

## 会議報告

## TILC09 開催報告

藤本 順平\*

## Report on TILC09

Junpei FUJIMOTO\*

## Abstract

TILC09-Joint Physics and Detector Workshop and GDE Meeting on International Linear Collider was held at EPOCAL Tsukuba in Japan, where more than 200 researchers attended. It is reported on research and development of ILC accelerator, physics and detectors.

## 1. 概 要

2009年4月17日から21日にかけて、茨城県つくば市の国際会議場（エポカルつくば）で「TILC09-Joint Physics and Detector Workshop and GDE Meeting on International Linear Collider」が開催された。報告者は国内組織委員会（LOC）のメンバーとして企画・運営に携わった。まずは、その会議構成について触れる。

TILC09はアジア域の加速器計画を検討するアジア将来加速器委員会（ACFA）が組織したILCの物理及び測定器を議論する国際研究集会であるとともに、ILC加速器設計と遂行計画を練る国際設計チーム、GDE（Global Design Effort）の会議との合同開催であった。2つの会議は、初日の開会本会議と最終日の閉会本会議を合同で行った。会議の重要な議題項目には、中三日の平行・セッションの他、GDEの加速器諮問委員会（Accelerator Advisory Panel—AAP）レビュー、ILC物理研究責任者RD（Research Director—RD）のもと国際測定器諮問委員会（International Detector Advisory Group—IDAG）による測定器システムのLetters of Intent（LOI）のレビュープロセスの開始が含まれていた（図1参照）。

AAPはGDEディレクターに助言し、提言を行うためのGDEによる内部レビュー委員会である。今回はその第1回目であった。一方IDAGの主な目的は測定器趣意書（LOI）の評価認証プロセスである。本年3月末日の提出締め切りに対し、「ILD」、「SiD」、

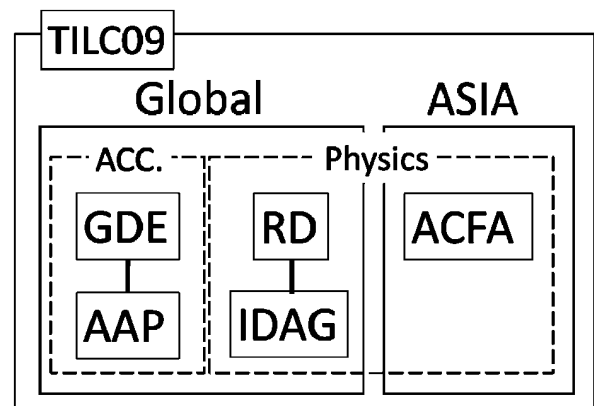


図1 TILC09の会議構造

そして「4th」の三つのILC測定器設計グループによる3つのLOIが提出された。IDAGによって「認証」された測定器コンセプトが、測定器システムの考察例としてILCの設計作業と統合的に扱われることになる。

これらを踏まえて、2012年を目処に準備が進められている加速器技術設計報告書（TDR）の完成に向けての活動が本格化することになっている。さしあたっては既に報告されている基準設計（Reference Design Report—RDR）の技術的妥当性を高めるための「LC技術設計フェーズ1（Technical Design Phase—TDP1）」を2010年夏までに終わることが予定されている。そこでは、コスト削減も焦点となっており、「Re-baseline」となる設計案が盛り込まれることとなる。

\* 高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所 KEK High Energy Accelerator Research Organization  
(E-mail: junpei.fujimoto@kek.jp)

以上のように TILC09 は ILC 推進にとって重要なステップとなった会議であったが、昨年の金融危機以来、円高水準が続いている日本での開催に海外からの参加者数低下が懸念された。結局、210 名を超える総参加者数に達することができたのは関係者による地道な努力の結果であったと言えよう。LOC の一員として紙面をお借りして御礼を申し上げたい。

## 2. 初日の開会合同本会議

初日の開会合同本会議は、ICFA 議長でもある、鈴木厚人 KEK 機構長による挨拶から始まった。挨拶では昨年他界された前戸塚機構長の業績と ILC に向けた思いならびに、果たされた役割が紹介された。

ILCSC 議長である E. Iarocci 氏による ILCSC の活動報告の講演の後、先端加速器科学技術推進協議会事務局長の有馬雅人氏による「産・政・学の協力による先端加速器科学技術の推進」と題した講演があった。

同協議会は 2008 年 6 月に設立され、「国際リニアコライダー」計画を中核のモデルケースと定め、政・官・有識者および産・学の連携により、戦略的な観点を基に最先端の加速器の技術開発を行うことで、人類の知の地平の開拓、医療・エネルギー・環境問題など世界規模の課題への新しい対応、そして先端科学・技術による国際競争力の強化を目指している。この目的のため、基礎科学と技術の社会への発信と理解の促進、アジアをはじめ国際的な連携の方策や知財の課題などにも取り組んでいる。現在 34 の大学・研究所と 66 の企業がこれに参加している。

コーヒーブレークの後、S.-Y. Choi 氏による高エネルギー物理学における ILC の役割の講演があった。LHC が始まる現時点で、ILC の役割は明解であり、それはテラ・スケール現象のより精密な観測である。LHC では様々な新現象の発見が期待されているが、ILC はその正体を特定するとして、ヒッグス事象、超対称性事象、余剰次元事象、リトルヒッグス事象等が議論された。

一方、TILC09 のグローバルな側面として、RD の山田作衛氏の講演、GDE ディレクターである B. Barish 氏の講演が続いた。講演内容はそれぞれ以下の IDAG の章と、GDR の章に多く重なるのでここでは割愛させていただく。

## 3. GDE

GDE のパラレル・セッションの報告から始める。成果は多岐にわたっているため、ここでは、(1)超伝導加速空洞製作の R&D に関する現状、(2)加速器試験施

設の状況、(3) ILC 施設ならびにサイト関係、(4) TDP-1 に向けての“Re-baseline”の 4 点に焦点をあて、報告する。

### 3.1 超伝導加速空洞製作の R&D の現状

GDE の示す超伝導空洞製作のためのロードマップによれば、TDP-1 において、縦試験時に 35 MV/m 以上の性能を持つ空洞製作の歩留まりが 50% に達することを目指している。TILC09 からのメッセージは、この目標達成の可能性が示されたことである。2008 年 11 月の時点で、ACCEL 社、AES 社、ZANON 社、三菱重工ほかの複数の供給元による空洞を DESY, JLAB, FNAL, KEK などでも測定したところの歩留まりは 48 本中、19 本ではあるが、とくに優れた成績をもつ特定の製造供給元での製作の場合、23 本中、11 本が達成でき、ほぼ 50% を満足している。これまでは目標の達成に向け、製造方針などの根本的な改良までを立ち返っての検討が必要であるか、との危惧があったが、今回の報告により、基本的には現在の方針を進めれば TDP-1 の達成がかなう可能性が見いだされたのである。

さらに、縦試験により 35 MV/m が達成できても、クライオモジュールに収めた時に TDP-1 の条件である、31.5 MV/m が達成できるのかも危惧されていたが、KEK の事例では、縦試験時とクライオモジュールに収めた時で大きな差がない、という結果も報告された。そこで今後の R&D 項目としては、1.製造過程に焦点をあて、特に電子溶接 (EBW) で熱的影響を被る部分の表面劣化ほかについての理解を深めること。2.電解研磨などの表面処理中、またはその前後で発生している可能性のある汚染対策について、さらに詰めを急ぐこと。3.空洞の状態を精密検証する光学検証システムを進展させ、製作現場への、より質のよい、より速いフィードバックを実現すること。4.大量生産に向けての研究所と企業との協力体制の構築を始めること。があげられた。

現在空洞は主に、FNAL, DESY, KEK のそれぞれで独立に R&D が進められている。開発段階で独自性を損なわずに、互換性を維持するため、プラグ・コンパティビリティとよばれるコンセプトが提唱されている。これは、開発中には詳細仕様の変更が生ずるので、インターフェースの仕様を統一し、世界共通設計部の詳細な仕様の束縛をゆるめるという考えである。たとえばクライオモジュールに収めるときのインターフェースのみが統一されていけばよいとする考え方である。このようにして各国で製作した空洞を、同じクライオモジュールに実際に納めて運転してみる、とい

う「S1 グローバル」計画の準備中状況についての報告があった。プラグ・コンパティビリティ概念については、これを推し進めて、実機の製作時にも適用することも考えられている。

最後に工業化についての話題を取り上げる。現在欧州では、ACCEL 社、Zanon 社が、また北米では、AES 社と Niowave 社が、日本では三菱重工業が製造技術を持っている。ILC を計画決定から4年で完成させるためには年間で約4,000本の製作能力が必要となり、アジア、ヨーロッパ、アメリカの各極で一日あたり5~6本の製作能力が必要となる。現在のところ、この製作能力を有する企業は存在しない。そこで工業化を促進し、コスト的に最も効率的な製造方法・品質管理等を検討するためのR&D施設の設置が議論された。

### 3.2 加速器試験施設の状況の状況

ATF (KEK) における Low Emittance Tuning の実現は、軌道の dispersion と coupling を軌道反応マトリックス解析によって反復して修正を行うことで得られる。会議の行われた週に、X線放射光を使った測定で  $\epsilon_y$  が 10 pm, レーザーワイヤーでの測定で 5 pm が確認されている。測定系のさらなる検証が必要であるが、計画は順調に進んでいると報告があった。

KEK では ATF2 も 2009 年をはじめから運転を開始した。目標は  $\sigma_y$  で 35 nm の達成と長期にわたる運転の実現、ナノ BPM によりビームセンターの 2 nm 以下の安定の実現である。ゴールに向かっての今後の研究に期待がかかった。

CesrTA (Cornell 大学) からは、電子雲不安定性に関する研究が進んでいる旨の報告があった。研究項目は TiN,  $\alpha$  炭素コーティングされた真空容器の効果、電極の改良、真空容器の表面に構造を入れ反射を吸収する grooved chamber の開発等である。また、遅延場解析法による電子雲の状態のモニター、ビーム近くの干渉チューンシフトによる電子雲の密度測定も行っている。更に X 線を用いたバンチ毎のビームサイズのモニター、TE モード波の測定も行っている。これら多岐にわたる測定により電子雲の性質がより詳細に明らかにされるであろう。電子雲対策としての電極の改良に関しては KEKB のウィーグラーを用いての研究も進められている。鍵はフィードスルーの改良である。改良版の検証は現在進行中である。

また、線形加速器の試験施設としては、ドイツで進められている FLASH は 2400 バンチによる 9 mA のオペレーションが可能である点で ILC に条件に近い。既に去年の 5 月, 9 月, 今年の 1 月と実験が行わ

れ、今年の 9 月の時点で 3 MHz において 3 ナノクーロンのバンチチャージ, 2400 バンチの実現が報告されている。今年中にビームパワー 36 kW で、全体で平均 27 MV/m の達成を目標として準備が進められているとの報告があり、出席者の期待を集めた。

### 3.3 ILC 施設及びサイト関連

RDR では、加速空洞の設置されるトンネルとクライストロンを設置するトンネルの 2 本のトンネル構成が提案されていた。次項目の Re-baseline と関連があるが、コストの削減の一案として、1 本トンネルの検討が進んでいる。北米で検討されているのは加速空洞のみをトンネルに収納し、クライストロンギャラリーは地上施設に置くクライストロン・クラスター案である。トンネル掘削費は 28% の減となるが、地上のクライストロン・クラスターとつなぐトンネルの設置、地上施設の設置があるため、全体では RDR に比べ、5% のコスト削減になるという。一方、KEK では 1 トンネルに加速空洞とクライストロン (Distributed RF) を同時に設置するデザインの検討が進んでいる。

なお、サンプルサイトとしてロシアのモスクワ近郊の地域 (ドゥブナ研究所周り) が報告された。

### 3.4 Re-baseline

TDP-1 は、RDR で提案された ILC 建設計画をより実現可能に改良する第一段階である。その検討項目は、1.ビーム・デリバリー系、2.陽電子生成系、3.ダンプ・リング、4.バンチ圧縮系、5.クライストロン・クラスター R&D を含む RF 配送系、6.全体パラメータの一部見直し等である。Re-baseline となる “design & integration” を行うのは約 30 名の核となる研究者チームである。

TDP-1 は実現可能性にとどまらず、コストの削減も目指している。この側面が喧伝され、Re-baseline の作業計画が “minimum machine” というように表現された時期があった。しかし、TILC09 ではコスト削減のみが強調される表現を避けるため、今後は AD&I (Accelerator Design & Integration) と呼称することとし、その結果起こることになる baseline 設計の変更を、Re-baseline と呼ぶように用語を整理した。

## 4. AAP

AAP は常任メンバー 11 名、外部専門家委員 5 名で構成されており、各極による内訳は欧州域から 7 名、北米域から 5 名、アジア域から 4 名である。

GDE では 3 名のプロジェクトマネージャーが活動しているが、そのそれぞれに AAP のコンタクトパー

ソンが割り振られている。従って AAP はレビュー機能のみならず、プロジェクトのサポートとしての側面も持ち合わせている。

そのレビューの要点は計画のプライオリティ付けとタイムラインの監視である。今回のレビューでの具体的な案件は、1.プロジェクトマネジメント、2. e-cloud、3.超伝導 RF 空洞、4. ILC 施設とサイト、5. 加速器試験施設 (ATF, FLASH)、6. 加速器システム (電子、陽電子源, DR, Beam Delivery System (BDS)) である。試験施設における実験の進行状況や超伝導技術の進展について、高い評価がなされた。2012 年というタイムライン達成のためには、プロジェクトマネジメントチームが研究所間の調整に積極的にかかわり、シナジー効果をより高め、透明性を確保した上で目的達成のためにより集中して取り組む体制づくりが提言された。

## 5. ACFA : 物理と測定器に関する発表

ここからは TILC09 における物理と測定器の検討に関する報告に移る。「概要」の章で紹介したように 3 月末の締め切りにむけ、3 つの測定器案検討グループが物理と測定器の検討を集中的におこない LOI を提出したところである。従って、その発表も自ずと LOI を準備のために行った研究の紹介、並びに LOI のプレゼンテーションの場でもあった。そこでまず、LOI として提案された 3 つの測定器案をまとめておく。

- 1) **ILD 測定器** : 基準設計時の GLD (日本グループが提案しアジアを中心として検討されてきた測定器案) と LDC (ヨーロッパを中心として検討されてきた測定器案) が統合・発展したものである。荷電粒子飛跡検出器として、衝突点から外側に向かってシリコン-ピクセル・バーテックス検出器、シリコン飛跡測定器、主飛跡検出器としてタイム・プロジェクトジョン・チャンバー (TPC)、そしてシリコン飛跡測定器を配置している。さらにその外側を細密電磁カロリメータと細密ハドロン・カロリメータが取り囲み中性粒子をつかまえる。これらの飛跡検出器、カロリメータは全て、3.5 テスラの巨大なソレノイド電磁石の中におさめられる。
- 2) **SiD 測定器** : ILD 同様、PFA を設計理念の中心に据える。一番の特徴は、その名の通り、オールシリコンの荷電粒子飛跡検出器システムで、シリコン-ピクセル・バーテックス測定器、シリコン飛跡検出器を擁し、その周りを中性粒子検出の

ための細密シリコン-タングステン電磁カロリメータ、そして細密ステンレス/RPC ハドロン・カロリメータが取り囲む。5 テスラの強磁場ソレノイド、それに付随する磁束リターン・ヨーク、そしてミュオン粒子検出システムを持つ。

- 3) **4th 測定器** : 二重ソレノイドとエンド・ウォール電流コイルを持つ。衝突点での統合のため内部に最終収束光学補正が組み入れられている。また、シールドを組み込まないオープンな構成のため軽量である。測定器自体はピクセル・バーテックス測定器、軽量なクラスター・タイミング測定によるドリフト・チャンバー、二重読み出しをもつ電磁/ハドロン両カロリメータを使っている。PFA ではなく、二重読み出しによる高分解能カロリメータでジェット・エネルギーの高分解能測定を目指す点が他の測定器案との大きな違いである。

測定器提案グループは、期待される測定器システムの性能を評価するためにベンチマーク試験を行った。これは、標準的な素粒子反応過程を、エネルギーや反応断面積に関する共通の仮定のもとでシミュレーションし、想定した測定器システムを使ってどの程度、目的とする物理量の測定が可能かを調べるものである。標準模型で現象がよく分かっている反応や、超対称性模型のような未検証の理論で想定される反応の中から、それぞれの測定器要素の能力差がよりはっきり出るような反応がベンチマーク過程として選択され、大量のモンテ・カルロ事象が生成され、シミュレーションが行われた。物理及び測定器の平行・セッションではそうした発表が立て続けになされた。これまで物理のシミュレーションというと簡易測定器シミュレータを使ったものがほとんどであったが、今回の特徴は、測定器の微細構造まで組み込んだ詳細なフル・シミュレーターによるシミュレーションを行ったことだ。

一方、GDE は現在のところ「プッシュアップ」システムを利用して二つの測定器を一つのビームラインで共存させる構想を持っている。3 つのグループと加速器の代表者らはすでに測定器プッシュアップに関する合意文書を作成し、加速器-測定器インターフェースを特に重視したプッシュアップの衝突点での機能的要件を、共通了解事項としてまとめている。

会議ではそれぞれの LOI グループが、測定器のプッシュアップの仕組み、放射線環境シミュレーション、衝突点近傍のビームパイプ設計、そして周辺測定機材など MDI 関連の課題についての発表を行った。

## 6. IDAG

LOIは3つとも受理され TILC09 開催中に IDAG によって綿密な検証が始まった。IDAG は3日間かけて測定器設計グループをインタビューしたが、それらのセッションは他の参加者には非公開であった。その非公開セッションでは、LOI グループを個別に招き、それぞれの R&D やサブ測定器の選択、物理パフォーマンスについて質疑応答を行った。

非公開セッションのうち、共通のイベント生成プログラムを使用し、生成された同じシミュレーションのイベントサンプルを使うベンチマークに関しての聴聞は3つの設計グループが同時に招集された。

会議の終わりに、IDAG はそれぞれのグループに新しい質問リストを手渡した。特に、ベンチマーク評価についての追加検討のリクエストや、プッシュアップ構造で二つの測定器が交替する際にどのように測定器を校正や位置修正するのかについての説明が求められることになった。

## 7. サテライトセッション

本会議に合わせ一般向け講演会と高校生向け実験教室が行われた。

4月18日は科学技術週間期間中の土曜日で、つくばの研究所を訪ねる多くの市民を対象とし、講演会「反物質の消滅は宇宙史上最大のマジック？」が実施された。ILC 国際会議においては、しばしば一般向け講演会が開かれている。まず、反物質はどこに消えたのか？」と題した村山斉 IPMU 機構長の講演では、人気のアニメキャラクターを使った物質、反物質の説明に子供達の歓声が上がった。樋口岳雄 KEK 助教とクローズアップ・マジシャンの前田知洋氏も加わった後半のトークショーでは、反物質を世界一「量産」している加速器 KEKB の解説やお札を使った「エネルギー保存の法則」マジックなどが披露された。親子連

れを中心に、約500名が来場し、その6割以上は、素粒子物理のイベントへの参加が初めてとのアンケート結果を得ている。

翌4月19日(日)には、高校生と先生のための物理実験教室「e-lab」が開かれた。日本での e-lab の開催は、昨年の仙台に続き二度目になる。9名の高校生と教師が集まり、ケン・セシル氏(米国ハンプトン大学)、ロバート・ペーターソン氏(米国フェルミ国立加速器研究所)、ジェレミー・パシュケ氏(米国ヨーク高校)の指導のもと、宇宙線を数える装置を組み立て、観測を行った。データはその場で解析され、発表が行われた。e-lab 終了後、装置は茗溪学園高等学校(つくば市)に設置され、継続的に観測が行われる。これまでに e-lab に参加した世界中の学校はネットワークでつながっており、測定データは世界中の至るところで見ることができる。装置には GPS による時刻記録機能があるため、e-lab 装置は全世界にはりめぐらされた宇宙線観測網として機能する。

## 8. 今後の予定

今後の予定を述べ、会議報告を終えたい。AAP は2010年の早い段階で、TDP-1に関する本レビューを行う。そのタイミングで GDE は Re-baseline として AD&I を公表する予定である。2011年の TDP-2 に関する予備レビューを経て、最終的に2012年に本レビューを行う。

一方、IDAG による測定器認証の最終結論は、加速器と測定器のグループが再び参集する次回 ILC 会議、9月29日から10月3日までニュー・メキシコ州アルバカーキで開催される ALCPG 09 で、公表される予定である。

最後に、この報告書執筆にあたり助言をいただいた、KEK の横谷馨さん、峠暢一さん、藤井恵介さん、大森恒彦さん、高橋理佳さんに謝意を表します。