

令和 4 年 6 月 9 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2021

課題番号：20K20112

研究課題名（和文）単振動イオン高周波共鳴による多価イオン出力機構の実証機開発

研究課題名（英文）Development of a resonant extraction system for a high efficiency charge breeder

研究代表者

小川原 亮 (Ogawara, Ryo)

京都大学・化学研究所・助教

研究者番号：00807729

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：稀少な不安定核（RI）を使用した物理実験は宇宙の元素合成の解明などの大きな学術的トピックに繋がる実験だが、その生成量の少なさから可能な実験に制限がかかっている。それらの実験では、生成したRIを実験に必要なエネルギーまで効率良く加速するためには、1価のイオンを多価イオンに変換するチャージブリーダー（CB）が必要だが、従来の装置ではその価数変換効率は20%程度である。本研究では、生成したRIを無駄なく使用し新たな実験領域を切り開くため、原理的に100%の価数変換効率が得られる共鳴取り出し型CBの原理実証機を開発した。テスト実験の結果、提唱する共鳴取り出しの原理を実験的に証明することに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

共鳴取り出しはチャージブリーダー（CB）開発において未だ報告されていない全く新しい手法であり、生成した不安定核（RI）を効率良く使用することで今まで実現できなかった新たな不安定核実験が可能になる。また、世界中の不安定核施設で既に多くのCBが稼働しているが、共鳴取り出しは既設のCBへの導入が容易である。したがって、本研究で原理実証した共鳴取り出しは今後のチャージブリーダー開発におけるスタンダードな方法になり得る可能性がある。また、RIを大量に生成するためには大電力や施設の放射線対策が必要になるが、共鳴取り出し型CBは効率的にRIを使用できるためそれらを抑えることが可能である。

研究成果の概要（英文）：Experimental studies using unstable nuclei can lead to major scientific themes, such as understanding nucleosynthesis and reaching the island of stability, but the small amount of RI produced limits the number of feasible experiments. Ions of unstable nuclei are accelerated for these nuclear reaction experiments. For an efficient acceleration, it is essential that RI ions are a highly charged ion beam. An EBIS type charge breeder (CB) is widely used to make a charge state higher, the efficiency has so far been obtained to be around 20%. To improve the efficiency, we developed a prototype of a resonant extraction charge breeder by which only the desired charge state ions are selectively extracted.

研究分野：原子核科学

キーワード：チャージブリーダー EBIS 共鳴取り出し

1. 研究開始当初の背景

(1) 原子核科学と量子ビーム技術

現在世界中で不安定核 (RI) 研究施設が建設され精力的な研究が行われている。その先には、宇宙の元素合成の解明、中性子星の構造解明、安定の島上陸という学術的なビッグピックが存在している。RI を用いた量子ビーム技術開発では、RI 内用療法などの放射線治療や核変換による放射性廃棄物処理などといった医療や産業への応用が期待されている。こうした RI 研究はイオン源や加速器技術といった量子ビーム技術の進歩と共に進化してきたが、より短寿命核へ、より精密な測定へという RI 研究のさらなる興味と要求が世界中で高まっている。しかし現状の量子ビーム技術では不可能な研究開発も多く存在するため、新しい量子ビーム技術開発が待ち望まれている。

(2) RI 研究のための量子ビーム技術開発の課題と解決策の提案

RI 研究において最も大きな課題の一つは実験に使用できる RI の数が少ないことである。特に物理的関心の高い短寿命 RI はそもそもの生成量が少ない場合が多く、それを使用した実験は極めて困難である。また、生成した RI ビームを適当な標的と散乱させ反応実験を行う場合、99.9%以上の RI ビームは要求する反応を起こすことなく標的を通過し廃棄されてしまう。現在世界中で RI ビーム強度の増強競争が行われており、今まで生成 RI が少なく手が届かなかった領域の実験に足を踏み入れようとしているが、それでも反応実験において 99.9%以上の RI を無駄に廃棄しているという状況は変わらない。また、これ以上の RI ビーム強度の増強は消費電力や強烈な放射化問題を考慮すると非常に困難である。そこで、生成した稀少 RI を一つも無駄にすることなく反応実験に使用するため、2018 年度から“ビームリサイクル”という新しい量子ビーム技術の研究開発が開始した。ビームリサイクルでは、廃棄されるはずだったビームを重イオン蓄積リングによって再利用し、反応するまで標的に衝突させ続ける(図1)。したがって、生成した稀少な RI を無駄なく有効利用可能である。ビームリサイクルを実現するためにはいくつかのデバイスを新しく開発する必要があるが、本研究ではその中の一つであるチャージブリーダー(イオン多価化装置)を開発する。

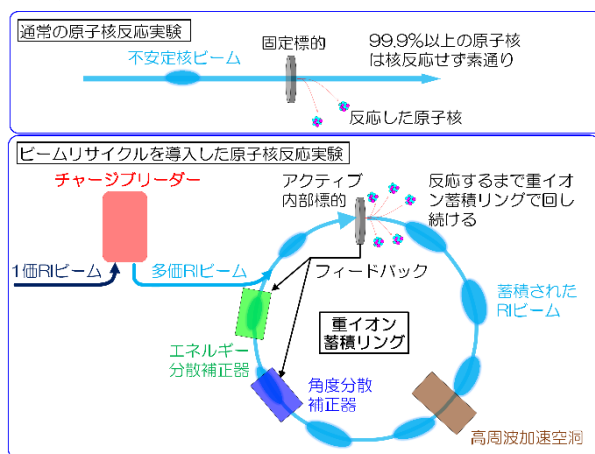


図1：ビームリサイクル概念図

(3) チャージブリーダー

ISOL (Isotope Separator On-Line) 型 RI イオン生成分離器から出力される RI イオンは 1 価であり、またエネルギーは数十 keV 程度である。したがって、実験に必要なエネルギーまで後段の加速器で加速する必要がある、その際多価イオンの方が高い加速効率を得られる。そこで、加速器前段にチャージブリーダーと呼ばれる入射した 1 価イオンを多価イオンに変換する装置が必要となる。しかし、現在世界中で開発されている Electron beam ion source (EBIS) 型チャージブリーダー(イオン多価化装置)は、1 価イオンを任意の多価イオンとして取り出す効率(価数変換効率)が 20% 程度と低く、ここで既に 8 割近い RI イオンを失っている。図 2 に示す様に、EBIS 型チャージブリーダーは電子ビームの負のポテンシャルと電極による静電ポテンシャルによってイオンを捕獲領域に閉じ込め、電子ビームとの散乱によって多価化を進行させる。イオンの入出力は捕獲用静電ポテンシャルを下げることで実現しているが、この方法ではポテンシャルを下げたときに全ての捕獲イオンが取り出されるため、要求する価数以外のイオンを捨ててしまうことになる。したがって、価数変換効率を改善するためには、要求価数のイオンのみを出力し、他のイオンはチャージブリーダー内に捕獲し続けるための機構を開発する必要がある。

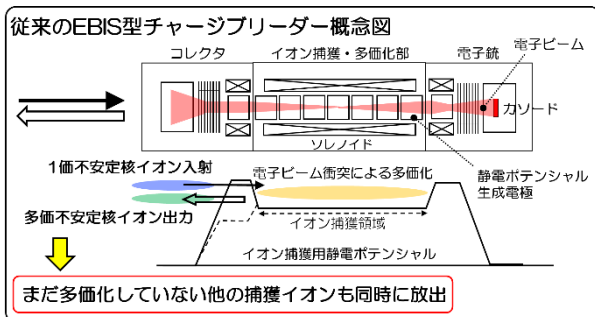


図2：EBIS 型チャージブリーダー

## 2. 研究の目的

本研究ではチャージブリーダーにおいて原理的に 100%の価数変換効率が実現できる方法の開発を目指し、「共鳴取り出し」という新しいアイデアを考案した。「共鳴取り出し」では捕獲用の静電ポテンシャルを井戸型ではなく二次関数にする。二次関数ポテンシャルに捕獲されたイオンは、その価数と質量に依存した固有振動数で単振動する（図3）。そのポテンシャルを要求価数の固有振動数で強制振動させることによって、そのイオンのみが共鳴し、振動振幅が増加することで捕獲領域から出力される。その時、他の価数は共鳴しないため、要求価数になるまで捕獲領域で価数が変化し、要求価数になった瞬間に共鳴して取り出すことが可能である。したがって、「共鳴取り出し」は原理的に全く無駄のない多価変換が可能であり、本研究ではこの原理を実験的に実証することを目的とする。

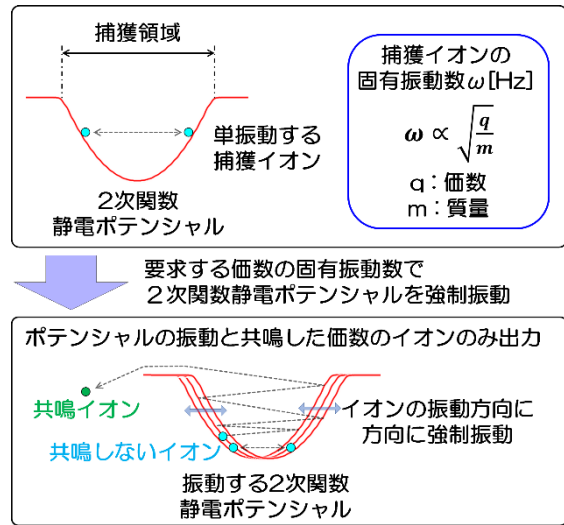


図3：共鳴取り出し

## 3. 研究の方法

### (1) 共鳴取り出し型チャージブリーダーの原理実証機の開発

原理実証機の基本的な構成は従来の EBIS 型チャージブリーダーとほとんど同じであり、イオン捕獲用電極の構成が異なるだけである。共鳴取り出しでは二次関数型の静電ポテンシャルを作成する必要があるため、独立に電圧を印可できる多段電極が必要である。シミュレーションによって必要な段数を見積もり、今回はその段数を 20、捕獲領域を 300 mm として設計した。また、20 個の電極に必要な電圧は一台の直流電源と作成した抵抗分割回路によって印可した。強制振動用にはファンクションジェネレータ (AFG31021、Tektronix) を使用し、任意の周波数と振幅のサイン波を任意の時間だけ出力できるシステムを構築した。

EBIS 型チャージブリーダーには大強度の電子ビームが必要不可欠なため、バリウム含浸型の電子銃 (#101157-04 (Mcoating), HeatWave Labs, Inc.) を選択した。電子銃を収束させるための電極や、大強度電子ビームを回収するためのコレクタも全て一から設計を行った。また、捕獲領域内において電子ビームを収束させるためのソレノイドコイルは京大化研に留置してあったものを流用した。

チャージブリーダーから出力されたイオンを分析するため、チャージブリーダー下流には分析用の電磁石を設置し、更にその下流にはイオン計数用の検出器 (チャンネルトロン) を設置した。図 4 に前述した共鳴取り出し型チャージブリーダーの原理実証に必要な主たる要素をまとめる。

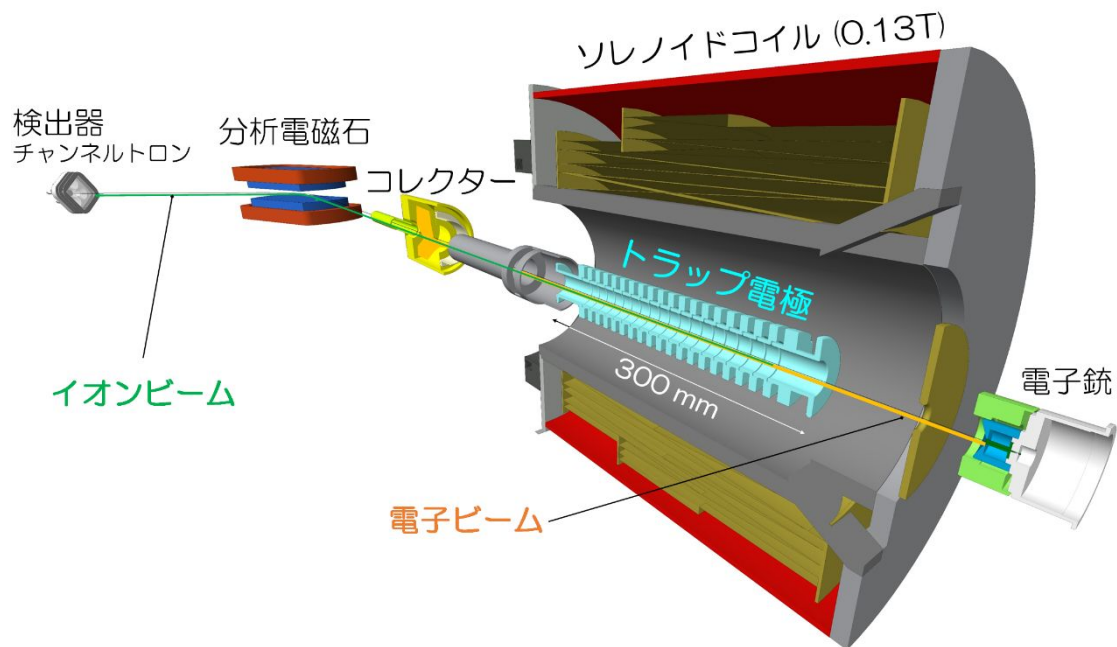


図4：共鳴取り出し型チャージブリーダーの原理実証用テストベンチ外観図

### (2) 電子ビームの性能評価実験

EBIS 型チャージブリーダーにおいて電子ビームの性能（エネルギー、サイズ、電流など）は極めて重要な要素であり、捕獲可能なイオンの量や多価化の速度を決定する。今回エネルギーは 50 kV 以下で任意のエネルギーが与えられる様に設計した。捕獲電極前後にはアルミナ蛍光板（Demarquest 製）を設置し、電子ビームの位置を視覚的に観測できる様な設計を行った。また、直径 50  $\mu\text{m}$  のタングステンワイヤーを電子ビーム上でスキャンすることによって正確な電子ビームサイズを測定した。電子ビーム電流は電子銃に高電圧を印可している電源に流れる電流とコレクタに流れる電流によって評価し、またそれらの比からコレクタでの電子ビーム回収率を解析した。

### （3）共鳴取り出しの原理実証実験

チャージブリーダーの捕獲用電極は基本的に高真空中の環境に設置されているが、酸素や炭素、水といった残留ガスは残っている。この残留ガスは電子ビームと衝突しイオン化され、勝手に捕獲領域内で多価化が進行していく。今回の原理実証実験ではこの残留ガスを利用した。この測定では分析磁石の磁場を一定にし、ポテンシャルに強制振動を与える振動の周波数を変化させることで共鳴したイオンのみがチャージブリーダーから取り出されるか調べた。この測定に使用した残留ガスは水素、酸素 1 ~ 4 価、炭素 1 ~ 4 価を対象にした。測定時の電子ビームは捕獲領域中でエネルギーが -32 keV、ビーム電流が 10 mA という条件で実験を行った。

## 4. 研究成果

### （1）共鳴取り出し型チャージブリーダーの原理実証機の開発

図 5 に開発した共鳴取り出し型チャージブリーダーの原理実証機を示す。電子銃や電子ビームコレクタ、イオン捕獲用電極は EPICS (Experimental Physics and Industrial Control System) と 横河電子株式会社製の PLC (Programmable Logic Controller) を使用した。また、ポテンシャルを強制振動させるタイミングや振動させ続ける時間は FPGA (cRIO9053, NI9041, CompactRIO, National Instrument) を使用して制御を行った。また、グラフィカルに各デバイスを操作するための GUI は Labview を使用して開発し、共鳴取り出し型チャージブリーダーの制御系と計測系は全て制御機で操作できる様にした。今回の実験中の到達真空度はベーキングしていない状態で約  $10^{-6}$  Pa という値が得られた。今後の実験ではより高真空が必要になることが予想されるため、各チェンバーにはベーキング用のシーズヒーターが巻かれている。

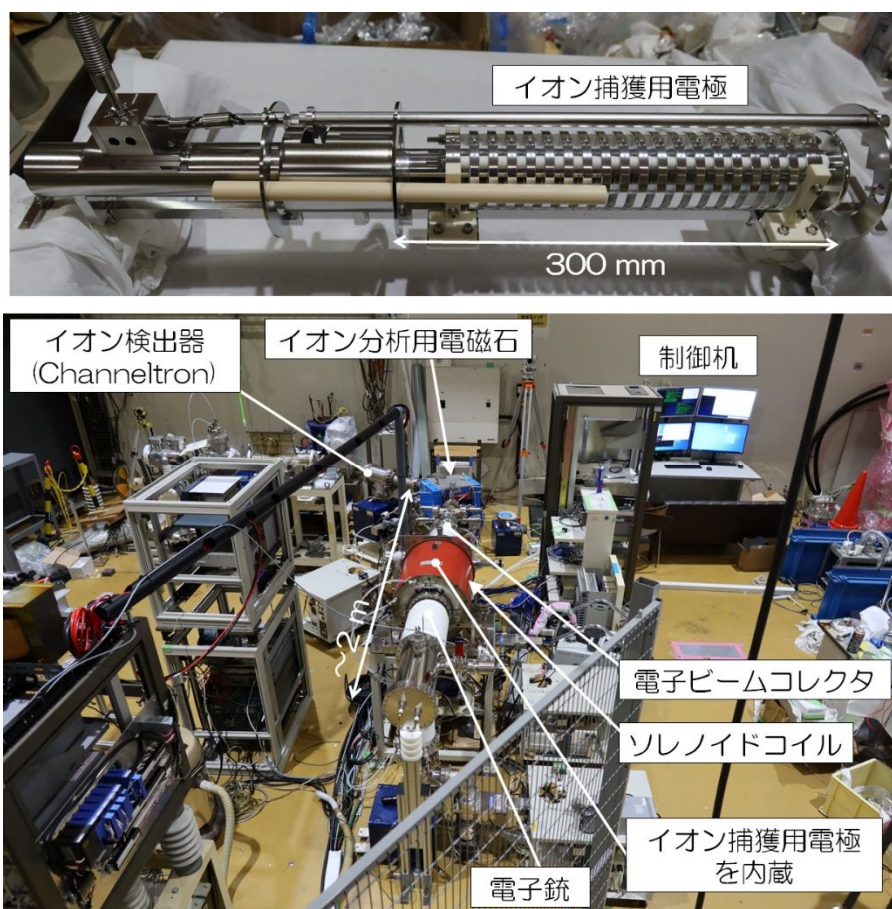


図 5：共鳴取り出し型チャージブリーダーの原理実証用テストベンチ

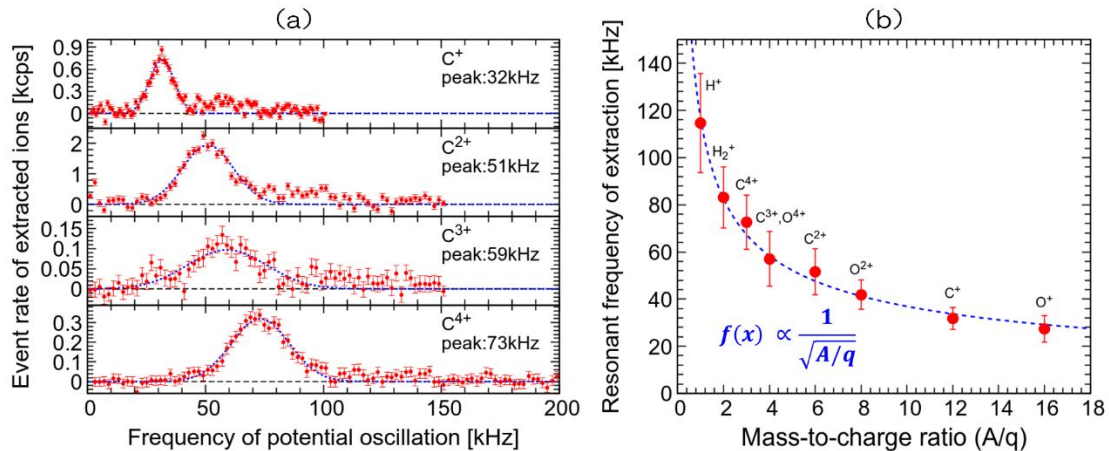
## (2) 電子ビームの性能評価実験

今回の実験では電子ビームエネルギー32 keVにおいて最大約20 mAの電子ビームが得られ、その時コレクタでの電子ビーム回収効率は99%以上が達成できた。このエネルギーと電子ビーム電流の限界は電源や電子銃の性能ではなく、これ以上電子ビーム電流を大きくすると放電が起きてビームが不安定になってしまうからである。これらはワイヤモニターやその他真空中の構造物を支える絶縁物のチャージアップによるものと考えており、現在原因となっている構造物を調査中である。また、電子ビームサイズは半値全幅で0.31 mmであり、この時ワイヤモニターが溶けない様に電子ビーム電流は1  $\mu$ A程度で測定を行った。これらの電子ビームの性能は軽い残留ガスを使用した原理実証実験には十分だが、今後価数が大きくなる重いイオンを対象に実験する場合は、より低エネルギーかつ大電流が必要になる可能性が高い。

## (3) 共鳴取り出しの原理実証実験

図6(a)にポテンシャル振動の周波数を変化させた時の共鳴取り出しチャージブリーダーから取り出された炭素1~4価イオンの計数率を示す。価数ごとにピークを取る周波数が異なり、また価数が大きいほど早い周波数で取り出されていることが分かる。捕獲イオンの質量電荷比(A/q)に依存する共鳴周波数(計数率がピークを取る時の周波数)を解析した結果を図6(b)に示す。共鳴周波数がA/qの二乗根に反比例していることから、それぞれのA/qの単振動周波数と共鳴していることが分かる。これらの結果は、任意の価数のイオンのみを取り出す共鳴取り出しの原理実証に成功したことを示している。

しかし、図6(a)から分かる通り、例えば炭素4価のみを取り出そうと73kHzでポテンシャルを振動させた場合、3価のイオンも同時に取り出されてしまう。この単一の価数のみを取り出す分解能を向上させるため、現在シミュレーションを元により性能が向上するポテンシャル構造を検討している。また、残留ガスを使用した場合、チャージブリーダーに入射した1価のイオンの量が定義できないため、価数変換効率の解析が困難である。したがって、価数変換効率を評価するためにはチャージブリーダー外部から1価のイオンを入射するためのビームラインを建設する必要がある。



5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0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 R. Ogawara, S. Takagi, K. Tsukada, H. Tongu, Y. Kuriyama, M. Wakasugi	4. 巻 54
2. 論文標題 Development of Resonant-Extraction Charge Breeder (RECB)	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 RIKEN Accelerator Progress Report	6. 最初と最後の頁 88
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 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件／うち国際学会 0件）

1. 発表者名 高木周、小川原亮、塚田暁、頓宮拓、若杉昌徳
2. 発表標題 共鳴取出型チャージブリーダの実証機開発
3. 学会等名 第17回 日本加速器学会年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高木周、小川原亮、塚田暁、頓宮拓、若杉昌徳
2. 発表標題 共鳴取出型チャージブリーダの 原理実証機開発の現状
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小川原亮
2. 発表標題 RI-RI反応実験を目的としたビームリサイクル技術開発用蓄積リング（RUNBA）の動作原理
3. 学会等名 小川原亮、阿部康志、伊東祐起、大西哲哉、久世啓太、塚田暁、前原義樹、山口由高、若杉昌徳
4. 発表年 2022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
研究協力者	周 高木  (Shu Takagi)	京都大学・化学研究所・修士  (14301)	
研究協力者	頓宮 拓  (Tongu Hiromu)	京都大学・化学研究所・技術員  (14301)	
研究協力者	若杉 昌徳  (Wakasugi Masanori)  (70250107)	京都大学・化学研究所・教授  (14301)	
研究協力者	塚田 暁  (Tsukada Kyo)  (10422073)	京都大学・化学研究所・准教授  (14301)	

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
---------	---------