

リチウムイオン電池LIB(Li-ion battery)の高エネルギー密度化、大容量化にともない、車載用バッテリーの安全性の向上がより重要となっている。

車載用バッテリーの安全性評価の重要性は世界規模で高まっており、国連協定規則(UN Regulation)などで安全要求が規定されている。そのなかでも、近年注目される安全要件として、熱連鎖対策がある¹⁾。熱連鎖は、「組電池(複数の単電池を組んだもの)において一部の電池が熱暴走(電池が異常発熱し制御が効かなくなる現象)した際に、その熱暴走現象が隣接セルに伝搬する現象」をいう。これを原因とするEV火災など危険事象への対応がEVの安全性に関する世界統一基準GTR-20(Global technical regulation No.20)²⁾において規定されている。一方、熱連鎖対策の評価(熱連鎖試験)は、熱暴走の発生方法や評価方法に議論があるほか、試験場の確保や作業員の安全対策、計画から電池の廃棄までに費やすコストや時間が課題である。

これらの課題を軽減する方策として、CAE解析(Computer aided engineering)による熱連鎖シミュレーションがある。熱連鎖シミュレーションは断熱材などの評価を効率的におこなえる手段である一方、複雑な反応である熱暴走やそれに起因する熱連鎖を高精度に予測することは難度が高く、実測データをもちていかに実現に則したモデル構築をおこなうかが課題となっている。

本記事では、熱連鎖シミュレーションの精度向上を目的に、重要なパラメータである発生ガス流量の測定手法について検討をおこない、発生ガスが熱連鎖におよぼす影響を実験的に検証したので紹介する。



技術本部 EV・電池ソリューションセンター 安全性評価試験室
さきま こういち
佐伯 公一



技術本部 EV・電池ソリューションセンター 安全性試験評価室
にしうち まさと
西内 万聡



技術本部 EV・電池ソリューションセンター 安全性評価試験室
ほり やすのり
堀 泰規

G-1 熱暴走時の流量測定技術

電池が熱暴走した際の発生ガスは、次の①～④のような特徴を持つため、一般的にもちいられるガス流量測定手法では測定が困難である(第1図)。

- ① 高流速(数百m/s)
- ② 高温(数百度)
- ③ 噴出状況が刻々と変化する
- ④ 多量の粉塵を含む

これらへの対応として、当社ではピトー管をもちいた流量測定手法を検討した。ピトー管の原理を第2図に示す。ピトー管は金属製であることから、強度面・耐熱面で上記①、②の問題をクリアできる。③は、高応答の圧力計の選定および高速の温度変化に追従する温度センサの選定により解決可能である。④については、解決のハードルが高く、電池の熱暴走時の流量測定をもっとも困難としている事象と思われる。当社では、装置構成をはじめとしたさまざまな検討により課題解決をおこなった。

第2図 ピトー管の原理

手法	概要	原理図
超音波式	管に設けられた孔から全圧、静圧を測定し、その差圧(動圧)で流速を求める。配管の断面積を乗じて流量を求める。	全圧、静圧測定 ピトー管

第1図 ガス流量測定手法の例

手法	概要	原理図
超音波式	管内の流体を斜めに横切って交互に超音波を送受信し、2つの超音波の伝播時間の差を流量に換算する。	センサ 超音波
面積式	テーバー管内のフロートの押上力と自重がバランスし流量を示す。最も古い流量計の1つ。	テーバー管 フロート
熱式	流体が熱物体に接触した際の温度変化を計測し、流量を計算する。	温度センサ ヒータ

1.1 測定対象および装置の構成

LIBの形状には、円筒型、ラミネート型、角型の3種類がある(写真1)。円筒型、角型には安全機構として安全弁が備わっている。これは、何らかの要因で電池内部の圧力が上昇した際に、電池が破裂することを避けるためのものである。これにより、熱暴走時のガス噴出の方向が限定される。一方、ラミネート型には同様の機構はなく、周囲の接合部が開裂することでガス噴出が起こる。そのため、特段の措置がない限り、ガス噴出の場所を事前に予測することは困難である。以上のことから、ガス噴出箇所が固定されている角型LIBを対象に測定手法の検討をおこなった。

測定装置の構成例を第3図に示す。電池の固定と治具との接続を容易にするため、セルを箱型の容器内に設置した。容器の上面(安全弁の上方)には穴が開いており、そこに配管を接続した。これにより、発生したガスの流路を限定した。また、配管にピトー管と温度センサを設置することで、動圧、ガス温度を測定し流速、流量を算出した。ここで、算出に必要な流体密度は、別途ガス分析をおこない評価した。

1.2 測定精度に関わるパラメータと実例

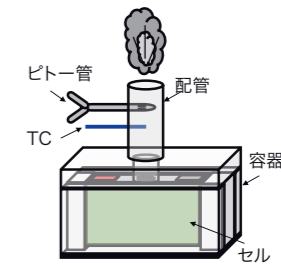
本手法では、測定精度に関わるパラメータとして治具の構成やピトー管の設置位置などが挙げられる。ここでは、ピトー管の設置位置を検討した結果を紹介する。設置位置は、粉塵の影響を左右する要素であると思われるほか、セルからの距離による測定値の確からしさやバラつき点からも検証する必要がある。そこで、セルからの距離を3水準とし、設置位置と流量の傾向について調査した(第4図)。セルは25Ah角型リチウムイオン電池を使用し、ヒータ加熱により熱暴走を発生させた。測定結果を第5図に示す。B位置については、再現性確認のため二回測定をおこなった。セルに近い箇所(A位置)では流量が増加するのに対して、ある一定程度離れた場合は、B位置、C位置ともに同等の測定結果がえられた。また、B位置では良好な再現性が確認された。A位置で流量が増大する要因として、ピトー管が電池に近すぎるとガスの流れが安定していないことや、粉塵の直撃を受けることでピトー管が根詰まりしやすいことから、過大な数値となっている可能性が考えられる。

写真1 LIBの形状(当社試作品)

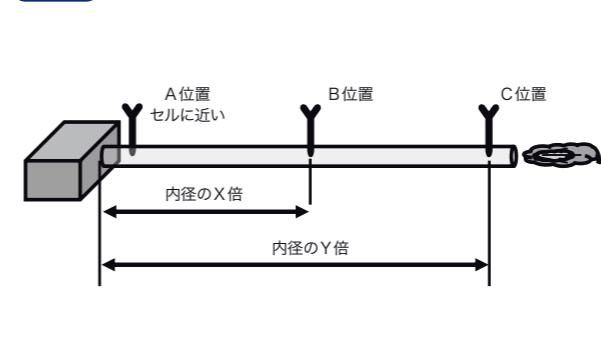


第3図 流量測定の測定装置構成例

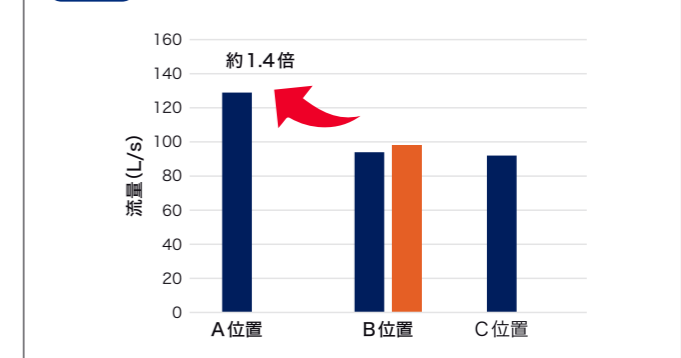
治具配置要領	目的
セルを容器で拘束する	セルの保持
安全弁と同軸上に配管を配置する	発生ガスの流路を限定させる
配管にピトー管とガス温度計測用の温度センサ(TC)を設置する	測定した圧力、温度から流速・流量を求める



第4図 ピトー管の設置位置



第5図 測定位置を変えた場合の流量変化

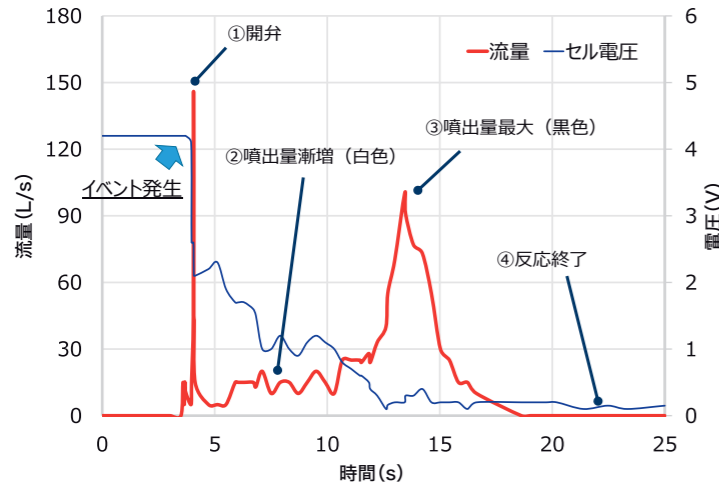


1.3 測定事例

実際の流量測定事例を第6図に示す。試験条件は1.2と同様である。開弁後、電池電圧の低下にたいがい流量が増加した。流量は約100L/sで極大値を示し急激に減少した。流量の極大値前後で発煙の色が白から黒に変化し、この時点が観察上も、もっとも

勢いよくガスが噴出していた。このように本手法においては、実際の噴出挙動と測定された流量波形がよく一致しており、外乱因子となる粉塵の影響などを排除できていることがわかる。なお、当社ではピトー管以外の測定方法も同時検討しており、そこでえられた値とピトー管で計測した流量は同様の数値であることを確認している。

第6図 熱暴走時のガス流量測定の一例



番号	ガス噴出状況
①	
②	
③	
④	

G-2 熱暴走時の発生ガスが熱連鎖に及ぼす影響

車載用バッテリーは電池パックとして筐体内に格納されている。セルに熱暴走が発生した際に放出されるガスは、数百度におよび、これが電池パック内に充満することで熱連鎖を助長する可能性がある。熱連鎖に至る熱移動の支配的要因は、熱暴走したセルから隣接するセルへの熱伝導と考えられるが、高温ガスからの入熱がどの程度影響するかは、これまで知見はなかった。高温ガスの影響は熱連鎖が進展するほど大きくなると考えられるほか、熱伝導により加熱されていないセルにもその影響が届くため、実測とシミュレーションの双方において重要な因子と推定される。

し、噴出ガスの受熱影響を調査した。

- A) 密閉容器/蓋あり：電池パックを模擬した噴出ガスの影響を受ける環境(写真2)
- B) 開放容器/蓋なし：噴出ガスの影響をほとんど受けない環境(写真3)

2.2 検証結果

A) 密閉容器(噴出ガスの影響あり)の試験結果を第9図に示す。トリガーセルの熱暴走から200秒後に隣接セルが熱暴走した。さらに500秒後に最外セルが熱暴走した。おのおのの温度履歴から200°C以上への温度上昇が熱暴走に至る条件と考えられる。容器内温度はガス噴出時に160～210°Cまで上昇した。ガス噴出が収まった後も比較的高温(40°C～70°C)で推移した。

B) 開放容器(噴出ガスの影響がほとんどない)の試験結果を第10図に示す。隣接セルの温度が最大190°Cまで上昇したが熱暴走には至らなかった。最外セルも同様に熱暴走に至らなかった。容器内温度は開放系のため、ほとんど上昇することはなかった。

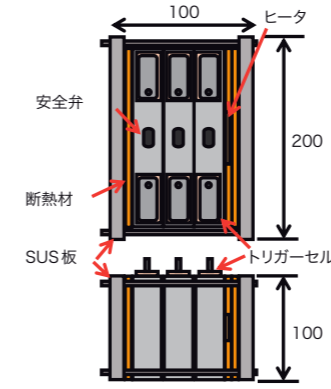
以上から今回の検証では、噴出ガスの影響を受ける環境とそうでない環境で明確に熱連鎖の発生有無に差が生じた。

2.1 模擬電池パックをもちいた実験的検証

熱暴走時のガスによる受熱が熱連鎖におよぼす影響を調べるため、模擬電池パックを作製して検証をおこなった。セルはこれまで同様に25Ah角型リチウムイオン電池をもちいた。これを3つ並べヒータ、断熱材とともにステンレス板で拘束することで簡易的なモジュールを作製した(第7図)。ヒータ加熱により最初に熱暴走させるセルを以降トリガーセルと称する。

試験容器の構造を(第8図)に示す。容器は厚み10mmのステンレス製とし、蓋を設置することで密閉となる構造とした。蓋には安全上の観点からリリースバルブを設置した。モジュールはリリースバルブとは反対側の短辺に沿うように設置した。試験は2水準と

第7図 モジュールの構成



第8図 模擬電池パックの構成

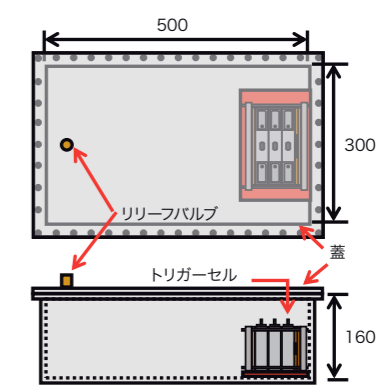
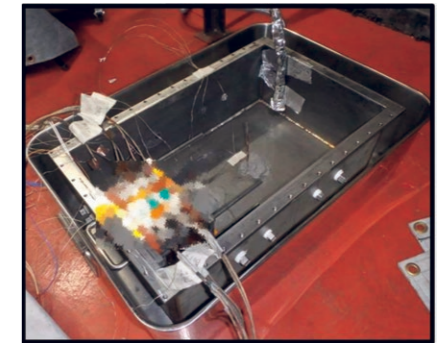


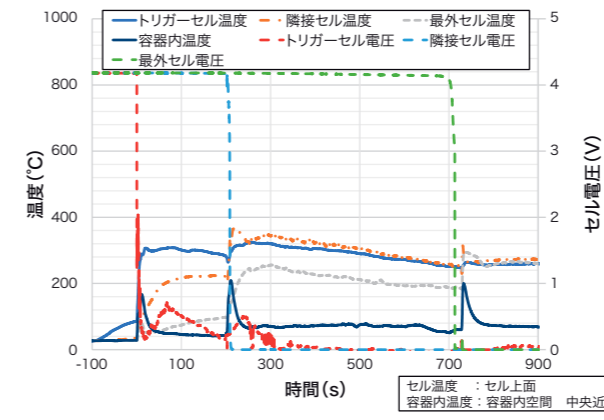
写真2 密閉容器の外観



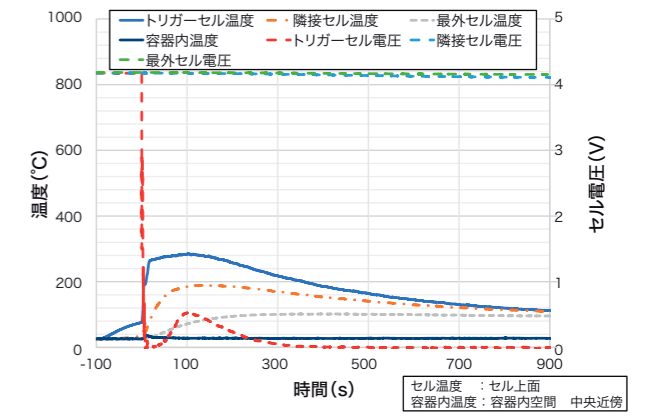
写真3 開放容器の外観



第9図 密閉容器の試験結果



第10図 開放容器の試験結果



本稿では、熱暴走時の流量測定手法の検討ならびに噴出ガスが熱連鎖におよぼす影響を検証した結果について紹介した。噴出ガスから受ける熱影響は無視できるものではなく、熱連鎖試験においては実環境あるいはそれを模擬した環境で評価をおこなうことの重要性が示されたと考えられる。また、開発したガス流量測定手法は、シミュレーションの精度を飛躍的に向上させるものと考えられる。今回の結果をもちいた熱連鎖シミュレーションは、今号の別レポートにて報告する。

参考文献 *1) 小島健一郎：独立行政法人 自動車技術総合機構 交通安全環境研究所 フォーラム2022、交通安全環境研究所におけるバッテリー安全に関する取組、講演7、(2022)
*2) Global Technical Regulation No.20(Electric Vehicle Safety(EVS)), <https://unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29wgs/wp29gen/wp29registry/ECE-TRANS-180a20e.pdf>