

BRITANNIA LOSS PREVENTION INSIGHT

第1号 // 2021年8月

電気自動車の火災 海運事業者向け概説



筆者紹介



DARREN HOLLING

修士、博士、英国王立化学会フェロー (FRSC)、シンガポール国立化学協会会員 (MSNIC)、英国消防技術者協会准会員 (AIFireE)

Dr J H BURGOYNE & PARTNERS INTERNATIONAL LIMITED パートナー
化学、火災・爆発担当

Holling博士は、Burgoyneのパートナー職として化学事故の調査を専門に行い、火災・爆発の根本原因を研究しています。これまでの事例研究は欧州、アフリカ、アジア、オセアニアで700件以上に上ります。

陸上・海上どちらの事故も研究対象としており、海上事故については、タンカー、ばら積み船、一般貨物船、RORO船、PCC・PCTCでの事故に関する研究実績があります。また、乗用車、トラック、重工業プラントのほか、バッテリー駆動型車両などの特殊自動車を火元とする火災についても研究してきました。大容量バッテリーやバッテリー搭載機器の船積みなど、コンテナ危険貨物に関する研究にも取り組んでいます。

はじめに

電気自動車 (EV) が初めて開発されたのは19世紀のことです¹。20世紀初期にはそれなりの人気を博しましたが、その後は内燃機関 (ICE) 駆動自動車が多まり自動車市場を席巻する状態が今世紀初めまで続きました。EVはスピードや航続距離に限界があり、一晩というかなり長い時間をかけての充電が必要だったことから、主流化のための開発は進まず、NASAのアポロ15号計画での月面車など、特殊装置として主に使われました²。

しかし、特に20世紀中頃から末期にかけて科学が大きな発展を遂げたことで、リチウムイオンバッテリーが開発され、この高度な技術は2019年にノーベル化学賞としても認められました³。今ではエネルギー貯蔵技術の本命として、携帯電気製品に幅広く採用されています。EVもそうした製品の一つです。2022年には世界で約500のEVモデルが生産されるようになるとの予測もあり⁴、この数字は今後数年でさらに増えることが見込まれています。現に、脱ICEの流れが加速していることで、一部の国では早ければ2030年代にICE新車の販売を禁止する法律の導入や、最低でもその検討を進める動きが進んでいます。

¹ 米エネルギー省、『電気自動車の歴史』、2014年9月

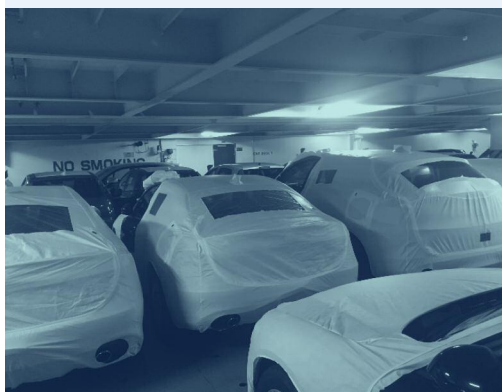
² 米宇宙航空局 - NASAアポロ15号月面計画、1971年7月31日

³ 2019年10月、スウェーデン王立科学アカデミーが「リチウムイオンバッテリー」の開発者にノーベル化学賞を授与

⁴ ブルームバーグNEF、『2020年 電気自動車の展望』



今後EVの普及が見込まれるということは、海上輸送される自動車においてもEVが増加するということです。



PCCにぎっしりと積み込まれた自動車

EVの海上輸送

新しく生産された自動車は陸上や海上経由で輸送されます。こうした車両を世界中に輸送するうえで欠かせない存在となっているのが、自動車専用船(PCC)や自動車・トラック専用船(PCTC)です。

多くの新車を生産地から世界各国の販売市場まで輸送する際には、PCCやPCTCが広く用いられています。また、中古車や旅客車両もPCCやPCTC、RORO船によって各地間で輸送されています。こうした大量の車両を運ぶためには、貨物デッキの積付スペースを最大限確保するべく車両同士の間隔を限りなく詰めて積み込まなければなりません。最大級の専用船であれば、標準サイズの手車を全部で8,000台以上輸送することが可能です。そして、今後EVの普及が見込まれるということは、海上輸送される自動車においてもEVが増加するということです。

⁵ 米運輸省・道路交通安全局、『電気自動車およびプラグインハイブリッド自動車用リチウムイオンバッテリーの安全上の問題』、2017年10月、[リポート番号: DOT HS 812418]

⁶ 米電気化学会ジャーナル、『リチウムイオンバッテリーの耐火性に関するレビュー - メタレビュー: 業界の課題と研究貢献』、2020年、[第67巻、090559]

⁷ www.batteryuniversity.com.

LI-ION +

リチウムイオンセル、リチウムイオンバッテリー

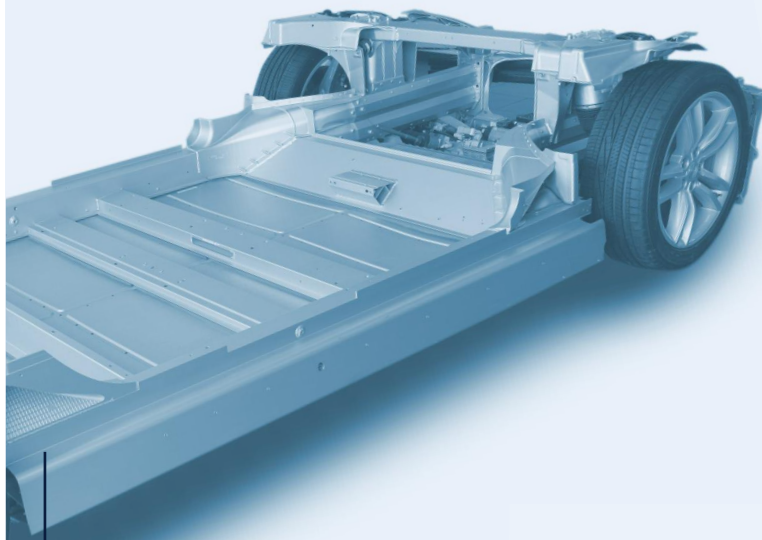
リチウムイオンセル、リチウムイオンバッテリーとは、簡単に申し上げますと、炭素でできた負極、リチウム遷移金属酸化物でできた正極、負極と正極の間に設けたプラスチック製の多孔性膜（いわゆるセパレーター）、そして少量のリチウム塩と共に負極・正極材料が浸かった電解液で構成されたものです⁵。電気エネルギーが発生するのは、放電中に負極・正極間でリチウムイオンが移動することで外付の回路を介して電気が流れるためです。充電中はリチウムイオンの移動方向が放電時と逆になります。

リチウムイオンセルには、ボタン形、円筒形、角形、パウチ形の4つのタイプがあります。ボタン形、円筒形、角形は外装材に硬質の金属缶を用いているのが特徴で、パウチ形はプラスチック製のフィルムを使用しています。EVでは一般的に円筒形かパウチ形のいずれかのセルが使われ、複数のセルが並んでバッテリーモジュールを形成しています。複数のバッテリーモジュールを繋げたものがバッ

テリーパックとなり、それを丈夫なスチール製の外装材に収めることで、道路で使用する際に見込まれる激しい衝撃からリチウムイオンセルを保護しています。

リチウムイオンバッテリーとEVは国の規制対象となっており、その規制内容は多くの場合、国内や海外の安全基準を相互参照して定められています。ただ、こうした基準は統一されているわけではありません。試験パラメーターや合格・不合格基準がそれぞれで大きく異なる場合もあります⁶。さらに、基準に用いられている実験室検査の結果が実際の条件を正確に反映したものであるかどうかという点もよく議論の的になっています。メーカー同士はこれまで統一したバッテリー

システムを採用してきませんでした。そのため、バッテリーパックの設計や組み立て方法にある程度の違いがどうしても出てきてしまいます。例えば、日産リーフの容量30kWhのバッテリーパックはパウチ形のセル192個からなり、それが48個のバッテリーモジュールにグループ化されています。一方、テスラ・モデルSの容量100kWhのバッテリーパックは円筒形のセル8,256個からなり、それが16個のバッテリーモジュールにグループ化されています⁷。



テスラ・モデルSのシャーシ
床下のバッテリーモジュールの場所が見える
© Sylvain Robin | Dreamstime.com



日産リーフの
バッテリー

日産リーフのバッテリーボックスを開いた様子
充電可能なセルが見える
© Svyatoslav Lypynskyy | Dreamstime.com



最近の車両は
可燃性の部品を
多く使用するよう
になっています

車両火災

ICE車の火災の原因として特に多いのは、燃料漏れ、機械の損傷、擦過・摩擦、電気系統の故障です。

ICE車の生産メーカーでは、生産車両の中に火災を引き起こすおそれのある欠陥部品が見つかった場合に修理やリコール通知を出しています。EVの生産メーカーも同様で、この数年、リチウムイオンのバッテリーパックに問題があり熱破損のおそれがあるとして、世界大手のメーカー数社がさまざまなリコール通知を出してきました。ワイヤーハーネスを伝ってバッテリーパックに水が入り込む、金属異物に起因するバッテリー製造上の問題が発生したなどがその例です⁸。

車両火災は運転中のほか、充電中やアイドリング中、停車中や確実に電源を落としている際にも起こる可能性があります。幸い、そこまで頻度の高い事象ではありませんが、それでも陸上ではこれまでに、駐車中の車両が数十台、数百台、ときには数千台も巻き込まれる大火災が数多く発生している^{9, 10}。ほか、PCCやPCTC、RORO船での輸送中にも発生しています^{11, 12}。こうした火災は物的損害や経営損失、環境汚染を引き起こし、人命も奪うなど、多大なる被害を生み出してきました。そこで、今後同様の事故が起きる可能性を減らすべく、原因の詳細な把握に努めるためにこれらの事故や関係車両の調査が行われてきました^{13, 14, 15}。

多層式駐車場の中と多層デッキを有する船舶の中とでは火災の発生の仕方は明らかに違うものの、共通点もいくつかあります。車両が密接している、天井が低い、車両の上に別のデッキがある、などです。これらの点は延焼の仕方を考える際にとっても重要な要素となります。もう一つ重要なのは、最近の車両がプラスチックの外装材など可燃性の部品を多く使用するようになってきているという点です。こうした部品がさらなる燃料となり、比較的簡単に発火してしまうおそれがあるのです。

港内で出火したPCC © Jacksonville Fire and Rescue Department



船内でのEV火災についての調査

日本郵船株式会社(NYK)は先頃、一般財団法人海上災害防止センター(MDPC)およびブリタニヤP&Iクラブと共同でPCC、PCTC、RORO船内でのEV火災の消火活動について研究するため、ある調査を行いました¹⁶。このプロジェクトの一環として行われたのが、日産リーフを用いてのEVの実物大火災実験です。実験の結果、EV

のバッテリーパックに火がついて熱暴走が始まると、火は10分も経たずに車体下面からホイールアーチのプラスチック外装、そして燃えやすい他の箇所へと広がり、熱暴走が始まってから15分もすれば隣の車両に延焼する可能性が高まることが分かりました[写真1、2]。

もちろん、事故ごとのさまざまな要素によって延焼速度は変わってきます。燃焼実験では、車両1台が発火すると、その車両に正面を向ける形で停まっているすぐ隣の車両に延焼するまでに5分もかからないことが分かりました¹³。車両の横幅分より少しだけ広く離して平行に停まっている場合は、出火元の車両から2台目に延焼するまでは10~20分程かかりますが、その後3台目以降への延焼速度はかなり速くなるという結果も出ています¹³。車両スタッカーなどを使って車両が上下に積まれ、それぞれの間隔が50センチメートル以下になっている場合は、1段目の車両から出た火は2段目の車両のタイヤやホイールアーチ下部のプラスチック外装に着火し、出火から5分強で燃え広がる可能性があります¹³。

実験ではスプリンクラー装置を使用し、複数あるスプリンクラーのうち最初の1台は出火から4

分以内に作動しました¹³。ただ、出火元の車両内部の火を消し止めるにはこれだけでは不十分で、消防士の手によって消し止められるまで1時間ほど燃え続けました。

リチウムイオンバッテリーパックから出た火が車両下面から後輪のホイールアーチに延焼している。
NYKより許可を受けて転載



リチウムイオンバッテリーパックから出た火が、ホイールアーチと車両前部の格納コンパートメントに延焼している。
NYKより許可を受けて転載

⁸ 英国ウェブサイトポータル: www.check-vehicle-recalls.service.gov.uk/recall-type/vehicle/make.

⁹ 英国マージーサイド消防局、『「キングス・ドック駐車場火災」消火活動報告書』、2018年4月

¹⁰ RISEスウェーデン国研究機構、『2020年1月7日 スタヴァンゲル空港駐車場火災の評価』、[RISEレポート番号: 2020:91]

¹¹ DNV GL、『ROROデッキでの火災』、2005年4月、[文書番号: 2005-P018]

¹² DNV GL、『ROROデッキでの火災』、2016年4月、[文書番号: 2016-P012]

¹³ 英国コミュニティ地方政府省、『駐車場での延焼』、2010年12月、[BREレポート番号: BD2552]

¹⁴ スウェーデン国立試験研究所(SP)、『船内カーデッキでの模擬火災実験』、2002年、[SPレポート: 2002:05]

¹⁵ エナジーズ誌、『火災車両による延焼の特徴および放熱率に関する大規模熱量計を使用した実験研究』、2019年4月、[第12巻、1465]

¹⁶ 海上災害防止センター、『自動車運搬船のための見て解る消火活動』、2021年3月

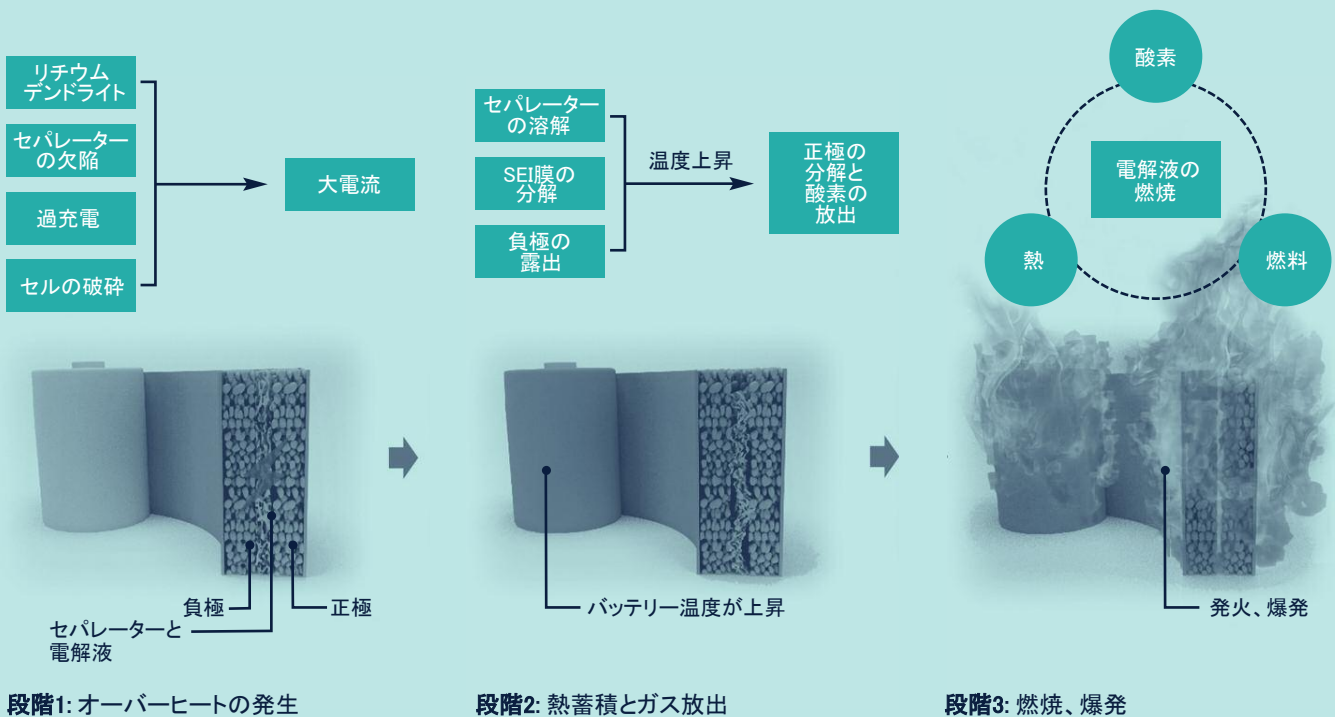
スプリンクラー装置では、車両の保護されている部分(車内など)の消火はできませんでしたが、隣接する車両への延焼はきちんと防ぐことができ、それ以上の延焼をうまく抑えつつ、消防士による消火活動の時間を稼ぐことができました。

PCGやPCTC、RORO船で車両火災が発生した場合、船内にはラッシング用の穴が開いたデッキに車両がぎっしり積まれており、それらが同じ火災区画内にあるため、出火元の車両からその周囲の車両に向けて上下左右に火が急速に燃え広がると、車両1台の火災がたちまち深刻な事故になってしまうおそれがあります。そのため、火災の早期発見と鎮火が何よりも重要になってきます。

EV火災の原因

多くのEVを巻き込んだ火災を調査してきたところ¹⁷、火災の原因として多く見られたのがバッテリーパックの損傷でした。リチウムイオンのバッテリーパックが損傷すると、熱暴走によって最後は破局的な故障が引き起こされます。EVのバッテリーパックの損傷を引き起こすメカニズムには次のようなものがあります。一つは、バッテリーパックの充電・放電中に生じる熱応力です。そのほかには、極度な環境温度、水の侵入や多湿、激しい衝突(おそらく荒天によって貨物が大きく移動したことが原因)の際に機械が受けた衝撃、過度な放電、設計・生産上の欠陥なども挙げられます。熱暴走は、セルやバッテリー内で発生した熱量が周囲環境への放熱可能量を上回ることによって発生し、温度上昇を引き起こす現象です。

事故に至る段階





EV火災の主な原因であるバッテリーパックの損傷が起きると熱暴走によって最後は破局的な故障を引き起こされます

個々のセルの中で誘発された熱暴走の事象を調べたところ、発熱による障害には複数の段階があり¹⁸、影響を受けるバッテリー内部の部品も温度変化とともに変わってくるのが分かりました。第1段階である分解は温度が約80～90℃になると負極で始まり、約180℃になると電解液を巻き込んださらなる分解反応が正極で発生し、障害の起きたセルの温度が急速に上がります。基本的には、熱暴走が一度始まるとプラスチック製のフィルムセパレーターが劣化してしまうため、このセパレーターで意図的に離してあった負極と正極の材料が直に接触するとほぼ同時に、発熱による電気化学反応（ショート）が発生します^{19, 20, 21, 22, 23}。

リチウムイオンバッテリーの技術にはメリットもあるものの、大規模かつ破局的な故障が起こるといふ悪評価もつきまとうようになりました。その理由の一つとして挙げられるのが、リチウムイオンセルやバッテリーで現在使われている電解液が基本的に1種類以上のアルキル炭酸エステルで作られているという点です^{24, 25}。アルキル炭酸エステルは、可燃性または高可燃性物質に分類される、ないしは温度が上がると燃えやすくなる、可燃性の物質です。電解液の量がバッテリーの全質量のおよそ10～16%だとすると²⁶、パウチ形のリチウムイオンセル150キログラムで構成されるバッテリーパックには、およそ15～24キログラムの可燃性電解液が含まれているといえます。新しいセルでは、そのうちの少量が余分な電解液として存在している場合もあります²⁷。

EV新車の場合、バッテリーパックは約75%の充電（つまり電気化学エネルギーが蓄えられた）状態で出荷されると見込まれます。例えば、容量30kWhのバッテリーでは約22kWh（81メガジュール）のエネルギーが蓄えられているということです。さらに、現在のEVバッテリーパックの設計では、中に含まれる可燃性電解液が燃焼によって推定200～400メガジュールのエネルギーを発する可能性もあります。一方、ICE新車の出荷時に各タンクに入っている燃料は通常おそらく5リットルほどと、タンクの容量からするとわずかなため、液体燃料が燃焼した場合のエネルギー量は約170～200メガジュールとなります。

¹⁷ ファイヤー・テクノロジー誌、『電気自動車のバッテリー火災の概要』、2020年、[第56巻、1361から1410]、およびその正誤表 / ファイヤー・テクノロジー誌、『修正版：電気自動車のバッテリー火災の概要』、2020年、[第43巻、1411]

¹⁸ パワーソース誌、『熱濫用された高性能リチウムイオンセルの診断試験』、2006年、[第161巻、648から657]

¹⁹ ナイチャー・コミュニケーションズ誌、『リチウムイオンバッテリーの熱暴走中のインオペランド高速トモグラフィ』、2015年、[第6巻、6924]

²⁰ 英国王立化学会、『過充電により熱暴走中のリチウムイオンバッテリー材料の研究：オペランド・マルチスケールX線CT調査』、2016年、[第18巻、30912から30919]

²¹ 米電気化学会ジャーナル、『リチウムイオンセルへの釘刺しによる内部温度と構造エネルギーの追跡』、2017年、[第164巻、A3285からA3291]

²² パワーソース誌、『リチウムイオンバッテリーの釘刺し試験中に発生する熱暴走による内部状態の直接観察』、2018年、[第393巻、67-74]

²³ 米電気化学会ジャーナル、『レビュー - リチウムイオンバッテリーの熱安全管理：現在の問題と今後の展望』、2020年、[第167巻、140516]

²⁴ 米電気化学会インターフェース誌、『電解液がバッテリーの安全性に与える影響』、2012年夏

²⁵ 米電気化学会ジャーナル、『リチウムイオンバッテリーの電解液の燃焼性：引火点と自消時間の測定』、2015年、[第162巻、A3084]

²⁶ (英国王立化学会アドバンス誌、『金属酸化物およびオリビン型正極を使用した民生用リチウムイオンバッテリーの熱暴走実験』、2014年、[第4巻、3633]

²⁷ 米電気化学会ジャーナル、『業務用大型プリズム型リチウムイオンバッテリーセルの自由電解液の量』、2019年、[第166巻、A779]



そのため、EV新車のバッテリーパックに蓄えられている総エネルギー量は、ICE新車の燃料タンクに通常蓄えられているエネルギー量よりもかなり多く、PCCやPCTC、RORO船の最大積載可能台数まで車両を積んだ場合、その差は何百倍、何千倍にもなります。

ICE車の燃料タンクが火災に巻き込まれた場合はたいてい燃料漏れが起き、少なくとも瞬間的に火の勢いが増します。また、火の付いた燃料が流れ出るため、出火元の車両からさらに横方向や下方向に延焼する可能性もかなり高くなります。一方、EVの充電済みバッテリーパックが火災に巻き込まれた場合は、まず少なくともセルの1つに障害が発生し、そこから派生するようにバッテリーパック全体でバッテリーモジュールに障害が発生することによって^{28, 29}、火の勢いが急速に増していきます。障害が発生したバッテリーセルからは中に蓄えられていた電気化学エネルギーが放出され、それによってバッテリー材料の温度が数百度まで上がります。さらに、この熱によって電解液の蒸発や沸騰、分解が非常に高い確率で起こり、最終的には熱暴走によってセルが破裂する事態になります。水素、メタン、エタン、エチレン、一酸化炭素、二酸化炭素³⁰などの気化物質やガス、揮発性の分解生成物は、EV周囲の局所環境に放出されます。気化物質やガスが引火範囲にある場合、しかもそこに発火源がある場合は、猛烈な火災につながりかねません。SNSでもこうした火災の映像をよく目にします^{31, 32, 33}。

障害の発生したバッテリーパックで放電が起きると、ガスや気化物質が放出されて有力な引火源となります。一方、バッテリー内の物質が熱されてその温度が発火点を上回ると、物質が空気に触れた途端に自然発火します。ガスや気化物質が放出された場合は、激しい炎が燃え上がることの方がどちらかと言えば多いのですが、仮に発火前からガスや気化物質が局所的に引火範囲に溜まっていた場合は、爆燃(爆発)も起こりかねません³⁴。いずれにしても、こうした事態になると、隣接した車両に延焼する可能性があります。しかも、この大惨事の最中に酸素ガスが発生すると、それがたとえ少量であっても、火の勢いをさらに激しくしてしまうおそれもあるのです。

²⁸ 米電気化学会ジャーナル、『リチウムイオンバッテリーモジュールの熱暴走と伝播の実験分析』、2015年、[第162巻、A1905 - A1915]

²⁹ パワーソース誌、『リチウムイオンセル18650個を並べた状態での派生障害に関する実験研究: 正極化学の影響』、2020年、[第446巻、227347]

³⁰ DNV GL、『リチウムイオンバッテリーの爆発リスクと鎮火に関するテクニカルリファレンス』、2019年11月、[リポート番号: 2019-1025, Rev. 4]

³¹ <https://www.youtube.com/watch?v=sAQLLu5ttOk>

³² <https://www.youtube.com/watch?v=Le6KNI9YsH0>

³³ <https://www.scmp.com/video/china/3136069/electric-bus-bursts-flames-sets-nearby-vehicles-fire-china>;
https://www.youtube.com/watch?v=T71cVhxG_v4&t

³⁴ 米国サンディア国立研究所、『リチウムイオンバッテリーのバントガスによる爆発の危険』、2019年、[リポート番号: SAD2019-6428J]

EV火災はICE車火災とは別物か？

EVに関しては当初、火災に巻き込まれた場合の火の回り方がICE車と同じなのか、それとも違うのか、ということが懸念事項として挙がりました。これは当然と言えば当然のことです。これに関して、EVとICE車を用いて実物大火災実験を行ったところ、どちらの車も車内から発生した火は比較的同じような回り方をしました^{35,36}。しかし、ICE車のタンクに入っている燃料とEVのバッテリーパックに関しては、火の回り方が異なってくるため、EV火災にうまく安全に対処するためには、EV火災専用の消火活動を取り入れる必要があります。

EV火災の消火活動

EVの人気の高まり、今後はICE車に代わってこちらのタイプが自動車市場の中心になるであろうことを受けて、EV火災についての対応

者の教育や認識、経験の不足を補うため、一次対応者と二次対応者向けのプロトコルの策定が既に進められています^{37,38,39}。

これらのプロトコルの目的は、高圧回路などの新たな危険に対する認識を向上させ、EVの衝突・火災事故や事故後の処理に対応する者が直面するリスクを明確にすることです。

NYKのプロジェクトを受け、MDPCは先頃、EV火災などカーデッキで車両火災が発生した場合の一次・二次対応者による消火方法や注意事項を定めたガイドラインを発表しました¹⁶。この中では、同じデッキから火元に直接近づることができる場合や、上下のデッキからでない直接近づけない場合を想定した消火方法を紹介しています。また、車両火災では噴霧器やピアシングノズルを使った人力消火が大きな効果を発揮することも記載しています。

MDPCが先頃行った実験では、水噴射器（アプリケーションノズル）をうまく使うと素早く消火できることが分かりました[写真3、4]

一次対応者による水噴射器（アプリケーションノズル）を使った鎮火の様子。
NYKより許可を受けて転載



3



4

消防隊が水噴射器（アプリケーションノズル）を使って複数方向から鎮火する様子。
NYKより許可を受けて転載

³⁵ 第2回車両火災国際会議、『実物大火災実験での電気自動車とガソリン車の火の回り方の比較』、2012年9月

³⁶ 第2回車両火災国際会議、『電気自動車と内燃機関車の火災後の比較』、2012年9月

³⁷ 全米防火協会、『代替燃料車に関する安全訓練 - ハイブリッド車・電気自動車モジュール - 学生用マニュアル』2018(全米防火協会、『緊急時フィールドガイド - ハイブリッド車、電気自動車、燃料電池車、ガス燃料車』、2018年)

³⁸ 米国家運輸安全委員会、『電気自動車のリチウムイオンバッテリー火災に伴う緊急対応者の安全上のリスク』、2020年11月、[リポート番号: NTSB/SR-20/011]

³⁹ 米国自動車技術会、『陸上車両用推奨規格 - ハイブリッド車および電気自動車一次・二次対応者向け推奨規格』、2019年7月、[リポート番号: J2990]



火災が起きた際、一次対応者が特に注意しなければならないのが、火災車両がICE車かEVかという点です。

火災車両の種類を確認する

火災が起きた際に一次対応者が特に注意しなければならないのが、火災車両がICE車かEVかという点です。現在、一次対応者向けのアドバイスは、代替車(EV)でないことが明らかな場合を除き、EVに対応することを想定した内容となっています。新車を輸送する船舶の場合は、船積みの前や最中に提供される貨物情報をもとに車両の種類や情報をすぐに把握できるため、ICE車かEVかの確認は比較的簡単といえるでしょう。問題は、乗客とその車両と一緒に運ぶRORO船や、中古車を運ぶPCCやPCTCの場合です。なぜならICE車とEVが混在している可能性が高いからです。マフラーの有無で見分けるという方法もありますが、それでもハイブリッド車である可能性は排除できません。

車両の固定・無力化

対象車両が半EVや完全EVであることが確認できたら、次は、その車両の固定と、可能であれば無力化を試みます。PCCやPCTCに積み込まれているEVは通常、ラッシング用の合成繊維ストラップが火災で既に劣化していない限りはデッキに固定されているはずで、火が車両のどこから出ているのか、一次対応者が現場に到着した際に隣の車両にまで延焼しているのかによって、消火活動の方法は大きく変わってきます。ただ、現在標準となっている水やその他一般的な消火剤を用いた車両消火用装置や消火作戦も引き続き利用できることはぜひ覚えておいてください⁴⁰。

感電リスク

EV火災が発生した際に一次対応者が新たな危険として警戒しなければならないのが高圧回路です。主要なハイヤーハーネスなどの高圧部品にうっかり触れてしまう可能性があるような道具は使わないでください。バッテリーパックの外装ケースに無理に道具を入れることも厳禁です。怪我をすることがあります。ケーブルを切断する際は、各EV車種の緊急時マニュアルを参照して、該当する指示やガイダンスがないか事前に確認してください。PCCやPCTCでEV新車を輸送する場合は、船積み前にあらかじめ自動車メーカーから簡易マニュアルなどが提供されるか、本船上ですぐにマニュアルを入手できるような形が取られるはずで、一方、旅客車両や中古車を輸送する場合は、メーカーのマニュアルを入手することは難しいかもしれません。ただ、こうした問題が起こることを見越して、船内にあらかじめマニュアルをデータベースとしてまとめておくか、荷主にマニュアルを前もって提供してもらうようお願いしておくことは、それなりのメリットがあるでしょう。

⁴⁰ エナジー誌、『リチウムイオンバッテリー鎮火の概要』、2020年、[第13巻、5117]

バッテリーケース

EVのバッテリーは、バッテリーパックに水がすぐに入り込まないよう丈夫なスチールケースで覆われているため、EVのメインバッテリーパックが火災に巻き込まれると消火は非常に難しくなり、障害の起きたリチウムイオンセルを冷やすのも大変になります。バッテリーパックの外からしか冷却できない場合は、鎮火やバッテリー冷却にかかる時間が長くなり、数十分どころか数時間かかる可能性もあります。大量の水も必要になるでしょう。冷却をやめるのが早すぎてバッテリーパックの内部が熱いままだと、中から煙霧や煙が発生し続けて、こうした中に含まれる揮発性物質に再び引火するおそれもあります。

バッテリーパックから出る炎はなかなか消えない。
NYKより許可を受けて転載



消火後の問題

いったん火が消えても、分解中のリチウムイオンバッテリーパックから爆発性や毒性の雰囲気形成される可能性がまだ残っているため、バッテリーパックの取り扱いや事後処理には注意が必要です。EVのバッテリーパックは、損傷したセルにまだ充電が残っていると、最初の火災が消し止められたように見えても、それから数時間や数日、ときには数週間も経ってから大惨事を引き起こすという危険をなおももたらすのです。PCCやPCTC、RORO船で固定式の泡消火剤や二酸化炭素の供給量が限られているような場合や、最初の火災でそれらを使い切ってしまうような場合、こうした危険は大きな問題となり、仮にまた火災や爆発が起きれば適切な対処ができないおそれがあります。



車内の火が消えた後も、リチウムイオンバッテリーパックからは煙霧が出続けている。
NYKより許可を受けて転載

から気化物質やガス、分解生成物が出て結局また発火してしまうのです。

MDPCが先頃行った実験でも、バッテリーパックの消火は難しく、車内の火が消えた後も熱を持ったままであることが分かりました[写真5、6]。既に発表されている他の実験でも同様の結果が出ています³⁸。バッテリーモジュールへの放水をやめても、そこ



7

燃えたEVのオーバーホール中にバッテリーパックに放水をする消防士
 NYKより許可を受けて転載

車内にある安全ベントプラグからバッテリーパックに水を注入できたのは、300°C以上あったパックの温度を50°C以下までうまく冷却できてからのことでした[写真7]。MDPCが実験の際に記録した温度データ[図1]を見るとよく分かりますが、バッテリーパックへの放水をやめると、バッテリー内部の温度はまたすぐに約100°Cまで上がり、そこで横ばいになります。このデータから、放水した水が蒸発することで温度上昇が抑えられていたであろうこと、また、バッテリーに蓄えられている電気化学エネルギーが熱として放出されきるまで、一定間隔で放水を続ける必要があることが分かります。リチウムイオンバッテリーパックは中の部品を直接冷却することが難しいため、いつまでも熱を保つことができるという点が消火活動の主な懸念事項になるのは間違いありません。複数のバッテリーパックが火災に巻き込まれて大火事になった場合は特にそうです。

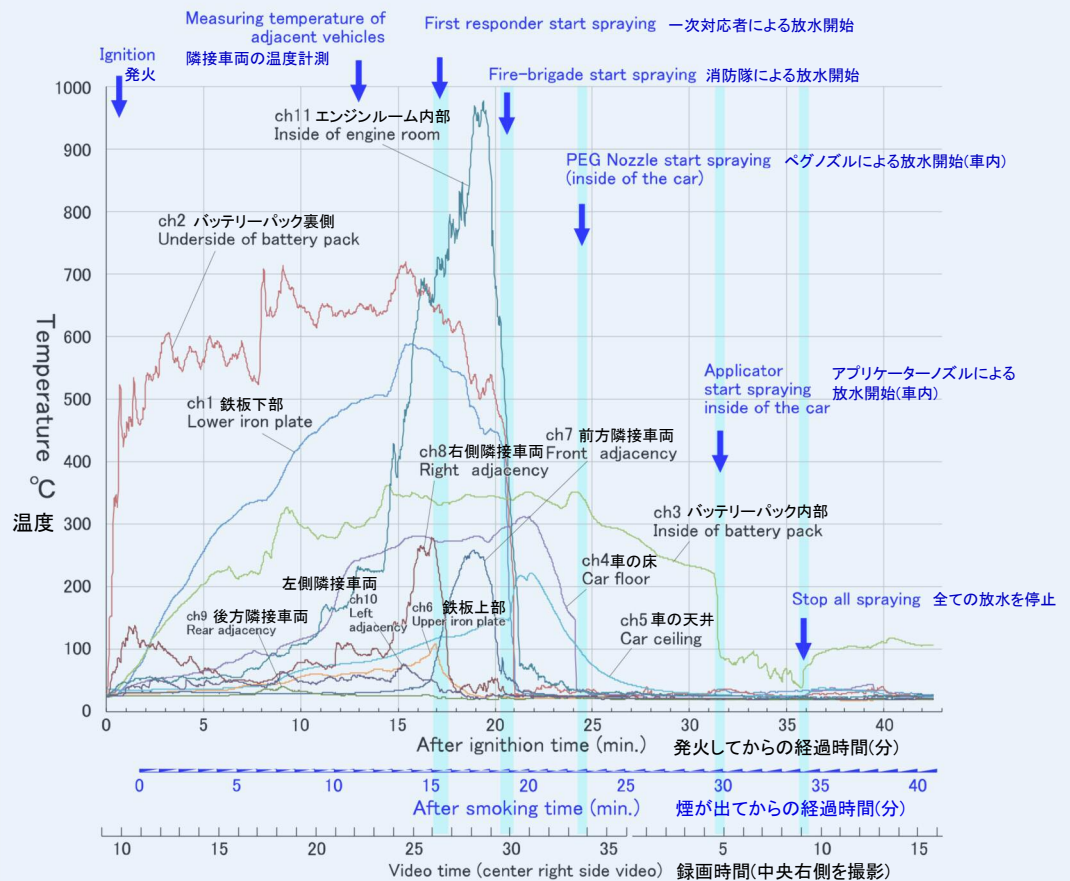


図1: 実物大の燃焼・消火実験中に記録した温度データ

NYKより許可を得て転載



バッテリーの
長寿命化と
EV人気の
高まりによって、
新たに多くの
危険とリスクが
生まれています。

リスクを軽減する新しい流れ

バッテリーの長寿命化とEV人気の高まりによって、新たに多くの危険とリスクが生まれています。ただ一方で、こうした発展は、PCC、PCTC、RORO船での火災リスクを減らす有望な機会ももたらしてくれます。その例を以下にご紹介します。

バッテリー技術

バッテリー技術が向上すれば、いずれはバッテリー火災のリスクを軽減できると考えられています。バッテリーの設計・組み立て・材料の改良^{41, 42, 43}や、バッテリー内部の温度状況を監視するセンサーの設置⁴⁴のほか、バッテリーの化学的性質の調整^{45, 46}や抜本的な変更⁴⁷といったものさえもすべて、破局的な故障が起きる可能性を減らしてくれる可能性があります。また、可燃性のアルキル炭酸エステル電解液を不燃性のものに替えれば^{48, 49}、大火災に至るような破局的な故障が起きる可能性を軽減できるでしょう。

実験と規則

技術の向上に加えて、より厳格な世界共通の規制基準を設けることや、商品化前の実験プロトコルを改善することも、EVバッテリーの火災リスク軽減に役立つと考えられています。

火災検知

火災検知に関する既存の技術や新しい技術をPCCやPCTC、RORO船に導入すれば、火災を早期に検知できるようになるはずですが、早期に検知できるということは火災事故において非常に大きな強みで、手に負えなくなる前に鎮火が可能になります⁵⁰。例えば、サーマルカメラや一酸化炭素ガス検知器を使えば、火災を早期に検知し、判断ができるようになるはずですが、ただ現時点では、ICE車とEVと一緒に輸送する船にこうした技術を搭載することはできません。ICE車の排気装置から出るガスによって、実際は火災が発生していないときでもカメラやセンサーが反応してしまうおそれがあるからです。もちろん輸送車がすべてEVのみになれば、こうした新しい技術を搭載することも可能になるでしょう。

⁴¹ アイ・サイエンス誌、『リチウムイオンバッテリー生産の現在と未来』、2021年、[第24巻、102332]

⁴² セル・レポート・フィジカル・サイエンス誌2、『ポリマー基質集電体によるリチウムイオンバッテリーの熱暴走の防止』、2021年3月、[100360]

⁴³ サイエンス・アドバンス誌、『リチウムイオンバッテリーの安全確保に適した材料』、2018年、[第4巻、eaas9820]

⁴⁴ ネイチャー・サイエンティフィック・レポート誌、『リチウムイオンバッテリー内部の早期検知・予測・予防による熱安全管理』、2019年9月

⁴⁵ 米化学会エネルギー・レター誌、『ナトリウムイオンバッテリーとリチウムイオンバッテリーの類似点とは？』、2020年、[第5巻、3544-3547]

⁴⁶ 米化学会ケミカル・レビュー誌、『電気自動車およびグリッドの脱炭素化用の「リチウムイオンを凌駕する」次世代バッテリーの将来性と課題』、2021年、[第121巻、1623-1669]

⁴⁷ パワーソース誌、『次世代バッテリー用の有機電極材料と技術に関する展望』、2021年、[第482巻、228814]

⁴⁸ 米電気化学会ジャーナル、『不燃性無機電解液のリチウムイオンバッテリー』、2020年、[第167巻、070521]

⁴⁹ バッテリー誌、『リチウムイオンバッテリーの安全性を向上させる不燃性電解液の近年の進化』、2019年、[第5巻、19]

⁵⁰ ビューローベリタス、RISE、ステナ、『「防火II」WP1 - WP4リポートシリーズ』、2018年12月

消火技術

現在、火災が起きた際は、固定式の二酸化炭素装置や水泡消火装置をメインに使いつつ、ホースやランスから海水を放水するという昔ながらの方法で補いながら鎮火・消火を行っています。こうした消火方法は緊急事態が起きてからでないと対応できないため受動的といえ、この段階では既に手遅れになっているかもしれません。一方、歴史的建造物や機密施設、コンピューターサーバー施設、重要な価値のある施設では、建物を火災から守るため、窒素ガス発生装置や不活性ケミカルタンクを使って低酸素環境⁵¹を作り出すことで空間を保護するといった、能動的な鎮火方法を採用するところが増えてきています。こうした方法はあらゆる種類の船舶に導入が可能で、現在一般的となっている二酸化炭素や水泡・水による受動型の消火を補ってくれるでしょう。この窒素濃度を高めた低酸素環境の利点は、鎮火媒体が空中で常時作られるという点です。

この他に、燃えている車両に大きなファイヤーブランケットを被せるという鎮火方法もあります。ブランケットを被せることで、炎を閉じ込めて空気を遮断して火を消す、もしくは、そこまでは難しくてもせめて消火用の水が届くまでは火の勢いを抑えるといったことが可能になるのです。この技術は、従来の車両火災⁵²やEV火災⁵³でも既にその効果が見事に実証されています。PCCやPCTC、RORO船で使用するにはおそらく調整が必要ですが、船内での使用にも向いていると評価されれば、すぐに導入可能な消火策として活用できるようになるかもしれません。また、さらなる研究や開発が進めば、その恩恵を受けることができるでしょう。

消火後の危険

一度火が消えた後も損傷したEVは丁寧に扱わなければなりません。ご存じのように、損傷したリチウムイオンバッテリーは最初の火が消えてから数時間、数日、ときには数週間も経ってから再び発火することがあるため、車両を陸揚げするまで船は引き続き危険にさらされているのです。二酸化炭素や水泡がもう尽きてしまっている状況でこうした2度目の火災が起きれば、船にとって大惨事になりかねません。やはりここでも、船内で低酸素環境を自由に作り出せるようにしておいたり、車両サイズのコピーファイヤーブランケットを用意したりしておけば、消火後の対応にも効果を発揮するでしょう。

51 全米防火協会研究財団、『倉庫貯蔵向け酸素低減装置の概要』、2018年11月

52 韓国火災消防学会、『車両火災へのファイヤーブランケットの使用』、2021年、[Volume 35, 143-149]
www.youtube.com/watch?v=L4wwBo1irFo&t; www.youtube.com/watch?v=SJnLTvvYUWE

53 サラゴサ車両研究センター誌、『車両火災の消火・防止のためのイノベーション試験』、[第83巻, 26-29]、2020年3月
www.youtube.com/watch?v=yO8cVW0zcg&t

PCC、PCTC、RORO船では今後、EVの輸送が大半を占めると考えられています。



終わりに

PCC、PCTC、RORO船では今後、EVの輸送が大半を占めるようになると考えられています。ただ、EVの受け入れが急速に進めば、船や船員の安全に影響を及ぼすさまざまな危険やリスクが発生することになります。バッテリー技術の向上も見込まれてはいますが、それだけでは火災リスクを完全に取り除くことはできません。そのため、これらの船における火災検知や鎮火・消火に関する戦略や作戦は、新しい技術を同時並行で開発していきながら発展させていく必要があります。

免責事項: 本文書に記載の見解は筆者個人の見解であり、Britannia Steam Ship Insurance Association Limited 2021、Dr J H Burgoyne & Partners(International)Ltdおよびその系列グループ会社の見解を必ずしも反映したものではありません。筆者は本文書の内容の正確性を保証せず、一切の責任を負いません。本文書に記載の見解はあくまで意見であり、読者が取るべき行動に関するガイドラインや推奨事項を定めたものではありません。



TR(E)

MANAGERS:
TINDALL RILEY EUROPE SÀRL

Registered Office:
42 - 44 avenue de la Gare, L-1610 Luxembourg.

AGENTS FOR THE MANAGERS:
TINDALL RILEY (BRITANNIA) LIMITED

Regis House, 45 King William Street, London EC4R 9AN.
T: +44 (0) 20 7407 3588 | F: +44 (0) 20 7403 3942

THE BRITANNIA STEAM SHIP INSURANCE ASSOCIATION EUROPE UK BRANCH

健全性監督機構の認可を受けたものとみなされ、金融行為規制機構の規制および健全性監督機構の限定規制下にあります。

Britannia Steam Ship Insurance Association Europeはルクセンブルク法人で、相互組合 (No.B230379)として登録されています。ルクセンブルク財務大臣の認可を受けており、同国保険監督委員会の規制下にあります。

britanniapandi.com