

2008年12月5日

LHC事故調査報告

=====

2008年9月19日にLHCのセクター 3-4 で発生した事故（インシデント）の調査結果を報告する。本報告書では、2008年10月16日の中間報告に引き続いて、LHCの修理、改良及び2009年のLHC稼働開始予定に主眼を置く。LHCの概要、用語に関しては中間報告書を参照のこと。

初期調査結果の確認及び分析

^^

冷却されていたLHCのセクター 3-4 を室温まで戻した後、磁石の接合部を開け、詳細な調査を行った。磁石位置測定、機械的および電氣的測定、目視調査の結果および写真が記録された。これら調査記録の分析と、電氣的、熱的、機械的シミュレーションの結果により、中間報告に於いて示された事故の様子、特に事故の発生源から周辺の磁石・機器へと損傷が波及していく経過が正しいことが確認された。

主要原因箇所 [磁石間のバス・バー接合部] が事故により破壊されたため、事故の根本的原因の特定は推測による部分を含まざるを得ないが、今回の事故と同様の異常現象が、正規とは大きく異なる方法で組立られたバス・バー接続部サンプルによる実験で再現された。

一方で周辺の磁石・機器に対する派生的な損傷は以下のように完全に理解された。2008年9月19日の事故時のヘリウムの排出率は想定外の量であり、クライオスタット断熱真空槽の安全弁はそれよりも低い排出率を想定して設計されていた。従って真空槽内の圧力がヘリウムガスによって上昇し、磁石の軸方向に力が加わり、その力が磁石支持構造の降伏強度を超えた結果、磁石が移動し破損した。

通電中の高精度電圧測定、及びそれとは独立の超流動ヘリウムの熱量測定を組み合わせた高感度検知方法が検証され、LHCの残りのセクターに対して新たに導入された。検査の結果、トンネル設置後に接続作業した磁石間バスバー接続部については、抵抗の異常は見つからなかった。ただし、超伝導磁石本体（コールドマス）内部のコイル接続部分に関して、2台の磁石では接続抵抗が予想される範囲を大きく上回っていた。しかしながら、LHCトンネル内に搬送される前に行われた磁石単体での励磁試験やセクター全体での一括通電試験のどちらでも定格運転に求められる性能を満たしていた。

被害状況

^^^^^^

全長 3km に及ぶLHCセクター 3-4 のクライオスタットは、154台の超伝導偏向磁石と、超伝導四極電磁石及び多種の補正電磁石を内蔵する55台の“短直線部” (Short Straight Section, 以下SSS)から構成されている。事故個所の両側の十分な範囲を網羅する計66箇所の磁石接合部が開けられた。トンネル内での現地調査が実施され、地上に搬送する磁石とそうでない物に分けられた。39台の超伝導偏向磁石と14台のSSS、計53台の磁石が地上に搬送され、詳細な調査の後、清掃あるいは修理が施される予定である。磁石搬出は既に開始されており、19台の超伝導偏向磁石及び9台のSSSが地上まで搬送された。53台すべての磁石は2008年末までに地上に搬送される予定である。

連続するクライオスタットの全長に渡り、すなわち真空分割部の真空仕切り弁まで、電気アークにより生じた煤や裂けた多層断熱材の切れ端によるビームパイプの汚染状況を内視鏡を用いて調査した。この調査によって煤による汚染の範囲が分かり、上述の53台の磁石が搬出されることが決定された。搬出する53台に対しては、ビームパイプの交換あるいは清掃を地上で実施する。多層断熱材の切れ端による汚染は事故現場から広範囲にわたり観測された。しかし、これらの切れ端は現場において掃除機による清掃により除去可能である。清掃方法は確立されつつあり、現在実験室に於いて検証中である。

低温（ヘリウム）供給ラインへの損傷はジャンパー接続部4カ所の機械的変形に限定されており、損傷個所は切断後除去された。

改良計画

^^^^^^

既述の高精度な電圧測定と超流動ヘリウムの熱量測定は、保守期間終了後、再試運転の一部として系統的にLHC各セクターに適用される。さらに、大電流用バス・バーと磁石間接続部の異常な電気抵抗を検出する専用のシステムが新しく設計され、試作品の動作検証が行われており、LHC全セクターに設置される予定である。これに伴い、約2000台の検出システムの製造と設置作業及び全長約160kmになる信号線の敷設作業を2008年から2009年にかけての冬季停止期間中に行う。

ヘリウムの大量放出やそれに伴う断熱真空槽内のヘリウム圧力上昇をもたらすような事故が万一起きた場合でも被害の軽減を図るため、設計圧力0.5気圧を決して超えないように、断熱真空槽の安全弁の径を大きくし、また設置数を増設する予定である。また、9月19日の事故を鑑み、同様な事故による最悪の事態を再検討した。その結果、SSSクライオスタットのフランジ部には全開流量型安全逃がし弁を設置し、全体でこれまでの8倍の安全逃がし弁口径面積を達成する。この変更は冷却中のセクターに対して現場で実施可能である。更に、超伝導偏向磁石に大きな開口部を設け、全開流量型安全弁を取り付ける。この修正は室温にあるセクターに施され、順次全セクターに適用していく。これらの改良により、全体でこれまでの40倍の安全逃がし弁口径面積を達成し、真空部の圧力上昇を許容値内に留めたまま9月19日の事故時の2倍のヘリウム放出にも対応可能となる。また、真空隔壁を備えた超伝導四極電磁石のトンネルコンクリート床への固定構造を補強する。

修理計画

^^^^^^

磁石は地上に搬送された後、詳細に調査され、被害、汚染状況により以下の三種に分類される。

再利用：

非常に軽微な損傷、汚染が見つかった場合、又は損傷、汚染が見つからなかった場合にはクライオスタットから超伝導磁石本体を分解することなく再利用可能である。これらの磁石はビームパイプの交換あるいは洗浄で対処する。12月5日現在、9台の超伝導偏向電磁石が再利用に分類されている。

再改修：

クライオスタットと多層断熱材が（煤などで）汚染されている場合、磁石を再改修する。再改修では、クライオスタットを分解して、清掃し、多層断熱材を交換する。ただし、クライオスタットから取り外した超伝導磁石本体（コールドマス）はそのまま保存される。12月5日現在、5台のSSSが再改修に分類されている。

再組立：

超伝導磁石本体（コールドマス）のコイル端部の接続に損傷が見られる場合、又は磁石性能に疑いがある場合には、利用可能なスペアにより新しいコールドマスに交換して磁石クライオスタットを組立直す。このカテゴリーには、30台の超伝導偏向電磁石、9台のSSSが分類されている。このうち、16台の超伝導偏向電磁石、5台のSSSが既にクライオスタットへの再組立を完了した。

再利用、再改修、再組立の分類に関わらず全ての磁石をLHCトンネル設置前に冷却し通常運転条件での通電テストを実施する。本テストにより、健全なる磁石運転性能および機械的、電氣的な整合性を運転時と同様の状況で確認する。本テスト実施のため、磁石納品時の検査に使用した低温試験装置を再利用する。LHCセクター 1-2 に使用する大型冷却装置と再び接続することで、低温試験装置の最大冷却性能の回復を図っている。

修理開始に必要な、ビームパイプ真空系を含むクライオスタット構成部品や超伝導磁石予備機は十分に確保してある。予備部品を補充し、修理工程を中断しないように、部品の追加発注が行われた。修理および再設置には、LHCセクターの組み立て及び設置作業携わった経験豊かなスタッフが従事する。

低温供給ラインのジャンパー接続部の修理に必要な主要部品は確保されており、2009年1月よりトンネル内で修復作業を開始し、2009年2月中旬には作業を終える予定である。

今週、2台の交換用磁石をLHCセクター 3-4に設置した。LHCセクター 3-4の全ての磁石の再設置作業は2009年3月末に完了する予定である。磁石間の接続作業は 2009年2月に開始し、2009年5月中旬に終了する見通しである。LHCセクター 3-4 は 最終の耐圧試験と冷却の後、2009年の6月末に励磁が可能になる見込みである。

=== 以上 ===