

大型太陽炉の製作と太陽熱エネルギーを利用した水素製造技術の開発
Manufacturing of large-sized solar furnace
and development of hydrogen production technology using solar thermal energy

室岡裕之^{*1}、重田達雄^{*1}

Hiroyuki MUROOKA, Tatsuo SHIGETA

Abstract

The hydrogen production was tried by the reaction of the material and the water generated by the material reaction at the ultrahigh temperature. A clean, unlimited sunlight is collected with a Fresnel lens and "Solar furnace" produces ultrahigh temperature. The solar furnace is composed of the plane Fresnel lens 1.40 m in length and 1.05 m in width and the reactor core box containing the crucible for heat reduction reaction. It was made to react at the temperature about 1,800 in the crucible. As a result, the data about the rate of an iron oxide suitable for generating of hydrogen by disassembly of water and the data of the required time for mechanical alloying were able to be obtained. Moreover, large-sized 10kW solar furnace was designed and manufactured for development of future research, and the prospect utilizable for the research on a heat reduction reaction and on processing of various toxic substances etc. were acquired.

要約

フレネルレンズを用いてクリーンで無尽蔵な太陽光を集光し、超高温を作り出す「太陽炉」を使用して、超高温での物質反応によって生成した鉄系酸化物と水との反応による水素製造を行った。使用した太陽炉は、縦 1.40 m、横 1.05 m の平面フレネルレンズを用いた集光部と、熱還元反応を行う坩堝が入った炉心ボックスからなり、坩堝内の集光点において 1,800 程度の温度で反応を行わせた。この結果、水素の発生に適した鉄系酸化物の割合や水素発生に要する時間についてのデータを得ることができた。また、今後の研究の発展のために、10kW の大型太陽炉を設計・製作し、熱還元反応や各種有害物質等の処理に関する研究に活用できる見通しを得た。

1. 緒言

近年、化石燃料の大量消費により、二酸化炭素による地球の温暖化や酸性雨などの地球レベルでの環境悪化、化石燃料の枯渇によるエネルギー問題などが深刻になっている。このため、地球上に 1 kW/m² で降り注ぐクリーンで無尽蔵な太陽光を利用したエネルギー・材料開発が必要となってきている。なかでも、フレネルレンズを用いて太陽光を直接集光し、短時間で超高温を作り出す「太陽炉」は、最高 3,000 程度の高温が比較的簡単に得られる有力なエネルギー・材料開発手段の一つである。また、太陽炉は不純物の混入が少なく、任意の気体中で試料を加熱・冷却できるため、高温物性研究にも利用可能である。

鉄系酸化物の一つであるウスタイト (FeO) は、水素製造や炭酸ガスの還元剤として知られているが、一般にウスタイトは鉄鉱石をコークスなどの炭素を用いて高温で還元し製造されるため、副産物として大量の炭酸ガスが発生する。一方、エリンガム図による熱力学的計算から Fe₃O₄ は、大気中 2,315 °C で酸素を放出して FeO に還元されるため、この熱還元反応を利用した製造方法が有効である。

そこで本研究では、水素発生量を増加させることを目標に、太陽炉を用いて環境を損なわない熱還元反応でウスタイトを製造し、これを用いた水の分解による水素生成を行うとともに、大型太陽炉を設計・製作した。

^{*1} 研究開発部 エネルギー開発グループ

本研究は、(財)若狭湾エネルギー研究センターが福井県の受託研究として実施した研究を含んでいる。

II. 実験方法

1. 太陽炉を用いた FeO 生成

図 1 に本実験で使用した小型「太陽炉」の外観を示す。主に二つの部分から構成され、集光部分であるフレネルレンズと反応炉心ボックスからなる。フレネルレンズはプラスチック板の表面に凸レンズ断面の一部分に相当する溝を切り、全体としてレンズの働きをするようにしたものである。そのため広い面積にもかかわらず薄いレンズが作れ、効率的に太陽光を集光することが可能である。本装置に使用しているレンズは、アクリル樹脂製で大きさ縦 1.40 m、横 1.05 m、厚さ 3 mm、溝のピッチ幅 0.3 mm である。反応炉心ボックスは、縦 26 cm、横 26 cm、深さ 14 cm のステンレス容器で構成されている。

熱還元反応実験では、 MnO 、 NiO 、 Fe_2O_3 を混合した試料を使用した。 MnO 、 NiO は、鉄酸化物の還元温度を下げるために混合するものである。試料をアルミナ坩堝に入れて反応炉心ボックス内に装填する。試料の量は、集光した太陽光が試料全体に照射される量として 1.7g とした。また、反応場内は大気中のままで行う。装填後、レンズの仰角、方位角を制御して反応場を焦点位置に一致させ、照射により最高温度まで上昇させる。試料が溶融し球状にまとまった後相変化を起こし、坩堝の底に広がるまで照射する。その後、試料の表面に銅棒を接触させ急冷を行う。急冷の様子を図 2 に、溶融開始から急冷までの流れを図 3 に示す。熱還元反応実験後の生成物の同定・定量分析には粉末 X 線回折装置 (XRD) を用いた。

2. 水素生成

水の分解による水素の発生については、生成物の表面活性度を上げるために、ボールミル装置を用いてメカニカルアロイング (MA) を行うことにより、生成物の粒子サイズをナノサイズまで微小化した。まず、ミルポットにアルミナ球石と蒸留水 50ml を入れ、乳鉢で熱還元反応生成物質を粉碎して粉末にし、30g をミルポットに加える。次にミルポット内をアルゴンガスで置換・密封し、ミルポットをボールミル回転台に載せ MA を行った。水素の発生確認はガス検知管により行った。反応原理は、酸素と反応して水蒸気を生成し、この水蒸気が過塩素酸マグネシウムと反応し、指示薬が変色するものである。検知管には、50ml の水素検知管 (測定濃度範囲 0.05 ~ 0.8%) を用いた。



図 1 小型「太陽炉」



図 2 急冷の様子

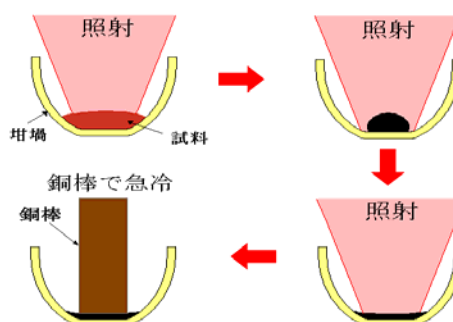


図 3 溶融開始から急冷までの流れ

III. 実験結果

1. FeO の生成

各試料の熱還元反応実験後の X 線回折スペクトルから、加熱前には存在しなかったウスタイト (FeO) のピークが見られた。溶融前に配合した Fe_2O_3 の割合と X 線回折スペクトルから推測される生成物質 FeO の簡易定量値

の関係を図 4 に示す。熱還元実験後の X 線回折スペクトルからウスタイト (FeO) のピークを見ると、 Fe_2O_3 の配合の割合が少なくなるにつれて FeO のピークが高くなっている。また、図 4 から Fe_2O_3 の割合が少ないほど簡易定量値が高くなっている。但し、MnO、NiO の比率が高い試料では FeO と同じ結晶構造の MnO が FeO の X 線回折スペクトルに影響を与え、FeO の定量値が高く出ていると考えられるため、X 線回折スペクトルからの簡易定量値では FeO の正確な定量値を示すことはできない。図 4 でも Fe_2O_3 の割合が 30% 以下の低い部分の FeO 簡易定量値はグラフから除外した。

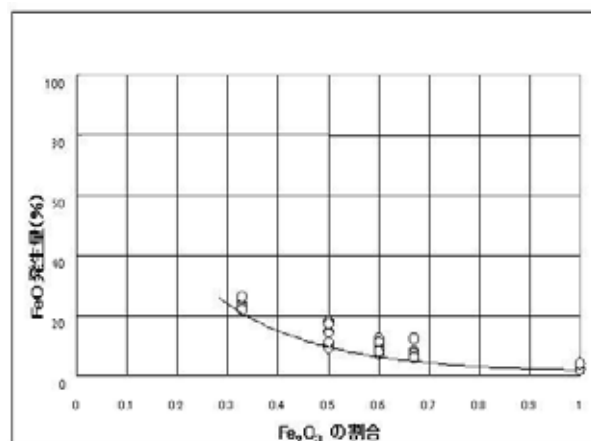


図 4 NiO+MnO+ Fe_2O_3 中の Fe_2O_3 の割合と FeO 発生量の関係

2. 水素生成

Fe_2O_3 の割合が 33%、50%、60%、100% の試料を熱還元反応させた後にメカニカルアロイング (MA) を行った。また、 Fe_2O_3 、 Fe_3O_4 、FeO の試薬、 Fe_3O_4 と FeO の試薬を混合したものを、それぞれ熱還元反応を行わずに MA を行った。水素の測定結果から発生量を計算した結果を図 5、図 6 に示す。

図 5 より、水分解反応実験の結果では熱還元反応を行った試料の MA 開始後約 100 時間の時点ではどの試料も水素発生量は微量で、はっきりした違いは見られなかった。しかし、MA の運転時間を増やすにつれ水素発生量に変化が見られ、MA を行った試料の中で Fe_2O_3 の割合が最も低い 33% の試料が XRD 測定結果による FeO の簡易定量値が最も高かったにもかかわらず、500~800 時間まで MA を行くと、 Fe_2O_3 の割合が 50% の試料で水素発生量が多くなった。図 6 より、試薬の MA 結果からは FeO が多い試料ほど (鉄に対する酸素の割合が少ないほど) 運転時間を増やすに従い水素の発生量が急に増えることが分かった。

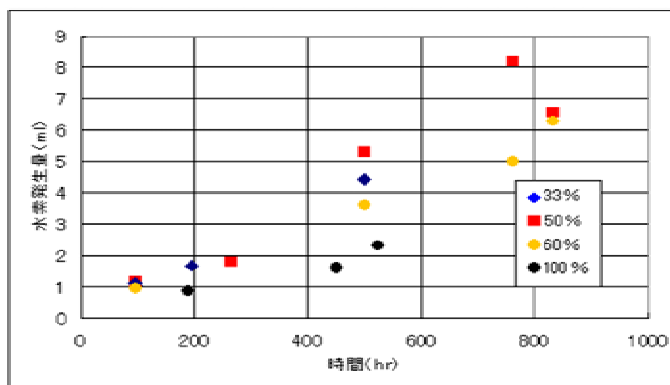


図 5 熱還元反応物質の MA 結果
(Fe_2O_3 の割合に対する水素発生量)

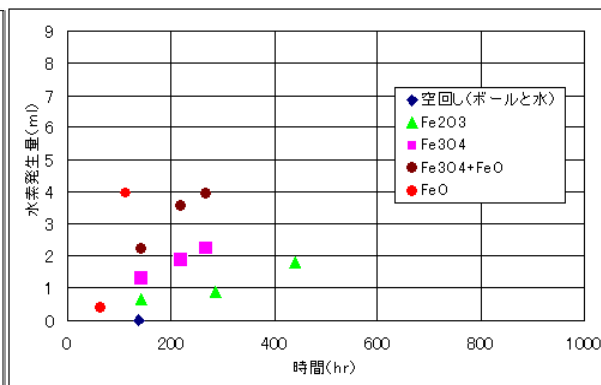


図 6 試薬の MA 結果

MA 前後の SEM 画像を図 7、図 8 に示す。この SEM 画像を比較すると、MA 後の試料の粒子サイズは、0.1 μm まで粉砕されているが、1 μm 以上の粒子も存在している。MA の運転は長時間行わなければ水との反応が活性化されない。そのため、短時間で効率よく試料を粉砕できる方法で MA を行うことが今後の課題である。

IV. 大型太陽炉の設計・製作

小型太陽炉では、熱エネルギーが試料の融解熱に使われ、試料自身の温度が上昇しないことがある。また、熱還元反応温度を下げるために NiO、MnO などの物質を混合させている。この温度上昇しない問題を解

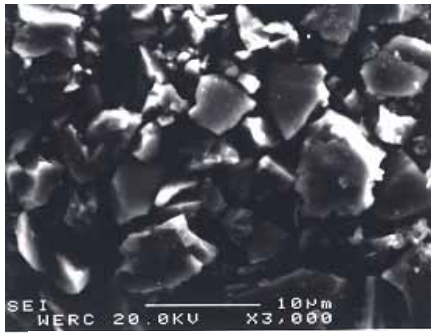


図 7 Fe₂O₃33% MA 前 3000 倍

決し、熱還元反応温度を下げるために混合させる物質を使わないで Fe₂O₃ や Fe₃O₄ から直接還元により FeO を作るとともに、処理量の増加を図るために、より出力の大きな太陽炉を設計・製作した。

平成 17 年度はフレネルレンズの製作、レンズ枠の製作及び太陽炉本体の基本設計を行った。太陽炉は常に太陽を追いかけてレンズの方向を変化させる必要があり、水平方向の方位角調整と高さ方向の仰角調整によってこれを行う。方位角の駆動方法については、電動機 減速機 ピニオン リングギア方式とし、仰角調整については「二支点方式」を考案した。図 9 にこの方式の原理を示す。これはレンズ面が単なる回転運動をするのではなく、二つの「支点」が水平方向と垂直方向に移動していく方式である。視覚的な安定性ととも、比較的小さくまとまる点、焦点位置が上下しないので作業性がよい点が長所である。なお、駆動方法は電動機 減速機 ボールネジ方式とした。

平成 18 年度には二支点方式の原理模型を製作して動作確認をした後、詳細設計・製作を行った。図 10 に完成した 10kW 大型太陽炉の写真を示す。レンズ面の大きさは 3.3m × 3.3m である。なお、「二支点方式」は「集光装置における集光レンズ位置調節機構」として特許出願を行っている。この大型太陽炉では焦点部分の大きさは直径 30mm 程度となり、放射温度計による簡易測定では 3,000 弱を得ている。方位角と仰角の調整については手動であるが、平成 19 年度には自動追尾制御装置の設計製作を予定している。

V. まとめ

本研究では太陽熱エネルギーを直接用いる太陽炉を用いて太陽光を鉄系酸化物に照射し、酸素を放出する熱還元反応により物質創製を行い、その生成物質を用いた水の分解による水素製造を行った。その結果、Fe₂O₃ の割合が 50% 程度がウスタイト生成、水素発生に最も適した比率であることが分かった。一方、ボールミルによる MA で水素を発生させるには長時間を要することが分かり、エネルギー収支の点からの今後の検討課題である。また、10kW の太陽炉を設計・製作し、今後予定されている熱還元反応や各種有害物質等の処理に関する研究に活用できる見通しを得た。

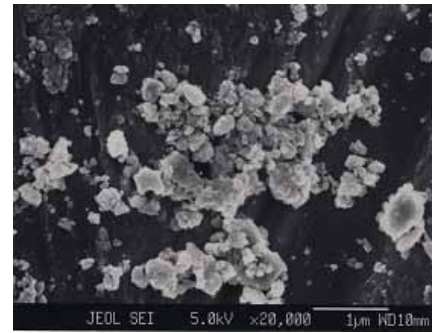


図 8 Fe₂O₃33% MA500 時間後 2 万倍

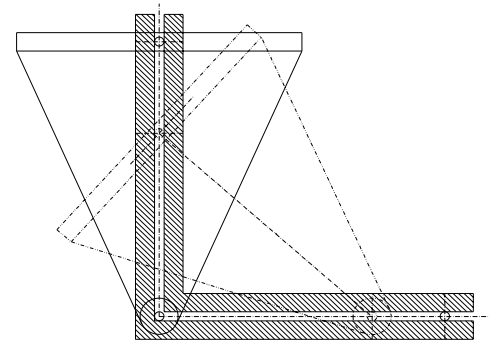


図 9 太陽炉二支点方式の原理

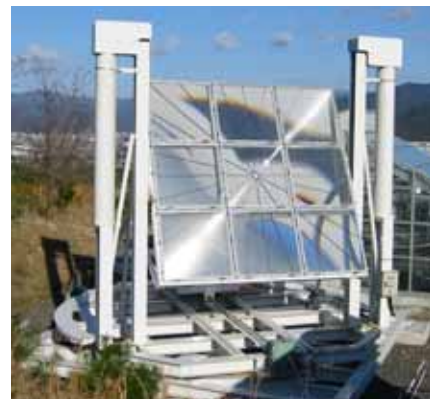


図 10 10kW 大型太陽炉