

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 16 日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2022

課題番号：21K14732

研究課題名(和文)次世代水素ステーション実現に向けた太陽熱活用熱駆動水素圧縮の研究

研究課題名(英文)Research on heat-driven hydrogen compression utilizing solar heat for next-generation hydrogen station

研究代表者

五舛目 清剛 (Goshome, Kiyotaka)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・エネルギー・環境領域・研究員

研究者番号：70790476

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：非危険物の体心立方晶系(BCC系)水素吸蔵合金の水素吸蔵特性評価を行い、20℃での冷却、150℃での加熱により約1.0MPaから20MPaまでの水素圧縮が可能な合金を特定した。真空断熱管式太陽熱パネルによる集熱実験では、晴天時に150℃以上の熱媒温度の到達を確認した。太陽熱パネルから水素合金容器へ熱媒を供給することにより熱駆動水素圧縮の実証試験を行った。その結果120℃の熱媒供給により1.0MPa未満の水素を圧縮し6MPaの水素ボンベに充填可能であること確認した。目標圧力20MPaの達成には及ばなかったが、BCC合金と太陽熱パネルを用いたベンチスケールでの熱駆動水素圧縮の実証に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

熱駆動水素圧縮機は未利用熱の低質なエネルギーを回収し水素を圧縮することが可能である。熱駆動水素圧縮技術が確立されれば、機械式圧縮機からの排熱、工場排熱、太陽熱等を利用することで水素圧縮の省エネルギー化が期待される。

熱駆動水素圧縮の研究報告は合金の開発を目的とした小スケールでの合金特性評価に留まる事がほとんどであり、実証試験事例は世界的にみても多くない。これは高圧水素を取り扱う実証試験設備構築の難しさが一因と考えられるが、本研究では国内法規を遵守した安全な設備を構築した上で、太陽熱を利用したベンチスケールでの実証試験に成功しており、貴重な成果が得られたと考えている。

研究成果の概要(英文)：In the evaluation of hydrogen ab-desorption characteristics of body-centered cubic type hydrogen storage alloys which could be non-hazardous materials, the BCC alloy which can compress hydrogen from 1.0MPa to 20MPa by cooling at 20℃ and heating at 150℃ were found. In the heat collection experiment by using solar heat collector with vacuum heat-insulation tube, it was confirmed that maximum heat-medium temperature up to 150℃ can be achieved in the fine weather. Finally, demonstration of heat-driven hydrogen compression was conducted by supplying the heat medium from the solar heat collector to the hydrogen alloy container. It was confirmed that 1.0 MPa of hydrogen can be compressed into the hydrogen cylinder at 6 MPa by supplying 120℃ of heat medium. Although the target pressure of 20 MPa was not achieved, the thermal-driven hydrogen compression by using the BCC alloy and the solar heat panels was successful demonstrated.

研究分野：エネルギー分野

キーワード：水素 水素吸蔵合金 水素圧縮 太陽熱

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

水素圧縮機は水素社会実現に向けて重要な役割を担う。従来水素輸送には 19.6MPa の圧縮水素方式が用いられ、また近年水素ステーションでは 80MPa 以上に水素が圧縮される。既存の機械式圧縮機は振動や摩耗が著しく、高頻度にメンテナンスが必要で、消費電力も含め運営費が高額である。そこで水素吸蔵合金を用いた水素圧縮の研究が行われてきた。合金は低温低圧で水素を吸蔵し、高温高圧で水素を放出する。このとき水素放出圧力はファントホッフの式に従い温度に対して指数関数的に上昇し高圧に達する。この性質を応用した熱駆動水素圧縮は機械駆動部がなく低振動、低騒音、低メンテナンス頻度の利点を有し、さらに排熱利用による省エネ運用が可能である。

水素吸蔵合金の熱力学特性から、例えば 1MPa 未満から輸送用圧縮水素圧 19.6MPa への圧縮を実現するためには 200 程度の熱源が必要と推測されるが、工場排熱等の安定的な熱源は現実には限られる。そこで熱源として太陽熱が利用可能であれば、より汎用的に熱駆動水素圧縮が適用可能になると考えられる。

### 2. 研究の目的

太陽熱パネルは一般的に 60 以下の温水利用で用いられるが、真空管式太陽熱集熱器に熱媒オイルを適用すれば、200 前後の集熱は可能であると考えられる。本研究では真空管式太陽熱集熱器からの熱媒を水素吸蔵合金容器に供給することによる熱駆動水素圧縮の実証試験を行い、太陽熱をどの程度水素圧縮エネルギーとして利用可能か検証する。

### 3. 研究の方法

#### (1)水素吸蔵合金の熱力学特性評価

PCT(Pressure-Composition-Temperature)測定により、水素吸蔵合金の水素吸蔵放出圧力の温度依存性を評価し、利用可能な温度域で駆動可能な合金組成を明らかにする。

#### (2)太陽熱集熱特性評価

真空管式太陽熱集熱器に熱媒を循環することで 150 以上の温度域での集熱実験を行う。この際使用する熱媒は 100 以上でも安全に集熱が可能なシリコンオイルを用いる。

#### (3)太陽熱による熱駆動水素圧縮実証試験

真空管式太陽熱集熱器により加熱した熱媒オイルを水素吸蔵合金反応容器へ供給することで、水素圧縮サイクルの実証試験を行う。

### 4. 研究成果

#### (1)水素吸蔵合金の熱力学特性評価

水素吸蔵合金の圧力温度依存性を把握するために、PCT 測定をジーベルツ型自動測定装置(株式会社鈴木商館, PCT-1SDWIN-10 MPa, 圧力最小表示: 0.0001 MP)により実施した。水素吸蔵合金はステンレス容器に封入し、ステンレス容器を温度調節器(アズワン製、UCT-1000、温度制御範囲: -10 ~ 80、温度調節精度:  $\pm 0.1$ )を備えた水槽中に浸けることで、測定中一定温度に制御した。本研究ではより安全な熱駆動水素圧縮を実現するために、水素吸蔵放出に伴う微粉化傾向が比較的小さく、消防法危険物に該当する可能性が低い BCC (Body-centered-cubic) 系合金に着目した。合金の PCT 測定に際しては、加熱真空引き及び水素加圧による活性化後、水素吸蔵放出サイクル初期に特に顕著に見られる水素吸蔵量減少や水素吸蔵放出平

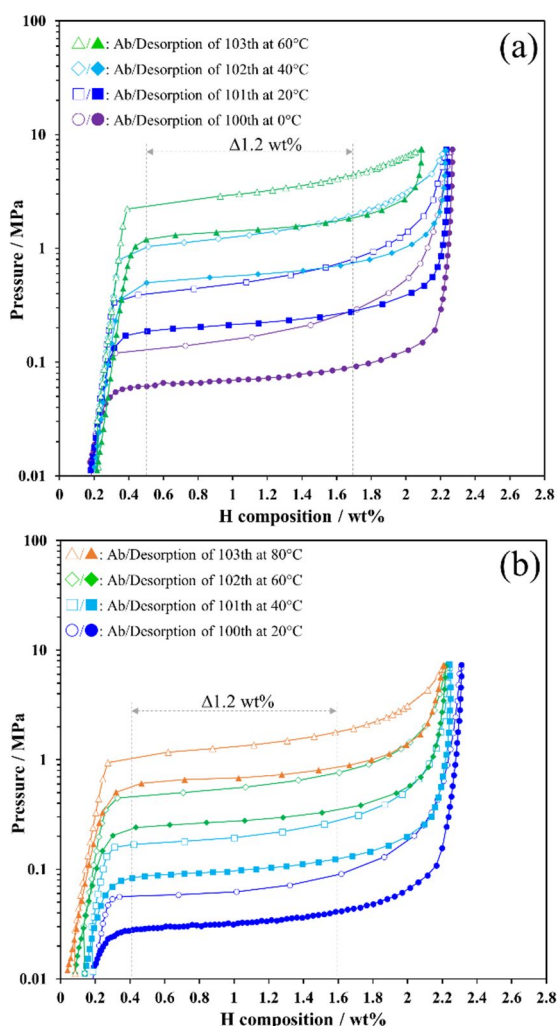


図1 (a)VTiCrFe合金、(b)VTiCrFe合金のPCT特性

平衡低下等の変化の影響をなるべく避けるために、予め100サイクルの吸蔵放出を実施した。図1に2種のBCC合金(VTiCrFe系合金、)に関する、4つの異なる温度における100-103サイクル目のPCT測定結果を示す。合金及びは約1.5~1.7%の水素吸蔵放出プラトー領域を有し、いずれの合金も温度を20ずつ上昇させた際の吸蔵放出プラトー圧力の上昇を確認した。図2に上記PCT特性から得られる水素吸蔵放出平衡圧力の温度依存性を示す。ここでは図1の補助線に示す通り、合金中水素量 $\Delta 1.2\text{wt}\%$ に相当するプラトー領域を水素圧縮サイクルに利用するものとし、吸蔵平衡圧は $\Delta 1.2\text{wt}\%$ のプラトー領域右端における値、放出平衡圧は $\Delta 1.2\text{wt}\%$ のプラトー領域左端における値を採用してプロットした。合金は20で約0.1MPaの水素を吸蔵し、水素輸送圧力付近の20MPa程度で放出するためには、190以上が必要と推測される。一方合金では20における吸蔵圧力が0.8MPaと高くなってしまいが、150で20MPa程度での放出が可能と推測される。

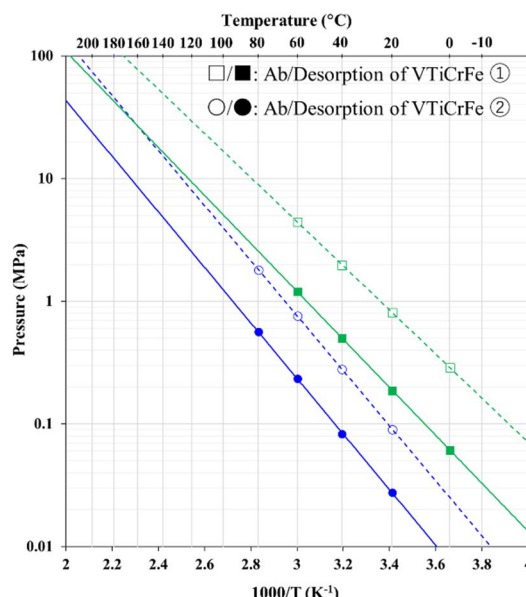


図2 VTiCrFe合金、の水素吸蔵放出平衡圧の温度依存性

しかし実際には水素吸蔵合金は粒体状でタンクに充填されており、合金層の熱伝導率は高くないため、現実的な速度で合金層を加熱、冷却するためには、上記平衡論での推測よりも広い温度域での加熱、冷却が必要となる。このことを考慮しながら、また利用可能な温度域やターゲット圧力に応じて合金組成を調整する必要があるが、BCC系合金は組成の変更により比較的広い範囲で温度-平衡圧特性を調整可能であり、条件に合わせた適切な合金選定が可能と考えられる。

### (2) 太陽熱集熱特性評価

太陽熱集熱実験は、真空ガラス管型太陽集熱器(CPC式、 $6\text{m}^2$ )にシリコンオイルを循環させ、太陽熱集熱器の熱媒出入口温度、流量を記録することで実施した。図3にある快晴日における通日の集熱実験結果を示す。日射強度の増加と共に、太陽熱集熱器を循環する熱媒温度は上昇し、13:00頃に太陽熱集熱器出口温度が最高となる162を観測した。このとき、熱媒循環流量は温度上昇と共に粘度が低下したことで、流量が増大し、最高温度の162付近で $8\text{L}/\text{min}$ であった。循環流量を落とすことでより高温での集熱が可能であることを確認しているが、放熱ロスが大きくなることや、熱媒の劣化が加速されることを考慮し、熱駆動水素圧縮実証試験での太陽熱集熱は上記と同様の熱媒流量条件にて実施した。

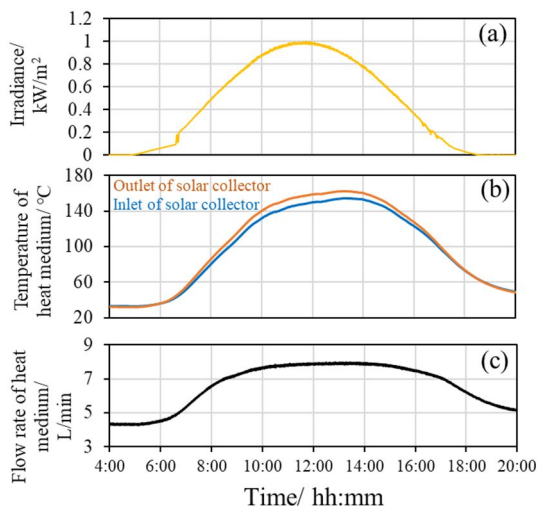


図3 真空ガラス管型太陽熱集熱器による集熱実験時の(a)日射強度、(b)集熱器出入口温度、(c)熱媒流量

### (3) 太陽熱による熱駆動水素圧縮実証試験

実験には代表的なBCC合金として知られるVTiCr系合金を1.4kg使用した。合金はステンレス製2重管の内管(1インチ)に導入し、太陽熱集熱器を接続した加熱ライン及び冷却用チラーとの熱交換器を備える冷却ラインからの熱媒を2重管外管に循環させることで加熱冷却した。水素吸蔵過程は、合金容器を冷却しながら一定圧力で水素を30分供給することで行った。水素放出過程は、合金容器を加熱しながら、予め圧力を4MPa、3MPa、1MPaに調整した水素ポンペA、B、C(内容積50L)のいずれかに水素を30分放出することで行った。図4にある快晴日における通日の太陽熱集熱及び水素圧縮サイクル試験結果を示す。日射強度の増加と共に、太陽熱集熱器を循環する熱媒温度が上昇し、9:30頃に140に達した。この時点で合金容器をバイパスするかたちで加熱ラインへの熱媒供給を開始し、10:00に合金容器の加熱及び水素ポンペAへの水素放

出を開始した。合金容器へは約 120 の熱媒が供給され、水素ポンベ A の圧力は 30 分で 4MPa から 4.5MPa へ上昇した。その後合金容器への熱媒供給を冷却ラインに切り替え、23 前後の熱媒を供給、冷却しながら、0.95MPa で 30 分の水素吸蔵を行った。再び加熱ラインに切り替えることで、合金容器内圧は急上昇し、水素ポンベ A へ水素が放出された。上記のような圧縮サイクルを 5 回繰り返すことで、水素ポンベ A の圧力は最終的に 4MPa から 6.2MPa に上昇した。その際日射強度の低下と共に太陽熱集熱器の熱媒循環温度が低下したことで、水素ポンベ A への水素放出速度が低下したため、より低い圧力に設定された水素ポンベ B, C と順次切り替えることで、その後の水素圧縮サイクルを継続した。その結果、水素ポンベ B は 3.1MPa から 3.7MPa に、水素ポンベ C は 1.1MPa から 1.4MPa に圧力が上昇した。上記のように最高で 6.5 倍程度の圧縮率で水素圧縮が可能であったが、一方で目標とした 19.6MPaG への水素圧縮

には至らなかった。これは太陽熱集熱器の循環系と合金容器の循環系をオイルタンクを介して別々に設けており、太陽熱集熱器からの熱媒が直接反応容器に供給されるようになっていなかったために、合金容器の加熱温度が想定より上がらなかったことが原因の一つと考えている。実際図 3(b)に示す通り、放出過程における合金容器への熱媒供給温度は太陽熱集熱器出口温度よりも 15 程度低かった。目標値へ近づけるためには、上記熱媒循環ラインの改善を行うと共に、太陽熱集熱器面積、熱媒循環流量、合金組成、合金反応容器の伝熱性等、様々な点を改善する必要がある。

熱駆動水素圧縮の研究報告は合金の開発を目的とした小スケールでの合金特性評価に留まる事がほとんどであり、実証試験事例は世界的にみても多くない。これは高圧水素を取り扱う実証試験設備構築の難しさが一因と考えられるが、本研究では国内法規を遵守した安全な設備を構築した上で、太陽熱を利用したベンチスケールでの実証試験に成功しており、貴重な成果が得られたと考えている。

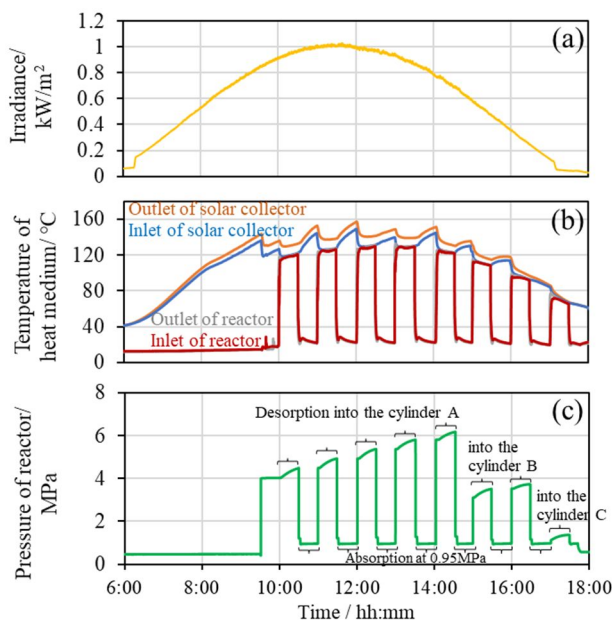


図 4 太陽熱による熱駆動水素圧縮実証試験時の (a) 日射強度、(b)集熱器・合金容器出入口温度、(c)合金容器圧力

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

|  | 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号) | 所属研究機関・部局・職<br>(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 |
|---------|---------|
|---------|---------|