



7. 国内施設の中性子工学

7. Status of the Fusion Neutronics in the Domestic Fusion Facilities

助川篤彦¹, 瓜谷 章¹, 西村清彦², 西谷健夫²

SUKEGAWA Atsuhiko, URITANI Akira¹, NISHIMURA Kiyohiko² and NISHITANI Takeo²

*日本原子力研究開発機構, ¹名古屋大学大学院工学研究科, ²核融合科学研究所

(原稿受付: 2015年9月16日)

国内の核融合実験装置の中で、すでに重水素実験を行ってきたJT-60及び改造中のJT-60SAと重水素実験の準備を進めているLHDの中性子工学の現状を紹介する。JT-60及びJT-60SAでは、MCNPとPHITSを主に使用して遮蔽設計等を行っており、JT-60では放射化箔を使用した中性子フルエンスの測定と良く一致した。またLHDでは放射線安全評価を2次元輸送コードDORTで行うとともに、中性子計測の較正試験のシミュレーションをMCNPで行った。

Keywords:

JT-60, MCNP, PHITS, activation foil, LHD, DORT, neutron calibration

7.1 JT-60及びJT-60SAにおける中性子工学の現状

臨界プラズマ試験装置JT-60及びその後継装置となる超伝導トカマク装置JT-60SAにおける中性子工学の主な役割には、施設の遮蔽評価、運転時・保守時の被ばく線量評価、放射化量評価、各計測・制御機器の放射線損傷評価に加え超伝導コイルの発熱(JT-60SA)等がある。従来の核解析では、2次元中性子輸送計算でこれらを安全側に評価していたが、近年の計算機の飛躍的な進歩に伴い、装置建屋を含めた実規模モデルの3次元中性子輸送計算が可能となり、実測値との比較が可能となってきた。ここでは、JT-60の重水素運転における3次元中性子輸送計算と実測値との比較を中心に中性子工学の現状を紹介する。

7.1.1 核解析の現状

JT-60では従来、装置およびその装置周辺での放射線の空間およびエネルギー変化を評価するにあたり、トーラス形状の体積中性子源を考慮した3次元中性子輸送計算コード(MCNP, PHITS)による中性子輸送計算を実施している。

JT-60での重水素核融合反応(DD反応)による中性子発生率分布は、プラズマの密度分布、温度分布および加熱による高速粒子分布で決まる。MCNP等では、プラズマ領域を多領域に区切ってその領域ごとに発生確率を与えることで分布線源とすることができるが、JT-60ではトーラス線源を発生するようにMCNP及びPHITSの線源ルーチンを書き換え、式(1)に基づきプラズマ位置(R_p, Z_p)、小半径(a_p)、非円形度(k)、パラボナのべき数(m)をパラメータとして与えることによって簡単に中性子線源の分布形状を変更できるようにした[1, 2]。JT-60およびJT-60SAでの分布線源のパラメータを表1に示す。また作成した線源

ルーチンによるJT-60の中性子発生分布を図1に示す。

$$S = \left[1 - \left\{ \frac{(R-R_p)^2}{a_p^2} + \frac{(Z-Z_p)^2}{a_p^2 k^2} \right\} \right]^m \quad (1)$$

計算モデルについては、解析したい場所(機器)に対して、どこまで計算モデルを簡素化できるかが鍵となる。すなわちトカマクプラズマ近傍では、DD反応による2.45 MeVの中性子が支配的であるが、周辺部になると散乱中性子の寄与が大きくなるため、周辺部になればなるほど様々な周辺機器を計算モデルに取り入れる必要がある。このため計算手順としては、まず計算領域として建屋全体を与え、その中に真空容器、ポロイダル磁場コイル、トロイダル磁場コイルからなるトカマク本体を設置した計算モデルを基本とし、これに解析したい場所に応じて、加熱装置(タンク)等の周辺機器を追加していくことになる。図2には、JT-60の核解析に使用する入力データを逆変換した3次元鳥瞰図の一例を示す。図3に、PHITSによるJT-60装置周辺の中性子束の分布表示例を示す。なおMCNPとPHITSで計算される中性子束の比較については、2.45 MeV中性子を発生するJT-60の場合、同じ評価済核データライブラリ(20 MeV以下)、同じ幾何形状モデ

表1 JT-60およびJT-60SAにおける中性子発生分布のパラメータ。

	JT-60	JT-60SA
R_p (Major radius[m])	3.470	2.957
a_p (Major radius[m])	0.98	1.178
Z_p (Vertical shift of the plasma center [m])	0.17	0.024
k (Ellipticity)	1.4	1.945
m (Power of the plasma center)	2	2

*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

corresponding author's e-mail: morioka.atsuhiko@qst.go.jp

ル、同じ線源を用いる限り、両者が一致することを確認している[3].

7.1.2 JT-60 本体室内実測値との比較

JT-60のDD反応の中性子輸送に関しては、計測器数の制限から放電中に中性子の空間分布を実測することは困難である。このため放射化断面積の異なる3種類の純金属箔

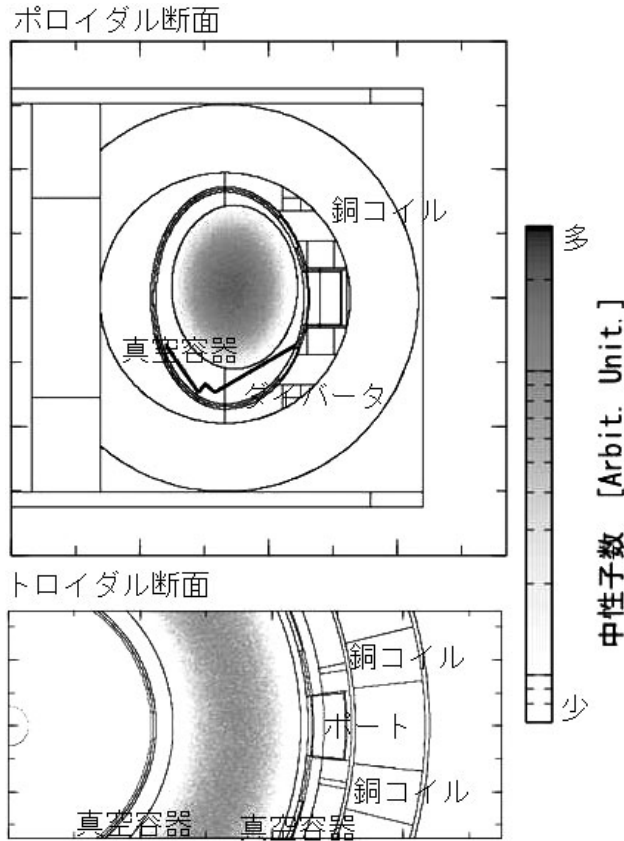


図1 JT-60のプラズマ体積線源例。

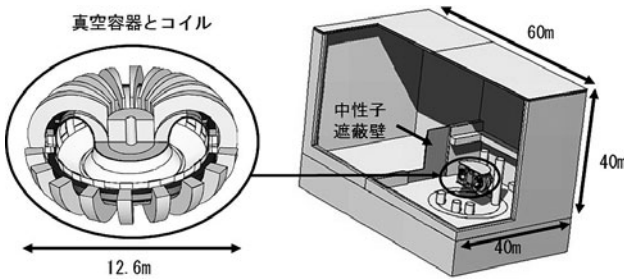


図2 計算用入力データを逆変換した鳥瞰図(一部、切り抜き)。

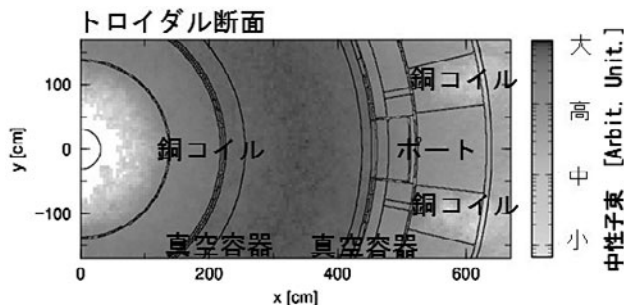


図3 JT-60 真空容器周辺の中性子束分布例。

(Au, Co, Ni)を真空容器ポートから直接見込める空間に配置し、運転期間の終了後に純金属箔の放射化を測定することで、中性子の空間分布(その場所の反応率)を評価した。そしてこの実測値とJT-60の建屋を含む実体系モデル(トカマク本体、加熱装置(タンク)、中性子遮蔽壁)を作成し、その計算による反応率を比較した。中性子スペクトルの算出には、トーラス中心から各評価位置の中心部に球形状(直径20 cm)のトラック長タリーを採用している。計算で使用した反応断面積は、FENDL-A/2.0である[4]。Au, Coについては低エネルギーの中性子、Niについてはおよそ0.5 MeV以上の中性子に対し高い感度を示す。3種類の材料とも、その実測値は、図4に示すように3次元モンテカルロ計算の結果と良く一致することを確認した[5].

7.2 LHDにおける中性子工学の現状

大型ヘリカル装置(LHD)では、2017年初めに重水素実験を計画しており、これまで数年にわたり放射線安全に関する準備を行ってきた。

7.2.1 LHD 本体室内の放射線線量評価

LHDの本体室及び周辺放射線量については、2次元Sn中性子輸送コードDORTを用いて評価した。Sn計算は基本的に決定論であるため、モンテカルロ計算のような統計誤差は生ぜず、厚いコンクリートの透過を含むような計算ではすぐれている。3次元であるLHDをいかに2次元モデルに落とし込むかで計算精度がきまるといっても過言ではない。LHDのDORT計算モデルを図5に示す。LHDではヘリカルコイルが回転しているためポロイダル断面形状がトロイダル角によって大きくことなる。そこで大型の水平ポート(Oポート)を持つ形状と、垂直ポート(U/Lポート)を持つ形状に分けて計算し、その平均をとることによって本体室内及び壁の透過線量を評価した。予想される最大中性子発生量のショット当たりの中性子及びγ線束を図6に示す。一方本体室内の詳細な線量分布を評価するためにLHDを3次元モデル化したMCNP計算も最近実施しており、このDORTによる計算は3次元モデルを用いたMCNP計算と比較的良好一致することが確認されている[6].

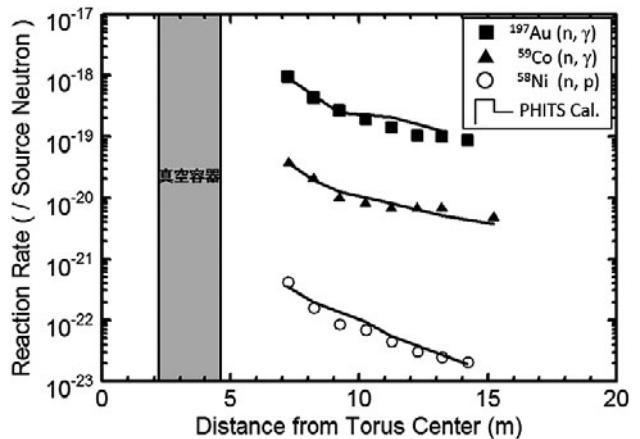


図4 トーラス中心からの反応率の測定値と計算値。

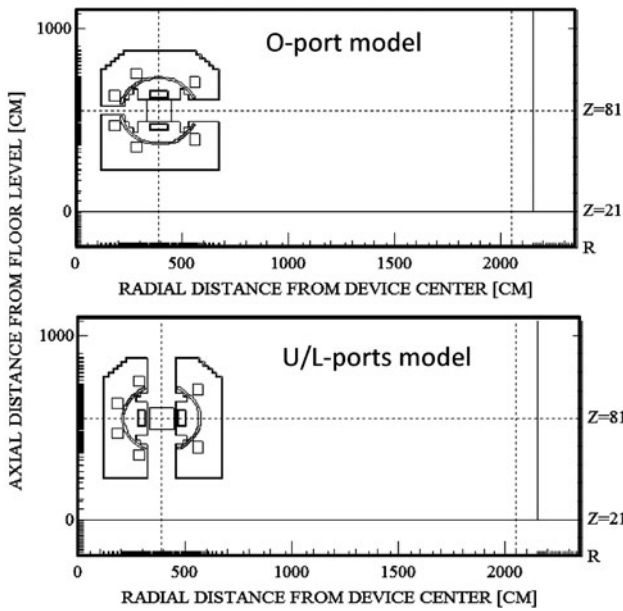


図5 LHDにおけるDORTの計算モデル。

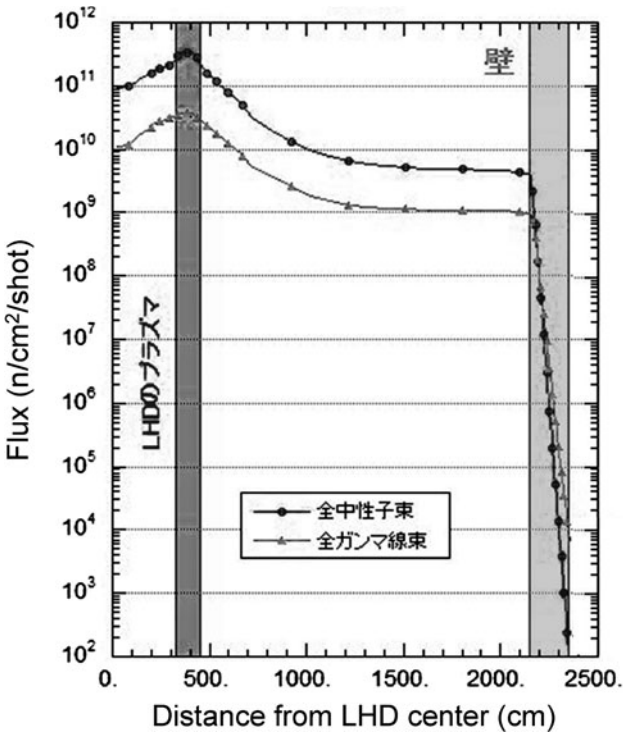
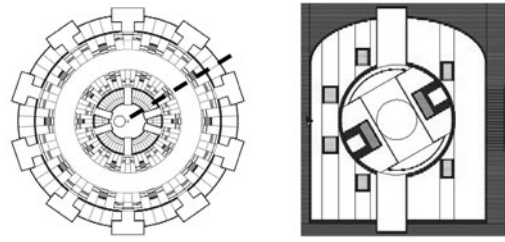


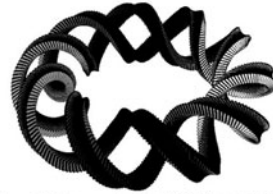
図6 LHDで想定される最大中性子発生量のショット当たりの中性子及び γ 線束分布。

7.2.2 LHDの中性子モニターの較正試験のシミュレーション

LHDではDD実験時の中性子発生率をフィッションチェンバーとHe-3比例計数管, B-10計数管で測定する予定である。フィッションチェンバーは、ガンマ線によるノイズの影響をうけにくいことに加え、ダイナミックレンジが広くとれるため、プラズマ診断ばかりでなく装置の安全監視に適しており、JT-60での使用実績がある[1]。使用に当たっては、トーラス体積線源に対するフィッションチェンバーの出力との関係を較正する必要がある。LHDでは真空



(a) 赤道面におけるトロイダル断面と $\theta=30^\circ$ のポロイダル断面



(b) ヘリカルコイルの形状(360分割)

図7 中性子較正実験のシミュレーションのためのLHDのMCNP用3次元モデル。

容器内に鉄道模型のレールを敷設し、自発核分裂中性子源 ^{252}Cf を乗せた電車を周回させて擬似的にトーラス線源として、トーラス全体からの中性子発生量とフィッションチェンバーの計数を較正することを計画している。そのために予想される中性子モニターの計数やレールやその支持具等の影響を評価しておく必要がある。また、超伝導コイル冷却用の液体Heの有無など、較正時と運転時で異なる条件についても、その影響を評価する必要がある。そこでこれらの影響についてMCNPコードを用いたシミュレーションにより評価を行った。

MCNP (PHITSでも)では、全てのセルを構成する面を2次元方程式及びトーラスで記述するが、ヘリカル面は記述できない。そこでLHDをトロイダル方向に多数に分割し、一つのトロイダルセクター内ではトロイダル方向に対象であるとして図7のようにモデル化を行った。トロイダル分割数と中性子モニターの計数の予測値の関係を調べたところ360分割で予測値がほぼ一定になることがわかった。またこの計算から、トーラス状中性子線源に対するフィッションチェンバーの計数率はその設置位置に依存し、 $4.4\sim 7.7 \times 10^{-8}$ counts / (source neutron)と予想された。また較正に使用するレール等による散乱の影響は、やはりフィッションチェンバーの設置位置に依存し、6~11%と見積もられた[7]。

7.3 まとめと今後の課題

JT-60とLHDにおける中性子工学の現状を紹介した。JT-60では、3次元モンテカルロ計算コード(MCNP, PHITS)において、適切な線源の設定、計算モデルの作成等により、実測値を良く説明できることを確認した。LHDでは複雑なヘリカル構造を2次元のDORTでは代表的な二つのモデルの計算結果の平均をとることによって、MCNPではトロイダル方向に多数に分割することによって計算を行っている。

今回は具体的には触れなかったが、核融合実験装置の運転や解体に伴って発生する装置・機器類に際しては加速器

施設等と同様に放射化物か否かの判定が必要になる。すなわち、将来想定される装置の解体品のクリアランス判定に向け、放射化物の放射化量の実測値だけでなく、中性子照射の履歴と放射化量の計算評価が必要である。そのためには今後加熱機器、計測機器等の本体室内の機器を含めたより複雑な計算が必要になると思われる。

参考文献

- [1] T. Nishitani *et al.*, Rev. Sci. Instr. **63**, 5270 (1992).
- [2] A.M. Sukegawa *et al.*, Prog. Nucl. Sci. Technol. **1**, 36 (2011).
- [3] 助川篤彦, 仁井田浩二: JAEA-Data/Code 2014-013 (2014).
- [4] A.B. Pashchenko *et al.*, FENDL/A-2.0, IAEA Report IAEA-NDS-173 (1996).
- [5] A.M. Sukegawa and K. Okuno, IEEE Trans. Plasma Sci. **43**, 3916 (2015).
- [6] T. Nishitani *et al.*, *to be published in* Plasma Fusion Res.
- [7] Y. Nakano *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **85**, 11E116 (2014).