

令和元年6月19日現在

機関番号：13501

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K14535

研究課題名（和文）異種気体による自然循環流のパッシブ流体制御機構の開発

研究課題名（英文）Development of passive fluid control method by different component gases

研究代表者

武田 哲明（TAKEDA, Tetsuaki）

山梨大学・大学院総合研究部・教授

研究者番号：30370422

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,900,000円

研究成果の概要（和文）：例えば、超高温ガス炉の下部に冷却系配管が位置する場合に配管が破断すると、一般的には破断口上部の炉内には密度の小さいヘリウムガスが、破断口下部には密度の大きい空気が存在するため、安定な密度成層が形成される。また、側部に冷却系配管が位置する場合に配管が破断すると、対向置換流によって空気が容器内に浸入し、流速は一旦上昇するが、その後直ちに低下し、再度上昇する。これは、破断直後に炉内に浸入した空気をヘリウムガスとの安定密度成層が形成され、空気の浸入が抑制されることによる。いずれの状況においても原子炉の上部からヘリウムガスを供給することにより空気の自然循環流を制御することが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

ヘリウム/空気の密度の異なる気体について、大量の空気が浸入する空気の自然循環流の発生を防止するため、既に自然循環流が発生している状態において、実験装置の上部または下部から微量のヘリウムガスを注入することにより、空気の自然循環流を停止させることができた。これにより、注入するヘリウムガスの量及び注入位置、注入方法により、空気の自然循環流を制御できる可能性を明らかにした。超高温ガス炉の原子炉設計を行う際に想定事象の一つである一次冷却系主配管破断時の空気浸入事象において、密度の小さい気体により空気の浸入を防止することができれば、今後の安全設計に関して、設計上の安全裕度を各段に向上することができる。

研究成果の概要（英文）：When a depressurization accident of a Very-High-Temperature Reactor occurs, air is expected to enter into the reactor pressure vessel from the breach. In order to investigate of preventing natural circulation flow by injecting helium gas, the experiment has been done as follows. Firstly, heavy gas is filled with the reverse U-shaped passage and the storage tank. Then, two vertical walls of the high-temperature side passage is heated and cooled. Thus, natural circulation flow will be generated. When the steady state is established, helium gas injects from the top of the passage. Natural circulation will be stopped immediately. After the time elapsed, natural circulation will be regenerated suddenly. Re-onset time of natural circulation increased with increasing the amount of injecting helium gas. From the results obtained from these experiments, if a helium canister is placed in the upper part of the reactor pressure vessel, air ingress from the ruptured pipe can be prevented.

研究分野：熱工学

キーワード：分子拡散 自然対流 密度成層 自然循環流 異種気体

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

密度の異なる2成分気体により鉛直な流体層内の上部から下部に向かって密度が大きくなるような安定密度成層が形成される場合、一般的には気体混合は分子拡散に支配され、2成分気体の拡散係数により気体混合速度が決まる。図1に示すような逆U字型やループ型の流路内に密度の小さいヘリウムガスを充てんし、一方の流路を加熱、他方を冷却して流路間に温度に起因する密度差を生じさせた場合、常温でヘリウムガスの約7倍密度が大きい窒素や空気は主として分子拡散により浸入し、密度差に伴い発生する浮力は流路下部に存在する重い気体の自然循環流を発生させるほど大きくないことを明らかにしてきた。図2に示すように、1次元的な流路については、例えば空気其自然循環流が発生している定常状態において、空気より密度の小さいヘリウムガスを流路内に注入して、空気其自然循環流を停止させることに成功した。

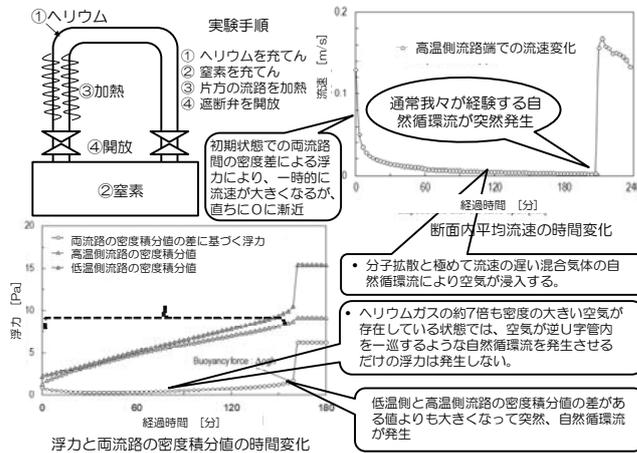


図1 本提案に関する特徴的な現象

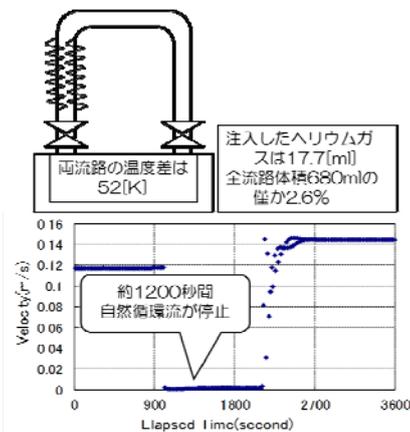


図2 ヘリウムガスによる自然循環流の停止

しかしながら、実際の装置への対応を考えた場合に既に局所的な自然対流が発生している状況における分子拡散や自然対流による気体の移動が自然循環流の制御方法に与える影響が不明である。危険性気体取り扱い設備の事故時や次世代原子力システムの一つである超高温ガス炉の配管破断事故時の空気浸入防止法として、この現象を利用した手法を検討したが自然対流を制御する方法の開発には至っていない。

2. 研究の目的

本提案は、密度の異なる気体により安定成層が形成された逆U字型またはループ型の流路で構成される一方の流路を加熱することによって発生する特定気体の自然循環流を密度の小さい気体、例えばヘリウムガスを一定量もしくは連続的に受動的な方法で注入することにより停止させ、流量を制御する方法の開発に関するものである。密度の小さな気体を能動的、あるいは受動的に注入し、気体を拡散させることによって、自然対流あるいは1次元的な自然循環流を制御する方法を実験と解析により明らかにする。本課題では、ヘリウムガス注入による自然循環流の流動・制御特性を調べ、受動的な自然循環流制御方法の開発に目途をつけ、高温伝熱機器の異常事象時における能動的な安全設備に代わる受動的な設備の開発に役立てるものである。

3. 研究の方法

高温工学試験研究炉に代表されるような原子炉の下部に一次冷却系配管が位置する場合に配管が破断すると一般的には破断口上部の炉内には密度の小さい気体が、破断口下部には密度の大きい空気とヘリウムの混合気体が存在するため、炉内外が均圧後、直ちに混合気体が浸入する可能性は低い。この場合、炉内流路は逆U字型を構成するが、単純な流路の場合、高温側が並列流路の場合、局所的に自然対流が発生している場合について、実験及び数値解析を行い、黒鉛が酸化する場合についても考察してきた。更には、密度の異なる2成分気体を用いて、全体として逆U字型流路を構成する鉛直矩形流路の一方の流路を加熱冷却し、密度の小さい成分気体の自然対流を発生させ、下部から密度の大きい成分気体が分子拡散により移動する場合において、局所的な自然対流や2成分気体の分子拡散係数が気体の混合過程に及ぼす影響を調べ、自然循環流が発生した後、頂部からヘリウムガスを注入して自然循環流を停止させてから、流路内を一巡する混合気体の自然循環流が再発生するまでの持続時間について報告してきた。ここでは、超高温ガス炉の減圧事故時における炉内への空気浸入挙動をこれまでの研究から気体の混合現象と自然循環流の発生までを考察し、さらに原子炉測部に一次冷却系配管が位置する場合についての実験概要と気体混合現象を考察した結果を報告する。

4. 研究成果

過去の研究から1次元的な逆U字型流路内に空気より密度の小さいヘリウムガスを注入することで空気其自然循環流を制御することができるという結果より、2次元的な逆U字型鉛直矩

形流路を流れる空気の自然循環流に対してヘリウムガスを注入することで制御できるか、および自然循環流の再発生時間について調べることを目的として実験を行った。自然循環流は低温側の混合気体密度の積分値が高温側の密度積分値の最大値より大きくなると発生する。そこで実験装置上部より空気と比較すると約 1/7 の密度であるヘリウムガスを注入することで、高温側流路の密度積分値を小さくし、自然循環流を停止させることが出来るかを検討した。

実験装置は図 3 に示す逆 U 字型鉛直矩形流路実験装置を使用した。実験手順について以下に示す。まず、鉛直矩形流路と貯留容器との間の仕切り板を開放する。その後貯留容器のガス供給ポートから空気を注入する。この時装置上部のサンプリングポートを開放し気体を排出する。実験装置内部が空気で満たされたことを確認後、空気の注入を止める。気体注入後、加熱側鉛直矩形流路を加熱冷却し、両鉛直矩形流路の温度差により流路内に空気の自然循環流が発生する。自然循環流が定常状態に移行したことを確認後、ヘリウムガスを実験装置上部より流路内に注入する。自然循環流が再発生後、実験を終了する。実験条件としてヘリウムガス注入量は、実験装置上部の鉛直矩形流路の容積の 3~10% とし、加熱冷却平板の温度差は 30, 50, 70, 100°C とした。

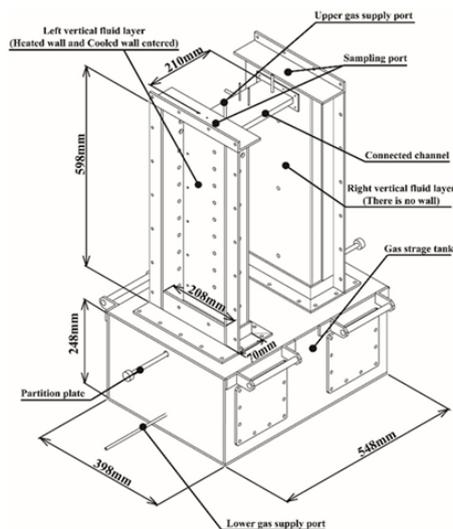


図 3 実験装置

壁間温度差 50°C の加熱側と冷却側の温度変化を図 4, 5 に示す。実験結果では、ヘリウムガス注入後、加熱側鉛直矩形流路内の気体温度は急激に上昇、冷却側鉛直矩形流路内の気体温度は急激に減少する。これはヘリウムガス注入後、流路内を一巡する自然循環流が停止したことで加熱側鉛直矩形流路内では気体が加熱され温度が上昇し、冷却側鉛直矩形流路内では加熱された気体が浸入しなくなったため温度が減少したと考えられる。一定時間経過後、加熱側鉛直矩形流路内の気体温度が急激に減少、冷却側鉛直矩形流路内の気体温度が急激に上昇していることがわかる。これは自然循環流が再発生したことで加熱側鉛直矩形流路内に貯留容器内の加熱されていない気体が浸入し、冷却側鉛直矩形流路内には加熱側鉛直矩形流路内で加熱された気体が浸入したため、このような温度変動が生じたと考えられる。ヘリウムガス注入後の自然循環流再発生メカニズムは以下のように考察できる。まず、両流路の間に温度差が発生すると、密度は温度と反比例の関係にあるので、加熱側流路の密度積分値は、冷却側流路の密度積分値よりも小さくなる。密度差を駆動力とした浮力が発生し自然循環流が発生する。ヘリウムガス注入後、加熱された空気と注入されたヘリウムガス、冷却側流路内の空気の重さがバランスするため、冷却側の密度積分値が軽くなる。その結果、冷却側と加熱側の密度差が小さくなるため自然循環流が停止する。しかし時間の経過に伴い、分子拡散と加熱側鉛直矩形流路の壁間温度差により発生する局所的な自然対流により、空気とヘリウムガスの混合が促進する。その後、冷却側の密度積分値が加熱側の密度積分値を超えると、自然循環流が再発生する。

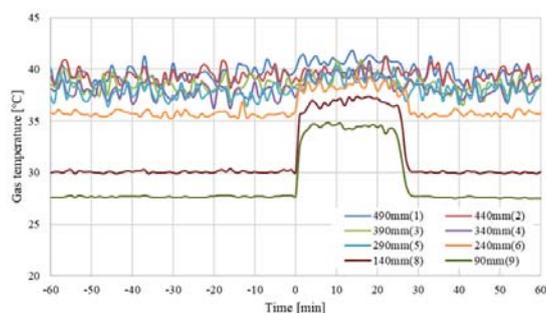


図 4 加熱側流路の気体温度変化

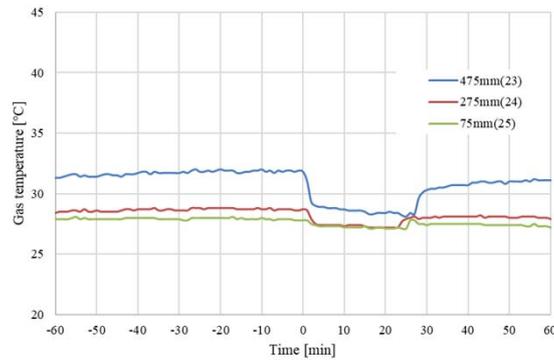


図5 冷却側流路の気体温度変化

図6にヘリウムガス注入量と各温度差における自然循環流の再発生時間をまとめた結果を示す。同じ注入量について比較すると壁間温度差の増加に伴い、自然循環流の再発生時間が短くなっていることがわかる。このことより壁間温度差の増加に伴い、自然循環流の停止に要する最小注入量が増大することが分かった。また、ヘリウムガス注入量が増加するに伴い自然循環流の再発生時間が単調増加することが分かった。

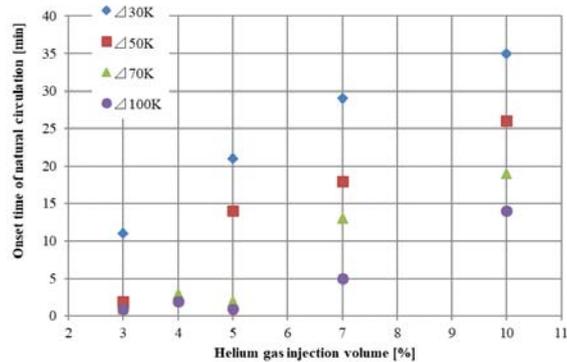


図6 ヘリウムガス注入量と各温度差における自然循環流の再発生時間

同軸二重円筒の実験装置の概略図を図7に示す。実験装置は、同軸二重円筒（外側、内側円筒）と水平二重管で構成した。二重同軸円筒の外側円筒の寸法は、高さ410mm、外径283.4mm、及び内径267.4mmである。内側円筒の寸法は高さ255mm、外径139.8mm、内径129.8mmである。同軸水平二重管の内管は内側円筒下部に接続されており、その寸法は長さ550mm、外径21.7mm、内径17mmである。同軸水平二重管の環状流路は外側円筒に接続されており、その寸法は長さ224mm、外径34mm、内径30mmである。同軸水平二重管の内管と外管にはそれぞれボールバルブを取り付けた。また、4つのカートリッジヒータを内側円筒内に取り付け加熱した。カートリッジヒータの規格は、長さ300mm、外径12.8mm、有効発熱部170mm、定格電圧100V、定格容量100Wである。水冷ジャケットを外側円筒に挿入して冷却した。放熱を防ぐため、内側円筒には高さ200mm、厚さ23.5mmの断熱材を取り付けた。実験装置の上下を蓋で覆い装置を閉じた。気体サンプリングポートとして外径6.35mmのステンレス管を装置各部に取り付けた。温度測定にはK型熱電対を用いた。この熱電対の温度測定誤差は±1.5Kである。熱電対は、外側円筒側面・装置底部蓋・装置上部蓋に設けられたコンプレッション・フィッティングの直径1.2mmの孔を通して挿入した。外側円筒側面から5mmの位置、16.5mmの位置、28mmの位置に各6本の熱電対を取り付けた。実験装置底部の気体温度を測定する為に、装置底部蓋から25mmの位置に6つの熱電対を取り付けた。実験装置上部の気体温度を測定するために、装置底部から410mmの位置に7本の熱電対を取り付けた。カートリッジヒータ付近の気体温度を測定するために、装置下部から310mmの位置に熱電対を取り付けた。冷却水温度測定用の2本の熱電対を水冷ジャケット入り口に取り付けた。カートリッジヒータ温度は内臓の熱電対で測定した。気体濃度の測定には超音波ガス濃度計を用いた。実験装置下部に6点、上部に8点、同軸水平二重管に2点の計16点で測定した。実験装置各部に設けた気体サンプリングポートと超音波ガス濃度計の間にシリコンチューブを接続し、マイクロチューブポンプで気体をサンプリングすることにより濃度を測定した。気体濃度のサンプリング時間遅れは1分である。気体流速の測定にはアネモマスター風速計を用いた。風速計の表示分解能は0.01m/sである。同軸水平二重管の環状流路出入口部に1点、内管出入口部に1点の計2点を測定した。

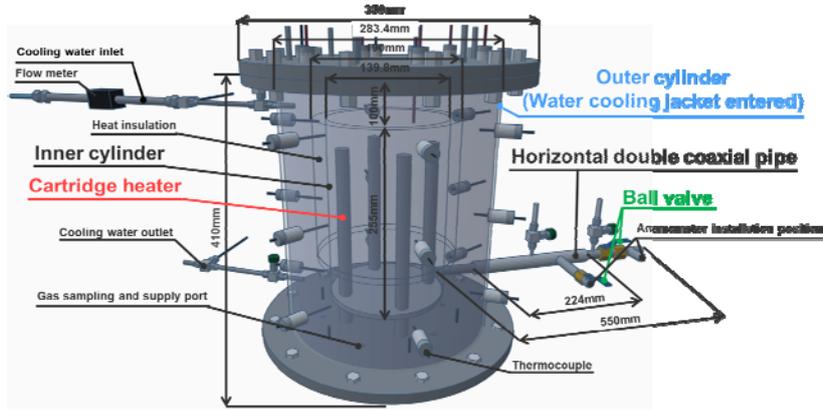


図7 同軸二重円筒実験装置

まず、装置内を真空置換により、ヘリウムガスを大気圧まで充てんする。ヘリウムガスで置換されたことを確認後、カートリッジヒータで内側円筒内を加熱する。同時に外側円筒容器内に挿入された冷却ジャケット内に水道水を流し、外側円筒を冷却する。ヒータ温度の定常状態は $0.1\sim 0.2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ とした。ヒータ温度が定常状態になったことを確認後、水平二重管内管と環状流路に接続されるバルブを同時に開放し、実験を開始する。その後、装置内が空気でおおよそ置換された時点で実験を終了した。実験中は装置内気体温度、気体モル分率、水平二重管出入口部の流速を測定した。装置内の気体濃度と水平二重管出入口部の流速の測定は別々に行った。実験条件は熱入力 36W ($1.22\text{kW}/\text{m}^2$)、 144W ($4.89\text{kW}/\text{m}^2$)、 324W ($11.00\text{kW}/\text{m}^2$)とした。

図8に各熱入力での水平二重管対向部装置下部・上部の空気モル分率変化を示す。全ての条件・測定位置でバルブを開放後、緩やかにモル分率が増加し、その後急激に減少した。これは、バルブ開放後に装置内に空気が浸入し、ヘリウムと空気の安定な密度成層が形成された後、自然循環流が発生し、装置上部に溜まっていたヘリウムが下部へ移動した為だと考えられる。装置上部の方が下部よりもモル分率の減少が遅いのは、自然循環流の流れが装置最上部に関与せず、装置上部のヘリウムは一旦下部へと移動するも、自然循環流は非常に弱い為、装置内環状流路で生じる局所的な自然対流により、再びヘリウムガスが上部に移動した為だと考えられる。その後、モル分率は再び緩やかに上昇し、装置内は空気で満たされた。図12に自然循環流発生時間と熱入力の関係を示す。各熱入力での Gr 数 $\times 10^4$ ・相互拡散係数範囲(装置下部・中間・上部)もグラフ内に示した。熱入力が増大するに従い、 Gr 数と相互拡散係数ともに増大した。熱入力の増大に伴い内側円筒と環状流路の温度差が増大し、自然循環流発生時間が短くなった。

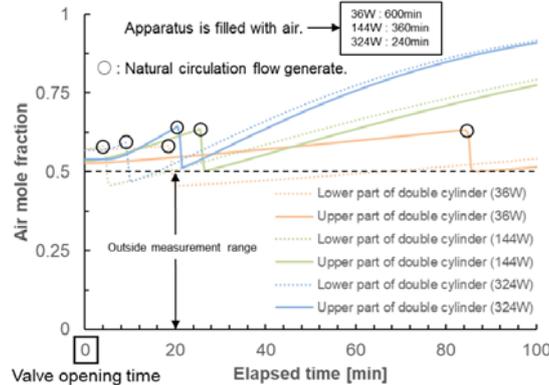


図8 各熱入力での水平二重管対向部装置下部・上部の空気モル分率変化

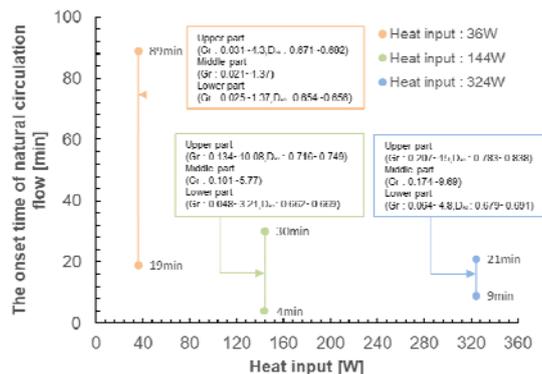


図9 自然循環流発生時間と熱入力の関係

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 4件)

- ① Tetsuaki Takeda, “Experimental and Numerical Analysis of Mixing Process of Two Component Gases in a Vertical Fluid Layer in a VHTR”, Journal of Nuclear Engineering and Radiation Science, APRIL 2019, Vol. 5, DOI: 10.1115/1.4041690. (査読有)
- ② Tomoya Shiga, Yudai Tanaka, and Tetsuaki Takada, “Process of Air Ingress during a Depressurization Accident of GTHTR300”, Science and Technology of Nuclear Installations, Volume 2018, Article ID 6378504, doi.org/10.1155/2018/6378504. (査読有)
- ③ Tetsuaki Takeda, “Study on Air Ingress Processes during A Depressurization Accident of VHTR”, Proceedings of HTR 2018 Warsaw, Poland, October 8-10, 2018, Paper HTR 2018-180. (査読有)
- ④ Tomoya Shiga, Tetsuaki Takeda, “STUDY ON GAS MIXING PROCESS AND NATURAL CIRCULATION FLOW IN STABLE AND UNSTABLE STRATIFIED LAYER”, Proceedings of the Eleventh Korea-Japan Symposium on Nuclear Thermal Hydraulics and Safety Busan, Korea, November 18-21, 2018, Paper Number N11P0021. (査読有)

[学会発表] (計 7件)

- ① 武田哲明, 齋藤直樹, 「超高温ガス炉減圧事故時の空気浸入挙動の研究 (4) 水平二重配管が破断した場合の空気浸入挙動」, 日本原子力学会「2019年春の年会」, 2019年3月21日, 茨城県・茨城大学
- ② 志賀 倫哉, 武田 哲明, 「超高温ガス炉の水平二重管が破断した場合の空気浸入過程」, 日本機械学会第23回動力・エネルギー技術シンポジウム, 2018年6月15日, 山口県・交際ホテル宇部
- ③ Tomoya Shiga, Tetsuaki Takeda, “Study on Gas Mixing Process and Natural Circulation Flow in Stable and Unstable Stratified Layer”, The 11th Korea-Japan symposium on Nuclear Thermal Hydraulics and Safety, Nov.19, 2018, Busan, Korea.
- ④ Tetsuaki Takeda, “Study on Air Ingress Processes during A Depressurization Accident of VHTR”, 9th International Topical Meeting on High Temperature Reactor Technology, Oct.10, 2018, Warsaw, Poland.
- ⑤ 武田哲明, 志賀倫哉, 「超高温ガス炉減圧事故時の空気浸入挙動の研究 (3) 破断位置が自然循環流発生時刻に及ぼす影響」, 日本原子力学会「2018年春の年会」, 2018年3月26日～3月28日, 大阪府・大阪大学.
- ⑥ 武田哲明, 「超高温ガス炉減圧事故時の空気浸入挙動の研究 (2) 自然循環流発生時刻の考察」, 日本原子力学会「2017年秋の大会」, 2017年9月13日～9月15日, 北海道・北海道大学.
- ⑦ 武田哲明, 「超高温ガス炉減圧事故時の空気浸入挙動の研究 (1) 炉内における多成分気体混合現象の考察」, 日本原子力学会「2017年春の年会」, 2017年3月27日～3月29日, 神奈川県・東海大学.

[その他]

ホームページ等

武田研究室 Heat and Mass Transport Laboratory

<http://www.me.yamanashi.ac.jp/lab/takeda/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号 (8桁)：

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。