

2008年12月5日

2008年9月19日のLHCの問題に関する追加報告

これは、2008年9月19日に、LHCのセクター3-4で起こった事故の分析と対処方法についての最終レポートであり、LHCの修理、強化、再開始に関する主要な結果を提示する。2008年10月16日の中間報告に続くレポートで、2009年の活動と今後の予定を特に強調し補足する。<http://cdsweb.cern.ch/record/1135729/> LHCレイアウトと用語に関する基礎的な情報は、2008年10月16日の中間報告を参照のこと。

前回の報告の確認と問題のさらなる分析結果

セクター3-4が室温に暖められた後、磁石の連結部分は開けられそして系統的に調査された。それによって、かなりの情報がえられた：測量結果、機械的なそして電気的な測定結果、綿密な目視調査と写真のデータベースができた。このデータの分析、そして電気的、熱的、機械的なシミュレーションの結果は、2008年10月16日の報告で言及された事故の連鎖を基本的に確かめた。特に最初に起きた問題と二次的な損害の関連が明らかになった。

問題の原因を特定する主な証拠は（2個の磁石間の不完全なバス接続）事故によって破壊されたので、問題の正確な起源は完全には特定できない。しかしながら、推論された最初の問題と同様の問題は、導線の相互接続を行う手順を大きく逸脱した場合に起こりうることを、実験室のテストで再現された。

二次的な損害に関しては、クライオスタットにつけてある安全弁の設計は、2008年9月19日の事故より、低いヘリウム流出量を想定して設計されていた。（つまりこの事故の際の流量は「想定外」と考えられる。）そして、真空容器内の過圧から生じる軸方向の力が磁石を支えるポイントの耐震性を完全に上回ったと思われる。このようにして、クライオスタットが動いて二次損害に至った。

電力テスト中の測定電圧を積分してフィルターを通すことにより感度を上げる方法と、それと独立に超流動ヘリウムの熱量収支の測定によって、（問題のある接続を）検出する方法を確立でき、事故の起こったセクター以外のセクターを検査した。その結果、トンネルにインストール時に行った磁石間の相互接続部については、異常な抵抗値を示すケースがほかにはないことを明らかにした。しかし、磁石を製造する際に行われた磁石内部の接続で、想定される抵抗値より大きな値を示す磁石が2つ発見された。この2つのマグネットに関しても、トンネルに搬送する前のテストで問題なく規定の電流を流すことができているし、トンネル内でのセクター全体の電力テストでも、問題が生じていないレベルである。

被害状況のまとめ

セクター3-4の長さ3kmのクライオスタットの中には、154の超伝導双極磁石と、四重極磁石やほかの異なるタイプの修正磁石が入った、55台の「ショート・ストレート・セクション（短直線部）」（SSS）を含む。全体で、66の隣接する磁石連結部を開けた。このように、「損害を受けたゾーン」の両側でかなりの広い領域を調査した。これによって、それぞれの磁石をトンネルから搬出して修理するか、そこにおいたままにできるかを、その場で検査することができた。合計53個の磁石、39の双極子と14のSSSはトンネルから搬出され、地上で完全に調べられ、清掃あるいは修理される。この過程は始まっており、既に19の双極子と9つのSSSが取り出された。2008年内に搬送が完了されることになっている。

磁石への損害に加えて、電気アークからの煤と多層緩衝材のチップからによる、ビーム真空パイプの汚染の状況も調査した。内視鏡によって、連続したクライオスタットの全体の長さに沿って、すなわち、セクターを分けるための真空弁まで区間を調査した。煤による汚染は、トンネルから除去された53個の磁石の外には見られなかった。それらの磁石は地上でビーム真空パイプを交換するかあるいはきれいにされる。多層緩衝材のチップによる汚染は、最初の事故の位置からかなりの長距離にわたって見られた。これらのチップはビームパイプの表面に堆積しているだけであり、その場での真空掃除によって除去できる。：このための特別な手続きは、開発され、実験室で確認されている。

低温媒体分配ラインへの損害は、4つのジャンパー接続の機械的な変形に限られ、すでに切られて取り除かれた。

強化対策方針

上で言及された新しい機密な検出方法は、LHCのセクターのメンテナンス作業後の再試運転の際に系統的に行われることになるが、それに加えて、高電流を流したときに、バスバーや導線接続部で異常な電気抵抗が生じないかを検出するシステムが開発され、プロトタイプで効果が確かめられたので、全部のマシンで実装されるだろう：これはさらに約2000の電子装置の製造と組立が必要で、さらに2008～2009年のシャットダウンの期間に、約160kmの電線を引くことになる。

今後同様に、ヘリウム大量流出と真空容器内の圧力上昇が伴う事故が起こった場合に損害を少なくするために、クライオスタット真空の救済弁の数と寸法を増やすことにする。これによって、設計値である0.5気圧を決して上回らないことを確実にする。9月19日の事故を参考にしてこのタイプの出来事最悪のケースを再検討した結果、以下の方針を導いた。SSSクライオスタット装置に既に付いているフラン

ジには新しい全流量対応の安全バルブが備えられるだろう。これによって、気体放出の断面積をこれまでの8倍に増加できる。;この修正は、セクターを冷やしたまま、現場で行うことができる。そのうえ、各々の双極クライオスタットの上に大きなポートを設置しそこに、全流量対応の安全バルブをつける。この修正は常温に戻っているセクターについてまず行い、徐々に全部のマシンに実行される。全体として、解放断面積は今までの40倍になる。これによって、9月19日の事故の二倍のヘリウム放出事故が起こっても、容器内の加圧が設定値以下にすることができる。そのうえ、真空隔壁を備えた四重極磁石のをトンネルに固定するコンクリートのアンカーを強化させる。

補修計画

トンネルから地上への運び出した後に徹底的に点検して、磁石を、観察される損害または汚染のタイプとレベルにより3つのクラスに分類される。

軽微のまたは全く損害/汚染のない磁石については、真空ビームパイプだけを交換するか、きれいにし、クライオスタット装置の分解なしで再利用することができる：今日現在、9つの双極磁石が、そのカテゴリーに分類される。

クライオスタットが多層緩衝材が汚染されている場合、磁石は再調整される;これは、磁石のクライオスタット装置が分解され、きれいにされ、緩衝材を取り替えられることを意味する。しかし、磁石の主要部(コールドマス)は保存される。今日現在、このカテゴリーは6つのSSS。

コールドマスのコイル端部の接続に損傷がある場合、または、コールドマスに損傷の疑いがある場合は、新しいコールドマスを使って磁石を再構築する。そのための、スペアは確保してある。：これには、30の双極磁石(そのうち16は既に(スペアのコールドマスを使って)組み立てられている。)と9つのSSS(5つは組み立て済み)が該当する。

そのまま使われるか、調整されるか、新しいコールドマスで作り直されるかどうかに関係なく、トンネル内に再インストールされるすべての磁石は、事前に冷却されて電力テストを行い、既定値でのテストを行う。これにより、規定の性能が出ることを確認するとともに、運転状況において構造的および電氣的な完全性を確実にする。この目的のために、CERNへの納入時にすべてのLHC磁石をテストするのに用いられた低温試験装置が再利用される。そして、その最大限の低温能力を出すために、通常LHCのセクター1-2用に使われる冷却装置を接続する。

予備の磁石とクライオスタット装置の構成部品(ビーム真空システムを含む)に関

しては、修理作業を開始するための十分な量が確保できている。予備部品の減少を回復するためと、修復作業を中断なく進めるために、追加発注も行われた。LHCの組立と取り付けに関与してきた経験豊かなスタッフが、修理と再設置作業の任をおった。

低温媒体分配ライン修理のためのすべての主な部品は確保できている。トンネル内での修理は、**2009年1月**の始めから進行し、**2009年2月中旬**までに完了する。

除去された磁石のための置き換えとして、最初の**2個**の新しい磁石は、今週、セクター**3-4**の元の位置にすでに設置した。**2009年3月末**までにはセクター**3-4**ですべての磁石の再設置を完了することが予想される。磁石間の相互接続の作業は**2009年2月**の始めに開始し、**2009年5月**の半ばまでに完了されるだろう。最終的な圧力テストとクールダウンの後、修理されたセクターは、**2009年6月末**までに再び電力テストを行えるようになる。