

核融合装置向け 中性子計測システム

Neutron Monitoring System for Nuclear Fusion Facilities

山内 通則

河野 繁宏

石澤 和哉

■ YAMAUCHI Michinori

■ KONO Shigehiro

■ ISHIZAWA Kazuya

核融合エネルギー利用の実現に向けた実験プロジェクトでは、重水素と三重水素（トリチウム）から成るプラズマの長時間核融合燃焼を実証することを目指したITER（国際熱核融合実験炉）の建設や、重水素放電や高性能プラズマ研究を目指した大型ヘリカル装置（LHD）及び臨界プラズマ試験装置 JT-60U^(注1)の改造が進められている。核融合反応での中性子発生率は核融合出力に比例することから、いずれの計画においても中性子計測が核融合出力のモニタとして重要になる。

東芝グループは、中性子計測システムを構成する機器の一つで核分裂計数管の一種であるフィッションチャンバ（FC）を国内でもっとも多数^(注2)供給するメーカーとして、これらの計画に参加している。核融合装置特有の課題である高い時間分解能、広いダイナミックレンジ、及び多様な周辺機器ノイズに対する耐性向上を実現するため、ノイズ除去フィルタを備えた信号処理ユニットを開発し、成果を上げている。またITERでは、真空容器内の厳しい環境に耐える、中性子計測システム関連の機器も開発した。

International research and development projects aimed at realizing a nuclear fusion reactor are currently being implemented. Among these projects are ITER, which is being constructed in order to verify deuterium-tritium plasma ignition, and the Large Helical Device (LHD) and JT-60U (JT-60 Upgrade) facilities, which are being redesigned in order to pursue research on high-performance plasma through the new phase of deuterium discharge. In all cases, the measurement of neutrons in these facilities plays a major role because the neutron generation rate is proportional to the output of the nuclear fusion reactor.

The Toshiba Group has been contributing to these projects by supplying a neutron monitoring system, utilizing its long-accumulated experience as a main Japanese manufacturer of fission chambers. We have developed effective components for ITER, which can work under the extremely severe conditions of a vacuum chamber. To overcome the specific problem of a noisy environment caused by the wide variety of components in such facilities, we have also developed a signal processing unit that offers superior performance for the removal of miscellaneous noises as well as a high time resolution and a wide dynamic range, and have obtained good results.

1 まえがき

現在、核融合エネルギー利用の実現に向けた実験プロジェクトでは、ITER国際核融合エネルギー機構（ITER機構）の国際熱核融合実験炉（ITER）の建設や、大学共同利用機関法人 自然科学研究機構 核融合科学研究所（NIFS）の大型ヘリカル装置（LHD）及び国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構（JAEA）の臨界プラズマ試験装置 JT-60Uの改造などが進められている。

ITERは、重水素と三重水素（トリチウム）で構成されたプラズマの長時間核融合燃焼における工学技術を実証することを目指しており、将来の核融合発電を実証するための原型炉建設に向けたデータ取得を目的としている。また、LHDは重水素放電や高温高密度プラズマの研究を、JT-60Uを改造した JT-60SA（Super Advanced）は核融合反応が持続するため

の臨界条件クラスの高性能プラズマの研究を目指しており、ITERの技術目標達成に向けた支援研究や原型炉建設に向けてITERを補完する研究を目的としている。

これらの目的を達成するためのプラズマの運転及び物理研究を進めるうえで、核融合装置の中性子計測は欠くことのできない技術である。核融合中性子の発生率は装置の核融合出力に比例する。したがって、核融合施設における中性子モニタは、装置の核融合出力をコントロールするための有効な手段の一つである。

東芝グループは、核分裂計数管の一種であるフィッションチャンバ（FC）を国内でもっとも多数供給するメーカーとして、これらの計画に参加し、中性子計測システム及びその関連機器を開発している。

ここでは、これらの実験プロジェクトで用いられる核融合装置に向けて開発した中性子計測システムや、ITERの真空容器内での厳しい環境に耐えるために開発した中性子計測システム関連機器について述べる。

(注1) 臨界プラズマ試験装置 JT-60の真空容器などを改造したもの。更に現在、高性能プラズマ研究などに向け、JT-60UをJT-60SA（Super Advanced）に改造中。

(注2) 2015年12月現在、核分裂計数管において、当社調べ。

2 中性子計測システムの開発

核融合実験施設の中性子モニタでは、広いダイナミックレンジの中性子計測が要求され、これを実現するために、低い計数率にはパルス計測法、高い計数率には直流信号を計測するキャンベル法が適用されている。東芝グループは、軽水炉で実績のあるパルス・キャンベル法による中性子測定技術を駆使して、核融合実験施設の中性子測定システムの開発と製造を行っている。

2.1 キャンベル法の演算技術の進展

核融合炉では広範な中性子計測を可能にするために、パルス計測法とキャンベル法を組み合わせ、ワイドレンジモニタ技術と呼ばれる広帯域中性子計測技術を適用している。

東芝グループは、沸騰水型原子炉 (BWR) において、起動時の中性子計測を行う中性子源領域モニタ (SRM: Source Range Monitor) のパルス計測法と、起動後から定格出力運転に入るまでの中性子計測を行う中間領域モニタ (IRM: Intermediate Range Monitor) のキャンベル法のどちらにも適用できる広帯域プリアンプを1980年代に開発した。そして、中性子源領域と中間領域の両方に対応するワイドレンジモニタ技術を採用した起動領域モニタ (SRNM: Start-up Range Neutron Monitor) を数多くの原子力発電所に提供してきた。SRNMは原子炉出力の変化 (ペリオド) を監視する安全系機器で、誤動作防止のために時定数フィルタを設けて中性子信号を監視している。

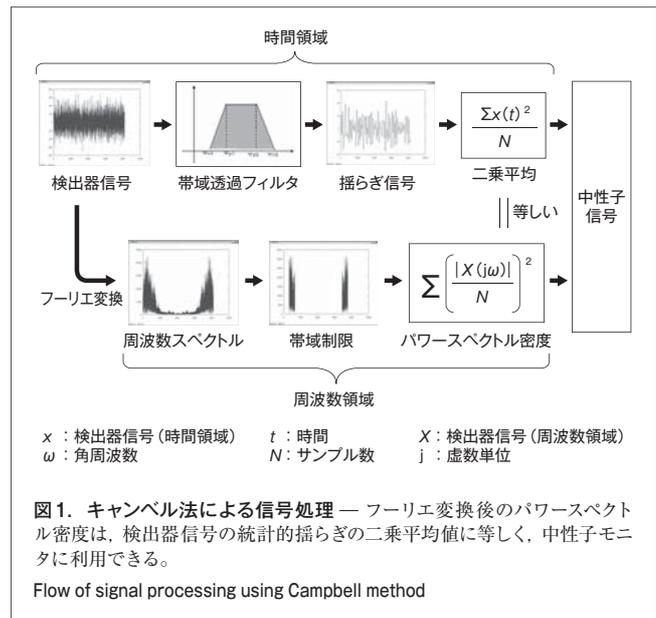
キャンベル法そのものは、原子炉開発の黎明 (れいめい) 期 (1950年代) に確立された技術であり、その信号処理の中核をなす二乗平均演算にはアナログ回路を使用し、JT-60Uの中性子モニタに適用した。2000年代になるとデジタル演算素子で二乗平均演算やデジタルフィルタ演算を行う装置を開発し、LHDに適用した。これらはFCの信号をデジタル化して時間領域で二乗平均演算しているが、ITERに適用を計画している中性子モニタのキャンベル法の演算ではそれを更に発展させ、デジタル化した検出器信号をフーリエ変換して周波数領域でノイズ除去することにより耐ノイズ性の向上を図っている (図1)。

高速フーリエ変換 (FFT) を実行するために、FFTアクセラレータを搭載したDSP (Digital Signal Processor) を採用した。近年のDSPの性能向上により、周波数スペクトルからパワースペクトル密度を計算する方法でのキャンベル法の演算を、リアルタイム監視に適用できるようになった。

以下に、それぞれの核融合実験装置での中性子計測システムについて述べる。

2.2 JT-60Uの中性子モニタ

1990年に、FCを使用したJT-60U用中性子モニタを製作した。この装置の主要機器は、検出器、プリアンプ、及びJT-60Uでは総合アンプと呼ばれている信号処理ユニットである。これら



は、従来原子力発電用機器として用いられていたものであり、厳しい電磁ノイズ環境となる核融合炉での使用は考えられていなかった。そこで、電磁ノイズの影響を最小限にするために、検出器とプリアンプを一体化し、プリアンプと総合アンプ間の距離もできるだけ短くして、総合アンプを核融合炉本体室内に設置した。しかしその後、JT-60Uの性能が向上し、また、運転期間が長くなるに従って、核融合中性子によるプリアンプ及び総合アンプの放射線劣化が発生し、その対策が必要であることがわかった。

2.3 LHD用機器の開発と製作

軽水素やヘリウムを用いた放電によりプラズマの閉込め性能や、温度、長パルス化運転などで大きな成果を上げたLHDは、現在いっそうの性能向上を目指し、重水素放電のための改造が進められている。改造後の装置からは核融合中性子が発生するため、環境モニタとしての役割に加え、安全管理と実験データ取得の両面から中性子モニタシステムの新設が計画された。

LHDでは、JT-60Uでの経験に基づき、放射線劣化対策を行った。検出器とプリアンプはJT-60Uと同一のものを使用した。プリアンプをLHD本体から離して本体室地下に設置し、LHDではPCM (Pulse Campbell Measurement) ユニットと呼ばれている信号処理ユニットを本体室外に設置した。一方、検出器とプリアンプ間及びプリアンプとPCMユニット間の距離が長くなったため、電磁ノイズ対策をいっそう強化する必要が生じた。検出器とプリアンプ間の信号ケーブルに電磁シールド性能が高い3重同心ケーブルを採用し、更に伝送路全体を金属製電線管でシールドし、プリアンプ盤に隙間なく接続した。また、プリアンプとPCMユニット間のケーブルも電線管でシールドし、フェライトコアやノイズカットトランスなど

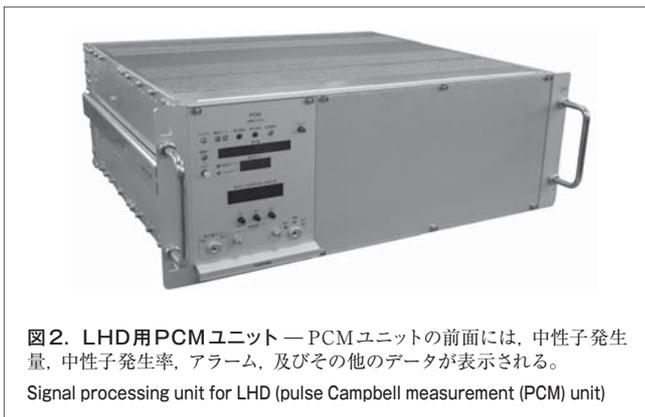


図2. LHD用PCMユニット—PCMユニットの前面には、中性子発生量、中性子発生率、アラーム、及びその他のデータが表示される。
Signal processing unit for LHD (pulse Campbell measurement (PCM) unit)

のノイズ対策部品を適所に配置するとともに、接地線の接続先にも配慮した。

このシステムには、約1 msの速い信号処理と6桁程度の広いダイナミックレンジが要求されるが、JT-60Uでは原子炉用の機器をそのまま使用したため、中性子信号応答時間に問題があった。また、JT-60Uや米国のTFTR (Tokamak Fusion Test Reactor) など、先行する重水素放電の核融合装置に用いられたアナログ式回路は、既に廃形のため新規製作が困難であった。そこで、LHDでは中性子ブリップ現象^(注3)も観測できるように、最適なノイズ除去フィルタを備え、キャンベル法測定系の応答時間を高速化した専用のデジタル式PCMユニットを開発した(図2)。

専用のPCMユニットを開発するため、まずNIFSとともに、LHDの環境ノイズ測定を行って除去すべきノイズ周波数を特定し、ノイズ除去と中性子応答との両立を図った専用フィルタを設計した。このフィルタ特性は、原子炉用のものとは異なるため、検出器波形を用いたモンテカルロシミュレーションを実施するとともに、実験用原子炉の実際の中性子信号を用いて中性子モニタとしての性能検証を実施した⁽¹⁾。

このPCMユニットは、高速炉の炉外検出器用に開発されたFCとともに製作され、2014年度の作業でLHDに設置された。

2.4 ITER用機器の開発計画

ITERは、核融合燃料である重水素とトリチウムの長時間燃焼によるエネルギー増倍の実証を目的としているため、核融合反応によりプラズマ中から大量の中性子が発生する。その測定には、わが国が提案して調達合意した、検出器として小型のマイクロFC (μ FC) を備えた μ FCシステムが用いられる。

JT-60U及びLHDでの実績と経験を踏まえて、現在、 μ FCシステム用機器の開発を行っている。ITERでは真空容器による中性子の減衰を受けずになるべく純粋な中性子発生率をモニタするため、軽水炉の炉内モニタで実績のあるSRNMタイプの核分裂計数管⁽²⁾をベースとした μ FCを環境の厳しい真

真空容器内に設置する。したがって、 μ FCやそこから信号を取り出すための機器は、熱や電磁力などに対する種々の厳しい条件を満たさなくてはならない⁽³⁾。この要求に対し、JAEAと東芝グループは、 μ FCとその台座や、無機絶縁 (MI: Mineral-insulated) ケーブルとその固定用クランプ、MIケーブル接続部、真空境界機器である真空導入端子などの機器の耐環境性能を、詳細な設計とともに、多様な健全性評価試験や応力解析などにより実現した。

海外に建設されるITERでは現地対応が難しくなるため、真空容器外で行う信号処理のためには遠隔で、あるいは、オペレーターに指示するだけで問題を解決できるような機器を開発する必要がある。

ノイズ事象で問題が発生すると、その解決に長期間を要することを軽水炉で経験している。特にキャンベル法による中性子測定は、検出器の微弱信号の揺らぎを測定するので、環境ノイズの影響に配慮する必要がある。更に、ITERは、JT-60Uと同様にトロイダルコイルを採用した核融合炉なので、ノイズ源としてコイルからの強力な漏れ磁場もある。このためITERが運転状態であっても調整可能なノイズフィルタを適用することを提案した。

キャンベル法は、パワースペクトル密度を算出しているので、検出器信号をフーリエ変換して得られる周波数スペクトルからも計算できる。この周波数スペクトルの状態で、特定の周波数の信号だけを削除することで、任意のフィルタ特性を実現することができる⁽⁴⁾。周波数の指定をオンラインで行うことで遠隔操作が可能になり、ユーザーインターフェースを通じて行うことも可能である。

ITERでは、この方式によるキャンベル法測定系を採用した μ FCシステムを実用化する計画である。

3 ITER真空容器内の検出器関連機器の開発

μ FCシステムは2012年4月、ITER機構とJAEAの間でわが国での調達が正式に合意され、東芝グループがその詳細設計を受注した。そしてそれまでの経験を踏まえ、同年より本格的にITER真空容器内機器の開発及び設計に着手した。

3.1 真空容器内機器の据付け環境

μ FCは、ブランケットと真空容器の2 cmあまりの間隙に上下2か所の高さで真空容器に取り付けられ、MIケーブルはそこから上部ポートまで間隙中を引き回される。そして上部ポート外端の下側取出し配管から真空導入端子を通じて真空容器外に取り出され、信号処理ユニットまでの外部ケーブルに接続される。真空容器内のこれらの機器は、製造時の熱処理や運転中の核発熱などにより数百℃の高温にさらされる。また、プラズマの崩壊現象 (ディスラプション) や垂直移動現象 (VDE: Vertical Displacement Events) などのプラズマ不安定現象に

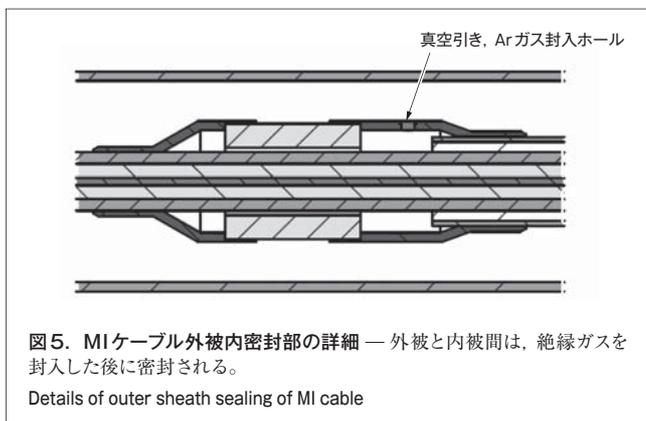
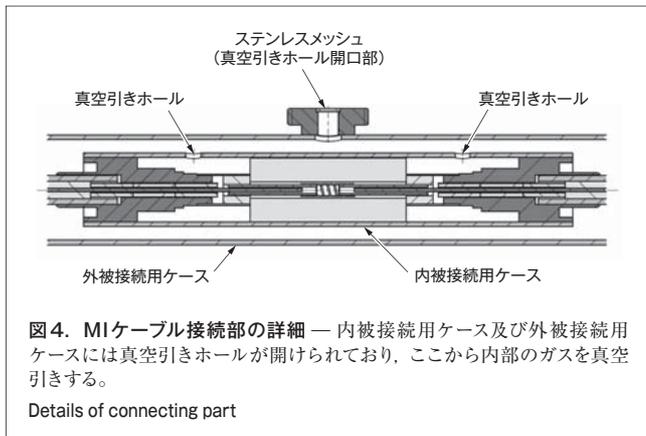
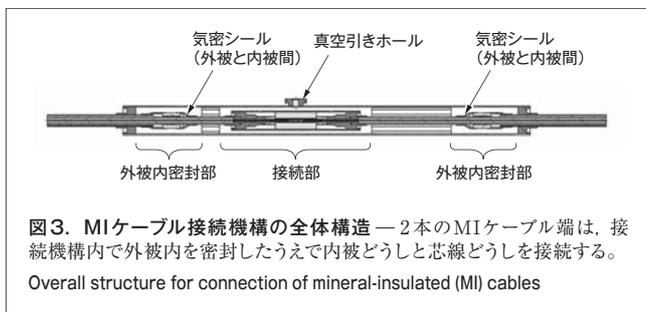
(注3) プラズマ加熱のための中性粒子入射時に、中性子発生量が急増する輝点現象。

より、複雑な電磁力を受けて強力な応力が発生するとともに、疲労や、摩耗、振動などにより劣化する可能性がある。この環境下においても真空容器内機器は十分な強度を保ち、 μ FCやMIケーブルからのガス漏れを制限値以下に保ちながら、健全な信号伝送性能を維持しなければならない。

これらの機器のうち、MIケーブルについては、ITER機構の予備設計レビュー (PDR: Preliminary Design Reviews) 及び最終設計レビュー (FDR: Final Design Reviews) で適用性の承認を受け、実機製作の作業に入っている。

3.2 検出器とMIケーブルの接続及び固定

μ FCシステム用機器は、他の真空容器内機器の複雑な据付け工程に準じて異なる時期に設置される。そのためMIケーブルには接続機構が必要となる。MIケーブル接続機構の全



体構造を図3に示す。また、MIケーブル接続部の詳細を図4に、MIケーブル外被内密封部の詳細を図5に示す。

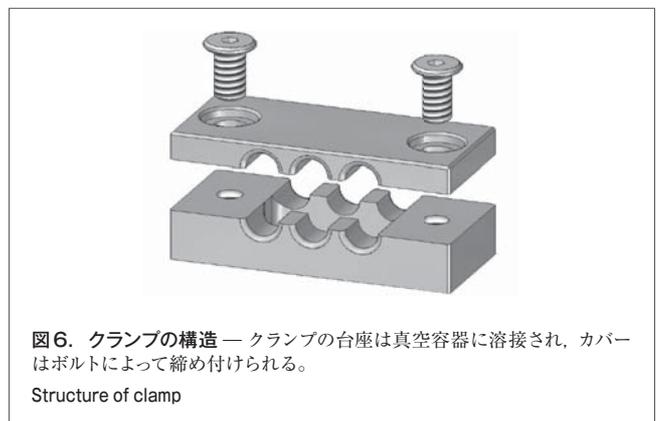
接続部は、MIケーブル本体とともに、まず高温環境下での運転性能評価のため380℃(部分加熱)までの熱サイクル試験及び540℃までの耐熱性能試験を実施し、ITER基準が要求するリーク率 (10^{-10} Pa \cdot m³/s以下)、絶縁抵抗値 (100 M Ω 以上)、耐電圧 (放電がないこと)、及びインピーダンス (10%以下の減衰と5%以下の反射)を確認した。更にMIケーブル及び接続機構には、内部に残留するガスが運転中に漏れいして真空度が下がるリスクへの対策が要求されている。そこでMIケーブルは、内被内と外被内を共に接続部で密閉し、接続作業後に接続部内の残留ガスを容易に排気できる設計とした。この構造の妥当性は、2015年度中に確認する予定である。

μ FCや接続部は台座を用いて真空容器に取り付け、MIケーブルはクランプによって固定する。クランプの構造を図6に示す。これらの機器には真空容器内の環境下で強力な応力が生じる。それに対する健全性はANSYS[®]コードを用いた解析により検証した。その結果、クランプの構造設計及び配置を適切に行うことで、熱や、電磁力、真空容器の歪み(ひずみ)など、いずれの負荷に対してもクランプ本体、ボルト、及び溶接部に発生する応力は基準値の14.7 MPa以下となり、運転中も健全性を維持できることが確認された。

3.3 真空導入端子の開発

真空導入端子はITERの安全重要機器に指定され、真空容器内の健全性を守るために非常に高い安全性と品質保証が要求される。この要求を満たすため、最終設計では、プラズマ側高真空からも大気からも隔離した中間真空部を設け、MIケーブル端をその中で密封したうえで芯線と内被を耐熱コネクタにつなぐ。更に、耐熱コネクタをフィードスルーにつないで大気側に取り出したうえで、信号処理ユニットからのケーブルに接続する構造にした。下側取出し配管に設置した真空導入端子の構造を図7に示す。

この構造で健全性がもっとも懸念されるのは絶縁材ろう付け部分であり、MIケーブルより高い安全重要度が要求されて



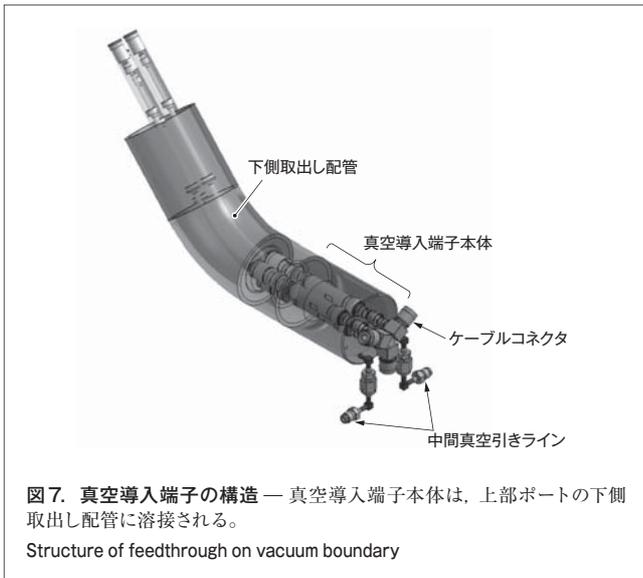


図7. 真空導入端子の構造 — 真空導入端子本体は、上部ポートの下側取出し配管に溶接される。
Structure of feedthrough on vacuum boundary

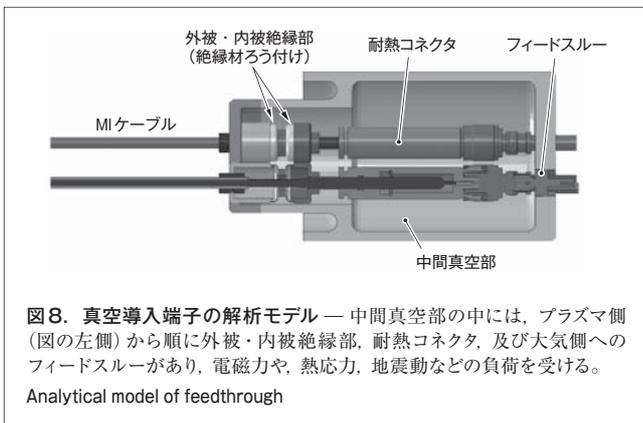


図8. 真空導入端子の解析モデル — 中間真空部の中には、プラズマ側(図の左側)から順に外被・内被絶縁部、耐熱コネクタ、及び大気側へのフィードスルーがあり、電磁力や、熱応力、地震動などの負荷を受ける。
Analytical model of feedthrough

いるが、試作と240℃までの昇温試験により、熱負荷に対しては気密性能の目標である 10^{-11} Pa・m³/sがほぼ達成できる強度であることを確認した。また、電磁力に起因する振動や熱応力などに対しては、図8に示すモデルを用いた解析により、絶縁部の強度が十分大きいことを確認した。

一方、下側取出し配管の内部はプラズマ側が高真空であり、配管と真空導入端子との溶接は真空境界の健全性に直結する。これについては、設置個所で使用可能な画像診断法や放射線による非破壊検査法などで溶接部を診断し、溶接結果の妥当性を確認する計画である。

4 あとがき

現在、核融合エネルギー利用の実現に向けて、ITERの建設やLHDとJT-60Uの改造が精力的に進められている。ここでは、これらに用いられている中性子計測システムに関連する機器の設計と検証のための試作や、試験、解析などについて、その一部を述べたが、これまで開発した機器はおおむね要求

される仕様を満たすことが確認できた。また、中性子計測システムでの信号処理ユニットには高い時間分解能や広いダイナミックレンジなどが要求されるが、LHD用に開発したユニットでそれらの性能を実現できることが確認できた。今後、LHD本体でのノイズ試験や較正試験などを経てLHDの安全管理及び実験用機器として問題ないことを証明するとともに、ITERへの適用も目指して改良し、核融合施設の重要な機器として発展させていく。

文献

- (1) Isobe, M. et al. Wide dynamic range neutron flux monitor having fast time response for the Large Helical Device. Rev. Sci. Instrum. **85**, 11, 2014, p.11E114-1 - 11E114-4.
- (2) 小林 明 他. BWR用中性子検出器の開発. 東芝レビュー. **34**, 10, 1979, p.844 - 847.
- (3) Ishikawa, M. et al. Development of in-vessel components of the microfission chamber for ITER. Rev. Sci. Instrum. **81**, 10, 2010, p.10D308-1 - 10D308-3.
- (4) 東芝. 中性子測定装置およびその測定方法. 特許第5665783号. 2014-12-19.

・ ANSYSは、ANSYS, Inc. 又はその子会社の米国及びその他の国における商標又は登録商標。



山内 通則 YAMAUCHI Michinori

電力システム社 原子力事業部 原子力電気システム設計部。
核融合装置の計測技術開発に従事。日本原子力学会会員。
Nuclear Energy Systems & Services Div.



河野 繁宏 KONO Shigehiro

電力システム社 府中電力システム工場 原子力制御システム部
主査。中性子測定システムの開発に従事。日本原子力学会会員。
技術士(原子力・放射線部門)。
Fuchu Operations - Power Systems



石澤 和哉 ISHIZAWA Kazuya

東芝電子管デバイス(株) 電力管技術部主務。
放射線検出器の開発に従事。
Toshiba Electron Tubes & Devices Co., Ltd.