

素粒子原子核研究所活動報告（1）ILCグループ

令和4年1月11日

ILCに関する国内外の動き

2021年6月、現在 ILC 計画の推進母体となっている KEK がホストする国際推進チーム (IDT) は、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）のプランを策定し、「Proposal for the ILC Preparatory Laboratory (Pre-lab)」[1]および「Technical Preparation and Work Packages (WPs) during ILC Pre-lab」[2]を公表した。これと同時に、高エネルギー物理学研究者会議 (JAHEP) と KEK は、ILC 計画に関する主な課題について、課題解決に向けた取り組みの現状、今後の方策と見通しを ILC 計画提案者の立場からまとめた「ILC 計画に関する主な課題について」[3]を公表した。これらの文書の公表を受け、文部科学省は、2021年7月末、「国際リニアコライダー (ILC) に関する有識者会議」[4]を再開した。既に5回のオンライン会議が開かれ、学術的意義、技術の成立性、国際費用分担についての見直し等を中心に議論が行われている。今年度中には報告書がまとめられる見通しである。

これらの進展と並行し、IDT の物理と測定器を担当する作業部会である WG3 は、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[5]を ILC コミュニティの拡大を図る好機と捉え、最終報告書作成に向けた活動を続けている。それらの活動には、月例の公開オンライン研究会や、「ILC 白書」の取りまとめが含まれ、固定標的実験の検討等の ILC 施設の新しい利用の可能性を含む様々な物理の検討が理論家も交えて続いている。作業中のドラフトは「ILC 白書」のページ[6]からダウンロードできる。また、このページは、ILC 計画支持の署名募集ページにもなっている。是非、署名にご協力頂きたい。

これらの活動やその成果をまとめ今後の推進方針を議論するとともにコミュニティ拡大をはかるため、2021年10月26～29日にかけて、「ILC Workshop on Potential Experiments (ILCX2021)」[7]が、IDT、KEK、JAHEP ILC 推進パネル主催でオンライン開催された。約600名が登録し、従来のコライダー実験に加えて、固定標的実験や、物性や産業利用も含めた様々な ILC 施設利用の可能性が議論された。

IDT の枠組みでの活動が ILC 計画そのものの推進を主眼とするのに対し、ILC でのコライダー実験の準備を主目的とするのが、測定器コンセプトグループの活動である。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、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い、これを用いた解析作業を進めている。結果は、「ILC 白書」や、スノーマス研究、欧州で始まった ECFA ヒッグスファクトリー研究への入力となる。

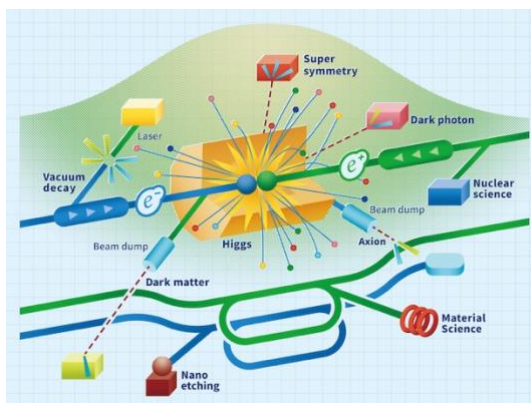


図 1: ILCX2021 会議の趣旨の図示 (ポスターより)

こうした中、素核研では、2021年10月、ILC計画推進体制の強化を目指し、ATLASグループとILCグループを統合し、新たにHigh Energy Frontierグループ(HEF)を発足させた。今後は、新体制の中でILC物理と測定器の検討を進めることになる。

物理の検討

素核研 ILC グループに属する総研大の学生が行っている物理シミュレーション研究の進展を中心に紹介する。一つ目は250 GeVにおける $e^+e^- \rightarrow \gamma H$ 反応のフルシミュレーション研究である。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、標準理論を超える物理が相対的に大きな効果をもたらすと期待される。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。前回報告以降、フルシミュレーション研究が完了し、最終結果が得られた。結論としては、当初の予想を超えて標準理論からの背景事象が大きく、この反応によって、HL-LHC等で期待される制限を超える結果を得ることは難しいことが判明した。ネガティブな結果であるが、これは新しい知見である。最終結果は博士論文の一部として近々最終審査される予定である。また、この解析は、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ILCX2021でも報告されている[8]。

二つ目は、いわゆるRadiative Return to Z過程と呼ばれる $e^+e^- \rightarrow \gamma Z$ 反応で、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、特にビーム偏極非対称度(A_{LR})測定を通して、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。また、エネルギー測定の較正にも大変有用である。この反応についても、フルシミュレーション研究が終了し、 A_{LR} 測定については、従来の精度(SLCでのSLD実験の結果)を約一桁向上できる見通しが得られた。また、光子のエネルギー測定については、120 GeVの光子について約80 MeV、250 GeV光子について約15 MeVの精度で、ジェットのエネルギー測定については、ジェットのエネルギー20~120 GeVの範囲で、約10 MeVの精度でのエネルギースケール較正が可能であることが示された。これも新しい知見である。これらの結果は博士論文の一部として近々最終審査される予定である。また、この解析も、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ILCX2021でも報告されている[9]。

三つ目は、 $e^+e^- \rightarrow \tau^+ \tau^-$ 反応である。これは、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、ILCの特徴を活かした 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。前回紹介した運動学的再構成に加え、バーテックス測定器情報を組み合わせた新しい τ の偏極ベクトル測定法を開発中である。この解析についても先日オンライン開催されたILCX2021でも報告されている[10]。

これ等の解析に加え、新粒子直接探索の検討も進んでいる。一つは、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研究である。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、簡易シミュレーションでもフルシミュレーションでも高い感度が期待できるとの初期結果が得られている[11]。もう一つは、理論家の協力を得て最近始めたミューオン $g-2$ 異常を説明できる超対称性模型

の ILC での検証に関する研究で、現在、超対称レプトン生成のシミュレーション研究が進行中である。

ソフト開発および MC データ生成

前述のように、ILD では、250GeV での物理検討をさらに進めるため、2020 年秋に大規模モンテカルロデータ生成 (MC-2020) を開始し、2021 年夏までに第 1 段階のデータ生成を完了した。MC データ生成は、素核研 ILC グループと日本歯科大学のメンバーの担当である。MC-2020 では、標準模型 MC データを最新のソフトウェア (Geant4 ベース測定器フルシミュレータと実際の実験と同様の事象再構成プログラム) を用い従来のデータに比し 10 倍以上高統計で生成することが目標である。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イベント生成プログラム、Whizard2.8.5 により作成されている。第 1 段階で生成したサンプルを表 1 にまとめる。

表 1: MC2020 の第 1 段階(2020 年 10 月~2021 年 7 月)により作成したイベントのプロセス数。Type 4 は Beamstrahlung により生じた光子が始状態に関与するプロセス、それ以外は $e+e-$ 対消滅反応である。表中、2f は終状態にフェルミオンが 2 つ現れる反応、4f は、WW、ZZ 生成等の終状態にフェルミオンが 4 つ現れる反応、6f は、WWZ、ZZZ 等の終状態にフェルミオンが 6 つ現れる反応である。また、例えば eL.pR は電子偏極が左巻き、陽電子偏極が右巻きの組み合わせを表す。

Summary of 1st step MC2020 sample (250GeV)				
Type	Process	Planned sample size		Produced 10 ⁶ (M) events
		eL.pR/eR.pL	eL.pL/eR.pR	
1	2f (excluding Bhabha)	5 ab ⁻¹	1 ab ⁻¹	1179.26
2	4f	5 ab ⁻¹	1 ab ⁻¹	437.42
3	6f	10k events		0.48
4	($e\gamma/\gamma e/\gamma\gamma \rightarrow$) 3f, 5f, aa_2f, aa_4f	1 ab ⁻¹		501.42
5	Zh, h \rightarrow inclusive	500k events each ($>1ab^{-1}$)		7.00
6	Zh, h \rightarrow exclusive	500k or 100k events each		29.40
Total				2154.98

生成したサンプルは、合計約 2.15G イベントである。この生成には ILCDirac を使い、ILCVO GRID に参加している 30 弱の CPU サイト上で、約 10M ジョブを実行した。作成した約 130TB のデータは、DESY および KEK の計算機センターに保存され、ILD グループの物理研究に使用されている。データ保存量の推移を図 2 に示す。KEK でデータ保存に使用した KEK-SRM は、頻繁なデータ読み書きに不向きなテープ媒体なので、使用が限定的なシミュレーションデータ用とする計画でスタートしたが、膨大な量なのでイベント数の多い 2f や 4f プロセス

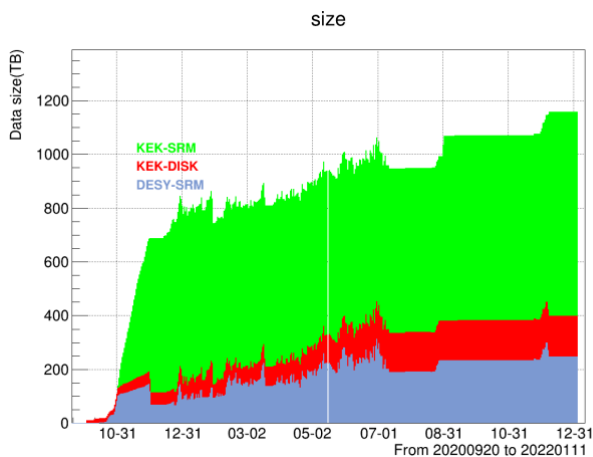


図 2: DESY および KEK に保存しているデータ量の推移。

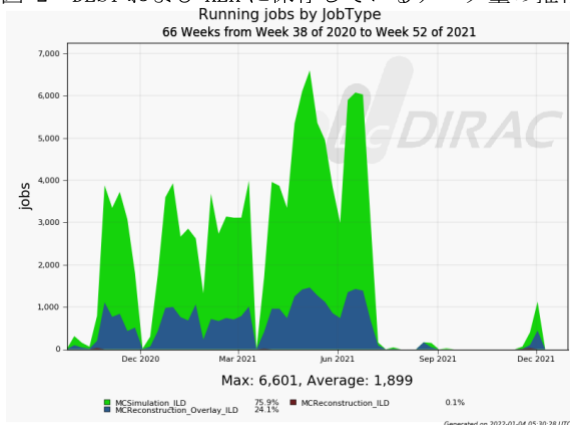


図 3: 同時実行ジョブ数の推移。緑はシミュレーション、青はデータ事象再構成のジョブ。

のツールの効率向上のための大幅変更案も検討したが、マンパワーの観点から、最低限今までの機能が維持できるレベルの変更にとどめた。更新したツールの確認のタイミングで、ILD グループのソフトウェア群である ILCSofT のパッチリリースが行われたので、その確認もかねて、測定エネルギー等の標準較正用データの生成を行った。その後、生成されていなかった 500 GeV での 2 ヒッグス生成反応 ($e^+e^- \rightarrow ZHH$ 等) の生成も行っている。

MC2020 の第 1 段階のデータ生成時点では、イベント生成上の問題のため、仮想光子が関与する 3f, aa_2f などのプロセスと Bhabha イベントの生成を行わなかった。今後これらのデータの生成を行う予定である。このうち Bhabha イベントの準備ができたので、間もなく MC データ生成を始める。これには約 2 か月を要する見込みである。

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、これまで、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きた。ここでは、素核研 ILC グループが進めてきた、VTX、TPC、CAL の開発研究、

の生成が行われた第 1 段階の後半ではシミュレーションデータの保存を断念した。DESY-SRM と KEK-DISK はディスク媒体であり物理解析の入力となる DST ファイルなどを保存している。

図 3 はジョブ並列度の推移を示す。2f プロセスの生成に集中した 2021 年 3 月以降は、トラブル対応に習熟したこともあり、最大で 7000 ジョブ弱、通常状態で 5000 ジョブ程度を並行して実行することができた。積算 CPU 使用量は、9.6M HS06 日であった。8 月以降はソフトウェア更新作業が行われていたので、小規模データ生成が行われた 12 月まで CPU 使用量は限定的であった。

第 1 段階のデータ生成終了後、中核ソフトウェア群の大幅なバージョンアップが行われた。、DIRAC は v6r22 より v7r2 へ、ILCDirac は v29r2 より v32r0 への更新である。この更新には、Python2.7 より Python3 への変更準備などが含まれていて、後方互換性がないため、我々のツールの変更も不可避であった。この変更に合わせて、我々の

また、素核研の低温グループと協力して行っている超伝導ソレノイドの設計、加速器と関連の深い Machine Detector Interface (MDI)部分、陽電子源の開発等の ILC 加速器研究について、最近の進展を報告する。

バーテックス検出器 (VTX)

素核研 ILC グループは、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。現在の中心課題は、FPCCD をバーテックス検出器として用いる際に問題となる放射線耐性改善のための研究である。電荷注入はそのための一つの方法であり、浜松ホトニクスとの協力により、図 4 に示すような電荷注入機構を持った FPCCD の試作を進めている。この試作品では、水平方向の転送レジスタの各ピクセルに外部から一定量の電荷を注入し、それによって放射線損傷によって水平転送レジスタ内に生じたトラップを前もって埋めておくことで、後から来る信号電荷がトラップされることを阻止し、信号電荷の減少を防ぐことを期待している。試作品完成後はそれらの放射線耐性の測定のために 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 1cm^2 あたり 10^{12} 程度まで照射する実験を計画しており [12]、そのための照射装置の開発を進めている。

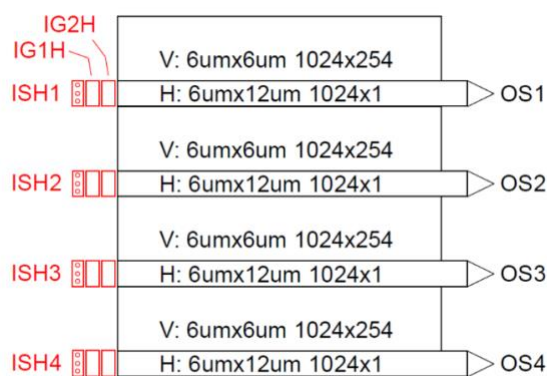


図 4: 電荷注入機構を持った FPCCD 試作品の模式図。赤い部分が電荷注入に関する入力ソース (ISHn) 及び入力ゲート (IGnH)。

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。特に、GEM を含む Micro-Pattern Gaseous Detector (MPGD) 読み出し TPC の位置分解能を与える解析的公式の導出や、MPGD 読み出し TPC に共通する問題であるガス増幅で生じた陽イオンのドリフト領域への逆流を抑止する陽イオンゲートの開発で大きな成果をあげてきた。既に、プロトタイプのビーム試験や宇宙線試験により、陽イオンゲートを装着した GEM 読み出し TPC によって、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。これらの結果は、近々最終審査される予定の総研大博士論文に含まれている。一方、これまでの陽イオンゲートの試験は、ゲート開または閉の静的な状態での性能評価にとどまっていた。そこで、2021 年度は、陽イオンゲートを想定されるビーム構造に対応するパルス運転した際の性能を評価するため、高電圧ベースラインを基準としてゲート電極をパルスできる特殊なパルサー、および歩留まり向上を狙った新製法による陽イオンゲートの設計と製作準備を進めた。これらは昨年末発注され、年度内に納品の予定である。並行して、

GEM 読み出し端部検出器モジュールの動作安定性をさらに高めるための開発研究を継続している。ここでは、ガス増幅機構の理論モデルに基づく理解が進み、タウンゼント過程の微視的なモンテカルロシミュレーションが、自由行程の関数として表したガス分子の電離確率に基づく解析的な計算により、かなり再現できるようになった。この成果は、ガス増幅率の安定化条件の探索等へ応用が期待される。

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对対応させ、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 (15 レイヤーのシリコン・タンダステンサンドイッチ型) を開発し、DESY でビーム試験した。図 5 は、2022 年初めに撮影したビームラインに設置された CALICE の SiW-ECAL 試作機の写真である。



図 5: DESY テストビームラインに設置された ECAL 試験機 (2022 年 1 月撮影)。

加速器-測定器インタフェース (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 に関して、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、さらに KEK 施設部と協力して、ILD 超伝導ソレノイドそして ILC 実験ホールなどの研究開発を行っている。特に、地上部を含めた ILC 実験ホール周辺の施設・設備の概念設計は、近い将来の ILC Pre-lab 期間中に行われる CFS 基本設計までに決定しなければならない。

通風ダクト、冷却用パイプなどの地下実験ホールへの導入を主垂直シャフトからユティリティシャフトへ変更し、それに伴って空調システムを地下に設置すると KEK 施設部からの提案を受け、種々の検討を行った。検討結果を前述の国際会議 ILCX2021 で発表した。同時に、ILD や SiD などの個々の測定器によらないユニバーサルな実験ホール床構造の提案を行った。

超伝導ソレノイド電磁石開発研究では、大型の重量物の陸上輸送とそれに伴う輸送路周辺の障害物処理の大幅な軽減が期待される、anti-DID を含めたソレノイドコイルの現地巻きの可能性等に関して、東芝株式会社と検討を進めた。また、北上サイトでの現地巻きのためのインフラストラクチャーと陸地輸送、特に障害物の扱い方の検討に対して東北 ILC 事業推進センターとの打ち合わせを行った。新超伝導線材の開発研究のため、N_bT₃ 線とアル

ミ合金だけで構成する線材の超伝導安定性の評価を 2022 年 1~3 月に A5052 合金のサンプルを用いて行う。来年度には強度のより高い A7020, A7068, A6082 (CMS) のサンプルも試験する。

QD0 のサポートシステムに関して、IDT WG2-BDS, WG3-MDI グループとの議論に基づき、図 6 のように、L*値を変更せず 4.1m のままで、BDS トンネルからのサポートするという条件で QD0 の振動解析を行うこととした。このとき、SuperKEKB での RVC (Remote Vacuum Connection) を ILC でも使用できるかの検討も行うこととした。

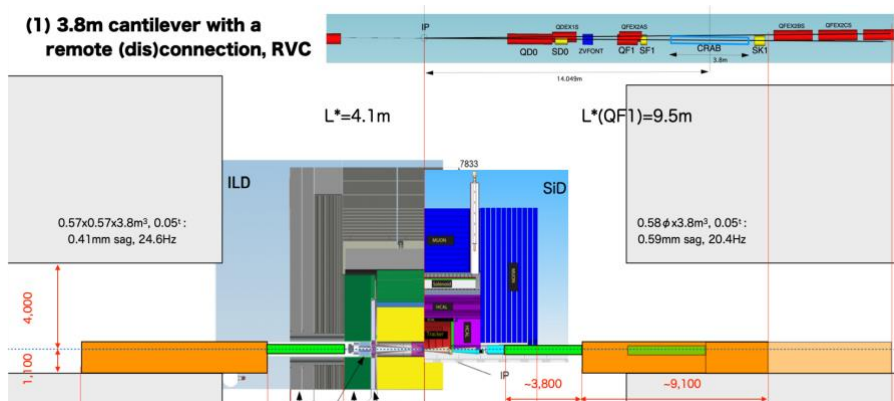


図 6: QD0 サポートシステムに関する新案。

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。

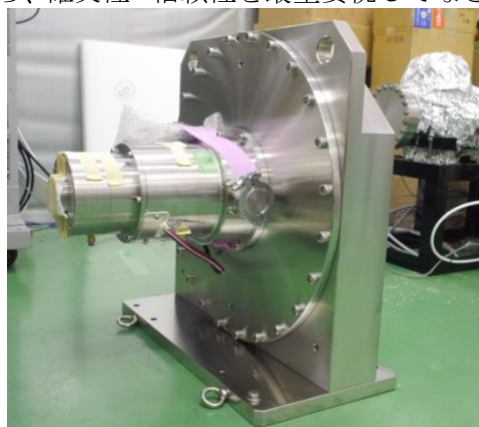


図 7: 先端加速器試験棟に設置された試作 2 号機 (ダミーディスク付加後)

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。素核研 ILC グループは当初から ターゲット開発を中心的課題として取り組んできた。2020 年 9 月から 2021 年 1 月にかけて行った、二段式真空シールを持つ試作 2 号機の回転・真空試験では、(一段式真空シールを持つ) 試作 1 号機において数時間に 1 回程度見られたスパイク状の圧力急上昇が完全に消えることが確認できた。ただし、ここまでの試験は、回転ディスクなしで行われた。先端に回転ディスク (ダミー回転標的) を設置した試験を行うため、試作

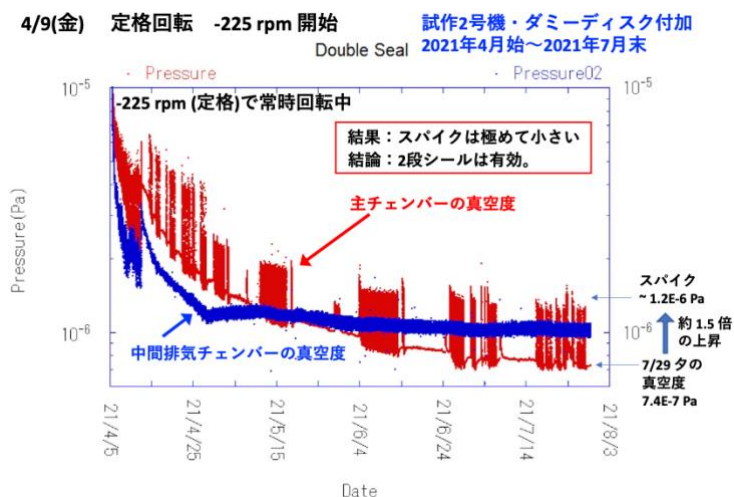


図 8: ダミーディスク付加後のターゲット試作

2 号機は試験後直ちにメーカーの工場に送られ、ダミーディスク付加の改造を行った。ここまでは、前回報告の通りである。改造を終えたプロトタイプは先端加速器試験棟に設置された (図 7)。2021 年 4 月からこのダミーディスクを付けた試作 2 号機の真空回転試験を行った。結果を図 8 に示す。ベース圧力 7.4×10^{-7} Pa を達成、スパイクは存在するがその高さはベースの約 1.5 倍と極めて小さく問題ない。これは、

実機大の回転ディスクをつけた状態での安定な運転可能性の実証である。

陽電子生成ターゲットの下流にある、コリメーター、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、広島大学、KEK が核になり、いくつかの企業の参入を得て 2020 年末に開始した。これらの企業の中には長年にわたって加速器の構成部品を手掛けてきた企業だけでなく、岩手県の地元の小さいが優れた技術をもつ企業群が参加していることが特徴である。これらの地元企業群は各々優れた技術を持つが加速器の経験は全くない。2021 年度はまず冷却のシミュレーションから始め、次に形状が一番単純なコリメーターの冷却性能評価試験機の製作を進めている (図 9)。この試験機は完成後に中心部にヒーターを仕込んで、いわて産業振興センターにて冷却試験を行いシミュレーションの結果との比較を行う予定である。なおこの冷却性能評価試験に用いるチラーは SuperKEKB 加速器グループのご好意で借用させていただいている。

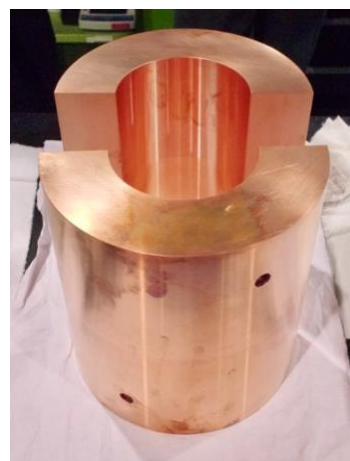


図 9: 冷却評価試験機のパーツ

参考文献

- [1] 「Proposal for the ILC Preparatory Laboratory (Pre-lab)」:
- [2] 「Technical Preparation and Work Packages (WPs) during ILC Pre-lab」:
- [3] 「ILC 計画に関する主な課題について」:
- [4] 国際リニアコライダー (ILC) に関する有識者会議 (第 2 期):
https://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chousa/shinkou/064/index.html
- [5] スノーマス 2021-2022 研究: <https://snowmass21.org>
- [6] 「ILC 白書」 home page: <https://agenda.linearcollider.org/event/9135/>
- [7] ILC Workshop on Potential Experiments (ILCX2021):
<https://agenda.linearcollider.org/event/9211/>
- [8] “Study of photon-associated Higgs production at the ILC”, Yumi AOKI:
<https://agenda.linearcollider.org/event/9211/contributions/49374/>
- [9] “Jet energy calibration using $e^+e^- \rightarrow \gamma Z$ process at the ILC”, Takahiro MIZUNO:
<https://agenda.linearcollider.org/event/9211/contributions/49458/>
- [10] “Tau reconstruction in $e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-$ at ILC250”, Keita YUMINO:
<https://agenda.linearcollider.org/event/9211/contributions/49277/>
- [11] “Exploring right-handed neutrinos at ILC”, Jurina NAKAJIMA:
<https://agenda.linearcollider.org/event/9211/contributions/49266/>
- [12] <https://kds.kek.jp/event/35387/contributions/173242/attachments/135204/163990/sugimoto.pdf>