

大学及び研究機関向け 核融合実験装置の開発と性能向上への取り組み

Efforts for Development and Enhancement of Experimental Devices for Nuclear Fusion Research in Universities and Research Institutions

五味川 健治

■ GOMIKAWA Kenji

国内の大学や研究機関では、ITER (国際熱核融合実験炉) や改造が進められている臨界プラズマ試験装置 JT-60SA (Super Advanced) などのトカマク型の核融合実験装置とは異なるプラズマ閉込め方式の研究開発が行われてきた。例えば、国立大学法人 筑波大学のミラー型実験装置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) といった実験装置によって、核融合反応による発電の実現に向けた独創的な研究が進められている。

東芝は、核融合研究開発の黎明 (れいめい) 期からこれら大学や研究機関の実験装置を開発及び製作し、納入してきた。その中でもLHDでは現在、高温・高密度プラズマの性質を明らかにすることを目的とした重水素実験に向けた準備が進められている。当社は、三重水素 (トリチウム) 総発生率監視装置の導入や垂直中性粒子入射装置 (垂直NBI) の増強改造などを行い、重水素実験開始に向け貢献している。

In contrast to nuclear fusion devices of the tokamak type, typified by the ITER and JT-60SA (JT-60 Super Advanced) facilities, universities and research institutions in Japan are also promoting the research and development of nuclear fusion devices using unique methods to produce the magnetic field that confines the plasma. These include a mirror type device of the University of Tsukuba and the Large Helical Device (LHD) of the National Institute for Fusion Science (NIFS), one of Japan's inter-university research institutes.

Toshiba has been developing, manufacturing, and delivering such experimental devices to universities and institutes since the beginning of nuclear fusion research. Under the LHD project, NIFS has been making preparations for a deuterium experiment program to investigate the characteristics of high-temperature and high-density plasmas, as the next stage of nuclear fusion research for the realization of nuclear fusion power generation. In this program, we are contributing to the installation of a tritium production rate monitor and the enhancement of a perpendicular neutral beam injector (NBI).

1 まえがき

わが国の核融合研究は、各大学や研究機関で開始された。ここ数年は核融合装置の大型化に伴って、国際協力によって進められているITER計画や国立研究開発法人 日本原子力開発機構が推進するJT-60SA計画といった大型プロジェクトに集約されてきているが、東芝はこれらが計画される以前から、各大学や研究機関での核融合研究に貢献するため、多くの実験装置の開発や製作を行い納入してきた。

ここでは、当社が納入した大学及び研究機関向け核融合機器のうち、主に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) の概要と、LHDでの今後の重水素実験計画に対する当社の取り組みについて述べる。

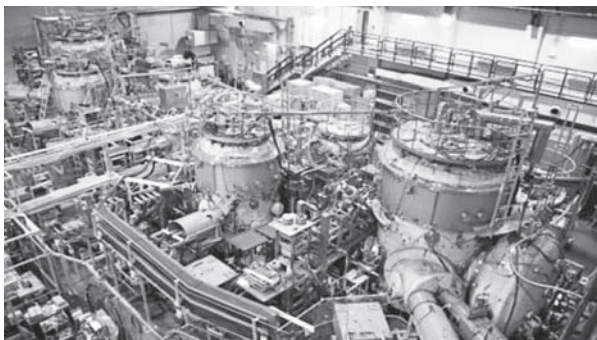
2 大学及び研究機関向け核融合実験装置

これまでに当社が大学や研究機関に納入してきた核融合実験装置を表1に示す。各大学では様々なアプローチで核融合実験装置の研究が行われ、当社は40年以上にわたって装置の開発、製作、及び建設に貢献してきた。

表1. 東芝が納入した国立大学法人及び研究機関向け 核融合実験装置
Experimental devices for nuclear fusion research delivered by Toshiba

装置名称	納入先	納入 (年)	東芝製作機器
RFC-XX	名古屋大学	1976	装置本体
GAMMA 6	筑波大学	1978	装置本体
GAMMA 10	筑波大学	1983	装置本体、加熱装置、電源・制御装置、データ処理装置
WT-III	京都大学	1986	装置本体、加熱装置、電源・制御装置
ヘリアック	東北大学	1988	装置本体
LHD	NIFS	1998	超電導ボロイダルコイル、加熱装置、電動発電機
RT-1	東京大学	2005	装置本体、加熱装置、電源
QUEST	九州大学	2008	装置本体

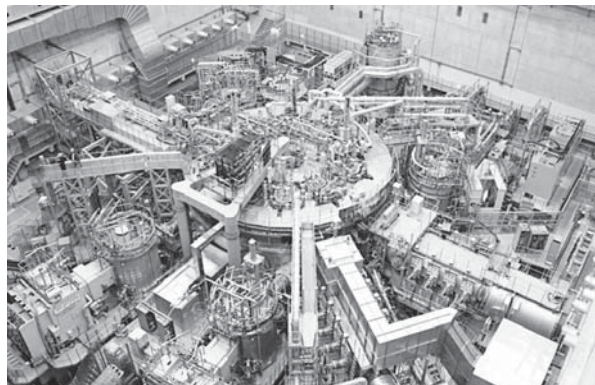
表1の中でも、筑波大学 プラズマ研究センターのGAMMA 10 (図1)、国立大学法人 九州大学 応用力学研究所 高温プラズマ力学研究センターに設置されているプラズマ境界力学実験装置 (QUEST) (図2)、及び国立大学法人 東京大学のRT-1は現在でも実験や研究が行われている。GAMMA 10は現在では数少ない複合ミラー型核融合実験装置であり、QUESTは球状トカマクと呼ばれるトーラス型の核融合実験装置である。またRT-1は、トーラス型の真空容器の中で高温超電導コイルを磁気浮上させ、それによってプラズマを閉じ込める非常にユ



資料提供：筑波大学

図1. GAMMA 10 — 複合ミラー型核融合実験装置であるGAMMA 10は、1983年に筑波大学に納入され、現在でも実験が行われている。

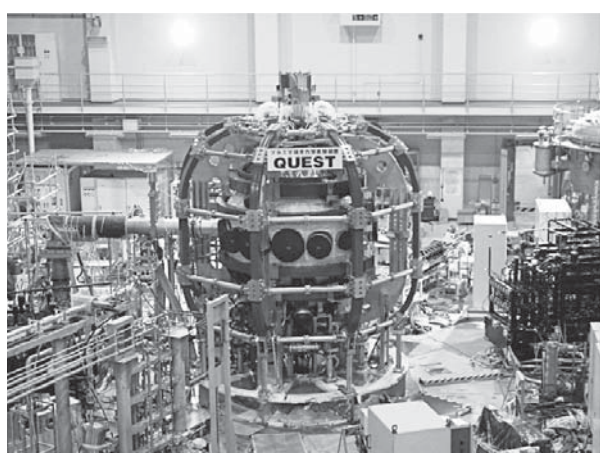
GAMMA 10 tandem mirror type plasma confinement device



資料提供：NIFS

図3. LHD — 超電導コイルを用いた世界最大級のヘリカル型核融合実験装置である。

LHD



資料提供：九州大学

図2. QUEST — 九州大学のプラズマ境界力学実験装置で、球状トカマクと呼ばれる新しいタイプの核融合実験装置である。

QUEST plasma boundary dynamics experimental device

ニークなプラズマ実験装置である。

3 LHD

核融合研究を国内外の大学や研究機関と協力して進め、同時に次世代の優れた人材を育成することを目的として1991年にNIFSが設立され、学術研究の推進のためにわが国独自のアイデアに基づくLHDの建設が開始された。プラズマの閉込めに超電導コイルを用いた、世界最大級のヘリカル型核融合実験装置であるLHD(図3)は、1998年に完成し、プラズマ運転を開始した。

ここでは、LHD計画の中で当社が建設当初から関わってきたポロイダルコイル、NBI、電子サイクロトロン加熱装置(ECH)、及びはずみ車付電動発電機設備について述べる。

3.1 ポロイダルコイル

LHDで使われているポロイダルコイルはプラズマ閉込めに使用される超電導コイルの一つで、LHDの赤道面に対して垂直に磁場を印加するものである。LHDのポロイダルコイルはヘリカル型真空容器の外周側に2個、内周側に4個配置されており、6個のポロイダルコイル全ての製作を当社が担当した。

このコイルは超電導線材にニオブチタン(NbTi)合金を使用した強制冷却方式を採用している。最大外径11.7mは超電導コイルとして1998年当時世界最大であった。このコイルの製作では、巻線後の絶縁硬化熱処理でコイルが変形するにも関わらず、最大外径11.7mに対して±2mm以内の寸法精度が要求されるなど、技術的困難を極めた。当社は、実規模での試作を行って熱処理後の変形量を予測し、かつ巻線中に寸法を測定して巻幅を調整することで、全てのコイルを要求精度内で製作した。

3.2 NBI

NBIは、イオン源で生成したイオンを加速して得た高エネルギーイオンビームを中性粒子ビームに変換してプラズマに注入し、プラズマを加熱する装置である。現在LHDには負イオン源を使用した接線NBIが3基と、正イオン源を使用した垂直NBIが2基ある。当社はこのうち全NBIの電源、NBI1号機のビームラインと負イオン源、及びNBI4号機の正イオン源の製作を担当した。また、装置の大型化に伴って入射エネルギーも高強度化したため、NIFSの協力も得て、ビームラインと負イオン源の新規技術開発を行った。

負イオンビームから変換された中性粒子ビームを入射するNBI1号機では、横250×縦1,250mmの縦長の形状に配列した多孔電極から180kV-35Aを超える負水素イオンビームを引き出す世界最大級の負イオン源を製作した。

NBIでは中性化されずに残る高エネルギーイオンビームを熱

負荷として除熱する必要があるが、通常の冷却管では除熱性能が足りずにバーンアウトを起こす問題があった。これについてはねじりテープを配管内に入れたスワール伝熱促進管により10 MW/m²のイオンビームを除熱できるビームダンプを開発し、信頼性の高いビームラインを製作することができた。

3.3 ECH

ECHは、プラズマ中の電子が共鳴する周波数(サイクロトロン周波数)を持つ電磁波をプラズマへ入射させ、共鳴によってプラズマ中の電子を加熱する装置である。ECHは大きく分けると、電磁波を生成するジャイロトロンとその電源、生成された電磁波をプラズマまで低損失で伝搬させる導波管、及びプラズマへの電磁波の入射方向を制御するアンテナから構成される。当社はこれらのECHシステム一式の設計と製作を担当した。

3.4 はずみ車付電動発電機

NBI, ECHといった加熱装置は、その運転時に大電力を消費する。しかし、LHDの運転計画では加熱装置の運転時間は5分の運転周期の中で最大10sと短いので、商用電力システムからの受電負荷を平準化するために、縦型のはずみ車付電動発電機を使用している。当社はこのはずみ車付電動発電機の製作を担当した。

電動発電機は、運転周期のうち加熱装置が運転していない時間に電動機で発電機の回転子をはずみ車として使用して回転エネルギーを蓄積させる。その後加熱装置の運転のタイミングで発電機を運転し、その回転エネルギーを電力として加熱装置へ供給する。発電容量は250 MVAである。これらには当社で蓄積してきた縦型水力発電機の技術を応用した。

4 LHDでの重水素実験計画

現在LHDのプラズマ実験では水素を使用しているが、NIFSは、これを重水素に変更して核融合発電の実現に向けて研究をいっそう進展させることを目指している。当社もこの計画に合わせて、主に次のような装置を納入してきた。

4.1 トリチウム総発生率監視装置

重水素実験では、自己点火条件は満たさないものの微量ながら重水素同士が核融合反応を起こし、中性子とトリチウムが放出される。水素の放射性同位元素であるトリチウムは、LHD外部への放出や拡散を避けるために回収する必要があり、年間のトリチウム総発生量に基づいて重水素実験期間が決められている。

この発生量の管理のためには、リアルタイムでのトリチウム総発生率の監視が必要になるが、トリチウムの直接の計測は困難である。一方で、この反応の副産物である中性子は検出できることから、実験中の中性子発生率を測定することでトリチウム総発生率を監視できる。中性子検出器から計測装置までを一

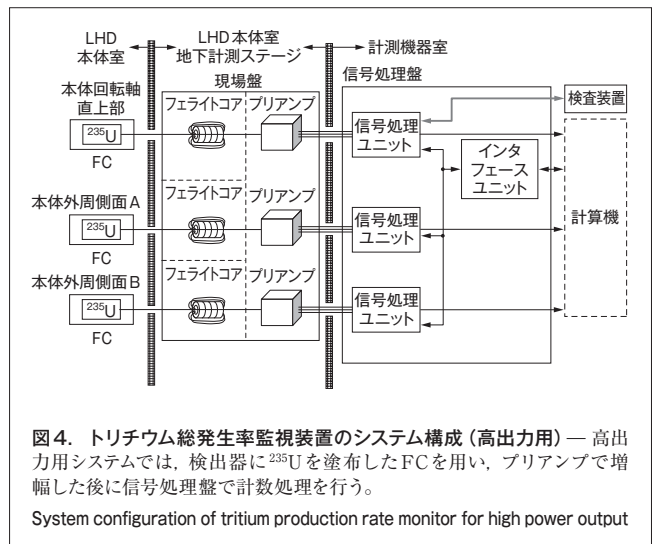


図4. トリチウム総発生率監視装置のシステム構成(高出力用) — 高出力用システムでは、検出器に²³⁵Uを塗布したFCを用い、プリアンプで増幅した後に信号処理盤で計数処理を行う。
System configuration of tritium production rate monitor for high power output

貫して開発できる会社として、当社がこのシステムを受注した。この装置には出力に合わせて低出力用(0~1×10³カウント/s)と高出力用(1×10³~5×10⁹カウント/s)の2種類の測定システムが用意されている⁽¹⁾。高出力用のシステム構成を図4に示す。高出力用検出器にはウラン235(²³⁵U)を検出管に塗布した核分裂計数管の一種であるフィッションチャンバ(FC)を使用し、低出力用にはホウ素10(¹⁰B)又はヘリウム3(³He)を用いた計数管を使用する。本体室地下計測ステージの現場盤にてプリアンプで信号を増幅した後、放射線管理区域外となる計測機器室内の信号処理盤で計数を行い、計算機や検査装置へと出力する。FCは、プラズマの上下振動の影響が少ないLHD本体外周側面の赤道面上に2か所と、プラズマ位置の影響が少ないLHD本体回転軸直上の1か所に設置した。

低出力での測定に使用するパルス計数法は、中性子を検出した際に出るパルスを数える方法で、高計数率の領域では中性子パルスのパイルアップ(積重なり)により数え落としが発生し、測定した中性子計数率と実際の中性子発生率との間の直線性が崩れてしまう。一方で、高出力用の測定に使用するMSV(Mean Square Value)法とも呼ばれるキャンベル法は、中性子検出器出力信号の揺らぎ成分の二乗平均値を測定することで、高計数率において良好な直線性が得られるものの、低計数率では相対的にバックグラウンドノイズの割合が増すことで実際よりも高い測定値を示す。

このシステムでは、パルス計数法とキャンベル法が共に直線性を維持している範囲に測定法を切り替える遷移領域を設定し、遷移領域ではこれら二つの値の加重平均演算を用いて二つの測定領域をスムーズに切り替えられるようにした(図5)。このシステムを京都大学 原子炉実験所にて核分裂で生じた実際の中性子を用いて検証したところ、遷移領域で良好な直線性を確認することができた。

放射線計測を行うにあたり、最大の障害は電磁ノイズであ

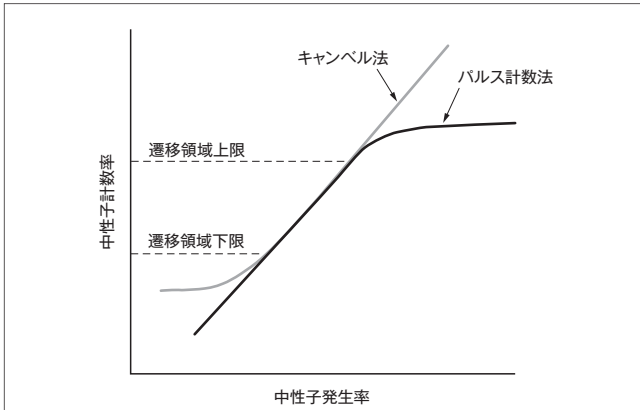


図5. パルス計数法とキャンベル法の遷移領域 — パルス計数法は高出力側、キャンベル (MSV) 法は低出力側で直線性が悪い。このため、互いに直線性が出ている領域を遷移領域として計測方法を切り替える。
Transition region of neutron counter rates measured by pulse count system and mean square value (MSV) count system

る。特にLHDでは様々な計測・運転・制御装置が実験装置を取り巻くように配置されており、これらから生じるノイズが中性子計測に及ぼす影響には注意が必要である。特に加熱装置の一つであるNBIでは、通常運転中であっても高電圧の電極間での放電現象 (ブレイクダウン) が頻繁に発生し、その際に大きな電磁ノイズを近傍へと放出する。この影響を把握するため、当社では実機製作前からNIFSでのプラズマ実験の際にノイズ測定を行った。その結果、運転中に発生する有害なノイズを確認し、ノイズ対策としてデジタル処理でそのノイズを除去する機能を設けることにした。

これらを基にトリチウム総発生率監視装置を開発し、2015年3月に据付けが完了した。

4.2 垂直NBI増強改造

LHDの重水素実験計画における設備増強の一環として、プラズマの主加熱装置である垂直NBIの1機を40 keV-6 MWから60 keV-9 MWへと増強する計画があり、このうち垂直NBIを構成する電源とイオン源の改造を当社が担当した。

今回の改造内容の概要を図6に示す。既設加速電源は直流40 kV電源であり、直流20 kVの電源を新たに製作して既設電源と直列に接続して直流60 kV電源を実現する。また、印加電圧の上昇に伴い、イオン源についても60 kV運転時の絶縁性能及び熱負荷耐性を向上させる改造を行う。

加速電源はNBIの性能を左右する非常に重要な電源であり、加速電極群に直流高電圧を供給するだけでなく、ブレイクダウンと呼ばれる電極間の短絡が起きた場合に、高速に供給電力を遮断して電極の保護を行う。改造後は既設電源と増設電源が直列接続されるという特殊な構成であることから、運転時に発生しうるリスクを考え、それを回避するために主に以下の対策を盛り込んだ。

- (1) 直列接続された既設電源と増設電源を同じタイミング

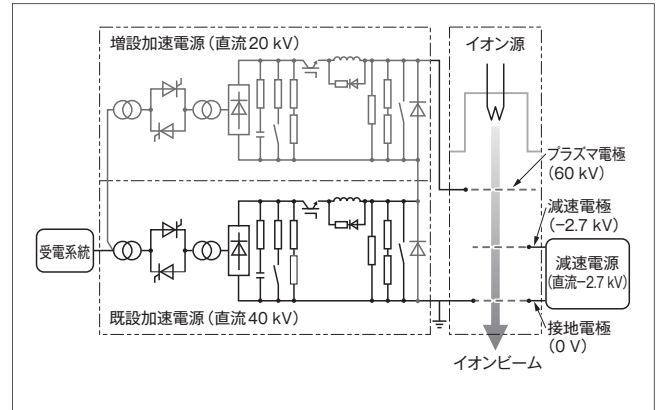


図6. 垂直NBI改造の概要 — 垂直NBIの主回路単線結線図を示す。灰色で示した部分が、今回改造 (増設) を実施した部分である。
Single-line diagram of main circuit for perpendicular NBI

で動作させて出力波形を最適化できるように既設電源のデジタル制御化を実施

- (2) それぞれの波形の立上り/立下りのタイミングがずれた場合に、電源を保護するための回路 (バイパスダイオード) を追加
- (3) ブレークダウン時に発生するサージが出力電圧の上昇に伴って増大することを抑制するために、既設サージロックの並列抵抗値を変更

これらの対策を実施した後、2014年9月に工事及び現地調整を完了した。

5 あとがき

当社が核融合開発の黎明期から国内の大学に納めてきた核融合実験装置の概要と、NIFSのLHDに対する当社の貢献について述べた。

現在、大学や研究機関では核融合炉の実現に向けた研究開発が精力的に行われている。特に、NIFSでは核融合研究開発の次期計画である重水素実験への準備が進められており、当社はトリチウム総発生率監視装置の導入や垂直NBIの増強改造を皮切りに、重水素実験開始に向け、今後も貢献していく。

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.



五味川 健治 GOMIKAWA Kenji

電力システム社 原子力事業部 原子力先端システム設計部主務。
核融合システムのエンジニアリング業務に従事。
Nuclear Energy Systems & Services Div.