

話 題

ヒッグス粒子の発見に成功した LHC 加速器物語

リンドン エヴァンス^{*1}・近藤 敬比古^{*2}

The Story of LHC which successfully led the Discovery of the Higgs Particle

Lyndon EVANS^{*1} and Takahiko KONDO^{*2}

Abstract

The Higgs particle was discovered at LHC as announced on July 4, 2012 by CERN. This article describes the overview of the LHC accelerator from its conceptual stage all the way to the initial LHC operation. This is a digested Japanese translation of “The Large Hadron Collider from Conception to Commissioning: A Personal Recollection” appeared in RAST 3 (2010) 261-280.

1. ヒッグス粒子の発見

2012年7月4日にCERNは2つのLHC実験、アトラスとCMSでヒッグスと思われる粒子が発見されたと発表した。そのニュースは世界を駆け巡り主要新聞の一面を占めた。素粒子物理学史上で待ちに待った世紀の発見であった。ここではそのLHC加速器の概要を紹介する。第2著者(近藤)は加速器の専門家でないが、1980年代から開始されたSSCやLHCプロジェクトに初期の段階から一実験屋として直接携わってきたので、プロジェクト全体と加速器建設の概要と推移をそれなりに理解している。LHC承認から15年以上にわたりLHC加速器のリーダーであったLyndon Evans氏(CERN)を訪れて資料をお願いしたところThe Large Hadron Collider from Conception to Commissioning: A Personal Recollection¹⁾という論文をその場で頂いた。それは「LHC物語」と表現して良いほどLHCプロジェクト全体と加速器の本質を現場責任者の目で記述しており読んで圧倒された。私が浅い加速器の知識と経験を述べるより、そこに載せられた記述には加速器専門家にとっても歴史的な価値があると判断して、ここに日本語訳を載せた。なおこの論文はヒッグス粒子発見の2年前に書かれたも

のである。以下「註」で始まる部分は第2著者が付け加えた部分である。

2. はじめに

LHC (Large Hadron Collider) の建設は起案から運転開始までほぼ30年を要した巨大なプロジェクトであった。LHCの誕生はCERNの次期計画を議論するために1984年に加速器屋と実験屋がローザンヌワークショップに集まった時だと一般に言われている²⁾。しかし実際にはその起源はもっと旧く、CERNの交差型ストレージリング(ISR)とそれに続いてCERNとフェルミ研究所で陽子・反陽子コライダーが建設されたところまでさかのぼる。この論文ではLHCを実現するために満たさなければならなかった政治的・技術的・財政的課題のいくつかを歴史的な観点で記述することにした(図1)。

LHCでの最高の可能なエネルギー(7 TeV)を既存の周長27 kmでかつ口径が3.8 mしかないLEPトンネルの中に建設するには多くの技術革新が必要だった。まず狭いトンネル内に入れるため2-in-1型のマグネット(BNLのBob Palmerが1978年に提案した)の技術開発が必要であった。さらに超流動ヘリウム冷却を大規模に採用することでコスト的にも可能なNb-Ti超伝導線³⁾で8.3

^{*1} CERN and Imperial College London (E-mail: lyn.evans@cern.ch)

^{*2} 高エネルギー加速器研究機構 KEK, High Energy Accelerator Research Organization (E-mail: taka.kondo@kek.jp)



図1 LHC 加速器

Tesla を達成することを目指したのである。

LHC 加速器の詳細は LHC 設計文書³⁾ にあり細かい文献リストも載っている。さらに LHC と実験装置についてのよりポピュラーな説明は文献⁴⁾にある。ここではプロジェクトの承認から運転開始までの概略をまとめ、この真に素晴らしい加速器が動き出すまでに必要だった加速器技術の本質的なポイントと建設途中での苦難を述べる。

3. LHC プロジェクトの承認

LHC の誕生は苦難を極めた。CERN での pp 衝突の概念は 1977 年に遡る。ところが 1987 年にアメリカが SSC (Superconducting Super Collider) の建設を決定した⁵⁾。SSC の重心系エネルギーは 40 TeV で LHC の 3 倍にもなるため LHC 計画には疑問符がつき瀕死の状態に陥った。これをともかくも存続させたのが W, Z 粒子の発見で 1984 年にノーベル物理学賞を受賞した Carlo Rubbia である。彼は「エネルギーでの劣勢はルミノシティを SSC の 10 倍に上げることで挽回できて SSC と互角に戦える。しかも SSC よりはるかに安くできるし重イオン加速もできる」と主張した。

そして SSC は建設途中で中止された (1993 年)⁶⁾。しかし当時のヨーロッパの財政事情は暗く、大きな計画を承認する雰囲気ではなかった。CERN の最大の出資国ドイツは東西ドイツ統一のためのコストで、他の多くの CERN 加盟国も EU

創設のマスターヒト条約の条件を満たすために、苦しんでいる時期だった。

1993 年末に LHC 建設費をぎりぎりまで切り詰めかつ LEP の運転以外のプログラムを殆ど止める方針が提案された⁷⁾。しかしドイツとイギリスは予算の増加に賛成せず、さらに投票規則を単純過半数から二重多数決方式に変えて理事会決定をしにくくした。

一方、アメリカは SSC 中止後の粒子物理学将来パネルで LHC 建設参加を推薦し⁸⁾、インド・日本・ロシアからも協力の意向が届いた。

1994 年 6 月に再び LHC 計画が理事会に提案された。この時理事会は「投票を任意にして投票したい国のみ投票して、理事会を開会状態のまま終える」という異常な方法を選んだ⁹⁾。17ヶ国が LHC 計画を承認したがドイツとイギリスは二重多数決方式を使って阻止した。さらに二国は「CERN の予算執行によって経済上の特典を受けているホスト国のフランスとスイスは追加財政貢献をすべきであり、CERN の年間予算も実質毎年 1% ずつ減らすべきだ」と主張した。

CERN は LHC の二段階建設案を 1994 年 12 月の理事会に提案した。第一ステージは 3 分の 1 のマグネットを除いた missing magnet 方式にすることで約 300 億円を節約し、その後いずれアップグレードして最高エネルギーに到達するという案である。フランス・スイス・ドイツ・イギリスの間で激しい議論になったが、フランスとスイスが 2% の年間インフレーション調整を受け入れた (他国は 1%) ことがきっかけで、半年前で議決されないまま残っていた二段階建設案の承認が決議された¹⁰⁾。ただし 1997 年に非加盟国からの貢献の規模を見極めて見直すことを条件としていた。理事会の決議にはフランス・スイスとの困難な交渉を反映して、外交交渉で使われる *couché* (外交辞令) と呼ばれる表現を用いて「理事会はフランスとスイスが LHC プロジェクトを支援し加速するために好意的な貢献をするという約束に感謝の意を表す」という文言が織り込まれた。

その後は非加盟国からの協力を取り付けるための交渉が続いた。最初に財政的な協力を宣言したのは日本であり 1995 年 6 月に日本は CERN 理事会のオブザーバー国になった (註: 日本の LHC 協力 138.5 億円のうちの最初の 50 億円の

拠出金は阪神・淡路大震災復興のための補正予算に組み込まれた). 日本に続いて1996年3月にインド・ロシアが1996年12月にカナダがLHC協力を宣言した。

ところがドイツは東西ドイツ統一のための財政負担を軽減するために, CERNに支払うドイツの拠出金を8-9%減らしたいと一方的に宣言した。イギリスも似たような予算削減を言い出した, イギリス科学省大臣はちょっと前までは「CERNへの拠出金はreasonable, fair and sustainableだ」と言明していたのに, 残った唯一の道はCERNが銀行からローンを受けてLHC完成後に返済するというのを承認することであった。

1996年12月の理事会でドイツは「LHCには大きなリスクが避けられない」と宣言した。一方で理事会は, ①銀行からのローンで建設予算不足を補う, ②コストを建設の半ばでレビューし完成年を調整する, という条件付きでLHCの一段階建設案を承認した。しかしLHCの建設コストを立案した1993年にはまだ超伝導マグネットのプロトタイプも完成していなかったし, 承認された建設コストには予備費がすべて削除されたので, いずれ財政危機が起こることは避けられなかった。実際2001年にCERNは18%のコスト超過を理事会に通告し大問題になった。外部レビュー委員会が設置され, ①銀行ローンを増やす, ②完成時期を延ばすことになった(註: 18%のコストオーバーランは加速器史上では稀にみる小ささである。SSC計画は総建設費約4000億円で発足したが途中で1兆2000億以上に上がり命取りになった。ちなみにFermilabの400 GeVシンクロトロン建設では所長のR. Wilsonは建設予算が余ったので国に返したという逸話が残っている)。

一方, 自国の素粒子物理学に責任を持つ米国エネルギー省は査定パネルを独立に設置してLHC計画を審査し「23億スイスフランの加速器建設コストは十分で妥当である」と報告した¹¹⁾。その報告書では「最も重要なことは, 技術も人材もCERNには存在することだ。強力な指導体制が存在することに加えて, プロジェクト成功の歴史(註: SPSを改造して陽子・反陽子コライダーでW, Zボソンを発見したことやLEPプロジェクトが成功したこと)を考慮するとLHC計画は成功するという確信が持てる」との記述がある。1997

年12月にはホワイトハウスのインディアン条約の間でエネルギー省長官とCERN理事長が合意書に署名をした。現在1300名以上のアメリカ研究者がCERNのユーザーである。

発足時のごたごたと建設途中でのしゃっくり(hiccup)はあったが, その後はLHC加速器の建設はかなりスムーズに進みLHC加速器は完成した。LHCはヨーロッパの国の協力とリーダーシップの素晴らしい典型例である。

4. コライダーの簡単な歴史

コライダー(衝突型加速器)は1950年代後半では加速器屋の夢であった。重心系エネルギーがビームエネルギーの平方根でしか増えない固定標的実験に比べビームエネルギーに比例して増加するからである。1960年代にはSLAC(米), フラスカッチ(伊), ノボシビルスク(露)で最初のコライダーが作られたが全て e^+e^- コライダーであった。ビームから出る放射光のおかげでビームの横方向の自然ダンピング効果がありビームを強く絞れるからである。しかしながら放射光によるエネルギー損失は E^4 に比例するため e^+e^- コライダーでは最高エネルギーが限られてしまう。

1969年にCERNは陽子コライダーISR(Intersecting Storage Rings)の運転を開始した。これは加速器の歴史上では大変なチャレンジであった。放射光による減衰効果がないため多くの加速器屋が成功を疑った。しかし結局ISRは加速器としては成功し31 GeVのビームエネルギーに到達できた, e^+e^- コライダーでは数GeVが最高だった時代に。この成功で加速器屋は放射光ダンピングがなくても陽子の蓄積リングを動かす術を知りLHCへ発展する道が開けたのである。反面ISRを使った実験の成果は芳しくなかった。ISRの殆どの実験装置は前後方の小角度をカバーしているだけで90°方向などの大角度は重視していなかったからである。同じころSLACの e^+e^- コライダーSPEARの実験装置Mark-1での Ψ 粒子の発見で新しい物理は大角度にあることが証明された。ISRで実験屋が学んだ教訓でもあった。

LHCにつながるもう一つの重要なステップは, Carlo Rubbiaが提案した陽子・反陽子コライダー(SppS)である。1970年代に建設された固定ターゲット実験用の加速器SPSを改造し, Simon

Van de Meer が発明したビーム冷却法を使って PS で作られた反陽子ビームを冷やして蓄積し、それを SPS の一つのビームパイプの中で陽子と反対方向に廻してビームエネルギー 273 GeV ままで加速し陽子ビームと衝突させた。そして UA1, UA2 の実験で弱い相互作用を媒介する W, Z ボゾンが発見された。この成功で LHC 加速器と実験装置に必要な知識が得られたといえる。

他方大西洋を隔てた米国の Fermilab では世界最初で最大の超伝導シンクロトロン Tevatron が建設された。この加速器のおかげで普通のマグネットに比べて磁場の性質が悪くてもビームを蓄積できることが実証された。1987 年には Tevatron が SppS のエネルギーを越えてエネルギー最前線加速器となった。

5. LHC の設計

LHC では建設コスト削減のため CERN にあるインフラを最大限に利用した。LEP トンネルと既存加速器の利用がその最たるものである。しかしそのため技術的な選択に強い制限がかかった。まず周長 27 km のトンネルで最高エネルギーを達成するため、それまでの超伝導加速器を 60% 上回る 8.3 Tesla の磁場を目指した。そのための超伝導マグネットと付随冷却システムの技術は未踏のものであった。さらにトンネルの径が 3.8 m なので 2 つの真空容器を設置するのは不可能だったので 2 つのビームを 19 cm 離して共通のヨークに入れた。おかげで総建設費を約 20% 減らすことができた。既存加速器の最高エネルギーは 450 GeV と低いので LHC へのビーム入射は技術的に難しかった。

6. 超伝導マグネットとクライオジェニクス

この 2 つは LHC の心臓部分である。表 1 に LHC 加速器で用いられた超伝導マグネットをリストした。主ダイポールと四極マグネットの他に軌道と chromaticity 補正, 永久電流 (persistent current) 制御のための高次の多極補正, 衝突点の低いベータ挿入のためのダイポールと四極マグネットなど多種多様の超伝導マグネットが数多く必要だった。予備のため coherent instability の Landau damping のために強い八極マグネット (MO) も数多く設置した。これは実際にバンチ

表 1 LHC の超伝導マグネットリスト

Type	Number	Function
MB	1232	Main dipoles
MQ	392	Arc quadrupoles
MBX/MBR	16	Separation & recombination dipoles
MSCB	376	Combined chromaticity & closed orbit correctors
MCS	2464	Sextupole correctors for persistent currents at injection
MCDO	1232	Octupole/decapole correctors for persistent currents at injection
MO	336	Landau damping octupoles
MQT/MQTL	248	Tuning quadrupoles
MCB	190	Orbit correction dipoles
MQM	86	Dispersion suppressor & matching section quadrupoles
MQY	24	Enlarged-aperture quadrupoles in insertions
MQX	32	Low beta insertion quadrupoles

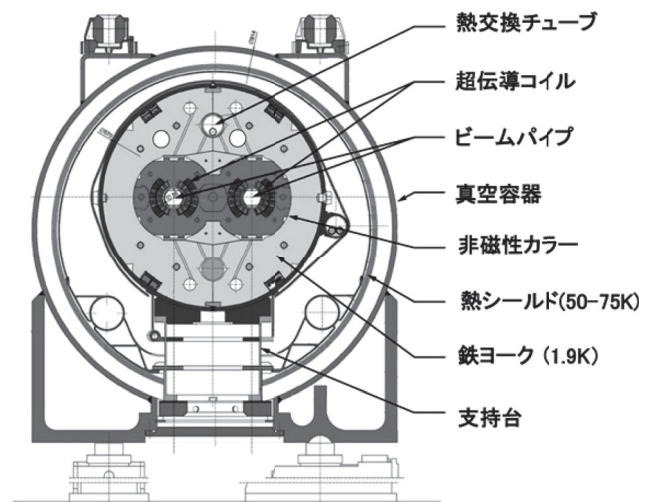


図 2 超伝導ダイポールマグネット断面図

強度を設計より上げた時にビームの安定性を保つために役立った。

主ダイポールマグネット (図 2) の磁場 8.3 Tesla を実現する物質には、延性のある Nb-Ti 合金か Nb₃Sn 金属間化合物の 2 つがある。後者は 4.5 K の臨界超過ヘリウムで目標磁場を実現できるが力学的に砕けやすくコストも最低 5 倍高いので大量生産には向かなかった。唯一の解は Nb-Ti であるがヘリウムのラムダ点より低い 1.9 K まで冷却する必要がある。このため大幅に革新的なクライオシステムが必要となった。

超伝導ケーブルは直径約 1 mm のストランドか

らなり 1/3 は Nb-Ti で 2/3 は銅である。Nb-Ti フィラメントは径 6 ~ 7 μm で銅のマトリックスの中に 1 μm の隙間をおいて正確に並べられている。Nb-Ti のインゴットと銅の棒と缶を何度も引き延ばして作られる (図 3 参照)。

ダイポールマグネット 1 台はできるだけ長い方がコスト削減になり filling 係数も得するが、道路運搬や設置設備の制限を考慮して 15 m に決めた。標準ラティスは 106.9 m で 6 台のダイポールマグネットと 2 台の四極マグネットからなる (図 4)。ダイポールマグネットの両端には小さな八極と十極を置いて、入射時に永久電流が引き起こす強い非線形現象の高次磁場を補正した。他に trim, skew quad, Landau octupole など各種の補正マグネットを置いた。

ダイポールマグネットでは電磁力で機械的な力が 300 tons/m にも達しコイルを外側に押し出す。その力は鉄ヨークとステンレス円筒で囲まれた強力な非磁性鉄カラー (註: 材料は新日鐵が供給) で保持される。ダイポールと四極マグネットの製造は歴史に残る事業だった。すべての超伝導ケーブルと部品は製品の一様性を保証するために CERN を通じて供給された。加盟国のバランスも考慮してダイポールは 3 社で四極は 1 社で製造さ

れた。クライオスタットへの組み込みは CERN で行い、すべてのマグネットはトンネルに降ろす前に 1.9 K で性能試験された。ケーブル製造からすべてのマグネットの製造試験が終わるまで 6 年かかった。

1.9 K まで冷却される物質の全重量は 37,000 トンで、そのために超流動ヘリウム約 80 トンが運転時に必要である。超流動状態で運転する主要理由は磁場を高くするためであるが、ラムダ点以下で運転することはそれなりに有利な点がある。導体は低温では比熱が急激に減るため、超流動ヘリウムの特殊な性質を利用する必要がある。コイル導線間の絶縁にはポリイミドテープ (註: カネカ製) を使い、巻き方を工夫して低い粘性のヘリウムがコイル導体間に侵入できるようにしてある。そして単位体積当たり導体の 2000 倍もある超流動ヘリウムの高い比熱のために熱の揺らぎを吸収できる。また 1.9 K で最高値になる熱伝導率 (OFHC (高伝導度無酸素) 銅の 1000 倍) のため、液体は循環させなくても熱を効率的に伝えることができるのである。

マグネットは 1 気圧の超流動ヘリウムの静的な容器の中にじゃぶ漬けて置かれる。液体ヘリウムは各ラティスに 1 本ずつ設置された 107 m の長さの直線状の熱交換パイプで連続的に冷却される (図 5)。熱交換パイプの内圧は 15 mbar で J-T バルブを通じてパイプに流れ込む膨張したヘリウムの温度は 1.8 K になる。このパイプの中に残る少量の超流動ヘリウムが蒸発するときの潜熱でマグネットが入っている容器内の循環していないヘリウム (1 気圧) が冷やされる。この方法は素晴らしく成功し LHC を長期にわたって所定の温度に保持している。

ビームエネルギーが設計値の 7 TeV の場合、陽子といえども放出される放射光がビームあたり

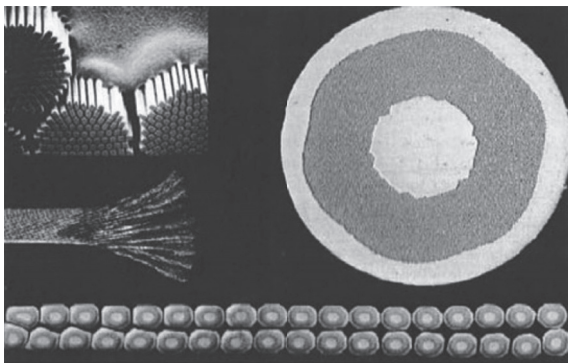


図 3 LHC 加速器用の超伝導導体とケーブル

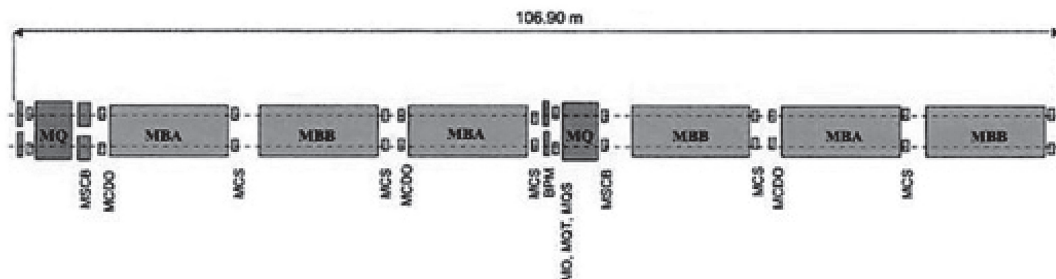


図 4 LHC の 1 セルの構造

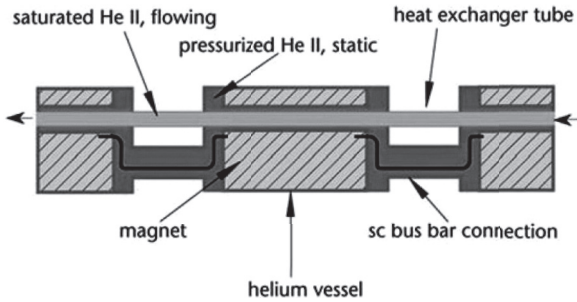


図5 LHC マグネットの冷却法の概略図

4 kW になる。シンクロトロン減衰効果には役立たないが 1.9 K のビームパイプにあたると厄介である。1.9 K での 1 W は室温換算で 1 kW なので冷却装置が膨大になってしまう。ビームパイプの内側に 20 K に冷やしたライナーを入れて放射光を遮ることで解決した。

7. 加速器の設置

LHC では ATLAS, CMS, ALICE, LHCb の 4 つの実験装置が設置された。それらの実験装置は CERN とは独立な組織を持ち、各国からの出資による予算で運営されており、CERN からの出資は 20% 程度である。しかし CERN は実験装置を設置する地下実験室を含むインフラを提供する義務がある。

7.1 土木工事

最初の仕事は 4 つの実験装置をどこに設置するか決めることだった。LHC リングはポイント 1 から 8 と呼ばれる 500 m の長い直線部と 8 個のアーチ部（セクターと呼ぶ）に分割される。このうちポイント 2, 4, 6, 8 の 4 つは LEP の実験装置が配置されており、それらの地下実験室の大きさは ALICE と LHCb を収容するのに十分であった。ATLAS と CMS ははるかに大きなドームを必要とし、かつ LEP 加速器が運転中なのに掘削を開始しなければならなかった。そのため偶数番のポイントは使えない。ポイント 3 はジュラ山脈の下で深いため不適格であり、ポイント 7 も様々な理由で大実験には合わなかった。残った二つのうちポイント 1 は CERN メインキャンパスのすぐ近くでポイント 5 は CERN から最も遠い。ATLAS, CMS とともに最も便利なポイント 1 を強く要求した。最終的にはボーリング調査の結果、ポイント 1 の方がより大きな実験室の掘削に適し



図6 CMS 実験用の立坑の工事では地下水流が速すぎるので液体窒素で壁を凍結して工事を行った。

ていたので ATLAS に、CMS にはポイント 5 に配分された。ALICE は、ポイント 2 で LEP 実験 L3 の大マグネットを再利用することになり、LHCb はポイント 8 が与えられた。

ポイント 1 と 5 の大きな地下実験室の掘削にはさまざまな問題が起こった。ポイント 1 の掘削はこのような地盤条件では今までで最大であった。また掘削は LEP 加速器が動作している間にも行わなくてはならなかった。ポイント 5 ではボーリングで地下水がたくさんあることを示したものの、掘削し始めたら水の流れる速度が驚くほど速かった。大規模な地面凍結を実施して立坑の周りに氷の壁を生成する必要があった（図 6）。

ポイント 5 の工事をさらに複雑にしたのは、現場工事の準備中に古代ローマ時代の農場（4 世紀 AD）の跡が発見されたことである。法律に従い考古学的調査ができるよう工事が直ちに停止された。ロンドン、リヨン、そしてローマの南西 35 km にあった古代の港湾都市オスティアで鑄造された宝石や硬貨が発見された。ロンドンで鑄造された硬貨は 309 から 312 AD の物であった。空中写真（図 7）をみてすぐわかった印象的なことは、現代の畑の境界の方向と発掘された村の境界の方向が正確に一致していたことである。つまり「土地台帳」または今の土地登記は、ローマ占領時のそれに起因するという証拠であった。

第 3 の土木工事は、LHC と SPS を接続する 2 つの 2.6 km のトンネルと 2 つのビームダンプトンネルと空洞の建設だった。

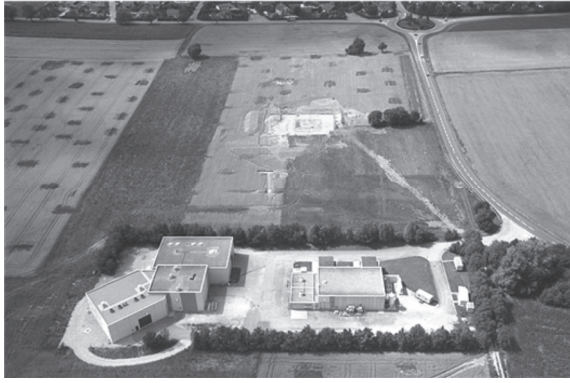


図7 CMS 実験室の工事では表面近くで古代ローマ時代の農場 (4 世紀 AD) の跡が発見された。

7.2 加速器用設備

加速器はマグネットを作ることだけではない。4つの直線部分が実験装置に割り当てられた後は、他の4つは加速器に欠かせない設備に割り当てられた。

図8はLHCリングのおおよその配置を示している。2つのビームはポイント1, 2, 5, 8で交差して他方のリングに移る。他の直線部分では別々の真空チェンバーを通る。ビームはSPSから2.6 kmのトンネルを通過してポイント2と8でLHCリングに入射される。ポイント3の直線部は高いジュラ山の中にあり地質条件が非常に悪い。1000 m以上の高さから岩石の亀裂や割れ目を通して大きな水圧が発生する。そのためトンネルの追加土木工事は許されなかったので、現存のトンネル内に収めることが可能な2つのコリメーションシステムの1つをここに設置した。

コリメーションはコライダーでは不可欠である。ビームが長時間貯蔵されるにつれ、主に磁場の非線形成分やビームビーム相互作用によって、ビームの周りにハローが増えていく (e^+e^- コライダーなら放射光のおかげでハローはすぐなくなる)。ビームハローをそのままにしておくと、最終的にビームパイプにぶつかり、実験装置に許容できない量のバックグラウンドを生じ、マグネットをクエンチの危険にさらす。コリメータは特別に設計された電動のブロックでビームパイプ内に入り込み局所的にビームハローを除去する。コリメータが加速器の口径を決めている。最高エネルギーにあるとき加速器の口径は、全ヨーロッパの地図が描かれているユーロ硬貨の中のイベリア半

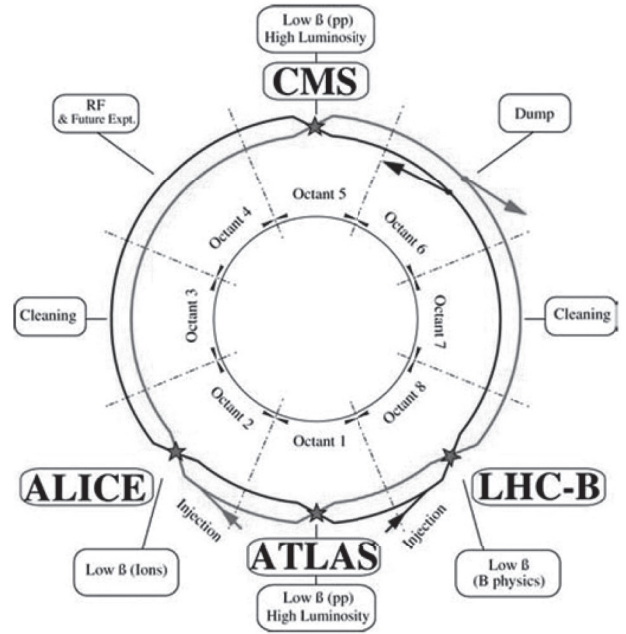


図8 LHC 加速器のレイアウト

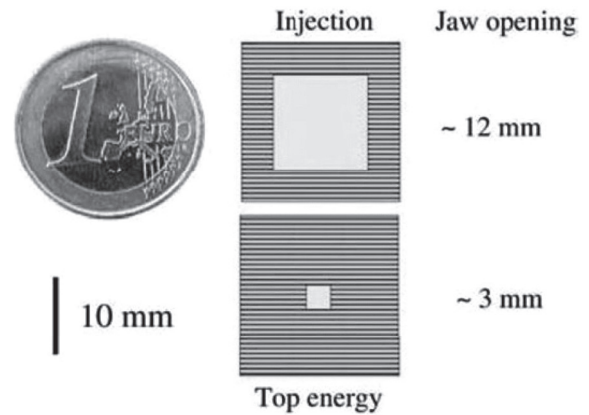


図9 コリメータの口径。上は入射時で下はトップエネルギーの時。左上の1ユーロ硬貨と比べて欲しい。

島の部分に相当するほど小さい (図9 参照)。ポイント7にはポイント3と同様の二次コリメータが設置されている。

ポイント4にはRF (400 MHz) 加速システムが設置されている。空洞内の電界は非常に高く500万 V/mを超える。ここでも超伝導が使われている。空洞本体は銅であるが内表面にはニオブの薄膜があり、電流が空洞壁を損失なしに流れることができる (図10)。

最高エネルギーの7 TeVで片方のビームの全エネルギーは350 MJouleでTNT火薬の80 kg

以上に相当する。従ってもしこのビームがコントロールされずに失われると、加速器にかなりの損傷が起こり回復に数ヶ月もかかってしまう。確実にしかも素早くビームを取り出して特殊な吸収体ブロック上にダンプできるシステムが不可欠である。このビームダンプをポイント 6 に設置した。特殊なマグネットセットが 1 ターンで全体のビームをキックしてリングの外に出す。取り出されたビームは 700 m の真空パイプを通過して、巨大なエネルギーを吸収するように設計された特殊吸収材ブロックに捨てられる。

ビームダンプはいろいろな原因でトリガーされる。たとえば、コリメータのところでビーム損失がリミットを越えたときとか、重要な電源が故障した場合などである。また通常運転中でも、ビーム強度が低くなったら次のサイクルのためにオペレータによってビームはダンプされる。

4 つの実験装置の両側の長い直線部分には、2

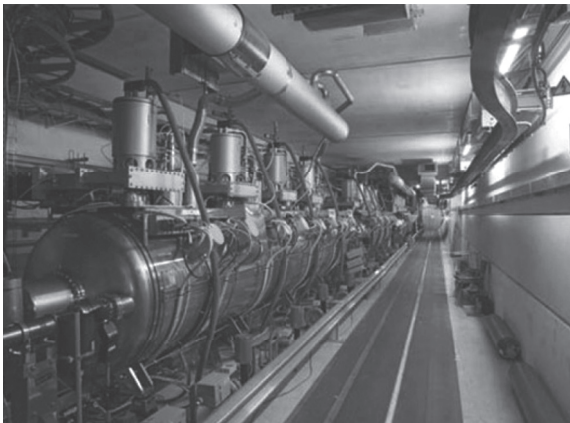


図 10 超伝導高周波空洞



図 11 直線部のインナートリプレット。オレンジ色のクライオスタットの中の四重極超伝導マグネットがビームを衝突点で 30 μm のスポットに絞る。

つのビームを近づけて、実験装置の中央の衝突点で半径約 30 μm の小さなスポットに集束するための機器が設置されている。これでは多くの特別なマグネットが必要で、LHC 加速器建設における国際協力のいい一例の部分でもある (図 11)。

ビームを集束させるために必要な超伝導マグネットは米国と日本で製造された。日本の超伝導マグネットは、CERN へ輸送される前に、米国へ出荷されて統一クライオスタットの中に設置された。2 つのビームを同じ軌道に載せるための特殊なダイポールは米国ブルックヘブン研究所で建設された。直線部にあるすべての常伝導から超伝導ケーブルに変換するフィードボックスはフェルミ研究所で作られた。そのほかインド、ロシアからも各種の直線部分用のマグネットの供給を受けた。

8. 最初のクールダウン

2008 年は非常に多くの作業が忙しく進んだ。上半期中に加速器全体 (図 12) を冷却できた。室温から 80 K には熱交換器内に液体窒素を送って気化させることによってマグネット内を循環するヘリウムを冷却した。1 セクターあたり 1200 トンの液体窒素が必要で、10 日の間に 60 台、4 時間ごとに 20 トンの液体窒素トラックが到着した。80 K から 4.5 K への冷却はヘリウム冷凍機が使用された。最後に 15 mbar のヘリウムを吸引するコールドコンプレッサが始動され 1.9 K の動作点まで温度が下げられた。

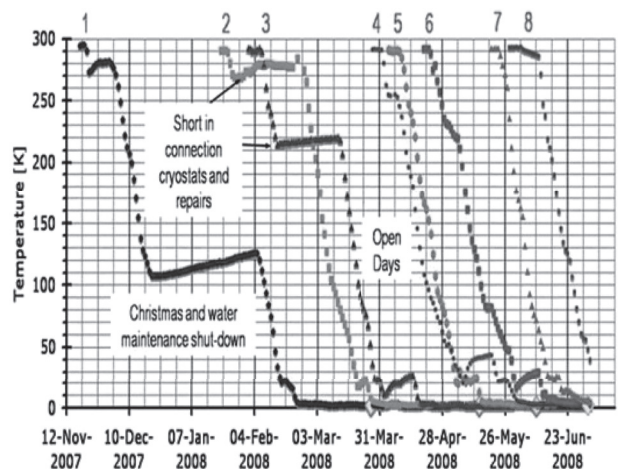


図 12 LHC セクターの冷却、最初の開始 (2007 年 11 月) から終了 (2008 年 7 月) まで 8 ヶ月を要した。

9. 最初のビームコミッショニング

2008年9月10日前までに8セクターのうち7セクターが5 TeV 運転のために5.5 TeV 相当の電流テストに成功していた。時間不足のため最後の1セクターのみ4 TeV 相当の電流までテストが終わっていた。LHC への初めてのビーム入射は、時計回りのビームを、軌道補正しながらセクターを一つずつ順次進めて次の直線部分でビームを停止させた。1時間未満でLHCを1周させることができ、蛍光スクリーン上には入射ビームと1周を終えたビームの二点が同時に光った(図13)。

その後間もなく数百ターンの周回ビームに成功した(図14)。RFシステムがまだオンでなかったため、デバンチが起こりビーム強度は減少した。図15はRFによる捕捉の過程を示す。画面上の各水平線は10ターンおきのビーム強度を表示し

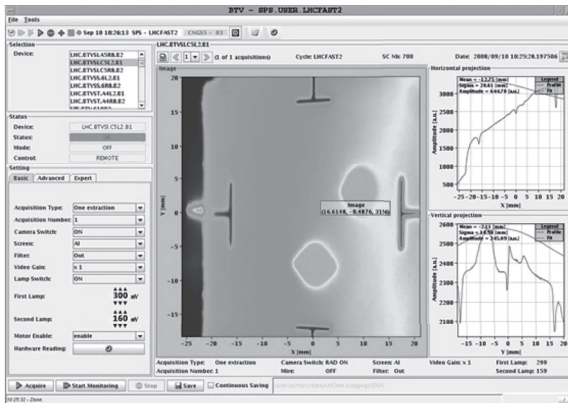


図13 ビームが初めてLHCを1周して入射ビームと1周したビームが蛍光スクリーン上に光った瞬間。

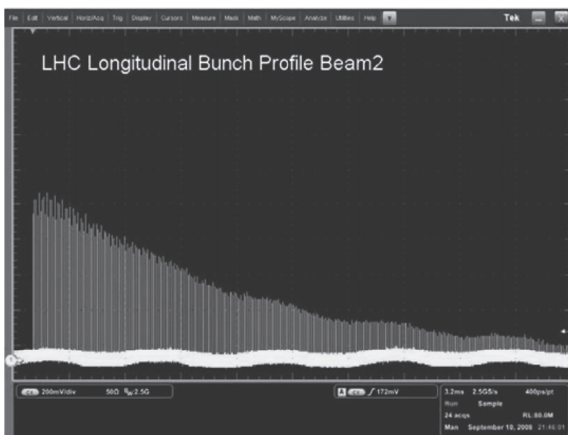


図14 RFなしでビームは数百回減衰しながら回った。

ている。RFがないと約250ターン(25ms)でデバンチしたがこれは期待通りである(1)。次の図のように、RFをONにしてビーム捕獲を試みたが、入射位相が全く間違っていた(2)。次に位相を調整したら部分的なビーム捕獲に成功したがわずかに周波数がずれていた(3)。最後に周波数を調整して完璧な捕獲に成功した(4)。次に最初のClosed-orbit補正を実施した。驚いたことに、ごく初期の段階なのに軌道のずれはRMSで2mm未満であった。水平面内での平均軌道は半径方向に1mmほどずれており、これは約0.09%のエネルギーミスマッチがあったことを示している(図16)。

10. 事故

LHCの試運転はその後もう一つのリングも含めて急速かつ順調に進んだ。9月18日にポイント8で変圧器が故障し、そのセクターでのクライオジェニックがダウンした。ビームを循環させることは不可能になったので、この時を使って、最後に残っていたセクター3-4を他のセクターと同

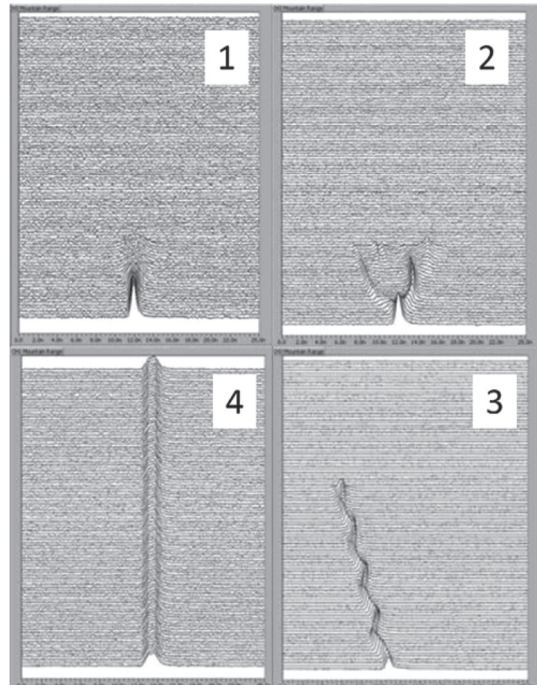


図15 LHCに入射された450 GeVのビームの時間経過。下から上に各10周毎のビーム強度がプロットしてある。1はRFなし時、2はPhaseが合わなかった、3は周波数が違った、4はRF捕獲に成功した時。

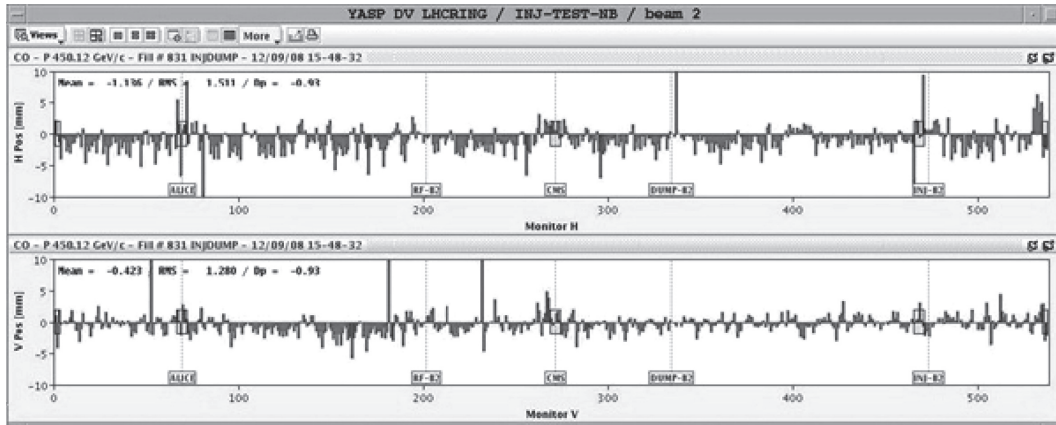


図 16 補正後の Closed-orbit. 上図が水平方向, 下図が垂直方向. 縦軸は ± 10 mm で横軸は LHC 全周を示す. 周波数が少し違ったので 0.09% のエネルギーオフセットが見える.

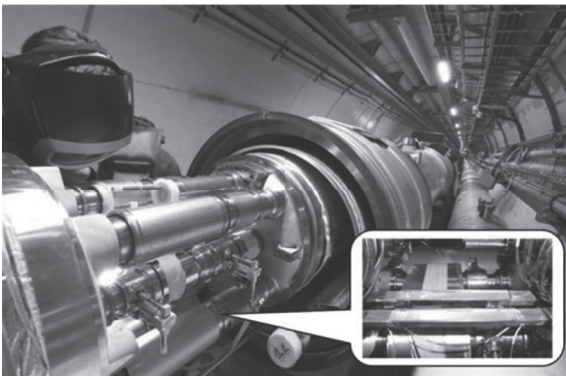


図 17 破壊事故の原因となった超伝導ケーブルの接続部とバスバー (挿入図). この図は原文にはない.

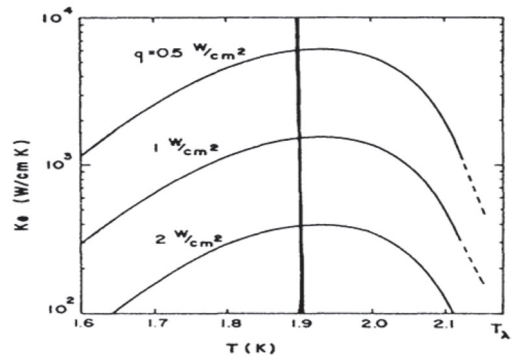


図 18 超流動ヘリウムの熱伝導率の熱流密度依存性.

様に 5 TeV 運転のための通電テストを行った. 9 月 19 日に最後の残っていた電源をフルの磁場までランプしている途中に, 5.2 TeV 相当の電流の時バスバーで壊滅的な破壊が起こり, セクター 34 で甚大な被害が発生した (註: バスバーとは 2 つのマグネット間にある超伝導線の接合部分 (スプライス) のこと. 図 17 参照). これらのバスバーは銅ボックス内で 3 層の錫・銀半田による誘導加熱ろう付けによって接続されている. 最初の設計では半田付けのみならずバスバーを機械的にクランプする予定だったが, 接続領域での流体インピーダンスが増えて超流動ヘリウムの伝熱冷却効果が減るという理由でクランプは除かれていた.

事故調査委員会が設立された. 最も可能性の高い原因は, 1 万ヶ所存在する超伝導バスバー接続部分の一つで半田がなかったために抵抗が高すぎたためと結論された. 通常の加速器ならほんの軽

微な被害で済んだであろう. しかし接続部分の破壊でスパークが生じヘリウム容器に穴が開いた. 真空容器とヘリウムガス容器に備わった破裂板でも支え切れないほどの過度の内部圧力が発生して, マグネットが土台から離れるほどの変位をもたらした. 合計で 14 台の四重極および 39 台のダイポールマグネットを交換する必要があった.

11. さらなる欠陥の調査

事故後の緊急の優先事項は, 事故の発生直前に事故の前兆, 特に異常な温度上昇があったかどうかを残存データから確認することであった. しかし超流動ヘリウムの温度上昇を検出するには二つの理由で困難であった. 一つは超流動ヘリウムの高い熱伝導率である. これは接続部に良好な冷却を提供するが, 実は熱伝導率は熱流密度に強く依存 (図 18) するため, 加熱が増加すると冷却能力が急激に小さくなる, 特に接続部の様に流体イン

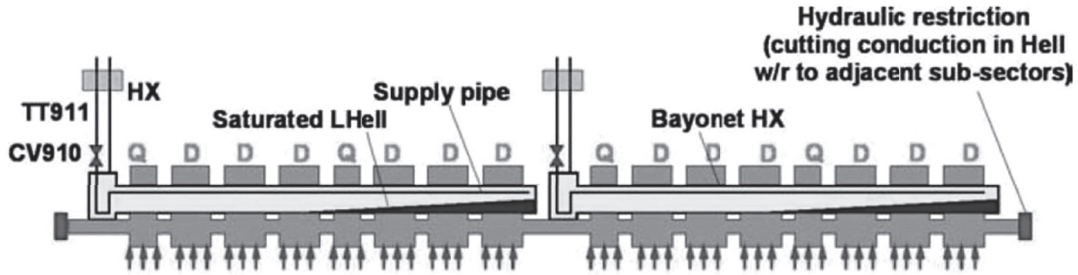


図 19 温度上昇測定法. まず J-T バルブ (CV910) を閉じて定常的な熱侵入量を測る. 次に通電を行って余分な熱源が生じたかを超流動ヘリウムの温度上昇から推定する.

ピーダンスが高い所では. もう一つの理由は, 超流動冷却回路自体の設計による. 図 19 は 107 m 長のセル 2 つの図だが, 一次超流動ヘリウムはバヨネット熱交換器を通して流れ, その流量は J-T 弁 (図中 CV910) を介して制御される. これらの弁の作用で温度を一定に保つサーボループが働いてしまうからである.

明らかに重要なことは, 他に類似の悪い接続部がないことを確認する方法を見つけ出すことであった. 二つの方法が開発された. 第 1 はカロリーメーター (温度測定) 法である. サーボループをオープンにしておけばバルブは単に静的な熱侵入をバランスするように調整される. その条件下で抵抗による 10 W の熱侵入による温度上昇は測定できる. 較正を実施した後セクターに J-T 弁をオープンループにしたまま 5 kA を通電する. もしすべての接続部が正常なら (異常熱発生がなければ), 渦電流による加熱で少しの温度上昇が出たあとはしばらくしてもとに戻るはずである. 図 20 は異常のある場合で 5 kA の通電中に遅い単調な加熱が起こっておりセル内のどこかに 100 nΩ の抵抗が存在することを示唆している.

2 番目は電位差を測る方法である. 各マグネットにはクエンチ時のトリガー電圧を測定するためにバッファメモリを含む ADC カードが搭載されている. これを使って抵抗のある接続部 (スプライス) で生じた電圧を測定することが可能であることが分かった. 直流モードで信号を平均化して S/N 比を改善することによって抵抗値の測定が可能になった. 図 21 は 5 kA まで電流を段階的に上げる間にセクター 67 と 78 のダイポール回路内のすべての接続部の電圧差測定を示す. このグラフからセクター 67 に 47 nΩ の抵抗が見つかった.

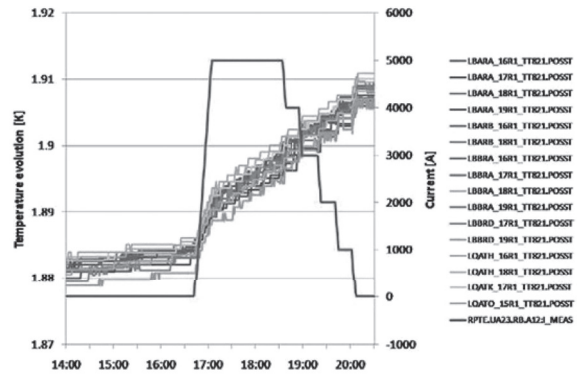


図 20 5 kA を通電 (赤線) した時の 16 台のマグネットの温度の時間経過. ランプ時の急上昇はエディ電流による. その後の上昇は 100 nΩ 相当の抵抗が原因. 縦軸の表示範囲が全部で 5 mK と大変小さいことに注目.

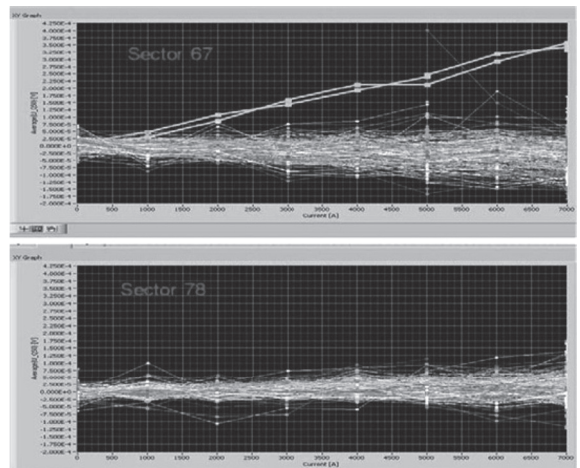


図 21 セクター 67 と 78 の 154 台のダイポールマグネットを 5 kA までランプ通電した時に観測された電位. 縦軸は -0.2 ~ +4.2 mV. セクター 67 で一つのマグネットが 47 nΩ 相当の電位上昇を示している.

た. どこの接続部が原因かも正確に突き止めることができた. 前述の 100 nΩ スプライスおよび

47 nΩ スプライスの両方がすでにフル電流までテスト済のマグネット内にあった。これらの両方のマグネットは取り出されて解体した結果、悪いスプライスが確認された。それ以外のそのようなスプライスは加速器のどこにも見つかっていない。

ところが破損したマグネットを取り出して修理している最中に、ろう付けの際に半田が接合部から漏れていたケースが発見された。バスバー部分でクエンチが起こったら（非常に低い確率だが）接合が弱くなる可能性があった。そのため長期シャットダウン中に追加の改善策を施すまで、LHC を設計値より低いビームエネルギーで運転することに決定した。長期シャットダウン中には (1) 超伝導接続部を強化し、(2) 破裂板をすべてのマグネットに取り付け、(3) 真空障壁の土台を強化してより高い圧力差に耐えること、を行うことにした。

12. 運転の再開

修理と再試運転は 2009 年 11 月までかかった。2009 年の終わりまで 1 ヶ月という短い間で、ビームは電流 2 kA 相当の 1.18 TeV のエネルギーまで加速され実験も少量だがデータを取った。2010 年 3 月 30 日に、重心系エネルギー 7 TeV での最初の衝突に成功した。それ以来、加速器の運転時間は、加速器スタディと実験データ取り込みに分割されてきている。

ビームにたまっているエネルギーは膨大なので、加速器の保護とビームコリメーションシステ

ムに特に注意が払われてきた。120 個以上のコリメータは一次、二次および三次コリメータと階層的に配置されている。コリメータ領域付近ではフィードバックシステムによってビーム軌道が精密にコントロールされている。図 22 はランプ中の軌道のフィードバックを示している。3 つのプロットはランプ中の平均値と軌道のずれの RMS と運動量偏差を示している。最大の RMS 軌道偏差は 0.08 mm である。

コリメーションシステムは非常に効率よく動作した。図 23 はビーム損失を人工的に引き起こした時のリング全体のロスマップである。コリメータでのビームロスが他の冷たいビームパイプの部分のそれよるファクター 10,000 倍も差が出ているが、それは予想と正確に一致していた。

この初期の段階での加速器の運転性能は印象に

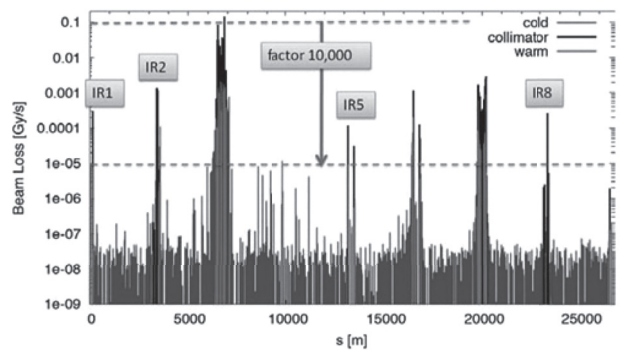


図 23 ビーム損失を人工的に引き起こした時のリング全体にわたるビームロスの分布。赤はビームパイプが常温のところを、黒がコリメータ付近の領域を示す。

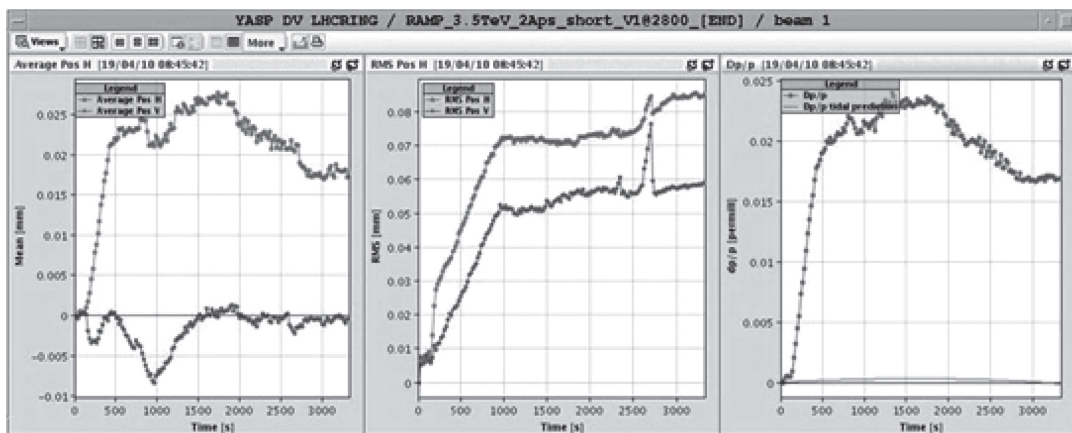


図 22 3.5 TeV ランプアップ中のビーム軌道。赤が水平、緑が垂直方向。(左) 平均軌道 (y 軸は -0.01 ~ 0.03 mm), (中) 変位分布の標準偏差値 (-0.003 ~ 0.09 mm), (右) 運動量変位 dp/p (-0.0001 ~ 0.0025%)。

のころほど良かった。単一ビームの寿命は 1000 時間を超え予想より一ケタ長かった。真空が予想よりもはるかに良かったことと RF システムのノイズレベルが大変低かったことが、この長いビーム寿命で証明されたのである。ビームバンチ強度の設計値 1.1×10^{11} が達成され（註：現在は 1.6×10^{11} ）衝突点における β^* は 2 m までに絞れた。Closed-orbit は RMS で 1 mm より小さく抑えることができ再現性も非常によい。ビームバンチあたりの陽子数は増加しつつあり、2010 年の終わりまでに輝度を $1 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ に到達できそう（註：2012 年末には $4 + 4 = 8 \text{ TeV}$ で 7.73×10^{33} まで達した）。加速器を最高エネルギーまで上げるには依然として多くの改良を施さねばならない。

13. 結 論

LHC の最初のコミッショニングは非常にスムーズに出来た。ビーム周回とビームの捕捉が記録的な速さで達成された。2-in-1 の構造のマグネットは完全に予想通りの性能を発揮した。Closed-orbit は RMS で 1 mm 以下に調整できて加速器のオプティックスは非常に良さそうだ。不幸なことにスプライス破壊が起きて大きな被害が発生し修復が必要となった。二つの強力な診断ツールが開発され、不良スプライスを検出し、運転中にも連続的に監視することが可能になった。加速器は現在低いエネルギーで物理実験のために運転されている。最高エネルギーなど LHC が持つ可能性を最大限に発揮するにはいくつかのさらなる改良が必要である。7 TeV で十分にデータを取った後に、長いシャットダウンを実施してそれらの改良が行われることになっている。

謝 辞

LHC はこれまで作られた中で最も複雑な科学

研究装置である。建設に 15 年を要し、途中で多くの問題に遭遇した。これらはすべて建設に携わった人々の機知と不屈の回復力のおかげで克服された。CERN 内と世界中の協力してくれた研究所のおかげである。現在、加速器は運転段階に移行した。これまでと同じように有能なチームは、今後数年間で LHC の能力を最大限に発揮する点まで到達することを私は確信しています。

参考文献

- 1) L. Evans, The Large Hadron Collider from Conception to Commissioning: A Personal Recollection, in *Reviews of Accelerator Science and Technology (RAST)*, Vol. 3 (2010) 261-280.
- 2) Large Hadron Collider in the LEP tunnel, in *Proc. ECFA-CERN Workshop (ECFA 84/85, CERN 84-10; Lausanne, 1984)*.
- 3) The LHC Design Report, Vol. 1: The LHC Main Ring, CERN-2004-003, June 2004.
- 4) Lyndon Evans (ed.), *The Large Hadron Collider: A Marvel of Technology* (EPFL, 2009).
- 5) S. Wojcicki, The Supercollider: the pre-Texas days — a personal recollection of its birth and Berkeley years, in *RAST*, Vol. 1 (2008), p. 303.
- 6) S. Wojcicki, The Supercollider: the Texas days — a personal recollection of its short life and demise, in *RAST*, Vol. 2 (2009), p. 265.
- 7) CERN/SPC/679, CERN/CC/2016, The Large Hadron Collider and the long-term scientific programme of CERN: executive summary (Dec. 1993).
- 8) High Energy Physics Advisory Panel's Subpanel on Vision for the Future of High Energy Physics (DOE/ER-0614P, May 1994).
- 9) CERN/2052, Hundredth Session of the Council, First Part (24 June 1994).
- 10) CERN/2075, Hundredth Session of the CERN Council, Second Part, Resolution Approval of the Large Hadron Collider (LHC) Project (15 Dec. 1994).
- 11) Department of Energy Assessment of the Large Hadron Collider (DOE/ER-0677, 1996).