



研究技術ノート

核融合における技術革新(1) —閉じ込め装置本体—

伊藤 裕¹⁾, 古山昌之²⁾, 太田 充³⁾

¹⁾日立製作所, ²⁾日立プラントエンジニアリング, ³⁾元日本原子力研究所, 元日本アドバンステクノロジー

(原稿受付: 2009年3月2日 / 原稿受理2009年4月6日)

トラス型核融合装置を用いた核融合の研究は, 1960年代後半から活発になり, 研究装置の建設に産業界が深く係わりはじめた. 以来40年間多数の研究装置・施設が製造・建設されてきた. ここではトラス型(トカマク系, ヘリカル系)を対象として, 実験装置本体の建設に際し培われた製造技術を中心に, その変遷・革新・波及について述べる.

Keywords:

nuclear fusion, tokamak, helical device, vacuum vessel, magnet, manufacturing, innovation, technology transfer

1. はじめに

プラズマ・核融合学会の前身である核融合懇談会が発足して50年を経過, この間様々な研究に対応した実験施設・実験装置が建設されてきた. それに伴い様々な技術が開発・蓄積され, 今日 ITER に代表される核融合実験炉の建設が具体化する段階に到っている. 今回, 核融合研究・開発, 特に装置開発にかかわる技術革新に光を当ててみることにした.

一般的に「技術革新」と言うと, 例えばフラットパネルディスプレイの出現でブラウン管テレビが薄型テレビに置き換わってしまい, 携帯電話の普及で生活環境が一変してしまうような事例を思い浮かべる. 核融合研究・開発においても従来技術が一変してしまう事例がないわけではないが, 多くは地味で地道な改良の積み重ねから生まれたものである. しかし核融合装置建設のプロジェクトにおいて, その技術がなければ成り立たなかった事例は多い. そのような技術に光をあて, 意義を明らかにしていくことにする.

ここでは, 核融合装置本体としてトラス型(トカマク系, ヘリカル系)を対象とし, 真空容器, コイルの製造を中心に置き, 技術の変遷・波及, 時代背景などを示す.

また, プロジェクトを成功に導いた背景にある研究者・技術者・技能者の取組姿勢についても触れる.

2. トラス型核融合装置の構成と技術的特徴

本体機器の基本構成は, トラス状の真空容器(プラズマ生成の環境を整えるためまず超高真空領域まで排気する), 真空容器内部にプラズマを閉じ込めるための磁場配位を発生させる電磁石系(コイル), これらを所定位置に保持する支持構造体(架台)に大別される. リング状のプラズマとこのプラズマの断面内に閉じ込め磁場を発生させるコイルは, 必然的に鎖交する. この真空容器とコイルの鎖

交を矛盾なく成立させることが, トラス型核融合装置技術の基本的特徴である.

トカマク型の電磁石系は, プラズマ断面に強い磁場を発生させるトロイダル磁場コイルと, プラズマに大電流を流すための変流器コイル(トランスの一次巻き線に相当)と, プラズマの位置, 断面形状を制御するためのポロイダル磁場コイルで構成される. ポロイダル磁場コイルはプラズマとの近接性が求められることから, トロイダル磁場コイルのボア内に設置されることがある. 特に近接性を要請される場合には, 真空容器の内側にコイルが収納される場合(例: JT-60 の磁気リミタコイル)もある. この場合はトロイダル磁場コイルとポロイダル磁場コイルは鎖交することになる. トロイダル磁場の強さ(磁束密度)は主半径に反比例する. 有効に磁場を利用するために, 真空容器はトロイダル磁場コイルのボア内で主半径インボード側へ寄せられる. したがって益々空間制限が厳しくなり, 設計・製作がむずかしくなるとともに作業性が悪くなる.

ヘリカル型の電磁石系は, ヘリカル磁場を発生させるヘリカルコイルと, ヘリカルコイルが発生するポロイダル磁場(主に垂直磁場)を補正するためのポロイダル磁場コイルで構成される. 必ずしも必須ではないが, 研究領域拡張のためトカマク型と同様にトロイダル磁場コイル, 変流器コイルが設けられる場合もある. ヘリカルコイルはプラズマとの近接性を特に要求されるので, 高い製作精度を要求されることから, 真空容器との相互関係が深い.

コイル系には大きな電磁力が作用する. 金属性の真空容器にもプラズマの挙動に伴い渦電流が発生し, 閉じ込め磁場とカップルし電磁力が作用する. この電磁力は真空容器の構造・形状因子(ベローズや各種ポート類)も絡み複雑なモードの電磁力となる.

プラズマの閉じ込め性能は, プラズマの体積を大きくし, かつアスペクト比(トラス主半径/プラズマ断面副

半径)が小さく縦長楕円のプラズマとし、さらにダイバータ配位とすることで改善されてきた。すなわち、このことは各構成機器を、主半径インボード側や上下の狭空間に配置することとなり、特に装置の中心部近傍は空間的制限が顕著となる。この狭い空間内で機械的強度および剛性、除熱(超伝導方式では冷凍)、電気的な健全性、放射線遮蔽・安全性、据付・組立、保守性などの諸要件を満たすことが装置技術上の特徴であり、課題である。

3. 真空容器

3.1 トカマク装置

(1) 真空容器の変遷

核融合の真空容器(放電管)には、当初ガラス管を用いていたが、プラズマ閉じ込め研究が進展するに従い、超高真空の重要性が認識され、真空漏れを防ぐための全溶接の採用、容器内表面からのガス放出を減らすための数百度のベーキングの採用などで鋼材が使われるようになった。また、放電破壊させてプラズマ電流を立ち上げるため真空容器のトーラス一周の電気抵抗を高める必要性や、ディスラプション時に発生する巨大な電磁力の支持のために、真空容器の構造にも様々な工夫が取り入れられるようになった。

大型トカマク臨界プラズマ試験装置 JT-60[1]では、高温での高強度、高電気抵抗、低透磁率などの観点から、真空容器材料としてそれまで採用されていたステンレス鋼に替えてインコネル625を採用した。また、プラズマ生成を確実なものとするため、トーラス一周電圧 250 V を発生させ、0.1 秒で 2.7 MA までプラズマ電流を立ち上げる仕様を設定した。それに伴い真空容器も、トーラス一周の電気抵抗を 1.3 mΩ 以上に設定し、その仕様を満たすために、厚肉リングとベローズをトーラス方向につなぎ合わせる構造を採用した。当時の三大トカマクと呼ばれた米国の TFTR[2]、EU の JET[3]でも同様のベローズ構造を採用している。

真空容器を設計する際のもう一つの要素は、プラズマディスラプション時間である。プラズマ電流が瞬時に消滅する際、真空容器に誘導電流が誘起され、磁場との相互作用で巨大な電磁力が真空容器に作用する。JT-60では 2.7 MA の電流が 1 ms で消滅するという条件を設定した。

ディスラプション時間に関しては、ある国際会議での筆者(M.O.)の質問に対して「TFTRでは当初 1 μs のディスラプション時間を設定したが、真空容器が設計できず、次に 100 μs、1 ms と設定し直し、最終的に 4 ms に落ち着いた」との回答があった。これは、未知の領域を開拓する際にはプラズマ研究者と設計技術者との必須の対話を意味している。また JET では、運転開始の当初、ディスラプション時にトロイダル磁場とハロー電流との相互作用で真空容器が数 cm 浮き上がり、一部損傷したとの情報を耳にしたが、新領域への挑戦には、建設に万全を期したつもりでも見落としや失敗は避けて通れないのが常である。

JT-60では、プラズマの閉じ込め性能をさらに向上させるためにプラズマ電流 2.7 MA から 6.5 MA に高める大電流化改造を1991年に実施した。これが JT-60 U[4]である。こ

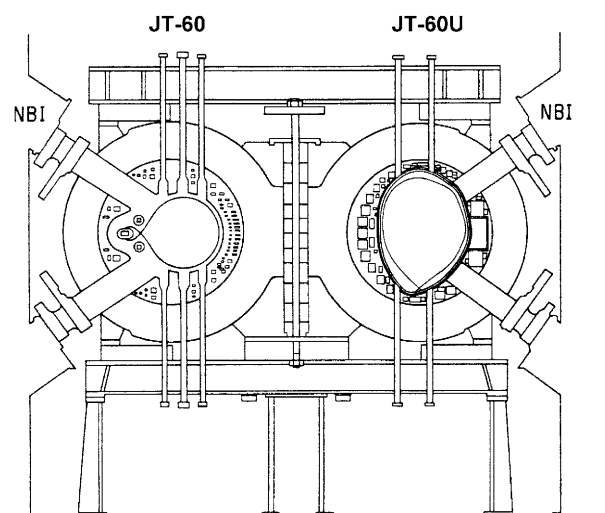
の改造では、トロイダル磁場コイルを再使用し、真空容器やポロイダル磁場コイルを新設した。

新設する真空容器の設計では、JT-60での実験で得られた知見を基にいくつかの仕様を変更した。プラズマ生成時の放電破壊電圧は 250 V から 10~40 V に下げ、トーラス一周の電気抵抗も 1.3 mΩ から 0.2 mΩ に下げた。さらには、プラズマディスラプション時間も 1 ms から 10 ms へと変更した。このように常に最新の実験データをフィードバックさせて次世代装置の建設が進展する。ちなみに ITER では、真空容器の電気抵抗は、トーラス方向で 7.9 μΩ、ポロイダル方向で 4.1 μΩ である。これは、ITER のプラズマ断面が大きく放電破壊が起こりやすいこと、また JT-60U の実験結果から、トーラス方向の電界が 0.3 V/m でも約 2 MW の ECH(電子サイクロトロン加熱)入射により十分プラズマ電流が立ち上がると判断したためである。設計条件として設定したプラズマディスラプション時間も 27 ms である[5]。

JT-60Uでは、再使用するトロイダル磁場コイルの内側に可能な限り大きなプラズマ容積を確保するために、真空容器には二重壁構造を採用した。この結果、JT-60ではベローズの高さ 70 mm に対して、JT-60U の二重壁の高さはベーキングや冷却機能を取り入れても 40 mm に下げることができた。この二重壁構造は、DIII-D[6]や Tore-Supra[7]に採用された構造である。トーラス一周の電気抵抗の条件が緩和されたための進展でもある。

(2) 成形ベローズ型真空容器 (JT-60)

JT-60のトーラスの断面を JT-60U と比較して図 1 に示す[4]。真空容器内部には中央水平面位置に磁気リミタコイ



	JT-60	JT-60U
Plasma major radius	3.1m	3.4 m
Plasma minor radius	0.9 m	1.1m/1.4m
Toroidal magnetic field	4.5 T	4.2 T
Plasma current	2.7 MA	6 MA

図1 JT-60, JT-60U 真空容器断面図(提供:日本原子力研究開発機構)。

ル3個を設置した。これは、JFT-2aの成果を基に採択したもので、JETやTFTRにはない設計である。真空容器は、厚さ65mmの厚肉リング8個とU型成形ベローズ8個を交互に溶接接続した構造である。トラス一周電気抵抗を高めるために、セラミックスリングの挿入や溶接ベローズの使用も検討したが、前者は、ベーキング時やディスラプションによる電磁力の発生時でも健全性を維持できる、金属とセラミックスとの溶着技術の開発に自信が持てなかったこと、後者は、あまりに長すぎる溶接線の真空漏れを懸念したためにその採択を断念し、成形ベローズの採択に踏み切った。

成形ベローズの板厚は2.7mm、山の高さは70mm、ピッチ22mmである。応力解析は、当時、一般解析手法の有限要素法では節点数があまりに膨大になり、それによる解析は実用的ではなかった。そのため、まずベローズを等価な異方性板に置き換え、厚肉リングと一体化して全体解析を行い、得られた変位やモーメントなどを境界条件としてベローズ単体の応力を解析するズーム手法を採用した。開発した手法は、縮小モデルベローズを用いた実験でその妥当性を検証した[8]。

曲率の異なる卵形断面の大型ベローズの製作では、従来の成形技術では製作できなかったため、まず円断面の成形ベローズを製作し、それを少しずつ卵形に引き伸ばしては熱処理する工程を6回繰り返すことにより、当初の寸法精度を満たす成形ベローズ製作技術を開発した。図2に卵形ベローズを示す。

ベローズといえば、溶接ベローズの応力解析で体験した教訓的なエピソードがある。真空容器と一部のポートとの間にベーキング時の変位差を吸収するために溶接ベローズを挿入した。ポートには、ディスラプション時に捩じりトルクが発生する。ベローズ専門メーカーから「計算してみると、この捩じりトルクでは許容応力を超えてしまい適用できない。もともと溶接ベローズは変位を吸収する性格のもので、捩じれの吸収には適せず、これまでも使ってこなかった」との報告があった。「それでは、どこまでの捩じれであれば使えるのか、実験してみたら」との指摘に、実験してみたところ、ベローズの軸回転が蛇の動きに似たベローズのうねりに置き換わり、円環の一方ではベローズが伸び、180度反対側ではベローズが縮む変形をして、まったく

問題ないことが判明した。その折りのベローズ専門メーカーの「ド素人さんは本当に恐ろしい」との眩きを、筆者は今でも忘れることはできない。本件は新しい技術を開発したわけではないが、「新技術への挑戦や技術革新には、事実だけを見つめ、常識に疑問を持つことも大切である」ことを示唆している。

ディスラプション時に真空容器に発生する誘導電流の解析も初めて直面する課題であった。と言うのも、当時は軸対称に近似するか、もしくは電気回路で誘導電流を算出していた時代であり、卵形断面の厚肉リングと異方性を持つベローズの複合構造物の誘導電流の解析は未踏の領域であった。このため、有限要素回路コードと電流ベクトルポテンシャルを用いた解析手法[9]が新たに開発され、初めて任意形状の構造物に誘起される誘導電流が解析できるようになった。これもJT-60を契機に生み出された革新的解析技術の一つと言える。

真空容器のベーキングや冷却機能を持つ温度制御層の設計も困難を極めた技術の一つである。真空容器のベーキング温度は500℃で、70hr以内に立ち上げ、48hr保持した後、60hr以内に80℃まで冷却する仕様を設定した。500℃のベーキング温度は、酸化されたモリブデン製リミタの表面を水素還元し、清浄化するために設定した。

温度制御層の構成、配置については試行錯誤を繰り返して、加熱には電気ヒータを、冷却には水と窒素ガスの併用を採用した。また、実機大モデルを製作し、加熱・冷却試験を通して仕様を満足することを確認した[10]。

この温度制御層の設計・製作過程では、プラズマ実験から要請される仕様と、それを満たすための技術の困難さとの調整の難しさを体験した。JT-60の製作開始から完成まで8年掛かり、その間、プラズマ閉じ込め研究の進展を背景にモリブデンの表面をTiC被覆する変更(後述)を行った。その結果、500℃のベーキング温度は必ずしも必要ではなくなり、当初からガス出し用のベーキング温度300℃を設定していれば、電気ヒータに替えてガス加熱も可能であった。また、500℃から80℃までの冷却時間を60hrに制限したが、さらに1~2日延長すれば、冷却時間を短縮する水冷却は不要になり、冷却システムを簡素化することも可能であった。未踏の研究領域を開拓するためにはプラズマ閉じ込め研究を優先しなければならないが、それを支える技術は困難を極めることになる。その結果、装置が複雑になり、試作開発も必要になるため建設コストが上昇し、工期も長くなる。研究と技術、両者のバランスをいかに取るかの技量は、未知の領域を開拓する際にはその成否を左右するほど重要な要素となる。

なお、真空容器、コイル類、真空排気設備、支持架台など本体関連機器の仕様変更件数は些細な項目も含めて50件ほどになったが、その多くは建設と併行して進められていたプラズマ実験の結果を反映させて、後から発注しても間に合う機器の追加発注であった。これも、長期の建設期間を要するプロジェクトでは大切なプロセスである。

真空容器のポート先端に取りつけるゲートバルブには、250℃以上のベーキングが可能で、2000回を超える開閉

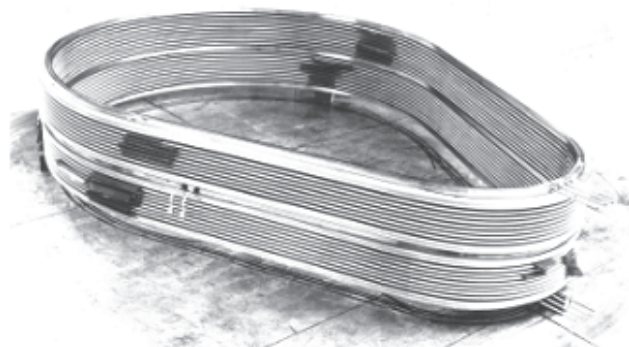


図2 JT-60 卵形ベローズ。

操作でも真空漏れを 10^{-8} Pa m³/s 以下に抑える、口径10~30 cm の全金属ゲートバルブの仕様性能が設定された。そこで国外メーカ 2 社と国内メーカ 1 社(岸川特殊バルブ社)の製品を取り寄せ、設定仕様を満たすバルブか否かを調べる試験を行った。その結果、国外メーカ 2 社の製品は駆動機構に問題があり、数百回の繰り返し操作でベローズ破損やベアリング焼き付けなどの損傷が発生した。一方、国内メーカの製品は駆動機構には一万回を超える開閉操作後もまったく問題がなかったが、ベークング時にはシール性能が劣化し、目標値を 2 桁ほど下回ることが判明した。これはディスクに無酸素銅を使用したため熱歪が大きく、またシール面に結晶粒界割れが発生したためでもあった。当初、無酸素銅に替わって強度や硬度を高める銀入り無酸素銅やキュプロニッケルを試作し試験したが、結晶粒界割れが判明した後は SUS304 製ディスクのシール部に銀を溶接する方式を取り入れてシール性能を改善した。その他の改良点としては、バルブの駆動部や摺動部に使われた MoS₂ ペーストのダストがシール部に付着し、シール性能を劣化させることが判明したため焼結性 MoS₂ に変更したり、更にはベークング時の温度分布の不均一によってもシール性能が損なわれることがわかり、ボディを溶接補強し温度分布を均一化するなどの工夫を施して、仕様を満たす全金属ゲートバルブを開発した[11]。

この開発で感じたことは、国外メーカ製品の採用に当たっては注意が必要とのことである。国外メーカは、ベローズ破損等の不具合が生じてもその修復に長時間を要し、原因究明にも熱心ではなかった。一方、国内メーカは、たとえ性能に遅れをとっていても技術開発に対する積極的な姿勢を維持し、すぐに国外メーカを追い越した。これは、先進的な開発製品の採用に際しては、不具合が生じた場合の対応など保守の観点も考慮して機器の選定をしなければならないことを示唆している。

図 3 に工場における真空容器組立(卵形ベローズと厚肉リングを順次溶接していく途上)を示す。

(3) 二重壁型真空容器 (JT-60U)

二重壁構造を有する JT-60U の真空容器の構造を図 4 [4] に示す。材料はインコネル625で、板厚 6.1 mm の内板、外板の間に一辺が 28.5 mm の正方形断面を有する角管を挟み、全体で 40.7 mm の高さに抑えた。角管は、内板とは角

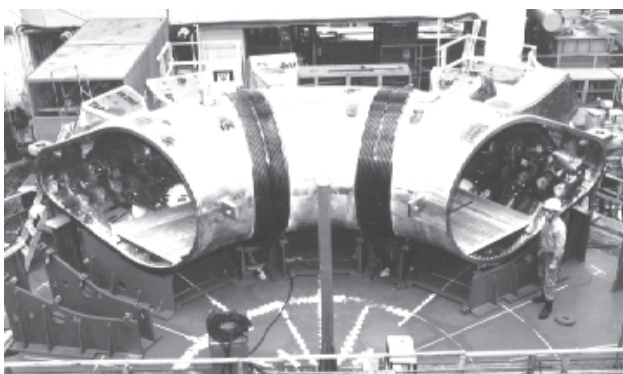


図 3 JT-60 真空容器 工場組立状況。

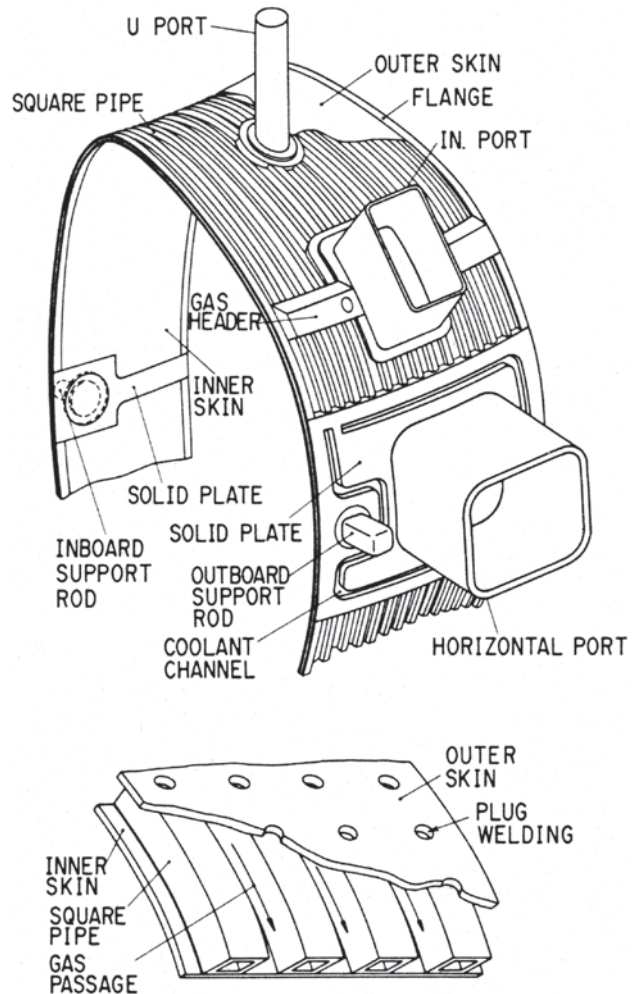


図 4 JT-60U 真空容器構造図(提供：日本原子力研究開発機構)。

管の全長ですみ肉溶接を行ったが、外板とは外板に丸穴をあけ、スロット溶接を行った。スロット溶接の総数は 2 万個近くになり、角管と外板との一体化を図って真空容器の剛性を確保した。また、300℃のベークングや冷却には内板、外板、角管の間の空間に窒素ガスを流す方式を採用した。真空容器の支持は、トーラスの内周側と外周側の中央水平部に設けた厚肉板に総計36個のロッドを溶接し、ポロイダル磁場コイル支持部材に嵌め込む方式を採用した。図 5 に工場で完成した JT-60U の真空容器を示す。

真空容器の応力解析には、ポートを含む三次元の複雑形状をシェル要素モデルに置き換え、有限要素法で解析した。この解析での最大の課題は、角管の配列密度やスロット溶接の配置密度が場所により異なるため、異方性を持つ各部のシェル要素の剛性値の設定にあった。そのため、数種類の部分モデルについて、トーラス方向とポロイダル方向の引張り、曲げ、せん断変形の解析を行い、各部のシェル要素の剛性値を得た。

シェル要素モデルの解析結果から、新たに開発したブリーミング手法で二重壁の詳細な応力を解析し、外板と角管を接合するスロット溶接部が疲労強度の観点から最も厳しい箇所であることが明らかになった。そこで、二重壁部分モデルを製作し、外板の引張り、引き剥がし、せん断の 3 種

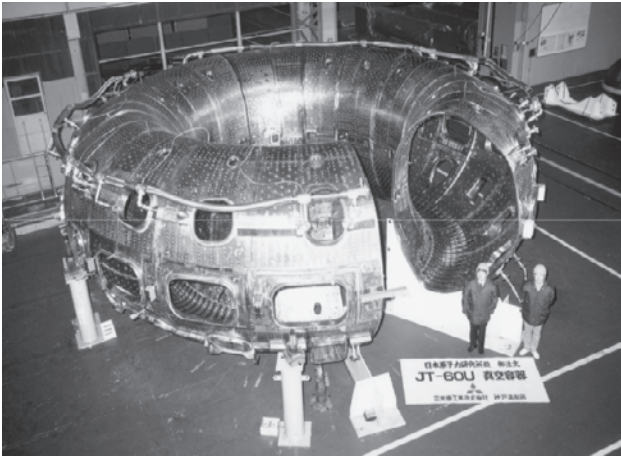


図5 JT-60U 真空容器(工場完成)(提供: 日本原子力研究開発機構)。

類の荷重条件で疲労強度、破壊試験を行って、二重壁構造の真空容器の健全性を実証した。この試験は、疲労破壊を引き起こす要因の一つである溶接部の応力集中係数が溶接形状で異なり、計算では求めることが難しいために実施したが、設計では安易に計算を信用するのではなく、特に初めて開拓する構造物の健全性には実験による裏づけが欠かせないことも意味している。

誘導電流・電磁力解析には最も多くの労力を費やした。と言うのも構造解析のメッシュに対応する電磁力の解析、1 ms 未満の時間刻みで計算する動的挙動解析への電磁力の時間刻みの入力、人力に頼らざるを得なかったためである。この電磁力解析を含む強度解析にあたっては、試行錯誤を繰り返しながらも実験データに裏打ちされた荷重や異方性の剛性値の入力と解析に、数人の設計者が1年以上にわたり毎日夜遅くまで専念するという力業であった。これも与えられた期間内に解を見出さなければならないという条件下では、不可避の仕事である。新技術の開拓の多くが、技術者の新領域に挑戦する情熱と弛まぬ努力に支えられていることを物語っている。

真空容器の製造技術では、寸法精度の確保のためにいくつかの工法を開発した。

まず寸法精度の確保に大きな役割を果たしたのが「ホットサイジング」「サンドイッチ工法」「角管の曲げ工法」である。「ホットサイジング」は二重壁の内板・外板の三次元熱間曲げ加工の後に、その形を拘束した状態で高温を維持し、スプリングバックを低減させる工法である。その際、内板と外板の間に一定厚さの金属板を挟み、三重層の「サンドイッチ工法」で熱間加工とホットサイジングを行った。これまで小型の部材での経験はあったが、真空容器を上下2分割した大型部材の工法は初めての試みであった。「角管の曲げ工法」は、断面を变形させずに精度よく曲げ加工するために、角管を引張りながら型に沿って曲げる工法である。これらの技術開発により、十分な寸法精度を確保し、その後の内板と角管との溶接、外板と角管とのスロット溶接が容易になった。また、外板と角管とのスロット溶接以外の部分でもその間隙を最小化でき、冷却材流路の適用を可能にした。

もう一つの特筆すべき製造技術は、三次元のロボット機能を持った研磨剤入り高圧噴流水(AJ: Abrasive Jet)によるポート孔やスロット溶接用孔の自動加工技術の開発である。当時、機械加工以外の金属の切断方法といえばガス切断やプラズマ切断であったが、切断面が粗雑なため2次加工が必須であった。そこで当時一般にはほとんど知られていなかったAJに着目し、インコネル625を用いて試験を行い、最適な加工条件を割り出して機械加工などの2次加工なしに切断・穴あけができることを確認した。また、工期短縮の制約からAJの自動化も必須であった。そこで当時はまだ大型構造物への適用例がなかったCAD/CAM(Computer Aided Machining)装置に挑戦し、三次元のロボット機能を持たせたAJ自動システムを開発した。これも工期厳守という制約が生み出した技術革新の一つと言える。

真空容器の支持方式は、300℃のベーキング時には約20 mmの変位を円滑に摺動させる一方、電気絶縁を保持しながら自重だけでなく、ディスラプション時に発生する、一支持ロッドあたり0.6 MNの電磁力の衝撃にも耐えなければならない。特にディスラプション時の摺動特性であるpV値(面圧×摺動速度)は、当時工業界で実績のあった値を約50倍も上回るため、MoS₂やCr₃C₂など6種類の摺動材料を使って耐磨耗試験を行い、最終的にDUメタルを選定した[12]。さらには、摺動面を鏡面仕上げするなど、均一な面圧を得る工夫を行った。

一方、ベーキング時に均一なベーキング温度を確保するためには、できるだけ均一な流量での加熱が必須である。しかし、各種ポート部や支持ロッド部では流路が複雑になり、分岐・合流の流路構成を採用せざるをえなかった。そのため数種類の分岐・合流の流路モデルを製作し、流動試験を行って流動損失係数を取得した。そのデータを基に、各流路間での均一な流量を確保するため、流路の途中に適宜オリフィスを設けた。

真空容器の製作途上で開発されたこれらの技術は、他分野でも活用されている。

ホットサイジング技術は、原子力分野で製作された、高さや幅が約6 mの大型ジルコニウム製容器の加工に適用され、時効を起こすことなく高精度の容器を製作することができるようになった。また、ロケット胴体の製作にはJT-60Uで試みられた電子ビーム溶接の応用技術を適用し、工期短縮とコストダウンに寄与した。その他、CAD/CAMによる設計・製造技術は、その後、他分野でも汎用的に使われるようになり、角管の曲げ加工技術は、各種配管の高精度曲げに適用され、AJも各種原子力部材の切断加工手段として使用されるようになった。

3.2 ヘリカル装置

ヘリカル系の真空容器はヘリカルコイルとの相互関係が深い。初期のヘリカル型核融合装置(JIPP-I, JIPP T-II, ヘリオトロンDなど)では、円形断面の単純トラス管を用いていた。JIPP-I, T-IIでは真空容器を巻芯としてコイルを真空容器外に、ヘリオトロンDではヘリカルコイルを真空容器内部に包含する構造としている。ヘリカル系のプラ

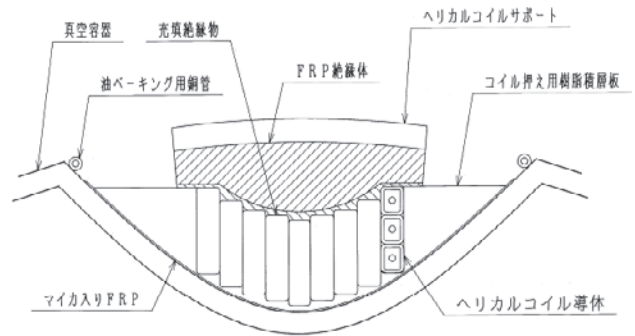
ズマは、ポロイダル断面で楕円形の磁気面に沿ったものとなり、単純トラス管の真空容器では長径方向端部が真空容器と干渉するなどして、外部コイルのみで磁気面を形成できるヘリカル系の利点を十分生かすことが難しくなる。また真空容器内部にヘリカルコイルを設置する方式では、装置寸法が大きくなることと、必要な起磁力の確保が困難となる。プラズマ性能の向上から低アスペクト化の指向もあって、真空容器はヘリカルコイル用の溝を確保した非円形断面のトラス管に移行した。ここでは、ヘリオトロン E, CHS, LHD, ヘリオトロン J の真空容器製造に関して技術の変遷を記す。

ヘリオトロン E は真空容器にヘリカルコイルの溝を設けた最初の装置である [13]。この規模で同じプラズマ体積を得ようとした場合、ヘリカル溝を設けた場合では単純トラスの真空容器にヘリカルコイルを巻くよりヘリカルコイル物量あたりのプラズマ体積比で 40% 以上改善できる。

図 6 はヘリカルコイルの進行方向に直角の断面を示したものである。ポロイダル断面では直線状で示されるヘリカル溝の板も、ヘリカル状にうねった曲面である。ヘリカル溝はコイルの巻芯を兼ねており、高い形状精度が要求される。三次元精密型を用いた熱間プレス成型で製作した部片 190 枚からなる。真空容器のポロイダル断面は概ね 820 mm × 430 mm で振れており、セクタ分割で溶接していくとプロファイルの修正が難しい。そこでトラス環の水平中心面で上下に二分割し製作し、内外面のプロファイル精度を確保した後、上下のあわせ面を、最大出力 110 kW の電子ビーム溶接 (EBW, 後述) を適用して所定精度の真空容器を製作した [14]。溶接変形の最も少ない EBW の特徴を生かしたものである。

CHS では、より太ったヘリカル系プラズマ (低アスペクト比: $R/a = 5$) の研究を狙った装置である。薄板の溶接構造ではヘリカルコイルの巻芯としての寸法精度が期待できないことから、ブロックからの削り出し方式を採用した [15]。素材は加工中の透磁率増加を回避するため、窒素添加オーステナイトステンレス鋼製鍛造成形品を用いた。大筋の製作手順は、①内外面の堅旋盤粗加工 (上下 2 枚)、② 90 度セクタに切断 (全 8 分割)、③外面, 内面の NC 機械加工及びポートの穴あけ、④ポロイダル面溶接 (180 度セクタに)、⑤水平面溶接 (トラス 2 分割)、⑥溶体化処理 (熱処理の一種, ここでは加工による透磁率の上昇を防ぐ)、⑦ヘリカル溝仕上げ加工、⑧分割部ベローズ挿入・溶接 (トラス管一体) の順である。図 7 に 8 分割段階での機械加工状況写真を示す。分割部のベローズは周回抵抗 1 mΩ を確保するもので、楕円断面形状で、ヘリカル溝に適合する様に両端部では若干の振りを設けてある。

大型ヘリカル装置 (LHD) [16, 17] は超伝導磁石を採用しており、真空容器とヘリカルコイルとは独立に支持されているが、複雑に絡み合った構造になる。ダイバータ領域の空間を確保するように、プラズマ断面の長径延長側に膨らみを設けた形状で、ヘリオトロン E の真空容器よりも複雑な立体形状となっている。現地におけるヘリカルコイル巻き線終了後に、分割された真空容器の部片をヘリカルコ



注: 略語説明 FRP (ガラス繊維強化プラスチック)

図 6 ヘリオトロン E ヘリカル溝, ヘリカルコイル断面図 [18].

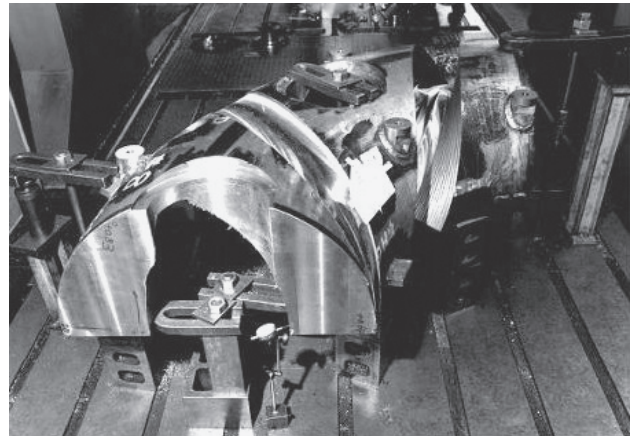


図 7 CHS 真空容器 NC 加工状況.

ルのピッチ間に挿入し、部片を溶接することで一体としている。ヘリカルコイルの巻芯 (円管状の治具) を基準に真空容器の外周部より組立溶接を開始し、外周部の作業完了後に巻芯を細く分割し撤去した。ヘリカルコイル直下の部片は、あらかじめ輻射シールドを取りつけた後ポート開口部より搬入し、組立溶接を進めた。狭隘部での作業であり、これらの部片のハンドリングには 3D-CAD での検討が功を奏した。

真空容器の部片の製作には、従来の精密型を用いた熱間プレス加工と併用して、多数のポンチを設けたプレス装置を新たに開発し適用した [18]。当時この方法は造船業で船体外板の二次元的な成形に適用を試みていたが、ヘリカル装置用では三次元曲面の振じれ形状成形が必要となる。ポンチにかかる横荷重、成形品のしわ・圧痕の回避法、スプリングバックや成形後の素材切断時の変形、等の課題を解決し実用化した。図 8 に多点プレス装置を示す。プレスの容量は 550 トン相当で、板の最大加工寸法は 1.4 m × 1.2 m、板厚約 20 mm で、ストロークは 0.5 m である。上下のポンチ群は必要とされる部片の形状に合わせて各々数値制御され、多様な曲面の製造を可能とした。部片ごとに準備する絞り型の数を減らすことができ、生産性の向上に寄与した。

輻射シールドと組み合わせた真空容器部片 (工場完成状態) を図 9 に示す。真空容器内面にはベキングおよび除熱のための水の流路として、ステンレスの門形鋼を溶接により取りつけた。曲面への施工であり、第一壁設置との整

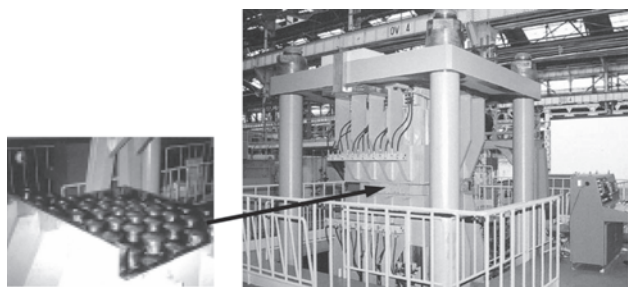


図8 多点プレス装置 全景とポンチ群.

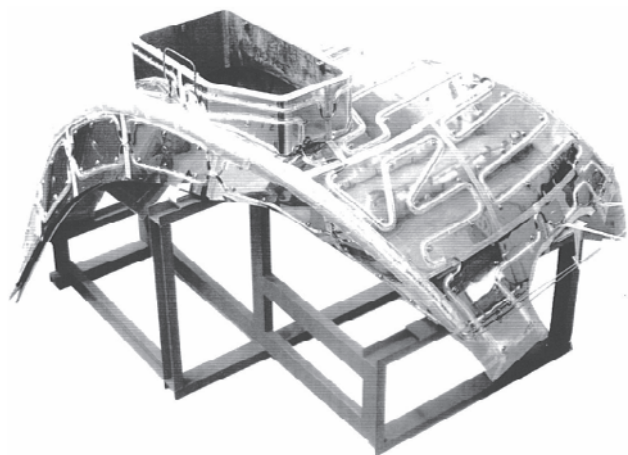


図9 LHD 真空容器部片.

合性および真空容器の変形防止に細心の注意を払い実施した。真空容器に取りつけた輻射シールド板とヘリカルコイル容器との間隙は、ヘリカルコイルの副半径インボード側で最も狭く図示上でも 20 mm 程度しか確保できていない。真空容器の現地の組立溶接では、プレス成形した真空容器部片が溶接時の入熱により歪が開放され、溶接の進捗につれて当該間隙が狭くなった。ヘリカルコイル容器と輻射シールド板の接触は避けなければならない。組立溶接の最終段階、特に冷却流路溶接の段階では、当該間隙は溶接施工側（プラズマ真空容器内側）からは見られない。完成済みのヘリカルコイルのシェルアームと支持シェルの、やっと一人が入れる狭空間に QC マンが断熱真空容器側より潜りこみ、日々当該間隙の寸法測定を行った。この結果を元に、真空容器の変形が極力分散・平均化するように、日々の溶接位置や溶接量を検討し施工を進めた。その結果、真空容器最終組立完了後の輻射シールド板とヘリカルコイル容器間の必要最小間隙を確保できた。

ヘリオトロン J は CHS と同様にリング状の鍛造材から内外面を全面機械加工による製法を踏襲しているが、3D-CAD の進展・適用により、さらに複雑な形状の構造物

に対応可能とした。

各々の真空容器、特にヘリカル溝の製造に注目した特徴を表 1 に纏める。

3.3 ITER 実機大セクターモデル R&D

ITER EDA 期間中に 7 大工 R&D の一つとして実施されたものである [19, 20]。

ITER 真空容器は断面形状が D 形で、縦 15 m、横幅 9 m の二重壁トーラス容器である。ポート中央部で分割された 18 度セクタを工場生産し、現地にてトロイダル磁場コイルと真空容器セクタを交互に据えつけ溶接し、トーラス容器を構成するものである。

R&D では国際分担調達を想定して、9 度相当の真空容器セクタ A および B をそれぞれ日本国内二社（日立製作所、東芝）が、延長ポートをロシアが担当した。セクタ A、B はポート中央面をはさんで鏡対象である。一つの容器を作る場合はプロセスを統一して品質管理することが一般的であるが、製造設備・容量・技術の異なる 2 社が、各々が異なる生産技術を駆使して取り組んだ。ITER の国際分業を想定した新たな試みであった。

二重壁構造の製作に関しては、内壁とリブの溶接は隔壁としての信頼性担保のため完全溶け込み溶接が要請され、リブと外壁との溶接は二重壁間に遮蔽体を設置することから外側からのみの接近との条件が課せられた。セクタ A は電子ビーム溶接（EBW）、セクタ B は狭開先 TIG/MIG 溶接を用いている。図 10 に両方式の二重壁溶接の継手構造を示す。セクタ A は設備制限からポロイダル方向を 9 分割とし、EBW の低歪性の利点を生かし拘束治具を合理化した。セクタ B は対称性の良い 4 分割とし、溶接歪を制御するため高剛性の治具により内壁側を拘束するとともに、自走式溶接ロボットを開発し生産性を高めた。両セクタとも寸法精度は、目標 ±5 mm に対し ±3 mm を確保し、溶接構造物としては破格の精度を達成した。

本 R&D のハイライトは現地の建設を模擬したセクタ A、B の接合である。図 11 は架台へ据付途上（セクタ A）を示すものである。ITER のトカマク組立手順からは、外壁、内壁共にプラズマ側からの接近に限定される。溶接は狭開先 TIG 方式で、外壁は突合せ開先、内壁はスプライス板（セクタ A、B の内壁は、外壁を溶接するために空間を空けている。この空間をつなぐ板でポロイダル方向に分割している。）を挿入する。いずれも内壁に設けたレール上を自走するビークル型自動溶接機を外壁用と内壁用を別個に開発した。外壁と内壁の間隙は 180 mm から約 1 m 弱奥まった位置にあるため、溶接トーチを外壁に接近させる機構（Z 軸アーム）を設けた。溶接トーチの動き、開先の做い機構の方法は別々の方式を採用したが、全姿勢溶接で溶着量 30 g

表 1 ヘリカル系真空容器製造における特徴.

装置 (完成年)	Heliotron-E (1980年)	CHS (1988年)	LHD (1998年)	Heliotron-J (2000年)
主/コイル副半径	2.2 m / 0.293 m	1.0 m / 0.313	3.9 m / 0.975 m	1.2 m / 0.22 m
ヘリカル溝形成	精密プレス型成型,	リング鍛造材 内外面 NC 加工	3 次元多点プレス適用	リング鍛造材 内外面 NC 加工
その他特徴	電子ビーム溶接適用	非円形振れベローズ	3D-CAD 適用	3D-CAD 高度適用

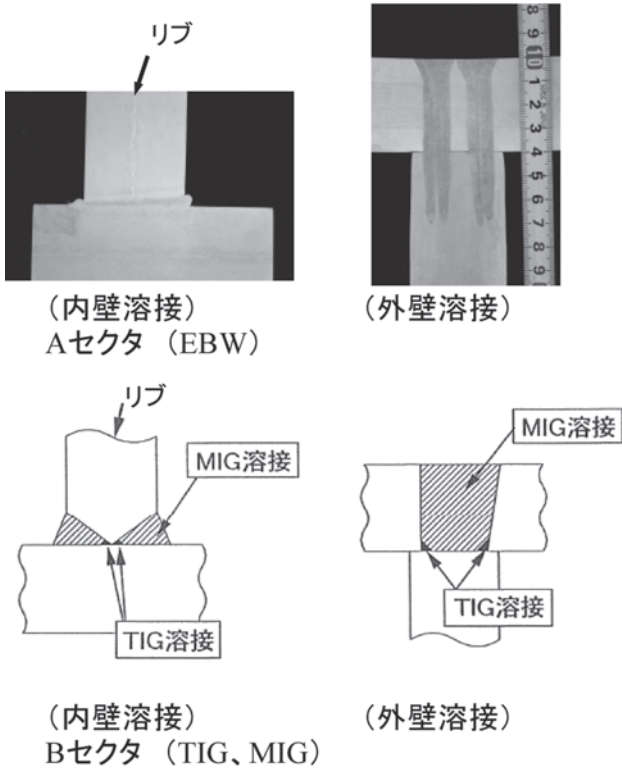


図10 ITER 真空容器二重壁溶接の継手構造比較。



図11 ITER 真空容器 実機大セクタモデル (Aセクタ)。

/minを目標とした。内壁溶接では限られた空間内でのスプライス板のハンドリンクおよび仮固定に工夫を凝らした。

溶接は片方のセクタのみを架台に拘束し、一方を自由にした状態で進め、溶接パスごとに収縮量、角度変位、D形断面形状を計測管理した。溶接による収縮は外壁溶接が支配的で約5 mm、D形断面の変形量は、上下方向は剛性が高く約1 mm、水平方向が約5 mmの結果が得られ、真空容器の現地据付模擬の実証が達成された。

4. 電磁石・常伝導コイル

4.1 トカマク装置 (JT-60, JT-60U)

JT-60Uでは、JT-60のトロイダル磁場コイルを流用、ポロイダル磁場コイルもJT-60と類似であるので、ここでは主としてJT-60について記述する。

(1) トロイダル磁場コイル

JT-60のトロイダル磁場コイルは、18個の単位コイルから構成され、プラズマ中心半径3.0 mの位置にて4.5 Tの磁束密度を発生させるため、67.5 MATの起磁力を有している。JT-60では、真空容器の断面が横長の卵形をしているため、トロイダル磁場コイルの配列中心半径は3.32 mになり、トロイダル磁場コイルの磁気エネルギーは2.8 GJで同世代の米国のTFTRの約2倍である[21]。

これに伴い、トロイダル磁場コイル全体として、約1 GNの中心支柱方向への向心力、約3 GNの単位コイルを押し広げようとするフープ力、さらに、ポロイダル磁場による単位コイルを押し倒そうとする転倒力、温度上昇による熱膨張、熱応力等が重畳して加えられる。

これらに耐える1個の単位コイルは、2個のパンケーキ形コイルを、外径約6 mの補強枠の中に磁気中心を合わせて収納したものである[22]。各パンケーキ形コイルの導体は、冷間圧延無酸素銅材および0.2%銀入銅を半周ごとにろう付接続した36ターンから構成されている。単位コイルの外観写真を図12に示す。導体と絶縁物が同時に強度部材であり、補強枠材も高強度で低透磁率ということが要求される。

これらの要求に対し、導体の銅材自身を、通常使用しない塑性域まで含む強度限界まで使用する必要が生じた。しかし、熱履歴や加工や成分により弾性域が大幅に変化する銅材を強度部材として塑性域まで使用した経験がなく、設計強度評価基準もなかった。いろいろな議論の結果、単純な引張力の場合は塑性域まで使うと永久変形が生ずるため、弾性域に抑えるべきだが、熱応力のように変形すると応力が緩和される場合は塑性域でも支障はない、また、製作時に予め高い応力を加え加工硬化させ弾性域を増すことが出来れば使用範囲を広げられる等が結論づけられた。疲労強度についてはテストピース試験結果にばらつき等を考慮した所定の安全率を設定する等、ASME圧力容器の鋼材に対する評価基準を参考にしながら、銅材の弾塑性や加工硬化を考慮した評価基準を新たに作成し、ようやく設計強度評価にこぎつけることができた。

大断面導体接続部の強度確保のためには、従来の通電断面面積確保には必要でなかった全面全ろう付けが必要となり、かつ、ろう付け面積にばらつきのない信頼性が必要のため、試行錯誤の末、大容量高周波(1 kHz)ろう付機、新ろう材、自動超音波探傷装置による全面検査等の技術が開発された。

また、導体として、ろう付等の熱履歴、巻線加工等の後の強度低下の少ない0.2%銀入銅等の大型導体の製造には、電線会社の設備から新設せねばならなかったが、JT-60という重要なプロジェクトのため、関係者の協力を得て完

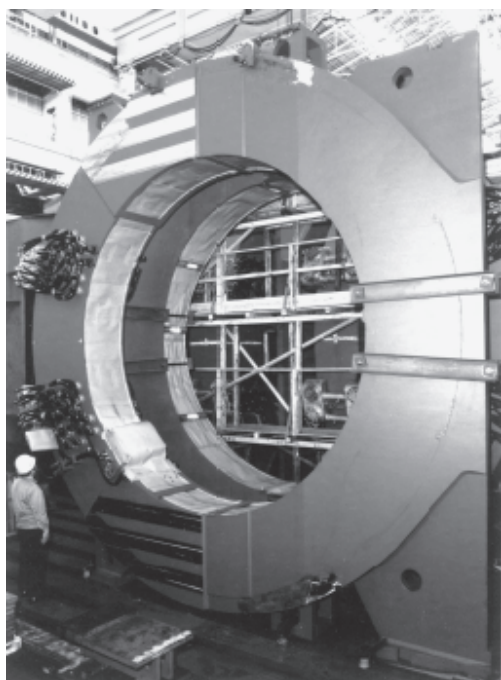


図12 JT-60トロイダル磁場コイル 完成写真。

遂することができた。

その大型導体に溝を加工し、そこに冷却水を通す小型の中空導体を嵌入し、はんだ付けで接合させるのであるが、運転時に接合強度不足になるわずかな場所が存在することが計算により発見され、その部分のはんだの剥離が健全なはんだ付けの部分にまで進展する恐れがあることが判明した。このため、その部分のみは、冷却より強度を優先させ、はんだ付けをしなない等、しらみつぶしの検討と細かい苦心が織り込まれた巻線技術が開発され実施された[23]。

ターン間の絶縁物としては、向心力とフープ力による圧縮力、転倒力によるターン間のせん断力に耐えるように開発された両面ガラス不織布ポリアミド積層シートを挿入し、その後、加熱締付固化させ高寸法精度パンケーキ形コイルとする製作方法が採られた[24]。

強大なフープ力に対して、パンケーキ形コイルの巻き端部は、通常の構造では、そのフープ力に耐えられず、巻き端から剥離してしまうことが計算上判明した。そこで、巻き端から数十 cm 内側の所に通電端子を接合して通電回路を確保し、そこから巻き端部側は導体をテーパ形状にし、そのテーパ形状と絶縁の厚さの変化を、フープ力に対する絶縁物のせん断応力許容値以下に最適化して設定する技術開発も行われた[25]。

単位コイルの最外部は、絶縁耐力と機械的強度と高寸法精度が要求される。強度設計者は強度の高いガラステープを主張し、絶縁設計者は絶縁耐力の高いマイカテープを主張した。この議論の中から、ガラス裏打ち集マイカテープが開発使用され、さらにその外側に機械的強度を確保するガラステープを、いずれもプリプレグ材の状態で巻き付け、巻き付け後、一体成形することにより、絶縁耐力と機械的強度と寸法精度を同時に確保する方法が採用され、製造設備も新たに設置された。

補強材としては、通常のステンレス鋼では、強度的に耐えないばかりか、溶接部が磁性化し適用ができない。高ニッケル鋼はコスト的に採用できない。そこで、これらの要求を満たす、高強度で、溶接や加工に対して低透磁率を確保できる高マンガン非磁性鋼を、鉄鋼会社に設備新設してまでの協力を受け、開発使用することができた。特に、0.2%耐力650 MPa、引張強さ900 MPaの最も強度を要する部分では、18Mn 5 Cr 鋼材を熱間鍛造・溶体化処理・冷間加工することにより、高強度と比透磁率1.02を達成した。

ところが、この材料を削ってみると、粘り強く削り難いばかりか、削った表面が0.1 mm程度の深さで加工硬化してしまい、通常の工具では加工できず、摩耗した工具の山を築く結果となった。特に穴あけ加工の場合、ドリルの先端部のように少しずつ擦り取る方法では、擦り取った次の部分の表面が加工硬化し、ドリルが進まない。そこで、考案されたのが、穴の周辺部のみリング状に正面から削り取る超硬刃先を有する超硬トレパニングカッタという工具であり、その後、他にもいろいろ使用されるようになっていく。

補強材の厚板溶接は溶接変形の少ないことが要求されたため、ビーム出力110 kW、溶接深さ200 mmの低ひずみ・高強度の電子ビーム溶接装置が開発され、真空室内での溶接が行われた。これについては、詳細後述する。

トロイダル磁場コイル全体のコイルの巨大な向心力、転倒力による振れに対しては、これらに耐えながら熱膨張に追従する輪切り状の中心支柱が開発された。また転倒力の支持は、これをJT-60本体機器内のみで行おうとすると、上下架台を強固に連結する必要が生じ、大口径ポート等は設置できなくなってしまうことがわかった。この解決策として、水力発電所の経験豊かな技術者が編み出した構造が、上架台から建屋壁面へビーム（梁）で連結する方式（星形トラス）である。本方式の採用により、大口径のプラズマ加熱および計測ポートの設置がようやく可能になった。建屋側への負担も、埋め込み金具近傍の鉄筋を増やす程度の僅かな補強で対応できることがわかり、胸をなでおろした。

上記以外にも、徹底した解析計算が行われたが、これらを実物にて検証して、確認することも行われた。すなわち、最初に製作したパンケーキにて、電磁力および熱サイクルを模擬した実負荷試験を実施した[26]。加重には油圧ジャッキを用い、フープ力、向心力、転倒力をそれぞれ印加した。図13に試験実施状況を示す。

JT-60Uへの大電流化改造に際しトロイダル磁場コイルは流用されたが、増大する転倒力に対し、隣接するコイル2個の補強材の先端部を据付途上で溶接接合する補強策を実施した。

なお、1個で100トンにもなる単位コイルや真空容器等の大物を、製造された日立製作所・日立工場から、那珂研究所まで輸送するには、JT-60輸送作戦が実施された。この経路では、地元のご了解を得て、夜間の限られた時間に、一般の通行を遮断し、大型トレーラーの通行に支障となる信号機や歩道橋を一時移動、輸送直後復旧という緊張した作業をせざるをえなかった。また、経路にある久慈川の橋梁の重量制限に対しては、河口の北側の日立埠頭から、南

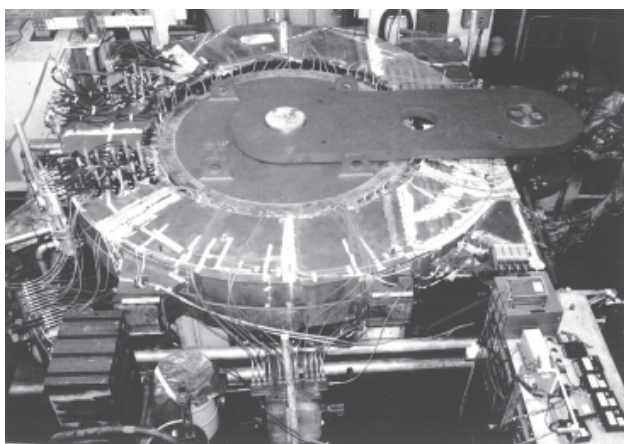


図13 JT-60 トロイダル磁場コイル 荷重試験.

側の東海埠頭まで、1 km 程度の距離を貨物船で輸送することで切り抜けた。これら、運輸会社と一体となった糸乱れぬ輸送作戦も、JT-60 建設の底辺を支えた技術のひとつである。

以上のごとく、既存技術とその技術者を総動員し、解析計算、製造設備開発、試作、実物での確認等、徹底した技術開発により製品信頼性の作り込みがなされた結果、当初、耐用期間10年間とされたJT-60 建設当初のトロイダル磁場コイルが、JT-60Uにも流用されて、通算23年間のその使命を全うできたものと考えられる。

(2) ポロイダル磁場コイル

JT-60 のポロイダル磁場コイルは、いずれもトロイダル磁場コイルの内部にあり、真空容器外には、空心変流器コイル、垂直磁場コイル、水平磁場コイル、四重極磁場コイル、真空容器内には、磁気リミタコイル(JT-60Uでは、真空容器外)が配置される。空心変流器コイルは、最大起磁力 5.5 MAT, 最高使用電圧 30 kV を有する[27]。

これらの各コイルは、トロイダル磁場コイルとの鎖交を可能にするために、トロイダル磁場コイルの据付後に現地にて接続することが必要となる。導体構造例を図14に示す。輸送制限から小半径コイルはC形状、大半径コイルは180度相当の半ターンごとに製作される。図は大口径コイルの1ターン分を示したものである。

これらの現地接続部(分解部)も含めて、電磁力に耐える高強度でありながら熱膨張を吸収し、しかも高寸法精度の維持、高耐電圧絶縁等が要求される[28]。

これらに対し、トロイダル磁場コイルのところで述べた新技術に加えて、次のような新技術が開発された。

まず、直径約 10 m, 断面積約 50 cm²の大型コイル導体製作において、必要強度を維持しつつ変形の少ない溶接技術が開発された。(JT-60Uでは部分真空電子ビーム溶接を適用)また、フープ力に対し口出し部分が巻きほどけないようにするため、導体に下駄の歯のような互いに変形を拘束する構造も採用された。

真空容器外コイルの支持枠においては、コイルとの熱膨張差を吸収しながら、コイルを支持する高マンガン非磁性鋼製のスリーブ付きの構造で、かつ、ポートとの干渉を避ける配置が考案された。真空容器内の磁気リミタコイル

[29]においては、500℃まで温度上昇する真空容器との熱膨張差を耐摩耗性黒鉛で摺動吸収させながら、コイルを支持し、かつ、コイルを真空に曝さないようベローズを有する筒状のケースに收容する構造が編み出された。図15に磁気リミタコイルを示す。

トロイダル磁場コイルと鎖交して設置する方法として、真空容器およびポロイダル磁場コイルを、トロイダル磁場コイルを挿入する1か所(分解部)を除き設定した後、その分解部から、トロイダル磁場コイルを挿入、狭隘な空間を円周状に移動させ、所定の位置に設定し、その後、分解部のポロイダル磁場コイルを接続するという組立方法が採用された。

狭隘な分解部のコイル導体を接続し、かつ、熱影響による導体の軟化を最小限に抑えるためには、大電流パルス

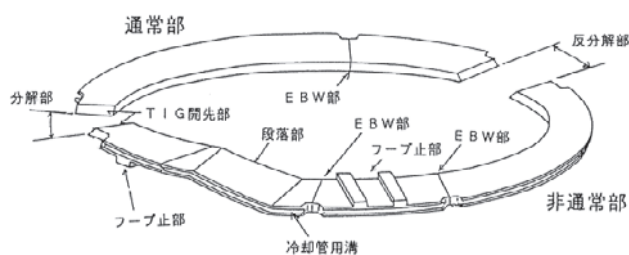
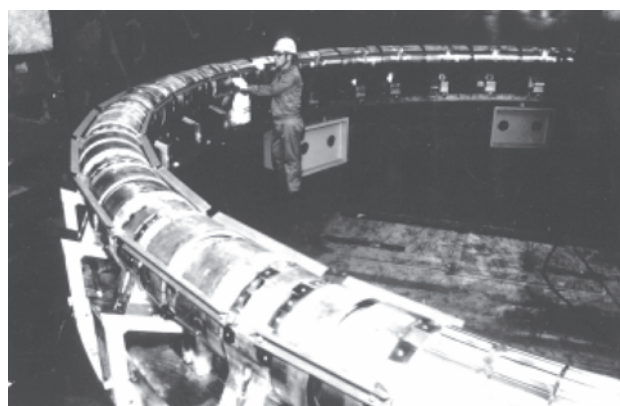
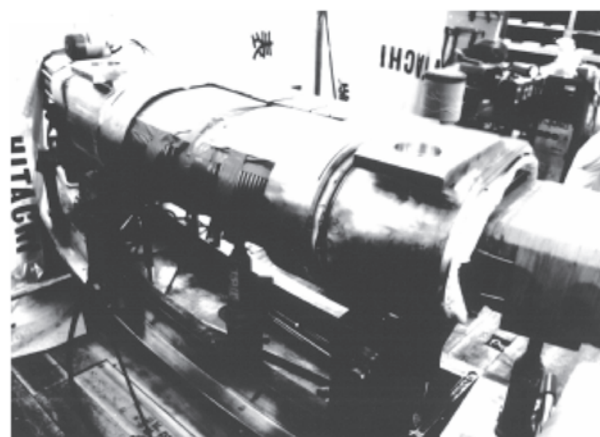


図14 JT-60 ポロイダル磁場コイル 構造模式図.



A) 完成写真



B) 保護管の取り付け状況

図15 JT-60 磁気リミタコイル.

TIG(タングステン不活性ガス)溶接が開発された。溶接部の大断面超音波探傷技術および高耐電圧、高耐ひずみ絶縁材料による絶縁技術も開発されたが[30]、いずれも最後は作業者の腕に頼らざるをえないところも少なくなかった。

これらのうち、特に作業条件の悪い、分解部の狭隘空間での導体接続の1人作業を行うために、接続作業には、技能五輪出場者も含めた精鋭を6か月以上の訓練のうえ認定した。

孤独な環境のなかで、約7か月間、接続作業を続け、検査で見えないような些小なミスも自ら申告し、自分のミスは何としても自分で直すという姿勢で、結果において、不良ゼロで完遂した作業者の技能とモラルの高さには、今でも頭の下がる思いである。

今後も、このような技能と心を持った技能者を育成し、引き継いでいくことが必要であり、来たるべき国際協力においても、他国には真似のできない日本の力を発揮すべきところと思われる。

4.2 ヘリカル装置

ヘリカルコイルは形状が複雑で、プラズマに近接して設置されることから、不整磁場の発生を極力低減する必要がある。このためコイルの寸法・形状精度とともに、トロイダル磁場コイルとの鎖交、輸送上の制限等による分割部のコイル導体間接続や、給電構造に特別の配慮が必要である。初期のヘリカル装置では製作上の困難さから、大電流・小ターン・単層のコイル構造(例えば、Heliotron-Dでは円形断面中空導体の1ターンコイル)がとられた。

JIPP-1[31]では第1ステップで極数3のヘリカルコイルが用いられた。導体は矩形の中空導体で直接水冷方式が採用されている。分割部における導体接続および冷却水供給の観点から導体配列は横一層で、マルチターン化(9ターン)している。接続は導体断面寸法の範囲内で接続片ボルト締結方式とし、電流の迂回を極力回避する構造としている。またコイルの給電は同軸構造を採用し不整磁場の影響を極小とすることに努めている。しかし分割部のボルト締結方式は、機械的・熱的および絶縁の面で構造上の弱点となった。ヘリカルコイルの電磁力支持は、随所に配列したリング状の締輪で溝からの逸脱を押さえた。

第2ステップでは極数3と極数2の二階建てのヘリカルコイルに置き換えられた。内層側の極数3コイルは外層側の極数2コイルに覆われている。したがって極数3コイルは分割部での接続作業の空間が確保できないのでここで折り返す構造とし、かつポロイダル断面内の渡り部は対向側と電流方向を相互に打ち消す方式とし、プラズマ表面に直角方向のダイポール成分の不整磁場を回避する二段重ね構造とした。図16に内層コイルの写真を示す。この分割構造の概念はTRIAM-1M(後述)のポロイダル磁場コイル(フラクショナルターン構造)に生かされている。

ヘリカルコイルの形状精度を左右するヘリカル溝は、FRP製絶縁ブロックより削り出した部片を、巻芯上に精度よく配列して形成した。このブロック加工は多軸数値制御加工機により加工しヘリカル溝の精度を確保した。多軸数値制御加工機は、当時(1960年代末期)はまだ産業界には

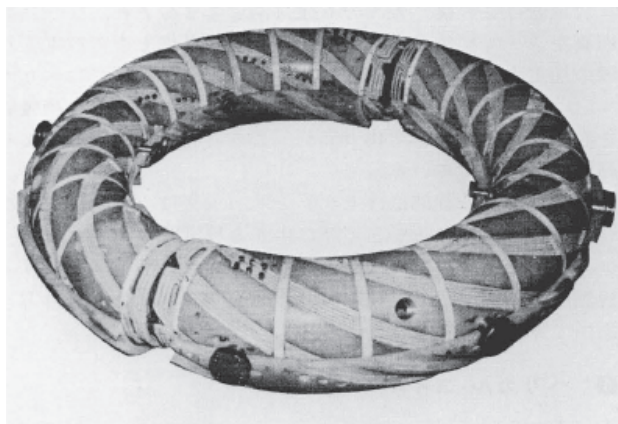


図16 JIPP-1 内層コイル (極数3)[31].

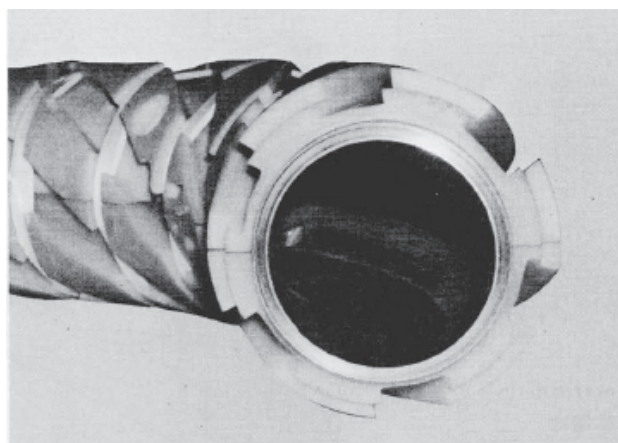


図17 JIPP-1 ヘリカルコイル溝 (2層構造)[31].

普及しておらず、ある研究機関に導入された加工機を利用した。図17に巻棒を示す。

JIPP-1でのヘリカルコイルの構造概念および製造技術は、接続部がボルト締結から銀ロウ付けに進化した。その後のヘリオトロンEおよびJ、JIPP T-IIのヘリカルコイルに受け継がれている。

ヘリオトロンEの特徴は、真空容器にヘリカル溝を設けたことである(前述)[13]。ヘリカルコイルは分割部の組立作業性を考慮して、JIPP-1と同様に一層で横に9ターンの導体配列としている。ただし1ターンは電流値129 kA(矩形換算通電時間1.3 s)による昇温に対応するため、矩形断面の中空導体を3本持ちとして、直接水冷方式としている。コイルの形状精度を確保するために、NC工作機で加工したポロイダル方向上下半ターン相当分の精密金型を用いて導体を成形した。これを真空容器のヘリカル溝中に設定し、上下半ターンを逐次高周波ロウ付けで接続した。この接合および絶縁は狭隘部で作業性の厳しい条件下であったが、漏水防止のためロウ付けの品質に完璧を期す困難なものであった。高周波ロウ付け用加熱コイルは、ロウ付け後簡便に取り外しが可能な構造とし、次のターン接続に再利用できるものとするのが一般的である。しかしヘリカル溝内の空間制限のため繰り返し使用可能な加熱用コイルが使用できず、導体接続一本ごとに小型の加熱コイルを巻きつけ、一本接続するごとに加熱コイルを切断・廃棄せざる

を得なかった。

ヘリカルコイルの支持は、先行機に比べ規模が大きく運転条件も厳しくなり、離散的支持方式では電磁力および熱膨張に耐えられない。ヘリカルコイルの外周全周にFRP製スペーサを介してステンレス製の押え板（ヘリカルコイルサポート）を設け、これをヘリカル状に連結して支持した。

CHS[15]は低アスペクト比を狙った装置である。それまでのヘリカルコイルとは異なる構造概念を用いた。図18にヘリカルコイルの断面図を示す。凸になった側がプラズマに近いインボード側（副半径方向）であり、コイル電流中心をできるだけプラズマに近接させるものである。先行機に比べ圧倒的にターン数が多い。この狙いは、コイルの空間占有率を高め、コイル内部での渡り・段落で生ずる不整磁場を低減することである。ヘリカル溝（前述）は壁面全面にFRP絶縁板を対地絶縁として接着（銅貼り絶縁）し、再度全面機械加工を施し巻芯としての精度を高めた。

コイルの巻き線方法はダブルパンケーキ巻（ヘリカルコイルは立体的軌跡をとるが、断面で見るとダブルパンケーキ巻と同じとなる。）とし、副半径インボード側に段落部を設け、2本の導体を順次アウトボード側へ積み上げていく方式である。アウトボード側に給電部および冷却水供給部が出る。横方向には10ダブルパンケーキが配列されている。導体は7.4 mm角の比較的小断面積の中空導体を用いているが、一本物で製作できる導体長に限りがある。ヘリオトロン-Eでは中空導体を逐次口付けしてゆく方式を取ったが、作業性、空間占有率、品質保証の面で得策ではない。1ダブルパンケーキの全長は約400 m必要となる。一つのダブルパンケーキを巻くのに100 m長の導体を4本用意し、トロイダル方向4箇所（4条巻き）に段落部を配置し、同時に巻き線を進行する方法（4条巻き）とした。即ち一本の導体はトーラスを周回して元の位置に戻ったときには4本の導体を乗り越え、5段目の位置に積み上がることになる。本方式でコイル断面内での導体接続を回避でき、また冷却水の圧力損失を低くすることができた。ヘリカルコイルの巻き線作業は、計80個の導体ボビンが真空容器を取り囲み、さながら和装用組紐作業の巨大お化けの様相を体していた。図19にヘリカルコイル巻き線完了時の写真を示す。

結果として ± 0.5 mmの巻き線精度を確保し所定の磁気面を得ることができた。またこのマルチターン化の試みの成功は、次に続くLHDの超伝導ヘリカルコイル挑戦の礎になったと確信する。

5. 超伝導核融合装置

5.1 トカマク装置 (TRIAM-1M)

1986年に稼動を始めた強磁場トカマク装置 TRIAM-1M [32, 33]は化合物超伝導材 Nb_3Sn をトロイダル磁場コイルに使用した世界で初めての装置である。常伝導のポロイダル磁場コイルも含めてすべてを断熱真空容器に収めた構造をとっている。

開発にあたっては超伝導トロイダル磁場コイル自身の技術課題と断熱真空容器にすべての構造物を収納することに伴う課題が問題となった。

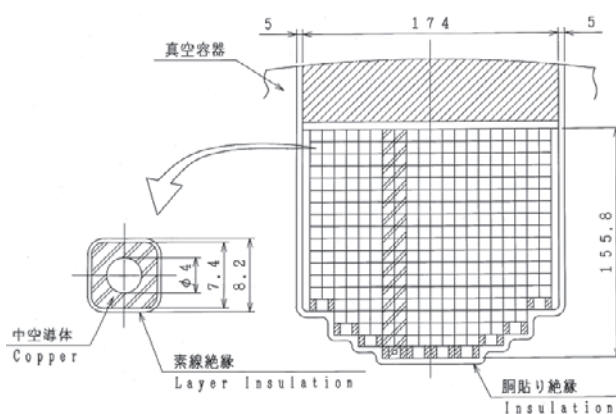


図18 CHS ヘリカルコイル断面 導体配列。

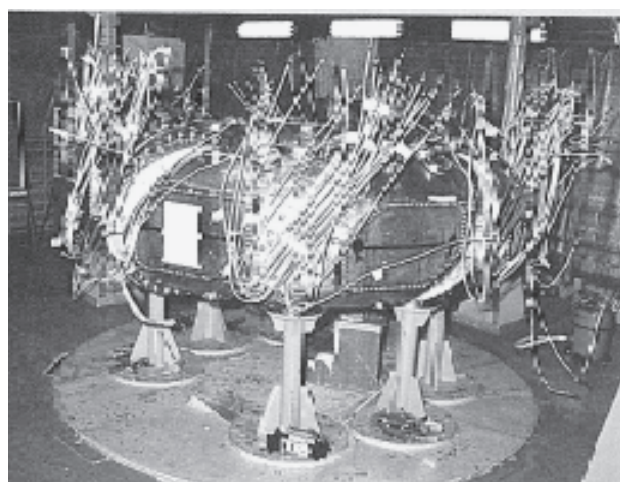


図19 CHS ヘリカルコイル 巻線完了状態。

超伝導トロイダル磁場コイルは主半径80 cmで8 Tという強力な磁場を発生させるために高電流密度が要求され、トカマク運転に伴う擾乱に耐える高い安定性を確保することが最大の課題となった。基本的には当時実績のあった浸漬冷却方式をとり、LCT (Large Coil Task) の日本コイルでも採用された高熱伝達表面処理(サーモエクスセル) [34]に加え、当時まだ一般的に用いられていなかった残留抵抗比(液体ヘリウム温度と室温の電気抵抗の比) RRRが1000という超高純度アルミニウムを安定化材として使用した。電磁力を受ける銅安定化材と一体化するためにアルミニウムの表面には銅を被せた。超伝導安定性の確保と強大な電磁力に耐えるために、コイル巻線はステンレス鋼の容器と隙間なく一体となる必要があることから非常に高精度が要求され、曲げ歪に弱い化合物線材を取り扱うために高精度の巻線機を開発した。16個のトロイダル磁場コイル(図20)の電磁力は上下の低温ベースと外周側のシアパネルにより支持されている。

安定性の要求からトロイダル磁場コイルの巻線断面積を最大限確保したため、この中に配置される真空容器(図21)とポロイダル磁場コイルは組立至難の構造となった。TRIAM-1Mの当初はトーラス一周電圧20 kVに達する乱流加熱を実施する計画であったことから真空容器の一周絶縁は高抵抗とする必要があり、非円形(D型)断面の大形セ

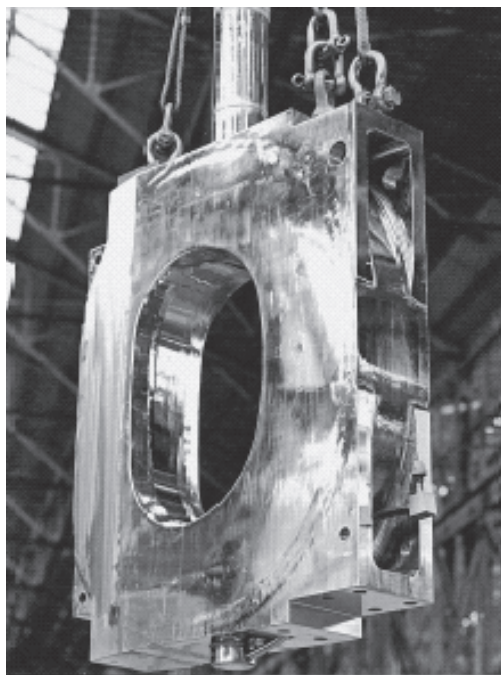


図20 TRIAM-1M 超伝導トロイダル磁場コイル。

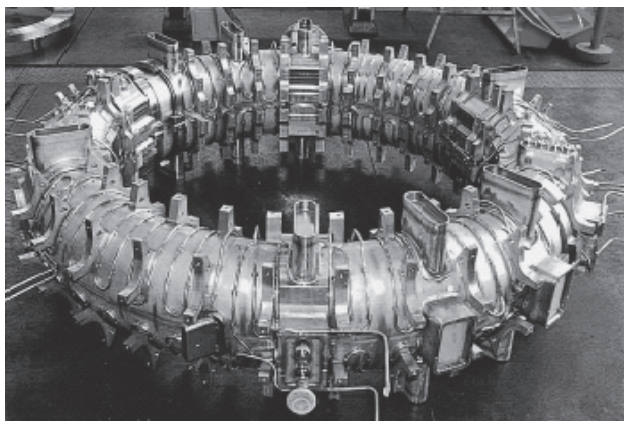


図21 TRIAM-1M 真空容器。

ラミック絶縁と保護ベローズが開発された。また、真空容器は断熱真空中で運転されるため、水冷却配管を備えている。真空容器の2分割部の結合はトロイダル磁場コイルの組合せが終了した後、内部から溶接したが、アクセスできるポートは腕がやっと入る程度の大きさであるため、光ファイバとモニタによる間接視でのシール溶接作業となった。

トロイダル磁場コイル内に配置されるポロイダル磁場コイルは通常の巻線では組立不可能であることから周方向に分割し、組立時の巻線内導体接続を排した（フラクショナルターン構造）。ただし、プラズマ近傍で導体を組み合わせるために不整磁場の制限がきわめて厳しく、通電中の温度変化に伴う導体の変位や断面内の動的な電流分布を考慮した形状を採用すると共に、導体内の電流分布を制御する目的で成分調整したニッケル-銅合金を導体に埋め込んだり、断熱真空中での導体同士の動きによる絶縁物の磨耗を防ぐために潤滑剤を選定して塗布するなどの対策を行った。こ

れらのコイルはプラズマ近傍の磁場に大きな影響を及ぼすことから電工部品としては異例の精度（1 mm）で製作・組立が行われた。他方、構造上巻数が少なく、電流が大きいコイルであることから、コイルの電流引き出し部も非常に複雑になった。ここでもコイル電流を互いに打ち消して、プラズマに与える不整磁場を抑えるためにサンドイッチ構造や折り返しなどを多用して導体の組み合わせを工夫した。水冷コイルであるポロイダル磁場コイルは、以上の対策のためにロウ付け箇所が通常のコイルに比べて大幅に増えた。特にトロイダル磁場コイルへの組み込み後は狭い場所の中で一箇所づつ接続を繰り返す作業が続いた。強大な電磁力に耐えるために電流引き出し部はステンレス鋼のサポートで押さえ込む構造とした。

高い一周電圧への対応はトカマクを構成するすべての部品に影響を与えている。全体を収納する断熱真空容器はFRP板をはさんだ2分割絶縁シール構造を採用したが、輸送制限と後の保守性を確保するために上部蓋部を取り外し可能としたことから、シール部が直交する十字シール・T字シールを開発した。また、トロイダル磁場コイルには周方向に絶縁を挿入するとともに、上部のヘリウム液溜も2分割し、セラミック管で絶縁接続する構造となった。

超伝導コイルを収納しているため、断熱真空容器内には液体窒素冷却の輻射シールド板が設置されているが、常温の真空容器とポロイダル磁場コイルも断熱真空容器内に共存するため、シールドも20本以上の真空容器のポートや多重構造のポロイダル磁場コイル口出しが貫通する複雑な構造となった。特に一周電圧対策として多数の絶縁分割が必要となったこと、真空容器から断熱容器に出るポートとトロイダル磁場コイルとの間隙がヘリオトロンEやJT-60などの大型装置に比べて極端に狭隘で、作業者が作業姿勢も自由に取れなかったことが組立作業を極めて困難にした。組立後半の断熱真空容器内での作業には瘦せ型で腕の長い作業員や、小柄で柔軟な作業員が選抜されてこれに当たった。また、狭い断熱真空容器内の作業では、換気や冷房による作業環境・安全性の確保にも注意した。

ポロイダル磁場コイルの電流導入端子は数十kV、数十kA級のものが要求されたため、FRPブッシング・水冷構造のものを開発して適用した。

5.2 ヘリカル装置（LHD）

LHDは主要コイルを超伝導化したヘリオトロン磁場配位の試験装置である[35, 36]。LHDでは三つの大きな超伝導技術上の進展が見られた。それは、①浸漬冷却方式の大型・高精度ヘリカルコイル、②ケーブルインコンジットの導体を用いた超臨界圧ヘリウム強制冷却方式の大口徑コイル（ポロイダル磁場コイル）、および③大電流超伝導バスの実用化である。

ヘリカルコイルおよび外側のポロイダル磁場コイルは外径約10 mで、国内の輸送限界をはるかに超えるものである。どちらもLHD本体室の一隅に巻線機や治工具等を設置し、現地で巻線作業を行った。

導体、冷凍、超伝導安定性などの超伝導特性に関する開発・技術革新に関しては、本シリーズ「核融合における技

術革新」の一環として別途予定されている報告に委ねるとして、ここではヘリカルコイルの製造にかかわる技術開発に関して述べる[37].

LHDのヘリカルコイルは主半径3.9 m, 副半径0.975 mで、トーラスを一周する間にポロイダル方向に5回転するコイル2本で構成し、中心トロイダル磁場最大3 T, ヘリカルピッチ10の磁場を発生する.

1コイルの巻き数は全450ターンで、発生磁場の多様性を確保するため、プラズマに近い副半径インボード側、中間層、アウトボード側の3層に分けて150ターン毎にブロック化している. 各々のブロックは別電源で通電電流を制御する方式を取っている. このため巻き線はCHSがダブルパンケーキ巻きとしているのに対し、LHDではソレノイド巻き(巻芯に沿って層状に巻き、次の層を巻き重ねてゆく方式)とし、導体の渡りやフィードをヘリカル溝の幅方向に出している. 表2にCHSとLHDのヘリカルコイルの方式および諸元を対比させて示す.

超伝導導体の断面を図22に示す. NbTi/Cu超伝導素線の平角撚線と、ホール効果による磁気抵抗を軽減するためにCu-Niで表面を被覆した高純度Al安定化材(クラッド材: 異種金属を接合したもの)を、門型の銅条に収納しはんだで固定した後、銅の蓋を電子ビーム溶接(EBW, 後述)で固定したものである. EBW採用に到るまで各種の方法を試みたが、巻き線の握りに対する機械的特性を満すものがなかったため、部分真空方式の専用EBW装置(後述)を開発し、1 km長の複合超伝導導体の製造を可能とした.

ヘリカルコイルの巻き線は、円環状の巻芯にコイル容器(ヘリカル溝)を精度良く設定し、この溝をガイドとして巻き線をしてゆく. 巻芯を跨いで二つのリングが設置され、一方が導体を供給するポピンで、もう一方が導体成形ヘッドを搭載しポロイダル方向に回転するためのものである. これらが同期してトロイダル方向に回転しながら巻き線をしてゆく. 導体成形ヘッドは、数値制御による4点ローラーを3セット(図23)を有し、導体の長辺・短辺の曲げおよび握りに対応している[38].

実機のヘリカルコイル巻き線機の完成に到るまでに種々の開発ステップを踏んだ. 主なものは、①実規模巻き線試作

(TOKI-WT), ②超伝導ヘリカルコイルの実証試験(TOKI-HB)[39], ③1/5スケール巻き線機試作である.

TOKI-WTでは、LHDの実導体を模擬した半硬化銅の矩形断面導体を、110度相当の実規模円環状に巻きつけ、導体の3次元成形と浸漬冷却で重要なクーリングチャンネル確保の課題を摘出した. 図24にTOKI-WTの試作状況を示す.

TOKI-HBは実機の1/5スケールで浸漬冷却方式の超伝導ヘリカルコイルの実現性実証に取り組んだものである. 導体の3次元成形(曲率, 撓率)はヘリカルコイル軌跡の各位置で微妙に変化する. TOKI-HBのヘリカルピッチ $m=3$ はLHDの $m=5$ と異なるが、実機巻き線機の設備開発の一段階として、導体成形ヘッドをトロイダル方向とポロイダル方向を軌跡にあわせ数値制御により同期回転する巻き線機を準備して臨んだ. 巻き線完成までにコイル軌跡の計測は3000点に及んだ. 図25に巻き線途中での導体位置計測状況を示す. TOKI-HBは核融合科学研究所における励磁試験で所定の電流を安定に流し、浸漬冷却方式のヘリカルコイルの実現性に自信を得た[40].

これに続く1/5スケール巻き線機試作は主に制御系の確証を行ったもので、成果を実機巻き線機の製作に反映させた. その結果、実機巻き線機は独立13軸の数値制御装置となった.

実機巻き線機は工場を組み立てて試運転・調整を行うとともに

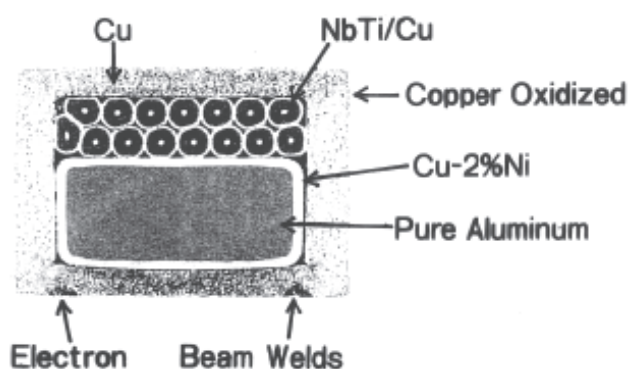


図22 LHD ヘリカルコイル 導体断面.

表2 LHD, CHS ヘリカルコイル主要諸元 比較表.

装置 (完成年)	LHD (1998年)	CHS (1988年)
主半径/副半径 (m)	3.9/0.975	1.0/0.313
コイル数/ヘリカルピッチ	2/10	2/8
中心トロイダル磁場 (T)	3	1.5
導体	NbTi-Al-Cu 複合導体	Cu 中空導体
導体断面寸法 (mm)	矩形 12.5×18.0	正方形 7.4×7.4-4.0φ
巻き線方式数	ソレノイド巻き	ダブルパンケーキ巻き
コイルブロック	3ブロック 8層 + 6層 + 6層	1ブロック 10パンケーキ
ブロック内層間導体接続	有り	なし
絶縁	絶縁スパーサ	テープ絶縁, ワニス注入
導体の成形	数値制御多軸4点ローラー	人力
電磁力支持	支持シェル	コイルブロック
コイル要求寸法精度 (mm)	±2	±0.5

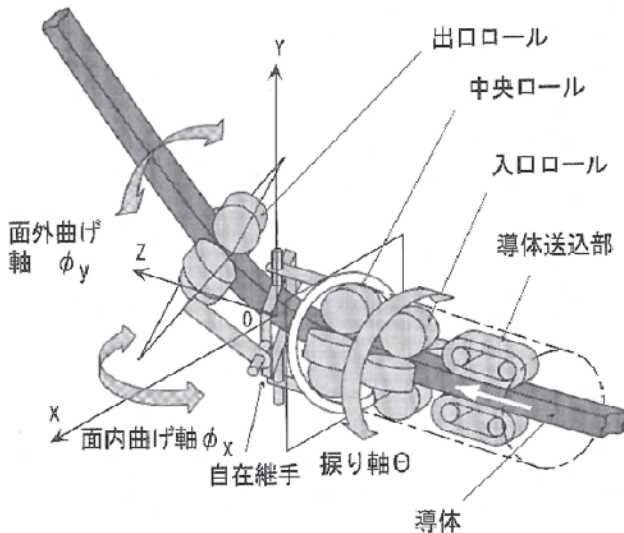


図23 LHD ヘリカルコイル巻線機導体成形ヘッド模式図。

に、巻線試作を実施した。図26に工場における巻線機の試運転状況を示す。それまでの巻線試作の過程では、導体を成形しヘリカル溝に押しつけてゆくだけでは、導体に張力を与えることができず、コイル断面が膨らむ課題が未解決であった。試行錯誤の末この課題は、あらかじめヘリカル軌跡の正規の位置より若干軌跡長の短い経路で巻線を行い、その後導体を横方向に押し正規の軌跡位置に移動させることにより導体張力を発生させること(擬似張力巻線法)で解決できることを見出した[41]。巻線試作では、塑性加工専門の研究者が設計者および生産技術担当の技術者と一緒に泊り込みで現場に張りつき、逐次指導と試行錯誤を繰り返した。これは現地での巻線でも続いた。実際の超伝導体を用いた巻線試作で横方向の移動量を決定した。この間、巻いては外しの繰り返しで、導体の成形法、絶縁間隙およびHe冷却路の確保、コイル剛性の確保、導体位置の計測法などの複合的課題の解決策を見出すのに時間を要し、工程の迫るなか技術者は厳しい状況の中での開発に邁進した。ちなみに計測点は10000点を越えた。またコイル部品(絶縁スペーサなど)の準備方法、作業プロセスの最適化、作業者の習熟に取組み、現地での巻線の完全性を期した。

コイルの絶縁は、電気的絶縁特性はもとより、超伝導の安定性(浸漬冷却の場合、導体の液体Heへの露出率が重要な要素)とコイル剛性との兼ね合いで決定されている。コイル剛性および寸法精度維持は絶縁スペーサ(ターン間絶縁および層間絶縁)との密着具合が重要な要素となる。層間絶縁は次層巻線の基準面となるので特に重要である。個々の導体は微妙なズレや倒れを有しており、また微妙にばらつく。ばらつきの原因は一様ではないが、その一因としては、複合導体の機械的特性(例えば曲げや捩じり剛性)のばらつきが考えられる。各々の導体端部より切り出したサンプルで機械的特性を計り、導体成形の制御にフィードバックさせた。これらを補償するため多関節3次元測定器(ベクトロン)と専用のレーザー測長器により導体の位置や倒れを計測し、その場で絶縁スペーサを計測に基づき加工して、絶縁許容間隙を確保する範囲で取り付

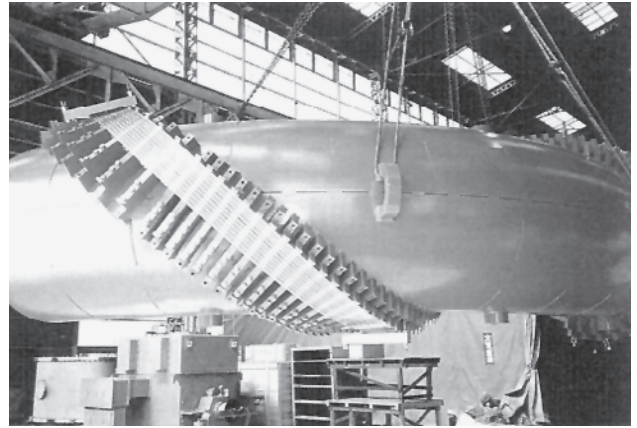


図24 TOKI-WT ヘリカルコイル実規模巻線試作。

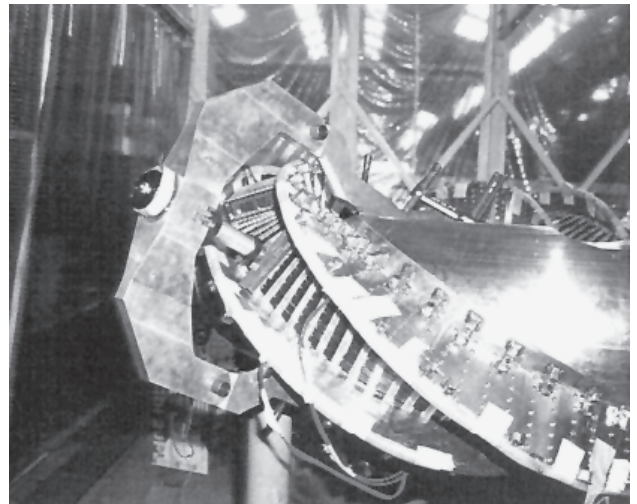


図25 TOKI-HB 1/5 スケール巻線試作における導体位置計測。

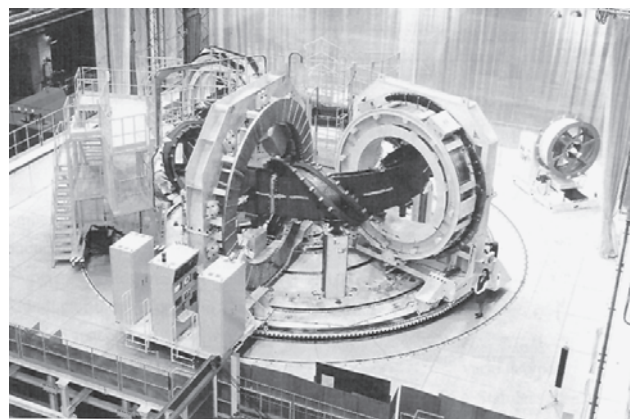


図26 LHD ヘリカルコイル巻線機(工場における試運転調整)。

け、寸法誤差の集積を回避する手順を取った。計測値の評価に関しても要素試作の繰り返しと経験の積み重ねで精度を上げた。また導体と絶縁スペーサ間の空隙低減は特に重要で、細心の管理(平均65μm)のもとプロセスを進めた。

層間渡りの導体接続および各ブロックのフィーダ引き出しは、コイル容器のヘリカル溝を局所的に広げ空間を確保している。コイル導体間の接続は、超伝導線の接続ピースを介したはんだ付け方式で、あらかじめR&Dにて低抵抗

接続法（一箇所あたり $1\text{ n}\Omega$ 以下）を開発し適用した。巻線機上の限られた空間で所定の接続（複合導体の端部の解体、接続ピースの組み込み、はんだ接続）を実施するのは、R & D 段階の供試体作りに比べ格段に難易度が高い。Al 安定化材および蓋の除去は、専用の加工機を工夫し、超伝導素線を傷つけることなくかつ成形済みの導体に塑性変形を及ぼすことのない手法を確立した。また狭隘部を模擬した部分モデルを準備し、はんだ付けの加熱範囲、はんだの流れなどの検証と、作業者のトレーニングを実施した。

現地における巻線作業は昼夜で継続実施し、完成まで1年半の期間を要した。浸漬冷却方式の超伝導であること、ヘリカルコイルが連続巻きで導体全長が1コイルあたり18 kmにも及ぶこと、一箇所でも不具合を見逃すと実験装置として成立しない。巻線機はスライド式の防塵室で覆い空調し、入室者を厳しく限定した。使用する工具類はもとより、作業者の着用する眼鏡や筆記具に到るまで防塵策を講じた。作業関係者は緊張感の連続で、心の負担を感じながら取り組まざるを得なかった。コイル励磁に到るまでの緊張感の持続は、個人はもとより、組織として研究者・技術者・技能者の立場を超えた協力が目的意識の醸成であり、プロジェクトを進める組織としても成功の大きな要因であった。

コイル容器（ヘリカル溝）はヘリウム容器でもある。ヘリカルコイルに生じる電磁力は、ヘリウム容器の蓋を兼ねるコの字型断面のシェルアームを介して支持シェルに伝えられる。支持シェルはポロイダル磁場コイルの支持も兼ね、超伝導磁石として一体の極低温構造物となる。外径11 m程の大型溶接構造物であり、シェルアーム、支持シェルともに多数分割された部片を、現地にて溶接していく。この大きさの溶接構造物でヘリカルコイルの寸法精度 $\pm 2\text{ mm}$ を確保することは、大変高度な課題であった。

コイル容器へのシェルアームの取り付けは、溶接実施前に蓋とコイルの間にスペーサと感圧紙を介して仮組みし、コイルと蓋との間隙管理を行った。あらかじめ溶接の収縮量を考慮した溶接構造が取られ、コイルに圧縮加重が作用し適正なコイル断面剛性を確保するように収縮量を管理した。

サポート類の板厚は100 mmで、部片は工場にて機械加工により精度を確保した。現地での溶接は狭開先TIG溶接を採用した。コイル容器の蓋の溶接では溶接のアーキがコイルを損傷しないように開先先端に保護板を挿入した。溶接による収縮、変形を回避するため、板厚の一部に未溶着部を残し、ここを突合せ密着させることにより変形防止を図る溶接構造、溶接の歪を相互に打ち消すような作業手順、溶接員の技量のレベル合せ等、様々な工夫を駆使して、最終的に狙いとするコイル寸法精度を達成した。

この他、真空容器とヘリカルコイルの狭空間の輻射シールド構造、約850トンの極低温構造物を支持する断熱支持脚、など新たに開発した事例は多い。

6. 生産技術事例

ある分野での技術革新が他分野で大きく発展する事例は

多い。技術の波及は一方通行ではなく双方向、あるいはスパイラル的である。核融合分野での調査[42, 43]は1980年代後半に精力的に行われた。ここでは核融合装置本体の建設に関して、ごく限られた事例を紹介する。

6.1 電子ビーム溶接

一般に大型構造物の製造過程は、材料加工（切断、塑性加工）→溶接→機械加工→組立の手順で進められる。この中で溶接に依る手法を採用するかは、製品の信頼性ばかりではなく生産性にも大きく影響する。JT-60の本体は概略重量5000 tの構造物である。限られた工程の中で品質確保と生産性の飛躍的向上をはかる目的で、大容量電子ビーム溶接機の開発・適用を画った。電子ビーム溶接（EBW:Electron Beam Welding）の特徴は、①入熱が局所で熱影響が少ない、②厚板のワンパス溶接が可能、③溶接変形が少ない、等が挙げられる。

それまでのEBWはビーム電力数kW、真空チェンバーも 1 m^3 程度であり、厚板構造物には適用ができなかった。そこでビーム最大電力110 kW、真空室容積 150 m^3 のEBW設備を建設した。110 kW電子銃はソビエト連邦から導入し、電子銃の電源・制御、駆動装置、真空室・排気系は独自に開発した。真空室は大口径油拡散ポンプで排気し真空圧力は1 Pa以下に、電子銃には小型ターボ分子ポンプを取り付け2桁低い真空圧力とした。当初、電子銃の放電、電子ビームの収斂で苦労したが改良を重ね実用化した。製品に適用したのはヘリオトロンEの真空容器（高耐力ステンレス鋼YUS-170:25Cr-12Ni-0.3N製）が最初である[13, 14]。

JT-60では大々的に適用を展開した。表3はEBWを適用した部品の材質、最大溶接板厚および部品重量を示す。図27はトロイダル磁場コイルの補強枠に適用した事例を示す。この補強枠は、ステンレス鋼よりも高強度の高Mn非磁性鋼（14Mn系、18Mn系）の厚板材および鍛造材を組み合わせた溶接構造物である。側板の溶接にEBWを適用した。継手部の品質向上、溶接時間の短縮、機械加工工数の削減と共に、作業環境・安全性の改善に効果をあげた。

EBWは実際の溶接時間が短縮できるが、真空室の排気・大気開放に時間がかかるのが難点である。JT-60の大電流化改造時のポロイダル磁場コイルの導体溶接に、真空室を溶接部位に限定する部分真空EBW装置を開発した。ポロイダル磁場コイルの導体を挟み上下分割できる局所真空箱を設け、電子銃をスライドできるように取りつけたもので、図28にこの適用例を示す。真空箱の容積は 1 m^3 以下で排気時間を短縮でき、作業効率に大きく貢献した。

さらに部分真空EBWは、LHDヘリカルコイル用の超伝導複合導体（前述）組立の微細溶接にも応用された。溶接真空室への導体導入・引き出し部にそれぞれ差動排気室を設け、長さkm級に及ぶ長尺物へのEBW適用を可能とした。図29はLHDヘリカルコイル用の超伝導導体組立用EBW装置を示す。門型銅、超伝導素線、Al安定化材をはんだで複合し、銅の蓋を仮止めしてボビンに巻き取った状態から、直条に伸ばし差動排気室を通してEBW装置に送り込み、蓋と門型銅が溶接され、再度差動排気室を通してボ

表3 JT-60における電子ビーム溶接の適用.

部品	部位	材質	溶接最大板厚	単品重量
真空容器	厚肉部	インコネル625	65 mm	12.1 ton
トロイダル磁場コイル	コイル補強枠	高 Mn 非磁性鋼	70 mm	37.4 ton
ポロイダル磁場コイル	導体	銀入り無酸素銅	50 mm	2.8 ton
架台	スペーサー, 他	高 Mn 非磁性鋼	150 mm	15.5 ton

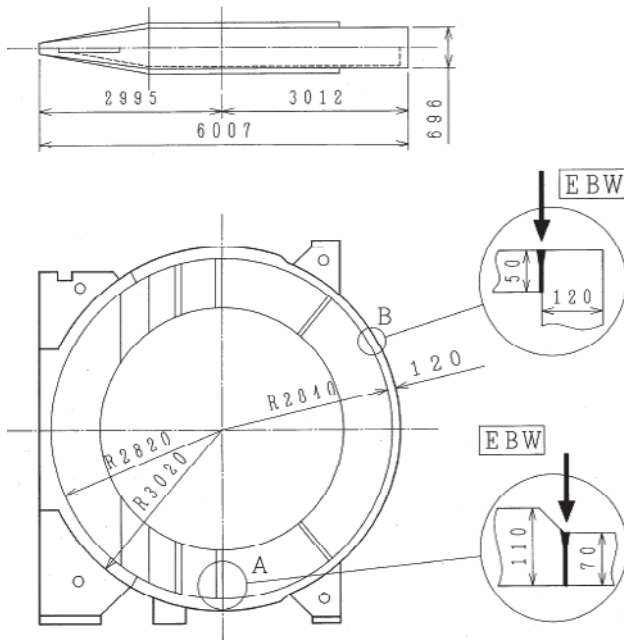


図27 JT-60 トロイダル磁場コイル補強枠 EBW.

ピンに巻き取られる。超伝導線の特性に影響を及ぼさないように、溶接中の導体の温度管理用冷却機構が組み込まれている。溶接部にはんだが侵入すると溶接の品質が損なわれる。導体の機械的要求特性、複合化のはんだの充填率、作業効率と品質の安定性を精査して、溶接の溶け込み深さを決定した。

EBWの技術はその後、Ti合金やNi-Co系超高強力鋼冷間圧延材等の特殊合金を用いた宇宙機器用部品等の特殊用途に適用が拡大した。また、大電力EBW装置は鉄鋼産業、機械産業向けに生産設備として出荷された。家庭用の鍋や薬缶の底板に使われている銅とステンレスのクラッド材の製造過程で、EBWの技術が使われていることはあまり知られていない。現在では大電力EBWの技術は一般産業機器の製造プロセスの一つとして多方面にわたり広く普及している。

6.2 真空リーク試験 ソープシヨンスニファ法

この試験法はJT-60建設時、真空容器の工場出荷前試験の段階で発生した真空リークを契機に、開発されたリーク試験の手法である。

JT-60の真空容器は液滴を横にした断面で概寸縦2 m, 横3 m, 最外径10 m, 容積約120 m³のトラス容器である。内部に3本の磁気リミタコイル(主コイル1本, 副コイル2本)を収納している。このコイルは真空容器と同様インコネル625製の厚肉部と板厚1.8 mmのペローズを溶接でつなぎ合わせた保護管に収められ、真空容器に組み込ま

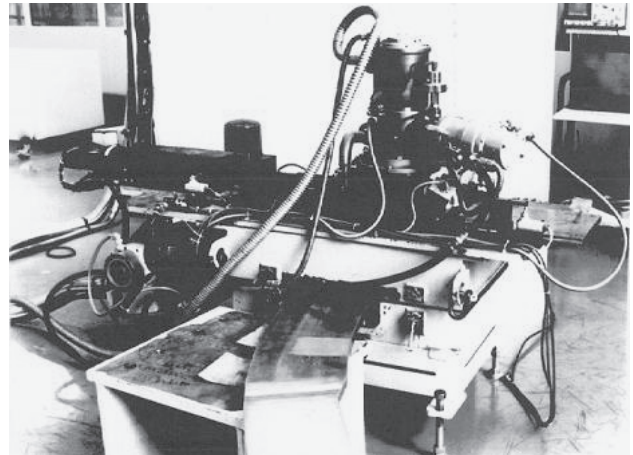


図28 JT-60U ポロイダル磁場コイル導体用部分真空 EBW 装置.

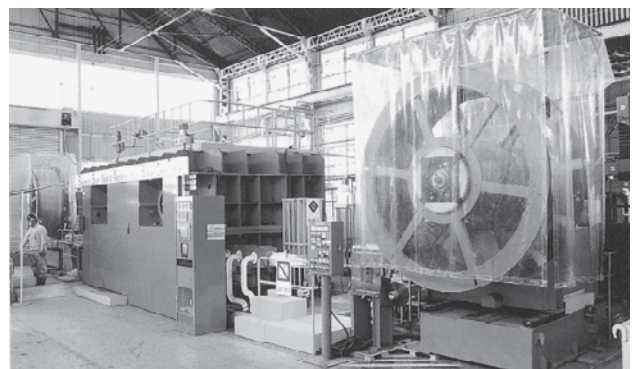


図29 LHD ヘリカルコイル導体 EBW 装置全景.

れている。また副コイル1本の保護管には、144個のペローズが使われている。

出荷前試験は、輸送制限からトラス容器の半分・180度相当分ごとに組み立てられ実施された。350℃のベーキング後真空リーク試験で、上側副磁気リミタコイルから7×10⁻⁸ Pam³/s程のリークが検出された。保護管の部品(ペローズなど)は製造の要所所でリーク試験を実施し、コイルを保護管に組み込み後にも単独で試験し、信頼性確認のステップを経て真空容器に組み込んだものである。

リーク箇所の探索は困難を極めた。その理由は、①リーク量が小さく検出感度との差が小さい。②真空容器の容積、内表面積が大きい。③ベーキング直後はリークが顕在化するが、常温でのリーク試験実施中にバックグラウンドに埋没してしまう。④保護管の内部真空法はコイルの絶縁物からの放出ガスの影響でリークが検出できない。⑤当該のコイルは真空容器内部の狭隘部に設置されており構造も複雑なこと等である。

真空容器全体のベーキングおよび保護管の部分ベーキン

グを繰り返しながら、外部真空法（保護管の外側に仮設のカバーを溶接し部分的に排気し、そこへの漏れを計る方法）で洩れ箇所を絞っていった。あるベローズと厚肉部の溶接組立部に漏れがあることを突き止めるのに2ヶ月半を要したが、欠陥の特定までには到らなかった。

この状況を打破したのは、村上等によるソープシヨンスニファ法の提案[44]である。この原理概念を図30に示す。スニファのプローブ（吸い込み口）に細長いステンレスチューブ（実施例では直径0.6mm、長さ約10m）を用い、ゼオライトを液体窒素で冷却したソープシヨンプを介してHeリーク検出器につないだ構成となっている。この特徴は、①長い細管を用い大量の試験ガスを安定に吸い込む。②ソープシヨンプで空気や水分のHe以外のガスを吸蔵排気する。③リーク検出器にはHeの濃縮されたガスが導入される。この結果従来のスニファ法に比べ1000~10000倍の感度が得られるようになった。ちなみにソープシヨンプの代わりにクライオポンプとした場合は、クライオパネルの空気吸着層にHeがトラップされてしまう。また、感度が飛躍的に向上したことにより大気中のHe（体積組成比約5ppm）が検出されてしまう。したがって、被試験体の当該部は乾燥窒素でパージした状態で試験を実施した。

リーク箇所はベローズと厚肉部の溶接接合近傍の厚肉側（厚肉側は溶接時の熱容量を合わせるためベローズの板厚程度に薄く加工される。）と判明、液体浸透探傷試験で欠陥のポイントを確認した。欠陥の大きさは数 μm であった。

本事例は、プロジェクト工程の迫る中、発注者・受注者の枠を超えた取り組みから生まれ育った技術である。その後このリーク試験法は、核融合装置はもとより、加速器、超伝導機器にも広く活用されている。また、真空機器に拘らず一般の産業用機器の漏れ検査にも適用されるようになってきた。一例として複雑な冷却水管路の漏れ探索を紹介する。減圧した管路の一端から乾燥窒素を流しておき、もう一端から細管を挿入し吸い込み口を移動させることにより、洩れ位置が探索できる。この場合は大気中のHeが検出されることになる。

6.3 その他波及技術

(1) 電磁場解析

磁場閉じ込め核融合装置の電磁気設計で重要なことは、①電磁力の把握と十分な構造強度、②必要な磁場を発生するコイル配置、である。前者では特に渦電流を正確に把握する計算コードを発展させ、後者ではコイル形状を計算できる計算コードを発展させた。

JT-60以前の'70年代の中小装置(JFT-2, JIPP T-II等)では、数値計算技術が不十分で、手計算に頼って構造強度設計を行っていた。それでも中小装置では、電磁力が比較的小さいため、十分余裕を確保した構造設計が可能であった。しかし、'85年に運転開始したJT-60では、それまでの装置に比べてプラズマ電流が1桁大きくなり（電磁力は2乗倍）、詳細な電磁力把握が必要となった。計算機の発達にも助けられ、電磁力の詳細な把握が行われた。特に、ディスプレイ時の渦電流による電磁力は装置成立に関わる

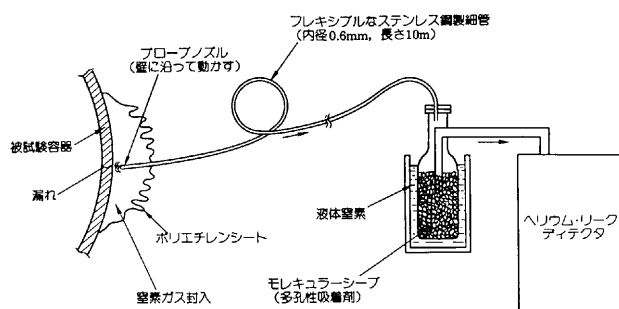


図30 ソープシヨンスニファ法の原理図[44].

ので、JT-60設計や他の大型装置(TFTR, JET)設計に並行して渦電流コードの開発が行われた。その中で薄板近似でスカラーである電流ポテンシャルを解く手法は汎用性に優れたために、広く用いられた。代表に亀有の開発した計算コード[45]がある。またその計算アルゴリズムに従ったコードは磁気浮上列車[46]や回路基板設計等の他分野でも用いられるようになった。さらにこの薄板近似手法の成功と計算機の発達をバネに、三次元渦電流解析へと進んで、厚板導電体を流れる解析が可能となっている。最近の例では、25Hz交流運転を行う加速器磁石中の渦電流解析、発熱量把握から熱設計を行い、J-PARC加速器建設に寄与している[47].

一方、コイル配置では、1970年代までは、垂直磁場、四重極磁場を正確にポロイダル断面上で構成できるポロイダル磁場コイル群を設計していたが、プラズマに対する正確な磁場の最適化は行われていなかった。しかし、P.Merkelが三次元形状モジュラーコイルの設計手法[48]をWendelstein 7-ASに'88年に適用・現実化し、またトカマク装置では実測磁場データからプラズマ断面形状や平衡磁場配位が逆問題を解いて把握[49]できるようになると、プラズマに対する磁場分布の最適化が行われるようになった。P.Merkelの手法はトーラス形状に限られたが、汎用的な任意コイル形状最適化ツールを、阿部らが開発した[50]。この手法は任意曲面上の電流を目的磁場分布に対して最適化できるので、核融合分野以外への応用も進められた。例としてMRI傾斜磁場コイルがある。図31はMRI装置の写真[51]である。

(2) 第一壁

プラズマに接する表面（第一壁）は装置技術としても興味深い技術である。

JFT-2a(原研, 1974年完成)[52]は軸対称ダイバータ配位プラズマを最初に生成した装置であるが、液滴断面のプラズマの安定化に無酸素銅製のシェルを真空容器内に設置した。シェル内面に10 μm 厚の金メッキを施すことになり、その方法としてイオンプレーティングが採用された。当時はメッキの廃液による産業公害が問題となり、無公害・乾式メッキが注目され始めた頃で小型サンプルでの試行段階であった。シェル部品の高さは約1m \times 0.4mでこのような広い断面への適用は初めての試みであった。その後イオンプレーティングは宝飾品(時計など)への適用を皮切りに、広く工業製品に適用され、ナノテクの基本技術

の一つとして発展している。

また、その後の JFT-2a ではプラズマ第一壁低原子番号化の研究としてシェル内面を炭素皮膜で覆うことになった。円筒形の高純度グラファイトをターゲットとし、小口径のポートから挿入できる高周波スパッタ装置を開発し、In-situ でシェル内面にカーボンスパッタ膜を形成した。この試みはその後のグラファイト第一壁（高熱伝導グラファイト、炭素繊維強化グラファイト）が常識化する魁となったものである。図32は装置シャットダウン後展示されたシェルとダイバータフープコイルの一部（手前）である。

JT-60の第一壁は、当初リミタをMo製、ライナをInconel-625製で計画し製作に着手したが、低原子番号化の流れのなかでTiCコーティングを採用した[53]。ライナは基板の耐熱性からイオンプレーティングを採用し、熱負荷のより厳しいリミタは強固な皮膜生成が期待できる化学蒸着法(CVD)の適用を検討した。CVDは1930年代に生まれ、1950年代には工具の耐摩耗性TiC皮膜が実用化されている。しかし当時のCVD技術は基板の温度が1000℃を超える高温が必要であった。Moが耐熱材料であっても再結晶温度940℃を超えるプロセスでは、リミタとしての機械的要求を満たすことができなくなる。そこで低温プロセスでのCVDの開発を進め、反応ガス(H₂, CH₄, TiCl₄の混合ガス)を高周波放電でプラズマ化することにより、基板温度約900℃でTiCのCVDが可能となった[54]。JT-60のファーストプラズマはTiC膜の第一壁で点火された。TFTR, JETに比べ研究の立ち上がりが順調に推移できた理由の一つとしてTiC膜第一壁が挙げられている。

JT-60の第一壁はその後グラファイトおよびCFCタイル、さらにタイル表面へのIn-situプラズマCVDによるボロン膜へと進化していった。

7. おわりに

核融合の実験装置本体の建設に際して生まれ発展した技術に関し、トラス型（トカマク系、ヘリカル系）の装置製造技術を主な対象として、その技術の変遷・波及・時代背景・関係者の努力などを、技術革新の視点から取り上げた。ここでは、真空容器、電磁石、超伝導装置、生産技術事例の章立てで纏めた。

トラス型核融合装置は1960年代後半のテーブルトップ規模から、JT-60（1985年）・JT-60U（1991年）の大型装置へ、またTRIAM-1M（1986年）・LHD（1998年）の超伝導システムへ、さらにはITER建設へと進化してきている。それに伴い個々の装置に要求される技術課題は飛躍的に高度化されてきている。その時々で考案された概念や技術は、広く一般化され他分野へも応用された技術もあるが、そのプロジェクト特有技術に留まったものもある。また記載した技術範囲は限定的・散発的ではある。しかしこれらの一連の活動が、次のプロジェクトの技術的な礎になったと確信する。この点を読み解いていただければ筆者として幸甚である。なお、新しい技術を生み出すのはそれに携った人々の情熱であり、この点に光を当てた図書[55]を参照されることを希望する。



図31 任意コイル形状最適化ツールを適用したMRI装置（提供：株式会社日立メディコ）。

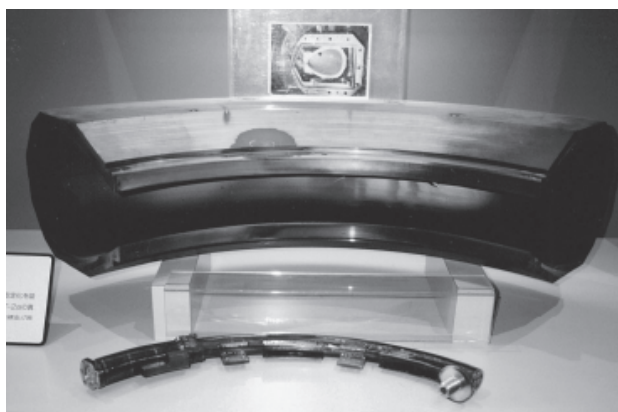


図32 JFT-2a プラズマ安定化シェル。

本報告書は科学研究費特定領域研究「日本における技術革新」の公募研究課題「日本の技術革新が核融合の進展に果たした役割の研究」（代表者：松岡啓介，分担者：西谷健夫，中村幸男）のサポートによるものであり、プラズマ・核融合学会50周年記念行事の一環としても位置づけられる。科研費研究の関係者との有益な議論に感謝します。本稿で取り上げた内容は、これまでの核融合実験装置建設に携った関係各位、特に大学・研究機関および産業界の多くの研究者・技術者の叡智と努力、および卓越した技能者の活躍の賜物である。これら関係各位に謝意を表します。また、本稿を纏めるにあたって、内川高志氏（元三菱重工）、阿部充志氏（日立）、鈴木昌平氏（日立）には情報提供など多大な協力をいただきました。ここに紙面を借りて御礼申し上げます。

参考文献

- [1] M. Ohta *et al.*, *Fusion Eng. Des.* 5, 27 (1987).
- [2] W. Reddan *et al.*, *Proc. Symp. Engrg. Problems Fusion Res.* 1369 (1981).
- [3] G. H. Rappe *et al.*, *Proc. 10th Symp. Fusion Technol.* 2, 753 (1978).
- [4] N. Hosogane *et al.*, *Fusion Sci. Technol.* 42, 368 (2002).
- [5] プラズマ・核融合学会誌別冊 特集/ITER工学設計

- 78 Suppl., 39 (2002).
- [6] R. Gallix *et al.*, *Proc. 11th Symp. Fusion Engrg.* Austin, Texas, p.842 (1985).
- [7] P. Deschamps *et al.*, *J. Nucl. Mater.* **38**, 128 (1984).
- [8] H. Takatsu *et al.*, *Proc. 7th Symp. Engrg. Problems Fusion Res.* Knoxville 1376 (1977).
- [9] A. Kameari *et al.*, JAERI-M 7120 (1977).
- [10] S. Kajiura *et al.*, *Proc. 12th Symp. Fusion Technol.* Julich **1**, 315 (1982).
- [11] 小原建治郎他：真空 **26**, 435 (1983).
- [12] K. Takanabe *et al.*, *Proc. 14th Symp. Fusion Eng.* **2**, 964 (1992).
- [13] 宇尾光治, 加沢義彰他：日立評論 **62**, 343 (1980).
- [14] 喜多久直他：溶接学会誌 **50**, 296 (1981).
- [15] S. Imagawa, Y. Shimanuki *et al.*, *Proc. 15th Symp. Fusion Technology* 412-416 (1988).
- [16] A. Iiyoshi *et al.*, *17th IAEA Fusion Energy Conf.* (1998, Yokohama) IAEA-F1-CN-96/OV1/4.
- [17] プラズマ・核融合学会誌 特集／大型ヘリカル装置 (LHD) 計画 **74** Suppl., 121 (1998).
- [18] 中村敬一他：第45回塑性加工連合講演会 p.339-342 (1994).
- [19] K. Koizumi *et al.*, *Proc. 16th IAEA International Conf. Fusion Energy* **3**, 845 (1996).
- [20] プラズマ・核融合学会誌 特集／ITER 工学R&Dにおける成果 **75** Suppl., 20 (1999).
- [21] 太田 充他：日立評論 **66**, 645-650 (1984).
- [22] 太田 充他：核融合装置用コイル 特許第1482897号 出願1979. 8. 15.
- [23] 滝沢照広他：電気巻線 特許第1137036号 出願1978. 5. 4.
- [24] 大久保実他：パンケーキ形コイル 特許第1388519号 出願1978. 12. 1.
- [25] 古山昌之：パンケーキ形コイル 特許第1297725号 出願1979. 11. 28.
- [26] M. Ohkubo, Y. Itou *et al.*, *Proc. 11th Symp. on Fusion Tech.* Oxford **1**, 409 (1980).
- [27] T. Iijima *et al.*, *Hitachi Review* **30**, 159-164 (1980).
- [28] H. Kojima *et al.*, *Fusion Technol.* **6**, 253-264 (1984).
- [29] T. Ando, T. Watanabe *et al.*, *J. Nucl. Sci. Technol.* **24**, 730-741 (1987).
- [30] T. Watanabe *et al.*, *Proc. 12th Symp. on Fusion Technol.* Julich **2**, 1151 (1982).
- [31] 井村泰也他：日立評論 **56**, 965 (1974).
- [32] S. Itoh, Y. Nakamura, N. Hiraki, K. Nakamura, A. Nagao, S. Moriyama, S. Kawasaki and E. Jotaki, *Proc. 11th Int. Conf. on Plasma Phys. and Contr. Nuclear Fusion Res.* Kyoto, **3**, 321 (1986) (IAEA, Vienna, 1987).
- [33] 伊藤智之, 鈴木登夫他：日立評論 **66**, 671 (1984).
- [34] 中山 恒他：日立評論 **57**, 637 (1975).
- [35] O. Motojima *et al.*, *16th IAEA Fusion Energy Conf.* (1996) IAEA- CN-64/G2-4.
- [36] O. Motojima *et al.*, *17th IAEA Fusion Energy Conf.* (1998) IAEA- CN-96/FT2/1.
- [37] プラズマ・核融合学会誌 特集／大型ヘリカル装置 (LHD) 計画 **74** Suppl., 63 (1998).
- [38] 畑田直純他：塑性と加工 **43**, 119-124 (2002).
- [39] T. Senba *et al.*, *Fusion Eng. Des.* **20**, 195 (1993).
- [40] N. Yanagi *et al.*, プラズマ・核融合学会第9回年会(1992) 29aB4.
- [41] T. Senba *et al.*, *18th Symp. Fusion Technol.* **2**, 905-908 (1994 Karlsruhe).
- [42] (社)日本原子力産業会議, 「核融合研究開発の波及効果に関する調査」(1987年3月).
- [43] 森野信幸：プラズマ・核融合学会誌 **70**, 634 (1994).
- [44] 村上義夫他：真空 **29**, 245 (1988).
- [45] A. Kameari, *J. Comput. Physics* **42**, 124 (1981).
- [46] 亀岡陽子, 福本英士, 吉岡 健：電気学会 リニアドライブ研究会 '91年12月.
- [47] 千田 豊他：日立評論 **89**, 192 (2007).
- [48] P. Merkel, *J. Comput. Physics* **66**, 83 (1986).
- [49] D.W. Swein and G.H. Neilson, *Nucl. Fusion* **22**, 1015 (1982).
- [50] M. Abe *et al.*, *Phys. Plasmas* **10**, 1022 (2003).
- [51] <http://www.hitachi-medical.co.jp/>
- [52] 伊藤 裕他：日立評論 **58**, 813 (1976).
- [53] 阿部哲也, 村上義夫他：真空 **27**, 394-413 (1984).
- [54] 村上義夫他：核融合装置用第一壁部材の製造法 特許第1653797号 出願1983. 10. 28.
- [55] 太田 充：飛躍の軌跡・核融合 新しい技術を生み出した人びととの経験 (㈱ERC 東京 2006年).