

## ALCPG11 会議報告

東北大学大学院理学研究科

佐貫 智行

sanuki@epx.phys.tohoku.ac.jp

2011年7月23日

### 1. はじめに

2011年3月19日から23日まで、米国オレゴン州にあるオレゴン大学へ世界中から200名ほどが集まり、The 2011 Linear Collider Workshop of the Americas(ALCPG11)が開催された(図1)。これは、リニアコライダーにおける物理に関する米国内の研究グループと、国際リニアコライダー(International Linear Collider; ILC)の国際設計グループ(Global Design Effort; GDE)が合同開催した研究会である。

3月19日といえば、東北地方太平洋沖地震の1週間後であった。会議は、GDEリーダーであるBarry Barish氏の以下の言葉から始まった。To our Japanese colleagues: On behalf of the Global Design Effort for the International Linear Collider, I would like to convey our deepest care and sympathy to the citizens of Japan and to our physics colleagues and collaborators for the tragedy that your country has suffered as a result of the earthquake and tsunami last week.

ここで、高エネルギー加速器研究機構の被災状況について、横谷氏から報告があった。リニアコライダー関連施設にも大きな被害があったことを聞き、世界中のILC研究者が危機感を持ったことと思う。

### 2. ALCPG11 まで

GDEの任務は、ILCの技術設計報告書(Technical Design Report; TDR)をまとめあげることである。GDEが発足した2005年以降、年に2回、もしくはそれ以上の頻度で開催されてきたGDE全体会議は、TDRをまとめるために続けられてきたともいえる。ALCPG11もそのような流れの中で開催された会議である。今回の会議の位置づけを紹介するために、私の知る限りでこれまでの流れを振り返ってみたい。次世代電子陽電子加速器としてのリニアコライダー開発研究は、大別すると常伝導加速器と超伝導加速器という陣営に分かれて進められていた。しかし、2つの加速方式を並行して開発していくのでは人的にも金銭的にも効率



図1 緑豊かなオレゴン大学で開催された(photograph by Jack Liu)

が悪いということで、2004年8月に次世代リニアコライダーには超伝導加速器を用いることが決められ、ILC と名付けられた。その3ヶ月後にKEKで開かれた第1回ILCワークショップを経て、ILCの設計を国際的に進めるグループとしてGDEが発足した。2005年8月に米国スノーマスで開かれた第2回ILCワークショップでILCのベースラインを作成し、さらに検討を経た後、2007年8月に基準設計報告書(Reference Design Report; RDR)が発表された[1]。ここで、ILC加速器の第一期計画では、到達重心系エネルギーは500GeV、平均加速勾配は31.5MV/m、全長は31kmと決められた。RDRに書かれている基準設計を元に、国際的なR&D計画が練られ、詳細設計が進められている。また、工業化へ向けた各種の検討も続けられている。

GDEではRDRの公表以降の数年間を技術設計フェーズ(Technical Design Phase)と称して、RDRのデザインを吟味してきた。RDRのデザインは「性能優先」であり、その性能を「确实」に実現できるように工夫されている。また、性能という観点でも、運転という観点でも、「安全」「安心」を重視した設計であるといわれている。一方で、技術設計フェーズでは「性能」「确实性」「安全」「安心」という観点がやや軽視され、「コスト削減」ばかりに集中しているような雰囲気を感じずにはいられなかった。2009年後半になると、RDRに記されたベースライン設計からの変更案として「ストローマン・ベースライン2009(SB2009)」が提案された[2]。この変更案には、低エネルギーにおけるルミノシティが激減してしまうという、我々物理屋にはとうてい納得できない仕様変更が含まれており、物理屋から大反対の声が上がった。それでは、1年間かけてじっくりと話し合しましょう、ということで始まったのが、トップレベル変更管理(Top Level Change Control; TLCC)プロセスである。

TLCCプロセスでは、「性能」と「コスト抑制」を両立すべく、RDR発表以降に進められた各種のR&Dや検討の成果を取り込むとともに、建設にかかるコストやスケジュールを節約し、実際に建設開始までに生じるかもしれない諸処のリスクを勘案して、デザインの変更が検討された。このプロセスで重要な検討課題として取り上げられたのは「技術選択」「土木設計」「ビームパラメータ」「システム配置」の4つであった。

「技術選択」では、超伝導空洞の平均加速勾配としてはRDRで設定した31.5MV/mを堅持する一方で、実機に組み込まれるための加速勾配の許容範囲は $\pm 20\%$ へと広げられることになった。この変更によって、少々できの悪い空洞もスペックを満たすことになる。実効的に歩留まりが上がることに相当し、全体のコストを低減できると期待できる。

「土木設計」では、主線形加速器と加速用高周波電源を併走する2本のトンネルに別々に設置するダブルトンネル設計から、1本のトンネルにすべてを設置する「シングルトンネル設計」へ変更になった。この変更に伴い、2種類の新たな高周波電力システムの研究開発が進められることとなった。一つは、数カ所に35台の10MWクライストロンを設置し、それらの出力を束ねて巨大な導波管によって運び、多数の加速空洞へ分配していくクライストロン・クラスター方式(Klystron Cluster Scheme; KCS)、もう一つは8000台ほどの800kWクライストロンを主線形加速器に沿ってまんべんなく配置する分散RFシステム(Distributed RF System; DRFS)である。前者は欧米のような平坦な地形の場所に適するが、日本のような山岳地形には適さないと考えられる。

「ビームパラメータ」に関しては、バンチ数が半減されることになった。これにより、電力供給システム的大幅なコスト削減が見込まれる。さらに、RDRでは6.4kmであったダンピングリングの周長を、その半分の3.2kmまで縮小できる。バンチ数の削減によって低下するルミノシティについては、最終収束系でビームをより細く絞ることで回復可能であるとされている。しかし、これを実現するには、より正確な軌道制御が必要となるために、リスクが増加することになる。

「システム配置」に関しては、RDRでは主線形加速器の途中に設置することになっていた陽電子源を電子ライナック末端部に移動することになった。この変更によって、ビーム収束システムの一部とトンネルの共有が可能になり、全体のトンネル長が短縮され、ライナックシステムの設計と運転が単純化される。しかしながら、低エネルギーでの運転では陽電子の強度が大きく下がってしまうという問題があった。そこで、重心系エネルギーが250GeV以下のときには、電子ライナックおよび入射システムの運転周波数を5ヘルツから10ヘルツにまで高め、パルスの半分が陽電子を生成して残りの半分が衝突点に向かうこととなった。この変更により、LEPで到達したエネルギーから1TeVまでの全エネルギーにわたって、陽電子生成の最適化が可能になるといわれている。

TLCCプロセスは、ALCPG11の直前に終了した。GDEの説明を信じれば、このプロセスを経て、コストの上昇を抑えつつも、より現実的なベースラインデザインを実現したことになる。

### 3. ALCPG11の様子

TLCCプロセスを経て新しいベースラインがほぼ固まり、TDRへ向けて動き始めたという意味で、ALCPG11はILCの設計にとって一つの大きな区切りとなる会議であった。

ALCPG11 は物理と加速器の合同研究会であり、10 個ほどのセッションが平行して進められた。この小文では、プレナリーセッションで報告された加速器の話題を中心に報告し、私が出席した GDE の Conventional Facilities and Siting (CFS) グループの雰囲気をお伝えしたい。パラレルセッションで議論された内容は、会議のウェブページを参照してほしい[3]。

加速器関係では、技術設計フェーズ前半における R&D の成果が報告された。超伝導空洞関係では、高い加速勾配の実現、システムとしてのテスト、そして工業化を目標に進められている。

加速勾配に関しては、ILC の規格を満たす 35 MV/m 以上の加速勾配を実現できる超伝導空洞の歩留まりは、この 1 年ほどで 20% ほど上昇して 55% に達しているようである。R&D 計画では、超伝導空洞の歩留まりが 2010 年中に 50% を超え、2012 年末には 90% を超えることを目標に掲げている。一つ目の目標は達成したことになる。ILC の建設コストを下げるためにも歩留まりの向上はきわめて重要であるので、二つ目の目標も達成されることを願わずにはられない。

システムの試験としては、KEK において S1-Global と名付けられた試験が行われた。S1-Global というのは、FNAL、DESY、KEK から提供された超伝導空洞とインプットケーブルを 2 台のクライオモジュールに組み込み、この 2 台をつなげたシステムの実証試験を目指したものである。世界中から、DESY、FNAL、INFN、KEK、SLAC が参加して行われた。平均加速電界として 28 MV/m を実現し、成功裏に終わったようである。世界中で組み立てられるクライオモジュールをつなげあわせるためには、「プラグコンパチビリティ」がキーワードになる。どの国で作られたクライオモジュールも、RF パワーをビームへ渡すという機能は同一である。しかし、クライオモジュールに組み込まれる多くの構成要素の各々は、各国の得意とする技術や考え方に違いがあり、完全に同一規格とすることは必ずしも効率的ではない。それでも、世界中から持ち寄ったクライオモジュールをつなぎ合わせたときに、システムとして機能する必要がある。実際、S1-Global に持ち込まれたクライオモジュールも、空洞形状や共鳴周波数を調整するチューナなどの詳細設計は微妙に異なる。この、プラグコンパチビリティという考え方は、クライオモジュールの工業化を推し進めるためには必須の条件である。

超伝導空洞で重要な R&D 項目の最後の一つは、この工業化に関する事項である。ILC 実現のためには、超伝導空洞のコストを下げるのが絶対に必要である。世界各国の企業と連携して、工業化とコストダウンについて大変な努力をしていることが報告された。この努力が実を結び、大

幅なコストダウンが実現されることを期待せずにはられない。

試験施設における研究も進んでいる。ドイツの TTF/FLASH 施設において実施された、ILC 規格の大電流を加速する試験に関して報告があった。これまでに、(i) 800 パンチ、3 nC、1 MHz (800 μs) で 15 時間以上、(ii) 1600 パンチ、~2.5 nC、3 MHz (530 μs) で数時間、(iii) > 2200 パンチ、3 nC、3 MHz で短時間、の運転に成功したようである。さらに、ビームを加速している 400 μs の間、加速電界を一定に保てることや、加速後のビームエネルギーを 0.02% の精度で一定に保てることも実証されていた。このような報告を聞いていると、ILC に必要な性能を満たす加速器の実現へ確実に近づいていることを実感できた。

ダンピングリングで心配されている電子雲に関しては、CesrTA で進んでいる研究が報告された。ビームパイプ内壁の形状や表面処理によって、かなり改善されてきているようである。

最後に、KEK の ATF/ATF2 の状況が報告された。ATF2 では、ビームサイズを 37 nm まで絞り込み、その軌道をナノメートルの精度でコントロールすることを目標としている。レーザー干渉を用いた「新竹モニタ」によってビームサイズの測定に成功した様子を紹介されたが、地震で被害を受けた後ということもあってか、「KEK において何をすべきで、何ができるのか、計画を練り直す必要がある」とまとめられてしまったのは、少々残念であった。

会議中のパラレルセッションでは、私は CFS グループのセッションに参加した。CFS グループでは、加速器や測定器を納める地下トンネルや実験ホールに関連した施設や、電力・冷却水の供給システムなどの設計を行うグループである。CFS のセッションでも、TDR をいかにして準備してゆくか、という議論が中心であった。これは、非常に実務的な議論で、各システム設計の分担だけでなく、図面や文書の名前の付け方のルールや図面の色の使い方といったことまで申し合わせをした。新しい発見や目新しい発表に巡り合えなかったことは残念であるが、ILC プロジェクトを実現に近づけるためには、このような段階が必ずや必要になるのであろう。

#### 4. ALCPG11 のあと

TLCC プロセスを経て生まれた新しいベースラインは、技術設計フェーズ後半戦の出発点である。2011 年中には、様々なレビューを経てさらに詳細な検討を行うとともに、到達重心系エネルギーを 1 TeV にまでアップグレードする計画を詰め、いよいよ TDR へ向けた仕様を決定する。技術設計フェーズは、2012 年末に技術設計報告書(TDR)の発表で終了し、GDE もその使命を終えることになる。しかし、

TDRを発表してすぐにILCの建設が始まると決まっているわけではないし、ILCの設計を磨くためのR&Dは続く可能性が高い。これだけの大型プロジェクトを実現するためには、強固な組織も必要になる。

ALCPG11の中で、GDEはプロジェクト実施計画(Project Implementation Plan)について紹介していた。これは、ILC計画をいかにして実現していくかを議論しているもので、ガバナンスや工業化などが含まれている。同じような検討は、GDEの親組織である国際リニアコライダー運営委員会(International Linear Collider Steering Committee;ILCSC)の内部でも進められており、“Comprehensive Project Design Guidance (CPDG)”と題された文章のドラフトが公開され、パブリックコメントが募集されている[4]。2012年以降の計画に関しては決まっていなかったことばかりである。ILCを実現するためには、R&D以外にもやらねばならないことが非常にたくさんあることだけは間違いあるまい。

RDRからSB2009を経てTDRへ向かう過程の中で、ILCを取り巻く状況は刻々と変化してきている。今後、ILC計画にかなり直接的な影響を与えるのは、LHCとCLICの動向であろう。LHCはCERNで運転中の陽子・陽子衝突型加速器で、重心系のエネルギーは14TeVである。CERNで開発中のCLICは非常に複雑なシステムであるが、ILCと同じ程度の長さで3TeVまで到達できるというメリットがある。LHCでは、質量の起源であるとされるHiggs粒子や、超対称性粒子の発見が期待されている。こういった粒子の発見は、ILCの存在意義を確実なものとし、運転開始時点におけるビームエネルギーを決定するのに重要な役割を果たす。しばしば語られるようにHiggs粒子の質量が比較的軽いと確認されれば、ILCの早期実現には追い風になるだろう。一方で、Higgs粒子も超対称性粒子も、いつまでも発見されないとすると、我々が探りたいと考えている物理のエネルギースケールはILCでは到達し難いほど高いという可能性が高まり、LHCのアップグレードや、CLICへの期待が俄然高まると容易に予想できる。その観点からは、ILCにとってはドキドキの毎日である。

## 5. 終わりに

私事になるが、ALCPG11の直前に起きた東北地方太平洋沖地震は、私が勤める東北大学や仙台市内の自宅にも少なからず被害を与えた。そんな中で参加したワークショップである。議論に集中できたといえば嘘になる。家族のことや、親族の安否確認も食糧の確保もままならない友人知人のことが頭から離れなかった。それでも、ILCのような夢のあるプロジェクトに関わり、知的欲求を満たすことに取り組める幸せを再認識する、またとない機会になった。

## 参考文献

- [1] <http://www.linearcollider.org/about/Publications/Reference-Design-Report>
- [2] [http://ilc-edmsdirect.desy.de/ilc-edmsdirect/file.jsp?edmsid=\\*879845](http://ilc-edmsdirect.desy.de/ilc-edmsdirect/file.jsp?edmsid=*879845)
- [3] <http://physics.uoregon.edu/~lc/alcp11/>
- [4] <http://cpdg.kek.jp/>

高エネルギーニュース編集部注：  
日本加速器学会誌「加速器」8巻2号104-107(2011)より転載。