

## 会議報告

## ILC08, 国際リニアコライダー加速器ワークショップ

久保 浄\*1・福田 茂樹\*2

## ILC08, International Linear Collider Workshop

Kiyoshi KUBO\*1 and Shigeki FUKUDA\*2

## Abstract

ILC08 (International Linear Collider-ILC-Accelerator workshop) and LCWS (ILC physics and detector workshop) were held together at University of Illinois, Chicago. More than 300 researchers participated from all over the world. Here, we report on research and development of ILC accelerator.

11月16日から20日迄の5日間、シカゴ市イリノイ大学キャンパス内のUIC Forumにおいて、ILC08 (International Linear Collider-ILC-加速器のワークショップ) と LCWS08 (リニアコライダーの物理・測定器ワークショップ) とが合同で開催され、世界中から300人以上の研究者が参加した。ここではリニアコライダー加速器の開発研究に関して、報告をさせていただく(ワークショップのホームページ <http://www.linearcollider.org/lcws08/>)。

今回の会議の大きなテーマの一つが、「Minimum Machine」(この名称は誤解を招く可能性が高いので変更されることになっている)の設計の決定と開発研究の進め方についての議論であった。ILCの基本的な設計に関しては昨年既に、建設コストの試算を含む基準設計報告書(RDR)が発表され、我々は概念設計の段階から、実際の建設に向けた「engineering design」の段階に入っている。しかし、その後の議論で、試算されている建設コストが高すぎるのではないかと、RDRの基本設計がコストの点で必ずしも最適ではないのではないかと、ということから、より効率のよい、無駄を省いた設計に沿った研究も進めていくことになり、今後2010年までをめぐり集中検討を行い、その検討が済んだ時点でILC加速器の基本設計構成の組み直しをはかることになったのである。「Minimum Machine」と通称するのは、そのさいの重点検討項目として、とくにコスト低減の立場から、

抽出、とりまとめたものを指す。今回の会議では、「Minimum Machine」での検討項目に盛り込むものとして、基準設計からの変更可能性として以下の諸点を決めた。

- 主ライナックのトンネルを二本から一本に(サービストンネルの廃止)
- 主ライナックの高周波電力分配方式の変更(高周波源を地上に集中させて配置)
- パルスあたりのバンチ数を半減(高周波源の負荷低減, ダンピングリングの周長短縮)
- サイト中央部分(粒子源, 衝突点周辺)の配置の変更(地下構造等の建設費削減)
- バンチ圧縮器を2段階方式から1段階にする(加速器全長の短縮)

このような設計の見直しについて多くの提案、議論があった。ここでは、そのうち、サービストンネルの廃止について簡単に説明する。

サービストンネルの廃止に関しては、主ライナックの高周波源の構成をどのようにするかということと密接に関連するため、両者がリンクした議論が必要であった。まず簡単な構成を説明すると加速器トンネル(全長約40 km)には合計約1,950台のクライオモジュールがある。それぞれのクライオモジュールには8台又は9台の超電導空洞があり、それぞれにカップラーを通してマイクロ波電力が供給される。超電導空洞の総数は約16,900台である。3台のクライオモジュール(従って26台の超電導空洞)へ1台の10

\*1 高エネルギー加速器研究機関 加速器研究施設 KEK, High Energy Accelerator Research Organization (E-mail: kiyoshi.kubo@kek.jp)

\*2 高エネルギー加速器研究機関 加速器研究施設 KEK, High Energy Accelerator Research Organization (E-mail: shigeki.fukuda@kek.jp)

MW 大電力 MBK (マルチビームクライストロン) から電力が供給される。RDR で主ライナックのトンネルを 2 本にした理由は、主ライナックの RF 源の運転維持を容易にするためであった。電源やクライストロンが故障したときにビーム運転を中断せずに迅速に保守しながら稼動効率を上げることを主眼としていた。RDR の基本設計ではコスト高なので、トンネルを 1 本にする案が検討され始めた。しかし、トンネルを 2 本から 1 本にすると当然、保守の効率を犠牲にすることになる。これを最小限に抑えた代替案が 2008 年 6 月にロシアの Dubna で開催された LCWS から検討され始めた。RF 源とトンネルの関係からまとめると (図 1), DESY の XFEL 計画は、超電導のクライオモジュールのすぐ脇に 10 MW 大電力 MBK とパルストランスを配し、それに電力を供給する電源は地上部に置き、数 km にわたる同軸給電線 (12 kV, 1.6 kA) で給電する案である。欠点はクライストロンが故障したとき運転を中断せずに交換は出来ないことである。Dubna 会議で、かねてから提唱されていた深度の浅いトンネルによる主線形加速器をロシアで実装した場合の例が紹介された。その場合、クライストロンと電源は地表の建屋に設置され、マイクロ波電力は導波管で地下トンネルに送られる。これは高エネルギー加速器研究機構の電子陽電子ライナックと同じ方式であり、トンネルの深さが違うだけである。比較的浅いトンネルを仮定しているので Shallow Site 案と呼ばれている。これの欠点は地上に 40 km に渡るクライストロン・ギャラリーを作る敷地はロシアぐらいいにしか見出せないことと、コストが比較的高いことである。Dubna の LCWS ではこれらに替わる新提案として米国から RF クラスタ案が出てきた。これは地上部に 32 台の 10 MW 大電力 MBK と電源をまとめ、その電力を全て合成して 350 MW の電力を約 1 km にわたって設置した直径 500 mm の低損失円筒導波管で運び、順次 10 MW ずつ再配布するものである。この案は面白く今回の LCWS で施設面、RF 源の両方から比較検討された。今回、KEK からこの計画と対極

にある 16,900 台の空洞へ 1 対 1 又は 1 対 2 で RF 源を配置する案を提案し、議論を行った。これについては後で再度触れたい。

パルスあたりのバンチ数を半減すると、そのままではルミノシティも半分になってしまう。これを回復するために、衝突点でのビームサイズを基準設計よりもさらに小さくすることにしている。これらの変更は、加速器の額面上の性能 (ルミノシティ) を落とすものではないが、多くの項目が、運転条件の柔軟性、各々の機器の性能や安定性の面での余裕を減らすことで、費用を節約しようとするものになっている。このような「余裕」が実は「無駄」なのか、あるいは必要なものなのか、十分な検討が必要であろう。

今回は、基準設計を変更することを決めたのではなく、基準設計にもとづく開発研究は引き続き進められる。並行して行われるこれらの研究結果を踏まえ、2 年後をめどに最終設計が見直されることになっている。

会議では、開発研究の最近の進展が数多く報告された。以下、そのうちのいくつかを紹介する。

(1) CFS (Conventional Facility and Siting : 施設関係)

CFS はパラレルセッションで独立したプログラムを組んでいたが、ILC サイトをどこにするかは重要な問題であり、日欧米三極ともサイトの条件は異なっているためにそれぞれの領域からの代表者がサイト特有の条件を加味した今後の検討案を提出した。日本からは榎本、田中両氏が参加した。上記の Minimum Machine の議論や空調や冷却水関係の議論では、他のセクションの関係者特に HLLRF (大電力高周波系) との議論が必須であり、筆者の一人 (福田) が参加した。トピックスとして上記の RF クラスタ案に関する CFS の検討とそれに対するコスト効果について議論された。サイト別の検討からは、山岳地帯に敷地を想定する場合はトンネルへのアプローチが立坑でなく横からの斜め坑となり、RF クラスタ案がベストであるとは言い兼ねる検討結果であった。コスト的には

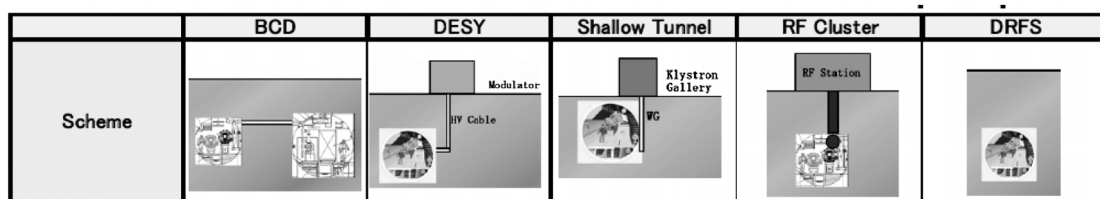


図 1 種々の検討案の模式図

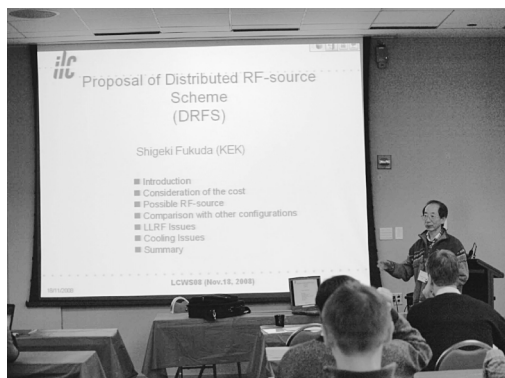


図2 DRFSを提案した発表

主ライナックのトンネルを2本から1本にして付随する分を加えるとCFSコスト全体の6~8% (サイトごとで異なる) の削減効果があることが報告された。

(2) ML (Main Linac : 主ライナック)

(a) SCRf (超電導 RF 空洞)

MLの平行セッションに筆者達は参加していないので総括からのハイライトのみに留める。空洞の製作のばらつきであるが、量産に入っている「ある製造元」での実績として、35 MV/m までの空洞に対する歩留まりが50%近くに達した(会議ではもっと高い数字が示されたが後で修正された)。又27 MV/m以下の低い空洞に関しては内部の表面観察などから溶接時に出来たピットが原因であることが突き止められ、今後の改善に道が出来た。KEKのSTFにおける4空洞の評価試験が進行中であるが、4台の内1台が32 MV/mに達したのは我々にとって明るいニュースであった。

(b) HLLRF (大電力 RF)/LLRF (低電力 RF)

MLの一部ではあるがSCRfとはほぼ平行で行われ、HLLRF (大電力 RF のシステム) 単独、LLRF (デジタルフィードバックを含めた低電力 RF システム) 単独、HLLRF/LLRF 合同のセッションが行われた。HLLRFでは、現状報告 (DESY, SLAC, KEK) 及びACD (代替的概念設計 Alternative Configuration Design で基本設計BCDからの変更設計を意味する) としてのR&D技術が紹介された。マルクス電源、シートビームクライストロン等。中心的な議論としては、上でも述べたMinimum Machineの一貫としてのRFクラスター案が議論された。それに対して筆者の一人(福田)が分布型RF源スキーム(略称: DRFS)案を提唱した(図2)。上でも述べたが従来の案と対極的に1乃至2台の空洞ごとに比較的小電力のRF源(例えば730 kWクライストロン)と

電源を配置する案である。一見するとコスト的に高く思われるが、8,000台から17,000台のRF源を製作することによる量産効果、比較的成本的に高い導波管系が不要であること、完全な1トンネル案で地上部に電源室が不要であること。そして最も大きな利点は、制御が楽であるということである。他の案は10 MWクライストロンから26空洞に電力を供給する為に、個々の制御は諦め26台のベクトルサムの制御を行う。従って高価な超電導空洞の特性がばらついても最適化できないのである。しかしDRFSでは制御が細かく出きる利点がある。コスト効果が上がる具体案を提示できるかどうか依存している。LLRFとの合同セッションでは今述べたACDの内、LLRFから見たRFクラスターとDRFSの比較、DESYのFLASHで9 mAビーム電流を目指したLLRFの実験の結果などが議論された。

(3) ダンピングリング

ダンピングリングの設計を決定する上で大きな問題となっているのが電子雲によるビーム不安定性 (electron cloud instability) である。この問題は、リニアコライダーに限らず、大電流の陽電子円形加速器に共通の課題であり、KEKB (日本)、DAΦNE (イタリア) 等でも精力的に研究が進められている。たとえばKEKBの陽電子リングでは、SLAC (アメリカ) で作られたグループ付真空チェンバ(図3. 電子雲の形成を抑制する効果があると期待される)が挿入されて試験中であることが報告された。素粒子物理(電子陽電子衝突)実験用であったCESR (アメリカ, コーネル大学)は、今年から加速器試験用の「CesrTA (Cesr Test Accelerator)」となり、主にこの電子雲に関する実験的研究が始まっている。既にビームラインに電子雲の密度を測定する装置などが挿入され、収集された測定データなどが報告された。CesrTAでの実験を含め、この分野ではKEKBの研究者を中心に日本からも大きな寄与がなされている。

ダンピングリングにバンチを一つずつ入射し、リングから取り出すための高速のキッカー(立上り, 立下りが3ナノ秒を超えない)は重要な研究開発の一つであり、KEK, DAΦNE, SLAC (アメリカ)などで研究が行われている。KEKでは、これまで試験用の高速のキッカーをATF (Accelerator Test Facility) のダンピングリング内に設置してリング内のビームを使って実験が行われてきたが、取り出しビームラインの改造が進められ、2009年早々には実際にビームを取り出す実験を行う。

又、リニアコライダーではダンピングリングから取

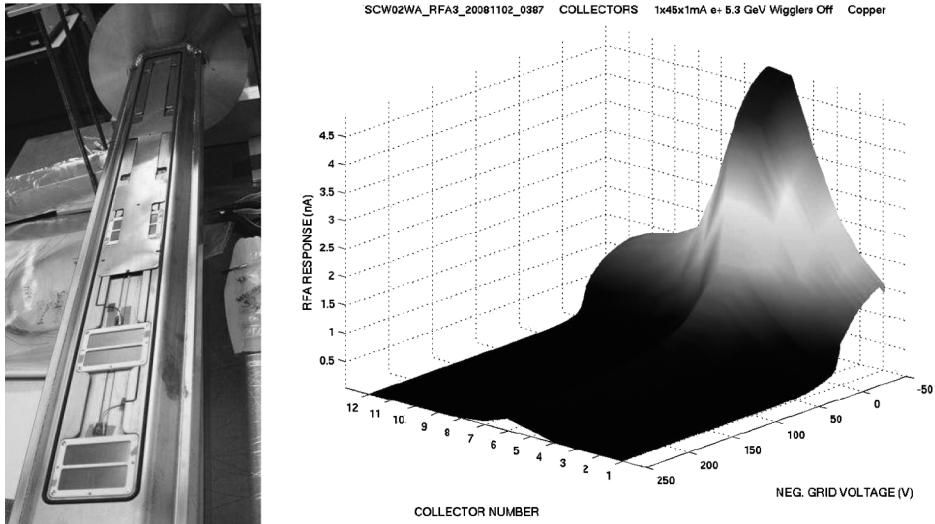


図3 CesrTAに挿入された電子雲密度測定装置付の真空チェンバー（左）と、電子密度の測定データの例（右）。（CesrTA Collaboration）

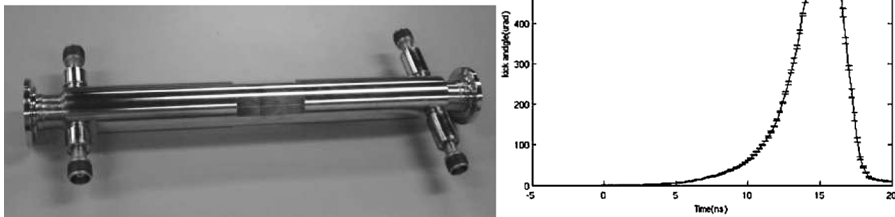


図4 KEKのATFで試験中の高速キッカーと偏向角の時間変化の実験結果（内藤孝氏による）

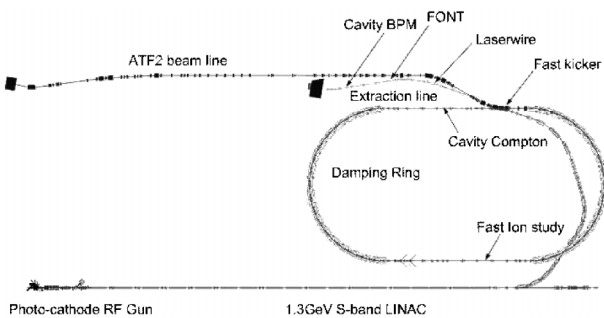


図5 ATF2を含むATFのレイアウト



図6 完成したATF2ビームライン（峠暢一氏撮影）

り出すビームの垂直エミッタンスは2 pm 以下でなければならず、このためのKEKのATFでの実験的な研究が引き続き重要であることが確認された。

(4) ATF2

リニアコライダーのための実験施設の中でも大きな進展の一つがKEKのATF2ビームラインが完成し

たことである。ATF2は、既存のATFを拡張し、ATFダンピングリングから供給される超低エミッタンスビームを使って、ILCと同じ最終収束方式のビームラインによってナノメートルレベルまでビームサイズ（垂直方向に約40ナノメートル）を収束できるこ

と、安定なビーム（軌道のふらつきが2ナノメートル程度以下）を保持できることを実証しようとするものである。この施設は、設計段階から完全に国際協力による計画として進められ、建設費用も国際的に分担され、運転計画等も国際的な合意の下で決められることになっている（このような計画の進め方から、「ミニ ILC」とも呼ばれる）。既に ATF2 のビームラインは完成し、ほとんどのコンポーネントの準備が整いつつあることが報告された。

(5) 余談

今回、KEK の提案の DRFS 案は、概ね反響は良かったが、だからといって「Minimum Machine」案に取上げられ今後の検討課題に含まれるかというところではない。それなりに手続を踏んで上に上げないと、提案しっぱなしで終わりということになる。特に今回

の LCWS08 は次回「つくば」で4月に開かれる TILC09 で TDR に向けての方向性を出す為の最後のワークショップであった。というわけで、発表とか議論だけでなく PM（プロジェクトマネジャー）への働きかけ等をして、「Minimum Machine」に含まれるプランであると認知されるためのプロセスが必要であった。国際的な物事の決まり方とはこういうものかと認識した次第である。勿論、これだけでは済まず、Work Package 案を作り、プランの詳細を詰め、コストを算出するという具体案を4月までに急いで行う必要がある。

最後に、本稿執筆にあたり助言をいただいた、横谷馨、峠暢一、設楽哲夫の各氏（所属は全て KEK 加速器）に謝意を表します。