

電動車両用リチウムイオン電池の発熱機構

Thermal Behavior Mechanism of Lithium-ion Batteries
for Electric and Hybrid Vehicles

丸 野 直 樹*
Naoki MARUNO

荒 木 一 浩*
Kazuhiro ARAKI

佐 藤 登*
Noboru SATO

要 旨

電気自動車(EV)やハイブリッド電気自動車(HEV)の電源として期待されているLiイオン電池の熱力学的実験と考察を行った。その結果、充電時と放電時の熱収支はそれぞれ異なり、発熱因子も電池反応熱: Q_r 、分極損失熱: Q_p 、ジュール熱: Q_j の3種類に分類されることが確認された。更にこの発熱因子を充電時と放電時に区分することで、各因子の寄与度合いを定量的に表現できた。

電池反応の熱力学的解析からの発熱計算と実際のEV用大型Liイオン電池の発熱データとは良い一致を見せ、この熱力学的考察の確からしさが裏付けられた。この手法を用いることでEV用のみならず、HEV用Liイオン電池の熱制御技術の構築が可能となる。

ABSTRACT

Thermodynamics experiment and study were carried out for the Lithium ion batteries that are expected as the power sources for electric and hybrid vehicles. It is confirmed that the heat income and outgo depend on charging and discharging, respectively. And the heat generation factors will be decomposed to three elements: reaction heat value Q_r , polarization heat value Q_p , jule heat value Q_j . Furthermore, the contribution degree of each factor was able to be expressed quantitatively, by dividing these heat generation factors for charging and discharging.

The accuracy of thermodynamics logic was verified since the thermodynamics calculation coincided with the experimental data of heat generation for the practical Li-ion batteries for EV. It is possible to utilize the calculation and simulation for the development of Li-ion battery and the establishment of thermal control technology not only for EV but also for HEV.

1. はじめに

電気自動車、ハイブリッド電気自動車、ならびに燃料電池自動車(FCV)の電動車両開発が活発になっているなか、エネルギー貯蔵としての電池技術の進化が目覚ましい。特に、高性能ニッケル金属水素化物(Ni-MH)電池、およびリチウムイオン(Liイオン)電池の進化に大きな期待が寄せられている。なかでもNi-MH電池は性能、信頼性、安全性の面で一歩抜きんでており、実用化という観点では“HONDA EV PLUS”が既に市場実績で三年を、またHEVとしての“insight”で半年を経過した。

しかしNi-MHやLiイオン電池のような常温型電池は熱の影響を受けやすく、特に50℃以上の領域では充電効率や寿命特性が低下する場合があります。発熱制御が重要になっている。また、電池系に応じて発熱挙動が大きく変わることから、電池反応や発熱因子を十分に考慮したうえでの熱マネジメントが必要になる。

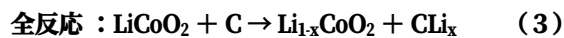
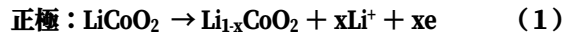
しかしながら、これまでに電動車両電池の熱挙動を熱力学的に扱った論文はほとんどなく⁽¹⁾、既報で取り扱ったNi-MH電池の発熱解析は定量的にまとめられた最初の論文である⁽²⁾。この既報をベースに、本報告では将来的に期待されているLiイオン電池をとりあげ、発熱因子の解析による発熱機構の明確化と、併せてLiイオン電池に必要な熱マネジメントの在り方について議論することを目的とした。

2. Liイオン電池の原理と特徴

コバルト酸リチウム(LiCoO_2)、マンガン酸リチウム(LiMnO_2 , LiMn_2O_4)、ニッケル酸リチウム(LiNiO_2)、あるいはこれらのハイブリッド材料を正極とし、ハードカーボンや黒鉛を負極に、エチレンカーボネート(EC)やプロピレンカーボネート(PC)から構成される非水系溶媒を電解液に、また LiPF_6 を支持電解質塩にするのが一般的なLiイオン電池である。この電池の充放電反応は式(1)～

*栃木研究所

(3)で表される。



すなわち、Fig.1 に示すように充電時に負極が Li イオンを吸蔵し、一方の正極が放電時に Li イオンを吸蔵するインターカレーション機構の Solid State 反応である。

電極活物質には鉛電池や Ni-MH 電池に比べて軽量材料が使われることから、Li イオン電池は重量当たりのエネルギー密度が大きくなるという特徴を有している。併せて容積エネルギー密度も大きいために、パソコンや携帯電話の電池は Ni-MH 電池からほとんど Li イオン電池に転換された。この延長上に Li イオン電池の大型化技術があり、EV および HEV 用に開発が加速されている。

3. Li イオン電池の熱作用による影響

一般にほとんどの二次電池は熱による作用によって性能が低下する。低温域では主に電解液の電気伝導度の減少から出力低下が起こり、また高温域では電池の寿命が低下する場合がよく見受けられる。その一例として、1.25Ah の民生用 Li イオン電池の発熱作用による容量劣化データを示す。

実験条件としては、環境温度：25℃、充電は 1A 定電流と 4.2V 定電圧の組み合わせでトータル 2.5 時間、放電は 1A, 2A, 3A および 4A の定電流により 2.5V の終止電圧とした。また充放電後の休止時間は10分とし、充電から放電までを1サイクルとした。この時の各電流値におけるサイクル数と容量比の関係を Fig.2 に、各電流値と放電中の電池平均温度との関係を Fig.3 に示す。

電動車両用の大型 Li イオン電池に対し、以上のような温

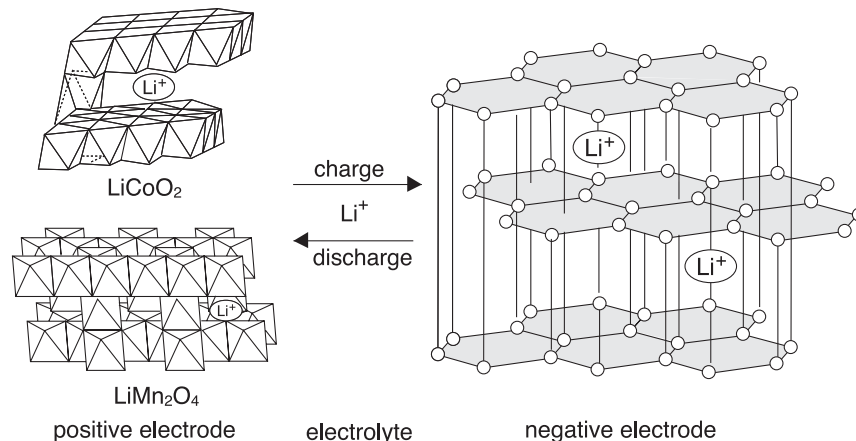


Fig.1 Crystal structures of Lithium cobalt oxide and Lithium manganese oxide as positive active material and carbon material as negative material

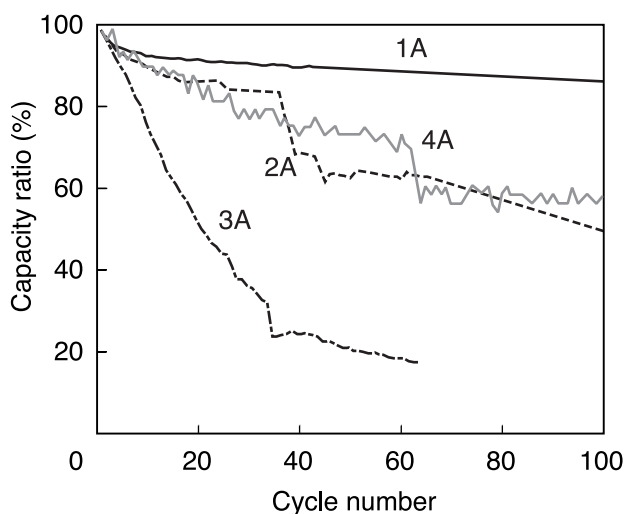


Fig.2 Change of the capacity ratio for each discharge current

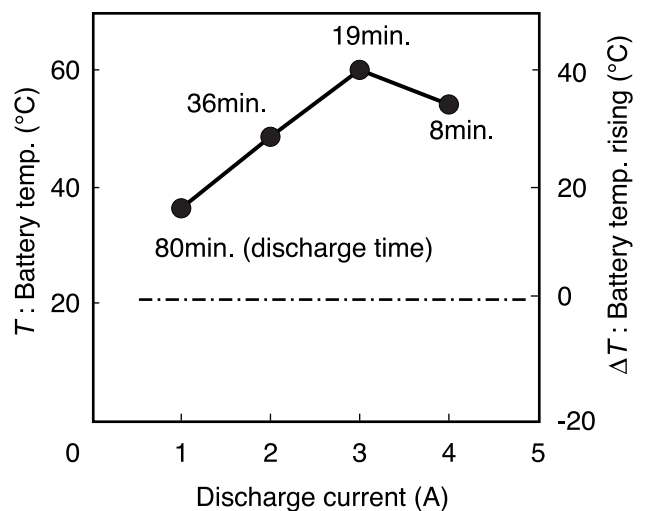
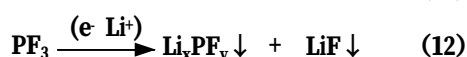
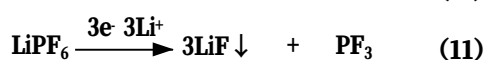
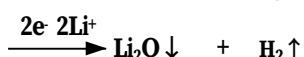
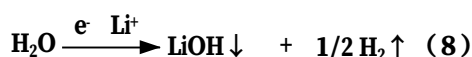
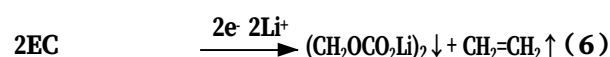


Fig.3 Relationship between the discharge current and the battery temperature rising

度上昇を任意に与える実験は安全上まだ課題があるので、民生用電池でのデータを基に解析したが、発熱機構や発熱の影響は基本的に同様である。

Fig.3 において、3A 放電よりも 4A 放電の方が電池温度が低くなっているのは、放電時間が 3A 放電に比べて短いため、電池温度が上昇する前に下限電圧の 2.5V に到達し次のサイクルに移行することで、電池温度が比較的低温に抑えられた結果と考えられる。

次に劣化速度について考察する。劣化の主要原因としては電極バルクの劣化と電極表面皮膜の成長・成分変化およびそれに伴う電解液の変質が考えられる。式(4)～(12)に示すように、複数の反応が複雑に絡み合って劣化が進行すると考えられている^{(3)～(9)}。



一方、電極劣化反応速度は式(13)のように表現できると考えられる。

$$K = I / nF \quad (13)$$

K : 電極劣化反応速度(mol/s)

I : 劣化で消費される電流値(A)

n : 反応次数

F : ファラデー定数(9.64846×10^4 C/equiv.)

ここで式(13)を用いて劣化反応速度を算出する。初期容量の 20%低下したところでサイクル寿命とし、その容量を寿命までに経過した積算時間で割ることにより、電池劣化に消費される電流値を求めた。反応次数は式(4)～(12)にあるように、 $n=1$ と 2 の場合がある。そこで、それぞれに関して式(13)より各温度における劣化反応速度を算出した。その結果を Table 1 に示す。

ここで活性化エネルギーを E_a (kJ/mol)、気体定数を R (8.31451 J/K·mol)、頻度因子を A (A/mol·s)とすると、Arrhenius の式は式(14)のように表現できる。

$$\ln K = -E_a / RT + \ln A \quad (14)$$

この式(14)を活用するために、電池の絶対温度の逆数に対し、劣化反応速度： K を対数換算してプロットしたものを Fig.4 に示す。

この近似式は相関係数 R が 0.987 であり、相関性が高いことが確認できる。すなわち温度変化に影響を受ける劣化メカニズムは、この劣化反応速度： K により大筋表現できるといえる。

式(14)を利用すると、 $E_a = 150.6$ (kJ/mol)、 $A_{n=1} = 3.643$

Table 1 Degradable reaction rate

I (A)	1	2	3	4
ΔT (°C)	11.3	23.7	35.0	29.2
Cycle number (≒)	500	38	10	27
Degradable rate: $K_{n=1}$ (mol/s)	1.25E-09	1.99E-08	8.24E-08	3.23E-08
Degradable rate: $K_{n=2}$ (mol/s)	6.25E-10	9.93E-09	4.12E-08	1.61E-08

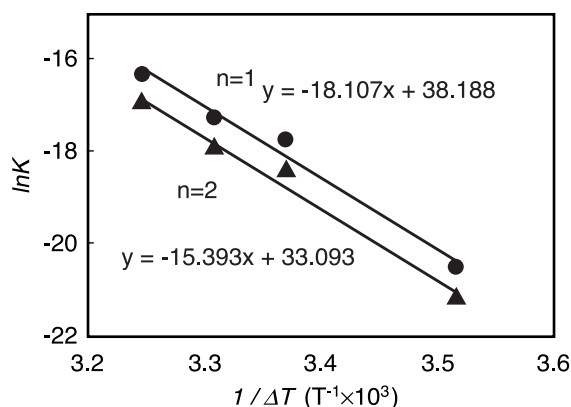


Fig.4 Arrhenius plot for the practical Li-ion battery

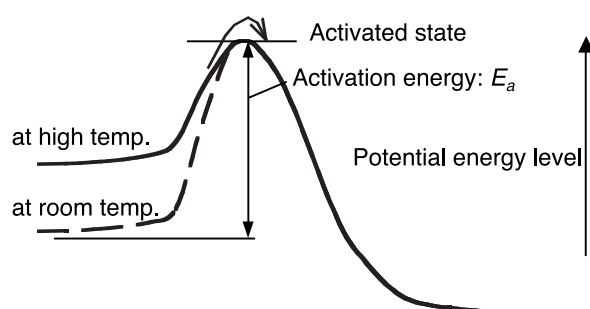


Fig.5 Energy barrier for chemical reactions

(mol/s), $A_{n=2} = 3.500$ (mol/s)となる。

ここで活性化エネルギーとは Fig.5 の E_a を指し、一般的に反応が進む時に乗り越えなければならないポテンシャルエネルギー障壁のことである。つまり、Li イオン電池が劣化反応を起こす際に必要なエネルギーということになる。

Li イオン電池の電極表面は常温状態において Fig.5 の破線のエネルギー準位にあり、比較的安定な状態にある。ところが、高温状態ではポテンシャルエネルギー準位が上がり、実線のエネルギー準位となる。この状態では活性化状態とのポテンシャルエネルギー差が減少するため図の頂点を越えやすくなる。つまり劣化反応速度が増すことになる。

また $n = 1$ と 2 では、活性化エネルギーは同等だが頻度因子： A は異なる値となっている。これは式(4)～(12)の各種反応の発生頻度を表わしていることになり、複合的に劣化反応が起きる結果と考察される。

以上のように、劣化を支配する因子として電池温度が大きく影響していることがわかる。そこで次に電池の充放電中の発熱機構を詳細に解析する。

4. 電池の発熱機構解析

一般に電池は充放電反応の段階で発熱または吸熱を伴う。電池反応における発熱は、可逆電池が定温定圧での熱力学的関係を保ち、その結果、電気的仕事に相当するギブスの自由エネルギー変化： ΔG により式(15)で表現される。

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (15)$$

ここで ΔH は電池反応のエンタルピー変化、 T は絶対温度、 ΔS は電池反応のエントロピー変化である。電池反応が可逆的に進行する場合、充電時と放電時とでは反応が逆になるため熱の出入りも逆になる。式(15)の $T\Delta S$ が電池反応における熱エネルギーに相当し、電池反応熱 Q_r として式(16)で表現される。

$$Q_r = T\Delta S = T(-\delta \Delta G / \delta T) \quad (16)$$

一方 ΔG は電池の起電力を E_e 、ファラデー定数を F 、電池反応に関与する電荷数を n とすると式(17)が成立するため、式(16)は式(18)に変換できる。

$$\Delta G = -nFE_e \quad (17)$$

$$Q_r = nFT(\delta E_e / \delta T) \quad (18)$$

しかし実際の電池の端子電圧 E_f は電池の電気化学的分極によって電極電位である平衡起電力からずれるため、この分極によるエネルギー損失分の発熱 Q_p を伴うことになる。この Q_p は充電時も放電時も発熱である。さらに電池反応では電解液の分解による副反応や自己放電なども生じ、これらに相当する Q_s の熱因子が現れる。また電池の電気的抵抗成分がもたらすジュール熱 Q_j も加わるため、電池反応の総

発熱量 Q_t は式(19)で表現される。

$$\begin{aligned} Q_t &= Q_r + Q_p + Q_s + Q_j \\ &= nFT(\delta E_e / \delta T) + Q_p + Q_s + Q_j \end{aligned} \quad (19)$$

5. Li イオン電池の熱挙動解析

5.1. 充電時の熱挙動

Li イオン電池の正極に Co 系の酸化物を用いた場合、充電時での反応では電池反応熱成分 Q_r は吸熱となるため、Ni-MH 電池と反対になり温度上昇の抑制が起こる。また充電末期での電解液の分解に伴う副反応は不可逆なガス発生反応であり、可燃性ガスを生成するため安全上問題が生じるので、副反応が起こる前段階で制御する必要がある。したがって Ni-MH 電池と異なり、必然的に Q_s 項はゼロとなる。実際には 3. で記述したように、劣化時に副反応が伴うため微量の熱は発生していると考えられるが、他の熱と比較すると小さいためここでは無視することとした。

一方、放電時では電池反応熱成分 Q_r は発熱となるため、充電時に比べて電池反応から生じる熱ストレスが大きくなる。さらに電気的抵抗成分がもたらすジュール熱 Q_j も加わるため放電時の発熱はさらに大きくなる。自己放電等の大きな電池ではこれに相当する発熱も無視できなくなるが、現在実用化されている Li イオン電池の自己放電は小さく、熱挙動を解析する上では無視しても問題ないレベルであり、ここでは考慮しないことにする。よって放電時においても Q_s 項はゼロとなる。

すなわち Li イオン電池の場合には、使用上の制限により式(19)は式(20)に置き換えることができる。以上のように、充電時と放電時では関連する支配的な熱因子が異なってくることに注目する必要がある。

$$\begin{aligned} Q_t &= Q_r + Q_p + Q_j \\ &= nFT(\delta E_e / \delta T) + Q_p + Q_j \end{aligned} \quad (20)$$

5.2. 熱挙動因子の解析

5.2.1. 電池反応熱； Q_r

Li イオン電池における充電時の反応熱は、正極から取り出された Li イオンが負極にインターカレートされる際の吸熱に相当する。そしてこれと等価の発熱が放電時に生じることになる。式(1)および(2)の全生成熱を Q_1 (kJ/mol) とし、電池の充電時電流を I_c とすれば、これに伴う単位時間当たりの電池反応熱 Q_r は式(21)のようになる。すなわち単位時間当たりの電池反応熱は充電電流の一次関数で表現できる。

$$\begin{aligned} Q_r &= Q_1 / (F / 3600) \cdot I_c \\ &= 3.73 \times 10^2 \cdot Q_1 \cdot I_c \text{ (kJ/h)} \end{aligned} \quad (21)$$

5.2.2. 分極損失発熱； Q_p

実際の電池反応で理論起電力からずれる分極の原因は、

電池反応過程で原子の拡散や移動にエネルギーが必要とされるためである。Li イオンの場合、化学拡散係数が $5 \times 10^{-9} \text{cm}^2/\text{s}$ と小さいため⁽¹⁰⁾、電極内での拡散や移動が支配因子となる。また3. で記述したようなサイクルに伴う電極表面の変質が分極増大の原因となる。したがって、発熱制御の観点からは分極の小さな組成設計が鍵となる。

この分極に伴う放電時の分極抵抗成分 R_{pd} は、放電時の電池全抵抗 R_{td} の一部に相当する分極抵抗成分として出現することから、電気的抵抗成分を R_e と表現すると R_{pd} は式(22)のように表現される。この時の単位時間当たりの分極損失熱 Q_{pd} は放電電流を I_d とすると式(23)となる。充電の場合は抵抗成分 R_{pd} を R_{pc} に、電流値 I_d を I_c に置き換えることにより、式(24)および(25)のように表現できる。

$$R_{pd} = R_{td} - R_e \quad (22)$$

$$Q_{pd} = I_d^2 \cdot R_{pd} \text{ (W)} = 3.60 \cdot I_d^2 \cdot R_{pd} \text{ (kJ/h)} \quad (23)$$

$$R_{pc} = R_{tc} - R_e \quad (24)$$

$$Q_{pc} = I_c^2 \cdot R_{pc} \text{ (W)} = 3.60 \cdot I_c^2 \cdot R_{pc} \text{ (kJ/h)} \quad (25)$$

しかしこの発熱量は全ジュール熱として出現するため、分極損失発熱 Q_{pd} と Q_{pc} は直接求めることはできなく、式(22)および(24)の全抵抗成分から分極抵抗成分を分離し、その抵抗成分に相当する発熱量として算出する必要がある。

5.2.3. 電気的抵抗成分のジュール熱: Q_j

電池の内部抵抗に依存する発熱がジュール熱として現われるが、式(22)と(24)に示したように内部抵抗は電気的抵抗と分極に基づく反応抵抗とから構成され、そのトータルとしての発熱を生じる。後者の発熱は 5.2.2. に示した通りであるが、電気的抵抗成分の単位時間当たりのジュール熱 Q_j は放電電流を I_d とすると式(26)で表現できる。また充電時は電流値 I_d を I_c に、電気的抵抗 R_{ed} を R_{ec} に置き換える

ことにより式(27)で表現できる。

$$Q_j = I_d^2 \cdot R_{ed} \text{ (W)} = 3.60 \cdot I_d^2 \cdot R_{ed} \text{ (kJ/h)} \quad (26)$$

$$Q_j = I_c^2 \cdot R_{ec} \text{ (W)} = 3.60 \cdot I_c^2 \cdot R_{ec} \text{ (kJ/h)} \quad (27)$$

したがって、このジュール熱を下げるためには電池の電気的抵抗成分 R_e をできるだけ小さくする材料設計と構造設計が必要になる。電気的抵抗成分は集電体と電極活物質間をつなぐ電流ネットワークや非導電材であるセパレータ、あるいは電解液などが支配的になる。 R_{td} は Fig.6 に示す通り放電状態: DOD により変化し、DOD 値の大きいゾーンで増加する。ここでは DOD50% のポイントを基準値 1.0 とした。

また Fig.7 に示す通り、Li イオン電池に一般的に使用される PC/DMC/LiPF₆ 系の電解液の電気伝導度は温度によって変化し、電池温度が低温側にシフトすると電池の内部抵抗が増大することになる。

5.2.4. 充放電時の熱収支

(1) 充電時の熱収支 以上の結果と式(20)より、単位時間当たりの充電時の熱収支 Q_c は式(28)で表現される。

$$\begin{aligned} Q_c &= Q_r + Q_{pc} + Q_j = -3.73 \times 10^{-2} \cdot Q_1 \cdot I_c \\ &\quad + 3.60 \cdot I_c^2 \cdot R_{pc} + 3.60 \cdot I_c^2 \cdot R_{ec} \\ &= -3.73 \times 10^{-2} \cdot Q_1 \cdot I_c + 3.60 \cdot I_c^2 \cdot R_{tc} \text{ (kJ/h)} \end{aligned} \quad (28)$$

(2) 放電時の熱収支 同様に単位時間当たりの放電時の熱収支 Q_d は式(29)で表現される。

$$\begin{aligned} Q_d &= Q_r + Q_{pd} + Q_j = 3.73 \times 10^{-2} \cdot Q_1 \cdot I_d \\ &\quad + 3.60 \cdot I_d^2 \cdot R_{pd} + 3.60 \cdot I_d^2 \cdot R_{ed} \\ &= 3.73 \times 10^{-2} \cdot Q_1 \cdot I_d + 3.60 \cdot I_d^2 \cdot R_{td} \text{ (kJ/h)} \end{aligned} \quad (29)$$

5.2.5. 電流値に対する反応熱とジュール熱の変化

式(28)と(29)を用いて電流値に対する反応熱およびジュール熱の変化を解析する。式(28)において第1項は反

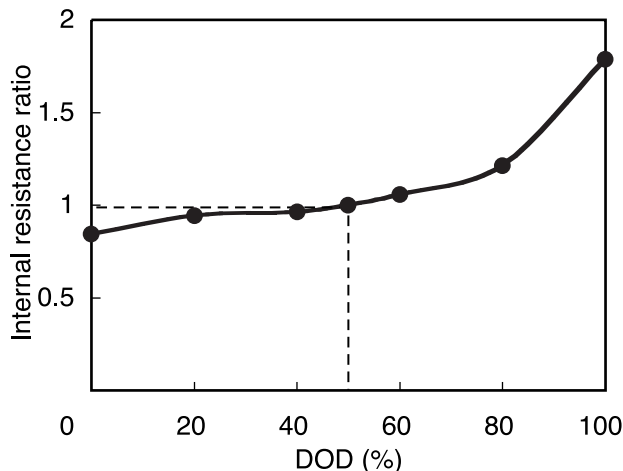


Fig.6 Relationship between DOD and internal resistance ratio

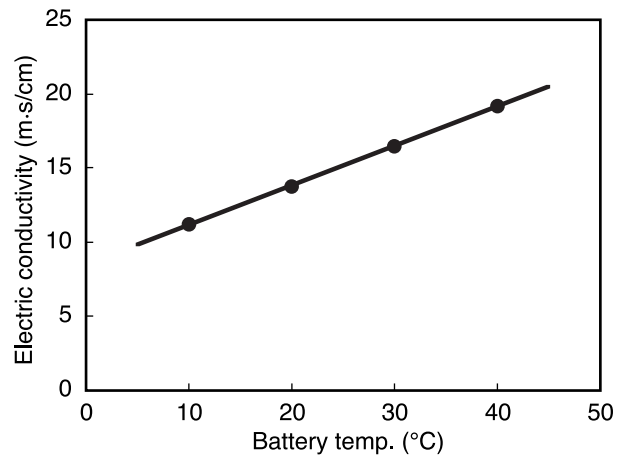


Fig.7 Battery temperature dependence on electric conductivity of 1.0M-PC/DMC/LiPF₆ electrolyte

応熱による吸熱，第2項はジュール熱による発熱を示している。一方，式(29)における第1項は反応熱による発熱を示している。この関係を Fig.8 に示す。

第1項，第2項に含まれている生成熱 Q_I 及び内部抵抗 R_t は DOD によって変化する。ここでは代表的な値として DOD50%における各項の発熱量を算出する。 Q_I は 9.39kJ/mol，内部抵抗 R_t は電池のサイズによって単位セル当たり EV 用で 1～2 mΩ，HEV 用で 3～5 mΩである。試算のために EV 用として 1.2 mΩ，HEV 用として 4 mΩで算出したときの反応熱および放電時のジュール熱による発熱量の変化を Fig.9 に示す。

充電側では反応熱は吸熱となり，EV 用の Li イオン電池では電流値が 70～80A までは反応熱による吸熱量の方がジュール熱による発熱量よりも大きくなるため，充電時熱

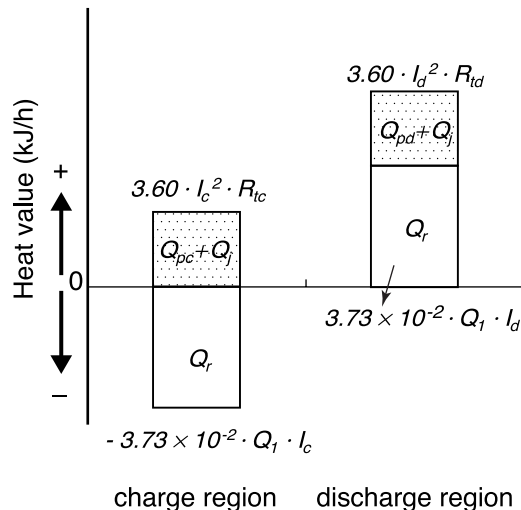


Fig.8 Heat income and outgo model of Li-ion batteries during charge and discharge process

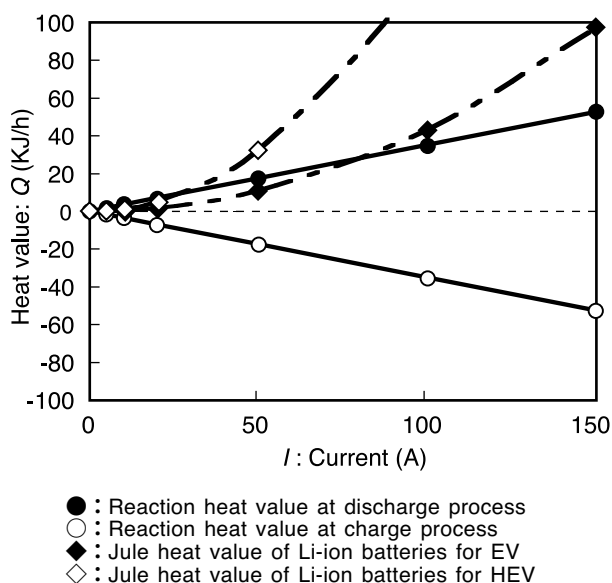


Fig.9 Relationship between current and heat value

量 Q_c はマイナス値となり電池温度を低下させることになる。放電側では反応熱もジュール熱も発熱であるので，常に温度上昇することになる。EV 用の Li イオン電池では，70～80A までは反応熱による温度上昇の方がトータルの温度上昇へ与える寄与率是大きいが，それを越えるとジュール熱による寄与率の方が大きくなる。

一方，HEV 用のように小容量の Li イオン電池では，内部抵抗が EV 用に比較すると大きくなるため，20～30A 程度で反応熱よりもジュール熱による発熱の方が寄与率も大きくなる。すなわち，20A 以上の大きな電流の流れる頻度が多くなる HEV 用 Li イオン電池では，内部抵抗の低減が電池寿命を延ばす上では必須となる。

6. シミュレーションと実測値の比較

ここで式(28)と(29)を用いて発熱シミュレーションを行い，実測値との比較を行った。Fig.10 の実車走行モードにおける電池出力： W から式(30)を用いてモード電流値を算出し，マイナス電流値の時は式(28)に，プラス電流値の時は式(29)を用いて発熱量を算出した。

$$I = \{E_e - (E_e^2 - 4 \cdot R_t \cdot W)^{1/2}\} / 2 \cdot R_t \quad (30)$$

さらに式(31)で示すように，その発熱量を電池熱容量： C (kJ/K)で割ることにより単位時間当たりの電池温度変化： ΔT を算出した。また電池熱容量は電池構成材料から $C = 3.42$ (kJ/K)と算出した。そこでFig.11に示すように，25℃断熱状態での単位時間当たりの熱放射速度： T_r を考慮してシミュレーション精度の向上を図った。

$$\Delta T = Q_t / C - T_r \text{ (K/h)} \quad (31)$$

その結果を実測値とともにFig.12に示す。実測値はEV用 80Ah大型Liイオン電池を断熱材で囲い，断熱状態に近い状態での電池温度を表示した。シミュレーション結果と実測値はほぼ一致している。DOD70%を境に各々実測値とのわ

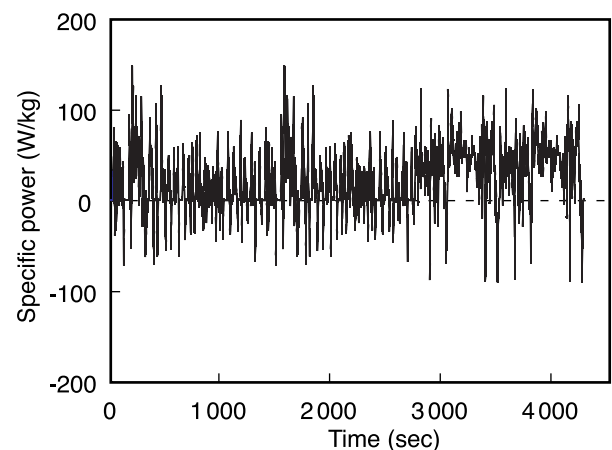


Fig.10 Vehicle test mode

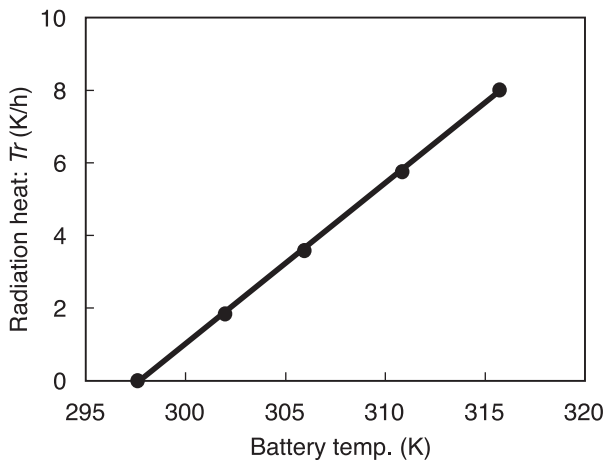


Fig.11 Correlation between battery temperature and radiation heat with an adiabatic state

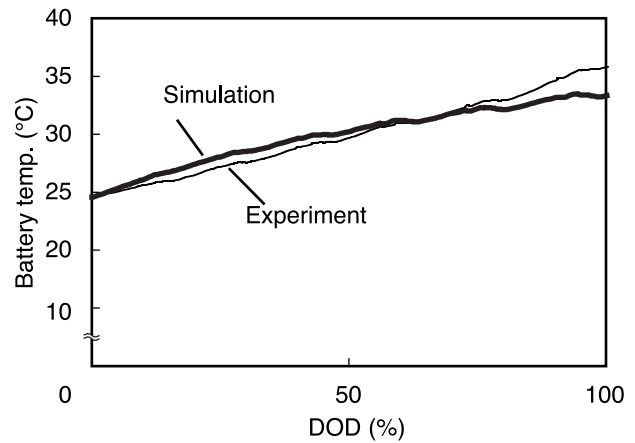


Fig.12 Comparison of experimented heat value with simulation data

ずかなずれがある原因は、シミュレーションを行うにあたり計算を簡略化するために内部抵抗 R_t をDOD50%の値に統一したためである。実際にはFig.6に示したようにDODによって内部抵抗が変化し、特にDODの大きい領域で上昇する。すなわちDODの大きい領域でシミュレーションより実測値の方が若干大きくなった理由は、実際の内部抵抗より小さい値を使ったためである。

以上のことから、5.で記述した発熱挙動の解析結果は理論上正しいことが裏付けられた。本論文では、EV用を対象にLiイオン電池のシミュレーションを行ったが、当然のごとくHEV用でも同様な試算が行えることになる。

7. まとめ

電池反応の熱力学的解析により、以下の発熱因子の細分化および電池の発熱特性の推測が可能となった。

- (1) 熱生成因子は電池反応熱: Q_r 、分極損失熱: Q_p 、ジュール熱: Q_j の3種に分類でき、 Q_r は $3.73 \times 10^2 \cdot Q_1 \cdot I$ 、 Q_p は $3.60 \cdot R_p \cdot I^2$ 、 Q_j は $3.60 \cdot R_e \cdot I^2$ と表現できる。
- (2) 正極材料に LiCoO_2 を用いた場合、充電時の電池反応熱は吸熱となり、EV用 80Ah の大型 Li イオン電池では電流値が 70 ~ 80A までは反応熱による吸熱量の方がジュール熱による発熱量より大きくなるため、充電時熱量: Q_c はマイナス値となる。
- (3) 発熱因子を充電時と放電時でさらに細分化し、それらの値を元にシミュレーションをした結果、実測値との良い一致が確認され、本解析手法の確からしさを裏付けることができた。
- (4) この手法により、EV用のみならず HEV 用などの容量の異なる Li イオン電池に対しても発熱特性の定量的推測が可能となる。

8. おわりに

本論文により発熱機構を解析することで、Liイオン電池の実負荷による発熱の定量的な解析を可能にすると共に、電動車両用のLiイオン電池設計への指針を明確にすることができた。本報告が魅力ある HEV 用あるいは EV 用電池の実用化を目指した開発の指針となれば幸いである。

記号一覧

- ΔG : ギブスの自由エネルギー変化
- ΔH : 電池反応のエンタルピー変化
- ΔS : エントロピー変化
- E_e : 活性化エネルギー
- T : 絶対温度
- K : 電極劣化反応速度
- R : 気体定数
- A : 頻度因子
- F : ファラデー定数
- C : 電池熱容量
- W : 電池出力
- T_r : 熱放射温度
- Q : 熱量
- Q_t : 電池全熱量
- Q_c : 充電時熱量
- Q_d : 放電時熱量
- Q_r : 電池反応熱
- Q_p : 分極損失熱
- Q_s : 副反応熱
- Q_j : ジュール熱
- I_c : 電池充電電流

I_d : 電池放電電流
 R_t : 電池全抵抗
 R_{tc} : 充電時電池抵抗
 R_{td} : 放電時電池抵抗
 R_p : 分極抵抗
 R_{pc} : 充電時分極抵抗
 R_{pd} : 放電時分極抵抗
 R_e : 電気抵抗

参考文献

- (1) 斎藤善康, 金成克彦, 高野清南: リチウムイオン二次電池の熱特性解析, 電池技術, Vol.8, p.129-138(1996)
- (2) 佐藤登, 八木一彦: 電気自動車用ニッケル金属水素化物電池の熱挙動解析, HONDA R&D Technical Review, Vol.10, p.32-41(1998)
- (3) 竹原善一郎 監修: 高密度リチウム二次電池 その反応, 材料開発, 東京, 株式会社テクノシステム, 1998, p.45-49
- (4) Chusid, O., Ein-Eli, Y., Aurbach, D., Babai, M. and Carmeli, Y.: J.Power Source, Vol.43, p.47 (1993)
- (5) Aurbach, D., Ein-Eli, Y., Chusid, O., Carmeli, Y., Babai, M. and Yamin, H.: J.Electrochem.Soc., Vol.141, p.603 (1994)
- (6) Ein-Eli, Y., Markovsky, B., Aurbach, D., Carmeli, Y., Yamin, H. and Lusk, S.: Electrochim. Acta, Vol.39, p.2559 (1994)
- (7) Aurbach, D., Ein-Eli, Y., Markovsky, B., Zaban, A., Lusk, S., Carmeli, Y. and Yamin, H.: J.Electrochem.Soc., Vol.142, p.2882 (1995)
- (8) Aurbach, D. and Ein-Eli, Y.: J.Electrochem.Soc., Vol.142, p.1746 (1995)
- (9) Ein-Eli, Y., Thomas, S., Chadha, R., Blakley, T. and Koch, V.: J.Electrochem.Soc., Vol.144, p.823 (1997)
- (10) 芳尾真幸, 小沢昭弥: リチウムイオン二次電池 材料と応用, 東京, 日刊工業新聞社, 1996, p.13

■ 著 者 ■



丸野直樹



荒木一浩



佐藤 登