

# iso-BTCを使用したゲルバッテリーの特 評価に関するケーススタディ

ジョセフ・ウィルモット、マーク・アップルトン博士

WD6 1GW、ボアナムウッド、キャピタルビジネスパーク9-10、H.E.L Ltd

## 要旨

iso-BTC はセルまたはバッテリーパックの試験用に設計された等温熱量計です。これらのユニットの一つを充放電ユニットに接続し、あるバッテリー（以下「バッテリーA」）の幅広い作動条件における特性を評価しました。その結果、このバッテリーの正確な特性が確認され、特徴をさらに理解することができました。

## 序論

iso-BTC では、熱効率情報をオンライン校正やオフライン計算をすることなくリアルタイムで取得することができます。パウチ型や角型、円筒型バッテリーに対応し、-40°C から 100°C までの温度で作動します。

通常、iso-BTC は充放電ユニットと組み合わせて使用され、セルの電気容量測定やセルの特性評価に役立ちます。iso-BTC はセルを一定温度に保ちながら、セルの充放電中に生成されるエネルギー量および電力量を測定することができます。そのため、iso-BTC はバッテリー温度管理タスクを実行しており、結果は直接実際の例に適用可能です。

「バッテリーA」は使用範囲が広く、耐久性があり、他のゲルバッテリーと同様の意匠的特徴を持つことから、試験の対象となりました。バッテリーA の電荷容量は 2.2Ah であり、一般的な筐体に 3 つのゲルセルが直列接続で収められ、パッシブ方式のセルバランス機能を有します。

本研究の目的は、iso-BTC がどのようにしてバッテリーA の特性を評価することに役立つかを明らかにすることです。この特性はバッテリーセルの設計や構成、健全性（SOH: State Of Health）に関係する可能性があります。

## 機器および方法

iso-BTC は加熱および冷却を調節することでバッテリーを等温に保ちます。冷却はバッテリーの設定温度より温度が低い 2 枚の熱伝導プレートを通じて行われます。ヒーターはバッテリーに固定され、設定されたバッテリー温度になるよう冷却分を補います。これを電力補償と呼びます。

バッテリーが一定温度になると、ヒーターからの電力も安定します。バッテリー由来の発熱または吸熱現象はすべてヒーターの出力を増減させることで速やかに補償されます。したがって、ベースラインからの電力差を発熱および吸熱現象の電力として測定することができます。

## バッテリーAの充放電サイクルの温度依存性

バッテリーAを60°C~0°Cの間で充電（5アンペア）および放電（8アンペア）しました。得られたバッテリー温度およびヒーターの電力プロファイルを下の図1に示します。

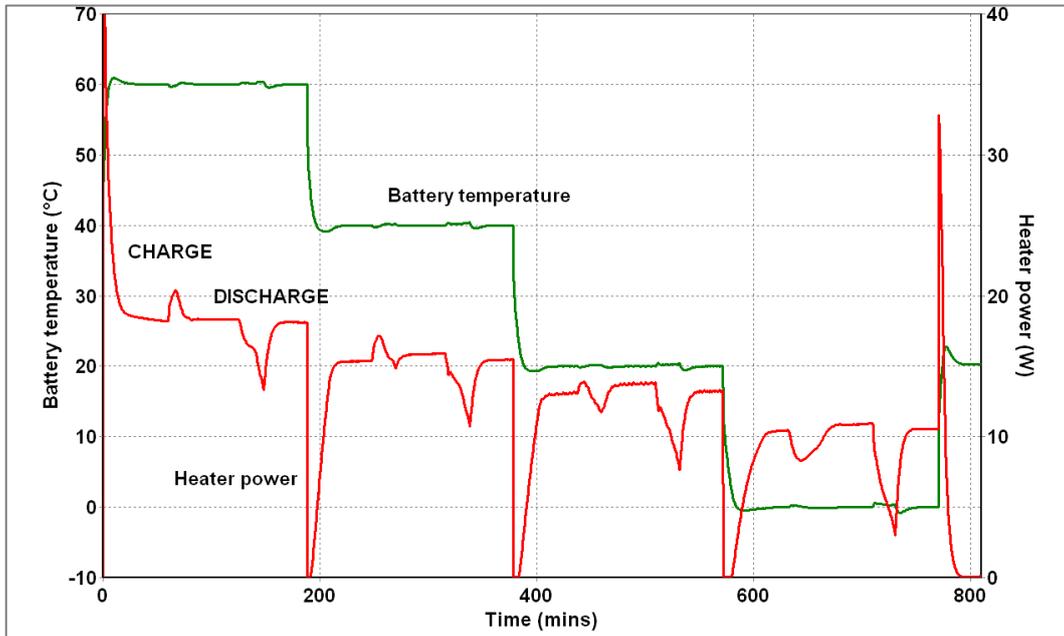


図1 - 60°C~0°C、充電（5A）および放電（8A）

制御装置の出力解析から、図2に示すような、熱およびエネルギー放出プロファイルが得られます。

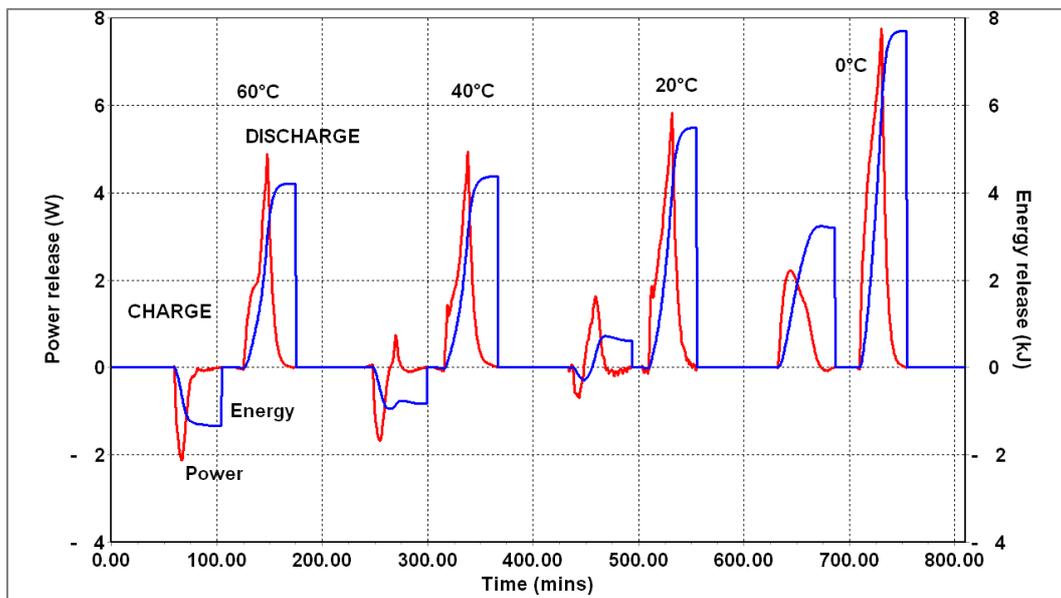


図2 - 充電（5A）および放電（8A）中に放出される熱

充電および放電の両プロファイルは、温度が低下すると、興味深い形状変化を示しますが、これは、60°Cでは完全に吸熱性ですが0°Cでは完全に発熱性である充電プロセスの場合に最も顕著です。中間の温度では、再現性のある過渡的な挙動が観察されます。バッテリーの充放電サイクル中の、温度の関数としてのピーク電力およびエネルギー出力を下の図3に示します。注：バッテリーの充電は吸熱性でもあり発熱性でもあるため、別個の2つの充電電力プロファイルを示しています。

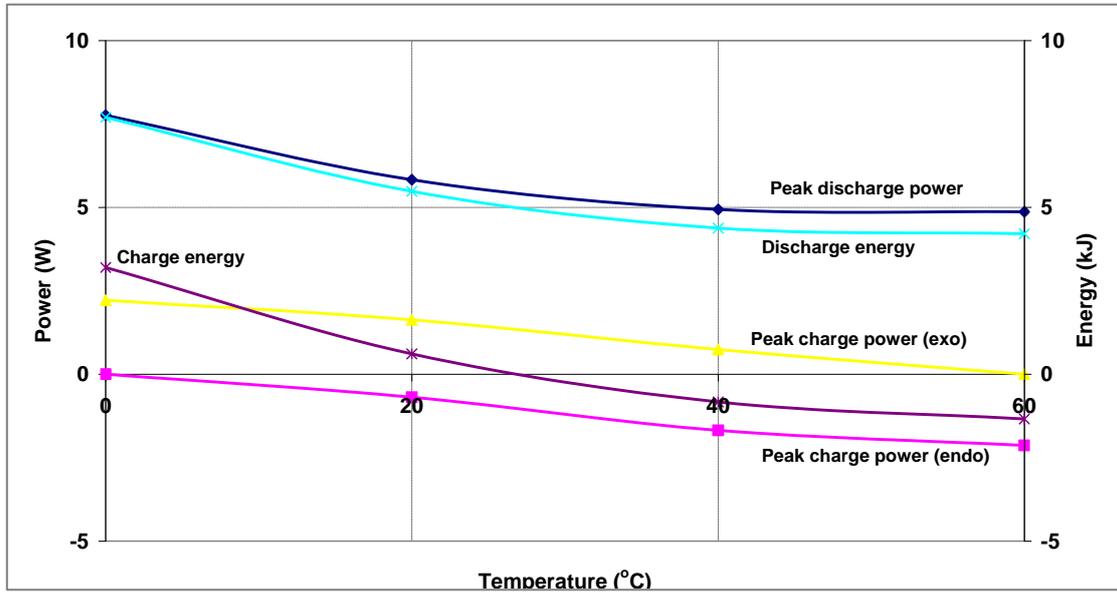


図3-バッテリーAの温度依存性

下の図4は、4つの温度における充電電力プロファイルを重ね合わせたものです。

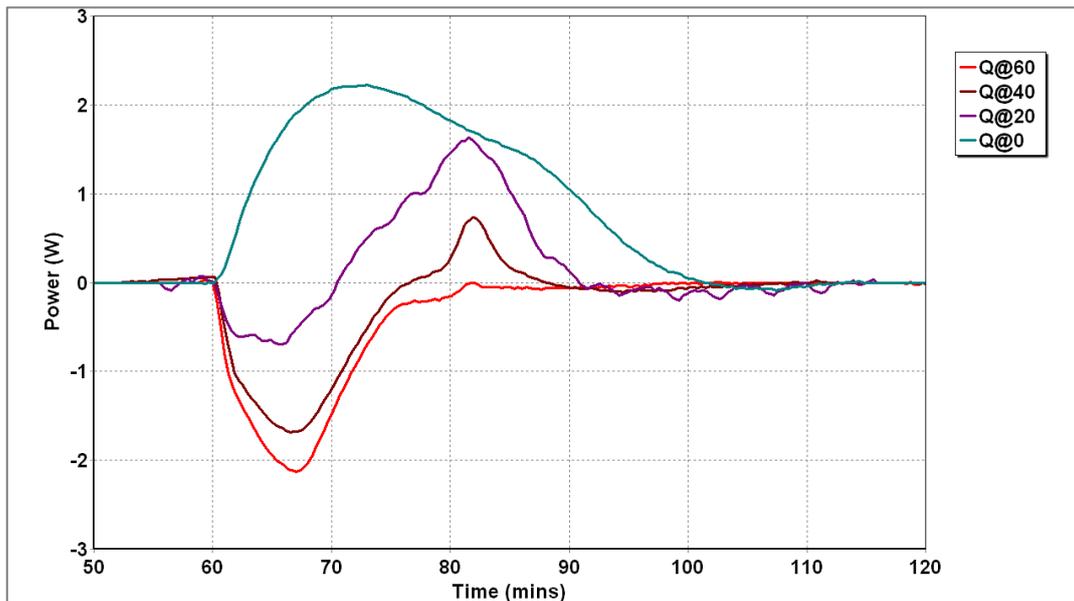


図4-異なる温度におけるバッテリーAの充電プロファイル-電力放出

吸熱挙動から発熱挙動への遷移の他にも、このデータから明らかになる変化があります。出熱中の小さな発熱ピーク（上の図4において約80分経過後）が60°Cでも確認できますが、温度が低下するほどピーク強度が増加します。このピークはバッテリー内部の固体の変態に対応していると考えられ、ほぼすべての充電速度／放電速度において、充電プロファイルと放電プロファイルの両方で確認されます。

放電プロファイルの形状もまた温度に強く依存します。温度が低下すると放電はますます発熱方向に進みます。さらに、上述の鋭いプレピークは一般に放電プロファイルの開始後間もなく目に見えるようになります。どの程度はっきりと見えるかはバッテリーの充電履歴に左右されます。さまざまな温度における放電プロファイルを図5に重ね合わせて示します。

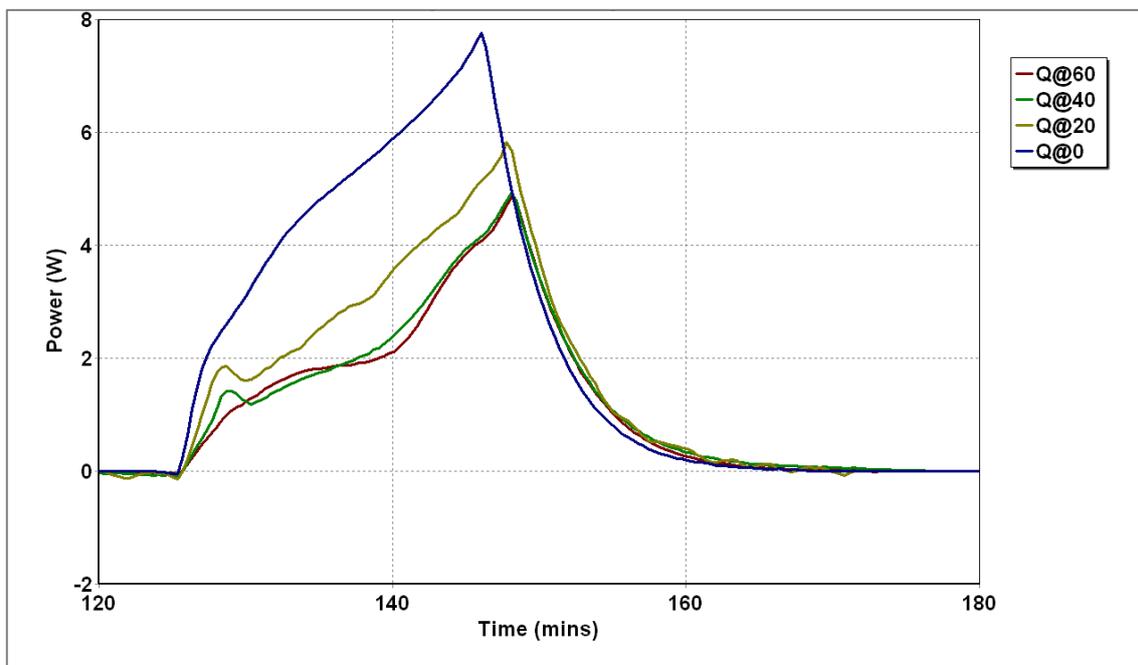


図5 - 異なる温度におけるバッテリーAの放電プロファイルー電力放出

バッテリーAの容量は一見温度に依存しているように見えます。充電電流および放電電流のプロファイルを図6に示します。

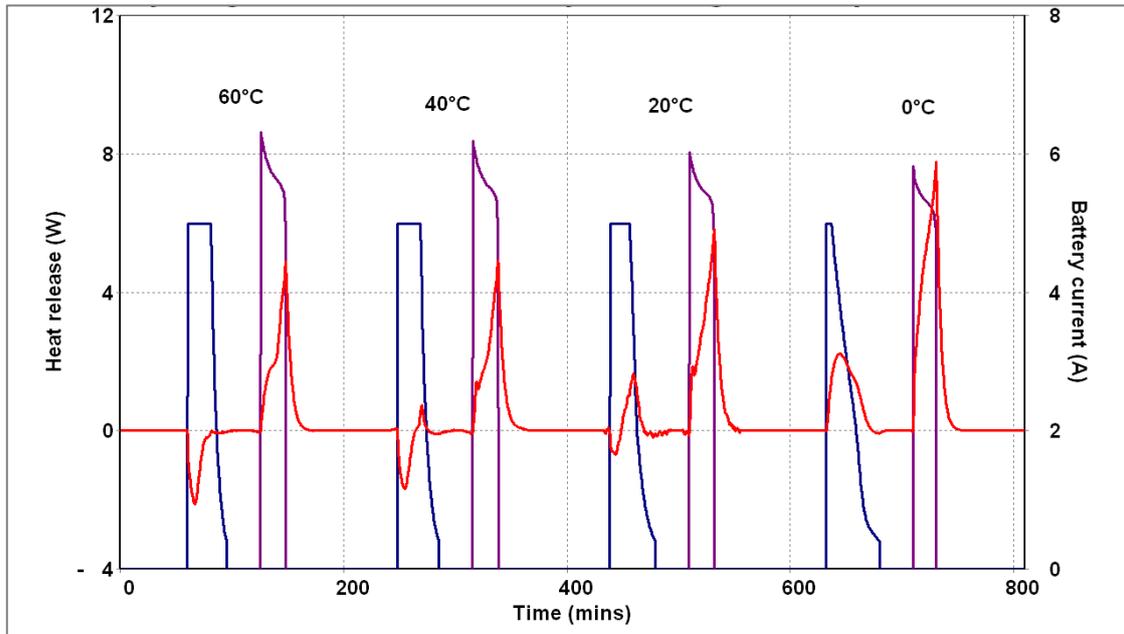


図6-ある温度範囲においてバッテリーAを繰り返し充放電した場合のバッテリー電流および放出されるバッテリー熱

これらのプロファイルを積分することで、バッテリーから取り出すことができる充電量の目安を温度の関数として得ることができます。その結果を図7にグラフとして示します。

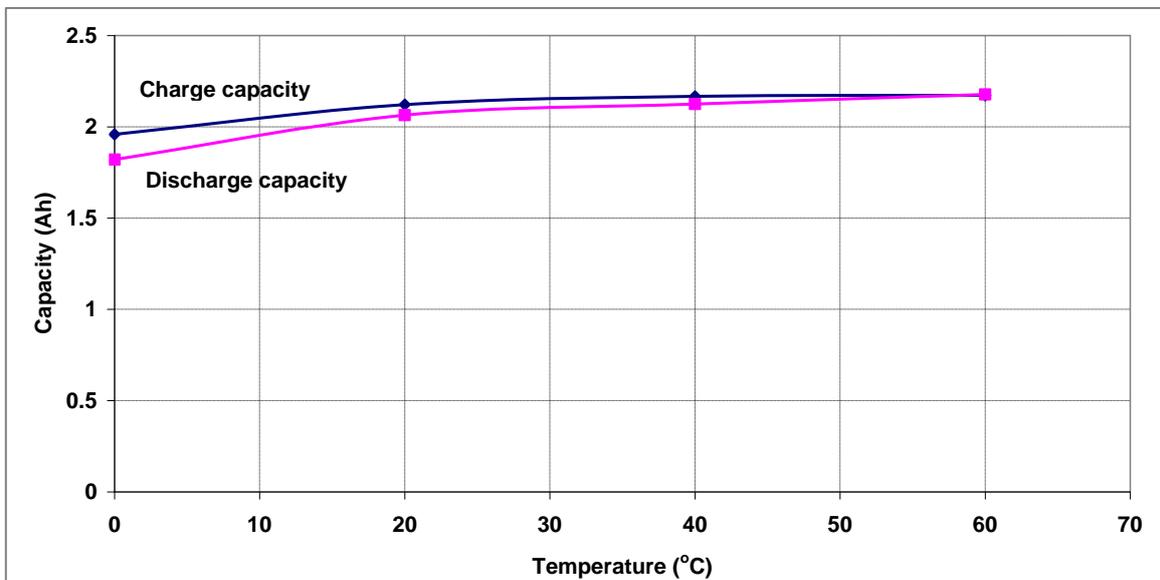


図7-バッテリーAの5A充電(5A)／放電(8A)サイクルの温度依存性

バッテリー効率として知られる充電容量／放電容量の比を図8に示します。この図から、容量も効率もバッテリーの温度に強く影響を受けることがわかります。

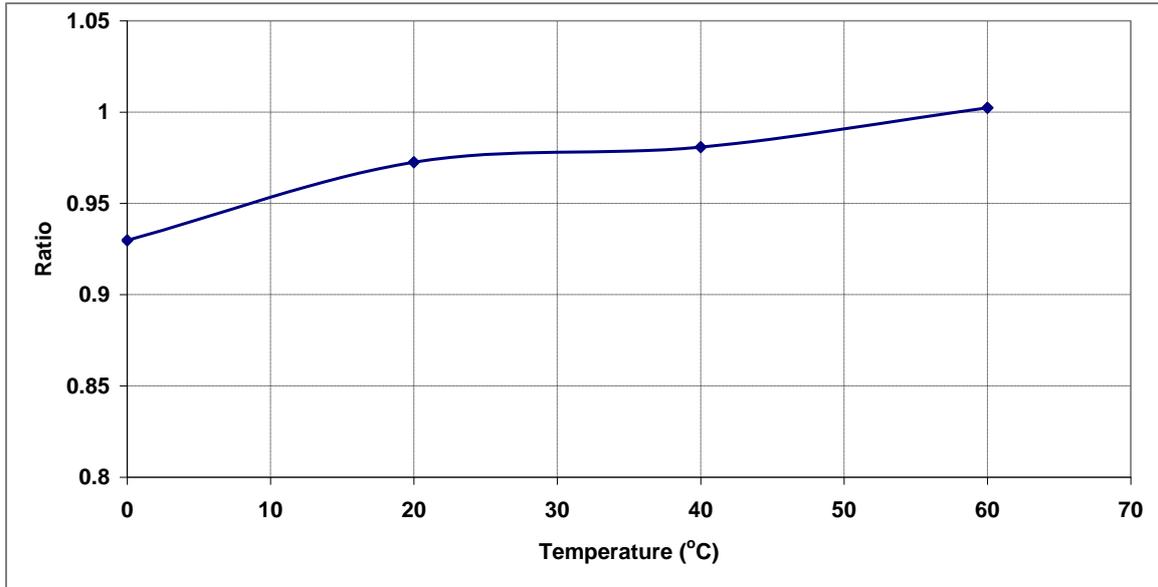


図8-バッテリーAの充電(5A)／放電(8A)容量比の温度依存性

バッテリーAには他に厄介な問題があります。バッテリーAは、3つの別個のセルが直列に接続されている設計になっており、個々のセルの充放電は制御されていません。バッテリーを最初に組み立てる際に、セルは通常、ある程度よく釣り合うよう選ばれますが、セルが古くなるにつれ、必ずしも一様に経年劣化するわけではなく、通常の使用でもバッテリー内部に不均衡が生じることがあります。これは、アクティブまたはパッシブ方式のセルバランス機能が何かしら実装されていない場合に起こります<sup>1</sup>。

代わりに、保守的な充放電が行われるべきです。この充放電では、個々のセル電圧を監視し、スタックの中のいずれかのセルがしかるべき危険閾値に達し次第、即座に充放電を終了します。この影響として、概して、バッテリーの有効容量が公称容量よりいくぶん低くなり、減少する傾向がみられます。このプロセスが継続すると、セルの充電／放電深度が低下する場合があります、熱量測定プロファイルにわずかな変化が起こります。この保守的な方法を採らなかった場合（個々のセル電圧を監視する前に）、バッテリーは過充電や過放電により破壊され、それに伴う安全上の影響も被る可能性が高くなります。

<sup>1</sup> アクティブ方式のセルバランス機能では、電圧が（スタック平均よりも）「高い」セルは、電圧が「低い」セルの充電に使われます。パッシブ方式のセルバランス機能の場合、高電圧のセルは、電圧がスタックの中の電圧が低いセルと同じになるまで、バランス調整用の負荷を介して放電されます。

## バッテリーAの充放電プロファイルの詳細

iso-BTCを使用しバッテリーAを徹底的に調査したところ、このバッテリーのさまざまな温度および充電／放電速度における熱量測定プロファイルが多数得られました。これらのプロファイルはすべて、ヒーターまたは熱電対の位置や冷却方法に関係なく、おおよそ同じ特徴を示しました。

これらの全体的な特徴に加えて、非常に小さいが再現性のある特徴がいくつかあります。おそらくこれらはバッテリー自体の内部で起こっている潜在的な変化によるものです。このような特徴をまとめて下の図9に示します（これらはこの文書のここまでの節で触れられています）。

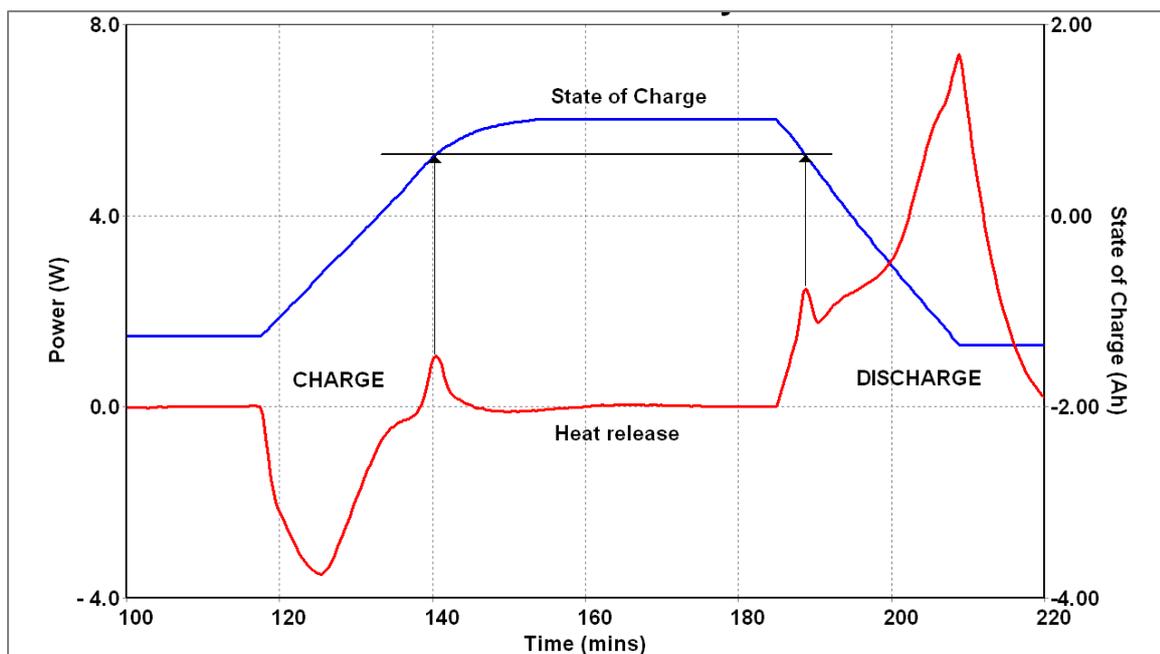


図9-バッテリーAの充放電サイクルにおける発熱スパイク

この図はバッテリーAの40°Cにおける充放電サイクルを示しています。この温度では、充電サイクルはおおむね吸熱性ですが、充電サイクルの終わりに近いところで短時間の発熱が起こっています。同様の短時間の発熱は放電サイクルが始まってすぐに生じています。この充放電サイクル工程全体を通して充電状態（SOC: State of Charge）プロファイルを検討したところ、この2つの発熱はまったく同じSOC値（満充電より0.61Ah下）で起こっていることが明らかになりました。また、おそらくさらに興味深いことに、充電電流が減少しその結果充電サイクルが長くなると、下図のように、すべてのサイクルで、同じSOC値のときに発熱が見られました。

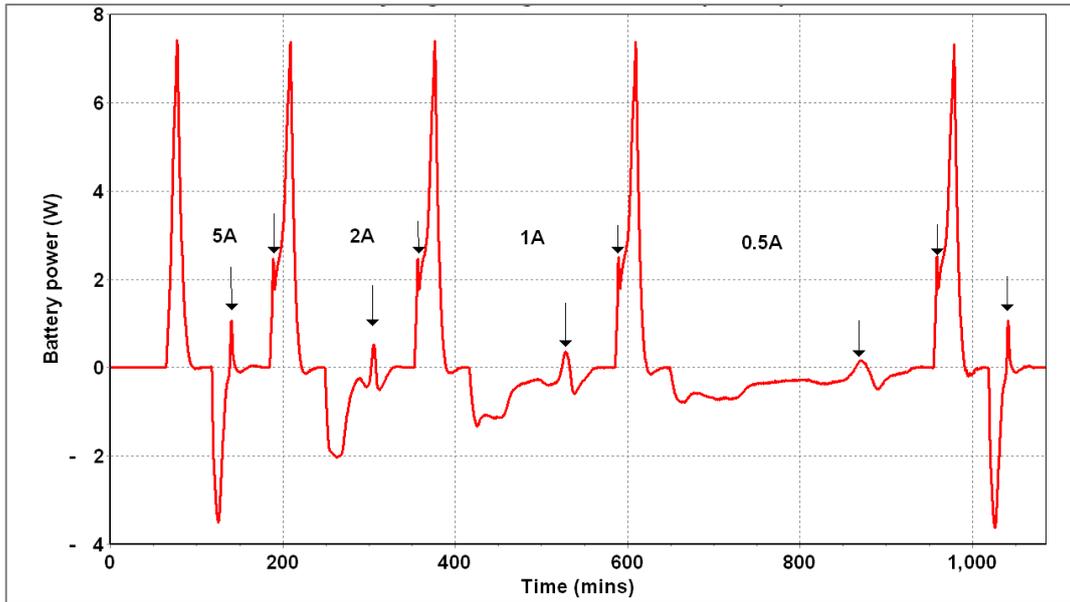


図 10 - 充電電流を変化させた場合のバッテリーAの充放電サイクル (40°C)

図 10 では、放電速度は固定負荷を使用することで6 アンペアで一定とし、充電電流を5 アンペアから0.5 アンペアまで段階的に下げて、繰り返しバッテリーを充放電しました。スパイクが観測された時点でのバッテリーのSOCを求めることで、下記のデータが得られます。

表 1 - 充電／放電速度によるスパイクの位置

サイクル	スパイクの位置 (満充電より mAh 低い)
6A 放電	-
5A 充電	610
6A 放電	610
2A 充電	610
6A 放電	610
1A 充電	610
6A 放電	610
0.5A 充電	600
6A 放電	600

下記のことを確認することができます。

- スパイクが発生する SOC は非常に再現性が高い。
- このスパイクは最初の放電サイクルでは確認できません。これはバッテリーの初期充電が（自己放電により）低かったためか、または、何らかの経年変化現象が充電済みバッテリーの中で起こる場合があり、その後、発熱プロセスが起こらなかったためかもしれません。

これは、バッテリーパックの単純な加熱および冷却以外の情報を得るために熱量測定はどのように使えるのかということと、このような通電されているマイクロな構造において同様の

## バッテリーAの放電プロファイルのインピーダンス解析

上述した鋭い発熱性の特徴（バッテリー電極内部の再配列に起因するもの）の同定以外に、バッテリー放電プロファイルはさらに解析することができる可能性があると考えられました。プロファイルはすべて類似した形状でした（下の図 11 を参照）。

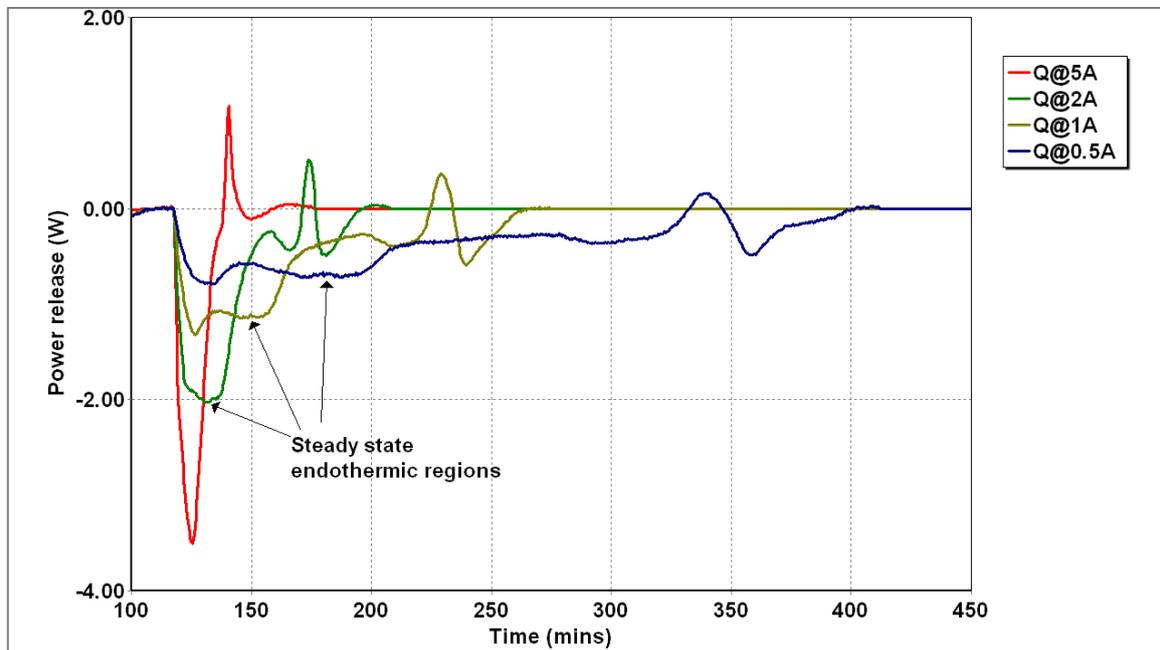


図 11 - 充電電流をさまざまに変化させたときのバッテリーAからの電力放出

最初は比較的一定の吸熱がありますが、それが後に小さくなり、その後すでに議論した発熱スパイクが現れます。バッテリーからの熱出力には、バッテリーの化学的性質に関する熱力学的な項と、バッテリー抵抗を通る実質的な電流に関するオーム性加熱の項があります。バッテリーが当初充電されていない（「二次」の相互作用の効果を最小限にする）場合、熱力学項は電流について線形であると仮定できるでしょう。

$$Q = kI - I^2R$$

$I$ : バッテリー電流

$Q$ : 出力 (+ve は吸熱を示す)

$R$ : バッテリー抵抗の影響

$K$ : 求める未知の定数

この形の式を、2回の繰り返し試験からなる上記の実験から得られた初期の定常熱出力にフィットさせると、下の図12に示した3つのプロファイルが得られます。

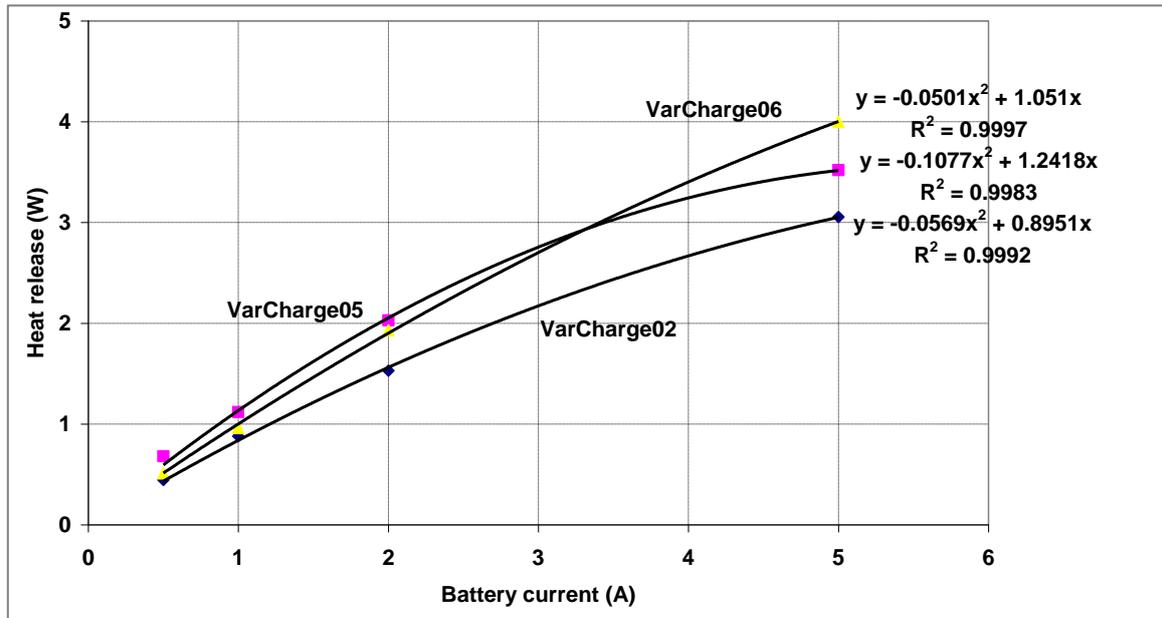


図12 - バッテリーAから放出される定常熱のモデリング

モデルのパラメータとして次の値が得られます。

表2 - バッテリーのSOHに依存するバッテリーの抵抗および定数

実験	R	K
VarCharge02	0.0569	0.895
VarCharge05	0.1077	1.242
VarCharge06	0.0501	1.051

この解析で得られた相関係数は悪くはないものですが、それほど説得力のあるものではありません。複数回の実験におけるKの再現性が高くなると、背景にある化学的性質を反映することに役立ちます。しかし、今回の3回の繰り返し実験では、健全性（SOH: States of Health）の異なるバッテリーを使用したため、おそらくこの程度のばらつきは想定内のものでしょう。

## 結論

このケーススタディでは iso-BTC がバッテリーおよびセルの特性を明らかにするのにどれほど役立つかを実証しました。特性が分かれば、試験対象バッテリーの化学的および電氣的、熱力学的性質を深く理解することができます。

iso-BTC では、セルの正確な内部構造を詳細に知ることはできませんが、セル構成を変化させた場合の正味の効果を明らかにすることには役立ちます。バッテリー温度管理システムに必要な重要パラメータは、iso-BTC から得られる結果からたやすく設定することができます。