

ILC 測定器開発の現状

東北大学大学院理学研究科 ニュートリノ科学研究センター

山本 均

yhitoshi@awa.tohoku.ac.jp

2006年6月5日

1. はじめに

ILC (International Linear Collider) は電子と陽電子を高エネルギーで衝突させることで TeV のエネルギー領域の物理を高感度、高分解能で研究するものである。重心エネルギーは当初は約 500 GeV で、後に約 1 TeV へと改良される予定である。次期リニアコライダーに必要な加速器技術の開発は、ヨーロッパ(主にドイツ)、アメリカ、そして日本で進められて来たが、アメリカと日本は常温加速管に基づき、ドイツは超伝導加速管に基づくものであった。それが、2003年8月に ITRP (International Technology Recommendation Panel) の決定により、超伝導を基本とした開発に一本化されることになり、リニアコライダー実現に向けて大きな一歩が踏み出されることになった。2004年3月には ITRP の議長であった Barry Barish をディレクターとした GDE (Global Design Effort)^[1] が発足し、2015年頃の運転開始に向けて具体的な加速器設計が急速に進展している。一方 ILC 測定器の開発は、これまで WWS (Worldwide Study on Physics and Detectors for Linear Colliders)^[2] による組織と調整のもとに進められて来たが、現在加速器開発と測定器開発はますます緊密な関係になりつつある。このレポートでは ILC 測定器開発に焦点を当てて近況を簡単にお知らせしたい。

2. ILC 測定器に要求される性能

ILC は来年稼働開始が予定されている LHC より約 8 年程遅れる予定であるが、電子陽電子対という簡単な始状態およびクリーンな終状態のおかげで高い感度と分解能を実現することが出来る。また、ILC 測定器はそのような高感度・高分解能を実現する様に開発されなければならない。たとえば、標準模型のヒッグス粒子 (H) を検出するための代表的な反応は

$$e^+e^- \rightarrow ZH, \quad Z \rightarrow \mu^+\mu^-$$

であるが、ここで始状態の運動量はゼロと判っているため、 Z 粒子崩壊によるミュオン粒子対を測定するだけで、

ヒッグス粒子が何に崩壊するかに関わらず、たとえ検出不可能な粒子ばかりに崩壊したとしても、ヒッグス粒子を検出することが可能である。また、ヒッグス粒子検出に必要な稼働時間は LHC の 1 年に対して ILC は約 1 日と遥かに短く、相応に感度が高い。ただし、このような性能を実現するためには Z 粒子崩壊によるミュオン粒子対の運動量を典型的な LHC 測定器の約 10 倍の分解能で測ることが必要となる。それは確かに簡単なことではないが、ILC のクリーンな環境を最大限に利用し、特に飛跡検出器の物質量を軽くすることで可能であることが判っている。

バーテックス検出器に対しては、ヒッグス粒子が b クォーク対に崩壊する場合と c クォーク対に崩壊する場合とを分別しなければならない。これは、ヒッグス粒子とフェルミオンの反応の強さがフェルミオンの質量に比例することを確認するために重要である。高いバーテックス分解能はバーテックス検出器をビームに近く配置すること、バーテックス検出器のピクセルを小さくすること、そしてバーテックス検出器の物質量を少なくして多重クーロン散乱を押さえることで達成される。LHC 検出器と比較すると、ILC 検出器においては、典型的にビームパイプの径は約 5 分の 1、バーテックス検出器のピクセルの大きさは面積で典型的には約 50 分の 1、後に述べる高精細型ピクセル検出器の場合は約 1000 分の 1 となる。また、バーテックス検出器 1 層あたりの物質量は約 30 分の 1 となっている。これらは、ILC においてビームバックグラウンドが比較的少なく、平均計測率自体が LHC に比べて遥かに低いことによって可能になっている。

ILC 測定器にとって特に重要なのは、クォークの 4 元運動量を正確に測ることである。トップクォーク対生成など多くの重要な終状態にはいくつものクォークジェットが含まれているため、ジェットエネルギー分解能の違いは全体としての測定器の性能に大きく影響する。指標となるのは、4 ジェット終状態で W 対と Z 対を分別することであるが、そのためには LHC 測定器の約 2 倍のジェットエネルギー分解能、即ち、

$$\sigma_{\text{jet}} \approx \frac{30\%}{\sqrt{E_{\text{jet}}}}$$

が必要であり、これが ILC 測定器開発の目標となっている。このジェットエネルギー分解能を達成するうえで有望と考えられているのが PFA (Particle Flow Algorithm) で、簡単に言えば、荷電粒子のエネルギーは飛跡検出器で測定し、光子と中性ハドロンはカロリメータで測定し、重複を除いて足し合わせるという方法である。この「重複を除く」ことが鍵になるが、そのためには高い精細性を持ったカロリメータと複雑なソフトが必要になる。単純に考えて、カロリメータの半径が大きいほど粒子間の分離が簡単になると考えられるが、半径を小さくすることで、カロリメータの容積を小さく保ち、そのかわり高価な超精細カロリメータを使用するという方向も考えられる。現在、主な ILC 測定器概念研究グループとして次の三つが存在していて、PFA を重視することは共通であるが、それに対するアプローチが違っている。カロリメータの半径の大きい順に、アジアをベースとした GLD、ヨーロッパをベースとした LDC、そして米国をベースとした SiD である。図 1 はそれらの概念を図示したものである。

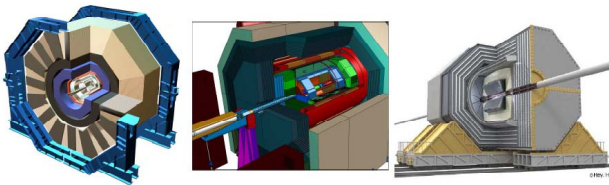


図 1 ILC 測定器概念図

左から、北米を中心とする SiD、ヨーロッパを中心とする LDC、そしてアジアを中心とする GLD。

これらの研究グループは、リーダーシップに他の地域からの研究者を加えるなどそれぞれ国際化を図っており、各検出器部分に関しては横のつながりも深く、一つ以上の測定器概念研究グループに参加することも奨励されている。ILC の承認されていない現在ではこれらの研究グループは「コラボレーション」はないが、WWS によって公式に承認されている。

3. WWS と ILC 測定器概念研究グループ

WWS (Worldwide Study on Physics and Detectors for Linear Colliders) は 1992 年にバンクーバーで開催された国際高エネルギー物理学会議においてリニアコライダの物理と測定器に関する研究を国際的に組織調整するために、リニアコライダに関心を持つ研究者たちによって自主的に設立された。現在、WWS の目的は「測定器概念研究を

認知し、国際的な測定器 TDR (Technical Design Report) に向けて進展を助成する」こと、「加速器設計の中核である GDE と、特に加速器と測定器の接点に関する事項について連絡をとり、物理実験グループと加速器グループとの橋渡し役を務める」こと、「世界で行われている ILC 測定器開発の目録を作り、弱い部分、欠損している部分を確認し、それらが補われる様に活動するとともに、それぞれの研究計画の専門家による評価を奨励する」こと、そして「国際リニアコライダー会議を企画する」ことである。また、WWS は ILCSC (国際リニアコライダー運営委員会) の物理測定器委員会としての役目も担っている。WWS 組織委員会は、欧、米、アジアの各地域のそれぞれから、1 人の共同議長と 6 人の委員を選出して形成され、3 人の共同議長は GDE の正規メンバーともなっている。

現在 WWS によって認知されている測定器概念研究グループは先に述べた三つであるが、それらの違いは単に大きさだけではない。荷電粒子の運動量測定のためのソレノイドは三つとも超伝導であるが、大きなものほど磁場を強くすることは困難で、GLD、LDC、SiD の磁場はそれぞれ 3 テスラ、4 テスラ、5 テスラとなっている。電磁カロリメータに関しては、SiD と LDC が比較的高価なシリコン検出器を用いているのに対し、GLD はその大きな容量の電磁カロリメータの値段を押さえるためにシンチレータを用いている。主飛跡検出器は、GLD と LDC が TPC (Time Projection Chamber) を使い、SiD は比較的小さな半径で運動量分解能を上げるためにシリコンストリップ検出器を使っている。さらに、四つ目の測定器概念が 2005 年夏に発表された。これはその名前も「4-th」といい、ハドロンカロリメータにおいてチェレンコフ放射とシンチレーションを別々に読み出すことを特徴とするが、いまのところ、測定器全体としての研究が十分なレベルに達していないために、WWS に更なる研究を奨励されてはいるものの、正式には承認されていない。図 2 に WWS の組織図を示す。

Worldwide Study on Physics and Detector for Linear Collider (WWS)

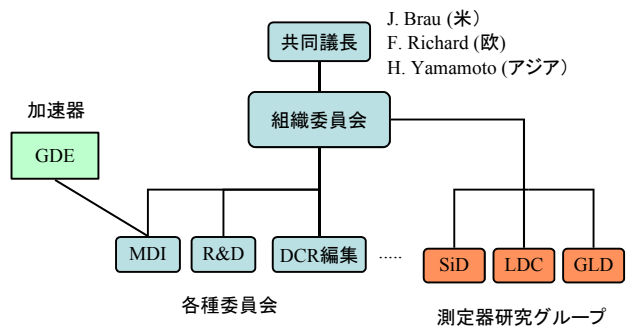


図 2 ILC 測定器と物理研究の国際組織、WWS の組織構造

2005年12月にGDEによってILCの基本構成ベースラインが決定されたが、それによるとILC稼働当初の衝突点の数は二つであり、従って、当初の測定器の数も二つであるというのがベースラインになっている。ただし、ベースラインは必ずしも固定されたものではなく、必要ならば後々に変更は可能であり、衝突点が一つの場合も評価が進められている。ただし、衝突点が二つより多くなることは考えられていない。従って、最終的にはILC稼働当初の測定器グループの数は一つか二つであり、現在の測定器研究組織に関しては、何らかの形の統合再編成が行なわれる。さらに、現在の測定器概念研究グループと最終的な測定器グループにはいくつかの大きな違いがある。一つは、現在の測定器概念研究グループは各測定器要素の開発において非常に緊密な横のつながりを持っているということ。たとえば、カロリメータに関してはCALICE共同研究と呼ばれる、欧、米、アジアにまたがった研究開発が進んでおり、TPCにおいては、ヨーロッパとアジアの間にLC-TPCと呼ばれる共同研究が進んでいる。さらに、シリコン飛跡検出器に関してはSiLC共同研究が活動している。そして二つ目の違いは、一人の研究者が複数の測定器概念研究グループに参加している例が多く、実際それはWWSによって奨励されている。最終的な測定器グループ、即ち「コラボレーション」の場合、競争原理が強く表面にでるため、一人の研究者が複数のILC測定器グループに参加することは、原則としてないであろうと考えられる。現在の、横の繋がりや流動性を重視した体制はいずれ訪れる再編をスムーズにするために重要である。再編は、ILCをホストする国が決まる前に各研究グループの話し合いによって自主的にされるかもしれないし、また、WWSまたはGDEの指導のもとに行われるかもしれない。ILC国際研究所が設立されたあとに、いくつかの測定器LOI(letter of intent)がその研究所に提出され、研究所の評価委員会の議論を経て「このグループとこのグループはまとめられ」といった命令もしくは提案が出されるかもしれない。測定器研究グループ再編が実際にどのように行われるかは今のところ未定である。

WWSが2005年春に設定した測定器研究開発に関するロードマップは次のようなものである。まず、WWSの測定器研究開発委員会が世界で行われているILC測定器研究開発の現状を調べ、ILC測定器概念を念頭において、各研究開発の重要性を評価し、欠けている研究をリストアップすること。これは加速器側の基本構成ベースラインの決定とともに、加速器の研究開発の評価が行われたことに同期する様に行われ、レポートは2006年1月に発表された。そして、2006年4月にインドのバンガロールで行われた国際会議を期限として各測定器概念研究グループが「測定器概要書(DOD: Detector Outline Document)」をWWSに提出すること。これも、すでに三つの各測定器概念研究グルー

プと四つ目のグループによってなされた。これは、それぞれの測定器概念を説明するもので、設計方針、重要な物理反応に対する性能、測定器要素の技術選択、そして値段の評価を含んでいる。ただし、値段に関する部分は政治的に微妙なので、すべての測定器概念で分冊となっているようである。さらに、2006年末には加速器の概念設計(RDR: Reference Design Report)が発表されるが、それと同時に「測定器概念報告(DCR: Detector Concept Report)」がまとめられる。これは、各測定器概念研究グループに一冊ずつではなく、測定器全体に一冊である。この書物の目的は、ILCの物理的意義を整理するとともに、それを実現するために必要な測定器が適当な値段で建設出来ることを示すことにある。よって、測定器の値段の記述はDCRの重要な部分である。その後のロードマップは定かではないが、ホストが決まり、ILCの国際研究所が設立されたあと、再編後の測定器グループがこの研究所に一つまたはそれ以上の測定器工学設計を提出することになるであろうと思われる。通常、測定器グループの最初の意思表示であるLOI(Letter of Intent)に始まって、概念設計、工学設計へと続くが、ILCはまだ承認されていないために、その通りに進まない可能性がある

4. WWS と GDE の関係

WWS はリニアコライダの物理と測定器の研究活動のための国際組織であり、リニアコライダの加速器設計のための国際組織であるGDEの約10年前から存在していたが、リニアコライダが現実度を増すに従って両者の関係はますます密になっている。一つには、前にも述べた様にWWSの共同議長はGDEの正式なメンバーになっており、また加速器と測定器から約5人ずつのメンバーを持ち、GDEの一部であるBDS(Beam Delivery System)グループとWWSの両方に属するMDI(Machine Detector Interface)委員会が存在する。MDI委員会は加速器と測定器の接点に関する問題について議論し提案を行う。たとえば、衝突点近傍の設計、ビームによるノイズ、実験ホールの設計などである。最初の電子陽電子衝突の物理が一通り出た後、レーザーによるコンプトン後方散乱を使って光子光子衝突実験を行うことがオプションとして考えられているが、そのために必要な衝突点付近の改造なども、この委員会で議論されている。また、リニアコライダ国際会議では、MDI委員会が加速器と測定器の議題に関するセッションの企画を行う。

現在、GDEがどこまで測定器に関する問題に首を突っ込むべきかについて活発な議論がなされている。一つの考え方は、本来GDEは、加速器の設計のみが国際リニアコライダ運営委員会ILCSCから与えられた任務であり、測定

器のことは口を出すべきでないという考え方で、今一つの考え方は、将来国際研究所が設立された時には、測定器の審査は研究所が行うものであり、GDE は実際の研究所の前身となるものであるから、測定器関係にも口を出すべきであるという考え方である。さしあつたては、GDE は測定器研究開発の申請を審査すべきか、という問題がある。GDE のディレクターはそのようにしたいという意向を表明しているが、それに対する反対意見も多い。反対意見の主なものは、WWS の測定器研究開発委員会がすでに測定器開発に関する評価を行っているというもの、そして、各地域によって測定器開発の資金確保の方法や現状が大きく違っており、地域によっては、GDE が一つ一つの申請を審査したところで、実際の審査機関がそれをほぼ無視する可能性があるということである。この問題は、単に測定器研究開発に関わるだけでなく、実際の ILC の運営に際して測定器と物理のグループ、すなわちいわゆるユーザーがどれだけの独立性を持つかということに直接関わっているため、今のうちから注意深い検討が必要である。

5. 測定器要素の開発状況

さて、ここで各測定器要素の開発状況を簡単に説明したい。前にも述べた様に、これらはいわゆる緊密な国際協力体制のもとに進められている。

バーテックス検出器

ここでもっとも手強い問題となるのが、読み出しである。その原因は超伝導加速管をつかったリニアコライダのビームのバンチ構成にある。それは、約 300 ナノ秒間隔で配置された約 3000 のバンチが 1 ミリ秒の長さのトレインを形成しており、それが 5 ヘルツで衝突する。すなわち、トレインとトレインの間には約 200 ミリ秒の間隔があり、その時間を使ってゆっくり読み出せばいいようなものだが、バーテックス検出器、特に最内層はビームに近いところにあるため、ビームからのバックグラウンドを受けやすい。ここでは、大量の低エネルギー（1 GeV 程度）の電子陽電子対が主なバックグラウンド要因となるが、これは、電磁相互作用であるので、比較的正確に予想出来る。その研究によると、一つのトレイン全部のヒットを積分してトレインが過ぎ去った後に読み出していたのでは、通常のピクセル検出器のピクセルサイズ（20 マイクロン角）だと占有度が要求の 20 倍ほど高くなり過ぎて使い物にならない。

そこで様々な解決法が研究されているが、おおざっぱにトレインとトレインの間に読み出すものと、トレインの途中に 20 回ほど読み出すものに分けることが出来る。トレインとトレインの間に読み出す場合には、20 マイクロン角だ

が各ピクセル上にトレインを約 20 に時間分割したそれぞれのヒット情報を保存するものと、5 マイクロン角程度の高精細ピクセルを用いるものがある。各ピクセルにヒットを 20 個保存するには CMOS 技術を用いて各ピクセル内にある 20 個のキャパシターを使うものと ISIS (In-situ Storage Image Sensor) 技術を使うものが英国のグループを中心として進められている。ISIS は既に超高速カメラに実用されており、ピクセルあたり 20 のヒット情報を CCD の形で保存する。実際の超高速カメラの場合は約 100 のヒット情報を保存する。この場合 CCD であるので、電磁干渉に強いという利点がある。高精細ピクセルを用いたものでは、高エネルギー加速器研究機構が推進しているもので、CCD 技術を用いてピクセルを 5 マイクロン角程度にしたものがあるが、ここでは拡散を抑えるために全空乏型を使う必要がある。5 マイクロンより大きく拡散すると小さなピクセルを使う意味がなくなるからである。また、エール大学とオレゴン大学のグループは高精細ピクセル検出器と通常の大きさのピクセル検出器を貼り合わせた設計を推し進めている。トレインの途中に 20 回ほど読み出す場合、非常に高速な読み出しが要求される。一つは、CCD 技術を使ったもので、すべての行を独立平行に読み出すことで読み出しを高速化する。現在毎秒 2500 万ピクセルの読み出しまで成功しているが、目標は毎秒 5000 万ピクセルで、それでも最大の CCD センサー長さは 5 cm 程度にとどまる。また、CMOS 技術、DEPHET 技術、SOI 技術などで高速読み出しを研究するグループも多く存在するが、いままでのところ十分な読み出し速度が得られていない。バーテックスに関しては、これなら大丈夫と ILC での使用が可能と実証されたものが存在しないのが現実である。

カロリメータ

前に述べた PFA (Particle Flow Algorithm) を実現するうえで決定的に重要なのが電磁カロリメータとハドロンカロリメータである。とくに、シャワーを分離するために高精細性が要求されると考えられている。

電磁カロリメータには、主として電離検出にシリコンを用いるものとシンチレータを用いるものがある。吸収体には密度が高く、電磁シャワーが横に広がりにくいタンゲステンを使用する。ヨーロッパを中心とした CALICE 共同研究はパッドの大きさが 1cm^2 の試作機のビームテストを既に成功しており (図 3 参照)、アメリカを中心としたグループが進める研究ではパッドの大きさが 4 mm 角程度の高精細シリコンウェハを開発している。日本では、シンチレータを用いて $1\text{cm} \times 16\text{cm}$ のストリップと 4 cm 角のタイルを組み合わせたものを開発している。シンチレータの読み出しには最新の光検出素子 MPPC (Multi-Pixel Photon

Counter)を用いる。これは、最近ロシアで発明された素子で、SiPMともよばれ、低電圧(約60V)で作動し、5テスラの磁場の中でも問題なく、小型で安価であるという魅力的なスペックを持っているが、課題はノイズと作動電圧領域が狭いことである。

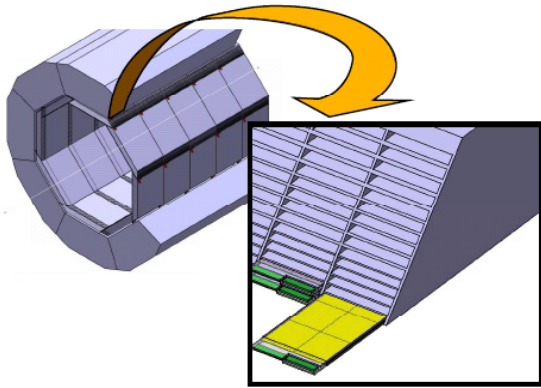


図3 CALICEのカロリメータ構造体
電離検出器は何種類かが挿入出来る様になっている。

ハドロンカロリメータはシンチレータを用いた電磁カロリメータで、比較的シンチレータのサイズの大きくしたものを使って来た。そのようなハドロンカロリメータは日本やヨーロッパのグループによって試作器がテストされた。とくにCALICE共同研究はSiPMをつかった試作機のビームテストで成功をおさめている。ここでも、MPPC/SiPMが高精細化の鍵を握ると思われる。今一つのアプローチはGEM(Gas Electron Multiplier)またはRPC(Resistive Plate Chamber)を使って、1cm角程度の高精細化を実現し、ただし、データ量を抑えるために各チャンネルを1ビットで読み出すというものである。これはデジタルカロリメータと呼ばれる。そのアイデアが、成功するかどうかはPFAのソフトウェアにもかかっているが、いまのところ十分に研究し尽くされたとは云えない。

飛跡検出器

飛跡検出器にはTPC(Time Projection Chamber)とSilicon Trackerが候補として考えられている。TPCの電子検出は伝統的にはワイヤ(MWPC)が使われて来たが、増幅がワイヤのみで起こるため位置分解能が劣る。シグナルは陽イオンのドリフトによるために遅く、その結果ドリフト方向に近接した荷電粒子の分解能が悪い。また、ワイヤはちぎれやすいという難点もある。そこで、研究が進められて来たのがMPGD(Multi-Pixel Gas Detector)である。GEM(Gas Electron Multiplier)とMicroMEGAS(Micro-mesh Gas Detector)の二つのタイプがILC用に開発されているが、これらは約100マイクロン以内で、ドリ

フトした電子の当たったところで増幅が起こり、また、シグナルは電子のドリフトによって起こるので速い。さらに、陽イオンのTPC内へのフィードバックも少ないという利点を持つ。図4にGEMの動作を図示する。

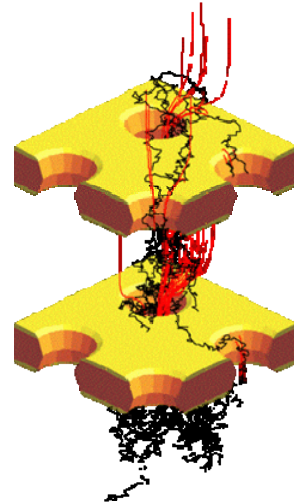


図4 GEM(Gas Electron Multiplier)による増幅の様子
穴の直径は50マイクロン、ピッチは150マイクロンである。

MPGDによって増幅された電子がドリフトするとき、その下の電極に信号を誘発するが、そこに $2\text{mm} \times 5\text{mm}$ 程度の精細さのパッドを並べることでシグナルを読み出す。もし増幅された電子の雲の大きさがパッドのサイズより大きければ、複数のパッドがシグナルを得て重心法を用いることによって100マイクロン以下の位置分解能を得ることが可能である。ただし、そのためには抵抗膜を使って人為的に電子雲を広げてやるなどの手を加える必要があるが、その試験は成功している。さらに、 $2\text{mm} \times 5\text{mm}$ 程度のパッドのかわりに100マイクロン角のピクセルのシリコン検出器を使うことが考えられている。この場合、人為的に電子雲を広げてやる必要はない上、分解能もパッド読み出しによって制限されなくなる。

ILC用のTPCの試作機はアーヘン大学、MPI、ビクトリア大学、DESYなどのグループが制作して来たが、日本のグループは特にドイツ(MPI, DESY)、フランス(IPC Orsay)との共同研究により日本の磁場1テスラ内径85cmの超伝導マグネットを使うなどして高エネルギー加速器研究機構でのビームテストを進めて来た。MPGDとワイヤの比較、ガスの比較など基本的な測定は出揃ったところである。現在、ヨーロッパの資金による大型プロトタイプが計画されており、そのプロトタイプの大きさは上の日本の超伝導マグネットにちょうど収まる様に設計されている。当然のことながら、日本のグループはこのプロトタイプの設計、製作、試験に深く関わっていく。

シリコン飛跡検出器は SiD 測定器概念の中央飛跡検出器であるが、LDC と GLD 測定器概念の TPC の内側の飛跡検出器として、そして、エンドキャップや TPC 外部の飛跡検出器としても使用されている。ヨーロッパの豊富な ILC 測定器資金を背景に、ヨーロッパを中心とした SiLC 共同研究は ILC 測定器のためのシリコン飛跡検出器の開発を目的として活動している。既に長さ 28 cm のシリコンストリップセンサーが製作され Sr^{90} を使ったテストで成功している。また、アジアでは韓国のグループが GLD の TPC の内側の飛跡検出器としてのシリコン検出器の開発を進めている。一方、SiD の場合、10 cm 角のシリコンセンサーを多数並べるといった方式を採っている。

その他の測定器要素

他にも、ミュオン検出器や前方カロリメータなど、重要な測定器要素があるが、ここでは省略する。また、データ取得に関しては、国際的運営を支えるためにも、遠隔操作で実験シフトをとることが望まれるが、そのための構想が GDN (Global Detector Network) である。世界中に三カ所か四カ所の実験シフトの出来るセンターを設置し、そこであたかも実際の測定器の近くにいるように実験シフトをとり、測定器をモニターし、必要なときにはリモートに修理し、それが出来ないときには実際に測定器にアクセスする人員に連絡する。データ取得の設計もこのような実験の形態を前提になさなければならない。

6. ILC 測定器開発資金の世界的状況

WWS の測定器研究開発委員会は、現在存在する ILC に必要な測定器研究開発のリストを作り、今後約 4 年間の研究開発費として獲得されている資金を国別に集計した。図 5 にその結果を示す。ただし、直接経費のみで、人件費は除いてある。また、一般測定器開発で ILC のためという名目のないものは含まれていない。青は 2006 年 1 月までに確定しているもので、赤は測定器研究開発委員会のレポートにはないが、それ以後 2006 年 5 月までに確定したものである。日本の ILC 測定器開発費は、2006 年 1 月の段階では、皆無に近い状態であったが、5 月現在ではアメリカ合衆国に近い資金となっている。これは、この春に学術創成研究「国際リニアコライダーでの実験のための革新的測定器システムの開発研究」が採択されたことによる。

ヨーロッパの ILC 測定器開発費がアメリカ合衆国の 4 倍以上とここまで大きいことには、主として EUDET 計画が昨年承認されたことが寄与している。EUDET は ILC 測定器開発のための基盤整備を目的としたもので、EU から今後 4 年間に人件費も含めて 700 万ユーロ (約 10 億円)、大学

や研究所から出されるマッチング資金を含めると 2150 万ユーロ (約 30 億円)となる。ヨーロッパは EUDET 以前も ILC 測定器開発資金で世界をリードして来たが、それは現在、測定器要素の共同研究、CALICE、SiLC、LC-TPC がいずれもヨーロッパに生まれ、ヨーロッパ主導で行われている事実となって現れている。

アメリカ合衆国では、現在 ILC に関する資金の大幅な増加が見込まれており、その一部として測定器開発も大きく拡大する様子である。日本は、学術創成研究の採択によって一息ついたとはいえ、近い将来におこる測定器グループの再編において主導権を失わないためには、さらなる資金だけでなく人材の確保も重要課題である。

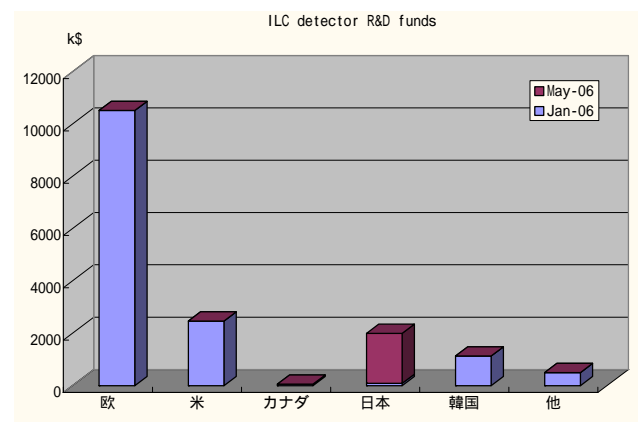


図 5 ILC 測定器開発資金

今後約 4 年間の総資金で、間接経費および人件費は除く。青は 2006 年 1 月までに確定しているもの、赤はそれ以後 2006 年 5 月までに確定したものの。

7. おわりに

ILC 測定器開発に関しては、現在の緊密な国際協力を実現した研究者共同体の協力精神があった。しかし、この記事に関してもっとも重要なものは、長い歴史を持つ日本のリニアコライダー測定器開発活動である。それに携わって来た方々に心から感謝の意を表します。最後に、あきらめることなく励まし続けてくれた編集委員の高橋さんと川越さんに謝辞をさし上げます (これは、感謝の謝であるとともに、謝罪の謝である)。

[1] GDE (Global Design Effort) home page :

<http://www.linearcollider.org/cms/>

[2] Worldwide Study on Physics and Detectors for Linear Colliders home page :

<http://physics.uoregon.edu/~lc/wwstudy/>