

水素吸蔵合金と空気熱交換式容器を用いた 住宅・自立電源用水素貯蔵システムに関する研究

学位論文内容の要旨

現代社会は、ライフスタイルの変化、経済成長等に伴うエネルギー消費により資源枯渇という大きな課題に直面している。これを解決するため、従来から利用してきた石油資源だけでなく、天然ガス由来エネルギーや再生可能エネルギーを大幅に導入可能とするエネルギー有効利用技術や得られたエネルギーを最大限利用する貯蔵技術が求められている。これらに対し水素エネルギーを用いたエネルギー有効利用技術や貯蔵技術は、資源と環境の両面で持続可能なエネルギー技術と考えられ、これまでのエネルギーモデルに新たな経路を与えるものと期待されている。

この水素エネルギーを利用する手段として期待される燃料電池は、常温から 80 °C 程度の低温域で作動することにより材料の低コスト化が可能となるとともに、高い性能や環境保全性等の利点を有しており、国内外で実用化に向けた取り組みが行われている。これを用いた住宅用コージェネレーションに関しては、実際の運転や解析により高い省エネルギー効果が確認されている。また、自然エネルギーをエネルギー供給源とした自立電源についても先進的な事例が確認できる。しかしながら、前者では起動エネルギー、負荷追従性能に課題があるため、商用電力の援用が必要で一次エネルギー削減効果向上の余地が大きいと考えられる。また、後者では、得られた自然エネルギーを水の電気分解により水素化し、それを貯蔵し、再び燃料電池で発電に使用するが、水素から電気に変換する際の効率が低い上、水素を貯蔵する際には一般的に圧縮機を使用するため、さらに低効率となり、当初得た自然エネルギーを有効利用できない課題がある。

本論文は、水素貯蔵媒体として水素吸蔵合金に着目し、ポンプや熱媒を必要とせず、簡便に製作・施工が可能である特長を有し、設置場所の空気と熱交換する容器と組み合わせたパンプ型の水素貯蔵システムを提案し、住宅用燃料電池コージェネレーションや自立電源への最適な導入を図ることを目的とした。

本論文は 9 章より構成され、各章の概要は以下の通りである。

第 1 章では、世界、日本のエネルギー需要・供給状態や各種エネルギー利用システムについて概説するとともに、水素エネルギーシステムを導入する利点を明らかにした上で、本論文の構成を示した。

第 2 章では、固体高分子形燃料電池の仕組みを示し、これを用いたコージェネレーションでは起動エネルギーが大きく、負荷追従性能に課題があることを示した。また自然エネルギー利用自立電源では、蓄電池の耐久性が低いこと、エネルギー密度が低いこと、水素でエネルギーを貯蔵する場合には、電力-水素間のエネルギー変換効率が低い課題があることを示した。次にこれらの課題の解決のため、本研究で提案する住宅・自立電源用水素貯蔵システムについて概説するとともに、これに関連

する既往の研究(水素貯蔵方式, 水素吸蔵合金封入容器, 負荷追従用燃料電池, 水素エネルギーを利用した自立電源)について調査, 検討し, 本研究の位置付けを明確にした。

第3章では, 本水素貯蔵システムに適した水素吸蔵合金の選定とその基礎的な物性評価を行った。まず, 条件を満たす可能性の高い合金として均質化熱処理を行った $MmNi_5$ 系の合金を選定し, 平衡水素圧の関係から $MmNi_{4.6}Al_{0.4}$, $MmNi_5$ が利用し得る特性を有していることを示した。次に両者の水素貯蔵能力を比較し, $MmNi_5$ が適していることを示した。

第4章では, 提案したパッシブ型の水素貯蔵システムについて試験機を作製し, その構造や水素吸放出性能について概説するとともに, 第4章で選定した $MmNi_5$ の使用環境温度 20°C における有効性を示した。また, $MmNi_5$ を封入した水素貯蔵システムを用いて, 燃料電池への水素供給試験を行い, パッシブ形水素貯蔵システムの水素放出能力を確認した。

第5章では, 水素吸蔵合金を利用したパッシブ型水素貯蔵システムは, 水素を吸放出させる際の発熱・吸熱を外部から強制的に加熱・冷却を行うアクティブ型と比較して, 熱移動に工夫を要することを概説した。次に, システムの水素吸放出性能に影響を与える合金層の有効熱伝導率について実機を模擬して計測し, 合金層の有効熱伝導率は, 合金の組成や圧力の増加, 合金層内への伝熱促進材の混入, 合金層の空隙率の低下により増加すること, 合金種により異なることを示した。また, 水素吸蔵合金層内の熱伝導の影響は, 表面熱伝達と比較して小さく, 水素吸放出時の熱移動は容器表面の熱伝達が律速となり, 容器表面と周囲空気との熱交換性能の向上が重要であることを示した。

第6章では, 本水素貯蔵システムの容器と周囲空気との熱交換特性を改善するフィン付容器や小径容器について研究した。まず, フィン枚数を変えた容器の水素吸放出特性を評価し, フィン付容器が使用環境温度 $5\sim 35^\circ\text{C}$ の範囲で有効に機能し, 第5章の容器と比較して使用環境温度範囲が増加することを示した。また, 容器径を変えた小径容器についても同様に水素吸放出特性を評価し, 径を減少させると有効水素放出率・吸蔵率が 90% 以上となる水素流量範囲が増加することを示した。最後に容器-周囲空気間の総括熱伝達係数を定量化することにより, これらの容器の有効性を明確化した。

第7章では, 住宅用燃料電池コージェネレーションにおいて, 改質器で生成した水素を提案した水素貯蔵システムを経由して貯蔵・供給する手法の省エネルギー効果について評価を行い, 戸建て住宅に水素貯蔵システムを導入した場合, 一次エネルギー削減効果が向上すること, 起動エネルギーの削減による効果と負荷追従性能の向上による効果の寄与率が同程度であることを示した。

第8章では, 提案した水素貯蔵システムの住宅用や自立電源用としての導入可能性について評価した。まず, 導入する水素貯蔵システムの必要重量について, 札幌の住宅を対象としてシミュレーションにより評価した。住宅用で負荷追従運転させる場合は, 必要合金量は最大でも 15 kg と低く, 現実的な合金量であることを示した。また, 自立電源として, 自然エネルギーで得られる電力が不足する場合に備え, 補助として 12 kWh/日 に相当する水素を貯蔵することを想定した場合, 室温 $5\sim 35^\circ\text{C}$ に対して, 140 kg 程度の水素吸蔵合金を導入することにより, 水素貯蔵システムは有効に機能すること, 使用温度環境によって容器の使い分けが可能であることを示した。さらに, 住宅用・自立電源を問わず, 水素貯蔵システムは鉛蓄電池やリチウムイオン電池と比較してエネルギー密度, 耐久性, コストの面で優れており, 導入可能性が高いことを示した。

第9章では, 本研究で得られた結果を要約して述べた。

学位論文審査の要旨

主 査 准教授 濱 田 靖 弘
副 査 教 授 長 野 克 則
副 査 教 授 横 山 眞太郎
副 査 教 授 近 久 武 美

学 位 論 文 題 名

水素吸蔵合金と空気熱交換式容器を用いた 住宅・自立電源用水素貯蔵システムに関する研究

現代社会は、ライフスタイルの変化、経済成長等に伴うエネルギー消費により資源枯渇という大きな課題に直面している。これを解決するため、従来から利用してきた石油資源だけでなく、天然ガス由来エネルギーや再生可能エネルギーを大幅に導入可能とするエネルギー有効利用技術や得られたエネルギーを最大限利用する貯蔵技術が求められている。これらに対し水素エネルギーを用いたエネルギー有効利用技術や貯蔵技術は、資源と環境の両面で持続可能なエネルギー技術と考えられ、これまでのエネルギーモデルに新たな経路を与えるものと期待されている。

この水素エネルギーを利用する手段として期待される燃料電池は、常温から 80℃程度の低温域で作動することにより材料の低コスト化が可能となるとともに、高い性能や環境保全性等の利点を有しており、国内外で実用化に向けた取り組みが行われている。これを用いた住宅用コージェネレーションに関しては、実際の運転や解析により高い省エネルギー効果が確認されている。また、自然エネルギーをエネルギー供給源とした自立電源についても先進的な事例が確認できる。しかしながら、前者では起動エネルギー、負荷追従性能に課題があるため、商用電力の援用が必要で一次エネルギー削減効果向上の余地が大きいと考えられる。また、後者では、得られた自然エネルギーを水の電気分解により水素化し、それを貯蔵し、再び燃料電池で発電に使用するが、水素から電気に変換する際の効率が低い上、水素を貯蔵する際には一般的に圧縮機を使用するため、さらに低効率となり、当初得た自然エネルギーを有効利用できない課題がある。

本論文は、水素貯蔵媒体として水素吸蔵合金に着目し、ポンプや熱媒を必要とせず、簡便に製作・施工が可能である特長を有し、設置場所の空気と熱交換する容器と組み合わせたパッシブ型の水素貯蔵システムを提案し、住宅用燃料電池コージェネレーションや自立電源への最適な導入を図ることを目的とした。

本論文は 9 章より構成され、各章の概要は以下の通りである。

第 1 章では、エネルギーの利活用を巡る状況について概説するとともに、本研究の構成を示した。

第 2 章では、固体高分子形燃料電池の仕組みを示し、これを用いたコージェネレーションでは起動エネルギーが大きく、負荷追従性能に課題があることを示した。また自然エネルギー利用自立電源

では、蓄電池の耐久性が低いこと、エネルギー密度が低いこと、水素でエネルギーを貯蔵する場合には、電力-水素間のエネルギー変換効率が低い課題があることを示した。次にこれらの課題解決のため、本研究で提案する住宅・自立電源用水素貯蔵システムについて概説するとともに、これに関連する既往の研究について調査、検討し、本研究の位置付けを明確にした。

第3章では、本水素貯蔵システムに適した水素吸蔵合金の選定とその基礎的な物性評価を行った。まず、条件を満たす可能性の高い合金として均質化熱処理を行った $MmNi_5$ 系の合金を選定し、平衡水素圧の関係から $MmNi_{4.6}Al_{0.4}$ 、 $MmNi_5$ が利用し得る特性を有していることを示した。次に両者の水素貯蔵能力を比較し、 $MmNi_5$ が適していることを示した。

第4章では、提案したパッシブ型の水素貯蔵システムについて試験機を作製し、その構造や水素吸放出性能について概説するとともに、周囲温度 20℃における有効性を示した。また、 $MmNi_5$ を封入した水素貯蔵システムを用いて、燃料電池への水素供給試験を行い、パッシブ形水素貯蔵システムの水素放出能力を確認した。

第5章では、システムの水素吸放出性能に影響を与える合金層の有効熱伝導率について実機を模擬して計測し、合金層の有効熱伝導率は、合金の組成や圧力の増加、合金層内への伝熱促進材の混入、合金層の空隙率の低下により増加すること、合金種により異なることを示した。また、水素吸蔵合金層内の熱伝導の影響は、表面熱伝達と比較して小さく、水素吸放出時の熱移動は容器表面の熱伝達が律速となり、容器表面と周囲空気との熱交換性能の向上が重要であることを示した。

第6章では、本水素貯蔵システムの容器と周囲空気との熱交換特性を改善するフィン付容器や小径容器について研究した。まず、フィン枚数を変えた容器の水素吸放出特性を評価し、フィン付容器が周囲温度 5~35℃の範囲で有効に機能し、第5章の容器と比較して使用可能な周囲温度が広範囲になることを示した。また、容器径を変えた小径容器についても同様に水素吸放出特性を評価し、径を減少させると有効水素放出率・吸蔵率が 90% 以上となる水素流量範囲が増加することを示した。最後に容器-周囲空気間の総括熱伝達係数を定量化し、これらの容器の有効性を明確化した。

第7章では、住宅用燃料電池コージェネレーションにおいて、改質器で生成した水素を提案した水素貯蔵システムを経由して貯蔵・供給する手法の省エネルギー効果について評価を行い、戸建て住宅に水素貯蔵システムを導入した場合、一次エネルギー削減効果が向上すること、起動エネルギーの削減による効果と負荷追従性能の向上による効果の寄与率が同程度であることを示した。

第8章では、提案した水素貯蔵システムの住宅用や自立電源用としての導入可能性について評価した。まず、導入する水素貯蔵システムの必要重量について、札幌の住宅を対象としてシミュレーションにより評価した。住宅用で負荷追従運転させる場合は、必要合金量は最大でも 14 kg と低く、現実的な合金量であることを示した。また、自立電源として、自然エネルギーで得られる電力が不足する場合に備え、補助として 12 kWh/日に相当する水素を貯蔵することを想定した場合、室温 5~35℃に対して、140 kg 程度の水素吸蔵合金を導入することにより、水素貯蔵システムは有効に機能することを示した。さらに、住宅用・自立電源を問わず、水素貯蔵システムは鉛蓄電池やリチウムイオン電池と比較してエネルギー密度、耐久性、コストの面で優れており、導入可能性が高いことを示した。

第9章では、本研究で得られた結果を要約して述べた。

これを要するに、著者は、住宅用燃料電池や自立電源の高効率化に資するパッシブ型水素貯蔵システムの設計を行い、その導入効果について総合的に評価するとともに、水素エネルギーを利用したシステムについて知見を得たものであり、エネルギー利用工学、建築環境工学に貢献するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格があるものと認める。