低炭素社会の実現に向けた
技術および経済・社会の定量的シナリオに基づく
イノベーション政策立案のための提案書

大規模エネルギー貯蔵システムの安全性評価に関する技術的課題と社会実装への展望

令和３年３月

Technical Challenges and Forecasts on Safety Assessment of Large-Scale Energy Storage Systems for Its Social Implementation

Proposal Paper for Policy Making and Governmental Action
toward Low Carbon Societies

国立研究開発法人科学技術振興機構
低炭素社会戦略センター

LCS-FY2020-PP-07

概要

本提案書は、大規模エネルギー貯蔵システムの安全性評価の動向を調査し、将来重要となる考え方や取り組みを提案することを目的とした。まず、低 / 脱炭素社会実現のためのキーテクノロジーとなる大規模エネルギー貯蔵システムの安全性に関する技術動向を調査した。次に、安全工学的観点で動向調査結果を整理するためのフレームを提案し、定性的リスク分析により重要となるいくつかのリスク項目を抽出した。さらに、リスクの定量化に向けて蓄電池モジュールのモデル化を試行した。最後に、大規模エネルギー貯蔵システムの安全性評価に関して、今後必要となる要素を提案した。

Summary

The purpose of this proposal paper is to review previous studies of the safety and risk of large-scale energy storage systems, and to suggest essential concepts and actions to develop safer systems of this kind. Firstly, this report surveyed technology trends relating to the safety of large-scale energy storage systems, which will be a key technology for achieving a low/zero-carbon society. Secondly, a framework was developed for summarizing the results of this survey from the perspective of safety engineering, with qualitative risk analysis used to identify critical risks. Next, modeling of an energy storage module was tested to quantify risk. Finally, essential concepts and actions for the safety assessment of these systems were proposed.

国立研究開発法人科学技術振興機構（JST）
低炭素社会戦略センター（LCS）

目次

概要

1. はじめに（本提案／報告の位置づけ）…… 1
2. 安全技術動向 …… 1
3. LiB を用いた大規模蓄電池システムのフィジカルリスクアセスメントとその課題…… 3
   3.1 リスクシナリオ特定 …… 4
   3.2 リスク分析 …… 4
   3.3 リスク評価 …… 5
4. 包括的シナリオ抽出に向けた初期検討 …… 6
   4.1 大規模蓄電池システムモデルの構築 …… 6
   4.2 シナリオ特定手法 …… 7
   4.3 HAZID および HAZOP の実施 …… 7
5. リスク定量化に向けた蓄電池システムの物理モデル化初期検討 …… 9
   5.1 複合物理領域・システムレベルモデリング …… 9
   5.2 複数セル接続モデル構築 …… 10
   5.3 モデルの妥当性検証 …… 12
   5.4 モデル活用の試行例 …… 14
6. まとめ …… 16
7. 結論（科学的、技術的な結果のとりまとめ）…… 16

参考文献…… 17

1. はじめに（本提案／報告の位置づけ）

大規模エネルギー貯蔵システムとは、必要に応じて大量の電力を充放電可能な技術システムであり、特に再生可能エネルギーの出力変動を吸収することができることから、当該システムの社会実装は低 / 脱炭素社会実現のための必須要件となっている。そのため、大規模エネルギー貯蔵システムの安全性確保は、これらが実装される社会の受容性を高めるのみならず、経済性や競争力にも強く関連する重要なファクターである。エネルギー貯蔵システムには様々な方式があるが、大規模エネルギー貯蔵においてはリチウムイオンバッテリー（以下､LiB）が使用されることから、本提案書は LiB を使用した大規模蓄電池システムを対象とした。大規模蓄電池システムは、多量の LiB の直並列接続を組み合わせて目的のエネルギー容量を実現する大規模エネルギー貯蔵システムであり、①高エネルギー密度（システムが内包するエネルギー量が大きい）、②高複雑性（サブシステムや外部システムと複雑に相互作用する）、③高社会結合性（社会生活との相互影響が大きい）という特徴を有しており [1, 2]、社会実装に向けて経済性や安全性等の包括的なリスクアセスメントが求められる。大規模蓄電池システムを含む先端科学技術に関する包括的なリスクアセスメントおよびその具体的な手順等については、横浜国立大学先端科学高等研究院リスク共生社会創造センター「先端科学技術の社会総合リスクアセスメントガイドライン」[3-5] を参照されたい。本調査研究では、大規模蓄電池システムが有するリスクの中でも、特に安全性に関するリスク（フィジカルリスクと呼ぶ）に焦点を絞り、この技術動向を安全工学的視点に基づいて整理した。また、システムの安全性検討で用いられる定性的リスク分析手法により、大規模蓄電池システムが有する多様なリスクを抽出した。さらに、モデリング技術を活用した蓄電池モジュールの熱暴走シミュレーションを試行した結果についても報告した。最後に、社会実装に向けて今後必要とされる事項について提案した。

2. 安全技術動向

LiB の安全性技術に関しては、これまで公開・非公開に関わらず、多くの検討がなされている。本調査研究では、学術論文引用データベース Web of Science に登録されている論文に関して、計量書誌学に基づく分析が可能なソフトウェア VOSviewer を用いて、LiB の安全性に係る研究動向を調査した。2021 年 1 月までに公開された学術論文より、Web of Science の検索項目であるタイトルおよびアブストラクトに「Lithium ion battery」かつ「runaway」と入力し、2 つのキーワードが含まれる論文を抽出した。その結果、991 件の論文が検索され、これら論文中のタイトルとアブストラクトにおいて使用された単語の結びつきを解析した結果を図 1 に示した。図中の色は、各キーワードが使用された論文の出版年の平均を表しており、研究動向の推移（青色から黄色への色の変化が古い論文から最新論文への動向変化を表す）を読み取ることができる。2015 年までは、熱耐性に優れた正負極材など高性能な電池材料開発が盛んに行われていた。一方で、2017 年頃より、主に自動車（vehicle）用の LiB を念頭に置いたバッテリーシステムやバッテリーマネジメントシステム（BMS）の検討が多く実施されるようになり、「Fire（火災）」や「battery thermal management」などのキーワードが多く見られるようになった。また、LiB の熱暴走に関する学術論文の著者は、中国系の研究グループ（特に清華大学の M. Ouyang 教授や中国科学技術大学の Q. Wang 教授らが中心）が大きな研究ネットワークを形成していることが同様の解析から分かった。

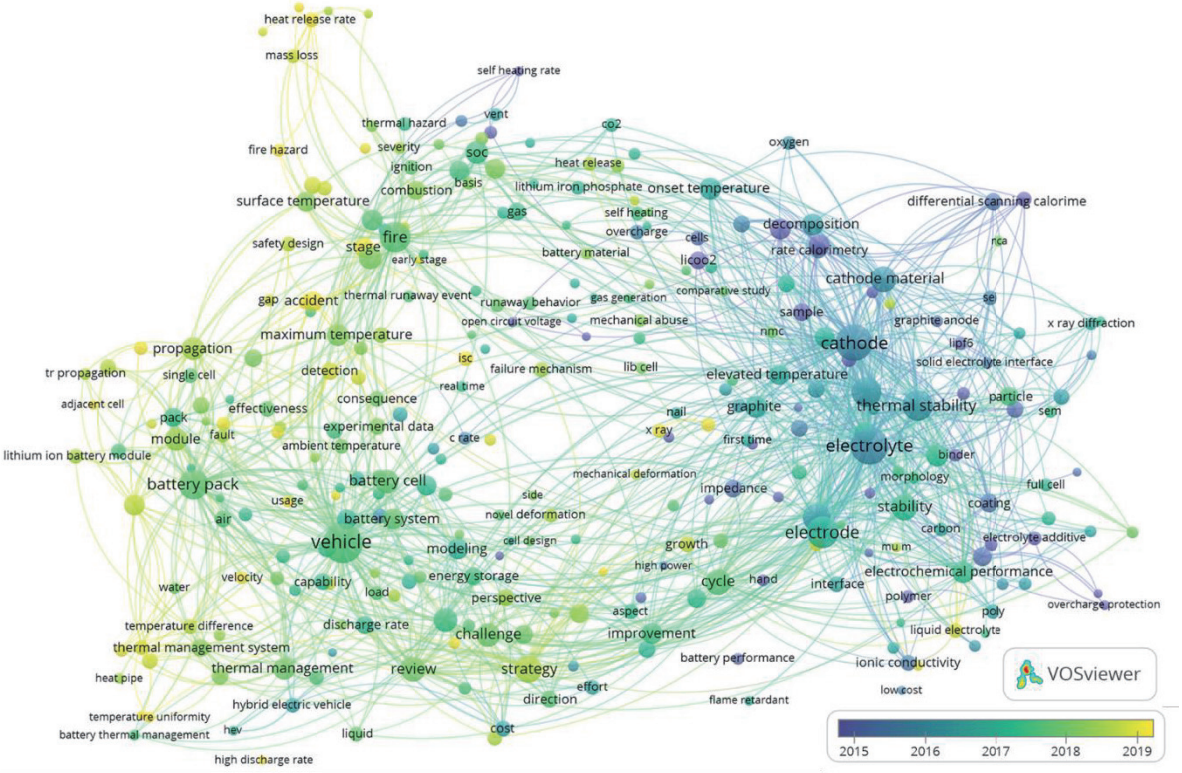

図１　Web of Science で学術論文のタイトルおよび
アブストラクトに使用される英単語の共記ネットワーク解析結果

これまでの LiB の安全性検討に関する学術動向は、主に自動車用の LiB を念頭に検討が進んできており、既に多くの研究例が Review 論文 [6-10] として整理されている。Review 論文を参考に、LiB の事故要因と安全対策分類を表 1 に示す。これら分類は LiB 自体の事故要因および安全対策であり、LiB を用いた大規模蓄電池“システム”としての事故要因および安全対策ではないことに留意する必要がある。また、LiB が事故に至る過程のリスクシナリオ特定に関する既往研究 [11, 12] においても、個別 LiB の事故発生要因の特定および安全対策の提言に留まり、大規模蓄電池システムを志向した詳細な検討は行われていない。以上より、これまでの安全性検討研究は電池自体の危険性とその安全対策に関する研究が主であり、システム全体としての安全性検討は明示的には研究が進んでいないことが明らかとなった。

国際規格や調査報告書などに関して、2017 年および 2020 年に International Electrotechnical Commission（IEC）から蓄電池システムの安全性検討および安全要求に関する国際規格が発行されている [13, 14]。特に、2020 年国際規格は独立行政法人製品評価技術基盤機構が規格原案を作成しており、蓄電池システムの安全性評価を日本が先導していることがわかった。2017 年国際規格では、蓄電池システムのハザード、リスク分析およびリスク低減対策の概要が記載されており、安全性評価の考え方が整理されている。また、2020 年国際規格では、2017 年国際規格に主に安全要求、本質安全設計、ライフサイクルマネジメントが追記された。安全要求について、各サブシステムの故障が他のサブシステムへ影響を及ぼさないことや蓄電池システムからの騒音や振動等を最小限に抑制することが要求された。また、本質安全設計では、蓄電池システムの設計に関して火災や爆発等を発生させないための設計方針が記されている。両規格はいずれも蓄電池システムの安全性検討および安全設計に関する考え方が整理されている一方で、規格という性質上、具体的なリスクアセスメント結果は記載されていない。

2019 年にノルウェーの DNV GL 社が大規模蓄電池システムのリスクアセスメントフレームに関する技術文書 [13, 14] を公開しており、今後は当該フレームを基盤に既存の知見が統合され、リスクアセスメント研究が推進されていく可能性がある。DNV GL 社が提案するリスクアセスメントフレームは、化学プラントおよびオイル＆ガスプラント分野で構築されてきたリスクアセスメントフレームを大規模蓄電池システムへ拡張した構造と考えられる。当該技術文書では、まずアセスメント対象とするリスクを定性的に描像した後に、多重防護解析（LOPA: Layer of protection analysis）（詳細後述）的にリスクを定量化するフレームを示し、定量的にリスク推算を試行している。しかし、本検討では、簡易的なシステムモデルを設定しており、さらに故障確率等の情報の精度は高くないため、リスク分析の精緻化には課題が残されていることがわかった。したがって、今後は定量的リスクアセスメントに関する動向を注視する必要がある。例えば、システムモデルの詳細化や各機器の故障確率等の情報はリスクの定量化には重要な情報である。また、リスク評価のためのリスク基準の設定も蓄電池システムの実装には不可欠である。定量的リスクアセスメント技術が比較的に進んでいる化学プラントに関しては、既に日本を除く多くの国々で定量的リスクアセスメントが義務付けられており、リスク基準を満たさないプラントの新設は認められない。化学プラント関連の定量的リスクアセスメントに関するコンサルティングを手掛ける DNV GL 社が大規模蓄電池システムのリスクアセスメントに関する技術文書を公開したことから、大規模蓄電池システムに関しても同様のトレンドとなることが予測される。

表 1　LiB の事故要因と安全対策分類

事故要因分類	I.　機械的不具合：衝突による電池の変形・貫通 II.　電気的不具合：過充放電・外部短絡 III.　熱的不具合 IV.　内部短絡
安全対策分類	I.　過充電防止機構：主にバッテリーマネジメントシステムによる制御 II.　過熱防止機構：主に正負極材量改良、セパレータ材質改良、断熱材（Thermal retardant） III.　バッテリーマネジメントシステム IV.　バッテリー熱マネジメントシステム V.　その他安全装置：サーマルヒューズ、PTC（正温度係数）サーミスタ、電流遮断装置、安全弁

3. LiB を用いた大規模蓄電池システムのフィジカルリスクアセスメントとその課題

リスクアセスメントにおける重要な 3 つのプロセスを以下に示す。

① リスクシナリオ特定：ハザード特定、リスク顕在化シナリオの描像
② リスク分析：各シナリオの発生頻度と影響の定性的および / または定量的な推定、およびそれらの組み合わせによるリスク推定
③ リスク評価：算定されたリスクが許容可能かどうかを判定するためのリスク基準との比較

リスクアセスメントの実施においては、第一に、システムが有するリスク源とその顕在化シナリオに関する情報が必要である。これは社会実装される技術システムが内包する、想定され得る最大の影響を与える事象群とその発現経路の特定と言い換えることもできる。第二に、想定されたリスクシナリオの発生頻度と影響を見積もり、それらを組み合わせることでリスクを推定する。第三に、推定されたリスクとリスク基準を比較する。リスク基準を満たさない場合は、リスク低

減 / 回避が現在または将来の技術によって可能であるかを検討し、以後のリスク対応方針を決定し、設計・運用情報に反映させる。ここで算定されたリスクが原理的に回避不可能であり、かつその事象が社会的に受容不可能であると判断される場合は、技術システム構想全体の見直しが必要となる場合もある。以下、大規模蓄電池システムのリスクアセスメントにおける課題を上記 3 ステップに沿って概観する。

3.1 リスクシナリオ特定

図 2 に大型蓄電池システム（Energy Storage System: ESS）の事故シナリオに関する Bow-tie モデル構造案を示す。Bow-tie モデル [15] とは、事故を支配する重要な事象を中心に置き、それが発生する原因系から結果系に至るまでの事象進展と、これを阻止する安全対策（原因系に作用しシナリオの未然防止に資する対策と、結果系に作用し影響拡大防止に資する対策に分類）を蝶ネクタイ型に整理することで、重要な事故シナリオやシステムの脆弱性について把握することができる考え方である。前述の研究動向調査より、中央に位置する LiB の熱暴走の発生メカニズム（機械的要因等から熱暴走に至る過程）、およびその未然防止策に関しては詳細に検討されていることが明らかとなった。一方で、大規模蓄電池システムにおいて LiB の熱暴走は重要であるが、あくまで事故の一形態に過ぎない。また、大規模蓄電池システムの有する特徴（高エネルギー密度、高複雑性、高社会結合性）を考慮すると、機械的要因等に代表される LiB の熱暴走の直接的要因のみならず、その背後、すなわち Bow-tie モデルの左端に位置する事故要因（システム内部要因および外部環境要因等）に由来するリスクシナリオや、熱暴走発生後にシステム全体、さらには社会へ影響を与えるリスクシナリオも特定することが重要となる。したがって、大規模蓄電池システムに対して上記の条件を考慮した複雑なシナリオも含めた、より体系的・包括的なリスクシナリオ抽出が必要である。4 章において、包括的リスクシナリオ抽出に関する試行について報告する。

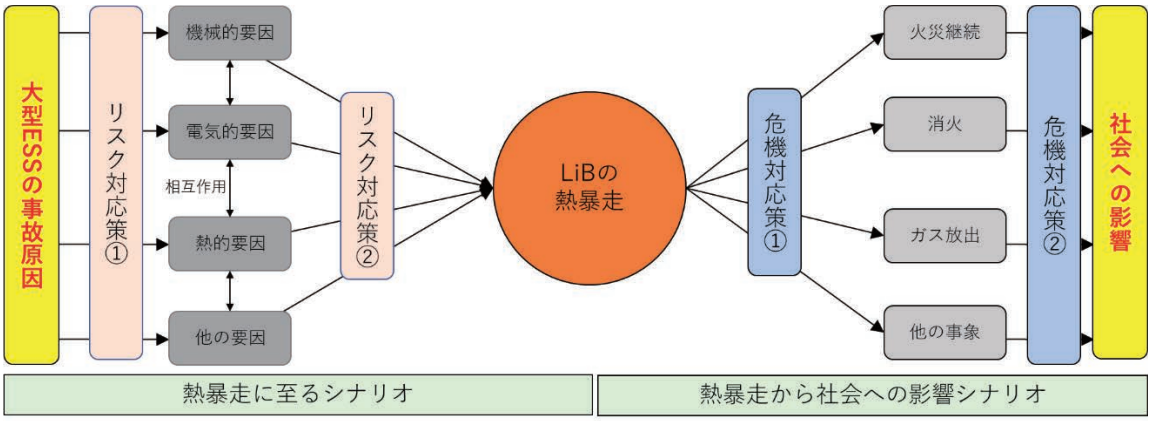

図 2　大規模蓄電池システムにおける熱暴走事故シナリオに関する Bow-tie モデル案

3.2 リスク分析

リスクシナリオが体系的・包括的に整理された後は、詳細なリスク分析に移行する。大規模蓄電池システムのリスク分析には、（半）定量的リスク分析手法である防護層解析（Layer of Protection Analysis: LOPA）[16] が有効である。前述の DNV GL 社が提示するリスクアセスメントフレームにおいても LOPA の活用が意図されている。LOPA とは、米国化学工学会（AIChE）が設立した化学プロセス安全センター（CCPS）が考案した手法である。一つのリスク低減措置を

独立防護層（Independent Protection Layer: IPL）とし、IPL が突破される確率の積から結果の発生頻度を求め、残存リスクを受容するために必要な追加のリスク低減措置を決定するために用いられる。表 2 に LOPA の考え方を大規模蓄電池システムへ適用した場合のリスク分析イメージを示す。防護層 1 から防護層 9 に関して、蓄電池システムの構成要素に関係する安全対策を記載し、それらのリスク低減効果を定性的 / 定量的に記載する。このような LOPA の活用により、表 1 で示した安全対策のみならず、幅広い視点に基づいた総合的安全対策が必要であることがわかる。LOPA を用いて定量的にリスクを把握するには、大規模蓄電池システムが有するリスクおよび各 IPL のリスク低減効果を定量的に見積もることが必要である。しかし、個々の LiB 事故のリスク推定と大規模蓄電池システム全体における事故のリスク推定には乖離があるのが現状である。例えば、単一のバッテリーにおける熱暴走メカニズムが既知であったとしても、電気的・機械的に複雑に組み込まれた大規模蓄電池システムにおける熱暴走がシステム全体へ及ぼす影響を一概に知ることは容易ではない。本課題の克服に向けた初期検討について 5 章で報告する。

表 2　大規模蓄電池システムに関する LOPA 実施イメージ

安全対策層		安全対策例	低減リスク
Layer 1： 本質安全設計	電池セル	耐熱正負極材 不燃性電解液	
	電池パック		
	電池モジュール		
Layer 2： 基本制御	電池セル	バッテリーマネジメントシステム 過充電防止機構	
	電池パック		
	電池モジュール		
	制御システム		
Layer 3： 安全制御	電池セル	バッテリーサーマルマネジメントシステム 安全弁	
	電池パック		
	電池モジュール		
	制御システム		
Layer 4： 電気的防御機構	電池セル	サーマルヒューズ 電流遮断装置	
	電池パック		
	電池モジュール		
Layer 5：防消火		火炎検知 適切な消火剤	
Layer 6：手順		遠隔モニタリング・監視	
Layer 7：レイアウト		設置箇所の最適化（自然災害など）	
Layer 8：危機対応		緊急避難対応等	
Layer 9：復旧			

3.3 リスク評価

リスクが詳細に分析された後にリスク評価へ移る。リスク評価とは予め設定されたリスク基準と分析・算定されたリスクを比較することである。技術システムが満たすべきリスク基準について、我が国においては明確な基準は存在しない。しかし、日本学術会議が提案する工学システムの安全目標 [17] の考え方を導入することができる。当該安全目標は ALARP（as low as reasonably practicable）概念に準拠したものであり、絶対に許容されないリスクである A 基準と、広く受け入れられると判定されるリスクである B 基準があり、その間を合理的に実施可能なレベルでリス

クを低減させる ALARP 領域とする。A および B 基準の詳細は社会等との合意によって形成されるものであるが、様々な工学分野におけるリスク基準とその根拠が例示されている。大規模蓄電池システムの社会実装に向けて、当該システムが満たすべきリスク基準について、関係者間での合意形成に向けた議論を十全に進めておく必要がある。

4. 包括的シナリオ抽出に向けた初期検討

4.1 大規模蓄電池システムモデルの構築

リスクシナリオ抽出にあたり、既往の実証試験設備および事故報告書等 [18-20] を参考に大規模蓄電池システムモデルを構築した。構築したモデルを図 3 および図 4 に示す。図 3 より、大規模蓄電池システムが有する高社会結合性および高複雑性という特徴を鑑み、大規模蓄電池システムと、当該システムを取り巻く外部環境、およびシステム内要素の相互の関係性を考慮した。当該システムを取り巻く外部環境としては、自然環境のみならず、当該システムを包摂する技術システム、ならびに社会インフラ等を含む社会システムについてもモデルに取り込んだ。図 4 より、大規模蓄電池システムの内部については特に大規模蓄電池の構成要素を細分化し、単一の小型電池を意味するセル、セルを数十個直列接続したモジュール、モジュールを複数並列接続した蓄電池盤を整理し、それらの相互作用を考慮した。また、各セルの健全性を保つためのバッテリーマネジメントシステム、過熱した蓄電池盤を冷却する空調等も考慮した。

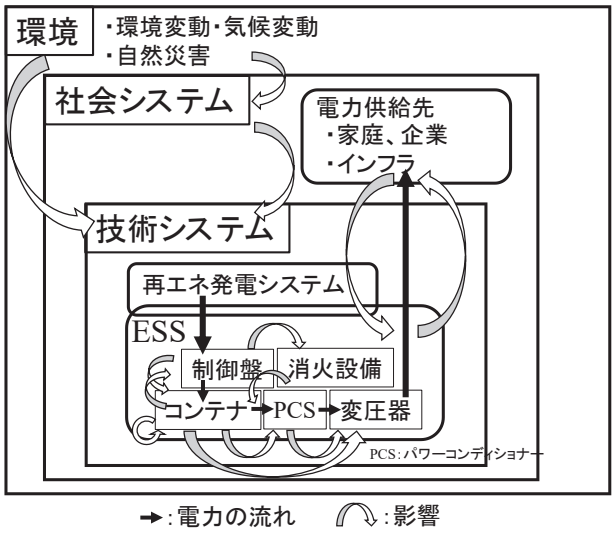

図 3　エネルギー貯蔵システムの外部環境連関モデル

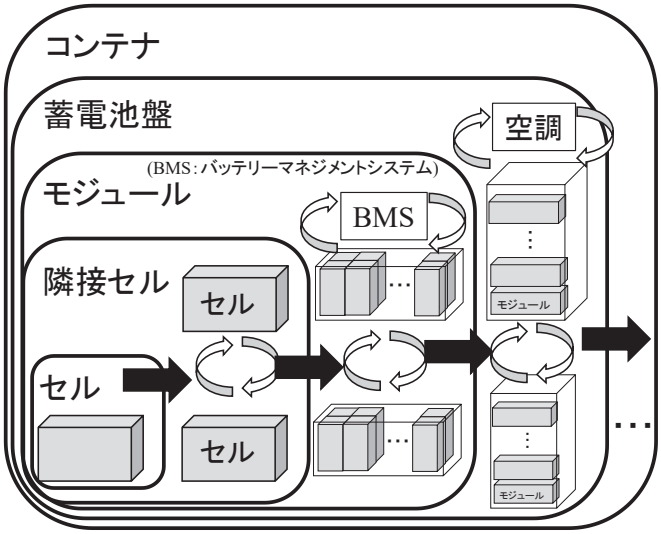

図４　大規模蓄電池構成要素連関モデル

4.2 シナリオ特定手法

シナリオ特定手法として Hazard identification study（HAZID）および Hazard and Operability study（HAZOP）を選定し、当該システムを導入した社会において顕在化し得るリスクを広い視点で抽出した。HAZID は対象システムの外部環境変動に着目し、ガイドワード集に整理された様々な環境変動を想定し、技術システムにおいて発生し得る事故シナリオをブレインストーミング形式で抽出する手法である。また、HAZOP は温度や圧力などのシステムにおけるパラメータとガイドワードの組み合わせより、通常状態からのずれを想定し、技術システムにおいて発生し得る事故シナリオをブレインストーミング形式で抽出する手法である。本検討ではこの 2 種のシナリオ特定手法を用いてシナリオ特定を実施することで、大規模蓄電池システムの包括的リスクシナリオ特定を試行した。なお、ここでは抽出シナリオの網羅性を高めるため、バイアスとなり得る安全対策機器については作動しないと仮定した。

4.3 HAZID および HAZOP の実施

大規模蓄電池システムモデルに対して、HAZID および HAZOP ガイドワード [5, 21] に基づきリスクシナリオを抽出した。HAZID を実施した結果、164 件のシナリオが抽出された。表 3 にリスクシナリオの事例を示す。例えば、強風・竜巻によって周辺物が飛来し、コンテナに衝撃が加わることで内部の蓄電池盤が損傷し、蓄電池盤内の複数のセルが同時に内部短絡・熱暴走に至るシナリオを抽出した。また、大雨・洪水によって蓄電池システム周辺機器である室外機・空調が水没して機能喪失し、冷却不良によってセルの劣化が加速して内部短絡・熱暴走に至るシナリオを特定した。さらに、通信システム遮断によってバッテリーマネジメントシステムが機能不全となり、蓄電池盤内部の異常が検知不可になり内部短絡・熱暴走に至るシナリオ等が挙げられた。このように、システム外部環境の変動等の特殊な状況を想定することにより、多様なリスクシナリオを取り扱うことが可能となる。また、HAZOP を実施した結果、106 件のシナリオが抽出され、表 4 にリスクシナリオ例に示す。主要なシナリオとして、セル内部の温度・圧力上昇や過充電に起因した内部短絡が発生し、セルが熱暴走に至り、当該セル周辺の温度上昇に伴い隣接セル、モジュール、蓄電池盤へと熱暴走が伝播・拡大していくシナリオが特定された。当該シナリオは、大規模蓄電池システムの構成要素の相互作用により、単一セルでの異常がシステム全体へと拡大し、大きな被害を引き起こす特徴的なシナリオであるといえる。したがって、当該シナリオに着

目し、次章の検討を実施した。

表３　HAZID により得られたリスクシナリオ例

ガイドワード		対象	シナリオ
自然環境	強風・竜巻	蓄電池盤	強風・竜巻によって周辺物が飛来してコンテナに衝突し、激しく損傷すると共に、セル内セパレータの破壊により内部短絡が生じ、大量の電流が流れることで発熱・発火する。
自然環境	大雨・洪水	空調	室外機が水没により故障し、空調の作動が停止することでコンテナ内および各セルの温度が上昇し、セル内の物質が劣化する。劣化によるセル内生成物がセパレータを破壊することで内部短絡が生じ、大量の電流が流れることで発熱・発火する。
自然環境	地震	BMS	地震による強い揺れにより制御盤および BMS が故障し、セルの動作管理が不能になる。各セルの充電率がそれぞれ等しい状態に保つことが困難となり、セル内部の劣化が進行し、劣化によるセル内生成物がセパレータを破壊することで内部短絡が生じ、大量の電流が流れることで発熱・発火する。
人工環境	飛来物	蓄電池盤	周辺飛来物がコンテナに衝突して激しく損傷すると共に、セル内セパレータの破壊により内部短絡が生じ、大量の電流が流れることで発熱・発火する。
情報環境	通信遮断	BMS	通信システムの遮断により BMS の管理情報を取得できなくなる。セル・モジュール内部で異常発熱が発生していることを検知できず、発熱を放置することで発火、システム全体へ火災が拡大する。

表４　HAZOP により得られたリスクシナリオ例

ESS モデル	パラメータ	ガイドワード	意味	原因	単一セルでの影響	隣接セルへの影響	モジュールへの影響	システム全体への影響
蓄電池盤	温度	MORE[1)]	セル温度上昇	・高気温 ・外部火災 ・冷却不良 ・電解液の反応	① セルの温度上昇により電極・電解液・セパレータが分解 ② セパレータが破壊され内部短絡が発生、発熱 ③ さらに温度上昇、電極・電解液の分解 ④ セルの熱暴走	① セルの熱暴走により隣接セルの温度上昇 ② 温度上昇により電極・電解液・セパレータが分解 ③ 隣接セルのセパレータが破壊、内部短絡により発熱 ④ さらに温度上昇、電極・電解液の分解 ⑤ 隣接セルの熱暴走	① 隣接セルの熱暴走によりその他のセル・モジュール全体の温度上昇 ② モジュール内セルの電極・電解液・セパレータが分解、セパレータの破壊 ③ モジュール内セルで内部短絡の発生、発熱によりモジュール内で発火・火災	① モジュール内で発生した火災が蓄電池盤全体へ延焼 ② システム全体に延焼・大規模火災
蓄電池盤	充電率	MORE	セル過充電	・高気温 ・BMS の故障 ・CMU[2)] の故障 ・劣化	① 過充電によりセル内の金属リチウムが生成・成長 ② 成長した金属リチウムがセパレータを貫通し電極同士が接触 ③ 内部短絡が発生、発熱 ④ セルが温度上昇し、電極・電解液が分解 ⑤ セルの熱暴走	① セルの熱暴走により隣接セルの温度上昇 ② 温度上昇により電極・電解液・セパレータが分解 ③ 隣接セルのセパレータが破壊、内部短絡により発熱 ④ さらに温度上昇、電極・電解液の分解 ⑤ 隣接セルの熱暴走	① 隣接セルの熱暴走によりその他のセル・モジュール全体の温度上昇 ② モジュール内セルの電極・電解液・セパレータが分解、セパレータの破壊 ③ モジュール内セルで内部短絡の発生、発熱によりモジュール内で発火・火災	① モジュール内で発生した火災が蓄電池盤全体へ延焼 ② システム全体に延焼・大規模火災
蓄電池盤	圧力	MORE	セル容器圧迫	・高気温 ・過充電 ・過放電 ・劣化	① セル容器が圧迫され変形 ② 変形によりセパレータが破壊され内部短絡が発生 ③ セル温度が温度上昇し、電極・電解液が分解 ④ セルの熱暴走	① セルの熱暴走により隣接セルの温度上昇 ② 温度上昇により電極・電解液・セパレータが分解 ③ 隣接セルのセパレータが破壊、内部短絡により発熱 ④ さらに温度上昇、電極・電解液の分解 ⑤ 隣接セルの熱暴走	① 隣接セルの熱暴走によりその他のセル・モジュール全体の温度上昇 ② モジュール内セルの電極・電解液・セパレータが分解、セパレータの破壊 ③ モジュール内セルで内部短絡の発生、発熱によりモジュール内で発火・火災	① モジュール内で発生した火災が蓄電池盤全体へ延焼 ② システム全体に延焼・大規模火災

5. リスク定量化に向けた蓄電池システムの物理モデル化初期検討

5.1 複合物理領域・システムレベルモデリング

大規模蓄電池システムは単一セルが多数集合したシステムであるが、当該システムが有する高複雑性により、システム全体のリスクを単一セルのリスクの単純な足し合わせで評価することはできない。したがって、システムの個々の構成要素の物理的挙動のみならず、システム全体の複合的な物理的挙動を再現可能なモデルを構築し、システムレベルでのリスク評価が重要になる。

昨今の情報・計算工学技術の発展・進歩に伴い、対象となるシステムを複合物理領域・システムレベルモデリング言語 Modelica によりモデル化し、システムの構成要素間での複数の物理領域にわたる相互作用に着目したリスク分析・評価が、宇宙機推進システムを対象に取り組まれてい

1) HAZOP で使用されるガイドワードの 1 つで、対象とするパラメータ（温度や圧力など）が設計値よりも増加することを意味する。他にも No や Less、Reverse などがある。

2) CMU（Cell Monitoring Unit）：バッテリーマネジメントシステム（BMS）よりも小さいシステムであり、セル単位の温度や電流などを監視する。

る [22]。本検討では、モデリング技術を大規模蓄電池システムに応用し、当該システム内における熱・電気等に代表される複合物理領域にわたる物理現象をモデル化し、定量的リスク分析に向けた初期検討を実施した。具体的には、複合物理領域・システムレベルモデリングが可能な 1D シミュレーションソフトウェアである SimulationX を用いて、各物理分野における基礎的な物理方程式（エネルギー保存則、オームの法則等）を記述することで、複数のセルが接続されたシステムモデルを構築し、その妥当性を検証した。さらに、構築モデルを活用することで、蓄電池モジュールに関する熱暴走確率分布の推算を試みた。

5.2 複数セル接続モデル構築

本提案書は、既往研究 [23-25] を参考に、電気・熱的現象を記述する基礎方程式を用いてモデルを構築した。以下、モデル構築に用いた基礎方程式の詳細を示す。

（1）電気的モデル

基本的な電気的挙動は等価回路で表すことが可能である。等価回路とは、図 5 に示すように、起電力源、コンデンサー、電気抵抗等の要素を組み合わせた回路のことである。等価回路中では、オームの法則 $V = IR$ が成り立つ。この等価回路中の V は LiB の開回路電圧（open circuit voltage: OCV）、I は等価回路中に流れる電流、R は LiB の内部抵抗、C_{th} はコンデンサーの電気容量を意味する。

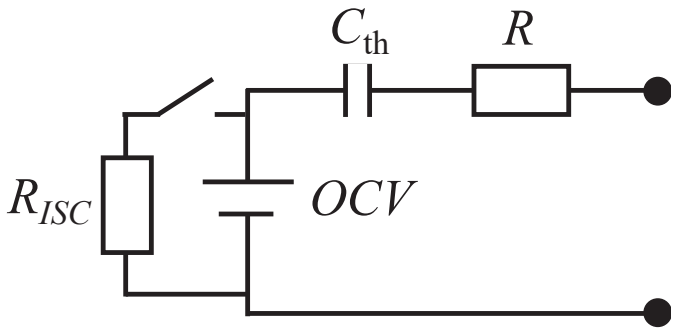

図 5　等価回路図の例

LiB の OCV は充電率（state of charge: SOC[3]）によって変動する。本検討で用いた SOC と OCV の関係を表した SOC － OCV 曲線を図 6 に示す。SOC － OCV 曲線は通常は個別 LiB ごとに異なるが、SOC 最大値において OCV は最大値を取り、LiB を使用する（放電する）と共に OCV が低下し、SOC が 0 に近づくと OCV が急減するという挙動は共通している。

LiB の内部抵抗は、電極の活物質界面や電解液中のリチウムイオンの拡散移動抵抗等によって定まる。しかし、熱暴走の主要因の一つである内部短絡が発生した場合は、LiB が本来持つ内部抵抗とは別に、極めて小さい抵抗に大電流が流れることになる。したがって、内部短絡が発生した場合には、図 5 に示す小さい抵抗値を持つ電気抵抗 RISC を考慮することで再現した。

起電力と内部抵抗が定まれば、オームの法則によりその回路に流れる電流が定まる。LiB の SOC は、流れた電力分だけ減少し、電流と時間の積算値によって定まる。すなわち、次式のように表される。

$$\mathrm{SOC} = \mathrm{SOC}_0 - \frac{1}{C}\int I\,dt$$

[3] SOC とは、ある電池が満充電に保有できる電力量に対して、その時に保有している電力量のことであり、充電率を意味する。

ただし、C は電池が最大充電されている時の電力容量であり、SOC_0 は初期充電率である。LiB の放電によって SOC が減少すると、図 6 に従って OCV が変化し、電流の値も変化する。最終的には、SOC が 0 になることで OCV も 0 となり、電流は流れなくなる。なお、充電時の挙動は電流の符号が逆向きになることで再現される。また、電流が流れた時に発生する電力 P は $P=IV$ で表すことができる。

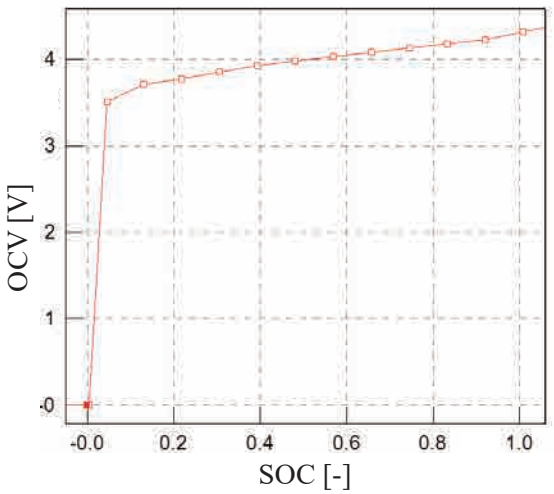

図 6　LiB の SOC － OCV 曲線

(2) 熱的モデル

LiB のセル一つに対して、熱収支式は以下のように表される。

$$\Delta E = Q + Q_{cond} + Q_{conv} + Q_{rad}$$

ここで、Q はセルに由来する単位時間当たりの発熱量であり、Q_{cond}、Q_{conv}、Q_{rad} はそれぞれ熱伝導、熱伝達、熱放射による冷却を表す。Q には化学反応により生じる Q_{chem} と、電力により生じる Q_{ele} の二つが含まれる。Q_{chem} は電極や電解液等の各部材が燃焼や熱分解した時に生じる熱の総和である。これらの算出に用いる各部材の熱容量等の値については文献 [23] を参照されたい。また、Q_{ele} はセル内の抵抗に電流が流れることに由来する熱であり、前述の電力 P の値を用いる。

熱伝導 Q_{cond} はセル同士の熱伝導を表し、セル同士の接触面積を A_{cell}、セル容器の熱伝導度を λ、セル容器の厚さを δ、T_n を n 個目のセル温度とすると次式のように表される。

$$Q_{cond} = A_{cell}\frac{\lambda}{\delta}(T_{n+1} - T_n)$$

熱伝達 Q_{conv} はセルと空気との対流伝熱を表し、熱伝達係数を h、セルと空気の接触面積を A_{air}、空気の温度を T_∞ とすると、次式のように表される。

$$Q_{conv} = A_{air}h(T_n - T_\infty)$$

なお、本検討では空気の温度 T_∞ は 25℃で一定としている。

熱放射は、周囲から放出される可視光や赤外域における電磁波による熱エネルギーの直接移動を表し、ステファン―ボルツマン定数を σ、放射率係数を ε とすると、次式のように表される。

$$Q_{rad} = \varepsilon\sigma(T_n^4 - T_\infty^4)$$

ただし本検討では、セルから放出される熱放射先を空気としている。

5.3 モデルの妥当性検証

上記の物理方程式を用いて、複数セルを接続した物理モデルを構築し、その妥当性検証を行った。比較対象とした既往研究 [23] における実験装置の概念図を図 7 に示す。実験は、6 個のセルを隣接させたセル集合体の一番端のセルを内部短絡させ、その後生じる熱暴走による温度上昇が隣接セルへ伝播する際の各セルの温度挙動を取得したものである。本実験例を念頭に置いて構築した物理モデルの一部を図 8 に示す。セル内部の電気的・熱的現象をモデル化すると共に、電気的モデル内の内部抵抗および内部短絡を模擬した抵抗において生じる熱を、熱的モデルに入力する機構も取り込んだ。

図 9 に、物理モデルに基づく各セルの温度挙動のシミュレーション結果および実験結果の比較図を示す。本検討では実験結果に合わせて、$t = 0$ s においてセル 1 の内部短絡が発生する条件でシミュレーションを行った。比較の結果、各セルにおいて急激な発熱が開始する時間、各セルにおいて観測される最大温度、およびその後の温度低下挙動がよく一致した結果が得られた。

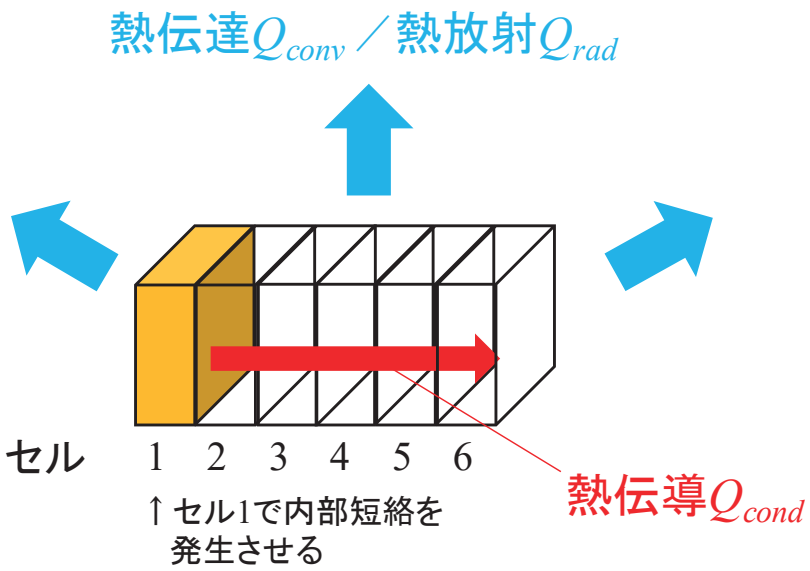

図 7　既往研究 [23] で実施された実験装置概念図

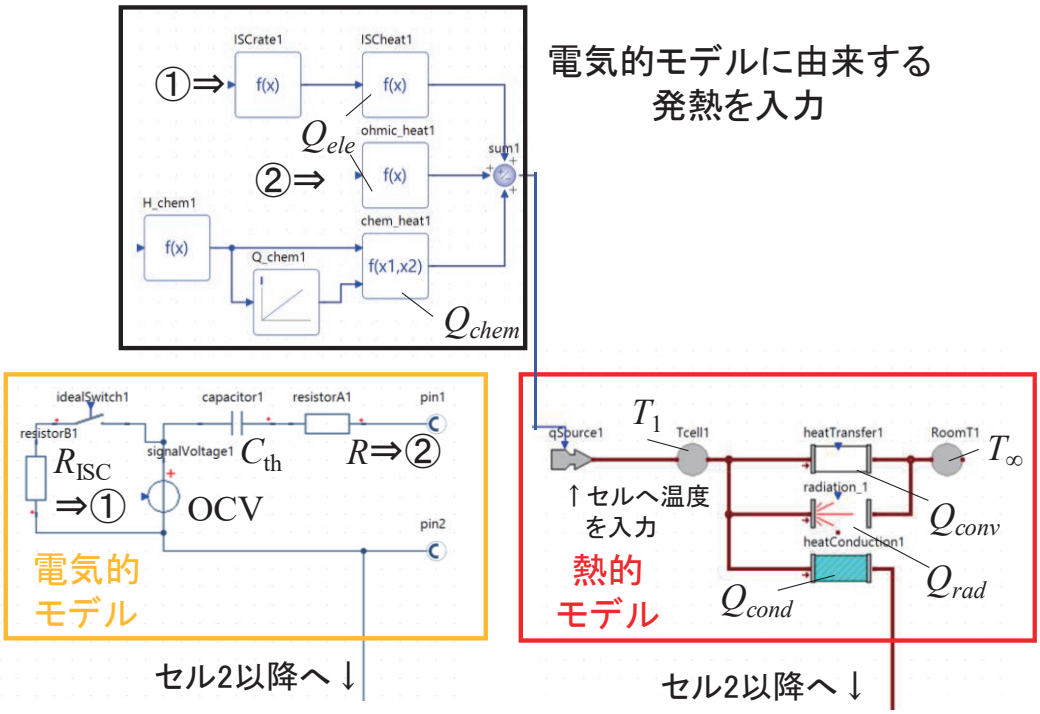

図８　SimulationX 上で構築した物理モデル（一部）

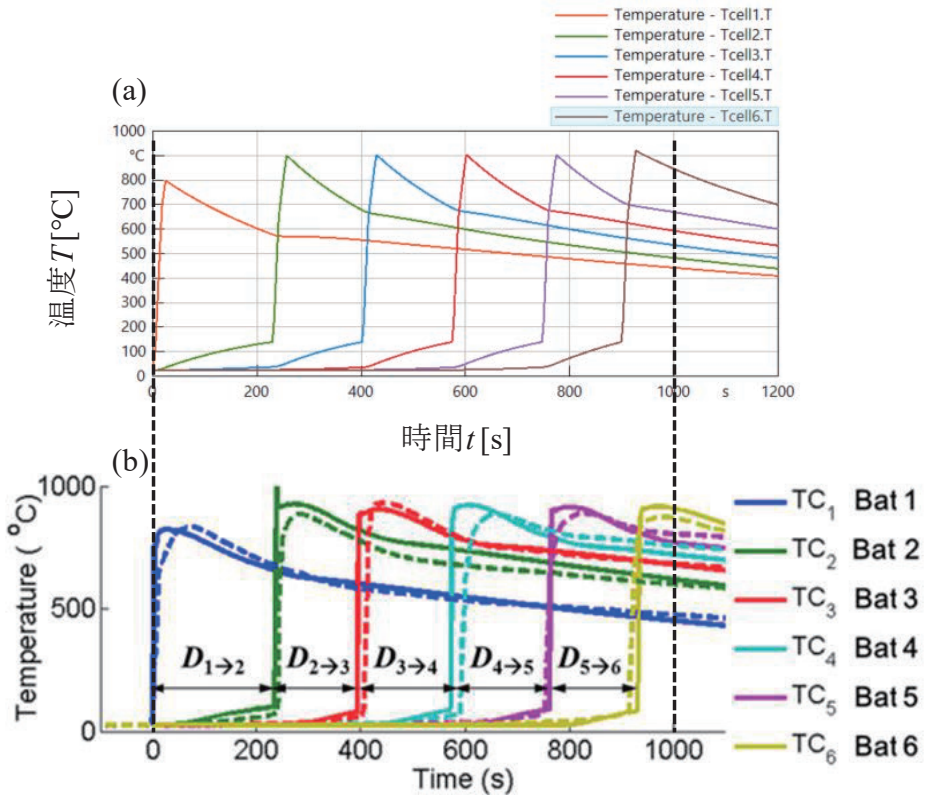

図９　シミュレーション結果および実験結果の比較
（a）：物理モデルに基づく各セルの温度挙動（b）：実験による各セルの温度挙動（点線）

5.4 モデル活用の試行例

4 章で構築および妥当性検証を実施した物理モデルを活用し、大規模蓄電池システム内における熱暴走シナリオのリスク定量化に向けて、シナリオ発生確率の定量化を試行した。検討対象としたシナリオは、先のシナリオ特定において抽出されたリスクシナリオの 1 つである、「ある単一セルが何らかの要因で内部短絡し、当該セルが熱暴走し、熱暴走により生じた熱が隣接セルに伝播し、隣接セルの温度上昇によって隣接セルが熱暴走することが連鎖的に生じる」シナリオである。本試行では、単一セルが熱暴走に至る温度の閾値を 140 ℃ [23] と設定し、6 つの各セルの温度に着目して、各セルの温度が閾値を越えたとき、熱暴走に至ると設定した解析を実施した。シミュレーションの手順を以下に示す。

① 構築した物理モデルにおいて、確率分布に基づく各種入力パラメータを定義する。入力パラメータには、セルの設計変数（内部抵抗値や電池容量など）や周辺環境変数（外環境温度など）が挙げられる。本試行では、妥当性検証に用いた各種条件に加え、変動確率分布を考慮する入力パラメータとして、「初期充電率（SOC）」、「熱暴走閾値温度」、「セル内部の発熱がセル温度上昇に寄与する割合」を設定した。具体的な条件は下記の通りである。
- 初期充電率（SOC）：連続一様分布に基づく 0 %から 100 %の範囲での充電率
- 熱暴走閾値温度：$\mu = 140$、$\sigma = 6.7$ で表される正規分布
- セル内部の発熱がセル温度上昇に寄与する割合：$\mu = 0.5$、$\sigma = 1/6$ で表される正規分布

② 各入力パラメータに関して乱数を生成し、各パラメータの値を確率分布に基づきランダムに決定し、物理モデルを用いた過渡解析を実施する。シミュレーション 1 回当たりの解析時間を 1,200 秒と仮定した。

③ 算出された各セルの最終到達温度を閾値（140 ℃）と比較することで、各セルが熱暴走するかどうかを判定する。

④ モンテカルロシミュレーションにより②および③を 1,000 回試行し、各セルが最終到達温度に達するヒストグラムを作成する。閾値より高い温度を観測した解析数から、各セルの熱暴走確率を算出する。

図 10 および図 11 にモンテカルロシミュレーションの結果を示す。横軸はセルの最終到達温度、縦軸は確率密度を表し、青色の領域は熱暴走が発生しない確率、ピンク色の領域は熱暴走が発生する確率（熱暴走発生確率）を示す。図 10 より、熱暴走が発生しない確率は 58.2 %、熱暴走発生確率は 41.8 %であることが分かった。図 11 より、同様の解析が他のセルに関しても可能であり、例えばセル 3 の熱暴走発生確率は 28.4 %となった。

以上より、物理モデリングおよびモンテカルロシミュレーションを組み合わせた手法により、蓄電池モジュールモデルにおける各セルの熱暴走発生確率を算出することが可能となった。ただし、熱暴走発生確率は、初期充電率や熱暴走閾値温度、セル内部の発熱がセル温度上昇に寄与する割合などに依存するため、熱暴走発生確率を精緻化するためには入力パラメータが実測に基づくデータであることが期待される。また、単一セルが内部短絡する発生頻度を取得することができれば、本手法を応用することにより、各セルの熱暴走発生頻度を算出することが可能となり、リスクを定量的に分析することができる。定量的リスク分析に関して、一般的に信頼性の高い各入力パラメータを取得することは難しい。その主要な理由は、プロセス開発あるいはシステムの運用データは機密情報であるためである。したがって、より正確なリスクアセスメントに向けて、リスク情報データベースを構築する必要があると考える。データベースの構築により、システムモデルの妥当性向上およびリスクアセスメントに基づく迅速な技術開発・システム改良が可能となる。今後、アセスメント実施者が必要なデータを共有できる環境構築が必要である。

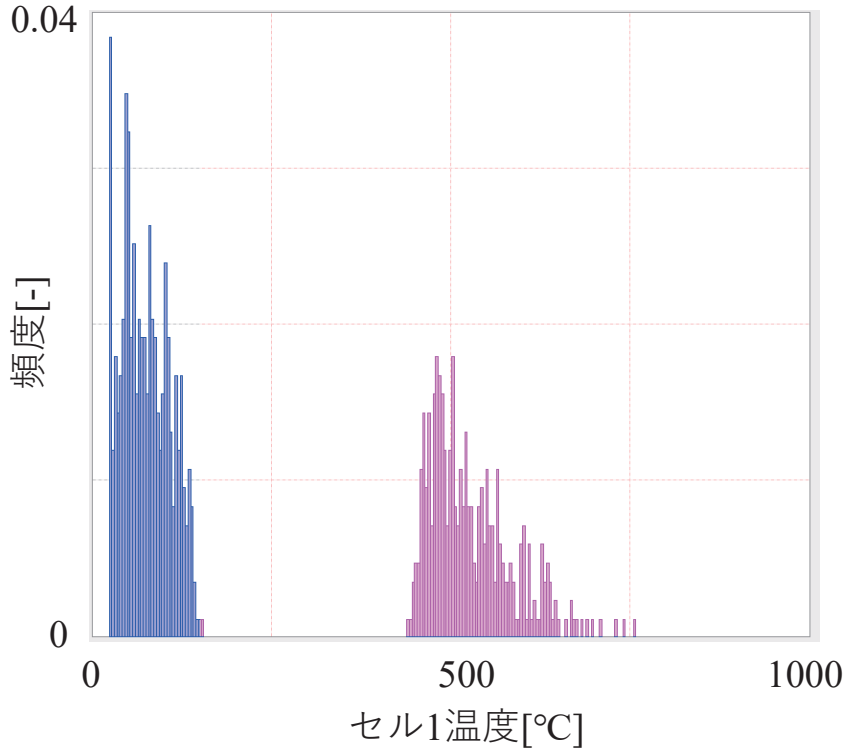

図 10　セル 1 が最高到達温度に達するヒストグラム

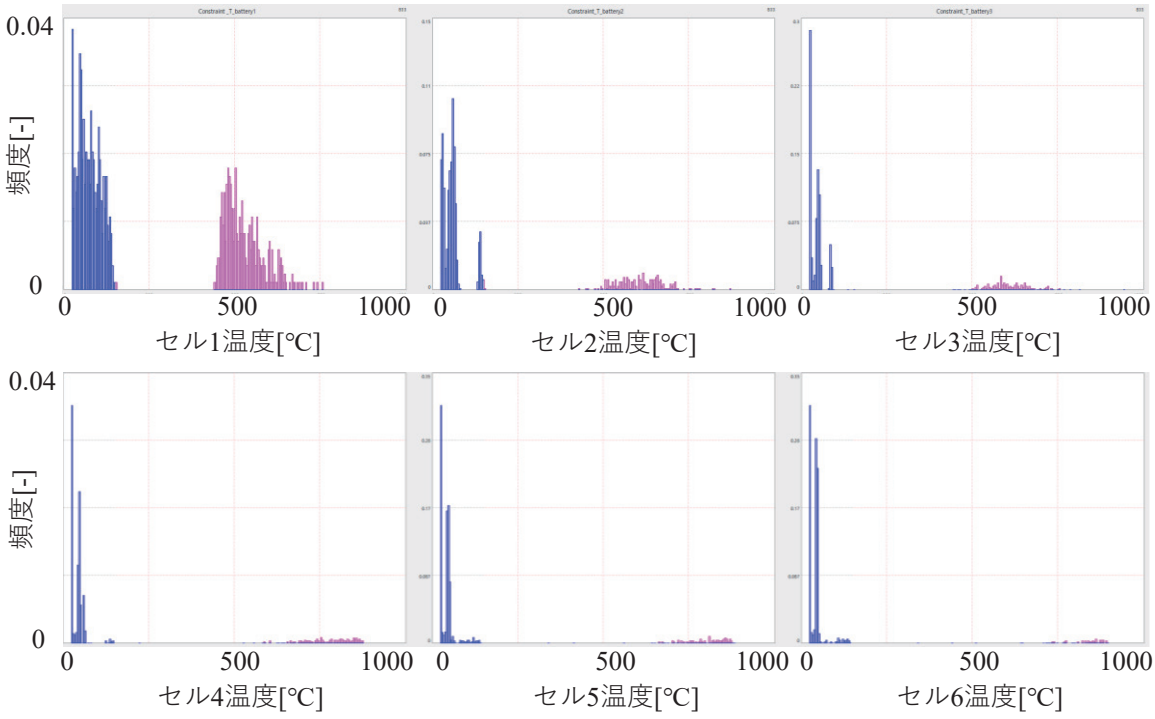

図 11　各セルが最高到達温度に達するヒストグラム（図 10 と図 11 のセル 1 は同一）

6. まとめ

文献調査の結果、LiB の安全性に関しては、熱暴走による事故を中心とした検討が多数実施されており、機械的・電気的・熱的要因による熱暴走に至るまでのメカニズムの理解や熱暴走の未然防止策の検討が進んでいることが明らかとなった。一方で、大規模蓄電池システム全体のリスクアセスメントという観点では、検討するための項目や考え方は整理されている一方で、検討されているリスクシナリオが未だ限定的であり、特定されたシナリオのリスクを定量的に扱う手段も未成熟であることがわかった。

本調査研究では、リスクシナリオの網羅的な抽出を目指す例として、当該システムへ HAZID および HAZOP を適用し、包括的にリスクを抽出した。HAZID および HAZOP の検討結果は、大規模蓄電池システムはその機械的および社会的に様々な要素と相互的に関わり合っていることを示しており、リスクシナリオが様々な要因から多様なルートを経て顕在化することがわかった。リスクアセスメントを実施する上では、これら多様な事故シナリオを可能な限り体系的に抽出し、シナリオ一つ一つのリスクを分析する必要がある。一方で、大規模蓄電池システムは複雑システムであるがゆえに、そのリスクを定量的に把握することが困難である。機械的のみならず社会的に強く結合したシステムの場合、そもそも対応すべきリスクとは何か等について事前に関係者で同意を得ておく必要がある。

リスクの定量化に向けた取り組みとして、大規模蓄電池システムの主要な構成要素であるモジュールの物理モデル化を試みた。典型的な事故である蓄電池モジュールの熱暴走・発火事故だけを取り出しても、そのリスクを定量化するのは困難である。本調査研究では、非因果的物理モデリング手法を用いて、電気的・熱的に結合されたバッテリーの熱暴走確率分布の推算を試行した。当該試行より、セル間の相互作用によって、単一バッテリーの熱暴走確率分布がモジュール化により変化することが示された。すなわち、システム全体の事故率は、個々の電池の事故率の線形結合ではないことを意味する（暴走した際の影響も同様と考えられる）。これはシステム全体として要求されるリスク目標（≒安全基準）を満たすために、単一バッテリーよりも厳しい基準が要求されることを示唆する。本試行モデルは、実機検証や仕様パラメータの精査など実用に向けて多くの課題はあるが、当該モデルを洗練化させることで、定量的にシステム全体の熱暴走リスクと単一バッテリーの信頼性データを紐づけられる可能性が示された。

7. 結論（科学的、技術的な結果のとりまとめ）

大規模エネルギー貯蔵システムの安全性評価に関する調査を行い、今後の社会実装に向けて、以下の結論を得た。

1）大規模エネルギー貯蔵システムの社会実装において、対処すべきリスクを経済性や安全性等の総合的観点から特定し、関係者で共有する必要がある。政策担当者は、当該システムに関する潜在的な利害関係者を抽出し、これら関係者が重要と考えるリスク項目について議論する場をコーディネートすることが社会実装に向け重要となる。

2）大規模エネルギー貯蔵システムのリスクアセスメントフレームを構築し、当該フレームに基づいた安全規格確立が重要となる。特に、3）に示す定量リスク分析のためのデータおよびリスク基準（評価項目や各項目の評価基準、リスク基準値など）が必要である。定量的リスクアセスメント技術が比較的に進んでいる化学プラントに関しては、日本を除く多くの国々で定量的リスクアセスメントが義務付けられており、リスク基準を満たさないプラントの新設は認められていない。IEC の国際規格の発行に加え、化学プラント関連の定量的リスクアセス

メントに関するコンサルティングを手掛ける DNV GL 社が大規模蓄電池システムのリスクアセスメントに関する技術レポートを公開したことから、大規模蓄電池システムのリスクの定量化へトレンドが移行することが予測される。したがって、安全技術に加えて、安全性を定量的に評価するリスクアセスメント規格に関するイニシアティブを取ることができれば、関係者による国内外の事業化が容易となり、国際的に優位性を有することが可能となる。

3）定量的リスクアセスメント促進に向けたリスク情報データベースを構築する必要がある。リスクアセスメントにおいては、各機器の安全性のみならず様々な運転統計データが必要となる。しかし、これらの多くは機密情報であり、他機関がアクセスすることは難しい。データベースを構築することができれば、システムモデルの妥当性向上およびリスクアセスメントに基づく迅速な技術開発が可能となる。そのため、フレーム規格を早急に策定するとともにし、アセスメント実施者が必要なデータを共有できる環境構築が必要である。

参考文献

[1] Lyu P, Liu X, Qu J, Zhao J, Huo Y, Qu Z, et al., “Recent advances of thermal safety of lithium ion battery for energy storage”, Energy Storage Mater 2020;31:195-220, https://doi.org/10.1016/j.ensm.2020.06.042.
[2] Soares FJ, Carvalho L, Costa IC, Iria JP, Bodet JM, Jacinto G, et al., “The STABALID project: Risk analysis of stationary Li-ion batteries for power system applications”, Reliab Eng Syst Saf 2015;140:142-75, https://doi.org/10.1016/j.ress.2015.04.004.
[3] 横浜国立大学 先端科学高等研究院 リスク共生社会創造センター，“先端科学技術の社会総合リスクアセスメントガイドライン（第 1 版）”，2019.
[4] 横浜国立大学 先端科学高等研究院 リスク共生社会創造センター，“水素ステーションの社会総合リスクアセスメントガイドライン（Version3.2）”，2019.
[5] 横浜国立大学 先端科学高等研究院 リスク共生社会創造センター，“水素ステーションの社会総合リスクアセスメント書”，2019.
[6] Wang Q, Mao B, Stoliarov SI, Sun J, “A review of lithium ion battery failure mechanisms and fire prevention strategies”, Prog Energy Combust Sci 2019;73:95-131, https://doi.org/10.1016/j.pecs.2019.03.002.
[7] Wen J, Yu Y, Chen C, “A review on lithium-ion batteries safety issues: Existing problems and possible solutions”, Mater Express 2012;2:197-212. https://doi.org/10.1166/mex.2012.1075.
[8] Ouyang D, Chen M, Huang Q, Weng J, Wang Z, Wang J, “A Review on the thermal hazards of the lithium-ion battery and the corresponding countermeasures”, Appl Sci 2019;9, https://doi.org/10.3390/app9122483.
[9] Feng X, Ouyang M, Liu X, Lu L, Xia Y, He X, “Thermal runaway mechanism of lithium ion battery for electric vehicles: A review”, Energy Storage Mater 2018;10:246-67, https://doi.org/10.1016/j.ensm.2017.05.013.
[10] Feng X, Ren D, He X, Ouyang M, “Mitigating Thermal Runaway of Lithium-Ion Batteries”, Joule 2020;4:743-70, https://doi.org/10.1016/j.joule.2020.02.010.
[11] Hendricks C, Williard N, Mathew S, Pecht M, “A failure modes, mechanisms, and effects analysis (FMMEA) of lithium-ion batteries”, J Power Sources 2015;297:113-20, https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.07.100.
[12] Bubbico R, Greco V, Menale C, “Hazardous scenarios identification for Li-ion secondary batteries”, Saf Sci 2018;108:72-88, https://doi.org/10.1016/j.ssci.2018.04.024.
[13] International Electrotechnical Commission (IEC), IEC TS 62933-5-1, “Electrical energy storage (EES) systems – Part 5-1: Safety considerations for grid-integrated EES systems – General specification”, 2017.
[14] International Electrotechnical Commission (IEC), IEC 62933-5-2, “Electrical energy storage (EES)

systems – Part 5-2: Safety requirements for grid-integrated EES systems – Electrochemical-based systems", 2020.
[15] Center for Chemical Process Safety, "Bow Ties in Risk Management: A Concept Book of Process Safety", Wiley-AIChE; 2018.
[16] Center for Chemical Process Safety, "Layer of Protection Analysis: Simplified Process Risk Assessment", Wiley-AIChE; 2011.
[17] 日本学術会議，工学システムの社会安全目標の新体系，2020.
[18] 大型蓄電システムによる需給バランス改善実証事業 南相馬変電所需給バランス改善蓄電池システム実証事業 成果報告書 2017.
[19] 大型蓄電システム緊急実証事業 西仙台変電所周波数変動対策蓄電池システム実証事業 成果報告書 2018.
[20] DNV-GL, "McMicken Battery Energy Storage System Event : Technical Analysis and Recommendations", 2020.
[21] Center for Chemical Process Safety, "Guidelines for Hazard Evaluation Procedures, with Worked Examples", 2nd edition, New York: Wiley-AIChE; 1992.
[22] 河津要, "複合物理領域モデリング＆動的シミュレーション技術を活用した宇宙システムに対するシステム視点でのリスク分析手法", 日本機械学会論文集 2019;85:1-12, https://doi.org/10.1299/transjsme.18-00172.
[23] Feng X, Lu L, Ouyang M, Li J, He X, "A 3D thermal runaway propagation model for a large format lithium ion battery module", Energy 2016;115:194-208, https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.08.094.
[24] Liu L, Feng X, Zhang M, Lu L, Han X, He X, et al., "Comparative study on substitute triggering approaches for internal short circuit in lithium-ion batteries", Appl Energy 2020;259:114143, https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114143.
[25] Naha A, Khandelwal A, Agarwal S, Tagade P, Hariharan KS, Kaushik A, et al., "Internal short circuit detection in Li-ion batteries using supervised machine learning", Sci Rep 2020;10:1-10, https://doi.org/10.1038/s41598-020-58021-7.

低炭素社会の実現に向けた
技術および経済・社会の定量的シナリオに基づく
イノベーション政策立案のための提案書

大規模エネルギー貯蔵システムの安全性評価に関する技術的課題と社会実装への展望

令和 3 年 3 月

Technical Challenges and Forecasts on Safety Assessment of Large-Scale Energy Storage Systems for Its Social Implementation

Proposal Paper for Policy Making and Governmental Action
toward Low Carbon Societies,
Center for Low Carbon Society Strategy,
Japan Science and Technology Agency,
2021.3

国立研究開発法人科学技術振興機構　低炭素社会戦略センター

本提案書に関するお問い合わせ先

●提案内容について・・・低炭素社会戦略センター　特任研究員　三宅 淳巳（MIYAKE Atsumi）
共同研究者 横浜国立大学　特任助教　中山 穣（NAKAYAMA Jo）
特任助教　塩田 謙人（SHIOTA Kento）
助教　伊里 友一朗（IZATO Yu-ichiro）
●低炭素社会戦略センターの取り組みについて・・・・低炭素社会戦略センター　企画運営室

〒102-8666　東京都千代田区四番町5-3　サイエンスプラザ 4 階
TEL :03-6272-9270　FAX :03-6272-9273　E-mail :lcs@jst.go.jp
https://www.jst.go.jp/lcs/

© 2021　JST/LCS
許可無く複写・複製することを禁じます。
引用を行う際は、必ず出典を記述願います。