

LHC 実験始動

東京大学 素粒子物理国際研究センター

小林 富雄

tomio@icepp.s.u-tokyo.ac.jp

2010年2月26日

1. はじめに

2009年11月23日、CERNのLHC加速器は初めての陽子陽子衝突に成功し、その瞬間を長らく待ち望んでいた4つの実験(ATLAS, CMS, LHCb, ALICE)も見事に衝突事象をとらえた。この時点では、まだLHCでの加速は行わない重心系エネルギー900 GeVでの衝突であったが、その後12月に入り、Tevatronを超える2.36 TeVでの衝突にも成功し、世界最高エネルギーのコライダーLHCがいよいよ始動した。

これをさかのぼること9年前の2000年11月2日、同じトンネル内に設置されていたLEP加速器が、12年にわたる運転を終えた。この年ヒッグス粒子生成の兆候が強まっていたが、CERNは苦渋の決断をもってLEP運転を打ち切り、直ちにLHC建設へと舵をきったのである。(LEP終了の経緯については、山下了氏による高エネルギーニュース記事[1]に詳しく書かれている。)この時点ではLHCの完成予定は2005年としていたが、その後建設費の約20%の不足や、衝突点付近のビーム収束用四極マグネットの事故やビームパイプ内側のビームスクリーンを接続するplug-in-moduleの折れ曲がり問題などで約3年の遅れが生じた。ようやくCERN所長Robert Aymar氏の任期最後の年2008年9月10日にfirst beam circulationにまで持ち込んだのもつかの間、その9日後に発生した大量のヘリウム流出事故により、さらに1年以上もの時間が復旧、事故対策、再調整についやされることになった。事故調査と復旧計画立案までは、近藤敬比古氏による高エネルギーニュース記事[2]に詳しく報告されているので、私は実際の復旧作業からビーム衝突実験開始にいたるまでの経緯について報告する。

LEPでのヒッグス粒子の解析結果は、最終的には当初いわれていたよりsignificanceが下がり、ALEPH実験のみ115 GeV付近の質量のヒッグス粒子生成を 3σ と報告しているが[3]、他の3実験には有意な兆候は見られていない。4実験合わせた質量下限値は114.4 GeV (95% C.L.)である[4]。その後ヒッグス粒子探索の中心はFermilabのTevatronへと移ったが、LHC実験開始の遅れもあり、すでにヒッグス

粒子の探索領域をどんどんせばめつつある[5]。こういう状況でのLHC実験開始となったわけであるが、今後予想されるLHC運転とヒッグス粒子をはじめとする新粒子、新物理の発見の展望についても簡単に触れてみたい。

2. LHC 加速器ヘリウム流出事故からの復旧

世界中の報道が注目するなかで大成功をおさめた2008年9月10日のfirst beam circulationと9月19日のヘリウム流出事故。これはまさにCERNでの研究が一つの題材ともなっている最近の映画「天使と悪魔」のタイトルをほうふつとさせる出来事であった。19日の午前中、筆者はATLAS実験のある委員会に出席していたが、11時20分過ぎ頃Technical CoordinatorのMarzio Nessiのもとに連絡が入り、多数のマグネットがクエンチを起こしたとのこと。知らせを聞いたある委員の「That's serious!」のひと言が今でも忘れられない。

2.1 LHC 加速器の概要

ここで、まずはLHC加速器の概要を述べておく。LHC (Large Hadron Collider at CERN)計画全体についての最近の解説記事としては、日本物理学会誌2007年12月号に小特集としてまとめられているので、こちらをご覧ください[6]。LHC加速器は、陽子を7 TeVにまで加速して正面衝突させる加速器で、これによりTeV領域の物理を初めて直接見ることが可能になる。

表1にLHC加速器の主要パラメータをまとめた。

表1 LHC 加速器の主要パラメータ(陽子陽子衝突)

主リング周長	26.7 km
陽子ビームエネルギー	7 TeV
ルミノシティ	$10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
主超伝導双極マグネット	8.33 T, 1232 台 (1 台の長さは14.3 m)
同マグネットに蓄えられるエネルギー	7.8 MJ (1 台当たり)
バンチ当たりの陽子数	1.15×10^{11}
バンチ数, 衝突間隔	2808, 25 ns
ビームに蓄えられるエネルギー	362 MJ (片方のビーム当たり)

LHC では陽子陽子衝突だけでなく、重イオン同士の衝突も可能である。LHC 加速器は LEP 加速器のために作られたトンネル内に据え付けられている。LHC リングは 8 つのセクターに分けられており、そのうち 4 つのビーム衝突点 1, 2, 5, 8 には主要な 4 つの実験 ATLAS, ALICE, CMS, LHCb が設置されている(図 1)。LHC 加速器の最も重要なエレメントは、主リングの bending 用超伝導双極マグネットである。このマグネットは、二本のビームパイプを一つの鉄ヨークの中に埋め込んだ一体型の、いわゆる two-in-one の構造を持つ(図 2)。ニオブチタンの超伝導線を超流動ヘリウム温度 1.9K に冷却し、11.85kA の電流を流すことにより、8.33 teslas の高磁場を達成する。このとき 1 台のマグネットに蓄えられる電磁エネルギーは 7.8MJ にものぼる。このマグネット 1 台の重さが 26トンなので、このエネルギーはマグネット自体が時速 88km で動いているときの運動エネルギーに相当する。このこれまでの加速器にはない膨大な蓄積されたエネルギーこそ、今回の事故被害を大きくした第一のファクターなのである。

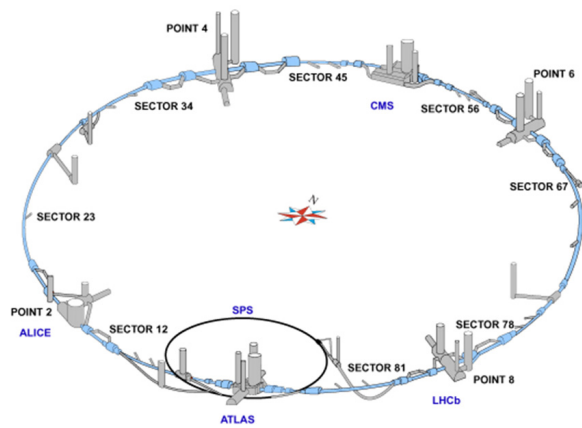


図 1 LHC リングと LHC の主要 4 実験

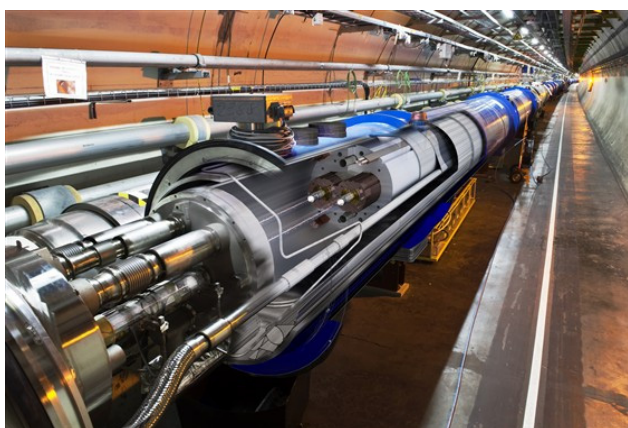


図 2 LHC 主リングの超伝導双極マグネット

2.2 ヘリウム流出事故から復旧へ

2008 年 9 月 19 日に発生した出来事¹については、近藤氏の報告[2]に詳しいが、要約すると、

¹ CERN はこのヘリウム流失事故のことを accident ではなく

- 1) セクター34 のパワーテスト中、電流が 8.7kA (5.15 TeV 相当)に達したところで、超伝導マグネット間をつなぐ超伝導ケーブルの接合部で抵抗領域が発達した。
- 2) 電源はトリップし、電流減少が始まったが、最初の 1 秒で電氣的アークが発生した。
- 3) このアークでヘリウム容器に穴が開き、断熱真空容器の中へ液体ヘリウムが漏れ出した。
- 4) 3 秒後にはビームパイプの真空が劣化。
- 5) 約 100 台のマグネットのクエンチ検出器が動作し、ヒータトリガーによるクエンチを発生させた(これは正しい動作である)。
- 6) 真空容器内の圧力が、流失したヘリウムにより急上昇。安全弁が働き、ヘリウムをトンネル内に放出したものの、圧力上昇に追い付けないところがあり、真空障壁に大きな力がかかり破壊された。この結果、いくつかのマグネットが物理的に動かされ、一部ではコンクリート床のアンカーが破壊された(図 3)。

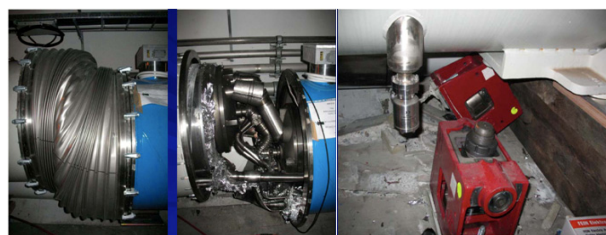


図 3 破壊された真空障壁とアンカー

- 7) 1 セクター全体で 15 トンあるヘリウムのうち、6 トンのヘリウムがトンネル内に流出した。
- 8) ビームパイプ内も 4km にわたってスス状の塵による汚れが広がった。

となる。合計 53 台のマグネット(双極マグネット 39 台、四極マグネット 14 台)が修理および検査のため、地上に運び出されることになった。

そもそもの原因は、マグネット間をつなぐ超伝導ケーブル接合部の splicing 不良によるものである。このようなケーブル接合部はリング全体で 10,000 ヶ所以上あるが、この接合部の抵抗は 0.5nΩ 以下であることが要求されている。その後の調査により、問題の接合部の抵抗は約 200nΩ だったことがわかり、おそらく接合部をハンダ付けする際にハンダ板を入れ忘れたものと推定されている。この問題に対処する最初の方策は、接合部の抵抗異常をいち早く検知することである。熱的計測による方法や感度のよい新たな電氣的計測方法が導入され(約 1nΩ の精度)、これらを用いて全

incident と呼んだ。このへんの言葉のこだわりは、その後の事故調査における情報公開のしかたにも表れているように感じられたが、各国政府代表者を招待しての LHC 完成記念祝賀会を 10 月 21 日に予定していたことなどへの配慮があったかもしれない。

接合部についてシステマティックな検査を行った結果、このような異常抵抗を示す接合部はマグネット間では見つからなかったが、マグネット内部の接合部で2ヶ所抵抗異常が見つかった(セクター12で100nΩ, セクター67で50nΩ)。これら2台のマグネットも交換された。地上に持ち出された53台のマグネットのうち、16台は修理して再使用し、37台はスペアのマグネットと交換された。最後のマグネットがトンネル内に戻されたのは、2009年4月30日であった。

さて今回の事故のもう一つの要因は、いうまでもなく大量の液体ヘリウムの存在である。これが蓄積された膨大なエネルギーと隣接しており、LHCの運転中は常時大変に危険な状態にいるわけである。これがクエンチ→アークという導火線により爆発をおこしたようなものであるが、事故の二次被害をこれほどにまで広げたのは、流入したヘリウムによる真空容器内の圧力上昇を逃がすための安全バルブの容量不足であった。この対策もただちにとられた。既設バルブの容量増強と、これまではSSS(Short Straight Section, 四極マグネットや補正マグネットなどを内蔵する)にのみ付けていた圧力解放バルブをすべての双極マグネットにも取り付けることにした。しかしバルブの増設には、セクターを常温に戻して作業しなければならないので、2009年の運転再開までには4つのセクターでの増設を行い、残りの4つは次の長期シャットダウン中に行う予定になった。

2.3 シャモニー加速器ワークショップ

2009年1月から新しくCERN所長にRolf Heuer氏が就任した。新所長は、2009年中のLHC物理実験スタートを最優先とすること、シャモニー加速器ワークショップの復活、情報公開などの所信を年頭に表明した。このシャモニーワークショップは、LEPの頃は毎年2月頃開かれていたものであるが、Heuer氏は当時OPAL実験スポークスパーソンとして、この会議の重要性を認識していたものと推察される。早速2月の第一週に開催され、事故の原因調査、その修繕、再発防止策など様々な議論が展開された[7]。これを受け、翌週Heuer所長はLHC再開のスケジュールを発表した[8]。その概要は、

- 9月末にビーム入射開始、10月後半からビーム衝突
- クリスマス休みの短期間を除き、2010年秋まで連続運転する
- ビームエネルギーは5TeV

というものである。前年12月の理事会で報告された、6月末までに加速器の冷却を完了させるという予定からは、2~3ヵ月遅れとなったが、これはおもに、クエンチを確実に検知するモニター装置を新たに設置すること、および二次被害を最小限に食い止めるための圧力解放バルブを増

強・増設することなどによるものである。また、CERNでは通常電気代の高い冬季は加速器の運転は行っていないが、長いシャットダウンを入れずに連続運転することで、加速器運転の経験を積むとともに、実験グループが物理結果を出すために十分なデータを確保しようというものである。

ビームエネルギーに関しては、クエンチトレーニング問題(近藤氏の報告[2])が未解決ため、安全と運転効率を考慮して5TeVでの運転はやむをえない判断である。この問題は、2008年の運転開始以前に、事故が起きたセクター34以外の7つのセクターでハードウェアコミッショニングを行い、5.5TeVまでのパワーテストを行った結果、すべての超伝導マグネットはクエンチなしに5.3TeVまで達することができたが、5.5TeVまでに1回起き、それより高くすると急激にクエンチ数が増えるが見積もられたことである。詳しく調べられたセクター56の結果にもとづく見積もりでは、6TeVまでに11回、6.5TeVまでに84回、7TeVまでにはなんと~1000回ものクエンチが起こると推定された。すべてのマグネットはトンネル内に設置される前に地上でテストされ、12.85kA(7.6TeV相当)までトレーニングされていたのであるから、これは大きな驚きであった。LHCマグネットを分担して製造した3社のうちの1社にトレーニングの記憶を忘れるものが集中している傾向があり、また小統計にもとづいた推定ということもあり、原因究明と対策は今後の重要課題である。

2.4 復旧後半戦

真空障壁を備えたSSSをコンクリート床に固定するアンカーの補強工事や、スズで汚染されたビームパイプの掃除などを終え、マグネットの冷却も近々始められるかと期待していた5月末頃、超伝導線の結線部分での新たな問題浮上のニュースが伝えられた。

クエンチが起こった場合に超伝導線を流れていた電流を逃がすために、超伝導線のまわりを銅の安定材(copper stabilizer)で取り囲んでいる。マグネット間の結線部分では、超伝導線同士はもちろんのこと、銅の部分の接合も正しく行われていなければならない。そうでない場合、近くのマグネットでクエンチが起きた時、大きな電流が超伝導状態ではなくなった超伝導結線部分を流れることになり、熱でこの部分が溶かされ、アーク発生につながってしまう(図4)。この問題点に関しては、すでに一部専門家の間では早い時期から指摘されており、シャモニーワークショップで設立が決められたレビュー委員会でもその重要性が確認された。実際に、常温に戻されていた4つのセクターで(問題の34と異常抵抗が見つかったマグネットがある12と67に加え、クライオスタットの接続部分の修理のためセクター

56も常温に戻っていた)測定を行ったところ、驚くべき大きな広がりを持った抵抗分布が得られたのである。ガンマ線撮影法などにより検査した結果、これら多くの接続不良の原因は、超伝導線を接続する際、銅部分のハンダが流れ出してしまう、隙間が生じてしまうことと判明した(図5)。

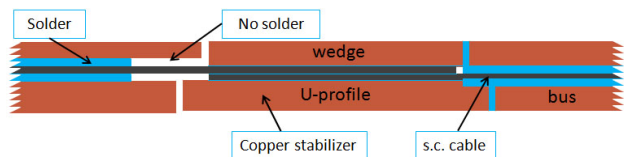


図4 マグネット間の結線部分(悪い例)

超伝導線同士のみでなく、copper stabilizer 部分の接触も保たれていなければならない。

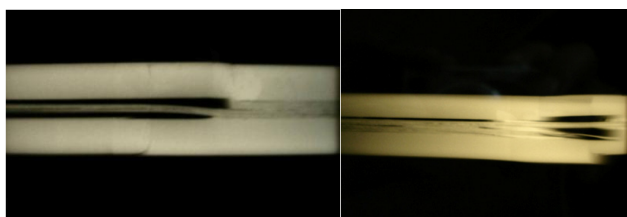


図5 ガンマ線撮影法で撮った接続不良の結線部分

特に大きな抵抗値の箇所は修理されたが、問題は、全数接合をやり直すか、あるいはどこまで許容して運転再開間に合わせるかと、まだ未測定のもの4つのセクターをどうするかである。このうち二番目の問題については、超伝導状態のままでは銅の結合部分の抵抗は測定できないが、常温に戻していると時間がかかり(ヘリウムを一時保存しておく場所が足らず、一度に全セクターを常温にできないのも一因)、結局年内の運転再開はなくなるということであった。しかしここでヘリウム温度を80Kにまで上げて測定するという方法があみ出された。測定精度はやや落ちるが、セクター45でこの方法が試され、さらにこのセクターを常温に戻して測定を行い、新測定法の信頼性が確かめられた。そして残りの3セクターの測定が80Kで行われた。もしそこで大きな抵抗値を持つ接続不良箇所が見つければ、そのセクターは常温に戻して修理することになってしまい、年内の運転再開は危うくなる場所であったが、幸いにも特に大きな抵抗箇所は見つからなかった。クエンチが発生した場合に接合場所で熱暴走→アークの発生が起らないためには、5TeVで $67\mu\Omega$ 以下、3.5TeVでは $120\mu\Omega$ 以下である必要があることが、シミュレーションやテストベンチによって見積もられた²。測定結果の最大値は $53\mu\Omega$ であったので、2009年から2010年にかけての期間は、安全を考えてまず3.5TeVで運転を行い、そこで得た経験をもとに5TeVまで上げるかどうかの判断をくだす計画とした。

² これらの値はいろいろなモデルにより変わり、その後のstudyにより、現在ではもう少し低い値がいわれている[14]。

ここまでで済めば、9月末に運転再開という予定でいけたはずであるが、実はセクターを80Kに温める作業中に新たなヘリウム漏れが発生していたのである。しかし、幸いにも軽微な漏れであったこともあり、セクターの一部を温めて修理することが可能であったため、大きな遅れにはならなかった。この他に、新クエンチ保護システムの虫出しや真空漏れの修理などもあり、全セクターの1.9Kへの冷却が完了したのは10月8日となり、LHCへのビーム入射が開始されたのは10月半ば過ぎになってからであった。その後、鳥にパンを落とされたせいで冷却装置が一時停止状態になり、一部セクター温度が8Kまで上昇する事件もあったが[9]、大事にはいたらず、1年前の9月10日の再現となるビーム周回を11月20日にむかえたのである。

3. ATLAS 実験

さてここで、LHCの各実験がこの間何をしていたか、特にATLAS実験を中心に振り返ってみる。2008年9月10日のfirst beam circulationの時点では、4実験とも9割以上の完成度に達しており、見事 splash event³を記録できたのはまだ記憶に新しい[2]。しかし、いざこれからという期待が大きかった分だけ、ヘリウム流出事故の直後の落胆は大きいものであった。しばらくの間、事故の被害状況や復旧の予定などがよくわからないということもあり、とにかく完成した測定器の状態を宇宙線ランを続けることにしたわけである。10月21日のLHC完成記念祝賀会も無事に終え、ようやく事態の詳細が明らかになってきた11月半ばにATLAS実験は、測定器を開き、一部未完成だった部分の建設と、不具合のあったパーツの修理を行うことを決定した。

ATLAS測定器(図6)の詳細に関しては、参考文献[10]を参照いただくとして、その概要は表2のsub-detectorから構成されている。

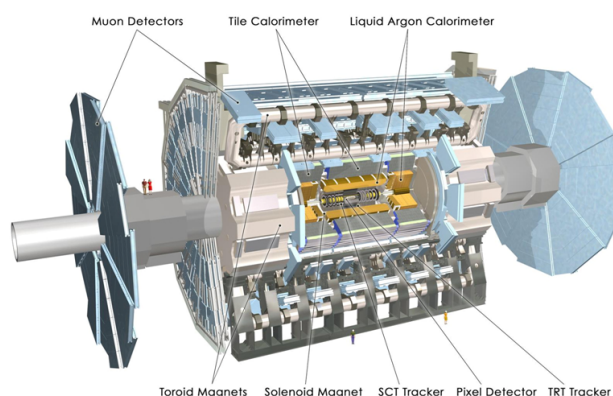


図6 ATLAS測定器

³ Single beamではあるが、陽子が上流のビームコリメータに当たって発生した大量の二次粒子が測定器を通過するeventのことを splash eventと呼ぶ。この他数本のミュオンがビーム軸とほぼ平行に測定器を横切る halo event も多く観測された。

表 2 ATLAS 測定器を構成するおもな sub-detector

Inner Tracker Silicon Pixels SCT(Semiconductor Tracker) Silicon Strips TRT(Transition Radiation Tracker)	8×10 ⁷ チャンネル 6×10 ⁶ チャンネル 4mmφ ストロー, 40万本
電磁カロリメータ 鉛-液体アルゴン検出器	アコーデオン型
ハドロンカロリメータ 鉄-プラスチックシンチレータタイル 銅-液体アルゴン検出器	バレル部 エンドキャップ部
前方カロリメータ 銅(電磁部)+タングステン(ハドロン部) 液体アルゴン検出器(チューブ状)	ラピディティの 3.1~4.9 をカバー
ミュオン検出器 RPC(Resistive Plate Chamber) TGC(Thin Gap Chamber) MDT(Monitored Drift Tube) CSC(Cathode Strip Chamber)	バレル部トリガー 前後方部トリガー Tracking Tracking, 前後方部の一部
マグネット 超伝導ソレノイド(Inner Tracker 用) 超伝導トロイド(ミュオン検出器用)	2 テスラ 空芯

これらのうち、日本グループ⁴が担当した部分は、SCT, TGC, MDT 読み出しエレクトロニクス, 超伝導ソレノイド磁石などである。

12 月には測定器を完全に開き、翌 2009 年 4 月までの間に、既知の問題点であった液体アルゴン検出器の電源や Inner Tracker の冷却装置の修理、放射線耐性に問題のあった MDT 用光学ファイバーの交換の他、ほぼすべての sub-detector で、不具合のある検出器やエレクトロニクスの修理あるいは交換、データ解析の結果判明したケーブルスワップの修正、などなどを行った。Marzio Nessi (Technical Coordinator) の「Bring known problems from % to % where possible.」という号令に集約されているように、これらの作業は ATLAS 測定器の完成度を飛躍的に高めることになったともいえる。5 月に測定器を閉じ、6 月にはマグネット(ソレノイドとトロイド)の励磁試験を行い、宇宙線ランを開始した。

その後、各 sub-detector でデバッグ、テストを行い、10 月には連続運転モードに入り、LHC ヘビームが入射されるのを待つ態勢に入った。この時点では、半分以上の sub-detector で 99% 以上のチャンネルが稼働状態にあり、残りの sub-detector も 98% 以上の稼働率を達成できた。Fabiola Gianotti(この年の 2 月に Peter Jenni から ATLAS

Spokesperson を引き継いだ)が 10 月 12 日の RRB⁵ で言った「We are “even more ready” to take and analyse data than last year」が、この時点での ATLAS 測定器の状態をよく物語っている。

CMS 実験のほうも、ATLAS 実験と概ね似たような状況で、同じ RRB では spokesperson の Jim Virdee から「essentially in “beam-ready” state」であると報告された。CMS 建設では、PbWO₄ の結晶を用いた電磁カロリメータの製作がもっとも遅れていて、エンドキャップ部はおそらく片側しか入らないだろうと予想されていたのが、見事 2008 年 9 月の first beam circulation に間に合わせたのはさすがであった。しかしながら、その前に設置されるプリシャワー検出器は間に合わず、staging されていたのが、今回の「シャットダウン」中にインストールされ、晴れて“complete detector”となったのである。8 月にはグローバル宇宙線ランも長期間行い、ATLAS と同様に「よく理解された detector」になったといえる。

4. データ解析システム

LHC でのデータ解析は、コンピューティンググリッド技術を用いた、まさに全世界に広がった計算機システム網により行われる(参考文献[6]の坂本・尼子両氏による記事を参照)。LHC 実験参加国の 200 近くある計算機サイトをつなぎ、あたかも単一の計算システムのように運用するのが、WLCG(World-wide LHC Computing Grid)コラボレーションである。実際どのようにグリッドを使うかは、各実験により違いはあるが、ATLAS の場合は、次のような tier(階層)構造を持たせている。Tier-0(CERN)で生データの保管と一次処理を行い、10 カ所の Tier-1 サイトでは Tier-0 から送られた生データを二次処理して解析用データを作成すること、生データの保管およびその再処理などを行う。約 50 カ所ある Tier-2 サイトでは、データ解析とシミュレーションデータの作成が行われる。東大素粒子センターは ATLAS 実験の Tier-2 サイトとして 2007 年から地域解析センター計算機システムを本格稼働させている。

世界規模で数度にわたるコミッショニング作業を繰り返し行い、2008 年 9 月の first beam circulation の時は、データ転送・データ処理に成功している。しかし一方では、LHC 事故の後、あるグリッド関係者による「もしあのまま LHC が走り続けていたら、LCG は大量のデータを処理しきれたかどうか?」という声も聞こえた。実際その後、LHC の 4 実験合同での予想されるフルデータ量で負荷をかけた総合

⁴ 現時点で日本から ATLAS 実験に参加しているのは、KEK, 東大, 筑波大, 首都大東京, 東工大, 早大, 信州大, 名大, 京大, 京都教育大, 阪大, 神戸大, 岡山山大, 広島工大, 長崎総合科学大の 15 研究機関である。

⁵ Resource Review Board. LHC 実験に参加している各国の財源機関代表者と CERN および実験代表者からなる委員会、実験の進行状況や財政状態をモニターする役割をもつ。毎年春と秋の 2 回開催される。

試験 STEP09 (Scale Testing for the Experimental Program 2009) を行ったのは, 2009年5月末から6月にかけてであった。CERN(Tier-0)から Tier-1 サイトへのデータ転送レートは, 最大4GB/s (ギガバイト/秒)を達成し, 試験期間中安定して, 各実験の要求を十分満たすことができた(図7a)。ATLAS 実験は, STEP09 の期間中, データの分配, データ再処理と二次処理, データ解析およびシミュレーションデータの作成などを行い, 11日の間に4PB (ペタバイト)のデータをグリッド上に保管し, 100万にもものぼる解析ジョブを高い成功率で走らせることに成功している。東大素粒子センターのサイトでも, 多くのジョブを走らせ(図7b), 安定して高いレートでファイル転送を行った(図7c)。

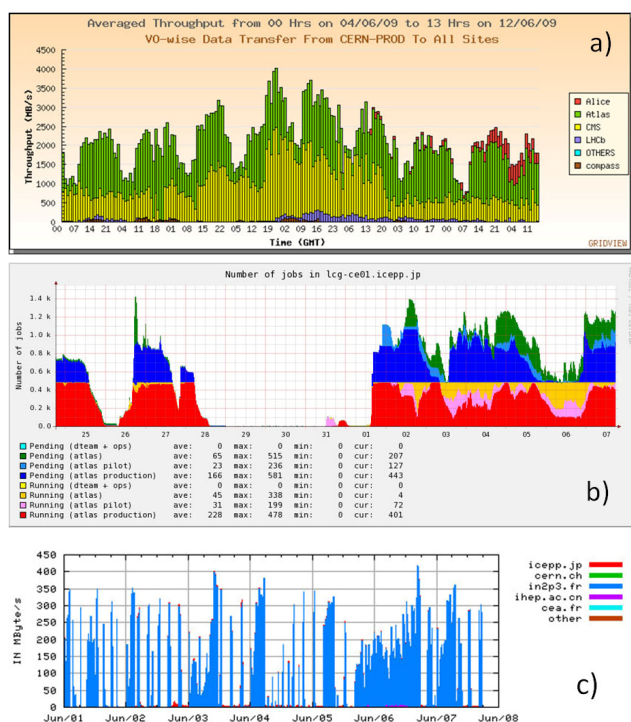


図7 a) STEP09 時の CERN からのデータ転送レート
b) STEP09 時の東大サイトでのジョブの実行状況—赤系の色(図の下半分)が実行中のジョブ数, 青系の色(図の上半分)が実行待ちのジョブ数を表している。
c) STEP09 時の東大サイトでのファイル転送の状況—青い色はフランスリヨンの IN2P3 計算センターからの転送を表しており, 持続的に 200 MB/s から 300 MB/s を達成しているのがわかる。

5. ビーム衝突実験開始

10月後半から LHC へのビーム入射が開始されたが, この時点ではまだクエンチ保護システムのコミッショニングが終了しておらず, これがクリティカルパスとなっていた。10月初め頃の予定では, 年内の 3.5 TeV + 3.5 TeV でのビーム衝突が期待されていたが, 全セクターのクエンチ保護システムを 2kA (ビームエネルギー 1.18 TeV に対応)までコミッショニングするのが 11月16日の予定となり, それを

3.5 TeV まで行うには更に 1 ヶ月程度必要であることがわかってきた。各実験ともぜひ年内にビーム衝突の実データが欲しいという点で一致していたので, クリスマス前までに, ビームエネルギー 450 GeV (SPSからの入射エネルギー)での衝突実験と, もし可能なら 1.18 TeV での衝突実験を優先させることとし, クエンチ保護システムのコミッショニングを完了させるのは 1月に行う予定に変更された。

ヘリウム流出事故から, 長い復旧作業を経て, 更にまたスケジュールの遅れがと, ともしれば暗い気持ちになりがちだったところ, 11月20日のビーム周回から始まったビームコミッショニングはそういう気分を一掃し, 大きな希望へと変えたのである。前年の9月10日と同様に LHC 四実験は splash event を確実にとらえた(図8)。そしてその3日後には, 重心系エネルギー 900 GeV でのビーム衝突に成功したのである(図9)。



図8 ビーム運転が再開され, splash event の記録に成功し, 喜びにわく ATLAS コントロールルーム(2009年11月20日)

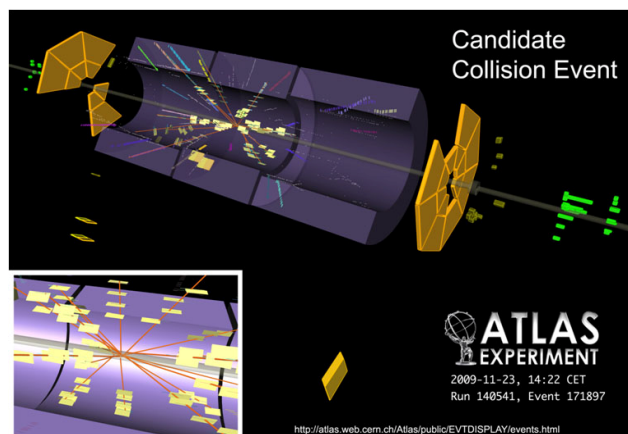


図9 ATLAS 実験で記録された LHC 最初のビーム衝突イベントの一つ(重心系エネルギーは 900 GeV)

11月26日に「LHC, week 1」と題したセミナーが CERN で開かれ, LHC 加速器と 4 つの LHC 実験の報告があった[11]。最初に登壇した LHC operation 責任者の Steve Myers 氏(CERN's Director for Accelerators and Technology)の「LHC is back! From the dark days after September 19,

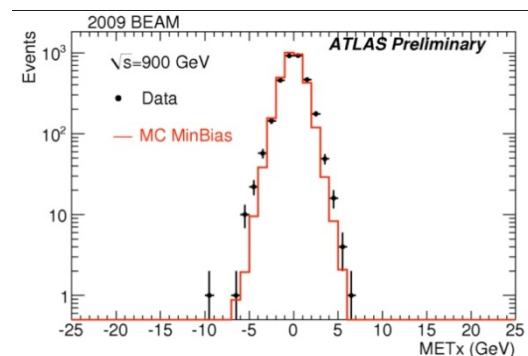
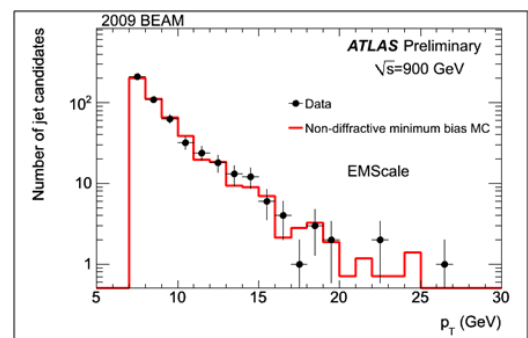
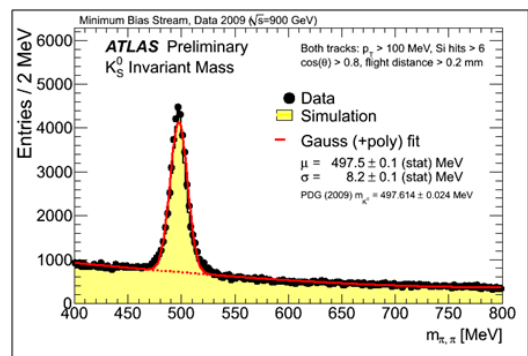
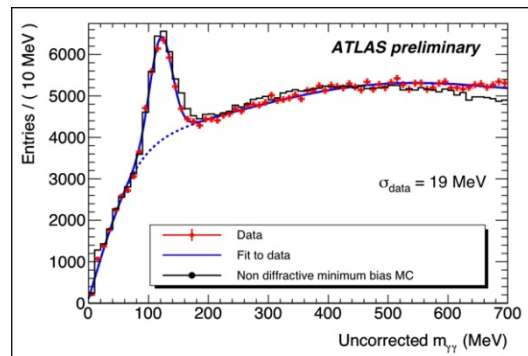
2008 to the bright days of late November 2009」というトークは実に感動的なものであった。それに続いた4実験の報告も、みな測定器がほぼ予定通りの性能で働いており、データ解析も素早く行われていることを示すものであった。測定器の磁場は4実験ともまだかけていない状態ではあったが(加速器からの要請で)、ALICE実験はここまでのデータを用いて、早くも12月1日に荷電粒子の pseudorapidity 分布に関する論文を発表した[12]。

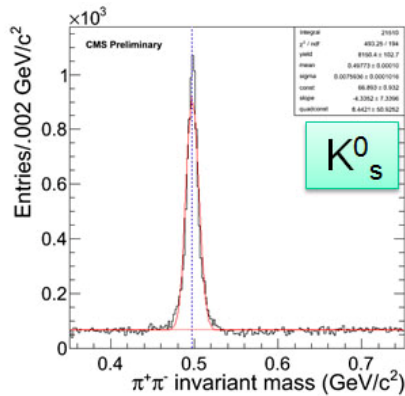
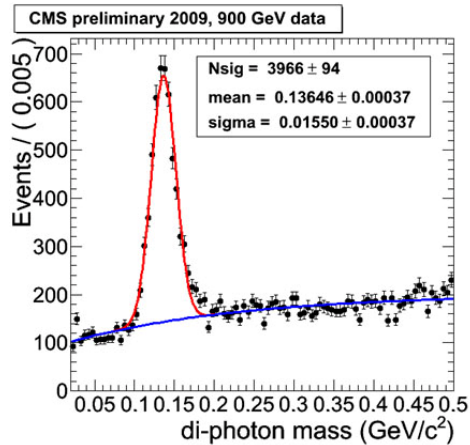
それからの LHC の立ち上がりもまさに快進撃といった様子であった。11月29日には両ビームとも1.18 TeV まで加速することに成功し、LHC は世界でもっとも高いエネルギーの加速器となった。11月30日からは各実験の磁場をかけてのビームコミッショニングが開始された。また陽子数やバンチ数を徐々に上げて、重心系エネルギー900 GeV での安定した衝突運転を行った。12月13日には重心系エネルギー2.36 TeV での衝突に成功し、Tevatron を抜いて世界最高エネルギーのコライダーとなったのである。LHC は12月16日まで走り、2009年の運転を終了した。この間 ATLAS 実験は、920k イベント(約 $20 \mu\text{b}^{-1}$) の衝突事象を記録した。これには約 $1 \mu\text{b}^{-1}$ の2.36 TeV のデータも含まれる。また ATLAS で記録した最大ピークルミノシティは $7 \times 10^{26} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ であった。12月18日に行われた CERN 理事会への報告を兼ねた公開セミナー[13]では、LHC の各実験からはおもに測定器の performance を示す発表がなされた。そのうちのいくつかの例を図10に示すが、 π^0 、 K_S^0 、ジェットなどを確実にとらえ、どれも simulation と驚くほどよい一致を示している。各実験とも測定器の理解が十分に進んでいることがうかがわれ、しかもデータ取得後何日もたっていないことを考えると、ヘリウム流出事故による1年と2カ月の遅れの期間を有効に使ったことの証明であるといえる。また同セミナーでの LHC 加速器の報告によると、潮汐運動によるビームエネルギーの変化が、「ビーム周回からたった10日後に観測された」(Steve Myers)とのことであった⁶。

6. これからの運転予定と物理結果の見通し

年明けて、LHC 加速器関係者が再びシャモニーに集まり、ワークショップを開いたのは1月最終週であった[14]。議題の中心は、今年以降の運転計画であった。ここでの議論をもとに、Heuer 所長と加速器責任者である Myers が下した決定は、

⁶ Steve Myers は LEP でも加速器 operation の責任者を務めた。LEP でビームエネルギー変動に対する潮汐運動効果が発見されたのは、運転開始から2~3年後のことであった。





$$M=497.7 \text{ MeV}/c^2, \sigma=7.6 \text{ MeV}/c^2$$

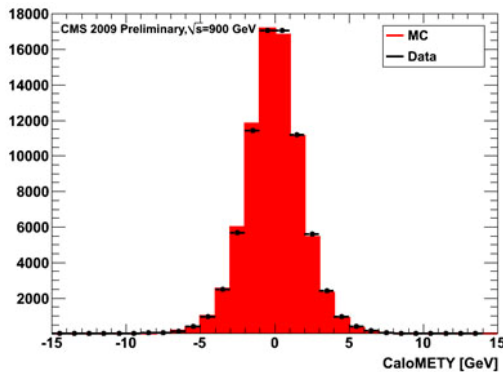
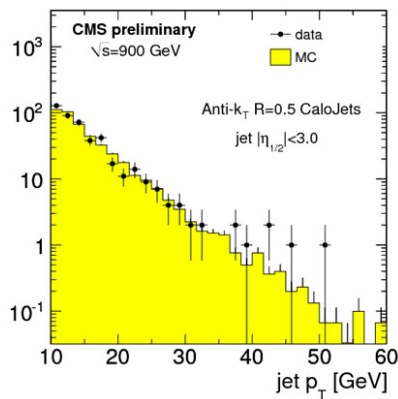


図 10 ATLAS, CMS の performance プロット π^0 , K_s^0 , ジェット P_T 分布, missing- E_T 分布。

- 今年と来年は 7 TeV (すなわち 3.5 TeV/beam) で運転を行う。
- その後長期シャットダウンをとり, 14 TeV での運転に必要な作業を行う。

というものであった。いくつかのシナリオが検討されたが, 結局のところ,

- 超伝導線の結合部分の抵抗はすべて $3 \text{ m}\Omega$ 以下で問題はないが, 銅の安定材 (copper stabilizer) の結合部分の問題がネックとなり, 10 TeV の運転は危険が大きい。最終的には, マグネットを常温に戻して, 結線を全部やりなおす。
- 14 TeV の運転に必要な作業の準備には時間が必要。
- 実験側としてはできるだけ早くデータが欲しい。

が主な理由となつての決定であった。それにクエンチレーニング問題もまだ未解決である。現在予想される各年ごとの積分ルミノシティは, 次のようになっている。

- 2010 年 $\sim 200 \text{ pb}^{-1}$ (7 TeV)
- 2011 年 $\sim 1 \text{ fb}^{-1}$ (7 TeV)
- 2012 年 シャットダウン
- 2013 年 $3 \sim 7 \text{ fb}^{-1}$ (13 TeV)
- 2014 年 $5 \sim 16 \text{ fb}^{-1}$ (13 ~ 14 TeV)

今年の正月明けから行っていた 7 TeV での運転に必要なクエンチ保護システムのコミッシュニングは予定通りに完了し, LHC ビーム運転は 2 月後半に再開される予定である。この記事が紙面に載る頃には, 7 TeV での衝突実験が始まっているものと期待している。

さて, 今後数年間に LHC で期待される物理結果を簡単に展望してみたい。まず 2010 年で, 第一に重要なことは, ビーム衝突の実データを用いた測定器の理解である。大量の minimum-bias event や $J/\psi \rightarrow \ell\ell$, $Z \rightarrow \ell\ell$ ($\ell = e, \mu$) などのイベントを用いての測定器 calibration を行う。7 TeV, 200 pb^{-1} に対しては, ~ 2 百万 $J/\psi \rightarrow \mu\mu$, ~ 5 万 $Z \rightarrow ee$ イベントが得られると予想されている。2010 年中に確実に期待できる物理結果としては, W , Z , トップクォーク, QCD ジェットなど, 「標準モデルの再発見」である。トップクォークの生成断面積は, 2 TeV に比べて 7 TeV は約 40 倍なので, 2010 年のデータで Tevatron (8 fb^{-1} として) と比肩する結果を出せる。

標準モデルを超える新物理も, 2010 年中に見え始める可能性がないわけではない。超対称性は, 現在の Tevatron の limit が gluino と squark の質量が縮退している場合で 392 GeV (95% C.L.) であるが [15], LHC の 7 TeV, 200 pb^{-1} のデータで, 500 GeV までの発見ができ (図 11), 棄却領域は 700 GeV にまで広げられる。また, 重いゲージボソン (Z' など) も, Tevatron の現在の limit である 1 TeV には, 100 pb^{-1}

で到達する(図 12)。ただし、その limit を超えた領域での発見となると、2011 年の運転を待たなければならない。

肝心のヒッグス粒子については、2010 年中に Tevatron の sensitivity に追い付くのは困難そうである。2010 年末で Tevatron の各実験の積分ルミノシティが 8 fb^{-1} に達したとすると、LHC の各実験は少なくとも 300 pb^{-1} ためなければ Tevatron に並ぶことができない。また 2011 年に予想される $\sim 1 \text{ fb}^{-1}$ (7 TeV) のデータでは、もっとも sensitivity の高い 160 GeV 付近の質量領域でも $\sim 3\sigma$ 程度である ($H \rightarrow WW \rightarrow \ell\ell$ モード)。従って、ヒッグス粒子発見のニュースは 2013 年以降となろう。14 TeV でのヒッグス粒子や新粒子探索については、[6]の浅井祥仁氏の記事 (pp.922-929)および[16]にまとめられている。

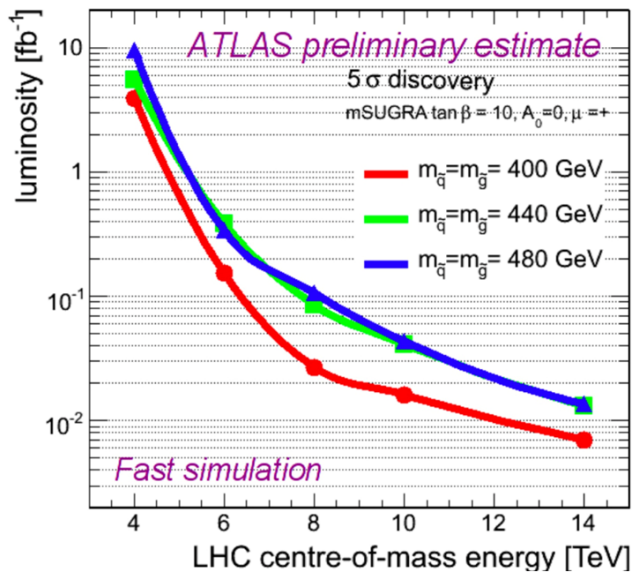


図 11 超対称性粒子の発見に必要な積分ルミノシティ

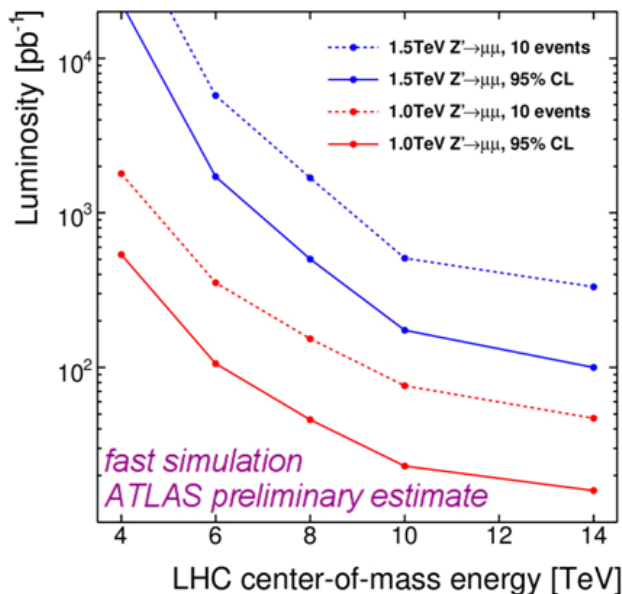


図 12 Z' の発見または棄却に必要な積分ルミノシティ

7. おわりに

TeV 領域の物理を直接探索する LHC 実験は、いよいよその幕を開けた。LHC の計画段階はもとより、正式に建設が決定された 1994 年の時点でも、予想もされていなかったテラスケールでの新しい物理の可能性が数多く示唆されてきている。今後 4~5 年のうちにはそれらが明らかにされ、さらにそのあとに続く次期計画 (SLHC, ILC) への重要なインプットともなる。

今回のヘリウム流出事故は、LHC の開始を 1 年以上遅らせてはしめたが、その後の迅速な原因究明と復旧作業、徹底した対策の取り方はさすが CERN と思わせるものであった。品質管理の重要性を再認識させるよい機会であったともいえる。今後 upgrade を含めれば LHC は少なくとも 15 年間は運転を続けるであろうことを考えると、今回の経験は決して無駄ではないと思われる。また情報公開の重要性もあらためて感じられた。復旧作業中に浮き出た新たな問題やビームエネルギーの決定に関する説明などが速やかに行われたことは、信頼感を深めることにも大いに役立ったように思われる。

LHC, ATLAS 実験に関する最新情報は、ATLAS 日本グループのホームページ[17], あるいは LHC アトラス実験グループオフィシャルブログ[18]に掲載しています。

参考文献

- [1] 山下了, 「LEP でのヒッグス兆候観測と実験終了について」, 高エネルギーニュース, **19-3** (2000) 130-150.
- [2] 近藤敬比古, 「LHC 加速器の現状と CERN の将来計画」, 高エネルギーニュース, **27-3** (2008) 163-171.
- [3] ALEPH Collab., Phys. Lett. B **526** (2002) 191.
- [4] ALEPH, DELPHI, L3, and OPAL Collaborations, The LEP Working Group for Higgs Boson Searches, Phys. Lett. B **565** (2003) 61.
- [5] The CDF Collaboration, the D0 Collaboration, the Tevatron New Physics, Higgs Working Group, “Combined CDF and D0 Upper Limits on Standard Model Higgs-Boson Production with 2.1 - 5.4 fb⁻¹ of Data”, arXiv:0911.3930, Nov. 2009.
- [6] 「小特集:LHC 実験が始まる」, 日本物理学会誌, 62-12 (2007 年 12 月) 907-948.
- [7] LHC Performance Workshop - Chamonix 2009, 2-6 Feb. 2009, <http://indico.cern.ch/conferenceDisplay.py?confId=45433>

- [8] <http://press.web.cern.ch/press/PressReleases/Releases2009/PR01.09E.html>,
<http://press.web.cern.ch/press/PressReleases/Releases2009/PR02.09E.html>
- [9] CERN twitter,
<http://user.web.cern.ch/user/news/2009/091106b.html>
- [10] ATLAS Technical Proposal, CERN/LHCC/94-43 (Dec. 1994);
 ATLAS Detector and Physics Performance Technical Design Report, LHCC/99-14/15 (May 1999);
 Expected performance of the ATLAS Experiment: Detector, Trigger and Physics, arxiv:0901.0512, 2009.
- [11] “LHC, week1”,
<http://indico.cern.ch/conferenceDisplay.py?confId=74907>
- [12] The ALICE Collaboration, “*First proton-proton collisions at the LHC as observed with the ALICE detector: measurement of the charged particle pseudorapidity density at $\sqrt{s} = 900$ GeV*”,
http://arxiv.org/PS_cache/arxiv/pdf/0911/0911.5430v2.pdf
- [13] “*LHC report*”,
<http://indico.cern.ch/conferenceDisplay.py?confId=76398>
- [14] LHC Performance Workshop - Chamonix 2010, 25-29 Jan.2010,
<http://indico.cern.ch/conferenceDisplay.py?confId=67839>
- [15] The CDF Collaboration, “*Inclusive Search for Squark and Gluino Production in p anti- p Collisions at $\sqrt{s}=1.96$ TeV*”, Phys. Phys. Lett. **102** (2009) 121801.
- [16] 浅井祥仁, 「LHC で期待されている物理」, 高エネルギーニュース, 24-4 (2006) 249-258.
- [17] <http://atlas.kek.jp/>
- [18] <http://d.hatena.ne.jp/lhcatlasjapan/>