

アトラス実験ミュオントリガーチェンバーの開発

KEK 素粒子原子核研究所

田中 秀治 shuji.tanaka@kek.jp

2006 年 (平成 18 年) 8 月 31 日

1 はじめに

2007 年に始まる LHC 実験では 14 TeV の陽子陽子衝突によって、1 TeV 周辺の素粒子現象の直接探索が初めて可能になるようとしている。ここでは、トップクォークの大量生成、ヒッグス粒子の発見やその性質の研究が可能になり、標準模型におけるゲージ対称性の破れの機構の解明につながることを期待される。また超対称模型や、その他標準模型を越える粒子の発見やその性質の研究により、超対称模型の破れの機構自体が明らかになる可能性が考えられる。LHC 加速器では ATLAS [1]、CMS、ALICE、LHCb の四つの大型実験が計画されているが、われわれが参加している ATLAS 測定器は高さ 25 m、長さ 45 m にもなる最大の検出器になる (図 1 は地下での建設中の現場)。

日本 ATLAS グループは 1994 年に結成され Thin Gap Chamber (TGC) [2][3]、シリコンストリップ検出器、ソレノイドマグネット、Monitored Drift Tube 用 TDC チップなど ATLAS 検出器のさまざまなハードに貢献しており、さらには物理解析のみならずシミュレーション、トリガーなどのソフトウェアなど多岐にわたって参加している。ATLAS 実験で用いられるミュオンスペクトロメータは超伝導トロイド電磁石が特徴的で、機能別に超伝導トロイド電磁石、高精度飛跡検出器、トリガー検出器の三つに分けられ、スタンドアロンによる運動量測定を可能にしている。高精度飛跡検出器としてはビームに近い部分には Cathode Strip Chamber (CSC) が用いられているが、それ以外の領域は直径 30 mm のドリフトチューブを束ねた Monitored Drift Tube (MDT) が使用される。トリガー検出器としては barrel 部に Resistive Plate Chamber (RPC)、バックグラウンドのヒット数により厳しい endcap 部に TGC が使用される。トリガーシステムにはミュオンの横方向運動量による弁別と衝突パンチ (25 ns 毎) の同定が要求される。ミュオンスペクトロメータに入射したミュオンはトロイド磁場に

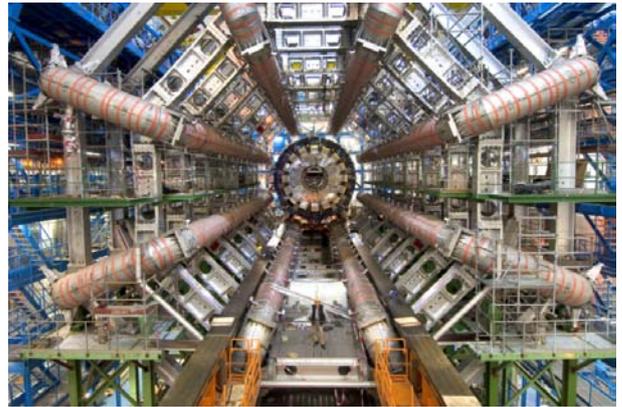


図 1: ATLAS 検出器建設の様子。現在ではバレル部ミュオンチェンバー、液体アルゴンカロリメータ、ソレノイドマグネット、内部飛跡検出器などがインストールされている。

より曲げられるが、ミュオンの横方向運動量が大きい程直線に近くなり、そのずれの大きさを横方向運動量を測定できる。Higgs 粒子や SUSY などの物理現象を伴う事象の中には、この横方向運動量の大きなミュオンを伴うものがあるので、トリガー検出器によってこのような事象を効率的に弁別することが可能になる。

TGC は一般には MWPC (多線式比例計数管) と呼ばれる構造をしている。断面を見ると、直径 50 μm のタングステンワイヤーを 1.8 mm 間隔に張ってある面があり、その面から 1.4 mm 離れたところにグランド面となるカーボン塗装したプリント基板が両側に配置されている。タングステンワイヤーには 2.9 kV の電圧を印加して、ガス中を通過した荷電粒子によって作られる電子を 10^6 程度ガス増幅し ASD (Amp-Shaper-Discriminator) [4] によってバイナリー信号として検知する。この検出器の特徴としては荷電粒子が入射してから電気信号が出力されるまでの反応時間が 25 ns 以下で短く [5][6]、さらに耐放射線性が高いことが挙げられる。このような構造は高エネルギー

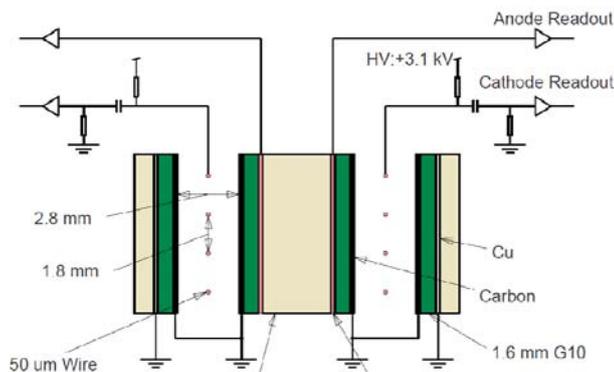


図 2: TGC の断面図

ギー物理の世界では珍しいものではないが、大きさが約 $1.5 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$ で、なおかつ生産枚数が 1000 枚を超えるというのは日本では前例のない作業であるといえる。

2 TGC

TGC の内部構造は図 2 のようなものになっており $50 \mu\text{m}$ と比較的太いワイヤーを用いることで広い範囲で高い電場を形成し、アノード・カソードギャップが狭いことにより高頻度入射での出力電荷の低下を防いでいる。ガスは高いクエンチ能力を与えるため CO_2 (55%) + n-Pentane(45%) を使用し、印加電圧は 2.9 kV を与える。構造体は FR4 を使用し、グラウンドを与える高抵抗のカーボン ($1 \text{ M} \Omega/$) を塗装することで反対面に張ったピックアップストリップによる二次元読み出しを可能にしている。またワイヤーサグを防ぐためのワイヤーサポートなどの不感領域が存在するためダブルレットまたはトリプレット構造にすることで不感領域を補完している。

ATLAS におけるトリガーチェンバーに対する要請は以下のようなものが挙げられる [6][7] :

1. 高い検出効率 (99%以上)
2. 早い反応時間 (25 ns 以下)
3. 放射線耐性 (1 C/cm)
4. 高頻度入射耐性 (1 kHz/cm² 以上)

TGC 量産のための試作は 1999 年 1 月より開始し、2001 年 1 月より量産が開始され、2005 年に終了した。ATLAS に用いられる TGC は 3600 chambers, 読み出し 32 万 channels, 総面積は 2700 m^2 に及びトリガーエレクトロニクスはほぼすべて日本が担当している。TGC の生産は日本、イスラエル、中国で行われ日本では 3600 台中 1056 台を担当している (予備品込みで約 1200 台)。

生産設備を KEK の富士実験棟に設置し、12 名で生産工程毎に分割した 9 ブースを使用することで並行生産を可能にした。特に日本では予算と日程の関係より 1 日 2 枚の TGC 生産を達成することが命題となり、それを満たすために試作時においてさまざまな工程、道具の自主開発を東大、信州大、神戸大の協力で行った。

3 製作工程

製作工程は約 20 工程ほどあるが大きく分けると以下の 10 工程に分割される (1 日当たり必要数) :

1. 材料確認およびマスキング (4)
2. カーボン塗装 (4)
3. フレーム (内部構造の骨組み) 接着 (4)
4. ワイヤー巻き・はんだ付け (2)
5. HV 試験および TGC 閉じ工程 (2)
6. ダブルレット・トリプレット製作 (1)
7. HV 試験および信号確認 (2)
8. 信号読み出し部分の取り付け (1)
9. CO_2 チャンネル製作 (外周部分の処理) (1)
10. 神戸大へ搬送

すべての工程は 1 日に並行して作業を行ったが、カーボン塗装作業だけは東大、信州大、神戸大の協力で月に一度まとめて行った。ここでは今回の生産のために開発した特徴のある部分を紹介する。

3.1 ワイヤー巻き・はんだ付け

今回の TGC 生産において約 80 万本のワイヤーをハンダ付けすることになる。また TGC 内部で 1 本でも破断もしくはクリープ現象による緩みなどが起こると作動させることが出来なくなる。このため使用するタングステンワイヤー生産時のアニール温度のコントロールおよび金メッキ厚の設定 (メッキが厚いと AuSn_4 が生成され機械接合力が落ちるため $0.3 \mu\text{m}$ とした [8]) は安定生産において重要な項目に挙げられる。われわれはコスト、生産へのフィードバック対応などを考慮してアライドマテリアル社 (旧東京タングステン) の製品を使用した。またハンダは 350 gw の張力で張ったワイヤーを保持でき

るように Sn(80)+Zn(20) の非共晶ハンダ（共晶は 91:9）を用いた。ちなみに一般に使用される Sn(60)+Pb(40) は共晶ハンダであるためワイヤーを保持能力の落ちるフレット状にしか接合できなくなる。フラックスはハンダ付け後のイオンマイグレーションを防ぐために ZnCl₂ を主成分とする水溶性フラックスを用いた。しかしながら ZnCl₂ 残渣は吸湿性の腐食性を持つ [8] ため洗浄する必要が生じるが、これは Sn(80)+Zn(20) の融点が約 280 度と高いことで松脂系では安定使用が難しいためである。ワイヤー巻き作業を自動で行うために FR4 板を回転させるメイン部とワイヤー送り出し部からなるワイヤー巻き機を KEK 工作センターの協力で製作した。これは一度に 2 枚の板を約 4 時間で張り終えることが可能である。ハンダ付けの終わった FR4 板はハンダ部分を純水の超音波洗浄で残渣を除去し、板全体もスプレー噴射により洗浄を行った。

3.2 HV 試験および TGC 閉じ工程

ハンダ付けを終了した FR4 板はワイヤーテンションによって弓のように最大 10 cm 程度歪むことになる（ワイヤーの緩みはこの時点で目視で行った）。また TGC のギャップは 1.4 mm しかないため 100 μm 歪むとゲインで 10 % 以上変化を与えることになる。このため平面性を確保するために図 3 のセットアップを開発した。FR4 板を吸着するためのシール部分には粘性を持たすためにイソプロピルアルコールで表面処理した 0.5 mm 厚、幅 2 cm のシリコンラバーを用いた。さらにシール部分の厚みと合わせるために 0.5 mm 厚ポリプロピレンスクリーンをシール内側に張った。このスクリーンが一樣に隙間を与えることにより FR4 板を 100 μm 以下の歪みで石定盤に吸着させることが可能となった。

TGC は一度接着すると二度と分解できなくなるため、塵などによる放電の有無を接着前に調べることは非常に重要になる。そこで HV 印加試験を図 3 のセットアップにおいて圧力コントロールに用いるフィードバックエアとして炭酸ガスを使用して行うことにより生産歩留まりを向上させることが可能になった。さらに接着作業では接着剤の均一な塗布作業が重要になる。図 4 は一般的な二種混合型エポキシ接着剤の混合量ごとの内部温度の時間変化を表している。量産においては均一な品質が求められるためこのような依存の影響を除去する必要がある。このためエポキシ塗布のためにポリアリレート繊維を用いたスクリーン印刷で均一厚に塗布する工法を開発した。面積当たりの塗布量はメッシュの密度およびマスクの厚みでコントロールが可能である。ポリアリレート繊維は

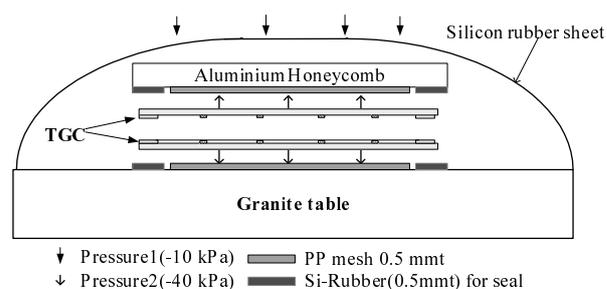


図 3: TGC 閉じ工程のセットアップ図。ワイヤーを張った FR4 板は石定盤にマイナス 40 kPa の圧力で吸着し、蓋になるもう一枚はアルミハニカムに同様に吸着してお互いの平面性を確保する。さらに全体をシリコンラバーで覆いマイナス 10 kPa の圧力を与えることで一樣な力で接着することが可能になる。これらの圧力差はソレノイドバルブによるフィードバックエアシステムによって実現している。

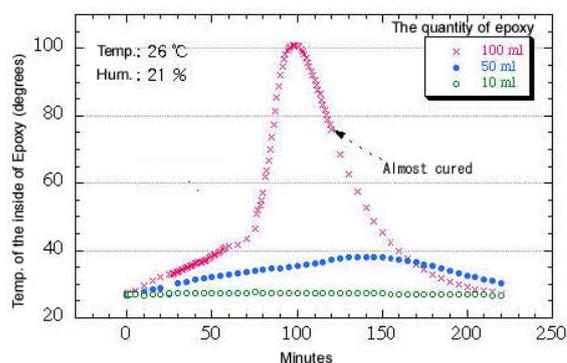


図 4: エポキシ接着剤 (Araldite2011) 硬化時の温度の変化。100 cc のカップに 10, 50, 100 cc と入れた時の内部温度の変化。100 cc の場合は約 2 時間で完全硬化する。

ポリエステル的一种で耐薬品性があり、単位面積当たりの糸強度がステンレスの 2.5 倍と強度・耐久性に優れているところが特徴である。またエポキシは硬化前であれば水で洗浄可能であるため、高水圧洗浄器を用いて繰り返し使用することにより低コストを実現した。TGC の接着後の平面性の結果を図 5 に示す。この接着工法は 2 枚（または 3 枚）の TGC を接合するダブレット（トリブレット）接着の工程でも応用して使用した。

3.3 品質管理および試験

TGC 量産においては先ほど表した工程を並行生産で製作を行うため各工程における品質管理が生産歩留まりに

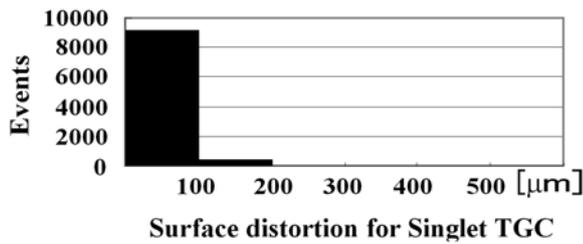


図 5: TGC 接着後の歪み。ほとんどの測定点で $100 \mu\text{m}$ 以下になっている。

影響する。たとえばトリプレットの場合、6 枚の FR4 板により構成される。各工程における組み合わせはデータベースを用いて決定されるが 1 枚でも不良があると製品として使用できなくなる。各工程で試験した後、TGC を閉じる工程までの不良品は一旦分解して再利用している（それ以降では再生不可能）。

以下に生産中に行った主な試験項目を挙げる：

1. グラウンド電極であるカーボン面の面抵抗測定（ストリップ読み出しを保証するため）
2. パーツ接着後の厚み測定
3. HV 試験（高電圧印加可能であることを確認。インストールまでに 6 回行われる。）
4. テストパルス（矩形波を HV 印加部より与えて、各読み出しのクロストークを用いて信号の結線を確認）
5. ガスリーク試験
6. β 線を用いた信号確認

これらの品質管理を行ったことで TGC の生産歩留まりは約 99 % を保ち、ダブレット（トリプレット）ユニット工程までの歩留まりでも 97.5 % と高水準になった。神戸大学への輸送後、ガスリーク試験、HV 印加試験、宇宙線試験を行ったがこれによる歩留まりは 96 % となった [9]。不良品の半数は生産初期に平面性が悪いものなど品質が安定していないものであった（図 6 に宇宙線試験での検出効率結果のサンプルを示す）。

4 CERN における建設

神戸大学で試験された TGC は 2005 年までに海路で CERN に輸送され、TGC を円盤状への組み上げ（Big Wheel）を開始した。Big Wheel は両端 3 面ずつの 6 面

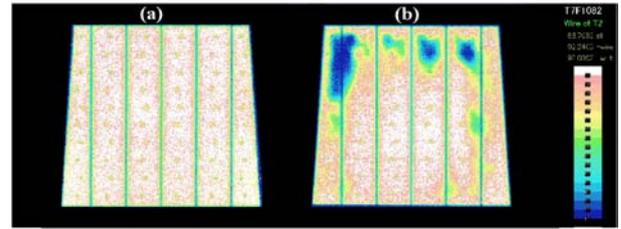


図 6: 神戸大学における宇宙線試験（5 mm 四方のセグメント単位で測定している）。(a) 平面性がよい場合のサンプル。ワイヤーサポートと有感領域がきれいに分かっている。(b) 接着時に歪みのあったサンプル。



図 7: 組み上がったセクターの様子。

で構成され各 7 層の TGC を用いて Pt トリガーおよびリードアウトを行う。32 万 channels におよぶ膨大な信号線はすべてをエレキハットへ配線することが出来ないため、一部のエレクトロニクスは TGC 上に設置することになる。このインストール作業は日本からは東大 ICEPP が中心となって各大学の協力で行われている。

円盤を 12 分割した扇形のフレーム（セクター）に、1 台約 2 m^2 の台形をした TGC ユニートを順次設置している（図 7）。1 つのセクターあたり、18 台または 22 台のユニットが取り付けられる。円盤の総面積は約 2700 m^2 あり、すべてを覆うのに 1488 ユニートが設置される。またユニットは 1 枚が 80 kg 近くあり、とても人の手では持ち上げることが出来ない。そのため、特別な吊り具を作成し、クレーンを用いて吊り上げてセクターに取り付けている。ユニットは取り付けられる場所により様々な角度に傾けて取り付けなければならないため、吊り具は中心で回転出来るよう製作されている（図 8）。エレクトロニクスの接続やガスの流入、HV の印加テストなど様々なチェックを行った後に、地下 100 m の実験ホールに移され円盤状に組み上げられる。2006 年 7 月 3 日に最初のセクターが実験ホールに移動した。移動にはタイヤが 40



図 8: TGC を吊り具で設置する作業。



図 9: セクターをトラックで輸送している様子。

個も付いた台車上にセクターを載せてトラックで牽引し、移動中は極力振動を与えないよう非常にゆっくり（時速 10 km 以下）で輸送された（図 9）。地上から 20 分かけて地下 100 m の実験ホールに降ろされたセクターは、壁に一時的に固定され、そこから徐々に円盤状に組み上げられた（図 10）。今後 2006 年末までに全体の半分にあたるエンドキャップ片側全三面の Big Wheel が組み込まれ、宇宙線を用いた動作テストを行う予定である。

CERN には様々な国の研究者が集まって来ており、セクターへの取り付け作業は、非常に国際色豊かな現場となっている。現在、日本グループの他に、イスラエルや中国、さらにはパキスタンなどからの協力のもとに TGC システムの建設作業が進められている。彼らとのコミュニケーションは英語で行われ、現場では常に活発な議論が繰り広げられている。また、作業が一段落したときには皆でパーティやバーベキューなどをして、より信頼関係を深めている。



図 10: 現在、ATLAS 地下ホールにおいて TGC の建設が進んでいる。

5 おわりに

1999 年より TGC の生産のための試作を開始し、2001 年より約 1200 台の TGC 量産を行った。量産では 1 日 2 台の TGC を生産できるように 20 以上の工程に対し生産管理を行い、生産歩留まりは 97.5 % となった。生産したユニットは神戸大学で宇宙線試験を行った後、現在インストールを行っているところである（図 10）。2007 年夏までにインストールを終了し、秋より LHC 加速器の運転が開始される。運転開始時は LHC での加速は行わず 450 GeV ビームで衝突させる予定である。この時期エレクトロニクスのチューニングを行い 2008 年には 7 TeV まで加速して物理実験を開始する予定である。

今回の KEK における TGC 生産は KEK、東大 ICEPP、信州大、神戸大の協力なしでは実現しえなかった。学生・スタッフの皆さんに感謝する。特に生産設備の建設現場においては横山千秋氏、近藤敬比古教授の貢献は非常に大きく、ここに感謝する。また TGC 部品の供給および生産工法について助言を頂いた Weizmann Institute of Science の George Mikenberg 教授、Meir Shoa 氏に感謝する。

参考文献

- [1] ATLAS Muon Technical Design Report, CERN/LHCC/97-22, (1997).
- [2] K. Nagai, Nucl. Instrum. Meth. **A384** (1996) 219.
- [3] A. Rimoldi, Nucl. Instrum. Meth. **A409** (1998) 669.

- [4] O. Sasaki *et al.*, CERN /LHCC/ 96-39, Second Workshop on Electronics for LHC Experiments, Balatonfured, Hungary, September 1997.
- [5] D. Lazic *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. **A410** (1998) 159.
- [6] Y. Arai *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. **A367** (1995) 398.
- [7] H. Fukui *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. **A419** (1998) 497.
- [8] 大沢直, "電子材料のはんだ付技術", ISBN4-7693-1033-1, 工業調査会
- [9] T. Sugimoto *et al.*, IEEE NSS Conference 2003.