

## ■ 研究紹介

# 新 ATLAS ピクセル最内層「IBL」の建設

CERN

生出 秀行

Hideyuki.Oide@cern.ch

KEK 素粒子原子核研究所

田窪 洋介

Yosuke.Takubo@cern.ch

2014 年 (平成 26 年) 8 月 8 日

## 1 はじめに

LHC は 2 年間のシャットダウンを経て、エネルギーを 13-14TeV に、ルミノシティを  $1 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  に増強して、2015 年から再開される (Run2)。さらに、2019 年から計画されている Run3 においては、ルミノシティは  $2 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  になる予定である。2022 年まで LHC を運転した場合には、最終的に ATLAS 検出器において  $300 \text{ fb}^{-1}$  以上のデータを取得することになる。

現行の ATLAS 内部飛跡検出器はビーム衝突点に近い側から、ピクセル検出器、シリコン検出器、TRT (Transition Radiation Tracker) で構成されている。2023 年以降に HL (High Luminosity)-LHC への加速器のアップグレードが計画されているが、LH-LHC において現在のシリコン検出器は放射線損傷に耐えられないだけでなく、TRT は事象レートに対応できない。そのため、HL-LHC では、ATLAS 内部飛跡検出器をすべて新しいシリコン検出器に取り換える予定になっている。

しかし、HL-LHC 以前においても Run3 を念頭に、ピクセル検出器の改良がこれまでの懸案事項となっていた。元々、ピクセル検出器は  $1 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  のルミノシティに対応するように設計されているため、Run3 においてルミノシティが  $2 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  になると、設計上、性能の保証外となる。特に、最内層では、FE (Fronnd-End) チップを制御するために各センサー・モジュールに実装されている ASIC のデータ転送帯域が不足し、検出効率が維持できなくなる。

以上の理由から、2012 年から 2014 年にかけての LHC のシャットダウン (LS-1) 期間中に、既存のピクセル検出器の最内層のさらに内側に、新たにピクセル検出器をインストールすることになった (図 1)。この新規に追加する層は Insertable b-Layer (IBL) [1] と呼ばれ、LS-1 における ATLAS 検出器のアップグレードの主眼である。IBL は日本を含む

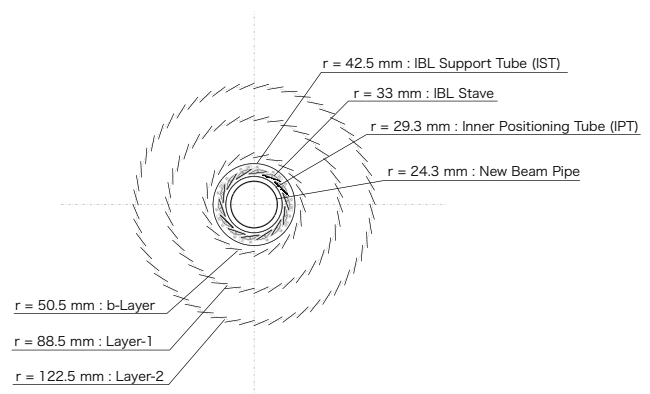


図 1 既存のピクセル検出器と IBL の配置。

15 カ国・43 の研究機関が参加する予算規模約 10 億円のプロジェクトである。

IBL は名前の示す通り、ビームパイプごと組み立てられたパッケージを、既存のピクセル検出器の内側に挿入する方式が大きな特徴である。そのため、既存のピクセル検出器とは完全に独立に組み立てられるため、測定器としての概念は「ピクセル検出器の第 4 層」ではあるが、一方で最新の技術を取り入れている。センサー、FE チップ、冷却方式、サービス、DAQ など、ほぼすべての要素が既存のピクセル検出器とは異なっており、技術的にはまったく新しい検出器である。

多い事象数に対応するという第一の目的を強調したが、IBL は当然、物理測定のための能力、特に  $b$  タグの性能向上に大きく貢献する。IBL によって、衝突点により近い  $r = 33 \text{ mm}$  の位置から検出できるようになるため、飛跡とバーテックスの再構成能力は大幅に向上し、結果として  $b$  タグ性能の向上が見込まれる (図 2)。IBL は Run2 で測定すべきもっとも重要な物理の一つである  $H \rightarrow b\bar{b}$  など、 $b$  タグが必要となる物理に大きく貢献することは間違いない。

本稿では 2014 年 5 月に ATLAS 検出器に無事インストールされた IBL について紹介する。

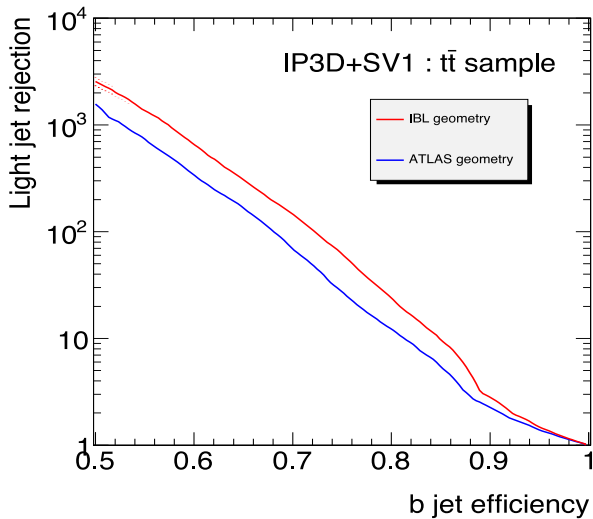


図2 IBL有り無しの場合の $tt$ 事象における $b$ タグの選択効率と軽いジェットの除去効率のシミュレーション結果。

## 2 IBLの概要

前節でも述べたように、IBLは既存のピクセル検出器の最内層のさらに内側にインストールされる。しかし、既存のピクセル検出器の最内層とビームパイプとの隙間はたった8.5mmであるため、そのままではIBLを挿入することは不可能である。そのため、IBLをインストールするために、ビームパイプを29mmから23.5mmの内径のものに置き換えることになった。しかし、それでも14mmの隙間にビームパイプと共に、ピクセル層を挿入するのは至難の業である。

限られた隙間にIBLを挿入するために、IBLでは検出器をビームパイプと一体型で組み上げ、その後、既存のピクセル検出器の内側に挿入する(“Insertable”)という方式を採用した。

IBLでは $n^+$ -in- $n$  プラナー・センサーと3Dセンサーの2種類のセンサーを使用する。センサーのピクセル・サイズは $50 \times 250 \mu\text{m}^2$ で、既存のピクセル検出器のピクセル・サイズである $50 \times 400 \mu\text{m}^2$ と比較すると、その大きさは約60%である。それぞれのセンサーはFEチップとバンプ・ボンドによって接続され、モジュール・フレックスと呼ばれるフレキシブル基板を装着することでモジュールを形作る。

IBLの検出器部分は、ステープと呼ばれるセンサー・モジュールが搭載された $74.8 \times 1.88 \text{cm}^2$ の長方形の細長い板を円筒上に14枚配置することで構成されている。IBLステープではビーム軸方向について中央部分の75%の領域にプラナー・モジュールを使用し、前方と後方の25%の領域に3Dモジュールを使用している。IBLは全体で12Mピクセルを有し、これが既存ピクセル検出器の約80Mピクセルに新たに加わることになる。

14枚のステープはビームパイプの外側に配置されているカーボンファイバー製の筒(IPT: IBL Positioning Tube)の周りにビームパイプを覆うように設置される。IBLの検出可能範囲は $|\eta| < 3.0$ であり、ATLAS内部飛跡検出器で一般的な検出範囲である $|\eta| < 2.5$ よりも広く取ってある。衝突点からIBLまでの輻射長は動径方向で1.7% ( $X/X_0$ )である。

IBLにおける非常に重要な要素の一つに冷却がある。IBLはビーム衝突点の最近傍に設置されるため、2020年まで運転した場合、センサーの放射線損傷は1MeV中性子に換算して $5 \times 10^{15} n_{\text{eq}} \text{cm}^{-2}$ にも達する。そのため、逆アニール効果によるセンサーの性能劣化と漏れ電流による発熱を抑制するため、運転初期には $-15^\circ\text{C}$ に、 $5 \times 10^{15} n_{\text{eq}} \text{cm}^{-2}$ の放射線損傷を受ける運転時期には $-40^\circ\text{C}$ 程度に冷却しなければならない。

さらに、IBLをATLAS検出器ヘインストールした後に、ビームパイプの中を超高真空にするために、ベイクアウトという作業を行う。ビームパイプの内側にはあらかじめ不揮発ゲッター材(Ti/V/Crの合金)が蒸着されている。これを真空状態で加熱することで、ゲッター材に吸着されている不純物分子を追い出す(ベイクアウト)。ベイクアウトにより再び不純物分子吸着が可能な活性化したコーティング面を作り出し、 $10^{-7} \text{Pa}$ の超高真空を実現する。このベイクアウトでは、 $200^\circ\text{C}$ を超える熱を加えるため、ビームパイプから平均8mmの距離に設置されているIBLを高温から守るためにも強力な冷却が必要となる。

既存のピクセル検出器では $\text{C}_3\text{F}_8$ 冷却を使用しているが、この冷却方式では約 $-15^\circ\text{C}$ までの冷却能力しかないため、新たな冷却システムを導入する必要がある。そこで、IBLでは $\text{CO}_2$ 気液2相冷却方式( $\text{CO}_2$ クーリング)を採用した。 $\text{CO}_2$ クーリングは冷却効率がよく、少ない接触面積で効率よくセンサー・モジュールを冷却することができる。そのため、冷却パイプの径を小さく抑えることが可能で、物質量の低減につながるという利点もある。

IBLのパッケージ内部は結露を防ぐために、冷却時は窒素を流して湿度を3%以内に保つようにしてある。

それぞれのステープの両端には、電圧や制御信号を供給するためにサービス・ケーブルが接続される。サービス・ケーブルは銅配線できており、ピクセル検出器のエンド・キャップ領域よりも外に配線を引き回すために5.2mの長さがある。そのため、 $-40^\circ\text{C}$ に冷却してある運転時とベイクアウトの際の温度差による銅線の熱膨張を考慮しておく必要がある。以上の理由から、ステープとサービス・ケーブルの間にベローズ的な役割を果たす波型のフレキシブル基板が使われている。さらに、サービス・ケーブルはビームパイプに沿ってまっすぐ配置されるのではなく、うねりをつけて長さに余裕を持たしてある。

サービスクーブルは電圧供給や温度・湿度モニター用のケーブル(電源ケーブル)と、FEチップの制御・読み出し用のケーブル(データ・ケーブル)の2つの系統を持っている。電源ケーブルは最終的にHV、LV、モニター用システムにそれぞれ接続される。データ・ケーブルはまず、パレル電磁カロリメータの断面部に設置されてある光電変換器に接続される。ここでFEチップ用の信号は電気信号を光信号に変換された後、光ファイバーで約80m光路長離れたDAQエレクトロニクスまで運ばれる。

以下の章では「センサー・モジュールの製造」、「ステープの製造」、「IBLの組み上げ」、「インストール作業」に分けて、それぞれの活動を紹介する。

### 3 センサー・モジュールの製造

#### 3.1 IBLモジュールの構成要素

IBLモジュールは図3に示す通り、大きく分けて、センサー、FEチップ、モジュール・フレックスから構成される。ここではこれらの構成要素を紹介する。

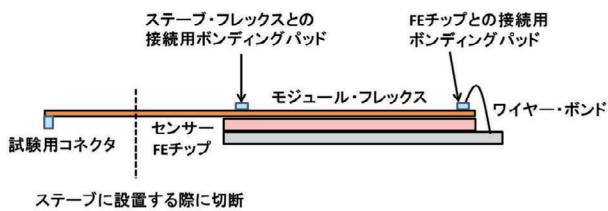


図3 IBLモジュール断面の概念図。

#### センサー

IBLでは第2章で紹介した通り、 $n^+$ -in- $n$  プラナー・センサーと3Dセンサーの2種類のセンサーを用いる。表1にIBLモジュールに使用したセンサーの特性をまとめた。

$n^+$ -in- $n$  プラナー・センサーはステープ中央の75%の領域に使用され、飛跡検出において主要な役割を担う。 $n^+$ -in- $n$  プラナー・センサーは $n$ 型のバルク領域に対し、センサー面にグラウンド電極のための $n^+$ インプラントを配置し、裏面にHV電極のための $p^+$ インプラントを配置している。

ピクセル・センサーには端部に表面と裏面の高電圧を分離するための不感領域がある。そのため、既存のピクセル検出器ではモジュールをステープに配置する際に、高さ方向( $r$ 方向)にセンサーのオーバーラップを設けることで、ビーム軸方向の有感領域が繋がるようにしている。しかし、IBLはビームパイプも含めて14mmという限られたスペースに挿入しなければならないため、高さ方向にモジュールを重ねて配置することが不可能である。

以上の理由から、IBLではより不感領域の少ないセンサーを開発した。 $n^+$ -in- $n$  プラナー・センサーにはセンサー端部

表1 IBLセンサーの特性。

	プラナー	3D
ピクセル・サイズ ( $\mu\text{m}^2$ )	50×250	50×250
センサー・サイズ ( $\text{mm}^2$ )	41.32×18.59	20.45×18.75
厚み ( $\mu\text{m}$ )	200	230
バルクの型	$n$ 型	$p$ 型

にある高電圧の分離構造が裏面に配置されている。そのため、表面のセンサー構造を高電圧の分離構造を越えてセンサー端部に近づける事により、ピクセル有感領域を広げて不感領域の削減に努めた。既存のピクセル検出器に使用されているセンサーでは端部の1,100 $\mu\text{m}$ が不感領域となっていたが、IBLでは200 $\mu\text{m}$ まで不感領域が圧縮されている。

$n^+$ -in- $n$  プラナー・センサーは既存のピクセル検出器に使用されており、その特性は既によく理解されている。製造は現在のピクセル検出器同様、ドイツのCiSという会社が担当した。

3Dセンサーはステープ両端の25%の領域に使用されている。3Dセンサーではプラナー・センサーのようにセンサー面の両側にHVを掛けるのではなく、 $p$ 型のセンサー・バルクに対してグラウンド電極のために $n^+$ を、HV電極のために $p^+$ のインプラント電極をバルク内に垂直に配置することによって空乏化を実現する。電極は50 $\mu\text{m}$ の間隔で配置されているので、プラナー・センサーに比べると、はるかに低い電圧で全空乏化できるのが大きな特徴である。たとえば、放射線損傷を受けていない状態で、全空乏化電圧は僅かに6V程度である。以上の理由から、放射線損傷に対して強いとされており、次世代の高エネルギー実験を担うセンサーとして有力視されている。

3Dセンサーの製造はイタリアのFBKと、スペインのCNMが担当した。センサーのサイズは技術的な歩留まりを考慮して表1の通り、プラナー・センサーの半分になっている。なお、高エネルギー実験では3Dセンサーを本格的に実機に使用するのにはIBLが初めてとなる。

#### FEチップ

IBLではFE-I4Bと呼ばれるFEチップを新たに開発した。センサー・モジュールを製造するにあたり、センサーとFEチップを接続するためのバンプ・ボンドはコスト内の大きな割合を占める。例えばIBLではバンプ・ボンドに掛かる費用はモジュール製造コストの約25%である。このコストはモジュールの個数に比例しており、一般的にモジュールの面積には比例しない。そのため、大面積のFEチップを開発できれば、その分だけコストを削減できる。

HL-LHCにおけるATLASピクセル検出器の総取り替えではバンプ・ボンドのコスト低減は大きな課題となってい

る。そのため、FE-I4B チップは HL-LHC におけるピクセル検出器の低コスト化を視野に入れて設計が行われ、 $20.2 \times 18.8 \text{ mm}^2$  の大面積を持つに至った。これは、高エネルギー実験に使用されている FE チップでもっとも大きな面積である。その大きさを比較すると、既存ピクセル検出器の FE チップである FE-I3 ( $7.6 \times 10.8 \text{ mm}^2$ ) と比べて、面積比で 4.5 倍である。

FE-I4B チップは IBM の 130 nm テクノロジーを用いており、チップ当たり  $80 \times 336$  のピクセル・ブロックが埋め込まれている。そして、各ピクセル内でセンサーからの信号を増幅し、デジタル化を行い、最終的に電荷情報として 4 ビットの TOT (Time-Over-Threshold) 情報を出力する。IBL で使用する際には 1 つの電源ライン以外は、クロック、コマンド、データの 3 ラインのみが外部と接続されており、たった 3 つの制御ラインで FE-I4B 内の 26,880 ピクセルすべてを読み出すことができる。

#### モジュール・フレックス

モジュール・フレックスは 2 層のフレキシブル基板で、FE チップの制御のための信号線や LV ライン、センサーの HV ラインが実装されている。モジュール・フレックス上のボンディング・パッドは、FE チップやステープ・フレックスの信号線とワイヤー・ボンディングで接続される。センサー・サイズの違いから、プラナー・モジュール用と 3D モジュール用で大きさの異なる 2 種類のモジュール・フレックスが開発された。性能評価において試験システムと接続できるように、モジュール・フレックスにはテール部分にコネクタが実装されている。これは、モジュールをステープに設置する際には不要なので、テールの途中で切断することになる。

### 3.2 モジュールの製造工程

IBL モジュールはジェノバ大学とボン大学が製造を分担した。モジュールの製造手順は以下の通りである。

まず、センサーと FE チップをバンプ・ボンドで接続することでベア・モジュールを作成する。プラナー・センサーに比べて 3D センサーの大きさは半分なので、プラナー・センサーには 2 つの FE チップを、3D センサーには 1 つの FE チップがバンプ・ボンドされる。バンプ・ボンドは IZM というドイツの会社が担当した。

次に、エポキシを用いてモジュール・フレックスをベア・モジュールのセンサー側に貼り付ける。その際、特に FE チップとのワイヤー・ボンディング部分には空気が入らないように、接着材が固まるまではプラナー・モジュールで 500g を、3D モジュールで 350g の重りを載せておく。

最後に、FE チップとモジュール・フレックスを接続するために、FE チップ毎に約 90 本のワイヤーを打つ。ワイヤーには Al(99%)-Si(1%) を使用している。ここで、ワイヤーの接続強度を調べるために、FE チップ上で実際には使用しないパッドに余分にワイヤーを打ち、ワイヤーを引き抜く際に必要となる力を測定する。IBL では 5g 以上の引き抜き強度を要求している。

完成したモジュールはアルミ板に固定し、透明なプラスチック・カバーを取り付けた上(図 4)で、次に紹介する性能評価試験を行う。

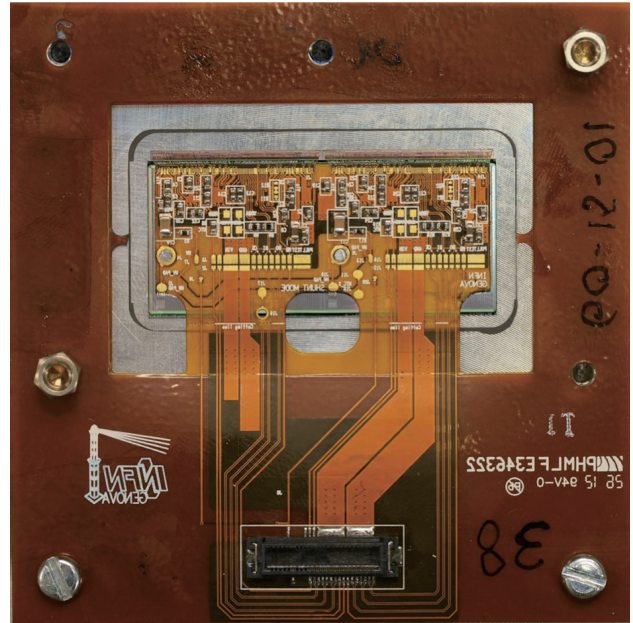


図 4 プラナー・モジュール。

### 3.3 性能評価試験

モジュールを製造すると、すぐに性能評価試験を行う。試験項目としては、センサー試験、FE チップの動作試験、放射線源を用いた試験、温度耐性試験を行う。

まず、センサーの特性を IV 測定で評価する。シリコンセンサーでは  $p-n$  接合に逆バイアス電圧を掛けることで、空乏層が広がる。そして、全空乏化したところで、電極間に流れるもれ電流はほぼ一定になる。そして、さらに逆バイアス電圧を上げていくと、電子なだれやトンネル効果によって、急激にもれ電流量が増加する。この時の電圧を降伏電圧 (breakdown voltage) といい、もしセンサーに何らかの損傷があると、この降伏電圧が全空乏化電圧よりも低くなり、センサーとしては機能しない。IBL ではプラナー・センサーに対して 80V 以上、3D センサーに対して 20V 以上の降伏電圧を要求した。なお、この降伏電圧は放射線損傷と共に増加し、IBL では  $5 \times 10^{15} n_{\text{eq}} \text{ cm}^{-2}$  の放射線損傷を受けた後に、プラナー・センサーで 1000V 以上、3D センサーで 180V 以上となるように設計されている。

FE チップにはセンサーの信号を増幅するアナログ部分と

コンパレータを介した後のデジタル部分に分けられる。FEチップの動作試験ではアナログ部分とデジタル部分に疑似信号を入力することで基本動作の確認を行う。

FEの動作が確認できたところで、 $^{241}\text{Am}$ からのX線を用いた試験を行う。この試験ではセンサーとFEチップの応答を確認すると共に、隣のピクセルへのバンプのはみ出しや、バンプの接続不良を確認する。

IBLでは以上の試験において、不良ピクセルの数が1%以下であることを要求した。

最後に、モジュールの温度耐性を確認する。もし冷却しなければ、モジュールはFEチップの発熱のためにLVを供給した状態で $50^{\circ}\text{C}$ 以上になる。IBLは $-40^{\circ}\text{C}$ から $-15^{\circ}\text{C}$ での運転が想定されているが、もし何らかの理由で冷却系が止まった場合、一時的にモジュールの温度が上昇することが考えられる。そのため、温度耐性試験では約1日かけて $-40^{\circ}\text{C}$ から $+40^{\circ}\text{C}$ に10回ほど温度を上下させて、不具合が発生しないかどうかを確認する。

なお、ジェノバ大学における性能評価試験には東京工業大学の本橋君が参加した。IBLでは最終的に、スペアを含めて18枚のステープを製造したが、それに必要となる360個のモジュールの内、約20%の試験を本橋君が担当した。

### 3.4 バンプ・ボンドの不具合

約200個のモジュールを製造した段階で、30%のモジュールでバンプ・ボンドの不具合が判明した。センサーとFEチップの不具合も合わせると、全体の60%のモジュールで不具合があるという事態だった。この問題はモジュール製造が始まってすぐに判明したため、プロジェクトの継続を左右しかねない問題となった。

詳しい調査の結果、バンプ・ボンドに使用する溶液がバンプ間に残ってしまったためであることが分かった(図5)。

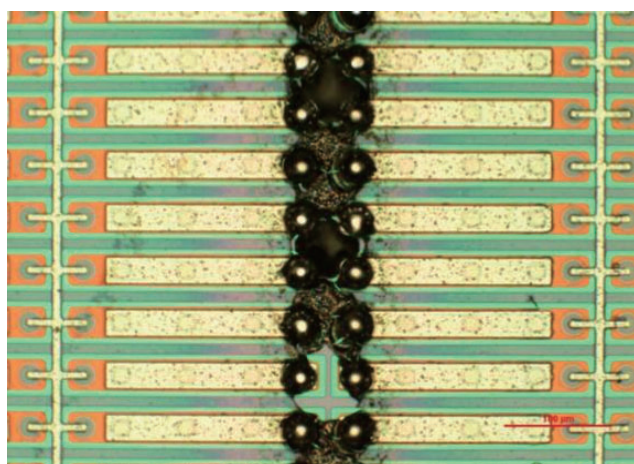


図5 バンプが外れていたモジュールのセンサー側のボンディング・パッド。黒ずんでいるところにリフロー用の溶液が残ってしまっている。

バンプ・ボンドはセンサーとFEチップの接続パッドにAgSnのバンプを載せた後、センサーとFEチップの距離を調整しながらバンプを溶かして溶着する。その際、溶液(ハンダ・フラックス)を塗布し、金属面の酸化膜を溶かすことでハンダが金属面に溶着するのを助ける。しかし、溶液が多すぎるとフラックス自体がセンサーとFEチップの距離を制御する際の物理的抵抗となり、バンプが付かない。

この問題を根本的に解決するため、IZMではリフローの際に溶液を必要としないボンダーを最終的に使用することにした。しかし、問題解決までに約6ヵ月を費やしたために、IBLの開発スケジュールは大幅に遅れることになった。

### 3.5 製造実績

先に紹介したとおり、バンプ・ボンドの不具合のために、約6ヵ月間製造がストップしたものの、その後は順調に製造数を伸ばし、2013年11月にすべての製造を完了した。IBLにおけるモジュールの製造実績を図6にまとめる。図6のL1の製造バッチの欄に示されている通り、バンプ・ボンドの不具合のためにモジュール製造の歩留まりは当初プラナー・モジュールで40%、CNMの3Dモジュールで15%だったが、最終的にはプラナー・モジュールで75%、3Dモジュールで60%以上にまで改善した。バンプ・ボンドの問題を解決した後の歩留まりの主原因はFEチップの不具合であった。

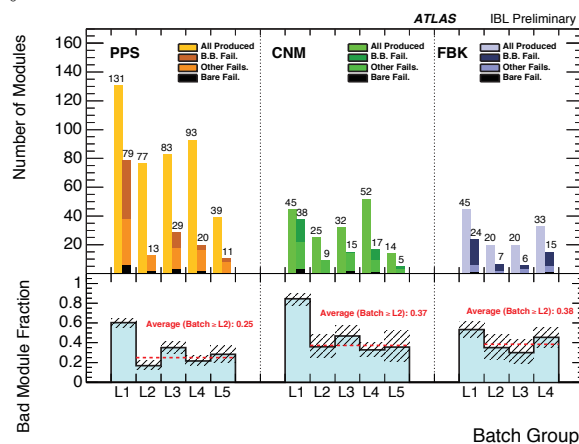


図6 製造バッチ毎のIBLモジュールの製造実績。PPSはプラナー・モジュールを、CNMとFBKは3Dモジュールを示している。上段は製造個数と不良モジュールの個数で、下段が歩留まりを表している。

## 4 ステープの製造

### 4.1 製造工程

IBLステープはジュネーブ大学が製造を担当した。図7のようにIBLステープは大きく分けると、ステープ基板、ステープ・フレックス、そして先に紹介したモジュールに大別される。

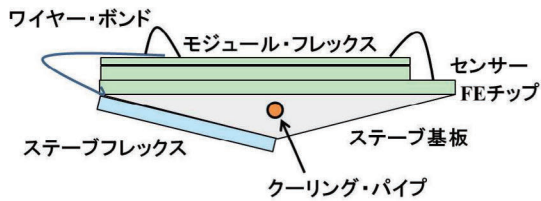


図7 IBL ステープ断面の概念図。

ステープ基板は  $74.8 \times 1.88 \text{ cm}^2$  のカーボン・フォームをベースに、三角形の断面積を持つ。内部にはチタンの冷却パイプが配置されている。全体の物質量は冷却パイプも含めて  $0.6\% (X/X_0)$  に抑えられている。さらに、ステープを構造体に円形に設置するためには、ステープ基板の  $r$  方向のゆがみは  $350 \mu\text{m}$  以内に納まっていなければならない。

モジュールをステープ基板上に載せる前に、ステープ基板の斜辺部分にモジュールに信号や電源を供給するためのステープ・フレックスを接着する。このステープ・フレックスは物質量を低減するために、FEチップ用の電源(LV)ラインがアルミ配線で出来ている。

前述のとおり、IBL は限られたスペースゆえに高さ方向にモジュールを重ねることができない。そのため、不感領域を最小限に抑えるために、各モジュールは  $350 \mu\text{m}$  以内のギャップ間隔でステープ基板上に並べる。その際、FEチップから発せられる熱を効率よく除去するために、ステープ上に放熱グリスを塗布し、その上にモジュールを設置する。そして、ステープ基板上の放熱グリスを塗布していない箇所にエポキシを塗布し、モジュールとステープを接着する。

フレックス内の信号線の数を最小限に抑えるために、LVとHVは4FEチップを1つのグループとして電源ラインが共通化されている。このまま何もしないと、各HVグループ毎に電源をオン・オフした際に、異なるHVグループに属する隣り合うセンサーの端面同士で放電を起こしてしまう。そのため、異なるHVグループに属するモジュールの境界には  $100 \mu\text{m}$  厚のカプトンの分離層を設置してある。

モジュールをステープ基板上に設置した後、各モジュールとステープ・フレックスの信号線を接続しなければならない。ステープ基板の斜辺に設置されているステープ・フレックスからはステープ上面に向かって、各モジュールと接続するためにフレキシブル基板の足が伸びている。この

フレキシブル基板とモジュール・フレックスをエポキシで接着し、各信号線はワイヤー・ボンディングで接続する。

図8にIBLステープを示す。一見しただけでは識別できないが、中央部分にプレーナ・モジュールを、前方と後方の4モジュールに3Dモジュールが使用されている。

製造されたステープはCERNに輸送する前に、ワイヤーの打ち間違えや動作不良のモジュールを発見するために簡単な性能試験を行う。この試験はKEKとジュネーブ大学が担当し、室温においてFEチップの動作試験とセンサーのIV測定を行った。

この試験で動作不良のモジュールが見つかったら、即座に新しいモジュールに置き換えて、再度試験を行う。最終的に18枚のステープに対して、約5%のモジュールを置き換えることになったので、ピクセル検出器を開発するに当たって、不良モジュールを交換できるデザインにしておくことが如何に重要であるか理解できる。

## 4.2 性能評価試験

ジュネーブ大学で基本性能が保証されたステープはCERNへと輸送され、詳細な評価試験が行われた。当初、試験項目としては、顕微鏡による目視確認の後、FEチップの校正、センサーのIV測定、 $^{241}\text{Am}$ と $^{90}\text{Sr}$ の放射線源を用いた応答試験、宇宙線を用いた応答試験を行った。しかし、次の章で述べるFEチップのボンディング・ワイヤーの腐食が見つかったからは、試験時間の短縮のために宇宙線による試験は省略された。この試験では室温と共に、実機で使用する $\text{CO}_2$ クーリングを用いて、 $-15^\circ\text{C}$ に冷却した状態で試験を行った。

顕微鏡の目視で問題がなければ、簡単なFEチップの動作確認の後に、FEチップ内の制御パラメータを調整することで閾値やTOT値に関する校正を行う。一般的には閾値を常温運転で $3,000e$ に、 $-15^\circ\text{C}$ の低温運転で $1,500e$ に設定する。そして、MIP(Minimum Ionization Particle)がセンサーを垂直に入射した時に得られる電荷量である $16,000e$ に対して、10TOT( $10 \times 25 \text{ ns}$ のパルス幅)が得られるように増幅器を調整する。これらの試験と校正の結果はすべて筆者の一人(生出)が開発したデータベースで一元管理されていて、ウェブ・ブラウザを使ってステープの性能をすぐに確認することができる。

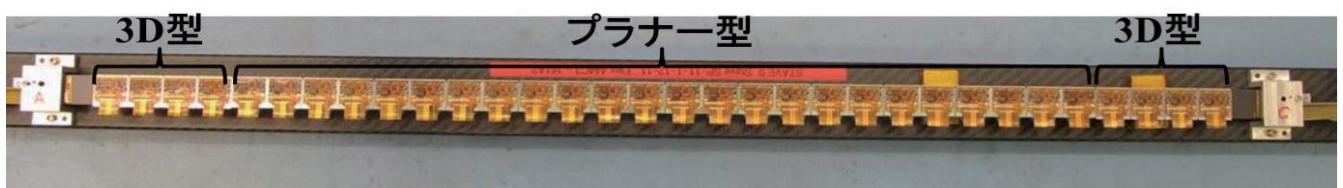


図8 IBL ステープ。

### 4.3 ボンディング・ワイヤーの腐食

ステープの製造が最盛期に差し掛かった 2013 年 9 月、性能評価試験中の 2 枚のステープが凍結し、破損するという事故が起きた。この時、試験は  $-15^{\circ}\text{C}$  で行っていたが、何らかの理由で試験ボックスの蓋が緩み、そこから外気が混入することで結露が起こったためであることが判明した。この問題自体は試験ボックスの蓋をより頑丈なものに置き換えることで解決したのだが、その後、思いもよらないことが発覚してしまう。

凍結したステープに損傷がないか顕微鏡で目視してみると、モジュール・フレックス上のワイヤー・ボンディング用のパッドに腐食物が付着していることが判明した。そのため、念のために凍結していない他のステープも確認したところ、それまで製造した 13 枚すべてのステープで腐食物が見つかった(図 9)。

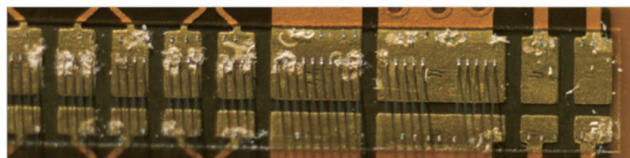
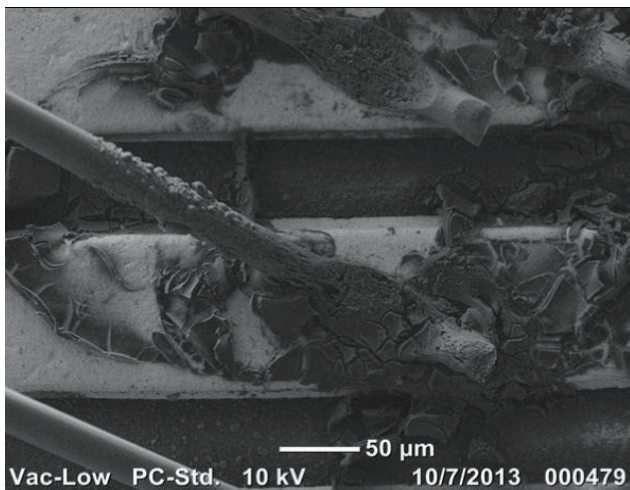


図 9 ボンディング・ワイヤーの腐食。

この問題が発覚したのは IBL を ATLAS 検出器にインストールする 8 ヶ月前だったので、事は非常に重大だった。そのため、すぐに調査のためのタスクフォースが結成された。

腐食物質を調べてみると、その物質は水酸化アルミであることが分かった。これは、ボンディング・ワイヤーに使用しているアルミと水中の水酸基が化合してできたのであろうことはすぐに推察がつく。水の起源としては、ステープの温度耐性試験において温度を  $-40^{\circ}\text{C}$  にした時に結露が起きていたであろうことが分かった。しかし、水酸化アルミを形成するには、塩素やフッ素などの媒介物質が必要となる。実際に腐食物質からもそれらの元素が見つかってい

る。しかし、モジュール・フレックスなどを調べてみても、最後までこれらの媒介物質の混入経路は発見されなかった。

既に IBL のインストールが目前に迫っていたので、対策としては、とにかく結露を起こさないように湿度管理を徹底することにした。ウレタン・スプレーでモジュールをコーティングすることや、ワイヤーの足をウレタン系接着剤で補強するなどの案も出ていたが、作業中におけるワイヤーの切断など、さらなる状況悪化を危惧して何もしないことになった。長期運転において湿度管理のみで腐食が防げるのかどうか完全には保証できないが、この段階においてはこれ以上の対策は事実上不可能であった。

なお、この水酸化アルミは我々の生活に馴染みのある物質である。たとえば、アルミ鍋を使用しているうちに白い物質が付着するが、これが水酸化アルミである。この場合は、水道水に含まれる塩素がアルミと水の化合を媒介している。

### 4.4 腐食ステープの修理

ボンディング・ワイヤーの腐食の防止方法は決まったが、次はどうやって腐食してしまったステープを修理するかが問題となる。IBL ではスペアも入れて 18 枚のステープを製造するが、13 枚が腐食してしまった。実際に実機に使用するのは 18 枚の内の 14 枚だが、それでも 14 枚のステープを用意するためには、どうしても腐食したステープの修理が必要となる。新たにステープを増産するだけのモジュールは既に持ち合わせていなかったのである。

そこで、CERN の DSF (Department of Silicon Facility) で、問題のある 13 枚のステープについて、約 50% のワイヤーを打ち直すことになった。

まず、腐食しているすべてのワイヤーを引き抜き、ボンディング・パッドをクリーニングする。そして、ワイヤーを打ち直すことになるが、モジュールをステープ基板から取り外してワイヤーを打つことは、その数量を考えると不可能である。そのため、ステープごとボンディング・マシンに載せて、ワイヤーを打ち直すという荒業を採用した。

モジュールのワイヤーを打ち直さなければならない箇所は、ステープ基板よりも外側に突き出しているために非常に不安定で、通常であればワイヤーを打つのは至難の業である。そういった状況にも関わらず、数々のワイヤー・ボンディングをこなしてきた DSF のエンジニアだけあって、たった 3 ヶ月ですべてのステープの修理が完了した。

修理されたステープは KEK とジュネーブ大学が試験を担当した。我々は試験システムを DSF のクリーンルームに運び込み、修理後のステープを即座に試験した。この試験で、ワイヤーの打ち間違えているモジュールを 8 個、ワイヤーの打ち直しの際に静電気で FE チップが故障したモ

ジュールを 2 個、センサーがダメージを受けたモジュールを 2 個発見した。ワイヤーを打ち間違っているモジュールは再度ワイヤーを打ち直し、それ以外のモジュールはジュネーブ大学で新しいものに置き換えた。

#### 4.5 製造実績

図 10 に IBL に使用された 14 枚のステープについて、性能評で見つかった不良ピクセルの割合を示す。ステープの腐食という大きな困難があったが、すべてのステープで不良ピクセルの割合は 1% 以下で、IBL の要求を満たしていた。

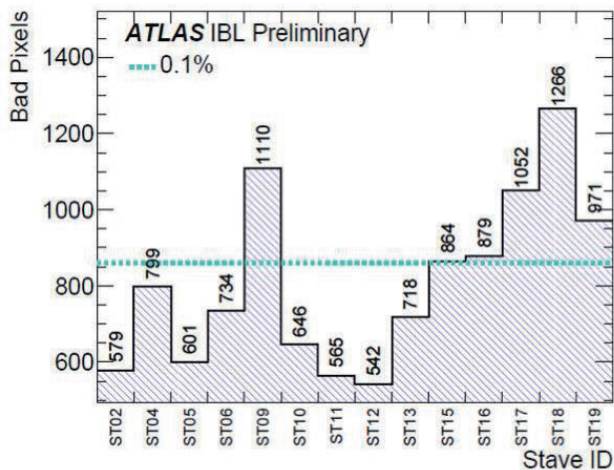


図 10 IBL に使用されたステープ中の不良ピクセルの割合。

### 5 IBL の組み上げ

本来、IBL の組み上げは 2013 年 10 月にも開始されるはずであったが、前述のボンディング・ワイヤーの腐食の問題によって 2014 年 2 月まで持ち越しになった。ATLAS 実験ホールへ IBL を運ぶ期日は 2014 年 5 月 5 日と厳格に決まっており、組み上げ終了後のラッピングにかかる期間を考えると、既にやり直しの効かない時期まで差し迫っていた。このためチームは全体として非常に緊張を強いられる期間が続いた。

ステープを IPT に設置するに当たり、まず 18 枚のステープのうち性能のもっともよい 14 枚を選定する必要がある。さらに、どのステープをどこに配置すべきか考慮しなければならない。IBL では不良ピクセルの数を極力減らすとともに、不良ピクセルができるだけ空間的( $\eta, \phi$ )に一樣に分散するように配置するという方針を採った。これは筆者(生出)の提案・実装によるものである。具体的には、与えられたステープの配置に対して、不良ピクセルの( $\eta, \phi$ )空間における 2 点相関関数を取り、それを一様分布の形状と比較することで非一様度を計算し、ステープの配置の好ましさを定量化するという手順を取った。

しかし、ステープの IPT への設置が始まった 2014 年 2 月時点で、18 枚すべてのステープの性能評価が完了していなかったため、一度に 14 枚のステープの選定と配置を決定することは不可能であった。そのため、1 週間に 2 枚のペースでステープの性能評価試験が進捗していたことに合わせて、次に IPT に載せるべきステープを決めるという方法を取った。つまり、「将来配置されるであろうパターン」の期待値に対し、「もっともよい非一様度を返すステープ」を次に載せるステープとするというものである。最終的な不良ピクセルは、IBL 平均で 0.09% だった。特に、 $|\eta| < 2.5$  の範囲に絞ると 0.07% であった。図 11 に IBL 全体の不良ピクセルの( $\eta, \phi$ )分布を示す。

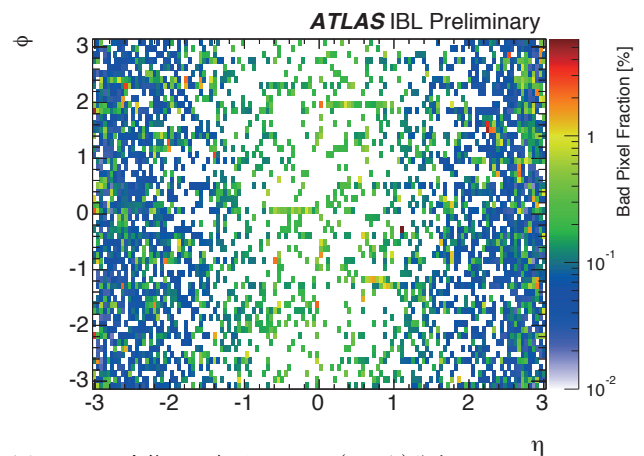


図 11 IBL 全体の不良ピクセルの( $\eta, \phi$ )分布。

設置すべきステープが決まると、まず、冷却パイプをピクセル領域の外に引き出すために、ステープ両端のチタン製冷却パイプを真空中電気溶接によって全長 7m に延長する。最初のステープは 2 月 11 日に溶接されたが、溶接機へ固定するためのパイプの増し締め強度が強すぎたため、冷却パイプが潰れるという事故があった。そのため、溶接作業の確実性を高めるために一週間の見合わせがあった。

冷却パイプの延長が終わると、いよいよ IPT 上の構造体にステープを取り付けることになる。まず、ステープを専用の精密な搭載アームに取り付け、これによって IPT 上に固定する。そして、各ステープの両端に全長約 5.2m のサービス・ケーブルを取り付ける。IBL のパッケージは全長約 7m であるので、サービス・ケーブルの端の約 2m が固定されずに自由になっており、そのままでは既存のピクセル検出器の内部へインストールすることはできない。そのため、インストールの際には、サービス・ケーブルが IBL のパッケージ内に収まるように、コンパクトに巻き固められる。しかし、この巻き付け作業はケーブルに大きな負荷をかけることになる。データ・ケーブルに関しては半径約 4cm で巻きつけなければならず、200 $\mu$ m の径しかないデータ・ケー



ブル内の銅線が断線してしまうのではないかと心配したほどである。

最後に、ステーブの設置作業中に何らかの不具合が発生していないかを確認するために、サービス・ケーブルの終端で読み出しテストを行った(KEK, ジュネーブ大学, SLAC が担当)。この試験において、サービス・ケーブルの接続不良や断線などが見つかり、それらの問題箇所は修正もしくは総取り替えを行った。

ステーブは1週間に約3枚のペースで順調に設置され、3月27日に14枚すべてのステーブの搭載が完了した(図12)。

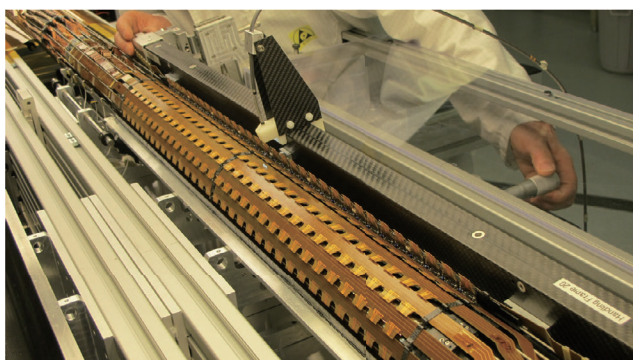


図12 IBLの最後のステーブを搭載時の写真。

## 6 インストール作業

### 6.1 ATLAS 検出器へ挿入

IBLは4月の半ばにはインストールのための準備を終え、5月5日にその日を迎えた。当日は抜けるような素晴らしい青空が広がり、新しい検出器の船出を強く印象づけるものとなった(図13)。

IBLはクレーンを使ってATLASピクセル検出器のある地下約90mまでゆっくりと降ろされた。この際、搬入用の巨大な穴にIBLが吸い込まれていく光景は壮観であった。

IBLが所定の場所に設置されると、早速、既存のピクセル検出器の内側へと挿入が開始された。なお、既存のピクセル検出器もサービス・ケーブルを総取り替えるためにRun1終了後にATLAS検出器から地上に引き出され、サービスの総交換、不良モジュールの修理、光ファイバーの交換といった一連の改修が施された。そして、2013年12月に修復を終え、既にATLAS検出器に再インストールされていた。

既存のピクセル検出器の内側にはIBLの挿入時に検出器を保護するとともに、IBLをスムーズに挿入できるようにIST(Inner Support Tube)と呼ばれる筒が配置されている。IBLとISTとの間には、6.4mの長さに対して1mm以下しかクリアランスがなく、IBLの挿入は決して容易ではない。し

かし、実際の挿入は非常にスムーズに進み、5月7日には挿入を完了した。

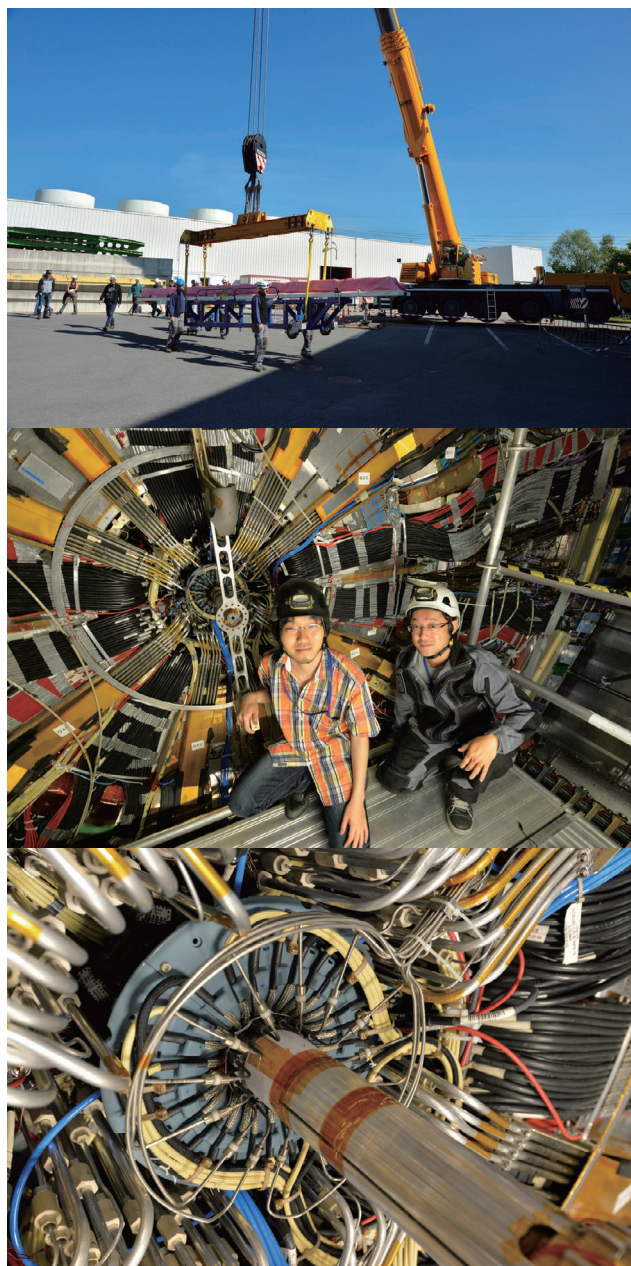


図13 (上): クレーンで地上アセンブリ施設から地下へと運ばれる途中。(中): 電源ケーブルを接続する前に記念撮影。(下): 冷却パイプの取り付けを終えたIBL。周辺に見える既存ピクセル検出器の冷却パイプやケーブルと比較してサービスの精緻さが分かる。

### 6.2 電源ケーブルの接続

IBLの挿入と冷却パイプの取り付けが完了すると次に、検出器から外部まで延びてきているサービス・ケーブル(データ・ケーブルと電源ケーブル)をそれぞれの制御系に接続しなければならない。具体的にはFEチップを制御するためのデータ・ケーブルを光電変換器に接続し、電源ケーブルをHV, LV, モニター用システムにつながる電源延長ケー

ブルに接続する。ここで、電源ケーブルの接続に使用されている 67 ピン・コネクタの接続が頭痛の種となった。

地上における IBL の組み上げ作業中に、ステーブの試験のために、この 67 ピン・コネクタに接続したところ、正しく接続できず、結果的にピンを破損するという問題が発生した。このケーブル自体は直ちに交換されたが、IBL を ATLAS 検出器にインストールした後では、IBL を引き抜かない限りケーブルの交換は不可能である。そのため、果たして確実にコネクタの接続ができるのかという問題が残った。

電源ケーブルの接続に冗長性は一切なく、仮に HV のピン 1 本が繋げない場合、全 FE チップのうち 1% 近くがまとめて使えなくなるという状況になる。そのため、如何に全 28 個のコネクタを確実に接続するかが議論となった。

調査の結果、コネクタの接続時にピンに強いストレスがかかり、許容範囲以上にピンの位置がずれたことが原因であることが分かった。そのため、既に IBL は ATLAS にインストールされていたが、コネクタの製造会社 (AXON Cable) の技術者を呼び、すべての 67 ピン・コネクタの確認と清掃を依頼した。さらに、エキスパートのみがコネクタの取り扱いをするなどの細心の注意を払った。

特にピンの設計位置からのずれについては、コネクタごとに精細な写真を撮り、それを画像解析することで約  $7\mu\text{m}$  の分解能でずれの量を測定した<sup>1</sup>(図 14)。さらに接続の深さについても、合計 2,000 本近くあるすべてのピンが確実に接続する深さを予備のケーブルを用いたテストから統計的

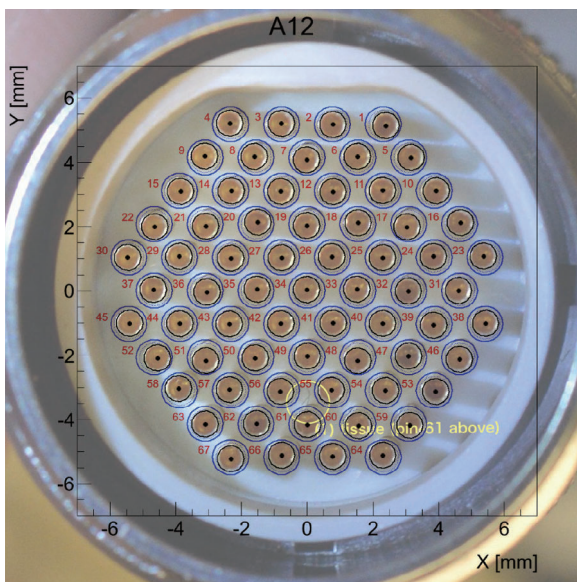


図 14 サービス・ケーブルのコネクタの画像解析の例。

<sup>1</sup>このアイデアは破損が生じた翌日、筆者(生出)が簡易な画像解析コードを作り、コネクタの写真を用いて実際にピンのずれの定量的な測定ができることを緊急ミーティングで示したことで採用されたものである。

に推定し、その基準を遵守するという事も行った。

以上の万全の状態を整えた上で、最終的に筆者の 2 人がすべての電源ケーブルの接続を行うことになった。検出器の運命を大きく左右する作業だけに、この間、我々 2 人は大きなプレッシャーを感じるようになったが、結果的には無事一つの断線もなく全 28 個の 67 ピン・コネクタを接続することができた。

### 6.3 動作試験

電源ケーブルの接続が終わると、検出器側のあらゆる配線の接続と共に、検出器の動作を確認するために評価試験を行った。具体的には電源ケーブルにつながる実機用の HV, LV, モニター・システムを用いて、IV 測定によるセンサーの動作を確認し、温度・湿度モニターを読み出すことでモニター系の接続を確認した。そして、測定器側のデータ・ケーブルに直接、試験用読み出しシステムを接続して FE チップからのデータを読み出すことで、検出器の性能を評価した。この試験は KEK を中心としたジュネーブ大学、SLAC, CERN の合同チームで行った。

この試験によって IBL のすべてのモジュールは正しく動作しているだけでなく、インストール前と同じ性能を維持していることが分かった。これにより、インストールまで数々の困難があったものの、IBL は検出器として完璧に動作していることが保証された。

## 7 最後に

LHC の LS-1 における ATLAS アップグレードの目玉であった IBL のインストールは完了し、一つの大きな山を超えた。本稿で詳述したように、ここに至るまでに多くの困難を伴ったが、「起こらなかつた失敗」も含めて「マーフィーの法則」を乗り越えるために物理屋、エンジニア、テクニシャンが一体となってそれぞれの持ち場で多くの仕事をこなしてきたことを強調したい。すでに Run2 に向けて運用が開始できるためのコミッショニングが始まっている。

本原稿執筆の 2014 年 7 月現在の目下の課題は、IBL を運転温度まで確実に冷却し運転すること、DAQ システムの立ち上げである。9 月にはビームパイプのベイクアウトが控えている。11 月には ATLAS 検出器全体での宇宙線データ取得を行う。この期間を通じて既存ピクセル検出器と統合した 4 層ピクセル検出器としての運用態勢の確立と、検出器としての性能評価を行い、Run2 を迎える予定である。

### 参考文献

- [1] ATLAS Collaboration, “ATLAS Insertable B-Layer Technical Design Report”, CERN-HLCC-2010-013, ATLAS TDR 19, 15 September 2010.