

電気自動車海上安全輸送について

— 電気自動車の火災の特徴と対応指針について —

多羅尾 保允*

1. はじめに

最近、電気自動車が街中で走っているのを目にすることが多くなってきた。電気自動車はリチウムイオン電池がその駆動源として利用されており、ガソリン車のように走行時に二酸化炭素を排出しないため、環境に優しいといわれている。リチウムイオン電池の特徴としてはエネルギー密度と電圧が高く、充電できることである。

図1は国際エネルギー機関が公表している電気自動車の登録台数のグラフである。カーボンニュートラルを達成するために、国際的に電気自動車の普及率は指数関数的に増加しており、就航船を含め自動車運搬船による電気自動車の輸送が開始され、輸送される割合が増加しているのが現状である。では何が問題となっているかという点、電気自動車の駆動用のリチウムイオン電池に異常が起こった場合、もしくはリチウムイオン電池から出火した場合の対処方法が特殊であるということである。リチウムイオン電池は出火すると鎮火するまでに多くの時間を要するということが分かっている。自動車運搬船で輸送される自動車は、狭い間隔で車両積載区域に積載される。そのため、自動車から出火すると、隣接した自動車に延焼するリスクがあり、出火した車両に近づいて消火活動を実施することが難しい可能性がある。電気自動車に延焼、もしくはそれから出火した場合、特殊な対応を車両積載区域という特殊な環境の中で実施しなければいけない。このように、自動車運搬船の車両積載区域の特徴や自動車の積載状況の特性を考慮して消火活動が実施できるのが課題である。つまり、自動車運搬船でリチウムイオン電池が搭載された電気自動車を安全に輸送するための特別な対応や指針が必要となる。

本稿では、自動車運搬船での電気自動車海上安全輸送に貢献するために本会にて発行した電気自動車安全輸送ガイドラインの内容を解説する。

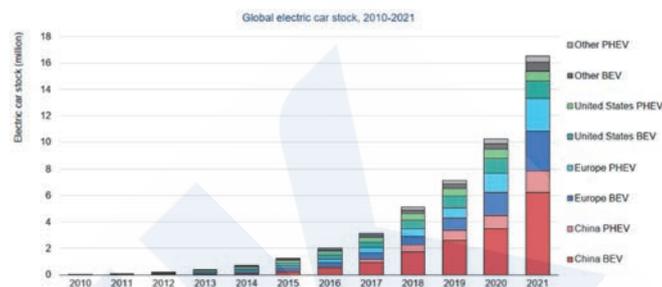


図1 電気自動車登録台数¹⁾

2. 本会の取り組み

ここ最近の自動車運搬船の火災事故を受けて本会では、特に電気自動車を輸送する際の火災安全措置の検討を継続的に進めている。ここで注意したいのは、電気自動車の火災発生確率はガソリン車に比べて低いという統計データがあることと、また自動車運搬船の火災事故の原因として、未だ電気自動車が出火元であると特定された事例はないことである。

しかし、電気自動車は、ガソリン車と異なり、動力源が二次電池（リチウムイオン電池）に蓄えられる電気である。このリチウムイオン電池が内部短絡を起こすと熱暴走が始まり、さらには火災が発生してしまう。リチウムイオン電池は火災が発生すると鎮火させるのが非常に困難であることが分かっている。

また、陸上ではリチウムイオン電池火災の対処方針は既に存在しているが、船舶という特殊な環境下でそれらが実行できるのかが大きな課題の一つである。

そこで、本会では船舶という特殊な環境及び電気自動車火災の特性を考慮し、電気自動車火災の対処方針について2023年8月に「電気自動車安全輸送ガイドライン（第1.0版）」と「電気自動車火災対策検討リスト」を公表している。船舶を所有、運航または管理されている方々ならびに船舶を建造されている造船所の方にこれらを参考にして対策を検討いただき、自動車運搬船の火災被害の低減に繋がればよいと考えている。3章からは具体的に電気自動車海上安全輸送に関して詳細に解説していく。

* 技術本部 材料艤装部

3. 電気自動車安全輸送ガイドラインの技術的解説

3.1 電気自動車の特徴とその火災の特徴

3.1.1 電気自動車

電気自動車は電気を動力源とした自動車のことである。電気を動力源とする自動車としては、純電気自動車、プラグインハイブリッド自動車、ハイブリッド自動車がある。それぞれに使用されている電池の種類やシステム、容量は異なるが電気自動車の一種であると考えて差し支えない。ただし、バッテリーセルの種類や電池容量が異なっているため火災発生時のリスクが全くの同一ではないということに留意されたい。

電池容量が一番大きい純電気自動車は、リチウムイオン電池が使われていることが多く、図2の通り車両の床一面に広がったバッテリーパックにリチウムイオンセルがしきつめられている。車両やバッテリーの種類により異なるが数十個から数千個のリチウムイオンセルがバッテリーパックに搭載されている。

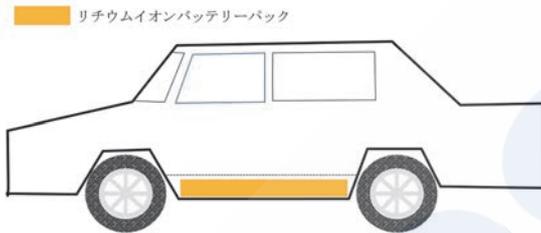


図2 電気自動車の駆動用バッテリーの位置

3.1.2 駆動用バッテリー

電気自動車の走行に必要な電力量を、実用可能なレベルで車載可能とするエネルギー密度をもつ電池は、いまのところリチウムイオン電池しかないといわれている。リチウムイオン電池は電解液に有機溶媒を用いていることで、高い電位（電圧）まで電気分解を起こしにくいという特徴により、高い定格電圧と高いエネルギー密度を実現している。しかし、一度電気分解を起こしガス化してしまうと元には戻らないため、入出力電力からセルの温度まで様々な要素がモニターされている²⁾。

リチウムイオン電池セルの種類は、セルがシート状になっているラミネート型、角型、そして乾電池の形状として馴染みのある円筒型の3種類がある。バッテリーセル自体の特徴は様々あるが、航続距離や冷却器の要否によりどのセルを使用しているのかは車種毎に異なっている。前述の通り電気自動車にはバッテリーパックと呼ばれるリチウムイオンセル

を収容した強固な筐体に取り付けられており、電池の総容量は20 kWhから100 kWh以上である。そして、その電圧は300 Vから400 Vと非常に高電圧である。

3.1.3 電気自動車の安全性

高電圧のリチウムイオン電池を搭載している電気自動車には、以下のような自動車の乗員に対する安全対策が設けられている³⁾。

- 1) 感電に対する対策として、駆動用バッテリーは車両衝突時に乗員が高電圧電池や高電圧部に触れないような位置に配置すると共に、強固な筐体で保護し、衝突時に高電圧回路を遮断する。
- 2) 熱暴走を防止するために、バッテリーマネジメントシステムにより電流・電圧・温度を監視制御し、異常を検知した場合は高電圧回路を遮断する。

しかし、電気自動車の安全性は日々高められており、電気自動車の安全対策はここに言及した事項だけではないことを理解されたい。

3.1.4 電気自動車火災の特徴

電気自動車はバッテリーパックという重量物を搭載しているため、車体自体の軽量化が行われており複合樹脂などが多く使用されている。通常のガソリン車と比べ、可燃性材料が多く使われていることにも留意しなければならない。

さらに、リチウムイオンセルは内部短絡を起こすと熱暴走を起こす。リチウムイオン電池の熱暴走に至る一例を図3に示す。この図は円筒形セルの実験データを示したものである。内部短絡を起こしたバッテリーセルはジュール発熱によりバッテリーセルの温度が上昇していく。その過程で電解液や負極の反応、セパレーターのメルトダウンを起こし、最終的には1000℃を超える発熱反応に至る。この実験結果では1000℃に至るまでの時間はわずか28分足らずである。

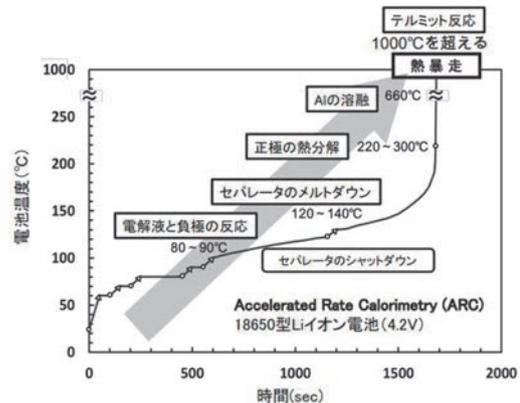


図3 熱暴走に至るまでの温度及び時間の一例⁴⁾

さらに、熱暴走を起こす過程で可燃性ガスが発生することにも留意しなければならない。リチウムイオン電池から発生するガスを分析した結果より、メタンやエタンなどの炭化水素ガスや水素ガスなどの可燃性ガスが発生することが分かっている⁵⁾。つまり、電気自動車積載区域中は可燃性ガス雰囲気になる可能性があり、着火・爆発に注意しなければならない。

また、発生するガスは可燃性ガスだけではなく、毒性ガスであるフッ化水素ガスも発生する。フッ化水素ガスは、リチウムイオン電池の電解液に含まれる六フッ化リン酸リチウムと水との反応や、一般的なバインダーであるポリフッ化ビニリデンの熱分解の過程で発生する人体に有毒なガスである⁶⁾。30分以内に脱出不能な状態や回復不能な健康障害に陥る危険を回避できる限界濃度である脱出限界濃度 (**I**mmediately **D**angerous to **L**ife or **H**ealth ; IDLH) は30 ppmである。

そして、感電に対する留意も必要である。前述の通り電気自動車のリチウムイオン電池の電圧は300 Vから400 Vの高電圧であるが、既に内部短絡を起こしているセルに射水しても感電のリスクは非常に低いと考えられる。しかしながら、数十個から数千個のバッテリーセルが電気自動車には搭載されていることを考えると、全てのバッテリーセルが内部短絡を起こしているとは限らず、内部短絡を起こしていないバッテリーセルへの射水によって引き起こされる感電に留意した消火活動を行うことが重要である。

3.2 電気自動車火災への対応指針

ここまでは電気自動車自体の火災の特徴やその注意点について説明してきた。この後は、それら特徴

や自動車運搬船の車両積載区域の環境ならびに車両積載状況を考慮し、電気自動車火災の際に具体的にどのような対策がとれるのかを解説する。個別に解説する前に、火災発生に至るまでのシナリオを整理した表1を参照されたい。3.1でも説明しているが、電気自動車に搭載されているリチウムイオン電池が内部短絡を起こした場合、熱暴走を起こす。リチウムイオン電池が熱暴走を起こすとジュール発熱によりセルの温度は上昇していき、正極や負極の熱分解や電解液が気化し可燃性ガスが発生する。それらガスがバッテリーパックの安全弁から車両外へ放出されることとなる。それらは白煙として認識可能である。可燃性ガスが車両積載区域中へ放出されることで、車両積載区域中で爆発性雰囲気を形成する可能性がある。ガス濃度が爆発下限界 (**L**ower **E**xplosive **L**imit ; LEL) に達し、着火源により着火エネルギーを与えられると引火し爆発・火災が発生する。その火災が車両の部品に引火し電気自動車の火災が始まると考えられる。電気自動車の火災により隣接車両に延焼したり、可燃性ガスが火災車両とは違った場所で滞留し着火することで意図しない所で火災が発生したりする危険性があり、これらにより車両積載区域中で火災が拡大していくと考えられる。これら火災シナリオを考慮した上で有効と考えられる火災対策について解説していく。

3.2.1 早期発見

電気自動車の火災対策を考える上で最も重要なことの一つは、火災を起こしそうな車両もしくは火災車両を早期に発見することである。図3で内部短絡から熱暴走末期までの時間が非常に短いことを説明した。つまり、火災を起こしそうな車両の隔離、火災車両への対応について少しでも早く行動を起こせ

表1 自動車運搬船の火災拡大のシナリオ

事象の整理				
内部短絡	温度上昇	白煙発生	ガスへ着火 車両部品へ延焼	火災拡大
				
内部短絡等のトリガーによりリチウムイオン電池が熱暴走を起こす	内部短絡を起こしたセルの温度が上昇する。	温度上昇により正極、負極での化学反応等の反応が起こりガス（可燃性ガスや毒性ガス）が発生し、セルもしくはパックの安全弁から吹き出す	可燃性ガスに着火し、車両部品へ着火する	ガスが車両積載区域中で爆発下限界に達し、火災車両以外でも火災を起こす。火元車両に隣接している車両も火災になる。

るようになることが望ましい。これらを解決するためには、図4に示す通り、リチウムイオン電池の熱暴走に至るまでの過程を事象毎に整理し、それらの段階で有効となるような措置をとることが重要である。熱暴走を起こしたバッテリーセルはバッテリーセルの温度上昇が起こる「温度上昇段階」、バッテリーパックから可燃性ガスが噴出する「可燃性ガス発生段階」、そして火災が発生する「火災発生段階」の3フェーズに分類できる。

「温度上昇段階」ではセルの温度上昇を検知できるセンサーをバッテリー近くに設置する対策が考えられる。しかしながら、センサーで感知した温度上昇の信号をどのように送受信するのかなど課題は多い。

「可燃性ガス発生段階」では発火前に発生する可燃性ガス（HC系ガスや水素）をガス検知器で検出する対策が考えられる。リチウムイオン電池から発生する可燃性ガスの総量を考慮して、どの程度の濃度の検知が可能なガス検知器とするのか、車両積載区域内の通風状況によってはガスが拡散してしまい迅速に検知できない可能性があるなどこちらも課題は多い。

「火災発生段階」では、火災探知器や熱探知器、そして煙探知器が効果を発揮する。しかし、火災探知器や熱探知器は、それぞれ炎が見える位置もしくは輻射熱を受ける位置に設置されていないと、それぞれが持つ機能を最大限に発揮することができないため、車両積載区域内への設置台数が著しく多くなることが予想される。また煙探知器の効果を最大限に引き出すためには、火災時に発生した煙を探知器にタイムリーに到達させる必要がある。しかしながら、車両積載区域内の天井部には梁や桁が配置されており、煙の流動に制限をかけているため、煙探知器の設置場所の工夫が必要である。

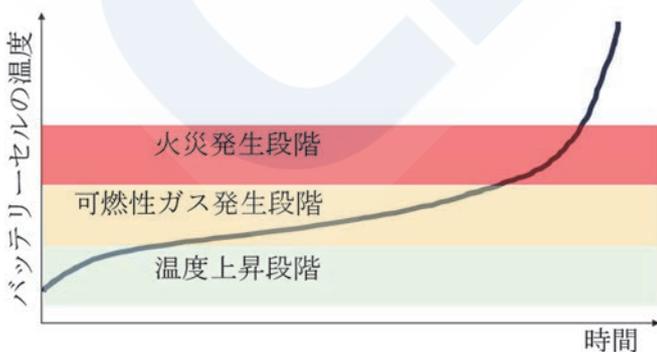


図4 リチウムイオンセルの熱暴走に至るまでの事象の整理

現時点の技術で「火災発生段階」と「可燃性ガス

発生段階」の両方で効果を発揮する製品がある。それは**Closed Circuit Tele-Vision(CCTV)**である。CCTVは火災発生時の黒煙はもちろん可燃性ガスの白煙も画像として認識することが可能であり、車両積載区域をCCTVで監視することにより可燃性ガス発生段階から発見することが可能となる。図5にCCTVを車両積載区域に設置した場合に確認できるカメラからのイメージ画像を示す。ただし、車両積載区域を網羅的に監視するためには非常に多くのCCTVを設置しなければならず、それら1つ1つの映像を常時監視することは現実的ではない。そこで、AIによる画像認識技術を用いて煙を認識し警報を発するという技術の採用が有効であると考えられる。



図5 車両積載区域に設置したCCTVからの自動車の見え方（イメージ）

ここまで早期発見に関して様々な対策を解説してきたが、電気自動車から警報を発することも早期発見に寄与すると考える。電気自動車に搭載されているバッテリーマネジメントシステムはバッテリーセルの状態（温度、電圧等）を監視しているため、バッテリーセルの温度上昇を検知したある段階で自動車のライトを点灯させることやクラクションを鳴らすことができれば異常車両の早期発見に大きく貢献するものと考えられる。電気自動車の外部から目視できる異常が現れる前に、内部で起こっている異常を診断できるのは電気自動車に搭載されているバッテリーマネジメントシステムだけである。

3.2.2 二次災害の防止

熱暴走の過程でリチウムイオン電池から可燃性ガス、具体的には水素ガスや、メタン、エタン、プロパンなどのHC系ガスが発生する。それぞれどの程度の量の可燃性ガスが発生するのかは正極、負極の種類、電解液の種類や量、充電率により異なる⁴⁾。可燃性ガスが発生すると車両積載区域中に滞留し、LELに達する恐れがある。さらに、爆発雰囲気中に着火源があった場合、着火エネルギー以上のエネルギーを与えられると引火し爆発・火災が発生する。

例えば図6で示すように梁と桁で形成される空間に、非防爆型の電気機器がある時、滞留した可燃性ガスが100%LELに達すると引火して火災が発生する可能性がある。そのため、可燃性ガスが車両積載区域中のどこに滞留する可能性があるのかを把握し、そもそも滞留しない構造にすることも有効な対策の一つであると考えられる。

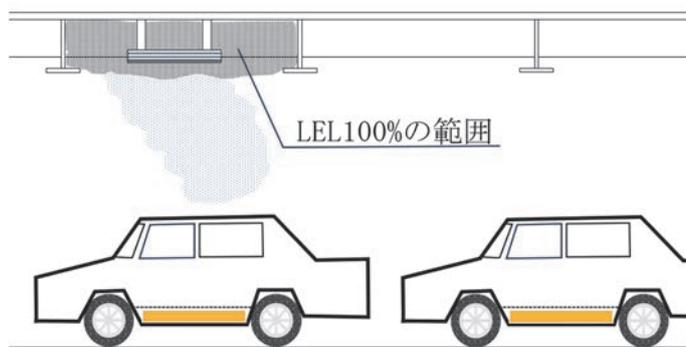


図6 車両積載区域中での爆発性雰囲気形成のイメージ

車両積載区域中で二次災害を防止する方法は大きく分けて以下の2つの手段が考えられる。

- 可燃性ガスが放出されても爆発性雰囲気を形成しないように通風によって、可燃性ガスを船外に排出し、ガスが車両積載区域内に滞留しないような構造とする
- 爆発性雰囲気が形成されても引火しないように車両積載区域内の電気機器は適切な防爆型とする

電気機器の防爆等級は、車両積載区域では、有事の際に可燃性ガスが放出されるため、IEC60079-10で区分されるZone 2での使用に適した防爆構造とし、ガス蒸気グループ及び温度等級については、熱暴走時に発生するガス種を調査した結果に基づき、ガス蒸気グループIIC、温度等級T2が適当である。なお、これはリチウムイオン電池から発生するガス種のみを考慮した防爆等級であり、ガソリン車や天然ガス自動車、水素自動車、危険物などを積載する場合はそれぞれに要求される防爆等級を考慮しなければならないことに留意されたい。

3.2.3 延焼防止

単一車両から火災が発生した場合、車両はDoor to Doorで10cm、Rear to Bumperで30cmの隙間で積載されているため、火災時の輻射熱で隣接車両へ延焼するという事は容易に想像できる。そのため、火災が発生した後に、火災車両と隣接車両を隔離するための延焼防止措置を実施することが極めて重要である。延焼防止を行う手段としては様々なものが

考えられるが、比較的知られているものはウォーターカーテンとファイヤーブランケットである。

ウォーターカーテンはノズルから噴霧する水により水のカーテンを形成するもので、火災車両から発生する輻射熱を遮断することができる。固定式のウォーターカーテンシステムは存在するが、図7に示すような持運び式のウォーターカーテンホースという消火ホースを応用した製品がある。ウォーターカーテンホースは固定式のウォーターカーテンシステムとは異なり、固定配管やノズルは不要で、消火ホースに特殊な形状の穴が開いている。車両積載状況に応じてウォーターカーテンを形成したい箇所に設置しておくことが可能であるため、有効な手段の一つであると考えられる。

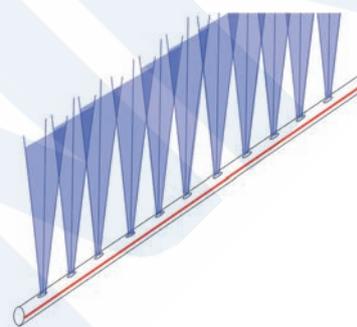


図7 ウォーターカーテンホースイメージ図

ファイヤーブランケットは、本来は火災車両を包み込み、ブランケット内で酸欠状態を作り出して消火するものであるが、自動車運搬船ではラッシングホールが空いているため火勢は弱まる可能性はあるものの鎮火には至らないと考えている。しかしながら、ファイヤーブランケットの優れた耐熱性から延焼防止手段としても利用可能と考えている。ファイヤーブランケットは図8に示す通りに本会職員2名でも展開できる一方で、車両積載状況を考慮すると、車両積載区域内でファイヤーブランケットを展開するための工夫が必要であろう。



図8 ファイヤーブランケット
(協力：日本特装株式会社)

3.2.4 消火手順

リチウムイオン電池の消火手順として大切なのは

「バーニングアウト」の考え方を理解することである。「バーニングアウト」とは燃える材料がなくなり燃え尽きてしまうことを意味する。例えばガス火災が発生した場合、消火したとしてもガスは漏れ続けることとなり区画内に可燃性ガスが充満しそれに再引火すれば爆発を起こすこととなる。この場合はすぐに消火せずにガスの供給元を遮断し、ガスを燃やしつつすることが消火手順となる。その間は延焼を防止することに努めることとなる。

バッテリー火災も同様であり、バッテリーからの火災を消火したとしても熱暴走を起こしたバッテリーは電極間の電位差がなくなるまで化学反応は続き、発熱やガスの発生は継続する。ガスの発生元からの供給を遮断することはできないため、熱暴走を起こしたバッテリーの温度を下げ化学反応を緩やかにし、化学反応が終わるまで周囲に延焼しないような措置を講じ続けることに専念する必要がある。

バッテリーを冷却するための手段としては、船内に配置されている消火栓からの放水が有効である。電気自動車のバッテリーは車両下部に配置されているため、単に車両の上から水をかけているだけでは、バッテリー自体を冷却できない。図9に示す水噴霧放射器を使用し車両下部から放水しバッテリーを冷却することや貫通型ノズルを用いてセルを直接冷却することが有効である。感電防止のために、貫通型ノズルに関しては内部短絡を起こしていないセルに貫通することのない位置にノズルを安全に挿入できる場合に限る。

バッテリーを冷却する上で重要なことは、熱暴走を起こしたバッテリーの冷却を止めてしまうと再び温度が上昇し可燃性ガスが発生し再燃することである。バッテリーの冷却を止めても温度が上昇してこないかをサーマルカメラ等を用いて都度確認することも重要である。



図9 水噴霧放射器

(Marine Fire fightingより引用)

バッテリーの冷却は非常に重要ではあるがバッテリーは高電圧であるがゆえに感電に対して留意して消火活動を行わなければならない。通電したグリッドに対し直射水及び噴霧した際に、どの程度の距離をとればホースを持っている人に電気が流れないかを実験した結果⁷⁾がある。水の流量約28.35 m³/hで0.21 MPaの圧力のもとでは、直射水であれば11.5 ft(約3.45 m)、30度の噴霧角度の場合は1.5 ft(約0.45 m)、90度の噴霧角度の場合は0.5 ft(約0.15 m)離れば電流値は0 mAとなった。つまり、感電に対して配慮するには噴霧を利用することが重要であることを示している。

3.2.5 消火活動

ここでは消火活動をする上で重要な点を解説する。消火活動を行う場合安全性を確保するために少なくとも2人1組(Two buddy system)で火災に立ち向かうことが基本原則である。1人に何か危険が起きたとしても他方の消防員で対応が可能となる場合がある。また、1人では見過ごすような危険な状況に対しても2人であれば見過ごす確率が低下する。

火災が発生すると当然の如く煙が発生する。煙は浮遊固体(すす、繊維及びほこり)、液体粒子(炭化水素及び水)及びガス(一酸化炭素、シアン化水素等の有毒ガス)が混合された気体であり、人体に有害である。火災発生区画ではこのような煙が発生し、視界不良に陥る。故に、消火活動を行う前に火災時に発生した煙を排気すること、つまり通風を行うことが重要である。通風制御については次項で詳しく解説する。通風により煙を火災発生区画から排除することで視界を確保することができる。視界を確保することで火元の特定に繋がりが、適切な対処ができると共に、火災拡大ルートも推定することができる。また、煙を排気することで消防員の安全につ

いても確保することができる。つまり通風作業というのは消火活動において最も重要な要素の一つである。

バッテリー火災の鎮火には冷却を完了させる必要があるため非常に長い時間を要することが分かっている。SOLAS条約で規定されている消防員用の呼吸具は一般的に使用可能時間が20分から30分程度である。そのため、消火活動を長時間継続できるような呼吸具を備えることや通風作業を適切に行い呼吸具なしでも消火活動を行えるような環境にすることが極めて重要である。

そして消火の際に延焼防止措置や消火活動で使用した消火水を適切に排水することも重要である。火災の熱で溶けた樹脂等がスカッパーに詰まってしまうと適切に排水できず船の復原性に影響を与える危険性がある。消火活動の最中にスカッパーから適切に排水ができていないか、詰まりがないか等は都度確認する必要がある。

3.2.6 通風制御

前項では通風の重要性について解説してきたが、通風によって新鮮空気を車両積載区域内へ流入させることは火災を拡大させることに繋がるという懸念があるため、火災時には火災を封じ込めるために通風を遮断するべきであるという声が多くある。しかしながら、車両積載区域のような大空間で数台の火災車両が消費する酸素量程度では車両積載区域内が酸欠状態になる可能性は低く、かえって煙を充填させ危険な状況を作り出す可能性がある。消火栓を用いた消火活動を行う上では火災時の煙を効果的に排除し、消火活動を行える空間を作ることの方が極めて重要である。排煙作業の目的について整理すると下記の通りである。

- 1) 消防員の視界を改善し、火元の確認や逃げ遅れ者を発見し易くすること
- 2) 高温の可燃性ガスや有毒ガスを排出し、それらの危険性を低減すること
- 3) フラッシュオーバーやバックドラフトの発生の可能性を軽減すること

通風の基本原則は図10に示すような消防員がアクセスし易いような空気の流れを作ることである。しかしながらファンの配置やスロープの位置、通風ダクトの開口の向きによっては空気が滞留する所が存在する。そのような状況では効果的に排煙することはできない。故に、個船毎に通風状況について調査し、滞留し易い箇所を特定しておくことが大切である。空気が滞留している箇所については火災時に効果的に排煙できるようにポータブルファンを用いて強制換気を行うか、区画内を正圧にして煙を効率良

く排出する方法が考えられる。

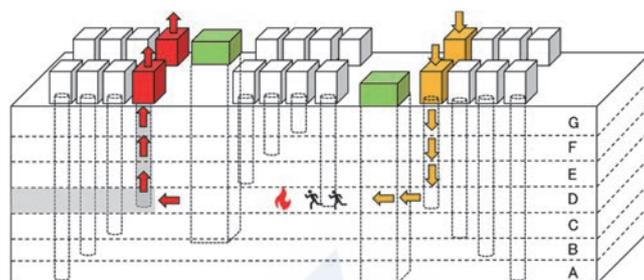


図10 船内通風制御の概念図

3.2.7 固定式消火装置

いままで解説してきたような早期発見、延焼防止、二次災害防止及び消火活動の対策は非常に有効であるが、固定式消火装置を迅速に起動することも有効な対策の一つである。火災安全設備のための国際コード（FSSコード）にて自動車運搬船の車両積載区域に設置が認められている固定式消火装置は、水系消火装置、高膨張泡消火装置及び炭酸ガス消火装置の3つである。水系消火装置にあっては搭載が現実的ではないため、自動車運搬船においては高膨張泡消火装置または炭酸ガス消火装置が主流となっている。固定式消火装置は消火手段として最後の砦と考えられるが、電気自動車火災を対象とした場合は少し様相が異なってくる。それぞれの消火装置の効果を簡単に記載すると表2に示す通りである。

表2 固定式消火装置の消火原理の整理

装置名	消火原理
高膨張泡消火装置	泡で火災対象を包み込むことで酸欠状態及び冷却効果で消火する
炭酸ガス消火装置	保護区画の酸素濃度を燃焼が継続できなくなるレベルまで下げることで消火する
水系消火装置	冷却することで可燃性ペーパーの発生を防ぎ火災を継続できなくする

電気自動車のリチウムイオン電池が熱暴走を起こした場合、火のある所は有酸素燃焼であるが、バッテリーの発熱反応は酸素を必要としない化学反応である。炎を消すのであれば表2に示すいずれかの固定式消火装置による効果が期待できる。

水系消火装置であれば、電気自動車のバッテリーは車両下部に配置されているためバッテリーを直接は冷却できないが、水自体の冷却効果は非常に高く火災周囲車両も水膜で覆うことができるため水自体

は非常に優れた消火剤である。

しかし、高膨張泡消火装置や炭酸ガス消火装置に化学反応を緩やかにする冷却効果が期待できるのかといえば、必ずしもそうではない。冷却効果が期待できないということは固定式消火装置を起動しただけでは、化学反応を緩やかにして鎮火することが難しいことを意味する。

具体的には、高膨張泡消火装置であれば泡はいずれ消滅することになり、窒息効果がなくなって再発火に至る可能性がある。そして、炭酸ガス消火装置の炭酸ガスはそれ自身に冷却効果はない。また、区画に隙間があると炭酸ガスは外部へ漏れ、区画内の酸素濃度が上昇することにより再発火に至る。

つまり、固定式消火装置でも達成できることとできないことを理解し、それらを補うような対策を検討することが必要である。例えば、炭酸ガス消火装置であれば、冷却効果を補うために炭酸ガス放出後に、炭酸ガス放出ノズルから散水するという方法が考えられる。

また、火災が長引くという観点から固定式消火装置の消火剤の投入可能回数も重要な要素である。高膨張泡消火装置であれば、保護区画を泡で満たすのに必要な量の5倍の泡原液を保持しているため区画へ泡を再投入することが可能である。しかしながら、炭酸ガス消火装置であれば区画に対し1回分の放出量しかないため、再発火した場合のリスクは高膨張泡消火装置と比べて高い。

水系消火装置は海水を利用するため消火剤がなくなるということはないが、水系消火装置を自動車運搬船に搭載することは給水ポンプの配置やノズルの配置、コスト面を考慮すると非常にハードルが高いものとなっている。

3.2.8 固定式消火装置の作動信頼性の向上

固定式消火装置は前述の通り全体消火装置とも呼ばれ区画全体を消火剤で埋め火災を鎮火もしくは抑制する効果を期待するものである。火災発見段階もしくは初期消火段階を経て火災を抑制できなくなった際に起動するものであり、最後の砦であるといっても過言ではない。それほどまでに大切な消火装置がいざという時に起動できないのでは退船を余儀なくされてしまう。

高膨張泡消火装置は、高膨張泡を保護区画へ放出するために非常に多くの機器やセンサーを使用していることからそれら機器の保守及び管理は非常に重要である。センサー類については例えば二重化し、一方が故障した際でも起動シーケンスがスムーズに進むようにするなどの措置を講じることが重要である。

また、炭酸ガス消火装置であれば、放出弁を開放すればタンク内の自圧で放出されるため、作動信頼性は高膨張泡消火装置と比べ高いと考えられる。

搭載している固定式消火装置の種類に応じて構成要素が異なっているため、それぞれの装置に対して起動のためのシーケンスを理解すること、消火剤を区画に放出するためにどのセンサーや機器がキーコンポーネントとなっているのかを把握し強化することも有効な対策の一つである。

3.2.9 その他

自動車運搬船の火災対策措置として、船舶設備の観点から様々なことを解説してきたが、火災発生リスクの高い車両をそもそも積載しないといったことも考えられる。中古車両のリチウムイオン電池がどの程度劣化していて、危険な状態であるかを判定する指標というものは現時点ではないが、今後バッテリー診断技術が向上すれば、車両積載前に火災発生リスクの高い車両を排除することが可能となる。

もう一つの問題は、電気自動車とガソリン車の区別がつかないことである。実際に火災を起こしている車両を目撃したとしても、それが電気自動車なのか否かが分からなければ適切な対処はできない。例えば、Stowage planに電気自動車はどこに配置しているのかを明記する、ラベル等で車両に表示するなどの措置を講じることが有効であると考えられる。

3.2.10 消火戦術の構築

いままで説明してきた火災の特徴やその注意点、対処方針を参考にし、電気自動車火災発生時の対処方針について消火戦術としてまとめておくことが大切である。

実際に火災が発生した場合、その場でいろいろなことを考えて行動することは非常に難しいため消火戦術として図11に示すように流れをまとめ、それらを乗組員に周知しておくことが大切であり、日ごろの訓練で体に覚え込ませておくことが大切である。

電気自動車火災であれば、バッテリーから出火し

ていない発熱のみの段階、単一車両から火災が発生している段階、複数車両から火災が発生している段階に分け、それぞれの段階に応じた対処方針を整理することが大切である。

3.2.11 ノーテーションについて

本会が2023年8月に公表した電気自動車安全輸送ガイドラインに基づき、船舶に講じられた火災安全措置に応じて表3に示すようなノーテーションを船級符号に付記することができる。本ガイドラインでは具体的な設備要件を規定しておらず、どのような対策を講じるのかを提案してもらうものとしている。その理由は2つある。

1つ目は、火災安全措置をどのような目的で、どのような効果を期待してその機器を設置するのかを理解しておくことこそが一番重要であり、それができていないといざという時に最大限の効果が発揮できない可能性があるためである。各社がそれらを検討することで、目的や重要性を一番理解することができ、自動車運搬船の火災被害低減に繋がると考えている。

2つ目は、電気自動車火災に対して有効となる技術は世の中に幅広くあり、また、今後開発される技術も期待できるためである。そのため、本会としては、これら技術の使用に制限を設けることなく、さらに海事業界から他業界に伝達することで、火災対策として必要な技術は何であるかを伝えることがで

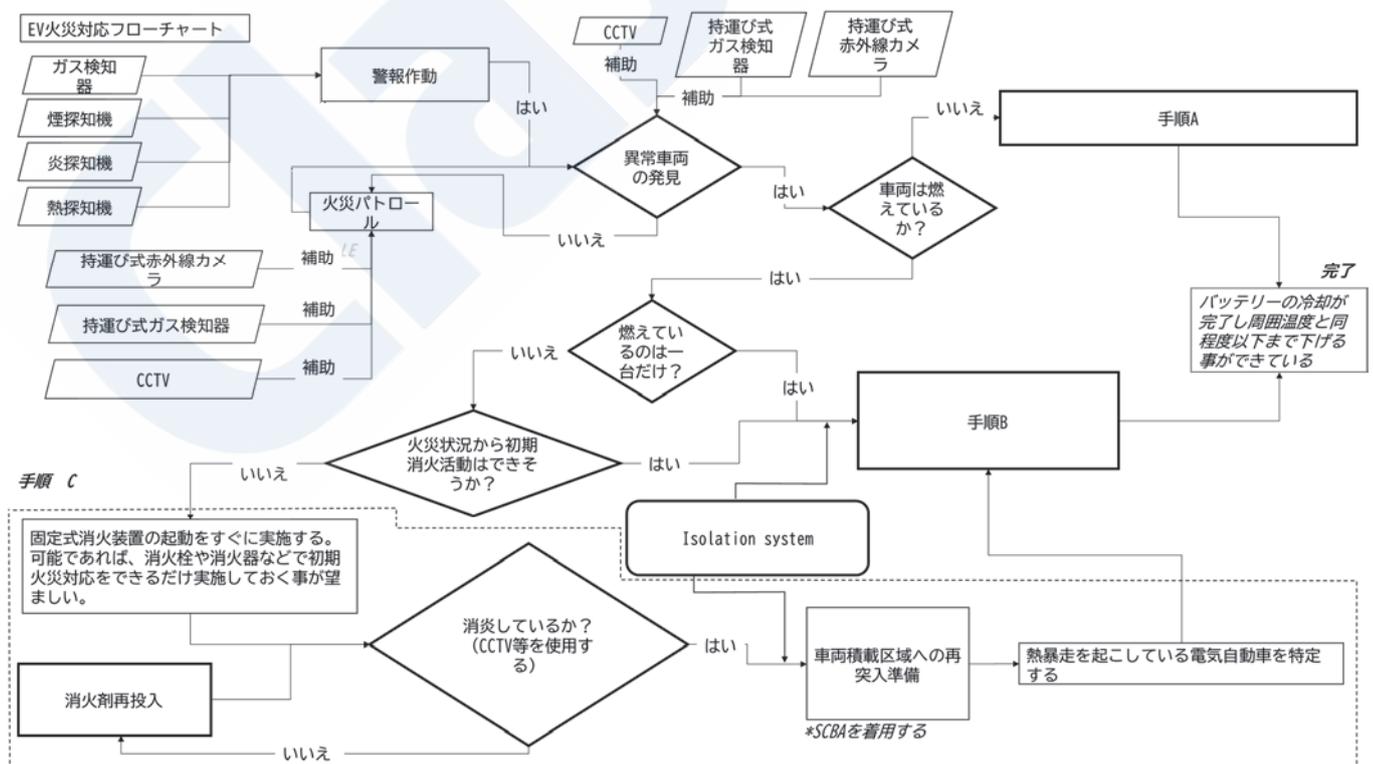


図11 消火戦術フローチャート（イメージ）

表3 追加火災対策の付記符号

付記符号	詳細
AFVC(FD)(EV)	Additional Fire-fighting Measures for Vehicle Carrier (Fire Detection)(Electric Vehicle) バッテリーに異常のある車両は火災発見に寄与する対策を講じた船舶に付記する
AFVC(PS)(EV)	Additional Fire-fighting Measures for Vehicle Carrier (Prevention of Secondary Fire)(Electric Vehicle) バッテリー火災に伴い発生した可燃性ガスに伴う二次災害発生の防止に関する対策を講じた船舶に付記する
AFVC(PFS)(EV)	Additional Fire-fighting Measures for Vehicle Carrier (Prevention of Fire Spread)(Electric Vehicle) 単一火災車両からの火災の延焼に対する対策を講じた船舶に付記する
AFVC(FF)(EV)	Additional Fire-fighting Measures for Vehicle Carrier (Fire Fighting)(Electric Vehicle) 電気自動車火災の消火・鎮火に関する対策を講じた船舶に付記する
AFVC(EFF)(EV)	Additional Fire-fighting Measures for Vehicle Carrier (Enhanced Fixed Fire-extinguishing system)(Electric Vehicle) 固定式消火装置の能力強化や作動信頼性を向上される対策を講じた船舶に付記する

きると考えている。

ガイドラインの発行を通じて、非常に優れた技術が出てくることを期待するとともに、各社の火災安全措置の検討が加速することを願うところである。

4. 今後の展望や課題

本会では継続して自動車運搬船の火災安全措置の検討を進めている。ガイドライン公表後に本会へ頂いた意見を踏まえガイドラインをブラッシュアップする予定である。さらに、ガイドライン発行までに調査が及ばなかった業界の技術についての調査も継続し、船舶に応用することで火災安全措置の効果が期待できるものがないかを調査しアップデートしていく予定である。

加えて、本会では火災時における脱出に関する検討も進めている。自動車運搬船で前述のような火災安全措置を講じていたとしても、最終的に退船を余儀なくされる状況もありうると考える。まずは、リスクアセスメントで退船時にどのようなリスクがあるのかを洗い出し、そのようなリスクに対して船員が安全に救命艇までたどり着き、脱出できるような対策を検討しガイドラインに反映させる予定である。

5. IMOの動向と国際的な動向

現在、国際海事機関（IMO）では、電気自動車を含む新燃料自動車の輸送時の火災安全措置の規則改正に関して、2027年完了を目途に第10回船舶設備小委員会（SSE10）より議論を開始している。今後、新燃料自動車の火災特性、各国で実施されている実験結果や有識者の意見等を集約して国際条約として要求する設備を検討する予定である。

日本の船主は運航隻数を見ても数多くの自動車運搬船を運航していることから、電気自動車を輸送する上で安全でかつコストエフェクティブな対策を日本からIMOへ積極的に提案していき、これら対策がグローバルスタンダードとなるように努めていく必要があると考えている。

また、国内の自動車業界とも積極的に意見交換を行い、日本全体として本件に対処していく必要がある。

6. おわりに

電気自動車の火災時の特徴や注意点、そしてそれらを踏まえた火災安全措置について解説してきた。火災時の被害を低減するためにとられた火災安全措置は、検討したその人がその効果を最大限に発揮できる利用方法を熟知している。その設備が設置されている意図や目的を誰もが理解しておくことこそが火災事故を低減させるために一番必要なことである。一旦、国際条約や本会鋼船規則で設備要件として規定されてしまうと、その設備が要求されている技術的背景の理解が薄れてしまい、本来発揮すべき最大限の効果を発揮できない可能性もある。海事産業にかかわる人が長い時間検討を重ねて構築した火災安全措置が宝のもち腐れにならないよう、本会では火災事故低減に向け継続的に取り組み、ステークホルダーに火災時に有効な手段や対処指針などの情報をタイムリーに提供していきたいと考えている。

また、各社が独自に取り組まれている自動車運搬船の火災安全措置を踏まえて、最も効果的で合理的な火災安全措置がグローバルスタンダードとなるように尽力していきたいと考えている。

謝辞

本稿やガイドラインをまとめるにあたり様々な業界の方々のご意見を頂き、また様々な文献を参考とさせていただいた。この場を借りて御礼を申し上げます。

参考文献

- 1) Global EV Outlook 2022, issued by IEA(International Energy Agency)
- 2) Motor fan illustrated vol.192 電気自動車の正体, 株式会社三栄
- 3) 火災便覧 第四版, 共立出版株式会社
- 4) 向井 孝志, 境 哲男, 柳田 昌宏「リチウムイオン電池の熱暴走メカニズムと高安全性技術」, 一般社団法人表面技術協会 表面技術 第70巻6号 小特集 製品の品質と安全性を支える信頼性評価試験 p.301-307
- 5) Austin R. Bird, Erik J. Archibald, Kevin C. Marr, Ofodike A. Ezekoye, “Explosion Hazards from Lithium-Ion Battery Vent Gas”
- 6) 蔦島 真一：リチウムイオン電池の安全性と要素技術, 科学情報出版株式会社
- 7) E.H. Bolander, J.T. Hughes, T.A. Toomey, H.W. Carhart, J.T. Leonard, “Use of Seawater for Fighting Electrical Fires”
- 8) “Marine Fire fighting”, issued by IFSTA
- 9) “Marine Fire fighting for land based fire fighter”, issued by IFSTA
- 10) Ola Willstrand, Roeland Bisschop, Per Blomqvist, Alastair Temple, Johan Anderson RISE Research Institutes of Sweden, Division Safety & Transport Borås, Sweden “Toxic Gases from Fire in Electric Vehicles”
- 11) Theory of Fire Tactics, 消火戦術理論, イカロス出版株式会社