

廃熱回収ヒートポンプの開発

Development of Waste Thermal Energy Recovery Heat Pump

大野 裕之*

Hiroyuki Ohno

畠山 淳*

Jun Hatakeyama

長田 光昭*

Mitsuaki Nagata

前田 知広*

Tomohiro Maeda

要 旨

電気自動車 (EV) において、冬季の暖房使用による航続可能距離低下は EV 普及の課題となっており、高効率で低コストな暖房システムの実現が期待されている。一方で電気自動車は普及過渡期にあり、現行車のエアコンシステムを大幅に変更することは、コストメリットの観点から望ましくない。この課題に対応すべく、現行車に搭載の HVAC を変更せず、これまで利用できていなかった廃熱を回収利用した高効率暖房システムの考案、実証を行ったので取組内容について説明する。

Abstract

In winter season, using heater for air condition decreases cruising range of electric vehicle (EV). It is one of the issues for EVs' popularization. So the high efficiency and low cost heating system is desired for EVs. For this demand, a heat pump system has been developed that recovered waste thermal energy in EV and had an HVAC unit without changing from mass product one. This paper reports the detail of this system and experimental results.

Key Word : Electric Vehicle (EV), Air conditioning, Heat pump, heater

1. はじめに

内燃機関の車両においては、冬季の暖房エネルギーはエンジン廃熱により確保しているが、電気自動車 (EV) になると暖房用の熱源を別に確保する必要があり、熱源として電気エネルギーが使用されることが一般的である。したがって、EV では暖房運転による電力消費により、航続可能距離の低下が発生してしまう。近年では暖房運転時の航続可能距離低下を抑えるべく高効率な空調システムであるヒートポンプ式空調が EV 用に登場し始めた。しかしながら、外気を吸熱源とする方式の場合、熱交換器の凍結や、低外気温時の COP (成績係数) 悪化、車室内 HVAC の大幅な形状変更などの課題がある。

本稿では、暖房時の電気エネルギーの消費を抑えるべく、外気では無く車室内気及びバッテリーへの蓄熱、機器廃熱を熱源とした暖房システムを考案し実験を行った。

2. システムの特徴

本システムは、HVAC を変更することなく内燃機関車用エアコンシステムを流用することで、車両への搭載を容易なものとしながら、暖房熱源として、車室内空気、バッテリー蓄熱、モータ / インバータの駆動系部品の廃熱を利用できる構成とした (Fig. 1)。

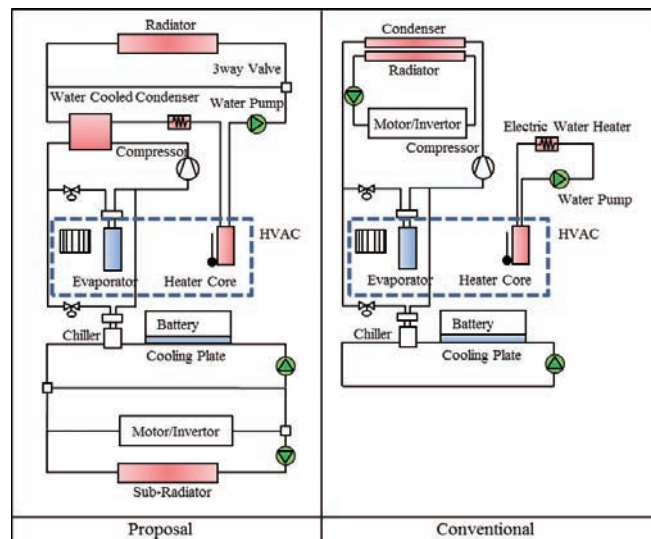


Fig. 1 System structure

2.1. システムの狙い

EV における廃熱とは、以下の熱エネルギーを指す。

- (1) 窓曇り防止のための室内換気で放出される熱 (換気損失熱)
- (2) 充電時に発生するバッテリーの発熱
- (3) 走行中のインバータ、モータの電力損失

* グローバルテクノロジー本部 環境技術開発グループ

従来は、これらの熱は低温であり暖房に利用できない為、空気/水を介して外気へ廃棄されていた。本システムは、この熱をヒートポンプで回収することで暖房へ利用するものである。

熱の回収にはエバポレータ/チラーを使い、コンプレッサにて圧縮された高温高圧の冷媒を作り、水冷コンデンサを介してヒータ暖房の為の温水を加熱する。これにより車室内への高圧冷媒の引きこみを必要とせず、新冷媒等への変更対応も容易である。

2.2. 換気損失熱の回収

暖房時に窓曇りを防ぐため湿度の低い外気を車室内へ導入すると、暖かい空気と共に外部へ熱エネルギーを放出することになる。この換気損失は、外気0℃では車両の熱負荷に対する割合が約50～60%と大きい(Fig. 2)。この換気損失を低減するには車室内の空気を内気循環させる手段が知られているが、室内湿度の上昇により窓曇れ性能は悪化する。

本システムでは、これらの両立を狙い、除湿熱回収方式を採用した。これはエバポレータで冷却除湿する際の熱をヒートポンプで回収し、この熱を使って再加熱するシステムである。この方式により換気損失を抑えつつ除湿性能を確保した。また内気循環による車室内の温度分布悪化を防止するため、内気循環率は60%に設定した。

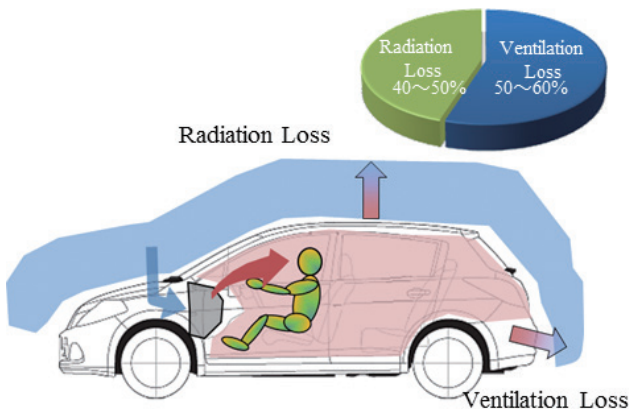


Fig. 2 Vehicle heat load ratio

2.3. バッテリからの熱エネルギー回収

走行用バッテリーは車両走行や充電時の電流の入出力により発熱するが、とりわけ急速充電時(QC: Quick Charging)のセル発熱は大きく温度上昇も大きい(Fig. 3)。

またバッテリー温度が低い状態では充放電特性が悪化する為、それを回避すべくバッテリーを加熱する機能が付帯される。

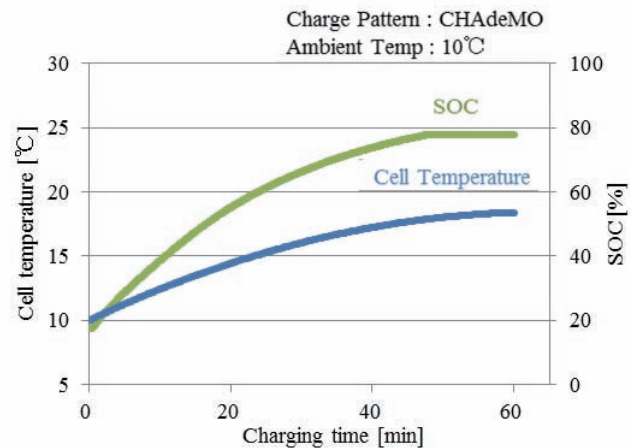


Fig. 3 Cell temperature and SOC at QC

一方で、バッテリーモジュールは熱容量が非常に大きいことから、見方を変えると一種の蓄熱器として捉えることができる。これらのことから、走行前に充電したり適温範囲内で加温を行えば走行中に熱を回収して利用することが可能となる。Fig. 4はバッテリーを30℃に加熱し、10℃になるまで吸熱した場合に利用可能な熱量をバッテリー容量と対比して示している。バッテリーの重量エネルギー密度により利用できる熱量は斜線の範囲内であればつくが、例えば40kWhのバッテリー容量を持つ車両では1200Wh～2200Whの熱量が利用可能である。この熱を走行中に十分回収できれば暖房エネルギーとして利用できる。

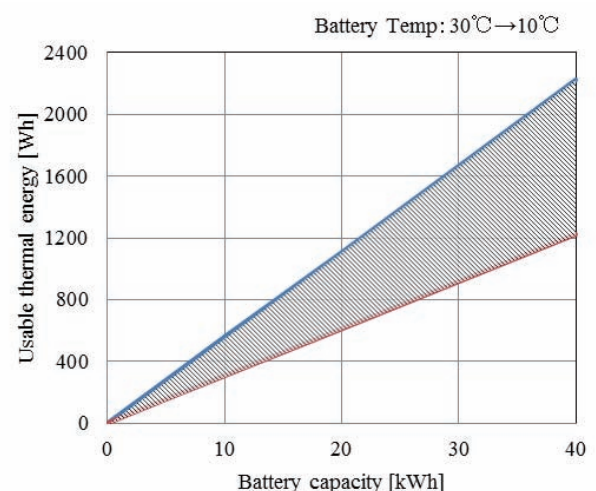


Fig. 4 Heat storage capacity

2.4. 強電機器からの熱エネルギー回収

駆動用に使われるインバータ/モータは、エネルギー効率が内燃機関に比べるとはるかに高い。とはいえ、必要駆動力に応じて発熱はあり、Fig. 5はD-seg相当を想定した電動車両のJC08モード走行でのインバータ/モータの損失を計算した例である。走行状態

によって損失は大きく変化するが、平均で 250W 程度発生している。

また、インバータ／モータは、車載用として高出力密度を要求されることから発熱密度が高く、水冷されるのが一般的である。前述の損失による発熱はこの冷却水で冷却されるため、冷却水より熱回収することで、強電機器の熱エネルギー回収が可能となる。

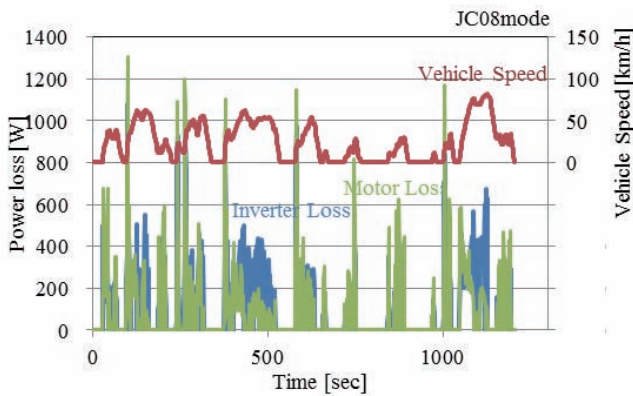


Fig. 5 Vehicle energy loss

3. システム構成部品

本システムを実現するにあたり、構成部品の新規開発を行ったので、主要部品について特徴を説明する。

3.1. 電気温水ヒータ

低コストで安全性を考慮した新型シーズヒータを採用した (Fig. 6)。PTC 素子を用いたヒータに対して安価なニクロム線を採用することでコスト低減を図り、課題となる異常加熱に対しては弊社独自技術であるバイメタルを用いたフェイルセーフ技術により対応している。

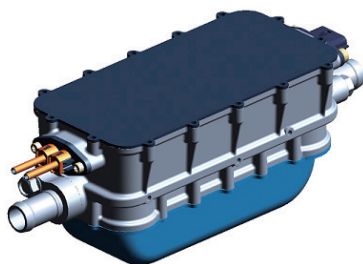


Fig. 6 High voltage water heater

3.2. 水冷コンデンサ

一般的にエアコン用コンデンサは空冷であり車両前方に配置されているが、本システムでは冷媒の凝縮熱全てを暖房にも利用できるように水冷コンデンサを採用した。水冷コンデンサで水に渡された凝縮熱は水冷回路の切り替えによってラジエータまたはヒータコアで放熱される。また、搭載位置をキャビン近くに配置することで

配管長さが削減され、一般的なヒートポンプシステムに比べて、冷媒封入量を低減させることができた。

但し、空気へ直接放熱を行う空冷コンデンサと比べ、水から空気と間接的に放熱を行う水冷コンデンサは冷媒の凝縮温度が高くなる。これにより、夏季冷房時の作動圧力が高くなり、コンプレッサ動力が増加する (Fig. 7)。

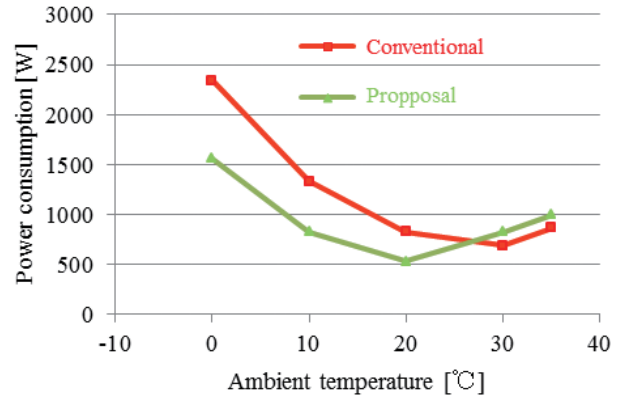


Fig. 7 Comparison Of AC power consumption

このコンプレッサ動力の増加に対しては、放熱係数の高い水冷コンデンサを設定することで対応した。また、リキッドタンクを介してサブクールコンデンサを設定することにより凝縮エンタルピ差を大きくさせ、コンプレッサ動力の増加を最小限としている (Fig. 8)。

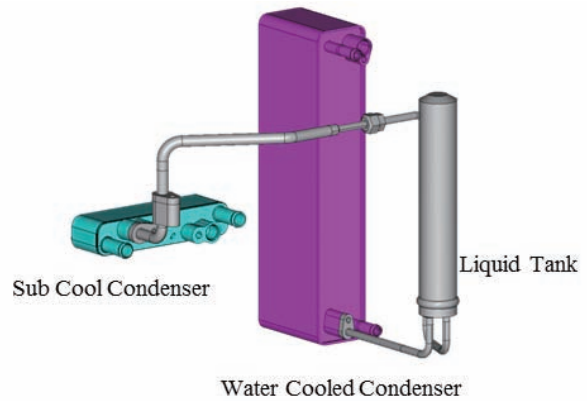


Fig. 8 Sub cooled condenser system

3.3. クーリングプレート

バッテリー冷却・加温用のクーリングプレートは、バッテリーパックの搭載性や車室内の居住性に関わる為、小型薄型である必要がある。

本システムでは上下に配置したバッテリーモジュールの平面部に密着させる両面薄型クーリングプレートを採用した (Fig. 9)。バッテリー蓄熱を短時間で利用できるように熱抵抗を下げ、冷却水が全面で均一流れになるよう設計してバッテリーモジュール内の冷却バラつきを抑制した。

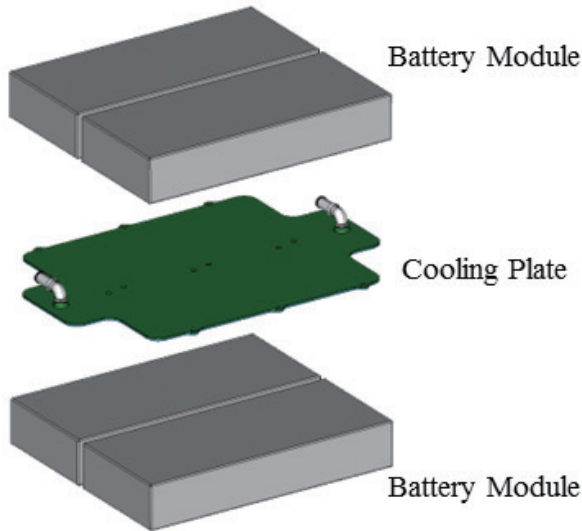


Fig. 9 Structure of battery modules and cooling plate

4. システム動作方法

本システムは暖房運転時に以下の運転モードを有する。

- (1) 車室内の空気を内気循環させ、エバポレータからのみ吸熱するモード
- (2) (1)に加え、バッテリーの蓄熱をチラーより吸熱し利用するモード
- (3) (2)に加え、モータ/インバータの廃熱をチラーより吸熱し利用するモード

運転制御方法は、(1)でコンプレッサ回転数によりエバポレータの除湿量を制御することを前提として、バッテリーが暖房利用できる温度範囲内であれば(2)、さらにモータ/インバータの冷却水温が暖房利用できる温度範囲内であれば(3)で動作させる。各々から吸熱された熱は水冷コンデンサでヒータ温水回路へ放熱される。この時、温水回路の目標水温 T_{wh} は、車室内への目標吹出し空気温度 X_m によって決定される。水冷コンデンサからの放熱で目標水温に到達しない場合、電気温水ヒータによる温水加温を行う。以上のシステム熱収支は下記のように表される。

$$Q_{cond} = Q_{Evap} + Q_{Chiller} + P_{Comp} \quad (1)$$

$$Q_{HC} = P_{Heater} + Q_{Cond} \quad (2)$$

- Q_{HC} : ヒータコア放熱量
- Q_{Cond} : コンデンサ放熱量
- Q_{Evap} : エバポレータ吸熱量
- $Q_{Chiller}$: チラー吸熱量
- P_{Comp} : コンプレッサ動力
- P_{Heater} : 電気ヒータ電力

Fig. 1 に示した従来システムでは、電気温水ヒータが唯一の熱源であったが、Fig. 10 に示すようにチラーとエバポレータで熱回収することでヒータコア放熱量が確保され、電気温水ヒータの電力を削減することが可能である。また、熱回収量が多い条件下では、式(2)から電気温水ヒータの消費電力はなくなり、コンプレッサ電力のみで暖房が可能となる。

モータ/インバータの廃熱は通常はサブラジエータより放熱されるが、バッテリー冷却回路の水温 T_{wc} とモータ/インバータ冷却回路水温 T_{ws} の関係より、3方弁の向きを切り替えることでチラーから吸熱できるよう制御を行っている。

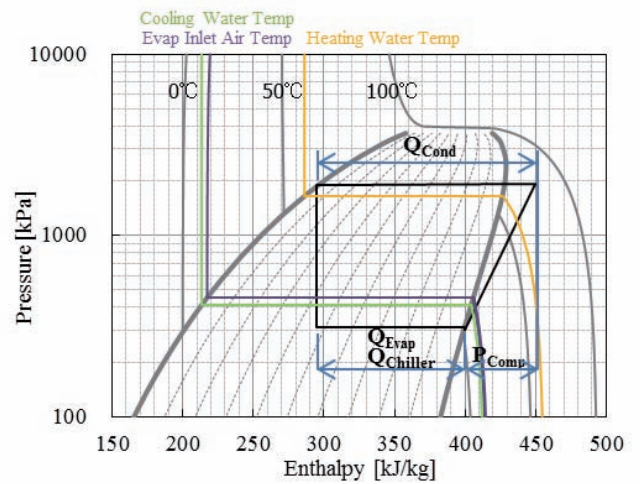


Fig. 10 p-h diagram

5. 検証結果

本システムを(株)SIM-Drive社の先行開発車事業第4号を用いて効果検証した(Fig. 11)。

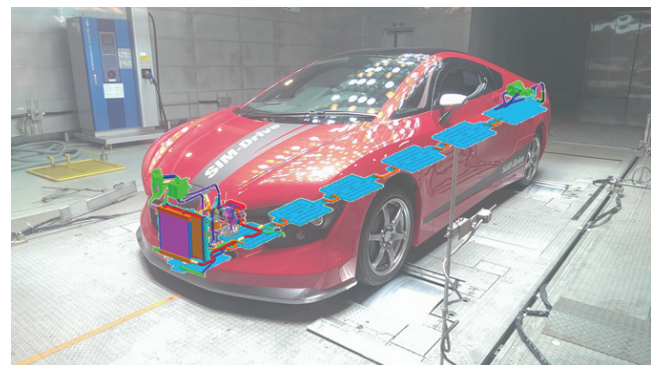


Fig. 11 Test vehicle installed proposal system

5.1. 消費電力低減効果

外気 0℃, JC08 モードにおいて, 電気温水ヒータのみで暖房を行った場合, 内気循環による熱回収をした場合, さらにバッテリー蓄熱 1200Wh を加えた場合の 3 パターンについて, それぞれの 40 分走行時の暖房消費電力総量を比較したものを Fig. 12 に示す. 結果, 電気温水ヒータのみの場合に比べそれぞれ 17%, 53% の消費電力低減が確認できた. 消費電力の低減に伴い航続可能距離もそれぞれ 16%, 49% 伸長する.

尚, この評価条件では走行負荷が小さくインバータ/モータの発熱量が少ないことから, 暖房利用できる温度範囲に至らず熱回収はしていない.

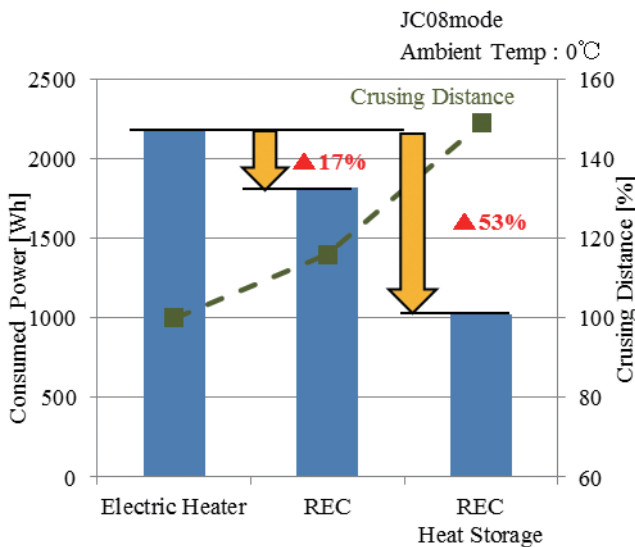


Fig. 12 Consumed power after 40 min. run

5.2. 暖房時の熱収支

Fig. 13 は初期バッテリー温度 30℃ から 40 分走行した時の消費電力と室内暖房性能の推移を示している. 走行初期は, 室内暖房に必要なエネルギー (Output) に加えて冷却水や熱交換器を加熱する分で大きな消費電力 (Input) を必要とするが, 5 分後以降は消費電力が減少し, 暖房エネルギーを大きく下回る. この差がバッテリーの蓄熱利用や換気損失回収の効果であり, 10 分後以降は定常的に消費電力がほぼ半減していることがわかる.

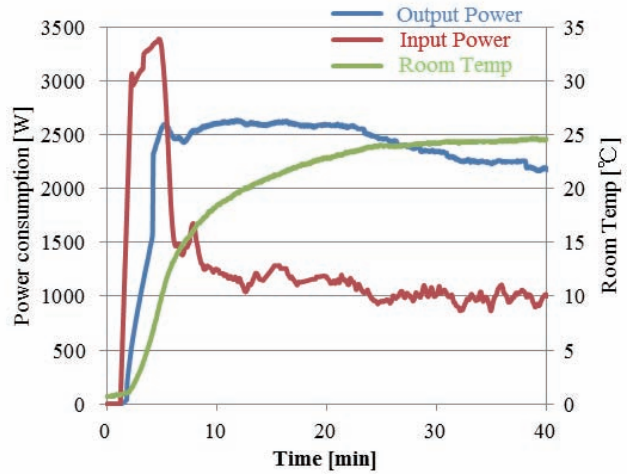


Fig. 13 Energy balance

5.3. 内気循環による熱回収効果

バッテリー熱は常に利用できる状態とは限らないため, 常時活用できる内気循環のみ行った場合の熱回収量を Fig. 14 に示す. 暖房開始後, 室温と共にエバポレータ吸込み温度が上昇し, 熱回収量が増えていく. 室温安定時には 800W の熱回収が出来ている. これは暖房に必要なエネルギーの約 30% に相当にする.

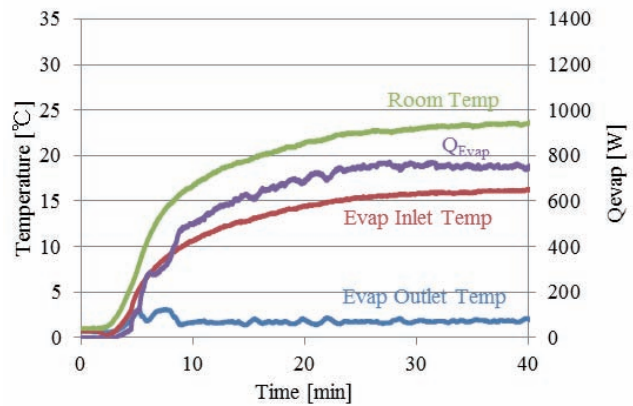


Fig. 14 Heat recovery by recirculation

さらに 40 分走行時の総エネルギー量でみると 400Wh の熱回収量となっており, 内気循環による効果が十分確認できた.

EV や PHV のような, 家庭用電源からの電力で空調が可能な車両であれば, 乗車前の事前空調との組み合わせにより, さらに効率的な暖房が可能となる.

6. おわりに

以上のように、これまで捨てていた熱エネルギーを回収し、バッテリー蓄熱と併用することによって、暖房消費電力を大幅に削減できることを確認した。しかしながら、電気自動車の走行電力に対する暖房電力の割合は依然として高く、更なる改善が望まれる。空調システムの熱容量低減や熱損失低減のみならず、車両全体で熱負荷低減を進めることが重要である。

また本システムは、電気自動車のみならず他の電動車両へも適用可能であり、開発を進めていきたい。



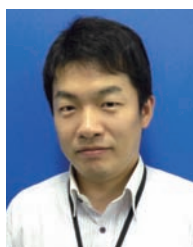
大野 裕之



畠山 淳



長田 光昭



前田 知広