

博士（工学） 小 綿 泰 樹

学 位 論 文 題 名

プルトニウムを利用する圧力管型重水炉の 冷却材ボイド反応度の研究

学 位 論 文 内 容 の 要 旨

全炉心に酸化プルトニウム（MOX）燃料を装荷して利用できる熱中性子炉は、重水減速・軽水冷却の圧力管型原子炉（以下、重水炉と略す）である。蓄積するPuを効率的に燃焼できる動力炉として、日本では1995年まで設計の成立性を検討してきた。チェルノブイリ原子力発電所事故以来、構造が類似の重水炉の冷却材ボイド反応度（ボイド反応度と略す）の評価、とりわけPuがボイド反応度に及ぼす効果が注目された。本論文はMOX燃料を使用した体系でのボイド反応度の測定手法の開発、実験による核計算コードの精度と有効性の評価を行い、Puの利用がボイド反応度に及ぼす効果の解明を重点として、ボイド反応度の挙動を実験と理論の両面から研究したものである。

本論文は7章から構成され、各章の概要は以下の通りである。

第1章は序論で、本研究の意義と背景について述べてある。動力用重水炉の安全設計にとって、ボイド反応度の特性とその炉物理メカニズムの解明の重要性、更にボイド反応度の研究の意義についてチェルノブイリ型炉の炉物理特性と対比して概説した。そして設計コードの信頼性と設計根拠の確証となる臨界実験の必要性及びボイド反応度の挙動解明の方法論を示してある。

第2章では、ボイド反応度が大きく正になりうる重水炉格子における重水と軽水の炉物理的役割を概説した。重水炉は二種の減速物質を使用する二重減速格子であることから、格子条件によってはボイド反応度は負から正の広い範囲の値をとりうる。それでもの大きい小型の臨界実験装置(DCA)を使って測定したボイド反応度のパラメータ依存性から得られた結論が大型動力炉の設計へ適用しても有効であることを示す。

第3章では、燃料置換法とパルス中性子法を組み合わせて一様な格子をもつ炉心（一様炉心）のボイド反応度を実験的に決定する測定原理を述べている。一般に、MOX燃料は少数体しか準備できないので、この手法は試験領域を大きく確保できなくても格子固有の物理量を得るのに有効であり、また他の炉物理実験への応用も考えられる。本手法により一様炉心での測定値が得られたことで、異なる組成の燃料格子間でそれぞれの物理量の直接比較や計算精度の正確な評価等が可能になった。本研究では、この手法を開発してデータの外挿によりMOX燃料一様炉心のボイド反応度を決定できることを確認した。燃料置換法による実験の結果、同一実験条件でボイド反応度の燃料組成依存性を実験的に決定でき、そのメカニズムの解明に有益である。数種の燃料格子で決定したボイド反応度の実験結果を、燃料のマクロ熱中性子吸収断面積を用いて整理すると、 ^{29}Pu の

0.3eVの共鳴吸収がボイド反応度をより低減させていることが確認できた。またPuがUに比べボイド反応度の抑制上有利な理由は、この共鳴吸収によることを示した。この結果により本手法が減速材対燃料体積比の大きい重水格子での反応度の測定に有効であることを確認した。

第4章では、第3章の実験結果から導いた考察、即ちPuの共鳴断面積がボイド反応度の低減に寄与する効果の妥当性をWIMSコードの解析により検証できたことを述べる。本解析は、第3章の実験体系に基づくが、少数の実験パラメータを補足するため、MOX及びウラン燃料の核分裂性Pu又はUの濃度範囲を拡大している。格子計算ではボイド反応度をエネルギー群、核種、領域、断面積等の成分に分離し、各成分の寄与を分析した。重水炉格子はボイド率が大幅に変化しても、ボイド反応度に及ぼす主なエネルギー範囲は1~2eV程度の熱・減速領域である。このためPuの0.3eVの共鳴吸収のような細かいパラメータの影響については均質化と積分的扱いを行う四因子分析では必ずしも明確にならない。本解析では、ボイド反応度の各成分と熱化中性子スペクトル変化との比較により、²⁹Puの0.3eVの共鳴吸収がボイド反応度の抑制をより助長することを明らかにしている。これは、中性子束が大きく窪む共鳴幅内では、ボイド率の増加によってその窪みは更に顕著になり、共鳴核分裂率を減少させ負の寄与が重畳することによる。

第5及び6章では、動力炉の余剰反応度又は出力分布制御に使用する3種類の中性子吸収材(ポイズンと略す)がボイド反応度に及ぼす影響とそのメカニズムの解明について述べる。このうち減速材中に溶解する¹⁰Bポイズン(¹⁰Bと略す)又は挿入する制御棒については第5章に、燃料中に添加するガドリニア(Gdと略す)については第6章にそれぞれ示す。ポイズンは、Pu富化度に応じて付加され、燃焼サイクル全体を通して炉心に滞在するので、ボイド反応度への影響因子として重要である。これらポイズンの効果についての解説には、第3章と同様実験及びWIMSコード等の解析結果とを用いている。更に摂動計算コードPERKYを用いてボイド反応度を各種成分に分離し、それらのポイズン濃度等依存性を分析した。また第5章では、これらのポイズンを含む炉心でのボイド反応度の測定のために、独自に改良した臨界水位差法の測定原理についても述べる。臨界水位差法はパルス中性子法とは異なる測定法で、狭い範囲の反応度測定に用いられるが、外部中性子源を使用しないで、また正の反応度も測定できる利点がある。

¹⁰Bは炉心全体に一様に数ppm添加され、炉心全体がポイズン入格子となるが、制御棒は炉心出力分布の平坦化と臨界制御のみに使用する局所的吸収材である。減速材中の¹⁰Bは、その中性子吸収率がボイド率によって変化するので、¹⁰B濃度の増加と共にボイド反応度を正方向に移行させる。制御棒も¹⁰Bと同様の効果があるが、挿入数が少なく、体積も小さいためボイド反応度への影響は小さいことが分かった。

第6章では、燃料の高燃焼度化に伴って添加されるGdのボイド反応度に及ぼす効果について述べている。運転初期の取替燃料には核分裂性物質と巨大な熱中性子吸収断面積のGdが共存し、格子の非均質性を一層高める。Gdは重水中の¹⁰Bと異なり燃料と一体物質で燃料集合体の内部の数本のピンに添加される。運転中にその濃度を調整できなく炉心内では分散的に存在するので、ボイド反応度に及ぼす濃度や配置の効果が重要である。ボイド反応度はGd濃度の増加に対して他のポイズンの場合と同様正の効果であるが、飽

和特性を示すことを確認した。しかしそのメカニズムは他のポイズンの場合と異なる。Gd入燃料格子はポイド率の増加が大きいほど隣接格子での熱中性子束の増加と中性子スペクトルの硬化を誘導し、ポイド反応度を間接的に正方向へ移行させることができた。隣接燃料がMOXの場合は、 ^{29}Pu の0.3eVの共鳴の存在と1/Eスペクトル領域での捕獲対核分裂断面積比 α ($= \sigma_c / \sigma_i$)の特性がポイド反応度の正方向への移行を抑制する。

第7章は結論で、本論文の各章において得られた結果をまとめた。

本研究は、我が国が構想した重水炉の安全性評価において重要なポイド反応度の挙動を評価するため実験と解析を行ったものである。その成果は、動力炉の核設計に適用するとともに、また炉物理分野では、重水格子の中性子スペクトル場における積分実験によるPuの核データの検証に使用される。

学位論文審査の要旨

主査 教授 成田 正邦
副査 教授 石川 迪夫
副査 教授 熊田 俊明
副査 助教授 沢村 晃子

学位論文題名

プルトニウムを利用する圧力管型重水炉の 冷却材ボイド反応度の研究

重水減速軽水冷却圧力管型原子炉は、軽水炉に比べて中性子の寄生吸収が小さく、酸化プルトニウム燃料を全炉心で利用できる熱中性子炉である。しかし、この型の原子炉はチェルノブイリ原子炉と類似した二重減速炉であり、冷却材ボイドによる反応度係数が正になる可能性をもっている。特にチェルノブイリ原子力発電所事故以来、重水炉の冷却材ボイド反応度（ボイド反応度と略す）の評価、とりわけ Pu がボイド反応度に及ぼす効果が、炉の安全確保の観点から注目されるようになった。

本論文では、重水減速動力炉の核設計手法の確立と成立性に理論的根拠を供することを目的に、圧力管型重水炉のボイド反応度挙動が実験と理論的解析の両面から研究されている。実験は、重水臨界実験装置により行われ、ボイド反応度の測定手法の開発、種々の炉物理パラメータを変化させてボイド反応度の測定を行っている。解析では、核計算コードモデルの改良を行うと共に、Pu 燃料がボイド反応度に及ぼす効果を重点としてボイド反応度挙動を解明している。また、実験と計算の比較により改良コードの精度と有効性が評価されている。

本論文は 7 章から構成され、各章の概要は以下の通りである。

第 1 章は本研究の意義と背景を述べている。ボイド反応度と関連する中性子挙動解明の、炉の安全設計・制御性にとっての重要性と、挙動解明の方法論を示している。

第 2 章では、重水炉における正のボイド反応度の原子炉物理にとる説明と、臨界実験装置による実験結果を大型動力炉へ適用することの有効性について概説されている。

第 3 章は、著者が開発した燃料置換法とパルス中性子法を組み合わせたボイド反応度測定手法について述べている。この方法は少数体燃料の部分的装荷炉心の測定値を、全装荷格子の物理量に外挿する手法で、従来は、主に物質バックリングの決定に適用されていた。本研究で初めて反応度の測定に応用し、その有効性が実証された。本法により、異なる燃料組成、格子パラメータを有する炉心に対する炉物理量間の比較、計算との比較等が可能になった。得られたボイド反応度を、共通の指標（例えば、熱中性子吸収断面積）で比較・整理し、 ^{239}Pu の 0.3eV の共鳴吸収がボイド反応度の低減化に寄与することを明らかにしている。

第4章では、Puの共鳴断面積によるボイド反応度の低減効果を改良WIMSコードにより検証している。著者はWIMSコードのライブラリをUKAEAからJENDL-3.1に置き換えることにより格子計算精度の向上をはかり、更に本コードがボイド反応度挙動の解明手段として有効であることを示した。摂動法的手法を導入してボイド反応度をエネルギー群、核種、領域等の成分に分離して解析し、 ^{239}Pu の0.3eVの共鳴吸収によるボイド反応度低減化を計算によつても明らかにしている。

第5及び6章では、2種類の中性子吸収材、 ^{10}B （重水減速材および制御棒中に添加）・Gd（燃料中に添加）のボイド反応度に及ぼす影響について述べている。吸収材は燃料サイクル全体を通して炉心に存在するのでボイド反応度への影響因子として重要である。第5章で、吸収材を含む炉心でのボイド反応度の測定手法として、著者が本研究のために改良した臨界水位差法と、吸収材 ^{10}B への応用を述べている。この方法は外部中性子源に依存せず、また正の反応度も測定できる利点を有している。実験結果はWIMSコードの他、摂動計算コードPERKY等により解析されている。 ^{10}B はその濃度の増加と共にボイド反応度を正方向に移行させること、それは軽水の大きな減速効果に起因することが示されている。第6章では、Gdが熱中性子束の増加、中性子スペクトルの硬化を助長し、ボイド反応度を正方向へ移行させること、しかし、 ^{239}Pu の0.3eVの共鳴と $1/E$ スペクトル領域での捕獲対核分裂断面積比 α の特性は、この傾向を抑制することを明らかにしている。

第7章は結論である。

以上のように本論文は、我が国が構想した重水減速軽水冷却圧力管型原子炉の安全性上重要なボイド反応度を評価するための実験と解析を行ったものである。その成果は、原子炉物理学および原子炉設計学の進歩に寄与するところ大なるものである。

よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。