宮崎大学学術情報リポジトリ
University of Miyazaki Academic Repository

蓄熱粒子流動型熱交換器のための粒子供給装置の開発

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 宮崎大学工学部 公開日: 2021-10-18 キーワード (Ja): キーワード (En): Beam down solar concentrator, Solar heat, Solar receiver, Heat exchanger, Heat storage 作成者: 邵, 子陽, 長瀬, 慶紀, 友松, 重樹, 木村, 正寿, 橋本, 直季, Shao, Ziyang, Hashimoto, Naoki メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10458/00010263

蓄熱粒子流動型熱交換器のための粒子供給装置の開発

邵　子陽[a)]・長瀬　慶紀[b)]・友松　重樹[c)]・木村　正寿[d)]・橋本　直季[a)]

A Particle Supply Device for Heat Storage Particle Flow Type Heat Exchanger

Ziyang SHAO, Yoshinori NAGASE, Shigeki TOMOMATSU,
Masatoshi KIMURA, Naoki HASHIMOTO

Abstract

In solar power generation of this study, stroage particles heated by a solar receiver are put into a heat exchanger and directly contacted with the working fluid to exchange heat and drive a heat engine. It is difficult to continuously supply storage particles to a solar receiver and exchange heat because it is a batch type heat storage device up to now. In order to drive a heat engine and generate electricity while heating by solar heat, it is necessary to develop a system that continuously exchanges heat with the working fluid and heat storage particles. However, there is a pressure difference between the receiver and the heat exchanger, and the working fluid of the heat engine leaks when the heat storage particles flow. Therefore, the purpose of this study is to transport the heat storage particles to the heat exchanger from the solar receiver without leakage of the working fluid. Two valve mechanisms were used to prevent leakage of the working fluid.

Keywords: Beam down solar concentrator, Solar heat, Solar receiver, Heat exchanger, Heat storage

1.　はじめに

近年の地球温暖化や石油資源枯渇の危機が迫る中、再生することができ、クリーンなエネルギー源の開発が注目されている。太陽熱発電は太陽をエネルギー源として発電するので，太陽が存在すれば半永久的に使えること，太陽エネルギーによる発電のため、温室効果ガスを排出しないことと、蓄熱システムが存在するため、夜間でも発電できることなどのメリットがある[1)]。 太陽熱発電の研究はさまざまな太陽光集光装置と蓄熱媒体で行われている。太陽光集光装置の形状としては、パラボラ・トラフ型、リニア・フレネル型、タワー型、ディッシュ型などがある[2)]。図 1 に示すように宮崎大学では、2012 年に三鷹光器製ビームダウン式太陽集光装置が設置され、今まで太陽熱発電について研究が行われている。

再生可能エネルギーである太陽熱を利用して、昼夜問わず熱機関を駆動させるには蓄熱が必要である。これまで、ビームダウン式タワー型太陽集光装置を用いて、蓄熱粒子を加熱し蓄熱を行う実験が行われてきた[3)]。ビームダウン式タワー型太陽光集光装置を用いて加熱した蓄熱粒子から熱エネルギーを取り出すには、蓄熱粒子と流体の間で熱交換を行う必要がある。蓄熱粒子として使われているアルミナ球が太陽集光装置により加熱された後、熱交換器に投入される。伝熱面積が大きいという蓄熱粒子の特性を活かし、加熱されたアルミナ球を直接空気と接触させ、熱交換を行う[4)]。その後、加熱された作動流体である空気が圧縮空気エンジンに送られ、発電を行う。作動流体は熱交換器でアルミナ球と接触させるため、熱交換器の中は高圧である。しかし、熱交換器に投入する直前は大気圧であるため、蓄熱粒子を熱交換器内に投入する際に圧力差により作動

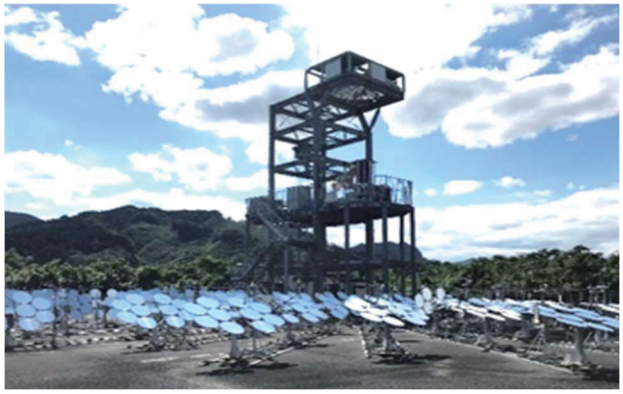

Fig.1　Beam down solar concentrator.

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)機械械設計システム工学科助教
d)教育研究支援センター技術専門職員

流体が漏れないようにする必要がある。

本研究の目的は、レシーバと熱交換器の間に圧力差を保ちながら蓄熱粒子がスムーズに熱交換器に投入されるための粒子供給装置を開発することである。

2. 実験

2.1 太陽熱発電システム

太陽熱発電システムは太陽光レシーバ、熱交換器、または圧縮空気エンジンなどの熱機関により構成される。図2に太陽熱発電システムの概要図を示す。本研究は蓄熱媒体として蓄熱粒子を使っている。太陽光レシーバで加熱された蓄熱粒子を熱交換器内に投入し、直接作動流体である圧縮空気と接触させ、熱交換を行う。熱エネルギーは蓄熱粒子から奪われ、圧縮空気に移動する。熱交換を行い、熱エネルギーを失った蓄熱粒子は太陽光レシーバに戻され、レシーバと熱交換器の間を循環し、再利用される。加熱された空気は圧縮空気エンジンなどの原動機に送られ、発電を行う。

しかし、太陽光レシーバ内は大気圧であり、熱交換器内は高圧である。そのため、蓄熱粒子を熱交換器内に投入する際に圧力差による圧縮空気の漏れが生じる。熱エネルギーの損失を減らすため圧縮空気の漏れを抑えなければならない。よって、太陽光レシーバと熱交換器の間に圧縮空気の漏れを抑えながら蓄熱粒子をスムーズに流せる粒子供給装置が必要である。

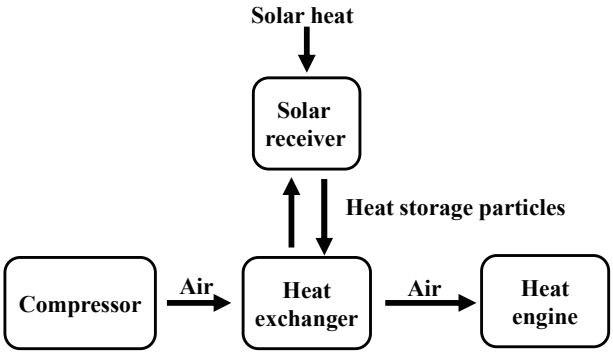

Fig.2 Solar thermal power generation system.

2.2 粒子供給装置

圧縮空気の漏れを抑えながら蓄熱粒子を投入するには、図3のようにバルブ1を閉じた状態から、バルブ1のみ開き、蓄熱粒子をバッファ内に移動させる、その後、バルブ1を閉じ、バルブ2を開くことで圧縮空気の漏れを抑えながら蓄熱粒子を熱交換器に投入することができる。

図3において観察用実験装置は主にアルミ製の本体と別体、ポペットバルブ、アクリル板などより構成される。設計あたり以下の項目を検討した。

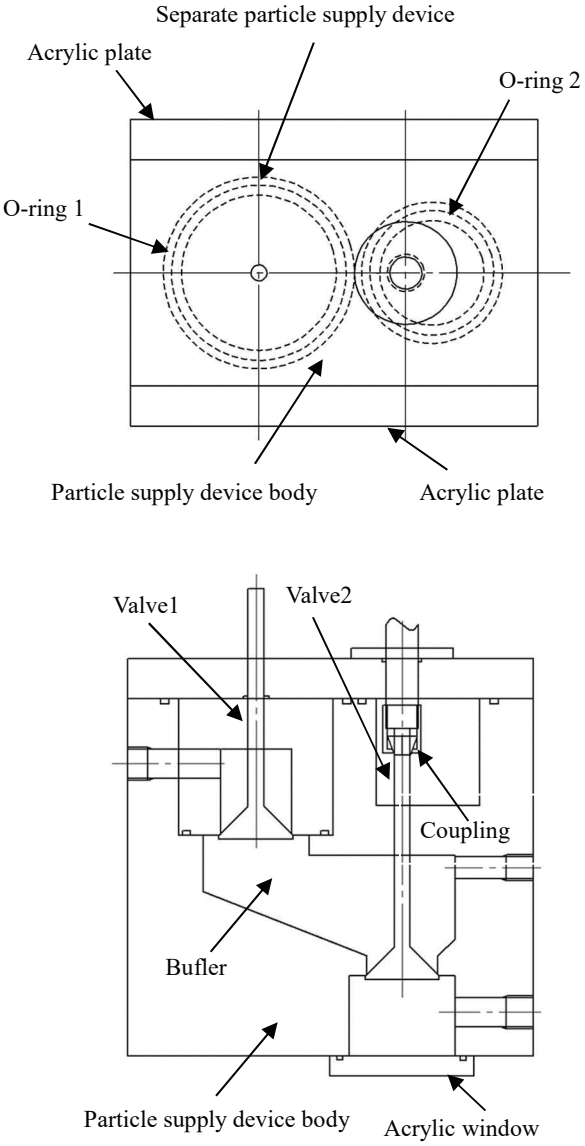

Fig.3 Particle supply device.

2.2.1 気密性 粒子供給装置において、装置内部の気密性が最も重要である。図4に示すように粒子供給装置の本体と別体の間、粒子供給装置本体とアクリル板の間や二本のバルブの摺動面などにOリングを設置し、圧縮空気の漏れを抑える。

2.2.2 耐圧性 粒子供給装置は圧力容器であり、1 MPaまでの圧力を耐えられることを目標にする。そのため、各板厚の強度計算が必要である。アクリル窓の強度計算は式(1)を用いて行った[5]。

$$t = 5 \times \sqrt{\frac{P \cdot A}{\sigma_a}} \tag{1}$$

ただし、t [mm]はアクリル窓の計算厚さ、P [MPa]は設計圧力、A [m^2]は受圧面積、σ_a [Pa/mm^2]はアクリル材質の許容曲げ応力である。

計算結果より1 MPaの圧力に対してアクリル窓の板厚が3.46 mm以上必要となる。安全率を3にとり、1 MPa

の圧力に対してアクリル窓の板厚を 10 mm にした。粒子供給装置本体とアクリル板及び O リング蓋との固定はボルトにより行う。ボルトの規格と本数はそれぞれの場所にかかる圧力を計算した上で安全率を 4 以上として決定した。ボルトの位置はボルトの中心軸から端までの最小縁端距離を計算して決定した[6]。

2.2.3 蓄熱粒子の流動性 粒子供給装置は太陽光レシーバからの蓄熱粒子を熱交換器に供給するため、蓄熱粒子がスムーズに流れることが必要である。そのため、二つのバルブの間の空間と二つ目のバルブヘッドの周辺に蓄熱粒子が問題なく流れるように斜面の形状にし、蓄熱粒子のガイドとした。

蓄熱粒子が粒子供給装置を通過する際に内部の蓄熱粒子の流れを確認するため、図 3 に示すように二枚のアクリル板で粒子供給装置の本体を挟んで、二つのバルブの間の空間を可視化する。装置の底面にアクリル窓を設置しており、カメラによって蓄熱粒子が粒子供給装置を通過する状況を把握する。

ポペットバルブのバルブシートとバルブフェースの中心軸を合わせるため、バルブシートとバルブガイドを一体化し、別体として作られる。別体は円柱の形状をしており粒子供給装置にすきまばめで挿入する。粒子供給装置本体と別体の間の隙間からの漏れを抑えるため、別体の外側と底面に O リングを設置することにより気密性を保つ。バルブステムからの漏れを抑えるため、別体との摺動面に O リングを設置し、 図 3 に示すように O リング蓋 1 によって固定する。O リングの溝は直接別体の上面に設ける。バルブフェース面とシート面の接触面圧を高め、気密性を保ちやすくすることと蓄熱粒子を挟みにくくするため、バルブシートの幅を 1 mm にしている。

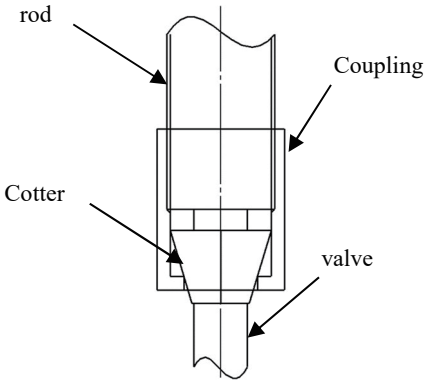

Fig.4 Attaching the coupling to the valve.

粒子供給装置の右側のポペットバルブの軸を延長するためのカップリングが必要である。カップリングをつけた状態の様子は図 4 に示し、 カップリングの外形と寸法を図 5 に示す。カップリングの形状を円筒状にしており、バルブの軸との接続はコッターを用いて行う。右側のバルブを延長する軸の先端はカップリング内部に設けられためねじと噛みあうおねじにより軸の先端をカップリングに直接挿入する形で接続する。そのため、カップリングを設置する際に作業できる幅の溝を設置し、その溝の外側に O リング溝を設置した。

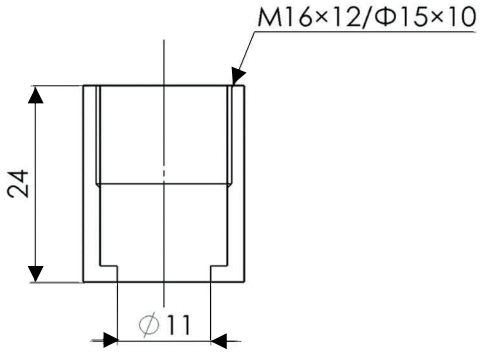

Fig.5 Coupling.

バルブの延長軸からの漏れを抑えるため、O リング蓋 1 との摺動面に O リングを設置し、その上に 図 3 に示すように O リング蓋 2 によって固定する。 O リングの溝は O リング蓋 1 に設ける。容器内の圧縮空気が粒子供給装置本体とアクリル板の間の隙間から外に漏れないため、二つのバルブの間の空間の端から 5 mm 離して O リングの溝を設けている[7]。本体とアクリル板を固定し、アクリル板と本体の間に O リングを挟んで気密性を保つ。

O リングの溝の周辺にねじ穴を均等に設置し、ねじの本数と規格は、一本当たりのねじの許容荷重と二つバルブの間の空間にかかる圧力を計算した上で、安全率を 4 以上に取り、規格が M8 のボルトを 18 本に決定した[8]。ポペットバルブの制御しやすさを考慮して、二つのバルブの軸を平行に設置している。粒子供給装置に圧縮空気を供給するため、図 3 の左上と右下に規格が R3/8 の管用テーパねじの穴が開けられている。別体に蓄熱粒子を入れるため、粒子供給装置本体の正面に規格が R1/4 管用テーパねじの穴が設置されている。また二つのバルブの間の空間の横に設置している穴はブルドン管圧力計を取り付けるためのものである。

2.3 ポペットバルブ

粒子供給装置に取り付けられるポペットバルブを図 6 に示す。その諸元を表 1 に示す。このポペットバルブは豊田中央研究所の試験用単筒エンジン(TRE エンジン)のバルブである。このバルブを開閉することにより蓄熱粒子を止

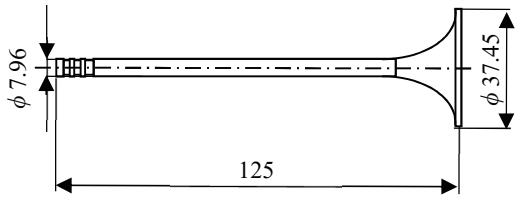

Fig. 6 Poppet valve

めたり排出したりする動作を行う。バルブのバルブシートとバルブフェースを密着させることにより気密性を保つ。

Table 1 Specifications of valve

Valve shaft length	125.0 mm
Valve shaft diameter	7.96 mm
Valve umbrella diameter	37.45 mm

2.4 蓄熱材料

蓄熱材料として用いるのは粒径が 5±0.5 mm の平均直径5 mmの球であり、材質はアルミナのアルミナ球である。表 2 にアルミナ球の諸元を示す。

Table 2 Specifications of alumina sphere

Chemical formula	Al_2O_3
Density	3890 kg/m^3
Particle diameter	5±0.5 mm

2.5 エアシリンダ

所定のリフト量でポペットバルブを開閉する動作を実現するため、圧縮空気を用いる複動型のエアシリンダを使用した。その諸元は表 3 に示す。

Table 3 Air cylinder

Cylinder inner diameter	20 mm
Stroke	20 mm
Acting method	Double acting type
Piston speed	50～500 mm/s
Supply pressure	0.1～1.0 MPa

3. 蓄熱粒子投入実験

3.1 蓄熱粒子投入実験装置

蓄熱粒子がポペットバルブに通過する際に蓄熱粒子の動きを把握するため、一つ目のバルブの周辺を模擬した窓付き圧力容器を用いて、蓄熱粒子投入実験を行った.

蓄熱粒子がポペットバルブを用いた粒子供給装置を通過する際に、蓄熱粒子の排出時間に対する圧縮空気の逆流とバルブの傾斜角の影響の調査をするために実験を行った. 窓付き圧力容器、ポペットバルブ、レギュレータとエアシリンダなどを用いて、蓄熱粒子を投入する予備実験を行った。一回投入する蓄熱粒子の量を 10 cm^3、窓付き圧力容器の下部圧力容器に供給する圧力を 0.11、0.22、0.34 MPaG にして、それぞれの圧力と傾斜角において蓄熱粒子がバルブを通過する時間を調べる。

図 7 に蓄熱粒子投入実験で使用する窓付き圧力容器を示す。この装置は一つのバルブの周辺を模擬した実験装置であり、粒子供給装置のバルブとして使われるポペットバルブ、上部圧力容器、下部圧力容器、アクリル窓などにより構成される。アクリル窓は下部圧力容器の底に設けられ、圧力容器の底にカメラを設置し、下から蓄熱粒子がバルブを通過する様子を撮影する。図 7 に示すようにポペットバルブのバルブガイドとバルブシートが上部圧力容器と一体化し、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。粒子容器の側面には蓄熱粒子を充填するための穴が開けられている。左下の穴はブルドン管圧力計を取り付けるための穴であり、右下の穴は圧縮空気を供給する穴である。

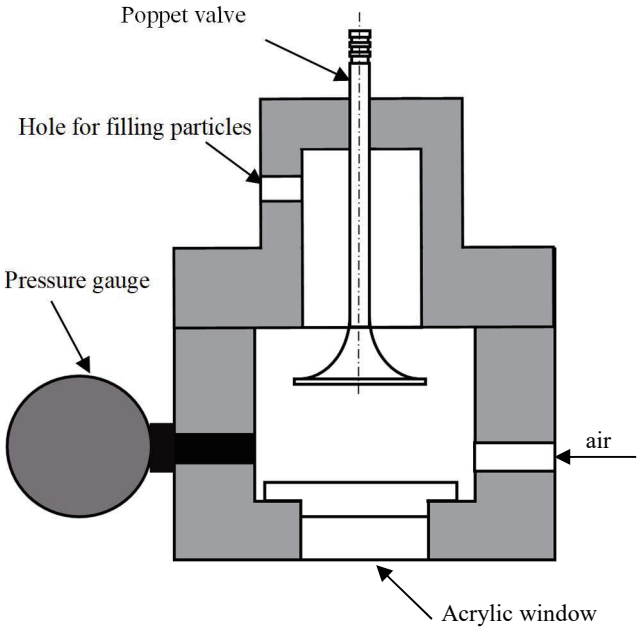

Fig.7 Pressure vessel with window

3.2 実験方法及および実験条件

窓付き圧力容器の上部圧力容器内において、大気圧でポペットバルブを閉じた状態にし、所定の量のアルミナ球を入れる。次に窓付き圧力容器を所定の傾斜角に調整する。レギュレータを用いてコンプレッサーからの圧縮空気を所定の圧力に調整し、下部圧力容器内に充填する。 ブルドン管圧力計で下部圧力容器内に所定の圧力になっているかを確認する。エアシリンダを駆動し、ポペットバルブを軸方向に押し出し、蓄熱粒子を上部圧力容器から下部圧力容器内に投入する。その時の蓄熱粒子の流れを下部圧力容器の底に設けたのぞき窓から動画を撮影し、映像を分析する。ポペットバルブが開き始める瞬間から蓄熱粒子がすべて投入されるまでの時間を蓄熱粒子の排出時間とする。以上の手順を繰り返し、一条件につき三回実験を行う。

表 4 に加圧状態の蓄熱粒子投入実験の実験条件を示す。蓄熱粒子がポペットバルブを通過できる最小のリフト量が 7 mm であり、実験に用いるバルブの最大リフト量が 20 mm である。その中間値を取って実験に用いるリフト量を 13 mm にする。コンプレッサーからエアシリンダに供給する圧力に対し、バルブを開けられる最大の圧力が 0.34 MPaG であるため、今回の実験条件として下部圧力容器に

供給する圧力を 0.11、0.22、0.34 MPaG とした。またバルブのリフト量と傾斜角の定義は図 8 に示す。バルブのリフト量はバルブが開いた際に軸方向に動いた距離と定義し、傾斜角は圧力容器を傾斜させる際に水平面とバルブの軸の中心線がなす角度と定義する。

Table 4 Experimental conditions

Valve lift [mm]	13
Particle volume [cm^3]	10
Tilt angle [deg.]	10, 20, 30, 50, 90
Supply pressure [MPaG]	0.11, 0.22, 0.34
Times of experiments	3

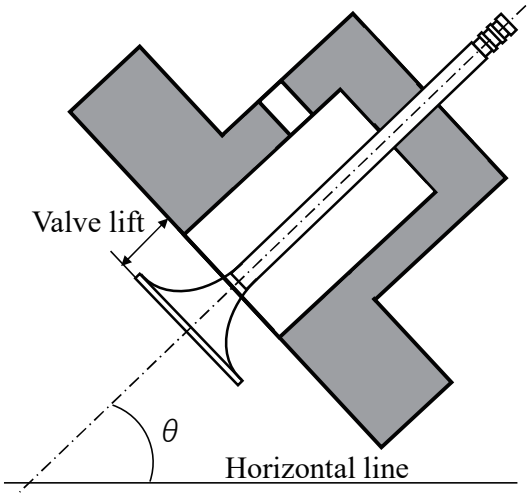

Fig.8 Valve lift and tilt angle.

4. 実験結果と考察

下部圧力容器に供給する圧力と蓄熱粒子の排出時間の関係を調べるため、各実験条件において三回ずつ実験を行った。図 9 にその実験結果を示す。縦軸に蓄熱粒子の排出時間を、横軸に傾斜角を示している。各条件の実験結果の平均値をプロットして、最小値と最大値をエラーバーで表示する。

図 9 よりどの圧力においても傾斜角が 10°から 30°までの間では蓄熱粒子排出時間が急激に減少する。傾斜角が 30° から 50° の間に蓄熱粒子投入時間の変化が 30° 以下の場合よりも緩やかになり、投入時間は約 75%減少した。傾斜角が 50° から 90° までの間では蓄熱粒子投入時間の変化が更に緩やかになり、圧力が 0.34 MPa の場合はほぼ変化しない傾向になった。よって、10°から 50°までの間の範囲においては傾斜角による蓄熱粒子排出時間の変動が大きいため、バルブの軸の傾斜角を 50° 以上にすべきである。

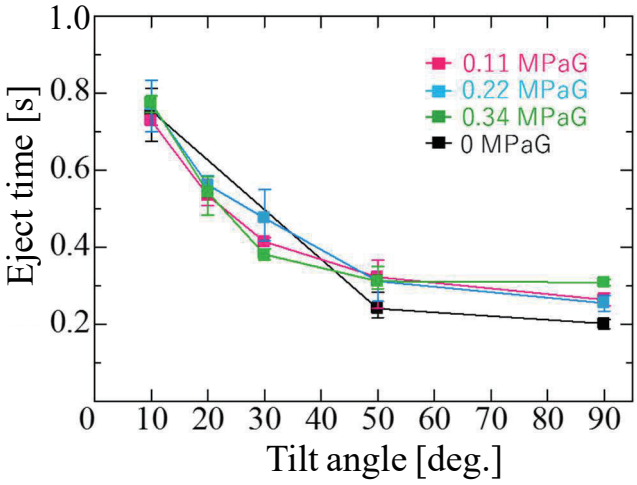

Fig.9 Particle eject time at each pressure.

変動を考察すると、傾斜角が 90°の蓄熱粒子排出時間の変動が一番小さく安定している。その原因として考えられたのはバルブの傾斜角が図 10 に示すように、90° に設置する場合、蓄熱粒子が排出される前では上部圧力容器内に均一に分布する。そのため、毎回蓄熱粒子が落下する時間は比較的に安定している。蓄熱粒子の排出時間を短くすることとバルブの制御しやすさを考慮し、バルブを垂直に設置した方が良いと考えられる。

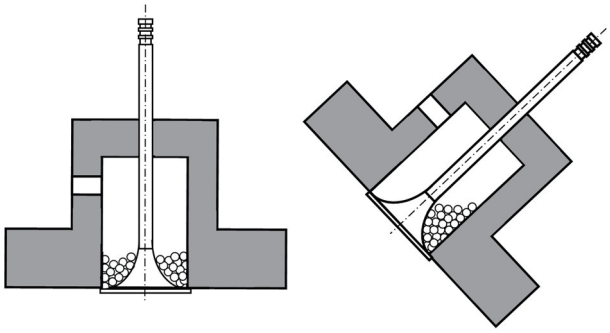

Fig.10 Tilt pressure vesssel.

圧力による蓄熱粒子排出時間への影響を調査するため、図 11 のように非加圧の状態における蓄熱粒子の投入時間と、実験条件の中で一番大きいであり、圧力が 0.34 MPaG の状態の蓄熱粒子排出時間の比較を行った。

図 11 より非加圧状態の蓄熱粒子排出時間は加圧状態の蓄熱粒子投入時間より短く、傾斜角の上昇につれて蓄熱粒子の排出時間の差が大きくなる傾向があった。傾斜角が 90°の場合に排出時間の差が一番大きく、0.11 s であった。圧力の差に対して大きな時間変化ではないため、圧力が 0.34 MPaG 以下の場合における圧縮空気による蓄熱粒子の排出時間への影響は小さいと考えられる。よって、圧力が 0.34 MPaG 以下の状態において、蓄熱粒子の排出時間は圧力による影響はバルブの傾斜角の影響より小さいことがわかった。しかし、圧力が 0.11～0.34 MPaG の範囲に

おいて圧力が上昇するにつれて圧縮空気による蓄熱粒子の排出時間への影響が増加する傾向があるため、もし更に圧力を上昇させれば蓄熱粒子の排出時間が長くなることが予想される。

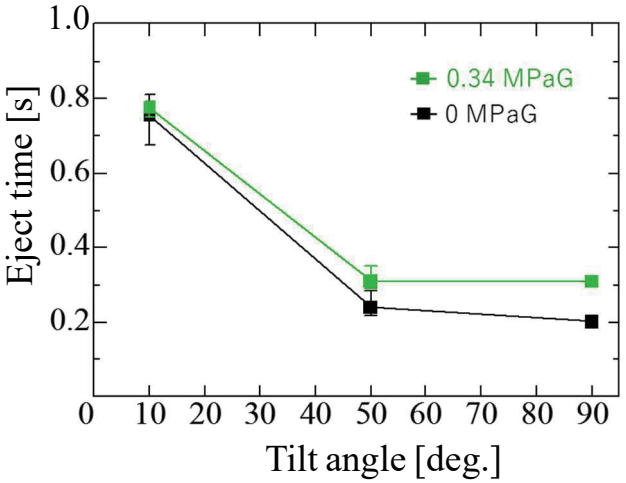

Fig.11 Eject time of particles from the pressure vesslel.

5. 結論

粒子流動型レシーバから排出される蓄熱粒子を熱交換器内に供給する際に、圧力差による圧縮空気の漏れを抑えながら蓄熱粒子をスムーズに熱交換器に供給するための粒子供給装置の設計を行った。また、蓄熱粒子の動きを観察するため、ポペットバルブの周辺を模擬した窓付き圧力容器を設計、製作して加圧状態で蓄熱粒子投入実験を行った結果、以下の結論を得た。

1. ポペットバルブの底面に作用する圧力が 0.34MPaG 以下の状態において圧縮空気によらずに蓄熱粒子を移動できることがわかった。

2. バルブステムの傾斜角が 90° の場合、蓄熱粒子の排出時間が最短であり、また安定して移動できることがわかった。

謝辞

本研究は JPS 科研費 JP19K05354 の助成を受けたものである。

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 5 章 太陽熱発電・太陽熱利用，pp.5-6，2014.
2) 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 5 章 太陽熱発電・太陽熱利用，pp.38-41，2014.
3) H. Al-Ansary, A. El-Leathy, S. Jeter, E. Djajadiwinata, S. Alaqe, M. Golob, C. Nguyen, R. Saad, T. Shafiq, S. Danish, S. Abdel-Khalik, Z. Al-Suhaibani, “On-Sun Experiments on a Particle Heating Receiver with Red Sand as the Working Medium”, AIP Conference Proceedings 2033, 2018.
4) M. Krüger, P. Bartsch, H. Pointner, and S. Zunft, “Solar tower power plant using a particle-heated steam generator: Modeling and parametric study”, AIP Conference Proceedings 1734, 2016.
5) 日本産業規格, JIS B8286 圧力容器用のぞき窓，第 5 章 のぞき窓ガラスの計算厚さ，p.136，2005.
6) F. Xu, Q. Li, “Desigh of Precision Machinery ”, Tsinghua University Press，第 1 版, p538, 2005.
7) 日本産業規格, JIS B2420 マイクロ O リング，第 1 部 形状,寸法および測定方法，p.5，2018.
8) 日本産業規格, JIS B8267 圧力容器の設計，第 4 章 ボルト材料の許容引張応力，p.107，2015.