

令和 5 年 5 月 31 日現在

機関番号：14501

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K14963

研究課題名（和文）急減圧時における船用液体水素タンク内部の沸騰現象の解明

研究課題名（英文）Study on boiling phenomenon inside liquid hydrogen tank under rapid depressurization

研究代表者

前川 一真（Maekawa, Kazuma）

神戸大学・海事科学研究科・助教

研究者番号：20760664

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、液体水素を大量に海上輸送するための基盤技術の提供を目指して、船用液体水素タンク急減圧時におけるタンク内部の沸騰現象について解明することを目的とし、小型液体水素タンクを用いた急減圧実験を行った。液体水素による急減圧実験では、液体状態、初期充填率、減圧速度が液体水素の蒸発特性に与える影響を明らかにした。また、数値解析ソフトSTAR-CCM+を用いて、液体水素タンク内部の蒸発モデルを構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

我が国の水素エネルギー社会実現のためには、海外から水素を液体水素の形で安価に大量輸入する必要がある。液体水素を海上輸送する際は、蓄圧した状態で輸送される。蓄圧状態の時に、真空断熱が破壊され、タンク内圧が急激に上昇した場合、安全弁・破裂板の作動によってタンクは急減圧される。この急減圧に伴う沸騰現象を知ることが、輸送技術およびタンク・配管の設計をする上で非常に重要である。液体水素急減圧に伴う過渡的な沸騰現象のメカニズムの詳細は未だ明らかにされていない。本研究により、液体水素急減圧時における気液相転移現象を解明するとともに、液体水素を安全に輸送するための基盤技術に貢献することができる。

研究成果の概要（英文）：In this study, we aim to provide basic technology for the marine transportation of large amount of liquid hydrogen. To clarify the boiling phenomenon inside liquid hydrogen tank for ship under rapid depressurization, we performed the rapid depressurization test using small liquid hydrogen tank. In the rapid depressurization test, we clarified the effects of liquid condition, filling ratio and depressurization speed on evaporation characteristics of liquid hydrogen. Moreover, we developed the evaporation model inside liquid hydrogen tank using the simulation software STAR-CCM+.

研究分野：低温工学

キーワード：液体水素 減圧沸騰 数値解析 船用液体水素タンク 海上輸送 水素 気液相転移現象 熱流動

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、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

2017年12月に決定された「水素基本戦略」で、我が国は世界に先駆けて究極のカーボンフリー社会である水素エネルギー社会を実現すべく、水素の生産から利用までの技術開発を加速し始めている。今、オーストラリアにある未利用の褐炭を利用し、現地で水素を製造・液化し、高密度・高純度の極低温液体である液体水素(LH₂:沸点約20 K)の形で、船舶によって安価で大量に神戸空港島へ海上輸送する計画が進んでいる。

これまでに行った2000 L液体水素タンクのトラック公道走行試験、世界初となる練習船深江丸を用いた海上輸送実験を通じて、極低温液体は絶えず外部からの侵入熱等にさらされることから、蒸発ガスを閉じ込めて蓄圧状態で安全に輸送するためには、液体水素タンク内部の温度、圧力、液面揺動の挙動を正確に把握することが重要であることが分かった。加えて、安全性の観点から、液体水素タンクの真空断熱が万が一破壊され、安全弁・破裂板が作動したときの、液体水素タンク内部の減圧沸騰に伴う熱流動挙動を把握することも重要であるという着想に至った。また、液体水素海上輸送実験等において、予備的に行った手動の急減圧試験の中で、光学クライオスタット内部が減圧開始とともに、ミストで覆われ、その後激しい沸騰が起こる現象が目視で観測された。この急減圧に伴う液体水素の沸騰現象を詳細に明らかにする必要があると考えた。

この急減圧に伴う沸騰現象を知ることは、液体水素海上安全輸送技術およびタンク・放出ガス配管の設計をする上で非常に重要であるという着想に至った。

2. 研究の目的

2018年10月に開催された水素閣僚会議で「東京宣言」が発表され、国際的な水素社会実現に向けた取り組みが加速し始めている。本研究は、高密度・高純度の極低温液体である液体水素(LH₂:沸点約20 K)に着目し、我が国に船舶によって安価で大量に海上輸送するための基盤技術の確立を目指している。

本研究の目的は、蓄圧状態で液体水素を海上輸送した際、真空断熱の破壊等により、タンク内圧が急激に昇圧し、安全弁・破裂板が作動した場合の、船用液体水素タンク急減圧時におけるタンク内部の沸騰現象(気液相転移現象)の解明である。

3. 研究の方法

本研究の目的は、液体水素タンク急減圧に伴う過渡的な沸騰現象を、初期の液体状態、初期充填率、減圧速度をパラメータとし、液体水素タンク内部の減圧開始から沸騰が終わるまでの現象を高速度カメラによって詳細に観測する、急減圧に伴う沸騰現象が液体水素タンク内部の温度、圧力、液面変化等に及ぼす影響を実験的に明らかにする、数値解析による液体水素タンク内部の蒸発モデルを構築することである。予備的な研究を含めて、主な研究方法は以下のとおりである。

(1) 急減圧時における液体水素タンク内部の沸騰現象の解明

液体水素タンク急減圧実験システムの構築

初年度に、液体水素タンク急減圧実験システムの構築を行った。実験システムを図1に示す。実験システムの構築では、まず、光学観測窓付きクライオスタット(小型液体水素タンク:約20 L)内部の温度を測定するために、4 Kから室温まで測定が可能なカーボンセラミックセンサー(CCS)の校正試験を行った。その後、クライオスタットの液面計測用の500 mm外部加熱型超伝導 MgB₂液面センサーを固定している支柱に、100 mm間隔で6個のCCSを取り付けた。続いて、放出ガスラインに流量調整弁、電磁弁、熱交換器、流量計、熱電対温度計を取り付け、高速度カメラおよび光学観測用カメラによって光学的にクライオスタットの液体水素槽を観測しながら、液体窒素による予備実験を行った。液体窒素による予備実験によって、校正した温度計、流量計等の作動を確認した。

液体窒素による急減圧予備実験

液体窒素による急減圧予備実験では、クライオスタットの設計圧力よりやや低い0.4 MPaGまで液体窒素の蒸発ガスによって蓄圧し、ガスの漏えいがないことを確認した。その後、急減圧実験を行い、各種計測データが正常に取れていることを確認した。

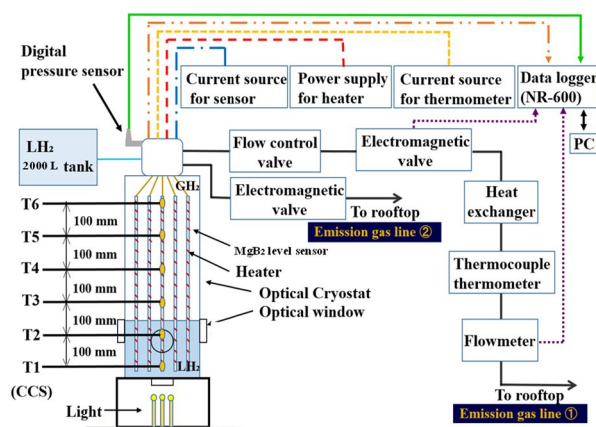


図1 実験システム

(2) 液体水素による急減圧実験

液体水素の急減圧実験では、(1)で構築した液体水素タンク急減圧実験システムを用いて、液体水素による急減圧実験を行った。実験条件として、初期の液体状態、初期充填率、減圧速度をパラメータとし、初期の液体状態は、飽和と成層の2通り行う。液体の温度が均一な飽和状態は、クライオスタート

Stratification(成層)				Saturation(飽和)			
Test#	Filling ratio [%]	Depress. speed [Valve rotation]	Setting pressure [MPaG]	Test#	Filling ratio [%]	Depress. speed [Valve rotation]	Setting pressure [MPaG]
run1	73	High [10 rotation]	0.4	run9	75	High [10 rotation]	0.4
run2	50			run10	50		
run3	25			run11	25		
run4	10			run12	10		
run5	75	Middle [5 rotation]		run13	75	Middle [5 rotation]	
run6	50			run14	50		
run7	25			run15	25		
run8	10			run16	10		

図2 実験条件

の液体水素槽に沈めてあるヒーター(マンガン線)によって加熱し、温度分布のある成層状態は、光学観測窓からライトで容器内部を照射し加熱することで作り出した。初期圧力は、クライオスタートの設計圧力よりやや低い0.4 MPaGで行った。初期充填率は、75%、50%、25%、10%で行った。減圧速度は、ニードル弁付き流量調節弁の開度によって高速・中速の2通り行った。図2に実験条件をまとめたものを示す。実験時には、高速度カメラと光学観測用カメラの2種類で、液体水素槽内部を観測した。

(3) 数値解析ソフトを用いた急減圧時における液体水素タンク内部熱流体解析

数値解析では、実験で用いた小型液体水素タンクを解析対象として、数値解析ソフト STAR-CCM+を用いて、蒸発モデルの構築を行った。特に、長時間の熱流体解析を行うために、計算負荷の低減を目指し、最適なメッシュ形状および計算条件を調べた。さらに、実験値と比較を行い、実験を再現するための解析モデルの構築を行った。ここでは、蒸発量に大きく影響するアコモデーション係数の最適化や最適な壁面熱流束を調べた。

4. 研究成果

本研究で得られた成果を以下に示す。

(1) 液体水素による急減圧実験(蒸発量): 本実験で蒸発量は、計測された全体の蒸発ガス流量から自然蒸発量を差し引くことで、沸騰による蒸発のみとしている。図3、図4に成層状態と飽和状態の蒸発量の結果を示す。

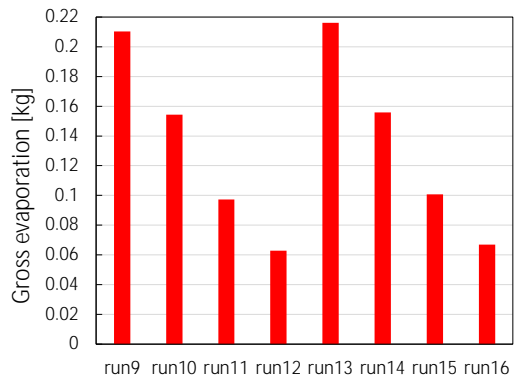
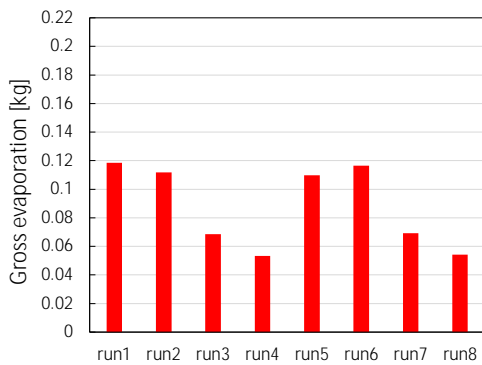


図3 成層状態(自然入熱)における蒸発量の比較

図4 飽和状態(ヒーター加熱)における蒸発量の比較

成層と飽和の比較: 図3、図4より、液体状態の違いによる蒸発量の差に着目すると、全体的にヒーター加熱の方が蒸発量は多かった。これは液体部の温度分布に原因があると考えられる。すなわち、ヒーター加熱では、液全体が飽和温度に達しているのに対し、自然入熱では液体下部がサブクール状態で飽和温度に達していない。そのため、ヒーター加熱の方が減圧前のエンタルピーが大きいため蒸発量が多くなったと考えられる。

初期充填率の違い: 図3、図4より、初期充填率の違いによる蒸発量の差に着目すると、充填率が高い方が蒸発量は多かった。これも液体状態の違い同様に、加圧前の容器内のエンタルピーは充填率が高い方が大きいため蒸発量が多くなったと考えられる。

減圧速度の違い: 図3、図4より、減圧速度の違いによる蒸発量の差に着目すると自然入熱、ヒーター加熱共に、減圧速度の遅い方が蒸発量は多くなる傾向が見られた。しかし、これは誤差程度の違いであると考えられる。今回の実験条件では、蒸発量の大きな違いが見られなかったため、

より減圧速度を遅くした実験条件を設けて比較する必要がある。

(2) 液体水素による急減圧実験 (温度・圧力変化)

液体状態の違いによる温度・圧力変化：図5、図6に液体状態の違いによる温度・圧力変化の一例を示す。成層状態・飽和状態ともに減圧開始と同時に圧力は急減少し、その後、緩やかに下降した。この急減少から緩やかに下降する過程で、圧力がジャンプしている現象が観測された。

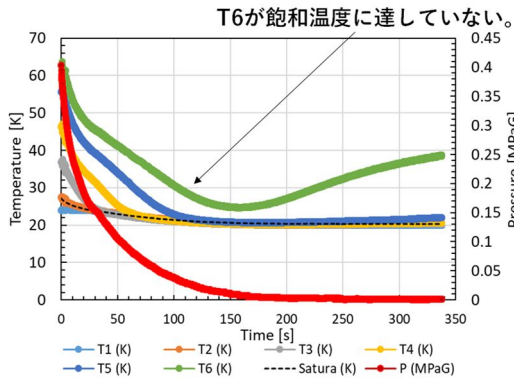


図5 run3における温度・圧力変化 (成層・初期充填率 25%・10 回転)

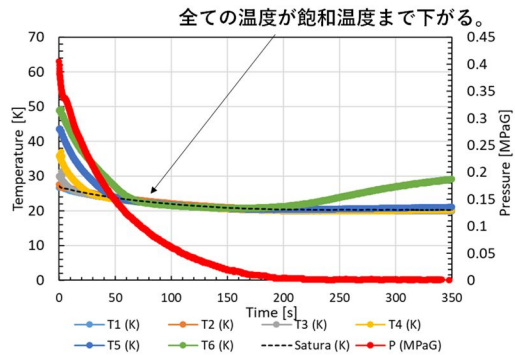


図6 run11における温度・圧力変化 (飽和・初期充填率 25%・10 回転)

これは、高速度カメラでの観測から急激な沸騰が開始する時刻と一致していることが明らかになった。減圧開始から圧力がジャンプするまでの時刻は、成層状態と飽和状態では成層状態の方が遅かった。

減圧速度による違いによる温度・圧力変化：図7、図8に結果の一例を示す。減圧速度が遅いと圧力ジャンプも遅くなることがわかった。

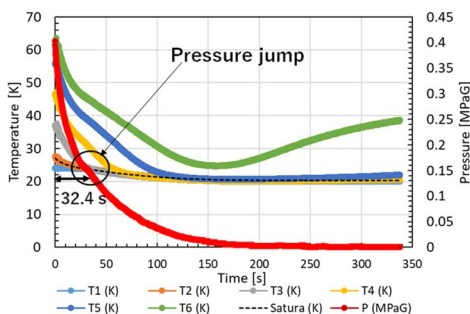


図7 run3における温度・圧力変化 (成層・初期充填率 25%・10 回転)

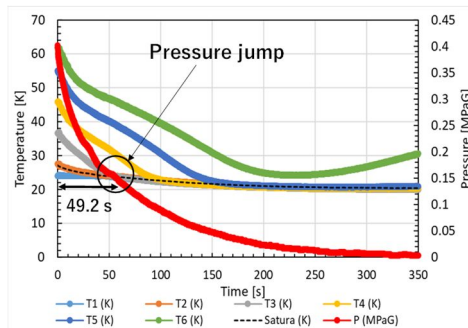


図8 run7における温度・圧力変化 (成層・初期充填率 25%・5 回転)

初期充填率による違いによる温度・圧力変化：結果の一例を図9、図10に示す。初期充填率の違いでみると、初期充填率が高いほど激しい沸騰が起こるまでの時間が短い傾向にあった。しかし、初期充填率 10%ではこの圧力ジャンプは確認されなかった。

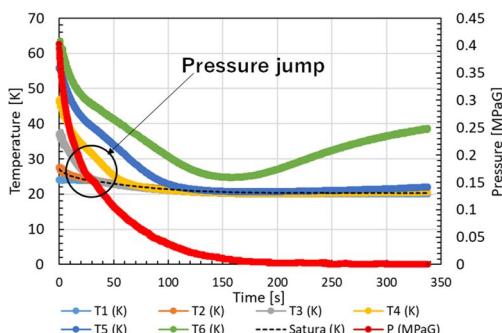


図9 run3における温度・圧力変化 (成層・初期充填率 25%・10 回転)

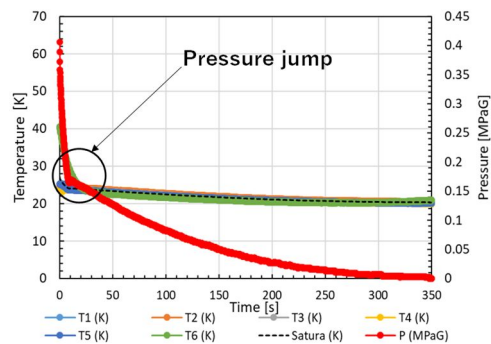


図10 run1における温度・圧力変化 (成層・初期充填率 73%・10 回転)

(3) 数値解析ソフト STAR-CCM+を用いた蒸発モデルの構築：本研究では、液体水素タンク内部の熱流体解析を行うために、飽和点付近における気液間の質量輸送率の式である Schrage の式を、蒸発・凝縮現象のモデリングとして、気液界面に使用した。実験結果により近い解析結果を得るために、アコモデーション係数を 0.00001、0.0001、0.001、0.01 と設定し、実験値の再現性を調べた。本解析では、図 11 に示すトリムメッシュを使用し、計算負荷を低減することで、より長時間の解析が可能となった。

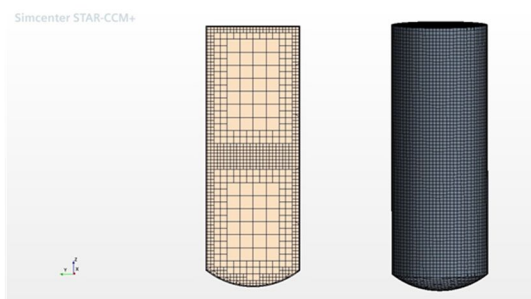


図 11 メッシュ図

図 12 に、アコモデーション係数を 0.00001 ~ 0.01 まで試した際の解析結果を示す。比較の結果、アコモデーション係数 = 0.00001 の時最も再現性が高いと期待できることが分かった。

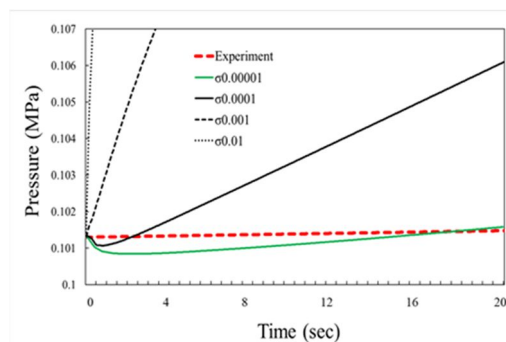


図 12 アコモデーション係数 による圧力上昇の時間変化の比較

図 13、図 14 に解析結果の一例を示す。壁面熱流束を 0.15 W/m²、1.5 W/m²、2.95 W/m² の 3 パターンで比較した結果、壁面熱流束 1.5 W/m² において物理時間 600 s 時点までは圧力および圧力上昇率に関して再現性が高いことが分かった。

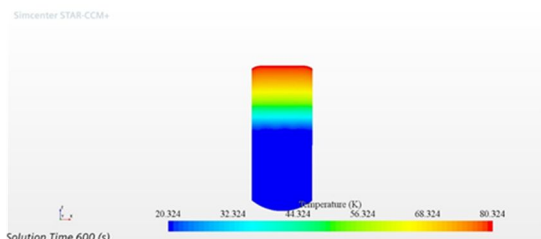


図 13 物理時間 600 s における温度コンター図(1.5 W/m²)

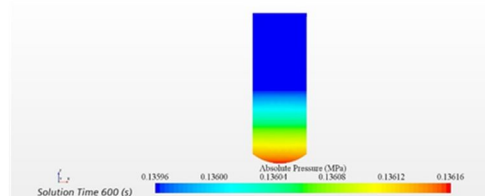


図 14 物理時間 600 s における圧力コンター図(1.5 W/m²)

本研究により、液体水素タンクの蒸発モデルの構築の目処を立てることが出来た。今後は、さらに長時間の解析と実条件に近い入熱条件での解析を行っていく予定である。

本研究は、我が国の水素エネルギー社会早期実現を目指して、液体水素の海上輸送基盤技術の開発を行うものであり、本研究がさらに発展することで、世界規模での水素エネルギーの普及に大きく貢献することができる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 福本祥一、高田芳宏、武田 実、前川一真、熊倉浩明	4. 巻 57
2. 論文標題 液体水素液面センサー用長尺 MgB ₂ 線材の作製とその評価	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 低温工学	6. 最初と最後の頁 39-45
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2221/jcsj.57.39	査読の有無 有
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18件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 松田竜之介、前川一真、武田 実
2. 発表標題 液体水素容器内部の蓄圧状態に関する数値シミュレーション
3. 学会等名 2023年第70回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 山根直人、武田 実、前川一真
2. 発表標題 小型冷凍機を用いた水素液化に関する基礎研究
3. 学会等名 2023年第70回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 佐藤 更、杉原弥悠加、武田 実、前川一真
2. 発表標題 液体水素用流量計開発のための低温下におけるGFRP管の力学的特性研究
3. 学会等名 第104回2022年度秋季低温工学・超電導学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 真鍋航輝、米満侑作、松田竜之介、幡井翔悟、前川一真、武田 実
2. 発表標題 横振動下における液体水素の熱流動特性に関する研究
3. 学会等名 第92回(令和4年度)マリンエンジニアリング学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 米満侑作、真鍋航輝、松田竜之介、幡井翔悟、前川一真、武田 実
2. 発表標題 急加圧下における液体水素の温度・圧力・液面測定
3. 学会等名 第92回(令和4年度)マリンエンジニアリング学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 池北智亮、武田 実、前川一真
2. 発表標題 横振動下における極低温液体の流体シミュレーション
3. 学会等名 第103回2022年度春季低温工学・超電導学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Sara Sato, Minoru Takeda, Kazuma Maekawa
2. 発表標題 Measurement of apparent strain of foil strain gauge at low temperature
3. 学会等名 ICEC28-ICMC 2022(国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 前川一真 , 岩佐太陽 , 知念健太 , 武田 実
2. 発表標題 海上輸送時における液体水素タンクを対象とした熱流体解析
3. 学会等名 低温工学・超電導学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 前川一真 , 中山郁夢 , 永廣 衛 , 武田 実
2. 発表標題 加圧液体水素の減圧時における蒸発特性に関する研究
3. 学会等名 低温工学・超電導学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 知念健太 , 前川一真 , 岩佐太陽 , 武田 実
2. 発表標題 極低温液体の貯蔵・輸送に関する数値シミュレーション
3. 学会等名 低温工学・超電導学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐藤 更 , 武田 実 , 前川一真
2. 発表標題 液体水素用流量計開発のための低温用箔ひずみゲージの温度特性
3. 学会等名 低温工学・超電導学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中山郁夢, 赤松慧亮, 松田竜之介, 永廣 衛, 岩佐太陽, 知念健太, 武田 実, 前川一真, 熊倉浩明
2. 発表標題 減圧時における加圧液体水素の観測
3. 学会等名 低温工学・超電導学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 北田一輝, 武田 実, 前川一真
2. 発表標題 横振動下における極低温液体の温度・圧力・蒸発量測定
3. 学会等名 低温工学・超電導学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 岩佐太陽, 前川一真, 知念健太, 武田 実
2. 発表標題 液体水素の海上輸送時における容器内部の熱流動特性の計測と数値解析
3. 学会等名 日本マリンエンジニアリング学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 知念健太, 前川一真, 武田 実, 岩佐太陽
2. 発表標題 液体水素の貯蔵・輸送に関する数値シミュレーション
3. 学会等名 日本マリンエンジニアリング学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 福本祥一, 高田芳宏, 荘林純一, 山本博和, 武田 実, 前川一真, 熊倉浩明
2. 発表標題 液体水素用外部加熱型MgB2長尺液面センサーの研究開発
3. 学会等名 低温工学・超電導学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 永廣 衛, 中山郁夢, 岩佐太陽, 松田竜之介, 武田 実, 前川一真, 高橋和彦
2. 発表標題 液体水素タンク内部圧力の時間変化に関する研究
3. 学会等名 低温工学・超電導学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐藤 更, 武田 実, 前川一真
2. 発表標題 低温下におけるGFRP管内圧力変化に伴うひずみの測定
3. 学会等名 低温工学・超電導学会
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
---------	---------