

コンパクトヘリカルシステムのヘリカルコイルにおける技術革新 Innovation in Helical Coil of Compact Helical System

松岡 啓介*
MATSUOKA Keisuke

核融合、ヘリカル装置、ヘリカルコイル、アスペクト比、磁場精度
Nuclear Fusion, Helical Device, Helical Coil, Aspect Ratio, Magnetic Field Accuracy

要旨

1980年代は、日本のみならず世界的にもヘリカル型閉じ込め研究にとって飛躍の時期であった。ヘリカル型の将来にとって、低アスペクト比を持つ「太った」プラズマの研究が必須となった。CHS (Compact Helical System) はその要求に応えるべく1980年代後半に設計・製作された。ヘリカルコイルはヘリカル型装置の心臓部に相当し実験の成否を左右する最も重要な技術要素であるため、「太った」プラズマを実現するために考案されたCHSのヘリカルコイル設計・製作における技術革新について述べる。

プラズマ閉じ込め用環状磁場装置の歴史

トカマクやヘリカル型（ステラレータ、ヘリオトロンなどの総称）のプラズマはドーナツ形状（トーラス状、或いは環状と言う）であり、粒子の速度空間に損失領域^{注1}は無いと言ってよい。このため、大雑把に言えば閉じ込め時間は3次元座標空間における拡散によって決まるため、トカマクやヘリカル型の装置は段階を踏んで大型化されて来た。

トカマクは、プラズマ断面の非円形化という自由度はあるものの、1950年代に発明された当初からITER（国際熱核融合実験炉）に至るまで似たような形状をしている。トーラスの大きい方の半径（大半径）による円周方向をトロイダル方向と呼ぶ。一方、小さい方の半径（小半径）による円周方向をポロイダル方向と呼ぶ。トカマクではポロイダル角を一定とすれば、トロイダル方向に磁場の強さが変わらない。このため、主軸（大半径の中心）の周りに対称性（軸対称性）がある。即ち、トロイダル角は荷電粒子の運動を記述するハミルトニアンに現れないため、トロイダル角の共役運動量は保存される。このことから粒子の軌跡が磁気容器から有限の幅しかずれないことが導かれ、単一粒子軌道の観点から閉じ込めが良いことを意味する。

一方、ヘリカル型は閉じ込めに必要な磁場（閉じ込め磁場）^{注2}を外部コイルや配位の捻れによって作り出すので、装置の形状には多様性がある。1952年

にプリンストン大学の天文物理学者ライマン・シュピッツァーはModel A ステラレータ（8の字ステラレータ）を発明した。ヘリカル型の元祖である。8の字ステラレータはヘリカルコイルではなく、磁気軸（磁気面の中心軸）をねじることによって閉じ込め磁場を構成した。磁気面とは、磁力線を追跡して行く時に形成されるトーラス状の面のことである。磁力線によって形成される磁気容器には無数の入れ子状の磁気面が形成されている。磁気面上ではプラズマの圧力が一定となる。8の字ステラレータの後、プリンストン大学プラズマ物理研究所（PPL、後にPPPL）ではModel C ステラレータ（通称Cステラレータ）と呼ばれるヘリカルコイルを初めて装着した装置が製作された（1961年）。Cステラレータは1960年代に世界を席卷した装置である。ヘリカルコイルを用いた理由はプラズマの巨視的不安定性への対策のためである。

実は、トーラス状のヘリカル型装置にはトカマクが有するような対称性が存在しない。この点については後述する。対称性が存在しないと、トカマクに比べて閉じ込めが悪い。Cステラレータは、対称性が無いことに加え、磁場の精度が悪かったため、閉じ込めはボーム拡散^{注3}を越えることが出来なかった。1968年に旧ソ連クルチャトフ研究所のT-3トカマクが電子温度1000万度、ボーム拡散を越える閉じ込め時間を達成したが、当時の西側の研究者は誰も信

*核融合科学研究所 連携研究推進センター 教授

*National Institute for Fusion Science Coordination Research Center Professor

じなかった。1969年にイギリス・カラム研究所の研究者がモスクワに乗り込み実際に電子温度を測定したこと等によってT-3トカマクの実験結果が事実であることが確認されると、Cステラレータはすぐさまトカマクに転換され、1970年にSTトカマクに生まれ変わった。アメリカにおいては、ステラレータは一旦「捨てられた」ことになる。

ヘリカル型の装置は、アメリカで発明された後、1960年代に日本、ドイツ、英国において造られた。日本とドイツでは今日まで中断すること無く研究が継続されている。1950年代後半の日本の核融合研究黎明期から1980年代にかけて、京都大学において、ヘリオトロンA(1959年、完成年を示す(以下同様))、ヘリオトロンB(1960年)、ヘリオトロンC(1965年)、ヘリオトロンD(1970年)、ヘリオトロンE(1980年)、名古屋大学プラズマ研究所において、JIPP-1ステラレータ(1970年)、JIPP T-IIステラレータ/トカマク混成型装置(1976年、プラズマ研の第二期計画の主装置)、CHS(1988年)が製作された。その後、文部省傘下の京都大学、名古屋大学プラズマ研究所の実験は、核融合科学研究所の設立に伴い、LHD(大型ヘリカル装置、1998年)に集約された。ドイツのマックスプランク・プラズマ物理研究所(MPI)では、Wendelstein(ヴェンデルシュタイン)シリーズのステラレータ(W-Ia, W-Ib, W7-A(1970年), W7-AS(1988年))が製作された。W7-ASからはいわゆる最適化ステラレータ^{注4)}の路線が採用されている。ヨーロッパにおいてもヘリカル型は、LHDと同規模のW7-X(2004年完成予定であったがコイルの製作が難しいため現在も建設中)に集約されている。イギリスのカラム研究所では、CLEOステラレータなどの装置が造られたが、ヘリカル型の研究拠点は研究者とともにオーストラリアに移動した。アメリカでは約10年の中断の後、W7-AやヘリオトロンEの実験結果を受けて、1980年代に入るとヘリカル型に対する関心が高まり、オークリッジ国立研究所の研究者はATF(Advanced Toroidal Facility, 1987年)を製作した。PPPLにおいても同時期にヘリアックなどのヘリカル型への関心が高まり今日に至っている。

先に述べたが、ヘリカル型では、磁場配位の捻れやヘリカルコイルによって閉じ込め磁場を作るため、軸対称性は存在しない。一見したところ、ヘリカル対称性が存在するように見える(周期は存在する)が、実は、ヘリカル対称性は直線状のヘリカル型の

場合にしか存在しない。つまり、ドーナツ形状にするとヘリカル対称性は失われる。このことが、1970年代からトカマクが世界の主流になった理由の一つである。主流になれなかったもう一つの理由として、ヘリカル型はトカマクに比べて製作が難しいことが挙げられる。ヘリカル型は外部コイルのみによって閉じ込め磁場を作るため、トカマクに比べて磁場精度は概略10倍厳しくなる。

ヘリカル対称性を得ようとするれば、出来るだけ直線に近づける必要があり、ドイツではプラズマの大半径/小半径(アスペクト比という)を大きくした装置が製作された。即ち、出来るだけ細いプラズマである。W7-Aは大半径/小半径=2m/10cm=20とアスペクト比が際立って大きい。JIPP T-II(1976)はトカマク運転を行うとともにプラズマに電流を流すヘリカル型でもあったため、91cm/18cm=約5であった。ヘリオトロンEでは2.2m/20cm=11である。W7-AとヘリオトロンEはアスペクト比の大きい装置の代表格である。

1984年に大学の核融合研究の将来計画を策定するために、文部省学術審議会研究領域推進分科会核融合部会(部会長、早川幸男・名古屋大学教授(1987年から名古屋大学学長))が設置された。結果的に、大学では核融合科学研究所を設立してヘリカル型の研究を進めることとなったが、アスペクト比の大きい装置では、プラズマ小半径をトカマク並みにすると装置規模が大きくなり建設コストが高くなる。プラズマの小半径は、炉を考える場合、1m以上は必要になる。このため、アスペクト比の小さい、即ち、トカマク並みの太ったヘリカル型のプラズマを研究対象とする必要が生じた。

アスペクト比を小さくすることは、ヘリカル対称性を益々失う方向であるので、閉じ込め性能を回復させるには別途方策が必要となる。これは、幸いなことに実験を進めるうちに、理屈は簡単であるが、磁気軸を内側に移動させることによって解決された。CHSの成果はLHDに活かされている。アスペクト比を小さくする時にもう一つ注意すべきことは、悪いことが予想される閉じ込めの物理を解明する上で誤差磁場の影響を排除することである。Cステラレータは極端な例であるが、磁場の精度が悪くては実験そのものの意味が無くなるからである。このため、CHSでは、磁場の精度に格段の注意を払ってヘリカルコイルの設計・製作を行った。磁気容器は実験装置の心臓部であり、特に、ヘリカルコイルは、プラ

ズマに最も近い所に設置されるコイルであるため、最も重要である。

1980年代のヘリカル型装置

1980年代はヘリカルプラズマの研究にとって、世界的に見ても飛躍の時期になった。日本においては、JIPP T-II (名大プラズマ研)、ヘリオトロン E (京大ヘリオトロン核融合研究センター) が実験データを生産する一方で、CHS (名大プラズマ研、アスペクト比 5) が建設され運転が開始された (1988年)。ドイツでは、W7-A の実験が終了し、磁場配位の最適化を行った W7-AS が運転を開始した (1988年)。アメリカにおいては、ATF (1987年、アスペクト比 7) が運転を開始した。これらの動向を踏まえ 1980年代末には LHD (アスペクト比は ATF と CHS の間で約 6) の設計が固まった。当時のヘリカル型の物理と工学に関する世界の現状をまとめたレビュー論文が 1990 年に出版され、その中で CHS の設計・製作・初期結果についての記事も掲載された¹⁾。

日本のヘリカル型装置の殆どは日立製作所によって製造されて来た。このため、JIPP T-II → ヘリオトロン E → CHS の流れの中で、技術の伝承を見ることができる。写真 1 に JIPP T-II の全景を示す。写真 2 に、真空容器、ヘリカルコイルなどを示す。JIPP T-II は現在、核融合科学研究所において写真 2 に示す形で保存、展示されている。ヘリオトロン D、ヘリオトロン E、LHD 真空容器 (実物大 1/5 セクター) も同じ部屋に保存、展示されている。

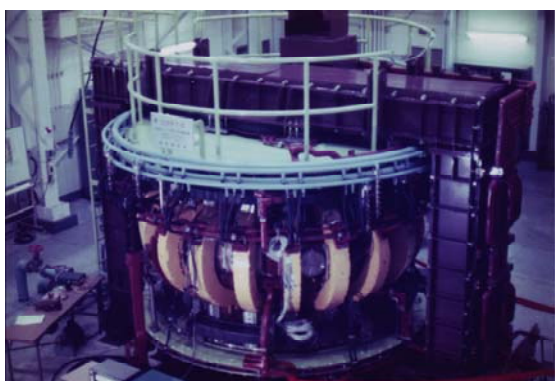


写真 1. 名大プラズマ研に搬入時の JIPP T-II
JIPP T-II の装置の概要を述べる。

1) プラズマの大半径は 91cm である。写真 1 の黄色のコイルはトロイダル方向の磁場を作るトロイダル磁場コイルである。ステラレータの場合、(正確には極数^{注5)} = 2 のステラレータの場合) ヘリカル

コイル導体は 4 つ (写真 2 ではその内 2 本が上部と水平面右側に見えている) あり、導体毎に電流の向きを互い違いとするので、ヘリカルコイルはトロイダル磁場をつくらない。このため、トロイダル磁場コイルが必要である。

2) 装置の中心には透磁率の大きいケイ素鋼板で造った鉄心があり、鉄心の中の磁束を時間的に変化させることによりトロイダル方向に 1 周電圧 (電場) を発生させ、プラズマ中に電流を流す。これは、トカマク実験には必須であるとともに、ヘリカル型としても 1980 年代中頃まではプラズマ生成・加熱のためにプラズマ中に電流が流された。装置の外側の鉄心は閉じた磁気回路を構成するためのものである。



写真 2. JIPP T-II の真空容器、ヘリカルコイル他 JIPP T-II ステラレータのヘリカルコイルは、4 導体からなり、各々トロイダル方向に 1 周する時、ポロイダル方向に 2 周する。1 導体あたり 9 本のバーからなっており (写真 2 参照)、最大 40kA の電流を流す。即ち、1 導体当たり 360kAT (キロアンペア・ターン) である。この値は実験計画から要請される。磁場のフラットトップは、定常実験を目指さない限り、プラズマの閉じ込め時間 (この規模の装置では 0.1 秒以下) よりもはるかに長い時間プラズマを生成しても意味が少ないので、1 秒程度である。銅を用いた導体の場合、水冷却を行うとしても約 1 秒間の通電の間は冷却が殆ど効かず断熱温度上昇となるので、コイルの電流密度は 50A/mm² 程度である。温度は 100 度ほどに上昇するが、通電後数分かけて通電前の温度に戻る設計になっている。

JIPP T-II に見られるように、大電流 (数 10 キロアンペアのオーダー)、大断面導体 (約 10cm²) だとヘリカルコイルをドーナツに沿って何回も周回することが困難となり、大抵の場合、ポロイダル方向半

周で導体内接続を余儀なくされる。当初はボルトによる接続が行われたが、ボルト接続では通電を重ねるうちにボルトが緩み絶縁破壊を引き起こす。実際に、JIPP T-II および ATF においてそのようなトラブルを経験している。その後 JIPP T-II、ATF では溶接による接続に改められ、1980 年代後半以降、ボルト接続は採用されていない。しかしながら、溶接時の加熱、その後の絶縁作業を行うためにはバーの周りにスペースが必要であり、そのために他のバーを本来の位置から変形させることが必須になる。その変形を修正することが困難であるため、コイルの巻線精度を上げることが難しく、誤差磁場の一因になりうる。

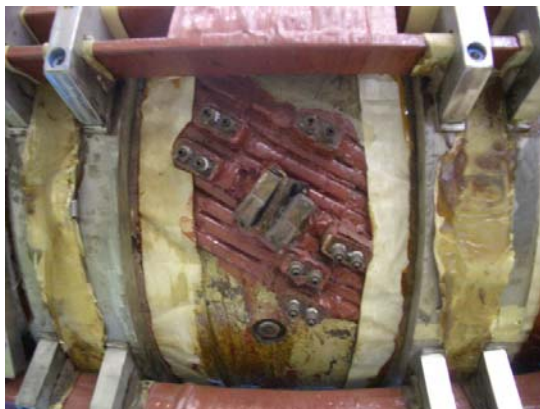


写真3. JIPP T-II ヘリカルコイルの口出し部

大電流・大断面積のバーを用いる時のもう一つの問題は、バーの渡りに伴う誤差磁場の発生である。写真3にはヘリカルコイルに給電するための口出し部（写真中央部、他の口出し部は冷却水の出入り口）が示されている。バーは高さ方向に3段に重ねられているが（3本は並列接続のため）1層である（写真2参照）ため、段落としに伴う問題は無い。9本のバーはシリーズに接続されているため、バーはドーナツを1周する度にトロイダル方向に渡って行く。給電部入り口に戻るためには、バーは渡りの方向とは逆方向に導体を横切らざるを得ない。このため、磁気双極子モーメントが生じる。大きさは、 $40\text{kA} \times \text{面積}$ （概略、導体の幅 \times バーの高さの半分 $=$ 約 80cm^2 ）で与えられ、約 $3 \times 10^2 \text{A} \cdot \text{m}^2$ となる。この値はかなり大きな値である。JIPP T-II を設計・製作した頃は、磁力線をドーナツに沿って追跡して磁気面を描くには当時の計算機では非現実的な時間がかかったため、実際に磁場の容器としてどの程度の精度のものであったかは分からないが、今から考えると十分に満足いくものではなかったと考えら

れる。しかしプラズマに電流を流すヘリカルプラズマの実験を行う上では磁場精度は十分であったと考えられる。

JIPP T-II の後に造られたヘリオトロン E においても、ヘリカルコイルは JIPP T-II と殆ど同じ構造であり、1 導体当たり 9 本のバーから構成されている。1 本のバーは 3 段並列接続であり、この点も同じ設計となっている。ヘリオトロン E は極数 $=2$ でプラズマ断面は楕円であるが、ステラレータではなくヘリオトロン型であるためヘリカル導体は 2 つしか必要ない。また、ヘリカル導体には同じ向きに電流が流れている。このため、ヘリカルコイルのみでトロイダル磁場が作られる。トロイダル磁場コイルも装着されているが、これはヘリカルコイルの作るトロイダル磁場の値を増減させて実験の幅を拓げるためである。

ATF は 1980 年に入り設計が始まった。ヘリオトロン E と同じく極数 $=2$ で、プラズマは楕円断面である。ヘリカルコイルは 2 本であり同じ向きに電流を流すため、トロイダル磁場コイルは装着されていない。大半径/小半径 $=2.1\text{m}/30\text{cm}=7$ のサイズは当時最大規模の装置であった。ヘリカルコイルは大電流・大断面積の路線を踏襲し、1 導体は 14 本のバーから成り、トロイダル方向に半周する度に導体接続されている。既に述べたようにボルト接続は後に溶接されている。ヘリカルコイルは、JIPP T-II、ヘリオトロン E とほぼ同じ考え方で製作された。ただし、磁場精度は悪く、磁気面計測^{注6)}では大きな乱れが観測され、閉じ込め容器の大きさとしては設計の半分程度にしかならなかった。

CHS の設計・製作

CHS はヘリオトロン E、ATF と同じく、極数 $=2$ 、楕円形のプラズマ断面、2 本のヘリカルコイル、トロイダル磁場コイル無し（写真4参照）である。このため、大きなポートを取ることが出来、プラズマへのアクセスが極めて良く、まさに実験のための装置となった。

CHS の設計を始めたのは、学審・研究領域推進分科会核融合部会での議論が進んでいた 1986 年度に入ってからである。ATF が建設中であったため、規模の小さい同種の装置建設には批判があった。しかしながら、ATF よりも更に太ったプラズマでの実験であることと磁場精度の良さに特徴を持たせることによって予算を獲得出来た。設計1年、建設1年と

いう短期間で装置が完成され、ATF に遅れること数ヶ月で実験結果を発表出来た²⁾。余談ながら、ATF は磁場精度の悪さが不評を買い、早々と 1994 年にシャットダウンを余儀なくされたが、CHS は 2006 年 8 月まで実験を続けた。

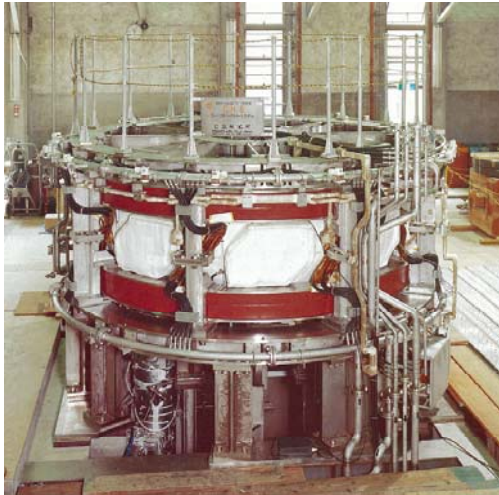


写真 4. CHS の全景 (名大プラズマ研)



写真 5. CHS の真空容器 (日立製作所提供)

大電流・大断面積ではバーの渡りによる誤差磁場が大きくなるため、小断面のホロー導線(水冷用の孔(直径 4mm)付き、断面積は 7.4mm×7.4mm)を採用し、巻線の位置の精度を上げるために、真空容器に溝を切り直巻きとした。8 個のステンレス鋼のブロックから水平面上下、トロイダル方向 90 度毎に分割された 1/8 セクターの真空容器 8 個を精度よく削り出し、その後、溶接によって真空容器を作り上げた。溶接によって歪みが生じることを考慮して、最終的には巻線用の溝に対地絶縁(胴張絶縁)を施した後、再び溝を精度よく仕上げた(写真 5 参照)。実際に溶接によって最大 2mm の誤差が生じたため、胴張絶縁の前に再度 5 軸 NC マシンによって仕上げ

た。胴張絶縁後の寸法誤差は大半径 1m の真空容器に対して±0.5mm に収まった。

採用した導線は人力によっても可撓性がある太さであるため、導線に絶縁を施したあと、写真 6 に見られるように 1 本毎に位置の精度を確認しながら巻線作業が行われた³⁾。



写真 6. 完成時のヘリカルコイル巻線 (日立製作所提供)

図 1 にコイル系を示す。捻れている 1 対のコイルがヘリカルコイルである。残りの円形コイル(総称してポロイダル磁場コイル^{註7)})の役割は、①ヘリカルコイルの作る垂直磁場(上下方向磁場)の打ち消し(これが無いと磁気面が真空容器の中心に位置しない)、②プラズマ断面の制御(楕円の長軸と短軸の比を変える)、③コイル全体としての双極子磁気モーメントの最小化(装置周辺の計測、加熱機器に対する漏洩磁場を少なくする)、である。

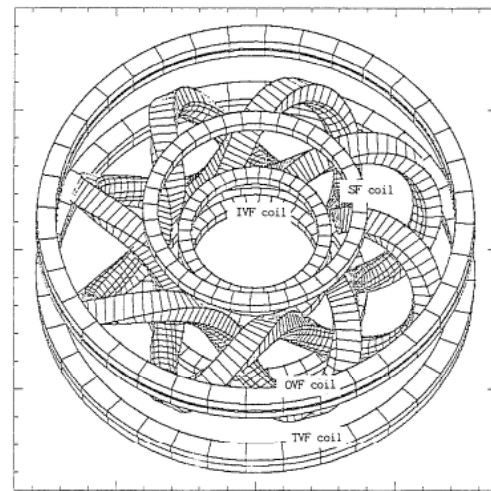


図 1. CHS のコイル系

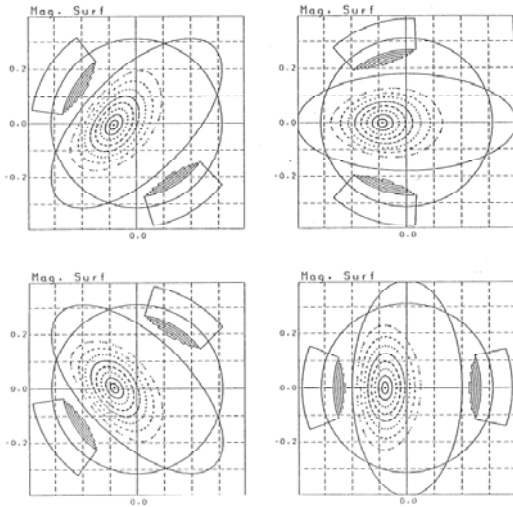


図2. ヘリカルコイルと磁気面

図2にヘリカル導体断面と磁気面及び真空容器との関係を示す。一番外の磁気面がプラズマの境界と考えて良い。大きな楕円は真空容器の内側（プラズマ側）を示す。磁場の強さ（CHSの場合最大2テスラ）など磁気容器に対する要求から導体の起磁力（アンペア・ターン）が決定される。詳細は省略するが、回転変換（トロイダル磁場に対するポロイダル磁場の比率に関係する）を大きく取るためには導体の断面積をなるべく小さくし、且つプラズマに近づける必要がある。これらは相矛盾する要求であり、CHSの場合、導線の絶縁や巻線精度に関して0.1mmのせめぎ合いになった。絶縁や水冷孔を含めたグロスの電流密度は約50A/mm²であり、これまでの値とほぼ同程度であり、導線1本当たり3kA弱である。

2本のヘリカル導体は各々、トーラスを1周する時、ポロイダル方向に4周する。このため、磁場配位はトロイダル角45度毎に繰り返される（周期8と呼ばれる）。図2ではトロイダル角11.25度毎の断面が示されている。注意すべきこととして、右下を0度とすると、特に右上の22.5度の断面が分かり易いが、導体が真上、真下に配置されていないことである。これは、ヘリカルコイルに正のピッチモジュレーション^{注8)}を施し、トーラス外側でのコイルのピッチを大きく（逆にトーラス内側では小さく）したためである。ピッチを大きくすることは、コイルがトロイダル方向に進む時にポロイダル方向に進む度合いを大きくすることに対応する。正のピッチモジュレーションは、閉じ込めの観点からは良くないが、プラズマの体積が大きくなることとポートが大きく取れることのため、実験のやり易さ、計測や

加熱のための近接性を重視し採用された⁴⁾。

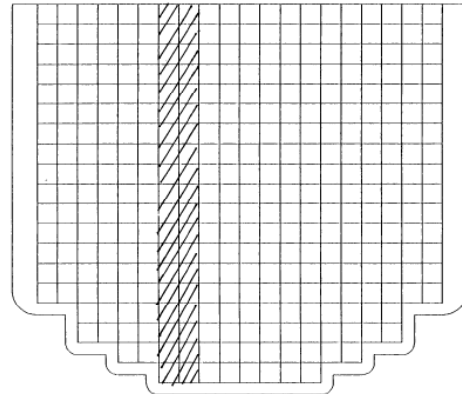


図3. ヘリカルコイル断面

図3にヘリカルコイル導体を長さ方向に直角に切った断面を示す。全体で352個ある小さい四角が絶縁された導線1本に対応する。長方形断面でなく下方（プラズマに近い方）に飛び出しがあるのは、導体の電流中心を出来るだけプラズマに近づけるためである。図2に示された斜めの断面を参照すると単純でない導体断面が合理的であることが理解出来る。このような導体形状を検討するには、計算機を用いて磁気面の計算を何回も行う必要があり、計算機の進歩が無ければ不可能であった。単純でない導体形状はATFのコイル設計から採用された。

導線は、高さ方向に15段、17段、18段、19段、横方向に20列、16列、12列、8列（全て4の倍数）に配列されている。例えば、斜線を施した19段の2列の巻線を考える。トーラス1周は約10mであるから、全体で約10m×19×2=約380mの長さが必要である。1本のヘリカル導体はトロイダル角90度でポロイダル方向に1周するため、周期4である。2列分を1本の導線で巻くのではなく、4周期あるため4本の並列巻きを考える。即ち、約380mに対応するように、約100mの導線を4本用意し、4カ所（トロイダル角0, $\pi/2$, π , $3\pi/2$)から同時に巻き始める。巻線完成時の様子を写真6に示す。相当複雑な作業であったことが推測される。4本の並列巻きのため、幅方向の渡りと高さ方向の段落とを4カ所で行うことになる。最下層で渡りを行うが、左（左パイ）から右（右パイ）に移る導線はトーラスを1周し、元に戻ってくると4段目から5段目に乗り上げる。左パイの巻線は逆方向に段落とを行うことになる。要約すると、最上層から見ると、左パイはトーラス1周毎に4段下に降り、最下層で右パイに渡った後は、1周毎に4段上がって最上層に出てくるこ

とになる。このため、出口が最上層に現れた時は、必ずしもトロイダル方向で入り口と同じ位置に来るとは限らない。この状況は段数に依存し、15, 17, 19 段では出口は $\pi/2$ だけ進んだ位置に現れ、18 段では $\pi/2$ だけ遅れた位置に現れる。次のパイ(2列)では、渡りを右パイから左パイに行くと、段落としや渡りに伴う誤差磁場を与える双極子磁気モーメントが互いに打消され、モーメントの次数が上がる。即ち、4列で考えると設計次第で4重極になるため誤差磁場を非常に少ないレベルに低減できる。全て巻き上げた後、同じトロイダル位置での口出し部の導線を4重極モーメントを作るように接続していくと、4導線並列のヘリカル導体が出来上がる。口出し部の磁気モーメントも4重極となり、ほぼ誤差磁場のない磁気容器が完成する。渡りを段落とし位置の間で行うと、2列当たりで最下層に同じ大きさの空隙($4 \times 2 = 8$ 個所)が生じる。巻線を滑らかに行うためと巻線位置の精度を上げるためにダミーの導線を挿入した。このため、最下層の実際の巻線数は20列の半分の10となり、342本が総巻線数となる。4本並列であるので、ターン数が85.5という整数でない数になるが、普通でないこのことが技術革新を物語っていると云える。最後に磁気面の測定の結果について述べる(図4参照)^{5,6)}。

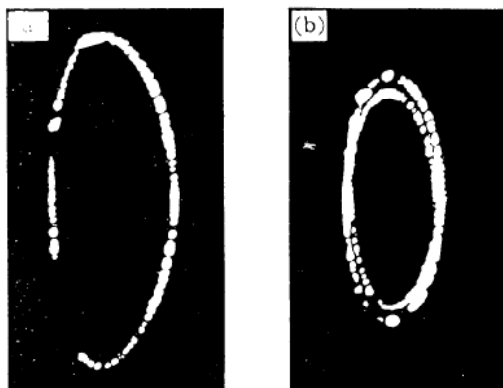


図4. 磁気面計測の結果

注6)の補足説明を行う。磁場は500 Gaussから1キログauss程度である。もっと低い磁場だと地磁気や建物の構造材の磁化の影響が無視できなくなる。高い値は冷却が定常通電を可能にするかどうかで決まる。LHDのように超伝導コイルであれば、実験と同じ磁場での磁気面計測が出来、理想的である。また、蛍光メッシュの線は出来る限り細いものが望ましい。これは電子ビームの透過性が良くなり、電

子がトーラスを何周も旋回する結果、磁気面の全周が観測されるからである。CCDカメラを用いて撮影した結果を図4に示す。磁場の値は875 Gaussである。左の図(a)は磁気面の平均半径が約19cmで低次の有理面^{注9)}でない場合、右の図(b)は $m/n=2/1$ (トーラス方向に2周するとポロイダル方向に1周する)という低次の有理面の場合に生じた磁気島である。CHSの場合、低次の有理面として $m/n=3/1, 5/2, 2/1, 3/2$ が考えられるが、 $m/n=2/1$ が最も危険な有理面である。地磁気などの誤差磁場が印加されると、大抵の場合、共鳴成分が存在するため右図(b)のように磁気島が発生する。磁気島の幅は磁場の関数として変化する(磁場が高くなると幅が減少する)ことが示された。このことは、誤差磁場が装置固有のものでないことを意味する。プラズマから離れて設置される単純な円形コイルであるポロイダル磁場コイルの製作及び設置精度も重要であることが磁気面計測の結果判明した。総じて、磁気面としてはきれいなものが形成されたと言える。

まとめ

単一粒子軌道の観点からヘリカル対称性を持つプラズマに近づけるため、1980年代中頃までは細長いプラズマを実験対象としていたが、ヘリカル型の将来を拓くためには太った低アスペクト比のプラズマを実現する必要があった。CHSはその目的のために製作された装置である。低アスペクト比のプラズマは閉じ込めが悪いことが予想され、物理現象を明らかにするためには磁気容器の精度を十分確保する必要があった。CHSでは、ヘリカルコイルの設計・製作に技術革新を取り込み、ヘリカルコイルからの誤差磁場を画期的に減少させることに成功した。また、閉じ込めの悪さは磁気軸の内側シフトによって解決され、今日のLHD実験につながっている。

注

- 1) 粒子の速度成分は、磁場に垂直と平行な成分を持っているが、例えば、直線型のミラー装置の場合、平行成分/垂直成分がある一定の値を越えると磁力線に沿って装置の外に逃げる。損失領域が速度空間で円錐形となるので、損失円錐と呼ぶ。速度空間に損失領域があると、装置をいくら大型化しても閉じ込め時間は長くない。
- 2) 環状プラズマの閉じ込めには、安定性を保つためにトロイダル磁場が、平衡を保つためにポロイダル磁場が必要である。トカマクは、プラズマ中に電流を流すことによってポロイダル

磁場を生成するが、ヘリカル型ではプラズマの外に巻かれたコイル(外部コイル)によって必要な全ての磁場を生成する。トカマクを定常に運転するためには、プラズマ電流をなんらかの形で流し続けなければならないが、ヘリカル型では、超伝導コイルを使えば定常運転が可能である。

- 3) ボーム拡散とは、プラズマが乱流状態にある時の拡散を与え、閉じ込めはほぼ最悪となる。1960年代の閉じ込め実験はボーム拡散を越えることを第一の目標とした。対称性の無いヘリカル型でも磁場の精度を確保すればボーム拡散を越えることは十分に可能である。
- 4) 1980年代中頃までは、先ずコイルの形状、即ち磁場の構造を決めた上で、そこに閉じ込められるプラズマの性能を吟味し、コイル形状にフィードバックをかけていた。最適化は、全くその逆で、最初に必要とされるプラズマの性能を与えて、そのようなプラズマを閉じ込める磁場の構造、即ち、コイル形状を求める手法である。ドイツの J. Nuehrenberg によって発明された。この場合には、コイル形状はヘリカルコイルのような連続巻線ではなく、モジュラーコイルになる。ただし、コイル形状が複雑になり、W7-X の建設の遅れの一因になっている。Nuehrenberg は粒子から見るとほぼ直線のヘリカル型に見えるトーラス状のヘリカル磁場配位を見いだした。また、トカマクのような軸対称性をほぼ満たすようなヘリカル型装置⁷⁾も設計できるようになっている。
- 5) 極数=1は円形、極数=2は楕円、極数=3はおむすび型の断面になる。円形断面の場合は、磁気軸が平面上になく立体的にならないと閉じ込め磁場が形成されない。楕円やおむすび型の場合は、JIPP T-II, ヘリオトロン E, CHS, ATF, LHD のように平面状の磁気軸でよい。
- 6) 低い磁場で定常通電を行う。タングステンフィラメントに直流を流し赤熱させると熱電子が放出されるので、100ボルト程度の電圧を印加し磁力線に沿うように指向性を持たせて加速する。例えば、真空容器の中に蛍光塗料を塗ったメッシュを入れておけば電子が衝突した所から蛍光が発する。蛍光メッシュは、蛍光塗料の粉末を酢酸ブチルの溶液に溶かしてメッシュに塗布すれば出来上がる。極数=2の場合には、発光スポットが楕円形を形成する。電子ビームの位置を変えて測定を行えば、計算通りの入れ子状の磁気面が出来ているかどうか調べられる。
- 7) 図1では4種類のポロイダル磁場コイルとなっているが、OVFコイルとTVFコイルは同じ目的であるため、実質的には3種類である。OVFコイルはヘリカルコイルと直列接続されている。3種類のコイルで、本文にある3つの役割を果たす。ステラレータの場合は、電流が互い違いの4本のヘリカルコイルによるため正味の垂直磁場は形成されないが、CHS などのように同じ向きの電流を持つ2本の場合には、相当大きな垂直磁場

がヘリカルコイルによって生成される。これは、ヘリカルコイルが真空容器の外側に来た時、真空容器の内部に作る上下方向の磁場は、ヘリカルコイルが内側に来た時に作る真空容器内部(コイルの外側に相当する)の上下方向の磁場よりも強いという単純な理由による。

- 8) ピッチモジュレーションの考えは1980年代に入って導入された。閉じ込めを良くするために負のピッチモジュレーションをかけることは技術的に何の問題もないが、プラズマが小さくなるとともに、ポートも小さくなるため採用しなかった。低アスペクト比と正のピッチモジュレーションに伴う欠点は図1に示したように磁気軸を真空容器の中心に対して大半径方向内側にシフトさせることによって克服される。本文中に簡単な理屈と記述したが、これは磁力線に沿う磁場強度の極小値を一定とする(次善の策として極小値の変動を小さくする)ことに対応している。
- 9) 入れ子状の磁気面は無数にあり、殆どはポロイダル周回数/トロイダル周回数=無理数である。この場合、磁力線がトーラスを何回を回っても、元の位置には来ない。しかしながら、有理数の場合は、何回か周回するうちには、閉じる磁力線によって形成される磁気面が存在する。周回数が1, 2, 3のような小さい整数で閉じる磁力線による磁気面を低次の有理面と呼ぶ。この場合には、共鳴する誤差磁場が存在すれば、磁気島が形成される。

参考文献

- 1) K. Nishimura, K. Matsuoka et al., "Compact Helical System Physics and Engineering Design", Fusion Technology, 17 (1990) 86.
- 2) K. Matsuoka et al., S. Kubo et al., "Confinement Study in Compact Helical System", Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research (Proc. 12th Int. Conf. Nice, 1988) Vol. 2, IAEA, Vienna (1989) 411.
- 3) S. Imagawa, Y. Shimanuki et al., "MANUFACTURING OF COMPACT HELICAL SYSTEM" Fusion Technology (1988) pp. 412-416.
- 4) K. Matsuoka, K. Nishimura et al., "Design of Compact Helical System", 12th Symposium on Fusion Engineering, Monterey California (1987) vol. 2, p. 848.
- 5) Kiyohiko Nishimura, Keisuke Matsuoka et al., "REDUCTION OF ERROR FIELD IN CHS" Fusion Technology (1988) pp. 398-401.
- 6) H. Yamada, K. Matsuoka et al., "Magnetic-field study in a compact helical system", Reviews of Scientific Instruments, 61 (1990) 686.
- 7) K. Matsuoka, S. Okamura et al., "ENGINEERING DESIGN STUDY OF QUASI-AXISYMMETRIC STELLARATOR WITH LOW ASPECT RATIO", FUSION SCIENCE AND TECHNOLOGY, 46 (2004) 378.