



講座 核融合施設における放射線計測の基礎

4. JT-60 における管理測定の実状

4. Radiation Control in the JT-60 Facilities

4.1 中性子環境下におけるトカマク装置運転のための放射線計測

4.1 Radiation Measurement for Tokamak Fusion Device Operation under Neutron Environment

助川 篤彦

SUKEGAWA Atsuhiko

日本原子力研究開発機構核融合研究開発部門

(原稿受付：2013年7月25日)

臨界プラズマ試験装置 JT-60 の重水素プラズマ実験で、中性子計測による放射線管理を実施した。中性子計測装置に核分裂計数管を用い、インターロック機能を有するプラズマ発生装置として、ハードウェアの整備を行うことで安全運転の観点から放射線管理を実施するとともに、重水素核融合反応では中性子発生とほぼ同じ確率で生成するトリチウム量（トリチウム生成量）を把握してきた。これらと併せて、放射線障害防止法で定められている JT-60 の使用施設内外および周辺環境の中性子計測および中性子に起因する放射線計測を行うことで、関連法令および地元自治体の行政に沿った重水素実験時の放射線管理に務めてきた。

Keywords:

JT-60, radiation safety, interlock, neutron measurement, fission chamber, calibration, ^{252}Cf source

4.1.1 はじめに

臨界プラズマ試験装置 JT-60 の重水素プラズマ実験による中性子発生を把握し、その計測に基づいた装置運転と周辺環境の監視を行うとともに、放射線障害防止法を含む関係法令および地元自治体の原子力安全行政に沿った放射線計測による装置運転管理を行った。その概要を紹介する。

4.1.2 中性子計測の役割

JT-60 の重水素運転にかかる放射線管理に関する項目は、図1に概念図を示すように、①装置運転時の放射線（X線、中性子、中性子に起因するガンマ線の混合場）の測定、②遮蔽（管理区域内外、敷地境界の線量測定）、③排気・排水の監視、④中性子計測装置の較正時および装置保守時の外部被ばく、内部被ばくの測定が主となる。

なかでも、JT-60 の放射線計測の一つである中性子計測の役割は、プラズマ診断のみならず、放射線障害を防止するよう装置を安全に運用監視することにある。また、中性子を計測することにより重水素プラズマにおいて、ほぼ同じ確率で反応が起こるトリチウム生成量を間接的に把握することにもなる。

4.1.3 JT-60 運転にかかる関係法令と対応

JT-60 は、昭和60年から平成元年10月までは、水素プラズマを用いた実験だったので、労働基本法の下で法律であ

る厚生労働省労働安全衛生法電離放射線障害防止規則（電離則）に基づく放射線装置として運転され、管理されてきた。電離則に基づく放射線計測と管理については別記事を参照されたい[1]。

その後、JT-60 はプラズマ燃料として、水素に加えて重水素を用いた実験を進めるため、平成元年11月から大電流化改造工事が実施された。

JT-60 で重水素実験をするには、平成元年4月に原子力基本法の下で法律である放射線障害防止法（障防法）に基づくプラズマ発生装置に指定されたことにより、障防法の下で運転し、管理することとなる。

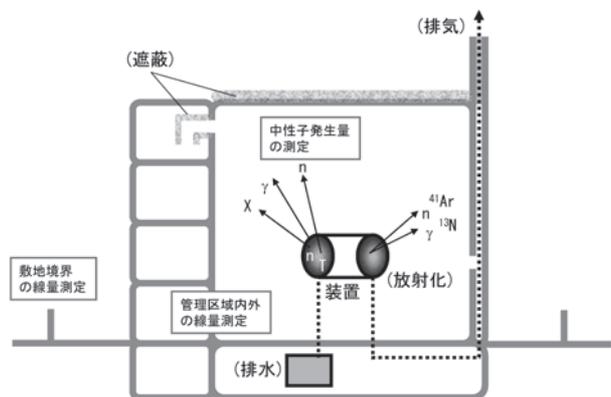


図1 JT-60 施設にかかる放射線管理の概念図。

JT-60では、JT-60とその追加熱装置を組み合わせた状態で、運転に必要な中性子発生量(瞬間最大、週、3月、年)を国に申請し、装置と設置関連施設に対して認可がされている。

障防法で定められている施設検査に合格するまでの準備期間には、JT-60の重水素実験に対応した放射線管理用設備(施設内中性子・ガンマ線モニタ、環境放射線モニタ、ハンドフットクロスモニタの設置等)の増設、障防法で定められている放射線障害予防規程およびその下部規程の作成および制定作業の実施、放射線安全教育および特殊健康診断の実施、²⁵²Cf線源の使用・貯蔵に係る許認可申請業務の実施、²⁵²Cf線源による中性子計測装置の校正作業時の放射線管理等を実施した。

この改造工事後(平成3年7月以降)、障防法によって定められた施設検査および科学技術庁による立入検査を受けた。JT-60に係る施設検査は、中性子発生量(核融合出力)を段階的に上昇させて実施した。平成5年3月に第4回目の施設検査を受け、同年9月に合格証が交付され、障防法に基づく放射線発生装置および放射性同位元素の使用、貯蔵、廃棄に係る適用施設となった(図2)。

また、これと併せて、重水素実験で発生する中性子の計測装置として核分裂計数管を使用するので、原子炉等規制法(炉規法)に基づく核燃料物質の使用に係る適用施設となった。

施設検査に合格した後も、平成20年8月に運転を休止するまでJT-60では、5年毎の定期確認・定期検査を3回実施し、その都度、施設の放射線遮蔽等の安全性を確認してきた。定期検査とは、障防法によって定められた検査のことで、放射線発生装置やその付属設備、放射性同位元素の使用、貯蔵、廃棄に関する施設について、国の検査を受け、許認可申請内容および国が定める技術基準に適合するよう維持され、運用されていることを確認してきた。

図3に示すように、JT-60は、平成3年以降の重水素実験開始以降、障防法に沿った中性子計測による放射線管理を適切に実施してきた。運転を休止するまでに、世界第1位又はトップクラスのデータを産出することで、核融合プラズマの進展に大きく貢献したプラズマ発生装置であったといえる。

4.1.4 トーラス中性子源と中性子環境

核融合トーラスプラズマで発生する中性子は、図4に示すように、主にイオンの温度と密度のプロファイル(典型

平成元年	平成2年	平成3年	平成4年	平成5年
許可申請			施設検査	合格証
	JT-60改造・重水素化対策	重水素実験開始 1.3	2.8 DD中性子発生率(10 ¹⁶ 個/秒)	5.6 (世界第1位)

図2 JT-60装置の施設検査の概要。

的なプラズマとして、中心部で温度や密度が高く、容器の端に近づくにつれて温度や密度が下がる分布)に依存し、ほぼ等方に発生する。

トカマク型核融合試験装置の重水素実験で発生する中性子の振る舞いがどのようになるかについて一例として、3次元モンテカルロ計算コードを使ってシミュレーションしたJT-60同程度の建家内の中性子環境例(総中性子束分布)を紹介する。簡単のため、計算モデルは真空容器、周辺構造物、遮蔽壁、建家で構成されている。図5に中性子環境を示す。中性子束は、プラズマ生成部分となる真空容器周辺部で最も高く、真空容器周辺から遠ざかるにつれ中性子束が減少していることがわかる。また、周辺装置の後方部では、中性子束の濃淡が確認されるとともに、遮蔽壁で隔てた空間部の中性子束が急激に減少していることがわかる[2]。

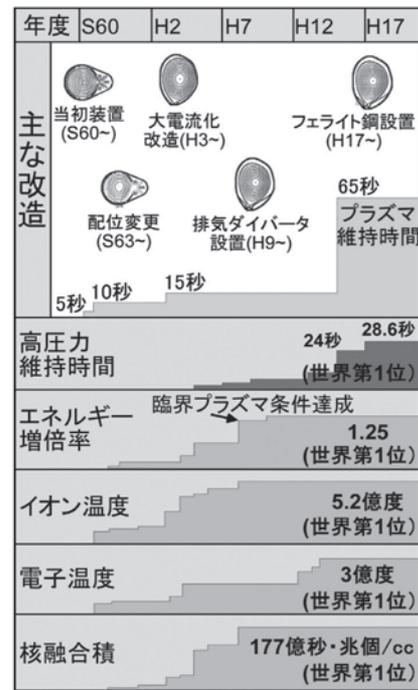


図3 JT-60の核融合プラズマの進展。

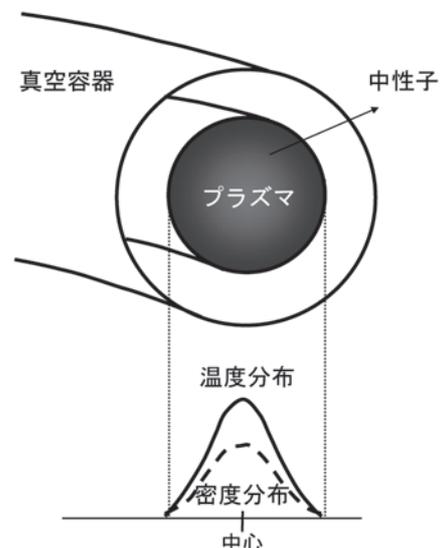


図4 プラズマ断面内のイオン温度分布と密度分布の概念図。

4.1.5 JT-60 での中性子計測

4.1.5.1 中性子計測装置の設置場所

トカマク型核融合装置におけるプラズマ計測では、プラズマ中のイオン系の挙動といった物理現象を理解するには、中性子発生量の時間変化の測定が不可欠であるため、これまでに多種多様な中性子計測装置が開発され利用されてきた。プラズマ物理の理解のための中性子診断方法については、別記事にゆだねることとするが[3], JT-60では、図6に示すように3つの中性子計測装置がサテライトのように真空容器を見込むよう設置されている。

4.1.5.2 核分裂計数管

JT-60では、放射線管理用の中性子計測装置として核分裂計数管を使用している[4]。核分裂計数管は、核融合プラズマ診断用としては、世界標準となっており、米国のTFTR, 欧州のJETといった大型トカマク装置で実績があり信頼性が高い。また原子炉での実績もあり信頼性が高い。ガンマ線によるノイズの影響をうけにくいいため、中性子計測に最適な検出器である。この優位性に加え、ダイナ

ミックレンジが広く取れ、ごく短時間に時間変化するプラズマの中性子計測に適している。さらに、検出器のシグナルと雑音の比(SN)問題、インターロック採用問題等、いずれの点においても安定的に動作する検出器として優れている。以上の観点からJT-60への採用を決定し、国、地元自治体を通して、了解を得た経緯がある。

核分裂計数管からの信号については、計測範囲(パルスモード: $0 \sim 10^5$ counts/s, $10^4 \sim 10^9$ counts/s(キャンベルモード)[5])に連続性をもたせて、JT-60のプラズマ着火時から高性能プラズマ生成時までの中性子発生量を計測している。サンプリング時間は1ミリ秒、場所は3か所(P-3, P-7, P-13)でトロイダル断面水平ポートから真空容器を見込むよう設置されている。

4.1.5.3 核分裂計数管の較正方法

中性子発生量測定において最も重要な事は、核分裂計数管の出力とトラス全体の中性子発生量との関係を較正することといえる。

TFTR, JETといった大型トカマク型核融合試験装置の中性子モニターの標準的較正方法の推奨例が、中性子モニターの較正方法に関するワークショップで報告されている[6]。当時の詳細な点については不明であるが、ここでは、 ^{252}Cf 核分裂計数管を検出器とし、 $\sim 10^7$ 個/秒の ^{252}Cf 中性子源を検出器からトロイダル角で $\pm 90^\circ$ の範囲で、プラズマ軸上40点以上、 $\pm 90^\circ$ 以外でさらに20点以上の位置に置いてスキャンする較正方法が採用されている。

^{252}Cf (半減期: 2.645年)を中性子較正に使う理由として、重水素同士の核融合反応による中性子エネルギーは2.45 MeV(DD中性子)であるのに対し、 ^{252}Cf は平均エネルギー約2.1 MeVのマックスウェル分布で、中性子エネルギーが比較的DD中性子のエネルギーに近いことがあげられる。

JT-60の較正は、上記の標準的方法に沿った方法を参考とし、トカマクの真空容器内に ^{252}Cf の中性子源を置き、それを移動させて、真空容器内の各点から検出器の出力に与える寄与(応答関数)を求める方法とした[7,8]。

JT-60では、18年間の重水素運転期間中に真空容器内の主な改造が3回あり、その都度、較正を実施してきた。

較正前にはあらかじめ、3次元モンテカルロ計算コードを用いてトロイダル角度に対する核分裂計数管の応答関数を評価することで、較正に係るスケジュールをたて、それに従って較正を実施した。図7には、その際に使用した3次元計算モデルを基に逆変換して作成した鳥瞰図による真空容器内の計算モデルの変遷を示す。図8には、トロイダル角度に対する核分裂計数管の応答関数の計算結果を示す。真空容器内の構造が変わっても、実際の ^{252}Cf 線源を使った測定を行うことで核分裂計数管の応答関数を評価し、重水素実験に支障をきたさないよう限られたスケジュール内で確実に較正を実施し、確認してきた。

以下、3回行われた較正に関する方法を述べ、また表1に、簡単なまとめを記す。

(1) 大電流化改造時の較正方法

平成3年の重水素運転を開始する時の核分裂計数管の較正は、真空容器内のトロイダル方向全周磁気軸上に周回

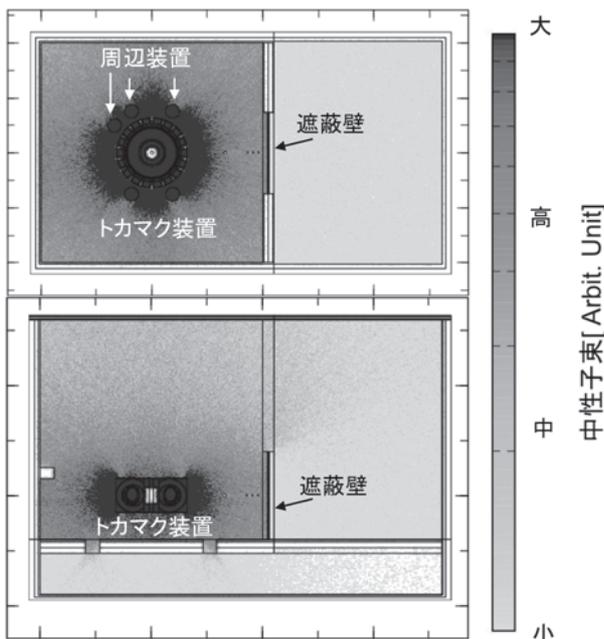


図5 装置建家内の総中性子束分布例。

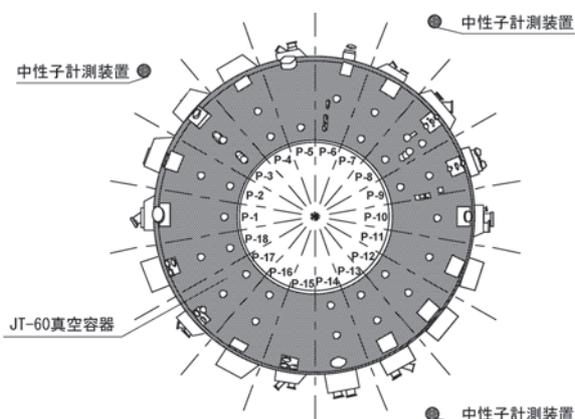


図6 中性子計測装置の設置場所。

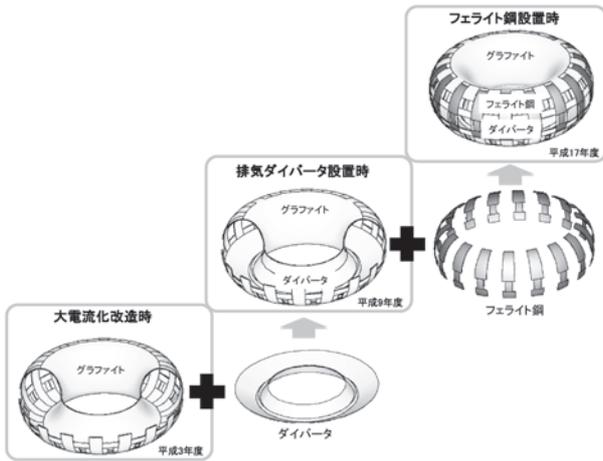


図7 JT-60の主な改造に伴う、真空容器内の変遷。

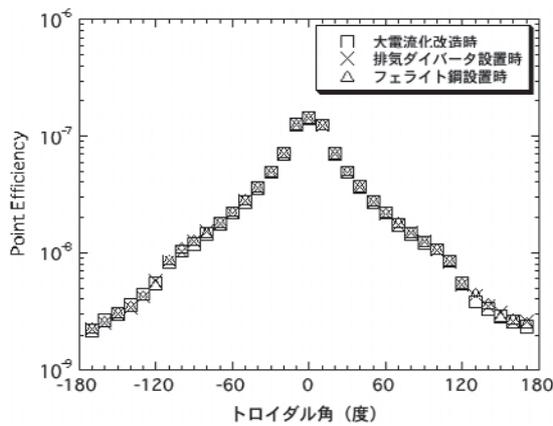


図8 JT-60の主な改造に伴う、核分裂計数管の応答関数。

表1 核分裂計数管の較正のまとめ。

	大電流化改造時	排気ダイバータ設置時	フェライト鋼設置時
較正時期	平成3年	平成9年	平成17年
²⁵² Cf線源の強さ	400 MBq	~100 MBq	240 MBq
測定点数	92 ^{*1}	24	36
1点の測定時間	1000~2000秒	1000~2000秒	500~1000秒

* 1 : JT-60 プラズマの典型的な 2 配位について実施(合計184点)

レールを敷設し、²⁵²Cf中性子源を設置したトロッコを遠隔操作で移動させ、各位置から発生する中性子1個あたりの計数率を測定した。同年7月に較正用線源として²⁵²Cf (400 MBq) を1個導入し、較正を行った。

測定点数はトロイダル角5度毎に、当時の標準的較正方法に沿った内容で実施し、JT-60 プラズマの典型的な2つの配位での磁気軸位置で全92点でのデータを取得した。

検出器自体の感度が正確にはわかっていなかったため、トロイダル角0度の位置で、測定値と計算値を規格化した。

JT-60における中性子発生量の測定誤差については、²⁵²Cf中性子源強度、較正の統計誤差、トロッコとそのレールによる散乱、²⁵²Cf中性子源とDD中性子のエネルギースペクトルの誤差、中性子発生分布、プラズマ位置の変化、キャンベルモード測定/パルス測定の相対誤差、キャンベルモードの直線性を考慮することにより、最終的に±11%

となっている[7]。

(2) 排気ダイバータ設置時の較正方法

平成9年の排気ダイバータ設置時の核分裂計数管の較正は、重水素実験が開始されてから6年が経過し、真空容器構造材の⁶⁰Co核種等の影響により放射線レベルが増加した状況にあった。線源の移動には、大電流化改造時の較正方法とは異なり、放射線業務従事者が真空容器内に立ち入り、手で線源を移動させる方法により較正を実施した。測定点数は24で、得られた結果は、大電流化改造時の較正により得た応答関数とほぼ同じであることを確認した。

(3) フェライト鋼設置時の較正方法

平成17年には、プラズマ中のイオンの閉じ込め改善のため、真空容器内のトロイダル磁場コイル下の一部にフェライト鋼を設置した。フェライト鋼設置時の中性子モニタの較正については、中性子線源の移動には、排気ダイバータ設置時と同様に線源用トロッコを利用せず、放射線業務従事者が、真空容器内に立ち入り、手で線源を移動させる方法により較正を実施した。

平成3年の較正に使用した²⁵²Cfは減衰して弱くなっていて、測定点1点に係る計測時間がかかるため、核分裂計数管の較正時間がこれまで以上に必要となった。そこで、較正用線源として同年新たに²⁵²Cf (240 MBq) 1個を譲り受けし、較正を行った。あらかじめ計算で応答関数を評価していたとおり、排気ダイバータ設置の応答関数とほぼ一致することを実際の²⁵²Cf線源を使った較正で確認した。

4.1.5.4 中性子発生量の測定

較正された核分裂計数管によって、大電流化改造後の平成3年7月の重水素実験開始から平成20年8月停止までの18年間にわたる総中性子発生量は 1.52×10^{20} 個であった。

4.1.5.5 中性子計測による管理

(1) 運転にかかる装置管理

ここでは、JT-60に設置した核分裂計数管について、プラズマ診断とは異なる視点から、JT-60施設を安全に運用・管理し無用な放射線障害を防止するために必要なハードウェアの一部としてみることにする。

真空容器の周囲には3つの核分裂計数管が設置されていて、互いに独立している。3つの中性子計測装置の内2つの中性子計測装置から信号があがらなければ装置の運転をすることができない2アウトオブ3の原理で装置の運転管理がされている。

また、JT-60の安全運転に係るソフトウェアの整備としては、中性子発生量(瞬間最大、週、3月、年)に対し、制限値(認可値)を超えないよう運転条件の監視用インターロックによる運転制御(中性子発生量のフィードバック制御[9]も可能)がされている。

JT-60運転には、認可値の中性子発生量(瞬間最大)に対し検出器から送られてくる電圧信号をコンパレータで判断することで10ミリ秒程の時間応答でインターロックが作動するシステムとなっている。また、認可値の中性子発生量(週、3月、年)については、中性子発生量(瞬間最大)を計算機で積算することによりインターロックが作動するシステムとなっている。制御システムの入力数値について

は、核分裂計数管の測定誤差を考慮していないが、許認可申請時に施設にかかる実効線量評価で安全マージンがとつてあるので問題なく、インターロックによる安全運用を実施した。

(2) 建屋の管理区域内

JT-60の管理区域内には、中性子エリアモニタとして、検出器に減速材付 ^3He 比例計数管を使用し、中性子線量当量率を運転中に測定している。また、管理区域内の雰囲気中の放射線については、X線、中性子と装置、構造材、建家壁との相互作用により発生する即発ガンマ線や2次ガンマ線が発生するため、エリアモニタとしてSi半導体、X-ガンマ線エリアモニタとして電離箱で測定している。

検出器からの信号は1秒毎に収集し、1分間の最小、最大、平均値を算出している。リアルタイムのトレンドについては最大13時間分のデータを表示できる。モニタ共通のデータ処理は、データ収集装置のシステム制御と警報発報機能である。データ収集装置では、システムの起動および停止と1分間毎にメモリーへの記録およびメモリーから復元できるようになっている。また、あらかじめ設定された警報設定値と収集したデータを1分間隔でチェックし、放射線警報および故障警報を表示できるシステム(JT-60放射線モニタ自動監視装置)となっている[10]。

(3) 建家の管理区域境界

建家内の放射線遮蔽(中性子)は、厚さ最大200cmのコンクリート(一部、ポリエチレン材)で十分に遮蔽される。重水素によって発生するDD中性子は、非弾性散乱や熱化され吸収される際に2次ガンマ線の発生が伴う。DD中性子源のコンクリート体系への垂直入射形状での中性子、2次ガンマ線の透過率を図9に示す[11]。コンクリートの厚さが約150cmの厚さを超えると2次ガンマ線による寄与が中性子による寄与より高くなる。よって、建家外では中性子計測の他にガンマ線の管理測定を行う必要がある。

管理区域境界用として、中性子とガンマ線のエリアモニタに加え、管理区域境界内外に積算線量計としてTLD(熱ルミネッセンス線量計)を設置し、管理区域周辺の監視を行っている。TLD設置場所としては、JT-60設置建家(JT-60実験棟)の1階(30箇所)、2階(17箇所)、2階(14箇所)、2階(25箇所)となっている。延べ18年間の放射線発生装置等の運転に伴う管理区域内外での異常は認められなかった。

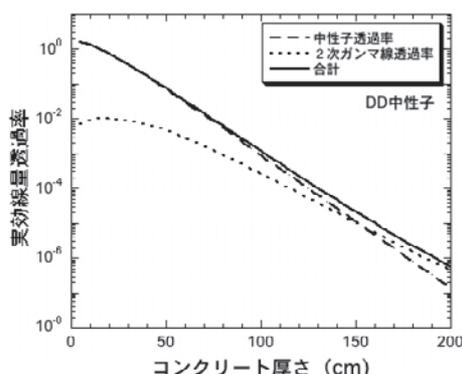


図9 DD中性子の実効線量透過率。

(4) 敷地境界での監視

JT-60施設の敷地境界の放射線監視の一つとして、敷地境界の線量当量率の放射線関係測定記録があるが、放射線障害防止法による測定のみならず、茨城県東海地区環境放射線監視委員会に四半期毎(4回/年)に報告されている。

那珂核融合研究所のモニタリングポストは、事業所境界の南北2地点(モニタリングポストNo.1(JT-60中心から130mの地点)、モニタリングポストNo.2(JT-60中心から480mの地点)に設置され、中性子とガンマ線について測定を行っている[12-26]。

中性子検出器には ^3He 比例計数管を用い、ガンマ線検出器にはアルゴン加圧式電離箱を用いている。また、同じ場所には積算線量計による測定も行われている。延べ18年間の放射線発生装置等の運転に伴う事業所境界での線量当量率はJT-60の中性子発生量との相関はなく、宇宙線、環境放射線の変動範囲内にあり、特に異常は認められなかった。

4.1.6 まとめ

JT-60の18年間の重水素実験で、中性子計測による、装置インターロックを含めた安全運転と周辺環境の監視と中性子に起因する放射線計測を適切に実施してきた。その間にJT-60による核融合プラズマの大きな進展がみられた。JT-60で経験した中性子環境下における装置運転のための放射線計測は、次期装置となる超伝導トカマク装置(JT-60 SA)に引き継がれる予定である。

参考文献

- [1] 山西弘樹他：プラズマ・核融合学会誌 74, 716 (1998).
- [2] A.M. Sukegawa *et al.*, Prog. Nucl. Sci. Technol, 1, 36 (2011).
- [3] 西谷健夫他：プラズマ・核融合学会誌 80, 860 (2004).
- [4] T. Nishitani *et al.*, Rev. Sci. Instr. 63, 5270 (1992).
- [5] Y. Endo *et al.*, IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-29, 714 (1982).
- [6] 笹尾真美子, 西谷健夫：核融合研究 62, 415 (1989).
- [7] 西谷健夫：核融合研究 68, 6 (1992).
- [8] T. Nishitani *et al.*, Rev. Sci. Instrum. 63, 5270 (1992).
- [9] Y. Neyatani *et al.*, Fusion. Eng. Des. 36, 429 (1997).
- [10] 梅原 隆他：JAERI-Review 2004-019 (2004).
- [11] 財団法人原子力安全技術センター：放射線施設のしゃへい計算実務マニュアル 2007 (2007).
- [12] 日本原子力研究所：JAERI-M 92-144 (1992).
- [13] 日本原子力研究所：JAERI-M 93-172 (1993).
- [14] 日本原子力研究所：JAERI-Review 94-007 (1994).
- [15] 日本原子力研究所：JAERI-Review 95-020 (1995).
- [16] 日本原子力研究所：JAERI-Review 96-014 (1996).
- [17] 日本原子力研究所：JAERI-Review 97-016 (1997).
- [18] 日本原子力研究所：JAERI-Review 98-015 (1998).
- [19] 日本原子力研究所：JAERI-Review 2000-001 (2000).
- [20] 日本原子力研究所：JAERI-Review 2001-007 (2001).
- [21] 日本原子力研究所：JAERI-Review 2001-041 (2001).
- [22] 日本原子力研究所：JAERI-Review 2002-036 (2002).
- [23] 日本原子力研究所：JAERI-Review 2003-034 (2003).
- [24] 日本原子力研究所：JAERI-Review 2004-024 (2004).
- [25] 日本原子力研究所：JAERI-Review 2005-028 (2005).
- [26] 日本原子力研究開発機構：JAEA-Review 2009-040 (2008).