

ATLAS ミューオントリガーシステムの 組み上げと立ち上げ

東京大学 素粒子物理国際研究センター

石野 雅也

ishino@icepp.s.u-tokyo.ac.jp

on behalf of ATLAS TGC グループ

2008年2月18日

1. ATLAS ミューオンシステムの特徴

2008年某日、重心系エネルギー14TeVでの陽子・陽子衝突がCERN LHC加速器で実現される。その衝突点の一つ、地下100mのピット内でわれわれはアトラス検出器を組み上げ、その衝突イベントに含まれる重要なシグナル[1]をとらえようとしている。LHCは実効衝突エネルギーが数TeV、狙い目の実験結果を得るために十分のルミノシティ（最終的には $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$ ）を持つ唯一無二の加速器であり、そこで起こるすべての重要なイベント、情報を完全につかまえることがわれわれ実験屋の本懐である。その目的のために、インストールされたすべての検出器は、それぞれ重要な役割を担うが、ヒッグスを含む新粒子の崩壊終状態（の多く）にミューオンが含まれることから、ミューオン検出器の重要性は自明である。

そのシステムは、次に述べる様にチャレンジング、かつリーズナブルなデザインがなされている。特徴を二つ記すならば、

- 1) 「ミューオントリガー生成のための検出器」と「ミューオントラックの運動量を精密測定するための検出器」を独立に設置し、各々がその性能を妥協することなく追及した。
- 2) アクセプタンス全体 ($|\eta| < 2.7$) をカバーする巨大なトロイダルマグネットを配置し、ミューオンシステム単独での運動量解析を可能にした。

この二点は、ATLAS ミューオンシステムの最大の特徴であり実現のために払った苦労も大きい、そのご利益も大きい、と思う。

ご利益1: ATLAS 実験では初段のミューオントリガーで設定閾値以上の P_T を持つミューオンが含まれる衝突パンチを選択する (Level-1 ミューオントリガー)。LHC のパンチ衝突間隔が25nsecであるからには、それを識別できるだけの高速レスポンスが検出器に要求される。信号の propagation delay 込みで time jitter がそれぞれ20nsec程度

の TGC ($1.05 < |\eta| < 2.4$) と7nsec程度のRPC ($|\eta| < 1.05$) を配置することで、クリアに高運動量ミューオンを含む衝突パンチを同定することを可能にした。一方、トラッキングのためには、そのみを目的としたドリフトチューブを用い、 β 気圧のAr/CO₂ガスを封入しドリフト速度を遅くして位置精度の向上を追求する (tubeあたり80micronの精度が目標) ことが可能になった。

ひとつで多機能、万能...と呼ばれるものは検出器に限らず世の中に多くあるが、結局、何をしてもどっつつかず、いずれにせよ使い勝手が悪い、所期の効能が得られない、という目にあいがちなので、このミューオン検出器を潔い態度でデザインをしたのは賢明であったと思います。

ご利益2: 先に「閾値以上の運動量を持ったミューオンを含むイベントを選択する」とさりりと書いたが、これはもちろん、特徴2)として書いた磁場が存在して初めて可能になる。図1に示したトロイダルマグネットのベンディングパワー、 $\int B dl$ で1.5~5.5T·m ($0 < |\eta| < 1.4$, パレルトロイダルマグネットによる)、1.0~7.5T·m ($1.6 < |\eta| < 2.7$, エンドキャップトロイダルマグネットによる) がこれを可能にする。なお、50mT以上の磁場強度を持つ空間を積算すると12,000m³になる程、巨大な装置である。

この磁場領域を挟む形でトラッキングチェンバーを配置し100GeVのトラックに対してミューオンシステム単独で精度4%の運動量を得る。衝突点近傍、半径1.1mまでに存在しているシリコン検出器とソレノイドマグネットをベースにしたトラッキングシステムが存在するが、それぞれ独立に得たトラックのつながりあわせや、運動量のコンシステンシーチェックにより、より精度が高く、正確なトラッキングが可能である。

ミューオンシステム単独でのトラッキングが可能であることのご利益は、トリガーシステム、特にレベル1にあるかもしれない。ATLASのMuon LVL1システムは6層、あるいは7層のチェンバーのヒットコインシデンスを要求し、そのヒットパターンからミューオンキャンディデートに荷電情報、 P_T の情報、飛び込んだ位置の情報などを付加して

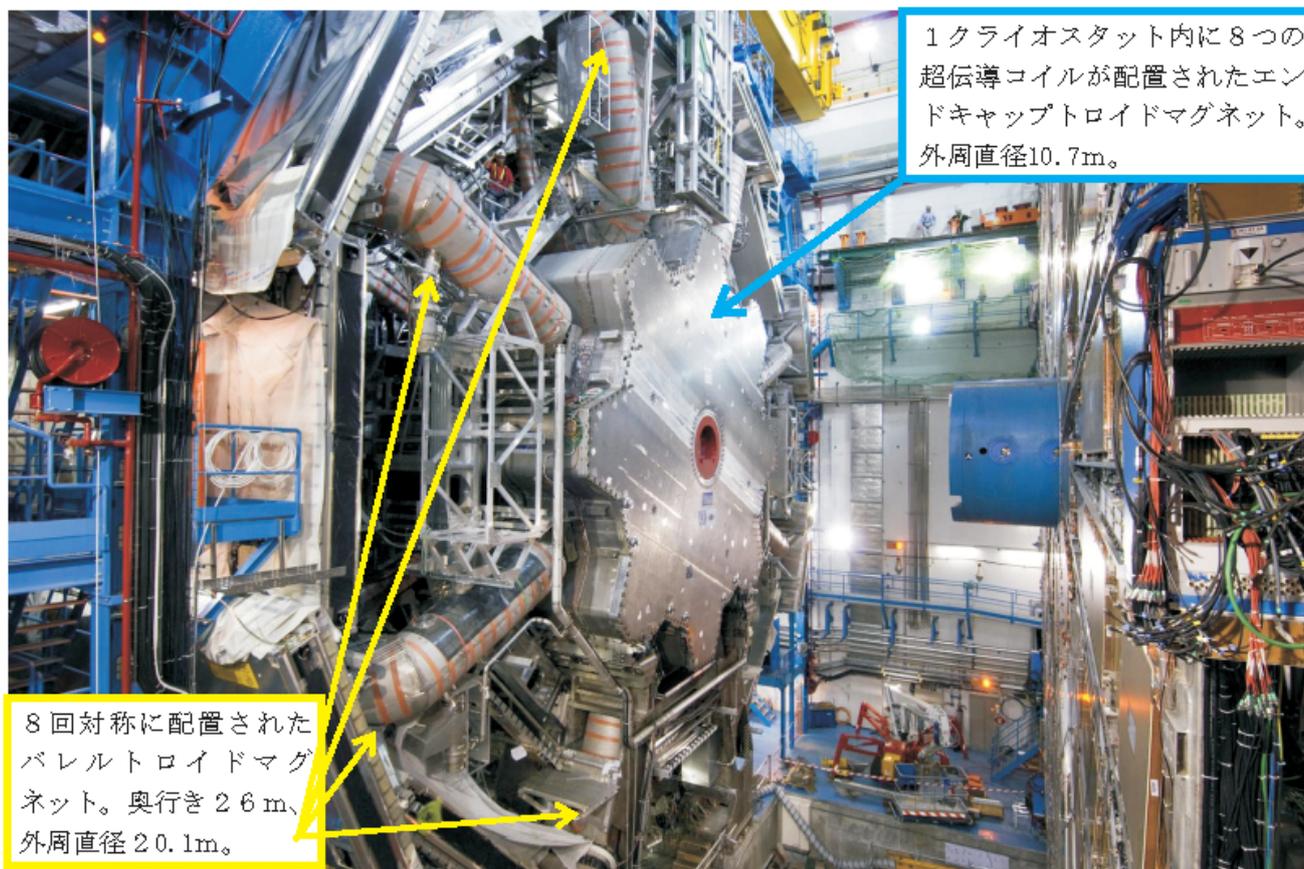


図1 左側に8回対称に配置されたバレルトロイドマグネットと一つのベッセルに8個のコイルが組み込まれたエンドキャプトロイドマグネットが見える。画面右端は TGC Big Wheel。

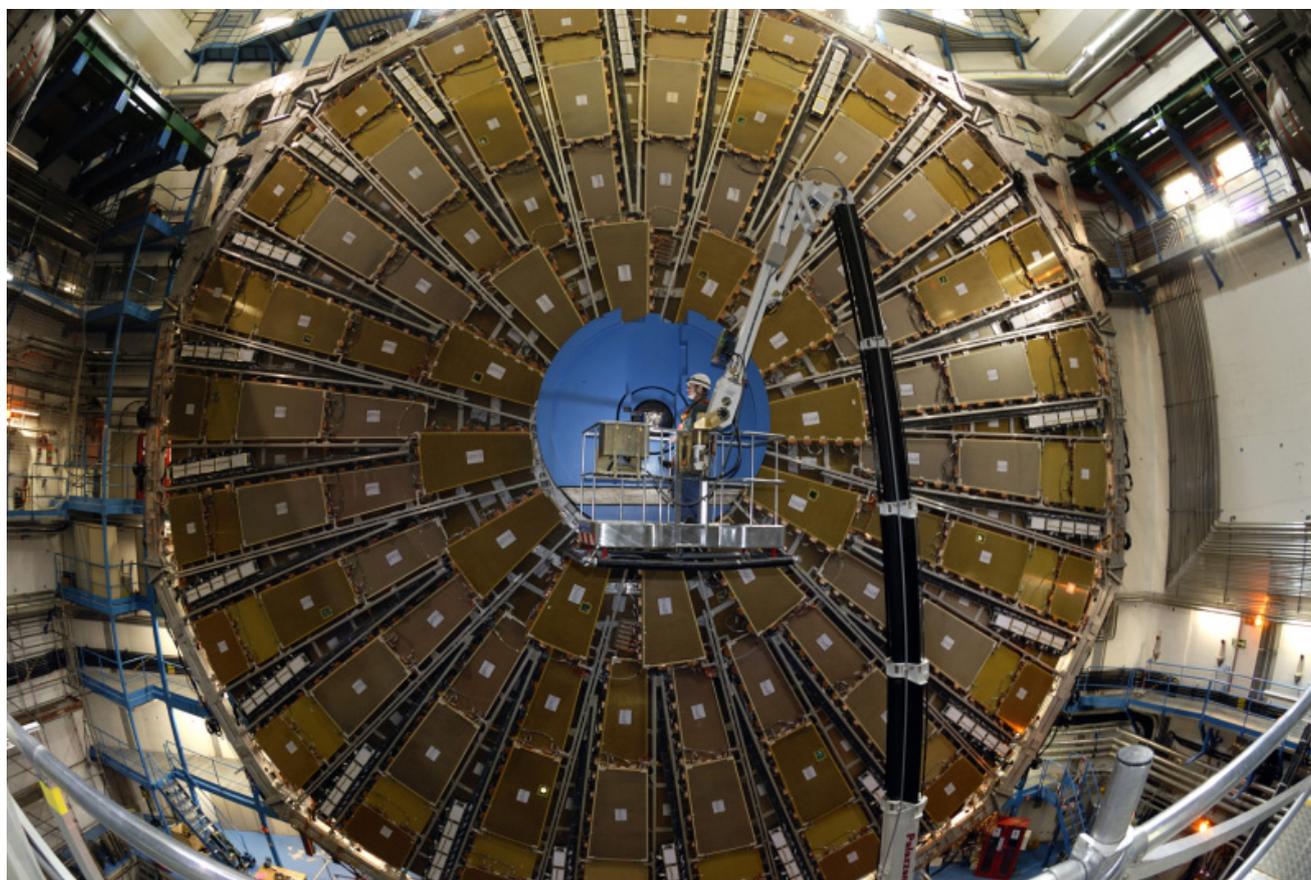


図2 完成した1枚目の TGC (Thin Gap Chamber) Big Wheel

Central Trigger Processor (CTP) に渡す。Calorimeter の情報も CTP に渡され、LVL1 としてアクセプトすべき衝突バンチであるかどうかの判断が CTP でなされる。ミュオンシステム自身に磁場が存在し、各トラックキャンディデートに対して P_T 、チャージの情報が付加されることで、柔軟なトリガメニューを LVL1 の段階で用意することが可能になる。用意可能な P_T の閾値は 6 種類であり、典型的には 6, 8, 10, 15, 20, 40 GeV/c が境界として用いられる (= 1 チャンネルの granularity, 磁場の強さが、その程度の分解能を持つように設計されている)。たとえば、20 GeV 以上の P_T を持つミュオンが 1 発やってきたらトリガーを引く、というのはもっとも単純な例。6 GeV 以上 1 発, 10 GeV 以上 1 発, ただし両者の電荷は異なることを条件としてトリガーを引く、という条件を課すことも LVL1 で可能である。目的とする物理に応じて柔軟にトリガー条件を課し、効率よくバイアスをかけてイベントを選び出していくことができる。LVL1 のレイテンシーは $2.5 \mu\text{sec}$ と決められており、内部飛跡検出器のヒット情報を併せて判断している時間的余裕はないので、これはミュオンシステム自身が磁場を持っているが故のご利益である。

2. ミュオントリガーシステムの組み上げ

以下、ATLAS のミュオントリガーシステムのエンドキャップ部分の組み上げにまつわる話をする。何はともあれ図 2 が 2006 年秋に地下 100m の ATLAS ピットで完成した 1 枚目の Big Wheel の写真である。ATLAS のエンドキャップ部を閉じる直径約 23m の構造体であり、大きな円盤型のオブジェクトであることから Big Wheel とのニックネームで呼ばれている。地上でのアセンブリの単位は図 3 に示した二等辺三角形のオブジェクト、TGC セクターであり、これを作り溜めた後、1 日 1 台、スケジュール管理サイドからの強烈なプレッシャーがかかった時期は、1 日 2 台地下に降ろし、それを壁に貼り付け、隣のセクターとの間を接続することで 1 枚の Big Wheel が完成する。都合 6 枚の Big Wheel を完成させるために、われわれは 72 セクターを完成させた。

2.1 システム組み上げ 地上編 (TGC セクター)

2005 年 3 月から CERN の West Hall と呼ばれる実験ホール $140\text{m} \times 50\text{m}$ をフルに活用してセクターアセンブリ作業を進めた。元来この建屋は SPS 加速器からの 1 次, 2 次, 3 次ビームを利用した物理実験エリアとして使われていたが、2000 年頃から ATLAS 測定器の構成要素のアセンブリホールとして主に利用され、電磁 Calorimeter (Barrel & End-Cap) のアセンブリ、ソレノイドマグネットのコミッショニングと Barrel Calorimeter クライオスタットへの組

み込み、バレルソレノイドマグネットアセンブリなどが行われた。予定では 2004 年前半にわれわれ、ミュオンエンドキャップチーム、がこの場所を使い始める予定であったが、予想外にバレルソレノイドマグネットのアセンブリに時間がかかり、結局 2005 年 3 月のスタートとなった。20m \times 5m のどでかい 8 つのバレルソレノイドが床を埋め尽くしている間、早くピットへ搬出されてしまえ、と日々毒づいていた。元々、一つ目のセクターアセンブリを通じて半年位、現物でケーブルインストールの詳細、手順の最適化、チェンバーインストールの練習、作ったもののテスト方法のチェックの確立などが行えることを見込んでいたが、そのための時間は完全に吹き飛んでしまった。スタートが 1 年近く遅れたからには、こちらの準備は万端かという、必ずしもそうはいかず、実際に作業が始まってから理想のスピード (1 セクター/week) に達するまでには実に 1 年という時間が必要であったことが図 4 の作業進行表を見るとわかる。作業の慣れ、場所の確保、道具の改良、必要最適数の確保など、インフラの整備にそれだけの時間がかかった。

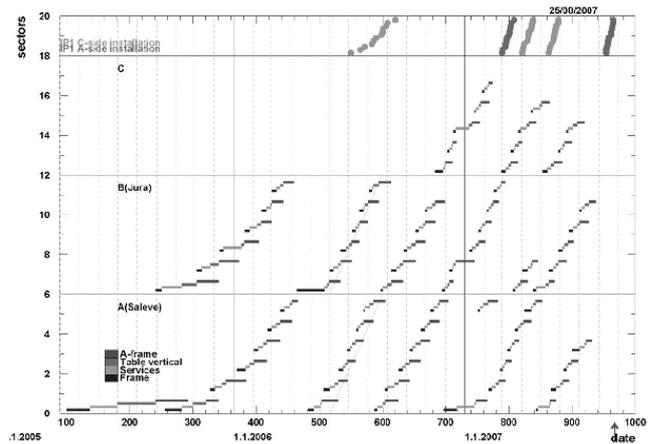


図 4 TGC セクター組み上げ作業進行の歴史

横軸の単位は日、縦軸の単位は完成セクター。1 セクターの完成に必要な 4 つの大工程のそれぞれが一つの横棒 (点) に該当する。

具体的な TGC セクター組み立ての内容と、それをを行う人員を以下に示す。いわゆる学術雑誌にこの手のことを書き留めるチャンスはないが、直接・間接的に実験屋 (あまりファンシーではないタイプの) にとって、何らかの糧になると思うので、この場を借りて記憶が風化する前に細かいことにこだわった記録を残してみたいと思う。

2.1.1 チェンバーの準備

1 セクターには 10 種類、22 台のチェンバーユニットが組み込まれる。チェンバーの制作は 1999 年にイスラエルで、2000 年には日本でスタートし [2]、以来制作工程の各段階で KEK における動作テスト、神戸大学での宇宙線テスト、



図3 TGC セクター
地上でのアセンブリ単位で Big Wheel の 1/12 をカバーする。



図6 サービスインストールが済んだセクターを黄色いテーブルごと 90 度回転させ、表面にチェンバーをインストールしたところ



図7 チェンバーインストールのための吊り具

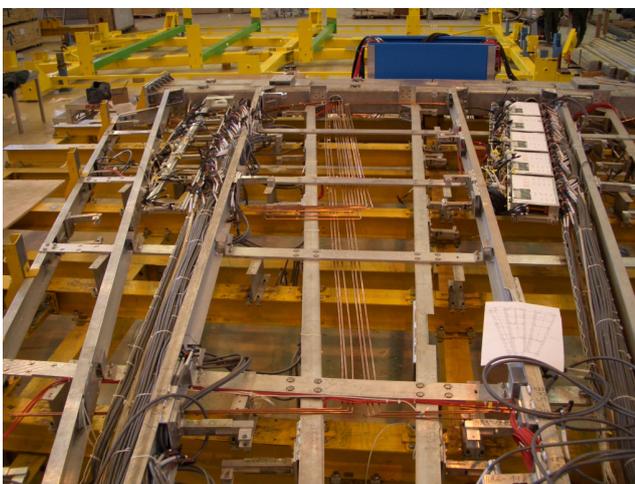


図5 ガス管、信号線 7 種類、高圧ケーブル、信号読み出し回路、トリガー回路などのサービスを組み込んだ第 1 号セクター (2005 年 6 月)



図8 The LAST セクター
72 個目のセクターを運搬用トレーラーに収納しているところ。

CERN 搬送直後のアクセプタンステスト、と執拗にテストを繰り返してきたが、やはり組み込み直前にもテストし万全を期した。

チェンバーとしての動作安定性については、それまでの動作テストの甲斐もあって特筆すべき問題点は出てこなかったが、ガスリーク、といってもいわゆるチェンバーポリウムからのリークではなく、それを囲う空間のリーク修理に予定外の時間と人手を奪われた。これは歴史的事情に絡んだ設計不備に足下をすくわれたという典型的な例で、TGC では *n*-pentane をクエンチャーとして利用するが、設計が固まった後のある時点で、このガスが可燃性であることから安全部門がイチャモンを付けてきて、これをかわすために後付けでバッファ空間を設けてそこに CO₂ を流せば爆発限界以下の混合比率に抑えられるのでよいだろう、ということで合意した。しかしながらこの部分、チェンバー設計段階で詰めていなかったこともあり、糊代のないブラモデルを組み立てるかのようなぶざまな仕様になってしまい、止まっていたはずのリークがこの最終インストール段階で散見される事態に陥った。しかも、よいのか悪いのか、リーク自体はわずかであるために場所の特定が困難という塩梅で、この行程は 2 年半の間、常に自転車操業状態であった。

ここにはイスラエルのテクニシャン 2 名と日本人の物理屋 1 名が常に張り付いて、ことにあたった。ここでの人員消費はまったくの予定外であった。他にチェンバー準備として、チェンバー位置を後の写真撮影で得るための撮影用特殊ターゲットの貼り付けや、ガス導入管の処理、位置モニターセンサーの貼り付けなどを同時に行なった。

2.1.2 組み込み部品の準備

大物から小物まで、多種多様なブツが必要になる。一つの TGC セクター（円盤の 1/12 相当）の作成に必要なのは次のようなものである。

構造体作成（図 5 参照）

- *r*-方向に走る高さ 173mm、最長 8.5m のアルミ I-（あるいは U-）プロファイル 10 本
- 上記プロファイルと直行するアルミの板（断面 150mm×15mm 厚、最長約 5.3m）8 本
- Big Wheel の外周に位置し全体の構造を支える一辺が 50cm の角パイプ型アウタービーム（実際には 5 タイプあり、セクターがインストールされる位置に対して一意に決まっている）
- 最内部の構造を作るインナーリング
- チェンバーを支えるアルミブラケット 66 種類

サービス系アイテム

ステンレス製ケーブルトレイ 3 種類（3m×4 本、3m×6 本、3m×4 本）、プラスチック製ケーブルトレイ（2m×6 本）、銅ガス管 2 種類（6mmφ×50m、8mmφ×100m）、プラスチックチューブ（12mmφ×10m）、80 芯信号線 総長 600m（136 本、段ボール箱 9 箱分）、トリガーデータ、ヒットデータ読み出し線 総長 1,110m（15m×74 本）、HV 線 総長 380m（44 本）、9 芯 LV 線 総長 110m（36 本）、タイミング・トリガー供給線 総長 170m（34 本）、温度センサー+ケーブル（22 本）、アナログ信号モニター用リモケーブル（22 本）、チェンバー相対位置モニター用ケーブル（56 本）、オンセクターエレクトロニクス（PS-Board）[3]18 箱、それを支える梯子状の構造体（2 本）、その構造体を支える C-チャンネル（16 個）、電源分岐箱（2 箱）、ガスコネクター 3 種類（6-6mm 12 個、6-8mm 24 個、bulkhead type 8-8mm 16 個 超音波洗浄済み）、ガスマニフォールド 1 to 8 タイプ 6 個、ネジ、ワッシャー M6、8、10、12 多数、各種工具、追加用ラベル、各種工具、...

他にも細かい物品はいくらでもあり、悪乗りしてすべてを書き出したら、おそらく更に半ページは優に埋まるが、なにしろ、これらの物品を組み上げていくことで TGC セクターが一つ完成する。そして組み上げた総数は 72 セクターである。

この物品管理、現場への供給、品質管理は基本的に全責任を一人で負って 2 年半を凌いだ、なかなか厳しかった。物品に不備があれば、7 人から 8 人の作業は、ただボーツと突っ立っているだけになる。これはなかなかのプレッシャーである。何度かそんなシーンが夢に出てきたが、幸い現実には、そのような目にはあわずにすんだ。企業、各インスティテュートの物品作成責任者をせっつきつつ、現場の進行状況を先読みしながら、なんとか大きな失態を演じることもなく最後までたどりつけたが、初期に数例、物品の選定ミスがあり作業のやり直しを引き起こしてしまったことがあった。丸 1 日の労働を棒に振ることになり、翌日、前日インストールした物をひっぺがし、同様な仕事を行なう様、説明、指示するというのは非常に嫌な体験であった。

2.1.3 TGC セクター骨組みの構築

チェンバーインストール前の様子が図 5 に示されているが、そこに見えるアルミの材料が TGC セクターの骨組みである。

最初に、図 5 にみられる黄色い鉄骨を組み合わせてできた「テーブル」上にアウタービーム、インナーリングを設置し、I-プロファイルを精度 2mm で並べていく。長さ 8m 強、かつ、後にインストールされるチェンバーを支えるためのブラケットの台座を溶接する際の熱の影響で一目瞭然

のゆがみをもっている I-プロファイル 5 本を強制的にまっすぐに整形しながら精度よく配置していくために、テーブルの側に工夫したクランプ、ピンを配置して短時間で作業が終えられるようにした。それと直交する方向に置かれるアルミの角板もピンを 3 本利用して実に単純に誰がやっても必要精度を満たすように設置することが可能であった。さらにアルミの角板より上側に位置する I-プロファイルを同様に 5 本設置しクランプで仮止める。

次の作業は、骨組みをネジで締め上げるための現物あわせでの穴開けである。アルミの角板にあらかじめ精度のよい穴加工をしておき、それをガイドにして相方の I-プロファイルに現場あわせで穴を開け、トルクレンチでネジをしめあげ骨組み完成である。ネジ締め箇所数を図面で確認すると 332 カ所であった。

全行程 3 日。図 5 の黄色いアセンブリテーブルに凝らした、部品配置のための工夫の数々が、短時間での作業を可能にした。デザイナーのアイデアの勝利である。また、図 2 にある通り、12 セクターをつないで一つの円盤が構成された。材料、および、その組み上げ精度が許容範囲内であったことの証拠である。

この作業はパキスタンからやってきたチームが行なった。常に 6 人位のメンバーが四半期交代でやってきて作業にあっていたが、リーダーを中心に力強く、黙々と仕事をこなす姿が印象的であった。

2.1.4 サービスのインストール

各種ケーブル、ガス管、組み込みエレクトロニクス、他、この時点でインストール可能なありとあらゆるサービスアイテムを骨組み完成直後にインストールした。

物品の内容は実に多様であり、立体的にお互いは交差し、入れる順番を誤るとすべてが収まらない。この時点では、一見、使ってよいスペースに見えるが、実は後の工程でインストールされるチェンバーに浸食されるスペース、セクター完成 1 年後にピットに収めた時点で隣のセクターが、あるいは、他のサブディテクターが入り込んでくるスペースなど、見えない envelope に注意しながらデザイン、手順を固めていった。

最初は図面上でストーリーを描こうと努力していたが、途中でちががあかなくなり模型に頼った。しかも 1:10 模型からはじめて、最後には 1:1 模型まで作った。インストールするケーブルの長さをあらかじめ決定しなければいけないというのが 1:1 模型を作った主な理由であったが、手順を固めていくにも本質的な役割を果たした。立体的に複雑な構造を持つオブジェクトのデザインをするには模型を作

ってアプローチするのが近道であると改めて感じた。(よっぽど頭のよい人は別かもしれませんが。)

この工程はイスラエルのテクニシャン 4 名が行なった。彼ら、彼女らのうち約半数はチェンバーを長年制作した経験のある人々であり、ガス管、ガスコネクターの取り扱い、ケーブルのコネクターを壊さないように注意するなど、作業のイロハをあらかじめ持っていたためか、非常にスムーズにことは運んでいった。時にはよりよい方法、特に作業の並行度の向上について、彼らからの提案を受けて現場で議論をし、全行程で 3 日かかると思っていた作業が平均 2.5 日で終わるように改善されたということもあった。

2.1.5 チェンバーのインストール(おもて面)

サービスがインストールされたセクターは、黄色いテーブルごと 90 度回転し、図 6 のような状態にしてチェンバーのインストールを開始する。

チェンバーは 11 種類(外形が異なる)、重さは 50kg から 80kg 程度、設置される台形の角度は目的地毎に異なる。1 台インストールするのは大した作業ではない。が、通算 1,500 台つっこむとなると、さすがに考える。すべての型に対して共通なコンセプトでチェンバーを保持できること、安全に作業ができること、素早く異なる型へ移行できること、説明なしで使い方が想像できることなどで、1 年がかりで数度考察キャンペーンを行ない達した答えが図 7 に写っている、少々へんてこな吊り具である。2 年半使ってみての満足度は 90% 程度であるが、チェンバーのインストール、引き続いて行なわれるチェンバー側へのサービス接続、信号線、HV 線、ガス管などをつなぎこむ作業が予定通り 2 日以内にコンスタントに終わられたのでよしとする。この作業もイスラエルのテクニシャンが 2 名で行なった。

2.1.6 チェンバーのインストール(うら面)

ここまでで衝突点に近い側の半数のチェンバーのインストールが済んだことになる。うら面、というか、図 5、図 6 でいうとアルミフレームと黄色いテーブルの間の空間に収まるもう半分のチェンバーをインストールせねばならぬが、図 6 の状態のままでは不可能である。

そこで、図 3 で少々セクターに隠れてしまっているが、やはり黄色く塗られた鉄の構造体(見た目がアルファベットの A の字を連想させるので A-フレームと呼んでいた)でセクター全体をつかみあげ、黄色いテーブルから引き離し、別の場所へ移動、衝突点から遠い側の面を解放してチェンバーのインストールを可能にする。

2.1.2 で書いた骨組みの構成要素の dimension をみて、全体のサイズの割に部品が貧弱であると思った方がおられる

と思うが、まさにその懸念は正しく、各部品を運搬する時などこれで大丈夫かと心配になるほどによくしなう。組み上げた後強度は増すが、骨組みを直接クレーンで吊れる程には強くない。そこで、A-フレームが必要になる。この時点での移動、後のセクター保管スペースへの移動、そこから ATLAS ピットへの移動、すべての移動に A-フレームを用いた。

チェンバーインストールの作業自体は 2.1.5 で述べたのとまったく同じ要領で行なわれ、2 名、2 日で 11 台のインストールとケーブル、ガス管のチェンバー側への接続を終えた。ここまでで骨組み開始から数えて 10 日間、1 週間で稼働日が 5 日なので、ちょうど 2 週間になり、この作業までが全体の工程期間を決める要素となる。この後、チェンバーがインストール位置の測量、保管スペースへの移動が行なわれるが、これはクレーンの空き時間、手の空き具合に応じて便利な時に行なった。

チェンバーがインストールされた位置の測量であるが、チェンバー準備の段階でチェンバー表面に貼り付けた鳥の目玉の様な、ストロボに対してよく光るターゲットに対して CERN サーベイグループが 72 台のセクターのすべてをサーベイした。ターゲットを 1 台のチェンバーに対して最大 4 ヶ所貼り付け、その絶対位置を知らせてもらう。サーベイグループは精度 100 ミクロン以下で絶対座標を出してくるが、実際にはそこまでの精度は必要なく、そもそもターゲット貼り付けの精度自体はせいぜい 1mm、構造体のゆがみによる本来あるべき位置からの変位は最大 3mm 程度あるので、4mm 以上、測定結果とあるべき姿に食い違いがみられたらそのチェンバーの位置を修正（チェンバーを支えているブラケットの位置を修正）するという対処をした。測量後、セクターを保管スペースに移動する。

2.1.7 完成したセクターの検査

ここまでで、メカニカルにはセクターが完成したことになるが、そのまま地下へ降ろすわけにはいかない。宇宙に検出器を飛ばすほどではないにしても、いったん地下へインストールしてしまえば、アクセス不能になる箇所は多く、また、可能な場所にしてもアクセスが困難であるので、作業性が悪いので、地上では簡単にできることに 10 倍の時間がかかってしまうという事情がある。というわけで、事実上、セクターのアセンブリホールを出るタイミングが Point of No-Return である。このことを何度も、何度も繰り返し自分自身に、テストチームに言い聞かせながら、緊張感を持ってことにあたった。具体的なテストの手順は、以下のようなものである。

1. チェンバーにガス (CO₂) を流し、10 回置換以上を待つて高圧 2.7kV をかける。テスト期間中(1 週間程度)は、

できる限り高圧をかけ続け、トリップの回数が多いものはカレントリミットをできるだけ高くしてゴミを焼きにかかる。それでも解決しないものは交換する、ということをした。実際には、HV がかからないことが理由で交換したチェンバーの数は全体で 3 台程度と少なかった。この時点までに繰り返されたテストのご利益と言えるが、それでもゼロではなく 0.1% のオーダーで基本的な不具合が出てしまったということは、ダメなものをダメと判断しきれていない、あるいはインストール、運搬の過程が理解を超えた悪さをしていることになり、将来への一抹の不安を感じるが、追求はできていない。

2. 1. と平行してセクターに組み込んだエレクトロニクス [2], その間をつなぐケーブルのテストを行なった。まず、テスト用の専用ラック 1 台に収まるエレクトロニクス群に、ヒットデータ、トリガーデータを転送する CAT6 ケーブル、ファイバー、スローコントロール用 CAN ケーブル、LV 線などを接続する。検査セクターから直線距離で 50m、その間に張ったファイバーの経路に沿って 150m 先にはデータ取得用ボードコンピューターなどが置かれたミニエレキハットがあり、front-end エレクトロニクスのコンフィギュレーション、ランのコントロールなどはそちらから行なう。このスキームは最終的にピットで使われるものに比べて規模が 1/12、考え方によっては 1/36 ではあるが、まさに共通のシステムであり、ソフトウェアなどもアトラス標準のものを用了。このセクターテストの主目的は完成セクターのテストであるが、同時に、このテストをただの作業に終わらせることなく、最終的なデータ収集系構築のための訓練の場としても利用した。ランのメニューとしては、
 - a) ひと通り front-end エレクトロニクスのレジスターにアクセスし、システムの健康を確認。
 - b) オンセクターエレクトロニクスの PS-Board[2]までテストパルスを送り、エレクトロニクスの健康を確認。
 - c) その先の On-Chamber のアンプヘテストパルスを送り、アンプから下流、ケーブルを含むすべてのアイテムが健康であることを確認。1 チェンバーに 1 ライン、アナログ信号をモニターできるしかけを用意してあるが、これの動作確認もテストパルスをとらえることで同時に行なう。
 - d) 次に宇宙線を利用した総合コミッションを行なう。われわれの TGC システムは元来、トリガーを出すことを目的にしているために、余計なしかけを用意することなく、自身でトリガータイミングを作れるので物事が進めやすい。部分的にチェンバーを稼働させながら、対応する場所に反応が出現することを HV、信号線、ヒットデータ・トリガーデータ転送線などの

誤配線（主にスワップ）をチェックする。実際、2, 3 セクターに一つ程度の割合でなんらかの間違いを発見したので、このテストは非常に有効であった。繰り返すことになるが、間違いがチェンバー側にある場合、ピットに降りてしまった後では、修正したくとも、どんなに作業そのものは簡単であろうとも、アクセスできない場所については、お手上げである。このテストの後、セクター上のチェンバーすべてを稼働させてセルフトリガーで宇宙線でのデータを取り、ヒットプロファイル、ヒットマルチプリシティなどの基本的なヒストグラムを確認して、極端にノイジーなチェンバーがないこと、欠けチャンネルがないことを確認する。

- e) 宇宙線のランを行なっている間に温度、チェンバー相対位置を測定するポテンシオメーターのスローモニターが稼働していることを確認する。

というわけで、一連のテストが行なわれる。老若男女、日本、イスラエルの物理屋が入れ替わり立ち替わりテストの進行に寄与したが、特に日本の大学院生はこの中でコアチームの役割を果たしテストを推進していった。すべてが問題なく流れると3日で終了するが、ひとたび問題がおけると1週間程度の時間は瞬く間に流れていってしまう。ピットにでていく前のセクター保管スペースで行なっている作業なので、短期的なプレッシャーは少ないが、だいたい3ヶ月先をにらみながら、いつまでに何セクターこなさねばいけないのか、許された時間のなかでどこまで問題を追及するか、どこであきらめるか。物品、特に大作業になるチェンバーの交換、しかも原因がノイズという場合、100%の確信がない中で決断をすることになる。経験の積み重ねにより最終的には自信を持って決断できることは多くなったが、実にいろいろな問題が出て、悩みながら決断をしていたことは多かった。なお、現時点で解決しきれなかった死にチャンネルの数は250kチャンネルに対して35、割合で言うと 1.4×10^{-4} 。

2.2 システム組み上げ ピット編(TGC Big Wheel)

CERN West Hallのセクター保管スペースでピットへの移動準備を完了したセクターは数日から数ヶ月、放置され、ピットへのインストールを待つ。他のATLASサブディテクターの作業との折り合いをつけ、作業期間を確保してピットへの搬送をはじめ。図8にあるトレーラーで搬送する。タイヤの数が10列×4輪で合計40輪、あまり普段お目にかからない代物である。

(1) West Hallからピットへの搬送し、それを地下100mに降ろして床に設置する。(2)前日床に設置されていたセクターをATLASの壁から突き出ている5本のピン(セクター外側2本、内側3本)に差し込み、A-フレームをWest

Hallに持ち帰る。これを1日1回行なう。これらの二つの作業を平行に進め、およそ12 working daysで1 Big Wheelを完成させる。1チーム4名、2チームでことにあたる。クレーンドライバーとそのサポートスタッフは別に2名。他にセクターインストールチームはセクター間の接続作業を空き時間を利用して行なう。

Big Wheelが完成すると次に行なうのが、セクターの間をまたぐタイプのサービスインストールである。データ読み出し、エレクトロニクスコントロールのためのファイバーバンドル48芯100m×26本、スローモニター、コントロール用CANケーブル100m×26本、電源コントロール用ケーブル100m×14本がコントロールルームまで達する長いもの。他にもピット内ガス供給ラックから各セクターに設置されているマニフォールドに到達するまでのガス管10~25m×240本、セクター周辺に設置するエレクトロニクスのAC電源線30m×24本、水冷のための配管、煙探知機の信号転送線などを1週間でインストールする。ピットでの作業時間は極限まで切り詰められており、かつ、25mの高さまで到達可能な作業台(現場ではナセルと呼ばれていた)は一つしかない。常に2チームから3チームが、隙あらばそれを使用したいという状況が1週間続くので、事前ミーティングでの使用権争いは熾烈を極めた。

一切のサービスインストール、セクター間のメカニカルな接続終了後、ピンで支えられているBig Wheelの荷重を時計の2時と10時の位置から伸びている腕(図2)を使って台車(図2の緑色のレールの上にある)に移動させる。特に1枚目のBig Wheelに関して、台車にかかる荷重をモニターしながら数本ずつピンを抜き、あらかじめ計算で予想した荷重移動がされたかをチェックするという工程を繰り返している間は空気が張りつめていた。丸一日かけて60本のピンが抜けた時には、拍手喝采であった。

最後に台車でBig Wheelを約7m前進させ、測定器のオペレーション地点近傍まで移動させる。台車の速度は2.5cm/minから15cm/minまで5段階の調節が可能である。直径25mものオブジェクトが移動する光景というものを、うまれてはじめて見たが、遠近感がぼける、平衡感覚が悪くなるなど異様な感じがした。これも最初は丸一日がかりの大作業であったが、今では日常的に周辺の要請に応じて、前後へ気軽に移動させ(られ)ている。

3. ミューオントリガーシステムの立ち上げ

TGC LVL1トリガー、DAQシステム立ち上げの詳細報告は、若葉の季節にすべてのセクターが稼働状態に入るマイルストーンを待つことにして、ここでは簡単にcommissioningの現状について述べる。

TGC は最後から 3 番目に地下に降ろされた ATLAS サブシステムである。ATLAS では 2, 3 ヶ月に 1 度、可能な限りのサブシステムを参加させて一緒に宇宙線を取得しましょう、というキャンペーンを行なっている。検出器自身の試運転という意味合いもあるが、現段階ではオンラインソフトウェアの validation, データ転送パスの機能チェック, オンライン, オフラインのモニタリングシステムのデバッグという意味合いの方が大きい感じがする。

TGC も 2007 年夏からこのキャンペーンに加わった。われわれはトリガーを出すシステムであるので、それを受けて FIFO からデータを引っ張り出してくるだけの他の多くのシステムとは、意味合いが大分異なり、それだけにシステムの安定性、信頼性が参加初期から要求された。

現時点で、72 セクターのうち 10 セクターを稼働させた。宇宙線トリガーは TGC の 1/4 領域から ATLAS-DAQ システムに配布している。現在のボトルネックは納品の遅れている LV/HV 電源システムとチェンバーオペレーションガスの供給源からピットへいたる配管作業の進行にあるが、2008 年 4 月中にすべての検出器に火を入れることを目指している。

4. 大規模プロジェクトの推進に大切なこと コーディネーション

ATLAS の検出器組み上げの大本営として TC (Technical Coordination Group) という組織が存在する。この存在なくして、ATLAS の様な大規模検出器の完成は不可能だ。われわれのようなサブディテクターを構築していく立場の人間にとって、直接的には全体のスケジュール管理で TC との闘いがくりひろげられる。また、ATLAS ピット周辺で検出器を稼働させるためのインフラストラクチャの整備全般 (電気、ガス、水道、アクセスプラットフォーム、*etc.*)、検出器を ATLAS に組み込むためのしかけのデザインにはじまり、材料調達、制作組み立て、運搬までのすべてにわたって人的支援込みで TC からのサポート、また CERN の専門チームからのサポートを受けた。つまり、日程、工程のコーディネーションをはじめ、インフラと呼ばれる部分の実働も行なう巨大、強力なグループである。

ピット内外の日程、工程管理における TC のリーダーシップは尊敬に値するもので、しばしば、とある理由により、不本意にスケジュールをタイトにさせられたり、インストールのタイミングをずらされたりして困難に陥ることがあるが、こちらとしてはそれに合わせて自分らの持つ力の限界を引き出すことで期日に間に合わせる。その分、他の何かが進行し ATLAS 全体としては完成に一歩近づく。およそ気付く限りの日程のスリムアップを貪欲に試みる、時に

数個のサブディテクターを含む方針変更も、その効率改善に勝算があれば調整をいとわず強力に推し進める。言うのは簡単だが、その背後で行なっている努力は並大抵のものではないはずだ。大規模プロジェクトを限られた期日の中で遂行するのに不可欠の存在である。

人的、物的インフラストラクチャと事前の計画の重要性

TGC 72 セクターのアセンブリをはじめにあたり、どの建屋を利用して、どのようにインフラを利用しながらことを進めていくかという検討を、TC グループを巻き込みながら執拗に行なった。特に床面積、クレーンの数・性能、天井・ドアの高さなどがわれわれの場合ポイントであった。物的なもの、人的なもの、どちらも重要であるがどれだけのインフラを用いて、ことを完遂できるかという目算が立たないうちにことを始めたら、必ず途中で計画は頓挫する。頑張ればなんとかなる、気合いで切り抜けよう！というのは、72 TGC セクターの完成という目的にはまったく通用しない手段であった。当たり前のことではあるが、今、あらためて思う次第である。戦略が立たないうちに戦争を始めてしまっはいいけません。

人的なインフラという観点でいうと、これも CERN の専門家たち、アトラス TC からのサポートに大分助けられた。特にデザイナー、エンジニアの能力にはほとほと感心した。2005 年に実際の作業を始める前の 3 年間、TC チームのエンジニアのところ週に 2, 3 回通いつめ、図面を仕上げた。彼らはもちろん物理のことは何も知らない。たとえば Big Wheel チーフエンジニアの Raphael はパリの Charles-de-Gaulle 空港の美しいゲート 2F のデザインチームで働いていたし、Big Wheel フレーム内のありとあらゆるサービスインストールのためのしかけの図面描画してくれた Erik は Volvo で自動車の図面を描いていた。しかしながら、物理を知らないということは、彼らの専門能力の高さ、アイデアの豊かさに比べると何の問題にもならない。とことん、彼らとコミュニケーションを取ってこちらの実現したいことを伝えることで、すべての困難は結果的に解決されたし、こちらのイメージーションが及ばなくなり始めるセクターハンドリングツールの様な大物に関しては、ただただ、彼らに頼りきりであった。

他にも TGC セクターアセンブリ遂行の中で、多くの CERN チーム、ATLAS TC からのサポートを受けたことは第 2 章で述べた通りである。セクターのトランスポート、測量、West Hall 内のスケジュール管理、他のグループとの間のリソースシェアリングの調整において、限られたスコープ内で物事に取り組む専門的能力の高いグループや個人の果たした役割は本当に大きく、表面的にはわかりにくいことではあるが CERN の底力とはこういうものかと思いま

した。プロジェクトを開始する段階で、表面には出てきにくくいリソース、インフラまで込みで検討、準備することが大規模プロジェクトを時間内に遂行するために重要であることを再認識させられた次第です。

TGC セクター組み上げというマイルストーンに到達しての個人的な感想

TGC チームとして物理屋 15 人、テクニシャン 10 人、CERN・TC 側の人で直接関わる人 25 人、あわせて 50 人の仲間と作りあげた 6 枚の TGC Big Wheel 組み上げプロジェクトは、実に楽しいものでした。この世紀の大プロジェクトに参加、かつ、チームをリードしていく立場で関われたことは、本当にラッキーなことでした。

リーダーシップ、というものについて考える機会も多かったです。多分、その観点で、うまくやりきれていないなあ、という意識が常にあったということなのでしょう。セクターアセンブリを通じて熟成されてきたモットーは、

- 実現したいことをクリアに、何度もチームのメンバーに伝える。何度でも繰り返す。お経のように唱え続ける。コミュニティのサイズの大きさの分だけ、よりメッセージをクリアにすること、繰り返すことが要求されるのは当たり前。面倒だと思っはいけない。
 - 決断をすることをおそれない。決断をしないよりは、間違った判断でも下した方がまだマシ。チームの面々はそれに従って行動を進められ、その失敗の中で何かは学ぶ。
 - 常に前向き、あきらめない。転んでもタダでは起きない。
- という様なものでした。

だらだらと書き続けましたが、ここで終わりにします。TGC Big Wheel 6 枚が完成するまでのすべての作業は必要不可欠のものであり、そのすべては貴重でした。このプロジェクトに寄与をしたすべての人々は、この成果を誇りに思っよいいと思います。

ATLAS 実験開始に向け、TGC チームはシステム全体の立ち上げを急ピッチで進めていきます。

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] 佐々木 修, 高エネルギーニュース, 26 巻 3 号, 2007.