

研究紹介

小柴賞を受賞して 高輝度電子・陽電子衝突実験のための大規模データ収集システムの 開発研究

高エネルギー加速器研究機構

伊藤 領介, 田中 真伸, 中尾 幹彦, 鈴木 聡, 樋口 岳雄

2008年5月31日

1 はじめに

このたびは大変名誉ある賞をいただきまして、本当にありがとうございました。今回受賞対象となった私たちの研究は、種々の紆余曲折や困難を乗り越えて完成したものであっただけに、非常に感慨深いものでした。そこで本稿では私たちの研究を改めて紹介させていただきます。詳細は2007年の高エネルギーニュース 26巻3号[1]のなかで既に述べましたので、オーバーラップする部分が多々あることを最初にお断りしておきます。本稿では加えて現状と今後についても述べたいと思います。

2 Belle DAQ のパイプライン化

KEKB 加速器は実験開始以来順調に性能向上を続け、2003年には初期の目標であったルミノシティ $10^{34} / \text{cm}^2 / \text{sec}$ に到達した。これにともない Belle 実験装置のトリガーレートも上昇し、500 Hz に近くなることも増えてきた。Belle のデータ収集システムは、当初 500 Hz の場合全データ収集時間のうち 10% 程度のデッドタイムを許容するように設計されていた。しかし 10% のデッドタイムは事実上 10% のルミノシティを失うことと等価であり、何らかの対策が必要であった。しかも KEKB 加速器スタッフの努力によりルミノシティはさらに上昇を続けており、crab cavity を加速器に追加することで、近い将来ルミノシティは $3 \times 10^{34} / \text{cm}^2 / \text{sec}$ を越え、トリガーレートは 1 kHz に迫ると予想された。それまで使用していた FASTBUS の読み出しシステムは、パイプライン化されていないため読み出しデッドタイムが不可避であり、トリガーレートが 1 kHz 程度に達した場合、デッドタイムは 20% にも上ることが予想された。

この状況を根本的に解決するためには、FASTBUS の使用をやめ、パイプライン化したデッドタイムレスの読み出しシステムに置き換える必要があることは自明であった。そこで Belle データ収集グループは、KEK エレクトロニクスシステムグループによるパイプライン読み出しプラットフォーム COPPER の開発に当初から全面的に参加し、共同で完成させた。

COPPER モジュールは完成したが、それでは次に COPPER を使用してどのように Belle データ収集システムのパイプライン化を進めるかが問題となった。Belle 実験は進行中の実験であり、長期間シャットダウンしてフロントエンドエレクトロニクスごと読み出しシステムのすべてを入れ替えてパイプライン化することは許されない。そこで COPPER をベースに、従来使用していた FASTBUS TDC と信号のコネクタレベルまで完全に互換性を持つパイプライン TDC モジュールを製作し、読み出しシステムを検出器ごとに順次入れ替えていくという段階的なアップグレードをおこなうことにした。パイプライン TDC チップには ATLAS 実験に使用される AMT3 を用いたが、TDC 本体を COPPER に搭載する FINESSE として製作することにより、最小限のコストとマンパワーで、パイプライン TDC モジュールを製作することができた(図1)。



図1：Belle DAQ のパイプライン化に用いた COPPER-TDC モジュール

LeCroy 1877S とピンコンパチブルな信号コネクタ 6 個を 2 枚の大型 FINESSE に搭載し、物理的に完全な互換性を実現している。

図2にCOPPERによる Belle 検出器読み出しシステムの概念図を示す。COPPERは9UのVMEクレートに収納される。たとえば Belle の中央飛跡検出器 (CDC) の読み出しシステムは、89枚のCOPPERが6個のクレートに搭載される。トリガーを受けるとAMT3から読み出されたデータはリードアウトFIFOに移され、COPPER上のCPUカードでデータのフォーマットや圧縮処理がなされた後、readout PCで部分的なイベントビルディングがおこなわれる。さらに local event builder PCで検出器単位のイベントビルディングがおこなわれ、Belleのイベントビルダーに送出される。

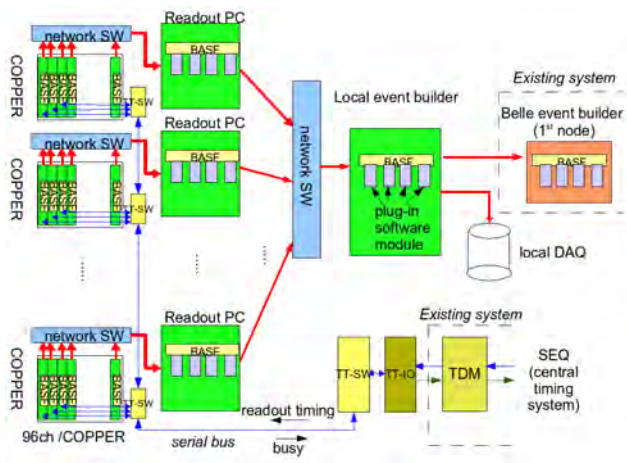


図2：COPPERによりパイプライン化した検出器読み出しシステムの構成

COPPERからイベントビルダーに至るまで Belle の標準ソフトウェアフレームワークである B.A.S.F. が動作し、高度な分散処理を可能にしている。

このシステムの最大の特徴は、読み出しモジュールのすべてに Linux が動作する CPU カードが搭載されており、高度な分散処理を実現している点にある。この CPU の上ではデータ収集システムのみならず Belle のオフライン解析でも使用されている統一ソフトウェアフレームワークが動作し、オンライン・オフラインを問わないシームレスなソフトウェア環境で、複雑な分散並列処理がおこなわれていることである。検出器フロントエンドの読み出しの最初の段階で、オフライン解析と同じソフトウェアを使用してデータ処理をおこなわせているシステムは他には例がなく、このシステムを非常に独創的なものにしていく。

3 パイプライン化作業の経緯

2005年の夏から検出器の読み出しシステムを順次 COPPER システムに入れ替える作業を開始した。まず、もっとも小規模な超前方カロリメータ (EFC) の読み出しシステムを入れ替えて動作試験をおこなった。その結果

COPPER システムが完全に動作することが実証され、次の検出器 CDC に着手することになった。

CDC は Belle の主要トラッキングデバイスであり、チャンネル数も多いため、最長の読み出しデッドタイムを持っていた。Belle のデータ収集システムのデッドタイムは、もっとも読み出しの遅い検出器で決まっており、CDC がパイプライン化されればパイプライン化作業途上においてもデッドタイムの低減に貢献できると考えられた。しかし CDC のシステムではテストの段階で問題が噴出した。読み出した信号が三つのピークを持ってしまう、レートは十分に低いのに AMT3 のパイプラインがオーバーフローしてしまうといった問題が続発したのである。これらの解決には半年以上の時間を要したがすべてをクリアすることができ、2007年の正月明けから CDC の読み出しシステムの入替えを始めた。

入れ替え作業は Belle DAQ グループ総出でおこない、1月末までには Belle の他の検出器と協調して宇宙線ランができるようになった。そして2月より始まったビームランで実際の運用が始まった。すぐにビームラン中での性能評価がおこなわれたが、図3に示すように FASTBUS システムでは $30\mu\text{sec}$ 程度あったデッドタイムが $1/10$ 以下に低減されており、パイプライン化の効果が確認された。また心配されていた CDC の運動量分解能も、従来の性能とまったく変化がないことが確認され、物理解析に影響がないことが実証された。

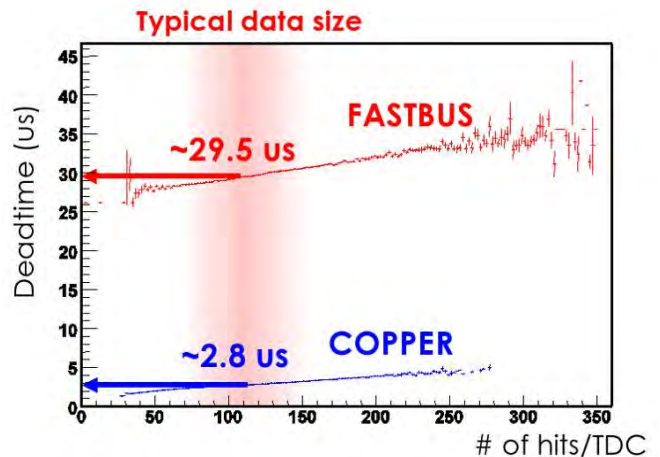


図3：トリガーあたりのデッドタイムの長さを CDC 読み出しシステムの COPPER 化前後で比較した図

TDC あたりのヒット数の関数としてプロットしてある。赤色 (上) で示されたのが従来の FASTBUS 読み出し時のデッドタイム、青色 (下) が COPPER を用いた場合のデッドタイムである。

4 現在の Belle DAQ システム

CDC のパイプライン化の成功を受け、他の検出器の読み出しシステムを順次パイプライン化する作業を開始した。

パイプライン化されていないシステムが残っていれば、そのシステムが Belle DAQ システムの全体のデッドタイムを決めてしまうため、パイプライン化を急ぐ必要があった。2007年の夏にはエアロジェルチェレンコフカウンタ (ACC) の読みだしシステムを COPPER 化した。CDC の作業で十分に経験を積んでいたため、入れ替え作業は短期間で終わることができた。このシステムも現在おこなわれているビームランで非常に安定に動作している。データクオリティについてもオフライン解析の結果、従来と変わらない性能が得られていることが確認されている。

これに自信を得て 2008 年 1 月にはさらにトリガー情報の読み出しシステム (TRG) のパイプライン化をおこなった。このシステムは比較的数据量が多いため、パイプライン化の効果が期待できるが、その反面非常に速い信号が多いため、AMT3 の性能の限界を超える可能性があった。入念なテストを経て、読み出しシステムの COPPER への入れ替えを決定した。入れ替え作業は非常にスムーズであったが、予期しなかったトラブルが起こった。シリコン崩壊点検出器 (SVD) のデータ解析に必要な、レベル 0 トリガーの情報が読めていないことが発見されたのである。この情報はトリガー信号の通常のリターンに含まれていなかったため、発見が遅れてしまった。調査の結果、信号の入力されていた TDC モジュールが不調であることがわかったので交換したが、それでも信号が読めない。しかしシステム自身の動作にはまったく異常が見つからず、原因究明は困難を極めた。2 週間ほど苦闘した結果、オフラインで使用している COPPER のデータをデコードするソフトウェアのエラー処理に問題があることがわかり、修正の結果解決した。オフライン処理の問題であったので、それまでに収集したデータも問題なく解析に使用できることがわかり、事無きを得た。

図 4 に現在の Belle DAQ システムの全体像を示す。既に従来の FASTBUS による読み出しシステムの半分が COPPER によりパイプライン化されており、システム全体のデッドタイムの低減と動作の安定化に貢献している。

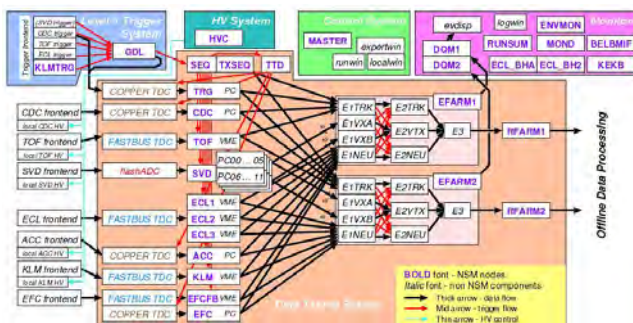


図 4 : 現在の Belle DAQ システム

5 SuperKEKB に向けて

KEKB 加速器は現在 crab cavity のチューニングが進んでおり、順調にいけば非常に近い将来、ルミノシティは目標である $3 \times 10^{34} / \text{cm}^2 / \text{sec}$ に達すると思われる。これはトリガーレートが 1kHz に近づくことを意味する。FASTBUS の読み出しシステムが残っていれば、デッドタイムは 20% 近くに達すると思われるので、パイプライン化を早急に始めていく必要がある。2008 年度には残りの検出器の読み出しシステムのパイプライン化を進めていく予定である。

しかし、早ければ 2009 年度から、いよいよ SuperKEKB へのアップグレードが始まることになり、Belle のデータ収集システムも対応する必要がある。SuperKEKB では最大 30kHz にも達するトリガーレートが予想され、読み出しシステムの大規模なアップグレードは必須である。これまでおこなってきた Belle DAQ のパイプライン化は、既に SuperKEKB へのアップグレードを見据えた上で進めてきている。COPPER による読み出しシステムは、SuperKEKB における 30kHz のトリガーレートに耐えることが実証されているし、統一したソフトウェアフレームワークによる大規模分散処理も、1GB/秒を越えると予想されるフロントエンドのデータの流を速い段階で効率良く圧縮するための備えでもある。

しかし SuperKEKB に向けてのアップグレードにおいて、各検出器の読み出しエレクトロニクスは大きく変わる。非常に高いレートに耐えるために、検出器の検出単位の細分化を進める必要があり、その結果読み出しチャンネルの数は現在の数倍にも増加する。また信号のデジタル化の手法も、波形サンプリングの導入など検出器ごとに特化した方法を使用する必要があり、現在 Belle で使用しているような Q-to-T 変換を使った統一的な手法を用いることができなくなる。よって現在のような COPPER を用いて作られたパイプライン TDC をエレクトロニクスハットに設置し、そこまで検出器フロントエンドからの信号を引き回す方法では対応できない。

そこで現在使用している COPPER をいわゆるリードアウトモジュールとして使用し、検出器の近くに設置されたフロントエンドエレクトロニクスに組み込まれたデジタル化しないデータコレクタから、光ファイバーを通して送られるデータを受信するような改造を考えている。データ受信のためのプロトコルを標準化し、COPPER 側のデータのレシーバーは、すべての検出器で共通の FINESSE カードとして搭載する。またフロントエンド側のデジタル化直後に置く、レベル 1 パイプラインやデータを送出するためのロジックも共通化し、FPGA に搭載できるコアとして供給することを考えている。デジタル化を測定器の近く

に設置した場合には、従来 COPPER の中で閉じておこなうことができたデジタル化へのトリガータイミングの分配やハンドシェイクも、長い距離の光ファイバーを介しておこなう必要があり、新たなデッドタイムの原因になり得る。現在これを防ぐための設計を進めており、ハンドシェイクをおこなわない非同期データ読み出しの可能性も含め、検討が進んでいる。今年度の後半には基本的なデザインをまとめる予定である。

6 おわりに

著者らはまず、パイプライン化作業を現場で率先しておこなってきた東京大学大学院の学生である中山浩幸氏と KEK の J. Schuemann 氏に深い感謝の意を表します。彼らの献身的な努力がなければ、パイプライン読み出しの成功はありませんでした。彼らこそが小柴賞の真の受賞者です。さらに KEK エレクトロニクスシステムグループのみなさまにも深い感謝の意を表します。COPPER の成功は、彼らの忍耐と努力とアイデアのたまもでした。そして最後に、実験中途の無謀なパイプライン化を許し、かつ協力してくださった EFC, CDC, ACC, TRG の各検出器サブグループの皆様、そして Belle 実験グループのメンバー全員に深く感謝いたします。

参考文献

- [1] 伊藤領介・田中真伸, 「COPPER を用いた次世代データ収集システム」, 高エネルギーニュース, 第 26 巻 3 号, 232 (2007)。