大型ヘリカル装置ヘリカルコイルにおける常伝導伝播

今川 信作^{*1,*2,†}, 尾花 哲浩^{*1}, 濱口 真司^{*1}, 柳 長門^{*1,*2}, 三戸 利行^{*1}

Normal-zone Propagation in Helical Coils of Large Helical Device

Shinsaku IMAGAWA^{*1,*2,†}, Tetsuhiro OBANA^{*1}, Shinji HAMAGUCHI^{*1}, Nagato YANAGI^{*1,*2} and Toshiyuki MITO^{*1}

Synopsis: Large Helical Device (LHD) has been in operation since 1998. Propagation of a normal zone has been observed 26 times in a pair of helical coils, named H1 and H2, of the LHD during the 21 years of operation. The only fourth propagation resulted in quick discharge due to the imbalance voltage higher than the preset value of 0.2 V, whereas the propagation in the other cases stopped within a few seconds. Each the coil is divided into three blocks, named H-I, H-M, and H-O, from the inside. Since the conductor of the helical coils consists of NbTi/Cu strands, a pure aluminum stabilizer clad with a Cu-2%Ni layer, and a copper sheath, the current center shifts from the superconducting wires to the pure aluminum stabilizer at the normal zone. Therefore, imbalance voltages between H1 and H2 are induced in all the blocks during propagation of a normal zone. The cross-sectional position of the conductor in which the normal zone propagates can be estimated from the difference of the imbalance voltages among the blocks. In 2001, pickup coils were installed along the helical coils by the pitch of 30 degree of the poloidal angle in order to detect the position of a propagating normal zone. The pickup coils detect the change in magnetic field by a shift of current center at the normal zone. The position and velocity of propagating normal zones were detected successfully 15 times after the 10th propagation. Most of the normal zones were induced at the bottom of the coils, and all of them propagated to one side, which is downstream of the transport current, with recovery on the opposite side. As the results of investigation of all the data, normal zones are considered to have been induced in the conductor in the first or last turn of the first or second layer of the H-I block. Therefore, normal zones should be induced at the position under the worst cooling condition with large disturbance due to slippage of the conductor against the helical coil case.

Keywords: helical coil, normal zone, pool-cool, propagation, superconducting magnet

1. はじめに

大型ヘリカル装置 (LHD) のヘリカルコイル¹⁾では、1998年から21年間の運転において26回の常伝導伝播が観測されている。高純度アルミニウム安定化材を超伝導撚線の片側にのみ配置した導体を採用したことから常伝導伝播速度に異方性が観測され²⁾、25回は片側にのみ伝播 (電流上流側からの回復を伴いながら電流下流側に伝播) し、緊急減磁の設定電圧0.2 Vまでは拡大せずに超伝導に回復した。

ヘリカルコイルは内側からI, M, Oの3ブロックに分割されている。常伝導伝播の際に導体内で電流重心のシフトが生じるため、1つのブロックで常伝導部が伝播する際に、他のブロックのバランス電圧にはその誘導電圧が検知される。各ブロックに誘起される誘導電圧は伝播位置によって大きさが異なることから、バランス電圧を分析することにより、ヘリカルコイル断面内の伝播位置を同定することが可能である³⁾。また、2001年に取り付けけたピックアップコイルによる計測によって、ヘリカルコイル長手方向の伝播位置や伝播速度も計測可能となった⁴⁾。これまでの観測データを整理し、常伝導発生位置と冷却安定性について考察する。

2. バランス電圧計測システム

ヘリカルコイルの断面図を Fig. 1に示す。H1と H2の2つのヘリカルコイルは、各々、150ターンずつのI, M, Oブロックに分割されており、同じブロック同士が電源に対して直列に接続されている。クエンチ検出のため、各々のブロックで H1と H2の差電圧 (バランス電圧) を計測してい

Received May 22, 2020

^{*1} 核融合科学研究所

〒502-5292 岐阜県土岐市下石町322-6

National Institute for Fusion Science, 322-6 Oroshi-cho, Toki, Gifu 509-5292, Japan

^{*2} 総合研究大学院大学

〒502-5292 岐阜県土岐市下石町322-6

SOKENDAI (The Graduate University for Advanced Studies), 322-6 Oroshi-cho, Toki, Gifu 509-5292, Japan

[†] E-mail: imagawa@nifs.ac.jp

DOI: 10.2221/jcsj.55.357

る。Iブロックでの常伝導伝播によってIとMブロックに生じるバランス電圧 e_I と e_M は次式で与えられる³⁾。

$$e_I = \dot{M}_{Ik} I_I + V_R \quad (1)$$

$$e_M = \dot{M}_{Mk} I_I \quad (2)$$

ここで、 I_j は j ブロックの輸送電流、 V_R はIブロックを伝播する常伝導部の抵抗成分、 M_{jk} は常伝導伝播による電流重心の変化によって生じる電流ループ k (Fig. 2参照) と j ブロックの相互インダクタンスである。この電流ループの面積を S_k 、この部分に j ブロックの作る直交磁場を B_j とおくと、 M_{jk} の時間微分は次式で与えられる。

$$\dot{M}_{jk} = \frac{d}{dt} \left(-\frac{B_j S_k}{I_j} \right) = -\frac{B_j}{I_j} \frac{dS_k}{dt} \quad (3)$$

式(1)-(3) より、 V_R は次式で与えられる。

$$V_R = e_I - \frac{\dot{M}_{Ik}}{M_{Mk}} e_M = e_I - \frac{B_I I_M}{B_M I_I} e_M \equiv e_I - \frac{e_M}{\alpha} \quad (4)$$

α は、ヘリカルコイル断面内の各導体位置におけるIブロックの作る横磁場 B_I に対するMブロックの作る横磁場 B_M の比である。磁場計算位置を各導体の超伝導燃線中心とする場合のIブロックの α を Table 1 に示す。Table 1 から分かるように、9列から成る1層目はどの列でも同じ範囲 (0.69-0.71) である。13列から成る2層目は端 (1列または13列目) で小さく、中央で高いが、0.81 よりも高い。3層目以降はさらに高くなるので、最適な α が0.7近傍であれば1層目、0.8近傍であれば2層目の端部で常伝導伝播が生じたと識別することが可能である。

3. ピックアップコイル計測

3.1 ピックアップコイルの検出原理と配置

ヘリカルコイル導体は、Fig. 1 に示すように、超伝導燃線の横に高純度アルミニウム安定化材が配置されており、常伝導部が伝播する際には電流重心がシフトする。この際の磁場変化をヘリカルコイルの長手方向に多数配置したピックアップコイルによって検知することにより、常伝導部の発生位置と伝播速度を評価することが可能である。2000年の第4サイクル実験の後に、Fig. 3 (赤道面より上部のピックアップコイルのみを表示) に示すようにヘリカルコイル上蓋にポロイダル角で30度ピッチで左右交互に設置した。この場合の左右は反時計方向から見たヘリカルコイル断面で定義されている。第3セクターの内周側には多数のひずみゲージが取り付けられているため、304L, 305R, 306L (左からセクター番号 (1桁) +ポロイダル断面位置 (2桁) + 左 (L) または右 (R)) の位置には設置していない。そのため、全個数は117個となる。ピックアップコイルの巻数は10,000で、内径×外径×幅は89.1×109.1×15 mm³ である。励磁による磁束変化を打ち消すため、Fig. 4 に示すように、H1コイルのピックアップコイル出力から対角位置の

Fig. 1 Cross-section of the LHD cryostat. The helical coil consists of I, M, and O blocks from the inner side. The pitch of spacers between conductors is 55 mm, and the wetting surface fraction of the conductors is around 0.5.

Fig. 2 Sketch of an additional current circuit k equivalent to the current shift during propagation of a normal zone.

Table 1 Maximum and minimum ratio of the magnetic field in the overturning direction by M-block to that of by I-block. T and L mean "turn" and "layer", respectively.

	L8	L7	L6	L5	L4	L3	L2	L1
T13	-1.23	-1.81	-3.68	36.2	2.89	1.46	0.95	0.71
	-1.56	-2.53	-7.35	7.21	2.33	1.36	0.94	0.69
T14	-1.23	-1.82	-3.71	33.5	2.87	1.45	0.95	0.71
	-1.57	-2.54	-7.47	7.10	2.32	1.35	0.94	0.69
T15	-1.24	-1.84	-3.80	27.1	2.81	1.44	0.95	0.71
	-1.58	-2.58	-7.85	6.76	2.28	1.34	0.94	0.69
T16	-1.25	-1.87	-3.98	19.9	2.70	1.39	0.93	0.71
	-1.60	-2.65	-8.65	6.20	2.21	1.32	0.92	0.69
T17	-1.27	-1.93	-4.28	11.9	2.45	1.33	0.91	0.71
	-1.64	-2.76	-10.2	5.49	2.09	1.27	0.89	0.69
T18	-1.30	-2.00	-4.78	8.54	2.22	1.25	0.84	
	-1.69	-2.93	-13.6	4.72	1.95	1.19	0.83	
T19	-1.34	-2.19	-6.28	6.25	1.99	1.16	0.82	
	-1.75	-3.17	-23.9	3.99	1.77	1.10	0.81	
T20	-1.39	-2.38	-8.61	4.71	1.76	1.04		
	-1.84	-3.54	-52.3	3.35	1.56	1.00		
T21	-1.46	-2.66	64.8	3.62	1.58	1.01		
	-1.97	-4.15	-89.8	2.63	1.42	0.98		
T22	-1.58	-3.13	96.1	2.74	1.37			
	-2.15	-5.35	8.54	2.15	1.26			
T23	-1.69	-4.10	9.11	2.04				
	-2.46	-9.55	4.51	1.73				
T24	-1.98	409	4.46					
	-3.11	-199	2.94					
T25	-2.87							Max.
	-5.50							Min.

H2コイルのピックアップコイル出力を引いた差電圧（設置していない304L, 305R, 306Lの対角位置の804L, 805R, 806Lは単独）を50 Hz サンプリングで連続計測している。ローパスフィルターは50 Hz または30 Hz を選択している。

3.2 常伝導伝播時の信号波形

ピックアップコイルの代表的な測定波形として13回目と15回目の常伝導伝播の場合を Fig. 5, 6に示す。13回目は電流が正方向励磁, 15回目は逆方向励磁の場合であるが, どちらの場合も, 電流下流側へ伝播しながら反対側では回復する「片側伝播」である。左側ピックアップコイルの信号レベルは右側の約1/2であることから, コイル右側（最終列側）の導体を伝播したことが分かる。ピックアップコイルの極性は, 正方向励磁の場合にヘリカルコイルの作る磁場を弱める磁場変化を正としているので, どちらの場合も常

Fig. 3 Layout of sector numbers and coil leads of the helical coils. Pickup coils in the upper half are shown.

Fig. 4 Concept for measuring outputs of pickup coils. Only the pickup coils in the upper halves at the 5th and 10th sectors are shown.

伝導伝播の起点は, H1コイルの#10セクタ下側と判別できる。15回目の伝播の場合は, 伝播開始時に010Lのピックアップコイルに負のスパイク電圧が観測されており, 電磁力で導体が外側に移動した際の誘導電圧と考えられる⁵⁾。全ての場合に同様のスパイク電圧が観測される訳ではないので, 擾乱の大きさやピックアップコイルとの相対位置に依存すると考えられる。伝播距離は, 13回目の伝播は1ピッチを超えず, 15回目は2ピッチを超えたが, どちらの場合でも, ヘリカルコイルの最上部を通り過ぎて止まる結果となっている。最下部付近で常伝導伝播が発生し, 最上

Fig. 5 Pickup coil outputs for the 13th propagation of a normal zone. The numbers of the figures represent the sector and poloidal position of the coils.

Fig. 6 Pickup coil outputs for the 15th propagation of a normal zone.

部を通り過ぎて停止することは、ピックアップコイルによって伝播位置を特定できた範囲では、飽和ヘリウム冷却の場合に共通している。

ピックアップコイルの出力が最大となる時刻とピックアップコイルの位置から伝播速度を求めることができる。

Fig. 7に、14-16回目の伝播における伝播速度と1, 2層目の最終列における導体直交磁場を示す。伝播速度は磁場強度と強い相関があり、高磁場のトラス内周側で早く、低磁場のトラス外周側で遅くなる。**Fig. 5, 6**から、常伝導伝播の起点は#10セクター最下部付近であることが分かっているが、磁場強度が最高となる場所ではない。また、13回目の伝播の場合の伝播停止位置はポロイダル断面位置の4と5の間（上部内周側）と判断され、磁場強度が最低の場所ではない。常伝導伝播の開始と停止には磁場強度だけでなく、冷却状態も関わっていると考えられる。

4. 常伝導伝播挙動の分析

4.1 常伝導伝播時の抵抗成分電圧の解析

片側伝播の場合のヘリカルコイル導体の電圧降下をモデルコイルにおいて測定した例を **Fig. 8**に示す。各位置における常伝導転移開始から回復開始までの「回復遅れ時間（常伝導転移の持続時間）」を t_r 、定常時の電圧を V_0 とおくと、過渡時の電圧 V は次式の回帰曲線で近似できる³⁾。

$$V(t \leq t_r) = V_0(1 + 1.6 \exp(-2t/\tau)) \quad (5)$$

$$V(t > t_r) = V_0 \left(C_1 e^{-(t-t_r)/0.018} + C_2 e^{-(t-t_r)/2\tau} + 0.03 e^{-(t-t_r)/1.5} \right) \quad (6)$$

$$C_1 = 0.58 + 1.99 e^{-2t_r/\tau}, C_2 = 0.39(1 - e^{-2t_r/\tau})$$

$\tau (=0.12 \text{ s})$ は超伝導線からアルミニウム安定化材に電流が転流する際の電流拡散時定数である。一方、安定化材から超伝導線に回復する場合の電流拡散時定数は 4τ となる^{3,6,7)}。電圧降下は電流密度の二乗に比例するため、抵抗値の時定数は電流拡散時定数の1/2となる。式(6)の右辺第1項は、実測値から回帰して求めた減衰項で、安定化材以外からの拡散と安定化材からの高次時定数の拡散の寄与である。右辺第3項は、超伝導燃線に流れる遮蔽電流の寄与である。ピックアップコイルで実測された伝播速度から積分距離が求まるので、 t_r を仮定すれば抵抗成分 V_R を計算することができる。この値と式(4)から求めた値を比較することにより、抵抗成分の分離と伝播位置の同定が可能である。

13回目の伝播の場合を **Fig. 9**に示す。電圧計算では、導体を長手方向に 0.01 m の要素に分割し、伝播速度から各要素の常伝導到達時刻を求め、式(5), (6)から求まる各要素の電圧を積分することにより V_R を求めた。バランス電圧から求めた V_R と比較すると、 $\alpha=0.7$ が最適であることが分かる。特に伝播開始時と伝播停止後の電圧変化には t_r の影響が小さいので、明確である。この数値を **Table 1** と比較することにより、1層目で伝播したと結論できる。 t_r にも

ポロイダル角度依存性を考える方が、バランス電圧から求めた値と良く一致する。

Fig. 7 Propagation velocities in the LHD helical coil and the transverse magnetic field at 11.2 kA at the conductor in the last turn in 1st and 2nd layers (L1T17 and L2T19).

Fig. 8 Voltage drop of the conductor of HC Model Coil during propagation and recovery of a normal zone.

Fig. 9 Balance voltage (a) and estimated resistive voltage (b) for the 13th propagation of a normal zone.

4.2 ピックアップコイル信号の解析

様々な t_r に対する1次元電流拡散解析の結果から求めた電流重心シフトの時間変化は次式で近似できる³⁾。ただし、超伝導撚線から安定化材への拡散過程では、撚線中心から安定化材の表面までは時間遅れなく電流重心がシフトすると仮定した。

$$d(t < t_r) = 4.55 - 0.418e^{-20t/\tau_1} - 2.1e^{-t/\tau_1} \quad (7)$$

$$d(t > t_r) = m_1e^{-100t/\tau_2} - m_2e^{-10t/\tau_2} - m_3e^{-t/\tau_2} \quad (8)$$

$$m_1 = 0.1783 + 0.982\exp(-2.66t_r/\tau_1)$$

$$m_3 = 4.253 - 3.966\exp(-t_r/\tau_1)$$

$$m_2 = d(t_r) - m_1 - m_3$$

τ_1 は超伝導線から安定化材への電流拡散時定数、 τ_2 は逆過程の時定数であり、以下の計算では0.12 sと0.48 sとした。片側伝播の場合は、Fig. 10に示すように、この波形が移動していくと見なすことができるので、電流重心が変化する分の有限長の電流ループ (Fig. 10のグレーの領域) がピックアップコイル位置に作る磁場を計算することにより、ピックアップコイル出力を評価できる⁴⁾。

14回目の伝播に対する計算値と実測値の比較を Fig. 11に示す。計算値は、文献4の Fig. 8に対して回復時の電流拡散時定数の見直しを行ったものである。時刻0は計算において常伝導先端がピックアップコイルに最も近づく時刻であり、左右のピックアップコイルの3個ずつの実測データは、電圧が立ち上がる時刻が計算値と一致するように時刻をシフトして表示してある。この計算では伝播速度を8.5 m/s一定とした。回復遅れ時間については0.04 s, 0.06 sまたは0.08 sの3通りを比較し、0.08 sが実測値と最も一致する結果となった。常伝導伝播位置については、1-3層目の最終列で比較した結果、1層目最終列 (L1T17) での計算結果が左右のピックアップコイルとも実測値と最も一致した。2層目と3層目での計算結果は、左右のピックアップコイル出力最大値の比が実測値と異なる。その原因は、上の層になるほど、常伝導部先端が左側ピックアップコイルの位置に作る磁場は小半径方向が主となり、鎖交磁束が少なくなるためである。14回目の伝播は1層目最終列あるいはその近傍で生じたと判断できる。

4.3 バランス電圧の抵抗成分の分離

常伝導伝播が停止して超伝導に回復する過程の抵抗成分には時定数 2τ で減衰する特徴的な波形が現れるため、最適な α が0.70 (1層目) か0.81 (2層目端部) かを判別することが可能である (Fig. 9参照)。回復過程に着目して α を判別した一覧を Table 2に示し、伝播距離が1ピッチ以内の15回の抵抗成分の時間変化を Fig. 12に、1ピッチ以上を伝播した11回を Fig. 13に示す。4thの伝播は回復せずに緊急減磁に至ったため、伝播開始直後のみを表示している。他の伝播に比べて電圧の立ち上がりが明らかに早い。

Fig. 10 Sketch of the current shift in the conductor.

Fig. 11 Calculated pickup coil voltages compared with the measured data. The time of each measured data is shifted to adjust the starting time of the voltage change. L1T17, L2T19, and L3T21 are the last turns in the 1st, 2nd, and 3rd layers, respectively.

10th 以降は、20th と26th を除いてピックアップコイルにより伝播位置が判明しており、飽和ヘリウム冷却では、全てコイル最下部近傍が起点で、コイル上部を通過した所で停止した。3rd, 9th および20th は2層目最終列の伝播で、それ以外は1層目の伝播である。伝播開始と回復の時刻より、1st, 6th, 7th, 8th も最下部近傍が起点で、各々、3ピッチ目、2ピッチ目、4ピッチ目、5ピッチ目まで伝播してコイル上部で停止したと考えられる。2nd と9th は回復の時刻がこれらとは異なることから、起点あるいは停止位置が異なると推定される。飽和ヘリウム冷却において、コイル最下部近傍が起点となっている原因は、導体姿勢が水平のため最大熱流束が低い⁸⁾ ことに加えて、次章で述べるように、各層の端部はヘリウム泡が滞留しやすいためと考えられる。コイル上部を通過した所で伝播が停止する理由には、1, 2層目最終列に着目するとコイル上部は泡が溜まら

ず良い冷却状態が維持されることと、外側赤道部から最上部では磁場が低いことが関わっていると考えられる。

ヘリカルコイルは、コイルの上部に環状ヘッダータンク

Table 2 Propagation of normal zones in the LHD helical coils. The 18th, 19th, 23rd, 25th, and 26th propagation occurred under subcooling operation.

No.	Mode	H-O/M/I current (kA)	Coil	Position
1st	#1-o	11.25/ ← / ←	H1-L1	
2nd	#1-o	11.29/ ← / ←	H2-L1	
3rd	#1-o	11.42/ ← / ←	H2-L2	
4th	#1-o	11.46/ ← / ←	H1-L1	
5th	#1-o	11.33/ ← / ←	H1-L1	
6th	#1-d_γ1.258	12.02/11.82/11.08	H1-L1	
7th	#1-d_γ1.258	12.02/11.82/11.08	H1-L1	
8th	#1-d_γ1.258	12.07/11.87/10.98	H1-L1	
9th	#1-d_γ1.258	12.06/11.86/10.96	H2-L2	
10th	#1-c_R4.1 m	11.16/ ← / ←	H1-L1(R)	#10 bottom
11th	#1-o_γ1.258	11.71/11.57/10.93	H1-L1(R)	#10 bottom
12th	#1-o	11.04/ ← / ←	H1-L1(R)	#10 bottom
13th	#1-o	11.15/ ← / ←	H1-L1(R)	#10 bottom
14th	#1-d	11.30/ ← / ←	H1-L1(R)	#10 bottom
15th	#1-c	-11.08/ ← / ←	H1-L1(R)	#10 bottom
16th	#1-o	-11.11/ ← / ←	H1-L1(R)	#10 bottom
17th	#1-c_R4.0 m	11.00/ ← / ←	H1-L1(R)	#10 bottom
18th	#1-o	11.45/ ← / ←	H2-L2(L)	#8 top
19th	#1-d_R3.65 m	-11.75/-11.35/-11.35	H2-L2(L)	#8 top
20th	#1-o	11.17/ ← / ←	H1-L2	—
21st	#1-o	11.21/ ← / ←	H1-L1(R)	#10 bottom
22nd	#1-c_R4.1m	11.06/11.00/11.00	H1-L1(R)	#10 bottom
23rd	#1-o	11.53/11.40/11.40	H1-L1(R)	#10 bottom
24th	#1-o	-11.37/-10.97/-10.97	H1-L1(R)	#10 bottom
25th	#1-d	11.80/11.75/11.20	H1-L(R)	#8 bottom
26th	#1-d	11.72/11.67/11.18	H1-L1	—

Fig. 12 Resistive component of normal zones that stopped within one pitch of the LHD helical coils.

Fig. 13 Resistive component of normal zones that propagated over one pitch of the LHD helical coils.

を有しており、この液面を一定に保つように、コイル最下部から液体ヘリウムを供給する冷却方式である⁹⁾。冷却安定性を改善するために、供給温度を3.5 K に低下させる改造を2006年に実施した¹⁰⁾。ヘリカルコイルと環状ヘッダータンクの連絡配管にヒータを追加し、1 kW 程度を入熱することによって50 g/s の流量を確保し、コイル出口温度を3.8 K 以下に低下させた。サブクール冷却では、励磁に伴う交流損失によって励磁中にコイル内部の温度が上昇することを考慮する必要がある。最初の励磁試験において、励磁速度を半分に下げて交流損失を低減する対策を行ったが、11.4 kA 相当の電流値を超えたところで、常伝導伝播が2回(18th と19th) 観測された。2回とも H2コイル2層目第1列での伝播であり、コイル上部から伝播を開始し、内側赤道付近で停止した¹¹⁾。サブクール冷却では、冷媒入口のコイル下部から出口のコイル上部に向かって温度勾配が形成され、励磁中は交流損失による温度上昇が重畳される。コイル断面内の流動は自然対流が支配的であることから、コイル断面内に温度勾配が形成され、導体の交流損失によって局所的に飽和温度に近い領域ができると推測される。サブクール冷却においても、コイル最下部の右側あるいは最上部の左側が伝播の起点となっていることについては、ヘリカルコイルに働く横方向の電磁力が関与している可能性がある。標準配位の励磁では、横方向の電磁力は小さいが、コイル最上部と最下部では、常伝導伝播の起点となっている側で導体がコイル容器から離れる方向の電磁力であるため、摩擦力が弱まり、導体がコイル容器に対して滑りやすくなる。

その後は、励磁による発熱の影響を小さくするため、11 kA で2時間の電流保持を行い、出口温度が4.0 K 以下に低下した後にそれ以上の励磁を行うように励磁方法を変更した。この方法で2019年度までに3回(23rd, 25th, 26th) の伝播が観測されたが、伝播距離は1/4ピッチ以内であり、安定な運転が可能な範囲と判断している^{12,13)}。

ヘリカルコイルの26回の伝播の際の電流と磁場の関係をモデルコイルの実験結果と合わせて**Fig. 14**に示す。ヘリカルコイルのI, M, Oブロックに同一電流を流す条件では、飽和ヘリウム冷却の場合に11.0 kA以上の電流値で片側常伝導伝播、11.4 kA以上では両側伝播が発生しており、モデルコイルの「before subcool」と同等の冷却安定性といえる。モデルコイルでは、飽和ヘリウム冷却で最小伝播電流を測定した後で、一旦、サブクール状態に冷却してから再び飽和ヘリウム冷却に戻した場合には、最小伝播電流が向上した^{14,15)}。長い熱時定数を有するコイル容器との熱交換によってコイル内部の液体ヘリウムのクオリティが変わり、冷却安定性に影響すると考えられる。ヘリカルコイルの場合は、熱容量の大きな電磁力支持構造物からの侵入熱の影響も加わって、定常侵入熱になるまでに数日を要すると考えられる。LHDの健全性確認のための励磁試験は、冷却

Fig. 14 Minimum propagating current, $I_{m.p.}$, of the LHD helical coil and the model coil.

完了後の最初に実施しており、ヘリカルコイルの冷却安定性の観点からは厳しい条件での試験といえる。

5. 緊急遮断に至った4回目の常伝導伝播

4回目の常伝導伝播の際の I, M, O ブロックのバランス電圧を Fig. 15 に示す。H1-I で常伝導部が生じ、伝播開始後 22.5 秒で一気に常伝導部が拡大伝播して緊急減磁が作動した¹⁶⁾。H1 コイルの 1 層目から伝播が生じたと仮定して、I と M ブロックのバランス電圧の差から求まる抵抗成分($e_I - e_M/0.70$)を Fig. 16 に示す。ピックアップコイル取付前のため 4 回目伝播の起点は観測できていないが、H1-I コイルで繰り返して起点となっている最下部付近と仮定した伝播速度分布で電圧計算を行った結果を Fig. 17 に示す。「伝播速度は、電流下流側に 14 m/s、上流側に 5 m/s、かつ、上流側への伝播停止が 0.3 s 後、回復遅れ時間 $t_r=0.3$ s」の条件にすると、抵抗成分の立ち上がり部分をほぼ再現できる。モデルコイルの飽和ヘリウム冷却における 11.45 kA での伝播速度は、各々 12 m/s と 4 m/s 程度なので、励磁による発熱によって冷却条件が悪化していたと考えられる。伝播開始 3 秒後から抵抗成分が 60 mV から 130 mV に拡大するところは、 t_r が 0.3 秒から 1 秒程度にまで長くなったと考えられる。

1 層目の各列のトロイダル 1 周 (5 ピッチ) の長さは 35.10~35.14 m であるので、電流下流側への平均伝播速度が 14 m/s の場合は 2.5 秒で 1 周する。一気に隣の導体に伝播するまでの 22.5 秒間に 9 周、すなわち、1 層目最終列で生じた常伝導部が 1 層目全列を伝播したと推察される。Fig. 18 に示すように、遮断後のヘリカルコイル容器の温度は、内外赤道位置の 10 箇所の中で #4 内側赤道と #5 外側赤道が他よりも高くなったことから、隣の導体に一気に常伝導が拡大伝播した場所は #4 セクターの下側であり、常伝導部は H1-I の口出し部まで到達したと考えられる。30-130 mV の抵抗値は 3-15 m の常伝導長さに対応するので、半ピッチから 2 ピッチの範囲で長さを変化しながら常伝導部が 1 層目の全長 300 m 強を伝播し、次第に冷却が悪化した第 1 列で隣接導体に一気に伝播したと推定される。

Fig. 15 Balance voltages and magnetic field during the 4th propagation of a normal zone and quick discharge.

Fig. 16 Time evolution of resistive component during the 4th propagation of a normal zone.

Fig. 17 Calculated resistive voltage for both-side propagation of a normal zone with t_r of 0.3 s.

伝播時の電圧計算との比較から、常伝導発生初期は両側に伝播し、0.3 秒以降は片側伝播となり、6 m 弱の長さの常伝導部がトラス 1 周して再び最初の場所に戻ってきたところで回復が遅くなって常伝導部が 15 m 程度まで長くなったが、3-7 周には t_r が 0.2 秒程度にまで次第に短くなったと推定される。ヘリカルコイル巻線部には、平均 55 mm ピッチで導体間にスペーサが挿入されており、長手方向の冷却流路は巻線部の周辺に限定されているが、3-7 列目 (1 層目の中央付近) は、断面内でコーナーに泡が移動できるため、冷却が悪化しにくいと考えられる。14 秒後と

17秒後付近では、新たな擾乱による（別の場所での）常伝導部伝播と回復の信号が重畳している可能性も考えられるが、他の常伝導伝播・回復の波形と比較すると回復時の時定数が長すぎるので、回復の停止と再開が生じたと考えている。**Fig. 19**に示すように、1層目第1列は、最下部から外側赤道の範囲では最も高い所に位置するために泡が溜まって冷却が悪化しやすいことから、最終的に#4セクター下側で隣接導体への常伝導伝播に至ったと考えられる。

6. おわりに

LHD ヘリカルコイルでは、21 年間の運転において 26 回の常伝導伝播が観測された。4 回目を除いて片側伝播であり、1 ピッチを超えて伝播した場合でもトーラス 1 周以内に伝播が止まり、超伝導に回復した。バランス電圧およびピックアップコイルによる伝播位置計測データの分析の結果、伝播した導体の位置は、H-I ブロックの 1, 2 層目の第 1 列または最終列と推定される。ヘリカルコイルでは励磁と減磁の度に導体滑りに起因すると考えられる多数のスパイク電圧が観測され、その中で大きな擾乱は、第 1 列または最終列の導体がコイル容器に対して滑ることによって発生していると考えられる。コイル下部は、導体姿勢が水平であることに加えて泡が滞留しやすい構造であるため、飽和ヘリウム冷却の場合の最小伝播電流は 11 kA 程度であり、それ以上の電流値で大きな擾乱が生じた場合に常伝導伝播に至ると考えられる。

Fig. 18 Temperature of the H1 coil case after quick discharge.

Fig. 19 Sketch of the upper corner of the LHD helical coil case at the bottom.

ヘリカルコイルの運転においては、局所的な冷却の悪化を抑制するため、最小伝播電流近傍の 10.5 kA 以上では励磁速度を 1/5 (1.4 A/s) に下げることに加えて、I ブロックの電流値を M, O ブロックよりも下げて高磁場に到達した後に総電流値を下げながら所定の電流値に移行する方法を採用している。この方法により、最小伝播電流以上の電流値、具体的には、飽和ヘリウム冷却では 11.2 kA 相当、サブクール冷却では 11.6 kA 相当の電流値までの励磁をプラズマ実験で使用可能としており、21 年間の運転において性能の変化は観測されていない。

本研究を遂行するにあたり、多大なご支援をいただいた、本島修博士、佐藤隆博士を始めとする LHD 建設グループと実験グループおよび共同研究者の皆様に感謝いたします。本研究は、核融合科学研究所共同研究 NIFS10ULAA702 の支援の下に実施されました。

参 考 文 献

- 1) S. Imagawa, et al.: "Overview of LHD superconducting magnet system and its 10-year operation," *Fusion Science and Technology* **58** (2010) 560-570
- 2) N. Yanagi, et al.: "Asymmetrical normal-zone propagation observed in the aluminum-stabilized superconductor for the LHD helical coils," *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **14** (2004) 1507-1510
- 3) S. Imagawa, N. Yanagi and T. Mito: "Reconsideration of evaluation of balance voltages during a normal zone propagation in the LHD helical coils," *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **23** (2013) art. no. 4700904
- 4) S. Imagawa, N. Yanagi and T. Mito: "Detection system of a propagating normal-zone with pick-up coils in the LHD helical coils," *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **21** (2011) 2316-2319
- 5) N. Yanagi, et al.: "Performance of the superconducting helical coils of LHD," *Fusion Science and Technology* **58** (2010) 571-580
- 6) A. Lee, R. H. Wands and R. W. Fast: "Study of current redistribution in aluminum stabilized superconductor," *Cryogenics* **32** (1992) 863-866
- 7) A. Devred: "Investigation of current redistribution in superstabilized superconducting winding when switching to the normal resistive state," *J. Appl. Phys.* **65** (1989) 3963-3967
- 8) A. Iwamoto: "Discussion of heat transfer to liquid helium on surface orientation dependence," *Plasma and Fusion Research* **7** (2012) art. no. 2405073
- 9) S. Imagawa, et al.: "Design and performance of cooling system of helical coils for LHD," *Adv. Cryo. Eng.* **45** (2000) 675-682
- 10) S. Imagawa, et al.: "Upgrading program for improving the cryogenic stability of LHD helical coils by lowering the operating temperature," *Fusion Eng. Des.* **81** (2006) 2583-2588
- 11) S. Imagawa, et al.: "Results of the excitation test of the LHD helical coils cooled by subcooled helium," *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **18** (2008) 455-458
- 12) S. Imagawa, et al.: "Increase of operating current of the LHD helical coils by upgrading the cooling system," *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **20** (2010) 438-441

- 13) S. Imagawa, H. Noguchi, T. Obana, S. Hamaguchi, N. Yanagi and T. Mito, "Effects of subcooling on lengths of propagating normal zones in the LHD helical coils," IEEE Trans. Appl. Supercond. **25** (2015) art. no. 4201805
 - 14) S. Imagawa, et al.: "Improvement in cryogenic stability of the model coil of the LHD helical coil by lowering the temperature," IEEE Trans. Appl. Supercond. **16** (2006) 755-758
 - 15) S. Imagawa, et al.: "Results of stability test in subcooled helium for the R&D coil of the LHD helical coil," IEEE Trans. Appl. Supercond. **14** (2004) 1511-1514
 - 16) S. Imagawa, et al.: "Results of the first excitation of helical coils of the Large Helical Device," IEEE Trans. Appl. Supercond. **10** (2000) 606-609
-

今川 信作 1961年1月17日生。1983年京都大学工学部原子核工学科卒業。同年4月株式会社日立製作所入所。1991年4月文部省核融合科学研究所助手，1997年10月助教授。2004年4月教授。主として大型超伝導マグネットに関する研究に従事。低温工学・超電導学会，プラズマ核融合学会会員。IEEE 会員。博士（工学）。

尾花 哲浩 1977年生。2006年総合研究大学院大学高エネルギー加速器科学研究科博士後期課程修了。同年核融合科学研究所助手。現在、同研究所助教。核融合及び加速器用超伝導マグネットに関する研究に従事。低温工学・超電導学会会員。博士（工学）。

濱口 真司 1970年10月12日生。1993年東京工業大学理学部応用物理学学科卒業。1998年同大学大学院総合理工学研究科創設エネルギー専攻博士後期課程修了。核融合科学研究所 COE を経て，同年7月より同研究所助手。2016年6月より准教授。主に超伝導マグネットの冷却，超流動ヘリウム熱輸送に関する研究に従事。低温工学・超電導学会，プラズマ・核融合学会会員。博士（工学）。

柳 長門 1962年12月24日生。1987年京都大学大学院工学研究科修士課程修了。1989年12月核融合科学研究所助手，2000年助教授，2014年教授。主としてヘリカル型核融合炉の設計研究と大電流高温超伝導導体の開発に従事。低温工学・超電導学会，プラズマ・核融合学会，日本物理学会会員。博士（工学）。

三戸 利行 1955年12月21日生。1983年九州大学大学院工学研究科博士後期課程修了。1983年高エネルギー物理学研究所助手。1988年京都大学ヘリオトロン核融合研究センター助教授。1989年核融合科学研究所助教授、1998年同研究所教授。核融合用超伝導低温システムの開発研究に従事。低温工学・超電導学会，プラズマ核融合学会会員。工学博士。