

## 素核研活動報告 (2) ILC グループ 2014 年 4 月 16 日

### ILD 測定器による ILC 物理の検討と ILD 測定器設計の再最適化

ILC Technical Design Report (TDR)の物理測定器編(DBD)の完成した現在、ILC 測定器の次のマイルストーンは ILC 計画承認後の測定器プロポーザル公募になると考えられる。それまでにはなお少し時間があるため、素核研 ILC グループが参加している ILD 測定器グループでは物理探索能力を落とさず、また ILD 測定器の基本的構成には大きな変更を加えずに、測定器コストを下げるための測定器設計の見直し作業 (Detector re-optimization) を行うこととなった。ILD 測定器の設計変更に伴い物理のアウトプットがどう変化するかをシミュレーションで明らかにすることが中心課題となる。

一方、ILC 加速器については国内候補地に適した設計の最適化作業が始まっている。これに関連して、日本が提案している重心系エネルギー250GeV からの段階的エネルギー増強案を念頭に、各段階での加速器パラメータの最適化の作業を始めている。これを受け、Snowmass Summer Study の一環として行われた物理検討(前回報告済)を発展させ、ILC 物理の鍵となる反跳質量測定によるヒッグス生成断面積の絶対測定やヒッグス自己結合測定における更なる精度向上を目指した解析技術の向上に加えて、重心系エネルギー500GeV までの中間にあるトップ対しきい値領域(重心系エネルギーで 350GeV 近辺)でのフル・シミュレーションが進んでいる。

### イベント・シミュレーションおよび解析ソフトの開発

解析技術を向上するための努力としては、LHC でも使われている遷移行列要素を使用する Likelihood Analysis 法のための汎用ツールの開発や、反跳質量測定を始めとする様々な反応の解析で中心的な役割を果たす孤立レプトン同定ツールの更なる改良を進めている。後者には ILD 測定器の特徴を活かし、TPC の  $dE/dx$  情報や超細密カロリメータ中のシャワー形状の情報を利用した性能向上が含まれる。

DBD で標準的に使用したイベント生成プログラム Whizard については、DBD 完成後も課題が残っていた。6 フェルミオン以上のプロセスの生成に長大な CPU 時間がかかり、QED と QCD の干渉効果が正しく取り扱えないなどの問題があったからである。LHC 向けに全く新しいバージョン(Whizard2)の開発が進み、上記の問題のかなりの部分が解決されたが、ILC 物理シミュレーションで使用するにはビーム・ストラルング・インターフェースの組み込み、ILC 用 IO ルーチンへの取り込み、更に生成されたイベントの検証などの多くの作業が必要で、また、Whizard2 では従来 ILC コミュニティーが使用してきたライブラリーが使えない問題もあった。これらの解決のため、Jan Strube 氏(2013 年 9 月に招聘)の協力を得て Whizard2 の使用環境(コンパイラ等)を整備し簡単なテストを行い、問題点を Whizard の著者である Juergen Reuter 氏に伝え、11 月に開催された LCWS2013 の機会には Reuter 氏と ILC ジェネレータグループの会合を組織し今後の計画を協議した(Reuter 氏はその後 KEK を訪問しセミナーを行った)。なお、昨年夏以降は ILD としての組織的なモンテカルロ・データの生成を行っていないが、個別の物理解析のためのデータ作成は ILCDirac GRID ツールや KEKCC バッチシステムを使って日常的に継続している。

この間の解析ソフトの開発で特筆すべきことのひとつはトラッキング・コードの改良である。従来の ILD トラッキング・コードでは、シリコン測定器中でトラック候補を探す際に低い運動量の粒子を十分にとらえることができず、運動量( $P_t$ )が 1.3GeV/c 以下でのトラッキング効率の低下が見られた。改良の結果、バックグラウンド・ヒットがある場合でも、 $P_t=0.6$  GeV/c でのトラッキング効率を 97%以上とすることが出来た。今後は必要な CPU 時間を短縮し、またある条件でフレーバー・タギングの性能が若干低下する点等を改善する必要がある。測定器再最適化のための大量モンテカルロ・データ生成はこれらの改善を反映して行う予定である。

### ILC のための測定器および加速器要素の開発研究

日本の ILC 物理/測定器グループは ILD グループの主要メンバーとして、ILD 測定器による物理の検討や ILD 測定器の全体設計以外に、ILD 測定器の要素測定器の開発研究も進めている。中でも、ILD 測定器の設計原理である Particle Flow Analysis (PFA) の要となる主要測定器要素、すなわち、バーテックス検出器 (VTX)、主飛跡検出器 (TPC)、および精細カロリメーター (CAL) に力を入れ、このうち、素核研 ILC 物理測定器グループは VTX および TPC の国内開発拠点となっている。また、素粒子原子核研究所の低温グループと協力して超伝導ソレノイドの設計開発に関与している。更には、ILC 物理測定器グループにおいても、ILC 加速器のための ATF・ATF2 による研究や陽電子源の開発等の ILC 加速器研究にも関わっている。但し、ILD 測定器超伝導ソレノイドの研究と ATF/ATF2 での研究については別途報告されるものとして本報告では触れない。

## (1) バーテックス検出器

ILD 測定器バーテックス検出器に用いるシリコンセンサー素子として、KEK や東北大学等からなる日本のバーテックス検出器グループは Fine Pixel CCD (FPCCD) の R&D をすすめている。FPCCD は優れた空間分解能を持つ一方、一般的には放射線損傷に比較的弱い欠点がある。ILC で予想される放射線量への耐性試験として、東北大学 CYRIC 中性子ビームを用いて、FPCCD センサーの対中性子放射線耐性テストを行った (2013 年 10 月)。照射後の FPCCD センサーの性能測定は現在も進行中であるが、室温においては照射による暗電流の増加 (いわゆるホットピクセル) が確認された。しかし、この増加は、ILC 実験において FPCCD センサーを  $-40^{\circ}\text{C}$  まで冷却して使用する場合、問題とならないことが確認された。

バーテックス検出器では、シリコンセンサー素子中での荷電粒子の多重散乱による位置分解能の低下を防止するため、センサー素子をどこまで薄くできるかは重要な点である。図1に 50 ミクロンまで薄くした 2013 年型大型 FPCCD プロトタイプセンサー ( $12.3 \times 62.4\text{mm}^2$ ) を示す。この試作センサーの寸法と厚さは実機最内層に用いるセンサーと同等である。

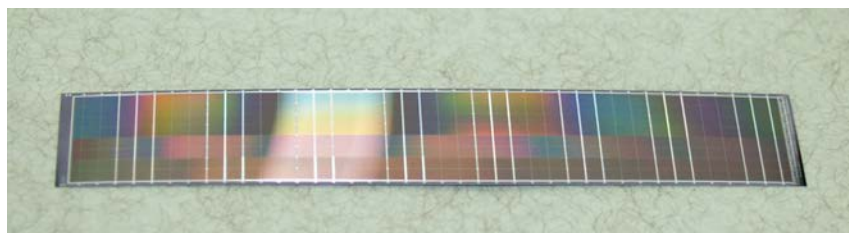


図1. 大型FPCCDプロトタイプセンサー

センサー支持構造の拘束を受けていない大型FPCCDプロトタイプセンサーはその薄さの故に大きく湾曲している。2012年度試作のプロトタイプセンサーと比較すれば明白である。

## (2) 主飛跡検出器 MPGD TPC

ILD 測定器の主飛跡検出器は端部検出器としてマイクロパターン・ガスディテクター (MPGD) を備えたタイムプロジェクション・チャンバー (MPGD TPC) を使用する。TPC では TPC ガス中を通過する荷電粒子を約 200 点の測定点からなる連続した 3 次元飛跡として記録する。ILD のための MPGD TPC の開発を進める LCTPC コラボレーションは DESY、KEK や Saclay 等の主要研究所と多くの大学チームが組織する国際的な測定器 R&D コラボレーションである。その中核グループの一つとして、KEK と佐賀大学や広島大学等の大学チームからなる国内グループは清華大学 (北京) とも協力して LCTPC アジア・グループとして開発研究を進めている。

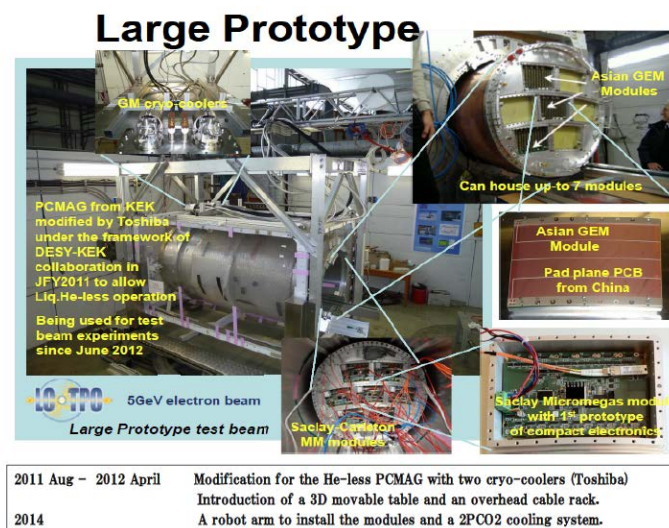


図2 TPC大型プロトタイプ (LP) ビーム試験設備 (DESY)

DESY に設置する TPC 大型プロトタイプ (LP) ビーム試験設備 (図 2) における各種 MPGD モジュールの試験の一環として、アジア・グループは現行の LP 用アジア GEM モジュールの最終試験を行った (2012 年 12 月)。そのデータ解析の最終結果として、1T 磁場中での位置分解能を図 3 に示す。点線は MPGD モジュールの構造、特性やガス増幅の揺らぎ等のガス物理の効果を含むシミュレーションの結果である。2010 年度のデータに比べて、2012 年データはドリフト距離が長い領域で分解能がやや悪くなっているが、これは TPC ガスの純度の違いによって理解される。比較のために DESY の GEM モジュールによるデータを共通解析プログラムを用いて KEK において解析した結果も示す (青の口点)。異なるモジュールによる結果はよく一致していて、いずれも ILD TPC に対する要求を満足するものである。(なお、いずれのモジュールも以下で述べる陽イオンゲートは搭載していない。)

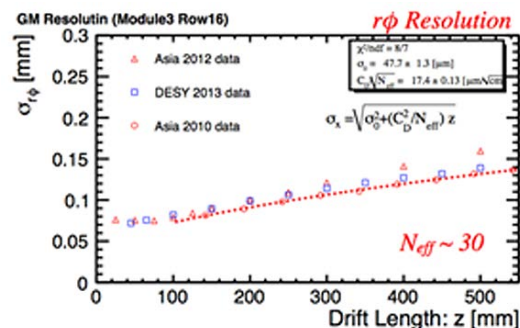


図3 GEMモジュールによる位置分解能

LCTPC コラボレーションでは昨年 11 月に 2 日に渡って ECFA デテクター・パネルのレビューを受けた (<http://indico.desy.de/conferenceDisplay.py?confid=8573>)。このレビューにおいて、LCTPC コラボレーションは、ILD TPC の本格的な工学設計を開始する時期までに解決しておくべき優先度の高い課題を同定した。それらは、(1) 電子透過度の高い陽イオンゲートの選択、(2) 主に MPGD モジュールの構造に起因するドリフト電場の局所的非一様性による飛跡の歪みの理解と解消、(3) 特定のモジュール (あるいは MPGD) に付随する懸念の解消等である。以下ではこの (1) と (2) について日本グループの活動を報告する。

TPC では、端部検出器ガス増幅領域で発生する陽イオンが TPC ドリフト領域に帰還し、加速器バックグラウンドが高い場合にドリフト領域中の陽イオン濃度が高くなってドリフト電場を乱し、測定される 3 次元飛跡が歪む古典的な問題がある。日本グループの詳細な数値計算 (2011-2012 年) によれば、ILD における ILD の MPGD TPC の場合、この陽イオン濃度は ILD TPC 内筒付近の限られた領域において約 60 ミクロンの歪みを生ずる可能性がある。この歪みをなくすためには陽イオンの帰還を阻止する陽イオンゲートを設置する必要がある。陽イオンゲートとしては、LEP 等で使用されたワイヤーゲートではなく、MPGD モジュールの構造に親和性の高い GEM ゲートが望ましく、日本グループでは高いドリフト電子透過度を持つ

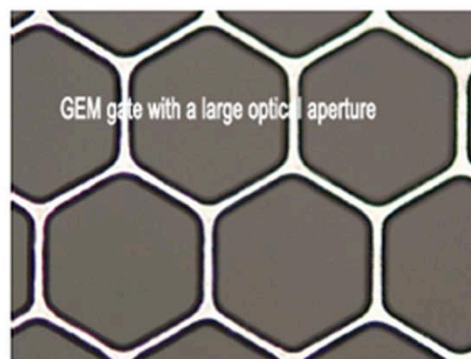


図4 六角形のGEM穴を持つGEMゲートのプロトタイプ

GEM ゲートの開発を進めてきた。最近のシミュレーションによって、図 4 のような大きな光学的開口度を有する GEM ゲート (六角形の GEM 穴の内接円の直径 300 ミクロン、ピッチ 320 ミクロン程度) が作れば、高磁場中では 90% に近い電子透過度が得られる可能性があることがわかった。現在、異なる GEM 製造プロセスによってこの GEM ゲートの中型 (10 cm 角) プロトタイプを制作中 (一部制作済み) で、4 月後半に KEK 低温センターの MRI 型ソレノイド (1T) を使用して最初の試験を行う予定である。一方、ワイヤーゲートについてはワイヤーゲートのワイヤーによる粒子飛跡歪みの有無を下記の UV レーザービーム装置を使用して測定する予定である。

課題 (2) の飛跡歪みについては、TPC LP ビーム試験において 4 種類すべてのモジュールで認められた。原因は複数の MPGD モジュール間に設定された 2mm のギャップや、それぞれのモジュールに特有の局所的構造等によるドリフト電場の局所的非一様性によるものである。この歪み、あるいはドリフト電場の非一様性は、詳細な電場計算と試験ビームによる測定に基づいて適切な電極を追加し、あるいはモジュール構造を変更することによって改善されるべきものである。日本グループでは、試験ビームによる測定に代えて、荷電粒子とほぼ同等の飛跡を残すコンパクトな UV レーザービーム装置を準備し (図 5)、この UV レ

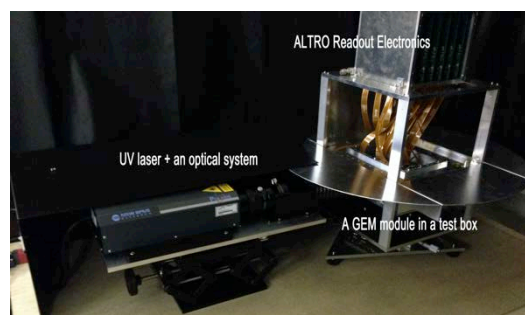


図5 TPCモジュール試験用UVレーザービーム

レーザービームを GEM モジュールに入射して読み出した飛跡の歪みの有無・程度を調べることによって対策を講じる。なお、レーザービームの使用については安全担当者と相談して十分な安全対策を講じている。

### (3) 2 相 CO<sub>2</sub> 冷却と KEK における常温ガスブースターを使用する 2 相 CO<sub>2</sub> 冷却循環装置

コライダー実験での大型測定器で安定した性能を得るためには、読み出しエレクトロニクス冷却と測定器の温度管理が非常に重要となる。ILD 測定器では、FPCCD バートックス検出器は零下 40℃での運転が必要である一方、隣接する主飛跡検出器 TPC は室温において TPC ガスの温度管理が重要である。

従来は水冷が発熱の大きい測定器やエレクトロニクスの冷却の常套手段であったが、最近では気相と液相が混合する炭酸ガスの 2 相流体を冷媒とする冷却方法 (2 相 CO<sub>2</sub> 冷却または 2PCO<sub>2</sub> 冷却) が有望である。2 相 CO<sub>2</sub> 冷媒は大きな潜熱を有し、2 相冷媒の圧力で決まる定められた一定温度での冷却が可能である。また高圧の 2 相冷媒を使用するので細く軽い冷却配管が使用できて測定器の物質量を減らすことができる。更に、万一、冷媒の漏洩が生じても水冷のように測定器やエレクトロニクスに障害を起こすことがない。

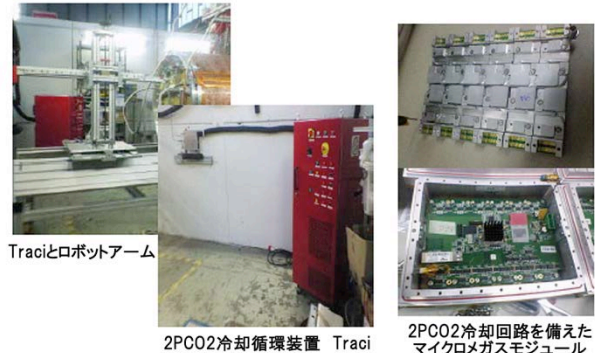


図6 Traciによるマイクロメガスモジュールの2PCO<sub>2</sub>冷却

低温ポンプ(ギヤーポンプまたはメンブレンポンプ)を使用する2相 CO<sub>2</sub> 冷却循環装置はオランダの NIKHEF で開発され、当グループでも NIKHEF の協力を得て試験用小型冷却循環装置 Traci(メンブレンポンプ使用)を制作し、TPC 大型プロトタイプ(LP)ビーム試験設備が設置されている DESY の試験ビームエリアに設置した(2013年)。2014年3月にはフランス、カナダおよび DESY のグループと協力して、ビーム試験において7台のマイクロメガス TPC LP モジュールのエレクトロニクス(T2K)の室温冷却に成功した(図6)。次期 TPC 読み出しエレクトロニクスである S-ALLEGRO16 の 2PCO<sub>2</sub> 冷却は日本の LCTPC グループが準備することとなっている。

低温ポンプを使用する 2 相 CO<sub>2</sub>冷却循環装置では、零下 20-25℃以下の冷却温度で冷却能力が低下する。一方、FPCCD バートックス検出器は零下 40℃に冷却する必要がある。零下 40℃から常温までの広い温度範囲の冷却に対応するため、当グループでは素粒子原子核研究所の低温グループの協力や KEK 測定器開発室の支援を得て、常温ガスブースターを使用する 2 相 CO<sub>2</sub> 冷却循環装置の開発を進め、2014年3月に試作1号機を完成した。この試作機の冷凍能力は高圧ガス保安法等の法律の適用対象外であるが、KEK の内部安全審査を受け、各種法令に準拠していることを確認している。現在試験運転を行っているが、零下 40℃から 15℃の間での冷却運転に成功した。試作機を零下 40℃の冷却温度で運転している際の写真を図7に示す。サイドパネルから飛び出している冷却パイプに白い霜がついていることが見て取れる。

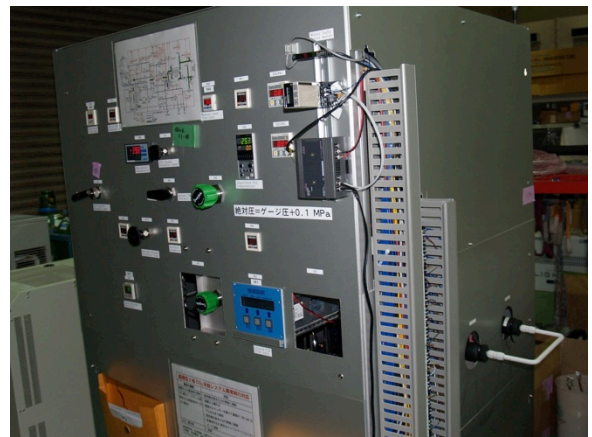


図7 常温ガスブースターを使用する2相CO<sub>2</sub>冷却循環装置

### (4) 陽電子源の開発

素核研 ILC グループでは、物理検討や測定器研究開発に加えて、物理に触発された偏極陽電子源開発や物理屋の得意とする電磁シャワーシミュレーション等の手法を活かした陽電子源開発などを行なっている。ILC 陽電子源に関しては、ILC を早期にかつ確実に建設するための「コンベンショナル陽電子源」と偏極ビーム生成

を視野に入れた「レーザー・コンプトン陽電子源」の両方を検討している。

近年 ILC 国内実現の気運が高まっている事もあり、「コンベンショナル陽電子源」の完成を急いでいる。この開発は加速器研究施設、機械工学センター、広島大学、ANL、DESY、ハンブルグ大学、IHEP 等との協力で進めている。「コンベンショナル陽電子源」は電子ビームを厚いタングステン・ターゲットに打ち込み、電磁シャワーにより陽電子を生成するもので、TRISTAN、SLC、LEP や KEKB などで使用された技術である。ただし、ILC では単位時間あたり SLC における場合の約60倍の陽電子を生成する必要があるため、陽電子生成ターゲットの熱ストレスと生成された陽電子の安定的な加速の問題が R/D 課題となる。ILC 物理測定器グループでは、機械工学センターと広島大学とともに主としてターゲット開発に取り組んでいる。ターゲットは熱によるストレスを分散するため、ターゲット上での照射点を数メートル／秒の速度での移動させる必要がある。ターゲット下流には生成された陽電子を捕獲する高電界加速管が置かれるので超高真空に保つ必要があるから、この超高真空とターゲット移動を両立させることが課題となる。

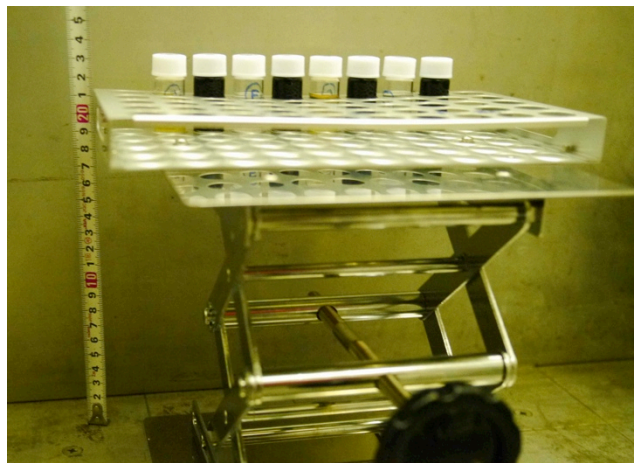


図8: 磁性流体真空シールの放射線耐性試験

ターゲットの開発は2つのタイプのを並行して行っている。一つはベローズにより真空を保つ振り子型ターゲットである。このタイプは真空の保持が確実な点で有利であるが、機械的強度の確認やベローズの耐久性の確認が課題である。2013年8月に機械工学センターによる振り子ターゲットの耐久性試験機が完成し、先端加速器試験棟に設置し、まずは大気中での長期間試験を行なった。その結果、種々の改良すべき点が見つかり、これらを順次改良した。この改良が一段落したので、2014年4月末からは真空ベローズの耐久性を確認する長期試験を開始する予定である。

もう一つのタイプのターゲットは磁性流体真空シールを用いた回転ターゲットである。このタイプでは超高真空の維持と磁性流体の放射線耐性が課題である。超高真空の維持に関しては小型の回転ターゲット(株式会社リガク製)で試験を行い、十分な見込みがあることを確認した。磁性流体真空シールの放射線耐性については原研高崎のコバルト60ガンマ線照射施設において磁性流体への放射線照射テストが進行中である(図8)。

以上