

講演 10. 電気自動車の安全性に関する国際基準調和に向けた取り組み

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 No 20、以下 GTR20) が議論されている¹⁾。ここでは、車載バッテリセルの熱暴走が発生した場合の安全性を評価するための試験法 (熱連鎖試験) が話し合われている。本発表では、当研究所のバッテリ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が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

2012 年、衝突安全分科会 (GRSP) 傘下に、電気自動車の安全に関する作業部会 (EVS: Electric Vehicle Safety – Informal Working Group) が設置された。共同スポンサー国として、米国 (議長)、中国、欧州 (共同議長)、日本 (事務局) がこの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、GTR20 が 2019 年 3 月に成立了。現在は、第 2 期 (フェーズ 2: 会期 2019 年–2026 年 3 月) であり、フェーズ 1 で合意に至らなかった『熱連鎖試験』を主要な議題として継続している。『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と言う。(GTR20 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. 热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 GTR20 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はない。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

2. 3. 1 フェーズ 2 序盤

フェーズ 2 序盤では、熱連鎖試験について技術的な議論が活発化した。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、車載パックレベル、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。

2. 3. 2 フェーズ 2 中盤

フェーズ 2 中盤では、欧州と米国の主張が対立し、EVS-IWG が議論休止となった。欧州は試験データを集積することで、客観性、再現性の高い試験法が策定できると主張したが、米国は、熱連鎖試験によってカバーされるのは、EV 火災の一部の事例でしかないと認め、試験法を追求するよりも、現在の文書化要件を高度化することが重要と主張した。これらの主張の溝は埋まらず、議長が議論の休止を宣言し、熱連鎖試験は、欧州のリードによって SIG-TP (Special interest group for thermal propagation) にて、UNR100 の改定を目標に活動することになった。

2. 3. 3 SIG-TP における議論

SIG-TP では、欧州委員会が準備した試験法ドラフトをもとに、日本、中国、韓国、英国、ドイツ、フランス、スウェーデン、オランダによって議論が進められた。日本が主張したレーザや釘差しといったヒータ以外の熱暴走開始方法の採用や、ハイブリッド車用のバッテリに関しては、バッテリパックレベルの試験を認めるといった要求はすべて盛り込まれ、熱連鎖試験を含む UNR100-05 が 2025 年 3 月に成立した。

2. 3. 4 フェーズ2現在

EVS-IWG はフェーズ 2 の目標を GTR20 amendment1 の策定として定め、2024 年 9 月に議論を再開した。2025 年 3 月の第 29 回会議において、現時点で発行している各国法規（国連規則 UNR100、米国法規 FMVSS、中国法規 GB）を包含する形で GTR20 amendment1 を策定することで合意した。現在、米国とカナダのリードでドラフティング作業が進められている。

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リチウム析出に由来するリチウムイオン電池の熱安定性低下に関する検討と②非破壊診断を用いたバッテリ安全性確保に向けた検討事例を紹介する。

3. 1. リチウム析出に由来するリチウムイオン電池の熱安定性低下に関する検討

3. 1. 1. 検討の背景と明らかにする内容

米国がフェーズ2中盤で指摘したように、UNR100-05 に盛り込まれた熱連鎖試験は EV 火災のすべてをカバーしているわけではない。例えば、UNR100-05 に記載された熱連鎖試験の対象は新品のバッテリであり、使用過程においてバッテリの熱安定性が低下することは考慮されていない。筆者はさらなる電気自動車の安全性確保には、使用過程で起こるとされるリチウム析出と熱安定性低下に関する実験データを集積することが重要と考え、リチウム析出による熱安定性低下の事象をラボレベルで再現することを試み、熱連鎖性能への影響を明らかにした。（表 1）

表 1. リチウム析出と熱安定性低下に関して明らかにする内容

検討	明らかにする内容
1	リチウム析出による熱安定性低下の確認（三元系セル）
2	リチウム析出による熱安定性低下の確認（リン酸鉄系セル）
3	熱安定性低下による熱連鎖性能への影響

3. 1. 2. 検討を行った内容の概略³⁻⁵⁾

検討 1²⁾は、リチウム析出による熱安定性低下を確認することを目的に実施した。具体的な手法としては、市販の円筒形小型セル（三元系正極）を低温環境で充放電を繰り返し、負極に金属リチウムが析出した

サンプルを作成した。金属リチウムが析出したセルにレーザ照射し、熱暴走に至るまでに投与したエネルギーを新品セルと比較することによって熱安定性の変化を評価した。金属リチウムが析出したセルは新品に比べて約 10 分の 1 の投与エネルギーで熱暴走し、リチウム析出による熱安定性低下が確認された。

検討 2³⁾は、リン酸鉄系セルにおいてもリチウム析出による熱安定性低下が起こるか確認する目的で実施した。市販の円筒形小型セル（リン酸鉄系正極）を低温環境で充放電を繰り返し、負極に金属リチウムが析出したサンプルを作成した。レーザ照射による熱暴走試験を実施すると、金属リチウムが析出したセルは新品に比べて半分以下の投与エネルギーで熱暴走し、リン酸鉄系セルにおいてもリチウム析出による熱安定性低下が確認された。

検討 3⁴⁾は、熱安定性が低下したセルの熱連鎖の起りやすさについて調査する目的で実施した。具体的な手法としては、新品セルをレーザにより熱暴走させて、リチウム析出した隣接セルに連鎖させる実験を行った。リチウム析出したセルは、新品に比べて XX 秒早く熱連鎖した。これにより、熱暴走を起こしたセルの隣接セルにリチウム析出があった場合、より短い時間で熱連鎖を起こす可能性（バッテリパック内の燃え広がりが早い可能性）が示された。

3. 1. 3. 調査から得られたリチウム析出に由来するリチウムイオン電池の熱安定性低下に関する知見のまとめ

リチウムイオン電池内の負極に金属リチウムが析出するとセルの熱安定性は低下し、金属リチウムが析出していない場合に比べて、少ないエネルギー投与で熱暴走を起こす。これは、三元系正極セルとリン酸鉄系正極セルのどちらでも起り、特に三元系正極セルでは、少量のリチウム析出発生で、熱安定性が大きく低下した。

熱安定性が低下したセルを含む組電池では、熱連鎖のスピードが速くなると推定され、熱暴走発生時に、客室の安全確保が新品セル（リチウム析出無し）に比べて難しくなるケースが発生しうることが示唆された。

3. 2. 非破壊診断を用いたバッテリ安全性確保に向けた検討

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⁵⁾。一方、当研究所では、前述の通りリチウム析出に由来するリチウムイオン電池の熱安定性低下に関する調査²⁻⁴⁾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安全性モニタリングによる電気自動車の使用過程における安全性の確保に向けた検討を行っている。(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。

表2. 非破壊診断技術を用いた電気自動車の使用過程における安全性の確保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	負極容量維持率を指標とした安全判定の可能性
5	組電池を対象とした不安全電池検出の可能性
6	車両を対象とした非破壊診断の実施とデータサンプリング手法の影響

3. 2. 2. 検討を行った内容の概略⁶⁾

検討4⁶⁾は、充電曲線解析による負極容量維持率を指標とした安全判定の可能性について調査した。具体的な手法としては、複数の条件下で充放電を繰り返し、劣化させたセルを対象に充電曲線解析を行いセルの負極容量維持率を明らかにする。その後、レーザ照射を用いた熱暴走試験を行い、対象セルの熱暴走に至るまでに投与したエネルギーを明らかにし、その関係を分析した。負極容量維持率と熱暴走に至るまでの投与エネルギーの関係を分析したところ、ある負極容量維持率を境に投与エネルギーが大きいグループと小さいグループに分けられた。このことから、負極容量維持率を指標として安全判定ができる可能性が示唆された。

検討5⁷⁾は、組電池を対象とした不安全電池検出の可能性を確認することを目的に実施した。具体的な手法としては、4直列接続リチウムイオン組電池内の1

セルを、リチウム析出したセルに入れ替えた不安全セルを含む組電池を対象に充電曲線解析を実施した。対象組電池の充電曲線を解析したところ、組電池内的一つのセルの負極容量維持率が大きく低下しており、対象組電池が、不安全セルを含む組電池であると判定された。このことから、充電曲線解析は、組電池を対象として不安全な電池の検出が可能であることが示された。

検討6⁸⁾は、車両を対象とした非破壊診断の実施とデータサンプリング手法の影響評価を目的として実施した。具体的には、使用過程の電気自動車を対象に充電曲線解析を実施した。このときデータサンプリング時に、充電器によるデータサンプリングとOBDスキヤンツールによるデータサンプリングを実施し、データサンプリング手法の違いによるバッテリの内部状態推定への影響を明らかにした。この検討では、車両を対象とした検討の第一段階として評価対象をSOHとして実施した。今後、評価対象を安全性にも拡大していく予定である。

3. 2. 3. 非破壊診断を用いたバッテリ安全性確保に向けた検討のまとめ

非破壊診断の一つの手法である充電曲線解析を活用した車載バッテリの安全性確保の検討を行っている。充電曲線解析から得られるセルの内部状態に関する情報のひとつである負極容量維持率に着目することで、セルの熱安定性低下を引き起こすリチウム析出を推定できることをセルレベル、組電池レベルで実証した。現在、車両レベルの実証に向けて取り組んでおり、その第一段階として、データサンプリング手法が推定結果に与える影響について検討を行った。

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している。WP29における国際議論の主導では、米国、欧州、中国をはじめとした協定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引き続き評価を行う。

5. おわりに

本発表では、当研究所におけるバッテリ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、熱連鎖試験を含む UNR100-05 が GTR20 amendment1 に先立って成立した経緯について説明するとともに、フェーズ2の最新の状況について解説した。当研究所における研究内容では、リチウム析出による熱安定性低下の事例と非破壊診断を用いたバッテリ安全性確保に向けた検討事例を過去に発表した論文等を引用しながら紹介した。

参考文献

- 1) UNECE wiki site for EVS-IWG.
<https://wiki.unece.org/display/trans/EVS+30th+session>
- 2) Koshika, K., Tsuruga, H., Honda, K., "Summarizing Relation between Battery Degradation and EV Safety and Evaluating Battery Safety with Laser Irradiation" Proceedings JSAC Congress (Spring), 20235193.
- 3) Koshika, K., Tsuruga, H., Morita, M., Honda, K., "Sensitivity Analysis on Temperature, Charging Condition and Operating SOC Range to Degradation of LFP-type Lithium-ion Battery" Transactions of Society of

Automotive Engineers of Japan, Volume 56 Issue 2 Pages 207-212, 2024, doi: 10.11351/jsaeronbun.56.207.

- 4) 小鹿 健一郎、本多啓三 "レーザ照射法によるダメージセルの安全性低下現象の把握" 第66回電池討論会 2025.
- 5) 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.
- 6) Koshika, K., Tsuruga, H., Morita, M., Honda, K., "Pre-feasibility Study on Detecting Increased Risk of Thermal Runaway for Batteries Using the Charging Curve Analysis as a Non-Destructive Diagnostic Method" Transactions of Society of Automotive Engineers of Japan, Volume 55 Issue 5 Pages 853-858, 2024, doi: 10.11351/jsaeronbun.55.853.
- 7) Koshika, K., Tsuruga, H., Morita, T., Honda, K., "Demonstrating Nondestructive Safety Diagnosis for Lithium-Ion Battery Modules Based on Charging Curve Analysis Data" Proceedings JSAC Congress (Spring), 20255184.
- 8) Koshika, K., Morita, T., ODA, T., Honda, K., "Preliminary demonstration of internal state estimations for batteries in an in-service EV using a nondestructive diagnosis technique" Proceedings JSAC Congress (Fall).