

令和 5 年 6 月 20 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02638

研究課題名(和文)次世代型原子炉における革新的静的安全系の開発

研究課題名(英文)Development of the Innovative Passive Safety System for Next Generation Nuclear Reactors

研究代表者

三輪 修一郎(Miwa, Shuichiro)

東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・准教授

研究者番号：00705288

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究助成により取り組んだ蒸気インジェクタ(SI)の実験ならびに解析モデルについて以下の通り纏める。SIの運転特性については、供給蒸気圧の上昇に伴い、混合ノズル内に水噴流が形成され、その長さは蒸気圧との相関関係にあることが示唆された。背圧弁調整によりSI内部圧を上昇させた後、凝縮ショックがディフューザ後方で形成されることが確認できた。本研究助成により新規開発した一次元モデルは、SIの圧力分布を従来手法よりも正確に計算することが可能である。新たに提案した凝縮ショックモデルを追加項として運動量保存式に組み込むことで、最大吐出圧の計算値の精度が大幅に向上することが確認できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

SIは、蒸気の熱エネルギーを運動エネルギーに変換することで、入口蒸気圧力よりも常に高い吐出圧が得られる装置である。SIを静的安全装置の一部として原子力施設へ導入することで、事故時に発生する蒸気を利用し、水噴流と混合させることで、圧力変動に影響されずに安定した注水と徐熱が可能となる。更に、混合ノズル内部において生じる蒸気-水の直接接触凝縮型熱交換は、従来の熱交換機の1,000倍以上の伝熱性能を有する。本研究成果は小型炉等の次世代原子炉へのSI導入に向けて必要となる最大吐出圧ならびに正常作動・不働の作動条件を熱流体工学の観点から検証したものであり、次世代炉の安全性向上に寄与するものと期待される。

研究成果の概要(英文)：The following is a summary of the Steam Injector (SI) experiments and analytical models conducted under this funding period. Regarding the operation characteristics of the SI, it was suggested that as the supply steam pressure increases, a water jet is formed in the mixing nozzle, and that its length is proportional to the steam pressure. After the SI internal pressure was increased by adjusting the back pressure valve, it was confirmed that a condensation shock was formed at the rear part of the diffuser. The one-dimensional model newly developed through this research grant can calculate the pressure distribution of the SI more accurately than conventional methods. By incorporating the newly proposed condensation shock model into the momentum conservation equation as an additional term, it was confirmed that the accuracy of the calculated maximum discharge pressure was greatly improved.

研究分野：熱流動工学

キーワード：気液二相流 蒸気インジェクタ

1. 研究開始当初の背景

世界的に研究開発が活発に進められている小型モジュラー炉（Small Modular Reactor, 以下 SMR）や第4世代原子炉（以下、GenIV 炉）を含む次世代原子力技術がベースロード電源として国民に受け入れられるためには、全電源喪失時（SBO）においても炉心の崩壊熱徐熱が可能であり、炉心水位を維持したまま原子炉より発生する広範囲圧力の蒸気を確実に凝縮させることが可能な静的（パッシブ）な徐熱・注水設備の開発が必須である。特に、2030年代より分散型ベースロード電源として海外で多数新設されると考えられる SMR の安全性向上は、原子力技術の信頼回復に大いに影響をもたらすと考えられる。SMR の設計では、大型プールからの冷却水を炉心内外部へ重力落下させる安全系が提案されているが、炉容器冠水を重要視するあまり SMR の小型化・モジュラー化が阻まれているのが現状である。また、福島第一原子力発電所に設置されていた非常用復水器（IC）や原子炉隔離時冷却系（RCIC）関連の大型徐熱設備は、莫大な建設費・維持費に加え、3・11 事故時に露呈した通り、蒸気圧力やバッテリー電源、運転員の操作等に依存することから理想的なパッシブ安全系とは程遠いのが現状である。現在提案されている Gen IV 炉では、世界で 280 基以上運転中の PWR に類似した 2 次・3 次循環系による蒸気発生器（SG）が搭載され、SBO 時には徐熱系統としての役割を担う。SG より発生する蒸気を利用したパッシブな注水系が存在すれば長期間安定した一次系冷却が可能となる。

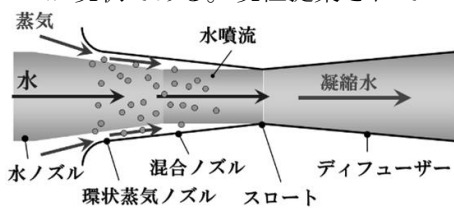


図1 SI 内部構造

図1に、電源無しで駆動可能で、パッシブ（静的）なジェットポンプとして機能する蒸気インジェクタ（Steam Injector、以下 SI）の作動原理を示す。SI は、蒸気の熱エネルギーを運動エネルギーに変換することで、入口蒸気圧力よりも常に高い吐出圧が得られる装置である。駆動源となる水噴流が SI 内部へ流入する際、混合ノズル内で負圧が生じ、環状蒸気ノズルより高圧蒸気が吸引される。蒸気速度は超音速に達し、混合ノズル内で水噴流との熱伝達により凝縮する。凝縮水は、ディフューザーでベルヌーイの定理より昇圧後、排出される。従って、非常時に減圧弁作動後に発生する蒸気を利用し、水噴流と混合させることで、圧力変動に影響されずに安定した注水と徐熱が可能となる。更に、混合ノズル内部において生じる蒸気-水の直接接触凝縮型熱交換は、従来の熱交換機の 1,000 倍以上の伝熱性能を有する。即ち、小型炉心や、蒸気発生器を有する次世代型原子炉（SMR、GenIV 炉）に SI を適用することで、全電源喪失時や炉心熔融事故を回避するコンパクトな注水及び高効率徐熱システムの構成が可能となる。これにより、原子力発電技術の更なるコスト低減と高度な安全性が期待され、ベースロード電源として市場競争力向上に繋がると考えられる。

国内では、タービン給水復水系に SI を使用した発電プラント設備削減に関する研究が行われてきた。近年では、SI 内部可視化や、特殊熱電対・ピトー管を利用した内部計測が行われている。海外では、1970年代より米国研究所を中心に SI 昇圧機構についての研究が行われてきたが、SI 作動原理については未解決のまま実用化に至っていない。

2. 研究の目的

本研究目的は、既存原子炉および次世代型原子炉における革新的静的安全系の開発であり、最新鋭の熱流体計測手法により蒸気インジェクタ（SI）の作動メカニズムを解明し、原子炉への適用が可能な注水システムとしての技術確立を行うことである。目的達成のため、可視化 SI 試験体による直接接触凝縮現象と衝撃波生成機構の可視化実験を実施し、粒子画像流速測定法による SI 内部熱流動の高解像度計測を試みとともに、取得したデータセットから吐出圧力の予測が可能な一次元二相流モデルの構築を目指す。

3. 研究の方法

本実験にて使用した実験装置は、水噴流中心型のSI試験体、蒸気供給ボイラー、水供給ループのコンポーネントにより構成されている。

本研究課題では高圧試験を行う際のステンレス製と、可視化計測を行うポリカーボネート製の二種類のSI試験体を用いた。材質以外の寸法は同一である。水噴流と蒸気が直接接触する混合ノズルはテーパー形状となっており、蒸気-水の著しい相対速度差による質量・運動量・エネルギー変換が混合ノズル内部で生じる。混合ノズル壁面には圧力計や熱電対を挿入するためのタップ孔が設けられている。スロート付近には、逆止弁を備えたオーバーフロー管を備え、SI起動時には逆止弁が閉じ、作動液はすべてディフューザーの出口から排出される。水噴流はSI上流部に設置された水ノズル部より形成され、外部のハンドル機構により軸方向への移動が可能となる。SI



図2 本研究助成にて新規製造した可視化実験用SI試験体

への蒸気供給には、小型多管式貫流ボイラーを使用した。また、水ノズル部への液相供給にはインライン多段ポンプを使用した。可視化計測用のSI試験体においては、内部流路を明確に区別できる画像を取得するため、高速度カメラを使用した。本実験装置のループ全体図を図3、4に示す。

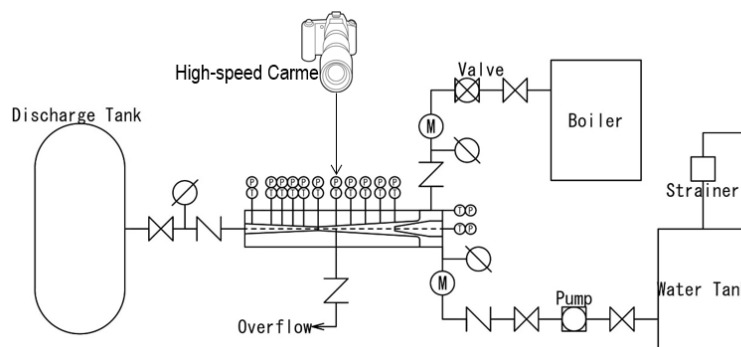


図3 SI試験装置レイアウト全体図

4. 研究成果

SIを正常に作動させるためには二つの条件が必要となる。一つは混合ノズル部の下流近傍圧力が負圧であることと、二つ目はポンプとして機能するための吐出圧力が供給圧を上回る必要があること、の二点である。そこで、この研究期間2年目には、この二つの条件について可視化実験を行い、内部流れの観察を行った。図4に可視化実験結果の一例を示す。図4に示した条件は、SI起動時の水の質量流量を0.5 kg/s、蒸気圧を0.05 MPaと設定し、水の質量流量を一定に維持した上で蒸気圧を0.28 MPaまで上昇させた結果である。圧力上昇の間、混合ノズル部(図中、赤い破線枠内)内部では、蒸気圧の上昇と共に水噴流が形成された。混合ノズル部内の流動様式としては逆環状流から分散流へと遷移する傾向が確認できた。また、混合ノズル内部では、蒸気の質量、運動量、エネルギーが直接接触凝縮により水噴流へと伝達され、下流部圧力は負圧となる傾向が確認できた。二つ目の作動条件として、背圧弁の調整によりSI内部の昇圧を行った。背圧弁の調整を行わない場合はディフューザー部(SI下流部)は気液二相流となり、気液凝縮地点にて凝縮ショック(Condensation Shock)の生成が可視化実験により確認された。衝撃波後流では、気相割合を示すボイド率値は急激に減少した。背圧弁の調整により、供給条件におけるSIの吐出圧力についても検証を行い、結果、衝撃波の位置がスロート部(ディフューザーの起点)付近に達する際に最大吐出圧力に達することが確認された。

SI の正常作動範囲を調査せるため、供給条件を変えての実験を実施し、ステンレス製 SI を使用した高圧供給条件ならびに、ポリカーボネート製 SI を使用した低圧供給条件にて実験を行った。結果を図 6 に示す。この結果から、SI の正常作動には、低水流量領域と低蒸気圧領域の二つのバウンダリーが存在することが明らかになり、実際のオペレーションを行う上での下限値としての解釈が可能である。この知見から、将来的には無次元数を用いたスケーリング法の概念から境界領域を定義することが設計・運用の観点からも重要になると考えられる。

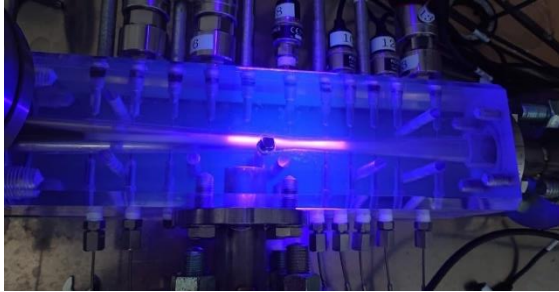


図 4 2色LIFとPIVによる可視化実験

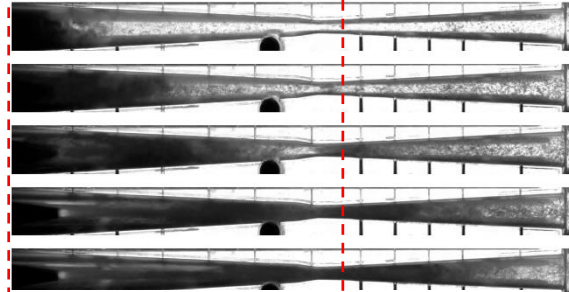


図 5 SI内部流動様式

以上に示した最大吐出圧実験と作動・不作動領域境界の検証に加え、内部流動構造の可視化より得られた知見から、吐出圧力予測のための一次元モデルの構築を行った。具体的には、SI 内部の流動様式を逆環状流、分散気泡流、単相流の三領域に区分けし、それぞれにおいて二流体モデルをベースとした質量・運動量・エネルギー保存式を導入した。ここで重要となるのが流動様式の遷移条件の数式化である。逆間上流は、中心部を流れる水噴流が崩壊すると同時に分散噴霧流へと遷移するものと仮定し、次式に示した水噴流崩壊距離 (Z_{bu}) を実験的に求めた。

$$Z_{bu} = 0.11425 \left(\frac{U_{v,0} M_{v,0}}{U_{l,0} M_{l,0}} \right)^{-0.2978} \quad (式 1)$$

ここで、 U 、 M はそれぞれ速度と質量流束であり、いずれも SI 境界条件から求めることが可能である。本実験相関式は、申請者が使用した SI 試験体の形状のみに適用可能であることから、水噴流距離に関してもスケーリング法に則った検討を行う考えである。分散気泡流から液単相流への遷移については、断面平均ボイド率値が 0 に近接した地点を完全凝縮箇所とし、ディフューザー形状に伴う昇圧効果を解析的に組み込んだ。

上記の方程式を、混合ノズル入口からディフューザー出口まで、 Z 軸方向において dz の刻みで数値的に解いた。その結果、凝縮ショックによる圧力上昇は、上記の方程式を用いた場合、いくつかの入口供給条件では適切に捉えられないことが分かった。噴流崩壊 (Z_{bu}) 後に観測される圧力分布の急峻さは、液体の急激な膨張と同時に残存した蒸気の完全凝縮に起因するものであることが考えられる。そこで、スロート部付近で見られる急峻な圧力を解析するため、追加圧力項として、(1) 急激な液体膨張と蒸気の同時完全凝縮、(2) 相変化を考慮しない通常の衝撃波機構、の 2 つの異なるメカニズムを検討した。(1) のメカニズムは、SI における凝縮衝撃は、SI 中心部の水噴流が混合ノズル内で凝縮した環状蒸気流に急激に拡大することに起因するという考えに基づいている。摩擦の影響を排除した運動量バランスを考慮すると、 Z_{bu} での液相噴流崩壊後の圧力上昇は、次のように表すことができる。

$$\Delta P = \frac{1}{A} \{ M_g U_g + M_f U_f \}_{Z_{bu}} - \left(\frac{M_l^2}{\rho_f A^2} \right)_{Z_{bu}} \quad (式 2)$$

昇圧機構 (2) については、先行研究により提案された窒素—水系の二相流における衝撃波モデルを採用した。

$$P_{s2} - P_{s1} = \frac{\alpha_{s1}}{1 - \alpha_{s1}} \frac{G^2}{\rho_f} \left\{ 1 - \left(\frac{P_{s1}}{P_{s2}} \right)^{1/n} \right\} \quad (式 3)$$

ここで、 α は断面平均ボイド率、 G は質量流束であり、添字 $s1$ ならびに $s2$ はそれぞれ衝撃波上流、下流を表す。解析モデルと実験データの比較として、代表的なケースについての結果を図 8 に示す。軸流圧力の逆環流モデルは、今回実験したすべての条件においてうまく機能することが分かり、噴流崩壊位置 (Z_{bu}) 直前の圧力分布が良好に捉えられていることがわかる。 Z_{bu} の下流では、ボイド率が 0 ($\alpha = 0$) に漸近するまで分散流モデルによる運動量保存式が用いら

れる。

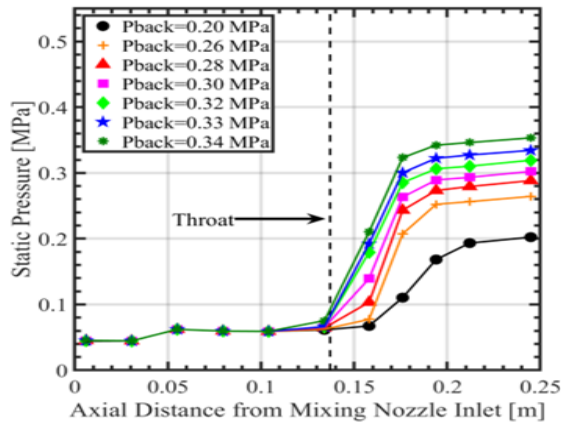


図6 SI軸方向の圧力分布

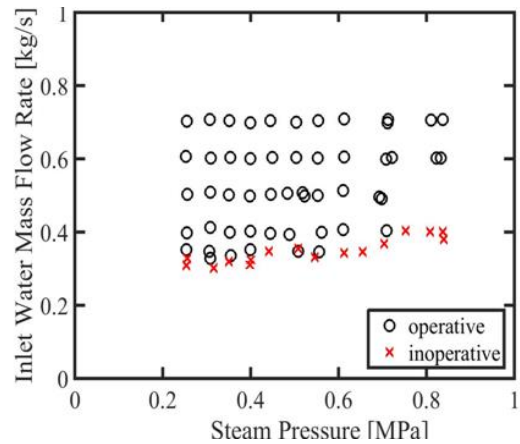


図7 SI作動条件の検証

入口蒸気圧と入口液相質量流量が高い条件においては、分散流モデルのみを使用した場合、平均絶対誤差 (MAE) が 3.5% と、軸方向の圧力分布が比較的よく捉えられる結果を得た。これに対し、入口液相流速が小さくなるにつれて、分散流モデルで計算した完全凝縮後の圧力上昇値は、実験データを大きく下回る傾向が見られた。これは、液相流速の減少は質量流量比 (ω) を減少させ、流入する蒸気質量流束を完全に凝縮させるために必要な最小液相流量の下限に近くなる。 ω が最小値に近づくと、水噴流の崩壊位置が混合ノズルの上流側に移行し、より多くの非凝縮蒸気が分散気泡流の形でスロート部付近に存在するようになる。このため、液体が凝縮蒸気流に向かって急膨張するための空間が追加されることから、式 (2) に示した圧力上昇機構の追加が必要となる。結果、図 8 に示した通り、入口蒸気圧力 0.8MPa においては、凝縮ショックモデルの追加により MAE 値 5.6% までの精度向上が確認できた。

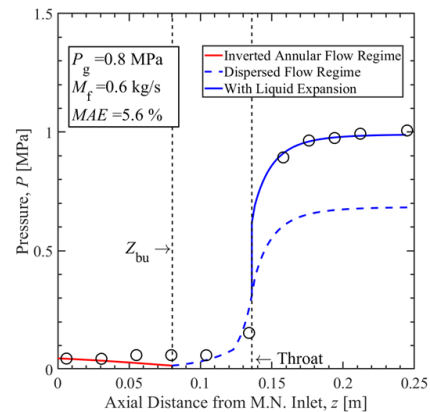


図8 SI軸方向の圧力分布検証

本研究助成により取り組んだ SI の実験ならびに解析モデルについて以下の通り纏める。

(1) SI の運転特性については、供給水の質量流量が一定になった後、供給蒸気圧の上昇に伴い、混合ノズル内に水噴流が形成され、その長さは蒸気圧との相関関係にあることが示唆された。SI 起動後、背圧弁を調整することにより SI 内部圧を上昇させた後、凝縮ショックがディフューザー後方部で形成され、背圧値によって徐々にスロート部に移動する傾向にあることが可視化実験より明らかになった。この現象と SI の吐出圧の関係性を可視化実験により調査したところ、衝撃波がスロート部付近まで到達する際に SI の最大吐出圧力が得られることが分かった。

(2) SI 内部の温度分布としては、蒸気と水が直接接触して凝縮する混合ノズル内で急速な温度上昇が生じることが確認された。直接接触後のディフューザー部での温度上昇は殆ど確認されなかった。従って、蒸気から水への熱伝達は主に混合ノズルで生じることが分かった。

(3) SI 内部の流況推移については、可視化実験により、逆環状流、分散流、液体単相流の 3 つのパターンを確認した。逆環状流から分散流への移行条件は、水噴流が崩壊することと重なることが分かり、噴流崩壊位置を予測する相関式を新たに構築した。

(4) 本研究助成により新規開発した一次元モデルは、SI の圧力分布を従来手法よりも正確に計算することが可能である。最大吐出圧力について本モデルにより計算結果と実験値を比較すると、供給水量の値によって軸方向圧力分布の傾向が異なることが分かった。そこで、凝縮ショックモデルを追加項として運動量保存式に組み込むことで、最大吐出圧の計算値の精度が大幅に向上することが確認できた。

本研究期間中、コロナ禍中での緊急事態宣言が発令され、申請時に予定していた共同実験内容の大幅な変更を余技無くされたことが心残りではあるが、そのような状況下においても精力的に本研究課題の目標達成に向けてご尽力頂いた研究分担者一同に感謝の意を表する。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件／うち国際共著 2件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Shuichiro Miwa, Yifei Xu, Takashi Hibiki, Hiroto Sakashita, Kazuhiro Sawa	4. 巻 170
2. 論文標題 Pressure Elevation of High-Performance Steam-Water Condensing-Injector	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal of Heat and Mass Transfer	6. 最初と最後の頁 120971
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.120971	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

1. 著者名 Shuichiro Miwa, Takashi Hibiki	4. 巻 186
2. 論文標題 Inverted annular two-phase flow in multiphase flow systems	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 International Journal of Heat and Mass Transfer	6. 最初と最後の頁 122340
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.122340	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5件（うち招待講演 0件／うち国際学会 0件）

1. 発表者名 徐 芸斐, 原 裕輝, 三輪 修一郎, 澤 和弘
2. 発表標題 蒸気インジェクタ流れ場の熱流体挙動と作動メカニズム解明に関する研究
3. 学会等名 日本混相流学会 混相流シンポジウム2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 三輪修一郎
2. 発表標題 超音速蒸気インジェクタの作動特性と吐出圧評価モデルの構築
3. 学会等名 日本混相流学会 混相流シンポジウム2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 徐芸斐, Xin Xie, 三輪修一郎, 坂下弘人, 澤和弘
2. 発表標題 蒸気インジェクタ流れ場における可視化研究
3. 学会等名 日本原子力学会 北海道支部 第 38回研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y. Hara and S. Miwa
2. 発表標題 Study on Operating Characteristics of Steam Injector Associated with Supply Water Temperature Change
3. 学会等名 日本混相流学会混相流シンポジウム、2019年8月5 - 7日、福岡大学
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Hara and S. Miwa
2. 発表標題 蒸気インジェクタ内部における熱流体挙動ならびに作動特性評価手法の開発
3. 学会等名 日本原子力学会秋の大会、2019年9月11 - 13日、富山大学
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
研究 分担者	坂下 弘人 (Sakashita Hiroto) (00142696)	北海道大学・工学研究院・准教授 (10101)	

6. 研究組織（つづき）

	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
研究分担者	伊藤 大介 (Ito Daisuke) (30630024)	京都大学・複合原子力科学研究所・助教 (14301)	
研究分担者	伊藤 啓 (Ito Kei) (50421590)	京都大学・複合原子力科学研究所・准教授 (14301)	
研究分担者	舩谷 俊平 (Funatani Shumpei) (50607588)	山梨大学・大学院総合研究部・准教授 (13501)	
研究分担者	沢 和弘 (Sawa Kazuhiro) (80355015)	北海道大学・工学研究院・教授 (10101)	

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