

太陽光レシーバから熱交換器への蓄熱粒子移動方法の検討

橋本 直季^{a)}・長瀬 慶紀^{b)}・友松 重樹^{c)}・野村 文椰^{a)}・木村 正寿^{d)}

Examination of transfer method for heat storage particle in solar receiver to heat exchanger

Naoki HASHIMOTO, Yoshinori NAGASE, Shigeki TOMOMATSU, Fumiya NOMURA, Masatoshi KIMURA

Abstract

In solar thermal power generation, it is necessary to put the heat medium heated by the solar light receiver into the heat exchanger, and exchange heat with the working fluid such as water or air that drives a heat engine such as a turbine. Previously, heat exchange experiments were conducted by directly contacting high-temperature air with a certain amount of alumina particles as a heat storage material. However, continuous heat exchange was not possible due to the batch type heat exchanger. Therefore, it is necessary to develop a heat exchanger that continuously exchanges heat by directly contacting the heat storage particles with the working fluid. For this purpose, a mechanism that allows the heat storage medium to move from the receiver at atmospheric pressure to the heat exchanger at high pressure is required. Since the mechanism uses a poppet valve to discharge heat storage particles, a preliminary experimental device was manufactured to confirm the operation.

Keywords: Heat storage particles, Heat exchange, Poppet valve, Alumina particles, Solar heat

1. はじめに

現代の人類は電気エネルギーを利用し生活しているが、主な発電方法としては化石燃料を燃焼させ水を沸騰させて水蒸気を取り出しタービンを回す火力発電や、ウランやプルトニウム等の物質が核分裂する際に放つ熱を利用し発電を行う原子力発電などである。火力発電は化石燃料を燃焼させるので温室効果ガスを大量に排出して環境破壊などにつながるほか、資源が有限であるため将来の燃料の枯渇が懸念されている。原子力発電は、火力発電のように多量の温室効果ガスを排出したりしないが、放射線の出る使用済み燃料が排出されるため、その廃棄場所などが問題である。再生可能エネルギーを利用した発電方法には、水力発電や風力発電などがあり、発電時には温室効果ガスを出さないが、発電量が天候に左右されることなどがあり、電力供給が不安定であるデメリットがある。その再生可能エネルギーを利用した発電方法の一つとして太陽熱発電がある。本研究室では、単位面積当たりの集光率が高く太陽光集光装置の規模として中規模から大規模のエネルギー供給が適しているビームダウン式タワー型太陽光集光装置 (Beam-Down Solar Concentrator 以下 BDSC と記す) の利用についての研究が行われている。BDSC を用いて太陽光を集光し、太陽光を熱に変換する太陽光レシーバ内の蓄熱粒子を加熱し、加熱

した蓄熱粒子から熱エネルギーを取り出すために粒子と流体間で熱交換を行う。熱交換により加熱された流体は、タービンや圧縮空気エンジンなどの熱機関に送られ、発電機が調動することで発電を行う。熱交換器内は熱機関のための高圧の作動流体で満たされているため、加熱された粒子を熱交換器に投入する際、高圧の作動流体の漏れを極力少なくすることが必要である。

また、太陽熱発電における熱媒体は、水蒸気、熔融塩、固体粒子などがある¹⁾。水蒸気を用いることのメリットは、直接加熱することで約400°Cの蒸気を発生させることができることにより、発電効率が向上することである。近年、水・水蒸気を熱媒体として利用する DSG システムを採用したタワー型のプラントが建設され、アメリカの eSolar, BrightSource では、450-550 °Cの水蒸気を生成可能としている。デメリットとして、蓄熱する際には蒸気をそのままタンクで保存するので、蓄熱できる時間が短い点が挙げられる²⁾。熔融塩については、一般的に使用されているのは硝酸塩系の熔融塩である。メリットは、熔融塩は最高 550 °C程度まで加熱が可能のため、熱交換器によって水蒸気を発生させる場合 550 °Cに近い温度の水蒸気を発生させることができる点、熔融塩自体を蓄熱媒体として利用できる点などが挙げられる。デメリットとしては、熔融塩の凝固を防ぐために熔融塩の温度を熔融塩の融点よりも約 40-50 °C高く維持するための必要エネルギーが大きい点、熔融塩がシステム外に漏れ出した際の環境への負荷が大きい点などが挙げられる³⁾。固体粒子については、カーテン状に砂を空中に自由落下させ流し続けているところに太陽光を集光させ蓄熱するという方法などが研究されており、700°C前後の高温の蓄熱も可能にした事例もある³⁾。固体粒子を用いるメリットと

a)工学専攻機械・情報系コース大学院生

b)機械設計システム工学科教授

c)機械設計システム工学科助教

d)教育研究支援技術センター技術専門員

しては、固体粒子が太陽光により加熱された後、熱交換を行わずそのまま蓄熱を行える点がある。デメリットとしては、粒子に蓄熱を行う際に太陽光受光部から粒子がこぼれてしまうことや風の影響によって粒子の落下位置に影響が出る点などが挙げられる。

本研究室では、粒子と流体の熱交換についての研究⁴⁾が行われているが、高圧の熱交換器内に粒子を投入し、直接接触させることにより熱交換を行うことに関する研究は行われていなかった。よって、本研究は熱交換器内の高圧の作動流体の漏れを抑えながら、加熱粒子を熱交換器に投入するための機構を設計・製作し、動作を確認することを目的とする。

2. 実験装置

2.1 太陽熱発電システム

図1に太陽熱発電システムの概要図を示す。本研究での太陽熱発電は、太陽光レシーバで加熱された粒子が、熱交換器に投入され、熱交換器内で高圧の作動流体に直接接触することにより熱交換を行い、熱量を得た作動流体がタービンや圧縮空気エンジンなどを駆動させ、発電を行うものである。固体粒子を蓄熱材料として利用する太陽熱プラントシステムに関する研究は少なく、最も集光倍率が高く高温化が可能であると考えられる BDSC についても研究は行われてこなかった。本研究室は BDSC の利用を目的とする研究が様々行われてきたが、BDSC と固体粒子を用いて連続的に発電することを目的とする研究は行われていなかった。そこで、固体粒子に蓄熱する太陽光レシーバや、空気と加熱された粒子が熱交換する熱交換器と粒子が循環できるようにし、両者の間を循環させ、連続的な発電を行う装置を開発する必要がある。太陽光レシーバ内は大気圧であるが、熱交換器内は高圧の作動流体によって満たされている。そのため、熱交換器内の圧力を保ったまま粒子を熱交換器内部に投入する機構が必要である。

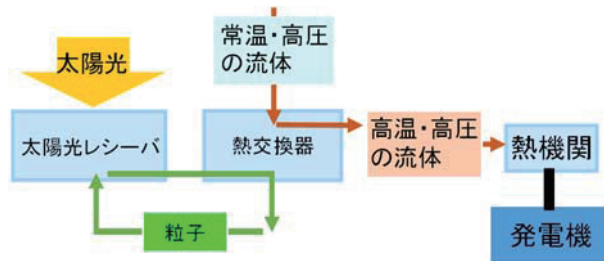


図1. 太陽熱発電システム概要図

2.2 BDSC

図2にBDSCの概略図を示す。タワー周辺に設置され凹面鏡を備えたヘリオスタットと呼ばれる太陽追尾ミラーとタワー上部の楕円鏡によって、太陽光を1点に集める装置である。図2において、太陽光がヘリオスタットに反射し、楕円鏡の第一焦点を通過する。そのまま楕円鏡に反射し、楕円の性質によって楕円鏡の第二焦点を通過する。第二焦点はCPCと呼ばれる光濃縮装置の上端に位置しており、第二焦点を通過した光はCPCの中に入り、第二焦点に集光された光がさらに濃縮されレシーバに照射される。宮崎大学のBDSCは、熱ベースで100kWhを得ることができる。

一般的なタワー型太陽集光装置のメリットとしては、多数のヘ

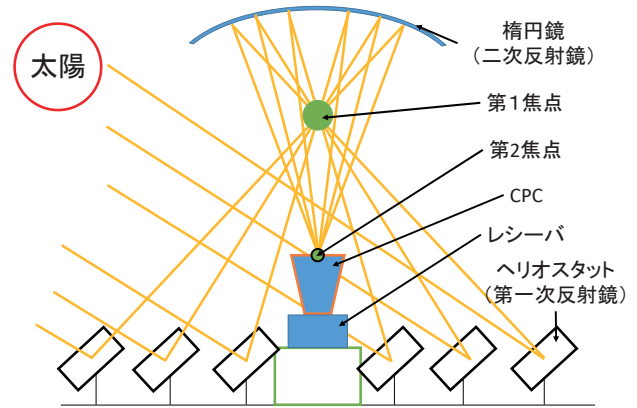


図2. BDSC

リオスタットを制御して反射される太陽光を1点に集めるので、集光度が高く高温化に向いている点が挙げられる。一方、デメリットとしては、メンテナンスが比較的困難である点とシステム導入のコストが高い点が挙げられる。

BDSCは、タワー型太陽光集光装置の一種であり、焦点が地上に近い場合、蓄熱装置などの設置が行いやすいなどのメリットがある。

2.3 粒子供給機構

粒子を熱交換器内の圧力を保ったまま太陽光レシーバと熱交換器を循環させる必要がある。そこで使用するのが粒子供給機構である。粒子供給機構の動作は以下のように行われる。粒子供給機構の動作イメージ図を図3に示す。

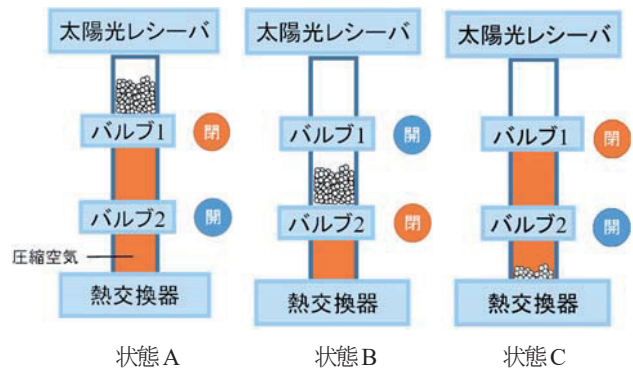


図3. 粒子供給機構イメージ図

図3の状態AからCまで時系列列挙にならんでいる。初めに、太陽光レシーバから落下してきた粒子がバルブ1で止まり、状態Aになる。バルブ2が閉じた後にバルブ1が開き粒子がバルブ1とバルブ2の間の空間に投入され、状態Bになる。バルブ1が閉じた後にバルブ2が開き熱交換器内に投入され、状態Cになる。この状態Aから状態Cを繰り返し、熱交換器へ粒子を投入する。

2.4 粒子排出装置

図4に粒子排出実験で使用する粒子排出装置を示す。この装置は、図3に示された粒子供給機構のバルブとして、二つバルブが

ある内の一つを取り出したものである。粒子排出装置は粒子容器、粒子が排出される様子を記録するカメラなどから構成される。

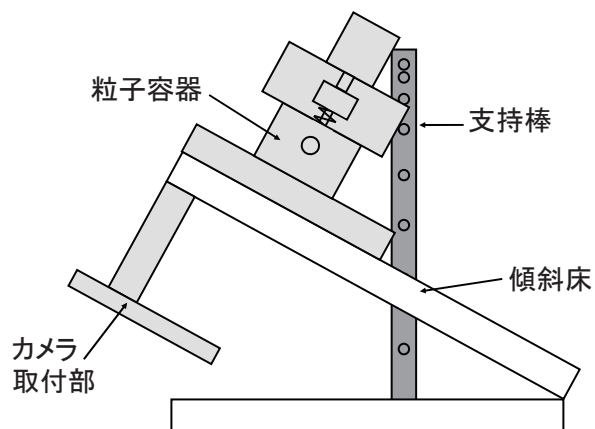


図4. 粒子排出装置

2.5 粒子容器

図4の粒子排出装置の、粒子容器周辺機器のみを示した概略図を図5に示す。粒子容器には、ソレノイド、ポペットバルブ、バルブスプリング、タペットなどが含まれる。粒子が粒子容器内に充填され、ソレノイドを動作させることによりソレノイドはタペットを介してポペットバルブを押し出し、粒子容器内の粒子を排出する。その後、ソレノイドの電源を切るとバルブスプリングによりポペットバルブは閉じられる。図4のカメラのレンズは、図5中のポペットバルブの軸の延長線上に配置され、ポペットバルブの底面と正対するように設置される。

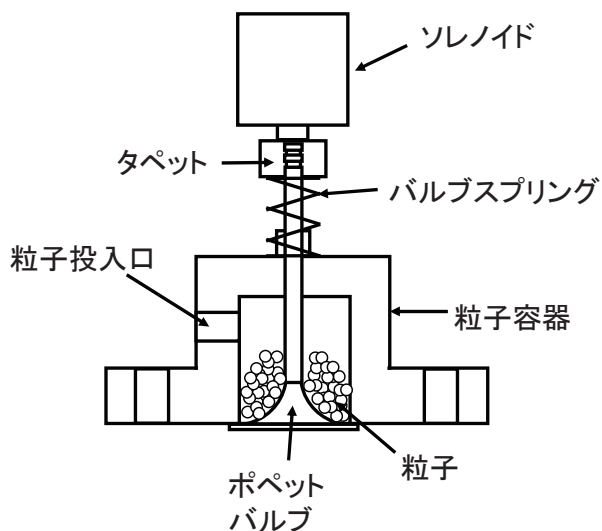


図5. 粒子容器

図6に粒子容器単体の断面図を示す。粒子容器はポペットバルブのバルブガイド、ポペットバルブの座面と一体化しており粒子容器の中央にポペットバルブが差し込まれ取り付けられるように設計されている。材質はA5083、粒子容器内体積は41.4cm³であり、傾斜床と接続するためにM8の並目ねじが通る穴がフランジに開けられている。また、粒子容器の側面には粒子を充填する

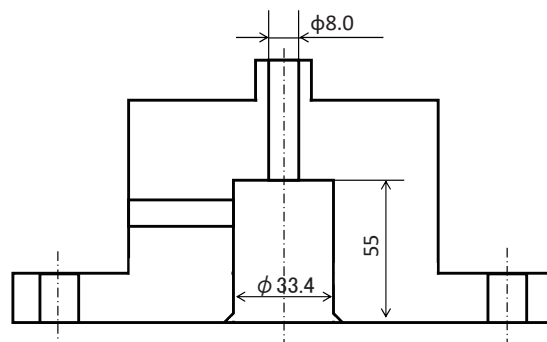


図6. 粒子容器単体

ための穴が設けられている。

粒子容器に取り付けられたポペットバルブを図7に示す。また、その諸元を表1に示す。このポペットバルブは、粒子容器に充填された粒子を排出するためのバルブである。

表1. ポペットバルブの諸元

型番	トヨタ 13715-61030
バルブ軸径	7.95 mm
バルブ傘部直径	37.45 mm
バルブ軸長さ	125 mm

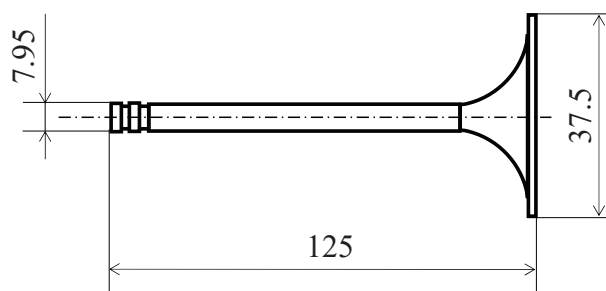


図7. ポペットバルブ

図8にソレノイドの外観を、表2にソレノイドの諸元を示す。ソレノイドは、電流を流すことによってプランジャ（可動鉄心）が押し出され、ポペットバルブを押し開く。

表2. ソレノイドの諸元

製造会社	国際電業
型番	SA-3002
定格電圧	AC 100V

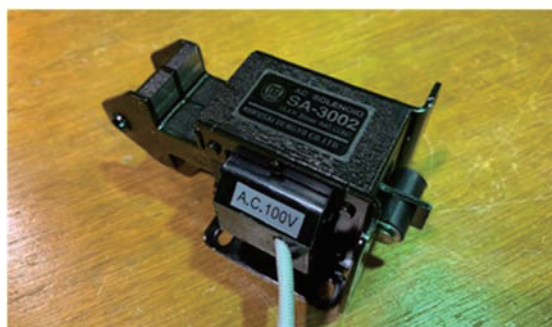


図8. ソレノイド

バルブスプリングの諸元を表3に示す。バルブスプリングのバネ定数は、ポペットバルブを設置した時のバネの力がバルブの重量、ソレノイドのプランジヤの重量を上回るように選定した。

表3. バルブスプリングの諸元

バネ自然長	48.5 mm
バネ線径	1.5 mm
バネ定数	1 N/mm
巻き数	8

2.6 蓄熱材料

蓄熱材料は本研究室内で最も使用される粒径が 5 ± 0.5 mmの平均直径5 mmのアルミナの球を採用した。表4にアルミナ球の諸元を、図9に外観を示す。

表4. アルミナ球の諸元

化学式	Al ₂ O ₃
密度	3890 kg/m ³

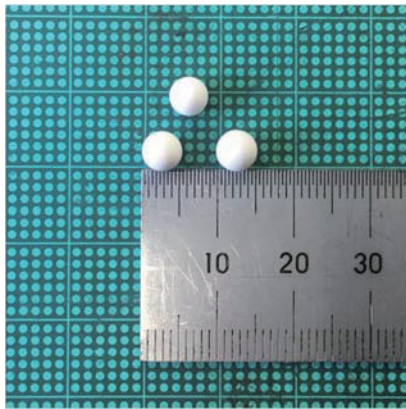


図9. アルミナ球

2.7 カメラ

撮影に使用したカメラは、スマートフォン付属のカメラを使用しスローモーション動画を撮影・解析することで粒子の排出時間を計測した。レンズの中央の位置はポペットバルブの軸の延長線上に設定し、バルブの真下に設置された。表5にカメラの諸元を示す。

表5. カメラ諸元

画素数	1920×1080
フレーム数	240 fps

3. 粒子排出実験

粒子容器、ソレノイド、駆動部品取付け部、ポペットバルブを用いて、熱交換器に粒子を排出する際の粒子供給機構の設計のデータを得るために実験を行った。粒子供給機構を模擬した粒子排出装置を製作し、粒子投入装置の傾斜角、ポペットバルブのリフト量、排出粒子量を変化させ、それぞれの条件下で粒子を排出する際に必要な時間を計測する実験を行った。

3.1 実験条件

粒子容器を傾斜させ、ポペットバルブの軸と水平面との間になす角度を傾斜角 θ と定義する。また、バルブが開いた際に軸方向に動いた距離をリフト量 L と定義する。両者を図10に示す。また、表6に実験条件を示す。

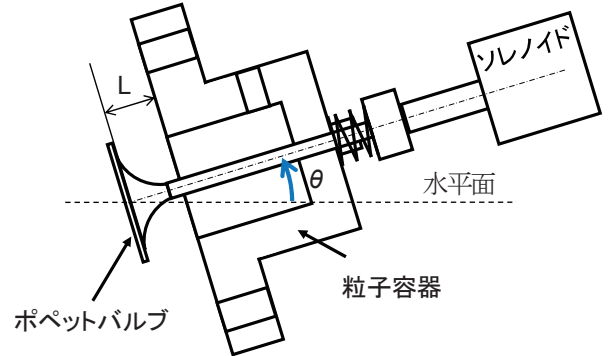


図10. 傾斜角とリフト量の定義

表6. 実験条件

リフト量 [mm]	7	13, 20
粒子量 [cm ³]	10, 20, 30	
傾斜角 [deg.]	10, 50, 90	10, 20, 30, 50, 90
粒子直径 [mm]	5	
実験回数 [回]	3	

7 mmのリフト量は、直径5 mmの粒子がバルブを通過する事の出来る最小のリフト量である。最大リフト量である20 mmとその中間の13 mmのリフト量を設定した。粒子量は、粒子容器内体積が30 cm³までの粒子を充填することを想定して作られたため、最大量を30 cm³とし、傾向を確認するため10 cm³と20 cm³の条件を設定した。傾斜角については、粒子容器を傾けた場合の粒子の排出時間に対する影響を把握するため、10°、50°、90°の3条件で実験を行い、次にリフト量が13 mmの場合と20 mmの場合で20°と30°の条件を追加した。

3.2 実験方法

初めにバルブのリフト量をスパーサによって所定のリフト量に設定する。次にカメラの光軸がバルブの底に垂直になるように設置する。そして、所定の傾斜角に設定し、粒子容器内に所

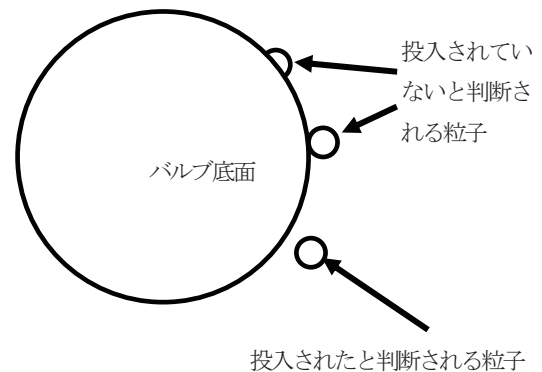


図11. 粒子位置の判断基準

定量のアルミナ球を投入する。動画の撮影を開始し、バルブを開き、粒子を排出した後に撮影を終了する。動画をPCに取り込み、バルブが動き始める瞬間から最後の粒子が排出されるまでの時間を求める。粒子がすべて排出されたと判断する基準については、図 11 に示すように粒子がバルブの傘部の底面の円より外側に全部の粒子が排出された瞬間とする。同様の実験を3 回行う。

3.3 実験結果及び考察

3.3.1 実験結果

粒子排出装置を用いた粒子排出実験の結果を以下の図 12 から図 14 に示す。縦軸に粒子の排出時間を、横軸に傾斜角を示しており粒子の体積をパラメータとしてバルブのリフト量別の結果を示している。なお、各条件の平均をグラフにプロットし最大値と最小値をエラーバーで表している。各条件での実験回数は3 回である。

図 12 のリフト量7mm の粒子排出時間の実験結果については、他のリフト量に比べ粒子排出時間のばらつきが大きい。また、リ

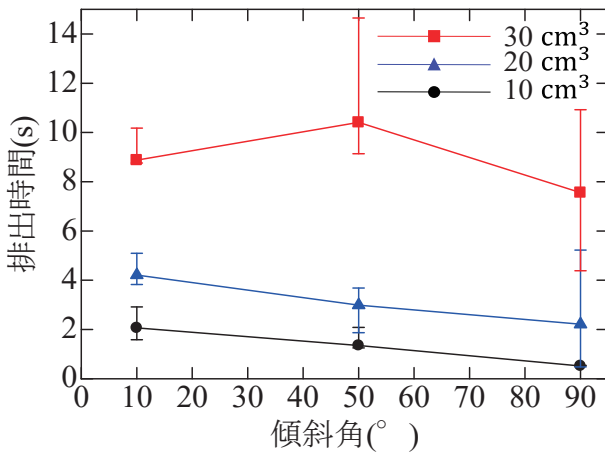


図 12. リフト量7mmにおける傾斜角による粒子量別排出時間

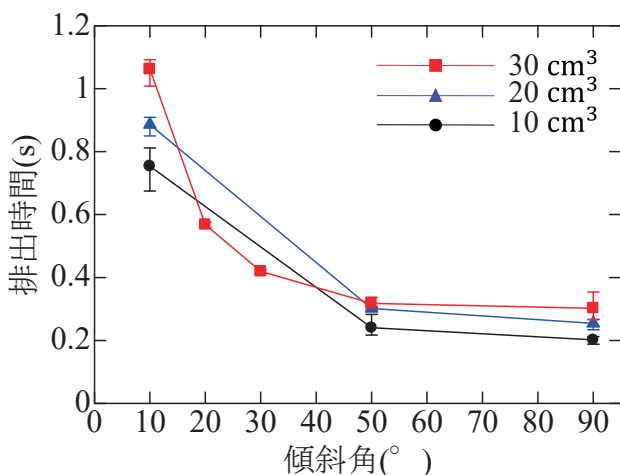


図 13. リフト量13mmでの傾斜角による粒子量別排出時間

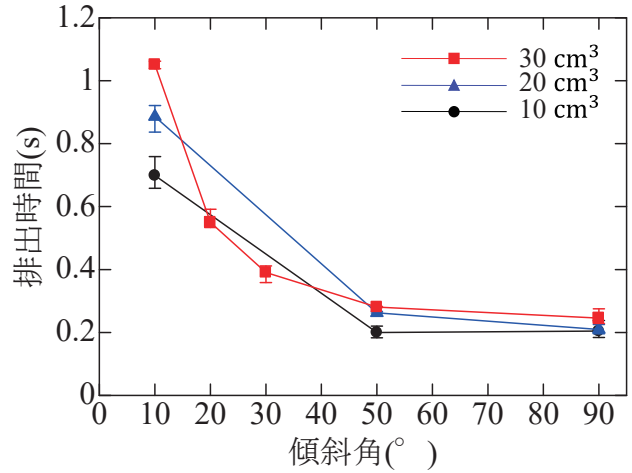


図 14. リフト量20mmでの傾斜角による粒子別排出時間

フト量が13mm の条件と20mm の条件の結果と比較して排出時間が10 倍程度長いことがわかる。その原因として、バルブ座面と傘部間の粒子の詰まりが考えられる。リフト量の7mm というのは、粒径に若干の差がある直径5mm のアルミナ球が通過する事の出来る最小のリフト量であるため、詰まりが発生したと考えられる。さらに、実験によってそれぞれ違うタイミングで断続的な粒子の流れが複数回観測され、ばらつきが大きくなったと考えられる。粒子量が多くなるほど粒子の排出時間が増加することにも同様の理由が考えられ、粒子の量が増加した影響と、粒子の量が多い条件の方がバルブシートとバルブフェースの間を通過しづらい粒子の数も増加することになり、排出されやすいはずの粒子が排出されにくい粒子にせき止められてしまう時間が増加する影響があるからだと考えられる。以上より、7mm のリフト量の実験には再現性がなく、粒子排出時間も長いので、設計条件から除外すべきである。

リフト量13mm、リフト量20mm の図 13 と図 14 については、どの傾斜角についても投入する粒子量が多いほど粒子排出時間は長くなっている。また、傾斜角が大きくなるほど排出時間が短くなっている。傾斜角が50°と90°の場合の粒子排出時間については共に差はほとんど見られなかったが、傾斜角が10°では、排出時間がそれらに比べ3 倍程度長くなった。傾斜角が大きな場合、すなわちバルブの軸が水平面に対して垂直に近い場合は、粒子の初期分布はバルブの傘部の上に満遍なく広がり、図 15 の左図のようにバルブの底面から見た時に粒子がバルブの軸を中心に放射状に排出されるが、傾斜角が小さくなると傘部の上全体には広がらず、粒子はバルブの座面の最も位置エネルギーが小さくなる位置を中心にバルブの傘部の上と粒子容器の円筒の軸方向に広がり、図 15 の右図のようにバルブの下側に偏った場所から粒子が排出されるためだと考えられる。そのため、単位時間あたりに排出される粒子の量が少なくなり粒子投入時間が長くなると考えられる。図 13、図 14 のリフト量が13mm および20mm において、粒子の量が30cm³ の条件では、いずれのリフト量の場合も、傾斜角が20°と30°の排出時間の差が、傾斜角30°と50°の排出時間の差よりも大きくなっていることから、傾斜角30°付近から急激に排出時間が増加していくと考えられる。



図15. 放射線状に排出される粒子(左)と偏って排出される粒子(右)

3.3.2 粒子排出時間

2章で記述した通り、粒子供給機構を用いて粒子を熱交換器内に投入するためには、二つのバルブを順に開けなければいけない。バルブが開いてからすべての粒子が完全に排出されるまでの時間は、バルブの上方に1秒あたりの流量と同じ体積の粒子が溜まっているとすると、設定された流量を保つためにはその粒子群が1秒以内に粒子供給機構を通り抜ける必要がある。粒子が粒子供給機構を通り抜ける間に必要な時間として、図3に示すバルブ1が開き粒子が全て投入される時間、バルブ1が閉じる時間、バルブ2が開き熱交換器に粒子が完全に投入される時間、バルブ2が閉まるまでの時間が必要になる。図16に二重バルブのタイミングチャートを示す。

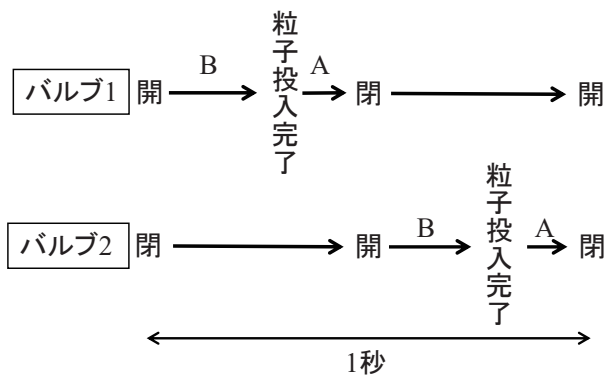


図16. 二重バルブのタイミングチャート

開いたバルブが閉じるまでの時間は0.04秒であることが実際に計測することで判明した。バルブが閉まる時間をAとし、バルブが開いて粒子を完全に排出するまでの時間をBとすると、一つのバルブを通過するのに使用できる時間は、 $A=0.04$ 秒なので、1回の投入する時間を0.46秒以内にする必要がある。図13と図14のリフト量13mmと20mmのグラフより、傾斜角が10°、50°、90°の場合に粒子量が少なくなるほど粒子の排出時間が短くなっているため、傾斜角30°の場合も同様に粒子量が30cm³の排出時間より短くなることが予想できる。よって、図17に排出粒子量を30cm³とし、横軸をリフト量、縦軸を粒子排出時間と

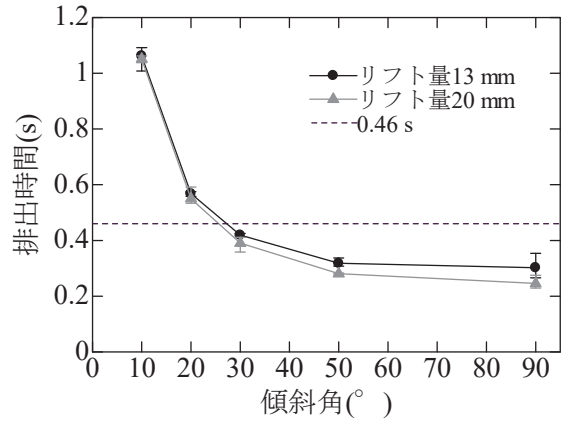


図17. 30cm³でのリフト量と粒子排出時間の関係

したグラフを示し、0.46秒の基準線を載せたグラフを示す。

図17よりリフト量が13mm、排出量が30cm³の場合、傾斜角30°で排出時間が0.419秒であるため、排出量が30cm³以下であれば、傾斜角が30°以上であれば設定流量は保たれることがわかった。図17よりリフト量が20mm、投入量が30cm³の場合、傾斜角30°で排出時間が0.390秒であるため、排出量が30cm³以下であれば、傾斜角が30°以上であれば設定流量は保たれることがわかった。

よって、粒子の設定流量を設計・製作した実験装置で実現する場合、傾斜角を30°以上かつリフト量を13mm以上にする必要があることがわかった。

4. 結論

熱交換器内の高圧の作動流体の漏れを抑えながら粒子を熱交換器に投入するための機構を模擬した実験装置の設計・製作ならびに動作確認を行った結果、以下の結論を得た。なお、設定した粒子流量は、BDSCに設置された太陽光レーザーで粒子を加熱する実験から得られたものである。

- 蓄熱粒子を熱交換器に投入する粒子供給機構のバルブ動作を模擬した実験装置を設計・製作した。
- 粒子の設定流量を設計・製作した実験装置で実現する場合、傾斜角を30°以上かつリフト量を13mm以上にする必要があることがわかった。

参考文献

- 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, (2014), pp.43
- 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, (2014), pp.39
- Clifford K.Ho, A review of high-temperature particle receivers for concentrating solar power, Applied Thermal Engineering 109, (2016), pp.958-969
- N. Maeda, Y. Nagase, S. Tomomatsu, F. Fukui, S. Akasaka, F. Nomura, R. Kawamura, "Improving Uniformity of Temperature Distribution in Heating Medium of a Solar-Particle Receiver", International Conference on Science, Technology & Education (ICSTE 2018) (2018/09), pp.93 - 98