

令和 4 年 6 月 7 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2021

課題番号：17K07011

研究課題名(和文) 炉心異常診断のための中性子輸送理論による高精度炉雑音解析に関する研究

研究課題名(英文) Research on high precision reactor noise analysis based on neutron transport theory for reactor core diagnosis

研究代表者

山本 俊弘 (Yamamoto, Toshihiro)

京都大学・複合原子力科学研究所・准教授

研究者番号：70355048

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,100,000円

研究成果の概要(和文)：欧州委員会のCORTEX計画の一環として発電用原子炉の内の異常振動等によって発生する中性子雑音を周波数領域で高精度で解析するモンテカルロ計算手法を開発した。本計算手法を臨界集合体で行われた燃料振動実験及び吸収体振動実験に適用した。前者では十分な精度の計算結果が得られなかったが後者では実験結果と比較して妥当な結果が得られた。本計算手法を同じく臨界実験装置での中性子雑音を用いた水中ボイド速度測定実験に適用し本測定手法の特性を明らかにした。原子炉内における中性子雑音の一点炉近似からの乖離の原因を明らかにした。中性子雑音解析で使用する群定数等の各定数が中性子雑音に与える感度解析手法を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

モンテカルロ法の粒子輸送計算では、定常状態或いは時間依存の解析が従来から行われてきたが、原子力分野において複素数のウェイトを用いた周波数領域の解析は、研究代表者が世界に先駆けて開発したものである。この手法の炉心異常診断等への適用可能性を示したことで、モンテカルロ法の適用分野を大きく切り拓いたといえる。成果はCORTEX計画において高精度参照解として採用され計画の推進に貢献した。

研究成果の概要(英文)：A Monte Carlo calculation method for analyzing neutron noise propagation in a nuclear power reactor core caused by abnormal vibration of an in-core component has been developed. The method has been applied to analyses of neutron noise experiments in critical assemblies, where the neutron noises were produced by vibration of fuel or neutron absorber. Whereas the method does not yield sufficiently accurate result for the fuel vibration, reasonably accurate result is obtained for the absorber vibration. The method is applied to an experiment where void velocity in a water channel was measured using noise method in the critical assembly. A unique feature in the velocity measurement is revealed via the Monte Carlo analyses. The deviation of neutron noise in a reactor core from the point kinetics theory is investigated. A sensitivity analysis method for calculating sensitivity of neutron noise with respect to group constants that are used for neutron noise analyses has been developed.

研究分野：原子力学

キーワード：中性子 炉雑音 原子炉 異常診断 輸送理論 モンテカルロ 周波数領域

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

欧州の一部の原子力発電炉では、炉内で中性子束の異常振動などが発生しており、その原因として炉内構造物の何らかの異常振動が原因ではないかと推測されていた。この原因を特定するために、炉内構造物の異常振動が中性子束に及ぼす影響を明らかにする研究開発、また、逆に、中性子束の異常振動から炉内の異常状態を推定する方法の研究開発の必要性が高まっていた。このような背景から、欧州原子力共同体 EURATOM では、欧州委員会の補助金によりこれら異常事象の診断技術の研究開発を進めることが計画されていた。本計画(以下、CORTEX 計画)は、2017年9月から2021年8月までの4年間の期間で欧州委員会の補助金事業として採択され、欧州の約20の研究機関が参画するコンソーシアム(代表機関はスウェーデンのチャルマース工科大学)が設立された。

発電炉内では、冷却材の乱流、沸騰や炉内構造物の機械的振動、核反応の確率的変動などにより、中性子束、温度などの計測パラメータの揺らぎが発生する。これらの揺らぎは炉心特性に密接に関連しており、炉心状態を診断するうえで有用な情報源となる。CORTEX では、炉心内外に既に設置されている中性子検出器、熱電対信号などを用いて炉内の状態を監視する非侵襲型炉心健全性測定技術開発を行うこととなっていた。

研究代表者は、中性子束の振動(中性子雑音)を周波数領域で解析するモンテカルロ計算手法の開発を行っていたところ、コンソーシアムから CORTEX への参加協力の打診があった。そこで、この計画に参画し、開発した手法をさらに発展させ、実機発電炉での異常振動問題に適用するための研究開発を行おうとしたものである。研究開始当初は、中性子雑音の解析手法は、拡散理論に基づく近似の多い計算手法のみが開発されていた。しかし、異常事象の発生源近傍や複雑な炉内構造物の取り扱いには限界があり、より高精度な計算手法の導入が望まれていた。研究代表者の手法は、厳密な輸送理論に基づくものであり、また、複雑な炉内構造物まで厳密に取り扱える方法ではあったが、研究開始当初は簡易な計算形状にしか適用できなかった。そこで、本計画に参画することで、実機発電炉にも適用可能な詳細解析手法への発展が必要と考えていたところであった。

2. 研究の目的

実機原子力発電炉内の燃料集合体や制御棒などの炉内構造物の異常振動等に起因する異常状態を、炉内検出器で測定される中性子雑音情報を用いて特定するための技術開発が欧州原子力共同体 EURATOM で計画されていた。その計画(以下 CORTEX 計画)に参画し、異常振動に伴って発生する中性子雑音の解析を、従来の近似の多い拡散理論に代わって、厳密な解析が可能なモンテカルロ法で行うための新たな手法を開発する。研究代表者がすでに開発している周波数領域での複素数ウェイトを用いたモンテカルロ法による解析手法をさらに発展させ、実機に適用するための技術開発を行う。そのため EURATOM で実施される予定の研究炉を用いた炉雑音実験結果を用いて手法の検証及び改良を行い、高精度解析手法の確立を図る。実機での異常状態の炉雑音シミュレーションを行い、異常状態と中性子検出器応答との関連を明らかにする。

3. 研究の方法

(1)基本アルゴリズムの開発と汎用モンテカルロコードへの組み込み:研究代表者が参考文献(1)において開発した周波数領域の中性子雑音を中性子輸送理論に基づきモンテカルロ法を用いて解析する手法を利用する。ここでは、複素数で与えられる中性子雑音の炉心内での輸送現象をモンテカルロ法で解く。中性子雑音は、モンテカルロ法では粒子ウェイトとして与えられるが、粒子輸送の過程で粒子数が増大し発散するという問題点があった。それを克服するために、核分裂の起こる領域を多数の領域に分割し、そこで正と負のウェイトを相殺する操作が必要である。しかし、この手法を、実機炉心への適用が可能な汎用モンテカルロコードに導入するのは困難である。したがって、参考文献(1)では、単純形状に適用できる程度にとどまっていた。そこで、新たな発想に基づく、領域分割を要しないアルゴリズムの開発が必要となってくる。可能性のひとつとして、モンテカルロ法で一般的な手法である陰的吸収を使ったアルゴリズムではなく、アナログモンテカルロ手法の導入が有望と考えられる。実機での炉雑音解析を行うべく、複雑な三次元形状も扱える汎用モンテカルロコードへの炉雑音解析のためのアルゴリズムの組み込みを行う。汎用モンテカルロコードとして、世界的に使われている連続エネルギーモンテカルロコード MCNP を採用する。

(2)雑音源を記述する数理モデルの開発:燃料集合体や制御棒の振動などの中性子雑音源を周波数領域での中性子雑音輸送方程式で記述する数理モデルを開発する。この数理モデルを MCNP に組み込むためのコード開発を行う。

(3)臨界実験装置での炉雑音実験への適用:CORTEX で実施予定の臨界実験装置を用いた炉雑音実験の解析を、(1)で改良した MCNP コードを用いて行う。実験は、ドレスデン工科大学の AKR-2 炉及びスイス連邦工科大学ローザンヌ校(EPFL)の CROCUS 炉で行われる。実験に関する詳細情報

を調査し実験結果との比較により(1)で開発する計算コードの検証を行うとともに必要な改良を行う。

(4)実機発電炉での炉雑音特性の解析：以上で開発する解析手法を用いて、実機発電炉での炉雑音の伝播挙動のシミュレーションを行う。実機発電炉の解析モデルを作成し、上で述べた各種異常状態を模擬した周波数領域での炉雑音解析を行い、異常状態と中性子検出器応答との関係を明らかにする。また、CORTEX 計画に参加する他のグループが行う解析結果との比較を行い、その性能を評価する。

4. 研究成果

(1)炉雑音解析モンテカルロ計算コード開発：炉心内の燃料集合体の振動現象等に起因する周波数領域の中性子雑音を、中性子輸送理論に基づいて解析する手法としてモンテカルロ法を用いた計算手法の開発を行った。本来なら、計算体系の領域分割を行い、各領域で正負のウェイトの相殺を行う必要があるが、より汎用性を高めるために、領域分割を必要としない計算手法を汎用連続エネルギーモンテカルロコード MCNP へ組み込みを行ったところ、0.01 ~ 30 Hz の周波数範囲内で解析を行うことに成功した。この周波数範囲は、炉内で発生する炉雑音の周波数範囲をほぼ包絡しており、開発した手法でもって実機炉雑音解析に適用できる見通しを得た。改良 MCNP コードを用いて、実機沸騰水型発電炉の模擬炉心内での炉雑音伝播特性の解析を行った。この解析の結果、炉雑音の周波数特性の位置依存性が顕著に見られ、特に雑音が発生する位置近傍では汎用的に使われている一点炉近似から大きく乖離することが分かった。この成果は、査読付論文誌 *Annals of Nuclear Energy* に掲載された。解析可能な周波数範囲をさらに拡張させるために、モンテカルロ計算法にアナログモンテカルロ手法を導入した。これにより、解析可能な周波数の上限を約 50 Hz にまで拡張できるようになった。

(2)炉雑音空間依存性の研究：炉雑音の周波数特性の位置依存性及び一点炉近似からの乖離が生じる原因を明らかにするための研究を実施した。その結果、炉雑音の空間依存性を考慮した場合は、一点炉近似に対応している基本モード成分に加えて高次モード成分の影響が大きく現れ、特に雑音源近傍でそれが顕著になることを明らかにした。この成果は査読付論文誌 *Progress in Nuclear Energy* に掲載された。

(3)実機プラント炉雑音解析用多群モンテカルロコードの開発：ドイツ PreussenElektra 社の加圧水型原子炉を炉心解析コード SIMULATE-5 で解析するための入出力データを CORTEX のコンソールシームを通して入手し、SIMULATE-5 による炉心計算の出力ファイルから、炉心形状と 4 群群定数を自動的に読み込んで、周波数領域での中性子雑音解析を行うモンテカルロコードを新たに開発した。これにより、実機炉心を対象としたモンテカルロ法による炉雑音解析を可能とした。

(4)臨界集合体 CROCUS 炉での炉雑音実験解析：上述の(1)で開発した改良 MCNP コードを用いて、EPFL の臨界集合体 CROCUS で行われた炉雑音実験の解析を行った。CROCUS では 18 本の燃料棒配列を 1Hz 程度の周波数で振動させて、それによって発生する中性子変動のパワースペクトル密度の測定が行われた。この燃料棒配列の振動によって発生する炉雑音源を周波数領域で記述するための数理モデルは、フランスの CEA によってすでに開発がなされており、それを MCNP コードに組み込み、本実験のシミュレーション計算を行った。その結果、得られる中性子雑音は、正と負のウェイトが相殺するために極めて小さく、モンテカルロ法では統計誤差に埋もれてしまい非常に長い計算時間を要することが判明した。得られた結果は、他の計算手法の結果と必ずしも整合するものではなく、燃料棒振動に伴う炉雑音解析をより効率的に解析できる新たなアルゴリズムの開発が必要であることが判明した。

(5)臨界集合体 AKR-2 炉での炉雑音実験解析：ドレスデン工科大学の臨界集合体 AKR-2 では、炉内のカドミウム吸収体を振動させてそれによって発生する中性子変動を複数の位置に置かれた検出器で測定し、パワースペクトル密度の測定が行われた。カドミウム吸収体は、ディスク状のものを水平方向に振動させるものと、八ツ橋状の湾曲した板を回転させるものがある。これらの吸収体振動によって発生する中性子雑音源を記述する数理モデルを新たに導出し、それを改良 MCNP コードに組み込んだ。CROCUS 炉での実験とは異なり、吸収体が非対称の位置に設置されていれば、モンテカルロ計算において有意な強度の中性子雑音が発生し、(1)で開発した手法で十分な精度で解析が可能であった。ただし、COVID-19 の影響により、ドレスデン工科大学などの実験参加者の活動が大きく制限されるなどしたために、十分な精度の実験が行えなかったという制約があった。そのため検証に使える高精度の実験データも極めて限られていたが、モンテカルロコードで計算したパワースペクトル密度 (APSD 及び CPSD) 分布の解析結果は実験結果を概ね再現することができ、解析手法の妥当性が示されたといえる。

(6)周波数領域のモンテカルロ計算によるボイド移動速度の推定：周波数領域のモンテカルロ計算手法の適用例として、EPFL の臨界実験装置 CROCUS で行われた炉雑音による原子炉内でのボイド移動速度測定実験の解析を、本研究で開発している改良モンテカルロコード MCNP を用いて行い、炉雑音手法によるボイド速度測定特性を調べた。この実験では、炉心近傍の水反射体領域に

設置された平断面が約 5 cm×5 cm の流路に下部から気泡を流し込み、流路近傍に配置された複数の中性子検出器間の中性子雑音の CPSD からポイド速度が推定されている。この手法は、実機の沸騰水型原子炉のポイド速度やポイド率の測定に利用可能な測定手法であり、原子炉の計測制御技術の高精度化への応用が期待できる。この実験に対して、周波数領域のモンテカルロ計算を行った結果によれば、高周波側の雑音では、実際のポイド移動速度を精度よく測定できるが、低周波側の雑音はポイド伝播がより広範囲に及び、これが原因でポイド移動速度を過大評価することが判明した。このような知見は実験で得ることは困難であり、本研究によって初めて解明したものである。本成果は、査読付論文誌 Journal of Nuclear Science and Technology に掲載された。

(7)周波数領域の中性子雑音計算手法の相互比較：周波数領域のモンテカルロ計算手法を実機発電炉の炉雑音解析に適用したところ、正負の値が相殺しあい計算誤差が非常に大きくなることが本研究によって判明している。そこで、単純モデル体系において、モンテカルロ法ではない決定論的手法の精度確認をモンテカルロ法との比較により行い、そして、本格的な実機発電炉の解析はモンテカルロ法によって精度の検証された決定論的手法で行うことが合理的であるとの結論に至った。この目的のため、CORTEX では、モンテカルロ法を含む複数の解析手法の比較検討を行い、決定論的手法の解析精度が同定された。モンテカルロ計算手法としては、研究代表者が自主開発した計算コード及びフランス CEA が開発している TRIPOLI4 コードが用いられた。決定論的手法としては、拡散近似による既存の二つの計算コードと、チャルマース工科大学が本プロジェクトで開発した離散角度法による輸送計算コードが用いられた。計算体系は、水中に正方形の燃料棒が配列した体系で、そのうちの 1 本の燃料棒から中性子雑音が発生するというものである。中性子雑音の伝播状況を計算手法間で比較したところ、二つのモンテカルロ計算コードはほぼ一致し、輸送計算コードはこの結果を概ね再現する結果となった。拡散計算手法は詳細な雑音分布までは再現できないが、全体的な雑音の伝播状況を再現できる結果となった。以上の比較検討により、各計算手法の精度同定がなされた。本成果は、チャルマース工科大学によって国際会議 The International Conference on Mathematics and Computational Methods Applied to Nuclear Science and Engineering で発表がなされた。

(8)周波数領域の中性子雑音計算手法の感度解析：周波数領域の中性子雑音計算に使用する各種の核データ、群定数、動特性パラメータ(周波数、遅発中性子割合、遅発中性子先行核崩壊定数)には、それぞれ不確かさが含まれており、これらの不確かさが、中性子雑音に与える感度を解析する手法を、決定論的手法とモンテカルロ法のそれぞれに対して開発した。この成果は査読付論文誌 Progress in Nuclear Energy に掲載された。

参考文献

(1)Toshihiro Yamamoto, "Monte Carlo method with complex-valued weights for frequency domain analyses of neutron noise," Annals of Nuclear Energy 58, 72-79 (2013).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Toshihiro Yamamoto, Hiroki Sakamoto	4. 巻 58
2. 論文標題 Frequency domain Monte Carlo simulations of void velocity measurements in an actual experimental setup using a neutron noise technique	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Nuclear Science and Technology	6. 最初と最後の頁 190-200
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/00223131.2020.1814176	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Toshihiro Yamamoto, Hiroki Sakamoto	4. 巻 117
2. 論文標題 Decomposition of neutron noise in a reactor into higher-order mode components and investigation of the space and frequency dependence	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Progress in Nuclear Energy	6. 最初と最後の頁 103098
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.pnucene.2019.103098	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Toshihiro Yamamoto	4. 巻 115
2. 論文標題 Implementation of a frequency-domain neutron noise analysis method in a production-level continuous energy Monte Carlo code: Verification and application in a BWR	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Annals of Nuclear Energy	6. 最初と最後の頁 494-501
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.anucene.2018.02.008	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Yamamoto Toshihiro, Sakamoto Hiroki	4. 巻 145
2. 論文標題 Deterministic and stochastic methods for sensitivity analysis of neutron noise	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Progress in Nuclear Energy	6. 最初と最後の頁 104130 ~ 104130
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.pnucene.2022.104130	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 P.Vinai, H.Yi, A.Mylonakis, C.Demaziere, B.Gasse, A.Rouchon, A.Zoia, A.Vidal-Ferrandiz, D.Ginestar, G.Verdu, T.Yamamoto
2. 発表標題 Comparison of neutron noise solvers based on numerical benchmarks in a 2-D simplified UOX fuel assembly
3. 学会等名 The International Conference on Mathematics and Computational Methods Applied to Nuclear Science and Engineering (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------