

## 素核研研究活動報告（2） ILC 物理測定器グループ

平成25年9月

ILC 計画では、IDAG (International Detector Advisory Group)によって採択された二つの測定器コンセプト・グループである ILD および SiD がそれぞれ物理シミュレーションと測定器 R&D を行い測定器の詳細設計を進めている。素核研 ILC 物理測定器グループを含む日本グループは、ILD 測定器の建設を目指す ILD グループの主要メンバーである。前回報告したように、2012 年末には、これまでの ILC の物理検討、加速器および測定器の詳細設計をまとめた ILC Technical Design Report (TDR) のドラフトが完成したが、その後も校正を重ねて 2013 年 6 月に印刷物（および CD）として出版した。これを祝して、6 月 12 日には日米欧の 3 カ所で同時に TDR 完成記念式典が開かれた。素核研 ILC グループは、この TDR、とりわけ TDR の Volume 2 (Physics) および Volume 4 (Detectors) の校正作業に深くかかわった。

TDR の完成により、国際的な ILC 加速器の設計のための組織である GDE (Global Design Effort) と物理および測定器の検討のための組織である RD (Research Directorate) は任務を完了して解散し、これらを統合した新たな国際組織である Linear Collider Collaboration (LCC) が発足して、ILC 実現へ向けての活動を行うこととなった。LCC の Director には、LHC の加速器責任者であった Lyn Evans 氏、Deputy Director には、Kavli IPMU 機構長でもある村山斉氏が就任した。測定器建設に向けたより現実的な設計と工業化を行うため、ILD 測定器グループでも組織再編の議論が始まっている。

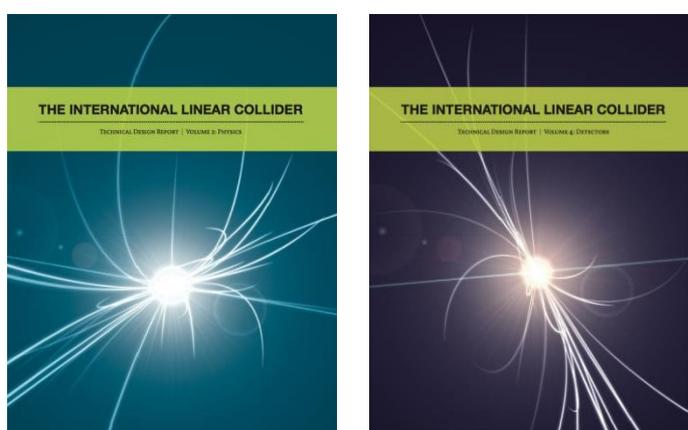


図 1: TDR Volume 2: Physics と Volume 4: Detectors

こうした動きと平行して、高エネルギー物理学の今後の戦略に関する議論が日本、欧州、アメリカの 3 極で進行している。日本の高エネルギー物理学者コミュニティは、「高エネルギー物理学将来計画検討小委員会答申」、その後の LHC によるヒッグス粒子発見を受けた「国際リニアコライダー計画の段階的実施について」と銘打った提言で、グローバル・プロジェクトとしての ILC の国内建設に向けた意思表明を行っており、また、「KEK ロードマップ」も日本がホストする ILC 計画の推進を謳っている。欧州では、5 月に欧州戦略文書が CERN カウンシルで正式に採択されたが、この中で、LHC のルミノシティ増強 (HL-LHC) を始めとする 4 つの高優先度大型将来計画の一つとして日本がホストする ILC 計画への期待が表明されている。一方、アメリカでは、前回の報告以降、いわゆるスノーマス・プロセスによるコミュニティ合意形成過程が進められてきた。日本の ILC 物理検討グループは、TDR 完成以降、スノーマス・プロセスへの入力を目的として、実験／理論の両面から検討を続け、日米欧の合同チームによる ILC ヒッグス白書を準備中である。

### 物理検討（スノーマスに向けて）

日本の ILC 物理検討グループは、ILC 物理の支柱としてヒッグス物理について特に重点的に検討を進めてきた。スノーマス・プロセスでは、「ILC が HL-LHC (High Luminosity LHC) を超える質的に新しい情報を提供するや否や」が厳しく問われた。LHC における近年の解析技術の飛躍的進歩は、今後、系統誤差もデータ量に従ってどんどん改善すると期待させる。CMS グループは、さらに理論誤差も将来的に半分になると仮定すれば、HL-LHC で 3000fb<sup>-1</sup> のデータを収集することで、ヒッグスとゲージボソン、タ

ウ粒子との標準模型で規格化した結合定数を2%程度の精度、ボトムクォーク、トップクォークとの結合の場合はそれぞれ4%および7%の精度で決定できる可能性があることを示した。ヒッグス自己結合の測定可能性もある。ILCの精度が、これらLHCの精度を質的に超える知見をもたらすのかどうか問われたのである。ILCヒッグス白書は、この間に答える事を最重要課題とした。

結論は、もちろん「YES」であり、論拠となるポイントは以下の通りである：

- 1) 多くの標準模型を超える物理 (BSM) のシナリオにおいて、期待されるヒッグス結合の標準模型からのずれは高々数パーセントである。よって、期待される HL-LHC の精度は意味のある測定に必要なぎりぎりの所にあり、BSM への十分な感度を得るには、少なくとも 1% 程度の精度が要求される。
- 2) LHC においても ILC においても、測定できるのは結合定数そのものの測定ではなく、基本的に断面積と分岐比の積 ( $\sigma \cdot BR$ ) である。ILC においては、これに加えて、 $e^+e^- \rightarrow Zh \rightarrow l^+l^-h$  (ただし  $l = e, \mu$ ) 反応でレプトン対に対する反跳質量を測定することでヒッグス粒子の崩壊を見ずに生成断面積 ( $\sigma(e^+e^- \rightarrow Zh)$ ) の絶対測定ができる点が決定的な違いである。これによって初めて、ヒッグス粒子の崩壊分岐比、全崩壊幅、さらには結合定数の絶対値の完全にモデル非依存な決定が可能となる。これは LHC では不可能である。
- 3) LHC におけるヒッグス発見には、QCD 起因の巨大な背景事象に打ち勝つため、信号事象として光子、電子、ミュー粒子を含むとりわけ明快な崩壊モードを使う必要があった。これは、LHC ではヒッグス粒子の検出効率が、その崩壊モードに大きく依存することを意味している。特にチャームクォークとの結合定数測定は極めて困難と考えられている。これに対し ILC では全ての背景事象が基本的に電弱相互作用によっており、検出効率も LHC と比べて崩壊モード依存性が遥かに小さく、 $\sigma \cdot BR$  の測定精度はおおよそ  $1/\sqrt{BR}$  のように振る舞う。チャームクォークに対してもモデル非依存に ~1% 精度の測定が可能である。
- 4) LHC でヒッグス粒子の結合定数を決めようとする場合、測定できないチャームクォークとの結合定数の標準模型からの相対的なずれの大きさが同じアップ型クォークであるトップクォークとの結合の場合と同じである、また、未知の崩壊モードは存在せず、想定する崩壊分岐比の和が 1 になるなどの仮定を必要とする。これらの仮定のもとに LHC と ILC での標準模型で規格化したヒッグス結合の期待される精度を比較したのが以下の表である (ILC の値は、ルミノシティ、偏極度、b-tagging による系統誤差、理論誤差を含む)。同じ仮定で比較した場合、 $\gamma\gamma$  結合のような稀崩壊モードの場合を除き、ILC の精度は LHC のそれを数倍から 1 桁上回り、BSM 物理探索に必要な精度を提供することが分かる。

表 1：期待される結合定数の精度 (モデル依存フィットの場合)

	LHC	HL-LHC	ILC (500)	ILC (1000)	ILC (LumUp)
$\sqrt{s}$ (GeV)			250+500	250+500+1000	250+ 500+1000
L (fb <sup>-1</sup> )	300	3000	250+500	250+500+1000	1150+1600+2500
$\gamma\gamma$	(5-7)%	(2-5)%	8.3%	3.8%	2.3%
$gg$	(6-8)%	(3-5)%	2.0%	1.1%	0.7%
$WW$	(4-5)%	(2-3)%	0.4%	0.3%	0.2%
$ZZ$	(4-5)%	(2-3)%	0.5%	0.5%	0.3%
$t\bar{t}/c\bar{c}$	(14-15)%	(7-10)%	2.5%	1.3%	0.9%
$b\bar{b}$	(10-13)%	(4-7)%	1.0%	0.6%	0.4%
$\tau^+\tau^-$	(6-8)%	(2-5)%	1.9%	1.3%	0.7%
$\Gamma_T (h)$	-	-	1.7%	1.1%	0.8%

- 5) 一方、LHC では、 $h \rightarrow \gamma\gamma$ 、 $h \rightarrow \mu^+\mu^-$  のような稀崩壊モードの分岐比の場合であっても、その ZZ 崩壊との比であれば、理論誤差、系統誤差の多くを相殺できるため、高い精度で測定できる。そこで、これらの測定と ILC での反跳質量測定による  $hZZ$  結合の高精度測定を組み合わせれば、精度 1% の測

定が可能となる。 $h \rightarrow \gamma\gamma$ のようなループ結合による崩壊では、標準模型の寄与と BSM の寄与が同じオーダーで現れ、BSM への感度が高いと期待されるので、この LHC と ILC の相乗効果は特筆される。

- 6) BSM 物理探索の観点から忘れてならないのは、ヒッグス粒子のダークマターへの崩壊など非可視モードへの分岐比測定である。非可視モードの測定は LHC でも可能であるが、標準模型の場合に期待される 95%CL 上限値は、HL-LHC でも 1 実験あたり (6-17)% である。これに対して ILC の場合は、標準ルミノシティーでも 1% 以下、ルミノシティー増強をすれば 0.3% まで押さえることが可能である。
- 7) ヒッグスの物理は、弱電荷を持った真空の謎解きの物理と言える。その鍵となるのがヒッグス場を真空に凝縮させる原因となる力、ヒッグスの自己相互作用であり、ヒッグスの 3 点結合測定には、3 点結合の観測自体に深い原理的な意義がある。ヒッグスの 3 点結合の測定は、極めて難しく、HL-LHC でも 1 実験あたり 50%、ATLAS と CMS の 2 実験を合わせても 30% 程度の精度と言われている。これは、ある種の電弱バリオジェネシスのシナリオで予言される標準模型からのずれと同程度の大きさであり、ずれを確認するには不十分である。一方、ILC では TDR に記載されている 1TeV までのエネルギー増強とルミノシティー増強を行えば、現在の解析技術で 13% の精度の測定が可能であることがフル・シミュレーションで分かっており、将来の解析の改善を考えれば最終的には 10% に到達すると期待できる。

ミネソタのスノーマス・エネルギー・フロンティア作業部会では、ヒッグス粒子の性質は、あらゆる手段をもって解明されなければならない、そのためには HL-LHC に加えてレプトン・コライダーが必要との合意に達した。電子・陽電子リングコライダーによるヒッグス・ファクトリー構想も議論されたが、ルミノシティー増強した ILC の提供するヒッグス結合の精度と比較した場合には大きな差は見られず、また、トップ湯川結合やヒッグス自己結合の測定の可能なエネルギーに到達できない等の物理の側面が確認された。最終日のサマリーセッションでは、以上のような物理の観点に加えて、技術的な成熟度の点から、今後 10-20 年程度の計画としては、HL-LHC と ILC が現実的な選択であると総括された。

## 測定器開発の現状

上記のように、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 測定器の全体設計および測定器要素開発研究を進めているが、中でも、ILD 測定器の設計原理である Particle Flow Analysis の要となる主要 3 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)、そして精細カロリメーター (CAL) の開発に特に力を入れてきた。素核研 ILC グループは、VTX、TPC の国内開発拠点となっている。以下、開発研究の現状をまとめる。

### VTX :

ILD のバーテックス検出器センサーにはいくつかの選択肢があるが、我々は候補として Fine Pixel CCD (FPCCD) の開発研究を進めている。FPCCD には、分解能、物質量の低減、バンチトレイン中で読み出す必要がない、ヒットの形でバックグラウンド・ヒットの除去を行える等のメリットがある。すでに  $6\mu\text{m}$  角の FPCCD を開発しベンチ試験に成功しているが、その優れた空間分解能を実証するためのビームテストを J-PARC のテストビームラインで 6 月に行う計画を立て、その準備を行ってきた。しかしハドロンホールでの事故のため、このビームテスト実験は無期限延期になっている。そのため、センサーの放射線耐性試験の準備や、後述の VTX に必要な  $-40^\circ\text{C}$  まで冷却可能な圧縮機式 2 相 CO<sub>2</sub> 循環冷却システムに重点を移して開発を進めている。

### TPC :

ILC 測定器グループの TPC グループでは、ILD 実験コンセプトの中央飛跡検出器である大型 MPGD TPC の実現に向けて開発研究を進めている。前回の報告以後、最近 (2013 年 8 月現在) は以下のような課題を中心に研究を進めている。これらの研究は、国内では佐賀大学、広島大学、近畿大学、東京農工大学、

工学院大学等との共同研究で、国際的な測定器開発グループの一つである LCTPC コラボレーションによる研究開発の一貫として進めている。

(1) 2012 年ビーム試験データの詳細な解析：

当グループでは、昨年（2012 年）、DESY のビーム試験エリアに設置している TPC 大型プロトタイプ of ビーム試験施設を用いて、ILD-TPC 用 GEM モジュール・プロトタイプ（いわゆるアジア GEM モジュール）のビーム試験を実施した。このビーム試験は現行のアジア GEM モジュール・プロトタイプ of ビーム試験としては最後の試験として行われた。試験で得られた位置分解能等の結果については前回報告したが、ILD 用 TPC への位置分解能についての基本要件を満たすことを再確認した。データの詳細な解析と構造の異なる GEM モジュールの結果の比較するため、9 月中旬に日本グループと同様に GEM モジュールの開発を進めている DESY-FLC の TPC グループとの合同解析会議を（9 月 17 日 - 19 日施 KEK）を開く。TPC では共通の技術的課題である「モジュール構造による電子のドリフト電場の局所的歪みとこれに起因する粒子軌跡の歪み（以下では TPC における粒子軌跡の歪み）」の詳細な調査を通じて、GEM モジュール構造の改良を目指し、併せてビーム試験データの解析におけるパラメーターの扱いや解析プログラムの共通化などについて検討する。

(2) 紫外線レーザービームによる GEM モジュールの試験：

前回の DESY でのビーム試験の準備過程で、紫外線（266nm）レーザービームによる GEM モジュールの試験が上記の TPC における粒子軌跡の歪みの調査に大変有効であることが認識された。このレーザービームによるモジュール試験を KEK でも進めるため、一体化したコンパクトなレーザー光学系（光量手動調節機能付コリミーター）と小型レーザー発振器（工学院大学）を組み合わせ、安全性の高いレーザービーム試験のセットアップを準備中である。必要な安全対策を行いレーザー使用の許可を得て近日中に試験を開始する。

最初の試験としては、ILD TPC において不可欠な陽イオン・ゲートの有力な候補であるワイヤーゲートの電子透過度やゲート・ワイヤーによる局所的な歪みの程度などの基本的な測定を行う予定である。この基礎試験等のためにアジア GEM モジュールに搭載できるワイヤーゲート・モデルを制作した（図参照）。このモデルではピッチ約 2 mm の 20 ミクロンワイヤーはスポット溶接で固定されている。ILD 測定器の磁場（3.5T）中での測定試験を有効に行うためには国内で高磁場電磁石を得ることが課題である。

(3) 次期アジア GEM モジュールの制作準備：

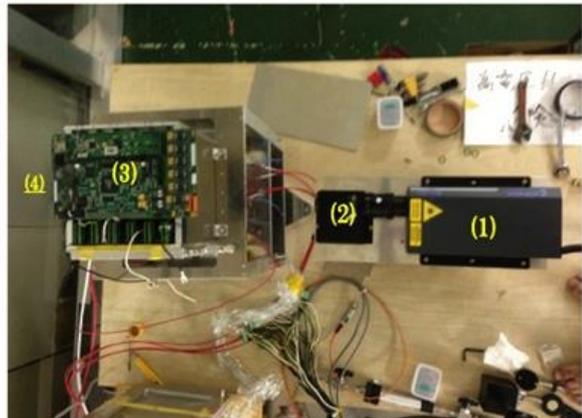


図 2：紫外線レーザーによる MPGD モジュール・プロトタイプ of 試験セットアップ（仮置）：(1) レーザー発振器（POLARISII）、(2) 光量調整機能付きコリメータ、(3) MPGD モジュール試験ボックスと ALTRO エレクトロニクス、(4) ビームダンプ（陰で見えない）

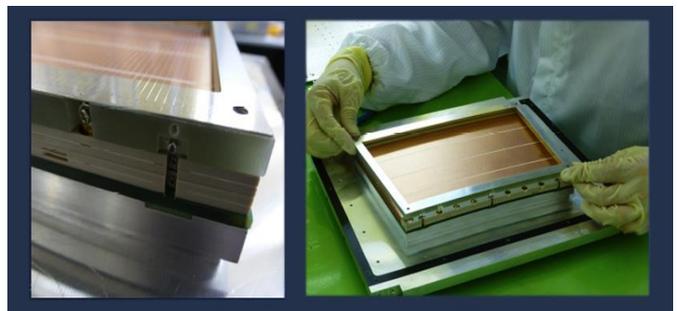


図 3：基礎試験用ワイヤー・ゲート・モデル

TPC グループでは、現行 GEM モジュールのビーム試験をおこない、GEM を用いる TPC モジュールが位置分解能など ILC での TPC に課せられる要求を満足するものであることを示した。今後は、現行 GEM モジュールの基本設計概念を継承しつつ、過去数度のビーム試験で認識された諸問題（GEM のマイクロ放電の頻度と影響、(2)で述べた粒子軌跡の局所的歪み、モジュールの機械構造的諸問題等）を解決すべく、簡素で信頼性の高い構造による次期 GEM モジュール・プロトタイプ的设计試作を進めている。具体的には GEM 電圧を供給する高電圧接続のコンパクト化（ほぼ完了）、ILD TPC 条件における各種 GEM のマイクロ放電率の測定を進めるとともに、基本的な電氣的機械的構造を試験するモックアップを制作し、このモックアップの成果に基づいて、より本格的なワイヤゲートを搭載する次期アジア GEM モジュール・プロトタイプ的设计を本年度中に完了し、以後制作試験する計画である。

#### (4) ILD TPC 冷却用 2 相 CO<sub>2</sub> 循環冷却装置と冷却試験

高い位置分解能を目指す TPC では電子のドリフト速度やガス電子増幅に影響する TPC ガスおよび MPGD 端部検出器パッドプレーンの温度安定性と一様性は一般的に大変重要な要求である。TPC ガスおよびパッドプレーンの温度制御と、端部検出器背面に直接搭載されて熱源となる TPC 読み出しエレクトロニクスの適切な冷却が不可欠であるが、一方、物質量の低減も TPC を含む粒子軌跡測定器全般に不可欠な要求であるから、TPC の冷却では従来の冷却水循環等による冷却は不相当である。このため、後述のように ILC 測定器グループでも 2 相 CO<sub>2</sub> 冷媒による測定器冷却の研究を進めているが、TPC グループでも 2 相 CO<sub>2</sub> 冷却による MPGD モジュールと S-ALIRO 読み出しエレクトロニク（CERN および Lund 大学）の冷却試験の準備を進めている。昨年度までに CERN および NIKHEF の 2 相 CO<sub>2</sub> 冷却開発グループの協力を得て、液体 CO<sub>2</sub> プンプを使用するコンパクトな小型 2 相 CO<sub>2</sub> 循環装置（図）を製作した。本装置は -20 度から室温までの冷却が可能である。TPC での冷却は常温冷却である。



図 4: LCTPC 開発研究用小型 2 相 CO<sub>2</sub> 循環冷却システム（液体ポンプ式）

液体 CO<sub>2</sub> 循環のために使用されていた従来のギアポンプは液体 CO<sub>2</sub> の低い粘性のため耐久性に問題があることがわかったので、本装置ではメンブレンポンプを使用することとし、そのための設計変更を行った。循環装置は現在 NIKHEF で長期運転試験中であるが、年末頃には DESY のビーム試験エリアに設置し、来年からは MPGD モジュールの冷却試験を開始する予定である。

GEM モジュールおよびエレクトロニクの冷却エレメント（熱交換器）としては、ステンレス細管（直径 0.5 mm から数 mm）による冷却系、多数のマイクロチャンネルに 2 相 CO<sub>2</sub> 冷媒を流す軽金属製（チタン等）薄膜熱交換器（additive manufacturing により制作）、あるいは物質量の少ない熱伝導材料である TPG（熱分解グラファイト）等を利用する方向で、Micromegas グループ（Saclay）等と協力して設計を検討中である。

#### (5) ICFA 測定器 R&D パネルによるレビュー等：

ILD 測定器の DBD を提出して後初めての ILD 会議（第 5 回）が 9 月 24-26 日、クラコフ/ポーランドで開催される。ILC 加速器 TDR と合わせて ILD 物理測定器 DBD（Detailed Baseline Design）が発表された後の初めての ILD 会議として今後の研究の進め方・スケジュールや測定器最適化等が議論される。さら

に、11月初めには ICFA 測定器 R&D パネルによる LC TPC グループの TPC R&D のレビューが予定されている（11月4日施 DESY）。レビューでは TPC の R&D 一般としての評価ではなく、ILC TPC のための R&D として評価されると聞いている。

## 圧縮機式 2 相 CO<sub>2</sub> 冷却システム

上記のように、DESY に設置されている大型 TPC プロトタイプ試験施設を使った LC TPC 開発研究用の 2 相 CO<sub>2</sub> 循環冷却システムとして、 $-20^{\circ}\text{C}$  から常温までの冷却に対応したポンプ式システムの試作機を国際協力で作製し試験中であるが、素核研 ILC グループでも ILD 測定器のためのバーテックス検出器 ( $-40^{\circ}\text{C}$ ) および TPC (常温) の冷却のために、 $-40^{\circ}\text{C}$  から常温付近にいたる広い温度範囲の冷却に対応できる、2 相 CO<sub>2</sub> を用いた冷却システムの開発を行っている。上記、LC TPC 開発研究用の 2 相 CO<sub>2</sub> 循環冷却システムでは、液化 CO<sub>2</sub> を循環させるために液送ポンプを用いているが、この方式では低温での高い冷却能力を得るのが難しい。バーテックス検出器の冷却性能要求をより容易に実現するため、我々は液送ポンプの代わりにガスブスターを CO<sub>2</sub> の圧縮機として用いた循環型のシステムの開発を行っている。この方式は、一台で広い温度範囲をカバーできるので、いろいろな測定器の冷却試験のための汎用 2 相 CO<sub>2</sub> 冷却システムとしても利用価値が高いと考えられ、測定器開発室プロジェクトの一環にもなっている。すでに試作 1 号機が完成し、KEK 内部での安全審査を受ける予定になっている。



図 5 : 圧縮機式 2 相 CO<sub>2</sub> 循環冷却システム

## 陽電子源開発

素核研 ILC グループでは、物理検討、測定器研究開発に加えて、測定器と関わりの深い最終収束系回りの MDI、物理に触発された偏極陽電子源開発、また、物理屋の得意とする電磁シャワー・シミュレーションなどの手法を活かした陽電子源設計のためのシミュレーション研究などを通じて加速器との協力/連携関係を継続している。今回は、陽電子源開発に関する最近の進展について簡単に触れておきたい。

素核研の ILC グループは、ILC 陽電子源に関して、ILC を早期に確実に建設する為の「コンベンショナル陽電子源」と将来の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」の両方を加速器研究施設、機械工学センターおよび国内外の大学や研究所と協力して進めている。近年は ILC 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。「コンベンショナル陽電子源」のための開発研究の一環として 8 月末に機械工学センターによる陽電子生成用・振り子ターゲットのプロトタイプが完成し先端加速器試験棟に設置された。これは大型ベローズを用いて振り子の動きを真空中に導入するものである。これによりベローズ部が長期連続動作に耐えるかどうかの耐久試験を 9 月より行う予定である。



図 6 : コンベンショナル陽電子源用振り子ターゲットのプロトタイプ

以上