

ATLAS SCT ビームテスト解析

自然科学研究科 数理物理学専攻
素粒子物理学研究室
41414016 留田 洋二

平成16年2月16日

概要

現在建設中の大型ハドロン衝突型加速器 (LHC) はスイス郊外にある CERN 研究所において重心系 14TeV の陽子陽子衝突型加速器である。LHC は 1989 年から 2000 年まで実験が行われてきた大型電子陽電子衝突型加速器 (LEP) のトンネルをそのまま使い、そこに超伝導磁石を用いた LHC が建設される。ビームの衝突頻度は 40MHz と非常に高く、ルミノシティは $10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ (最初の 3 年間は $10^{33} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$) に達する予定である。LHC 実験は、素粒子物理学の標準模型で唯一未確認の粒子のヒッグス粒子の探索を最大の目的としている。標準模型や超対称性理論で予想されるヒッグス粒子が存在するならば 10 年間の測定により必ずヒッグス粒子が発見される。アトラス検出器は LHC に設置される検出器のひとつであり、LHC の性能を十分に発揮されるように設計された汎用型粒子検出器である。その規模は高さ 22m、全長 46m、総重量 15,000 トンに及ぶ。アトラス検出器の内側のビームパイプから順に、内部飛跡検出器としてピクセル型検出器と半導体飛跡検出器 (SCT) と遷移輻射飛跡検出器 (TRT) があり、その外側にソレノイド磁石、電磁カロリメーター、ハドロンカロリメーター、そして、ミュー粒子検出器と並んでいる。

アトラスの内部飛跡検出器のひとつである SCT (Semi-Conductor Tracker) は、シリコンマイクロストリップ型飛跡検出器を用いて、ビームの衝突点から発生した粒子や、その二次粒子の飛跡を捕らえる。SCT は 4 層からなる円筒状のバレル部と前後方各 9 枚からなる円盤状の前後方部からなっている。バレル SCT では、4 枚のシリコンセンサー、12 個の ASIC を搭載したフレックスハイブリッド基盤などからひとつのモジュールが作られている。2003 年に CERN の SPS H8 ビームラインにて $180 \text{GeV}/c \pi^-$ を使って、アトラス実験のためのシリコンマイクロストリップ型半導体飛跡検出器 (SCT: Semi-Conductor Tracker) のビームテストを行ない、その性能を評価した。テストした SCT バレルモジュールは我々アトラス日本シリコングループが 2002 年 2 月より量産しているものである。今回のビームテストでは量産時の電気的性能試験において ASIC の性能が完全でないものの振る舞いについて調べた。問題の ASIC は 3 種類で、それぞれ、Gain が不安定なもの、Gain のオフセットが負に出ているもの、また閾値付近で不安定な振る舞いをする 3 種類である。評価は、検出器の性能を表す典型的な物理量を、LHC 実験 10 年間で受ける照射量である $3 \times 10^{14} p/\text{cm}^2$ を照射する前、照射した後の 2 回のデータを解析し評価を行なった。読みだし ASIC 内での信号波形分析を行なった。パルスシェーピング後の平均的なピーキングタイムが 20nsec と設計値を満たすことを確認した。これは LHC が 40MHz (25nsec 毎) のビーム・クロッシングよりも小さい値であり、1.25~10fC の電荷信号の 1fC 閾値でのタイムウォークを 16nsec 以下にし、ビームタギ

ングを可能にする要求からきている。位置分解能はストリップの幅 $80\mu\text{m}$ からの期待される分解能 $23\mu\text{m}$ が確認され、クロス・トークもなくきれいな残差分布が得られた。しかし、ゲインのオフセットが負に出る ASIC では、スレッシュホールド 1fC において、ノイズ占有率が他より 1 桁高い 5×10^{-4} 以下でかつ、検出効率 99% 以上という条件を満たす事が出来ず、実用に耐えられることが出来ない事がわかった。これにより、不良 ASIC の内 29.8% の ASIC が、予備品として製造に使用が可能である事がわかった。

また、GEANT4 を使って SCT のジオメトリーを構築をおこなった。GEANT4 とは物質中での粒子の振舞を記述するソフトウェア (関数群) である。TDR[1] の段階でのシミュレーションでは、デザインも決まっておらず、物質も正しく入っていなかったので、アトラス日本グループは量産をしている事もあり、検出器のジオメトリ・物質量を調べ、フレームワーク構築に貢献した。物質量を見積もる事は m バックグラウンドイベントとなる e^+e^- 対生成などの見積りをするという事で、大変重要な事である。放射長の η 分布を測る事で、どの方向にどれだけの物質量があるかを正しく見積った。

目次

1 はじめに	5
2 LHC 計画	7
2.1 LHC における物理	7
2.2 アトラス検出器	15
2.2.1 アトラス検出器	15
2.2.2 内部検出器	17
3 半導体飛跡検出器 (SCT)	20
3.1 シリコン半導体検出器	20
3.2 SCT の特徴	21
3.2.1 バレルモジュールとフォワードモジュール	21
3.2.2 マイクロストリップ構造	21
3.2.3 2 値読み出し	22
3.2.4 動作原理	23
3.3 モジュールの構成	24
3.4 ベースボード	27
3.5 Hybrid	28
3.5.1 フレックスハイブリッド基盤の構造	28
3.5.2 フレックスハイブリッド基盤の役割	28
3.6 読みだし ASIC	31
3.7 暗電流	33
3.8 位置分解能	36
4 テストビーム解析	37
4.1 セットアップ	37
4.2 バイナリー読みだしとコントロール	39
4.3 アライメント	41
4.4 検出器のヒットマップ	42
4.5 位置分解能の評価	43
4.5.1 ビームの直線の決定	43
4.5.2 クラスター中心の作成	43
4.5.3 位置分解能	44
4.5.4 多重ヒット	48

図 目 次	2
4.6 読み出し ASIC 内の信号波解析	51
4.6.1 ASIC 内の波高分布の求め方	51
4.7 読み出し ASIC 内の信号波解析の評価	53
4.8 検出効率の評価	53
4.8.1 検出効率の決定	53
4.8.2 ノイズ占有率の評価	59
5 ビームテストのまとめ	63
6 GEANT4によるジオメトリの構築	65
6.1 GEANT4 概要	65
7 ジオメトリの構築	67
7.1 フレームワーク	67
7.2 検出器の記述	70
7.3 モジュールの構築および階層化構造	70
7.4 放射長による物質見積り	74
7.4.1 GEANT3とNOVA版GEANT4ジオメトリ	74
7.4.2 NOVA版GEANT4と詳細なジオメトリのGEANT4	76
8 結論	80
A 付録	84
B 付録	85
C 付録	92

図 目 次

1 LHC リングと各検出器の位置	9
2 ヒッグス粒子の生成	11
3 生成断面積	12
4 分岐比	13
5 アトラス検出器	15
6 内部検出器	19
7 バレルモジュール	21

8	フォワードモジュール	22
9	マイクロストリップ構造	23
10	鉛中でのエネルギー損失	24
11	シリコン検出器	25
12	シリコン検出器の鳥瞰図 [2]	26
13	ベースボード	27
14	フレックスハイブリッド基盤	29
15	フレックスハイブリッド基の各層の構造	30
16	ABCD3T のテスト回路	32
17	マイクロディスチャージ	34
18	マイクロディスチャージの観察	35
19	セットアップ図	37
20	セットアップの写真	38
21	トリガーシンチレーターの時間分解能	39
22	オフセットが負の ASIC のヒットマップ	42
23	テスト検出器のクラスター中心点	44
24	残差分布	45
25	一様分布へのガウスフィット	45
26	標準偏差と RMS	46
27	位置分解能の閾値依存性	47
28	クラスターの数	48
29	クラスターの幅	49
30	平均クラスター幅の閾値依存性	50
31	様々な閾値におけるトリガーからの時間に対する検出効率	51
32	閾値に対する 2 次元プロット	52
33	閾値に対する検出効率	53
34	ASIC 内のパルスハイ	54
35	検出効率の閾値依存性	55
36	閾値付近で不安定なモジュールの検出効率	56
37	閾値付近で不安定なモジュールの検出効率	57
38	Gain が不安定なモジュールの検出効率	57
39	Gain が不安定なモジュールの検出効率	58
40	Gain のオフセットが負にでるモジュールの検出効率	58
41	40MHz ランダムサンプリング	59
42	ノイズ占有率の閾値依存性	60

43	閾値付近で不安定なモジュールのノイズ占有率	61
44	閾値付近で不安定なモジュールのノイズ占有率	61
45	Gain が不安定なモジュールのノイズ占有率	62
46	Gain が不安定なモジュールのノイズ占有率	62
47	Gain のオフセットが負にでるモジュールのノイズ占有率	63
48	フレームワーク	68
49	アトラス検出器のジオメトリーツリー	69
50	検出器構築の記述方法	70
51	検出器シミュレーションの流れ	71
52	階層化構造	71
53	クラス関係図	72
54	バレル SCT4 層	73
55	シリコンバレル 4 層の放射長	75
56	NOVA 版と詳細版のジオメトリ	77
57	詳細なものとの比較	79
58	個々の放射長	84

表目次

1	LHC の仕様	7
2	アトラス検出器に用いられているテクノロジーと性能	17
3	おもな ABCD3T チップの仕様	32
4	パラメタとスキャンした値	40
5	テストしたモジュールの表	40
6	GEANT3 と GEANT4 の比較	66
7	メモリーと CPU 使用率	74
8	主な物質の放射	76
9	SCT で使われる主な物質の値	76
10	構成要素の違い	78
11	詳細なものとの比較	78

1 はじめに

現在、素粒子物理学実験の最大のトピックのひとつといえば間違いなく「ヒッグス粒子の探索」が上げられる。このヒッグス粒子とは、「標準理論」で予言されている粒子である。標準理論は現時点までの実験データを矛盾無く説明している理論であり、ヒッグス粒子が発見されればこの理論はより確かなものになる。ヒッグス粒子探索や既知の粒子の緒反応の高い精度の測定及び新粒子の探索を目指した大型陽子陽子衝突加速 (LHC: Large Hadron Collider) 実験が 2007 年よりスイスのジュネーブ郊外の欧州合同原子核研究機関 (CERN: Conseil Européen pour la Recherche Nucleaire) で行なわれる。LHC は 2000 年まで稼動していた電子・陽電子衝突型加速器 LEP (Large Electron Positron) 実験で用いていた円周 27km のリングを改造して、重心系エネルギー 14TeV, ルミノシティ $10^{34} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ の陽子・陽子衝突型加速器となる予定である。

アトラス (ATLAS: A Toroidal LHC ApparatuS) とは、LHC に設置される汎用型粒子検出器である。本研究は、このアトラス検出器の内部飛跡検出器の一部である SCT (Semi Conductor Tracker) に用いられるシリコンマイクロストリップ型飛跡検出器の性能・品質評価である。この内部飛跡検出器は、ヒッグス粒子から崩壊した B メソンなどの軌跡、また運動量といった大変重要な物理量を測定する検出器である。これまでも何回かビームテストは行われている [3] [4] [5] [6] [7] [8] [9] [10] [11]。それまでの実験は、R&D であったり、また、試作器のテストであったりした。2000 年 10 月、実際に実験で使う最終版、及び最終版直前のパーツを用いてビームテストが行われ、物理からの要求、また、デザインされた性能がきちんと出ている事を確認した。これによりアトラス日本シリコングループは 2002 年の 2 月より量産を開始した。現在この量産の QA が筑波にある、高エネルギー加速器研究機構の富士実験棟 B2 において行なわれている。2004 年の 6 月には、アトラスシリコンバレルモジュール 2112 台のうち日本グループの担当である、985 台を製造し終了する予定である。8 月からは、オックスフォード大学に運ばれ、バレルへの取り付け作業の準備が始まる。現在までのところ、量産時の電気的性能試験において、性能が完全でない ASIC が 1.1% 出てきている。この ASIC がはたして、本当に使えない物かどうかこの ASIC を使ってモジュールを製造し、完全でない ASIC の評価を行なった。この評価として、位置分解能、ノイズ占有率、パルス波高分布などの測定を行なうことで、実際の実験で使えるかどうかの評価を行なった。

次に GEANT4 によるアトラス SCT バレル部のジオメトリの構築を行なった。6 章で詳しく述べるが、我々の高エネルギー物理学には、20 年以上の実績のある GEANT3 という FORTRAN ベースのシミュレーションのツールキット (関数群) がある。しかし、今日メンテナンス性の悪さ、大規模・複数人での効率的な開発のし難さにより、GEANT3 の開発は終りを迎えつつある。この GEANT3 での教訓を生かし、この後継に純粋にオブジェクト指向言語で書かれた GEANT4 が CERN、KEK、SLAC を中心に

開発された。アトラスでも、2007年の実験開始に向けて検出器の建設とともにシミュレーションの準備が開発が進められている。アトラス日本グループは、SCTのハードウェア建設の中心的役割を担っている。従って、SCTのジオメトリーや物質質量などをよく把握している。また、97年に作られたGEAN3のジオメトリーは、検出器のデザインがまだ決まっていない段階の物であった。物質質量は、 e^+e^- の対生成など解析をする上で、バックグラウンドとなるイベントを見積もるために、正確に入れる事は大変重要な事である。また、ジオメトリーに関しても、シミュレーションでは当然使いますし、出てくるヒットデータを物理量に直す作業、イベントの再構築など必ず使われ、シミュレーション、解析のどちらにとっても大変重要なことである。そこで、アトラス日本グループでSCTのジオメトリーをGEANT4に入れることから始めた。今回、GEANT3と同等のジオメトリーをGEANT4に入れ、テストプログラムにて放射長を測定することで、物質質量・検出器の位置の確認を行なった。また、モジュール部に関しては、最終版のデザインで詳細にジオメトリーを入れたプログラムを作成した。本論文における構成は、まず、2章でLHC計画についてふれ、3章がアトラス検出器について述べ、4章、5章で今回行なったビームテスト解析、6章でGEANT4によるアトラスシリコンバレル部のジオメトリー構築について述べる。

2 LHC 計画

2.1 LHC における物理

LHC 計画はヒッグス粒子探索や既知の粒子の緒反応の高い精度の測定及び新粒子の探索を目指した実験で、2007 年から CERN において稼働する予定である。LHC は 2000 年まで稼働していた電子・陽電子衝突型加速器 LEP 実験で用いていた円周 27km のリングを改造して、重心系エネルギー 14TeV, ルミノシティ $10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ の陽子・陽子衝突型加速器となる予定である。主な仕様は表 1 にまとめている。

主リング周長	26.66	km
陽子エネルギー	7.0	TeV
ルミノシティ	10^{33}	$\text{cm}^{-2} \text{sec}^{-1}$
入射エネルギー	450	GeV
バンチ衝突間隔	25	nsec
バンチ陽子数	1×10^{11}	個
バンチ数	2835	バンチ
ルミノシティ寿命	10	時間
双極電磁石数	1232	台
双極電磁石磁場	8.4	Tesla
四極電磁石数	386	台
アーク部四極磁場勾配	223	T/m
衝突点でのビーム径	16	μm
ビーム衝突角度	200	μrad

表 1: LHC の仕様

LHC は、シンクロトロン加速器である、LEP トンネルをそのまま用いるが、電磁石をすべて超伝導に置き換えることにより加速エネルギーを上げる。従来の LEP-2 や TRISTAN などのように電子を用いたシンクロトロン加速器では、シンクロトロン放射によるエネルギー損失が大きくなり、加速に限界がある。しかし、電子に比べ、質量の重い陽子では、シンクロトロン放射が少なく、TeV 領域まで加速する事が可能であ

る。式を以下に示す。

$$U = \frac{4\pi E_b^4}{3} \frac{r_e}{\rho (m_e c^2)^3} \quad (1)$$

E_b : ビームのエネルギー

r_e : 電子の古典半径

ρ : リングの半径

陽子は電子と違い、クォークやグルーオンのような内部構造を持っている。これらの構成要素のエネルギーを制御することはできないので、すでに質量がわかっている粒子などの精密測定という部分では電子のほうが有利である。しかし、高いエネルギー領域での未発見粒子の探査などには、質量の大きな陽子のほうが適している。Tevatron (米国, フェルミ国立加速器研究所) でも、陽子を用いているが、こちらは、陽子—反陽子衝突型加速器であり、重心系エネルギーは 2 TeV である。このエネルギーでは、粒子内部でクォークの密度が大きくなるため粒子—反粒子対消滅により新しい粒子を探査する。先ほども述べましたが、LHC では 14 TeV の陽子—陽子衝突型加速器である。このエネルギー領域では、粒子内部でグルーオンの密度が大きくなるため、グルーオンの融合による物理探査が主力となり、衝突粒子が陽子か反陽子かの違いは小さくなる。よって高い積算ルミノシティを達成すべく陽子—陽子衝突を採用している。これにより 2 系統の加速管が必要となるが、冷却系を共有し 2 本の加速管をコンパクトに配置した 2-in-1 方式をとることで製造コストを下げている。よって、あえて生産が困難な反陽子を加速する必要はなくなる。

LHC では図 1 に示すように 4 つの大きな検出器が計画されている。

- ATLAS
- CMS(Compact Muon Spectrometer)
- ALICE(A Large Ion Collider Experiment)
- LHC-b

LHC の主目的であるヒッグス粒子等の新粒子の探索を主な目的として作られているのが CMS 検出器とアトラス検出器である。アトラス検出器については次節で説明する。CMS 検出器はアトラス検出器と同様に汎用型検出器である。ALICE 検出器は鉛イオン同士を衝突させ、高エネルギー状態での原子核内におけるクォーク・グルーオン・プラズマの研究を行う。LHC-b 検出器では、衝突において大量に発生する b クォークを用いて、CP 非保存の物理などを研究する。

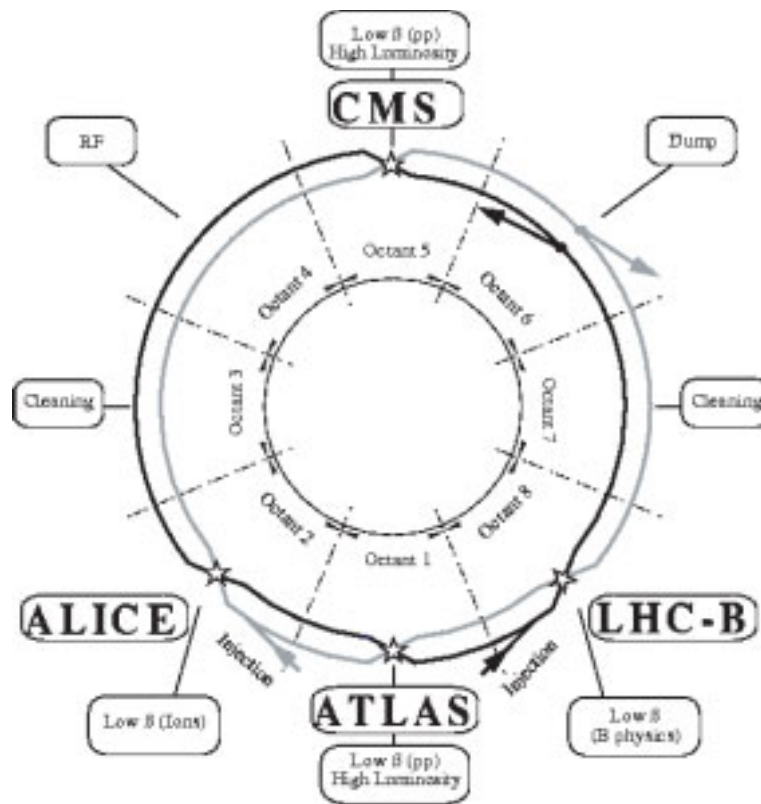


図 1: LHC リングと各検出器の位置 [12]

アトラス実験では、Physics Technical Design Report[1]に示されている様に、非常に多彩な物理の成果が期待されている。衝突エネルギーが高いために、トップ・クォークの精密研究並びに、ヒッグス粒子や超対称性粒子の発見などが期待される。一方、衝突頻度も高いため、ボトム・クォーク W/Z などのゲージ・ボソンの質量や崩壊過程の精密測定、並びに QCD の精密研究が可能である。これらの多彩な物理分野のうち、主要な 6 つのトピックスをここにまとめる。

i) 標準理論の精密検証: トップ・クォークの対生成断面積は 833pb ($\text{ECM}=14\text{TeV}$) と大きいので、実験開始後わずか数年 (30fb^{-1}) で、 2.5×10^7 もの大量のトップ・クォークの対生成イベントが生成される。この大量のイベントサンプルを用いて、以下の様々なトップ・クォークの特性を調べる事が出来る。

(1) トップ・クォークは、その重い質量故に、標準理論の量子補正に重要な役割を果たしている。従って、その質量を精密に測定することは、LEP 実験で得られた様々な精密測定の結果を、標準理論の精密検証として完結させる為に極めて重要である。アトラス実験では、このトップ・クォークの質量を 1% の精度で決定出来る。これにより、ヒッグス粒子の質量を 30-40% の精度で予言することが可能になり、ヒッグス粒子の発見・研究とあいまって、標準理論の精密検証を完結することが初めて可能になる。質量の測定は、 $t\bar{t} \rightarrow bW + bW \rightarrow b\bar{b} l \nu qq$ を用いて測定している。レプトンでトリガーをかける。また、セミ・レプトニックならジェットの組合せの間違いが極めて少なくなる。まず、始めに qq の不変質量を組み、 W として制約を課す。次にこの qq システムに近い方のボトム・クォークをとって bW の不変質量を組んでいる。LHC は、運動学的に余裕があるので、生成されたトップ・クォークの P_t は大きい。従って、“ qq システムに近い方のボトム・クォーク”を選択すれば、ボトム・クォークの正しい組合せの割合が高くなる。これが、Tevatron と大きく違う点である。この、 bW の不変質量がトップ・クォークの質量である。統計誤差は 1 年の運転で 0.25GeV (10fb^{-1}) とすぐに小さくなり、主要な誤差は、ハドロンカロリメータのエネルギースケール (1.0GeV) とグルーオンの終状態 (1.4GeV) である。これらを合わせて 1.7GeV の精度 (1%) になる。

(2) $t \rightarrow bW$ の崩壊分岐比は、標準理論の予言では、ほぼ 100% である。これを 0.1-0.3% の精度 (統計誤差のみ) で測定することが可能であり、小林益川行列の V_{tb} 成分に直接情報を与えることが出来る。これは、小林益川行列のユニタリー条件の検証に重要な役割を果たし、クォークの世代数が 3 であることを検証する重要な研究である。

(3) トップ・クォークの湯川結合定数の測定が可能である。トップ・クォークは重い為、ヒッグス粒子との結合定数である湯川結合定数が大きい。そのため、トップ・クォークから、ヒッグス粒子が放出されるイベントが期待され、その割合から湯川結合定数が測定される。ヒッグス粒子の質量が 120GeV と軽い時、湯川結合定数を 16% の精度で測定することが出来、湯川結合の初めての直接検証になることが期待されてい

る。ヒッグス粒子の質量が重くなると、運動学的に生成断面積が減少するので、測定精度は悪化する。(200GeV の時は、約 50%の精度になる。)

ii) ゲージ・ボソンの精密研究: W/Z などのゲージ・ボソンの研究は、トップ・クォークと並んで、アトラス実験における標準理論の精密検証で重要な役割を担っている。ゲージ・ボソンの対生成過程は、ゲージ・ボソンの 3 点や 4 点自己結合定数に関する重要な情報を含んでいる。TeV 領域に標準理論を超えた新しい素粒子現象があると、これらの自己結合定数に異常が起きることが分かっている。従って、ゲージ・ボソンの異常自己結合を探ることは、TeV 領域の新しい物理を切り開く重要な役割を果たす。もし、1TeV ぐらいまでに、ヒッグス粒子が発見されない場合は、電弱対称性 ($SU(2) \times U(1)$) の破れの起源として、Dynamical Symmetry Breaking シナリオが有力となる。この場合、ヒッグス粒子は電弱相互作用をする「素粒子」ではなく、非常に強い相互作用をする「複合粒子」である。ゲージ・ボソンの対生成過程を通して、アトラス実験では、ヒッグス粒子が発見されない場合にも、電弱対称性の破れの起源を研究することが可能である。

iii) ヒッグス粒子の発見とその研究: ヒッグス粒子の発見は、素粒子の質量の起源を担い、真空中に凝縮していると考えられるスカラー場の直接の証拠となり、電弱対称性 ($SU(2) \times U(1)$) の破れのメカニズムを理解する上で極めて重要である。標準理論は、一つの中性ヒッグス子 (H_{SM}^0) の存在を予言しており、真空の安定条件より、その質量は約 1 TeV 以下であると期待されている。アトラス実験での、ヒッグス粒子の生成過程は以下に上げる 4 つが主である。

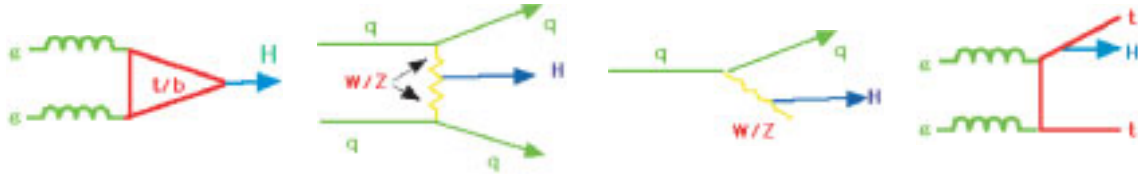


図 2: ヒッグス粒子の生成。 $gg \rightarrow H_{SM}^0$ 、 $qq \rightarrow qqH_{SM}^0$ 、 $qq \rightarrow (W/Z)H_{SM}^0$ 、 $qq/gg \rightarrow ttH_{SM}^0$

(1) トップ・クォークやボトム・クォークのループを介したこの過程の生成断面積は、20pb ($M_H=160\text{GeV}$) である。反面、ヒッグス粒子の崩壊から出てきた粒子以外は、大きな横運動量をもつ粒子がなく、バックグラウンドが厳しい過程である

(2) ふたつのクォークから放出された二つのゲージ・ボソンから H_{SM}^0 が生成されている。反応断面積は、3.5pb ($M_H=160\text{GeV}$) と比較的大きく、ゲージ・ボソンを放出して反跳したクォークに起因する大きな横運動量を持つジェットが 2 本観測される特徴を持っている。

(3) クォークペアの対消滅で生成されたゲージ・ボソンから、更に H_{SM}^0 が放射される過程であり、 $1.2\text{pb}(M_H=160\text{GeV})$ の反応断面積である。終状態に、ゲージ・ボソン (W/Z) が観測される特徴を持っている。

(4) 対生成されたトップ・クォークから、 H_{SM}^0 が放出される過程であり、トップ・クォークの湯川結合と言う重要な情報を含んでいる。 $0.16\text{pb}(M_H = 160\text{GeV})$ と反応断面積は小さいが、特徴のあるトップ・クォーク ペアを終状態に含んでいるのでバックグラウンドが少なく、軽い H_{SM}^0 には重要な過程である。それぞれの過程の生成断面積を、図 3[1] に示す。

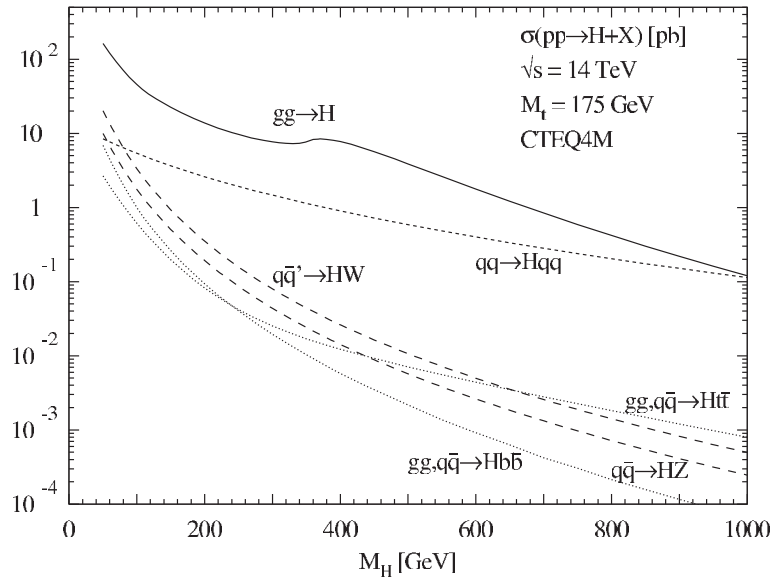


図 3: 生成断面積 [1]

図中の $q q \rightarrow HW/q q \rightarrow HZ$ が W/Z associate production である。Z の寄与は、W の寄与の約半分である。(Tevatron では、これらの過程が重要である)

$gg, q q \rightarrow Hb \bar{b}$ や $Ht \bar{t}$ が、湯川カップリングによるヒッグス粒子の生成である。これは、湯川定数と言う "フェルミオンの質量の起源" と言う重要な情報を含んでいる。従って、これらの過程の研究は、重要であると同時に、 e^+e^- 衝突型実験では出来ない、pp 衝突型実験の面白い特徴である。

SM ヒッグスボソン粒子の崩壊過程の分岐比を図 4[1] に示す。ヒッグス粒子の質量が 130GeV より軽い場合は主な崩壊先は $b\bar{b}$ である。 130GeV より重い場合は WW や ZZ が重要になってくる。例えば、 130GeV のヒッグス粒子では、 $H \rightarrow b\bar{b}$ が 50% で $H \rightarrow WW$ が 30% 150GeV のヒッグス粒子では、 $H \rightarrow b\bar{b}$ が 20% で $H \rightarrow WW$ が 70% LHC

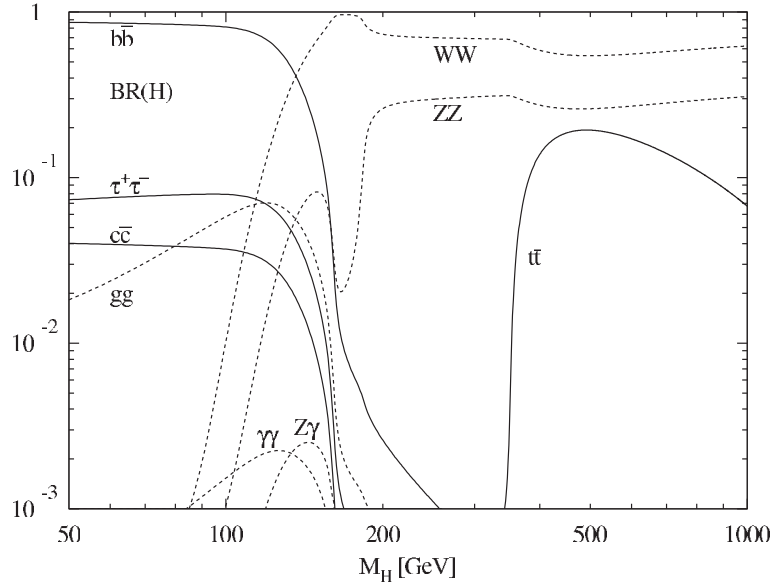


図 4: 分岐比 [1]

が狙っている軽いヒッグス粒子（120-200GeV）では、分岐比が目まぐるしく変化するため、 $bb, WW, ZZ, \tau^+\tau^-, \gamma\gamma$ の5つのモードを完全にカバーする必要がある。

iv) 「超対称性」など標準理論を越える新しい素粒子現象の探索: LEP 実験に於けるゲージ理論の精密検証の結果、「超対称性(SUSY)」による「力の大統一」の可能性が示唆された。力の大統一こそが、素粒子物理学の究極の課題であり、超対称性の発見はこれに向けての大きな一歩と最も有望視されているものである。また、超対称性はヒッグス粒子の質量発散問題を解決するのみならず、宇宙の暗黒物質 (Dark Matter) 問題を解決する可能性を秘めたものであり、ニュートリノ物理、 $b \rightarrow s \gamma$, K 中間子の稀崩壊や、更には、 μ の異常崩壊などのフレーバー物理にも、計り知れない影響を与えるものである。超対称性は、通常の知られている粒子と spin が 1/2 だけ異なる「超対称性粒子」の存在を预言する。この超対称性粒子の発見こそが、超対称性の動かぬ証明となるが、現在のところ一つも発見されていない(現在の制限)。もし超対称性が完全な対称性の場合は、普通の粒子と超対称性粒子の質量は同じになるので、このことは超対称性が何かの理由により破れていることを意味している。この破れのスケールとそのメカニズムを理解することは、「超対称性粒子」発見の後の重要な研究テーマである。

v) ボトム・クォークの精密研究: アトラス実験では、データを全て取り込むことが困難なくらい大量のボトム・クォークが対生成される。トリガー条件に依存するが、年間 2.3×10^{10} ものボトム・クォーク対生成イベントがデータとして収集される予定で

ある。この非常に大きなデータサンプルを用いて、クォーク・セクターの CP の破れを精度良く測定することが可能であり、同時にボトム・クォークの稀崩壊現象を非常に高い感度で探索することが出来る。また、ボトム・クォークの生成と崩壊の理解は、トップ・クォーク (ほぼ 100% $t \rightarrow bW$ に崩壊する) や軽いヒッグス粒子の主な崩壊モードである $h \rightarrow b\bar{b}$ の測定にとっても非常に重要である。ボトム・クォークは、その豊かな崩壊過程故に、様々な物理が期待されている。

vi) QCD の精密研究: 高い横運動量を持ったジェット・イベントの生成断面積の測定を通して、 10^{-18}cm の極超微細なスケールで、クォークを観察することが可能になり、現在「素粒子」と考えられているクォークに内部構造がないかを探ることがアトラス実験では可能である。

以上に挙げた物理の要求から LHC に設けられる検出器に対しては電子やミュー粒子、タウ粒子などのレプトン粒子、光子、ジェット等のエネルギー・運動量を高精度かつ高速度で測定することが要求される。

2.2 アトラス検出器

2.2.1 アトラス検出器

アトラス検出器は汎用型粒子検出器で、全長 46m, 高さ 22m, 重量 15,000 トンという巨大な装置である。その外観を図 5[12] に示す。装置は大きく分けて次のパートに分かれており、各パートはそれぞれ多数のサブディテクターで構成されている。ビームラインから近い順に並べて記述すると

- 内部検出器
- カロリメーター
- ミューオン検出器

となる。

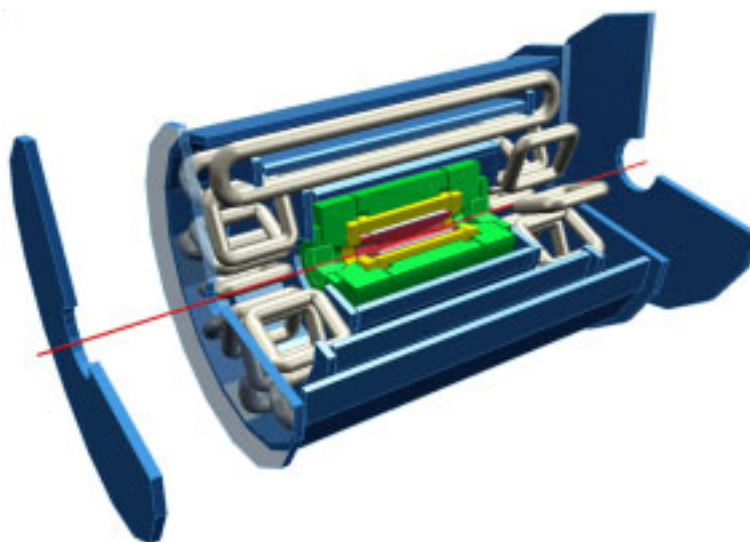


図 5: アトラス検出器

内側から飛跡検出器、ソレノイド磁石、電磁カロリメーター、ハドロンカロリメーター、トロイダルコイル、ミュー粒子検出器が配置されている [12]

内部検出器では生成された粒子の飛跡を精密に測定する。カロリメーター部分では、粒子のエネルギーを測定する。鉛と液体アルゴン検出器のサンドイッチ・カロリメーターである電磁カロリメーターで電子や光子によるエネルギーを、鉄とプラスチック

ク・シンチレーターのサンドイッチ・カロリメータであるハドロン・カロリメータでハドロン（陽子や π 中間子など）によるエネルギーをそれぞれ測定する。

ミュオン検出器は μ 粒子を検出する。強い相互作用をせず、電子のように電磁シャワーを発生させない μ 粒子に対し、この最も外側にある検出器を使って同定する。また、トロイダルマグネットによって磁場がかけられており、 μ 粒子の軌道を曲げ、その運動量を精密に測定する。

アトラス検出器はLHC加速器に建設される汎用粒子検出器で、その建設の構想は、上に示した物理目標を達成するために、次のようになっている。

- 電子および光子をより精度良く同定する電磁カロリメータを装備し、横方向消失運動量を測定するために、大立体角を囲むように、ハドロンカロリメータを設置する。
- ミュー粒子の運動量を精密に測定するための専用のミュオン粒子スペクトロメータを設置する。
- 大きな横方向運動量を持つ重いクォークの同定を可能にするために、高精度の粒子飛跡検出器を用いる。

粒子の運動量を測定するために使われる電磁石は、大きく分けて2つある。内部飛跡検出器を囲むソレノイドと、カロリメータの外側に取りつけられるトロイダルコイルである。ソレノイドは2 Teslaの磁場を飛跡検出器にかけ、荷電粒子の飛跡を曲げることによって、電荷の符号と運動量を測定するために用いられる。トロイダルコイルはカロリメータの外側に取りつけられ、カロリメータを通過した荷電粒子の運動量と電荷の符号を測定するために用いられる。構造上磁場の大きさは場所により異なるが、最大で4 Teslaになる。カロリメータを通り抜けられる粒子のほとんどは、ミュオン粒子がニュートリノである。ミュオン粒子はカロリメータでエネルギー測定ができないので、トロイダルコイルとミュオン粒子検出器で、運動量の精密測定を行う。ニュートリノは検出することができないので、その運動量の合計が消失運動量となる。カロリメータは、電子や光子のエネルギーを測定するための電磁カロリメータと中間子やハドロンのエネルギーを測定するためのハドロンカロリメータ、ビーム軸に対し浅い角度へ飛んだ粒子に対し超前方でエネルギーを測定する超前方カロリメータがある。ハドロンカロリメータは、バレル部と前方部に分けられている。バレル部は、鉄とシンチレータのサンプリング型カロリメータで $|\eta| < 1.7^1$ を覆う。エンドキャップ部は、銅と液体アルゴンの層をタイル状に重ねた構造で、 $1.6 < |\eta| < 3.2$ を覆う。前方カロリメータは、銅の吸収体に穴をあけ液体アルゴンを注入し、その

¹擬ラピディティとは $\eta = -\ln(\tan \frac{\theta}{2})$ で定義される物理量である。 θ はビーム軸となす角とする。

検出器	テクノロジー	配置	性能、分割
内部飛跡検出器	ピクセル	B 層	ピクセルサイズ $50\mu\text{m} \times 300\mu\text{m}$
		バレル部	ピクセルサイズ $50\mu\text{m} \times 400\mu\text{m}$
	マイクロストリップ	バレル部 前方部	ストリップ間隔 80μ
	ストローチューブ	バレル部 前方部	分解能 $170\mu\text{m}$
電磁カロリメータ	液体アルゴン (アコーディオン)	バレル部	$10\%/\sqrt{E} \oplus 0.7\%$
ハドロンカロリメータ	タイルファイバー	バレル部	$50\%/\sqrt{E} \oplus 3\%$
	液体アルゴン	前方部	$50\%/\sqrt{E} \oplus 3\%$
		超前方部	$100\%/\sqrt{E} \oplus 10\%$
ミュー粒子検出器	ドリフトチェンバー	最外層	10%

表 2: アトラス検出器に用いられているテクノロジーと性能 [1]

中に銅の電極を通した構造で、 $3.1 < |\eta| < 4.9$ を覆う。電磁カロリメータは液体アルゴンの層と鉛をアコーディオン状に重ね合わせたサンプリング型のカロリメータである。その形状から、検出器の方位角方向にはギャップがなく、また、高速読み出しが可能である。これらのカロリメータにより、 $|\eta| < 4.9$ を覆い、横方向消失運動量の測定を精度良く行う。内部飛跡検出器はビーム軸近くからピクセル型検出器、シリコン検出器、TRT(遷移輻射) 検出器から構成されている。荷電粒子の飛跡を測定することで、運動量の測定、電荷の測定、衝突点および 2 次崩壊点の測定を行う。

2.2.2 内部検出器

内部検出器は、もっともビーム衝突点に近い部分に配置される。全体にビーム方向に平行に 2Tesla の磁場がかかっており、衝突後に生成される粒子の運動量や二次崩壊点の高精度測定に耐えるエレクトロニクスが開発が進められている。

衝突点から近い順に、

- ピクセル検出器 (Pixel)
- シリコン半導体飛跡検出器 (SCT)

- Transition Radiation Tracker(TRT)

というサブディテクターが配置されている（図 6[1]）。

ピクセル型検出器は衝突点に最も近い飛跡検出器で、その主な役割は衝突点及び崩壊点の決定である。バレル部は 3 層、エンドキャップ部は 4 層が並べられる。バレル部の一番内側の層は B 層と呼ばれ、ルミノシティの低いはじめの 3 年間だけ B 粒子の測定に使われ、その後は取り外される。ピクセル検出器に用いられるモジュールは縦 22.4 mm、横 62.4 mm、厚さ 150 μm のセンサーと読み出し用エレクトロニクスからなる。使われるセンサーのピクセルサイズは、B 層では 50 $\mu\text{m} \times 300 \mu\text{m}$ 、その他の層では、50 $\mu\text{m} \times 400 \mu\text{m}$ である。ピクセル型検出器には特に低ノイズのエレクトロニクスを設置し、放射線損傷により収集電荷が減少しても十分大きな S/N を得られるように設計されている。シリコンマイクロストリップ検出器と比較して、ピクセルサイズが小さいこととバルクが薄いことから、放射線損傷による暗電流の増加が少いことが特長であり、 $10^{15}\text{neutron}/\text{cm}^2$ までの放射線耐性がある。ただし、全体で約 10^8 個ものチャンネルがあり、さらに LHC では多くの荷電粒子が生成されるので、その読み出しは大変な試みであり、これ以上の領域を覆うのは困難である。

TRT は内部検出器のもっとも外側に位置し、直径 4mm 最大の長さ 144cm のストローのような構造になっている飛跡検出器である。約 50000 本で構成される。荷電粒子の飛跡を測定するとともに、ポリエチレン層を通過する際の遷移放射を測定する。遷移放射は密度の異なる物質の境界面を荷電粒子が通過するときに可視領域から X 線領域の放射が現れる現象で強度は γ 因子に比例する。そのため、実質、電子のみに現れる現象である。従って、検出される電荷の量、飛跡のぼやけ具合等から電子とそれ以外の π 粒子等との識別が可能となる。遷移放射による X 線を効率良く検出するため、Xe ガスを用いる。コストが低くできるため、大きな領域を覆う必要がある ATLAS 飛跡検出部の最外層には最適である。

主には電子の識別をする。内部検出器はなるべく物質量が少なくなるように設計されているが、それでもゼロになることはない。そのため内部検出器内の物質と相互作用を起こし電子が発生する。このバックグラウンドの電子を識別することが重要で TRT はその役目をになっている。

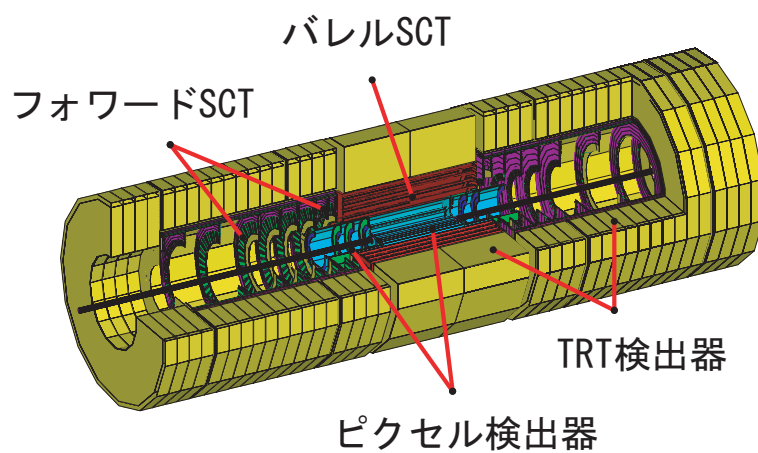


図 6: 内部検出器

生成粒子の飛跡と運動量を精密に測定。

内側から、ピクセル検出器、シリコン半導体検出器、TRT となっている。[1]

3 半導体飛跡検出器 (SCT)

アトラス SCT モジュールの構造は、シリコンマイクロストリップ型半導体検出器である。ここではまず半導体検出器において簡単に触れ、そのあとで SCT の特徴に触れる。

3.1 シリコン半導体検出器

シリコン半導体検出器における信号は、荷電粒子が空乏層と呼ばれる領域を通過する際の電離損失により発生する電子・正孔対である [13][14]。半導体検出器の利点としては、電子・正孔対を生成するエネルギーが小さいことが挙げられる。ガスチェンバーの動作原理は半導体検出器と良く似ていて、電子・イオン対生成がこれにあたるが、電離するのに必要なエネルギーが 30eV であるのに対し、シリコン半導体検出器が 1 つの電子・正孔対を生成するのに必要なエネルギーは常温 300K で 3.6eV と 10 分の 1 ほどである。これによってエネルギー分解能がよくなるのである。また、電子・正孔対を収集するのに必要な時間が厚さ 300 μm 以下の検出器では 3ns 以下であるから大量のデータを短時間で扱う SCT にとって実に良い特性である。

半導体検出器は放射線損傷によって性能が劣化する。最も良く見られる現象はフレンケル欠陥と呼ばれるものであり、照射された粒子によって半導体物質の原子がその正常な格子位置から変位して作られる。欠陥は生成されたキャリアを捕獲し、収集効率を下げる。また、pn 接合にバイアスをかけた場合には、特に電離性放射線が無い場合でもわずかな電流が観測される。これを漏れ電流と呼ぶが、これは放射線損傷によって増加する。漏れ電流は信号のノイズの原因になるが、その増加によって熱を発生する。熱によって漏れ電流は増加し、また熱を出すという熱暴走を起こす。

SCT の設置される場所において、最もビーム衝突点に近いところでは、10 年間の実験期間において $3 \times 10^{14} \text{ protons/cm}^2$ の放射線損傷を受けることが予想されるので、それに耐えうる検出器の開発が進められている。また、漏れ電流による熱の発生を抑えるためにも、実験環境は 10 年間を通してマイナス 7°C 以下に保つことが要求されている。

3.2 SCTの特徴

3.2.1 バレルモジュールとフォワード モジュール

SCT モジュールは2タイプの形状があり、内部検出器に配置される場所の違いからそれぞれバレルモジュール、フォワードモジュールと呼ばれている。バレルモジュール (図7) は $6.36\text{cm} \times 6.40\text{cm} \times 300\mu\text{m}$ のウェーハを、2枚つなげて12cm ストリップ長とする。これを2枚用いて互いに 40mrad の角度をつけて配置した形となっている。これによって、粒子が通過した位置の2次元の情報を得るようにしている。

一方、フォワードモジュール (図8) の方は円盤状に配置されるようにシリコンウェーハが台形のものをを用いる。配置される位置によって異なる3種類のサイズがある。読み出しストリップ数は $768 \times 2 = 1536$ ストリップ、チップ数 $6 \times 2 = 12$ チップというのはバレルモジュールと同じである。

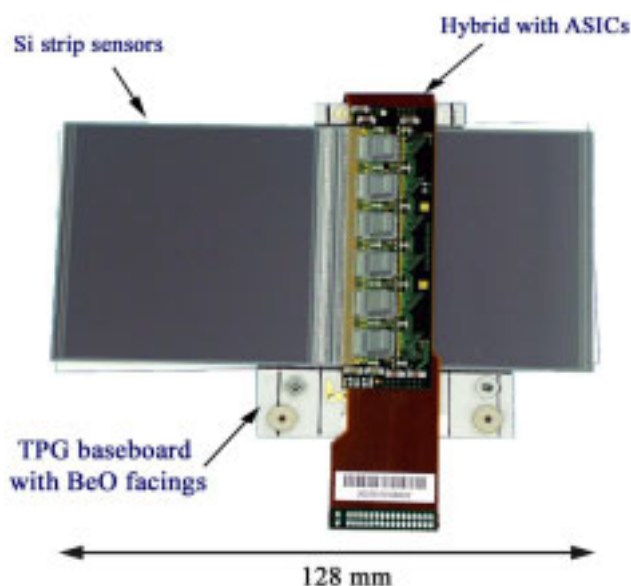


図7: バレルモジュール 完成品

3.2.2 マイクロストリップ構造

n または p 型半導体の一方をストリップ構造にすると、個々のストリップから信号を読み出すことによって、より精度の高い位置情報を得ることが可能である。SCTでは、

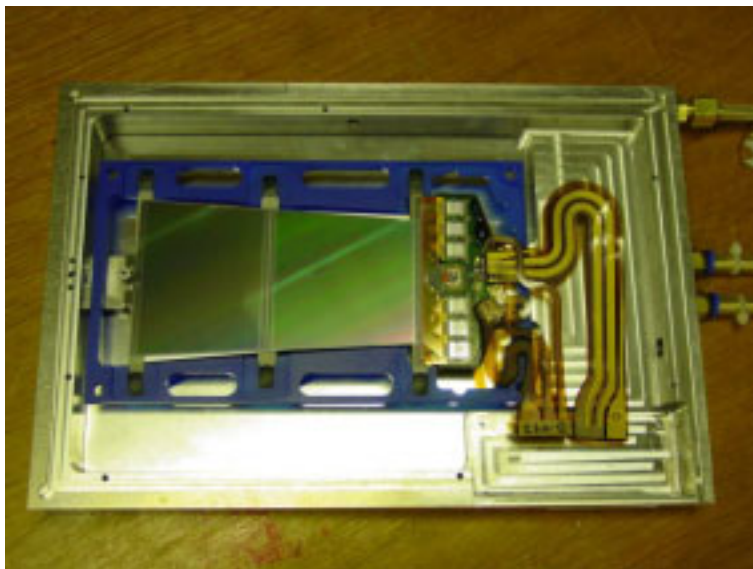


図 8: フォワードモジュール

n バルク p ストリップ読み出しを採用している。n バルクを採用した理由は、「マイクロディスチャージ」「タイプインバージョン」の対策として採用された。

放射線損傷があまり無い時には、バルクは n 型であり空乏層領域は pn 接合面は読みだし側である、p 側から拡がってくる。オンセット電圧はまだあまり下がっていないし全空乏化電圧もさほど上昇していないのでこの期間は問題なく使える。

次に、問題の放射線損傷を与えられた後だが、この時はタイプインバージョンを起こしてバルク部は p 型に型反転しているため、n 側が pn 接合面になる。そのため空乏層領域は n 側から拡がっていく。またオンセット電圧の下降と全空乏化電圧の上昇により動作可能な電圧領域は狭くなってきている。もしバルク全体を空乏化できる電圧をかけられなくとも n 側から空乏化していくため信号を読みとる事が可能である。また、p ストリップとアルミニウム電極の間に酸化層を形成し、漏れ電流を抑えている。(図 9)

3.2.3 2 値読み出し

LHC においては陽子-陽子衝突が 25ns に一回の頻度で起こり、数百億個の粒子が生成される。大量のデータを高速で扱うために、SCT は各チャンネルから得られる信号に対してスレッシュホールドをかけ、それを超えたものを 1、超えなかったものを 0 とする On-Off 読み出しを行っている。これを 2 値読み出し (binary read out) と読んで

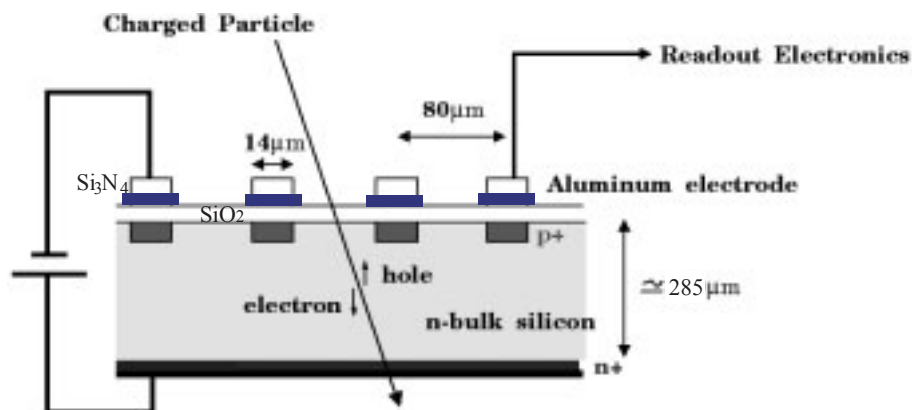


図 9: マイクロストリップ構造 (断面図)シリコンセンサーの動作原理

いる [15]。

3.2.4 動作原理

シリコンマイクロストリップセンサー（以下センサー）は、 $285\ \mu\text{m}$ の高純度シリコンウェハーに不純物濃度の高いp型シリコンをストリップ状に埋め込んだものである（これをインプラント電極と呼ぶ）。シリコンウェハー部分は高純度ではあるがドナー不純物が残りn型半導体となっている（この部分をn-バルクと呼ぶ）。pストリップとアルミ電極は酸化シリコンと窒化シリコンの二重被膜で絶縁されている。pインプラント電極に誘起された信号はアルミ電極でAC的に読み出す。pインプラント電極はDCパッドで表面に出し、高抵抗のポリシリコン（ $1.5\ \text{M}\Omega$ ）を介してバイアスリングに接続されている。SCTに用いるのは片面読み出しセンサーで、片面にのみストリップ状に電極が埋め込まれている。一方反対面にはバイアスを加えるための電極用として、高濃度のn型シリコン層が全面に形成され、表面はアルミが蒸着されている（図11）。上下の電極に逆バイアスをかけると、残留キャリアが電極に移動しキャリアがなくなる状態（空乏化状態）が達成される。電極と共にp電極側からn-バルクが空乏化していきn+電極側まで達すると全空乏化する。このときの逆バイアス電圧を全空乏化電圧という。次に荷電粒子がn-バルク中を通過すると荷電粒子の落としたエネルギーにより電子-ホール対が生成する。平均的に 3fC （20,000個の電子・ホール対相当）の電荷を $285\ \mu\text{m}$ で生成する。荷電粒子が物質中で落すエネルギーはLandau分布に従う事が知られている。これは、原子核中の電子との間にCoulomb力が働いて、電子が励起されるためにエネルギーを失うプロセスである。失うエネルギーはBethe-Blochの式で与えられる（図10[16]）。

$$-\frac{dE}{dx} = k_z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[\frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{\max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta}{2} \right] \quad (2)$$

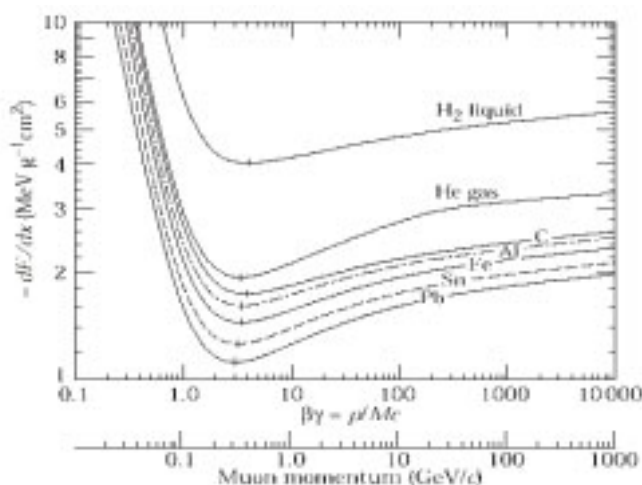


図 10: 鉛中でのエネルギー損失 [16]

生成した電荷は、逆バイアスがかけられ電場の向きは n 電極側から p インプラント電極側なので、その電場に沿ってドリフトする。ホールや電子の移動により p 電極に誘起されるプラスの電荷は、アルミ電極に AC 的に読み出される。読み出された信号はアンプにより増幅され、読み出し回路へわたされる。(図 11)

3.3 モジュールの構成

SCT モジュールは大きく分けて以下の構成となっている。

- センサー
- ベースボード
- ハイブリッド基盤

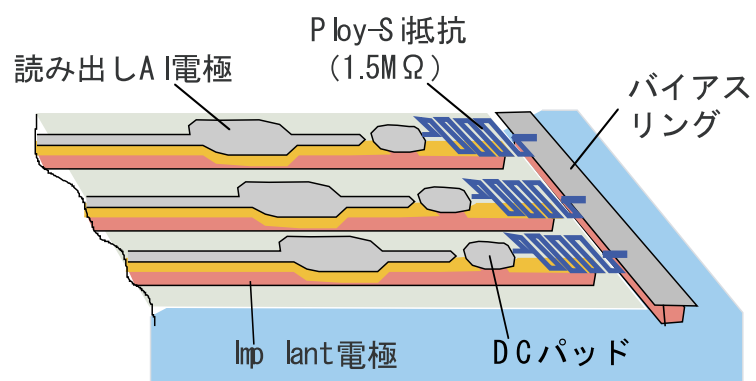


図 11: シリコン検出器の概念図 [17]

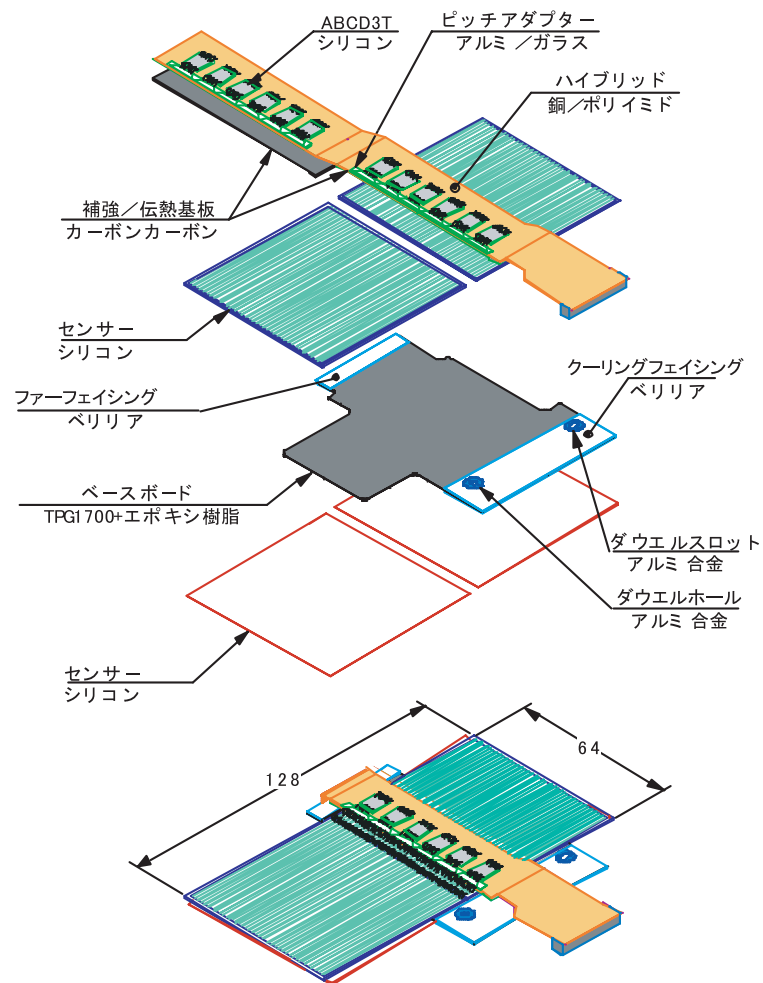


図 12: シリコン検出器の鳥瞰図 [2]

3.4 ベースボード

ベースボードの主な役割はシリコンセンサーとフレックスハイブリッド基板の放熱とモジュール全体の支持である。材質は主に熱伝導性に優れた TPG1700 (熱分解黒鉛 VHCPG: Very High thermal Conductivity Pyrolytic Graphite) である。この電気伝導性は、1450~1850 W/m/K と優れ [18]、またシリコンセンサーに逆バイアス電圧をかける役割も担う。ベースボードの端にあけられた穴 (ダウエルホール及びダウエルスロット) はモジュールのバレルシリンダーへの位置決めに使われる。直接シリンダーに接する部分にはベリリアによる補強板 (BeO: Beryllium-Oxide 以下、フェイシングと呼ぶ) があり、クーリングパイプへの熱接触及び電氣的絶縁に使われる。

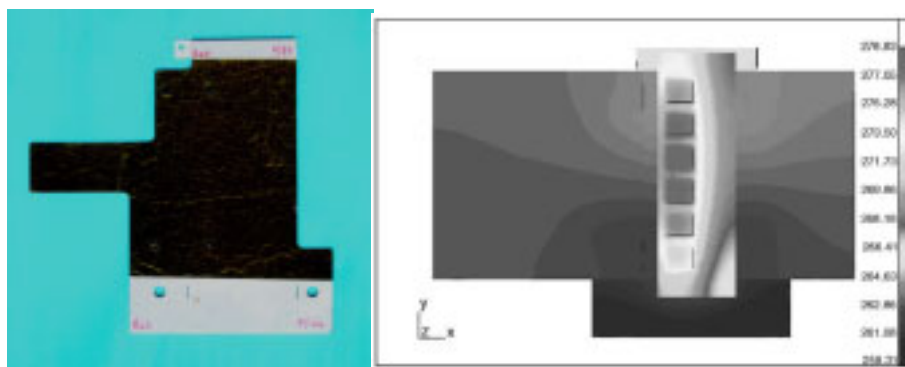


図 13: 左側:ベースボードの写真 (冷却用の BeO フェーシング付き。)
右側:6W の ASIC を載せた時の、ベースボードの熱伝導の様子 [18]。

3.5 Hybrid

3.5.1 フレックスハイブリッド基盤の構造

フレックスハイブリッド基盤 (図 14) の主要部分は 4 つの銅エッチングされた回路面であり、3 枚のポリイミド基材に形成されている。L1 と L4 の銅エッチング面は、ポリイミド基材の片面、L2 と L3 の銅エッチング面は、ポリイミド基材の両面に形成され、それらの間には接着剤層がある。CO₂ レーザーで 2 種類のホール、スルーホール (through-hole) とビアホール (via-hole) を開け、各回路面の電氣的接続のため、化学処理により穴の表面は銅メッキされている。このうち L1 と L2 面はビアホールを介して電氣的に接続している。チップが載せられる部分には、L1,L2,L3,L4 の各面を貫いたスルーホールがあり、両面に接着されたカーボン基盤と接続することで、チップのグラウンドの強化と発熱を有効に除去するように設計されている。また、モジュールにしたときの上面と下面それぞれにサーミスタが取り付けられている (図 15)。ASIC の読みだし用のパッドのピッチが 48 μ m にたいし、シリコンセンサーの読みだしパッドのピッチが 80 μ m である。ワイヤーボンディングを平行に行なうためにガラス製のピッチアダプターが載せてある。

3.5.2 フレックスハイブリッド基盤の役割

フレックスハイブリッド基板の L1、L2、L3、L4 回路層を図 15 に示す。
以下に各回路層の役割を述べる。

- L1 層
 - 各 ABCD3T チップのデータを送り出すための回路配線とパッド (回路配線はチップ間のデータ伝達路となる。)
 - L2 層の回路配線を介した外からの命令信号を ABCD3T チップに送るための回路配線とパッド。
 - ABCD3T チップのデジタル回路とアナログ回路に L4 層から送られた電圧 (Vcc, Vdd) を供給するためのパッド。
 - シリコンセンサーに L2 層から送られた逆バイアス電圧 (HV) を供給するためのパッド。
 - ABCD3T チップのデジタル回路とアナログ回路に L3 層のグラウンドを供給するためのグラウンド面とパッド。
- L2 層

- 外の命令信号を L1 層の回路配線に送るための回路配線。
 - 故障した ABCD3T チップを迂回するための予備回路配線 (一つおいた隣りの ABCD3T チップとも配線されている)。
 - ABCD3T チップのデジタル回路の供給電圧 (Vdd) とアナログ回路の供給電圧 (Vcc) を L4 層の電圧供給面に送るための配線。
 - シリコンセンサーの逆バイアス電圧 (HV) を L1 層のパッドに送るための配線。
- L3 層
 - ABCD3T チップのデジタル回路とアナログ回路の幅広いグランド面 (デジタルグランドとアナロググランドは分離されている)。
- L4 層
 - 各 ABCD3T チップのデジタル回路とアナログ回路に電圧を供給するための電圧面。

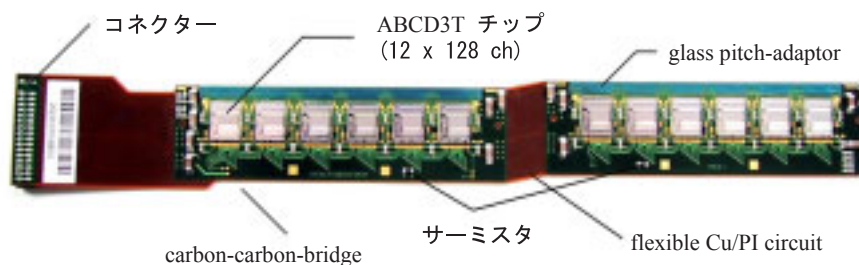


図 14: ASIC やその他すべて載せた状態のフレックスハイブリッド基盤の写真 [2]

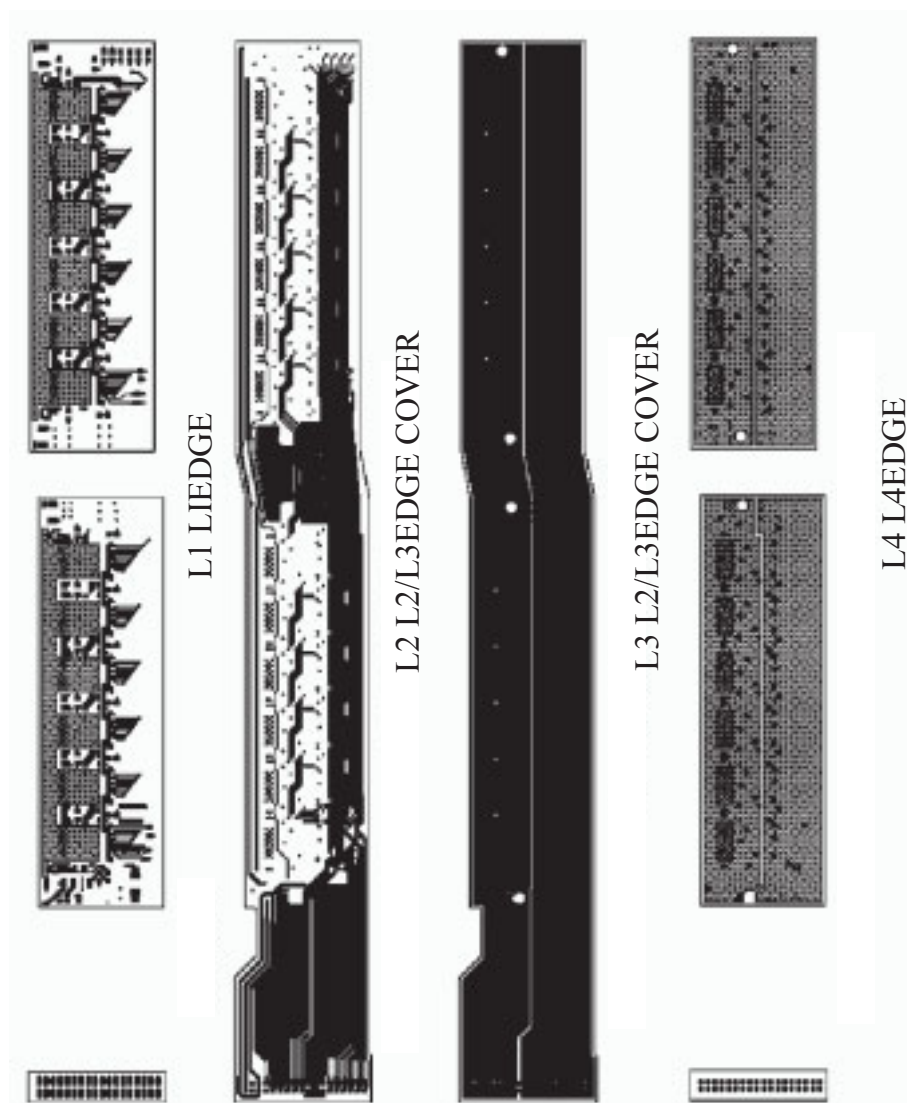


図 15: フレックスハイブリッド基の各層の構造

L1、L2はシグナルを伝える、電気回路。L3はデジタルとアナログのグラウンド。L4は電源を供給する [19]。

3.6 読みだし ASIC

ABCD3T チップとは ATLAS Binary Chip DMILL の略で、アトラス SCT 用の ASIC として、フランスの CEA 社と CERN により開発された。このチップは最新の半導体技術、SOI²ウェーハを使用しており、強度の放射線下で使用されるため放射線耐性が良い DMILL プロセスを用いて作られた [15]。このプロセスは BiCMOS³ で、rad-hard プロセスを取り入れたものである。また、バンチ衝突が 40 MHz であるため 50 MHz のクロックでも作動するように設計されている。このチップはチップ当り 128 チャンネルの入力を持つので、全 1576 チャンネルの 1 モジュールあたり 12 個のチップが必要となる。ABCD3T チップの主な機能 (表 3) のブロックとして、フロントエンド、入力レジスタ、132 段の FIFO パイプライン、読み出しバッファ、データ圧縮ロジック、さらに読み出し回路、読み出しコントロール、コマンドデコーダ、そして閾値生成と較正用回路等がある。SOI では、基材のシリコンが基本的に表面の回路部分から絶縁されており、裏面に何もなければ裏面も酸化シリコンで覆われ、絶縁された導電体が表面回路の下にあることになる。この導電体を通して入力出力のフィードバックが起り発振する可能性がある。このフィードバックループを消すには、導体をグラウンドに落すことであり、導電接触を取るため裏面を金属処理しハイブリッドのグラウンドと接続する。薄くする理由は、シリコン基材は抵抗があり、基材とハイブリッドグラウンドとの接触抵抗を下げるためである [20][21]。

²Silicon On Insulator されるデバイス。MOS トランジスタを SOI で形成すると、特性の改善や寄生容量の低減が図れ、低電圧での動作が可能となり、低電力デバイスを実現できる。

³バイポーラ技術 (電器信号の増幅とスイッチングを高速動作で処理するバイポーラトランジスタを初段に用いている。消費電力が大きい。) と、CMOS (n チャンネルと p チャンネルを組合せ高集積、低消費電力の優れた特徴をあり、デジタルメモリ等に用いている。) の両方をプロセスできる。

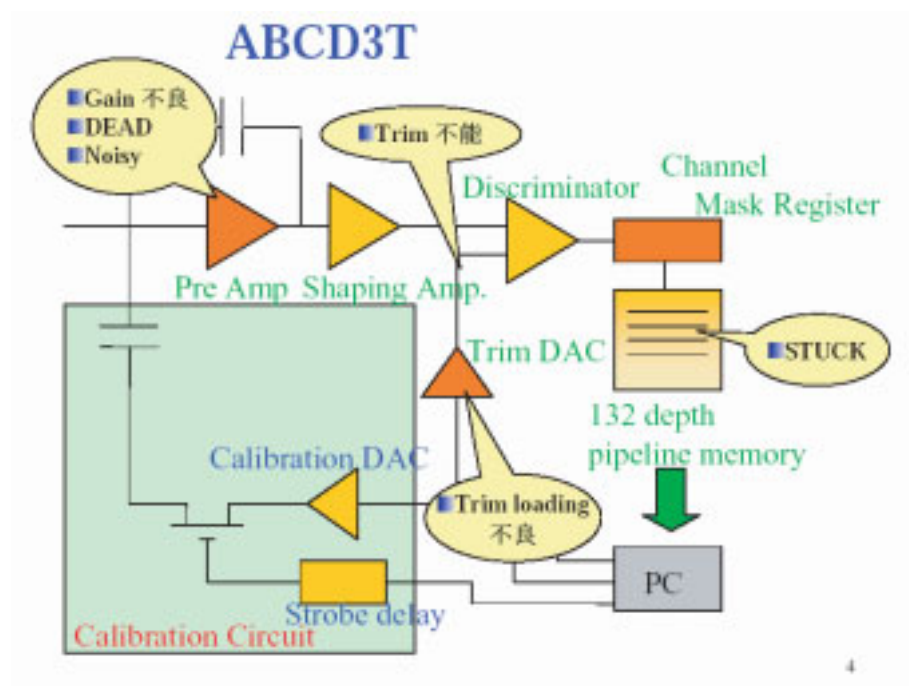


図 16: ABCD3T チップの電気的性能試験で使うテスト回路の簡略図。
 実際は、左から検出器の信号が来て、プリアンプ、シェーピングアンプ、ディスクリミネータをとおり、メモリーに貯められ、読み出しを行なう [22]。

回路のタイプ	バイナリー読みだし
増幅率	50 mV/fC
ピーキング時間	20 ns
入力チャンネル	128 ch/chip
ENC	1500 e (放射線損傷なし) 1800 e (放射線損傷あり)
閾値の選択	4 つ範囲を選ぶことができる 4 bit トリム DAC
タイムウォーク (閾値 1fC)	<16 ns @ 1.25-10 fC
Readout redundancies	By skipping a bid chip
テクノロジー	0.8 μ m BiCMOS (DMILL)

表 3: おもな ABCD3T チップの仕様 [15]

3.7 暗電流

インプラント電極と裏面の電極間の電気容量をバルク電気容量という。逆バイアスを加えていくと空乏層が広がっていく。[13]によると加えた逆バイアス V と空乏層の厚さ d の関係は全空乏層化に至るまでは

$$d = \sqrt{\frac{2\varepsilon V}{e} \frac{N_A + N_D}{N_A N_D}} \quad (3)$$

で与えられる。ここで e は素電荷、 ε はバルク部シリコンの誘電率、 N_A はバルク中のアクセプタの密度、 N_D はドナーの密度である。この式と平行板コンデンサーの電気容量の式から、バルク電気容量 C は全空乏層化に達するまでは次の式 4 に従って変化することになる。

$$C = S \sqrt{\frac{e\varepsilon}{2V} \frac{N_A N_D}{N_A + N_D}} \quad (4)$$

ここで S はシリコンセンサーの有感領域の面積である。このようにバルク電気容量が逆バイアス電圧により減少する理由は逆バイアス電圧を加えていくと空乏層が広がっていき、見掛けの電極間距離が広がっていくからである。空乏層化は p-n 接合面から広がり始め、バルク全体が空乏層化する電圧値を全空乏層化電圧というが、全空乏層化電圧を超えるとバルク電気容量は一定になる。バルクの電気容量と加えた逆バイアスの関係を CV 特性という。逆バイアス電圧を加えたときにシリコンセンサーに流れる暗電流は特徴的な逆バイアス依存性 (IV 特性という) を示し、センサー製造過程の良否の簡単な評価に用いられる。暗電流はシリコンセンサーの発熱やノイズの原因となり、小さいことが望まれる。暗電流の種類には以下のものが存在する

- バルク暗電流
- 表面暗電流
- マイクロディスチャージ

バルク暗電流は、空乏層化領域の結晶中に熱的揺らぎによって生成された電子・ホール対がバルク内の電場に従って電極に集まると、全空乏層化し逆バイアス電圧を加えているにも関わらず電流が流れる。このときに流れた電流をバルク暗電流という。このことからバルク暗電流の大きさは空乏層の厚さに比例することになるが、一方空乏層の厚さは式 (3) に従う。従って暗電流の逆バイアス電圧の依存性としては、全空乏層化電圧以下では $\sqrt{V}$ に比例して大きくなるが、全空乏層化電圧を超えると変化をしない

くなる。熱的揺らぎに起因するバルク暗電流 I は温度依存性を持ち、その特性は以下の式に従うとされている [13]。

$$I(T) = aT^{\frac{3}{2}} \exp \left[\frac{-E_g}{2k_B T} \right] \quad (5)$$

ここで、 a はシリコンセンサーの形状や加えた逆バイアス等で決まる定数、 T は絶対温度、 E_g はシリコンのバンドギャップエネルギー (1.21eV)、 k_B はボルツマン定数 (8.62×10^{-5} eV/K) である。結晶中の格子欠陥や不純物はエネルギーバンドを形成し、半導体中の電子の荷電子帯から伝導帯への遷移確立を上昇させるため、バルク暗電流を増加させる原因となる。典型的に暗電流は 7°C の温度変化で 2 倍になるので、IV 特性の測定では正確な温度の設定が重要となる。

表面暗電流は結晶表面には切断時にできたひびや凹凸、表面構成物による有限抵抗があるために電流が流れやすくなっており、この表面に流れる電流を表面暗電流と呼ぶ。これは加工の技術力などにも依存する。

マイクロディスチャージは、電場が局所的に強くなると発生する現象で、主にインプラントストリップ電極付近の配置や電極のエッジ形状などの設計や、不純物による電場の乱れも関係する。高電場によって電子雪崩が発生し、急激に暗電流がながれる。マイクロディスチャージがあると思われるモジュールを赤外線カメラで観測したところ、図 17 のようなマイクロディスチャージによる発光点が観測された。その発生点付近のストリップのノイズの増加も確認された。しかしながら、長時間の逆バイアス電圧の印加により、マイクロディスチャージは徐々に減少し消滅した。同時にノイズも減少した。



図 17: 赤外線カメラによる、マイクロディスチャージの写真
赤く光っているところがホットスポットである。右は左の丸の部分拡大したもの。

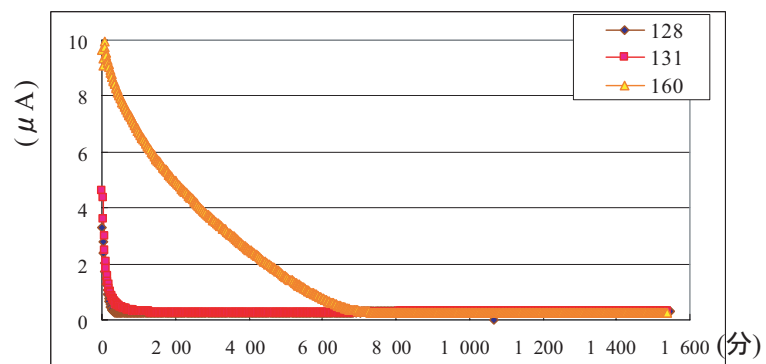


図 18: マイクロディスチャージの観察

恒温槽に入れ、温度を 15 度に保ち 500V の逆バイアスをかけた状態で測定。横軸が時間、縦軸が流れた電流。

3.8 位置分解能

シリコンセンサーの位置分解能はストリップの間隔で決定される。CMOS テクノロジーを用いるので加工精度として約 $1\mu\text{m}$ 程度が可能であるが、キャリアが移動する際の散乱のために典型的に $5\mu\text{m}$ が限界である [16]。読み出しエレクトロニクス収集精度やチャンネル数からも制限を受ける。SCT では位置分解能の要請からストリップ間隔は $80\mu\text{m}$ に決定した。

ここで位置分解能を計算する。まず、位置分解能はアナログ読み出しとデジタル読み出しで異なる。アナログ読み出しの方は重心法を用いることでより良い位置分解能を得ることができるが、読み出したあとの信号の処理等がより複雑となる。一方、デジタル読み出しの位置分解能はストリップ間隔で決定されてしまうが、読み出した後の信号は 1 ビットで扱いやすい利点がある。SCT ではデジタル読み出しを用いる。そこで、デジタル読み出しの位置分解能は、粒子が一様に入射してくると仮定し、あるストリップの位置を x_0 、ストリップの間隔を h とすると、 $x_0 - h$ から $x_0 + h$ までの粒子の位置は x とされるため、この条件で位置測定をすれば RMS は

$$\sigma^2 = \int_{x_0-h/2}^{x_0+h/2} (x-x_0)^2 \frac{dx}{h} = \left(\frac{h}{\sqrt{12}}\right)^2 \quad (6)$$

となる。従って、デジタル読み出しの時の位置分解能は、ストリップ間隔の $\frac{h}{\sqrt{12}}$ これより $23\mu\text{m}$ 程度の位置分解能を得ることができる。

4 テストビーム解析

これまでも何回かビームテストは行われている [3] [4][5][6][7] [8][9][10][11]。前回までの実験ではアトラス検出器に組み込む形、読み出しチップ数 12 チップ、1536 ストリップ、12cm ストリップ長で行われたがモジュールの形にはなっていないまたは実際に実験で使う最終版、及び最終版直前のパーツを用いておこなった。今回の実験は、現在量産時の電气的性能試験において、性能が完全でないチップを使って、モジュールを製造し、完全でないチップがどの程度の振舞をするかを調べた。なお、本解析はアトラス日本グループが開発、製造したバレルモジュールについて解析を行っている。

4.1 セットアップ

ビームテストは 2003 年 5 月及び 9 月に、CERN の 400 GeV SPS H8 ビームラインにおいて、180 GeV 家電 π 中間子を用いて行なった [23]。そのセットアップを図 19 に示す。図 19 中のテレスコープ A,B,C,D と称しているのは、ビームの通過位置を決定するために用いた検出器である。テレスコープもまたシリコンマイクロストリップ検出器で、面積 $2\text{cm} \times 2\text{cm}$ で読み出しストリップ間隔 $50\mu\text{m}$ 、厚さ $285\mu\text{m}$ のウエハを使用し、これを 2 枚 90° ずらして配置することにより、通過した荷電粒子の 2 次元情報を得る。テレスコープは VA2 マルチアナログ読み出しで、ピーキングタイム $1\mu\text{s}$ で、その分解能は $5\mu\text{m}$ である。IRAM フラッシュ ADC により、各々のテレスコープからの信号を読み出す。IRAM 上にのった DSP には、ペDESTアルの算出、クラスターアルゴリズムが搭載されてある。このシステムのトータルのデッドタイムは $\sim 13\mu\text{s}$ で、これがほぼ、イベントレートとなる。

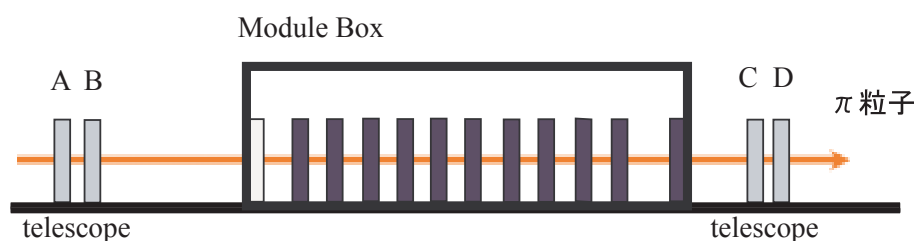


図 19: 5 月に CERN SPS H8 ビームラインにて行なった、ビームテストのセットアップ図

図 20 のように、テスト検出器及は冷却箱の中にセットされ、実際のアトラス実験とほぼ同様の -10°C の状態に保って実験を行った。冷却箱の上流と下流にセットしたシ

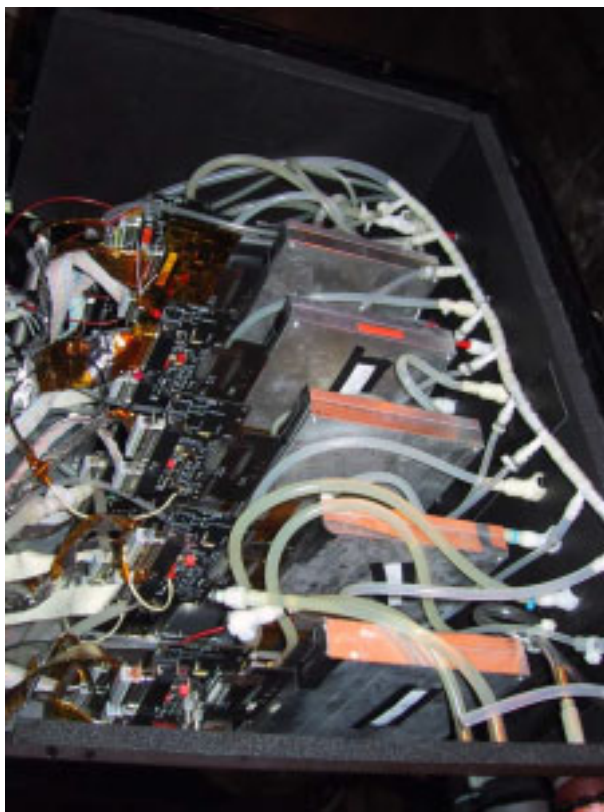


図 20: セットアップの写真（冷却箱の中に入っている）

シンチレーション・カウンタによってトリガーをかけ、そのときのテスト検出器およびテレスコープからの信号を読む。また、ビームテスト後半では、加速器と同期をとり、LHC のバンチクロッシングと同じ、25nsec(40MHz)での、読み出しを行なった。そのため、シンチレーション・トリガーからの信号と、次のクロックの立上り信号との間の時間の測定には TDC⁴(Time to Digital Converter) を使って識別した(図 21)。また、オフラインではトリガーのフェーズ依存性も評価した。イベント収集において、各バイアス電圧・読み出し信号にかける閾値の値をかえながらデータ収集を行った。スキャンポイントは表 4 に示してある。各スキャンポイントにおいてそれぞれ 10k~20k イベント集めた。

放射線損傷を与えたモジュールについては、放射線損傷を与えていないものよりもバイアス電圧を高めを設定してある。これは、損傷をあたえることによって全空乏層化に達する電圧が増加するためである。

⁴CAEN model V488

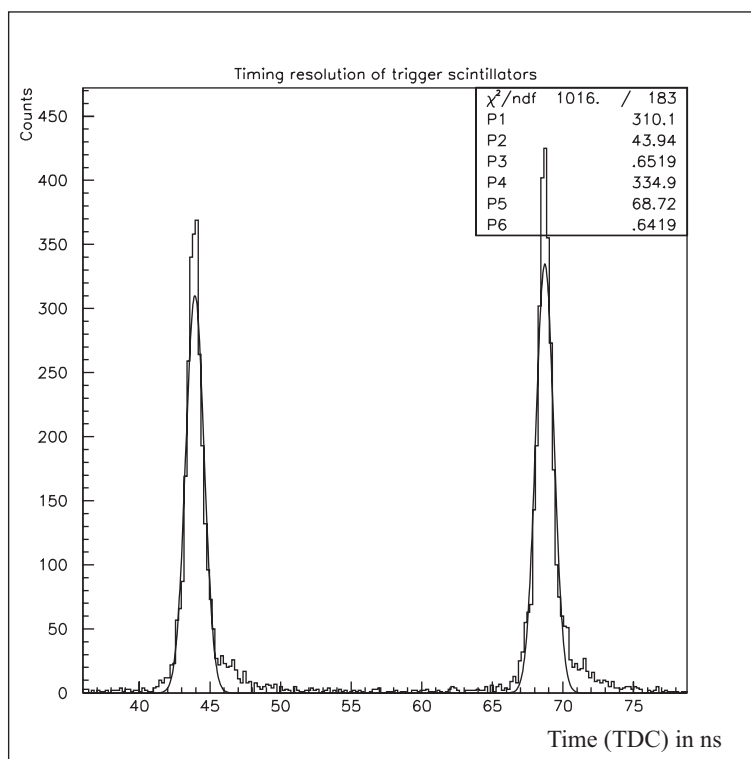


図 21: トリガーシンチレーターの時間分解能。横軸時間 (nsec)。25nsec のイベントを十分区別するだけの時間分解能があることがわかる。

最もビームの下流に配置されているアンカー (Anchor) と称しているものはバレルモジュールである。アンカーモジュールは、表4のスキャンを通して、常に高い検出効率でかつ、低いノイズ占有率に保たれるように最適化されている。また、閾値、逆バイアスともに、スキャンを通してすべて一定に保たれている。そして、このモジュールはほんのわずかにタイミングをミスしているテスト検出器とテレスコープのコインシデンスを調整するために用いられる。実験の間、アンカーにかかるバイアスは 150V、閾値は 1fC に固定した。

4.2 バイナリー読みだしとコントロール

SCT モジュールは、専用にカスタマイズされた VME モジュール⁵によって電力を供給され、コントロールして読み出しを行なっている。

⁵National Instruments 社の VME-MXI インターフェース経由

放射線照射したモジュールの バイアス電圧 [V]	150,200,250,300,350, 400,450,500
放射線照射したモジュール の閾値 [fC]	0.69,0.8,0.9,1.0,1.1,1.2,1.3,1.5,2.0, 2.5,3.0,3.5,4.0,4.5,5.0,5.5,6.0
放射線照射していないモジュールの バイアス電圧 [V]	100,150, 200,250,300
放射線照射していないモジュールの 閾値 [fC]	0.69,0.8,0.9,1.0,1.1,1.2,1.3,1.5,2.0, 2.5,3.0,3.5,3.8,4.0,4.5,5.0,5.5,6.0

表 4: パラメタとスキャンした値 [24]

モジュール番号	状態	モジュールの型
11		フォワード
0	放射線損傷有 **	フォワード
1	放射線損傷有 **	バレル
2	放射線損傷有 *	フォワード
3	放射線損傷有 **	バレル
4	放射線損傷有 **	フォワード
5	アンカー LO	バレル
6	放射線照射有 *	フォワード
7	LGS S03	バレル
8	放射線照射有 **	バレル
9		フォワード
10	reference NO S03	バレル

表 5: SCT モジュール *,**は放射線損傷を表し、それぞれ、アトラス実験 5 年、10 年
分相当 ($1.5, 3 \times 10^{14} \text{ protons/cm}^2$)

MuSTARD⁶ は、複数の SCT モジュールからデータを受けとり、格納しデータをデコードする。12 個の入力ストリームはシステムクロックと同期がされており、FIFO の中でバッファされる。読みだしのコントロール回路はストリームデータからイベントを構築し、出力はデュアルポートメモリーによってホストコンピュータへ送られる。さらに、ヒットチャンネルのヒストグラム化を瞬時に行なう能力がある。MuSTARD のデータ入力 LVDS(Low Voltage Differential Signaling) でおこなう。

CLOAC⁷ は正確にコントロールされ 40MHz のクロックを供給し、すべてのモジュールと、読み出しシステムに寄与している。

SLOG⁸ は ABCD3T チップに制御コマンドを送るモジュールである。複数の SCT モジュールの電氣的テストのセットアップにおいて SLOG は LVDS レベルの内部で生成されたスローコマンドと一緒に CLOAC からのクロックとファーストコマンドを 6 つの SCT モジュールへファンアウトする。内部の 40MHz のクロックにより SLOG は単独でクロックとコマンドを生成する事も可能である。ホストコンピュータによって作られた、スローコマンドは RAM にロードされ、出力はクロックに同期される。クロックは外部コマンド、および内部コマンドを各チャンネル別に設定する事も可能にするために、3 つの 14 ビットレジスタを持つ (Output Enable Register)。

4.3 アライメント

ビーム・テレスコープは 2 つの垂直な空間座標で 4 つの非常に正確な測定値を提供します。トラックの再構築、内挿は、すべての検出器の座標が相対的に正確に分かっている必要がある。テレスコープの位置と個々の SCT モジュールの位置は、アルミフレームの固定台に安定に固定されている。すべての検出器の平面の相対的座標の決定には多くのトラック (~10K) で統計的に決めていく。このアライメントをとる作業を反復してパラメーターを変えていく事によりエラーの値 (例えば、残差分布) を最小限にする。

まず、2 つのテレスコープを使って、座標 X-Y とビーム軸方向 Z 軸のグローバル座標を固定する。続いて、残り 2 個のテレスコープを使い座標を固定する。4 枚の平面を使う事により、1 つのヒットだけのイベントや、ノイズヒットを効果的に除去する事ができる。トラックにより推定された軌跡の位置と平面による測定の間差が最小に集中するまで、テレスコープの各々のパラメーター (1 つにつき 9 パラメータ) それぞれのディテクターファイルを作成) を最適化する。テレスコープによる、グローバル座標

⁶Multi-channel SCT ABCD Readout Device

⁷clock and control

⁸slow command generator

の決定が終ると、つづいて各 SCT モジュールのアライメントとそれぞれにつき、ディテクターファイルの作成を各 RUN 毎に行なう。パラメーターはテレスコープと同様、9パラメータで、ディテクターファイルにはその、検出器の特徴、例えば、死んでいるチャンネルや、ノイジーなチャンネル、マスクされたチャンネル、ビームの中心等を RUN 毎に作成し書き込む。そうして、常に最適な状態で解析を行なった [24]。

4.4 検出器のヒットマップ

アライメントをとった後のヒットマップを以下に示す (図 22)。

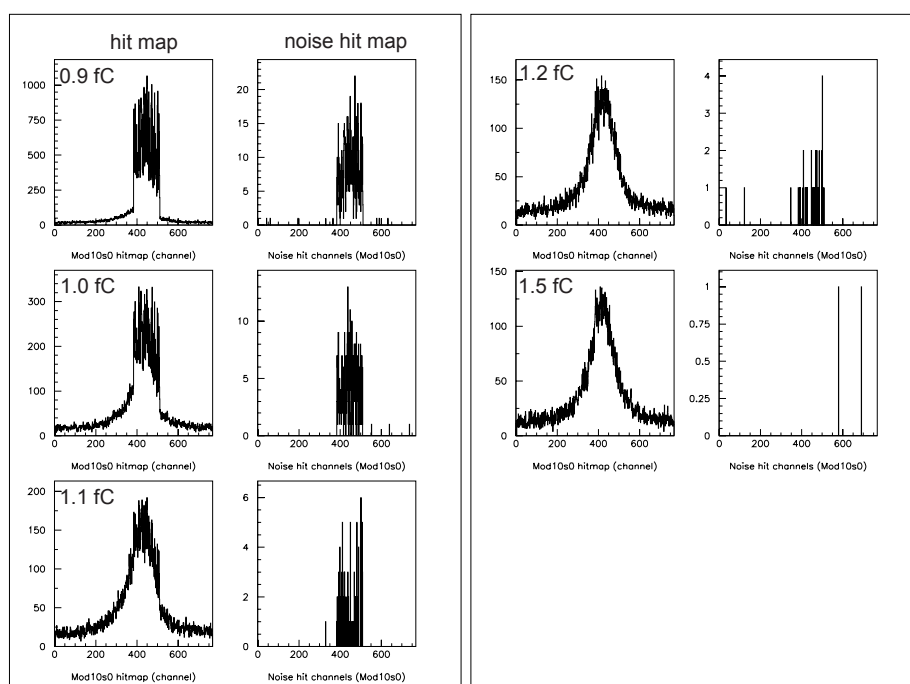


図 22: オフセットが負の ASIC のヒットマップ

横軸はストリップ番号、縦軸イベント。閾値 0.9 から 1.5fC のもの。低い閾値では、ノイズによるヒットが多い。

この図 22 はオフセットが負に出る ASIC を搭載したバレルモジュールなのだが、それぞれ、0.9~1.5fC までスレッシュホールドスキャンをしたヒットマップの分布を示した。この図 22 を見る限り大変ノイズが多いなチップである。ヒットマップの横のプロットはノイズのみのヒットマップであるが、これを見てもスレッシュホールドが 1.2fC あたりまでノイズでなっているのが見てとれる。別の RUN で検出器を移動させてビームス

ポットが問題の ASIC からはずした場合でも、このチップは図 22 の様な特徴が見てとれた。

4.5 位置分解能の評価

4.5.1 ビームの直線の決定

ビームの直線の出し方は 4 台の望遠鏡を用いて行う。望遠鏡のヒット情報から、

- まず、望遠鏡 A,B,C,D の 4 台のデータで直線を出す。
 - － 4 つの望遠鏡と、アンカーモジュールに Hit(8 hit) がある事を要求。
- その直線から得られる望遠鏡における通過位置と、実際にヒットした望遠鏡の通過位置との差を出す。
- 各望遠鏡に複数の通過位置の情報があれば、差が最も小さいものを選ぶ。

その差が、 $150\mu\text{m}$ 以内(望遠鏡のストリップの 3 ピッチ分の長さ) にあり、かつ同時にアンカーモジュールでも同じことが言えたのなら、良い直線であるとしてその後の解析に用いる。両面(xy)ともにその条件を満たさなかった場合は、そのときのイベントは解析に用いない。上記の条件により、トラックを再構築する際に間違ったトラックや、多重散乱によって、大角度に散乱した物を効果的に減らす事ができる [25][26]。

4.5.2 クラスタ中心の作成

ビームが 1 度通過する際に、信号を出すチャンネルはほとんどの場合一つだけなのであるが、2 つ以上のチャンネルが信号を出すこともある。要因としては、ビームが 2 つのチャンネルの中間付近を通り、出来たキャリアが 2 つのチャンネルに分かれて検出された場合などが考えられる。このような状況に対して、次のような処理を行い、通過位置を一点に定める。

- チャンネルが 1 つだけなら、そのチャンネルの中心点
- チャンネルが 2 つ以上であれば、その中間の位置

クラスタ中心点は図 23 の様になる。この処置によってテスト検出器におけるビームの通過位置を一つに定める。

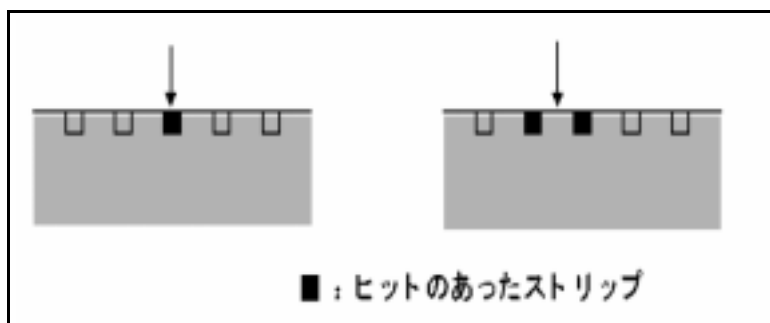


図 23: テスト検出器のクラスター中心点。テレスコープではアナログ読み出しのため、パルス高も含め、重心法を用いる。2 値読みだしの SCT モジュールは、単純に連続してヒットがあるストリップの中心とする。

4.5.3 位置分解能

4つのテレスコープの各々のヒット点で直線トラックを引く。その引いたトラックより各々のテスト検出器のビームの通過位置を算出し、実際にヒットのあったテスト検出器のヒット点との残差をとる。これを同じ条件下で行ったイベント数だけ繰り返し、残差分布を作成する。

次にテレスコープにより算出された通過位置から $800\mu\text{m}$ (前後5ストリップ)の領域を考え、その中にヒット点がなかったイベントを除く。

これをガウスフィットさせて得られた標準偏差を位置分解能とする(図24)。しかし、これは期待される一様分布の位置分解能 $\frac{80}{\sqrt{12}} \sim 23\mu\text{m}$ より悪い値になる。これについて以下の原因が考えられ、それぞれに対して補正をおこなった。

分布は一様分布(図25の黒線)になるはずである。

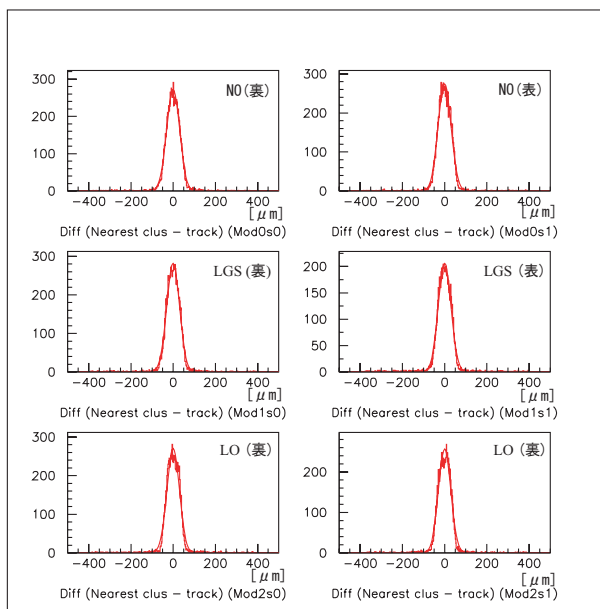


図 24: モジュールの残差分布。上から、Gain のオフセットが負にでるモジュール、Gain が安定しないモジュール、閾値電圧付近で、不安定なモジュール。

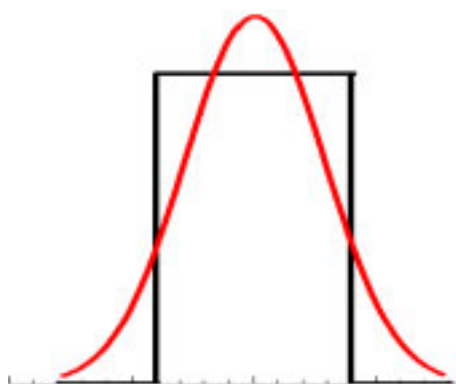


図 25: 一様分布へのガウスフィット

そして本来欲しい値は一様分布の RMS である。しかし、解析の段階でその一様分布にガウスフィット（図 25 の赤線）をして、その標準偏差を位置分解能としている。ガウス分布は RMS と標準偏差は同じ値であるが、一様分布の RMS とそれにフィットした標準偏差の値は当然異なるはずである。したがって、標準偏差を RMS に変換した。

方法は以下の通りである。まず、様々な RMS の値に関してガウスフィットを行う。そのときの RMS と標準偏差をプロットする。そして、それに直線をフィットした。その直線を標準偏差を RMS に変換する関数とした (図 26)。

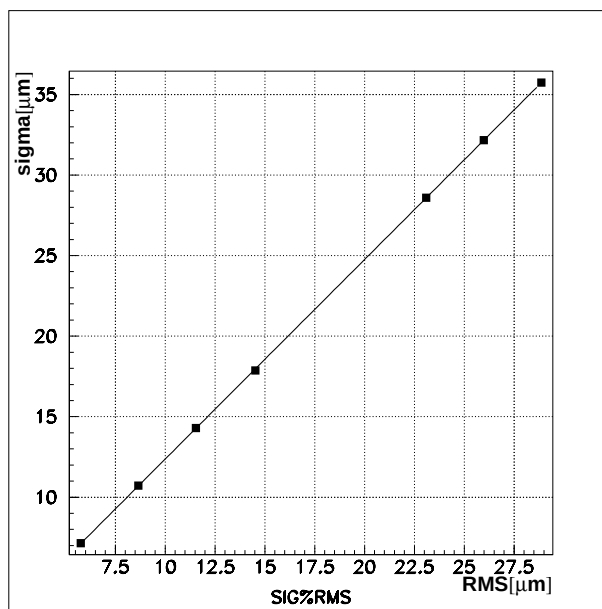


図 26: 様々な RMS の値に対してガウスフィットを行ない、標準偏差と RMS をプロットした。

図 27 に電圧一定での位置分解能のスレッシュホールド依存性を示した。放射線損傷がないものに関しては電圧は 150V、放射線損傷があるものに関しては電圧は 350V である。スレッシュホールド 1fC 辺りでは期待される位置分解能 $23\mu\text{m}$ に近い値である。また、スレッシュホールドが高いところと低いところで位置分解能が良くなっている。これは以下の理由によると考えられる。

放射線損傷があるものに関しては放射線損傷がないものよりも位置分解能がよくなっている。これはストリップの多重ヒットの影響である。位置分解能はよくなるが反対に、検出効率は低くなる。スレッシュホールドが低いところで位置分解能が良くなるのはストリップの多重 (double) ヒットが増えるためである。それにより、有感領域が狭くなり位置分解能が良くなっている。同様に、スレッシュホールドが高いところで位置分解能が良くなっているのもストリップの有感領域が狭くなるからである。これによって位置分解能は良くなるけれども、検出効率 (efficiency) は下がる (図 33)。

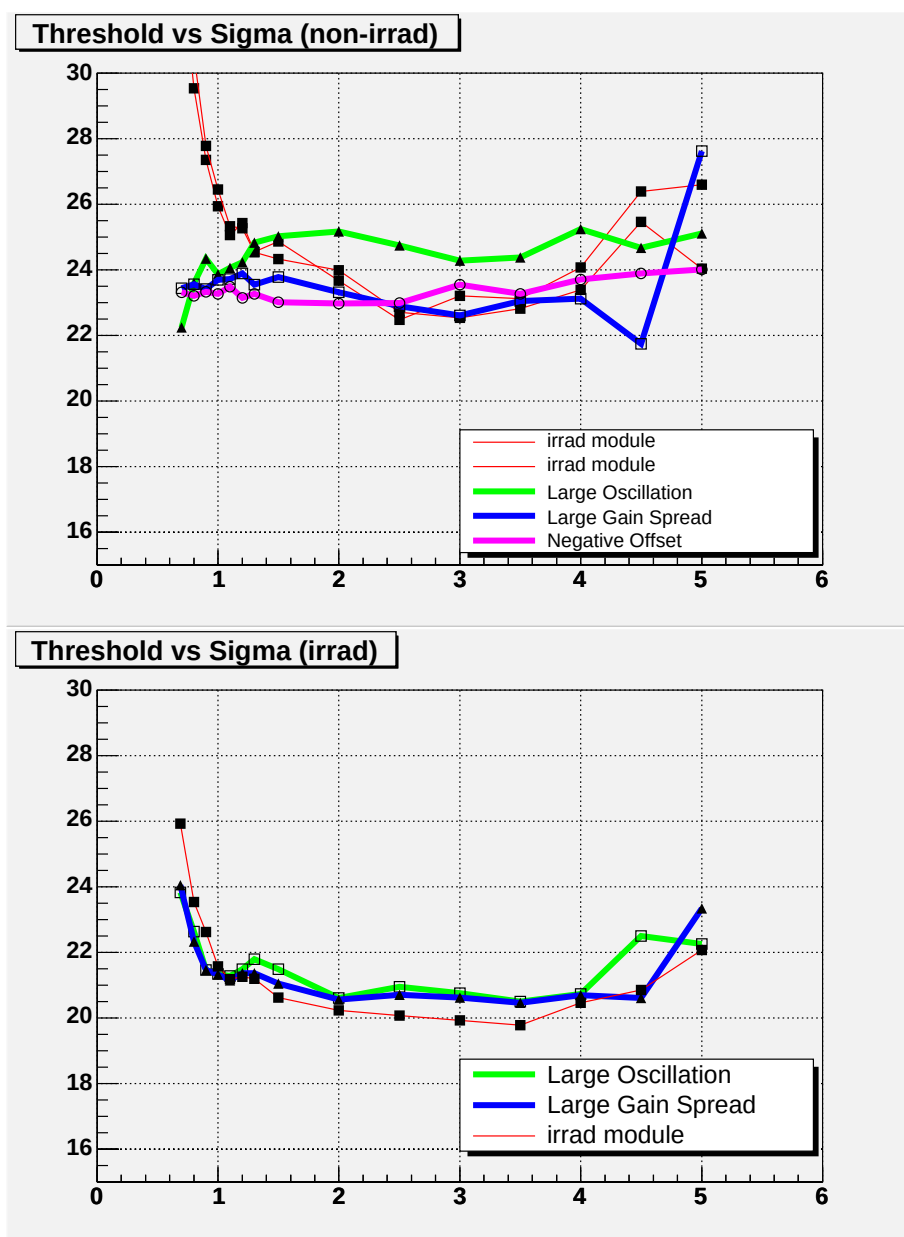


図 27: 位置分解能の閾値依存性。上図:放射線損傷を与える前(5月の結果)。下図:放射線損傷を与えた後(9月の結果)。放射線損傷を与えたモジュールでは、閾値 1fC 以下で位置分解能が悪くなっている。

4.5.4 多重ヒット

4.5.2 章でマルチヒットの場合のクラスタ点の決定の仕方について述べたが、ここではシングルヒットとマルチヒットの数の割合について評価する。この評価の指標として平均のクラスタ幅を定義する。その定義は以下の通りである。

$$MCW = \sum_i h_i \times n_i / \sum_i n_i \quad (7)$$

MCW:平均クラスタ幅

h_i :ヒットしたストリップ数

n_i :イベント数

図 28 はマルチヒットの数をあらわしたものである。横軸がクラスタの個数、縦軸がイベント数である。放射線損傷を与えていないものは、ほとんどすべてのヒットはシングルヒットである（黒線）。しかし、放射線損傷を与えたものは、マルチヒットの数が増えているのがわかる（赤線）。ストリップの連続した2つにヒットがあるのはダブルヒットと呼び、ストリップとストリップの間に粒子が通ったと考えている。

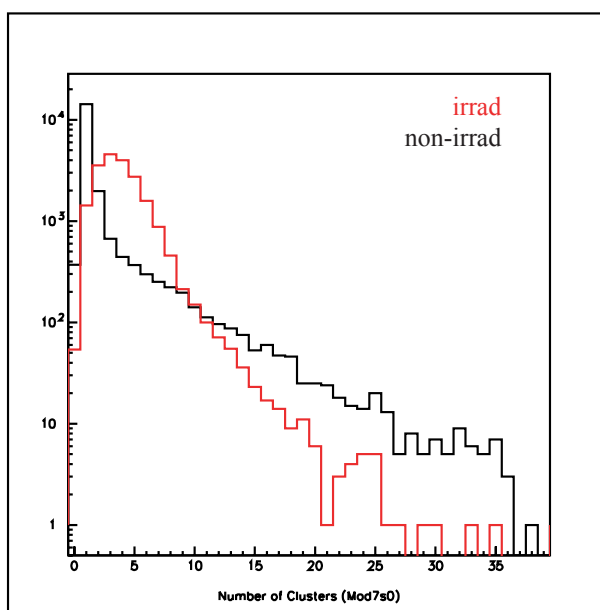


図 28: 横軸がクラスタの個数、縦軸がイベント数。黒線：放射線損傷を与える前。赤線：放射線損傷を与えた後。

図 29 は、横軸が平均クラスタ幅、縦軸がイベント数でプロットしたものである。放射線損傷の有無でクラスタの幅におおきな変化は見られない。図 28 と図 29 より、

ヒットした数は増えているが、クラスターの幅が変わらないことより、ビームスポットの周りのストリップが鳴ったのではなく、無関係にノイズで鳴っているという事が言える。

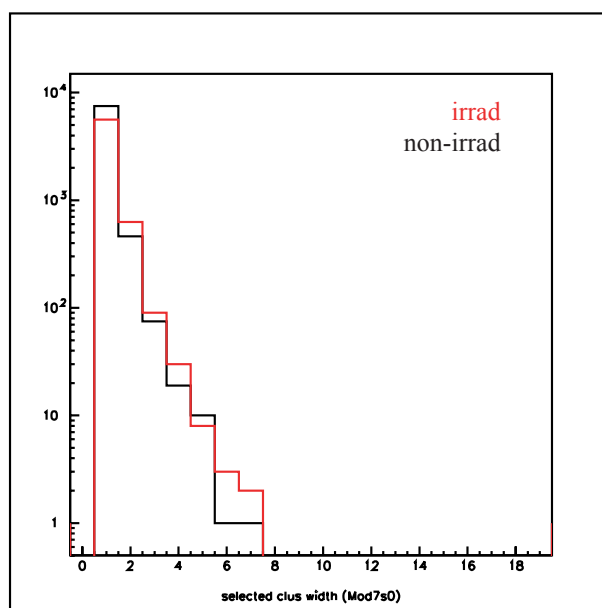


図 29: 横軸が平均クラスター幅、縦軸がイベント数。黒線：放射線損傷を与える前。赤線：放射線損傷を与えた後。クラスターの幅は変わらないが、図 28 よりクラスターの個数は増えている、相関はない。ランダムにストリップがなっていると言える。

平均のクラスター幅はスレッシュホールドに依存するので、その関係図を図 30 に示した。Gain の不安定なもの (LO) と、Gain のオフセットが負にでる (NO) チップが載っているモジュールで、平均クラスター幅が太くなっているが、これはモジュールの位置が後ろにきており、多重散乱のためだと思われる。どのモジュールも閾値が低くなると多重ヒットの割合が増えている。

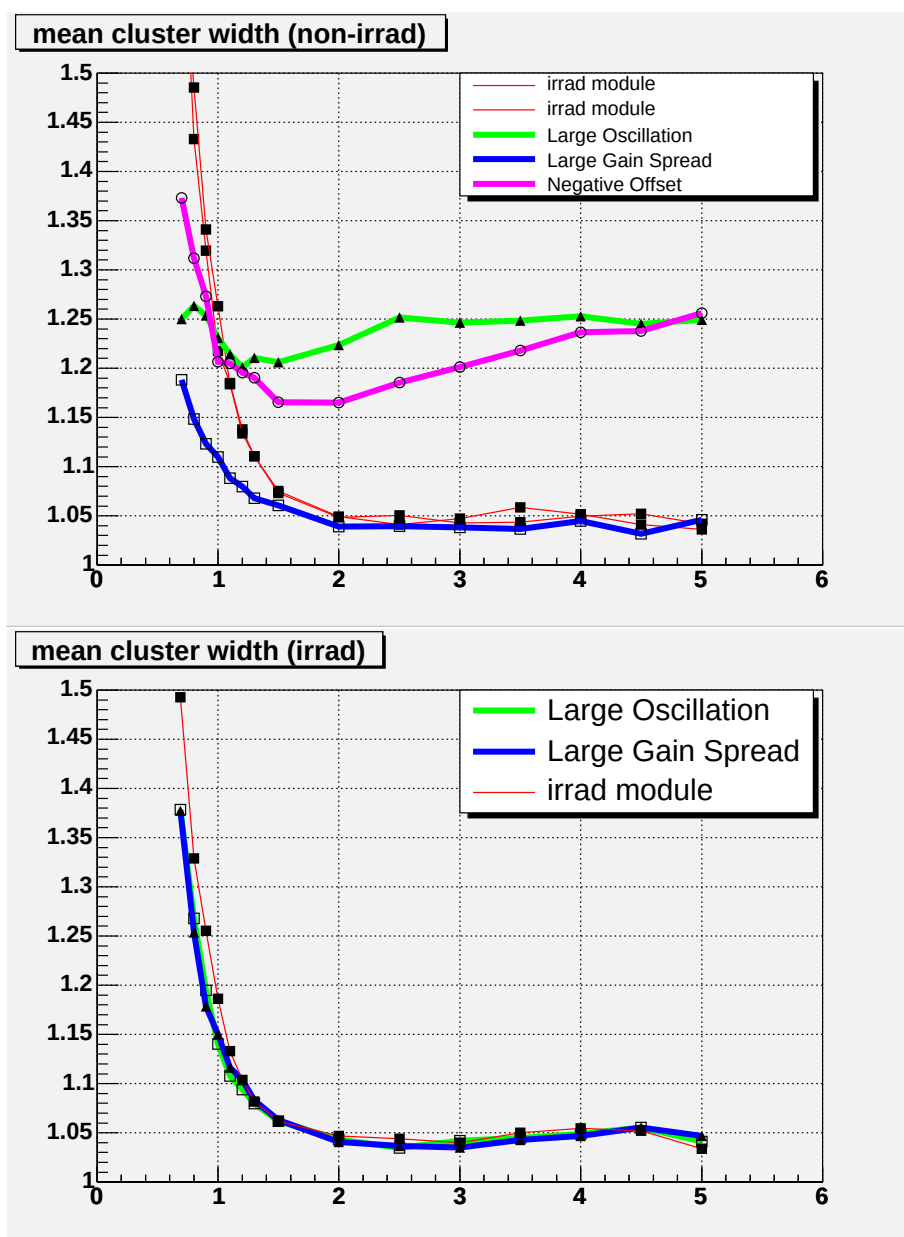


図 30: 平均クラスター幅の閾値依存性。上図：放射線損傷を与える前(5月)、下図：放射線損傷を与えた後(9月)。どのモジュールも閾値が低いところで多重ヒットの数が増えている。

4.6 読み出し ASIC 内の信号波解析

4.6.1 ASIC 内の波高分布の求め方

SCT モジュール、は高速化のために電子-正孔対からくるアナログ波形信号を、閾値を越えたか否かでデジタル読み出しを行っている。よって ASIC 内の波高分布は直接見ることはできない。よってつぎのような方法で波高分布を間接的に求めた。

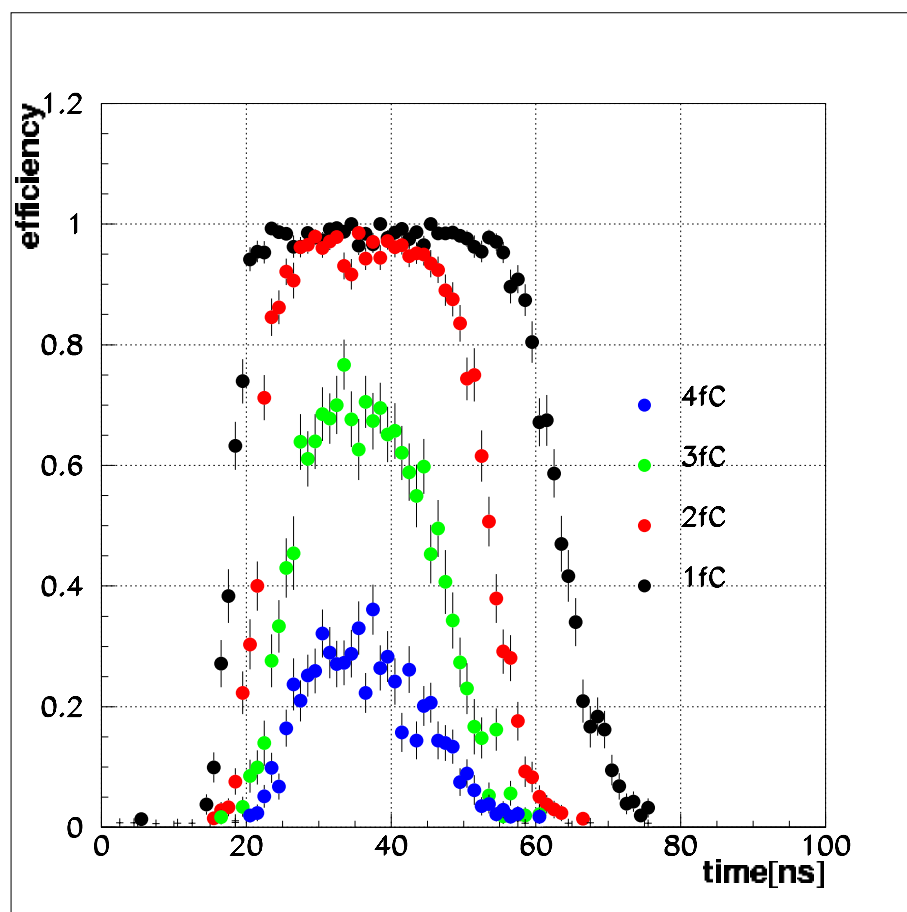


図 31: 様々な閾値におけるトリガーからの時間に対する検出効率。

まず、図 31 に様々な閾値に対してトリガからの時間に対する検出効率を示した。それらを 2 次元プロットにまとめたものが図 32 である。それを各時間に対して、閾値に対する検出効率を図 33 に示す。そして、検出効率 50% の閾値を波高とした。時間に対する波高を求めると図 34 のようになる。

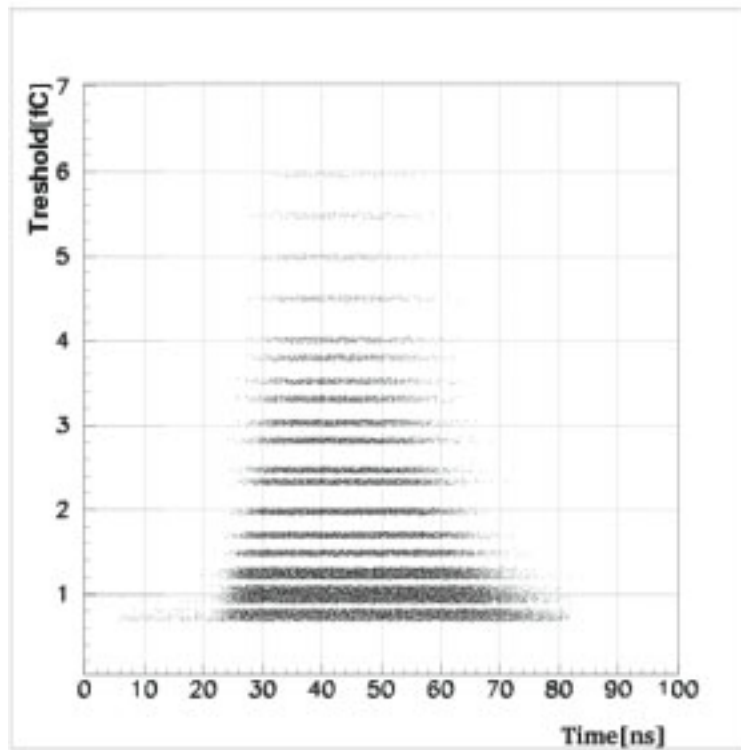


図 32: 横軸は時間、縦軸は閾値。図 31 の様々な閾値に対して 2 次元プロットを行った。

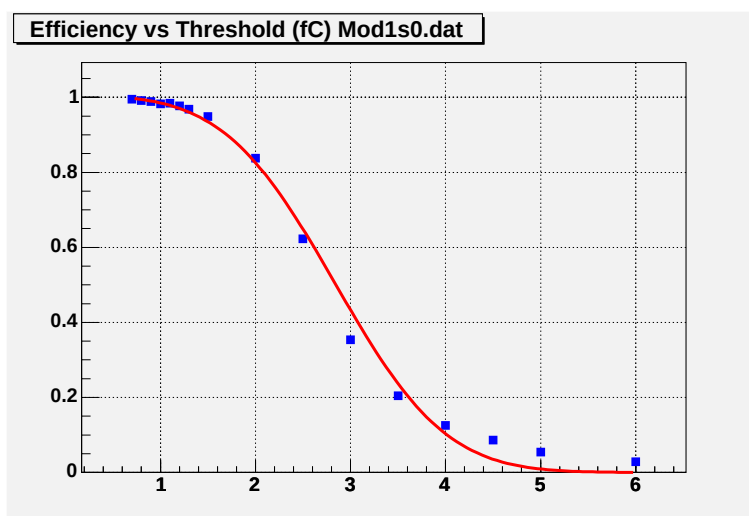


図 33: 40ns での閾値に対する検出効率。検出効率が 50%になる点をメディアアンチャージと呼ぶ。

4.7 読み出し ASIC 内の信号波解析の評価

図 34 に ASIC 内の波高分布を示した。アトラス検出器は 25ns 毎にビームが衝突する。したがって、ピーキングタイムが 25ns 以上だと、どのビームが衝突したときにできた粒子なのかをタグすることが困難になる。テスト検出器の読み出し ASIC のピーキングタイムは設計値が 20ns である。これは 1.25 ~ 10.0 fC の電荷信号のスレッシュホルド 1fC でのタイムウォークを 16ns 以下にしタギングを可能にするという要請から来ている。図 34 を見ると、どのテスト検出器もピーキングタイムはだいたい 20ns くらいになっていることがわかり、設計値通りになっていることが確認できた。

4.8 検出効率の評価

4.8.1 検出効率の決定

検出器を通過する荷電粒子の検出効率の決定方法を述べる [8]。モジュール上の粒子の通過位置はテレスコープにより決定されている。この通過位置から前後 5 ストリップの領域を考え、其の中にクラスタ中心点があれば、モジュールは粒子を検出したとする。実際にあるクラスタ中心点の数を N_{Exp} 、上の条件を満たしたクラスタ中心点の

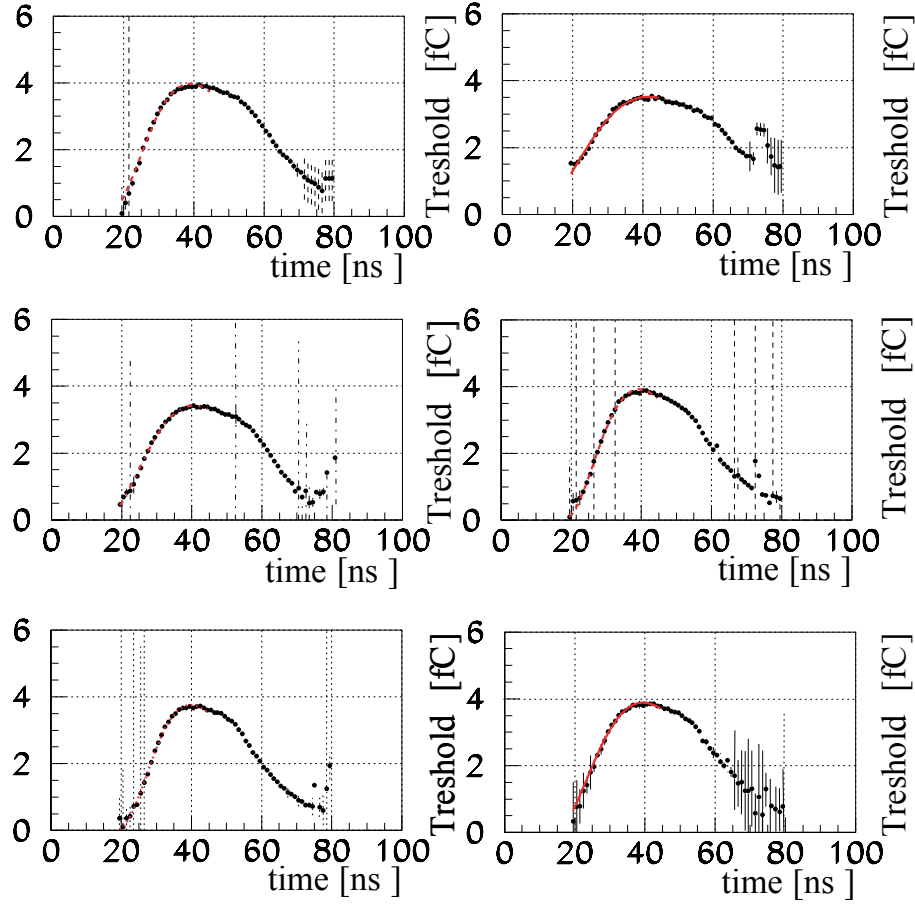


図 34: ASIC 内のパルスハイト。どの ASIC も 20nsec 以下の鋭い立上りを見せている。

数を N_{Real} と置けば、1 イベントでの検出効率 ε は次のように表される。

$$\varepsilon = \frac{N_{\text{Real}}}{N_{\text{Exp}}} \quad (8)$$

クラスタ中心点は 1 つしかないので、上記の式における N_{Real} の取りうる値は 1 か 0 である。イベント数 i だけこれを繰り返し、次の式から検出効率 (ε) を定めた。

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^n \frac{(N_{\text{Real}})_i}{(N_{\text{Exp}})_i} \quad (9)$$

誤差に関してであるが、 N_{Real} は先に述べた通り二項分布

$$P(r) = {}_{\text{Exp}} C_r \varepsilon^{E_{\text{Exp}}} (1 - \varepsilon)^{N_{\text{Exp}} - r} \quad (10)$$

に従うので、その分散は $N_{\text{Exp}}\epsilon(1-\epsilon)$ となる。よって、検出効率の分散は

$$\sigma = \sqrt{\text{Var}\left(\frac{N_{\text{Real}}}{N_{\text{Exp}}}\right)} = \sqrt{\frac{N_{\text{Exp}}\epsilon(1-\epsilon)}{N_{\text{Exp}}^2}} = \frac{\sqrt{N_{\text{Exp}}\epsilon(1-\epsilon)}}{N_{\text{Exp}}} \quad (11)$$

となる。

実際の実験におけるデータ収集は、ある閾値に固定して行なう予定である。その値は 1fC とされている。逆バイアスが一定 (放射線損傷無し 150V) モジュール平均での検出効率の閾値依存性を図 35 に示す。1fC での検出効率を見ると、Gain のオフセットが負にでるモジュールを除き検出効率が 99%を越えている事がわかる。

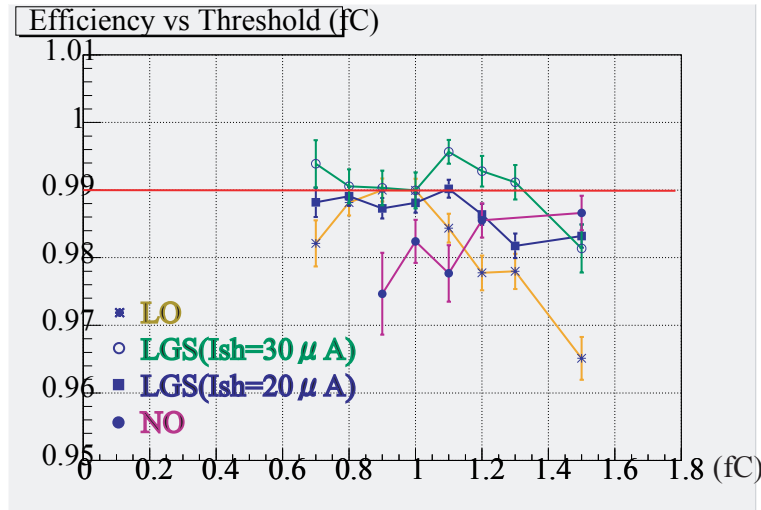


図 35: モジュール平均での検出効率の閾値依存性。検出効率は閾値 1fC において 99%以上を要求する。

今回のビームテストは、問題の ASIC について詳しく調べるため、検出効率をそれぞれ、別々に載せた。それぞれ、赤線が問題の ASIC で、黒線がモジュールで平均をしている。放射線損傷を与える前、与えた後の検出効率を、図 36、図 38、図 40、図 39、図 37 に示す。

閾値付近で Gaing が不安定になるモジュールの検出効率については、閾値 1fC にて、放射線損傷を与える前、与えた後、共に要求される 99%以上を満たしている。

Gain が不安定になるモジュールの検出効率については、シェーピングアンプに流す電流を、20μA にすると、閾値 1fC にて、放射線損傷を与える前、与えた後、共に要求される 99%以上を満たしている。

Gain のオフセットが負に出るモジュールの検出効率については、残念ながら、要求される検出効率 99%以上と言うのを満たす事が出来なかった。

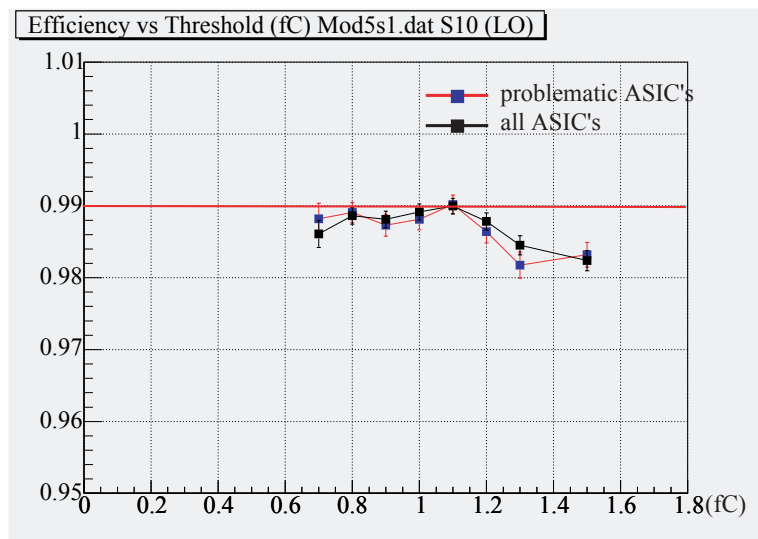


図 36: 閾値付近で不安定なモジュールの、放射線損傷を与える前の検出効率

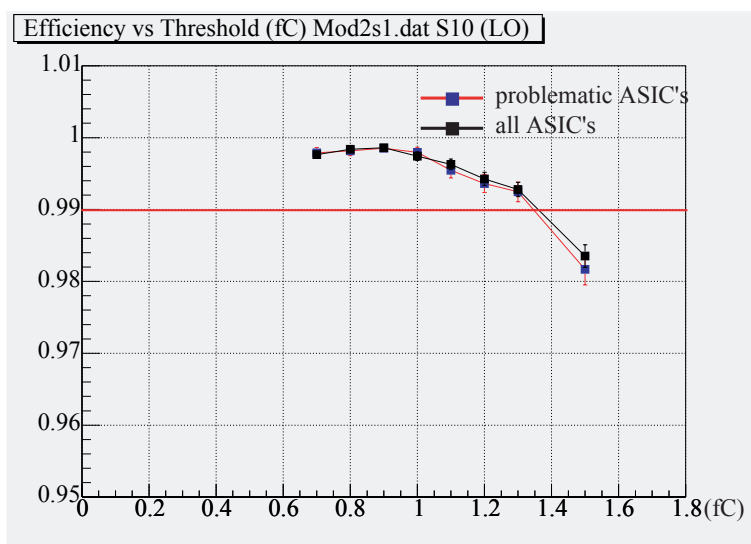


図 37: 閾値付近で不安定なモジュールの、放射線損傷を与えた後の検出効率

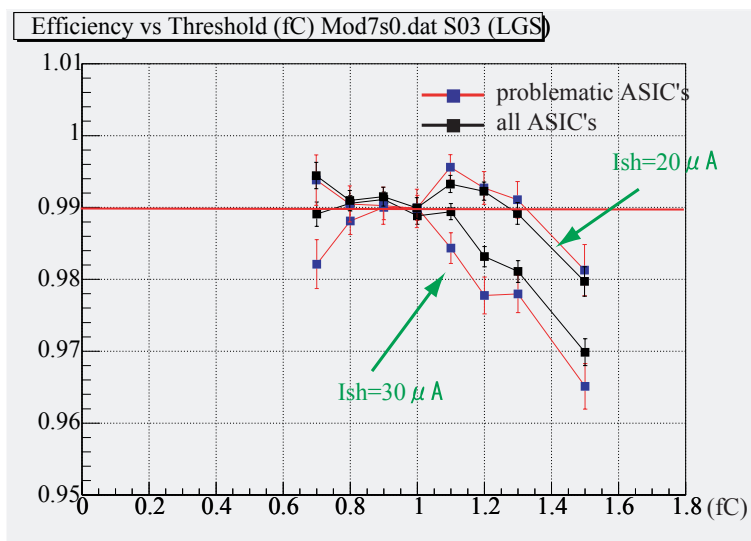


図 38: Gainが不安定なモジュールの、放射線損傷を与える前の検出効率。シェーピングアンプに流す電流を $20\mu A$ にした場合良好。

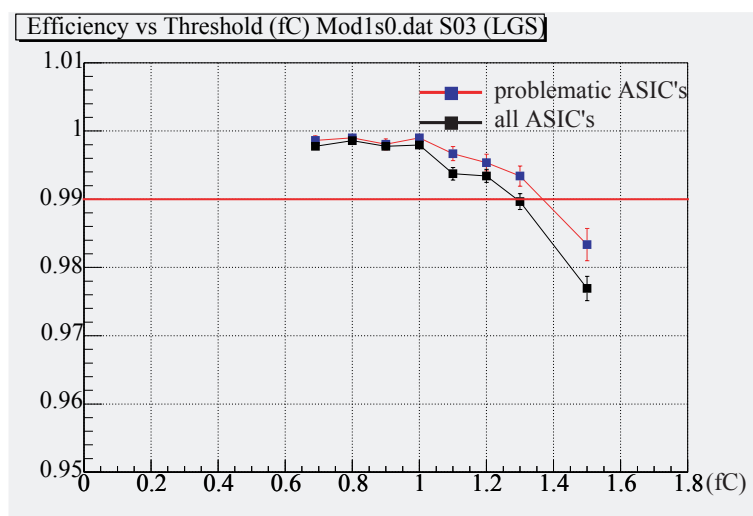


図 39: Gain が不安定なモジュールの、放射線損傷を与えた後の検出効率

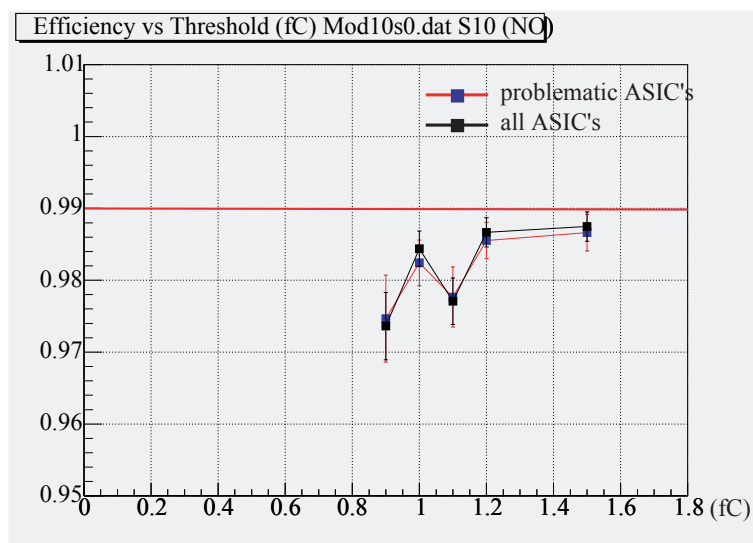


図 40: Gain のオフセットが負にでるモジュールの、放射線損傷を与える前の検出効率。要求する検出効率 99%を満たしていない。

4.8.2 ノイズ占有率の評価

LHC 実験と同様、このビームテストでも 40MHz ランダム・サンプリングでおこなっている。つまり 25ns 毎にデータを検出器に読みに行っている。これは LHC 実験では 25ns ごとにビームが衝突するため、どのビームのデータかをタグする必要が生じるからである。図 41 に概念図をしめしている。タイミング 1,2,3 で読みに行っている。タイ

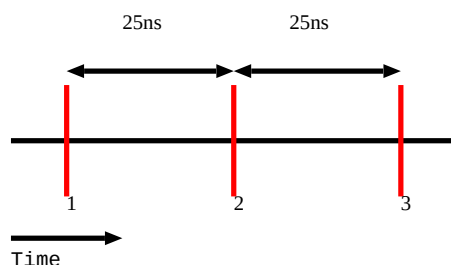


図 41: 40MHz ランダムサンプリング。パイプラインメモリに 3 バンチ、75nsec のイベントがバッファされている。

ミング 1 の後の 25ns はタイミング 1 にタグできる。しかし、今回ビームテストを行った CERN SPS 400GeV H8 ビームラインを使い 180 GeV π^- は約 15 秒周期でビームが衝突する。よって、ビームが来ていないときのテスト検出器のヒット情報のデータをとることによってテスト検出器の電氣的なノイズを評価できる。トリガーはテスト検出器群の上流と下流におき、ビームとの同期を取った。

トリガーからタイミング 2 でビームが当たったことが言えれば、タイミング 1 はビームがあたる 25ns 前の情報である。このタイミング 1 の時間を 0ns とし 15ns より前の時間のデータを用いてノイズの評価を行った。

位置分解能のところでヒットがあったとする条件を決めるとき、テレスコープの通過位置より算出されたストリップから前後 5 ストリップ内にテスト検出器のヒットがあれば、それをヒットとみなすとした。ノイズの評価では、その 2 倍の前後 10 ストリップの外にヒットがあれば、それをノイズのヒットとみなすとした。図 42 にノイズ占有率の閾値依存性を示した。閾値の低いところでエレクトロニクスのノイズが見られる。テスト検出器に要請されるノイズ占有率は、バレルモジュールにおいて閾値 1fC で放射線損傷を与えていないものに関しては 1×10^{-4} 、放射線損傷を与えたものに関しては 1×10^{-3} である。なぜ、この数値かという理由は以下の通りである。

まず、本物のトラックによる占有率がある。これがシミュレーションによれば 5×10^{-3} 程度ある。したがってノイズによる占有率はこれ以下にする必要がある。テスト検出器によって取られたデータは後処理の為に送信しなければならない。データ量が多す

ぎるとデットタイムが発生する。どれだけのデータ量をどれだけのスピードで送ればデットタイムがなくなるか。それが 5×10^{-3} 程度ならよい。そして放射線損傷を受けるとノイズが増加する。よって値を一桁下げておく。図 42 をみると Gain のオフセットが負に出るものを除いてその要請を満たしていることが分かる。ノイズ占有率と閾値の関係は次の式で近似される。

$$occupancy(q) \propto \exp \frac{q^2}{2\sigma^2} \quad (12)$$

ここで σ はアンプの Equivalent-Noise-Charge(ENC)、 q は閾値である。これを図 42 にフィットした。

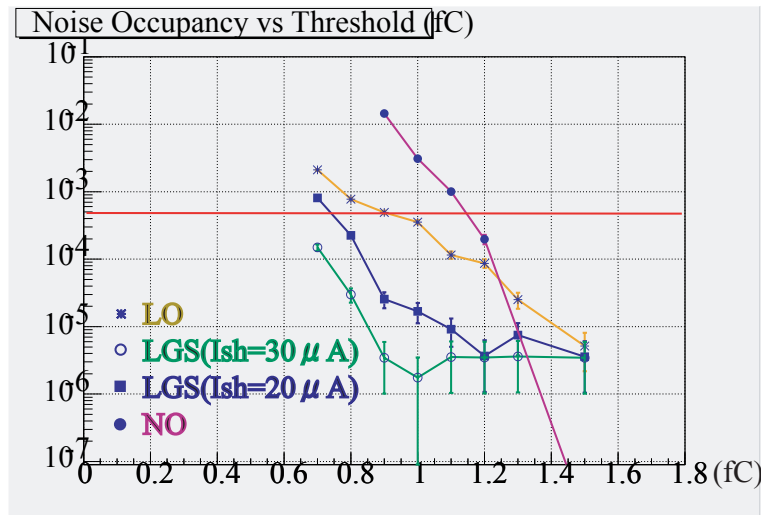


図 42: モジュール平均でのノイズ占有率の閾値依存性。閾値 1fC において、 5×10^{-4} 以下を要求する。Gain のオフセットが負にでるモジュールが、他より 1 桁高いノイズ占有率を示している。

今回のビームテストは、問題の ASIC について詳しく調べるため、ノイズ占有率をそれぞれ、別々に載せた。それぞれ、赤線が問題の ASIC で、黒線がモジュールで平均をしている。放射線損傷を与える前の、与えた後のノイズ占有率をそれぞれ、図 43、図 45、47、図 44、図 46、に示す。

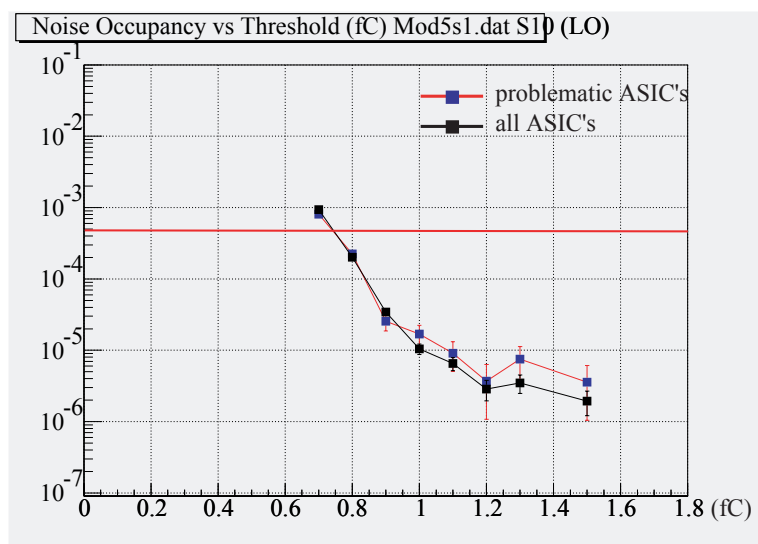


図 43: 閾値付近で不安定なモジュールの、放射線損傷を与える前のノイズ占有率

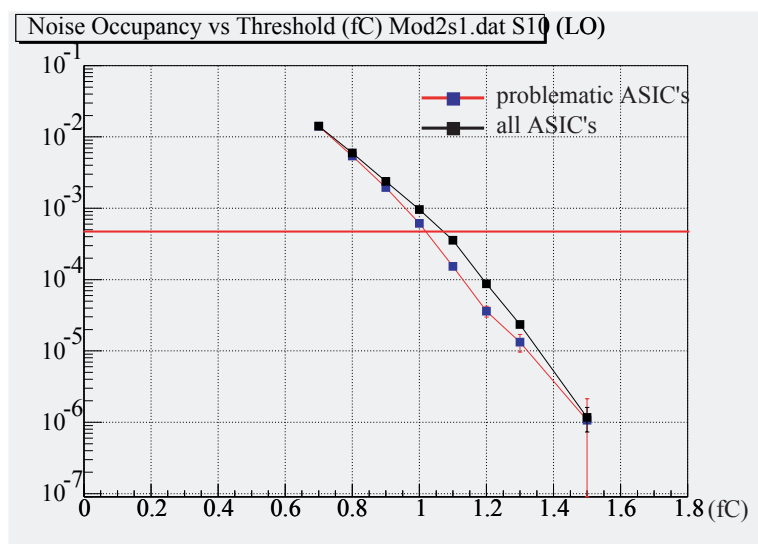


図 44: 閾値付近で不安定なモジュールの、放射線損傷を与えた後のノイズ占有率

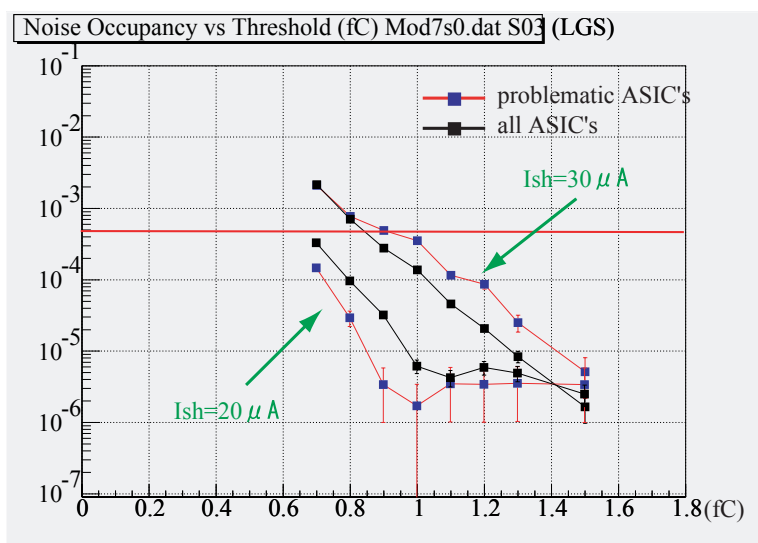


図 45: Gain が不安定なモジュールの、放射線損傷を与える前のノイズ占有率。シェーピングアンプに流す電流を 20 μ A にした場合良好。

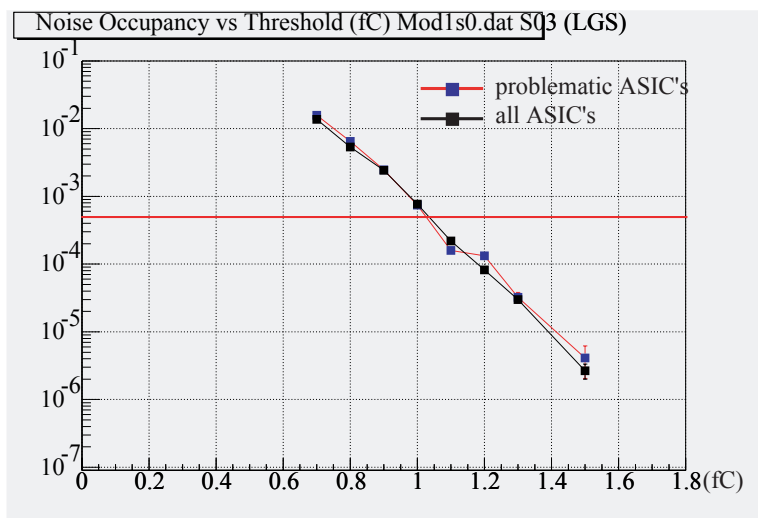


図 46: Gain が不安定なモジュールの、放射線損傷を与えた後のノイズ占有率

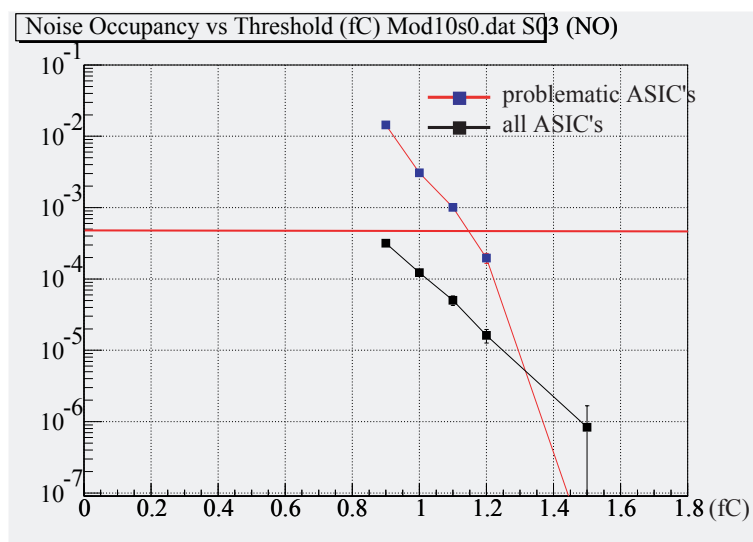


図 47: Gain のオフセットが負にでるモジュールの、放射線損傷を与える前のノイズ占有率。問題の ASIC は、要求するノイズ占有率より 1 桁高い。

5 ビームテストのまとめ

2003 年 5 月および 9 月に CERN において、 $180\text{GeV}/c\pi^-$ ビームを用いて行われたアトラス SCT モジュールのビームテストを行い、得られたデータを解析して、検出器の性能を評価した。

今回のビームテストは、量産時の電氣的性能試験において、性能が完全でないチップを使って、モジュールを製造し、完全でないチップがどの程度の振舞をするか評価するものである。

Gain のオフセットが負にでる該当のチップのヒットマップが非常にノイズが多い事が分かった。他の問題のチップは正常に動作している事を確認した。

位置分解の評価を行った。放射線損傷を与えていないモジュール、放射線損傷を与えているモジュールともに $80\mu\text{m}$ ピッチの一樣分布から期待される位置分解能 $23\mu\text{m}$ を与え、要求される位置分解能が確認することができた。

読み出し ASIC 内の信号波解析を行った。立上りピーキングタイムは約 20ns であり、LHC のビームクロッシング 25ns という要求を見たし、設計値とほぼ同じ値であることを確認した。

検出効率について評価した。Gain のオフセットが負にでるものを除いて放射線損傷を与えた後も、検出効率のスレッシュホルド依存性はアトラス実験で使用する 1fC のスレッシュホルドにおいて検出効率が 99% 以上であった。

ノイズ占有率の評価を行なった。Gain のオフセットが負に出るもの除いて放射線損傷を与えた後も、 5×10^{-3} 以下の値で、要求を満たしている。

6 GEANT4によるジオメトリの構築

6.1 GEANT4概要

我々、高エネルギー物理学実験では標準理論に基づいた新たな粒子、たとえばヒッグス粒子を、さらには、標準理論を越えた粒子、たとえば SUSY 粒子を見つけようと実験を行っている。こういった粒子を発見するためには、大変高いエネルギーが必要となる。その代表としてはアメリカ、フェルミ研究所の TEVATRON(2TeV) やフランス・スイス国境にある CERN の LHC(14TeV)がある。このような実験は非常に大規模複雑であり、予算、物理現象、データもともに膨大である。このような理由より、シミュレーションなしで実験を行うことはもはや不可能に近くなってきている。また、シミュレーションを記述するソフトウェア事態も非常に複雑・多岐になってきている。たとえ複雑になってもメンテナンスがしやすく扱いやすいプログラム言語で書き直す必要性がある。GEANT4はそのような条件を満たすべく開発されたソフトウェアである。

GEANT4(Geomtry and Tracker)[27][28] は、20 年以上の実績がある GEANT3 をオブジェクト指向化するために、C++にて書き直された高エネルギー物理学で使用される測定器シミュレーションツールキットである。1994 年に CERN LHC 測定器 R&D プロジェクト (RD44)として承認され、国際協力により、CERN/KEK/TRIUMF/SLAC といった約 40 の機関で多くの研究者により分散開発がなされてきた。高エネルギー物理学では、アトラス (LHC)をはじめ BaBar(SLAC)、BELLE(KEK)などで使用されている。また、今日では原子核物理学、宇宙開発、放射線医療など広い分野で実際に使われている。

この GEANT4 は、光学プロセスや熱中性子プロセスなど GEANT3 にはないプロセスが含まれており、ハドロンプロセスに於いても高エネルギーにまで対応出来るようになっている。また、サンプリング・カロリメーターのような物質の原子番号 Z が交互に異なって配置されるような検出器のトラッキングには、GEANT4 のカット値 (粒子の飛程相当) が有効となる。しかし、GEANT4 はまだ歴史が浅く、低エネルギーのハドロンプロセスなど、未だに未定なところもある。この様に、GEANT4 を使って検出器の R&D をすることや、近い未来の実験に向けて準備することは大変重要なことである。

違い	GEANT3	GEANT4
プログラムと 方法	FORTRAN (手続き型)	C++ (オブジェクト指向)
視覚化	組み込み型 システムの1つ	汎用インターフェース (OpenGL,VRML,DAWN)
ハドロンプロセス	GEISHA,FLUKA の組み込み	20GeV 以下 GEISHA 20GeV 以上 GEISHA 互換
光学プロセス	簡単なモデル 光学的光子はない	正確な記述が可能に Optical Photon が別に定義
トラッキング	Cut of Energy 物質に依らない	Cut Value 物質によって異なる 放射長相当：飛程で指定

表 6: GEANT3 と GEANT4 の比較

7 ジオメトリの構築

7.1 フレームワーク

フレームワークの必要性は以下のような事があげられる。巨大なコラボレーションでの開発では、それぞれが独自に開発を行なうのではなく、フレームワークを使う事により、効率的な開発を行なう事が出来る。各検出器のサブグループ毎に、作業を分業して行なう事により作業効率が上がる。

2章でも述べたが、アトラス実験は複雑・大規模である。オブジェクト指向の良いところは、大多数の人で分担を分け、他に依存しないように部分部分を完成させていく事ができる。さらに、共通で使うものや、サービス、他へのインタフェース的なものは、ある、フレームワークに乗って開発を行なうことで効率的な開発ができる。アトラスのフレームワークとしてオフィシャルには ATHENA[29] という大きなフレームワークがある。ATHENAは重厚長大なので、軽い FADS/Goofy⁹[30] [31] というフレームワークを使って開発を行なった。FADS/Goofyはまず、goofyという、プログラムが走る。そして、goofyはマクロ言語によって、プラグインモジュールを実行時に、共有ライブラリーを動的にローディングと実行時のバインディング機能 (late binding) をうまく使って実現されている。

図 48、図 49 で、今回開発したのは、アトラス検出器の内部検出器 (図中の Inner Det もしくは、図 49 の赤字の部分) の中のシリコンバレル 4 層の部分である。赤矢印が外部へのインターフェースを示している。この図 reffig:fads が示すことは、個々の検出器のジオメトリ、イベントジェネレーター、解析プログラム、視覚化など、その都度ユーザーが用途に応じてインタラクティブにマクロコマンドで呼び出す事で使う事ができる。この様に

- 検出器のジオメトリ
- 検出器の有感領域 (Sensitive Volume / detector hit)
- イベントの生成と管理 (Event Generator / Persistency I/O)
- 粒子の軌跡追跡 (Tracking)

が、一つのアプリケーション (goofy) で、ユーザの様々なセットアップに利用可能である。

⁹FADS: Framework for Autonomous Detector Simulation
Goofy: Geant4-based Object Oriented Folly

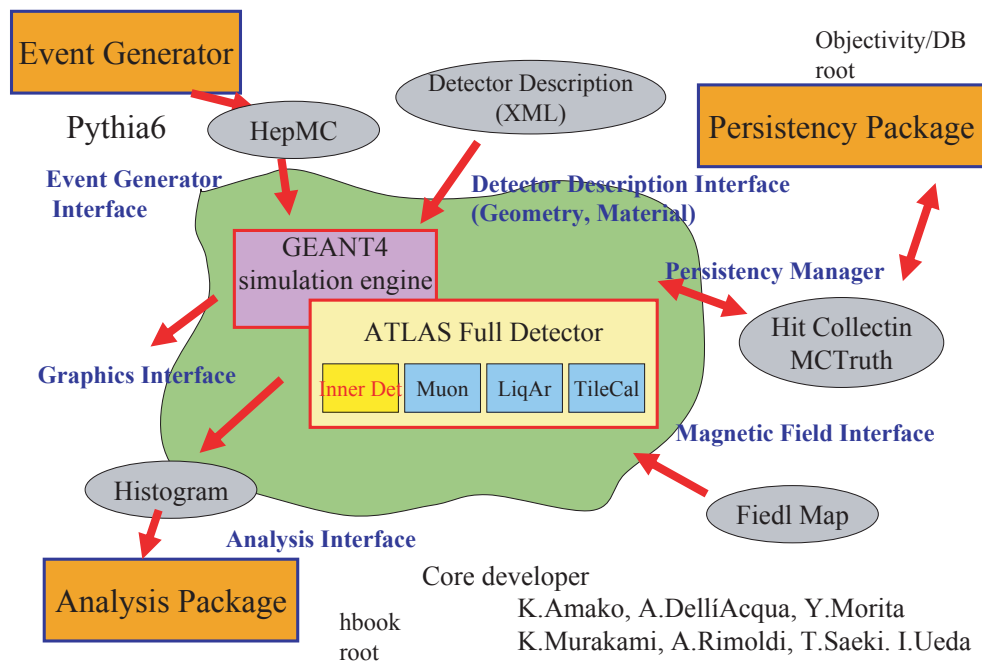


図 48: フレームワーク。FADS/Goofy の紹介。赤色の矢印が、外部へのインターフェースを示す。

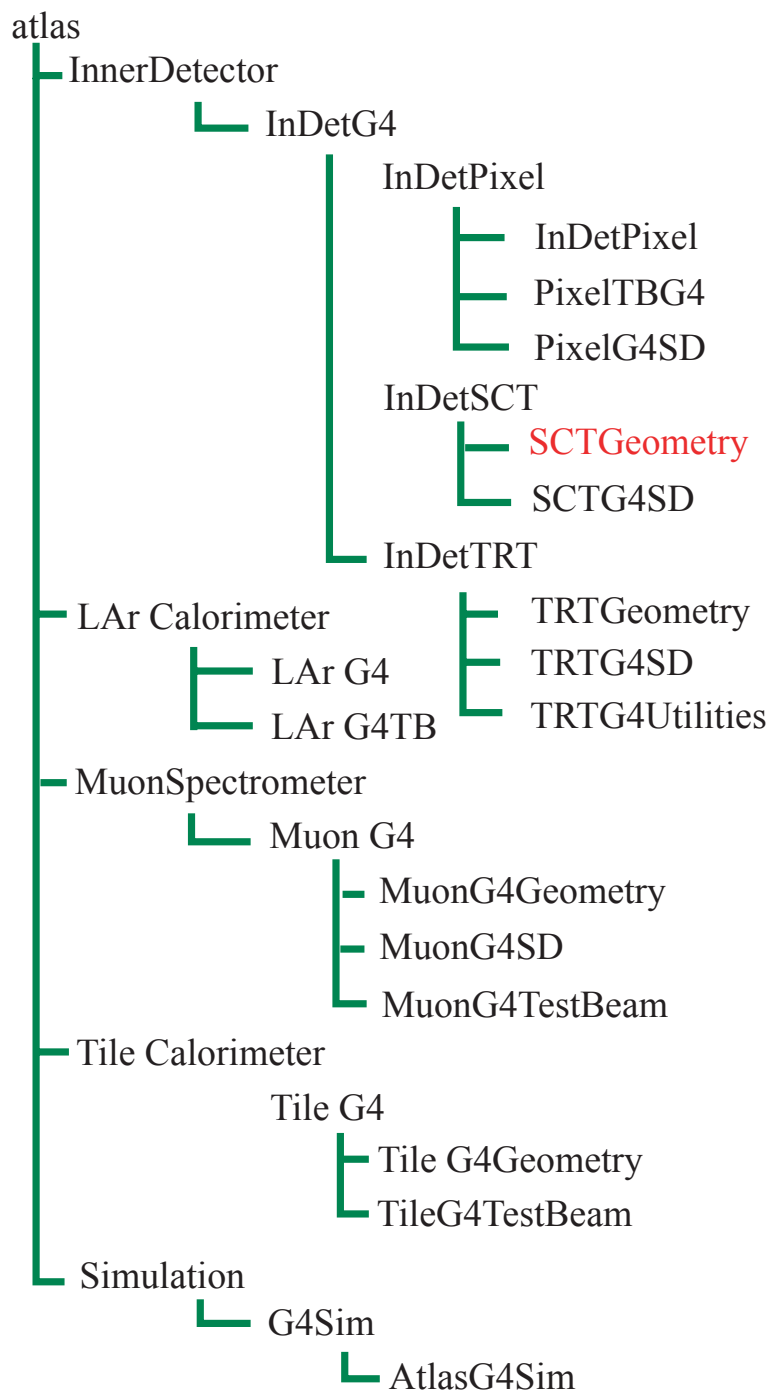


図 49: アトラス検出器のジオメトリツリー。赤字の部分今回開発。

7.2 検出器の記述

アトラス検出器を構築する際に、SCT(SCTだけでなく Pixel,TRT を含めた内部検出器)では以前の Geant3 で使われていた値をデータベースに入れ、そのプライマリーナンバーをとってきて、Geant3 と同等のジオメトリを Geant4 で構築するようにしている。その方法が、SQL であったり、XML であったりしたが、中期的解として図 50 のようなフローチャートをたどるようになっていた。今回は、図 50 の赤矢印のパスが完成した。

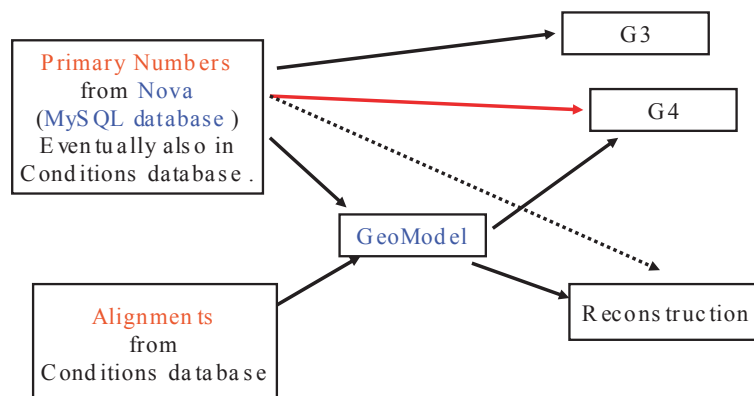


図 50: 検出器構築の記述方法。SQL データベースより、値をとってきて GEANT4 の検出器を構築すると言う、赤いルートが今回開発した。

図 51 は、シミュレーションのフローチャートを示した物である。シミュレーションは、RDO(Raw Data Object)に渡す時に、フォーマットを実際の実験のデータフォーマットに揃え、同じ解析プログラムで比較ができるようにする。構築したジオメトリは GEANT4 でのシミュレーションでつかわれ、そこから出てくるヒットデータをデジタル化するとき、また、そのイベントを再構築 (Reconstruction) する際にもつかわれる大変重要な事である。

7.3 モジュールの構築および階層化構造

アトラス SCT のジオメトリを構築するのに図 52 のような階層構造をもたせた。

まず、シリコンウェハーとベースボード、ハイブリッドの 3 つのシリコン検出器を構築し、それを z 軸方向に 12 個ならべ、次に Φ 方向で回し、それを 1 レイヤーとする。これを繰り返す事により、4 レイヤー作り図 54 のようなアトラス SCT バレル 4 層を構築した。

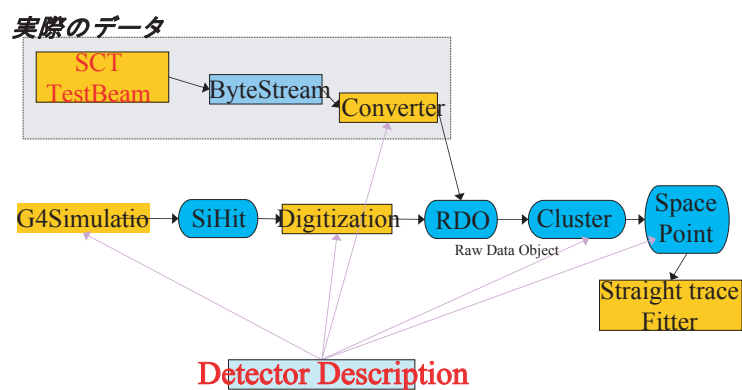


図 51: 検出器シミュレーションの流れ。検出器の情報は、何度も呼ばれ、大変重要 [29][31]。

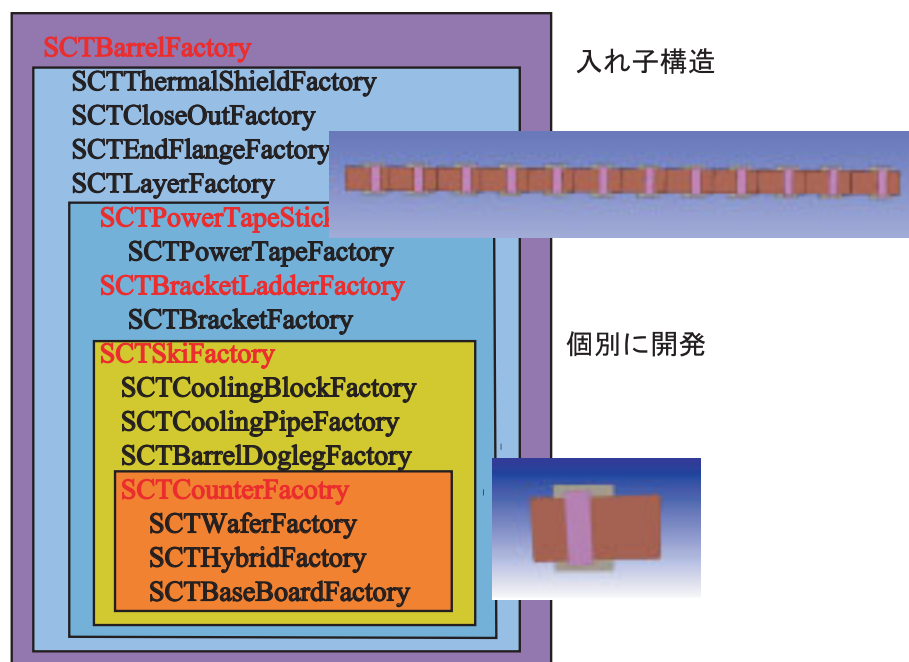


図 52: 階層化構造。各々の構成要素のプログラムは小さく分かりやすい。

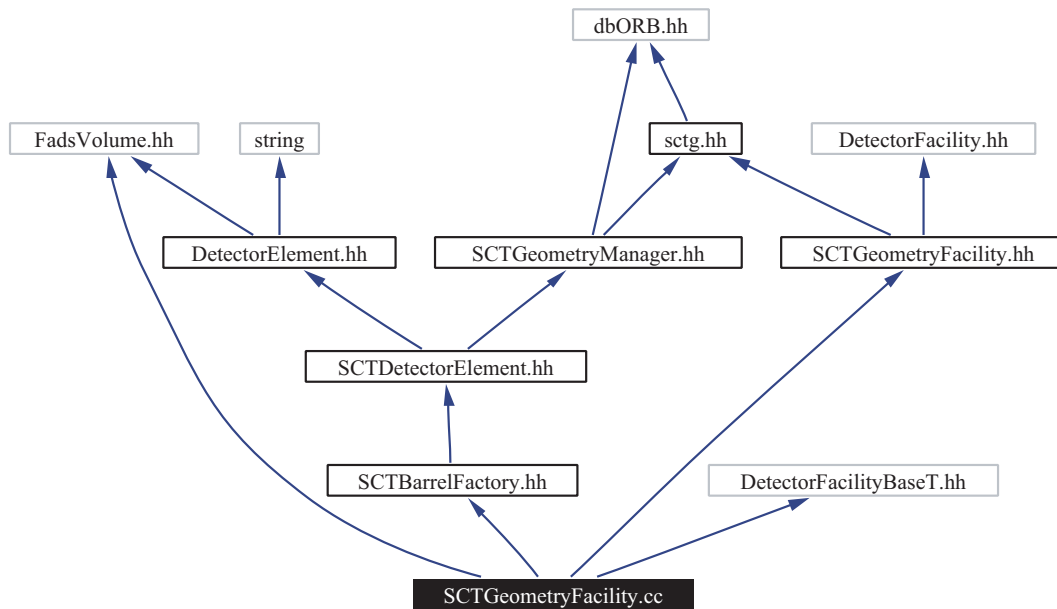


図 53: クラス関係図 [24]。

階層化構造をもたすことにより、メモリーの節約をした(表7)。メモリーはアトラス検出器を全体をロードした際でも現在標準的なパソコンで、誰もが解析が行なえるような環境をめざして 256MB を目標にしている。

テストプログラムにて、100K イベント走らせた時のメモリーと CPU の使用を載せた(表7)。スキューボリュームを維持し、階層化構造が持たせた方が圧倒的に良いと言える。また、GEANT4 のバージョンと gcc のバージョンを変更で、メモリー使用量が下がった。なお、GEANT4 のバージョンの違いでのメモリー使用量は、開発者に尋ねる機会があったが、原因不明のままである。

図 53 にクラス関係図を示した。SCTGeometryFacility に自分の作ったジオメトリを登録する事によって、したがってこれ以後、この登録した名前で参照できる。各々の検出器は GeometryManager で一括管理され、GeometryManager は値を返すようになっている。GeometryManager は実行時に dbORB でデータベースにアクセスし sctgeo.hh とかの構造体に値を入れている。

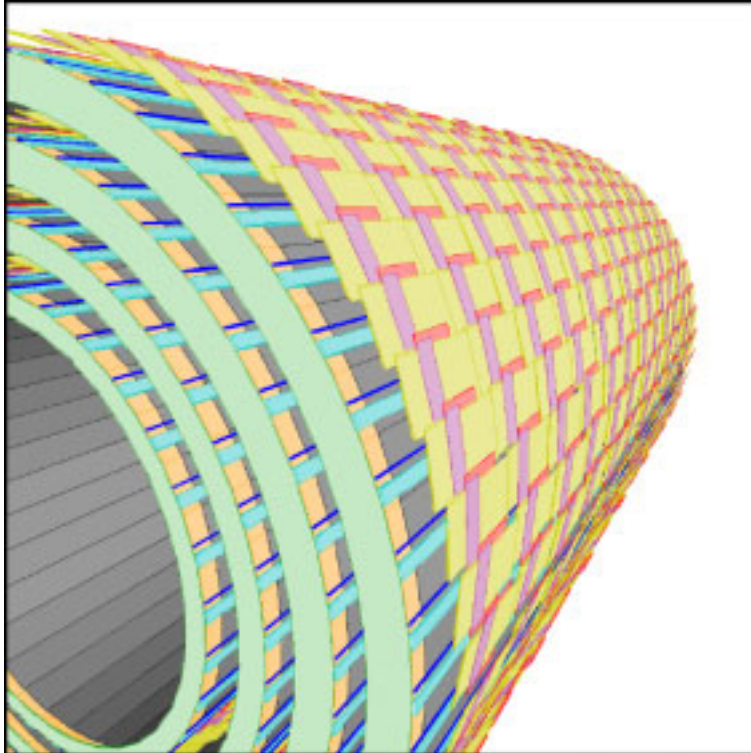


図 54: バレル SCT4 層

7.4 放射長による物質の見積り

7.4.1 GEANT3 と NOVA 版 GEANT4 ジオメトリ

NOVA とは Networked Object-based Environment for Analysis ¹⁰ の略で、GEANT3 で使われていた変数が格納されている、SQL データベースである。まずは、詳細なジオメトリに行くのではなく、GEANT3 で使われていたのと同等のジオメトリを構築する事から始めた。

構築したジオメトリが正しく入っているか確認のため、テストプログラムにより、ボリウムの衝突、物質の総和、ポジションされた位置を、放射長を測る事により確認した。

放射長とは、電子が制動放射でエネルギーを失って $1/e$ 倍になる長さである。放射長は Y.S.Tsai の式 14[16] を用いて計算した。

$$\frac{1}{X_0} = 4\alpha r_e^2 \frac{N_A}{A} \{ Z^2 [L_{rad} - f(z)] + ZL'_{rad} \} \quad (13)$$

$$X_0 = \frac{716.4gm^{-2}A}{Z(Z+1)\ln(287/\sqrt{Z})} \quad (14)$$

式からも分かるが、放射長はおおむね。原子の質量に比例している。代表的なものを表 8 に載せる。

図 55 は、アトラスシリコンバレル 4 層分の放射長を比較した図である。黒い点線が GEANT3 の結果で、赤い線が今回構築した NOVA 版の GEANT4 ジオメトリでの放射長である。NOVA 版 GEANT4 で GEANT3 と同等の結果が得られ、GEANT3 から GEANT4 へのジオメトリの移行は正しく行なえている事を確認した。また、表 9, 付録 B にも示されているように、計算値とも合う事を確認した。

G4 Geometry	Andrea	Andrea	Tomeda	Tomeda	Tomeda
gcc バージョン	2.95	3.2.3	2.95	3.2.3	3.2.3
G4 バージョン	4.5.1.p01	4.5.2	4.5.1.p01	4.5.2	4.5.2
SKI Volume の有無	有	有	無	無	有
メモリー	55MB	55MB	78MB	58MB	35MB
CPU time	95 秒	95 秒	167 秒	178 秒	152 秒

表 7: メモリーと CPU 使用率

¹⁰[http://atlassw1.phy.bnl.gov/NOVA/index.php3\[32\]](http://atlassw1.phy.bnl.gov/NOVA/index.php3[32])

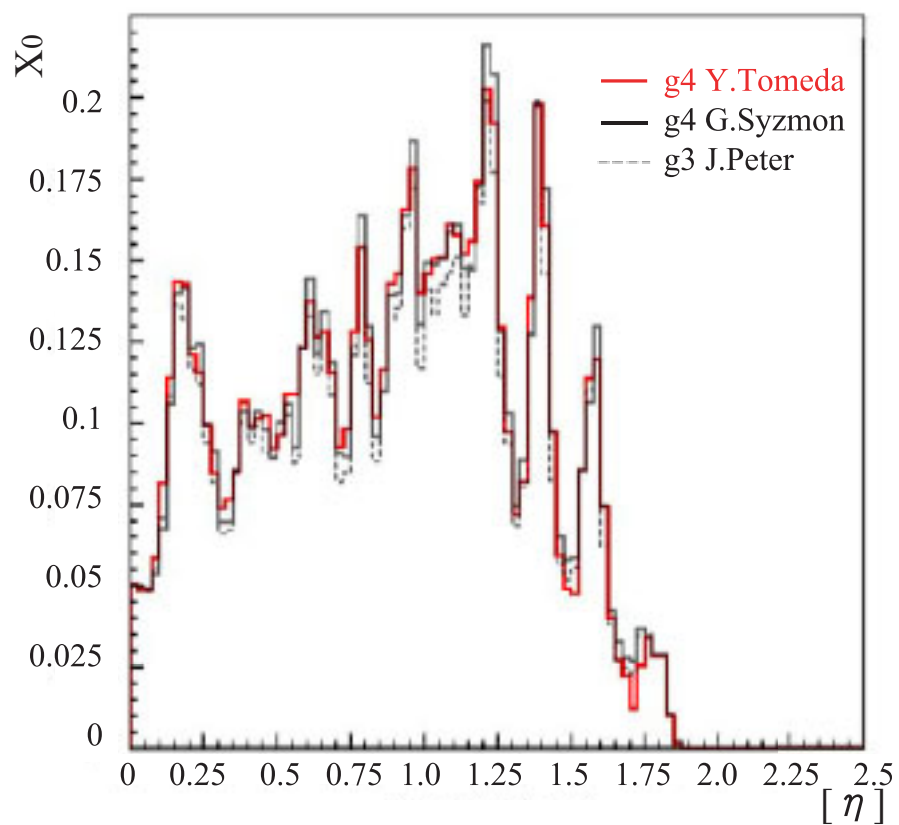


図 55: シリコンバレル 4 層の放射長。横軸はラピディティ。 $\eta = -\ln(\tan \frac{\theta}{2})$, θ はビーム軸となす角度

物質	密度 [g/cm ³]	放射長 [g/cm ²]	[cm]
C	2.265	42.70	18.8
Al	2.7	24.01	8.9
Si	2.33	21.82	9.36
Pb	11.35	6.37	0.56
H ₂ O	1.00	36.08	36.1

表 8: 主な物質の放射長 [16]

	主な物質	密度 [g/cm ³]	厚さ [mm]	平均放射長 [%]
Silicon wafer	Silicon	2.328	0.285	0.608
Baseboard	TPG	1.595	0.580	0.142
BeO Facing	BeO	3.002	0.250	0.055
Carbon bridge	Carbon	1.82	0.580	0.064
Cu/PI hybrid	Polyimide	1.93	0.279	0.119
ASIC's	Silicon	2.46	0.600	0.065
Pitch-adaptor	glass	2.71	0.250	0.014
Hybrid Interconnect	Polyimide	2.05	0.150	0.004
Pit tail	Polyimide	2.05	0.150	0.017

表 9: SCT で使われる主な物質の値 [2]

7.4.2 NOVA 版 GEANT4 と詳細なジオメトリの GEANT4

続いて、NOVA 版 GEANT4 と最終のデザインよりシミュレーション用に直した、詳細ジオメトリとの比較を行なった。図 56 の上図が、NOVA 版 GEANT4 ジオメトリ下図が、今回入れた詳細な検出器部分のジオメトリである。簡単に違いをテーブルにしてみた表 10。

先ほどと同様の方法で、放射長の比較を行なった (図 57)。図 57 の赤線が、詳細なジオメトリである。表 11 を見ると、CPU 時間も 100K イベントで約 30 秒の増加、メモリーはほぼ現状維持で、最適化を行なった暁には十分要求を満たすものになるであろう。

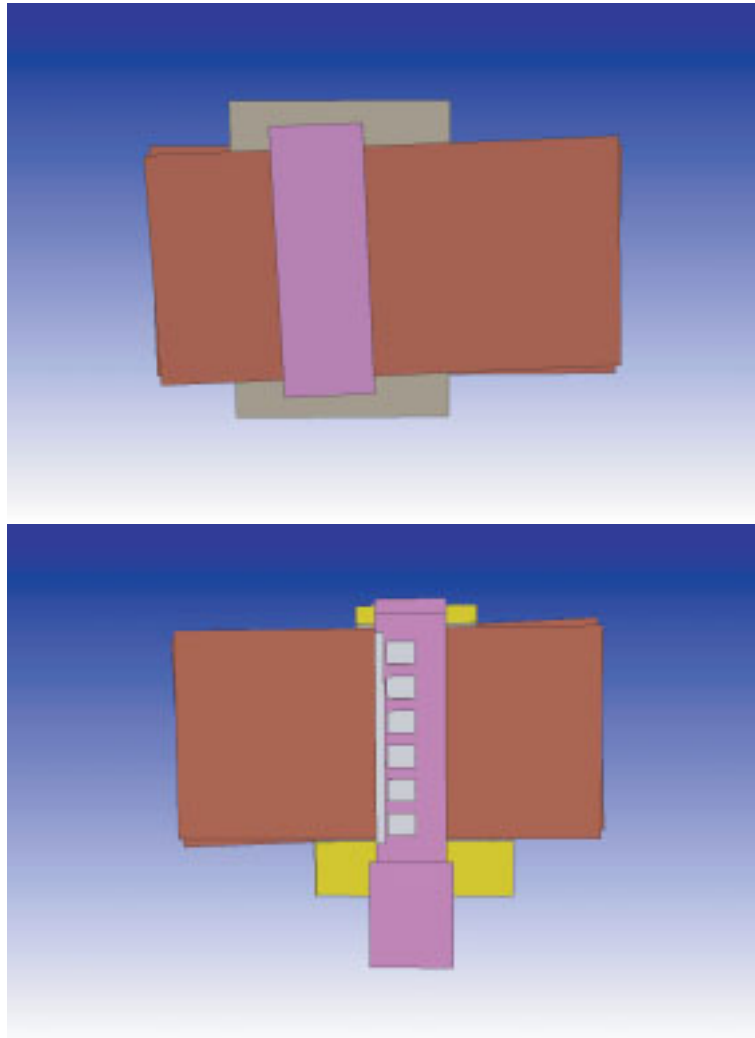


図 56: NOVA 版と詳細版のジオメトリ。上：NOVA 版、下：詳細版

NOVA ジオメトリ	詳細ジオメトリ
SCTBaseBoard	SCTBaseBoard1～5
SCTHybrid	SCTHybrid
	SCTCarbonbride
	SCTCarbonstep
	SCTHybridInterconnect
	SCTChip
	SCTPitchadaptor
SCTWafer	SCTWafer
	SCTFarendFacing
	SCTCoolendFacing
	SCTPigtail

表 10: 構成要素の違い

G4Geometry	NOVA	詳細
gcc バージョン	3.2.3	3.2.3
SKI Volume の有無	有	有
メモリー	35MB	36MB
CPU time	156	187

表 11: 詳細なものとの比較 イベント数 100K

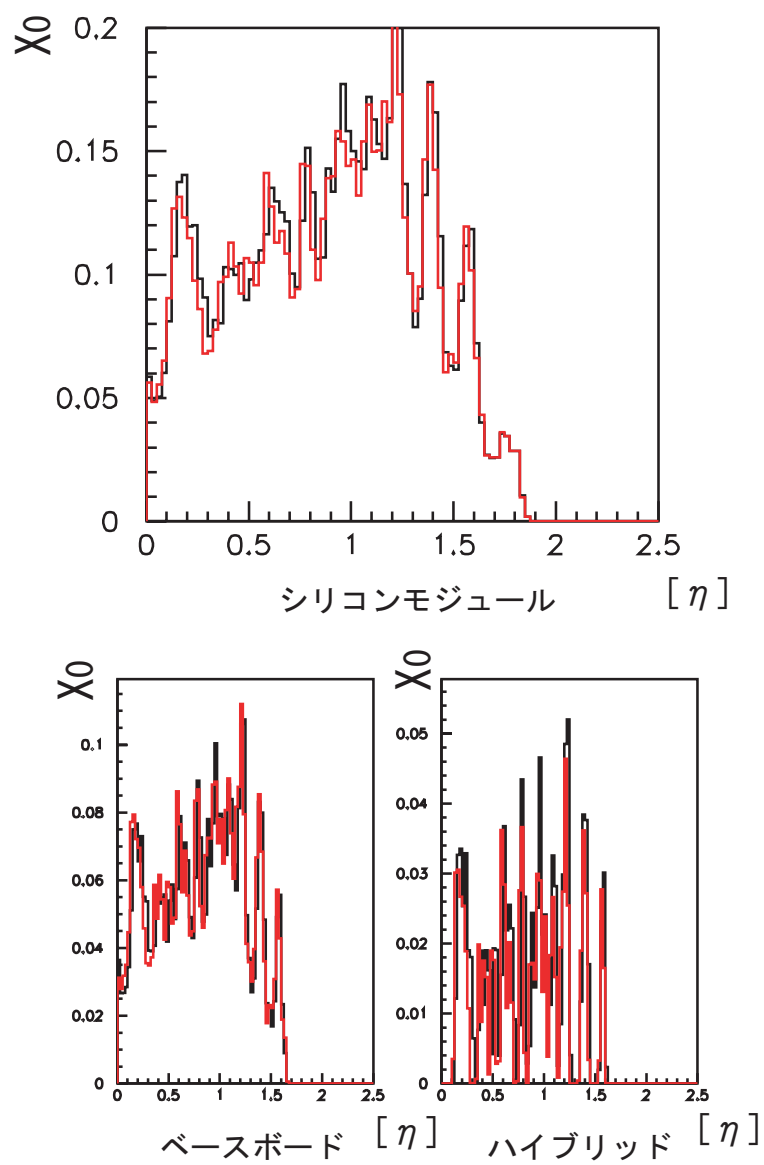


図 57: 詳細なものとの比較

8 結論

アトラス日本シリコングループでは、LHC 実験に向けてつくばの高エネルギー加速器研究機構にて、シリコン半導体飛跡検出器の製造・検査を行なっている。日本が担当する 985 台中、現在までに約 500 台の製造を行なった。2004 年 6 月には製造終了予定である。

2003 年 5 月および 9 月に CERN において、 $180\text{GeV}/c\pi^-$ ビームを用いて行われたアトラス SCT モジュールのビームテストを行い、得られたデータを解析して、検出器の性能を評価した。今回のビームテストは、量産時の電氣的性能試験において、性能が完全でないチップを使って、モジュールを製造し、完全でないチップがどの程度の振舞をするか評価したものである。

まず、位置分解の評価を行った。放射線損傷を与えていないモジュール、放射線損傷を与えているモジュールともに $80\mu\text{m}$ ピッチの一様分布から期待される位置分解能 $23\mu\text{m}$ を与え、要求される位置分解能が確認することができた。次に、読み出し ASIC 内の信号波解析を行った。立上りピーキングタイムは約 20ns であり、LHC のビームクロッシング 25ns という要求を見たし、設計値を満たす事を確認した。ゲインのオフセットが負にでる該当のチップのヒットマップが非常にノイズが多い事が分かった。他の問題のチップは正常に動作している事を確認した。検出効率について評価した。ゲインのオフセットが負にでるものを除いて放射線損傷を与えた後も、検出効率の閾値依存性はアトラス実験で使用される 1fC の閾値において検出効率が 99 % 以上であった。ノイズ占有率の評価を行なった。ゲインのオフセットが負に出るものを除いて放射線損傷を与えた後も、検出効率の閾値依存性はアトラス実験で使用される 1fC の閾値においてノイズ占有率が 5×10^{-3} 以下の値で、要求を満たしている事を確認した。

MySQL を使って、GEANT3 のデータベースが入っている NOVA にアクセスをして、GEANT3 と同等の、GEANT4 によるアトラスシリコンバレル 4 層のジオメトリーを構築する経路が完成した。アトラスシリコンバレルのジオメトリーを構築する際に階層構造を持たすことで、メモリーの節約ができた。テストプログラムにて、放射長の η 分布を見る事で、検出器の座標、物質量が、正しく入力できた事を評価し、確認した。モジュール部に関しては、詳細なジオメトリーを構築した。また、同様のテストプログラムにて、放射長の比較の行ない評価した。今後の課題は、検出器を支える他のサービス周りのジオメトリーをいれること。また、詳細に入れたジオメトリーと現行の NOVA の比較を行ない、また、最適化する事である。

参考文献

- [1] Atlas inner detector technical design report. *CERN/LHC/99-17*.
- [2] <http://atlas.kek.jp/si-soft/index.html>.
- [3] T.Akimoto. Beam study of irradiated atlas-sct prototypes. 2002.
- [4] Y.Unno et al. Beamtest of nonirradiated and irradiated atlas sct microstrip modules at kek. *IEEE Trans.Nucl.Sci.49:1868-1875*, 2002.
- [5] Y.Unno et al. valuation of radiation damaged p-in-n and n-in-n silicon microstrip detectors. *KEK test Experiment*.
- [6] Y.Unno and On behalf of the ATLAS SCT collaboration. Atlas silicon microstrip semiconductor tracker(sct). *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A453,p.109-120*, 2000.
- [7] 松尾武. ATLAS SCT モジュールの性能評価. **岡山大学修士論文**, 2002.
- [8] 橋崎徹. ATLAS SCT モジュールの性能評価. **岡山大学修士論文**, 2001.
- [9] 山下智弘. ATLAS Semiconductor tracker の研究. **岡山大学修士論文**, 2000.
- [10] M.Vos et al. Beam tests of atlas sct silicon strip detector prototypes; an overview of recent results. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*.
- [11] J.Bernabeu et. al. Beam study of irradiated atlas-sct module prototypes. *Nucl.Instrum.Meth.,A 485 (2002) 67-72*, 2002.
- [12] <http://atlas.web.cern.ch/atlas/internal/welcome.html>.
- [13] William R.Leo. Techniques for nuclear and particle physics experiments. *Springer-Verlag*, 1994.
- [14] G.F.Knoll. Radiation detection and measurement third edition. *John Wiley & Sons, Inc.*, 2000.
- [15] ABCD3T chip specification version v1.2. July 24, 2000.
- [16] Particle data group, review of particle physics. *The European Physical Journal C3*, (1998) 1.

- [17] 秋元崇. アトラスバレル sct 用量産モジュールの品質保証のシステム. **筑波大学修士論文**, 2002.
- [18] R.de Oliverira AA.Carter and A.Gandi. Novel thermal management structures and their applications in new hybrid technologies and feed-through structures. *CERN Report 99-08 (ISBN 92-9083-152-9) Also patent World International Property Organization: WO 00.03567A1 January 2000.*
- [19] T.Kondo et al. Construction and performance of the atlas silicon microstrip barrel modules. *Nuclear Instruments and methods in Physics Research A* 485, 2002.
- [20] W.Dabrowski et al. Development of front-end electronics for silicon strip detectors using the dmil bicmos rad-hard process. 1996.
- [21] W.Dabrowski et al. Sct128b-a prototype radiation hard chip for binary readout of silicon stripdetectors. 1999.
- [22] Y.Ikegami et al. Results of early phase of series production of atlas sct barrel hybrids and modules. *Colmar*, 2002.
- [23] http://atlas.web.cern.ch/atlas/groups/inner_detector/sct/testbeam/.
- [24] <http://fphy.hep.okayama-u.ac.jp/tomeda/sct/index.html>.
- [25] M.Vos. A study of the tracking performance of irradiated sct prototypes using test beam data. *ATLAS Internal Note,ATL_COM_INDET_2002_022.*, 2002.
- [26] <http://ific.uv.es/jgarcian/testbeam/>.
- [27] <http://geant4.org>.
- [28] <http://wwwasd.web.cern.ch/wwwasd/geant4/geant4.html>.
- [29] http://atlas.web.cern.ch/atlas/groups/inner_detector/software/software.html.
- [30] <http://gfarm.kek.jp/index.html>.
- [31] <http://atlas.web.cern.ch/atlas/groups/software/oo/simulation/index.html>.
- [32] <http://atlassw1.phy.bnl.gov/nova/index.php3>.

謝辞

指導教官である岡山大学・田中礼三郎助教授にはアトラスのビームテストへの参加、データ解析の機会を与えて下さりありがとうございました。また学会など発表の準備、実験現場に於きましては、直接御指導を頂き、本論文作成時にも最後まで見て頂き感謝しております。

高エネルギー加速器研究機構の近藤教授、海野助教授には、本研究を進める上で、お忙しい中、数多くの御指導を頂いたり検出器のこと、解析の手法を教わる事が出来ました。また、資料・情報を集めて下さったり、解析結果などを見ての鋭い指摘・アドバイスを、深く感謝致します。

高エネルギー加速器研究機構の池上助手、筑波大学原講師には、富士実験室で作業を共にする中で、多くの事を学ばさせて頂きました。特に、電気回路・ハードウェアの事につきましては、多くの事を学ばさせて頂き、ありがとうございました。

高エネルギー加速器研究機構の森田助教授、東京大学上田助手には、考え方、プログラムの作法など一緒にモニターに向かって教えて頂き、大変ためになりました。

京都教育大学高嶋教授、広島大学岩田助手には、CERNでのビームテストと一緒に参加し、ビームラインでは僕の質問に親切に答えて下さったり大変お世話になりました。

中野教授には、4年生の頃から、3年間大変お世話になりました。また、研究室の同期の、池田、伊藤、小林君にも3年間大変お世話になりました。

最後になりましたが、アトラスシリコングループの皆様、大変お世話になりました。SCTの量産が無事終了し、バレルシリンダーに無事に装着される事を心からお祈り致します。

平成16年2月16日

留田 洋二

A 付録

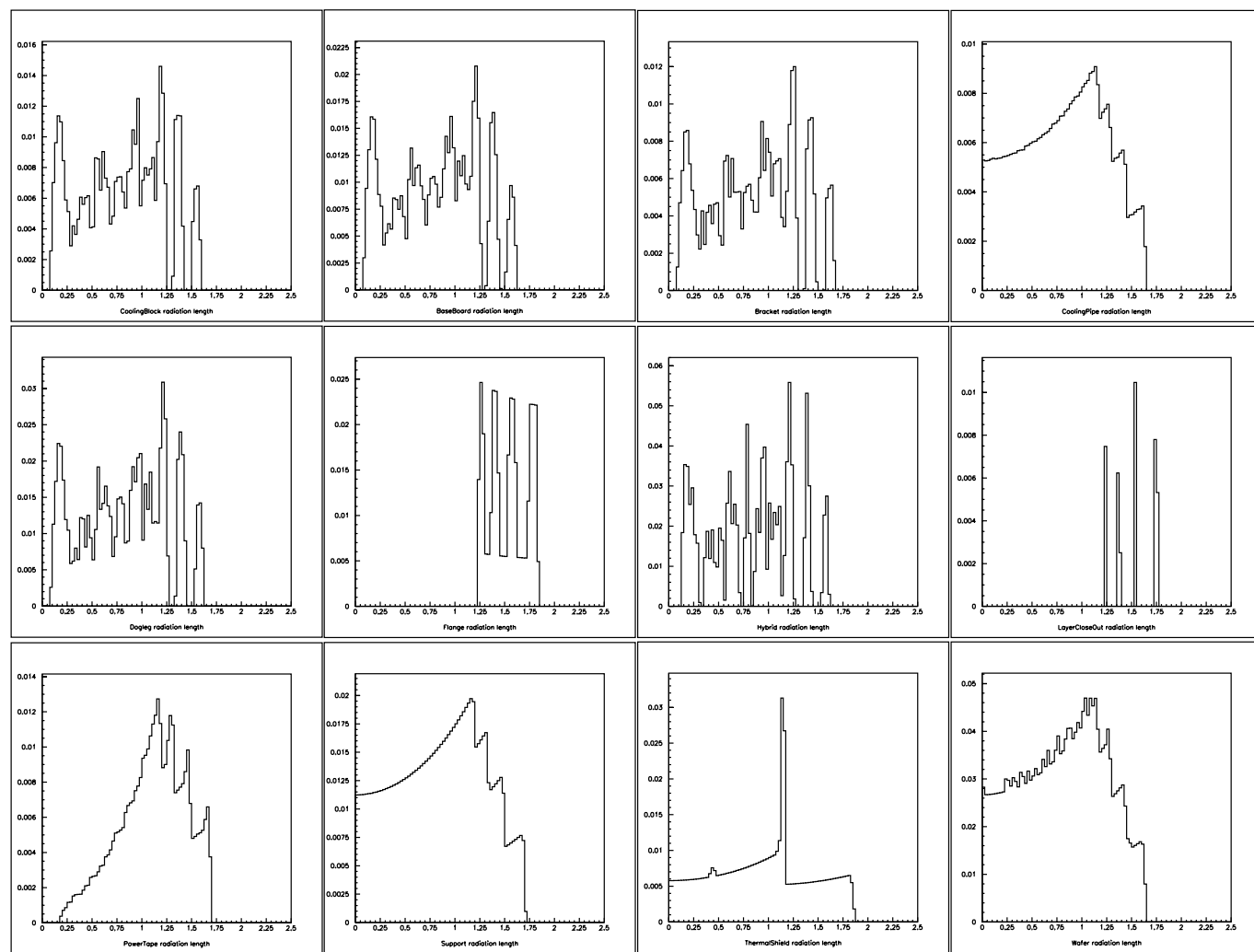


図 58: 個々の放射長

左上から順番に：

CoolingBlock, Baseboard, Bracket, CoolingPipe,

Dogleg, Flange, Hybrid, CloseOut,

Support, Powertape, Thermalshield, Wafer

B 付録

Basic Table (Geometry, Radiation Length and Mass) of ATLAS Barrel SCT Module

original = K 5 from Y. Unno
2003.1.19 updated by T. Kendo (KEK)
 = input data
 To be confirmed
 linked to Material sheet

Normalise to 128 x 63.6 mm ² = 8141														No. off	Basic x (mm)	Basic y (mm)	Basic area	Less area	Actual area	Scaled area	Thickness (mm)	Scaled thickness	X0 (mm)	av. Rad len (%)	Density [g/cm ³]	Mass (gm)	material
Module TOTAL																								1.145		24.414	
Silicon sensors																								0.608		10.798	
Silicon sensor														4	63.96	63.56	4065.30	0.00	4065.30	0.499	0.285	0.1423	93.68	0.608	2.33	10.798	Si
Baseboard																					0.580			0.142		4.921	
TPG baseboard														1	82.10	87.20	7159.12	1814.0	5345.10	0.657	0.380	0.2495	188.92	0.132	2.26	4.590	TPG
Epoxy coating around TPG edge														1	0.02	338.6	6.77	0.0	6.77	0.001	0.420	0.0003	364.43	0.000	1.15	0.003	epoxy
Epoxy coating top and bottom														2	82.10	87.20	7159.12	1814.0	5345.10	0.657	0.020	0.0131	364.43	0.007	1.15	0.246	epoxy
Silicon sensor conductive adhesive														16	1.5	1.5	2.25	0	2.25	0.000	0.080	0.0000	37.16	0.001	3.13	0.009	cond-glue
Silicon sensor thermal adhesive														296	1.5	1.5	2.25	0	2.25	0.000	0.080	0.0000	312.36	0.002	1.35	0.072	therm-glue
BaO facing (cooling-end)																								0.047		1.501	
BaO facing (cooling-end)														2	59.975	16.674	1000.01	32	968	0.119	0.250	0.0297	144.42	0.041	2.86	1.384	BaO
Dowell washers (Al)														2	5	5	25.00	3	22	0.003	1.000	0.0027	88.93	0.006	2.70	0.118	Al
BaO facing (far-end)																								0.008		0.274	
BaO facing (far-end)														2	35.975	5.325	191.57	0	192	0.024	0.250	0.0059	144.42	0.008	2.86	0.274	BaO
Carbon-Carbon bridge step																								0.010		0.356	
Carbon-Carbon step														4	21	4	84.00	0	84	0.010	0.500	0.0052	224.71	0.009	1.90	0.319	CC
Step-Facing thermal adhesive														4	21	4	84	0	84	0.010	0.080	0.0008	312.36	0.001	1.35	0.036	therm-glue
Carbon-Carbon bridge																								0.064		2.098	
Carbon-Carbon bridge														2	21	74.6	1566.60	0	1567	0.192	0.300	0.0577	224.71	0.051	1.90	1.786	CC
Parylene coating														4	21	74.6	1566.6	0	1567	0.192	0.010	0.0019	255.92	0.003	1.289	0.081	parylene
Conductive adhesive (7% area)														2	21	74.6	1566.6	1462	105	0.013	0.050	0.0006	37.16	0.003	3.13	0.033	cond-glue
Thermal adhesive (93% area)														2	21	74.6	1566.6	105	1462	0.180	0.050	0.0090	312.36	0.006	1.35	0.198	therm-glue
Cu/PI hybrid																74.6		0			0.267			0.119		1.684	
"Gold flash(0.4um)														2	21	74.6	1566.6	881	686	0.084	0.0004	0.0000	3.35	0.002	19.30	0.011	Au
"Nickel plating(2um)														2	21	74.6	1566.6	881	686	0.084	0.002	0.0002	14.33	0.002	8.85	0.024	Ni
"Photoreist (20um) layer														2	21	74.6	1566.6	567	1000	0.123	0.020	0.0025	357.19	0.001	1.14	0.045	Polyimide
"L1: Copper(12um)+TH-plating(13um) (66														2	21	74.6	1566.6	881	686	0.084	0.025	0.0021	14.36	0.029	8.96	0.307	Cu
"Polyimide+adhesive (25+25um) layer														2	21	74.6	1566.6	0	1567	0.192	0.050	0.0096	357.19	0.005	1.14	0.178	Polyimide
"L2: Copper tracking(12um)														2	21	74.6	1566.6	1268	298	0.037	0.012	0.0004	14.36	0.006	8.96	0.064	Cu
"Polyimide layer (25um)														2	21	74.6	1566.6	0	1567	0.192	0.025	0.0048	357.19	0.003	1.14	0.089	Polyimide
"L3: Copper gnd plane(12um)														2	21	74.6	1566.6	112	1455	0.179	0.012	0.0021	14.36	0.030	8.96	0.313	Cu
"Polyimide+adhesive (25+25um) layer														2	21	74.6	1566.6	0	1567	0.192	0.050	0.0096	357.19	0.005	1.14	0.178	Polyimide
"L4: Copper(12um)+TH-plating(13um) (66														2	21	74.6	1566.6	873	694	0.085	0.025	0.0021	14.36	0.030	8.96	0.311	Cu
"Polyimide cover+adhesive (13+33um) lay														2	21	74.6	1566.6	0	1567	0.192	0.046	0.0089	357.19	0.005	1.14	0.164	Polyimide
ASIC's w/conductive adhesive																								0.065		0.976	
FE amplifiers (ABCD3T)														12	8.4	6.55	55.02	0	55	0.007	0.500	0.0034	93.68	0.043	2.33	0.769	Si
FE amplifiers conductive adhesive														12	8.4	6.55	55.02	0	55	0.007	0.100	0.0007	37.16	0.022	3.13	0.206	cond-glue
Pitch-adaptor																								0.014		0.231	
Pitch-adaptor glass														2	2.7	63	170	0	170	0.0209	0.200	0.0042	122.95	0.007	2.20	0.150	SiO ₂
Pitch-adaptor tracks														2	2.7	63	170	119	51	0.0063	0.001	0.0000	88.93	0.000	2.70	0.000	Al
Pitch-adaptor-hybrid adhesive														2	2.7	63	170.1	0	170	0.0209	0.050	0.0010	37.16	0.006	3.13	0.053	cond-glue
bonding wire														\$454	0.025	3	0.075	0	0.075	0.0000	0.025	0.0000	88.93	0.001	2.70	0.028	Al
Passive components																								0.043		0.736	
SMD 220nF (1608)														28	1.6	0.8	1.28	0.00	1.28	0.0002	0.800	0.00013	51.17	0.007	5.46	0.157	ceramic
SMD 330nF (3216)														8	3.2	1.6	5.12	0.00	5.12	0.0006	1.250	0.00079	51.17	0.012	5.46	0.280	ceramic
SMD 10nF (3216)														5	3.2	1.6	5.12	0.00	5.12	0.0006	1.250	0.00079	51.17	0.008	5.46	0.175	ceramic
SMD resistors (1608)														7	1.6	0.8	1.28	0.00	1.28	0.0002	0.400	0.00006	51.17	0.001	5.46	0.020	ceramic1
SMD thermistors														2	1.6	0.8	1.28	0.00	1.28	0.0002	0.800	0.00013	51.17	0.000	5.46	0.011	ceramic2
SMD soldering solders														44	1.6	0.8	1.28	0	1	0.0002	0.200	0.00003	9.19	0.015	8.40	0.095	solder
Hybrid Interconnect																					0.149			0.004		0.054	
"Polyimide+adhesive (25+25um) layer														1	21	8.4	176.4	0	176	0.0217	0.050	0.0011	357.19	0.000	1.14	0.010	Polyimide
Copper tracking														1	21	8.4	176.4	67	109	0.0134	0.012	0.0002	14.36	0.001	8.96	0.012	Cu
Polyimide layer														1	21	8.4	176.4	0	175	0.0215	0.025	0.0005	357.19	0.000	1.14	0.005	Polyimide
Copper gnd plane														1	21	8.4	176.4	13	164	0.0201	0.012	0.0002	14.36	0.002	8.96	0.018	Cu
"Polyimide+adhesive (25+25um) layer														1	21	8.4	176.4	0	176	0.0217	0.050	0.0011	357.19	0.000	1.14	0.010	Polyimide
Pig tail																					0.149			0.017		0.251	
"Polyimide+adhesive (25+25um) layer														1	25.09	32.26	809.4	42	767	0.0943	0.050	0.0047	357.19	0.001	1.14	0.044	Polyimide
Copper tracking														1	25.09	32.26	809.4	203	606	0.0745	0.012	0.0009	14.36	0.006	8.96	0.065	Cu
Polyimide layer														1	25.09	32.26	809.4	42	767	0.0943	0.025	0.0024	357.19	0.001	1.14	0.022	Polyimide
Copper gnd plane														1	25.09	32.26	809.4	90	719	0.0883	0.012	0.0011	14.36	0.007	8.96	0.077	Cu
"Polyimide+adhesive (25+25um) layer														1	25.09	32.26	809.4	42	767	0.0943	0.050	0.0047	357.19	0.001	1.14	0.044	Polyimide
Connector pad																					4.967			0.004		0.535	
Pigtail connector														1	25.4	3.05	77.47	0	77	0.0095	4.500	0.0428	364.43	0.012	1.15	0.401	connector
connector solders														3 4	1.6	0.8	1.28	0	1	0.0002	0.200	0.0000	9.19	0.012	8.40	0.073	solder
"Gold flash(0.4um)														1	25.4	5	127.0	80	47	0.0058	0.000	0.0000	3.35	0.000	19.30	0.000	Au
"Nickel plating(2um)														1	25.4	5	127.0	81	46	0.0056	0.002	0.0000	14.33	0.000	8.85	0.001	Ni
"Photoreist (20um) layer														0	25.4	5	127.0	0	127	0.0156	0.020	0.0003	357.19	0.000	1.14	0.000	Polyimide
"L1: Copper(12um)+TH-plating(13um)														1	25.4	5	127.0	81	46	0.0056	0.025	0.0001	14.36	0.001	8.96	0.010	Cu
"Polyimide+adhesive (25+25um) layer														1	25.4	5	127.0	0	127	0.0156	0.050	0.0008	357.19	0.000	1.14	0.007	Polyimide
"L2: Copper tracking(12um)														1	25.4	5	127.0	107	20	0.0025	0.012	0.0000	14.36	0.000	8.96	0.002	Cu
"Polyimide layer (25um)														1	25.4	5	127.0	0	127	0.0156	0.025	0.0004	357.19	0.000	1.14	0.004	Polyimide
"L3: Copper gnd plane(12um)														1	25.4	5	127.0	76	51	0.0062	0.012	0.0001	14.36	0.001	8.96	0.005	Cu
"Polyimide+adhesive (25+25um) layer														1	25.4	5	127.0	0	127	0.0156	0.050	0.0008	357.19	0.000	1.14	0.007	Polyimide
"L4: Copper(12um)+TH-plating(13um)														1	25.4	5	127.0	81	46	0.0056	0.025	0.0001	14.36	0.001	8.96	0.010	Cu
"Polyimide cover+adhesive (13+33um) lay														2	25.4	5	127.0	0	127	0.0156	0.046	0.0007	357.19	0.000	1.14	0.013	Polyimide

List of Materials for SCT

original 2003.2.7 (T.Kondo)

Last update 2003.2.9 (T.Kondo)

NOTE:

shows input data

needs checking

Materials	compounds	weight fraction	density	atomic element	atomic ratio	Z	A	mol fraction	g/mol	weight fraction	X 0 g/cm ²	X 0 (mm)
H ₂ O (sample)	water	1	1.000	H O total	2 1 3	1 8	1.01 16.00	0.667 0.333 1.000	2.02 16.00 18.02	0.112 0.888 1.000	63.05 34.24 36.09	360.89
Sensor	silicon	1	2.330	Si	1	14	28.09	1.000	28.09	1.000	21.83	93.68
TPG	carbon	1	2.260	C	1	6	12.01	1.000	12.01	1.000	42.70	188.92
Epoxy C ₁₈ H ₂₀ O ₃	epoxy	1	1.150	C H O total	18 20 3 41	6 1 8	12.01 1.01 16.00	0.439 0.488 0.073 1.000	216.18 20.20 48.00 284.38	0.760 0.071 0.169 1.000	42.70 63.05 34.24 41.91	364.43
Conducting glue: Ag (71%) Epoxy (29%)	Epoxy Ag all	0.29 0.71 1	1.150 10.490 3.126	C H O Ag total	18 20 3 6.454 47.45	6 1 8 47	12.01 1.01 16.00 107.87	0.379 0.421 0.063 0.136 1.000	216.18 20.20 48.00 696.24 980.62	0.220 0.021 0.049 0.710 1.000	42.70 63.05 34.24 8.97 11.62	37.16
Thermal glue (see SCT barrel FDR, 5.5)	Epoxy Boron Nitride all	0.6925 0.3075 1	1.150 2.260 1.355	C H O B N total	18 20 3 5.088 5.088 51.18	6 1 8 5 7	12.01 1.01 16.00 10.81 14.01	0.352 0.391 0.059 0.099 0.099 1.000	216.18 20.20 48.00 55.01 71.27 410.66	0.526 0.049 0.117 0.134 0.174 1.000	42.70 63.05 34.24 52.69 37.99 42.31	312.36
Beryllia	BeO	1	2.860	Be O all	1 1 2	4 8	9.01 16.00	0.500 0.500 1.000	9.01 16.00 25.01	0.360 0.640 1.000	65.19 34.24 41.30	144.42
Aluminum	Al	1	2.700	Al	1	13	26.98	1.000	26.98	1.000	24.01	88.93
Carbon-Carbon	CC	1	1.900	C	1	6	12.01	1.000	12.01	1.000	42.70	224.71
Parylene C (poly- monochloro-para- xylylene)	parylene C	1	1.289	C H Cl all	8 7 1 16	6 1 17	12.01 1.01 35.45	0.500 0.438 0.063 1.000	96.08 7.07 35.45 138.600	0.693 0.051 0.256 1.000	42.70 63.05 19.28 32.99	255.92
Gold	Au	1	19.300	Au	1	79	196.97	1.000	196.97	1.000	6.46	3.35
Nickel	Ni	1	8.845	Ni	1	28	58.69	1.000	58.69	1.000	12.68	14.33
Polyimide (Kapton) C ₂₂ H ₁₀ N ₂ O ₅	polyimide	1	1.136	C H N O all	22 10 2 5 39	6 2 7 8	12.01 1.01 14.01 16.00	0.564 0.256 0.051 0.128 1.000	264.22 10.10 28.02 80.00 382.34	0.691 0.026 0.073 0.209 1.000	42.70 63.05 38.00 34.24 40.58	357.19
Copper	Cu	1	8.960	Cu	1	29	63.55	1.000	63.55	1.000	12.86	14.36
Glass	SiO ₂	1	2.200	Si O all	1 2 3	14 8	28.09 16.00	0.333 0.667 1.000	28.09 32.00 60.09	0.467 0.533 1.000	21.83 34.24 27.05	122.95
Ceramics for Electronics	Al ₂ O ₃	1	5.460	Al O all	2 3 5	13 8	26.98 16.00	0.400 0.600 1.000	53.96 48.00 101.96	0.529 0.471 1.000	24.01 34.24 27.94	51.17
Solder	Tin Lead all	0.63 0.37 1	8.400	Sn Pb all	0.531 0.179 0.709	50 82	118.71 207.2	0.748 0.252 1.000	63.00 37.00 100.00	0.630 0.370 1.000	8.82 6.37 7.72	9.19
Connector (samtec SFM C Series)	Black Liquid Crystal Polymer	1	1.150	C H O total	18 20 3 41	6 1 8	12.01 1.01 16.00	0.439 0.488 0.073 1.000	216.18 20.20 48.00 284.38	0.760 0.071 0.169 1.000	42.70 63.05 34.24 41.91	364.43

2003.2.9 by Taka Kondo (KEK)

Module TOTAL	#REF!
--------------	-------

SCTBSensorM aterial	weight(gm)	element	Si									total
	10.798	weight%	100.00									100.00
	10.798	Si	1.000									1.00
Sulton sensor												
SCTBBaseboardM aterial	weight(gm)	element	H	B	C	N	O	Ag				total
	4.921	weight%	0.44	0.20	97.95	0.25	1.04	0.13				100.00
	4.596	TPG			1.000							1.00
	0.003	epoxy	0.071		0.760		0.169					1.00
	0.246	epoxy	0.071		0.760		0.169					1.00
	0.009	cond-glu e	0.021	0.220		0.049	0.710					1.00
	0.009	cond-glu e	0.021	0.220		0.049						1.00
	0.072	them -glue	0.049	0.134	0.526	0.174	0.117					1.00
	0.072	them -glue	0.049	0.134	0.526	0.174	0.117					1.00
SCTBCoolingFacingM aterial	weight(gm)	element	Be	O	Al							total
	1.501	weight%	33.21	58.97	7.83							100.00
	1.384	BeO	0.360	0.640								1.00
	0.118	Al			1.000							1.00
Dowelwashers (Al)												
SCTBFarendFacingM aterial	weight(gm)	element	Be	O								total
	0.274	weight%	36.03	63.97								100.00
	0.274	BeO	0.360	0.640								1.00
BeO facing (far-end)												
SCTBCarbonCarbonBridgeStepM aterial	weight(gm)	element	H	B	C	N	O					total
	0.356	weight%	0.50	1.37	95.15	1.78	1.20					100.00
	0.319	CC			1.000							1.00
	0.036	them -glue	0.049	0.134	0.526	0.174	0.117					1.00
Leg-Facing them aladhesive												
SCTBCarbonCarbonbridgeM aterial	weight(gm)	element	H	B	C	N	O	Cl	Ag			total
	2.098	weight%	0.69	1.26	93.13	1.64	1.18	0.98	1.11			100.00
	1.786	CC			1.000							1.00
	0.081	polyim ide	0.051		0.693			0.256				1.00
	0.033	cond-glu e	0.021	0.220			0.049		0.710			1.00
	0.198	them -glue	0.049	0.134	0.526	0.174	0.117					1.00
Therm aladhesive (93% area)												
SCTBCopperPolyim ideM aterial	weight(gm)	element	H	C	N	O	N i	Cu	Au			total
	1.684	weight%	1.03	26.84	2.85	8.13	1.44	59.09	0.63			100.00
	0.011	Au							1.000			1.00
	0.024	N i					1.000					1.00
	0.045	Polyim ide	0.026	0.091	0.073	0.209						1.00
	0.307	Cu						1.000				1.00
	0.178	Polyim ide	0.026	0.091	0.073	0.209						1.00
	0.064	Cu						1.000				1.00
	0.089	Polyim ide	0.026	0.091	0.073	0.209						1.00
	0.313	Cu						1.000				1.00
	0.178	Polyim ide	0.026	0.091	0.073	0.209						1.00
	0.311	Cu						1.000				1.00
	0.164	Polyim ide	0.026	0.091	0.073	0.209						1.00
Polym ide cover+adhesive (13+33 "m) layer												
SCTBA SiCM aterial	weight(gm)	element	H	C	O	Si	Ag					total
	0.976	weight%	0.44	4.66	1.04	78.84	15.02					100.00
	0.769	Si				1.000						1.00
	0.206	cond-glu e	0.021	0.220	0.049		0.710					1.00
FE am plifiers conductive adhesive												
SCTBPatchAdaptorM aterial	weight(gm)	element	H	C	O	Al	Si	Ag				total
	0.231	weight%	0.47	5.08	35.67	12.08	30.32	16.36				100.00
	0.150	SiO2			0.533		0.467					1.000
	0.000	Al				1.000						1.000
	0.053	cond-glu e	0.021	0.220	0.049			0.710				1.000
	0.028	Al				1.000						1.000
Bonding Alum inum w ires												
SCTBH ybridPartsM aterial	weight(gm)	element	O	Al	Sn	Pb						total
	0.736	weight%	41.03	46.12	8.10	4.76						100.00
	0.157	ceram ic	0.471	0.529								1.000
	0.280	ceram ic	0.471	0.529								1.000
	0.175	ceram ic	0.471	0.529								1.000
	0.020	ceram ic1	0.471	0.529								1.000
	0.011	ceram ic2	0.471	0.529								1.000
	0.095	solder			0.630	0.370						1.000
	0.095	solder			0.630	0.370						1.000
SCTBH ybridInterconnectM aterial	weight(gm)	element	H	C	N	O	Cu					total
	0.054	weight%	1.21	31.78	3.37	9.62	54.01					100.00
	0.010	Polyim ide	0.026	0.091	0.073	0.209						1.000
	0.012	Cu					1.000					1.000
	0.005	Polyim ide	0.026	0.091	0.073	0.209						1.000
	0.018	Cu					1.000					1.000
	0.010	Polyim ide	0.026	0.091	0.073	0.209						1.000
	0.010	Polyim ide	0.026	0.091	0.073	0.209						1.000
SCTBH ybridPigtailM aterial	weight(gm)	element	H	C	N	O	Cu					total
	0.251	weight%	1.14	29.95	3.18	9.97	56.66					100.00
	0.044	Polyim ide	0.026	0.091	0.073	0.209						1.000
	0.065	Cu					1.000					1.000
	0.022	Polyim ide	0.026	0.091	0.073	0.209						1.000

Copper grid plane	0.077	Cu				1.000			1.000
Polyimide/adhesive (25+25 μm) layer	0.044	Polyimide	0.026	0.691	0.073	0.209			1.000

SC TBH ybrid connectorM aterial	weight(gm)	element	H	C	N	O	Ni	Cu	Sn	Au	Pb	total
	0.535	weight%	5.48	61.65	0.43	13.88	0.15	5.26	8.62	0.07	5.06	100.00
Pigtail connector	0.401	connector	0.071	0.760		0.169						1.000
connector solder	0.073	solder							0.630		0.370	1.000
Gold flash(0.4 m)	0.000	Au								1.000		1.000
Nickel plating(2 m)	0.001	Ni					1.000					1.000
Photoresist (20 m) layer	0.000	Polym id	0.026	0.691	0.073	0.209						1.000
L1 Copper(12 m) +TH -p lating(13 m)	0.010	Cu						1.000				1.000
Polym id+adhesive (25+25 m) layer	0.007	Polym id	0.026	0.691	0.073	0.209						1.000
L2 Copper tracking(12 m)	0.002	Cu						1.000				1.000
Polym id layer (25 m)	0.004	Polym id	0.026	0.691	0.073	0.209						1.000
L3 Copper gnd plane(12 m)	0.005	Cu						1.000				1.000
Polym id+adhesive (25+25 m) layer	0.007	Polym id	0.026	0.691	0.073	0.209						1.000
L4 Copper(12 m) +TH -p lating(13 m)	0.010	Cu						1.000				1.000
Polym id cover+adhesive (13+33 m) layer	0.013	Polym id	0.026	0.691	0.073	0.209						1.000

[illegible]

Volume List for Fine Geometry

2003.02.11 original, T. Kondo (KEK)

2003.03.01 V.1

NOTE: yellow = input data gray = linked to Composition Sheet
red letters = parameters white = numerically calculated
 The origin of the coordinate system is the center of the SCT module (see BM R-009,010,011)

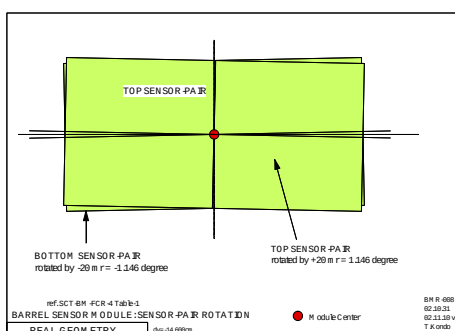
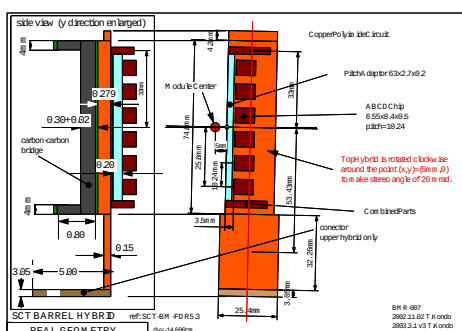
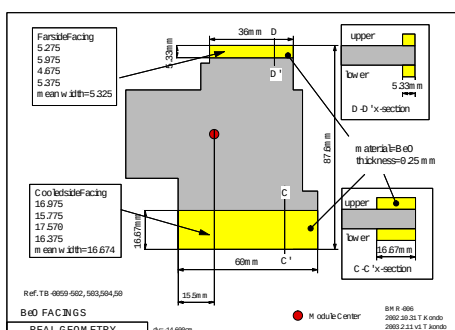
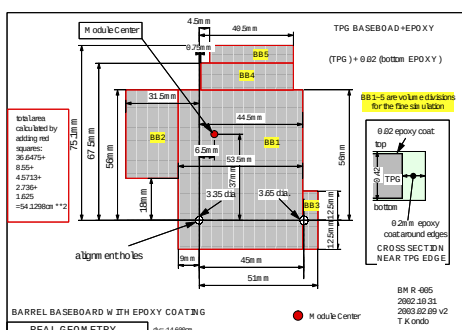
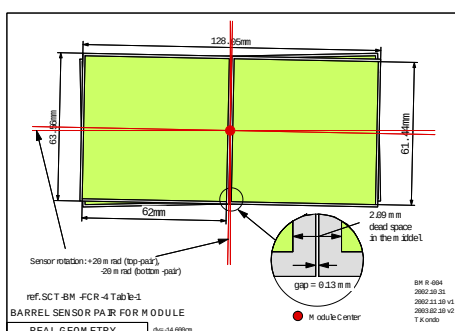
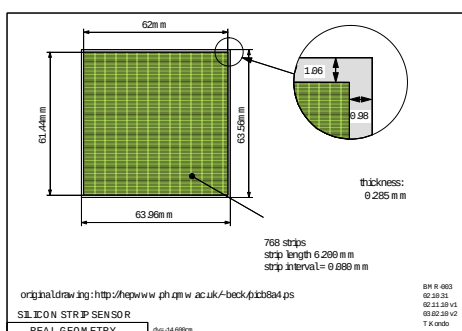
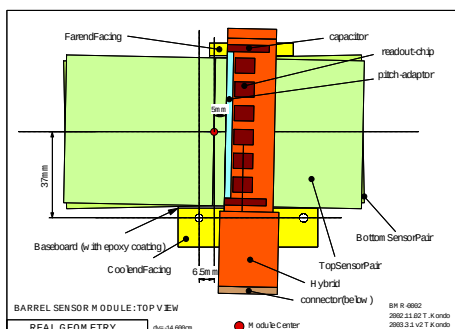
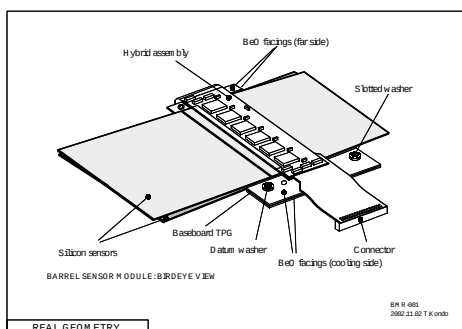
Volume Name Basic Parameters	Figures	NOVA	lengthx mm	lengthy mm	lengthz mm	center_x mm	center_y mm	center_z mm	angle_xy deg	Volume mm**3	density	material name
SiliconSensorPair	Figures	NOVA	lengthx	lengthy	lengthz	center_x	center_y	center_z	angle_xy	Volume	density	material name
SCTBTopSensorPair	BM R-004		128.050	63.560	0.285	0.000	0.000	0.4325	1.1459	2319.57	2.328	Si
SCTBBottomSensorPair	BM R-005		128.050	63.560	0.285	0.000	0.000	-0.4325	-1.1459	2319.57	2.328	Si
SCTBSensorPairLength		Dxyz3	128.050							Total Volume	4639.15	
SCTBSensorPairWidth		Dxyz2	63.560	mm								
SCTBSensorPairThickness		Dxyz1	0.285	mm								
SCTBSensorStereoAngle	BM R-004	Stereo	1.146	degree	0.020	radian						
SCTBSensorSingleLength	BM R-003		63.960	mm								
SCTBSensorSensorGap	BM R-004		0.130	mm								
Baseboard	Figures	NOVA	lengthx	lengthy	lengthz	center_x	center_y	center_z	angle_xy	Volume	density	material name
SCTBBaseboard1	BM R-005		53.500	68.500	0.580	11.250	-15.250	0.0000	0.0000	2125.56	1.595	SCTBBaseboardMaterial
SCTBBaseboard2	BM R-005		22.500	33.800	0.580	-26.750	0.000	0.0000	0.0000	441.09	1.595	SCTBBaseboardMaterial
SCTBBaseboard3	BM R-005		6.500	25.000	0.580	41.250	-37.000	0.0000	0.0000	94.25	1.595	SCTBBaseboardMaterial
SCTBBaseboard4	BM R-005		39.750	11.500	0.580	14.125	24.750	0.0000	0.0000	265.13	1.595	SCTBBaseboardMaterial
SCTBBaseboard5	BM R-005		36.000	7.600	0.580	16.000	34.300	0.0000	0.0000	158.69	1.595	SCTBBaseboardMaterial
SCTBThicknessBaseboardTPG	BM R-005		0.390	mm						Total Volume	3084.72	
SCTBThicknessEpoxyCoating	BM R-006	BB thick	0.020	mm								
SCTBThicknessSensorAdhesive	BM R-010		0.080	mm								
BeO facings	Figures	NOVA	lengthx	lengthy	lengthz	center_x	center_y	center_z	angle_xy	Volume	density	material name
SCTBTopCoolingFacing	BM R-010		60.000	16.674	0.250	14.500	-41.160	0.3350	0.0000	250.11	3.002	SCTBTopCoolingFacingMaterial
SCTBBottomCoolingFacing	BM R-010		60.000	16.674	0.250	14.500	-41.160	-0.3350	0.0000	250.11	3.002	SCTBBottomCoolingFacingMaterial
										Total Volume	500.21	
SCTBTopFarSideFacing	BM R-010		36.000	5.325	0.250	16.000	35.437	0.3350	0.0000	47.93	2.858	SCTBFarSideFacingMaterial
SCTBBottomFarSideFacing	BM R-010		36.000	5.325	0.250	16.000	35.437	-0.3350	0.0000	47.93	2.858	SCTBFarSideFacingMaterial
SCTBThicknessFacing	BM R-010		0.250	mm						Total Volume	95.85	
Carbon-Carbon bridge step	Figures	NOVA	lengthx	lengthy	lengthz	center_x	center_y	center_z	angle_xy	Volume	density	material name
SCTBTopCoolingSideCStep			21.000	4.000	0.580	14.792	-35.503	0.7500	1.1459	48.72	1.82	SCTBCarbonCarbonBridgeStepMaterial
SCTBTopFarSideCStep			21.000	4.000	0.580	16.204	35.083	0.7500	1.1459	48.72	1.82	SCTBCarbonCarbonBridgeStepMaterial
SCTBBottomCoolingSideCStep			21.000	4.000	0.580	16.204	-35.083	-0.7500	-1.1459	48.72	1.82	SCTBCarbonCarbonBridgeStepMaterial
SCTBBottomFarSideCStep			21.000	4.000	0.580	14.792	35.503	-0.7500	-1.1459	48.72	1.82	SCTBCarbonCarbonBridgeStepMaterial
SCTBCarbonCarbonStepLength	BM R-007		21.000	mm						Total Volume	194.88	
SCTBCarbonCarbonStepWidth	BM R-007		4.000	mm								
SCTBCarbonCarbonStepHeight	BM R-007		0.500	mm								
SCTBCarbonCarbonStepGap	BM R-011		0.080	mm								
SCTBHybridOffsetX			5.000	mm								
Carbon-Carbon bridge	Figures	NOVA	lengthx	lengthy	lengthz	center_x	center_y	center_z	angle_xy	Volume	density	material name
SCTBTopCarbonCarbon	BM R-010		21.000	74.600	0.370	15.498	-0.210	1.2250	1.1459	579.64	1.81	SCTBCarbonCarbonBridgeMaterial
SCTBBottomCarbonCarbon			21.000	74.600	0.370	15.498	0.210	-1.2250	-1.1459	579.64	1.81	SCTBCarbonCarbonBridgeMaterial
SCTBCCBridgeWidth	BM R-007		21.000	mm						Total Volume	1159.28	
SCTBCCBridgeLength	BM R-007		74.600	mm								
SCTBCCBridgeThickness	BM R-011		0.300	mm								
SCTBCCBridgeParyleneCoating	BM R-011		0.020	mm								
SCTBCCBridgeThickness	BM R-011		0.050	mm								
Cu/PI hybrid	Figures	NOVA	lengthx	lengthy	lengthz	center_x	center_y	center_z	angle_xy	Volume	density	material name
SCTBTopCopperPolyimide			21.000	74.600	0.279	15.498	-0.210	1.5495	1.1459	437.08	1.93	SCTBCopperPolyimideMaterial
SCTBBottomCopperPolyimide			21.000	74.600	0.279	15.498	0.210	-1.5495	-1.1459	437.08	1.93	SCTBCopperPolyimideMaterial
SCTBCopperPolyimideWidth	BM R-007		21.000	mm						Total Volume	874.16	
SCTBCopperPolyimideLength	BM R-007		74.600	mm								
SCTBCopperPolyimideThickness	BM R-011		0.279	mm								
ASIC Sw/conductive adhesive	Figures	NOVA	lengthx	lengthy	lengthz	center_x	center_y	center_z	angle_xy	Volume	density	material name
SCTBTopChip1			8.400	6.550	0.600	12.186	-25.595	1.9890	1.1459	33.01	2.46	SCTBASiCMaterial
SCTBTopChip2			8.400	6.550	0.600	12.391	-15.357	1.9890	1.1459	33.01	2.46	SCTBASiCMaterial
SCTBTopChip3			8.400	6.550	0.600	12.596	-5.119	1.9890	1.1459	33.01	2.46	SCTBASiCMaterial
SCTBTopChip4			8.400	6.550	0.600	12.801	5.119	1.9890	1.1459	33.01	2.46	SCTBASiCMaterial
SCTBTopChip5			8.400	6.550	0.600	13.006	15.357	1.9890	1.1459	33.01	2.46	SCTBASiCMaterial
SCTBTopChip6			8.400	6.550	0.600	13.210	25.595	1.9890	1.1459	33.01	2.46	SCTBASiCMaterial
SCTBBottomChip1			8.400	6.550	0.600	13.006	-15.357	-1.9890	-1.1459	33.01	2.46	SCTBASiCMaterial
SCTBBottomChip2			8.400	6.550	0.600	13.006	-15.357	-1.9890	-1.1459	33.01	2.46	SCTBASiCMaterial
SCTBBottomChip3			8.400	6.550	0.600	12.801	-5.119	-1.9890	-1.1459	33.01	2.46	SCTBASiCMaterial
SCTBBottomChip4			8.400	6.550	0.600	12.596	5.119	-1.9890	-1.1459	33.01	2.46	SCTBASiCMaterial
SCTBBottomChip5			8.400	6.550	0.600	12.391	15.357	-1.9890	-1.1459	33.01	2.46	SCTBASiCMaterial
SCTBBottomChip6			8.400	6.550	0.600	12.186	25.595	-1.9890	-1.1459	33.01	2.46	SCTBASiCMaterial
SCTBChipWidth	BM R-007		6.550	mm						Total Volume	396.14	
SCTBChipLength	BM R-007		8.400	mm								
SCTBChipThickness	BM R-010		0.500	mm								
SCTBChipLeadThickness	BM R-010		0.100	mm								
SCTBChipCenterToEdge			7.700	mm								
SCTBChipInterval			10.240	mm								
Patch adaptor	Figures	NOVA	lengthx	lengthy	lengthz	center_x	center_y	center_z	angle_xy	Volume	density	material name
SCTBTopPatchAdaptor			2.700	63.000	0.250	6.350	-0.027	1.8140	1.1459	42.53	2.71	SCTBPatchAdaptorMaterial
SCTBBottomPatchAdaptor			2.700	63.000	0.250	6.350	0.027	-1.8140	-1.1459	42.53	2.71	SCTBPatchAdaptorMaterial
SCTBPatchAdaptorLength	BM R-007		63.000	mm						Total Volume	85.05	
SCTBPatchAdaptorWidth	BM R-007		2.700	mm								
SCTBPatchAdaptorThickness	BM R-010		0.200	mm								
SCTBPatchAdaptorLeadThickness	BM R-010		0.050	mm								
Passive components	Figures	NOVA	lengthx	lengthy	lengthz	center_x	center_y	center_z	angle_xy	Volume	density	material name
SCTBTopCoolSideParts			18.000	3.000	0.500	13.338	-33.000	1.9390	1.1459	27.00	6.82	SCTBHybridPartsMaterial
SCTBTopFarSideParts			18.000	3.000	0.500	14.658	33.000	1.9390	1.1459	27.00	6.82	SCTBHybridPartsMaterial
SCTBBottomCoolSideParts			18.000	3.000	0.500	14.658	-33.000	-1.9390	-1.1459	27.00	6.82	SCTBHybridPartsMaterial

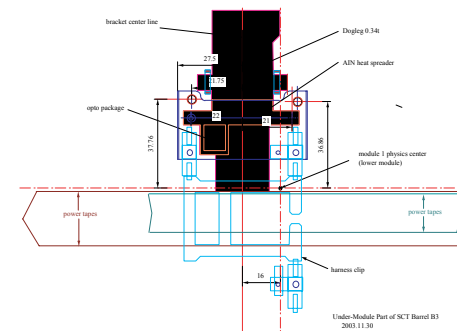
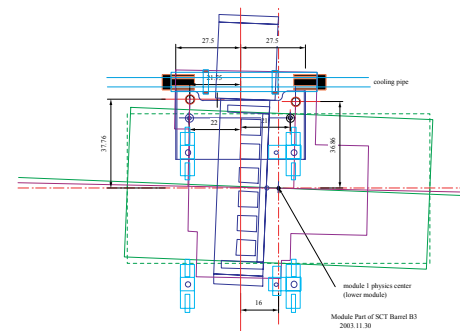
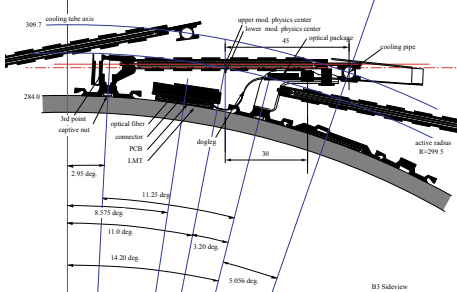
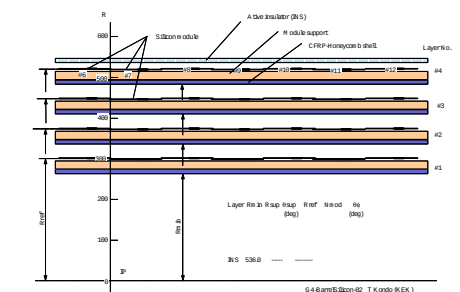
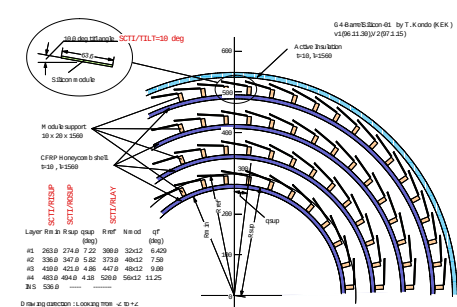
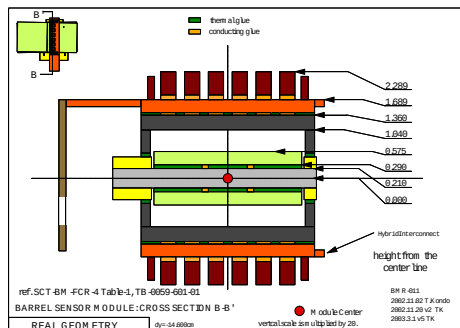
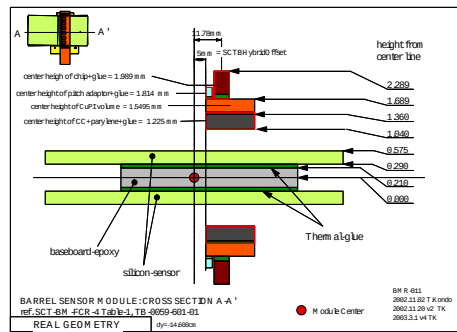
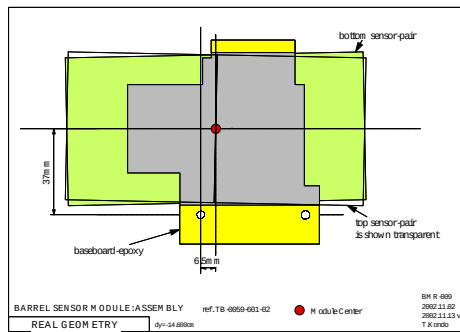
SCTBBottomFarSideParts			18.000	3.000	0.500	13.338	33.000	-1.9390	-1.1459	27.00	6.82	SCTBHybridPartsMaterial
HybridPartsLength			18.000	mm						TotalVolume	108.00	
HybridPartsWidth			3.000	mm								
HybridPartsThickness			0.500	mm								
HybridPartsOffset			33.000	mm								
HybridInterconnect	Figures	NOVA	lengthx	lengthy	lengthz	center_x	center_y	center_z	angle_xy	Volume	density	material name
SCTBTqHybridInterconnect			21.000	4.200	0.150	16.286	39.182	1.6140	1.1459	13.23	2.05	SCTBHybridInterconnectMaterial
SCTBBottomHybridInterconnect			21.000	4.200	0.150	14.710	39.182	-1.6140	-1.1459	13.23	2.05	SCTBHybridInterconnectMaterial
SCTBHybridInterconnectLength	BMR-007		21.000	mm						TotalVolume	26.46	
SCTBHybridInterconnectWidth	BMR-011		4.200	mm								
SCTBHybridInterconnectThickness	BMR-007		0.150	mm								
SCTBHybridInterconnectOffset	BMR-007		39.400	mm								
Pigtail	Figures	NOVA	lengthx	lengthy	lengthz	center_x	center_y	center_z	angle_xy	Volume	density	material name
SCTBHybridPigtail			25.400	32.260	0.150	14.429	-53.209	1.6140	1.1459	122.91	2.05	SCTBHybridPigtailMaterial
SCTBHybridPigtailLength	BMR-007		32.260	mm								
SCTBHybridPigtailWidth	BMR-011		25.400	mm								
SCTBHybridPigtailThickness	BMR-007		0.150	mm								
SCTBHybridInterconnectOffset	BMR-007		53.430	mm								
HybridConnector	Figures	NOVA	lengthx	lengthy	lengthz	center_x	center_y	center_z	angle_xy	Volume	density	material name
SCTBHybridConnector			25.400	3.050	5.000	14.076	0.210	1.6890	1.1459	387.35	1.38	SCTBHybridConnectorMaterial
SCTBHybridConnectorLength	BMR-007		25.400	mm								
SCTBHybridConnectorWidth	BMR-007		3.050	mm								
SCTBHybridConnectorThickness	BMR-007		5.000	mm								
SCTBHybridConnectorOffset	BMR-007		71.085	mm								

オリジナルファイル (T.Kondo) <http://atlas.kek.jp/si-soft/geometry.html>

C 付録

シミュレーションに入れる詳細なジオメトリー。





オリジナルファイル (T.Kondo) <http://atlas.kek.jp/si-soft/geometry.html>

口頭発表

- 日本物理学会秋期大会,2002年9月13日～16日
立教大
「アトラス SCT 用ハイブリッド及びモジュールの量産」
- 日本物理学会春期大会,2003年3月28日～31日
東北学院大
「ATLAS SCT FADS/Goofy を用いた Simulation」
- 第4回 GEANT4 研究会・講習会 2003年7月17日-18日
高エネルギー加速器研究機構 (KEK)
「ATLAS シリコン検出器の Geant4 を用いたシミュレーション」
- 日本物理学会秋期大会,2003年9月9日～12日,
宮崎ワールド コンベンションセンター・サミット
「ATLAS SCT モジュール性能評価」

論文発表

Y.Ikegami et al. ,“RESULTS OF EARLY PHASE OF SERIES PRODUCTION OF ATLAS SCT BARREL HYBRIDS AND MODULES.” ,Colmar,2002