

令和 6 年 6 月 14 日現在

機関番号：63902

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2023

課題番号：19K04364

研究課題名（和文）先進ガン治療装置の普及を加速させるための超伝導マグネットの極軽量化に関する研究

研究課題名（英文）Study on ultra-lightweight superconducting magnets to accelerate the spread of advanced cancer treatment devices

研究代表者

尾花 哲浩（Obana, Tetsuhiro）

核融合科学研究所・研究部・助教

研究者番号：60435518

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：重粒子線回転ガントリー用超伝導マグネットの極軽量化のために、アクティブシールド技術を導入した超伝導ダイポールマグネットの設計研究を行った。その結果、アクティブシールド型ダイポールコイルの設計手法の構築に成功した。また、通電時に生じる電磁力、及び、冷却時に生じる熱応力が、超伝導コイル形状に与える影響を明らかにした。更に、コイル形状におけるコイル長が、漏れ磁場に与える影響を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究成果によって、重粒子線回転ガントリー用超伝導マグネットの極軽量化に関するフェージビリティを示すことに成功した。その結果、重粒子線回転ガントリーの総重量の大幅な削減が期待できる。

研究成果の概要（英文）：In order to make superconducting magnets for heavy particle beam rotating gantries extremely lightweight, we conducted design study on a superconducting dipole magnet incorporating active shielding technology. As a result, we succeeded in establishing a design method for a dipole coil with active shielding. We also clarified the effect of the electromagnetic force generated by coil energization and the thermal stress generated when cooling on the superconducting coil shape. Furthermore, we revealed the effect of the coil shape on the stray field.

研究分野：超伝導工学

キーワード：超伝導コイル 回転ガントリー 電磁解析 構造解析

1. 研究開始当初の背景

近年、がん治療法の一つとして、重粒子を利用した“重粒子線がん治療”が注目されている。それは、他のがん治療方法に比べて、患者への身体的負担が非常に軽く、特に体力の衰えた高齢者への治療には最適だからである。そのため、各国において、重粒子線がん治療装置の開発が行われており、特に『回転ガントリー』の開発研究が精力的に進められている。『回転ガントリー』は、患者の体軸を中心にして360度回転することが可能であるため、加速器から取り出した重粒子ビームを患者の腫瘍に精度良く照射することを実現する装置である。それゆえ、『回転ガントリー』は、重粒子線がん治療の“鍵となる装置”である。

世界初の『回転ガントリー』は、独国ハイデルベルク大学病院に設置され、2012年から運用を開始した。独国の『回転ガントリー』には、銅コイルと鉄ヨークからなる電マグネット（常伝導マグネット）を使用しているため、装置の重量が650トンという巨大重量物となっている。それゆえ、患者の体軸を中心にして、ミリオーダーの位置精度で回転制御が求められる『回転ガントリー』にとって、650トンという巨大重量は、機械工学的・施設構造的に非常に厳しいものとなっている。そこで、日本の放射線医学総合研究所が中心となり、世界初の『超伝導回転ガントリー』を2015年に開発した。『超伝導回転ガントリー』では、マグネットを超伝導化することで、重粒子ビームを輸送するのに必要な偏向磁場の高磁場化を可能にした。その結果、『超伝導回転ガントリー』の装置サイズは、「独国の回転ガントリー」に比べて非常にコンパクトになり、更に、装置重量は「独国の回転ガントリー」の半分となる300トンを実現している。

しかしながら、国内外の医療機関に『超伝導回転ガントリー』を普及させるためには、300トンという巨大重量を更に軽量化することが不可欠である。そうしなければ、革新的技術である『超伝導回転ガントリー』を利用した治療方法を、多くのがん患者に提供することが困難である。

2. 研究の目的

超伝導回転ガントリーを用いた重粒子線がん治療を国内外に普及させるには、超伝導回転ガントリーの大幅な軽量化が必要である。そこで、本研究では、超伝導回転ガントリーの軽量化を実現するために、超伝導回転ガントリーの中核機器である超伝導マグネットの極軽量化を実現する。超伝導マグネットが極軽量化できれば、マグネット総重量の削減ばかりでなく、マグネットの支持構造も簡素化し軽量化できるため、超伝導回転ガントリーの総重量の大幅な削減が可能になる。

3. 研究の方法

回転ガントリー用アクティブシールド型超伝導ダイポールコイルに関する下記の4つのテーマについて、自作の計算コードと市販の有限要素法ソフトウェアを併用して取り組んだ。

- (1) コイル設計手法の構築
- (2) 通電時における電磁力の評価
- (3) 冷却時における熱応力の評価
- (4) 通電時における漏れ磁場の評価

4. 研究成果

(1) コイル設計手法の構築

本研究では、漏れ磁場を遮蔽するために鉄ヨークの代わりにアクティブシールドコイルを使用した。図1に、アクティブシールドコイルを用いた超伝導ダイポールマグネットの概念図を示す。超伝導ダイポールマグネットは、ダイポールコイルとアクティブシールドコイルの2種類の超伝導コイルから構成される。図1に示すように、マグネットの外側ではダイポールコイルの磁場とアクティブシールドコイルの磁場が互いに打ち消し合うため、マグネットから発生する漏れ磁場を遮蔽することができる。一方で、ビームパイプの内側では、アクティブシールドコイルの磁場によってダイポール磁場が弱められる。鉄ヨークを用いた超伝導ダイポールマグネットに比べて、アクティブシールドコイルを用いた超伝導ダイポールマグネットでは、ダイポールコイルの起磁力を大きくする必要がある。

開発したコイル設計コードを使用して、ダイポールコイルとアクティブシールドコイルの断面を設計した。図2に、ダイポールコイルとアクティブシールドコイルの断面を示す。ダイポールコイルの内半径と外半径はそれぞれ90mmと210mm、シールドコイルの内半径と外半径は300mmと350mmである。コイル設計後、マグネット中心に必要なダイポール磁場とマグネット外部への漏れ磁場に関する設計要求を満たすために、ダイポールコイルとアクティブシールドコイルの通電電流をそれぞれ調整した。その結果、設計要求（マグネット中心磁場2.37T、漏れ磁場 5.0×10^{-4} T @マグネット中心から距離0.5m）を満たすことができた。

(2) 通電時における電磁力の評価

マグネット中心磁場2.37T（マグネットの定格運転時）の際に、コイル断面で生じる単位長さあたりの電磁力を解析的に求めた。図3と図4に、ダイポールコイルとアクティブシールドコイルでの電磁力を示す。ダイポールコイルの場合、コイル内側では電磁力が外側に発生し、コイ

ル外側では、電磁力が内側に発生する。そのため、コイル巻線に圧縮応力が発生する。一方、アクティブシールドコイルの場合、電磁力が外側に発生するため、コイル巻線に引張応力が生じる。更に、ダイポールコイルとアクティブシールドコイルの電磁力を、各超伝導線に生じる電磁力の加算によって評価した。評価の際、電磁力を水平(x)方向と垂直(y)方向に分割した。表1に、コイル断面の第一象限における水平方向の電磁力と垂直方向の電磁力を示す。ダイポールコイルの水平方向の電磁力は、アクティブシールドコイルの電磁力と同程度である。一方、ダイポールコイルの垂直方向の電磁力は、アクティブシールドコイルの電磁力よりはるかに大きい。また、垂直方向では、電磁力の方向がコイルごとに異なる。

更に、電磁力がコイル断面形状に及ぼす影響を調べるために、FEM モデルを使用して、マグネットの2次元構造解析を実施した。図6と図7は、電磁力によるマグネットの変位分布と応力分布を示す。ダイポールコイルでは、電磁力によってマグネット中心に向かって変位し、コイルに生じる圧縮応力は、中間面(x軸)近くで大きくなる。シールドコイルでは、中間面に近づくにつれて変位が大きくなり、コイル形状はx軸上で外側に広がる。そのため、シールドコイルに引張応力が発生し、特に中間面付近で応力が大きくなることを確認した。

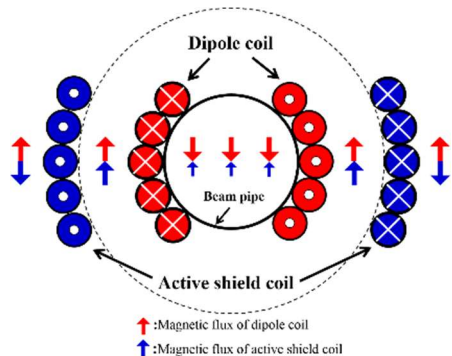


図1. アクティブシールド型超伝導ダイポールマグネットの概念図

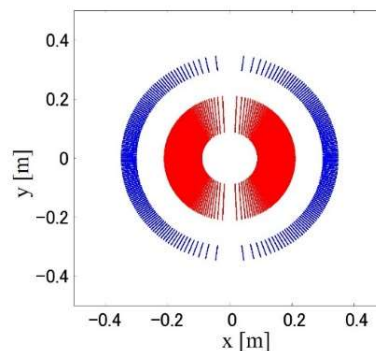


図2. 設計したコイル断面図

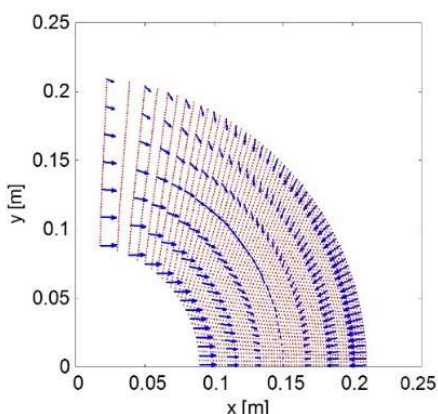


図3. ダイポールコイル(第一象限)での電磁力

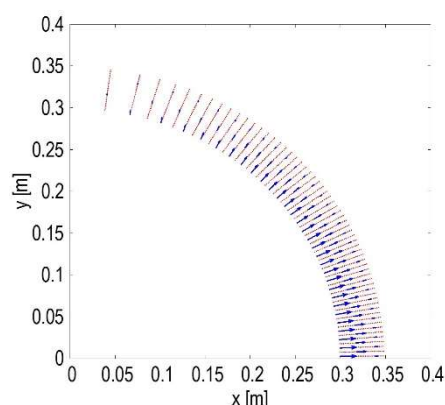


図4. シールドコイル(第一象限)での電磁力

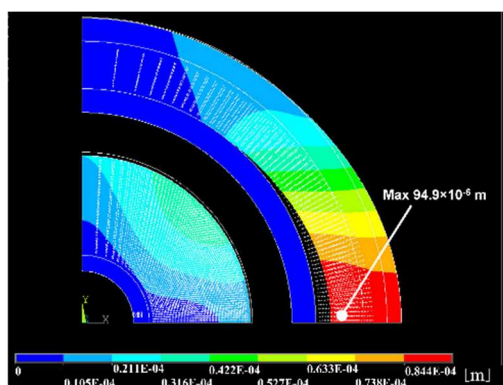


図5. 定格通電時におけるマグネット断面の変位分布(第一象限)

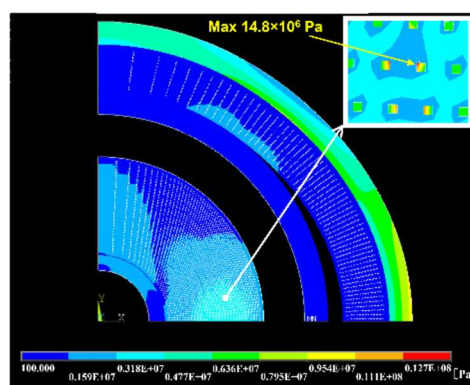


図6. 定格通電時におけるのマグネット断面の応力分布(第一象限)

表 1 コイル断面（第一象限）で生じる電磁力 @マグネット中心磁場 2.37 T

	EM force in horizontal direction	EM force in vertical direction
Dipole coil	196 kN/m	-538 kN/m
Shield coil	182 kN/m	98 kN/m

(3) 冷却時における熱応力の評価

2次元 FEM モデルを用いて、マグネットを室温（300 K）から運転温度（5 K）に冷却したときのコイルの変形を調べた。FEM モデルは、上記テーマ(2)で使用したモデルに、Nb-Ti、Al 合金、エポキシ樹脂の熱膨張係数を加えたものである。図 7 に、境界条件を加えたモデルを示す。モデルは、Nb-Ti 線、コイル巻線用エポキシ樹脂、アルミニウム合金製のコイル支持構造で構成されている。境界条件については、y 軸上にある線 1 と線 2 は y 軸方向に変位しない。また、x 軸上にある線 3 と線 4 は x 軸方向に変位しない。各構成要素の境界に関しては、Nb-Ti 線とエポキシ樹脂の境界は接着されており、支持構造とエポキシ樹脂の境界では、接触要素が使用され、境界の摩擦係数は 0 に設定した。

図 8 に、300K から 5K に冷却した際のコイルの変形を示す。冷却によりコイル全体が中心に向かって収縮し、シールドコイルの変位はダイポールコイルの変位よりも大きくなる。最大変位は、シールドコイルの外側で約 1.6 mm であり、冷却によるコイルの変形は、電磁力による変形よりもはるかに大きくなった。従って、コイル形状を設計する際には、冷却によるコイル変形を考慮する必要がある。

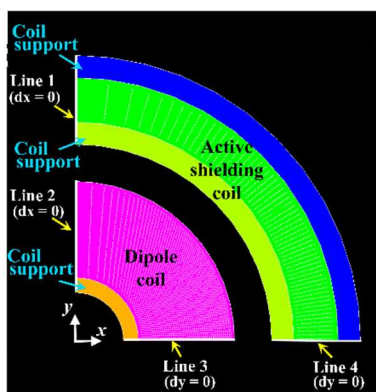


図 7. 熱応力解析用 FEM モデル

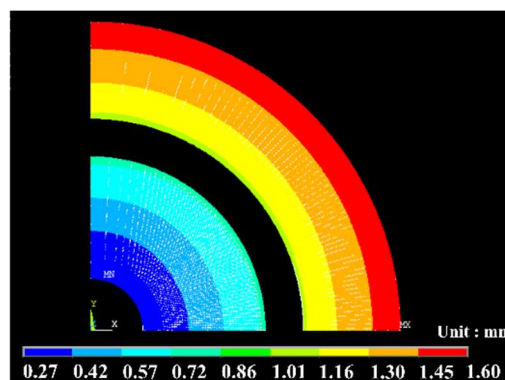


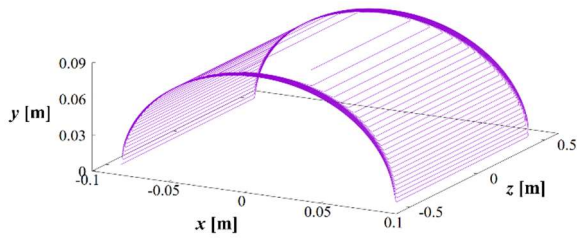
図 8. 冷却によるコイル断面(第一象限)の変位分布

(4) 通電時における漏れ磁場の評価

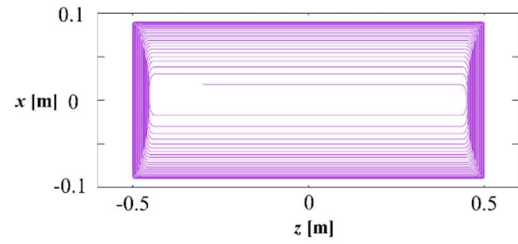
図 2 に示すコイル断面に基づいて、ダイポールコイルとアクティブシールドコイルの 3 次元形状を設計した。その際、コイル直線部の長手方向の長さが異なる 3 種類のコイル形状を作成した。図 9 に、ダイポールコイル第 1 層目上部のコイル巻線形状を示す。

設計した 3 次元コイル形状に基づき、ダイポールコイルとアクティブシールドコイルが発生する磁場分布を計算した。図 10 は、各コイル長におけるダイポールコイルとシールドコイルが、長手方向(z 方向)に発生する中間面 (x=0 mm, y=0 mm) での垂直磁場の計算結果である。ダイポールコイルとシールドコイルは、それぞれ垂直磁場分布が異なっている。図 11 に、各コイル長におけるダイポールコイルとシールドコイルの長手方向の磁場分布を足し合わせた結果を示す。コイル長が異なる 3 種類のコイルの磁場を比較すると、コイル電流が同じであっても、コイル中心 (z = 0 mm) での磁場強度が異なっている。また、コイル巻線内の磁場均一性も異なっている。これらの特徴は、コイル端部とコイル長の比に起因している。

図 12 と図 13 に、コイル中心 (z=0 mm) でのコイル半径方向の x 軸と y 軸の漏れ磁場をそれぞれ示す。コイル長が短くなると、半径方向の漏れ磁場が増加する。特に、コイル長が 1000 mm の場合の漏れ磁場は、他の場合よりも大幅に大きくなる。また、コイル端で発生する磁場は、コイル中心 (z=0 mm) の磁場分布に影響する。



(a)



(b)

図9. 3次元ダイポールコイル形状（第1層目上部）の鳥瞰図(a)と平面図(b)

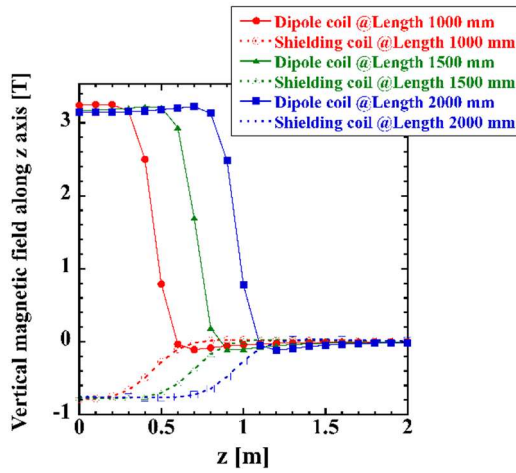


図10. 各コイル長さにおけるダイポールコイルとシールドコイルのZ軸に沿った中央面上の垂直磁場分布

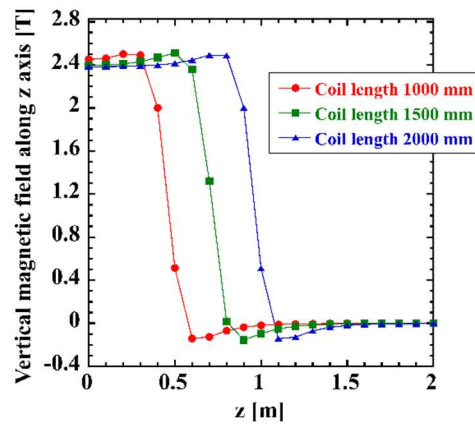


図11. ダイポールコイルとシールドコイルのZ軸に沿った垂直磁場分布をコイル長ごとに合計した結果

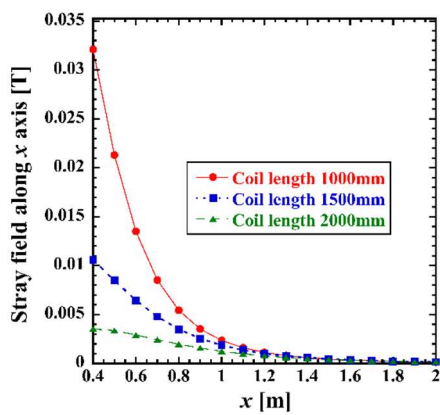


図12. コイル中心 ($z=0$ mm, $y=0$ mm) における各コイル長さに対する x 軸上の漏れ磁場

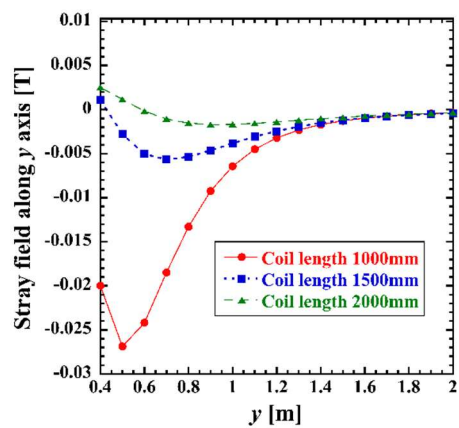


図13. コイル中心 ($z=0$ mm, $x=0$ mm) における各コイル長さに対する y 軸上の漏れ磁場

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3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 T. Obana	4. 巻 34
2. 論文標題 Investigating the Effect of Coil Length, Alignment Errors and Cooling Down on a Superconducting Magnet With Active Shielding for Rotating Gantry	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity	6. 最初と最後の頁 4401105
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TASC.2023.3345823	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 T. Obana	4. 巻 32
2. 論文標題 Electromagnetic-Structural Analysis of a Superconducting Magnet With Active Shielding for a Rotating Gantry	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity	6. 最初と最後の頁 4400304
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TASC.2022.3155535	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 Tetsuhiro Obana, Toru Ogitsu	4. 巻 30
2. 論文標題 Design of Lightweight Superconducting Magnets for a Rotating Gantry With Active Shielding	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity	6. 最初と最後の頁 4400305
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TASC.2020.2966431	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9件（うち招待講演 0件/うち国際学会 4件）

1. 発表者名 尾花哲浩
2. 発表標題 重粒子線回転ガントリーのためのアクティブシールド型超伝導マグネットの3次元コイル形状設計
3. 学会等名 2024年度春季低温工学・超電導学会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Tetsuhiro Obana
2. 発表標題 Investigating the Effect of Coil Length, Alignment Errors and Cooling Down on a Superconducting Magnet With Active Shielding for Rotating Gantry
3. 学会等名 28th International Conference on Magnet Technology (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 尾花哲浩
2. 発表標題 重粒子線回転ガントリーのためのアクティブシールド型超伝導マグネットの電磁構造解析
3. 学会等名 2022年度春季低温工学・超電導学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tetsuhiro Obana
2. 発表標題 Design study of a lightweight superconducting magnet for a rotating gantry in heavy-iron radiotherapy
3. 学会等名 28th International Cryogenic Engineering Conference and International Cryogenic Materials Conference 2022 (ICEC28-ICMC 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 尾花哲浩
2. 発表標題 重粒子がん治療用回転ガントリーのためのアクティブシールド型超伝導ダイポールマグネットの設計研究
3. 学会等名 日本加速器学会第18回年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Obana
2. 発表標題 Electromagnetic-structural analysis of a superconducting magnet with active shielding for a rotating gantry
3. 学会等名 27th International Conference on Magnet Technology (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 尾花哲浩
2. 発表標題 重粒子線回転ガントリーのためのアクティブシールド型超伝導マグネットの電磁力解析
3. 学会等名 2020年度春季低温工学・超電導学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 尾花 哲浩、 荻津透
2. 発表標題 重粒子線回転ガントリーのためのアクティブシールド型超伝導マグネットの設計研究(2)
3. 学会等名 2019年度春季低温工学・超電導学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T Obana, T Ogitsu
2. 発表標題 Lightweight design of superconducting magnets for a rotating gantry with active shielding
3. 学会等名 International Conference on Magnet Technology(MT26) (国際学会)
4. 発表年 2019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
---------	---------