

■ 研究紹介

Belle II でのコンピューティング と その先にあるもの

KEK 素粒子原子核研究所

原 隆宣

takanori.hara@kek.jp

2015 年（平成 27 年）5 月 9 日

1 はじめに

現在の素粒子実験においては、加速器の高エネルギー化や高輝度化、観測装置の大型化と同時に、精密測定の実験から検出器の細密化、出力信号情報の詳細化が進んでいる。これによる出力データ量の増加は、これまでの実験、特に計算機のあり方を変えた。CERN での ATLAS[1]および CMS[2]実験による Higgs 粒子の発見の口頭発表や論文[3,4]において、検出器、加速器と並んで計算機の重要性が言及されている。これは世界規模の分散計算モデルの実現とその成功を意味している。LHC 実験では、世界各地にある計算機資源をネットワークで有機的につなぎ、それら計算機の仕様の違いを吸収し、かつ必要な情報を統一的に取り扱えるようにするミドルウェアを導入することで、世界規模の分散計算モデルを現実化した。そして、日本で行われる次世代 B ファクトリ実験である Belle II でも、いよいよ分散計算モデルを導入し、そして運用することを目指し、国内外の研究者が日々研究と活動を展開している。そこで、この場を借りて、Belle II 実験における分散計算モデルの現状を紹介する。

2 Belle II 分散計算モデル

2.1 要求

2016年初めからコミッショニングを開始する SuperKEKB 加速器は、KEKB 加速器の 40 倍に相当する瞬間ルミノシティ $8 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ を目標としている。そして加速器の性能が目標値に達した際には 1.8 GB/s の生データが検出器から常時転送、記録され、最終的に積算ルミノシティにして 50 ab^{-1} 、容量にすると約 100PB に達するデータが生成されると期待される。さらにこの生データを処理し、物理解析に使用できる形式へ変換、保存し、また実データに対応したシミュレーションの作成を行う必要もある。これらのデータも合わせて同じく 100PB 規模である。一方、これらの処理、作成などに要する CPU 量も約 10 万コアとなる。これ

は CERN で行われている大型ハドロン衝突型加速器 (LHC)[5]における ATLAS や CMS 実験が Run1 時に実際に使用した資源量に匹敵するものである。

さて、これらの計算機資源を一研究機関で賄えるものか。前身にあたる Belle 実験は 1999 年から 2010 年の運転期間中に約 1 ab^{-1} のデータを記録した。そして、このデータの処理、シミュレーションの作成、ユーザー解析に至るほぼ全てを一か所の研究施設である KEK で行う、一極集中型計算モデルを採用した。これは、Belle 実験がこれまで発信した数多くの物理解析結果から証明できるように、このデータ量に対して非常にうまく機能した。しかし、Belle II 実験はどうであろうか。Belle 実験の 50 倍に相当するデータを滞りなく処理することが、果たして一研究機関にできるのか。

もう一つ考慮すべきは、共同研究者が地理的に世界中に分布していることである。Belle II 実験には日本はもとよりアメリカ、ドイツ、韓国、イタリア、台湾、オーストラリア、カナダなどアジア、ヨーロッパ、北米から 23 ヶ国・地域、99 研究機関・大学に所属する約 600 人の研究者が参加している。大型国際共同実験では各国・研究機関が担当する検出器を決め、それぞれが協力して検出器全体を建設していくことが常識である。そして LHC 実験の成功以降、検出器同様、計算機においても各国・研究機関の分担を明確にし、協力して計算機の運営を行うことが実験を成功に導く鍵となっている。ここで、Belle II に参画している各機関に目を向けると、そこには種類の異なる多くの計算機資源が存在している。これらをうまく利用することができないものか。

これら二つの問いかけに対する答えはすでにある。LHC 実験で成功したグリッド・コンピューティング（以下グリッドとする）である。これは LHC 実験のデータ解析に必要な計算機資源を整備するために作られた WLCG (Worldwide LHC Computing Grid)[6]が主体となり、必要なミドルウェアの開発・実装を行うことで実現された。そして開発された様々な基盤・ツールは LHC 実験以外でも使用することが許されている。また、Belle II 実験参加機関の多くは、既に

LHC 実験にも参加しているため、グリッドに必要な設備が整っているところが多い。KEK は WLCG には所属していないが、計算科学センターによって 2006 年にはいくつかの実験の VO (Virtual Organization) をサポートし、運用を開始している。さらに昨今、ポーランド CC1[7] やオーストラリア NeCTAR[8] などの学術・研究用クラウド、Amazon EC2 をはじめとする商用クラウドが計算機資源を無償・有償で提供し始めている。一方、日本の大学ではグリッドやクラウドを管理・運営する人的資源がない代わりに、小規模ではあるが各研究室レベルで計算機クラスタを組み上げ使用しているところが多い。そこで、既成のグリッドだけではなく、クラウド、計算機クラスタなど、仕様も環境も異なる計算機資源を統一的に管理し、ユーザーはデータや CPU が一体どこにあるのかを気にすることなく、あたかも一つの巨大な計算機として使用できる環境が必要となる。

前述したように、これを実現するための技術はすべてではないが、すでに LHC 実験で多くが確立、実証されている。しかしこれらをただ単に採用し、組み上げるだけでうまく行くほど世の中は甘くない。ここで検出器の開発を考えるとよい。実験で用いられる検出器を最終的にインストールし、データを取り、物理結果にまでつなげるためには、まずどういう物理を目的とし、それを満たすために必要な検出器の仕様を決め、研究者自らまたは業者と共にその実現に向けて試行錯誤する。その際、すでに実現する技術があるのであればそれを採用し、なければ研究開発する。計算機についてもまったく同じなのである。すでに確立されている技術は、特定の試験では機能するが、物理の目的も検出器の性能も違う Belle II に適しているかどうかはわからない。我々に不必要な技術が組み込まれているために処理速度が遅かったり、また我々に必要な機能が足りなかったりする。つまり、すでに確立されている技術は一つ一つの数多の点にすぎず、必要なものがなければ我々が点を作るしかない。そして、これらの中から点を選択し、線でつないで全体として機能するものに仕上げなくてはならない。この、必要な点を作り、点を選択し、線でつなぐ、というところが重要なのであり、まさしく Belle II 計算機グループが現在全力を尽くしているところである。

2.2 デザイン

話を元に戻そう。Belle II 計算機が行うべき役割は、

- ① 生データの処理：検出器から送り出されるデータから解析に使用できるデータを生成する。
- ② シミュレーション・データの作成：実験データのできる限り再現し、検出器および理論モデルの不定性や目指す物理の検出効率を評価するために用いられる。統計誤差の影響を減らすため実験データの数倍のシミュレーション・データを作成する必要がある。

- ③ 末端ユーザーによる物理解析：約 200 項目の物理解析をユーザーが並行して行う。

である。これを分散計算環境で効率よく実現するために、各役割に応じて、LHC 実験と同様、分散計算モデルとして階層構造を取り入れた (図 1 参照)。

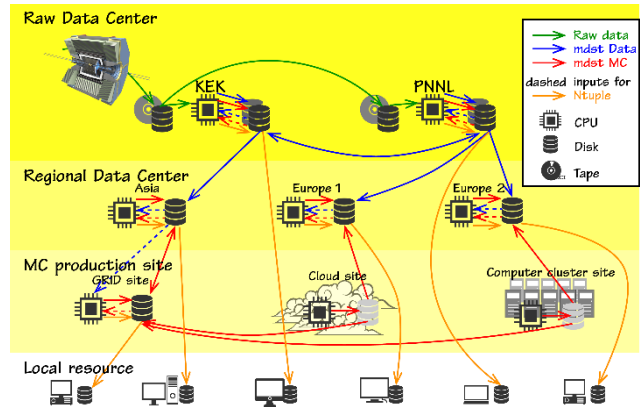


図 1 Belle II 分散計算モデルの概念図

①については、SuperKEKB 加速器、Belle II 検出器が KEK に建設されるため、生データの保存とプロセスは、階層構造の一番上に位置し “Raw Data Center” とよぶ KEK で行う。そして、同じ階層に属する米国 PNNL (Pacific Northwest National Laboratory) にも転送し、生データを二重化する。ここで、実験開始後は検出器の系統誤差やソフトウェアのチューニングおよび改良を、データ取得と並行して行わなければならない。そのため、特に実験初期においては、それまでに得られた生データを最新の検出器の較正定数と再構築ソフトでプロセスし直す必要がある。この再プロセスを複数箇所で行うことで高速化も図る。なお、生データの二重化については、実験開始後 4 年目以降は分散計算モデルを変更し、PNNL だけでなくヨーロッパやアジアの研究機関にも分散を始める予定である。

プロセス後のデータは mDST (mini Data Summary Tape) と呼ばれる解析用圧縮データ形式で保存し、いくつかの計算機サイトに分散、レプリカを作成する。これには二番目の階層である “Regional Data Center” が当たる。現在、ヨーロッパはドイツ、イタリア、スロベニアが分担する予定である。また Raw Data Center は生成した mDST も保存する計画なので、アジア、北米、ヨーロッパにそれぞれ同等の mDST を持つサイトが作られる。

シミュレーション・データ (②) は作成する際にインプット・データセットをあまり必要としない。そのため、分散計算環境で作成する用途として適している。これはグリッド上だけではなく、大きなストレージ・システムを持たず、長期にわたって生成したデータを保存することが難しい学術・商用クラウドや計算機クラスタでも十分活用できることを意味する。特にクラウドを使用すれば、これまでピー

ク需要期に必要とされる計算機資源を満たすようにデザインされてきたモデルを、定常使用分に重点を置いてデザインし、必要なときにだけクラウドを使用することで、より効率的な計算機モデルを組み立てることが出来ると期待されている。これらのサイトは三番目の階層にあたる“MC Production Site”に属する。

末端ユーザーによる物理解析(③)も分散計算環境を用いて行う。通常、分散計算環境を使って解析する際、ユーザーが解析したいデータは世界中のどこかにあるストレージに保存されている。これを解析するにはいくつかの方法がある。たとえば、データが保存されているサイトにジョブを投入する、またはジョブを投入したサイトにデータを持って来る、あるいはジョブを投入したサイトから他のサイトにあるデータを直接読みに行く、などである。現在、我々のグループでどの方法が最適か検討しているところであるが、いずれにせよ、このユーザーによる物理解析の結果はNtupleなどのデータで出力し、ジョブの終了後、各ユーザーのローカルなストレージに転送する(図1の“Local Resource”に対応)。

簡単に Belle II 分散計算モデルを見たが、この背後には我々で改良、開発しなくてはならない項目がたくさんある。たとえば、データの転送一つをとっても、生データを KEK から PNNL へ移動させる 1 対 1 転送、Raw Data Center や各サイトで作られた mDST ならびにシミュレーション・データの多対多の転送、ユーザー解析出力のカオス的データ転送、またデータのサイズも数 MB から数 GB まであり、どのように制御し、転送の効率を上げるのか、大きな課題である。

2.3 分散計算モデルの導入状況

Belle II 分散計算環境で使用するソフトウェアは、独自開発が必要な部分と既存のツールを利用する部分とに分けられる。我々のシステムの基幹となるものは元来 LHCb[9]実験のために開発され、現在は独立したプロジェクトとして様々な実験に使われ始めている DIRAC[10]である。DIRAC はヨーロッパ・アジアで使われている EMI (European Grid Initiative)[11]やアメリカで使用されている Open Science Grid (OSG)[12]という異なるミドルウェアを用いたグリッド環境、さらにはクラウド、より小規模の計算機クラスターなど、異なる計算機群を透過的にユーザーが使用できる環境を提供するソフトウェア・レイヤー(インターウェアと呼んでいる)である(図2参照)。これにより、ユーザーは解析ジョブを DIRAC に投入するだけで、どの環境の資源を使うか個別の環境ごとに制御する必要がない。また異なる環境を効率よく使用するため、DIRAC では pilot job という概念を導入している。この pilot job は解析ジョブを投入する前に、必要となる Belle II ソフトウェア環境が構築

できるかどうかを調べ、その結果を見て解析ジョブを最終的に投入するかどうか決定する。実は分散計算環境を使用した際の問題点の一つとして、解析ジョブを投入しても、そこに環境の不備があるために解析結果が生成できず効率が悪い、という問題点があった。しかし、この pilot job の導入により、この問題点は劇的に改良され、DIRAC 以外の同様のソフトウェア・レイヤーにも採用されるようになっている。

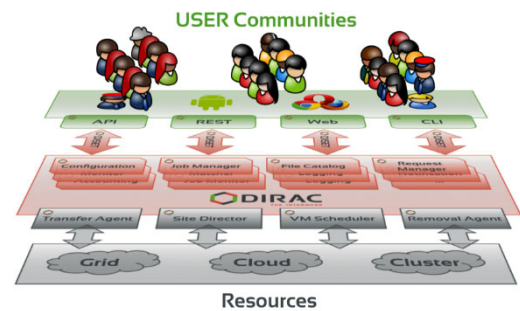


図2 DIRAC の概念図[10]

また大量に生成される生データ、シミュレーション・データ、解析データを処理するためには、メタデータを能率的に取り扱わなければならない。ここでメタデータとはファイル名を始め、実データかシミュレーション・データか、物理解析のコンディション、使用したソフトウェアのバージョンなど、データ固有の“データ”を指す。メタデータを管理するツールとしてはサポート体制等も考慮し、AMGA (ARDA Metadata Catalogue Project) [13]を採用した。AMGAで管理される多様なメタデータを用いることで、ユーザーは解析に必要なデータを取捨選択することができる。一方、ユーザーからのメタデータ取得要求が一旦すべてメタデータを管理するデータベースに一度集中するため、どのようにこの集中する要求を取り扱うかがボトルネックとなる可能性がある。

そして最も重要かつ独自開発が必要な部分が DIRAC や AMGA とユーザーとの間をつなぐインターフェースである。Belle II ソフトウェア・グループは basf2 と呼ばれるソフトウェア・フレームワークをすでに作っており、この上で事象生成、シミュレーション、再構築から生データのプロセス、ユーザーによる物理解析に至る全ての作業を行う。ローカルなバッチ処理を行う計算機で解析をするのであれば簡単なのだが、分散計算環境上では世界中に分散しているデータの入出力の管理や、各サイトで異なる適切な長さのジョブ・キューの選定、投入したジョブのログ管理、など Belle II ソフトウェアの仕様と DIRAC の間の溝を埋めなくてはならない。このため Belle II 分散計算グループは主に日本、チェコ共和国、ポーランドと共同で Python からなる gbasf2 (g は Grid を表す) とよばれる wrapper software を開発し

た。これにより、ユーザーはローカルなバッチ処理システムで使うジョブ・スクリプトをそのまま gbasf2 を用いて分散計算環境上で適用することができるようになった。

解析で使用するオフライン・ソフトウェアである Belle II ライブラリは CERN の協力の下、CVMFS[14] を通して提供する。また、DIRAC を介して投入されたジョブが正常に走っているかどうか、各サイトの計算機ノードやネットワークが正常に機能しているかどうか、などのモニターも円滑な Belle II 分散計算環境を運営していく上で必要不可欠である。これについては名古屋大学 Belle II グループが多大なる貢献をし、自ら検査ジョブを各サイトに投げて問題を検知するシステム、過去の情報を可視化することで異常を察知するツールなどを開発している。

3 Belle II 分散計算環境とネットワーク

この記事の初めの方に点を線でつないで全体として機能するものに仕上げなくてはならない、という例え話をを用いた。もう一度これを使おう。世界各地に点在する計算機資源は基本的に独立した存在である。しかし、これらを全体的に統括し、あたかも一つの計算機として、ジョブを投入したり、データをやり取りしたりするためには、各々の計算機資源をつなぐネットワークが必要となる。もちろん、一極集中型計算モデルにおいてもネットワークは必要であった。しかしこれは遠隔地のユーザーがネットワークを介して計算機システムにログインしたり、集中管理されているデータを自分の計算機にコピーしたりすることに主に使われていた。仮にネットワークが使えなくなったとしても、データやソフトウェアを集中管理している計算機システムが稼働していれば、使用できるユーザーに制限はあるが、データ解析はできるのである。一方、分散計算モデルの場合、データは世界中にばらまかれている。仮にネットワークが途絶えでもしたら、どのユーザーにとっても完全なデータは存在しなくなる。つまり、ネットワークはもはや CPU やストレージと同じ分散計算モデルを構成する重要な要素の一つとなっている。

一旦、Belle II 実験が始まると、生データの転送、物理解析用データのレプリカ作成、ユーザーによる分散計算環境での物理解析が本格的に始まる。そこで、計算機資源としてのネットワークへの要求を事前に見積もり、実験開始前から周到に準備をしておかなくてはならない。我々は 2013 年から Data Transfer Challenge と呼ぶデータ転送試験を開始している。特に前述した分散計算モデルの変更に伴い、日米回線だけでなく米欧回線も重要となる。これまでに、日米回線については、48 時間の Stability test ですでに 400MB/s の転送レートを達成し、また実験当初に必要な 1000MB/s の転送レートも瞬間値ではあるが達成した。

一方、米欧間のネットワークについては 2014 年 6 月に ANA-100G (Advanced North Atlantic 100G Pilot)[15]に参加する機会を与えられ、各国の NREN(National Education and Research Network) である GÉANT¹[16], ESnet[17], GARR[18], DFN[19]らの協力の下、アメリカ PNNL, ドイツ GridKa, イタリア INFN Napoli らとの転送テストを実施した。結果は約 500MB/s の転送レートを記録した。しかし、これによる問題点も見えてきている。特にデータの送り側、受け側双方のストレージ・サーバの性能が十分でなければ、例えネットワークが要求を満たしていても、データ転送はストレージの性能で律速される。また、小さなファイルを大量に送れば、それぞれの転送に対してオーバーヘッドが発生し、効率的ではなくなる。前者は計算機自体のデザインをする際に考えなくてはならないことであり、また後者はいくつかのファイルをひとまとめにしてできるだけオーバーヘッドを少なくするような仕組みを導入する必要がある。さらにネットワークの転送レート自体についても、やはり高速かつ安定な回線が必要である。加速器のルミノシティが目標値まで達した際には、数 GB/s の転送量が要求されるが現在の実測値では追いつかない。この点については、国立情報学研究所(NII) [20]が計画している SINET5 (2016年度から運用開始予定)による 100Gbps の日米回線、また新しく結ばれる計画の日欧直結線(2×10Gbps)に期待したい。

世界規模のネットワークを使ってデータを各計算機センターとやり取りする場合、速度と安定性を向上させるため、できるだけファイヤーウォールなどの機器を途中にははさみたくはない。しかし、わからない相手とデータをやり取りするにはセキュリティ上、ファイヤーウォールなどで制限を掛けなくては安全なネットワークが保たれない。LHC 実験では Tier2 サイト間などでデータをやり取りする際、LHCONE (LHC Open Network Environment) [21]という枠組みを作り、この枠組みに属しているサイト同士はファイヤーウォールを緩和したり、特別なネットワーク経路を構築したりすることで、LHCONE 内でのデータ転送をスムーズにする環境を作っている。この LHCONE には一定の条件をクリアすれば各サイトは加入することが出来るが、これまでは LHC 実験のためだけの環境であった。そこで我々は、運営している CERN やヨーロッパ及びアメリカの NREN と交渉を行い、2014 年 9 月、LHC 実験以外から初めて枠組みに加入することを承認された。現在は KEK 計算科学センターおよび NII らと協力し、この枠組み内でのデータ転送テストを準備中である。

ここで日本にも目を向けてみよう。現在、国内の Belle II 共同研究機関は名古屋大学、新潟大学、奈良女子大学を

¹ 正確には NREN ではなく、各ヨーロッパの NREN を相互接続する pan-European research and education network である。

じめ、13 研究機関・大学の研究室である。これらの多くでは、グリッドを始めとする分散計算システムを導入することが人的資源の制限から非常に難しい（例外として、名古屋大学はグリッドを既に導入し運営を開始している）。一方、各研究室には複数の計算機をクラスタとして組み、解析に用いているところが多い。DIRACは前述したとおり、グリッドやクラウドだけでなく、ある条件を満たした場合には計算機クラスタなどのローカルな計算機資源も Belle II 分散計算環境の枠組みに取り込み、ジョブを投入できる。そこで DIRAC を通してこれらのローカルな計算機資源をネットワークで繋ぐことにより、これまで眠っていた各大学の資源を掘り起こし、より少ない人的資源で日本に分散した計算機資源を統括的に制御、活用することが出来るようになる。このためにも国内の安定かつ高速であり、しかも安全なネットワークが必要となる。

4 Belle II 分散計算環境の検証

以上、簡単に Belle II における分散計算モデルや基本的な仕組み、ネットワークの重要性に触れてきた。ここでは現在までに我々 Belle II Distributed Computing グループが行ってきた、また今も行っている検証について話を移す。ここでいう検証とは我々が考えた分散計算モデルが本当に機能するのかどうかを指す。

我々の活動は 2008 年から開始した。その後、ソフトウェアやミドルウェアなどのテクノロジー選択を行い、DIRAC や AMGA などの導入を決めた。そして DIRAC を Belle II の仕様に合わせるモジュール、ユーザー・インターフェイス、各種モニターを開発してきた。これらの作業はまさしく点を選択する、そしてなければ作る、期間であった。そして 2012 年からこれらを線でつなぐ作業に取り掛かる。それは 2013 年 3 月、第一回目の大量 MC 作成テスト、MC production campaign を実践するまでに至った。これには KEK をはじめ、CYFRONET (ポーランド)、DESY および GridKa (ドイツ)、SiGNET (スロベニア)、UA-ISMA (ウクライナ)、CESNET (チェコ共和国)、KISTI (韓国)、PNNL および FNAL など (アメリカ) が参加した。ここでは Belle II 分散計算モデルを運営する上で基本となる様々なサービスが適切に導入され、最低限の機能が動作するかどうかを調べる計画であった。しかし、もちろん初めから全て上手くいくはずはない。投入したジョブの約 20% が、メタデータの登録失敗、入力データのダウンロードおよび出力データのアップロード失敗、ソフトウェア自体の実行エラーなどのため異常終了したのである。約一か月の期間で生成できたシミュレーション・データはたったの 60M 事象。しかし、それでも思い描いてきたモデルが実装され、実際にジョブを投入でき、そしてエラー率は大きいシミュ

レーション事象を生成することが出来た意義は大きい。その後約半年間をかけ、これら問題の原因を究明しつつ、システム自体を改良、2013 年 8 月には第二回目の MC production campaign を行い、第一回目に比べ桁多い 560M 事象を約一か月半の間に生成することに成功し、実行できる同時ジョブ数も 2500 本を記録した。ジョブのエラー終了率は約 10% となり、以前よりも減少したが、大量に事象を作成することによる、さまざまなボトルネックも明らかになった。引き続きメタデータの登録失敗や DIRAC サーバの負荷増大、出力ファイルの転送集中によるアップロードの失敗などである。しかし、これによりスケラビリティを上げた際に直面するであろう各サービスの問題点を知ることができた。さらに地道な改良を続け、2014 年 4 月には第三回目ですらに一桁多い 6,000M 事象、同年 10 月から約 2 か月間行った第四回目の MC production campaign では、システムの改良と共に、Belle II 共同研究機関の分散計算システムへの参加数も増え、15 カ国・地域、31 研究機関の協体制制となり、生成した事象数も 11,000M 事象に達した。この事象数は実験開始後 2 年目に記録されるデータ量にほぼ匹敵する。一日間で平均した同時ジョブ数も 18,000 本を記録した。この同時ジョブ数は同じく B-physics を目的としている LHCb 実験が達成している水準の約半分に当たる。しかし、これで終わりではない。SuperKEKB 加速器がデザイン・ルミノシティに到達した際には、このさらに 10 倍の同時ジョブ数に対応できるようにならなくてはならない。これをテストするためには、ジョブの投入と失敗したジョブの再投入、生成したデータの出力管理、データ転送システム、データの正当性チェックなどを自動化したプロダクション・システムを整備しなくてはならない。またこれと並んで、どうやって Belle II 分散計算資源を世界的に増やしていくか、大きな課題である。

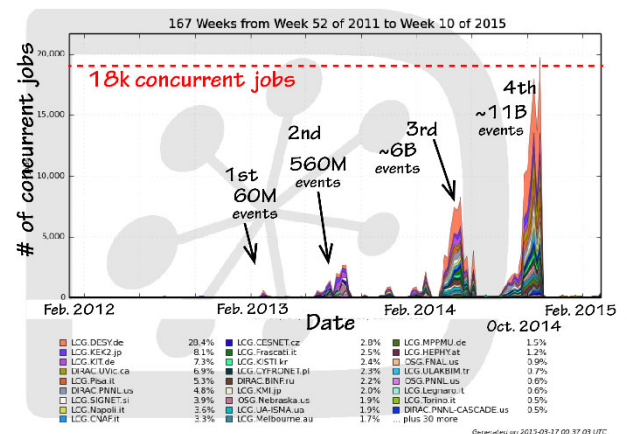


図3 3年間にわたる MC Production Campaign における同時ジョブ数の推移。色調の違いはそれぞれの計算機サイトを表す

5 WLCG への参加

Belle II 実験は分散計算モデルを採用し、WLCG が用意した設備基盤を活用していることは既に述べた。しかし、この WLCG は LHC 実験のために組織された枠組みであり、加入は LHC 実験および参加している機関に限られていた。一方、WLCG の中では設備基盤の今後について議論されることも多く、この決定によっては Belle II 実験に大きな影響が出ることも考えられる。そのため少なくとも、そこでどういう議論がなされ、どういう方向性を持って今後の設備基盤が展開していくのか、正当な手順で情報を得ることが重要である。2015 年 4 月に沖縄科学技術大学院大学で開かれた WLCG ワークショップでは、国内外の関係者、および協力者の手助けもあり、Belle II 実験および KEK 計算科学センターが報告する機会を得て、オブザーバーとして正式に WLCG への参加が承認された。これにより、Belle II 側として必要な情報を得るだけでなく、Belle II の存在を示し、我々からも情報を提供できる基盤が整ったといえる。

5 今後の予定、そしてその先にあるもの

現在のスケジュールでは、Belle II 検出器に崩壊点検出器はインストールされていない状態ではあるが、2016 年 9 月頃に宇宙線を使ったデータ取得が計画されている。ちょうどほぼ同じ時期、2016 年夏は KEK 計算科学センターの中央計算機システムが全て入れ替わる時期であり、これに伴いこれまで設定した Belle II 分散計算システムを全て構築しなおさなくてはならない。一方、加速器のビームを使った全検出器からなるデータ取得は 2018 年から開始するが、いきなり Belle II 分散計算システムをぶっつけ本番で使うわけにはいかない。そこでまず、この 2016 年の宇宙線ランに照準を合わせ、現在の Belle II 分散計算システムにまだ組み込めていない分散データ管理および転送システムなどを重点的に開発し、プロダクション・システムを完成させる。それが当面の目標である。

そろそろ話を締めくりたいと思うが、最後にもう一点。Belle II 分散計算システムを始めて、痛感していることがある。それは高エネルギー実験において、いまだ計算機の重要性についての認識が日本では薄いことである。取り扱うデータ量が飛躍的に増えた現在の大型実験において、計算機は加速器、測定器と並んで実験当初から綿密に計画され、周到に準備され、計画の一部として進めなくてはならない重要基盤なのである。日本は加速器や検出器開発の技術は世界最高レベルにあると思う。しかし、計算機、および今回触れる機会はなかったがソフトウェアの開発においては、まだまだ努力しなければならない。Belle II の先にある実験はさらに巨大化し、グローバル化すると期待される。その

なかで、計算機においても日本が主導権を握るのかどうか、若手の育成も含め、真剣に考える時期にきているのではないだろうか。

参考文献

- [1] The ATLAS Collaboration, JINST **3** (2008) S08003.
- [2] The CMS Collaboration, JINST **3** (2008) S08004.
- [3] The ATLAS Collaboration, Phys. Lett. **B716** (2012) 1-29.
- [4] The CMS Collaboration, Phys. Lett. **B716** (2012) 30-61.
- [5] L. Evens and P. Bryant (editors), JINST **3** (2008) S08001.
- [6] “Worldwide LHC Computing Grid” , <http://wlcg.web.cern.ch/> .
- [7] J. Chwastowski, R. Grzymkowski, M. Kruk, *et. al.*, Computer Science, 13, 2 (2012).
- [8] NeCTAR, <https://www.nectar.org.au/> .
- [9] The LHCb Collaboration, JINST **3** (2008) S080005.
- [10] “DIRAC” : <http://diracgrid.org/> .
- [11] “European Middleware Initiative” , <http://www.egi.eu/> .
- [12] “The Open Science Grid” , <https://www.opensciencegrid.org/> .
- [13] “ARDA Metadata Catalogue Project” , <http://amga.web.cern.ch/amga/> .
- [14] P. Buncic, C. Aguado Sanchez, J. Blomer, L. Franco, S. Klemer and P. Mato, PoS ACAT 08 (2010) 062057.
- [15] The ANA-100G project, <https://www.nordu.net/content/ana-100g> .
- [16] “The GÉANT Project Home” , <http://www.geant.net/Pages/default.aspx> .
- [17] “ESNet, Energy Sciences Network” , <https://www.es.net/> .
- [18] “GARR” , The Italian Academic & Research Network, <http://www.garr.it/> .
- [19] “DFN” , The German National Research and Education Network, <https://www.dfn.de/> .
- [20] <http://www.nii.ac.jp/> .
- [21] “LHCONE : LHC Open Network Environment” , <http://lhcone.net/> .