

アトラス シリコン マイクロストリップ モジュールの開発

高力 孝

高エネルギー加速器研究機構

素粒子原子核研究所・ATLAS グループ

〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

池上陽一^a、寺田 進^a、海野義信^a、近藤敬比古^a

原 和彦^b、小林博和^b、秋元崇^b、荒井信一郎^b、新間秀一^b、加藤陽一^b

^a 高エネルギー加速器研究機構

^b 筑波大学、〒305-8571 茨城県つくば市天王台 1-1-1

概要

アトラス シリコン マイクロストリップ モジュールは、荷電粒子の飛跡を高精度に測定するための半導体二次元粒子飛跡検出器である。読み出し用回路基板には、物質量を極力少なくする為に回路部とケーブルが一体となった銅ポリイミド・フレキシブル基板と高熱伝導高剛性のカーボン／カーボン・コンポジット補強基板を組み合わせたハイブリッド基板を開発し、機械的電気的性能が優れていることを確認した。また、高精度が要求される組立は、リニアアブッシュとピンを基本にしたシンプルなジグを開発し、充分な精度で量産出来ることが分った。

本報告書では、機械的な観点から、アトラス シリコン マイクロストリップ モジュールの開発について報告する。

1.はじめに

2006 年の完成を目指して建設が始まられている、欧州合同原子核研究機関 (CERN) の LHC 加速器を用いた衝突実験研究では、ヒッグス粒子や超対称性粒子の発見など素粒子物理学の本質的発展が期待されている。この LHC 加速器を用いた陽子・陽子衝突実験装置の一つに、アトラス測定器^[1]がある。アトラ

ス測定器は図 1 に示すように、高さ 22m 長さ 46m の巨大な測定器であり、各種の測定器により構成され、約 40 力国の研究者や技術者が共同で建設している。我々は、アトラス測定器の衝突点に近い半導体飛跡測定器 (Semiconductor tracker : SCT) の建設に参加している^[2]。SCT^[3]はバレル部とフォワード部からなっており、半径 300 ~ 520mm、長さ 5000mm の空間にシリンドラー 4 層、ディスク 9 × 2 層が配置され、それらにバレルモジュール ($4 \times 85 \times 128\text{mm}^3$) とフォワードモジュール ($4 \times 85 \times 160\text{mm}^3$) 合わせて約 5000 台のモジュールが取り付けられる。図 2 にバレル部を示す。これにはバレルモジュールだけしか示されていないが、実際には冷却パイプ、電源ケーブル、信号用光ケーブル等が布設され、信号数 700 万チャンネル、総発熱量 35kW の途方も無い代物になる。LHC に使われるモジュールには、荷電粒子に対して速い応答 (40MHz) や高い位置測定精度 ($23\mu\text{m}$) が要求されるばかりでなく、衝突点に近いので、10 年間で 3×10^{14} 粒子 / cm^2 以上と見積もられる高い放射能にも耐える必要がある。

日本は、第 3 層の製作(600 バレルモジュールの製造とバレルシリンドラーの組立)を担当している。また、バレル部の高密度信号読み出し回路基板に、我々が提案した「銅ポリイミド／カーボン・ハイブリッド回路基板」が採用されることになり、全部で約 2500 台の基板を、LSI を除く全ての部品を実装した状態で共同建設機関に配付する予定である。

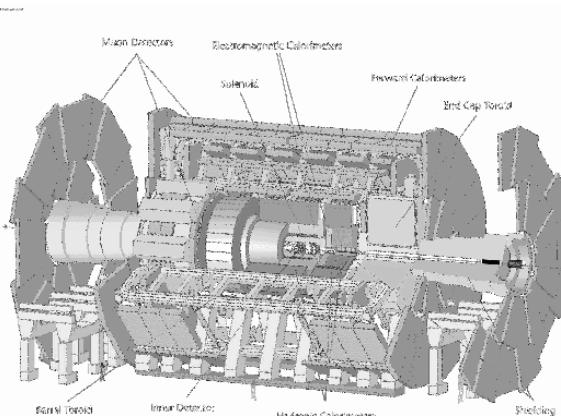


図 1：アトラス測定器

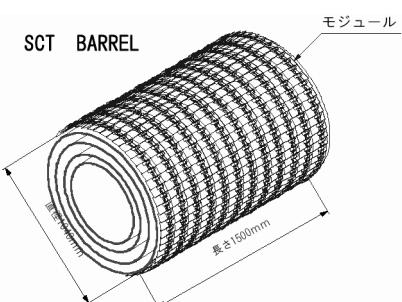


図 2：バレルシリンドラー

2 . モジュール

2.1 モジュールの構造

モジュールは図 3 に示すように、シリコンセンサー、信号読み出し用回路基板、伝熱基板（ベースボード：センサーに挟まれているのでベリリア補強板しか見えていない）の 3 つの主要な要素からなっている。シリコンセンサーは両面に在り、両面一体型信号読み出し回路基板（以下ハイブリッド基板と言う）で両面とも中央部から読み出される構造である。電気的な接続は $25 \mu\text{m}$ のアルミワイヤーボンディングで行っている。構成部品の詳細を図 4 に示す。ベースボードを挟んで、表と裏に 2 枚ずつセンサーを接着したサンドイッチ構造をしている。ハイブリッド基板はセンサーを跨いでいるが、橋型にしてベリリア補強板に接着している。ワイヤーチェンバー等従来の飛跡検出器の読み出し回路部は、いわゆるデッドスペースになっているが、本モジュールではセ

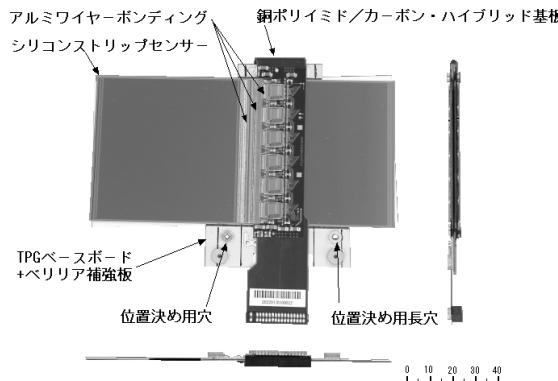


図 3 : バレルモジュール

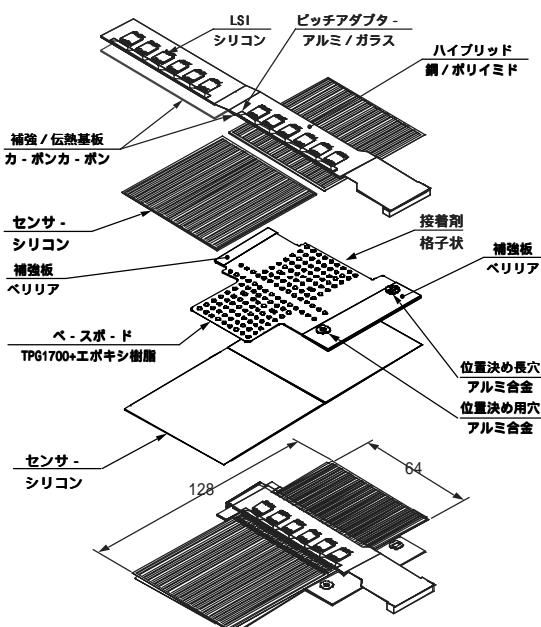


図 4 : モジュールの構成

ンサーと一緒にになっているので、物質量を極力少なくしたハイブリッド基板を開発する必要がある。モジュールの諸特性を表 1 に示す。センサーのストリップは長手方向に平行になっているので、表と裏のセンサーを相対的に 40 mrad （約 2.2° ）回転して二次元検出を実現している。したがって、ハイブリッド基板も交わった配置になっている。

表 1 : モジュールの主な特性

・ センサー枚数	表裏 各 2 枚
・ センサーの大きさ	$0.285 \times 63.6 \times 64 \text{ mm}^3$
・ センサーのタイプ	P in N
・ センサーのストリップピッチ	$80 \mu\text{m}$
・ センサーのストリップ数	760 本
・ 信号読み出し数	1536 チャンネル
・ ワイヤーボンド数	4980 本
・ ステレオ角度	$\pm 20 \text{ mrad}$
・ LSI チップ数	12 個
・ 消費電力	Min. 6.7W Max. 8.7W
・ センサー動作温度	-7
・ 動作電圧	150V ~ 500V
・ 10 年間に被爆する陽子線量	Max. 3×10^{14} 粒子 / cm^2
・ センサー両面相対位置精度 (μm)	
長手方向 midxf	± 10
短方向 midyf	± 5
厚み方向 dZ	± 50
・ ステレオ角精度	$\pm 0.13 \text{ mrad}$
・ 位置決め穴位置精度 (μm) m_{hx}	± 30
・ 平均放射長 / モジュール	$1.17\% X_0$

2.2 使用材料

モジュールに使用されている材料は、図 4 に示す通りである。それらの主な材料特性を表 2 に示す。物質量が少ないので放射長が長いことを意味するが、逆に極端に短い材料には銅と金がある。これはハイブリッドの導体なので、他の材料に置き換えるのは難しい。そこで、線幅を細くしたり（最小線幅 $75 \mu\text{m}$ ）、厚みを薄くして（最小厚み：銅 $12 \mu\text{m}$, 金 $0.3 \mu\text{m}$ ）影響を少なくしている。

また、表 2 で馴染みの薄い材料は、ベリリア、ボロンナイトライド、カーボン・カーボン、TPG であろう。ベリリアは、セラミックスの中で特に熱伝導が良い。ただし、毒性があるので、本当は使いたく無い材料である。ボロンナイトライドは、エポキシ接着剤の熱伝導率と熱膨脹率を改善するために、フィラーとして使っている。放射長が長く、柔らかいのが特徴。カーボン・カーボンは、ハイブリッドの補強と熱をベースボードに逃がす働きをする。そのままだとカーボンの粉を発塵するので、発塵防止皮膜処理をして使用する。TPG は面方向の熱伝導率がダイヤモンドに匹敵するくらい良く、特異な材料である。雲母のように層間強度小さく、平らにするのも難し

い。この材料も発塵防止処理をする必要がある。これらの材料は、耐放射線性に優れていることは言うまでもない。

表 2 材料特性

	密度 g/cm ³	熱伝導率 W/m/K	熱膨張係数 ppm/K	放射長 cm	ヤング率 GPa
シリコン	2.34	126	2.6	9.36	113
アルミニウム	2.7	200	23	8.9	70
ペリリア	2.86	280	8.7	14.4	380
ポロンナイトライド	2.08	23	3.0	20.8	55
銅	8.96	400	17	1.43	117
金	19.3	316	14.2	0.34	78
カ - ボン カ - ボン	1.95	//700 20	//-0.8 10	21.8	//294
TPG	2.26	ab=1700 c=25	ab=-1 c=25	19	ab=840 c=35
ポリイミド	1.42	0.2	10~20	28.7	-30
エポキシ接着剤	1~4	0.2~3	20~100	4~28.6	0.4~10

2.3 モジュール組立

モジュールの組立は以下の順序で行なう。

- センサーベースボード組立。
- 機械精度と各センサーのIVを測定して、問題ないことを確認。
- センサーベースボードの表側にハイブリッド基板を接着。
- センサーベースボードの裏側にハイブリッド基板を接着。
- ワイヤーボンディング

ハイブリッド基板は予め実装して各種の試験に合格したものを使用する。

組立には、高精度なセンサー位置決め装置と位置決めされたセンサーを吸着してモジュールに組立てる各種ジグを使用する。センサー位置決め装置を図5

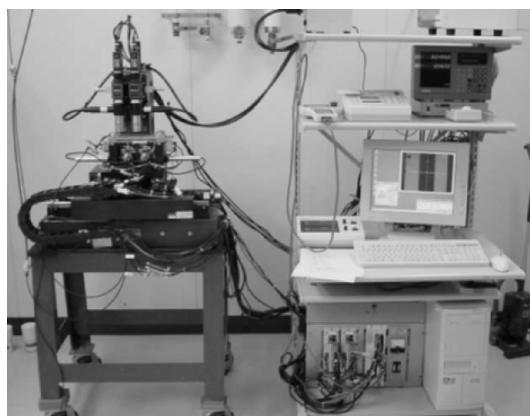


図 5 : センサー位置決め用精密 XY ステージ

に示す。2台のCCDカメラとステージにある基準マークと連係してセンサーを位置決めするXYステージである。センサーはXYステージに取り付けられたXYR(回転)ステージで別々に微調される。位置決めはCCDカメラからの画像処理信号でピエゾアクチュエータをコントロールし、自動的にされる。図6にXYRステージを示す。XYステージはACサーボモーターとリニアスケールを使ったフルクローズドループ制御のステージであるが、XYRステージの駆動は、

- X軸:手動操作モーター駆動 + ピエゾアクチュエータ(ST=20 μm)
- Y軸:手動マイクロメーター + ピエゾアクチュエータ(ST=20 μm)
- R軸:ピエゾアクチュエータ(ST=40 μm)

である。ピエゾアクチュエータは高圧電源素子とDACを組み合わせてコンピュータコントロールしているだけで、特別な専用のコントローラは使用していない。XYステージと同じようにモーターコントロールにしなかったのは、ピエゾアクチュエータの分解能が格段に良い為と、センサーをステージにセットする時、ピエゾアクチュエータのストローク以内の精度で置けばそれ以上動かす必要が無いと考えたからである。センサー予備セット用ジグを図7に示す。X軸は、センサーを置く時に当たらないように3mm離しておくので、手動操作モーター駆動で遠隔操作出来るようにしてある。

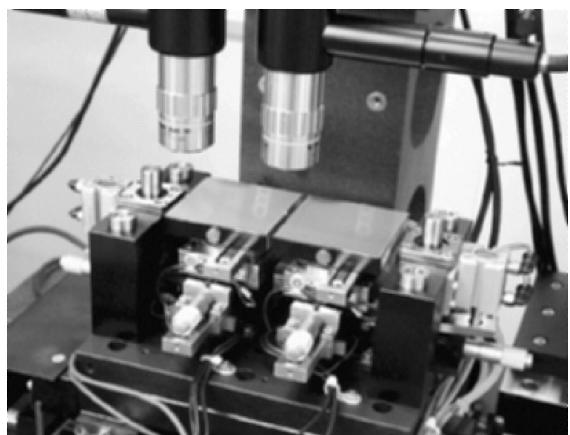


図 6 : XYR ステージ

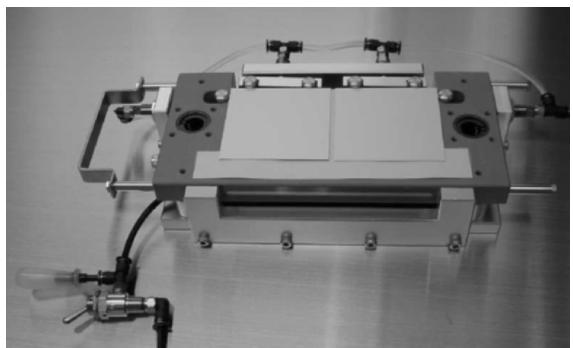


図 7 : センサー予備セットジグ

2.4 組立ジグ

ステージとジグやジグ同志の位置合わせはリニアブッシュとピンで行っている。図6のXYRステージ両側にフランジ付きリニアブッシュとピンが配置されているのが解る。図7のジグにも同様にフランジ付きリニアブッシュが取り付けられており、ピンがあれば、ステージとジグやジグ同志で、再現性の良い位置合わせができる。つまり、リニアブッシュの位置が同じジグを作れば、複数のモジュールを同時に組立てることが出来る。通常、ピンの太さはリニアブッシュの内径よりも細くしてあるので、そのまま使うと $5\text{ }\mu\text{m}$ 位ズレてしまう。そこで、寿命を考慮したうえで、使用するピンはリニアブッシュの内径より $5\sim7\text{ }\mu\text{m}$ 太くしてある。こうすることによって互いに弹性範囲内で拘束されるので、遊びの無い、再現ある組立が達成できた。ただし、全てのジグのリニアブッシュの中心距離が同じである必要がある。そこで、マスターゲージを考案した。これによりジグをいくらでもコピー出来る。（現実にはリニアブッシュを固定するのはネジ止めなので、力加減等を考えながらやらないと数 μm 以内に中心距離を揃えるのは難しい）

センサーは裸の半導体なので、キズやゴミが付かないようにする必要がある。ジグと半導体が接触する部分を、プラスチックなど柔らかいもので被う方法もあるが、硬いゴミや欠けたシリコンがめり込んで、逆に傷を付ける要因になる。また、ジグをプラスチックで作ると精度が出ないし、表面だけ張り付けるのも加工が複雑になる。そこで、ジグの必要な面に無塵紙を置くだけの構造にした。無塵紙はポーラスなのでセンサーを真空吸着でき、無塵紙も同時に固定されることになる。そして、無塵紙を使うことにより、ゴミや有害なイオン不純物の問題が無くなった。交換も簡単である。問題なのは置き忘れたが、作業手順書の確認事項に必ず入れて対処する。

2.5 センサーベースボード組立

センサーベースボードの組立はモジュールの最も基本的な組立である。ジグは吸着プレートAと吸着プレートBを使う。図8に吸着プレートA、吸着プレートB、ピンベース及びマスターゲージを示す。吸

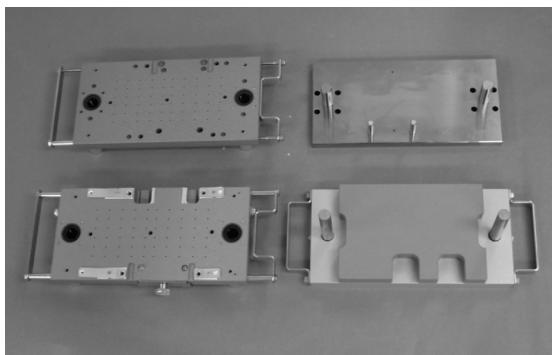


図8：吸着プレートB、マスターゲージ
吸着プレートA、ピンベース

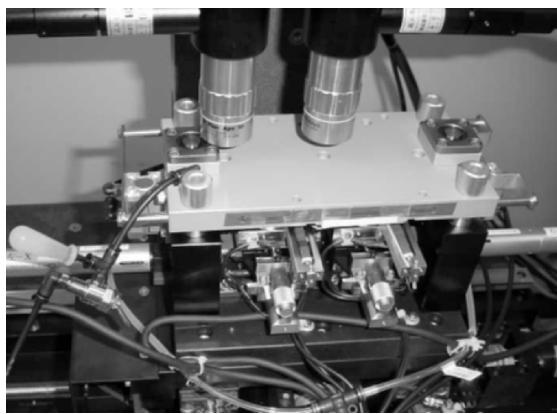


図9：センサー位置決め中

着プレートAはセンサーを吸着する機能とベースボードを位置決めする機能を持っている。共通の12リニアブッシュの他に、6のリニアブッシュでベースボードを位置決めする。ベースボードにある位置決め用穴は1.8なので、ピンは1.8/6の段付きである。

センサーの位置決めが終了したらこの吸着プレートでセンサーを取り上げるが、吸着を切り替える時にセンサーが数 $\mu\text{m}\sim10\text{ }\mu\text{m}$ ズレてしまうことが判った。これは両方の真空をONにして片方をOFFにした時が最も顕著で、強い真空の力で互いの平行度の違いやバックラッシュによる遊びによってセンサーが動かされるのが原因らしい。ズレの少ないのは、XYRステージの真空をOFFにして、1~2秒後に吸着プレートの真空をONにする場合である。しかし完全では無いので、吸着直後のセンサーの位置が判るように吸着プレートに穴を開けた。しかもズレた場合に直ぐやり直せるように、センサーの位置決めの最初から吸着プレートをセットしたまま行うようにした。その様子を図9に示す。

XYステージで位置決めされるセンサーは、2枚のセンサーの中心が2個のリニアブッシュの中心に合わせられ、-20mrad傾けて位置決めされる。したがって、センサーを吸着した吸着プレートAと吸着プレートBのリニアブッシュに対するセンサーの位置は全く同じで、吸着プレートAに接着剤を塗布したベースボードをセットして吸着プレートBを突き合わせれば、 $\pm20\text{mrad}$ のステレオ角を持ったセンサーベースボードが組立てられる。

2.6 センサーベースボードの接着

接着剤の使用には、

- ・接着剤の量は必要最小限にする
- ・空気溜まりをつくらない
- ・硬化歪みを最小限にする

工夫が必要である。そこで、ベースボードに塗布する接着剤のパターンは、図4に示すように格子状にした。そして、硬化後の接着剤の形状（ドット）を厚さ $75\text{ }\mu\text{m}$ 、直径 2mm に想定した。接着剤はアラルダイト2011^[4]にBNフィラーを加えたもので、混合比は主剤 2.5g ：硬化剤 2.0g ：BN 2.0g である。BNフィ

ラーを 30wt%も加えたので初期粘度が非常に高く、しかも常温硬化タイプなので時間とともに粘度が増し、60 分以内に作業を終える必要がある。最初はロボットによる自動化を諦めていたが、吐出抵抗の少ない精密ノズルと、粘度の上昇とともに加圧する圧力を変えることで達成することが出来た。5×5 のパターンによる吐出テストの結果を図 10 に示す。1 ドット当たり 0.26~0.28mg である。

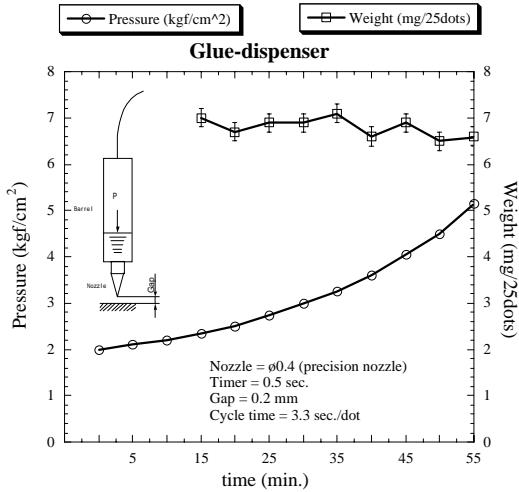


図 10：接着剤吐出テスト

2.7 ハイブリッド基板の接着

ハイブリッド基板の位置精度は $\pm 100 \mu\text{m}$ なので楽であるが、センサーに接着剤を付着させたり、ハイブリッド基板の実装部にダメージを与えないように、ちゃんとしたジグを使う必要がある。接着剤はセンサーベースボードと同じ常温硬化のものを使うので、片面ずつ接着する。接着が終了したセンサーベースボードを吸着プレート A にセットして、ハイブリッド接着ジグをピンに勘合させる。片面の接着が終わればセンサーベースボードをハイブリッド接着ジグ側に移す。ハイブリッド接着ジグにはヒンジがあつて折り返せるようになっており、センサーベースボ

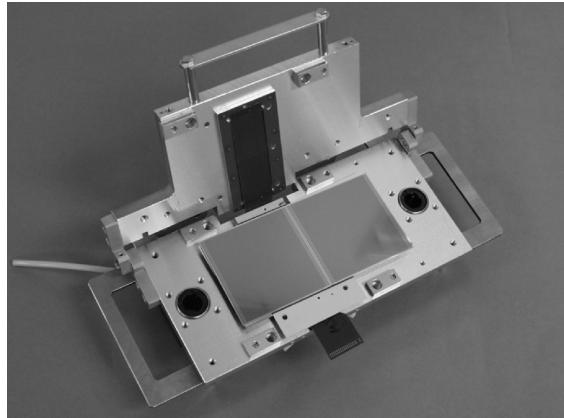


図 11：ハイブリッド接着ジグ

ードを挟み込んでもう片面を接着する。図 11 にハイブリッド接着ジグを示す。表側の接着を終えて、裏側の接着を行なおうとしている所。

2.8 組立精度

組立精度の測定は、非接触三次元 CNC 画像測定機^[5]を使って実施している。モジュールを適当なフレームに固定して測定するが、測定対象面が両表面なので一度に測定することができない。手段としては、フレームに両側から見ることができる基準を設けるか、モジュール自身に共通の基準を探すかである。Z 方向（平面度）の測定はそれ程高い精度（再現性）を要求していないので、表側のセンサーの四隅を基準にして測定している。裏側からは表側のセンサーの裏面しか見えないが、センサーの厚みを加えてやれば相対位置ができる。XY 方向（位置精度）の場合は、最初はフレームにガラス製の基準マークを付けて両面から測定していたが、フレームを反転させた時のモジュールのサグによる位置関係の変化や、ガラスの屈折率の影響などで、数 μm のばらつきを生じた。そこで Z 方向の測定と同じようなやり方で出来ないか検討した。センサーの断面は真四角では無く台形になっているが、ダイシングソーと呼ばれるカッターで精度よく切られているので、ダイシングソーを途中で交換しない限り対称に切られているはずである。したがって、エッジを精度よく測定すれば良いと思われた。しかし結果は悪かった。色々調べた結果、表側のエッジの測定にはばらつきが出ることが判明した。表側は台形の上底なので、エッジ検出をする時の焦点位置が少しでもずれると検出されるエッジも違ってくる。そこで、まず表面に焦点を合わせて、次に測定器の Z 軸を動かさないでエッジを検出するようにしたら $\pm 0.5 \mu\text{m}$ 以下で再現するようになった。

図 12 に主要な位置のサーマルサイクル前と後の測定結果を示す。全て精度内に入っている。サーマルサイクルの条件は -30 ~ 50 、5 回である。

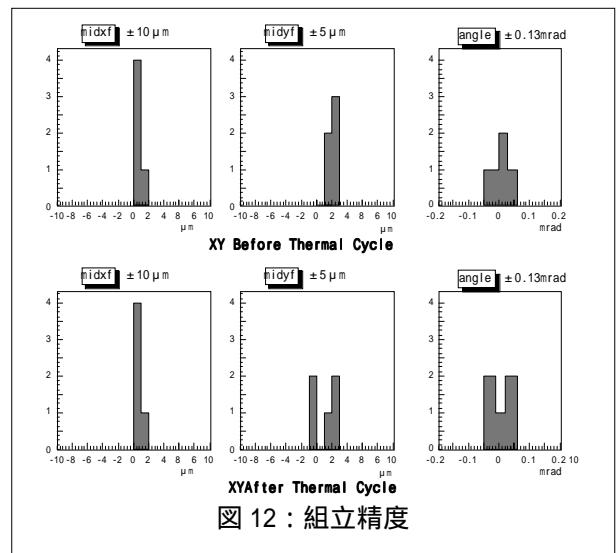


図 12：組立精度

3. 銅ポリイミド／カーボン・ハイブリッド基板

3.1 ハイブリッド基板の選定

高密度実装 4 層基板の材料の候補としては、値段と汎用性（又は量産性）を考慮すると、以下の 2 種類に集約される。

- セラミックス配線基板（アルミナ、窒化アルミ、ベリリア等）
- プリント配線基板（ガラスエポキシ基板、銅ポリイミド・フレキシブル基板等）

セラミックス配線基板は、安定した材料であるが、材料特性表 2 から分かるように、アルミナは熱伝導が悪く、窒化アルミは放射長が短い。ベリリアはどうちらも良いが、毒性があり、日本では非常に高価な材料で、加工も国内では不可能である。また、ライン幅 / ラインピッチを $100 \mu\text{m}$ / $100 \mu\text{m}$ を要求した場合、ベースがセラミックスであっても、回路形成部は絶縁体に別の材料、例えばガラスやポリイミド樹脂を使う必要がある。その場合焼成温度が高いのと絶縁体との熱膨張差で反りが発生し、あまり薄く出来ない。大体ベースの厚みは 0.6mm 以上は必要だとされている。回路形成部は 0.3mm 位なので、合わせて 0.9mm 以上にもなる。さらに、橋型に加工してから焼成したりするのは無理である。

プリント配線基板は熱伝導が悪いが薄くできるので、適当な放熱基板と合せて使うことが可能である。ガラスエポキシ基板は、ビルトアップ法を使えば 0.5mm 位まで薄く出来る。放射長はセラミックスに比べて倍くらいあるので、上記のセラミックスと同じ物質量にすれば、 0.6mm のセラミックスの放熱基板が使える。セラミックスの他に、熱伝導が 2 倍の材料があれば、厚みを半分に出来るので、物質量も減らせる。また、別々に加工して後で接着できるので、橋型にするのも可能である。

銅ポリイミド・フレキシブル基板は、ガラスエポキシ基板よりももっと薄く、 0.3mm 位に出来る。それに、カメラなどに見られるように、ケーブルと一緒に基板に出来るので、接続部分が減って信頼性も増す。日本は、銅ポリイミド・フレキシブル基板を得意としており、小型機器にはほとんど使われている。この技術と高放熱基板を組み合わせれば、物質量の少ない、高機能な基板を作れる筈である。

以上の検討より、我々は銅ポリイミド・フレキシブル基板^[6]を採用することにしたが、そのためには以下の問題を克服する必要がある。

- 熱伝導が良く、剛性の高い補強基板
- 補強基板との接着性
- センサーとの熱膨張差の克服（シリコン = $2.6\text{ppm}/^\circ\text{C}$ 、銅ポリイミド= $25\text{ppm}/^\circ\text{C}$ ）

3.2 銅ポリイミド・フレキシブル基板の設計

図 13 にレイアウトを示す。4 層構成で、各 Layer ともに上半分はアナログ部で下半分はデジタル部である。

- Layer 1：部品実装面、信号線
- Layer 2：信号線
- Layer 3：グランド
- Layer 4：電源

物質量を減らすため、幅を極力狭くした。初期のデザインでは、幅が 27mm だったが、最新のものは 21mm まで減らすことが出来た。これは、回路部は元々幅が狭くて良かったのだが、ケーブルの幅に合わせていたため。これを、ケーブル部と回路部からケーブル部につながる部分だけをそのままにして、その他の部分を必要最小限の幅にした。このように色々な形状に出来るのも、銅ポリイミド・フレキシブル基板の特徴である。また、熱伝導が悪いのを改善する為に発熱場所のダイパッドにスルーホールを沢山作った。サーマルビアと呼ばれる。そして、補強板との電気接続もここでやって、補強基板にシールド効果を持たせている。

層構成を図 14 に示す。基材は、ポリイミド厚 $25 \mu\text{m}$ 、銅箔 $12 \mu\text{m}$ の無接着タイプを使用している。積層は厚み方向で対称になるように、両面基材に片面基材をニトリル系エポキシ接着剤で両側に張り合わせている。ポリイミド厚は $12.5 \mu\text{m}$ まで薄く出来るが、絶縁やインピーダンスを考えたら、 $25 \mu\text{m}$ が妥当なところである。銅箔は、物質量を極力減らす意味から、なるべく薄い方が望ましい。出力される信号はデジタルなので、電源供給さえ問題なければ、 $5 \mu\text{m}$ でもよい。しかし、銅箔の厚みは圧延銅箔、電解銅箔とともに $12 \mu\text{m}$ が限界である。それ以下の場合は、ポリイミドシートに適当なボンディングメタルを蒸着やスパッタで付け ($0.25 \mu\text{m}$)、その上にメッキする方法が取られている。これの欠点は、銅の密着強度が通常のものに比べて半分位しかないことである。積層する時は、 150°C の熱を掛けたり、薬品処理などを頻繁に行うので、銅箔が容易に剥離する。試作

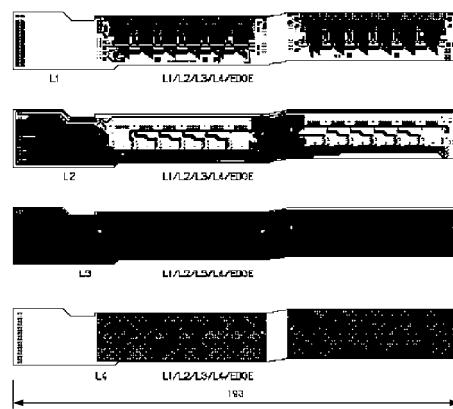


図 13：レイアウト

でもそれを確認した。圧延銅箔や電解銅箔は、表面を薬品処理などで荒らし、ポリイミドを直接キャスティングしているので密着強度が高いことは容易に想像できる。ただし、現在使用しているのは、 $17.5 \mu\text{m}$ のものをエッティングで薄くした物である。 $12 \mu\text{m}$ は、まだ市場に出たばかりで新しい基材。

Layer 1 と 4 の表面には、スルーホールメッキ ($20 \mu\text{m}$) が加わる。基材の銅箔の厚みをいくら薄くしても、スルーホールメッキで効果が薄められるのが現状である。後で、エッティングで薄くするやり方もあるが、その分、行程も増える。そこで、メッシュ (50%) にして、実効的に $4 \mu\text{m}$ の増加に押さえている。

回路部とコネクタ部は 4 層で、ケーブル部は 2 層であるが、単に銅箔が有り無しだけで基材のポリイミド層が途中で切れていないので、信頼性も高く、非常にスマートな構成である。また、ケーブル部の銅箔が Layer 2 と 3 の中心部分なので、曲げに対しても安全である。このように一体構造に出来るのが、銅ポリイミド・フレキシブル基板の特徴である。

IC と基板の電気的接続は、 $25 \mu\text{m}$ アルミワイヤーのウエッジワイヤーボンディングで行う。そのためには、基板の表面は無電解金メッキが施されている。銅の上に金を直接メッキすると銅の中に金が拡散するので、バリヤーメタルとして Ni をメッキする。 Ni メッキは硬いので、ボンディング性を良くする働きもする。 $1 \mu\text{m}$ 以下では不安定で、最低 $2 \mu\text{m}$ は必要である。製造は余裕をみて $4 \sim 6 \mu\text{m}$ に設定した。ワイヤーボンディング性は、放熱用基板（補強基板）と一緒に考える必要がある。センサーとのボンディングは、支えは両端なので、剛性が低いと超音波が充分伝達されず、ボンディング不良を起こす。ボンディング強度は 6 グラム以上あれば良いが、必ずアルミワイヤーのネックで切れる必要がある。剥がれることがあってはならない。

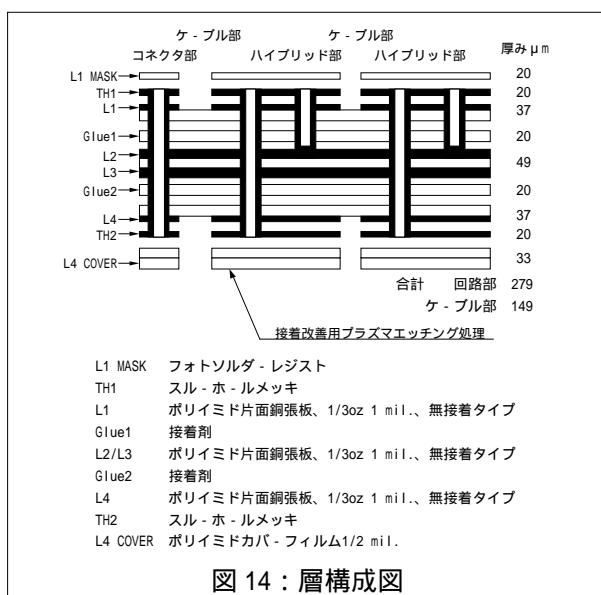


図 14：層構成図

3.3 カーボンカーボン・ブリッジ

材料特性表 2 から、熱伝導、放射長、剛性がいずれも良いものを選ぶと、金属ではベリリウム、セラミックスではベリリア、その他ではカーボン・カーボンが挙げられる。前者の 2 つは、何れも毒性があり、日本での入手は非常に高価で、加工も出来ない。

カーボン・カーボンは炭素繊維をレジンで固めて、レジンも炭素化させたものである。材料特性は焼成温度が高い程よく、 3000°C の物が一番性能が良い。繊維の方向は、一方向やクロスなど自由に設定できるが、材料が特殊なので、加工物に合わせて素材を作るのでは無く、素材に合わせて加工を考える必要がある。市場では、一方向材とクロス材が、いずれも $10 \times 200 \times 200 \text{ mm}^3$ 程度のブロック状で入手できる。クロス材は 1 プライが $250 \mu\text{m}$ 位有るので、切り出す厚みを 1 mm 以上にしないと $0/90$ の割合がデタラメになってしまう。一方、一方向材はトウと呼ばれる少し捩った束を使うのと、CFRP を作るのと同じように、 $100 \mu\text{m}$ 程度のプリプレグを積層する方法がある。トウで作ったものは薄い板に加工するとボイドが多数見られる。プリプレグ法は緻密で厚さ 0.3 mm に加工しても問題ない。表 3 にプリプレグ法^[7]で作った一方向材 (UD) の機械特性の一例を示す。材料特性の異方性が顕著である。

表 3：カーボン・カーボン一方向材の機械特性
熱処理温度 3000°C

・ 密度	1.9 g/cm^3
・ 曲げ強度(0)	394 MPa
・ 曲げ強度(90)	10 MPa
・ 曲げ弾性率(0)	363 GPa
・ 引張り強度(0)	294 MPa
・ 引張り弾性率(0)	294 GPa
・ 層間せん断強度	20 MPa
・ 热伝導度	$k(0) = 700 \text{ W/m/K}$ $k(90) = 20 \text{ W/m/K}$
・ 热膨胀係数	(0) $-0.8 \text{ ppm}/$ (90) $10 \text{ ppm}/$

繊維方向が長手方向に平行な平板 ($0.3 \times 21 \times 75 \text{ mm}^3$) を曲げてみると、 0° 方向は非常に硬く、 90° 方向は非常に軟らかい。このままでは、割れる心配が有り、使えそうにない。しかし、銅ポリイミド・フレキシブル基板と一緒にした時、 90° 方向はポリイミドと膨張係数や柔らかさが比較的近いことから、ポリイミドの粘り強さでカバーされるものと思われる。熱伝導度の異方性は、両端から熱を逃がす構造なので気にならない。したがって、放熱用基板に一方向カーボン・カーボンを選定した。

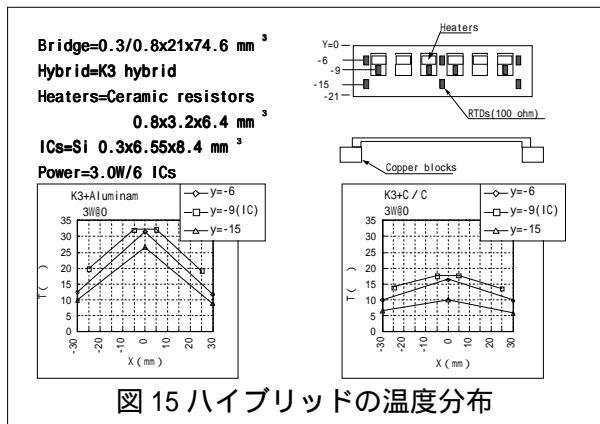
比較の為に $0.3 \times 21 \times 75 \text{ mm}^3$ に加工したアルミ合金とカーボン・カーボンにそれぞれハイブリッド基板を接着し、三点曲げ試験とヒーター加熱による温度分布の測定を行なった。まず三点曲げ試験では、スパンを 55 mm にした時、

- ・ アルミ合金 + ハイブリッド基板

- $4.1 \mu\text{m} / \text{gf}$
- カーボン・カーボン + ハイブリッド基板
 - $1.1 \mu\text{m} / \text{gf}$

で、カーボン・カーボンの方が約4倍剛性が高かった。接着後の仕上がり厚みはどちらも 0.6mm だった。次に、温度分布の測定結果を図15に示す。カーボン・カーボンの中心の温度はアルミ合金のそれの半分であった。巾方向の温度分布の異方性が見られるようであるが、問題ない。

カーボン・カーボンは、表面が露出しているとカーボンの粉を発塵する。さらに、約 $7\mu\text{m}$ の炭素繊維も脱離して接触する可能性もある。これらは、電気特性を確実に悪くするので、なんらかの発塵防止処理が必要である。表面に接着剤を塗れば良いと思うかもしれないが、密着性、作業性、厚味のコントロールなど難しい。金属メッキ法(銅+金)は、比較的簡単にできる方法である。ただし、膜厚が物質量にすぐ響くので、厚く出来ない。 $1\sim2\mu\text{m}$ 位が限度である。しかし、これだと薄すぎて、密着が不十分な所が出来易い。実際に、炭素繊維が脱離してセンサーとショートしたような感じのモジュールがあった。他の表面処理として、高分子樹脂のパリレン^[8]を気相蒸着法により膜付けする方法がある。この方法はあまり知られていないが、パリレン樹脂を加熱して蒸発させ、それを低真空容器内に導入して表面に付着させる方法である。蒸気なので、露出している部分はどの方向でも蒸着でき、小さな隙間も、平均自由行程より長ければ蒸着できる。また、膜の成長速度も、毎時 $1\mu\text{m}$ 以下なので、緻密な膜が出来、下地との密着力も充分強い。したがって、カーボン・カーボンの表面処理に、パリレンコーティングを採用して、膜厚を $10\mu\text{m}$ にした。



3.4 パリレンのレーザー表面処理

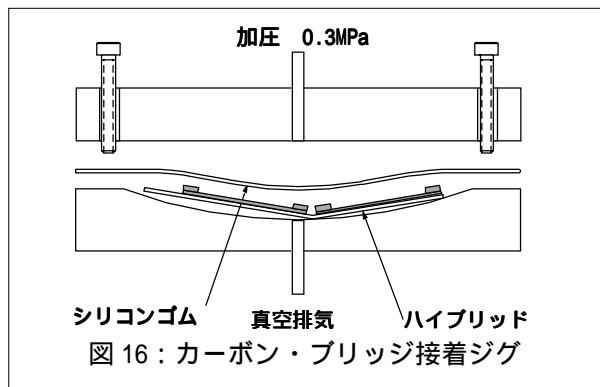
プラスチックで表面を覆うと問題になるのが接着性である。パリレンも例外では無く、そのままでは接着性が悪い。プラスチックの接着性を良くするには、表面を荒らせば良い。最近は、プラスチックの表面処理にプラズマエッティングを使う話をよく聞く。プラズマエッティング法は優れた方法だが、手元に装

置がないと簡単には出来ない。装置の形状によってプラズマのでき方が違ってくるし、条件出しに手間がかかる。そもそも、そういう装置は製造ラインに入っているので、外注ではなかなか使わせてくれない。そこで、レーザーを使ってみた。もともと、ICの部分は電気的に接続する必要があるので、 $2 \times 4\text{ mm}^2$ の窓をエキシマレーザーで開ける予定であった。表面処理後、試験片を接着してピール強度を測定したところ、 0.8kg/cm あり、合格だった。レーザーは単位面積当たりのパワーを定量的にコントロール出来るので、試作には便利である。

銅ポリイミド・フレキシブル基板も同じように表面処理する必要が有るので、接着性改善用プラズマエッティング処理付の材料を使用している。

3.5 銅ポリイミド・フレキシブル基板とカーボン・ブリッジの接着

この接着は、フレキシブル基板が使えるかどうかのキーポイントである。接着剤は、厚味の一様性や取扱いよさからフィルム状接着剤^[9]を選んだ。厚味は $50\mu\text{m}$ で、硬化温度は、 125×2 時間である。銅ポリイミド・フレキシブル基板とカーボン・ブリッジの熱膨張差は $24\text{ppm}/\text{°C}$ もある。したがって、そのまま平らな状態で接着すると、室温ではフレキシブル基板側が大きく窪んだ形になる。そこで、まずフレキシブル基板とフィルム状接着剤及びカーボン・ブリッジを仮止めする。次にお椀のように窪んだジグにフレキシブル基板の表側が下向きになるようにセットしてシリコンゴムでシールする。そしてジグとシリコンゴムの間を真空にして基板をジグに密着させる。更に、シリコンゴムの外側から 0.3MPa で加圧する。合計の圧力差として 0.4MPa を掛けたことになる。そして、この状態で加熱して硬化させる。カーボン・ブリッジの熱膨張係数には異方性があるので、 0° 方向はR300で、 90° 方向はR450のアールが付いたジグを使用。室温での平面度は、 $\pm 75\mu\text{m}$ 以下に押さえられている。図16に接着ジグの概略を示す。



3.6 表面はんだ付け実装

フレキシブル基板とカーボン・ブリッジの接着に使用しているフィルム状接着剤のガラス転移温度が低いので、リフローは残念ながら使えない。現在

はロボットを使って、接着による部品の仮止め、フランクスの塗布、ハンダボールの供給を行い、手ハンダで仕上げている。レーザーや光ビーム法などを使えば、限り無く自動ハンダに近付けることが出来ると思われる。ハンダは、環境に配慮して鉛フリーの Sn96/Ag4 を使用していたが、「Tin pest」^[10,11]の問題が UK グループから指摘され、急遽 Sn/Pb の共晶はなんだに戻すことにした。Tin pest は昔から良く知られている現象で、合金では問題無いとされてきたが、Sn の割合が多いもの（鉛フリーはんだ等）を 13 ~ -50 で長期間（年単位）保存すると脆くなると言うものである。ウイスカーも出来るらしい。アトラスのモジュールは、低温、高電圧、高放射線と最も危険な条件が揃っているので、鉛フリーは諦めるしかない。但し、それで問題が解決したわけでは無い。世の中の表面実装部品が既に鉛フリー化されているからである。

4 . モジュール冷却試験

シリコンセンサーが放射線損傷を受けると、全空乏化電圧も上がる。つまり、動作電圧を上げる必要がある。LHC で 10 年間に被爆する陽子線量は Max. 3×10^{14} 粒子 / cm² と見積もられており、動作電圧も 100V から 500V まで上げる必要がある。また、センサーのバルクも N タイプから P タイプに反転して比抵抗が下がり、流れる電流が増すので発熱も多くなって温度が上がる。センサーは半導体なので、温度が上がると抵抗が下がって益々電流が増えて発熱も多

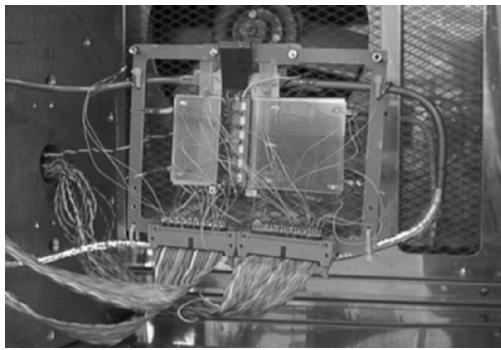


図 17 : モジュール冷却テスト

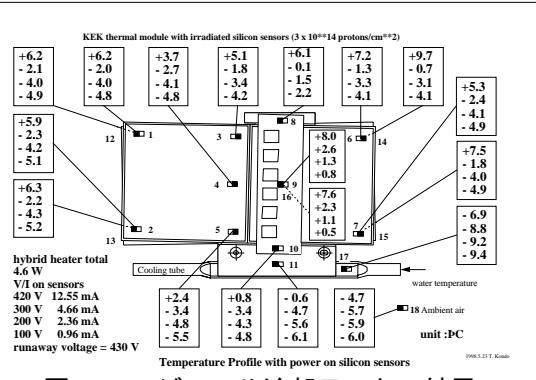


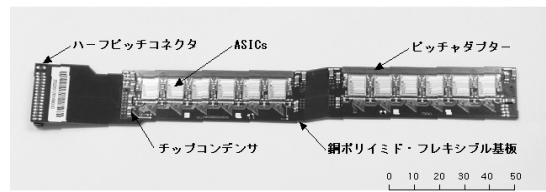
図 18 : モジュール冷却テストの結果

くなる。もし冷却がこれに追いつかなければ、遂には熱暴走 (Thermal runaway)^[12]を起こして溶けてしまう。それを防ぐ為に、モジュールはセンサーの温度が 0 以下になるように冷却され、しかも温度分布が均一になるように設計されている。図 17 はセンサーに陽子を 3×10^{14} 粒子 / cm² 照射したモジュールの冷却試験の様子を示す。ハイブリッド基板からの発熱にはチップ抵抗を使った。温度素子は白金抵抗測温体を使用した。図 18 に測定結果を示す。300V までは、それぞれの電圧でシリコンセンサーの温度は均一になっているのが分かる。また、300V を境にして電流と温度変化の様子が違っている。これはシリコンセンサーの発熱に対して冷却能力が足りなくなっているからである。この試験では冷却剤に不凍液を使い、入口温度-10 、流量 300cc / min に保った。このモジュールの熱暴走電圧は 430V であった。もちろんシリコンセンサーを 0 以下に保つように冷却すれば、500V でも熱暴走は起こらない。

シリンダーに取り付けられたモジュールは、配管の数がなるべく少なくなるように、一本の冷却パイプで 12 ~ 24 台まとめて冷却される。もしこの冷却に不凍液など比熱を利用したものを使うと、上流と下流のモジュールの温度差が大きくなり過ぎ、モジュールの電気性能の違いや温度差による機械的な歪みなどを生じて、精度の高い測定が出来なくなる。そこで、アトラスはフロン系の冷却剤を使い、蒸発潜熱を利用して冷却する予定である。理論上は比熱を利用したものより数十倍の冷却能力を持つ。ただし、測定器の外からシリンダーまで 8 気圧で送り、シリンダーのところに膨張弁を取り付けて断熱自由膨張させて-17 の気液混合流体を発生させないといけないので、そう簡単ではない。

まとめ

アトラス シリコンマイクロストリップモジュールの開発について機械的な観点で述べてきたが、電気的にも充分な性能を有することは言うまでも無い。日本グループ^[13]は、少ない人數ながらも各自がそれぞれの役割を分担して、組立（ペアチップの実装やワイヤーボンディングも含む）、各種テスト、データ収集、データ解析など一通りのことを自分達の手で出来る体制を整え、強力な集団となっている。今後は、モジュールの量産、銅ポリイミド / カーボン・ハイブリッド回路基板の量産、シリンダーの組立と休み無く計画を進めて行かないといけないが、常により良いものを作るように心掛けるつもりである。



銅ポリイミド / カーボン・ハイブリッド基板

謝辞

ここまで来られたのは、菅原機構長を初め、山田素核研究所長他素核研のみなさん、契約課のみなさんなど、沢山の方々の強力なご支援のお陰です。また、参考文献にあるメーカーの他に、飯村精密株式会社、林栄精器株式会社、吉本機工株式会社、武藏エンジニアリング株式会社、THK 株式会社、セイコープレジジョン株式会社の方々にも大変お世話になっております。この場をお借りして皆様にお礼申し上げます。そして、これからも皆様の一層のご支援をお願い致します。

参考文献

- [1] ATLAS Technical Proposal for a General-Purpose pp Experiment at the Large Hadron Collider at CERN, CERN/LHCC/94-43 (1994).
- [2] ATLAS Inner Detector Technical Design Report, CERN/LHCC 97-16 (1997), CERN/LHCC 97-I7 (1997).
- [3] Y. Unno, "ATLAS silicon microstrip Semiconductor Tracker (SCT)", Nucl. Instr. Meth. A453 (2000) 109-120, M. Turala, "The ATLAS semiconductor tracker", Nucl. Instr. Meth. A466 (2001) 243-254.
- [4] 接着剤 アラルダイト 2011 株式会社バンティコ BN フィラー 電気化学工業株式会社
- [5] 株式会社ミツトヨ
- [6] 日本メクトロン株式会社
- [7] 日石三菱株式会社
- [8] 日本パリレン株式会社
- [9] 日本エイブルスティック株式会社
- [10] www.geia.org/sstc/G12/mtg108/nasa_nepag_m108.pdf
- [11] www.smartgroup.org/pdf/tinpest.pdf
- [12] T.Kohriki et al,First Observation of Thermal Runaway in the Radiation Damaged Silicon Detector,IEEE Trans. Nucl. Sci.vol.43,No.3 (1996)1200
- [13] <http://atlas.kek.jp/>