

令和元年5月24日現在

機関番号：10101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K18344

研究課題名（和文）TM-EFP：原子炉過渡挙動解析のための革新的数理モデル

研究課題名（英文）TM-EFP: an innovative numerical model for nuclear reactor transient analyses

研究代表者

千葉 豪 (Chiba, Go)

北海道大学・工学研究院・准教授

研究者番号：50421524

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,900,000円

研究成果の概要（和文）：人類による原子力エネルギーの利用を可能たらしめているものは原子核分裂反応で発生する遅発中性子といっても過言ではない。この遅発中性子の放出は特に原子炉の安全設計において考慮される重要な物理現象である。これまでは遅発中性子を放出する多様な核分裂生成物核種を簡易的に扱う方法が用いられてきたが、本研究では個々の核分裂生成物を直接的に扱うモデルを提案・開発し、そのモデルを用いた空間依存の原子炉動特性解析を実現した。その一例として、ガス状の核分裂生成物核種の漏洩が生じる問題の数値解析を行い、本モデルの有効性を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

原子炉の安全設計において重要となる遅発中性子の放出に関しては近似的なモデルを導入することが一般的である。その精度は十分に担保されているものの、近似的なモデルであるが故の制限があり、それが安全設計における過大な設計余裕に繋がっている可能性がある。本研究は、遅発中性子放出に関するより厳密なモデルを空間依存の問題に世界で初めて適用したものであり、原子炉動特性解析分野における学術的意義は極めて大きい。また、本研究で開発したモデルの導入により、これまで考慮せざるを得なかった設計余裕を適正化できる可能性があり、社会的な意義も大きいと考える。

研究成果の概要（英文）：Delayed neutrons play an important role in nuclear energy utilization by human being, and delayed neutron emission is important physical phenomena which should be considered especially in safety analyses of nuclear reactors. The conventional model which has been widely and generally used in the world introduces an approximation that various fission product nuclides are treated as small number of fictitious nuclides, but we propose and develop a more sophisticated model which can handle with all the fission product nuclides explicitly and realize spatially-dependent nuclear reactor kinetics calculations with this model. As an example, nuclear reactor transient problems with leakage of gaseous fission product nuclides are carried out, and effectiveness of this model is demonstrated.

研究分野：原子力工学

キーワード：原子炉動特性解析 遅発中性子 核分裂生成物 行列指数法 FP漏洩

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

原子力発電所では、そのまさに心臓部と言える「原子炉の炉心」において、中性子による原子核分裂連鎖反応が実現し、膨大なエネルギーが発生している。原子核分裂反応の後に時間遅れを伴って発生する遅発中性子は、その発生割合は極めて僅かでありながら、原子炉内の核分裂連鎖反応において重要な役割を果たしている。これは、通常の原子炉は遅発中性子無しでは連鎖反応が持続しないように設計されていることに由来する。

ウラン等の原子核の分裂反応により 1,000 種を超える核分裂生成物核種が生成する。その大部分は中性子過剰核であり極めて不安定であるため、放射崩壊によって安定化する。その過程で中性子を放出する核種を遅発中性子先行核と呼び、現在確認されているだけでも 300 種以上存在する。

これまでの原子力発電所のための炉心設計解析・安全解析においては、300 種を超える遅発中性子先行核を、その崩壊定数に従って 6 つにグルーピングし、6 種の仮想的な先行核として取り扱ってきた(6 群モデル)。このモデルは極めて実用的であることから、原子力発電所の設計解析に耐え得る方法として広く認知されている。ただし、この 6 群モデルは実用的である一方、簡略化モデルであるがゆえ、必然的に多くの物理現象を無視せざるを得ない。また、6 群モデルは、従来の原子炉設計・安全解析への適用を目的として開発されたため、想定内の対象・物理現象・物理パラメータを精度良く評価することは可能であるが、それを越える役割は当然期待出来ない。

このような従来の 6 群モデルでは扱うことが困難な物理現象の数値解析を可能とするモデルとして、遅発中性子先行核を含む全ての核分裂生成物核種を陽に取り扱うというものが考えられる。研究代表者らはこれまでに、空間依存性を無視した簡易化した体系(一点炉)に対してこのようなモデルでの数値解析を実現し、原子炉の動特性を記述するパラメータのひとつである原子炉安定ペリオドの評価に重要となる遅発中性子先行核を特定するという成果を挙げている。

2. 研究の目的

本研究では、遅発中性子先行核を含む全ての核分裂生成物核種を陽に取り扱うモデルとして TM-EFP (Transient Model with Explicit representation of Fission Product) を開発し、それを用いた空間依存の原子炉動特性解析を実現することを目的とした。これにより、従来の 6 群モデルでは扱うことが困難な物理現象の数値解析が可能となる。

3. 研究の方法

本研究の方法は大きく 2 つに分けられる。

一点目は TM-EFP において利用する核データに関する検討である。TM-EFP では評価済み核データファイルに与えられている個々の核分裂生成物核種の核データ(崩壊定数や崩壊分岐比、核分裂収率など)を利用するが、これら核種の大部分は超不安定核種であるが故に難測定核種であり、これらの核データが精度良く推定されているとは言い難い。一方、従来の 6 群モデルでは、パルス状に引き起こした核分裂反応後の時間依存の遅発中性子放出データに基づいてパラメータが決められている。従って、TM-EFP と従来モデルの比較を行う際には、この核データ・パラメータにおける差異が大きく影響し、我々が関心をもつ動特性モデルの差異を抽出することが難しいという問題があった。そこで本研究では、TM-EFP で用いる核データと整合がとれる 6 群モデルのパラメータをマルカート法により求めることにより、核データ・パラメータの非整合性を排除することとした。

二点目は TM-EFP に基づく空間依存動特性問題の数値解法に関する検討である。TM-EFP では個々の核分裂生成物核種を陽に取り扱うため、核分裂反応や崩壊による核種の消滅・生成を記述するための方程式で定義される核種遷移行列が従来の 6 群モデルのものとその特性が大きく異なり、より高度な数値計算手法の導入が必要となる。本研究では、研究代表者らの研究グループで開発した方法である Mini-max polynomial approximation 法の適用を図った。また、空間依存の動特性問題に対しては、一点炉問題で適用可能であった行列指数法を用いることが困難となる。そのような問題に対処するため、新たな数値計算手法として部分行列指数法を開発し、適用を行った。

4. 研究成果

従来の 6 群モデルでの計算が可能な過渡状態の原子炉出力の時間履歴について、TM-EFP と従来の 6 群モデルのモデル間の差異を一点炉問題について評価した。この際、TM-EFP と従来の 6 群モデルの間に生じる核データ・パラメータの不整合という問題については、前項で述べた方法を採用することにより解決した。図 1 に瞬時核分裂反応後の中性子放出数の計算結果を示すが、通常の 6 群モデル(図中「Original 6-group model」)に対して、TM-EFP と整合がとれた核データ・パラメータを用いた 6 群モデル(図中「EFP-consistent 6-group model」)は、TM-EFP の計算結果と一致が良好となる様子が分かる。臨界状態からのいくつかの大きさの正及び負の反応度印加、さらには未臨界状態へのパルス状の外部中性子の導入といった種々の条件に対し

てTM-EFPと6群モデルの比較を行った結果、考えた全ての条件において、従来の6群モデルが十分な計算精度を有していることを確認した。図2には未臨界体系への中性子入射問題の解析結果を示すが、従来の6群モデルとTM-EFPの差異は2%以内であることが分かる。以上の検討より、様々な条件での原子炉の出力履歴の評価については、TM-EFPを導入する意義は小さいという結論を得た。

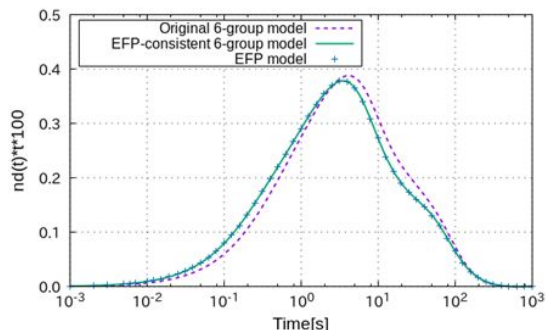


図1 瞬時核分裂反応後の中性子放出数

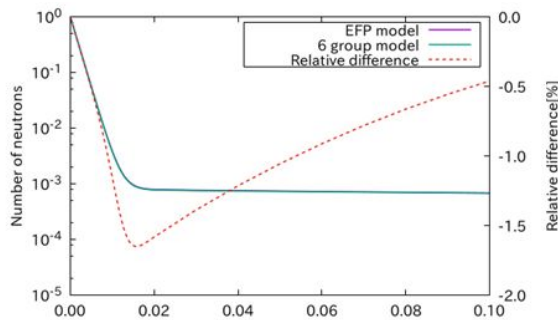


図2 未臨界体系への中性子入射問題解析結果

また、TM-EFPの空間依存動特性問題への適用に関しては、前項で述べた部分行列指数法を導入することにより、高精度の解析が可能となることを明らかとした。部分行列指数法は、空間依存動特性問題を行列形式の微分方程式で記述したときに、その全体に対して行列指数法を適用するのではなく、行列指数が数値的に計算可能である部分(核分裂生成物核種の生成・崩壊に対応する部分)に対して行列指数法を適用するというものである。図3に、核分裂生成物核種の数密度評価に関する計算精度について、部分行列指数法(図中「PME」)と一般的な解法(図中「Theta」)を比較したものを示すが、いくつかの核種について、一般的な解法と比べて部分行列指数法を用いることにより高い精度の結果が得られることが分かる。なお、一般的な原子炉動特性解析で適用される時間離散化の詳細度を考えた場合は、部分行列指数法と一般的な解法とに有意な差異は生じないという結果も得られた。以上で述べたTM-EFPによる空間依存動特性計算手法を用いて、従来の6群モデルでは扱うことが困難であるガス状FPの漏洩事象の解析を行った。臨界定常状態に対して、何らかの原因でヨウ素やキセノンといったガス状FPが漏洩した場合、漏洩が進むとともに、それらから発生する遅発中性子が原子炉から失われることとなるため、原子炉の出力が低下することが予想される。TM-EFPを用いた数値解析結果を図4に示すが、ガス状FPの漏洩によって原子炉出力の低下が始まること、その程度は漏洩の規模(図中「LC」、この値が大きいほど大規模な漏洩を模擬することになる)に依存することが分かる。

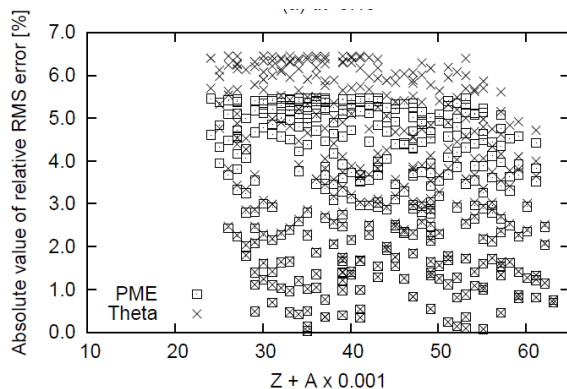


図3 個々の核分裂生成物核種の数密度再現誤差

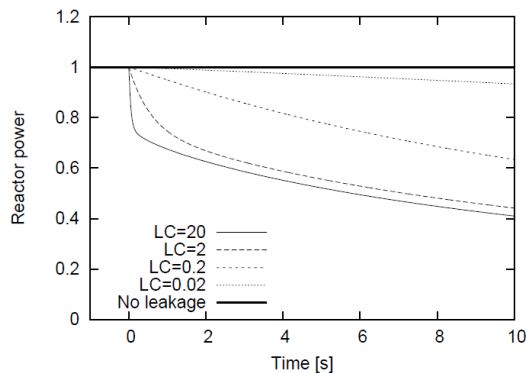


図4 臨界状態でのガス状FPの漏洩時の原子炉の出力変化

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

- (1) K. Katagiri, G. Chiba, “Spatially-dependent nuclear reactor kinetic calculations with the explicit fission product model,” Ann. Nucl. Energy, 133, pp.202-208 (2019), 10.1016/j.anucene.2019.05.024. (査読有り)

〔学会発表〕(計 5 件)

- (1) K. Katagiri, G. Chiba, “Spatially Dependent Kinetic Calculations with Explicit Fission Product Model,” Trans. Am. Nucl. Soc., **119**, pp.1236-1238, (2018), American Nuclear Society 2018 Winter Meeting, Nov. 11-15, Orland, FL, US.
- (2) 片桐耕司, 千葉豪, 核分裂生成物核種を陽に取り扱った空間依存動特性解析(2)全てのF Pを陽に取り扱ったモデルの実装と検討、日本原子力学会 2018 年秋の大会、9/5~7、2018、岡山大学
- (3) 片桐耕司, 千葉豪, 核分裂生成物核種を陽に取り扱った空間依存動特性解析、日本原子力学会 2018 年春の年会、3/26~28、2018、大阪大学
- (4) 片桐耕司, 千葉豪, 奈良林直, 核分裂生成物核種を陽に取り扱った一点炉動特性解析、日本原子力学会 2017 年秋の大会、9/13~15、2017、北海道大学
- (5) K. Katagiri, G. Chiba, “Nuclear Reactor One-Point Kinetic Calculations with Explicit Fission Product Model,” Reactor Physics Asia 2017 Conference (RPHA2017), Aug. 24-25, 2017, Chengdu, China

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

6 . 研究組織

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。