

コールドボックス内オイル汚染について

森内貞智、大場恒揮、関口温朗、前川龍司、三戸利行

核融合科学研究所

概要

大型ヘリカル装置（LHD）低温システムは、第7サイクル現在まで各サイクルにおいて大きなトラブルもなく長期連続運転を達成してきた。第4サイクル終了後の改修作業でコールドボックス内からオイル汚染が発見された。この状況と原因及び対策等について報告する。

1 LHD低温システムの概略

図1にLHD低温システムの概略フローを示す。LHD低温システムは、寒冷を発生・回収するヘリウム液化冷凍装置、被冷却体である超伝導ヘリカルコイル、超伝導ポロイダルコイル、電磁力支持構造物、80K放射シールド、各負荷への寒冷分配を制御するバルブボックス、超伝導バスライン及び電流リード等で構成される。ヘリカルコイルは液体ヘリウムの浸漬冷却、ポロイダルコイルは超臨界圧ヘリウムの強制冷却、電磁力支持構造物と超伝導バスラインはヘリウムの2相流強制冷却で冷却される。これらの冷媒に加え80Kシールドへの冷却ヘリウムガスも1台のヘリウム液化冷凍装置から供給及び回収される。このように、LHD低温システムはヘリウム液化冷凍装置と被冷却体が密接に結びついた一筆書きのフローとなっており、各装置間の連携をとった統合した操作が必要な複雑なシステムとなっている。

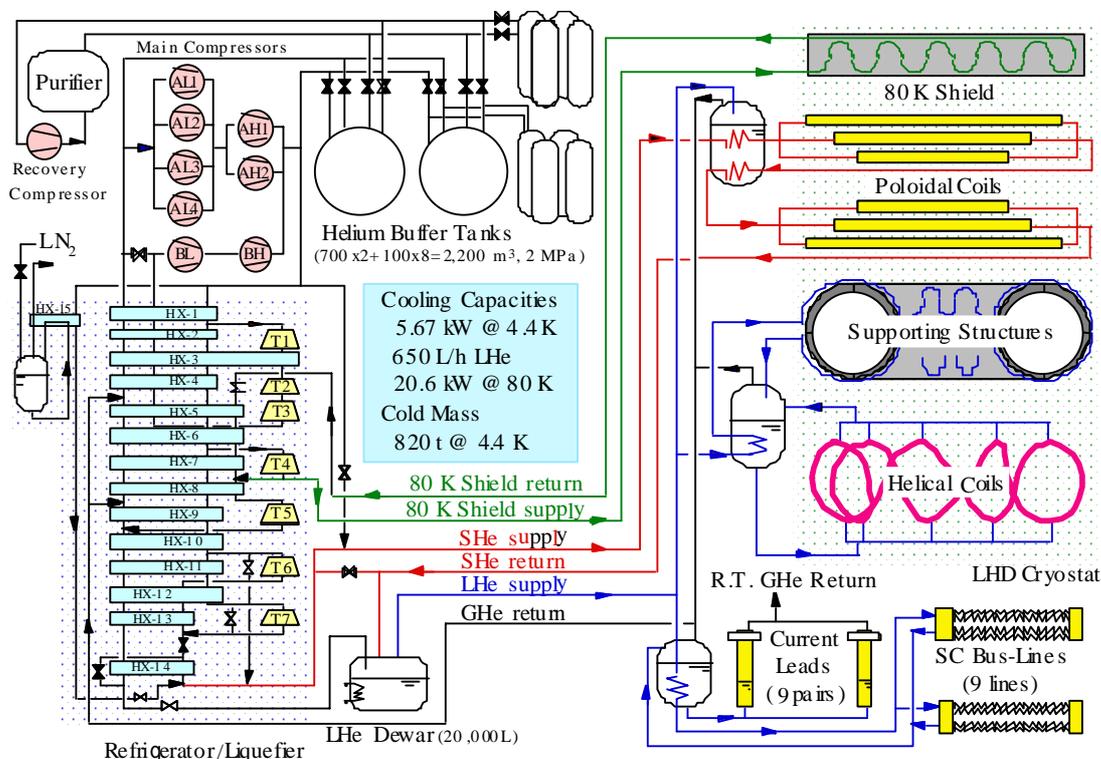


図1. LHD低温システム概要フロー

2 循環圧縮機ユニットの構成

図2にヘリウム循環圧縮機ユニットの構成フローを示す。合計8台の大型単段油噴射式スクリー圧縮機の組み合わせによる2段圧縮を行っている。本ユニットは軸動力合計3,490kW、処理流量合計960g/s(20,425Nm³/h)である。油系統は、各圧縮機に1次セパレータ、ユニット一括でインタークーラ、アフタークーラ、特殊繊維フィルタエレメント内蔵の

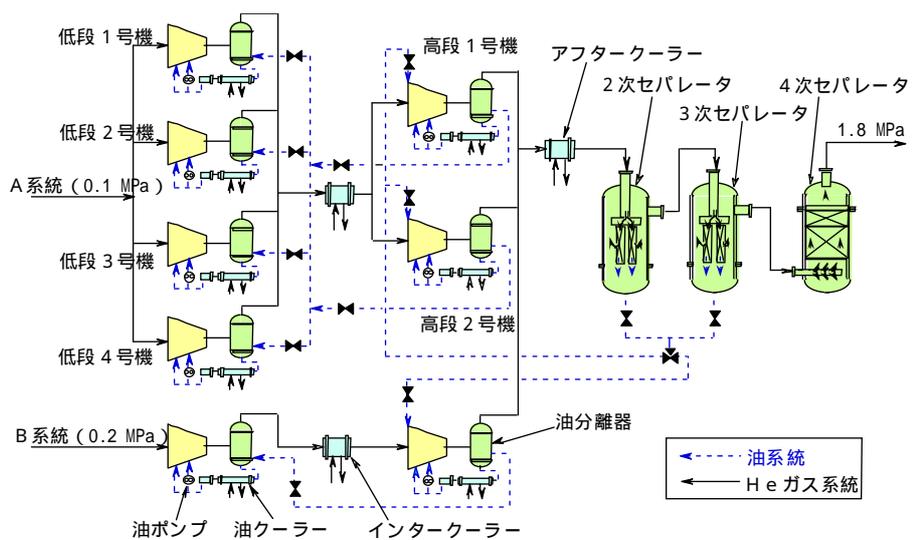


図2. 循環圧縮機ユニット構成フロー

2次・3次セパレータ、吸着剤が充填された4次セパレータにより構成され、これらにより油分離及び油配分が行われる。油分離システムとしては、その処理量のため大型であるが標準的な構成となっている。使用されているオイルはMH-41と呼ばれる合成油で、密度約0.8g/cc、固化温度約-60 とされる。

3 LHD低温システムの運転経過

LHD低温システムは予冷・加温運転にそれぞれ約1ヶ月弱の期間を要するため長期連続運転が要求される。平成10年2月から本格運転を開始し、各サイクル毎に精製・予冷・定常・加温期間を含め4～7ヶ月以上の連続運転を達成しており、試運転期間を含めると第7サイクル定常運転の現在で30,000時間以上の累積運転時間に達している。例として図3に第4サイクルのLHD低温システムの運転経過を示す。第4サイクルの連続運転時間が約5,000時間でその内定常運転が約3,500時間、試運転開始からの循環圧縮機の累積運転時間が約18,000時間であった。その間、特に大きなトラブルや異常な状態変化もなく運転を継続することができた。各サイクル以外の期間で定期点検・改修等を行っている。

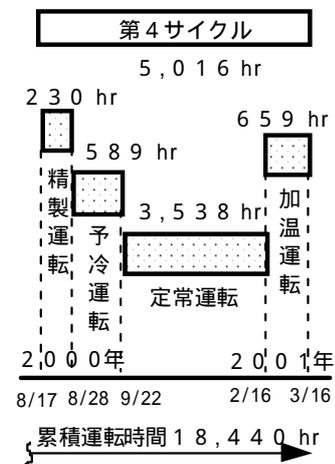


図3. 第4サイクル運転経過

4 オイル汚染

4.1 状況

第4サイクル運転終了後、第1タービン(T1)入口フィルタ閉塞対策としてフィルタ濾過面積変更のため、コールドボックス内の該当配管の開放作業を行っていた際、T1入口フィルタ入口側の水平部配管内にオイルと思われる液体が溜まっているのを発見した。この液体を採取したところ約40mlであった。この液体を分析した結果、圧縮機に使われているオイルであることが分かった。フィルタ自体にもオイルの付着が認められた。垂直部配管内部及びフィルタケーシングからはオイルの検出や通過した痕跡は認められなかった。

コールドボックス内に圧縮機からオイルの侵入があったものと判断し、汚染範囲の特定と被害状況の確認のための点検作業を行った。まずはT1タービンの開放点検を行い、インペラ部、低温ハウジング部、ガス入口周辺にオイルの付着が認められたが、インペラに傷などは無かった。次にT1出口側水平部配管内を開放点検したところ少量のオイルが溜まっていた。さらにT1入口弁と内部吸着器(ADS)1入口弁の開放点検を行い、T1入口弁は弁体にオイルの付着が認められ配管側にもオイルの流れた形跡が認められたが、ADS1入口弁にはオイルの痕跡は無かった。熱交換器1(HX-1)出口とHX-2出口の水平部配管の洗浄用ポートからファイバースコープにて目視点検し、HX-1出口水平部配管内部は異常なかったが、HX-2出口水平部配管内部にオイルが溜まっていることを確認した。

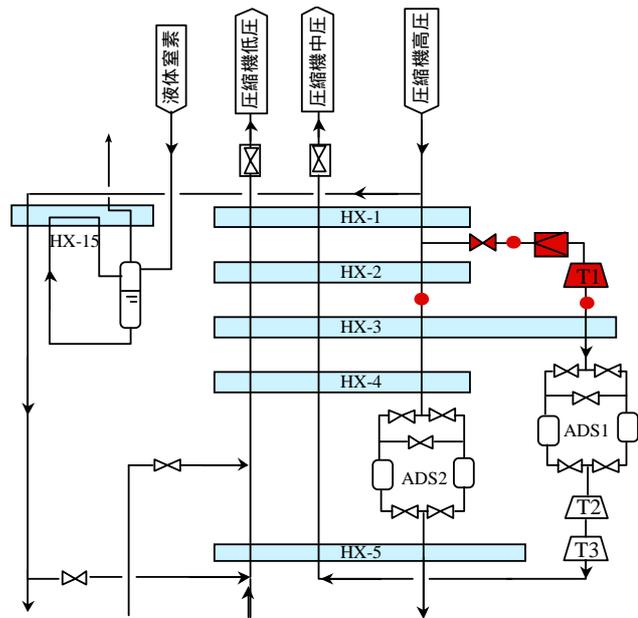


図4. コールドボックス内簡略フロー

図4にコールドボックス内簡略フローを示す。オイル汚染範囲は、オイルが発見されたのが図に示す黒点(T1入口フィルタ入口側水平部配管、T1出口水平部配管、HX-2出口水平部配管にオイル溜まり)及び黒塗り(T1入口弁、T1、T1入口フィルタにオイルの付着)の箇所のみであり、これまでの運転でもコールドボックス内の熱交換器で差圧の異常な増大や伝熱性能の劣化などは認められていないことから、内部吸着器以降へのオイル侵入は無く、熱交換器のオイル汚染も小さいと判断した。

4.2 対応

上記のことから、オイルが圧縮機から液体のままではなくミストの状態でコールドボックスに至り、低温部でかつ流路断面が小さくなっている部分に固体粒子としてトラップされ、それが常温状態になって液体として検出されたと断定した。したがって、コールドボックス低温部でトラップされやすい箇所を対象として、汚染範囲の洗浄を行うものとした。洗浄方法として、T1入口弁については溶剤をしみ込ませたウエスでふき取り、オイルが溜まっていた配管内は沸点の低い溶剤を洗浄ポートから流し込み、ポンプによる排出及び窒素ガスパージを繰り返し行った。汚染が小さいと考えられる熱交換器への溶剤の侵入が無いように注意して行った。タービンはメーカーにて分解洗浄・点検を行った。

4.3 原因

循環圧縮機ユニットの汚染源であると考えられる箇所の点検を行った。2次・3次セパレータ開放点検を行い、フィルタエレメント及びOリングの異常は認められなかった。4次セパレータ開放点検では、出口配管内部にオイルの付着は認められず、吸着剤にも特に異常は認められなかったが、内蔵されるフェルトが油をふくんでいた。これらのことから、フィルタセパレータの異常による液体オイルの流出ではなく、長期連続運転によって吸着剤が飽和したためこれらにオイルが液状で蓄積しオイルミストの発生源となっていたと推測される。

仮に、4次セパレータ出口からのヘリウムガスのオイル濃度が1wtppbの極微量としても、流量900g/sで5000時間運転したとすると

$$1 \times 10^{-9} \times 900 \times 3600 \times 5000 = 16.2(\text{g}) \quad 20(\text{cc})$$

のオイルが流出したことになる。また、運転当初の4次セパレータ出口のオイル濃度で0.25wtppmという測定結果があるが、この性能が第4サイクル現在まで維持された場合、上記の条件では約4リットルのオイルが圧縮機より流出したことになる。このように、オイル濃度が微量であっても処理流量が多くかつ長期連続運転を行うとオイルの蓄積量は無視できない量となる。しかしながら、今回のT1入口部で検出されたオイルが、いつから、どのくらい蓄積されていたかは不明である。

4.4 対策

表1に各サイクル運転前または運転後の各セパレータ出口の油分離度測定記録を示す。オイルチェックキットによる測定(カッコ内はコールドトラップ法による測定結果)のため正確な値ではないがオイルセパレータの性能劣化傾向が確認できる。第4サイクル運転前までの各セパレータ出口の油分離度に変化は認められないが、現状のフィルタセパレータではまだ吸着器に至るオイルミストが多い可能性がある。したがって、3次セパレータと吸着器の間にフィルタセパレータを設置することとした。追加するフィルタセパレータは、吸着器へ到達するオイル量を現状レベルより減少させ吸着器を通過するオイルミストなどをできるだけ除去するために設置し、3次セパレータで除去しきれないオイルミストを分離させる。第5サイクル運転前点検期間で本フィルタセパレータを追加設置し、あわせて4次セパレータ吸着剤の交換も行った。追加セパレータは他のフィルタセパレータと異なりオイル分離量が少ないので系外に排出するものとしており、この排出量から本セパレータの性能が推定できるが、油濃度に対応した量の排出が行われているため、本セパレータは十分予定の機能を発揮していると考えられる。しかしながら、2次・3次セパレータにおいて第5サイクル運転後からフィルタ交換を行った第7サイクル運転前までの間、フィルタの劣化と考えられる油分離度の悪化が見られ、これに伴って追加セパレータおよび4次セパレータ出口の油分離度が悪化している。したがって、吸着剤とともにフィルタの定期的なメンテナンスが必要である。

表 1. 油分離度測定記録

箇所	日付	基準値 wt.ppm	1998.8 #2運転前	1999.6 #3運転前	2000.8 #4運転前	2001.8 #5運転前	2002.3 #5運転後	2002.8 #6運転前	2003.3 #6運転後	2003.7 #7運転前	2004.1 #7運転後
2次セパレータ出口		100	75	75	75	75	112.5	112.5	150	50	75
3次セパレータ出口		1	0.63	0.75	0.75	0.75	1.75	1.5	2.5	0.25	0.75
高機能セパレータ出口		1				0.25	1.25 (0.041)	0.75	1.25 (0.234)	0.25	0.25 (-)
4次セパレータ出口		1	0.25	0.25	0.25	0.25	0.75 (0.041)	0.25	0.75 (0.230)	0.25	0.25 (-)

5 まとめ

第4サイクル運転終了後のコールドボックス内改修作業においてT1フィルタ周辺でオイル汚染を発見した。このオイルは循環圧縮機のものであり、ミスト状でコールドボックスに至り低温かつ流路断面の小さい部分に蓄積されていたと推定され、汚染範囲と考えられる部分の可能な限りの洗浄を行った。原因は圧縮機の長期連続運転によるオイルミストの蓄積であり、その対策として圧縮機油分離機能を高めるべくセパレータを追加しさらに定期的なメンテナンスを充実させることとした。

しかしながら、コールドボックスのオイル蓄積状況の詳細は不明であるため、今後は極微量の油濃度測定法およびオイル蓄積状況の確認方法の確立が必要である。