

修士学位論文

TGC(Thin Gap Chamber) の中性子に対する放射線耐性の研究

神戸大学自然科学研究科物理学専攻

喜家村 裕宣

平成 18 年 2 月 10 日

abstract

スイスのジュネーブにある CERN(欧州原子核研究機構)で、2007年より稼動開始予定の大型陽子陽子衝突型加速器(LHC=Large Hadron Collider)の建設が進められている。LHCは重心系で世界最高のエネルギーである 14TeV を誇る陽子陽子衝突型加速器であり、前人未踏のエネルギー領域が実現されるため、特に新粒子の発見には大きな期待が寄せられている。他にもトップクォークの物理やB中間子におけるCP非保存についての研究など様々な研究が行われる。

LHCに設置される検出器のひとつにATLAS検出器がある。ATLAS検出器を用いたATLAS実験では主に、未発見粒子であるHiggs粒子やSUSY粒子の探索が行われる。ATLAS検出器のエンドキャップ部分にミュオンのトリガー検出器として設置されるTGC(Thin Gap Chamber)はKEK(高エネルギー加速器研究機構)で生産され、神戸大学において動作検査が行われた。すでに全数がCERNに送られ、ATLAS検出器へのインストールが始まっている。

ATLAS実験が始まるとTGCは高頻度の、中性子バックグラウンド環境下に置かれることになる。中でも数 MeV ~十数 MeV の中性子の相互作用により放出される陽子、原子核はTGCのガスボリューム内に大きなエネルギーを落とし、MIP(Minimum Ionization Particle)に比べて非常に大きな信号を生成し、TGCの安定動作に悪影響を及ぼす恐れがある。中性子に対するTGCの動作特性の研究は過去にも行われているが、未だ不明な点が多い。よって、ATLAS実験でのTGCに対する中性子の影響を把握するため、TGCの中性子に対する動作特性の研究を行った。中性子源は日本原子力研究所FNS(Fusion Neutronics Source)を用い、TGCに 2.5MeV 及び 14MeV の単色中性子を照射して、TGCの中性子感度、出力電荷量、放電レート、クロストークイベントについての研究を行った。同時に、中性子に対する影響を軽減するような代替ガスの研究として、 CO_2 ベースのガスに加え、 CF_4 ベースのガスを使用して、その中性子に対する耐性の研究も行った。得られた結果から、中性子による信号の特性、TGCの中性子に対する耐性、 CF_4 ベースのガスを使用した際のTGCの動作などについての見解が得られた。また、中性子照射試験の結果に対する評価、理解を得るためにGeant4を用いたTGCへの中性子照射シミュレーションを行った。シミュレーションで取得したデータにより試験の内部構造を知ることが出来、理解を深めることが出来た。

contents

1	Introduction	1
2	LHC 計画	4
3	ATLAS 実験	6
3.1	ATLAS 実験で期待される物理	6
3.1.1	標準模型における Higgs	6
3.1.1.1	Higgs 粒子の生成	6
3.1.1.2	Higgs 粒子の崩壊	6
3.1.1.3	ATLAS の Higgs 粒子発見能力	7
3.1.2	超対称性粒子 (SUSY)	10
3.1.3	超対称性 Higgs 粒子	10
3.1.4	その他の物理	11
3.2	ATLAS 検出器	12
3.2.1	内部飛跡検出器	13
3.2.2	カロリメーター	14
3.2.3	超伝導空芯トロイドマグネット	15
3.2.4	ミュオン検出器	16
3.2.4.1	MDT(Monitored Drift Tube)	17
3.2.4.2	CSC(Cathode Strip Chamber)	18
3.2.4.3	RPC(Resistive Plate Chamber)	19
3.2.4.4	TGC(Thin Gap Chamber)	20
3.3	ミュオントリガーシステム	21
3.3.1	レベル1 エンドキャップミュオントリガー	21
4	Thin Gap Chamber (TGC)	24
4.1	動作原理	24
4.1.1	ガス増幅と動作モード	24
4.1.2	充填ガス	25
4.2	TGC の構造	27
4.2.1	ASD(Amplifier Shaper Discriminator) Board	29
4.3	中性子の信号による TGC への影響	31
4.3.1	中性子の性質	31
4.3.1.1	中性子の発生	31
4.3.1.2	中性子と物質の相互作用	31
4.3.2	中性子の TGC に対する影響	31
5	中性子照射試験	33
5.1	中性子源	33
5.2	T7 タイプ TGC と小型 TGC	35
5.3	実験セットアップ	36

5.3.1	データ取得セットアップ	37
5.3.1.1	ADC を用いたデータ取得	37
5.3.1.2	TMC を用いたデータ取得	38
5.3.1.3	カレントモニター	39
5.3.1.4	ガス供給システム	40
5.4	実験結果と考察	41
5.4.1	中性子感度	41
5.4.2	出力電荷量	42
5.4.3	放電レート	47
5.4.4	クロストーク	48
5.5	TGC 中性子シミュレーション	52
5.5.1	シミュレーションの概要とセットアップ	52
5.5.2	シミュレーション結果と考察	54
6	まとめと今後	58
6.1	まとめ	58
6.2	今後の予定	60

1 Introduction

現在、スイスのジュネーブにある欧州原子核研究機構 (CERN) において、重心系で世界最高エネルギーである 14TeV を誇る大型陽子陽子衝突型加速器 (LHC) が、2007 年の稼動開始に向けて建設中である。LHC により、これまで踏み入れることの出来なかった TeV 領域に及ぶエネルギー領域が実現され、新しい物理現象の研究が行われる。Higgs 粒子、SUSY 粒子と言った新粒子の発見や、top クォークの物理、B 中間子での CP 非保存の研究などが目的とされている [1]。LHC に設置される検出器の中のひとつである ATLAS 検出器では、主に Higgs 粒子、SUSY 粒子の探索が行われる。Higgs 粒子や SUSY 粒子は直接観測することは出来ず、崩壊の終状態を適確に捉えることが重要になる。しかし、内部構造を持つ陽子同士が重心系で 14TeV のエネルギーで衝突するため、非常に多くの反応過程が許され、非常に大きなバックグラウンドの中から必要な信号を抜き出さなければならない。こういった理由から、Higgs 粒子や SUSY 粒子の崩壊の終状態に現れる粒子の中でも観測、特定が比較的容易である μ 粒子は、Higgs 粒子、SUSY 粒子の発生の証拠を特定するのに必要不可欠である。日本ではこの μ 粒子に注目し、 μ 粒子のトリガーチェンバーである TGC の生産、検査、TGC からの信号読出しのエレクトロニクスの開発を行ってきた [2]。現在は、拠点はすでに CERN に移り、ATLAS 検出器へのインストールが行われている。

ATLAS 実験が始まると TGC は、高頻度の γ 、中性子バックグラウンド環境下に置かれることになる。TGC 設置位置での γ 、中性子バックグラウンドのレートが、FULKA2000 を用いたシミュレーションにより見積もられている [3]。(Fig.1.1、Fig.1.2) こういった環境下で TGC は安定に動作しなければならない。従って、前もってその動作の確認、動作特性の把握を行っておかなければならない。高頻度 γ 線に対する動作テストはすでに行われ、ATLAS 実験で予想される数 kHz の γ 線バックグラウンド環境下で安定して動作することが確認されている [4]。

TGC の中性子感度についてはすでに測定が行われ、 2.5MeV の中性子に対しておよそ 0.048 %、 14MeV の中性子に対しておよそ 0.13 % という結果が得られており [5]、ATLAS 実験では TGC への中性子ヒットレートは数 Hz/cm^2 以下であると見積もられている。しかしこれは、比較的弱い中性子源を用いての測定であり、統計量が少なく、実際の高頻度中性子バックグラウンド環境での動作については不明な点を残す。また、中性子による信号は、MIP (Minimum Ionization Particle) に比べ非常に大きく、放電の頻発やそれによる TGC の早期劣化、大きな信号によりヒットのないチャンネルからも信号が出てしまうクロストーク、それが多チャンネルにわたるマルチヒットなど、TGC の動作に悪影響を及ぼす恐れがある。したがって、ATLAS 環境下に匹敵する高頻度中性子に対する TGC の動作特性を把握しておくことは非常に重要である。

中性子の、TGC の動作への影響の研究には、日本原子力研究所 FNS の大強度単色中性子源を利用し、 2.5MeV 、 14MeV の単色中性子による TGC への中性子照射試験を行った。試験には ATLAS 検出器として実際に使用される TGC で、T7 と呼ばれるタイプの TGC と、小型の TGC を使用し、それらの中性子に対する動作特性の研究を行った。同時に、本番で TGC の動作ガスとして使用される $\text{CO}_2 + \text{n-Pentane}$ に加え、検出器劣化現象の抑制に実績のある CF_4 [6] を混入した $\text{CF}_4 + \text{n-Pentane}$ も使用し、放射線耐性のある代替ガスの研究も行った。取得したデータは

1. 中性子感度
2. 中性子入射時の出力電荷量
3. 中性子入射時の放電レート
4. クロストークイベント発生レート

である。また、Geant4 をもとにしたシミュレーションを行い、この実験を評価するとともに、実験結果への理解も深められた。

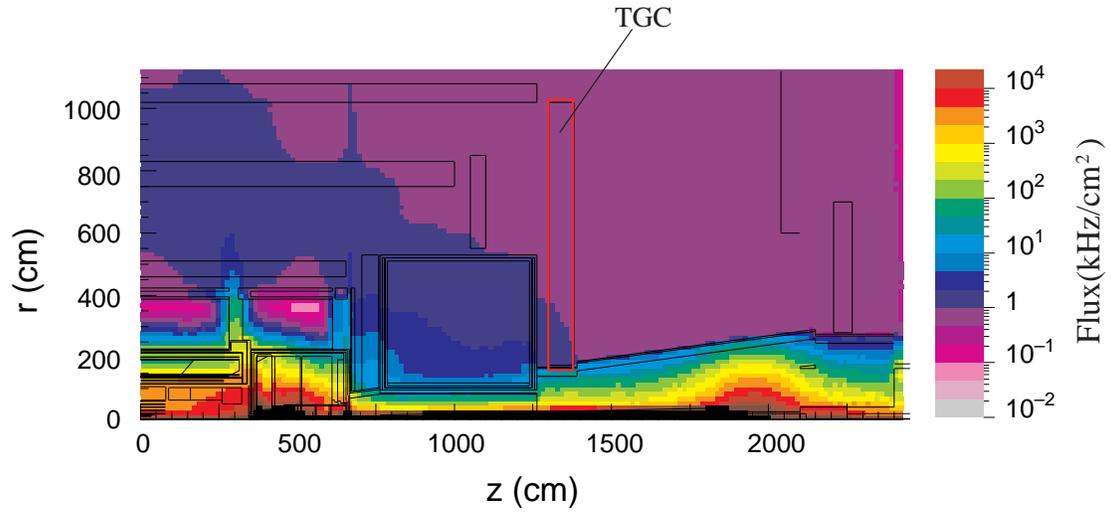


Fig. 1.1: ATLAS 実験ホールの γ 線バックグラウンド Flux のシミュレーション (High Luminosity) [1]

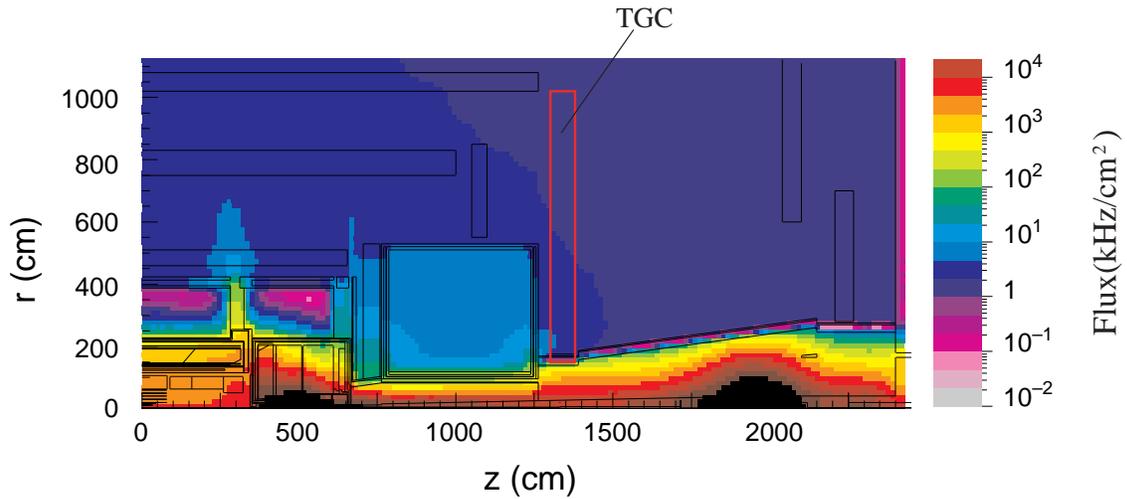


Fig. 1.2: ATLAS 実験ホールの中性子線バックグラウンド Flux のシミュレーション (High Luminosity) [1]

本論文では、2章では LHC 計画について、3章では ATLAS 実験について、4章では TGC について、5章では中性子照射試験について、6章ではまとめと今後の予定を述べる。

2 LHC計画

スイスにある欧州原子核研究機構 (CERN) において、大型陽子陽子衝突型加速器 LHC (Large Hadron Collider) が、2007 年に稼働開始を予定している。LHC 加速器は、重心系のエネルギーにして 14TeV の世界最高エネルギーを持つ円形加速器である。2000 年に停止した大型電子陽電子衝突型加速器 LEP (Large Electron Positron Collider) のトンネル内 (周長約 27km) に現在建設が進められている (Fig. 2.1)。LHC 加速器の主要なパラメータを Table 2.1 に示す。LHC 計画の目的は、標準模型 (Standard Model) の基本粒子である Higgs 粒子の探索や、超対称性粒子の探索、トップクォークの物理、B 中間子での CP 非保存の研究等である。LHC 加速器は、最大の特徴である 14TeV の重心エネルギーと $10^{34}\text{ cm}^{-2}\text{ s}^{-1}$ の高ルミノシティによって、TeV 領域の物理の開拓を可能にしている。陽子陽子衝突型加速器は、電子に比べ陽子の質量が重いので、円形加速器におけるシンクロトロン放射光の損失が小さく、高エネルギーを得るのに適している。反面、陽子は内部構造を持つため、複合粒子同士の非弾性散乱により生成されるジェット等のバックグラウンドが非常に多く、その中から興味のある事象を選別することは困難を伴う。このため、LHC に設置される検出器は、入射粒子数が高頻度な環境に耐え、研究目的の物理事象の選別を可能とするものであることが要請される。

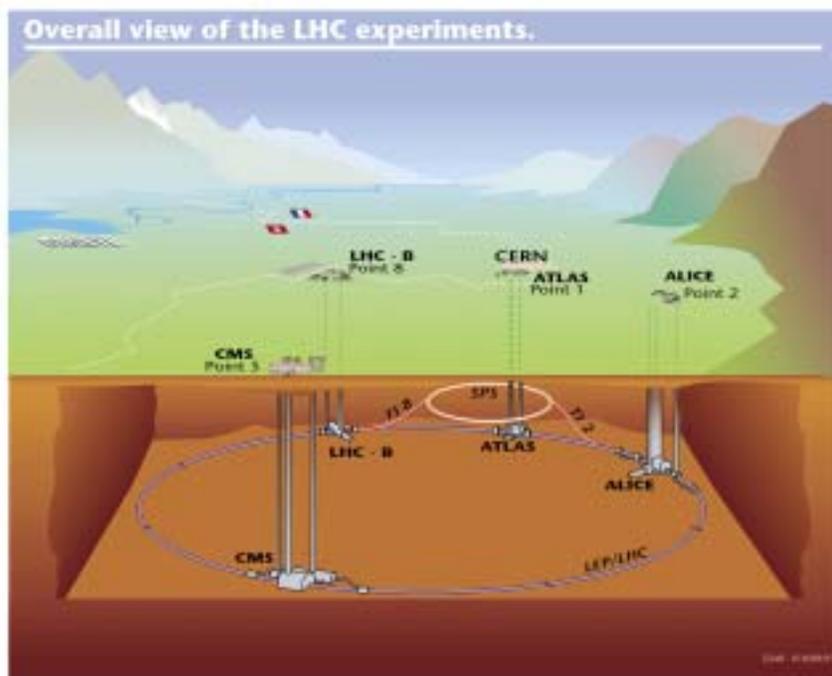


Fig. 2.1: LHC 加速器 [7]

LHC 加速器には 4 つの衝突点があり、それぞれ以下の検出器が設置される。

1. ATLAS (A Troidal LHC ApparatuS)
2. CMS (The Compact Muon Solenoid)(Fig.2.2)
3. ALICE (A Large Ion Collider Experiment)(Fig.2.3)
4. LHC-B(Fig.2.4)

ATLAS 検出器、CMS 検出器は汎用検出器であり、LHC-B は B 中間子の研究に特化したもの、ALICE は重イオン衝突実験を目的とした検出器である。

主リング周長	26,658.87m	バンチ間隔	24.95nsec
入射エネルギー	450GeV	バンチ内陽子数	1.1×10^{11} 個
陽子エネルギー	7.0TeV	バンチ長さ(陽子)	77mm
High Luminosity(7年)	$10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	衝突点でのビーム半径	15.9 μm
Low Luminosity(3年)	$10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	ビーム衝突角度	300 μrad
Luminosity Lifetime	10時間		

Table 2.1: LHC 加速器主要パラメータ [8]

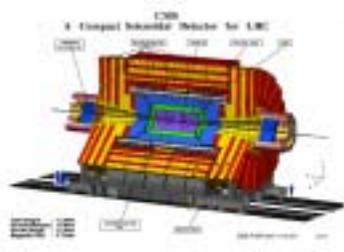


Fig. 2.2: CMS[9]

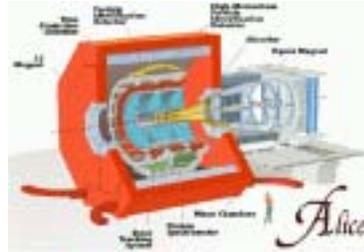


Fig. 2.3: Alice[9]



Fig. 2.4: LHC-B[9]

3 ATLAS 実験

ATLAS 検出器は汎用検出器であり、ATLAS 実験の目的は、標準模型の基本粒子であり、唯一未発見の粒子である Higgs 粒子の探索及び超対称性 (SUSY) 粒子の探索、top クォークの物理、B 中間子での CP 非保存の研究等と多岐に渡っている。LHC が世界最大の高エネルギーを誇る陽子陽子衝突型加速器であることから、中でも特に未発見粒子の探索に大きな期待が寄せられている。

3.1 ATLAS 実験で期待される物理

3.1.1 標準模型における Higgs

電弱相互作用での自発的対称性の破れの機構を説明するためにその存在が必要とされる Higgs 粒子は、質量起源を解明する手がかりと期待されるため、その発見は非常に重要な意味がある。Higgs 粒子自身の質量については、理論的におよそ 1TeV 以下とされている。下限については、これまでに行われた実験により 100GeV 以上とされている。ATLAS 実験では、100GeV 以上 1TeV 以下の全ての質量領域で、標準模型における Higgs 粒子の探索が可能である。

3.1.1.1 Higgs 粒子の生成

Higgs 粒子は質量の重い粒子と結合するため top クォークや W 粒子、Z 粒子のような質量の非常に重い粒子と強く相互作用し、その生成過程としては Fig.3.1 が主となると考えられている。Fig.3.2 に Higgs 粒子の生成断面積を示す。これより $m_{Higgs} = 200GeV$ としたとき、 $10^{34}cm^{-2}s^{-1}$ の高ルミノシティモードで 1 年間運転すると約 20 万イベント生成されると予想出来る。

3.1.1.2 Higgs 粒子の崩壊

Higgs 粒子の崩壊モードは、その質量により異なる。Fig.3.3 に各崩壊モードの質量に対する分岐比をプロットしたものを示す。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 の質量領域は、次の 4 タイプである。

(1) $100GeV < m_H < 120GeV$

$$H \rightarrow \gamma\gamma \tag{3.1}$$

この領域での 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。それゆえ、分岐比が 10^{-3} と小さいが、 $\gamma\gamma$ への崩壊過程を用いる。この測定にはエネルギー、角度分解能の優れた電磁カロリメータが要求される。

(2) $130GeV < m_H < 2m_Z$

$$H \rightarrow ZZ^* \rightarrow l^+l^-l^+l^- \tag{3.2}$$

この質量領域に入ると、 W^\pm 、Z の質量を超えるため、 WW^* 、 ZZ^* の崩壊モードが始まる。この時のバックグラウンドとして、 $pp \rightarrow ZZ^*/Z\gamma^*$ 、 $Zb\bar{b} \rightarrow 4lepton$ などがあるが、1 組の l^+l^- 対の横運動量 (p_T) に対して制限をつけ、さらにもう 1 組の l^+l^- 対の不変質量に対し制約を付ける事により、これらのバックグラウンドを除去することが出来る。

(3) $2m_Z < m_H < 700\text{GeV}$

$$H \rightarrow ZZ \rightarrow l^+l^-l^+l^- \quad (3.3)$$

この崩壊モードは”Gold Plated Channel”と呼ばれ、分岐比も大きく Z-mass constraint (2組の *lepton* 対の不変質量 $m_{l\bar{l}} \sim m_Z$) によるイベントの取捨選択が有効であるため、最も信頼性の高いモードであり、比較的きれいな信号が得られる。 $m_H = 200\text{GeV}$ としたとき、高ルミノシティで1年間運転して (100fb^{-1})100events 程度が期待されている。

(4) $700\text{GeV} < m_H < 1\text{TeV}$

$$H \rightarrow ZZ \rightarrow l^+l^-\nu\nu, H \rightarrow WW \rightarrow l\nu jj \quad (3.4)$$

この領域になると、より分岐比の高い (*4lepton* モードの約 150 倍) これらのモードを用い統計量を稼ぐ必要がある。これらのイベントは、前方にクォークによる2つのジェットが生じるのが特徴であり、これをタグする事により同定が可能である。

3.1.1.3 ATLAS の Higgs 粒子発見能力

LHC を高ルミノシティ - で約1年運転したとき、ATLAS 検出器において Higgs 粒子が発見される能力を Fig.3.4 に示す。このグラフの縦軸は Higgs を発見する能力を現し、予想される Higgs のイベント数をバックグラウンドのイベント数の平方根で割ったものである。縦軸の値が高い程、Higgs のイベントがあったときに、それがバックグラウンドでは説明できないことを示し、 100fb^{-1} あれば ATLAS 実験において Higgs 粒子を 10σ 以上の確かさで発見できる事を示している。また、ATLAS 検出器は、Higgs 粒子の質量の上限値である 1TeV まで探索出来ることを示しており、非常に優れた検出器である事を示している。

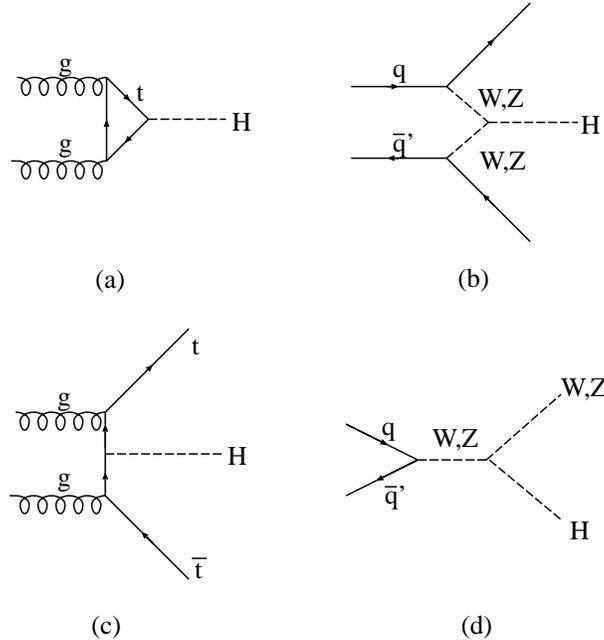


Fig. 3.1: Higgs 生成の代表的な生成過程 : (a)gluon-gluon 融合 (gluon fusion)、(b)WW/ZZ 融合 (Vector Boson Fusion)、(c) $t\bar{t}H$ 生成過程 ($t\bar{t}H$ production)、(d)W/Z 粒子随伴生成 (W/Z associate production)

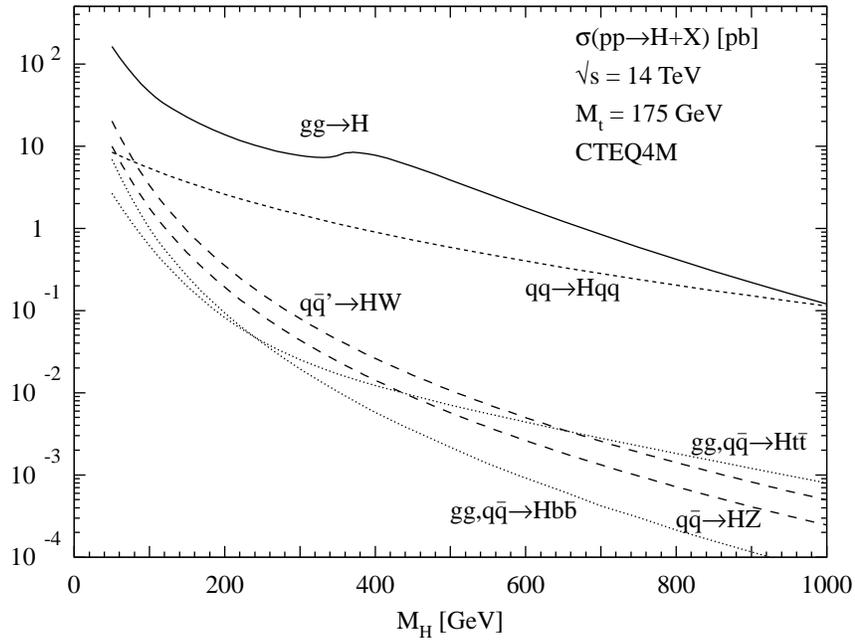


Fig. 3.2: Higgs 粒子の生成断面積

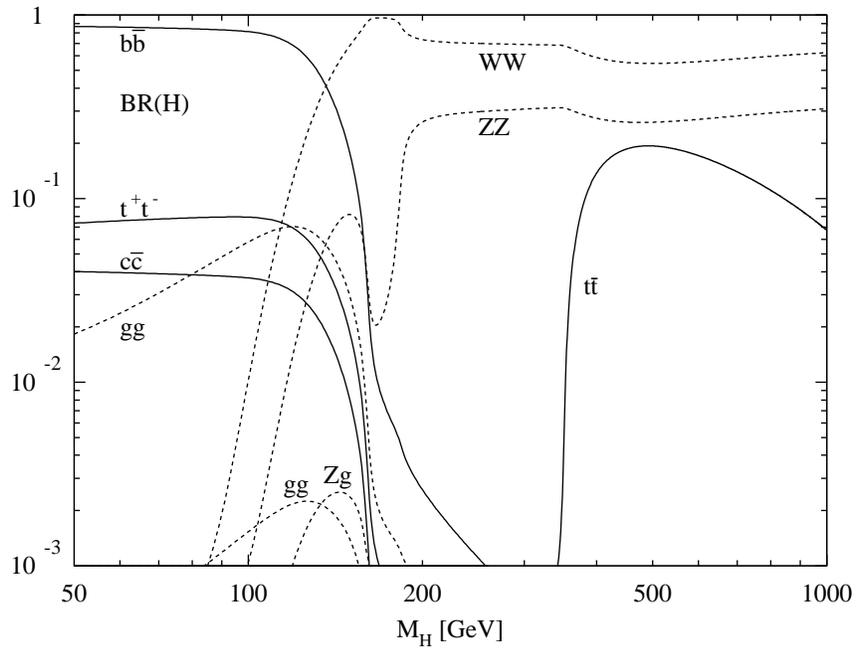


Fig. 3.3: Higgs 粒子の分岐比と質量の関係

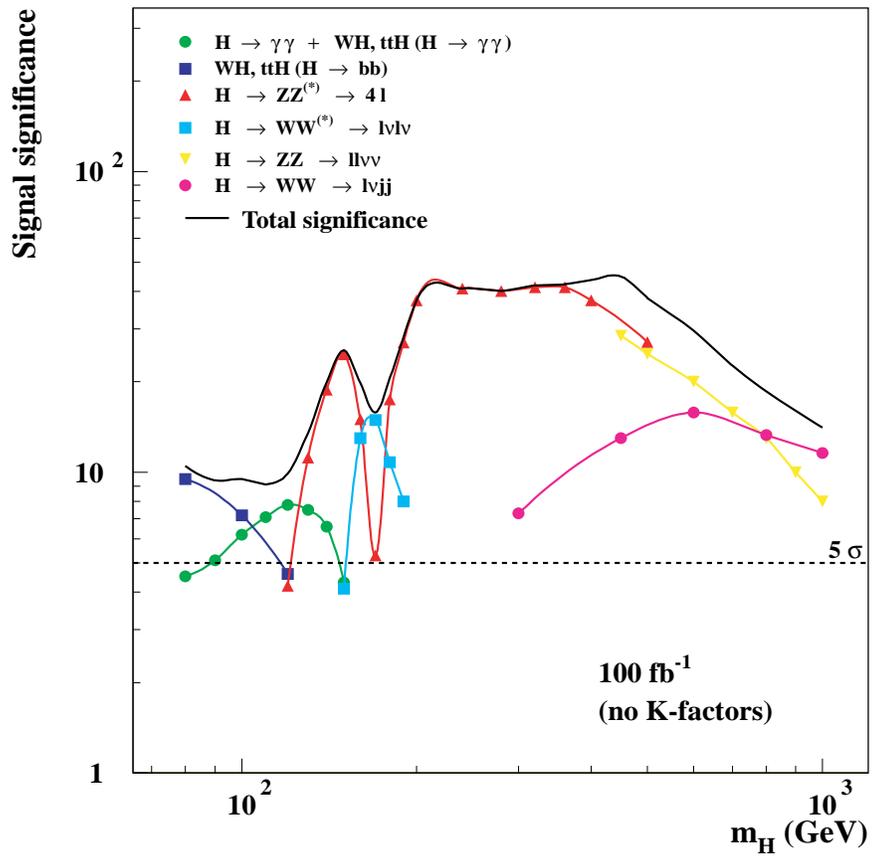


Fig. 3.4: ATLAS の Higgs 発見能力 [10]

3.1.2 超対称性粒子 (SUSY)

素粒子物理学の究極の目標は重力を含めた力の大統一であり、超対称性 (SUSY) の発見はこれに向けての大きい一歩であると最も有力視されている。LEP でのゲージ理論の精密検証の結果、超対称性による力の大統一の可能性が示された。

この超対称性は、ボソンとフェルミオンを交換する。つまり通常知られているボソンやフェルミオンに対し、スピンが $1/2$ だけ異なりスーパーパートナーと呼ばれる超対称性粒子の存在を予言する。例えば、クォークやレプトン (フェルミオン) のスーパーパートナーとして、スクォーク (\tilde{q}) やスレプトン (\tilde{l}) (ボソン) があり、グルーオン (ボソン) のスーパーパートナーとして、グレイノ (\tilde{g}) (フェルミオン) がある。もし、この理論が正しければ、LHC では強い相互作用をするスクォークやグレイノの対が大量に生成され、超対称性粒子の発見が期待される。

R パリティ保存則を課すと、超対称性粒子は必ず対で生成され、次々と崩壊を繰り返す。崩壊仮定によっては比較的重いニュートラリーノ ($\tilde{\chi}_{2,3,4}^0$) やチャージーノ ($\tilde{\chi}_{1,2}^\pm$) が生成されることがある。そして、最終的に超対称性粒子のなかで最も軽い質量を持つ LSP (Lightest SUSY Particle) になる。この LSP の候補としては最軽量ニュートラリーノ ($\tilde{\chi}_1^0$) が考えられるが、この粒子は直接観測にかけられない。しかし、解析に於いて消失横方向エネルギー E_T^{miss} として現れるので、ジェットと共に E_T^{miss} を指標として探索を行う。主な崩壊として以下の3つがある。

1. Multijets+ E_T^{miss} モード

$$\begin{aligned}\tilde{g} &\rightarrow q\tilde{q}\tilde{\chi}_1^0 \rightarrow \text{jets} + E_T^{miss} \\ \tilde{q} &\rightarrow q\tilde{\chi}_1^0 \rightarrow \text{jets} + E_T^{miss}\end{aligned}$$

2. 同符号の2レプトン・モード

$$2\tilde{g} \rightarrow 2(q\tilde{q}\tilde{\chi}_1^\pm) \rightarrow 2(q\tilde{q}\tilde{W}^\pm\tilde{\chi}_1^0) \rightarrow 2(\text{jets} + l^\pm + E_T^{miss})$$

3. 3レプトン・モード

$$\tilde{\chi}_1^\pm\tilde{\chi}_2^0 \rightarrow l\nu\tilde{\chi}_1^0 + ll\tilde{\chi}_1^0 \rightarrow 3l + E_T^{miss}$$

3.1.3 超対称性 Higgs 粒子

超対称性理論の中で最も単純な MSSM (Minimal Supersymmetric extension of Standard Model) では、2つの Higgs 2重項が要求され、結果的に5つの Higgs 粒子が導入される。この5つはそれぞれ、 H^\pm (荷電スカラー)、 h (中性軽スカラー)、 H (中性重スカラー)、 A (中性擬スカラー) である。これらの Higgs 粒子の質量は2つのパラメーター $\tan\beta$ 、 m_A で表される。

以下に、MSSM 中性 Higgs 粒子の崩壊モードで観測が期待されるものを説明する。

1. $H/A \rightarrow \tau\tau$

標準 Higgs 粒子の場合はこのモードは分岐比が低く観測に適さないが、MSSM では高い分岐比が期待される。生成された τ 粒子の両方がレプトンに崩壊するチャンネルと、一方はハドロンに崩壊するチャンネルの2種類のモードが利用できる。

2. $H/A \rightarrow \mu\mu$

$H/A \rightarrow \tau\tau$ に比べて、分岐比は $(m_\mu/m_\tau)^2$ 倍低いですが、精度よく測定が行えることから $\tau\tau$ モードでの測定を補う役割が期待される。

3. $H \rightarrow hh$

崩壊モードは、 $hh \rightarrow bb\bar{b}\bar{b}$ が支配的だが、このモードでは効率の良いトリガーが行えないため、 $hh \rightarrow \gamma\gamma\bar{b}\bar{b}$ チャンネルで観測されることが期待される。イベントレートは低いが、2つの異なる Higgs 粒子の反応という意味で非常に興味深い。

4. $A \rightarrow Zh$

2つの Higgs 粒子が関係した反応として興味深い。 $Zh \rightarrow ll\bar{b}\bar{b}$ など Z の崩壊で生じる2つのレプトンでトリガーを行う方法が有効である。

3.1.4 その他の物理

ALTA 実験の目的は上で述べた新しい素粒子現象の探索以外に標準理論の検証、ボトムクォークの精密検証、QCD の精密検証などもある。

標準理論の検証はトップクォークの質量や部分崩壊率の測定などにより行われ、ボトムクォークの精密研究はボトムクォークの稀崩壊現象を探索し標準理論を超える物理を探る手段として行われる。QCD の精密研究はクォークに内部構造がないかということの高い横運動量を持つジェットの生成断面積の測定を通して行われる。

3.2 ATLAS 検出器

ATLAS 検出器は、全長 44m、高さ 22m、総重量 7000t の世界最大の検出器である。検出器の構成は、衝突点に近い所から内部飛跡検出器、電磁カロリメータ、ハドロンカロリメータ、ミュオン検出器とつづく。これらを総合して、様々な陽子陽子衝突反応に対応し、超前方を除いた全立体角を覆い、ほぼ全ての粒子を検出する事が可能となっている。

ATLAS 検出器における座標系は、ビーム軸を z 軸に取り、これに垂直な方向を r 方向、ビーム軸周りを周回する方向に ϕ 方向を取った円筒座標系を採用する。また、衝突点から引いた線とビーム軸のなす角を θ とし、擬ラピディティ (pseudorapidity) η を

$$\eta = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{E + p_L}{E - p_L} \right) \simeq -\ln \left(\tan \frac{\theta}{2} \right) \quad (3.5)$$

と定義し、これを用いる。ここで、 p_L は生成粒子のビーム軸に沿った縦方向運動量 ($p_L = p_z$) である [13]。

衝突点に近い側から各検出器の概要を述べ、TGC が置かれる ATLAS 検出器の要素を説明する。

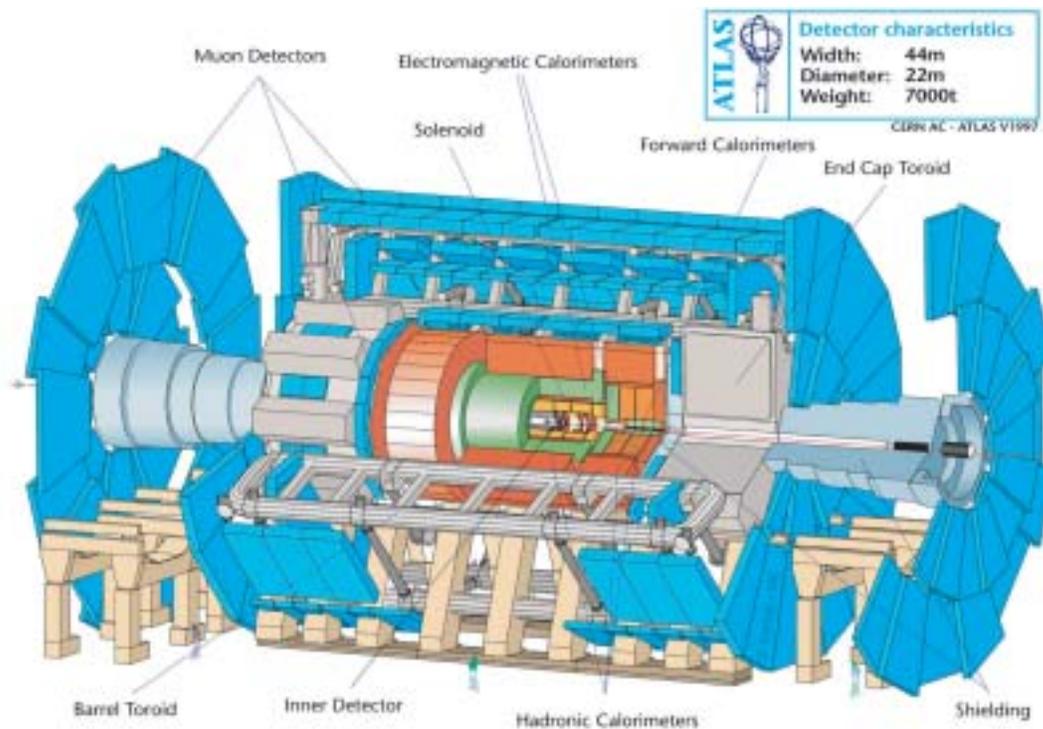


Fig. 3.5: ATLAS Detector [7]

3.2.1 内部飛跡検出器

荷電粒子のトラッキングを行う内部飛跡検出器は衝突点に最も近い位置に設置され、中央ソレノイドの約2Tの磁場によって運動量の測定を行う。中央飛跡検出器は、次の検出器から構成される。

Pixel Detector 最内層にある半導体検出器。1pixel が $50\mu\text{m} \times 300\mu\text{m}$ の位置分解能を持つ。

SCT(SemiConductor Tracker) シリコンマイクロストリップと称される、細長い有感領域を持った半導体検出器である。

TRT(Transition Radiation Tracker) 半径4mmのストローチューブ検出器であり、トラッキングの他に遷移放射を利用した電子識別を行う。最外層に設置される。

これらの検出器により、反応直後の粒子の飛跡測定、短寿命粒子の崩壊点の検出などが行われる。

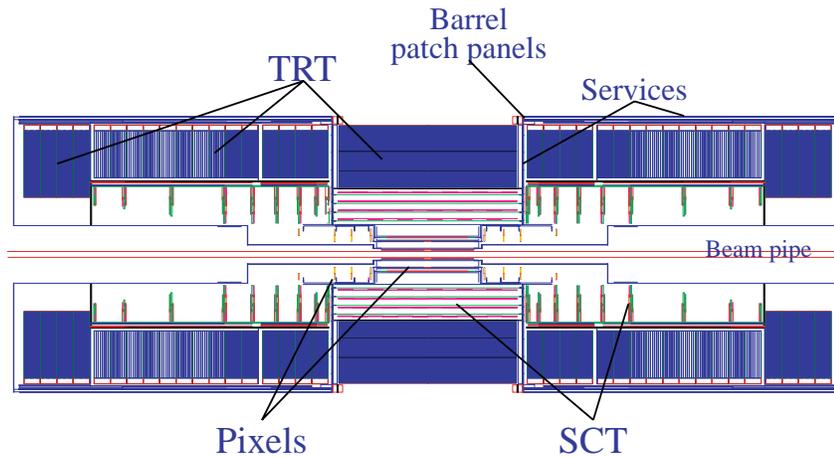


Fig. 3.6: 内部飛跡検出器 [1]

3.2.2 カロリメーター

超伝導ソレノイドの外側に電磁カロリメーター、ハドロンカロリメーターが配置される。電磁カロリメーターは鉛と液体アルゴンのサンプリングカロリメーターである。ハドロンカロリメーターは鉄とシンチレータをタイル状に並べたタイルカロリメーターをバレル部に用いる。エンドキャップ部には銅と液体アルゴンによるもの、タングステンと液体アルゴンによるものを用いる。ここで粒子の識別や位置測定、エネルギーの測定が行われる。

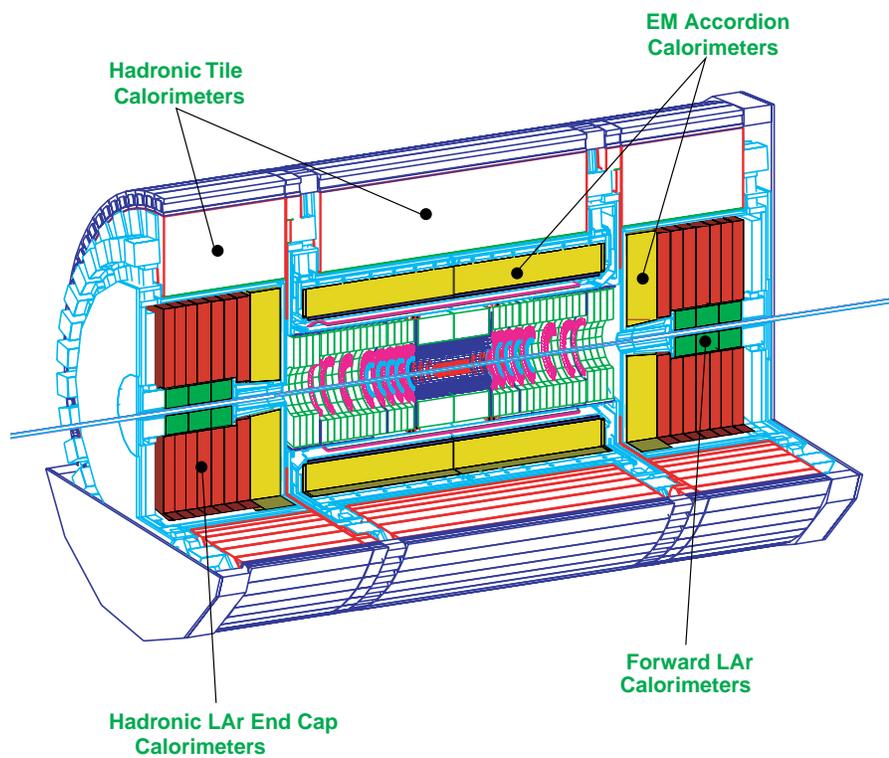


Fig. 3.7: カロリメーター [1]

3.2.3 超伝導空芯トロイドマグネット

Fig.3.8のように、8個の超伝導コイルをビーム軸回りに対称に配置し、トロイダル磁場を形成する。この磁場でミュオンの軌道を曲げる事により運動量の測定・選別を行う。多重散乱を抑えるために空芯になっている。Fig.3.9はビーム軸に垂直な断面での磁力線を表したグラフである。このような磁場により r 方向にミュオンの軌道が曲げられる。トロイダル磁場が完全ではなく、 ϕ 方向成分も持ち、ミュオンは ϕ 方向にも少し曲げられる。磁場による r 方向の曲がり具合でミュオンの運動量を測定するが、精密測定には ϕ 方向の曲がりも考慮する必要がある。

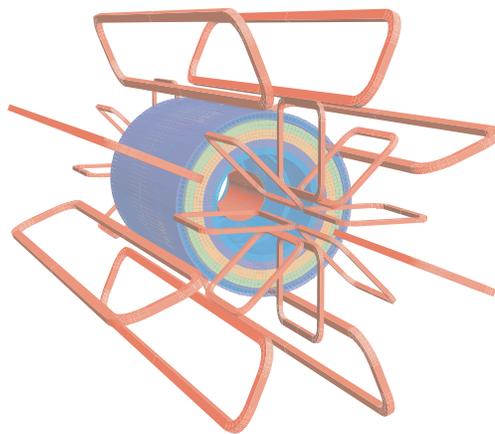


Fig. 3.8: 超伝導空芯トロイドマグネットの配置 [1]

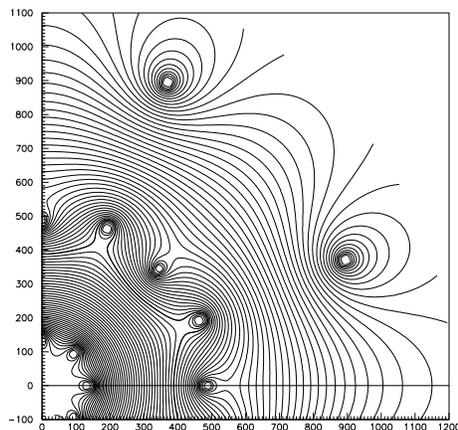


Fig. 3.9: エンドキャップトロイドの中央 ($z=1050\text{cm}$) におけるトロイダル磁場 (磁力線) [1]

3.2.4 ミューオン検出器

衝突点で生成したミューオンは、他の粒子に比べ透過性が高いため (Fig.3.10)、ミューオン検出器は、Fig.3.11 に示すように ATLAS 検出器の最も外側に配置される。ATLAS 検出器に設置されるミューオン検出器には、運動量の精密測定のための MDT、CSC、トリガー信号生成のための RPC、TGC が用いられる。

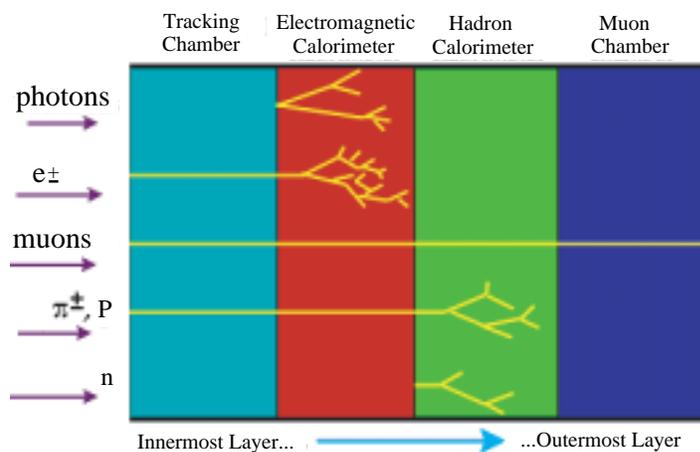


Fig. 3.10: 粒子の透過性の違い

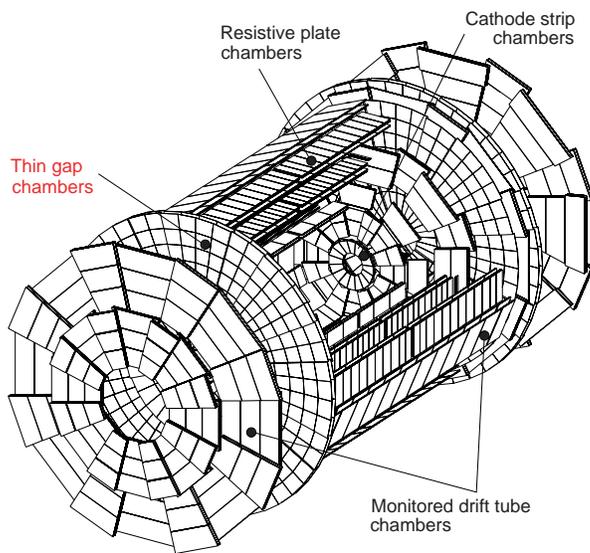


Fig. 3.11: ミューオン検出器 [1]

3.2.4.1 MDT(Monitored Drift Tube)

MDT は Fig.3.12 に示すように、直径 30mm の Drift Tube を俵積みにし、フレームに固定した構造をしている。混合ガスは $Ar : N_2 : CH_4 = 91 : 4 : 5$ で混合されたガスが 3 気圧で用いられ、印加電圧は 3270V で動作する。最大 Drift Time は 500ns、位置分解能は $80\mu m$ である。MDT は $|\eta| < 2$ のバレル・エンドキャップ部分に配置される。

Parameter	Design Value
混合ガス	$Ar : CO_2 = 97 : 3$
ガス圧	3bar(絶対圧)
印加電圧	3270V
位置分解能	$80\mu m$

Table 3.1: MDT の各種パラメータ [1]

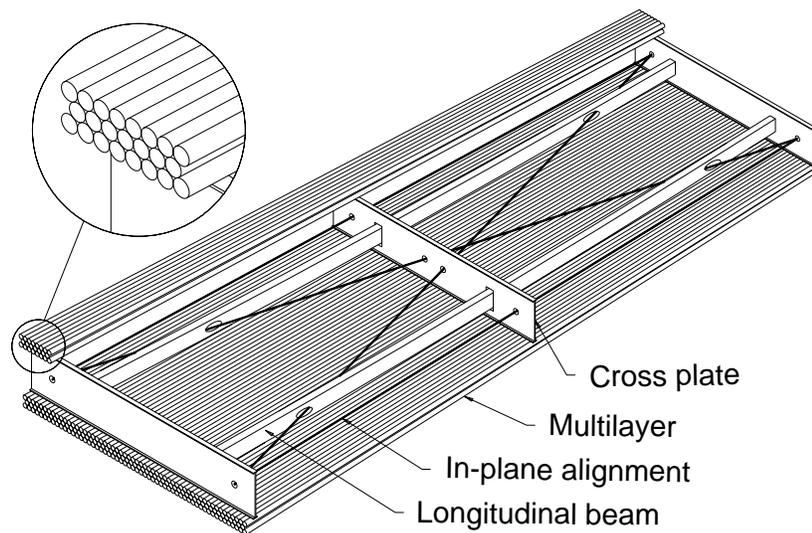


Fig. 3.12: Monitored Drift Tube [1]

3.2.4.2 CSC(Cathode Strip Chamber)

CSC は Fig.3.13 の構造をした、Cathode 読み出しの MWPC である。混合ガスとしては、 $Ar : CO_2 : CF_4 = 30 : 50 : 20$ で混合されたガスが用いられ、印加電圧は 2600V で動作し、位置分解能は $60\mu m$ 、Drift Time は 30ns 以下である。CSC はバックグラウンドとしてミューオン測定のための中性子への感度が 10^{-4} 未満と小さく、 γ 線に対する感度も 1% 程度となっている。そのため、最も放射線強度の高い超前方 ($|\eta| > 2$) に設置される。

Parameter	Value
ワイヤー間隔	2.54mm
Anode-Cathode 間隔	2.54mm
印加電圧	2600V
混合ガス	$Ar : CO_2 : CF_4 = 30 : 50 : 20$
ガスゲイン	4×10^4

Table 3.2: CSC の各種パラメータ [1]

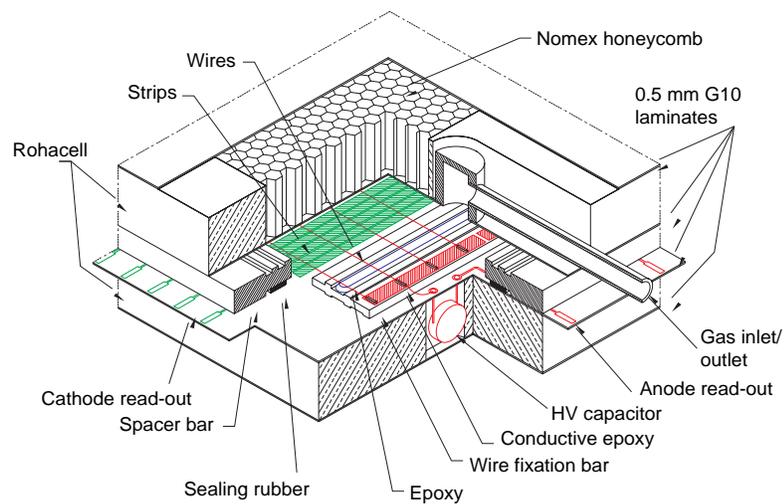


Fig. 3.13: Cathode Strip Chamber [1]

3.2.4.3 RPC(Resistive Plate Chamber)

RPC は $|\eta| < 1$ の Barrel 部をカバーするトリガ用検出器である。RPC の特徴は、Anode に Wire を用いないガスチェンバーであることで、2 枚の並行する Bakelite 板の間のガス ($C_2H_2F_4$) に数 kV/mm の電場を印加し、信号は Strip から読み出す。RPC は Strip が直交するように重ねられ、2 次元読み出しが可能である。

Parameter	Value
ガスギャップ	$2.00 \pm 0.22\text{mm}$
印加電圧	$8.90 \pm 0.15\text{kV}$
Bakelite Volume Resistivity	$(1 - 5) \times 10^{10}\Omega\text{cm}$
カーボン面抵抗	$100 \pm 40\text{k}\Omega$
混合ガス	$C_2H_2F_4 : C_4H_{10} = 97 : 3$
ガス圧	$(1.0 \pm 0.5)\text{mb}$

Table 3.3: RPC の各種パラメータ [1]

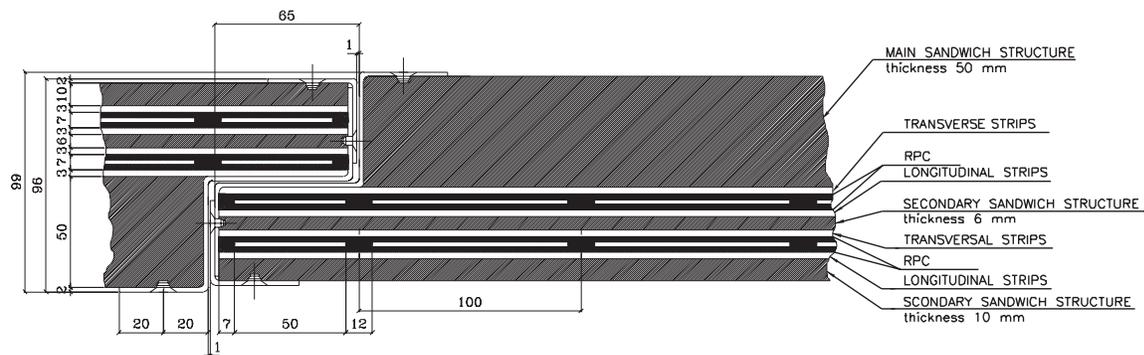


Fig. 3.14: Resistive Plate Chamber [1]

3.2.4.4 TGC(Thin Gap Chamber)

TGC は、 $2.4 < |\eta| < 1.05$ のエンドキャップ部分に設置されるトリガー用検出器である。TGC の構造は MWPC(MultiWire Proportional Chamber) で、Anode Wire と Cathode Strip のシグナルを読み出すことにより、2次元の位置測定が可能である。詳細については4章において述べる。

Parameter	Value
Anode-Cathode 間隔	1.4mm
Wire-Wire 間隔	1.8mm
印加電圧	3000V
混合ガス	$CO_2 : n\text{-Pentane} = 55 : 45$
ガス増幅率	10^6
位置分解能	$\sim 1\text{cm}$
時間分解能	25ns のゲート幅に対して 99%の検出効率

Table 3.4: TGC の各種パラメータ [1]

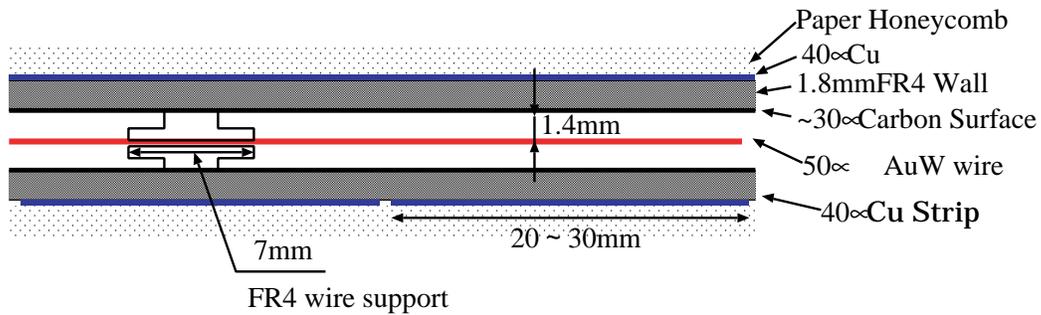


Fig. 3.15: Thin Gap Chamber [1]

3.3 ミューオントリガーシステム

LHC 加速器による 40.08MHz のバンチ交差により、ATLAS 検出器の衝突点で発生する陽子陽子の衝突率は 1GHz にもなる。これらの多量なイベントの中から目的とする物理現象のイベントを同定し、その現象由来のシグナルを探し出す必要がある。トリガーシステムは、これらの膨大なイベントの中からオンラインで、目的とする物理事象を含むイベントのみを収集するための判断を行う。最終的に DAQ システムに送られるイベントレートは、データストレージの容量の関係で 100Hz 程度にする事が要求されている。この目的を達成するために、ATLAS 実験のトリガーシステムは 3 段階のステージに分け順次イベントレートを落としていく設計になっている (Fig.3.16)

初段がレベル 1 トリガーで、カロリメータとミュオンシステムにより行われる。この時、粒子が入射している検出器の領域を Region of Interest として指定する。これが次段のレベル 2 トリガーへ渡される。Region of Interest のデータを用い、さらに精密な選択を行う。最後にイベントフィルタがあり、ここでは検出器の全データを用いてイベントの選択が行われる。

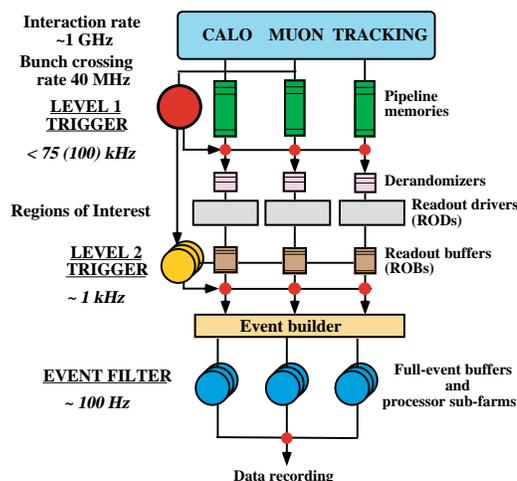


Fig. 3.16: ATLAS 実験のトリガーシステムのスキーム [11]

3.3.1 レベル 1 エンドキャップミュオントリガー

TGC は上記の各トリガーのうち、End-Cap 部分のミュオンレベル 1 トリガーを担当する。Fig.3.17 に TGC の配置を示す。TGC は 2 層ないし 3 層で 1Unit となっており (Fig.3.20)、それぞれ Doublet、Triplet と呼ばれる。TGC は衝突点から見て、Troid Magnet の外側に、Triplet(M1)、Doublet(M2)、Doublet(M3) の順で、Big Wheel と呼ばれる円盤上に配置される。中央の Doublet を Middle Doublet、外側の Doublet を Pivot Doublet と呼ぶ。Troid Magnet の内側には、Inner Station と呼ばれる Doublet が置かれる。

ミュオントリガーシステムとしての条件は

- $p_T > 20\text{GeV}$ のミュオンが 1 つ存在
- $p_T > 6\text{GeV}$ のミュオンが 2 つ存在

である。TGC でのミュオントリガーは、トロイド磁場での曲がり具合を、M1、M2、M3 の 3 層での位置測定で判定し、これより横運動量 (p_T) を求める。 $p_T = 6\text{GeV}$ 以上のミュオンの飛跡に対して、M2、M3 の内少なくとも 3 層の検出器の hit を要求し、さらに M1 の 3 層のうち 2 層を要求し、hit の位置からミュオンの運動量を測定する。これらの hit パターンより $p_T = 20\text{GeV}$ 以上のトラックを選別し、Higgs 粒子等の探索に用いられる (Fig.3.21)。

トリガーチェンバーである TGC に要求される条件として、

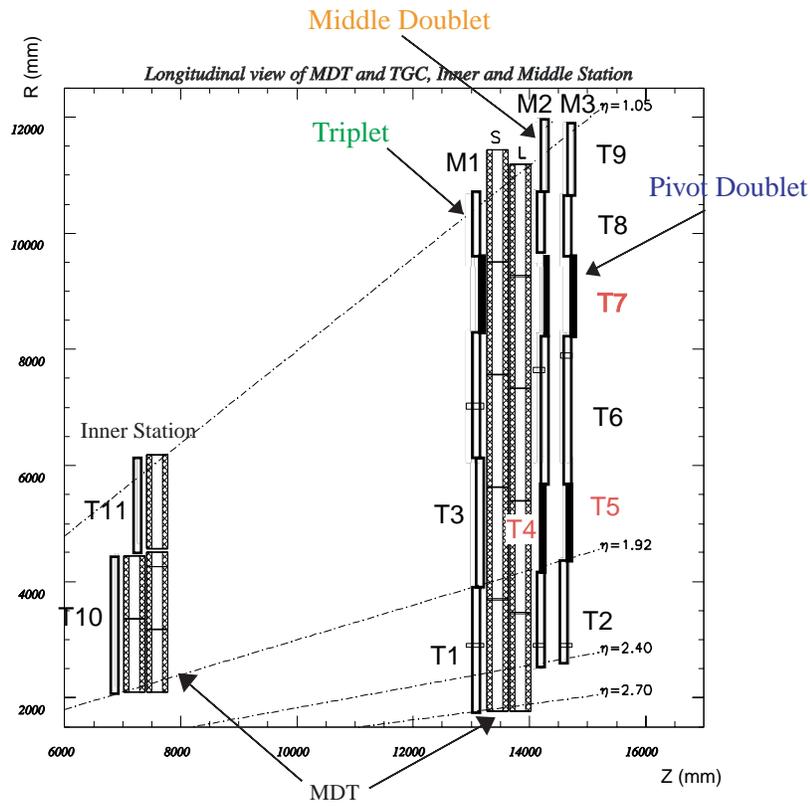


Fig. 3.17: エンドキャップミュオントリガー [1]

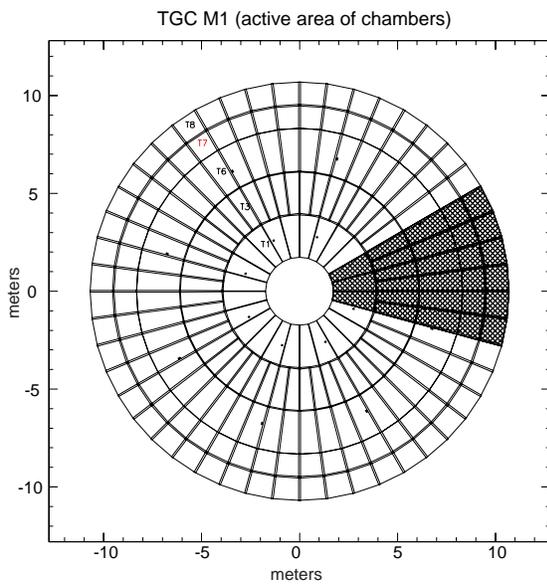


Fig. 3.18: M1 ステーションの TGC の配置 [1]

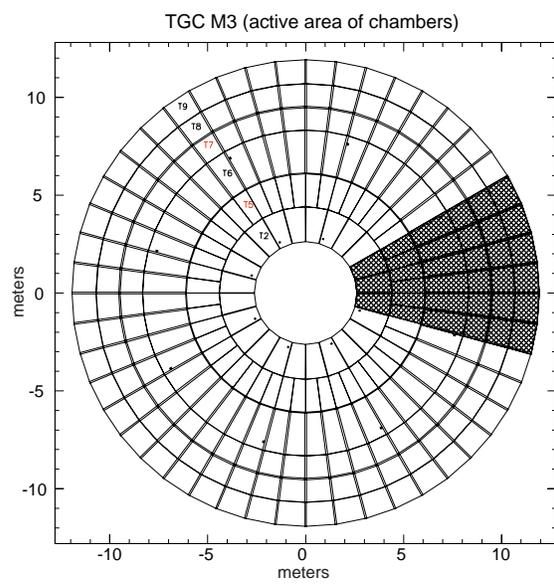


Fig. 3.19: M3 ステーションの TGC の配置 [1]

1. 検出効率が99%以上である。
2. LHCのバンチ間隔である25nsec以下の時間分解能を持ち、バンチの決定が可能である。
3. p_T をトリガー条件に組み込むため、 $\sim 1\text{cm}$ の位置分解能を持つ。
4. ATLAS実験ホール内での、 $0.1\text{kHz}/\text{cm}^2 \sim 1\text{kHz}/\text{cm}^2$ の高頻度入射粒子環境下において、10年間安定に動作する。

がある。これらの条件に対する様々な動作研究がこれまでに進行されており [15] [16] [17] [18]、要求された性能を持つことが確認されている。

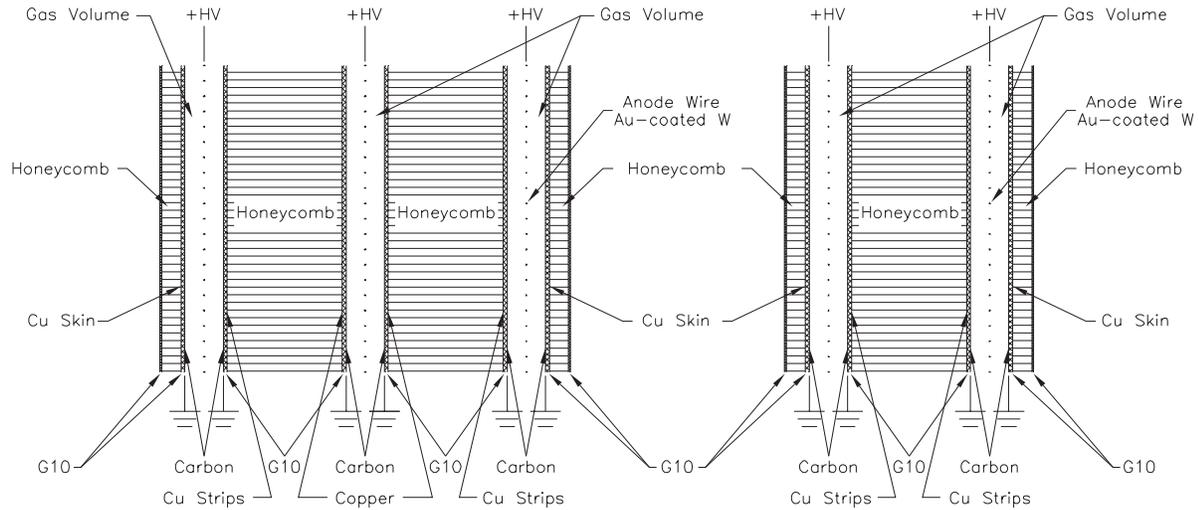


Fig. 3.20: Doublet / Triplet 断面図 [1]

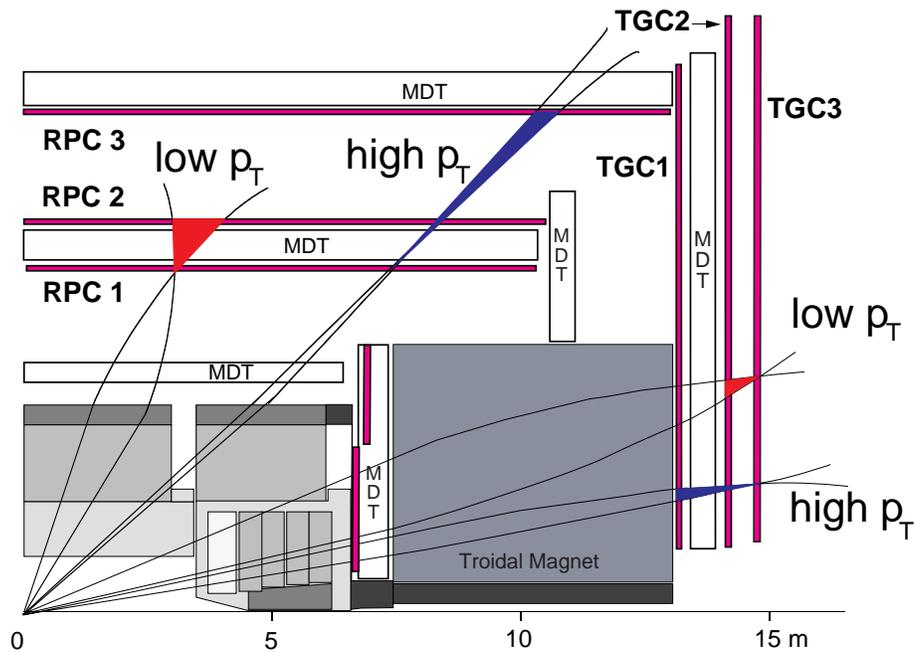


Fig. 3.21: トリガースキーム [11]

4 Thin Gap Chamber (TGC)

Thin Gap Chamber は、高エネルギー実験においてよく使用される Multi Wire Proportional Chamber(MWPC) 型の検出器の一つである。Anode Wire と Cathode Plane の間隔 (Gap) が通常の MWPC に比べ非常に狭いため、Thin Gap Chamber(TGC) と呼ばれる。TGC は、Majewski、Charpak らによって、高頻度入射粒子状況下でも動作できるチェンバーとして提唱された [12]。Anode Wire と Cathode Plane の間隔を狭くする事により、入射粒子によって形成された陽イオンが早く Cathode Plane に到達し、チェンバーの不感時間 (Dead Time) が短くなるよう設計されている。

4.1 動作原理

4.1.1 ガス増幅と動作モード

TGC に入射した荷電粒子は、その飛跡に沿ってガス中の分子と多数衝突し、イオン化させる (Fig.4.1(a))。電離された電子 (1 次電子) は、陽極へ Drift しながら、印加電場によって加速され、運動エネルギーを持つようになる。電子のエネルギーがガス分子の電離エネルギーを超えると、ガス分子をイオン化し、2 次電子を生成する (Fig.4.1(b))。一般に、その電場の閾値は 1 気圧で約 $10^6 V/m$ 程度である。2 次電子も電場によって加速され、それが次々と衝突、電離を繰り返す、タウンゼント型電子なだれと呼ばれるカスケード形の電子なだれを形成する。この過程をガス増幅という。電子とイオン雲はそれぞれ Drift を始めてお互いに離れ (Fig.4.1(c))、電子雲は Anode Wire を取り囲み (Fig.4.1(d))、イオン雲はさらにその周りを取り囲むように Anode Wire 半径方向に拡散していく (Fig.4.1(e))。TGC はこの電子なだれをシグナルとして Anode Wire から読み取り、Anode Wire の位置から、位置情報を得る。

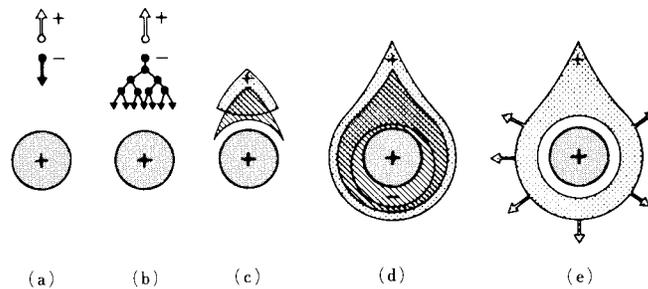


Fig. 4.1: Anode Wire 近傍でのタウンゼント型電子なだれの推移 [14]

ここで、単位長さ dx あたりに電子の数 n が増加する割合は

$$\frac{dn}{n} = \alpha dx \quad (4.1)$$

で、式 (4.1) をタウンゼントの式 (Townsend Equation) という。 α はタウンゼントの第一電離係数と呼ばれ、電場と圧力、および気体の種類によって変わる係数である。電場が空間的に一定であり、圧力も一定であると仮定すると、 α は定数とみなすことが出来、

$$n = n_0 \exp(\alpha x) \quad (4.2)$$

のように、電子の数 n が初期の電子数 n_0 に比例した関係にあることがわかる。

よって、印加電圧とチェンバー内の圧力のある範囲に設定すると、収集電荷を入射放射線によって生成された最初のイオン対数に比例させる事が出来る。この領域を比例モード (Proportional Mode) という。一方、電離によって生じた陽イオンは、移動度が電子に比べて非常に小さいため、電子を収集する間にはほとんど動かない。したがって、チェンバー内には陽イオンの雲が出来、それがゆっくり陰極へ向かって拡散していく。印加電圧をあげていくと、この陽イオン雲の濃度が高くなり、空間電荷を形成してチェンバー内の電場をゆがめ、電子なだれの成長を抑制するようになる。収集電荷が最初のイオン対の増加によって増大するが、直線性を示さない事よりこの領域の動作モードを制限比例モード (Limited Proportional Mode) という。

さらに印加電圧をあげていくと、陽イオンによる空間電荷が完全に支配するようになる。電子なだれと共に生成された陽イオンの濃度が高くなると、ガス増幅を起こす閾値以下に電場が下がってしまい、そこで電子なだれの生成は終了する。この過程は自己制限型で、収集電荷は最初に生成するイオン対の数に関係なく一定である。ここで入射放射線は分子を電離する事以外に励起も起こす。励起した分子は、可視、あるいは紫外線を放射して基底状態へ戻る。これらの紫外線もエネルギーが十分高ければ、電離能力を持ち、別の電子なだれを生成する。印加電圧が高くなると紫外線光子数も増加し、連続的に電子なだれが形成され、やがてチェンバー全体で放電するようになる。この連続放電は、電場がガス増幅の閾値以下になった時に止まる。このときの収集電荷は、最初に生成するイオン対の数に無関係で一定である。これをガイガーミュラー動作モード (Geiger-Müller Mode、GM Mode) という。

このとき、紫外線吸収能力の高い混合ガスを使用すると、最初の電離 (励起) が起こった位置からはなれた場所の電子なだれの生成を抑制する事が出来る。紫外線光子は電子なだれのすぐ近傍で、追加的な電子なだれを形成し、Anode から Cathode の方向に電子なだれが成長すると、先端部の電子なだれから陽極に達し、この部分から急激に電流が流れ、後方の電子なだれへと柱状に伝わりスパーク放電する。これが制限ストリーマーモード (Limited Streamer Mode)、または自己消滅型ストリーマー (Self-Quenched Streamer Mode) である。

1MeV と 2MeV の荷電粒子に対する、印加電圧と各モードにおける出力パルス波高 (すなわち捕獲した電子数) の関係を Fig.4.2 に示す。

4.1.2 充填ガス

TGCはトリガーチェンバーであるため、入射粒子のエネルギーに関係なく入射粒子を全て検出出来なければならぬ。それには制限比例モードで動作させる事が望ましい。制限比例モードで動作させる事は、比例モードと比べてガス増幅によって得られる電荷量が 10 ~ 100 倍と大きく有利である。また、検出効率を 100 % に近づけるためには、入射荷電粒子による電離で発生した電子の捕獲確率が低い気体の方が望ましい。この点で、電子捕獲確率が非常に小さい CO_2 が選ばれた。また、ガス増幅率が高くなると、紫外線による電離の影響が無視できなくなるため、紫外線吸収能力の高いクエンチガスも必要となる。クエンチガスとしては、n-Pentane が選ばれた。n-Pentane は非常に大きな紫外線吸収能力をもち、吸収した紫外線のエネルギーを分子自身の回転エネルギーやラディカル等の低分子への解離エネルギーに使用し、2 次電子の放出を抑える働きをする。0.5 気圧、室温で用いることが可能なアルカン系のガスの中で、紫外線の吸収断面積が最大である (Fig.4.3)。このことから、 $CO_2 + n\text{-Pentane}$ の充填ガスを用いると、高い増幅率と高い検出効率を得る事が出来る。ガス混合率は $CO_2:n\text{-Pentane}=55:45$ となった。

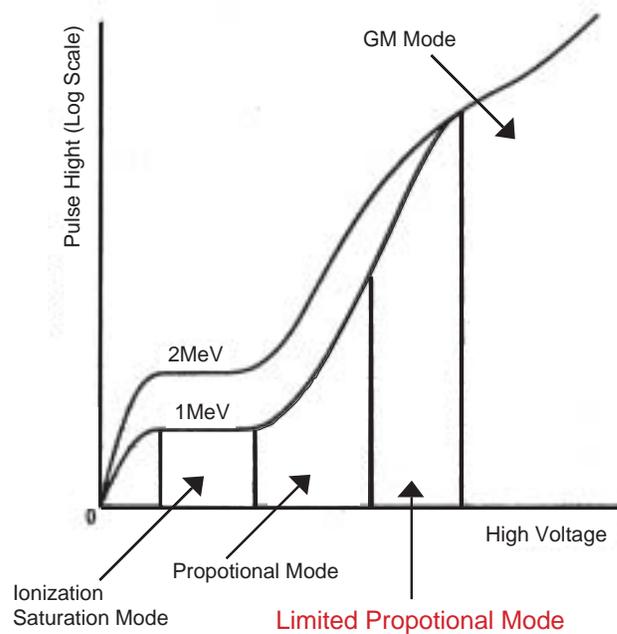


Fig. 4.2: 各動作モードにおける印加電圧と出力パルス波高の関係

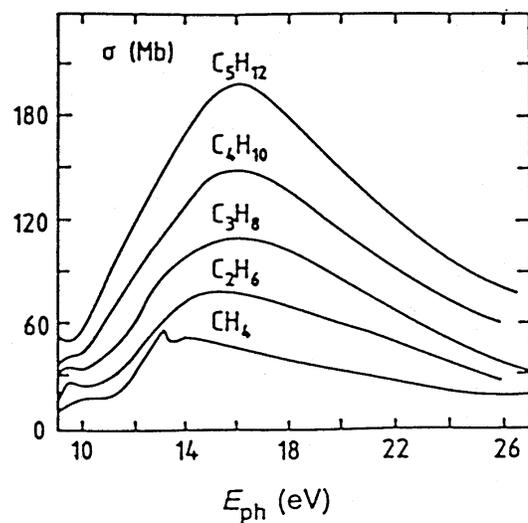


Fig. 4.3: n-Pentane の紫外線吸収断面積

気体	電子捕獲確率
CO ₂	6.2×10^{-9}
O ₂	2.5×10^{-5}
H ₂ O	2.5×10^{-5}
Cl	4.8×10^{-4}

Table 4.1: 各種ガスによる電子捕獲確率の違い

4.2 TGCの構造

TGCの断面図をFig.4.4に示す。TGCは、1.6mm及び1.8mmのFR4(ガラスエポキシ樹脂)を基板として、その片面にカーボン塗布することで、Cathode面を形成している。Anode Wireは直径 $50\mu\text{m}$ の金メッキタンゲステンワイヤーが用いられている。Wire-Wire間隔は1.8mmであり、これによって25nsecの時間分解能が実現される。また、Anode-Cathode間隔は1.4mmと通常のMWPCに比べ狭くなっており、陽イオンが早くcathodeに到達することにより、粒子の高レート入射に対して耐性をもつ。さらに、Wire-Wire間隔とAnode-Cathode間隔がほぼ同程度に狭いことにより、電子なだれの領域が広く取れる構造になっている。TGCの電場・電位構造をFig.4.7に示す。電場はWire近傍において $1/r$ で増加し、Wireから0.2mmの位置では約40kV/cmの電場を持ち、Cathode面近傍(Wireから1mm)の位置でも10kV/cmを持つ。このようにTGCは全領域にわたり非常に強い電場を持ち、ほぼ全領域でガス増幅が可能な構造を持つ。

陽イオンがCathode面に衝突した際に、電子がチェンバー内に飛び出さないよう仕事関数が大きく、かつ紫外線によって光電効果を起こさないよう原子番号の小さい物質がCathode面には適しており、カーボン塗布した面が選択された。カーボン塗布することで、放電を抑える事が出来、さらに高抵抗にする事により、Strip間のクロストークを抑える事が出来る。しかし、抵抗が高すぎると、局所的な電圧降下の影響を受けたり、チャージアップを起こしたりするので、均一にかつ $0.5\text{M}\Omega \sim 1.5\text{M}\Omega$ の範囲になるよう調整しなければならない。

Fig.4.5に、T7タイプのTGCの平面図を示す。TGCには2種類のスペーサーが入っており、一つはWireのたるみを防ぐためのワイヤーサポートで、もう一つはギャップ間隔を一定に保つためのボタン型サポートである。これらのスペーサーは不感領域となるが、Doublet/Tripletにする際、これらの不感領域が重ならないように、モジュール内のTGC間でワイヤーサポートの位置は半ピッチずつずれるよう製作される。WireとStripの両読み出しをする事で2次元での位置情報を得る事が出来る。Wireはr方向の情報を、Stripは ϕ 方向の情報を得るよう配置される。T7タイプの場合、Wire-Wire間隔が1.8mmで張られるため、1枚あたり約700本のWireが張られる。このため、 $\sim 20\text{ch}$ を1グループとして読み出しを行う(Fig.4.6)。Stripに関しては、 $\sim 40\text{mm}$ 幅のStripがチャンネルの数だけ刻まれている。

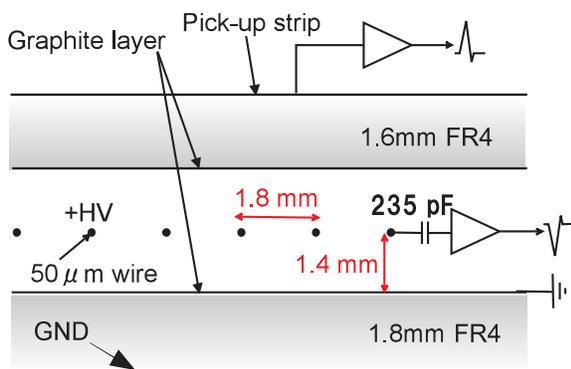


Fig. 4.4: TGCの構造(断面図) [1]

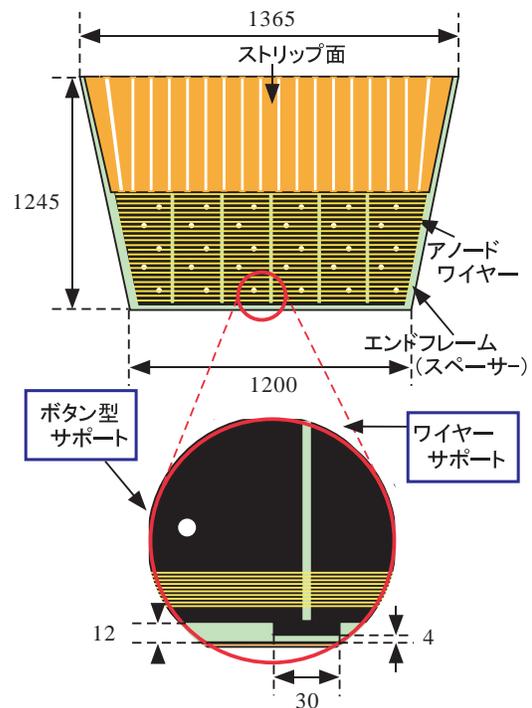


Fig. 4.5: TGCの構造(平面図)

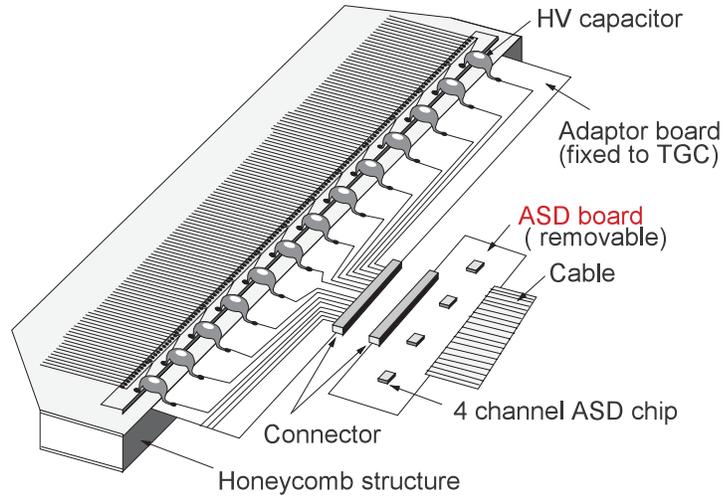


Fig. 4.6: Wire 方向の読み出し部分の構造 [1]

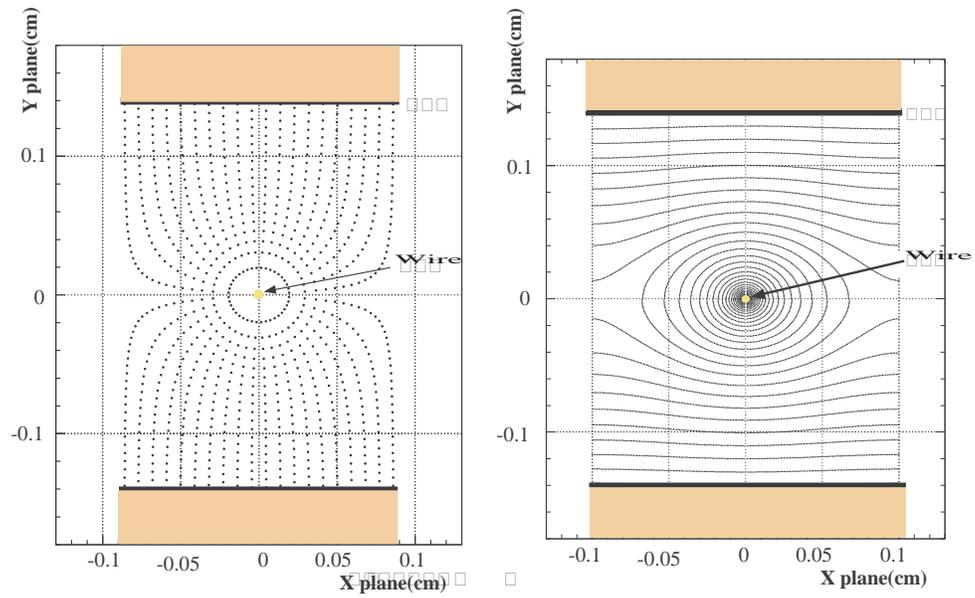


Fig. 4.7: TGC の電場 (左) ・ 電位 (右) 構造のシミュレーション [16]

4.2.1 ASD(Amplifier Shaper Discriminator) Board

ASD Board は TGC の側面に取り付けられ、4 チャンネル分の処理が出来る ASD ASIC(Fig.4.8) が 4 個搭載され、1 つのボードで 16 チャンネルを処理する。ASD ASIC は、TGC からのアナログ信号を増幅、整形し、ある閾値電圧を越えた信号だけを LVDS(Low Voltage Differential Signaling:低電圧作動信号) レベルの信号で出力する。ASD ASIC に入力された電荷量はプリアンプで $0.8V/pC$ に従って電圧値に変換され、メインアンプ ($G7$ と書かれた部分) で 7 倍に増幅される。プリアンプに 0.1 から $0.5pC$ の電荷を入力したときの出力を Fig.4.9 に載せる。メインアンプで増幅されたシグナルはサーキット回路 (offset setting と書かれた部分) に入り、外部から指定された閾値を超えた信号について出力される。また、ASD Board 以降のエレクトロニクス診断やタイミング調整のために、トリガー信号を受けて、擬似的な TGC の出力信号 (Test Pulse) を出力する機能も持っている。ASD Board は、ツイストケーブルで後続のボードに接続され、動作電源、閾値電圧を決定されて動作する。また、ASD Board には 16 チャンネル目のアナログ信号をモニタできるアナログ出力もついている。Fig.4.10 は ASD Board の写真である。

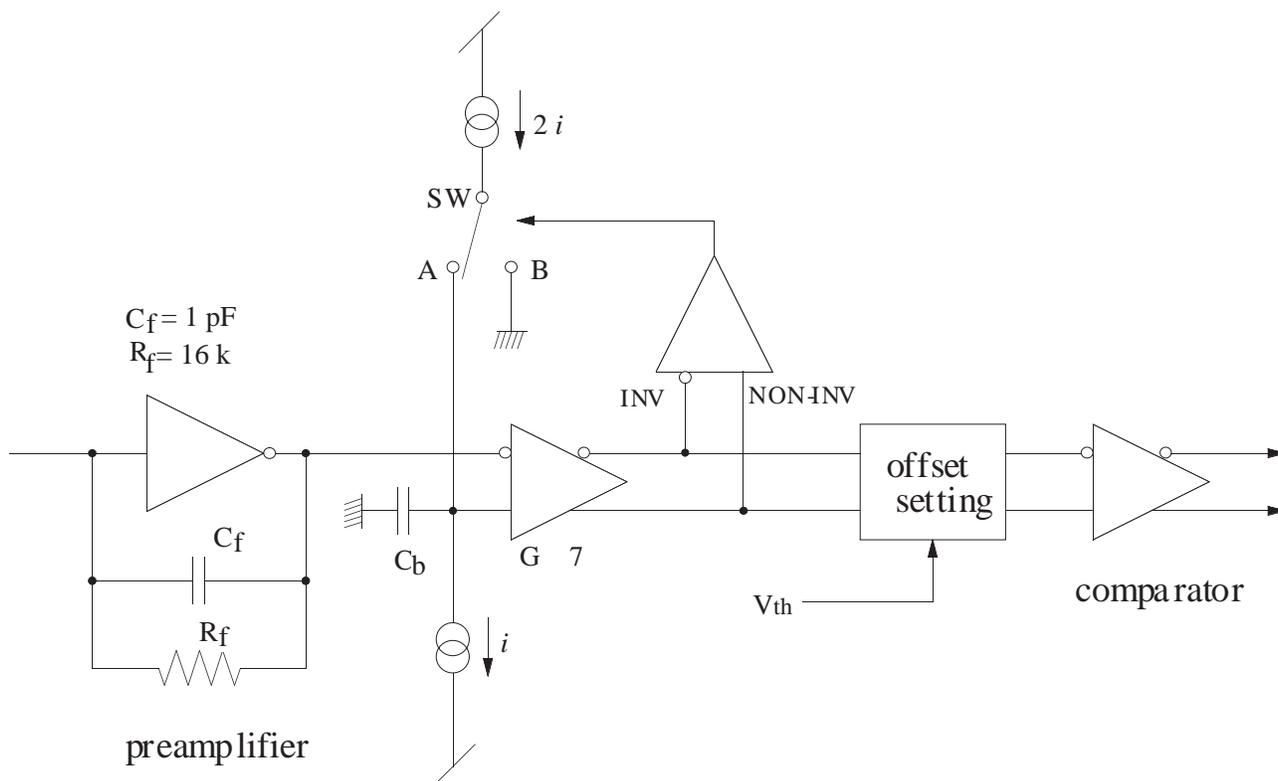


Fig. 4.8: ASD ASIC 回路図

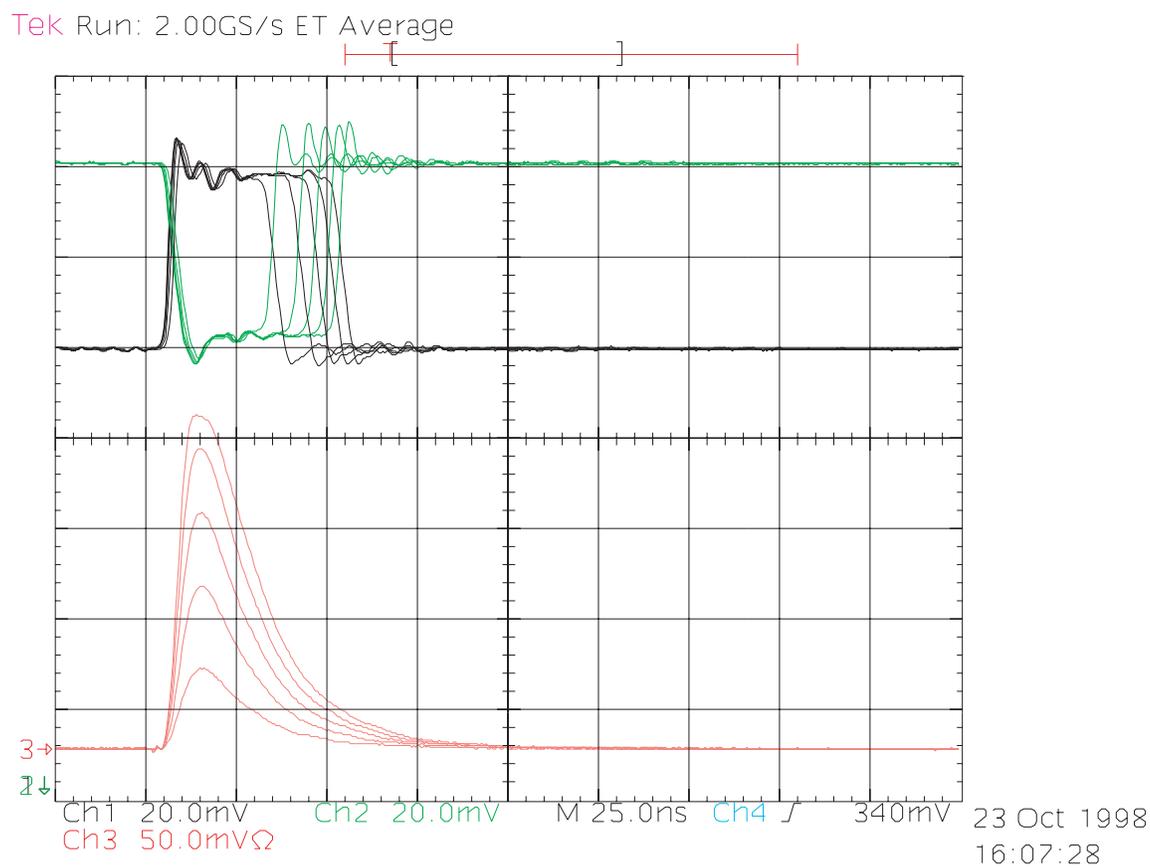


Fig. 4.9: オシロスコープで見た 0.1pC から 0.5pC までの入力に対するプリアンプの外部出力

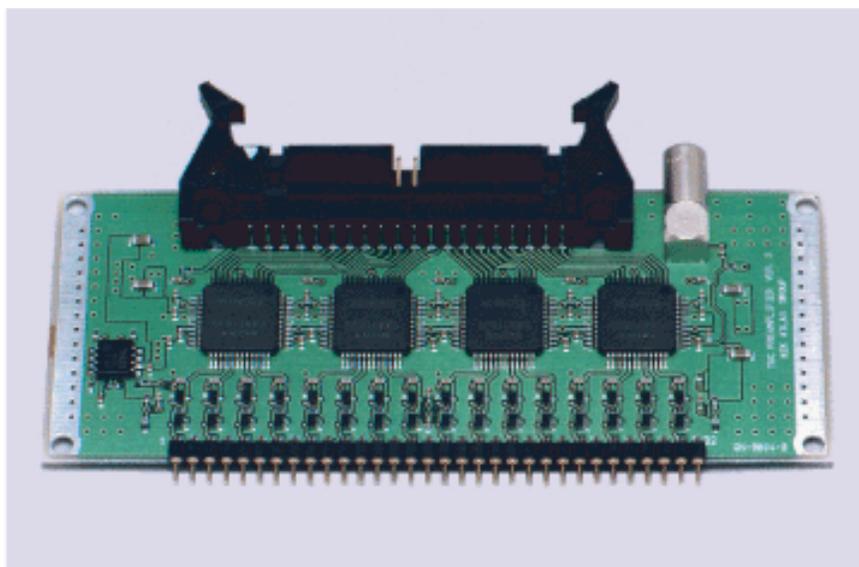


Fig. 4.10: ASD Board

4.3 中性子の信号による TGC への影響

4.3.1 中性子の性質

4.3.1.1 中性子の発生

中性子は陽子とともに原子核を構成する粒子で陽子とほぼ同じ質量を持つが、単独で安定に存在することは出来ず、半減期 13 分で崩壊して陽子に変わってしまう。このため、人為的に加速器か原子炉を用いて作らない限りは単独では自然界には存在しない。核融合反応や、加速した陽子をターゲットに当て、ターゲット物質内の原子核と陽子のスポレーション反応(核破砕反応)が起きる過程で発生する。

4.3.1.2 中性子と物質の相互作用

中性子は電荷を持たないので、物質との相互作用はスピンによる磁氣的相互作用か、核力によるものである。核力はその及ぶ範囲が $10^{-13}cm$ と非常に小さく、衝突の断面積は $10^{-24}cm^2$ 程度となっている。

中性子が物質に入射した際に物質内の原子核と起こす反応は、中性子のエネルギー領域によって以下の 3 通りに分けられる。

(1) $< 1MeV$

中性子は原子核に吸収され、原子核を励起状態にする。

励起状態になった原子核は、基底状態に落ちる際に γ を出す。

(2) $1 \sim 100MeV$

中性子は原子核と衝突し、スポレーション反応や散乱によって陽子、原子核を出す。

(3) $> 100MeV$

中性子は核力の影響を受けずに原子核内の陽子、中性子(、核子 N)と反応する。反応によって π 中間子が生成されるとともに、反跳核子、半跳原子核が観測される。

$$n + N \rightarrow n + N' + \pi \quad (4.3)$$

(4) \sim 数 GeV

このエネルギー領域でのスポレーション反応では、核子同士の多重衝突が短時間で起こり、高いエネルギーを持った核子が放出され、残された高励起状態の高温複合核から粒子蒸発が激しく起こり、標的核がばらになる。

4.3.2 中性子の TGC に対する影響

中性子と TGC を構成する物質との相互作用で発生した陽子が TGC のガス内に放出されると、Bethe-Bloch の式に従ってガス内にエネルギーを落とす。そのときの陽子のエネルギーと単位長さ当りのエネルギー損失のグラフを Fig.4.11 に載せる。このグラフから分かるように、 $1MeV$ 以下の陽子によるエネルギー損失は非常に大きく、したがって MIP(Minimum Ionization Particle) による信号と比べ、大きな信号が生成される。こういった中性子による信号によって引き起こされる可能性のある TGC の異常動作には、早期劣化、クロストークが考えられる。早期劣化は、中性子の大きな信号による放電の頻発によって起こる可能性がある。

放電は次のように起こる。粒子による信号により TGC に流れる電流は、イオン対数、素電荷、ガスゲイン、入射レートの積で表される。TGC 内で大きな信号が生成されイオン量が多くなると制限ストリーマーモードに入り、数 μA ~ 十数 μA のリークカレントが流れる。ちなみに通常 TGC のリークカレントは数 nA ~ 数十 nA である。これにより TGC 内の電場に影響を及ぼす場合もある。さらに大きな信号が生成された場合や、さらに高レートで粒子が入射するとストリーマーモードに移行し、放電が起こる。中性子は TGC 内で大きな信号を生成する可能性があり、高頻度中性子バックグラウンド環境下では放電が頻発する可能性が考えられる。

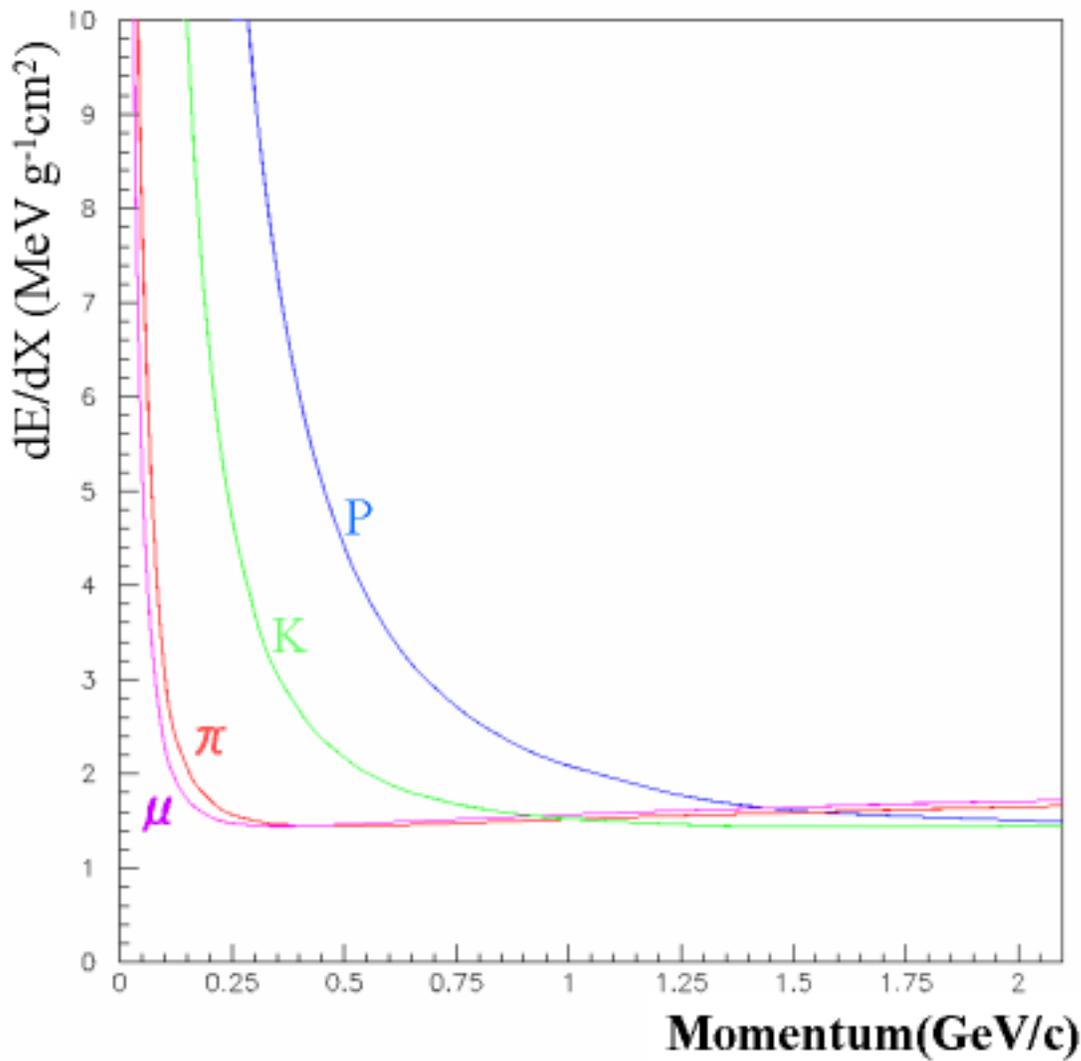


Fig. 4.11: 粒子の持つ運動量と dE/dx : 横軸が粒子の運動量、縦軸が dE/dx を表す。p、 π 、K、 μ の 4 粒子についての運動量とエネルギー損失を表す。

クロストークとは、本来信号を出すべきでないワイヤーもしくはストリップがなくなってしまうというもので、次のように起こる。入射粒子により電離された電子が近くのワイヤー (W1) に到達すると、W1 には局所的に負の電荷が集まっていることになる。もともとワイヤーワイヤー間、ワイヤーとカソードストリップ間には電気的な容量が存在するため、W1 付近のワイヤーにはそれぞれ W1 との容量にしたがって W1 とは逆符号の信号が生成される。ワイヤーの読出しに用いられる ASD には閾値が設定されており、逆符号の信号はカットされるため問題ないのだが、中性子による信号は非常に大きく、信号のアンダーシュートがその閾値を超えてしまう場合がある。このため、W1 以外のワイヤーからも信号が出てしまうことになる。カソードストリップにも同じことがあてはまる。この偽シグナルにより、ATLAS 実験本番において偽トリガーを生成してしまう恐れがある。

5 中性子照射試験

5.1 中性子源

実験には、日本原子力研究所の施設の1つである FNS(Fusion Neutronics Source) の中性子源を使用した。FNS の鳥瞰図を Fig.5.1 に示す。また、FNS に設置されている中性子発生装置の各パラメータを Table5.1 に、0 度、80 度ビームラインでの各パラメータを Table5.2 に示す。図中の 400keV 重陽子加速器により重水素 (D:Deuteron) を発生させ、ターゲットに向けて走らせる。加速器はコックロフト加速器で、2つの電極の間に高い電圧をかけ、それによってプラスイオンをまっすぐ加速する。ビームラインは加速器から考えて0度方向と80度方向の2方向に設けられており、それぞれ Table5.2 のビーム電流、中性子発生量を得られる。ターゲットの交換も可能で、Deuteron と Tritium を選択することが出来、以下の2つの反応に従ってそれぞれ 2.5MeV、14MeV の単色中性子を発生させることが出来る。

- (1) 2.5MeV 単色中性子の発生



- (2) 14MeV 単色中性子の発生



ビームのタイプには、

- (1) DC モード

ターゲットにビームを断続的に当て、断続的に中性子を発生させる。

重照射に適している。

- (2) パルスモード

ビームを一定間隔で区切って圧縮し、パンチ化してターゲットに当てる。

ビームのタイミングが把握できる。

があり、目的に応じてどちらも使用できる。DC モードは加速劣化試験、出力電荷量の測定、放電レートの測定に、パルスモードはクロストークイベントレートの測定に使用した。ビーム電流 (ビーム強度) は短時間で変更することが出来る。

今回の実験では、80度ビームラインを使用し、図中の実験体系部分に TGC をおいて測定した。

形式	400keV 重陽子加速器	バンチ間隔	24.95nsec
直流高圧電源	450kV、80mA	パルス最小幅	2ns
イオン源	体積型イオン源 (大電流用)、デュオプラズマトロン (小電流用)		

Table 5.1: FNS 加速器概要

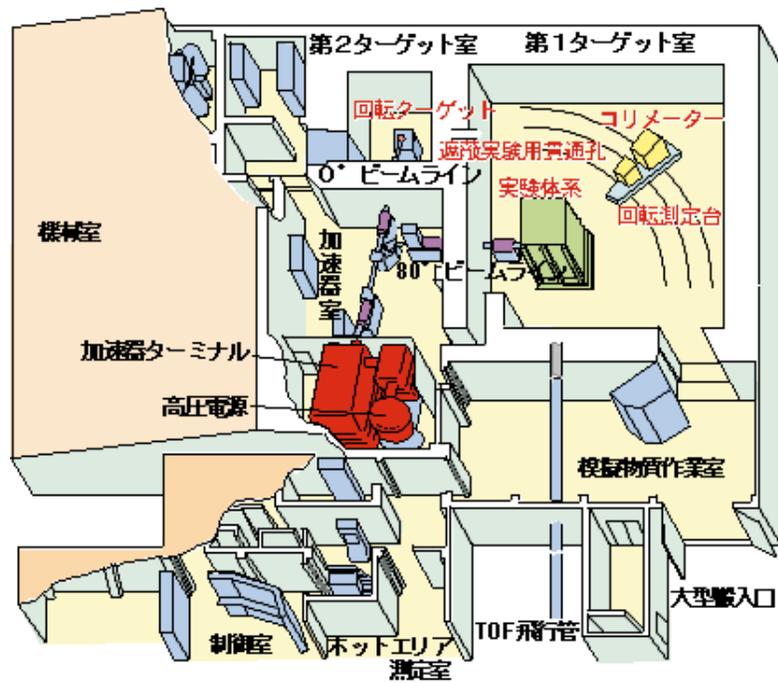


Fig. 5.1: FNS 鳥瞰図

ビームライン	0度	80度
ビーム電流	25mA	3mA
中性子発生量	$5 \times 10^{12} n/s$	$5 \times 10^{11} n/s$
トリチウムターゲット	回転ターゲット	固定ターゲット (水冷)
トリチウム装荷量	37TBq	3.7TBq

Table 5.2: 各ビームラインでのパラメータ

5.2 T7タイプTGCと小型TGC

実験には、ATLAS 検出器として使用される TGC(以下大型 TGC)1 台と、大型 TGC と同じ材質で作った小型 TGC を使用した。

使用した大型 TGC のタイプは T7 の Doublet(4 章参照、Fig5.2) である。Fig5.2 の右辺、下辺に取り付けてある ASD(4.2.1 参照) より、1 層についてワイヤー 16 × 2 チャンネル、ストリップ 16 × 2 チャンネルの信号を読み出す。Doublet なのでこれが 2 層あるのだが、今回使用した T7 は 2 層中 1 層が導通しており電圧をかけることが出来ないため、片面のみ使用した。

小型 TGC についてはアノードワイヤーの間隔、アノードワイヤーとカソードプレーンの間隔も、大型 TGC を再現した。大きさは 100 × 120mm で、長さ 80mm のワイヤーが 16 本張ってある。両端のワイヤーは他のワイヤーに対してドリフト領域が広く電場構造が異なるので、測定では両端 2 本と他のワイヤーをわけた。両端のワイヤーを除いたガス有感領域は 80 × 25.2mm である。小型 TGC の概略図を Fig.5.3 に載せる。小型 TGC の読み出しはワイヤーのみである。

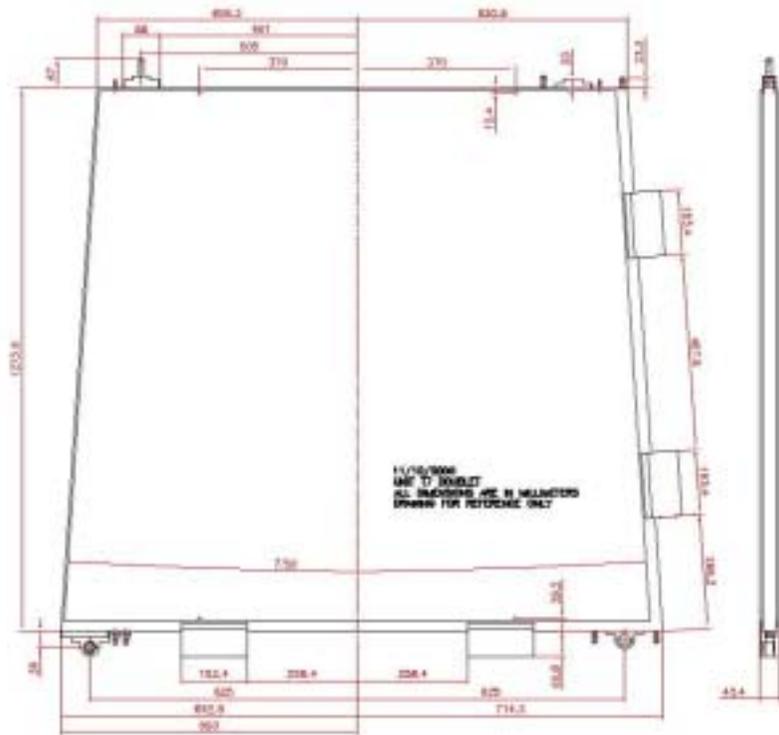


Fig. 5.2: T7 概略図

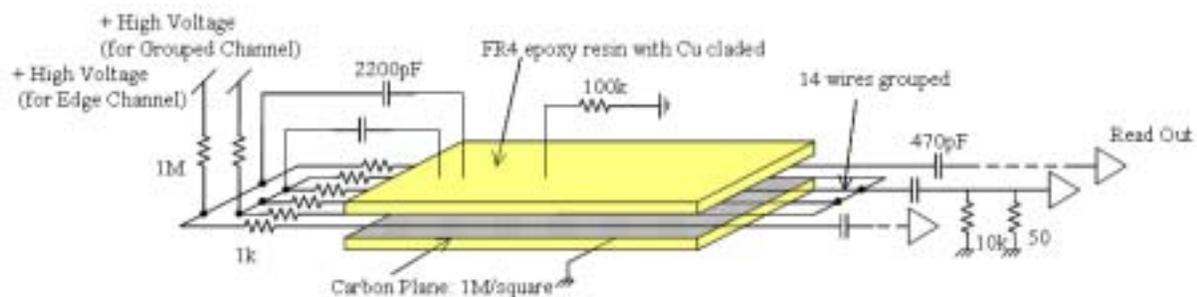


Fig. 5.3: 小型 TGC 概略図

5.3 実験セットアップ

2.5MeV 中性子照射試験 (2005 年 5 月)、14MeV 中性子照射試験 (2005 年 8 月) におけるビームターゲットの位置と TGC の設置位置の関係を Fig.5.4 ~ Fig.5.5 に示す。研究項目は以下である。

- 大型 TGC を用いた研究
 1. 中性子ヒットに対するクロストークレートの研究
 2. 中性子による劣化の研究 (加速劣化試験)
- 小型 TGC を用いた研究
 1. 中性子による出力電荷量の研究
 2. 中性子感度の研究
 3. 中性子ヒットによる放電レートの研究
 4. 中性子に耐性のある代替ガスの研究

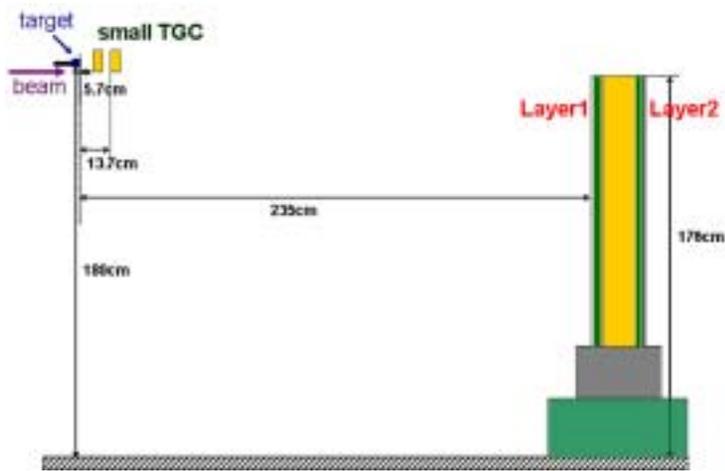


Fig. 5.4: 2.5MeV TGC 設置位置



Fig. 5.5: 14MeV TGC 設置位置 (加速劣化試験)

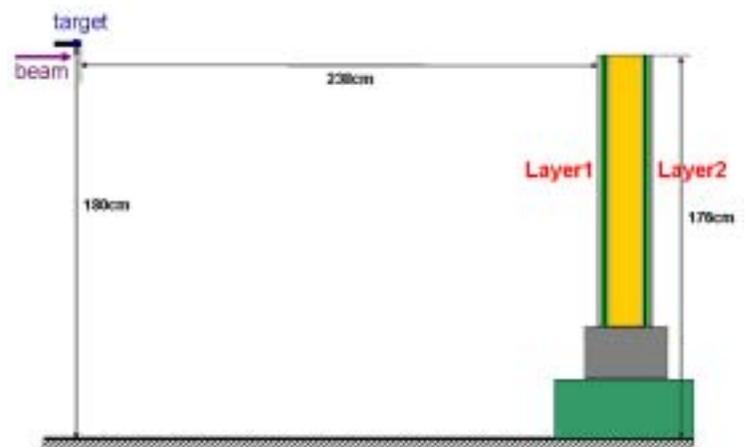


Fig. 5.6: 14MeV TGC 設置位置 (クロストークスタディ)

5.3.1 データ取得セットアップ

5.3.1.1 ADC を用いたデータ取得

使用した ADC は、ゲート間のアナログ信号の電荷量を積分し、その値を対応する 0 ~ 4000 のチャンネルに格納する。この ADC を用いて、中性子による信号の TGC からの出力電荷量データを記録した。回路図を Fig.5.7 に示す。ADC はセルフトリガモードで使用し、TGC からのデジタル信号を Gate generator を介して ADC のゲート信号として入力した。ゲート信号と ADC に入力するアナログ信号のタイミングは、オシロスコープで確認 (Fig.5.8) し、ゲート信号から ~50ns 後にアナログ信号が入るように Delay 回路を用いて調整した。ゲートの幅は、TGC からの出力パルスを全て収められるよう ~500ns とした。(Fig.5.8)

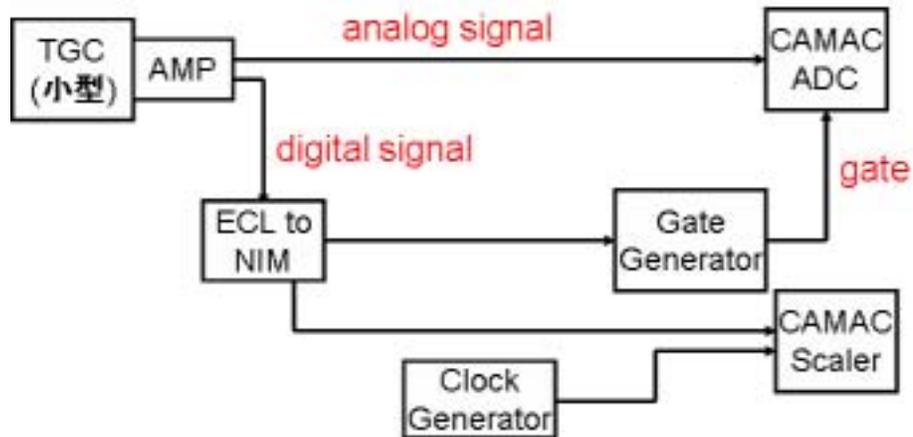


Fig. 5.7: ADC データ取得回路図



Fig. 5.8: ADC 信号タイミング:上が TGC からのアナログシグナル (ADC に入力)、下が TGC からのデジタルシグナル (ゲート信号)

5.3.1.2 TMC を用いたデータ取得

TMC はある一定時間の間の信号の情報を記憶できる。これを用いて中性子ヒットに対するクロストークレートの測定を行った。今回使用した TMC は $1\mu\text{s}$ 間の信号の時間情報を記憶しておくことができ、コモンスタートモードではスタート信号から $1\mu\text{s}$ 間、コモンストップモードではストップ信号からさかのぼって $1\mu\text{s}$ 前までの間の入力信号の時間情報を入力する。今回の実験ではコモンストップモードで使用した。回路図を Fig.5.9 に示す。TGC のヒット信号は ASD から読み出され、ASD Buffer を介してコインシデンスと TMC に送られる。ASD Buffer とは、ASD からの信号の読み取り用回路として開発されたモジュールで、背面に 2 個の 40 芯フラットケーブル用のコネクタカードが装備されており、それぞれ 16 チャンネル ASD カードからのデジタル信号、アナログ信号を入力できる。デジタル信号は ECL 信号に変換されて、アナログ信号は増幅されて出力される。また、ASD への閾値電圧、テスト信号、電源を供給する。

TMC のストップ信号には、ビームのターゲット付近に取り付けられているピックアップリングの信号と TGC のヒット信号のコインシデンスを取ったものを入力した。ピックアップリングにより中性子発生情報を取得し、中性子が発生した中で TGC にヒットがあったものについてデータをとれるようになっている。ストップ信号と TGC からのヒット信号のタイミングを Fig.5.10 に示す。

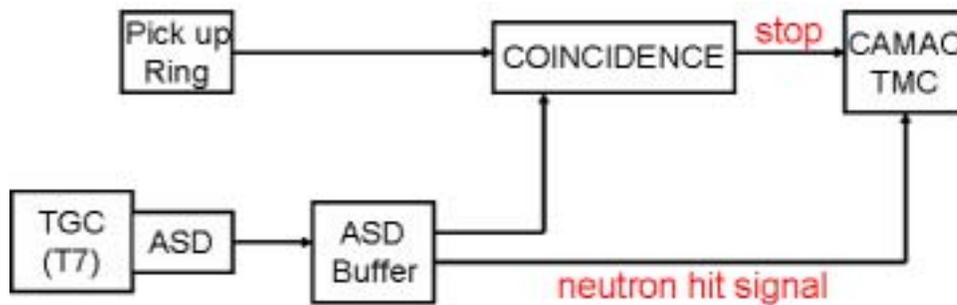


Fig. 5.9: TMC データ取得回路図

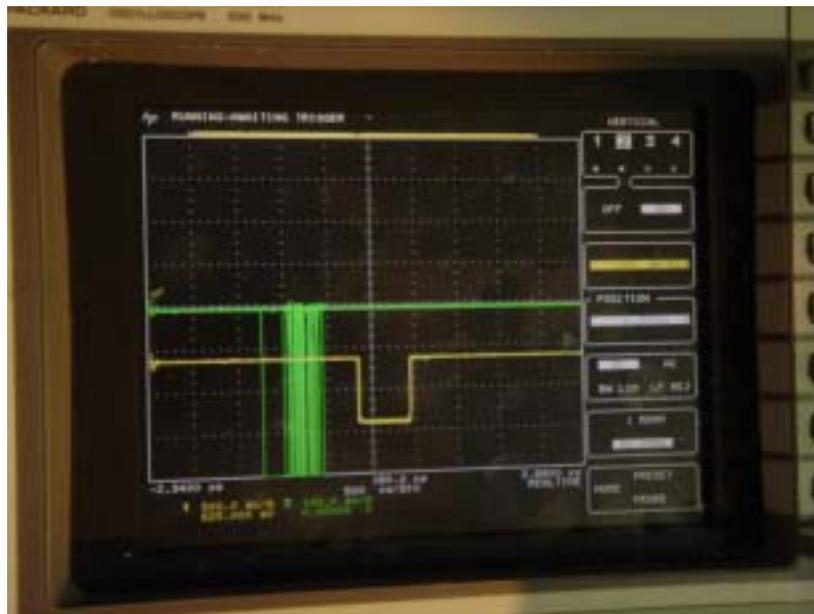


Fig. 5.10: TMC 信号タイミング:上が中性子のヒットシグナル、下が TMC のストップシグナル

5.3.1.3 カレントモニター

TGC に電圧を与える高電圧電源は、TGC の安全を確保するため、設定値以上のリークカレントが一定時間流れ続けると電源を落とすようになっている。また、TGC に印加中の電圧値、リークカレント値は高電圧電源から取得することができ、アナログ電圧値として出力される。この電圧値を常時モニターし、中性子照射中の TGC のカレント状況を把握し、放電レートの測定を行った。カレントモニターシステムの回路図を Fig.5.11 に示す。高電圧電源からの情報 (電圧値) はアンプを通して増幅され、ツイストケーブルで PC に接続されている AD ボード (Analog to Digital Converter Board) に入力される。信号は AD ボード + Visual Basic で作成されたアプリケーションによりデジタル値に変換されて記録される。AD ボードには AD12-64(PCI) を使用し、100Hz でのカレントモニターシステムを構築した。AD12-64 には 64Mbyte のメモリが搭載されており、入力された情報は一旦そのメモリに記憶される。メモリが搭載されていることで、より早い周期でのデータの取得が可能である。データ読み込みの周期はプログラムで指定でき、別に指定する周期でメモリからのデータの吸い上げとメモリの初期化を行う。+10V ~ -10V までの入力に対応し、Fig.5.12 に従って 0 ~ 4096 のデジタル値に変換される。プログラム内でさらに変換し、出力ファイルには印加電圧値、リークカレント値が出力されるようにした。

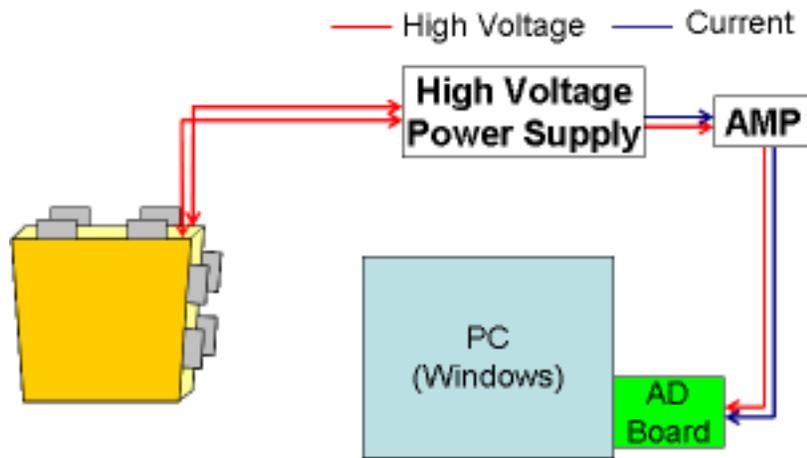


Fig. 5.11: モニターシステム図

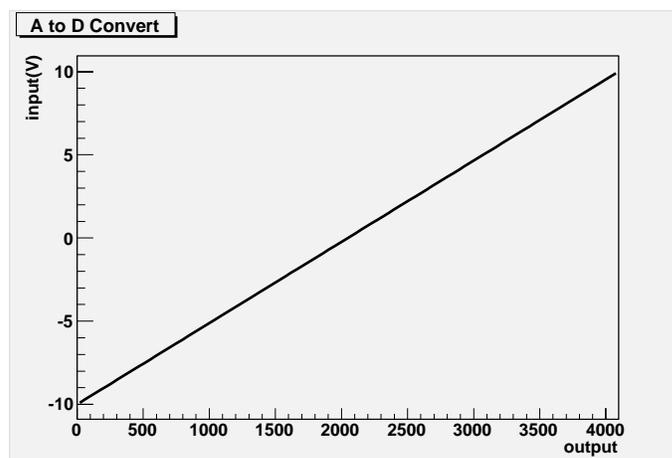


Fig. 5.12: AD 変換表

5.3.1.4 ガス供給システム

ガスシステムの概略図を Fig.5.13 に載せる。図中の点線で囲まれた部分をピンクの部分にもうひとつ作り、ガス供給系を 2 系統設置した。各系統の流量はそれぞれフローメーターで記録されており、実験を通して 20cc~40cc 内で値を決めてガスを流した。流すガスは各系統で別のものを選ぶこともでき、 CO_2 、 CF_4 を使用した。ガスポンプから供給されるガスを恒温槽で液体の n-Pentane の中でバブリングさせて n-Pentane と混合させる。恒温槽の設定温度を変えることで CO_2 、 CF_4 と n-Pentane の混合比を変えることができる。ガスの混合比は、TGC の後段にあるガスクロマトグラフを使い確認した。内圧の急上昇による TGC の損傷を防ぐために安全バブラー、n-Pentane 回収装置として HCT(Hydro Carbon Trap) を TGC の後段に設置した。各系統から TGC まではステンレスパイプ (1/4 インチ) でガスを供給した。小型 TGC が 2 台ある場合はその 2 台を直列につないだ。

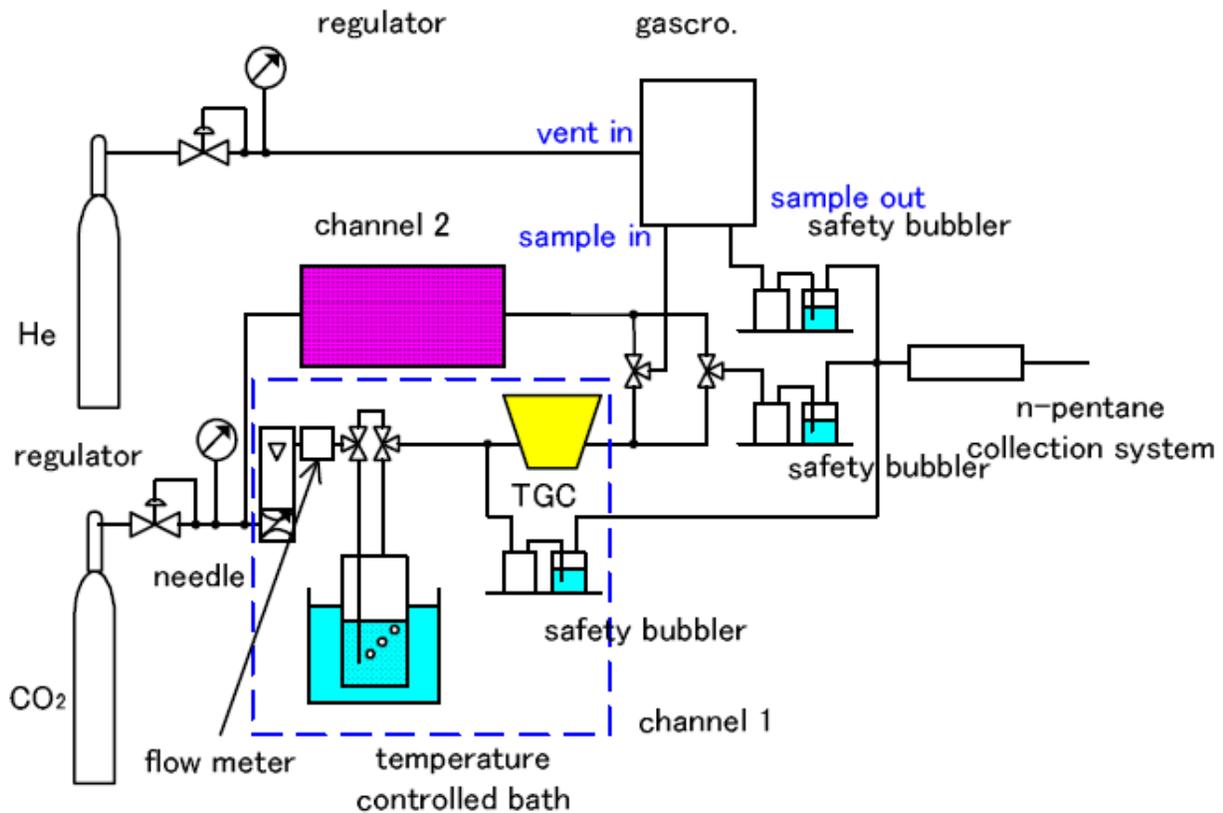


Fig. 5.13: ガスシステム図

5.4 実験結果と考察

5.4.1 中性子感度

FNS の 80 度ビームラインには、ターゲットから 179.1 度の位置に SSD (silicon surface-barrier detector) が、ターゲット後方の真空中にアルファモニターが取り付けられている。SSD によって中性子発生量は ~2% の誤差で測定され、MCS データという形で記録される。MCS データには、10 秒間の中性子の発生量の和が 10 秒毎に記録されている。この値に適切なパラメータ (アルファモニター、SSD の位置、SSD の感度を含む) をかけることによって、ターゲット位置での中性子発生量が導かれる [19]。このデータを使用し、ターゲットからの TGC の設置位置での立体角を考えて TGC に入射する中性子の量を算出した。MCS データから算出した中性子発生量の分布の一例を表示したものを Fig.5.14 に載せる。

中性子感度は、TGC の中性子ヒット数を MCS データから見積もった TGC への入射中性子数で割ることで求めた。中性子ヒット数は、次の手順で計算した。TGC の出力電荷量分布の中性子のピークをガウシアンでフィットし、ピーク値と標準偏差を出す。 $\sqrt{2\pi} \times (\text{ピーク値}) \times (\text{標準偏差})$ で出力電荷量分布中の中性子ヒットの割合が出る。これに全ヒット数である Scaler での計数値をかけると、その出力電荷量分布のデータを取得した間の TGC の中性子ヒット数が出る。なお、TGC の中性子ヒットには、20% 前後の系統誤差が含まれている。中性子エネルギーが 2.5 MeV、14 MeV での中性子感度を Table 5.3 に載せる。 $10^{10} \sim 10^{12}$ の中性子を当てたので、中性子感度から考えて $10^6 \sim 10^8$ のデータを取得したため、統計誤差は無視できる。結果を見ると、2.5 MeV より 14 MeV の方が中性子感度が、 CO_2 ベースのガスで約 4 倍、 CF_4 ベースのガスで約 5 倍と高くなっている。これは、TGC の材質の中で 2.5 MeV と 14 MeV で中性子との反応断面積が大きく違うものがあるためと考えられる。TGC への中性子ヒットを求める過程で生じる誤差を考えると、ベースガスの違い、n-Pentane の混合比の違いによる中性子感度の違いはほとんど見られなかった。

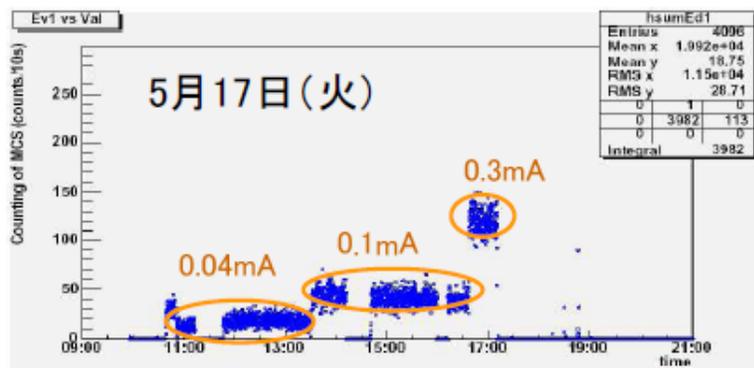


Fig. 5.14: 中性子発生量:縦軸が 10s 間の中性子発生量、横軸が時間

ガス	$CO_2 + n\text{-Pentane}$		$CF_4 + n\text{-Pentane}$	
混合比	55:45	70:30	55:45	70:30
2.5 MeV (%)	0.024	0.022	0.019	0.018
14 MeV (%)	0.083	0.085	0.10	0.10

Table 5.3: 中性子感度

5.4.2 出力電荷量

中性子照射試験に先立って、

1. TGC への入力電荷量と ADC からの出力値のキャリブレーション
2. 試験に使用する 4 種類のガスを使用し、TGC の MIP に対する出力電荷量の測定

を行った。

まず 1. について述べる。ADC から出力される値は、電荷量に対応した 0 ~ 4000 の値であり、この値から出力電荷量に戻す必要がある。この変換係数は、中性子照射試験と同じセットアップを用いて次の方法で測定した。Pulse generator からの矩形波をコンデンサーを通して入力することで、任意の電荷量を TGC に入力できる。Fig.5.7 のセットアップで、TGC のワイヤーにコンデンサーをつなぎ、入力電荷量に対して出力される ADC 値を複数の点で測定することで、ADC 値と電荷量の変換係数を導出した。その結果を Fig.5.15 に載せる。なお、ADC 値については得られた出力電荷量分布 (ADC 値) の平均を取った値をプロットしている。実験では、この図に従って ADC 値から出力電荷量を求めた。なお、出力電荷量が 20pC の付近からグラフの傾きが変わるのは、使用したアンプの特性によるもので、線形性は保たれているため、問題ない。

次に、2. を行った際のセットアップを Fig.5.16 に載せる。このセットアップで宇宙線ミュオンを用いて、TGC の MIP による出力電荷量を測定した。測定結果は Fig.5.17 となった。TGC への印加電圧が上がるにつれてガスの違いによる出力電荷量の差が大きくなる傾向にあるが、本来の動作電圧である 2.9kV 付近ではどのガスの場合も大きな違いは見られなかった。

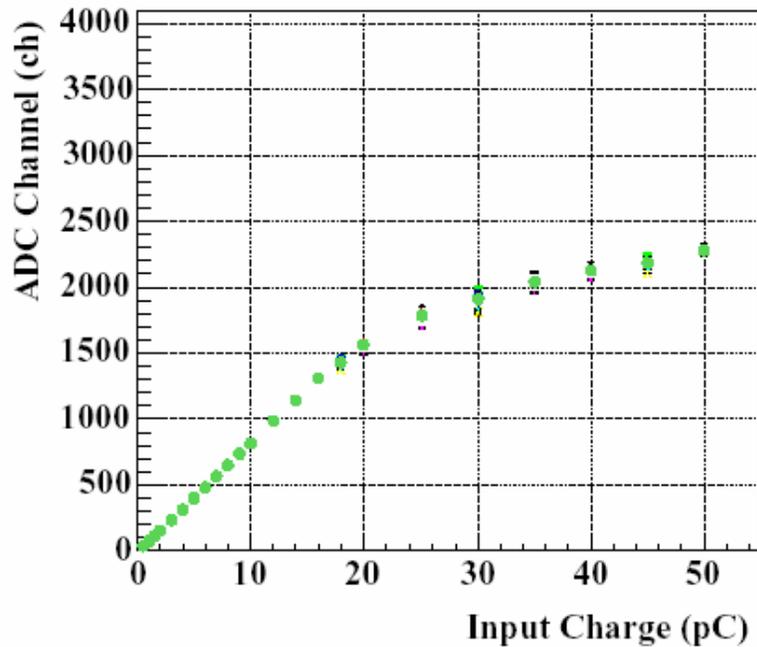


Fig. 5.15: ADC 値と電荷量の変換

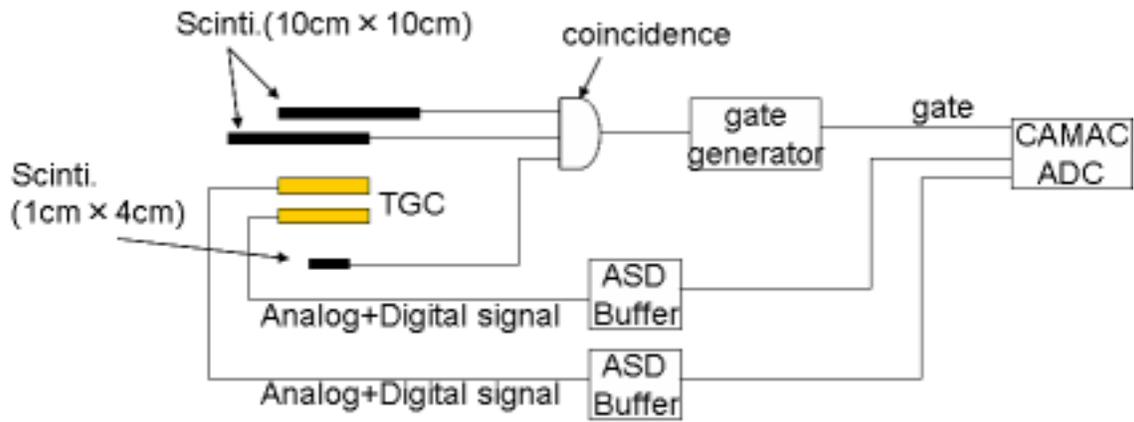


Fig. 5.16: MIP による出力電荷量測定セットアップ

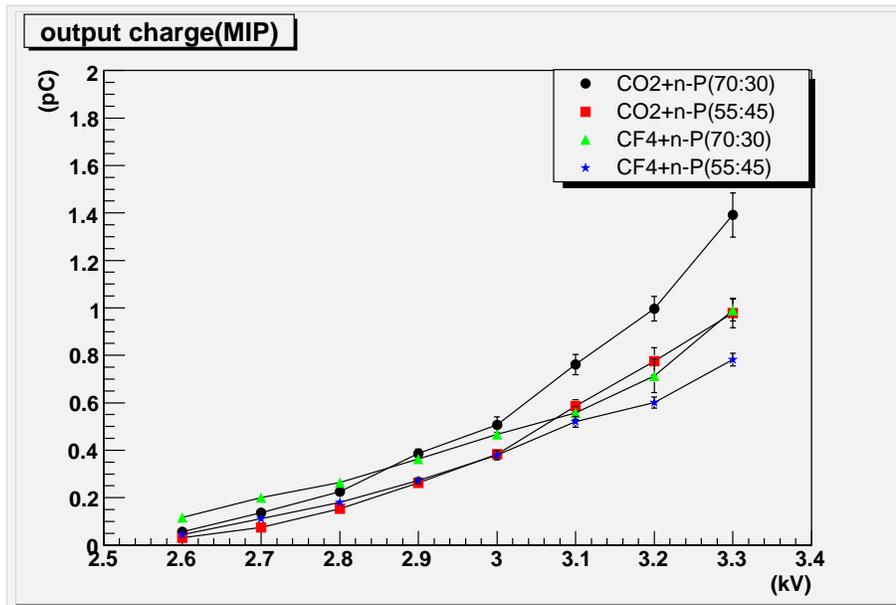


Fig. 5.17: TGC の MIP による出力電荷量

出力電荷量は、4種類のガスについてTGCに印加する電圧を $2.7kV \sim 3.8kV$ の範囲で $0.1kV$ 毎に変えて、ADCを用いて測定した。この測定で、中性子のエネルギーによる出力電荷量の違い、TGCへの印加電圧による出力電荷量の違い、 CO_2 ベースのガスを用いた場合と CF_4 ベースのガスを用いた場合での出力電荷量の違い、 CO_2 、 CF_4 とn-Pentaneの混合比による出力電荷量の違いについての研究を行った。

中性子による出力電荷量分布をFig.5.20～Fig.5.43に載せる。各ガス、各中性子エネルギーについて、TGC印加電圧が $2.7kV$ 、 $3.0kV$ 、 $3.3kV$ の場合の出力電荷量の分布である。ペDESTALのピークは取り除いてある。また、これらの分布中の中性子のピーク位置をFig.5.18、Fig.5.19に載せる。ピーク的位置は、中性子のピークをガウシアンでフィットし、その平均値を採用した。 γ の出力電荷量はMIPのそれにほぼ等しいことから、図中の左のピークが γ のピークであり、右のピークが中性子のピークを表す。全てのガスで、TGCへの印加電圧にかかわらず、2つ存在する出力電荷量分布のピークがはっきりと区別できており、TGCが良いn- γ 弁別能力を持っていることが分かる。

中性子のエネルギーによる違いに着目すると、 $2.5MeV$ では中性子のピークがはっきりしているのに対し、 $14MeV$ ではその形が崩れ出力電荷量が広く分布しており、 $2.5MeV$ ではほとんど表れなかった $20pC$ 以上の大きな出力電荷量成分が表れている。また、中性子のピーク位置は γ のピーク位置の4倍～20倍程度で、その差は印加電圧に比例して大きくなり、特にその増加率は CO_2 で顕著に表れている。Fig.5.18、Fig.5.19を見ると、 CO_2 ベースのガスの方が CF_4 ベースのガスに比べピーク位置が2～4倍と大きく出ている。MIPによる出力電荷量が CO_2 ベースガスと CF_4 ベースガスでかわらないこと(Fig.5.17)、 CF_4 ベースガスのピーク位置は中性子にエネルギーにかかわらず一定であること、印加電圧によるピーク位置の推移が CO_2 ベースのガスに比べ小さいことから、 CF_4 ベースのガスを使用すると中性子による信号が早い段階でサチュレートすると考えられ、中性子による大きな信号が出にくくなっていることが分かる。

n-Pentaneを混入する比率について見てみると、n-Pentaneを多く混入しているガスの方が出力電荷量のピークが CO_2 で数%、 CF_4 で数十%低く出ている。このことは特に CF_4 で顕著に表れた。

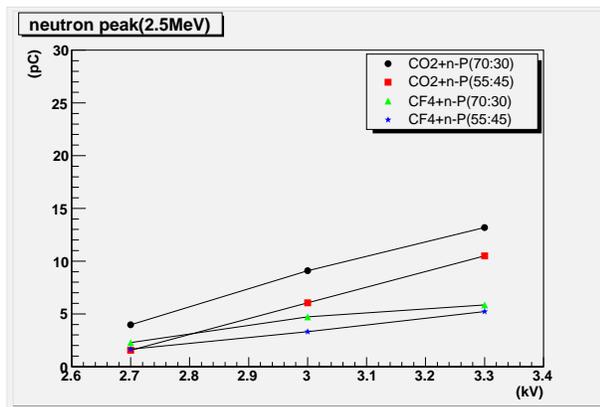


Fig. 5.18: $2.5MeV$ 中性子の出力電荷量分布のピーク

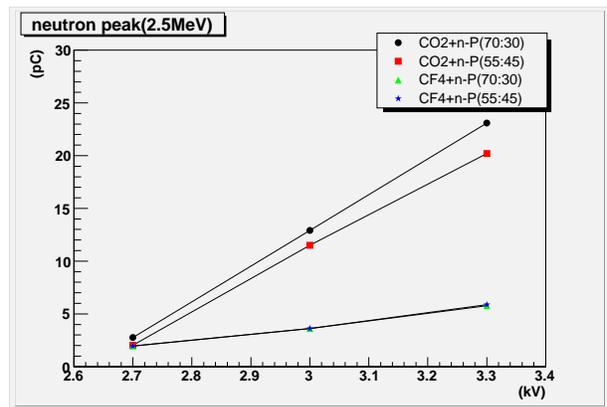


Fig. 5.19: $14MeV$ 中性子の出力電荷量のピーク

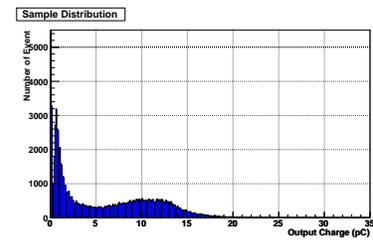
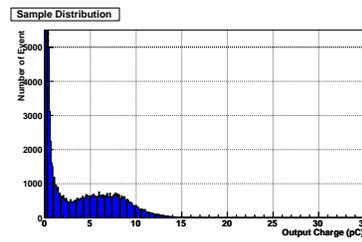
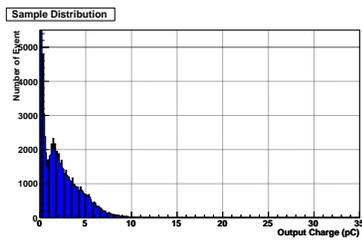


Fig. 5.20: $2.5\text{MeV } CO_2$ 55:45 2.7kV Fig. 5.21: $2.5\text{MeV } CO_2$ 55:45 3.0kV Fig. 5.22: $2.5\text{MeV } CO_2$ 55:45 3.3kV

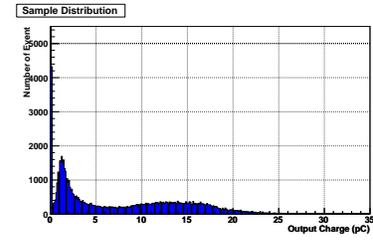
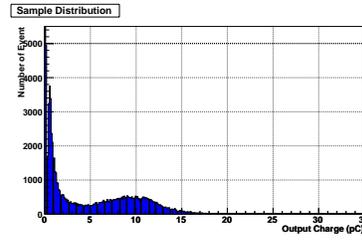
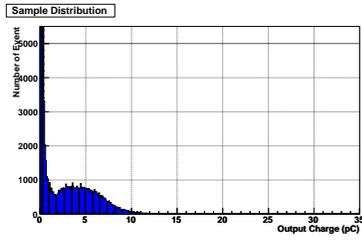


Fig. 5.23: $2.5\text{MeV } CO_2$ 70:30 2.7kV Fig. 5.24: $2.5\text{MeV } CO_2$ 70:30 3.0kV Fig. 5.25: $2.5\text{MeV } CO_2$ 70:30 3.3kV

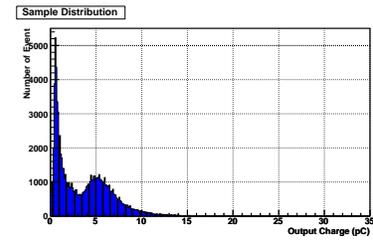
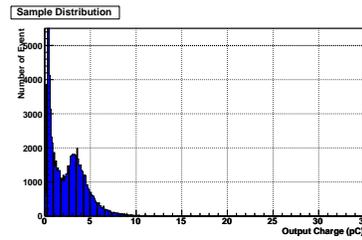
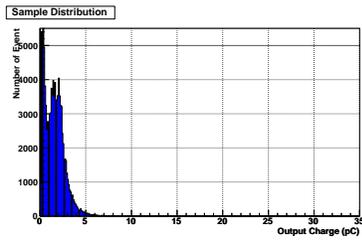


Fig. 5.26: $2.5\text{MeV } CF_4$ 55:45 2.7kV Fig. 5.27: $2.5\text{MeV } CF_4$ 55:45 3.0kV Fig. 5.28: $2.5\text{MeV } CF_4$ 55:45 3.3kV

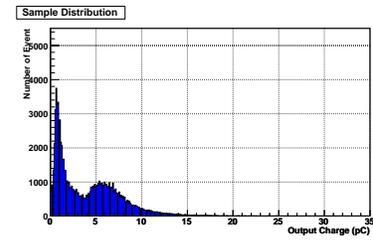
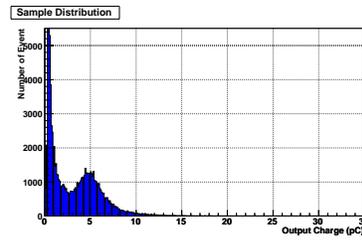
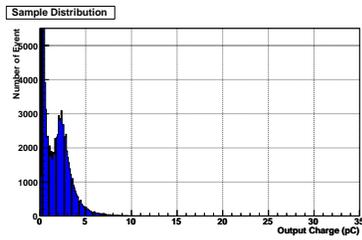


Fig. 5.29: $2.5\text{MeV } CF_4$ 70:30 2.7kV Fig. 5.30: $2.5\text{MeV } CF_4$ 70:30 3.0kV Fig. 5.31: $2.5\text{MeV } CF_4$ 70:30 3.3kV

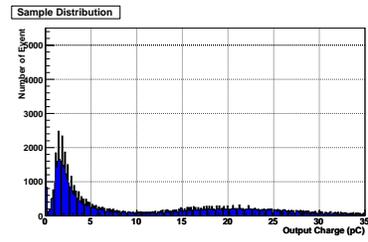
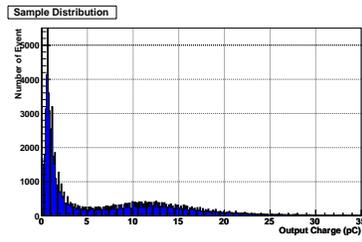
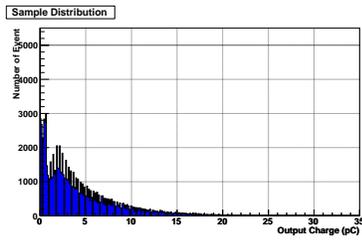


Fig. 5.32: $14MeV CO_2$ 55:45 2.7kV Fig. 5.33: $14MeV CO_2$ 55:45 3.0kV Fig. 5.34: $14MeV CO_2$ 55:45 3.3kV

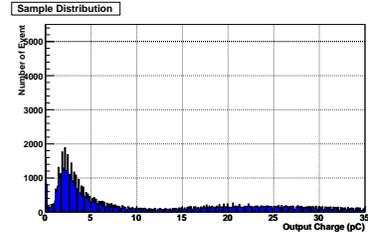
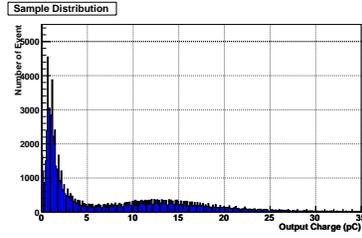
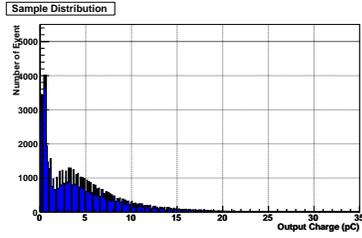


Fig. 5.35: $14MeV CO_2$ 70:30 2.7kV Fig. 5.36: $14MeV CO_2$ 70:30 3.0kV Fig. 5.37: $14MeV CO_2$ 70:30 3.3kV

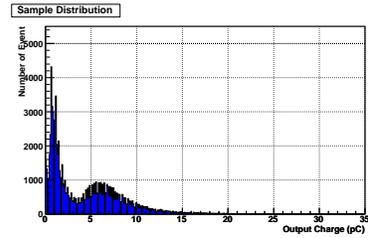
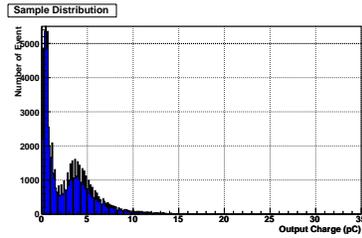
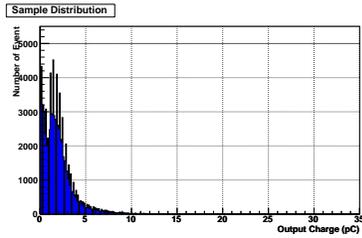


Fig. 5.38: $14MeV CF_4$ 55:45 2.7kV Fig. 5.39: $14MeV CF_4$ 55:45 3.0kV Fig. 5.40: $14MeV CF_4$ 55:45 3.3kV

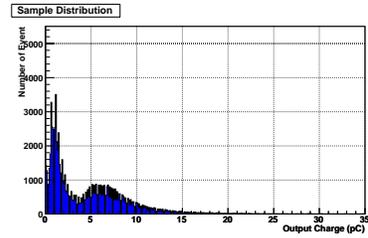
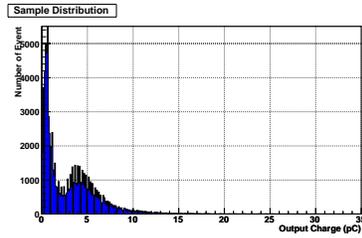
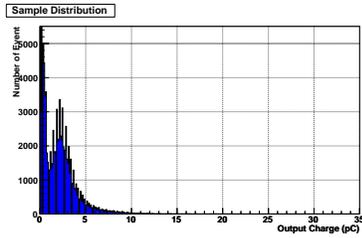


Fig. 5.41: $14MeV CF_4$ 70:30 2.7kV Fig. 5.42: $14MeV CF_4$ 70:30 3.0kV Fig. 5.43: $14MeV CF_4$ 70:30 3.3kV

5.4.3 放電レート

放電レートの測定は、1つの電圧について10分以上中性子を照射し続け、その間チェンバーへ流れた電流の推移を観測することにより行った。モニターデータには、データ取得時の時間も記録されており、この時間とMCSデータの時間とを照らし合わせ、各電圧についてモニターデータから中性子照射中のデータを抜き出し、その電圧でTGCを動作させた間の中性子数を計算して、中性子1個入射時の放電確率を出した。10分間のTGCの有感領域への中性子入射数は 2.5MeV で 4.2×10^{10} 程度、 14MeV で 1.4×10^9 程度である。放電レートは、カレントモニターの値に閾値を設け、Fig.5.44のように放電が起こった中で、 $3\mu\text{A}$ を超えたものを放電と定義し、その回数をカウントすることで算出した。カレント値が $3\mu\text{A}$ を超えてから $3\mu\text{A}$ 以下になるまでを一回の放電とした。 2.5MeV 、 14MeV それぞれの中性子照射時の放電レートをFig.5.45、Fig.5.46に載せる。図には、放電が起こった電圧のみプロットしてある。それぞれの中性子エネルギー、それぞれガスに関してFig.5.45、Fig.5.46に載せた電圧より低い電圧でも測定したが、放電は起こらなかった。図を見ると、 2.5MeV に比べ 14MeV の方が、放電が始まる電圧がどのガスでも低い。これは、 14MeV の出力電荷量分布に見られる出力電荷量の高い成分によるものだと考えられる。また、 CF_4 を混ぜたガスの方が放電が起こりにくくなっている。これは、中性子による出力電荷量が CO_2 に比べ、 CF_4 の方が小さく、生成される信号が CF_4 の方が小さいためだと考えられる。 $n\text{-Pentane}$ に関しては、やはり紫外線のクエンチ能力の高さが表れており、多く混入した方が放電は起こりにくくなっている。実験を通してTGCに電圧を供給する高電圧電源がトリップするような大きな放電(リークカレント $> 10\mu\text{A}$)は観測されなかった。

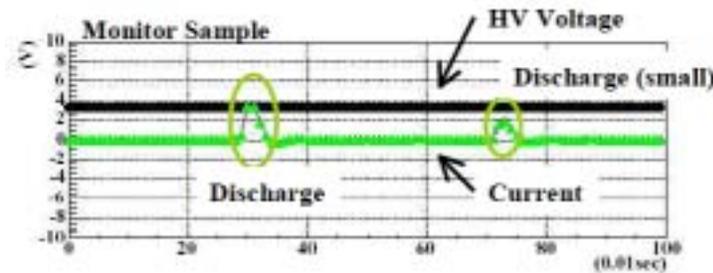


Fig. 5.44: カレントモニターディスプレイ

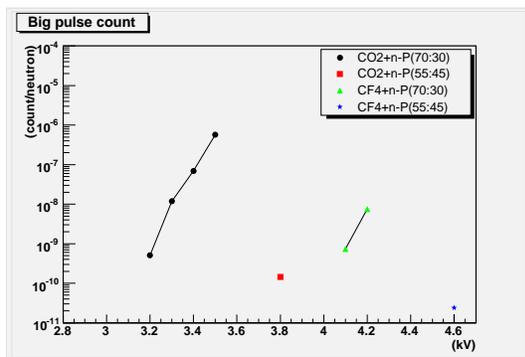


Fig. 5.45: 2.5MeV 中性子照射時の放電レート

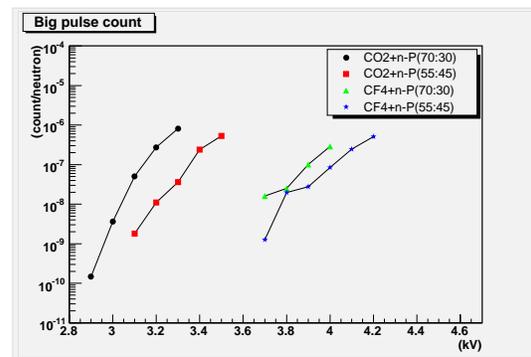


Fig. 5.46: 14MeV 中性子照射時の放電レート

5.4.4 クロストーク

クロストークイベントの測定にはパルスモードの中性子ビームを使用した。パルスモードでは、中性子がバンチ状に TGC に入射するので、TGC に入射する中性子のタイミングの把握が容易にできるため、各中性子ヒットに対する TGC の応答を観測するのに適している。ターゲット付近のピックアップリングから中性子の発生タイミングを取得し、TOF(Time of Flight) 法により即発 γ と中性子を区別し、中性子ヒットに合わせてトリガーを行った。2.5MeV、14MeV それぞれの中性子エネルギーでのパルスモードのビームのパラメータを Table.5.4 に載せる。また、Fig.5.47、Fig.5.48 はワイヤーからの信号で見た 2.5MeV、14MeV での中性子、即発 γ の TGC への到達時間分布である。横軸はストップ信号からの時間を表し、0 がストップ信号が TMC に入った点で、そこから x 軸の正の方向へ時間をさかのぼっていく。右側にあるピークが即発 γ 、左側が中性子のピークである。はっきりと、中性子と γ を識別できている。

	2.5MeV	14MeV
中性子発生量 (DC)	$10^9 n/smA$	$10^{11} n/smA$
パルス幅	—	5ns
繰返し周期	17 μs	17 μs
中性子強度	2.8mA(ピーク値)	—

Table 5.4: パルスモード各種パラメータ

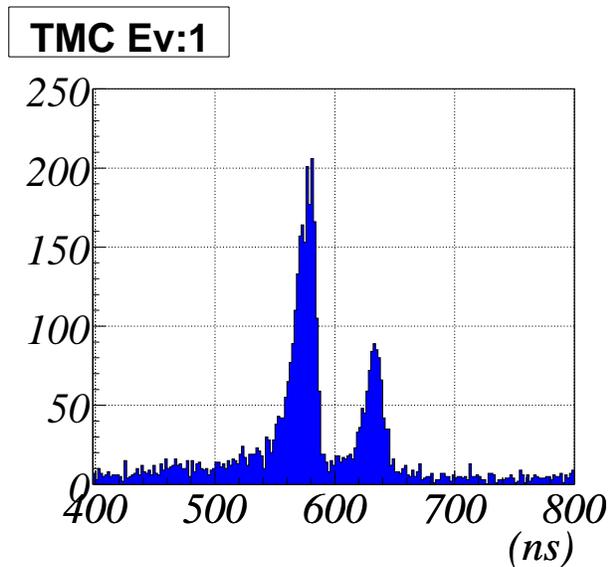


Fig. 5.47: 2.5MeV の中性子、即発 γ の到達時間

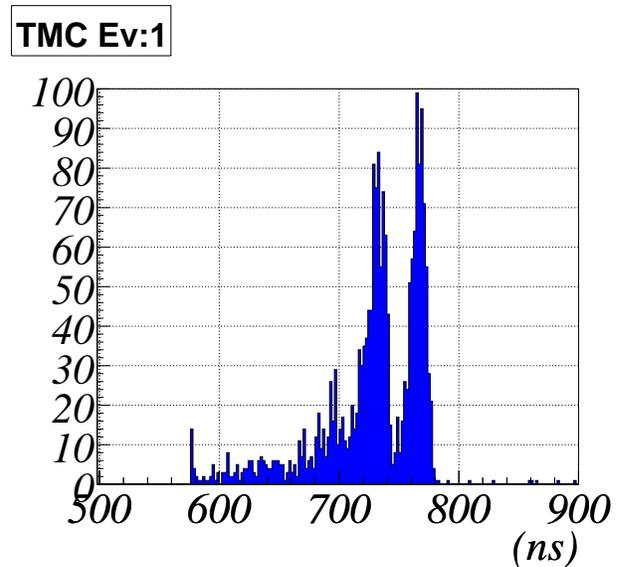


Fig. 5.48: 14MeV の中性子、即発 γ の到達時間

TMC で取得したデータの表示例が Fig.5.49 である。上から Layer1 のワイヤー (W1)、ストリップ (S1)、Layer2 のワイヤー (W2)、ストリップ (S2) の順にヒットのタイミングを表す。横軸が、ストップ信号が TMC に入った時点から 1 μs 前までの時間を表し、0 の点がストップ信号の時間を表す。右に行くほど時間をさかのぼり、1 μs 前までのヒット情報を表示する。ヒットがあれば Fig.5.49 のようにヒットのあったチャンネルのヒットのあった時間に赤い印が表示される。電圧をかけているのは Layer1 のみなので、通常のイベントであれば Fig.5.49 のように W1 と S1 の中性子入射位置に該当する位置にのみ信号が出る。

取得したデータの中で、クロストークを起こしているイベントが観測された。表示例は Fig.5.50 のようになる。W1 に複数のヒットが見られることから、中性子による大きな信号が生成されたことが分かる。この信号により、クロストークが起こり、S1 では全チャンネルが信号を出している。また、電圧がかけられていない Layer2 の W2、

S2にも信号が現れている。このようなクロストークイベントの中で、Fig.5.50のS2のように、クロストークが全チャンネルに広がっているものをマルチヒットと呼ぶことにする。動作電圧と信号の閾値をATLAS実験本番で予定されているものと同じにして以下のデータを集めた。

1. マルチヒットイベントレート

中性子ヒットがあり、かつW1もしくはS1の15チャンネル以上に $200ns$ 以内にヒットがあるイベントのレート。

2. クロストークイベントレート

中性子ヒットがあり、かつW2もしくはS2にヒットがあるイベントのレート。

なお、W1とS1の両方に $15ns$ 以内にヒットがあるものを中性子ヒットとした。クロストークヒット、マルチヒットイベントのレートをTable5.5に載せる。

W1にマルチヒット	0.24 ± 0.14	S1にマルチヒット	37 ± 1.4
W2にクロストークヒット	6.3 ± 0.68	S2にクロストーク	53 ± 1.4

Table 5.5: クロストークレート:中性子ヒット中の各事象の割合 (%)

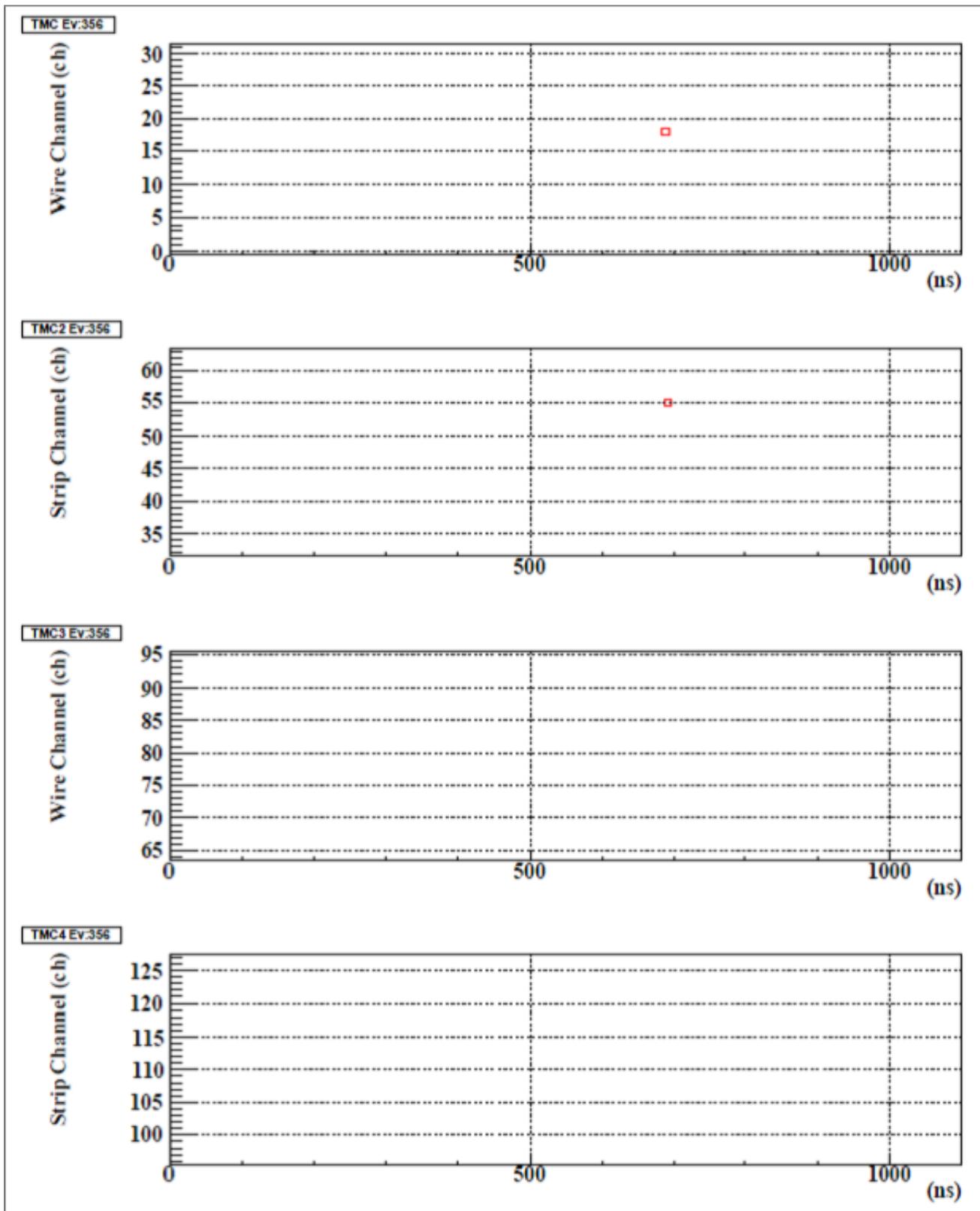


Fig. 5.49: クロストークのないイベント:上から Layer1(電圧印加)のワイヤー W1、ストリップ S1、Layer2(電圧印加せず)のワイヤー W2、ストリップ S2 のヒットタイミングを表す。横軸が時間 (負の方向に時間が進む。)、縦軸がチャンネルを表し、赤印がヒットを表す。W1 と S1 の 1 チャンネルだけにヒットがあり、TGC が正常な動作をしていることがわかる。

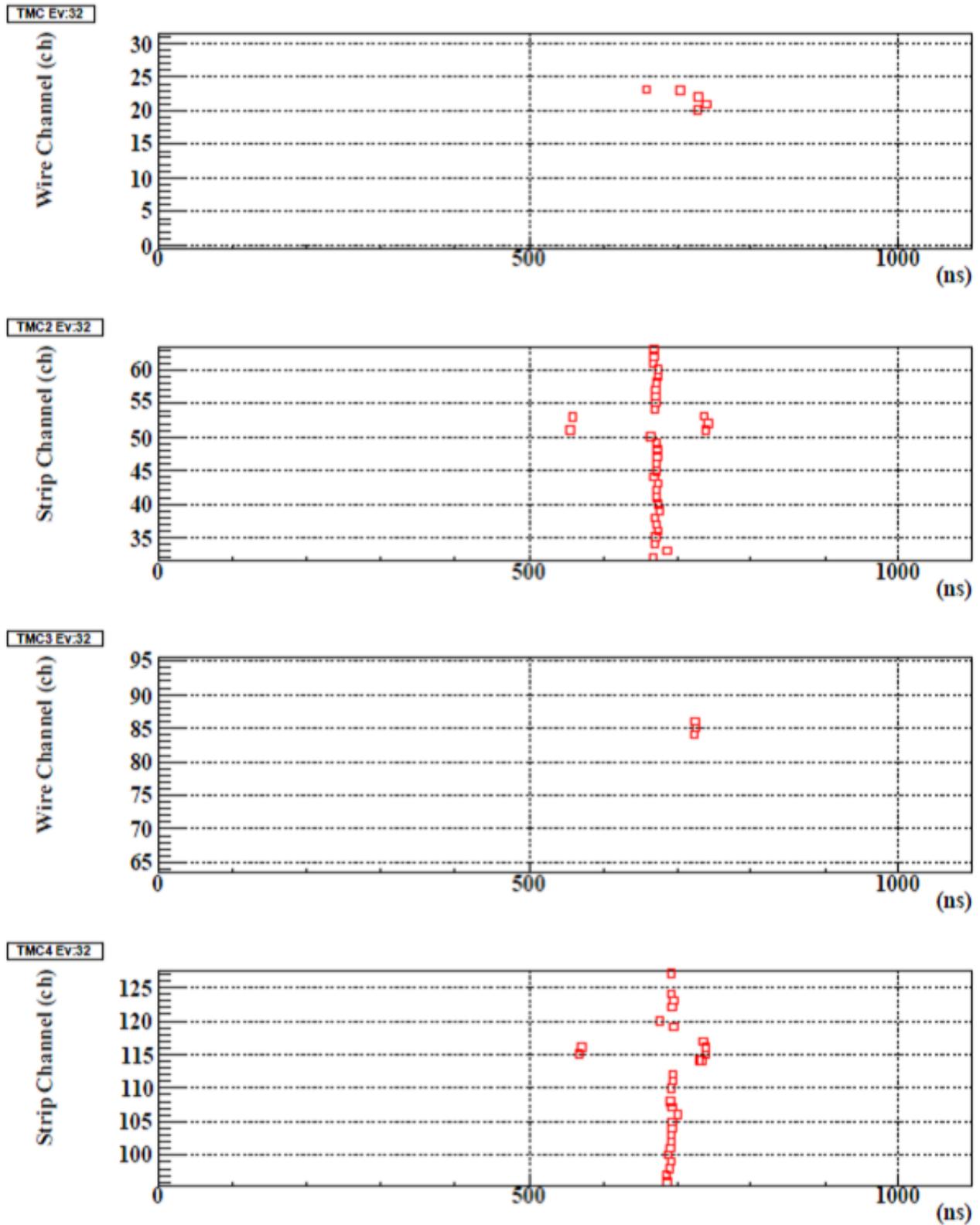


Fig. 5.50: クロストークのあるイベント：大きな信号により W1 の複数のチャンネルにヒットがあり（同層内のクロストーク）、S1 に関してはほぼ全チャンネルに同時にヒットがある（マルチヒット）。また、電圧を印加していない Layer2 にもヒットがあり、Layer1-2 間でのクロストークも起きていることがわかる。

5.5 TGC 中性子シミュレーション

中性子照射試験の実験結果についての理解を深めるために、Geant4を使用したモンテカルロシミュレーションを行った。Geant4はプログラミング言語であるC++を使用して記述されたシミュレーションソフトである。Geant4のパッケージに含まれるプログラミング例の中のN03を元にコードを改良し、TGCに中性子を入射させてデータをとるプログラムを作成した。このプログラムでは、中性子のエネルギーを任意に決めることができる。実際に試験を行った2.5MeV、14MeV以外にも様々なエネルギースペクトルの中性子を入射し、TGCの動作の内部構造の研究を行った。

5.5.1 シミュレーションの概要とセットアップ

Geant4では、実際に行われた実験結果に基づいてデータを生成するのだが、Geant4にはデフォルトではハドロンに関する反応は組み込まれていないため、ハドロンの反応に関するシミュレーションを行う際には、適したモデルを組み込む必要がある。本シミュレーションには、低エネルギーの中性子の反応を取り扱ったG4NeutronHPモデルを組み込んだ。G4NeutronHPモデルでは、G4NDL3.7というデータベースに基づいてイベントを生成する。このモデルをGeant4の物理現象を司るクラスであるPhysicsListに組み込むことで、数MeVから十数MeVの中性子に関する反応のシミュレーションを可能にした。

シミュレーションには簡略化したT7タイプのTGCを組み込んだ。シミュレーションに組み込む検出器は、その幾何学的形状、位置情報とともに、構成物質によって定義する。その構成物質は、原子組成と物質の密度を指定することで与えられる。その情報をExN03DetectorConstructionクラスのメンバを使用して記述することで、検出器が作成される。セットアップ図をFig.5.51に載せる。また、各物質のパラメータをTable5.6に載せる。このTGCの中心に中性子を垂直入射させ、データを取得した。3章に述べたように本来のTGCはさらに複雑な構造をしているのだが、中性子が物質と相互作用する反応断面積は $10^{-24}cm^2$ と非常に小さいので、ある程度の物質質量を持ったFR4フレームと充填ガスがそのほとんどを占めると考えられるため、ワイヤー以外はこの2つのみを組み込んだ。このことは過去に行われている同様のシミュレーションの結果としても示されている[5]。ガスボリュームはSensitiveDetectorに指定した。SensitiveDetectorに指定することで、その検出器内での粒子の振る舞いを詳しく知ることができる。充填ガスは実験に使用したCO₂+n-Pentane、CF₄+n-Pentaneのガス比率55:45、70:30の計4種類のガスを組み込んだ。

シミュレーションでは、様々な情報をデータとして出力させることができる。シミュレーションでの粒子の入射からデータ取得までの流れを述べる。

1. 入射させる粒子は、シミュレーション開始時に指定するマクロファイルに書き込むことで決めることができる。今回指定したパラメータは入射粒子(中性子)、入射粒子数(1.0×10^6)、入射粒子のエネルギーである。このマクロファイルを指定してシミュレーションを走らせる。
2. 1回のシミュレーションは大きく以下の3つに分けられ、それぞれのクラスでデータが保持される。
 - (1) Run:シミュレーションの最初から最後までを指す。ExN03RunActionクラスが管理する。
 - (2) Event:粒子1発の入射についてのシミュレーションを指す。ExN03EventActionクラスが管理する。ExN03EventActionクラスのメンバであるEndOfEventAction内にSDからの情報を記録する記述を入れた。
 - (3) Step:粒子が反応、生成されるたびに生成される。ExN03SteppingActionクラスが管理する。各粒子のエネルギー損失、位置、起源となる物質などの情報を持つ。
3. 各Event、各Stepごとに保持されたデータを集めることで、粒子の情報やSensitiveDetectorからの情報を得ることができる。

今回のシミュレーションでは、

1. 中性子と反応し、陽子、原子核を放出した物質
2. 中性子によりガス内に放出された粒子の種類
3. 中性子によりガス内に放出された粒子がガス内に落としたエネルギー
4. 中性子によりガス内に放出された粒子がエネルギーを落とした位置

などの情報を集め、解析し、

1. 中性子感度
2. TGC を構成する各物質の中性子感度
3. 中性子によりガス内に放出された粒子がガス内に落としたエネルギーの分布
4. 中性子によりガス内に放出された粒子がエネルギーを落とした位置の分布

を出した。

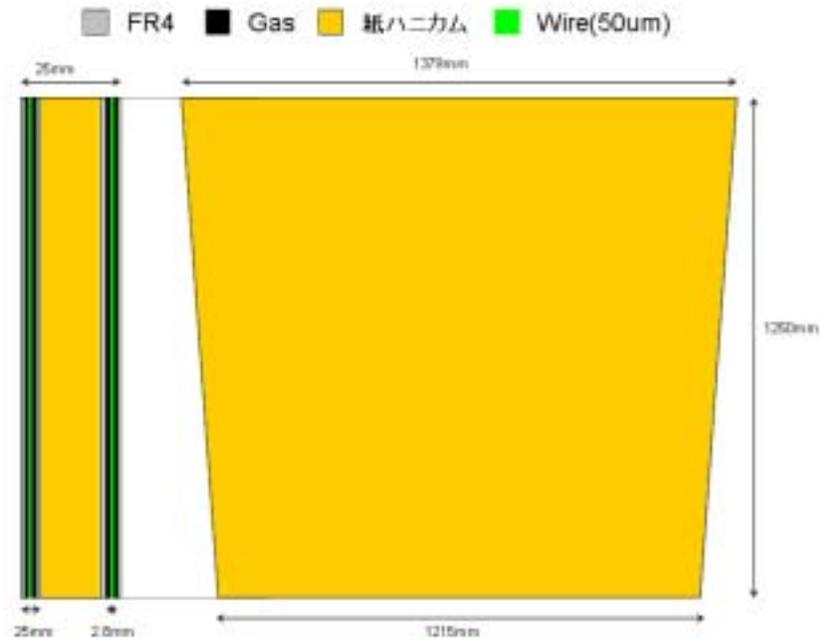


Fig. 5.51: シミュレーションでの TGC の構造

物質	FR4	Gas	Wire
厚み、直径 (mm)	5	2.8	0.05
密度 (g/cm^3)	1.7	32.1 ~ 50.8	19.3
radiation length(g/cm^2)	27.05	36.6 ~ 42.0	6.76
interaction length(g/cm^2)	90.2	-	185

Table 5.6: シミュレーションセットアップの各種パラメータ

5.5.2 シミュレーション結果と考察

中性子感度は、TGC に 1.0×10^6 個の中性子を入射させ、ガス内でのエネルギー損失の総和が0でないものを中性子ヒットとみなし、その数をカウントした。結果を実験値とともに Fig.5.52 に載せる。実験値と比較すると、シミュレーション値が実験値を大きく上回っている。2.5MeV では1.5 から2倍、14MeV では2倍弱の値が出ている。原因としては、

1. ガス内でのエネルギー損失の総和は0でないが、吸着等の効果でワイヤーには届かず、信号を生成しないもの
2. 信号は生成するが実験で設定した閾値を超えずヒットとみなされないもの

が挙げられ、これらの点での実験とシミュレーションでの相違が中性子感度の差として表れていることが考えられる。

1. のようなものとして考えられるのが、中性子がFR4をたたいて出てくる原子核である。エネルギーの低い原子核は陽子同様、エネルギー損失が大きいためガス内でそのエネルギーを失いすぐに止まってしまう。その場合、電離された電子は壁の近くに多く分布することになるため、ワイヤーまで届かずガスや壁に再吸着されるかもしれない。このような原子核が多数存在する場合、実験値との差が大きくなる。このことについて調べるためにFR4フレームから出てきた原子核のみの、ガス内での位置分布を示したものがFig.5.54である。横軸が位置、縦軸がイベント数を表す。これを見ると、壁に吸着されるような原子核は全体の中性子ヒット数の1%に満たないため、中性子感度に大きな影響を及ぼすとは考えられない。

2. について述べると、*Geant4* ではステップが刻まれる際は必ずイオン化が起こっている。イオン化が起こった際、少なくとも数百eV程度のエネルギー損失があるため、電子が生成されないようなイベントはないと考えられる。したがって、実験では中性子の信号をなるべくカットしないように閾値はできる限り低くしていることから、閾値を超えないような信号はないと考えられる。残る可能性として、実験データからの中性子感度の導出の際に計算し、使用したTGCへの中性子入射数、中性子ヒット数に含まれる誤差がある。これらの値に含まれる誤差を考えた場合、実験値とシミュレーション値の差が小さくなる可能性がある。この点については今後追求していく。

次に、TGCを構成する各物質についての中性子感度の図をFig.5.53に載せる。2.5MeV以下の中性子エネルギーでは主にガス分子が、14MeV付近では主にFR4が中性子と反応して信号を生成していることがわかる。ガスの中性子感度の差は2.5MeVと14MeVでごくわずかであるが、FR4については14MeVでの中性子感度が2.5MeVの中性子感度の約5倍と大きく変化している。次に、中性子によりガス内に放出された粒子が落とすエネルギー分布をFig.5.55に載せる。全てのガスにおいて14MeVのピークは2.5MeVのピークのおよそ10分の1であり、これは、Fig.4.11を良く表しており、実験とも一致している。また、Fig.5.55の0.5MeV以上の分布を拡大したものをFig.5.56に載せる。この図から、14MeVの方が2.5MeVに比べ、粒子が落とすエネルギー分布の最大値が大きいことが分かる。これも実験と一致している。実験とシミュレーションとの違いに関して、実験では中性子による出力電荷量分布の中性子ピークの位置が CO_2 と CF_4 で大きな差があったのに対し、シミュレーションではその差が殆どない。この原因として、このシミュレーションでは出力電荷量ではなく、エネルギー損失の大きさの分布を出しただけであるからだと考えられる。実際に観測されたパルス高と関係付けるには、エネルギー損失だけでなく、ガス増幅の過程やドリフト中の電子の分子による吸着を組み込む必要があるのだが、これらについてははっきりと解明されておらず、シミュレーションに組み込むことが出来ない。実際には CO_2 に比べ電気陰性度が非常に高いフッ素を含む CF_4 の方が良く電子を吸着し、信号が小さくなると考えられる。また、シミュレーションにおいても、n-Pentaneの比率による出力電荷量分布の差は見られなかった。

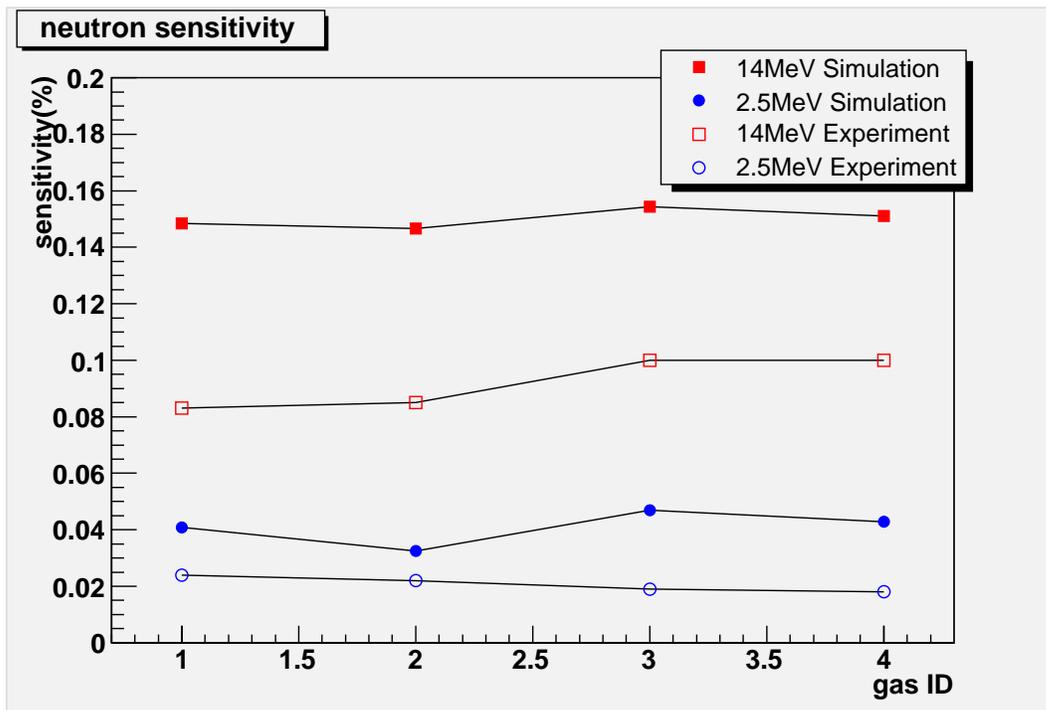


Fig. 5.52: 中性子感度:ガス ID は 1 が CO_2+n -Pentane(55:45)、2 が CO_2+n -Pentane(70:30)、3 が CF_4+n -Pentane(55:45)、4 が CF_4+n -Pentane(70:30)

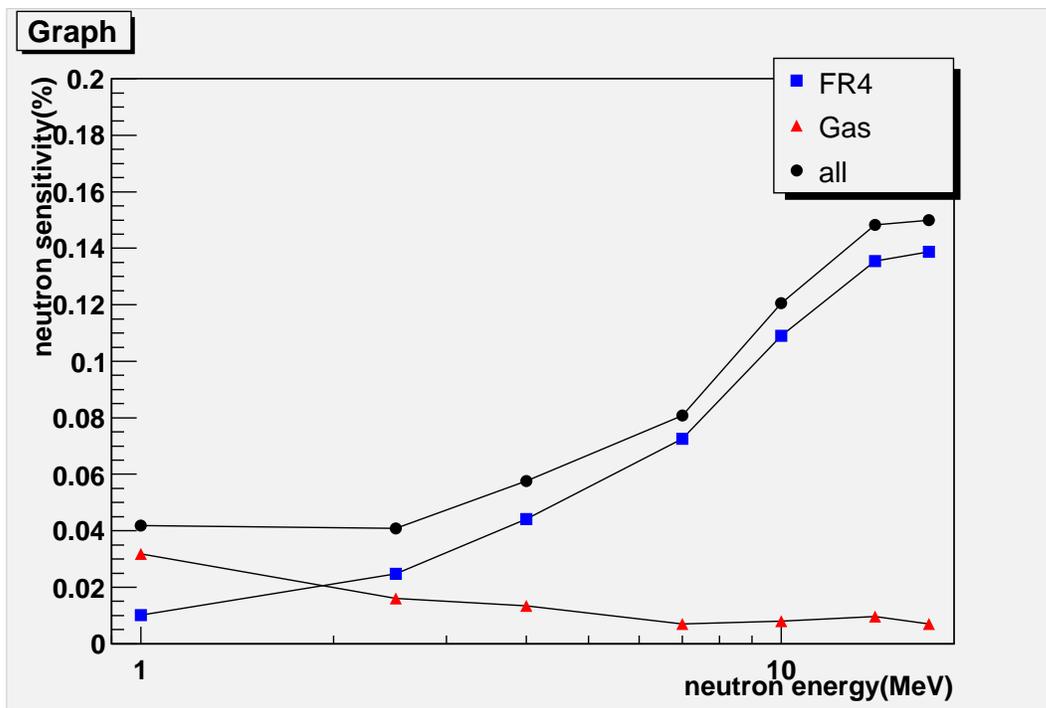


Fig. 5.53: TGC を構成する物質の中性子感度:シミュレーションを行った中性子エネルギーは1MeV、2.5MeV、4MeV、7MeV、10MeV、14MeV、17MeV

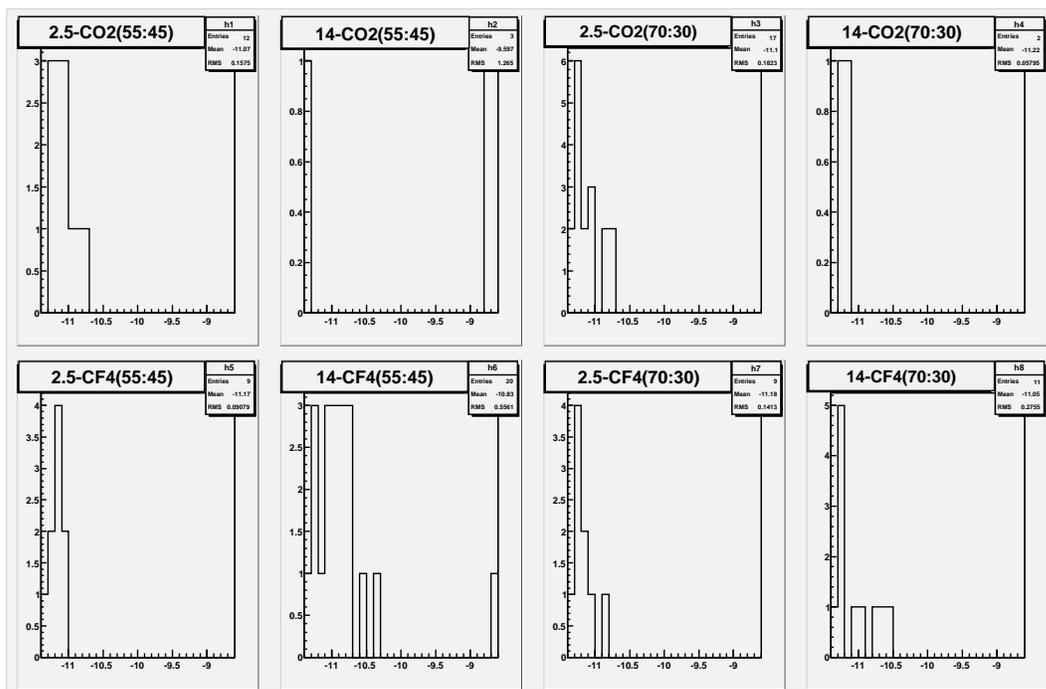


Fig. 5.54: FR4 起源の原子核の分布

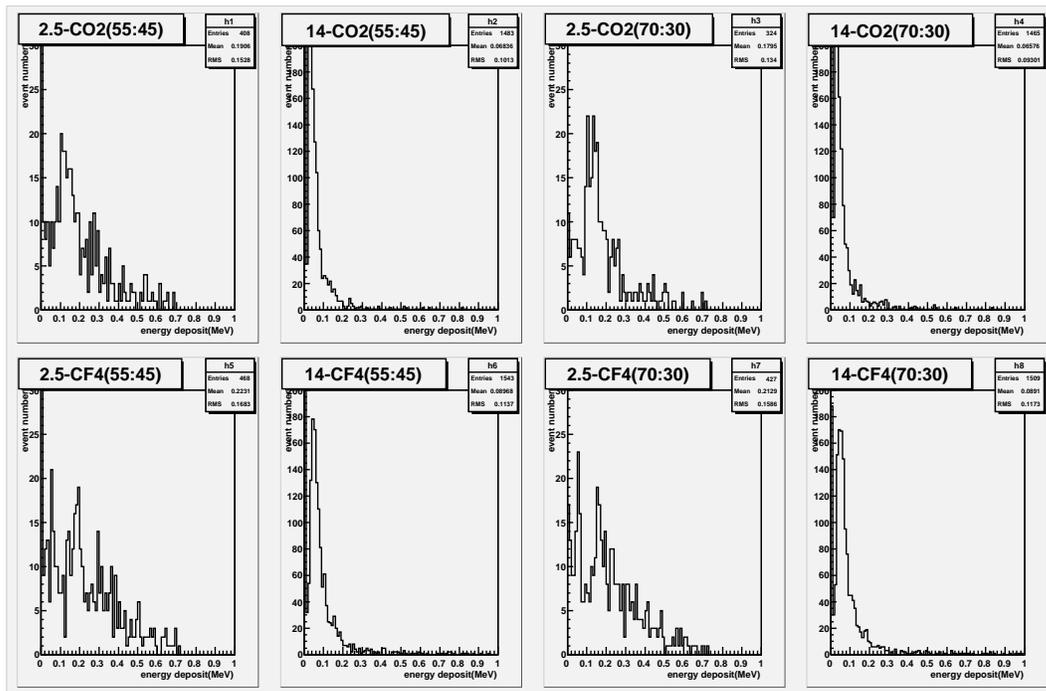


Fig. 5.55: TGC に落とされたエネルギー分布

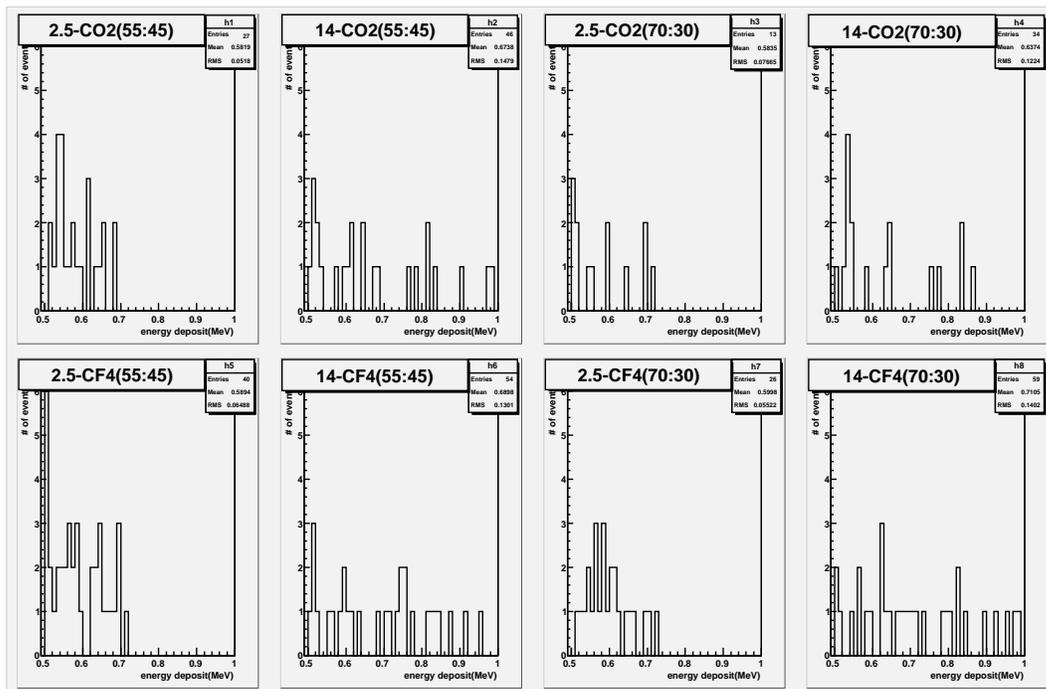


Fig. 5.56: Fig.5.55 の 0.5MeV 以上の分布の拡大図

6 まとめと今後

6.1 まとめ

2007年よりスイスのジュネーブにある CERN で開始予定の ATLAS 実験で、ミューオントリガーチェンバーとして TGC が使用される。ATLAS 検出器への TGC のインストールは着々と進められており、ATLAS 実験で TGC はしっかりと動作することが期待される。

シミュレーションにより、ATLAS 実験での TGC 設置位置での γ 線、中性子バックグラウンドは数 kHz から十数 kHz と見積もられている。この環境下で TGC は安定に動作しなければならない。 γ 線バックグラウンドに対する TGC の動作は既に確認されており、正常に動作することが保障されている。今回の実験では、日本原子力研究所 FNS の中性子源を利用し、ATLAS 実験での中性子バックグラウンドに対する TGC の動作の確認、動作特性の研究を目的として、TGC への中性子照射試験を行った。同時に、ATLAS 実験で使用される CO_2+n -Pentane に加え、放射線耐性に実績のある CF_4 を混入した CF_4+n -Pentane をチェンバーガスとして流入し、TGC が放射線環境下でより安定して動作するための代替ガスの研究も行った。また、 $CO_2(CF_4):n$ -Pentane=55:45、70:30 と混合比を変えて測定し、 n -Pentane の効果についての研究も行った。

中性子照射試験では TGC に、 $2.5MeV$ 、 $14MeV$ の単色中性子を入射し、

1. 中性子感度
2. 中性子入射時の出力電荷量
3. 中性子入射時の放電レート
4. クロストークイベント発生レート

を測定した。

中性子感度は中性子入射数の、 $2.5MeV$ の中性子に対して 0.018 % から 0.024 %、 $14MeV$ の中性子に対して 0.083 % から 0.10 % という結果が出ており、ATLAS 実験での TGC の中性子ヒットレートは数 Hz 程度であると予想される。

出力電荷量の測定では、中性子エネルギー、TGC への印加電圧、ベースガス (CO_2 、 CF_4)、 n -Pentane 比率の違いによる出力電荷量分布の特徴を知ることができた。結果として、中性子エネルギーが大きくなるほど出力電荷量は広く分布し、大きな信号を生成するようになる。また、TGC への印加電圧が高くなるほど、中性子のピークは印加電圧にほぼ比例して出力電荷量の大きくなる方向にシフトしていき、このことは特に CO_2 ベースのガスで顕著に表れた。 CO_2 ベースのガスでは、 $2.5MeV$ の中性子と $14MeV$ の中性子でピーク位置の大きさ、推移の仕方に変化があったが、 CF_4 ではその変化はほとんど見られなかった。 CF_4 ベースのガスでは、出力電荷量や電圧によるピーク位置の変化が CO_2 ベースのガスに比べて小さいことから、中性子による信号がサチュレートしていると考えられる。よって、中性子による大きな信号が出にくくなっている。ATLAS 実験での中性子による TGC への悪影響として考えられる放電の頻発やそれによる早期劣化、クロストークは全て中性子による大きな信号が原因であるため、 CF_4 をチェンバーガスに使用することでその大きな信号が抑えられ、中性子の悪影響が軽減されることが期待される。

放電は、ATLAS 実験での TGC の動作電圧である $2.9kV$ 付近では観測されず、また、電源をトリップさせるほどの大きな放電 (リークカレント $> 10\mu A$) も観測されなかった。よって、ATLAS 実験で中性子の信号による放電の影響は、ほとんどないと考えてよい。

今回の実験で、クロストークイベントが観測された。クロストークイベントの測定では、大型 TGC の片面にの

み電圧を印加し、読出しは全チャンネルから行った。電圧を印加した面のワイヤー、ストリップを W1、S1、他方を W2、S2 とすると、TGC で中性子ヒットが観測された場合の 0.24 % で W1 に、37 % で S1 に、6.3 % で W2 に、53 % で S2 にクロストークあるいはマルチヒット信号が生成される。とくにストリップではクロストークのほとんどがマルチヒットであった。

中性子照射試験の結果の評価、内部構造の理解のため、*Geant4* を用いたシミュレーションを行った。T7 タイプの TGC を作成し、その中心に中性子を垂直入射させて様々なデータを取り出した。取り出したデータは以下である。

1. 中性子感度
2. TGC 構成物質それぞれの中性子感度
3. ガスボリウム内でのエネルギー損失
4. ガスボリウム内での粒子の位置情報

以下にそれぞれについての計算結果を述べる。

中性子感度は、 2.5MeV の中性子に対して 0.032 % から 0.047 %、 14MeV の中性子に対して 0.15 % 程度という結果が出ており、実験値と比較して大きい。シミュレーションの正当性については、過去に行われた同様のシミュレーションの結果 [5] とよく一致しているため、問題ないと思われる。原因のひとつとして、原子核または原子核により放出された電子が FR4、ガス分子によって再吸着され、信号を生成しないことが考えられる。原子核はエネルギー損失が大きく、ガス内ですぐに止まり、FR4 に吸着される可能性が高い。*Geant4* には吸着は組み込まれていないため、この効果が大きければ中性子感度に影響すると考えた。このことを調べるために、ガスボリウム内でのイオンの位置分布情報を取り出し解析した。その結果、特に FR4 付近に目だった粒子の集まりはなく、中性子ヒットに対して 1 % にも満たないものであったため、中性子感度に大きな影響を及ぼしているとは考えられない。他の原因として、実験での中性子ヒットの導出の過程で生じる 20 % 前後の誤差が考えられるが、この点はまだ確かではなく、今後追求していく必要がある。

中性子のエネルギーによる TGC 構成物質の中性子との反応断面積の変化を調べるため、今回のシミュレーションに組み込んだ FR4 とガスについての中性子感度を、中性子エネルギーを 1MeV から 17MeV に変えて入射して測定した。 2MeV 以下の中性子に対しては主にガスが中性子と反応して信号を生成し、FR4 はほとんど反応しないが、 2MeV 以上では中性子の FR4 に対する反応断面積が徐々に大きくなり、 14MeV 付近では主に FR4 が中性子と反応して信号を生成していることがわかった。

実験での出力電荷量分布を評価するため、ガスボリウム内でのエネルギー損失の分布を出した。実験結果として得られた分布との相違点としては、ベースガスによる違いがほとんど表れなかった点が上げられる。原因はおそらく、シミュレーションにイオンの吸着が組み込まれていないためであると考えられる。ガス分子や TGC の素材によるイオンの吸着については解明されておらず、シミュレーションに組み込むことができない。中性子のピークが全ガスで 2.5MeV の中性子のほうが大きく出ている点、 14MeV の方が大きなエネルギー損失を起こしている点では、実験とよく一致しているといえる。

6.2 今後の予定

中性子照射試験で、TGC に中性子ヒットがあった場合にクロストークヒット、マルチヒットが起こることが分かった。TGC は ATLAS 実験でミュオントリガーチェンバーとして安定に動作することが求められており、クロストークヒットやマルチヒットによる偽トリガーの影響を知っておかなければならない。これについては、単に手計算で求めるだけでなく、ATLAS 検出器全体を組み込んだシミュレーションを用いてその影響を確認することも考えている。実験値とシミュレーションでの中性子感度の違いについては、TGC への中性子ヒットの導出方法等についての改良の余地がないか検討し、その原因について追求していく。

現在 TGC は、CERN で最終チェックが行われ、1/12 フレームへと取り付けられている。今後、2007 年の実験開始に向けて、TGC のインストール作業に参加し、2006 年からスタートされる予定のテストビームを使って TGC の解析を行い、物理解析へと進んでいく予定である。

謝辞

本研究を行うにあたり、その機会を与えて頂くとともに適切なご指導並びに助言を頂いた武田廣教授^a、野崎光昭教授^a、蔵重久弥助教授^a、川越清以助教授^a、本間康浩助教授^bに深く感謝いたします。また、本研究に参加し、惜しめない協力と適切な助言を頂いた岩崎博行教授^c、金子純一助教授^e、越智敦彦助手^a、田中秀治助手^cに深く感謝致します。そして、本研究を行う場所を提供して頂くとともに数々の助言を頂き、様々な面で研究の補助をしていただいた落合健太郎氏^f、中尾誠氏^f、その他日本原子力研究所 FNS 職員の皆様に深く感謝致します。本研究を進めるにあたり、適切な助言を頂き、研究への理解を助けて頂いた近藤敬比古教授^c、坂本宏教授^g、佐々木修助教授^c、福永力助教授^h、池野正弘氏^c、他日本アトラスグループの皆様に深く感謝致します。本研究を共に行い議論し、数々の助言を頂き、支えていただいた大下英敏氏^dに深く感謝致します。また、研究生生活を通して議論し、適切な助言を頂いた杉本拓也氏^a、緒方岳氏^a、大町千尋氏^a、田村勇樹氏^a、永曽有亮氏^a、他研究室の皆様に深く感謝致します。上記の方々のご協力があったからこそ、本研究を成功させることができました。最後に、全ての方々に、心から感謝申し上げます。

所属:

神戸大学 自然科学研究科^a

神戸大学 工学部^b

高エネルギー加速器研究機構 (KEK)^c

信州大学 工学系研究科^d

北海道大学 工学研究科^e

日本原子力研究所 FNS^f

東京大学素粒子物理国際研究センター (ICEPP)^g

東京都立大学 理学研究科^h

Figure List

1.1	γ 線バックグラウンド Flux のシミュレーション	2
1.2	中性子線バックグラウンド Flux のシミュレーション	2
2.1	LHC 加速器 [7]	4
2.2	CMS[9]	5
2.3	Alice[9]	5
2.4	LHC-B[9]	5
3.1	Higgs 生成の代表的な生成過程:(a) gluon-gluon 融合 (gluon fusion)、(b) WW/ZZ 融合 (Vector Boson Fusion)、(c) $t\bar{t}H$ 生成過程 ($t\bar{t}H$ production)、(d) W/Z 粒子随伴生成 (W/Z associate production)	7
3.2	Higgs 粒子の生成断面積	8
3.3	Higgs 粒子の分岐比と質量の関係	8
3.4	ATLAS の Higgs 発見能力 [10]	9
3.5	ATLAS Detector [7]	12
3.6	内部飛跡検出器 [1]	13
3.7	カロリメータ [1]	14
3.8	超伝導空芯トロイドマグネットの配置 [1]	15
3.9	エンドキャップトロイドの中央 ($z=1050\text{cm}$) におけるトロイダル磁場 (磁力線) [1]	15
3.10	粒子の透過性の違い	16
3.11	ミュオン検出器 [1]	16
3.12	Monitored Drift Tube [1]	17
3.13	Cathode Strip Chamber [1]	18
3.14	Resistive Plate Chamber [1]	19
3.15	Thin Gap Chamber [1]	20
3.16	ATLAS 実験のトリガーシステムのスキーム [11]	21
3.17	エンドキャップミュオントリガー [1]	22
3.18	M1 ステーションの TGC の配置 [1]	22
3.19	M3 ステーションの TGC の配置 [1]	22
3.20	Doublet / Triplet 断面図 [1]	23
3.21	トリガースキーム [11]	23
4.1	タウンゼント型電子なだれ	24
4.2	各動作モードにおける印加電圧と出力パルス波高の関係	26
4.3	n-Pentane の紫外線吸収断面積	26
4.4	TGC の構造 (断面図) [1]	27
4.5	TGC の構造 (平面図)	27
4.6	Wire 方向の読み出し部分の構造 [1]	28
4.7	TGC の電場 (左)・電位 (右) 構造のシミュレーション [16]	28
4.8	ASD ASIC 回路図	29
4.9	オシロスコープで見た 0.1pC から 0.5pC までの入力に対するプリアンプの外部出力	30
4.10	ASD Board	30

4.11	粒子の持つ運動量と dE/dx	32
5.1	FNS 鳥瞰図	34
5.2	T7 概略図	35
5.3	小型 TGC 概略図	35
5.4	2.5MeV TGC 設置位置	36
5.5	14MeV TGC 設置位置 (加速劣化試験)	36
5.6	14MeV TGC 設置位置 (クロストークスタディ)	36
5.7	ADC データ取得回路図	37
5.8	ADC 信号タイミング	37
5.9	TMC データ取得回路図	38
5.10	TMC 信号タイミング	38
5.11	モニターシステム図	39
5.12	AD 変換表	39
5.13	ガスシステム図	40
5.14	中性子発生量	41
5.15	ADC 値と電荷量の変換	42
5.16	MIP による出力電荷量測定セットアップ	43
5.17	TGC の MIP による出力電荷量	43
5.18	2.5MeV 中性子の出力電荷量分布のピーク	44
5.19	14MeV 中性子の出力電荷量のピーク	44
5.20	2.5MeV CO ₂ 55:45 2.7kV	45
5.21	2.5MeV CO ₂ 55:45 3.0kV	45
5.22	2.5MeV CO ₂ 55:45 3.3kV	45
5.23	2.5MeV CO ₂ 70:30 2.7kV	45
5.24	2.5MeV CO ₂ 70:30 3.0kV	45
5.25	2.5MeV CO ₂ 70:30 3.3kV	45
5.26	2.5MeV CF ₄ 55:45 2.7kV	45
5.27	2.5MeV CF ₄ 55:45 3.0kV	45
5.28	2.5MeV CF ₄ 55:45 3.3kV	45
5.29	2.5MeV CF ₄ 70:30 2.7kV	45
5.30	2.5MeV CF ₄ 70:30 3.0kV	45
5.31	2.5MeV CF ₄ 70:30 3.3kV	45
5.32	14MeV CO ₂ 55:45 2.7kV	46
5.33	14MeV CO ₂ 55:45 3.0kV	46
5.34	14MeV CO ₂ 55:45 3.3kV	46
5.35	14MeV CO ₂ 70:30 2.7kV	46
5.36	14MeV CO ₂ 70:30 3.0kV	46
5.37	14MeV CO ₂ 70:30 3.3kV	46
5.38	14MeV CF ₄ 55:45 2.7kV	46
5.39	14MeV CF ₄ 55:45 3.0kV	46
5.40	14MeV CF ₄ 55:45 3.3kV	46
5.41	14MeV CF ₄ 70:30 2.7kV	46
5.42	14MeV CF ₄ 70:30 3.0kV	46
5.43	14MeV CF ₄ 70:30 3.3kV	46
5.44	カレントモニターディスプレイ	47
5.45	2.5MeV 中性子照射時の放電レート	47

5.46	14MeV 中性子照射時の放電レート	47
5.47	2.5MeV の中性子、即発 γ の到達時間	48
5.48	14MeV の中性子、即発 γ の到達時間	48
5.49	クロストークのないイベント	50
5.50	クロストークのあるイベント	51
5.51	シミュレーションでの TGC の構造	53
5.52	中性子感度	55
5.53	TGC を構成する物質の中性子感度	55
5.54	FR4 起源の原子核の分布	56
5.55	TGC に落とされたエネルギー分布	57
5.56	Fig.5.55 の 0.5MeV 以上の分布の拡大図	57

Table List

2.1	LHC 加速器主要パラメータ [8]	5
3.1	MDT の各種パラメータ [1]	17
3.2	CSC の各種パラメータ [1]	18
3.3	RPC の各種パラメータ [1]	19
3.4	TGC の各種パラメータ [1]	20
4.1	各種ガスによる電子捕獲確率の違い	26
5.1	FNS 加速器概要	33
5.2	各ビームラインでのパラメータ	34
5.3	中性子感度	41
5.4	パルスモード各種パラメータ	48
5.5	クロストークレート	49
5.6	シミュレーションセットアップの各種パラメータ	53

Reference

- [1] ATLAS Muon Spectrometer Technical Design Report, CERN/LHCC/97-22 ATLAS TDR (27 May 1997)
- [2] ATLAS Collaboration, Muon Spectrometer Technical Design Report, CERN/LHCC 97-22, 1997
- [3] I. Dawson, "MDT Background rate predictions using FLUKA2000 "
- [4] 神戸大学 杉本拓也、修士学位論文「ATLAS 実験用大型ミュオントリガーチェンバー検査設備の構築と評価」、2003年2月
- [5] H. Nanjo, et al., Nucl. Instr. and Meth. A543(2005) 441
- [6] M.Hoglmann, et al., Nucl. Instr. and Meth. A494(2002) 179
- [7] CERN Public home ,<http://public.web.cern.ch/public/>
- [8] LHC Large Hadron Collider Home Page ,<http://lhc-new-homepage.web.cern.ch/lhc-new-homepage/>
- [9] 東京大学 藤井祐介、修士が食い論文「ATLAS 前後方ミュオントリガーシステムオンライン系の開発と統合テストビームによる動作検証」,2005年1月
- [10] ATLAS DETECTOR AND PHYSICS PERFORMANCE Technical Design Report Volume II, CERN/LHCC/99-15 ATLAS TDR (25 May 1999)
- [11] ATLAS Level1 Trigger Technical Design Report, ATLAS TDR-12 (20 Aug 1998)
- [12] S.Majewski,G.Charpak,A.Breskin,and G.Mikenberg, A THIN MULTIWIRED CHAMBER OPERATING IN THE HIGH MULTIPLICATION MODE, Nucl. Instr. and Meth. ,217(1983)265-271
- [13] 高エネルギー物理学実験、パリティ物理学コース、真木晶弘、丸善 (30 Sep 1997)
- [14] 粒子線検出器 - 放射線計測の基礎と応用 -, K. クラインクネヒト, 培風館 (15 Dec 1987)
- [15] 東京大学 深津吉聡、修士学位論文「ATLAS 実験ミュオントリガー用 Thin Gap Chamber の動作原理の研究」,1998年3月
- [16] 東京大学 長嶋壮洋、修士学位論文「ATLAS 実験ミュオントリガー用 Thin Gap Chamber の量産と動作検証」,2000年2月
- [17] 東京大学 津野総司、修士学位論文「ATLAS 実験ミュオントリガー検出器のバックグラウンド放射線に対する動作研究」,1999年1月
- [18] 東京大学 南條創、修士学位論文「アトラス実験ミュオントリガー用検出器の中性子バックグラウンドに対する動作研究」,2001年1月
- [19] JAERI-M 83-219 "Neutron Yield Monitors for The Fusion Neutronics Source (FNS) - For 80 degree Beam Line"