

■ 会議報告

2017 International Workshop on Future Linear Colliders (LCWS2017) 報告 (加速器)

KEK 加速器研究施設

森川 祐

yu.morikawa@kek.jp

2018年1月29日

1 はじめに

2017年10月23日から27日の5日間、フランスのストラスブールで International Workshop on Future Linear Colliders (LCWS2017) が開催された。LCWSは国際リニアコライダー (ILC) やコンパクトリニアコライダー (CLIC) などの次世代リニアコライダー計画を推進する世界の研究者が集う国際会議である。今回は19か国265名の参加があり、内62名が日本からの参加であった。図1は会議の集合写真である。ILCについては、文部科学省が日本誘致を検討している中、その判断に向けて建設コストの削減が課題となっている。本会議でも後述の「ステージング」や各加速器コンポーネントの技術革新によるコスト削減の可能性について議論された。特に技術革新によるコスト削減の可能性については、「ILC cost reduction by new technology」という特別セッションを設けて議論された。

また ILC 日本誘致に向けて、ILC 建設の有力候補地である岩手県と東北 ILC 推進協議会合同の東北地区 PR ブースが設置され、東北地方の魅力や ILC 実現に向けた地元の取り組みが紹介された。その他に先端加速器科学技術推進協議会 (AAA) や東北経済連合会から民間企業の参加もあり、地域企業の ILC 関連技術の紹介もあった。

本会議で私は ILC の衝突後のビームを止めるメインビームダンプと Undulator 光を止めるフォトンダンプの開発状況について報告した。以下では私の立場から見た ILC の加速器に関する会議内容を報告したい。



図1: LCWS2017 参加者の集合写真

2 ILC 建設コスト削減に関する議論

ILC 加速器自体の研究開発状況から ILC 建設候補地での具体的な施設設計まで多岐にわたる報告・議論がなされた。その中でも議論の中心は ILC 建設コスト削減についてであり、以下のステージング導入や各加速器コンポーネントの技術革新による建設コスト削減の可能性が議論された。

2.1 ILC におけるステージング

ILC の当初計画 (TDR) では、実験開始時の重心系エネルギーを 500 GeV として設計していたが、この実験開始時の重心系エネルギーをヒッグス粒子の詳細測定が可能な 250 GeV に下げて設計しなおすことでコスト削減を図り、必要に応じて加速器を延長してエネルギーを増強するステージングが議論されている。このステージングにより従来の ILC の全長は 31 km であったが、初段の全長を 20 km に抑えることができ、初段の建設コストも最大 40%削減できる可能性がある。本会議では重心系エネルギーを 250 GeV とした場合に、全体設計がどう変わるかなどのより詳細な検討の報告 [1] があった。本報告によると、250 GeV 版 ILC では TDR の設計に比べて RF ユニットやクライオモジュールの台数が 45%程度削減され、加速器の運転電力も 167 MW から 129 MW 程度まで抑えられる見込みとのことであった。これらステージングの検討資料は国際将来加速器委員会 (ICFA) に提出されており、2017年11月6日から9日に開催される第12回 ICFA セミナーで議論されることになっている。

なお、第12回 ICFA セミナーの議論の結果、2017年11月8日に ICFA より「250 GeV の ILC 加速器建設の支持と ILC 早期実現を奨励」する声明が発表されている [2]。

2.2 技術革新によるコスト削減

図2は加速器のセクション毎にかかる建設コストを示している。ILC の建設コスト全体の内、Main Linac 部分のコストが約 67%を占めており、Main Linac を構成する超伝導 RF の技術革新によるコスト削減が最も効果的である。超伝導 RF 技術におけるコスト削減の可能性としては、ニオブ材加工費及びニオブ材料自体の低価格化 [3] や、ニオブ超伝導

空洞内面の窒素添加による高加速電場及び高 Q 値の実現 [4] などが報告された。ニオブ超伝導空洞への窒素添加技術はフェルミ国立加速器研究所 (FNAL) で開発されたもので、TDR での超伝導空洞の設計値に比べて Q 値は 2 倍程度高く、加速電場も最大 45 MV/m (単セルを用いた縦測定の結果) のものが実現されている (TDR ではクライオモジュールの加速電場を 31.5 MV/m としている)。現在、本窒素添加技術について FNAL と KEK で研究協力をしており、KEK の実験でも窒素添加による Q 値上昇が確認されたとのことであった [4]。これらの技術が実用化された場合、ニオブ材加工費及びニオブ材料自体の低価格化で 2~3%、窒素添加による Q 値上昇の効果 (クライオシステムの簡素化) だけで 5% 程度の建設コスト削減が見込まれている。窒素添加により加速電界を増強できればさらなるコスト削減が見込めるとのことであった。

上記の超伝導空洞技術以外にも「ILC cost reduction by new technology」という特別セッションにて技術革新によるコスト削減の可能性が議論された。このセッションでは、ダンピングリングや電子・陽電子源などの加速器のセクション毎に新技術によるコスト削減の可能性がないか議論がなされた。永久磁石をベースにしたダイポール電磁石 [5] や、窒化チタン (TiN) コーティング付絶縁セラミックをコーティング不要の新素材セラミックに置き換えた RF 入力パワーカプラー [6] などが議論された。

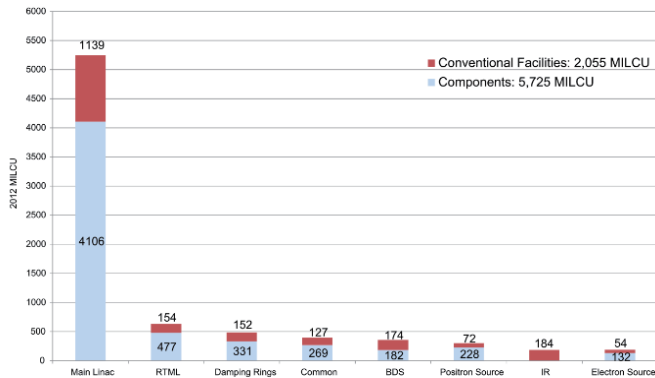


Figure 15.8. Distribution of the ILC value estimate by system and common infrastructure, in ILC Units. The numbers give the TDR estimate for each system in MILCU.

図 2 : 加速器のセクション毎にかかる建設コスト [7]
 *ILCU (ILC unit) : ILC コスト評価に用いられる基準通貨であり、2012 年 1 月時点の米ドルに相当する。

3 ILC 加速器の技術開発

私は ILC ビームダンプの開発状況の報告のために本会議に参加した。ビームダンプと同様にハイパワービームを受ける陽電子源標的にも関心があり、これらのセッションにも参加した。以下では陽電子源標的とビームダンプ開発状況について報告する。

3.1 ILC 陽電子源標的の開発

ILC の陽電子源としては 2 つの方法が検討されている。1 つは TDR のベースラインになっている Undulator 光を用いた陽電子生成方法である。Undulator 内で蛇行運動した電子ビームから発生する 7 MeV 程度の光子を標的に照射することで陽電子を得る。この時、発生した光子は円偏光しているため、得られる陽電子も一部が偏極している。この Undulator 方式の陽電子発生方法は他の加速器では実用化されたことがないため、この Undulator 方式のバックアップとして、他の加速器でも実績のある電子駆動方式による陽電子生成も開発されている。この電子駆動方式の場合は、3 GeV の電子ビームを標的に当てることで陽電子を得るが、電子駆動方式では偏極した陽電子は得られない。

標的の開発については、Undulator 方式と電子駆動方式で熱負荷などが異なるため、それぞれ別の設計で開発が進められている。Undulator 方式の標的開発は主にドイツ電子シンクロトロン (DESY) 研究所が主導している。標的の材質にはチタン合金が用いられ、熱負荷を分散させるために標的を回転させながらビームを受ける。熱負荷は 4 kW 程度であるため熱輻射による冷却方式が採用されている。現在は熱応力緩和にむけてデザインの最適化や模型試験などが計画されている [8]。

電子駆動方式の標的開発は主に KEK と広島大学が共同して進めている。標的の材質にはタングステン合金が用いられ、Undulator 方式と同じく標的を回転させながらビームを受ける。熱負荷は最大 30 kW にもなるため水冷方式となっている。回転軸のシール材には磁性流体が用いられており、現在は磁性流体を用いた模型による真空試験が行われている [9]。

3.2 ILC ビームダンプの開発

ILC には全 15 基のビームダンプがあり、私はこの中でも最大ビームパワー (14 MW) の電子または陽電子ビームを止めるメインビームダンプと最大 300 kW もの Undulator 光を止めるフォトンダンプの開発を進めている。

メインビームダンプのデザインは SLAC 国立加速器研究所にてビームパワー 2.2 MW 用に開発された水ダンプ [10] をアップグレードしたものである。図 3 に ILC メインビームダンプの構造を示す。動作原理としては、水でビーム熱を吸収し、その水を強制対流させることでビーム熱を輸送し冷却するというやり方である。ILC メインビームダンプの基本デザイン [11] はすでに完成しているものの、いくつかの技術課題が残っている。その内の一つがビーム窓の耐久性であり、今回の会議ではこのビーム窓の耐久性評価を報告した [12]。図 4 はビーム窓にかかる応力とビーム窓温度の窓厚依存性である。ビーム窓を厚くすると窓温度が上がるものの、窓を厚くすることで水の圧力による応力は緩和され 5 mm 厚まではビーム窓中の最大相当応力は減少していく。しかし、5 mm 以上厚くするとビームによる熱膨張が大きく

なり、最大相当応力も増大することが分かった。現在のビーム窓厚は1 mm としているのに対し、この解析結果からビーム窓厚は少なくとも5 mm 程度までは厚くできると言える。

フォトンダンプについては、TDR 設計ではメインビームダンプと同様に水ダンプを基にしたデザインであったが、水の放射化によるトリチウムの大量発生といった課題があった。本会議ではフォトンダンプをグラファイト製で出来ないかという検討内容を報告した [13]。グラファイトと金属の接合方法など技術課題が指摘されたが、グラファイト製フォトンダンプは今後も検討を進める価値はあるとのコメントもあった。今回の議論を踏まえてより詳細設計を進めたい。

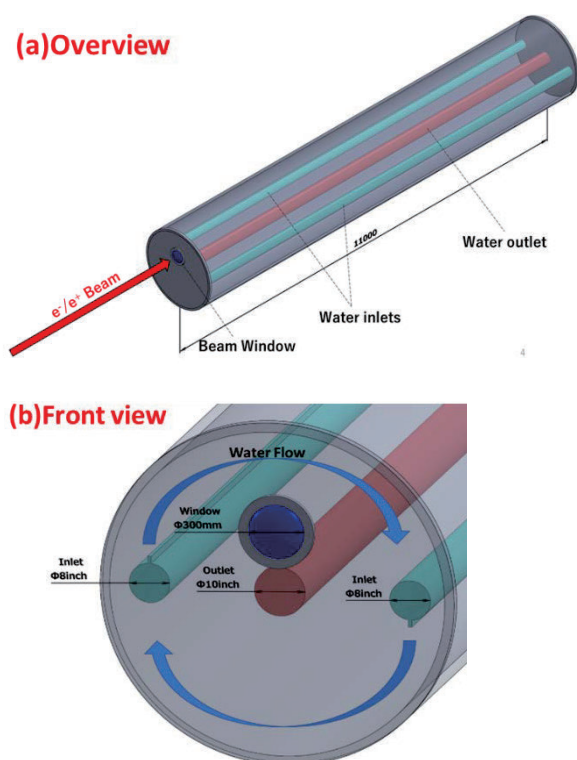


図 3 : ILC メインビームダンプの構造

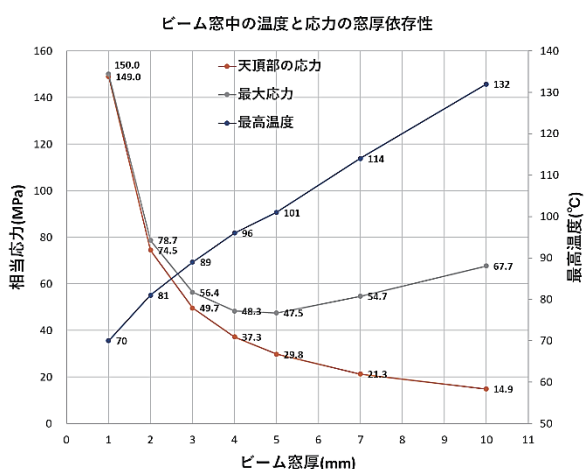


図 4 : 窓温度と窓にかかる応力の窓厚依存性

4 おわりに

今回の LCWS では ILC 実現に向けて要素技術の研究開発だけでなくコスト削減の議論もより具体的なものになってきた。参加者と話していても ILC 実現への意気込みが感じられ、ILC 実現がすぐそこまで迫っているように思われた。

私は KEK の 2 年目技術職員であるが、将来 ILC の舞台で活躍できるように今から技術を磨いていきたい。

参考文献

- [1] S. Michizono, "ILC accelerator status and optimization", LCWS2017 Plenary session.
- [2] "ICFA Statement on the ILC Operating at 250 GeV as a Higgs Boson Factory", The 12th ICFA Meeting, November 2017
- [3] T. Dohmae, "Activities of Cavity fabrication Facility", LCWS2017 Super conducting RF session.
- [4] K. Umemori, "N-doping/infusion study in KEK/J-PARC", LCWS2017 Super conducting RF session.
- [5] N. Terunuma, "Damping Ring", LCWS2017 ILC cost reduction by new technology session.
- [6] Y. Yamamoto, "Cost reduction for power coupler", LCWS2017 ILC cost reduction by new technology session.
- [7] ILC Technical Design Report volume III part II
- [8] S. Riemann, "The ILC positron source target using cooling by thermal radiation", LCWS2017 Sources session.
- [9] T. Omori, "Rotation Target R and D of ILC E-driven source", LCWS2017 Sources session.
- [10] R.B. Neal, "SLAC 2.2MW Water Dump", The Stanford Two-Mile Accelerator.
- [11] P. Satyamurthy et al, "Design of an 18MW vortex flow water beam dump for 500GeV electrons/positrons of an international linear collider", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 679 (2012).
- [12] Y. Morikawa, "Simulation Study of ILC Main Beam Dump Window", LCWS2017 Beam Delivery session.
- [13] Y. Morikawa., "A Photon Dump Study for ILC Undulator Positron Source", LCWS2017 Sources session.