

(論文)

直接接触潜熱蓄熱技術を用いた熱輸送システムの開発

Development of Thermal Energy Transport Systems Used on Direct Contact Latent Thermal Energy Storage Technology



高橋和雄*
Kazuo Takahashi



東 康夫*(工博)
Dr. Yasuo Higashi



田頭成能**
Shigeyoshi Tagashira



村上吉明**
Yoshiaki Murakami

Kobe Steel and Kobelco Eco-Solutions have developed a thermal energy transport system for utilizing low-temperature factory waste heat. We employed a direct contact latent thermal energy storage technology using PCM (Phase change material) to achieve high efficiency thermal energy storage and equipment that is light in weight. Experimental studies using a 1-tonne thermal storage cassette, showed that the thermal energy of 90% can be recovered. The studies showed that this method was applicable to air conditioning in absorption refrigerators.

まえばき = 熱を利用する工場，廃棄物処理施設，バイオマス発電施設などの熱源を持つ施設からは，従来，200 以下の中低温排熱の多くが未利用で排出されている。

そこで，熱発生源において，熱を容器に蓄え，車両や船舶などの輸送手段によって熱需要側に輸送し利用する熱輸送システムが考案された¹⁾。

ただし，この熱輸送システムを運営する場合には，1 回当たりに輸送できる熱量の増加とシステムの年間稼働率の向上（暖房，冷房の双方への適用）が技術課題となっている。

そこで，当社と㈱神鋼環境ソリューションとは共同で，融点 119℃，融解熱 340kJ/kg と高融点，高蓄熱量の蓄熱材であるエリスリトール²⁾の潜熱と顕熱を使用し，熱交換器を必要としない直接接触式潜熱蓄熱技術を用いた熱輸送システムに適用する開発を実施してきた。本方式を使用すれば，原理的には 90% 以上の温熱を 1 回当たりに多く輸送することが可能になり，更に排熱利用型吸収式冷温水機を使用することにより冷房も可能になるため，システムの年間を通じた運用が可能になる。

本報告では，まず，筆者らが開発してきた熱輸送システムの特徴について説明し，続いて蓄熱材エリスリトールを使用した基礎実験装置によって確認された，蓄熱・放熱運転での基礎特性について報告する。

続いて，エリスリトール 400kg を格納した小型搬送用蓄熱カセットと蓄熱・放熱ユニットからなる小型熱輸送試験システムの開発，ならびに放熱性能及び公道輸送試験結果について述べる。

更に，本システムと吸収式冷温水機を組合わせた冷房試験も実施し，運転特性とシステムの CO₂ 排出量削減効果を確認したので報告する。

1. 熱輸送システムの特徴

1.1 熱輸送システムの考え方

現状の熱源を所有する工場では，高温排熱は工場内での利用が進んでいるが，200℃ 以下の中低温の排熱は，工場での熱利用が進まず，未利用のまま放出されている場合が多い。

一方，我々が日常生活において空調や給湯の用途で必要とする温度域は数十℃ であり，中低温排熱で十分にまかなうことが可能である。しかしながら，工場施設と熱需要施設とは立地が互いに離れているために，これらの工場施設の中低温排熱は，熱需要施設で利用することはできなかった。

そこで筆者らは，熱発生源において熱を容器に蓄え，車両や船舶などの輸送手段によって熱需要側に輸送し利用する熱輸送システムの開発を進めてきた。

この熱輸送システムを用いた場合のエネルギー利用の将来像は図 1 のようになり，未利用であった工場排熱を熱需要先で活用することが可能となり，地域全体としての省エネルギーに寄与することができると考えられる。

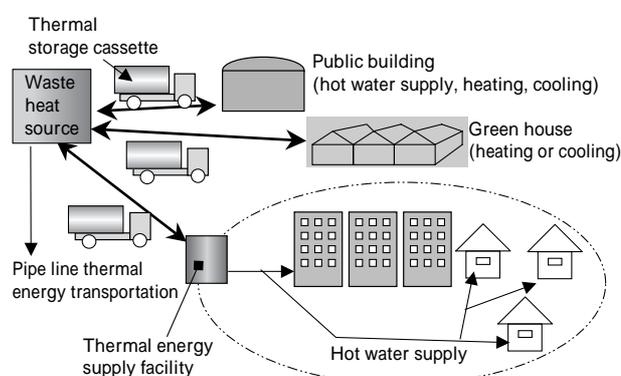


図 1 熱輸送システムを用いた排熱利用の将来像
Fig. 1 Future vision of waste heat transport system

*技術開発本部 機械研究所 **㈱神鋼環境ソリューション 技術開発本部 プロセス技術開発部

1.2 直接接触潜熱蓄熱技術

筆者らは熱輸送システム用の蓄熱技術として、直接接触潜熱蓄熱技術を用いた。本技術は、比重の軽い熱媒を比重の重い潜熱蓄熱材の下部より分散させて供給し、潜熱蓄熱材と、供給速度と比重差によって上昇する熱媒とを直接接触させ熱交換することにより、蓄熱材の潜熱蓄熱や放熱を行う技術である。熱交換後の熱媒は、比重差によって蓄熱材の上部に分離、蓄積され、この部分から熱媒のみを回収して蓄熱装置の外部の装置に供給し、熱の利用が行われる。

図2に従来使用されてきた間接触潜熱蓄熱技術と直接接触潜熱蓄熱技術の概念図を示す。直接接触熱交換の場合、熱交換器が不要であるため重量を軽量化することができるほか、熱媒と蓄熱材が直接熱交換するために、融解した蓄熱材による対流熱伝達や、熱媒と蓄熱材との間の伝熱面積の拡大により高い熱交換能力が可能となる特徴がある。

1.3 潜熱蓄熱材の特徴

前節の直接接触潜熱蓄熱技術に用いる潜熱蓄熱材として、ここではエリスリトールを採用した。エリスリトールは、通常、甘味料として使用される炭化水素化合物であるが、融点が119℃、融解潜熱が340kJ/kgと高い特徴を持つ材料である(図3)。

以上のことから、潜熱蓄熱材エリスリトールを使用し

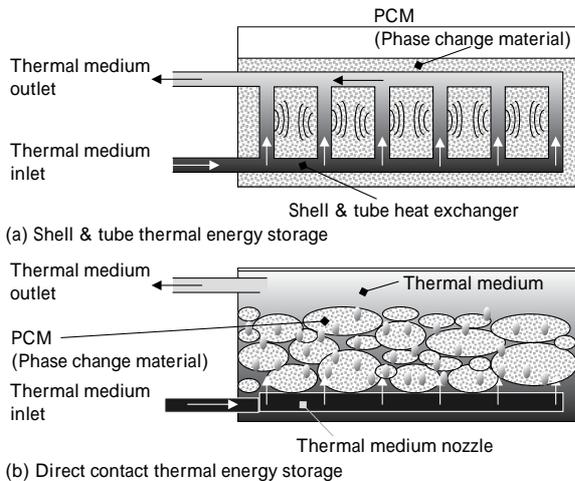


図2 間接触蓄熱と直接接触蓄熱のコンセプト

Fig. 2 Concept of shell & tube thermal energy storage and direct contact thermal energy storage

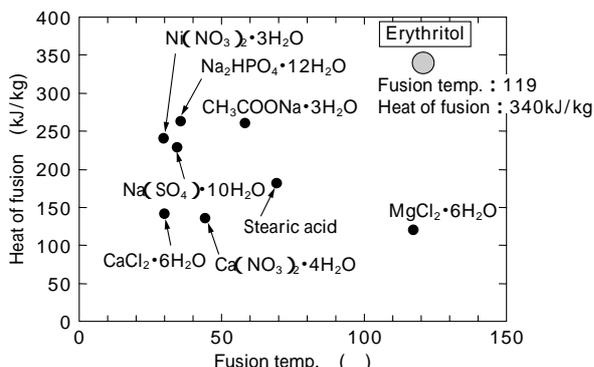


図3 蓄熱材の融点と潜熱

Fig. 3 Fusion temperature and heat of fusion of PCM

た直接接触潜熱蓄熱の機能を確認するために、モデル実験装置により蓄熱・放熱運転を実施した。

2. 潜熱蓄熱モデル実験装置による蓄熱・放熱検討

2.1 潜熱蓄熱モデル実験装置と運転方法

まず、図4のような蓄熱装置を製作し、潜熱蓄熱材エリスリトールに熱媒を直接接触させて蓄熱・放熱の運転を行い、温度変化、熱入出力、熱回収量、運転の安定性を評価した。蓄熱槽A内には潜熱蓄熱材エリスリトール15kgと熱媒系熱媒油8.7kgを入れた。蓄熱槽Aの底部には、熱媒を供給するためのノズルが配置されている。このノズルは、蓄熱材の中に熱媒を分散させることによって、熱伝導率の低い蓄熱材の凝固時の形状を制御し、蓄熱・放熱運転が一定時間以内に達成されるよう設計している。

電気熱媒加熱装置Bによって所定の温度に加熱された熱媒油は、配管内を流通し、蓄熱槽Aで蓄熱材と直接接触し、蓄熱材を加熱・融解する。加熱を終了した熱媒油は蓄熱槽Aから回収され、熱媒ポンプCによって再び加熱装置Bに送られる。

蓄熱が終了した後に、バルブD、Eの切替えによって、放熱運転が行われる。蓄熱槽Aから回収された熱媒油は、熱媒ポンプCによって熱交換器Fに送られ、冷却された後に、再び蓄熱槽A内に供給され、直接接触により蓄熱材から熱回収を行う。

それぞれの装置前後の配管には熱電対を配置し、温度計測を行い蓄熱量、放熱量及び入出力を確認した。

2.2 潜熱蓄熱モデル実験装置の実験結果と考察

2.2.1 蓄熱運転

熱媒供給温度(T_1)を160℃とした場合、熱媒供給量2.3ℓ/minの蓄熱での時間経過に伴う熱媒排出温度 T_2 、熱媒油から蓄熱槽内部への熱入力 q_1 の変化を図5に示す。試験では、上記の条件において、15kgのエリスリトールを156℃まで蓄熱するために約2時間15分を要した。供給した累積入力量は12.9MJであり、蓄熱槽に格納されたエリスリトール15kg、熱媒油8.7kgによる蓄熱可能熱量10.9MJの1.2倍であった。

同様に熱媒供給量と熱媒温度を変化させた実験結果を図6に示す。蓄熱時間は単位時間当たりの入力熱量に反比例するので、熱媒供給温度が高くなれば入力熱量が増加し、蓄熱時間が短縮する。更に熱媒供給量の増加により、入力熱量が増加し、蓄熱時間を短縮できることを確

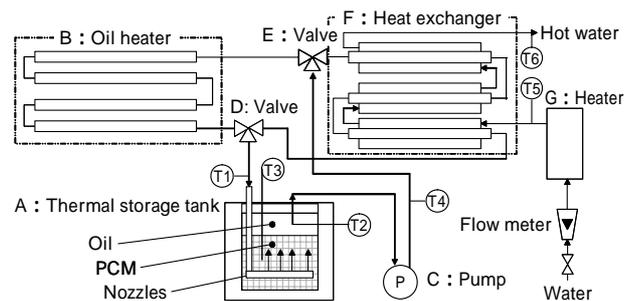


図4 潜熱蓄熱モデル実験装置

Fig. 4 Thermal energy storage (TES) experiment system of PCM

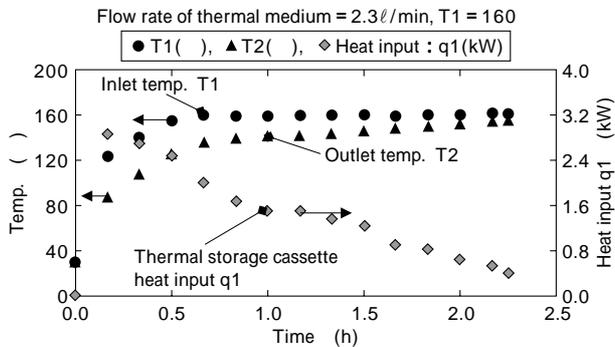


図5 蓄熱運転時の温度推移と熱入力変化

Fig. 5 History of temperature and heat input in thermal storage operation

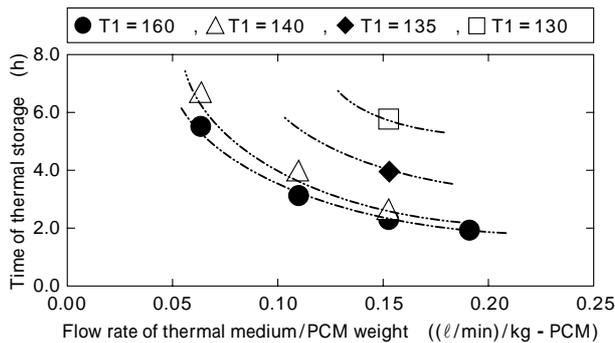


図6 蓄熱運転時の熱媒流量、熱媒温度と蓄熱時間の関係

Fig. 6 Relationship between time of thermal storage and T1 and flow rate of thermal medium in thermal storage operation

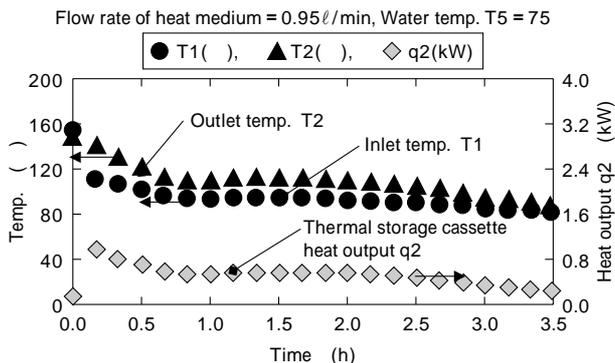


図7 放熱運転時の温度推移と熱出力変化

Fig. 7 History of temperature and heat output in thermal recovery operation

認した。

2.2.2 放熱運転及び温水熱回収

図7に、吸収式冷房装置への適用を考え、水温(T5)75の水を0.9l/min一定で供給、熱媒油流量0.95l/minで熱交換させ放熱運転をさせた場合の時間経過に伴う熱媒入口温度T1、熱媒出口温度T2、蓄熱槽の熱出力q2を示す。本条件での蓄熱槽からの累積放熱量は7.2MJであった。

これは、蓄熱槽に格納されたエリスリトールと熱媒油の90 から157 までの運転温度範囲での利用可能熱量8.5MJの約85%にあたる。このようにエリスリトールの使用によって、90 以上の熱を回収できることが確認された。また図8のように、放熱時も熱媒流量と温度により熱出力を制御することが可能である。

以上の基礎実験の結果から、直接接触潜熱蓄熱技術が蓄熱・放熱運転を繰返す蓄熱装置として成立することが

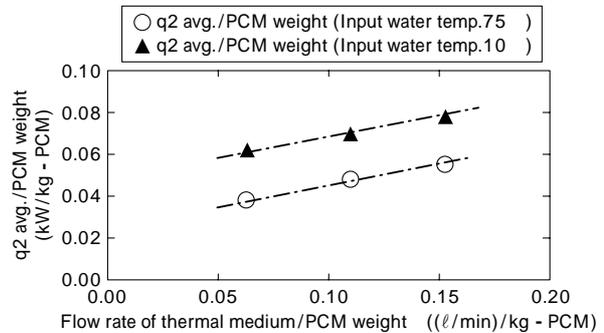


図8 放熱運転時の水温、熱媒流量と平均熱出力の関係

Fig. 8 Relationship between average value of heat output q2 and input water temperature and flow rate of thermal medium in thermal recovery operation

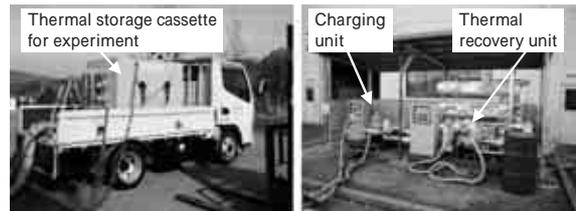


写真1 実験用蓄熱力セットと蓄熱、放熱ユニット

Photo 1 Thermal storage cassette for experiment, charging unit and thermal recovery unit

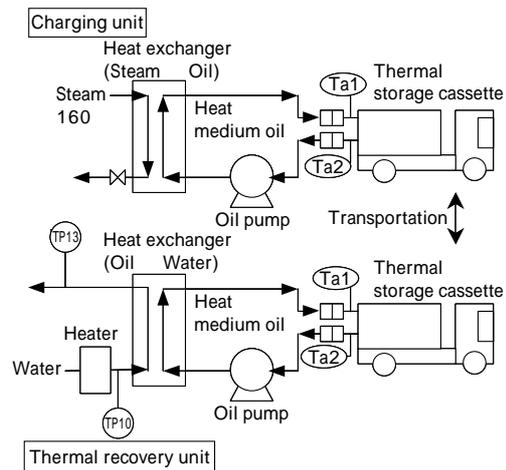


図9 熱輸送試験システム

Fig. 9 Transportation test system of thermal energy

確認された。

3. 小型熱輸送試験システムによる運転研究

3.1 小型熱輸送試験システムによる実験方法と結果

前述の試験結果に基づき、同様のノズルの設計思想を用いた直接接触潜熱蓄熱技術を用い、潜熱蓄熱材400kgを格納できる小型搬送用蓄熱力セット(写真1、総重量1.5t)と、蓄熱力セットに熱供給を行う蓄熱ユニット、蓄熱力セットから熱回収し温水を加熱する放熱ユニットからなる小型熱輸送試験システムを製作した。実験システムのフロー図を図9に示す。

蓄熱ユニットは、ボイラで発生させた160の蒸気を熱源として、蒸気熱媒油熱交換器で熱媒油を加熱して蓄熱力セットに供給することにより、蓄熱力セットへの蓄熱が行われる。蓄熱力セットから回収された熱交換後の熱媒油は、熱媒ポンプによって吸引され、再度熱交換器に供給される。

蓄熱運転終了後、蓄熱カセットは蓄熱ユニットと分離され、放熱ユニットに接続される。放熱ユニットでは、蓄熱カセット内部の熱媒油をポンプによって回収し、熱媒油を温水 熱媒油熱交換器に供給して、水と熱交換して温水を取出す。熱交換後の熱媒油は、再度蓄熱カセットに供給され、蓄熱カセット内の熱回収に使用される。

蓄熱カセットの熱の入出力については、熱媒油入口配管温度 Ta_1 と熱媒油出口配管温度 Ta_2 によって評価した。また、放熱運転時の水の温度は、温水 熱媒油熱交換器の水出入口の温度 (TP10, TP13) を計測した。

エリスリトール 300kg を使用した蓄熱カセットを蓄熱した後に、放熱ユニットに接続して、熱媒油流量 = 15.8ℓ/min, 水流量 = 11.4ℓ/min, 平均水温 TP10 = 76.1 の条件で放熱運転を実施した。この時の蓄熱カセット出入口の熱媒油温度 Ta_1 , Ta_2 と累積出力量 Q_{out} の経時変化を図10に示す。

試験の結果は、熱媒油出口配管温度 Ta_2 が初期温度 155 から最終温度 90 まで、安定して熱回収できることを示しており、排熱利用型吸収式冷温水器の熱源として蓄熱カセットを使用し、冷熱転換を行うことが可能であることを示している。累積出力量は約 180MJ, 平均出力は 15.8kW であった³⁾。累積出力量は、従来材料である塩化マグネシウムを 300kg 使用した場合と比較して 1.8 倍となることがわかった。

3.2 公道輸送実験の方法と結果

エリスリトールを 400kg に増加させた蓄熱カセットを、車載重量 2t のトラックに搭載し、当社の神戸総合技術研究所 (神戸市西区) で蓄熱後、(株)神鋼環境ソリューションの技術研究所 (同) までの約 5km の間で公道輸送

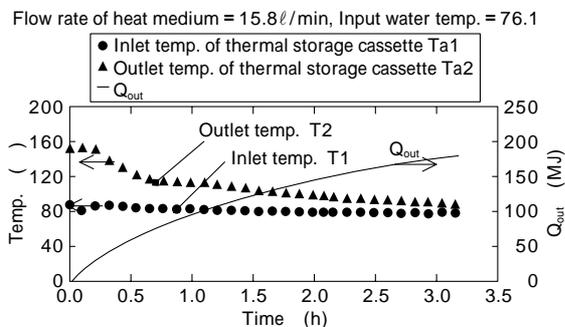


図10 蓄熱カセットの熱回収性能 (蓄熱材重量300kg, 供給水温度76.1)
Fig.10 Thermal recovery property of thermal storage cassette (PCM 300kg and input water temperature 76.1)

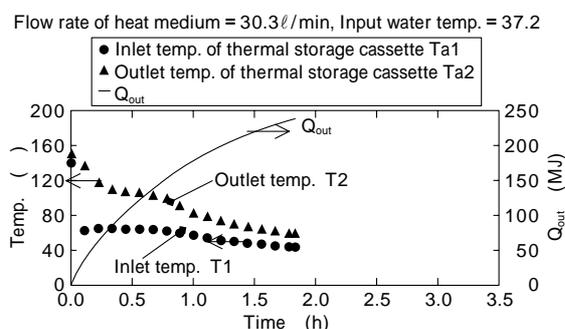


図11 公道輸送後の熱回収性能
Fig.11 Thermal recovery property of thermal storage cassette after transportation on road (PCM 400kg and input water temperature 37.2)

した。輸送後に放熱ユニットでクーリングタワーから出る平均 37.2 の循環水配管と熱交換して 60 以上の温熱を回収した。このときの蓄熱カセット出入口の熱媒油温度 Ta_1 , Ta_2 と累積入力量 Q_{out} の経時変化を図11に示す。

実験結果は、輸送後でも安定して放熱運転を行うことができることを示しており、蓄熱カセットの熱媒油出口配管温度 Ta_2 が初期温度 155 から最終温度 60 まで低下する間、蓄熱カセットから取出された累積出力量 Q_{out} は 238MJ, 平均出力は 36kW であった。累積出力量は、従来材料である水酸化バリウムを 400kg 使用した場合と比較して 1.2 倍になることが確認された⁴⁾。

3.3 冷熱転換実験方法と結果

実際の冷房への適用を確認するべく放熱ユニットと排熱利用型吸収式冷温水システム (本体: 矢崎総業製 WFC-SCB77 で定格冷房出力は 25kW, クーリングタワー: 冷却能力 60.7kW, 室内機: 定格出力 5kW) を組み合わせ、蓄熱カセットから供給した熱を冷熱に転換する試験を行った。システムのフロー図と写真を図12に示す。

蓄熱運転終了後、蓄熱カセットは放熱ユニットまでトラックで輸送され、放熱ユニットでは、蓄熱カセットと配管を通じて熱媒を循環することで、高温の熱媒油を温水 熱媒油熱交換器に供給して、温水と熱交換することで熱回収が行われる。一方、熱回収した温水は、配管を通して吸収式冷温水機との間で循環し、吸収サイクルの再生器用熱源として使用される。吸収冷房サイクルによって冷却された冷水は、室内機との間で循環し、室内で冷風を発生させる。吸収式冷温水機は、冷水温度によって ON-OFF 制御がなされており、熱の入力が十分と判断されると温水循環が停止する。そのとき、放熱ユニット

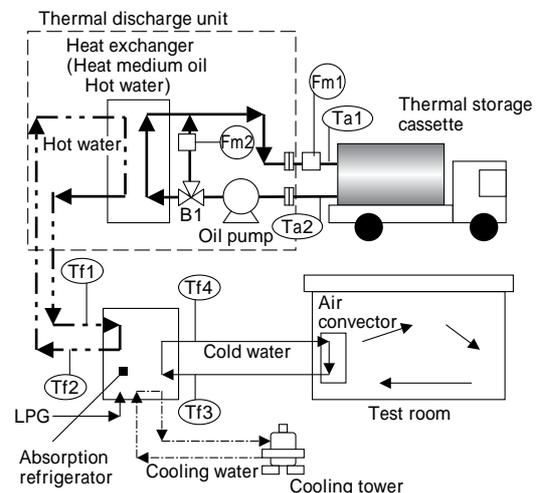


図12 蓄熱カセットと吸収式冷温水機を用いた冷房実験システム
Fig.12 Air conditioning experiment system with thermal storage cassette and absorption refrigerator

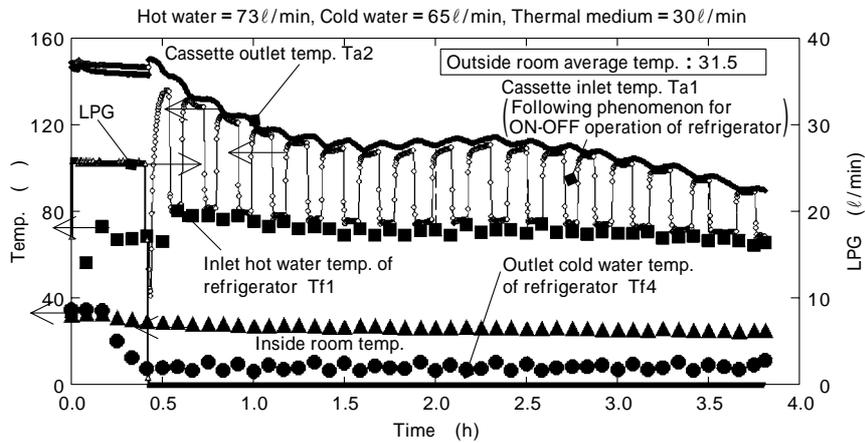


図13 蓄熱カセットと吸収式冷温水機による冷房実験結果

Fig.13 Result of air conditioning experiment with thermal storage cassette and absorption refrigerator

では三方バルブ B1 を切替え、熱媒油をバイパス配管に流すことで、蓄熱カセット内を流れる熱媒流量一定のままで、温水 熱媒油熱交換器への熱供給を停止する。

蓄熱カセットの熱の出力については、従来と同様に熱媒油入口温度 Ta1、熱媒油出口温度 Ta2、熱媒油流量によって評価した。また、吸収式冷温水機への温水の温度は Tf1 で計測し、冷水出口温度は Tf4 で計測した。

図13に、冷温水機の補助ボイラによる立上運転から、蓄熱カセットによる熱供給の場合の、蓄熱カセットの熱媒入口温度 Ta1、出口温度 Ta2、吸収式冷温水機の温水入口温度 Tf1、出口冷水温度 Tf4 及び LPG 流量の経時変化を示す。

蓄熱カセットを利用した場合、装置立上後、吸収式冷温水機の熱要求信号に応じて、ON-OFF 制御による蓄熱カセットからの熱供給を行い、65~80 の温水を発生させ、補助燃料である LPG を使用せずに冷水温度を 7~10 に維持した安定運転ができることを確認した。

また、3.4 時間の運転で、蓄熱カセットから取出された熱量の総量は 225MJ であった⁵⁾。

更に、吸収式冷温水機の燃料消費量を、従来の補助ボイラを使用した場合と今回の試験結果で比較すると、表1に示すように補助燃料の LPG を 1.96m³削減できることが確認された。この結果からトラックの燃費 4.5km/ℓ (軽油燃料) と輸送距離往復 10km を仮定した輸送による CO₂ 排出量を差引いたところ、システム全体として蓄熱カセット 1 台当たり 4.9kg の CO₂ 排出量の削減が可能であることが示された。

今後、更に高効率で大型の蓄熱カセットを使用した熱輸送システムを運用することにより、CO₂ 排出量の削減効果は更に増大していくものと期待される。

むすび = 蓄熱材エリスリトールと直接接触潜熱蓄熱技術を用いた熱輸送システムの開発において、以下に示す特徴を確認した。

1) 熱媒供給方法の工夫により、蓄熱材 (エリスリトール) と熱媒の直接接触によって熱交換することが可

表 1 実験による CO₂ 排出量削減効果

Table 1 Reduction effect of CO₂ emissions by experiment

	Unit	Study
Operating time	h	3.4
Average cooling output	kW	6
Total cooling output	MJ	73
Thermal recovery energy of thermal storage cassette	MJ	225
Reduction of LPG	m ³	1.96
Reduction effect of CO ₂ emissions	kg-CO ₂ /Cassette	10.8
Mileage of truck (Light oil)(Assumption)	km/ℓ	4.5
Cassette weight	t	1.5
Distance of both ways (Assumption)	km	10
CO ₂ emissions by truck	kg-CO ₂	5.9
Effective reduction of CO ₂ emissions(-)	kg-CO ₂ /Cassette	4.9

能となり、なおかつ、熱入出力の制御が熱媒流量と温度によって可能であることを確認した。

2) 本方式による小型蓄熱カセット (総重量: 1.5 トン、蓄熱材: 400kg) を製作し、90 以上の温熱回収ができることを確認したほか、蓄熱した上での公道輸送試験を行い、輸送後でも安定した温熱回収運転が可能であることを確認した。

3) 吸収式冷温水機の定常運転状態において、蓄熱カセットからの熱供給のみで安定して冷房運転ができることを確認した。このときの冷房用燃料の削減量から、本試験装置において輸送用燃料の消費量を考慮しても CO₂ 排出量の削減になることを算出した。

参考文献

- 1) NEDO: 平成 9 年度調査報告書, NEDO-NP-9734 (1998).
- 2) 日高秀人ほか: 化学工学論文集, 第 30 巻, 第 4 号(2004) p.552.
- 3) K. Takahashi et al.: The Sixth KSME-JSME Thermal and Fluids Engineering Conference, DK08 (2005).
- 4) 高橋和雄ほか: 第 15 回環境工学総合シンポジウム講演論文集 (2005) p.207.
- 5) 高橋和雄ほか: 熱工学コンファレンス講演論文集 (2005) p.297.