

PHITSコードのトカマク型核融合試験装置への適用 Applicability of the PHITS code to a Tokamak Fusion Device

(独)日本原子力研究開発機構 核融合研究開発部門
トカマクシステム技術開発ユニット JT-60安全評価グループ
助川 篤彦
株式会社間組 技術研究所
奥野 功一
伊藤忠テクノソリューションズ株式会社^(*)
川崎 弘光

要旨

重水素プラズマ実験を行うトカマク型核融合試験装置の放射線輸送解析、放射線遮へい設計、ニュートロニクス解析に、粒子・重イオン汎用3次元モンテカルロコードPHITS (Particle and Heavy Ion Transport code System) を適用している。PHITSによる解析には、重水素核融合反応による単色2.45MeV中性子について、トーラス形状の中性子源が必要となるため専用の線源サブルーチンを新たに作成した。PHITSによる試解析結果を含む、初期段階の解析結果の一例を紹介する。

1. はじめに

PHITS¹⁾ (Particle and Heavy Ion Transport code System) は、日本原子力研究所 (現 原子力機構) が開発した高エネルギー核反応モデル組込み核子中間子輸送コードNMTC/JAM²⁾ Ver.2コードを基に、高度情報科学技術研究機構、東北大学、原子力機構、高エネルギー加速器機構及びスウェーデンのチャルマース大学等により重イオン輸送計算機能が組み込まれた、ほぼ全ての粒子と重イオン (原子核) の物質中の輸送を計算する3次元モンテカルロシミュレーションコードである。計算結果のグラフ化や2次元のグラフィカルな出力を簡単に見ることが出来るのが特徴である。さらに、並列化機能が備わっており、並列コンピュータで計算することも可能である。

トカマク型核融合試験装置の放射線遮へい設計、装置メンテナンス、装置運転の健全性評価のためにコイルの発熱評価、施設内の装置周辺の半導体の放射線損傷評価が要求されるなか、従来の核データを使用するモンテカルロ計算では扱えないイベント毎の情報を記述するPHITS固有の機能を活かした解析方法の適用を進めている。現在、PHITSをトカマク型核融合試験装置・施設の遮へい設計・解析に適用しており、今回、PHITSユーザーとして、イベント情報を取扱う半導体解析例を中心に適用例の一部を紹介する。

*1 : 2011年6月末定年退職

2. トカマク型装置への適用

2.1 トカマク型核融合試験装置の概要

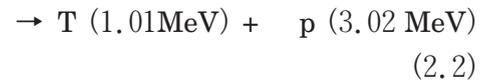
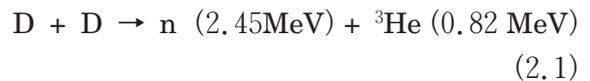
トカマク型核融合試験装置とは、ドーナツ形状の真空容器の周囲にコイルを並べてドーナツ方向につくる磁場（トロイダル磁場（TF））とプラズマに電流を流してつくる磁場（ポロイダル磁場（PF））とで、磁力線のかごを作ってプラズマを閉じ込める装置（以下、トカマク型装置）をいう。図1には、トカマク型装置の概念図を示す。また、図2には、トカマク型装置の鳥瞰図を示す。プラズマを閉じ込める真空容器には、各ポートセクション毎（TFコイルとTFコイルの間）に計測装置用、追加熱装置用（P-NBI、N-NBI）の水平、斜上、斜下ポートがある。

従来型の装置では、磁場生成用コイルに常温水冷却方式の常伝導コイルが用いられていたが、導体の許容電流密度が常伝導コイルに

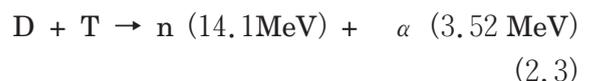
比べ大きい超臨界ヘリウム冷却方式の超伝導コイルを用いると、長時間の定常運転が可能となる利点があるため、現在のトカマク型装置では、超伝導コイルが導入されている。超伝導コイルを用いると真空断熱容器（クライオスタット）が必要となることから、トカマク型装置は複雑な構造体系となる。今回紹介するトカマク型装置は、このような超伝導コイルを持つ装置を対象としている。

2.2 トカマク型装置で発生する放射線

トカマク型装置の重水素プラズマ実験で発生する放射線は、下記となる。高温プラズマ内部では、式（2.1）の重水素同士の核融合反応（1次反応）により2.45 MeVの中性子（DD中性子）が、また、式（2.2）の反応により約1 MeVのトリトン（T）が発生する。



式（2.1）と式（2.2）の反応はほぼ同じ確率で分岐するが、式（2.2）の反応で生じるトリトンはプラズマ中の電子やイオンとのクーロン衝突により減速、熱化される。トリトンが減速すると式（2.3）の重水素とトリトンの核融合反応（2次反応）により14.1 MeVの中性子（DT中性子）が発生する。臨界プラズマ試験装置（JT-60）の重水素実験において、DT中性子はDD中性子の1%程である^{3, 4, 5)}。



また、これらの反応により生じた中性子は、真空容器等の装置構造材料を放射化するとともに、式（2.4）や式（2.5）の様に装置

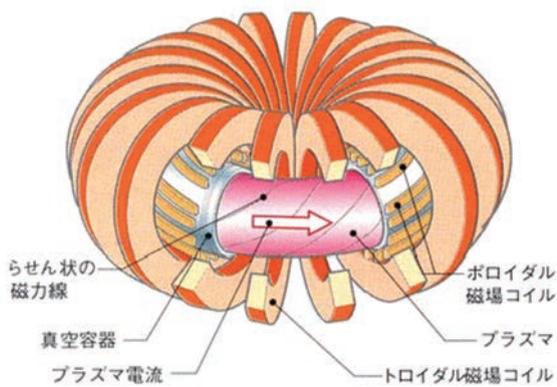


図1 トカマク型装置の概念図

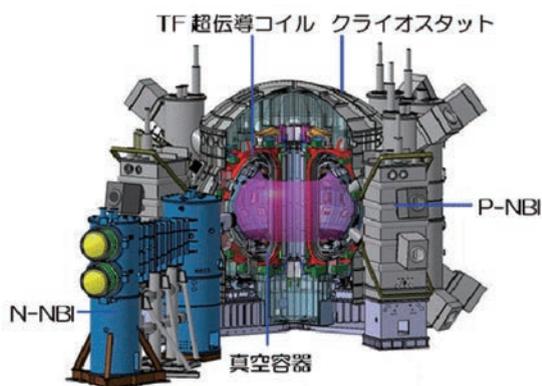


図2 トカマク型装置の鳥瞰図

建屋内の空気中の窒素 (N)、アルゴン (Ar) と反応してこれらを放射化させる。



2.3 計算環境

PHITSは、汎用PC (Windows -2000, -XP, -Vista, -7 /Linux/OSX)はもとより、並列計算機においても問題なく動作している。核データライブラリーは、JENDL-3.3⁶⁾ ベースのFSXLIB-J33⁷⁾を使用した。Weight Windowは、2.4節で述べる線源サブルーチンを改良している関係上、トカマク型装置解析用実行ファイルを使うとき、使用していない。

計算中は、中間ファイル (出力結果テキストファイル (datファイル)、出力描画ファイル (epsファイル))を確認しながら計算結果を評価することができ、また、相対誤差も確認できる。

2.4 トカマク型装置の中性子源

PHITSをトカマク型装置へ適用するため、著者らは、ドーナツ形状の線源分布のcell内において、中性子が乱数によって決まった座標で発生するように、トカマク型装置用の線源サブルーチン (ユーザー定義ソース)を新たに作成した^{8, 9)}。プラズマ実験にもよるが、大部分のプラズマは中心部でイオン温度が最も高く、周辺部で低いパラボラ型分布を持つ。重水素同士の核融合反応による中性子発生量は、そのイオン温度分布で決定される。作成した線源サブルーチンを用いて試解析を行い、新たに3次元解析モデルを作成すると共に、計算パラメータの整理を行った。ドーナツ形状の線源分布関数の主要パラメータについては、現状、プラズマ形状に近づくように、プラズマ三角度等のパラメータを含めて考慮している。

次に、PHITSによるドーナツ形状の中性子

源の確認作業を実施した。図3は、DT中性子 (14.1MeV) がDD中性子 (2.45MeV) の1%の割合で含まれる中性子線源のエネルギー分布を示す。図4は、トカマク型装置のポロイダル断面における空間分布例 (xz平面)を示す。

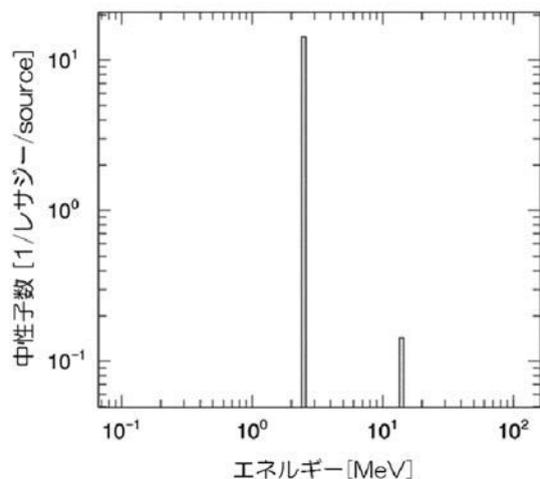


図3 14.1MeV中性子が1%の割合で含まれる中性子線源のエネルギー分布

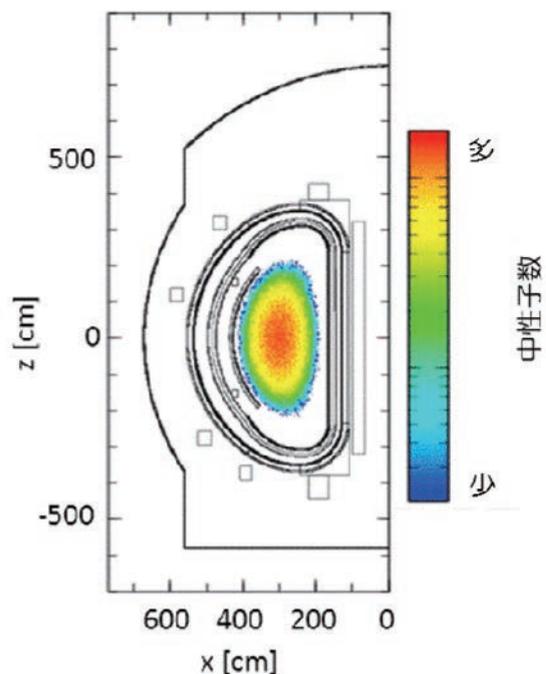


図4 トカマク型装置のポロイダル断面における中性子源の空間分布例 (xz平面)

3. PHITSの入出力データ

3.1 入力データ

トカマク型装置においては、2.1節でも述べたような複雑形状部にも対応した放射線遮へい計算コードによる解析が要求されている。かつ、入力における形状データの確認方法も重要な項目である。モンテカルロ法の特徴の一つは、低次の面方程式と高次の曲面方程式を組み合わせることにより3次元の幾何学形状を忠実に表現できることにある。その中でも、複雑なトカマク型装置形状を正確に計算入力用モデルの表示化をできるのがPHITSの特徴の一つでもある。PHITSは、計算用入力モデルの三次元表示の方法について、図形が遠くにあっても見える大きさが変わらない平行投影とは異なり、図形が遠くになればあるほど小さく見える表示方法である透視投影（パース表示）機能を有する。トカマク型装置の入力データの3次元パース表示機能に一部図面を切り抜く機能（BOX機能）を用いたPHITSの表示結果例を図5に示す。

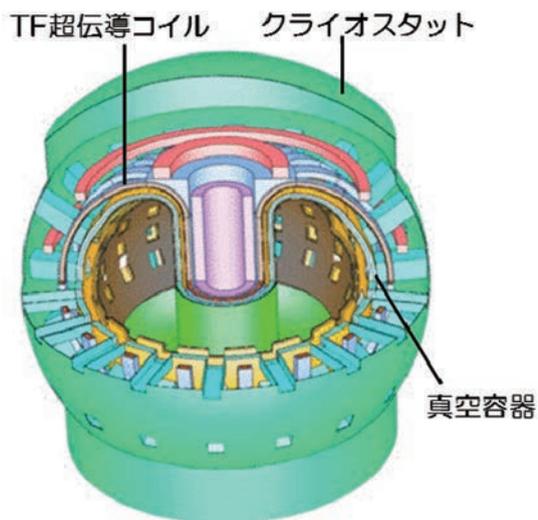


図5 トカマク型装置、計算モデルにおけるPHITSにおける3次元表示（BOX機能を一部適用）

3.2 出力データ

PHITSでは、計算実行中に、計算結果のグラフ化や2次元描写の表示化が可能である。これらがPHITSの特徴の一つであり、ユーザーが計算結果を判断しつつ、途中で計算を止めることも可能である。

4. PHITSの応用

ここでは、第1章で述べたように、PHITSの特徴の一つであるイベント情報を取り扱う半導体損傷評価手法を中心にトカマク型装置に適用した結果の一例を紹介する。

(1) 半導体損傷評価

トカマク型装置建屋内の放射線環境においても、装置を動かすために必要な計測機器、制御機器が必要不可欠である。そうした機器類の中には、半導体素子を使った機材も含まれる。

半導体素子の放射線による影響として、放射線の通過に伴う電子・正孔の変化（電場変化）のためにおこるソフトエラー（シングルイベント効果）と、放射線フルエンスに伴うダメージ（トータルドーズ効果）とがある。主要メーカーにおける放射線によるソフトエラー対策として、アルファ線によるソフトエラー対策と宇宙線によるソフトエラー対策を施しているが、トカマク型装置では、両対策の検討・評価を実施している。

半導体素子のシングルイベント効果によるソフトエラーの評価は、放射線で付与されるエネルギーの分布が問題になる。即ち、付与エネルギーがあるしきい値以上のときにメモリービットの反転が起こるので、ソフトエラーの発生率を評価するには、平均付与エネルギーではなく、付与エネルギー分布が必要となる^{10, 11)}。

シングルイベント効果の観点から、トカマク型装置周辺における素子に対する付与エネルギー分布の評価方法は下記のとおりであ

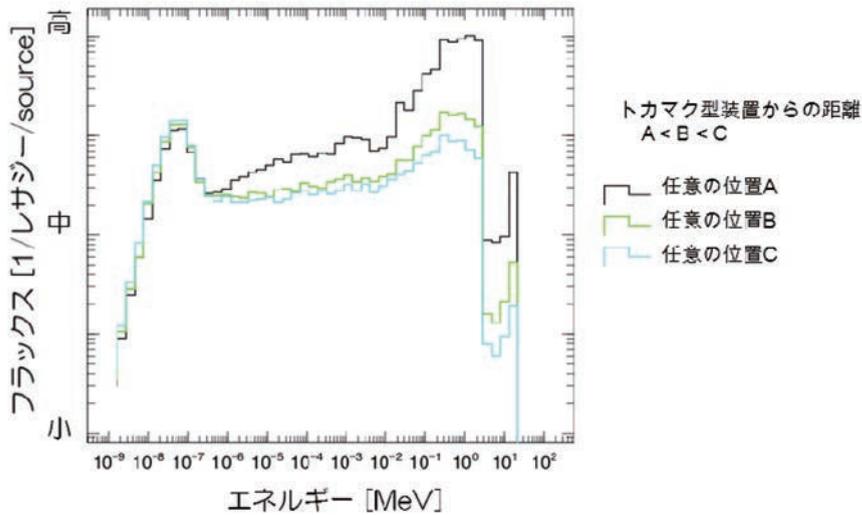


図6 中心から各位置での中性子のエネルギースペクトル例

る。はじめに、トカマク型装置中心から評価位置に検出器 (Track Tally) を任意の距離毎に設置し、そのタリーにおいて、図6に示すようにそれぞれ中性子スペクトルを算出する。

高エネルギー中性子成分は中性子線源からの距離が遠くなるにしたがい減少するが、熱中性子領域成分はほぼ同じであることがわかる。次に、2.45MeVエネルギー中性子と14.1MeVエネルギー中性子成分は核融合反応による中性子線源が唯一のソースであるので、高エネルギー中性子成分である2 MeVと14MeVの中性子に着目して、それぞれのフ

ラックスの大きさを線源 (プラズマ中心位置より300cmを仮定) からの距離の関数として図7に示す。2つのソースはこの図から、立体角、即ち距離の二乗に反比例して減少していることがわかる。

一方、図7における全体の中性子フラックスについては、熱中性子領域が各位置でほぼ同じ大きさを持つことから距離の二乗に反比例する依存性がないことがわかる。熱中性子領域の中性子のソースは、主に建屋のコンクリートの反射等により減速され拡散されているため、建屋空間の全体にほぼ同等に分布し

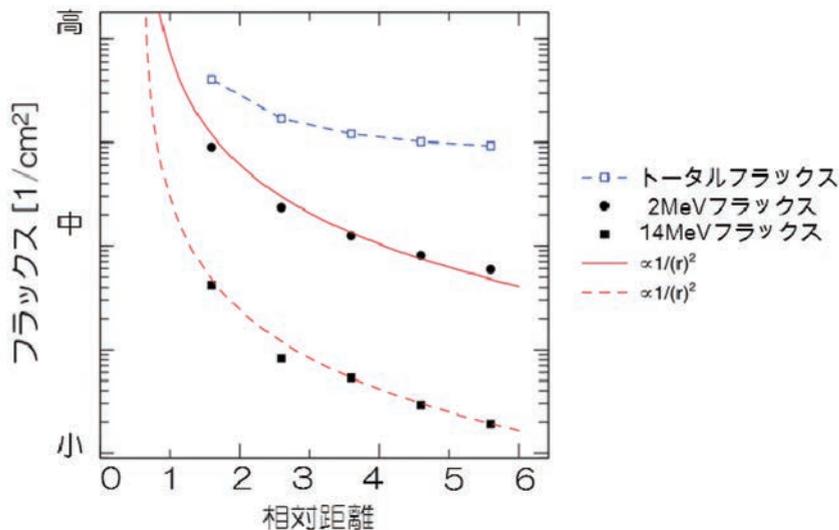


図7 中心からの距離の関数としての2 MeV、14MeV中性子フラックス例

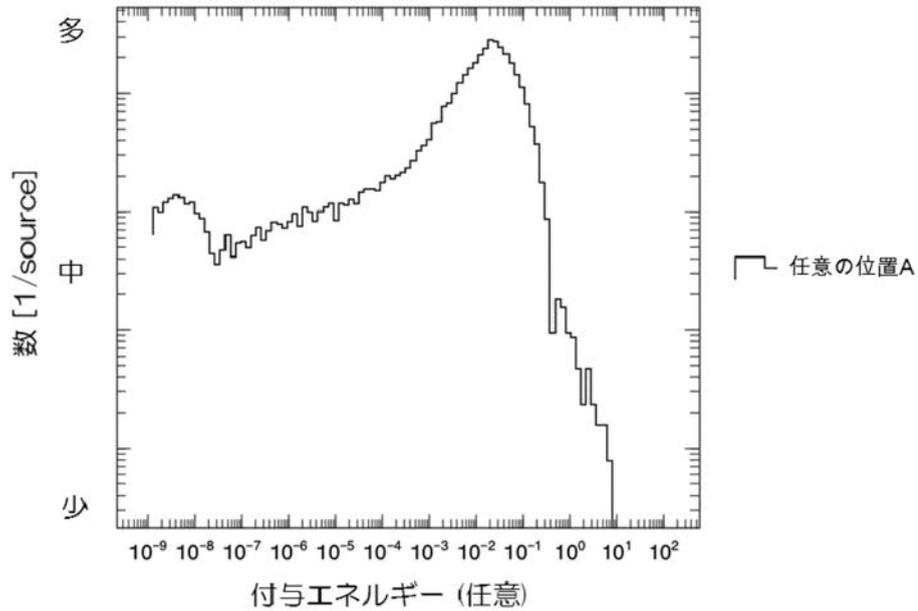


図8 中心からの任意の位置でのSiチップへの付与エネルギー分布例

ていると考えることができる。

次に、中性子スペクトルを算出したある任意の位置において、評価対象としてマイクロオーダーのSiチップに照射したと仮定したとし、図8に示すように、Siチップの付与エネルギー分布を求める。算出した付与エネルギーがSiチップのシングルイベントによるソフトエラーに効くため、トカマク型装置周辺に機器類を設置する際、遮へい体等により保護するなどの配慮が可能となる。

一方、トータルドーズ効果の観点から、Siチップに付与するエネルギー（熱量）を図9に示す、図9については、2 MeV中性子フラックスを例にとり、装置中心から任意の位置で規格化している。赤線が付与されたエネルギーの変化である。この図から、付与されるエネルギーは、ほぼ高エネルギー成分の中性子のフラックスによって決まることがわかる。従って、Siチップに付与されるエネルギーは、概ねプラズマ中心からの距離の二乗に

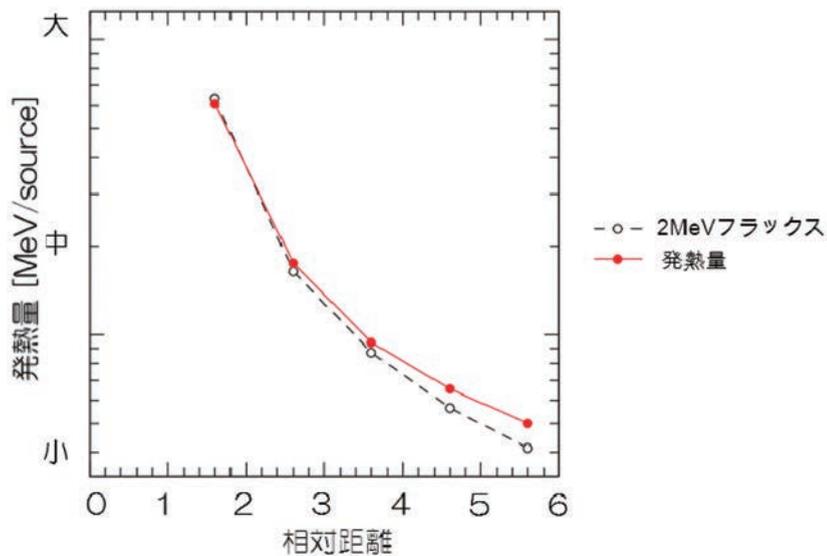


図9 任意の位置で規格化したSiチップの付与エネルギー例

半比例する。このことから放射線フルエンスに伴う半導体のトータルドーズ効果を低減する策としては、トカマク型装置からの設置場所を遠ざけるか、追加遮へい材を設置することにより放射線の半導体への寄与を減少させることが必要となる。以上述べたような指針がPHITSによる解析結果から得られている。

(2) 核発熱評価

半導体損傷評価と同様に重要なものは、超伝導コイルの核発熱評価である。磁場生成のために超伝導コイルを用いるトカマク型装置において、超伝導素線は、動作磁場と温度と臨界電流密度の3種類の材料特性が、ある一定の条件を満たした場合にのみ超伝導状態となる。中性子及び中性子に起因するガンマ線(光子)と物質との相互作用で発生する電子加熱によって、コイル導体部で発生する熱(核発熱)量によっては、超伝導状態が崩れ、急激な温度上昇を伴うクエンチ現象を起こして通電が停止する恐れがある。このような現象が生じないように、設計においては、あらかじめコイル導体部における核発熱の分布評価が必要となる。著者らは、PHITSを用いた核発熱の分布解析を行うことにより、装置の運転に伴う核発熱を精度良く評価し、超伝導コイルの温度上昇を抑える方策を検討している。PHITSによる核発熱の解析としては、一つは、重水素プラズマ実験に伴う超伝導コイル導体部の局所的な核発熱の瞬時値を、もう一つは超伝導コイルのクエンチ防止のため導体部全体の温度上昇を評価している。

5. Sn法コードとの比較

トカマク型装置の遮へい設計ではドーナツ形状の中性子源が必要なため、これまでのモンテカルロ計算やPHITS計算では、線源サブルーチンの改良を行って対応してきたが^{8, 9)}、一方では、簡易的な手法による精度良い解析方法についても模索している。

表1には、トカマク型装置の放射線遮へい評価項目に適した計算コードを示す。また、図10には、トカマク型装置の放射線遮へい設計の合理的な手順及び方法を示す。遮へい計算の各項目を比較して、総合的にPHITSが優れた特徴を持つと考えている。計算を行う初期段階では、材料の選定、遮へい構造検討(ラジアルビルドの決定)のため円筒モデルを作成した後、1次元Sn法ANISN¹²⁾を用いた放射線輸送計算が行われる。その後は、ストリーミング、追加遮へい材、スカイシャイン評価の精度向上のため、次元数を増やすことが必要となる。一方、トカマク型装置は、真空容器ポート開口部等も含めた複雑形状を持った構造となるため、そのモデル化には空間、エネルギー、角度においてメッシュ間隔を設定(近似設定)しなければならない2次元計算(3次元計算を含む)の差分法による数値解析法の適用には限界がある。よって、最終的には、複雑形状を正確にモデル化できる3次元のモンテカルロ法による詳細計算が必要不可欠と考えている。

解析するエネルギー領域が広範囲に及ぶ中性子・ガンマ線(光子)の挙動解析において、従来から使われているボルツマン方程式の数値解法として、差分法で解く決定論式手法の一つであるSn法と確率論的手法のモンテカルロ法は相補的に共存する手法と位置づけ、これまでSn法とMCNP-4C¹³⁾との比較検討を行っている。これらに加え、筆者らはPHITSを用いた遮へい設計を実施するため、Snコード及びメッシュ型検出器(Mesh Tally)を有するMCNP-5¹⁴⁾との比較検討のための試解析を行っている。

比較に用いているSnコードは核融合核設計計算コードシステムTHIDA-2¹⁵⁾で使用のANISNと2次元DOT3.5¹⁶⁾であり、解析モデルは装置本体から建屋までモデル化している。PHITSは3次元で円筒モデル化し、比較用計算として、1次元計算比較用、2次元計

算比較用共に円筒モデルを用いている。PHITSとの差異については、Sn計算、MCNP-5とで比較すると、それぞれ解析に使用している断面積ライブラリー（但し、JENDL3.3ベース）の違いはあるものの、各評価位置における中性子束とガンマ線束の輸送に関する解析結果は、ほぼ同等の値を得ており、従来の核融合遮へい設計資料^{17, 18, 19)}と同様な解析が、PHITSでも可能となっている。こうした結果からドーナツ形状の線源サブルーチンの利用なしに、簡易モデルによる

PHITSの利用方法も可能と考えている。

6. 今後の展望

PHITSは、ここで紹介した遮へい計算や核発熱量評価、半導体損傷評価のみならず、材料損傷に係るDPA (Displacement Per Atom)解析や重水素プラズマ実験を行うトカマク型装置ではトリトンによる真空容器内の第一壁損傷評価なども1つの入力データで行える総合的な解析コードであるため、装置・建屋の放射線遮へい設計、材料耐久性評価、

表1 トカマク型装置の放射線遮へい評価項目に適した計算手法

遮へい計算	Sn法			モンテカルロ法	
	1次元	2次元	3次元	MCNP	PHITS
材料選定	○	○	○	○	○
基本構造の決定	○	○	○	○	○
ストリーミング	×	○	○	○	○
複雑形状に対応した輸送計算	×	×	△	○	○
ニュートロニクス	○	○	○	○	○
イベントに対する物理量の平均値	×	×	×	○	○
イベントに対する物理量	×	×	×	△	○

放射線遮へい設計手順

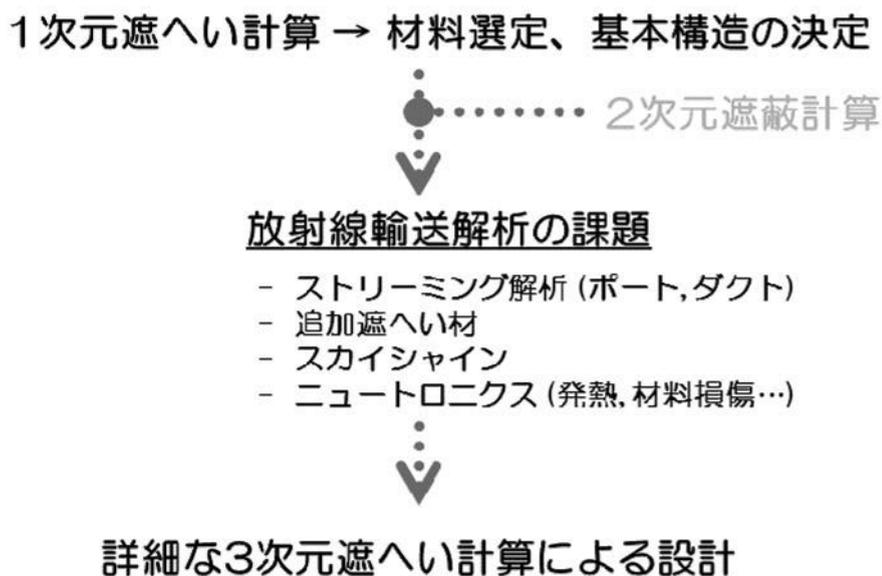


図10 トカマク型装置の放射線遮へい設計手順

安全評価等に非常に有用である。

著者らは、トカマク型装置の放射線遮へい設計について、Sn法とモンテカルロ法は計算時間を含めた合理的な方法を選択して設計計算・確認計算を行うため、両手法は相補的に共存するものと考えており、Snコード等との比較、放射化解析の本格的な検討を進めていく考えである。

7. まとめ

トカマク型装置・建屋の放射線輸送解析にPHITSを初めて適用した。今回、PHITSの有効性の一部を紹介した。PHITSを使うことで、トカマク型装置の中性子・ガンマ線(光子)輸送解析により、従来にない半導体ソフトエラーの発生率評価のための付与エネルギー分布や超伝導コイルの核発熱の分布結果を得ることが出来た。これにより、装置の遮へい評価に関わる検討を行う上で、新たな遮へい設計指針が得られつつある。

今回、PHITSの適用性・可能性に関する利点を紹介したが、多々あるモンテカルロ計算コードの中からPHITSを選択する合理的な判断基準は、次世代のユーザーが解析する対象を独自に判断して利用すれば良いと思われる。PHITSの1ユーザーとして、PHITSのさらなる発展を期待している。

謝辞

核融合ニュートロニクスについてご教授していただいた元日立製作所の故真木絃一氏に感謝いたします。また、本報告を作成するにあたり、高度情報科学技術研究機構の仁井田浩二氏、伊藤忠テクノソリューションズの天野俊雄氏、経済産業省原子力保安院の滝吉幸嗣氏に深く感謝するとともに、多大なるご尽力をいただいておりますPHITS開発チームに心から敬意を表します。

参考文献

- 1) K. Niita, N. Matsuda, Y. Iwamoto, H. Iwase, T. Sato, H. Nakashima, Y. Sakamoto and L. Sihver, PHITS: Particle and Heavy Ion Transport code System, Version 2.23, JAEA-Data/Code 2010-022 (2010)
- 2) K.Niita, S.Meigo, H.Takada, Y.Ikeda, "High Energy Particle Transport Code NMTC/JAM", JAERI-Data/Code 2001-007 (2001)
- 3) M.Hoek, T.Nishitani, Y.Ikeda et al, "Initial Results from Neutron Yield Measurements by Activation Technique", JAERI-M 94-002 (1994)
- 4) M.Hoek, T.Nishitani et al., "Triton burnup measurements by neutron activation at JT-60U", Nucl.Instr. Methods **A 368**, 804-814 (1996)
- 5) 原野英樹, "JT-60Uにおけるシンチレーションファイバー検出器を使用したトリトン燃焼研究", JAERI-Research 97-060 (1997)
- 6) K. Shibata et al., "Japanese Evaluated Nuclear Data Library, Version - 3 - JENDL-3.3", J. Nucl. Sci. Technol., 39[11], 1125-1136 (2002).
- 7) K. Kosako et al., "The Libraries FSXLIB and MATXSLIB Based on JENDL-3.3", JAERI-Data / Code 2003-011 (2003).
- 8) T.Nishitani, "Monte Carlo Simulation for the Calibration of Neutron Source Strength Measurement on JT - 60 Upgrade", JAERI-M 89-138 (1989)
- 9) A.M.Sukegawa, K.Takiyoshi et al., "Neutronic Anlysis of Fusion Tokamak Devices by PHITS," Prog. Nucl. Sci. Technol., Vol.1., 36-39 (2011).
- 10) 仁井田浩二, "PHITSの最近の動向",

- RISTニュース No.43 , 20-29 (2007)
- 11) 仁井田浩二, “PHITSに導入されたイベントジェネレーターモード”, RISTニュース No.45, 21-29 (2008)
 - 12) Engle, W. A. Jr., A User’s Manual for ANISN, A One-dimensional Discrete Ordinates Transport Code with anisotropic Scattering, K-1693 (1967)
 - 13) Judith F. Briesmeister., MCNP - A General Monte Carlo N - Particle Transport Code Version 4C, LA-13709-M (2000)
 - 14) X-5 Monte Carlo Team, MCNP-A General Monte Carlo N - Particle Transport Code, Version 5, Los Alamos National Laboratory, (2003)
 - 15) Y. Seki et al., “THIDA-2: An advanced Code System for calculation of Transmutation, Activation, Decay Heat and Dose Rate”, JAERI 1301 (1986)
 - 16) Rhoades, W. A et al., DOT3.5 Two-Dimensional Discrete Ordinates Radiation Transport Code, CCC-276 (1977)
 - 17) Department of Large Tokamak Research, “Conceptual Design Study of Fusion Experimental Reactor (FER)”, JAERI-M 86-134 (1986)
 - 18) 真木 絃一等, “核融合実験炉における炉心部の遮蔽設計”, JAERI-M 91-017 (1991)
 - 19) 中島 宏, “核融合炉遮蔽設計法のベンチマーク実験による評価に関する研究”, JAERI-M 95-025 (1992)