

素核研研究活動報告 ILC 物理測定器グループ

令和 2 年 7 月

ILC に関する国内外の動き

昨年 3 月初めの文部科学省による ILC に関する日本政府としての初めての公式見解の表明の中で示された「正式な学術プロセス（日本学術会議が策定するマスタープラン等）で議論することが必要」との指摘、「欧州素粒子物理戦略等における議論の進捗に注視する」、「ILC 計画に関心を持って国際的な意見交換を継続する」との意向表示に関し、前回報告以降、特筆すべき進展があった。まず、本年 1 月末、日本学術会議によりマスタープランが公表された[1]。ILC 計画は学術大型研究計画に選択され、重点大型計画には入らなかったが、ヒアリング対象になった計画としてリストされた。翌月 2 月 20 日には、米国スタンフォードの SLAC 国立加速器研究所で ICFA/LCB（国際将来加速器委員会/リニアコライダーボード）会議が開催され、文部科学省研究振興局審議官、ILC 議員連盟議長からの日本国内における ILC 計画の状況に関する直接説明を踏まえた議論の後、ICFA 声明[2]が公表された。声明の中で ICFA は、「電子・陽電子ヒッグスファクトリーを次期エネルギーフロンティア加速器計画の最優先とするとのコンセンサス」を確認するとともに、日本での ILC 建設に対しあらためて期待を示した。さらに、前回報告した KEK による「ILC プロジェクト実施に関する提言」[3]に記載されている、ILC 研究所設立に先立つ準備段階の必要性に注意し、準備段階への移行を促進する「国際推進チーム」を KEK に設置するよう提言した。一方、先日、6 月 19 日には、欧州素粒子物理戦略の更新案[4]が CERN カウンシルで承認、公表された。欧州素粒子物理戦略は、「次期最優先コライダーは電子・陽電子ヒッグスファクトリー」と明言し、「ILC がタイムリーに実現する場合には、欧州の方針と適合しており、協働して取り組みたい」との意向を示すとともに、協働して取り組む場合の CERN の役割についても言及した。前回、2013 年の戦略更新における ILC に関する記述と比較すると、「参加」から「協働」へ、「提案を待つ」から「戦略に適合」と記載に進展が見て取れる。昨年 3 月の文部科学省見解表明の 3 点目にある国際意見交換については、特に米国からの強いサポートが表明されているが[5]、欧州戦略公表により、日欧の議論も次の段階に進むことが期待される。こうした中、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、8 月からは前述の KEK がホストする「国際推進チーム」が引き継ぎ、新しい推進体制がスタートする予定である。国際推進チームは、1~1.5 年をかけ、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。

前回、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)測定器グループで、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遂行し、これらを含め、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) を作成中である旨、報告したが、外部レビューを経て、本年 3 月これを完成、公表した[6]。IDR における測定器設計最適化では、パラメータの違いによる測定器の性能の差をよりはっきりと見るために、主として衝突エネルギー500GeV での物理過程をベンチマーク反応過程としてシミュレーションを行い、測定器の基本的な性能を、大小 2 つの測定器モデルについて比較評価した。IDR が完成し、また新たに米国の素粒子物理戦略策定プロセスであるスノーマス研究がスタートしたことを受け、今後、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う予定であり、現在、試験サンプルのチェックを進めている。一方、LCC の ILC 物理検討グループでは、ILC に興味を持つ新しい人材の勧誘を目指して、スノーマス研究で検討すべき物理の質問集を用意するとともに、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のための準備を進めている。こうした動きの中、ILD グループでは、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、希望すれば新規参加者でもできるように、ゲストメンバーの仕組みを作った[7]。スノーマス研究の ILC に関連する 8 つの作業部会の活動は既に始まっている。

物理の検討

素核研 ILC グループは、IDR に記載されている測定器最適化に深く関与してきた。ここでは、素核研 ILC グループで行った解析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過程であるが、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ある。また、ある種の標準模型を超える新物理模型 (例えば Inert Triplet Higgs 模型) では、標準模型からの大きなズレが期待される反応である。前回報告以降、ヒッグスがボトムクォーク対に崩壊するモードに加え、 WW^* に崩壊するモードについて解析を進めた。二つ目は、ヒッグスが直接終状態に現れないが、SMEFT によるヒッグス結合解析で重要な役割を果たす $e+e \rightarrow \gamma Z$ 反応である。この反応は、電磁カロリメータ (ECAL) による光子エネルギー測定の較正、Z 粒子のハドロンへの崩壊モードにおけるジェットのエネルギー較正のためにも重要な役割を果たす。図 1 は、Z 粒子が $\mu+\mu^-$ に崩壊するモードを使い、光子のエネルギーを運動学的に再構成することによる光子エネルギー較正の様子を示したものである[8]。運動学的再構成には、 $\mu+\mu^-$ の運動量と光子の角度のみを使い、追加の始状態放射

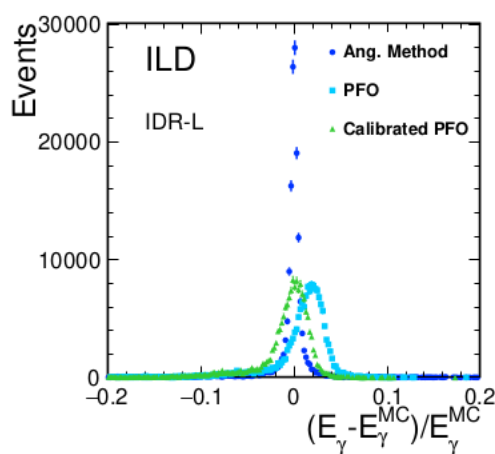


図 1 : $e+e \rightarrow \gamma Z$ 反応を用いた光子エネルギー較正の例

(ISR) 光子の存在を許した上で光子のエネルギーを推定する方法 (図中の Ang. Method) を取っている。較正前、ゼロからずれていた光子エネルギーの相対残差 (PF0) が、較正後 (Calibrated PF0) ゼロに構成されている様子が見て取れる。三つ目は、ヒッグス粒子のボトム、チャーム、グルーオンへの崩壊分岐比解析である [9]。この解析では、機械学習による解析が中心的な役割を果たしている。四つ目は、 $e+e\rightarrow\tau+\tau$ -反応である [10]。この反応では、フェルミオン対生成過程の中でも終状態のスピン偏極が測定できるため、例えば s -チャンネルに Z' 等の新粒子の寄与がある場合、 τ との結合のカイラリティを探るため重要な役割を果たすと期待される。

ソフト開発および MC データ生成

素核研 ILC グループは日本医科大のメンバーと協力して、ILD 標準 MC データの作成を担当している。ILD では 250 GeV での物理解析を系統的に行うことが、500GeV の MC データによる測定器最適化以降の課題である。500 GeV MC データサンプルの作成が終了した 1 昨年以降、イベント生成、シミュレーション、解析、データ生成等多岐にわたるソフトウェアの改善を行うとともに、新しい OS への対応を行ってきた。従来より 10 倍程度多いイベント統計量のデータを作成することが、MC データ生成上の課題である。ほぼコードの開発は終了し、現在は、データ生成直前のシステム全体の検証を行っている段階である。

このために、本年 3 月以降、Single Particle イベントやいくつかの物理イベントを作成し物理解析グループによるデータの確認を進めている。物理イベントとしては、 $e+e\rightarrow\mu+\mu-H$ 、 $\tau+\tau-$ 、 $l\nu qq$ 等のイベントである。今までに ILCDirac で 7 つの Production タスクを実行し、CPU 資源を延べ約 7000HepSpec06 日分消費し、7TB 強のデータを作成した。データは DESY のディスクシステムを Tier0 として使用し、物理解析に使用する一部データのみ KEKCC に複製している。500GeV のデータ生成で使用された大小 2 つの測定器モデル (ILD-L と ILD-S) のうち、今回は ILD-L モデルでのみでシミュレーション・データ生成を行っている。データ解析使用するカロリメータモデルは ECAL も HCAL アナログ読み出しを標準としているが、セミデジタル HCAL およびシンチレータ ECAL の場合についての解析も解析コードの確認ができ次第行う。シミュレーションデータは CPU 時間を節約するためにどちらのカロリメータ構成でも解析できる用に作成されている。

今回作成したデータの解析により、Whizard2 イベント生成プログラムの問題 (偏極 τ の生成や質量パラメータの設定) やバレル・エンドキャップカロリメータ境界領域での Muon 同定効率の低下などの問題が判明したので、コードの修正を行い、再度テストプロダクションを行う予定である。

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、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、バーテックス検出器のための荷電粒子センサーの候補として、高精細画素 CCD (FPCCD) の研究開発を行っている。FPCCD の最大の強みは、2 粒子分離能力である。これを実証するため、ピクセルサイズ 6 ミクロン角の小型プロトタイプ宇宙線テストを行った結果、垂直に近い角度で入射した宇宙線(天頂角 10 度以内)に対し、ほとんどの場合、信号が 1 ないし 2 ピクセルに収まり、4 ピクセルを超えて広がらないことを確認した。この結果から、FPCCD を用いたバーテックス検出器は非常に優れた 2 粒子分解能を持つことが実証できた。

FPCCD は、その放射線耐性を高めるため、零下 40°C 程度で運転する必要がある。そのため測定器冷却システムとして、2 相 CO₂ を冷媒として用いた冷却システムの開発も行っている。これまで Belle-II や ATLAS IBL で用いられた 2 相 CO₂ 冷却システムでは冷却対象温度まで冷やした液化 CO₂ を測定器まで液体用ポンプで送っているのに対し、我々はコンプレッサーで CO₂ ガスを圧縮しコンデンサーで液化された常温の液化 CO₂ を測定器近傍で冷却対象温度まで下げる方式を追及している。図 2 に冷却システム試作 3 号機の写真を示す。今後、この試作機の性能評価と、この試作機を用いての測定器側(バーテックス検出器及び TPC)の冷却機構の開発を進める予定である。

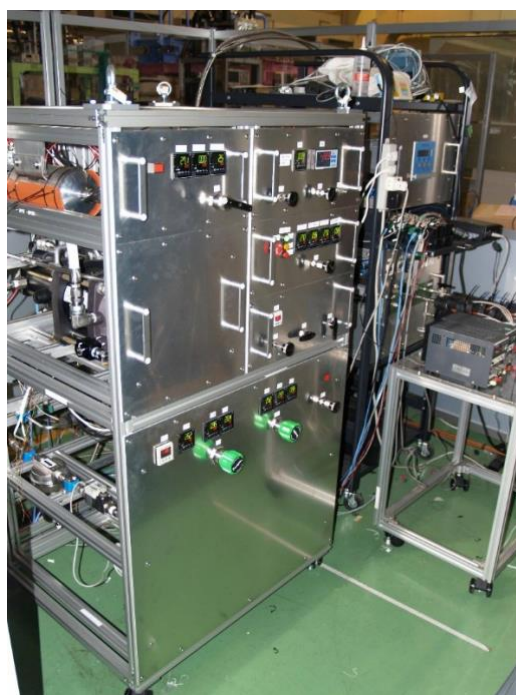


図 2 : 2 相 CO₂ 冷却システム試作 3 号機。

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。特に、GEM の増幅率の不均一性の主要な原因が GEM 厚みの不均一性と想定されるため、GEM の厚みと増幅率の関係を明らかにするためのシミュレーション、実験の両面からの研究を進めている。現在、GEM の厚み測定システムを設計/制作中である。

また、シミュレーションによる GEM の素材の検討も進行中で、放電耐性があり、剛性が高く支持構造の簡略化が期待できるガラス GEM の ILD-TPC への応用可能性を研究中である。最適な構造を探るため、GEM の穴径やピッチ、厚みや印加電圧を様々に変えたシミュレーションを進めている。

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、来る大量生産を見据え、読み出しに使用する Si センサーの温度毎の I-V 特性の自動測定システムを開発している。

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。そこで素核研 ILC グループでは、測定器運転に必要な設備 (電源、冷却、ガス、レーザーと設置空間など) の仕様の取りまとめ、それに基づく地下実験室に併設するユーティリティ用側室 (USC) の設計を、アクセストンネルから実験ホールへトレーラーによる搬入・搬出を条件として見直した。これらに関しては、ILC の建設、施設、サイトを検討する CFS グループとの共同作業が進行中である。また、日本での製作を前提とした ILD 超電導ソレノイドのコストの評価を行った。ILD Design Report (IDR) の作成の中で欧州の共同研究者により同様のコストの再評価も行われた。前者は日本のメーカーによる概算額、後者は LHC-CMS ソレノイドの実績額に基づいたものであったが、ほぼ等しい金額であった。直径 8m、長さ 7.4m、重量 195 トンの ILD 超電導ソレノイド磁石は工場で作製され、陸上輸送のために長さ方向に 3 分割される。また、ソレノイド磁石の外側に設置される anti-DID 超電導コイルも同工場で作製され、陸上輸送のために長さと同方向にそれぞれ 2 分割、合計 4 分割される。これらは工場から北上サイト近くの気仙沼港まで海上輸送される。水揚げ後 ILC 衝突点までの陸上トレーラー輸送の方法と途中の障害物などの有無の調査と概算輸送費用の見積りを業者に委託した。全長約

25kmの調査経路上に在るトンネル、函渠、陸橋のいずれの構造物も物理的な寸法上、支障なく輸送できることが確認された。全日程は3晩の運行とされた。通過時に一時撤去の必要な道路上の障害は154箇所あった。このうち上空障害は60箇所であった。積載高さを5.1mから4.9mとすれば障害箇所は約100箇所程度まで減少できることがわかった。道路通行上の許認可と障害箇所の対策のための費用を含まない、ソレノイド磁石とanti-DIDコイルの概算輸送費用を得た。

加速との接続分で重要なもう一つの検討事項は、測定器に対する加速器由来のバックグラウンドである。素核研 ILC グループでは、これら加速器由来のバックグラウンドのシミュレーションによる検討を行なっている[11]。バックグラウンドの起源としては、ビーム衝突の際に起こるビームストラールング、最終収束系上流のコリメータセクションで発生するミュオン粒子、ビームダンプで発生した中性子を考慮し、異なるビームパラメータ、磁場に対しバックグラウンドの変化を評価した。初期の結果からは、ミュオン粒子バックグラウンドの影響は小さく、また、中性子も測定器損傷等の大きな問題にならないことが分かったが、今後、さらに詳細な検討を進める。

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準備研究所の設立時近辺が目安と考えられている。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

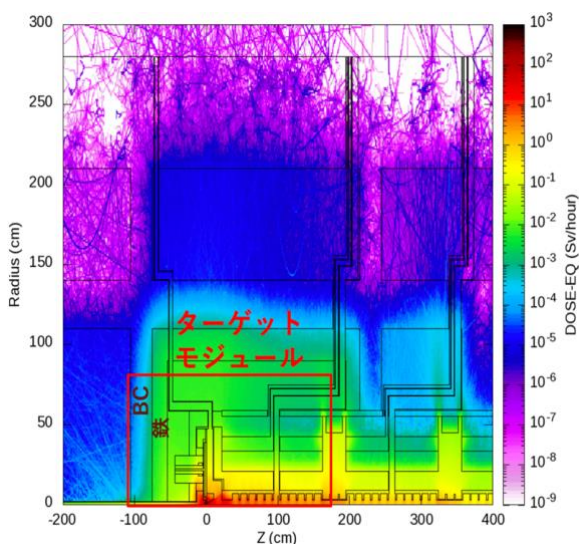


図3：ビーム1年照射冷却100時間後の等価放射線量(DOSE-EQ)

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、メインリニアックのビームを使用しないため、メインリニアックの建設・運転とは独立して陽電子源を建設運転できる。そこで、陽電子源のコミッションをメインリニアック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（図3）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4に示す。

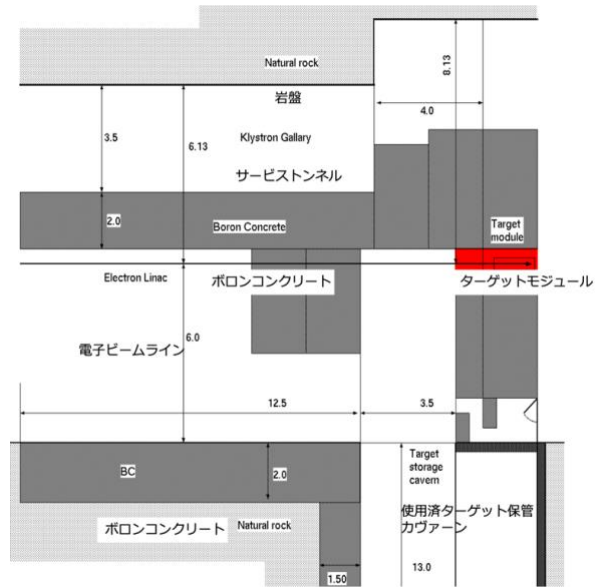


図 4: 陽電子生成ターゲット付近のトンネル概念設計

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。これは要求値の5倍の圧力である。しかし、時折ではあるが、圧力の急激な上昇が観測された。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設計した。2020年3月に二段式真空シールの試作品の製作を完了し、7月から真空試験を開始した。また、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、著しい分解は観測されず、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。照射した磁性流体に対するガスクロマトグラフィー試験及びゲル浸透クロマトグラフィー測定を実施した結果、両方の測定において分子の架橋の発生が認められた。しかし、一般的には架橋は真空シール性能の低下を引き起こすものではないと考えられる。また、また、両方の測定において強磁性流体の分解が観測されたが、分解の量は許容可能なレベルにとどまった。

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] “日本学術会議マスタープラン 2020”、
<http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/kohyo-24-t286-1.html>
- [2] “ICFA 声明”、<https://www.kek.jp/ja/newsroom/2020/02/25/1400/>
- [3] “Recommendation on ILC Project Implementation”、High Energy Accelerator Research Organization (KEK), Oct. 1, 2019,
https://www.kek.jp/ja/newsroom/attic/20191001_%20ILC%20Project.pdf
- [4] “欧州素粒子物理戦略更新”、
<http://europeanstrategyupdate.web.cern.ch/sites/europeanstrategyupdate.web.cern.ch/files/CERN-ESU-015-2020%20Update%20European%20Strategy.pdf>
- [5] “Talk by Melinda Pavek (US embassy in Tokyo)”、
https://agenda.linearcollider.org/event/8217/contributions/44502/attachments/35114/54363/Sendai_ILC_draft_remarks-final_for_Jim.pdf
- [6] “ILD Interim Design Report”、<https://arxiv.org/abs/2003.01116>
- [7] “ILD Guest Membership”、<https://confluence.desy.de/display/ILD/ILD+by-laws?preview=/43904867/167951335/ILD%20guest%20membership.pdf>
- [8] ILD-PHYS-PUB-2019-006, “Photon Energy Calibration using $e^+e^- \rightarrow \gamma Z$ at the ILC”, Takahiro Mizuno
- [9] ILD-PHYS-PUB-2019-008, “Hadronic branching ratios of the Higgs: $H \rightarrow bb/cc/gg$ ”, Masakazu Kurata, Ryo Yonamine
- [10] ILD-PHYS-PUB-2019-004, “ILD benchmark: a study of $e^-e^+ \rightarrow \tau^-\tau^+$ at 500 GeV”, Daniel Jeans and Keita Yumino
- [11] ILD-TECH-PUB-2019-001, 24 March 2020, “Machine-related backgrounds in ILD”, Daniel Jeans and Akiya Miyamoto