

令和 4 年 6 月 13 日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18K04951

研究課題名(和文) 活性の凍結と再解凍を利用した極低温域用温度計の開発

研究課題名(英文) Development of a thermometer for cryogenic regions using activity freezing and rethawing

研究代表者

清水 洋孝 (Shimizu, Hirotaka)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設・助教

研究者番号：10448251

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：1. 研究開始当初の背景:極低温環境下で使える温度計は、概ね電子の動きを利用したもので、それ故電気信号を送ったり受け取ったりする為の金属信号線の導入が必ず必要であった。2. 研究の目的:この電子の動きを、光子に置き換えて、従来に無い方式の温度計の開発を行う事が本研究の目的である。3. 研究の方法:光ファイバとバイメタル治具の組み合わせを用いて、極低温環境下で温度の変化を波長の変化として捉えられるかどうかを実験的に検証する。4. 研究成果:20K周辺までの温度変化の様子は、光の波長変化として測定が可能である事が判った。より低い温度領域での感度向上には、更に別の工夫が必要である事が判った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまでの極低温域の温度測定では、半導体素子の電気抵抗が環境温度と共に変化する性質を利用した、半導体温度計の使用が主流であった。この方式の場合、半導体を駆動する為の電流を流す金属線2本に加え、抵抗の変化を読み取る計測線2本を加えた、計4本の信号線を常温部から低温分に敷設する必要があった。この電子を媒介として付随する金属線が必要である従来の方式に対し、本研究では、熱伝導率が極めて小さいガラス製の光ファイバも使い、媒介として光を使う測温方式を提唱し、その実用化に向けて開発を進めてきた。これまでに用いられて居なかった信号媒介と信号線素材の組み合わせを提唱した意義は充分にあると考えられる。

研究成果の概要(英文)：1. Background at the beginning of the research: Thermometers that can be used in extremely low temperature environments generally utilize the movement of electrons, so it was absolutely necessary to introduce metal signal lines to send and receive electrical signals. 2. Purpose of the research: The purpose of this research is to replace the function of this electron with a photon and develop a thermometer of a method that has never existed before. 3. Research method: Using a combination of optical fiber and bimetal jig, we will experimentally verify whether the change in temperature can be perceived as the change in wavelength in an extremely low temperature environment. 4. Research result: It was found that the state of temperature change up to around 20K can be measured as the wavelength change of light. It was found that another device is required to improve the sensitivity in the lower temperature range.

研究分野：低温

キーワード：温度計 極低温 光ファイバ

### 1. 研究開始当初の背景

超伝導加速空洞技術や電磁石技術を用いた加速器施設では、併設されたヘリウムプラントから供給される液体ヘリウムを用いて、加速空洞の冷却が行われる。冷却開始前の常温の状態から、徐々に施設全体を冷却していく事になるが、寒冷が供給される装置の各部分が、今現在何度に冷えているかを常時観測し続ける事は、加速器の安全な冷却において非常に重要である。最終的に超伝導加速空洞は、液体ヘリウム温度にまで冷やされ、必要に応じて、更に飽和蒸気圧を減圧する事によって、超流動状態の液体ヘリウムによる冷却が行われる。この様な液体窒素温度(77 K)を遥かに下回る、所謂 20 K 以下の極低温の温度領域の温度を正確に知る事が、施設の安全な運用に対して必須の技術である。

従来は、半導体を持つ、自身の抵抗値が設置された環境温度に伴って、連続的に変化していく性質を利用した、半導体温度計を用いる事で、極低温温度域の計測が行われていた。計測の精度を高める為に、4 芯線法と呼ばれる計測方法が採られており、この方法に従うと、半導体を駆動する為に必要となる電流を流す金属信号線が 2 本必要となり、これとは別に、半導体の抵抗値を測定する為の信号線が更に 2 本必要となる。従って、測定点 1 点につき、合計 4 本の金属信号線を常温部から極低温部にまで敷設する必要があるが生じる。これらは測定点毎に必要な最小本数である為に、測定点を増やす場合は、その点数の 4 倍の金属信号線の導入が避けられない。しかもこれらの信号線は、多くの場合、断熱真空槽の中を通過して極低温部に導かれる為に、常温部から流入して来る熱は、対流の効果で散逸される事が無く、信号線の熱伝導率の高さに助けられる事で、容易に極低温部にまで侵入してくる事になる。温度計測に伴うこれらの余計な侵入熱が、冷凍機の不可となり、施設全体の冷却能力を圧迫する事に繋がる。これらの背景を踏まえると、極低温温度域の温度計測は必須であるが、従来方式の温度計の多点導入は、好ましく無い熱侵入を発生させる事から、温度計測方法に関する画期的な改善が求められていた。

### 2. 研究の目的

本研究開発では、極低温温度域の計測方法として、これまで用いられてきた方法とは異なる方式を提唱し、その実用性を確かめる事を目的とする。半導体温度計を用いる方法では、温度を感じ取る媒介として電子を利用し、その電気的な信号を伝える為に、金属信号線を用いてきた。本研究で提唱するのは、温度を感じる媒介として、光を用いる事で、金属信号線の導入の必要性を排し、半導体を駆動するのに必要な電流を流す必要も無くす事を目的としている。光信号の通り道としては、熱伝導率が非常に小さいガラスを主な構成要素とする光ファイバを利用する。これにより、常温部から極低温部への熱の伝導による流入を抑える効果が期待出来る。即ち、従来の電子・金属信号線の組み合わせから、光・光ファイバの組み合わせへの置き換え目指し、極低温温度域の温度計測に最も相応しい測温方式の開発と実用化を目的とする。

本研究で開発を行う、光ファイバと光を用いた測温システムの特徴として、1 本の光ファイバを導入する事で、測定点の多点化が容易に行える点が挙げられる。元々光ファイバの熱伝導率が低い事と、導入する光ファイバの本数が、測定点の多点化に影響されず、少なく抑えられる利点を考えても、新しい測温の方式を開発する事の価値は十分に認められると思われる。

### 3. 研究の方法

光と光ファイバの組み合わせが、温度計として極低温温度域の温度計測に利用出来る事を、実際に冷却試験を通して確かめる。光信号の通り道としての光ファイバには、ブラッググレーティングと呼ばれる格子構造を彫り込む加工を施す。この格子構造が、光源から送られて来る白色光の中から、特定の波長の光のみを選択的に反射して、光源方向に送り返す働きをする。格子間隔は、光ファイバが置かれた環境温度の変化に伴って変化する。光源から供給される白色光の中から、選択反射される波長が環境温度に拠って変化する事から、光ファイバの格子構造が設置された部分の温度を知る事が出来る。この構成素子の基本的な働きを確認する為に、いろいろな格子間隔のブラッググレーティングを光ファイバに彫り込む。その作製したグレーティングファイバを実際に液体窒素や液体ヘリウムで冷やす事で、格子間隔の変化を測定する。白色光源としては、自然放出光を増幅して出射する光ファイバンプを用いる。波長の変化を検出する方法としては、光スペアナを用いて選択反射されて戻って来る光の波長と、白色光のスペクトルから格子部分を通過出来ずに抜け落ちた波長成分の確認を行う。

ここまでの測定方法では、光ファイバに施された格子間隔の変化が検温の感度を決めて居り、環境温度が極低温となり、更に絶対零度に向けて温度が下がっていくに連れ、何処かの段階で、光ファイバの収縮が完全に止まり、温度計としての感度を発揮しなくなる温度点が現れる事が予想される。この問題を解決する為に、凍結される光ファイバの温度感度を回復させる働きを持つ治具を別途製作し、これをあてがう。光ファイバ中を伝わる白色光と取り付けられた治具の相互作用により、光ファイバの温度感度が極低温温度域にあっても、回復する事を実際の冷却実験によって確認する。用いる寒冷としては液体ヘリウムを想定し、極低温が保てる断熱真空槽と蒸発するヘリウムの回収装置を用意して実験を行う。

#### 4. 研究成果

##### (1) ブラッググレーティングファイバの性能評価

格子構造を彫り込んだ光ファイバを作製し、白色光源、光ファイバ、光スペアナの順に各素子を配置して、どのような信号が得られるかの試験を行った。施工した格子間隔に応じて、反射される光の波長が異なり、十分に白色光源から供給される自然放光の帯域に収まっている事が確認出来た。この事から、1本の光ファイバに、間隔が異なる格子を多数箇所彫り込む処理を行う事で、測定点間の干渉を起こす事無く、多点測定が行なえる事が確認出来た。続いて低温環境での性能評価を行った。寒冷としては、液体窒素と液体ヘリウムを用いた。冷却の方法は、ブラッググレーティングファイバを液体の中に直接浸す、直接浸漬方法と、液体を保存したステンレス製容器の外側にブラッググレーティングファイバを貼り付ける事で、間接的に液体の温度を測定する方法を試した。間接測定の場合、光ファイバの置かれている空間の雰囲気は、空気・真空・ヘリウムの各雰囲気を試した。この試験を通して、ブラッググレーティングファイバが環境温度の変化に伴って示す、反射光の波長変化の様子を調べる事が出来た。非常に興味深い点として、ヘリウム液中に浸けた場合や、ヘリウム雰囲気中での試験を行った場合、格子間隔の変化の割合が、空気雰囲気中や液体窒素中での変化の割合に比べて、大きくなっている事が明らかになった。選択的に反射される波長の変化によって、環境温度の値を検知する事を狙っているため、同じ温度変化が生じた場合に、より大きな波長変化が得られる事は、非常に望ましい結果である。このような予想していなかった波長変化の増加が得られる原因としては、光ファイバを構成する硝子製のコア部分に、ヘリウムが吸蔵される事でもたらされると考えられる。通常、ブラッググレーティング部分で反射される光の波長は、格子の間隔とコア部分の屈折率の積によって規定される。ガラス部分にヘリウムが吸蔵されると、実効的な屈折率が大きくなり、温度変化に伴う非常に僅かな格子間隔の変化であっても、屈折率の上昇分だけ、増幅されて波長変化として検出される。図1に、常温で1040 nmの反射光が得られる様に格子間隔を調整した光ファイバを用いた、実際の冷却試験の様子を載せる。環境温度が冷えるに従って、反射光の波長(格子間隔)が、より短波長側に移っていく様子が見られる。また、ヘリウムの吸蔵が発生する環境下での実験結果では、より大きな波長変化が得られている事が見られる。

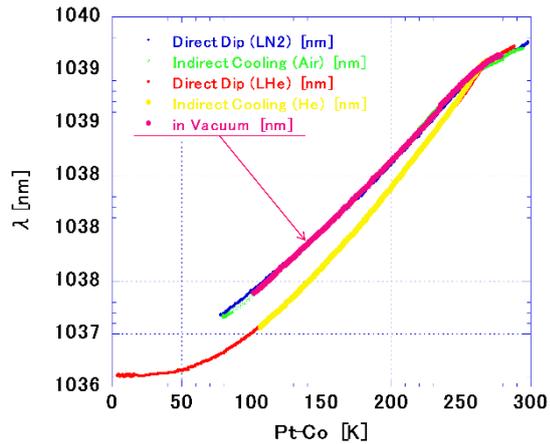


図1 温度変化に伴う格子からの反射光の変化

実際の冷却試験の結果として、ブラッググレーティングファイバの格子間隔の変動は、20 K程度までは継続的に起こっており、このままの状態であっても、20 K程度の環境温度を測定出来る事が確かめられた。しかし目標としているのは、20 Kを下回る、極低温温度域での温度計測に用いる事が出来る温度計の開発なので、ブラッググレーティングファイバだけでは測定感度が不足している事が判った。20 K以下の温度領域での感度を向上させるための治具を用意する事が、温度計開発の置いて非常に重要である事が判った。

実際の冷却試験の結果として、ブラッググレーティングファイバの格子間隔の変動は、20 K程度までは継続的に起こっており、このままの状態であっても、20 K程度の環境温度を測定出来る事が確かめられた。しかし目標としているのは、20 Kを下回る、極低温温度域での温度計測に用いる事が出来る温度計の開発なので、ブラッググレーティングファイバだけでは測定感度が不足している事が判った。20 K以下の温度領域での感度を向上させるための治具を用意する事が、温度計開発の置いて非常に重要である事が判った。

##### (2) クラッドモード光の検出

ブラッググレーティングファイバの特性として、グレーティング処理を施した部分では、特定の波長の光を選択的に反射させる事が出来る。このグレーティング部分での反射では、クラッドモードと呼ばれる光を発生させる事が知られていた。通常光ファイバのコア部分を伝搬する光が、グレーティング構造による反射を受ける事によって、コア部分を包んでいるクラッド部分に一部漏れ出す現象を指して居り、この光を利用する事によって、極低温温度域に置いて、補助治具の熱収縮運動に必要なエネルギーを光ファイバから与える事に利用する。補助治具としては、バイメタル構造を有した合金の利用を提案していた。バイメタル合金を利用する理由としては、これまでの研究から、線膨張率の著しく大きい金属と、小さい金属の組み合わせの構造を低温環境に置いた場合、線膨張率の大きい金属側が激しく熱収縮を起こす為、殆ど長さが変化しない線膨張率の小さい金属側が、引っ張られる事で、低温になればなる程、当初の長さよりも延びる結果になる事を、明らかにしている。この低温になる程、物の長さが延びる特性は、ブラ

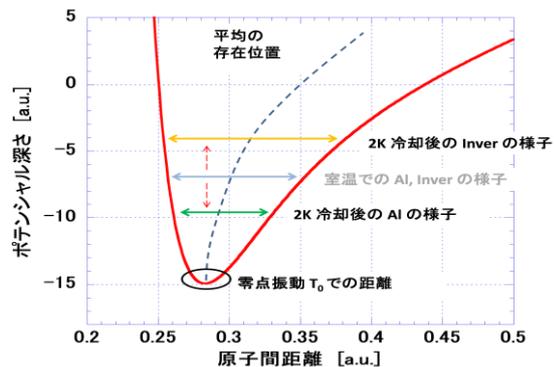


図2 バイメタル合金の熱収縮の変化の様子

ラッググレーティングファイバの格子間隔の温度変化を助長して、極低温温度域における温度測定に利用出来る性質と考えた。ある厚みのバイメタル合金を用意して、それを極低温にまで冷却すると、何処かの段階で、熱収縮が平衡に達して、バイメタル合金全体が反った状態になる。しかしこの状態は、エネルギー的には不安定な状態であり、線膨張率の大きい金属側は、より自信を縮めて安定な状態に移行しようとする途中であり、線膨張率の小さい金属側は、接合された金属に引っ張られる事で、冷却前よりも伸びた状態に移行して居り、あたかも最初の状態よりも熱的に温められた様な挙動を示している事になる。この均衡の状態に対して、クラッド光を通して少量のエネルギーを供給する事で、自由度の凍結が解けた線膨張率の大きい金属は、より縮もうとし、線膨張率の小さい金属は、引っ張りを受ける事でより伸びる方向に力を受ける事になる。結果として、自由度が凍結した時の光ファイバの格子間隔よりも、少し間隔が広がる方向に系全体が移行する事が期待される。この様な機構を利用する事で、極低温温度域においても、ラッググレーティングファイバの格子間隔の変動の自由度に対して活性を与え、温度計としての機能を保持させ続ける事が補助治具の狙いである。

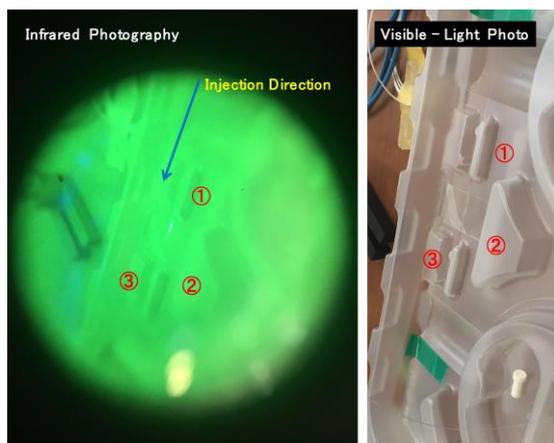


図3 クラッドモード光の観察

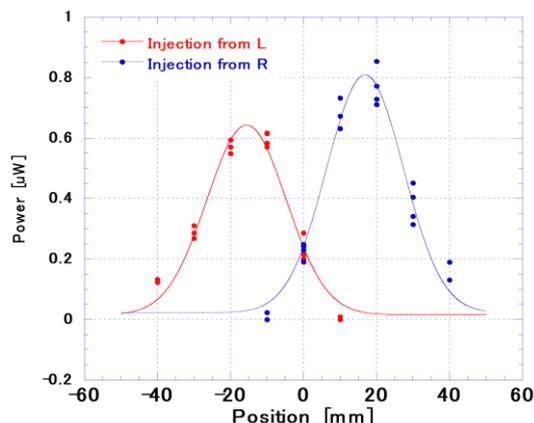


図4 クラッドモード光の強度測定結果

### (3) 光ファイバの低温脆性試験

ラッググレーティング処理を施した光ファイバを極低温温度域で用いる事から、低温脆性による強度の劣化が懸念される。特に、格子構造をコア部分に彫り込む事が原因となって、十分な強度が保てなくなると、温度計として用いる事が出来ない。この問題を解消する為に、低温に冷やした光ファイバの引っ張り試験(破断試験)を行った。液体窒素中にグレーティング部分を浸けて、高荷重センサを用いて引っ張り強度を記録しながら、破断が起こるまで両端に荷重をかけ続ける。常温での破断試験では、約 8.6 N の力が加わった際に、グレーティング部分の近くで破断が起こった。これに対して、液体窒素温度まで冷やした試験においては、14 N 以上の力を加えても、破断は起こらなかった。光ファイバの構造としては、光が伝搬するコア部分の周囲に、クラッド材と呼ばれる、全反射を起こさせる屈折率の異なる材料が配置されているが、その外周が、アクリル樹脂で覆われており、厚みとしては、このアクリル樹脂の層が一番厚い。つまり低温に冷やす事で、この樹脂層が硬化して、強度を補強させていた為、低温脆性を示す事なく、極低温温度域においても強度を保ったまま利用出来る事が検証された。

### (4) HIP 材の利用

補助治具として利用を考えているバイメタル合金は、構成する金属の線膨張係数を比較しながら、最適な組み合わせを検討して、試作する事を試みた。最も素朴な加工方法は、圧延時の熱の発生を抑えながら、2種類の金属を接合させる、冷間圧延の手法を用いる事であった。この方法は、同じ金属の組み合わせで、大量のバイメタルを製作するのに非常に適した方法であるが、少数の試験体を作る場合の費用が高くなり、今回の開発では利用を諦めた。他のバイメタル合金の製作方法として選んだのが、熱間等方圧加圧(HIP)と呼ばれる加工技術であり、この工法を利用する事で、任意の異種金属の組み合わせで、バイメタル合金を作る事が可能となった。しかしこの工法で作られたバイメタル合金は、ある程度の厚みを持った状態でしか取り出せない難点が残っており、異種金属接合を行った後、必要な厚みのバイメタル合金に追加工する必要が生じた。圧延時にも、発生する熱をうまく取り除かなければ、常温の段階で反った形状のバイメタルが出来てしまう。これと同じ理由から、出来上がったバイメタルを切削する場合、加工熱が発生して、やはりバイメタルが変形を始めてしまう。この結果、狙った厚みに精密に加工する事が難しくなる。厚みの調整は、補助治具としてのバイメタル合金の比熱を小さく抑えたい事と、線膨張率の組み合わせの微調整による反り具合の追い込みが必要であった為である。補助治具としてのバイメタル合金の製作方法に関しては、今回利用したHIPの手法以外にも、更に検討が必要

と考えられる。

#### (5) 低温温度測定における技術協力

極低温温度域で使える温度計の開発を進めて来たが、この開発に伴って得られた温度計測の技術が、他の実験での低温測定に流用出来た。超伝導加速空洞方式の加速器は、空洞や電磁石等の加速器を構成する要素が、断熱真空槽の中に収められている。このうち、超流動ヘリウムを熱浴として、伝導冷却方式で冷やされる電磁石の温度は、6 K から 10 K 程度となっていたが、これまでの測定では、予想通りの温度に冷えていない、若しくは、正しく温度が計測出来て居ないと思われる不具合が発生していた。電磁石の温度が設計通り冷えていない原因を特定して、温度を正しく測定する事に、今回の開発研究で得られた技術が応用出来、加速器の運転時に、当初の設計通りの通電を行っても、超伝導状態を維持したまま正しく励磁させる事に成功した。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Hirota Shimizu	4. 巻 1
2. 論文標題 Performance test of FBG and bimetal for very low temperature thermometer use	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan	6. 最初と最後の頁 682-685
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
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 Hirota Shimizu	4. 巻 1
2. 論文標題 Progress report of thermometer development for very low temperature use	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan	6. 最初と最後の頁 664-668
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
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 Hirota Shimizu	4. 巻 1
2. 論文標題 Low temperature tests of thermometer for very low temperature use	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan	6. 最初と最後の頁 545-548
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
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 Hirota Shimizu	4. 巻 1
2. 論文標題 R&D activities report on superconducting magnet in STF	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan	6. 最初と最後の頁 48-52
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
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 Shimizu H., Arimoto Y., Zong Z., Ohuchi N., Umemori K., Yamamoto A., Kimura N., Kashikhin V.	4. 巻 32
2. 論文標題 Study on Conduction Cooling of Superconducting Magnets for the ILC Main Linac	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity	6. 最初と最後の頁 1~5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TASC.2022.3155487	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 該当する

〔学会発表〕 計6件 (うち招待講演 1件/うち国際学会 2件)

1. 発表者名 清水 洋孝
2. 発表標題 STF における超伝導電磁石開発の取り組み
3. 学会等名 日本加速器学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hirotaka Shimizu
2. 発表標題 Study on Conduction Cooling of Superconducting Magnets for the ILC Main Linac
3. 学会等名 27th International Conference on Magnet Technology (MT27) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hirotaka Shimizu
2. 発表標題 Helium Refrigerator and its Operation Strategy at KEK
3. 学会等名 Lecture Series under the Banner of MOU between KEK and Cryogenic Engineering Center (IIT Kharagpur) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 清水洋孝
2. 発表標題 極低温用温度計の低温試験
3. 学会等名 日本加速器学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 清水 洋孝
2. 発表標題 極低温用温度計開発の進捗
3. 学会等名 日本加速器学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 清水洋孝
2. 発表標題 極低温温度計用FBG 及びバイメタルの性能評価
3. 学会等名 日本加速器学会
4. 発表年 2018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
---------	---------