

核データ部会・「シグマ」特別専門委員会合同企画セッション

核融合炉関連核データの現状と将来展望

日本原子力学会「2009年春の年会」、2009年3月23日、東京工業大学

(1) 核融合中性子工学研究の現状と将来展望

日本原子力研究開発機構

核融合研究開発部門

西谷 健夫

nishitani.takeo@jaea.go.jp

1. はじめに

核融合エネルギーの科学的・工学的検証を目的として、国際熱核融合実験炉 (ITER) の建設がフランスのカダラッシュで開始され、本格的な D-T 核融合プラズマが 2020 年代に得られる見通しになっている。また主に核融合原型炉を目指した研究開発として日欧協力により、幅広いアプローチ活動が日本を舞台として展開され、ITER サテライトトカマク (JT-60SA)、国際核融合材料照射施設 (IFMIF) 工学設計・工学実証活動 (EVEDA)、国際核融合エネルギーセンターの 3 つの事業が開始された。このように実際に 14MeV 中性子が大量に発生する実験や IFMIF の設計・R&D、原型炉の設計を行う段階に入り、核融合中性子工学及びそれに必要な核データの重要性はますます大きくなっている。ここでは核融合の研究開発全般にわたる核融合中性子工学の現状を核データニーズも含めて紹介する。

2. 遮蔽設計

核融合炉は、中性子源であるプラズマを囲むブランケット、真空容器、ダイバータ、超伝導マグネット、加熱機器、計測機器等の構造物で複雑に構成されており、その中には中性子照射に敏感な超伝導材や有機系・無機系の電気絶縁材等も含まれているため、核融合の遮蔽設計においては機器遮蔽が主要課題になっている。またブランケットやダ

イバータ等の真空容器内機器は遠隔保守ツールを用いて、in-situ でモジュール毎またはその一部を交換することが計画されており、再溶接性の観点から、材料の水素・ヘリウム脆化等の評価も重要である。核融合炉は加熱ポート、真空排気ポート等の多数のダクトがあり、遮蔽設計においては、それらのポートを通したストリーミングが重要な要素となる。したがって、そのような体系の中性子輸送計算を扱うには、詳細な 3 次元形状モデルを用いた、MCNP 等のモンテカルロ法が不可欠である。

実際、ITER の遮蔽設計では 3 次元モンテカルロコード MCNP が使用されており、ITER の構造をほぼ忠実に 3 次元モデル化し詳細な計算が行われている。図 1 は ITER の中性粒子加熱 (NBI) ポート周辺 60°モデルである。これにより計算した超伝導コイルの核発熱は 12.7 kW (500MW 運転時) で、コイルの冷却能力に対応する設計目標値 13.7 kW をか

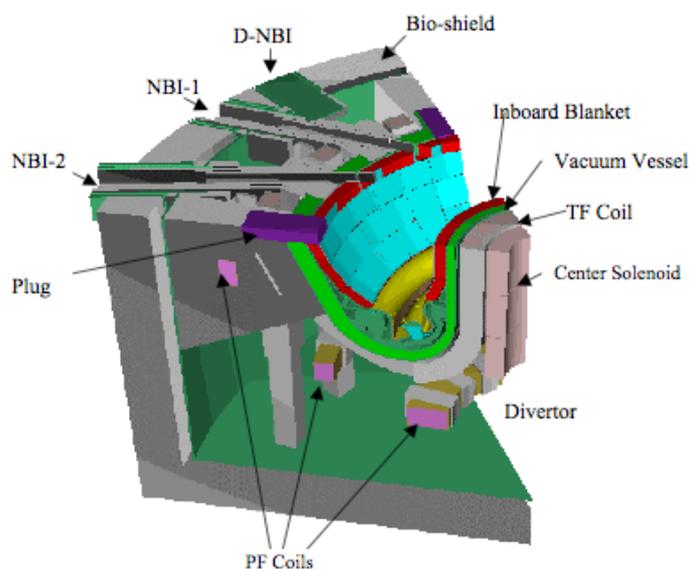


図 1 ITER の NBI ポート周辺の 60°セクターモデル
(MCNP 用ジオメトリ：水平面より下側のみ表示)

ろうじて下回っており、限界設計になっていることがわかる[1]。

このモデルでもセル数が約 6000 あり、各参加極が分担しても、手作業での MCNP 形状入力データ作成に約 1 年を要した。現在、CAD データを MCNP の形状入力データへ自動変換するシステムの開発が日、米、欧、中で進められており、ほぼ実用段階まで来ている。

図 2 は日本が開発している CAD→MCNP 自動変換システムの流れを示している。CAD データに含まれていないボイドは、全体の空間から実体のあるセルを差し引くことにより定義するが、ITER のような複雑な体系では、差し引くセルが多くなりすぎ、処理できなくなる。そこでまず全体をキューブに分割し、キューブごとにボイドを定義することにより、これを回避した[2,3]。

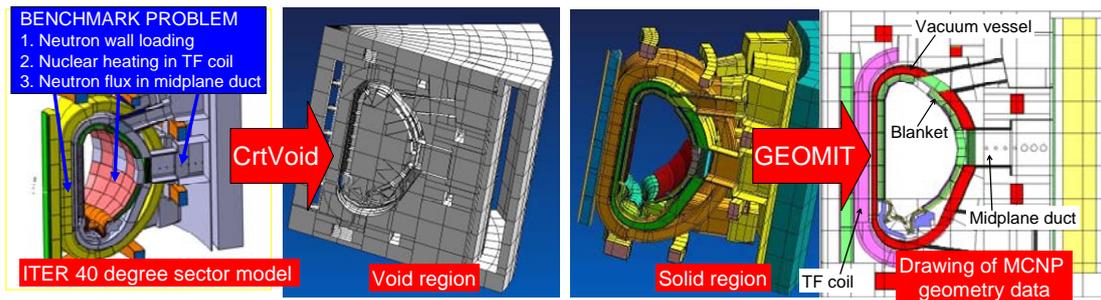


図2 日本が開発している CAD→MCNP 自動変換システムの流れ

3. ブランケット設計

核融合炉ではブランケットにより熱を回収するとともに、プラズマ中の核融合反応で消費されたトリチウムを増殖する。固体増殖型や液体金属型、熔融塩型等の概念設計が進められているが、日本は水冷却固体増殖型を主案として開発を進めている(図3参照)。トリチウム増殖比(TBR)は1以上とすることが不可欠ではあるが、ブランケットが真空容器全体を覆うと仮定したTBRで1.35程度であるが、ダイバータや加熱ポート、ブランケット間にギャップ等の非増殖領域を考慮した実効TBRは1.0~1.1であり、3桁目(0.01の桁)の攻防になっている。3桁目の予測精度となると計算体系のモデル化の精度とともに、使用する核データの精度が重要になってくる。

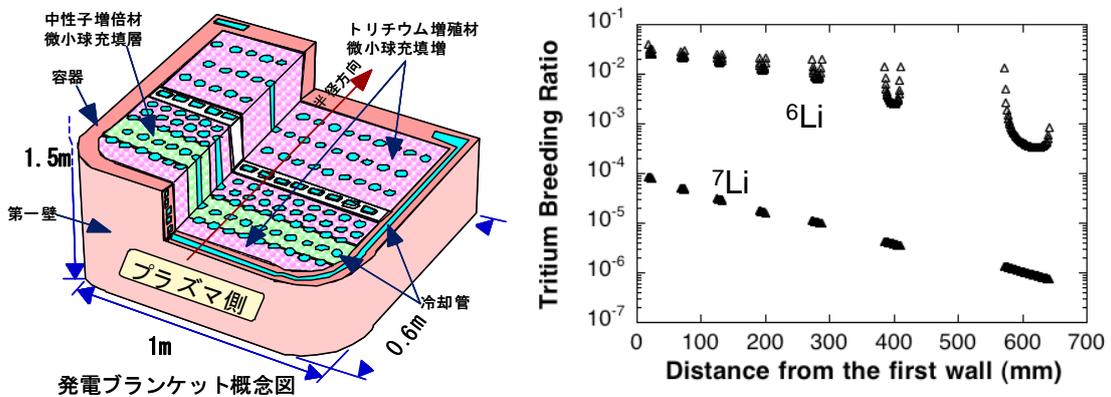


図3 日本開発を進める水冷却固体増殖型ブランケットの概念図とトリチウム増殖率分布(1次元計算)

ITERにおいては、3つの水平ポートをそれぞれ2分割して、合計6つの増殖ブランケットのプロトタイプの試験を行う計画(ITERテストブランケットモジュール計画)が進められている(図4参照)。ブランケット核特性試験が重要な試験項目の一つに挙げられており、核融合プラズマという体積中性子源の下での核特性の予測精度が検証される予定である。日本のテストブランケットモジュールでは、回収されるトリチウムの量を測

定するとともに、モジュール内に放射化箱を気送管で送り、いわゆるマルチフォイル法でモジュール内の中性子スペクトルを測定し、MCNP による計算値と比較することを計画している。

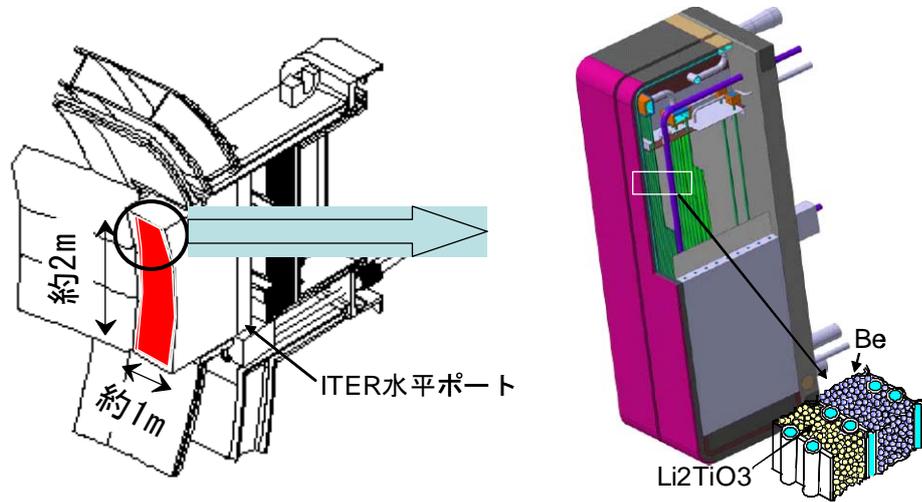


図4 水冷却固体増殖型 ITER テストブランケットモジュールの概念図

4. ベンチマーク積分実験

核融合用の核データライブラリーの検証を目的として、多くの積分実験が FNS（原子力機構）や OKTAVIAN（阪大）で行われてきた。最近、原子力機構では、かつて FNS で実施した核融合関係材料に関する平板体系の積分実験に対して FENDL-2.1, JENDL-3.3,

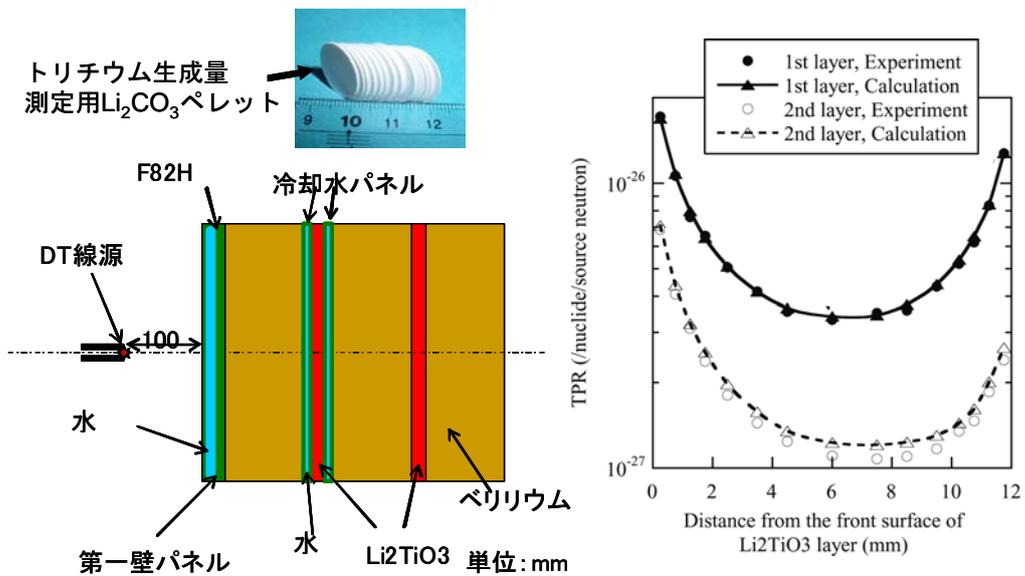


図5 ITER テストブランケットモジュール核特性実験の体系とトリチウム生成率分布

JEFF-3.1, ENDF/B-VII による再解析を行っており、各ライブラリーの問題点を摘出している[4]。

また 3. で述べた ITER テストブランケットモジュールの模擬体系を用いた、核特性積分実験を FNS で実施している。この実験では、トリチウム増殖材層に炭酸リチウムペレットを埋め込み、14MeV 中性子照射後、液体シンチレータでトリチウム生成率の測定を行った。図 5 に ITER テストブランケットモジュール核特性実験の体系とトリチウム生成率分布を示す。増殖層で積分したトリチウム生成率の実験値は MCNP による計算値と実験誤差の範囲で一致することを確認した[5]。

5. IFMIF 設計と核データ

IFMIF は核融合材料照射試験を行うための強力中性子源として建設計画中の施設であり、40MeV に加速した 125mA × 2 本の重陽子ビームを液体 Li ターゲットに照射し、 $\text{Li}(d, n\text{x})$ 反応により中性子を発生させる。本施設では稼働率 70% 以上を目指しているが、重陽子による加速器構成材料の放射化によってメンテナンス作業が制限されることが、稼働率を抑制する要因となるため、重陽子入射に対する低放射化材料の選択と放射化断面積の評価は重要な課題である。そこで、Fe、Ni、Cr、Mn、Au 等の IFMIF 加速器構成材料について重陽子入射による放射化断面積の測定を TIARA (原子力機構) の AVF サイクロトロンを用いて行った。図 6 に、 $^{27}\text{Al}(d, X)^{24}\text{Na}$ 反応と $^{\text{nat}}\text{Fe}(d, X)^{55}\text{Co}$ 反応の例を示す。測定した断面積に対して、ACSELAM ライブラリー及び TALYS による計算結果の比較を行ったところ、TALYS を用いた計算結果が実験値を比較的良く再現することがわかった[6]。

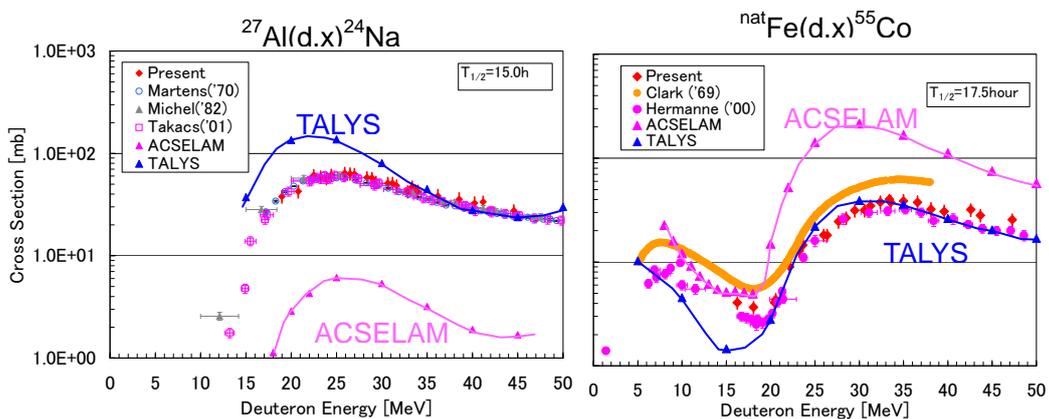


図 6 $^{27}\text{Al}(d, X)^{24}\text{Na}$ 反応と $^{\text{nat}}\text{Fe}(d, X)^{55}\text{Co}$ 反応の断面積の重陽子入射エネルギー依存性

IFMIF の中性子源スペクトルに関しては、東北大で角度依存の精密な測定がなされており、その結果に基づいて、中性子源スペクトルのモデル化が FZK にて行われている。中性子源スペクトルは 14MeV 付近にピークを持つが、約 55MeV までテイルを引いている。

したがって IFMIF の照射試料の精密な DPA 値評価や H/He 生成量評価には 55MeV までの中性子断面積が必要であるが、現状では十分とはいえない。

6. 核融合核データの現状と今後

汎用核データファイルは当初核分裂炉の核設計を主目的に作成された。しかし核融合反応そのものである D-T 反応を利用した加速器中性子発生装置が MeV 領域の中性子源として比較的容易に利用できたことや、核融合への適用も視野に入れて、20MeV 程度まで作成されており、核融合のエネルギー領域をカバーしている。しかし核融合では(n,2n), (n,αT)等の反応の終状態が3体（または4体）になり、2次中性子が連続スペクトルになる。このような反応を取り扱うために、二重微分断面積の考えが導入され、特に OKTAVIAN、FNL（東北大学）で精力的に測定がなされた。二重微分断面積は現在ほとんどの汎用核データファイルに取り入れられており、そのため現在の汎用核データファイルはほぼそのまま核融合用に使用できる。現在 ITER の核設計の標準核データファイルである FENDL（最新版は FENDL-2.1）は、JENDL-3.3, ENDF/B-VI 等の既存の核データファイルから核融合関連核種を中心に編集されたものである。

核融合開発では、ITER の建設が始まり、テストブランケットモジュールにより、トリチウム増殖や熱回収を実証する段階に来ている。これまでの概念設計と異なり、高い精度の核解析が求められており、核データ自身の高精度化とともに、誤差評価や感度解析のために、共分散ファイルも重要になると考えられる。

IFMIF では、これまでの汎用核データに加えて、20～55MeV の中性子反応断面積や、～40MeV の重陽子入射断面積が必要である。IAEA が改訂を始めた FENDL（FENDL-3）では、これらの IFMIF 用の断面積を含むことが予定されている。

また ITER では、核融合反応生成粒子、特に高速アルファ粒子のプラズマ中での挙動（密度、速度分布等）を調べるためにプラズマ中の燃料イオン（d または t）や不純物イオンとの核反応で生成するガンマ線を測定することが計画されており、 ${}^9\text{Be}(\alpha, n\gamma){}^{12}\text{C}$, ${}^9\text{Be}(p, \alpha\gamma){}^6\text{Li}$, ${}^9\text{Be}(p, n\gamma){}^{10}\text{B}$ などの正確な断面積や、ガンマ線分岐比等が求められている[7]。

参考文献

- [1] S. Sato, et al., J. Nucl. Sci. Technol., Supplement 1, 258 (2000).
- [2] S. Sato, et al., Fusion Eng. Design, 81, 2767 (2006).
- [3] K. Ochiai, et al., 22nd IAEA Fusion Energy Conf., Geneva, October 2008.
- [4] C. Konno, et al., Fusion Eng. Design, 83, 1774 (2008).
- [5] S. Sato, et al., Nucl. Fusion, 47, 517 (2007).
- [6] K. Ochiai, et al., Fusion Eng. Design, 81, 1459 (2006).
- [7] V.G. Kiptily, et al., Nucl. Fusion, 45, L21 (May 2005).