

令和 6 年 6 月 2 日現在

機関番号：82110

研究種目：若手研究

研究期間：2022～2023

課題番号：22K18129

研究課題名（和文）新方式波長分解分析法に基づく片側読み出し型光ファイバ放射線位置検出器の実現

研究課題名（英文）Development of a single-end readout position-sensitive optical fiber radiation sensor based on a novel wavelength-resolving analysis

研究代表者

寺阪 祐太（Terasaka, Yuta）

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・福島研究開発部門 福島研究開発拠点 廃炉環境国際共同研究センター・研究職

研究者番号：60831948

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では福島第一原子力発電所廃炉に向けた放射線分布測定法として光ファイバセンサに着目し、光ファイバ片側のみからの光読み出しにより光ファイバに沿って放射線入射位置を推定可能な「新方式波長分解分析法」の開発を進めた。開発した検出器を福島第一原子力発電所実環境に適用し、100 mSv/hを超える高線量率環境での放射線分布測定、90Sr/90Yを含むと考えられるホットスポットの検知に成功した。このことから、本研究で開発した光ファイバ型放射線位置検出器が高線量率環境でのガンマ線線量率分布測定およびホットスポット探査に適用可能であることが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

福島第一原子力発電所（1F）原子炉建屋内外等の廃炉作業環境においては、放射線業務従事者の作業安全確保のため、空間線量率や放射性物質分布等の把握が随所で進められているが、1F原子炉建屋内には10 mSv/hを超える高線量率エリアも多数存在する。現状では最低限の頻度で人が立ち入ることで空間線量率の測定やスミアサンプル採取による汚染密度の測定が行われている。本研究で開発した光ファイバ型放射線位置検出器について、1F実環境において高線量率環境での放射線分布測定およびホットスポット検出に成功したことから、現状人手で行われている測定を今後省略できる可能性があり、作業者の被ばく線量低減に寄与できる。

研究成果の概要（英文）：In this study, we focused on optical fiber sensors as a radiation distribution measurement method for the decommissioning of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant. We developed a new method called "wavelength-resolving analysis" that can estimate the incident position of radiation on an optical fiber by reading scintillation light from only one side of the optical fiber. The developed detector was applied in the actual environment of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station. We successfully measured radiation distribution in a high dose rate environment exceeding 100 mSv/h and detected hot spots thought to contain 90Sr/90Y. These results indicate that the optical fiber-type radiation sensor developed in this study is applicable to gamma dose rate distribution measurement and hot spot detection in high dose rate environments.

研究分野：放射線計測

キーワード：プラスチックシンチレーションファイバ 波長分解 アンフォールディング 放射線分布 福島第一原子力発電所

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、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

現在、東京電力ホールディングス福島第一原子力発電所(1F)原子炉建屋内外等の廃炉作業環境においては、放射線業務従事者の作業安全確保のため、空間線量率や放射性物質分布等の把握が随所で進められている。1F 原子炉建屋内には 10 mSv/h を超える高線量率エリアも多数存在するが、現状では最低限の頻度で人が立ち入ることで空間線量率の測定やスミアサンプル採取による汚染密度の測定が行われている。ここで、原子炉建屋内作業環境の十数メートルのスケールにおいて、高線量率環境下での空間線量率分布の長期モニタリング手法や放射性物質分布の面的測定手法を確立できれば、現状人手で行われている測定を省略することができ、作業者の被ばく線量低減に寄与できる。

2. 研究の目的

本研究では線量率分布または放射性物質分布の一次元測定が可能なセンサとして光ファイバに着目する。これまで光ファイバを一次元放射線センサとした放射線分布測定法が数多く実証されてきたが、多くの場合ファイバ両端からの信号読み出しが必須であることが高線量率場に適用する上での課題であった。本研究では光ファイバ内での光減衰量に波長依存性が存在することを利用して光ファイバへの放射線入射位置を「ファイバ片側のみからの光読み出し」により逆推定する新方式波長分解分析法の開発を進め、高線量率の 1F 原子炉建屋内環境において線量率分布または放射性物質分布を測定できるセンサとしての確立を目指す。

3. 研究の方法

片側読み出し・超高線量率対応を可能とする新方式波長分解分析型光ファイバ放射線位置検出器について、1F 廃炉作業環境への適用を見据えた検出器を設計・製作する。製作した検出器について、ガンマ線照射場における性能評価を行い、提案する光ファイバ型放射線位置検出器の適用可能範囲を明らかにする。さらに、1F 原子炉建屋内にて本検出器を実際に適用し、現場への適用可能性評価および未知のホットスポット探査を行う。

4. 研究成果

(1)原理

本研究で提案する新方式波長分解分析法の概念図を図 1 に示す。プラスチックシンチレーションファイバ(PSF)と放射線の相互作用により発生するシンチレーション光を分光器で受光し、波長分解を行う。ここで、PSF 内を透過する光の減衰量には波長依存性が存在するため、PSF 端から出力される光の波長(色)スペクトルを分析することで、元の放射線入射位置を逆推定可能である。これにより、従来ファイバ両端での受光が必須であった光ファイバ型放射線位置検出器が片側のみからの光読み出しで実現可能になる。さらに、本手法は放射線 1 発 1 発のパルスカウンティングを行わない積分型の測定手法であるため、パイルアップや偶然同時計数が原理的に発生せず、超高線量率にも適用可能となる。

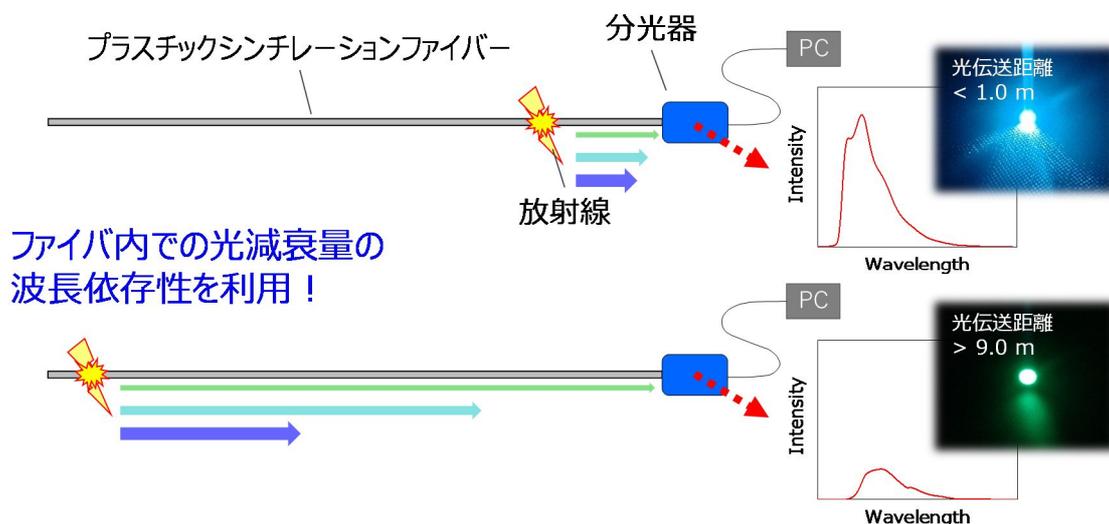


図 1 本研究で提案する新方式波長分解分析法の概念図。

本研究では波長スペクトルからの放射線分布逆推定にアンフォールディング法を適用する。ある任意の放射線分布を測定した際に光ファイバ片側で測定される波長スペクトルは、以下の式(1)で表すことが出来る。

$$S(\lambda) = \int I(\lambda) e^{-(x/\mu(x))} f(x) dx = \int R(\lambda, x) f(x) dx \quad (1)$$

ここで、 λ は光の波長、 x は光ファイバ内での光子透過距離、 $S(\lambda)$ はファイバ端で測定された波長スペクトル、 $I(\lambda)$ は発光初期の波長スペクトル、 $\mu(\lambda)$ は波長 λ の光の減衰長 (光強度が $1/e$ まで減少する長さ)、 $f(x)$ は放射線分布、 $R(\lambda, x)$ は応答関数行列である。ここで、応答関数行列 $R(\lambda, x)$ は事前実験的に求めることが出来るため、波長スペクトル $S(\lambda)$ から放射線分布 $f(x)$ を逆推定できる。逆推定を行う上で、式(1)を式(2)の通り位置毎・波長毎に離散化し、行列式として記述する。

$$\begin{pmatrix} S_1 \\ \vdots \\ S_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_{1,1} & \cdots & R_{1,j} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ R_{i,1} & \cdots & R_{i,j} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_1 \\ \vdots \\ X_j \end{pmatrix} \quad (2)$$

ここで、 i は波長範囲、 j は光ファイバ発光位置、 S_i はファイバ端で測定された波長スペクトルの波長範囲 i のスペクトル強度、 $R_{i,j}$ は位置 j にて発光した際に光ファイバ端の分光器で測定される波長スペクトルの波長範囲 i のスペクトル強度を表す応答行列、 X_j は位置 j での放射線強度である。ここでのアンフォールディング処理は、以下の式(3)で表されるカイ二乗 χ^2 を最小化する $X_1 - X_j$ の組み合わせを最適化計算手法により探索する処理である。

$$\chi^2 = \sum_i \left(\frac{S_i - \sum_j R_{i,j} X_j}{\sigma_{S_i}} \right)^2 \quad (3)$$

$X_1 - X_j$ の最適化計算処理には、1F 事故直後の環境放射線スペクトル解析の研究で応用実績のある一般縮小勾配法 (Generalized Reduced Gradient 法、GRG 法) を用いた。

(2)検出器製作

本研究で製作した光ファイバ型放射線位置検出器を図 2 に示す。本検出器はセンサ部にプラスチックシンチレーションファイバ (PSF、Kuraray SCSF-81、 $\phi 1.0$ mm、長さ 10 m)、光伝送部に石英光ファイバ (Thorlabs FP400URT、 $\phi 0.4$ mm、任意長さ)、受光部にポータブル分光器 (Ocean Insight QEPro、スリット幅 200 μm) の 3 要素から構成される。ここで、分光器の CCD は放射線にさらされるとスパイク状のノイズが波長スペクトルに混入するため、低線量率場に設置する必要がある。そのため、高線量率場に設置する PSF からの発光を任意長さの石英光ファイバで読み出す方式とした。まず初めに、長さ 10 m の PSF 素線の読み出し側を垂直研磨、非読み出し側を斜めに研磨した (非読み出し側での反射を防止)。次に、PSF 素線を石英光ファイバおよび分光器に接続し、PSF に対して UV 光をコリメート照射することで PSF を疑似的に励起発光させた。これを 10 cm または 50 cm 間隔で実施し、発光位置毎に分光器で得られる応答波長スペクトルを取得した。最後に PSF 素線を遮光チューブに封入し、エポキシ樹脂により読み出し側を SMA905 コネクタと接着させ、図 2 に示す PSF パッチケーブルとした。

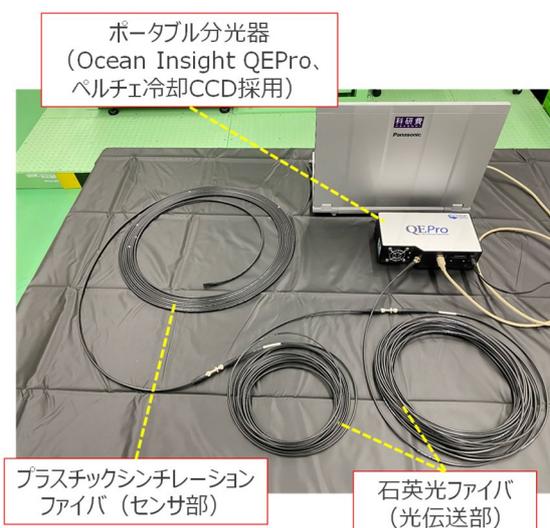


図 2 製作した波長分解分析法に基づく光ファイバ型放射線位置検出器。

(3) 1F2号機原子炉建屋 SGTS 室での実証試験

製作した検出器について ^{137}Cs および ^{60}Co ガンマ線照射場において照射試験を実施し、検出感度および耐放射線性の確認を行った。その結果、数十 mSv/h 以上の線量率に対して十分な感度を有すること、最大で 10 Sv/h 以上の高線量率場に適用可能であることを確認した。1F 原子炉建屋内で想定される線量率域にて十分使用可能であることが確認できたため、この光ファイバ型放射線位置検出器を用いて 1F2 号機原子炉建屋 SGTS (Standby Gas Treatment System、非常用ガス処理系) 室内にて放射線分布測定試験を実施した。測定セットアップ、測定試験の様子、放射線分布逆推定結果とサーベイ結果の比較を図 3 に示す。2 号機 SGTS 室内の高線量率エリア床面 (最大線量率 100 mSv/h 超) に伸縮棒を用いて長さ 10 m の PSF を敷設し、長さ 30 m の石英光ファイバを介して室外の低線量率エリアに設置した分光器で波長スペクトルを測定した。得られた波長スペクトルにアンフォールディング法を適用した結果、光ファイバ終端側にかけて線量率が急激に上がっていくという実際の放射線分布傾向を再現した。このことから、最大で 100 mSv/h 超の 1F 実環境にて本研究で製作した光ファイバ放射線位置検出器の有効性を確認できた。

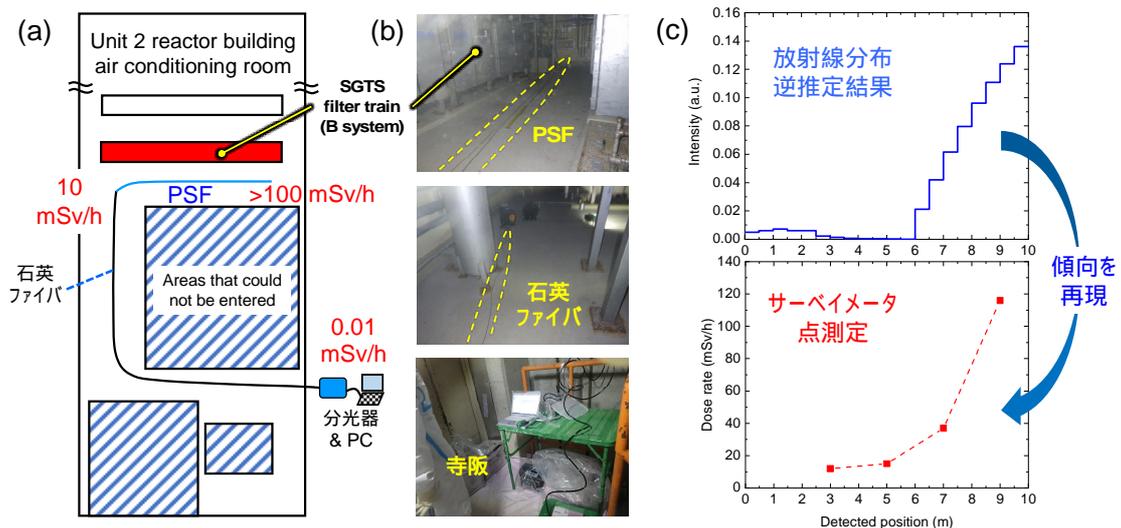


図 3 (a)1F2 号機原子炉建屋 SGTS 室における測定セットアップ、(b)測定試験の様子、(c)放射線分布逆推定結果とサーベイ結果の結果。

(4) 1F3 号機原子炉建屋 1 階 HCU 付近でのホットスポット探査

PSF はベータ線に対してより感度を有するため、原子炉建屋内での $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 検知にも適用できる可能性がある。そこで、 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 検知用光ファイバケーブルの製作および 1F3 号機原子炉建屋内への適用を行った。 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ からのベータ線を大幅に遮蔽するステンレスチューブを用い、ステンレスチューブで覆う/覆わない 2 本の PSF ケーブルを製作した。これらの PSF ケーブルの発光強度の違いから、1F 原子炉建屋内にて $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ の有無を検知できる可能性がある。1F3 号機原子炉建屋内における測定セットアップを図 4 に示す。3 号機原子炉建屋 1 階南側 HCU (Hydraulic Control Unit、制御棒駆動水圧系水圧制御ユニット) 付近の高線量率エリア (空間線量率 10 mSv/h 超) にステンレスチューブで覆う/覆わない PSF を 2 本敷設し、3 号機タービン建屋内の低線量率エリアに設置した分光器まで長さ 60 m の石英光ファイバを用いて光を送り、発光波長スペクトルの測定を行った。波長スペクトル測定結果と放射線入射位置分布逆推定結果を図 5 に示す。ここで、図 5(a) の波長スペクトルは分光器へのバックグラウンド放射線入射により多数のスパイクノイズが乗っていたため、ここでは視認性向上のため 450-500 nm の範囲でスパイクノイズが乗っていないデータのみを抽出し、平均化したものを示している。ステンレスチューブ遮蔽の有無により発光強度が約 5 倍異なった。この差分は高濃度の $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ の存在を示唆している。図 5(b) の放射線入射位置分布逆推定結果からは、南側 HCU 前および南側 TIP 室前付近にホットスポットが確認された。このことから、原子炉建屋内での分布が十分に知られていない $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ の高ガンマ線バックグラウンド下での測定に成功した。

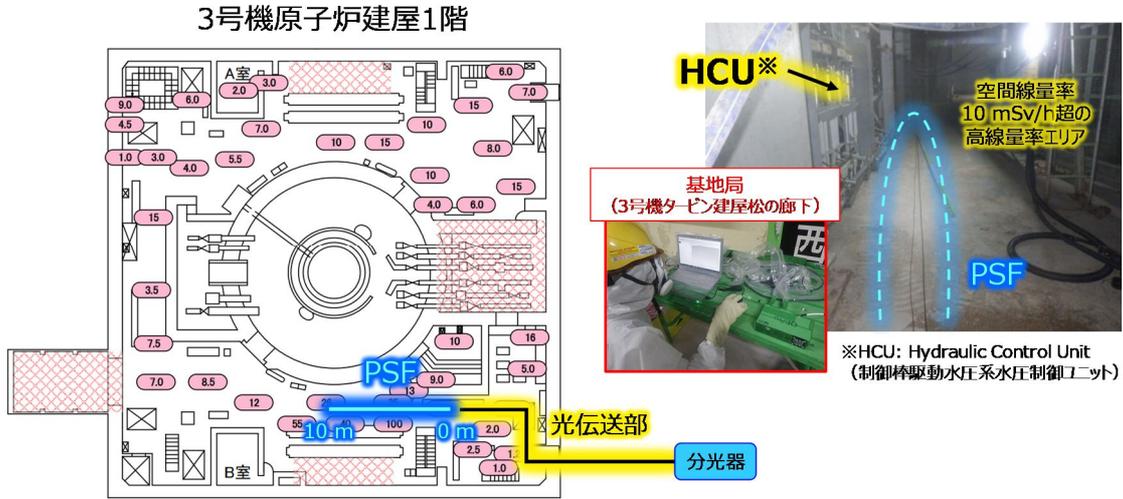


図4 3号機原子炉建屋1階における測定セットアップ。

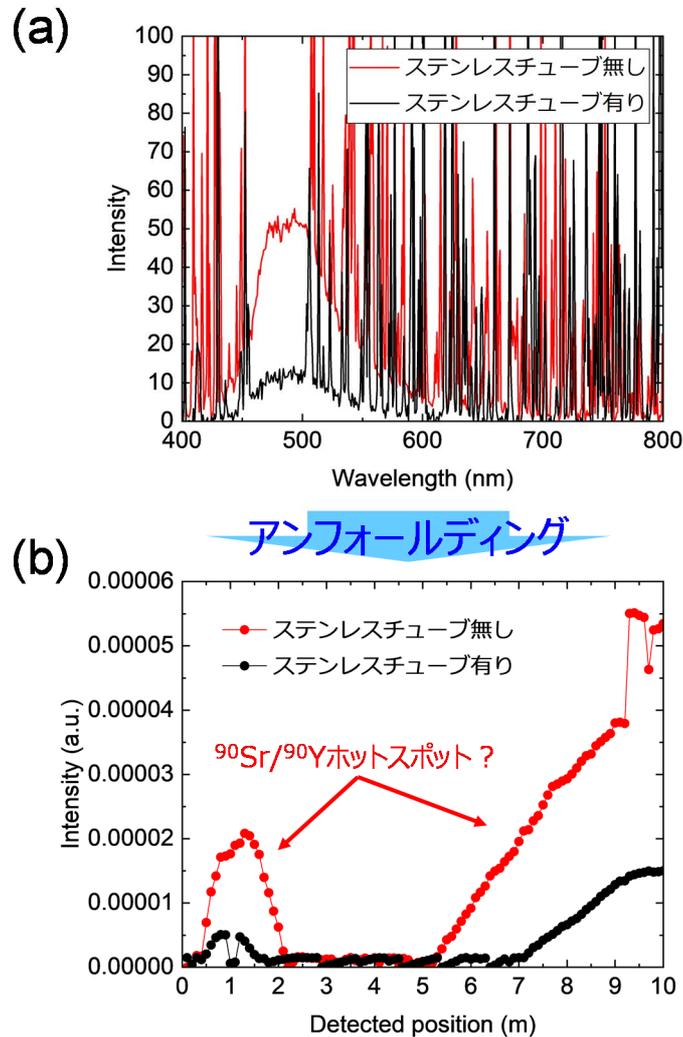


図5 (a)3号機原子炉建屋1階南側HCU付近で測定された波長スペクトルと
(b)放射線入射位置分布逆推定結果。

以上の通り、本研究で開発した新方式波長分解分析法に基づく光ファイバ型放射線位置検出器について、1F実環境において高線量率環境下でのガンマ線線量率分布のモニタリングおよび未知のホットスポット探査に適用可能であることが確認された。

5. 主な発表論文等

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

| | |
|--|---------------------------|
| 1. 著者名 Yuta Terasaka, Yuki Sato, Akira Uritani | 4. 巻 1062 |
| 2. 論文標題 First demonstration of a single-end readout position-sensitive optical fiber radiation sensor inside the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station based on wavelength-resolving analysis | 5. 発行年 2024年 |
| 3. 雑誌名 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment | 6. 最初と最後の頁 169227(1-6) |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nima.2024.169227 | 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2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

| |
|--|
| 1. 発表者名 寺阪祐太、佐藤優樹、瓜谷章 |
| 2. 発表標題 波長分解型光ファイバ放射線位置検出器を用いた福島第一原子力発電所における放射線分布測定 |
| 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 Yuta Terasaka, Yuki Sato, Akira Uritani |
| 2. 発表標題 Measurement of radiation distribution inside the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station using a single-end readout position-sensitive optical fiber radiation sensor based on wavelength-resolving analysis |
| 3. 学会等名 2023 Symposium on Radiation Measurements and Applications (SORMA XIX) |
| 4. 発表年 2023年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

光の色から、放射線の位置を知る。

<https://fukushima.jaea.go.jp/pamphlet/topics/html/topics-fukushima110.html>

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 |
|---------|---------|
|---------|---------|