

会議報告

LCWS13 会議報告

山本 康史^{*1}・榎本 収志^{*1}・栗木 雅夫^{*2}・ヤン ジャクリン^{*3}

Conference Report of LCWS13

Yasuchika YAMAMOTO^{*1}, Atsushi ENOMOTO^{*1}, Masao KURIKI^{*2} and Jacqueline YAN^{*3}

Abstract

The 2013 International Workshop on Future Linear Colliders (LCWS13) was held at The University of Tokyo from 11/Nov to 15/Nov. The purpose of this workshop is to study the physics case for a high energy electron-positron collider, taking into account the recent results from Large Hadron Collider (LHC), and to review the progress in the detector and accelerator designs for both International Linear Collider (ILC) and Compact Linear Collider (CLIC) projects. In the first day of the workshop, Mr. Takeo Kawamura, who is the Chair of the Federation of Diet members for promoting the ILC, presented the politics situation in Japan with the motivation of the construction and the past circumstances. In this report, main content in LCWS13 will be presented.

1. はじめに

LCWS13^{†1} は半年毎に開催される将来のリニアコライダー計画 (ILC および CLIC) に関する国際会議で、11月11日から15日に亘って東京大学 (本郷キャンパス) にて開催された。ILC に関しては、昨年末から今年にかけていくつか大きな動きがあり、そのような中で今回の会議が日本国内で開かれたため、世界中から多くの研究者達が集まる結果 (今回の参加者は346名で、通常は200名程度のため、如何に世界からの期待が大きいかが分かる) となった。また、今回の会議は ILC の前国際設計チームである Global Design Effort (GDE) 以後に新たに発足した Linear Collider Collaboration^{†2} (LCC ; ILC と CLIC を融合させた組織) 主導の元に開催された最初の国際会議でもあった。

加速器のワーキンググループは全部で7つあり、それぞれ AWG1 が Sources, AWG2 が Damping Rings, AWG3 が Beam Delivery & Machine Detector Interface (BDS & MDI), AWG4 が Beam Dynamics, AWG5 が Conventional

Facilities (CFS), AWG6 が System Tests and Performance Studies, AWG7 が Superconducting RF Technologies (SCRF), となっている。この会議報告では、全体まとめ (Plenary Session) と SCRF を山本, CFS を榎本, Sources を栗木, BDS & MDI をヤン, の4名で分担執筆しており、全てのワーキンググループの内容を網羅出来ないことを予めお断りしておく。

2. Plenary Session

会議初日はプレナリーで、SLAC の M. Peskin 氏から物理について、BNL の M. Harrison 氏から ILC 加速器について、CERN の S. Stapnes 氏から CLIC について、東北大の山本氏から測定器と物理についての講演があった。午後は、加速器と物理・測定器に分かれての平行セッションが行われた。加速器のセッションでは、KEK の宮原氏から科学的見地に基づいて国内の ILC 建設のための最適候補地となった北上サイトについて詳細な説明がなされた。たとえば、地質の分布、ボーリング調査の結果、地震の頻度に加えて、海外からクライオモジュール等を海上輸送した場合

^{*1} 高エネルギー加速器研究機構 KEK, High Energy Accelerator Research Organization
(E-mail: yasuchika.yamamoto@kek.jp, atsushi.enomoto@kek.jp)

^{*2} 広島大学 Hiroshima University (E-mail: mkuriki@hiroshima-u.ac.jp)

^{*3} 東京大学 The University of Tokyo (E-mail: jackie@icepp.s.u-tokyo.ac.jp)

^{†1} <http://www.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/lcws13/>

^{†2} <http://www.linearcollider.org/>

の国内の港から現地までの輸送距離や荷降ろし可能な輸送船の大きさ、なども報告された。

初日の最後は、衆議院議員で、かつ ILC の国内誘致を目指す超党派の「リニアコライダー国際研究所建設推進議員連盟」の会長である河村建夫氏による講演があった。政治的な話を中心であったが、トリスタン計画からの因果関係などにも触れられており、非常に力強く興味深いメッセージを頂いたので、ILC に関心のある方は是非一読して頂きたい（講演内容は先のホームページからダウンロード可）。写真 1 は初日の昼休みに撮影された集合写真で、写真 2 は河村氏による講演の様子である。

3. Parallel Session

3.1 Sources

ILC 陽電子源はヘリカルアンジュレーターからの偏極ガンマ線の対生成反応を利用する。電子のエネルギーとして少なくとも 100 GeV 以上が必要なことから、衝突用の電子ビームを共用する。加速器稼働開始前のシステムテストが事実上不可能であることがエンジニアリング的に最大の課題である。Convener の一人である ANL の W. Gai 氏は高速回転標的の技術的実証を喫緊の課題としてあげた。LLNL の J. Gronberg 氏は陽電子捕獲用の磁場を生成する Flux Concentrator において、必要なパルス長の実現を報告し、着実な進歩を印象づけた。DESY の F. Staufenbiel 氏は標的のビー

ムによる影響を評価し、熱応力による金属疲労限界から 100 m/s の接線速度が必要なことを指摘した。現在 ILC1 と称して重心系 240 GeV での運転が検討されているが、現在の設計では充分な量の陽電子生成は困難であり、陽電子生成のためだけに 150 GeV 電子ビームを加速する。DESY の A. Ushakov 氏は 120 GeV ビームでも、現在のトンネルを変更せずに、必要な陽電子が確保できることを示した。DESY の S. Riemann 氏は、偏極陽電子がルミノシティの実効的増大や S/N 比の改善に有効であり、系統誤差抑制のため、パルス毎のスピンの反転ビームラインの必要性を強調した。

アンジュレーター方式がシステム統合に原理的不確定性を抱えるため、技術的担保として通常方式の陽電子生成が検討されている。本方式では、数 GeV の電子ビームを金属標的に入射し、発生する電磁シャワーに含まれる陽電子を集める。陽電子生成を 60 ms かけて行うことで、標的における負荷を軽減する。KEK の奥木氏はシミュレーションにより本方式で充分な量の陽電子が確保できることを示したが、挑戦的な値になっている一部パラメータを妥当な値とするのが今後の課題である。KEK の浦川氏からは、RF の合成による早い振幅変調法とそれによるビームローディング補正が提案された。KEK の大森氏からは標的のプロトタイピングの状況が示され、また広島大の高橋氏からは磁性流体シールにおける吸収線量評価が示された。今後は試作機の試験運転と、真空シール材の耐放射線損傷テストが予定されている。KEK の紙谷氏からは Super-B 用の Flux-concentrator の開発状況が示され、このデバイ



INTERNATIONAL WORKSHOP ON FUTURE LINEAR COLLIDERS (LCWS13)
11-15 NOVEMBER 2013, THE UNIVERSITY OF TOKYO, JAPAN

写真 1 会議初日に撮影された集合写真



写真 2 河村氏による講演の様子

スがほぼそのまま ILC 陽電子源に応用可能であることが示された。

レーザーコンプトン散乱による陽電子生成について、広島大の高橋氏から ATF での最新実験結果が、KEK の浦川氏からは cERL を利用しての X 線生成と、タルボ干渉計による位相コントラストイメージングの実証実験について報告された。

広島大の栗木より 500 kV-DC 電子銃における 10 mA ビーム生成が報告され、ILC への適用可能性について発表があった。名古屋大学の山本尚人氏からは、超格子カソードの歪制御により、結晶品質をそこなわず超格子のレイヤー数を増やし、高い偏極度と量子効率実現の提案があった。CERN の S. Döbert 氏からは 2014 年には CLIC ドライブビームの CTF3 での実証をめざしているとの報告があった。

LCC の ILC 担当の M. Harrison 氏と CFS グループを迎えての合同セッションでは、重要コンポーネントは事前に十分なレベルで技術実証を必要とすることが確認された。また 300 Hz 従来方式は同じトンネル内に収まることが条件であり、フットプリント作成のためのシステム設計の完成が急がれることが指摘された。

ILC 陽電子源は課題を抱えながら、その開発は着実な進歩を見せている。ILC の実現性が高まる状況の中で、技術的な不確定性に対応した実行計画の策定が必要となっている。陽電子源は ILC と CLIC の共同開発グループが形成され、毎年ミーティングを持ち回りで開催している。来年は ILC 候補地が近い盛岡での開催が決定し、より大きな進展を決意して WG は終了した。

3.2 SCRF

超伝導空洞技術に関しては、今回の会議で入力結合器の仕様を決めるための議論を行う、ということが主な内容であった。入力結合器とは、空洞へ大電力高周波を送り込むための高周波機器であり、特に超伝導空洞の入力結合器では 2 枚のセラミック窓が用いられた特殊な構造となっている。また、常温部 (300 K) から低温部 (2 K) まで物理的に連結されているため、低温技術に関しても特別な配慮が要求される。この議論のために、各研究所 (CEA-Saclay, CERN, DESY, FNAL, KEK, LAL-Orsay, SLAC) から多くの専門家が、また各製造・鍍金会社 (CPI, KYOCERA, Nomura

Plating, RI, THALES, Tokyo DENKAI, TOSHIBA) から多くの技術者が参加し、製造工程、銅鍍金技術、組み立て工程、コスト評価、などの細部にまで亘る非常に広範な議論を行うことが出来た。写真 3 は会議の様子である。

これまで DESY が開発してきた TESLA 型空洞の入力結合器のポートの直径が 40 mm であるのに対し、KEK が開発してきた TESLA-like 型空洞の方は 60 mm で設計されている。plug-compatibility の観点からこれらを 1 種類の入力結合器に集約することが求められており、両方のタイプに関して、その利点と問題点を洗い出し、最適な解決策を模索する、ということが議論の論点であった。まず始めに、ILC に対する入力結合器の要求性能が SLAC の C. Adolphsen および FNAL の N. Solyak 両氏から提示された。それによると、ビーム電流が 5.8 mA と 8.75 mA の両方に対応させるためには入力結合器の負荷 Q 値として、 $10^6 \sim 10^7$ 程度変化させる必要がある、とのことであった。DESY で開発された TTF-3 タイプの入力結合器は現時点でこの要求仕様を満足するが、KEK で開発された STF-2 タイプはまだ満足していない。

その後は、日本とヨーロッパの現状がそれぞれ説明された。日本側からは最近問題となっている銅鍍金技術(入力結合器は同軸構造となっており、その内外導体表面に銅鍍金が施される)に関する報告(たとえば、銅の純度、鍍金厚み、鍍金条件等)があった。また、TTF-3 および STF-2 の両方を製造しているメーカーからそれぞれのパーツ数や製造工程 (Brazing, EB Welding, TiG



写真 3 SCRF Session の様子

Welding, TiN coating, Copper Plating) の比較についての説明があった。これまでに 60 台以上の入力結合器を製造しているヨーロッパのあるメーカーからは、自社の製造工程に関するコストの内訳の表が提示され、機械製造と銅鍍金の工程が大半を占めていることが判明した。コスト低減の一つのアイデアとして、2 つ存在する高周波窓を 1 つにするということが検討された。多くの加速器では一つの高周波窓を持った空洞が問題無く動作しているが、ILC に適用する場合はクリーンルームでの組み立て作業時の取り扱いやクライオモジュールの大きさが変わってしまうことが考えられ、あまり現実的とは思われないが、コストは驚くほど下がるそうである。40 mm の径を持つ STF-2 タイプの入力結合器を新たに製造することも検討されており、高周波特性を調査したシミュレーション結果が示された。ただし、実際の製造に到るにはなお多くの課題が残されている。入力結合器に関しては、セッションの最後に参加者全員で議論のまとめを行い、今後の方針を示して終了した。

入力結合器以外では、1 TeV へのエネルギーアップグレードおよびランニングコストの低減を目指した空洞開発の最近の試みが示された。空洞単体試験の現在の性能は、世界平均で 37 MV/m であるが、さらに上の性能を目指すために空洞形状を変えたり、材料を変えたり、熱処理後にガス導入を取り入れたたりすることによって、まだ性能が上がる可能性があることが示された。他に、日米欧の 3 地域で進められているクライオモジュールの組み立ておよび試験状況がそれぞれ説明された。日本特有の問題として地震によるクライオモジュールへの影響が考えられるが、有限要素法によるシミュレーションの結果、治具やボルトを多少強化することで問題ないレベルになることが示された。また、この変更によるコスト増加もほとんどないとのことであった。

3.3 BDS/MDI

Beam Delivery System (BDS) と Machine Detector Interface (MDI) の合同セッションはワークショップの三日目の水曜日からはまった。水曜日は主に Beam Dynamics と System Tests のトピックであった。世界各地で行われているビーム安定化技術の研究と、そこから生み出され

た技術を (ILC や CLIC のための最終収束プロトタイプである) KEK の ATF2 で試験した結果が報じられた。午前前半の部では、電子ビームジッターと電磁石や床の振動の測定手法に関して、午前後半の部では ATF2 での電子ビーム測定や安定化のために開発されている幾つかのシステムの R&D について報告がされた。例えば、LAL (フランス) からは diamond sensor を用いた測定器と beam halo モニターが紹介され、韓国からは nm レベルの期待分解能を持つ空洞型 Beam Position Monitor (“IPBPM”) が commissioning 中であるという報告がなされた。午後の部は ATF2 で目標とされている仮想衝突点でのビームサイズ 37 nm の達成に向けてもっと少人数での詳細な議論が行われた。まず ILC と ATF2 の間の beam tuning tolerance の違いの比較、次に要求 emittance の実現が議題となった。さらに今期の ATF beam run の現状報告と今後のプランが話し合われ、そして最後に最終収束試験施設としての目標達成に向けての課題について議論が行われた。

木曜日には、普段この分野で顔を頻繁に合わせる研究者の発表以外に、Canon など会社からの新測定技術の紹介などが行われ、小さな会場から溢れ出る程の多くの方々が参加した。午前は ATF2 の目標衝突点ビームサイズの達成を制限する wakefield などの問題点に関する simulation study, それから実際ビームサイズを測定するレーザー干渉型新竹ビームサイズモニターの性能評価が報告された。また、もう 1 つの ATF2 目標である nm レベル電子ビーム位置安定化のために重要な feedback 補正技術が紹介された。午後は ILC や CLIC の設計や tuning 技術の違い、それから電磁石の R&D が主な話題であった。特に、beam crossing angle などの設計パラメータが luminosity や物理実験へ及ぼす影響について議論が盛んに行われ、電子陽電子型のみならず $\gamma\gamma$ コライダーなどの将来型実験へ発展も考慮された。

3.4 CFS

ワーキンググループ (WG) 5 は ILC の施設・サイト (CFS) の設計を担うグループで、世話役は V. Kuchler (FNAL), J. Osborne (CERN) と榎本 (KEK) である。今回のワークショップは ILC サイトが一本化されて初めての会議であった。したがって、TDR の設計を日本の北上サイ

トに適用する場合, 何が問題となるかということが最も重要な議題であり, また, 建設を想定した今後の具体的な課題, 必要なリソース, 日程などの議論が開始される場であった. 2~4日目のパラレルセッションではWG5 単独あるいはMDI (Machine Detector Interface) グループ等との合同セッションがもたれた.

最初のセッションでは, 東北大学の佐貫氏からサイトの地質情報のほか, 衝突点予定地点や地表アクセス点等について説明があった. また, 海外からの輸送品を受け入れる港や道路の状況などについても詳細な報告があった. TDR には陽電子源や衝突タイミングなど設計が未確定の部分があるが, これらの報告をもとに, 北上サイトが施設設計条件を満たし, 技術的な面で加速器設計に基本的な影響を与えないということを確認した.

今後詳細設計を進めていくに当たって, これらサイトの情報をどのようにデータベース化し, 管理, 利用していくかは, 極めて重要な課題のひとつであり, LCWS 開催前の日曜日とこの冒頭セッションのほか, 電子書類管理システム (EDMS) の利用に関する合同セッションを特別に設けて議論を行った. DESY の L. Hagge 氏が CFS グループ用の EDMS について, 必要なデータの種類, 標準化と操作性, 想定されるユーザとアクセス権などについて具体例を示しながら説明を行った. その結果, DESY チームが維持管理する ILC-EDMS を引き続き発展させていくことで合意した.

ディテクタホールに関する重要な議論がいくつかあった. TDR のアジアサイトの設計ではディテクタの搬入口として斜坑を採用している. しかし, 北上サイトはなだらかなので, LHC の CMS 方式のディテクタ組み立てが可能な「立坑」の可能性もあるのではないかと提案が出た. これについては, コストやリスクなど, 原案との比較を次回のワークショップまでに行うことになった. また, ディテクタホール建設時及びディテクタ設置・運用後の岩盤の変形について, 土木コンサルタントの技術者から報告があった. 北上サイトの地質データを考慮した3次元有限要素法によって解析されたが, 北上サイトが大変優れた地質条件を備えていることが示された. これは, CERN サイトでのディテクタホールの解析と比較し評価を行うことになった. ディテクタアセンブリホール

について, SLAC の M. Oriunno 氏から提案があったが, 組立て方式の確定とともに, その要求条件を早急にまとめていくことが必要と思われる.

学会会議は2~3年かけて誘致について検討することを勧告している. 例えば, そこでゴーサインが出て, 今から5年後ぐらいに ILC 建設を開始することになったと想定する. トンネルなど地下施設着工が最初になるが, 果たして可能なのか, 何を準備しなければならないのか. 類似プロジェクトの経験を有する建設コンサルタントの協力も得て準備計画及び必要なリソースについてのたたき台を作成し, WG で議論をしていただいた. 期間的にも厳しく, リソースの要求も相当なものである. GDE のディレクタだった B. Barish や過去に SLAC の加速器部長をつとめた E. Paterson もこの議論に終始参加していたが, 彼らの pre-construction phase での経験から, このたたき台の期間や必要なリソースは決して ridiculous なものでなく reasonable とのコメントであった. 最後に, ILC に関する ECO や Green についての提案が3件あったが, ここでは紹介を省略する.

ILC は候補サイトが一本化され, 政府が前向きな姿勢をみせつつも, まだはっきりとゴーサインが出ない状態である. 行動予算の途絶えている外国チームもある. GDE の次の体制である LCC の site-specific な設計を詰めるという一般的な方針は理解しつつも, 個人的には十分な方針が期待できないと思っていた中でのワークショップであった. しかし, 実際にはいくつか重要な議論が行われ, また CFS アジアチームに具体的な行動計画が提示されたことは大きな収穫であったと感じている.

4. 終わりに

5日間に亘る会議は大盛況に終わった. LCC 主導の元に行われた今回の会議では, いよいよ加速器の詳細設計に立ち入ろうとする姿勢が示されたように思う. 今後, 半年毎の会議を経るにつれて細部の設計が徐々に決まっていくものと思われる. 次回は, 2014年5月12~16日に米国フェルミ研究所にて開催されるとのアナウンスがあった. 最後に, 会議の事前準備, 初日の受付対応, 毎日の会場整備等を行って下さった Local Organizing Committee のメンバーに感謝申し上げます.