電磁力平衡コイル用ヘリカル巻線機の開発とコイル製作技術

正員 野村 新一 (東京工業大学) 非会員 渡辺 成章 (東京工業大学)
 非会員 味川 浩樹 (東京工業大学) 非会員 筒井 広明 (東京工業大学)
 正員 佐藤 義久 (東京工業大学) 非会員 飯尾 俊二 (東京工業大学)
 正員 嶋田 隆一 (東京工業大学)

Development of Helically Winding Machine for Force-Balanced Coil and Winding Technique

Shinichi Nomura, Member, Naruaki Watanabe, Non-member, Hiroki Ajikawa, Non-member, Hiroaki Tsutsui, Non-member (Tokyo Institute of Technology), Yoshihisa Sato, Member (Toshiba Corporation), Shunji Tsuji-Iio, Non-member, Ryuichi Shimada, Member (Tokyo Institute of Technology)

Strong electromagnetic force caused by high magnetic fields and coil current is a serious problem in Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES) systems and magnetically confined fusion devices. In facing this problem, we proposed the concept of Force-Balanced Coil (FBC) applied to SMES and fusion devices. The FBC is a helically wound toroidal coil which balances the centering force with the hoop force. The helical winding of the FBC is modulated in order to reduce the torsional force. However, the winding of the FBC is a three-dimensional complex shape so that it may be difficult to manufacture the modulated helical windings. To overcome this difficulty, we developed a helically winding machine. In this paper, we discuss the winding techniques by using the winding machine and improve the shape of the helical windings from the view point of the reduction of the time consumed in winding the coil.

キーワード：電磁力平衡コイル，超電導磁気エネルギー貯蔵 (SMES)，核融合実験装置，強磁界，ヘリカル巻線機

1. はじめに

超電導磁気エネルギー貯蔵装置 (SMES) や核融合実験装置で用いられる超電導コイルにおいて、高磁界化、大電流化、大型化に伴って発生する巨大な電磁力が問題になっている。この問題を解決する方法として、著者らは、コイル形状をヘリカル巻線形状とし、トロイダル磁界コイルのポロイダル方向電流成分によって生じる向心力をトロイダル方向電流成分によって生じるフープ力で平衡させた電磁力平衡コイル (FBC: Force-Balanced Coil) を提案し、概念の検証実験を行った⁽¹⁾。また、NbTi線を用いた最大磁束密度2 Tの超電導小型電磁力平衡コイル1号機を手巻きにより製作し、定格の約90%までの励磁に成功した⁽²⁾。その後、ヘリカル巻線を変調ヘリカル巻コイルとすることで転倒力を低減させる方法が確立した⁽³⁾。さらに、電磁力平衡コイルをSMESへ適用した場合、トロイダル磁界コイルに比べ、向心力を大幅に低減できることだけでなく、所定の蓄積エネルギーを得るために必要な超電導体量を低減できることを示した⁽⁴⁾⁽⁵⁾。しかし一方で、電磁力平衡コイルは、形状が複雑になり製作が困難になるという点が懸念されている。そこで、本研究では、電磁力平衡コイルの製作技術に

関して検討を行うために、機械巻によって製作するコイルを設計し、専用のヘリカル巻線機を開発した。本論文では、開発したヘリカル巻線機の仕様を示すとともに、巻線作業を通じ、製作の容易性を考慮した電磁力平衡コイルの形状について検討する。

2. 機械巻製作のための電磁力平衡コイルの設計

〈2.1〉 変調ヘリカル巻コイルの原理 一般にヘリカルコイルは、図1に示す様に、一様なトロイダル方向電流分布を形成し、ヘリカルコイルが横たわるトーラス表面 (以下コイル面) を自身が発生するポロイダル磁界が貫くために、ヘリカル巻線に捩れの力を与える転倒力が生じる。この転倒力を低減するために電磁力平衡コイルでは、トロイダル方向電流分布を、コイル面とこの電流によって形成される磁気面とを一致させる様に変調させている⁽³⁾。この様な電流分布は、式 (1) に示す様に、ヘリカル巻線を変調ヘリカル巻コイルとすることで実現している。

$$\phi = \frac{1}{\rho} \left(\theta + \sum_{k=1}^{\infty} c_k \frac{\sin k\theta}{k} \right) + \frac{2\pi i}{m} \quad (i = 0, \dots, n_c - 1) \quad \dots\dots\dots (1)$$

図1 トロイダル方向電流分布

Fig. 1. Toroidal current distribution.

図2 アスペクト比の小さい電磁力平衡コイルの軌道と巻棒の位置関係

Fig. 2. Winding and structure of the FBC with small aspect ratio.

ここで、 c_k とは、トロイダル方向電流分布を決めるポロイダル角 θ に対する k 次のフーリエ係数である。 ρ は、ヘリカル巻数（以下ピッチ数と呼ぶ）である。ピッチ数 ρ はアスペクト比（大半径/小半径）の関数で与えられる⁽¹⁾。また m とはトロイダル磁界コイルの要素コイルの数を示し、極数 n_c を用いて、 $m = \rho n_c$ の関係がある。

〈2・2〉機械巻製作コイルの設計諸元 本研究では、“作り易さ”の観点から懸念される電磁力平衡コイルの製作技術に関して検討するため、手巻きでは不可能な大きさで、かつ、最も製作が困難であると予想されるアスペクト比（大半径 R /小半径 a ）の小さい電磁力平衡コイルを設計・製作した。

一般に、電磁力平衡コイルのピッチ数は、アスペクト比とともに増加する⁽¹⁾。そこで、ピッチ数2または3の電磁力平衡コイルについて検討した。図2にピッチ数2及び3の場合の電磁力平衡コイルの上面図、即ち、電磁力平衡コイル1極分の軌道を示す。図中の点線部分は巻棒の位置を示している。図2において巻棒の上側にあるコイルを水色で、下側にあるコイルを青色で表す。

図2-(a)に示す様に、ピッチ数2の電磁力平衡コイルは、磁束密度が最大となるコイル最内周部でコイル中心軌道の巻棒に対する曲率が反転し、巻棒の溝に導体が固定されない。即ち、巻線機を用いて巻線作業を行うと、外部支持材がなければ巻棒の溝から導体が離れてしまい、電磁力平衡

図3 試験巻線用電磁力平衡コイル上面図

Fig. 3. Top view of FBC for winding tests.

図4 ヘリカル巻線機の概形図

Fig. 4. Schematic diagram of winding machine.

コイルの軌道を確保することができなくなる。これに対し、図2-(b)に示すピッチ数3の電磁力平衡コイルは、コイル最内周部においてコイル中心軌道の巻棒に対する曲率が反転せず、導体を巻棒に巻きつけていくことが可能な形状となる。以上の様な検討結果より、巻線機を用いて製作することが可能であり、かつアスペクト比が小さく最も製作が困難であると予想される電磁力平衡コイルとして、ピッチ数3のコイルを製作することに決定した。

図3に、巻線機を用いて製作する電磁力平衡コイルの上面図を示す。コイルの規模は、大半径0.361 m、小半径0.205 mである。使用する巻棒は、肉厚50 mmのアルミ鋳造製で、5軸のNC旋盤により幅30 mm、深さ42 mmのヘリカル形状の溝を彫っている。巻棒の総重量は400 kgである。

3. ヘリカル巻線機の開発と巻線作業

〈3・1〉ヘリカル巻線機の仕様 図4に、開発した巻線機の概形図を示す。この巻線機はコンピュータ制御により丸線導体をヘリカルコイル中心軌道に沿って巻棒に供給していくもので、核融合科学研究所大型ヘリカル装置(LHD)のR&Dヘリカルコイル、TOKI-TF⁽⁶⁾において使用され

図5 ヘリカル巻線機の回転角と旋回角

Fig. 5. Poloidal and toroidal angles of the helically winding machine.

図6 ヘリカル巻線形状の比較

Fig. 6. Shapes of ordinary and modulated helical windings.

た巻線機の機能⁽⁷⁾を適用し、電磁力平衡コイル用ヘリカル巻線機として開発されたものである。

開発した巻線機の大きさは、幅3.3 m、高さ2.7 m、奥行き1.1 mである。巻線機は、3つのサーボモータ(a, b, c)、1極分の導体をあらかじめ巻き取る貯線ドラム(e)、ヘリカル導体中心座標にそって導体を供給する巻線リング(f)、巻枠(h)を支えるサポートスタンド(g)及び制御部から構成されている。巻線機の貯線動作は、サーボモータ(b)の駆動により電線の貯線ドラムへの巻取りを行う。

巻線機の巻線動作は、巻線リング(f)が貯線ドラムから導体を解しながらサーボモータ(c)により一定の回転数でポロイダル方向に回転する。同時に、旋回アーム(d)が、サーボモータ(a)によってトロイダル方向に旋回し、ヘリカル巻線が施される。このとき旋回速度は、巻線リングの回転速度に対して変調されている点に特徴を有する。尚、巻線リングの回転速度、即ち、ポロイダル方向の巻線速度は、0 ~ 0.97 rpmの範囲で調節可能である。

図5に、ポロイダル方向一周分の回転角(ポロイダル角 θ)と旋回角(トロイダル角 ϕ)の関係を示す。また、図6に、ピッチ数3の変調ヘリカル巻コイル(電磁力平衡コイル)及び単純ヘリカル巻コイルの巻線形状を示す。図5より、単純ヘリカル巻コイルでは一定の旋回速度で巻線が施されるのに対し、変調ヘリカル巻コイルでは、コイル最内周部で巻線が施されるとき旋回速度が最高速となり、コイル

図7 電磁力平衡コイル用ヘリカル巻線機

Fig. 7. Helically winding machine for FBC.

最外周部の巻線が施されるとき最低速となることがわかる。

巻枠を支えるサポートスタンドは、5脚で構成され、1脚あたりの耐荷重は155 kgである。サポート脚は空圧式で昇降し、サポート脚と旋回アームとの衝突を避けるため、5脚のうち1脚は降りている状態になっている。従って、常に巻枠は、4脚のサポート脚で支えられている。

図7に開発した電磁力平衡コイル用ヘリカル巻線機の写真を示す。

〈3・2〉巻線作業 本研究では、開発した巻線機の動作確認と電磁力平衡コイルの製作上の問題点を明確にするため、素線径1 mmの丸型銅線を用いて試験巻線を行った。丸型銅線を用いた試験巻線作業は、図8に示す様に、各層に銅素線を26本並べ、計5層巻線作業を行った。

図9に示す様に巻線リングに取りつけられた電線ガイドが、銅線を貯線ドラムから解しながら巻枠へ送り出している。電線ガイドにはブレーキ機構が取り付けられており、ブレーキトルクを調整することで巻線時に生じる銅線の弛みを抑制している。このブレーキトルクの大きさは、0.02 ~ 0.5 Nmまで調節可能であり、試行錯誤的に0.3 Nm程度のブレーキトルクを加えながら試験巻線作業を行った。

開発した巻線機は、銅線をヘリカル状に彫られた溝の中心へ供給するだけの機構である。このため図8に示す様に、素線を一列に並べる調整作業が必要となる。素線の調整方法は、適宜巻線機を停止させ、檜の木など堅い素材のへらを用いて素線を所定の位置へ調整し、瞬間接着剤を用いて固定した。素線の調整作業は、特にトラス内側から下側にかけて作業スペースが狭い上に、ヘリカル状の溝の壁が見えにくく困難であった。そのため、1トロイダルターン

図8 巻線構造

Fig. 8. Winding construction.

図9 巻線機の巻線動作

Fig. 9. Winding motion of the winding machine.

(3巻)につき約30分、1層26本の素線の巻線に9時間～12時間を費やし、作業効率は思わしくなかった。この結果、作業効率を向上させるためにも、なるべく巻数を減らし、作り易さの観点からコイル形状の最適化を行う必要があることがわかった。

4. 製作の容易性を考慮したヘリカル巻線形状

巻線機による電磁力平衡コイルの試験巻線を通じ、変調ヘリカル巻線の製作の可能性を見出すことができた。しかしながら、製作に費やす時間は多く、作り易さの観点からコイル形状の最適化を行う必要がある。

本研究では、素線径1 mmの丸型銅線を用いた試験巻線作業を行ったが、実機レベルの強磁界コイルでは、CIC導体をはじめ角型の超電導導体が多く用いられている。例えば、核融合科学研究所大型ヘリカル装置(LHD)において製作された大半径3.9 m、小半径0.975 mの大きさを有するヘリカルコイルは、外形12.5 mm×18.0 mmの角型超電導導体を使用している⁽⁸⁾。そのため、ヘリカル巻線機には、角型の超電導導体にヘリカルコイルによる曲げや振れを加えるために、形状成形装置が取り付けられている⁽⁹⁾。しかし、角型導体の成形誤差は、図10に示す様に、導体間に隙間ができ導体表面に凹凸を生じさせる。凹凸が許容値を越える場合、その都度補正を加える必要がある⁽⁶⁾⁽¹⁰⁾。従って、曲げや振れなどの複雑な形状を有するヘリカルコイルを製作する場合、角型の導体よりも丸型の導体を使用する方が、巻線作業を容易にすることができる。

丸型導体の使用に関しては、電磁力による変形の問題等、今後詳細な検討が必要であるが、現在、国際熱核融合実験炉(ITER)のトロイダル磁場(TF)コイルにおいて丸型

図10 成形誤差による巻線断面形状

Fig. 10. Inclinations of the conductors caused by forming error.

(a) ヘリカルコイルの巻線張力

(b) LHDにおける巻線張力の印加方法

図11 ヘリカル巻線の巻線張力

Fig. 11. Winding tension of the helical coil.

のCIC導体が使用される計画であり、実規模サイズの導体の研究開発が進められている⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。

また、ソレノイドコイルなどの円形コイルの場合、導体に張力を加えても容易に巻線を施すことができる。しかし、ヘリカルコイルの場合、図11-(a)に示す様に、導体は最短コースを通ろうとするため、導体長さ方向に加えた巻線張力は導体の巻線位置からのずれを引き起こす⁽¹⁰⁾。この対策として、LHDのヘリカルコイルでは、図11-(b)に示す様に、一度導体を正規の位置より全長が短くなる方向に仮固定しておき、1層巻線後に正規の位置に幅寄せすることで張力を印加する方法が行われている⁽¹⁰⁾。従って、導体の固定作業の容易性を考慮する場合、アスペクト比の大きい電磁力平衡コイルを設計し、トラス内側の作業スペースを十分に確保する必要がある。このことに加え、導体の調整作業そのものを簡略化するため、ヘリカル巻線の構造を工夫する必要もある。

一般に、電磁力平衡コイルのピッチ数 p は、ポロイダル方向の巻数 N_p とトロイダル方向の巻数 N_t との比で表される。即ち、ピッチ数 p は、 N_p/N_t の規約分数で与えられる。ここで、コイル総巻数を N_{total} 、極数を n_c としたとき、1極分のヘリカル巻線に巻かれる導体の数 $N_{modified}$ は、

$$N_{modified} = \frac{N_{total}}{N_p n_c} \dots\dots\dots (2)$$

となる。例えば、図12に示す様に、コイル総巻数を1040

図12 ピッチ数5の電磁力平衡コイル

Fig.12. FBC with 5 poloidal turns ($N_p = 5$, $n_c = 2$, $N_{\text{modified}} = 26 \times 2$).

図13 ピッチ数5.2の電磁力平衡コイル

Fig.13. FBC with 5.2 poloidal turns ($N_p = 5.2$, $n_c = 2$, $N_{\text{modified}} = 5 \times 2$).

ターン、ピッチ数5、極数2の電磁力平衡コイルを製作する場合、ポロイダル方向の巻数が5となり、1極分のヘリカル巻線（図中の青い線）に巻かれる導体の数は52 (26×2) 本となる。このとき、巻線機の成形加工装置には、52本の導体の曲げ及び振れのデータを入力し、導体52本分の固定作業が必要になる。即ち、1極分のヘリカル巻線に数多くの導体を巻くことは、多くの巻線調整作業を必要とし、製作期間の短縮化を実現することが困難になると予想される。例えば、前節で述べたLHDのヘリカル巻数（ピッチ数）5、極数2のヘリカルコイルでは、1極分のヘリカル巻線に巻かれる導体の数が450本であり⁽⁸⁾、全長36 kmの超電導導体に16ヶ月の昼夜の巻線作業を要した⁽¹³⁾。従って、製作期間を短縮させるためにも1極分のヘリカル巻線に巻かれる導体の数を減らす工夫が重要になる。

1極分のヘリカル巻線に巻く導体の数を減らす方法として、コイルの極数を増やす方法が考えられる。コイル総巻数 N_{total} を一定としたとき、式(2)より、導体の数 N_{modified} は、極数 n_c に反比例して減少する。しかしその反面、極数を必要以上に増やすことは、多くの導体の極間接続作業を必要とする。そこで、1極分のヘリカル巻線に巻く導体の数を減らし、かつ極間接続箇所を増大させない方法として、電磁力平衡コイルのピッチ数を非整数値に選ぶ方法を考える。

図13は、図12に示すコイルと同様、コイル総巻数を1040ターン、極数を2とし、ピッチ数を非整数値の5.2としたコイルである。ピッチ数5.2を規約分数で表すと、 $26/5$ となる。即ち、トロイダル方向に5周する間にポロイダル方向に26ターンするコイルとなり、ポロイダル方向の巻数は26となる。このとき、式(2)より1極分のヘリカル巻線（図中の青い線）に巻かれる導体の数は、10 (5×2) 本となる。いま、ヘリカルコイルの製作期間は、1極分のヘリカル巻線

に巻かれる導体数に比例すると考えると、図13に示すピッチ数5.2のヘリカルコイルは、図12に示すピッチ数5のヘリカルコイルに比べ、製作期間を1/5に短縮させることが期待できる。従って、ピッチ数を非整数値に選定することによりポロイダル方向の巻数が増加し、極間接続箇所を増やさずに1極分のヘリカル巻線に巻く導体の数を減少でき、巻線の調整作業を簡略化することが期待できる。

5. ま と め

本研究では、電磁力平衡コイルの製作技術に関して検討を行うために、機械巻によって製作するコイルを設計し、専用のヘリカル巻線機を開発した。開発した巻線機を用いての巻線作業を通じ得られた成果を以下にまとめる。

- (1) 幅3.3 m、高さ2.7 m、奥行き1.1 mの変調ヘリカル巻が可能な巻線機を開発した。開発した巻線機は、トロイダル方向の旋回速度がポロイダル方向の回転速度に対して変調されている点に特徴を有する。
- (2) 開発した巻線機の動作確認と電磁力平衡コイルの製作上の問題点を明確にするため、素線径1 mmの丸型銅線を用いて試験巻線を行った。試験巻線の結果、機械巻によるコイル製作の可能性を見出すことができた。しかし、製作に費やす時間は多く、作り易さの観点からコイル形状の最適化を行う必要があることがわかった。
- (3) 電磁力平衡コイルの製作の容易性を考慮した巻線形状に関して検討した。検討の結果、製作期間の短縮化を図るためには、丸型の導体を使用し、ヘリカルコイル1極分に巻かれる導体の数を減らすために、ピッチ数を非整数値に選定したアスペクト比の大きい電磁力平衡コイルを設計する必要がある。

謝辞

巻線機の開発及び運用から現場での巻線作業、ヘリカル巻線技術に至るまで、株式会社東芝京浜事業所 伊藤進 元技監、高野広久 技監、村井成 主査、水牧祥一 主務、京藤誠 様はじめ数多くの技術者の皆様に御指導、御協力を戴きました。ここに厚く御礼申し上げます。また、電磁力平衡コイルの設計及び巻線作業において協力戴いた東京工業大学大学院修了生の大崎朋也氏、山形和弘氏、安食泰秀氏に感謝致します。

(平成13年5月15日受付, 同13年10月26日再受付)

文 献

- (1) 三浦, 迫田, 嶋田: "強磁界発生用超電導電磁力平衡コイルの概念検討", 電気学会論文誌D 114巻11号, pp. 1155-1161, 平成6年.
- (2) 佐藤, 近藤, 嶋田, 京藤, 花井, 浜島: "超電導磁気エネルギー貯蔵用電磁力平衡コイルの実験", 電気学会論文誌D, 118巻3号, pp. 402-409, 平成10年.
- (3) 近藤, 藤田, 筒井, 佐藤, 飯尾, 嶋田: "電磁力平衡コイルのトカマク装置への適用", 電気学会論文誌B, 118巻2号, pp. 191-198, 平成10年.
- (4) 佐藤, 大崎, 野村, 近藤, 浜島, 嶋田: "超電導エネルギー貯蔵装置用電磁石の巻線方式の比較検討", 電気学会論文誌D, 118巻10号, pp. 1157-1164, 平成10年.
- (5) 佐藤, 大崎, 野村, 近藤, 浜島, 嶋田: "超電導エネルギー貯蔵装置用電磁力平衡コイルの最適化", 電気学会論文誌D, 120巻1号, pp. 112-119, 平成12年.
- (6) K. Kitamura et al., "Mechanical analysis and fabrication of the R&D forced-flow helical coil (TOKI-TF)", Fusion Engineering and Design, 20, pp. 167-174, 1993.
- (7) 中山勝三郎, 高橋義雄, 本多誠一, 沖澤正一: "螺旋状線輪の巻線成形装置", 公開特許公報 (A), 平3-198937, 日本国特許庁.
- (8) 小特集「大型ヘリカル装置のための超伝導装置の開発と製作」, プラズマ・核融合学会誌, Vol. 72, No. 12, pp. 1302-1351, 1996.
- (9) S. Imagawa et al., "Construction of Helical Coil Winding Machine for LHD and On-site Winding", IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 32, No. 4, pp. 2248-2251, July 1996.
- (10) T. Senba et al., "A real-scale helical coil winding trial of the Large Helical Device", Proceedings of the 18th Symposium on Fusion Technology, vol. 2, pp. 905-908, Karlsruhe, Germany 22-26 August 1994.
- (11) D. Ciazynski et al., "Test Results and Analysis of Two European Full-Size Conductor Samples for ITER", IEEE Trans. on Appl. Supercond., Vol. 10, No. 1, pp. 1058-1061, March 2000.
- (12) Jean-Luc Duchateau et al., "Electromagnetic Evaluation of the Collective Behavior of 720 Twisted Strands for the TF Model Coil Experiment", IEEE Trans. on Appl. Supercond., Vol. 11, No. 1, March 2001.
- (13) 増刊 プラズマ・核融合学会誌 特集/大型ヘリカル装置 (LHD) 計画, Vol. 74 Supplement, 1998年5月.

野村 新一 (正員) 1973年6月20日生。96年3月明治大学理工学部電気工学科卒業。96年4月東京工業大学大学院修士課程入学、98年3月修了。98年4月同大学院博士後期課程入学、2001年3月修了。同年4月同大学原子炉工学研究所講師、現在に至る。工学博士。主として超電導、電力工学、核融合に関する研究に従事。

渡辺 成章 (非会員) 1976年12月31日生。99年3月東京工業大学工学部機械知能システム学科卒業。99年4月東京工業大学大学院修士課程入学、現在に至る。主として超電導、電力工学に関する研究に従事。

味川 浩樹 (非会員) 1976年5月16日生。2000年3月東京工業大学工学部電気・電子工学科卒業。2001年4月東京工業大学大学院修士課程入学、現在に至る。主として超電導、核融合に関する研究に従事。

筒井 広明 (非会員) 1962年2月16日生。89年3月東京工業大学大学院博士課程修了。同年4月日本原子力研究所・那珂研究所、核融合特別研究生。同年12月東京工業大学工学部電気電子工学科助手。90年12月同校原子炉工学研究所助手、現在に至る。プラズマ物理、核融合、超電導応用の研究に従事。工学博士。日本物理学会、プラズマ・核融合学会、日本原子力学会、日本応用数理学会会員。

佐藤 義久 (正員) 1950年4月21日生。76年3月東京工業大学大学院修士課程修了。同年4月(株)東芝入社。主として、核融合装置、加速器、超電導応用装置の技術開発に従事。96年4月東京工業大学大学院博士課程入学、98年3月修了。工学博士。現在、東芝 電力技術グループ 部長。

飯尾 俊二 (非会員) 1955年4月18日生。83年3月東京工業大学大学院博士課程修了。同年、日本原子力研究所入所。核融合、特にJT-60の実験研究に従事。95年3月東京工業大学原子炉工学研究所助教授、現在に至る。理学博士。核融合プラズマの閉じ込め、計測の研究に従事。

嶋田 隆一 (正員) 1948年1月31日生。75年3月東京工業大学大学院博士課程修了。同年、日本原子力研究所入所、核融合の研究に従事。88年4月東京工業大学工学部電気電子工学科助教授、90年3月同教授、90年5月同大学原子炉工学研究所教授、現在に至る。工学博士。大電流工学、核融合プラズマの制御、大電力システム、電力貯蔵の研究に従事。