

## ILC に関する国内外の動き

前回報告以降、ILC に関する国内外の情勢に関して、いくつか特筆すべき進展があった。まず、文科省の「国際リニアコライダー (ILC) に関する有識者会議」が 250 GeV ILC の物理の意義、250 GeV ILC 加速器の技術的成熟度とコストの再評価を終えたことで、2014 年に始まった約 4 年間の有識者会議による検討が完了し、2018 年 7 月にその最終報告書が公表されたことが挙げられる [1]。文部科学省はこの有識者会議の最終報告書とともに、日本学術会議に、250 GeV ILC 計画の学術的意義や学術研究全体における位置づけ、国民及び社会に対する意義、施設の建設及び運営に関する諸条件などについて調査審議を依頼した。日本学術会議は、「国際リニアコライダーの見直し案に関する検討委員会及び分科会」を設置し、4 ヶ月あまりに渡って集中的な審議を行った。素核研 ILC グループは、機構の ILC 推進準備室の活動を通して、ILC の学術的意義を中心に、学術会議の議論への入力を精力的に行った。10 月 22 日から 26 日にかけて米国テキサス州アーリントンで Linear Collider Workshop 2018 (LCW2018) が開催されたが、そこで採択された国際コミュニティの ILC に対する期待と決意を示す「テキサス宣言」も学術会議へ送付された。こうした流れを経て、学術会議は、2018 年 12 月 19 日に、「国際リニアコライダー計画の見直し案に関する所見」を公表、文科省に手交した [2]。

学術会議の所見は、ILC 計画の学術的意義を認めつつも、国際経費分担や必要人員の確保等における課題を指摘しており、その総合所見では「現状で提示されている計画内容や準備状況から判断して、250 GeV ILC 計画を日本に誘致することを日本学術会議として支持するには至らない。」としている。現状では、支持するに至らないということであり、ILC 計画の学術的意義は認めている。また、誘致の決定には慎重であるべしとしているが、日本が ILC をホストすることへの関心の表明 (Expression of Interest : EoI) を行い正式な国際協議を開始することを否定してはいない。そこで、KEK は、この所見に関する見解を直ちに公表し、学術会議が指摘した課題の解決のためにも、政府から前向きな声明がタイムリーに出されることを求めた [3]。同様な意見表明は、政治からも出ている [4]。すでに米国、ドイツ、フランスとの間には政府間の非公式な話し合いのチャンネルができており、日本政府の意思表示があれば、協議を次の段階に進められるものと期待している。これらの動きは、現在進行中の欧州素粒子物理戦略の更新プロセスと大きく関わっている。実際、世界の大研究所の所長や地域代表からなるリニアコライダー国際推進委員会 (LCB) からは、ILC 計画が欧州戦略更新プロセスできちんと議論されるためには、2019 年 3 月初めの ICFA/LCB の委員会開催時点までに日本政府からの意思表示があることがギリギリ待てる限度であることが表明されており、ILC 計画が先に進むか否か正念場を迎えている。

日本政府から EoI が示されたとして、次の課題は、欧州戦略にしかるべく位置づけられることである。ILC コミュニティは、欧州戦略への入力として二つの文書：“The International Linear Collider, A Global Project” [5]と“The International Linear Collider, A European Perspective” [6]を提出しているが、前者には素核研 ILC グループも深く関わっている。また、素核研 ILC グループが中核研究所の一つとして参加している International Large Detector (ILD)測定器グループは、それとは独立に“The ILD Detector at the ILC”を提出した [7]。これらの欧州戦略への入力文書には、それを支える背景資料が必要となるが、後述のように、現在、欧州戦略議論に向け、複数のベンチマーク物理過程について刷新されたソフトウェア群を用いたフルシミュレーション研究を精力的に行っており、TDR 以降の進展を総括した報告書 (ILD Design Report : IDR) にまとめる作業が進行中である。

## 物理の検討

これまでの ILD の測定器 R&D の進捗、最新の測定器構成の記述パッケージである DD4Hep を用いた測定器シミュレーションや解析ツール開発を経て、大規模モンテカルロ (MC) ・シミュレーション研究が進行中である。その結果は、IDR の中心となる。測定器の基本性能のシミュレーションによる評価は、測定器性能の差がより顕著となる重心系エネルギー500 GeV での物理過程を用いて、図 1 のようなベンチマーク過程を設定して行っている。測定器性能のサイズ依存性を見るため、サイズの異なる 2 つの測定器モデルを想定した検討が進行中である。

特に  $H \rightarrow bb, cc, gg$  過程を用いたジェットのフレーバー同定の性能評価、 $e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-$  過程に対する  $\tau$  レプトン再構成における荷電粒子の飛跡再構成や  $\gamma, \pi^0$  再構成の性能評価、ヒッグスの不可視崩壊過程の解析におけるジェット分解能の影響評価、あるいは、ダークマター

Benchmark	b/c JER/JES	uds JER/JES	pt res	mu ID	e ID	$\gamma$ E/B	ISR tag	Beam Cal	b-/c-tag	PID, vertex charge	tau ID
M(H->bb)											
BR(H->mmumu)											
H->invisible											
ee->tautau											
ee->WW->qqlnu											
ee->nunuqqqq											
ee->gammaZ											
tt->bb qqlnu											
BR(H->bb/cc/gg)											
low DM Higgsinos											
mono-photon WIMPs											
extra H bosons											

図 1: ILC500GeV における物理ベンチマークプロセスと測定器評価の主なコンポーネント

一対生成過程を用いた前方・後方部における  $\gamma$  再構成のエネルギー較正など、それぞれの物理解析においてキーとなる測定器コンポーネントの性能評価を行っている。2 月下旬までに大小 2 つの測定器モデルの定量的性能評価を終える予定である。

これと並行し、250 GeV ILC の中心となるヒッグス物理については、別途、シミュレーション研究が進行中である。特に有効場理論に基づくヒッグス結合定数の測定精度評価のため、 $H\gamma Z$  結合など、標準理論ではループレベルで初めて現れるような異常結合の精度評価を行

なっている。多変量解析や運動学的フィットを用いて感度を向上させる試みが進行中で、結果の一部は 2018 年 10 月の LCWS 2018 で発表している。有効場理論の枠組みでの解析では、ヒッグスを終状態に含まない反応過程も関わってくるため、例えば、 $e^+e^- \rightarrow Z\gamma$  のような反応も重要な役割を果たすことになる。これら諸々の物理解析において、生成されたジェットの元クォークの電荷が推定できると感度が向上することがしばしばある。例えば、崩壊点電荷の同定によるトップ対生成事象のトップ・反トップ識別精度向上は前後方非対称度に対する感度向上に不可欠である。この測定は、トップ・Z ボソンの右巻結合・左巻結合の決定に重要な役割を果たし、複合ヒッグス模型や余剰次元模型などに高い感度がある。現在、新しいシミュレーション・データを用いて、二次バーテックス情報及び  $dE/dx$  情報を用いた K 中間子同定による崩壊点電荷同定の性能評価を行なっているが、それが終わり次第、前後方非対称度測定のパフォーマンスに移る予定である。同様に、 $e^+e^- \rightarrow b\bar{b}$  過程での b クォークの電荷同定は b クォーク対の生成角分布測定に必須である。この過程は s-チャンネル Z' 交換などの新物理による振幅と標準理論振幅との干渉効果の探索に重要である。現在、ジェット生成粒子の電荷の和や、b、c 中間子の崩壊点での電荷和を用いたジェット電荷同定の試みが行われている。最終的にこれらの電荷情報を組み合わせてジェット電荷同定のための解析ツールを構築し、Z' 間接測定に用いる予定である。

## ソフト開発および MC データ生成

ILD ソフトウェア・グループの中で、素核研 ILC グループはカロリメータを中心とするシミュレーション・ソフトウェアの開発と MC データ生成を担当している。

ILD グループは、2013 年に出版された ILC TDR に記載されている詳細基本設計 (Detailed Baseline Design: DBD) 研究の終了後、測定器の最適化のために、ソフトウェアの大幅改造を進めてきた。2018 年春には、ソフトウェアの刷新が完了し、系統的な MC データ生成とそれを用いた物理ベンチマーク反応の研究を開始した。

今回の MC データ生成は DBD 研究に使用された 500 GeV の物理サンプルを用い、2つの測定器モデル (従来とほぼ同じ大きさの L モデルおよび少し小さい S モデル) について行った。データ生成は ILC Dirac システムを使用して行った。

今回の MC データ作成を開始して以来の使用 CPU 積算時間の推移を図 2 に、データ積算作成量を図 3 に示す。図 3 で 9 月以降に減っているのはエラーのあるデータ (図 2 の v02-00 に対応する部分) を削除したことによるものである。今回の MC データ生成では 600 を超える様々な物理反応を物理反応ごとに別々にかつ短期間で効率的に作成することが課題であった。昨年の小規模テスト生成では、データ生成に付随するエラー回復処理やデータロギングなどのオペレータ作業がボトルネックであり短期間でデータ生成を完成するのは難しい見通しであった。そのため、オペレータ作業の自動化やデータ生成の効率化を昨年来行ってきた。

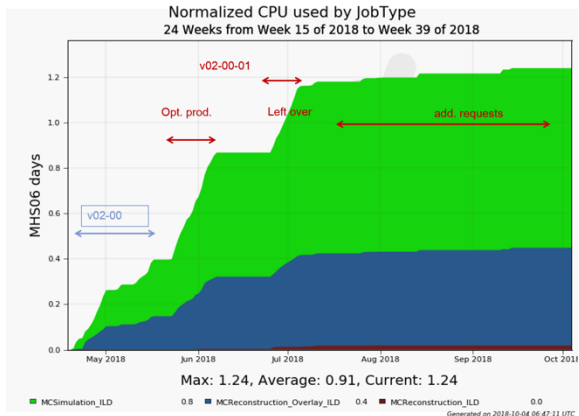


図 2: CPU 積算使用量。縦軸の単位は HepSpec2006

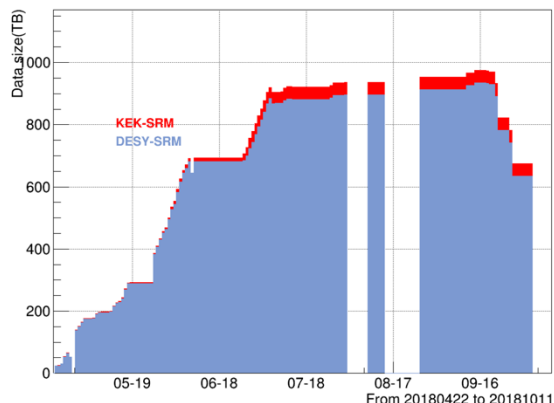


図 3: データ積算作成量。

データロギングの効率化の一助として、Elog サーバーを活用し、これをデータ作成自動化に組み込んだ。Elog サーバーは日本歯科大と協力して運用し、作成したデータのデータベースとしても利用している。このウェブ表示の例を図 4 と図 5 に示す。

その結果、今回はデータ生成の実効率が大幅（10 倍以上）に改善され、当初目的としたデータの生成をほぼ 1 か月で終わることができた（図 2 の Opt. Prod. に相当する部分）。その後追加のデータ生成が必要になり、データ生成を漸次進めた（図 2 の Left Over および add. requests の部分）。10 月以降も小規模の追加データ生成を行った。

ID	Date	SimID	RecID	Ecm	ProcName	ProcID	Pol	ILDConfig	Detector	JobStatus	NEvents
192	2018/05/26 15:29:52	10289,10300	10301,10302(ov)	500	4f_2z_semiLeptonic	250014,250016	mixed-pol	v02-00-01	ILD_h5_e1_v02	Production	444373 events will be submitted.
191	2018/05/26 12:55:25	10295,10296	10297,10298(ov)	500	higgs_fm	106524-106730	mixed-pol	v02-00-01	ILD_h5_e1_v02	Production	239636 events will be submitted.
190	2018/05/26 09:26:34	10291,10292	10293,10294(ov)	500	4f_singleZsingleWfhs_leptonic	250049-250052	mixed-pol	v02-00-01	ILD_h5_e1_v02	Production	67521 events will be submitted.
189	2018/05/26 09:12:44	10287,10288	10289,10290(ov)	500	4f_singleZnuu_leptonic	250054,250056	mixed-pol	v02-00-01	ILD_h5_e1_v02	Production	146824 events will be submitted.
188	2018/05/25 03:22:09	10273,10274	10275,10276(ov)	500	6f_tbar	108859-108876	mixed-pol	v02-00-01	ILD_h5_e1_v02	Production	1916046 events will be submitted.
187	2018/05/24 22:22:05	10269,10270	10271,10272(ov)	500	6f_tbar	108835-108869	mixed-pol	v02-00-01	ILD_h5_e1_v02	Production	2681636 events will be submitted.
186	2018/05/24 18:31:44	10265,10266	10267,10268(ov)	500	4f_singleW_leptonic	250045-250048	mixed-pol	v02-00-01	ILD_h5_e1_v02	MergeDST/Logging	1477239 events will be submitted.

図 4: Elog summary ページ

Worker:	A.Hiyamoto
SPRINT:	500192
SimID:	10129,10130
RecID:	10131,10132(ov)
Ecm:	500
ProcName:	4f_WW_semiLeptonic
ProcID:	250014,250016
Pol:	mixed-pol
ILDConfig:	v02-00
Detector:	ILD_h5_e1_v02
JobStatus:	Done
NEvents:	999920
Log_SimLog:	see attached file: log_upload_368.txt
Log_RecoLog:	see attached file: log_upload_368.txt

図 5: Elog 個別ページ

ILD は DESY を主要データ保存先としているが、今回のデータ生成では DESY に対して 1 GByte/sec 程度を超えるデータ転送が行われるとエラー頻度が大きくなることが分かった。このような速度で数日以上書き込みを行うと DESY 内でのディスクからテープへのデータコピー速度が追いつかない場合があることが分かった。今後の大規模データ生成ではこのような問題に留意する必要がある。

ILD では、今後、250GeV ILC の最新のビームパラメータや Whizard2 イベント生成プログラムを用いて 250 GeV MC データを作成することを計画している。

DD4Hep による新しいシミュレーションでは、磁場計算に基づく一様ではない測定器ソレノイド磁場と Anti-DID 磁場を使用するモデルも用意した。このモデルを使用した、ILC でのビーム衝突により生じる電子陽電子対バックグラウンドのシミュレーションも行った。この際、数 MeV 以下の低エネルギー電子陽電子がビームパイプ真空中で止まってしまうという予期せぬ問題が見つかったが、シミュレーションのパラメータを調整して解決した。このデータは現在 ILD のデータ収集量の評価やバックグラウンド下でのトラッキング性能の評価などに使用されている。

## ILC のための測定器開発研究の進捗

物理シミュレーションに基づく現実的な測定器設計の最適化には、各測定器要素に関する性能パラメータを裏付けるハードウェア開発が不可欠である。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、特に、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) に力を入れて開発研究を進めている。素核研 ILC グループは、特に VTX および TPC の国内開発拠点の役割を果たすとともに、CAL についても国内の関係大学とともに開発研究を進めるための準備を開始した。また、素核研の低温グループと協力して超伝導ソレノイドの設計や 2 相 CO<sub>2</sub> 冷却システム (2PCO<sub>2</sub>) 開発も行っている。更には、ILC 物理測定器グループにおいても、加速器と関連の深い Machine Detector Interface (MDI) 部分、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。今回は、VTX、CAL、MDI、陽電子源開発について最近の進展を報告する。

### バーテックス検出器 (VTX)

ILD 測定器の要素として衝突点に最も近接して設置されるバーテックス検出器の候補として、高精細画素 CCD (FPCCD) をセンサーとする検出器の R&D を進めている。最近では実機の最内層に用いられるセンサーとほぼ同じサイズの大型プロトタイプ (図 6) の性能評価を行っている。X 線源 (Fe55) を用いたテストでは、隣接するピクセルへの信号電荷の漏れ出しが予想以上に多く、その原因を究明し、解決策を見出すことが現在の課題となっている。

FPCCD センサーは放射線耐性向上のため、 $-40^{\circ}\text{C}$  程度に冷却して使用することを想定している。そのための冷却システムとして、2 相 CO<sub>2</sub> を冷媒として用いた冷却システムの開発も行っている。我々が開発を目指しているシステムは常温付近の液化 CO<sub>2</sub> を測定器の近傍まで送り、測定器の近傍、あるいは内部で圧力を下げることで液化 CO<sub>2</sub> を低温の 2 相 CO<sub>2</sub> に変えて測定器を冷却するものである。原理実証はすでに終わり、現在、実用に耐えうる小型の冷却システムの試作を進めている。

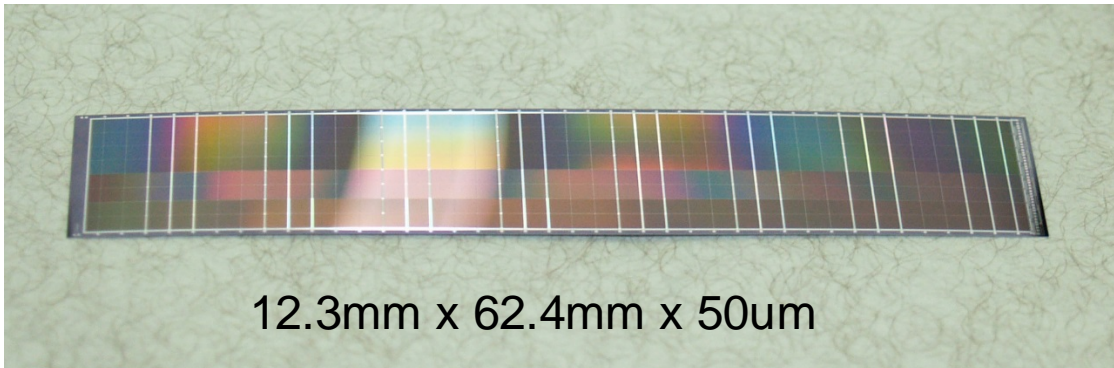


図 6 : 50  $\mu\text{m}$  まで薄くした FPCCD センサーの大型プロトタイプ。性能評価には厚さ 500  $\mu\text{m}$  でパッケージに収められたものを用いた。

### カロリメータ(CAL)

読み出し密度の高いカロリメータは、PFA を設計原理に据えた ILD 測定器において、中心的な役割を果たす。ILD の電磁カロリメータの基本設計では、5mm $\times$ 5mm のセルサイズを持つシリコンセンサー読み出しのサンプリング型カロリメータが採用されている。2mm $\times$ 12mm のストリップ型読み出しを使えば、より高い実効細密度を実現でき、コストや技術的複雑さを増すことなく、より優れた位置分解能を達成できる可能性があるが、シャワーの再構成が複雑になる。2018 年度は、ストリップ型読み出しのためのシャワー再構成アルゴリズムを ILD の標準事象再構成ソフトウェアに実装するとともに、ストリップ型読み出しのシリコン電磁カロリメータのため、読み出し形状の違ういくつかのセンサーの試作を行なった。

### 加速器-測定器インタフェース (MDI) と実験室周りの検討

KEK の Conventional Facility and Siting (CFS) グループと共同で、衝突点付近の施設・設備の最適化とともに ILC 建設時に必須の基本計画書策定のために、衝突実験用の設備・施設の要求仕様の取りまとめを行っている。実験用の地下空洞、地上での測定器組み立てと地下空洞への搬入方法、2つの測定器の入れ替えのためのプッシュプル方式、測定器の放射線・電磁遮蔽、超伝導ソレノイドと最終収束超伝導電磁石用の冷却システム、消費電力、エレクトロニクスラック配置、冷却水、ガス循環装置などの詳細仕様がその対象である。また、MDI グループは、素核研低温グループと協力して、超伝導ソレノイドからの非常に強い電磁力を受ける anti-DID コイルを効率的に支持する方法の検討を開始した。ILC-TDR で提案された厚さ 50mm のソレノイドコイル用支持シリンダ上に結合させる構造を考案した。予備的な結果であるが、この支持構造は少なくとも方位方向の電磁力に十分耐えられることを解析的方法で確認した。さらに超伝導ソレノイドと一体化した構造のより詳細な検討を進めている。ANSYS による有限要素法解析によると、厚さ 50mm の支持シリンダのときのトレスカ

応力（最大剪断応力の2倍）は105 MPaと算定された。これは許容限界150 MPa（LHC-CMSソレノイド値）より小さいが、TDRコイル安定化材中の純アルミの剪断強度と同程度である。安全性のさらなる向上のため、倍以上の剪断強度をもつアルミ合金のみを安定化材として使用する、コストダウンも期待できる新コイル線材開発研究の提案を行った。2018年11月29日には、Mini-Workshop on ILC Infrastructure and CFS for Physics and DetectorsをKEKで開催し、衝突点近辺に測定器運用のために必要な施設と設備、特に、測定器を地上で組み立て地下実験室に下ろすためのガントリークレーン（荷重4,000トン）の北上サイトでの実現可能性の予備的検討結果、そして耐震設計について議論を行った。

250 GeV ILCでのビーム起源バックグラウンドをフルシミュレーションにより評価した。これはILCのための測定器設計に際して考慮すべき鍵となる要素である。特に、強く収束されたビームバンチが交差する際に発生するビームシュトラールングによるバックグラウンドが重要である。結果として大量の低エネルギー電子・陽電子対が発生する。今年度は、これらの電子・陽電子対が測定器及びその磁場とどのように相互作用をするかを理解することを目的とするシミュレーションを進めた。Anti-DIDの磁場は、これらの低エネルギー電子・陽電子対をビームパイプの中へとガイドし超前方の測定器要素にぶつかるのを避けるよう設計される。Anti-DID磁場がない場合、バーテックス検出器の内側のレイヤーのバックグラウンドによるヒット数は、衝突点から直接やってくる粒子によるヒット数と同程度であるが、Anti-DIDの設置でその数をおよそ4分の1に減らせることが判明した。

## 陽電子源開発

ILCは、単位時間当たりの生成量でSLCの約30～60倍という多量の陽電子を必要とする。この極めて難度が高い課題に対して、ILCでは「ベースライン」と「バックアップ」の2つの方式で挑んでいる。ベースラインはアンジュレータに基づく方式、バックアップは従来の電子駆動方式（e-Driven）である。ベースライン方式には技術的な不確実性があるため、バックアップを十分に開発することが重要となっている。素核研ILCグループは、加速器研究施設、広島大学、DESY、CERN、ANL、BINP、IHEPとともに、e-Driven方式の開発に取り組んでいる。

2017年に国内、国際の2つのレビューにおいてe-Driven方式の方がより実現性が高いと結論されたこと、また同年ICFAがILCのエネルギーを250 GeVと正式に決定したことを受け、2018年はe-Driven方式を採用してのILC建設が開始できることを目標に開発を進めた。具体的には加速器本体部分の研究開発に加えて、トンネル構成の最適化、コミッションング、メンテナンスなど実効ルミノシティを確保するために大切になる部分を含めた総合的な研究開始した。e-Driven方式は主リニアックのビームを使用せずに陽電子を作るので、主リニアックとは独立に建設、運転が可能である。この利点を生かし陽電子源を含む中央部分のコミッションングを主リニアックのコミッションングに先行させて行い、

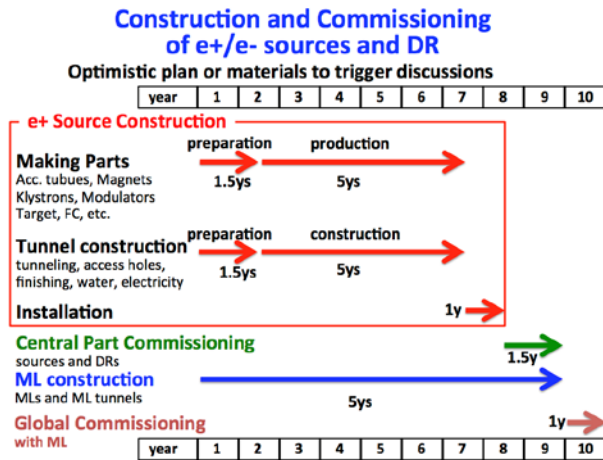


図7：中央部先行コミッショニング案

陽電子生成部では高いレベルの放射線発生があり、各部の放射化も問題となる。これらに対応するためのシールド設計や放射化を前提としたメンテナンス・スキームの研究等が重要である。この研究はJ-Parcの強度増強後のメンテナンス・スキームと強いシナジーがあり、J-Parcの研究者とも連携して進めている。e-Driven方式はアンジュレータ方式に比して実現性が高く、また上に見たように多くの点で利点を持つが、ただ陽電子ビームの偏極は得られない。そこで、まずe-Drivenで陽電子源でILCをつくり、将来アンジュレータを使った偏極陽電子源にアップグレードできる道を残しておくための研究も進めている。

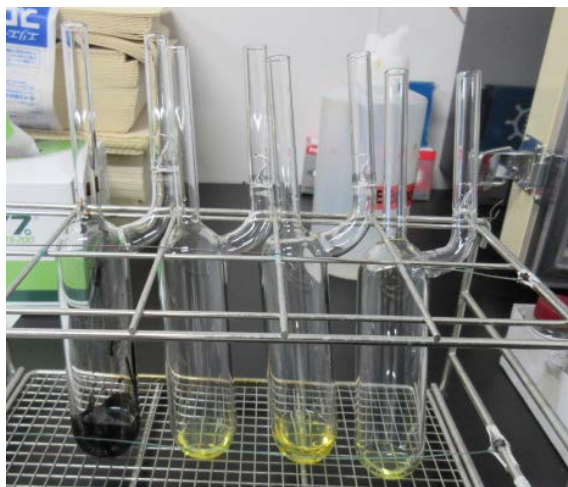


図9：真空封じり瓶に磁性流体とベースオイルを封入

コミッショニング全体に掛かる時間を短くし、可能な限り早く物理ランを開始するシナリオの研究を始めた(図7)。

トンネルの配置に関しては、e-Driven方式ではトンネルの長さを大幅に短くできるため、土木工事費はアンジュレータ方式よりも有意に低くなる。これにより出来たゆとりを生かして陽電子源用の独立トンネルを作ることにより、建設年数の短縮、コミッショニング及びメンテナンスを容易にしスピードアップを図る研究も進めた(図8)。

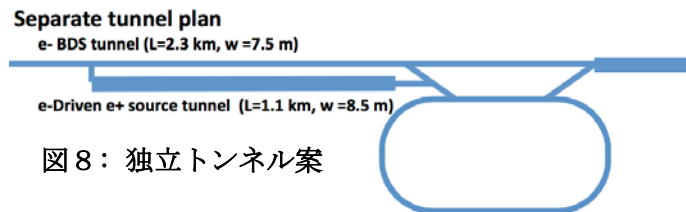


図8：独立トンネル案

電子駆動リニアックと陽電子捕捉・ブースターリニアックの設計は、広島大学で詳細なシミュレーション研究が行われた。KEKでは、ターゲット・プロトタイプの回転真空試験を継続して進めた。ターゲットは強度の高い放射線にさらされるため、回転真空シールに使用される磁性流体の耐放射線性を確認する試験を進めている。一昨年度までに、磁性流体は放射線により粘性が高くなるが、ILC運転6年分相当までは分解などはせず真空保持の基本的な性質は維持することを確



認した。昨年は放射線照射後の磁性流体に対しゲル浸透クロマトグラフィー法を用いて、粘性が高くなる要因は流体のベースである高分子同士の間架橋によるいっそうの高分子化（真空保持の点ではむしろ良い）である傍証を得た。今年には特殊な真空封じきり瓶（図9）を用いて、放射線照射時に発生するガスを採集し分析することで、放射線の磁性流体への影響をより確実に調べる実験を進めている。

## 参考文献

- [1] “国際リニアコライダー（ILC）に関する有識者会議：ILC計画の見直しを受けたこれまでの議論のまとめ”、文部科学省 国際リニアコライダー（ILC）に関する有識者会議、  
[http://www.mext.go.jp/component/b\\_menu/shingi/toushin/\\_icsFiles/afieldfile/2018/09/20/1409220\\_1\\_1.pdf](http://www.mext.go.jp/component/b_menu/shingi/toushin/_icsFiles/afieldfile/2018/09/20/1409220_1_1.pdf)
- [2] “回答「国際リニアコライダー計画の見直し案に関する所見」”、日本学術会議、  
<http://www.sci.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-24-k273.pdf>
- [3] “「国際リニアコライダー計画の見直し案に関する所見」について”、KEK、  
<https://www.kek.jp/ja/newsroom/2018/12/19/1700/>
- [4] “学術会議所見に対する政治からのメッセージ”、ILC議連会長、ILC誘致実現連絡協議会代表、河村建夫  
[https://www2.kek.jp/ilc/ilc-tsushin/2018/12/27/lnewslne\\_181222/](https://www2.kek.jp/ilc/ilc-tsushin/2018/12/27/lnewslne_181222/)  
“The International Linear Collider, A Global Project” , The Linear Collider Collaboration, <https://arxiv.org/abs/1901.09829>
- [5] “The International Linear Collider, A European Perspective” , European ILC community, <https://arxiv.org/abs/1901.09825>
- [6] “The International Large Detector at the ILC” , ILD Group.