

自動車排熱利用のための蓄熱技術の開発

Development of Thermal Storage Technology for Automotive Waste-Heat Management

田中賢吾^{*1}
Kengo Tanaka

岩野勇輝^{*1}
Yuki Iwano

木原泰^{*1}
Yasushi Kihara

反町真人^{*1}
Masato Sorimachi

鮎澤恒志^{*2}
Hisashi Ayuzawa

〈概要〉

自動車走行中のエンジン排熱を蓄熱し、コールドスタート時にエンジンオイルやミッションオイルなどを、その溜めておいた熱によって暖機するシステムを開発している。早期暖機することで始動時の燃焼効率が改善すると同時にオイルのフリクションロス(摩擦抵抗)も低減するため燃費を改善することが可能となる。排気熱の温度帯を利用するための蓄熱材として代表的な酸化カルシウムがあるが、大きな出力を得ようとする場合、材料の表面積を大きく取り、水蒸気との反応を促進させる必要があるため、装置が大型化する課題があり、自動車搭載の障壁となっていた。我々は、ヒートパイプ技術と蓄熱材を組み合わせ水蒸気(気体)ではなく、水(液体)と蓄熱材とを直接反応させて高出力で高密度な小型の蓄熱システムとすることを検討してきた。これまで原理試作器による一次評価において、従来型蓄熱器の2倍以上の熱出力密度となるデータを得ている。

1. はじめに

世界の経済発展や人口増加にしたがいエネルギー消費量は増大していくと予測されているが、現状エネルギー消費の大半は化石燃料に依存しているため、地球環境の視点や持続可能な社会を考えると、再生利用可能なエネルギーへシフトしていくことが重要である。加えて、いかにエネルギーを効率よく使用し、無駄を少なくすることも重要な点である。

自動車分野では内燃機関からEVへの転換が進むと想定されているが、内燃機関もHVやPHVなどで2035年以降も継続的に展開されるとの予想である¹⁾。内燃機関における燃料の持つエネルギーについては、その燃焼効率から動力として取り出されるのはおおよそ30%であり、その他の大半は排気やラジエータから熱として大気に排出されている。一方、コールドスタート時にはエンジンやオイル、更に排気浄化用触媒などの暖機に熱エネルギーが必要となっており、現状は燃料をその分余計に燃やして熱エネルギーにして暖機している。したがって走行中に大気に排出していた廃熱を回収して蓄熱しておき、始動時に暖機に利用することができれば、より効率的なエネルギー利用となると考えられる。

2. 蓄熱材の種類と特長

蓄熱材に用いられる代表的な材料と特長を表1に示す。蓄熱技術は相変化などを伴う潜熱蓄熱と化学変化を利用する化学蓄熱の二つに大別される。潜熱蓄熱は固体と液体の相変化する際の熱エネルギーの出入りを用いて蓄熱する方式であり、顕熱に潜熱が加算されるため蓄熱密度としては大きくなる。温度範囲は-20℃~200℃程度の範囲であり、保冷剤や床暖房の保温材などに使用されている。一般的には時間とともに外部に熱が放出されるため、高性能な断熱材とともに使用されることが多い。かつて自動車の冷却水を魔法瓶で保温して始動時に使用するようなシステムも実用となったことがある²⁾。一方で化学蓄熱は蓄熱材と反応ガスが化学反応して結合する際の反応熱を利用するものである。蓄熱材と反応ガスを物理的に分離しておき、反応させたいときに混合して熱を発生させる。逆に化学反応を進行させないことで長期間に渡って蓄熱状態を維持することも可能であり、断熱構造は必要としない。また、化学蓄熱は潜熱蓄熱と比べて約2~5倍程度の蓄熱密度を持ち、使用温度は100℃~500℃程度の高温の領域となる³⁾。本開発においては排気熱の温度領域である化学蓄熱材として、高蓄熱密度であることと、反応速度や可逆反応性を考慮して、酸化カルシウム(CaO)を選択した。選択した材料は $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O}(\text{g}) \rightleftharpoons \text{Ca}(\text{OH})_2 - 109 \text{ kJ/mol}$ で示される吸熱・発熱反応を起こすものである。

^{*1} 研究開発本部 自動車・エレクトロニクス研究所

^{*2} ものづくり改革本部 生産技術部 ものづくり改革センター

表1 蓄熱材種類
Types of Thermal Storage Material.

蓄熱種類	潜熱蓄熱	化学蓄熱
蓄熱原理	相変化(固体⇄液体)の熱	化学変化(水和反応)
代表的材料	酢酸ナトリウム三水和物 硫酸ナトリウム十水和物 パラフィン	$\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{Ca(OH)}_2$ $\text{MgO} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{Mg(OH)}_2$
温度領域	-20 ~ 200℃	100 ~ 500℃
メリット	熱交換設計容易	高蓄熱密度
デメリット	低い蓄熱密度	装置が大型になる
利用形態	均熱化や時間差熱利用 ・蓄熱ボード(カプセル化) ・冷却マット(ジェル) ・ホックイロ(過冷却現象) ・ビル冷房、暖房 ・ヒートポンプ霜取り ・冷凍庫、車室内冷房	実用化の例は極めて少ない ・廃熱による冷房、 冷凍の補助 ・太陽熱発電など

3. 従来型の蓄熱器と課題

従来型の一般的な化学蓄熱装置の基本構成を図1に示す。蓄熱材を封入した蓄熱容器と反応ガスを封入した反応ガス容器をパイプなどの流路で接続し、その間にバルブを接続した構成である。

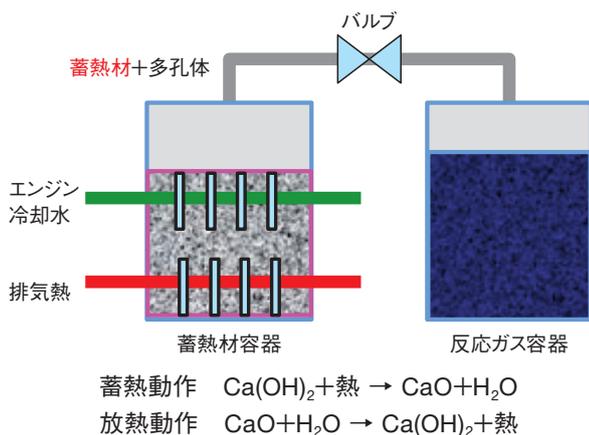


図1 一般的な化学蓄熱システム
Normal Chemical Thermal Storage System.

CaO/H₂O系で動作を説明する。蓄熱容器にCa(OH)₂を充填しておき、蓄熱容器を加熱し、反応ガス容器を冷却することにより脱水反応が起こり、水蒸気(H₂O)が反応ガス容器に移動して凝縮して反応ガス容器に水及び水蒸気として溜まる。脱水反応が完了した時点でバルブを閉じればCaOとH₂Oが分離したことになる。加熱を停止してバルブを閉じた状態で常温まで戻すと、蓄熱容器は負圧になり、反応ガス容器は常圧(飽和水蒸気圧)となる。そこでバルブを開けると水蒸気が蓄熱容器側へ移動して蓄熱材と反応し、反応熱が発生することとなる。同時に反応ガス容器側は水の蒸発が進行し、蒸発熱が奪われ温度が下降することとなる。このように蓄熱容器側と反応容器側の温度勾配を発生させることができるというのがこの構成の特長でもある⁴⁾。

しかしながら、水蒸気と蓄熱材との反応を効率よく促進させ

るためには反応するための材料の表面積が必要であり、そのために、熱交換機で使用されるコルゲートフィンなどの表面に蓄熱材を配置するような構成となり、この結果蓄熱容器サイズが大きくなってしまいう問題がある。また、反応速度を得ようとする場合、多くの水蒸気を一気に反応させなければならず、多くの水蒸気を反応ガス容器に保持しておくため反応ガス容器側も大型化してしまう。このような事情で材料そのものの蓄熱密度は2000 kJ/L以上もあるが、蓄熱装置として見た場合の蓄熱密度は200 kJ/L以下となり、潜熱蓄熱材レベルまで低下してしまい、これが車載への障壁となっているのである。

4. 車載用蓄熱器

4.1 車載目標値

自動車のエンジン暖機には熱量として具体的には1 MJ程度必要と言われており、従来型の蒸気反応型の熱出力密度(容器体積当たり熱として利用できる密度)が170 kJ/L程度(当社推定値)であることを考慮すると、約6 Lのそれぞれの容器が必要となり前述のとおり自動車への搭載の障壁となっていると考えている。本開発では、まずは、従来型蓄熱器の2倍以上の熱出力密度、熱出力を目標として進めてきた。従来型の蒸気反応型の熱出力密度が170 kJ/L、熱出力は0.7 kW/Lであるため、本開発の目標値として従来の2倍以上の熱出力密度500 kJ/L以上、熱出力1.5 kW/L以上を目指すこととした⁵⁾。かつてトヨタ自動車プリウスに採用されたエンジン暖機用の温水保温魔法瓶タイプの蓄熱システムでは、約400 kJの熱量で燃費2%改善、エミッション14%改善(LA#4外気温25℃)の報告があるため、今回目標としている熱出力密度500 kJ/Lでは装置サイズ2 Lにてエンジン暖機した場合、約5%程度の燃費改善が見込めると推定している⁶⁾。

4.2 ループ型蓄熱装置

蓄熱材と水蒸気と効率よく反応させるためには、前述のようにより大きな表面積が必要になってしまうため蓄熱材を粉体状としなければならず、それにより一気に蓄熱装置の蓄熱密度が下がってしまう。そこで体積の小さい状態の水(液体)と反応させることができないかを検討した。具体的な構成としては蓄熱容器に圧縮成形した蓄熱材を詰め、脱水と発熱反応を繰り返す動作をさせるためにループヒートパイプ(LHP)構造を用いることとして、図2の構造を考案した。蓄熱材CaOは水(液体)との結合でも反応し、そのときの反応熱は65 kJ/molである。バルク換算で約1939 kJ/L(密度2.2 g/cm³)の蓄熱密度を保持している。

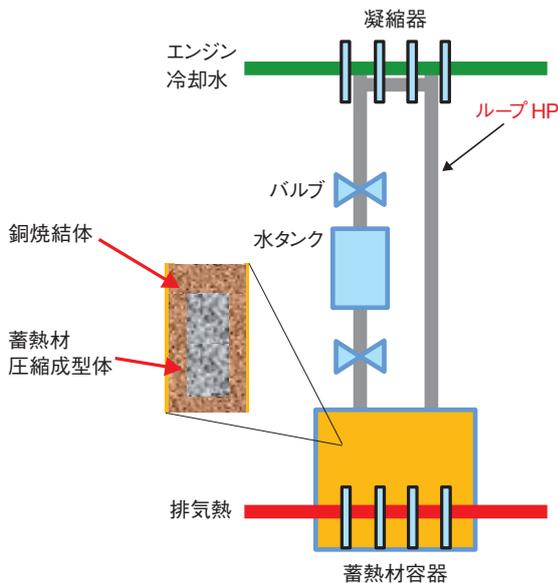


図2 ループ型化学蓄熱システム
New Chemical Thermal Storage System by Using LHP
(Loop Heat-Pipe).

蓄熱動作について、図3(a)にて説明する。蓄熱時はバルブ1を開、バルブ2を閉とした状態で蓄熱容器を加熱する。加熱された蓄熱材が脱水反応を起こして水蒸気を発生し、水蒸気は凝縮器にて液体になり水タンクに貯留することとなる。反応が完了したところでバルブ1を閉じて蓄熱完了となる。

放熱動作時(図3(b)に示す)は、バルブ2を開いて水を蓄熱容器に供給することで発熱反応させる。このことにより蓄熱材は発熱反応し発熱することとなるが、反応に必要な量の水より多く供給することで水が蒸発するため、その蒸気が凝縮器まで移動してループヒートパイプとして働き、凝縮器まで熱を運ぶことができる。

このように、放熱時はヒートパイプ動作をさせることが可能であるため、蓄熱器で発生した反応熱をヒートパイプのどの地点へも輸送することができるのが本システムの最大の特長である。

蓄熱密度に関して、前述したように水(液体)との反応熱は65 kJ/molでバルク換算で約1939 kJ/L(密度2.2 g/cm³)の蓄熱密度を保持している。本実験での圧縮成形体の密度は1.5 g/cm³であるため1322 kJ/Lが達成可能な蓄熱密度限界値となる。

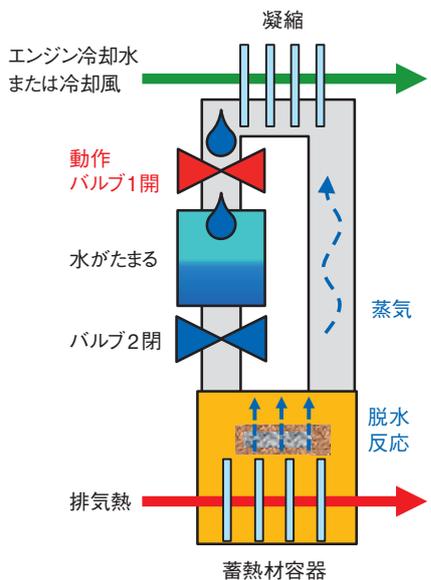


図3(a) 蓄熱動作
Thermal Storage Operation.

バルブ1閉で蓄熱完了
常温まで放置

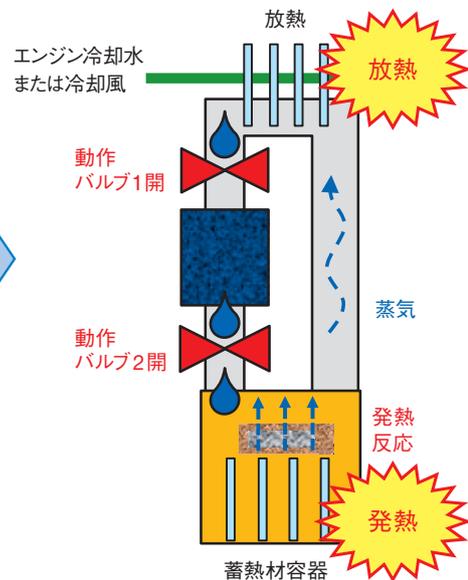


図3(b) 放熱動作
Heat Output Operation.

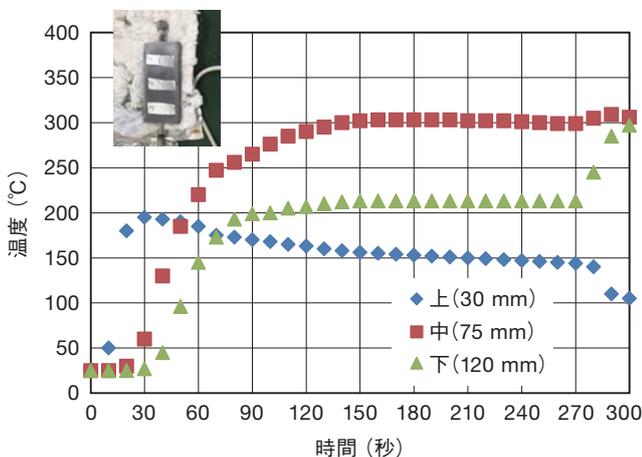


図4 蓄熱容器温度
Surface Temperature of Thermal Storage Case.

4.3 放熱実験

発熱時の蓄熱容器の温度プロファイルを図4に示す。容器の3か所の温度を示しているが、容器上側部は水供給開始から30秒で約200℃に達する。水が連続的に供給されている容器上側は温度が下がるが、容器中央部は徐々に上昇して150秒で300℃に達している。また、発熱(体積換算)のプロファイルは図5であるが、300秒で660 kJ/Lの熱出力密度となっており、500 kJ/L以上の目標はクリアしたことを確認した。また、300秒までの平均熱出力は2.2 kW/Lと高出力を得ることに成功している。本蓄熱容器内の蓄熱材料の体積から容器の蓄熱密度を計算すると853 kJ/Lであるため、理論値に対して77%の熱量が回収された結果となった。

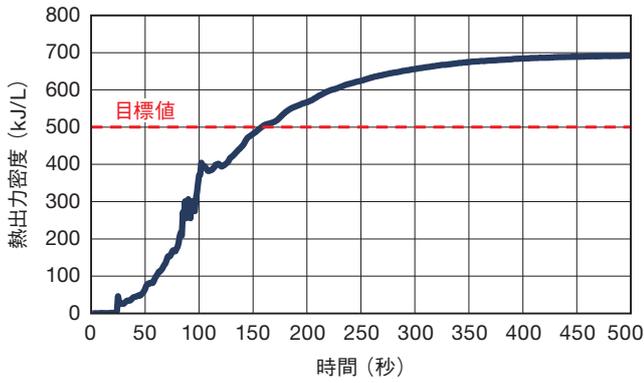


図5 熱出力密度推移
Heat Output transition of Thermal Storage Case.

ループヒートパイプ上の凝縮器の放熱温度のプロファイルを図6に示す。水供給開始から100秒後温度上昇が見てとれ、300秒時点での熱出力密度と熱出力はそれぞれ385 kJ/L、1.3 kW/Lとなっている。蓄熱容器での発熱量に比べて凝縮器での熱回収量が小さい原因はパイプの熱容量(図7に示す)などが影響したと考えられる。1mと長かったパイプの長さを短くするほか、部材の熱容量を減らすなどの熱輸送効率改善は今後の課題である。

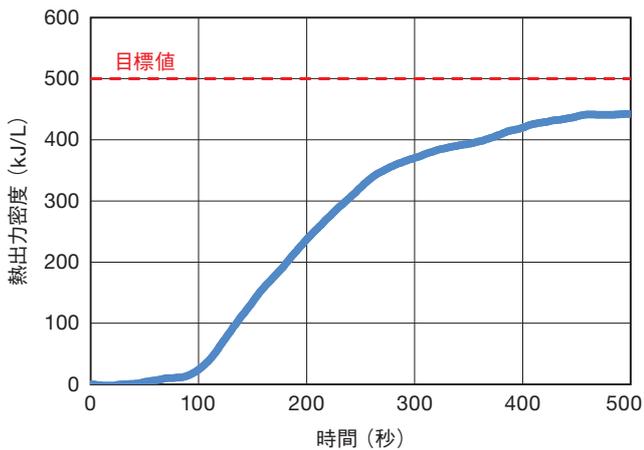


図6 熱回収部での熱出力密度
Heat Output at Condenser of LHP.

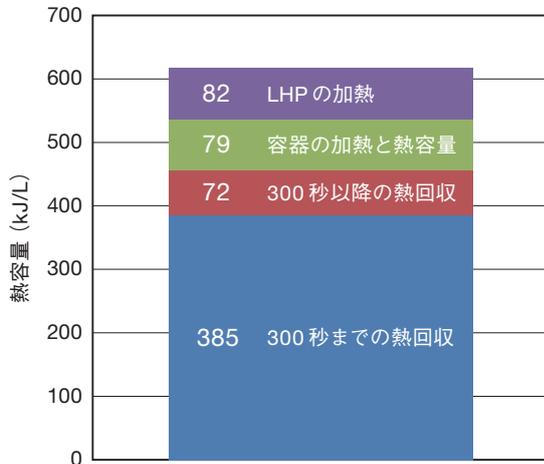


図7 熱容量の内訳
Brokeden of Heat Capacity.

4.4 蓄熱実験

蓄熱時の挙動を図8に示す。蓄熱容器の温度が上昇してきて350℃付近(180秒)から凝縮器温度が60℃以上まで上昇しているのが見てとれる。この状態は水蒸気が凝縮器に移動を開始し、凝縮を開始していると考えられ、蓄熱材が脱水反応している挙動と推定される。500秒あたりで凝縮器温度が元に戻ったため脱水反応が終了し蓄熱完了と見なすことができる。図9にループヒートパイプ内の圧力(飽和水蒸気圧)と脱水温度と水蒸気温度の関係(計算値)を示す。凝縮器温度(水蒸気温度)が57℃では飽和水蒸気圧が17 kPaであり、このときの脱水温度は357℃である。図8で350℃付近で脱水反応しているとすると計算値と合致する。

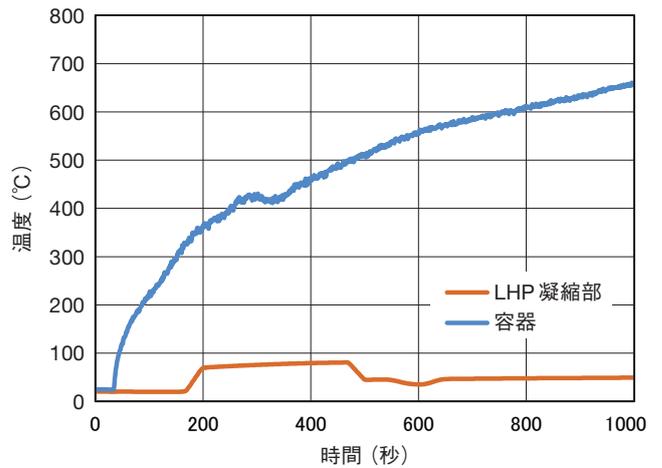


図8 蓄熱時の温度推移
Case and Condenser Temperature during Thermal Storage.

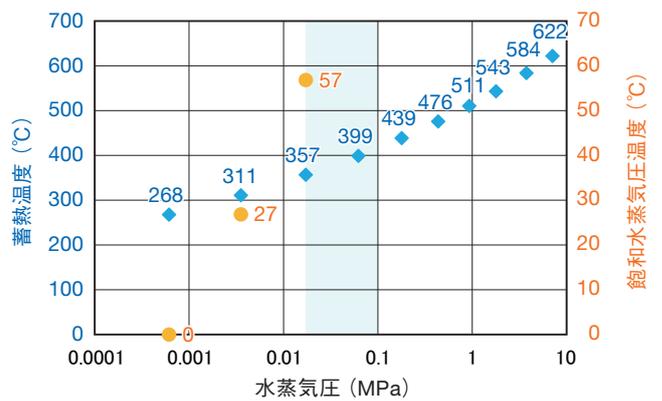


図9 水酸化カルシウムの脱水反応計算値
Calculated Value of $\text{Ca}(\text{OH})_2$ Dehydration Reaction.

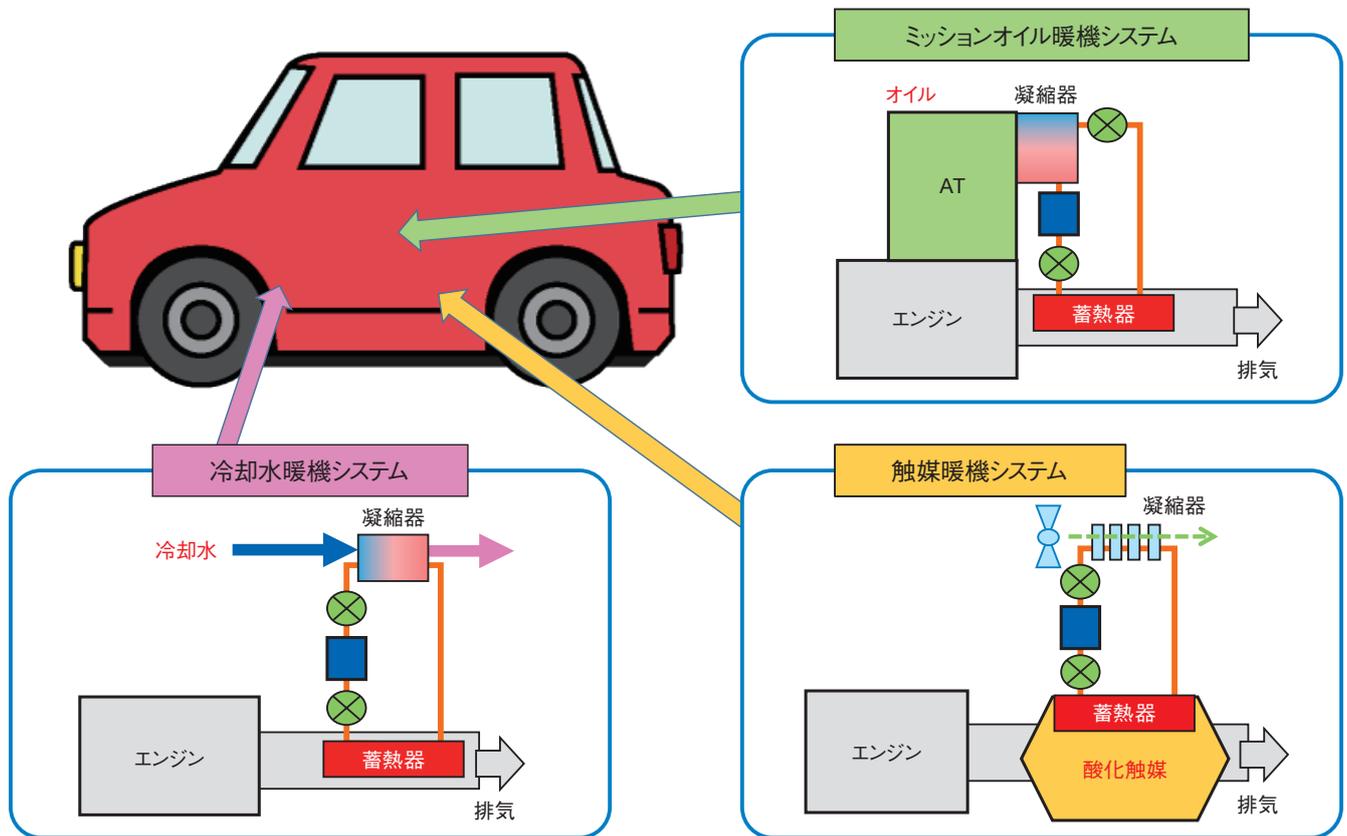


図10 暖機システム適用例
Examples for Heating System of Thermal Storage Device.

5. おわりに

ループヒートパイプの一部に蓄熱材を構成したループ型蓄熱装置を試作し、目標の500 kJ/L以上の熱出力密度660 kJ/L、熱出力2.2 kW/Lが得られることを実験にて確認することができた。凝縮器での熱輸送による熱出力密度は385 kJ/Lに留まったものの、熱輸送が可能であることも確認できた。従来型の化学蓄熱器とは異なったコンセプトの装置ではあるが、高蓄熱密度で排熱利用ができる可能性を示したと考えている。また、本実験では凝縮器までの熱容量などが原因で凝縮器への熱輸送時間がかかり放熱量が目減りしてしまうなどの課題も明らかにすることができた。今後、繰返し耐久性、低温時の起動性などを確認し、具体的な自動車暖機システムへの応用(応用例を図10に示す)を検討していきたいと考えている。

参考文献

- 1) 株式会社総合プランニング:2017年版電気自動車関連市場の最新動向と将来予測.
- 2) 宮田喜夫:エンジン暖機用蓄熱システムの開発, デンソーテクニカルレビュー, Vol.10, (2005).
- 3) 小林敬幸:排熱を化学的に蓄える技術の実例と諸課題, 自動車技術, No.14-14, (2014).
- 4) 岡村徹:化学蓄熱を用いた自動車排熱の貯蔵・利用技術, デンソーテクニカルレビュー, Vol. 19, (2014).
- 5) 未利用熱エネルギー革新的活用技術研究組合(TherMAT)平成29年度実施方針.
- 6) 岡村徹:技術情報協会セミナー, ケミカル蓄熱のニーズ検討, (2012).