

小特集 最近の核融合中性子工学の進展

6. ITER に関するニュートロニクス活動

6. Neutronics Activity on ITER

石川正男, 今澤良太

ISHIKAWA Masao and IMAZAWA Ryota

*日本原子力研究開発機構

(原稿受付: 2016年3月18日)

ITERにおいてニュートロニクス(核解析)活動は, ITERを構成する機器の構造設計や遮蔽設計を進める上で重要であるだけでなく, これらの機器の保守点検時における作業者の被曝管理をはじめITERの安全要求を満たすための設計指針を与える上でも重要な役割を有している。そのため, ITER機構及びITER参加極の専門家によってニュートロニクス活動が精力的に進められている。本章では, ITERにおけるニュートロニクス活動の重要性について詳述するとともに, ITERニュートロニクス会合の概要について紹介する。

Keywords:

neutronics, ITER, shutdown dose rate, nuclear heating, TF Coil

6.1 はじめに

ITER計画では, 複数の建家が建設段階に入ると共に多くの機器について実機の製作が開始され, その他の機器も設計の最終段階を迎えている。その中で, ニュートロニクス活動は, ITERの建設・設計活動の中で最も重要な項目の一つとして位置づけられ, 活動で得られる知見は, ITER計画の基盤を与えている。

本章では, ITER計画においてニュートロニクス活動がどのような役割を果たしているかを記述する。また, ITER機構及び参加極の専門家を集めて議論するために毎年開催されているITERニュートロニクス会合の概要について紹介する。

6.2 ITERにおけるニュートロニクス活動の役割

ITER計画における, ニュートロニクス活動の役割として, 大きく以下のような項目が挙げられている。

- ・ 人類初の核融合実験炉の安全性をはじめとする, ITER計画が基本的に満足すべき要求事項を満たすためのニュートロニクス【基本解析】
- ・ ITERを構成する機器の構造設計及び遮蔽設計支援のためのニュートロニクス【設計支援解析】
- ・ 機器設計における安全係数の付与や安全管理を行うためのニュートロニクス【安全管理】

「基本解析」に対しては, ITERに対する要求事項をまとめた文書(Project Requirement[1])や予備的安全解析書(PRRS[2])に記載された要求を満たす設計を実現するために解析を行う必要があり, 現在は, より工学的な要求に応えるための解析が進められている。例えば, ITERトカ

*現在の所属: 国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構

マク建家内外においては, 予想される放射線量の強度に基づき立ち入り条件が異なる区域分けが設定されるが, 各区域での放射線量が規定値を超えないように, 放射線遮蔽壁や遮蔽扉の厚さ, 材質等を解析によって評価する必要がある。その評価結果を用いた放射線量マップの作成が重要であり, 図1に最新の放射線量マップ(2014年版)を示す。また, このマップに基づき, 建家の遮蔽設計や電子機器への影響の詳細評価が実施されている[3]。

「設計支援解析」に関しては, ポートプラグ, 中性粒子入射装置及び冷却システム等の遮蔽設計・遮蔽設計への支援や, 耐放射線性評価への設計指針を与えるとともに, 放射

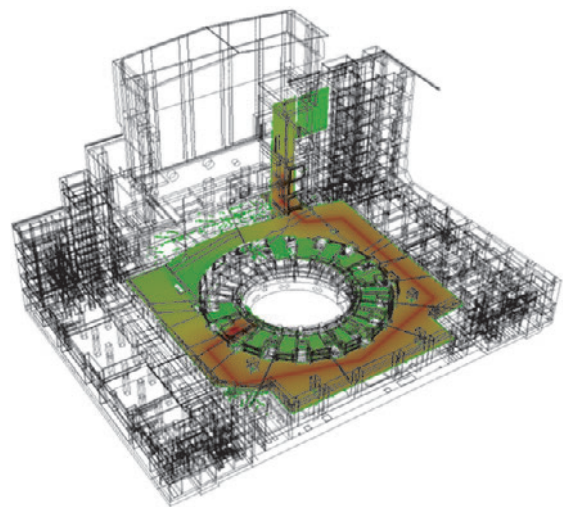


図1 ITERの線量マップの一例。水の放射化によって冷却配管回りが線量が高いこと(赤色)を示している(M. Loughlin氏[3])。

corresponding author's e-mail: ishikawa-masao@qst.go.jp

性廃棄物の放射線量の評価を行うための解析が進められている。その中でも、特に重要な解析項目として挙げられているのが、トロイダル磁場 (TF) コイルの核発熱、ポートインタースペースと呼ばれる領域での停止後線量率、冷却水の放射化 (中性子によって冷却水中の酸素¹⁶O が放射性窒素¹⁶N に核変換することに起因) である。

TF コイルの核発熱は ITER の運転そのものに影響を与える極めて重要な課題で、核発熱量がコイルの冷却能力を上回るとコイルの温度が上昇し、超伝導状態がクエンチして、最悪の場合コイルを破損する恐れがある。そのため、超伝導状態を維持できるように TF コイルへ到達する放射線束を減少させる設計としている。ITER では、遮蔽体として十分な厚さを有するブランケットモジュールが真空容器内部に設置されているが、コイルの核発熱にはポート開口部からの中性子ストリーミングが大きく寄与している。この中性子ストリーミングを正確に評価するには、可能な限り正確に ITER を再現する 3 次元モデルを用いてモンテカルロ計算 (MCNP 等) を行うことが必要であり、ITER では、超並列計算機上での数万セルにもものぼる大規模モデルを用いた解析が行われている。ITER の水平ポート (計測ポート、RF 加熱ポート、TBM ポート等) に設置されるポートプラグは、ポート出口の閉止フランジ面側のみ固定される、真空容器方向に差し込まれた片持ち梁の構造をしている。ポートプラグと水平ポートの間のギャップ (間隙) は、当初 20 mm で設計されていたが、ポートプラグの詳細設計や組み立て手順の検討が進むにしたがい 35 mm 程度のギャップが必要とされるようになった。解析の結果、TF コイルの核発熱や次に示すインタースペース領域の停止後線量率が大きく増加することが定量的に評価され、これに基づき、上部と左右両側のギャップを 22 mm に縮小するよう設計変更が進められている。そのほか、50 式以上設置される計測装置個々について、それぞれ詳細な解析が行われている。

停止後線量率に関しては、プラズマ運転後に行う機器の保守点検のための立ち入りに関連して基準を設けている。例えば、各ポートのインタースペース領域においては、運転停止後 10^6 秒 (約12日) 後に線量率が $100 \mu\text{Sv/h}$ 以下にするという目標が設定されている。図 2 に示すように、ポートでのストリーミング中性子によるポートフランジやインタースペース領域内の構造物の放射化によってインタースペース領域の停止後線量率は決まる。直線的なギャップ構造ではインタースペース領域の停止後線量率が $100 \mu\text{Sv/h}$ を大幅に超えるため、2 段屈曲構造のギャップに変更したり、ポートプラグ後方からギャップを埋めるための追加遮蔽体を挿入するといった設計検討が行われた。また、遮蔽設計の観点からの計測機器の設計の最適化が進められた。その結果、一つのポートだけであれば、 $100 \mu\text{Sv/h}$ 以下を達成できることに目処が得られるようになった。一方、他のポート (例えば、対象としているポートが水平ポートであれば、上部ポートや下部ポート) から回り込む放射線が加わることで、トータルとして $100 \mu\text{Sv/h}$ を超えてしまう解析結果も報告されており、他ポートからの影響低減法に

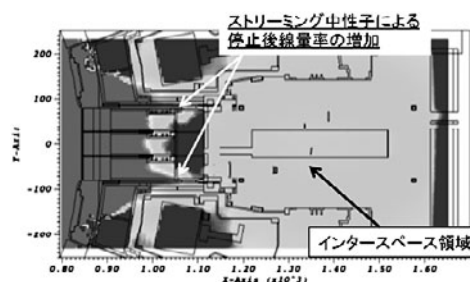


図 2 水平ポートインタースペース領域の停止後線量率の解析結果の一例 (M. Loughlin 氏[3]).

ついて検討を進めているところである。

冷却水の放射化については、冷却水配管ルートの見直しが行われているところで、解決に向かった設計が行われている。

また、「安全管理」に関するニュートロニクス活動は、近年その重要度が増してきている。例えば、原子力安全の観点に基づき、安全率を考慮に入れた設計基準を設けて設計を進める必要があるが、解析によって得られる評価結果の精度が不十分であれば、それだけ安全率を大きく取る必要が生じ、設計裕度を狭めたり製作コストの増加につながる。そのため、より高い精度での解析が求められており、プラズマ中の中性子発生分布を模擬した高精度な中性子源の設定、遮蔽性能の正確な評価および核データライブラリの正確な設定が求められる。これらを進めていくために、解析結果を検証するためのベンチマーク実験が各国で精力的に実施されている。また、ITER 機構からは、これまでの様々なニュートロニクス活動の結果をまとめ、各機器の設置位置での中性子束やフルエンス等の指標を示し、機器の設計の指針を与える Nuclear Analysis Report [4] が発行されている。近年では、より詳細な解析結果が数多く出されており、その改訂に向けた取り組みも進められている。

6.3 ITER ニュートロニクス会合

ITER 機構では、ニュートロニクス活動の進展や課題を議論するために、ITER 機構および参加各極の専門家が一同に会する ITER ニュートロニクス会合が毎年開催されている。これまでに10回の会合が開催されており、各会合で活発な議論が行われた。本項では、2015年に開催された第10回ニュートロニクス会合 (6月30日~7月3日, ITER 機構) の概要を紹介する。会合では、各国及び各研究所の1年間のニュートロニクス活動の成果について数多く報告され、中国の MCAM[5]やドイツのカールスルーエ研究所で開発されている McCad[6]など、3次元 CAD モデルを MCNP 等の核解析コードの入力ファイルへ自動変換するソフトの更新状況も報告された。

また、インタースペース領域の停止後線量率に関する解析結果も数多く報告された。イギリスのカラム研究所からは、水平ポート10番での計測装置設計統合のために実施された解析の結果が報告された[7]。1式の水平ポートプラグ内には、3式の計測用遮蔽体 (DSM) が設置される計画であり、各 DSM 毎に計測機器等の設計が進められている。報告では、水平ポートプラグ10番の DSM のうち中央に設

置されるポロイダル偏光計測装置[8] (日本が開発中, 以下 PoPola と記す) の遮蔽設計が不十分であり, 図 3 (b) に示す通り同装置によってもたらされるインタースペースの停止後線量率の増加分が非常に大きくなり, その値は $1000 \mu\text{Sv/h}$ 以上になっていることが示された. PoPola は, プラズマ電流分布を測定するために複数のレーザーを入射し, プラズマ対向壁に設置する回帰反射鏡で反射させてそのレーザー光を計測室まで帰還させる. プラズマ対向壁及び DSM の設計との整合性及び真空容器内ミラーの偏光特性などを考慮すると, 図 4 (a) のようにポートプラグ開口部分を小さくすることが不可能であることが明らかとなり, 遮蔽設計の改善には大きな課題があった. これに対し, 筆者らの検討により, ポートプラグの開口部面積が同じであっても, 図 4 (b) に示すように小さな開口の集まりとなるように設計を行うことによって, インタースペース領域における停止後線量率の増加への寄与分を $15 \mu\text{Sv/h}$ まで減少させることに成功した. ニュートロニクス活動が各機器

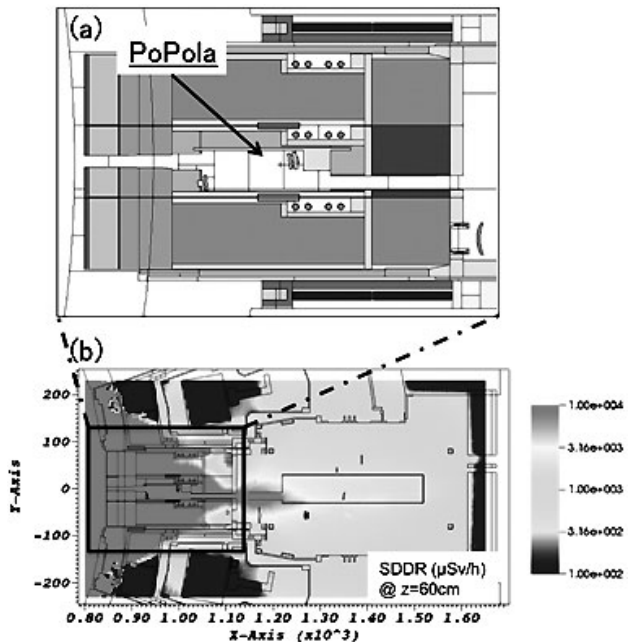


図 3 (a) 水平ポート10番の中央の DSM に PoPola の光学システムを組み込んだ解析モデル, (b) 停止後線量率 (10^6 秒後の等高線 (T. Eade 氏[7])).

の設計に重要な役割を果たした好例である.

その他の報告の中では, 解析で得られた計算結果の妥当性を検証するベンチマーク試験や核データライブラリの検証試験等の報告も目立った. 原子力機構の FNS やイタリアの DT 中性子源 FNG からは, 核データに対するベンチマーク実験の結果が報告され, とともに, 銅およびモリブデン核種の核データについては, 計算結果は実験結果を過小評価していることが示され, 今後のさらなる検証の必要性が示された. イタリアの ENEA 研究所からは, イギリスのトカマク装置 JET を用いた停止後線量率の解析結果と実測値との検証試験の結果が報告された[9]. 図 5 は JET の運転停止 3 ヶ月後におけるポート扉からの距離に対する停止後線量率の違いを示しており, 実線は解析結果を示し, □ は実測値を示している. 停止後線量率の評価には複数の評価方法 (凡例の MCR2S[10], R2S[11], AdD1S[12]そして R2 mesh[13]がそれに当たる) が適用され, 図 5 (b) に示している通り, 各評価方法で得られた停止後線量率と実測で得られた値は良い一致を示しており, それぞれ停止後線量率の評価方法が大きく前進した. また, 同報告からは, 停止後線量率の評価に利用できる見込みであることが示された. 同報告では, 上記の評価方法を用いた JET の運転シナリオを利用したベンチマーク計算の結果も報告され, 実機の製作を見据え核解析の高精度化に向けた取り組みが進んでいる.

また, 各参加極から, MCNP による核解析の支援ツールや MCNP とは異なる解析コード開発状況の報告も数多く

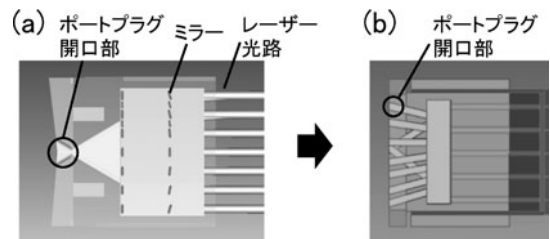


図 4 PoPola の水平ポートプラグの設計の例 (a) 理想的な開口部を有するが他機器との取合いが整合しない光学システム, (b) 小さい開口部の集まりとすることで取合い整合と高い遮蔽性能を両立した光学システム. いずれも DSM のトロイダル中心のポロイダル断面である (筆者).

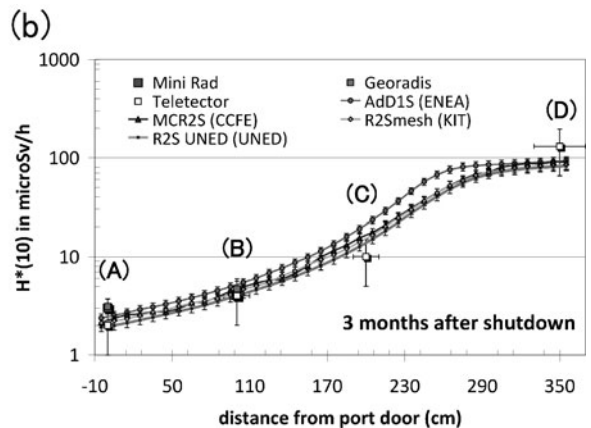
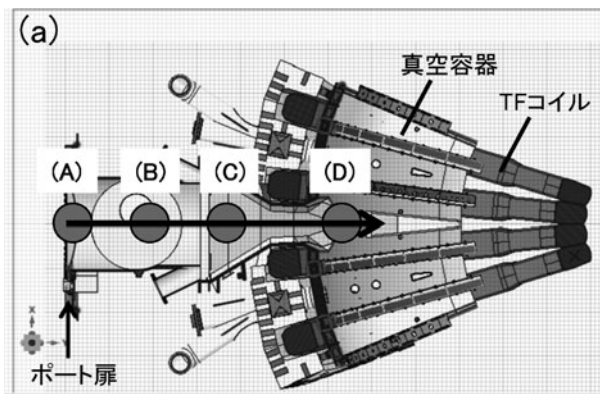


図 5 JET におけるポート扉からの距離に対する停止後線量率 (運転停止 3 ヶ月後). (a) JET 真空容器と測定位置 ((A) - (D)) (b) 解析結果と実測値の比較 (実線は解析結果を表し, □ は実測値を示す. R. Villari 氏[9]).

行われた。ITER 機構の要請で IDOM 社が開発した MCNP のメッシュ計算結果を ANSYS 等の熱構造解析コードのメッシュデータに変換するコード iMesh[14]は、ニュートロニクスの結果を直接他の解析ツールの入力データとして活用でき、解析の効率化の観点から魅力的である。その他、MCNP に代わる解析コードとして期待されている米国 Varian Medical Physics 社の Attila コード[15]の開発計画について報告が行われた。解析コードの応用として、ドイツのカールスルーエ研究所やフィンランドの専門家からも報告が行われた。

6.4 まとめ

本章で示したように、ITER 計画の進展に従い、ニュートロニクス活動の重要性が高まっている。その中でも、TF コイルの核発熱および停止後線量率の正確な評価並びにこれらに基づく適切な遮蔽設計が重要な課題として位置づけられており、ITER 機構及び各参加極の専門家が精力的に活動を進めている。また、解析結果の妥当性を検証するベンチマーク試験も重要であり、核データライブラリの評価試験および停止後線量率のベンチマーク試験等が各国のト

カマク装置や中性子発生装置を利用して実施されている。今後より一層、ニュートロニクス活動の役割が大きくなることから、専門家の育成も重要な課題である。

参考文献

- [1] ITER Document, ITER UID 27ZRW8.
- [2] ITER Document, ITER UID 3ZR2NC.
- [3] ITER Document, ITER UID RFUN82.
- [4] ITER Document, ITER UID 22F2ST.
- [5] Y. Wu *et al.*, Fusion Eng. Des. **84**, 1987 (2009).
- [6] L. Lu *et al.*, Fusion Eng. Des. **89**, 1885 (2014).
- [7] B. Colling *et al.*, Fusion Eng. Des., *in press* (2016).
- [8] R. Imazawa *et al.*, Proc. PLASMA2014, 18aC2-1 (Niigata, Japan, 18-21 November 2014).
- [9] R. Villari *et al.*, Fusion Eng. Des. **87**, 1095 (2012).
- [10] T. Eade *et al.*, Fusion Eng. Des. **100**, 321 (2015).
- [11] Y. Chen and U. Fischer, Fusion Eng. Des. **63**, 107 (2002).
- [12] R. Villari *et al.*, Fusion Eng. Des. **89**, 2083 (2014).
- [13] M. Majerle *et al.*, Fusion Eng. Des. **87**, 443 (2002).
- [14] ITER Document, IDM UID PR29RS.
- [15] M. Youssef *et al.*, Fusion Eng. Des. **88**, 3033 (2013).