

積層型プローブの JT-60 設置

笹島唯之^{A)} 柳生純一^{A)} 三代康彦^{A)} 宮直之^{A)} 榊原悟^{B)}

^{A)}日本原子力研究所 那珂研究所 核融合装置試験部 JT-60 第2試験室

^{B)}核融合科学研究所 大型ヘリカル研究部 プラズマ制御研究系

1 概要

臨界プラズマ試験装置 (JT-60U) では、電磁気検出器を用いてプラズマ制御を行っている。実験運転に於いてはプラズマが急激に消滅する現象 (プラズマディスラプション) が発生し、これに伴って真空容器が振動する。この際、電磁気検出器が破損することがあり、対処として電磁気検出器の交換を行ってきた。しかし、この電磁気検出器は高価であり、今後、実験運転により破損した場合の交換や次期装置への適用を考慮すると低コスト化が要求される。

一方、核融合科学研究所 (NIFS) ヘリカル型核融合装置 (LHD) で使用されている電磁気検出器 (積層型プローブ) は、コンパクトで低コストでの製作が可能であり、プラズマディスラプション時の耐震性の問題を除けばそのまま JT-60U 環境下で使用が期待できる。

そこで、JT-60U と LHD の共同研究の一環として専用ケースを製作し耐震性を向上させた電磁気検出器の製作に着手し JT-60 への適用性を検討した。本研究会では、JT-60U に於ける積層型プローブの設置に関わる R&D について報告する。

2 JT-60U での電磁気を用いたプラズマ制御

JT-60U はドーナツ形状の真空容器内に高温のプラズマを作り出し、トロイダル磁場コイル及びポロイダル磁場コイルにより真空容器壁に接し無いように強力な磁場によりプラズマを閉じ込めている。

電磁気検出器はプラズマの位置制御に用いられ、**図-1** に示すように各々同一ポロイダル断面に設置された 24 本の電磁気検出器から構成される。電磁気検出器は主にポロイダル断面の真空容器面に沿った方向の磁束を測定する 16 本の TC プローブと、ポロイダル断面の真空容器に直角方向の磁束を測定する 8 本の N プローブが設置されている。

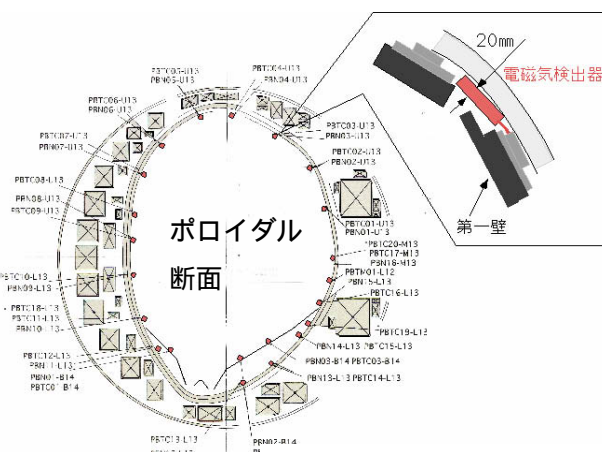


図-1 JT-60U 電磁気配置

2.1 JT-60U 制御用電磁気検出器

JT-60U でのプラズマ半径が大きな放電ではプラズマが真空容器内壁に近付くため、電磁気検出器はプラズマからの熱負荷保護の観点からプラズマに直接対向する第一壁と真空容器壁との間に設置される。このことから設置空間の制限としては電磁気検出器の高さが 20mm 以内の形状としている。

電磁気検出器は図 2 に示すように TC プローブ、N プローブ共にセラミック製のボビンに 0.3mm のセラミック線を TC プローブでは約 6 0 0 0 ターン、N プローブでは約 1 0 0 0 ターン巻きつけたコイルが主要部品となり、このコイルを熱負荷と真空の環境から保護するための SUS 製のケースに収めた構造となる。

これらの電磁気検出器の線材は JT - 6 0 U 真空容器がベーキングにより 300 となるため白金を使用し且つ、コイル形状をコンパクトとし、ターン数を稼ぐために極細線を使用している。よって、製作技術に熟練を必要とすることから必然的に製作コストが高くなっている。

2.2 LHD 電磁気検出器（積層型プローブ）

大型ヘリカル装置（LHD）のプラズマ制御に用いられている電磁気検出器（積層型プローブ）は、図 3 に示すようにアルミナ板にモリブデンパターンを金属蒸着させ、それを 4 0 枚積層した構造となっておりその仕様は外形寸法 55 mm × 33 mm × 10.5mm と非常にコンパクトで耐熱温度 900 の性能を持っていることから JT - 6 0 U においても使用できることが判明した。また、この積層型プローブの大きな特徴としてはパターンの異なるアルミナ板を組み合わせることにより一つの検出器で X、Y、Z の 3 方向それぞれにおいて低周波と高周波の磁場計測が可能であり基本的にパターン化された基盤を用いることから製作コストを抑えることができるという点である。

JT - 6 0 U の環境下ではプラズマディスラプションによる振動が著しく大きいため、アルミナ板の積層構造を持つ本検出器がこれに耐えられることが求められる。よって、積層型プローブの耐震性向上を図ることを最優先に考え設計、製作に取り組んだ。

3 耐震向上のための R&D

3.1 構造設計

JT-60U に於ける既存の電磁気検出器の耐震設計条件は真空容器の動的解析結果から最大 8 0 G を想定して設計されている。よって、この値を設計条件とした。設計にあたっては積層型プローブの固有振動について検討を行い、積層型プローブの健全性を確認した。

積層型プローブの固有値については LHD 装置の据付方法を簡易モデル化して積層型プローブ、取り付け治具及び台座を組み立てた状態で検討を行った。その結果、図 4 に示すように積層型プローブが破損に至ると思われる値は 4kHz 程度の早い周波数応答となる結果が得られたが、真空容器の振動周波数は既設電磁気検出器の加震試験の結果から 100Hz 程度であることが明らかであるため共振は発生せず、JT - 6 0 U の取り付けに関して問題無いと判断した。この結果は、積層型電磁気検出器のサイズが小さく質量が少ないためと考えられる。これより形状及び構造設計条件に余裕が得られた。

ただし、この評価結果はあくまでも簡易モデルとして評価しているため、据付時の状態または熱負荷による取り付け治具の熱伸び等様々な条件が重なったときに起こり得る状況を踏まえ、万が一積層型プローブが

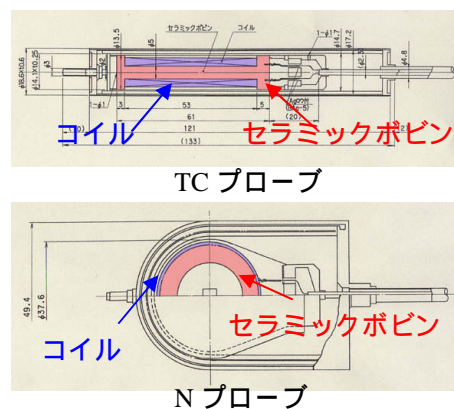
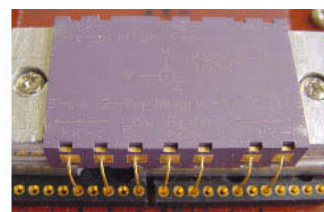


図-2 JT-60U 電磁気検出器



外観

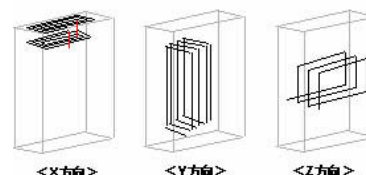


図-3 積層型電磁気検出器

破損した場合に於いてもプラズマ実験に影響を及ぼさない工夫が必要となった。

そこで、この積層型プローブで機械的に一番脆いと考えられるアルミナ板積層部と端子接続部を金属（SUS製）のケースに閉じ込める構造とした。

次に、積層型プローブの端子と引き出しケーブルの接続について検討を行った。JT-60Uでの電磁気検出器引き出しケーブルは据付環境が真空であるためMIケーブルを使用している。積層型プローブ端子の接続方法についてもMIケーブルをロー付けで行うものとした。

積層型プローブは形状がICチップのように端子部が一方向についていることから組み立て工程の簡略化を考え、当初セラミックの接続基板を採用し組み込むことを検討した。しかし、セラミックの熱伝導率は

1.5 W/(mk) と悪いためロー付けによって端子部に応力、歪等が生じる可能性が高いため接続端子部の検討を行った。図5に接続端子部の熱負荷低減用の構造とそのときの熱負荷評価について示す。本構造は端子間を空けるとともに強度的に弱いセラミックの厚さを増して接続作業時に起こりうる破損を回避できるようにしたものである。しかし、この設計ではセラミックの部品点数が増え逆にコストアップにつながるため、さらに接続部の構造の簡略化を図った。

端子部の接続は絶縁を確保するための絶縁材が必要となる。更に絶縁材については無機質であることも条件となる。これは、真空中への絶縁材からの放出ガスの流入を防ぐためであり、最も一般的なセラミック材を採用した。接続によるセラミックの割れを防ぐためにケーブルを接続したのちケース内部に流動状のセラミックを端子部に流し込み熱負荷による割れ防止を行った。また、これによりケーブル部の構造の簡略化と耐震性向上を図った。

3.2 製作

ケースに収めた積層型プローブの製作過程で新たな問題が発生した。それはケーブル接続後、流動状のセラミックを流し込み硬化過程で生じた。セラミック硬化後の各端子の導通を確認したところケーブルが断線していることから判明した。セラミック硬化前までの導通確認ではケーブル接続部は健全であったことからセラミック硬化によりケーブルに何らかの力がかかり断線したと思われる。断線部のX線撮影を行い断線箇所の原因を検討したが写真上では明確な断線原因究明にいたらなかった。ただし、ケーブル周辺のセラミック部には若干の変色が見られることからセラミックが乾燥収縮に至る際、ケーブル周辺とその他のセラミックとの収縮率の違いによりケーブルに荷重が加わったと想定した。

接続部はケーブルが非常に細いため機械的に脆く振動による影響を一番受けやすい。これまでのJT-60Uの運転実績から電磁気検出器に不具合が生じた場合を調査した結果、接続部の断線が原因となることが分かっている。この原因としては接続部とケースの間には空間になっていることからケーブルの補強が不足していたためと考える。また、接続部では端子とケーブルが剥き出しになるので他のケーブル及びケースとの接触を防ぐために接続部周辺に絶縁を確保する必要がある。よって、以上の結果を踏まえ急遽設計の見直しを図り構造の再検討を行った。

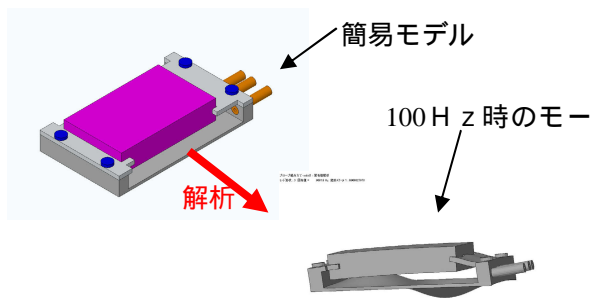


図-4 固有値解析

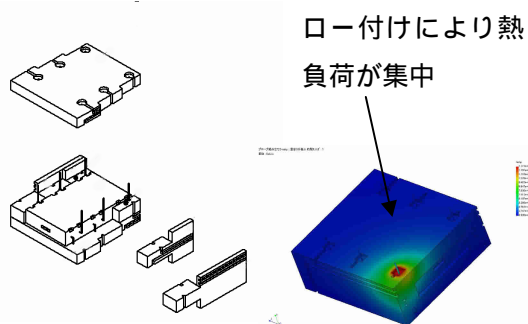


図-5 端子部構造検討

これらを踏まえた結果、流動状セラミックの代用品として考えたのが綿状のセラミックファイバーである。このセラミックファイバーを接続部に充填し、絶縁性能を兼ねたケーブル補強を行うこととした。充填に関しては綿状のセラミックファイバーをどのようにして接続部空間に詰めるか検討を行った。これは綿状のセラミックファイバーを詰めすぎた場合ケーブルに余分な加重が加わり補強以前にケーブルの断線に繋がると考えたからである。検討としては 0.3mm の接続部ケーブルの強度について行った。ケーブルは積層型電磁気検出器の端子とケースで固定されているため両端固定としたモデルで考えた。この場合、ケーブル直径が 0.3mm と細いためケーブルに発生する応力はせん断より引張応力で評価した。その結果、ケーブルに加えらる加重は約 4.5kg となった。更にケーブルをばね秤にて実測した結果、計算値と合うことを確認した。次にセラミックファイバーを接続部の空間全体に充填した場合についての重量を確認しケーブルに必要な以上の加重が加わらないことを確認した。セラミックファイバーの密度は 0.13 g/cm³、充填部の体積は 9.19 cm³、充填重量は約 1.2g となる。実際に充填する際にはできるだけ空間を空けないようにする必要があり、空間体積より多めに充填した後ケース蓋で押し付けることとなる。よって接続部空間を模擬して実際にセラミックファイバーを充填し、その際の充填重量を求めケーブルに負荷が加わらないことを確認し製作を行った。

3.3 耐震試験

製作した積層型プローブの性能を確認するために振動試験を行った。振動試験は加振力 1000kg の試験機に積層型プローブを取り付け、図-6 に示すように加振方向を 2 軸として行った。条件としては加振力を 10G から開始し 110G まで 20G ステップで振動周波数を 100Hz として各 5 秒間加振した。その結果、各ステップ毎のケーブル導通は良好であり、110G

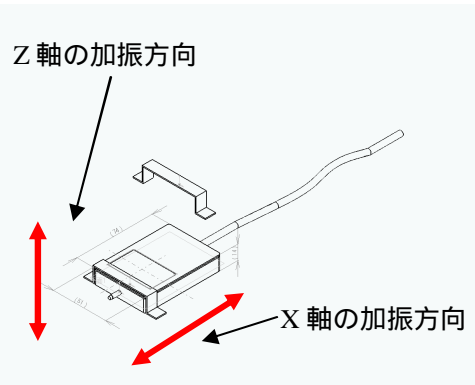


図-6 加振試験

までの加振力でも健全性を保てることを確認した。

3.4 磁場測定試験

今回製作した積層型プローブは現在 JT-60U に据え付けており、図-7 に示すように既設 JT-60U 電磁気検出器と同じようなデータ波形が得られた。

4 まとめ

大型ヘリカル装置(LHD)で使用されている積層型プローブを用いてさらに耐震性を向上させる構造にした結果、加振力 80G を上回る耐震性を得ることができた。これにより、JT-60U でも十分使用できることを確認し、今後の電磁気検出器の製作での、コスト低減化に見通しをつけた。

今後、JT-60U での実測による初期データから計測精度についてプラズマ配位による影響、設置精度による影響及び耐震性の実機ベース評価を検討課題として行い、さらにプラズマ制御に使用する電磁気検出器としての信頼性を図る。

参考文献

[1] H.Takahashi S.Sakakibara, et al.Rev.Sci.Instrum., Vol.72, No8, August 2001 3429-3259

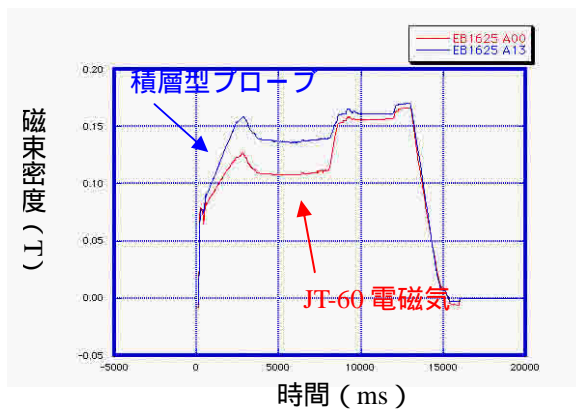


図-7 既設電磁気検出器との比較