

密閉式電池パックの冷却技術についての基礎検討*

Basic Research about Cooling Technology for Sealed-Type Battery Pack

井上 美光
Yoshimitsu INOUE

山本 啓善
Hiroyoshi YAMAMOTO

Current battery pack have open-type cooling structure which cools the cell by air conducted from vehicle cabin. Therefore, there exist various problems such as limited cooling performance by noise issue, dust and moisture intrusion, volume increase by air duct and wider temperature distribution. The author resolved the problems above by sealing-up battery pack housing, and heat exchange technology between internal circulation air and outside through housing wall. As a result of sealing-up, noise can be minimised, duct can be eliminated and temperature distribution can be decreased. Also, heat exchange technology enabled higher cooling efficiency. These theoretical and experimental results will be shown in the presentation.

Key words :

EV and HV systems, battery technology, cooling/heat and temperature management, Battery Cooling

1. まえがき

近年、自動車産業は環境志向の定着により、ハイブリッド車、電気自動車など様々な環境車が公道に姿を見せている。多くの環境車はその減速エネルギーなどを有効に活用するため、高電圧の二次電池を搭載している。現状、寿命や出力を保証するための電池の管理温度は約 40℃～50℃と他機器に比べ低く、多くは車室内の空調空気を直接誘導し冷却している。その結果、問題点としてダクトなどによる大型化、埃や湿気の侵入による高電圧部品への影響、冷却風による騒音の乗員への影響および走行状態ごとの音適合工数の増大、セル温度ばらつきの低減など、車両への搭載を成立させるための課題を有している。

今回、それらの問題点を解決すべく、筐体を密閉化

し、小型化、耐埃、セルの均温化などを図った構想の基礎技術検討を行ったので報告する。

2. 密閉式電池パック

2.1 従来電池パックの課題

従来の電池パックは車室内の空調空気をダクトとファンによってよび込み電池に直接その空気をあてて冷却する。車両の修理書 A 巻 (2012 年)¹⁾によるプラグインハイブリッド (以下 PHV) での構成を Fig. 1 に示す。EV 走行距離を確保する為、電池の数が多くそれに応じてパック内外のダクト数が 14 本にのぼり、このため体格は約 20% 増加している。また車室内の空気を直接冷却空気として使用している開放式冷却のため、埃・湿気などの侵入、堆積と共に冷却通風経路

* (公社)自動車技術会の了解を得て、「2015 年秋季大会学術講演会予稿集」より一部加筆して転載

の音やファンの音が車室内に入り込み、乗員への影響を回避すべく車両の走行状態に応じて冷却風量を低減するなどの配慮が必要と考える（適合工数増大）。そのため現状は、前者は入口にフィルタ等を設け、後者は入出力電流などを制限し対応している。

冷却風の流れを Fig. 1 に矢印で示す。ファンの負圧で吸引された空調空気は細い（黄色の）ダクトを通り、直角に曲がり各々のセル間通路に誘導される。その後さらに直角に曲がり排出ダクト→ファンへと導かれる。このような流れは、一条件で各セルへの風量バランスを適合しても、風量に変化すればそのバランスはくずれてしまう。

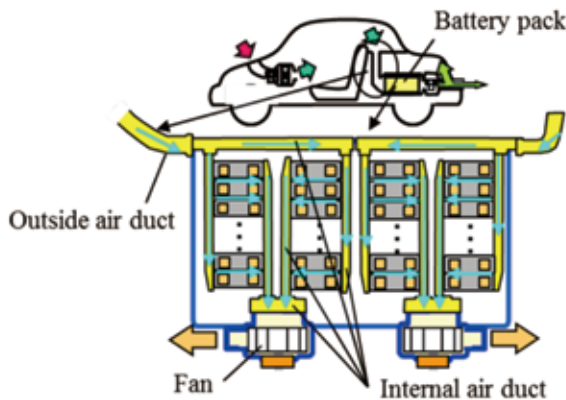


Fig. 1 Construction of conventional battery pack

また冬場車両始動時に電池を昇温して出力を確保する必要もあるが、電池全体をほぼ均等に昇温することが求められる。

2.2 密閉式電池パックの構想とうれしさ

密閉式電池パックの構想を Fig. 2 に示す。本構想はパックの内外を筐体でしきり、その内部にファン、ECU、リレー等を配置し、パック自身が自立した機能を持つ、言わばスタンドアロン化であり、車両への搭載を容易にできることが特徴である。

密閉された筐体によって、セルおよび筐体内壁部を空気循環させる内部循環流によりセルの熱を筐体に移動させ、筐体温度を上げることで連通しない外部空気と温度差をつけ熱交換し放熱する。

筐体は閉塞することにより外部から電池品質にとって有害な埃や湿気を隔離するだけでなく、ファン送風

により発生する外部への騒音を著しく低減（筐体の蓋の有無で13dB低減、ファン風量約150m³/h時）できる。そのため、音を気にせず最大風量で内部のファンを稼働でき、内部循環流のセル通過部はセル間風速を従来の2倍以上に高めることでセルからより多くの熱を取ることができる。加えて内部循環流は部分的に断面積を変化させることで外部放熱とセル温度の均温化に貢献する。外部に積極的に放熱したい部分は断面積を狭く（風速を速く）放熱性を高め、一方、セル上下の空間部分は断面積を広く確保することで、風速を低減しベルヌーイの定理により、静圧比率を多くし、セル間断面積を一定とすることで、各セル間風速が均等に流すことが可能となる。さらに、セル間風速が高く熱伝達率の勾配が緩やかで、放熱ばらつきが従来の低風速の場合に対し低減しセルの均等な冷却を達成できる（Fig. 3）。この方法を活用すれば冬場の加熱時も、例えば一か所に PTC ヒータを搭載することで、全セルに対し均温加熱を可能とする。

また真夏は筐体よりその雰囲気温度が高くなるため、筐体外部放熱部に熱交換器を内外に設け、筐体外部に空調空気を誘導しかつ内外の熱交換器を工夫することで冷却性確保と低騒音の両立を図る。

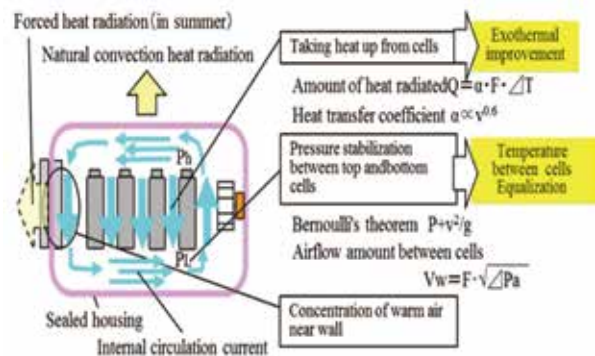


Fig. 2 Design of sealing up-type battery pack

セルの温度分布について実機での評価結果を Fig. 4 に示す。セル間風速に対し、セルの温度分布を黄色の点で示す。セル間風速の増加とともに温度分布は小さくなっていることがわかる。

空調・熱マネ

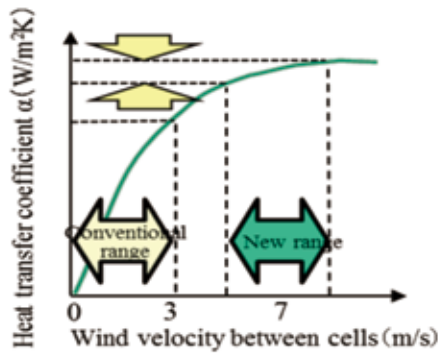


Fig. 3 Image relation diagram of heat transfer coefficient and wind velocity between cells

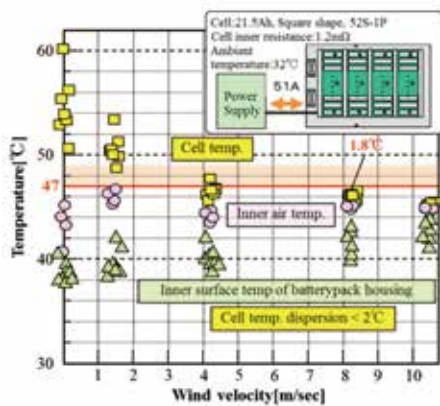


Fig. 4 Evaluation results of temperature distribution

また筐体側面とスタック，筐体底面の強度部材とスタック，各々結果的に構成される空間を冷却通風路として活用することで，ダクトを削減し，小型化へも寄与できる (Fig. 5)。

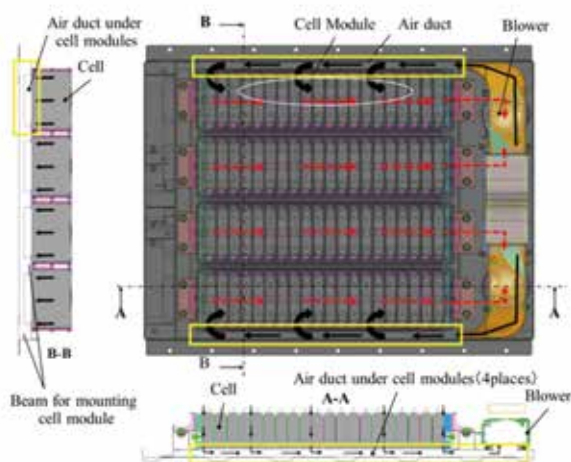


Fig. 5 Utilization of existing space for duct

2.3 密閉式電池パックの課題

筐体を閉塞し，セルの熱量を形態自由度のある筐体へ移動させ筐体自身の温度を上げ外部に放熱させるメカニズムでの課題は，その雰囲気温度が筐体より高くなるであろう夏場の放熱である．その為には，従来の直接冷却方式に対し，壁を隔てて従来と同じ熱抵抗とすることが必要であり，その上で筐体外側では空調空気（設計温度32℃）を用い放熱させる必要があるが，車室内への騒音への配慮も必要となる．

まず真夏に電池パック周辺がどの程度の温度になるか，実車を用いて実測した．条件は過酷な米国の炎天下放置状態を想定し，外気40℃，日射1kW/m²，地熱55℃とした．

Fig. 6にその実測結果を示す．外気温度が40℃を若干超えている状態で，パックの周辺温度が44℃～47℃に至っていることがわかる．

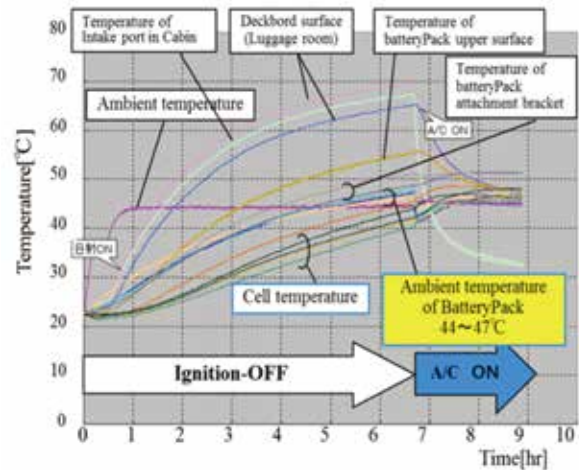


Fig. 6 Result of battery pack ambient temperature

3. 課題の対応

3.1 対応技術の考え方

直接冷却に対し，壁を隔てた場合の冷却は熱抵抗が増加し放熱しにくくなる．その中で従来の熱コンダクタンスと同等のレベルを得ることを考える．熱抵抗の比較図を温度ばらつき→冷却効率とともに Fig. 7に示す．従来の直接冷却が熱抵抗回数1回に対し壁前後の熱抵抗もあり3回の熱抵抗（図中①②③）を，各々最小限にすることが肝要である．

一方、温度ばらつきは従来に対して向上しているため、最高温度のセルを例えば50℃に抑える時、他の低い温度のセルには余分な冷却空気を送風することとなる。本構想では Fig. 4 の結果にもあるように温度ばらつきが約2℃まで抑えられるため、余分な冷却風の量は少なく効率的な冷却が達成できる。

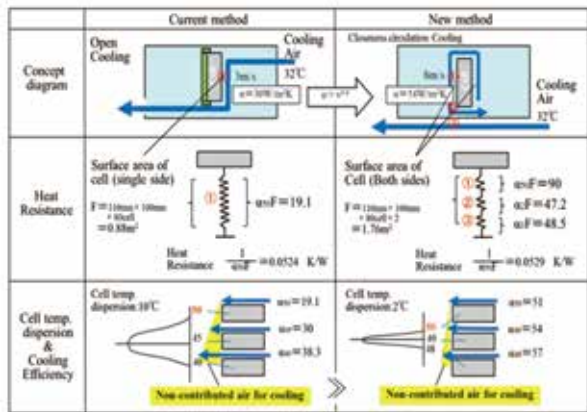


Fig. 7 Way of thinking of correspondence technology

3.2 対応構想

一つ目は、内部循環流の中で、筐体外部に放熱したい部分の風速を速くし、同時にそこに放熱フィンを用い放熱性を上げ熱コンダクタンスを向上させることである。

二つ目は、筐体外部の同じ領域に放熱フィンを設け、併せて熱コンダクタンスを最大化することを考える。

対応構想を Fig. 8 に示す。一つ目は内部循環流の流量を妨げない様、通風抵抗の低いストレートフィンとし、二つ目は車両乗員への騒音、搭載体格への配慮から、コンパクトで少ない風量で大きな熱伝達率が得られるルーバフィンとした。

尚、搭載体格もあるので今回内部循環流の流路から外部放熱部分は筐体側壁部分のみとした。

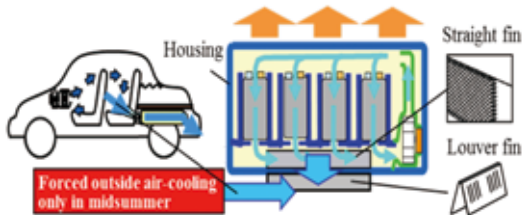


Fig. 8 Correspondence concept

3.3 熱計算と放熱仕様

本件は車両に搭載するのみで機能するスタンドアローン化を製品構想の柱の一つとしている。よって筐体にはセルだけでなく冷却ファン、ECU、リレー・バスバーなど他の機能部品も内包されている。よって発熱量もそれらの合計となる。その発熱量を含んだ熱計算模式図を Fig. 9 に示す。セルを流れる電流値は一般市街地走行の上限電流相当に、セルの劣化により内部抵抗が1.5倍増加したことを含め、それを新品セルで置き換えた45.9Aとした。12V系のファンは最大風量時の廃熱量を適用し、さらに余裕度として約60Wを見込み、それが車室内空調空気の吸入温度として32℃を筐体外部に流した前提で計算した。尚、内外の冷却気流は相対的に逆向き、いわゆる対向流とし、熱交換効率に配慮した。

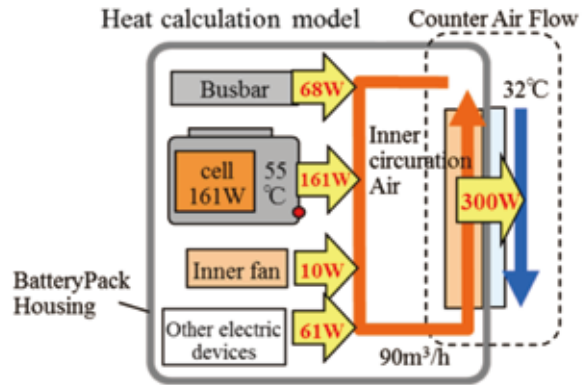


Fig. 9 Heat calculation schematic view

現状の熱抵抗は Fig. 7 に示した様に0.0524K/Wであるから壁を隔て300Wを放出する総熱抵抗はこれ以下（熱コンダクタンスは19.1W/K以上）とする必要がある。まず外部仕様から算出した。外部は車室内への騒音要件がありそれを満たす風量と通風抵抗である必要がある。

高、中級車にも通用する騒音レベルとして35dBを基準とし騒音対策で△5dB低減を見込み、40dBを設計目標とした。騒音値は以下の式で示される為、騒音値を抑えるには通風抵抗と風量を低減する必要がある。その関係を Fig. 10 に示す。

$$SPL = Ks + 10 \log (\Delta Pa^2 \cdot Va) - 19.83 \quad (1)$$

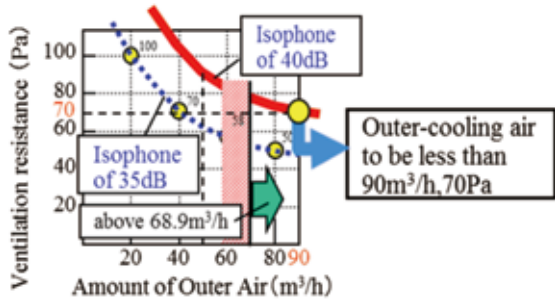


Fig. 10 Relationship of noise level

外部空気の熱容量から、300Wを取り込める必要風量は68.9m³/h以上(温度効率など未考慮)を考慮し、外部放熱仕様は90m³/hで70Pa以下とした。風量、通風抵抗かつ300W放熱が両立できる様、ルーバフィンを2列並設配置とした(Fig. 11, Fig. 12参照)。

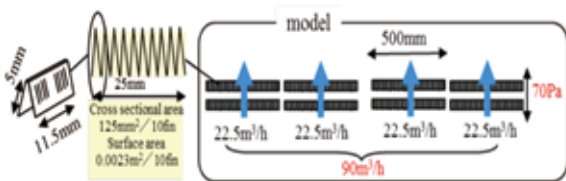


Fig. 11 Specifications of outside heat radiation fin

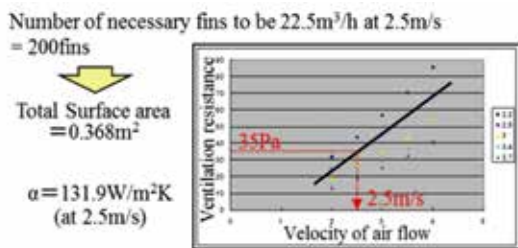


Fig. 12 Calculation of number of fins to satisfy ventilation resistance

以上から外部放熱の熱コンダクタンスは

$$\alpha_2 F_2 = 131.9 \text{ W/m}^2\text{K} * 0.368 \text{ m}^2 = 48.5 \text{ W/K} \quad (2)$$

次に内部フィンについて考える。前記の様に現状の熱コンダクタンスは19.1W/K以上であるから、筐体内部の熱コンダクタンスは以下の式(2)で目標値として算出され、 $\alpha_1 F_1 \geq 31.5 \text{ W/K}$ となる(Fig. 13)。

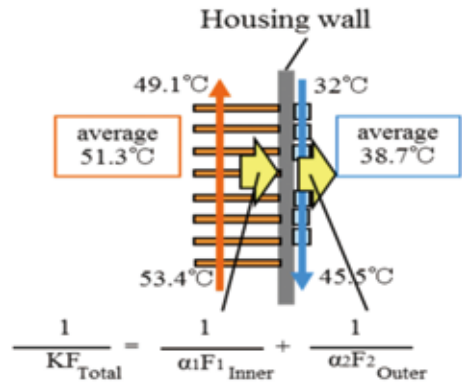


Fig. 13 Calculation method of inner fin specifications

内部放熱フィン仕様は筐体のスペースと内部通風抵抗を考慮し、これが前記熱コンダクタンスをまかなえるかを比較判断した。以下に内部放熱のストレートフィン仕様を示す。

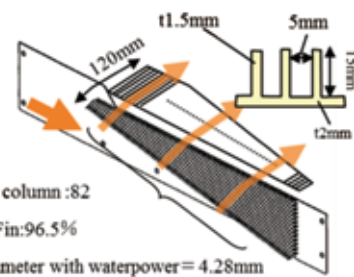


Fig. 14 Inside fin specifications of housing

本仕様から内部フィンの代表断面積は0.00157m²、表面積0.86m²、通過風速16m/sが算出され、その時の平板熱伝達率は54W/m²Kとした。

結果その熱コンダクタンスは以下となり目標値を上回る。

$$\alpha_1 F_1 = 54 \text{ W/m}^2\text{K} * 0.86 \text{ m}^2 = 47.2 \text{ W/K} \quad (3)$$

よって総KFは23.9W/Kであり、内外の温度差を考慮すると、 $Q = \text{総KF} * (51.3 - 38.7) = 301.4 \text{ W} > 300 \text{ W}$ の結果となり理論計算上、放熱仕様は成立する(温度差は実機データ採用)。

4. 試作と評価

4.1. 密閉冷却パックの試作品

Fig. 15 に以上の仕様を織り込んだ試作品を示す。本技術は汎用性があり、どのような種類の環境車の電池パックにも適用可能であるが、題材としてPHV用を選定した。HVとEVの中間容量、体格でありここで製品化に向け熟成すれば双方の環境車にも比較的簡単に展開可能と考えた。

電気容量 9kWh, 出力 64kW, 電圧 340V で体格が 116L であり、ダクトレス以外の効果も含め現状の約 2 倍の電気容量密度を可能にした。また、セルはリチウムイオン電池 28Ah セルを 80 個 (20 個/スタック) 用いた。

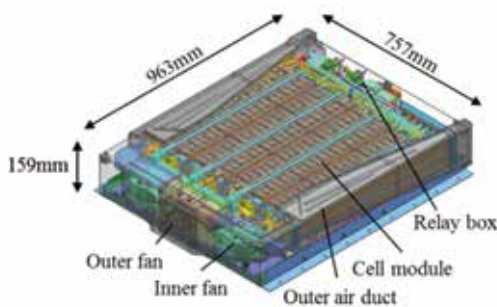


Fig. 15 Appearance of prototype product

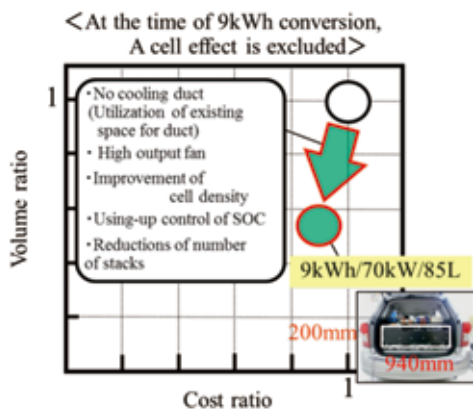


Fig. 16 Volume, cost effect

4.2 評価要領と評価結果

Fig. 15 で示す試作品にて実機ベンチ評価を実施した。最も過酷な条件として対米条件 (外気 40℃, 日射 1kW/m², 地熱 55℃, A/C 内気モード想定) 時のパック雰囲気温度を考慮し、雰囲気 50℃とした。また評価

結果に放熱側の影響を与えない様に、恒温槽内ドラフト回避板設置, パック下面に発泡性断熱シート (t5mm) を設け実施した。筐体側面の内部にストレートフィン, 外部にはルーバフィンを取り付け真夏での放熱性を実機で確認した。さらにセル劣化による内部抵抗上昇 (1.5 倍) も考慮し, 新品セルでの電流値は 45.9A とした (セル当り 3.16W 発熱)。

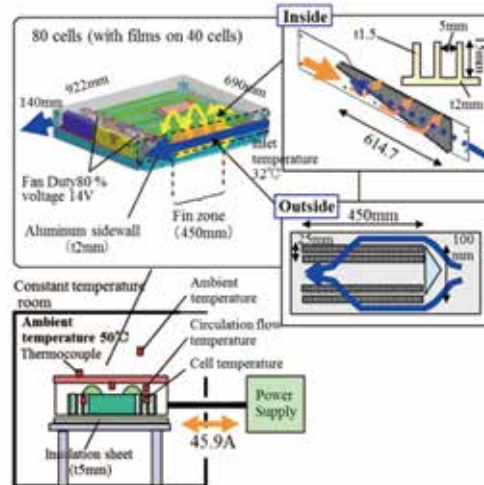


Fig. 17 Evaluation method with actual equipments

放熱性の評価結果を Fig. 18 に、外部風量無時も含め示す。

セルにより異なるが車両での出力保証できるセル温度 55℃を判断基準とし、筐体外部に車室内空調空気から得られる冷却風温度を車両後方日射の影響も考慮し平均 32℃とした。筐体外部送風量は、騒音基準相当の風量前後で評価した。評価はセルを繰り返し充放電させ発熱をさせながら内部循環流および外部送風させ、その温度推移を 3 時間確認した。

外部冷却風が無い場合は開始後 30 分程で許容値を越え、1 時間後 60℃を越えた為、評価セル保護の観点から評価を中止した (破線はその後の推定線)。

一方外部冷却風を送風した場合、90m³/h 未満の風量でもセル温度は基準値を下回り、成立の見込みがあることがわかる。よって真夏でも常用最大発熱+セル劣化状態で放熱の可能性を確認できた。

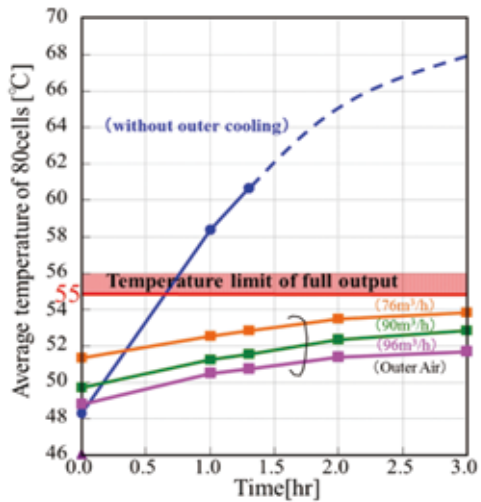


Fig. 18 Evaluation results of cooling performance

4.3 システムイメージ

Fig. 19 に電池パック雰囲気温度（季節）ごとに内外の送風機がどの様に稼働するかのイメージも実機測定点も交え示す。内部送風機は真夏は放熱，中間期（春・秋）は温度均一化，真冬は PTC ヒータなどでのセル加熱の為である。一方外部送風機は雰囲気温度約 32°C を越えると稼働が必要となり，しかし雰囲気温度が高くとも騒音許容以下で冷却可能である。

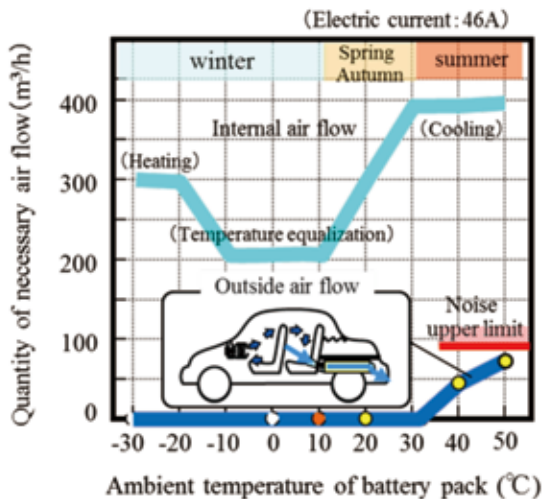


Fig. 19 Outside fan operation image during a season

4.4 加熱への応用

内部循環気流のセル温度の均一性を活用すれば，冬場 1 つの加熱器でセルが加熱できる安価で温度分布の少ないシステムが構築できる。セルは -20°C などの低温になると出力が低減し，パック全体では一つでも低

温セルがあるとそのポテンシャルを出せない。一方それを回避する為面状ヒータなどを全セルに適用すると多くの面状ヒータが必要となり，高価で複雑なシステムとなる。内部循環気流の一端に PTC ヒータを設置し，昇温時のセル温度分布を測定した。ばらつきは一点加熱にも係わらず約 7°C 以内に納まっていることがわかる。

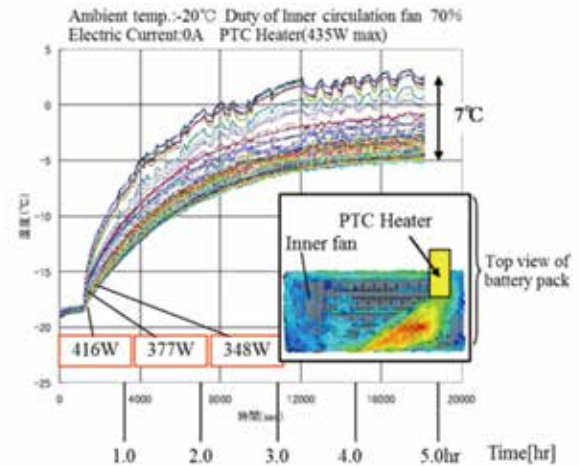


Fig. 20 Evaluation result of cell heating performance

5. まとめ

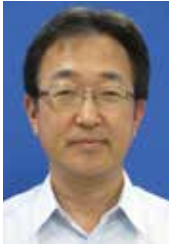
現在の電池パックは品質レベル，性能ともに向上してきた。しかし多くの課題も存在する。搭載性，車両での音の適合，温度分布適合，埃・湿気対策などを鑑み，パックの中に必要なコンポーネントを内蔵しスタンドアローン化するとともに車両での適合要素を徹底して削減する電池パックを目指した。今回の検討で得られた可能性をもとにさらに進化させ，さらなる小型化，標準パックへと進化させていきたい。その為の本構想で用いた熱技術および気流技術が役立てば幸いである。

最後に本検討に際し，ご協力頂いた筐体メーカー，モーターメーカーの関係者にお礼を述べたい。今後，本構想が公道で走る環境車に搭載され，価格や静粛性そしてさらなる品質向上に繋がり，環境車がより世界に普及し，環境と移動の両立が高いレベルで融合した未来を期待するものである。

参考文献

- 1) PRIUS PHV 修理書 A 巻 HV1164-HV1236 (2012)
- 2) 伝熱工学資料 改定第3版 日本機械学会

著者



井上 美光

いのうえ よしみつ

エレクトリフィケーション機器技術2部
第4技術室
電池パック他の冷却技術，製品開発に
従事



山本 啓善

やまもと ひろよし

エレクトリフィケーションシステム開発部
電源システム開発室
高電圧電池パックの要素技術開発に従事