大型ヘリカル装置のサブクール冷却への改造と運転状況

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

Upgrade of the Large Helical Device Cooling System and the Operating Status

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

Synopsis: The Large Helical Device (LHD), the largest stellarator, has been operating for the research of fusion plasma since 1998. A toroidal field of almost 3 T is produced by a pair of pool-cooled superconducting helical coils. A normal-zone had been induced several times at the bottom of the innermost layers of the coil at currents higher than 11.0 kA. Upgrading the cooling system was investigated to improve the cryogenic stability. The effect of subcooling was examined using a model coil. The minimum current to begin propagation of a normal zone was increased from 10.8 kA in saturated helium to 11.7 kA in subcooled helium of 3.5 K. On the basis of these results, an additional cooler with two-stage cold compressors was installed at the inlet of the LHD helical coil in 2006. The inlet and outlet temperatures of the coil were successfully lowered to 3.2 K and 3.8 K, respectively, with a mass flow of 50 g/s. However, a normal-zone was induced near the top of the coil at 11.45 kA during continuous excitation from the zero current. In order to remove the additional temperature rise caused by AC losses during charging, the excitation method was revised to waiting cool-down at 11.0 kA, and excitations equivalent to 11.5 kA were attained. In addition, an average of 11.83 kA was attained by the current grading method among three blocks of the helical coil.

Keywords: loss measurement, propagation of a normal zone, pool-cool, stability, subcooled helium

1. はじめに

大型ヘリカル装置のヘリカルコイルは、浸漬冷却方式の大型超伝導マグネットであり、約 7 T の高磁界中で低温端安定条件を達成するために、導体の安定化材に高純度アルミニウムが採用された。しかしながら、導体の大型化に伴ってこの低抵抗安定化材への電流拡散時間が長くなり、その間の高い発熱率のため、11.0 kA 以上の電流値で片側への常伝導伝播が繰り返して観測された¹⁾。定常冷却時には、Fig. 1 に示すように、コイル内部で蒸発する分の冷媒がコイル最下部から供給されて上部ヘッダの液面が一定値に保持される。常伝導伝播の起点はコイル最下部近傍に集中しており、その原因はコイル最下部の水平な部分において気泡の滞留が生じて局所的に冷却条件が悪化しているためと推測されている²⁾。そこで、冷媒温度を下げることによって冷却安定性を改善する改造が検討された。

まず、ヘリカルコイル全体を減圧して飽和温度を下げる方法と入口側に減圧熱交換器を追加して飽和温度以下（サ

ブクール状態）にする方法の 2 通りが検討され、絶縁破壊電圧と大気混入防止の面で有利な後者の方式が選択された。次に、実機と同じ容量の低温排気圧縮機を備えた試験ループが整備され、モデルコイルを用いて冷却安定性の改善効果が確認された^{3,4)}。この成果に基づいて実機の改造が行われ、計画通りに、ヘリカルコイル入口温度を 3.2 K に低下させることに成功した⁵⁾。モデルコイルから予測された改善度には至らないものの、これまでに平均 11.83 kA までの励磁方法が確立され、プラズマ実験に利用されている。これらの改造計画の全体について説明する。

Fig. 1 Cross-section of the LHD cryostat and the helical coils.

Received March 21, 2009

^{*} 核融合科学研究所

〒509-5292 岐阜県土岐市下石町 322-6

National Institute for Fusion Science, 322-6 Oroshi, Toki,

Gifu 509-5292, Japan

[†] E-mail: imagawa@LHD.nifs.ac.jp

2. 冷却システム増強方式の検討

超伝導マグネットの冷却安定性に対する冷媒温度低下の効果として、(1) 温度マージン増大による最小クエンチエネルギー (MQE) の増大、(2) 低温端の温度低下による低温端回復電流あるいは最小伝播電流の上昇、(3) 熱伝達向上による低温端回復電流の上昇、などが期待できる^{6,7)}。マグネットの冷媒温度を低下させる手段として、全体を減圧して飽和温度を下げる方法と、減圧された飽和ヘリウムとの熱交換によって飽和温度以下 (サブクール状態) にする方法の2通りがある。飽和ヘリウムの場合は 70 kPa 付近で臨界熱流束と過渡熱伝達が最大となり、サブクールの場合は温度低下に伴って臨界熱流束が増大し、低熱流束域の熱伝達率が向上することが知られている。

LHDヘリカルコイル全体を減圧する場合の冷却フローを Fig. 2a に、入口側に減圧熱交換器を追加してサブクール状態にする場合を Fig. 2b に示す。サブクールの場合には、循環ポンプも追加して液相だけの循環ループに改造する案も検討されたが、液戻り配管の追加など改造範囲が広がる点が問題であった。最終的に、絶縁破壊電圧と大気混入防止の面で有利なサブクール方式が選択され、改造期間が短いことも重要視されて Fig. 2b の方式が選択された。

Fig. 2 Flow diagrams of the LHD helical coil when lowering temperatures by evacuating(a) and subcooling(b). The dashed lines show the added parts.

3. モデルコイルによる安定性試験

3.1 モデルコイルと試験設備

冷媒温度を低下させることによって超伝導マグネットの特性改善を図った例として、米国・フェルミ国立研究所の Tevatron が挙げられる。低温排気圧縮機を用いてマグネット冷却システム全体を 75.8 kPa まで減圧し、4.45 K から 3.93 K に温度を下げたことにより、クエンチ電流を 7.5% 上昇させることに成功した⁸⁾。また、超臨界圧ヘリウムによる強制冷却方式における温度効果についてはいくつかの研究が報告されており、文献 9) に良く纏められている。しかしながら、浸漬冷却コイルの冷却安定性に対するサブクールの効果を定量的に評価できるような研究報告は見当たらなかったため、LHD ヘリカルコイルのモデルコイルを用いて実証試験が行われた。

モデルコイルは、Fig. 3, 4 に示すように、内半径が 200 mm で 24 列×12 層のレイヤー巻コイルであり、1 層目中央がヘリカルコイルと同じ経験磁界 (6.9 T @13 kA) と導体露出率 (67%) になるように設計されている。モデルコイルの冷却は、できるだけ実機を模擬するため低温排気圧縮機を用いた冷却システムが新たに整備された⁴⁾。そのフロー図を Fig. 5 に示す。減圧熱交換器を通過したヘリウムがモデルコイルの最下部より供給され、最上部から電流リッド貯槽へ排出される。2 段の低温排気圧縮機の出口ガスを熱交換器に戻す方式により熱負荷が小さい場合にも圧縮機の必要流量を確保することを可能としている。電流リッド貯槽の圧力が 0.12 MPa に保持された状態で減圧槽は飽和温度 3.0 K (23 kPa) 程度まで下げることができる。

サブクール状態では、コイル内部に温度分布が生じることが懸念されたが、Fig. 6 に示すように、巻線部のヘリウムの温度差はコイル全長に渡って 0.1 K 以内に収まった。常伝導伝播時には近傍のヘリウム温度が一旦上昇するが、速やかに元の温度に戻るなどから、コイル周方向には導体の高い熱伝導によって、断面方向にはヘリウムの対流によって巻線部のヘリウム温度が均一化されと考えられる。

Fig. 3 Schematic drawing of the model coil.

Fig. 4 Schematic drawing of the winding and sensors of the model coil.

Fig. 5 Flow diagram of the test facility for stability in subcooled helium.

Fig. 6 Temperature distribution in the model coil, where T02 and T03 are the temperatures at the outlet of the heat exchanger and the middle of the inlet pipe to the model coil.

3.2 モデルコイルの安定性試験結果

モデルコイルを用いた安定性試験では、導体とスペーサの間に挿入したヒータによって局所的に生成した常伝導部が拡大伝播を開始する電流値 $I_{(mp)}$ および常伝導部生成の最小エネルギーが測定された。その結果を Fig. 7 に示す。飽和ヘリウム中では、電流値の上昇に伴い、1 ターン以内の片側伝播、1 ターンを超える片側伝播、両側伝播と回復、クエンチと変化した。1 ターン内で常伝導伝播が止まる電流値が存在することは、コイル位置によってクオリティ悪

化の度合いが異なることを示唆している。一方、サブクール液体ヘリウム中では、 $I_{(mp)}$ において 1 ターンを超える片側伝播が始まり、両側伝播となる前にクエンチに至った。また、常伝導部生成の最小エネルギーはサブクールによって 20-30%増加した。

サブクール度に対する $I_{(mp)}$ の変化を Fig. 8 に、1 ターン平均の常伝導伝播速度を Fig. 9 に示す。サブクール液体ヘリウム中では、 $I_{(mp)}$ が冷媒流量には依存せずサブクール度に比例する結果が得られた。また、同一電流値における常伝導伝播速度が温度低下と共に遅くなることから、サブクール度が増すほど実効的な熱伝達率が高くなると考えられる。一方、飽和ヘリウム中では、サブクール状態を経験する前と後とで大きな差が再現性良く観測された。サブクール経験後の飽和ヘリウム中では、 $I_{(mp)}$ がサブクール液体ヘリウム中での値を外挿する点に一致したが、経験前、すなわち、液溜めして半日くらい経過した状態ではその比例関係から外れて低い値となった。常伝導伝播速度から実効熱伝達率を求めると 20%も差があることになり¹⁰⁾、コイル内部の気泡の影響によって飽和ヘリウムのクオリティが悪くなっているだけでなく、導体間の狭隙部が関与して実効的な濡れ面積も変化している可能性がある。

常伝導伝播速度の比較から、LHD ヘリカルコイルの冷却状態はモデルコイルの悪い条件の飽和ヘリウム冷却と同等と推測された¹⁰⁾。よって、ヘリカルコイルの冷却安定な電流値は、サブクール冷却への改造によって 8%程度高くなることが期待できると判断された。

Fig. 7 Minimum heat input for the dynamic propagation of a normal-zone in the model coil. The open and closed symbols mean without or with propagation, respectively.

Fig. 8 The minimum currents for propagating over a half turn of the model coil versus the degree of subcooling.

Fig. 9 Propagation velocity of the model coil during the first (solid lines), second (dashed lines), and third (closed symbols) cool-down cycles.

4. 実機の改造

4.1 改造内容

モデルコイルによる実証試験の成果を踏まえて、LHD実機の改造が実施された。Fig. 10 に示すように、2 段の低温排気圧縮機（仕様は Table 1 参照）と熱交換器を備えたクライオスタットを既設ヘリカルコイルバルブボックスに増設し、ヘリカルコイル供給配管等を連結する方式が選択された。定常運転時の熱負荷が既設ヘリウム冷凍機の定格能力よりも 2 kW 程度少ない値に収まっていることを利用して、ヘリカルコイルへの供給温度を 4.4 K 飽和温度から 3.2 K に低下させ、供給流量を約 50 g/s に増大させることによって、ヘリカルコイル巻線部の温度を約 3.5 K に低下させることが計画された。この冷凍負荷は 280 W であるが、低温排気圧縮機からの 300 W 程度の侵入熱に加えて、ガスで回収するために 50 g/s の液体ヘリウムを蒸発させる分の 1 kW 程度が追加熱負荷となる。

ヘリカルコイルは、Fig. 1 に示すように、ベルジャー（本体クライオスタット）内部の下部に入口ヘッダー、上部に出口ヘッダーを有し、液体ヘリウムをコイル最下部 10 箇所より供給し、蒸発ガスを最上部 10 箇所から回収す

る方式で冷却されている¹⁾。冷媒供給量は出口ヘッダーの液面が 30% 程度になるように制御され、約 100 W の定常侵入熱に対しては約 5 g/s となる。改造前は、液化機の貯槽から圧送された液体ヘリウムが、ベルジャーに隣接するバルブボックス内の気液分離器で再冷却されて供給されており、圧力 0.12 MPa の飽和ヘリウム（4.4 K）であった。

低温排気圧縮機を採用することによって小型化が可能となり、既設バルブボックスの点検ポートの 1 つを利用してサブクール用クライオスタットを増設する方式が実現した。取付後の写真を Fig. 11 に示す。連絡配管内には熱交換器往復配管、減圧タンク供給・回収配管、シールド往復配管の 6 本の低温配管が収納されている。ベルジャー内部では、冷媒流量を増やしてヘリカルコイル温度を低下させるためにコイル出口配管上部にテープヒータが追加され、温度監視のため全コイル出口に抵抗温度計が追加された。この改造で増設された信号は、アナログ入力・出力とデジタル入力・出力が各々、55, 6, 17, 7 点であり、現場盤 2 面の増設と電磁弁盤の更新および遠隔制御系の追加改造が行われた。現地工事は約 4 ヶ月で完了した。

Fig.10 Schematic drawing of the LHD subcooling cryostat.

Table 1 Specification of the cold compressors.

Items	1st Stage	2nd Stage
Inlet pressure	24.0 kPa,	64.4 kPa
Inlet temperature	3.0 K	5.31 K
Outlet pressure	64.4 kPa	120.0 kPa
Outlet temperature	5.31 K	7.50 K
Adiabatic efficiency	> 55%	> 65%
Heat load at 4 K	<186 W	< 173 W
Heat load at 50 K	< 70 W	< 70 W
Mass flow	15.9 g/s	
Impeller type	Unshrouded axial-centrifugal	
Impeller diameter	26 mm	
Maximum speed	1,550 Hz	
Type of bearing	Active gas bearing	
Maximum pressure	0.2113 MPaG	
Heat intercept	Gaseous helium (50 K, 5 g/s)

Fig. 11 Photograph of the LHD and the helical coil valve box. The subcooling cryostat is marked with a white circle.

4.2 冷却・励磁試験結果

低温排気圧縮機の回転数を待機状態の 700 Hz から 1,500 Hz に上昇させた際の熱交換器の温度およびヘリカルコイル出入口の温度変化を **Fig. 12** に示す。熱交換器出口温度が 3.0 K で、供給流量が 50 g/s の場合に、計画通りに、ヘリカルコイルの入口と出口を各々 3.2 K と 3.8 K に低下させることに成功した。この温度上昇は、供給配管およびヘリカルコイルの定常熱負荷として各々 20 W と 95 W に対応しており、機器の健全性が確認された。

モデルコイルを用いた安定性試験では、最小伝播電流がサブクール度にほぼ比例して高くなる結果が得られており、低い温度を保持することが重要である¹⁾。そこで、まず、励磁に伴う温度上昇を評価し、次に、コイル出口の温度上昇が 0.2 K 以下に収まるような励磁速度で 11 kA 以上の高磁場励磁を試みた。サブクール状態では、コイル出入口のエンタルピー差から定常侵入熱および交流損失を評価することが可能である。過冷却システムが定格運転（熱交換器温度が 3.0 K、コイル流量が 50 g/s）の場合のコイル出口温度の時間変化を **Fig. 13** に示す。励磁速度が速くなるほど、結合損失と渦電流損が増大して温度上昇が大きくなる。評価の結果、定常侵入熱については液面減少速度からの測定値と良く一致し、ヒステリシス損失については Kim モデルを用いた計算値と矛盾しない結果を得た。通常の 1/2 の電流変化率 3.5 A/s であれば、約 2/3 がヒステリシス損失となり、11 kA までの励磁においてもコイル出口温度を 4.0 K 以下に保つことができることを確認した。

モデルコイルの巻線部温度は、コイル断面内にも長手方向にも場所に依らず均一であった。また、簡易モデル計算では、ヘリカルコイル長手方向の温度分布は十分に小さいという結果が得られている¹¹⁾。巻線部の温度がコイル出口温度に近いとしても、4.0 K 以下に保たれるはずなので、モデルコイルの安定性改善の結果から、11.7 kA くらいまでは常伝導伝播は生じないと期待された。ところが 3.5 A/s で 11.0 kA までの励磁に続いて、0.7 A/s で 11 kA 以上

の高磁場励磁を試みたところ、11.4 kA 付近において、コイル最上部付近から常伝導部の片側伝播が始まり、最も高磁場の内周赤道部で止まる現象が 2 回観測された¹²⁾。外周赤道部付近でも伝播速度が遅くなっており、冷却条件がコイル長手方向に不均一であることが示唆された。

飽和ヘリウム冷却では、コイル最下部の導体が水平な場所では気泡が集積して局所的に冷却が悪化していると推察されているが、サブクール運転時においても、定常侵入熱に加えて導体の交流損失による局所的な温度上昇によって、H-I ブロックの温度が高くなっている可能性がある。そこで、11 kA において 2 時間以上保持した後に高磁場励磁を行うように励磁方法が変更された。この方法ではコイル出口温度が 3.9 K 程度まで下がった状態で高磁場励磁が行われるにも拘わらず、ヘリカルコイル 3 ブロックの電流値が H-O/M/I = 11.8/11.4/11.4 kA（ブロック名は Fig. 1 参照）において、#10 セクターの最下部付近からの常伝導伝播と回復が観測された。バランス電圧の分析からコイル断面内の常伝導伝播位置は H-I ブロックの 3 層目第 1 列と推定されている²⁾。飽和ヘリウム冷却において同じ場所で数回の常伝導伝播が観測されており、これらと比較して、常伝導成分の時間変化を **Fig. 14** に示す。サブクール運転時の常伝

Fig. 12 Inlet and outlet temperatures of the helical coil during subcooling.

Fig.13 Temperature rises at the helical coil outlet as the results of excitation.

導伝播速度は飽和ヘリウム冷却時の 11.0 kA の場合よりも明らかに遅くなっており、サブクールによる冷却安定性の改善効果が確認された。しかし、ヘリカルコイルの $I_{(mp)}^*$ としては 11.0 kA から 11.5 kA 相当への上昇に止まっており、改善の度合いはモデルコイルによる実証試験からの予測よりも小さいようにみえる。

LHD ヘリカルコイルとモデルコイルのロードラインと動的な最小伝播電流 $I_{(mp)}^*$ を Fig. 15 に示す。導体の経験磁界の違いを考慮すると、ヘリカルコイルで観測された常伝導伝播の最低電流値 11.0 kA は、モデルコイルでの最低値と良く整合しており、飽和ヘリウム中の冷却状態は同等と考えることができる。サブクール運転においてヘリカルコイルの方の安定性改善度が小さい理由として、スケール効果の他に常伝導転移時の擾乱の差が挙げられる。モデルコイルはテープヒータを用いており、加熱時間が長く加熱パワーが低いため、準静的な熱平衡によって常伝導伝播の有無が決定される。一方、ヘリカルコイルは瞬時の導体動きが原因であり、動いた距離が長いと初期の温度上昇が大きくなって $I_{(mp)}^*$ が低下する可能性もある。これらの評価については、解析モデルの構築を含めて今後の課題である。

Fig. 14 Propagation of a normal-zone from the bottom of the helical coil cooled by saturated or subcooled helium.

Fig.15 Minimum currents for dynamic propagation of a normal-zone, $I_{(mp)}^*$. Normal-zones in the LHD helical coil are estimated to be induced at the third layer.

プラズマ実験にはできるだけ高い磁場が望ましいことから、ヘリカルコイル3ブロックの経験磁界の違いを利用した傾斜電流による高磁場励磁が検討され、これまでに平均 11.83 kA (H-O/M/I=12.4/12.0/11.1 kA) までの安定な励磁が達成されている。ここから導体が動かないように電流重心を移動し、平均 11.6 kA (H-O/M/I=11.4/12.0/11.4 kA) をプラズマ実験に供している。

5. まとめ

大型ヘリカル装置ヘリカルコイルの冷却安定性を改善するために冷媒温度を下げる改造が実施された。同一仕様の導体で製作されたモデルコイルを用いた冷却安定性試験では、コイル内部の冷媒温度を飽和温度から 3.5 K まで低下させることにより、最小伝播電流が 8% 上昇する結果が得られた。この試作結果に基づいて、冷媒供給側に減圧熱交換器を追加する改造が実施され、計画通りに、ヘリカルコイルの入口と出口を各々 3.2 K と 3.8 K に低下させることに成功した。これまでのところ、最小伝播電流は 11.0 kA から 11.5 kA 相当に上昇したに止まっており、モデルコイルからの予測よりも改善効果が小さいため、その原因究明が進められている。並行して、ヘリカルコイル3ブロックの最大経験磁界の違いを利用した電流比制御によって平均 11.83 kA までの励磁法が確立され、プラズマ実験に利用されている。

参考文献

- 1) S. Imagawa, et al.: "Performance of the helical coils for the Large Helical Device in six years' operation," IEEE Trans. Appl. Supercond. **14** (2004) 1388-1393
- 2) S. Imagawa, et al.: "Consideration for the conductor motions in the helical coils of the Large Helical Device," IEEE Trans. Appl. Supercond. **13** (2003) 1484-1487
- 3) 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
- 4) Y. Hishinuma, et al.: "Design and operation of the sub-cooled helium test facility for the LHD helical coils," IEEE Trans. Appl. Supercond. **14** (2004) 1435-1438
- 5) S. Hamaguchi, et al.: "Performance of Upgraded Cooling System for LHD Helical Coils," Advances in Cryogenics **53B**(2008)1724-1730
- 6) A. Sakurai, M. Shiotsu and Hata: "A general correlation for pool film boiling heat transfer from horizontal cylinder to subcooled liquid," J. Heat Transfer, Trans. ASME, Ser C **112** (1990) 430
- 7) S. Caspi: "Heat transfer to subcooled He I," Advances in Cryogenic Engineering **29** (1984) 281-287
- 8) B. L. Norris: "Status report on the Tevatron lower temperature upgrade," Cryogenics **73** (1994) 73-76
- 9) Y. Wachi, et al.: "Stability of a cable-in-conduit conductor cooled by supercritical helium below 4.2 K," TEION KOGAKU **29** (1994) 106-115 (in Japanese)

和智良裕ら：「4.2 K 以下の運転温度での CIC 導体の安定性」，低温工学 **29** (1994) 106-115

- 10) S. Imagawa, et al.: "Upgrading program for improving the cryogenic stability of LHD helical coils by lowering the operating temperature," Fusion Engineering and Design **81** (2006) 2583-2588
- 11) T. Obana, et al.: "Performance Tests of the Subcooling System for the LHD Helical coils," IEEE Trans. Appl. Supercond. **18** (2008)1475-1478
- 12) 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

今 川 信 作 昭和 36 年 1 月 17 日生。昭和 58 年京都大学工学部原子核工学科卒業。同年 4 月(株)日立製作所入社。平成 3 年 4 月核融合科学研究所大型ヘリカル研究部助手，平成 9 年 10 月同助教授，平成 16 年 4 月同教授。主として大型超伝導コイルと極低温構造物に関する研究に従事。低温工学協会，プラズマ・核融合学会会員。博士（工学）。

濱 口 真 司 昭和 45 年 10 月 12 日生。平成 5 年東京工業大学理学部応用物理学科卒業。平成 10 年同大学大学院総合理工学研究科創造エネルギー専攻博士後期課程修了。同年 4 月核融合科学研究所 COE 着任。同年 7 月同研究所大型ヘリカル研究部助手。現在，同助教。主に超伝導磁石の冷却に関する研究に従事。低温工学協会，プラズマ・核融合学会会員。博士（工学）。

尾 花 哲 浩 昭和 52 年 12 月 17 日生。平成 13 年東京理科大学理工学部物理学科卒業。平成 15 年東京工業大学大学院総合理工学研究科修士課程修了。平成 18 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 4 月より核融合科学研究所助手。現在，同研究所助教。主に加速器及び核融合用超伝導磁石の研究開発に従事。低温工学協会，日本磁気学会会員。博士（工学）。

柳 長 門 1962 年 12 月 24 日生。1989 年 12 月京都大学大学院工学研究科博士後期課程中退。同 12 月，核融合科学研究所大型ヘリカル研究部助手。2000 年より同助教授（現在は准教授）。主に，大型ヘリカル装置（LHD）のヘリカルコイル用超伝導導体の開発および特性研究や，核融合エネルギー炉用の大電流容量 HTS 導体の開発研究に従事。また，ヘリオトロン磁場配位の最適設計に取り組む。低温工学協会，日本物理学会，プラズマ・核融合学会会員。博士（工学）。

三 戸 利 行 昭和 30 年 12 月 21 日生。昭和 53 年九州大学工学部電子工学科卒業。昭和 58 年同大学大学院工学研究科博士課程修了。同年 4 月高エネルギー物理学研究所助手，昭和 63 年 8 月京都大学ヘリオトロン核融合研究センター 助教授，平成元年 5 月核融合科学研究所・大型ヘリカル研究部助教授，平成 10 年 12 月同教授。平成 11 年 4 月総合研究大学院大学・数物科学研究科（現在は物理科学研究科）核融合科学専攻・教授併任，現在に至る。主として先進超伝導導体の開発研究，大型超伝導・低温システムの最適化研究，高温超伝導の核融合装置への応用研究に従事。低温工学協会，プラズマ・核融合学会，電気学会会員。工学博士。