

# 太陽集光装置による軽焼ドロマイトの加熱特性調査

赤坂 重堯<sup>1)</sup>・長瀬 慶紀<sup>2)</sup>・友松 重樹<sup>3)</sup>・前田 順登<sup>4)</sup>

## Investigation into Heating Characteristic of Light-burned Dolomite using Solar Concentrator

Shigetaka AKASAKA, Yoshinori NAGASE, Shigeki TOMOMATSU, Naoto MAEDA

### Abstract

Recently, the power generation using renewable energy such as solar light and wind power is noticed, but these power generation methods have a problem that they are strongly affected by weather and time. Then, the magnesium battery which solves these problems and can carry out the repeated power generation is noticed. While fossil fuels are used for refining magnesium. There are problems such as depletion of fossil fuel and air pollution. Solar heat is attracting attention as an alternative energy source to fossil fuels. In this study, it is considered that magnesium is refined by solar heat, and the research was carried out paying attention to light-burned dolomite. However, there is no heating experiment data of the light-burned dolomite, so the heating characteristics were unknown, when the light-burned dolomite was heated by a solar concentrator. From the experiments which the absorptance coefficient of light burning dolomite was calculated to be from 0.49 to 0.58. From this result, it is considered that the light-burned dolomite to be high temperature is difficult by direct heating.

**Keywords:** Solar concentrator, Light-burned Dolomite, Magnesium, Solar furnace, Renewable energy

### 1. はじめに

近年、再生可能エネルギーによる発電が注目されている。一般的には、太陽光発電や風力発電が再生可能エネルギーを利用した発電として挙げられる。しかし、これらの発電方法には天候や時間による変化に強く影響されてしまうという問題がある。これらの問題を解決し、最近注目されているのがマグネシウムを利用した発電である。

マグネシウムを利用した発電の一例として、マグネシウム空気電池がある。マグネシウム空気電池の負極活物質は金属マグネシウム、正極活物質は空気中の酸素である。負極のマグネシウムは、電子を放出してマグネシウムイオンとなり、電解液の中に溶け出す。一方、正極では酸素と水が電子を受け取り、水酸化イオンとなる。全体で見ると、マグネシウムと酸素、水から水酸化マグネシウムが生成される。水がなくなると、水酸化マグネシウムは最終的に酸化マグネシウムになる。最終的に生成された酸化マグネシウムを還元することで何度でも電池の燃料として使用することができるのでクリーンな発電方法として注目を集めている。

現在、マグネシウムの精製には化石燃料が使用されている。化石燃料はエネルギー枯渇の問題があることや、エネルギーを取り出す際に窒素酸化物や二酸化炭素など

の温室効果ガスが発生し、地球温暖化や大気汚染の原因となっている。よって、化石燃料に代わるようなエネルギー源が必要とされている。太陽熱はエネルギー枯渇の問題がないことや温室効果ガスを出さないことなどから化石燃料に代わるエネルギー源として注目を集めている。宮崎大学には、ビームダウン式タワー型太陽集光装置が設置されており、太陽光を集光しエネルギーを得ることができる。

本研究では、ビームダウン式タワー型太陽集光装置のためのレシーバを開発した。ビームダウン式タワー型太陽集光装置の一般的なレシーバでは、空気や熔融塩などの熱媒体を加熱するが、本研究で開発した固体攪拌型蓄熱装置では、蓄熱材となる固体粒子をビームダウン式タワー型太陽集光装置で直接加熱することができる。この固体攪拌型蓄熱装置は、受光部と蓄熱槽が一体となっている装置であり、この装置を使用することで1000℃以上の蓄熱が可能である。そこで、ビームダウン式タワー型太陽集光装置のために開発されたレシーバを改良し、発電に必要なマグネシウム精製のための太陽炉を設計し、マグネシウムの原料となる物質を連続加熱することを検討した。

本研究では、マグネシウムの原料として軽焼ドロマイトに注目した。しかし、軽焼ドロマイトをビームダウン式タワー型太陽集光装置での加熱実験のデータがなく、加熱特性が不明である。よって、本研究では、ビームダウン式タワー型太陽集光装置によって軽焼ドロマイトを加熱し、軽焼ドロマイトの加熱特性および加熱方法の検討を目的とする。

1) 工学専攻機械・情報系コース大学院生

2) 機械設計システム工学科教授

3) 機械設計システム工学科助教

4) 工学専攻機械・情報系コース大学院生

## 2. 実験装置

### 2.1 ビームダウン式タワー型太陽集光装置

宮崎大学に建設されたビームダウン式タワー型太陽集光装置を図1に示す。集光装置は、地上に配置されたヘリオスタット、タワー、そしてタワー上部に設置されている楕円鏡で構成されている。タワー型の発電効率は20~30%<sup>1)</sup>と考えられている。図2にビームダウン式タワー型太陽集光装置の集光原理を示す。太陽光は最初に地上のヘリオスタットによってタワーの上部にある楕円鏡の第1焦点に集光される。楕円鏡は2つの焦点を持ち、一方を通過して入射した光を他方に集光するため、太陽光は楕円鏡の第2焦点に最終的に集光される。宮崎大学に設置されているビームダウン式タワー型太陽集光装置は中央タワーの高さが16mで上部には楕円鏡が配置され、実験場が地上から7mの位置に設置されている。ヘリオスタットはタワーの周囲60m×60mの範囲に88基配置されている。ミラー構成はマルチミラー式と呼ばれるもので、直径500mmの凹面鏡10枚で1基のヘリオスタットが構成されている。ヘリオスタットの配置方式は南側の欠けたスリークオータ配置である。楕円鏡はタワー上部、高さ16mの位置に配置されている。楕円鏡の第1焦点は地上から14m、第2焦点は地上から10mに形成される。ビームダウン式タワー型太陽集光装置の集光度は、ヘリオスタットの総受光面積が約176m<sup>2</sup>、楕円鏡第2焦点に形成される集光部は直径約1000mm、出力は約100kW<sub>th</sub>である。

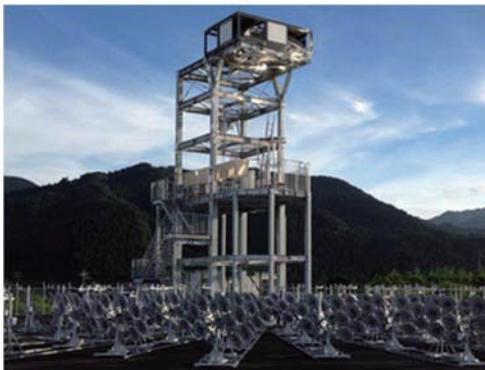


図1. ビームダウン式タワー型太陽集光装置.

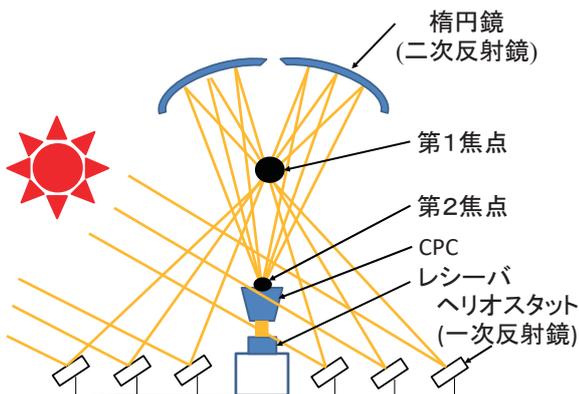


図2. 集光原理.

### 2.2 CPC

CPCを図3に、CPCの内部を図4に示す。CPCは、入口がビームダウン太陽集光装置の楕円鏡第二焦点にくるように設置されている。CPC内部には多数の鏡があり、その鏡によって第二焦点の太陽光がさらに集光がされる。楕円鏡第二焦点の集光部φ1000mm、それに対し、CPC焦点の集光部はφ400mm程度となり、集光部であるCPC出口ではより高い放射流束が得ることができる。



図3. CPCの外観.



図4. CPC内部(上部より).

### 2.2 軽焼ドロマイト

軽焼ドロマイトは、白色の物体で主に酸化カルシウムと酸化マグネシウムから構成される鉱物である。表1に軽焼ドロマイトに含まれている物質の含有率を図5に軽焼ドロマイトを示す。今回の実験で使用した軽焼ドロマイトは大きさが5mm未満で、形は不揃いであり、とがったような形になっている。この軽焼ドロマイトは、ドロマイトという鉱物が原料であり、ドロマイトは主に炭酸カルシウムと炭酸マグネシウムで構成されている。このドロマイトを約1000℃まで加熱することによって式(1)に示すような化学反応が起こり、軽焼ドロマイトとなる<sup>2)</sup>。



また、軽焼ドロマイトには多くの酸化マグネシウムが含まれており、酸化マグネシウムはアルミニウムと混合させ 1100℃まで加熱することで、式(2)に示すような化学反応が起こりマグネシウムが発生する<sup>3)</sup>。このとき発生するマグネシウムは気体である。



表 1. 軽焼ドロマイトの成分の含有率.

	MgO	MgO+CaO	CO <sub>2</sub>
質量比	30.0%以上	93.0%以上	2.0%以下



図 5. 軽焼ドロマイト.

### 2.3 アルミナ球

軽焼ドロマイトの加熱特性を評価するために比較対象として本研究室で蓄熱材として研究を行っているアルミナ球の加熱実験を行った。アルミナ球を使用した理由は、本研究室での研究で、ビームダウン式タワー型太陽集光装置で加熱する実験を行っており、加熱特性や物性値が判明しているからである。図 6 に実験で使用したアルミナ球を示す。アルミナ球は融点が 2015℃<sup>4)</sup>と高温である。また、アルミナ球の粒径については小さいほど、今回の加熱実験で使用している軽焼ドロマイトと同じくらいにすることが出来、二つの実験を近い実験条件にすることができるので、粒径 3 mm のものを使用した。



図 6. アルミナ球.

### 2.4 固体攪拌型蓄熱装置の受光部

本研究室では、太陽光を受ける受光部と、太陽光により加熱された熱を蓄熱する蓄熱槽とが一体となった固体攪拌型蓄熱装置が開発された。受光部・蓄熱槽は2つの円筒と2つのピストンからできている。材質は SUS303 であり、内円筒の大きさは直径 276 mm、高さ 320 mm、外円筒の大きさは直径 398 mm、高さ 450 mm である。この装置を使用することでビームダウン太陽集光装置での 1000℃以上の加熱が可能となる。図 7 に受光部の概略図を示す。

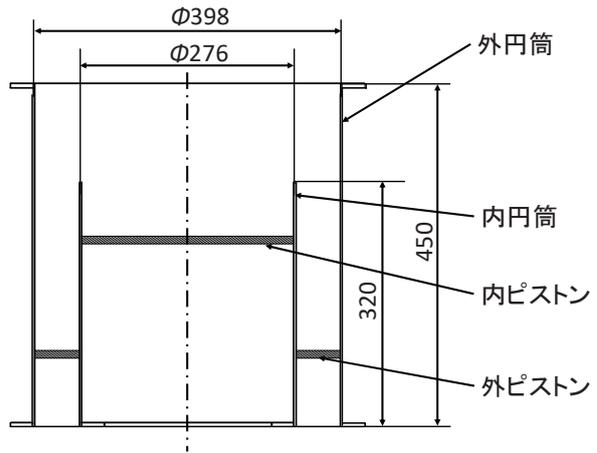


図 7. 固体攪拌型蓄熱装置の受光部概略.

### 3. 軽焼ドロマイト加熱実験

#### 3.1 実験方法

今回の実験では、固体攪拌型蓄熱装置を用いて実験を行った。また、固体攪拌型蓄熱装置を駆動させないので外円筒は使用せずに内円筒のみでの実験を行った。図 8 に温度の測定方法を示す。熱電対は内円筒の中心まで入れ、加熱部中心の温度を測定する。また、ビームダウン式タワー型太陽集光装置で加熱する物質は、軽焼ドロマイトとアルミナ球である。

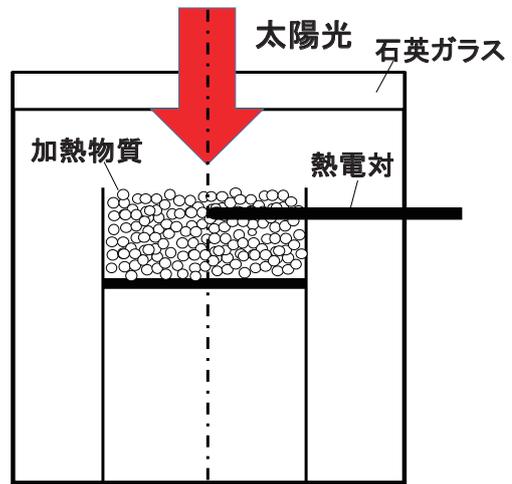


図 8. 温度測定方法.

### 3.2 実験結果

軽焼ドロマイトの加熱実験とアルミナ球の加熱実験の温度変化グラフを図9に示す。軽焼ドロマイト加熱実験では、実験時間50分とし、アルミナ球加熱実験ではアルミナ球の最高使用温度が1500℃となっているため、その温度に達する前に実験を終了した。実験時間は35分である。また、表2に直達日射量、ヘリオスタットの平均集光台数、実験終了時の温度をまとめた実験結果を示す。

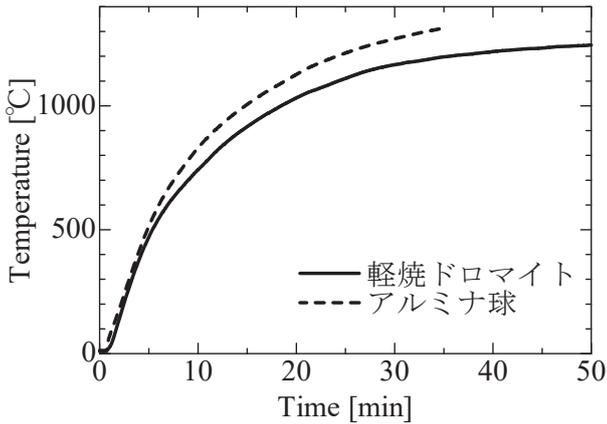


図9. 加熱実験結果.

表2. 実験結果.

被加熱材料	軽焼ドロマイト	アルミナ球
直達日射量[W/m <sup>2</sup> ]	892	964
平均集光台数	75	75
最高温度[°C]	1246	1314

図9から、アルミナ球のほうが短時間で高温になることが分かった。これは、二つの物質の熱伝導率や比熱などの熱物性値にあまり差がないことから吸収率が大きく関係しているのではないかと考えた。よって、実験データからアルミナ球と軽焼ドロマイトの吸収率の算出する方法を考察し計算を行った。

### 3.3 考察

#### 3.3.1 吸収率の算出

軽焼ドロマイトの加熱特性を考察するにあたり、物質内の熱伝導は一次元であると仮定し、熱伝導による温度上昇を計算し、実験の温度変化と比較することにより吸収率を求めた。一次元熱伝導方程式は、

$$\frac{\partial T(x, t)}{\partial t} = a \times \frac{\partial^2 T(x, t)}{\partial x^2} \quad (3)$$

となり、左辺の1階微分を前進差分、右辺の2階微分を2階中心差分により差分化すると、式(3)は、

$$\frac{T_i^{j+1} - T_i^j}{\Delta t} = a \times \frac{T_{i+1}^j - 2T_i^j + T_{i-1}^j}{(\Delta x)^2} \quad (4)$$

となり、 $\lambda = \frac{a\Delta t}{(\Delta x)^2}$ とおくと、

$$T_i^{j+1} = \lambda T_{i+1}^j + (1 - 2\lambda)T_i^j + \lambda T_{i-1}^j \quad (5)$$

また、今回は  $\Delta x = 1 \times 10^{-3}$ [m]として計算を行った。固体が初め周囲の温度と等しい温度で一定であり、 $x = 0$ にステップ状に温度変化を与えた時の温度分布の式は式(6)のようになる。

$$T_{(x, t)} = T_s + \left\{ (T_0 - T_s) \operatorname{erf} \left( \frac{\Delta x}{2\sqrt{a\Delta t}} \right) \right\} \quad (6)$$

式(6)を変形すると、

$$\Delta t = \frac{-(\Delta x)^2}{4 \times a \times \ln \left\{ 1 - \left( \frac{T_{(x, t)} - T_s}{T_0 - T_s} \right)^2 \right\}} \quad (7)$$

$\Delta t$  : 時間の刻み幅[s]、 $T_s$  : ステップ状に与える温度[°C]、 $T_0$  : 固体の初期温度[°C]、 $a$  : 熱拡散率[m<sup>2</sup>/s]、 $T_{(x, t)}$  : 表面からの距離 $x$ と時間 $t$ における温度[°C]、 $\Delta x$  : 深さ方向の刻み幅(=  $1 \times 10^{-3}$ )[m]

また、加熱表面部から $\Delta x$ での温度と初期温度の差である( $T_{(x, t)} - T_s$ )が加熱表面温度と初期温度の差( $T_0 - T_s$ )の99%以上の場合を温度変化の影響を受けていないとし、一瞬で加熱されるものとして計算を行った。

加熱実験では、熱電対が直接太陽光にあたらないように熱電対上に加熱物質の層を作り、表面よりも少し下に測定点のある状態になっている。よって、加熱部表面から熱電対上までの厚さが5mm、熱電対の直径は8mmあるので、図10のように熱電対の測定位置は加熱部表面から深さ9mmの位置にあるとし、計算を行った。また、物体の深さ方向は、50mmまで計算を行った。

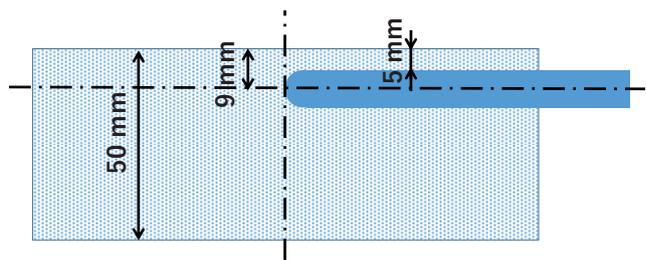


図10. 計測位置.

加熱表面からの位置を $x_i$ 、加熱開始からの時間を $t_j$ とし、

$$x_i = \Delta x \times i \quad i=0, 1, 2, \dots, 50$$

$$t_j = \Delta t \times j \quad j=0, 1, 2, \dots, n$$

とし、計算を行う。

また、表現を簡略化するために加熱表面からの位置 $x_i$ 、加熱開始からの時間 $t_j$ の場合の温度 $T_{(x_i, t_j)}$ を $T_i^j$ で表すこととする。加熱部表面の温度を $T_0^j$ とすると、加熱部表面の温度は式(8)で表すことができる。

$$T_0^j = T_1^j = T_1^{j-1} + \Delta T^j \quad (8)$$

ここで、 $\Delta T^j$ は、

$$\Delta T^j = \Delta T + \Delta T'^j \tag{9}$$

$\Delta T^j$  : 表面部の上昇温度

$\Delta T$  : 熱伝導がない時の加熱部表面の上昇温度

$\Delta T'^j$  : 熱伝導によって変化する温度( $\Delta T'^j < 0$ )

また、式(9)の $\Delta T$ 、 $\Delta T'^j$ は、

$$\begin{aligned} \Delta T &= \frac{Q}{m \times c} \\ &= \frac{DNI \times Cm \times \sigma \times N \times \Delta t}{\Delta x \times \rho \times c} \end{aligned} \tag{10}^a$$

$$\begin{aligned} \Delta T'^j &= \frac{Q'}{m \times c} \\ &= \frac{\lambda \times (T_2^{j-1} - T_1^{j-1})}{\Delta x^2 \times \rho \times c} \end{aligned} \tag{11}$$

$DNI$  : 直達日射量 [ $W/m^2$ ]、 $Cm$  : 集光倍率(9.0)<sup>6)</sup>、 $\sigma$  : 透過率(0.9)、 $N$  : 集光台数、 $\rho$  : 密度 [ $kg/m^3$ ]、 $c$  : 比熱 [ $J/(kg \cdot K)$ ]、 $\lambda$  : 熱伝導率 [ $W/(m \cdot K)$ ]

以上の式を利用し、アルミナ球の物性値から計算した結果を図11に示す。今回の計算では、吸収率のわかっている  $227^\circ C \sim 527^\circ C$  の範囲の実験データを使用して吸収率の算出を行ったところ、アルミナ球の吸収率が 0.57 という結果となった。文献値では、 $227^\circ C \sim 527^\circ C$  で吸収率が 0.6~0.7<sup>7)</sup>となっている。今回の計算では、熱損失を考慮していないので文献値よりも低くなったものと考えられる。

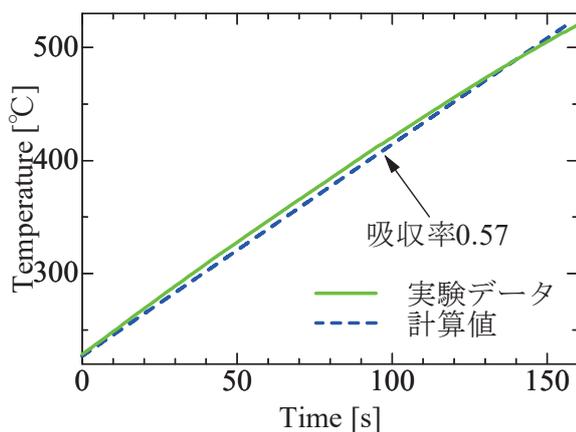


図11. アルミナ球の吸収率.

軽焼ドロマイトの吸収率算出もアルミナ球の吸収率算出と同様の方法で行った。しかし、実験データが  $227^\circ C \sim 527^\circ C$  間で単位時間当たりの温度上昇幅が変化しているので、0~50 s、50~100 s、100~150 s、150~190 s と区間を分けて計算を行った。また、軽焼ドロマイトの

物性値は正確な値が不明であるので、主な含有物である酸化マグネシウムと酸化カルシウムの物性値と表1に示されるそれぞれの物質が含まれる含有率の値を利用して予測した。計算結果のグラフを図12に示す。吸収率の値は0~50 sの区間では0.58、50~100 sの区間では0.55、100~150 sの区間では0.52、150~185 sの区間では0.49となった。

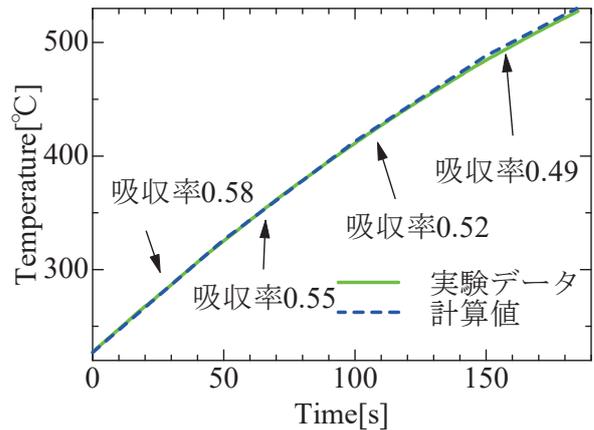


図12. 軽焼ドロマイトの吸収率.

### 3.3.2 加熱方法の検討

今回、軽焼ドロマイトを直接加熱してみたが、50分間の加熱で  $1245^\circ C$  という結果になった。しかし、この温度は熱電対上の部分の温度であり、熱電対下ではさらに温度が低い状態になっていると考えられる。軽焼ドロマイトから、マグネシウムを完全に取り出すには最低でも  $1390^\circ C$  必要であるため、今回の加熱実験では必要温度に達しないことが分かった。また、高温域になるにつれて温度上昇幅が小さくなっていることから、高温になると吸収率は低くなっていると考えられる。

以上のことから、軽焼ドロマイトをビームダウン式タワー型太陽集光装置で直接加熱してもマグネシウムの精製することは難しいと考え、直接加熱以外の方法を考えた。以下に加熱方法を示す。

#### (1) 軽焼ドロマイトとほかの物質を混合

軽焼ドロマイトのみでは吸収率が低く温度が上昇しなかった。よって、吸収率の高い物質を混合させることによって軽焼ドロマイトの温度が上昇すると思われる。混合させる物質の条件として、吸収率が高いということ以外に、目的の化学反応以外が起こらないこと、分離しやすいことが挙げられる。

#### (2) 軽焼ドロマイトを間接加熱する

軽焼ドロマイトのみの加熱では、目標温度まで上昇しなかった。よって、加熱表面部に吸収率の高い物質を加熱し、そこから熱を伝達することによって軽焼ドロマイトを加熱することが考えられる。間接加熱をする方法としてレトルトを使用した実験が行われている。<sup>8)</sup>

#### 4. 結論

軽焼ドロマイトをビームダウン式タワー型太陽集光装置で直接加熱した場合の加熱実験データがなく、加熱特性が不明であったので、軽焼ドロマイトの加熱特性および加熱方法の検討を行った。以下に得られた結論を示す。

1. 軽焼ドロマイト単体をビームダウン式タワー型太陽集光装置で加熱した結果、50分加熱で最高温度1245°Cまで加熱することができた。
2. 軽焼ドロマイトの吸収率の算出を行った結果、軽焼ドロマイトの吸収率は0.49~0.58となった。しかし、これは熱損失を考慮していないので実際の吸収率の値はこれよりも少し高いと考えられる。

今回の実験では、軽焼ドロマイトを直接加熱しても目標温度の1390°Cに達することができないことが分かった。これは、軽焼ドロマイトの吸収率が低く、高温になればさらに吸収率が低下することが原因だと考えられる。これ以上の温度に加熱するには間接加熱を検討する必要がある。

#### 謝辞

本研究を進めるにあたり、適切なご助言やサポートをしていただいた木村技術職員、三宅技術職員、濱畑技術職員に感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構, NEDO再生可能エネルギー技術白書 第2版 ー第5章 太陽熱発電・太陽熱利用ー, pp8-9, 2014.
- 2) Subagjo, Winny Wulandari, Pratitis Mega Adinata, and Anita Fajrin : “Thermal Decomposition of Dolomite under CO2-Air Atmosphere”, American Institute of Physics.
- 3) 松島知夫 大山繁 : 酸化マグネシウムとアルミニウムおよびアルミニウム-鉄合金との反応について, j-stage 軽金属 Vol.15 No.6 (No.74), pp31-36, 1965.
- 4) 国立天文台: 理科年表表 机上版 1991, p.485, 1991.
- 5) 前田順登: ビームダウン式太陽集光装置のための固体攪拌型蓄熱装置の改良, 平成二十八年度 宮崎大学卒業論文, p38, 2017.
- 6) 西山拓冶: ビームダウン式太陽集光装置でのCPC出口における放射流束計測, 平成二十八年度 宮崎大学卒業論文, p37, 2017.
- 7) 社団法人日本機械学会 伝熱工学資料 改訂第4版, 社団法人日本機械学会, p184, 1986.
- 8) 井上誠 丹野敦 小島陽: 真空昇華法によるマグネシウムの精製, j-stage Vol.40, No.12, pp879-884, 1990.