

素粒子原子核研究所・計算機グループの現在の主な活動は Belle II コンピューティング・グループに参加し、実験におけるオンライン・オフライン間 RAW データ転送とその分散管理、さらに分散計算環境の改良およびその定常的運用に従事している。またこれと並行して、国内外の研究機関と計算機ならびにソフトウェアに関する情報を共有し、世界的な動向を注視しつつ、KEK で行われている素粒子原子核実験や将来計画における持続可能な計算機環境を目指して活動を行っている。

1. Belle II 分散計算環境で得た経験の波及

Belle II 実験では、世界中の研究機関と協力して膨大なデータを処理するため、WLCG (Worldwide LHC Computing Grid)[1]で培われた技術を基盤とする分散コンピューティングシステムを構築している[2]。KEK は RAW データセンターとして位置づけられ、Raw データの一次保管、再構成処理、データ配布の中心的役割を担っている。海外にも複数の RAW データセンターを持ち、Raw データの二重化やデータアクセスの負荷分担を行っている。またさまざまな形態の計算資源を取り込み、MC 生成や解析を分担し、世界規模の分散環境を通じて効率的に研究を進めている。この仕組みを支えるのが、グリッドコンピューティング技術である。Belle II では WLCG の経験を活かし、LHCb 実験が開発した DIRAC [3]を基盤とする「BelleDIRAC」という統合的ジョブ・データ管理システムを導入している。研究者は Web ポータルや X.509 という認証証明書を用いてジョブ投入やデータ取得を行い、バックエンドでは自動的に最適な計算資源やデータ保存先が選択される。また、データ管理には Rucio を採用し、世界中のストレージ間でのデータ複製や削除、アクセス制御を効率的に行っている。転送には FTS (File Transfer Service) などの仕組みを利用し、大量データを安定的かつセキュアにやり取りする体制が整えられている。

一方、KEK で行っている他の実験では、コラボレータの世界的分散、データ量の肥大化などから「単一機関におけるストレージ逼迫」や「海外を含む共同利用者間での高速かつセキュアなデータ転送」といった課題が昨今話題に上るようになった。これらの課題に対しては、Belle II の経験が大いに参考となる。たとえば、データ転送については、所外から直接アクセス出来ないディスクに対して scp を用いて転送するよりも、所外にアクセスの開かれたグリッド・ストレージ・システムに対してグリッド転送ツールを使う方が速くかつ容易に転送出来る。更に FTS に代表される信頼性の高いツールを導入し、認証局による証明書を利用してアクセス制御を行うことで、セキュアな環境を整備できる。FTS は一つの転送ジョブを複数の並列スレッドに分割し同時に送信したり、転送元や転送先のネットワーク負荷をモニタリングし、過剰な負荷をかけないようにスレッド数を自動調整するなど、scp でデータ転送するよりも効率が良い。また他の例として Belle II 実験では、ソフトウェアの配布とバージョン管理の効率化・一貫性確保を目的として、CVMFS (CernVM-FS) [4]を採用している。ここで、CVMFS は、CERN が開発したソフトウェア配布用の分散ファイルシステムで、高エネルギー物理の大規模実験 (LHC 実験、Belle II など) で標準的に利用されており、研究者はどの計算拠点でも同じソフトウェア環境をすぐに利用できるという利点がある。Belle II では、オフライン解析コード (basf2) や対応ライブラリを分散環境へ迅速かつ信頼性高く展開するために不可欠なインフラとなっている。これら他の実験でも有益なツールがあるものの、実際に実験側でこのようなツールを使用したいと思っても、グリッドに関する知識が無ければ、導入はかなりハードルの高い作業

となってしまう。

素核研・計算機グループでは、Belle II 実験で利用しているさまざまな分散コンピューティングシステムに係わる有益なツールを自分の実験でも試してみたいと考えている研究者や、セキュアかつ高速のデータ転送を行いたいけどどのようにすれば良いのか分からないという研究者の質問などを受ける機会も増えてきている。実際、KOTO 実験が直面しているデータの分散管理などの問題について計算機グループに問い合わせがあり、その後 KOTO 実験と現在の計算資源量、計算環境、どのようなデータをどこ（国内外の研究機関）共有したいか、人的資源などについて意見交換を行った。これらを踏まえ、KOTO 実験では、計算科学センターの協力の下、グリッド技術を利用して必要な相手先とデータ転送ができるようなシステム実現に向けて作業中である。

なお、素核研・計算機グループでは前述したような質問を受け付ける窓口として `ipns-computing@ml.post.kek.jp` を設けている。是非、活用していただきたい。

2. 認証システムの移行

主に LHC 実験のための分散コンピューティング基盤を整備している WLCG では、現在ユーザーの認証と権限管理の仕組みの根本的転換が進められている。これまでは、X.509 という規格を用い、各個人に発行されたグリッド証明書によって個人認証を行い、それを利用してコンピューティング資源を利用する際に実験組織の情報を付加する VOMS というシステムを用いて各人の資源利用の権限を判断していたが、世界的に利用されているウェブの技術では、アクセス権限にトークンを用いる事が主流となっており、今後の技術的進展や継続性を考慮してウェブ・トークンを用いる事が数年前に決定されて移行準備が進められている。ウェブ・トークン発行には新たに開発された IAM というシステムを用い、またウェブ・トークンへの切り替えは異なる局面毎に段階的に進められるため、VOMS の機能も IAM に付加し、X.509 とウェブ・トークンの双方を平行して利用出来る様にしている。

Belle II 実験もこの WLCG に参画して共通の分散コンピューティング環境を利用しており、同じく認証と権限管理の仕組みの転換に向けて準備を進めて来ている。計算科学センターに新たに導入された新しい方式の認証・権限管理システム IAM を試験的に使うため、必要なユーザーの情報を VOMS システムから移植し、プロダクション・ジョブを各コンピューティング・サイトに投入するなどの試験に供した。現在は、今秋からの本格的稼働に向けて、旧システム内の全ユーザー情報を新システムに移植する準備を進めているが、円滑な移植のためには情報の不足・重複などを修正する必要がある、整理を進めている。この新システム IAM は、この先数年間は旧システム VOMS と平行運用する予定であり、二つのシステムの情報の整合性を保つための方法について計算科学センターと協議を重ねている。

3. 粒子物理コンピューティングサマースクールへの協力

高エネルギー加速器研究機構（KEK）つくばキャンパスでは、粒子物理分野における計算機利用の教育と人材育成を目的とした「粒子物理コンピューティングサマースクール」を開催している。

これは、粒子物理コンピューティング懇談会（PPCC）という、素粒子・原子核・宇宙物理といった粒子物理分野におけるコンピューティング技術活用の推進を目的としたコミュニティ（有志）が中心となり、これらの分野に属する若手研究者や学生が最新の計算技術を集中的に学ぶ場として位置付けられている。

2025 年度のスクールは 7 月 28 日から 8 月 1 日まで、KEK 小林ホールを会場に開催し、講義と実習を組み合わせたプログラムが実施された[5]。参加対象は主に修士課程の大学院生であり、今年度は全国の大学から 30 名程が参加した。幅広い背景をもつ学生が一堂に会して議論や実習に取り組む点が特徴である。

プログラムは前半に計算機基礎や最新のコンピューティング技術に関する講義を行い、後半では受講生が選んだテーマに基づく実習と成果発表を行う構成となっている。具体的には、解析で必須となる ROOT や Python の講義に加え、機械学習や深層学習、さらには量子コンピューティングに関する講義が組まれている。素核研・計算機グループもこのスクールに積極的に関わっており、主に Belle II 実験で得た知識をもとに、今年度は新しい実習課題として「分散コンピューティング」を実施した。この実習では、複雑なシステムと思われがちなグリッド環境を、バッチシステム、グリッド認証システム、Computing Element、Storage Element、DIRAC などの主要なコンポーネントに焦点を当て、それぞれを学ぶことで、最終的にグリッドがどのように機能し、大規模国際共同実験のデータ解析を支えているかを学ぶことを目的としている。実習環境はクラウド上に構築され、最新の計算資源を用いたハンズオン形式で学習できる点も魅力である。最終日には全員が成果を発表し、優秀な発表をおこなった 2 名に優秀発表賞（うち 1 名は実習に「分散コンピューティング」を選択）を授与した。

4. 参考資料

[1] : <https://cern.ch/wlwg>

[2] : T.Hara for the Belle II Computing group, "Computing at the Belle II experiment", *J. Phys. Conf. Ser.* 664 (2015) 012002

[3] : <https://dirac.readthedocs.io/en/latest/>

[4] : <https://cernvm.cern.ch/fs/>

[5] : <https://wiki.kek.jp/spaces/PPCC/pages/457541860/PPCC-SS-2025>