

# 修士学位論文

## ATLAS ミューオントリガー用 大型 TGC 制作と検査システム

神戸大学自然科学研究科物理学専攻  
970S108N  
鈴木 修

### 概要

物理学の最も根本的な問題である質量の起源の解明は、いまだなされていない。質量の起源と考えられているヒッグス粒子を発見しその性質を研究することは現代物理学の重要な課題のひとつである。この問題を解明すべく、欧洲原子核研究機構(CERN)では、2005年の稼働を目指して重心エネルギーが14TeVという世界最高のエネルギーをもつ陽子陽子衝突型加速器(LHC)の建設を進めている。LHCに配置されるATLAS検出器は汎用の測定器であるが、なかでもミューオンの検出は、ほとんどの重要な物理に関わっていること、およびハドロンライダーの厳しい実験環境の中でもきれいな信号がとりだせることよりその重要性は高い。神戸大学、東京大学、信州大学、高エネルギー加速器研究機構、ワイツマン研究所(イスラエル)と共に、陽子陽子衝突で生成されるミューオンを捉えるためのThin Gap Chamber(TGC)を用いたミューオントリガー装置の開発研究を進めてきた。これまでの研究開発の結果、十分な性能を持つことが確認された。2000年から本実験用大型TGCの量産がはじまる。本実験においてTGCの動作・性能を保証するために検査は不可欠なものである。1m<sup>2</sup>以上の大型検出器を約500台にわたって検査するため、大規模な設備、システムが必要となる。試作によるATLAS仕様のTGC検出器の製作について基本的な工法の確立をめざし、その試作機の性能評価、検査設備の構築を行なった。

# 目次

<b>1 序論</b>	<b>3</b>
1.1 LHC 計画	3
1.2 LHC での Higgs 探索	3
1.3 ATLAS 測定器	6
1.4 Thin Gap Chamber	7
1.5 フルサイズプロトタイプ TGC の製作と検査	10
<b>2 Thin Gap Chamber</b>	<b>11</b>
2.1 ガス・チェンバーでの電離及び電子増幅過程	11
2.2 Thin Gap Chamber の構造と特徴	11
2.3 Thin Gap Chamber の readout	22
2.4 フルサイズプロトタイプ TGC の製作	26
2.4.1 制作工程	26
2.4.2 制作上の注意と問題点	26
2.5 量産計画	29
<b>3 検査システム</b>	<b>32</b>
3.1 検査ステーション	32
3.1.1 TGC ガス供給システム	38
3.2 Drift tube による飛跡の確立	38
3.2.1 Drift tube	38
3.2.2 解析方法	39
3.2.3 解析結果	40
<b>4 宇宙線テスト</b>	<b>49</b>
4.1 セットアップ	49
4.2 検出効率	49
4.2.1 解析方法	49
4.2.2 解析結果	53
4.3 time jitter	60
4.3.1 解析方法	60
4.3.2 解析結果	60
<b>5 まとめと今後の研究</b>	<b>64</b>
<b>A TGC construction</b>	<b>65</b>
A.1 TGC の材料となる部品	65
A.2 材料の加工-位置決め用の穴あけ	68
A.3 材料の加工-切断、ヤスリがけ、その他	72
A.4 カーボン塗装のためのマスキング	73

A.5 カーボン塗布	76
A.6 カーボン面磨き、面抵抗測定およびグラウンドコンタクト（銅テープ）の接着	78
A.7 厚ハニカム（20 mm）の接着	80
A.8 パーツの接着	86
A.9 接着後の作業	90
A.10 カーボン面の水洗い	94
A.11 ワイヤー巻き	95
A.12 ハンダ付け	100
A.13 ワイヤーの除去	102
A.14 張力試験	103
A.15 ワイヤーの巻かれたFR4板の洗浄	104
A.16 ワイヤーの巻かれたFR4板の定盤への固定	105
A.17 H.V テスト	107
A.18 チェンバーを閉じる	110
A.19 H.V キャパシターの取り付け	115
A.20 ガスシール	116
A.21 ダブレットの接着	118
A.22 二枚目の外側ハニカム接着	126
A.23 アダプターボード及びH.Vコネクターの取り付け	128
A.24 シールド	133

# 1 序論

## 1.1 LHC 計画

現在、スイスの欧洲素粒子物理学研究所 (CERN) で、次世代の大型加速器の計画として、大型陽子・陽子衝突型加速器 LHC(Large Hadron Collider) の建設が 2005 年の稼働を目指して計画されている。LHC は、現在稼働中の大型電子・陽電子衝突型加速器 LEP (Large Electron Positron collider) の全長約 27 km のトンネル内に建設される。LEP-II のような電子・陽電子衝突型加速器では、基本粒子同士の衝突のため、バックグラウンドが少なく、生成した粒子の質量や相互作用の大きさなど精密測定に適している。反面、電子の質量が軽いためシンクロトロン放射によるエネルギー損失が大きくエネルギー増強には限界がある。

それに対して LHC のような陽子・陽子衝突型加速器では、陽子の質量は電子の質量に比べ非常に大きいのでシンクロトロン放射によるエネルギー損失が少なくエネルギー増強が容易であり Higgs 粒子や超対称性粒子といった未発見粒子の探索に適している。しかし、陽子は内部構造をもつため衝突時のバックグラウンドが大きく実験装置にはいろいろな要求が課せられる。LHC 計画では、7TeV の陽子を正面衝突させ、重心系で最大エネルギーを 14TeV を得る。このエネルギーは現在稼働もしくは計画中の加速器の中では最大である。Higgs 粒子の生成断面積はこのエネルギーでは  $10^{-35} \sim 10^{-36} \text{ cm}^2$  と予測される。LHC は  $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{s}^{-1}$  という非常に高いルミノシティを達成することでこのような断面積の小さな過程も十分に観測できるように設計されている。

## 1.2 LHC での Higgs 探索

現在稼働している加速器では 120 GeV 以上の領域は探索できない。LHC は、TeV の領域まで探索できる唯一の加速器である。Higgs 粒子は質量の重い粒子と結合するためトップクオークや W 粒子、Z 粒子のような質量の非常に大きい粒子と強く相互作用するので図 3 のようなものが主となる。図 1 は Higgs 粒子の生成断面積である。 $m_{Higgs} = 200 \text{ GeV}$  としたとき、luminosity  $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{s}^{-1}$  で 1 年間運転したとき約 20 万イベントできる。

LHC では様々なバックグラウンドがあるため Higgs 粒子の探索は図 2 のような S/N 比の良い崩壊モードを探す必要がある。図 4 は Higgs 粒子の各崩壊モードの分岐比をプロットしたものである。その中でもレプトンを含む事象の選択は Higgs 粒子発見の最も確実なシグナルである。次にそれぞれの崩壊モードでバックグラウンドから分離できる Higgs 粒子の質量領域を示す。[1, 2, 5, 8]

- $80 < m_H < 120 \text{ GeV}$

$$H \rightarrow \gamma\gamma$$

このモードの分岐比は小さい。エネルギー、位置、角度測定にバランスのとれたカロリーメーターの性能が要求される。

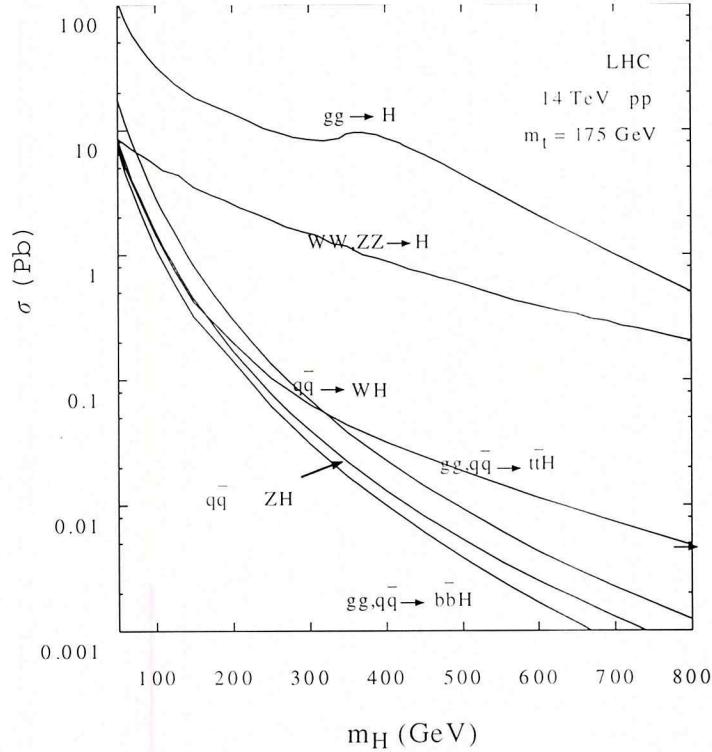


図 1: Higgs 粒子の生成断面積

Higgs 粒子の主な崩壊過程は  $b\bar{b}$ 、 $c\bar{c}$ 、 $\tau^+\tau^-$  であるが、これらについては陽子・陽子素過程による大きなバックグラウンドが大きく測定が難しい。

- $120 < m_H < 2m_Z$

$$H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l^\pm$$

この質量領域にはいると  $W^\pm, Z$  の質量を越えるため図 4 のように  $WW^*, ZZ^*$  の崩壊モードがはじまる。 $WW^*$  は  $t\bar{t} \rightarrow WWb\bar{b}$  がバックグラウンドになるため測定は難しい。図 5 は低 luminosity で 3 年 ( $30 fb^{-1}$ ) 行なったとき、 $m_{Higgs} = 130, 150, 170 \text{ GeV}$  の  $H \rightarrow 4\text{lepton}$  を再構成したときのバックグラウンド上の質量分布である。

- $m_H > 2m_Z$

$$H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l^\pm$$

この崩壊モードは分岐比も大きくそれぞれのレプトンの組の不变質量によるカットができるため最も信頼性の高いモードである。 $m_{Higgs} = 200 \text{ GeV}$  としたとき、luminosity  $10^{34} cm^{-2}s^{-1}$  で 1 年間運転して ( $10^5 pb^{-1}$ ) 100 event 程度である。

- $m_H > 500 \text{ GeV}$

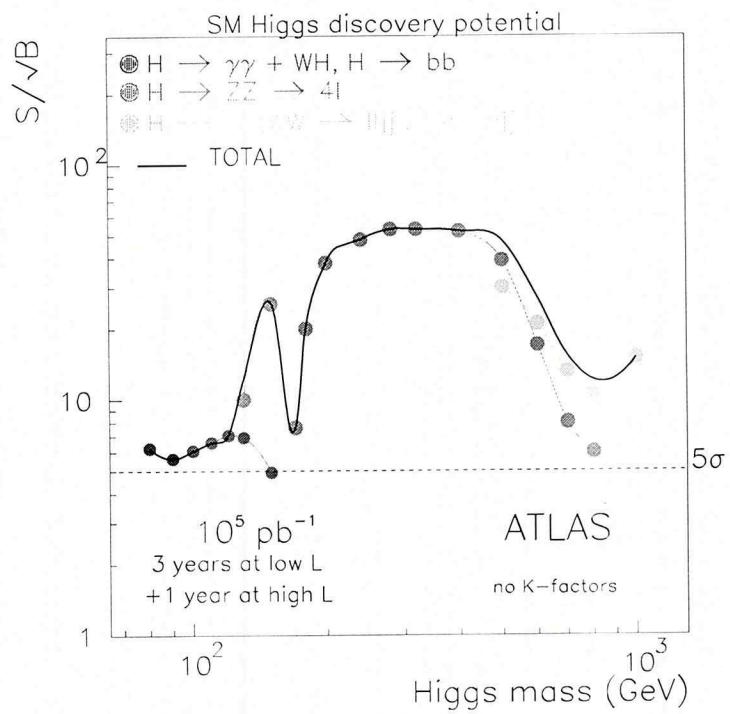


図 2: ATLAS 実験を低ルミノシティで 3 年、高ルミノシティで 1 年（約  $10^5 pb^{-1}$ ）行なったときの Higgs 粒子発見ポテンシャル [4]

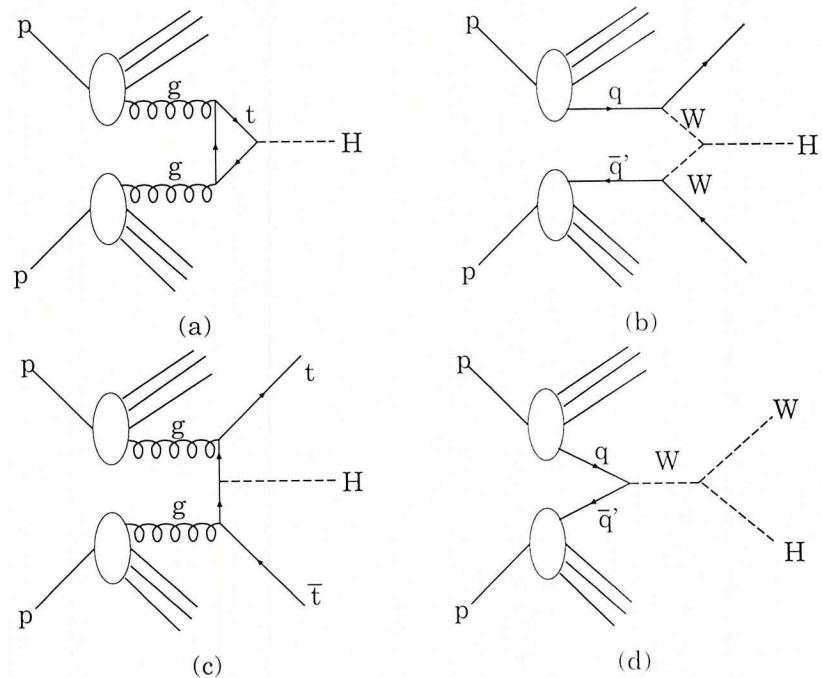


図 3: Higgs 粒子の生成。(a) グルーオン-グルーオン融合、(b) W-W 融合、(c)  $t\bar{t}$  クォーク随伴生成、(d) W 粒子随伴生成

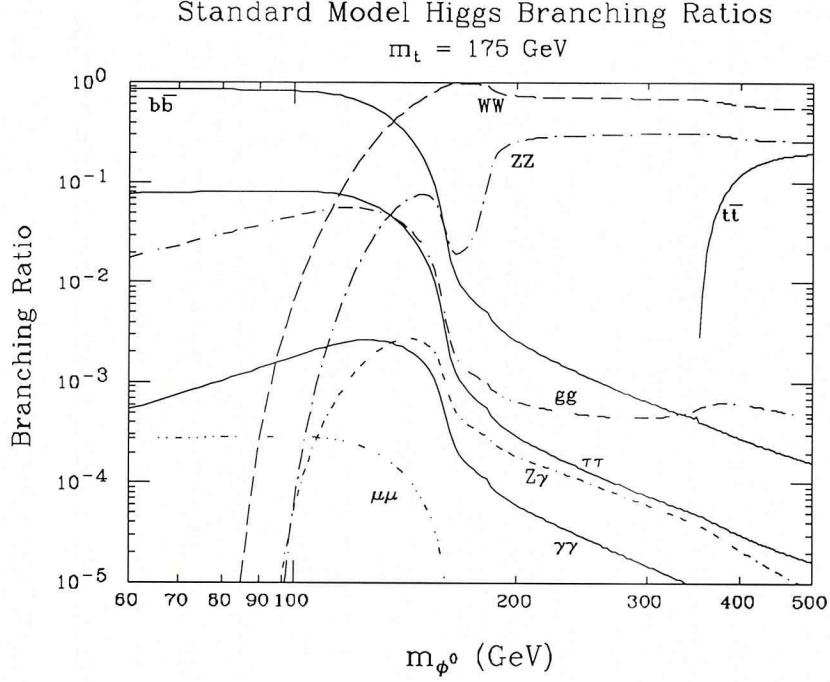


図 4: Higgs 粒子の Branching Ratio と質量の関係。

$$H \rightarrow ZZ \rightarrow 2l^\pm \nu\nu$$

この領域では 4lepton モードに比べて分岐比が高い。この崩壊モードも有望である。

### 1.3 ATLAS 測定器

LHC に設置される ATLAS 測定器(図 6)は LHC の  $10^{34} cm^{-2}s^{-1}$  という最大ルミノシティにおいても、e,  $\gamma$ ,  $\mu$ , jet,  $missingE_T$ , b-tagging などできるだけ多くのシグナルをバランス良くとりだし精度の良い測定を行なうこととした汎用の測定器である。

測定器の基本構成は大きく分けて荷電粒子運動量測定のための内部飛跡検出器、電子、 $\gamma$ 線、ハドロン、ジェット観測のためのカロリーメーター、ミューオンの検出およびその運動量測定のスペクトロメータの 3 つの部分からなる。

ATLAS 測定器の大きな特徴の一つとして

- 単体でも高精度でミューオンの運動量測定をおこなえるミューオンスペクトロメータ

があることである(図 7)。

LHC 実験において陽子陽子衝突という厳しい実験環境下のなかでもミューオンはきれいな信号がとりだせることから Higgs 粒子発見のための最も確実なシグナルである。これを精度よく測定するために内部飛跡検出器とは独立にミューオンの検出およびその運動量

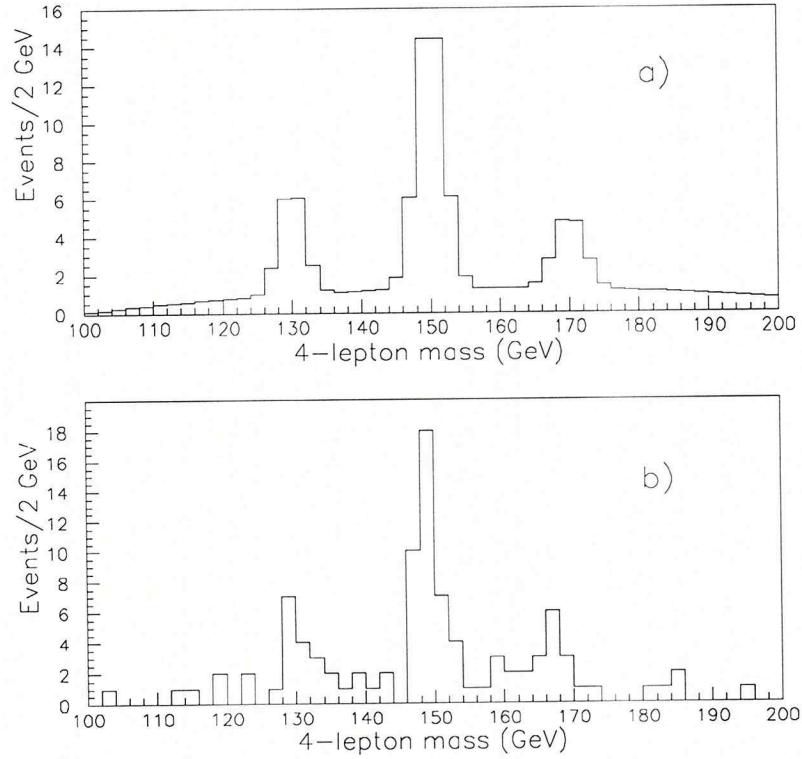


図 5:  $m_{Higgs} = 130, 150, 170 \text{ GeV}$  の  $H \rightarrow 4\text{lepton}$  を再構成したときのバックグラウンド上の質量分布 (データは  $30 \text{ fb}^{-1}$ )。a) 期待される平均のイベントの数。) 1つの実験で得られる分布。

測定を行なう。このとき超伝導空芯トロイド磁石を用いており粒子の多重散乱を最小に抑え、ミューオンの測定可能な  $\eta$  領域 (図 22) を広く取ることができる。

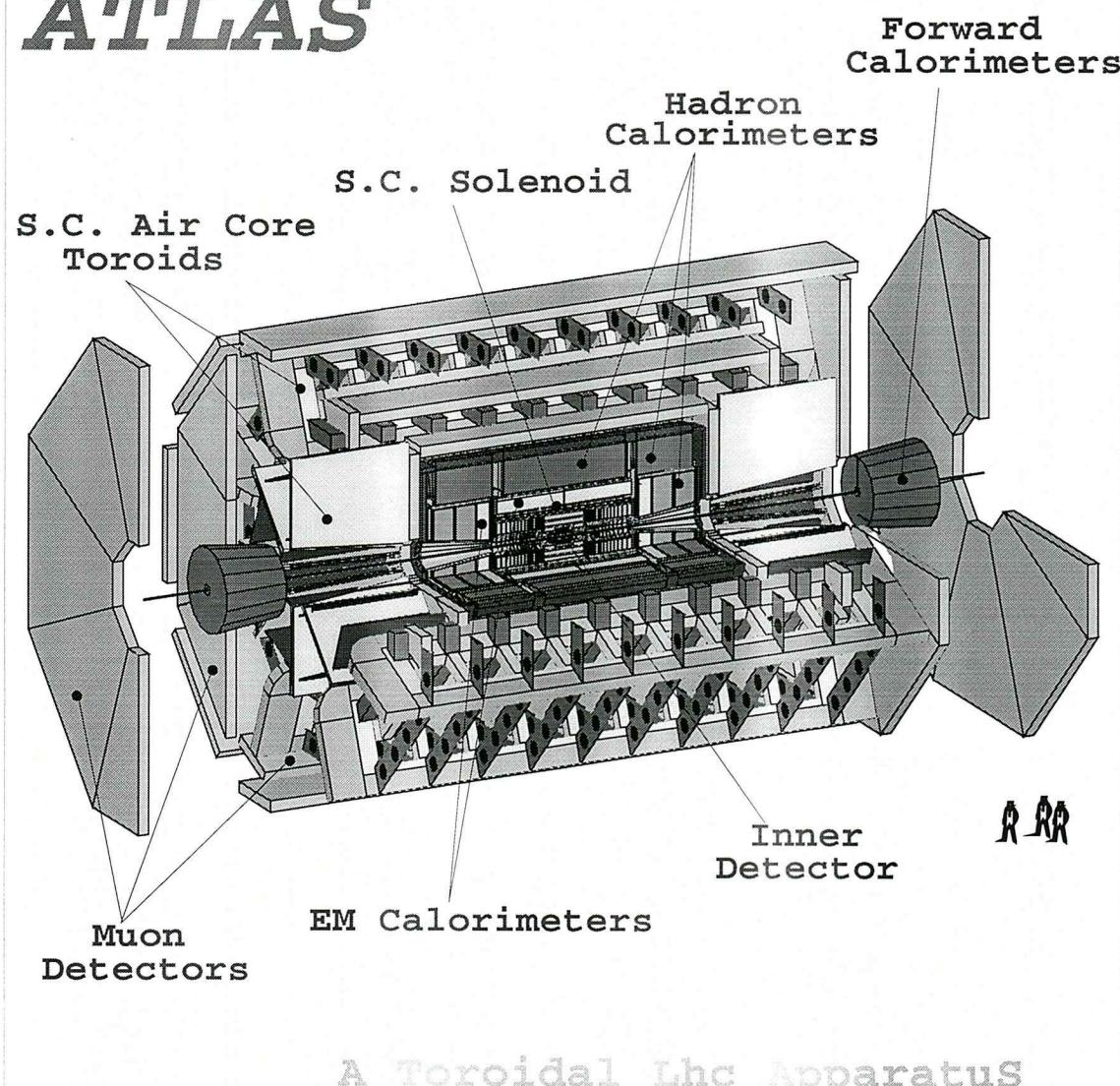
運動量の精密測定を行なう検出器は MDT (Monitored Drift Tube Chamber) と CSC (Cathode Strip Chamber) からなる。また、ミューオンを用いた散乱事象の取捨選択はトリガーの基本的な技術であり、実験の要である。そのためトリガー専用のミューオン検出器が置かれる。バレル部 ( $|\eta| < 1.05$ ) には RPC (Resistive Plate Chamber)、放射線量の高いエンドキャップ部 ( $1.05 < |\eta| < 2.4$ ) には本論文で述べる TGC (Thin Gap Chamber) が置かれる。

## 1.4 Thin Gap Chamber

TGC はアトラス測定器のエンドキャップ部において二つの役割を担っている。最も重要な役割はミューオンを検出し、前後方部ミューオンでの局所的なトリガー情報を出すことである。2つめはミューオン飛跡測定器 (MDT) は  $\phi$  方向 (図 8) の位置情報をだすことができないためこの  $r$ - $\phi$  位置情報をだすことである。

TGC の置かれるエンドキャップ部には、陽子・陽子素過程によるジェットやビームとビームパイプ等との相互作用等によって生じるハドロン衝突型加速器特有の高頻度の粒子入射が予想されている。モンテカルロシミュレーションにより見積もられたミューオン検

# ATLAS



A Toroidal Lhc Apparatus

図 6: ATLAS 測定器。[4]

出器のエンドキャップ部におけるバックグラウンドレートを表1に示す。

以上のことなどにより、Thin Gap Chamber には以下のような要請がある。

1. 99 %以上の高い検出効率
2. 陽子陽子衝突の時間間隔 25ns 每よりも短い信号到達時間
3.  $1\text{kHz}/\text{cm}^2$  の高頻度入射粒子に対して性能が劣化しない
4. ATLAS 実験の稼働期間 10 年以上かつ  $1\text{kHz}/\text{cm}^2$  の高放射線レベルの環境下で安定した動作
5. 第 2 座標読みだしの位置精度

## ATLAS Muon Spectrometer

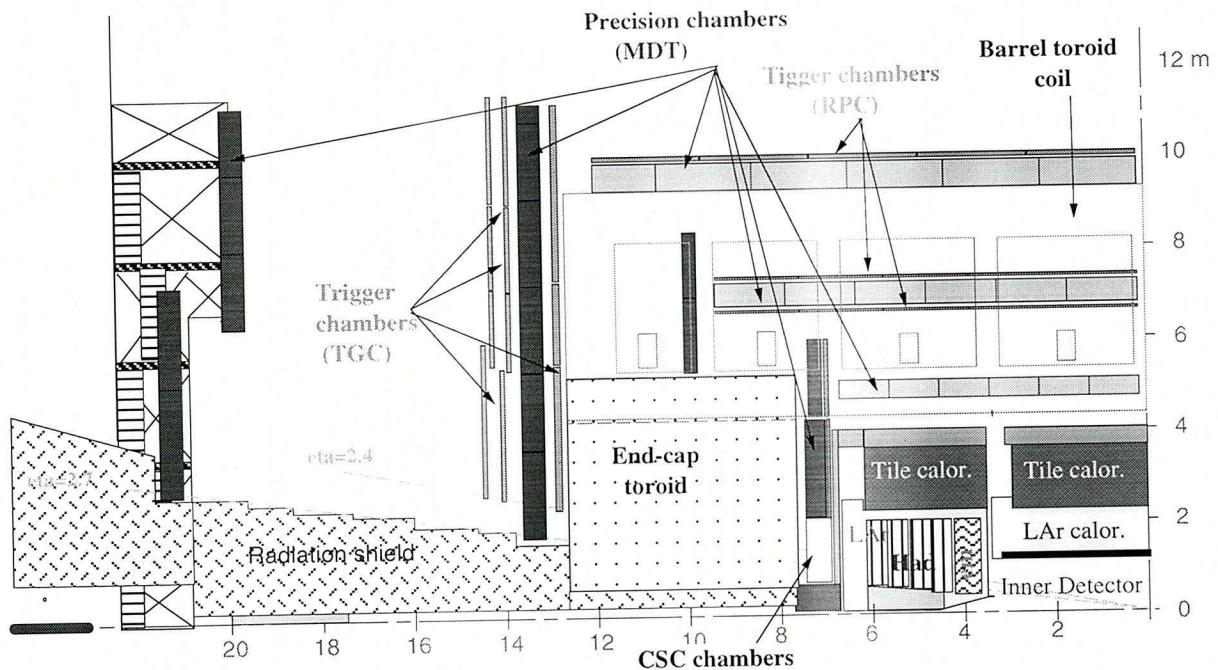


図 7: ミューオンスペクトロメーター。ATLAS 測定器の  $r$ - $z$  断面図。[4]

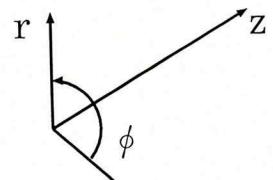
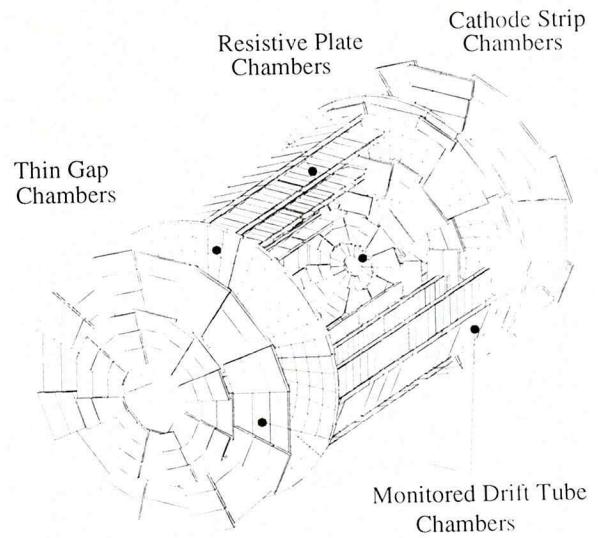


図 8: ミューオン検出器の配置。

	n	$\gamma$	$\mu$	hadrons $^\pm$	e $^\pm$
rate(kHz/cm $^2$ ± %)	4.1 ± 3	2.7 ± 3	$2.1 \times 10^{-3} \pm 9$	$2.8 \times 10^{-3} \pm 7$	$1.2 \times 10^{-2} \pm 7$

表 1: ミューオン検出器に対するバックグラウンドレート ( $1.44 < |\eta| < 2.3$ )。

## 1.5 フルサイズプロトタイプ TGC の製作と検査

これまでの開発研究の結果、TGCはミューオントリガー装置として十分な性能を持つことが確認された。[18, 11, 12] 2000年より高エネルギー加速器研究機構にて本実験用 TGC の量産がはじまる。1日 1module の製作を目標とし計 480module(1056Chambers) がつくられる。

製作された TGC は CERN に送られる前に予め動作確認を行ない不安定性のあるもの、異常のあるものは除外しておく必要がある。TGC は 2 週間毎に神戸大学に運ばれ検査に合格したものは CERN に輸送され ATLAS 測定器への取り付けが行なわれる。検査項目はエージングテストおよび宇宙線テストである。宇宙線テストにおいては検出効率、その一様性、長期安定性を確認する。このテストにおいては大規模な設備やシステムが必要とされ、また宇宙線の飛跡測定のための技術も確立しなければならない。

本研究は特にその基礎となるシステムを構築し、そのシステムが正常に動作することを確認するとともに大型 TGC を製作するための基本的な製作方法の確立を目指し、フルサイズプロトタイプ TGC の試作およびその性能評価も行なった。

## 2 Thin Gap Chamber

Thin Gap Chamber は、ガスを封入したワイヤー・チェンバーの一種である。高検出率、早い応答、高時間分解能を得るために、一般的なワイヤーチェンバーより高増幅率で動作している。この章では、ガスチャンバーの電離・増幅過程及び TGC の構造、動作原理を説明する。

### 2.1 ガス・チャンバーでの電離及び電子増幅過程

荷電粒子がガス中を通過するとガスを電離させる。チャンバーはその電離によって生じた電子を増幅させ信号として読みとる。この時の電離された電子を 1 次電子という。1 次電子は電気力線に沿ってドリフトしていき電場からエネルギーを受けとる。(ガスによってドリフト速度が異なる。図 9 はアルゴンーエタン、図 10 は  $\text{CO}_2 + \text{n-pentane}$  のドリフト速度である。) 電場エネルギーは運動エネルギーに転化され分子と衝突をする。この衝突による電離の確率は 1 次電子のエネルギーが電離電圧に達すると初めて現れ、その後 1 次電子のエネルギーの増加と共に次第に増加し電離電圧の数倍程度になったとき最高値を示し、その後は減少する。この衝突行程を繰り返すことで電離電子の数が増幅される。特にワイヤー近傍では強電場が実現されており電子雪崩の成長を促す。このとき電子は素早くワイヤーに吸収されるが陽イオンの移動度は小さく、電子が収集する時間内にはほとんど動かない。陽イオンの影響がないときには増幅された電子の数は 1 次電子の数に比例している。この領域を Proportional Mode という。

さらにワイヤー近傍の電場が強くなった時には陽イオンの濃度が十分高くなりワイヤーの電場が遮蔽される。その結果、電離電圧に必要な電場エネルギーを受け取りにくくなり、増幅された電子の数は 1 次電子の数に比例しなくなる。これを Limited Proportional Mode という。Proportional Mode においては電圧とともに指数関数的に増幅率は増大し、Limited Proportional Mode においては増幅率はほぼ電圧に比例する。

これよりさらにワイヤー近傍の電場が強くなった時、電離電圧に必要な電場エネルギーを受け取ることができず、増幅された電子の数は 1 次電子の数に無関係で一定となる。

電子雪崩過程においては電離のみならず、分子を励起させ紫外線を放出する過程も同時に存在する。印加電圧が大きいほどワイヤー付近の陽イオンの密度が高くなり、もし紫外線光子がガス分子を光電離し 2 次電子を放出するならばその陽イオンに向かって新たな電子雪崩が生じる。この行程を繰り返すことで陽極から陰極に向かって電極間を短絡し火花放電が完成する。[6, 13, 14]

### 2.2 Thin Gap Chamber の構造と特徴

図 12 は Thin Gap Chamber の断面図である。TGC の構造は基本的には MultiWire Proportional Chamber(MWPC) と同じである。構造上の特徴は一般的な MWPC に比べ

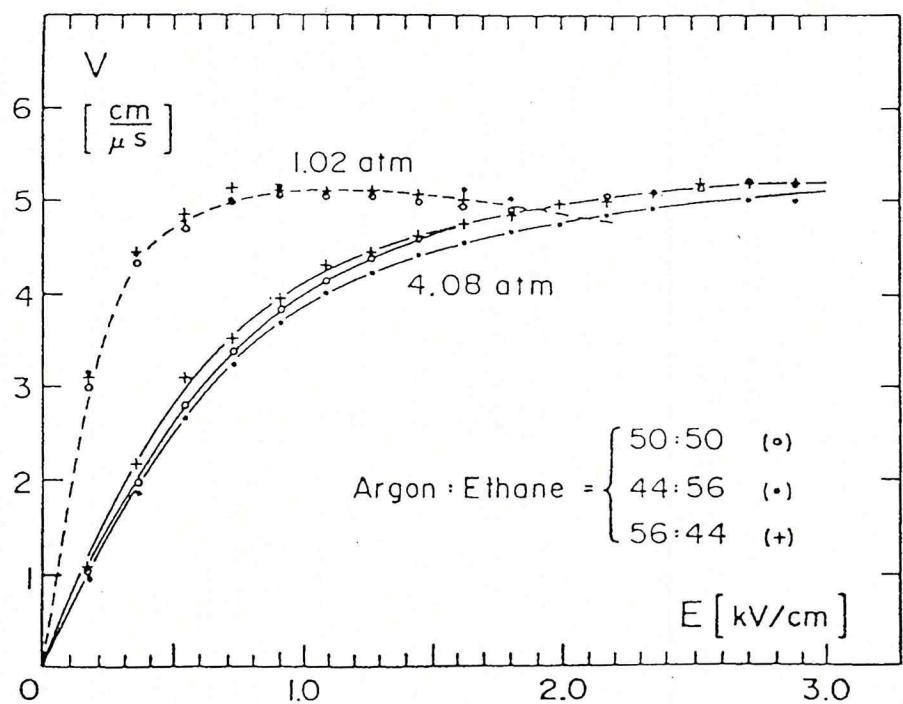


図 9: アルゴン+エタンのドリフト速度。[15]

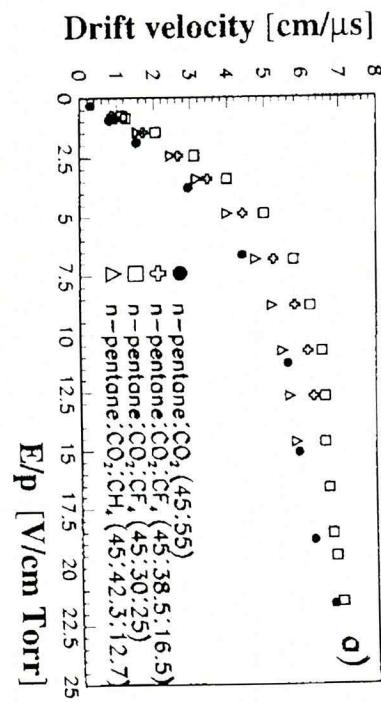


図 10: CO<sub>2</sub>+n-pentane のドリフト速度。[7]

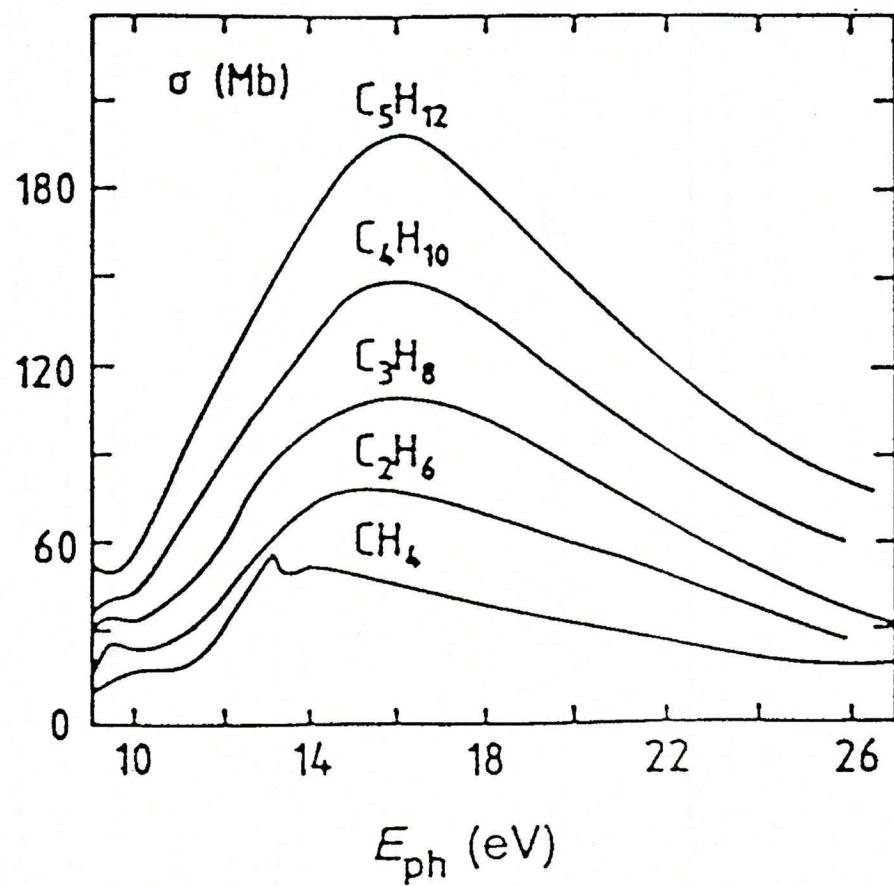


図 11: 紫外線の吸収断面積。[16]

てアノード・カソード間隔が非常に狭いことである。これが、'Thin Gap Chamber' の名前の由来である。

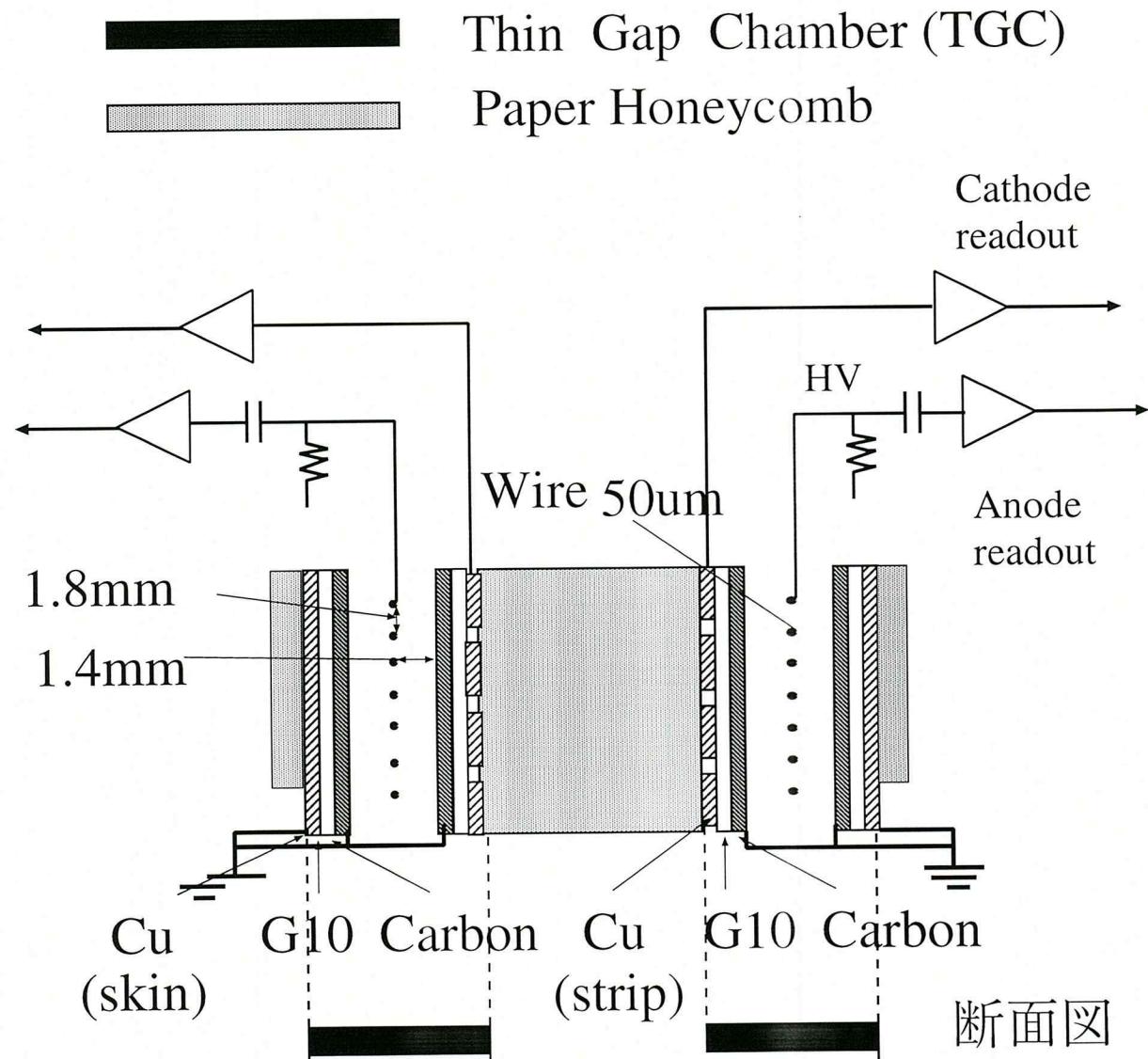


図 12: doublet の断面図。黒色の部分が 1 枚の TGC

アノードワイヤーには高電圧が印化される。ワイヤー間隔は 1.8mm であり表 2 にあるようにワイヤー信号の読みだしはあるピッチでまとめて読み出される。カソード面は G10 板(成分: 60 % ガラス ( $SiO_2$ )+40 % エポキシ樹脂)にカーボンが塗布され抵抗  $1M\Omega/square$  を有する。もう片面はエッチングにより表 2 にあるようなピッチ幅のパターンの銅ストリップがアノードワイヤー方向に対し垂直に構成されている。(図 13) もう 1 組のペアとして片面が全面銅スキンのものがある。これら 2 枚を重ねて 1 枚の chamber となる。

薄型で 1 辺が 1 m をこえるため、構造体の歪みを防ぐためにワイヤーサポート、ボタン型サポートが組み込まれ(図 14)、さらに 2 chambers で 1 unit(doublet)(図 16)あるいは 3 chambers で 1 unit(triplet)として使用され、それぞれの chamber の間と外側に強度補強

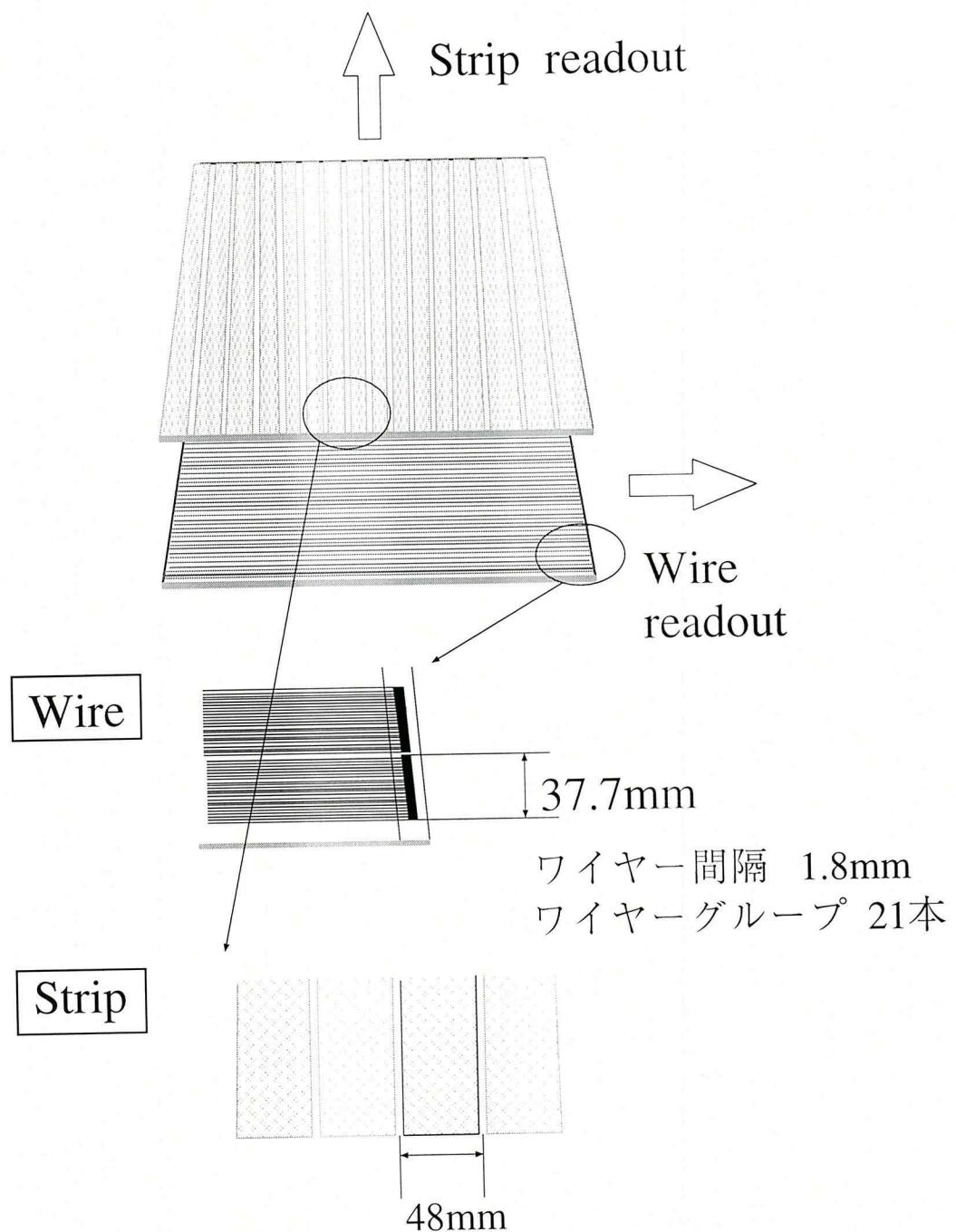


図 13: カソード、アノード読みだしで 2 次元の位置情報を得る。 (試作された doublet)

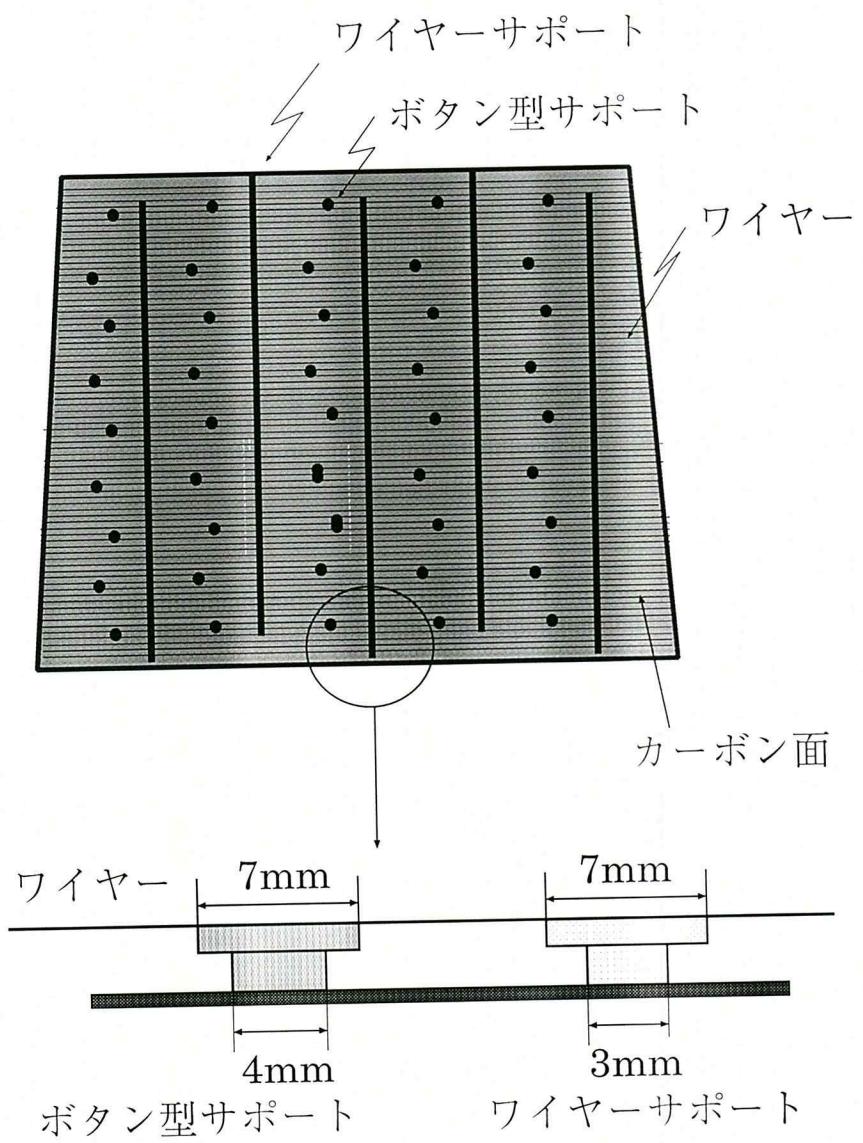


図 14: ワイヤーサポート、ボタン型サポート。(試作された doublet)

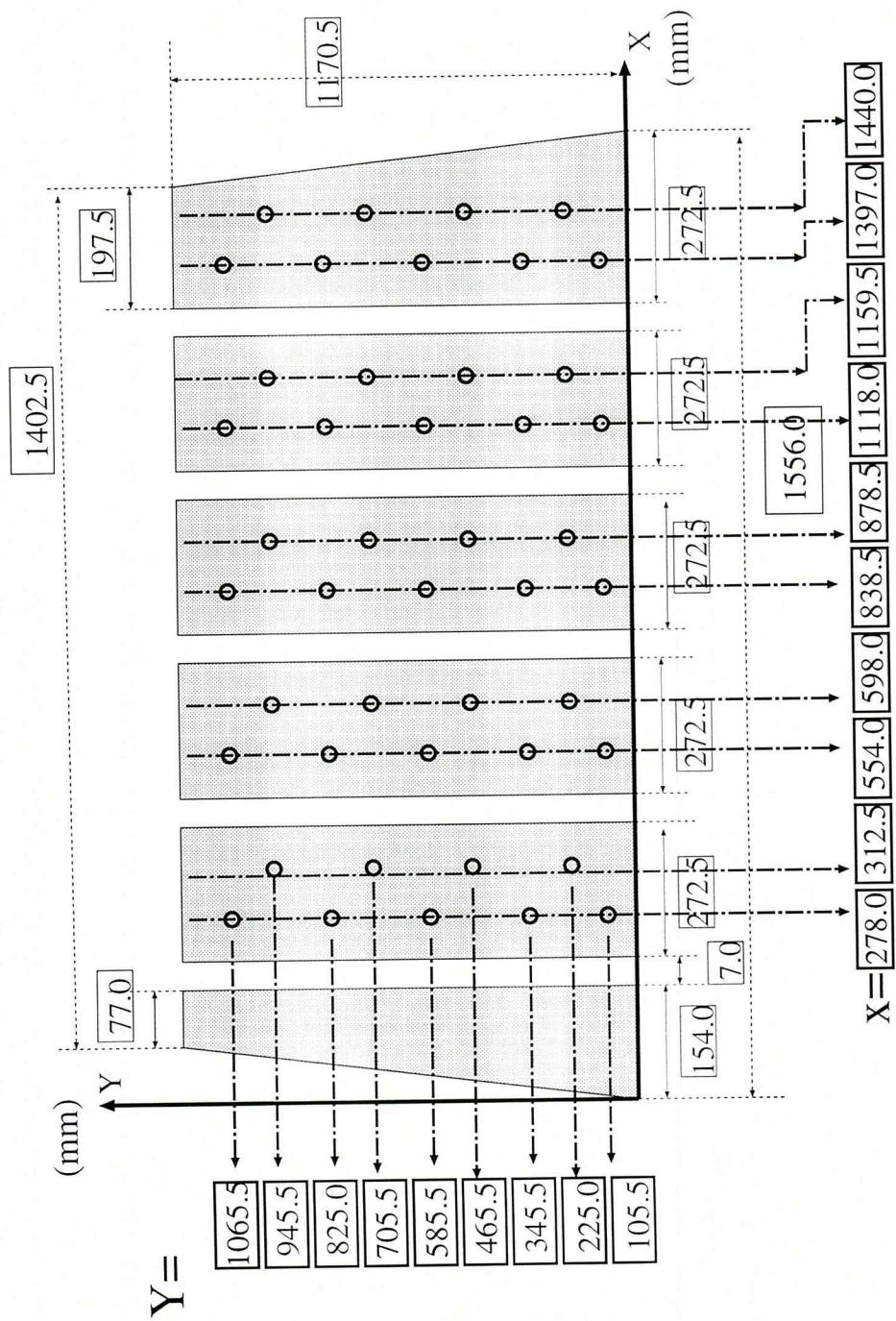
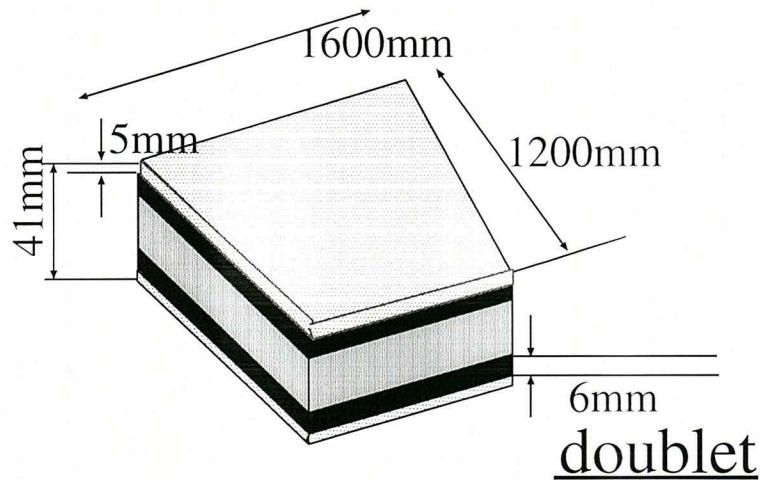


図 15: ワイヤーサポート、ボタン型サポート位置の座標。 (試作されたdoublet)



	paper Honeycomb
	Thin Gap Chamber (TGC)
	paper Honeycomb

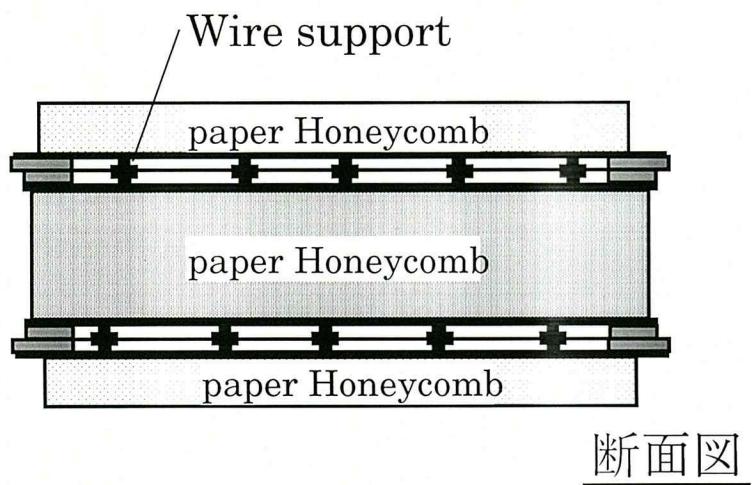


図 16: doublet とその断面図。 (試作された doublet)

のため紙ハニカムが装着されている。更にワイヤーサポートはアノードワイヤーが重力でたるまないよう、また静電気力が引き起こすワイヤーの不安定性が大きくならないようにという役割もしている。外側のハニカムはガスを流したときの over pressure 時においても平面性を保つ役割をしている。紙ハニカム、G10は単位体積あたりの物質量が少なく、通過する粒子の多重散乱や光電効果の影響をほとんど受けにくく粒子の入射位置の分解能が下がらずにすむ。これはミューオン検出器において運動量測定も行なうため特に重要な点である。

静電シールドのためにdoubletの各chamberは信号を読みとるstripperは内側に(Cathode readout)、銅スキンが外側くる。そしてカーボン面、銅スキン面はすべて同一の電位となるように接続し、これを外部回路(ワイヤー、stripperのアンプ)のグラウンドと共に通化することによって完全にシールドされる。(tripletも同様)

表 2: TGC の基本パラメーター

パラメータ	デザイン値
ワイヤー・カソード間隔	1.4mm
ワイヤー・ワイヤー間隔	1.8mm
ワイヤー径	$50 \mu m$
ワイヤーポテンシャル	3100V
ガス混合	CO <sub>2</sub> /n-pentane(55:45)
ガス増幅	$10^6$
アノード読みだしピッチ	7.2-36.0mm
ストリップ読みだしピッチ	14.6-49.1mm
時間分解能	25ns のゲート幅に対して 99 % の検出効率

## 1. 動作モード

Limited Proportional Mode で動作させる。Proportional Mode と比べて増幅によって得られる電荷量は 10~100 倍大きく、S/N 比が高く有利になる。出力信号の立ち下がりが非常に速いため時間分解能も小さい。また、ゲインの増加率が抑えられているため電荷分布が狭くかつ粒子入射角度依存も小さい。Landau テールも小さく、粒子入射が高頻度のときには有利となる。このテールはベースラインが移動する原因となる。

一般的にいって、電場の強さは増幅率に大きな影響を与える。Thin Gap Chamber の様に、アノードカソード間の距離が小さい時は、この間隔が変化することによる電場の変化が及ぼす増幅率変化の影響は大きい。しかし、Thin Gap Chamber では Limited モードで動作させることによって、この変化を小さくおさえており、大型検出器の量産時の工作精度に、より大きな許容範囲を与える。図 17 は Limited Proportional Mode でのガスギャップ間隔の違いによるゲイン変化をあらわしている。

## 2. 充填ガス

ガスとしては CO<sub>2</sub>+n-pentane(55:45) を用いる。ThinGapChamber では Limited Pro-

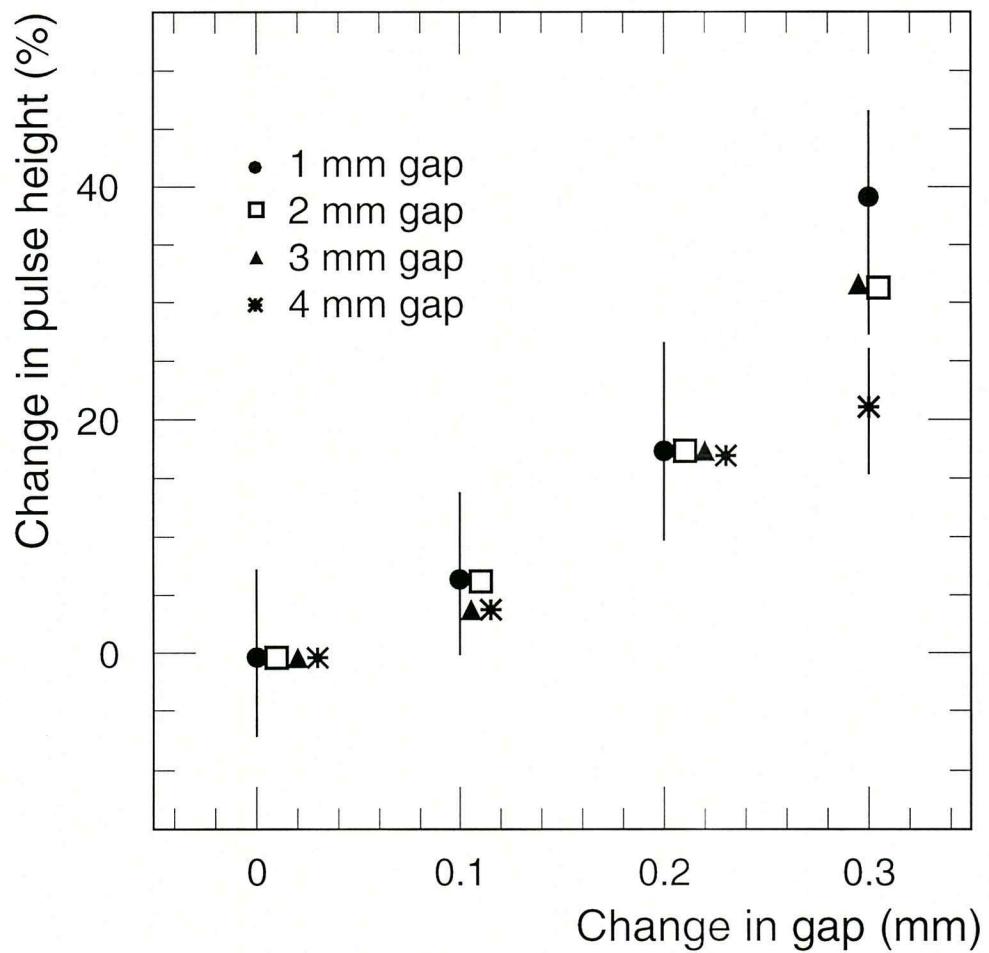


図 17: anode-cathode 間の距離を変化させたときの pulse height の変化。[2]

portional Mode で動作させており、この高い増幅率においては紫外線光子によるイオン化が無視できない領域となる。強力に 2 次電子の放出を抑えなければ電子雪崩が陽極から陰極に向かって電極間を短絡し連続放電が起こる。そこで、高分子ガスを混入させ、紫外線を吸収させ紫外線によるイオン化を押さえることが必要となる。紫外線光子の吸収断面積が大きく、かつ 2 次電子の放出をおさえるガスである。高分子のガスは紫外線を吸収して基底状態に戻るとき、自身の振動及び回転の励起を起こしてその内部エネルギーを高めることによってイオン化を伴わない非弾性衝突を起こすことが可能であり、n-pentane は分圧 0.5 気圧で気体でいられる最も振動、回転の自由度が大きい炭化水素分子である。

図 11 は炭化水素分子の紫外線光子吸収断面積を表している。

### 3. ワイヤー径

50 $\mu m\phi$  の金メッキタンクステンワイヤーを使用している。一般に細いワイヤー径の方がより高い電場を形成しやすいので、20 $\mu m\phi$  程度の細いワイヤーが使用されるがゲインを大きくしようとするとアノードワイヤーの近傍で生成された電子雪崩がアノードワイヤーを取り囲んでしまい電子雪崩の成長を止めてしまうことになる。TGC で動作させる Limited Proportional Mode のような高いゲインで使用するには好ましくない。更に TGC には 1chamber で約 700 本のワイヤーがあり、切れないようにという観点からも細すぎないほうがよい。

### 4. ワイヤー・ワイヤー間隔

LHC における陽子陽子衝突間隔は 25ns でありどのタイミングで衝突した事象かを同定するには信号を検出する時間分布がそれよりも短くなくてはならない。一般的にワイヤー間隔を減らすことは電離された電子のドリフトする距離が短くなり信号到達時間分布が狭くなる。CO<sub>2</sub>+n-pentane のドリフト速度を考慮して、1.8mm 間隔となっている。

### 5. ワイヤー・カソード間隔

LHC においては Luminosity が非常に高いため検出器のエンドキャップ部分では高頻度で荷電粒子が通過することになる。一般的にワイヤー・カソード間隔を減らすことは電子雪崩によってできた陽イオンの除去を速やかにする。陽イオンの存在は電場を打ち消しガスゲインを減少させ検出効率が低下してしまうことがある。ワイヤー・カソード間隔 1.4mm は 1kHz/cm<sup>2</sup> の高頻度入射粒子においても検出効率が低下しない間隔となっている。

### 6. カソード面

TGC においてカソード読みだしは位置座標測定用として重要である。カソード読みだしはワイヤー近傍にできた陽イオンの電場のつくる誘起電荷によってもたらされる。カソード面としてカーボンを選んだ理由は

- カソード面に陽イオンがたまらないよう、この陽イオンに対して電子を与え中性化することができる自由電子を多く持っていること。
- カソード面に陽イオンが衝突した際、中性化するため以外の電子がでてこないようにするため仕事関数ができるだけ大きい物質。

- 紫外線とカソード面が光電効果（原子番号の4~5乗に比例）を起こさないよう  
原子番号の小さな物質  
などがあげられる。

## 2.3 Thin Gap Chamber の readout

### 1. アノード読みだし

TGCのワイヤー近傍の電場はワイヤーの中心からの距離に比例する円筒型電場に近似することができる。電場、電位、単位長さあたりの静電容量はそれぞれ

$$E(r) = \frac{CV_0}{2\pi\epsilon_0} \frac{1}{r}$$

$$V(r) = \frac{CV_0}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{r}{a}$$

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln(\frac{b}{a})}$$

と表される。 $V_0$  はワイヤーへの印加電圧、 $a$  はワイヤー半径、 $b$  はワイヤー・カソード間隔である。

ワイヤーの長さを 1 とすればワイヤー全体の静電容量は  $C_l$  となる。ワイヤー近傍でできた電荷  $Q$  が距離  $dr$  だけ動いたときワイヤー上に誘起される電圧の変化  $dv$  は

$$dv = \frac{Q}{CLV_0} \frac{dV}{dr} dr$$

である。ガス増幅がワイヤー表面から距離  $\rho$  の位置で生じ電子と陽イオンの電荷がそれぞれ  $Q$  できたと仮定すれば、それぞれの電圧変化は

$$v^- = -\frac{Q}{CLV_0} \int_a^{a+\rho} \frac{dV}{dr} dr = -\frac{Q}{2\pi\epsilon_0 l} \ln \frac{a+\rho}{a}$$

$$v^+ = \frac{Q}{CLV_0} \int_{a+\rho}^b \frac{dV}{dr} dr = -\frac{Q}{2\pi\epsilon_0 l} \ln \frac{b}{a+\rho}$$

これより電子と陽イオンのシグナルの比は

$$\frac{v^-}{v^+} = 2.90 \times 10^{-2} (3\%)$$

TGCに対して  $a=25\mu m, \rho=3\mu m, b=1.4mm$  としている。よって主に陽イオンの移動が信号に寄与している。これから陽イオンによる信号だけを考える。陽イオンが時間  $t$  だけ動いたときの信号は

$$v(t) = - \int_0^t dv = -\frac{Q}{2\pi\epsilon_0 l} \ln \frac{r(t)}{a}$$

陽イオンのドリフト速度は

$$\frac{dr}{dt} = \mu^+ \frac{E}{P} = \frac{\mu^+ C V_0}{2\pi\epsilon_0 P} \frac{1}{r}$$

これを積分すれば

$$r(t) = \left( a^2 + \frac{\mu^+ CV_0}{2\pi\epsilon_0} t \right)$$

これを用いれば

$$v(t) = -\frac{Q}{4\pi\epsilon_0 l} \ln \left( 1 + \frac{\mu^+ CV_0}{\pi\epsilon_0 P a^2} t \right) = -\frac{Q}{4\pi\epsilon_0 l} \ln \left( 1 + \frac{t}{t_0} \right)$$

アノードから検出される電流はワイヤー上の電荷 ClV の時間変化であり

$$i(t) = Cl \frac{dV}{dt} = -\frac{QC}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{t + t_0}$$

となる。この  $1/t$  テールは陽イオンのアノードからカソードまでの動きを表し動作電圧によってテールは異なる。なお以上の式は Proportional Mode でのワイヤー信号である。Limited Proportional Modeにおいてはこのテールは減少する。

## 2. カソード読みだし

カソード部の構造は真中に G10、その両サイドに銅ストリップ、カーボン面の 3 層構造になっている。銅ストリップの読みだしは、まずワイヤー付近にできた陽イオンの電場が抵抗値の低い銅ストリップ面上に負の電荷を誘起し正の電荷を検出する。このときカーボン面は高抵抗であるため瞬間的には電流は流れないとともにカーボン上にも負の電荷が誘起される。この電荷は G10 の容量を通して銅ストリップに正の電荷を誘起している。すなわち、銅ストリップ上の電子はカーボン面の抵抗とカーボン・ストリップ間の静電容量の積の時定数で拡散していく。そこで、銅ストリップ面の誘起電荷はカーボン面抵抗値によってその拡散の仕方が大きく変わり読み出される信号検出数も異なってくる。図 18, 19 はこの拡散の様子を表したものである。出来るだけ複数のヒットが起こらないように、抵抗値はある程度高くなるように要求される。

同時にこのとき LHC 実験で要請される粒子入射頻度  $1kHz/cm^2$  に対してカーボン上を流れる電流による電圧効果によってモードが変化してはならない。モードが変わればガスゲインの大きな変化、電荷分布の広がりにより検出効率に大きく影響する。高抵抗ほど以上のことが起こりうる。なお  $10M\Omega/\text{square}$  であるとき粒子入射頻度  $1kHz/cm^2$  に対して局所的に 50V の電圧降下である。また、この抵抗値は ASD のノイズにも関係してくるため数百  $K\Omega/\text{square}$  以上でなければならない。以上の要請から約  $1M\Omega/\text{square}$  に最適化されている。

## 3. ASD (Amplifier Shaper Discriminator)

アノード、カソードとともに読みだしには ASD を使う。ASD とは Amplifier Shaper Discriminator の略であり信号を増幅して Shaper 回路にかけてテールを落し、LVDS のデジタル信号を出力する。Shaper は  $1/t$  テールをキャンセルするための pole-zero cancellation 回路をもっており高レートでのバイルアップを防いでいる。なおプレアンプ、メインアンプのゲインはそれぞれ  $0.8V/\text{pc}$ , 8 倍である。トータル  $6.4V/\text{pc}$  である。

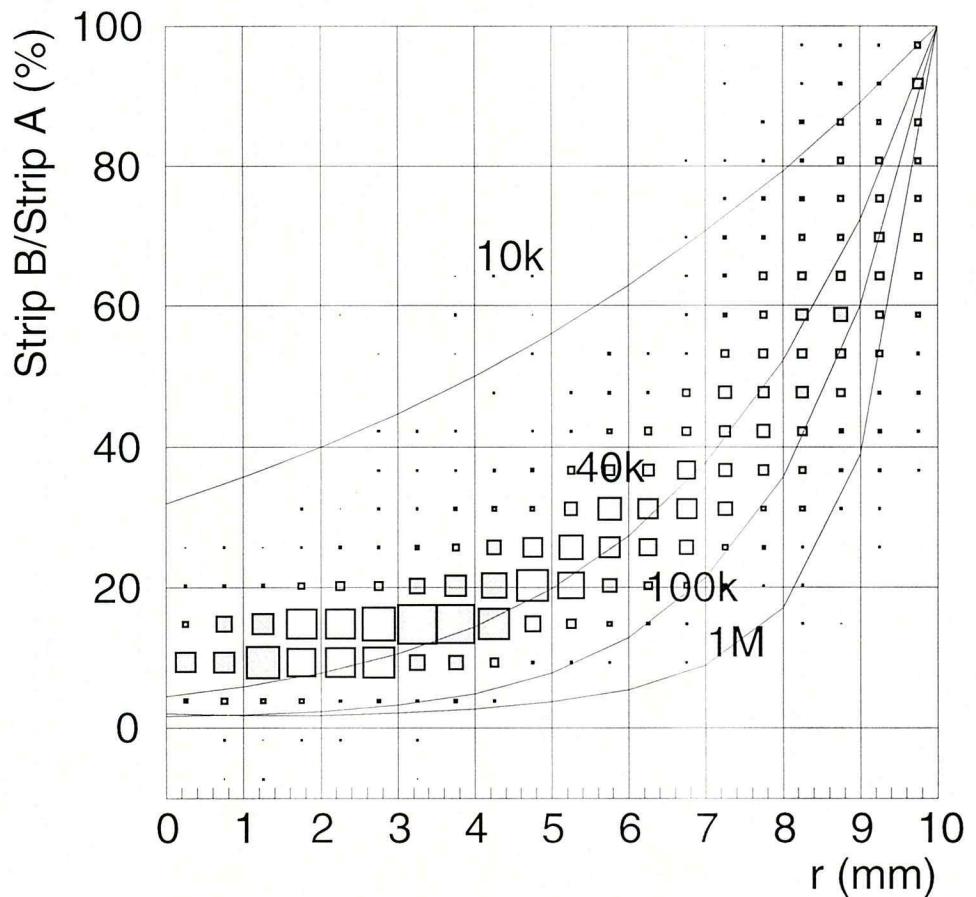


図 18: カーボン面抵抗値の違いとクロストーク。

ストリップ幅 1 cm の A、B においてビーム位置を A 上 0mm～10mm(  $r$  ) を動かしたとき  
隣のストリップ (B) におけるクロストーク。四角のプロットは面抵抗値が  $40K\Omega/square$   
のとき、実線は計算されたものである。[2]

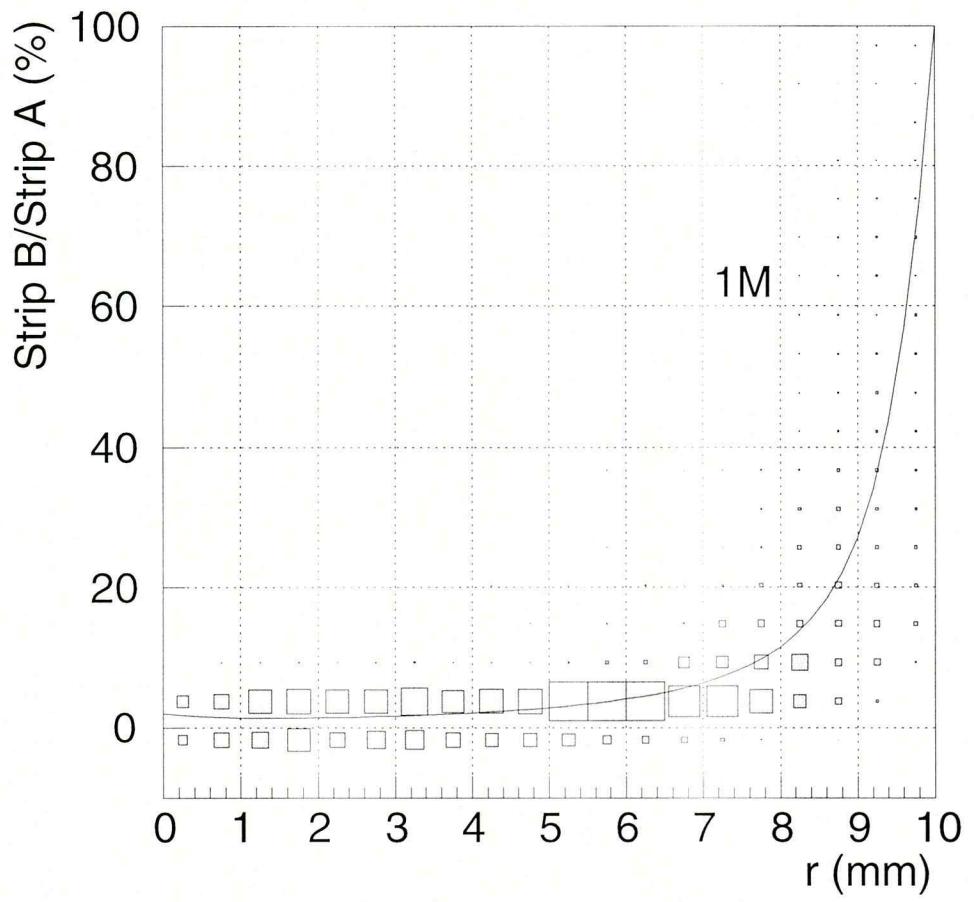


図 19: カーボン面抵抗値  $1M\Omega/\text{square}$  におけるクロストーク  
四角のプロットは面抵抗値が  $40K\Omega/\text{square}$  のとき、実線は計算されたものである。[2]

## 2.4 フルサイズプロトタイプ TGC の製作

試作は 1998 年 6 月～8 月にかけて高エネルギー加速器研究機構の FUJI 実験室で行なわれ 2doublet 目である。目的は大型 TGC の基本的な製作方法の確立である。

### 2.4.1 制作工程

図 20 は今回制作した doublet の断面図でその下図は各パーツにわけた分解図である。この図をもとに制作工程の概要を述べる。細かい工程については Appendix で説明している。

- i. まず、材料、部品を加工してその位置合わせをする
- ii. 図の 1 の部分のようにカーボンを塗装しカソード面をつくる  
高抵抗のカーボンと低抵抗のカーボンを調合して  $1M \Omega / \text{square}$  にしている。
- iii. 構造体であるハニカムを接着 (2)
- iv. ワイヤー・カソード面間隔 1.4mm を保つためのスペーサー (ワイヤーサポート、エンドフレーム) を接着 (3)  
接着位置精度は  $500\mu\text{m}$  である。
- v. ワイヤーを張る (4)  
1.8mm 間隔で約 700 回転まかれる。
- vi. チェンバーを閉じて接着 (5)  
平面度の要求条件は  $100\mu\text{m}$  である。
- vii. チェンバーとチェンバーの接着 (6)  
平面度の要求条件は  $100\mu\text{m}$  である。

表に試作 TGC の主なパーツの材質をしめす。

パーツ	材質
カーボン	Electrodag500, Electrodag501(日本アチソン社)
ワイヤーサポート	FR 4
ボタン型サポート	FR 4
ガス口	サス
ワイヤーの半田	Sn+Zn(72:28)

### 2.4.2 制作上の注意と問題点

量産される TGC はまず安定して動作しなければならない。そのためにはより信頼性の高い材質の選定、制作された TGC の均一性、そして構造体に歪みがないことが要求され

る。チャンバー内に流すガスは  $\text{CO}_2 + \text{n-pentane}$  という他の物質に影響を与えやすいガスであるため、用いる材料すべてにわたって注意をはらわねばならない。接着剤の塗り方やカーボン塗装においてもばらつきがあってはならない。また、平面性を容易に実現する接着方法も確立する必要がある。

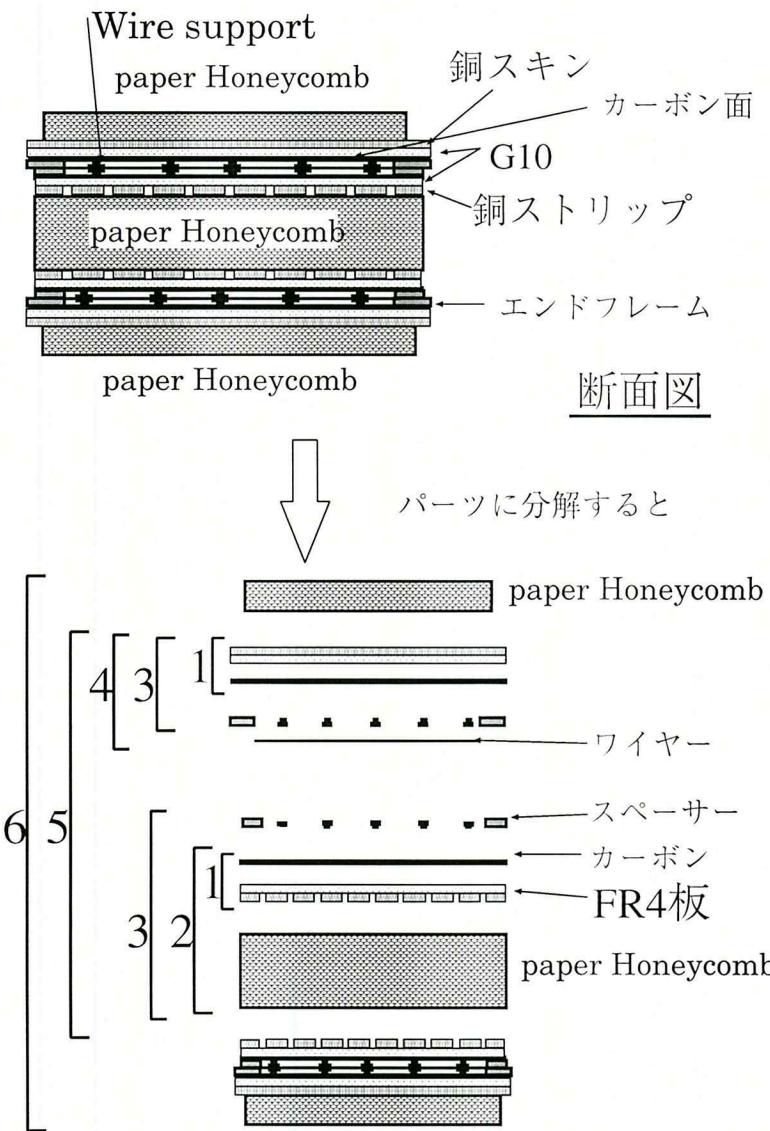


図 20: doublet 断面図

ここでは今回、平面性をだすために用いた方法をのべる。図21のように定盤の上にTGC、さらにその上にアルミ板をのせている。まずTGCの下面を真空ポンプで約400mmHgでひき下面の平面性をだす。次にバギングフィルムをかぶせゲージ圧720mmHgでひき40mmHgの力で接着する。このときチャンバー全体には約1トンの力が加わる。しかし、実際は下面を真空ポンプでひいているとき定盤と下面との間にもれがあり720mmHg以下になってしまふ。そのためレギュレーターの調整と針金を定盤とバギングフィルムの間に

いれることによってゲージ圧が 720mmHg になるように調整している。チャンバー内には空気を流し内圧をかけ、ごみの混入やアラルダイトのアウターガスの停滞を防いでいる。この方法の問題点は TGC の上面の上にアルミ板をのせているため上面の平面性を確認できることである。実際  $200\mu m$  程度の歪みがあった。そのため確実に上面の平面性を出す状態をつくるねばならない。また、針金とレギュレータをもちいて平衡状態をつくりだす工程は再現性がなく量産時における TGC の均一性が保てない。現在はこのような問題を解決しながら制作技術の確立をおこなっている。

### 内圧をかける

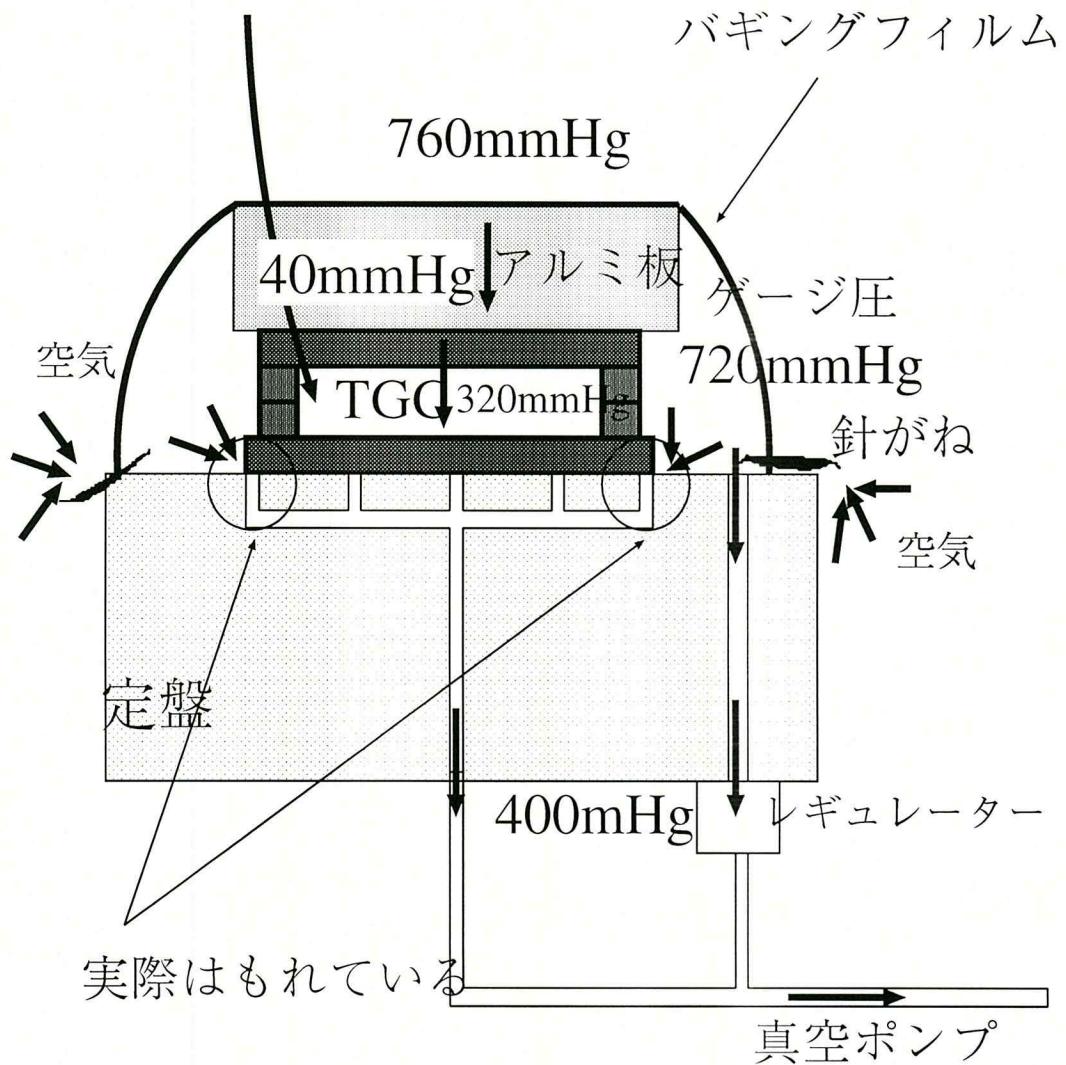


図 21: チェンバーの接着工程図

## 2.5 量産計画

TGCの量産は99年からはじまり2003年までに高エネルギー加速器研究機構にて1056Chamberがつくられる。1日あたり1doubletが製作される予定であり2週間毎に10doubletほど神戸に運ばれ検査される。検査に合格したものはCERNへ輸送される。日本で量産されるタイプと数は以下の通りである。配置は図22,23 形状は図24に示している。

	T4	T5	T7
Doublet units	96	96	192
Triplet units	0	0	96
units	96	96	288
Chambers	192	192	672

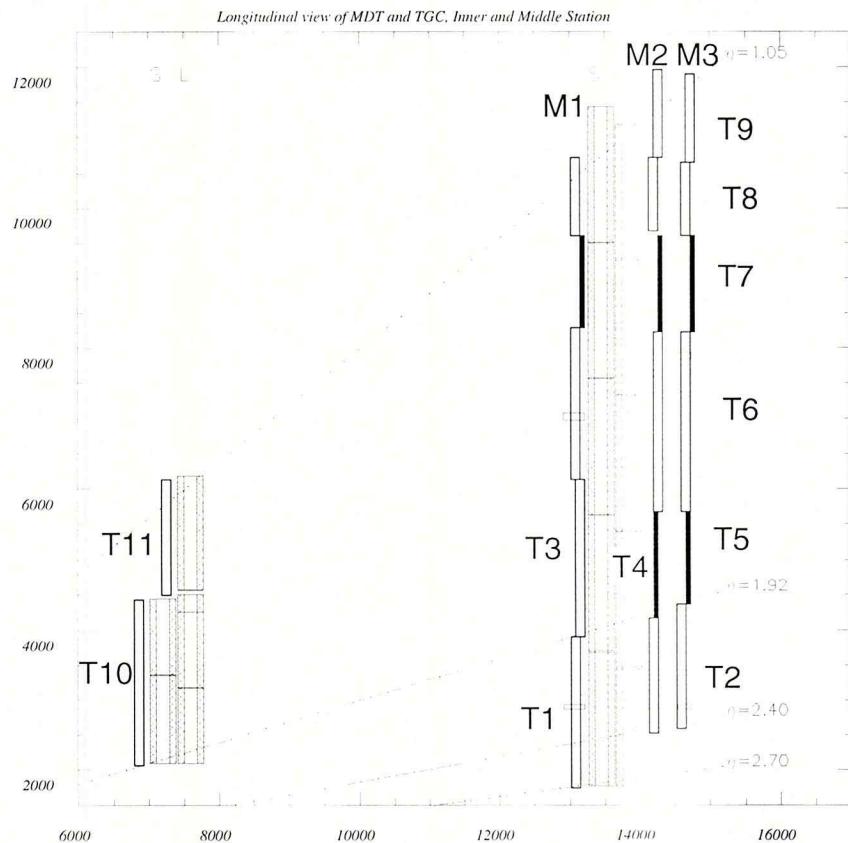


図22: ATLAS測定器1/4断面図。日本が担当するTGCは黒色のT4,T5,T7。

*TGC M3 (active area of chambers)*

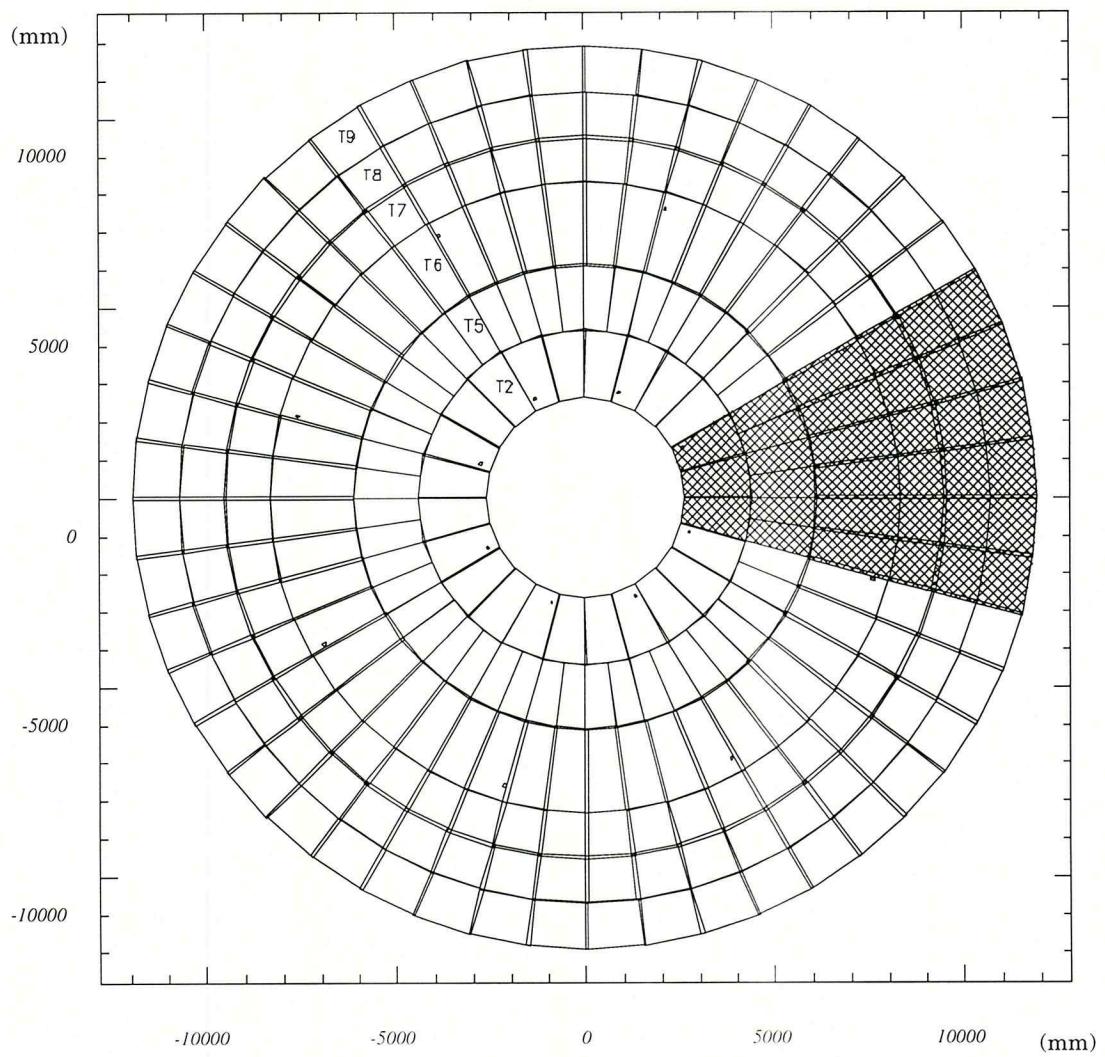


図 23: M3area

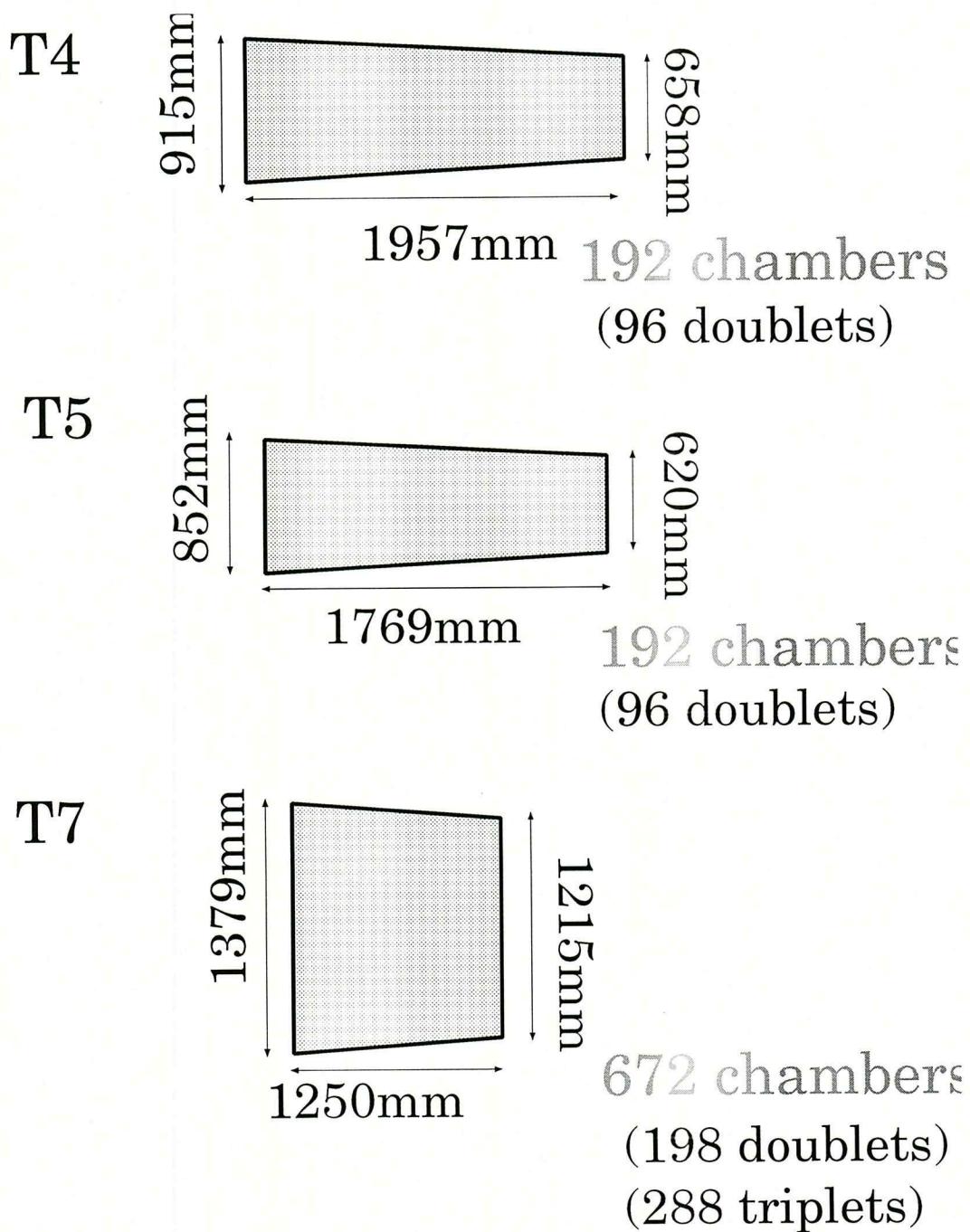


図 24: 日本で量産される TGC の型と数

### 3 検査システム

ここでは宇宙線による検出効率測定のための検査設備について述べる。2000年から TGC の量産がはじまり、3 年間で約 1000chambers 生産される。これら全てを検査しなければならない。

検査設備の置かれる部屋の大きさの制約、できるだけ長期間にわたってのテスト、検査設備のコストパフォーマンス、宇宙線検出頻度などから一度にテストする TGC の数は 20chambers である。検査の概略図を図 25,26 に示す。粒子が通過するとシンチレーションカウンターからの信号が NIM モジュールのロジック回路を通じてトリガー信号をおく。Drift tube の時間情報 (TMC) から飛跡が求まり、TGC 上の粒子通過位置がわかる。その位置において TGC のヒット情報を読み出し (MWPC module) 検出効率を算出する。

#### 3.1 検査ステーション

これだけの数と大きさの TGC をテストするためにはかなり大規模な検査設備が必要とされる。また TGC の検出効率測定のためには粒子の飛跡（トラック）を決める技術の確立も必要である。よって、1chamber のある 1 部分だけを測定できる小型の検査設備において検出効率測定の技術を確立する。この小型の検査設備がうまく機能することが確認されてから大型の検査設備へと移行していく。

実験のセットアップを図 27,28,29 に示す。TGC の検出効率を測定する時は、チャンバー全体の平均ではなく各位置での検出効率を出すことが必要である。宇宙線の通過した軌跡を 3 次元的に再構成する必要があり、その時の必要な位置精度は 1mm 程度である。以上の理由で、Drift tube ( $\Phi 50\text{mm} \times 1500\text{mm}$ ) (endcap 部: 図面 31) を  $5 \times 4 \times 5$  の 3 層俵積みに、上下 X、Y 方向に置き粒子のトラックを求める。TGC はこの上下の Drift tube の間に置かれる。TGC 上の粒子通過位置決定の有効領域は X、Y 方向がオーバラップする  $200\text{mm} \times 200\text{mm}$  である。この Drift tube によるトラックを求めるときには粒子通過時刻の情報が必要である。それを決定するためにシンチレーションカウンター ( $70\text{mm} \times 1300\text{mm} \times 10\text{mm}$ ) を上下に 4 枚ずつ設置する。このシンチレーションカウンターからの光は両端の光電子増倍管で電気信号に変換され、両端のコインシデンスを取ることで荷電粒子の通過を検出する。宇宙線通過イベントのトリガーは、(上 4 枚の OR) AND (下 4 枚の OR) で行う。トリガーレートは 10Hz 程度である。読み出し回路は Drift tube、TGC とともに ASD である。出力信号は LVDS であり ASD buffer を通して ECL 信号に変換され TMC 型 TDC に入力される。このときトリガー信号が検出器 (Drift tube、TGC) からくる信号よりも遅いため、トリガー信号がきた時間から  $1.25 \mu\text{s}$  さかのぼったタイムウインドウに入っている信号の TDC 値を測定するコモンストップモードを使用する。H.V 供給は CAEN の 40CH High Voltage System を用いている。これは PC 側から自由にコントロールでき 10 秒ごとに HV 値、カレント値及びトリップ時間が記録される。

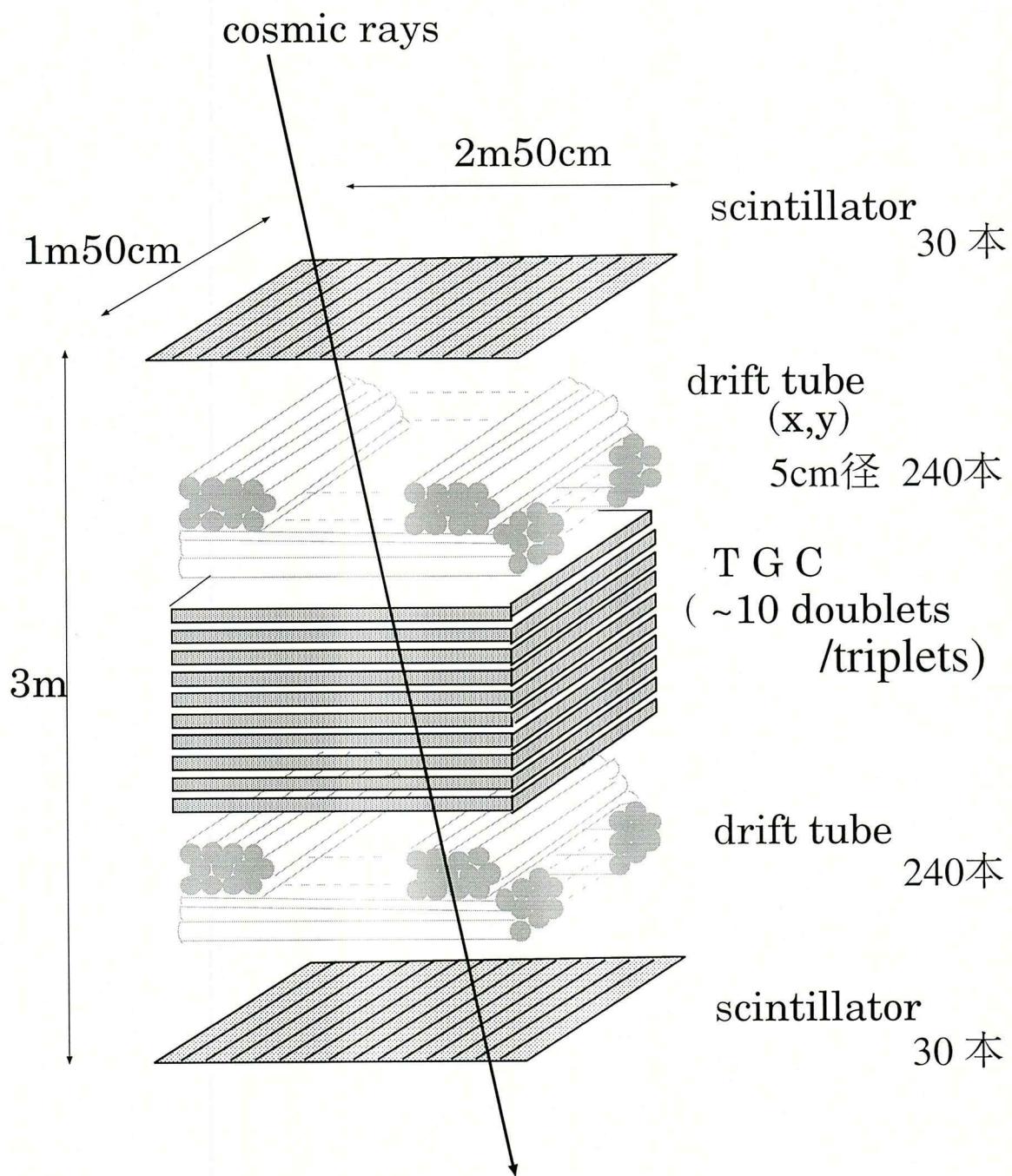


図 25: 検査ステーション

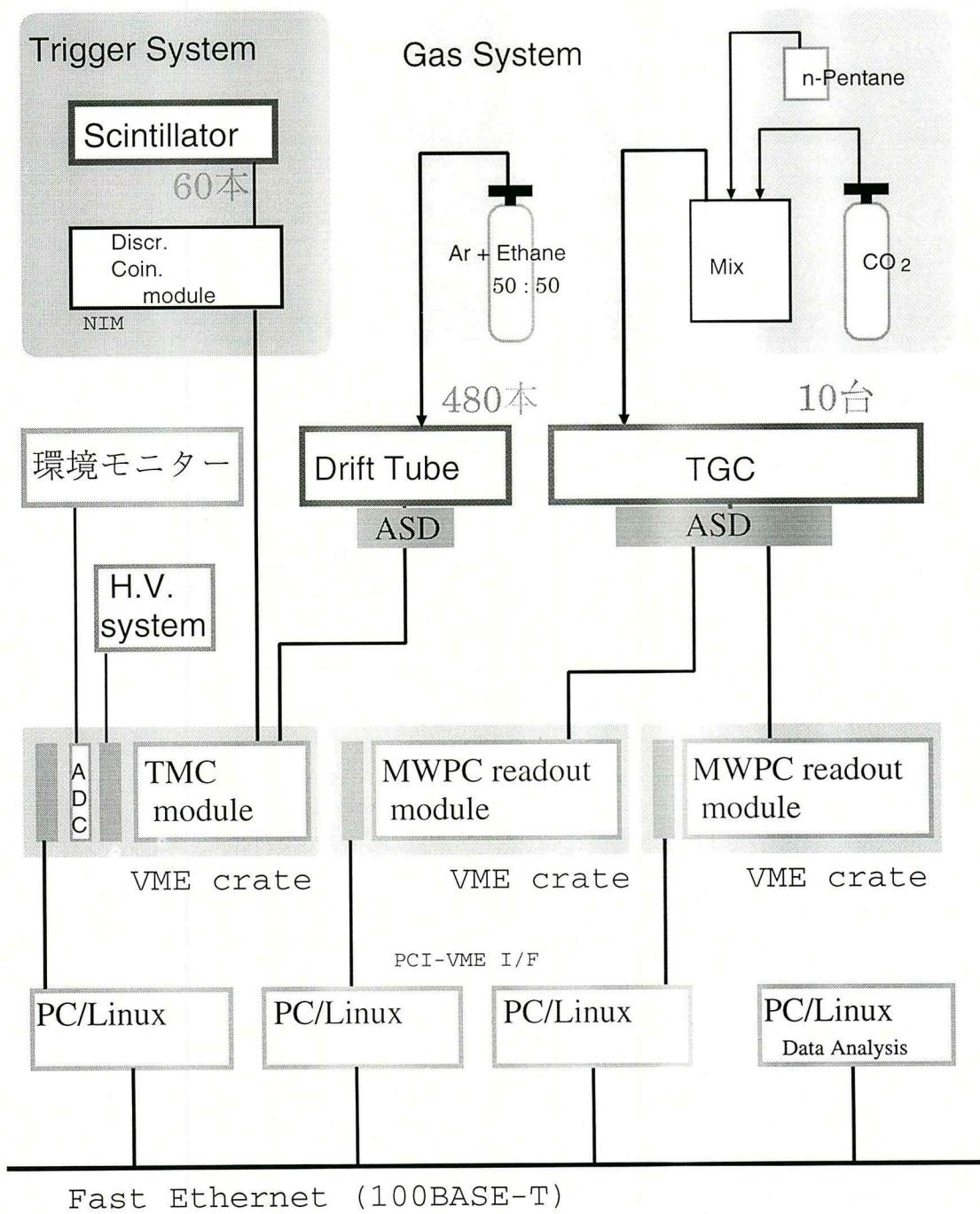


図 26: 検査ステーションの構成

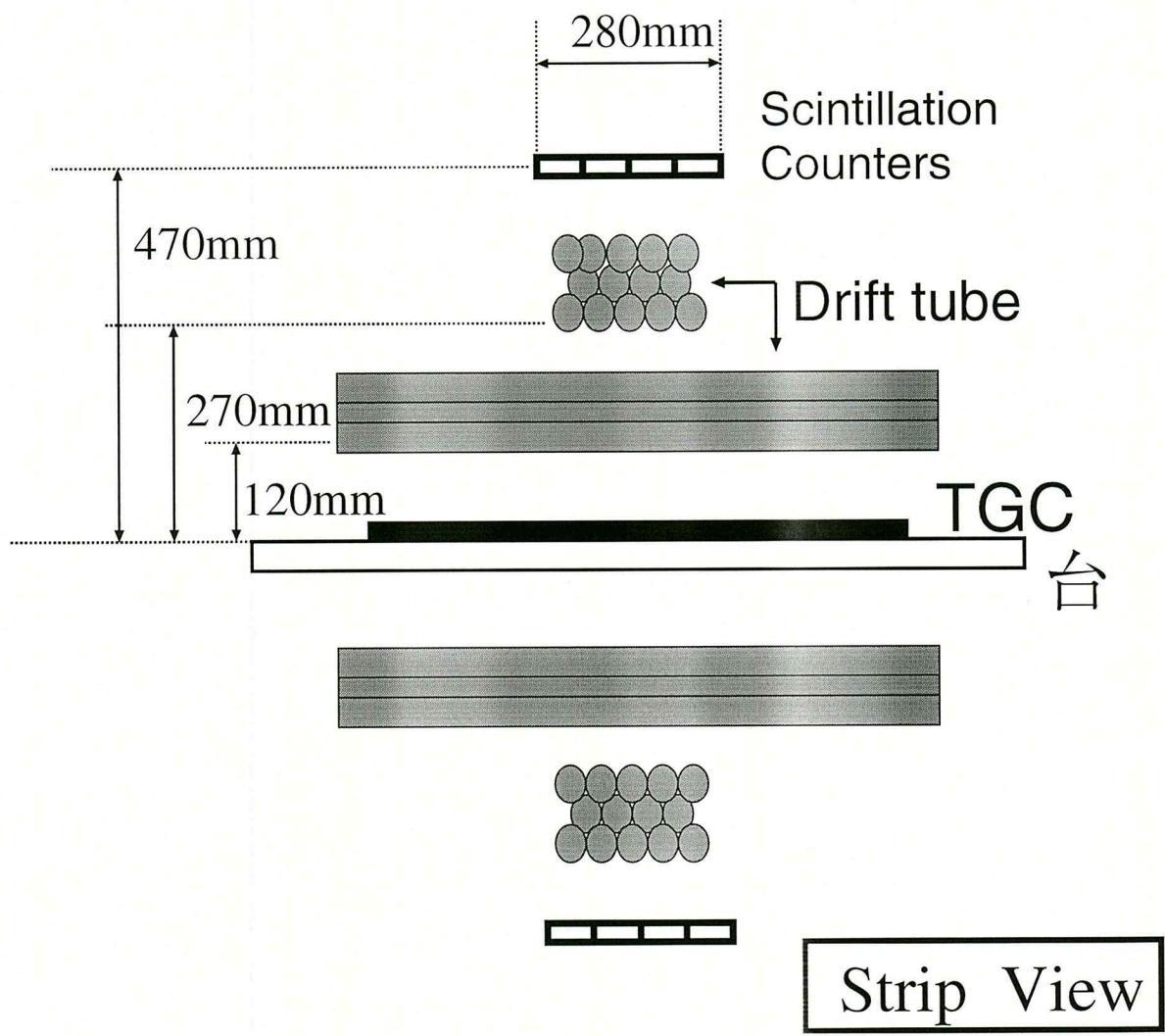


図 27: セットアップの断面図 (Strip 側からみている)

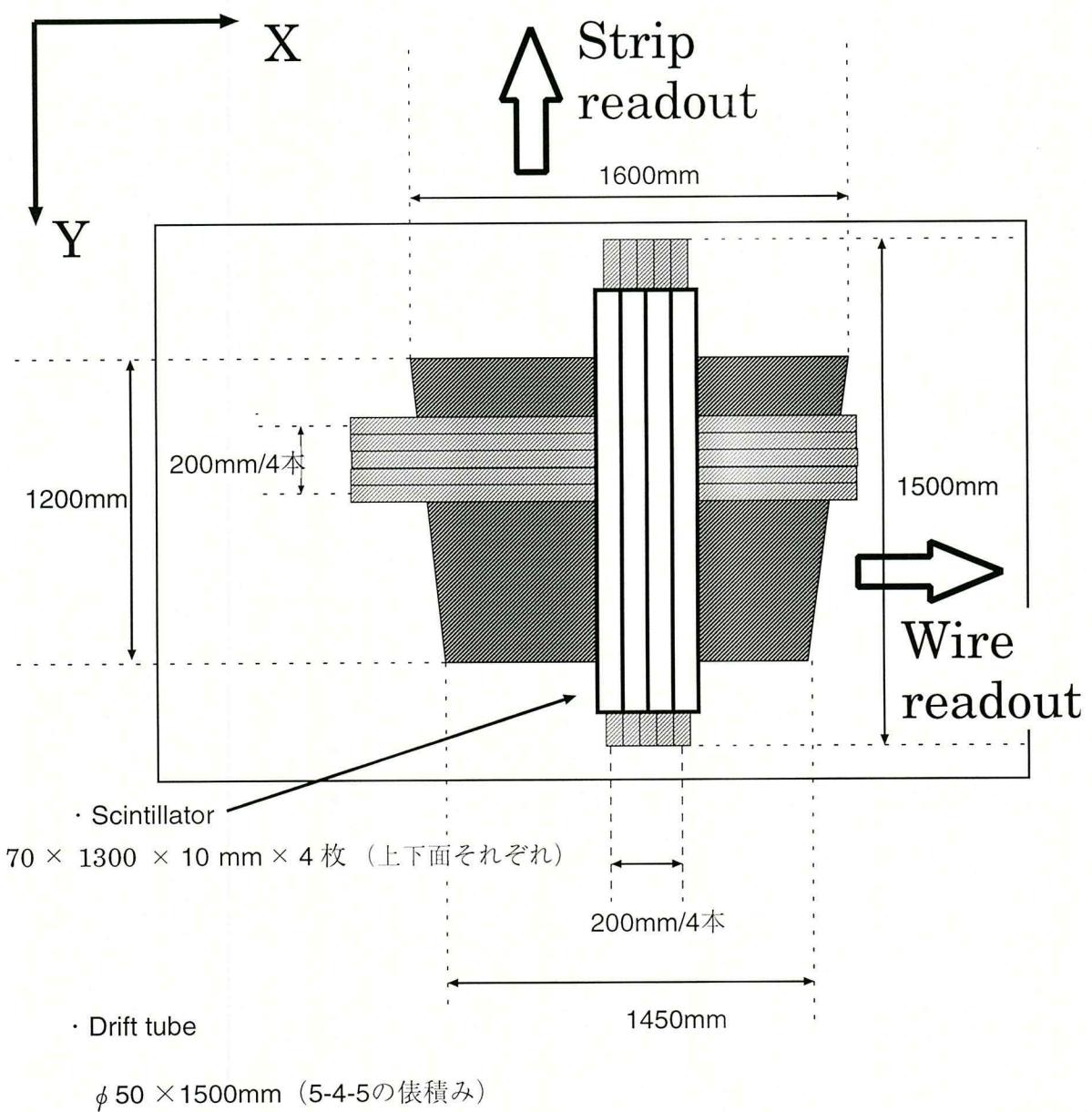


図 28: セットアップを上から見た図

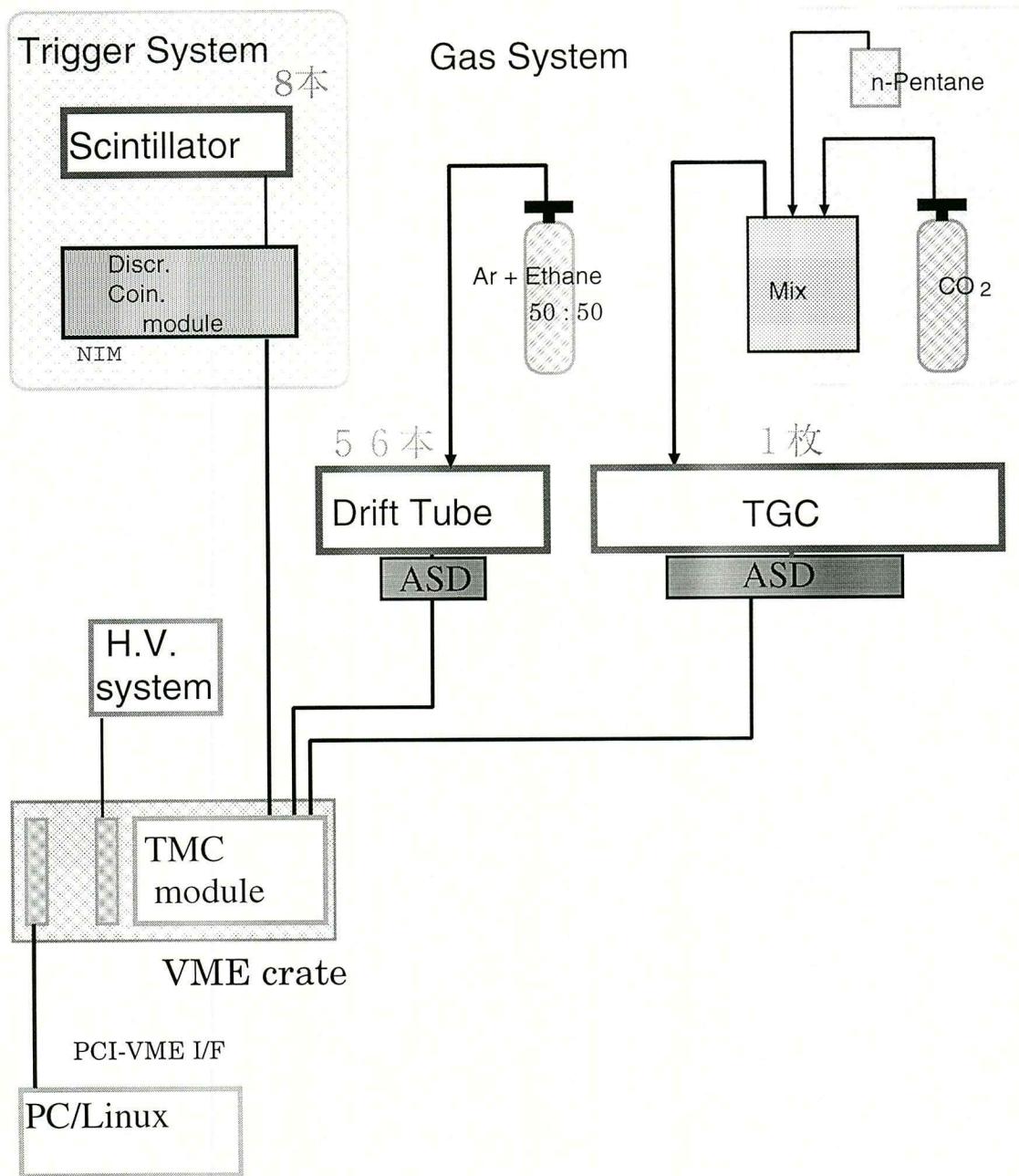


図 29: セットアップの構成

### 3.1.1 TGC ガス供給システム

TGC には  $\text{CO}_2 + \text{n-pentane}$ (55:45) が使用される。そのガスシステムを図 30 に示す。n-pentane の沸点 36.1 °C より十分高い 50 °C に保った気化槽で混合させ、 $\text{CO}_2 + \text{n-pentane}$  の流量はそれぞれガス質量流量コントローラー及び液体質量流量コントローラーで制御されている。このガスシステムでは混合比は外部の環境変化にとらわれず、常に安定した供給ができる。フルスケールのレンジは液体質量流量コントローラーが 500 $\mu\text{l}/\text{min}$ , ガス質量流量コントローラーが 200cc/min である。これは n-pentane: $\text{CO}_2$ =10cc:10cc(/min) で流して最大 10doublets に供給できる量である。本検査において十分な性能を満たしている。なお液体と気体の換算は 1 $\mu\text{l}=0.195\text{cc}$  である。

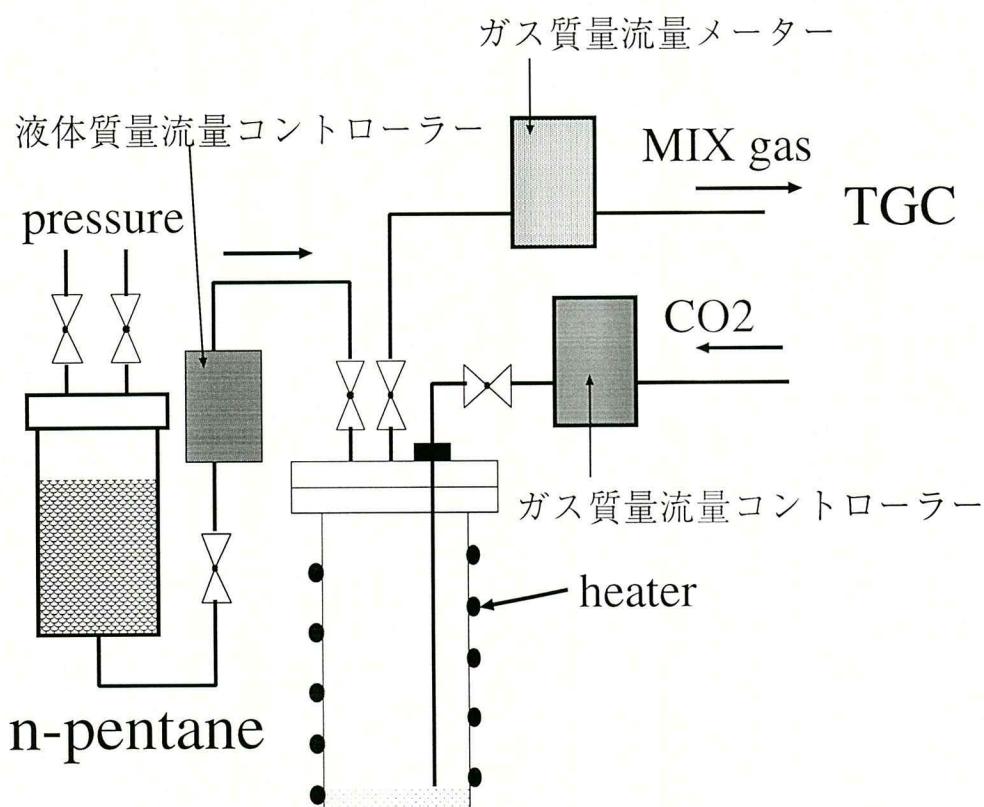


図 30: TGC ガス供給システム

## 3.2 Drift tube による飛跡の確立

### 3.2.1 Drift tube

Drift tube の目的は粒子のトラック（飛跡）を求めることがある。Drift tube は直径 50mm、長さ 1500mm、肉厚 2mm の円筒型アルミパイプの中心に直径 50  $\mu\text{m}$  のワイヤーをはったものからなり、内部には Ar+エタン (50 : 50) のガスが充満している。Ar+エタ

ン（50:50）を用いた理由は電子の移動速度が電場によらずほぼ一定のため粒子通過位置を比較的簡単に求めることができるからである。高電圧を印加することで粒子の通過による電離電子が増幅され信号を得ることができる。基本的には TGC と同じ増幅原理である。

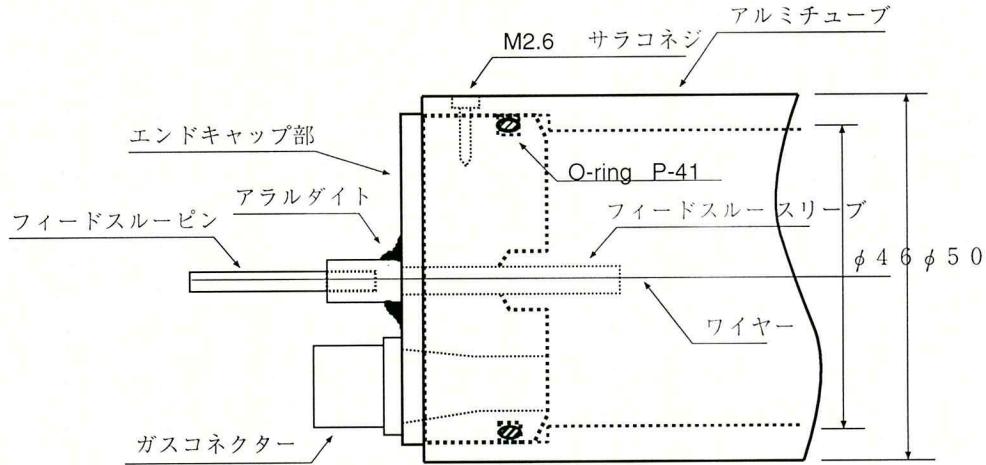


図 31: Drift Tube の断面図

ワイヤーからトラック（飛跡）までの距離は電離電子がワイヤーに向かって移動する速度（ドリフト速度）に信号を検出するまで時間をかけたものである。このときトラックはワイヤーを中心とした円（半径：ワイヤーからトラック（飛跡）までの距離）に接している。更に複数の層を重ねることによってその各々の円に fit する直線をひくことができる。これがトラックである。

しかしドリフト速度は電場の関数であり未知のパラメーターとなっているため上記のようにいかない。よって各々の円（ワイヤーからトラックとの距離）を決めるためには検出された時間 ( $t$ ) に対してワイヤーからトラックまでの距離 ( $x$ ) の関係 ( $x - t$  relation) を求める必要がある。

### 3.2.2 解析方法

1. event の選択を行なう。上下のシンチレーションカウンターに粒子の通過の信号があること、かつ各層 (1, 2, 3, 4, 5, 6) 1 本ずつ粒子通過の信号があること。（図 32 参照）
2.  $x - t$  relation の関係を求めるためにドリフト粒子のワイヤーからの距離を表す関数系  $X(t)$  を選ぶ。以下その係数を求めていく。
3. その関数を使って 1, 2, 3, 4, 6 の hit したチューブの時間情報から距離  $X$  を求める。距離  $X$  はその関数  $X(t)$  に時間を代入したものである。時間は TMC 値に時間変換 factor(1count=0.78ns) をかけたものである。
4. 1, 2, 3, 4, 6 のワイヤーからの距離  $X$  が求まつたので円を描きそれを直線（トラック）で

fit する。図のように傾き  $a$ 、切片  $b$  を微小変化させ、直線と各々のチューブの円との距離  $X$  の誤差の二乗の和 ( $er1^2 + er2^2 + er3^2 + er4^2 + er6^2$ ) が最小になるものを選び複数あるトラックのうち本物の飛跡である一つのトラックを選択する。

5. 4. でもとめたトラックはアライメントされていない（上の層と下の層が平行でない）ため正確なトラックではない。（図 33 参照）よって、下の層だけにおいて誤差の二乗の和 ( $er4^2 + er6^2$ ) が最小となるトラックを求める。
6. チューブ 5 のワイヤー中心とトラックの距離  $x_5$  を求める。
7.  $x_5 - t_5$  の関係が  $x - t$  relation である。
8.  $t_5$  をある時間幅でスライスし  $x_5$  の平均を求め、それらを fit した関数が新たな 2. の関数である。
9. 以下 2.~8. の行程を 2. の関数の係数が収束するまで行なう。

以上の解析方法により  $x - t$  relation, resolution が求まる。

### 3.2.3 解析結果

#### 1. x-t relation (図 34)

選んだ関数系は  $X(t) = P1(t_0 - t)^2 + P2(t_0 - t)$  ( $t_0 = TMC$  カウント  $1630 \times 0.78ns/1$  カウント) である。ワイヤーからの距離が 0 のときの時間を  $t_0$  としている。Ar+エタン (50:50) のドリフト速度はほぼ電界によらず  $5cm/\mu s$  であるため、初期値のパラメーターとして  $P1=0, P2=5$  と定めた。図 35 のように係数  $P1, P2$  が fit 回数とともに収束している。

#### 2. resolution(図 37) この評価を行なうために Residual という量を定義する。図 36 のように粒子通過位置を $X(t4), X(t5), X(t6)$ として

$$Residual = \left( 2.5 - \frac{X(t4) + X(t6)}{2} \right) - X(t5) \equiv R$$

ただし、 $\left( \frac{X(t4) + X(t6)}{2} \right)$  と誤差の二乗の和 ( $er4^2 + er6^2$ ) が最小となる直線は同じであるとしている。

この値は上下のチューブより求める中間の位置と真中のチューブの示す位置の差に対応している。この分布が resolution である。よって  $X(t4), X(t6), X(t5)$  の誤差のトータルが  $600 \mu m$  ということになる。Residual の分布の誤差を  $\sigma_R$ , 各々のチューブの位置精度は一様としてその誤差を  $\sigma$  とすると

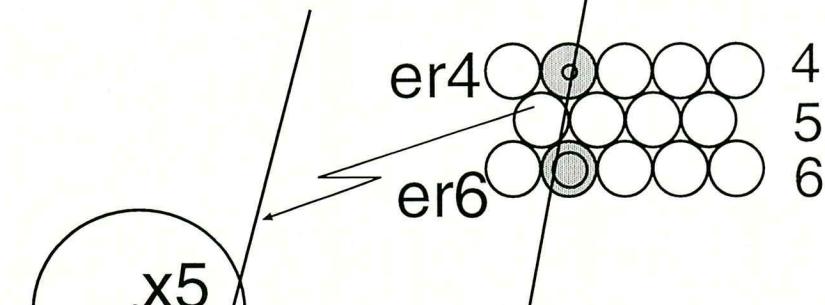
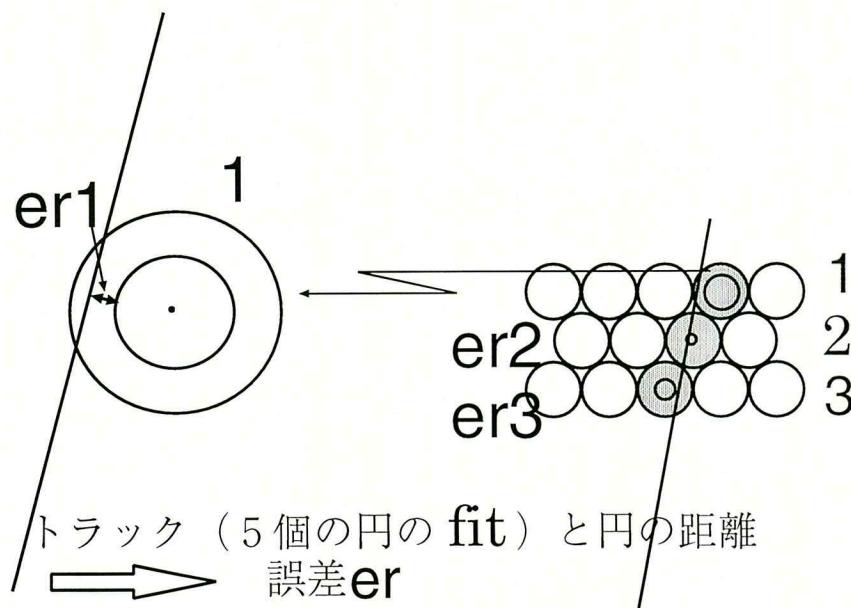
$$\sigma_R^2 = \left( \frac{\partial R}{\partial X(t4)} \right)^2 \sigma^2 + \left( \frac{\partial R}{\partial X(t6)} \right)^2 \sigma^2 + \left( \frac{\partial R}{\partial X(t5)} \right)^2 \sigma^2 = \frac{\sigma^2}{4} + \frac{\sigma^2}{4} + \sigma^2$$

結果

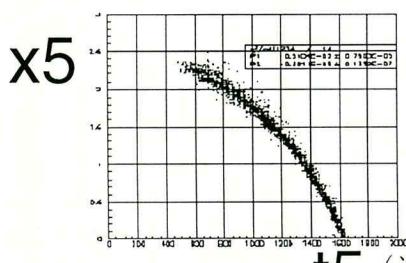
$$\sigma = \sqrt{\frac{2}{3}} \sigma_R$$

チューブ 1 本の resolution は  $490 \mu m$  となる。

#### 3. Evnet Display (図 38)



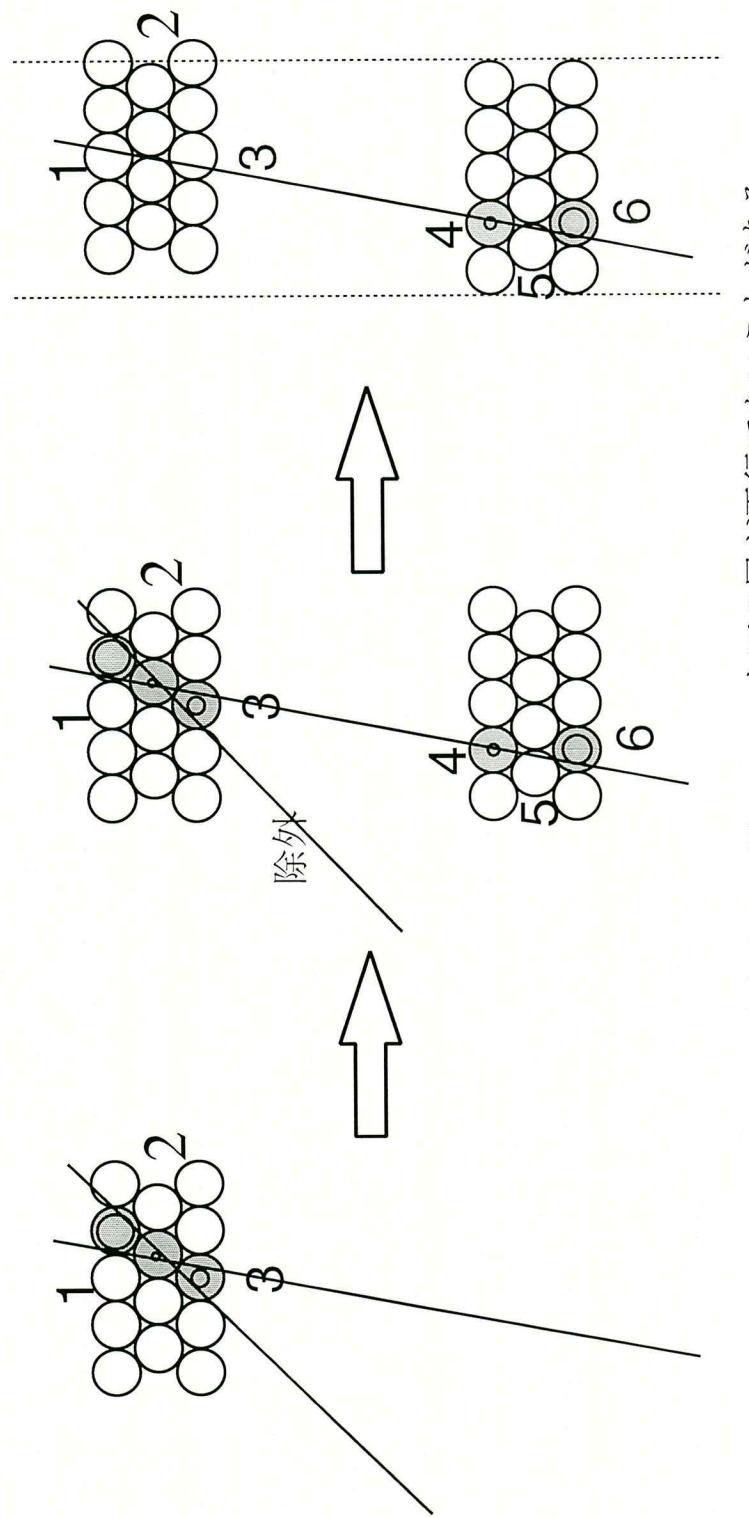
*x-t relation*



t5 (測定された時間)

収束するまで iteration する

図 32: トラッキング方法の説明図 1



上の層が平行でないことがある  
ので下の層だけを使って **fit** する

複数あるトラックから上下の層  
を使って1本のトラックを選択

図 33: トラッキング方法の説明図 2

## *x-t relation*

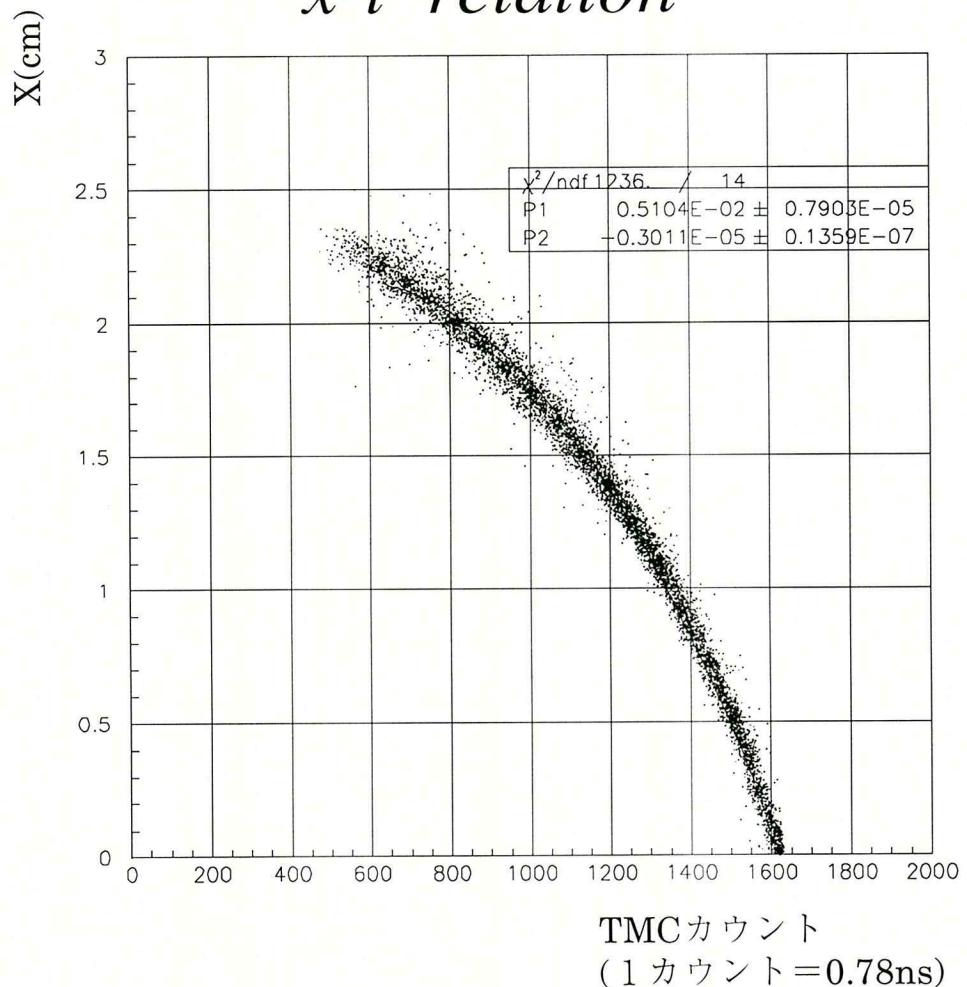


図 34: x-t relation 縦軸:ワイヤーからトラックの距離  $\times 5$ 、横軸:TMC カウント

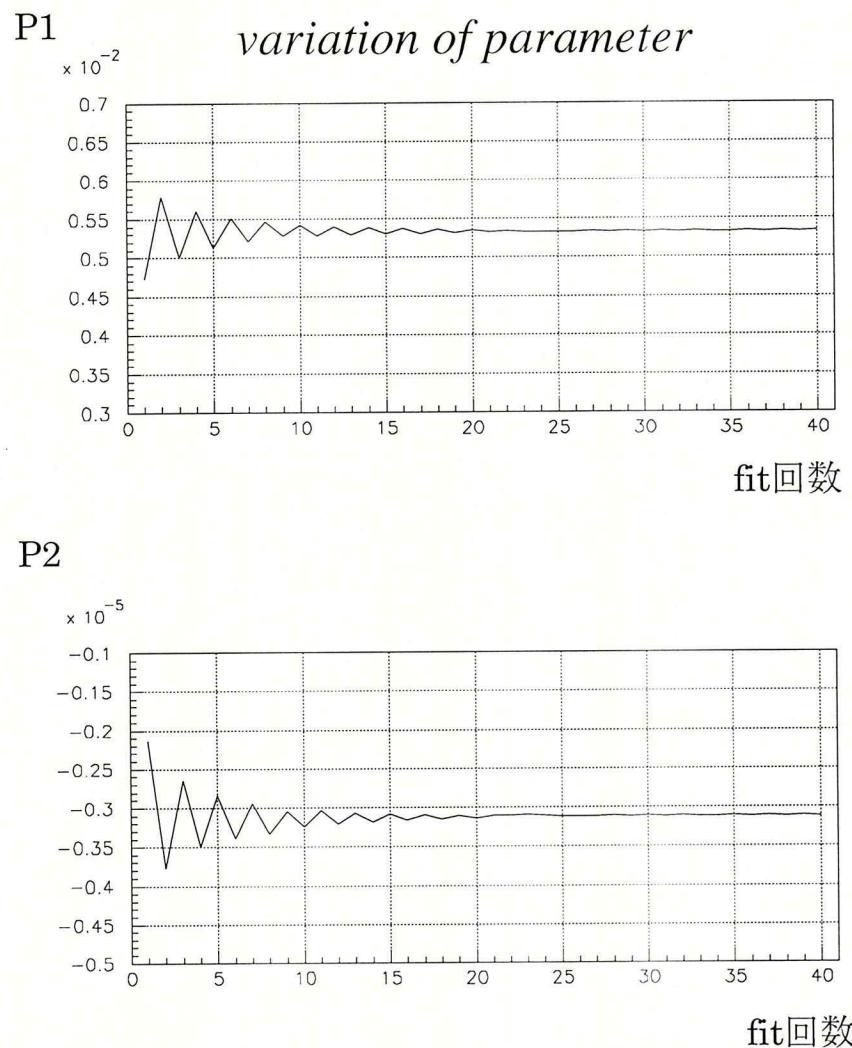
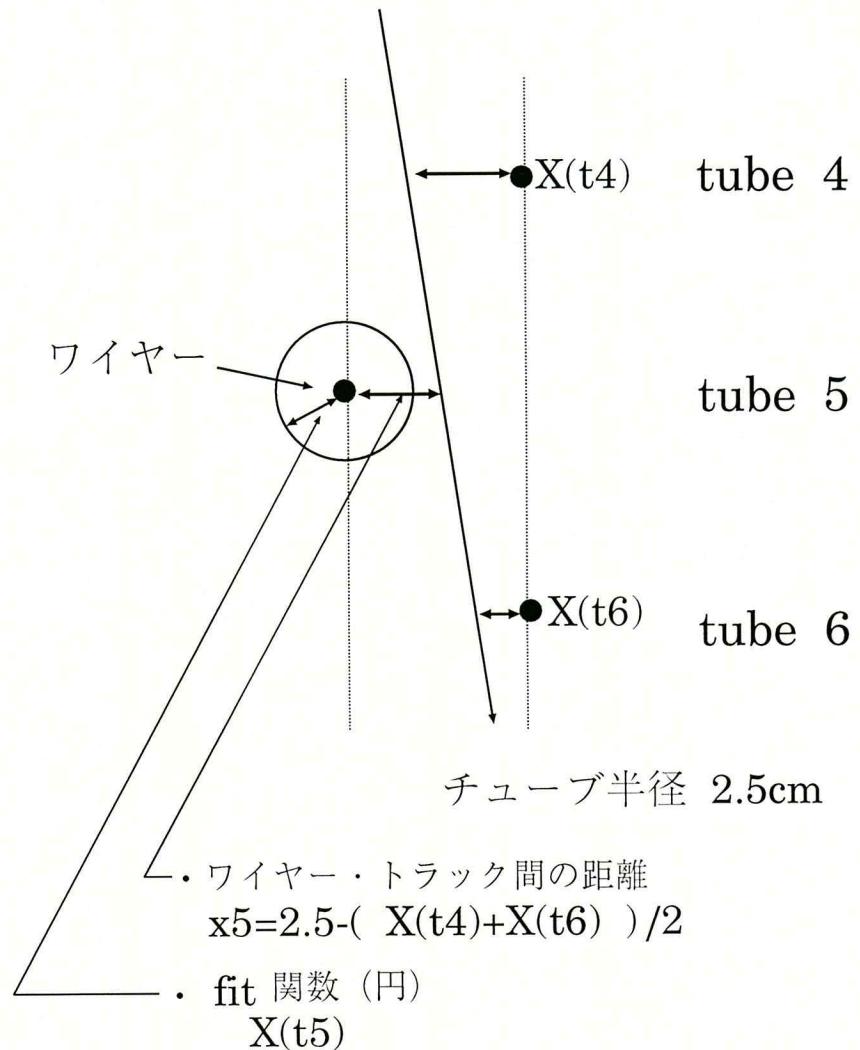


図 35: 関数の係数値と fit 回数の関係 縦軸:fit 関数の係数、横軸:fit 回数



この 2 つの距離の差の分布が resolution である

図 36: resolution の説明図

# *resolution*

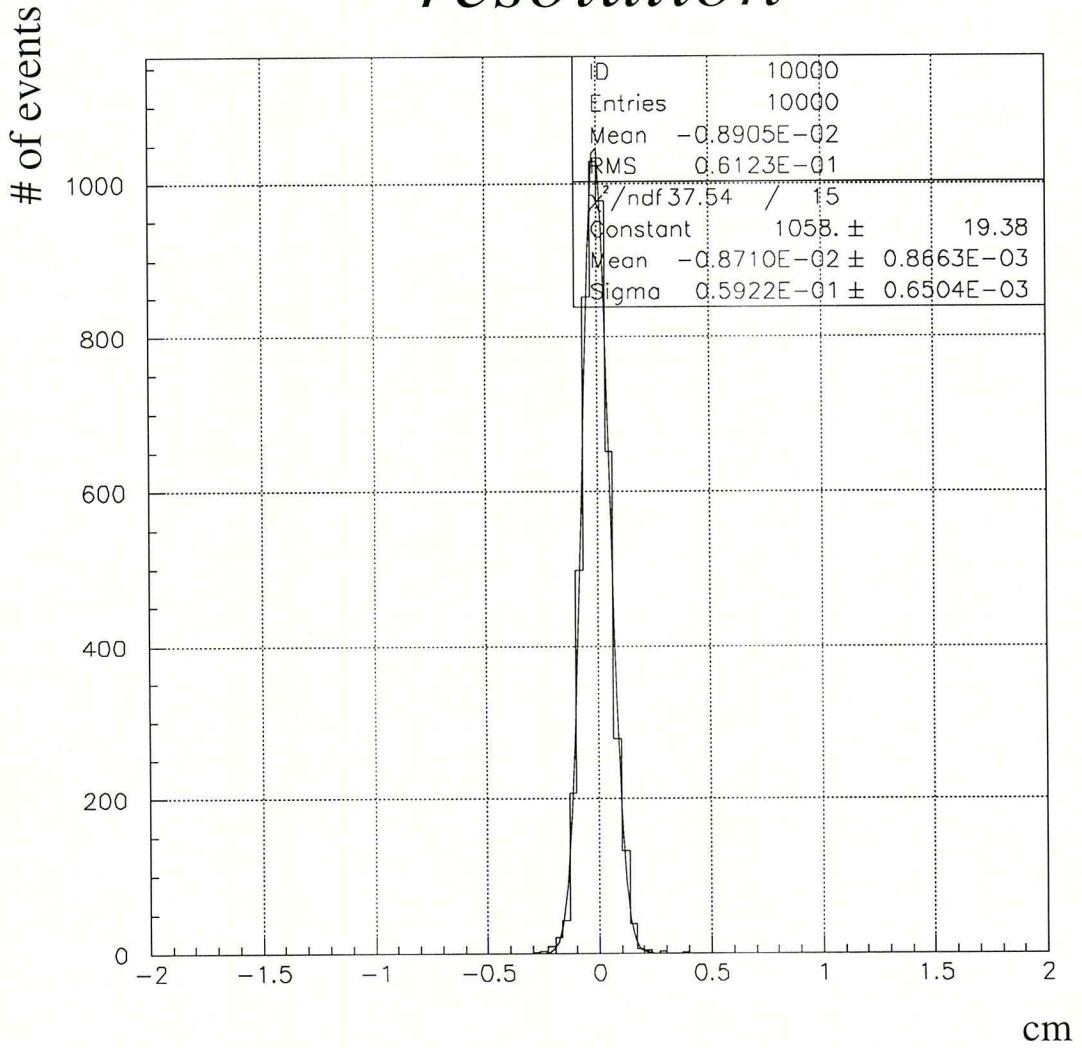


図 37: resolution

縦軸:event 数、横軸:各 event のワイヤーからトラックまでの距離  $\times 5$  ( $x-t$  relation のプロット) とその fit 関数(関数 X(t5))との誤差

粒子が通過したとき TMC から時間情報である信号が検出される。x-t の関係を用いて、その t に対する距離 - fit された関数 X の円を各々の tube について描き、円に fit する直線を引く。ただし、この直線と各々の X との距離の差の 2 乗和が最小となる直線を選んでいる。これがトラックである。図 39 は 6 本の tube の誤差の 2 乗和と event 数の関係である。テールの部分はトラッキングのミスであると思われる。

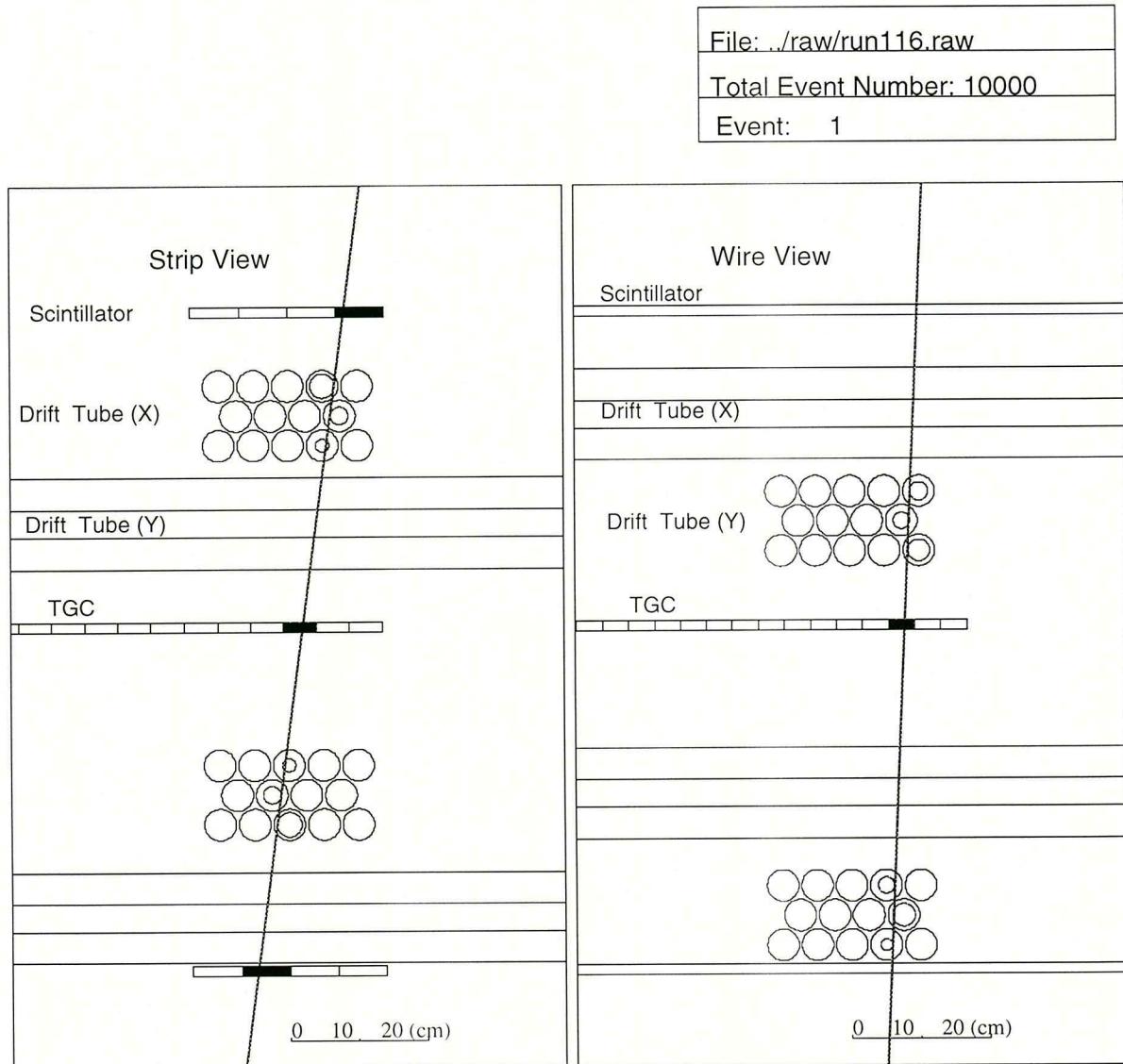


図 38: Event Display wire 側、strip 側からみた図 27 に対応する

## 誤差の距離の 2 乗和

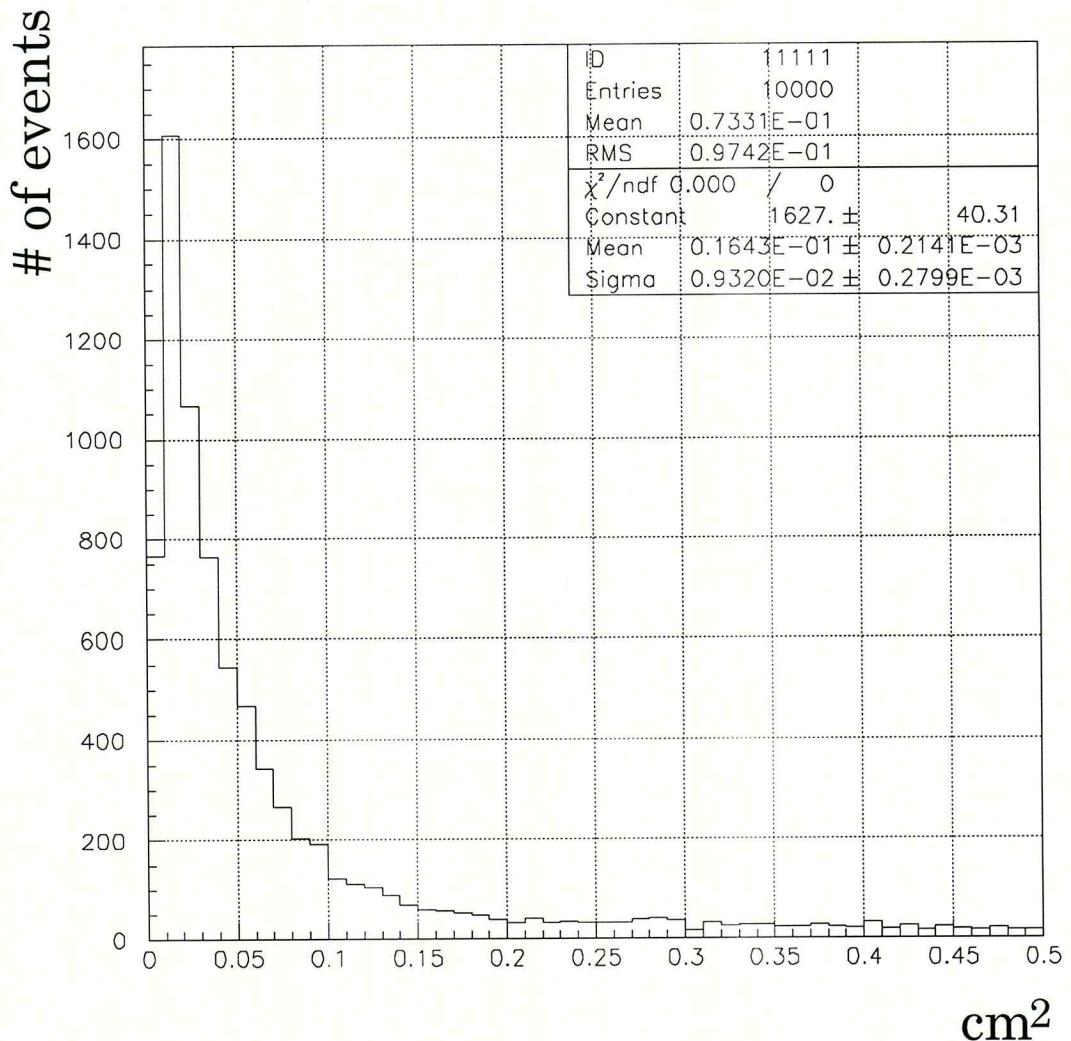


図 39: 6 本の tube の誤差の 2 乗和と event 数の関係

## 4 宇宙線テスト

製作された TGC が ATLAS 実験で要求される性能を持つことを確認しなければならない。その確認は神戸大学で行なわれ初期不良のものはここで取り除かれる。ここで測定する項目は検出効率と時間到達分布である。検出効率においてはワイヤーサポート以外での各チャンネルの検出効率が 99 パーセントを満たしているかどうか、またその一様性を確かめる。またワイヤーサポート部の不感領域を確認することでドリフトチューブによる tracking 技術を判断する。時間到達分布においては 99 パーセントの event を含む最小の時間到達分布幅が 25ns 以内に収まっていることを確認する。

### 4.1 セットアップ

98 年夏に製作された試作 2 号機についてその性能評価を行なった。ただし doublet のうちの 1chamber である。調べる領域は図 40 のワイヤーサポート、ボタン型サポートが確認できる図の白い部分である。信号の読みだしは 37.7mm 幅のワイヤーグループから 21 本のワイヤー信号をまとめて読み出している。ストリップは 48mm 幅の銅パターンからである。チャンネルの境目は異なる Strip-Strip 間、Wire-Wire 間とする。

以下の条件下で TGC をオペレートした。

- CO<sub>2</sub>+n-pentane(55:45) : HV=3.2KV
- Threshold(ASD) : アノード -170mV・カソード 110mV

### 4.2 検出効率

#### 4.2.1 解析方法

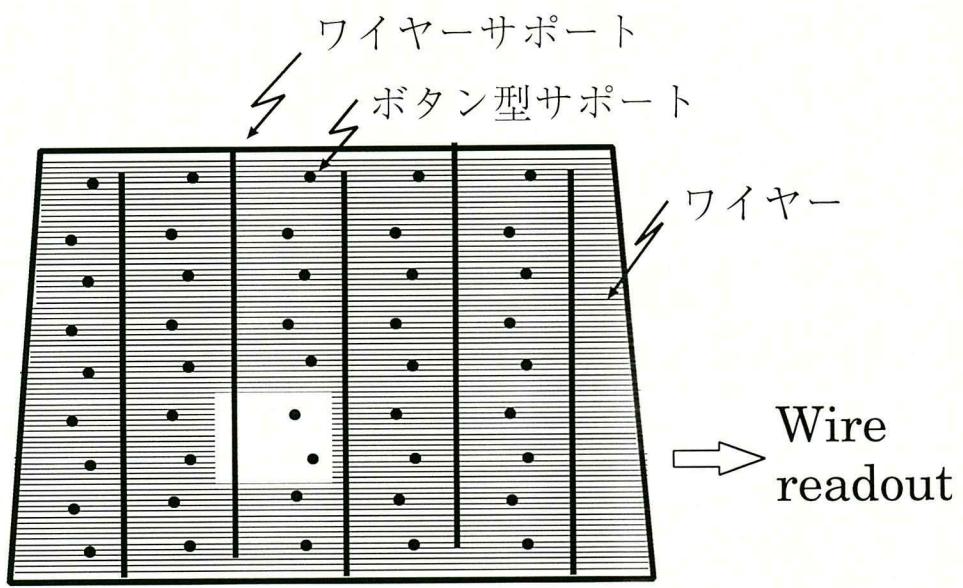
信号は Strip12~16、Wire2~7 のチャンネルのみ解析に使用した。このとき原点は図 40 のように Strip 側も Wire 側も 3 層のうちの一番左下のチューブのワイヤーにとる。ここでの検出効率は以下のように定義する。

1. 上下のシンチレーションカウンター及び 12 本のドリフトチューブ (Wire, Strip 各 6 out of 6) に粒子通過の信号がある。この全数を  $N_{tot}$  とする。
2. その粒子が TGC を通過した位置においてヒットがあったときこの全数を  $N_{hit}$  とする。
3. ただし、このとき信号到達時間分布の範囲を十分にカバーする 100ns の時間幅の間の信号のみ取り扱う。それ以外は除外する。

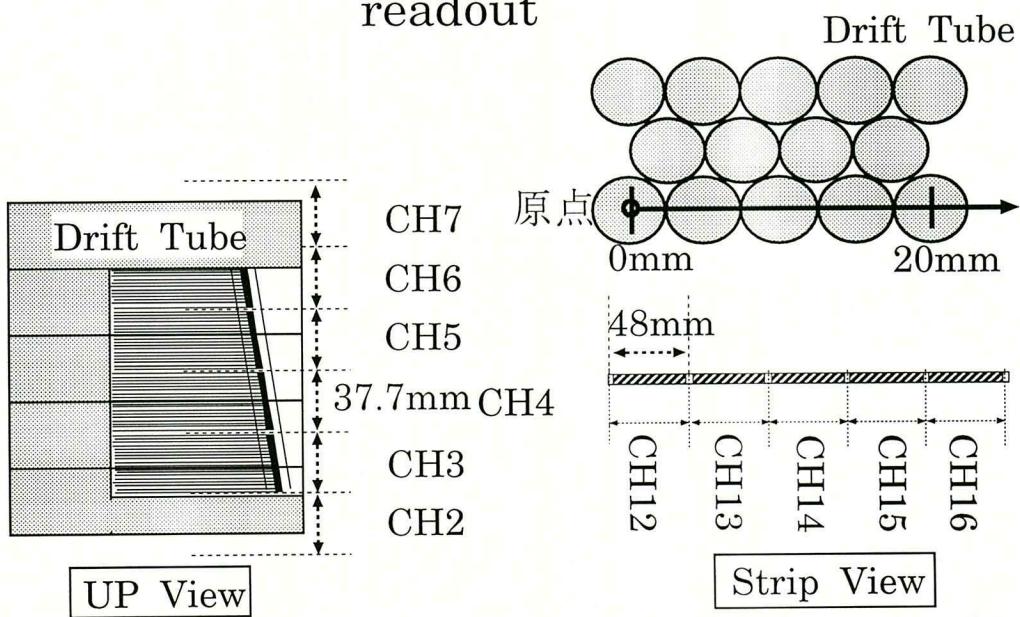
$$\text{検出効率 (efficiency)} = \frac{N_{hit}}{N_{tot}}$$

とする。

4. ジオメトリーの補正



Strip  
readout



Wire  
readout

Strip  
readout

図 40: セットアップ

注意しなければいけないのは 2. の粒子飛跡の TGC 上における位置とそのヒットである。解析するうえでのチューブと TGC の相対位置が真の位置と異なれば検出効率に大きく影響する。

よって以下の補正をおこなった。実際のジオメトリーの位置測定の誤差がおこりうる程度 ( $\pm 10\text{mm}$ ) を見積もって Strip と Wire グループ（チャンネル）位置を検出効率が最大となるように Strip 方向、Wire 方向それぞれに 平行移動させて決定した。

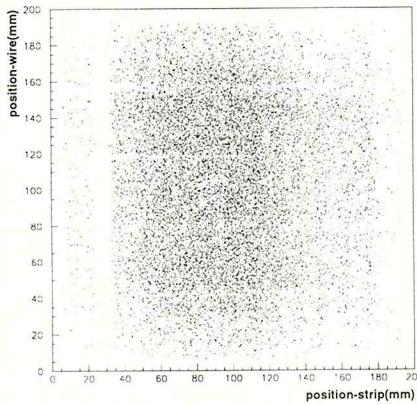


図 41: hit map

粒子が TGC 上を通過したとき TGC から信号が検出された場合をプロットしている (hit)。ただし、Strip と Wire 信号の AND をとっている。

図 41 は粒子が TGC 上を通過したとき TGC から信号が検出された場合をプロットしている (hit)。ただし、Strip と Wire 信号の AND をとっている。ワイヤー方向に向かって白い部分すなわち不感領域が伸びておりその間隔はちょうどワイヤーグループの間隔になっている。ストリップ方向にある大きな不感領域はワイヤーサポートである。

図 42 は Strip, Wire 方向に沿って検出効率を射影したものである。ただし、ワイヤー側は全てのチャンネルに渡ってワイヤーサポートの不感領域があるためその部分は除いてある。

このチャンネルの境目での検出効率の低下はゲイン低下によるものと、あるいは図 43 のようなジオメトリーのずれが考えられる。上記では Strip と Wire グループ位置を Strip, Wire 方向軸に平行移動させたがチューブと TGC のワイヤー位置が平行でなければ不感領域は残る。それを確認するためにチャンネルの境目  $\pm 5\text{mm}$  にある両隣のヒット（信号検出）を許す。ゲイン低下であるならば不感の領域は変わりなく、ジオメトリーのずれであるならばその領域はなくなることが予想される。また、信号の OR をとってはいるが

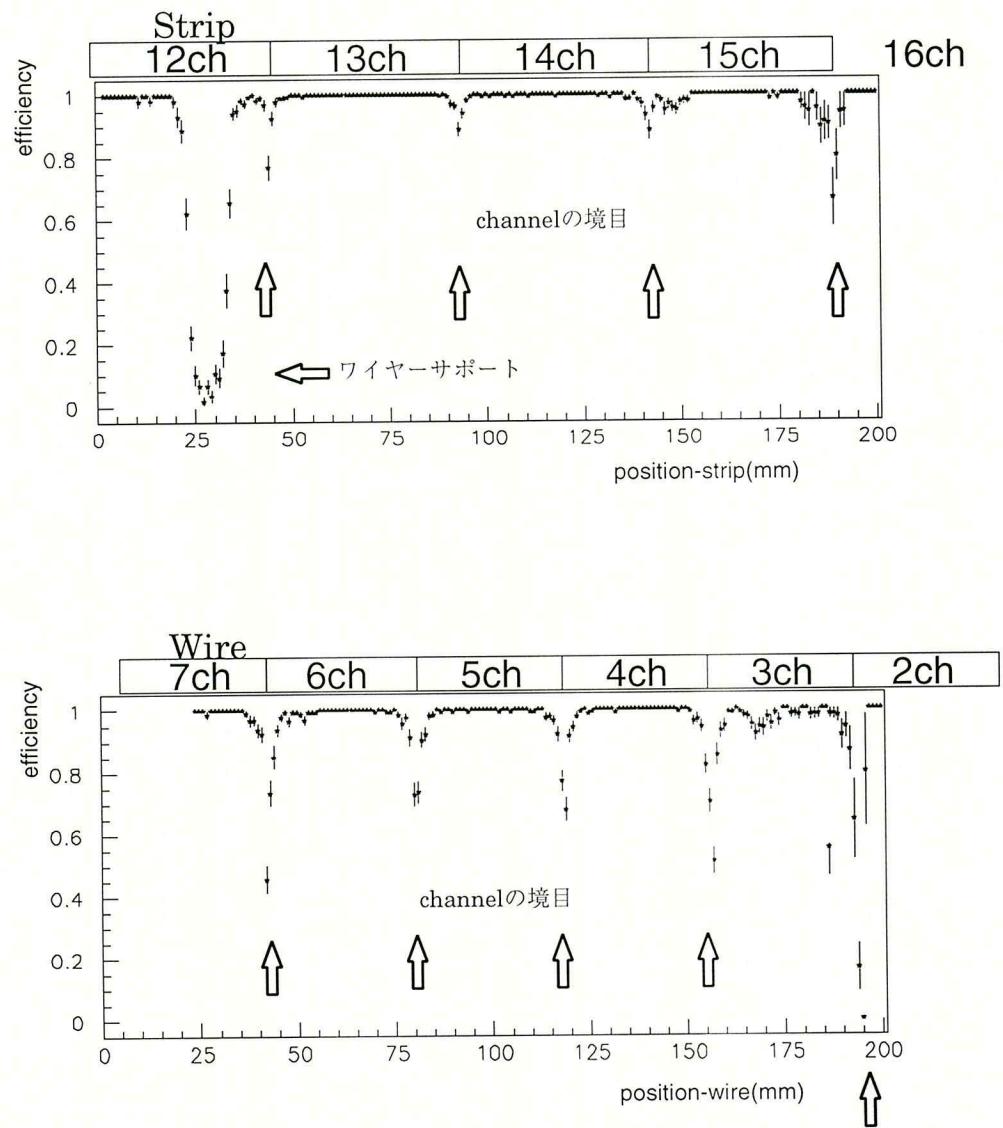


図 42: projection ちょうどチャンネルの境目での検出効率の低下が確認される

- (a) アクシデンタルな信号は 100 万秒に 2 発しかない
- (b) トリガー条件としてシングルトラックのみである  
という条件のもとである。

ずれていないと考えているとき  
hitはCH4にあった

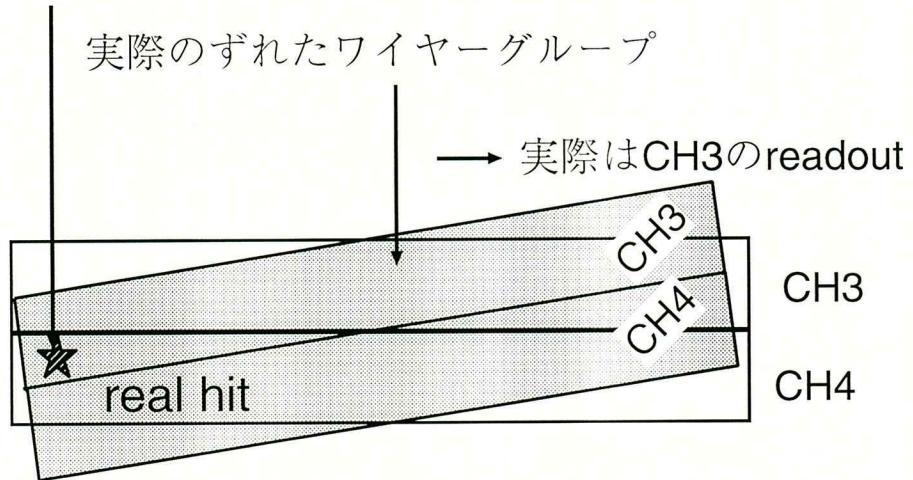


図 43: ジオメトリーのずれ  
チューブと TGC のワイヤー位置が平行でなければ信号を見誤る。

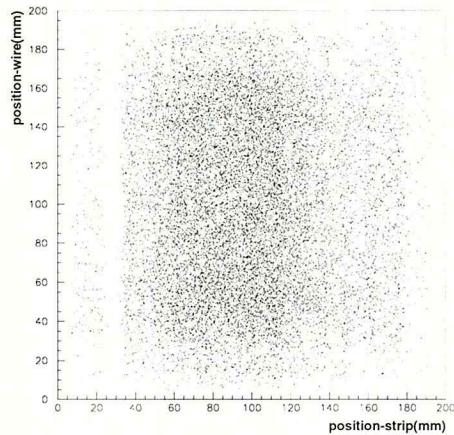
#### 4.2.2 解析結果

図 44 の上図は粒子が TGC 上を通過したときその位置において TGC から信号が検出されたときをプロット、下図は検出されなかったときをプロットしたものである。下図においてはワイヤーサポート、ボタン型サポートが確認されドリフトチューブによるトラッキングがうまくいっている。

図 45 は Strip,Wire 方向に沿って検出効率を射影したものである。チャンネルの境目の不感領域もはっきりなくなり、ゲイン低下による検出効率の低下ではないと判断される。ワイヤーサポート部において実際の大きさ 7mm にくらべて半値幅で 10mm である。ジオメトリーがずれているため射影からくるもの、トラッキングの精度によるもの、ワイヤーサポートの影響によるガス増幅が十分に行なわれない領域によって生じるものと考えられる。

次にワイヤーサポート部、ボタン型サポート以外での一様性を確かめる。ただしワイヤーとストリップの信号の AND をとった検出効率である。図 46 は Wire,Strip の 2 次元座標における検出効率を表している。図 47 はそれを数値化したもの、図 48 は hit (信号検出) した数を表している。このときの total event 数は約 3 万である。

hit position map  
with TGC



without TGC

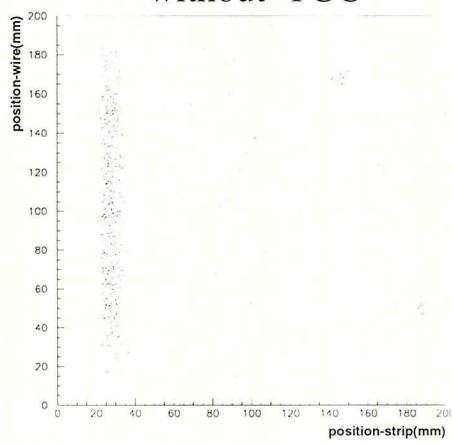


図 44: hit map (チャンネルの境目  $\pm 5\text{mm}$  内の hit の OR をとった)

上図は粒子が TGC 上を通過したとき TGC から信号が検出された場合をプロット (hit), 下図は検出されなかった場合をプロット。ただし、Strip と Wire 信号の AND をとっている。

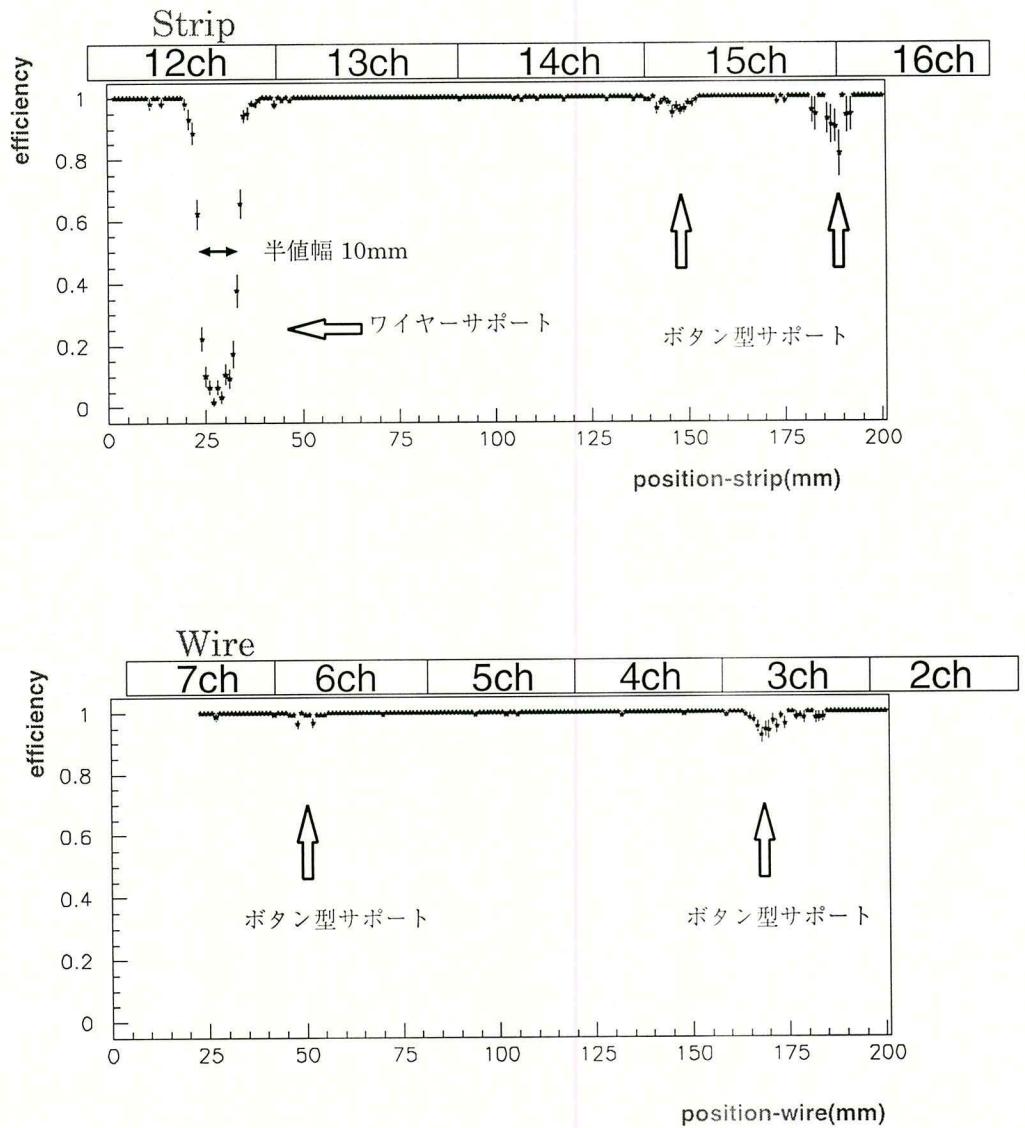


図 45: projection(チャンネルの境目  $\pm 5\text{mm}$  内の hit の OR をとった)  
ボタン型サポート、ワイヤーサポートが確認できる。

端のほうで検出効率が低下しているが event 数が少なくなっているため有意とは認められない。その領域およびワイヤーサポート部、ボタン型サポート以外での極端な不感領域はみられない。全体的に検出効率が低いのはワイヤーとストリップの信号の AND をとったものであり、かつ統計量がすくないため 1event の変動による影響が大きくなりてくるためである。

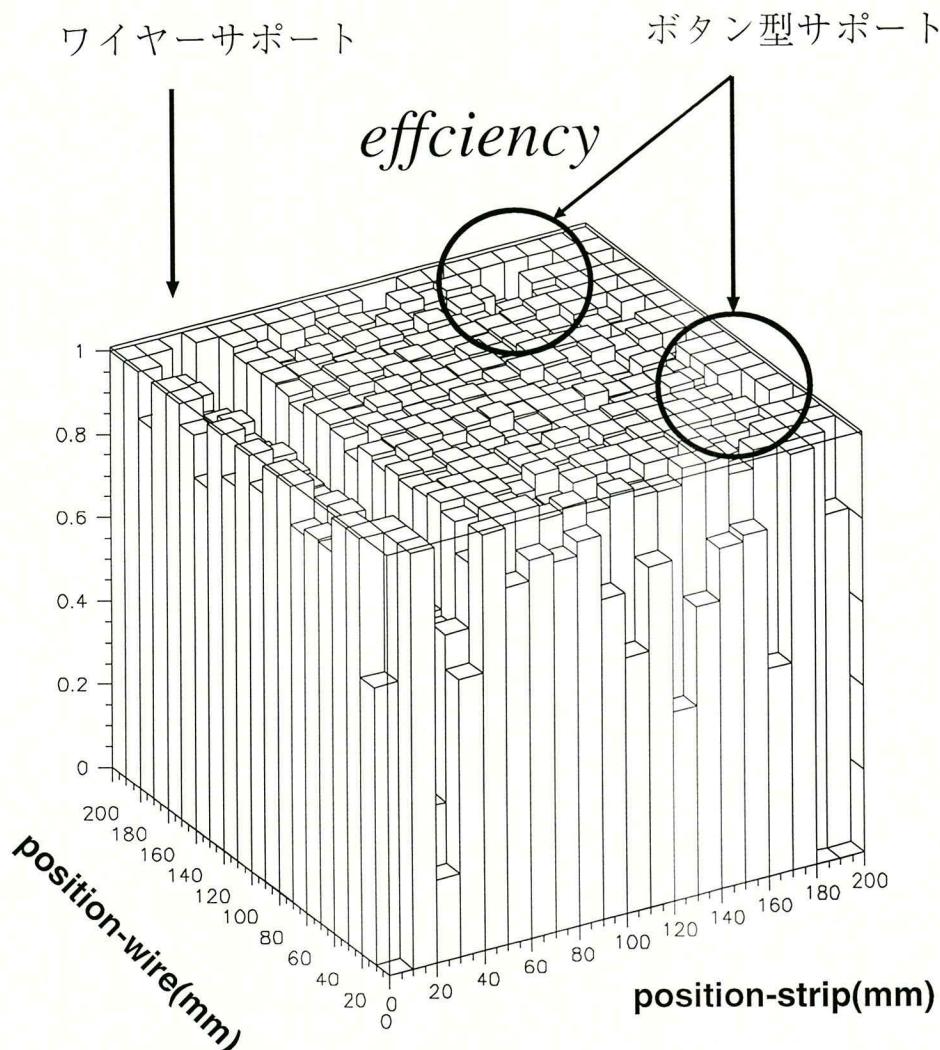


図 46: ワイヤーサポート部、ボタン型サポート以外での一様性  
端のほうで不感領域がみられるのは event 数が少なくなっているためである。その領域およびワイヤーサポート部、ボタン型サポート以外での極端な不感領域はみられない。

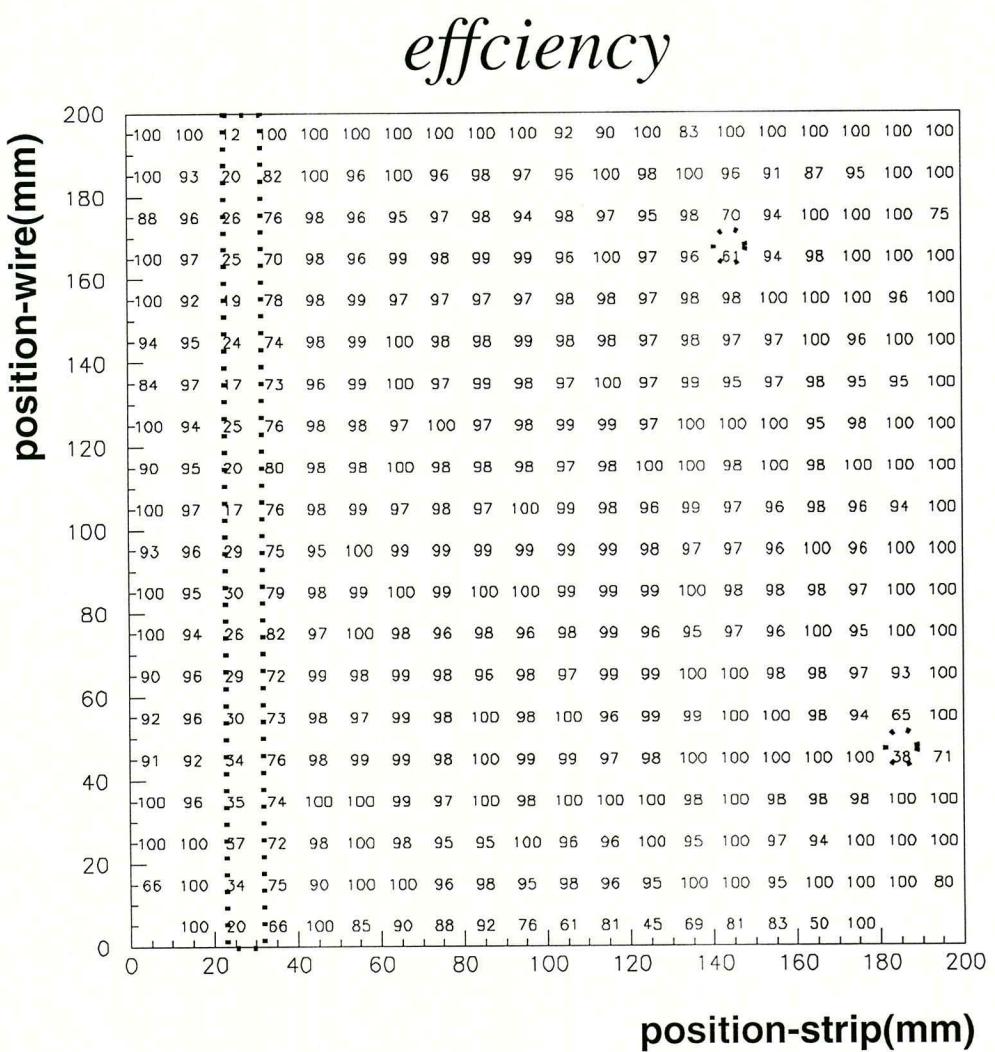


図 47: 検出効率の数値化

## number of hits

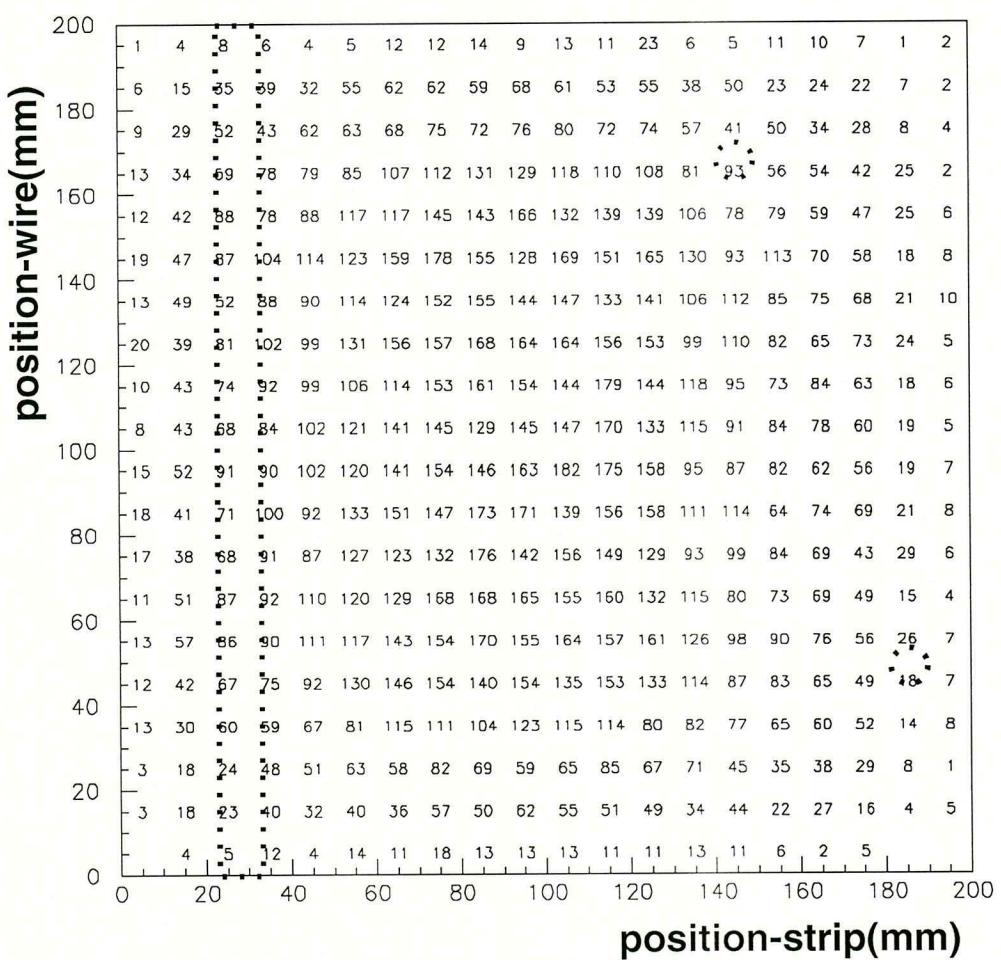


図 48: hit した event 総数

図49はワイヤー及びストリップの各々のチャンネルの検出効率である。図の中にはそれぞれのチャンネルの領域に粒子が通過した数(total)と信号を検出した数(number of hits)が示されている。ワイヤー及びストリップとともに全てのチャンネルで99パーセント以上である。

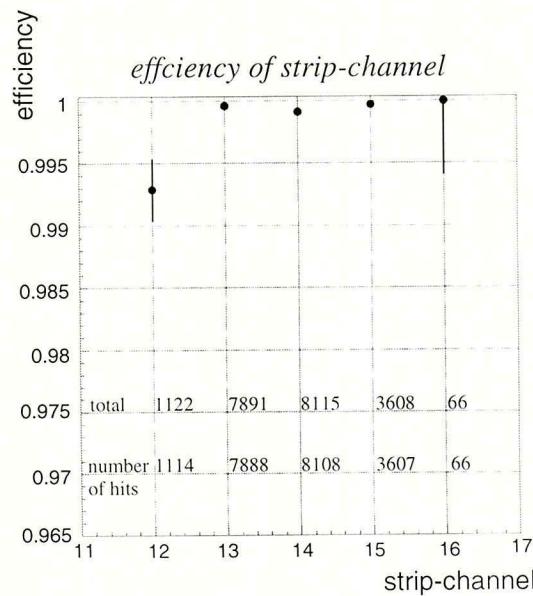
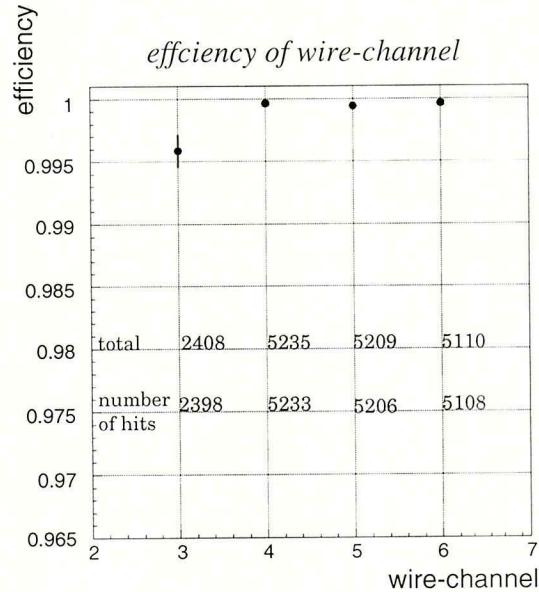


図 49: 上図はワイヤーの各々のチャンネルの検出効率。下図はストリップである。

### 4.3 time jitter

LHC 実験においては陽子陽子衝突の時間間隔は 25ns であるためトリガーチェンバーにはそれよりも短い信号検出分布が要請される。この時間分布は陽子陽子衝突のタイミングを決めるうえで重要な指標となる。同時に 99 パーセントという高い検出効率が求められている。よってこの 2 つを評価するために time jitter という量を定義する。

$time\ jitter = TGC$  が検出した信号のうち 99 パーセントを得られる最小ゲート幅

この time jitter が 25ns 以内であるならば ATLAS 実験に要求されるミューオントリガーチェンバーとしての性能を満たしている。

#### 4.3.1 解析方法

1. 上下のシンチレーションカウンター及び 12 本のドリフトチューブ（各 3 out of 3）に粒子通過の信号がある。
2. 粒子が TGC を通過した位置においてヒットがあるチャンネルの TMC 値だけを読む。言い換えれば粒子が通過していない位置のチャンネルから信号を検出したとしてもそれは除外されている。このとき信号到達時間分布の範囲を十分にカバーする 100ns の時間幅の間の信号のみ取り扱う。

この検査ステーションのセットアップにおいては垂直入射粒子が多数ふくまれる。このとき TGC のワイヤーワイヤー間の弱電場領域のために信号到達分布が広がっている。ATLAS 実験においては 10 度以下の入射粒子はないためこのカットをかけた信号到達時間分布も求めた。

#### 4.3.2 解析結果

図 50, 51 はワイヤーのカットなしの信号到達時間分布である。端のチャンネルでは入射角度のある粒子はトリガーにかかりにくくなるため垂直入射粒子の割合が多くなり到達時間分布が広がっている。図 52 はカットをかけたもので 25ns 以内という条件を十分満たしている。端のチャンネルにおいては event 数が少ないので除外した。

# カットなし

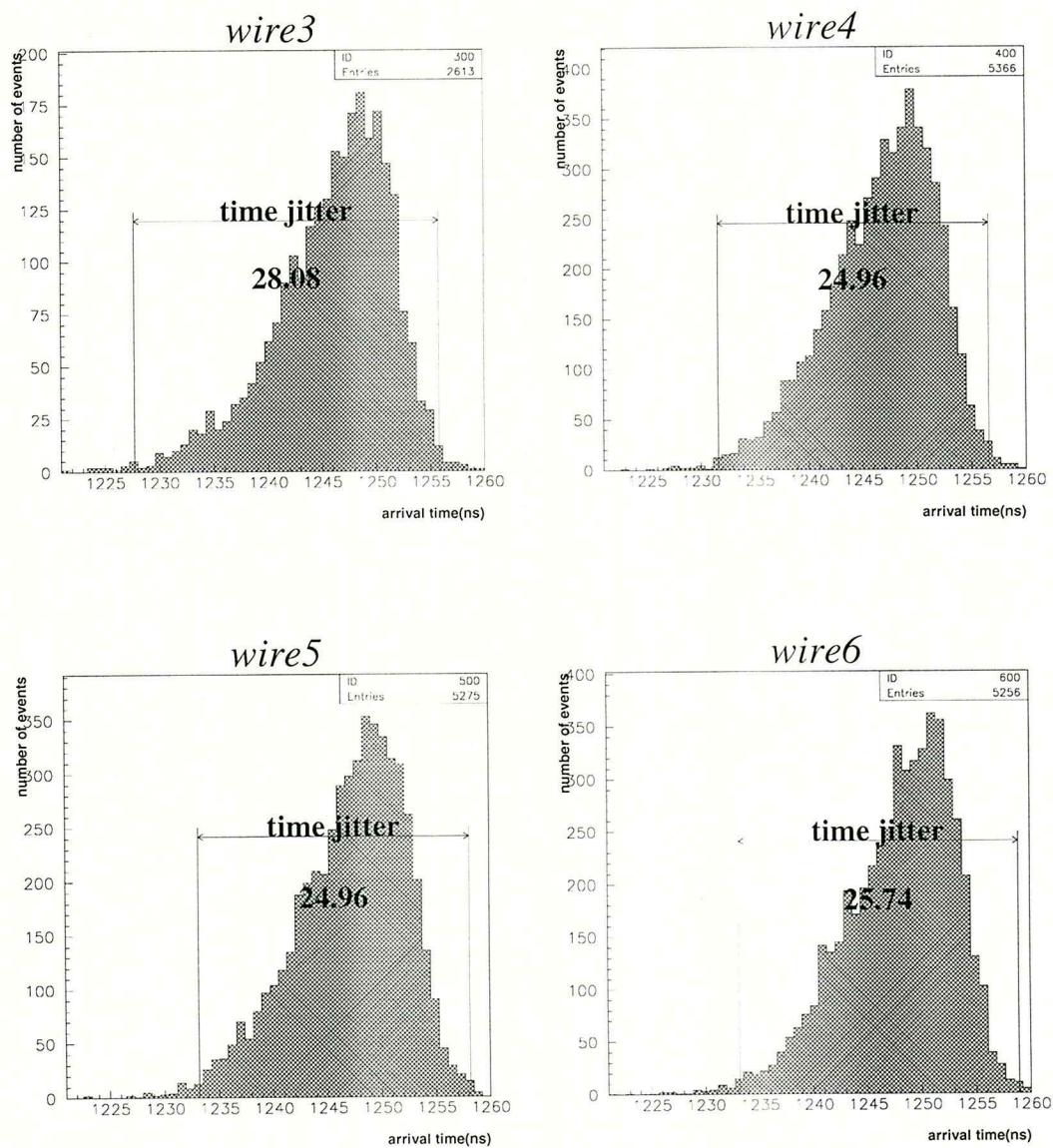


図 50: 図上にある数字はチャンネルナンバーを表し、図中に time jitter を示している

カットなし

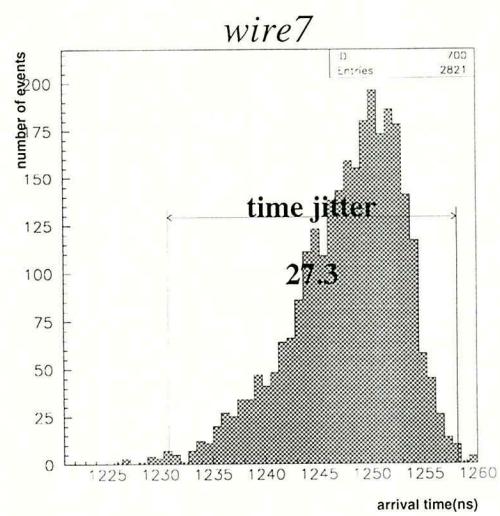


図 51: 図上にある数字はチャンネルナンバーを表し、図中に time jitter を示している

# 10° カット

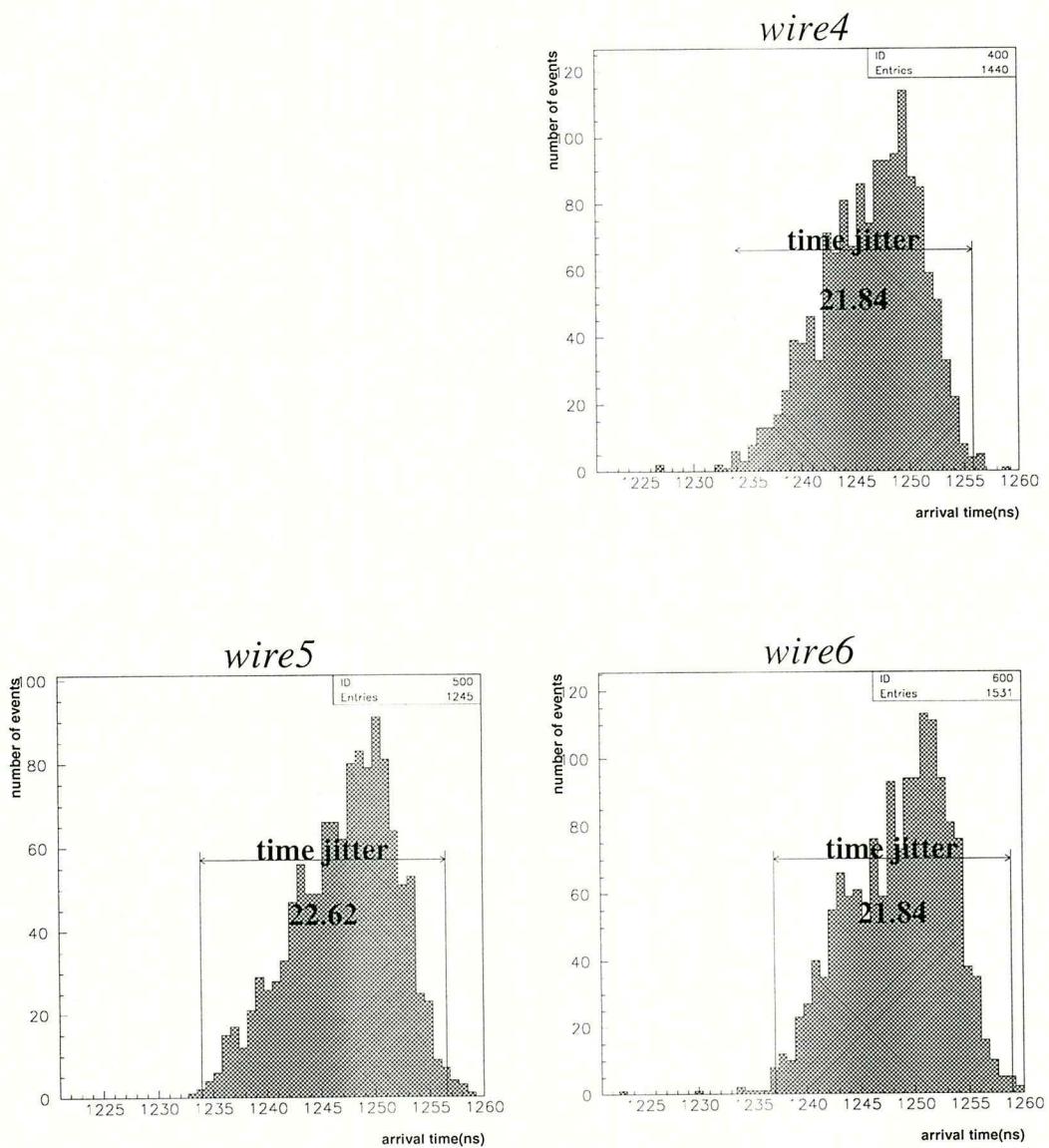


図 52: 図上にある数字はチャンネルナンバーを表し、図中に time jitter を示している。入射角度 10 度以下のものはカットしている。

## 5 まとめと今後の研究

2005年のLHC実験の開始に向けて2000年から大型TGCの量産が始まる量産されたTGCは検査にかけられ初期不良のものは除去されCERNへ運ばれる。それに向けて実器サイズの大型TGCの試作を行ない基本的な製作方法の確立、検査設備のデザインをした。検査の中でも検出効率の測定は大規模な設備とシステムが必要でありそのベースを構築した。

- ドリフトチューブによる宇宙線飛跡測定システム
- ドリフトチューブのデザイン
- TGC用ガス供給システム

試作TGCを用いてドリフトチューブによる宇宙線飛跡測定システムの確認を行なった。

- 粒子が不感領域(ワイヤーサポート)を通過したときTGCから信号が検出されないことの確認

さらに上記の技術を用いて試作TGCの性能評価をした

- ワイヤーサポート以外での検出効率の一様性
- ワイヤー、ストリップの各チャネルでの検出効率
- 信号時間到達分布

宇宙線の飛跡測定システムが正常に動くことを確認した。チューブ1本あたりのresolutionも $490\ \mu\text{m}$ で十分である。

TGC用ガス供給システムは本検査においても十分な性能を持つことを確認した。  
これから数を増やして本検査の設備へ移行していく。

試作TGCの性能はATLAS実験で要求される検出効率99パーセント、信号到達時間分布25nsを満たしている。ここでは検出効率をもとめるときジオメトリーのずれからチャネルの境目においてはORをとって解析した。このずれを補正する方法を確立し検出効率を求める必要がある。本検査のステーションの架台設計においてはDrift tubeとTGCの配置にかなり注意をはらわねばならない。

## A TGC construction

### A.1 TGCの材料となる部品

#### 1. TGC本体

- グラウンド付き FR4 板× 2 枚
- ストリップ付き FR4 板× 2 枚
- ワイヤーサポート（棒型）× 20 本
- ワイヤーサポート（ボタン型）× 180 個
- エッチングパターン付きスペーサーフレーム× 4 本（4種類× 1 セット）
- ハンダよけ付きスペーサーフレーム× 4 本
- ガス口付きスペーサーフレーム× 4 本（2種類× 2 セット）
- ガス口なしスペーサーフレーム× 4 本
- 500  $\mu$  m 厚 FR4 板× 2 枚
- 20 mm 厚ハニカム× 1 + 外枠× 1 + 枠組み立て用ネジ× 8 本
- 5 mm 厚ハニカム× 2 + 外枠× 2 + 枠組み立て用ピン× 24 本
- 金メッキタングステンワイヤー（50  $\mu$  m）× 3 km
- ワイヤー固定用ハンダ（6000 mm × 4 mm × 200 mm, Sn:72+Zn:28, ヤニ無し）
- 水溶性フラックス
- ガス口× 4 個
- グラウンドコンタクト用銅テープ× 1 m
- カーボン塗料× 3 リットル
- アラルダイト 2011（チバ・スペシャルティ・ケミカルズ（株））× 3 リットル
- アラルダイト 2012 × 50 ミリリットル
- 銀入りエポキシ接着剤× 10 ミリリットル
- 位置決め用ポリプロピレンのピン

#### 2. 読み出し用パーツ類

- アダプターボード（アノード用）× 4 枚
- アダプターボード（カソード用）× 4 枚
- 33 ピン-フラットケーブル用コネクター× 8 個
- キャパシター（470 pf）× 32 × 4 = 128 個
- H.V 用チップ抵抗（10 M  $\Omega$ ）× 32 × 2 = 64 個
- ハンダ（Sn:60+Pb:40, ヤニ入り）

- シールド用銅板

- カプトンテープ

### 3. H.V コネクター部

- H.V 用コネクター× 2 個+ターミナル× 2 個

- 100 k Ω 抵抗× 2 個

- 1 M Ω 抵抗× 2 個

- 470 pf キャパシター× 2 個

- 熱収縮チューブ

### 4. その他

- イソプロピルアルコール× 3 リットル

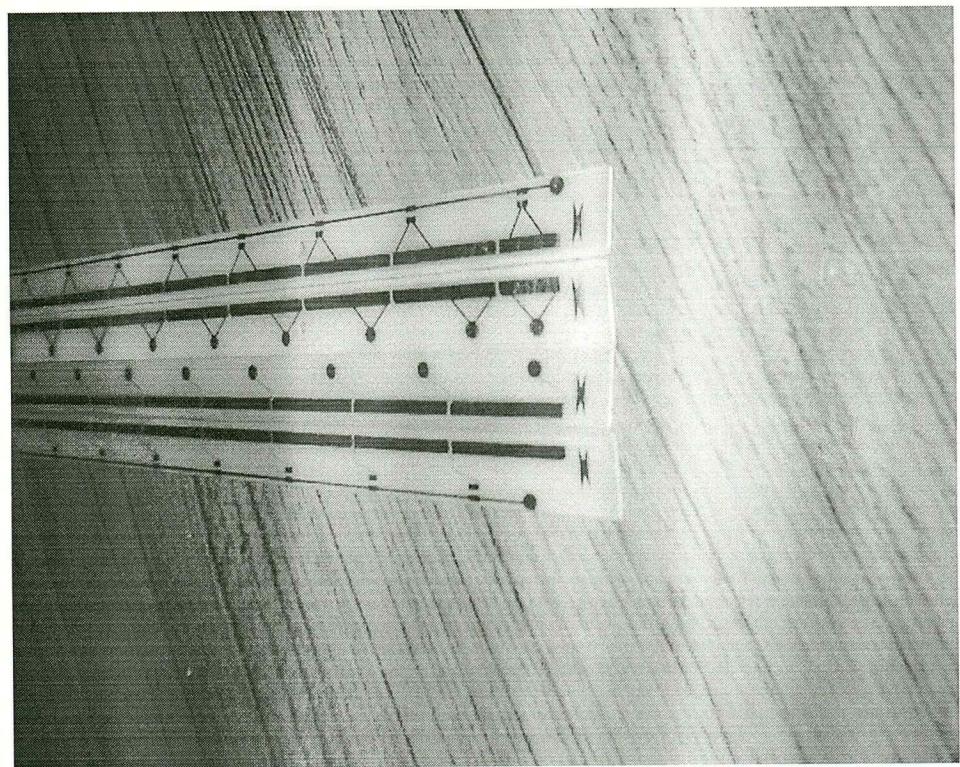


図 53: 4種類のエッティングパターン付きスペーサーフレーム。

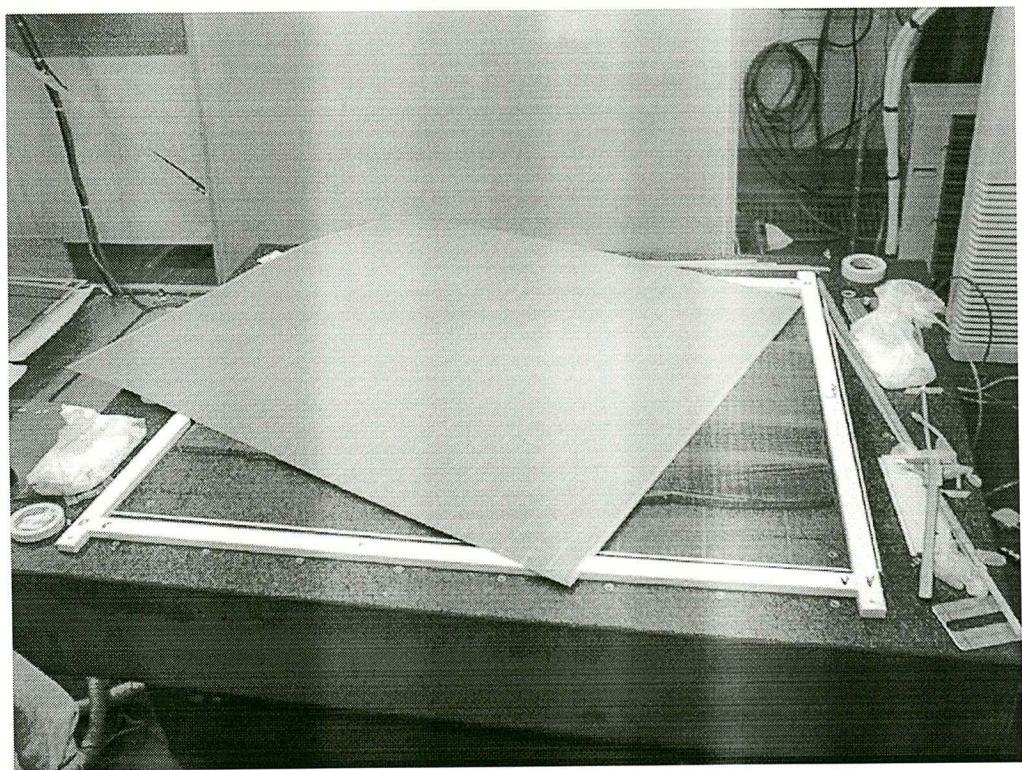


図 54: 板、フレーム、ハニカム。

## A.2 材料の加工-位置決め用の穴あけ

### 1. 基準となるハンダよけ付きスペーサーフレームの穴あけ

ストリップ付き FR4 板は、グラウンド付き板よりも小さいので、ストリップ付き FR4 板に接着されるハンダよけ付きスペーサーフレームに、まず位置決め用の穴を 2 個所あける。

### 2. 残りのスペーサーフレームの穴あけ

上で開けた二つの穴を基準に、残りのハンダよけ付きスペーサーフレームとエッチングパターン付きスペーサーフレーム全てに穴をあける。

### 3. FR4 板の穴あけ

穴のあいたスペーサーフレームとアルミ治具を FR4 板の上に実際に乗せて、板 4 枚に順次穴をあけていく。

注意

- この時、スペーサーフレーム、FR4 板の実際に接着される向き、順番を考慮してあけること。
- エッティングパターン付きスペーサーの外側に少なくとも 1.3 mm の治具を取り付けるための余地を残す。
- アルミ治具の位置を FR4 板上にけがいておく（後のマスキング、接着のため）。

### 4. ハニカム外枠 (20 mm) の穴あけ組終わったハニカム外枠の上にストリップ付き FR4 板をたるまない様にのせ、板の穴を基準に外枠に空ける穴の位置に印を付ける。それあと組んであるフレームを一本ずつはずし、上で付けた穴を目印にボール盤を用いて一本ずつ穴をあける。注意

- ハニカム外枠の穴あけ（位置決め）のとき、ストリップの読み出し部分が外枠で隠れてしまわない様に注意する。
- フレームをネジ止めする時、段差が出来ないように、万力と板を使って平面を出しながらネジ止めする。

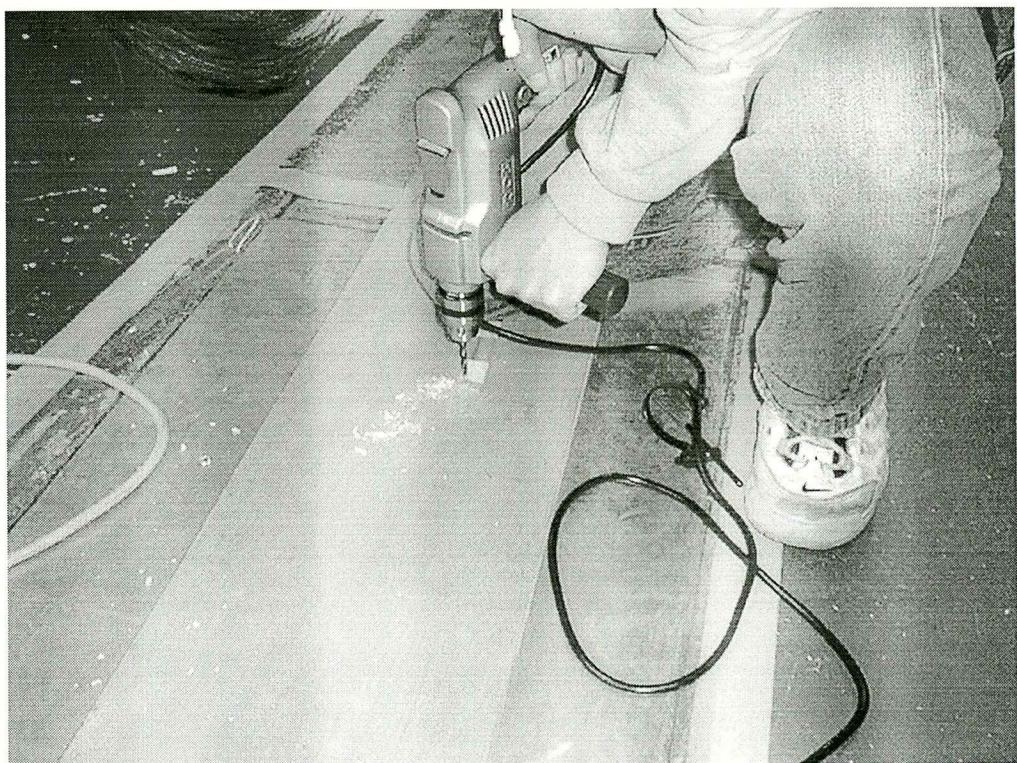


図 55: 電動ドリルによるスペーサーフレームの穴あけ作業

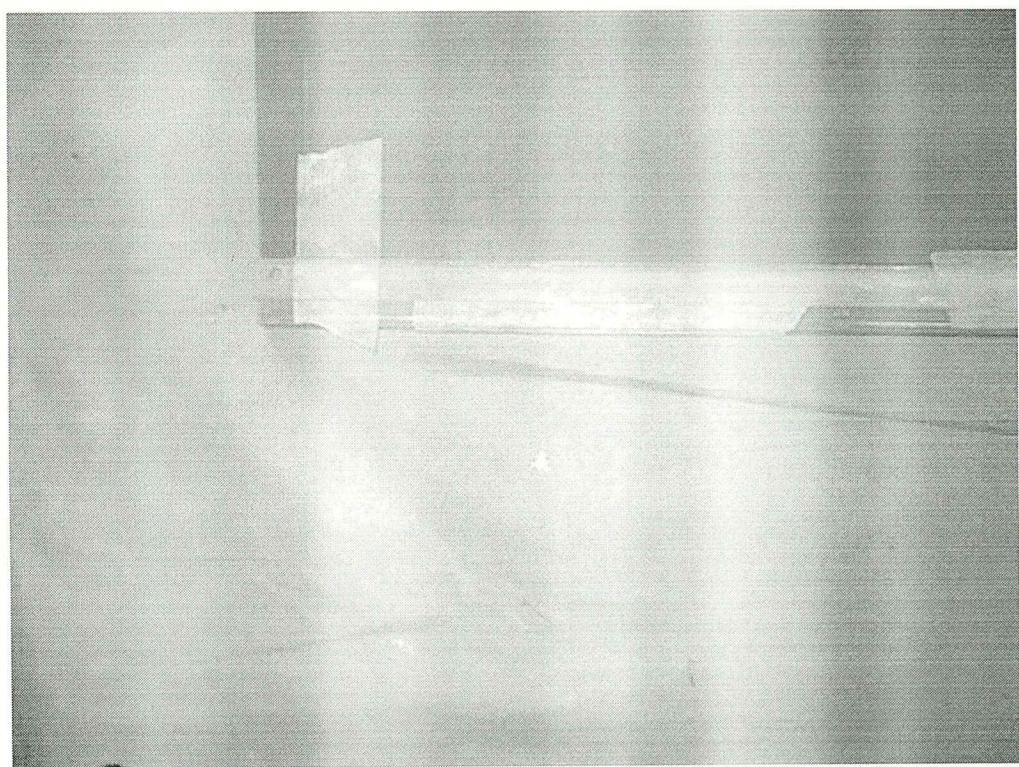


図 56: アルミ治具をのせてスペーサーフレームの位置を決めたあとマスキングテープで固定

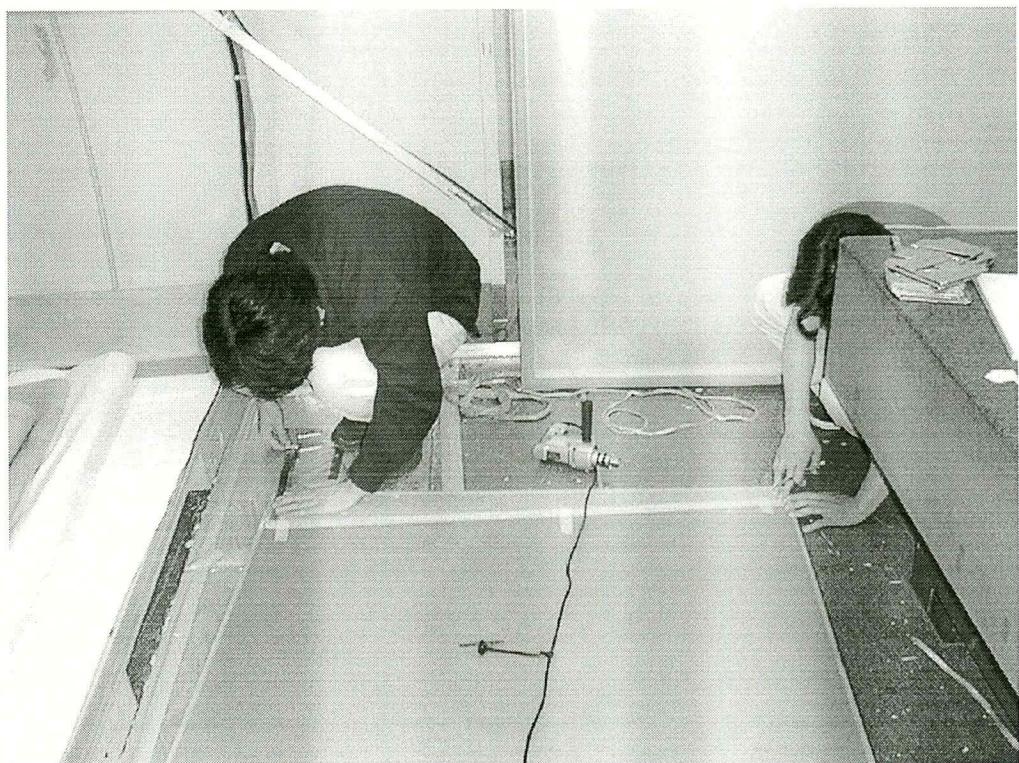


図 57: 穴のあいたスペーサーフレームに合わせて板に穴をあけていく



図 58: 板を重ねて穴をあけていく



図 59: ハニカム外枠の製作作業

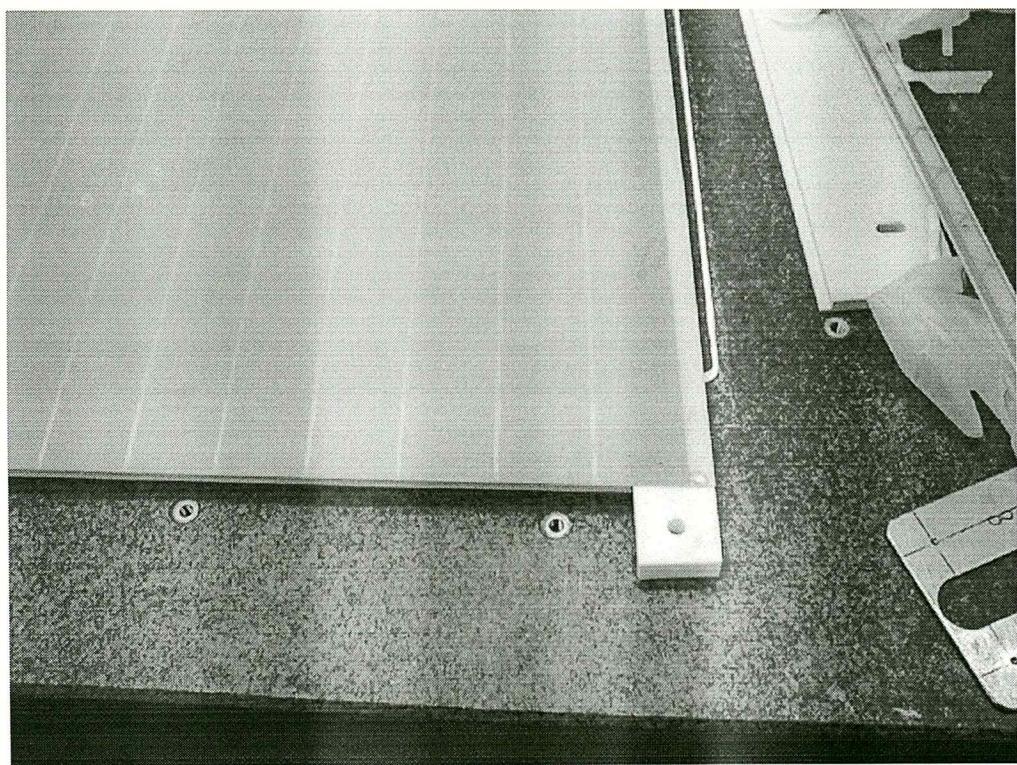


図 60: ハニカム外枠の穴あけ（位置決め）

### A.3 材料の加工-切断、ヤスリがけ、その他

1. エッチングパターン付きスペーサー両端部分のフィードスルー部分のヤスリがけ  
ガス口あり/無しスペーサーが重なるフィードスルー部分をヤスリで削る。
2. 銅テープが接着される部分のヤスリがけ  
銅テープが接着される部分を銅テープの厚みだけヤスリで削る。
3. ワイヤーサポートの表面処理  
ワイヤーサポート（棒型、ボタン型）の表面をチェックし、ガラス繊維の毛羽等がついていたら、それを取り除く。
4. 外枠（20 mm）を組み立てる  
この時、枠の辺と辺の隙間に段差が生じない様に接続部の両面を厚板で挟み、シャコ万力で締め上げ、平面を出した状態でボルトを締める。
5. 20 mm ハニカムの切断し、2ピース作る  
ハニカムを伸ばすと幅が縮むので、伸ばした時に枠の大きさにぴったり収まるよう、縮まった状態で約 2 cm のオーバーラップがあるように（このときハニカムの幅は約 12 cm）大きさを決めて切断する。
6. 500  $\mu$  m FR4 板の切断  
組んだフレーム（5 mm 厚）を厚さ 500  $\mu$  m の FR4 の板の上にのせ、ケガキ棒等で切断する線を引く。引いた線上を厚物用バサミなどで切断する。

## A.4 カーボン塗装のためのマスキング

ストリップ付き FR4 板 2 枚、グラウンド付き FR4 板 2 枚、合計 4 枚をマスキングする。

### 1. マスキングの位置決め

カーボンが塗装される FR4 板（塗装面を上に）を定盤の上にのせ、塗装面をイソプロパノールできれいに拭く。板の上にワイヤーサポート治具（アルミ製）とスペーサーフレームをのせて、マスキングする位置を決める。（穴あけの時にケガキ線を引いてあるはずなので位置決めは簡単である。）

### 2. マスキングテープをはる

テープはワイヤーサポート接着部：FORMALINE 製 Charting & Graphic Art Tape (3.53mm × 8.23 m)

スペーサーフレーム接着部（周囲）：市販の（通常の）マスキングテープ

### 3. マスキングテープの切り取り

グラウンドコンタクトテープを出す部分（ガスがターンする部分）を図のようにカッターで切り取る。



図 61: マスキングテープ張り

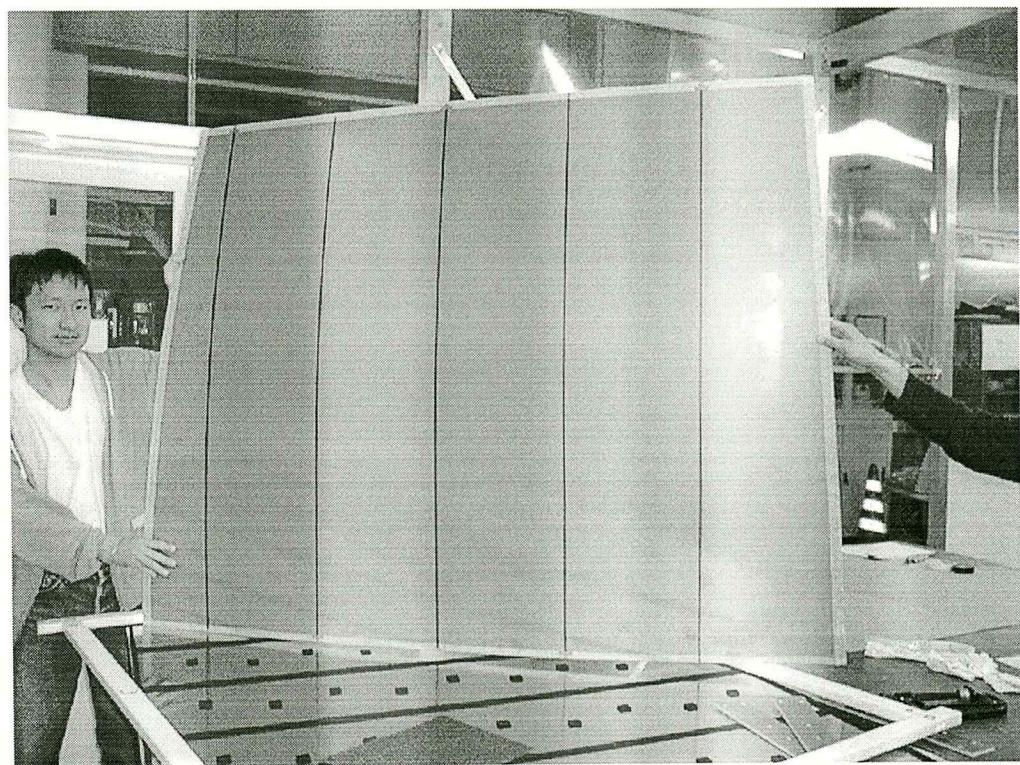


図 62: マスキングテープを張った状態

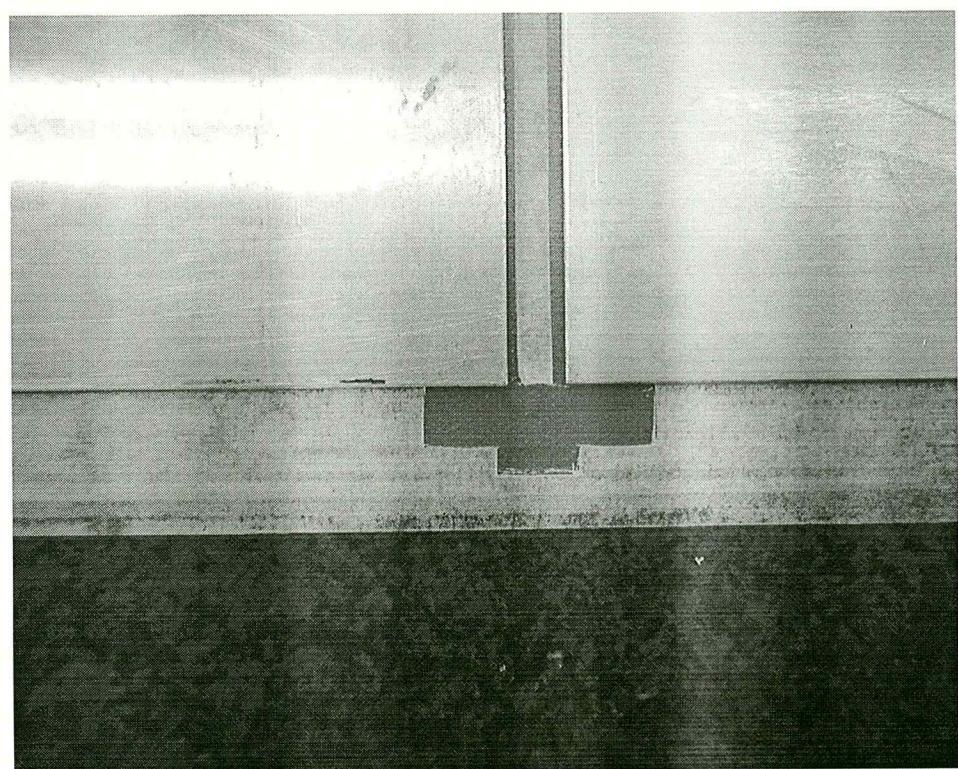


図 63: ガスリターン部におけるマスキングの様子

## A.5 カーボン塗布

ストリップ付き FR4 板 2 枚、グラウンド付き FR4 板 2 枚、合計 4 枚を塗装する。

### 1. 塗料を調合する

混合比は（気温約 20 度のとき）：Electrodag501：Electrodag500：MEK（希釀溶剤） = 7:3:20

### 2. 上で作った塗料を絹とロートを用いて濾す

濾し終わった塗料を蓋付きの試薬瓶に入れる。塗料をすぐに使わない時は攪拌子をその中に入れて、スターラーの上に置いておく。

### 3. 面抵抗の調整

カーボンをテストサンプルに塗布し、面抵抗を測って、面抵抗の平均値が約  $1 \text{ M}\Omega$  ( $0.5 \sim 2 \text{ M}\Omega$  が目安) になるように調合する。

### 4. スプレーガンの調整

市販のハンディーガンを用いる。噴霧状態をアルコールのテスト噴霧によって調整する。

### 5. テスト塗布

面抵抗調整の終わったカーボン塗料をスプレーガンのカップに入れ、古新聞の上などにテスト塗布する。

### 6. 本番塗布

ガンを動かす速さは約 20 cm / 秒。塗り方は一回塗りで、塗布領域の重なりは約 5~10 cm。

### 7. 乾燥、保存棚への移動

指触乾燥は約 10 分ぐらいである。指触乾燥したら、すぐにマスキングテープをはがし、保存棚に移動させ、ホコリがかぶらないように、紙などでカバーしておく。

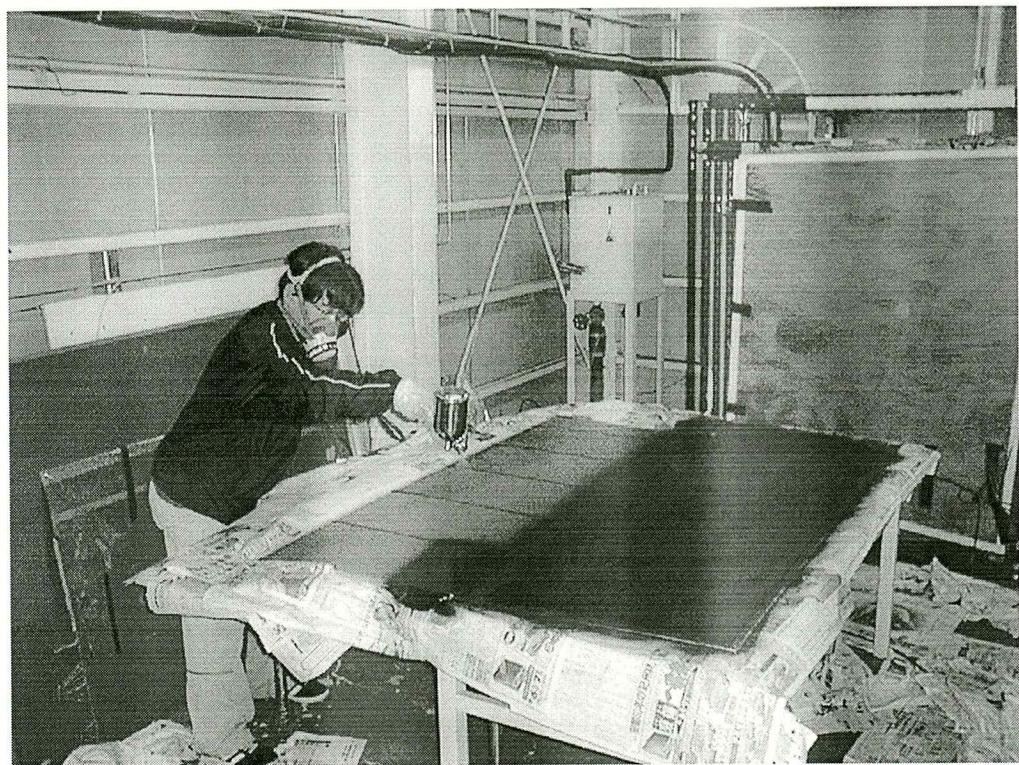


図 64: カーボン塗布の様子

## A.6 カーボン面磨き、面抵抗測定およびグラウンドコンタクト（銅テープ）の接着

### 1. 塗装の終わったカーボン面を磨く

磨くものは：TECHNI-CLOTH TX609。

### 2. 面抵抗の測定

全面にわたって約30個所測定する。1面の平均値が $0.5\text{ M}\Omega \sim 2.0\text{ M}\Omega$ の間にあればOK。そうでなければ塗り直す。

### 3. 銅テープの接着

面抵抗がOKならば、グラウンドコンタクトの銅テープを接着する。銅テープは粘着剤がついていないものを用いる（ついている場合はアルコールで除去する）。接着には銀入りのエポキシ接着剤を用いる。



図 65: カーボン面磨き



図 66: 面抵抗測定

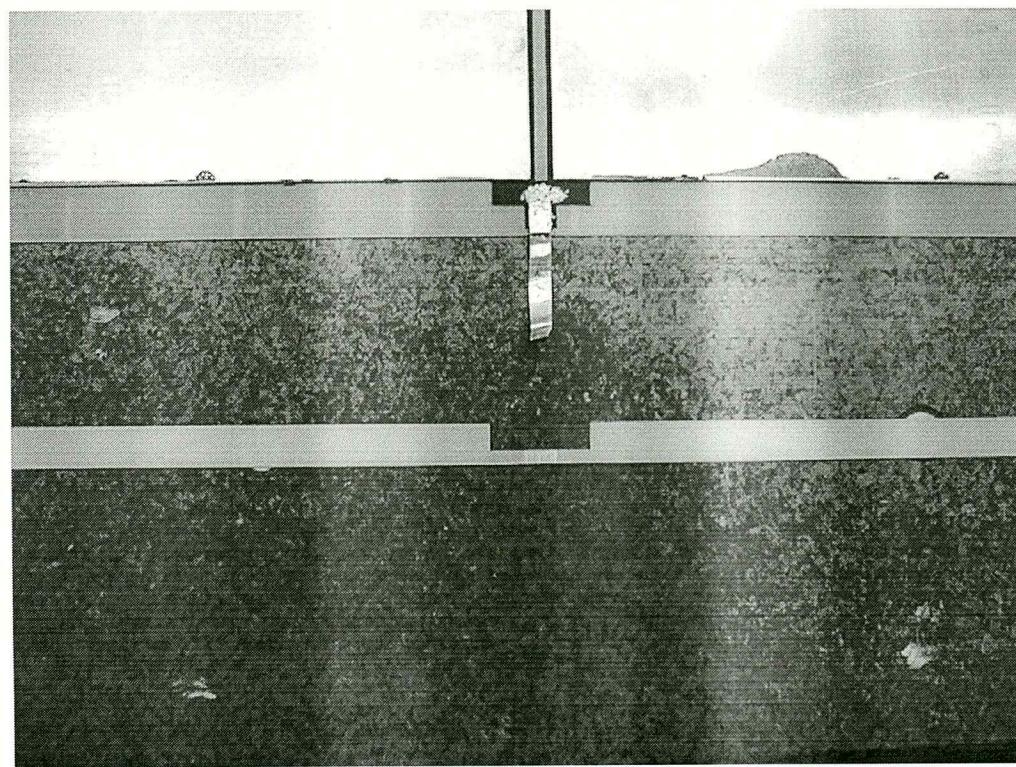


図 67: 接着されたグラウンドテープ。 (下のFR4 パーツは後に接着することになる)

## A.7 厚ハニカム（20 mm）の接着

### 1. ストリップ付き FR4 板とハニカム外枠の相対位置を確認する

G10 板 (0.5mm) を定盤の上にしき G10 板 (0.5mm) の上に、ストリップ面が上になるようにストリップ付き FR4 板を置く。ストリップ面、ハニカム外枠をアルコールでふき四隅にある穴にピンをさし、ストリップ付き FR4 板とハニカム外枠の相対位置が正しい事を確認する。

### 2. ハニカムが枠に収まるかどうかを確認する

確認が終わったら、接着の準備にとりかかる。

### 3. 接着剤の準備

接着剤は（A）アラルダイト（チバガイギー、型番 2011）（B）缶入りアラルダイト（主剤 AW106 + 硬化剤 H.V953U）250 g を適当にイソプロピルアルコールで薄めたもの、の二つを用いる。ハニカム外枠の片面と内側に（A）をぬる。ストリップ付き FR4 板とハニカムの片面に（B）をぬる。

### 4. ハニカム接着作業

ハニカム外枠を、ピンを使って位置を合わせながらストリップ付き FR4 板に乗せる。ハニカムを FR4 板の上に置き、外枠のサイズに合うように引き延ばし、ハニカムが縮まないようにマスキングテープでとめる。

### 5. 平面性をだすための接着の準備

アラルダイトがバギングフィルムに付着しないよう上からラップをかぶせ平面性を出すために FR4 板をその上にのせる。ハニカム外枠から約 1.5cm の所にアルミプロファイルを両面テープではりつけ、ハニカム外枠がバギングフィルムによって押されるのを防ぐ。このとき真空ポンプで減圧した時にバギングフィルムが傷つかないよう、アルミプロファイルの角にスポンジをおく。

### 6. 接着

バギングフィルムをかぶせ、減圧する。（ゲージ圧 690mmHg）

### 7. 平面性の確認

定規で平面性をチェックする。また、ストリップからの読み出しができるように、ストリップがハニカム外枠に隠れていないことを確認する。平面性が確認できたら、12 時間待つ。



図 68: ハニカム外枠、ハニカムへの接着剤の塗布

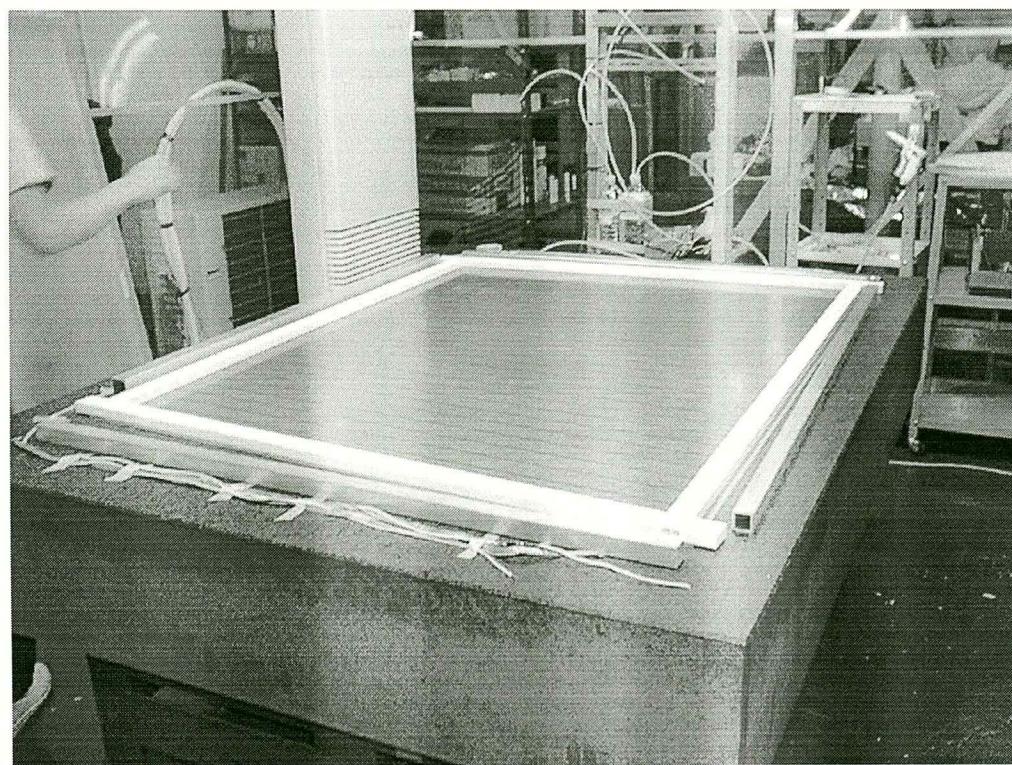


図 69: FR 4 板にハニカム外枠を接着

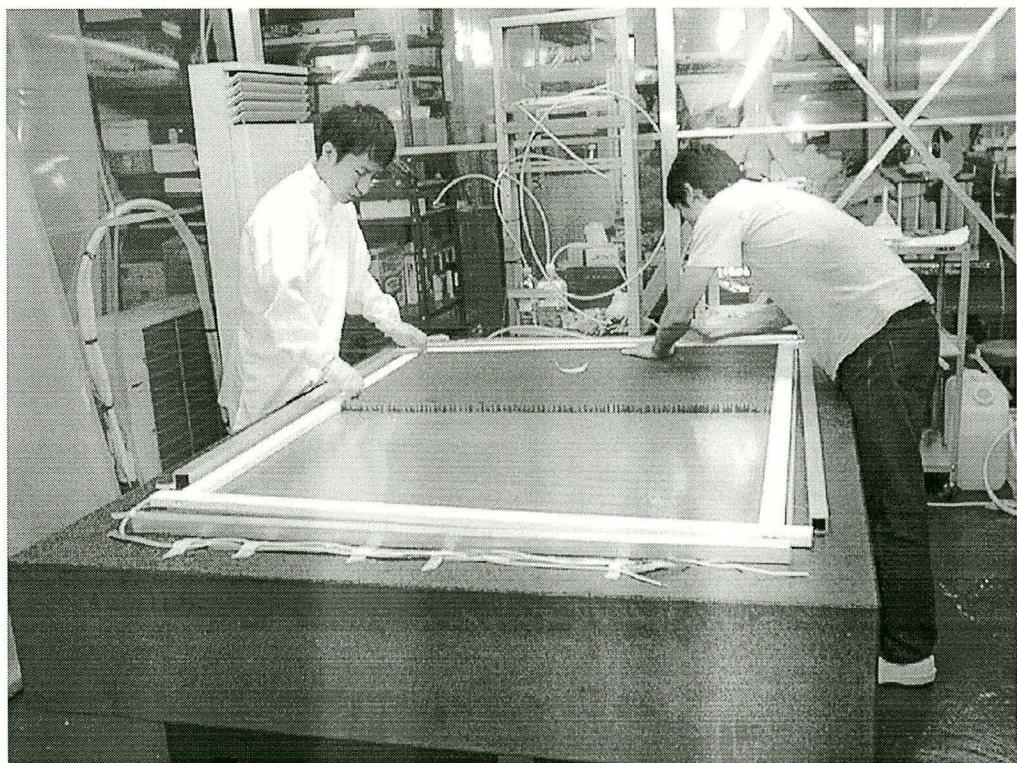


図 70: FR 4 板にハニカムを接着

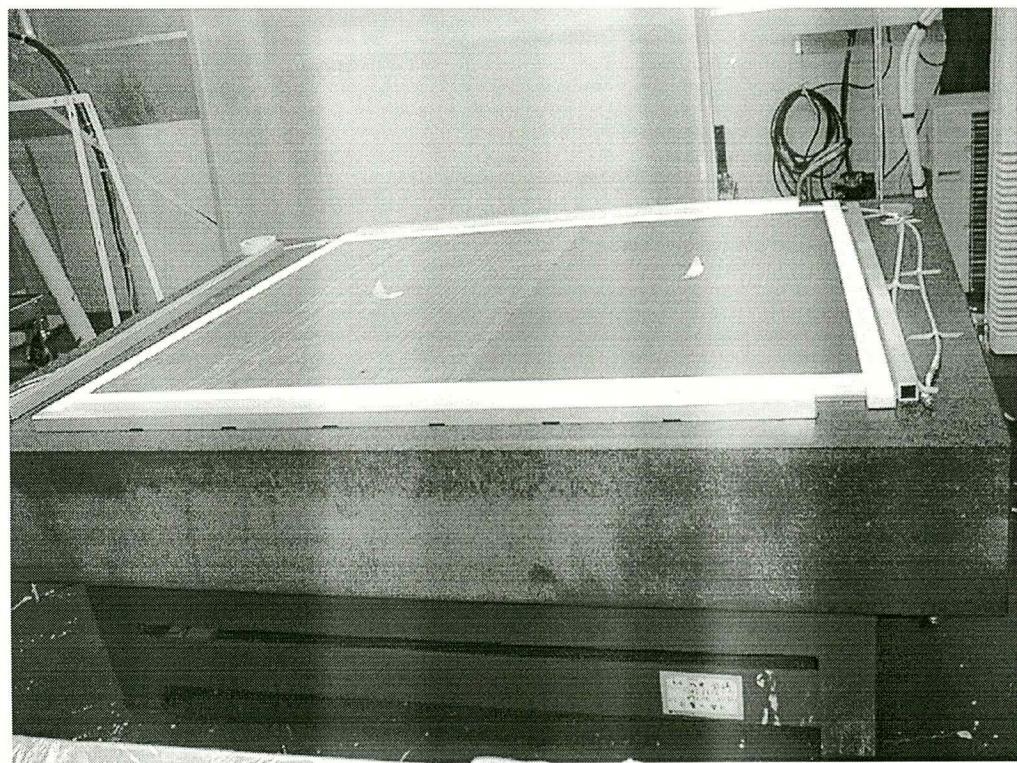


図 71: ハニカム接着

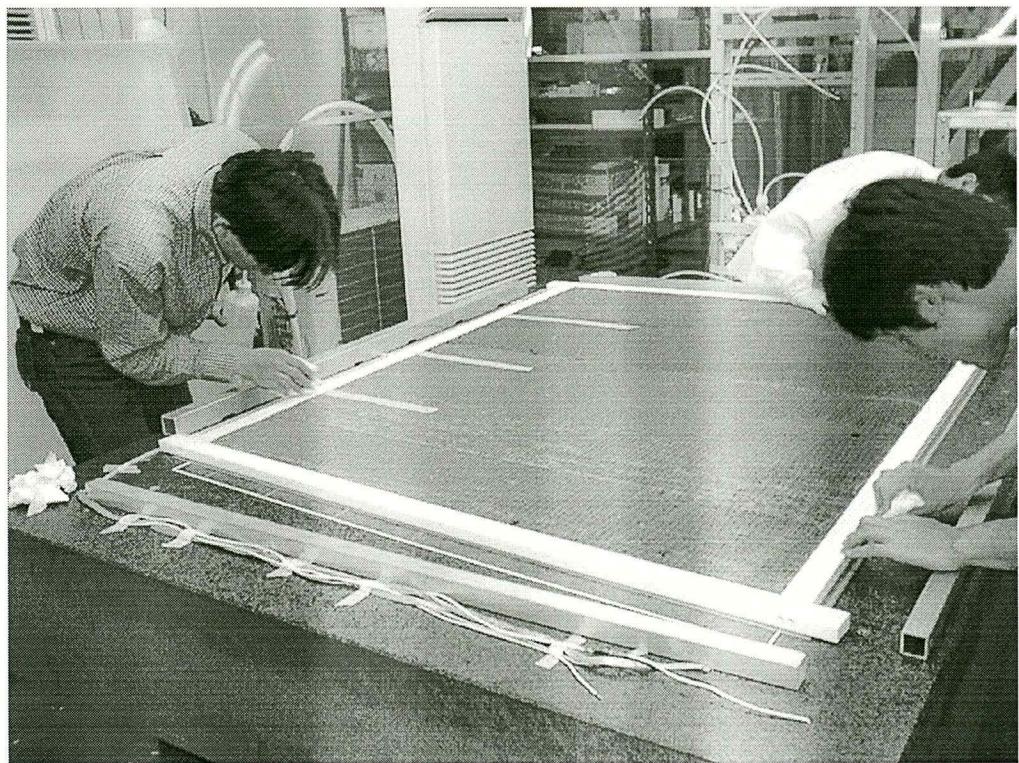


図 72: ハニカムが縮まないようにマスキングテープでとめる



図 73: アラルダイトがバギングフィルムに付着しないようラップをかぶせる

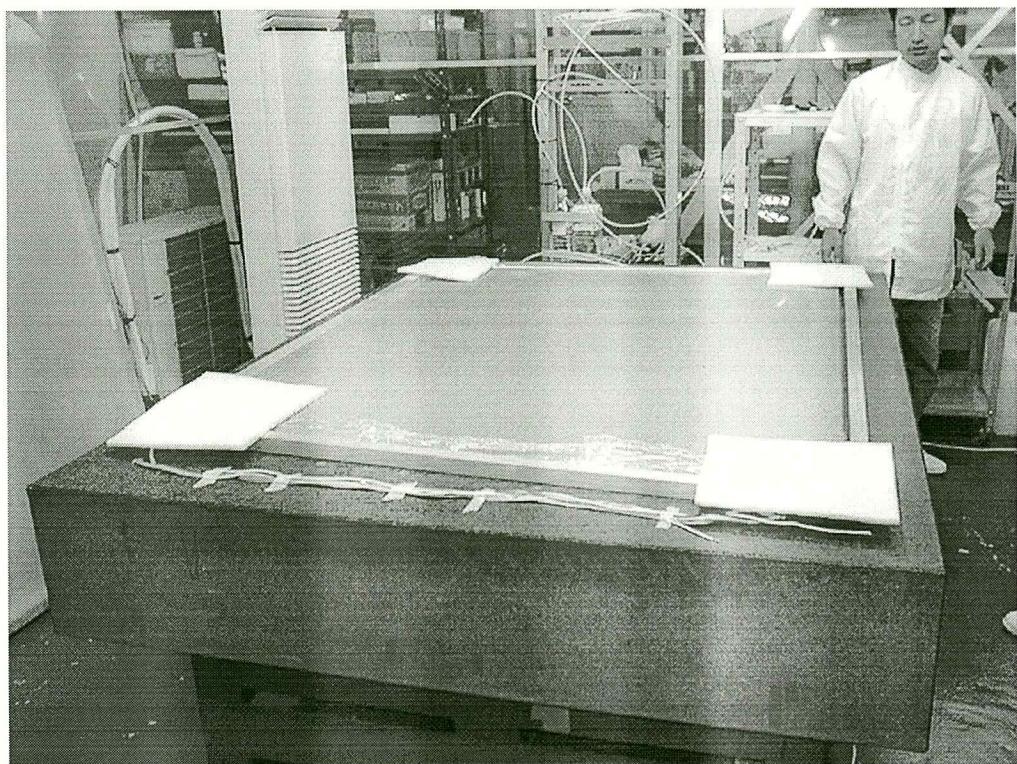


図 74: 平面性を出すために FR4 板をその上にのせる



図 75: バギングフィルムをかぶせ、減圧する



図 76: 平面性の確認

## A.8 パーツの接着

### 1. 定盤、アルミ治具に付着物（アラルダイト）がないことを確認する

定盤、アルミ治具、パーツの接着面をアルコールでふく。

### 2. パーツをのせて、位置関係を確認する

アルミ治具をFR4板にのせる。パーツをのせて、位置関係を確認する。位置決めの穴はあっていいるか。ツメを引っかけるための1.3mm以上の幅があるか。

### 3. ボタン型サポート接着部分のカーボンを削る

アルミ治具が動かないように鉛ブロックをのせる。カーボン削り機で、ボタン型サポート接着部分のカーボンを削る。

### 4. 接着部分、パーツをアルコールでふく

### 5. 接着の準備

アラルダイトは脱泡する。可使時間を長くするため、室温は25°C以下にする。

### 6. 接着

パーツにアラルダイトぬる。ボタン型1人、外枠1人、ワイヤーサポート1人で分担。接着箇所におく。パーツの固定にはマスキングテープを用いる。ハニカム付きのstrip板の場合は板の周囲にアルミプロファイルを両面テープで定盤上に固定する。

### 7. 接着によるアラルダイトの漏れをとる

バギングフィルムをかぶせる。数分間減圧（ゲージ圧660mmHg）した後、真空ポンプを止め、バギングフィルムをはずして、改めてはみでたアラルダイトを除去する。エッティングパターンにアラルダイトが付着するのを防ぐために、アルコールで拭き後マスキングテapeでカバーする。

### 8. 本接着

再びバギングフィルムをかぶせ減圧をし、ゲージ圧660mmHgで安定になることを確認する。（ハニカム付きの場合は720mmHg。）アラルダイトの硬化を確認するために、使用したアラルダイトはバギングフィルムの上に置いておく。

#### 注意

- アラルダイトのヌレの目安は、外枠は7割のヌレが見えればよい。その他のパー

ツについては、100 %のヌレがなくてはいけない。

- グラウンドコンタクトテープ付近のアラルダイトは多めにする。
- パーツどうしに段差がないことを確認する。
- パーツがFR4板からはみ出しているか確認する。
- ボタン型サポートが、治具にひっかかっていたり、斜めになっていないかをチェックする。
- アラルダイトは始め少なくなり、実際に接着面にあててヌレ性をチェックする。その上でアラルダイトの量を調整する。
- フィードスルーがアラルダイトで埋まってしまうことのないように注意する。

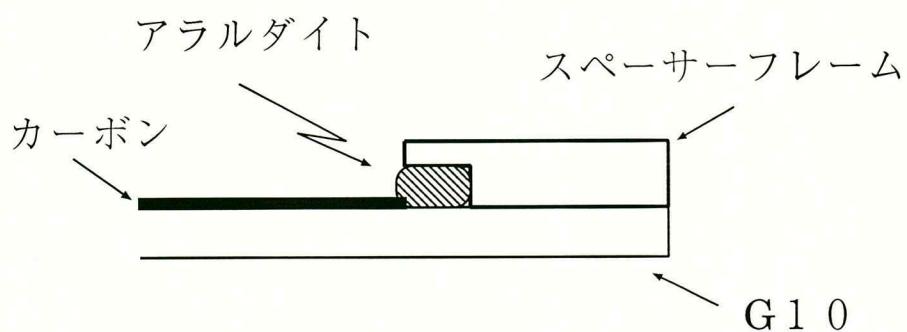


図 77: アラルダイトが斜線の部分に漏れると放電の原因になる

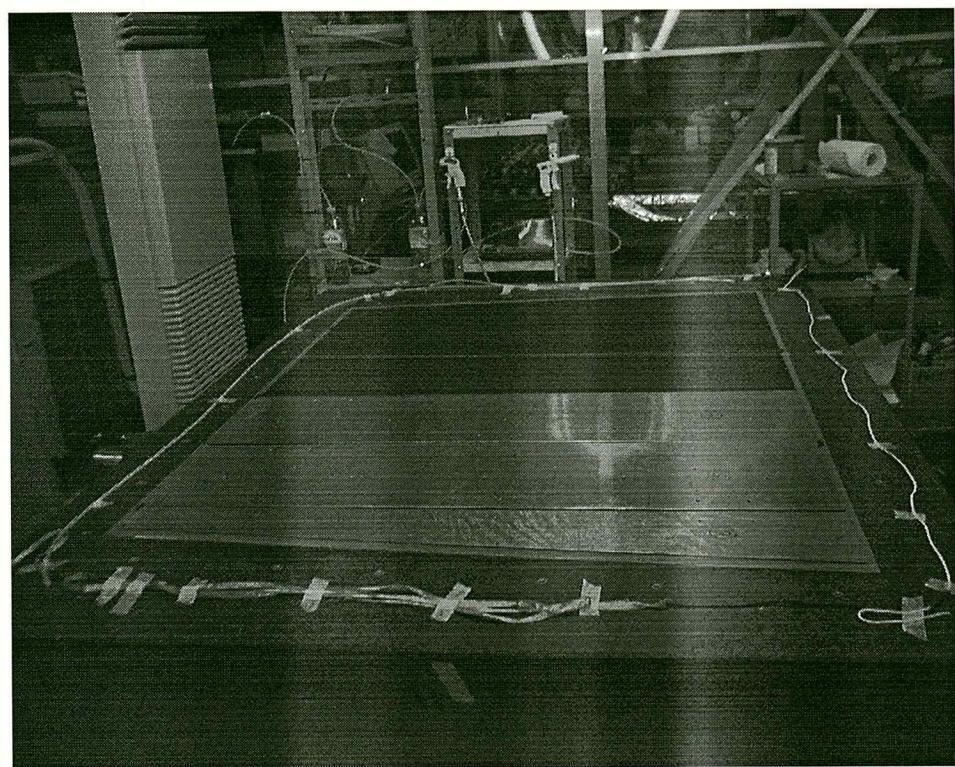


図 78: アルミ治具を FR4 板にのせる

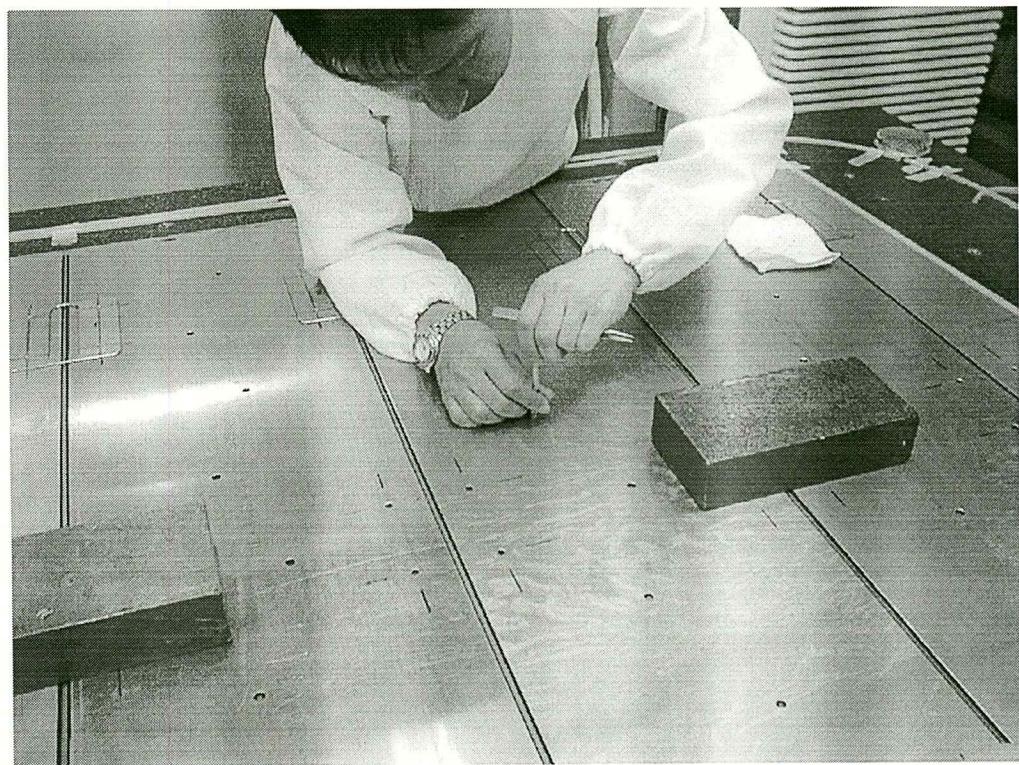


図 79: カーボン削り機によるボタン型サポート部分のカーボン除去。

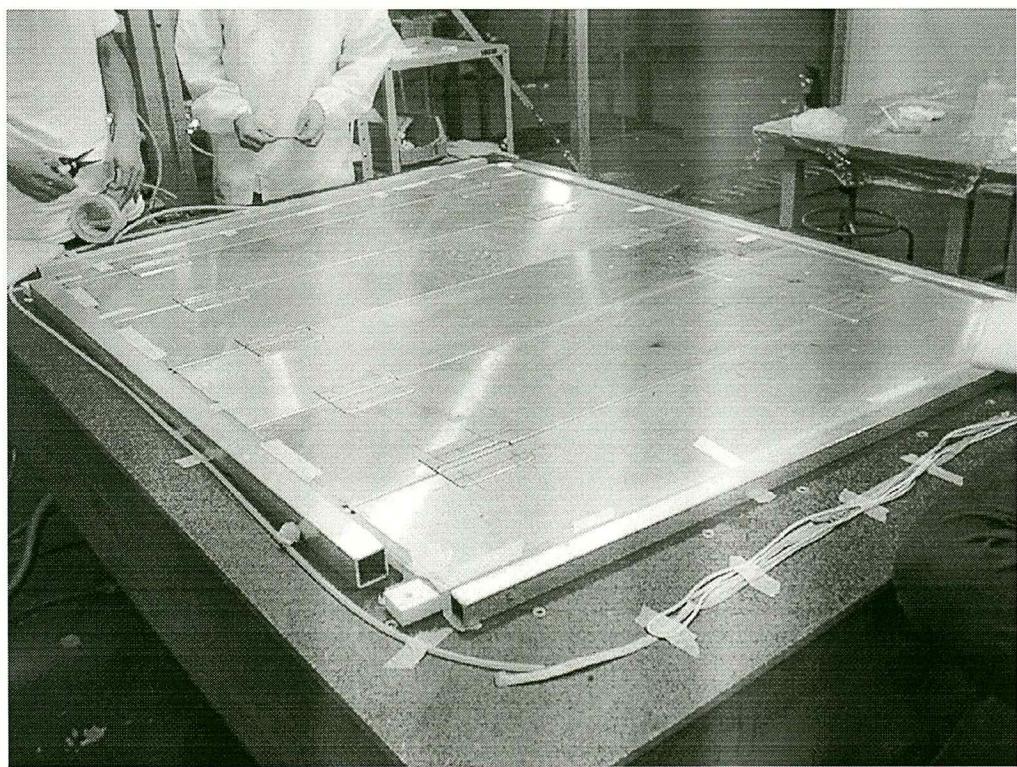


図 80: ハニカム付き Strip 板の接着のときには 周囲に設置しているアルミプロファイルによって減圧時の変形を防ぐ

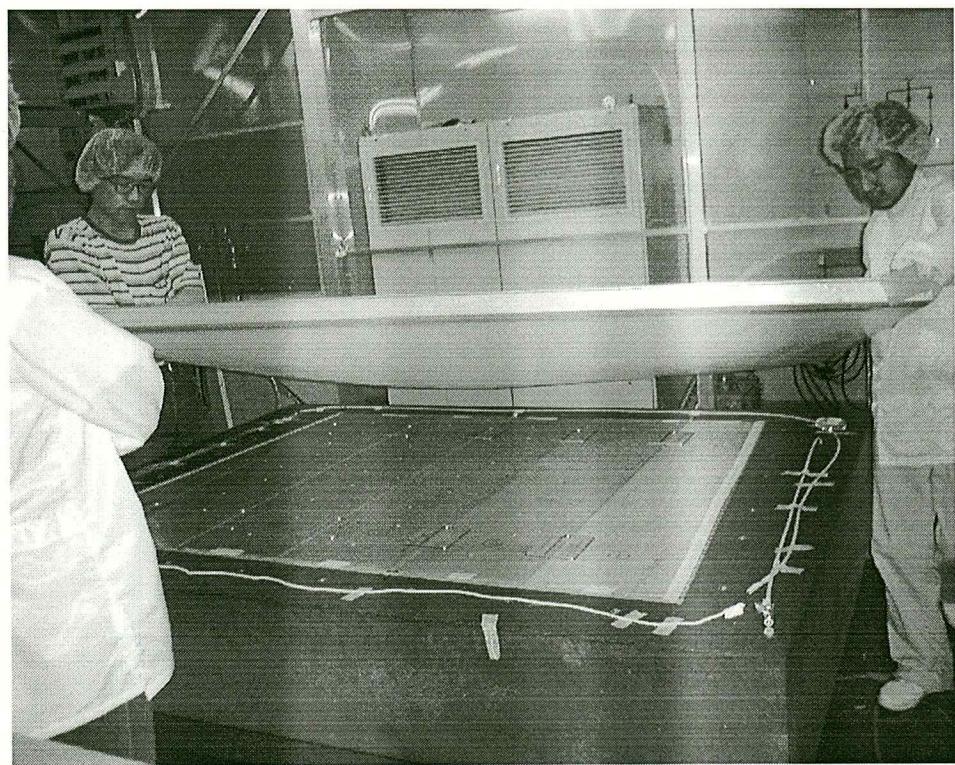


図 81: バギングフィルムをかぶせ減圧

## A.9 接着後の作業

### 1. バギングフィルムを外す

真空ポンプで減圧をして8時間以上経過した後、アラルダイトの硬化をチェックし、真空ポンプを止めてバギングフィルムを外す。

### 2. アルミ治具を外す

パーツからはみ出たアラルダイトとアルミ治具を分離するために、アルミ治具の縁をプラスチックハンマーで軽くたたく。アルミ治具にサクションリフターを取り付け、ボタン型サポートが引っかからないように気をつけながら治具を外す。

### 3. アフターケア

パーツ上の、はみ出たアラルダイトを彫刻等で削り落とす。カーボンがはがれたところは、筆でカーボンをぬる。

### 4. グラウンドコンタクト部の銀接着剤の上にカーボンをぬる

### 5. 銅テープ間の抵抗値をチェックする

オーダーは最短距離の銅テープ間で $10M\ \Omega$ である。

### 6. 保管庫に移す

定盤上でFR4板をずらし、定盤とFR4板がアラルダイトについていないことを確認した後、保管庫に移す。



図 82: プラスチックハンマーで軽くたたき、パーツからはみでたアルダイトとアルミ治具を分離

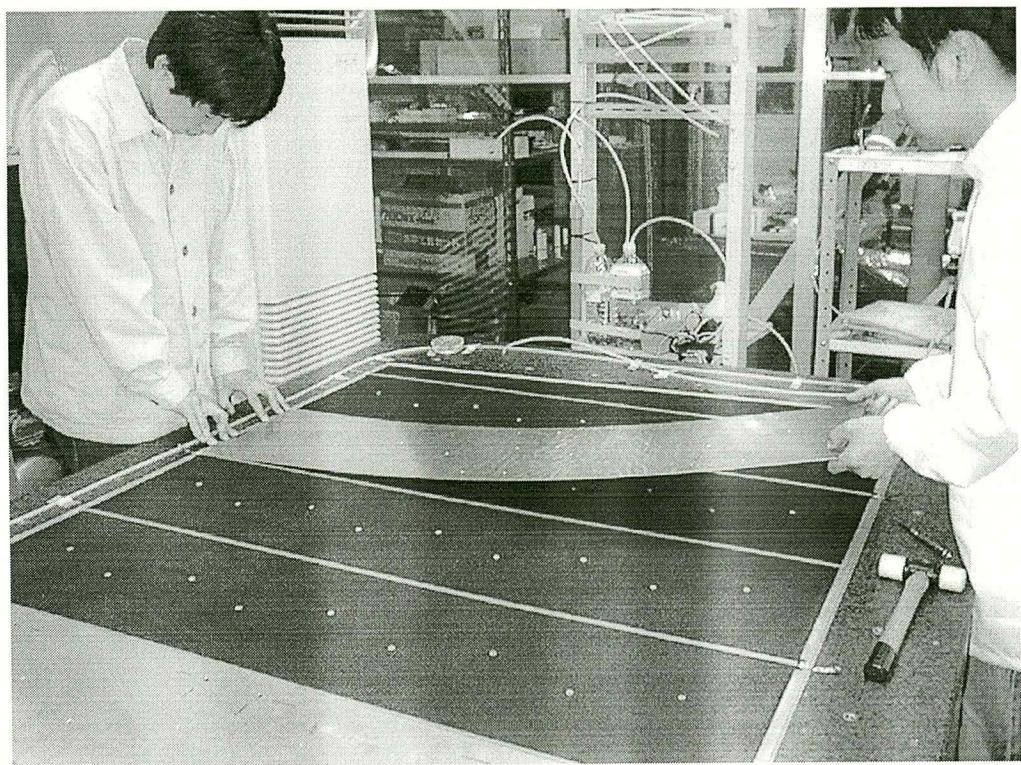


図 83: アルミジグの取り外し

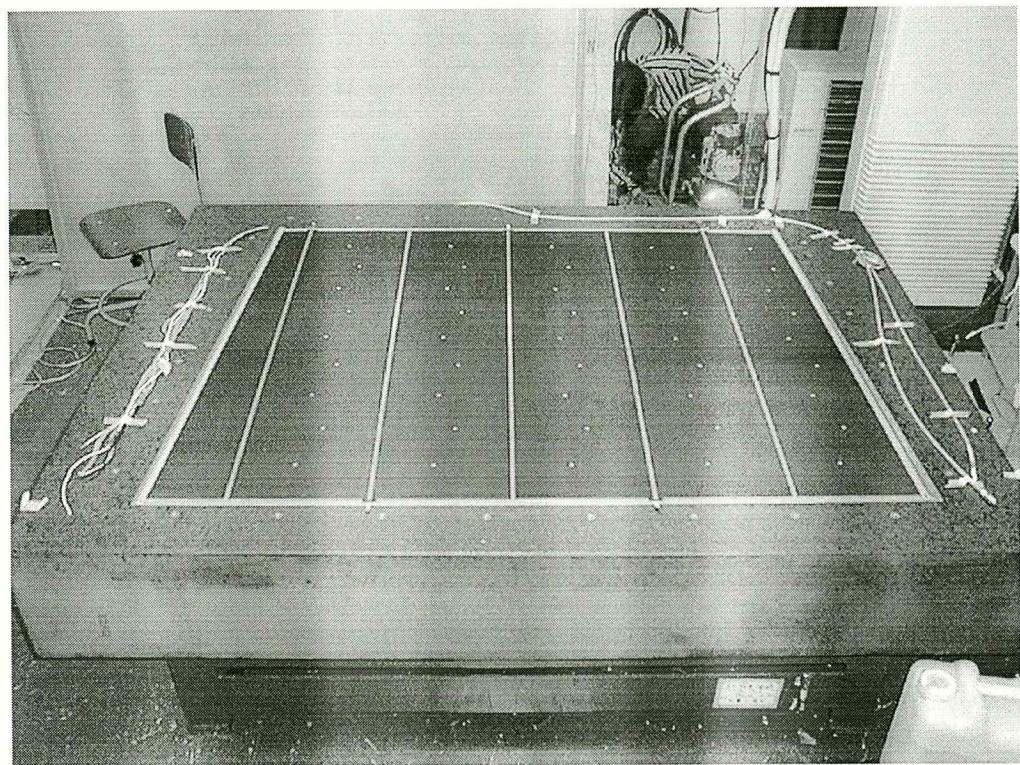


図 84: 接着されたパーツ

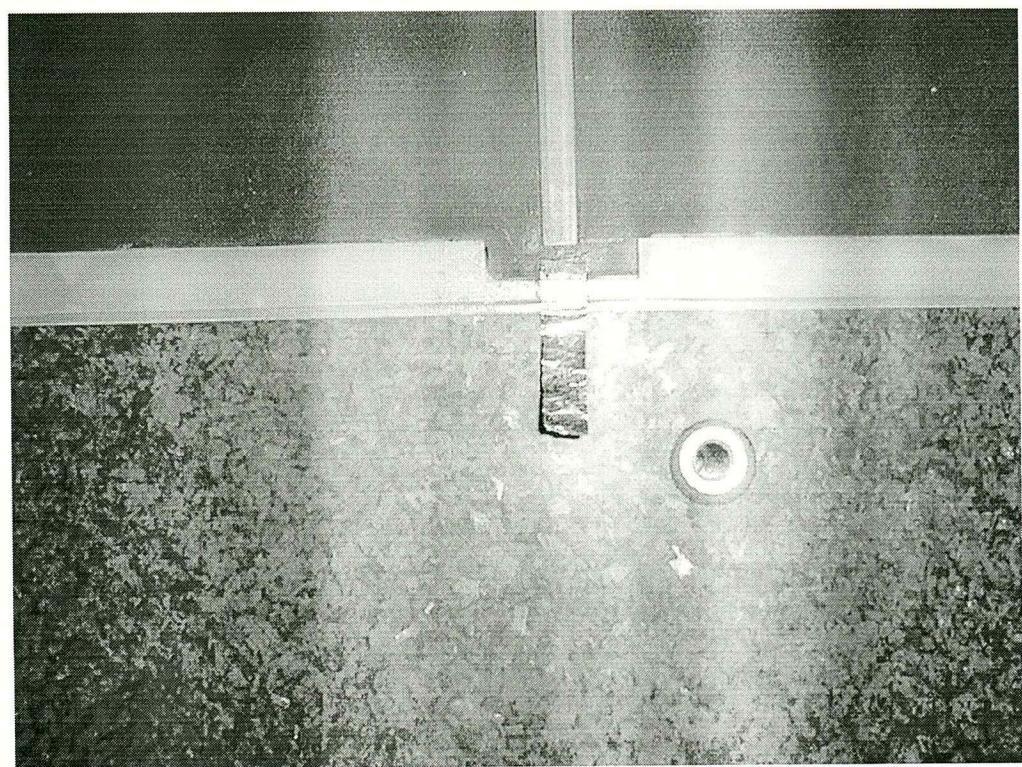


図 85: ガスリターン部分

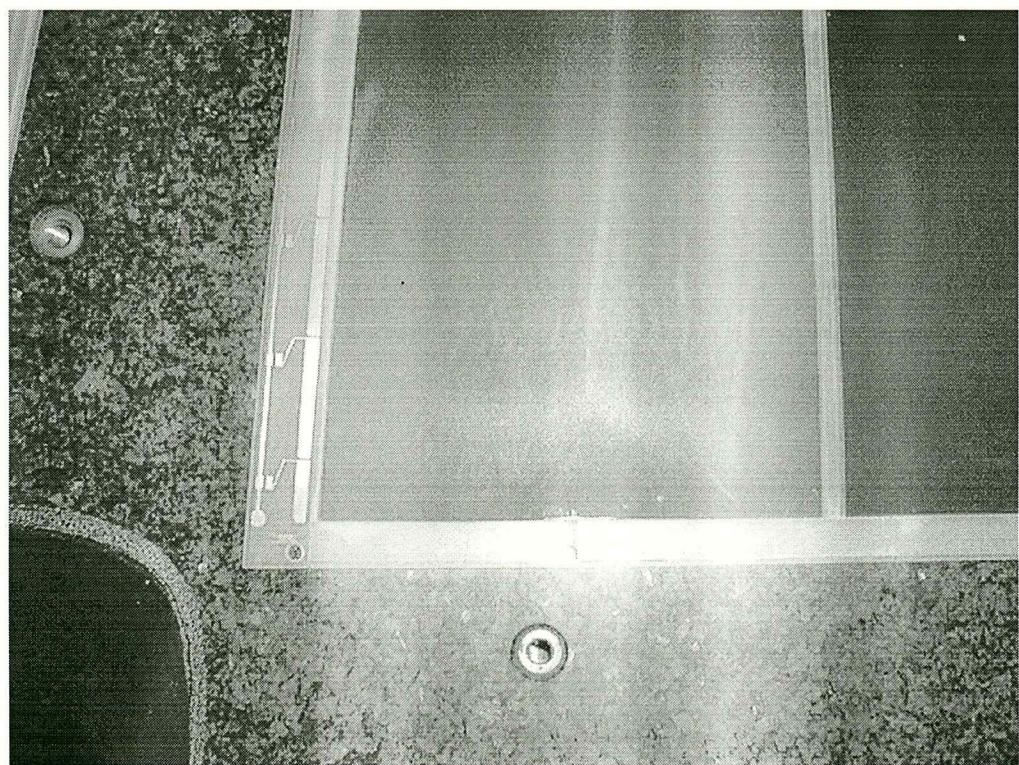


図 86: エンドフレーム部分

## A.10 カーボン面の水洗い

### 1. 洗浄道具の準備

純水を用意する。コンプレッサーのタンクの中の水を除去する。水おけ、水受け用すのこ、ポンプ、醤油チュルチュルを用意する。

### 2. 洗浄

FR4 板を水受け用すのこにのせ純水で洗う。

### 3. エアーガンで洗浄面を乾かす

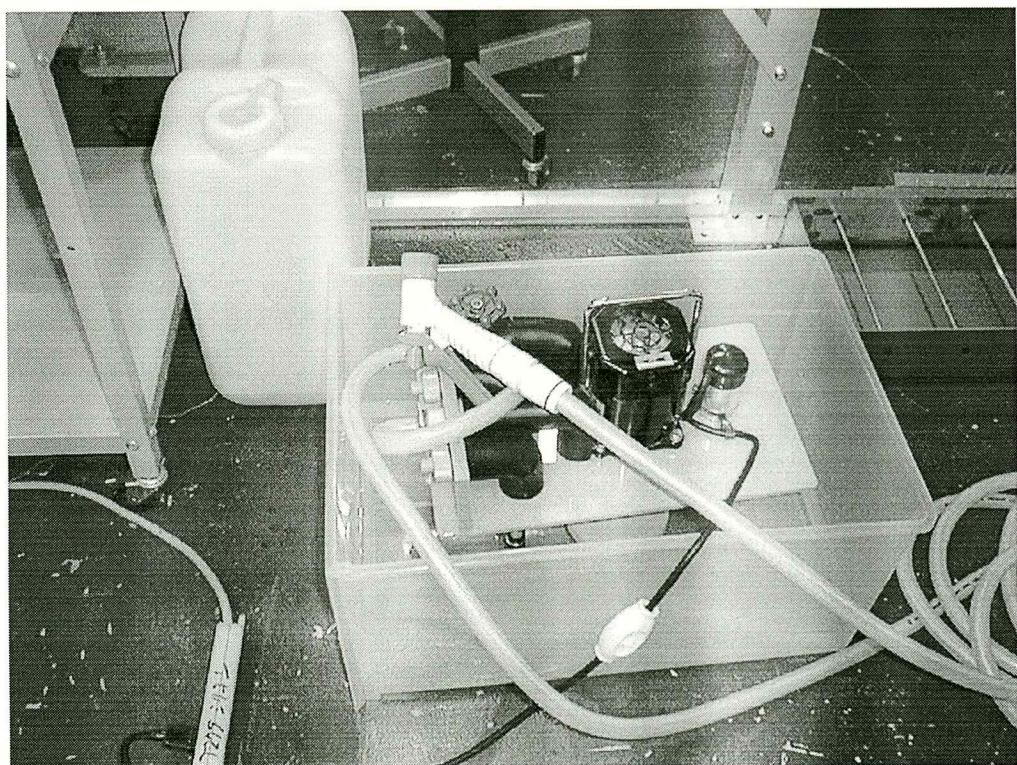


図 87: 水おけ、ポンプ、水受け用すのこ (左上)

## A.11 ワイヤー巻き

1. グラウンド付き FR4 板をワイヤー巻き機に乗せる  
ツメを用いて仮止めする。
2. ワイヤー巻き機のプログラムを起動  
プログラムを起動し、ワイヤー送り出し機を原点から 227 ピッチ目まで移動させる。  
この時ワイヤー間隔（ピッチサイズ）は 1.798mm にする。
3. トルクモーターの電圧は 15.0V に設定する
4. ワイヤー巻き機上にワイヤーをとめる  
ワイヤー送り出し機からワイヤーを取り出し、ワイヤー巻き機上にネジで仮止めする。
5. FR4 板の位置を調整  
後でグラウンド付き FR4 板の位置を微調整するために、ワイヤースペーサーをつける。ワイヤーを 233 周までまわす。233 周目のワイヤーが、ストライクマークにくるようにグラウンド付き FR4 板の位置を調整する。
6. 位置決め用治具で FR4 板を固定  
グラウンド付き FR4 板の位置が決まったら、位置決め用治具を FR4 板の端に両面テープで固定する。さらに、ツメで板を固定する。
7. もう一枚の板も以上の同じ工程  
ワイヤー巻き機を半周回し、もう一枚の板についても 5,6 の操作を行う。
8. FR4 板を両面テープで完全固定  
ワイヤーを切り、FR4 板の半分の部分だけツメをはずす。はずしたところの裏側に両面テープをはり位置決めの治具に合わせて位置を固定する。
9. もう一枚の板も同じ工程  
残りの部分、およびもう一方の FR4 板についても 8 の作業をおこなう。再びワイヤー巻き機を 227 ピッチまで戻し、3,4 の作業を行いワイヤーを 233 周までまわす。この時ワイヤーがストライクマークに来ていることを確認する。

## 10. トルクモーターの電圧を 31.3V に設定する

ワイヤー巻き機側面の G10 板に上に、ワイヤーをハンダ付けしトルクモーターの電圧を 31.3V に設定する。

## 11. ワイヤーを巻く

ワイヤーを数周回す。ワイヤーが切れるなどの不備がなければ、さらに 30 周回す。エッティングパターン上にワイヤーが正しくのっているか確認し、ワイヤーを巻き始める。ワイヤーを最後まで巻く。(750 周)

## 12. ワイヤーを切断する

トルクモーターの電圧を落し、ワイヤー送り出し機から出ているワイヤーを切断する。

### 注意

- ワイヤーを巻いている途中では、ワイヤー巻き機が水平になっている時以外止めてはいけない。再び動き出す時にワイヤーが切れるおそれがある。
- ワイヤーが途中で切れたり、スプールからなくなったりした場合は：
  - 先ずワイヤーがなくなった端から 10 ピッチ前のワイヤーをワイヤー巻き機側面の G 10 板 にはんだ付けして止めておく。
- その先のワイヤーは切断し除去する。
- 次に新しいワイヤーをセットし、送り出し機を上でハンダ付けした最後のワイヤーの端に目 視で合わせる。
- 新しいワイヤーを最後のワイヤーの上に重なるようにあわせて、側面 G10 板にハンダ付けする
- ワイヤー巻き機を約 30 度逆回転し、送り出し機の位置を最後のワイヤーの位置にくるようにする。
- 再び、ワイヤー巻き機を水平にし、正しいピッチ間隔になっていることを確認する(最後のワイヤーの上に新しいワイヤーが正確に重なっていることを確認する)。
- 正しくない時は、上の作業をやり直す。
- 正しいことが確認できたら、トルクモーターの電圧を 31.3V に設定する。
- ワイヤー巻き機が水平になっている事を確認した後、ワイヤー巻き機プログラムを用い一周回す。
- ピッチが正しいことを確認し、ワイヤー巻きを再開する。原点をかえる時は：
  - プログラムの set origin のボタンをおす。この時ピッチの値、ピッチ数、エンコーダの値を記録しておく。

- エンコーダの値を 0 にする。

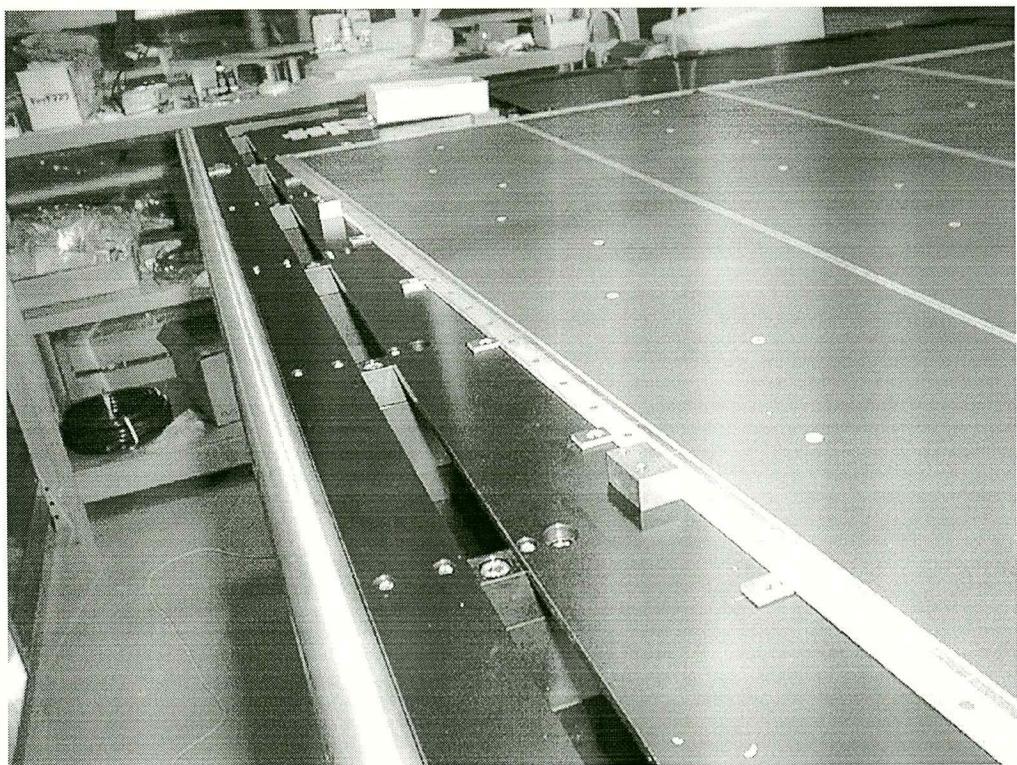


図 88: ワイヤー巻器上で位置決め用ジグを取り付けた状態

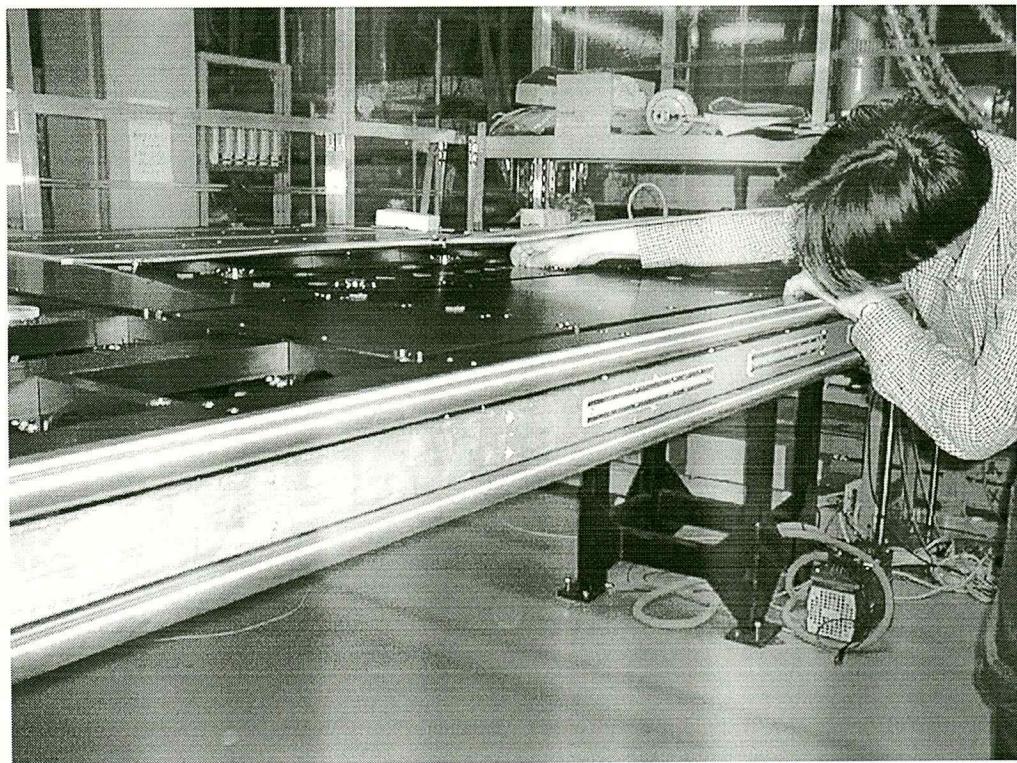


図 89: 両面テープの取り付け作業

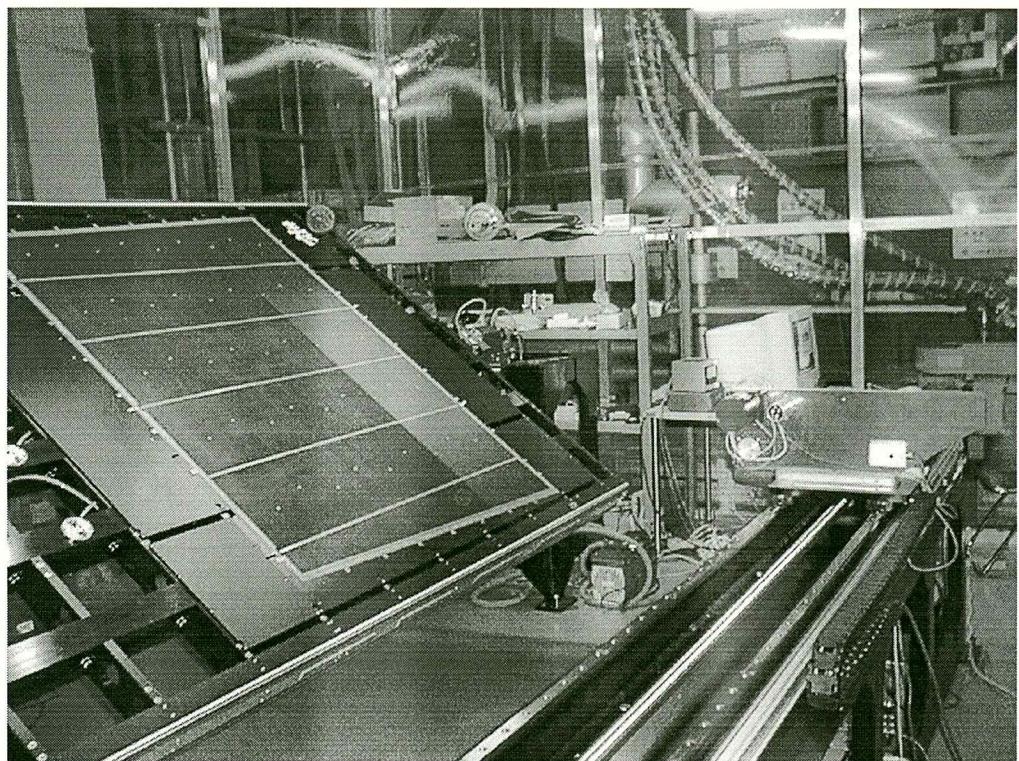


図 90: ワイヤー巻器動作中の様子。(右側にあるのがワイヤー送り出し機)

## A.12 ハンダ付け

### 1. エッチングパターンの上にフラックスをぬる

このときワイヤー上にフラックスが飛散しないように、ワイヤー上に紙をひく。

### 2. ハンダ付けを行う

ハンダごての温度を350℃に設定し、ハンダにフラックスをぬってハンダ付けを行う。ハンダの粘性が低く均一にハンダ付けできない時は、ハンダの上に再びフラックスをぬり、こてで表面を整える。ワイヤーが左右にずれた場合は、ハンダをこてで溶かし、こて先でワイヤーを元の位置に戻す。ハンダの粒がワイヤーの上にのってしまった場合は、ハンダこてを用いて除去する。

### 3. フラックスを拭き取る

ハンダ付けが半面終了したら、純水でフラックスを拭き取る。1,2,3の作業を全てのパターンについて行う。

### 4. ハンダ付け不良のチェック

ハンダ付けが終了したら、ワイヤーを軽く指ではじいてハンダ付け不良がないかチェックする。

### 注意

- 特にSn+Znハンダと水溶性フラックスを使用する場合、ハンダこてのこて先に酸化被膜が出来てハンダが溶けにくくなる場合がある。この時にはまずこて先にフラックスを塗り、そこにハンダをつける。そして溶けたハンダがこて先に均一につくまでフラックスを塗り付ける。ちなみにこの作業を行わないとハンダ付け不良及びエッチングパターンの損傷などを起こす可能性があり得る。



図 91: ハンダ付け作業の様子

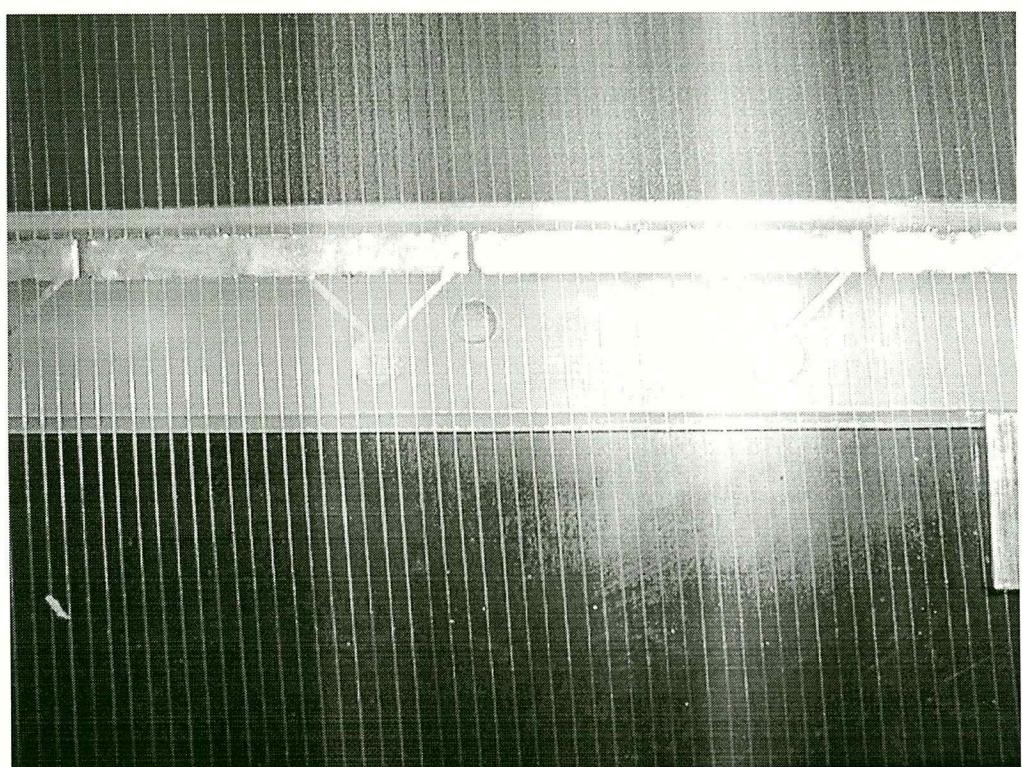


図 92: Sn+Zn ハンダによってハンダ付けされた状態

## A.13 ワイヤーの除去

### 1. 切断したワイヤーが飛散しないための準備

切断した時にワイヤーが飛散しないよう、ワイヤー巻き機の側面にワイヤーをマスキングテープで止める。

### 2. 切断

メスを用いてワイヤーを切断する。

#### 注意

- ワイヤーを切断する時に、エッチングパターンを切らないように注意する。切断したワイヤーは、回収しておく。
- ハンダ外しの方法：
  - 外したいワイヤーグループにハンダごてをあて、ワイヤーを外す。この時、隣のグループに触れないよう気を付けること。ワイヤーが外れたら、ハンダにフラックスを塗りこてで熱を与えながら、ハンダ吸い取り機でハンダを除去する。

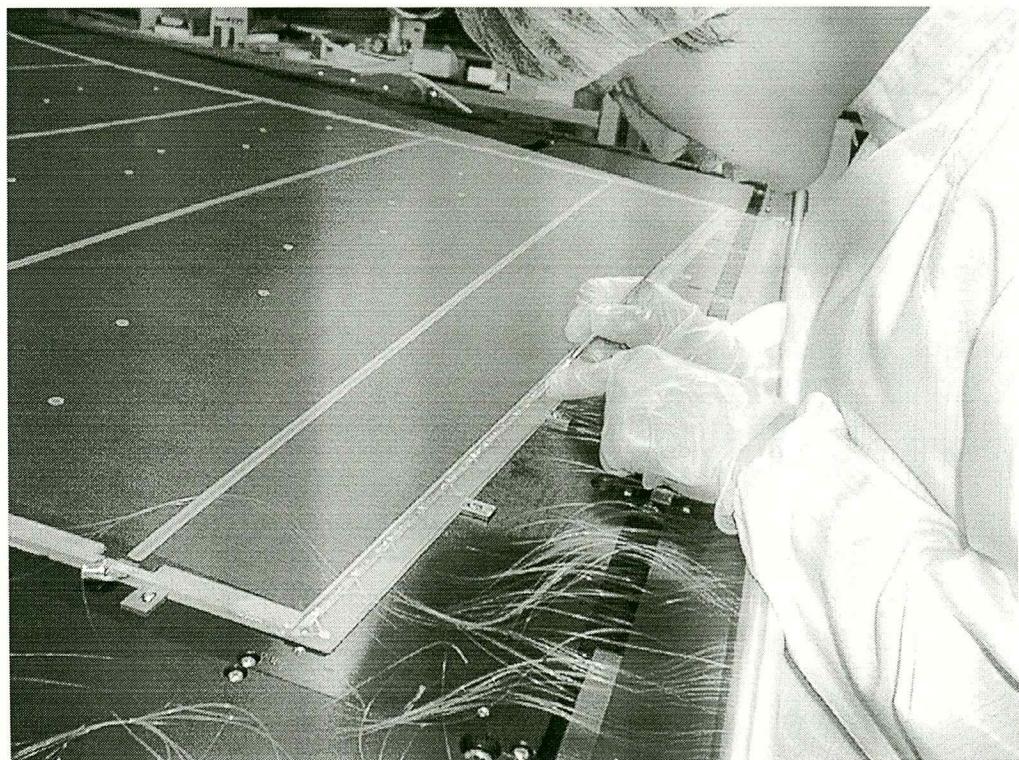


図 93: メスによるワイヤーの切断

## A.14 張力試験

### 1. ゆるんでいるワイヤーがないかチェック

ワイヤー巻き機上のFR4板を押さえているツメを取り外す。ワイヤーの張力によりグラウンド付きFR4板は反る。この時隣と比べて、極端にゆるんでいるワイヤーがないかチェックする。もしゆるんでいるワイヤーがあったならば、そのワイヤーグループはもう一度巻き直す。

### 2. ハンダ不良のチェック

ワイヤーのゆるみがなければ、 $10M\ \Omega$ の抵抗をつける。アルコールでハンダ付けした部分をふく。ハンダ不良がないか、テスターでチェックする。もう一方の板についても同様の作業をする。

### 3. FR4板を外す

ワイヤーの巻き終わったグラウンド付きFR4板を、ワイヤー巻き機から外す。最後にワイヤー巻き機をアルコールで拭き、巻き機テーブルを垂直にしておく。

## A.15 ワイヤーの巻かれたFR4板の洗浄

### 1. FR4板をワイヤーが垂直になるようにおく

ワイヤー付きのFR4板を水おけ用すのこの上に置く。その時ワイヤーが垂直になるようにおく。

### 2. ワイヤーの下半分を洗う

フラックスの付いているエッティングパターン上は、はけを使って入念に洗う。

### 3. もう半分を洗う。

下半分が洗い終わったら、FR4板を180度回転させ残りの半分を洗う。

### 4. 乾燥

洗い終わったら、エアガンで乾燥させる。



図 94: 水洗い作業の様子。(ハンダ部分を重点的に洗う)

## A.16 ワイヤーの巻かれたFR4板の定盤への固定

### 1. 治具で仮固定

ワイヤーの巻かれたFR4板を定盤の上にのせる。FR4板の四辺のうち、エッチングパターン付きスペーサーの付いた二辺のうち一辺を治具で固定する。エッチングパターン付きでないスペーサーの付いた二辺の定盤に接触している部分を治具で固定する。

### 2. 真空ポンプでFR4板を平面にする

真空ポンプのスイッチを入れ、FR4板の下面を減圧する。

### 3. 治具で完全固定

ワイヤーの張力によって反っているFR4板を平面になるように押さえ、治具で固定する。全ての治具を止め終わったら、もう一度治具が確実に止まっているか確認する。

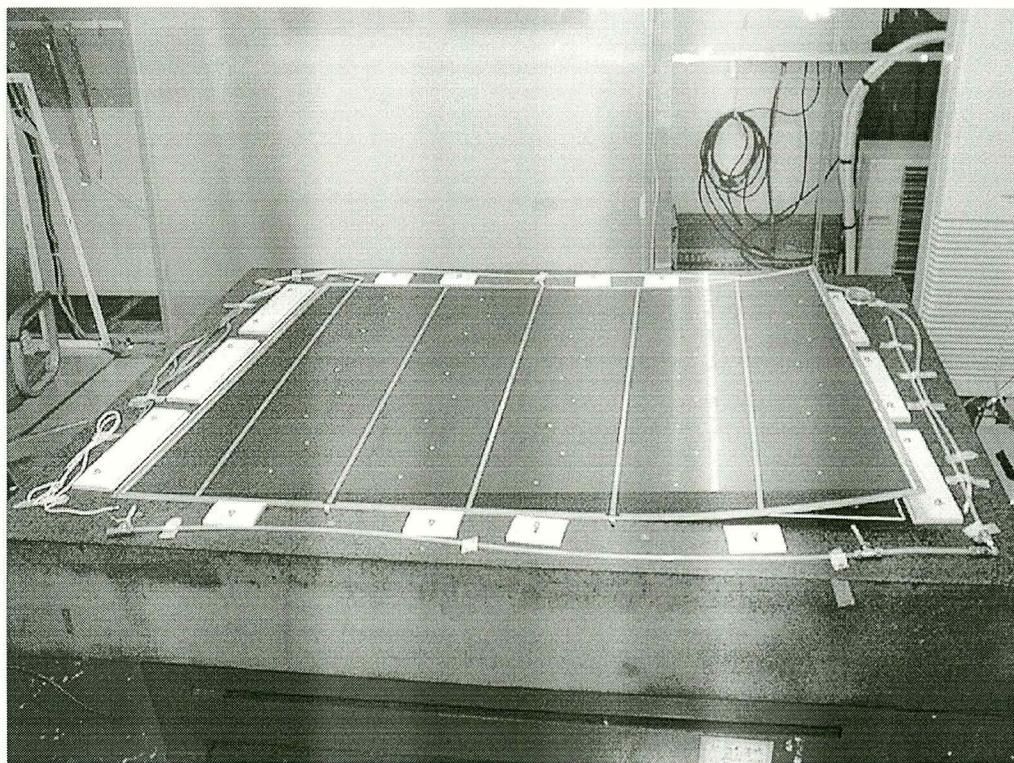


図 95: 定盤上に置いた状態のワイヤー付き FR4 板。(ワイヤーの張力による板の変形が確認できる)

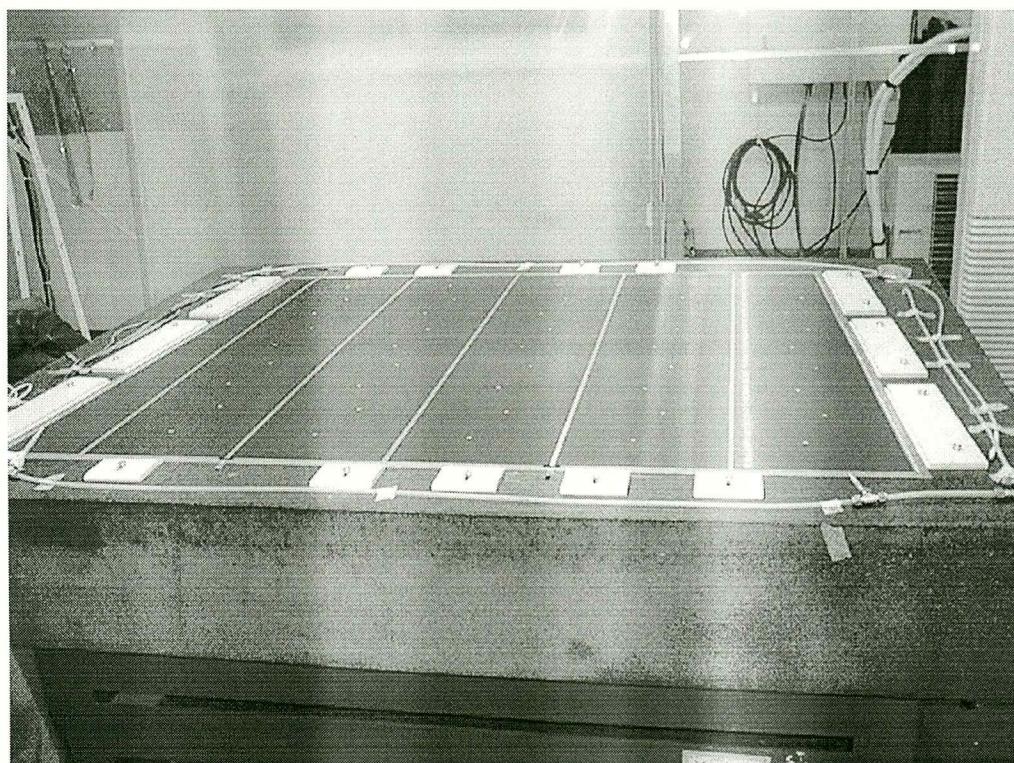


図 96: ワイヤー付き FR4 板がジグで固定された状態

## A.17 H.V テスト

1. グラウンドコンタクトテープをグラウンドにつなぐ  
ワイヤー付き FR4 板のグラウンドコンタクトテープをグラウンドにつなぐ。H.V ラインと H.V モジュールをつなぐ。
2. ゴミ、ちり等を取り除く  
H.V ライン、ワイヤー、カーボン面をエアーブラシ等できれいにする。スペーサー上をアルコールで拭く。
3. H.V テスト : 100V ずつ H.V を上げていき、H.V とリークカレントの関係を見る  
この時、H.V に対してリークカレントがリニアに上がっていくようであればゴミ等が付着している可能性がある。H.V が 1000V の時、リークカレントが 600 n A 以下であれば OK。リークカレントが高いようであれば、エアーブラシで FR4 板をはく。もしくは、水洗いをもう一度 1 行い、その上で H.V テストを行う。
4. H.V が 1000V の時、リークカレントが 600 n A 以下となったら、H.V をオフ
5. ストリップ付き FR4 板をのせる  
ピンを使って位置を合わせながら、定盤上のワイヤー付き FR4 板の上にストリップ付き FR4 板をのせる。ストリップつき FR4 板の位置はマスキングテープで固定する。ストリップ付き FR4 板のグラウンドコンタクトテープをグラウンドにつなぐ。
6. H.V テスト  
ストリップ付き FR4 板をかぶせた状態で 3,4 の行程を行う
7. 真空ポンプ引きでの H.V テストの準備  
ストリップ付き FR4 板の上にサクションリフターを使ってアルミ板をのせる FR4 板の周りに、両面テープを使ってアルミプロファイルを固定する。ガス口取り付け位置にガス口を差込み、シリカゲルを使って乾燥させた空気を送りこむ。バギングフィルムをかぶせる。バギングフィルムと定盤の間に針金を 4,5 本差し込んでおく。
8. 真空ポンプをオンにする  
チェンバーの下側はゲージ圧 660mmHg、チェンバーの上側とバギングフィルムの間はゲージ圧 720mmHg になるように、圧力を針金を使って調節する。

9. 供給している空気の流量が安定していることを確認する

10. H.V テスト

再び 3,4 の行程を行う。

11. 約 30 分間システムを放置

システムが安定であることを確かめる。H.V をオンにしてワイヤーが切れていないことを確認できたら、H.V をオフにし、接着の準備に取り掛かる。

注意

- ストリップ付き FR4 板を重ねる時、次のことをチェックする。接着面の間に隙間がないか。ハンダ付け部分とハンダ除け付きスペーサーの位置がっているか。ワイヤー付き FR4 板とストリップ付き FR4 板のガス口の位置がっているか。

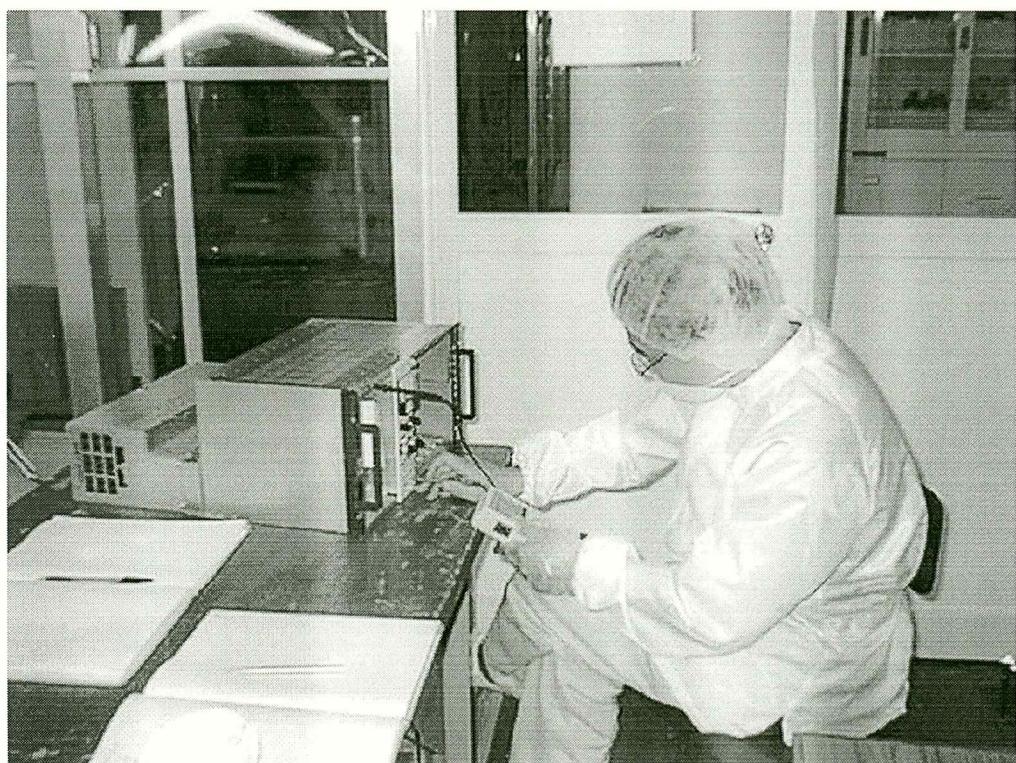


図 97: H.V テスト

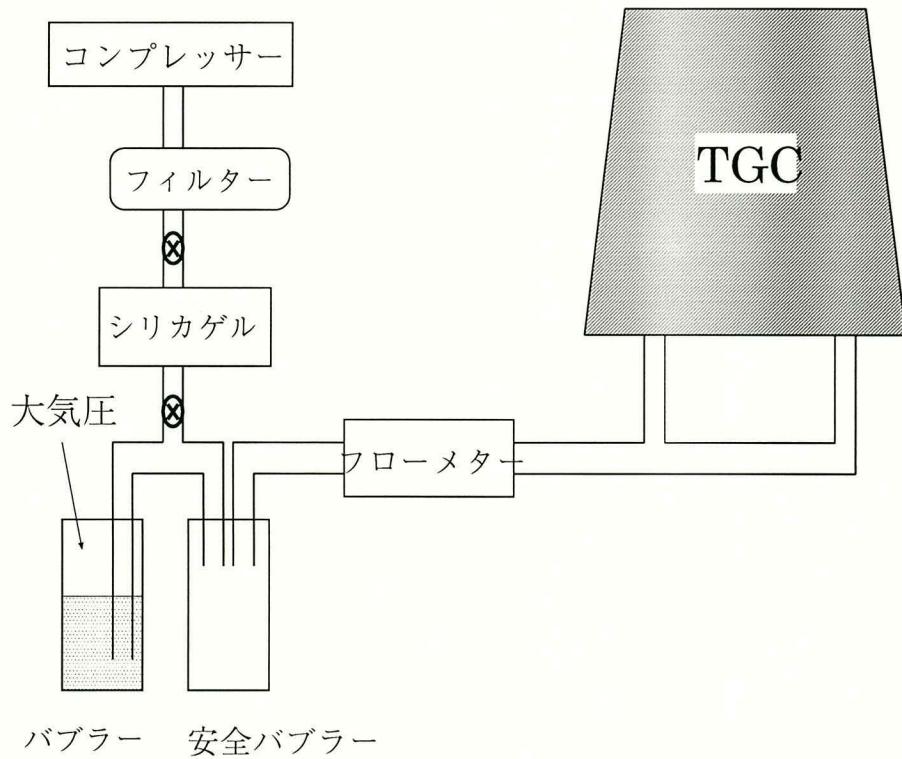


図 98: 圧力システム

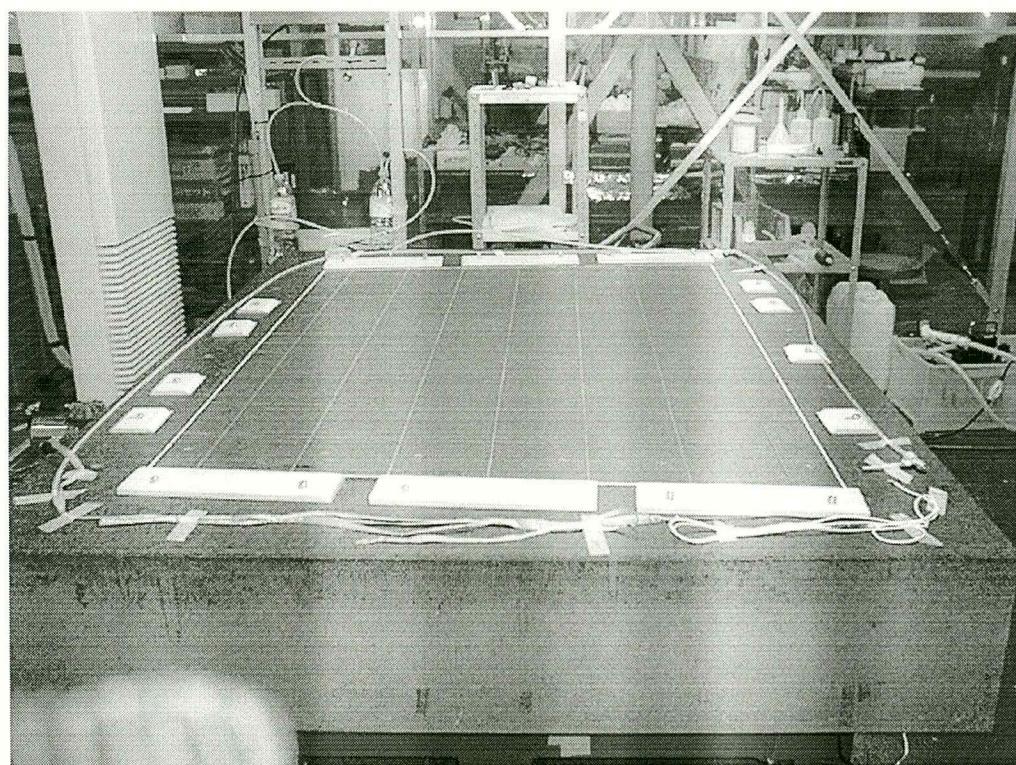


図 99: 定盤の表面には碁盤状にみぞがあり、真空ポンプでひいたときチェンバー下面の平面性をだす

## A.18 チェンバーを閉じる

1. 接着のために再びチェンバーをオープンする

2. アラルダイトを塗る

ワイヤーの張ってある板の方は

- ハンダの上に少量のアラルダイトを薄く塗る。
  - もう一方の側は
    - スペーサーフレーム
    - 棒型ワイヤーサポート
    - ボタン型ワイヤーサポート
- の全ての面に塗る。

3. 再びチェンバーを閉じる

エアブラシでもう一度塵飛ばしをする。アラルダイトを飛ばさないように。チェンバーを閉じる。この時の位置合わせの穴は片側に二つ（下図）。

4. H.V オン

H.V をかけて（100 V）ワイヤーが切れていない事を確かめる。

5. 真空ポンプ引きの準備

ゴム付きアルミ板を治具として上からのせ、アルミプロファイルで脇を固める。バギングフィルムをかぶせ、定盤とバギングフィルムの間に針金を3, 4本刺して置く。乾燥空気をチェンバーに供給する。

6. 真空ポンプをオンにする（720mmHg）

7. H.V オン

もう一度 H.V をかけて（100 V）ワイヤーが切れていない事を確かめる。

8. 約 30 分間システムを放置

真空系および乾燥空気供給のシステムが安定であることを確かめる。

9. 接着剤を硬化させる

安定であれば、キュアタイムとして 12 時間待つ。

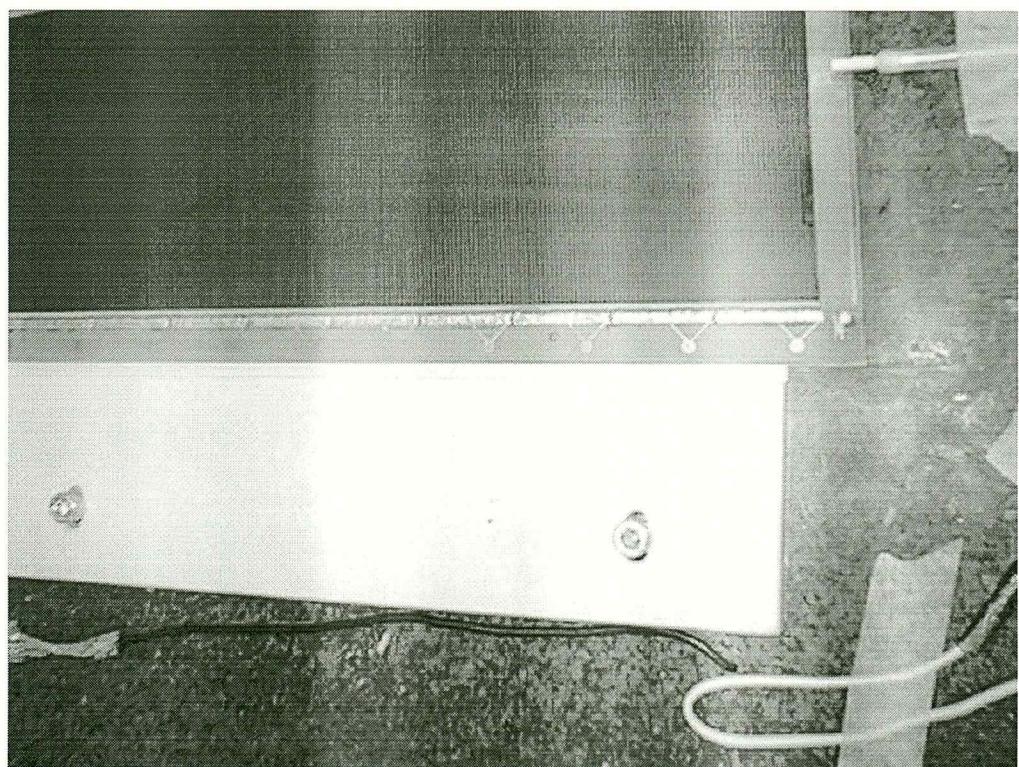


図 100: アラルダイト塗布後のワイヤー付き FR4 板。角の部分に位置決め用のピンが既に挿入されている

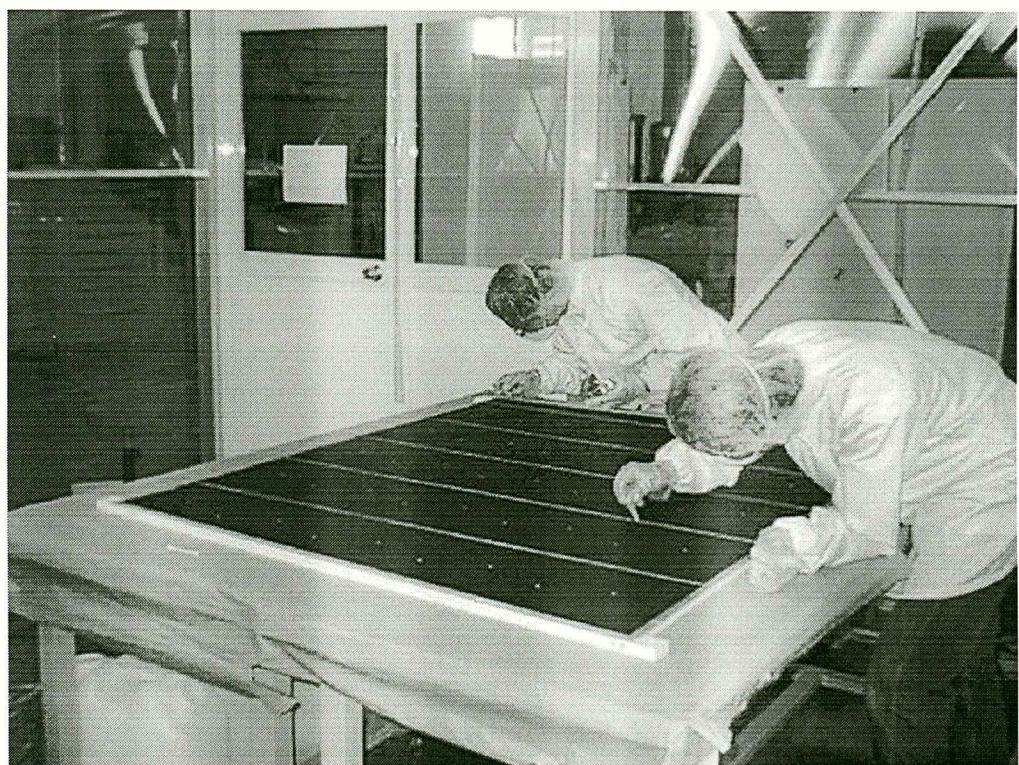


図 101: 接着剤塗布作業

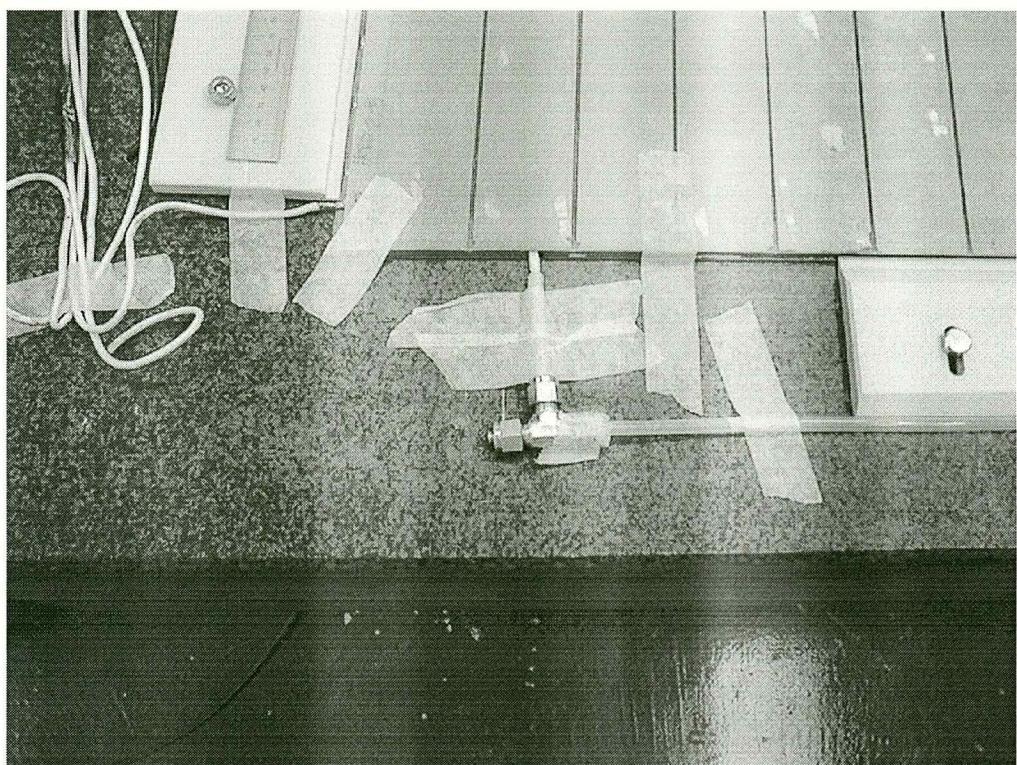


図 102: シリカゲルを使って乾燥させた空気を送りこむ

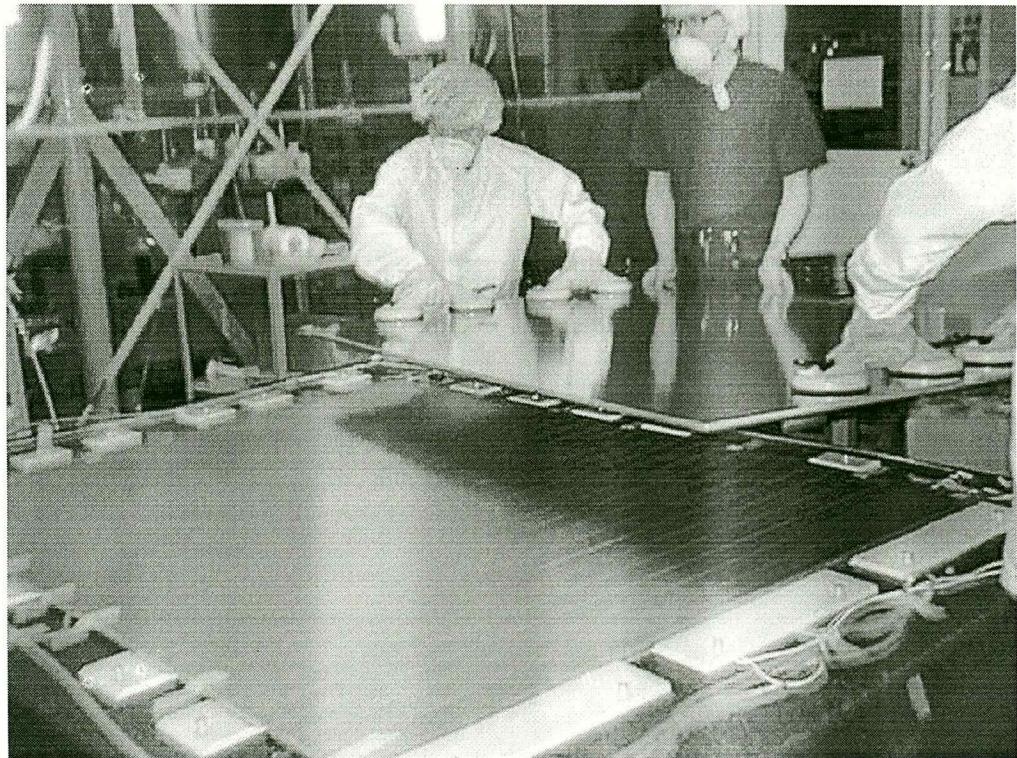


図 103: アルミ板をのせる



図 104: 真空ポンプで減圧した時にバギングフィルムが傷つかないよう、角にスポンジをおく

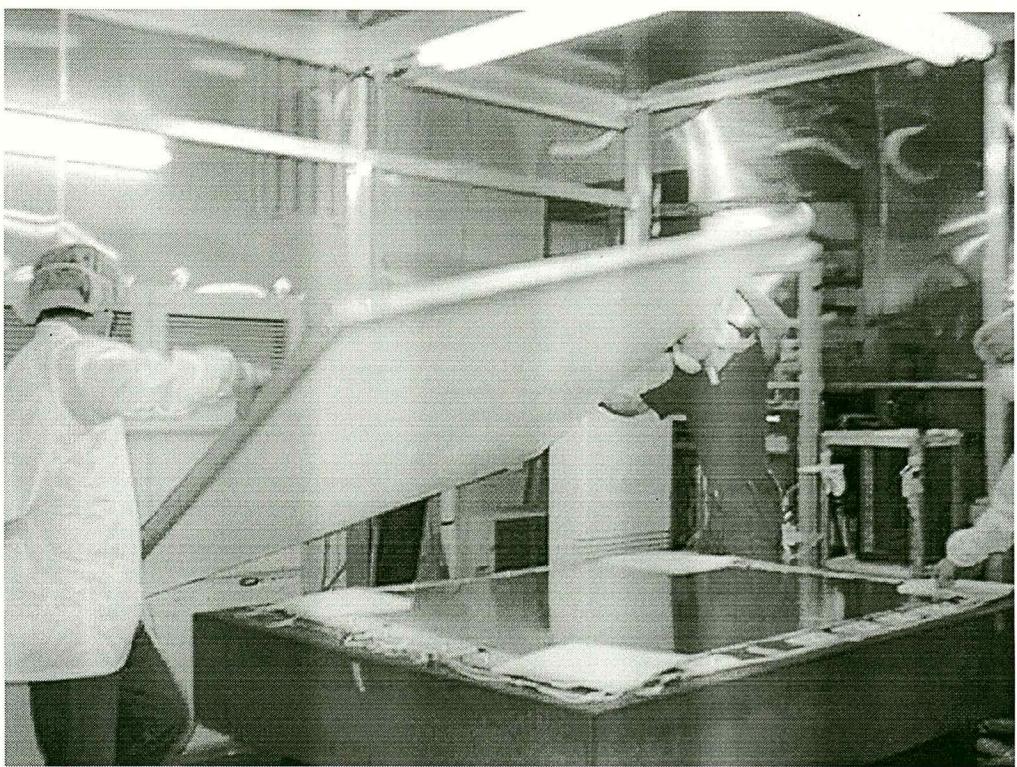


図 105: バギングフィルムをかぶせる

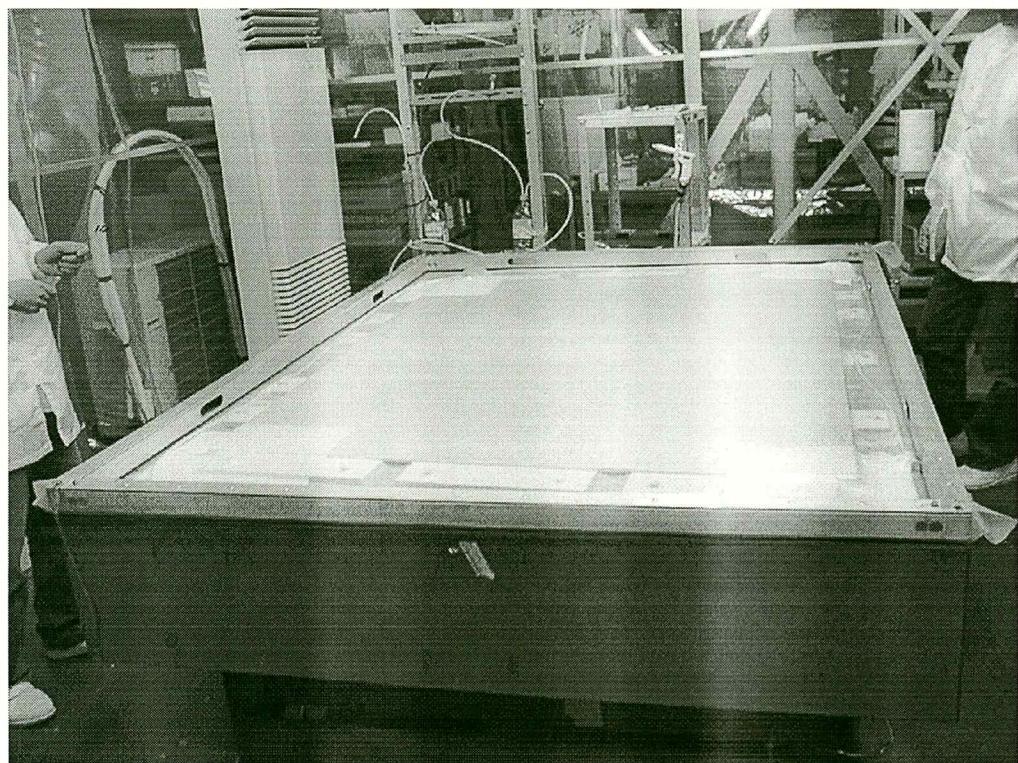


図 106: 定盤とバギングフィルムの間に針金を 3, 4 本刺して置く

## A.19 H.V キャパシターの取り付け

1. キャパシターの足の片方を 5 mm ぐらい残して切断する
2. 切断した足の先にハンダ（Sn+Pb の普通のハンダ）をのせ、チェンバー側のエッチングパターンの上にもハンダをのせる
3. ハンダがのったもの同士をコテで付ける  
以上、コテの温度は 300 度。

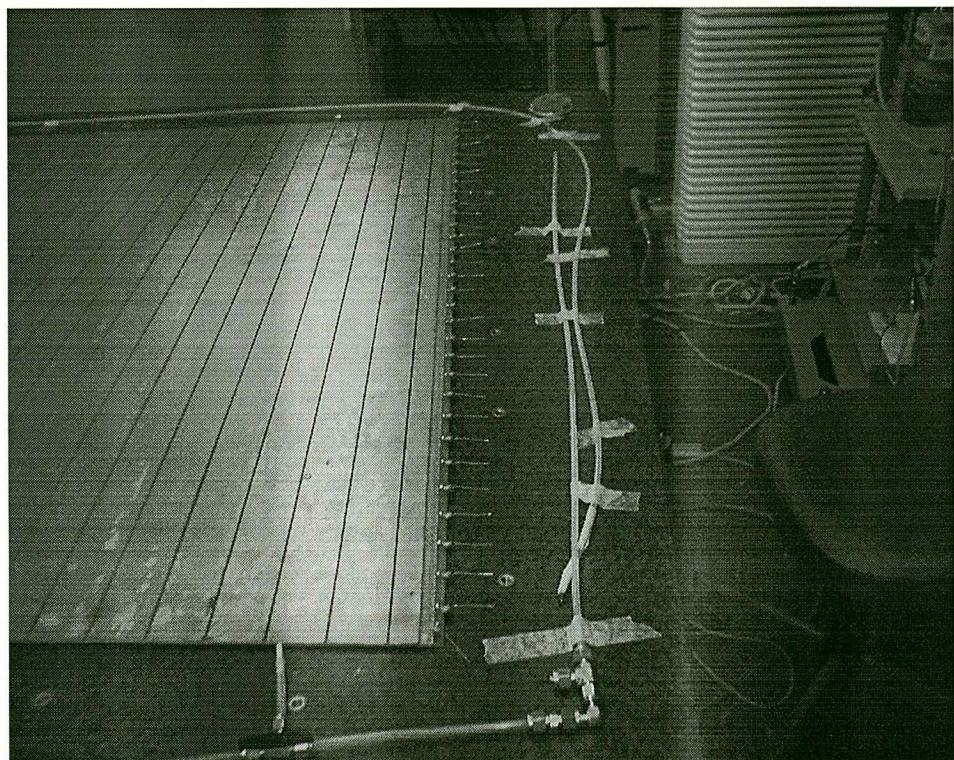


図 107: 高圧コンデンサーをハンダ付けした状態

## A.20 ガスシール

1. アラルダイト 2011 を注射器（10 ミリリットル用）に入れる
2. アラルダイトを注射器で少しずつ出しながら、チェンバーの各辺の隙間を埋めていく（ガスシール）  
シールする順番は
  - (a) ガス口のある辺
  - (b) その反対側
  - (c) キャパシター側の辺
  - (d) その反対側 (H.V 側)
3. 5 時間待ったらチェンバーを回転させて、順次各辺についてアラルダイトをのせていく  
一辺についてキュアタイムは約 5 時間

### 注意

- ガス口を取り付ける時は、チェンバー側面の外側（ストリップの反対側）にガス口が傾かない様に注意する。傾いたままアラルダイトが硬貨してしまうと、チェンバーを定盤にのせた時に、ガス口と定盤上面との間に隙間がなくなり、接着のとき、ガス口にガス供給のためのチューブがさせなくなる。
- グラウンドコンタクトの銅テープがストリップに接触しないように注意する。
- ガス口がシールのためのアラルダイトでふさがらないように、時々口ですってみる（但し、今後は注射器を用いる予定）

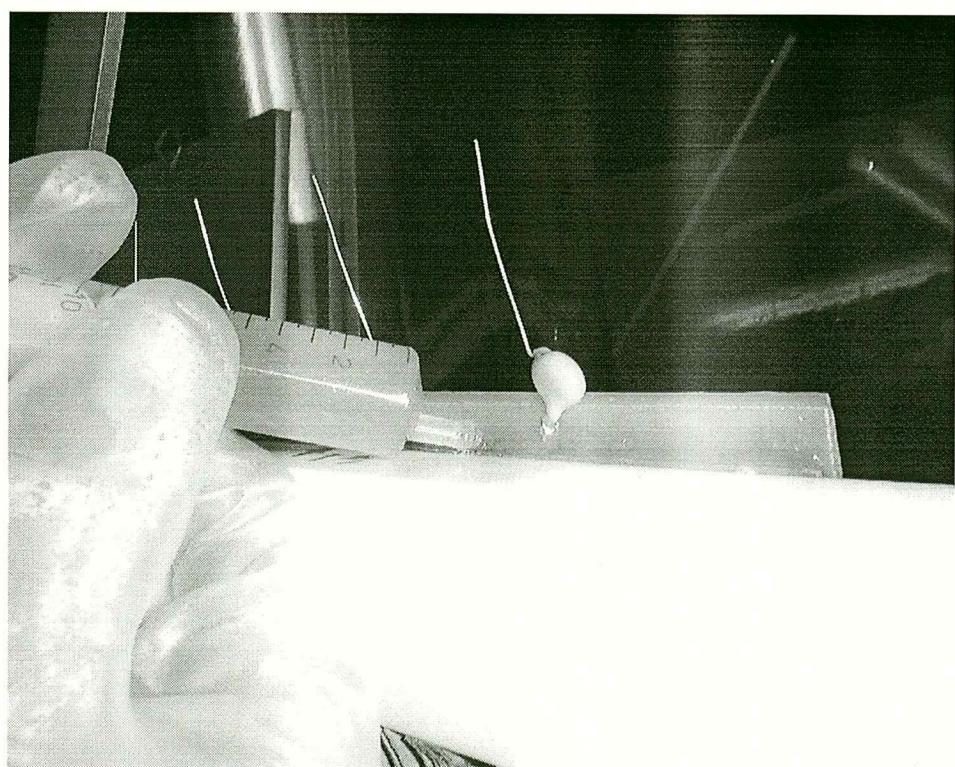


図 108: 注射器によるアラルダイト塗布作業

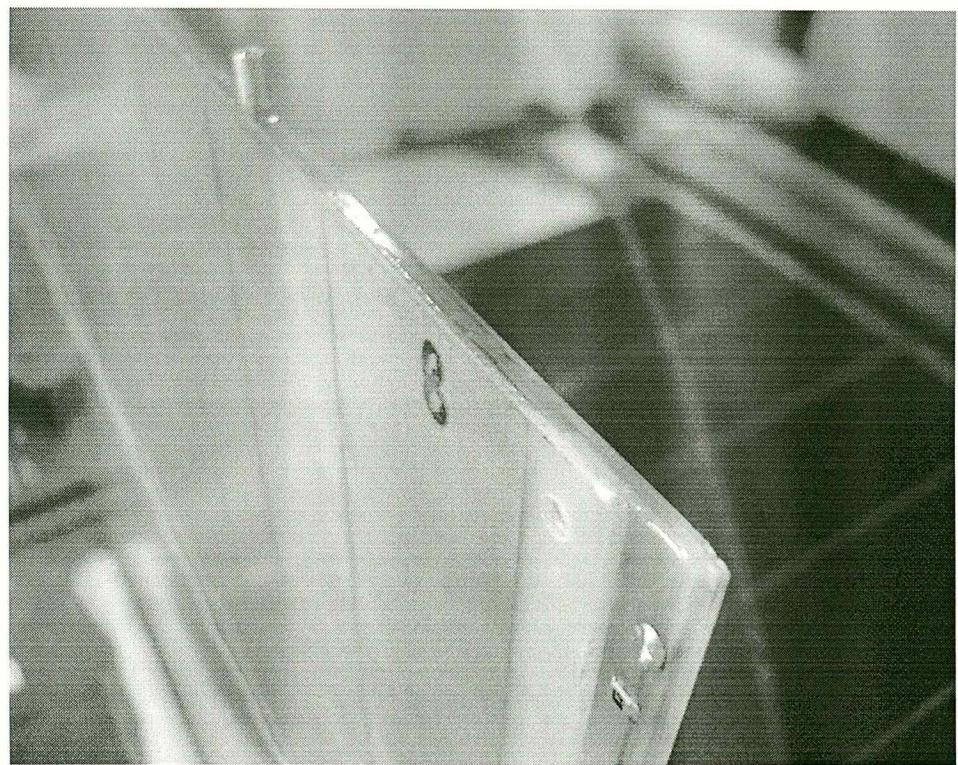


図 109: ガスシール後の表面の状態

## A.21 ダブレットの接着

1. ガス系を独立な 2 系統なものにする

2. テスト: 真空ポンプでチェンバー下面の平面性を出す

ガスシールを終えたハニカムの付いていないチェンバーを定盤に置きチェンバー下面の平面性を出すために、下面を減圧する。真空ポンプを止める

3. テスト: バギングフィルムをかぶせる前の諸準備

バギングフィルムがキャパシターを押しつぶさないように、カバーを付ける。チェンバーの周りに両面テープを使ってアルミプロファイルを固定する。二つのガス系のうちの一系統をチェンバーにつなぐ。バギングフィルムが傷つかないようにスポンジを置く。

4. テスト: バギングフィルムをかぶせゲージ圧 720mmHg なるように真空ポンプで引く

5. テスト: ガス系を調節し約 6mb の内圧をかける

流量を調節しながら、定規を使い平面性をチェックする。この時の流量と内圧は記録しておく。

6. テスト: バギングフィルムを外す

7. テスト: ピンで位置を合わせながらハニカム付きチェンバーをのせる

もしピンがうまくささらなければ、穴を調整する。上手くのせることができたら、ストリップに読み出ボード取り付けのためのハンダ付け可能なスペースがあるかチェックする。もしなければ、ハニカム外枠を削りスペースを作る。薄ハニカムをのせる。薄ハニカムはチェンバーのほぼ中央にのせ、のせた位置はけがいておくとよい。

8. テスト: バギングフィルムをかぶせる前の諸準備

アルミプロファイルの高さをかせぐために、治具は二段重ねにしてプロファイルを固定する。二つのチェンバーにそれぞれガス系をつなぐ。バギングフィルムをかぶせ針金を数本差し込む。バギングフィルムの四隅に鉛ブロックをおく。

9. テスト: バギングフィルムをかぶせゲージ圧 720mmHg なるように真空ポンプで引く  
ゲージ圧 720mmHg になるように真空ポンプで引く。ハニカムなしチェンバーには先ほどと同じ内圧、流量で空気を流す。

10. テスト:内圧、流量を調節しながらハニカム付きチェンバーの平面性をとる  
このときの流量と内圧は記録しておく。
11. テスト:約 30 分おいて、システムの安定性を確認する  
問題なければ真空ポンプをオフにし、バギングフィルム、ハニカム付きチェンバーを外す。
12. 接着の準備  
アルコールで接着面を拭く。接着剤は（A）アラルダイト（チバガイギー、型番 2011）（B）缶入りアラルダイト（主剤 AW106 + 硬化剤 H.V953U）250 g を適当にイソプロピルアルコールで薄めたもの、の二つを用いる。ハニカム付きチェンバーの外枠に（A）をぬる。ハニカム付きチェンバーのハニカム、ハニカムなしチェンバーのストリップ面に（B）をぬる。
13. 本接着:ピンで位置を合わせながらハニカム付きチェンバーをのせる  
13 と同様に接着剤を用意する。薄ハニカムの外枠に（A）をぬる。薄ハニカム、ダブルエットのグランド面に（B）をぬる。
14. 本接着:薄ハニカムをけがき線にあわせてのせる
15. 本接着:バギングフィルムをかぶせる前の諸準備  
ガス口にガス系を接続する。バギングフィルムをかぶせ、針金を数本差し込む。バギングフィルムの四隅に鉛ブロックをおく。
16. 本接着:バギングフィルムをかぶせゲージ圧 720mmHg なるように真空ポンプで引く  
ゲージ圧が 720mmHg になるように、針金とレギュレーターで調節する。
17. 本接着:内圧、流量を調節しながらハニカム付きチェンバーの平面性をとる  
二つのチェンバーそれぞれに、10 で記録した内圧と流量で空気を流す。ガス流量値が一定になるまで待つ。定規で平面性をチェックする。
18. 本接着:約 30 分おいて、システムの安定性を確認する
19. 本接着:接着剤を硬化させる  
問題なければ、キュアタイムとして 12 時間待つ。



図 110: 圧力システム



図 111: ハニカムの付いていないチェンバーに接着剤の塗布

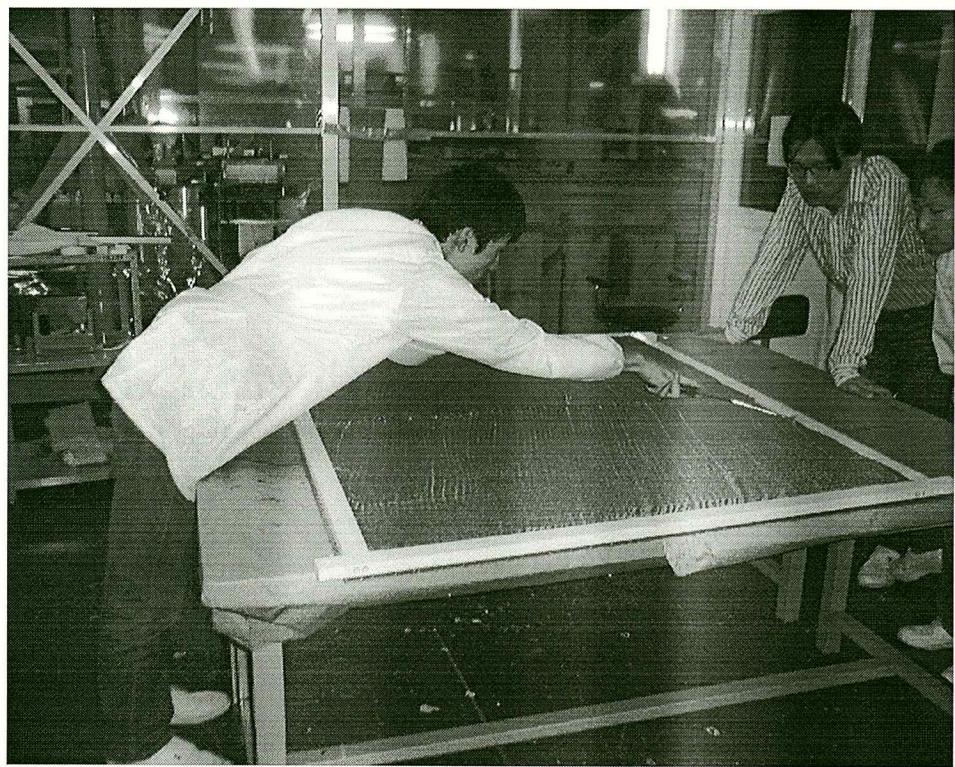


図 112: ハニカム付きチェンバーに接着剤の塗布。図 111 に重ねる。



図 113: バギングフィルムをかぶせ減圧したときチェンバー内に内圧をかけチェンバーの平面性をとる。

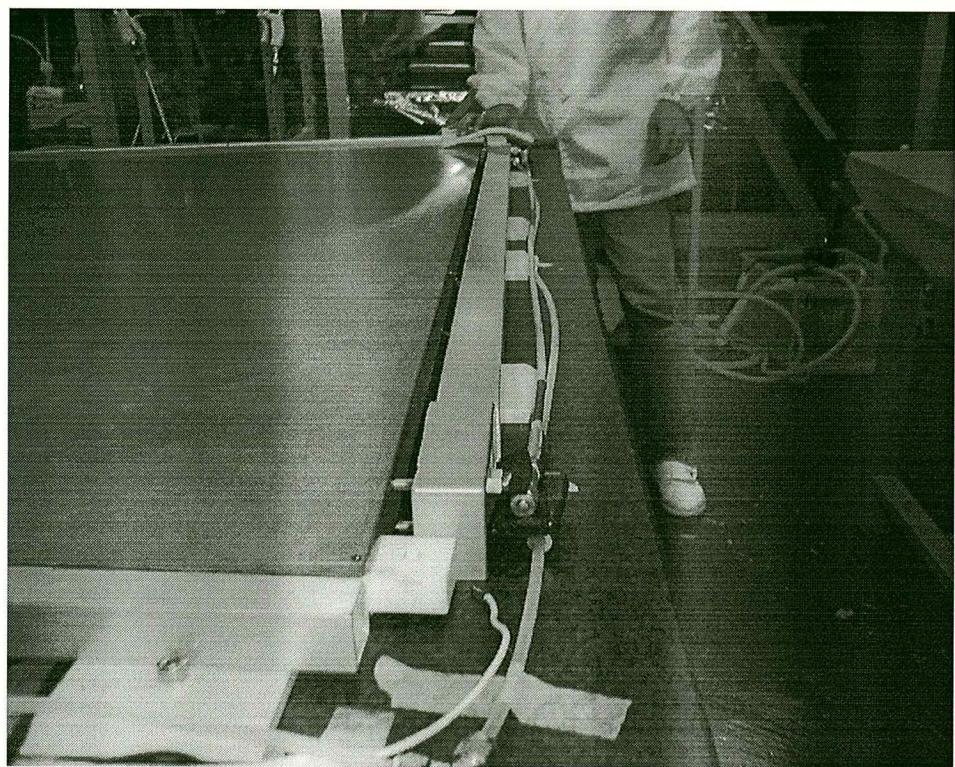


図 114: バギングフィルムがガス口を押しつぶさないように、カバーを付ける。



図 115: 平面性の確認。うまくいったら 薄ハニカム接着にはいる。



図 116: 2枚重ねになったチェンバーに接着剤の塗布。



図 117: 薄ハニカムに接着剤の塗布。これを図 116 に重ねる。

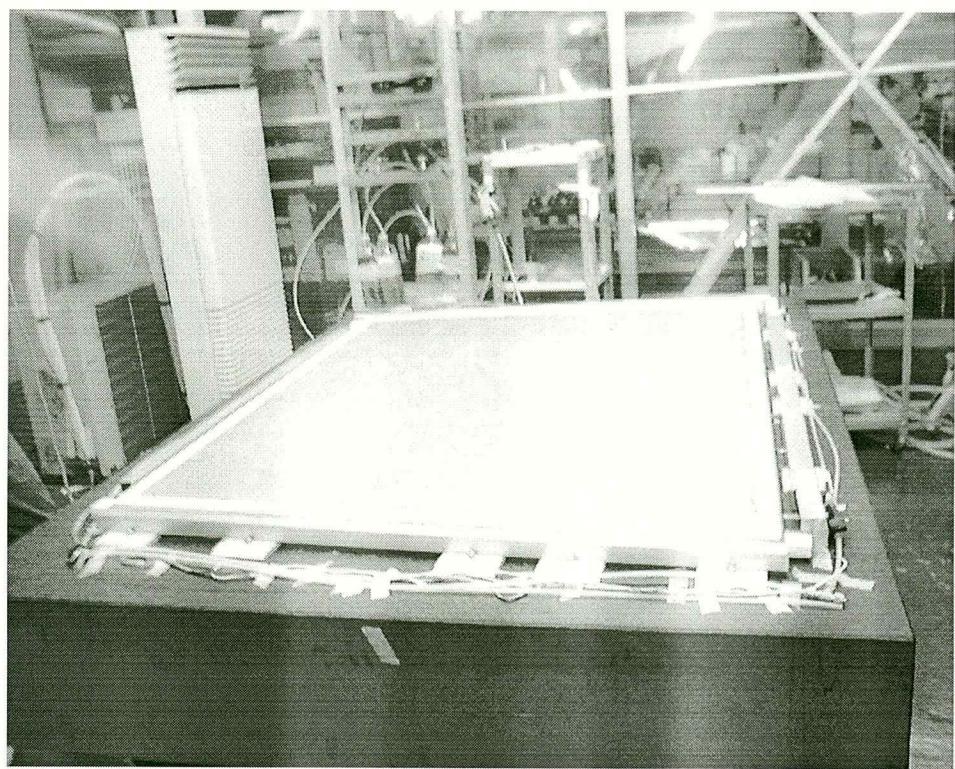


図 118: ダブレット接着時。

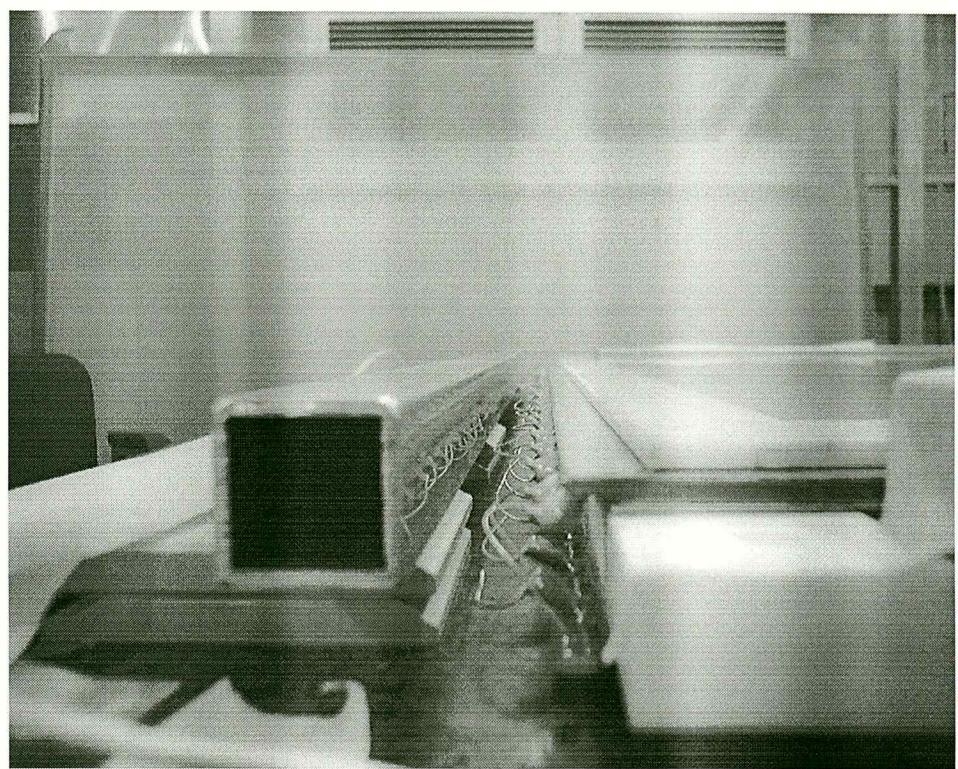


図 119: ダブレット接着時の断面。左側のアルミパイプはコンデンサー保護のために置かれている。

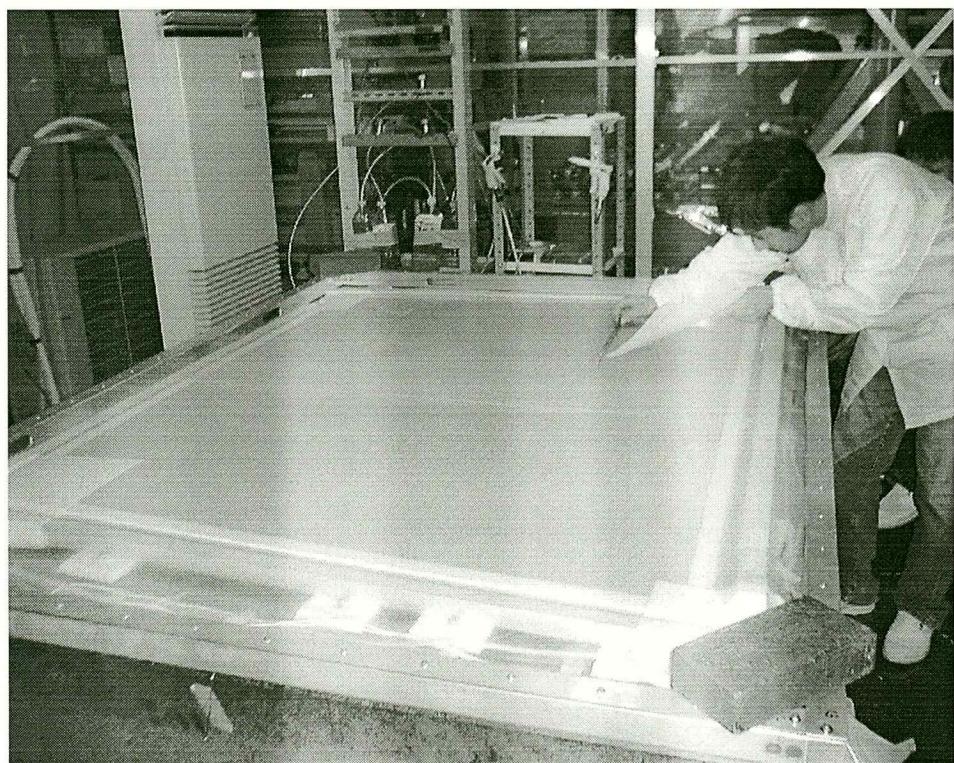


図 120: 平面性の確認。

## A.22 二枚目の外側ハニカム接着

1. 行程 21 でできたダブレットを裏返す

2. 薄ハニカムをのせて、位置を決めけがく

3. テスト:バギングフィルムをかぶせる前の諸準備

アルミプロファイルの高さをかせぐために、治具は二段重ねにしてプロファイルを固定する。二つのチェンバーにそれぞれガス系をつなぐ。バギングフィルムをかぶせ針金を数本差し込む。バギングフィルムの四隅に鉛ブロックをおく。ゲージ圧 720mmHg になるように真空ポンプで引く。

4. テスト:ガス系を調節し約 6mb の内圧をかける

二枚のチェンバーにそれぞれ空気をながし内圧をかける。定規で平面性をチェックする。

5. テスト:バギングフィルムを外す

6. 接着の準備

接着剤は（A）アラルダイト（チバガイギー、型番 2011）（B）缶入りアラルダイト（主剤 AW106 + 硬化剤 H.V953U）250 g を適当にイソプロピルアルコールで薄めたもの、の二つを用いる。薄ハニカムの外枠に（A）をぬる。薄ハニカム、ダブルットのグランド面に（B）をぬる。

7. 本接着:バギングフィルムをかぶせる前の諸準備

バギングフィルムをかぶせ、針金を数本差し込む。バギングフィルムの四隅に鉛ブロックをおく

8. 本接着:バギングフィルムをかぶせゲージ圧 720mmHg なるように真空ポンプで引く  
ゲージ圧が 720mmHg になるように、針金とレギュレーターで調節する。

9. 本接着:内圧、流量を調節しながらハニカム付きチェンバーの平面性をとる

二つのチェンバーそれぞれに、8,13 で記録した内圧と流量で空気を流す。ガス流量値が一定になるまで待つ。定規で平面性をチェックする。

10. 本接着:約 30 分おいて、システムの安定性を確認する

11. 本接着:接着剤を硬化させる

問題なければ、キュアタイムとして12時間待つ。

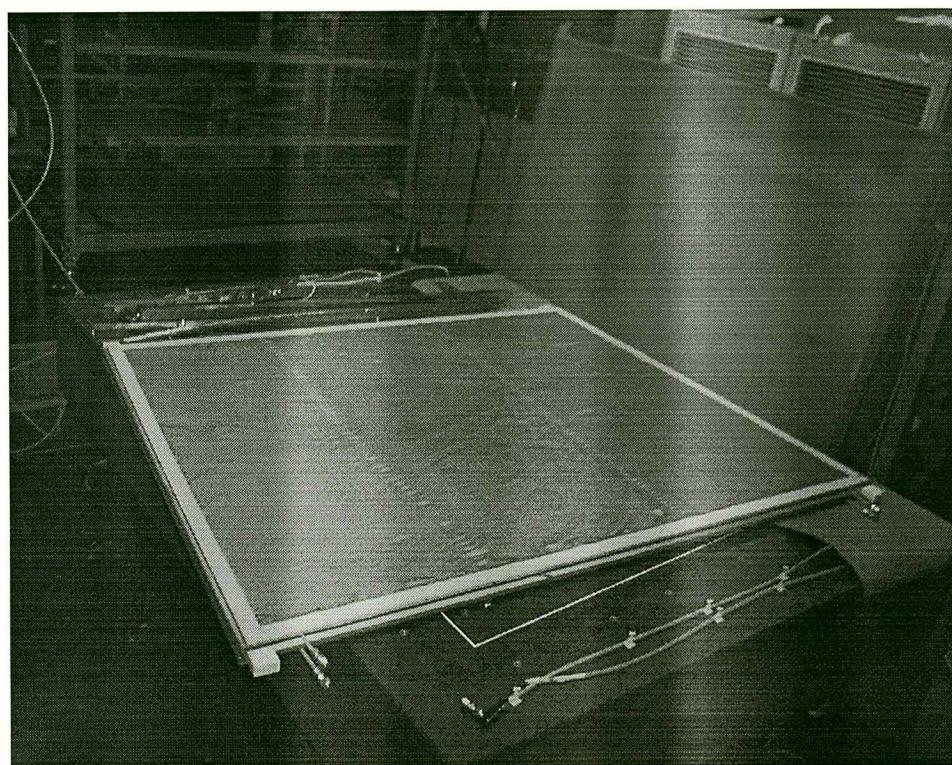


図 121: ダブルエット TGC 本体部分が完成

## A.23 アダプター ボード 及び H.V コネクター の取り付け

### 1. 取り付け前の注意

アダプター ボード を取り付けるのに邪魔になるようなアラルダイトの固まりがあれば、それを除去する。アダプター ボード の信号線パターンとキャパシター、ストリップの位置関係を上手くあわせて、ボード の余分な部分を切断する。

### 2. 33 ピン フラット コネクター をアダプター ボード にハンダ付けする

この時、取り付けられるアンプ（ASD ボード）の信号線とグラウンド線の順番を考慮する。ハンダ付けした後はイソプロパノールでヤニを良く拭き取る。

### 3. ワイヤー読み出し用のアダプター ボード だけキャパシター をこれにハンダ付けする

### 4. グラウンド コンタクト テープ を チェンバー 外側のグラウンド面 にハンダ付けする

### 5. ストリップ 側アダプター ボード の取り付け（導線を用いる）

アダプター ボード のグラウンドの面と チェンバー のグラウンドの面が同一平面上にくるように、ボード取り付けの位置を調節する。導線を用いて、ストリップとボードのパターンをハンダ付けによってつなぐ。

### 6. ワイヤー側アダプター ボード の取り付け（キャパシターを持ちいる）

キャパシターとボードのパターンをハンダ付けする。

### 7. ストリップ 側のグラウンドの接続

銅テープを用いて、ボードのグラウンドと チェンバー のグラウンドをハンダ付けでつなぐ。

### 8. ワイヤー側のグラウンドの接続

先ず、ボードと チェンバー のグラウンド面の境にカプトンテープを（グラウンド側から）張り、H.V ラインからの放電を防ぐ。次にそのカプトンテープをまたぐように、上から銅テープをわたして、ハンダ付けでグラウンド同士をつなぐ。

### 9. H.V コネクター の取り付け

H.V コネクター を作る。H.V コネクターと H.V ラインをハンダ付けする。

### 10. アダプター ボード をアラルダイト で接着

アダプターボードの仮止め。ボードとチェンバーの間からアラルダイトがもれないように、グラウンド面側からマスキングし、信号線側の空いたところを数箇所アラルダイト（ラピッド）で接着する。アラルダイト 2011 をボードとチェンバーの間に塗り、ボードを固定する。放電を防ぐためにボードの HV 部分にも塗る。ボードの強度を高めるために、上下 2 枚のボードの間にアクリルの支柱をアラルダイトで固定する。この時、できるだけこの支柱はボードのパターンの上に乗らないようにする。

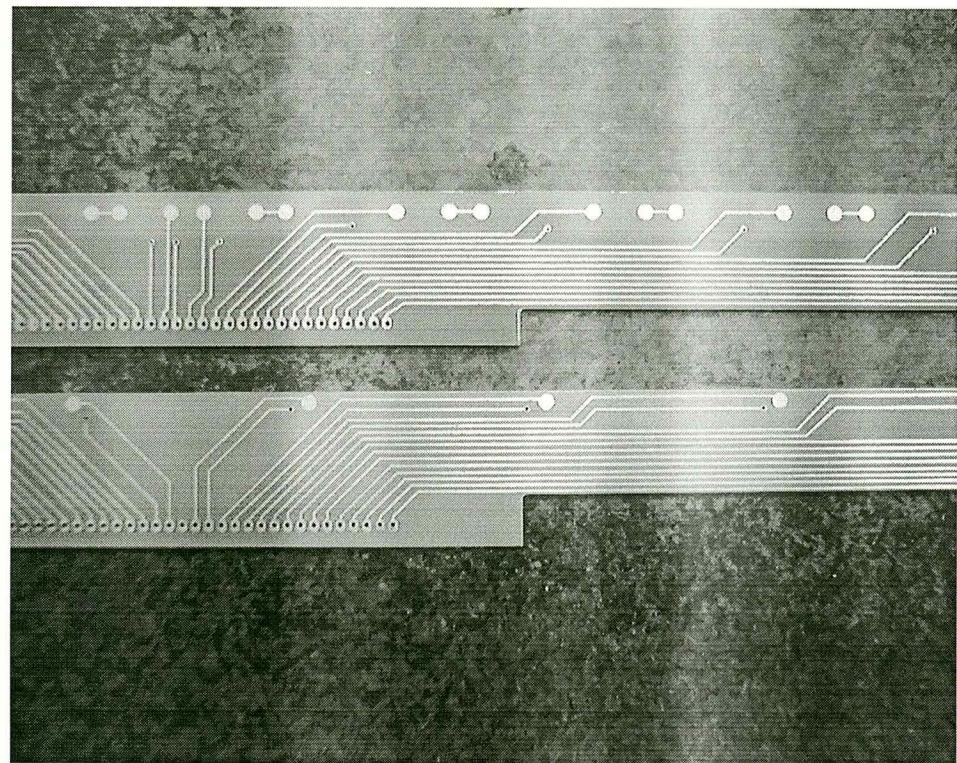


図 122: アダプターボード

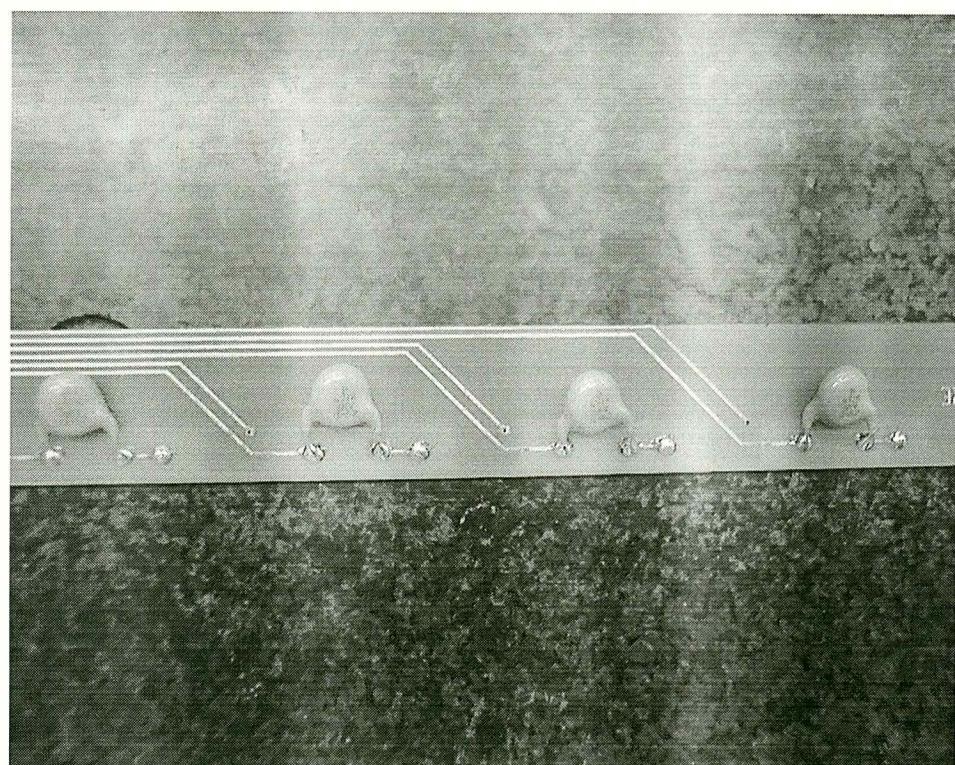


図 123: ワイヤー読み出し用のアダプターボードだけキャパシターをハンダ付けする。

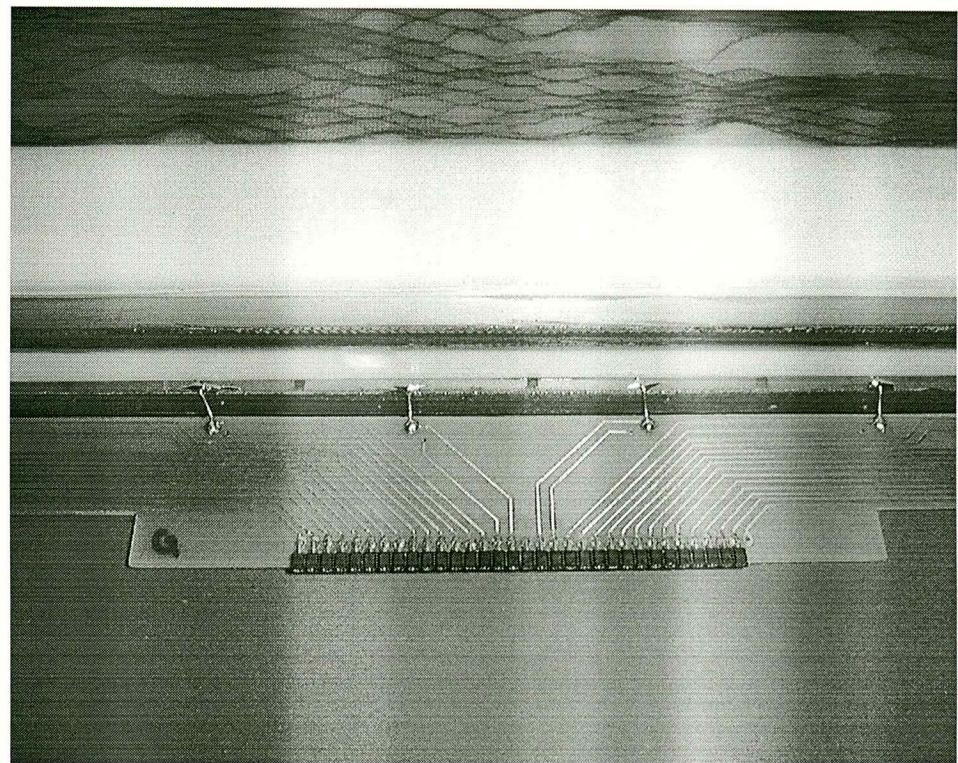


図 124: 導線を用いて、ストリップとボードのパターンをハンダ付けによってつなぐ。

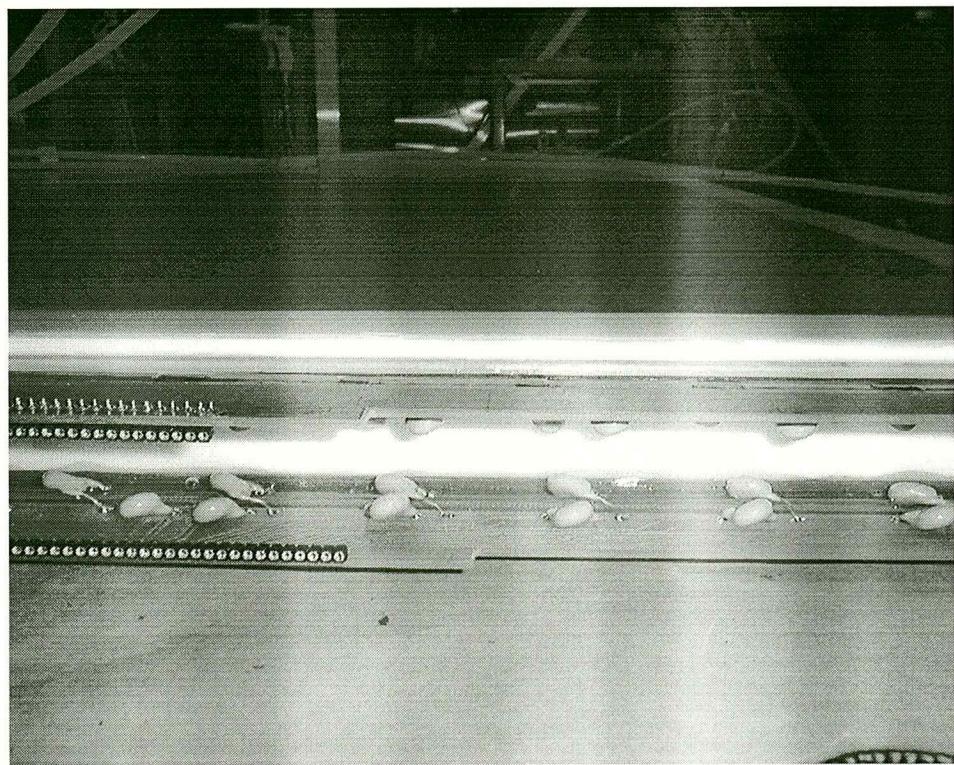


図 125: ワイヤー側アダプター板を取り付けた状態。



図 126: ストリップ側アダプター板を取り付けた状態。このとき銅テープ（グラウンドコンタクトテープ）は外側にくるように注意する。

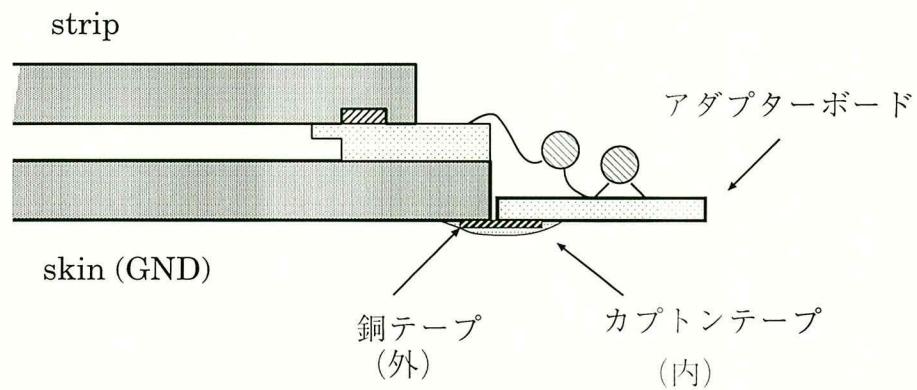


図 127: グラウンドの接続図。

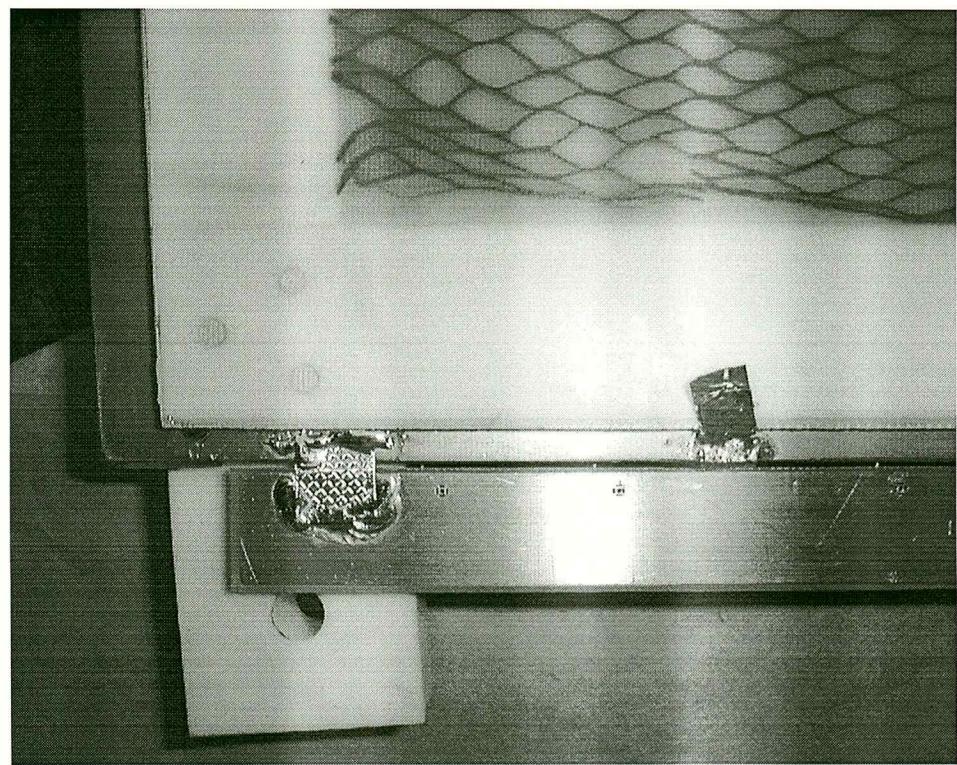


図 128: グラウンドの接続。(カプトンテープはまだはっていない)

## A.24 シールド

### 1. シールド板の加工

チェンバー側面を覆うための銅板を切り出す。読み出しボードがささる部分はくりぬく。シールドする時に内側となる面に、HV部分があるのでカプトンテープをはる。

### 2. シールド板をハンダ付け

銅板をチェンバー GND 面にハンダ付けして固定する。

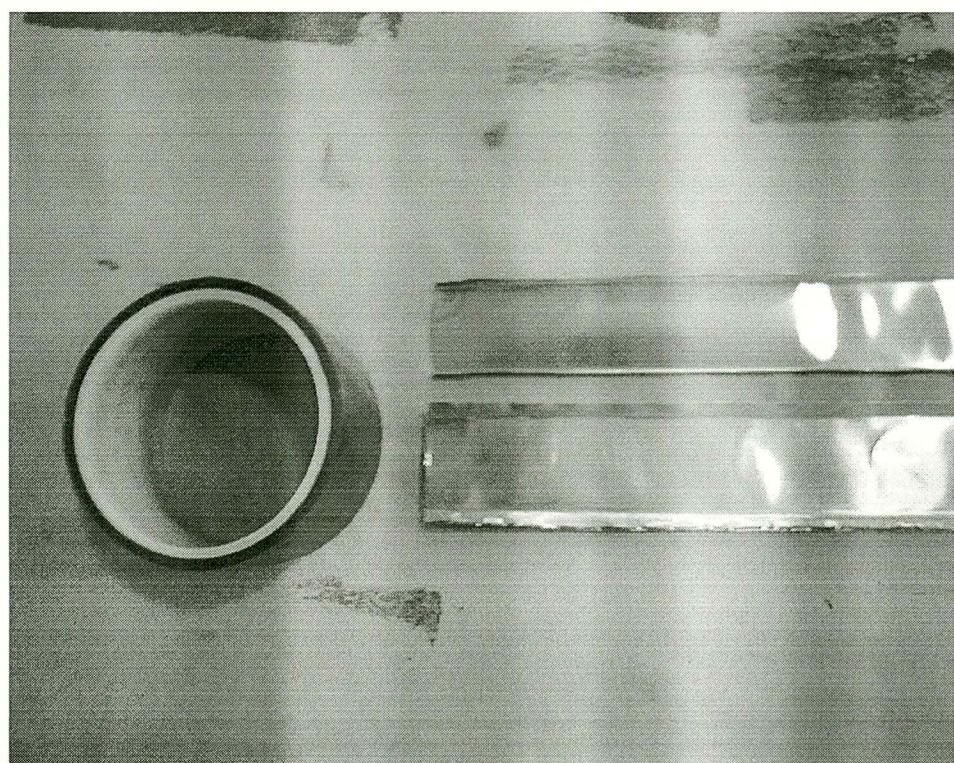


図 129: シールド板の加工

## 表 目 次

1	ミューオン検出器に対するバックグラウンドレート ( $1.44 <  \eta  < 2.3$ )。 . . . .	10
2	TGC の基本パラメーター . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . .	19

## 図 目 次

1	Higgs 粒子の生成断面積	4
2	Higgs 粒子発見ポテンシャル	5
3	Higgs 粒子の生成	5
4	Higgs 粒子の Branching Ratio	6
5	$m_{Higgs} = 130,150,170\text{GeV}$ の $H \rightarrow 4 - \text{lepton}$ を再構成したときのバックグラウンド上の質量分布 (データは $30\text{fb}^{-1}$ )	7
6	ATLAS 測定器	8
7	ミューオンスペクトロメーター	9
8	ミューオン検出器の配置	9
9	アルゴン+エタンのドリフト速度	12
10	$\text{CO}_2 + n\text{-pentane}$ のドリフト速度	12
11	紫外線の吸収断面積	13
12	doublet の断面図	14
13	カソード、アノード読みだし	15
14	ワイヤーサポート、ボタン型サポート	16
15	ワイヤーサポート、ボタン型サポート位置の座標	17
16	doublet とその断面図	18
17	anode-cathode 間の距離を変化させたときの pulse height の変化	20
18	カーボン面抵抗値の違いとクロストーク	24
19	カーボン面抵抗値 $1M\Omega/\text{square}$ におけるクロストーク	25
20	doublet 断面図	27
21	チェンバーの接着工程図	28
22	日本が担当する TGC の配置	29
23	M3area	30
24	日本で量産される TGC の型と数	31
25	検査ステーション	33
26	検査ステーションの構成	34
27	セットアップの断面図 (Strip 側からみている)	35
28	セットアップを上から見た図	36
29	セットアップの構成	37
30	TGC ガス供給システム	38
31	Drift Tube の断面図	39
32	トラッキング方法の説明図 1	41
33	トラッキング方法の説明図 2	42
34	x-t relation	43
35	関数の係数値と fit 回数の関係	44
36	resolution の説明図	45
37	resolution	46

38	Event Display . . . . .	47
39	6本の tube の誤差の 2乗和と event 数の関係 . . . . .	48
40	宇宙線テストのセットアップ . . . . .	50
41	hit position map . . . . .	51
42	projection . . . . .	52
43	ジオメトリーのずれ . . . . .	53
44	hit map . . . . .	54
45	projection . . . . .	55
46	ワイヤーサポート部、ボタン型サポート以外での一様性 . . . . .	56
47	検出効率の数値化 . . . . .	57
48	hit した event 総数 . . . . .	58
49	ワイヤー及びストリップの各々のチャンネルの検出効率 . . . . .	59
50	time jitter(カットなし) . . . . .	61
51	time jitter(カットなし) . . . . .	62
52	time jitter(入射角度 10 度以下カット) . . . . .	63
53	4種類のエッチングパターン付きスペーサーフレーム。 . . . . .	67
54	板、フレーム、ハニカム。 . . . . .	67
55	電動ドリルによるスペーサーフレームの穴あけ作業 . . . . .	69
56	検出効率の数値化 . . . . .	69
57	穴のあいたスペーサーフレームに合わせて板に穴をあけていく . . . . .	70
58	板を重ねて穴をあけていく . . . . .	70
59	ハニカム外枠の製作作業 . . . . .	71
60	ハニカム外枠の穴あけ（位置決め） . . . . .	71
61	マスキングテープ張り . . . . .	74
62	マスキングテープを張った状態 . . . . .	74
63	ガスリターン部におけるマスキングの様子 . . . . .	75
64	カーボン塗布の様子 . . . . .	77
65	カーボン面磨き . . . . .	78
66	面抵抗測定 . . . . .	79
67	接着されたグラウンドテープ。（下の FR4 パーツは後に接着することになる） . . . . .	79
68	ハニカム外枠、ハニカムへの接着剤の塗布 . . . . .	81
69	FR 4 板にハニカム外枠を接着 . . . . .	81
70	FR 4 板にハニカムを接着 . . . . .	82
71	ハニカム接着 . . . . .	82
72	ハニカムが縮まないようにマスキングテープでとめる . . . . .	83
73	アラルダイトがバギングフィルムに付着しないようラップをかぶせる . . . . .	83
74	平面性を出すために FR4 板をその上にのせる . . . . .	84
75	バギングフィルムをかぶせ、減圧する . . . . .	84
76	平面性の確認 . . . . .	85

77	アラルダイトが斜線の部分に漏れると放電の原因になる . . . . .	87
78	アルミ治具を FR4 板にのせる . . . . .	88
79	カーボン削り機によるボタン型サポート部分のカーボン除去。 . . . . .	88
80	ハニカム付き Strip 板の接着のときには 周囲に設置しているアルミプロファイルによって減圧時の変形を防ぐ . . . . .	89
81	バギングフィルムをかぶせ減圧 . . . . .	89
82	プラスチックハンマーで軽くたたき、パーツからはみでたアラルダイトとアルミ治具を分離 . . . . .	91
83	アルミジグの取り外し . . . . .	91
84	接着されたパーツ . . . . .	92
85	ガスリターン部分 . . . . .	92
86	エンドフレーム部分 . . . . .	93
87	水おけ、ポンプ、水受け用すのこ(左上) . . . . .	94
88	ワイヤー巻器上で位置決め用ジグを取り付けた状態 . . . . .	98
89	両面テープの取り付け作業 . . . . .	98
90	ワイヤー巻器動作中の様子。(右側にあるのがワイヤー送り出し機) . . . . .	99
91	ハンダ付け作業の様子 . . . . .	101
92	Sn+Zn ハンダによってハンダ付けされた状態 . . . . .	101
93	メスによるワイヤーの切断 . . . . .	102
94	水洗い作業の様子。(ハンダ部分を重点的に洗う) . . . . .	104
95	定盤上に置いた状態のワイヤー付き FR4 板。(ワイヤーの張力による板の変形が確認できる) . . . . .	106
96	ワイヤー付き FR4 板がジグで固定された状態 . . . . .	106
97	H.V テスト . . . . .	108
98	圧力システム . . . . .	109
99	定盤の表面には碁盤状にみぞがあり、真空ポンプでひいたときチェンバー下面の平面性をだす . . . . .	109
100	アラルダイト塗布後のワイヤー付き FR4 板。角の部分に位置決め用のピンが既に挿入されている . . . . .	111
101	接着剤塗布作業 . . . . .	111
102	シリカゲルを使って乾燥させた空気を送りこむ . . . . .	112
103	アルミ板をのせる . . . . .	112
104	真空ポンプで減圧した時にバギングフィルムが傷つかないよう、角にスポーツジをおく . . . . .	113
105	バギングフィルムをかぶせる . . . . .	113
106	定盤とバギングフィルムの間に針金を 3, 4 本刺して置く . . . . .	114
107	高圧コンデンサーをハンダ付けした状態 . . . . .	115
108	注射器によるアラルダイト塗布作業 . . . . .	117
109	ガスシール後の表面の状態 . . . . .	117
110	圧力システム . . . . .	120

111	ハニカムの付いていないチェンバーに接着剤の塗布	120
112	ハニカム付きチェンバーに接着剤の塗布。図 111 に重ねる。	121
113	バギングフィルムをかぶせ減圧したときチェンバー内に内圧をかけチェンバーの平面性をとる。	121
114	バギングフィルムがガス口を押しつぶさないように、カバーを付ける。	122
115	平面性の確認。うまくいったら 薄ハニカム接着にはいる。	122
116	2枚重ねになったチェンバーに接着剤の塗布。	123
117	薄ハニカムに接着剤の塗布。これを図 116 に重ねる。	123
118	ダブルエット接着時。	124
119	ダブルエット接着時の断面。左側のアルミパイプはコンデンサー保護のために置かれている。	124
120	平面性の確認。	125
121	ダブルエット TGC 本体部分が完成	127
122	アダプターボード	129
123	ワイヤー読み出し用のアダプターボードだけキャパシターをハンダ付けする。	130
124	導線を用いて、ストリップとボードのパターンをハンダ付けによってつなぐ。	130
125	ワイヤー側アダプターボードを取り付けた状態。	131
126	ストリップ側アダプターボードを取り付けた状態。このとき銅テープ（グラウンドコンタクトテープ）は外側にくるように注意する。	131
127	グラウンドの接続図。	132
128	グラウンドの接続。（カプトンテープはまだはっていない）	132
129	シールド板の加工	133

## 参考文献

- [1] ATLAS Technical Proposal,CERN/LHCC/94-43(1994)
- [2] ATLAS Muon Spectrometer Technical Design Report,CERN/LHCC/97-22 (1997)
- [3] ATLAS Letter of Intent,CERN/LHCC/92-4(1992)
- [4] ATLAS homepage, <http://atlasinfo.cern.ch/Atlas/Welcome.html>
- [5] 尼子勝哉「大型陽子・陽子衝突型加速器(LHC)計画とその物理」：日本物理学会誌 Vol.52,No.7(1997)508-516
- [6] Frank E. TAYLOR ,*A MODEL OF THE LIMITED STREAMAER MECHANISM*,Nucl.Instr.and Meth.A289(1990)283-293
- [7] D.Lazic et al. ,Drift velocity in n-pentane mixtures and its influence on timing properties of thin gap chambers,Nucl.Instr.and Meth.A289(1990)283-293
- [8] 高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所 山内一夫「標準 Higgs 粒子の探索」ATLAS-Japan workshop NARUTO(1997)
- [9] A.Ferrari and P.R.Sala,*Background ra*
- [10] A.Ferrari and P.R.Sala,Background rates in the muon tes in the muon system:recent results and the effect of the tungsten plug,*ATLAS Internal Note Muon-No-90(1995)*
- [11] H.Fukui et al.,Results of An Ageing Test of Thin Gap Chamber for ATLAS Endcap Muon Trigger,(1997) submitted to *ATLAS Muon Note*
- [12] H.Fukui et al.,Studies on ageing effect and rate dependence of Thin Gap Chamber,(1998)
- [13] Glenn F.Knoll 著 日刊工業新聞者、「放射線計測ハンドブック」
- [14] F.Sauli,PRINCIPLES OF OPERATION OF MULTIWIRE PROPORTIONAL AND DRIFT CHAMBERS,*CERN Report 77-09(1997)*
- [15] F.Sauli,DRIFT AND DIFFUSION OF ELECTRONS IN GASES:A COMPILATION
- [16] R.I.Schoen,Absorption,ionization and ion-fragmentation cross-section of hydrocarbon vapors under vacuum-ultraviolet radiation, *J.Chem.Phys.* 17 2032(1962)
- [17] 東京大学 三宅正明、修士学位論文「ミューオントリガーチェンバーの動作特性試験」
- [18] 東京大学 吉田光宏、修士学位論文 「ミューオントリガーチェンバーの信号特性の研究とフロントエンドモノリシック IC の開発」

[19] 神戸大学 石脇 史猛、修士学位論文「ATLAS・ $\mu$ 粒子 Trigger 用 Thin Gap Chamber の信号特性に関する研究」

[20] J.A.Kadyk, Wire chamber aging, *Nucl.Inctr.and Meth. A300* (1991)436-479

[21] R.Bouclier at el., Effects of outgassing from some materials on gas chamber ageing, *Nucl.Instr.and Meth.A350*(1994)464-469

## 謝辞

本研究を進めるにあたり、適切かつ親切な御指導をして下さった武田廣教授、野崎光昭教授、藏重久弥助教授、川越清以助教授に深く感謝の意を表します。また、研究を行なうにあたり適切な助言と惜しみない御協力を下さいました神戸大学工学部本間康浩助教授に深く感謝します。

高エネルギー加速器研究機構での研究活動にあたり、様々な助言、御指導を下さいました近藤敬比古教授、岩崎博行助教授、大須賀闘雄助教授、佐々木修助手に深く感謝します。研究活動のみならず研究生活全体においても惜しみない御支援、御協力をしていただいた田中秀治氏、山内一夫氏に心から感謝します。

そして、研究生活を共にし様々な支援をしてくれました福井秀人氏、仁木太一氏、林健一氏、塚原知宏の方々に深くお礼を申し上げます。

