

学位論文及び審査結果の要旨

横浜国立大学

氏名	鈴木 智也
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	環情博甲第530号
学位授与年月日	令和5年3月23日
学位授与の根拠	学位規則(昭和28年4月1日文部省令第9号)第4条第1項及び横浜国立大学学位規則第5条第1項
学府・専攻名	環境情報学府 人工環境専攻
学位論文題目	モデルベースドリスク分析を用いたエネルギーシステムのリスク分析の高度化に関する研究
論文審査委員	主査 横浜国立大学 教授 三宅淳巳 横浜国立大学 教授 大矢 勝 横浜国立大学 教授 澁谷忠弘 横浜国立大学 准教授 伊里友一朗 横浜国立大学 客員教授 野口和彦

論文及び審査結果の要旨

本研究の目的は、システムの物理的かつ動的振る舞いを取得可能な **Physics model** を活用したモデルベースドリスク分析(**MBRA**)を活用したエネルギーシステムのリスク分析の高度化である。持続可能なエネルギー利活用に向けた分散型エネルギーシステムの実現を念頭に、当該システムを構成する各エネルギーシステム(製造・貯蔵・利用設備等)の設計開発段階から実運用中も含めて継続的に実施されるリスク分析の高度化を目指すものである。

第1章では、本研究におけるリスクを「エネルギーシステムの持つフィジカルリスク」を意味するものとし、前述のエネルギーシステムの持つ複雑性から生じる特徴を踏まえた上で、当該システムのリスク分析における課題とその解決アプローチについて整理した。複雑性を持つシステムは、当該システムを構成する構成要素およびそれらどうしの相互作用が多数存在することにより、専門家であっても理解や予測が難しい非線形な振る舞いを呈する可能性があることなどが指摘されている。そこで、本研究ではシステム構成要素およびそれらの関係性について物理現象を元にモデル化し、それらの組み合わせによってシステム全体をモデル化する **Physics model** を活用したリスク分析(**MBRA**)に着目した。また、エネルギーシステムの中から、本研究において研究題材とする「水素ステーション(**HRS**)における水素充填システム」および「大型蓄電池システム(**BESS**)におけるリチウムイオン電池(**LIB**)モジュールシステム」を選定し、その背景情報を整理した。

第2章では、第1章で指摘した課題の解決に向けて、本研究における **MBRA** を定義した。既往研究によると、**MBRA** とそれに類する手法として、近年のシステム開発において用いられているモデルベースドシステムズエンジニアリング(**MBSE**)およびモデルベース開発(**MBD**)の考え方を背景とした総合信頼性および安全性解析手法が提案されている。このうち、後者に関する既往研究では設計者の要求仕様のみを定義する **Logic model** を活用した手法が主である一方で、システムの物理現象に関する不確かさをも取り扱う手法の開発はなされていない。それは、システムへの要求仕様を実際のシステムに落とし込む際に構築される **Physics model** と **Logic model** との間に、モデル化方式の違いというギャップがあるからである。そこで本研究では、システムの物理的かつ動的な振る舞いを取得可能な **Physics model** に着目することとし、本研究における **MBRA** の定義を、「システムの物理的かつ動的振る舞いを取得可能な **Physics model** に基づくリスク分析」とした。

第3章では、**HRS** における水素充填システム(以下、充填システム)を題材とし、充填システム

からの水素漏洩シナリオを対象として、Physics model を活用した影響度解析およびリスク分析を実施した。ここでの充填システムとは、HRS における高圧蓄圧器内の水素を、差圧により水素自動車に充填するシステムのことを指す。充填システムを含む HRS を対象とした従来の定量的リスク分析では、保守側の分析結果を得るための方法論として、水素漏洩時の上流圧力が最大値で一定であるとの仮定のもとでの分析を行うことから、静的な分析結果とならざるを得ない課題があった。そこで本検討では、充填システムの物理的かつ動的振る舞いを取得可能な Physics model を活用することで、従来の定量的リスク分析結果に対して、シナリオの動的情報を取り込むことを試みた。まず、充填システム内において生じ得る物理現象として、流体のエネルギーに関する現象に着目し、関連する諸法則(エネルギー保存則等)を用いて定式化することで充填システムの Physics model を構築した。次に、充填操作中の漏洩発生を想定した解析を実施し、漏洩発生後のシステムにおける動的振る舞いとして、水素漏洩速度を取得した。最後に、取得した経時変化する動的漏洩速度と共に、水素拡散およびジェット火災等の影響度解析モデルおよび漏洩頻度データを活用することで、漏洩シナリオ発生時の充填システム周辺における個人リスクを取得した。その結果、従来の定量的リスク分析により得られた個人リスク結果と比較してであることがわかった。しかし、本検討において、充填システム内流体である水素の漏洩に伴う事象進展の動的な振る舞いを考慮し、システムの動的な事象進展系の定量情報を付与した充填システムの影響度解析およびリスク分析を実施することが可能となった点において、充填システムを含む HRS を対象とした定量的リスク分析が高度化されたと言える。

第 4 章では、BESS における LIB モジュールシステム(以下、モジュール)を題材とし、単一 LIB の熱暴走を起因とする熱暴走伝播シナリオを対象として、Physics model を活用した頻度解析を実施した。ここでのモジュールとは、満充電状態にある複数個の角形 LIB を隣接させて直列接続しパッケージ化した蓄電池システムのことを指す。モジュールを含む BESS を対象とした従来の定量的リスク分析では、Layer of Protection Analysis を用いた分析が行われているが、ある単一 LIB により生じた熱暴走が隣接 LIB に伝播する確率が常に一定であるとの仮定に基づく概算的な分析に留まるという課題があった。そこで本検討では、モジュールの物理的かつ動的振る舞いを取得可能な Physics model を活用することで、従来の定量的リスク分析結果に対して、実際の物理現象に基づいた事象伝播確率を分析に取り込むことを試みた。まず、モジュールを構成する LIB と、LIB において生じる熱暴走現象およびそれに伴って生じる隣接 LIB 間における現象を、関連する諸法則(Ohm の法則、Newton の冷却の法則など)を用いて定式化した。次に、放電中の LIB 内部短絡による熱暴走伝播を想定したモデルシミュレーションを実施し、既往研究にて実施された実験値との比較により、熱暴走伝播シナリオ発生時のモジュールの動的振る舞い(各 LIB の温度挙動)を取得可能であることを確認した。最後に、本モデルとモンテカルロ法を組み合わせる算出した熱暴走伝播事象の事象進展確率、および熱暴走伝播シナリオの発生頻度解析を実施した。その結果、従来の定量的リスク分析により得られた熱暴走伝播シナリオの発生頻度解析結果と比較して、数倍の発生頻度を示すことがわかった。本検討において、モジュールにおける各 LIB の動的な温度挙動を用いてシステムの物理的な現象を捉えた分析により、熱暴走伝播シナリオのリスクの過小評価を防ぐことができる可能性がある点において、モジュールを含む BESS を対象とした定量的リスク分析が高度化されたと言える。

第 5 章では、以上の検討を踏まえて、Physics model を活用した MBRA の利点・弱点および今後の研究課題について整理した。利点としては、Physics model を用いた動的過渡解析によるシナリオの時間進展系の定量分析結果を活用することで、①シナリオの質的情報を付与したリスク分析ができる可能性があること、②システム内における事象伝播に伴い増幅し得る不確かさを取り扱える可能性があること、③MBSE や MBD の一環として、システムの設計開発の上流から下流およびシステムの運用中まで含めて Physics model を一貫してリスク分析に活用することで、システムのリスク最適化および高安全化を達成できる可能性があることの 3 点が挙げられ、これらの観点からエネルギーシステムのリスク分析が高度化された。ただし、これらの利点は本研究で対象とした充填システムおよびモジュールにおいて得られた結果であり、その適用範囲に注意する必要がある。また、Physics model の限界から生じる MBRA の弱点として、① Physics model に取り込まれない物理領域に関する現象は取り扱われないこと、②システムの 3 次元的な構造に代表される空間的な広がりを持つ要素については取り扱われないこと、③モデル

化技術の未熟さによる化学反応現象の取り扱いが困難であることの 3 点が挙げられる。したがって、これらの要素を含めてシステム全体のリスクを分析するには、別の異なる手法を用いて MBRA と相互に補完し合うことが重要である。最後に、今後の研究課題として、従来リスク分析スキームの各実施項目に対して Physics model を活用するための要素技術開発に関する研究課題を示した。

第 6 章では、最後に本論文の各章における主張をまとめた。本研究では、エネルギーシステムのリスク分析に対して、システムの物理的かつ動的振る舞いを取得可能な Physics model を活用した MBRA を適用することで、シナリオの時間進展に伴う質的情報やシステム内における事象伝播に伴い増幅し得る不確かさを取り扱うリスク分析が実施できる可能性を示した点で、エネルギーシステムのリスク分析の高度化を達成した。

以上の成果はエネルギーシステムのリスク評価に基づく社会実装大きく貢献するものであり、本論文は博士（工学）の学位論文として十分な価値があるものと認められ、合格と判定した。

注 論文及び審査結果の要旨欄に不足が生じる場合には、同欄の様式に準じ裏面又は別紙によること。