

	たけむら もりお
氏 名	竹 村 守 雄
授 与 学 位	博士（工学）
学位授与年月日	平成 15 年 3 月 24 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 4 条第 1 項
研究科、専攻の名称	東北大学大学院工学研究科（博士課程）量子エネルギー工学専攻
学位論文題目	原子炉の 3 次元遮蔽解析における合理的手法の適用と評価に関する研究
指 導 教 官	東北大学教授 中村 尚司
論 文 審 査 委 員	主査 東北大学教授 中村 尚司 東北大学教授 北村 正晴 東北大学教授 内田 俊介 東北大学助教授 岩崎 智彦

## 論文内容要旨

原子炉の遮蔽解析には 2 次元 Sn コードが現在広く適用されているが、複雑な 3 次元体系において精度の高い遮蔽解析を行うには、3 次元 Sn 法あるいはモンテカルロ法の適用が必要となってくる。

Sn 法は微小セル間のバランスをとりながら系全体にわたる線束の収束解を求めるものであり、空間内のメッシュごとの線束を出力することができる大きな利点が存在する。しかしメッシュごとの情報を保存するために大きな計算容量が必要であり、3 次元での実機大体系への適用となると通常の計算機的能力限界におさまらなくなる。モンテカルロ法においてはランダムサンプリングの方法にて粒子の追跡を行い検出器への粒子の到達割合を算出するものであり、メッシュ分割の必要はなく体系を基本形状の集合によりあるいは多次元式により表現できるために、複雑体系のモデル化にすぐれている。しかしこの手法には統計誤差が不可避であり、やはり実機大体系への適用において信頼できる統計精度を実現するためには、多くの粒子の追跡が必要なため膨大な計算時間がかかるようになる。3 次元解析法の実機大体系への適用におけるこれら計算上の制約のために、2 次元 Sn 解析にもできるだけ合理的に 3 次元効果を考慮した評価を工夫する努力が求められている。

本研究は、原子炉の 3 次元構造体系を対象として汎用の計算コードおよび断面積ライブラリーを適用した遮蔽解析の実施にあたり、上記の課題に対して解析法の合理的な適用をはかるものである。すなわち解析体系に存在する局所的な非均質領域あるいはストリーミング貫通部、さらには全体的な 3 次元構造をいかに 2 次元 Sn コードにて解析を実現するかを工夫した。複雑な構造をした大体系において詳細な線束分布を求めるため、現実的な計算機容量のもとで 3 次元 Sn 法の適用を可能とするためにコードの適用法を工夫した。3 次元体系での特定位置・領域の反応率・応答を求めるためのモンテカルロ法では、限られた計算時間内で統計精度を高めるために分散低減技法 variance reduction technique の適用、線源・検出器の合理的設定をはかった。

高温工学試験研究炉 HTTR 設計評価、高速炉実証炉概念研究、商業ガス炉廃止措置研究において、原子炉体系の遮蔽解析に適用した解析技法およびその適用成果は次の通りである。

(1) HTTR 炉体廻りの遮蔽解析を 2 次元 Sn コードを適用して実施し、原子炉運転中の遮蔽設計制限値を設計が満足していることを確認すると共に、HTTR の遮蔽性能特性を明らかにすることができた。炉心を囲む黒鉛反射体の周囲にはボロン領域が取り囲んでおり、ここでは黒鉛ブロックにボロンピンが多数打ち込まれた構造、あるいはボロン層にガス冷却流路孔が多数貫通した構造となっており、これらの領域を均質化して見かけ上のボロン濃度を調整することにより、ボロン領域から外部への漏洩量を保存する実効均質化断面積を作成し、炉体廻り 2 次元計算モデルに組み込むことができた。この 2 次元計算モデルとは独立に、制御棒案内カラムを中心軸とした局所 2 次元計算モデルにおいて S164 分点および S48 分点での計算比較から補正ファクターを評価し、制御棒案内カラムに存在する炉心下部まで達する軸方向貫通孔によるストリーミング効果およびこれらの貫通孔上端部に存在する B<sub>4</sub>C 制御棒等の遮蔽効果を、S48 分点での炉体廻り 2 次元計算結果に反映することができた。また bootstrap 法を活用して炉心部から順次周辺の領域に解析体系を接続拡張していくことにより燃取フロアまでの広い領域を 2 次元解析にて評価することができた。

(2) HTTR の広領域中性子検出器は、定格運転時には検出器応答飽和特性・供用寿命の観点から照射場中性子束レベルに上限が存在し、一方、低温未臨界時の中性子源のみの場合には所定のレベル以上の計数率の確保が要求される。このため検出器に遮蔽体等を設けこれらが同時に成立する中性子環境の実現をはからなければならない。この検出器は黒鉛固定反射体領域の径方向ほぼ中央の炉心を中心とした 120 度回転対称位置に挿入されており、その成立性評価のため検出器場中性子束を精確に求めるには 3 次元的な配置を考慮した解析が必要である。先ずこの解析体系は炉心を中心とした円筒体系と広領域中性子検出器を中心とした円筒体系との複合体系と基本的にみなせることから、2 次元重ね合わせ法 forward-adjoint flux folding technique を活用することにより上記要求を満足させる諸元—遮蔽体材料及び厚さ・検出器挿入高さ—についてのパラメータ解析を行うことができた。この結果に基づき選定した条件のもと、炉心部の大型六角柱ブロックの集合配列・制御棒の挿入等の 3 次元構造を精確に考慮した確認評価を行うために 3 次元モンテカルロ解析を実施した。その分散低減法として splitting boundary 法の適用をはかることにより、計算時間の大幅な短縮のもと信頼できる統計精度を実現することができた。この詳細評価に基づき、広領域中性子検出器が成立する中性子環境を実現するための検出器遮蔽体の仕様を設定することができた。

(3) 高速実証炉の主要な遮蔽設計課題のひとつである保修時の 2 次系配管廻りでの被曝線量が問題とならない自由な立ち入りを可能とするために、原子炉運転時の中性子照射による 2 次ナトリウムの放射化量の正確な評価が必要である。炉心を中心とした原子炉容器とナトリウムプール内の熱交換器とは複合 2 次元体系とみなせることから、(2) で適用した 2 次元重ね合わせ法による 2 次ナトリウム放射化量の解析を実施し、また並行して 3 次元モンテカルロ解析を実施した。モンテカルロ解析には splitting boundary 法を適用することにより、2 次元 Sn 法を組み合わせた重ね合わせ法よりも短い計算時間で放射化量を評価できることが明らかとなった。また 1000MWe タンク型炉での大型中間熱交換器 IHX においては、2 次ナトリウム放射化量を低減する B<sub>4</sub>C 遮蔽体は、熱交換器の炉心に面した周方向 1/3 の範囲だけで遮蔽効果が飽和することを、このモンテカルロ計算により明らかにできた。660MWe トップエントリー型高速実証炉においては、ナトリウムプール内の一次系配管周りにアニュラス間隙が存在するため、中性子ストリーミングが直接炉心補助冷却系熱交換器 DHX の 2 次ナトリウム放射化量へ影響をもたらすことが懸念される。このため同じモンテカルロ手法の適用をはかった

結果、中性子ストリーミングにより放射化量はファクター1.3ほど増加することを定量的に評価することができた。この計算では炉心側部と上部とに線源領域を分割することにより、放射化量への寄与の大きい領域からの中性子のヒストリー追跡に計算時間を集中させることを行い、線源一括入力よりも短い計算時間で統計誤差の小さな評価結果をうることができた。さらに原子炉容器と IHX 容器との間にある生体遮蔽壁の1次系配管貫通部への上記ストリーミングの寄与をモンテカルロ法によりルーフレッキの複雑な構造を対象として評価することができた。本モンテカルロ解析により、設計解析段階での2次元 Sn コードによる DHX および IHX の2次ナトリウム放射化量は、安全側の評価となっていることが確認できた。

(4) 大型高速炉のための遮蔽実験である JASPER 実験のうちの中間熱交換器2次ナトリウム放射化実験 (IHX 実験) に対する実験解析を実施した。JASPER 実験解析は、大型炉の設計解析に適用されている2次元 Sn 計算コード DOT3.5/JSDJ2 断面積ライブラリーによる解析手法の精度が評価されているが、当 IHX 実験解析では2次元 Sn 計算のほかに3次元モンテカルロコード MORSE および3次元 Sn コード TORT の適用を行った。MORSE 計算においては、計算時間の短縮の為に splitting & Russian roulette 法を適用するとともに、next event surface crossing detector を用いることにより2桁程度の計算速度の向上を達成することができ、現実的な計算時間で計算精度を議論できる統計精度を実現することができた。TORT 計算ではメッシュ分割、Sn 分点の合理化を検討し、計算容量の削減をはかった。また各種差分法について比較計算を実施し計算速度の速い  $\theta$ -weighted difference 法でも問題のないこと、DOT3.5 に標準的に適用されている weighted difference 法に比べ低い計算結果がもたらされることを確認した。3次元計算の MORSE と TORT とは整合のとれた解析結果が得られたが、2次元計算では RZ モデル化のために中心軸から径方向にずれた位置での C/E 値がこれらの3次元計算と顕著に異なる結果がみうけられた。しかし中心軸上の実測については2次元計算でも3次元計算とほぼ同程度の C/E 値であることを確認することができ、2次元 Sn コードを適用した設計計算におけるナトリウムプール中の B<sub>4</sub>C 遮蔽体付き中間熱交換器での2次ナトリウム放射化量の計算誤差はファクター1.25と評価することができた。

(5) 廃止措置が着手された東海発電所において、炉室に隣接する一次生体遮蔽壁と二次生体遮蔽壁とに囲まれた一次系配管区画ダクトエンクロージャ部は、一次系ガスダクトの貫通部をはじめ一次生体遮蔽壁に存在する各種の大開口部を通じて炉室から中性子が流入し、複雑な中性子束分布を示している。当区画を囲む生体遮蔽体コンクリートの残存放射能濃度の評価に不可欠な中性子束の詳細な分布を求めるため、(4) で実験解析への適用性検討を実施した3次元 Sn コード TORT の実機建屋大体系への適用をはかった。当手法は膨大な計算機資源を要するため空間的- (1) で適用の bootstrap 法利用- およびエネルギー的な分離接続計算法に工夫をこらし、これを可能とする計算システムを構築した結果、原子炉建屋規模の大体系での3次元 Sn 計算を実現することができた。この TORT 解析結果を、これまで蓄積されてきた放射化金属箔およびコンクリートコアでの実測結果と比較した結果、一次生体遮蔽壁開口部からの中性子流入効果をよく再現し、ダクトエンクロージャの地下1階から9階までの広い空間にわたり、中性子束および放射能濃度の計算値は実測値と良い相関を示していることが確認できた。本3次元 Sn 計算による中性子束を残存放射能評価にもちいることにより、従来の2次元 Sn 計算に比べ放射性廃棄物の物量を合理的に評価できるようになった。

本研究では、これらの HTTR 設計評価、高速炉実証炉概念研究、商業ガス炉廃止措置研究に関する具体的な遮蔽解析を通じて、2次元 Sn 法による3次元形状の解析、3次元 Sn 法での計算機容量を節減した解析、またモンテカルロ法での短時間での高い統計精度での解析について、次表にまとめるように、これらを合理的に実現できる手法を工夫・評価することができた。

表 3次元体系遮蔽解析における合理的適用手法

計算法	特長	課題	合理的適用手法	
			手法	適用対象
2次元 Sn	2次元メッシュにて記述が可能な体系での線束・反応率の詳細分布算出 計算機資源・計算時間の面で経済的、設計計算に適切	3次元形状への適用に工夫が必要	<ul style="list-style-type: none"> <li>bootstrap 法</li> <li>均質化領域の実効断面積の作成</li> <li>詳細な角度分点を適用した局所モデル計算によるストリーミング補正</li> <li>forward-adjoint flux folding 法</li> </ul>	大体系一般 ピン等の配列した非均質領域 大体系内の局所的ストリーミング効果 2次元形状の複合体系
3次元 Sn	3次元メッシュにて記述が可能な体系での線束・反応率の詳細分布算出	大体系適用時に計算機の必要容量が膨大となる 反復計算の収敛に時間がかかることあり	<ul style="list-style-type: none"> <li>bootstrap 法</li> <li>2次元 Sn 計算からの角度束接続</li> <li>散乱断面積のルジャンドル展開 次数のエネルギー群に応じた合理化</li> <li>領域に応じた角度分点の合理化</li> <li><math>\theta</math>-weighted difference の採用</li> </ul>	大体系一般 線源領域が2次元形状（炉心等） 大体系の多群計算 大体系内の局所的ストリーミング領域一般（計算時間の短縮）
Monte Carlo	単位幾何形状集合あるいは多項式にて記述可能な体系での局所位置・空間の線束・反応率の算出	大体系適用時に計算機の CPU 時間が膨大となる 統計誤差を%オーダに抑える必要あり	分散低減法 <ul style="list-style-type: none"> <li>splitting boundary</li> <li>splitting &amp; Russian roulette</li> </ul> 検出器設定 <ul style="list-style-type: none"> <li>次期面交差評価法 etc</li> <li>検出器の対称設置</li> </ul> 線源設定 <ul style="list-style-type: none"> <li>線源領域分割</li> <li>2次元 Sn 計算からの角度束接続</li> </ul>	寄与経路が推定可能な体系 同上 広がりのある面での積算・平均 構造配置に対称性のある体系 領域により寄与の異なる線源 線源領域が2次元形状

# 論文審査結果の要旨

原子炉の遮蔽解析には2次元 Sn 法が一般的に適用され、複雑な3次元構造はモンテカルロ法あるいは3次元 Sn 法が利用される。しかし3次元手法は体系が大きくなると、計算時間あるいは計算容量が膨大となり解析は容易ではない。本論文は、原子炉体系を対象とした標準的な解析コードによる遮蔽解析において、合理的な計算時間・計算容量のもとで精度の高い解を得るため各種計算技法の応用を図ったものであり、全編7章より構成される。

第1章は序論である。

第2章では、高温工学試験研究炉 HTTR 炉体廻りの遮蔽解析に2次元 Sn 法を駆使し、反射体外周部のピン配列等による非均質ボロン領域、制御棒挿入等のための軸方向貫通孔の効果を合理的に解析に取り入れ、燃料取扱フロアまでの大体系の遮蔽性能評価を行っている。

第3章では、HTTR 固定反射体に挿入される広領域中性子検出器に最適な遮蔽体選定のため、2次元 Sn 法に重ね合わせ技法を導入し合理的にパラメータ解析を可能とし、さらに炉心部の六角柱ブロックの集合配列・制御棒の挿入等の3次元構造を精密にモデル化した全炉心モンテカルロ計算に *splitting boundary* 技法を取り入れて統計誤差の小さな解を短い計算時間で得ている。

第4章では、高速炉実証炉の炉内熱交換器等における2次ナトリウムの放射化量解析において、交換器廻り  $B_4C$  遮蔽の局所的設置効果およびトップエントリー配管によるナトリウムプール内のボイドストリーミング効果を第3章の手法を応用して精度よく評価すると共に、モンテカルロ法には線源領域分割等の手法も導入しさらに計算時間を短縮している。

第5章では、2次ナトリウム放射化モックアップ体系の実験解析精度を評価し、モンテカルロ法では *splitting & Russian roulette* 手法と *next event surface crossing detector* の活用により大幅な計算時間の短縮を、また3次元 Sn 法では計算パラメータの合理化による計算容量の削減をはかり、高い精度の解析を実現している。

第6章では、商用ガス炉の炉室廻り各種大開口部のストリーミングによる隣接区画の複雑な中性子束分布について、空間的およびエネルギー的な分離接続計算法を工夫した計算システムの構築により計算容量の合理化をはかり、3次元 Sn 法により地下1階から9階までの大空間にわたり実測値と良い相関を示す解析を実現している。

第7章は総括である。

以上要するに、本論文では2次元 Sn 法による3次元構造の評価、3次元 Sn 法での計算容量の削減、モンテカルロ法での計算時間の短縮のための合理的な技法を工夫評価し、原子炉大体系での3次元形状の遮蔽解析を実現したものであり、原子炉工学、遮蔽設計工学の発展に寄与するところが大きい。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。