

令和 3 年 6 月 17 日現在

機関番号：12102

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2020

課題番号：19K14970

研究課題名（和文）最大パワー密度1.5倍を実現する電力変換器のスタートアップ手法の開発

研究課題名（英文）Starting-up method of power converters using a short-circuit operation to achieve high power density

研究代表者

萬年 智介（MANNEN, Tomoyuki）

筑波大学・数理工学系・助教

研究者番号：90806754

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）：本研究では、電気自動車の車載充電器の小型化・低コスト化を目的とした、電力変換器のスタートアップ手法の開発および、その信頼性の評価を行った。電力変換器のパワーデバイスを極限状態において動作させることによって、変換器のスタートアップ回路を不要とし、変換器の低コスト化・小型化へのボトルネックを解消する。その結果、開発手法は、プレーナゲートSiC-MOSFETを適用した変換器において、デバイスの電流定格増加や寿命減少することなく適用可能であることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、従来、必要不可欠とされていた電力変換器のスタートアップ回路が本質的に必要であるかを問い、不要とできることを明らかにした。これは、変換器を理論限界まで小型化可能とするために必要な技術である。また、従来は、事故時の回路保護を目的として担保していたパワーデバイスの短絡動作を、通常動作の一部として積極的に活用するという、パワーデバイスの新しい使い方を提案し、その有用性を確認した。本研究の成果が電力変換器やパワー半導体デバイスの新しい市場開拓の一助となることを期待する。

研究成果の概要（英文）：This project developed a startup method of power converter and evaluated its reliability with the aim of reducing the size and cost of on-board chargers in electric vehicles. Extreme overload operation of the power devices in the power converter eliminates its start-up circuit and removes the bottleneck for cost reduction and miniaturization of the power converter. The experimental verification clarified that the proposed method has no effect to the current rating and lifetime of the power converters equipped with planar-gate SiC-MOSFETs.

研究分野：パワーエレクトロニクス

キーワード：パワーデバイス 短絡動作 電力変換器 スタートアップ 初期充電

1. 研究開始当初の背景

近年、二酸化炭素排出量規制や化石燃料枯渇問題への対策として、電気自動車(EV)やプラグインハイブリッド自動車(PHV)の研究・開発が盛んに進められ、導入が始まっている。EV や PHV は、ガソリン車と比較して高価格かつ航続距離が短い点が普及への課題である。これを解決するため、EV や PHV の車載機器には小型化・軽量化が強く求められている。

EV や PHV は、図 1 のように車両のコネクタと家庭のコンセントを接続することにより、車載バッテリーを充電する。図 2 に車載充電器の回路構成例を示す。たとえば、充電器のコンデンサは、車載コネクタに交流電圧が印加されるまで零電圧である。もし、スタートアップ回路がなければ、電源を車載コネクタに接続すると、一時的に短絡された状態となり、突入電流が生じる。これを抑制するために、抵抗と機械スイッチで構成されるスタートアップ回路が必要となる。

車載充電器の電力変換回路に、炭化ケイ素(SiC)や窒化ガリウム(GaN)などのワイドバンドギャップ半導体パワーデバイスを用いることにより、高周波スイッチングと損失低減の両立ができるため、受動部品や冷却器の容量低減・小型化が近年進められている。しかし、バッテリー充電中に機械スイッチを流れる電流はコンデンサ容量に依存しないため、充電器のコンデンサ容量を低減しても機械スイッチの小型化は困難である。このため、コンデンサを低減するほど、スタートアップ回路が充電器に占める体積割合が大きくなり、小型化へのボトルネックとなる。

2. 研究の目的

本研究は、充電器の主回路のみを利用したスタートアップ動作の開発と、その有用性の検証を目的とする。具体的には、まず、主回路による直流側短絡を活用したスタートアップ手法を提案する。その結果、提案法によって専用のスタートアップ回路がなくても、従来のスタートアップ回路を用いた場合と同等の主回路寿命を得られることを明らかにする。図 3 に、専用回路がない場合のスタートアップ動作波形を示す。コンデンサが小容量であれば、突入電流も小さくなるため、過電流によりパワーデバイスを破壊することなくスタートアップできる。しかし、インダクタの蓄積エネルギーによってコンデンサ電圧は電源の 2 倍まで上昇し、コンデンサやパワーデバイスが過電圧となる。

本研究では、主回路デバイスを用いてコンデンサを瞬間的に短絡し、放電することにより過電圧を抑制する。このとき、主回路のパワーデバイスは、高電圧が印加されたまま、定格の数倍の電流が流れる短絡動作となる。

3. 研究の方法

- (1) スタートアップ動作のパワーフロー解析
まず、充電器を電源に接続した際のスタートアップ動作を理論的に解析し、パワーフローを明らかにする。その結果、スタート

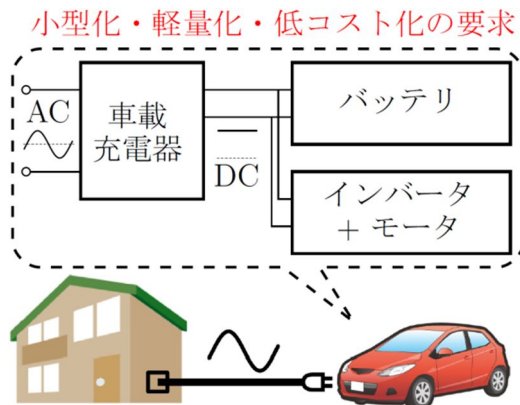


図 1 電気自動車の車載回路

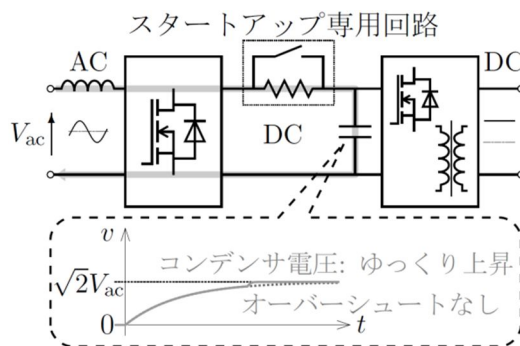


図 2 従来の車載充電器の回路構成例

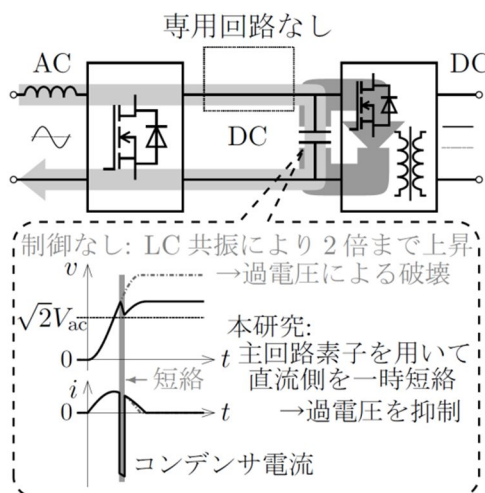


図 3 本研究により実現する車載充電器の回路構成とそのスタートアップ動作従来の車載充電器の回路構成例

アップ時に過電圧を抑制するために必要なエネルギー消費量の最小値を理論的に示し、これが、パワーデバイスの短絡耐量よりも小さいことを明らかにする。同時に、長時間の短絡を1回行うよりも、短時間の短絡を複数回行う方が、エネルギー消費量が小さく効率的であることを明らかにする。

(2) 直流側短絡によるパワーデバイスの損失と熱ストレス評価

直流側短絡に伴って、パワーデバイスでは、通常のスイッチング動作に比べて極めて大きなエネルギーが消費される。すなわち、数 μs の短絡によって、デバイスは数百度まで加熱されるため、破壊もしくは劣化する可能性がある。このため、短絡時の消費エネルギーとデバイス温度を評価する必要があるが、短絡時間が極めて短いため、ケース温度からデバイス温度を得ることは難しい。本研究では、短絡時の電圧・電流波形をもとに、シミュレーションを利用してデバイスのジャンクション温度を推定する。その結果、短時間の短絡を複数回行うことにより、デバイスの熱ストレスが低減できることを明らかにする。

(3) 直流側短絡を用いたスタートアップ法による耐久性評価

試作した充電器を用いてスタートアップ動作を繰り返し行い、短絡によるデバイスの劣化を評価する。提案するスタートアップ法は、電源接続時や停電復旧時に限って適用される。1日のスタートアップ回数を3回程度と仮定すると、提案法の適用回数は10年間で1万回程度である。繰り返し短絡によるパワーデバイスのオン抵抗の変化を測定し、その結果、短絡回数が1万回を超えてもオン抵抗の変化が2割以下であること、およびパワーデバイス自体の劣化がほぼないことを明らかにする。

(4) パワーデバイス構造の違いによる耐久性への影響評価

提案するスタートアップ法は、パワーデバイスを極限状態で動作させるため、デバイス構造やチップ面積など、デバイスごとの特性の違いにより、その挙動や劣化具合に大きな差異が出るのが想定される。本項目では、(3)で評価したデバイスと異なるゲート構造やチップ面積のデバイスに対して、スタートアップ動作を繰り返し適用し、その特性変化を評価した。その結果、プレーナゲート構造のデバイスであれば、オン抵抗の変化が小さく、パワーデバイスの劣化がほとんどないことを明らかにする。その結果、スタートアップ動作が充電器の寿命に影響しないことを示す。

以上の結果から、専用のスタートアップ回路がない場合においても、従来のスタートアップ回路を用いた場合と同等の特性が得られることを明らかにする。

4. 研究成果

本研究では、スタートアップ動作の検証および耐久性評価にあたって、図4の回路構成で実験を行った。ここでは、スタートアップ動作が1ms以下と短時間であるため、交流電源の代わりに線間電圧最大値で固定された直流電源と適用した。これにより、インバータにとって、最も負荷の高い状況において実験条件を統一することができる。

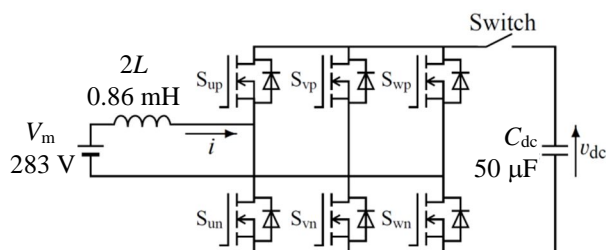
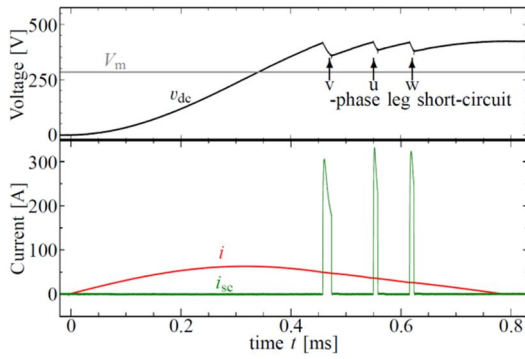
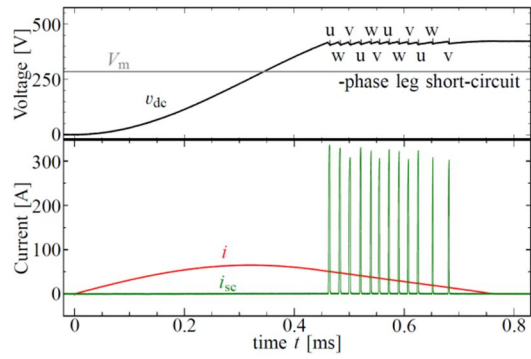


図4 スタートアップ動作の実験回路構成

(1) スタートアップ動作におけるパワーフロー解析の結果、直流コンデンサ電圧が過電圧設定値において一定となるとき、パワーデバイス内で消費すべきエネルギー量が最小となることを明らかにした。すなわち、スタートアップ時の過電圧抑制のために消費するエネルギーは、直流コンデンサ容量と過電圧設定値により最小値が決定する。しかし、実際には直流コンデンサ電圧を一定にすることが困難であるため、実際の消費エネルギーは、制御法によって変化する。図5にスタートアップ動作の実験波形を、図6に、このときの短絡によってデバイスで消費されたエネルギーを示す。長時間の短絡を1回行うよりも、短時間の短絡を複数回行う方が、直流コンデンサの電圧変動が小さく、平均電圧が高くなる。したがって、短時間の短絡を複数回行う方がエネルギー消費量は小さくなり、効率的である。このことを、理論および実験の両面から明らかにした。

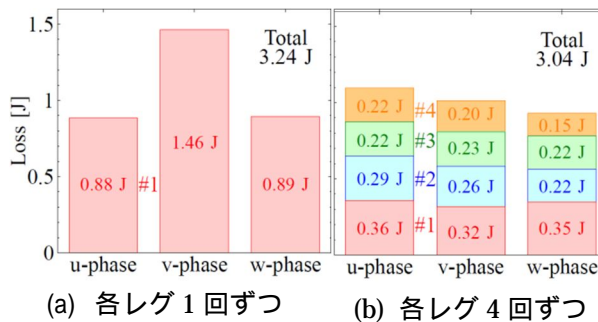


(a) 各レグ 1 回ずつの短絡



(b) 各レグ 4 回ずつの短絡

図 5 スタートアップ動作の実験波形



(a) 各レグ 1 回ずつ (b) 各レグ 4 回ずつ

図 6 各短絡時にデバイスで発生する電力損失

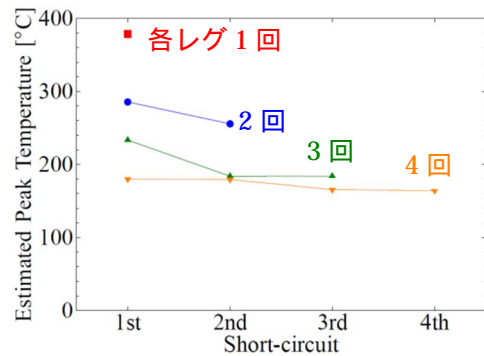
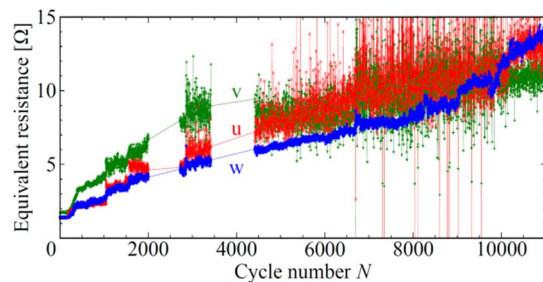


図 7 各短絡時のジャンクション温度ピークのシミュレーション

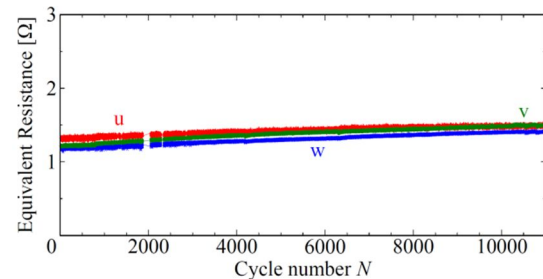
(2) 図 7 は、スタートアップ動作中のパワーデバイスのジャンクション最大温度のシミュレーション結果である。1 レグ当たりの短絡回数が増加するほど最大温度が抑制できている。複数回短絡では、パワーデバイスにおいて数 μ s の短絡動作を数十 μ s の間隔をあけて複数回繰り返す。すなわち、数十 μ s の間に、短時間ながらもパワーデバイス内部で生じた熱が拡散し、ピーク温度抑制に寄与していると考えられる。このため、デバイスのピーク温度上昇による、デバイスのゲート酸化膜劣化やデバイス破壊を避けられる。

この一方、短時間の短絡を複数回繰り返す場合、短絡回数自体は増加する。すなわち、過渡的な熱サイクルが増加するため、デバイスが劣化する可能性がある。このため、スタートアップ動作を適用した場合の耐久性評価が必要であることが明らかになった。

(3) 図 8 に、スタートアップ動作を繰り返したときのパワーデバイス特性変化の様子を示す。ここでは、短絡動作中においてパワーデバイスの等価的なオン抵抗を測定した。図 8(a)は各レグ 1 回ずつ短絡させた場合、図 8(b)は各レグ 4 回ずつ短絡させた場合である。各レグ 1 回ずつの場合、200 サイクル程度でオン抵抗が急増しはじめた。これに対して、各レグ 4 回ずつの場合、10000 サイクルのスタートアップを繰り返しても、オン抵抗の増加は 20%以下であった。すなわち、各レグにおけるエネルギー消費を目的とした場合、長時間の短絡を 1 回行うよりも、短時間に分割して複数回短絡した方が、パワーデバイスの劣化を抑制できることを実験的に明らかにした。これは、パワーデバイス内部で消費するエネルギーの総量よりも、短絡 1 回あたりのエネルギー量の方がパワーデバイスの特性に与える影響が大きいことを意味している。以上のことから、パワーデバイスの特性劣化という観



(a) 各レグ 1 回ずつの短絡



(b) 各レグ 4 回ずつの短絡

図 8 繰り返しスタートアップ動作に伴う等価オン抵抗の変化

点からは、内部の温度変化サイクル数よりも、ピーク温度抑制が重要であることを明らかにした。

- (4) 表1に本項目において比較したパワーデバイスの仕様を示す。(3)までの実験検証で使用していたデバイスはDUT-P1、すなわち、1200V耐圧のプレーナゲート構造のSiC-MOSFETである。DUT-T1はトレンチゲート構造のSiC-MOSFETであり、ゲート構造による特性の違いを検証するため、DUT-P1と同程度のチップサイズのものを採用した。また、DUT-P2はチップサイズによる違いを検証するため、チップサイズの小さいプレーナゲート構造のSiC-MOSFETとした。

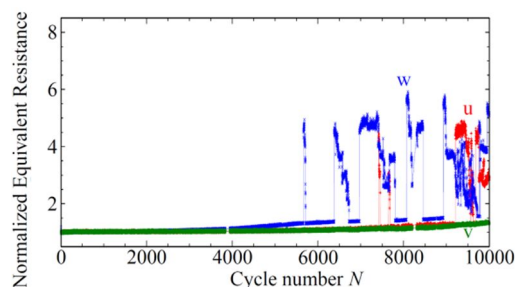
図9に10000サイクルの繰り返しスタートアップ動作時において短絡期間中のオン抵抗変化を示す。ここでは、各デバイスの特性変化を比較するため、初期状態におけるオン抵抗で規格化している。

図9(a)のトレンチゲート構造の場合、2000~5000サイクル程度のスタートアップ動作により、顕著なデバイスの劣化が観測された。この一方、図9(b)のプレーナゲート構造では、10000サイクルを超えても、オン抵抗変化率は2割以下となり、デバイスの劣化がほぼないことを明らかにした。すなわち、デバイスのチップ面積が同程度である場合、プレーナゲート構造の方がトレンチゲート構造よりも圧倒的に劣化が少ないことを示した。

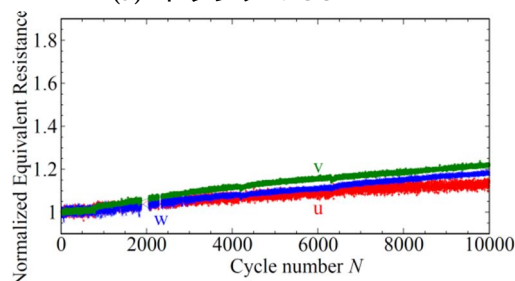
また、図9(c)のようら、同じプレーナゲート構造であっても、チップサイズの小さいデバイスを適用した方が、10000サイクルにおけるオン抵抗変化が小さく、5%以下に抑制できることを明らかにした。

表1 スタートアップ動作に使用したパワーデバイスの仕様

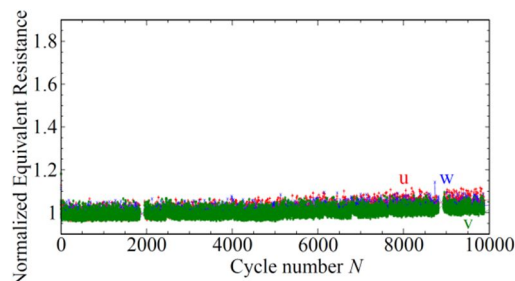
電圧定格	1200 V		
ゲート構造	トレンチ	プレーナ	
DUT 名称	T1	P1	P2
オン抵抗	30 mΩ	40 mΩ	80 mΩ
電流定格	72 A	60 A	40 A
チップ面積	19.8 mm ²	19.8 mm ²	14.4 mm ²
ゲート電圧	+17 / 0 V	+15 / -5 V	+17 / 0 V



(a) トレンチ MOS T1



(b) プレーナ-MOS P1



(c) プレーナ-MOS P2

図9 デバイスごとの繰り返しスタートアップ動作に伴う等価オン抵抗の変化

以上のことから、本研究で提案するスタートアップ法は、プレーナゲート構造のSiC-MOSFETを採用することにより、充電器の寿命に影響せずに適用可能である。また、スタートアップ法の適用にあたって、デバイスの電流定格増加も不要である。すなわち、専用のスタートアップ回路がなくても、従来のスタートアップ回路を用いた場合と同等の特性が得られることを明らかにした。

本研究のスタートアップ法は、は、電力変換器として最も広く普及している一般的な電圧形インバータに対しても適用可能である。すなわち、提案法によってインバータのスタートアップ回路をなくせるため、家電機器や産業用機器の小型化・低コスト化に寄与できる。

レグ短絡動作は、電圧形電力変換器を破損する恐れがあるため、一般に使用が禁止されている。本研究のスタートアップ法は、これをあえて、積極的に活用することにより、電力変換器にメリットをもたらすものである。本研究は、電圧形電力変換器におけるレグ短絡動作の活用可能性を理論・実験の両面から示している。本研究が、今後のレグ短絡動作の新たな活用可能性開拓やパワー半導体デバイス設計の新たな指針となることを期待したい。

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 Mannen Tomoyuki, Wada Keiji	4. 巻 55
2. 論文標題 Control Method for Overvoltage Suppression Across the DC Capacitor in a Grid-Connection Converter Using Leg Short Circuit of Power mosfets during the Initial Charge	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Industry Applications	6. 最初と最後の頁 4012 ~ 4019
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TIA.2019.2912800	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 Mannen Tomoyuki, Wada Keiji	4. 巻 100-101
2. 論文標題 Reliability evaluation of power MOSFETs used for an initial charge method using multiple short-circuits in each leg	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Microelectronics Reliability	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.microrel.2019.113428	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 Mannen Tomoyuki, Isobe Takanori, Wada Keiji	4. 巻 114
2. 論文標題 Investigation of multiple short-circuits characteristics and reliability in SiC power devices used for a start-up method of power converters	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Microelectronics Reliability	6. 最初と最後の頁 113775 ~ 113775
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.microrel.2020.113775	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 2件）

1. 発表者名 Mannen Tomoyuki, Wada Keiji
2. 発表標題 Reliability evaluation of power MOSFETs used for an initial charge method using multiple short-circuits in each leg
3. 学会等名 30th European Symposium on Reliability of Electron Devices, Failure Physics and Analysis (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Mannen Tomoyuki、Isobe Takanori、Wada Keiji
2. 発表標題 Investigation of multiple short-circuits characteristics and reliability in SiC power devices used for a start-up method of power converters
3. 学会等名 31th European Symposium on Reliability of Electron Devices, Failure Physics and Analysis (国際学会)
4. 発表年 2020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