

令和 2 年 6 月 11 日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H03479

研究課題名(和文)液体水素を用いた配管予冷の革新的高効率化手法の実証実験

研究課題名(英文)Verification of a novel, efficient pipe chilldown method using liquid hydrogen

研究代表者

吹場 活佳(Fukiba, Katsuyoshi)

静岡大学・工学部・准教授

研究者番号：50435814

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,100,000円

研究成果の概要(和文)：液体燃料を使用するロケットの打ち上げ作業において、作業時間およびコストの面で支配的要因となっている「配管予冷」の問題に対し、配管表面に低熱伝導率の被膜を塗布することで沸騰伝熱を促進する技術により予冷時間の短縮と燃料消費量の削減を図った。被膜に開口部を設けるなどの工夫を施すことで予冷時間をさらに短縮することに成功した。また燃料の持つ静電容量を活用した新しい計測技術を用いて、配管予冷時の液体の流動のメカニズムを把握、理解した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

極低温燃料を配管内に流す場合、輸送開始時に配管と流体との温度差による激しい沸騰を抑えるため、少量の燃料を流し配管を冷却する「配管予冷」と呼ばれる操作を行う必要がある。配管予冷には時間がかかるほか、使用した燃料は大気中に排気されるため燃料コストの上昇につながる。本研究では配管表面に被膜を施すことで沸騰伝熱を促進し、予冷時間を大幅に短縮する技術を開発することができた。また新しい計測技術を用いて配管内の沸騰流動メカニズムを把握、理解することができ、今後の開発において流動状態を予測することが可能になった。

研究成果の概要(英文)：This study addressed “pipe chilldown” in the sequences of liquid-propulsion rocket launches, which requires a long time and huge cost. A method to coat the inner surface of pipes with a low-thermal conductive layer was proposed and tested to improve the chilldown process. Some modifications including arrangement of openings were performed to improve the performance of the layer. Additionally, we developed a new observation method for cryogenic fluid using capacitance. The flow dynamics of the two-phase flow during chilldown was revealed using the developed device.

研究分野：航空宇宙工学

キーワード：沸騰熱伝達 極低温流体 液体水素

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

ロケットに用いられる液体水素は沸点が $-250$  と極めて低く、極低温燃料と呼ばれる。近年、極低温燃料の有効利用についての研究が海外を中心に盛んになっている。極低温燃料の有効利用のために特に重要となるのが、燃料を輸送する際に必要となる配管の予冷の高効率化である。燃料輸送開始前の配管はほぼ常温となっている。常温の配管と $-250$  の液体水素との温度差のため、輸送開始時には燃料が激しく沸騰し気化する。これを防ぐために少量の燃料を流し配管を冷却する「配管予冷」と呼ばれる操作を行う必要がある。ロケット打ち上げ当日に必要な作業のうち、最も時間を要するのがこの予冷である。国際宇宙ステーションへの物資の輸送に代表されるような、打ち上げ時間のずれの許容値(ウインドウ)が極めて短いミッションでは、予冷の短期化が大きな利益をもたらす。また、予冷に使用した燃料は大気中に排気されるため、燃料コストの上昇につながる。安全上、射場では燃料貯槽がロケットから離れた位置に配置されるため、長い地上配管を予冷するために多くの燃料を使用しており、打ち上げ費用の増大につながっている。また近年では、ロケットの2段エンジンを燃焼させた後、再び着火する再着火あるいは再々着火といった運用がなされている。エンジンを再度着火させる際、停止したエンジンからの熱の流入により、一度冷却した配管が再度加熱されてしまうため、ここでも予冷が必要となる。宇宙空間での予冷にはロケットの燃料を使用せざるを得ないため、この際のコスト増は地上予冷の場合とは比較にならないほど大きい。

### 2. 研究の目的

本研究では配管予冷の高効率化に向けた取り組みを実施した。配管予冷を高効率化するためには以下の2点が重要である。

(1) 予冷を高効率化するための具体的施策

(2) 極低温燃料による沸騰を伴う伝熱現象の理解

(1)について、背景に示した通りいまだ十分な手法が確立されていない。(2)の沸騰伝熱の理解についても、古くから原子力や冷凍分野などにおける応用を背景に研究がおこなわれている一方、極低温流体については研究が進んでいない。特に液体水素については危険性が高く、沸騰曲線といった基礎的なデータもほとんど取られていない。極低温流体はぬれ性が高く接触角が $0$ に近い、潜熱が小さいなど、特異な性質をもつものが多く、水や冷媒などとは異なる現象が生じる可能性が高い。そこで本研究では上記(1)、(2)に対し以下の項目を実施した。

(1) 「断熱層のパラドックス」を用いた予冷加速手法を確立する。

(2) 現象を理解するために必要な指標の計測方法を確立し、流動様式線図を作成する。

(1)の「断熱層のパラドックス」は物体表面にテフロンなど熱伝導率の低い薄膜を塗布し、沸騰伝熱において現れる膜沸騰と核沸騰という2つの沸騰モードの違いを利用して伝熱を加速する手法である。この手法はプール沸騰と呼ばれる物体を流れのない液体に浸した状態で起こる沸騰でその効果が確認されていたが、その後実用化されることなく現在に至っている。代表者らは過去に独自の手法でテフロンコーティングを施した配管に液体窒素を流し、予冷時間を最大64%削減することに成功した。これは他の研究者(Huら)の手法による削減率(約20%)と比べて非常に大きい削減率である。また(2)についても、代表者らはこれまでに新しい原理を用いたボイド率計などの開発を進めてきた。本研究ではこれらの項目を、最終的に液体水素を用いて実験をすることにより実用化に向け大きく前進することを目標とした。液体水素を用いた実験については、JAXAの所有する能代実験場(秋田県)を利用して安全に実験を実施した。

### 3. 研究の方法

#### (1) 予冷の高効率化

「断熱層のパラドックス」を用いて、予冷時間の短縮と予冷時の使用液量の削減を試みた。まず本研究のカギとなる「断熱層のパラドックス」による予冷時間短縮法について説明する。先述の通り、予冷時の極低温燃料から配管への伝熱は沸騰伝熱である。沸騰伝熱には大きく分けて「膜沸騰」と「核沸騰」の2つのモードが存在する(図1)。膜沸騰は配管と流体との温度差が比較的大きい場合、すなわち予冷開始直後に現れるモードである。膜沸騰では配管付近の燃料は気化した状態で膜を生成しており、熱の伝達は極めて悪い。一方、予冷が進み配管の温度が低下すると核沸騰に遷移し、配管表面から小さな気泡が発生するようになる。膜沸騰から核沸騰への遷移は液体と物体の温度差により決定される。例として液体窒素の場合、配管の温度が約 $150\text{ K}$ 程度まで冷却されると核沸騰に遷移する。

ここで、配管内面に熱伝導率の低い被膜を塗布した状態を考える(図2)。被膜の熱伝導率が低いため、被膜の内部には大きな温度勾配が生成される。その結果、被膜のない場合に比べ、液体に接する面の温度がより液体の温度に近づく。このことが膜沸騰から核沸騰への遷移を早める。核沸騰時の伝熱量は膜沸騰に比べ10倍以上大きいため、結果として予冷時間が短縮される。

過去の研究において、断熱層のパラドックスを用いて予冷時間の削減が可能であることが確認されているものの、さまざまな条件下(流量、配管径、圧力)における効果を立証する必要がある。また、異なる原理を用いて沸騰伝熱を促進する手法として表面に凹凸をつける方法が従来から研究されており、特に気泡核の生成を促すような空隙をもつ表面が有効であることが知られている。本研究では新たに ナノファイバー被膜を用いた方法、開口部を有する PTFE 被膜

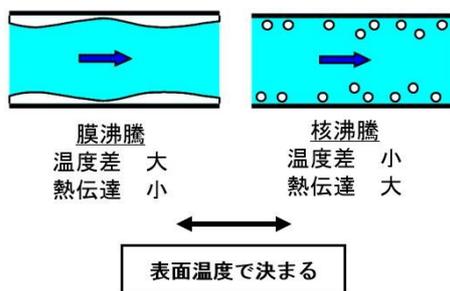


図 1：膜沸騰と核沸騰

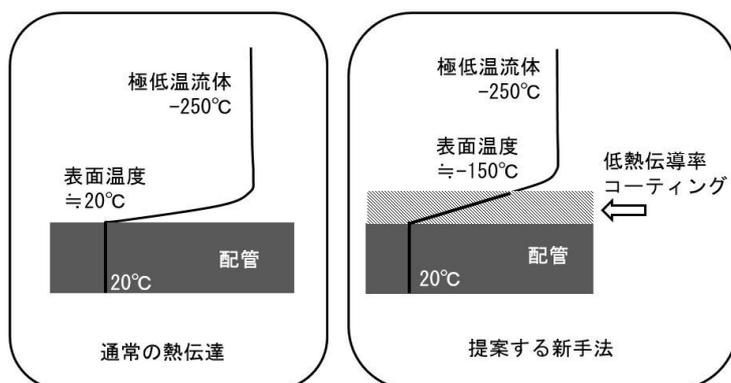


図 2：低熱伝導率の被膜による効果

による方法、および 微細な PTFE 溝を加工する方法を提案し、それぞれについて予冷実験を行った。

## (2)流動実験

気液二相流の実験において、流れを適切に把握するために必要な計測項目として、気相と液相との質量比であるクオリティ、体積比であるボイド率がある。このうちクオリティに関しては、供試配管下流における入熱量を適切に把握することで、出口の気体のエンタルピーより比較的容易に計測することができる。一方でボイド率に関しては現在のところ確立された計測技術がない。当研究グループでは以前より、二相流の持つ静電容量よりボイド率を算出する手法を開発しており、これを用いて液体水素のボイド率の計測を試みる。

## 4. 研究成果

### (1)予冷の高効率化

#### ナノファイバー被膜を用いた方法

冷却面表面にナノファイバーを塗布することにより沸騰伝熱を促進する方法を提案し、プール沸騰実験によりこれを検証した。図 3 にナノファイバーを塗布した銅板を用いたプール沸騰冷却実験装置を示す。厚さ 5 mm、縦横 50 mm の銅板にエレクトロスピンニング法により厚さ数  $\mu\text{m}$  のナノファイバー被膜を塗布した。銅板の周囲をポリスチレン発泡材で断熱し、液体窒素の中に沈め常温から液体窒素温度にまで冷却するのみにかかる時間を測定した。無垢の銅板を冷却する場合と比較し、冷却時間を 1/3.53 に短縮することができた (Fukiba et al, Cryogenics, 101(2019), pp. 75-78)。

#### 開口部を有する PTFE 被膜による方法

低熱伝導率被膜を用いた沸騰伝熱促進では膜沸騰から核沸騰への遷移を促進することで予冷時間を短縮する。一方で被膜自体は熱抵抗となるため、金属面温度が液体の飽和温度に近い領域においては熱流束が低下する。そこで図 4 のように低熱伝導率被膜の一部に開口部を設け、液体の飽和温度近傍ではこの開口部で熱伝達を行うことで予冷時間の更なる短縮を試みた。結果として、液体の飽和温度近傍の熱伝達が狙い通り向上した。さらに、開口部の存在により膜沸騰領域においても熱伝達を向上させる効果があることが分かった。

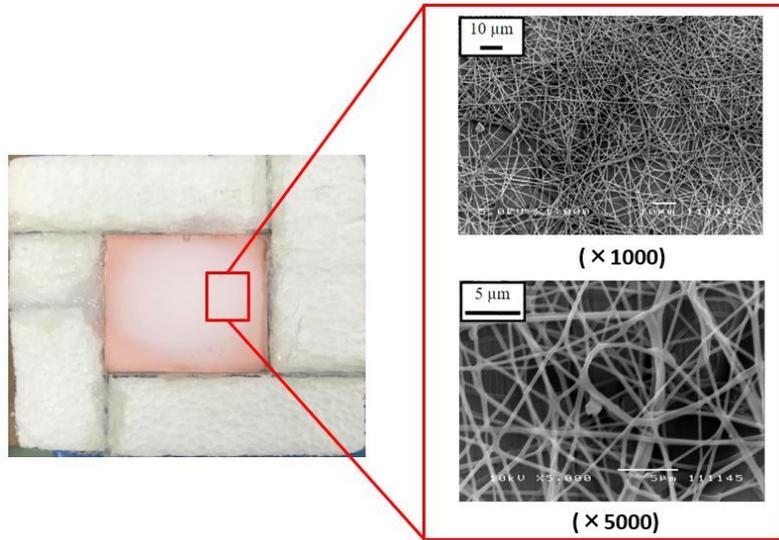


図 3： ナノファイバーを塗布した銅板によるプール沸騰冷却実験装置

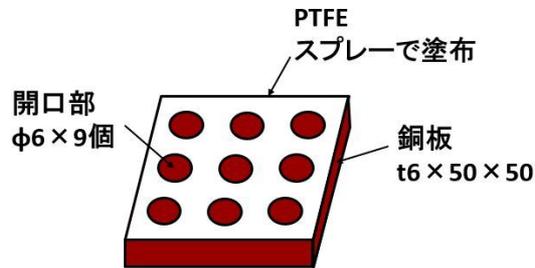
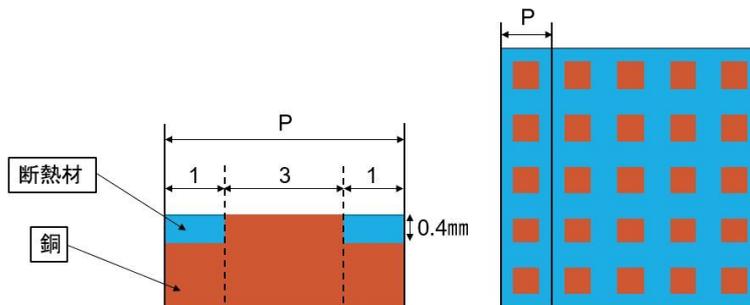


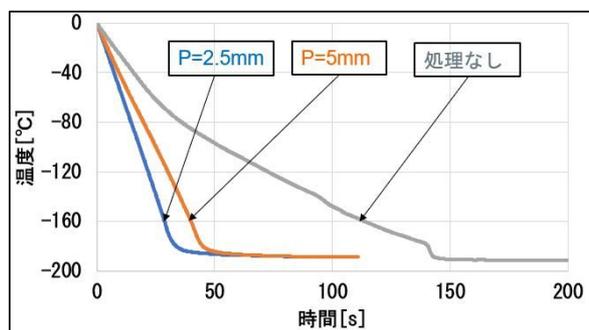
図 4： 開口部を有する PTFE 被膜を用いたプール沸騰実験装置

微細な PTFE 溝を加工する方法

上記のデータを検証した結果、一定の間隔で PTFE 被膜を設けることで液体を冷却面近傍に供給することが重要であることがわかってきた。そこで図 5(a)に示すような冷却面を作成した。銅の表面に放電加工で幅 2 mm の溝を加工し、溝に PTFE シーラントを充填した。PTFE シー



a) プール沸騰実験装置



b) 冷却実験における温度変化

図 5： 微細な PTFE 溝を加工した銅板を用いた実験装置とその結果

ラントは熱伝導率が低く断熱材として作用し，表面は液体の温度に近くなる．結果としてシーラントの部分より銅が露出した部分に液体が供給され，冷却が促進される．図 5(b)に冷却実験の結果を示す．溝と溝の間隔を適切に設定することで飽和温度までの冷却時間を約 1/3.6 に短縮することに成功した．

## (2)流動実験

上で述べた通り，流動実験による現象の理解ではボイド率の計測が鍵となる．本研究ではまず，ボイド率計測の精度を向上させるべく，静電容量を用いたボイド率計測手法の改善を試みた．図 6 にあるように，電極の形状を非対称にすることで計測精度の向上に成功した．

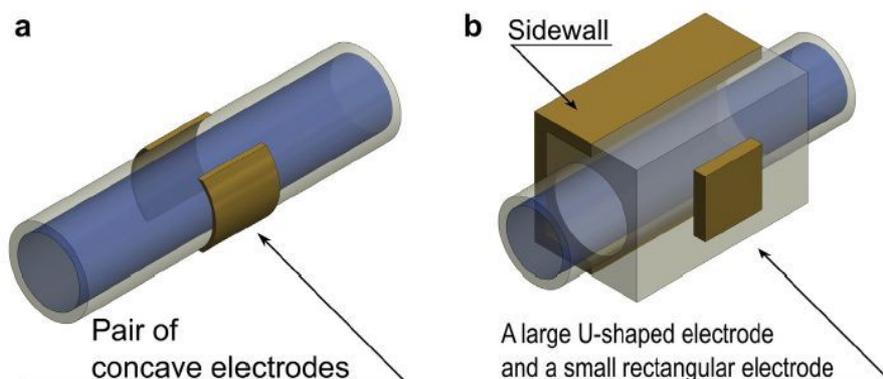


図 6：対称型電極（左）と非対称型電極（右）  
( Sakamoto et al., Int. J. Hydrogen Energy 44(2019) pp. 18483-18495. )

次に，改良されたボイド率計を用いて水素沸騰流の観測を行った．内径 15 mm の配管内を用い，質量流量 50-110 kg/s，圧力 250-300 kPa の条件下で実験を行った．ボイド率計の上流でヒータにより 0-12 kW/m<sup>2</sup> の熱を加えて様々な沸騰状態を作り出した．得られたデータを用いてクオリティとボイド率の関係を求め，過去に提案されたいくつかの理論式と比較した．結果として，クオリティとボイド率の関係は Steiner らにより提案されたモデルによく一致することが分かった．さらに実クオリティと熱平衡クオリティを関係づけるモデルとして，Sekoguchi らによるモデルが実験結果と一致した．( Satamoto et al, Int. J. Hydrogen Energy 44(2019), pp. 18483-18495. )

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 Fukiba Katsuyoshi, Tokawa Satoru, Kawashima Hiroki, Adachi Hiroki	4. 巻 101
2. 論文標題 Heat transfer enhancement in chilldown process with electrospun nanofiber coating	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Cryogenics	6. 最初と最後の頁 75 ~ 78
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） <a href="https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2019.06.004">https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2019.06.004</a>	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 Sakamoto Yuki, Kobayashi Hiroaki, Naruo Yoshihiro, Takesaki Yuichiro, Nakajima Yo, Furuichi Atsuhiko, Tsujimura Hiroki, Kabayama Koki, Sato Tetsuya	4. 巻 44
2. 論文標題 Investigation of the void fraction-quality correlations for two-phase hydrogen flow based on the capacitive void fraction measurement	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 International Journal of Hydrogen Energy	6. 最初と最後の頁 18483 ~ 18495
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） <a href="https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.05.066">https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.05.066</a>	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 箕手一眞, 坂本勇樹, 多根翔平, 中島曜, 古市敦大, 樺山昂生, 辻村光樹, 吉田光希, 小林弘明, 佐藤哲也	4. 巻 18
2. 論文標題 均質化機構によるスリップ比モデルを用いたクオリティ計測手法の開発	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 航空宇宙技術	6. 最初と最後の頁 109-118
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） <a href="https://doi.org/10.2322/astj.JSASS-D-18-00006">https://doi.org/10.2322/astj.JSASS-D-18-00006</a>	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21件（うち招待講演 0件／うち国際学会 6件）

1. 発表者名 足立大季, 吹場活佳, 佐藤哲也
2. 発表標題 開口部のあるフッ素樹脂コーティングを用いた沸騰伝熱の促進による予冷の高速化
3. 学会等名 令和元年度宇宙輸送シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 足立大季, 吹場活佳, 佐藤哲也
2. 発表標題 開口部のあるフッ素樹脂皮膜を用いた液体窒素プール沸騰伝熱の改善
3. 学会等名 第63回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Sakamoto, Y., Kobayashi, H., Naruo, Y., Takesaki Y., Nakajima Y., Tsujimura H., Kabayama K., Sato T.
2. 発表標題 Experimental investigation of flow regime transition for boiling hydrogen flow in horizontal pipes
3. 学会等名 Aerospace Europe Confernece -AEC2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Sakamoto, Y., Kobayashi, H., Naruo, Y., Takesaki Y., Nakajima Y., Tsujimura H., Kabayama K., Sato T.
2. 発表標題 Experimental investigation of heat transfer characteristics for boiling hydrogen flow in horizontal circular pipes
3. 学会等名 10th ACASC/2nd Asian-ICMC/CSSJ Joint Conference (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 吹場活佳, 小野貴良, 川島紘毅, 足立大季, 十川悟, 佐藤哲也, 小林 弘明
2. 発表標題 コーティングによる極低温燃料を用いた予冷の高効率化について
3. 学会等名 第59回航空原動機・宇宙推進講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小野貴良, 吹場活佳, 小林弘明, 川島紘毅, 足立大季
2. 発表標題 液体水素のプール沸騰特性とその促進について
3. 学会等名 平成30年度宇宙輸送シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 川島紘毅, 吹場活佳, 小野貴良, 十川悟
2. 発表標題 エレクトロスピニング法により生成したナノファイバー被膜による予冷時間短縮の効果
3. 学会等名 平成30年度宇宙輸送シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小野貴良, 吹場活佳, 川島弘毅, 小林弘明
2. 発表標題 液体水素を用いた沸騰伝熱の高効率化を目的とした基礎実験
3. 学会等名 第62回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 川島紘毅, 吹場活佳, 小野貴良, 十川悟
2. 発表標題 ナノファイバー被膜を用いた沸騰伝熱の促進による予冷の高速化
3. 学会等名 第62回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2018年

1 . 発表者名 Sakamoto, Y., Kobayashi, H., Naruo, Y., Takesaki, Y., Tane, S., Minote, K., Nakajima, Y., Furuichi, A., Tsujimura, H, Kabayama, K. and Sato, T.
2 . 発表標題 Thermal fluid characteristics of boiling hydrogen in a horizontal circular pipe flow
3 . 学会等名 15th International Space Conference of Pacific-basin Societies ( 国際学会 )
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Sakamoto, Y., Sato, T., Kobayashi, H., Kinefuchi, K., Sugimori, D., Higashi, K. and Nagao, N.
2 . 発表標題 Development of a Capacitive Void Fraction Sensor to Mount on a Space Propulsion System for a Ground Firing Test
3 . 学会等名 Space Propulsion 2018 ( 国際学会 )
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Nakajima, Y., Sakamoto, Y., Tane, S., K., Minote, A., Furuichi, Kabayama, K., Tsujimura, H., Yoshida, K.
2 . 発表標題 Optimization Design of the Capacitance Void Fraction Sensor adopting Multi Asymmetric Electrodes for Two Phase flow
3 . 学会等名 The 9th Asian Joint Conference on Propulsion and Power ( 国際学会 )
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Yuki Sakamoto, Hiroaki Kobayashi, Shohei Tane, Kazuma Minote, Yo Nakajima, Atsuhiko Furuichi, Hiroki Tsujimura, Koki Kabayama, Tetsuya Sato
2 . 発表標題 Investigation of flow boiling phenomena for hydrogen in a horizontal tube
3 . 学会等名 The 10th International Conference on Boiling & Condensation Heat Transfer ( 国際学会 )
4 . 発表年 2017年

1. 発表者名 小野 貴良、堤 夏樹、吹場 活佳、川島 紘毅
2. 発表標題 金属表面へのコーティングが極低温流体による予冷に及ぼす影響について
3. 学会等名 平成29年度宇宙輸送シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 川島 紘毅、吹場 活佳、小野 貴良、十川 悟
2. 発表標題 アルミニウム陽極酸化皮膜が予冷時間へ及ぼす影響
3. 学会等名 平成29年度宇宙輸送シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 古市敦大、坂本勇樹、多根翔平、箕手一眞、中島曜、樺山昂生、辻村光樹、吉田光希、佐藤哲也
2. 発表標題 MPS法を用いた気液二相流シミュレータの開発
3. 学会等名 平成29年度宇宙輸送シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 樺山昂生、箕手一眞、吉田光希、坂本勇樹、多根翔平、中島曜、小林弘明、佐藤哲也
2. 発表標題 深層学習による気液二相流の流動様式判別に関する研究
3. 学会等名 平成29年度宇宙輸送シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 辻村光樹, 窪田健一, 佐藤哲也, 高橋孝, 村上桂一
2. 発表標題 MPS 法を用いた気流による液滴変形のモデル化
3. 学会等名 第31回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 坂本勇樹, 箕手一眞, 多根翔平, 佐藤哲也, 小林弘明, Laura PEVERONI, Rosaria VETRANO
2. 発表標題 極低温流体用静電容量型ボイド率計の開発
3. 学会等名 平成29年度日本冷凍空調学会年次大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 古市敦大, 佐藤哲也, 坂本勇樹, 箕手一眞, 多根翔平, 中島曜, 樺山昂生, 辻村光樹, 吉田光希
2. 発表標題 粒子法を用いた配管内流れの数値解析
3. 学会等名 日本機械学会 第30回計算力学講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 中島 曜 , 坂本 勇樹 , 佐藤 哲也 , 小林 弘明 , 多根 翔平 , 箕手 一眞 , 古市 敦大 , 樺山 昂生 , 辻村 光樹
2. 発表標題 非対称螺旋型極板を用いた静電容量式ボイド率計の精度検証
3. 学会等名 日本機械学会 2017年度年次大会
4. 発表年 2017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	佐藤 哲也  (Sato Tetsuya)  (80249937)	早稲田大学・理工学術院・教授   (32689)	
研究 協力者	小林 弘明  (Kobayashi Hiroaki)  (50353420)	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・ 特任准教授   (82645)	