

(続紙 1)

京都大学	博士 (エネルギー科学)	氏名	山下 誠二
論文題目	低炭素社会に向けた水素エネルギーチェーン構築に関する研究		
(論文内容の要旨)			
<p>本論文は、低炭素社会を構築するための経済的・技術的に実現可能な水素エネルギーチェーンを提案するとともに、水素利用機器のさらなる効率向上と水素エネルギーを最大限有効に利用するための方策について検討した研究成果をまとめたもので、6章から構成されている。</p> <p>第1章の緒論では、化石燃料がCO₂排出のコストを伴う低炭素社会において水素の担うべき重要な役割を述べ、海外からの水素導入のキャリアとして液化水素が優位であることを示した。さらに、本論文の対象とする水素エネルギーチェーンにおいて、褐炭由来水素の実現可能性の検討、水素液化貯蔵システムの開発、エクセルギー解析によるガスタービンプラントの高効率化、および廃熱回収発電システムに関する研究の4項目について、それぞれの特徴を述べるとともに実用化に向けて必要な技術開発および研究動向をふまえ、本研究の目的と取り組むべき内容を提示している。</p> <p>第2章では、豪州の未利用褐炭を原料として水素製造を行い、この水素を液化・輸送して日本で消費する水素チェーンモデルを提案し、これが経済的・技術的に実現可能であることを明らかにしている。すなわち、経済的に採取可能で豊富な豪州ビクトリア州の褐炭を由来とする水素は海外からの最初の水素導入として有望であり、この水素チェーンモデルで製造した水素CIFコストは29.7¥/Nm³と算出される。これを燃料電池自動車で利用した場合の内部収益率は高い経済性を有し、事業用発電で利用した場合の発電コストはLNGなどの化石燃料発電より割高になるものの、CO₂フリー発電として再生可能エネルギーと比較した場合にはコストメリットがあることを示している。</p> <p>第3章では、水素液化システムおよび水素貯蔵システムの開発を行い、エネルギー用途の大型水素液化貯蔵システムの実現可能性を明らかにしている。まず、水素液化システムについて、エクセルギー解析等のプロセス検討に加え、コールドボックスや膨張タービンなど主要機器開発を経て独自のプロセスを確立し、産業用規模で国産初の水素液化システムを実現している。次に、水素貯蔵システムについて、高強度で断熱性能に優れたGFRP柱材を採用した1,000m³タンク試験設備を製作し、荷重試験により大型真空二重殻タンク構造の成立を確認している。また、真空二重殻タンクにおける輻射、対流断熱である真空積層フィルム断熱の要素技術開発を行い、高真空でフィルムの種類や層数および層密度等を適切に選定すれば熱流束0.5W/m²以下の断熱性能が達成できることを示している。さらに、30m³/h級浸漬型液化水素ポンプの試作を行い、セラミック相当の高耐久性軸受材料を選定し、広い流量範囲で全揚程0.18MPa以上の安定した液化水素移送を実現している。</p> <p>第4章では、水素ガスタービンプラントについて、エクセルギー解析によりその高効率化の方策について述べている。まず、現行のプラントの最大の損失は燃焼器のエクセルギー損失であり、圧縮機・タービンなどの流体機器の効率向上と高圧力比化が損失低減に有効であることを示している。次に、</p>			

水素ガスタービンの検討を行い、水素酸素燃焼の特徴を利用した 1200℃級グラーツサイクルは 1600℃級コンバインドサイクルと同等のサイクル性能を実現できることを明らかにしている。また、液化水素による水素導入を考えた場合、水素の物理エクセルギー（冷熱のエクセルギー）を有効に利用することが重要であり、1200℃級グラーツサイクルにおいて液化水素の冷熱を利用した深冷分離で酸素を供給した場合、送電端効率が 59.0%となるうえ、タービン入口温度の上昇と高圧力比化により、さらなる高効率化のポテンシャルを持っている事を示している。

第 5 章では、各種廃熱回収発電システムについて論じ、カーリーナサイクルは 100℃級廃熱回収では混合媒体の沸点上昇によりサイクル効率が上げられるが、200℃級廃熱回収においては再生器や吸気器の損失が増大するため、アンモニアランキンサイクルに利得があることを明らかにしている。また、低沸点媒体を利用した有機ランキンサイクルでは、R245fa など潜熱の小さい媒体を選定することでサイクル効率が向上することを示している。さらに、廃熱温度に応じたサイクル選定の考え方を明らかにし、300℃級廃熱回収では、水を用いたランキンサイクルが現実的な圧力でサイクルを実現でき、利得があることを示している。これらの検討結果を基に、200℃以下の小規模分散型廃熱回収に有効なバイナリータービン発電システムを開発し、産業温排水や地熱発電に適用して実証運転を行い、省エネルギーおよび再生可能エネルギーとしてのバイナリー発電システムの実現可能性を明らかにしている。

第 6 章の結論では、本研究の成果を要約し、特に低炭素社会の実現に必要な水素キャリア技術について、海外の未利用エネルギーからの水素製造、水素のエネルギー利用を可能にする大型水素液化貯蔵技術の開発、水素利用技術としてのガスタービンプラントに関する研究、さらには国内における省エネルギー・再生可能エネルギー機器としての廃熱回収発電に関する研究と、エネルギーチェーン全体を俯瞰しつつ重要機器開発を含む系統的な研究成果をまとめている。さらに、これらの研究成果に基づき、水素エネルギーチェーンの実現、水素エネルギーチェーンの大型化と水素発電の社会実装、およびエネルギー機器の高効率化と省エネルギーの推進の観点から、今後の課題と展望について考察している。

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、低炭素社会実現のための水素エネルギーチェーンを提案し、世界に豊富に存在する未利用・再生可能エネルギーを、水素をキャリアとして日本に導入可能にすること、および国内における水素利用機器のさらなる効率向上とエネルギーの有効利用に取り組んだもので、主な成果は以下の通りである。

1) 豪州において豊富な埋蔵量を持つ褐炭からの水素製造と、この水素を液化・輸送して日本で消費する水素チェーンモデルを提案し、その経済的、技術的実現可能性を検討した。その結果、褐炭由来の水素を国内で炭素フリー燃料として事業用発電で使用した場合、風力や太陽光などの再生可能エネルギー発電に対しコストメリットが生じる条件を明らかにした。

2) 水素エネルギーチェーン実現のための重要技術である水素液化貯蔵システムについて、効率的な液化プロセスを策定して国産初の産業用水素液化システムを実現するとともに、大型水素貯蔵システム実現に必要なタンク構造、断熱および移送技術の研究を行い、エネルギー用途の大型水素液化貯蔵システムが実現可能であることを示した。

3) 水素利用機器として重要なガスタービンプラントのエクセルギー解析を行い、最大の損失である燃焼のエクセルギー損失低減の方策を示すとともに、水素酸素燃焼サイクルの酸素製造に液化水素の冷熱を有効利用すれば、さらに効率が向上できることを示した。

4) 水素エネルギーチェーンの最下流で、さらに有効なエネルギーを取り出すことのできる各種廃熱回収発電について、サイクル検討によりそれらの特徴を把握し、廃熱温度に応じたサイクル選定の考え方を示した。さらに、これらの検討結果を基に産業温排水や地熱を利用した廃熱回収に有効なバイナリータービン発電システムを開発し、水素エネルギーシステムにおける実現可能性を明らかにした。

以上、本研究は水素エネルギーチェーン全体を俯瞰し、チェーンを構成する主要要素の設計・システム運用に関する研究を実施しており、今後の低炭素社会実現に向けて貴重な指針を提示し、得られた知見は学術上、實際上寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(エネルギー科学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成28年7月1日実施した論文内容とそれに関連した試問の結果、合格と認めた。

論文内容の要旨、審査の結果の要旨及び学位論文の全文は、本学学術情報リポジトリに掲載し、公表とする。ただし、特許申請、雑誌掲載等の関係により、要旨を学位授与後即日公表することに支障がある場合は、以下に公表可能とする日付を記入すること。

要旨公開可能日： 2017年 3月 31日以降