

大型ヘリカル装置用超伝導バスラインの運転・保守

○田上 裕之^{a)}、大場 恒揮^{a)}、野口 博基^{a)}、森内 貞智^{a)}、濱口 真司^{b),c)}

^{a)} 自然科学研究機構 核融合科学研究所 技術部、^{b)} 自然科学研究機構 核融合科学研究所 研究部、

^{c)} 総合研究大学院大学

1. 概要

核融合科学研究所 (NIFS) では、1998 年より大型ヘリカル装置 (LHD) によるプラズマ閉じ込め実験を推進している。LHD は超伝導システムを有し、コイル電源からの送電線設備も超伝導送電システム (バスライン) を採用している^[1,2]。超伝導バスラインは、真空断熱及び複雑な配線経路、冷却方式に対応するため 5 重同軸コルゲート管構造となっており、その運転保守結果も工学上重要な知見となる。本発表では、26 年間、総定常冷却時間 70,000 時間に及ぶ超伝導バスラインの運転保守並びに主な不具合履歴について報告する。

2. 大型ヘリカル装置(LHD)の概要

世界最大級の環状型のプラズマ閉じ込め実験装置であり、将来の核融合炉の実現を見通した学術研究を担う NIFS の基幹装置である。図 1、表 1 に LHD 本体の主な構成と諸元をそれぞれ示す。

LHD は超伝導システムを有し、図 1、2 に示すように超伝導ヘリカルコイル (HC)、ポロイダルコイル (PC)、バスライン、コイル電源、並びにヘリウム液化冷凍装置から構成される。

3. 超伝導バスラインの概要及び運転・保守内容

超伝導バスラインは、HC、PC に給電するための直流通伝導送電線設備であり、HC 用に 6 本、PC 用に 3 本実装されている。表 2 にバスラインの諸元を、図 3 に超伝導バスラインの構造を示す。配線の取り回しを容易にしつつ断熱を確保するため、5 重のコルゲート構造を採用している。バスラインの冷却系統図を図 4 に示す。定常冷却時は、冷凍機 (Coldbox) より供給される液体 He をバスラインの第一層目に気液二層状態で流し、冷却する。供給された He は第二層目を通り、Subcooler Tank を介して冷凍機まで戻る仕組みになっている。バスライン本体の冷却と並行して、コイル電源 (銅ブスバー側) とバスライン

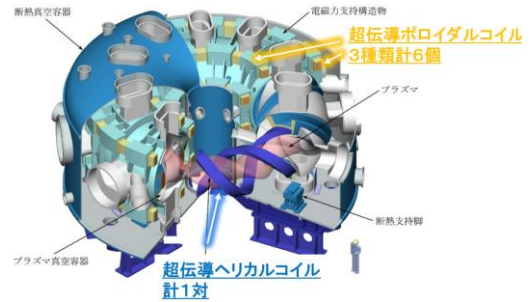


図 1 大型ヘリカル装置 (LHD) 本体の構成

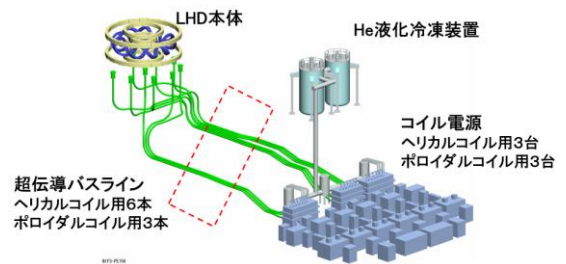


図 2 コイル電源—超伝導コイルまでの構成

表 1 大型ヘリカル装置 (LHD) 本体の諸元

外径	13.5 m
高さ	8.8 m
大半径	3.9 m
小半径	0.6 m
プラズマ体積	30 m ³
磁気軸磁場強度	3 T
本体の総重量	1500 tons
冷却総重量	820 tons

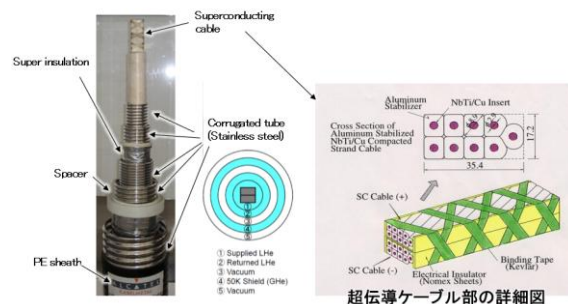


図 3 超伝導バスラインの構造

表 2 超伝導バスラインの諸元

総全長(9本合計)	497 m
平均全長	55 m
最小曲げ半径	1.5 m
超電導線	NbTi/Cu (Tc=9.5 K)
定格電流	32 kA@ 1T, 4.4 K
定格耐電圧	DC5 kV@77 KGHe

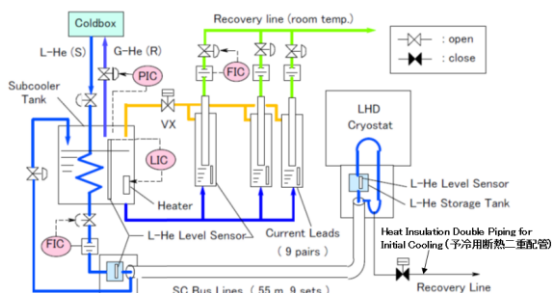


図 4 超伝導バスラインの冷却系統図

(超伝導線側)の接続部である電流リードの冷却も行う。

バスラインは冷却から加温に至るまでの1回の運転サイクルをこなすために、半年間程度の健全性維持が求められる。バスラインは2025年2月までに計25回の運転サイクルを経験し、総定常冷却時間は70,000時間、通電時間は13,500時間に達している。

4. 経験した主な不具合と対応

超伝導バスラインが2025年2月までに経験した主な不具合を表3にまとめる。このうち、No. 3, 4について詳細を4.1、4.2節にて述べる。

4.1 不具合 No. 3 バスライン H2-I 冷却不良

2018年度の実験運転サイクルにて、HC給電用のバスラインを冷却したところ、1系統のみ、液体Heを送液したにも関わらず温度が液体He温度(4.4 K)まで下がりきらず10 K程度にとどまり、結果的

に冷却完了が当初の予定より1週間遅延した。当初、IRカメラによるバスライン表面温度計測の結果などから、バスラインの第2管(4 Kヘリウム戻り層)と第3管(真空断熱層)が過去20年間の度重なる冷却/加温によって変形し、熱的に接触したことが原因と考え、レントゲン検査などを行った。

その後、図5に示すシールオフバルブとオペレータの接続に不良が生じ、真空排気時の開操作が不十分となっていたことが原因と判明した。不具合原因

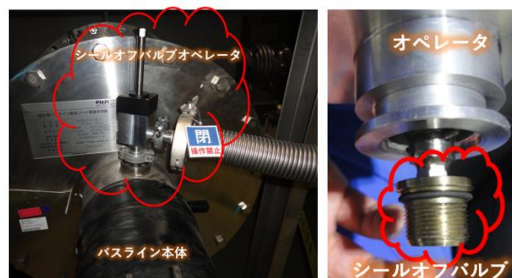


図 5 バスラインシールオフバルブとオペレータ



図 6 バスライン真空排気系の改善結果

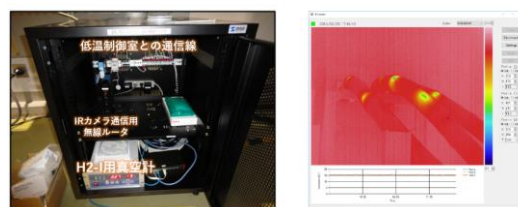


図 7 バスライン真空度、表面温度遠隔監視システムの導入 左図：真空度、温度遠隔監視盤の新設, 右図：IRカメラによる遠隔温度監視画面

表 3 超伝導バスラインの主な不具合履歴

No.	発生年	機器分類	不具合件名	不具合内容	対処
1	1998	電流リード	電流リードの異常着霜	真空度の悪化による異常な量の着霜	真空排気基準の見直し 除霜用ヒータの導入
2	1999-2009	クエンチ検出器	クエンチ検出器重故障誤発報	クエンチ検出器から重故障信号が誤発信された。長期にわたり事象が再発	ノイズによる誤発信を考慮した インタロックロジックの見直し
3	2018	バスライン本体	バスラインH2-I冷却不良	3.1節参照	3.1節参照
4	2019	予冷用断熱二重配管	予冷用断熱二重配管の異常着霜	3.2節参照	3.2節参照
5	2024	温度計	電流リード常温端温度計測定不良	バスラインの冷却運転開始後、18系統中5系統の電流リード温度計の計測が不可となった	既設温度系は生産中止かつ詳細不明のため、代替品を選定し、 直営作業にて実装

である常設のオペレータ本体の交換、真空排気基準の見直し、真空排気系の改善(図6参照)、真空度および IR カメラによる表面温度遠隔監視システムの導入(図7参照)などを行うことで2025年2月まで再発防止を果たしている。真空排気系の改善は、1)排気配管をベローズから直管へ変更 2) シールオフバルブオペレータ部に遠隔監視用真空ゲージの導入の2点である。

4.2 不具合 No. 4 バスライン予冷用断熱二重配管の異常着霜

不具合 No. 3の事象(4.1節参照)の水平展開として、バスラインの初期冷却時に使用する予冷用断熱二重配管のシールオフバルブ並びにオペレータそれぞれ全9点の交換を業者にて実施した(図8)。交換作業後、真空排気を行った後に当該配管の真空層を封じ切った状態で冷却運転を行ったところ、図9に示すように9本中3本の配管表面に大きな霜が生じた。その後、霜が解けることでLHD本体室地下の広範囲にわたって結露が滴下する結果となった。

調査の結果、真空排気後の封じ切りに失敗し、真空が劣化した状態で配管を冷却していたことが判明した。当該配管は全長約30mのベローズ配管であり、ベーキングも困難であったことから真空断熱の完全な復旧に2年を要し、ベローズ配管の真空破壊のリスクを痛感した。シールオフバルブは、排気後も現場に残すことで再発防止とした。また、すべての予冷用断熱二重配管表面に熱電対を設置し、遠隔温度監視する体制を整えた。



図8 バスライン予冷用断熱二重配管シールオフバルブの交換、左図：作業の様子、中央及び右図：シールオフバルブの詳細

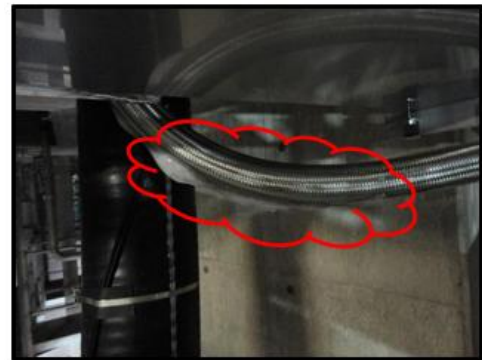


図9 予冷用配管表面に生じた霜

5. 保守管理方法の改善

バスラインの運用開始から20年経過した2018年には、建設当初の保守担当者が退職したこともあり、1000点以上におよぶ各構成部品の保守状況が不透明化し、今後の長期にわたる健全性維持に懸念が生じた。そこで、2019年よりバスラインの主要な機器・部品のリスト化を進め、各機器の個数、型番、製造元、設置年、点検、更新、不具合履歴、予備品の確保状況などを一元管理できる機器

LHD保守管理支援システム月報										LHD cryogenics group
機器分類別保守管理表(超伝導バスライン)										
機器分類	部品分類	個数	型番	製造業者	設置年	更新状況	更新推奨	不具合履歴	予備品	
開閉弁 (WEKA)	シールキット (BSOS1003, 1004, 1005, 1006) (BSOS2009, 2004, 2005, 2006)	8	DN25	WEKA	1997	2018	-		5	
	シールキット (予冷用VB SOS)	9	DN15	WEKA	1997	-	-		27	
	リミットスイッチ	17	XCK-T110 (後継機種: XOK-2110P16)	WEKA	1997	2016: 予冷用配管9台			無	
	ダイヤフラム (BSOS1003, 1004, 1006) (BSOS2003, 2004, 2006)	6	MA3.16A6.7S.POS	WEKA	1997	-		2017: BSOS2003異音 2017: BSOS2006締め癖	1	
	ダイヤフラム (BSOS1005, 2005, 予冷用9台)	11	MA3.16A6.3S.PS9	WEKA	1997	-			2	
開閉弁 (東工バレッタ)	グランドパッキン、ガスケット	2	T-8110 (100A, JIS10K) V-PTFEAFPM D型 (グランドパッキン) T#1890Cu(ガスケット)	東工バレッタ	1997	-			1	
	リミットスイッチ	2	ZE-N-2	東工バレッタ	1997	-			1	
電空変換器	電空変換器	54	10VPN-2A20	Msystem	1997	2016: 19台 2017: 35台 2020: 4台 (BCV3211, 3241, 3251, 3261)	-	2008: BGV2111, 2131更新 済-08-003 2010: BGV3001精度選抜のため更新 2011: BGV1111精度選抜のため更新 2016: 19台精度選抜のため更新 2020: 4台継手部選抜のため交換 2021: BGV1006, 2006ノイズによる入力値のブレ	7	
開閉弁動作用電磁弁	電磁弁	19	AG31-02-1	CKD	1997	2016年9台(予冷用配管分)		2005: BSOS2211	3	
フィルターレギュレータ (電空変換器/電磁弁用)	フィルターレギュレータ	4	W3000-8-W-Y	CKD	1997	2014	-		無	

図10 超伝導バスライン機器分類別保守管理表

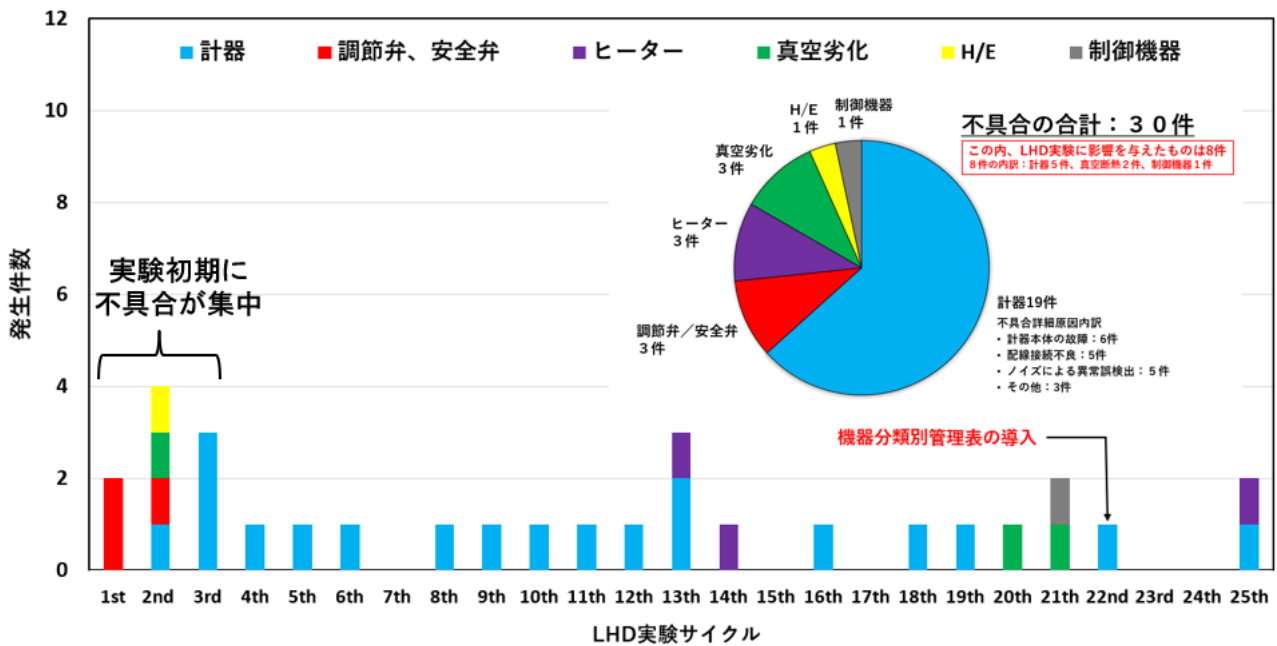


図 11 超伝導バスラインの冷却中に生じた LHD 実験サイクル別の不具合発生件数のまとめ

分類別保守管理表(EXCEL)を作成した。作成した管理表を図 10 に示す。管理表を作成後、過去 20 年分の保守点検、更新、改造記録などを反映することで、バスラインの各機器の現在の点検、更新状況が明確化され、今後のよりきめ細やかな保守計画の策定が可能となった。機器分類別保守管理表に紐づける形で、バスラインの冷却運転中に生じた不具合発生履歴の整理も行った。整理結果として、1998 年 3 月の運転開始から 2025 年 2 月までに生じた不具合を原因別、かつ LHD 実験サイクル毎にまとめたグラフを図 11 に示す。不具合は実験開始初期である第 1 - 第 3 実験サイクル時に多く発生しているが、その後は概ね毎年 1 - 2 件程度に抑えられている。第 22 実験サイクル前点検(2020 年度)より機器分類別管理表を導入し、第 25 実験サイクルまでの不具合の抑制に成功した。図 12 の円グラフに示した通り、計器が要因である不具合が 19 件と最も多く、LHD 実験の開始や継続に影響を与えた件数も 5 件と最多であった。

6. バスラインの運転保守結果の考察、まとめ

LHD 用の超伝導バスラインは、1998 年の運転開始から 25 回の実験サイクルを経験し、冷却中に様々な不具合を経験した。特に、真空劣化に基づく不具合は LHD 実験への影響が大きく、今後も真空排気時の真空度、表面温度の監視体制の維持、強化を行う等、重点的なケアが必要と考えられる。

一方で、バスラインの冷却中に生じた不具合の内訳では、計器によるものが最も多く、LHD 実験への影響に至った件数も最多であった。機器分類別保守管理表を活用し、各計器の合理的な点検・更新を進めていく。

また、今回作成した機器分類別保守管理表は、点検計画の策定時などに大変有用であることが示唆されたため、今後、超伝導バスラインに限らず様々な中・大型実験機器への適用を検討したい。

参考文献

- [1] S. Yamada, et al., Superconducting current feeder system for the large helical device, IEEE Trans. Magn. 32 (1996) 2422-2425.
- [2] S. Hamaguchi, et al., Reliable long-term operation of superconducting bus lines for the LHD, J. Phys.: Conf. Ser. 1857 012014, in: 10th ACASC / 2nd Asian-ICMC / CSSJ Joint Conference 6-9 January 2020, Okinawa, Japan.