

LHC 加速器の現状と CERN の将来計画

KEK 素粒子原子核研究所

近藤 敬比古

taka.kondo@kek.jp

2008 年 (平成 20 年) 12 月 5 日

1. LHC 計画の概要

LHC 計画は、標準理論が予言する粒子の中で、まだ唯一見つかっていないヒッグス粒子の発見と測定、および標準理論を越える超対称性粒子などの新しい物理の探索を目指すプロジェクトである。LHC 加速器の建設は、米国の SSC 計画 (40 TeV) が建設途中で中止になった翌年の 1994 年に、到達エネルギーを 2 段階に分けて 10 TeV 部分が承認された。1995 年春には CERN の非加盟国の中でもっとも早く日本政府が LHC 計画への協力を表明し、その後インド、ロシア、カナダ、米国が参加することによって、LHC 計画は欧州主導の全世界的プロジェクトとなった。2005 年に完成する予定であったが、建設費が 20% ほど不足したため 2007 年に完成を延期し、2011 年までの CERN 予算を前借りするという変更の後、ようやく 14 年目で完成した。完成の遅れは予算も一因であるが、主には加速器・測定器の技術的な先進性と複雑さに起因するとみてよい。

LHC では、周長 27 km の地下トンネルに敷き詰められた 1,700 台を超える超伝導マグネットを超流動ヘリウム温度の 1.9 K まで冷却し、 6×10^{14} 個の陽子を 7,000 GeV まで加速して陽子・陽子衝突を実現する。ヒッグス粒子など新粒子の発見をめざす ATLAS と CMS 実験では、毎秒 10 億回起こる陽子衝突で発生する粒子を測定し、オンラインで選別出した 100 イベントほどのデータを記録し、世界に分散する計算機センターに送る。これらはかつてない規模の複雑な装置であり、放射線耐性をもつ検出器や集積回路のみならず計算機システム・ソフトウェアに至るまで先進技術がふんだんに使われている。

LHC 計画の概要・物理・技術に関しては日本物理学会誌 2007 年 12 月号の小特集「LHC 実験が始まる」を参考にしてください[1]。

以下では主に LHC 加速器の建設最終段階とビームコミッション、さらに CERN の将来計画の概要を述べる。しかし記述のすべてが筆者自身が関与・担当した事項ではなく、CERN の公式発表、SPC 委員会 (Scientific Policy Committee) での報告、CERN 内での会合、ウェブの情報などをもとに書いたものである。その意味では、英語を日本語にし、図をコピーし、右のものを左に移しただけと非難されても、その通りなので甘んじて受けます。

2. LHC 加速器の建設

2.1 建設状況の公開

CERN は World Wide Web の発祥地でもあるためか LHC 加速器の建設の進行状況のかなりの詳細まで常にウェブで見ることができた。例として図 1 にあるような「ダッシュボード」と呼ばれる図が 66 図もあり、各部品の製造の状況が一目でわかるようになっていた[2]。図を見るとダイポールマグネットの製造・組立・据付作業が 6 年あまり続いたことがわかる。また 27 km の LHC 加速器周囲の温度の現状も図 2 のようにウェブ上で見ることができる[3]。これらの図のように進捗状況が一目で見えることは画期的なことで、

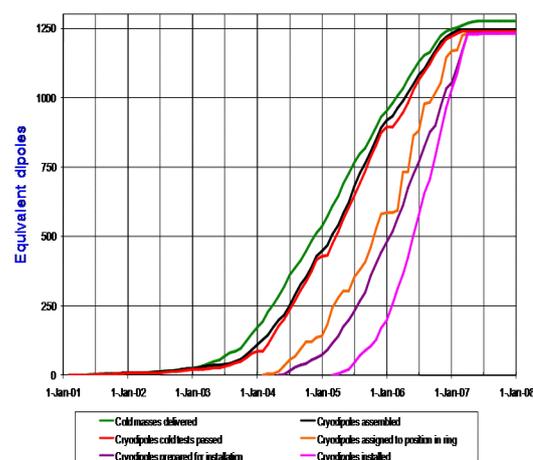


図 1 LHC 加速器部品の製造状況を年月日の関数としてプロットした「ダッシュボード」図。66 種類あった[2]。

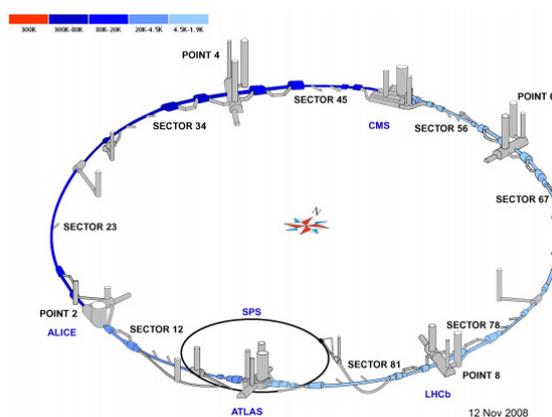


図 2 超伝導マグネットの温度状況を示している。

多数の人や国が関与する大規模なプロジェクトの現状把握には大変よかった。特に全世界から見えるようにオープンにしたことが評価できる。日本では、予算執行計画と違うとか会計検査があるからとかという理由で、こんなあからさまな公表は無理かもしれない。

2.2 LHC 加速器建設における国際協力

LHC でもう一つの際立った特徴は、加速器の建設において、かなりの規模の国際協力が実を結んだことである。これは HERA の建設から始まった方式であるが、LHC ではそれが世界の主要国に広がった。主な非加盟国からの資金ならびに物的供与と協力を表 1 にリストアップした。KEK による LHC 用超伝導四極マグネットの開発と生産は山本明氏率いるチームによって行われた。開発から量産と CERN での据付けと試運転の詳細は中本健志・佐々木憲一両氏が高エネルギーニュースに書いている[4]。

表 1 CERN 外からの加速器建設協力

国	協力資金	In-kind (物的供与) 協力
日本	138.5 億円	衝突点用超伝導四極マグネット
米国	200 M\$	衝突点用超伝導四極マグネット, 超伝導ビーム分割マグネット 他
ロシア	67 MCHF (測定器込み)	ビーム入射路マグネット, ビームダンプセプタム
カナダ	60 MCanada\$	衝突点 2 ビーム四極マグネット
インド	12.5 MCHF	超伝導六極補正マグネット

日本の企業も LHC 建設に大きな貢献をしている。CERN には財政運営において fair return という原則があり、CERN 予算の出資額にほぼ比例して加盟国にお金が戻らなければならない。そのため非加盟国の米国や日本の企業はこれまで CERN の入札には参加できなかった。ところが日本政府による LHC 建設協力で、日本企業にも一部ではあるが門戸が開かれた。その結果、日本企業である古河電工・新日鉄・JFE スチール・IHI・カネカなどが各種の加速器用の特殊資材を納入することができた。高品質、納期厳守の日本企業の実績は CERN に高く評価されている。厳しい仕様の LHC 用超伝導ケーブルの開発においては、古河電工が SSC 計画で開発した技術を発展させて成功した。CERN が他の企業に発注したケーブル開発はなかなか進まなかったようで、古河電工は CERN から “Your failure is our failure, your success is our success.” と言われたと聞く。古河電工はアーク部ダイポール外側ケーブルの 1/8 の生産を行ったが、欧米の企業分の孫請けを通じてその 3 倍のケーブルの生産を担ったようだ。加速器の部材のみならず実験装置の建設においても、浜松ホトニクス・東芝・クラレなどが活躍し、日本企業が得た信頼度の高さは格別である。

インドは物的供与のみならずマンパワーにも大きな貢献をした。1,700 台を超える超伝導ダイポールと四極マグネットはすべて地上で冷却・励磁テストが行われたが、この全数検査にインド原子力エネルギー省がインド国内の 4 研究所から 90 人の技術者を CERN に派遣したおかげで、昼夜を通して検査作業を実施することができた。前例のない長期にわたる人的資源の国際協力は双方に有益だったと聞く。HERA 建設でも、中国は資金は出さないが人を多く送り、その人たちが BES を作る原動力にもなったと聞いている。

2.3 建設完成までの苦難の連続

LHC 加速器では先進的な技術が各所で使われている。そのため建設終盤段階からビーム周回成功までの 2 年あまりの間には、予期しないトラブルがかなり発生した。主なトラブルはすべて公式に発表されている。

(1) ヘリウム分配ラインのトラブル

超伝導マグネットに液体ヘリウムを供給するラインは QRL と呼ばれ、27km のトンネル全周にわたってマグネットと並行して設置されている。2004 年 6 月にこのラインを数 km にわたって設置し冷やしたところ、ヘリウムパイプを所々で支えるグラスファイバーのスライド板が割れて真空リークが発生してしまった。材料が原因だったがスケジュールが大幅に遅れた。工事を請け負った Air Liquid 社を訴えては時間がかかりすぎるので、結局 CERN のマンパワーと 41 億円相当の追加予算を投入して修理を行った。

(2) Inner Triplet の圧力テストでの破損

Inner Triplet とは衝突点の前後に設置されたビーム収束用の四極マグネットセットである。その半分のマグネットを日本が開発・製造し、あと半分のマグネットとクライオジェニクス組込み全部をフェルミラボが担当した。1 セットの長さは約 30m で全部で 8 セットある。個々のマグネットは日本でもフェルミラボでもテストされたが、全長 30m のセットのテストは地上で行わないまま地下に据え付けられた。2006 年 11 月に Inner Triplet の圧力テストを初めてしたところ、超流動ヘリウム熱交換パイプが座屈、破断してしまった。フェルミラボで行われたロウ付け作業に起因する問題だった。新材料を発注し、すべて地下トンネル内で取り換えられた。

さらに 2007 年 3 月末に、熱交換器を交換後初めて行った Inner Triplet セットの圧力試験中に 20 気圧で大きな破裂音が起こり、KEK 製マグネットがビーム軸方向に 10cm 以上動いてしまった。マグネットを支持する GFRP 部品が軸方向の不均衡力に耐えきれず破壊されたことによる。支持部品はフェルミラボ担当であるが、(後から考えて当然の)不

均衡力の発生を完全に見落としていたことによる。CERN 関係者も含む設計レビュー委員会をパスしているのが概にフェルミラボを非難できないが、度重なるフェルミラボのミスと受けとられ、Pier Oddone 所長自ら陣頭指揮を執って問題解決に当たった。修復までの数ヵ月間はフェルミラボのホームページを開くと、この事故の調査や経過がトップに現れた。原因はすぐわかったが、すでに 8 セットすべてトンネルに設置されていたので、地上に運び出さず、かつ分解しないで修理可能かがキーポイントだった。熱収縮のないインバーの棒を四極マグネットの隙間に入れて端部フランジから支持補強するという大変に巧妙なアイデアが採用され、トンネル内での修理が可能になった。2007 年 9 月中旬に修理が完成した。災難続きの Inner Triplet であったが、2008 年 4 月には異常クエンチなしで定格磁場を越えての冷却・励磁テストに成功した。日本が担当したマグネットは完璧であった。これらの事故と修復の現場の様子も、中本健志・佐々木憲一両氏が詳しく書いている[4]。

(3) セクターの冷却と plug-in module の折れ曲がり問題

2007 年 1 月 15 日から全周の 8 分の 1 であるセクター 78 (約 3km) の冷却テストが始まった。超伝導マグネット 200 台以上を同時に冷却するのは初めてだったので、真空リークなどいろいろな技術的トラブルが続出し、目標の超流動ヘリウム温度 1.9K に到達するまで 4 ヶ月を要した。しかしこの最初のセクター冷却テストの経験は生かされて、セクター 78 を含む全セクターの本番冷却はかなりスムーズに行われた。図 3 に 8 セクターすべての温度の時間経過を示す。セクター 12 の冷却がもっとも速いが、それでも 1.9K に到達するまで 1 ヶ月近くかかっている。

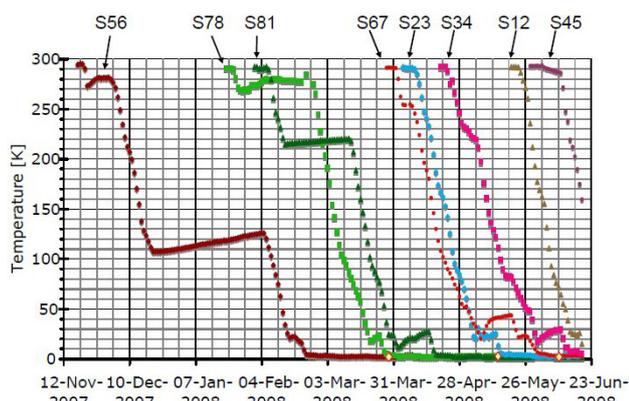


図 3 8 セクターの冷却経過。最速でも 1 ヶ月かかる。2008 年 1 月の冬期休暇以外は真空リークの修理で冷却が止まったのがわかる。

最初のセクター 78 はマグネットの交換や Inner Triplet の接続作業のため、常温まで昇温してから種々の修理が行われた。そこでたまたまビームパイプを開けてわかった新たなトラブルが plug-in module の折れ曲がりである。Plug-in module とは、ビームパイプの中に全周にわたって挿入され

ている幅 44mm のビームスクリーンを各マグネットの端隣に接続するために現場でプラグインするモジュールである。図 4 に示すようになりに複雑な構造である。ビームスクリーンの内側は 75 μm 厚の銅が張り付けてあり、ビームのイメージ電流が低い抵抗で流れるようになっている。運転時は 5–20K に冷やされてダイポール 1 台あたり 10cm ほど縮むので、ビームスクリーン同士の接続箇所では、電気抵抗を 0.1m Ω 以下に保ちながら伸び縮みを吸収するため、烏賊の足のような金メッキした多くのスプリング端子が相手のビームスクリーンの外側をスライドするようになっている。セクター 78 が常温 冷却 常温の 1 サイクルを終えたところで、たまたま開いたビームパイプでその烏賊の足のいくつかの内側に折れ曲がっているのが見つかった。Plug-in module は全周で 3,300 個近く据え付けられており、しかもこのような折れ曲がりのある場所は、二重の真空を破って開けてみなければ発見できないため大きな問題になった。LHC 加速器リーダーの Lyn Evans は「必要は発明の母だ。」と表現したが、出てきた解決策は奇抜だった。ビームスクリーンの内径よりほんの少し小さいピンポン玉状のボールの中に、40MHz の高周波を発生する回路を入れておく。このボールをビームパイプ内にガスの圧力で走らせる。リング 1 周で 1,032 カ所に設置されたビーム位置モニター BPM でボールが発する高周波をピックアップすればボールの位置がわかる。内側に折れ曲がったピンがあればボールはその場で止まるので、悪い plug-in module の位置がわかる。そして plug-in module の取り換えは 2 時間で済むという。



図 4 ビームスクリーンを低い電気抵抗でつなぐための plug-in module。写真はビームスクリーンが冷やされた時の相対位置状態を示している。

(4) クエンチトレーニング問題と到達ビームエネルギー

すべての超伝導マグネットは地上で 1 台ずつ冷却され励磁テストされた。ほとんどのマグネットは 0–2 回ほどのトレーニングクエンチ (注参照) で 11,850 A = 8.33 teslas (7 TeV 相当) を越え 9 teslas までテストされた。それらは保管と据付けのため常温に戻されてから再びトンネル内で据え付けられてから再冷却された。そのような thermal cycle を経ると、トレーニングクエンチで稼いだ磁場上昇分の一

部は失われてクエンチ電流が低くなるものがあった。調べてみると、そのようなマグネットが少なくともセクター45で3台、セクター56で29台あった。図5に各セクターでのダイポールのトレーニングカーブを示す。時間がなくてトレーニングクエンチ作業はまだ途中までしかやっていないが、図でわかるように電流上昇傾向がなだらかに過ぎて、ひょっとするとセクター56は7 TeV に届かないのでは、とも懸念されている。記憶を忘れた問題のマグネットのほとんどは3製造会社のうち Noell 社製造のものである。いくつかは1回目のクエンチ (virgin quench) の電流を下回るものもあった。1回のクエンチからの回復に半日かかり、したがって7 TeV に到達するには2ヵ月以上かかるので、当面は5 TeV で運転を開始し2009年冬の休止中にトレーニングを行うことになっていた。しかしその後起こった事故とその安全対策のため、予定したトレーニングは延期された。

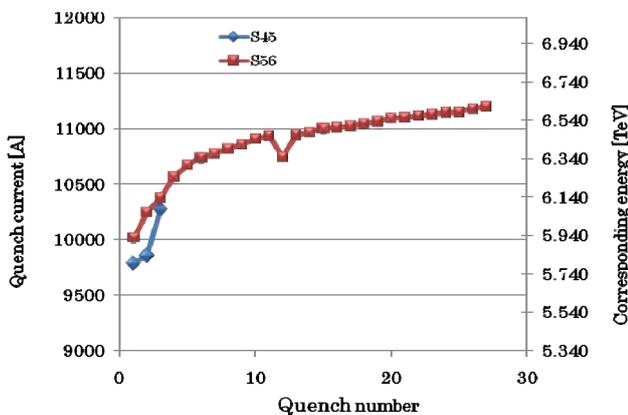


図5 セクター45と56のトレーニングカーブ。横軸がクエンチ回数が縦軸が到達電流/磁場。12回目のクエンチを除いてはすべて違うマグネットによる。二つのマグネット同時のクエンチが3点含まれている。

(注) トレーニングクエンチ: 超伝導マグネット製造後の最初の励磁では、超伝導コイルの一部が電磁力で動きクエンチが起こることがある。しかし動いたコイル部分はより安定な位置に収まるので、次の励磁では同じ磁場値ではクエンチが起こらなくなる。このように励磁とクエンチを繰り返して、達成磁場が次第に高くなる現象のことをいう。

3. LHC ビームコミッショニング

2008年4月5, 6日にはLHCの見納めという宣伝で「LHC オープンディ」が催され、近隣から5万人も見学者が訪れたため、地下のトンネルに入る切符を得るためにドームのそばに行列ができ、2時間も辛抱強く待っている人も大勢いた(図6)。2008年7月にようやく8セクターすべてが冷却状態に達したのを見届けて、CERNは全世界の報道機関に向けて9月10日に「ファーストビーム」をLHCに入れるとアナウンスした[5]。



図6 LHC オープンディには5万人がCERNを訪れた。

3.1 ブラックホール騒ぎ

LHCの運転開始に向けてもっともCERN首脳部を悩ませた問題は、ブラックホールによる地球消滅の噂である。1998年に提唱されたADDモデルでは余剰次元を導入することによってヒッグス粒子の質量の不安定性(階層性問題)を解決する。このとき重力はTeV領域で強くなり、LHCでの陽子衝突でブラックホールが生成され、ホーキング輻射のため 10^{-26} secで蒸発すると予言された。これは理論屋にとって大変魅力ある新しい展開で、危険性などまでには考えが及んでいなかった。

2008年3月に米国の元原子力保安検査官が、LHCで生成されるブラックホールで災害が起きる可能性があるので、第三者機関によってLHCの安全性を確認できるまでLHCの運用を禁止する仮処分命令を出すよう、ハワイ州地方裁判所に提訴した。これが新聞報道されて一気にネット上でも話題になり、You Tubeにはレマン湖わきから発生したブラックホールによって地球が崩壊する様子を想像力たくましく描いた動画も載った[6]。日本の雑誌には地球消滅カウントダウンなどという見出しの記事も載った。インドでは噂を聞いた16歳の少女が自殺したと報道された。ドイツの化学者も執拗にLHCの危険性をアピールし、彼はCERNにまで押しかけて来ると噂されたが、現れなかったようだ。

CERNはこの事態を重く受け止めた。理論グループのJ. EllisやM. Manganoが中心になり科学的な観点に基づいたLHCの安全性の根拠を論文にして投稿し、論文は特急で査読を経て出版された[7]。またプレスリリースやWikipediaなどウェブ上でも広くLHCの安全性をキャンペーンした[8]。V. Ginzburg, S. Glashow, F. Wilczek, S. Hawking, V. A. Rubakovら著名人からのメッセージも載せた。KEKもトビックス欄に安全であるとのコメントを載せてくれた。

LHCの衝突エネルギーは 10^{17} eVの宇宙線に相当すること、宇宙線のエネルギーは 10^{20} GeVまで存在するので、地球誕生以来おびただしい数のLHCエネルギーを越える衝突が起こってきたが、われわれはいま生存している、というのがLHC安全性の根拠である。たとえマイクロブラックホールができたとしても、すぐ崩壊する。万が一、安定なブラックホールができて、中性子星と白色矮星の存在が危険のないことを示している。ストレンジクォークを多く含むストレンジレット (Strangelets) が生成され、それが他の物質と合体して次々とストレンジ物質に変えていく危険がないことは、RHIC実験で実証され、LHCではRHICより生成頻度が低いと結論している。

以上のような対応のおかげでブラックホール騒ぎはなんとか静まってきた。しかしファーストビームの日にはCERN Control Centre (CCC) は警備が強化された。実害はこれまでは起っていないが、皮肉にもCERNが発明したウェブによりCERN自身が噂のターゲットになってしまった、とJ. Ellisは述べた。インターネットや報道界では、LHCはヒッグス粒子生成マシンからブラックホール製造器に変わり、より多くの注目を世界中から集めることにもなった。

3.2 シンクロナイゼーションテストの成功

9月10日にファーストビームを出すに世界に宣言したが、その前にLHCへのビーム入射テストを、入射といわずシンクロナイゼーションテストと表現を変えて実施した。8月8-11日には時計回り方向入射とセクター23部のビーム輸送が、8月22-25日には反時計回りの入射とセクター78部の輸送が実施され成功した。8月9日のテストではビームを曲げて超伝導マグネットに当てるテストが行われ、 4×10^9 個の陽子で超伝導マグネットがクエンチすることを確認した。これは1987年に計算されていた予言とよく一致した。さらに直前の9月5-9日にはセクター34, 45, 67のビーム輸送にも成功した。この際、いくつかのマグネットの極性のつなぎ間違いが見つかり修正した。この事前の極性の修正がなかったら、9月10日のファーストビームはすんなり進まなかったはずである。ビームを使って口径テストも行われ、ビームパイプ中に障害物がないことが確認された。

3.3 ファーストビームとメディアディ

9月10日のLHCファーストビームイベントは予想以上に注目を集めた。300人以上の報道関係者がCERNに押し寄せ、図7のようにロゴをLHCで巻いて載せてくれたGoogle



図7 成功を祝うグーグルロゴ。

によると、その日に3,500以上の記事が出され、約450のテレビ局が取り上げた。衛星放送のユーロビジョンは2,100回以上も放映した。CERNのウェブは1億回以上のアクセスがあり満杯となった。幸いKEKは特別チャンネルを確保でき、セミナーホールで同時放映を行った。加盟国のみならず世界に広くCERNのニュースが流され、米国では一時は大統領選のニュースはLHCに出し抜かれて二番手になるほどだった。「基礎科学のニュースでこれほど注目を浴びたことはなかった。」とAymar CERN所長は語った。ファーストビームイベントを世界がこれほど注目した理由は、CERNが全世界の報道機関にウェブなどを通じて徹底的に事前通知したこと、ブラックホール騒動があったこともさることながら、標準理論の完成とそれを越える新物理の可能性をLHC計画が秘めていることを、まえまえから世間がそれなりに知っていたせいではないかと思う。CERN所長はファーストビーム周回成功後に間をおかず「あなた方の長期にわたる地道な努力が実を結んで世界にデモンストレーションができた、君たち一人一人とすべてを誇りに思う、ブラボー！」とCERN職員に向けメールを送っている。

特約したBBCが世界に同時中継するなか、午前9時半からLHCへのビーム入射が始まった(図8)。BBCの放送内容は録画されウェブ上で今でも見ることができる[9]。私もCERNに滞在中だったので、放映会場に20分前に行ったら満員で入場禁止のテープが張られていた。あわてて別の会場に行き、ドア近くで立っている大勢の人たちを強引にか



図8 加速器コントロールルームで壁の上のスクリーンを見守る運転員・歴代所長らの姿。

き分けて階段状の通路に座り込んで眺めていた。9時40分から時計回りのビーム入射が始まり、約10分おきにセクターを一つずつビームが進んでいった。緑色のビームスクリーンモニターに黄色のスポットが瞬く度に拍手が会場から起こった。BPMで測られたビームの軌道のズレが、10分後に次のセクターに進むときには ± 2 mm以内に補正されているのには感動した(図9)。最後のセクターのコリメータを開けてビーム一周が初めて達成する直前には会場はシーン

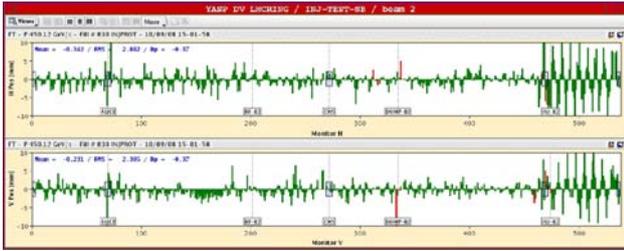


図9 BPMで測られたビームの位置 (V, H) はすぐ補正されて次の入射では小さくなっていった。

と静まり、固唾を飲むという言葉がぴったりだった。10時28分にビームスクリーンに二つのスポット（入射したものと一周したもの）が見えると、歓声と拍手がしばらく続いた。この光景と会場の熱気は、もう自分は死ぬまで見ないし経験しないだろうと、なぜか私はそのとき思った。アトラスコントロールルームでのその瞬間のスナップ写真がその熱気を伝えている（図10）。ATLAS, CMS, ALICE, LHCbなどの実験装置は、ともに上流のビームダンプから発生する多量のミュオンなどを観測した（図11）。

反時計回りのビーム周回は冷却系の調整でやや時間がかかり午後3時に成功した。午後9時30分には反時計回りの



図10 アトラスコントロールルームでビームの初周回成功を喜ぶアトラスチーム。

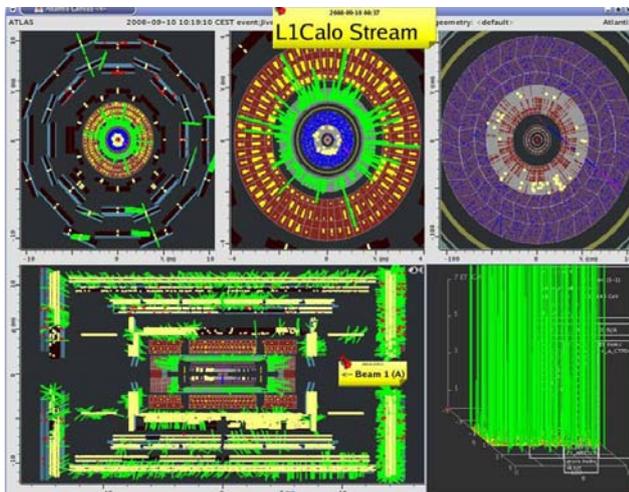


図11 アトラスで初めてのビームイベントを観測。

ビームが300回リングを回った。三日間にわたってビーム調整が続けられ、反時計回りのビームをRFキャプチャーしてリングを30分以上周回することにも成功した。ビームの振舞はあまりにも教科書通りなので、LHC加速器リーダーのLyn Evansは「まるで昔（LEPのことか）の旧い友達に会ったみたいだ。」と述べた。

アトラス実験チームでは、同じファーストビームディに各々の参加国の報道機関とCERNをハイビジョンTVで個別に結び、中継インタビューをしてビーム周回の成功を祝いあった。日本とCERNアトラス実験チームではKEK機構長・素核研所長や山本明氏と報道機関10社の参加を得て、前日に行った。詳しくは徳宿克夫氏が書いている[10]。

その後、予定では450+450GeVでの衝突を行う予定であったが、三日目に冷却系用の古い12kVA高圧変電器（30 tons）が壊れたため一週間の運転停止となった。

4. 大量のヘリウム漏れ事故

以下の情報は10月15日に発表された中間報告から抜粋したものである。詳しくは[11]に記述されている。

9月10日に成功したファーストビームの直前までは、8セクターのうち、6セクターまでが5.5TeV相当、一つが5.3TeV相当の電流までパワーテストされていた。セクター34のみが4TeVまでしかテストされてなかった（結果論ではあるが、もし事前にこの魔のセクター34を5TeVまでパワーテストしていたとしたら、事故はファーストビーム成功の前に起こっていたことになり、CERNは政治的にも大変な窮地に陥っていたことになる...）ので、ビーム再開直前の9月19日にセクター34のパワーテストを行った。電流が8.7kA（5.15TeV相当）に達した11時18分に、ダイポールC24と四極マグネットQ24の間をつなぐ超伝導ケーブルバスの結線部で抵抗領域が発達した。0.39秒後に抵抗による電圧が1Vになって電源が電流上昇を保持できなくなり0.46秒でトリップスロー減電モードになり0.86秒後に速い電流減少が始まった。最初の1秒で電気的なアークが発生し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。3秒後にビームパイプ#1が、4秒後にビームパイプ#2の真空が劣化した。それ以後起こったことの詳細も技術報告[11]に載っているが、省略して以下に主要な項目を抜粋する。

- 約100台のマグネットのクエンチ検出器が動作しヒータートリガーによるクエンチが発生した。
- 漏れ出した液体ヘリウムにより真空容器内の圧力が上昇し、スプリング型安全弁が開きヘリウムがトンネル内に漏れ出した。

- しかしいくつかの真空容器のサブセクターでは圧力を 0.15 MPa 以下に保つことができず、隣のサブセクターとの間の真空隔壁に大きな力がかかり破壊された。
- その力でいくつかのダイポールマグネットが物理的に動かされ、四極マグネットを入れた短直線部 (SSS) は支持ジャッキからずれて、一部ではトンネルのコンクリート床のアンカーが破壊された。
- セクター全体の 15 トンのヘリウムのうち 2 トン分は速い速度でトンネル内に漏れ出し、酸欠による緊急停止が働いた。電源回復までの間にさらに 4 トンのヘリウムが失われた。トンネル内の酸欠状態は約 6 時間後に解消された。
- 点検により、スス状の塵によって汚れが広がっていることが判明した。この塵はビームパイプの中にも、ある長さにわたって広がっていた。また断熱真空容器のスーパーインシュレーション層にも損傷があった。

事故の直接原因はマグネットの間の結線部での抵抗値の増加 発熱 アーク発生である。この結線部では図 12 に示すように両マグネット端からの超伝導ケーブルは長方形の安定化銅と 3 枚のスズ銀ハンダ板に挟まれて電磁誘導ハンダ付けされている。ジョイントあたりの発熱を 100mW 以下に抑えるため接続部の抵抗は 0.5 nΩ 以下であることが要求されている。今回の原因の結線部の抵抗は 200nΩ 程度だったと推定されている。おそらくハンダ板をハンダ付けの際に入れ忘れたのではと推定されるが、その部分は溶解してしまったので確認できない。ちなみにこのようなケーブル接続部はリング全体で 10,000 カ所以上ある。

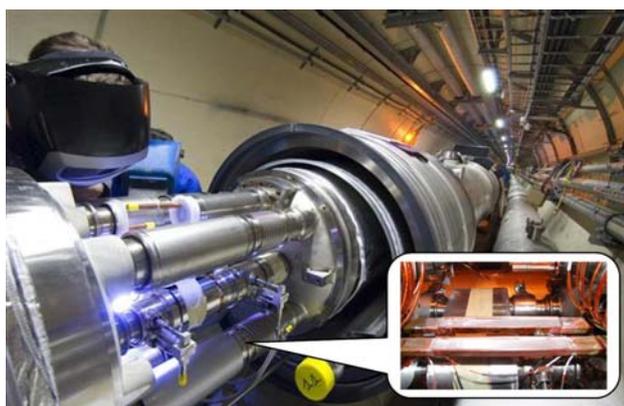


図 12 マグネット間の接続作業写真とアーク発生場所と推定される超伝導バスバーの位置と結線部分の拡大図。

CERN は翌日の 9 月 20 日にプレスリリースで事故を発表し、さらに 9 月 23 日にはビーム運転の再開は 2009 年になると発表した。発表の中で Aymar 所長は「9 月 10 日の LHC 運転開始で大成功を収めた直後の事故だけに 精神的ダメージであることは間違いない。しかし、LHC のファーストビーム入射成功は、何年にもわたる綿密な準備と、CERN の加

速器複合施設建設・運転に携わるチームの技術の証である。われわれはそれと同様の厳格さと応用力をもって今回の痛手を克服できると信じている。」と述べた[12]。LHC と同様の大型超伝導加速器を持つフェルミラボと DESY などからは「LHC は非常に複雑な装置であり、大規模でかつ多くの分野で技術の粋を尽くしている。特に運転初期には一時的な運転停止を引き起こすことがある。」などの励ましと協力のメッセージが寄せられた。

2008 年 11 月末での事故調査と修復作業の進展状況は以下にリストアップしたが、情報が多岐なのですべては網羅していないし、表現は必ずしも正確ではない場合もある。

- 事故発生直前に予兆があったか詳しく調べた結果、熱の消費がわずかに増える兆候が確認できた。
- マグネット・バスバー・結線部を含んでクエンチ検出システム的大幅な改善を行い、電圧と熱の予兆を検出しインターロックを強化する。このために約 2,000 台のクレーンと 160km のケーブルを新たに設置する。
- 真空容器についている安全解放弁の容量と数を増強して、設計の 40 倍、この事故の 2 倍の液体ヘリウム漏れに対応できるようにする。すべてのダイポール (現在冷えているものを除く) に安全解放弁を付ける。
- 真空隔壁付近の外部支持を強化する。
- アクセス規則を再調査し改善強化する。
- 三つのセクターを常温まで上げる。
- CERN 内外から約 100 人のマンパワーを動員する。建設時に参加したエキスパートを確保した。
- 年内に 39 台のダイポールと 14 台の SSS を取り外し、約 20 台のスペアダイポールを据え付ける。12 月 5 日までに 12 台のダイポールと 6 台の SSS が地上に搬出された。
- マグネットは修理規模の大小で 3 種類に分類して修理する。修理されたら地上で冷却励磁テストを行う。
- ビームパイプの内部汚染は、取り出したマグネット以上には広がっていなかった。
- 低い電流で抵抗の生じている場所を特定する強力な方法が開発され、冷えているセクターで系統的な検査を行っている。二つのダイポール内部の結線で基準より大きな抵抗が見つかった。ただそれらは地上でも地下でも既にフル励磁に成功している。マグネット間の結線部では基準以上の抵抗は見つかっていない。
- マグネットの過去の地上テストのデータを注意深く再調査している。
- バスバーの保護を強化し、似たような事故が発生しても連鎖的な破壊が起こらないようにする。

- クエンチトレーニング作業は行わないので、運転再開後のビームエネルギーは7TeVには達しない。おそらく5TeVの運転になると予想される。

12月5日にCERNはプレスリリースで「2009年3月までに、セクター34のマグネットをすべて据え付ける。2009年6月末までに、LHCを冷却してパワーテストができる状態にする。」と発表した[13]。

5. LHC 完成記念祝賀会

10月21日のLHC完成記念祝賀会に参加する各国代表は、午前中には夫々の国担当者に公式ガイドされて実験装置や加速器の見学を済ませた。日本代表の山内文科副大臣らの一行は中田達也氏（ローザンヌ工科大学、前LHCbグループスポークスパーソン）と池田仁美氏（KEK加速器）にエスコートされてATLAS、LHCトンネル、LHCbを見学した。

午後3時からの式典は、スイス大統領 P. Couchepin 氏、フランス首相 F. Fillon 氏はじめ関係国の大臣、著名な物理学者ら約一千名を招待して、超伝導マグネットが組み立てられた建物を会場にしておごそかに行われた。報道陣の見守る中、各国代表が二台のオートバイに先導されて黒塗りの自動車ですべてと刻みで会場に乗りつけた。代表らの写真撮影（図13）後、CERN 所長や各国代表のスピーチ（内容の一部は[10]参照）に続き、Carolyn Kuan の指揮でスイスロマンズオーケストラが新作の audiovisual コンサート“ORIGINS”を演奏するなかで“LIFE: A Journey Through Time”というナショナルジオグラフィック写真家作成による映像が映し出された。生演奏を聴きながらCGビッグバンから遠い銀河・火山・雲・花・砂漠・鳥の群が交叉するスクリーンを見ていると、悠久の流れを泳いでいるような気分になった。



図13 LHC完成記念祝賀会での参加国代表者。

式典後はマグネットの地上テスト棟で著名なシェフによるピュッフェが提供された。その会場で特別にセットされたイベントが日本代表の山内文科副大臣によるダルマセレモニーである（図14）。このダルマは1995年6月の理事会に与謝野文部大臣が出席して、CERN 非加盟国として

は最初に、日本政府がLHC加速器の建設に協力を宣言した時に、CERN側が用意したダルマに与謝野大臣が片眼を入れたいわくつきのものである[14]。CERN 所長室に13年半座り続けた後、ようやくLHCが完成して両眼が入ったことになる。



図14 山内文科副大臣によるダルマの眼入れ式。白髪の人がLlewelyn Smith 元所長，右端がAymar 現所長。

完成式典はLHC建設に参加した会社や組織からの寄付で可能になった。おごそかな式典の夜にはCERNの職員らの祝賀会LHC Festが同じ会場で開かれ、3,000人以上の参加者があり、映像や演奏や踊りなどで深夜まで盛り上がった。LHC完成祝賀式典とLHC Festの写真と映像はLHC2008にまとめられ、今でもウェブで見ることができる[15]。

6. CERN の将来計画案

LHC完成がほぼ確実になった2006年に、CERNはECFAと協力して欧州の高エネルギー物理学の戦略を立てた。CERN設立時の文書に書かれた「CERN理事会は欧州全体の粒子物理の責任を持つ。」という点をAymar所長が強調して実現したものである。欧州全体からの粒子物理研究者を集めた二つのワークショップを経たのち、2006年7月のリスボンでの特別理事会で承認された「粒子物理学における欧州の未来戦略」[16]によると、優先度順に

1. LHCの物理の可能性を最大限に引き出すルミノシティアップグレードに向けての開発。
2. 最前線の加速器技術開発（CLIC、高性能マグネット、高強度ニュートリノ）の強化。
3. 2010年頃の評価に向けてのリニアコライダーの設計と技術的な準備。
4. ニュートリノプログラムの促進。
5. 非加速器実験の調整と協力。

などが挙げられている。この欧州戦略に基づいて、CERNはLHC完成のために2008-2011年の4年間に総計で240

MCHF の追加予算を加盟国に認めてもらった。また最近、欧州戦略のための事務組織を CERN 理事会の下に置くことになった。

2008 年 4 月には、LHC の高輝度アップグレード (SLHC) に向けての R&D を開始する会が CERN で開かれた[17]。LHC アップグレードを二段階に分け、Phase-1 では 2013 年に ATLAS と CMS の衝突点光学を新しい Nb-Ti 超伝導マグネットでアップグレードする。Phase-2 では現在建設が始まった 160MeV の Linac4 に引き続いて 4GeV の SPL (Superconducting Proton Linac) と 50GeV の PS2 を建設する案が出されている。

一方、CLIC (Compact Linear Collider) の開発は 1990 年代から CERN で進められてきた。2010 年までに CLIC の 2 ビーム加速方式の原理を実証する加速器施設 CTF3 が CERN で完成する予定である。CLIC は当初は 30GHz の高周波数での加速を目指していたが、最近になって 12GHz に変更された。実証テストが成功した後は 2010 年代に CLIC 計画の技術設計に進む予定になっている。

欧州戦略に基づくことは明確なものの、2010 年代の CERN の具体的な将来計画は、LHC 運転の開始、2009 年からの Rolf Heuer 所長の就任、2011 年までの LHC ローンを支払い、LHC から出てくる物理結果などの要素で、まだかなり流動的であると思われる。2007 年に理事会に出された中期計画の文書[18]には、国際的な計画との関連に関し、「二つのプログラム (LHC アップグレードと CLIC の技術設計) に肯定的な決定がなされれば、2011-2016 年の間に、予算の範囲内で CERN が他の大きなプログラム (ILC またはニュートリノファクトリー) に実質的に参加することは不可能である。しかし二つのプログラムのどちらも認められない場合、あるいは欧州の中でもっと野心的な活動と支援が期待されるならば、上記の立場は全面的に変わることもありうる。」との記述が見受けられる。

参考文献・ウェブページ

- [1] 日本物理学会誌 2007 年 12 月号 小特集:「LHC 実験が始まる」
- [2] LHC ダッシュボード:
<http://lhc-new-homepage.web.cern.ch/lhc-new-homepage/DashBoard/index.asp>
- [3] LHC 冷却状況: <http://lhc.web.cern.ch/lhc/>
- [4] 高エネルギーニュース 27-2: LHC ビーム最終収束超伝導四極磁石の開発とコミッションング, 中本健志・佐々木憲一

- [5] CERN プレスリリース PR06.08 (2008 年 8 月 7 日)
- [6] You-Tube CERN black hole :
<http://jp.youtube.com/watch?v=M3iMX8xzofc&feature=related>
- [7] S. Giddings and M. Mangano, Phys. Rev. **D78**, 035009 (2008).
J. Ellis *et al.*, J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. **35** (2008) 115004.
- [8] 2008.6.20 CERN プレスリリース PR05.08 と安全性について (10 カ国語の翻訳付き)
2008.9.05 CERN プレスリリース PR07.08
<http://public.web.cern.ch/public/en/LHC/Safety-en.html>
http://en.wikipedia.org/wiki/Safety_of_the_Large_Hadron_Collider
<http://www.kek.jp/ja/news/topics/2008/LHCsafety.html>
- [9] CERN によるファーストビーム動画:
<http://cdsweb.cern.ch/record/1125916>
- [10] LHC のビーム初周回の中継放映を巡って、徳宿克夫, 加速器学会誌 2009 年 (投稿中)
- [11] 2008.10.16 CERN プレスリリース PR14.08
2008.12.5 CERN プレスリリース PR17.08
およびそれらに付随する詳細技術レポート
- [12] 2008.9.20 CERN プレスリリース PR09.08
2008.9.23 CERN プレスリリース PR10.08
- [13] 2008.9.23 CERN プレスリリース PR17.08
このページには事故現場の写真が載せられている。
- [14] LHC Milestone 1995 参照
<http://lhc-milestones.web.cern.ch/LHC-Milestones/year1995-en.html>
- [15] LHC2008 <https://lhc2008.web.cern.ch/LHC2008/>
- [16] 本文と和訳は以下にある。
<http://atlas.kek.jp/sub/CERN-LHC/StrategyJ.pdf>
- [17] SLHC kick-off meeting
<http://indico.cern.ch/conferenceDisplay.py?confId=30583>
- [18] CERN/2728/Rev. 15 June 2007