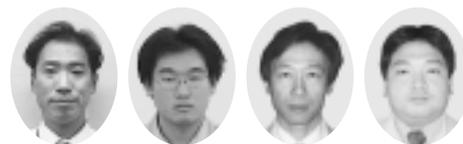


高効率熱輸送システム 「サーモウェイ®」の実用化

Field Test of High Efficiency Thermal Energy
Transport System "ThermoWay®"



技術開発本部
プロセス技術開発部廃棄物処理室
青木 勇
Isamu Aoki
中島 優一
Yuichi Nakashima

(株)神戸製鋼所 技術開発本部
機械研究所 流熱技術研究室
東 康夫
Yasuo Higashi
(工学博士)
高橋 和雄
Kazuo Takahashi

当社では、熱エネルギーを蓄熱カセットに蓄え、車両などの輸送手段によって輸送し、熱エネルギーを有効利用する高効率の熱輸送システムを開発してきた。このシステムでは、潜熱蓄熱材（エリスリトール）を利用することで、コンパクトながら多くの熱量を蓄えることができる。パイロットスケール蓄熱カセット（4 ton）を設計・製作し、実用化に向けて公道輸送試験（輸送距離：約35 km）をおこない、熱回収性能について評価した。試験の結果、8時間以上にわたり一定出力で90℃の高温水を安定して供給し、回収熱量90%以上の高い性能を確認した。さらに、暖房 & 60℃の給湯の負荷変動に対して追従して運転できることを検証でき、実用化の目処がついた。

Pilot-scale field tests of high efficiency heat transportation system "ThermoWay®" is carried out. This system uses phase change material (Erythritol) as heat storage media for high storage density. Heat storage cassette can be mounted on truck so that heat can be transported from waste heat emitting site to heat consumption site. A 4-ton cassette is designed and manufactured and used in the test series. In the field test, after transportation of 35 km on road, constant heat retrieval and hot water supply at 90℃ for more than 8 hours are achieved. Heat retrieval efficiency is calculated to be more than 90%, showing high performance. A load change test is also examined to simulate actual heat consumption. A changing heat load, which is a combination of constant air condition load and intermittent 60℃ hot water supply, is connected to heat retrieval unit. A PID-control loop installed in the heat retrieval unit responded successfully, matching the heat supply to the varying heat demand.

Key Words :

熱輸送システム
潜熱蓄熱材
エリスリトール
公道輸送
負荷変動

Thermal energy transport system
Phase change material
Erythritol
Public road transportation
Load change

まえがき

バイオマスエネルギー転換施設や廃棄物処理施設等の廃熱発生源から排出されている中低温廃熱(200~250℃以下)は、経済的な観点から熱回収、利用が効率的ではないため、利用されず排出されている場合が多い。たとえば、2000年における省エネルギーセンターによるアンケート調査¹⁾によると、工場等から排出される250℃以下の廃熱量は日本全体で約80万TJ/年にも及び、廃熱量全体の80%以上を占める。この250℃以下の廃熱量は重油換算で年間約24百万キロリットルに及び、約66百万トンのCO₂排出量に相当する。

この未利用の廃熱を熱輸送システムによって熱エネルギーとして有効利用できれば、化石燃料の使用量を削減でき、CO₂の発生量の削減、地球温暖化防止に貢献できる。

当社と(株)神戸製鋼所とは共同で、潜熱蓄熱材として融点119℃、融解熱340kJ/kgと高融点、高蓄熱



写真1 パイロットスケール蓄熱装置



写真2 蓄熱ユニット

量の蓄熱材であるエリスリトール²⁾をもちい、なおかつ、熱交換機を必要とせずに軽量化が可能な直接接触方式潜熱蓄熱技術を採用し開発を実施してきた。既報^{3, 4)}にて、ベンチスケールの蓄熱カセット(総重量1.5トン)によって、8時間以上にわたり一定出力で90℃の温水を安定して供給し、回収熱量90%以上を達成したことを報告した。

本報告では、ベンチスケールの蓄熱カセットをスケールアップしたパイロットスケールの蓄熱カセット(総重量4トン)、蓄熱ユニット、熱回収ユニットを設計・製作した。また、それらをもちいた公道輸送試験にて実用を想定した各種条件で熱回収実験をおこない、熱回収性能や運転性能について評価をおこなった。その結果、実用化への目処をえたので、ここに報告する。

1. パイロットスケール蓄熱・熱回収ユニットの製作

既報にて評価した、ベンチスケール蓄熱カセット(1.5トン機)の仕様に基づいて、パイロットスケール蓄熱カセット(4トン機)の詳細設計を実施し、製作した(写真1)。また、パイロットスケール蓄熱カセットの総合試験に適用可能な熱供給制御システムを検討し、蓄熱・熱回収ユニットを設計、製作した。詳細を次に示す。

1.1 蓄熱カセット

パイロットスケール蓄熱カセットの概要を以下に示す。

- ・形状 角型
- ・寸法 1 025 mm×1 800 mm×1 346 mmH
- ・総重量 約4トン
- ・内容物蓄熱量 約1.0 GJ

1.2 蓄熱ユニット(写真2, 図1)

蓄熱ユニットは、熱媒を150℃程度に加熱して蓄熱カセット内を循環させ、エリスリトールを溶解して蓄熱するための装置であり、熱源と熱媒ポンプが

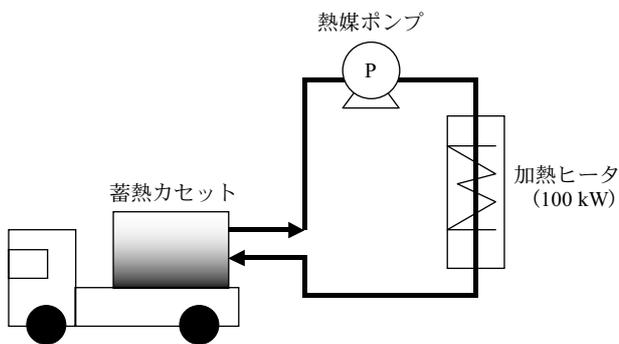


図1 蓄熱ユニット フロー図

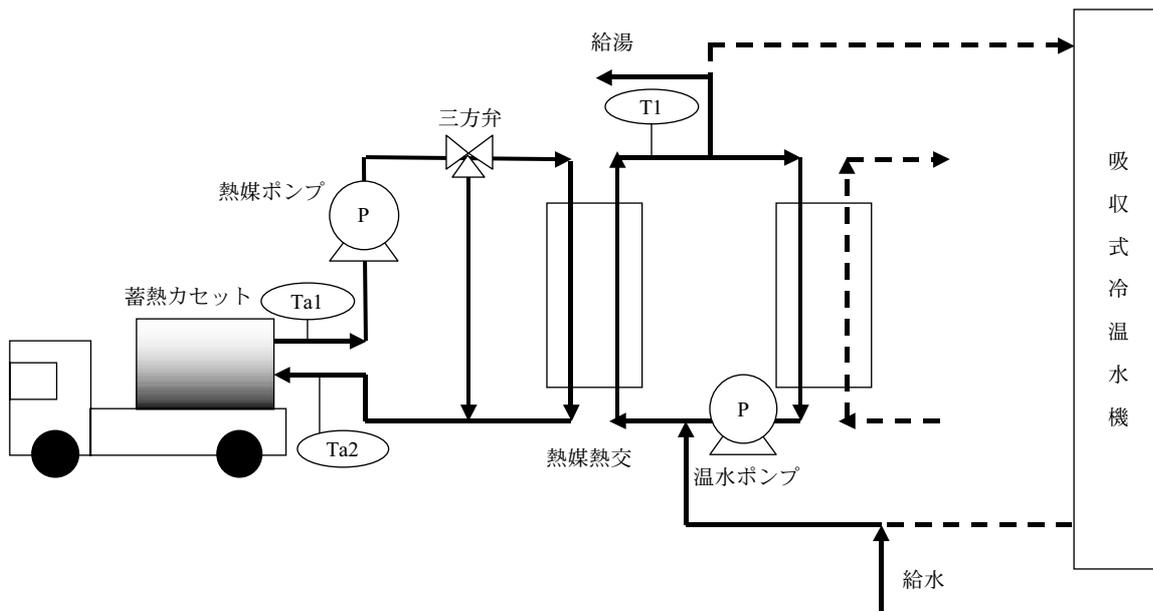


図2 熱回収ユニットフロー

ら構成される。

熱源としては電気ヒータを使用している。基本蓄熱時間を5時間とした場合、内容物蓄熱量が約1.0 GJのパイロットスケール蓄熱カセットの蓄熱に必要な出力は約50 kWである。これに対し、より短時間での蓄熱状況を検証するために、その約2倍の余裕をみて100 kWの出力の電気ヒータを採用した。また、熱媒油配管にクイックカップラを取り付け、パイロットスケール蓄熱カセットとの接続を簡単におこなえる装置とした。

1.3 熱回収ユニット（写真3、図2）

熱回収ユニットは、蓄熱された蓄熱カセットに熱媒を循環させ、熱を回収する装置であり、熱媒で回収した熱は熱交換機を介して熱需要先に熱を供給する。

設けた熱回収ユニットの熱媒ラインには三方弁を設け、その開度を温水温度（T1）によりPID制御してバイパス流量を調節することで、熱媒—温水熱交換器を流れる熱媒流量を自動調節した。

熱回収ユニットは、模擬負荷運転モードと吸収式冷温水機運転モードを選択して運転できる。模擬負荷運転モードでは、温水を熱媒—温水熱交換器と温水—冷却水熱交換器の間で循環して、冷却水によって負荷を与える運転であり、冷却水流量を調整することで、熱回収温度や放熱出力の条件を設定する。吸収式冷温水機運転モードでは、温水を吸収式冷温水機の熱源として供給することで、暖房運転または冷房運転ができる。



写真3 熱回収ユニット

2. 公道輸送試験

2.1 試験方法

蓄熱状態のパイロットスケール蓄熱カセットを、4トントラックの荷台に積載して約35 kmの距離を公道輸送した後、蓄熱カセットを熱回収ユニットに接続して熱回収実験をおこなった。

蓄熱試験では、蓄熱ユニットに蓄熱カセットを接続し、電気ヒータにて160℃に加熱した熱媒を循環させることで蓄熱カセットへの蓄熱運転をおこなった。熱回収実験では、熱回収ユニットに蓄熱カセットを接続して熱媒を循環させ、熱媒—温水熱交換器で温水を加熱することで熱回収をおこなった。

2.2 蓄熱試験

熱媒流量を120 L/minとして蓄熱実験をおこなった結果を図3に示す。前半は蓄熱カセット出口の熱媒温度が直線的に上昇した後、熱媒温度がエリスリトールの融解温度である119℃を過ぎたあたりで上昇速度が緩やかになり、潜熱分の蓄熱過程に入る。その後は蓄熱カセット出口の熱媒温度が緩やかに上昇し、蓄熱カセットへの蓄熱が進むにつれて入熱が徐々に低下して、やがて蓄熱を完了する。所要時間は約5時間であった。

2.3 輸送試験

蓄熱ユニットを4トントラックに積載し、神鋼環境ソリューション 技術研究所（神戸市西区）から、同 播磨製作所（兵庫県加古郡播磨町）までを図4に示すルートにより約35 km 輸送した。所要時間は1時間であった。この間、トラックの走行・停止、道路の傾斜などによる外力が蓄熱カセットにかかったが、後述のように熱回収を問題なくおこなうことができた。

2.4 90℃給湯試験

熱回収ユニットを模擬負荷運転モードで運転して、90℃の温水を供給する熱回収実験を実施した。熱媒—温水熱交換器出口の温水温度 T1を90℃に設定し、蓄熱カセットを流れる熱媒流量を100 L/minに設定して熱回収ユニットの運転をおこなった結果を図5に示す。これにより平均出力27 kWの一定出力で8時間以上、90℃の温水を安定供給できることを確認した。回収熱量は840 MJで、150℃から98℃までの理論蓄熱量の90%以上がえられ、ベンチスケール蓄熱カセットと同様の高い性能を確認できた。さらに、蓄熱カセットから取り出した熱エネルギーを使って生成した90℃温水を吸収式冷温水機の駆動熱源として供給してやれば、冷熱転換により冷房用途での利用が可能である。⁵⁾

2.5 暖房試験

熱回収ユニットを吸収式冷温水機運転モードで運転して60—70 kWの暖房試験を実施した。熱媒—温水熱交換器出口の温水温度 T1を60℃に設定し、温水を吸収式冷温水機に供給し、吸収式冷温水機を暖房モードで運転して室内（75 m²）の暖房をおこなった。図6に示すとおり、60℃温水を安定して供給して暖房運転できることを確認した。

2.6 負荷変動試験（暖房+60℃給湯）

熱回収ユニットを吸収式冷温水機運転モードで運転し、一定負荷（20 kW）で暖房運転をおこないながら、定期的に60℃給湯（60 kW）の負荷変動試験

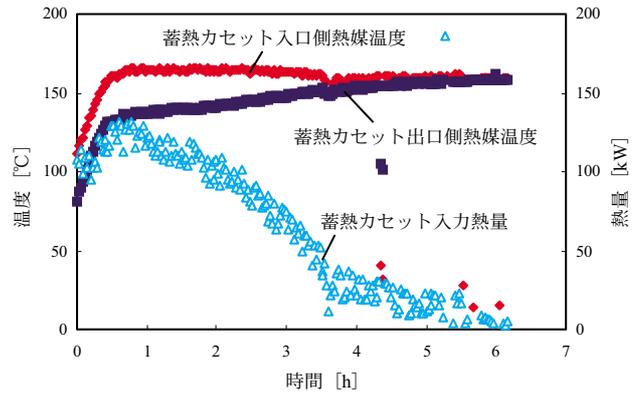


図3 蓄熱試験における入力熱量と温度

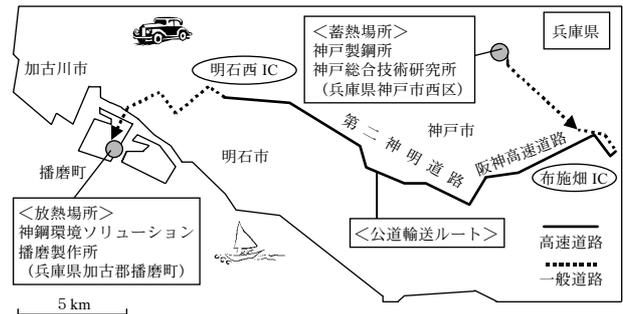


図4 公道輸送ルート

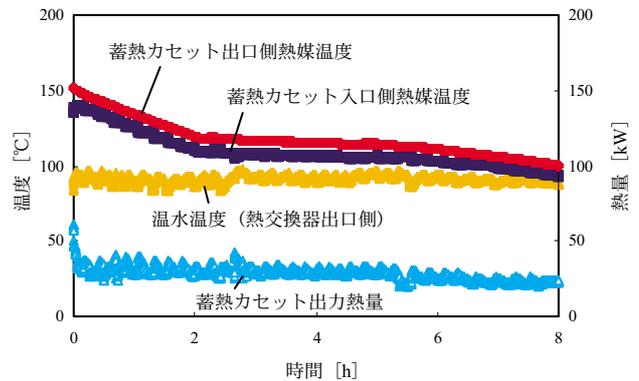


図5 熱回収試験における出力熱量と温度（90℃熱温水給湯）

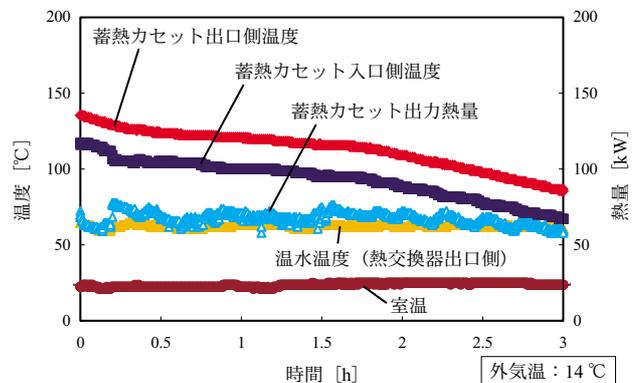


図6 熱回収試験における出力熱量と温度（暖房利用（温水温度60℃））

をおこなった。熱媒—温水熱交換器で60℃温水を生成し、これを吸収式冷温水機に供給して暖房運転をおこないながら、循環する60℃温水の一部を熱媒—温水熱交換器の出口位置で約15分間抜き出す運転をほぼ15分間隔で繰り返した。60℃温水を抜き出した分の水量が吸収式冷温水機に接続された給水ラインから自動的に補給される。図7に示すとおり、暖房 & 60℃給湯の負荷変動（20～80 kW）に対して十分追従して安定運転できることを確認したことで、高い実用性が示された。

2.7 公道輸送による熱損失

公道輸送時に蓄熱カセット表面から放熱する熱損失は約22 MJであった。これは有効熱量の2.6%程度に相当し、輸送過程における放熱によるエネルギー

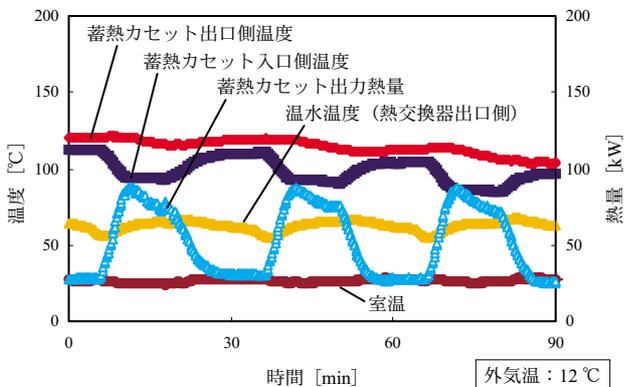


図7 熱回収試験における出力熱量と温度（暖房一定運転+間欠60℃給湯）

表1 試算における施設の基本条件

	施設の種類	規模	熱供給量または熱使用量
熱供給施設	バイオガス発生施設	処理量20 t/d バイオガス発生量 3 000 m ³ /d バイオガス発生原単位 150 m ³ /t	総発生熱量81.6 GJ/d ガスエンジンによる廃熱発生量 37 GJ/d
熱需要施設	病院	病床約 200床 24時間稼働	油使用量に換算して 55 GJ/d 常時25 GJ/dの熱量を消費している

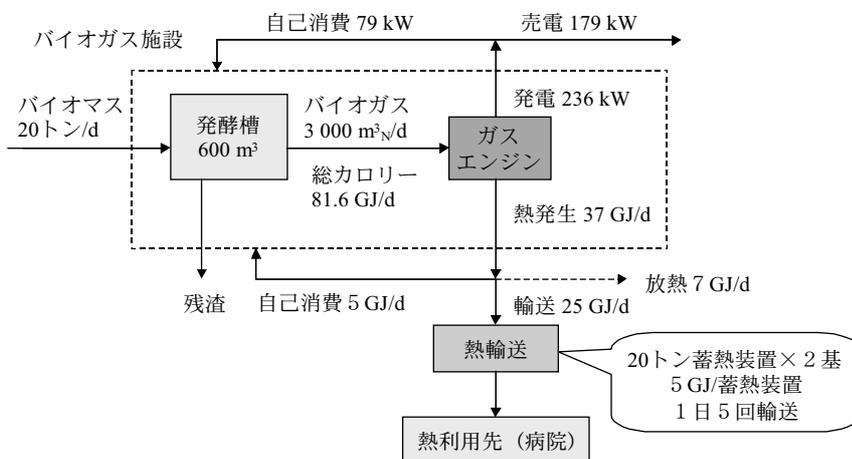


図9 熱源および熱利用先の熱フロー図

損失は非常に小さいと言える。（図8）

3. 実用化例ならびに二酸化炭素削減量の評価

3.1 熱源、供給先の想定

メタン発酵によりバイオガスを発生するバイオマスエネルギー転換施設を熱源として、近隣の病院（病床約200床）へ熱輸送をおこなうようなケースを例に取り、エネルギー削減効果ならびに二酸化炭素削減量の評価をおこなう。なお、バイオガス発生施設は1日当たりの処理量20t、バイオガスの発生原単位を150 m³/tとし、熱需要施設は病床約200床の病院を想定した。表1に試算における施設の基本条件を示す。

3.2 システムの構成

図9に、熱源と供給先の熱フロー図を示す。熱輸

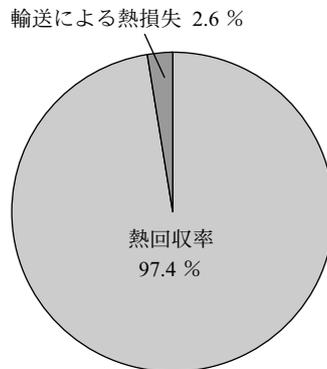


図8 輸送による熱損失の割合

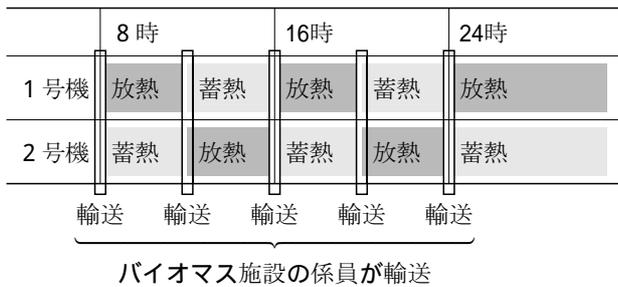


図10 熱輸送システム輸送パターン例

送の蓄熱カセットとしては、20トン規模（蓄熱量5 GJ）を想定した。発生したバイオガス熱量37 GJのうち、自己で使用するのはメタン槽の加温分であり、25 GJを熱利用先に搬送するものとする。熱利用先への輸送のタイムスケジュールは図10のとおりであり、蓄熱カセット1台あたりの輸送量が5 GJとすれば、カセット2台で25 GJ/dの輸送が可能である。

3.3 二酸化炭素削減量の試算

バイオマス施設での余剰エネルギー25 GJ/dを熱輸送により活用できるものと仮定して試算をおこなう。全国のバイオマス施設200ヶ所程度が25 GJ/d以上の廃熱を発生する施設と考えると、

$25 \text{ GJ/d} \cdot \text{施設} \times 365 \text{ d/年} \times 200 \text{ ヶ所} = 183 \text{ 万 GJ/年}$

原油に換算すると

$183 \text{ 万 GJ/年} \times 0.0258 \text{ kL/GJ}$

(原油換算係数1GJ当たり0.0258 kL) = 約4.7万 kL/年

さらにCO₂への換算で約126 000 t-CO₂/年の二酸化炭素が削減可能となる。

むすび

パイロットスケール蓄熱カセット（4 t）を使って実用化に向けて公道輸送試験を実施した。実用を想定した多様な熱供給の条件で熱回収実験をおこない、熱回収性能や運転性能について評価をおこない、高い実用性を示した。

本研究は、新エネルギー・産業技術総合開発機構との共同研究事業「バイオマスエネルギー高効率転換技術開発／バイオマスエネルギー転換要素技術開発／バイオマス資源の有効利用のための熱輸送システムの研究開発」として実施したことを記します。

[参考文献]

- 1) (財)省エネルギーセンター「工場群の排熱実態調査研究要約集」<http://www.eccj.or.jp/wasteheat/index.html>
- 2) 日高秀人, 山崎正典, 垣内博行, Erwin P. ONA, 小島義弘, 松田仁樹, 化学工学論文集 第30巻 第4号, p.552-555 (2004)
- 3) 田頭成能, 伊藤裕, 村上吉明, 東康夫, 高橋和雄 神鋼環境ソリューション技報, Vol.2, No.2, pp.36-41 (2006)
- 4) 高橋和雄, 東康夫, 青木勇, 中島優一, 熱工学コンファレンス講演論文集, p.53-54 (2006)
- 5) 高橋和雄, 東康夫, 田頭成能, 村上吉明, 第16回環境工学総合シンポジウム講演論文集, p.184-185 (2006)