Kobe University Repository : Kernel

PDF issue: 2025-07-06

水素社会の実現に向けた液化水素の大量輸送貯蔵技術に関する研究

猪股，昭彦

(Degree)
博士（工学）
(Date of Degree)
2019-03-25
(Resource Type)
doctoral thesis
(Report Number)
甲第7533号
(URL)
https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1007533

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。

（別紙様式 3）

論文内容の要旨

氏　　名　　猪股　昭彦

専　　攻　　海事科学専攻

論文題目（外国語の場合は，その和訳を併記すること。）

水素社会の実現に向けた液化水素の大量輸送貯蔵技術に関する研究

指導教員　　武田　実　教授

（注）2,000 字～4,000 字でまとめること。

（氏名：　猪股　昭彦　　NO. 1　）

世界的に深刻化している温暖化問題に対し、先進国、途上国ともに低炭素から脱炭素に向けた取り組みを本格的に開始している。日本政府も 2030 年度において CO_2 排出量を 26%減（2013 年度比）とすることを掲げている。IMO（国際海事機関）においても、温暖化ガス削減戦略を採択しており、2050 年までに GHG 排出量を半減させるとしている。

水素エネルギーは、このような課題を解決する有望な手段として、その利用が注目されている。水素は燃焼や燃料電池として使用しても水のみを発生し、温暖化ガスである CO_2 を発生しない。エネルギー利用には大量の水素が必要となるが、日本では水素を製造するために必要となる再生可能エネルギーや二酸化炭素の貯留等の環境に恵まれていない。このような地域が水素社会に適応するためには、海外で製造した安価な水素を液化して国際間を輸送する技術が重要な役割を果たす。

本研究は、液化水素運搬船や液化水素貯槽の断熱技術として有望な真空断熱について、真空性能に大きく影響する、タンクの構成材から発生するアウトガスについて、測定および計算の両面からその特性を把握した。その結果、材料からのアウトガス発生速度が、固体表面に吸着する成分が離脱する過程で律速になる場合と、固体内部からのガス成分の拡散が律速になる場合があり、材料によって異なることが分かった。その現象に則したアウトガス速度の定式化を構築し、真空度の予測計算手法を提案する。

また、アウトガスの発生を抑制する方法として、真空排気前および排気中に材料を加温するベーキングと、材料の表面にメッキ加工をする方法について、その効果を定量的に確認した。その結果、ベーキングについては、樹脂材料のアウトガス放出速度の律速が、固体内の拡散現象である領域で、アウトガス放出速度の低減効果が確認された。アウトガス成分とベーキングによる削減効果の相関についても分析を行った。その結果、アウトガスの主成分は水であり、それ以外に水素、二酸化炭素、窒素、一酸化炭素が存在することが分かった。また、ベーキング処理を行うことにより、これらいずれの成分についても削減効果があることが確認できた。

樹脂材の材料表面にメッキ処理を施す効果について測定を行った結果、アウトガス放出速度が 1/10 程度に抑制できることが確認できた。

さらには、大型貯槽モデルに対して、アウトガス成分の低温面への吸着を考慮した、真空層の劣化挙動の予測計算を行った。本研究で得られた知見は、液化水素用の大型真空二重貯槽を設計する際に、真空層の容積や使用材料、事前処理方法等の設計において有用なものとなる。

次に、国際間輸送において、船陸間の液化水素を移送する際の安全対策として重要となる、非常時に荷役配管中の液化水素を大量漏洩させることなく安全かつ瞬時に離脱で切る機能を持つ緊急離脱機構を、液化水素に適用することが必要となる。液化水素用に適用する場合の問題点として、以下が挙げられる。

- LNG や液化窒素用と比較して温度が低いことから、熱収縮の影響が大きくなる。

（氏名：猪股　昭彦　　NO.　2　）

・　表面温度が空気の液化する温度（約-183℃）になり、液化酸素が凝縮する状態になると、液化酸素が可燃物と接触した場合に激しく反応して発火する可能性がある。

そこで本研究では、極低温条件に適用可能な構造を検討するべく、有限要素法による熱応力解析方法を提案する。提案した解析方法を用いて、液化水素に適用する緊急離脱機構の温度分布およびひずみ分布の解析を行った。解析結果に基づき製作した試作品に対して、液化水素を館内に充填した状態で、表面の温度およびひずみを測定し、測定結果と解析結果を比較した。温度については高温部分で一部温度を低く予測する箇所があったものの、表面の低温部およびひずみ値ともに、解析結果は測定結果と良好に一致しており、解析結果の妥当性を示した。また、表面温度は液化空気が生成する温度よりも高くなることを示すことができ、世界初となる液化水素用の緊急離脱機構の開発に貢献する解析技術を確立した。

さらに、緊急離脱機構が離脱する際に飛散する少量の液化水素について、安全性評価を行うために、シミュレーションによる拡散挙動の予測手法の確立を目指して研究を行った。拡散したガスの濃度分布はガウス分布に従うことを仮定したシミュレーションソフトPhastを用いて、液化水素の拡散挙動を予測した。さらに、上記の試作品を用いて、内部に液化水素を充填した状態で実際に離脱試験を行い、離脱時の水素拡散挙動を、複数の水素濃度計を用いて各場所における時間変化を計測した。計測時の風速、風向や漏洩量などの条件を、上記の Phast に入力して、試験条件と近い条件で拡散挙動を計算により予測し、計測結果と比較した。その結果、計算値は実際の計測結果よりも高いピーク濃度を示し、また濃度カーブは計測結果の方が全体的になだらかな変化を示す傾向にあることが示された。これは、Phastが均一風速、均一風向を仮定しているためであり、実際の現象は、風向や風速が逐次変化していることが原因であると考えられる。以上より、本解析手法により安全性を検討するために濃度の絶対値を予測する場合には、実際の現象よりも安全側（高い値）で予測することから、本解析による予測手法の妥当性を示すことができた。

（別紙１）　　論文審査の結果の要旨

氏名	猪股　昭彦		
論文題目	水素社会の実現に向けた液化水素の大量輸送貯蔵技術に関する研究		
審査委員	区　分	職　名	氏　　名
	主　査	教授	武田　　実
	副　査	教授	劉　　秋生
	副　査	教授	古荘　雅生
	副　査		
	副　査		印

要　　旨

【論文概要】

化石燃料の消費に伴う大気汚染や酸性雨の問題、さらには地球温暖化の問題などが世界各国で深刻化している。これを受けて日本では、2014年4月に「エネルギー基本計画」が閣議決定され、2次エネルギーとしての水素を中心としたクリーンエネルギー社会の実現に向けた取組みが明記された。その後、2017年12月には「水素基本計画」が閣議決定されている。さらに「パリ協定」の運用ルールを採択したCOP24（第24回国連気候変動枠組み条約締約国会議）を経て、日本でも2030年度においてCO_2排出量を26%削減（2013年度比）することを掲げている。また、IMO（国際海事機関）でも2050年までに温暖化ガス排出量を半減させるとしている。このような状況の下、極低温の液化水素（沸点20 K）サプライチェーンが注目され、2020年度までに液化水素輸送船による実証試験（オーストラリアー日本／神戸）を行い、2030年度の商用化を目指すプロジェクトが進行している。

液化水素は液化天然ガス（LNG: 沸点111 K）と比べて約10倍蒸発しやすいため、液化水素輸送船に搭載する大型貯槽などには、真空断熱構造が性能的に有利になる。しかし、大型化した液化水素容器の真空槽内には断熱材や支持構造材などが多く設置されるため、これらの材料からアウトガスが放出され真空度が劣化する。従って、各種材料のガス放出特性を詳しく調べるとともに、その特性を低減する手法を開発することは非常に重要である。

一方、液化水素のサプライチェーンにおいて、液化水素輸送船と陸上基地との間で荷役するためのローディングシステムが必要となる。このシステムは、主に荷役中の船の揺動にも対応できるスイベルジョイント、緊急時に速やかに配管を離脱する緊急離脱機構などで構成される。しかし、これらの構成機器は、LNGでは広く使用されているが、液化水素ではまだ開発されていない。さらに、緊急離脱機構が作動して一部の液化水素が外部に飛散した場合、速やかに大気中の水素濃度を低減することは安全上極めて重要である。

本研究では、まず液化水素容器の真空槽内におけるステンレス鋼材、積層断熱材、支持構造材などのガス放出特性を詳しく調べ、アウトガス放出速度のモデル化および抑制方法について考察している。続いて、チェッキ弁式液化水素用緊急離脱機構を対象として、熱応力解析および流体解析を行い、計算結果と実験結果を比較して、解析モデルの妥当性を吟味している。さらに、液化水素用緊急離脱機構の安全性評価のために、緊急離脱機構作動時における水素拡散挙動に着目し、水素濃度のシミュレーション結果と実験結果を比較して、シミュレーション手法の有用性について議論している。

博士論文は、5章で構成されている。

第1章では、水素サプライチェーンに関する技術動向、液化水素の物性、液化水素貯槽の構造材料・断熱技術、液化水素荷役設備（ローディングアーム、スイベルジョイント、緊急離脱機構など）に関する技術動向、液化水素輸送船による国際海上輸送の技術実証プロジェクト等について述べた後で、本研究の目的を示している。第2章では、液化水素容器の真空槽内における各種材料（ステンレス鋼、ガラス繊維強化プラスチック、積層真空断熱材）のアウトガス放出特性の研究として、試験装置と試験方法、各種材料に対する試験結果と考察、ベーキング処理によるアウトガス速度低減量について詳述している。

続いて第3章では、液化水素用緊急離脱機構の熱応力特性および流動特性の研究として、液化水素用に適した緊急離脱機構の形式検討を行い、チェッキ弁式緊急離脱機構に対する熱応力解析結果と実験結果を比較している。また、緊急離脱機構内部を液化水素が通過する時の圧力損失を求めるために、解析ソフトを用いて得られた緊急離脱機構内部の圧力分布および流速分布について述べている。

氏名	猪股　昭彦

第 4 章では、液化水素用緊急離脱機構の作動時の安全性評価の研究として、シミュレーションソフトを用いて水素拡散挙動を解析し、解析結果と実験結果を比較するとともに、シミュレーション手法の評価について述べている。

以上の研究成果を第 5 章でまとめ、結論としている。

【審査内容および評価】

本申請者は、水素エネルギー社会の実現を目指して、液化水素運搬船を中心とした大量輸送貯蔵技術に関する最先端研究として、① 液化水素容器の真空槽内における各種材料のアウトガス特性、② 液化水素用緊急離脱機構の熱応力特性、③ 液化水素用緊急離脱機構の安全性評価に着目し、実験・計算・シミュレーション手法を駆使して最新成果を得ている。

① 液化水素容器の真空槽内における各種材料のアウトガス特性

液化水素容器の真空槽内における材料として、SUS304L（ステンレス鋼）、GFRP（ガラス繊維強化プラスチック）、SI（積層真空断熱材）を選定し、スループット法を採用して、ベーキング処理・メッキ処理の効果を含めて、各種材料のアウトガス特性を 48 時間調べている。その結果、ベーキング処理の効果のみならず、ガス放出速度の時間依存性の解析結果から、SUS304L では表面吸着分子による律速が、GFRP では固体内部分子による律速が、SI では初期段階で固体内部分子による律速が、またその後の段階で表面吸着分子による律速が支配的になることを明らかにしており、ガス放出速度のモデル化を容易にしたことは高く評価できる。また、GFRP 表面へのメッキ処理によるガス放出速度の低減手法、アウトガス成分分析およびベーキング処理によるアウトガス削減手法、ベーキング温度に依存するアウトガス低減効果および真空槽の内槽表面のクライオ効果を考慮した真空劣化予測手法の開発を行っており、液化水素の大型貯槽の断熱設計手法として極めて有効である。

② 液化水素用緊急離脱機構の熱応力特性

世界初の液化水素用緊急離脱機構を開発するために、LNG 用の弁体形式を参考にしてボール弁とチェッキ弁を比較検討し、入熱低減および配管表面での液化空気の生成防止の観点から、チェッキ弁式を選択している。突合せフランジ面を除いて真空二重構造を有するチェッキ弁式液化水素用緊急離脱機構に対して、3 次元ソリッド要素でモデル化し、緊急離脱機構表面の温度分布およびひずみ分布を解析している。その結果、表面最低温度は液化空気の生成温度より十分高く、フランジ面より内側の円周部にて最大ひずみが見られた。この解析手法の妥当性を明らかにするために、解析対象の試験機を製作し、解析条件と同様に液化水素を充填した状態で試験機表面の温度分布およびひずみ分布を計測して、実験と計算の定量的な一致を得たことは特筆すべき成果である。また、緊急離脱機構内部の流体解析を行い、流速分布の偏り等により圧力損失が生じるが、配管全体に対して問題ない程度であることを確認しており、将来の圧力損失低減化や緊急離脱機構の大型化に関する貴重な知見として高く評価できる。

③ 液化水素用緊急離脱機構の安全性評価

津波や火災等が発生する緊急時に、液化水素用緊急離脱機構が作動するが、少量の液化水素が外部に漏洩し、蒸発拡散して行く。危険物である水素の拡散挙動を調べるために、シミュレーションソフトを用い、風向・風速をパラメーターとして水素濃度分布の時間経過を解析している。その結果、離脱作動 1 秒後には、水素ガスの可燃範囲を示す領域が存在するが、5 秒後には水素ガスが拡散してその領域が消失する結果を得ている。解析結果の妥当性を明らかにするために、製作した試験機を用いて、離脱作動時における周囲の水素濃度分布およびその時間経過を計測しており、計算の最大値が計測の最大値を超えているものの計算値は安全側に評価できるので、任意の地点における最大水素濃度を予測する有用な安全性評価手法であると判定できる。

以上のとおり、本研究は、液化水素容器の真空槽内の構成材のアウトガス特性、液化水素用緊急離脱機構の熱応力・流動特性および水素拡散挙動を明らかにするとともに、液化水素輸送船を中心とした水素サプライチェーンに基づく水素社会の実現に必要不可欠で重要な知見を得たものとして価値ある集積であると認める。よって学位申請者の猪股 昭彦は、博士（工学）の学位を得る資格があると認める。