

令和 6 年 6 月 11 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04940

研究課題名（和文）革新炉の解析精度向上：有効部分空間法を用いた高精度かつロバストな断面積調整

研究課題名（英文）Improvement of prediction accuracy of advanced reactors: Precise and robust cross section adjustment method based on active subspace approach

研究代表者

山本 章夫 (Yamamoto, Akio)

名古屋大学・工学研究科・教授

研究者番号：50362265

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）： 革新的原子炉の核設計において、主要な不確かさの要因となる核反応断面積の不確かさを低減する新たな断面積調整法を開発した。

主要な成果は以下の通り。情報科学の分野で活用されている有効部分空間法と計算モデル上の近似が非常に少ない連続エネルギーモンテカルロ法を組み合わせることで断面積調整に初めて適用。ロボットの学習などに用いられるM推定を用いることで実験データの外れ値、ノイズなどに対する耐性が高い断面積調整を実現。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究においては、情報科学やロボティクス分野で用いられていた概念(active subspace、M推定)を原子炉の核特性解析に適用することにより、これまで大きな課題となっていた外れ値やノイズに耐性のある断面積調整法を開発することが出来た。また、遮蔽実験など、核特性の予測に直接用いることが出来なかった実験データの活用にも道を開いた。本研究の成果により、革新炉および既設炉の核特性シミュレーションの不確かさを減少させることができ、予測値の不確かさ現象は原子力安全の確保につながる。

研究成果の概要（英文）：A new cross section adjustment method to reduce the uncertainty of the reaction cross-sections, which is a major source of uncertainty in the nuclear design of advanced nuclear reactors.

The main outcomes are as follows: (1)A combination of the active subspace, which is used in the field of information science, and the continuous energy Monte Carlo method, which has very few approximations in calculation models, is newly applied for the cross section adjustment. (2) By using the M-estimation method, which is used in machine learning of robotics, a cross section adjustment method that is robust to outliers and noise in experimental data is developed.

研究分野：原子力工学

キーワード：炉心解析 断面積調整 感度係数 決定論的サンプリング 遮へい 不確かさ低減

1. 研究開始当初の背景

原子炉の安全性は予測計算により担保される。そのため、予測計算の精度と信頼性は、原子力安全確保の基盤である。現在、国により原子力のイノベーションを追求する NEXIP(Nuclear Energy X Innovation Promotion)事業が実施されており、革新的な原子炉の検討が行われている。NEXIP 事業ではハードウェアのイノベーションのみならず、研究開発プロセスのイノベーションにより、研究開発プロセスを劇的に加速することを目指している。そして、その中核になるのが信頼性の高いモデリング&シミュレーションである。

モデリング&シミュレーションを中核とした開発アプローチをとる場合、シミュレーションによる予測精度と信頼性をどのように担保するかが大きな課題となる。軽水炉は設置されている基数も多く実績も豊富なため、「実機によるシミュレーションの信頼性確認」が歴史的に実施されてきた。一方、実績が少ない高速炉の分野においては、限られた実測データを用いて断面積の不確かさを低減する断面積調整法が活用されてきている。

以上のように、核計算分野では、データ同化法として断面積調整法が用いられてきたが、以下の問題点がある。

- ・核計算に用いる手法の計算モデル誤差を評価する方法が確立されておらず、計算モデル誤差も含めた形で断面積が不適切に調整されている可能性がある
- ・断面積調整は、最尤法を仮定した解析式により実施されているが、数値計算において、実験データ間の相関、実験データのノイズ、外れ値などの存在により、適切でない断面積調整が行われる可能性がある
- ・最尤法を仮定した解析式では、断面積、実験データの不確かさとして正規分布を仮定しているが、必ずしも誤差が正規分布に従うわけではない

本研究は、これらの課題の解決を試みるものであり、以下の点が学術的に解くべき問いとなる。

- ・計算モデル誤差の影響を受けない断面積調整をいかに行うべきか
- ・実験データの適切さに依存しないロバストな断面積調整をいかに行うべきか
- ・不確かさとして任意の確率分布を許容する断面積調整をいかに行うべきか

2. 研究の目的

本研究の目的は、以下の特徴を有する断面積調整法を確立することである。

- ・計算モデル誤差の影響を受けない
- ・実験データの質に依存しにくい
- ・誤差として正規分布の仮定を必要としない

これまでに述べた断面積調整法の課題は、高速炉に対して断面積調整の適用が試みられ始めた 1980 年代から未解決であり、従来の手法の延長では解決できない。そこで、本研究では、以下の二点について、従来とは異なるアプローチを採用する。

- a)計算モデル誤差を排除するため、計算モデルにおける近似が非常に少ない連続エネルギーモンテカルロ法の解析結果を用いて断面積調整を実施する。
- b)最尤法に基づく解析的な断面積調整式ではなく、よりロバストなデータ同化が実施できる Bayesian Monte-Carlo 法の利用を検討する。

これまでアプローチ a)が用いられてこなかったのは、連続エネルギーモンテカルロ法を用いて断面積調整で必要となる様々な核特性パラメータに対する感度係数を計算できなかったこと、あるいは、計算できたとしても実用的でない計算時間を要したことである。この点に関し、調整すべき断面積の次元数(未知数)を大幅に減らすことが可能な有効部分空間法(Active subspace, AS 法)を適用する。AS 法を用いることで、核特性に対する寄与が大きい核種、反応タイプ、エネルギー群(有効部分空間、AS)に限定して、効果的に断面積調整を行うことが可能となる。本研究では、AS 法を用いて、連続エネルギーモンテカルロ法と同等の解析結果を与える代理モデルを構築することで、計算誤差を排除しつつ高速な計算を実現する。

BMC 法は、多数の核計算を実施する必要があり、計算時間の観点から実用的な断面積調整法として用いることが困難であった。しかしながら、上述したように、AS 法を用いて非常に短い時間で核特性を計算することができる代理モデルを適用することで BMC 法が断面積調整に適用可能となると予想される。

なお、本研究では、断面積を対象とするが、AS 法を用いた代理モデルと BMC 法の組み合わせでデータ同化を行う手法は、工学分野一般のシミュレーション技術として応用することが出来る枠組みであり、波及効果は大きい。

本研究の成果と社会的意義は、以下のように要約できる：計算モデル誤差の影響を排除し、実験データの質に依存しにくい断面積調整により、革新炉および既設炉の核特性シミュレーションの不確かさを減少させることができ、原子力安全の確保につながる。

3. 研究の方法

本研究の目標は以下の三点である。

- ・ 計算モデル誤差の影響を排除した断面積調整法を確立する
- ・ 実験データの質に依存しにくい断面積調整法を確立する
- ・ 誤差として正規分布の仮定を必要としない断面積調整法を確立する

これらの目標達成のために、以下に示す形で研究を進める。

連続エネルギーモンテカルロ法に対する AS 法の適用性確認：連続エネルギーモンテカルロ法で得られる様々な核特性パラメータを用いて AS を構築し、その有効性を調査する。また、構築した AS を用いて、連続エネルギーモンテカルロ法と同等の計算結果を出力する代理モデルの構築を試みる。

AS+BMC 法を用いた断面積調整の理論検討：これまで提案者らが用いてきた粒子フィルター法などの経験を元に、AS を使用した BMC による断面積調整の理論を検討・構築する。

BMC 法を用いた断面積調整の検討：BMC 法の理論に基づき、BMC 法により断面積調整を実施するシステムを開発、その妥当性を確認する。

実機体系への適用：仮想的に設定する革新炉を対象として断面積調整を実施する。断面積調整に用いる実験データとして、仮想的に外れ値、測定に起因するノイズなどを想定し、質的に問題がある実験データを用いた場合にもロバストに断面積調整が実施できることを確認する。

4. 研究成果

(1)連続エネルギーモンテカルロ法に対する Active Subspace (AS)法の適用性確認：連続エネルギーモンテカルロ法で得られる様々な核特性パラメータに対して、実効増倍率に対する感度係数を用いて AS を構築し、種々のパラメータに対する感度係数の評価における有効性を調査した。また、構築した AS を用いて、連続エネルギーモンテカルロ法により断面積の感度係数を算出し、その感度係数を用いて連続エネルギーモンテカルロ法と同等の計算結果を出力する代理モデルの構築を試みた。これらの結果、AS により得られた感度係数と線型モデルを用いることで、断面積変化に対する核特性の変化を予測する代理モデルを作成可能であることを明らかにした。また、誤差として正規分布を仮定する必要が無い BMC 法と組み合わせると効率的な断面積調整が行えることを明らかにした。(Fukui, 2021 ANS Winter Meeting, 図 1)

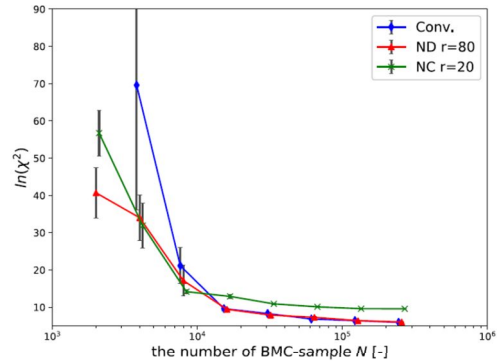


図 1 AS+BMC 法による断面積調整

(2)UT 法を用いた断面積調整の検討：単純な体系(小型臨界実験装置 Godiva)で実施された臨界実験を対象として、GLLS 法、MOCABA(RS)法、および Unscented Transformation (UT)変換にも基づく決定論的サンプリング法(UT 法)の性能の評価を行った。その結果、探索空間の次元を圧縮可能な UT 法により効率的な断面積調整が可能であるとの見通しを得た。

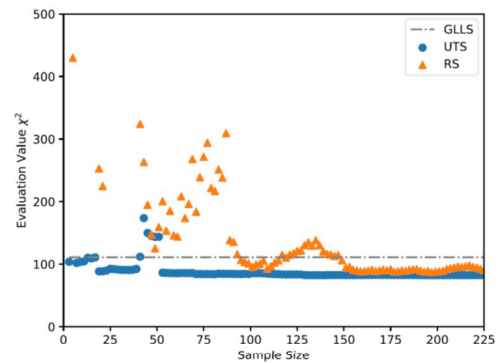


図 2 UT 法による断面積調整

(3)ノイズや外れ値を考慮した断面積調整の検討：ノイズや外れ値を工学的に除外することなく断面積調整を実施可能な枠組みを検討した。機械学習で用いられている M 推定を断面積調整理論に取り入れることで、ノイズや外れ値の影響を抑えつつ断面積調整が可能であることを確認した。M 推定は、実測値と計算値の差異を元に、断面積調整に用いるデータの重みを定める手法であり、実測値と計算値が大きく離れている外れ値の影響を小さく出来る特徴がある。また、核特性間に相関がある場合、これを適切に考慮するために核特性を座標変換する手法と組み合わせた適用が可能である。M 推定を用いた断面積調整法を臨界集合体の解析に適用し、従来の断面積調整法と比較した。その結果、

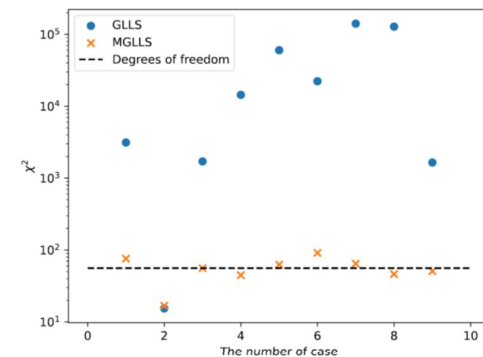


図 3 M 推定+GLLS 法による断面積調整

提案手法は、ノイズや外れ値に対する耐性が高いことを確認した。また、ノイズや外れ値がない場合は、従来の断面積調整法と同等の性能を有することを確認した。

(Fukui,10.1051/epjconf/202328100006, 図 3)

(4)実験データの質に依存しにくい断面積調整法に関する研究として、断面積調整法における未知共分散の推定手法に関する手法を新たに提案した。(Maruyama, 10.1080/00223131.2023.2203707, 10.1051/epjconf/202328100008, 図 4)。

(5)臨界実験以外の実験データの利用：特定核種の核データ起因不確かさを効果的に改善する手法について検討を実施した。具体的には、Na 遮へい実験結果を活用した断面積調整法により、革新炉の1つである高速炉の Na ボイド反応度の核データ起因不確かさのうち、Na-23 の核データに起因する不確かさを低減可能であることを明らかにした。(Maruyama, DOI:10.1080/00223131.2023.2244512, 図 5)。

さらに、水槽体系で測定された水の即発中性子減衰定数を活用したデータ同化により、ウラン溶液体系の ICSBEP 臨界実験について、軽水の熱中性子散乱則(TSL)データに起因した実効増倍率不確かさを低減できる見込みも得た。(Harada, 2024 ANS Annual Conference, 図 6)。なお本検討において、軽水の TSL データとして分子動力学計算に基づいた代理モデル(CAB モデル)を利用することで、不確かさ情報のパラメータ数を大幅に次元削減できる点に注目し (Endo, DOI: 10.1080/00223131.2023.2231931)、(2)で考案した UT 法により効率的にデータ同化できる点も明らかにしている。

(6)まとめ

以上の研究成果により、計算モデル誤差の影響を受けない、実験データの質に依存しにくい、誤差として正規分布の仮定を必要としない断面積調整を確立し、本研究の目的を達成することができた。

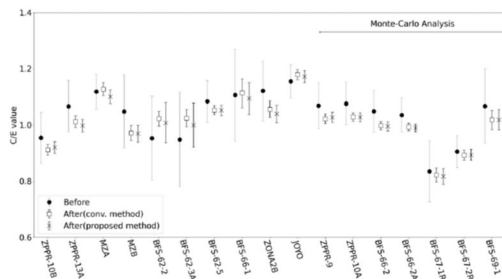


図 4 未知の共分散の推定を取り入れた断面積調整

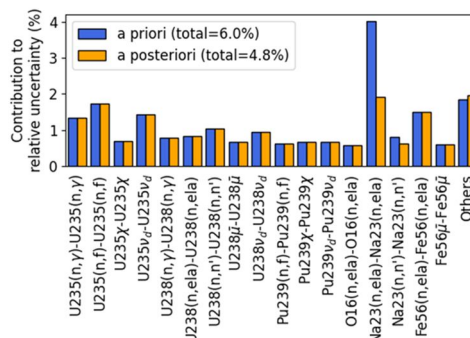


図 5 遮蔽実験データを用いた断面積調整

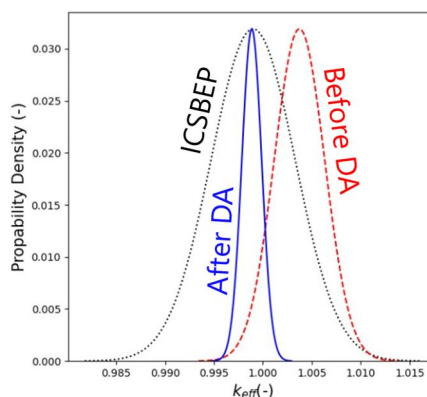


図 6 水槽体系データを活用した断面積調整

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6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 Shuhei Maruyama, Tomohiro Endo, Akio Yamamoto	4. 巻 60
2. 論文標題 An estimation method for an unknown covariance in cross-section adjustment based on unbiased and consistent estimator	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Nuclear Science and Technology	6. 最初と最後の頁 1372-1385
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/00223131.2023.2203707	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 Shuhei Maruyama, Tomohiro Endo, Akio Yamamoto	4. 巻 61
2. 論文標題 Uncertainty reduction of sodium void reactivity using data from a sodium shielding experiment	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Journal of Nuclear Science and Technology	6. 最初と最後の頁 31-43
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/00223131.2023.2244512	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 Tomohiro Endo, Shuhei Maruyama, Akio Yamamoto	4. 巻 61
2. 論文標題 Deterministic sampling method using simplex ensemble and scaling method for efficient and robust uncertainty quantification	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Journal of Nuclear Science and Technology	6. 最初と最後の頁 363-374
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/00223131.2023.2231931	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 -

1. 著者名 Yuhei Fukui, Tomohiro Endo, Akio Yamamoto	4. 巻 60
2. 論文標題 Nuclear data adjustment using a deterministic sampling method with unscented transformation	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Nuclear Science and Technology	6. 最初と最後の頁 238-250
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/00223131.2022.2095051	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 Yuhei Fukui, Tomohiro Endo, Akio Yamamoto, Shuhei Maruyama	4. 巻 281
2. 論文標題 Development of a robust nuclear data adjustment method to outliers	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 EPJ Web of Conferences	6. 最初と最後の頁 6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/epjconf/202328100006	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 Shuhei Maruyama, Tomohiro Endo, Akio Yamamoto	4. 巻 281
2. 論文標題 Applicability evaluation of Akaike's Bayesian information criterion to covariance modeling in the cross-section adjustment method	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 EPJ Web of Conferences	6. 最初と最後の頁 8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/epjconf/202328100008	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 -

〔学会発表〕 計17件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 9件)

1. 発表者名 Yoshinari Harada, Hibiki Yamaguchi, Tomohiro Endo, Akio Yamamoto
2. 発表標題 Uncertainty Quantification of Prompt Neutron Decay Constant due to the Thermal Neutron Scattering Law of Water
3. 学会等名 M&C2023, the International Conference on Mathematics and Computational Methods Applied to Nuclear Science and Engineering (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 遠藤 知弘、丸山 修平、山本 章夫
2. 発表標題 simplexアンサンブルとscaling法を利用した決定論的サンプリング法に関する検討
3. 学会等名 日本原子力学会 2023年秋の大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 森部 太陽、原田 善成、山口 響、遠藤 知弘、山本 章夫
2. 発表標題 決定論的サンプリングによる軽水の熱中性子散乱則に起因した即発中性子減衰定数の不確かさ定量評価
3. 学会等名 日本原子力学会 2023年秋の大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 丸山 修平、遠藤 知弘、山本 章夫
2. 発表標題 ナトリウム遮蔽実験データを利用したデータ同化法によるナトリウムボイド反応度の不確かさ低減
3. 学会等名 日本原子力学会 2023年秋の大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yoshinari Harada, Hibiki Yamaguchi, Tomohiro Endo, Akio Yamamoto
2. 発表標題 Data Assimilation Using Prompt Neutron Decay Constant for Water to Reduce Uncertainties due to Thermal Neutron Scattering Law
3. 学会等名 ICNC 2023, the 12th International Conference on Nuclear Criticality Safety (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Syuhei Maruyama, Tomohiro Endo, Akio Yamamoto
2. 発表標題 Nuclear Data Sensitivity Analysis of a Sodium Shielding Experiment Based on Generalized Perturbation Theory for Data Assimilation
3. 学会等名 ICNC 2023, the 12th International Conference on Nuclear Criticality Safety (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Tomohiro Endo, Akio Yamamoto
2. 発表標題 Efficient Uncertainty Quantification Using Deterministic Sampling Method with Simplex Ensemble and Scaling Method
3. 学会等名 ICNC 2023, the 12th International Conference on Nuclear Criticality Safety (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 丸山 修平、山本 章夫、遠藤 知弘
2. 発表標題 最大エントロピー法に基づく連続エネルギーモンテカルロ法での散乱角度分布の核データ不確かさ評価手法の検討
3. 学会等名 日本原子力学会 2024年春の年会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Yoshinari Harada, Hibiki Yamaguchi, Tomohiro Endo, Akio Yamamoto, Kenichi Tada
2. 発表標題 Data Assimilation Using Deterministic Sampling Method to Selectively Reduce Uncertainty due to Thermal Neutron Scattering Law for Light Water
3. 学会等名 2024 ANS Annual Meeting (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Yuhei Fukui, Tomohiro Endo, Akio Yamamoto, Shuhei Maruyama
2. 発表標題 Development of a robust nuclear data adjustment method to outliers
3. 学会等名 5th International Workshop on Nuclear Data Covariances (CW2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shuhei Maruyama, Tomohiro Endo, and Akio Yamamoto
2. 発表標題 Applicability evaluation of Akaike's Bayesian information criterion to covariance modeling in the cross-section adjustment method
3. 学会等名 5th International Workshop on Nuclear Data Covariances (CW2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tomohiro Endo, Akio Yamamoto
2. 発表標題 Review of data assimilation using prompt neutron decay constant
3. 学会等名 5th International Workshop on Nuclear Data Covariances (CW2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 福井悠平, 遠藤知弘, 山本章夫, 丸山修平
2. 発表標題 外れ値に堅牢な核データ調整法の開発
3. 学会等名 日本原子力学会2022年秋の大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 丸山修平, 遠藤知弘, 山本章夫
2. 発表標題 一般化摂動論に基づくナトリウム遮蔽実験の核データ感度解析
3. 学会等名 日本原子力学会2023年春の年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Y. Fukui, T. Endo, A. Yamamoto
2. 発表標題 Dimension-reduced Nuclear Data Adjustment Method based on the Bayesian Monte-Carlo Method
3. 学会等名 American Nuclear Society 2021 Winter Meeting (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 福井悠平, 遠藤知弘, 山本章夫
2. 発表標題 決定論的サンプリングによる核データ調整法
3. 学会等名 日本原子力学会 2021年秋の大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山口響, 福井悠平, 遠藤知弘, 山本章夫
2. 発表標題 感度係数行列を用いた線形近似に基づくモンテカルロ計算代理モデルの妥当性検証
3. 学会等名 日本原子力学会 2021年秋の大会
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
研究 分担 者	遠藤 知弘	名古屋大学・工学研究科・准教授	
	(Endo Tomohiro)		
	(50377876)	(13901)	

6. 研究組織（つづき）

	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
研究 分 担 者	丸山 修平 (Maruyama Syuhei) (70742170)	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・高速炉・新型炉 研究開発部門 大洗研究所 高速炉サイクル研究開発セン ター・研究職 (82110)	

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