

電気自動車における熱マネジメント技術の動向について*

Trend of Thermal Management Technology for Electric Vehicles

沼田 将成
Masanari NUMATA

There are still problems with the range and charging time of electric vehicles, and the complaints and requests from users are increasing as the use of electric vehicles expands. To solve these problems, battery capacity has been increased and charging capacity has been enhanced by high-power chargers, but thermal management technology for the entire vehicle, such as air conditioning and battery temperature control, is required to maximize these effects.

Key words :

cooling, heat and temperaturemanagement

1. はじめに

近年、地球温暖化抑制を背景にカーボンニュートラルに向けた取り組みとして電気自動車の開発・普及は日増しに加速している。世界各国にてカーボンニュートラルに向けたガソリン車販売規制や目標値が設定され、それに従い世界の電気自動車の販売台数は2021年660万台と過去5年で約9倍に増加している。しかし、電気自動車には航続距離や充電時間に課題が残されており、利用が広がるにつれてこれら課題に対するユーザからの不満・要望も大きくなっている。広く社会に普及させるためにはこれらの課題解決が不可避であるため、電池容量を増加させることで航続距離を延ばしたり、高出力充電器による急速充電能力の向上が図られているが、これらの効果を最大限引き出すには車両における熱マネジメント技術が以前にも増してより重要になってきている。

本論では、電気自動車における電池や空調に求められる熱に関する要求の特徴を述べ、車両全体の熱マネジメントシステムの技術の動向について述べる。

2. 電気自動車における熱マネジメントニーズの特徴

電気自動車における利用者のニーズとして航続距離の延長・充電時間の短縮があり、一方で、空調についてもこれまで通りの温熱快適性が求められている。

航続距離の悪化に関しては、これまでの内燃機関の車両と比較し、特に冬季での暖房による電費への影響が大きく、電気ヒータによる暖房では空調ON時の電費と空調OFF時の電費の乖離率が40%～50%になる場合もある（Fig. 1）。内燃機関の車両において暖房はエンジンの廃熱を利用しており、暖房必要熱量に対して十分な熱量があるため、若干の燃料消費量増加は

あるものの暖房による燃費への影響は小さい。一方、電気自動車においては、Fig. 2に示すように電駆動機器からの発熱量が少なく、機器の廃熱に頼らず電気ヒータなどの電気―熱変換により熱源確保するため、消費電力の影響が大きい。そのため、電気自動車における冬季の航続距離の延長のためには、ヒートポンプによる電気―熱変換効率の向上や電駆動機器の効率的な廃熱回収が求められる。また、暖房負荷の低減のため、車両の熱負荷低減やステアリングヒータ・シートヒータなどによる局所空調も重要になる。

一方、電気自動車は航続距離の延長のため、車載電池容量は増加の傾向にあり、充電器規格も高出力化に向かっている。車載用電池はその特性として、安全性・劣化抑制のために電池が高温時および低温時には電力の入出力に制限がかけられている（Fig. 3）。つまり、充電器が高出力化しても、電池の温度が適切に管理できなければその能力を最大限使い切れないことになる。したがって、充電時間の短縮に関しては、車載電池の大容量化・充電器の高出力化に対応するため、電池温調能力の向上が求められている。電池高温時の冷却については、充電時の電池の発熱量は（電気抵抗）×（電流）²となるため、例えば充電器能力が50kWから150kWと向上することで電池の発熱量（＝必要冷却量）は9倍となる。また電池低温時は入力制限により充電ができなくなるため、充電するためにはまず電池を温める必要があり、充電時間の短縮のためには電池を素早く加温する手段が必要になる。

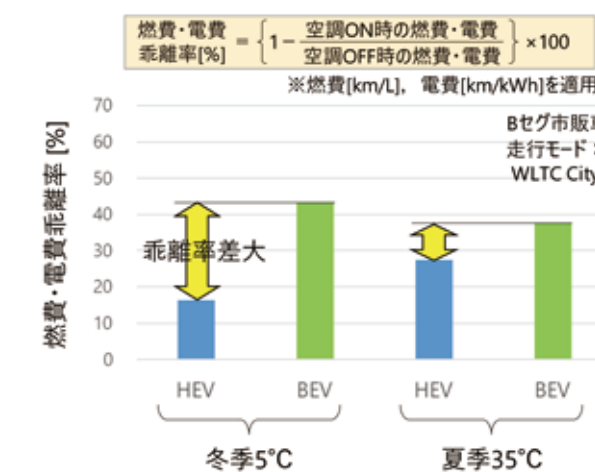


Fig. 1 Comparison of deviation rate of fuel/electric consumption (HEV/BEV)

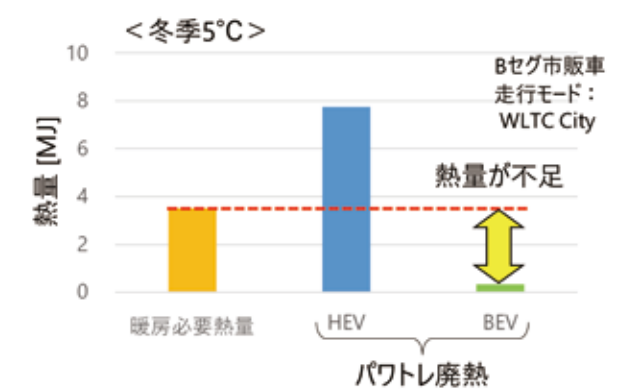


Fig. 2 Comparison of vehicle waste heat and heating heat (HEV/BEV)

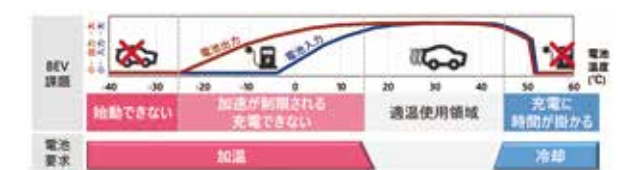


Fig. 3 Needs and challenges for battery temperature control

3. 電気自動車に求められる熱マネジメント技術

3.1 航続距離延長を実現する技術

前章で述べた通り冬季の航続距離の延長には暖房消費エネルギーの削減が必要であり、そのためには熱を生み出すための効率向上技術、暖房負荷の低減技術が必要となる。電気自動車の暖房熱源としては、外気から吸熱することでその効率（COP＝（暖房能力）／（コンプレッサ電力））を原理的に1以上にできるヒートポンプを使用されることが一般的となっている。本論では、ヒートポンプにおける更なる効率向上に着眼する。ヒートポンプ効率向上のためには、COP向上技術、およびヒートポンプの作動領域の拡大が求められ、暖房負荷低減のためには、換気熱負荷の低減、局所暖房の活用、車両熱負荷低減が求められる（Fig. 4）。次項から効率向上技術・暖房負荷低減術の一部を取り上げて説明する。

*（公社）自動車技術会の子承を得て、「自動車技術」Vol.77、2023.3より一部加筆して転載

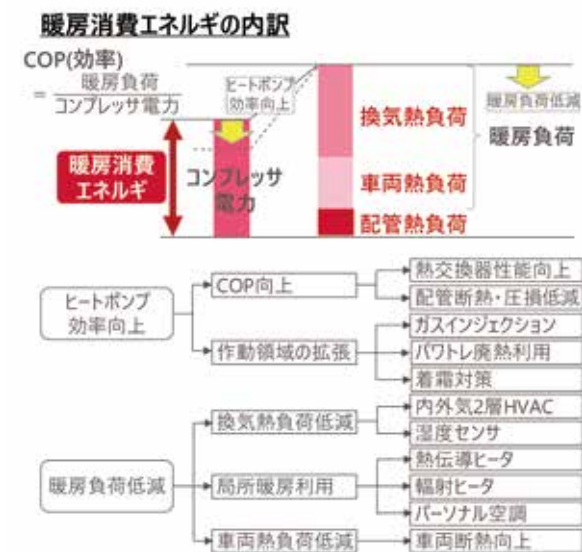


Fig. 4 Approach to reducing heating energy consumption

(1) ヒートポンプ COP 向上技術

ヒートポンプシステムは Fig. 5 に示すように、低温低压のガス冷媒をコンプレッサで圧縮、高温高压のガス冷媒を凝縮させながら放熱（暖房利用）し、膨張弁で断熱膨張、低温低压の二相冷媒を蒸発させながら吸熱する。COP = (暖房能力) / (コンプレッサ電力) であり、ヒートポンプシステムの COP 向上のためには、Fig. 5 に示すモリエル線図において高低圧差を小さくし、放熱・吸熱過程のエンタルピ差を大きくする必要がある。熱交換器の温度効率向上により、モリエル線図において高压低減・低压上昇し、低压配管圧力損失の低減によりコンプレッサ吸入圧力は上昇する。また、高压配管の断熱は放熱過程で利用できる熱量を増やすことができる。さらに、過冷却度を確保するためにサブクーラの利用なども有効な手段である。

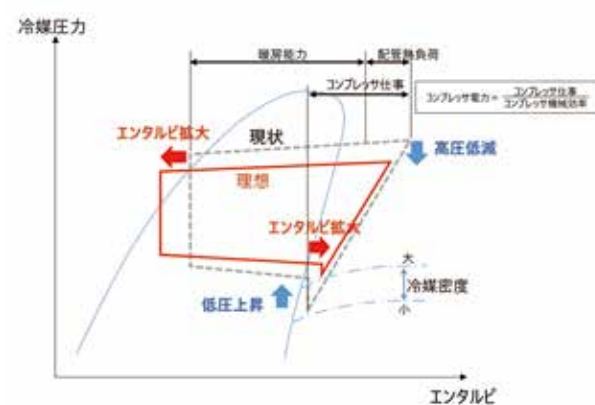


Fig. 5 Mollier diagram and COP improvement approach

(2) ヒートポンプ作動領域の拡張技術

車両における暖房消費電力低減のためには、ヒートポンプの作動領域を低外気温まで拡げることも重要である。低外気温下で外気から吸熱するヒートポンプ作動には以下2点の課題がある。まず1点目は、コンプレッサ吸入冷媒密度低下に伴う暖房能力の低下である。式(1)に示すように、暖房能力は冷媒流量と冷媒エンタルピ差に比例する。低外気温下において外気から吸熱する場合、コンプレッサ吸入冷媒密度が下がり冷媒流量が低下するため、暖房能力が低下する。2点目は、室外器の着霜に伴う作動停止である。着霜は低外気高湿度環境下にて大気から吸熱する際に室外器表面にて発生、ヒートポンプ稼働時間と共に増加し、最終的には室外器を覆うため作動停止に繋がってしまう。これら課題解決のために以下の技術がある。

a) ガスインジェクションサイクル

暖房能力低下を解決する手段として、ガスインジェクションサイクルがある。ガスインジェクションサイクルは Fig. 6 に示すように冷媒の膨張過程を2段階とし、中間段にて気液分離しガス冷媒をコンプレッサへ戻す。これにより、エンタルピの低い二相冷媒を室外器に流すことができ、外気からの吸熱量を増やすことができる。さらに中間段でコンプレッサへ戻されるガス冷媒は低段（室外器）よりも冷媒密度が高く、冷媒流量を増加させ暖房能力を向上させる。

b) 廃熱利用

低外気温での暖房能力の低下と着霜の課題を解決する手段として、インバータ・MG・電池などの機器廃熱を熱源としたヒートポンプ作動がある。廃熱量が吸熱量よりも多く機器廃熱を吸熱源とする場合、チラー水温は外気温よりも高くなるため、外気から吸熱する場合と比べてコンプレッサ吸入密度が上がり、暖房能力を向上できる（式(1)）。さらにこの場合、室外器における着霜は問題とならない。

また、着霜の課題に対して機器廃熱を利用して霜を解かす方法もある。着霜した室外器に機器廃熱で昇温した冷却水を定期的に通水し、霜を解かすことでヒートポンプ作動が継続できる。

$$Q_r = G_r \times \Delta H_r$$

$$G_r = N_{\text{comp}} \times V_{\text{comp}} \times \rho_{\text{comp}} \times \eta_v$$

$$\rho_{\text{comp}} = f(T_{\text{rcomp}}) \quad \dots \text{式(1)}$$

Q_r : 吸放熱量, G_r : 冷媒流量, ΔH_r : 冷媒エンタルピ差,
 N_{comp} : コンプレッサ回転数, V_{comp} : コンプレッサ容量, η_v : 体積効率,
 ρ_{comp} : 吸入冷媒密度, T_{rcomp} : 吸入冷媒温度

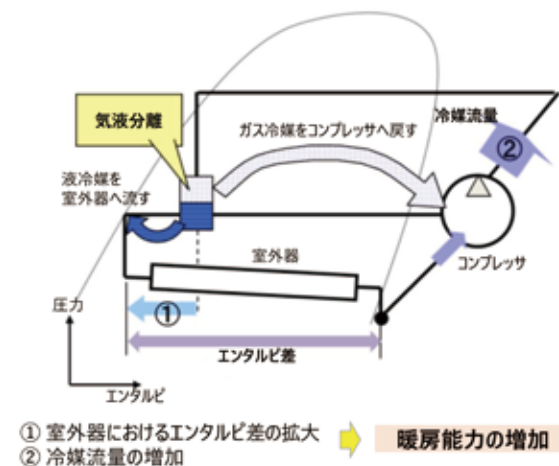


Fig. 6 Gas injection cycle

(3) 換気熱負荷低減による暖房負荷の低減

車載用空調システムにおける要求機能の1つとして、窓曇り防止による視認性の確保がある。車室内は乗員の呼気などにより絶対湿度が上がり、低外気温時は窓ガラス付近で車室内空気温度が低下するため結露し窓曇りが生じる。これを防ぐためには、絶対湿度の低い外気と車室内空気を入れ替え、車室内の絶対湿度を下げる必要があるが、低温の外気を導風することは暖房における換気熱負荷となる。Fig. 7 は暖房負荷の内訳を示しており、その約6割が換気熱負荷によるものである。つまり暖房熱負荷低減のためには、窓曇りを発生させない程度に車室内空気を循環させて利用することが重要となる。

内気利用率を上げる手段としては、内外気2層HVACユニットの利用と湿度センサを取り付けることによる内外気制御がある。Fig. 8 に内外気2層HVAC使用時の車室内風流れを示す。内外気2層HVACでは外気導入風と内気循環風を分離したままヒーターコアで加熱し、外気導入側は車室内の上部に、内気循環側は足元に吹き出すようにしたものである。DEF吹き出しやサイドFACE吹き出しからの風は、外気側の乾いた空気となるため窓ガラスは曇りにくくなる。さらに

フロントウィンドウに湿度センサを取り付け、窓ガラス周辺空気の相対湿度を制御するように内気利用率を制御すれば、Fig. 9 に示すように窓曇りが生じる限界まで内気利用率を上げることができる。

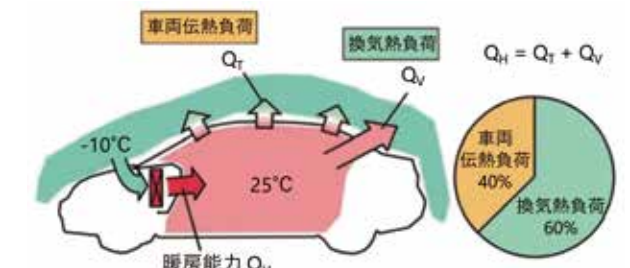


Fig. 7 Breakdown of heating load

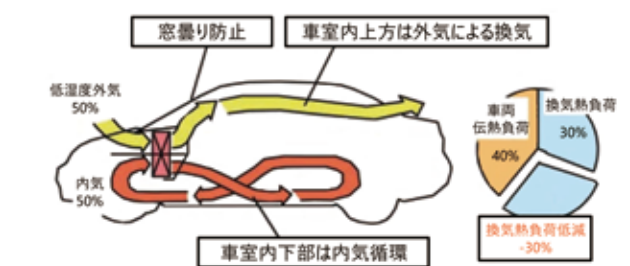


Fig. 8 Cabin air flow by using 2-layer HVAC



Fig. 9 Heating power consumption for recycle air utilization

(4) 局所暖房による暖房負荷の低減

暖房時の暖房負荷低減技術として、ステアリングヒータ・シートヒータといった熱伝導ヒータや輻射ヒータの使用がある。少人数乗車時にはこれらの機器の使用により、同じ温熱快適性を得るための車室内温度を低く設定でき、車両全体での暖房消費電力を抑える有効な手段となり得る。通常のHVAC空調に加えて局所暖房を使用した場合に、同じ温熱快適性を得るための暖房消費電力低減効果をFig. 10 に示す。局所暖房を使用した場合は局所暖房機器の使用電力が増加するが、車室内温度を下げることで、これによ

る消費電力は通常の HVAC 空調に対し約 25% 低減となっている。

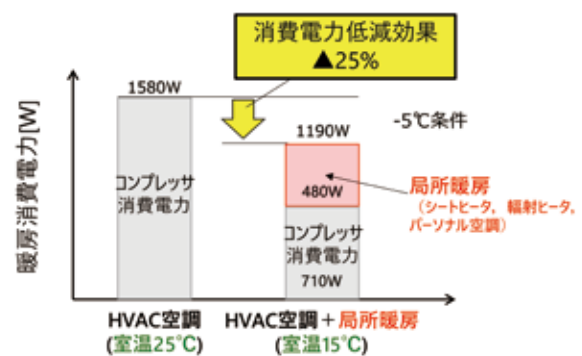


Fig. 10 Heating power consumption for using local heating equipment

3.2 急速充電短縮を実現する技術

2 章で述べた通り、車載用電池は安全性・劣化抑制のために電池が高温時および低温時には電力の入力に制限がかけられているため、充電時間を短縮するためには、電池を入力制限のかからない温度域に熱管理し、充電器の出力を最大限利用できる状態に保つことが必要となる。ここでは、充電時間を短縮するための電池温調に関わる熱マネジメント技術について述べる。

(1) 電池冷却技術

充電時、電池は入力電流に対して（内部抵抗）×（電流）² の発熱を生じ、この発熱は電流の 2 乗に比例して増加するため、大容量の電池を短時間で充電する際には大きな発熱量となる。具体的には、容量 75kWh の電池を 150kW の電力で充電する場合、その発熱量は 7～10kW 程度となる。また、このような電池発熱を吸熱し、電池の要求する温度域（40℃程度）を実現するためには、電池温度以下の冷却媒体温度が求められ、前記冷却には冷凍サイクルシステムを用いるのが一般的である。内燃機関の車両において、冷凍サイクルは乗員の空調のみに使用され、その最大冷凍能力は 4～8kW 程度であったことに対し、電気自動車では空調も合わせるとその倍以上の大冷凍能力が求められることが分かる。

ここで、式（1）に示すように冷凍能力は冷媒流量と冷媒エンタルピ差に比例する。一方、式（2）に示すように、電池冷却能力は電池冷却器の熱コンダクタ

ンスと電池－冷却水温度差から決まる。つまり、同じ発熱量を冷却する際に熱コンダクタンスが小さいほど低い水温が要求され、熱コンダクタンスが大きければ高い水温でも冷却が可能になる。再度式（1）に戻り、冷媒流量に着目すると、冷媒流量はコンプレッサ容量・回転数と吸入冷媒密度に比例し、吸入冷媒密度は水温に比例するため、冷凍能力向上のためには、コンプレッサ容量・回転数の増加と共に電池冷却器の熱コンダクタンスの向上が手段として考えられる。ここで、コンプレッサ回転数は通常、車両における NV の観点から上限回転数が制約されている。

コンプレッサ容量と電池冷却器の熱コンダクタンスを変化させたときの電池冷却能力を Fig. 11 に示す。この結果から、電池冷却能力向上のために熱コンダクタンスの向上の影響が大きいと言える。熱コンダクタンスの向上のためには電池－冷却器間の熱伝導率の向上や、冷却面の変更による電池－冷却媒体の距離の短縮が手段となる。

$$Q_{\text{batt}} = K_{\text{batt}} \times (T_{\text{batt}} - T_{\text{Wbatt}})$$

$$T_{\text{Wbatt}} = T_{\text{batt}} - Q_{\text{batt}} / K_{\text{batt}} \quad \dots \text{式(2)}$$

Q_{batt} ：電池冷却能力、 K_{batt} ：電池冷却器熱コンダクタンス、 T_{batt} ：電池温度、 T_{Wbatt} ：冷却水温度

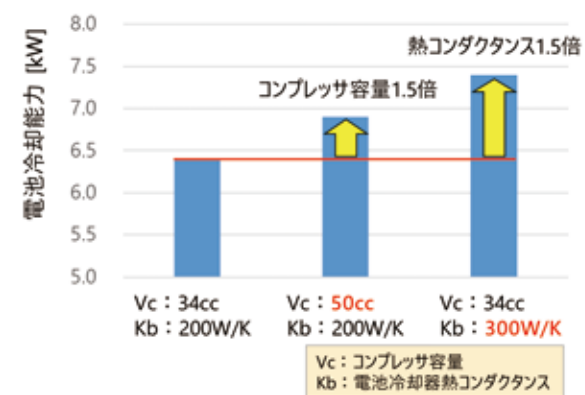


Fig. 11 Approach to improve battery cooling capacity

(2) 電池自己昇温技術

電池低温からの充電においては、電池を入力制限の掛からない温度まで素早く昇温することが充電時間を短縮するために重要となる。従来の電池暖機方法は、電池パックに設置された冷却器や電熱線ヒータからの熱伝導による手段が一般的だが、まず始めに冷却媒体

を加温するのに時間がかかることや、熱伝導による外部からの加温では電池パック全体が昇温するのに時間がかかることが課題となる。これに対して、電池の内部抵抗による発熱を利用した電池自己昇温技術がある。これは充放電の繰り返しによる内部発熱により電池内部から昇温するため、外部からの加温に対して短時間で均一な電池暖機が可能となり、低温からの充電時間短縮が可能となる（Fig. 12）。

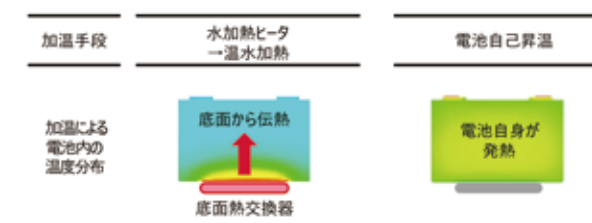


Fig. 12 Comparison of battery heating technologies

(3) プレ電池温調

これまでに述べたように、充電時間の短縮のためには電池温調能力の向上が求められるが、ナビゲーションシステムやユーザのスケジューラと連携し、急速充電に備えて事前に電池を温調することができれば、充電中に必要となる電池温調能力は小さくできる。もしくは、十分な電池温調能力が構えられない場合にも、プレ電池温調により急速充電時間の短縮が可能となる。Fig. 13 に示すように、急速充電中に冷却が必要となる条件においては、事前に電池を過冷却することで、充電中は電池自身の冷熱容量により電池昇温が抑えられ、充電完了まで電池の上限温度を超えることなく最大電流での急速充電が可能となる。また、急速充電前に暖機が必要となる条件においては、入力制限のかからない電池温度まで昇温しておくことで充電開始から最大電流での充電が可能となる。Fig. 14 に先読み電池温調の効果の一例を示す。こちらの条件においてはプレ冷却の効果として約 6 分、プレ暖機の効果として約 10 分の充電時間短縮効果が期待できる。

走行の途中で急速充電が計画される場合、ナビゲーションシステムと連携すれば充電器までの到着時間が分かり、車両の電池温調能力と目標電池温度に基づき、走行中にプレ電池温調を開始することができる。車両始動直後の急速充電を計画する場合は、ユーザのスケ

ジューラと連携することで車両の起動時刻に合わせたプレ電池温調を開始することも可能である。

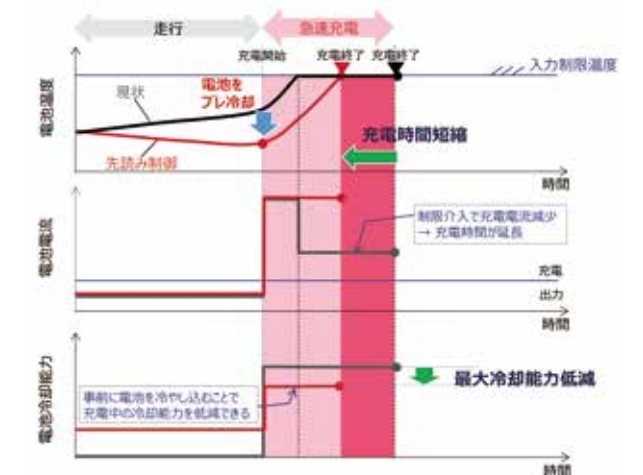


Fig. 13 Overview of predictive battery cooling

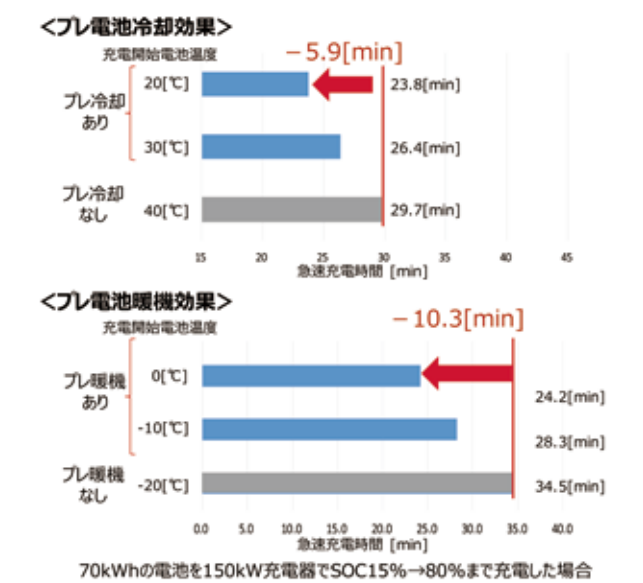


Fig. 14 Charging time reduction by battery pre-cooling / heating

4. まとめと今後の動向

以上述べてきたように、電気自動車において今後さらなる航続距離の延長・充電時間の短縮のためには、冷凍サイクル・冷却水回路・HVAC・局所空調機器・電池冷却器・ナビとの連携制御といったように、様々なシステムに関して車両全体での熱マネジメントのアプローチが必須となる。また、車両低コスト化の要求もあり、特に電池暖機・暖房用熱源確保のために既存

機器からの発熱を目的としたインバータ／MG の非効率運転制御による創熱技術や冷凍サイクルにおけるヒートブースト技術も電気自動車の熱マネジメント技術のトレンドである。また、冷凍サイクルにおいては、現行の車載用冷媒 R1234yf の使用規制の議論が欧州で進んでおり、代替冷媒として、自然冷媒である R744 や R290 への置換が検討されていることも記しておく。

さらに今後、自動運転の普及により自動運転用コンピュータのためのさらなる冷却ニーズ（絶縁媒体の利用，高熱伝達率）やその廃熱活用，個々の車両だけでなく社会全体としての電費最適化・充電の最適化のために社会とつながる熱マネジメント制御も必要となってくる。今後も車両や社会インフラの進化に応じ，ユーザへの提供価値最大化のためには電気自動車における熱マネジメント技術が重要となると考える。

著者



沼田 将成
ぬまた まさなり

熱マネシステム開発部
車両の熱マネ／エネマネシステム開発に従事