

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 リスクアセスメント手法の高度化

令和4年4月

Report on the Sophistication of Risk Assessment Methods for Large-Scale
Energy Storage Systems

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-FY2021-PP-12

概要

本研究の目的は、大規模エネルギー貯蔵システムのリスクアセスメント手法を高度化することである。リスク共生概念に基づき、安全問題のみならず社会実装において重要となるリスクを抽出する手法も検討した。特に重要とされる事故に関するリスクは、モデルベースドリスク分析手法を用いて、熱暴走や火災リスクを定量化する方法を提案した。

Summary

The purpose of this study is to sophisticate the risk assessment methods for large-scale energy storage systems. Based on the concept of risk symbiosis, a method to extract risks that are important not only for safety issues but also for social implementation was examined. For accident-related risks, which are of particular importance, a method for quantifying thermal runaway and fire risks was proposed using a model-based risk analysis method.

目次

概要

1. 本提案／報告の位置づけ	1
1.1 BESS の社会実装に関する政策動向	1
1.2 本提案／報告に関連した研究動向	1
1.3 BESS の安全研究に関する政策動向	2
1.4 まとめ	5
2. 大規模エネルギー貯蔵システムへの社会総合リスク概念の適用	5
2.1 社会総合リスクの導入	5
2.2 大規模エネルギー貯蔵システムの社会実装に関するリスク	6
2.3 まとめ	8
3. 物理モデリングを用いた定量的リスクアセスメント手法の提案	9
3.1 従来リスクアセスメント手法の課題	9
3.2 複合物理領域・システムレベルモデリングを用いた定量的リスク分析手法の提案	9
3.3 提案手法の有効性検証	10
3.4 まとめ	20
4. 結論（科学的・技術的な結果のとりまとめ）	21
5. 政策立案のための提案	21
6. 今後の研究内容	21
参考文献	23

1. 本提案／報告の位置づけ

1.1 BESS の社会実装に関する政策動向

令和3年10月22日に閣議決定された第6次エネルギー基本計画 [1] において、蓄電池は自動車の電動化や再生可能エネルギーの普及に必要となる調整力のカーボンフリー化等のグリーン化や、デジタル化の進展の要となる「新たなエネルギー基盤」と位置付けられている。こうした観点から、蓄電池の国内製造基盤強化に向け、2030年までに、国内の車載用蓄電池の製造能力を100 GWhまで高めることに加え、家庭用、業務・産業用蓄電池の合計で2030年に累計約24 GWhにすることが目標として掲げられている。家庭用蓄電池においては、日本の市場規模は世界でもトップレベルの水準であるため、再生可能エネルギーの更なる導入促進の観点からは、家庭用のみならず、システムに対する調整力としての活用が期待される業務・産業用やシステム用の蓄電池についても、一層の導入拡大が期待されている。当該目的を達成するための手段として、蓄電池を用いた大規模エネルギー貯蔵システム (Battery Energy Storage System: BESS) の研究開発・導入が活発化している。

再生可能エネルギーの社会実装のためには、事業の開始から終了まで一貫して、適正かつ適切に再生可能エネルギー発電事業の実施が担保され、安全面、防災面、景観や環境への影響、将来の廃棄等に対する懸念を払拭した責任ある長期安定的な事業運営の確保が望まれる [1]。近年の台風や大雨等に伴う自然災害の頻発・激甚化と、それに伴う再生可能エネルギー発電設備の事故により、再生可能エネルギー発電設備の安全性に対する社会的関心が高まるなか、こうした環境変化を適切に捉え、安全対策を進めていくことが重要となる。このような社会的背景のもと、令和3年3月に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 (以下、LCS) より、低炭素社会実現に向けた政策立案のための提案書として「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」 [2] が発行され、BESSの安全性に関する議論がなされた。さらに、第6次エネルギー基本計画 [1] では、エネルギー政策の基本方針として、安全性 (Safety) を前提とした上で、エネルギーの安定供給 (Energy Security) を第一とし、経済効率性の向上 (Economic Efficiency) による低コストでのエネルギー供給を実現し、同時に、環境への適合 (Environment) を図る、S + 3Eの視点の重要性が改めて確認された。すなわち BESS の社会実装には、安全性といった視点だけでなく、安定供給、経済性、環境性といった多角的な視点でシステムのリスクを評価する必要がある。

そこで、本提案書では BESS が有する多様なリスクを、社会総合リスクの概念に基づき、安全問題のみならず社会実装において重要となるリスクを抽出する手法を検討し、BESS のリスクアセスメント手法の高度化について議論する。社会総合リスクアセスメント手法を適用することで、エネルギーの安定供給や経済性といった各種リスクを分析する。また、熱暴走や火災リスクを例として、モデルベースドリスク分析手法を用いたリスクの定量化手法を提案する。

1.2 本提案／報告に関連した研究動向

本提案書では、BESS の関連技術に関する研究動向および重点検討領域について調査するため、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 を用いて解析を行った。2022年2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「battery energy storage system」と入力し、本キーワードが含まれる論文のうち、レビュー論文のみを VOSviewer の分析対象とした。その結果、2,533件のレビュー論文が検索された。

図 1-1 に BESS に関する論文が掲載されている論文誌名を示す。図中の紫色が2017年よりも前に論文が掲載された論文誌を示し、黄色が2020年頃の最新の論文が掲載された論文誌を示す。図 1-1 によると、2017年代までは再生可能エネルギーおよび持続可能エネルギー分野を主要研究

対象とする論文誌である「Renewable & Sustainability Energy Reviews」において多数の研究論文が発表されている。その後、2018年代から2020年代にかけては、前述と同様の研究対象を持つ論文誌である「Journal of Materials Chemistry」に加えて、エネルギーの取り出し・転換・貯蔵などに用いられる物質を主要研究対象とする論文誌である「Advanced Energy Materials」やエネルギーシステムとしての技術開発等を主要研究対象とする「Journal of Energy Storage」においても研究論文が発表されている。

図1-2に論文中のタイトルおよびアブストラクトにおいて用いられた単語の結びつきを解析した結果を示す。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。2018年までは、BESSはwindおよびwind turbineやhydrogenに代表されるように、再生可能エネルギーや水素エネルギーと関連する研究として位置づけられていた。また、2018年～2019年頃には電気自動車（vehicle）用のリチウムイオン電池（LIB）を念頭に置いた蓄電池システムの研究開発が多く実施されるようになった傾向が読み取れる。さらに、2019年以降になると、LIBの各部を構成する部材開発やそれに関する現象理解、安全性等に関する検討が盛んに行われている傾向が読み取れた。

以上の調査より、BESSを社会実装するためには、第6次エネルギー基本計画[1]で謳われるS+3Eに視点に基づいた、安全性以外のリスクに関する検討が不足していること、LIBやシステムの現象を反映した安全性研究の更なる精緻化が必要であることが明らかになった。

1.3 BESSの安全研究に関する政策動向

BESSの安全政策に関して、2020年度提案書[2]では、蓄電池システムの普及が進められるなかで、国際電気標準会議（IEC）から蓄電システムの安全性に関する技術仕様書として2017年に第1部 IEC 62933-5-1[3]、2020年に第2部 IEC 62933-5-2[4]が発行されたことを報告した。特に第2部は、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た、化学電池を用いたシステム（BESS）の安全性に関する国際規格であり、本規格により国内外で安全性を評価する環境が整備されつつある。さらに、IEC 62933-5-2の対応規格としてJIS C 4441:2021[5]が日本語版として発行されている。

IEC 62933-5-2では、BESSのリスクアセスメントおよびリスク低減の実施を要求項目としている。BESSのリスク分析およびリスクアセスメントについては、特に電気化学的蓄電サブシステムから他のサブシステムへ事象が伝播することに代表されるような、BESS内に存在するサブシステム間の相互作用を含むリスクシナリオについて考慮することが要求されている。また、これらの相互作用を含むシステムレベルのリスクを部品、モジュール、および最終システムレベルの3段階に分けて、評価しなければならないことが明記されている。これらのリスクに対する分析手法として、Fault Tree Analysis（FTA）、Failure Mode and Effect Analysis（FMEA）、Hazard and Operability Study（HAZOP）などの従来から活用されているリスク分析手法を用いて実施することが記載されている。しかし、IEC 62933-5-2の記載はリスク分析における一般的な要求項目が述べられているに過ぎず、各項目の具体的な検討手法については記述されていない。また、これら従来のリスク分析手法では、リスクシナリオ特定の多くは専門家集団のブレインストーミングによって実施されることから、部品間やモジュール間などの複数構成要素の相互作用に由来する創発的なリスクシナリオ等を見落とす可能性が否定できない。さらに、従来のリスク分析手法の多くは、各事象の独立性を前提とした分析となっている場合が多く、前述の相互作用による事象の相互依存性を持つようなリスクシナリオの分析が困難であるなどの課題がある。したがって、従来のリスク分析手法の課題を解決する手法開発が必要である。

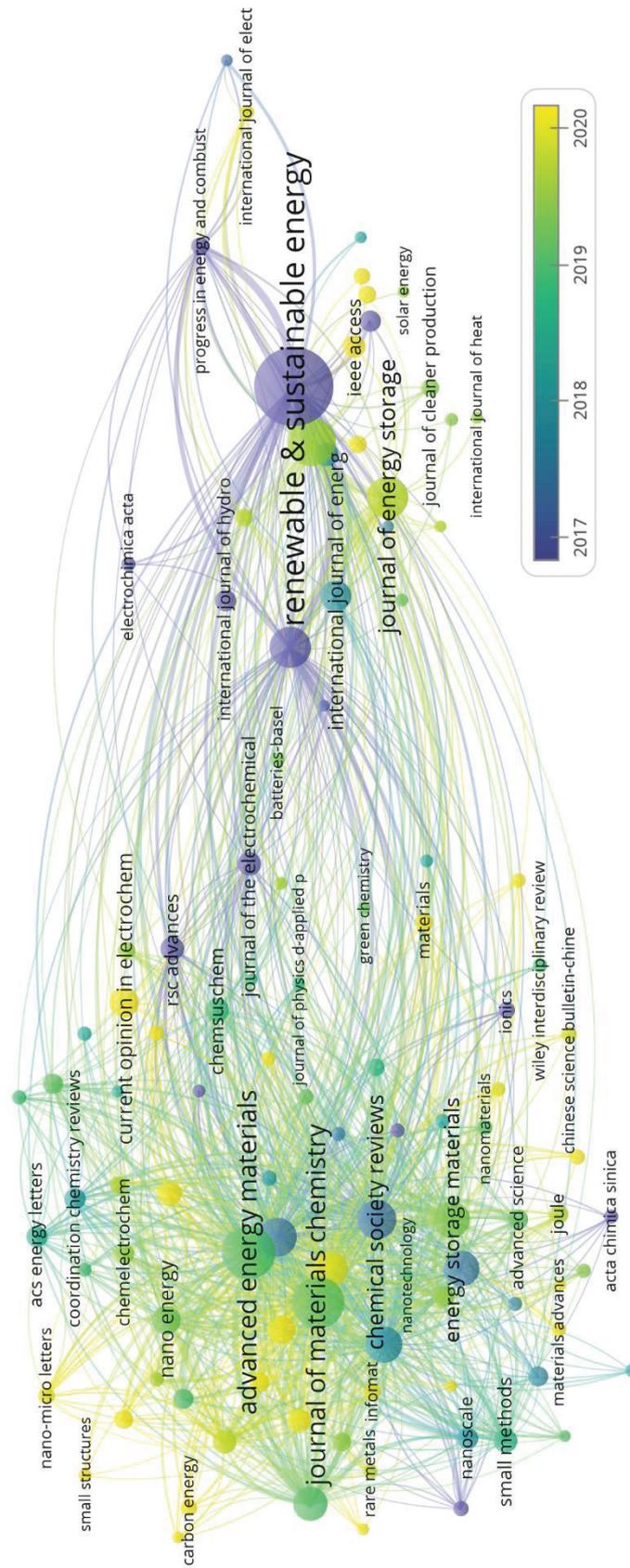


図 1-1 BESS の研究開発に関するレビュー論文が掲載されている論文誌の共起ネットワーク解析結果

1.4 まとめ

エネルギーシステムに関する政策動向、BESSに関する研究全般の動向、BESSの安全研究に関する政策動向を踏まえ、BESSの社会実装に向けて下記2点の課題を整理した。

一つ目は、安全性以外のリスク、特にエネルギーの安定供給（Energy Security）、経済効率性の向上（Economic Efficiency）、環境への適合（Environment）といったリスクの分析・評価の必要性についてである。二つ目は、今までの安全性検討では実施されていない、BESS内に存在するサブシステム間の相互作用までを考慮したシステムレベルでの安全性検討についてである。

本研究では上記の一つ目の課題に対して、BESSの多様なリスクについて社会総合リスクの概念に基づき、経済性、将来社会像と電力需要、安全性/セキュリティ、資源循環/廃棄物といったリスクを例に、不確かさと影響度を指標としたリスク分析・評価を実施した。二つ目の課題に対しては、BESS内に存在するサブシステム間の相互作用を含むモデル化が可能である、複合物理領域・システムレベルモデリングに着目し、本モデル化手法に基づくリスク分析手法の高度化について提案した。社会総合リスクアセスメントおよび複合物理領域・システムレベルモデリングを用いたリスク分析から、BESSの社会実装に際して重要なリスクを特定した。

2. 大規模エネルギー貯蔵システムへの社会総合リスク概念の適用

2.1 社会総合リスクの導入

大規模エネルギー貯蔵システムを含む先端科学技術は、その語義のとおり、過去に例を見ない技術システムである。それゆえに、その社会実装の道のりも本質的に不確かなものとならざるを得ない。また先端科学技術の社会実装は、良きにつけ悪しきにつけ、社会とそこに住む人々の暮らしを大きく変容させる。その変容の程度と範囲は多岐にわたるため、事前にその見通しを得ることは難しい。社会総合リスクアセスメントは、未知性が大きい、すなわちリスクが大きい事象に対する意思決定や対応を支援するために構築された技術体系である。社会総合リスクアセスメントについては、横浜国立大学の「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」[6]等を参照されたい。

リスクマネジメントの国際規格（ISO 31010:2019 リスクマネジメント [7]）において、リスクは「目的に対する不確かさの影響」と定義される。ここでの影響とは、「期待されていることから逸脱すること」であり、不確かさとは、「ある事象、その結果、または可能性に関する情報、理解、知識が部分的にでも欠けている状態のこと」と定義される。社会総合リスクアセスメントは、このISO31010におけるリスクの定義をベースに構築された。すなわち、先端科学技術とその実装に関する社会総合リスクとは、それらに関する情報、理解、知識が（部分的にでも）不完全であることによって、技術およびその実装に関する“評価、態度、意思決定”に対して影響を与えること、と考えることができる。

社会総合リスクは、そのリスクが多岐にわたるため、全てのリスクを同一の精度やコスト（技術や時間コストなどを含む）で分析・評価することは極めて難しい。したがって、優先して検討すべきリスクを特定し、その次に優先リスクを詳細に分析するという2段階の手順を踏むことが有効であると考えられる。この考え方の利点は、従来は各分野のリスクをそれぞれの専門家が有する問題意識に対して分析・評価を実施してきたが、社会総合リスクの導入により、システムの社会実装という目的に対して、各分野のリスクを交通整理することができ、システムが有するリスクの全体像を明らかにし、投入するコストを最適化することが可能となる点である。

第一段階目のリスク特定は、対象システムが有する各分野のリスク（経済や環境、安全など）を幅広く整理することから開始する。第一段階では、高い分析コストをかけず、既往の文献調査などにより、現状のリスクを明らかにし、それらリスクの程度を評価することが目的となる。そのため、対象となるリスク項目について表 2-1 と表 2-2 より不確かさと影響度をランク付けし、

表 2-3 のマトリクスより社会総合リスクを定性的に評価し、優先対象リスクを特定することができる。第二段階目は、各分野のリスク分析・評価の段階へ移行するため、その分野に特化したリスク分析・評価手法を用いることが有効である。

表 2-1 不確かさランクの例

不確かさ 1	事象およびその影響に関して理論的かつ経験的に理解が得られている
不確かさ 2	事象およびその影響に関して理論的または経験的に理解が得られている
不確かさ 3	事象およびその影響に関して一般的な知識はある
不確かさ 4	事象およびその影響に関して知識がほとんどない

表 2-2 影響度ランクの例

影響度 I	不確かさの度合いが“評価、態度、意思決定”に影響しない
影響度 II	不確かさの度合いによって“評価、態度、意思決定”に修正が必要となる。
影響度 III	不確かさの度合いによって“評価、態度、意思決定”が大幅に変容する

表 2-3 社会総合リスクマトリクスの例

	影響度 I	影響度 II	影響度 III
不確かさ 4	Low	High	High
不確かさ 3	Low	High	High
不確かさ 2	Low	Middle	Middle
不確かさ 1	Low	Low	Middle

2.2 大規模エネルギー貯蔵システムの社会実装に関するリスク

2.1 で示した考え方に基づき、BESS の社会実装（開発・導入期）に際し、社会総合リスクアセスメントに向けた第一段階目のリスク特定のための考え方を整理した。具体的には、大規模エネルギー貯蔵システムに関する経済性のリスク、将来社会像と電力需要に関するリスク、安全性 / セキュリティに関するリスク、資源循環 / 廃棄物に関するリスクについて考察した。

2.2.1 経済性に関するリスク

LCS の政策提案書「蓄電池システム（Vol.1～9、2022年2月現在）」（例として、“蓄電池システム（Vol.9）一次世代電極活物質を用いたリチウムイオン電池の製造コスト試算” [8]）に代表されるように、蓄電池システムのコストや経済性については、継続的に定量分析がなされてきた。その成果もあり、経済性に関する不確かさは低下してきているといえる。コストを継続的に低下させる努力によって実装が加速されることは間違いなく、今後もモニタリングと分析が必須であるが、実装に向けた評価、態度、行動は大きく変動することはないため、社会総合リスクは比較的に低いと考えられる（これはコスト削減やその分析が必要でないことを意味しない）。

2.2.2 将来社会像と電力需要に関するリスク

将来の電力需要量の大幅増加は、社会総合リスクが高いと考えられる。その理由は、電力需要が蓄電池システムの規模を決定する主要因であるからである。LCS では「情報化社会の進展がエネルギー消費に与える影響」に関する政策提案書 [9] を発行しており、電力需要の定量予測がなされている。当該予測分析において、2050年の電力消費量は、現在の日本の年間電力消費量（約

980 TWh) の約 200 倍となり、現在の技術で全く省エネルギー対策がなされないと仮定した場合、日本の発電可能量(最大値約 3,000 TWh) と比較して、情報関連だけで全てのエネルギーを消費してもまだ不足するという状況になり得ると指摘している。特に今後は業務用 AI の増加による計算量の著しい増大が予想されるため、CPU、GPU の省電力化が重要である。データセンターにおける電力消費量は増大しており、メタバースを含むサイバー空間の活用が進むにつれて、さらに増大すると考えられる。加えて電気自動車普及の加速化や、ロボティクスなど現行開発技術の推進、さらに未だ見ぬ先端科学技術の社会実装も考えられる。これらによって電力需要が想定以上に増大する可能性がある。そのような先端科学技術のイノベーションの発生を精度よく予測することは不可能であり、予測の不確かさは極めて高いといえる。繰り返しであるが、電力需要量は実装される蓄電池システムのスケールを決定する重要因子であり、その影響度は大きい。すなわち、将来の社会像の設定とそれに必要な電力需要については社会総合リスクが高い。リスク分析・レビューのサイクル頻度を高めることで、当該リスクについて継続的に検討する必要がある。

2.2.3 安全性/セキュリティに関するリスク

大規模蓄電池システムは、多量の蓄電池の直並列接続を組み合わせることで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、その安全を確保することの重要性は強く認識されている。電池の熱暴走に関するシナリオは現象論的にはよく検討されてきており、その不確かさは低下していると考えられる。一方で、国際的な安全認証においては、セーフティケースとよばれる概念により安全性を自ら立証することが求められる。その裏付けとなる証拠を得るために高度なリスクアセスメントが必要となる。そのためには、大型蓄電池システムの定量的リスクアセスメント技術の高度化が強く求められている。

大型蓄電池システムは内閣府サイバーセキュリティセンターの第4次行動計画[10]で定める重要インフラに該当するため、厳重なサイバーセキュリティ対応が必要となる。当該行動計画では、未公開の脆弱性を狙ったゼロデイ攻撃のような高度化したサイバー攻撃や内部不正に関しては、もはや「未然に防ぎきることは不可能である」ということを認識する必要がある、と述べられている。これに対して、リスクアセスメントの結果を踏まえたリスク対応を戦略的に講じることが必須の要件となっており、機能保証の観点からは、サイバー攻撃等に遭遇した場合であっても、重要インフラサービスを安全かつ継続的に提供できるように、適切な対応態勢が整備されることが必要である。

安全性/セキュリティに関するリスクに関しては、電池の熱暴走に関する現象論的な理解は得られつつあるが、システム全体における安全やサイバーセキュリティに関して体系的な検討が必要であり、社会総合リスクは未だに高いと考えられる。

2.2.4 資源循環/廃棄物に関するリスク

蓄電池システムで利用される二次電池としてはリチウムイオン電池が筆頭であるが、自動車の電動化に伴い、車載用蓄電池としてのリチウムイオン電池の需要は急激に拡大していく見込みである。リチウムイオン電池で使用されるリチウム、コバルトは採掘可能な地域に偏りがあり、電気自動車の大量普及時にはコスト高騰の可能性がある。鉛蓄電池などのリチウムイオン電池以外の二次電池を活用した大型蓄電池システムについてのフィージビリティについても検討し、リスク対応オプションとして保有する必要がある。

大型蓄電池システムの運用方法に依るが、高頻度の充放電が必要となる電池運用では、電池の劣化は急速に進むことになる。例えば、リチウムイオン電池の劣化挙動は詳細に調査で報告されている(LCS調査報告書「リチウムイオン電池の劣化挙動調査」[11]など)。上述したように電

力需要が増大した場合は、大型蓄電池システムの容量も大きくなる。そのため蓄電池システムからの劣化に起因する電池廃棄物量も増大することが想定される。大型蓄電池の大量廃棄およびリサイクル/リユースに関するリスクは十分に検討されているとは言い難い。排出される電池量を吸収できるリサイクル/リユースの技術のみならず、そのリサイクル/リユース製品のマーケットが確立されていなければ、廃棄物量は増大することが見込まれるため、電池廃棄物の安全管理も重要となる。近年、小型家電用リチウムイオン電池が回収されずに一般ごみへ混入することで、一般廃棄物処理施設で発火し、火災に至る事例が急増している。大型蓄電池システム運用においては一括して適正管理されるはずであるので、このような事例が増加するとは考えにくい。しかし、リサイクル/リユース品の管理を含めたライフサイクルをよく考慮する必要がある。資源循環/廃棄物問題に関しては不確かさが高く、社会総合リスクは高いと考えられる。

2.3 まとめ

大規模エネルギー貯蔵システムについて社会総合リスクアセスメントを適用し、当該システムの社会実装における各リスク項目を分析した。その結果、将来社会像における電力需要の不確かさは極めて大きく、これによって安全性/セキュリティや資源循環/廃棄物のリスクも影響を受けることが考えられた。未来を的確に予測することは難しいが、リスクの考え方に基づき、起こり得るシナリオについて体系的に整理し、これに備えておくことが重要となる。

上記の分析結果に基づき、社会総合リスクの観点から見た2020年度(前回)提案書[2]および本提案書の位置づけを図2-1に整理した。前回提案書は、BESSに関する社会総合リスクにおける「安全性に関するリスク」についての研究動向や課題を整理したものであった。これに対して本提案書は、安全性に関するリスクのみならず経済性や電力安定供給等も含めた多角的な視点でのリスク、および安全性に関するリスクの両面でリスクアセスメントの高度化を図ったものである。

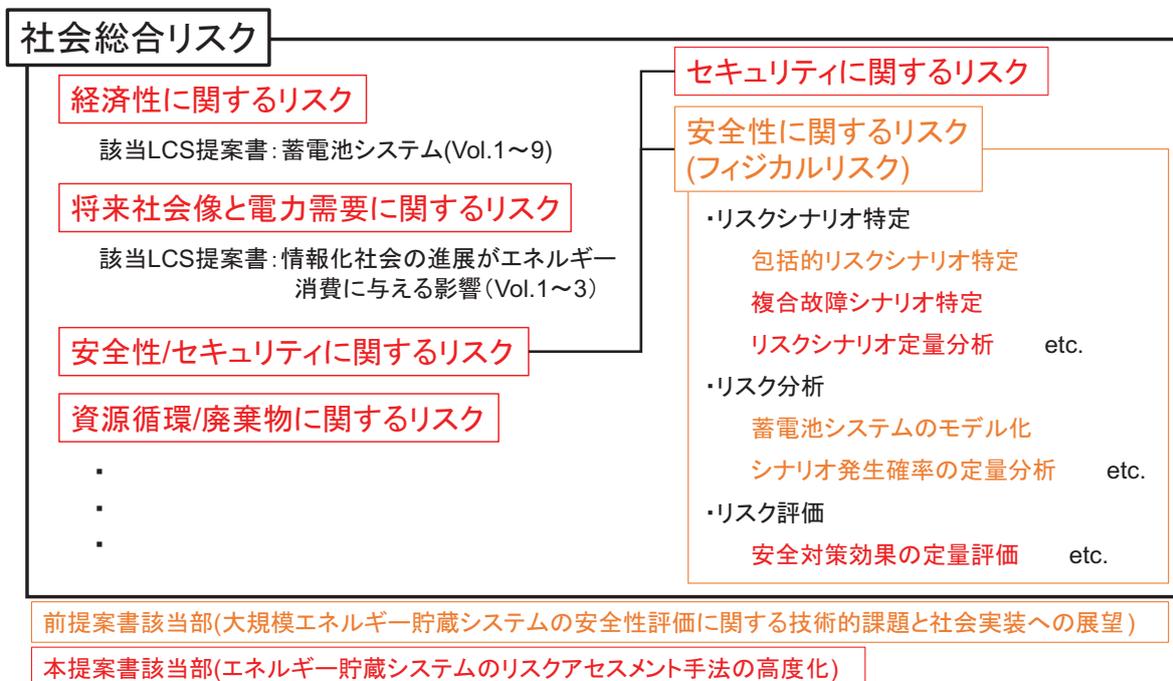


図 2-1 前提案書および本提案書の位置づけ

3. 物理モデリングを用いた定量的リスクアセスメント手法の提案

第2章では、社会総合リスクアセスメントの実施により、BESSの社会実装に伴って社会全体に与える様々なリスクについて考察した。本章ではそのなかでも特に、前述のBESSの安全性に関する規格でも取り扱われている安全性に関するリスクに着目し、BESSの安全性を裏付ける証拠を得るための定量的リスクアセスメント技術の高度化を目的とする。

3.1 従来リスクアセスメント手法の課題

BESSは、複数のセルが接続されたモジュールが多数集合した蓄電池コンテナによって構成されるシステムであり、当該システムが有する各セルやモジュールなどのサブシステムの間での相互作用が存在することから、各サブシステムの独立性を仮定したリスクの単純な足し合わせではシステム全体のリスクを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、サブシステムの集合によって構成されるシステム全体の複合的な物理的挙動を考慮したシステムレベルでのリスクアセスメントが重要になる。

従来のリスクアセスメント手法は、下記の三つの理由により上述の特徴を有するシステムのリスク分析を得意とせず、適切なリスクアセスメントを実施することができない可能性がある。ここでは、従来手法の代表例として、専門家グループがブレインストーミングによりリスク分析を実施するHAZOPを事例に課題を整理した。なお、2020年度提案書[2]にてHAZOPを大規模エネルギー貯蔵システムに適用した結果が記載されているが、下記課題は未解決である。

- (1) HAZOPは、対象システムにおける様々なパラメータ（温度や圧力など）の通常状態からのずれを想定することにより、そのずれがシステム内外へ及ぼす影響や事象進展を分析する手法である。HAZOPはパラメータとガイドワードを適切に組み合わせずれを想定することで、リスクシナリオの体系的な検討が可能となる利点がある一方で、ブレインストーミング形式で実施される手法であることから、特定されるシナリオの結果やそのリスク分析結果は分析者の専門性や能力に大きく依存するという弱点がある。また、分析結果は定性的（半定量的）であり、結果の精度にもバラつきが生じやすい。さらに、専門家グループで実施するため人的コストが高く、また分析時間が長期にわたるため、高頻度かつ複数回実施することが困難であり、例えばプラントの建設時やメンテナンス時に数回実施する程度となり、機器の劣化や更新などの変化をリスク分析に反映させることが難しい。
- (2) HAZOPを実施する際、大型かつ複雑なシステムを対象とする場合、分析者の視点を整理するため、便宜上システムをいくつかの要素に分割して分析する必要がある。しかしその場合、分割した要素間にわたって生じる影響に関しては分析することができない。また、ずれの与え方に関しても、原則として一つのずれをシステムに与えた場合のリスクシナリオの分析を行うことが多く、複数のずれが同時に発生する場合の分析は困難である。
- (3) HAZOPでは、特定されたシナリオのリスクを低減させる安全対策を導入することにより、定性的なリスク削減効果を分析することができる。例えば、「温度検知器や遮断弁などを追加設置することでリスク削減可能」と表記することで、定性的なリスク削減効果や新たな安全対策の必要性を検討するための気付きを付与することができるが、各対策のリスク低減効果を定量的に示すことはできない。

3.2 複合物理領域・システムレベルモデリングを用いた定量的リスク分析手法の提案

既往研究では、LIBを用いたBESSを想定し、定性的なシナリオ特定の例として、従来手法であるHAZOPやFMEA、System Theoretic Process Analysis (STPA)が実施されている[2, 12-14]。これらの検討では、多岐にわたるリスクシナリオが特定されている一方で、そのシナリオ情報の多

くはシステムに対して単一のずれを想定した場合において、ブレインストーミング形式での発想に基づく定性的なものに留まっている。したがって、蓄電池システムの持つ相互作用を表現可能なモデル化手法に基づいた蓄電池システムモデルを活用することにより、システム挙動を定量的予測に基づく定量的なリスク情報の取得が不可欠である。

そこで本研究では、大型蓄電池システムの定量的リスクアセスメント技術の高度化に向けたモデルベースドリスク分析手法を提案する。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は複合物理領域・システムレベルモデリング言語である Modelica によりモデル化され、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る [15]。本提案手法は、最新のシミュレーション技術を大型蓄電池システムおよびそのリスク分析へ適用することにより、3.1 に示した課題を解決し、本モデリング手法を用いた定量的リスクアセスメント手法を提案する。提案手法の特徴を下記に三つ示す。

(1) ブレインストーミングによる従来シナリオ分析の定量化

本モデル化手法により構築された物理モデルを用いることにより、システムの温度上昇や圧力変化などの物理パラメータを定量的に予測、分析することが可能である。この技術を活用することにより、HAZOP のずれの程度を定量的に扱うことができ、ずれによるシステム内外への影響を定量的に示すことが可能となる。また、システムモデルを修正・更新する度に定量的なシナリオ分析を迅速に実施できる点も有効であるといえる。

(2) システム内の複数箇所で生じる同時故障によるシナリオ特定

従来のシナリオ特定およびリスク分析では、システムにおける単一のずれや故障のみを取り扱う場合が多いが、本モデル化手法により構築された物理モデルを用いることにより、システム内における複数のパラメータに対して同時にずれを与えた分析が可能になる。具体的には、BESS の場合ではモジュールにおける複数パラメータ（初期温度や初期充電率など）にずれを与えることによるシステム内外への影響を分析することが可能となり、従来のシナリオ特定およびリスク分析では抜け落ちてしまう可能性の高い、複数のずれの同時発生により生じるリスクシナリオを特定、および定量的に分析することが可能となる。

(3) 安全対策の効果の定量分析

2020 年度提案書 [2] によるシナリオ発生頻度解析の試行結果から、適切な定量的影響度解析と組み合わせることで、本モデル化手法を用いて BESS の定量的リスクが分析可能である。そこで、本モデリング手法により構築された物理モデルに対して、安全対策を模擬したモデルを導入して同様の検討を行うことで、安全対策を付与する前後でのリスクの比較が可能となり、結果的に安全対策導入によるリスク低減効果を定量的に示すことができる。

3.3 提案手法の有効性検証

本検討では、3.2 に示すモデリング技術を BESS に適用し、手法の有効性を示す。

まず、本モデル化手法に基づいて対象システムの物理モデルを構築した。本検討では、BESS 全体のリスク分析を実施するための初期検討として、蓄電池コンテナを構成する一つの要素である「モジュール」を対象に、当該システム内における電気および熱的現象をモデル化対象とした。BESS におけるモジュールとは図 3-1 に示すように、複数個の LIB を直並列に接続して 1 単位としたもののことをいう。本検討では 2020 年度提案書 [2] の図 7 に示す概念図と同様に、6 個の角形 LIB を隣接させ、電気的に直列接続したモジュールを想定した。

物理モデル構築にあたっては、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、

Ohmの法則、Newtonの冷却法則等)を連立させて単一のセルモデルとして定式化し、それと同様の方程式群を組み合わせることで、6個のセルを持つモジュールモデルを構築した。モデル構築に用いた基礎方程式等の詳細、およびセルの形状や個数等の基礎情報については、2020年度提案書[2]を参照されたい。本研究では、モデリングソフトウェアとしてESI ITI社製SimulationX 4.2を用いた。構築したモデルの概観を図3-2に示す。黒の太線で示したセルは、2020年度提案書[2]の図8で示した単一セルモデルをパッケージ化したものであり、モジュールモデル構築の際にはその単一セルモデルどうしを電気的・熱的に接続し、さらに、熱伝達や輻射による外界との熱のやり取りもモデルに含めている。各セルについて、ここでは左からセル1、セル2、セル3、セル4、セル5、セル6と名付ける。

本研究では上記のモデルに加えて、リスクシナリオの定量分析や複合的なずれの検討を実施するための故障モデルをモジュールモデルに組み込んだ。セルおよびモジュールにおいて起こり得る故障として、短絡、地絡・漏電、回路の切断が考えられる。それぞれの故障のモデル化の考え方について、表3-1にまとめた。

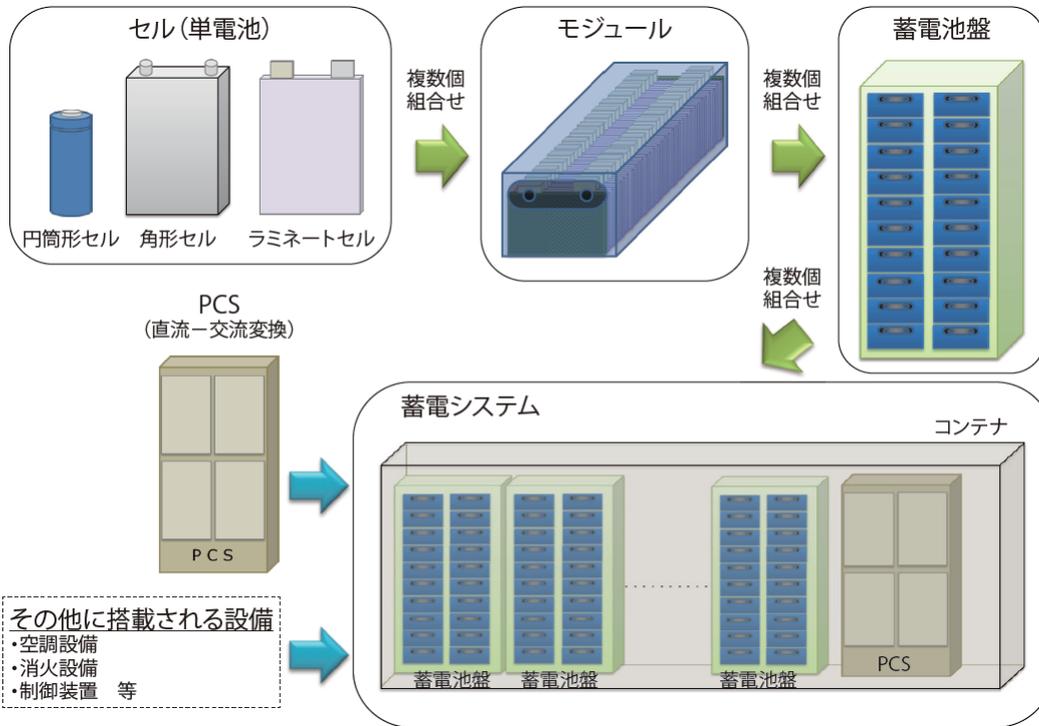


図 3-1 BESS の概観 [16]

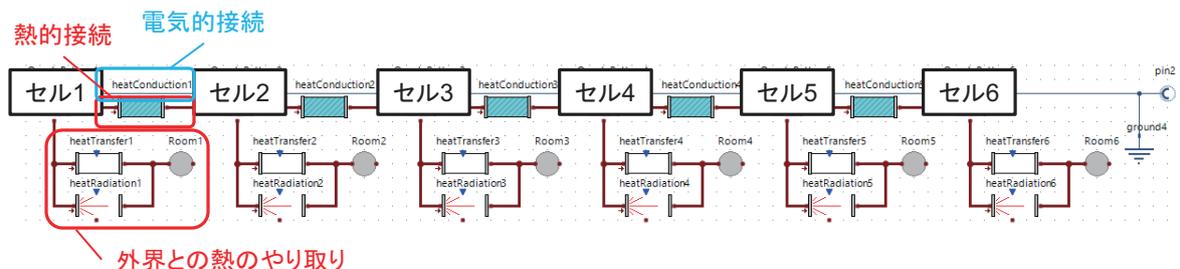


図 3-2 BESS モジュールのモデル概観

表 3-1 故障のモデル化の考え方

故障	故障のモデル化の考え方
短絡	短絡は、電極同士の直接の接触やセル内部への異物混入により生じる回路内の新たな電流のパス、セルの膨張による他セルとの接触等により生じる現象である。ここでは、蓄電池モジュールモデル内の本来繋がれていない構成要素同士を極小抵抗を持つ新たな回路で接続することにより表現した。
地絡・漏電	地絡・漏電は、電気回路と地表面が電氣的に接続された場合や、セル劣化による液漏れ等により生じる現象である。ここでは、蓄電池モジュールモデル内の電気の接続部分に損失を与えることによって表現した。
回路の切断	回路の切断は、セル間の接続が断絶された時や遮断器等の制御システムが誤作動を起こした時に起こる現象である。ここでは、蓄電池モジュールモデル内の構成要素間の接続部分を断絶させることによって表現した。

3.3.1 ブレインストーミングによる従来シナリオ分析の定量化

本検討では従来シナリオ特定手法である HAZOP を題材に、シナリオ定量分析を試みた。HAZOP において設定が必要となるパラメータおよびガイドワードを設定し、それらによって定義されるずれを上述のモデルに与えた際のシステム挙動を取得することにより、リスクシナリオの定量分析を行った。ここで、パラメータとはモジュールの設計パラメータおよび制御パラメータ等を指す。これらのパラメータは、通常は設計の意図を達成するために常に制御された状態にある。しかし、これらのパラメータが何らかの要因で通常状態から逸脱することでモジュールの状態が変化する可能性がある。本検討では、温度や電流など、モジュールモデル内に存在する全ての物理パラメータを対象とした。また、ガイドワードとは、上述のパラメータの通常状態からの逸脱を検討するためのキーワードのことである。本検討で活用したガイドワードを表 3-2 に示す。

表 3-2 ガイドワード [20]

ガイドワード	定義	解説
No / None	設計意図の否定	設計で意図したことが全く起こらない
More	量的増加	設計で意図した最大値を超えることが起こる
Less	量的減少	設計で意図した最小値を下回ることが起こる
Reverse	論理的反意	設計意図と反したことが起こる
As well as	質的増加	設計および運転で意図したことはすべて達成されるが、その他に余分なことが起こる
Part of	質的減少	設計および運転で意図したことの一部しか達成されない
Other than	完全な置換	設計意図は全く達成されず、全く異なることが起こる

構築した物理モデルを用いた計算にあたり、充電率 - 開回路電圧の関係および電池容量等の各パラメータの初期条件については、モジュールモデルの妥当性検証に用いられた実験情報 [17, 18] および妥当性検証時の設定条件 [19] 等を参考に定めた。本条件を、モジュール内パラメータの通常状態の挙動を得ることができる初期条件とした。この初期条件に対して、HAZOP のパラメータおよびガイドワードの組み合わせによるずれを与えることで、通常状態から逸脱した場合のシステム内パラメータの挙動を定量的に取得した。ここでは、本手法の適用事例として下記の 2 種類のシナリオについて述べる。なお、計算は電池の放電運用中を想定し、放電開始を 0 s とした。

- ・シナリオ(1)「パラメータ：セル1の初期充電率」「ガイドワード：More」
⇒「ずれ：セル1の初期充電率の増加」
- ・シナリオ(2)「パラメータ：セル1の内部抵抗」「ガイドワード：Less」
⇒「ずれ：セル1の内部抵抗値の減少」

シナリオ(1)について、セル1の初期充電率を通常状態想定時の100%から140%および150%に増加させた場合の各セル（セル1,2,3）の温度挙動を図3-3に示す。

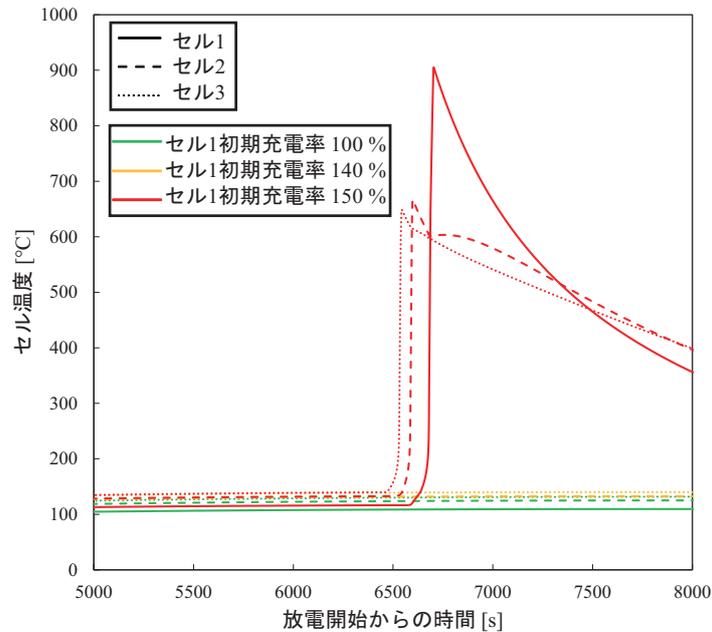


図 3-3 セル1の初期充電率を増加させた場合のセル1,セル2,セル3の温度挙動

図3-3より、セル1の初期充電率が140%の場合は、通常状態（100%）時よりもやや高い温度を推移する類似の温度挙動となるが、150%とした場合は放電開始から約6,500s後にセル3（およびセル4）が熱暴走閾値温度（140°C）に到達して熱暴走を起こし、その温度上昇および熱伝導によって隣接セル（セル2およびセル5）が加熱される。その約50s後に隣接セルも熱暴走に至り、さらにその他のセルにも熱暴走が伝播していく。最終的には全てのセルが熱暴走に至り、初期充電率の高かったセル1の温度のみが、他のセルより高い最高到達温度（約900°C）に至るという結果が得られた。セル3（およびセル4）が他のセルよりも先に熱暴走閾値温度に到達して熱暴走に至ったのは、モジュールの形状およびセルの位置関係により空気との接触面積と熱伝達による冷却効果がより小さいからであると考えられる。また、セル2の温度が熱暴走終了後に再度上昇しているのは、セル1の熱暴走から生じた温度上昇による熱伝導で加熱されたからであると考えられる。以上の結果から、セル1の初期充電率を増加させた場合、140%と150%の間に熱暴走の発生有無を分ける閾値が存在することがわかる。

シナリオ(2)について、セル1の内部抵抗を通常状態想定時の600mΩから500mΩおよび400mΩに減少させた場合の各セル（セル1,2,3）の温度挙動を図3-4に示す。

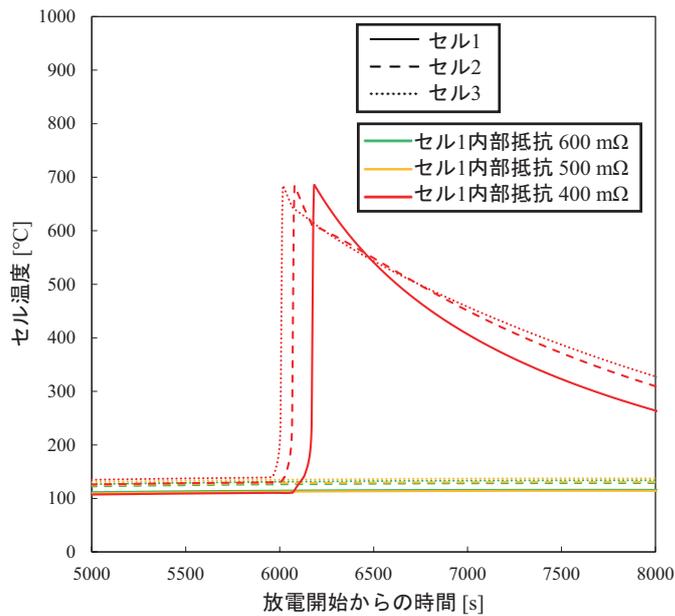


図 3-4 セル 1 の内部抵抗を減少させた場合のセル 1, セル 2, セル 3 の温度挙動

図 3-4 より、セル 1 の内部抵抗が 500 mΩ の場合は、通常状態 (600 mΩ) 時よりもやや高い温度を推移する類似の温度挙動となるが、400 mΩ とした場合は放電開始から約 6,000 s 後にセル 3 (およびセル 4) が熱暴走閾値温度に到達して熱暴走を起こし、その後の熱暴走伝播の過程は前述のシナリオ (1) と同様であった。ただし、内部抵抗を減少させたセル 1 の熱暴走後の温度挙動は、通常時とほとんど同様であった。以上の結果から、セル 1 の内部抵抗を減少させた場合、500 mΩ と 400 mΩ の間に熱暴走の発生有無を分ける閾値が存在することが分かる。

以上のように、本検討により構築した物理モデルに対して、通常状態の計算条件からのパラメータのずれを定量値として与えることで、従来の HAZOP による定性的なシナリオ特定手法では分析できなかった、熱暴走の発生有無を分けるずれの閾値を定量的に得ることができた。

3.3.2 システム内の複数箇所で生じる同時故障によるシナリオ特定

本検討では、既存の HAZOP では取り扱うことのできない、複数のずれを同時に与えた場合のシナリオ分析を行った。ここでは、3.3.1 において用いたパラメータとガイドワードの組み合わせで表されるずれを、物理モデルに対して複数同時に与えた場合を想定し、本手法の適用事例として下記の 2 種類のシナリオについて述べる。なお、計算は 3.3.1 と同様に電池の放電運用中を想定し、放電開始を 0 s とした。

- ・シナリオ(1) ずれ (i) : セル 1 の熱伝導率の減少 ($20 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ から $17 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ へ)
 ずれ (ii) : セル 2 の初期充電率の増加 (100%から 120%へ)
 ずれ (iii) : セル 2-3 間の関係性の創出 (外部短絡回路形成)
- ・シナリオ(2) ずれ (i) : セル 1 の内部抵抗の減少 (600 mΩ から 500 mΩ へ)
 ずれ (ii) : 環境温度の上昇 ($25 \text{ }^\circ\text{C}$ から $30 \text{ }^\circ\text{C}$ へ)
 ずれ (iii) : セル 3 の内部抵抗の減少 (600 mΩ から 500 mΩ へ)

シナリオ (1) について、ずれ(i)、ずれ(ii)、ずれ(iii) を同時に与えた場合の各セルの温度挙動を図 3-5 に示す。図 3-5 より、放電開始から約 6,400 s 後にセル 2 が熱暴走閾値温度 ($140 \text{ }^\circ\text{C}$) に到達して熱暴走を起こし、その温度上昇および熱伝導によって隣接セル (セル 1 およびセル 3) が加熱される。セル 2 が熱暴走してから約 50 s 後にセル 1 が熱暴走し、数秒遅れてセル 3 が熱暴

走に至る。その後はその他のセルにも熱暴走が伝播していき、最終的には全てのセルが熱暴走に至る。セル3の温度が他のセルより高い最高到達温度（約800℃）に至ったのは、外部短絡回路の創出によって、高い初期充電率を与えたセル2からセル3側に過剰に電流が流れ、そのジュール熱によってセル3の温度が上昇したからであると考えられる。以上の結果と3.3.1のシナリオ(1)で得られた結果を踏まえると、仮にあるセルの初期充電率が150%より小さい値であったとしても、その他の同時に起こるずれの種類によっては熱暴走が発生する可能性があるといえる。

シナリオ(2)について、ずれ(i)、ずれ(ii)、ずれ(iii)を同時に与えた場合の各セルの温度挙動を図3-6に示す。図3-6より、放電開始から約6,000s後にセル4が熱暴走閾値温度に到達して熱暴走を起こし、その温度上昇および熱伝導によって隣接セル（セル3およびセル5）が加熱される。セル4が熱暴走してから約50s後にセル3およびセル5が熱暴走に至り、その後はその他のセルにも熱暴走が伝播して全てのセルが熱暴走に至る。以上の結果と3.3.1のシナリオ(2)で得られた結果を踏まえると、仮にあるセルの内部抵抗が400mΩより大きい値であったとしても、その他の同時に起こるずれの種類によっては熱暴走が発生する可能性があるといえる。

これらのシナリオは、複数の（独立した）ずれが同時に発生することを想定しているため、本手法により特定されるシナリオの発生頻度は極めて低いものが多いと考えられるが、システムレベルのリスク分析に向けたシナリオの網羅性向上の観点から、これらのシナリオについても議論の俎上に載せることは重要である。

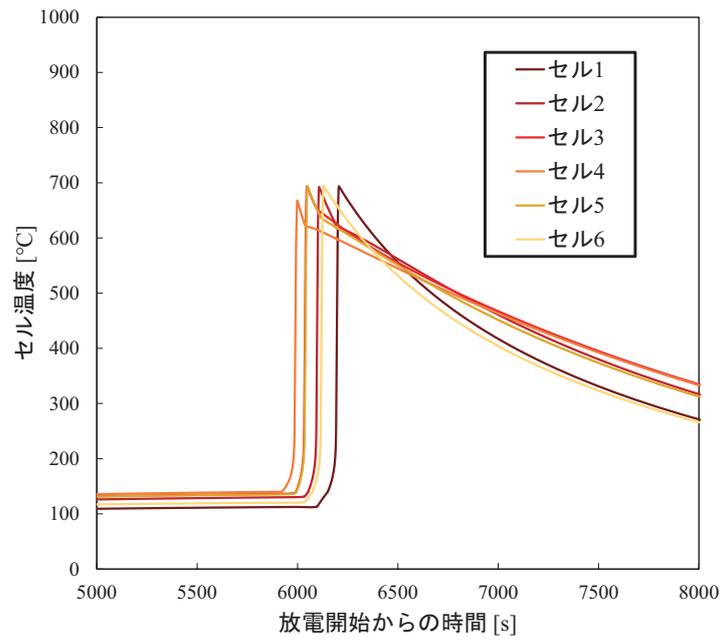


図 3-5 シナリオ (1) 発生時の各セルの温度挙動

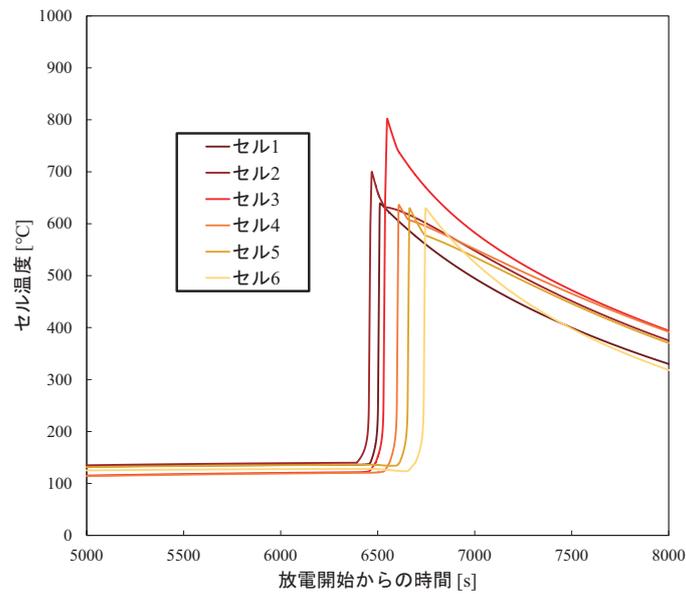


図 3-6 シナリオ (2) 発生時の各セルの温度挙動

3.3.3 安全対策の効果の定量分析

BESSの安全設計において、安全対策のリスク低減効果を定量的に把握することは重要である。そこで本検討では、モジュールのセル間に挿入される断熱材を事例とし、定量的リスクに基づく断熱材のリスク低減効果の解析を試みた。断熱材は、あるセルから生じた内部短絡および熱暴走によるセルの温度上昇に伴って、隣接セルが過熱・熱暴走に至る熱暴走伝播事象を遮断する効果を持ち、熱暴走シナリオのリスク低減効果が期待される。そこで、本検討では断熱材の導入による各セルの熱暴走発生確率の低減効果に着目し、その効果を定量的に把握することを目的とした。

検討を行うためのモジュールモデルを改めて構築した。前項のモデルのセル数を12個に拡張し、断熱材を導入する代表箇所としてセル3とセル4、セル6とセル7、セル9とセル10の間の3か所を選定した。次に、当該モデルの最も左端のセル（セル1）において内部短絡および熱暴走が発生した際に、その温度上昇がモジュール内の各セルに伝播して熱暴走に至るシナリオを想定し、モジュール内の各セルにおいて熱暴走が発生する確率を算出する。ここでは昨年度報告書[2]において用いたモンテカルロシミュレーション（MCS）による熱暴走発生確率算出手法を適用した。MCSを実行する際は、入力変数が膨大化して過剰な計算負荷がかかることを防止するため、入力変数の感度解析が有効である。ここでは、MCSにおいて分布を与える入力変数の分散に基づく感度解析の代表的な手法の一つであるSobol法を用いた。Sobol法において、その感度指標は入力変数のばらつきに起因するモデルの応答出力（動的シミュレーション結果に基づくシステムの動的挙動における異常な振る舞い）の分散に対する寄与度を表す[15]。なお、MCSおよび感度解析にはOptiY GmbH社製OptiY ver. 4.6を用い、感度解析については計算負荷を考慮して二つのセルのみを隣接させたモデルで実施した。感度解析の結果、出力変数である各セルの最高到達温度に対して大きな影響を与えるパラメータとして充電率（SOC）および熱暴走発生閾値温度が抽出された。

感度解析によって抽出された上記の入力変数に対して、12個のセルと三つの断熱材を持つ図3-7のモデルに対してMCSを実施した。

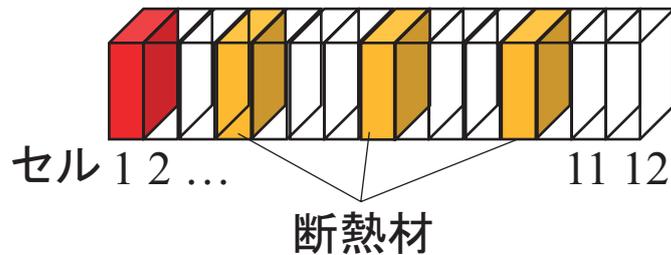


図 3-7 断熱材を導入した場合のセルと断熱材配列

計算の試行回数(ケース数)は3,000回とした。また、初期条件としての入力変数の分布について、SOCについては0～100%の一樣分布、熱暴走発生閾値温度は150～210℃の一樣分布と仮定して検討を行った。ただし、実際の蓄電池モジュールにおいては、これらの分布は一樣でないことが多い。本検討はあくまで手法提案を目的としているため、これらの分布については仮定のものとしたが、実際の系に適用する際にはより現実的な分布を入力する必要がある。MCSにより出力するパラメータとして各セルの最高到達温度(1回のケースの中で到達した温度の最高値)を設定し、上限の閾値(熱暴走閾値温度)として210℃を設定した。なお、下限の閾値について今回は設定しなかった。繰り返し計算を行い、セルの最高到達温度が熱暴走閾値温度を超えた場合のケース数をカウントし、各セルの熱暴走の発生回数を取得した。

断熱材を入れない場合のモジュールにおける各セルの最高到達温度のヒストグラムを図3-8に、断熱材を入れた場合のモジュールにおける各セルの最高到達温度のヒストグラムを図3-9に示す。

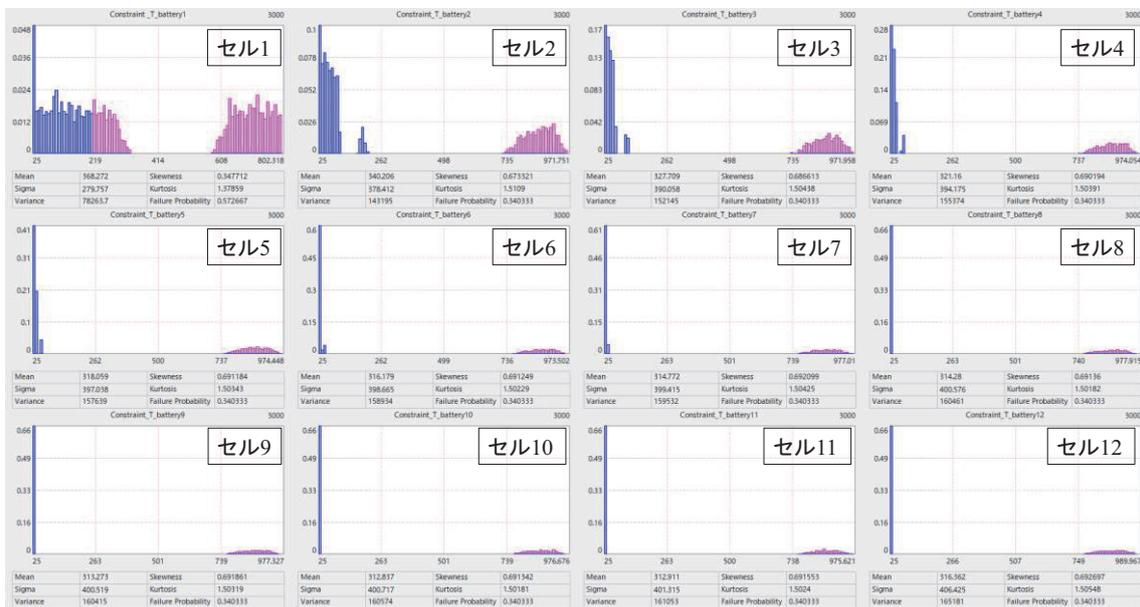


図3-8 各計算ケースにおける各セルの最高到達温度のヒストグラム(断熱材なし)

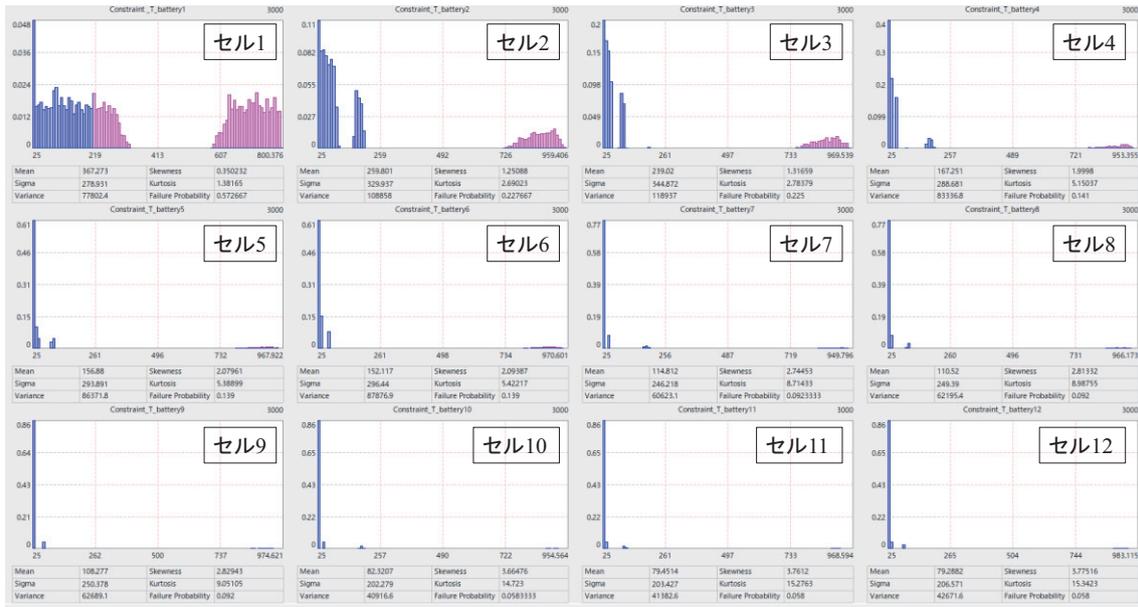


図 3-9 各計算ケースにおける各セルの最高到達温度のヒストグラム（断熱材あり）

各図内のヒストグラムは、横軸が各セルの最高到達温度、縦軸がその温度に到達した計算ケースの頻度を表しており、ヒストグラムの桃色で示された領域はそのセルが熱暴走閾値温度を越えているケース、紫色で示された領域はそのセルが熱暴走閾値温度を越えていないケースを表している。以上の結果から得られた各セルの熱暴走発生確率の値、および熱暴走伝播確率の値を表 3-3 に示す。

表 3-3 断熱材導入有り / 無し時の各セルの熱暴走発生確率および熱暴走伝播確率

セル No.	断熱材なし		断熱材あり	
	熱暴走発生確率[-]	熱暴走伝播確率[-]	熱暴走発生確率[-]	熱暴走伝播確率[-]
1	0.573	-	0.573	-
2	0.340	0.593	0.228	0.398
3	0.340	1	0.225	0.987
4	0.340	1	0.141	0.627
5	0.340	1	0.139	0.986
6	0.340	1	0.139	1
7	0.340	1	0.0923	0.664
8	0.340	1	0.0920	0.997
9	0.340	1	0.0920	1
10	0.340	1	0.0583	0.634
11	0.340	1	0.0580	0.995
12	0.340	1	0.0580	1

各セルの熱暴走発生確率とは、計算した全ケース数のうち、該当セルが熱暴走に至った（該当セルの温度が熱暴走閾値温度に到達した）ケース数の割合を指している。すなわち、各セルの熱暴走発生確率は、図 3-8 および図 3-9 に示されたヒストグラムの全領域の面積に対する、桃色の領域の面積の割合に相当する。また、各セルの熱暴走伝播確率とは、あるセルが熱暴走に至ったケース数のうち、その隣接セルが熱暴走に至ったケース数の割合を指している。

図 3-8 および表 3-3 より、断熱材を入れない場合の各セルにおける熱暴走発生の傾向として、セル 1 の熱暴走発生確率が最も高く（0.573）、セル 2 以降の熱暴走発生確率は一定の値（0.340）で推移していることが分かる。セル 2 以降の各セルの熱暴走伝播確率が 1 であることを示しており、セル 1 の熱暴走による温度上昇によってセル 2 が加熱された場合、ひとたびセル 2 の温度が熱暴走閾値温度を越えると、後続のセル全てが熱暴走することを意味している。したがって、蓄電池モジュールにおける熱暴走シナリオにおいては、あるセルから隣接セルへの熱の伝播を防止するような対策の導入が極めて重要であるといえる。

図 3-9 および表 3-3 より、断熱材を入れた場合の各セルにおける熱暴走発生の傾向として、セル 1 の熱暴走発生確率が最も高い（0.573）ことは断熱材を入れない場合と同様であるが、セル 2 以降の熱暴走発生確率は徐々に減少していることが分かる。また、その減少の程度は、熱暴走伝播確率に着目すると、断熱材を導入しなかったセル間では熱暴走伝播確率がおよそ 1 であるのに対し、断熱材を導入したセル 3 とセル 4、セル 6 とセル 7、セル 9 とセル 10 の間では熱暴走伝播確率がおよそ 0.64（平均値 0.641）であることが分かる。このことから、断熱材を入れることによって熱暴走の伝播が一定程度防止され、各セルの熱暴走発生確率を低減する効果があることが定量的に示された。

以上より、本手法を用いることで、モジュールに断熱材を導入した際の各セルの熱暴走発生確率の低減効果を定量的に示すことができることが分かった。これにより、熱暴走シナリオの影響度を定量分析するための手法、およびその結果を今回の結果と組み合わせることで、安全対策の効果を、定量的リスクを指標に評価できる可能性を示すことができた。

3.4 まとめ

本章では、複合物理領域・システムレベルモデリングを用いた定量的リスク分析手法構築に向けて、下記三つの検討を実施し、リスクアセスメントの高度化を図った。

1. ブレインストーミング式のシナリオ特定手法の代表例として HAZOP に着目し、従来の分析では区別できなかったシナリオの詳細分析を可能とした。
2. 従来の分析では扱われにくかった、複数のずれが同時に発生した場合のシナリオを想定し、そのシステム内パラメータ挙動を予測することで、従来分析では議論の俎上に乗りにくかったシナリオについて分析可能とした。
3. 蓄電池モジュールの安全設計に向けて、断熱材を組み込んだ物理モデルを用いたモンテカルロシミュレーションにより、断熱材を導入した際の各セルの熱暴走発生確率の低減効果を定量的に示した。これにより、熱暴走シナリオの影響度の定量分析結果と組み合わせることで、安全対策の効果について、定量的リスクを指標に評価できる可能性を示した。

なお、セルおよびモジュールモデル構築にあたって本検討で用いた情報には、分析上の仮定として用いたものが多数存在する。したがって、本手法を用いて実際の分析を行う際には、構築した物理モデルに対して、実システムに合わせたパラメータの入力値を与えて物理モデルの妥当性検証を十分に行う必要があることに注意すべきである。

4. 結論（科学的・技術的な結果のとりまとめ）

大型蓄電池システムを含む科学技術の安全性を様々なステークホルダーに対して示すには、セーフティケースという考え方が有効である。セーフティケースとは「ある技術が安全である」という主張を行うために、これを構成する安全を脅かす可能性がある項目について反証と証明からなる立論を行い、この立論に必要な証拠を揃えることで、体系的かつ包括的に“安全”である状態を証明するための論理手法である。この立論と証拠にリスクアセスメントが有効であるため、その高度化はシステムの“安全性”を競争技術として位置付けるために特に重要となる。リスクアセスメントを効果的に実施するための体制や検討すべきリスクアセスメント技術等については2020年度LCS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」[2]で述べたとおりであり、本提案書はその目的達成に向けた検討結果について報告したものである。

安全を脅かす可能性がある項目を体系的に抽出するには、リスクシナリオ特定が必要である。2020年度提案書で記したISOおよびJISにて発行された安全規格では、リスクシナリオ特定の実施を要求する記述は存在するものの、具体的な検討手法には課題が残されている。定性的なシナリオ特定の例としてFMEAやHAZOPがこれまで実施されてきたが、システミックなリスクシナリオ特定に対応する必要があった。さらに抽出されたリスクが許容可能であることを示すには（立論と証拠）、そのリスクの大きさと関連する安全対策の有効性を可能な限り定量的に示すことが有効である。当該課題を解決するために、複合物理領域・システムレベルモデリングに着目して、大型蓄電池システム内の熱・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活用するための初期検討を実施した。その結果、従来シナリオ特定手法では不可能であったシナリオの定量分析および複合故障シナリオの分析が可能となることを示した。また、BESSの安全設計に向けた要素技術の一つとして、同モデリング手法を用いて安全対策の有効性を定量的に分析できる可能性を示した。

5. 政策立案のための提案

リスクアセスメント技術を高度化させる一方で、そのリスクアセスメントを有効に実施するには、境界条件の設定が重要となる。これは何をリスクとして捉えるべきか、というフレーミング問題である。逆説的には、リスクアセスメントは、境界条件外の前提やそのずれを十分に考慮することができない（これが俗にいうところの想定外である）。考慮すべきリスクを特定するためには社会総合リスクという指標が有効であり、本提案書では簡易分析を行った。大型蓄電池システムは、想定される未来像、特にそこでの電力需要の変化によって、システムに求められる規模・構成・運用方法が大きく変化することが予想され、この変化は安全に関するリスクアセスメント結果へ大きな影響を与える。そのため実施したリスクアセスメントを有効たらしめるには、その前提条件や境界条件の妥当性に注意を払う必要がある。一方で、大型蓄電池システムの社会実装促進は資源循環システムとそれに付属するサブシステムに関して新たなリスクを生み出すことも想定されている。これらに対しても、何がどこまで把握されているのかを整理することは重要であり、社会総合リスクの大きいものについては詳細検討を進めるべきである。

6. 今後の研究内容

上述した通り、本研究では、物理モデリングを用いた定量的リスクアセスメント手法の提案に関して下記3項目を達成した。

- ブレインストーミングによる従来シナリオ分析の定量化
- システム内の複数箇所が生じる同時故障によるシナリオ特定
- 安全対策の効果の定量分析

一方、先端工学システムの定量的リスクアセスメントには下記の課題が未だ残されている。

【1】本研究で活用した物理モデリング技術は3次元構造を考慮していないため、定量的リスクアセスメントの結果には詳細設計情報等が反映されていない。

【2】システム全体の制御を考慮した定量的リスクアセスメントは実施されていない。

【3】稼働実績が無い、または乏しいため、各機器等の劣化や故障確率を取得することができず、精度の高いリスク分析を実施することが難しい。

【4】定量的リスクアセスメントは、分析対象システムを導入する際、あるいはメンテナンスする際など、数回の実施によりシステムのリスクを評価し、安全性を検討する。しかし、システムは常に変動するため、そのリスクも常に変化しており、そのリスクの変化をリアルタイムで更新し、システムの脆弱性を特定することが重要であるが、その手法は開発されていない。

【1】に関しては、本研究で活用した物理モデリング技術（1EDAE）と3DCAEを連携し、定量的リスク分析を可能とする技術開発が必要である。

【2】に関しては、本研究はBESSの中で電池モジュールにのみ着目した上で、その熱暴走リスクを定量的に分析した。一方で、実際のBESSは複数モジュールが組み合わせられた蓄電池盤、そして複数の蓄電池盤が連なるシステムとして稼働する。また、発電システムや需要側システムとの関係の中で、電池セルやモジュールの充電率等を厳密に制御し、それらの運転の中で熱暴走リスクを低減・維持することになる。したがって、物理モデリング技術を活用し、より現実的なシステムの稼働を想定した定量的リスク分析に関して研究の余地が残されている。

【3】に関して、新しいシステムはその稼働とともにデータが蓄積されるため、稼働前や初期においては故障確率を高い精度で取得することが難しい一方で、稼働とともにその精度が高くなる。物理モデリング技術およびベイジアンネットワークを活用することにより、類似システムの関連データ、物理モデリングにより生成したデータ、さらに稼働データを組み合わせることで、故障データを更新し、精度の高い故障確率を推測することができるが、この一連の手法は開発されていない。

【4】に関して、将来5GやIoTの発展、AI技術の開発により、システムのあらゆる情報が収集・解析され、システムの最適運用にフィードバックされることが確実視されている。それらの一連の技術はシステムの安全性技術にも応用され、リスクのリアルタイム更新による最適なリスク制御が可能となるため、リスクのリアルタイム解析に向けた技術開発が必要であり、1DCAE技術はその一端を担うと考える。

本研究においては、大規模エネルギー貯蔵システムを事例として、その論理を展開したが、本提案手法の他の先端工学システムへの適用も可能である。例えば、水素エネルギーキャリア（有機ハイドライドやアンモニア等）を用いたシステムの安全性はカーボンニュートラル社会を実現する上で極めて重要であり、本提案手法等を活用することによる高い安全性を有するシステム開発が必要となる。また、大規模エネルギー貯蔵システムを始めとする将来実装が見込まれる先端工学システムの安全化技術は、社会の安全・安心の根幹となることから、今後も研究開発を継続する必要がある。

参考文献

- [1] 経済産業省, エネルギー基本計画, 2021.
- [2] 低炭素社会の実現に向けた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”, 科学技術振興機構低炭素社会戦略センター, 2021年3月.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 日本産業標準調査会, “電気エネルギー貯蔵システムー電力システムに接続される電気エネルギー貯蔵システムの安全要求事項ー電気化学的システム”, 2021.
- [6] 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.
- [7] International Organization for Standardization (ISO), “ISO 31010:2019 Risk management”, 2019.
- [8] 低炭素社会の実現に向けた政策立案のための提案書, “蓄電池システム (Vol.9) 一次世代電極活物質を用いたリチウムイオン電池の製造コスト試算ー”, 科学技術振興機構低炭素社会戦略センター, 2021年3月.
- [9] 低炭素社会の実現に向けた政策立案のための提案書, “情報化社会の進展がエネルギー消費に与える影響 (Vol. 1) ーIT機器の消費電力の現状と将来予測ー”, 科学技術振興機構低炭素社会戦略センター, 2019年3月.
- [10] 内閣サイバーセキュリティセンター, “重要インフラの情報セキュリティ対策に係る第4次行動計画”, 2020.
- [11] 調査報告書, “リチウムイオン電池の劣化挙動調査”, 科学技術振興機構低炭素社会戦略センター, 2020年3月.
- [12] Bubbico R, Greco V, Menale C, “Hazardous scenarios identification for Li-ion secondary batteries”, Safety Science 2018;108:72-88, <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2018.04.024>.
- [13] Sandia National Laboratories, “Grid-scale Energy Storage Hazard Analysis & Design Objectives for System Safety”, 2020.
- [14] Rosewater D, Willams A, “Analyzing system safety in lithium-ion grid energy storage”, Journal of Power Sources 2015;300:460-471, <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.09.068>.
- [15] 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>.
- [16] 山本耕市, “大型蓄電システムの概要ー国際動向およびNITE評価施設”, GS Yuasa Technical Report 2017;14:1-6, https://www.gs-yuasa.com/en/technology/technical_report/pdf/vol14/14_1_01.pdf.
- [17] 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>.
- [18] Ren D, Feng X, Lu L, He X, Ouyang M, “Overcharge behaviors and failure mechanism of lithium-ion batteries under different test conditions”, Applied Energy 2019;250:323-332, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.05.015>.
- [19] 大和田奨, 鈴木智也, 河津要, 中山穰, 塩田謙人, 伊里友一朗, 三宅淳巳, “蓄電池システムの複合物理領域モデリングおよび熱暴走伝播機構解析”, 安全工学シンポジウム 2021 講演

予稿集 2021;GS-5-3:302-303.

[20] Center for Chemical Process Safety, “Guidelines for Hazard Evaluation Procedures Second Edition with Worked Examples”, Wiley, 1992.

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 リスクアセスメント手法の高度化

令和4年4月

Report on the Sophistication of Risk Assessment Methods for Large-Scale Energy Storage Systems

Proposal Paper for Policy Making and Governmental Action
toward Low Carbon Societies,
Center for Low Carbon Society Strategy,
Japan Science and Technology Agency,
2022.4

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・・・共同研究者 横浜国立大学 特任助教 中山 穰 (NAKAYAMA Jo)
特任助教 塩田 謙人 (SHIOTA Kento)
准教授 伊里 友一郎 (IZATO Yu-ichiro)
教授 三宅 淳巳 (MIYAKE Atsumi)
低炭素社会戦略センター 特任研究員 越 光男 (KOSHI Mitsuo)
- 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 8階
TEL : 03-6272-9270 FAX : 03-6272-9273
<https://www.jst.go.jp/lcs/>

© 2022 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。