

アトラスシリコン検出器の建設

高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所

高力 孝

takashi.kohriki@kek.jp

2008年2月1日

1. はじめに

「2006年の完成を目指して建設が始め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がある。」と2000年の仕様書に書かれていた。それが、2年遅れではあるが2008年の秋までには実現する予定である。

アトラス測定器[1]は地下100mに建設されている高さ22m、長さ46mの巨大な測定器であり、KEK Belle 測定器の約20倍の容積がある。35カ国の研究者や技術者が共同で建設している。図1は地下の実験場で組み立て中のアトラス測定器である。中央に見えるのは超伝導ソレノイド電磁石と一体になった液体アルゴンカロリメータのクライオスタットで、中心の開口部にシリコン検出器を含む内部飛跡検出器が設置される。図2は内部飛跡検出器をクライオスタットの内側に据え付けているところである。据え付けが終わっても、ケーブルなどサービス類の接続やテストなどまだまだたくさんの仕事が残っているのはいうまでもない。

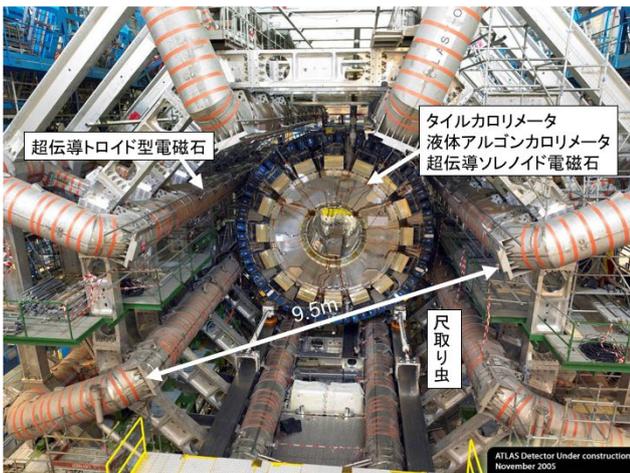


図1 地下100mの実験場で組立中のアトラス測定器
パレルカロリメータを尺取り虫が引っ張っている。
2005年11月（写真はCERN提供）

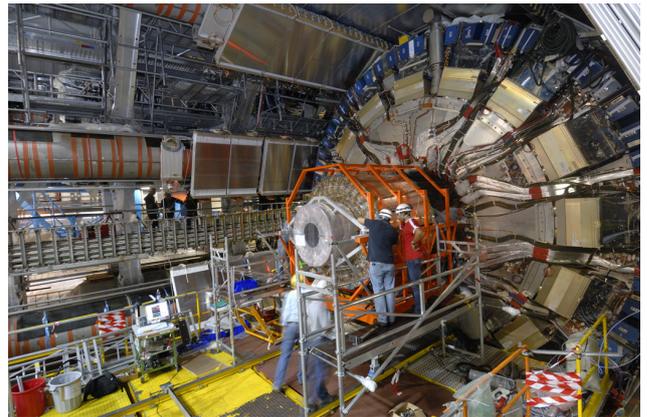


図2 内部飛跡検出器（Barrel SCT/TRT）の据え付け
2006年8月（写真はCERN提供）

アトラス日本シリコングループは、最先端技術にかかわって何か核となる仕事をするを動機づけに1994年よりアトラス半導体飛跡検出器（SemiConductor Tracker：SCT）の開発と建設に参加した。開発には自分たちで出来るものはメーカーに頼らないで何でもやる「ものづくり」を心掛けてやってきた。その甲斐あってか、われわれが提案したパレルモジュール用のハイブリッド回路基板が採用された。そして2000年から2005年にかけてハイブリッド回路基板2600台（必要数2112台と予備）を量産して供給した。また、パレルモジュールは980台組み立てて、そのうち実証用、ビームテスト用、不良品を除いた918台をシリンドラ取り付け用に供給した。日本製のモジュールは約5%の予備を残して最終的に860台（全数2112台）がシリンドラに取付けられており、実験本番を待っている。

2. アトラス SCT

図3にアトラス測定器の中心部分の断面図を示す。液体アルゴン電磁カロリメータのすぐ内側に超伝導ソレノイド（日本製）が取り付けられ、クライオスタットを共有する特殊な構造になっている。その内側にある飛跡検出器はInner detector[2]と呼ばれ、衝突点に近いところからピクセル検出器、SCT[3]、遷移放射検出器（Transition Radiation Tracker：TRT）の三種類の荷電粒子飛跡検出器で構成され

ている。図 4 に Inner detector 内部の断面図を示す。それぞれバレル部とエンドキャップ部がある。

アトラス SCT は半径 300 ~ 520 mm , 長さ 5600 mm の空間の中央にバレル SCT (シリンダー4 層) , 前後方にエンドキャップ SCT (ディスク各 9 層) で構成され, それらにバレルモジュール (4 mm × 85 mm × 128 mm) 2112 台とエンドキャップモジュール (4 mm × 85 mm × 160 mm) 1976 台 , 合わせて 4088 台のシリコン マイクロストリップ モジュールが取付けられている。図 5 にバレルモジュールとエンドキャップモジュールを示す。両者はおもにセンサーの形状と読み出しハイブリッドの位置が違う。

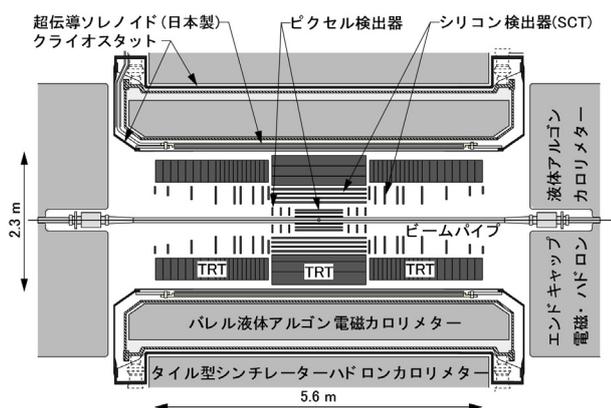


図 3 アトラス測定器の中心部断面図 (2D)

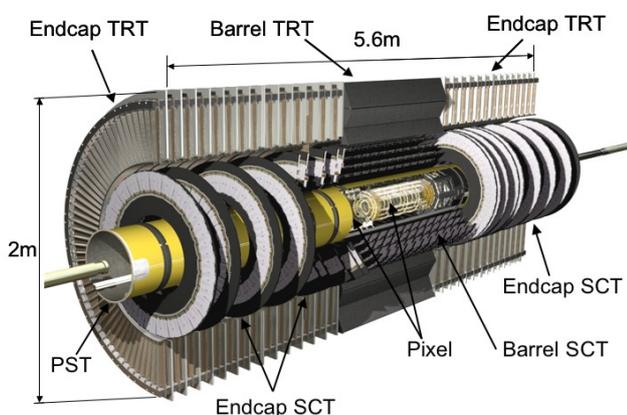


図 4 Inner detector の断面図 (3D) (CG は CERN 提供)

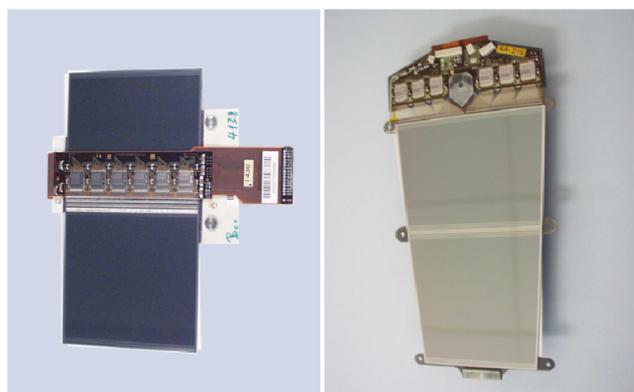


図 5 バレルモジュール (左) とエンドキャップモジュール

3. バレルモジュール

日本シリコングループがもっとも深くかかわったバレルモジュール (正確にはアトラス シリコン マイクロストリップ パレル モジュール[4], [5]) の詳細を図 6 に示す。また, モジュールの主な仕様を表 1 に示す。

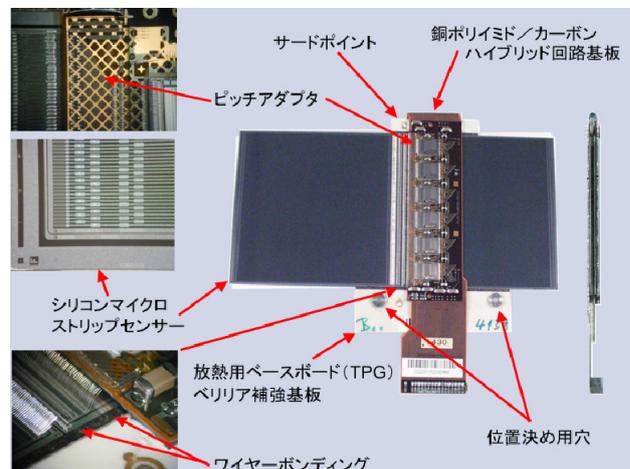


図 6 アトラス シリコン マイクロストリップ パレルモジュール

表 1 モジュールの主な仕様

センサー枚数	4 枚 (表裏 各 2 枚)
センサーの大きさ	0.285 mm × 63.6 mm × 64 mm
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 μ 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	40 mrad
ASIC チップ数	12 個
消費電力	min. 6.7 W max. 8.7 W
センサー動作温度	-7 ± 1 $^{\circ}$ C
動作電圧	150 V ~ 500 V
10 年間に被爆する陽子線量	max. 2×10^{14} 1MeV 等価中性子 / cm^2
センサー両面相対位置許容精度	
長手方向 (midxf)	± 10 μ m
短方向 (midyf)	± 5 μ m
厚さ方向	± 50 μ m
ステレオ角精度	± 0.13 mrad
位置決め穴位置精度	± 30 μ m
平均放射長/モジュール	1.17 % X_0

モジュールはシリコンセンサー, 信号読み出し用ハイブリッド回路基板, 大小の補強板が付いた放熱用ベースボードの三つのおもな要素からなっている。シリコンセンサーは 2 枚並びを 1 組とし放熱用ベースボードの両面に各組 ± 20 mrad 回転させて接着し, 中央の突合せ部でセンサー同士とセンサーとハイブリッド間をワイヤーボンディングしてステレオ角 40 mrad の二次元位置読み出しが出来るようになっている。ボンディングワイヤーは常温でボンディン

グが可能な $25\mu\text{m}$ のアルミ/シリコン1% ワイヤーである。冷却はパイプにハンダ付けされた冷却ブロックを放熱用ベースボードの大きい方の補強板に押し当てて行う。熱接触をよくするため間に放熱用シリコングリースを塗っている。

ハイブリッド回路基板はセンサーをまたいで取り付けられているが、センサーとの間には 0.5mm 位隙間を開けて補強板のところで固定（接着）している。したがって、チップからの熱は一部が気体を通して、大部分は両端の補強板から放熱用ベースボードを通して冷却ブロックに流れていく。センサーに直接接着しないのはセンサー表面へのダメージを防ぐためと、モジュールの発熱の90%以上を占めるチップからの熱が直接センサーに伝わると局部的に温度が高くなり、センサー全体の温度を一様 ($\pm 1^\circ\text{C}$) にするのが困難だからである。そのかわり伝熱距離が長くなることでセンサーに温度勾配ができないように放熱用ベースボードには面方向の熱伝導率が銅の4倍あるTPGと呼ばれる気相成長グラファイトとセラミックスの中で熱伝導率が一番よいベリリア (BeO) の補強板が採用されている。また、ハイブリッド回路基板は両端固定のブリッジ構造なので熱変形やワイヤーボンディング時の変形に敏感になる。厚くすれば簡単だが粒子飛跡検出器なので物質量を出来るだけ少なくする必要がある。そこで補強板に銅の2倍の弾性率と銅の1.7倍の熱伝導率を持ったカーボン複合材を採用した。カーボンやグラファイトを使うのは結果的に物質量を少なくするのにも役立っている。

モジュールの位置決めは図6の位置決め用穴をシリンダーにあらかじめ位置決めされたブラケットの取付座に合わせて、絶縁スリーブ付のM1六角穴付ボルトを締め付けて行う。しかし、2点で固定するだけでは円周方向の角度 (tilt angle) を正確に保つのは不可能なので、図6のサードポイントと呼ぶ3点目も固定して位置決めをしている。だが、図7のようにモジュールは重なっていて固定位置は奥になってネジ止めは出来ない。そこで「つ」の字のクリップを準備しておき、そこに挟み込ませて固定した。



図7 シリンダーに取り付けられたモジュール
隙間のないように配置されている。

4. ハイブリッド回路基板を獲得せよ

われわれのライバルはベリリアハイブリッドだった。ベリリアには毒性があるので基板にすることはもとより切削加工すらやる会社は日本にはない。したがってベリリアになれば日本はまったく手が出せないし、廃棄したときの環境への負担も大きいので、なんとか対抗できるものはないかと、実は例のSSC計画が中止になる前の1992年ごろから考えていた。

きっかけは広島大学の手伝いでフェルミ研究所 (FNAL) のCDF測定器用シリコン検出器のハイブリッドを考えていた時である。物質量を減らすには部品も減らさないといけないが、ベリリアの場合は基板同士やケーブルを繋ぐのにコネクタやはんだ付けによる接続が必要だった。それをフレキシブル基板で一体にして作ってはどうかと考えた。当時はフレキシブル基板が急速に伸び始めていたのでメーカーを探すのも簡単だった。それも日本一のメーカーがつくば市荃崎町にあった。日本メクトロン(株)である。早速連絡を取って交渉し、学術...を連発して試作をお願いすることになった。基材は $25\mu\text{m}$ ポリイミド、 $1/4$ オンス ($8\mu\text{m}$) 銅箔無接着タイプを使った4層基板である。当時の標準は銅箔1オンス ($35\mu\text{m}$) 接着タイプだったので、今思えば無知の無謀だったが、最初の試作はうまくいった (いってしまった)。しかし、二回目の試作からうまくいかなかった。積層すると銅箔が剥がれてしまう現象だった。その基材はポリイミドにボンディングメタルを蒸着してメッキにより $8\mu\text{m}$ にしてあるので、銅の密着強度が通常の半分以下になり積層温度に耐えられなかったらしい。そこで当時としては出始めたばかりの $1/2$ オンスで銅箔を接着したタイプを使ったらうまくいった。だが、その頃にはもうメクトロンに嫌われていた。結局CDF測定器のハイブリッドはベリリアになった。その時、もう一つのD0測定器はフレキシブル基板を使い始めていた。

アトラスの仕事を始めたら、ますますフレキシブル基板の有用性を感じてきた。それにメクトロンは量産を得意としているので、数千台規模のプロジェクトには最適である。しかしCDFの件以降関係は冷え込んでいて、工場に協力を断られる状態だった。その時は鹿島に新しい工場を作って主力を移しており、営業窓口も親会社のNOK(株)に移っていた。こちらをあきらめきれないので営業窓口の福田課長に何度か相談しているうちに同情を得られたのか、最後の手段として工場長に直談判をしたらどうかということになり面会の機会を作っていただいた。それで、こちらは皆でネクタイを締めて資料を一杯持って工場長に会いに行くと、こちらの熱意が伝わったのか、めでたく協力を得られることになった。

それからは回路図の詳細な検討を行い、林栄精器（株）の根岸さんの協力を得て回路パターンの設計をしてガーバーデータをメクトロンに送った。数回試作をして軌道に乗り、基材も接着タイプから無接着タイプの $25\mu\text{m}$ ポリイミド、 $1/3$ オンス（ $12\mu\text{m}$ ）銅箔になって厚さを2割も減らすことが出来て、ますます追い風が吹いて来た。図8にハイブリッド回路基板と主要な部品を示す。一番上がフレキシブル基板である。左側にはコネクタにつながるケーブル部と中央には左右の基板をつなげるケーブル部がある。厚さはケーブル部2層 $140\mu\text{m}$ 、回路部は4層 $250\mu\text{m}$ で極薄に仕上がった。

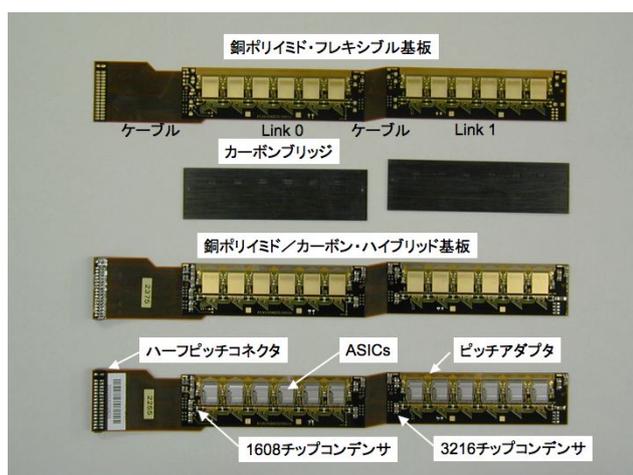


図8 銅ポリイミド/カーボン・ハイブリッド回路基板

試作段階でメクトロンと関係を保つために工夫したのは、試作品の良品（納品）数を決めないで必要な製造工程を流すための費用をその都度払って行ったことである。試作といってもメクトロンは量産をする工場なので量産用の試作ラインがあり、A4サイズのシートをバッチ処理で20～30枚流すラインであった。そこでそのラインに最小枚数を投入してもらって結果を見る方式にした。1シートで製品が6個くらい取れるが、デザインルールとしては一番難しいものを採用している。歩留まりが0であれば何も残らないが、たいいてい半分位の歩留まりはあり数量は十分だった。メクトロンは数量を確保するための余分な心配をしなくてもよいし、1バッチの処理費用がほぼ定額で通常の試作に比べたら格段に安く出来た（と思う）。密かな狙いは、このラインでうまくいけば、採用されたらいつでも本格的な量産に移行出来ることでもあった。

ピッチアダプタはASICのピッチ $48\mu\text{m}$ からセンサーのピッチ $80\mu\text{m}$ に変換するためのアルミ電極付きガラス基板である。大きさは $0.2\text{mm} \times 2.7\text{mm} \times 63\text{mm}$ でアルミの最小ライン幅 $15\mu\text{m}$ 、最小ギャップ $15\mu\text{m}$ 、膜厚 $1\mu\text{m}$ 、ライン770本、ボンディングパッド1540個で構成されている。この設計ではCADの有難みを十分感じた。ガラスの種類は

低アルカリ珪酸ガラスで、液晶によく使われているものである。熱膨張係数は $8\text{ppm}/^\circ\text{C}$ で鉄と同じくらいである。そもそもガラス基板を使うことに最初は抵抗があった。 0.2mm などという薄さで大丈夫なのかとか…。しかし、案ずるより産むが易いがまさに当てはまる事例で、とにかく作ってテストをしてみると意外にガラスもタフだということがわかった。それに後でわかったことだが、薄い方が曲げにより表面に生じる応力（割れに敏感なのは引張り）が小さいので割れにくくなる。試作も終盤に差し掛かったところに潰れたワイヤーの下からヒゲが無数に出ていることがわかり、隣のパッドに届くものもあったのでそれまでの試作はNGとなった。メーカーの見解は成膜方法が抵抗加熱蒸着だったので膜質が柔らかくて超音波振動で削られて出てきたのだらうということだった。それで、経験からEB（electron beam）蒸着のほうが硬い膜が出来ると言うのを信じて成膜したらうまくいったので（図9参照）、無事ピッチアダプタの準備も整った。しかし、これが後で述べる大きな落とし穴の前兆だったとは思いつかなかった。

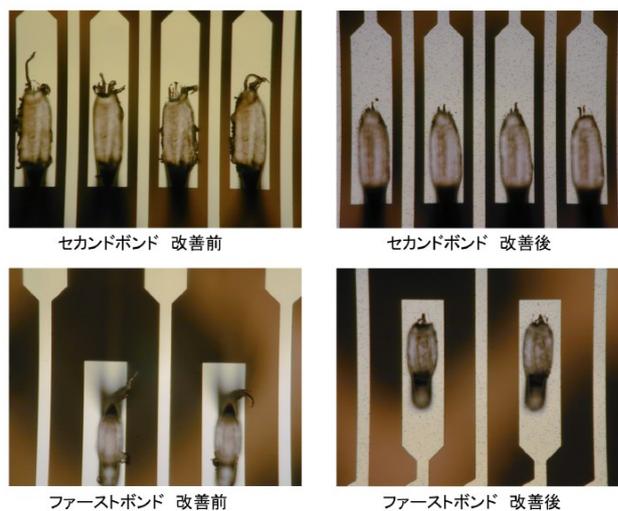


図9 ガラス基板上的アルミ電極へのボンディング状態
抵抗加熱蒸着（左列）からEB蒸着（右列）に変えてヒゲが大幅に改善した。

フレキシブル基板はそれ自身に剛性や放熱機能がないので、他の基板を接着して補強する必要がある。カーボンブリッジ補強板はカーボンカーボン製で、これは航空機に使われている炭素繊維強化プラスチック（CFRP）のプラスチックをエポキシ樹脂からフェノール樹脂に置き換えて焼成し、すべてをカーボン化させたものである。炭素繊維にはパン系とピッチ系があって、ピッチ系炭素繊維を高い密度で積層して高温処理（ 3000°C ）したカーボンカーボンは高剛性と高熱伝導性を兼ね備えたものになる。新日本石油（株）製CC-UD（一方向材）はその一つで、その主な特性を繊維の配向に対して $0^\circ/90^\circ$ 方向で示す。

- 熱伝導率 670/20 W/m/K (cf. 銅 400)
- 曲げ弾性率 400/NA GPa (cf. アルミ 70)
- 熱膨張係数 -1/10 ppm/°C (cf. ポリイミド 25)

かなり異方性があるがブリッジは長手方向にだけ剛性と熱伝導率が優れていればよいので、この異方性に着目してブリッジに採用した。大きさは縦横21mm×74mm、両端の4mmは厚さ0.8mmでそれ以外は0.3mmである。炭素繊維の太さが10 μ m位なので、薄い部分で30～40本積層されていることになる。厚さ0.3mmは、フレキシブル基板(0.25mm厚)と接着して0.6mm以下にこだわった結果で、この厚さでとにかく追求してみることにした。炭素繊維を固めているカーボン同様に炭と同じなので、そのままだと発塵して絶縁不良を起こしたり、フレキシブル基板との接着に支障をきたしたりする。そこでプラスチックで密着強度が高く薄い均一な膜を作れるものはないか探したら化学蒸着(CVD)法によるパリレンコーティングに行き着いた。パリレンを加熱蒸発させて低真空中で化学蒸着させるもので、粒子はサブミクロンなので表面の隙間に入り込み膜厚10 μ m位で十分な密着強度を発揮する。発塵防止は完璧になったがパリレン表面の接着性は他の高分子プラスチック同様にあまりよくないので、念には念をいれてさらにエキシマレーザーで接着面を粗くした。もう一つ駄目押しに接着方法は業界と同じようなプロセスで接着した。

- エポキシ系加熱硬化性フィルム状接着剤(厚さ50 μ m、120°C、2時間)を使用
- 真空と加圧を併用して0.4MPa以上の圧力をかけながら接着

この接着で普通ではないのは熱膨張係数が大きく異なるものを加熱硬化させることである。硬化が終わって温度を下げると熱膨張係数が大きいフレキシブル基板が収縮して反ってしまう。そしてブリッジの剛性が高いので平らになるうとしてフレキシブル基板を常に引っ張る状態で落ち着く。そうすると配線が断線する可能性が高くなるので、フレキシブル基板側は逆の圧縮が残留するのが望ましい。そこで細長いお椀のようなジグ(長い方の曲率300mm、短い方の曲率600mm)にフレキシブル基板を下にして押し当てて2mm以上曲げた状態で硬化させ、室温になったらフレキシブル基板側が100 μ mくらい凸になるように接着した。表面実装前は仕様を満足したが表面実装部品をハンダ付けすると少し軟化して平らに戻ることが判ったので全体が高温に長時間さらされるリフローによるハンダ付けは残念ながら諦めた。最終確認として接着面の引き剥がしテストを実施して接着面とは関係ない炭素繊維の剥離により破壊したのが十分な接着強度があることを確認した。

それから程なくすべての部品が揃ったので、自分たちでカーボンブリッジと銅ポリイミドフレキシブル基板の接着、部品実装、ASIC実装、読み出し側のワイヤーボンディング、電気性能試験をやって銅ポリイミド/カーボン・ハイブリッド回路基板を完成させた。性能は他のグループのものよりよかったのでSCTグループのレビューを経てわれわれの提案したハイブリッド回路基板が採用された。主要部品の製作は次の4社がそれぞれ担当することになった。

- 銅ポリイミドフレキシブル基板：日本メクトロン(株)
- ピッチアダプタ：豊和産業(株)、東邦化研(株)
- カーボンブリッジ：新日本石油(株)

役者が揃ったところで、次はいよいよハイブリッド回路基板組立の量産を依頼する会社探しである。条件としては、

- (1) 基板の接着が出来ること、
- (2) 部品実装で直径0.4mmのハンダボールを手ハンダ出来ること、
- (3) ベアチップを実装してアルミワイヤーウエッジボンディングが出来ること、

などであったが、結局アルミワイヤーウエッジボンディングが出来れば何でもやれるだろうとそれをキーワードに情報誌などを片っ端から調べたが該当する会社はなく、ボンディングマシンのメーカーに掛け合っても相手先に迷惑がかかると困るから教えられないと断られた。しかたなくウェブ検索を掛けたらたった一社、セイコープレジジョンのCOB(chip on board)実装にアルミという文字を見つけた。電話をしたら偶然近くに営業の方が来ておられたので、すぐに富士実験室B2にお越しねがった。その方がセイコープレジジョン(株)栃木事業所(SPI)営業係長の田中さんだった。田中さんがお持ちのCOBの資料には、正にわれわれが求めているものがすべてあった。ちなみに、アルミワイヤーウエッジボンディングを専門にしている会社のほとんどは大手企業の協力会社で、表に出ることはないらしい。ウェブ検索で見つけた唯一の会社がSPIだったのは幸運だった。栃木事業所の前身は栃木時計(株)だったので皆さんとても器用で、マイピンセットを持った実装のプロばかりであった。ボンディングマシンも少し古いタイプだか何十台もあって、まるでわれわれのためにある会社ではないかと思ったほどであった。

5. ハイブリッドとモジュールの品質管理

バレルモジュールの製造は日本、米国、英国、スカンジナビア連合で分担して行われた。厳しい環境のもとで長期にわたり正常に機能するモジュールを製造するという共通認識と結果が求められるので、製造過程の品質管理は重要

である。したがって、みんなが納得するようにさまざまな試験や検査が決められ、品質管理が製造時間よりも長くなることを覚悟しないとイケなかった。特に電気試験関係は大変だったが、タイミングよく CP 実験から移ってきた池上さんが付きっきりで世話をしてくれたのでなんとかやれた。一時的な手足になってくれた人もたくさんいたが、出てくる結果を正しく理解しながら注意深く進めないといけないし、やり方を指導しないとイケないし、あれやこれやで大変だったと思う。以下に主な工程を示す。図 10 に試験に使ったジグの一部を示す。

[ハイブリッド回路基板 その 1] (目:目視検査)

- フレキシブル基板とカーボンブリッジを接着 (目)
- 部品のハンダ付けとフラックスの洗浄 (目)
- 電気試験 (導通, 抵抗値やコンデンサ容量, 高電圧ラインの耐圧) (目)
- サンプルテストで合格したピッチアダプタを接着 (目)
- カーボンブリッジ面 (裏面) から平面度の測定
- 顕微鏡を使った総合目視検査 KEK
- 合格品を各アセンブリサイトへ出荷 KEK

[ハイブリッド回路基板 その 2]

- ASIC をダイボンド
- ASIC の読み出し側のみワイヤーボンディング 750 カ所 (目)
- 顕微鏡を使った目視検査 KEK
- 電気性能試験 (ASIC の性能試験, dead channel の検出) KEK
- 合格した基板の ASIC とピッチアダプタ間をワイヤーボンディング 1550 カ所 (目)
- 顕微鏡を使った目視検査 KEK
- 電気性能試験 KEK
- 加速試験 38°C, 80 時間 KEK
- 長期安定性試験 0°C, 20 時間 KEK
- 電気性能試験 KEK
- 顕微鏡を使った総合目視検査 KEK
- 合格品をモジュール組立へ

[モジュール組立 その 1: センサーベースボード組立]

- センサーを位置合わせしてジグに真空吸着
- ベースボードの両面に接着剤を塗布 (目)
- 裏面センサーのジグにベースボードをセット (目)
- 表面センサーのジグを重ねて一定トルクでねじを締め付けて硬化
- 顕微鏡を使った目視検査
- 機械精度測定試験 (三次元測定器)

[モジュール組立 その 2]

- 良品にハイブリッド回路基板を接着 (目)

- ピッチアダプタとセンサー間, センサーとセンサー間をワイヤーボンディング 3100 カ所
- 顕微鏡を使った目視検査
- 機械精度測定試験
- SPI での電気性能予備試験
- 受入検査 機械精度測定試験 KEK
- 電気性能試験 (ASIC の性能試験, dead channel の検出, センサーの IV 特性など) KEK
- サーマルサイクル -25°C ~ +40°C を 10 サイクル (20 時間) KEK
- 機械精度測定試験 KEK
- 電気性能試験 KEK
- 長期安定性試験 0°C, 24 時間 KEK
- 機械精度測定試験 KEK
- 電気性能試験 KEK
- レーザーによる全ストリップの応答の有無
768 ストリップ×4 枚/モジュール
= 3072 ストリップ/モジュール
(日本独自の試験だが, 筑波大の原さん主導で大学院生とがんばってくれた)
- 顕微鏡を使った総合目視検査 KEK
- 合格品はモジュール完成



図 10 ハイブリッドとモジュールの各種試験ジグ

6. ハイブリッド回路基板量産開始

製造方法は確立していたので SPI の技術者の方に 2 週間ほど栃木から富士実験室 B2 に通って,一緒に作業をして体で覚えていただいた。ただし量産になるとまた違うので,今までのやりかたに固執しないで SPI と一緒に考えて進めて行った。最初に悩んだのはハンダ付け後の洗浄である。ハンダ付けはリフローを断念したのですべて手作業で行ったが,部品が小さい (0.8mm×1.6mm) ため接着で仮止めてから直径 0.4mm のハンダボールを 1 個置いてハンダ付けした。試作ではロジン系のフラックスを使ってハンダ

付けした後にアルコールで湿らせた綿棒でこすって洗浄していたが量産になるとその時間ももたないのので有機溶剤洗浄か水洗浄を行いたい。有機溶剤洗浄だと超音波洗浄を併用しないといけないうから、はたしてこのデリケートなハイブリッド回路基板は耐えられるだろうか。今なら迷わず有機溶剤洗浄を選択するが、その時は時間がなかったので水溶性フラックスでハンダ付けして純水で洗浄するほうを選択した。水洗浄の心配は湿気によるボンディングパッド表面への悪影響であるが、水を使った後にアルコールですすいで速やかに乾燥させて窒素雰囲気デシケータに保管するという万全な態勢で船出した。

量産を始めた半年後に一つ目の大きな試練が訪れた。モジュールアセンブリをやってもらっているメーカーから急にピッチアダプタのボンディング不良が増えて、外観も異常に白いと連絡があった。ロットを調べるとロット 29 で手元にあるものも確かに白かった。これは後に White PA と名付けられた。モジュールアセンブリの前に ASIC の実装で SPI がロット 29 のピッチアダプタのボンディングを既に経験しているのになぜクレームがなかったか。それは ASIC 実装はセカンドボンドでモジュールアセンブリはファーストボンドだったからと思われる。

ファーストボンドはボンディングが終るとセカンドにいく前にループの形成のためにワイヤーを引き上げたりセカンドの方へ引っ張ったりするので付きが弱いと剥がれてしまいやすい。セカンドボンドはボンディングが終るとツールで押さえたままワイヤーを切って終るので余分な力が掛からなくて付きが弱くても剥がれにくい。納品されているすべてのロットを調べたら外観は問題ないのにボンディング性の悪いロットがあることもわかった。抵抗加熱蒸着から EB 蒸着に変更した以外は基板も成膜条件も何も変えていないはずなのに成膜ごとに膜の性質は少しずつ違って出来るらしいことがその後の試作でわかった。同じ条件といっても違いを生む原因は必ずあると思われるが、たいていはそれをとことん解明する時間はないし元気もない。おまけにうまくいかなかったらずっとダメで、しょうがないので別のメーカーのイオンプレーティング法で成膜してもらった。

今度は希望が持てる結果が得られたが、同じ膜でもボンディングマシンによる違いも出た。逆に今まで NG と思っていた膜が別のマシンでは良品に変身する恩恵もあったが。結局すべてのシートからサンプル(1シートあたり 25 個の内 4 個)を取り各国の製造場所へ送って評価してもらい、その結果でオーダーメイドのハイブリッドを作った。それ以来最後まで自転車操業になったが、責任を果たさないといけないので我慢の毎日だった。現在進めているアップグ

レードではピッチアダプタを使わないで ASIC とセンサーを直接ボンディングすることを考えている。

量産も 2 年を過ぎて後半になってきたところに今度は金メッキ表面に少し赤味を帯びた基板のボンディング性が悪いという報告が UK グループより上がってきた。確かにそういわれると赤っぽい感じがして、不思議なことにそのうちすべてが赤く見えてきた。早速表面の分析を依頼したら金表面への Cu, Ni, Ag の析出は見られず、C が若干多いので何らかの有機物が付着していると報告を受けた。

フレキシブル基板も製造から 2 年以上経って賞味期限が過ぎているだろうし、水溶性のフラックスとか水洗浄などによる環境でカビが発生しやすくなったなども考えられる。この問題を腕力で解決するにはアルゴンプラズマ洗浄しかないが、幸運にも SPI は洗浄装置を日常的に使っていたのですぐに対処出来た。今から思えば奇跡に近かったが、無事 2600 台のハイブリッド回路基板の製造を終えることが出来た。

2600 台のうちモジュールアセンブリのために 1100 台に ASIC を実装する作業も SPI で並行して行われた。ASIC チップの供給は US グループからだったので最初から嫌な予感がしていた。こちらもピッチアダプタの件があるので偉そうなことは言えないが、ありとあらゆる経験をさせてもらった。ASIC はウエハ上で試験済のいわゆる known good die でひとつひとつにウエハとその配置の番号が付けられてデータベースに登録されている。番号が付いているといっても刻印されている訳ではなく供給されるケースのふたに張られているラベルを信じるだけなので、実装後の結果をみてこのラベルは本当に正しいのか心配になることがあった。

マスクを 1 枚増やして ASIC ひとつひとつにウエハ上の配置の番号(マスクは共通なのでウエハ番号は入れられない)を付けておけば末端ユーザーも管理はずっと楽になったと思う。それがダイシングとピックアップを自分たちでやればよけいな苦労はなくなると考えていたら、実は他のグループはダイシングとピックアップを自分たちでやっていることがわかり、われわれのグループにもウエハで供給してもらうように要求した。耐放射線性 ASIC なので手続きに時間がかかったが約 1 割分のウエハを供給してもらい、何でも出来る SPI にダイシングとピックアップをお願いした。手間はかかるが自分たちの手元で部品をコントロール出来るのはやりやすい。

ハイブリッド 1 台当たりの ASIC は 12 個なので全部で 13200 個実装したことになる。そのうち約 150 個が NG だったので交換した。ハイブリッド単位では約 15% に NG ASIC があった。したがってリペア出来ることはハイブリッドの設計において重要な要素である。フレキシブル基板は

柔らかいので ASIC を取り除いた後のダイパッドを再生するために古い接着剤を除去する時は基板を傷つけないようかなり気を使ったが、出来ないことはなかった。アップグレードのモジュールは 80 個/モジュールを想定している。そうすると 1 台あたり必ず 1 個 NG ASIC が存在する恐れがある。

7. モジュール量産開始

モジュールの量産は 980 台のうち前半の 560 台をセンサーの開発でお世話になっていた浜松ホトニクス(株) HPK) にお願ひし、後半の 420 台は SPI にお願ひした。

組立は主に三つの工程からなっている。

- センサーとベースボードを接着してセンサーベースボードを組立てる。
- センサーベースボードの両面にハイブリッド回路基板を接着する。
- ワイヤーボンディング。

図 11 にアセンブリステーションの XY ステージに取り付けられた 2 枚のセンサーを位置決めするための XYR (回転) ステージを示す。左右にフランジ付きリニアブッシュが取り付けられ、それに $\phi 12$ の平行ピンがセットされている。

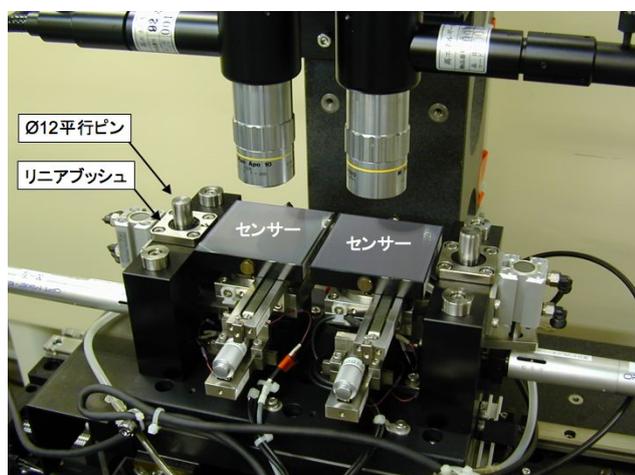


図 11 XYR ステージ

この左右のリニアブッシュの中心を基準にしてセンサーを位置決めする。モジュールの表側のセンサーは -20mrad で裏側のセンサーは $+20\text{mrad}$ なので、XYR ステージ上でセンサーを -20mrad 回転させて位置決めし、同じリニアブッシュが取り付けられたジグでセンサーを真空吸着したものを 2 セット準備して、センサーの裏面が向き合うように重ねれば自動的に $\pm 20\text{mrad}$ のモジュールになる。したがって、センサーの位置決めは -20mrad だけでよい。リニアブッシュの中心はピンの外径を何度も測定して決めないといけないので毎回のセンサー位置決めには利用出来ない。そこで画像認識が出来る小さなマークをリニアブッシュのフラン

ジに接着しておき、リニアブッシュとの位置関係を正確に測定しておいて、それを副基準にして毎回その位置を確認しながら位置決めした。

XY ステージ本体は精密級でコントロールも AC サーボモーターと高精度な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、その精度を最大限に発揮させるために以下のような工夫をした。

- $\phi 12$ の平行ピンをリニアブッシュの内径より $5\mu\text{m} \sim 7\mu\text{m}$ 太くして予圧を掛けて遊びをなくした。
- ジグで真空吸着させる時にセンサーが数 $\mu\text{m} \sim 10\mu\text{m}$ ズれる場合があることが判ったので、ジグの外からセンサーのマークが見えるように穴をあけてセンサーと同時にセットし、センサーの位置決めが終ってジグに吸着したらその場で位置を測定した。そして目標値よりズれていたら直ぐやり直せるようにした。このおかげで他のグループより高精度に組立てられたと思う。

その他に、作業性の向上のために以下のような工夫をした。

- XYR ステージのリニアブッシュを X 軸に対して $+20\text{mrad}$ 回転させて取り付け、センサーの位置決めを X 軸に平行にして XY ステージの動きを単純にし、直感的にも判りやすくした。
- 2 台の CCD カメラでセンサーの両側にあるマークを同時に見るようにしてステージの動きを最少にした。また、2 台の CCD カメラの位置関係を副基準マークで毎回校正した。
- XYR ステージにセンサーをセットする時もジグを使った。作業性のよい場所でセンサーを保護しながらジグにセット出来るだけでなく、リニアブッシュを利用して数十 μm 以内にセットすることにより、位置合わせの時間も短縮した。

図 12 はアセンブリステーションにセンサーと吸着ジグをセットするまでの工程を示す。

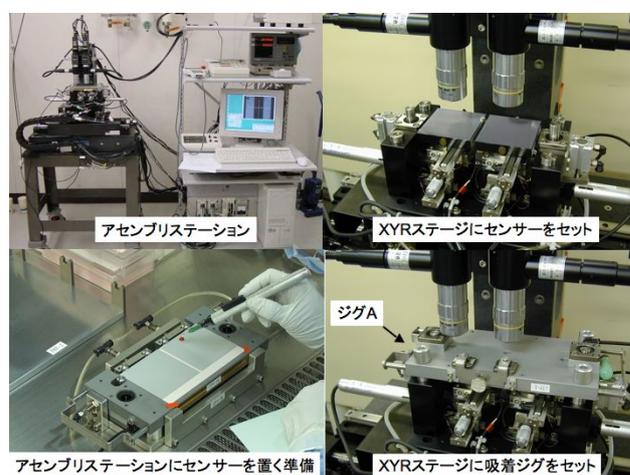


図 12 アセンブリステーションにセンサーとジグをセット

センサーと XYR ステージおよびジグの間には無塵紙を挟んでセンサーを保護している。無塵紙はポーラスなので真空吸着に支障はない。

ベースボードはモジュール位置決め用穴を使ってセットする。モジュール位置決め用穴の位置精度は $\pm 30 \mu\text{m}$ なので穴より $10 \mu\text{m}$ 位細いピン ($\phi 1.8$) をジグ A にセットしておき、それに差して位置決めする簡単なやり方にした。ピンはリニアブッシュを基準にして精度よく位置決めされている。図 13 はベースボードに接着剤を塗布してジグ A にセットし、その上にジグ B を重ねてセンサーベースボードを組立てている工程である。ベースボードに塗布されている格子状の接着剤は 1 ドット当たり $0.26\text{mg} \sim 0.28\text{mg}$ に調整されている。接着剤はアルダイト 2011 に BN フィラーを 30 wt% 加えたも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の経過とともに粘度が増して 60 分以内に作業を終える必要があった。吐出抵抗の少ない精密ノズル ($\phi 0.5$)、粘度の上昇とともに加圧力を変えることが出来るプログラマブル吐出装置、それに三軸ロボットがあればこの作業は出来なかった。ロボットは位置決めするだけでなく、吐出して次の場所に移る時にノズル先端に付着した接着剤の糸引きを絶妙なタイミングで切ってドットの形を整えていった。

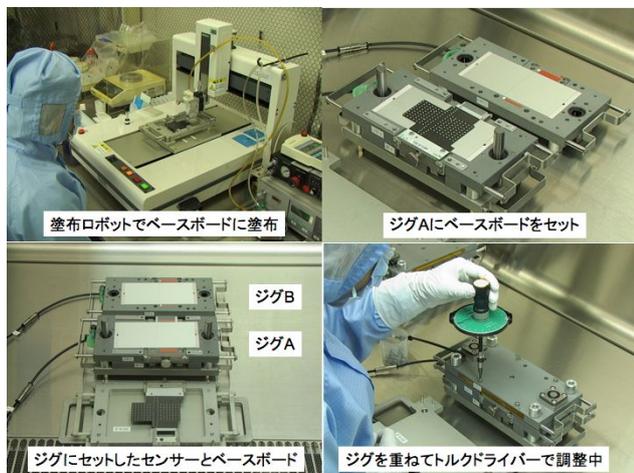


図 13 センサーベースボードの組立

ハイブリッド回路基板は実装部にダメージを与えないよう専用のジグ C にセットされ、ジグ A にセットされたセンサーベースボードに重ね位置を合わせて接着する。位置合わせには改造した測定顕微鏡を使った。Link-0 の接着が終わればジグ A の吸着を OFF にしてセンサーベースボードをジグ C に移す。ジグ C にはヒンジで折り返せるようになっており、センサーベースボードを挟み込んで Link-1 を接着する。図 14 にハイブリッド基板の接着工程を示す。

ワイヤーボンディングは古くて新しい技術とよく言われるが、この枯れた技術はわれわれの業界にはなくてはならないものである。モジュールを完成させるかガメにするか

の最後の作業でもあるので、マシンだけでなくオペレーターにももっとも信頼性が求められる。アルミワイヤーを使ったウエッジボンディングは 1 ボンドサイクルに 1 秒くらい掛かるのが欠点で、約 3100 ケ所あるので 1 時間以上かかる。今進めているアップグレードでは 11000 ケ所にも及ぶ。しかし、時間は掛かるがうまく使えばもっとも頼りになる技術でもある。その作業の様子を図 15 に示す。

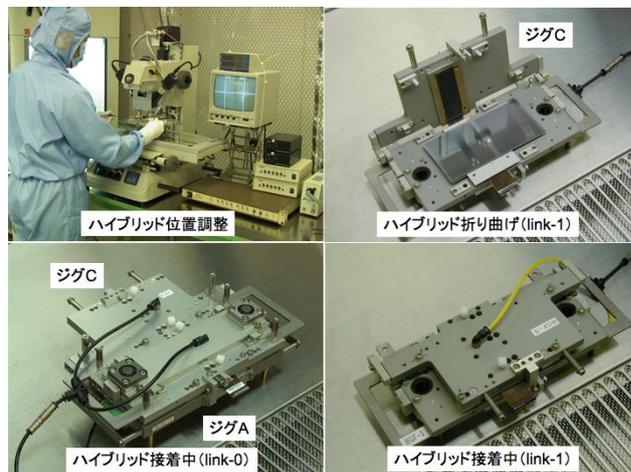


図 14 ハイブリッド回路基板の接着

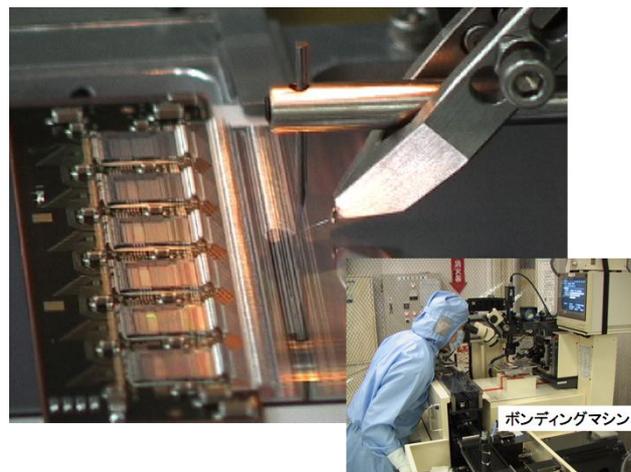


図 15 モジュールのセンサー同士をボンディング中

機械精度 (組立精度) の測定は、非接触三次元 CNC 画像測定機を使った。測定対象面が表裏両面なので一度に測定することができない。そこで、図 10 にあるようにフレームに固定して両面を測定しやすくした。両面の測定値を合体させるには共通の基準が必要になるが、幸いなことにセンサーは $\pm 20\text{mrad}$ 回転しているので両面から四隅のセンサーが見える。厚さ方向の測定はそれほど高い精度を要求していないので表側の四隅の表面を基準にして、裏側から測定する時は表側のセンサーの裏面も測定して厚さで補正してやれば相対位置が決められる。 $5 \mu\text{m}$ 以下の再現性で測定できた。XY 方向 (位置精度) の場合は四隅のセンサーの角を基準にした。角と言っても大抵は欠けているので辺を画像認識して交点を求める方法である。両面合わせて利

用出来る角が 8ヶ所あるのでこれを使って両面共通の座標軸を決める。具体的にはエッジを精度よく測定して交点を求めるが、センサーの裏面はチッピングだらけなのとセンサーの切断面は直角ではなく斜めになっているので測定にはそれなりのノウハウが必要だが、エッジをうまく測定することで $\pm 0.5\mu\text{m}$ 以下で測定が再現できた。

図 16 に日本、英国、米国、スカンジナビア連合の最終的なモジュール機械精度測定のおもな結果を示す。グラフは各サイトのモジュール番号ごとのセンサー短方向両面相対位置 (midyf) とステレオ角 $\pm 20\text{mrad}$ からのズレである。表 1 より許容精度は midyf: $\pm 5\mu\text{m}$, ステレオ角精度: $\pm 0.13\text{mrad}$ で、日本のモジュールが他のサイトより精度よく出来ているのが判っていたと思う。

当初、アセンブリジグは共通のものを使おうと申し合わせていたが、ものづくりの考え方があわなかったため日本は独自のジグを使った。スカンジナビア連合も独自のジグを使った。米国と英国は同じジグを使ったようだ。

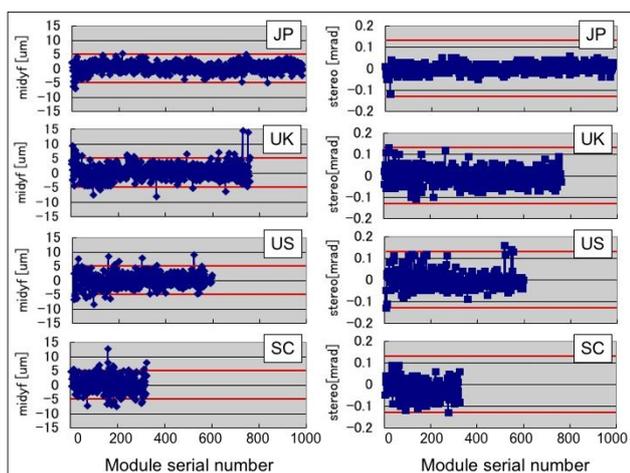


図 16 各サイトのモジュール組立精度

midyf (左列) 許容精度: $\pm 5\mu\text{m}$,
ステレオ角精度 (右列) 許容精度: $\pm 0.13\text{mrad}$

モジュール量産ではボンディング以外の道具やジグはすべてこちらが支給した。これにはこだわりがあって、なにかのレビューの時に「丸投げして終わりじゃないの」的な発言をされてカチンときて、最初のモジュールアセンブリに協力して頂いた HPK には迷惑だったかもしれないがこのようにこだわった。これが結局自分達への技術の蓄積につながったので、今となってはレビューワに感謝している。

HPK での作業は、最初はセンサー以外の部品がなかなか揃わず、揃いしたらジグが間に合わないなどで迷惑をかけたばなしだった。ほんとうはもっと早く終わっていたが、結局最後まで部品調達の制限で能力の半分からいしか発揮できなかったと思う。部品の調達能力があってはじめて量産という言葉を使う資格があると実感した。

ジグの部品加工は飯村精密(株)にお世話になった。営業の安藤さんに納期を聞かれると「明日にでも欲しい」と身体全体からオーラを出しながら「なるべく早くたのみます」と毎回答えていた。安藤さんもこちらの窮状をわかっておいでで、ずいぶん融通をきかせてくださったようだ。

8. マクロアセンブリ, 4 バレルアセンブリそして SCT/TRT 一体化

建設スタート時には日本グループは第 2 シリンダーへのモジュール取付け (macro-assembly) も分担していた。そして残り三つのシリンダーはオックスフォード大学が分担することになっていた。図 7 から判るように数 mm あいた空間に曲線を描くようにモジュールを正確に移動する必要があるため、ジグを使っても手動で出来る範囲ではないと悟り、早々にロボットを検討した。ロボットというすぐ異常動作による破壊が頭に浮かぶので、安全で必要最小限の動きと機能に絞った設計をした[6]。もっとも重要なソフト開発は筑波大学の大学院生たちの協力を得てなんとか使える目処が立った結果、オックスフォード大学でも使ってもらえることになったので、もう一台作って支給した。オックスフォード大学では彼らなりに使いやすいように改造して一番モジュールの少ない第 1 シリンダー (モジュール 384 台) からマクロアセンブリを行った。初めてだったので予定の倍の 3 ヶ月掛かったが、無事終わってロボットの有用性が証明された。図 17 は第 1 シリンダー (直径 640mm) のロボットによるマクロアセンブリの様子である。

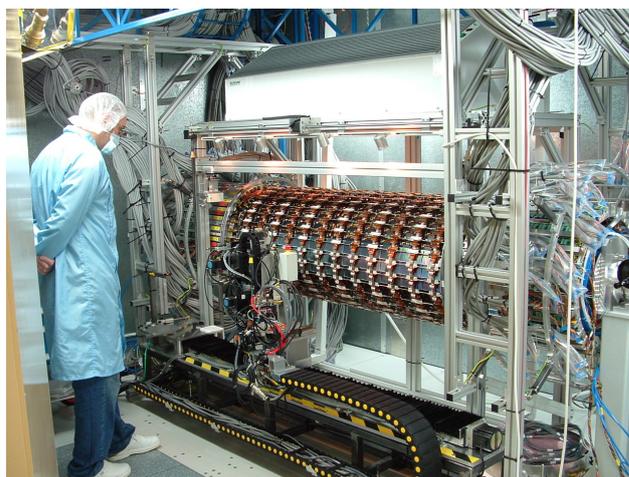


図 17 第 1 シリンダーにロボットがモジュールを取付け中
この部屋は動作テストのときは冷凍室にもなる。

諸般の事情ですべてのマクロアセンブリをオックスフォード大学で行ってもらい、2004 年 8 月から始めて 2005 年 7 月 27 日に無事にロボットの役目を終えた。結局 2112 台取付けてダメにしたモジュールは 5 台だけで、ロボットが直接関係したのは 0 台だった。ハードだけでは不可能で、オ

ックスフォード大学の色々な準備が優れていた結果だと思う。おまけにロボットの制御に使っている PLC の言語が日本語にもかかわらずやり遂げたオックスフォード大学にここで敬意を表したい。

マクロアセンブリを終えた 4 種類のシリンダー（直径 640mm , 800mm , 960mm , 1120mm ）を一体化させてバレル SCT 本体を完成させる作業（4 barrel assembly）はおもにジュネーブ大と UK-ラザフォードのグループが CERN で行った。図 18 はマクロアセンブリ兼輸送用架台に固定されたシリンダーの回転軸を両側からアームで支えて架台から外すために高さ調整をしているところである。シリンダーの回転軸を両側のアームで支えたら、架台を撤去して左に見える仮組台をシリンダーの方へ移動する。所定の場所に来たらシリンダーの荷重を回転軸から仮組台に移して固定し、回転軸を残して仮組台を元の場所に戻す。次にアームから回転軸を外して次のシリンダーの回転軸を支える。これを繰り返して 4 層を一体化させる。シリンダーの両側からはモジュール 1 台ずつから信号出力用の光ファイバーケーブル 2 本と ASIC チップへの電源供給やコミュニケーション用の LMT (low mass tape) と呼ばれる特殊なケーブル 1 本が 1m ~ 1.5m 出ているので最終設置まではそれらを保護する必要がある。仮組台にすでに挿入されたシリンダーのケーブル類が放射状に仮止めされているのが見える。

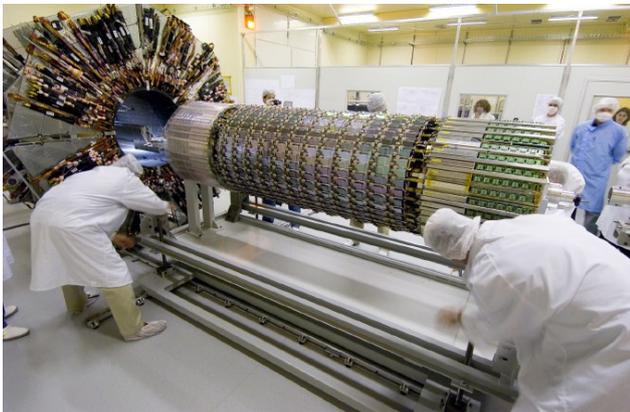


図 18 第 2 シリンダーの挿入準備中（写真は CERN 提供）

TRT と SCT の一体化は 2006 年 2 月に行われ、KEK のメンバーも参加した。図 19 はバレル SCT を片持ち梁 (cantilever stand) に載せて、バレル TRT を床に設置されたレールで導いて挿入させているところである。図 19 に見える ISSS (insertion services support structure) は TRT と SCT の一体化からアトラス測定器に設置するまで SCT から出たサービス類を仮収納するものであり反対側にもある。この ISSS は日本製で、すべて現物合わせで収納しないといけないので、いろいろ悩んだ末にパンチングメタルと呼ば

れる穴付きアルミ板に 100 円ショップで見つけた細めのネジリッコ (ガーデニングタイ) を通して固定するのを提案した。さすがにガーデニングが盛んなところだからなのか？すんなりと受け入れられた (ハイテクの裏にローテクの支えあり)。

一体化作業は基本的には 4 バレルアセンブリと同じである。この cantilever stand は KEK が設計を担当したので、KEK のメンバーがレンチを持って SCT の位置調整も担当した。そして SCT の荷重を cantilever stand から TRT に移して位置を微調整後に一体化を完了した。TRT は trolley の両脇に取り付けられたレールに載って移動出来るようになっている。このレールは LAr クライオスタットの内壁に設けられた Inner detector 据え付け用のステンレスレールと同じであり、trolley のレールとクライオスタットのレールを連結した後 TRT を滑り込ませて据え付ける。2006 年 8 月に無事据え付けられた。それから 17 ヶ月後にサービス類の接続などすべてのハードの準備が終了した。

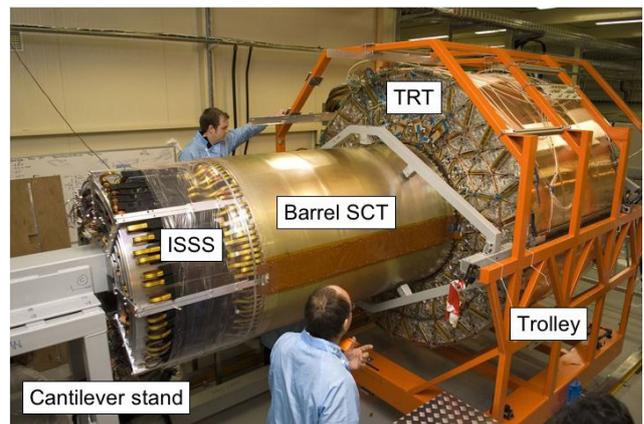


図 19 バレル SCT と TRT を一体化（写真は CERN 提供）

9. おわりに

開発開始から現在までのバレル SCT の時系列を簡単に追ってみると、

- 1994 年アトラス日本シリコングループ発足、
- 1996 年から本格的な開発を開始、
- 1996-2000 年 設計・試作・測定、熱設計と試験、耐放射線テストなどの技術開発、
- 2001 年 10 月からハイブリッド回路基板の組立開始、
- 2001 年 11 月からモジュールアセンブリ開始、
- 2001 年 12 月 13 日 Site Qualification Review で日本でのモジュールの生産を承認、
- 2002 年 2 月 13 日モジュールの量産を開始、

- 2005年3月にハイブリッド回路基板の組立終了,
- 2005年3月にモジュールアセンブリ終了,
- 2005年7月マクロアセンブリ終了,
- 2005年12月4層バレルアセンブリ終了,
- 2006年2月SCTとTRTのドッキング,
- 2006年5月地上でのSCT/TRTの合同テストで宇宙線の飛跡を観測,
- 2006年8月SCT/TRTをアトラス測定器に据え付け,
- 2007年2月ISSSを分解,
- 2007年2月アトラス測定器内のSCT用ケーブル配線終了,
- 2007年5月SCTからカウンティングルームまでの配線終了,
- 2007年12月SCT冷却関係の作業ほぼ終了,
- 2008年1月以降SCTのあらゆる性能検証作業,

となり,グループ発足から実に14年の歳月が過ぎようとしている。そして世界中の研究者たちが待ち望んだ実験開始を迎える時が近い。技術屋としても待ち遠しい限りである。

以下のリストはモジュールアセンブリに関わった実働部隊の人たちである。

[スタッフ]

KEK: 池上陽一, 高力 孝, 寺田 進, 海野義信,
近藤敬比古

筑波大学: 原 和彦

[当時大学院生だった人たち]

筑波大学: 中山貴司, 谷崎圭祐, 小林博和, 秋元 崇,
荒井信一郎, 新聞秀一, 加藤陽一, 千石大樹,
皆川真実子, 桑野太郎

岡山大学: 留田洋二, 伊藤彰洋

京都教育大: 河内知己

スタッフ6人と2年ごとに入れ替わる学生さんでよくここまで出来たと感心するが, 実はその何十倍もの人たちの支えがあったことを忘れません。ここに多くの人たちからいただいた温かいご支援と, 心の支えであった家族に感謝します。

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 97-17 (1997).
- [3] Y. Unno, *et al.*, ATLAS silicon microstrip Semiconductor Tracker (SCT), Nucl. Instr. Meth., **A453** (2000) 109-120.
- [4] The KEK technology prize 2000, KEK Internal 2001-13, February 2002, A/H/M/R/D.
<http://www-eng.kek.jp/news/t-prize/papers/h12-kr.pdf>
- [5] T. Kondo, *et al.*, Construction and performance of the ATLAS silicon microstrip barrel modules, Nucl. Instr. Meth., **A485** (2002), 27-42.
KEK preprint 2001-162, January 2002, H.
- [6] S. Terada, *et al.*, Design and development of a work robot to place ATLAS SCT modules onto barrel cylinders, Nucl. Instr. Meth., **A541** (2005) 144-149.