ATLAS ミューオントリガーシステムの コミッショニングと統合試運転

名古屋大学大学院 理学研究科　素粒子・宇宙物理学専攻
杉本拓也　　戸本　誠
sugimoto@hepl.phys.nagoya-u.ac.jp　　makoto@hepl.phys.nagoya-u.ac.jp
on behalf of ATLAS TGC group

2008 年 (平成 20 年) 8 月 28 日

1　はじめに

世界中の素粒子物理研究者が待ち望む LHC 実験の稼働が，2008 年秋にいよいよ現実のものとなる。全検出器のインストールはすでに完了し (図 1)，2008 年秋には，重心エネルギー 10TeV での陽子・陽子衝突実験を実施する。そして，2009 年初頭から，設計値である 14TeV の衝突が実現される。ヒッグス粒子や超対称性粒子に代表される LHC 実験で期待できる新しい物理 [1] の発掘を確実かつ早急に行うことがわれわれの使命であり，そのために，2008 年の 10TeV のビーム衝突データを用いて検出器を理解することは重要である。そして，ビーム衝突間近の現時点でわれわれが集中すべきことは，すべての検出器を確実にかつ安定に稼働させること，つまり，コミッショニングを成功させることである。

コミッショニングは，たとえるならば，電気屋で購入したステレオデッキの CD プレーヤー，アンプ，チューナー，スピーカーなどの個々では完成したパーツの配線接続を行い，電源を入れ，人間が思ったように機械を操作し，お好みの曲を，お好みの音量で聞けるようになるまでにシステムを完成させるようなものである。ATLAS ミューオントリガー検出器の場合は，検出器 [2][3] と回路モジュール群 [4] を配線接続し，ハードウェア的にミュー粒子運動量を算出し，40MHz のビーム衝突頻度の中からヒッグス粒子や超対称性粒子などがミュー粒子に崩壊するような興味ある物理事象に対して，

- 40 MHz のバンチ衝突周期に同期的に，
- 高効率な事象選別をし，そして，
- 2.5 μs の短時間 (Lvl1 トリガー判定時間) で，

トリガーを実行するシステムを完成させることがコミッショニングのゴールである。個々のハードウェアがどんなに優秀でも，一つのシステムとして物理データの収集を効果的に実施することが出来なければ，コミッショニングは失敗となり，逆に，ハードウェアの一部に不備があっても，他のハードウェアやソフトウェアなどでそれらを補い，物理データの収集が可能なシステムが構築できれば，コミッショニングは成功となる。つまりは，臨機応変かつ迅速な判断を下して，物理をする上でもっとも重要なポイントから順に着手し，たとえ検出器の稼働状況が 100 %でない場合でも，物理データ収集には問題がない運用を行えるようにするのが，コミッショニングの肝であり，重要な研究的要素である。ゆえに，コミッショニングは検出器 R & D とは異なった面白さがある。

本稿では，高エネルギーニュースにて掲載されてきた ATLAS TGC ミューオントリガー検出器の製作 [2] とその読み出し・トリガー回路の詳細 [4]，そして，組み立てから立ち上げ [3] の内容を引き継ぎ，コミッショニングの現状と，ビーム衝突データ収集とまったく同じシステムを用いたトリガー，データ収集系の統合試運転について述べたいと思う。

2　TGC ミューオントリガー検出器

ATLAS のミュー粒子検出器は，バレル部（$|\eta| < 1.05$）の RPC (Registive Plate Counter) トリガー検出器と MDT (Monitored Drift Tube) 飛跡検出器，エンドキャップ部（$1.05 < |\eta| < 2.4$） の TGC (Thin Gap Chamber) トリガー検出器と MDT 検出器で構成される。すべての検出器は，$\int B d\ell$ = 1.5~5.5 T·m (バレル部)，1.0~7.5 T·m (エンドキャップ部) のトロイド磁場によるミュー粒

図 1: ATLAS 検出器の完成写真。バレル部とエンドキャップ部の隙間が写っている。全検出器とビームパイプ (写真中央) のインストールが完了しビーム入射を待つ状態になった。写真の左にエンドキャップトロイドマグネット，右に TGC 検出器が写っている。最終的に TGC 検出器は画面左側の running position へと移動した (2008 年 7 月 9 日)。

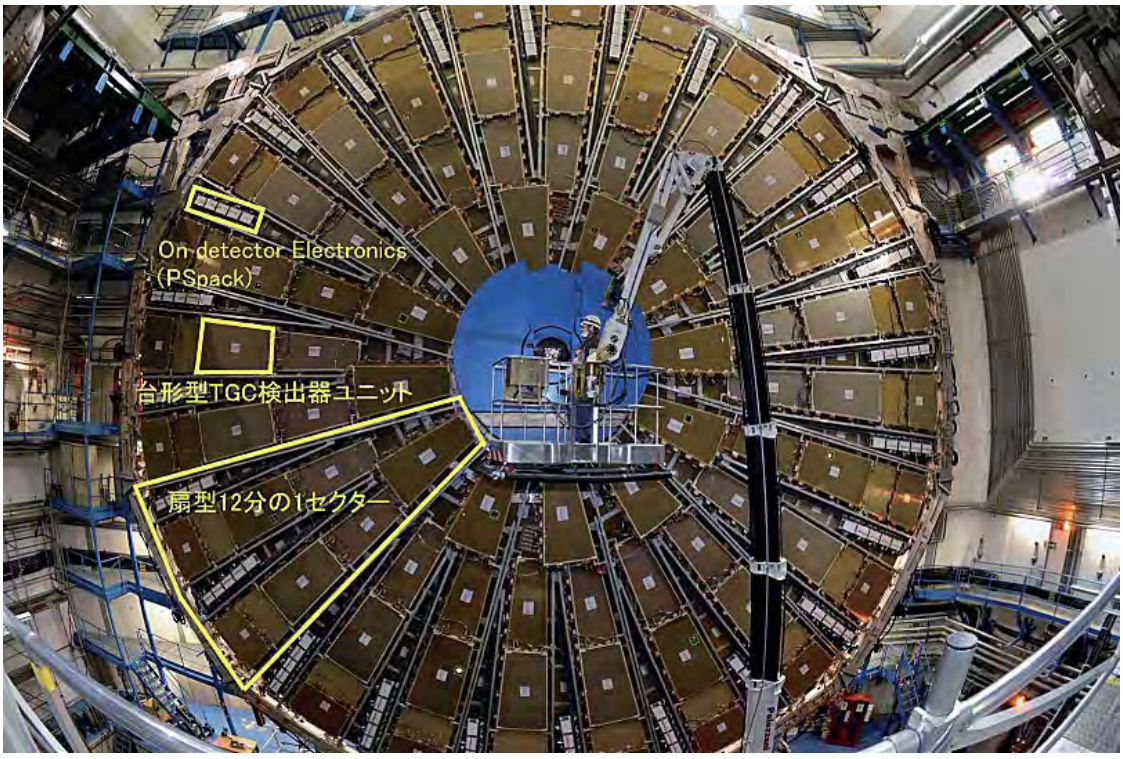

図 2: TGC Big Wheel ステーション。地上組み立て時に畳 1 畳程度のチェンバーを敷き詰め扇形 12 分の 1 セクターを作成し，地下実験ホールにて，直径 25 メートルの Big Wheel ステーションを構成した。ステーションは両エンドキャップに各々3 枚ずつある。

子飛跡の曲率を測定することにより運動量を算出する。エンドキャップ部，バレル部ともに，25 ns のビーム衝突頻度に耐えうる高速読み出し可能なトリガー専門の検出器と，100μm 以下の位置精度を誇る精密測定専門の検出器とに潔く分離したところが特徴である。

エンドキャップ部のミュー粒子トリガーを担う TGC 検出器は，ワイヤー間隔 1.8mm，ワイヤーとカソード間隔 1.4mm の MWPC の構造をしており，検出器内部は n-pentane と CO_2 の混合ガスが流入されている。狭いワイヤー間隔の採用により，ビーム衝突間隔 25ns に対して，信号の伝搬遅延を含んでも時間分解能が 20ns 程度となり，高速トリガーに特化した検出器を実現している。前世紀末から長年続いた巨大な TGC 検出器の開発，建設および，実験ホールへのインストールは，およそ 10 年の年月を経て 2007 年にようやく完了した（図 2)。

TGC 検出器の構成最小要素は，畳一畳程度の面積を有する台形型の検出器ユニットである。20 枚程度の TGC 検出器ユニットを並べることで，扇形のセクターを構成する。扇形セクターは，地上アセンブリホールにて組み立てられた [3]。その後，地下実験ホールに運び，ホール内で，12 枚の扇形セクターを円盤状にならべることで，直径 25m の円盤 (Big Wheel ステーション) が最終的に完成した（図 2)。この Big Wheel ステーションはエンドキャップの両側 (ATLAS 実験では，エンドキャップの片側を A サイド，もう一方を C サイドと呼ぶ) にそれぞれ 3 ステーションづつ配置され，ビーム衝突点から近い方向から，信号層が 3 層 (triplet) の TGC1 ステーション，2 層 (doublet) の TGC2 ステーション，同じく，doublet の TGC3 ステーションと続く。

TGC1 の 3 層間コインシデンス (内点) と TGC2 と TGC3 の合計 4 層間コインシデンス (ピボット点) から，１本のミュー粒子に対して二つの通過点を測定する。ピボット点とビーム衝突点を結ぶ直線と，ピボット点と内点を結ぶ直線とのずれから，トロイド磁場によるミュー粒子の曲率を測定し，運動量を算出する。曲率に対する許容範囲 (コインシデンスウインドウ) を制御することで，トリガーにかかる閾値運動量を自由に設定することが可能となる。実験初期では，閾値運動量を 6GeV，10GeV，15GeV，20GeV，40GeV と定める。高運動量に対するトリガー検出効率は，検出器不感領域込みで 95 %が想定されている。

32 万チャンネルの TGC 検出器を処理する 4 種類の ASIC を搭載する 30 種類の回路モジュール [4] によって，ミューオントリガーは実現される。図 3 に，TGC トリガーシステムを構築するのに必要な回路と配線をまとめる。これらの回路群は，図 4 のように組み上げ，上述のトリガー論理を実行し，データの収集を行う。読み出し信号のデジタル化を実現する回路系 (ASD ボード) と，Lvl1 トリガー信号が発行されるまでデータを保持するバッファー，初段トリガーを実現する回路系 (PSpack モジュール) は，地上での組み立て時に検出器に備え付けられた。この時点で，テストパルスや宇宙線を用いた一通りの地上動作試験を完了させた。地上動作試験の第１の目的は，アクセスが容易な地上で可能な限りの故障箇所を直すことであったが，可能な限り本番実験用の回路や DAQ ソフトウェアを用いたテストを地上で行えたことは，後々のコミッショニングで非常に有意義であった。

3　TGC 検出器コミッショニング

インストール完了の 2007 年夏ころから，積極的なコミッショニングがスタートし，われわれの研究活動の場は，検出器を組み立てていた建物から，ATLAS 実験ホールと ATLAS コントロールルームへと移行した。インストールした TGC 検出器を，一つのトリガーシステムとしてフル稼働させるためには，以下のものを ATLAS 実験ホールで整えていかなくてはならない。

- トリガー・読み出し回路系インストール
- 検出器と回路系間の配線接続
- 高・低電圧 (HV/LV)，ガスなど，検出器に不可欠なサービス
- サービスを監視・制御する検出器制御システム
- トリガー・読み出しソフトウェア
- TGC トリガー遅延の測定と同期確認
- 実験ホールでの最終動作確認
- 統合試運転による宇宙線データ収集

これらは，TGC 検出器グループが総力を上げて実施し，特に，日本グループの強力なリーダーシップのもとで，イスラエルグループなどと協力し，ときには，意見の不一致からの争いを行いながら，推進していった。われわれでしか出来ない部分はわれわれ自身が，ルーチンワーク的な人に頼めるが数の多いものはテクニシャンなどが，より専門的な知識が必要な場合は専門家に頼みながら，適材適所の仕事を行うことで短期間でのコミッショニングの実現を目指した。特に，ガス系統や 100 m 以上に及ぶ光ファイバーの接続などは，その道の専門家によってなされた重要な仕事であった。日本グループは，トリガー回路系を一つのシステムとして組み上げ，すべての電気系統のインストールと接続を行った後に，検出器と回路に電気を入れ，地下実験ホールでの最終動作確認を行い，

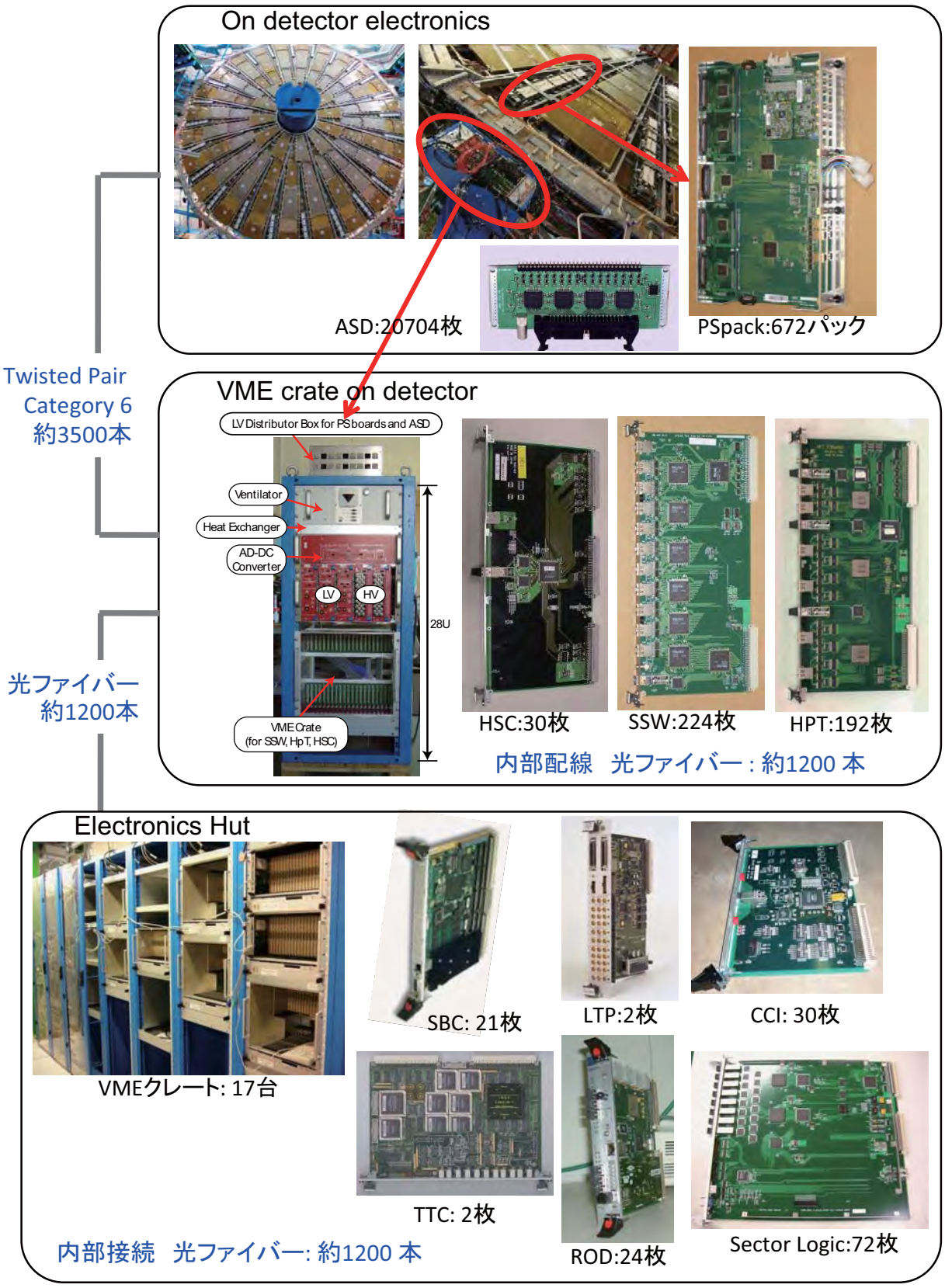

図 3: TGC システムに必要なモジュールやケーブルの種類とその総数。

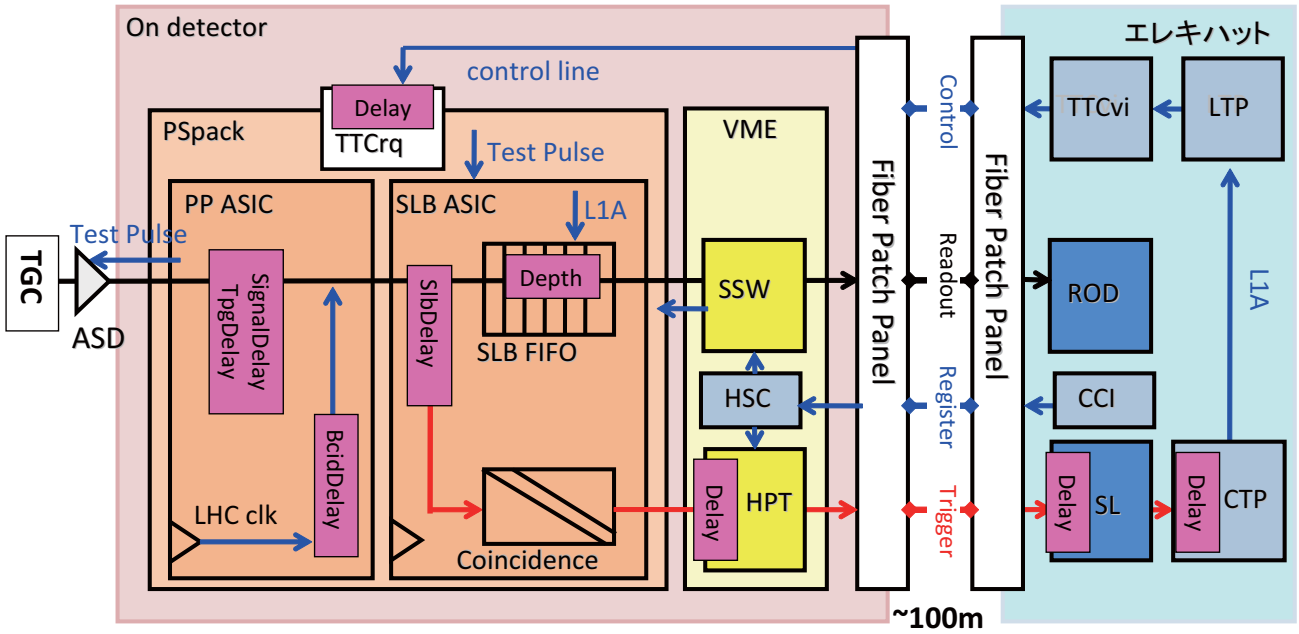

図 4: TGC ミューオントリガーのトリガー・読み出しの流れ。PSpack の SLB ASIC 内 Coincidence 回路から HPT モジュール，SL モジュールへと流れているのがトリガーの流れ，SLB FIFO から SSW モジュール，ROD モジュールへと流れているのが読み出しの流れである。その他，CCI モジュールから HSC モジュールを経由して実行されるレジスタへの制御ライン，クロック信号，Lvl1 Accept 信号 (L1A)，テストパルスのトリガー信号などを送るラインを含み TGC 検出器がトリガーシステムとして稼働する。

そして，統合試運転でデータ収集を行うという，重要かつ広い領域でその力を発揮した。

われわれは，コミッショニングの最小単位である一つの 12 分の 1 扇形セクターに的を絞り込み，トリガーと読み出しラインの構築を行うことからスタートした。地上動作試験時にて実績のあった扇形セクターを用い，地下実験ホール，ならびに検出器から約 100 m 離れたところに位置するエレキハットにおいて，すべての必要要素の構築を経験することがその目的であった。そして，一つの扇形セクターでの稼働を実現したのち，その扇形セクターの定常的運転を維持しながら，稼働セクターを拡張していった。以下の章では，日本グループが主に行った活動に的を絞り，具体的なインストールやコミッショニングに関してのこれまでの成果と現状をまとめる。

3.1 トリガー・読み出し回路

前章で述べた通り，地上での扇形セクター組み立ての際，検出器上に備えつけられる回路系のインストールと基本動作確認は終了した。地下実験ホールでは，まず，TGC 検出器の横に設置された VME クレートに組み込まれるモジュール群と，エレキハット内のモジュール群のインストールからスタートした。具体的には，まずエレキハット内に VME クレート (17 台) を備え付け，VME を制御するためのシングル・ボード・コンピュータ (SBC[1]) (21 枚)，クロックや L1A 信号などの制御信号を検出器に供給する TTCvi モジュール (2 枚)，TTCex モジュール (2 枚)，LTP モジュール (2 枚)，エレキハットの VME と検出器脇の VME モジュールや検出器上の回路系の制御を行うための CCI モジュール (30 枚) と HSC モジュール (30 枚)，読み出し回路である SSW モジュール (224 枚) と ROD モジュール (24 枚)，トリガー回路である HPT モジュール (192 枚) と SL モジュール (72 枚) のインストールを順次行っていた。

次に，ケーブルの配線である。ケーブル配線は，たった 1 本の接続ミスから，検出器不感領域の大きな塊をつくりうる可能性があるので，慎重に行った。検出器上の PSpack モジュールと検出器横の VME モジュールとの間の接続は，約 3500 本の Twisted Pair Cable Category 6(いわゆる LAN で用いるネットワークケーブル，主に電磁シールドを強化した特別仕様。以降 Cat.6 ケーブルと呼ぶ) により実現され，検出器脇にある VME クレート内のモジュールにより光信号に変換される。この光信号は，およそ 100m の光ファイバー束 (48 芯 × 26 束) によりエレキハット内のパッチパネルを経由して，エレキハット内 VME モジュール群に分配される。100 m 光ファイバー束

[1]VME64x バス上で動作する CPU ボード。6U のボードで，Linux が動作し，VME マスタとして動作する

は，検出器横の VME クレートから配線し，直径 25m の Big Wheel の円周上を美しく配線した後にエレキハットに運ばれ，エレキハット内で適当な長さで切断され，コネクタが結合された。その結果，ファイバー長は扇形セクター毎の異なるものとなった。トリガー遅延・同期の観点からは，あまり好ましいことではないが，われわれは，図 5 が示すように，各扇形セクターの光ファイバーの伝搬時間を測定し，ケーブル長を理解した。ちなみに，検出器横とエレキハットとの間は 100 m も離れているので，この単純な測定ですら高所作業用のハーネス (命綱) を着用して作業したり，エレキハット内と検出器横を携帯電話を用いて連絡を取り合うなど，ATLAS ならではでのユニークな測定であった。これだけ長距離かつ多数の配線が行われるので，様々な作業中にケーブルの欠損や，配線ミスが起きる。いかに単純かつ整頓された配線を実施するか，さらには，回路系を用いた配線ミスの確認手法を確立させるかがコミッショニングの鍵となった。普段は単調な作業であるケーブル配線も，その物量と広い作業領域の観点から，相当の気合いを持って挑んだ。いわゆるケーブル敷設キャンペーンを設けて，短期間に集中して多くの常駐学生と一緒に作業を楽しんだ。また，他検出器との物理的干渉による配線のやり直し，不調モジュールを交換する度に起こる配線ミスなど，様々な問題にぶち当たりながら試行錯誤を繰り返し，ようやく図 6 のような美しい配線がなされるに至った。

それぞれのモジュールには，ASIC や FPGA などのチップで実現するレジスタ群が，扇形セクターあたり約 5000 個ある (表 1)。レジスタの制御は，エレキハット内の SBC から実行され，CCI-HSC モジュールを経由し，SSW，あるいは HPT へ，SSW から JTAG プロトコルを通じて PSpack へと伝えられる (図 4)。つまり，読み出しの流れを逆走して，命令が伝達されるので，全レジスタへの書き込み・読み出しの確認は，レジスタの健康状態を確認するだけでなく，読み出しラインの接続確認にもなる。また，コミッショニングを行いながら，レジスタに書き込むべき初期設定値を定めなければならない。そのような設定値は，テストパルスや宇宙線を用いて，扇形セクター単位の入念な検査が行われた。われわれが特に注意した点は，トリガー遅延時間や，トリガーと読み出しラインとの整合性の評価である。図 5 に示したように，トリガー遅延の大半を占めるケーブルの伝搬時間は，扇形セクター毎に異なる。その対応として，ほぼすべてのモジュールには，コインシデンスの実行前にそれらを補正するためのレジスタが用意されている (図 4)。テストパルスを用いて，ケーブルや回路による遅延時間などを完璧に理解し，コミッショニングを進めるとともに設定値を決定した。TGC 検出器のトリガー遅延時間は，84 クロック (~2.1 μs) 程度と，ATLAS 実験が定める Lvl1 トリガー判定時間である 2.5 μs と比べて，十分に短いことを実証した。さらに，テストパルスを用いて，疑似トラックを発生させて，正しいタイミングで正しいトリガー信号が生成されるかを確認することで，トリガーラインの評価を行った。

コミッショニングを開始してから半年程度たった 2008 年 2 月頃にすべてのモジュール，ケーブルのインストールを完了し，データ収集を行うだけのシステムに仕立て上げることに成功した。ここでの，テストパルスや宇宙線による試運転は，検出器や回路系のデバッグだけでなく，後に述べる ATLAS 検出器統合試運転のよい経験となった。

表 1: 扇形セクターあたりのレジスタ数

	register/sector
PP ASIC (PSpack 内)	3210
SLB ASIC (PSpack 内)	1740
Hpt ASIC	64
SSW FPGA	64
SL FPGA	40
合計	5118

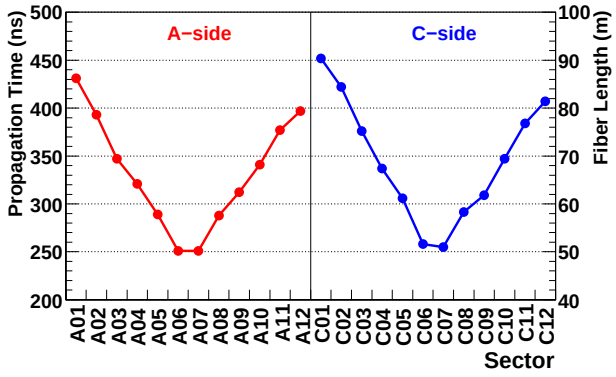

図 5: 48 芯光ファイバー束の各扇形セクター毎の長さの相違

3.2 トリガー・DAQ ソフトウェア

ATLAS 実験では，約 2700 台の Linux マシン (PC:2600 台，SBC:150 台) が DAQ に参加する。これだけのエレクトロニクスと PC のすべてが足並みを揃えて動作しなけれ

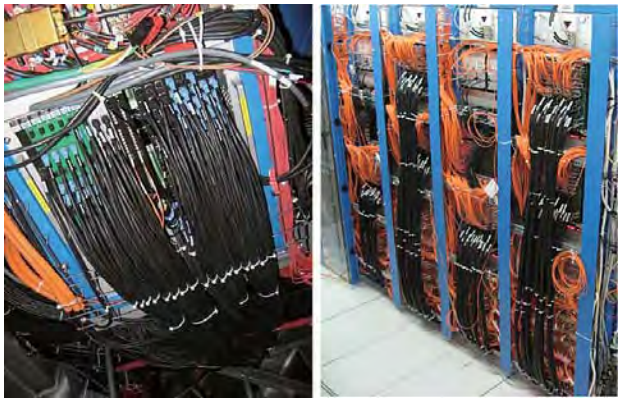

図 6: 検出器横の VME クレートのケーブリング（左）とエレキハット内のケーブリング（右）の様子。試行錯誤を繰り返しながら整頓された，美しい配線が実現した。

ばならず，それを制御するためのフレームワーク (Trigger and DAQ, TDAQ) は，非常に複雑で多数のパッケージから構成されている。各システムの DAQ 担当者は，この TDAQ フレームワークの規則に従ったプログラム (RCD) の開発を求められた。簡単に説明すると，TDAQ フレームワークとは，図 7 に示されるような主に 5 つのステートを持つステートマシーンで，各ステート間を遷移する際にコールされるメソッドを持つクラス (ReadoutModule クラス) が定義されている。各システムの RCD はこのクラスを継承することで共通の動作をすることが可能となり，全体として容易に足並みを揃えることが可能となるよう作られている。TGC 検出器の場合は，

1. BOOT → INITIAL
   PC や SBC との通信を確立し，RCD の子プロセスを生成する。
2. INITIAL → CONNECTED
   データベースからレジスタ設定値を取得し，各チップのレジスタにダウンロードする。
3. CONNECTED → RUNNING
   各 FIFO のクリアをし，CTP[2]から来るトリガー信号を受け取る準備をする。

という処理を行うためのソフトウェアを開発した。特に，データベースからレジスタの設定値を抽出し，各レジスタにアクセスするためのライブラリの開発は TGC 検出器グループの独自のものである。レジスタへの通信に使われているプロトコルは VME 通信と JTAG 通信の二つで，VME 通信は ATLAS で開発された VME ドライバ (vme_rcc) をベースに開発し，JTAG 通信はすべて独自で

[2]Central Trigger Processor の略称で、全検出器のトリガー信号を取りまとめてトリガーの最終判断を下す。

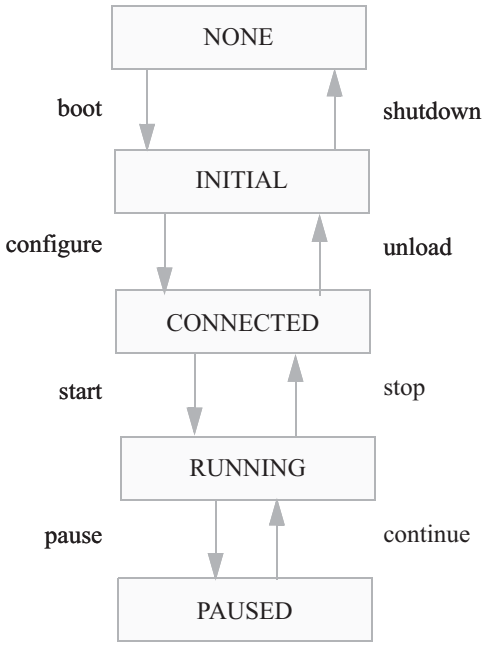

図 7: TDAQ フレームワークのステート遷移図

開発したライブラリを用いた。これらのソフトウエアは，ビーム衝突後もずっと使っていくもので，TDAQ フレームワークの中で安定して動作することが求められる。1 扇形セクターあたり約 5200 個のレジスタを設定しなければならず，通信速度とエラーレートの低さが求められた。初期段階では，地上動作試験で使用したライブラリを基礎とするソフトウェアを用いていたが，レジスタへの通信速度の遅さ (1 扇形セクターあたり最長で約 5 分かかっていた) と，書き込みミス率の高さ (∼0.04%) から抜本的な改革が迫られた。地上動作試験用のライブラリは，長い年月を経て，多くの人々の引き継ぎと再開発を繰り返しながら完成したソフトウェアであった。そのため，多くのバグが潜んでいたことでエラー率が悪化し，無駄なデバッグ機能が通信速度を遅らせていた。そこで，少数のソフトウェア開発者による徹底したソフトウェアの根本的改良を実施した。結果，レジスタ書き込みエラー率はほぼ 0%にまで改善し，通信速度も数倍向上した。さらなる通信速度向上を目指し，当初予定した SBC モジュールの数を 4 倍に増やした並列化も行い，今では，全 24 扇形セクターのすべてのレジスタを，60 秒程度で書き込むことが可能となった。

読み出し・トリガー回路に搭載されるレジスタには，データ転送に問題が生じた場合にエラービットを出力する機能を持つ。これらのエラーの監視や，レジスタへの書き込みミスなどがあった場合，図 8 で示されるモニターにより警告が出る。その他，検出器信号の閾値電圧や，HV/LV な

図 8: 回路系の健康状態と，期待される設定値かどうかを確認するモニターパネル

どを設定したり，検出器の温度監視を行う DCS (Detector Control System) などのソフトウェアも充実してきており，コミッショニング当初に行っていた検出器に近い地下実験ホールでの検出器運転から，地上の ATLAS コントロールルームでの運転，制御へと移行することに成功した。今後，ますます監視モニターソフトウェアを充実させ，エキスパートに頼らないシステム作りを行っていくことが鍵となる。

4 宇宙線による統合試運転

ATLAS 実験では，全 ATLAS 検出器が同期的にデータ収集が行われているかを確認する目的で，Milestone Run と銘打った統合試運転を 1〜2ヶ月位に 1 度の割合で開催していた (表 2)。一つの扇形セクターの運転がハードウェア的にもソフトウェア的にも可能となった段階 (2007 年 6 月より) で，TGC 検出器も ATLAS 検出器の統合試運転の参加を始めた。トリガーを供給しない検出器は，DAQ ソフトウェアや読み出し回路の安定性を確認するに留まっている中，TGC 検出器は，全 ATLAS 検出器に適切なトリガーレートで宇宙線トリガー信号を発行せねばならず，統合試運転に参加すると直ちに安定的なシステムの運用が求められた。

特に統合試運転中は，全 ATLAS 検出器グループがコントロールルームに集まり，各々の検出器グループが統合試運転期間中に少しでも多くの宇宙線データを取得して検出器解析をしようと必死であった。TGC 検出器の不調により DAQ を止めてしまうことがあれば，白い目で見られるような張り詰めた空気の中，われわれも，可能な限り多くのセクターを運転し，データ収集を行うことを目指した (図 9)。こういう雰囲気の中で試運転を成功

表 2: これまでに実施された ATLAS 検出器統合試運転の一覧。Mx は ATLAS 検出器全体での統合試験，Px はミューオンシステムだけでの統合試験。参加検出器の B はバレル，EC はエンドキャップを表す。TGC 検出器は M3 統合試運転から 1 扇形セクターでの参加を開始した。その後順調に稼働範囲を広げていき，M8 では，一度にではないが，統合運転期間中に 24 セクターの稼働を成功させた。

	期間	参加検出器	TGC 扇形セクター数
2007			
M3	6.4〜 6.18	M2 + EC Calo, EC M, SCT, TRT	1
M4	8.23 〜 9.3	M3 − SCT, + Lvl1 Calo/Mu	1
P1	10.1 〜 10.7	B & EC Mu	3
M5	10.22 〜 11.5	M4 − TRT, M4 + Pixcel	6
P2	12.3 〜 12.10	B & EC Mu	6
2008			
M6	3.3 〜 3.9	M5 + SCT	6
P3	4.11 〜 4.16	B and EC muons	6
P4	5.19 〜 5.25	B and EC muons	7
M7	5.29 〜 6.3	All	13
M8	7.11 〜	All	24

させたときに喜びも大きかった。特に，TGC 検出器トリガーで取得したデータから，MDT 検出器の飛跡を初めて確認したときは (図 10)，皆で興奮した。

図 9: 統合試運転の ATLAS コントロールルームでの 1 シーン。著者 (杉本) が中心となり，外国人共同研究者とともに，TGC 検出器の読み出し状況を見守っている。学生達も現場でのコアな研究を進めている。

M3 統合試運転のときには，1 扇形セクターを稼働させるだけでやっとの思いであったのも，M4, M5... と回数を重ねて行くにつれ，DAQ ソフトウェアの安定化，モニターの充実化が実現し，最近では，シフトによる運転が可能となった。現在は，検出器の特別かつ詳細な動作確

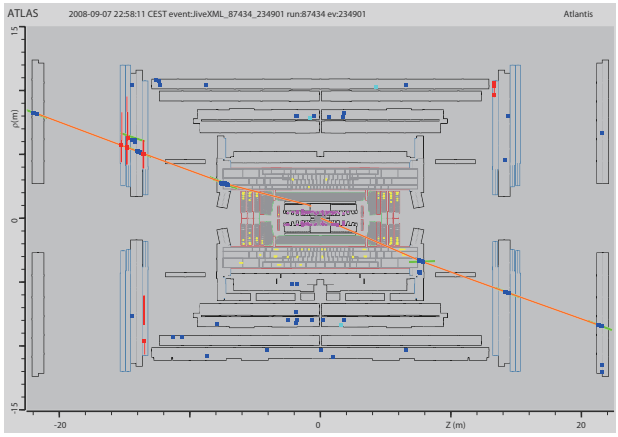

図 10: TGC 検出器でトリガーした宇宙線ミュー粒子イベント。左上の TGC 検出器がトリガー信号を発行した。2 本の直線は，MDT 飛跡検出器により再構成された宇宙線の飛跡。

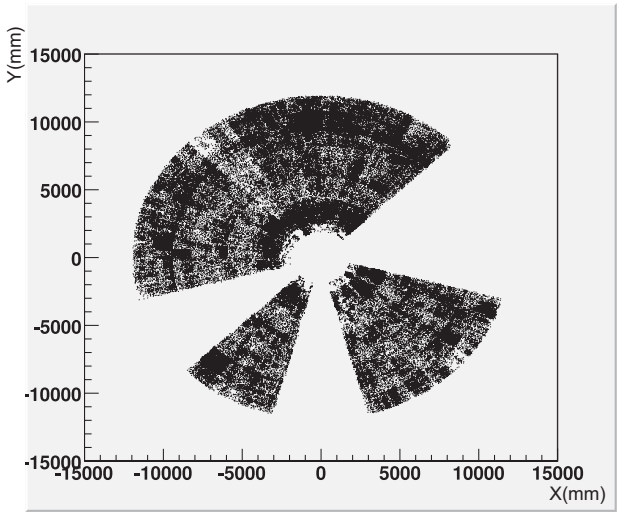

図 11: 宇宙線ミュー粒子にによりヒットした TGC の分布。Big Wheel の形が見える。プロットのないセクターは統合試運転で読み出しを行わなかったセクター。こうした分布図から，ノイズの多いチャンネルや欠けチャンネルを早期に発見することができる。

認が必要な扇形セクターは統合試運転から外しているものの，毎日のように統合試運転が実施され，日本人，イスラエル人，中国人，を始めとするシフトクルーが検出器の運転を行っている。そして，2008 年 8 月 6 日に，ついに全 24 セクターを同時に稼動させることに成功した。

コミッショニング当初は，n-pentane が可燃性ガスであるという性質のため，安全上の理由から CO_2 100 %での稼働を余儀なくされていたが，プロによる安全なガス系統の構築に伴い，最近，n-pentane ガスを混合した，本番実験と同じ検出器コンディションによる運転を行っている。結果として，CO_2 100 %時に 10 %であった検出器効率は， 90 %にまで向上し，最近では，TGC 検出器の応答理解のためのオフラインによる宇宙線データ解析が活発化してきており，最近のデータからは，図 11 のような宇宙線ヒット分布を容易に出すことができるようになった。検出効率 90 %から設計値である 95 %へのさらなる向上は，HV，閾値電圧，信号のゲート幅の最適化によりなされると期待される。ビーム衝突データが出始めた頃に，再び，TGC 検出器の性能評価解析の現状が，この高エネルギーニュースで発表されたら面白いことだろう。

5 最後に

2007 年度の始めからスタートしたコミッショニングは，ようやく一段落ついた。綱渡り状態だった研究も，最近ではやっと吊り橋渡り程度になったといえよう。ビームが出たときには，間違いなく TGC 検出器はミュー粒子トリガー信号を発行し，データ収集を行っていると断言できるようなレベルにまでシステムを構築することができた。しかしながら，LV 電源供給のモジュールの故障率が高かったり，VME クレートの冷却用のタービンの故障率が高かったりと，まだまだ，毎日のようにその対応に追われたりしている。われわれは，毎日，こうして新たに表れた問題に優先順位をつけ，少しでもよい検出器システムでビームデータを収集する努力を進めている。こうした努力は，これから期待できる革命的な新しい物理の発見のためであり，コミッショニングの成功は，物理屋の観点からいえば，ただのスタートラインにたったことを意味するのみである。今後の ATLAS 実験での研究に，特に TGC 検出器を用いた新しい物理の発掘に期待していただきたい。

参考文献

[1] 浅井 祥仁, 高エネルギーニュース, 24 巻 4 号, 2006.

[2] 田中 秀治, 高エネルギーニュース, 25 巻 2 号, 2006.

[3] 石野 雅也, 高エネルギーニュース, 26 巻 4 号, 2008.

[4] 佐々木 修, 高エネルギーニュース, 26 巻 3 号, 2007.