

素粒子原子核研究所活動報告（1）ILCグループ

令和3年4月7日

ILCに関する国内外の動き

2020年8月、これまでILC計画の推進母体となってきたLCC(リニアコライダーコラボレーション)/LCB体制がその役割を終え、KEKがホストする国際推進チーム(IDT)による新しい推進体制がスタートした[1]。国際推進チームは、1~1.5年をかけ、ILC準備研究所(ILC Pre-Lab)の設置と運営を含む、建設に向けた4年間の準備期間(この間に経費分担等に関する国際交渉、最終設計を行う)のプランを策定、準備期間への移行に必要な作業を行う。国際推進チームには、全体統括を行うWG1、加速器を担当するWG2、物理と測定器を担当するWG3の三つの作業部会が設置され、活発な活動を続けている。IDTの立ち上げと活動プランについては、10月19日から22日にかけてオンライン開催された北米地域のリニアコライダーワークショップであるAWLC2020[2]で報告されたが、この会議には、これまでILCに直接関与していなかった若手研究者の参加も得て、米国の素粒子物理戦略策定プロセスであるスノーマス2021-2022研究を契機にILCコミュニティの拡大を図るためのキックオフ会議ともなった。素核研ILCグループの活動に直接関わるWG3は、スノーマス研究においてILCが然るべく位置づけられるように、「ILC白書」の準備を主導するとともに、特に米国内でのILCコミュニティの拡大を目指して、様々な活動を行っている。これには、これまでILCに直接関与してこなかった研究者を念頭においた、スノーマス研究で検討すべき物理の質問集の作成[3]、簡易シミュレーションを中心としたモンテカルロサンプルと解析ツールの提供、またそのチュートリアル等が含まれる[4]。ILC白書に記載予定のこれ等の研究課題には、1TeVを超えるエネルギー拡張や、ILC施設(例えばビームダンプ)を使った固定標的実験の検討等が新たに付け加えられた。

一方、素核研ILCグループが中核メンバーとして参加しているILD(International Large Detector)グループは、TDR以降の測定器設計の最適化に向けた進展を総括した報告書(ILD Interim Design Report: IDR: 約180ページ)を完成し[5]、第1期計画である250 GeVヒッグスファクトリー実験のより詳細なフルシミュレーション研究のため、最新のソフトウェアツールを用いたモンテカルロサンプルの大量生成を行っている。既に、一部の断面積の大きい反応を除いて、標準理論サンプルの生成をほぼ終え、新サンプルを用いた研究が始まっている。また、これまで正式メンバーだけに許されていたフルシミュレーションを用いたより踏み込んだ研究を、希望すれば新規参入者でもできるように、ゲストメンバーの仕組みを作った[6]が、ヒッグス粒子のストレンジクォークへの崩壊分岐比の測定可能性の検討等、この仕組みを利用した共同研究が始まっている。

以上のようなIDTやILDの活動や成果は、3月15日~19日にオンライン開催された国際リニアコライダーワークショップLCWS2021で報告された[7]。この会議では、ILC Pre-Labの発足が確実になった時点で、IDTによりILCでの実験への関心表明書(EoI)公募が行われ、これをPre-Labで議論、その後、絞られた提案に関する意思表明書(LoI)提出を経てILC実験技術提案書(Technical Proposal)提出、ILC研究所正式発足後の承認といった実験提案選択プロセスの概要も示された。2021年10月26日~29日には、ILC施設における実験の議論に特化した国際ワークショップがつくばで開催予定である。

物理の検討

素核研 ILC グループは、IDR に記載されている物理解析や測定器最適化に深く関与してきた。ここでは、素核研 ILC グループに属する総研大学生が行っている物理シミュレーション研究をいくつか紹介する。一つ目は、250 GeV における $e^+e^- \rightarrow \gamma H$ 反応である。この反応は標準模型ではループを通して初めて現れる稀過程であるが、不活性ヒッグス模型等の場合、生成断面積が大きく増大する。また、標準模型有効場理論 (SMEFT) によるヒッグス結合解析に現れる γZH 結合に制限を与え得る反応でもある。多変量解析を解析を用いた信号事象の背景事象からの分離の様子を $H \rightarrow b\bar{b}$ 崩壊の場合について図 1 に示す。この解析の結果は、スノーマス研究の一つに含まれており、先日オンライン開催された LCWS2021 でも報告されている。

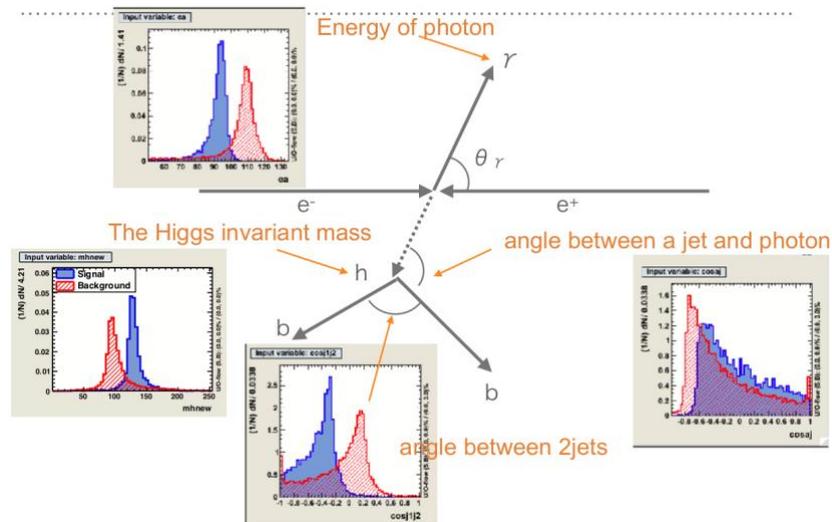


図 1: $e^+e^- \rightarrow \gamma H$ 反応解析における多変量解析による信号選択の例

$e^+e^- \rightarrow \gamma Z$ 反応は、いわゆる Radiative Return 過程により、大量の質量殻上の Z 粒子を生成できる反応である。この Z 粒子サンプルは、標準模型有効場理論 (SMEFT) によるヒッグス結合解析において重要な役割を果たすが、これに加えて、既に精度良く知られている Z 粒子質量を使ったエネルギー測定 of 較正にも大変有用である。図 2 は、 Z 粒子のハドロンジェットへの崩壊において、ジェットの生成角と質量からジェットのエネルギーを運動学的に再構成し (青)、その真値からの相対的なズレを、測定器で直接測定されたジェットのエネルギーの場合 (紫) と比較したものである。角度と質量から再構成したジェットのエネルギーのバイアスは小さく分解能も直接測定されたも

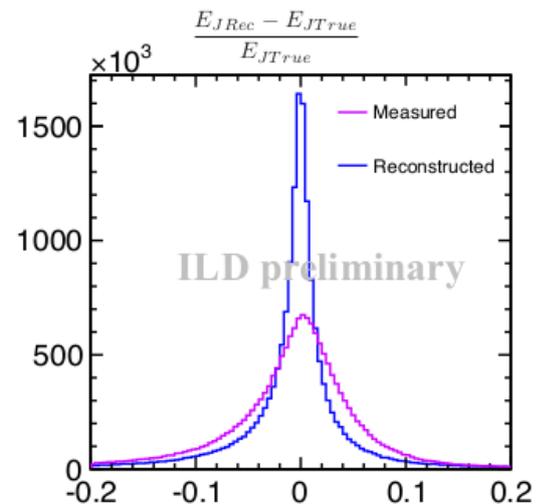


図 2: 運動学的に再構成されジェットエネルギーと測定器で直接測定されたジェットエネルギーの新力の相対的ズレの比較

のに比べ良いことが見て取れ、この方法がエネルギー較正の有用な手段であることが分かる。

ILCにおける $e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-$ 反応は、ビーム偏極のコントロールによる始状態偏極指定、 τ 粒子崩壊後の終状態分布解析を用いた終状態偏極測定を用いて、異なるカイラル状態を分離して測定でき、 Z' 粒子等の新物理のユニークな探索と測定の可能性を開く。現在、ILC 測定器の性能を活かし τ 粒子の偏極情報をいかに精度良く引き出すかを集中的に検討している。図 3 は、 τ 粒子のドミナント崩壊モードである $\tau \rightarrow \pi$

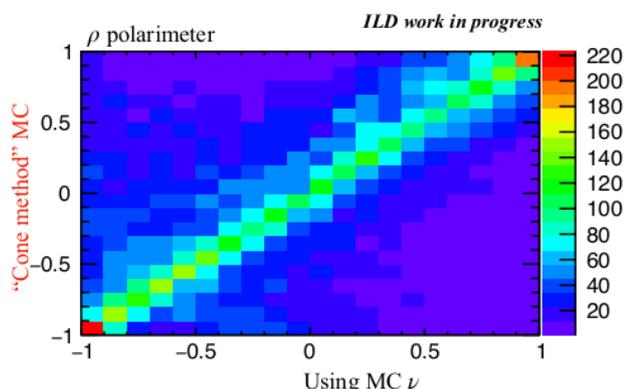


図 3：運動学的に再構成された偏極と真値の比較

ν 崩壊について、 $\tau^+\tau^-$ 対に関する運動学的再構成によって得られた偏極ベクトル (Cone method) とモンテカルロ真値による偏極ベクトルを比較したものである。両者の良い一致が見て取れる。

これ等の解析に加え、新粒子直接探索の検討の一つとして、重いマヨラナニュートリノ対生成探索のシミュレーションも進行中である。この反応では、マヨラナ性を活かした、非常にクリーンな同電荷符号レプトン信号による探索が可能で高い感度が期待される。

ソフト開発および MC データ生成

既に述べたように、ILD では、250GeV での物理検討をさらに進めるため、昨秋より大規模モンテカルロデータ生成 (MC-2020) を進めている。MC データ生成は、素核研 ILC グループと日本医科大学のメンバーはの担当である。MC-2020 では、最新のソフトウェアを用いて、既存の MC サンプルに比べ 10 倍以上の統計で標準模型 MC データを生成する。入力データは、最新の ILC 加速器パラメータに基づくビームスペクトラムを用いた最新の事象生成プログラム、Whizard2.8.5 により生成されている。 e^+e^- 衝突反応以外に beamstrahlung による光子との衝突反応も含めて、約 240 反応過程、合計 2.2G 事象の MC データ生成を目指している (但し未準備の Bhabha 反応と仮想トップクォーク反応は含まず)。このシミュレーションでは測定器最適化により得られた測定器モデルが採用され、データ解析ではシリコンセンサーを使用した電磁カロリメータとアナログ読み出しのハドロンカロリメータが標準として採用されている。

データ生成には、GRID 国際計算機網上の ILC-V0 仮想組織を用いた ILCDIRAC システムを使用している。反応過程の種類によって、生成する事象数やシミュレーションと解析ジョブに必要な CPU 時間やデータサイズが様々であり、計算資源を有効に使うためには細かい調整が不可欠である。この作業をできるだけ自動化するために様々なツールを開発し、データ生成と並行して改良を重ねてきた。

KEK 計算機センターを使用した評価では、予定したデータの生成に約 42 万 CPU 日 (約 850 万 HEPspecInt2006 CPU 日) 必要であり、約 250 万ジョブを実行する見込みである。典型的

な例では1シミュレーションジョブで400事象を約2時間(KEK CPUの場合)で処理し、約1.1GBのデータを出力する。解析ジョブはこのシミュレーションデータに加えて40MBから70MBの大きさのバックグラウンドデータ6組を入力とし約40分(KEK CPUの場合)のCPU時間で、約30MBのDSTファイルを作成する。生成されるDSTファイルは約130TBである。シミュレーションと解析の全データは10PB以上になるので、ごく一部以外は処理終了後削除することにした。削除しないシミュレーションデータはKEKのテープ領域(KEK-SRM)に保存し、解析データはDESYのディスク領域(DESY-SRM)に保存している。シミュレーションデータの一時保管場所としてKEKとDESYのディスク領域(KEK-DISKとDESY-SRM)を当初使用していたが、IOエラーが頻発するので、現在はDESYのみを使っている。また、ジョブがバックグラウンドデータを取り込む際に負荷が集中しないようにKEK、DESY、CERNにコピーを置き負荷分散を図っていたが当初はこの機能がうまく働かずIOエラーが頻発した。この問題は解決したが、ジョブ数が多いとエラーも増大するので、現在は同時に実行されるジョブ数を5000程度以下にとどめデータ生成を進めている。

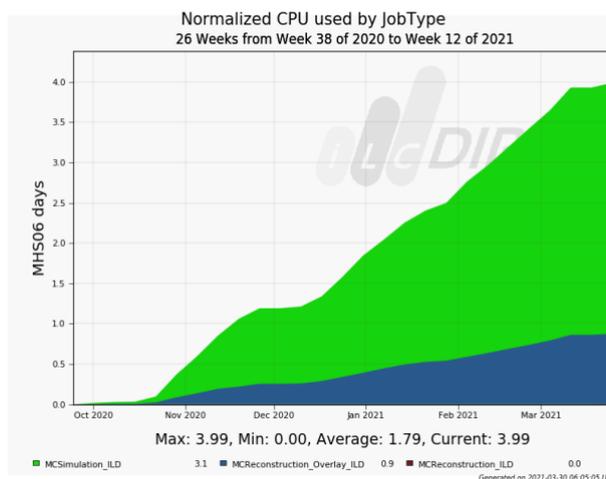


図 4 : 2020 年 10 月以降の積算 CPU 使用量。縦軸の単位は HepSpec2006

3 月半ばの時点で、予定の約半分の事象の処理が完了し、計画している全反応過程について最低 $1ab^{-1}$ のデータを生成できた。これは、これまで物理解析に使用されてきた統計量の数倍に相当する。昨年 10 月以来、積算で約 4M HepSpec2006 CPU 日を使用し(図 4)、DESY と KEK のディスク領域に約 200TB、KEK のテープ領域に約 600TB のデータを保存している(図 5)。まだ予定のデータ量に達していない反応過程は必要事象数の多い、 $e^+e^- \rightarrow q\bar{q}$ 、 $e^+e^- \rightarrow VV \rightarrow 2q + 2\bar{q}$ 等の一部に限られている。これらの生成は順調にいけば 6 月までには完了する見込みであったが、不意のトラブルや予定外の高い優先度のデータ生成が要請されることもあり、データ生成はやや遅れ気味である。

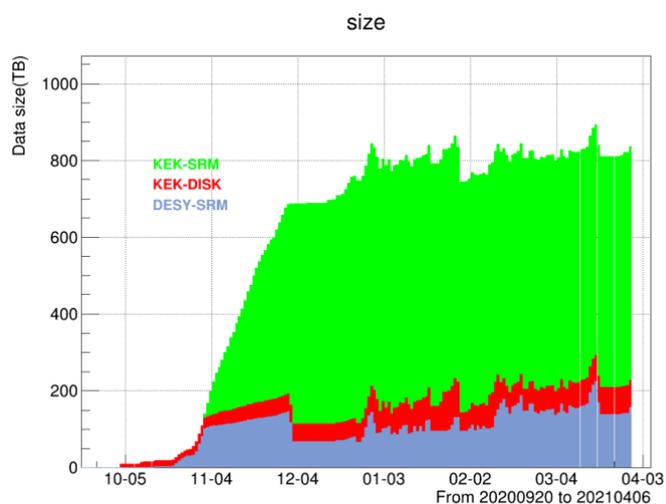


図 5 : 2020 年 10 月以降の データ保存量の経緯。保存データ量節約のため、12 月後半以降は、シミュレーションデータを作成後まもなく削除するようにしたので、ヒストグラムが上下している。

ILC のための測定器開発研究の進捗

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ている。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 CO₂ 冷却システム (2PCO₂) 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。これら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 測定器の最内層、衝突点の最も近くに設置されるのがバーテックス検出器である。素核研 ILC グループでは、ILC 実験のためのバーテックス検出器に用いるセンサーとして、高精細画素 CCD (FPCCD) の開発研究を進めている。FPCCD を ILC で用いる際には放射線耐性が問題となりうる。そこで、FPCCD の放射線耐性の研究のため、KEK の ATF の入射ライナックを用いて、電子線を FPCCD センサーに 1cm² あたり 10¹² 程度まで照射する実験を計画しており [8]、そのための照射装置の開発を進めている。また、これまで東北大学で行っていた、宇宙線による FPCCD センサーの 2 粒子分離能力のテストのための装置を KEK に移設して、より統計精度を上げたデータの収集を進めている。この実験では 6mm 角のセンサーを 4 層重ね、その上下を 2 次元のシンチレーターホドスコープで挟んだ装置を恒温槽の中に入れ、-40℃まで冷却してデータ収集を行っている (図 6)。



図 6: 恒温槽内の FPCCD センサー試験装置

中央飛跡検出器 (TPC)

ILD 測定器の中央飛跡検出器は、三次元的にほぼ連続的にヒット点を供給することで、優れたパターン識別能力を持ち、電離損失 (dE/dx) 測定による粒子識別を可能とする、Time Projection Chamber (TPC) である。素核研 ILC グループは、LCTPC アジアグループの中核として GEM をガス増幅に使った端部検出器モジュールを開発してきた。既に、プロトタイプのビーム試験や宇宙線試験により、位置分解能、dE/dx 分解能等の基本性能に関し、目標性能の達成が可能であることを実証しているが、現在、動作安定性をさらに高めるための開発研究を進めている。これ等の研究には、TPC の増幅機構である Gas Electron Multiplier (GEM)

の素材の検討、増幅率の不均一性の改善などを、実験・シミュレーションの両面から検討が含まれる。現在、これまで使用されてきた液晶ポリマーGEM と放電耐性が高く剛性のあるガラス GEM について、穴径や厚み等を変化させたシミュレーションを行なっている。



図 7：GEM の厚み測定装置の調整風景

また、増幅率の不均一性の原因が厚みの不均一性による可能性を精査するため、GEM の厚み測定装置を開発した。測定システム、アクチュエータ・センサーの較正が完了し、厚みの測定の準備が整った。現在、全面測定のため、自動スキャンプログラムを開発中である。

また、プロトタイプ性能の実機への外装をより信頼できるものにするため、ビーム試験の位置分解能データをより精密に再現できるシミュレータの開発も行なっている。

カロリメータ (CAL)

ILD の電磁カロリメータには、荷電粒子飛跡とカロリメータ中の信号クラスターとを一対一対応させ、Particle Flow Analysis (PFA) を可能とする高細密度 (1セル約 5mm 角) が要求される。素核研 ILC グループでは、CALICE 共同研究の枠組みの下、フランス、スペイン、東大、信州大、九州大等の国内大学グループと共に、電磁カロリメータ (ECAL) の共同開発を行なっている。ILC 実験ではコンパクトで高度に統合された ECAL が必要であるが、そのための技術課題解決の実証のため、次世代 ECAL 試作機を準備中である。そのための浜松フォトニクス製のシリコンセンサーは既に調達済みである。図 8 は、現在の CALICE の SiW-ECAL 試作機の写真である。

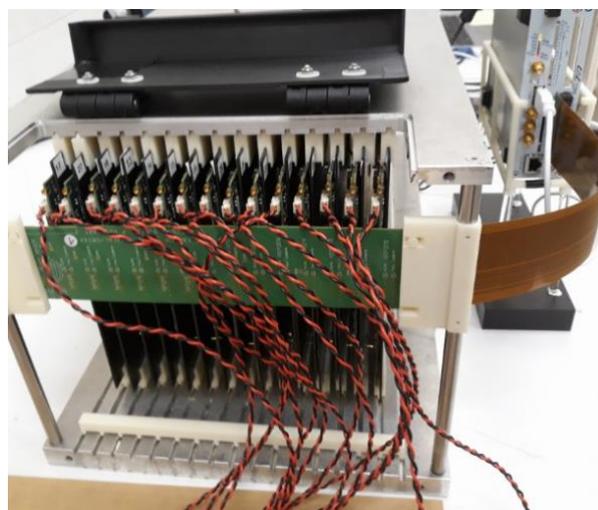


図 8：現在の CALICE の SiW-ECAL 試作機

加速器-測定器インターフェース (MDI) と実験室周りの検討

KEK は、加速器施設を持つ研究機関として、加速器と測定器の接続部分 (MDI) や実験室周りの検討等、施設サイドの検討を主導することが期待されている。素核研 ILC グループは、測定器の統合 (Detector Integration) と MDI に関する研究開発、特に、東北大学、素核研

低温グループおよび加速器研究施設 CFS (Conventional Facility and Site) グループと協力して、ILD 超電導ソレノイドおよび ILC 実験ホールなどの研究開発を行っている。昨年度は ILDC 超電導ソレノイド磁石と anti-DID 超電導コイルの工場からの北上サイト ILC 衝突点までの輸送の内、気仙沼港から衝突点までの陸上輸送についての検討を行った。今年度は、国内の3箇所の工場(神戸、横浜、日立)から気仙沼港までの海上輸送関係調査(費用概算を含む)を行った。気仙沼港の岸壁の強度などの新たな検討項目も明らかとなった。これらの検討より輸送に必要な費用そして諸課題を把握することができ、もう一つのオプションとして現地でのソレノイドコイルの製作の可能性を来年度に検討することとなった。また、コスト削減を目指し、超伝導安定化材としての最適なアルミ合金の同定を目的とした ILDC ソレノイド超伝導電磁石用の新線材開発研究を開始した。ATLAS Central Solenoid (CS) コイルで使用された重量比 0.1%のニッケルを含むアルミ合金や A5052 合金でサンプルを製作し、クエンチ時の導体の温度上昇や常伝導領域の伝播特性などの測定システムを構築している。また、IDT による測定器タイムライン設定を踏まえ、測定器製作過程・期間の再検討を行った。特に、ILD 超伝導ソレノイド磁石の工期、各測定器のインストレーション期間の短縮の必要性を指摘した。実験室関連では二つの測定器 (ILD, SiD) の運転と維持に必要な設備など収納する施設 (USC, Utility Service Cavern) のフロアプランと配置案の作成、

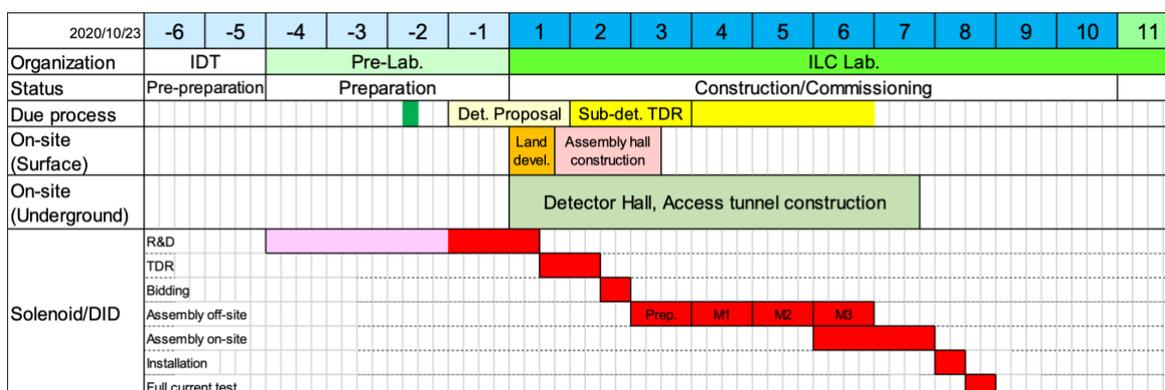


図 9: IDT によるタイムラインを基にした ILDC 超伝導ソレノイド磁石の製作工期

プッシュプル用のケーブルトレンチの大きさや配置などの最適化など実験ホール設計の見直しを行なっている。

一方、超伝導最終収束電磁石 QD0 を加速器 (BDS, Beam Delivery System) トンネルよりサポートする可能性とその ILDC 測定器への影響についても検討を開始した。具体的には、ILDC-TDR では衝突点から QD0 先端までの距離 (L*)が 4.1m であったものを、QD0 が測定器外部に設置できる L*=6m にする可能性の検討である。この方式の利点は、QD0 が BDS トンネルで支持されることにより測定器との機能的分離が完全なものとなり、より安定な運転が可能になると期待されることである。ただし、最終収束システムのビーム光学の再最適化が必要となる。この L*=6m の可能性については、CWS2021 の MDI, BDS と CFS グループの合同セッションで議論した。

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。この課題に対して、ILC では 2 つの方式を検討している。設計において従来の経験を生かせる電子駆動方式 (e-Driven) と陽電子偏極が得られるアンジュレータに基づく方式である。陽電子源方式選択は、選択時点での技術的観点から、確実性・信頼性を最重要視してなされるべきであるが、選択の時期は ILC 準備研究所の 3 年目の前半が想定されている。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、素核研 ILC グループは、2018 年から、加速器研究施設、広島大学、DESY、CERN、ANL、BINP、IHEP とともに、ILC 建設が e-Driven 方式を採用して開始することを仮定して開発を進めてきた。国際推進チーム、ILC 準備研究所、経費分担を含む国際合意を経て ILC 研究所設立へと進む ILC 実現への流れが明示されたことを受け、ILC 建設コストの不確定性を減らすためにトンネル部分を含めた電子駆動型のコストの再検討を始めた。この再検討では、e-Driven 陽電子源をダンピングリングに直結する独立トンネルに設置すること、アンジュレータを将来入れる場所を温存(トンネル長補正もそのまま)し、エネルギーアップグレードとは独立に偏極アップグレードが可能とする設計を想定している。

e-Driven 方式では、主線形加速器のビームを使用しないため、主線形加速器の建設・運転とは独立して陽電子源を建設運転できる。そこで、陽電子源の立ち上げを主線形加速器の完成に先駆けて行い、出来るだけ早く物理運転を開始するシナリオを検討した。独立トンネルはこのシナリオとも整合する。

コスト評価と並行し、捕捉シミュレーション、放射化シミュレーションを行い、捕捉部の加速構造の設計を含む E-driven 陽電子源の全体設計も進めている。独立トンネルを基本指針とし、放射化シミュレーションの結果をもとに、陽電子生成ターゲットが入る部分のトンネルの概念設計を行った結果を図 10 に示す。

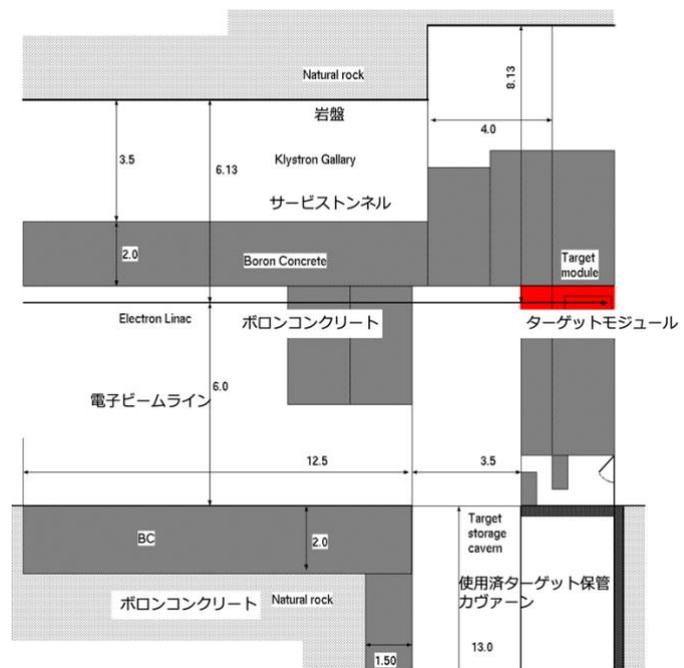


図 10 : 陽電子生成ターゲット付近のトンネル概念設計

陽電子生成のための回転ターゲットは陽電子源開発の重要な項目の一つである。現在、ターゲット試作機の長期真空試験と回転試験が行われており、 6×10^{-7} Pa のベース圧力を達成した。これは要求値より約 5 倍良い値である。しかし、時折ではあるが、圧力の急激な上昇(スパイク)が観測された。その頻度は数時間に 1 回であり、典型的なジャンプの高さはベース圧力よりも 1 桁以上高いものであった。このような急激な圧力上昇を防止するために、

二段式真空シールを製作をし、2020年9月から2021年1月にかけて回転・真空試験を行った。結果は良好でスパイクは完全に消え、2段シールにより急激な圧力上昇は完全に抑止できることが確認できた(図11)。図に示されるように実験を中止した時点で到達圧力は 1.1×10^{-6} Pa であり、実験を継続すればさらに高真空に到達したと予想されるが、次の実験の準備のために2021年1月8日で実験を打ち切った。ここまでの試験に用いられたターゲット試作機は、ターゲットとなる回転ディスクを持たないが、実機と同じ重さ・モーメントのダミーディスクを付加できるように設計されている。またシャフトの中には冷却水路がつくられ実機と同じ構造・仕様となっている。1月に実験を打ち切ったプロトタイプはメーカーの工場に送られ、そこでダミーディスク

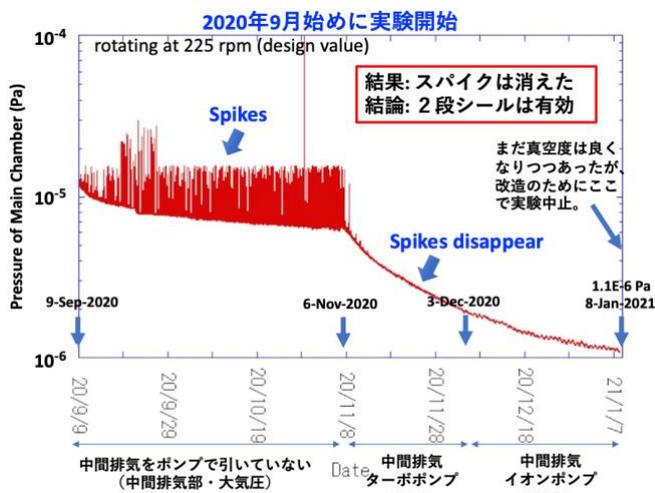


図 11: 中間排気付き 2 段階回転真空シールの試験結果

を付加した (図 12)。実機のターゲットは大部分が銅で造られたディスクで中に冷却水路があり、電子ビームが当たる外周部はタングステン合金のリングがロウ付けされる。しかしこのダミーディスクは価格を抑えるために全体が銅できており、また中に水路はない。この改造を終えたプロトタイプは 2 月に KEK に納品され、現在真空試験の準備を行なっている。回転真空試験は 4 月開始予定で最初の結果は 7 月末には判明すると考えている。その後も各種条件を変えて 2~3 年程度の長期試験を行い、回転真空シールの技術の完全な実証を行う。早稲田大学と共同で、高崎量子応用研究所においてターゲットの真空回転シールに用いる磁性流体の耐放射線性試験を実施した。その結果、著しい分解は観察されず、また照射した磁性流体を長時間の真空・回転試験で実際に使用することにより、十分な性能を維持していることを確認した。



図 12: ダミーディスク取り付け改造中のターゲット試作機(2 段階シール)

陽電子生成ターゲットの下流にある、陽電子収集用パルス電磁石、陽電子収集用加速空洞 (常電導) も電磁シャワーによる大きな入熱が問題となる。この部分の冷却設計を岩手大、岩手県工業技術センター、いわて産業振興センター、および岩手県の地元企業と始めた。

陽電子収集用パルス電磁石、陽電子収集用加速空洞の電磁的設計は CLIC、FCCee、SuperKEKB 等との共通性が高い。これらのグループと ILC との共同研究を立ち上げる準備を始めた。

陽電子源では、放射線量の高さとそれへの対応が課題であり、特に高い放射化に対応したメンテナンス方式が必要とされている。このようなメンテナンス方式の研究は、J-PARCの強度向上研究との強い相乗効果がある。そこで、J-PARC ビームライン、ミューオンターゲット、ニュートリノターゲットチームとの共同研究を開始した。

参考文献

- [1] 国際推進チーム (IDT)、<http://newsline.linearcollider.org/2020/09/25/icfa-and-the-ilcs-international-development-team/>
- [2] AWLC2020、<https://conf.slac.stanford.edu/awlc2020/>
- [3] “ILC Study Questions for Snowmass 2021”、<https://arxiv.org/abs/2007.03650>
- [4] “ILC Simulation Resources for Snowmass 2021”、<http://ilcsnowmass.org>
- [5] “ILD Interim Design Report”、<https://arxiv.org/abs/2003.01116>
- [6] “ILD Guest Membership”、<https://confluence.desy.de/display/ILD/ILD+by-laws?preview=/43904867/167951335/ILD%20guest%20membership.pdf>
- [7] LCWS2021、<https://indico.cern.ch/event/995633/>
- [8] <https://kds.kek.jp/event/35387/contributions/173242/attachments/135204/163990/sugimoto.pdf>