

氏名	はんだ ひろ ゆき 半田 博之
授与学位	博士(工学)
学位授与年月日	平成10年3月25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	原子力施設の複雑形状遮蔽設計における計算手法の適用性に関する研究
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 平川 直弘 東北大学教授 北村 正晴

## 論文内容要旨

原子力施設の遮蔽設計に対し、建設コスト低減、原子炉の長寿命化、予防保全及び廃止措置等の観点より、高精度且つ詳細な要求が出されており、高度な遮蔽計算法の開発が求められている。その為には、複雑形状に対する計算手法の精度向上が不可欠であるが、従来検討不十分であり、複雑形状計算手法の精度を検証し、適用性を明らかにする必要があった。本研究では、原子力施設の複雑形状体系に対する遮蔽計算手法の適用性の検証を目的として、以下の各複雑形状体系に対応した遮蔽実験及び実機プラントの測定データや実機体系の詳細解析を2次元及び3次元Sn法コードを用いて実施した。

- (a) 高速炉炉心廻り非均質体系
  - ・燃料集合体内の軸方向遮蔽体
  - ・炉容器内燃料貯蔵設備(IVS)
- (b) 原子炉本体貫通部体系
- (c) 屈曲ダクトストリーミング問題
- (d) スクリューダクトストリーミング問題
- (e) 複雑形状線源
  - ・BWR炉心
  - ・大型ヘリカル装置プラズマ

なお、本研究の対象とした計算コードは、設計計算での計算コードに対する要件を勘案して、離散座標Sn法輸送計算コードDOT3.5(2次元)及びTORT(2,3次元)とした。

以下、主な解析内容及び解析結果を示す。

(1) 高速炉炉心廻り非均質体系に対する2次元計算手法の検証を目的に、大型高速炉向け日米共同高速炉遮蔽実験(JASPER)の解析を実施した。解析した体系は、軸方向遮蔽体体系及びIVS体系である。適用した解析手法は、標準的な高速炉遮蔽解析手法で、計算コードはDOT3.5、断面積データはJENDL-2より作成した21群定数である。輸送計算近似は、 $P_3$ -S96を標準条件とし、ストリーミング計算では非対称のS166,100分点も用いた。また、IVS内の増倍中性子は外部反復計算により評価した。解析した結果、軸方向遮蔽体実験のC/E値は0.8~1.4で、40%以内の精度で2次元計算によって透過中性子束の予測が可能であることが分か

った。IVS については、増倍中性子を外部反復計算によって考慮した 2 次元計算による均質型 IVS 後方での透過解析精度は±10%以内であることが分かった。また、非均質型 IVS においても中央の円環の直径を燃料領域の幅に一致させた円環モデルの計算により、20%程度の精度で解析が可能であることが分かった。したがって、軸方向遮蔽体と IVS の高速炉炉心廻り非均質体系については、2 次元計算から設計値を評価する場合の補正係数は実験誤差を考慮しても 1.5 程度であることが分かった。

(2) 原子炉本体貫通部体系に対する 2 次元計算手法の検証を目的に、圧力管型の新型転換炉原型炉「ふげん」の遮蔽測定データを解析した。解析手順は、貫通部を除いた体系での原子炉本体廻りバルク計算を実施し、得られた角度束を編集・処理して境界線源を作成し、それを接続して貫通部のストリーミング計算を実施した。境界線源は、Euler の角の回転により角度座標を変換し、回転後の角度方向は  $S_n$  分点セットの最も近接した分点に置換し、中心軸方向の net leakage が保存されるよう補正して作成した。適用した解析手法は、計算コードは DOT3.5、断面積データは、中性子が ENDF/B-IV ベースの JSD100 ファイルを縮約して作成した 13 群データ、ガンマ線が SUPERTOG-JR コードより作成した 5 群データ、2 次ガンマ線生成は POPOP4 ライブラリである。輸送計算近似は、非等方散乱近似が  $P_3$ 、 $S_n$  分点はバルク計算が  $S_{30}$ 、ストリーミング計算が体系に応じ  $S_{48\sim 164}$  分点を使い分けた。その結果、原子炉本体貫通部体系の 2 次元計算手法の精度はファクター 5 であることが分かった。但し、その誤差は断面積に依存するところが大きく、最新の断面積を適用することによりかなりの精度の改善が見込まれるものと考えられる。ガンマ線量率計算については、2 次ガンマ線生成断面積が重要であることが分かった。

(3) 屈曲ダクトストリーミング問題に対する 2 次元及び 3 次元計算手法の検証を目的として、秦による中性子 2 回屈曲ダクトベンチマーク実験及び核破碎中性子源施設 ISIS の遮蔽実験の解析を実施した。前者の実験の解析方法は、解析コードが DOT3.5 及び TORT で、バックアップ解析として、連続エネルギーモンテカルロコード MCNP4.2 による計算も実施した。断面積データは、JENDL-3 ベースの JSSTDL ファイルを縮約した 12 群データで、輸送計算近似は非等方散乱近似が  $P_3$ 、 $S_n$  分点は DOT 計算が  $S_{96}$ 、TORT 計算が  $S_{192,60}$  を用いた。後者の解析の方法は、TORT に非等方の固定分布線源を直接入力できない為、ターゲットステーション全体を対象とした DOT による 2 次元計算を実施し、そこで得られた角度束を編集・処理して境界線源を作成し、それを接続して He ダクトの 3 次元ストリーミング計算を TORT により実施する手順を踏んだ。断面積データは、HILO86/J3 (中性子 66 群、400MeV 以下) を用い、輸送計算近似は非等方散乱近似が  $P_5$ 、 $S_n$  分点は DOT 計算が  $S_{96}$ 、TORT 計算がそれと等価な  $S_{192}$  を用いた。屈曲ダクトベンチマーク実験の解析より、TORT コードの中性子屈曲ダクトストリーミング問題に対する基本的な適用の妥当性を確認するとともに、離散角度分点の高次化によって特にダクト出口での C/E 値は 0.4 から 0.8 へと計算精度の改善がみられることが分かった。また、2 次元 DOT コードの計算結果は、計算モデルの制約上過大評価の結果を与えるもののその程度は 2.5 倍程度に収まることが分かった。核破碎中性子源施設 ISIS の遮蔽実験の解析より、ヘリウムダクト出口近傍の C/E 値は DOT 計算の 4.83~5.72 から TORT 計算の 1.18~1.53 に大幅に改善され、TORT コードの高エネルギー中性子の屈曲ダクトストリーミング問題に対する適用の妥当性が確認できた。高エネルギー中性子の深層透過問題については、断面積データの精度評価等解決すべき課題が残されていることを明らかにした。さらに、TORT コードは非等方の固定分布線源及び初回衝突線源を適用できるよう改良することが望ましく、初回衝突線源計算プログラム GRTUNCL の TORT に対応したバージョンアップの必要性も高いことが分かった。

(4) スクリューダクトダクトストリーミング問題に対する3次元計算手法の検証を目的として、E. Aaltoらによるスクリューダクト遮蔽実験と実機スクリューダクト模擬体系の解析を実施した。実験の解析方法は、解析コードがTORTで、バックアップ解析として、MCNP4.2による計算も実施した。断面積データは、JENDL-3ベースのJSSTD L ファイルを縮約して作成した12群定数で、輸送計算近似は非等方散乱近似が $P_3$ 、 $S_n$ 分点がS96である。模擬体系の解析では、計算コードがTORT、羽根のモデルは扇型の平板を螺旋階段状に重ねる形でモデル化している。断面積データは中性子がJSSTD L ファイルを縮約して作成した13群定数、2次ガンマ線生成断面積がJSSTD L ファイルからの7群定数、ガンマ線がSMUGコードより作成した14群定数である。輸送計算近似は非等方散乱近似が $P_3$ 、 $S_n$ 分点がS192を用いている。スクリューダクトベンチマーク実験の解析結果より、スクリューダクト体系に対するTORTコードの適用の基本的な妥当性を確認するとともにスクリューダクトのモデル化の方法が適切であることを確認した。また、実機模擬スクリューダクトの解析より、スクリュー羽根が鉄製である為ガンマ線に対するストリーミング効果は大きく、 $\phi$  700のスクリューダクトにおいてはストリーミング係数(均質計算に対する非均質計算の比)は最大30に達し、スクリューダクトの径が大きくなるにつれて、ストリーミング係数は大きくなる傾向があること、さらに、ストリーミング係数の最大値を示すのはほぼ半ターンの位置であること等設計上貴重なストリーミング特性が明らかとなった。

(5) 複雑形状線源に対する2次元及び3次元計算手法の検証を目的として、1100MWe級BWRのサーベランス試験の測定データと大型ヘリカル装置体系を解析した。測定データの解析では、解析内容は2次元R-Z、R- $\theta$ 及び3次元R- $\theta$ -Z計算による測定データ解析とパラメータサーベイ計算で、計算コードはTORTである。断面積データはJENDL-3ベースのJSSTD L ファイルを縮約した25群定数で、輸送計算近似は非等方散乱近似が $P_3$ 、 $S_n$ 分点はS192、S96である。大型ヘリカル装置の解析方法は、計算コードはTORTを用い、計算モデルはヘリカルコイルのピッチ数及びポートの配置の周期性を考慮して $\theta=0\sim 36^\circ$ についてモデル化し、真空容器内はプラズマ及びヘリカルコイルの回転ピッチを基にモデル化した。断面積データはJENDL-3ベースのFUSION-40を縮約した25群定数(中性子19群、ガンマ線6群)を用い、輸送計算近似は非等方散乱近似が $P_3$ 、 $S_n$ 分点はS192を用いた。BWRの炉心廻りの解析からは、2次元計算が炉心の形状や炉心上部からの中性子の漏れ込を考慮していない為測定値を10~30%以上過小評価するのに対し、これらの効果を考慮可能な3次元計算では10~30%以内で解析可能であることを示した。また、計算パラメーターの効果については、 $P$ の次数、 $S_n$ 分点、メッシュ幅のうち、メッシュ幅の影響が最も高く、その大きさは20%程度あることが分かった。さらに、パラメーター全体の効果は、個々のパラメーターの効果を積算して求めたものとほぼ同一となることが分かった。大型ヘリカル装置の解析からは、ヘリカルコイル及びプラズマのヘリカル形状による漏れ効果によって、装置本体内部の放射線束レベルが2次元計算で評価されるレベルよりも最大2倍程度高いことが明らかとなった。また、ヘリカル及びポロイダルコイルの発熱量については、2次元計算は各々20%及び10%弱3次元計算に比べ過小評価し、プラズマとコイルのヘリカル形状による放射線の漏れ効果を考慮する必要があることが分かった。また、線源評価の観点からは2次元計算は20~30%の保守性を有する妥当な手法であることが分かった。

以上の各複雑体系に対する2次元及び3次元計算手法の検証結果(解析精度、及び特性)に、さらにCPU時間、ターンアラウンドタイム(計算をスタートしてから終了するまでの期間)及び入力データ作成に必要な時間等の設計計算として考慮すべき要因も含めて総合的に適用性を評価した結果、以下の結論を得た。

高速炉炉心廻り非均質体系については原子炉全体の2次元モデルに組み込んで計算し、「ふげん」原子炉本体貫通部体系についてはENDF/B-IVベースの断面積データとともに2次元計算手法を適用した場合5倍程度の補正係数を見込む必要があることが分かった。屈曲ダクトストリーミング問題については、2次元計算は基本的な遮蔽仕様を設定する段階において適切な手法であり、3次元計算はより厳しい遮蔽条件下で詳細評価により線量当量等の低減が必要な場合が適切と考えられる。スクリュウダクトストリーミング問題については、特にガンマ線の解析に対しては、必要性の高い手法である。複雑形状線源については、特に線源近傍の詳細な線束やエネルギー分布を求める場合は3次元計算の適用が必要と考えられるが、複雑形状線源からある程度離れた位置での空間的な積分量を問題にする場合は、2次元計算でも数十%程度の若干の補正を考慮することにより妥当な計算結果が得られるものと考えられる。

さらに、2次元及び3次元計算手法の適用性を一般的にまとめると、3次元計算手法は2次元計算手法に比べ形状の模擬性が向上することにより解析精度が向上する為、適用のニーズは高いが、計算時間が2次元計算の10倍以上に達し、結果が得られるまでかなりの時間が必要である為、使用頻度は限定されたものとなる。したがって、総括的に適用対象を規定すると、2次元計算は設計の初期段階において評価の対象が比較的多く、基本的な遮蔽仕様を設定する場合に適切な手法であり、それに対し3次元手法は詳細設計段階において評価の対象が少なく比較的小さな体系で詳細なデータを得る場合に適用するのが妥当と考えられる。

## 審査結果の要旨

原子力施設の遮蔽設計に対し、建設コスト低減、原子炉の長寿命化、予防保全及び廃止措置等の観点より、高精度且つ詳細な要求が出されており、高度な遮蔽計算法の開発が求められている。その為には、複雑形状に対する計算手法の精度向上が不可欠であるが、従来検討不十分であり、複雑形状計算手法の精度を検証し、適用性を明らかにする必要がある。

本論文は、複雑形状体系に適応した遮蔽実験又は実機プラントの測定データ並びに実機体系を2次元又は3次元コードで解析し、これらの計算手法の適用性を評価したもので、全編8章からなる。

第1章は序論である。第2章では、高速炉炉心廻り非均質体系として燃料集合体内の軸方向遮蔽体や炉内燃料貯蔵について、大型高速炉遮蔽実験の解析に基づき2次元計算手法の精度を検証した結果について述べている。この結果は、高速炉体系に対する2次元計算手法の適用性を確認した点で評価できる。第3章では、原子炉本体貫通部体系について、圧力管型原子炉「ふげん」の遮蔽測定データを解析し、2次元計算手法の精度を明らかにするとともに輸送計算用断面積及び2次ガンマ線生成断面積の重要性を指摘している。第4章では、屈曲ダクトストリーミング問題について、2回屈曲ダクトベンチマーク実験及び核破砕中性子源施設ISISの遮蔽実験の解析による精度評価について述べている。この結果により、2次元計算の同体系での保守性を定量的に把握するとともに3次元計算の精度を確認している。さらに、高エネルギー中性子の深層透過については解決すべき問題が残されていることも指摘している。第5章では、スクリュウダクトストリーミング問題について、スクリュウダクトベンチマーク実験の解析により3次元計算手法の同体系に対する適用の妥当性を確認するとともに、実機模擬体系の解析により、ガンマ線についてはストリーミング効果が顕著であることを示している。その結果は、スクリュウダクトの遮蔽設計において極めて貴重な知見であり、同体系の3次元計算の必要性を示している。第6章では、複雑形状線源問題として、BWR炉心廻り測定データの解析による計算手法の精度検証及び大型ヘリカル装置プラズマを対象とした遮蔽特性解析について述べている。この結果は、複雑形状線源の効果を詳細に解明し、特に線源近傍の解析には3次元計算の必要性が高いことを示している。第7章では、各章で行なった検証結果を基に、遮蔽計算手法の総合評価を行ない、各複雑形状体系に対する遮蔽設計計算手法の適用性を明らかにしている。第8章は総括である。

以上要するに本論文は、複雑形状の遮蔽計算法の適用性を各種遮蔽実験等の解析を通じて評価し、今後の原子力施設の遮蔽設計に対する指針を与えたもので、遮蔽工学の進展に寄与するところ少なくない。

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。