

平成 30 年 6 月 4 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2017

課題番号：15K12469

研究課題名(和文) システム安全としてのリチウムイオン電池の安全設計手法の構築

研究課題名(英文) Safety design method of Lithium ion battery using systems approach

研究代表者

平尾 雅彦 (Hirao, Masahiko)

東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・教授

研究者番号：80282573

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：リチウムイオン電池のライフサイクルを考慮した安全設計手法の開発のために、製品事故事例を調査を行った。最も事故例の大きい内部短絡事象について故障の木解析(FTA)による安全性分析と熱化学的現象シミュレーションを行った。短絡時の電極材料の不動態化のような本質安全設計の重要性を明らかにした。リチウムイオン電池の設計者のための安全設計アクティビティモデルを示すとともに、電池製造者、製品製造者、使用者が異なるというステークホルダー間の複雑性を考慮した制御構造モデルを提示し、各ステークホルダーの安全対策行動を明確にする提案を行った。

研究成果の概要(英文)：We investigated a database of product accidents to develop a safety design method of Lithium ion battery considering its product life cycle. Most accidents were caused by internal short circuit and thus we analyzed the incidents using Fault Tree Analysis (FTA) and numerical simulation of thermochemical phenomena. We found that an inherent safety design such as passivation of electrodes in case of short circuit must be the first priority. An activity model for safety design of lithium ion battery and a sociotechnical system control structure model for clarifying safety action of each stakeholder were presented.

研究分野：ライフサイクル工学

キーワード：システム安全 製品安全設計 リチウムイオン電池 ライフサイクル フォルトツリー解析

1. 研究開始当初の背景

リチウムイオン電池は、優れた性能を持つため小型機器だけでなく、自動車や電力蓄電など大容量の蓄電用途としても使われ始めている。しかし、製造・使用・廃棄・リサイクル時における発火・発熱事故は社会問題となっているが、安全性を高めるための対策は体系的ではなく、製品試験も釘刺し試験のような極端な条件下での試験にとどまっている。一方で、安全性を考慮した正極・負極材料や電解液の開発が盛んに研究されている。今後は、こうした新規材料を安全性を含めて評価し、電池を設計、製造、使用さらに廃棄・再利用していくことが求められる。

2. 研究の目的

社会問題となっているリチウムイオン電池利用製品の事故防止のために、化学プロセス設計におけるモデル化、シミュレーション、システム評価技術を展開した新たな製品安全設計手法を構築する。そのために、リチウムイオン電池内部及び周辺の熱収支を分析するためのシミュレーションモデルを構築する。また、製品の設計から製造、使用、廃棄に至るライフサイクルを通して起こり得る事故要因を品質・安全工学の知見を利用して分析し、安全対策の有効性を評価する手法を構築する。これらを用いることで、製品ライフサイクルの情報を統合利用して安全性を考慮した適切な材料選択や、構造決定を行うことが可能とし、様々な製品に利用されているリチウムイオン電池の設計を支援する。

3. 研究の方法

(1) 手法構築に向けた基礎的検討

研究基盤の確立に向け、まず現状把握のための情報収集をする。製品評価技術基盤機構(NITE)などが調査・発行している製品事故事例データベースから「リチウム」「電池」のキーワードを持つ事象を抽出し、ライフサイクル上の使用段階で起こった事故の分析を行い、これまでに起こっているリチウムイオン電池の事故の中で重要なものを特定する。

(2) リチウムイオン電池のシミュレーションモデルの構築

電池の熱収支モデルを構築し、事故を想定した非定常シミュレーションを実施する。様々なシナリオのもとで事故要因となる現象を分析可能なモデルを構築する。これにより、熱環境の異なる使用環境で使用したときなど、実際の製品条件に応じたシミュレーションが可能となる。熱収支式には安全対策による除熱の項も含め、対策の十分性も評価できるようにする。

申請者がこれまでに行った「シナリオ分析」に基づく環境影響評価についての研究によって得られた知見が応用できる。

(3) 安全対策の評価手法の構築

安全対策の有効性の評価手法を構築する。リチウムイオン電池の事故は複数の要因の連鎖・連動によって発生し、要因事象の経過に従って適切な対策を取る必要がある。故障の木解析(フォルトツリー解析、FTA)を用いることで、製品事故の要因が網羅的に抽出、階層的に可視化され、製品の構造上の問題や品質不良、使用段階における不適切な使用など多様な要因間の複雑な相互関係が明確になる。さらに、(2)で示したシミュレーション結果と組み合わせることで、製品ユニットの材料やシステムの構造を安全性の観点から定量的に比較評価することが可能となる。

(4) 設計手法の体系化

(2)および(3)により構築した手法を実践するためには、製品設計業務の一連の作業における具体的な利用方法を明らかにする必要がある。ビジネスモデル記述手法 Integrated DEFinition type 0 (IDEF0)を用い、製品安全設計業務プロセスを詳細に定義する。IDEF0は設計プロセスにおけるアクティビティに関わる情報を入力、出力、制約条件、メカニズムの4つに分けて記述し、さらに階層間の整合性を保ちながら下層アクティビティを定義できる。これを用い、製品安全設計の各ステップと入出力情報を定義することで、標準化された安全設計の手順が明らかになる。

また、図1に示すように、リチウムイオン電池の設計・製造・流通・使用・廃棄というライフサイクルでは様々なステークホルダーが関与するが、事故の発生とその原因・対策に関わるステークホルダーは異なる場合が多い。そのような異なるステークホルダーの関係を分析し、社会システムとしての安全システムの構築のために、制御構造図による行動と実施者の分析および社会システムとしての安全対策の検討を行う。

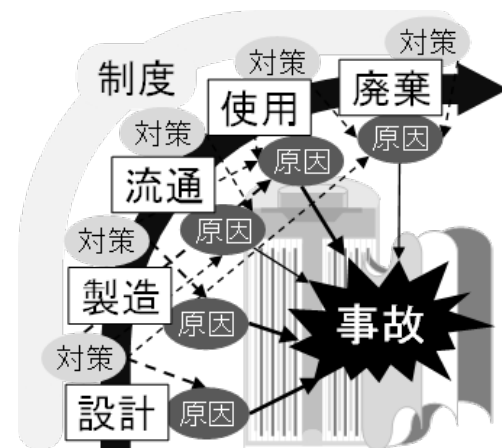


図1 リチウムイオン電池製品のライフサイクルにおける事故原因と安全対策の所在

4. 研究成果

(1) 手法構築に向けた基礎的検討

NITE の事故情報データベースから事故事例を抽出し、図1のライフサイクル上の使用段階で起こった事故の分析を行った。事故事例は、ほとんどが内部短絡による発熱・発火であったが、その本質原因は不明の事象が多かった。事故原因が確認できた事象と再発防止措置の分析と、既存のエアコンの事故分析との比較の結果、以下の課題が明らかになり、この課題を解決する解決手法が必要であると分かった。

- ・リチウムイオン電池は、使用時の充放電だけでなく熱暴走や劣化の際にも多くの化学反応を伴い、他の消費者製品と比べ複雑なメカニズムをもつため、各事故要因に対し安全対策を提案する必要がある。
- ・リチウムイオン電池は、電池組込製品として使用され、電池製造者、製品製造者と使用者が異なるというステークホルダー間の複雑性をもつため、各ステークホルダーの安全対策行動を明確にする必要がある。

(2) リチウムイオン電池のシミュレーションモデルの構築

内部短絡事故に対して、安全対策の効果を定量的に評価するため、シミュレーションのための物理モデルを構築した。図2に、電池の内部短絡のモデル図を示す。電池は現在流通している18650電池（直径18mm、高さ65mm、円筒形）を想定した。

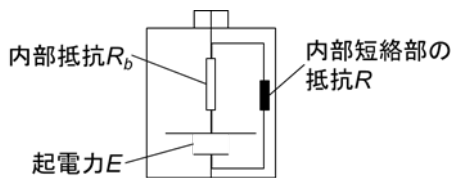


図2 リチウムイオン電池内部短絡モデル

電池の温度変化は、

$$\rho C_p \frac{\Delta T}{\Delta t} V = \dot{Q}_{in} - \dot{Q}_{out} + \dot{Q}_{generate}$$

より計算した。ここで、 \dot{Q}_{in} 、 \dot{Q}_{out} 、 $\dot{Q}_{generate}$ はそれぞれ吸熱量、放熱量、電池内部から発生する熱量である。

図3に、このモデルによる、放熱装置を設置したときの温度変化シミュレーション結果を示す。条件は、 $\dot{Q}_{in}=0$ 、 $\dot{Q}_{generate}$ は内部短絡によるジュール熱のみとし、反応熱を考慮しない。評価時間は、電池容量がなくなるまで、または、内部短絡してから3000秒後とした。電池の密度や熱伝達係数など、必要な値は参考文献および専門家からのヒアリングによった。放熱装置は、 \dot{Q}_{out} を自然対流または空気の強制対流による伝熱モデルで表し評価した。不動態は、内部短絡部の抵抗Rを時間とともに増加させることで評価した。

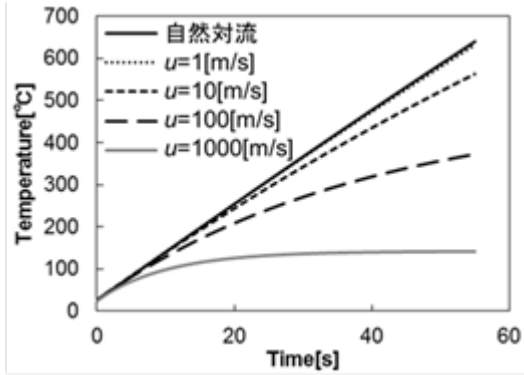


図3 放熱装置を設置したときの温度変化

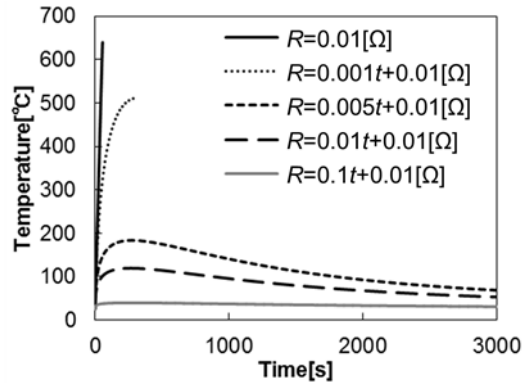


図4 不動態が生成したときの温度変化

図3より、自然対流のみによる放熱時は、電池は非常に高温になる。実際は187程度で発熱反応が起こり発火する。放熱装置を設置したときは、放熱量が増加し電池の温度上昇を防げることがわかる。

抵抗Rは、時刻tに掛かる係数が大きいほど急激に上昇し、不動態の生成速度が速いことを示している。不動態の生成速度が速いほど、電池の温度上昇が抑制され、3000秒後も電池容量はなくなる。

図4に、内部短絡部に不動態が生成したときの温度変化を示す。これらの対策は、実験結果との整合性も合わせて評価する必要がある。発熱反応は考慮していないが、ジュール熱による発熱だけでも電池は非常に高温になるため危険であり、短絡しても発熱しない本質的に安全な電池の開発が求められることが明らかになった。

(3) 安全対策の評価手法の構築

図5に、内部短絡を原因とした事故の安全対策を考案するために作成した故障の木解析図の一部を示す。故障の木解析とは、望ましくない事象が発生する際の要因間の因果関係の論理構造を分析する手法である。安全対策は解析図上で各事象に対し以下のように導入できると見出した。

- ・条件を追加し、事象が発生しても上流で防護する。例えば、設計時にセパレータの強度を上げることで、繰り返し使用しても短絡しないようにする。

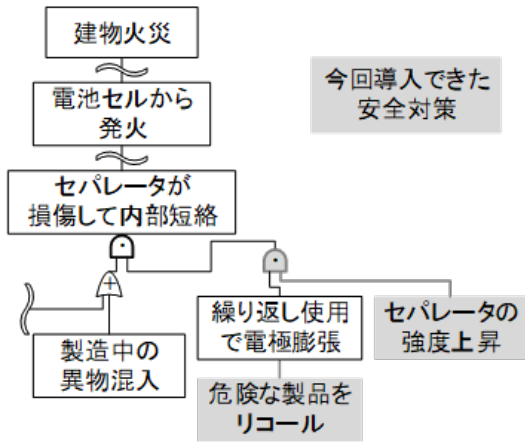


図5 安全対策を考案するための故障の木解析図

- ・事象そのものの発生を防ぐ。例えば、リコールを実施して危険な製品は使用させなくする。

このように、故障の木解析図上で既存安全対策を導入し、新規安全対策を提案できる。

(4) 設計手法の体系化

製品としての電池は、安全性以外に性能や使用環境などの要求も満たす必要がある。電池を総合的に評価し、必要な安全対策を選ぶためにヒートマップを用いた。表1にヒートマップを作成時の決定事項を、表2に本研究で設定した評価基準を示す。図6に提案した安全対策の総合評価のために作成したヒートマップを示す。

表1 ヒートマップを作成時の決定事項

決定事項	内容
評価条件	評価したい安全対策の列挙。 安全対策の条件を比較するため、実験やシミュレーションの詳細な条件を記入。
評価項目	・安全性に関する項目 (ex.最高温度、一定時間後の電池の状態) ・性能条件(ex.電圧、容量、寿命) ・使用条件(ex.温度、圧力、コスト)
評価基準	色分けの基準を設定。 (ex.最高温度の基準→さわれる温度、発熱反応の開始温度)

表2 ヒートマップの評価基準

最高温度		50分後の状態		
温度/°C	時間/s	温度/°C	残量/Ah	大きさ
600-	-55	100-	0	大
400-	55-	70-	-1	
187-	120-	50-	1	中
100-	240-	30-	2	
-100	300-	-30	2.7-2.75	小

放熱装置に比べ、不動態の方が安全対策としての効果が大きいことがわかる。特に、不動態の生成が速いほど、電池の安全性が保た

安全対策	シミュレーション条件	最高温度		50分後の状態		
		温度/°C	時間/s	温度/°C	残量/Ah	大きさ
なし	強制対流	0 m/s	640	55		0
	短絡抵抗	0.01 Ω				
放熱装置	強制対流	1 m/s	632	55		0 大
		10 m/s	562	55		0 大
		100 m/s	371	55		0 大
		1000 m/s	142	55		0 大
不動態の生成	短絡抵抗	0.1t+0.01 Ω	397	276	31	2.65 小
		0.01t+0.01 Ω	119	268	52	2.02 小
		0.005t+0.01 Ω	184	277	68	1.43 小
		0.001t+0.01 Ω	512	293		0 小

図6 ヒートマップを用いた電池の総合評価

れることがわかり、不動態が急速に生成されるような材料を選択することが有効だと考えられる。

電池の設計段階から体系的に安全対策を行うために、機能モデリング手法 IDEF0 を用いてアクティビティモデルを記述した。アクティビティモデルによって、設計管理者が電池性能などの条件や、電池の設計・製造など全段階からの情報のすべてを統合し、安全な電池の設計方針を決定するための点が明確となる。その設計方針に従い、設計者は、実際の設計図を作成し、設計図に対する評価を行い、設計管理者にフィードバックする。

安全性の高いリチウムイオン電池を設計段階から実現するためには、電池の性能、コスト、安全性に関する条件や、電池のライフサイクル全体を把握する設計管理者の存在が不可欠であることがわかった。設計管理者から出される設計方針に見合った設計を設計者や評価者が担うことで、安全性の高いリチウムイオン電池を設計することが可能となる。

さらに、ステークホルダー間の複雑性を考慮した上で、社会システムとしてステークホルダーの安全対策行動を明確にするため、解決手法を検討した。行動と実施者の分析に適した制御構造図を用いることにした。制御構造図は、製品システムの要素とその相互作用をモデル化する。システム内の機器、組織、環境を要素とし、要素間の相互作用として制御行動と情報を示す。

図7にリチウムイオン電池製品リコールに関する制御構造図の概略を示す。リコールは、消費者が事故製品を見て事故を発見し(1)、消費者が製造事業者に事故を通報し(2)、製造事業者や行政、販売事業者が消費者にリコール実施を告知し(3)、消費者がリコール製品の使用を中止する(4)という流れで行われる。

相互作用に注目することで安全対策に必要な行動は2通りに提案できると考察した。一つ目は、既存の相互作用を強化する。例えば、消費者が事故通報しなければ製造事業者は事故を把握できずリコールが行われない。そのため、行政や製造事業者が消費者に事故通報制度を周知すること(2')が有効である。二つ目は、新規の相互作用を構築する。例えば、リコール情報が消費者に周知されなければ製品は使用中止されない。

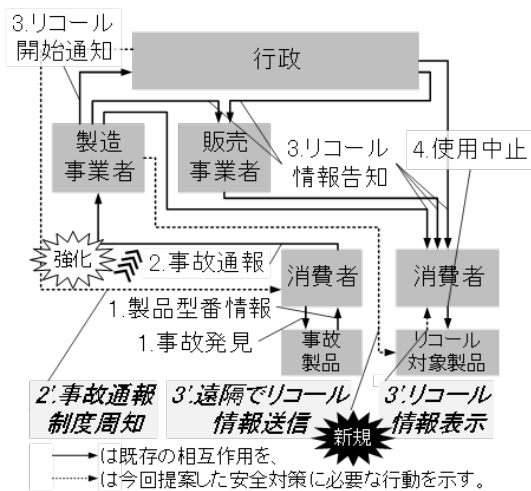


図 7 リチウムイオン電池製品
リコールに関する制御構造図の概略

そのため、製造事業者が消費者を介さず IoT 技術を応用し、遠隔操作で製品を停止したり、直接リコール情報を表示したりする技術(3')が有効である。このように、制御構造図を用いて、安全対策に必要な行動と実施者を提案できる。

(5) まとめ

故障の木解析により製品や事故のメカニズムの面から安全対策を提案し、制御構造図によりステークホルダーや制度の面から安全対策に必要な行動と実施者を提案することで、ライフサイクルを考慮したリチウムイオン電池の安全設計支援が可能となった。また、これらの手法によって提案される安全対策の効果を定量的に評価するため、シミュレーションモデルを構築した。今後はこれら手法を応用し、リチウムイオン電池にとどまらず、多様な製品の安全設計支援に役立てることが期待されるほか、各安全設計案の評価や選択支援が必要となる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計0件)

〔学会発表〕(計2件)

阿部将宜、杉山弘和、平尾雅彦、「電気自動車用リチウムイオン電池のリユース及びリサイクルにおける技術選択支援」第12回日本LCA学会研究発表会、2017年3月1日および2日、つくば

山西智紀、天沢逸里、杉山弘和、平尾雅彦、「ライフサイクルを考慮したリチウムイオン電池の安全設計支援手法」、化学工学会第83年会、2018年3月15日、吹田

6. 研究組織

(1) 研究代表者

平尾 雅彦 (HIRAO MASAHIKO)
 東京大学・大学院工学系研究科・教授
 研究者番号：80282573

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

杉山 弘和 (SUGIYAMA HIROKAZU)
 東京大学・大学院工学系研究科・准教授
 研究者番号：70701340

上原 恵美 (UEHARA EMI)

東京大学・大学院工学系研究科・助教
 研究者番号：10648132
 (2015年度)

(4) 研究協力者

天沢 逸里 (AMASAWA ERI)
 東京大学・大学院工学系研究科・助教
 研究者番号：80804989
 (2017年度)