はただちに他の粒子(たとえば、bクォークとその反粒子)に変化します。この様子は、打ち上げ花火が四方に開花する途中で枝分かれして、新しい粒になるイメージです。この枝分かれする場所を「反応点=バーテックス」と呼びます。生成された素粒子の軌跡を逆にたどり、中心から新しい粒子に枝分かれする様子を記録して(図33)、ヒッグス粒子がどの粒子に崩壊したのかを判別するのです。枝分かれの回数(バ

ーテックスの数)は粒子により異なります。バーテックス測定器は、生まれた粒子がどの粒子に崩壊したのか知るための重要な測定器です。

東北大学とKEKが協力して、画像記録素子(CCD)を使ったバーテックス測定器の開発を行なっています。日本は光学カメラ技術で世界をリードしていますが、カメラに使うCCDにおいても世界をリードしています。CCDは一枚のセンサーでは全体を覆うことができないので、何枚ものセンサーを円筒状に、何層にも組み合わせて設置します。CCDの他にも絶縁体上にシリコンを配置した技術(SOI)を用いたピクセルセンサーの開発も行われています。SOIセンサーは高い放射線レベルに対応できるため、将来、ILCのエネルギーが上がった場合にも使用可能なオプションとして期待されています。

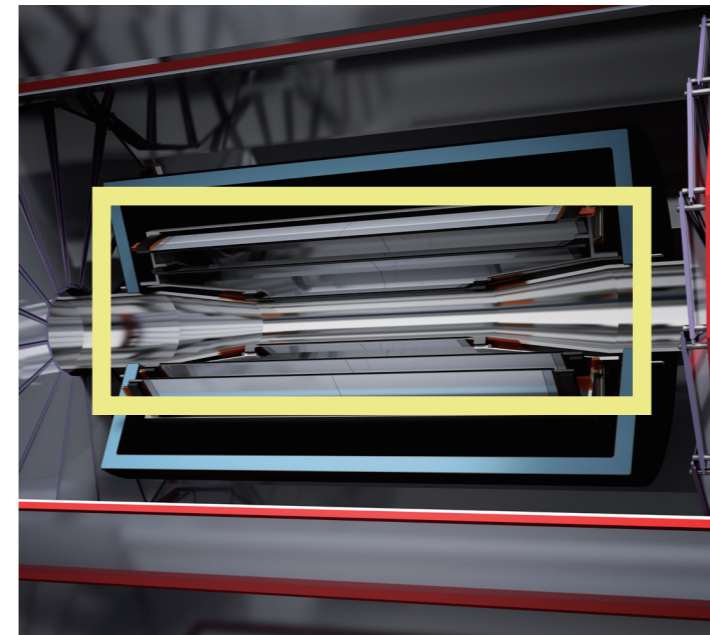


図32 / ILCの衝突点付近拡大図
最も衝突点に近い部分(黄色の枠)がバーテックス測定器
©Rey. Hori

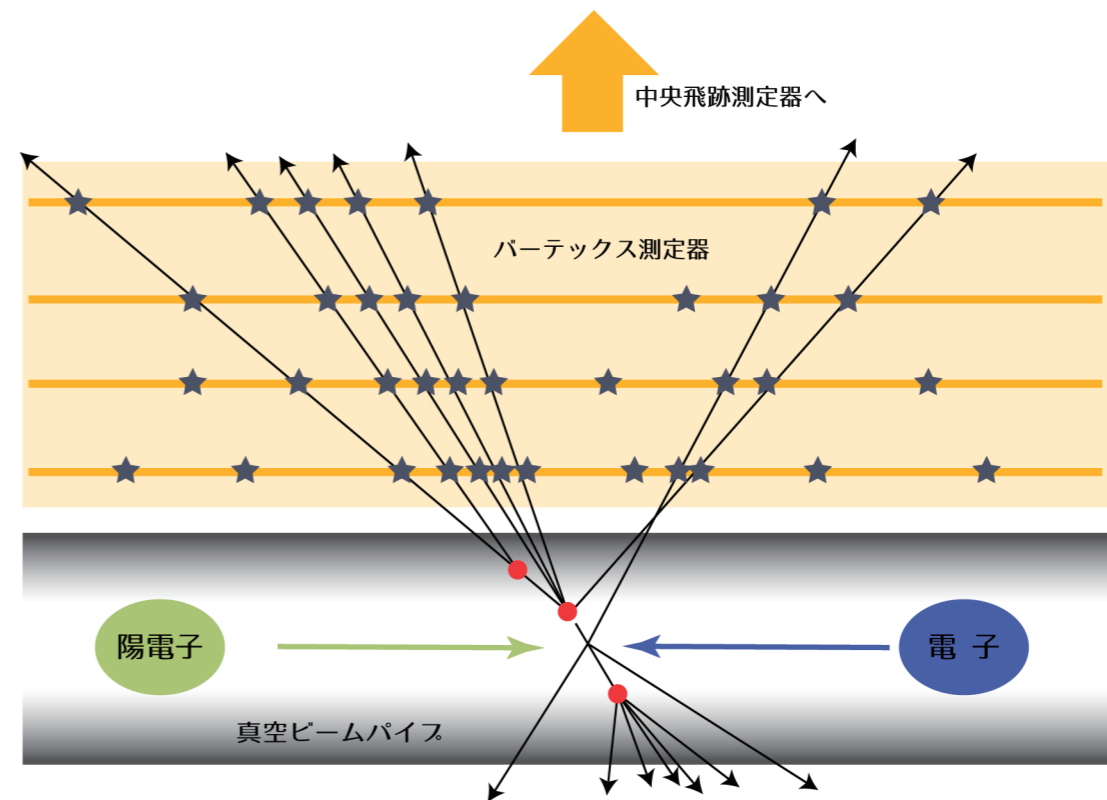


図33 / バーテックス測定器のしくみ 赤丸の部分が反応点(バーテックス)。

飛跡測定器

バーテックス測定器を取り囲むのが飛跡測定器で、内側から2番目に位置します(図32)。内部飛跡測定器と中央飛跡測定器からなり、衝突反応で生まれた粒子の磁場中での軌跡を観測します。ILDでは、粒子が測定器内のガスと次々と衝突して、ガスが電離してできる電子の情報をとらえることで、粒子の飛跡を調べる仕組みのタイム・プロジェクション・チェンバー(TPC)と呼ばれる測定器を用います。電離した電子の位置を測定し、磁場中で曲がった粒子の軌跡を三次元的に測る事ができます。これで粒子のエネルギー(運動量)を知ることができます(図33)。

佐賀大学、近畿大学、岩手大学、工学院大学、広島大学が KEK と協力して、ILD の中央飛跡測定器であるTPCの開発を行なっています。TPCには、イオンフィルター、PCB基板微細加工など日本が得意とする工業技術が使われています。PCB基板微細加工は携帯電話の回路基板として私たちの日常生活にも密着した技術です。試作したTPCはドイツ電子シンクロtron研究所(DESY)の協力を得て、加速器ビームを使って評価試験をしています。

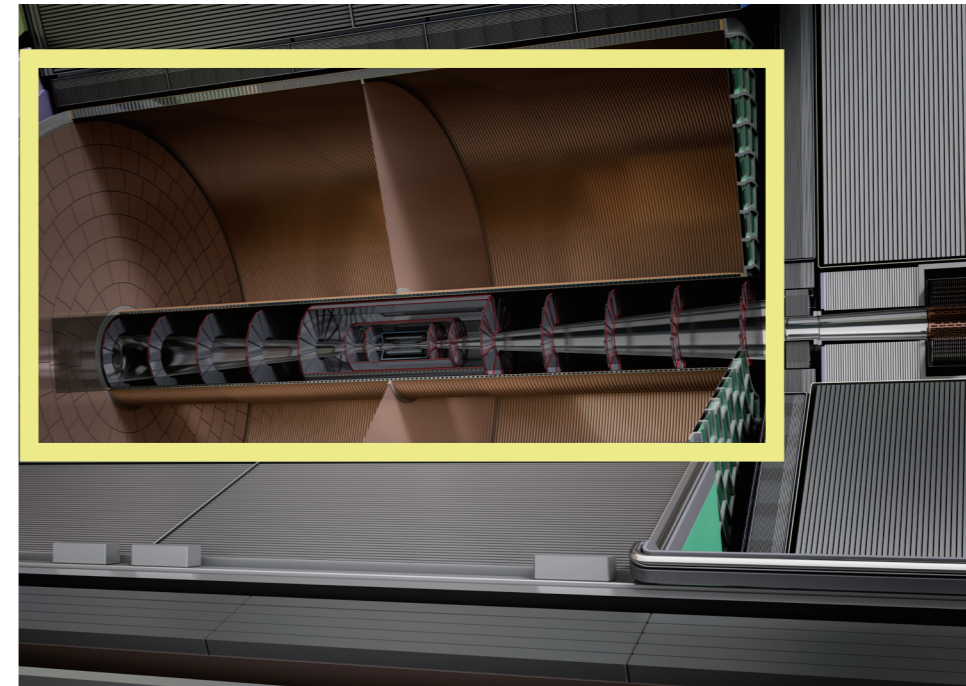


図32 / ILCの衝突点付近拡大図
バーテックス測定器の周りを取り囲むのが飛跡測定器(黄色の枠)

©Rey. Hori

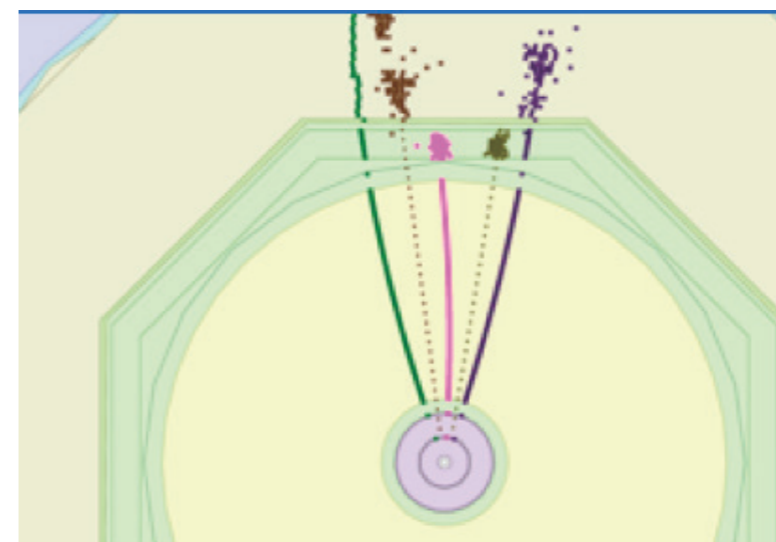


図33 / タイムプロジェクションチェンバーの中の粒子の飛跡

カロリメータ

内側から数えて3番目に設置される測定器が「カロリメータ」です(図34)。バーテックス測定器や飛跡測定器は電氣的に中性の粒子は検出することができませんが、カロリメータは中性粒子も検出できます。カロリメータのカロリーとは、熱量(エネルギー)をあらわします。

物質中で、光子は電磁シャワー、ハドロンはハドロンシャワーという粒子群を作り、エネルギーを失って吸収されます。粒子群全体をカロリメータで測定することで、元の粒子のエネルギーを測定することができます。ILCの測定器で使うカロリメータには、電子や光子などのエネルギーを測定する「電磁カロリメータ」と中間子や中性子などのハドロンのエネルギーを測定する「ハドロンカロリメータ」の2つがあります。シャワーは原子番号の大きな物質中で起こりやすいため、電磁カロリメータではタングステン、ハドロンカロリメータでは鉄の金属板とセンサーを組み合わせて

測定器を作ります。センサー部分には、荷電粒子が通ると発光するプラスチックシンチレーターと半導体光センサーを組み合わせたものや、パッド型シリコン半導体センサーを用いたものなどが検討されています。どちらの方法もセンサー部分を細かく分割し、カロリメータに入射した粒子を分離し測定できるよう工夫しています(図35)。シンチレーターを用いるタイプを信州大と東京大が担当、半導体センサーを用いるタイプを九州大とKEKが担当して開発しています。カロリメータを支える基礎技術には光センサー、半導体などのマイクロエレクトロニクスなどがあります。光センサーはバーコードリーダーやVICS道路交通情報通信システム、がんの診断装置のPETなどに、マイクロエレクトロニクスは携帯電話やPC、ゲーム機など使われ我々の生活と切り離せないものになっています。

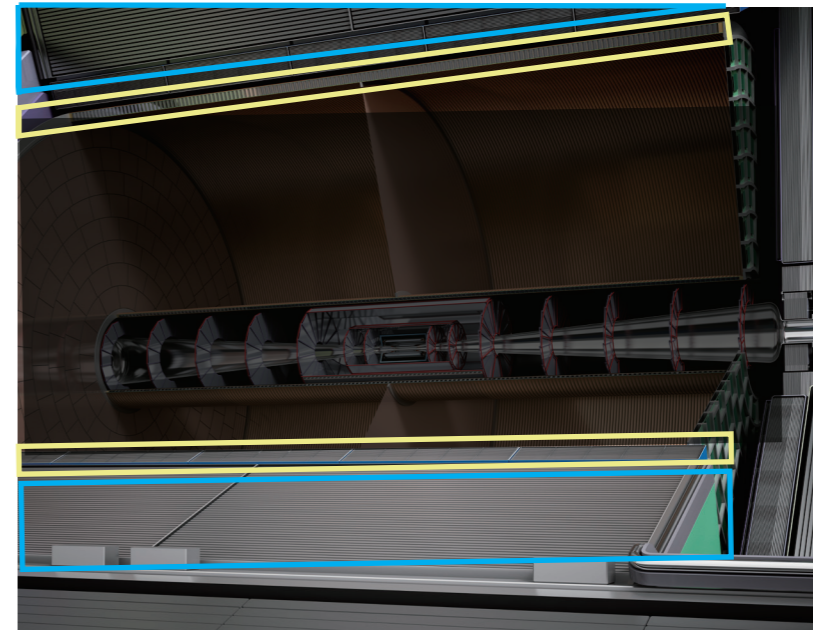


図34 / 飛跡測定器の周りには、電磁カロリメータ(黄色の枠)とハドロンカロリメータ(青の枠)の2種類のカロリメータが設置される ©Rey. Hori

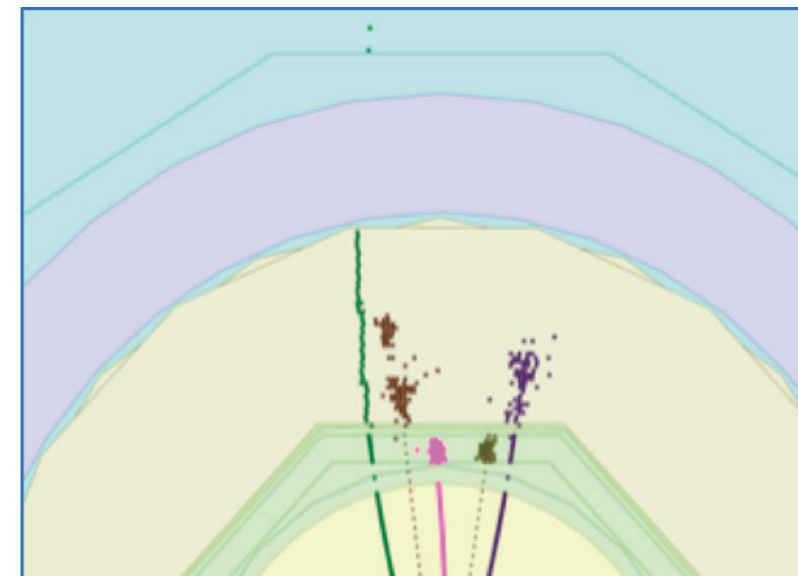


図35 / 電磁カロリメータ部(うす緑色部分)とハドロンカロリメータ(外側薄黄色部分)におけるシャワー発達の様子

超伝導磁石

強力な磁場をビーム衝突点の周囲に提供し、衝突で生まれて電気を帯びた二次粒子のエネルギー(運動量)の測定に貢献するのが大型の超伝導磁石です(図37)。超伝導技術で、効率良く3.5テスラという強力で大きな磁場空間を実現します(身近にある一般的な磁石の磁場の強さは、0.1テスラ以下)。

磁場で電気を帯びた二次粒子の飛跡を曲げます。飛跡の曲がりかたはエネルギーによって変わり、曲が

り具合で粒子のエネルギーを知ることができます。コイルの外には分厚い鉄構造(ヨーク)があり、磁場の形を整え、磁場をシールドする役割をします。

ミュオン測定器

一番外側にはミュオンを見るための測定器があります。ミュオンには物質を透過しやすい性質があり、内側のカロリメータ、超伝導コイル、鉄ヨークなどの重い物質でできた部分を通り抜けます。この特色を生かし、鉄ヨークの前後、中間に何層も配置されたシンチレーターという測定器を用いて、ミュオンを測定します。重なり合った磁石と鉄ヨーク中の磁場で

曲げられたミュオンの軌跡、曲がり方を知り、ミュオンの電気極性とエネルギーを知ることができます。ミュオンを他粒子から分離し識別することができます(図36)。



図36/ ミュオン測定器におけるミュオンの軌跡

デジタル信号処理、ソフトウェア

各種の測定器からの電気信号は、電子回路で高速に処理され、デジタル化されてコンピューターに送られます。この信号処理とそれに続くコンピュータ上でのソフトウェアでの処理により、意味のある物理実験情報を得られます

測定器をデジタルカメラに例えると、ソフトウェアはカメラに組み込まれている画像認識機能です。デジタルカメラではCCDの像をカメラに搭載されたソフトウェアが解析して、人間の顔を認識します。カメラで写した像は人の顔や街の風景など容易に認識できるものなので、ソフトウェアの力を借りなくても人間でも認識できますが、ILCの測定器ではソフトウェアの働きは不可欠です。粒子衝突反応は多数の粒子が飛び散った飛跡に沿って、3次元の稠密な位置情報、各点での信号の大きさ、信号発生時刻などの膨大な量の情報として捉えられます。これらの情報から、個々の粒子のエネルギー、種類、飛び去った向きなど、意味のある情報を再構成するのがソフトウェアの役割です(図37)。また最先端の人工知能(AI)技術もデータ処理に応用されます。

ILC実験では粒子のエネルギーをソフトウェア上で粒子フロー・アルゴリズム (PFA)という方法で再構成します。衝突反応によって生まれた寿命が短い粒子は、途中で複数の他の粒子にどんどん変わっていきます。変化したすべての粒子のエネルギーを足しあげることによって、元の衝突反応によって生まれた粒子のエネルギーが分かります。PFA法ではエネルギーを足しあげる時に、荷電粒子のエネルギーは飛跡検出器での測定結果を、中性粒子はカロリメータでの測定結果を、というように、それぞれ得意とする測定器の測定結果を用います。このとき、飛跡検出器とカロリメータのエネルギーを重複することなく足しあげることが重要です。カロリメータのセンサー部分が細く分割されているので、カロリメータ中で個々の粒子を分離して測定することができ、飛跡検出器での飛跡との対応を見ることによって重複を避けることができます。ILC実験ではPFA法を使うことでエネルギーの測定精度が大幅に向上し、様々な反応の精密測定が可能となります。

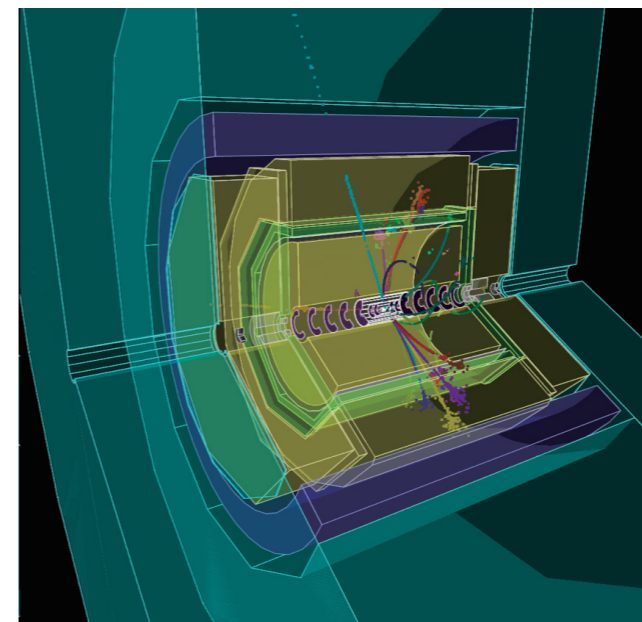


図37 / デジタル信号処理・ソフトウェアによって解析され、画像処理を経て、描き出された衝突反応により生成された粒子群の飛跡

国際ネットワークによる物理解析



図41 / GRIDコンピューティングイメージ図。物理解析作業は、GRID システムによって世界中の参加機関に配信され、分担、協力して進められる

ILC実験で蓄積されるデータは高速データネットワークで世界中の素粒子物理学者に共有され解析されます。このネットワークは単にデータの送信に使われるだけでなく、世界中の大学・研究所のコンピューターが一体となってネットワークとその上に築かれたGRID(グリッド)システムで膨大なデータを解析します(図41)。このGRIDシステムはCERNで行われているLHC実験を通して発展し、今日のクラウドコン

ピューティングと呼ばれるグローバル・ネットワークの先駆けとなりました。ILCではこれをさらに進化させた形で活用することが計画されています。

ILCの超高性能測定器

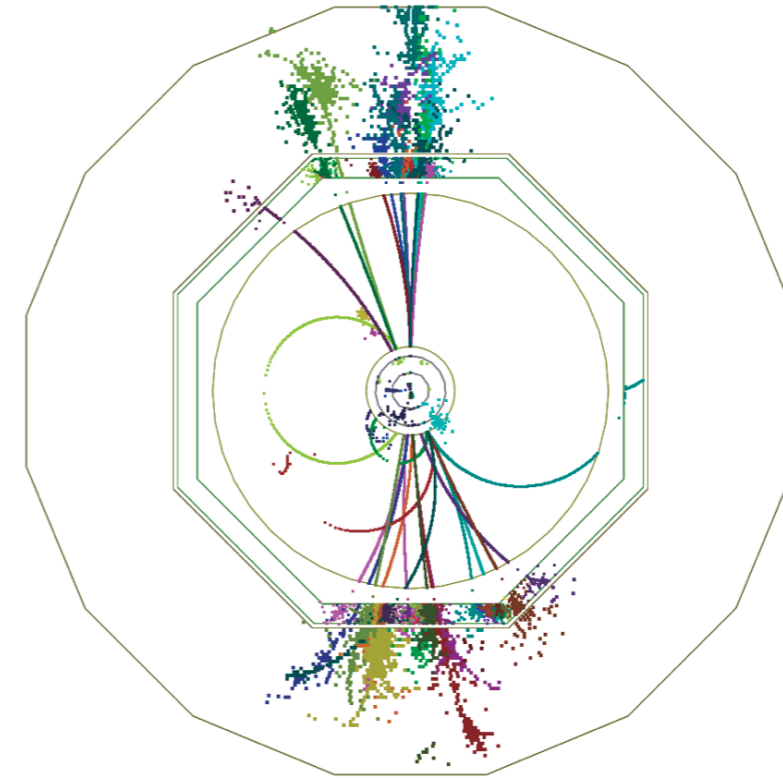


図42 / ILC におけるノイズ事象が少なく、精密な衝突反応測定イベント(シミュレーション)

これまでILD測定器を例として述べてきた各種の観測装置は、センサーの高精細化により、今までにない高い測定精度(飛跡測定精度やエネルギー分解能)を持っています。

素粒子実験においては、研究者が調べたい素粒子反応事象以外にも多くの不要なバックグラウンド反応が多くあります。ILCではLHCでの実験と比較してバックグラウンド事象が圧倒的に少なく、バックグラウンド事象に対処するために放射線耐性や高速性といった性能に対する要求が低くなります。その分、測定精度に重点を置いた設計が可能です。例えばILD測定器をLHC実験の一つであるアトラス測定器と比較すると、バーテックス検出器は精細度で800倍、空間分解能で2倍以上、中央飛跡検出器はセンサーの精細度で2倍、粒子のエネルギー(運

動量)分解能で10倍、カロリメータは精細度で60倍、エネルギー分解能で2倍性能が良くなるよう設計が可能です。これらの性能は小型モデルですすでに実証済みです。

今後、実機スケール・プロトタイプでの実証と実機の実装に関するエンジニアリング開発へと研究開発が進みます。ILCの実験では、このような高性能な測定器による精度の高い測定が、電子・陽電子衝突の全エネルギーがはっきりとわかっている利点と相まって、素粒子反応事象の詳細を・明解に観測し、効率よく物理学の成果を出すためのキーポイントとなります(図42)。

参考文献

本分冊では、ILC 加速器と電子・陽電子の衝突実験に必要な実験装置、それを支える、超伝導加速空洞、ナノビーム、測定器技術について紹介しました。

純粋な素粒子同士である電子・陽電子衝突型加速器では、衝突反応における全エネルギーが明確となり、バックグラウンド事象が少なく、明解、精密な実験を可能にします。直線・衝突型加速器とすることで、円形軌道での放射光損失をなくし、エネルギー拡張性に優れた加速器を実現します。ただし、直線・衝突型加速器では一回の加速で一度のみの衝突に限られることから、効率を高めるために、「超伝導高周波加速技術」が重要です。また衝突点でナノメートルレベルまでビームを絞り込み、輝度を高めたビーム衝突を実現するための「ナノビーム技術」も重要です。ビーム衝突反応を測定する測定器では、電子・陽電子衝突反応観測のバックグラウンド事象が少ないという特色を生かし、測定器の分解能を飛躍的に高め、より精密な実験を目指します。

- [1] ILC Technical Design Report (2013), URL:
- [2] ILC Progress Report KEK-2015-004 (2015), URL:
- [3] 岩田正義、木原元央、「リニアコライダー」・素粒子の謎に迫る最強の加速器」技術経済研究所、(2005).
- [4] 横谷馨、他、KEK 加速器セミナー, OHO- 2014(リニアコライダー),
URL: <http://accwww2.kek.jp/oHO/OHOtxt4.html>
- [5] 村山斉(編)、「宇宙を創る実験」、集英社新書、0768, (2014).
- [6] A. Yamamoto, K. Yokoya, “Linear Colliders”, Rv. Of Acc. Science and echnology, eds. A. Chao and W. Chu (World Scientific, 2012) Vol. 7, P.115.
- [7] 小島雄三、低温工学、20 (1985) p.144.
- [8] 山本明、加古栄治、仲井浩孝、“大型超伝導加速器計画(ILC)及び超伝導加速空洞システムに関する解説”「低温工学」Vol. 48, No. 8 (2013) 409-450.
- [9] 照沼信浩、他、“先端加速器試験装置(ATF)における R&D の現状”、「加速器」Olv. 7, No.3 (2010) p172.
- [10] 久保浄、“KEK-ATF における極小ビームサイズ達成”、「加速器」 Vol. 12, No.1 (2014) p.14.
- [11] 早野仁司、“超伝導加速器試験施設 STF(Superconducting RF Test Facility)の現状”「加速器」Vol.6, No.2 (2009) p.116-129).
- [12] 加藤、佐伯、沢辺、西脇、早野、両角、渡邊、Tyagi、岩下,” 超伝導加速空洞の高電界化に向けた研究(その1, 2)”, 「加速器」Vol.7, No.2, (2010) p. 95-109. P.199-208.
- [13] 佐伯学行“ILC 用超伝導加速空洞の量産化に向けた製造の研究”、「加速器」,Vol.11, No. 3, (2014) P.161.
- [14] 山本 明 “超伝導技術が切り拓く粒子加速器・素粒子物理実験のフロンティア”、「日本物理学会誌」 Vol. 72, No3, (2017). P. 167.
- [15] 特集「国際リニアコライダー(ILC)計画と新しい科学プロジェクトのあり方」「加速器」Vol.14 2017 p193-226

国際リニアコライダー その展望とKEKの取り組み

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