

氏名	つじむら のりお
授与学位	辻村 憲雄
学位授与年月日	博士(工学)
学位授与の根拠法規	平成19年9月12日
研究科, 専攻の名称	学位規則第4条第1項
学位論文題目	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
指導教員	核燃料施設における中性子線量当量高精度評価のための 減速中性子校正場と線量基準測定器の開発
論文審査委員	東北大学教授 馬場 護
	主査 東北大学教授 馬場 護 東北大学教授 若林 利男
	東北大学教授 笹尾 眞實子 東北大学名誉教授 中村 尚司

## 論文内容要旨

我が国では、エネルギーの長期的安定確保と資源の有効利用を目的に、核燃料サイクルの確立を機軸とした原子力エネルギー政策を進めてきた。旧動力炉・核燃料開発事業団（現在の日本原子力研究開発機構 核燃料サイクル工学研究所）における試験プラントの運転を経て、平成18年に商業用再処理工場が、続いて平成22年に同 MOX（ウラン-プルトニウム混合酸化物）燃料工場の操業開始が計画されている。こうしたプルトニウムの燃料利用においては、中性子による作業者の被ばく線量の測定・評価が極めて重要になる。

しかしながら、現在使用されている中性子個人線量計の多くは、レスポンス（線量当量当たりの指示値）のエネルギー依存性及び入射角度依存性が共に十分ではなく、ある限定されたエネルギー又は入射角度の範囲内でのみ適切なレスポンスを達成しているに過ぎない。このため、中性子個人線量計を使用する場合は、使用場所の中性子場の特性、例えばエネルギー分布や方向分布等を考慮に入れ、個人線量計の指示値を評価すべき線量当量に換算するための校正定数を定める必要がある。しかしながら、校正定数の決定に使用される RI 中性子線源（ $^{252}\text{Cf}$  等）の中性子スペクトルは、実際の作業場の中性子スペクトルとは大きく異なるため、中性子個人線量計の種類によっては中性子線量当量を過大評価するものなどがあつた。

こうした状況に鑑み、著者は、RI 中性子線源を使用する校正場と実際の作業場における中性子個人線量計のレスポンスの違いを適切に補う方法、すなわち作業場の中性子スペクトル等に対応した適切な校正方法の確立を目的に、(1) 核燃料サイクル工学研究所 MOX 燃料施設作業場における中性子スペクトルの測定、(2) RI 中性子線源における非等方性の評価、(3) MOX 燃料施設と同様の中性子スペクトルを持つ校正場の開発、及び(4) 中性子のエネルギー及び入射角度分布が不明な中性子場において中性子個人線量当量を精度良く測定できる新型測定器の開発について研究を実施した。本論文は、これらの研究成果をとりまとめたもので、全6章からなる。

第1章では、本研究の背景と目的について記述している。

第2章では、本研究の基礎となる MOX 燃料施設作業場の中性子スペクトルについて記述している。MOX 燃料施設における主たる中性子は、Pu 同位体の自発核分裂と酸素との( $\alpha, n$ )反応によるものであり、共に約 2 MeV の平均中性子エネルギーを持つ。しかしながら、MOX 燃料はグローブボックス等で取り扱われるため、遮へい条件によって作業場の中性子スペクトルが大きく変化する可能性がある。そこで、MOX 燃料製造施設 FBR 燃料製造工程 70 箇所において、ボナー球スペクトロメータを用いて中性子スペクトルを測定した。その結果、中性子スペクトルは、MeV 領域の線源スペクトル成分、1/E 減速スペクトル成分及び熱中性子成分からなり、それらの成分の割合の違いによって、大型グローブボックス近傍、連続焼結炉近傍及び燃料集合体近傍の3パターンに区分でき、それぞれ平均中性子エネルギー0.5 – 0.7 MeV、0.3 – 0.4 MeV 及び約 2 MeV を持つこと、またそれぞれの区分の中では極端に大きなスペクトル変化がないことを明らかにした。

第3章では、中性子校正場の基本要素である RI 中性子線源 ( $^{252}\text{Cf}$  及び  $^{241}\text{Am}\text{-Be}$ ) の中性子放出特性の非等方性の評価について記述している。RI 中性子線源を用いた校正場における基準線量当量率は、線源の中性子放出率から算出されるが、このとき、線源カプセル構造や線源物質との相互作用に起因する中性子放出角度分布の非等方性(等方分布からのゆがみ)を適切に補正する必要がある。本研究では、国際的に広く使用されている型式の中性子線源(X1型  $^{252}\text{Cf}$ 、X3 及び X4型  $^{241}\text{Am}\text{-Be}$ )について、カプセル構造や内容物を精密に模擬したモンテカルロ計算によって非等方性を評価した。その結果、カプセル構造によって変化するが、裸の線源カプセルの状態では約 1~4%、さらに線源をハンドリング用金属製容器等に入れた場合で約 10%の等方的な放出角度分布からのゆがみが生じることを明らかにした。本計算結果をもとに非等方性を適切に補正することによって、線源カプセルや周囲構造に依存しない校正が可能となった。

第4章では、MOX 燃料施設で使用する中性子個人線量計等の校正を目的とする MOX 燃料施設模擬減速中性子校正場の開発について記述している。本校正場は、 $^{252}\text{Cf}$  中性子線源の室内位置とその線源の周囲に配置する減速材の組み合わせを変えることによって、核分裂中性子スペクトルを減速・変化させ、MOX 燃料施設の作業場と同様の中性子スペクトルを人工的に造り出すものである。核燃料サイクル工学研究所計測機器校正施設に構築した本減速中性子校正場は、中性子スペクトルの特徴が異なる二種類の減速中性子校正場からなる。第1の減速中性子校正場は、室内散乱線による寄与が小さい地上階グレーチング上に、 $^{252}\text{Cf}$  線源と鉄(厚さ 40 mm) 及びメタクリル樹脂(厚さ 15~100 mm) 製中空円筒形減速材を配置することによって、平均中性子エネルギー0.85~1.7 MeV を持つ計 6 種類の中性子スペクトルを生成する。第2の減速中性子校正場は、 $^{252}\text{Cf}$  線源を地下1階の狭い空間で使用するもので、床及び壁のコンクリートからの散乱成分を活用し、

さらに  $^{252}\text{Cf}$  線源の周囲に厚さ 100 mm の鉄，黒鉛ならびにメタクリル樹脂ブロックを配置することによって，第 1 の減速中性子校正場に比べて，多方向から中性子が入射し，かつより減速された中性子スペクトルを生成する。中性子スペクトルは計 6 種類，平均中性子エネルギーは 0.43～0.80 MeV である。これら二種類の減速中性子校正場は，グローブボックス等を透過する中性子のスペクトル，室内散乱成分を含む作業位置での中性子スペクトルをそれぞれ模擬したものである。

減速材及び室内構造等を精密にモデル化したモンテカルロ中性子輸送計算と中性子スペクトロメータによる測定によって，本減速中性子校正場における中性子スペクトルと基準線量当量率を評価した。 $^{252}\text{Cf}$  線源から距離 1 m における中性子スペクトルの計算値と中性子スペクトロメータによる測定値を比較した結果の一例を図 1 に示す。図中の中性子スペクトルは MOX 燃料施設内大型グローブボックス近傍の中性子スペクトルを模擬したもので，平均中性子エネルギーはスペクトル A で 0.85 MeV，スペクトル B で 0.43 MeV である。計算値と実験値はよく一致しており，基準線量当量率の不確かさは約 10% ( $2\sigma$ ) であった。また，本減速中性子校正場を用いて，代表的な中性子個人線量計である熱ルミネセンスアルベド線量計と固体飛跡線量計について照射試験を実施し，両線量計のレスポンスのエネルギー及び入射角度依存性を明らかにした。さらに，両線量計についての本減速中性子校正場での試験結果と，実際の作業場で実施した試験結果との比較から，本減速中性子校正場が作業場の適切な近似であり，中性子個人線量計の直接の校正に適用できることを示した。

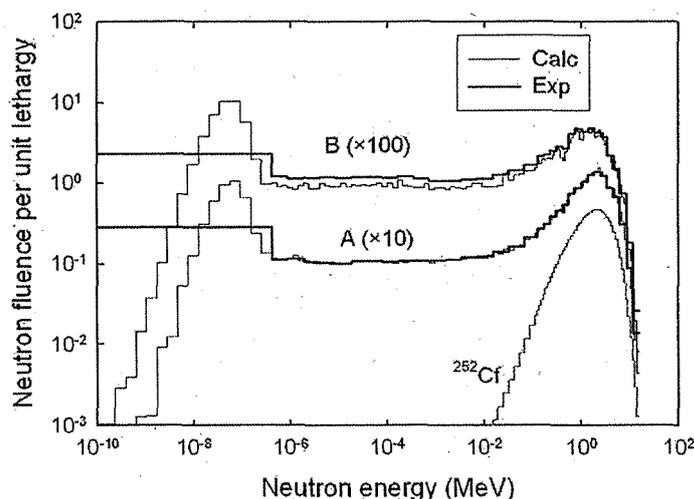


図 1 減速中性子校正場における中性子スペクトル例  
 スペクトル A:  $^{252}\text{Cf}$ +メタクリル樹脂 100mm 減速材 (地上 1 階)  
 スペクトル B:  $^{252}\text{Cf}$ +鉄 100mm/メタクリル樹脂 100mm 複合減速材 (地下 1 階)

第 5 章では，中性子個人線量当量基準測定器の開発と特性評価について記述している。本測定器 (図 2) は，中性子エネルギーや入射方向が不明な中性子場において中性子個人線量当量を簡便かつ精度良く評価す

ることを目的に世界に先駆けて開発したものであり、 $^3\text{He}$  比例計数管とポリエチレン減速材からなる中性子検出器を、ボロン入りポリエチレンからなる直径 30 cm の遮へい体に中心を偏芯させた状態で配置するという独特の構造を採用することによって、測定器の持つエネルギー依存性と方向依存性を、中性子個人線量当量そのものが有するエネルギー依存性・方向依存性に合致させた。図 3 に、様々な入射角度に対して、本測定器の単位フルエンス当たりのレスポンスを計算した結果を示す。正面入射 ( $0^\circ$ ) 時には一般的な中性子線量当量率サーベイメータとほぼ同等のエネルギー依存性、正面入射時以外には入射角度が大きくなるにつれて相対レスポンスが下がっていくという中性子個人線量当量そのものが有する入射角度依存性に近い特性を再現した。本計算の妥当性を単色中性子場での実験によって確認した。また、MOX 燃料施設模擬減速場で実施した特性試験の結果、エネルギー依存性で  $\pm 10\%$  以下、入射角度依存性で  $\pm 15\%$  以下 ( $0^\circ \sim 75^\circ$ ) の精度で中性子線量当量を評価できることを確認した。

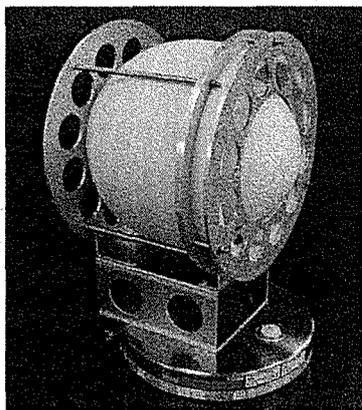


図 2 中性子個人線量当量基準測定器の外観 (右側が  $0^\circ$  方向)

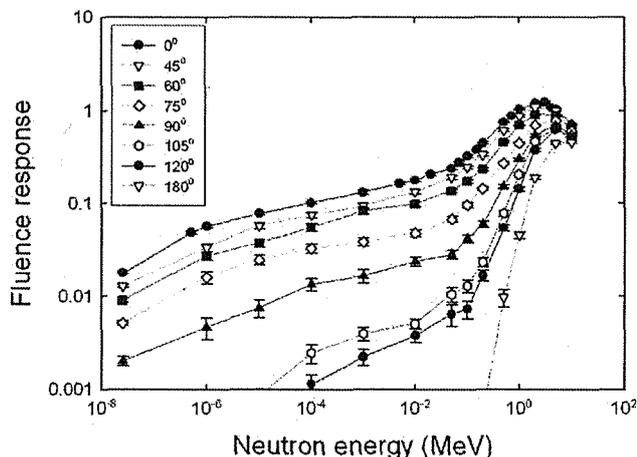


図 3 様々な入射角度 ( $0^\circ \sim 180^\circ$ ) における中性子個人線量当量基準測定器のエネルギー応答特性

第 6 章は本研究の総括である。MOX 燃料施設を主たる適用先として作業場の多様な中性子スペクトルに対応した中性子個人線量計の校正方法を開発した。MOX 燃料施設模擬減速中性子校正場は、MOX 燃料施設の作業環境の代表的な中性子スペクトルを精度良く定量された校正の基準量とともに実験室に再現したものであり、作業場における中性子スペクトルの変化に対応した中性子個人線量計の校正を可能にするものである。また、新規に開発した中性子個人線量当量基準測定器は、中性子のエネルギー及び入射角度分布に抛らず、作業場において校正の基準となる中性子個人線量当量を精度良く評価するものである。本測定器を利用することによって、様々な原子力施設の作業場において、そこで使用する中性子個人線量計を校正したり、あるいはその線量評価精度を客観的に確認したりすることが可能になる。これらの開発成果によって、MOX 燃料施設を含む核燃料施設における作業者の中性子被ばく線量評価精度の向上が期待される。

# 論文審査結果の要旨

天然資源の乏しい日本において、原子力は基幹的エネルギー源として重要な役割を演じており、更なる利用拡大が期待されている。それに伴って、核燃料施設の拡張も不可欠となり、燃料核種から自発核分裂や酸化燃料中での( $\alpha, n$ )反応によって生成する中性子による被曝を精度良く評価することが重要となる。しかし、現在用いられている中性子被曝線量測定器においては、中性子エネルギーと入射方向への依存性が期待される形状から大きくずれており、精度の高い測定は困難な状況にある。本研究は、この問題を解決するために、核燃料施設に特有なエネルギー依存性と方向特性を備えた校正用中性子場と線量測定の基準となる基準測定器を初めて開発したもので、全編6章からなる。

第1章は序論であり、研究の背景と目的、研究の方法の概要を述べている。

第2章では、著者が所属機関である日本原子力機構核燃料サイクル工学研究所において行ってきた研究を整理し、核燃料施設の様々な設備における中性子スペクトルを明らかにするとともに、中性子線量計測における精度の現状と精度向上に必要な条件を明らかにしている。これらは本研究の基礎となる内容であり、得られた作業場の中性子スペクトルデータは、第4章の減速中性子校正場の開発に利用されている。

第3章では、開発した R1 中性子線源( $^{252}\text{Cf}$  及び  $^{241}\text{Am-Be}$ )の中性子放出特性の非等方性評価手法について述べている。中性子源内部やその構造物における散乱は中性子に非等方性とスペクトルの歪みを発生させ、減速材と組み合わせた校正用中性子場の特性にも影響を及ぼすために正確な評価が必要であるが、従来詳細な解析が行われて来なかった。本研究では、モンテカルロ法と詳細な線源モデルによって、線源カプセルとその構造の影響を定量的に評価する手法を開発し、実験値を再現することに成功している。これは、重要な成果であり、4,5章の基礎になるとともに様々な応用が可能である。

第4章では、混合酸化燃料(MOX)施設で使用する中性子個人線量計等の校正を目的とした減速中性子校正場の開発について述べている。MOX 燃料施設の代表的作業場の中性子スペクトルを模擬するため、 $^{252}\text{Cf}$  中性子線源と減速材の適切な組み合わせ等について検討し、線源スペクトルと減速中性子スペクトルの重みを調整することによって、実際の場に近い中性子のエネルギー分布を実現している。その方法論は、様々な中性子場の設計に利用できる。さらに、その場について、入射角度分布を計算と実験によって評価し、校正の基準となる線量当量(率)を精度良く設定している。その上で、代表的な中性子個人線量計について、本減速中性子校正場と作業場での実験結果を比較することによって、本減速中性子校正場が作業場を適切に再現していることを確認している。

第5章では、中性子個人線量当量基準測定器開発のコンセプトと特性評価について述べている。本測定器は、線量計のエネルギー依存性と方向特性が、中性子個人線量当量測定に必要なエネルギー依存性・方向依存性になるようにモンテカルロ計算に基づいて設計したものであり、その特性を、単色中性子場及び MOX 燃料模擬減速中性子校正場での実験により検証している。入射角度 70 度までに亘って期待される角度依存性を再現することに成功している。このような角度依存性を具現した測定器は世界でも初めてのものであり、本研究の大きな成果である。

第6章では、研究の総括として各章で得られた知見をとりまとめている。

以上要するに本論文は、核燃料施設における中性子線量計測の問題点を明らかにし、その精度を向上させるための計測器及び計測手法の開発を行ったもので、量子エネルギー工学の発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。