

講演 7. 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

自動車安全研究部

※小鹿 健一郎

1. はじめに

国連の自動車基準調和世界フォーラム（WP29）において、電気自動車の安全性に関する世界技術規則（Global technical regulation、以下 GTR）が議論されている。^[1]ここでは、車載バッテリーセルの熱暴走発生を前提とした安全性を評価するための試験法（熱連鎖試験）の策定が話し合われている。本発表では、当研究所のバッテリー安全に関する取り組みとして、WP29 における熱連鎖に関する議論の状況および交通研で実施している研究内容について紹介する。

2. WP29 における議論

2. 1. EVS-IWG の概要

電気自動車の安全に関する作業部会（EVS: Electric Vehicle Safety—Informal Working Group）は 2012 年に衝突安全分科会（GRSP）傘下に設置された。共同スポンサー国である、米国（議長）、中国、欧州（共同議長）、日本（事務局）が会議を主導している。第 1 期（フェーズ 1）は 2 度の会期延長を経て、2018 年に終了し、GTR-20 が 2019 年 3 月に成立した。現在は、第 2 期（フェーズ 2: 会期 2019 年-2023 年 6 月 新型コロナウイルスの世界的な感染拡大のため、当初予定から 18 ヶ月の延長）であり、フェーズ 1 で合意に至らなかった『熱連鎖試験』の扱いを主要な議題として、議論が継続されている。

『熱連鎖』とは、組電池において一部の電池が熱暴走を起こした際に、その熱暴走現象が隣接セルに伝播する現象のことを言う。（GTR-20 において『熱暴走』は、セル内部の発熱反応により起こる制御不能なセルの温度上昇と説明されている。）

2. 2. 熱連鎖の議論におけるフェーズ 1 の結論

フェーズ 1 では、中国が自国で多発する電気自動車の火災への対応として、熱連鎖試験を GTR-20 に導入することを主張したが、合意に至らなかった。試験法導入に反対した米国、欧州、日本の主な主張は次の 2 点であった。①自国の事故発生状況を鑑みると試験法を用いて直ちに規制する必要があるという状況にない。②中国より提案された試験法が、客観性があり、

規制として活用するのに適当であるか、自国の研究機関に熱連鎖試験を実施させ検証する必要がある。

一方で、熱連鎖を原因とする電気自動車火災に対して対応が必要であるという認識が一致したことから、フェーズ 1 では、製造者が文書によってその安全性を説明することを義務付ける『文書化要件』による規制が採用となった。日本国内においては 2023 年 9 月以降に販売される新車から、製造者が熱連鎖に関する安全性についてその対策を文書で説明することが義務付けられた。

2. 3. フェーズ 2 における議論状況

フェーズ 2 では、熱連鎖試験について技術的な議論が活発化している。これは、フェーズ 1 におけるデータ提供国が中国に限られていたのに対し、フェーズ 2 では日本、欧州、米国、カナダなども、車載パッケレベル、車両レベルで熱連鎖試験を行い、その試験データを議論に提供していることによる。

熱連鎖試験の技術面では、熱連鎖における一つ目のセルの熱暴走発生（イニシエーション）をどのように行うか、可否に係する観察対象（爆発、火炎、煙、毒性ガス）を何にするか、どの程度まで許容するか、などいくつかの論点で議論されている。

米国は、熱連鎖試験はまだ客観性に乏しく、自国の事故発生状況を鑑みると試験法を用いて規制する必要があるという状況にないと主張し、熱連鎖試験により規制するよりも、フェーズ 1 で合意された文書化要件を改良（文書化要件において製造者が説明すべき内容を明確化し、より公平かつ客観的なものにする）することを提案している。また米国は、熱連鎖試験以外にもバッテリーの非破壊分析手法^[2]などを活用し、安全性の低下を検知したら警報を出すなどしてユーザーに知らせるなど、熱連鎖試験以外にも問題解決の方法はあると主張している。

3. 当研究所における研究の紹介

ここでは、当研究所の研究として、①レーザイニシエーションを活用した熱連鎖試験に関する検討事例と②モニタリングを活用した電気自動車の安全性向上に関する検討事例を紹介する。

3. 1. レーザイニシエーションを活用した熱連鎖試験に関する検討

3. 1. 1. 検討の背景と明らかにする内容

欧州、米国がフェーズ1終了時に示した『今後検討すべきと考えるイニシエーション方法の候補リスト』にレーザ照射法が含まれていた。しかし、国内自動車メーカーにおいてレーザ照射法の検討事例はなかったため、当研究所において実施することとなった。ヒータ加熱法や釘差し法に比べ、ほとんど情報が無い状態から検討を開始した。そこで表1に示すように、明らかにする内容を設定し、調査を開始した。

表1. レーザ照射法に対して明らかにする内容と実験時の対象バッテリーの規模

検討	明らかにする内容	対象バッテリーの規模
1	イニシエーション方法の原理 (熱暴走のメカニズムの推定)	セル
2	他の手法に比べた場合の特徴	モジュール
3	車載パックレベルでの実施可能性	車載パック

3. 1. 2. 検討を行った内容の概略^{[4][5]}

検討1^[3]は、レーザ照射法の原理を明らかにすることを目的に実施した。具体的な手法としては、レーザ照射から熱暴走に至るメカニズムを、バッテリー構成材料の熱分析、レーザ照射後のバッテリーの解体観察のデータをもとに推定した。推定されたメカニズムは、『レーザ照射された部分、およびその直下が加熱されることにより、セパレータが熱収縮を起こし、内部短絡を発生、その後、熱暴走に至る。』というものであった。これにより、レーザ照射は、加熱法的一种に分類されるイニシエーション方法であり、内部短絡を経て、熱暴走に至ることが明らかとなった。

検討2^[4]は、レーザ照射が、熱連鎖試験に用いられる場合、従来検討されてきた手法に比べてどのような

特徴があるかを明らかにすることを目的として実施した。具体的な手法としては、5セルを一組としたモジュールを用いて熱連鎖試験を行い、ターゲットセルの熱暴走が確認された時点の隣接セルの温度を従来検討されてきたイニシエーション方法である釘差し法とヒータ加熱法と比較した(隣接セルへの熱伝達状況の確認)。レーザ照射を用いた場合の熱暴走発生時の隣接温度の上昇程度は、釘差し法で実施した場合と同程度であった。これにより、レーザ照射法は、隣接セルの温度上昇を抑えた状態で、ターゲットセルを熱暴走させることができることが示された。これは、レーザは加熱法的一种であるが、セラミックヒータなどに比べて、単位面積あたりの出力が大きく、レーザ照射による加熱面積が小さいため、熱暴走が短時間で起こることが理由であると考えられた。

検討3^[5]は、車載パックを対象とした熱連鎖試験に、レーザ照射法が適用できるか確認することを目的として実施した。具体的な手法としては、車載バッテリーパックのカバーケースにレーザ照射用の穴をあけたうえで、熱連鎖試験を実施した。レーザは、照射用の穴を通過し、ターゲットセルに照射され、熱暴走を発生させた。隣接セルはターゲットセルの熱暴走の影響を受けて温度上昇するも、熱暴走には至らなかった。これにより、レーザ照射は、カバーケースに穴あけ加工することで、ターゲットセルを熱暴走することが可能であり、車載バッテリーパックを対象とした熱連鎖試験において、イニシエーション方法として使用できることが確認された。

3. 1. 3. 調査から得られたレーザイニシエーションに関する知見のまとめ

レーザ照射法は、加熱法的一种であり、レーザを照射された部分およびその直下の温度が上がることで、セパレータが熱収縮を起こし、内部短絡を発生する。レーザの照射径が小さく(1mmφ未満)且つ、高出力である(単位面積あたりの出力が大きい)ため、短時間で対象セルを熱暴走させることができる。この特徴により、セラミックヒータなどに比べて、隣接セルの温度上昇(対象セルの熱暴走発生時)を低く抑えることができる。これまで、車載パックへの適用例はなかったが、今回の検討において、車載パック(PHEV用)を対象として、現実的に熱連鎖試験が行えることを実証した。

3. 2. バッテリー安全性モニタリングに向けた検討

3. 2. 1. 検討の背景と明らかにする内容

米国は、バッテリーを対象とした非破壊診断技術を活用し、熱暴走発生前にその可能性を検知し、ドライバーに警報を出すなどして、電気自動車の安全性を高める検討を行っている。^[2] 一方、当研究所では、劣化と安全性の関係に関する調査^[9]を進めており、この知見と非破壊診断技術を組み合わせたバッテリー安全性モニタリングによる電気自動車の安全性向上を検討している(表2)。モニタリングを安全対策として取り入れることの一番の意義は、使用過程の車両にも対応できるということである。(前述の熱連鎖試験は、新車(新品バッテリー)を対象として現在検討されている。)

表2. バッテリー安全性モニタリングに向けた検討において明らかにする内容

検討	明らかにする内容
4	安全性の低下に影響を与えるバッテリー劣化の要因
5	バッテリーの安全性低下事象のラボでの再現可能性
6	使用過程バッテリーのモニタリングによる安全性低下の検知可能性

3. 2. 2. 検討を行った内容の概略^[9]

検討4として、安全性の低下に影響を与えるバッテリー劣化の要因について調査した。現時点で日本では、電気自動車の火災事故の報告例はないので、民生用、定置用のリチウムイオン電池に関する文献を対象に調査を行った。以下にその一例を示す。劣化によりバッテリーの安全性が低下する事例として、リチウム析出により熱暴走を起こしやすくなる事例が報告^[7,8]されており、安全性低下のメカニズムは、低温環境において充放電を繰り返すと、副反応によりリチウム金属が析出し、内部短絡の発生や自己発熱の発生により熱暴走を起こしやすくなるということであった。

検討5^[9]は、バッテリーの安全性低下事象のラボでの再現可能性を確認することを目的に実施された。具体的な手法としては、リチウムイオン電池(セル)を低温環境(1℃)で繰り返し充放電することで劣化セルを作成、劣化セルを対象として熱安定性評価、熱暴走試験、およびセルの分解調査により金属リチウムの析出の確認を行った。熱安定性評価では、劣化セルは新品セルに比べて、より低い温度から自己発熱が発生す

ることが確認された。また、熱暴走試験では、レーザ照射を行った場合、劣化セルは新品に比べて少ないエネルギー投与量で熱暴走に至った。分解調査では、負極上に灰色の金属リチウムが析出していることが確認された。安全性低下を引き起こす劣化の一例であるリチウム析出を伴う劣化サンプルをラボで作成し、評価するプロセスを実施した。

検討6の目的は、使用過程バッテリーのモニタリングによる、安全性低下の検知可能性を確認することであり、2022年度実施中である。具体的な手法として、非破壊診断技術として、充電曲線解析法^[9]を対象セルに適用し、セル内のリチウム析出程度に基づいて、熱暴走に対する安全性の変化を診断する。実際に安全性が低下しているかの判断は、レーザ照射による熱暴走試験を実施し、熱暴走に至るまでに投与したエネルギーをもとに判断することとする。

3. 2. 3. バッテリー安全性モニタリングに関する知見のまとめ

車載のバッテリーをモニタリングしながら、電気自動車の安全性を高めるというコンセプトは非常に有用なものであると現時点で考えている。その理由として、熱連鎖試験は、新車(新品バッテリー)を対象として、評価を行うため、劣化による安全性低下をカバーできないことが挙げられる。劣化したバッテリーに対して、熱連鎖試験を行うこと自体は可能であるが、バッテリーの劣化の程度は、ユーザーの使用状況や使用環境の影響を受けるために一律に規定することは難しいことが予想される。

今後、使用過程にある電気自動車のバッテリーのモニタリング技術を実用化するためには、複数の非破壊分析を組み合わせることで、検出できる事象を増やすことや、想定している事象がリアルワールド(電気自動車のバッテリー)で実際に発生しているか調査することなども重要であると考えている。

4. 今後の取り組みの方向性

当研究所は、電気自動車の安全性確保のために、バッテリー安全に関する取り組みを国交省と連携して進めていく。取り組みの主たる柱は、フィールドデータの調査、WP29における国際議論の主導、安全性向上に資する技術の評価である。フィールドデータの調査では、海外における事例に関する情報を収集、分析、分類等を行うことで、国内で事例が発生した場合に、適切に対応できるように準備する。WP29における国際議論の主導では、文書化要件の改良、客観性の高い試験法の開発と試験法を用いた規制の導入について、米国、欧州、中国をはじめとした締約国と議論を継続する。また、引き続き当研究所職員をテクニカルセクレタリとして派遣し、基準が調和されるように議論をリードする。安全性向上に資する技術の評価では、3.2で記載したモニタリング技術が、電気自動車の安全性を向上する技術として、実用化できる可能性があるか評価を行う。また、米国等と技術的情報交換を行い、熱連鎖試験以外にも安全性を高める方策がないか模索する。

5. おわりに

本発表では、当研究所におけるバッテリー安全に関する取り組みとして、WP29における熱連鎖に関する議論の状況および当研究所における研究内容について紹介した。WP29における議論の状況では、規制のあり方（試験による規制、文書化要件による規制）や、試験法における技術的な課題、米国のモニタリングによる安全確保の取り組みなどについて紹介した。当研究所における研究内容では、レーザイニシエーションを活用した熱連鎖試験について紹介するとともに、今年度から開始したモニタリングを活用した電気自動車の安全性向上に関する検討についても一部説明した。

参考文献

- 1) 国連 UN-ECE EVS ホームページ
<https://wiki.unece.org/pages/viewpage.action?pageId=3178628>
- 2) Tanim, T.R et. al., "Challenges and needs for system-level electrochemical lithium-ion battery management and diagnostics ". MRS Bulletin 46, 2021, Pages 420–428.
- 3) M. Umeda, K. Koshika et.al., "Thermal runaway

characteristics of a LiFePO₄-based lithium-ion secondary battery using the laser-irradiation method", Journal of Energy Storage, Volume 40, 2021,102715.

- 4) Y. Kagei, K. Koshika et.al., "Quantitative Comparison of Thermal Influence among Laser Irradiation and Other Methods for Thermal Runaway of Traction Lithium Ion Battery", International Journal of Automotive Engineering, Volume 13, 2022, Issue 1 Pages 15-20.
- 5) K. Koshika et.al., "Demonstrating Thermal Propagation Test for Battery Pack for PHEV with Laser Irradiation as Initiation Method", International Journal of Automotive Engineering, Volume 13, 2022, Issue 1 Pages 9-14.
- 6) M. Umeda, K. Koshika et.al., "Laser irradiation illuminates uncertain degradation, leading to thermal runaway of 18650 cells charged/discharged at low temperatures", Journal of Power Sources, Volume 542, 2022.
- 7) T. Waldmann et al., "Li plating as unwanted side reaction in commercial Li-ion cells – a review", Journal of Power Sources, Volume 384, 2022., Pages 107–124.
- 8) X. Feng et al., " Influence of aging paths on the thermal runaway features of lithium-ion batteries in accelerating rate calorimetry tests", International Journal of Electrochemical Science, Volume 14, 2019, Pages 44-58.
- 9) 森田 朋和 "充電曲線解析法を用いた組電池のセルバランス・劣化状態ばらつきの推定" 電気化学, Volume 89, 2021, Pages 101-106.