

博士論文

モデルベース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

*Advancement in risk analysis for energy systems
using model-based risk analysis*

国立大学法人 横浜国立大学大学院
環境情報学府

鈴木 智也

Tomoya SUZUKI

2023年3月

摘要

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リスク分析(**MBRA**)を用いたエネルギーシステムのリスク分析の高度化である。これは、持続可能な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。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。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 1 オーダー程度減少することがわかった。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。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ことで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、①Physics 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際には、別の異なる手法を用いて MBRA と相互に補完し合う必要がある。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、本論文の結論を述べた。

目次

第1章	緒論	1
1.1	緒言	1
1.2	工学システムのリスクと現代工学システムの特徴	2
1.2.1	工学システムのリスクと安全	2
1.3	工学システムのリスク	3
1.3.1	フィジカルリスク	3
1.3.2	リスクアセスメント	3
1.3.2.1	リスクアセスメントの手順	4
1.3.2.2	定性的リスクアセスメント	8
1.3.2.3	定量的リスクアセスメント	8
1.3.3	現代工学システムの特徴とリスク分析/アセスメント実施上の課題	9
1.4	エネルギーシステム	12
1.4.1	水素エネルギーシステム	12
1.4.1.1	水素エネルギーおよび水素ステーション	12
1.4.1.2	水素エネルギー及び水素ステーションの動向	13
1.4.2	電気エネルギーシステム	17
1.4.2.1	大型蓄電池システム	17
1.4.2.2	大型蓄電池システムの動向	17
1.5	研究目的	20
1.6	まとめ	20
第2章	モデルベースドリスク分析とは何か	21
2.1	概要	21
2.2	モデルベースシステムズエンジニアリング	21
2.3	モデルベース開発	21
2.4	モデルベースシステムエンジニアリングに用いられるモデル	22
2.5	モデルベースドリスク分析に関する既往研究とその課題	23
2.6	まとめ	26
第3章	水素ステーションにおける水素充填システムへのMBRAの適用	27
3.1	概要	27
3.2	本検討の背景	27
3.2.1	水素ステーションおよび水素ステーションにおける水素充填システム	27
3.2.2	水素ステーションにおけるリスク	27
3.2.2.1	社会総合リスクの観点から見た水素ステーションのリスク	27

3.2.2.2	水素ステーションにおけるフィジカルリスク	29
3.2.2.3	水素ステーションのフィジカルリスクアセスメント	30
3.2.2.4	水素ステーションのフィジカルリスクアセスメント事例	31
3.2.2.5	水素ステーションのフィジカルリスクアセスメントにおける課題	34
3.3	モデルベースドリスク分析の適用	36
3.3.1	水素充填システムモデルの構築	36
3.3.1.1	主要設備・機器構成	36
3.3.1.2	Physics model の構築	40
3.3.2	動的漏洩速度の取得	45
3.3.2.1	計算条件	45
3.3.2.2	モデル妥当性検証	46
3.3.2.3	動的漏洩速度の取得	47
3.3.3	リスク分析の実施と結果	49
3.3.4	考察	50
3.4	まとめ	52
第4章	大型蓄電池システムにおけるリチウムイオン電池モジュールへのMBRAの適用	53
4.1	概要	53
4.2	本検討の背景	53
4.2.1	大型蓄電池システム	53
4.2.2	大型蓄電池システムにおけるリスク	54
4.2.2.1	大型蓄電池システムにおけるフィジカルリスク	54
4.2.2.2	大型蓄電池システムのフィジカルリスクアセスメント	54
4.2.2.3	大型蓄電池システムのフィジカルリスクアセスメント事例	55
4.2.2.4	大型蓄電池システムのフィジカルリスクアセスメントにおける課題	56
4.3	モデルベースドリスク分析の適用	56
4.3.1	リチウムイオン電池モジュールモデルの構築	56
4.3.1.1	リチウムイオン電池における熱暴走現象	56
4.3.1.2	リチウムイオン電池モジュールにおける熱暴走伝播現象	57
4.3.1.3	Physics model の構築	59
4.3.1.4	モデル妥当性検証	63
4.3.2	熱暴走伝播シナリオの頻度解析	67
4.4	まとめ	69
第5章	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考察	70
5.1	概要	70

5.2	MBRA を活用する利点	70
5.3	MBRA の弱点および今後の研究課題	72
5.4	まとめ	75
第 6 章	結論	76
6.1	結言	76
引用文献一覧	78
研究業績	88	
謝辞	91	

第1章 緒論

1.1 緒言

分散型エネルギーシステム等の実現に向け、エネルギー製造・貯蔵・利用等に用いられる各種システムの開発短期化・効率化、および安全運用に向けたリスク分析が求められる。従来のリスク分析では、対象システムにおいて生じ得るリスクシナリオを論理的かつ体系的に洗い出した上で、特に重要であると判断されたシナリオについて優先的に分析・評価することで、対象システムへの少なくとも保守側の評価を与える考え方が取られてきた。しかし、分散型エネルギーシステム等の複雑性を持つシステムは、システムを構成する各要素が相互に有機的に結びつくことで機能する特徴を有しており、システム内で生じる事象が複雑化する傾向にある。ある事象がシステム内を伝播して意図せず重要シナリオとなり、専門家集団であっても発想の及ばないリスクシナリオが生じる可能性や、リスクシナリオを体系的に洗い出した際のシナリオ数が膨大化し、重要シナリオを見落とす可能性がある。したがって、こうした相互作用が関与する現象を掘り上げることが可能なシステムモデルに基づいたリスク分析が必要である。

そこで本研究では、モデルベースリスク分析(MBRA)手法に着目した。MBRAは、システム設計開発の上流段階から仕様書代わりに構築したモデルによるシミュレーションを活用し、実機検証回数や設計の手戻り回数の削減を行って設計開発の効率化を目指すモデルベース開発(MBD)に並行して、当該モデルを活用したリスク分析を行うことで、システムの安全上の課題に早期に対応することを目的とするものである。MBRAに関する既往研究では、主に設計者の要求仕様を記述するLogic modelに対してシステムのハザード情報を組み込み、システム内で生じるリスクシナリオを検出するアルゴリズムを構築することで、FMEAやHAZOP等を支援する手法等が開発されてきた。しかし、当該手法に用いられるLogic modelは設計者の要求仕様のみを捉えたモデルであり、要求を実現するための実システムの物理的かつ動的な振る舞いを捉えた分析は困難であった。そこで本研究では、システムを支配する複数の物理領域に亘る物理法則を定式化することでシステムの動的な振る舞いを取得可能になるPhysics modelを活用することで当該課題の克服を目指す。

本研究の目的を、Physics modelを活用したMBRAに基づくエネルギーシステムのリスク分析の高度化とした。研究題材としては、今後の設計開発の効率化の要求が予想されるシステムとして、水素および電気エネルギー関連システムの中から「水素充填システム」および「リチウムイオン電池(LIB)モジュール」を選定した。まず、各システムのPhysics modelを構築した。次に、既存RAの各手順項目においてPhysics modelを適用したRAを実施した上で既存RAの結果と比較することで、Physics modelを活用したMBRAの利点を明らかにした。最後に、各システムの結果を総合し、Physics modelを活用したMBRAの利点および弱点、今後の研究課題について整理した。本研究の成果は、エネルギーシステムの開発短期化・効率化および安全運用に資するものである。

1.2 工学システムのリスクと現代工学システムの特徴

1.2.1 工学システムのリスクと安全

工学システムとは、システムを構成する多数の要素が有機的に結合し、相互作用することでシステム全体が形成され、全体として特定の目的を達成するための機能を有するものを言う。工学システムの中には、自動車および航空機等の機械システム、原子力プラントや化学プラント等の化学反応を取り扱うシステム、クラウドサービス等の情報システムなど、さまざまなシステムが含まれる。これら工学システムは、その時々が求める価値を提供するものであることが望ましい。一方で、工学システムはそれと同時に社会が要求する安全を担保した上で社会に実装されていくことが大前提となる。日本学術会議 [1]では、多種多様な工学システムの規模・種類によって主に検討すべき安全の対象が異なることから、工学システムをいくつかのカテゴリーに分類し、それぞれの工学システムの特徴を踏まえた安全目標を定めることを推奨している。

工学システムは、その定義からも理解できる通り、ある特定の目的を達成するために設計・製造・社会実装がなされるものである。このとき、当該目的が達成される如何に関わらず、その工学システムの実装が社会に与える負の影響は必ず生じる。それは、その工学システムそのものがリスク源となり、社会に対する正の影響(主に特定の目的の達成)と、負の影響(例えば工学システムを由来とする事故)を同時に与えるからである。ここでのリスクとは、「目的に対する不確かさの影響」 [2]と定義される。

工学システムの社会実装に関わる意思決定において、当該リスクの概念を用いることが有用である。工学システムを社会に実装して達成したいある特定の目的に対して、様々な不確かさの影響として正の影響および負の影響をそれぞれ予め検討し、それらを予め定められたリスク基準と総合的に比較評価をすることで、科学的合理性に基づく意思決定が可能になると考えられる。こうした意思決定を支援するためのツールとして、リスクマネジメントがある。

前述の通り、工学システムの社会実装においては安全の担保が重要となる。ここでの安全とは、「許容されないリスクがないこと」 [3]と定義される。この定義におけるリスクは、前述のリスクの定義のうち、負の影響を持つリスクのことを指す。したがって、工学システムの安全を担保するには、当該システムにおける負の影響を持つリスクが、その許容基準を満たしているかどうかを判定することが重要となる。ここで、ある工学システムにおける負の影響を持つリスクについて、仮にその時代の科学技術の最善を尽くしてリスク対応策を取ったとしても、負の影響を持つリスクをゼロにすることはできない。また、当該リスク対応策が、新たな別の正および負の影響を持つリスクを派生させる可能性もある。したがって、工学システムにおける負の影響を持つリスクを取り扱う際には、可能な限り科学的合理的にリスクを分析し、リスク許容基準と比較評価する必要がある。

次項では、工学システムの安全に関する代表的なリスクとしてフィジカルリスクに着目し、従来から用いられ発展してきたフィジカル分析/リスクアセスメントについて述べる。

1.3 工学システムのリスク

1.3.1 フィジカルリスク

一般に、化学物質やエネルギーを扱う施設において、取り扱われている化学物質やエネルギーに由来する人の安全/健康、環境中の生物、建造物等に対するリスクは、定常的なリスクと、非定常的なリスクに大別される。

定常的なリスクとは、例えば、ある化学工場で行われる日常的な生産活動において生じる排気ガスなどの廃棄物が環境中に放出され、人の健康や環境中に影響を与えるリスクのことであり、ヒト健康リスク、環境リスク、生態リスクなどが分類される。

一方、非定常的なリスクとは、例えば、ある化学工場において化学物質が暴走反応を起こし、爆発や火災に至ることで、従業員や近隣住民、周辺の建造物等に影響を与えるリスクのことである。このとき、化学物質やエネルギーを扱う施設において、トラブルや事故に起因する化学物質やエネルギーの系外への非定常放出に伴うリスクのことを「フィジカルリスク」と呼ぶ。

1.3.2 リスクアセスメント

リスクアセスメントとは、ある目的に対してリスク基準を予め設定し、その基準と比較可能な形でリスクを分析した上で、基準との比較評価を行う一連のプロセスのことを指す。一般的なリスクアセスメントの流れを図 1.1 に示す。

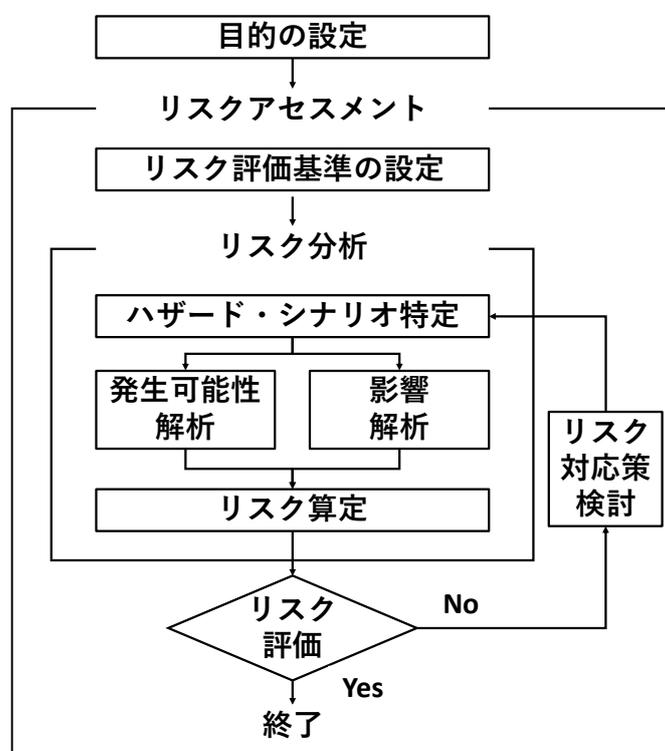


図 1.1 一般的なリスクアセスメントの流れ

1.3.2.1 リスクアセスメントの手順

(1)目的の設定

リスクアセスメントを実施する目的の設定は、リスクアセスメントを行う上で最も重要である。なぜなら、リスクアセスメントはあくまである目的を達成するための手段であり、リスクアセスメントを実施すること自体は目的となり得ないからである。また、目的を設定することによって初めて、リスクアセスメントに必要な情報の明確化、リスク分析手法の決定が可能になるからである。

リスクアセスメントを実施する目的としては、例えば、対象システムに対する安全対策の提案、安全対策技術基準の策定、安全対策機器の有効性検証、安全に関する法規制の整備等が挙げられる。

(2)評価基準の設定

(1)で設定したリスクアセスメントの目的に合わせて、リスク評価基準を定める(リスク目標とも呼ぶ)。リスク評価基準は、定性的あるいは定量的に設定される。

定性的なリスク評価基準はリスクマトリクスによって表現される。リスクマトリクスとは、横軸に影響の大きさ、縦軸に事象の起こりやすさを取ったマトリクス表である。縦軸および横軸それぞれを定性的な定義によっていくつかのレベルに分割し、さらにマトリクス内の各領域をいくつかのリスクレベルに分類する。

フィジカルリスクを対象とした場合、定量的なリスク評価基準は、ヒトの死亡確率として設定されるのが一般的であり、個人リスク(Individual Risk : IR)および社会リスク(Societal Risk : SR)によって表現される。IR とは、ある特定のリスクが顕在化したとき、ある地点において個人が死亡する頻度 $[1/y]$ を示したものであり、等高線図(リスクコンター)で表される。また、SR とはある特定のリスクが顕在化したとき、事象の発生頻度と死亡する人数の関係を示したものであり、横軸を死亡者数(Number : N)、縦軸を死亡者数 N 以上となる累積頻度(Frequency : F)とした F-N 曲線として表される。

オランダやイギリスに代表されるように、法的な枠組みで定量的な許容リスク基準が設定されている場合は、それがリスク評価基準として採用される。設定されていない場合は、実施者自らが種々の条件を踏まえてリスク評価基準を設定する。

日本においては定量的な許容リスク基準を定める法的な枠組みは存在しない。しかし、日本学術会議によって、化学物質を取り扱う施設を代表する化学プラント等の設備について、安全目標 [1]および定量的な許容リスク基準 [4]が提案されている。本リスク基準は、ALARP 原則(As Low as Reasonably Practicable : 合理的に実行可能な限り低くするという原則)に基づくものであり、プラント系工学システムについて 2 種類の定量的基準値(A 基準・B 基準)を設けたものである(図 1.2)。

[A 基準]

ア：設計そのものに起因する事故や機器の故障、破断、腐食、操作・作業ミス等の事象を原因とする重大事故の発生確率は、 10^{-6} [y]以下を満足すること。なお、この評価においては、システム操作のミスも含めヒューマンファクタの考慮も必要である。また、影響の大きさや発生確率の不確かさが大きな場合は、その不確かさを検討した際の情報等を含め、判断に有効な情報を示すことが必要である。

イ：地震等の自然災害に関しては、想定される原因事象に対して致命的な事故を発生させない為の設備や体制をとり、災害が発生した際に対応できる体制を整備すること。

ウ：テロに関しては、監視システム等による対応をおこなうこと。

[B 基準]

ア：設計起因や機器故障、テロ、自然災害等のあらゆる原因事象に関して、その時点で事故発生の可能性がシナリオとして明らかな重大事故の発生確率を 10^{-6} [y]以下を満足すること。

イ：テロ等を起因とするリスクの発生確率が 10^{-6} [y]より大きくても、A 基準ではテロ等起因の事故確率に関しては言及していないので、上記①を満足している場合は、A 基準を満足していることに変わりはない。テロ等のように発生確率の分散が大きな事象の評価は今後の検討課題である。

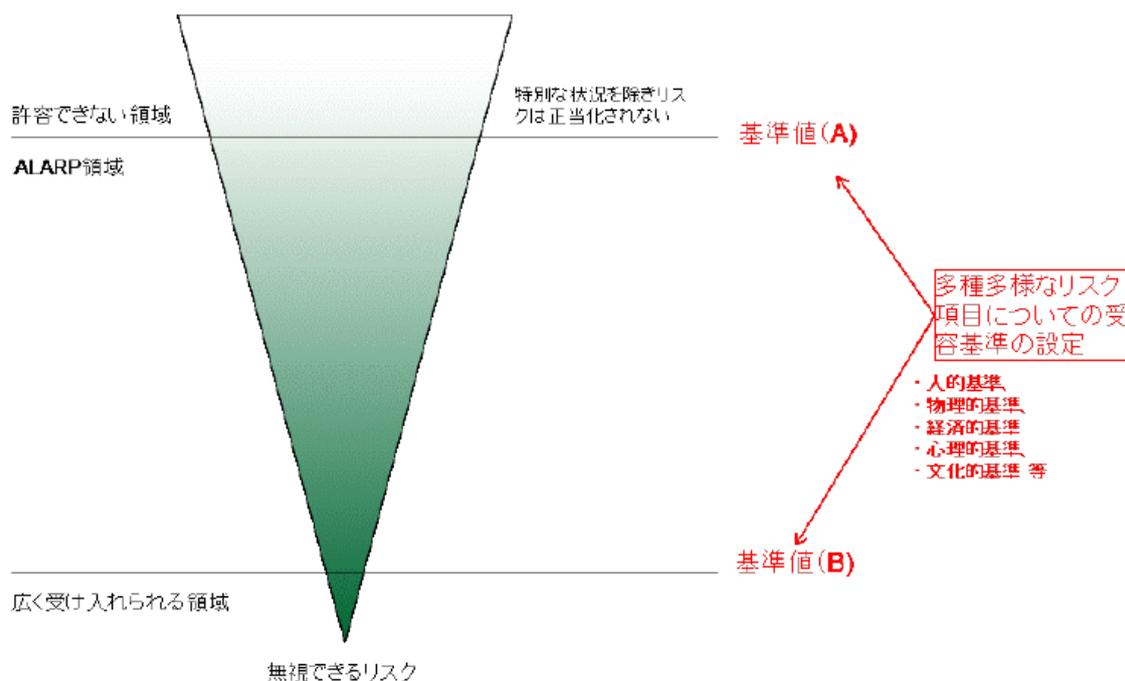


図 1.2 工学システムの安全目標 [4]

(3)ハザード・シナリオ特定

対象システムの保有するハザードおよびシナリオを特定する。

ハザードとは、ISO/IEC Guide 51 の定義によれば「人々の健康に対する被害や財産や環境に対する被害の潜在的危険性」 [3]であり、リスク共生社会における好ましくない影響を持つリスクソースのことである。ハザードの例としては、対象システム中の配管破断や漏洩などの設備に起因するもの、化学物質の保有する毒性などの物質に起因するもの、反応暴走などのプロセス固有の特性に起因するもの、作業員の誤操作などの人に起因するものなど多種多様である。

シナリオとは、ハザードがリスクとして顕在化するまでの一連の事象進展のことを表す。一般にシナリオは、トリガーとも呼ばれる初期事象、初期事象が招く複数の中間事象、火災や爆発等の最終事象で構成される。シナリオを明らかにすることで、そのシナリオの進展を防止する対策の検討が可能になる。

これらのシナリオの構造を表す代表的な概念に、Bow-tie model (図 1.3)がある。これは、ある重要な事象を中間事象として中心に配置し、左側に中間事象が生じる要因からのシナリオ、右側に中間事象から生じる結果に向けたシナリオを配置することで、Bow-tie 型に見えることから名づけられた。中間事象としては、化学プラント等においては「化学物質の漏洩」が想定されることが多い。Bow-tie model は、欧州連合(European Union : EU)において推奨されているリスクアセスメント書 [5]においても、重要な概念として位置づけられている。Bow-tie model において提案される安全対策は、左側に存在するものは発生防止対策、右側に存在するものは被害拡大防止対策と解釈できる。

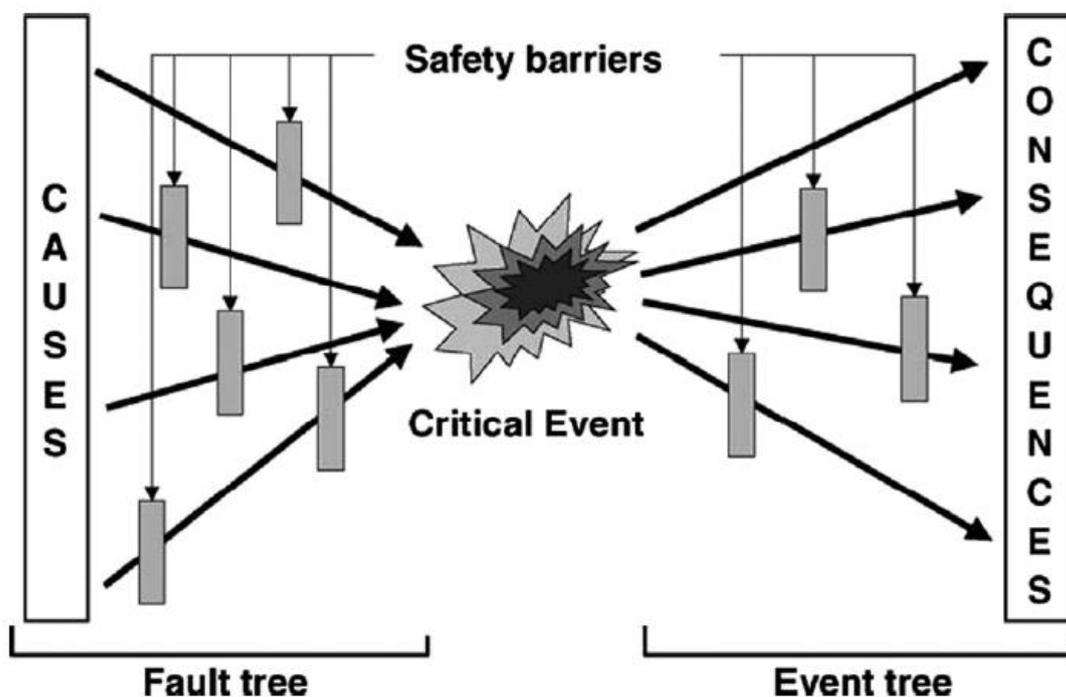


図 1.3 Bow-tie model [6]

シナリオ特定においては、シナリオの網羅性が大変重要である。なぜなら、特定されないシナリオのリスクは分析されず、対象システムのリスクを見落としてしまうことになるからである。しかし、対象システムにおいて生じうる様々な現象を含む全てのシナリオを網羅的に特定することは、現実的には困難を極める。したがって、実際のシナリオ特定においては、その過程における論理性や体系性が重要となる。ブレインストーミング型のシナリオ特定を実施する際に用いられる、体系的なシナリオ特定を支援する手法として、対象システム内に存在する全ての機器の故障に由来するシナリオを対象とする **Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)**、対象システム内のパラメータとそのずれの組合せから生じるシナリオを対象とする **Hazard and Operability study (HAZOP)**、対象システムを取り巻く様々な外的環境に由来するシナリオを対象とする **Hazard Identification study (HAZID study)** などがある。ブレインストーミング型のシナリオ特定手法は、上記のように、思考のきっかけとなるガイドワードを体系的に与えることで、シナリオの網羅性を高めることが可能である。

(4) リスク分析

(3)で特定した各シナリオについて、リスクを分析する。このとき、リスクは(2)の評価基準と比較可能な形で分析することが重要である。リスクの定義 [3]によれば、「望ましくない事象(シナリオ)の起こりやすさ(発生可能性)」と「その影響の大きさ」の組み合わせによりリスクは記述される。それぞれの要素について、定性的または定量的に分析が行われる。

【起こりやすさ(発生可能性)】

特定されたシナリオの起こりやすさを明らかにする。

定性的な方法では、起こりやすさのレベルを定性的に定義した上で、分析者が各シナリオの起こりやすさを吟味し、各レベルに当てはめることで判定する。

定量的な方法では、シナリオの初期事象および中間事象・最終事象のシナリオ分岐について定量的な値を与える。例えば、初期事象となる機器の損傷やヒューマンエラーについては、機器の損傷頻度、ヒューマンエラーの発生頻度等が様々な頻度データベースから与えられる。また、中間事象・最終事象については ETA 等を用いて分岐確率を与えることで、最終事象の発生頻度を算出する。

【影響の大きさ】

特定されたシナリオの最終事象それぞれについて、その影響の大きさを明らかにする。例えば、化学プロセスなどにおける可燃性物質の漏洩シナリオの場合、考えられる最終事象としてはプール火災、ジェット火災、沸騰液体蒸気膨張爆発(**Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion: BLEVE**)とそれに伴うファイヤーボールおよび蒸気雲爆発(**Vapor Cloud Explosion: VCE**)などが挙げられる。これらの最終事象に対する影響評価因子として主に用いられるのは、火災に対しては輻射熱、爆発に対しては爆風圧、毒性ガスの流出に対してはガス拡散によりヒトに影響を与える毒性ガスの濃度である。また、被害の大きさの推定にあたっては情報収集時に集めた気象条件や人口分布なども考慮する。

定性的な方法では、影響の大きさのレベルを定性的に定義した上で、分析者が各シナリオの影響の大きさを吟味し、各レベルに当てはめることで判定する。

定量的な方法では、得られたシナリオの最終事象について、輻射熱や爆風圧、毒性ガス濃度を明らかにするために、様々な計算モデルが使用される。近年では計算技術の向上により、計算モデルや計算条件、入力する情報等の取扱いに注意することで、影響範囲の高精度な予測が可能となっている。

【リスク】

「起こりやすさ」と「影響の大きさ」を組み合わせるリスクを分析する。

定性的な方法では、前述のリスクマトリクスのリスクレベルを定性的に定義した上で、起こりやすさのレベルとの影響の大きさのレベルを当てはめることで判定する。

定量的な手法では、各シナリオについて定量的に算出した「起こりやすさ」と「影響の大きさ」を、必要に応じて重みづけするなどして組み合わせる算出する。

(5) リスク評価

得られたリスクを(2)のリスク評価基準と比較し、基準を下回る場合はアセスメントを終了する。一方、基準を上回る場合は、アセスメントの前提条件の見直しやリスク対応策の追加等を行ったうえで再度リスク分析・評価を行い、基準を下回ればアセスメントを終了する。

1.3.2.2 定性的リスクアセスメント

リスクアセスメントの一連の取り組みにおいて、リスク評価基準を定性的に設定し、定性的にリスクを扱う場合を、定性的リスクアセスメントという。

定性的リスクアセスメントを実施する利点としては、シナリオの発生可能性や影響の大きさをおおまかに掴むことで、比較的短時間でのアセスメントが可能であることなどが挙げられる。一方、弱点としては、各種の分類レベルの設定が分析者に依存することから、リスク分析者によって得られる結果が異なることや、リスク分析者の素養が必要であることなどが挙げられる。

1.3.2.3 定量的リスクアセスメント

リスクアセスメントの一連の取り組みにおいて、リスク評価基準を定量的に設定し、定量的にリスクを扱う場合を、定量的リスクアセスメントという。定量的リスク評価を実施する利点としては、例えば、リスクコンターや F-N カーブなどの表現方法を用いて定量的なリスクを可視化することができ、複数のリスク分析結果の比較検討が容易であることなどが挙げられる。一方、弱点としては、分析のための対象システムのモデルの詳細度を高めるほど分析に時間を要することや、得られる結果が対象システムのモデルや計算に用いるモデルに依存することが挙げられる。

海外においては定量的リスクアセスメント(Quantitative Risk Assessment : QRA)または定量

的リスク分析(Quantitative Risk Analysis : QRA)と表現する場合、化学プロセス等のリスクを定量的に明らかにするシステムティックな手法論のことが示す、狭義の意味で用いることが多い。QRA はいくつかのガイドラインによって手法論が確立されている。主に石油化学系・化学系のプラントに対する QRA の代表的なガイドラインとして、オランダ応用化学研究機構(Netherlands Organization for Applied Scientific Research : TNO)の Coloured Book [7][8][9][10] や、CCPS の Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis [11]などが存在する。これらのガイドラインには、化学プロセスにおけるフィジカルリスクを定量的に分析するための実施手順や計算手法などが詳細にまとめられている。

QRA では、「起こりやすさ」の指標として発生頻度(Frequency)、「影響の大きさ」の指標として影響度(Consequence)をそれぞれ定量化する。発生頻度については、対象システムに存在する全ての機器を洗い出し、統計データに基づいて与えられた各機器の損傷頻度、およびETA の分岐確率を掛け合わせるにより算出される。影響度については、対象システムにおいて用いられる化学物質等の物性、プロセス条件、環境条件等の要素から、各種計算モデル等を用いて致死率として算出される。その後、シナリオごとに発生頻度と影響度を掛け合わせて個人リスクを算出する。

1.3.3 現代工学システムの特徴とリスク分析/アセスメント実施上の課題

現代工学システムは、社会の多種多様な要求に応えるため、高い機能性や付加価値を持つと同時に、高い信頼性を持ち安全なシステムであることが求められる。高機能性を持つ工学システムは多くの場合、そのシステムを構成する要素が多量かつ多様であり、また、それらが有機的に結びつくことによって初めて高機能を発現する。したがって、現代工学システムは、システムの構成要素の増加および多様化や、各構成要素の相互作用の強化により、システム内で生じる事象の複雑性が高まる傾向にある。

Leveson [12]は、工学システムの安全分析に向けた従来の安全工学的アプローチにおける課題の 1 つとして、システム内で生じる事象の複雑性に対応することができないことを挙げ、従来アプローチのパラダイム転換を提唱した。また、現代工学システムの持つ複雑性の特徴として、例えば、①interactive(システムの構成要素どうしの相互作用に関連するもの)、②dynamic(時間的な変化に関連するもの)、③decompositional(システム構造を分解したものが、必ずしもシステム機能の分解と一致しないことに関連するもの)、④nonlinear(原因と結果の関係が明白でない、非線形変化に関連するもの)などが挙げられている。

こうした特徴を持つ現代工学システムのリスク分析/アセスメントを進めるにあたっては、リスクシナリオの網羅性の向上は大変重要である。しかし、当該システムにおいてはある特定の分野の専門家以外には理解・予測できないほど複雑な、あるいは、そうした専門家が集まった専門家集団ですら理解・予測が困難なシステムの振る舞いを呈するシナリオが存在する可能性がある。例えば、上記の複雑性の特徴例と対応する事象として、①interactive : システム内で生じた各種の現象やずれが、個々の構成要素どうしの相互作用によってシステ

ム内を伝播していき、システムの広範囲にまで影響を及ぼす事象、②dynamic：システム内で生じた各種の現象やずれが、システム内に伝播していくことは予めわかっている、どのタイミングで伝播していくかがわからない事象、③decompositional：個々の構成要素どうしが相互作用によって結びつくことによって初めて、個々の構成要素単体の振る舞いとは異なる振る舞いが生まれる事象、④nonlinear：システム内のある箇所で生じたパラメータの小さな変化が、システム内を伝播する過程で非線形的に大きなずれを生んでしまうような事象などが挙げられる。これらのリスクシナリオを網羅的に特定することは困難である。なぜなら、事象が複雑化するに伴って、人間の想像力でリスクシナリオを補うには限界があると共に、論理的・体系的に実施しようとするると取り扱いリスクシナリオの数が膨大となり、現実的には取り扱うことができないからである。したがって、このような複雑性を持つシステムに対応するためには、人間のみの実施に頼らないリスク分析手法が必要となる。

このような状況の中で、何らかの「モデル」を活用したシステムの振る舞いの予測に基づくリスクシナリオ特定は、人間の苦手とする部分を補うためのツールとして有意義である。何らかの「モデル」を活用するアプローチには、大きく分けて2つある。

1つは、帰納的なモデルを活用する方法である。複雑性による様々な事象を呈するシステムから多数のデータを取得し、例えば機械学習などによって帰納的な予測モデルを構築することで、ある入力に対して、望ましくないシステムの挙動を出力として得ることができる。本アプローチによるモデルは、もし構築することが可能であれば一定の成果を挙げることが予想される。しかし、複雑性に由来するシナリオが実際に発生することは稀であることや、対象が新規システムや実装が待たれるシステムの場合には事象のデータが蓄積されていないことから、教師データの収集自体が困難であると考えられる。したがって、帰納的なモデルを活用するアプローチを取ることは困難である。

もう1つは、演繹的なモデルを活用する方法である。例えば、対象システムの現象を適切に表現可能な、物理方程式に基づいた数式的モデルを構築し、当該モデルを用いたシミュレーションによってシステムの挙動を予測する。本アプローチによるモデルは、帰納的なモデルのようなデータ収集・処理が不要であるため、システムの挙動を予測しやすいことが予想される。しかし、そのモデルを構築した瞬間にある種の現象が捨象されてしまうことや、モデル構築の目的に分析実施者の主観が入らざるを得ないという課題がある。この点は、リスク分析/アセスメントにおける基本的な発想であるリスクシナリオの網羅性担保の観点と相互に矛盾する点であり、重要である。したがって、演繹的なモデルを活用するアプローチを取る場合には、モデルの取り扱いに注意を要する。これに対応するための考え方としては、例えば、リスク分析/アセスメントの目的に対応するモデル化の目的を複数設定し、各目的に対してそれを達成可能なシステムのモデルを構築してそれぞれリスク分析を実施し、その結果を総合し重ね合わせることで、システム全体として包括的なリスク分析/アセスメントを可能にする方法を取ることができると考えられる。

演繹的なモデルを活用するアプローチのもう1つの課題は、複雑性の特徴を持つシステ

ムの挙動を適切に表現できるようなモデルを構築することができるかどうか、という点である。当該課題に対して有用なシステムのモデル化手法として、本研究では、モデルベースシステムズエンジニアリング(Model-based Systems Engineering: MBSE)およびモデルベース開発(Model-based development: MBD)分野でよく用いられている、「複合物理領域・システムレベルモデリング手法」の適用を検討した。本モデル化手法は、「対象システムが持つ複数の物理領域を同一のプラットフォーム上で取り扱えること」と、「対象システムの個々の構成要素(コンポーネント)とそのコンポーネントどうしの関係性を各種物理方程式によって記述し、それらを組み合わせるのみでモデルを構築すること」という2つの特徴を持つ。これらの特徴によって、例えば、①interactive: コンポーネントどうしの関係性を物理方程式で記述することで、両者の相互作用に関する現象を一部捉えられる可能性があること、②dynamic: 各種物理方程式を時間の関数として記述するモデリング手法であることなどから、冒頭の複雑性の特徴を反映したようなシステムの挙動を一部でも取得することができる見込みのあるモデル化手法であると考えられる。

したがって、この MBSE および MBD 分野で用いられるモデルを活用したリスク分析手法である、モデルベースリスク分析(Model-based risk analysis: MBRA)(第2章にて詳述)を用いることで、現代工学システムの持つ複雑性の特徴を踏まえたリスク分析を可能とし、対象システムのリスク分析全体を高度化することができると考えた。

ただし、MBRA そのものは未だ発展途上の手法であり、専門家集団の発想力でも得られないような対象システムのリスクシナリオの取り扱いが可能であるかどうかを示す検討は、現段階では時期尚早である。そこで、当該検討を実施する前に、まずは専門家集団にとっても馴染みのあるリスクシナリオの取り扱いが可能であるかどうかを示す検討が先決であると判断した。

そこで本研究では、ある対象システムにおいて MBRA を活用することで、一般的なリスクシナリオに対するどのようなリスク分析が可能であるか、あるいは、困難であるかを整理することにより、MBRA を現代工学システムのリスク分析に適用する上での初期検討を行った。

検討対象システムの題材としては、エネルギーシステムを選定した。その理由は、現代工学システムの持つ特徴である複雑性を持つこと、今後のエネルギー分散型社会構想を念頭に置いた場合のそれらシステムにおいて複雑性に由来する振る舞いを呈する可能性があること、および今回の結果の比較対象として従来リスク分析の実施例が存在し、本研究により当該システムのリスク分析がどのように高度化したのかを判定しやすくすること、などが挙げられる。

以下、今回の対象としたエネルギーシステムの概要を述べる。

1.4 エネルギーシステム

本研究では、第2章で述べる MBRA の有効性を適用検証するためのシステムとして、エネルギーシステムを選定した。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、既存のリスク分析スキームの適用例があり、かつ今後の新規システム設計開発の機会の増加が見込まれるシステムとして、二大二次エネルギーである水素および電気に関連するシステムの中から、現在社会実装が進められている段階にある「水素ステーションにおける水素充填システム」、および今後の社会実装が期待されている「大型蓄電池システムにおけるリチウムイオン電池モジュール」をそれぞれ選定した。以下、それぞれについて概説する。

1.4.1 水素エネルギーシステム

1.4.1.1 水素エネルギーおよび水素ステーション

水素は、化石燃料の水蒸気改質法や、様々な工業プロセスの副生成物として多量に得られ、これまで様々な産業分野で活用されてきた実績から長距離輸送・貯蔵技術が確立されているという特徴を持つ。また、水素は化石燃料由来のものだけでなく、バイオマスや再生可能エネルギー等の多様なエネルギー源からも製造可能であること、利用時には CO₂ を排出しない等の特徴から、クリーンなエネルギーとして注目されている。さらに、水素は水の電気分解および燃料電池技術を利用した電力との変換が容易であるため、電気エネルギーとの互換性が高い 2 次エネルギーとしても注目されている。水素エネルギーを導入して利活用することにより、従来システムと比較してエネルギーセキュリティの向上、および省エネルギーや環境負荷の低減が見込めると考えられている。

水素エネルギーの様々な利活用形態の中でも、特に重要な 1 つに燃料電池自動車(Fuel Cell Vehicles : FCV)がある。FCV は水素を燃料として車載タンクに水素を貯蔵し、燃料電池を用いて空気中の酸素と反応させ、発電した電気エネルギーによって走行する自動車である。FCV の走行時の排出物は水のみであるため、化石燃料を用いずに得られた水素を燃料に用いた場合には、実質 CO₂ 排出ゼロの自動車となる。FCV を社会に普及させ、一般市民が広く利用可能な状態にするためには、ガソリン車に燃料供給を行うガソリンスタンドが必要不可欠であるように、FCV に燃料供給を行う水素ステーションの設置および普及が必要不可欠である。水素ステーションは、FCV の燃料である水素を FCV に供給する施設であり、外部からの水素の輸送形態や貯蔵形態等によって複数の種類が存在する。

1.4.1.2 水素エネルギー及び水素ステーションの動向

■国際動向

(1)米国

水素エネルギーシステムについて、米国では米国エネルギー省(Department of Energy: DOE)の主導で 2002 年から本格的な開発支援を開始した [13]。現在 DOE では水素エネルギーを図 1.4 [14]示すように位置付けており、エネルギーセキュリティ、レジリエンシー、国内産業の振興等をアメリカにおける水素エネルギーシステム活用の意義として挙げている [15]。その中でも、最大の意義はエネルギーセキュリティである。

米国においては、カリフォルニア州が最も水素ステーションの普及に熱心である。カリフォルニア州における水素ステーションおよび FCV の普及目標(2014 年時点)によると、2016 年までに 51 箇所がすでに建設予定であり、2023 年までに州内で 123 箇所の建設が目指されていた(図 1.5) [16]。カリフォルニア州内で現在運用中の水素ステーション数は、普通車用が 62 基、大型車用が 6 基である [17]。

同州では Zero Emission Vehicle (ZEV)規制を 2009 年から実施しており、官民パートナーシップ組織であるカリフォルニア燃料電池パートナーシップ、カリフォルニア州エネルギー委員会、カリフォルニア州大気資源局などが連携して水素インフラ展開を進めている [18]。

(2)欧州

欧州では、他国に先駆けてドイツがいち早く水素利用計画を進めてきた。2004 年に FCV と水素ステーションの実証プロジェクトである Clean Energy Project が開始され、2009 年には 2015 年以降の FCV と水素ステーションの全国的な普及を目指したインフラ整備を検討する H2 Mobility が発足した [18]。H2 Mobility では 2023 年までに 400 箇所の水素ステーションを設置することを要望として発表している [19]。

2008 年には EU 諸国が連合して、水素・燃料電池プロジェクトを推進する官民パートナーシップである「燃料電池水素共同実施機構(Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking : FCH JU)」が発足し、近年はその第 2 弾が 2014 年から 2020 にかけて実施されている [20]。

(3)中国

中国では、近年の水素燃料電池産業の発展および水素ステーションの普及が著しく、その市場規模は拡大傾向にあり、2025 年までに 12 億元(約 240 億円)まで増加する見込みである [21]。民間調査機関の調査によると、2022 年 1 月末時点で運営中の水素ステーション数は 178 か所であり、現在世界第一位である [22]。

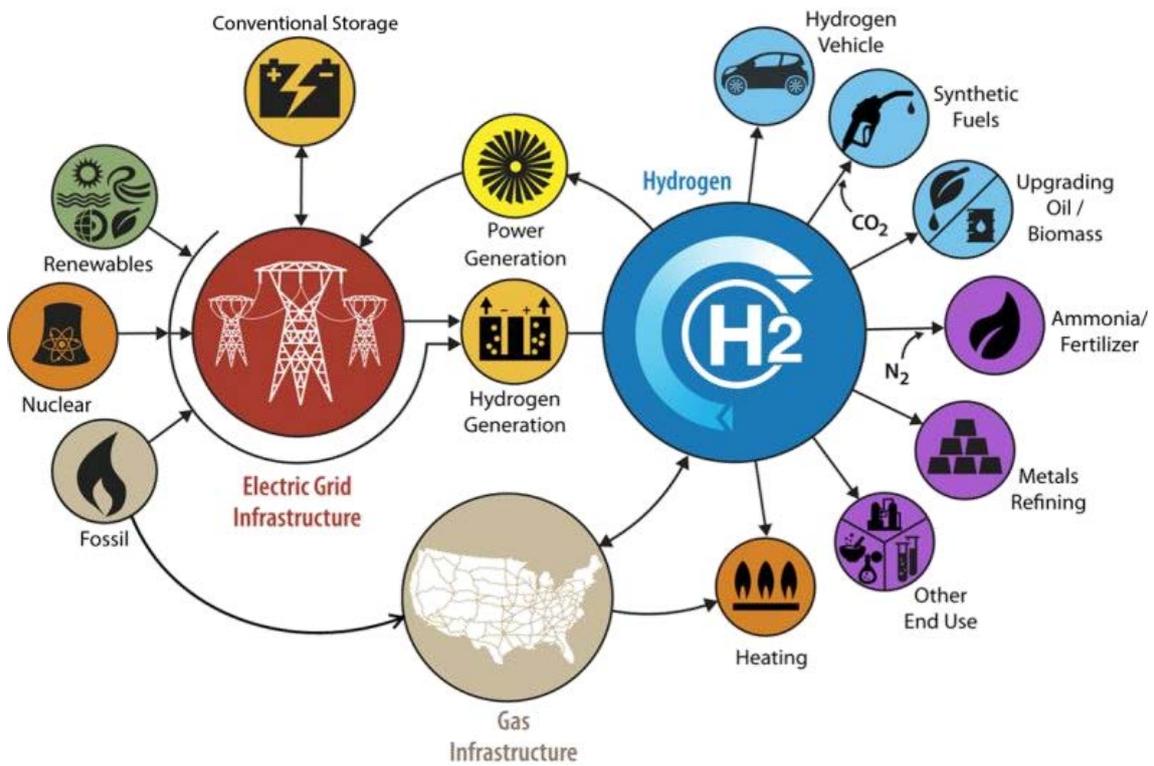


図 1.4 米国における水素エネルギーシステムの位置づけ [13]

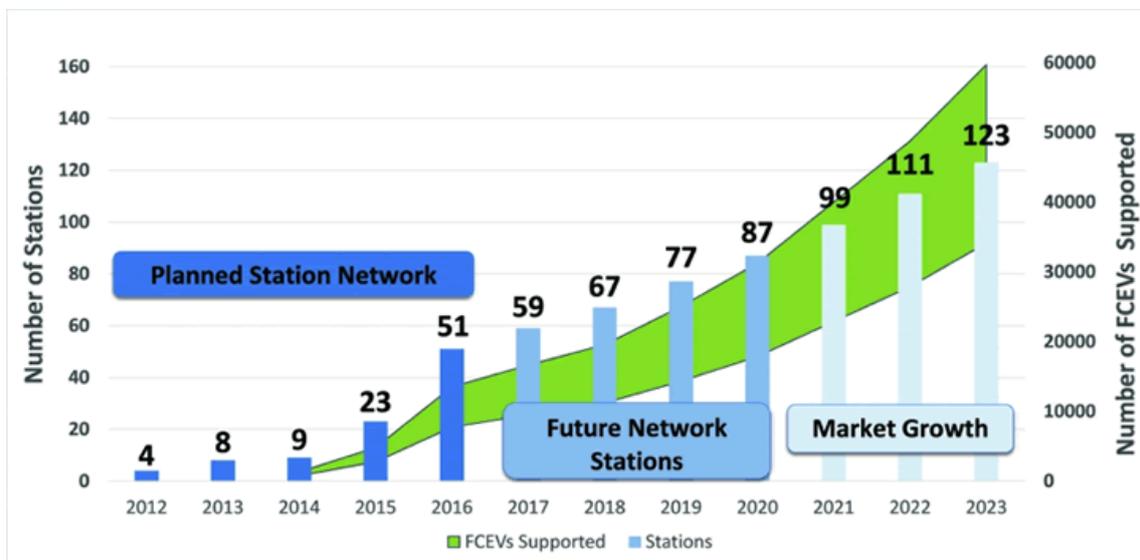


図 1.5 カリフォルニア州における水素ステーションと燃料電池自動車の普及目標 [16]

■国内動向

日本において、水素エネルギーについては2003年の「第1次エネルギー基本計画」の時点から新エネルギーの一部として触れられているが、本格的に日本の政策として明確に位置付けられたのは2014年の「第4次エネルギー基本計画」 [23]においてである。本計画では、水素エネルギーを将来の二次エネルギーの中心的役割を担うものとして位置づけ、前述の水素エネルギーの特徴等を踏まえて、水素を日常の生活や産業活動で利活用していく「水素社会」の実現に向けた課題解決やインフラ整備を進めていくことが宣言されている。また、2021年には「第6次エネルギー基本計画」 [24]が策定され、水素需要拡大の加速とともに、脱炭素化したエネルギーとして、水素を運輸・電力・産業等の様々な分野における利用が目指されている。

経済産業省では2013年から「水素・燃料電池戦略協議会」を設置し、水素エネルギー利活用に向けた時間軸を明確にしつつ、水素の製造、貯蔵・輸送、利用について2050年頃までを見据えた具体的取り組みに関する「水素・燃料電池戦略ロードマップ」を策定している。

近年では、2017年4月に行われた第1回「再生可能エネルギー・水素等関係閣僚会議」において世界に先駆けた水素社会の実現に向けた取り組みについて議論が行われ、同年に「水素基本戦略」 [25]が策定された。また、経済産業省及び国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(New Energy and Industrial Technology Development Organization: NEDO)が主催し、各国の大臣・担代表者が集う水素閣僚会議が東京で開催された。2018年10月に開催された第1回では、「東京宣言」として、水素社会(日常生活及びエネルギー・交通・産業活動にて水素を利用する、よりクリーンかつ豊かで安全な世界規模のエネルギーの未来)実現のため、水素エネルギー関連の技術協力、規格化と標準化における協力、安全性に関する情報共有などについて協力する重要性が確認された [26]。また、2019年9月に開催された第2回では、「東京宣言」の4つの柱に沿って具体的なアクションに適切に取り組むことが確認された。特に、水素ステーションについては"Ten, Ten, Ten"(今後10年間(10 years)で水素ステーション1万箇所(10 thousand)を整備、燃料電池システム1000万台(10 million)を整備する世界目標の中に位置づけられ、共有された [27]。

このような「水素基本戦略」「第5次エネルギー基本計画」および「東京宣言」で示された方向性・取組目標を踏まえて、2019年3月に「水素・燃料電池戦略ロードマップ」 [28]が改訂され、目標実現に向けて取り組むべきアクションプランが盛り込まれた。また、2022年3月には、CO₂排出量が多く航続距離や運転条件などからバッテリーのみでは電動化が困難な大型・商用モビリティ(Heavy Duty Vehicle: HDV)を対象とした「技術開発ロードマップ(HDV用燃料電池)」 [29]が策定されるなど、近年も技術導入に向けた検討が着々と進められている。

日本の水素ステーションは2013年度から整備が開始された。2014年7月、兵庫県尼崎市において日本初の商用水素ステーションである尼崎水素ステーション(液化水素型)が開所したことを皮切りに、現在までオフサイト型、オンサイト型、移動式などの様々な形態の水

素ステーションが建設、商用運用されてきた。日本水素ステーションネットワーク合同会社の調査によると、2022年6月末時点では日本全国において160箇所が稼働中である(図 1.6) [30]。前述の2019年の改訂ロードマップでは、水素ステーションの普及目標として、2020年度までに160箇所程度、2025年度までに320箇所程度、2030年度までに900箇所程度という数値が掲げられていた [28]が、2021年6月に改訂された「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」 [31]においては、商用車を含む各種モビリティの普及も見据えた水素ステーションに関する新たな政府目標(2030年度までに1000基)が設定された [32]。また、今後も水素ステーション普及に向けた補助金制度等の拡充が進む見込みである [21]。

多くの一般市民が水素エネルギーにアクセス可能である状態を目指して、今後も水素ステーションの社会実装および本格普及に向けた動きが加速すると考えられる。今後の検討課題としては、水素ステーションとガソリンスタンドやコンビニエンスストアを併設するなどのユーザーの利便性向上、安全対策・保安規制等の見直しによる建設及び運用コストダウン等が挙げられている。

都道府県別水素ステーションの整備状況

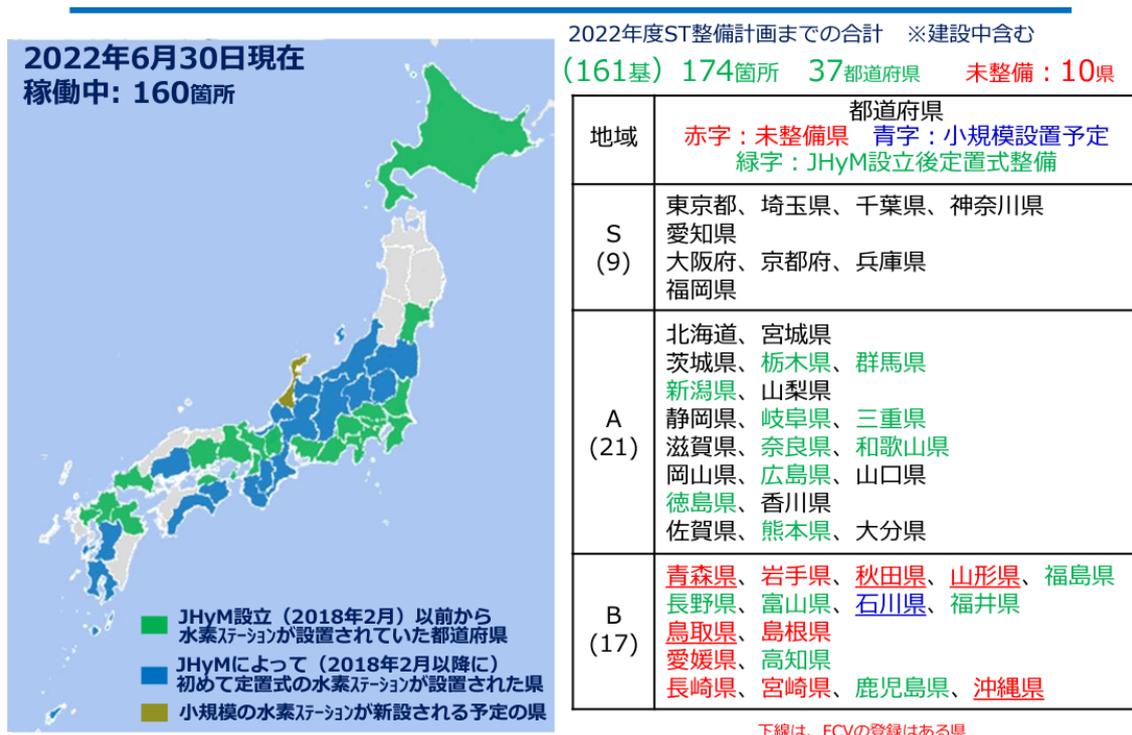


図 1.6 水素ステーション運用数(2022年6月30日現在) [30]

1.4.2 電気エネルギーシステム

1.4.2.1 大型蓄電池システム

分散型エネルギーシステムの実現に向けては、需要地付近において発電および蓄電設備が必要となる。特に、蓄電設備として着目されている大型蓄電池システムについて述べる。

大型蓄電池システム(Battery Energy Storage System: BESS)は、単一のセルを複数個接続して構成されるモジュールを、さらに複数個接続して構成される蓄電池コンテナの集合体に加えて、それらを適切に制御・管理するためのシステムを含めた全体のシステムを指す。BESSに含まれるセル、モジュール、および蓄電池コンテナの個数や直並列の接続方式を工夫することにより、必要に応じて大量の電力を充放電することが可能となる。BESSは、高エネルギー密度かつ高容量・高効率であることが重視されるものや、低効率でも長寿命であることが重視されるものなど、様々な用途・使用目的に合わせてその性質が選択され、設計される。例えば、分散型エネルギーシステムを実現する観点からは、供給不安定性を抱える再生可能エネルギーにより発電された電力の出力変動を吸収する役割を担うシステムとして、BESSの導入が期待されている。

1.4.2.2 大型蓄電池システムの動向

■国際動向

(1)米国 [33] [34]

米国はBESSの有望市場であり、カルフォルニア州やハワイ州、米国北東部の独立系統運用機関(PJM: Pennsylvania-New Jersey-Maryland)エリアが中心的な市場となっている。特にカリフォルニア州では、2020年までに1.3GWの電力貯蔵容量確保を義務化した州法が制定されたことから、その実現に向けた導入実績がある。米国エネルギー情報局によると、業務・産業用蓄電システムの導入量は2014年以降急激に増加し、2018年までにカリフォルニア州に導入された需要側蓄電システム約200MWのうち、約93MWが業務・産業用蓄電システムである。この導入拡大の背景には、Self-Generation Incentive Program (SGIP)と呼ばれる補助金が影響していると考えられる。また、オレゴン州やマサチューセッツ州でも、蓄電池システム導入目標を定める動きが始まっている。

(2)欧州 [33] [34]

欧州では国際連携線が強固であることから、系統問題に起因するBESSの導入ニーズは高くない。ただし、国によっては、蓄電システムへのニーズの度合いやその背景は異なっている。例えば、ドイツでは再生可能エネルギー導入量が加速的に増加しているため、蓄電システムへのニーズが高まっている。ドイツにおいては、2019年における累積導入実績として、再生可能エネルギー併設・系統用に比較して家庭用の割合が多いのが特徴である。また、イギリス・スペイン・イタリアなどにおいては、欧州系統の末端に位置していることや、洋上風力発電の需要増加などの背景から、BESS導入ニーズが見込まれている。

(3)アジア・オセアニア [33] [35]

中国では近年、蓄電池に限らず、エネルギー貯蔵システムの導入が急速に進んでおり、揚水発電を含む約 33 GW の設備容量がある。また、再生可能エネルギーの開発ペースも加速していることから、再生可能エネルギー併設型エネルギー貯蔵システムの開発プロジェクトが優先的に取り組まれている。しかし、規制の枠組みづくりはまだ発展途上である。

韓国は BESS の主要メーカーを輩出しており、特に発電グリッドに接続された BESS のリーダー的存在であると言われている。近年は BESS に用いているセルやコンテナの火災事故も報告されており、これら火災事故に関する調査や火災防止に関する研究開発への投資が盛んである。

インドでは、電力需要が非常に大きく、今後も人口増加・経済成長と共に需要増加が想定されるため、将来的な電力市場の拡大が見込まれる。ただし、現状インドは蓄電池システムの導入に向けた潤沢な資金を有していないため、電力分野への投資はグリッドの増強・拡大が優先されると想定されている。

オーストラリアでは、電力需要地と電力供給地とが離れており、送電網投資に対して蓄電池システムが経済性を有する可能性もあるが、人口も限られていることから、BESS 市場はすでに比較的成熟している。しかし、BESS を受け入れるための規制の枠組みは定期的な開発・改善されており、まだ発展の余地があると言われている。オーストラリアは太陽光発電のポテンシャルが高いため、自然エネルギーによる電力の大規模展開を目指している。

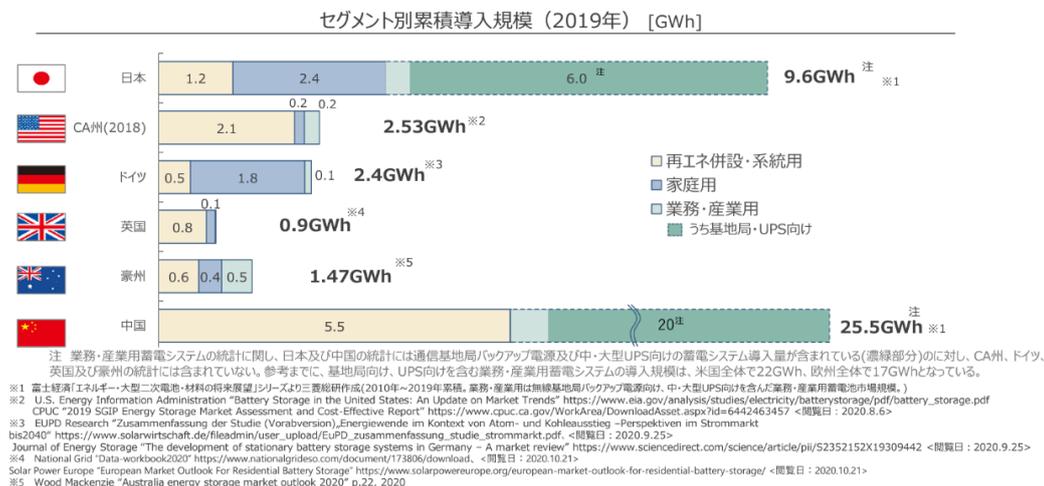
■国内動向

2021 年 10 月に第 6 次エネルギー基本計画 [24]が閣議決定され、再生可能エネルギーの主要電源化に向けて重要となる蓄電池システムによる調整力の確保を目指すことが明記された。三菱総合研究所の調査 [34]によると、2019 年時点での日本における定置用蓄電システムの累積導入容量は約 9.6 GWh(基地局及び UPS 向け含む)であり、基地局及び UPS 向けのシステムを含めずとも、他の先進諸国と比較すると BESS 導入がより進められている傾向にある(図 1.7)。再生可能エネルギー併設・系統用の用途での導入実績は他の用途と比較して少ないが、図 1.8 [36]に示した BESS の設置先別世界市場規模推移・予測によると、2022 年頃から、特に電力系統の安定用途(発電所・変電所設置、再生可能エネルギー電源併設)での BESS 設備容量の増加が予測されていることがわかる。また、BESS・定置用蓄電システム向け二次電池の世界市場について市場規模金額で比較すると、2035 年においては 2020 年比で 3.4 倍になることが見込まれている [37]。

日本における蓄電池システムの導入は 2011 年頃から試験的に行われており、2013 年から北海道南早来変電所 [38]にて、2015 年から宮城県西仙台変電所 [39]にて、2016 年から福島県南相馬変電所 [40]にて BESS の実証試験が開始されている。また、BESS の製造コスト低減にむけたロードマップ [41]や、安全性の確保に向けた安全規格の策定 [42]等が進められており、今後の本格的な普及に向けた動きが加速している。

定置用蓄電システム累積導入容量の国際比較 -日本、中国:基地局UPS含む-

- 定置用蓄電システムの導入状況を海外市場（米国カリフォルニア(CA)州、ドイツ、英国、豪州及び中国）と比較したところ、下図の通りとなる。
- なお、日本及び中国に関しては、業務・産業用の導入量に基地局及びUPS向け(グラフの濃緑部分)が含まれている。



Copyright (C) Mitsubishi Research Institute, Inc.

31

図 1.7 定置用蓄電システム累積導入容量の国際比較 [34]



矢野経済研究所調べ

注1. メーカー出荷容量 (MWh) ベース

注2. 2022年は見込値、2023年以降は予測値

注3.

・家庭用：戸建て住宅やマンション、集合住宅向け

・企業・業務用：BCP対策（医療・福祉・介護施設など）、大口需要家（工場、ビルなど）向け

・電力系統用：系統安定用途（発電所・変電所設置、再生エネルギー電源併設）、マイクログリッドシステム向け

図 1.8 定置用蓄電池(BESS)の設置先別世界市場規模推移・予測 [36]

1.5 研究目的

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(詳細後述)を活用したモデルベースリスク分析(Model-based risk analysis: MBRA)(詳細後述)を用いたエネルギーシステムのリスク分析の高度化である。これは、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。ここでのエネルギーシステムのリスクとは、経済的な影響などを含む社会的リスクの概念ではなく、従来の工学的リスクとして取り扱われてきた、前述のフィジカルリスクを意味するものとする。

本研究では、MBRA の有効性を適用検証するためのシステムとして、既存のリスク分析スキームの適用例があり、かつ今後の新規システム設計開発の機会の増加が見込まれるシステムとして、二大二次エネルギーである水素および電気に関連するシステムの中から、現在社会実装が進められている段階にある「水素ステーションにおける水素充填システム」、および今後の社会実装が期待されている「大型蓄電池システムにおけるリチウムイオン電池モジュール」をそれぞれ選定した。それぞれのシステムに対して MBRA を適用した結果を従来リスク分析手法による分析結果と比較考察することで、MBRA を活用することによる利点および弱点、今後の研究課題などについて整理した。

1.6 まとめ

第1章では、現代工学システムの特徴を踏まえた上で、当該システムのリスク分析/アセスメントにおける課題とその解決方法について整理した。本研究の目的を、「Physics model(詳細後述)を活用したモデルベースリスク分析(Model-based risk analysis: MBRA)(詳細後述)を活用したエネルギーシステムのリスク分析の高度化」とし、MBRA を活用して、分散型エネルギーシステムを構成する二大 2 次エネルギーである水素および電気に関連するシステムを題材に、エネルギーシステムのリスク分析の高度化を試みた。

第2章 モデルベースドリスク分析とは何か

2.1 概要

本章では、モデルベースドリスク分析(Model-based Risk Analysis: MBRA)、およびそれに関連する既往研究や周辺概念についてレビューすることによって、本研究における MBRA の意味を整理した。

2.2 モデルベースドシステムズエンジニアリング

「モデルベースドリスク分析」における”モデルベースド”とは、モデルベースドシステムズエンジニアリング(Model-based Systems Engineering: MBSE)における”モデルベースド”を背景に持つ言葉である。

MBSE とは、システム開発を実現するための複数の分野にまたがる開発アプローチであるシステムズエンジニアリング(Systems Engineering: SE)において、従来型の文書(仕様書・ドキュメント)を使用した設計者間のやり取りに代わり、視覚的に理解しやすいモデルを活用して、各分野の設計担当者間でのコミュニケーションの円滑化を図る目的で導入された SE である [43]。MBSE における「システム」とは、主にソフトウェアや制御系のシステムなど、物理的実体がないシステムを念頭に置かれた言葉であった。したがって、そのモデルにおいては少なくとも、設計しようとしているソフトウェアや制御系システムの要求性能を適切に反映させた上で、視覚的に理解しやすいモデルを作成する必要があった。

2.3 モデルベース開発

MBSE の流れを汲み、ソフトウェアや制御系のシステムに留まらず、機械系や流体系などの分野をも含む工学システムの設計開発においても、仕様書代わりにモデルを活用したシステム設計が行われることが主流になっている。こうした近年の工学システムの設計開発において、設計担当者間のコミュニケーションの円滑化のみならず、モデルを効率的に活用することによってシステム設計開発プロセスの短期化・効率化を図ることで、企業競争力を強化することが目指されている。こうしたモデルを活用したシステム設計開発プロセスを、モデルベース開発(Model-based development: MBD)という。MBD は、MBSE の一部に内包される概念である。MBD では、対象システムの仕様書代わりにモデルとして、前述の要求性能のみを反映させたモデルだけではなく、対象システムの物理的な振る舞いや構造を表現するモデルによるモデルシミュレーションを活用した設計を行う。それは、機械系や流体系などの物理的実体を伴うシステム開発において避けられない、実機による実証試験の規模や回数を可能な限り削減するためである。ここでは新規システム開発において物理方程式ベースのモデルが活用されており、当該モデルを用いたシミュレーション技術をフル活用することにより、あらかじめシステムの動的振る舞いを予測することによって実機による検証回数を削減することが意図されている。また、MBD に用いられるモデルは多くの場合、

設計変更に伴うモデル変更が容易であり、かつ計算負荷の比較的低いモデルである。これにより、概念的な設計に留まる設計上流段階から、詳細な設計が固まっていく設計下流まで、当該モデルの改変およびシミュレーション結果を用いた検証を繰り返すことにより、設計を進めることが可能である。さらに、対象システムによっては、システムの運用中にもモデルを保持しておき、運用中の変更管理や故障診断等を目的としたシミュレーションにも活用することができる。この特徴は、種々の工学システムのリスク分析/アセスメントに関する課題である「システム変更管理時のリスク分析/アセスメント」への適用可能性も期待されるものである。

現行 MBD は主に自動車・航空宇宙系のシステム開発や、医療機器やロボット系のシステム開発に多用されている開発プロセスであるが、今後のモデル化技術の発展と共に、MBD は宇宙機推進系や新エネルギーシステムなど、様々なシステムにも適用・応用されていくことが予想される。

2.4 モデルベースドシステムエンジニアリングに用いられるモデル

MBSE に用いられるモデルは大きく分けて 2 種類ある。①主にシステムの要求仕様を表現するモデルと、②その要求仕様を現実世界において実現するためのシステムの物理的な振る舞いを表現するモデルである。

前者の①については、SE においてかつて文書で行われていた設計担当者間の情報のやり取りを円滑化するために、システムの要求仕様をグラフィカルに表現するようになったモデルを指す。1990 年代前半にオブジェクト指向分析、設計を支援するさまざまなモデル化の方法論が乱立したため、1997 年に Object Management Group (オブジェクト指向技術の標準化団体)が先導して「統一モデリング言語(Unified Modeling Language: UML)」 [44]を標準のモデル記法として定めた。その後、UML がオブジェクト指向業界での表記法のデファクトスタンダードとして用いられるようになった。UML は基本的にグラフィカルな表現を採用しているため、各設計担当者が理解しやすいことに加え、システムの設計変更が発生した場合にも、どの要素を変更する必要があるのかを把握しやすいというメリットがある。UML における代表的なモデリング言語の 1 つに、System Modeling Language (SysML) [45]がある。SysML はシステム工学分野に特化したモデリング言語であり、システム開発時に必要な各分野固有のモデルの概略を表現するとともに、それぞれの「繋がり」を明確にすることを目的としている。したがって、前者のモデルはシステム内の信号の「繋がり」や「論理」だけをモデル化している、と解釈できることから、本研究では前者のモデルを「Logic model」と呼称することにする。これは、設計担当者を始め、システム設計に関わる多様なステークホルダー間のコミュニケーションを目的とした「実用的な(pragmatic)」モデルであるともいえる [46]。

後者の②については、前者のモデルによって定義された要求仕様を実際の物理現象に落とし込み、物理的な振る舞いを取得するための数値シミュレーションを可能にしたモデル

を指す。これを、「複合物理領域・システムレベルモデリング」 [47]という。これを実現するためのモデリング言語の 1 つに、**Modelica** 言語 [48]がある。**Modelica** 言語は、マルチドメイン(複合物理領域)にわたるモデル化が可能なオブジェクト指向の物理モデリング言語の 1 種であり、複合物理分野が密接に関わり合ったプラントの物理モデルを作成することができる。物理領域の種類としては機械・電気・流体(気・液)・熱・制御など多岐にわたり、これらの各物理分野における現象を記述する基礎的な物理方程式を連立させることでモデル化を行う。モデル構築に用いることができるオブジェクトの例を図 2.1 に示す。本研究では後者のモデルを、**Logic model** と対応する形で「**Physics model**」と呼称することにする。これは、システムにおける物理的な振る舞いを取得するための数値シミュレーションを目的とした数学的モデルであり、物理的な関係を明示的に表現した「形式的な、公式的な(formal)」モデルであるともいえる [46]。

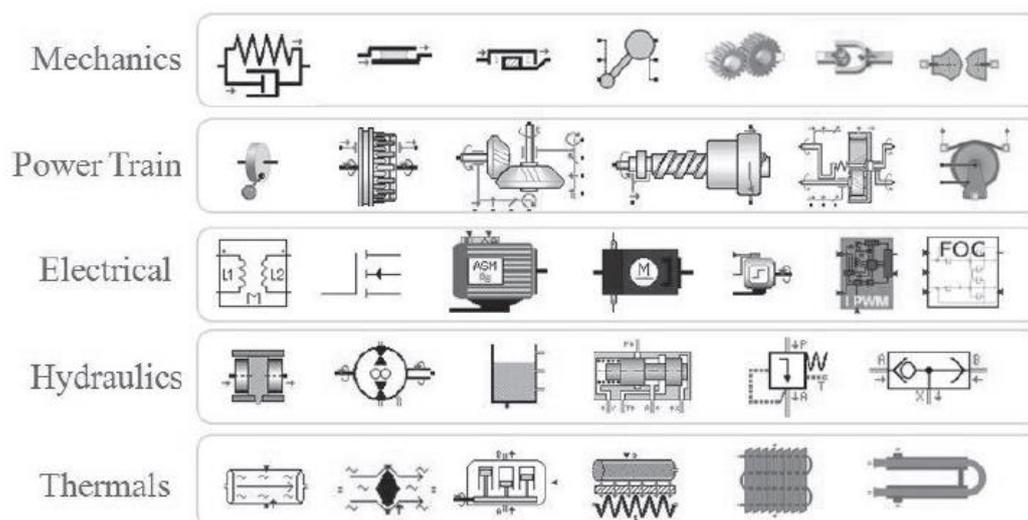


図 2.1 代表的な物理領域とその構成部品の例 [49]

2.5 モデルベースリスク分析に関する既往研究とその課題

MBRA やその類似概念に関する既往研究は、2000 年代頃から複数の研究グループによって様々な取り組みが行われてきた。

Gran らの研究グループでは、遠隔医療システムや、E コマースシステムといったソフトウェア系のシステムを対象として、「モデルベースリスクアセスメント/マネジメント(プロセス)」という概念を提唱した [50]。これは、UML によるモデルとリスクマネジメントプロセスを結び付けた概念である。システムの要求仕様を表す UML によるモデルをリスクマネジメントへ活用していくことを提案するものであり、リスク分析に関わる様々なステークホルダーのグループ間のコミュニケーションや相互作用の媒体として活用されることを意図している。また、Abdelmoez らの研究グループでは、Gran らと同様にソフトウェア系のシステムを対象として、システム設計開発の早期段階におけるリスク分析の実施を目的と

して、UML によるモデルを活用したリスク分析を提案している [51]。ソフトウェアのリスクは、ソフトウェアシステムが故障する確率と、故障によって生じる損害の重大性の組合せとして定量化される。ここでの MBRA 内で取り扱われるリスクとして、ある操作環境においてそのソフトウェア製品が故障する確率とその故障による影響を考慮に入れた指標である「reliability-based risk」と、システムの保全の困難さを表す指標である「maintainability-based risk」の2種類を定義・導入して議論している。その後、2010年頃までの間にさらにいくつかの関連研究論文が公開され、「Model-based XXX」や「XXX-based risk analysis/assessment」(XXXには、Availability、Reliability、Maintainability、Human reliabilityなどの言葉が入る)などの概念が乱立していった [52]が、その後、乱立していた言葉の意味が整理されてきた。最終的には、広義の信頼性を意味する Dependability (総合信頼性) [53]を適切に分析および対処するために、1つの手法として MBRA のアプローチを取る、という考え方にまとまった。これは、リスクよりも Dependability が上位概念である、という主張を意味している。Dependability という概念の中に含まれる細分化された項目として、Availability (可用性)、Reliability (信頼性)、Safety (安全性)、Security(セキュリティ)の4つが含まれる。そして、これらそれぞれの評価を行う際に、「リスク」という指標で取り扱うことが提案された [54]。その後、同研究の潮流においては Model-based “risk” analysis/assessment という表現が見られなくなり、Model-based “dependability/reliability” analysis/assessment (MBDA)という表現に収斂されていった。これら研究の特徴としては、主に「信頼性」の側面からリスクを語っている点にあると考えられる。その後、現在にかけては、主に自動車、航空宇宙機、ソフトウェア系のシステムを対象として、Dependability analysis (DA)の自動化や複雑性の高いシステムの動的挙動予測に基づく DA など、個別の要素技術開発研究が行われている [55]。

一方で、それらの動きと並行して、Joshi らの研究グループでは、ホイールブレーキシステムや航空電子工学系のシステムを対象として、Model-based safety analysis/assessment (MBSA)という表現を用いて、主に安全の側面から、モデルを活用したリスク分析に類する手法について提案している [56][57]。これらは、MBDにおけるV字プロセスを安全解析型に修正した安全性解析の観点で実施される手法であり、前者の研究グループは主に「信頼性」の側面からシステムを見ているのに対して、こちらは主に「安全性」の側面からシステムを見ている点の特徴である。そして、「安全性」という概念における要素の1つとして、Reliability、Maintainabilityなどと並んで「リスク」を取り扱おうとしている。その後、同研究の潮流においては Model-based “hazard/safety” analysis/assessment (MBHA/MBSA)という表現が引き続き利用され、Model-based “risk” analysis/assessment という表現は少なく、具体的な提案・適用事例も見られない。また、Mehrpooyan らの研究グループでは、MBSEの目的である「システム設計開発の短期化・効率化」を念頭に置き、MBHA や MBSA 手法の開発に取り組んでいる [58][59]。これらは、対象システム内に存在する構成要素どうしの相互作用に由来する事象に着目し、SysML を活用した検討フレームとして、システム内ハザードを取り除く設計改善サイクルの提案を行うものであり、現代工学システムの特徴である複雑性にアプ

ローチする研究の1つである [60]。その後、現在にかけては、主に自動車、衛生電力システム、航空機系のシステムを対象として、UMLによるモデルから安全情報を引き出すための個別の要素技術開発研究が行われている [61]。

これら既往研究の整理により、MBRA の他にも、MBDA、MBHA、MBSA など類似の名称を持つ概念や手法が多数存在することがわかった。また、それらは大きく分けると、「(総合)信頼性」の側面から見た手法と「安全性」の側面から見た手法の2つに分類できることがわかった。それは、「信頼性」がシステムの機能が正しく働いているか否かを問題にし、システムが機能を喪失した(故障した)後の結果については概念の範疇に含まれない一方で、「安全性」はシステムが機能を喪失した(故障した)後の結果を重視する、という、それぞれの概念の違いに由来する目的の違いによるものであると考えられる。

これらの研究はそれぞれ、設計開発プロセスの短期化・効率化や、システムの複雑性に由来するシナリオの多様化への対応、設計担当者が行う信頼性・安全性解析の作業量に関する負担軽減など、様々な文脈で語られてきたが、これらの研究に共通する点は、そのシステムモデルとして Logic model を活用している点にある。Logic model は前述の通り、設計者の要求仕様をグラフィカルに表現したモデルであり、システム内要素どうしの「繋がり」や「論理構造」のみをモデル化したものである。Logic model を用いる強みとしては、従来のドキュメントベースで行われる信頼性および安全性解析に比較し、設計担当者のコミュニケーションの円滑化による作業効率の改善によって、設計開発の短期化が期待される点にある。しかし、その弱点としては、Logic model はあくまで設計者の要求仕様のみが取り込まれたモデルであり、現実世界のシステムの物理的な振る舞いについては何ら言及しない点にある。つまり、あくまで設計者の要求仕様の中での信頼性や安全性が確保されたとしても、それが現実世界においてもそうであるとは必ずしも言えないのである。したがって MBSE においては、信頼性や安全性に関わる異常な事象を Logic model の検討領域で要求仕様として定義し、それを現実世界のシステムの物理現象に落とし込んだ Physics model をも活用した信頼性・安全性解析手法が求められてきた。

しかし実際には、Physics model を活用した信頼性・安全性解析手法に関する研究事例は未だ少ない。それは、MBSE の世界での Logic model と MBD の世界での Physics model が、モデル化の目的や方式、モデルを活用して可能になる検討などについてそれぞれ全く別物であり、そこに大きなギャップが存在するからである。MBHA/MBSA を含む安全性解析の発想では、Logic model を活用してハザードや望ましくないシナリオを特定し、それらを一つひとつ潰していくやり方でシステムの安全化を達成しようとする。しかし、前述の通り Logic model では現実世界のシステムの物理的な振る舞いを取り扱うことができないため、実現象の不確かさを考慮した分析とはなり得ない。一方で、MBDA を含む信頼性解析の発想では、可能な限りシステムが正常に作動する(信頼性が高い状態を実現する)ように努める。これは、僅かな可能性として信頼性が失われる不確かさの存在を認めてはいるが、この場合も、Logic model と Physics model とのギャップの存在によって、その不確かさをどのように検討に取

り込んで行くべきか、という議論には至っていない。

さらに、Physics model を活用したシステムの「リスク」に着目した手法の検討例は少ない。その原因の1つは、リスク分析における基本的な発想として存在する「多様なリスクシナリオを可能な限り網羅的に取り扱いたい」というニーズと、対象システムをモデル化する、すなわち「対象システムにおいて起こり得る多様で複雑な物理現象からその一部のみを切り出す(それ以外は捨象する)」というアプローチとの相性が悪いことにあると考えられる。対象システムを何らかの物理方程式系で表現することは、その物理方程式系そのものの不確かさを認めないことを意味することから、そのようなモデルに基づくリスク分析においては、物理方程式系そのものの不確かさが議論の俎上に乗ることは無い。したがって、この両者の相性の悪さを踏まえた上で Physics model を活用したリスク分析を実現するためには、当該モデル化によってどのような不確かさが取り扱われ、逆にどのような不確かさは取り扱われていないのかを適切に認識することが重要である。

ある特定のシステムを対象に Physics model を構築した場合、Physics model の保有する不確かさは、①当該システム内で生じる物理現象を何らかの物理方程式系によって表現するということにある不確かさ (Physics model に特定の物理現象が取り込まれない可能性があるという不確かさ)、② Physics model を構成する物理方程式系への入力パラメータに何らかの分布(ランダム性やバイアスなど)が存在するという不確かさ、③その分布を何らかの数学的な関数(確率密度分布など)として仮定する不確かさ、などがある。

第1章で述べたような現代工学システムの複雑性による特徴を持つリスクシナリオを取り扱うためには、Physics model においてこれらのような不確かさが存在することを認識した上で、MBRA を実施することが重要である。

以上の整理から、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。

本研究では、この Physics model に基づく MBRA の実現に向けて複数の具体的な事例検討を実施することにより、本手法の適用範囲や適用領域、利点や弱点などを整理する。これにより、本研究における MBRA が第1章で述べたエネルギーシステムの RA をどのように補完および高度化するのかを明らかにする。

2.6 まとめ

第2章では、MBSE および MBD の考え方を背景として、MBRA とそれに類する手法について、既往研究とその課題を整理した。整理の結果から、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 水素ステーションにおける水素充填システムへの MBRA の適用

3.1 概要

本章では、エネルギーシステムを構成する一技術システムの事例として、「水素ステーションにおける水素充填システム」を題材とし、第2章にて述べた MBRA を適用した結果について述べる。本章では当該システムを題材とし、一般的な RA スキーム(図 1.1)における「影響度解析」および「リスク分析」に関連する項目を実施した。

3.2 本検討の背景

3.2.1 水素ステーションおよび水素ステーションにおける水素充填システム

水素ステーション(HRS)は、燃料電池自動車(Fuel Cell Vehicles : FCV)に水素を供給する機能を持つ設備であり、水素を昇圧するための圧縮機、水素を貯蔵する蓄圧器、水素を FCV に供給するためのノズルを備えたディスペンサーなどから構成される。水素ステーションは、水素の貯蔵・輸送方法等に応じて様々な形態が存在する。大きく分類すると、オフサイト型、オンサイト型、および移動式水素ステーションの3つに分けられる。

本研究で題材とする水素ステーションにおける水素充填システムは、これら3種類のどのタイプの水素ステーションにおいても存在するシステムである。高圧貯蔵された水素蓄圧器から、高圧水素配管やその接合バルブ、熱交換器等を通して FCV に水素を差圧で流し込み、FCV タンクに水素を充填するためのディスペンサー部からなる。詳細については、後述する。

3.2.2 水素ステーションにおけるリスク

3.2.2.1 社会総合リスクの観点から見た水素ステーションのリスク

水素ステーションの普及・社会実装を目指すにあたっては、前述のような水素の性質を踏まえた安全性の確保は必要不可欠である。水素ステーションの安全性についてはこれまでに様々な検討がなされ、ステーションの従業員や利用者、近隣の一般住民や建造物に対する保安防災を目的とした事故発生および事故拡大防止対策の策定や法整備などが進められてきた。一方で、水素ステーションの普及・社会実装を社会目標とするときには、上記のような安全性以外にも、利用者の利便性や事業の継続性など、複数の要素についての検討が必要となる。また、これらは相互にトレードオフの関係になっている場合も多く、個々の要素を最適化することが、必ずしも社会実装に向けた最適解になるわけではない。したがって、水素ステーションにおいて検討が必要な各要素を総合的にマネジメントした上で、水素ステーションの普及・社会実装を進める必要がある。

そこで、2019年に横浜国立大学から「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」[62]および「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」[63]が発表され、社会総合リスクという新しい概念が提唱された。社会総合リスクとは、「生

命/健康/環境等の安全に関する影響に加えて、生活や社会活動・価値に影響を与える影響もあわせた、「社会の安全と活動に関する総合リスク」である。これは、ある科学技術において検討すべき各要素を、様々なステークホルダーに影響を与えるリスクとして捉え、それらのリスクを分析し相互に比較評価することによって、可能性の段階で必要な取り組みを検討、取捨選択し、より良い選択や意思決定を目指す考え方である。

本ガイドラインにおけるリスクの定義は、国際標準化機構(International Organization for Standardization: ISO)によって定められたリスクマネジメント規格である ISO31000 におけるリスクの定義、すなわち「Effects of uncertainty for objectives(目的に対する不確かさの影響)」[2]に従っている。このリスクの定義の大きな特徴の 1 つは、正負両方の影響を考慮することにある。従来の工学リスク等の概念では、基本的に負の影響のみを考慮してきた。しかし、ある科学技術の社会実装に関する選択を行う上では、その技術がもたらす負の影響と同時に、その技術が社会に導入されることによる利便性や経済効果等の正の影響までを含めて議論する必要がある。そのため、正負両方の影響を考慮している ISO31000 の定義を採用したものである。

社会総合リスクを用いた分析や評価には、リスク共生社会 [64]という考え方が前提にある。図 3.1 にリスク共生社会の概念図を示した。一般に、ある科学技術は人間に豊かさをもたらすものとして社会に導入される。しかし、獲得したい豊かさが大きいほど、好ましくない影響も増加する。これらの好ましい影響および好ましくない影響は、ある科学技術の持つリスクの集合体である共通のリスクソースから得られるものであり、好ましくない影響をゼロにするためには、その科学技術を導入しないという選択を取るしかない。すなわち、リスク共生社会とは、「豊かさを目指すとそこには必ずリスクがあることを認識し、ある種のリスクを受け入れることを覚悟してリスクへの対応の選択を行う社会」である。

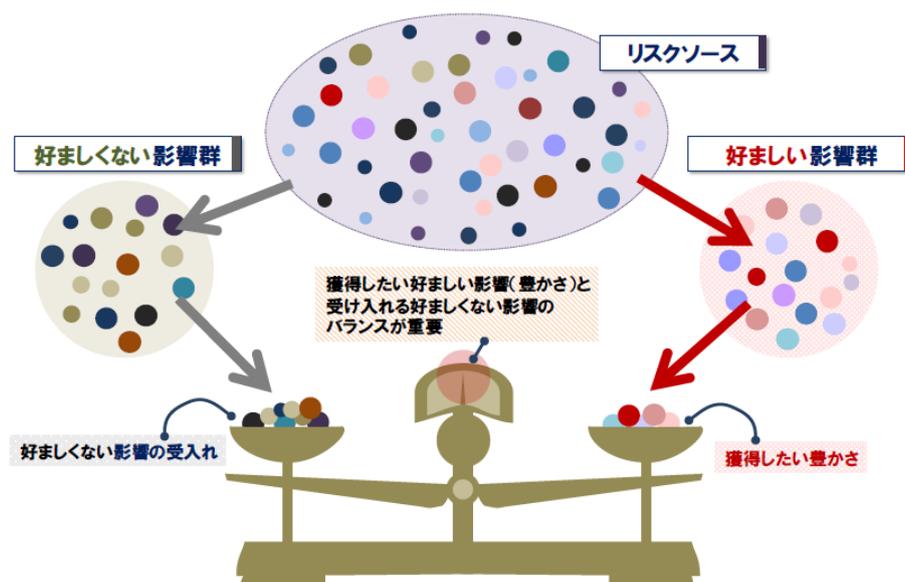


図 3.1 リスク共生社会の概念図

以上の考え方をもとに横浜国立大学では、未知性の大きな先端科学技術の事例として水素ステーションを採用し、本ガイドラインを適用している。

社会総合リスクの観点から見た水素ステーションのリスクは図 3.2 のように整理され、「安全性に関連する規制整備や検討の遅れ、市民が持つ計画に対する期待・不安、火災・爆発の不安や物理的・直接的影響などが重要であり、他の技術システムへの影響や経済性、エネルギーとしての価値や生活の質の向上などを検討する必要」 [65]が示され、特に重要なリスクとして「フィジカルリスク」および「環境・社会・経済リスク」が挙げられた。

本研究では上記の2つのリスクのうち、「フィジカルリスク」に着目している。

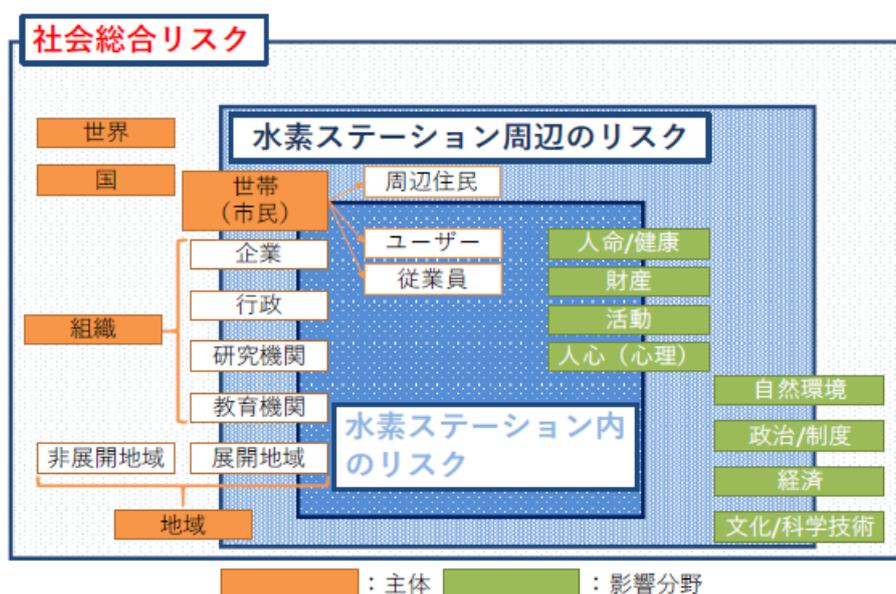


図 3.2 社会総合リスクの観点から見た水素ステーションのリスク

3.2.2.2 水素ステーションにおけるフィジカルリスク

水素はあらゆる元素の中で最も単純な構造を持ち、常温において無色、無味無臭の気体である。水素ステーションにおいて取り扱われる水素は、FCV への差圧充填を可能とするため、高圧で取り扱われることが多い。また、可燃性・爆発性を持つと共に、一般的な可燃性ガスと比較して最小着火エネルギーが低く、爆発範囲が広いという特徴を持つ。したがって、水素ステーションにおいて保有する水素が主なハザードとなる。これらの水素が漏洩するなどして系外に放出され、何らかの要因で着火し爆発するなどの現象が生じることで、周辺機器やステーション敷地外の人や構造物に影響を与える可能性がある。水素ステーションのリスクにおいては、こうしたフィジカルリスクを取り扱う必要がある。すなわち、水素ステーションを例にとると、プロセス内部で水素と酸素の混合気が形成して着火・爆発するリスク、水素が大気中に漏洩した直後に着火して生じるジェット火災によるリスクなどが、フィジカルリスクに分類される。

3.2.2.3 水素ステーションのフィジカルリスクアセスメント

水素ステーションのフィジカルリスクアセスメントは、水素ステーションが持つ様々な特性を考慮に入れた上で実施される必要がある。なぜなら、これまでに開発、発展してきた各種のシナリオ特定手法・リスク分析手法等は、大量の化学物質やエネルギーを保有する大規模化学プラント等を対象とすることが念頭に置かれているため、単純に水素ステーションに適用するのみでは、適切にリスクを把握することができない可能性があるためである。

水素ステーションにおける主なフィジカルリスクは、系内の水素が何らかの要因で系外に漏洩し、着火して火災や爆発に至る形で顕在化することが多い。そのため、水素ステーションにおけるフィジカルリスクシナリオを Bow-tie model 的に捉えるならば、中間事象に「水素の漏洩」を置き、左側にはトリガーから水素が漏洩するまでの事象進展、右側には水素が漏洩した後の事象進展およびジェット火災や爆発等の最終事象が描かれることになる。

各種の事故データベース(日本の高圧ガス保安協会による水素スタンド関連事故情報 [66]、欧州の Hydrogen Incident and Accident Database (HIAD) [67]など)では、何らかの原因で水素が漏洩し、ジェット火災や爆発が生じた例が数件報告されている。最近でも、2019年6月10日にノルウェーの Sandvika にある水素ステーションにて、水素の大規模漏洩による火災・爆発によって2名が軽傷を負う事故が発生している [68]。

Bow-tie model の左端である、水素ステーションにおけるフィジカルリスクのトリガーには様々なものが存在する。最も容易に想像されるのは、水素ステーションにおいて使用されるプロセス機器の異常である。通常運転の継続による機器の劣化、振動による緩み、腐食等がこれにあたる。また、プロセス内のパラメータの変動もトリガーとなり得る。プロセス内部の圧力・温度の変動、不純物の混入等がこれにあたる。

以上のトリガーは一般的な化学プロセスと同様であると考えられるが、水素ステーションの持つ特性を踏まえた場合は、一般の化学プロセスでは見られない、水素ステーション特有のトリガーの存在が否定できない。例えば、水素ステーションでは、ステーション運営・運転に関わるオペレータの他にも、ステーションの利用者や第三者などの専門的知識を持たない人々が入り込むことから、様々なヒューマンエラーがトリガーとなり得る。また、水素ステーションは、臨海部の大規模化学プラントと異なり、燃料電池自動車への燃料補給の観点から、住宅地やビル街の中に立地することが予想される。また、広い敷地面積を確保しにくいことから、周辺の建造物と近接して立地することが予想される。このとき、例えば水素ステーションの敷地周辺での住宅火災等が発生した場合には、水素ステーションのリスク顕在化のトリガーとなり得ると考えられる。また、水素ステーション特有の機能に由来する水素充填後の車両誤発進や、外部からの車両飛び込みなどもトリガーとなり得る。

さらに、これらの水素ステーション特有のトリガーに加え、前述の社会総合リスクアセスメント書で検討されている大規模災害につながるようなトリガーについても検討する必要がある。特に近年では、東日本大震災による原発事故に代表されるような自然災害に由来する産業災害(Natural hazard triggering technological disasters : NATECH) [69]への注目が集まって

いる。また、航空機の墜落やクレーンの倒壊など、発生頻度は極端に低いものの発生すると甚大な被害を生じるような、人間による発生予測が不可能な事象(black swan) [70] [71]によるリスクの存在も指摘されている。

伊里ら [72]は、以上の様な水素ステーションにおけるフィジカルリスクのトリガーを整理し、水素ステーションの包括的フィジカルリスク評価フレームワークを提案した(表 3.1)。本フレームワークでは、水素ステーションにおいて検討すべきリスクシナリオのトリガーを、シナリオ特定・リスク分析手法の組み合わせの観点から整理している。

一方、Bow-tie model の右端である水素ステーションにおける主要な最終事象として挙げられるのは、水素が漏洩して即時着火することにより生じるジェット火災、漏洩後に拡散・滞留して遅延着火することにより生じるフラッシュ火災・爆発等である。ただし、事象進展の観点からは、シナリオがこれらの最終事象で留まらない可能性も存在する。例えば、水素ステーション中のある箇所から生じたジェット火災が水素タンクを直撃し、加熱されたタンクが破裂してさらに影響範囲が拡大する場合などである。このように、ある事故事象が付近の設備に影響を与えることにより、事象が伝播してさらに次の事象の引き金となるような効果ことを「ドミノ効果」 [73]と呼び、近年も研究が進められている。

表 3.1 水素ステーションの包括的フィジカルリスク評価フレームワーク [72]

解析手法	事故のトリガー	定量的 頻度評価	定量的 影響度評価	対象となるリスクシナリオ	評価のアクション
GRA (漏洩頻度データによる)	・劣化、腐食 ・振動 ・緩み ・プロセス変動、その他	○ (可能)	○ (可能)	漏洩頻度データによりリスクの定量化が可能であり、定量的な評価が可能ナリスク	整備された漏洩頻度データと影響度算定によるGRA(定型手法)を実施
GRA (故障率データによる)	・機器固有の故障に起因	○ (可能)	○ (可能)	故障率データによりリスクの定量化が精度よく可能であり、定量的な評価が可能ナリスク	既存の機器故障データに基づくに事故発生頻度算定と影響度算定による定量的リスク評価
HAZOP&FMEA → ヒューマンファクターETA & 損傷評価	・誤操作などの ヒューマンエラー	× (困難)	○ (可能)	頻度データの不確かさが大きい が、リスクを相対評価可能なリスク	・シナリオの洗出し ・ETAおよびFTAを用いた詳細解析 ・エンジニアによる主観的頻度を用いた半定量的リスク評価(従来RA同様)
HAZOP&FMEA → 固有シナリオETA & 損傷解析	・近隣火災 ・車両誤発進 ・車両飛込み 等	× (困難)	○ (可能)	頻度データの不確かさが大きい が、リスクを相対評価可能なリスク	
シビアアクシデント What-if → 事故進展ETA	・天災(甚大災害) ・航空機墜落、クレーン倒壊 ・大規模火災 等	× (困難)	定量化は× (影響度 極大)	未然防止が困難かつ甚大な被害をもたらすリスク 頻度が極めて小さいため、定量的なリスク値に物理的な意味がない	トリガー事象発生から被害進展、復旧までの時系列シナリオの整理

3.2.2.4 水素ステーションのフィジカルリスクアセスメント事例

水素ステーションのフィジカルリスクに関する研究事例は、国内外問わず多数存在する。Suzuki ら [74]は、計量書誌分析手法 [75]を用いて、日本国内外における水素ステーションの安全およびフィジカルリスクに関する研究事例をレビューした。その結果、投稿論文数が最も多いのは日本であり、次いで中国、米国の順に投稿論文数が多いことが明らかになった。以下、これまでに実施されてきた水素ステーションのフィジカルリスクアセスメントに関する事例および既往研究について述べる。

2003年、European Integrated Hydrogen Project(EIHP)より、水素ステーションの定量的なリスク基準が提案された [76]。本リスク基準では、水素ステーションに関わるステークホルダーを、水素ステーションの従業員(First party)、水素ステーションの利用者(Second party)、水素ステーション周辺に存在する人々(Third party)の3つのグループに分類し、それぞれに異なる定量的な基準値を与えている。これは、各ステークホルダーの立場によって許容されるリスクが異なると考えられるからである。

2006年には、圧縮水素型水素ステーションについて定量的リスクアセスメントを実施し、ガソリンスタンド、圧縮天然ガス(Compressed Natural Gas : CNG)スタンド、液化石油ガス(Liquefied Petroleum Gas : LPG)スタンドと比較して同等の保安距離を得た例 [77]がある。これは、リスクベースで保安距離の検討を行った最初の事例である。

その後、2009年、米国の Sandia 米国立研究所により、水素ステーションに関する従来の影響度による保守側評価に基づく法規制の考え方をリスクベースの考え方に転換し、より合理的な保安距離を定めることが提案された [78] [79]。これと同時期に、日本では NEDO の委託研究事業である「水素インフラに関する安全技術研究」が実施され、水素ステーションにおける安全対策技術基準や、保安距離規制等が定められた。日本では、高圧ガスを取り扱う水素ステーションは従来から高圧ガス保安法で規制されており、その規制はハザードベースの考え方に基づいている。しかし、本 NEDO 事業内での取り組みはリスクの考え方をを用いて行われ、35 MPa 級および 70 MPa 級の圧縮水素型および液化水素型水素ステーションモデルに対してリスクシナリオ特定を行い、各シナリオを定性的な手法を用いて評価した上で、安全対策効果等について定量的に検証している [80] [81] [82]。さらに、欧州では、水素ステーションの定量的リスクアセスメントに関する様々な手法や計算モデル等についてのベンチマークを示す検討が行われ、それぞれの手法の違いや共通点、特徴を整理している [83]。

これ以降、様々な水素ステーションに対して定性的および定量的なリスク分析・アセスメントが行われてきた。

オフサイト型水素ステーションについては、Li らが圧縮水素型水素ステーションに対して複数の定量的リスクアセスメントを行い、保安距離について議論している [84] [85] [86]。また、Hirayama らは、水素ステーション設備の中でも、利用者が関係するディスペンサー部分の検討が特に必要であると指摘し、シナリオ特定や定性的リスク評価、定量影響度解析による保安距離の検討を行っている [87] [88]。

オンサイト型水素ステーションについても複数の検討事例が存在する。再生可能エネルギー由来の電力を用いた水電解装置のオンサイト型ステーションに対する検討例では、HAZOP・FMEA により特定したシナリオをリスクマトリクスで評価した例 [89]、HAZOP により特定したシナリオのうち、重要であると判断されたものについて定量解析を行い、保安距離について議論している例がある [90]。有機ハイドライド型水素ステーションに対する検討例では、Nakayama らを中心としてメチルシクロヘキサンの熱的ハザードの取得 [91]、

様々な環境変動をトリガーとするシナリオ特定および定性的リスク評価が行われてきた [92]。また、日本の産業技術総合研究所により定量的かつ詳細なリスク評価も行われている [93]。

一方、水素ステーションのフィジカルリスクアセスメントに関わる個別の要素技術の適用例および技術開発についても多数報告されている。

水素ステーションのシナリオの特定には、これまで化学プロセス等に用いられてきた前述の HAZOP、FMEA 等の手法を用いた検討例が他にも存在する [94] [95] [96]。

水素ステーションにおける事故事象の影響解析については、水素の拡散・爆発・ジェット火災等の現象理解を目的として、実験的なデータの取得、それらを基にした現象モデルを用いた影響度予測技術の開発などが盛んに行われてきた。水素拡散・爆発現象については、事故事例を基に水素の拡散・爆発現象をモデル化し、数値流体力学(Computational Fluid Dynamics：CFD)的に現象の再現を試みる研究 [97]、各種の様々な実験例 [98] [99]、水素拡散・爆発現象の CFD 解析例 [100] [101]等が存在する。また、水素のジェット火災についても、低圧から高圧条件にかけて膨大な実験例 [102] [103] [104]を始め、数値モデル構築 [105]、さらに影響度解析として火災長および輻射特性の評価を行った事例が報告されている [106]。現在では超臨界水素のジェット火災の現象理解に関する研究 [107]も行われている。

以上のような様々な検討を経て、水素の事故事象の影響度解析を支援するシミュレーションソフトウェア(Flame Acceleration Simulator：FLACS [108]、Process Hazard Analysis Software Tool：PHASt [109]、Hydrogen Risk Assessment Model：HyRAM [110]等)が多数開発されており、その有効性が広く認められている。

水素ステーションの水素漏洩頻度解析にあたっては、水素ステーションにおける水素漏洩頻度の統計データが必要となる。しかし、水素ステーションは運転実績や事故事例が少ないため、有効に使える統計データが存在しない。そのため、従来は他の化学プロセス等の機器の損傷頻度データ等を用いた解析が行われていた。そこで、現在主流となっているのが、ベイズ推定およびベイジアンネットワーク等による頻度解析手法を用いた研究 [111] [112]である。ベイズ推定とは、条件付き確率に関する定理であるベイズの定理を用いて、限られた統計頻度データから目的の頻度を推測することができる手法である。ベイズ推定およびベイジアンネットワークを用いた頻度解析手法は、水素ステーションのように、使用実績や事故事例等が少ないシステムの機器損傷頻度等を予測する手法としてその威力を発揮する。

また、一部ではあるが、水素ステーションのヒューマンエラー発生確率に着目したリスクアセスメント研究も見られる [113]。

日本では、フィジカルリスクアセスメントを用いて水素ステーションの安全対策等に関する技術基準を策定している。現行の技術基準は、2005年から2009年にかけてNEDOにより実施された「水素社会構築共通基盤整備事業 水素インフラ等に係る規制再点検及び標準化のための研究開発 水素インフラに関する安全技術研究」 [114]に基づいて策定されている。その後の約10年間では、水素ステーションにおいて用いられる各種設備の開発や、

商用運転による運転実績、水素および水素ステーションの安全に関する知見などが蓄積されてきている。そのため、本格普及期を迎えた現在は、これらの情報を用いたより詳細なフィジカルリスクアセスメントが可能となっている。以上の背景から、2018年より「超高压水素インフラ本格普及技術研究開発事業」[115]が開始され、安全確保と設備構成・運用の合理化の両立を指向した、従来の技術基準の適正化が求められている状況にある。

3.2.2.5 水素ステーションのフィジカルリスクアセスメントにおける課題

以上のように、水素ステーションのフィジカルリスクアセスメント事例および既往研究はすでに多数存在し、現在は新規のオンサイト型水素ステーションに対するリスクアセスメントの実施や、個別の要素技術の開発研究が主流となっている。その上で、水素ステーションに対してフィジカルリスクアセスメントを実施する際の課題について、RAスキーム(図1.1)の項目ごとに整理した。

(1) リスク評価基準に関する課題

水素ステーションのリスク評価基準を定めるにあたっては、いくつかの考え方が存在する。定量的なリスク評価基準を設定する際には、例えば、設備の類似性から水素ステーションを化学プラントの一種であると捉える場合には、化学プラントに対する一般的な定量的リスク基準値と言われる 10^{-6} /y を設定する考え方がある。一方、水素ステーションを様々な一般市民が利用する製品であると捉える場合には、製品安全の分野で設定されることの多い 10^{-8} オーダーの値を用いる考え方も存在する。

以上のように、水素ステーションのリスク評価基準の設定は現在でも議論が分かれるところであり、社会的な課題となっている。しかし、本来リスク評価基準とは、様々な価値観が存在する人間社会における社会的な合意によって定められるものであるため、本研究では取り扱わないこととした。

(2) システムのモデル化に関する課題

水素ステーションに対してリスクアセスメントを実施するためには、その目的に応じて対象システムの特徴を抽出し、適切なモデル化を行うことが必要となる。なぜなら、現実世界に存在するシステムをそのままリスクアセスメントすることは不可能だからである。モデル化の例としては、プロセス中の機器故障やパラメータ変動をトリガーとして生じるリスクシナリオの特定などを目的として構築される「プロセスフローモデル(Process Flow Diagram (PFD)や Piping & Instrumentation Diagram (P&ID))」や、プロセスからの水素漏洩後の現象による影響解析などを目的として利用される、水素漏洩・拡散現象、火災・爆発現象等を表現する数式的なモデルなどがある。

このようなモデル化における課題は、設定するモデルによってリスクアセスメントの結果が変化し得ることである。そのため、水素ステーションモデルの構築や影響解析における

数式的なモデルの選定等には十分注意する必要がある。

(3)シナリオ特定に関する課題

前述の通り、水素ステーションにおけるシナリオ特定事例は多数存在するが、いずれも正常状態からのずれを定性的に想定し、ブレインストーミングによってシナリオを特定している。すなわち、あるずれが水素ステーションプロセスに与える影響や特定されたシナリオの実現性は、分析者の知識や経験、定性的な判断に大きく依存していると考えられる。したがって、シナリオの網羅性を高める観点からは、分析者の高い専門性・素養が求められることになる。

また、どれだけ高い専門性やリスク分析の素養を持っている人間だとしても、複雑なシステムに起こり得るシナリオを全て特定することは困難である。その代表的な例が、連鎖故障および複合故障によるシナリオである。連鎖故障シナリオとは、プロセス中のある機器が故障したことに伴い、別の場所に存在する機器が故障して生じるシナリオである。また、複合故障シナリオとは、プロセス中の複数の機器が何らかの理由で同時に故障することにより生じるシナリオである。現代の技術システムは複雑性・結合性が増しており、小さなミスや失敗がシステムの思わぬところに伝播し、巨大な影響を及ぼす結果を招きやすくなっていることが指摘されていることから、こういった連鎖故障・複合故障のシナリオの特定は大変重要であると考えられる。しかし、これらのシナリオは複数のトリガー現象の同時発生を想定する必要があり、起こり得る結果の想定がそもそも困難であることや、トリガーの組み合わせによって特定すべきシナリオ数が爆発的に増加することから、ブレインストーミング的なシナリオ特定では限界があると考えられる。

(4)頻度解析に関する課題

水素ステーションの頻度解析における課題は、水素ステーションにおけるプロセス機器等の損傷頻度、故障確率のデータベースが存在しないため、定量的な頻度解析の結果の信頼性が低いことにある。現状では、化学・石油プラント、原子力プラント等で使用されている機器の損傷頻度を事前確率として、ベイズ推定を用いて得られた頻度を用いている。そのため、入力が求められる頻度データと実際に用いている頻度データの質の違いを常に意識しながら、頻度解析の結果およびリスク分析の結果を解釈する必要がある。

これらの頻度解析結果の信頼性をさらに高めるためには、今後の使用実績の積み上げを待ち、大元の統計頻度データもしくはベイズ更新に用いる頻度データを最新の情報に更新していくことが必要である。

(5)影響度解析に関する課題

水素ステーションにおける影響度解析に関する課題は、QRAの特徴と関係している。

QRAの最大の特徴は、各シナリオの発生頻度を機器の損傷頻度データベース等によって

与えることで、膨大な数のシナリオについて一括して取り扱うことができるところにある。すなわち QRA では、Bow-tie model における中間事象の発生頻度について、同様のプラントで実績があるものについては統計頻度データを与えることで、機器損傷が生じるまでのシナリオを詳細に記述することなく、まとめてリスク分析が可能である。水素ステーションに QRA を実施する場合、Bow-tie model の中心におかれる水素漏洩事象に対して、前述の手法等で得られた発生頻度が与えられる。

一方、QRA の弱点は、前述の特徴の裏返しとして、物質が漏洩に至るまでのシナリオの質的情報を与えないところにある。QRA の持つ特徴から、QRA における影響度解析では化学物質の漏洩後の事象について扱うことが多く、化学物質が漏洩に至るまでの現象を定量的に明らかにすることは少ない。これは水素ステーションの QRA においても同様である。水素ステーションの QRA における影響度解析は水素の漏洩後の現象を明らかにするものが多く、漏洩前の現象をもとにした解析事例はあまり見られない。また、水素の漏洩現象はプロセス内の水素の動的挙動が影響を与えると考えられるが、漏洩前の水素がプロセス中でのような動的挙動を取るか、また、それが算定されるリスクにどのような影響を与えるかについて検討された例はない。

以上のような種々の課題に対して、本研究では(5)影響度解析に関する課題に着目した。第2章で述べた Physics model の特徴である「システムの動的・物理的な挙動を表現する」点を活用することで、水素ステーションプロセス内における水素の物理現象を考慮し、水素が系外に放出される前のプロセスパラメータの動的挙動を取得可能である。これを活用した影響解析およびリスク分析により、従来 QRA では取り扱われなかった、プロセスシステムの動的挙動を前提に含む分析が可能になると考えられる。

以下、水素ステーションを構成する設備における代表システムとして水素充填システムを選定し、MBRA を適用した結果について述べる。

3.3 モデルベースリスク分析の適用

3.3.1 水素充填システムモデルの構築

3.3.1.1 主要設備・機器構成

本検討で対象とする水素充填システムにおける主要設備・機器構成について述べる。表 3.2 および図 3.3 に、水素充填システムを含む水素ステーションモデル [116] を構成する機器種と P&ID を示す。図 3.3 に示すオフサイト型水素ステーションの設備構成の内、蓄圧器ユニットおよびディスペンサーユニットで構成される一連のシステムを「水素充填システム」と呼ぶこととする。各ユニットの詳細は以下の通りである。

【受入ユニット】

・水素カードル(19.6 MPa)用と水素トレーラ(19.6 MPa 又は 45 MPa)用の 2 つの受入口を備える。水素カードルと水素トレーラの同時接続は行わないものとする。

・水素圧縮機向けラインには減圧弁(RV-101)が備わっており、水素圧縮機へは 0.6 MPa に減圧された水素を供給する。

【水素圧縮機ユニット(3 段レシプロ+1 段ダイヤフラム)】

・4 段圧縮の容積式圧縮機であり、1～3 段はピストン式、最終段はダイヤフラム式とする。なお、最終段をダイヤフラム式としたのは、両形式の圧縮機を本リスクアセスメントの検討範囲内とするためである。

・圧縮機の能力は 340 Nm³/h とした。

【中間蓄圧器ユニット】

・常用圧 45 MPa の中間蓄圧器(300 L×5 本)を備える。

・容量 1500 L(300 L×5 本)の設定は、既設商用ステーション調査結果による(中間蓄圧器装備のステーションの平均的な容量)。

・水素圧縮機向けラインには減圧弁(RV-301)が備わっており、水素圧縮機へは 0.6 MPa に減圧された水素を供給する。

【蓄圧器ユニット】

・常用圧 82 MPa の蓄圧器(300 L×3 本)を備える。

【ディスペンサーユニット】

・バス充填は行わない(JPEC S 0003(2016)に規定する 10 kg 超容器搭載車両(FC バス)用充填プロトコルには非対応)。

・差圧充填および併用充填(差圧充填と直充填を併用した充填)の 2 種類の充填方法に対応しているものとする。

【全般】

・水素主配管から分岐した枝管に設置される安全弁、圧力計、圧力リリーフ弁については、元弁(手動弁)設置を原則とした。ただし、設置スペースの制約が厳しい水素ディスペンサー筐体内部については、元弁を設置しないものとした。

・シンプルフローに記載のすべての遮断弁(XV)と調節弁(FCV)は、ノーマルクローズとする。すなわち、通ガス時に開状態となり、通ガス終了後には閉止されて待機時には閉状態となるものとする(ただし、水素圧縮機バイパス調整弁(FCV-201)、ディスペンサー脱圧弁(XV-402)を除く)。

・水素圧縮機バイパス調整弁(FCV-201)は、圧縮機の非稼働時には開状態を維持する(ノーマルオープン)ものとする。

・ディスペンサー脱圧弁(XV-402)は、充填終了時に脱圧のため脱圧のため開閉後、待機時には開状態を維持するものとする。

・常用圧が 19.6 MPa 以上の高圧水素配管は、呼び径 9/16(外径 14.3 mm、内径 6.3 mm)の使用を原則とする。ただし、圧力計(PG・PT)の枝管は呼び径 1/4 とする。

※補足：9/16 配管の内径は一定ではないが、文献値 6.3 mm を踏襲した。

記号	名 称	記号	名 称
	PSV : 安全弁		PG : 圧力計
	CV : 逆止弁		PT : 圧力伝送器
	EFV : 過流防止弁		TT : 温度計
	V : アンゲル弁(蓄圧器元弁)		FM : 流量計
	V : 仕切弁(手動弁) 運転時常時開		
	V : 仕切弁(手動弁) 常時閉		GD : 水素ガス検知器
	XV : 仕切弁(エア駆動自動弁)		FD : 火炎検知器
	FCV : 流量調節弁(エア駆動)		
	PRV : 減圧弁		
	リミットスイッチ		
	ポジショナー		
	電動機		
	高圧水素配管		FN : 軸流ファン
	低圧水素配管、その他の配管		PU : ポンプ
	エンドプラグ		C : 圧縮機
			HE : 熱交換器
	OF : オリフィス		VE : 槽
	FT : フィルター、ストレーナー		HPS : 高圧遮断装置(冷凍機)
	CP : 充填ノズル		LvS : 液面レベルスイッチ
	CP : 緊急離脱カプラ		

表 3.2 機器種の名称

3.3.1.2 Physics model の構築

ここでは、前述の P&ID 記載の機器構成を参考にして、各種の基礎的な物理方程式を用いて水素充填システムの Physics model を構築した。本検討における Physics model モデルでは、システム内の圧力 P 、温度 T 、体積 V を始めとした状態量を用いて、熱力学第一法則、気体の状態方程式、ベルヌーイ式(エネルギー保存則)等の基礎的な物理方程式によって物理現象をモデル化した。

(1) プロセス内の状態量どうしの関係

プロセス内の水素の内部エネルギー変化 U について、熱力学第一法則が成り立つ。

$$\text{熱力学第一法則} \quad : \quad \frac{dU}{dt} = \frac{dH}{dt} + \frac{dQ}{dt} - P \frac{dV}{dt}$$

$$\frac{dH}{dt} = \sum \dot{H}_i \quad : \quad \text{エンタルピー変化}$$

$$\frac{dQ}{dt} = \sum \dot{Q}_i \quad : \quad \text{熱量変化}$$

また、気体の状態方程式も状態量どうしの関係を表す。本検討では、理想気体の状態方程式を仮定した。

$$\text{理想気体の状態方程式} \quad : \quad P = \frac{nRT}{V}$$

(2) プロセス内での圧力損失現象

水素ステーションプロセスのある箇所で水素漏洩が生じた場合、配管中を水素が高速で流れることにより、圧力損失が生じると考えられる。ある長さを持つ配管内における総圧力損失 ΔP [Pa] は、管壁との摩擦による圧力損失 ΔP_{fr} [Pa]、流体の加速による圧力損失 ΔP_{acc} [Pa] によって定まる。また、 ΔP_{fr} と ΔP_{acc} それぞれについても以下の式で表現される。

$$\Delta P = \Delta P_{fr} + \Delta P_{acc}$$

$$\Delta P_{fr} = \lambda \frac{l}{d} \cdot \frac{\rho u^2}{2}$$

$$\Delta P_{acc} = C_1 \rho l \frac{du}{dt}$$

λ : 管摩擦係数[-], l : 配管長[m], d : 配管径[m]

ρ : 流体密度[kg/m³], u : 流体平均速度[m/s]

C_1 : 係数(層流 : $\frac{4}{3}$ 、乱流 : 1)

配管と同様に、バルブを通過する際にも圧力損失が生じると考えられる。このとき、バルブを流れる水素の流速は、バルブ入口圧力を P_1 、出口圧力を P_2 としたとき、以下の式で表される。

$$\frac{P_2}{P_1} \leq 0.5 \quad \text{のとき} \quad \dot{m} = 2.14 \times 10^{-3} \times C_V P_1 \sqrt{\frac{\rho_n}{T_1}}$$

$$\frac{P_2}{P_1} > 0.5 \quad \text{のとき} \quad \dot{m} = 4.28 \times 10^{-3} \times C_V \sqrt{\frac{\rho_n}{T_1} P_2 (P_1 - P_2)}$$

\dot{m} : 漏洩速度[kg/s], C_V : 流量係数[USgal/min]

ρ_n : 標準状態における流体密度[kg/m³], T_1 : バルブ入口温度[K]

(3)熱交換器における熱伝導現象

ディスペンサーユニットには、充填する水素の温度を十分低下させるための熱交換器が存在する。熱交換器中では管壁と水素間での熱移動が生じていると考えられる。ある配管中における熱伝導について、その伝熱速度 Q [W]は以下の式で表現される。

$$Q = \dot{m} c_p (T_1 - T_2)$$

\dot{m} : 配管内流量[kg/s], c_p : 定圧熱容量[J/kg·K]

T_1 : 高温側温度[K], T_2 : 低温側温度[K]

(4)漏洩口における漏洩現象

本研究では、プロセス中の物理現象に基づいた漏洩速度を算出して定量的影響度解析に展開するため、漏洩口における漏洩現象をモデル化する。ここでは、漏洩口を径の異なる配管が接続されている図 3.4 のような構造で表現されると仮定し、 d_1 の内径を持つ配管から、漏洩径 d_2 の漏洩口が形成され、大気中に開放されるとする。このモデルにおいて、漏洩径 d_2 の領域を流れる水素の流速は以下の式で表される。

$$\dot{m} = \alpha A_2 \sqrt{2\rho_1 P_1} \Psi$$

$$\frac{P_2}{P_1} > \left(\frac{2}{\kappa+1}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \quad \text{のとき} \quad \Psi = \sqrt{\frac{\kappa}{\kappa-1} \left(\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa}} \right)}$$

$$\frac{P_2}{P_1} < \left(\frac{2}{\kappa+1}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \quad \text{のとき} \quad \Psi = \sqrt{\frac{\kappa}{\kappa+1} \left(\frac{2}{\kappa+1}\right)^{\frac{2}{\kappa-1}}}$$

$$\alpha = \frac{\mu}{1 - \mu \frac{A_2}{A_1}}$$

$$\mu = 0.598 + 0.395 \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2$$

\dot{m} : 流速[kg/s], α : 流出係数[-], ρ_1 : 水素密度[kg/m³]

A_1 : 配管断面積[m²], A_2 : 漏洩口面積[m²]

P_1 : 内部圧力[Pa], P_2 : 大気圧[Pa], κ : 比熱比[-], μ : 粘性係数[-]

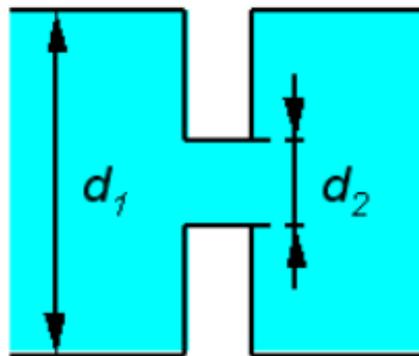


図 3.4 漏洩口の構造モデル

前項の物理方程式を組み合わせることで、水素ステーションプロセスの物理モデルを構築した。本検討では、物理モデルの構築を行うソフトウェアとして ITI 社製の SimulationX を用いた。SimulationX は、プラント制御設計の際のシステム解析を行うことができるソフトウェアであり、Modelica 言語を用いた複合物理分野に渡る物理モデルの作成が可能である。

図 3.5 に SimulationX 上で構築した Physics model の概観を示す。最も上流に位置する蓄圧器(No1_BANK_D350)から、最も下流に位置する FCV 車載タンク(FCV_TANK)までが接続されたモデルとした。その間に、一般的な手動弁(V)、過流防止弁(EFV)、熱交換器(HE)、圧力計(PT)、車載タンク直前の充填カプラー(CP)等が存在し、それぞれが配管(Pipe)によって接続されている。各機器の配置等は詳細 P&ID を参考とした。

各配管の長さは、P&ID に基づく配管長を参考に設定した。また、配管内壁粗さについては水素ステーションで用いられる上での規定は特に存在しないことから、最大高さとして $R_y = 3.0 \mu\text{m}$ という値を用いた。さらに、バルブの種類ごとに異なる Cv 値については、バルブメーカーのカタログを参考に設定した。設定値の一覧を表 3.3 に示す。

本検討では下記 3 つの漏洩シナリオを想定し、経時変化する動的漏洩速度を取得した。

- ・シナリオ A：蓄圧器直後配管の損傷(LEAK_EFV351)
- ・シナリオ B：蓄圧器ユニット-ディスペンサーユニット接続配管の損傷(LEAK_Middle)
- ・シナリオ C：充填ホース直前配管の損傷(LEAK_CP402)

SimulationX 上で構築される Physics model は、基本的にプロセスの系内における物理現象のみを再現する。しかし、本研究では系外への水素漏洩を想定するため、想定漏洩箇所からの分岐と漏洩口を模擬した流出オリフィスをそれぞれ設け、その直後に十分容量の大きい常圧のタンク(Air1, Air2, Air3)を接続することで、系外すなわち大気中への漏洩をモデル化した。漏洩口部のモデル拡大図を図 3.6 に示す。

本検討では水素の流体としての現象に着目するため、各機器における大気との熱移動現象については無視している。また、ディスペンサーユニットに存在する熱交換器(HE)については、熱交換器内の構造を長さ 1 m の直配管であるとし、管壁が常に -40°C に保たれていると仮定している。

表 3.3 Cv 値一覧

機器種		Cv 値	機器種	Cv 値
遮断弁 [117]	XV	1	逆止弁 [118]	CV 0.25
手動弁 [119]	V	0.85	フィルター [120]	FT 0.42
蓄圧器元弁 [121]	V	0.85		

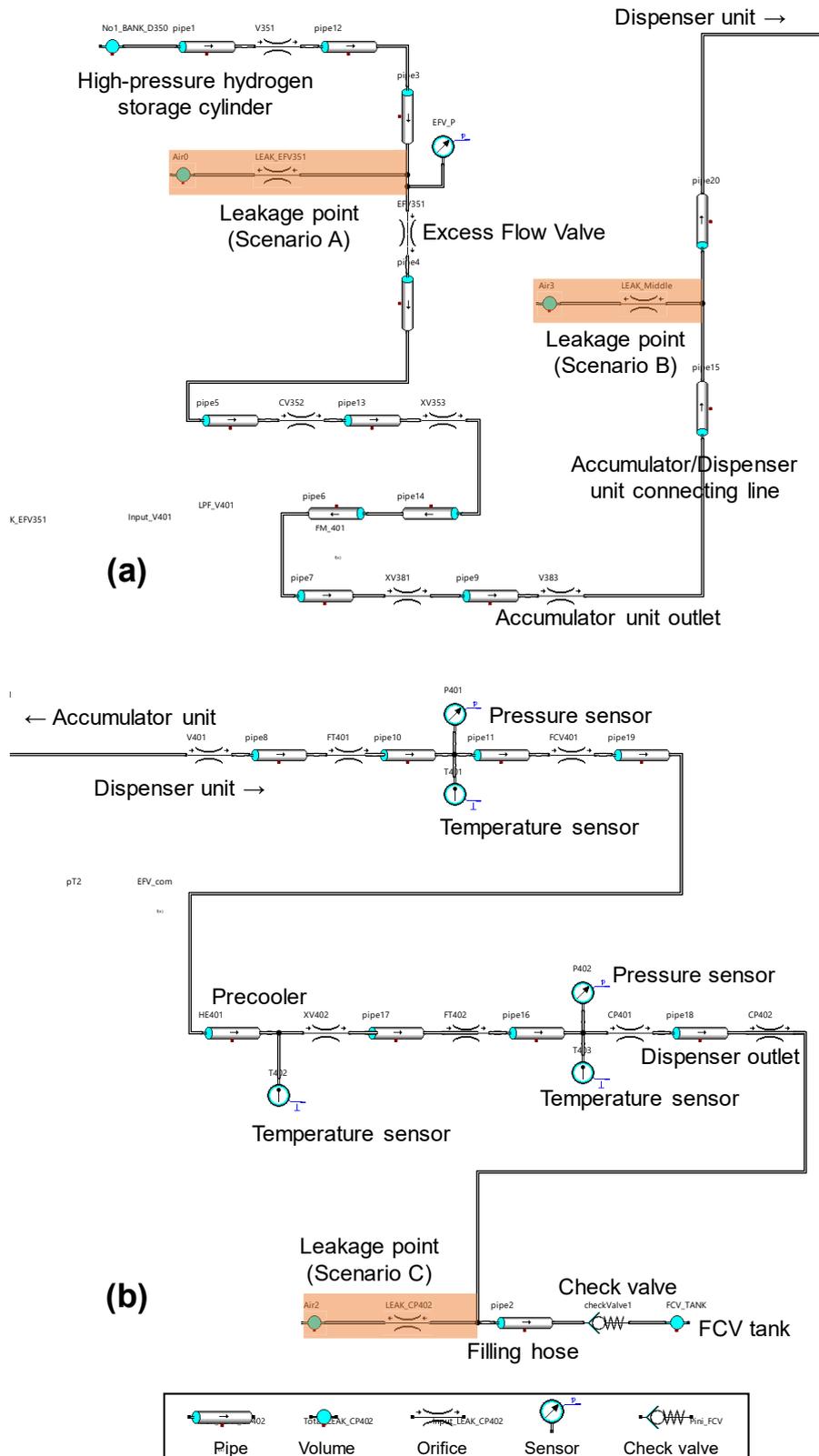


図 3.5 構築した Physics model の概観: (a) 蓄圧器ユニット, (b) ディスペンサーユニット

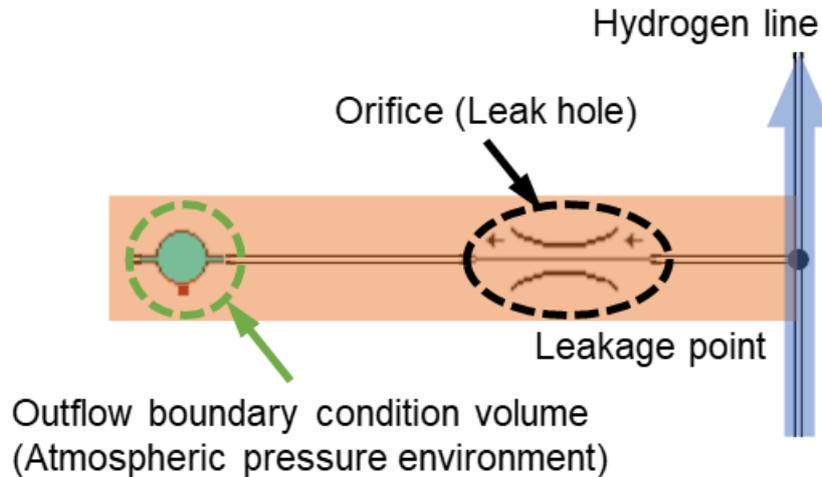


図 3.6 漏洩口部の拡大図

3.3.2 動的漏洩速度の取得

3.3.2.1 計算条件

物理モデルを用いた漏洩速度算出において重要となるパラメータについて、計算条件を設定した。主な設定値の一覧を表 3.4 に示す。

蓄圧器インベントリについて、水素ステーションの基本モデルにおける蓄圧器の幾何容量は 300 L であるが、文献 [116]におけるインベントリ設定条件に基づき、ディスペンサーユニットより上流に存在する主要水素保持設備の水素量の合計値(1.73 m³)を設定した。初期圧力および初期温度については水素ステーションの基本モデルに基づき、それぞれ 82 MPa、25 °C (298 K)と設定した。大気圧および大気温については、標準的な値として 1 bar (0.101 MPa)および 20 °C (293 K)と設定した。その他、高圧水素の物性データには National Institute of Standards and Technology (NIST)のデータベースを用いている。

漏洩速度算出にあたり重要となるオリフィス径(漏洩径)は、Sandia 米国立研究所発行のレポート [122]の考え方に基づき、最大配管径(Rupture: 6.3 mm)の断面積(a) 100%を基準に、面積比(b) 10% (Major: 2.0 mm)、(c) 1% (Medium: 0.63 mm)、(d) 0.1% (Minor: 0.20 mm)、(e) 0.01% (Very small: 0.063 mm)の 5 種類を設定した。ただし、本検討で構築した物理モデルにおける漏洩速度算出モデルにおいて、配管径と同じ 6.3 mm 径の計算時のみ、6.2 mm と設定して計算を行った。これは、入力値として 6.3 mm を与えると流出係数の値が著しく大きい値になってしまうためである。

漏洩口は漏洩開始直後から設定した径で漏洩するとした。また、漏洩水素の供給源は、FCV タンク(FCV_TANK)に接続された充填カプラーの手前に存在する逆止弁が存在することから、蓄圧器(No.1_TANK)のみであるとした。さらに、過流防止弁や逆止弁等の安全対策機器は作動しないものと仮定し、3600 秒間漏洩が継続すると仮定した。

表 3.4 漏洩速度算出パラメータ

Parameters	Value	Unit
Volume inventory in the cylinder (V)	1.73	m ³
Initial pressure in the cylinder (P_1)	82	MPa
Initial temperature in the cylinder (T_1)	298	K
Volume inventory assumed in atmosphere (V_{atm})	10 ⁷	m ³
Atmospheric pressure (P_{atm})	0.101	MPa
Atmospheric temperature (T_{atm})	293	K
Orifice diameter (ϕ)	6.3, 2.0, 0.63, 0.20, and 0.063	mm
Length of the pipe from the cylinder to the FCV tank	30	m

3.3.2.2 モデル妥当性検証

当該 Physics model モデルの妥当性について検討した。本モデルは、現実世界には実在しない水素充填システムをモデル化したものであるため、その妥当性として、本モデルそのものが実現象を適切に再現しているかどうかを確認することはできない。しかし、モデリング手法の特徴から、本モデルに活用されている各機器のモデルを組み替えるのみで構築された別のモデルの妥当性を示すことができれば、本モデルの妥当性を間接的に示すことができる。

Kawatsu ら [123]は、一般社団法人水素供給利用技術協会により実施された水素ステーション実証試験時に用いられた水素充填システムを対象に、同モデリング手法を用いて水素充填システムのモデル化を行い、システム内における水素の圧力・流量の経時変化を取得し、実証試験の結果と比較することによって、モデルの妥当性を示した。本研究では、このモデルに活用された機器や条件をトレースした Physics model を活用することで、妥当性を確保することとした。

3.3.2.3 動的漏洩速度の取得

構築した Physics model を用いて、各漏洩シナリオ(各漏洩箇所・各漏洩径の組合せ)での漏洩速度(単位: kg/s)を算出した(図 3.7)。その結果、いずれの漏洩シナリオにおいても漏洩開始直後に漏洩速度が急上昇していることが確認された。また、主に漏洩径が大きいシナリオについて、最大漏洩速度を観測した後に漏洩速度が減衰していくことが確認された。例えば、シナリオ A-a では 0.90 秒後に最大約 0.7 kg/s の漏洩速度となり、それ以降は漏洩速度が減衰している。これは、水素漏洩に伴う蓄圧器内の圧力や温度の低下、配管やバルブ内で生じる摩擦に寄る圧力損失など、プロセスパラメータの動的な挙動によるものである。

シナリオ A-a、B-a、C-a の結果をそれぞれ比較すると、漏洩速度の最大値が異なっていることがわかる。これは、水素充填時の蓄圧器-FCV タンク間の接続配管やバルブにおける圧力損失の程度が下流の方が大きくなり、各漏洩箇所における水素放出圧力が低下することによるものである。このことから、Physics model を活用することで、プロセスにおける漏洩箇所ごとの漏洩を区別して取り扱った上で影響度解析・リスク分析の実施が可能であることが示された。

シナリオ A-a、A-b、A-c、A-d、A-e の結果をそれぞれ比較すると、その漏洩速度は(a)Rupture 漏洩および(b)Major 漏洩の場合には時間と共に大きく変化していることがわかる。これは、Physics model における漏洩速度が漏洩径(漏洩面積)の関数で表されていることを反映している。一方で、他の漏洩径による漏洩速度は値そのものが小さく、時間の経過とともにほとんど変化が無い。これらの結果は、径の大きな漏洩の場合はプロセスパラメータの動的挙動に大きな影響を与えるが、径の小さい漏洩の場合はほとんど影響を与えないことを意味している。したがって、Rupture 漏洩や Major 漏洩のような、漏洩径の比較的大きなシナリオの分析を行う上では、Physics model を活用した分析が有意義である可能性があることが示された。

こうしたプロセスパラメータの動的挙動を考慮せず、漏洩時にもプロセス内圧力や温度が初期値のまま一定であると仮定する考え方は、漏洩速度を実際よりも高い値として見積もっておくことで、対象システムの保守的なリスク分析を可能にする考え方として有用であった。

本検討においてプロセスパラメータの動的な挙動を考慮した結果、漏洩速度が徐々に減衰していく結果が得られたことから、この経時変化を取り込むことで、保守的なリスク分析により得られるリスクよりも小さいリスクが得られる可能性がある。一方で、水素の漏洩継続時間やジェット火災継続時間は長期化することから、保守的なリスク分析により得られるリスクよりも大きいリスクが得られる可能性もある。これらの要素の重ね合わせでリスク分析結果が決まると考えられる。

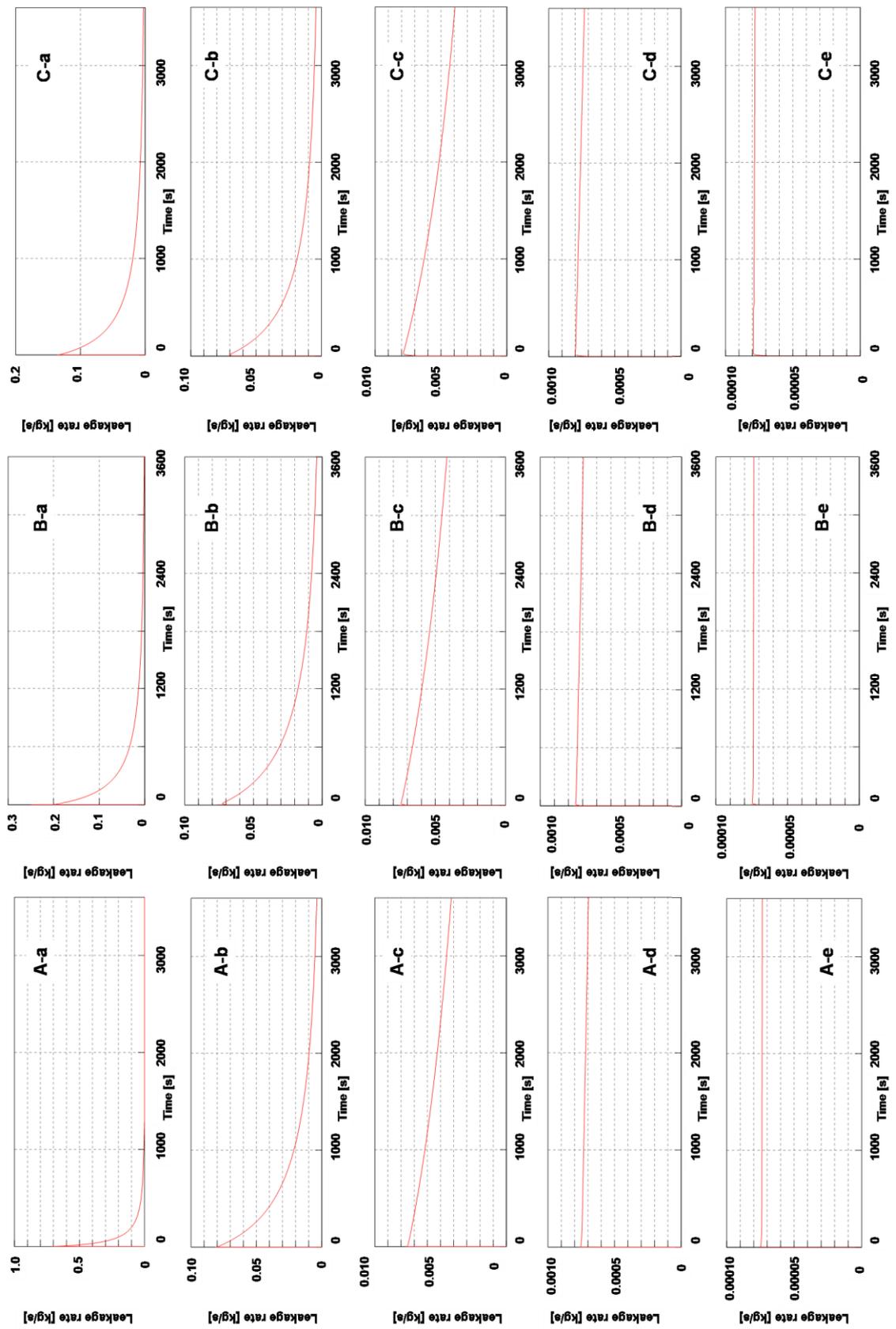


図 3.7 各漏洩シナリオ(漏洩箇所・漏洩径の組合せ)での漏洩速度の経時変化

3.3.3 リスク分析の実施と結果

前項で取得した漏洩速度の結果を用いてリスク分析を行った。水素関連設備に特化したリスク分析の実施を支援するソフトウェアとして HyRAM [110]がある。HyRAM は Sandia 米国立研究所により開発されたソフトウェアであり、水素のジェット火災・爆発等の現象について良い予測を与えることが知られている。また、水素関連設備における水素漏洩頻度データとの組み合わせにより、定量的なリスク評価も可能である。しかし、HyRAM は本検討で取得した漏洩速度データをマニュアル入力して行う分析は不可能である。そこで、本検討ではリスク分析の実施を支援するソフトウェアとして DNV 社製の PHAST 8.11 および Safeti 8.11 を用いた。PHAST は Process Hazard Analysis Software Tool の略称であり、内蔵する様々な物質の物性パラメータを基に、各種の現象予測モデル式を用いてプラントの損傷解析及び爆発や火災事象の影響度解析を行うことができるソフトウェアである。また、Safeti はプラント機器の損傷頻度とイベントツリー解析により得られた事象の発生頻度を、PHAST により得られた影響度と組み合わせることによって統合的に定量的リスク評価を行うことができるソフトウェアである。本ソフトウェアの特徴は、定量的リスク分析において膨大となるリスクシナリオを一括で比較的簡易的に取り扱うことが可能である点と、頻度および影響度を組み合わせて定量的な個人リスクおよび社会リスクを算出し、それらをコンター図やグラフ形式で可視化できる点である。PHAST/Safeti は、石油化学プラントや一般化学プラントにおいてその有効性が広く認められており、水素関連設備や水素ステーションに対して適用した例も存在する。また、PHAST/Safeti は、HyRAM では不可であった漏洩速度データのマニュアル入力が可能である。そこで、本研究では Physics model と PHAST/Safeti 内の影響度解析モデル [124] [125]を適切に組み合わせることで影響度解析およびリスク分析を実施することを試みた。

水素ステーションに対して従来型の定量的リスク分析を実施した結果 [116]によると、水素充填システム周辺において最も支配的なリスクシナリオは、ディスベンサーユニットに存在するフィルター損傷に由来する Major 径(2.0 mm)相当の漏洩シナリオである。当該シナリオは、前述の漏洩速度算出において Physics model を活用した分析が有意義であると考えられたシナリオに該当する。そこで本研究では当該シナリオを題材としてリスク分析を実施することとした。

当該シナリオの頻度解析については文献 [116]に倣い、漏洩を仮定する機器の漏洩頻度を Sandia 米国立研究所のレポート [122]から取得し、イベントツリー解析を活用して実施した。影響度解析については、本検討で得られた漏洩速度(図 3.7)のうち、漏洩箇所および漏洩径の観点からシナリオ B-b に該当する漏洩速度を選定し、PHAST/Safeti の「user-defined source」機能を用いて漏洩速度をマニュアル入力することで、漏洩速度の平均値におけるジェット火災およびガス爆発時の影響度を算出した。以上の結果を組み合わせることで個人リスクを算出し、リスクコンターの形で可視化した。ここでの個人リスクとは、「ある地点において、ある人が 1 年間常にその地点に存在すると仮定したときにその人が死亡する頻度[γ]

を表す。

図 3.7 におけるシナリオ B-b に該当する漏洩速度データを用いて、ディスペンサーユニットにおけるフィルター損傷に由来する漏洩シナリオのリスク分析を行った結果を図 3.9 に、漏洩速度の経時変化を考慮しない保守側のリスク分析を行った結果を図 3.10 に示す。漏洩中心点は水素ステーションレイアウト(図 3.8)におけるディスペンサー位置とし、レイアウト上における距離は図に示すとおりである。

3.3.4 考察

図 3.9 から、 10^{-8} /y および 10^{-9} /y のリスクコンターが敷地境界付近まで広がっていることがわかる。また、保守側の分析結果を示している図 3.10 の結果と比較すると、 10^{-8} /y および 10^{-9} /y のリスクコンターが約 0.5 m~1 m 程度狭まっている。敷地境界点(図 3.9 および図 3.10 において、ディスペンサー位置から最も近い敷地境界点を示す紺色の点)におけるリスク値に着目すると、1 オーダー程度リスク値が変化していることがわかる。このように、Physics model から得られた漏洩速度からリスク分析を実施した場合、保守側の分析結果よりもリスクは小さく算出されることがわかる。当該リスク分析に用いられている各種の解析モデルや入力値の不確かさが大きいため、現状の分析結果においてはリスクの絶対値そのもの(参考値：敷地境界点におけるリスク値はそれぞれ 6.2×10^{-9} /y、 8.6×10^{-9} /y)、およびその相対的な差分の定量値には物理的意味を持たせることはできないが、少なくとも相対的には、保守側分析結果よりも Physics model を用いた本分析におけるリスクの方が小さく算出されることがわかった。

図 3.9 の結果は、保守側の分析結果に比較して、漏洩箇所の情報、プロセスシステム内の物理パラメータの動的振る舞いの情報などが含まれた漏洩速度データを使用したものであるから、仮にその結果の相対的差分が小さいとしても、リスク分析結果を導く質的情報には変化があると言える。また、保守側の分析における漏洩速度算出時の物理的条件の仮定に比較して、Physics model を活用した漏洩速度算出の物理的条件の仮定の方が相対的には実現象に則していることから、保守側分析により過大評価されているリスクを、より現実的な仮定のもとに取得することができる可能性がある。

したがって、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。

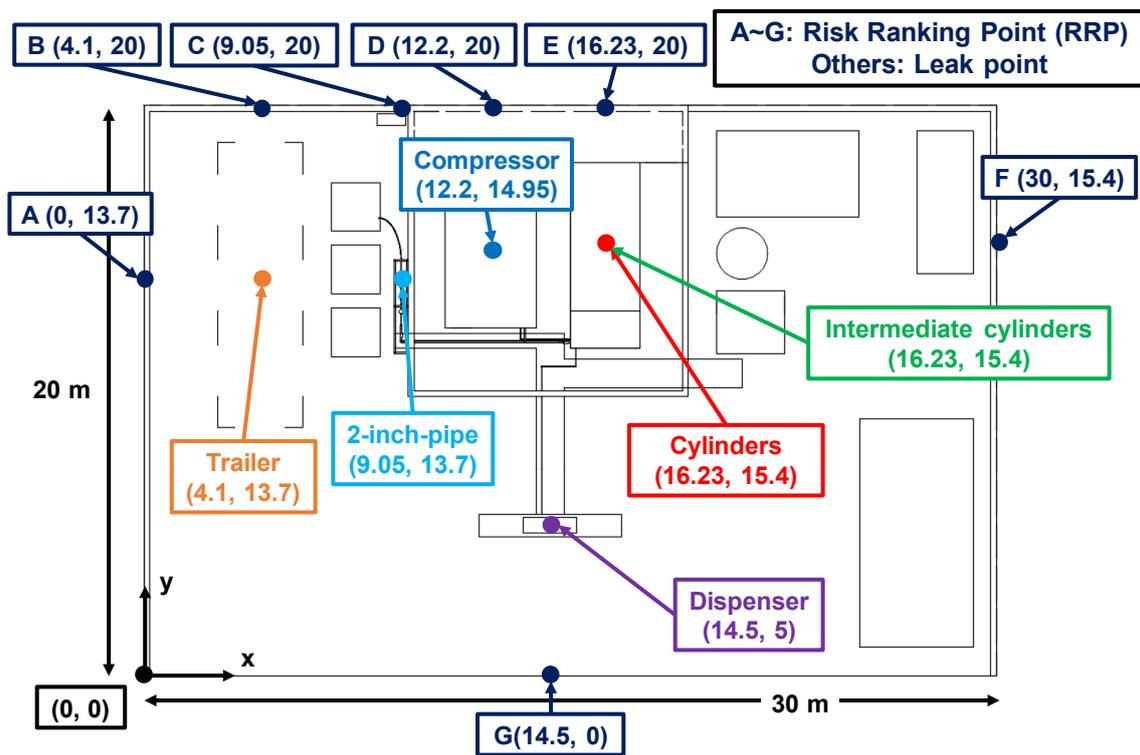


図 3.8 水素ステーションレイアウト図

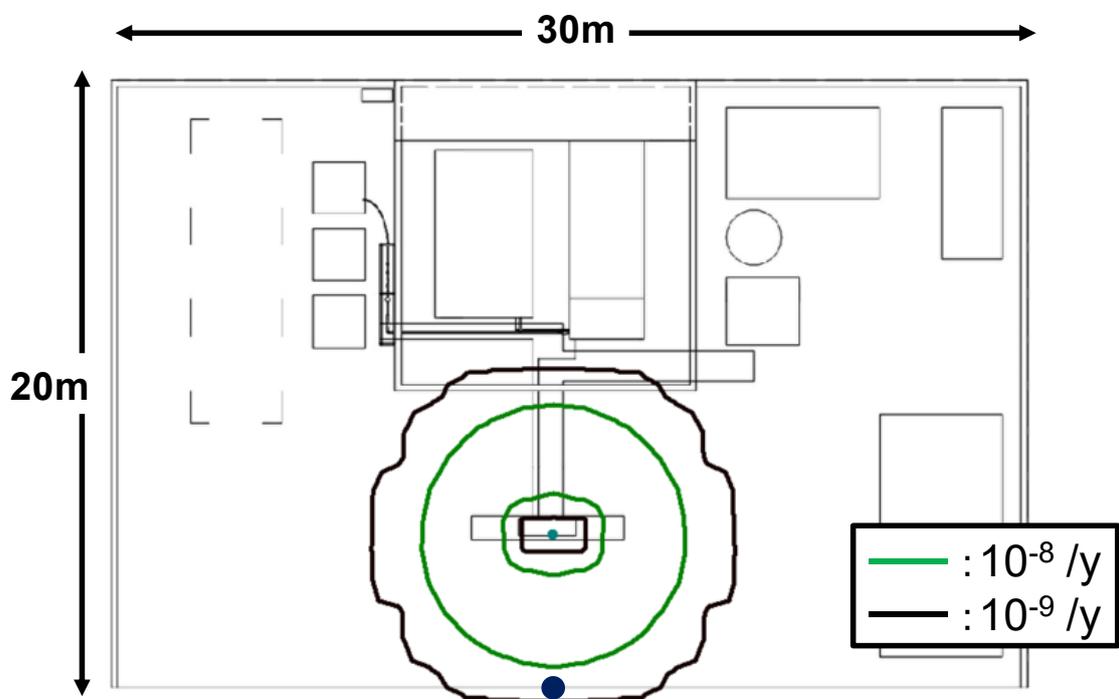


図 3.9 Physics model 活用時のリスクカウンター

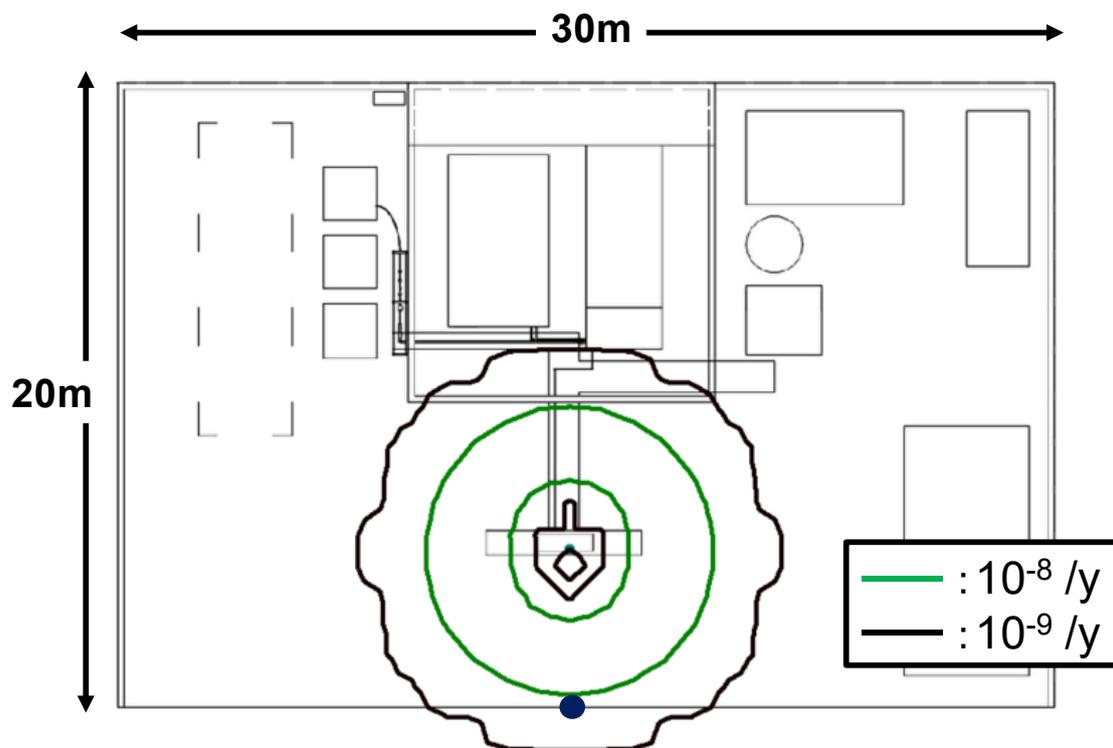


図 3.10 保守側解析時のリスクコンター

3.4 まとめ

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。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1オーダー程度減少することがわかった。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。

第4章 大型蓄電池システムにおける リチウムイオン電池モジュールへの MBRA の適用

4.1 概要

本章では、エネルギーシステムを構成する一技術システムの事例として、「大型蓄電池システムにおけるリチウムイオン電池モジュール」を題材とし、第2章にて述べた MBRA を適用した結果について述べる。本章では当該システムを題材とし、一般的な RA スキーム(図 1.1)における「シナリオ特定」および「頻度解析」に関連する項目を実施した。

4.2 本検討の背景

4.2.1 大型蓄電池システム

大型蓄電池システム(Battery Energy Storage System: BESS)は、単一のセルを複数個接続して構成されるモジュールを、さらに複数個接続して構成される蓄電池コンテナの集合体に加えて、それらを適切に制御・管理するためのシステムを含めた全体のシステムを指す。

BESS の構成の一例を図 4.1 に示す。蓄電システムの最小構成単位であるセルには、大きく分けて円筒形、角形、ラミネート型の3種類がある。これらを複数個直並列に接続して筐体内に収納したものをモジュールと呼ぶ。また、複数個のモジュールをラックに収納して構成されたものを蓄電池盤と呼ぶ。さらに、複数個の蓄電池盤をコンテナ等に収納したものが BESS である。各構成設備には、セル電圧などを監視するバッテリーマネジメントユニットや、直流を交流に変換し電力系統に接続するためのパワーコンディショナーや空調設備、消火設備、制御装置などが含まれる。

以下、BESS において特に重要となるリスクについて述べる。

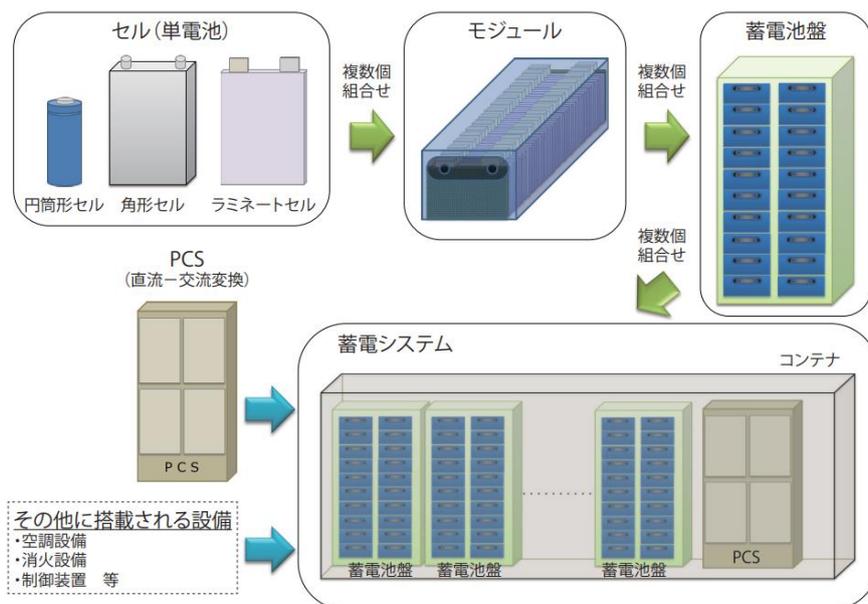


図 4.1 大型蓄電池システムの構成の一例 [33]

4.2.2 大型蓄電池システムにおけるリスク

4.2.2.1 大型蓄電池システムにおけるフィジカルリスク

第1章で述べたように、各種の用途において BESS の社会実装・普及を目指すにあたっては、そこに用いられるセルや、BESS のシステムとしての性質を踏まえた安全性の確保は必要不可欠である。例えば、現行の BESS によく用いられるリチウムイオン電池(Lithium-ion battery: LIB)は、加熱や衝撃等の様々な刺激によって発火・熱暴走し、周辺システムを巻き込む火災を生じる可能性があることが知られている。世界的にも LIB を用いた BESS の火災事故事例が相次いでいる。例えば、2017 年のベルギー [126]、2019 年の米国・アリゾナ州 [127]、2021 年の韓国 [128]、オーストラリア [129]などがあり、BESS に関する故障および火災事例が逐次まとめられるデータベース [130]も存在する。今後の BESS の社会実装・普及に伴い、こうしたトラブル事例の増加が予想されている。したがって、BESS の社会実装に向けた事前のリスク分析/アセスメントが必要である。

このような状況の中で、2017 年および 2020 年の 2 回にわたって、国際電気標準会議(International Electrotechnical Commission: IEC)によりエネルギー貯蔵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 [131] [132]が発行された。2017 年版は、化学電池のみならず、他のエネルギー貯蔵方式を用いたエネルギー貯蔵システム一般を対象とするものである一方で、2020 年版では化学電池特有のハザードに関する記述も含まれた。特に、2020 年版は日本の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ものである。

このように、BESS における多様なリスクの中でも、特に LIB を用いた BESS の火災等に代表されるフィジカルリスクは特に重要なリスクであると考えられる。

4.2.2.2 大型蓄電池システムのフィジカルリスクアセスメント

前述の国際規格において、2017 年の段階では、エネルギー貯蔵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 年国際規格に対して主に安全要求、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。また、2020 年版では、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/アセスメントについては、特に電気化学的なサブシステム(システム全体を構成するより小規模なシステム)から、他のサブシステムへと事象が伝播するような、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(セル)、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、従来から主に活用されているリスク分析関連手法を用いて実施することが推奨されている。一方で、規格という性質上、これらの文書には具体的なリスクアセスメント手順や結果は記載されていない。

4.2.2.3 大型蓄電池システムのフィジカルリスクアセスメント事例

以上のような背景のもとで、BESS を対象としたリスク分析/アセスメントを実施したいくつかの事例が存在する。BESS への安全性検討の特徴として、LIB そのものやモジュールレベルで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数の検討がなされているが、LIB を用いた BESS の”システム”としての特徴を志向した検討やリスク分析/アセスメントの事例は少ない。

ハザード・リスクシナリオ特定を実施した例として、Bubbico ら [133]は、BESS を対象に FMEA を用いてリスクシナリオ特定を行った。対象システムである BESS を単独セル、モジュール、バッテリーパックの 3 段階に分け、それぞれの領域ごとに FMEA を実施することで、BESS のシステムとしてのリスクシナリオをブレインストーミング式の手法で明らかにした。また、大和田ら [134]は、様々な BESS の実証試験設備情報から BESS の構造モデルを構築し、外部環境をトリガーとするリスクシナリオを特定するための Hazard Identification study (HAZID)、および内の事象をトリガーとするリスクシナリオを特定するための HAZOP を実施し、一部システムレベルのリスクシナリオを含む、多数のリスクシナリオをブレインストーミング式に特定している。さらに、Sanida 米国立研究所 [135]では、BESS システムの複雑性を課題とし、「事故は故障を原因とするのではなく、要素間相互作用を原因とする」と捉えるアクシデントモデルである Systems-Theoretic Accident Model and Process (STAMP)モデルを採用し、System Theoretic Process Analysis (STPA)と呼ばれるハザード分析ツールを用いて、BESS の構成要素間相互作用に由来するリスクシナリオをブレインストーミング式に特定することを試みている。

リスクシナリオ特定と共に、それに基づく定性的リスク分析を実施した例として、Soares ら [136]は STABALID (STAtionary Batteries Li-ion safe Deployment)プロジェクトの一環として、LIB のライフサイクル中に発生する可能性のある様々なハザードを分析するとともに、定性的なリスク分析を実施した。BESS と外部環境との相互作用についても考慮に入れるため、外部環境についてもハザードであるとして分析を行った。頻度および影響度ランクを用いた定性評価を行うと共に、リスク低減策の提案と、その適用前後でのリスクを定性的に比較評価し、対策の有効性について言及している。

定量的なリスク分析/アセスメントを試みている例として、DNV によるレポート [137] [138]がいくつか公開されている。Bow-tie モデルを用いて、主に LIB の熱暴走がシステム全体に伝播し火災に至るシナリオの構造を整理すると共に、いくつかの安全対策を提案した上で、Layer of Protection Analysis (LOPA)を活用した定量的リスク分析を実施している。本レポートでは、これら定量的リスク分析フレームの提案が主目的であるため、具体的な数値データ等については概括的な値が多分に用いられており、出力された定量リスクそのものは大きな物理的意味を持たないと考えられるが、BESS に対して定量的リスク分析を実施するフレームワークを示した点では先進的な事例である。

4.2.2.4 大型蓄電池システムのフィジカルリスクアセスメントにおける課題

以上のように、主に LIB を用いた BESS のフィジカルリスクアセスメント事例はいくつか存在するものの、安全規格において求められている”システムレベル”でのリスク分析にアプローチしている研究例は少ないのが現状である。また、システムレベルでのリスクシナリオ特定を行っている Sandia の事例であっても、本質的にはブレインストーミング式のシナリオ特定に留まっており、現代工学システムとしての特徴である”複雑性”によってリスクシナリオの見落としが生じうる点が改善されるものではない。また、定量的リスク分析フレームを示した DNV の事例について、本フレームはシステム構成要素の独立性を仮定した古典的な手法を適用するに留まっており、複雑な現象を伴うリスクシナリオやシステム間相互作用により増幅し得るリスクを適切に分析・評価する手法としては不十分である。

そこで本研究では、こうしたシステムレベルのリスクシナリオのリスクを適切に分析・評価しうる手法の 1 つとして、システム構成要素間の物理的な繋がりを考慮したシステムレベルでのモデル化が可能な Physics model を活用した MBRA の適用が有用であると考えた。ここでは、BESS におけるコンテナを構成する複数個の LIB が直線的に並べられた蓄電池モジュールにおけるシステムレベルのリスクシナリオを対象とし、当該リスクシナリオの発生頻度の定量分析に対して MBRA を適用した事例について述べる。

4.3 モデルベースリスク分析の適用

本研究では、BESS におけるシステムレベルのリスクシナリオの一例として、熱暴走伝播シナリオに着目し、MBRA を適用することで、当該シナリオの頻度解析に関連する検討を実施した。ここでの熱暴走伝播シナリオとは、LIB モジュールにおけるあるセルが何らかの原因で熱暴走し、それが隣接セルにも伝播し、最終的にモジュール全体が熱暴走・火災に至るシナリオである。ここでは、当該シナリオの発生頻度算出過程において必要となる、熱暴走伝播率(あるセルで生じた熱暴走が、隣接セルの熱暴走を引き起こす確率)、および発生頻度解析に MBRA を適用した事例について述べる。

4.3.1 リチウムイオン電池モジュールモデルの構築

リチウムイオン電池モジュールモデルを構築するにあたっては、リチウムイオン電池およびモジュールにおいて生じる物理現象について予め整理する必要がある。次項では特に重要な現象として LIB の熱暴走現象について整理した上で、リチウムイオン電池モジュールモデルを構築した。

4.3.1.1 リチウムイオン電池における熱暴走現象

LIB は小型化しやすいと共に高性能であるという利点から、PC やスマートフォンなどの小型家電や、電気自動車のバッテリーなど、身の回りの様々な製品に用いられている。しかし、過酷な使用環境において劣化が進みやすいことや、可燃性電解液を用いていることから

特定の条件下で発火・熱暴走に至る可能性がある点が課題である。近年はこうした課題の解決を目指し、高性能かつ高安全性の電気の開発研究も盛んに行われている一方で、現行の蓄電池として多量の LIB が市場および我々の生活に既に浸透しているのは周知の事実である。

本研究では、LIB における代表的な不安全事故として、LIB の発火・熱暴走に着目している。LIB には可燃性の電解液溶媒として、非極性溶媒であるエチルカーボネート(EC)やジメチルカーボネート(DMC)などが用いられることが多く、何らかの原因で発火する可能性がある。LIB の熱暴走現象、および安全性技術に関しては、これまで公開・非公開に関わらず、膨大な量の検討がなされている。一般に公開されている膨大な量の研究論文については、それらをまとめた様々なレビュー論文が既に公開されており、熱暴走現象のメカニズムの観点 [139][140][141]や、安全対策措置の観点 [142][143]、LIB の安全性試験の観点 [144]、当該分野の研究論文におけるトレンドの観点 [145]など、複数の観点から整理されている。非公開情報に関しても、LIB メーカーや LIB の安全性試験を実施する機関等が膨大な試験情報を保有していることが予想される。

LIB の熱暴走メカニズムについて、概要を述べる。LIB を熱暴走に至らしめる重要な現象として、内部短絡がある。内部短絡とは、通常はセパレータによって接触していない電池内部の正極と負極が何らかの原因で接触し、正規の回路とは別の、より電流抵抗の小さい新たな回路が形成することを言う。これにより、内部短絡回路に過剰に電流が流れることで顕著な発熱が生じ、電池全体の温度が上昇して熱暴走に至る。LIB 内で内部短絡が生じる要因には大きく分けて①機械的要因、②電気的要因、③熱的要因の3種類がある。これらの関係を示した概要図を図 XX に示す。①機械的要因としては、LIB に対して強い外部衝撃が加わることで、突起物が突き刺さることなどが挙げられ、これにより LIB 内の正極側と負極側を分離する役割を持つセパレータが変形または破損し内部短絡に至る。②電気的要因としては、LIB 内への過充電や過放電などが挙げられ、適正な充放電領域外での充放電が行われた際に電極周辺に生じやすい副生成物固体(デンドライト)が成長し、セパレータを突き破ることで内部短絡に至る。③熱的要因としては、LIB に対する外部からの加熱や内部での異常発熱などが挙げられ、セパレータの融解温度以上の温度上昇と共にセパレータが融解することで内部短絡に至る。内部短絡が発生すると、内部短絡抵抗に流れる電流により生じるジュール熱によって LIB 全体が過熱される。その後、ある温度まで到達すると、LIB を構成する各部材(正極活物質・負極活物質・セパレータ・電解液など)や、LIB の継続使用によって既に生じている副生成物(負極固体電解質界面層など)の分解反応によって生じる更なる発熱によって温度上昇が加速し、熱暴走に至る(図 4.2、図 4.3)。また、これらの分解反応によって可燃性ガスが生成し、これらに着火した場合は、LIB からの噴出火炎を形成する場合もある。

4.3.1.2 リチウムイオン電池モジュールにおける熱暴走伝播現象

LIB を複数個隣接して構成されているモジュール内のある LIB が熱暴走に至った場合、その熱暴走によって隣接 LIB が過熱され、隣接 LIB も熱暴走に至る可能性がある。このよ

うにして、ある LIB で生じた熱暴走が隣接 LIB の熱暴走を次々と誘発していく現象を、熱暴走伝播現象という。

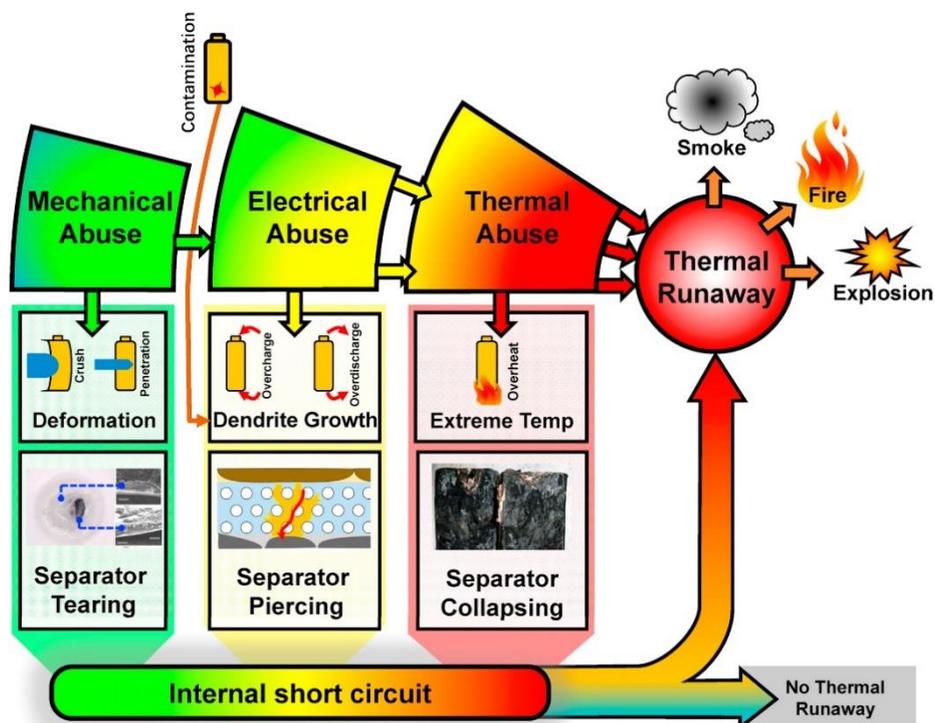


図 4.2 熱暴走の要因と内部短絡との関係 [139]

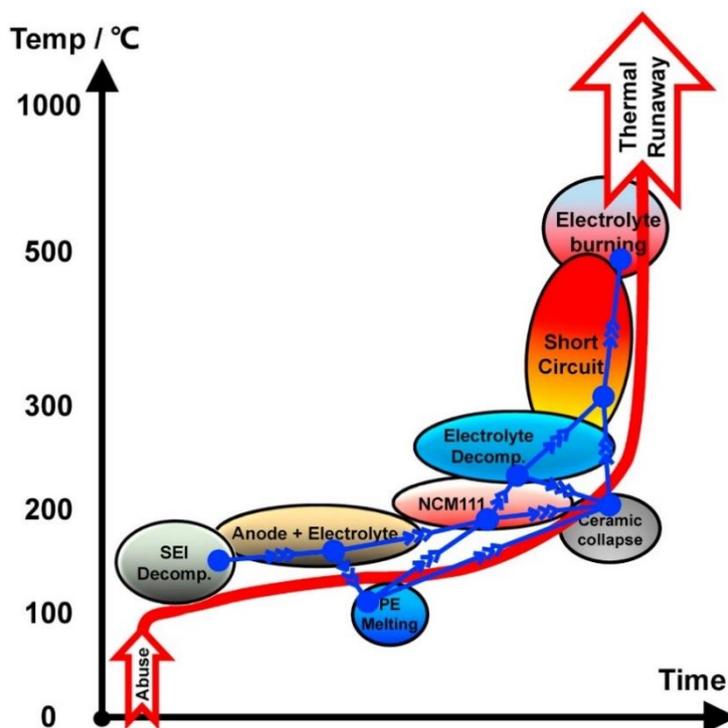


図 4.3 LIB の熱暴走メカニズム [139]

4.3.1.3 Physics model の構築

前項の整理を踏まえて、リチウムイオン電池モジュールモデルの Physics model を構築した。本研究では、リチウムイオン電池モジュールとして、図 4.4 に示すように、角形のリチウムイオン電池を複数隣接させて構成されるものを想定している。

モデル化にあたっては、モジュールを構成する構成要素(単一セル)とその関係性を重視する観点から、①単一セルにおける物理現象の定式化を基にモデル化した上で、②単一セル間の関係性における物理現象の定式化を基にモデル化し、③それらを組み合わせてモジュールモデルを構築する、という流れでモデル化を行った。

ここで、実際の BESS に用いられる LIB やモジュールの通常使用時に生じる物理現象、および熱暴走発生時の物理現象においては、複数の様々な物理領域(熱・電気・機械・制御など)が関わりと考えられる。実際のシステムに対してリスク分析を実施する際には、こうした複数の物理領域についても同時に取り扱う必要があると考えられるが、本研究では MBRA 適用の初期検討として実施する観点から、各物理領域の中でも特に重要である電気および熱の物理領域を選定してモデル構築を行うこととした。使用した物理方程式は、主に文献 [146]を参考にした。

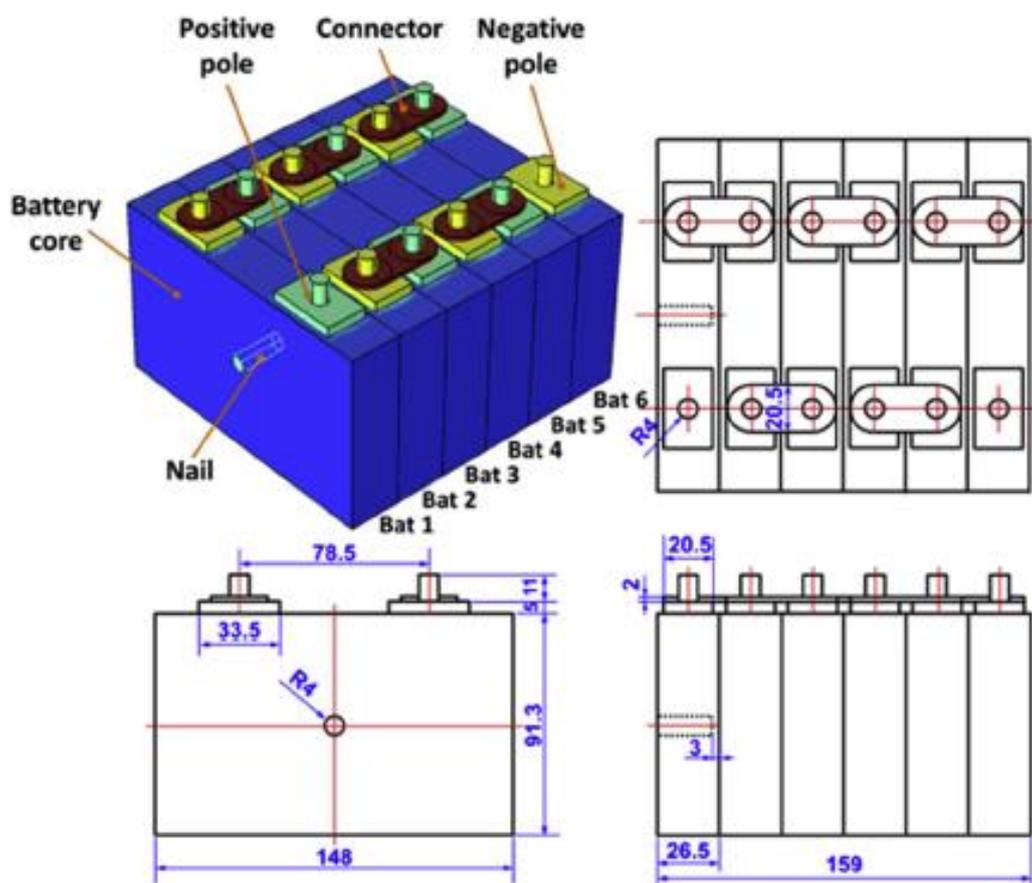


図 4.4 LIB モジュールの概観

①単一セルのモデル化

(1)電氣的現象

LIB を含む多くの電池に関する物理モデルには、その詳細度によっていくつかの種類があるが、本研究ではのちにシステムレベルでの分析を実施する際の過剰な計算負荷を避ける観点から、簡易的な等価回路モデルを採用した。本研究で取り扱う LIB にて想定する等価回路モデルを図 4.5 に示す。等価回路中では、Ohm の法則および Kirchhoff の法則が成り立つ。図中の V_{OC} 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_{IR} 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。また、本検討では熱暴走発生時の温度上昇を模擬するため、 R_{ISC} で表される内部短絡抵抗について、 V_{OC} と並列接続する形で等価回路を組むこととした。

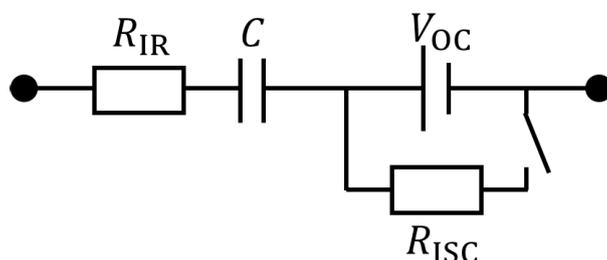


図 4.5 等価回路モデル

(2)熱的現象

単一セルに関する熱収支式を立式することで定式化した。

ある単一セルの温度変化は、セル内部で単位時間あたりに生じる発熱量 $Q_{gen}(t)$ と、セル外部との熱のやり取り $Q_{trans}(t)$ で決まる。そこで、単一セルの温度変化は、セル質量 M およびセル熱容量 C_p を用いて、以下の式で表される。

$$\frac{dT(t)}{dt} = \frac{Q_{gen}(t) + Q_{trans}(t)}{MC_p}$$

セル熱暴走時において、 $Q_{gen}(t)$ はセルが保有している内部抵抗によるジュール熱、熱暴走に伴う化学反応に由来する発熱、熱暴走時に形成される内部短絡抵抗に由来するジュール熱によって決まる。

$$Q_{gen}(t) = Q_{IR}(t) + Q_{chem}(t) + Q_{ISC}(t)$$

$Q_{IR}(t)$ および $Q_{ISC}(t)$ については、各抵抗を流れる電流値と抵抗値から算出することができる。化学反応に由来する発熱 $Q_{chem}(t)$ については、2 つの算出方法がある。1 つは、電極等

の各部材ごとの発熱量を求めて総和を取る方法である。これは、各部材に対する示差走査熱量測定データなどから算出することが可能である。もう1つは、単一セルを丸ごと試料として断熱型暴走反応熱量計による熱量測定を行い、見かけの発熱量を取得する方法である。本研究では、モデルの複雑化を避ける観点から、後者を選択した。このとき、単位時間当たりの発熱量は以下の式で表される。

$$Q_{\text{chem}}(t) = \Delta H_{\text{chem}} \frac{dc}{dt}$$

$$\frac{dc}{dt} = \begin{cases} \frac{MC_p}{\Delta H_{\text{chem}}} A \left(\frac{T}{T_{\text{ref}}} \right)^b & (T_{\text{chem}} < T \leq T_{\text{TR}}) \\ C_{\text{chem}} & (T > T_{\text{TR}}) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases}$$

ここで、 $T_{\text{ref}} = 260$ [°C]は規格化温度、 $T_{\text{chem}} = 140$ [°C]は分解開始温度、 $T_{\text{TR}} = 260$ [°C]は熱暴走開始温度である。A,bは熱量測定の結果に対してフィッティングをかけた際の係数であり、文献 [146]においては $A=0.92$ [s⁻¹], $b=28.5$ [-]である。 ΔH_{chem} はセルにおける総反応エンタルピー、 $C_{\text{chem}} = 1/12$ [s]は反応速度定数である [146]。

②単一セル間の関係性のモデル化

(1)電気的現象

単一セルと同様に、セル間においても Ohm の法則および Kirchhoff の法則が成り立つ。モジュールの接続方式には、直列および並列のいずれもあり得る。ちなみに、実システムにおいて直並列の接続方式のどちらが採用されるかは、システムの導入目的に合わせて、モジュールの出力や容量の観点から定まる。

(2)熱的現象

セル外部との熱のやり取り $Q_{\text{trans}}(t)$ は、熱移動3形態であるところの、熱伝導によるもの $Q_{\text{cond}}(t)$ 、熱伝達によるもの $Q_{\text{conv}}(t)$ 、熱放射 $Q_{\text{rad}}(t)$ によるものによって決まる。

$$Q_{\text{trans}}(t) = Q_{\text{cond}}(t) + Q_{\text{conv}}(t) + Q_{\text{rad}}(t)$$

熱伝導 $Q_{\text{cond}}(t)$ はセル同士の熱伝導を表し、セル同士の接触面積を S_{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。

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

熱伝達 $Q_{conv}(t)$ 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 S_{air} 、空気の温度を T_{∞} とすると、次式のように表される。

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

なお、本検討では空気の温度 T_{∞} は 25°C で一定としている。

熱放射 $Q_{rad}(t)$ 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。

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

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。

③モジュールモデル構築

以上により構築された①単一セルモデルと②セル間の関係性モデルを組み合わせることで、LIB モジュールモデルを構築した(図 4.6)。

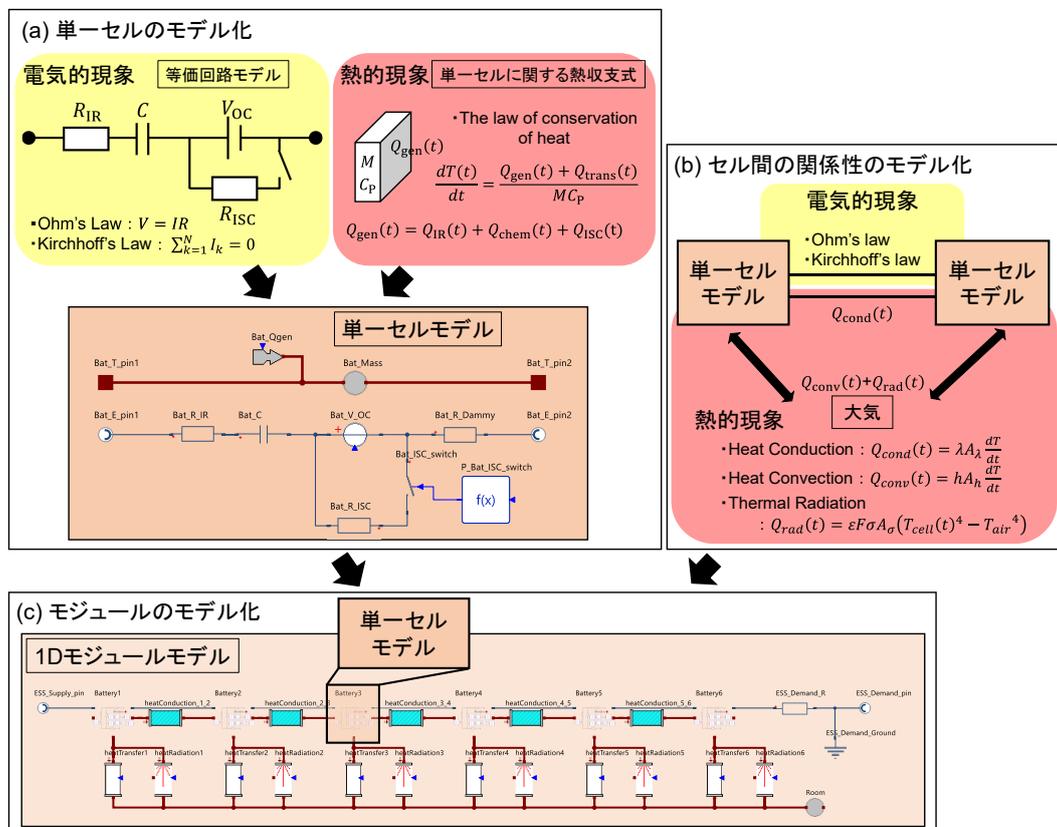


図 4.6 本研究における LIB モジュールモデルの概観

4.3.1.4 モデル妥当性検証

構築した Physics model の妥当性検証として、文献 [146]において LIB モジュールを用いて実施された熱暴走伝播現象の観測実験を参照し、熱暴走伝播シナリオ発生時の各セルの温度挙動の実測結果と、Physics model を用いた予測結果を比較検証した。本実験では、モジュールを構成する 6 個のセル(図 4.7)の内、最も端にあるセル(1st)を釘刺しにより強制的に内部短絡・熱暴走させ、隣接セルに次々と熱暴走が伝播した際の各セルの温度挙動を測定している。

Physics model から各セルの温度挙動を予測する際の入力データの一覧を表 4.1 に示す。基本的には文献 [146]の実験条件に揃うように設定した。また、SOC-VOC 曲線(図 4.8)についても、文献を採用して設定した。

妥当性検証の結果を図 4.9 に示す。図の上部(a)が実験による実測値、下部(b)が Physics model を用いて得られた計算値を示している。両者を比較すると、図中の①発熱速度を表す温度上昇曲線の傾き、図中の②最高到達温度を表す温度曲線の最大値、および図中の③熱暴走開始時間(あるセルが熱暴走に至ってから隣接セルが熱暴走に至るまでの時間)について、それぞれ概ね一致していることがわかる。したがって、6 個のセルを用いた LIB モジュールの Physics model は、同モジュールの温度挙動の予測について、妥当な結果を与えることが示された。

※モジュール構造イメージ

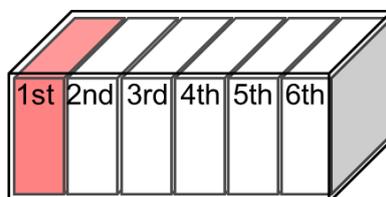


図 4.7 LIB モジュールモデル構造のイメージ

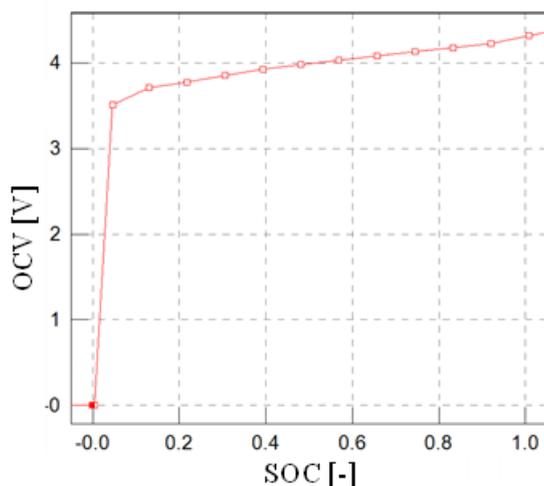


図 4.8 LIB の SOC-OCV 曲線 [147]

表 4.1 計算条件(文献値 [146]を参考に設定)

条件	値
各セルの初期温度 T_i	25°C
周辺空気温度 T_∞	25°C (一定)
セル体積 V	$3.58 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ (148 mm×91.3 mm×26.5 mm)
セル重量 M	0.72 kg
充電容量 C	27 Ah
比熱容量 C_p	$1100 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$
内部抵抗 R	0.60Ω
内部短絡抵抗 R_{ISC}	0.001Ω
総分解熱 ΔH	351.4 kJ kg^{-1}
セル間の熱伝導度 λ	$0.122 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$
セル間の厚さ δ	2 mm
空気との熱伝達率 h	$20 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$
ステファン・ボルツマン定数 σ	$5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$

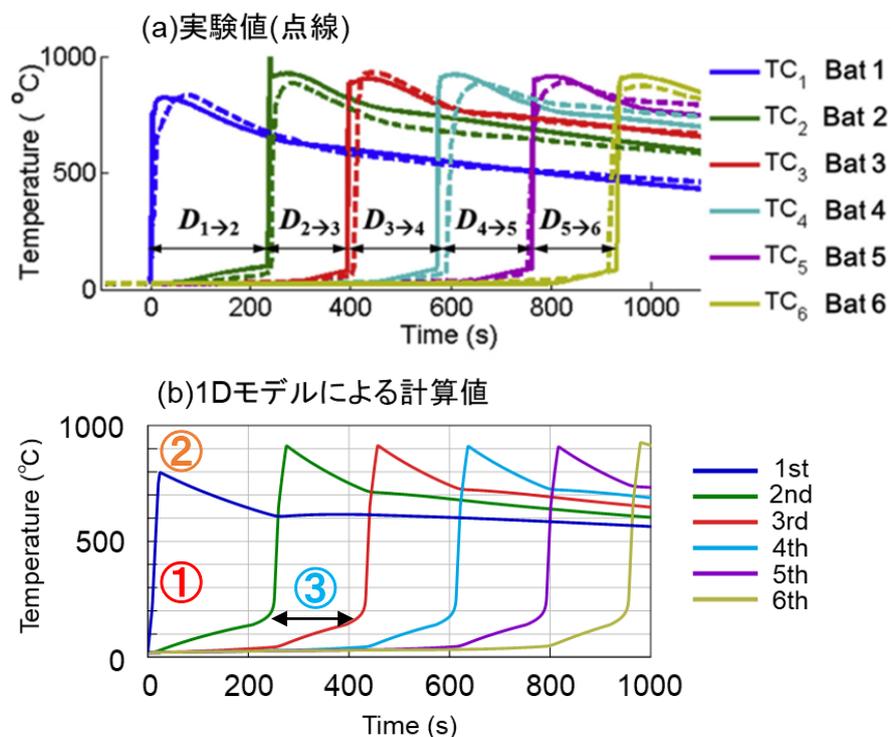


図 4.9 熱暴走伝播時の各セルの温度挙動：(a)実験値(文献値) [146]、(b)Physics model による予測値

図 4.9 の結果は、ある特定の LIB モジュールを対象にした結果であるから、①単一セルモデルおよび②セル間の関係性モデルを組み替えたモデルや、セルの個数を増加させて拡張したモデルについての妥当性については言及できていない。

そこで、モデルを拡張した際の妥当性についても示すため、図 4.6 のモデルを拡張したモデルを構築した。セルの数を 10 個とし、熱・電氣的接続方式をそれぞれ変更した、10 個のセルが 3 次元的に一列に並んだモジュールモデルを構築した。接続方式のバリエーションとしては、(1)熱的接続のみ、(2)熱・電氣的接続(保持状態)、(3)熱・電氣的接続(放電状態)の 3 方式、さらに電氣的接続について(A)直列、(B)並列のそれぞれ 2 方式の、計 5 方式を想定した。これらの各方式のモデルを用いて各セルの温度挙動を予測した。当該モジュール(セル 10 個のモジュール)についての直接的な実験データは存在しないことから、直並列接続などの接続方式を変更した際の温度挙動変化の傾向を再現可能かどうかによって、妥当性を確認することとした。

モジュール上流側(1st)のセルが内部短絡・熱暴走し、下流側の LIB に熱暴走が伝播した際の各 LIB の温度挙動を算出した結果を図 4.10 および図 4.11 に示す。丸数字は上流側から何個目に位置する LIB であるかを意味し、各 LIB 温度が急上昇する点を熱暴走発生(伝播)と見なすこととする。

(1)と(2-A)の比較では、下流側の LIB ほど熱暴走伝播が遅いことがわかる。これは、各 LIB 内部短絡時の電氣的相互作用が取り込まれた結果である。(2-A)と(3-A)、および(2-B)と(3-B)の比較では、保持中よりも放電中に熱暴走が生じた方が熱暴走伝播が早いことがわかる。これは、BESS の放電中に生じる熱暴走のリスクが保持中のそれよりも大きいことを示唆する。また、(2-A)と(2-B)の温度挙動はほぼ等しい一方で、(3-A)と(3-B)の比較では(3-B)の方が熱暴走伝播が早いことがわかる。これは、並列接続の場合、先に内部短絡が発生した上流側の LIB に対して、下流側の LIB から生じる電流が流れ込む回路の存在により熱暴走伝播が早期化することで、並列接続モジュールの熱暴走リスクが直列接続モジュールのそれよりも大きいことを示唆する。

以上の結果は、直並列の接続方式を変更した複数 LIB を用いた試験 [148]で得られた熱暴走伝播が加速・減速する傾向と一致しており、本モデルは複数 LIB モジュールにおける熱暴走伝播現象における温度挙動を予測可能なモデルであると考えられる。

したがって、本 Physics model を構成している各部を組み替え、電氣的接続方式や LIB 個数等を変更したモジュールモデルでも、熱暴走伝播シナリオにおける温度挙動の予測が可能であると考えられる。

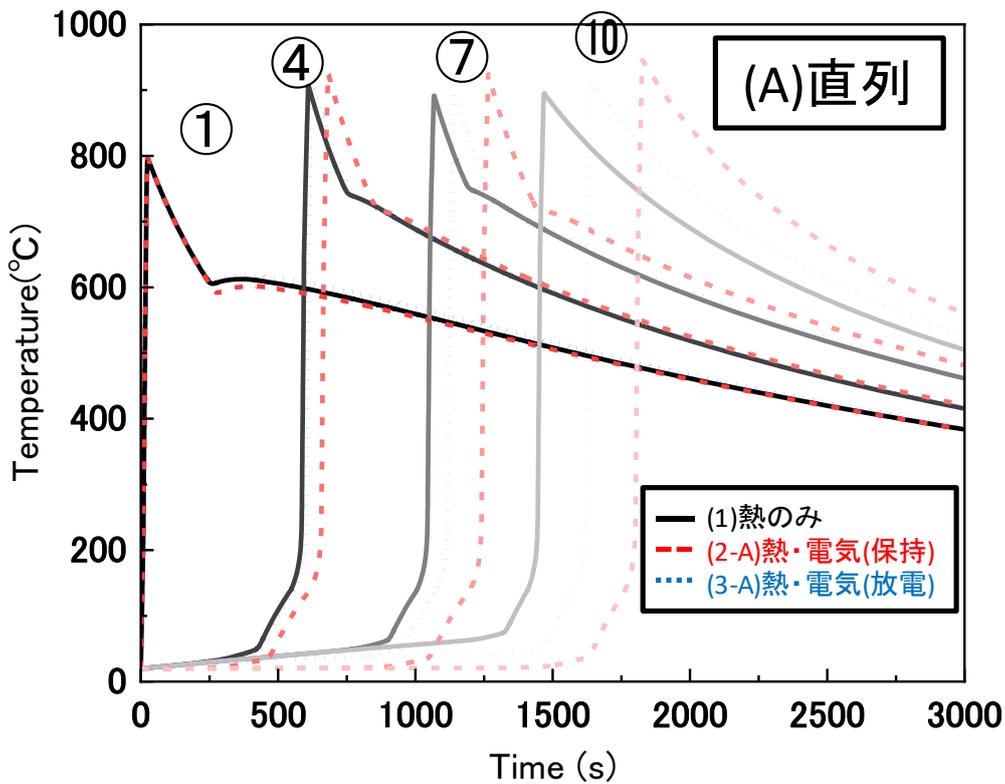


図 4.10 暴走時の各 LIB の温度挙動予測結果：(A)直列

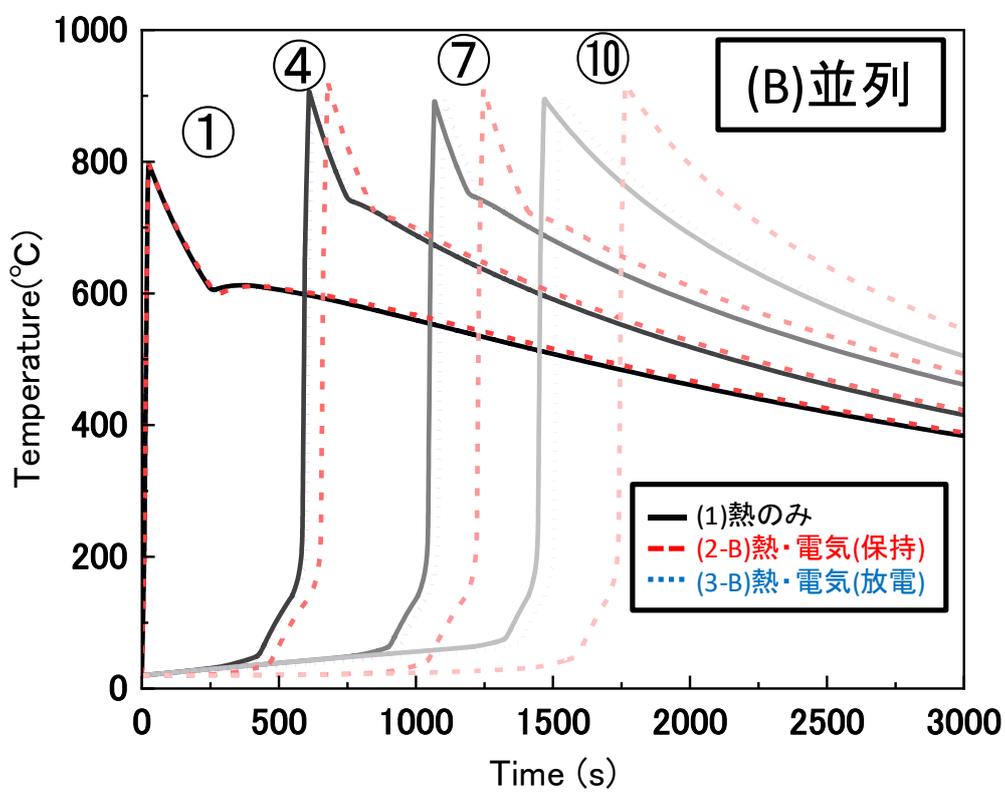


図 4.11 暴走時の各 LIB の温度挙動予測結果：(B)並列

4.3.2 熱暴走伝播シナリオの頻度解析

ここでは、前項で構築した Physics model を活用して、熱暴走伝播シナリオの発生頻度解析を実施した。当該シナリオの発生頻度を算出するためには、初期事象である「あるセルにおける熱暴走の発生頻度」および「熱暴走伝播率(あるセルで生じた熱暴走が、隣接セルの熱暴走を引き起こす確率)」の算出手法について述べる。

モジュールに用いられるセルは、セルごとに内部抵抗値や熱暴走閾値温度が異なる可能性や、周辺環境の温度などが異なる様々な条件下で使用される可能性がある。そこで本手法では、実際のモジュールにおいて変動し得るパラメータに対してモンテカルロシミュレーション(Monte Carlo Simulation)を用いて、各パラメータのばらつきを考慮した熱暴走伝播率の算出を試みた。以下に算出手順を示す。

- (1) MCS の入力変数として扱うモジュールモデル内のパラメータを特定する。本検討では、SimulationX®のための複合解析自動化・最適化ツールである OptiY® v4.6 の感度解析機能として実装されている Sobol'法を用いて、入力変数のばらつきに起因するモデルの出力(各セルの最高到達温度と定義)の分散に対する寄与度を指標として、出力に主要な影響を与えるパラメータを特定した [149]。その結果、各セルの最高到達温度に対して大きな影響を与える入力変数として各セルの「初期充電率(SOC)」「熱暴走閾値温度」「断熱材熱伝導率」「セル内部発熱がセル温度上昇に寄与する割合」が特定された。
- (2) (1)で特定された入力変数に対して、その確率密度分布を定義する。本検討では、各パラメータに対して一様分布を仮定した。ただし、SOC の初期状態は常に最大(100%)とした。
- (3) 各分布に対して乱数発生し、過渡解析の初期条件をランダムに与えることで MCS を実施する。本検討では、モジュール内のあるセルの熱暴走発生を初期事象とした条件下での過渡解析を多数繰り返し、出力変数を得た。各計算ケースではモジュールが 5000 秒間放電する運用シナリオを対象に、3000 ケース分の過渡解析を実施した。

出力変数のヒストグラムを生成し、条件を満たす計算ケース数の割合から各確率を算出する。本検討では、出力変数である各セルの最高到達温度についてヒストグラムを生成し、各セルの熱暴走発生率および熱暴走伝播率を取得した。ヒストグラムの例を図 4.12 に示す。図内のヒストグラムは、横軸が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数の割合を表している。入力変数の分布を考慮することにより、各セルの最高到達温度についても分布が生じ、熱暴走に至る場合と至らない場合がある。MCS の結果得られた各セルの熱暴走発生率および熱暴走伝播率の一部を表 4.2 に示す。熱暴走発生率とは、計算した全ケース数のうち、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意味する。すなわち、各セルの熱暴走発生率は、図 4.12 に示されたヒストグラムの全領域面積に対する、桃色の領域の面積の割合に相当する。また、熱暴走伝播率とは、該当セルの隣接セルが

熱暴走したケース数のうち、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意味する。熱暴走伝播率は、セル間に挿入される各断熱材の不作動確率(Probability Failure on Demand: PFD)であると解釈することができる。これは、セル間の相互作用に影響を与える断熱材の特性のばらつきを考慮に入れた物理的に妥当なモデルに基づいて得られた値であり、BESSに関する既往の定量的リスク分析事例 [138]にて与えられた PFD の値と比較して、より妥当性の高い確率的情報を与えるものである。最後に、全ての熱暴走伝播率の積および初期事象発生頻度から熱暴走伝播シナリオの発生頻度を取得した。

各セルの熱暴走発生を初期事象とした場合について同様の検討を実施し、初期事象発生頻度の値を仮定(F[y])することで、熱暴走シナリオの発生頻度の算出が可能となる。その総和として、各セルの熱暴走発生を初期事象としたモジュールにおける熱暴走シナリオの発生頻度を取得した結果、 $2.21 \times F[y]$ となった。これは、同モデルに対して前述の定量的リスク分析事例における手法を準用して得られた値(F[y])に比較して2倍程度大きな値となったことから、既往手法では熱暴走伝播シナリオの発生頻度を過小評価している可能性があることがわかった。

表 4.2 各セルの熱暴走発生を初期事象とした場合の結果(一部)

LIB No.	セル 1 の熱暴走		セル 5 の熱暴走	
	熱暴走発生率	熱暴走伝播率	熱暴走発生率	熱暴走伝播率
1	0.741	-	0.458	0.696
2	0.101	0.137	0.657	0.950
3	0.091	0.895	0.692	0.969
4	0.090	0.996	0.714	0.970
5	0.089	0.982	0.736	-
6	0.087	0.981	0.716	0.972
7	0.083	0.958	0.693	0.968
8	0.079	0.952	0.664	0.959
9	0.064	0.830	0.619	0.931
10	0.013	0.209	0.397	0.642
積	-	0.018		0.335

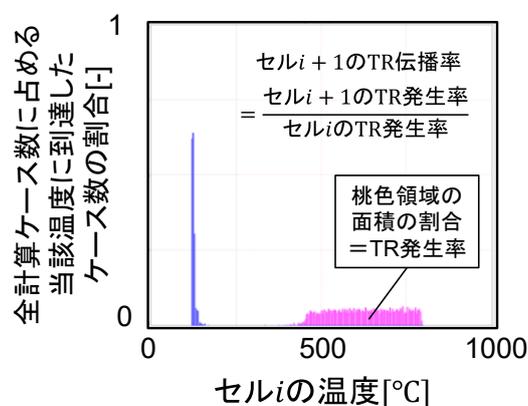


図 4.12 ヒストグラムの例

4.4 まとめ

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。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ことで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 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考察

5.1 概要

本章では、第2章にて定義した本研究におけるMBRAを、第3章および第4章にて「水素ステーションにおける水素充填システム」および「大型蓄電池システムにおけるリチウムイオン電池モジュール」に適用実施して得られた結果をもとに、エネルギーシステムのリスク分析にMBRAを活用することによってリスク分析が高度化される側面としての利点について述べると共に、MBRAを活用することによる弱点および今後の研究課題について整理した。

5.2 MBRAを活用する利点

第3章および第4章では、「水素ステーションにおける水素充填システム」および「大型蓄電池システムにおけるリチウムイオン電池モジュール」それぞれに対してMBRAを適用した結果、各システムのリスク分析のある側面が高度化された。

第3章では、水素ステーションに対する従来の定量的リスク分析における、「シナリオの進展と共に変化するシステムの状況を反映しない静的な分析により保守側の結果を与えることで、当該システムのリスクを過大評価し得る」という課題に対して、「水素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水素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で、リスクの過大評価を防ぐことができる可能性がある点」でリスク分析が高度化された。

第4章では、BESSおよびBESSにおけるLIBモジュールに対する既往の定量的リスク分析における、「LIBモジュールシステムの粗いモデル化により、リスク分析において事象伝播のしやすさが考慮されないことで、当該システムのリスクを過小評価し得る」という課題に対して、「LIB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を実施することで、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」でリスク分析が高度化された。

これらの結論を踏まえて、エネルギーシステムのリスク分析においてMBRAを活用することの利点について、いくつかの側面から整理した。

■動的過渡解析によるシナリオの時間進展系の定量分析

第3章では、水素ステーションの水素充填システムを対象として、水素漏洩シナリオに伴うプロセス内の水素の動的振る舞いを考慮した影響度解析およびリスク分析を実施した事例について述べた。本検討により得られたMBRAを活用することの主要な利点は、Physics modelを活用した動的過渡解析によって、水素漏洩シナリオの時間進展に関する情報が定量化され、シナリオの質的情報を付与した上で定量的なリスクを算出できた点にある。ここで

の「定量分析」とは、精度の高い定量的リスクを算出した、というよりは、「システムの動的な振る舞いの定量的な予測結果を使いながら、何らかのリスクを分析した」という意味合いである。今回のケースでは、シナリオの質的情報を付与しない定量的リスク分析結果との差異は大きくない結果が得られたが、これはシナリオの時間進展に関する情報をリスクに変換する際の処理が粗いことを原因とするものであり、結果として得られたリスク情報の質そのものは変化していると考えられる。こうしたシナリオの時間進展系に関する質的情報を付与することにより、第1章で述べたシステム複雑性の特徴の②dynamicに関する要素を取り込んだ分析が可能になる。

ちなみに、ここでの検討とは別に、Dynamic risk analysis/assessment (DRA) [150]という概念が存在する。DRAでは、常に動的に移り変わる対象システムの条件や環境条件などを考慮しながら、対象システムへのリスクアセスメントを繰り返し実施することで、リスクアセスメントの質的向上を図ることが意図されている。しかし、本研究における「動的」とは、あくまでシステムの動的な振る舞いのことを意味しており、DRAにおける「dynamic(動的)」とは意味が異なる。

■システム内の事象伝播に伴い伝播する不確かさの可視化

第4章では、大型蓄電池システムにおけるリチウムイオン電池モジュールを対象として、熱暴走伝播シナリオに伴う各セルの温度挙動に基づいた頻度解析を実施した事例について述べた。本検討により得られたMBRAを活用することの主要な利点は、Physics modelに対してモンテカルロシミュレーションを組み合わせることによって、Physics modelに対して与えた初期の入力変数の不確かさが、当該モデルでの事象伝播を経て、出力変数の不確かさとして得ることができる点である。これにより、初期に存在した各パラメータの不確かさが、システム内に存在する相互作用を経由した事象進展により、どのように増幅(または減衰)していくのかを可視化することができる。こうした不確かさの増幅や減衰の程度を可視化することにより、第1章で述べたシステム複雑性の特徴の④nonlinearに関する要素を取り込んだ分析が可能になる。

■システムの設計上流から設計下流および運用中まで含めた一貫したモデルの活用によるシステムの高安全化

MBRAにおいて用いられているモデルは、MBSEおよびMBDの文脈で用いられてきたモデルであることから、そのシステム設計開発プロセスの上流から下流まで、本モデルを改変し、使用し続けながらより良いシステム設計を行っていくことが想定される。ここで、一般的なリスク分析における課題として、設計上流の設計自由度が高い段階においては、リスク分析に利用できる情報が少なく有効なリスク分析の実施が難しく、設計下流の設計の詳細が定まった段階においては、リスク分析に利用できる情報は多いがシステムの設計自由度が低下している、というトレードオフの関係がある。MBRAは当該課題の解決に向けて

有用である。それは、設計上流から設計下流まで、可変性の高いモデルを活用して設計と同時にリスク分析を実施することで、設計の中に都度リスク情報を取り込むことができる可能性があるからである。また、設計下流までのみならず、システムの運用中もそのモデルを保存しておくことで、システムの変更管理の必要が生じた場合には、保存しておいたモデルを活用して変更を加えてリスク分析を行うことで、システム変更管理時のリスク分析にも活用することができる。これにより、システムの設計上流からシステムの運用中まで含めた一貫したモデルの活用によるシステムの高安全化に資する可能性がある。

以上のような観点から、エネルギーシステムのリスク分析において MBRA を活用することで、システムにおいて生じる物理的かつ動的現象に基づく質的情報を付与することが可能となり、従来の定量的リスク分析におけるエネルギーシステムのリスクに関する過大評価および過小評価を防止することができる可能性がある点で、エネルギーシステムのリスク分析が高度化されたと考えられる。

5.3 MBRA の弱点および今後の研究課題

前項では MBRA を活用する意義について述べた。一方で、MBRA には弱点を含め、適用上の注意点や課題が存在する。それらの多くは、Physics model を活用することそのものにより生じるものである。したがって、ここでは Physics model の限界について整理することで、本研究における MBRA の適用範囲および限界を示した。また、本研究における MBRA の今後の研究課題について、リスク分析/アセスメントの各手順項目に沿って整理した。

■ Physics model の限界から生じる弱点

- ・ 妥当な Physics model を構築することの難易度が高い点

⇒本研究では、現代工学システムのリスクシナリオの網羅性向上に向けて、システムの複雑性に由来するリスクシナリオに対して、人間の思考のみに頼らないアプローチ方法の1つとして Physics model の活用を位置づけた。こうしたリスクシナリオは、ある特定の分野の専門家以外には理解・予測できないほど複雑な、あるいは、そうした専門家が集まった専門家集団ですら理解・予測が困難なシステムの振る舞いを呈するシナリオとして存在する可能性があることを既に述べた。このような特徴のシナリオが存在する可能性のあるシステムをモデル化する際には、Physics model の『『個々の構成要素のモデル』と『構成要素どうしを結ぶ関係性』をモデル化し、それらを組み合わせることによってシステム全体をモデル化する』という考え方に基づいた。ここで、当該モデルの妥当性(当該モデルによる対象システムにおける現象の予測が実現象に見合う)を示すためには、①まず『個々の構成要素のモデル』の妥当性を示し、②次にそれら『構成要素どうしを結ぶ関係性』によって組み合わせた、ある特定のモデルの妥当性を示し、③最後にそれらを自由に組み替えたモデルの妥当性を示さなければならない。このうち、特に③を適切に行うことは難易度高いと言わざるを

得ない。本研究において例示した水素充填システムの場合、システム構造と現象が比較的単純であるから、各構成要素の数を増加させ、位置を変更したモデルであっても、現象のモデル化の仕方が不変であれば適切な予測を与える可能性は高い。一方で、LIB モジュールの場合、電気・熱・機械・化学反応などの、現象に関わる物理領域が多様であり、同様の考え方が使えないことから、妥当性を示す難易度は上がる。したがって、まずは②の段階まで構築した **Physics model** により取得される情報と、実機による実測される情報との妥当性検証を丁寧に行う必要がある。その上で、左記の観点で妥当性が確認された **Physics model** を適宜組み替えて、異なるシステムモデルを構築し、その振る舞いを予測する場合には、前提条件や取得された情報の取り扱いには特に慎重に行うべきである。

・「システム内の各パラメータの空間的な分布」は取り扱うことができない

⇒本研究における **Physics model**(および **Logic model**)は、システムの構成要素どうしの「繋がり(システム)」に重きが置かれたモデルであり、システム内のある箇所におけるある物理パラメータは、空間的な広がりを持たず、常に同一の値を取ることが前提される(集中定数系)。例えば、第4章の検討で用いた **Physics model** 内の単一セルモデルについて、単一セル内の温度は常にある特定の値のみを取ることが前提されている。実際には単一セル内に空間的に温度分布が存在し、熱暴走が発生する際も局所的な過熱から生じる場合があるが、**Physics model** ではそうしたパラメータの空間的な広がりについては考慮することができない。一方、そうであるからこそ、比較的大規模なシステムを、複雑化しすぎない形で、同一プラットフォーム上でモデル化可能である、という側面もある。

・「システムの3次元的な構造」は取り扱うことができない

⇒前述のパラメータの空間的な広がりが取り扱えないのと同様に、コンポーネントどうしやその「繋がり(システム)」に重きが置かれたモデルにおいては、それぞれのコンポーネントが3次元的にどのような位置関係にあるか、については全く言及しない。例えば、第3章の検討で用いた **Physics model** 内の水素充填システムについて、ある配管と別の配管が、**Physics model** 上の系統的な繋がり観点からは距離が離れているように見える配置であったとしても、現実世界においてはそれらが空間的に近接している可能性はゼロとは言えない。もし空間的に近接している場合は、一方で生じた異常(例：漏洩して着火、ジェット火災発生)が他方へ何らかの影響を与える可能性もあるが、**Physics model** においてはその点についての分析を行うことはできないため、システムの3次元的な構造を取り扱うリスク分析を志向する場合は、その目的に合わせて異なるリスク分析のやり方を検討する必要がある。

・「化学反応そのもの」は取り扱うことができない

⇒**Physics model** を構築する上で用いている **Modelica** 言語による物理モデリング技術の既往研究の観点で、化学反応を **Physics model** 内でモデル化することは現在でも主要な課題と

なっている。化学反応を伴わない機械・流体系などの物理現象についてのモデリングが比較的容易であるのは、本質的に取り扱われる物理パラメータが、運動量・エネルギー・3次元位置(x, y, z)の計5要素だけで済むからである。それに対して化学反応を取り扱うことを考えると、先の5要素を、出現する化学種の数だけ用意しなければならず、その数だけ基礎方程式の数が増加する。そのため、比較的単純な反応であっても取扱う方程式数が爆発的に増加してしまい、化学反応のモデリングは現在でも困難となっている。したがって、システム内で生じる化学反応そのものを捉えて **Physics model** に反映し、それを活用するような RA は不可である。例えば、第4章の検討で用いた **Physics model** における単一セル熱暴走時の化学反応について、これはセル熱暴走に伴う各部材の分解反応そのものを捉えたモデルでは無く、あくまでマクロな熱分析・熱量測定結果を **Physics model** の入力値に用いているのみであり、反応そのものを取り扱っているものではないことに注意が必要である。一方、今回の例のように、反応そのものではなく、反応によって生じる物理パラメータの変化を取得し、それを入力値の形で **Physics model** に反映することで、化学反応をマクロにモデル化して取り込むことは、一定のレベルで可能であると考えられる。

■今後の研究課題

【シナリオ特定における研究課題】

第1章で述べたように、現代工学システムの複雑性に由来する特徴によって、専門家集団であっても発想の及ばない領域におけるシステムの振る舞いを含むリスクシナリオの存在が指摘されている。そして、本来の **MBRA** の活用の狙いは当該課題の解決にあった。しかし、本研究の成果はあくまで当該課題解決に向けた第1歩の初期検討に対応する研究として、位置づけられている。そこで、まずは専門家集団にとっても馴染みのあるリスクシナリオを題材として **MBRA** 活用の利点や弱点について検討した。したがって、今後の研究の方向性として目指すべきは、①第一段階として、本研究の発想を踏襲し、専門家集団にとっても馴染みのあるリスクシナリオを題材として、**Physics model** 活用の可能性を探る研究、②第二段階として、論理的・体系的に複雑性に由来するリスクシナリオを分析することで膨大化するリスクシナリオに対して、**Physics model** 活用の可能性を探る研究、③第三段階として、専門家集団であっても発想の及ばない領域におけるリスクシナリオを引き出すことができるようなモデルを活用したリスクシナリオ特定およびリスク分析の可能性を探る研究である。

【影響度解析・頻度解析・リスク分析における研究課題】

上記3段階のそれぞれの段階において、**Physics model** を活用した影響度解析・頻度解析・リスク分析手法に関する研究や、システム設計開発に関する意思決定に資する情報を引き出す研究などがあり得る。特に、**MBRA** 活用の利点の3点目で述べた、リスク分析の結果をシステム設計に活かしていく概念に関連して、システムの設計指標の1つとしてリスク

を取り込んだ設計、もしくは、リスクを指標としたリスク最適化設計について言及できる可能性がある。

5.4 まとめ

第5章では、第2章にて定義した本研究における MBRA を、「水素ステーションにおける水素充填システム」および「大型蓄電池システムにおけるリチウムイオン電池モジュール」に適用実施して得られた結果から、エネルギーシステムのリスク分析において MBRA を活用することの利点について述べ、MBRA の弱点および今後の研究課題について整理した。

弱点については、主に Physics model の限界に由来するものについて整理し、今後の研究課題としては、第1章で述べた本来の目的である、人間の発想に拠らないリスクシナリオ特定を可能とするモデルの構築およびリスクシナリオ特定・リスク分析技術の開発の必要性について述べた。

第6章 結論

6.1 結言

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リスク分析(**MBRA**)を用い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した。

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。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。既往研究では、**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た。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かった。その理由は、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存在するからであった。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。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1オーダー程度減少することがわかった。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。

第 4 章では、BESS における LIB モジュールシステムを題材とし、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。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ことで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。

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、システム的设计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 点を挙げた。ただし、これらの利点は本研究で対象とした水素充填システムおよび LIB モジュールシステム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、①Physics 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 点が挙げられた。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際には、別の異なる手法を用いて MBRA と相互に補完し合う必要がある。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。

引用文献一覧

1. 日本学術会議 総合工学委員会 工学システムに関する安全・安心・リスク検討分科会, 工学システムに対する社会の安全目標 (2014).
2. ISO31000:2018, Risk management -Guidelines (2018).
3. ISO/IEC Guide 51:2014, Safety aspects — Guidelines for their inclusion in standards (2014).
4. 日本学術会議 総合工学委員会・機械工学委員会 工学システムに関する安全・安心・リスク検討分科会, 工学システムに対する社会安全目標の基本と各分野への適用 (2017).
5. European Commission, Recommendations for National Risk Assessment for Disaster Risk Management in EU, Approaches for identifying, analysing and evaluating risks, Version 0, JRC Science for Policy Report (2019).
6. A.D. Ruijter and F. Guldenmund, The bowtie method: A review, *Safety Science*, 88, 211-218 (2016).
7. CPR 12E ‘Red Book’ Methods for determining and processing probabilities, TNO Committee for the Prevention of Disasters (1997).
8. CPR 14E ‘Yellow Book’ Methods for the calculation of Physical Effects -due to releases of hazardous materials (liquids and gases)-, TNO Committee for the Prevention of Disasters (2005).
9. CPR 16E ‘Green Book’ Methods for the determination of possible damage to people and objects resulting from release of hazardous materials, TNO Committee for the Prevention of Disasters (2005).
10. CPR 18E ‘Purple Book’ Guideline for quantitative risk assessment, TNO Committee for the Prevention of Disasters (2005).
11. The Center for Chemical Process Safety of American Institute of Chemical Engineers, Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis (Second edition), Wiley-Interscience (2000).
12. N.G. Leveson, Engineering a Safer World, System Thinking Applied to Safety, The MIT Press (2017).
13. Department of Energy, National Hydrogen Energy Roadmap (2002) https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/national_h2_roadmap.pdf (Accessed on 12/29/2022).
14. Department of Energy, H2@Scale, <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/h2scale> (Accessed on 12/29/2022)).
15. Department of Energy, H2@Scale: Enabling affordable, reliable, clean, and secure energy across sectors (2019) <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2019/09/f67/fcto-h2-at-scale-handout-2019.pdf> (Accessed on 12/29/2022).
16. California Fuel Cell Partnership, A California Road Map, The Commercialization of Hydrogen Fuel Cell Vehicles (2014).
17. California Energy Commission, Hydrogen Refueling Stations in California (2022) <https://www.energy.ca.gov/data-reports/energy-almanac/zero-emission-vehicle-and-infrastructure-statistics/hydrogen-refueling> (Accessed on 12/29/2022).

18. 新エネルギー・産業技術総合開発機構 編, NEDO 水素エネルギー白書-イチから知る水素社会- (2015).
19. H2 Mobility Fueling Hydrogen, H2 Mobility, <https://h2.live/en/h2mobility> (Accessed on 12/29/2022).
20. Fuel Cell and Hydrogen Joint Undertaking, Fuel Cell and Hydrogen 2 Joint Undertaking, <https://www.fch.europa.eu/news/fuel-cells-and-hydrogen-2-joint-undertaking> (Accessed on 12/29/2022).
21. Leader associates, White Paper: Investing in Hydrogen Fueling Station 2022, Connecting Green Hydrogen Japan 2022 (2022) <https://www.japan.gh2events.com/cghj-whitepaper> (Accessed on 12/29/2022).
22. 新エネルギー・産業技術総合開発機構 北京事務所, 中国における水素・燃料電池の動向 (2022) <https://www.nedo.go.jp/content/100950648.pdf> (2022 年 12 月 29 日閲覧).
23. 経済産業省 資源エネルギー庁, 第 4 次エネルギー基本計画 (2014).
24. 経済産業省 資源エネルギー庁, 第 6 次エネルギー基本計画 (2021).
25. 経済産業省 再生可能エネルギー・水素等関係閣僚会議, 水素基本戦略 (2017).
26. 経済産業省, 第 1 回水素閣僚会議議長声明 (英文)-東京宣言 - (2018) <https://www.meti.go.jp/press/2018/10/20181023011/20181023011-5.pdf> (2022 年 12 月 29 日閲覧).
27. 経済産業省, 第 2 回水素閣僚会議議長声明(英文)-東京宣言実現に向けたグローバル・アクション・アジェンダ- (2019).
28. 経済産業省 水素・燃料電池戦略協議会, 水素・燃料電池戦略ロードマップ～水素社会実現に向けた産学官のアクションプラン～ (2019).
29. 新エネルギー・産業技術総合開発機構, NEDO 燃料電池技術開発ロードマップ-HDV 用燃料電池ロードマップ(解説書)- (2022).
30. 日本水素ステーションネットワーク合同会社, 水素ステーションの現状と課題 (2022) <https://www.hkd.mlit.go.jp/ky/ki/renkei/slo5pa000000ozyf-att/slo5pa000000p02a.pdf> (2022 年 12 月 29 日閲覧).
31. 経済産業省, 2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略 (2021) <https://www.meti.go.jp/press/2021/06/20210618005/20210618005-3.pdf> (2022 年 12 月 29 日閲覧).
32. 経済産業省 資源エネルギー庁 新エネルギーシステム課/水素・燃料電池戦略室, 今後の水素ステーション政策の方向性について (2021).
33. 山本耕市, 大型蓄電システムの概要—国際動向および NITE 評価施設, GS アユサ テクニカルレポート, 14, 1, 1-6 (2017).
34. 三菱総合研究所, 定置用蓄電システム普及拡大検討会第 4 回 定置用蓄電システム普及拡大検討会の結果とりまとめ (2021).
35. DNV, Whitepaper: Energy storage systems in the Asia Pacific region, The opportunities, challenges and business cases (2021).

36. 矢野経済研究所, プレスリリース No.3076, 定置用蓄電池(ESS)世界市場に関する調査を実施(2022年)(2022) https://www.yano.co.jp/press-release/show/press_id/3076 (2022年12月29日閲覧).
37. 富士経済, ESS 定置用二次電池の世界市場を調査 (2021) https://www.fuji-keizai.co.jp/market/detail.html?cid=21094&view_type=2 (2022年12月29日閲覧).
38. 井上彬, 柴田俊和, 南早来変電所大型蓄電システム実証事業について, 電気設備学会誌, 39, 4, 194-198 (2019).
39. 関沼和浩, 西仙台変電所周波数変動対策蓄電池システム実証事業について, 電気設備学会誌 39, 4, 199-202 (2019).
40. 植田喜延, 金山哲也, 加藤信行, 露木和生, 田島健二, 関口智弘, 早川有史, 松本光裕, 南相馬変電所における蓄電池システムを活用した電圧変動抑制実証試験, 電気学会全国大会講演論文集, 6, 295 (2017).
41. 低炭素社会戦略センター, 蓄電池システム—要素技術の構造化に基づく定量的技術シナリオと科学・技術ロードマップ—, LCS-FY2013-PP-03 (2014).
42. 日本工業規格, 電気エネルギー貯蔵システム—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—電気化学的システム, JIS C 4441:2021 (2021).
43. 情報処理推進機構, モデルベースシステムズエンジニアリング導入の手引き (2013) <https://www.ipa.go.jp/files/000033609.pdf> (2022年12月29日閲覧).
44. IT用語辞典 e-Words, UML 【Unified Modeling Language】統一モデリング言語, <https://e-words.jp/w/UML.html> (2022年12月29日閲覧).
45. OMG SysML Home | OMG Systems Modeling Language, <https://www.omgsysml.org/> (Accessed on 12/29/2022).
46. Antoine B. Rauzy and Cecilia Haskins, Foundations for model-based systems engineering and model-based safety assessment, System Engineering, 22, 2, 146-155 (2018).
47. 大畠明, 複合物理領域モデリング, 計測と制御, 53, 4 (2014).
48. The Modelica Association, <https://modelica.org/> (Accessed on 12/29/2022).
49. 八鍬洋次, システムシミュレーションソフト SimulationX, 計測と制御, 53, 4, 339-343 (2014).
50. Rune Fredriksen, Monica Kristiansen, Bjørn Axel Gran, Ketil Stølen, Tom Arthur Opperud, and Theo Dimitrakos, The CORAS Framework for a Model-Based Risk Management Process, Computer Safety, Reliability and Security, 2434 (2002).
51. Walid M. Abdelmoez, Model-based risk assessment, the doctoral dissertation of West Virginia University (2006).
52. Alfredo Garro and Andrea Tundis, A model-based method for system reliability analysis, Proceedings of the 2012 Symposium on Theory of Modeling and Simulation - DEVS Integrative M&S Symposium, 2, 1-8 (2012).

53. 日本工業規格, デイペンダビリティ(総合信頼性)用語, JIS Z 8115:2019 (2019).
54. Bjørn Axel Gran, Rune Fredriksen, and Atoosa P.-J. Thunem, Addressing dependability by applying an approach for model-based risk assessment, *Reliability Engineering & System Safety*, 92, 11, 1492-1502 (2007).
55. Sohag Kabir, An overview of fault tree analysis and its application in model based dependability analysis, *Expert Systems with Applications*, 77, 114-135 (2017).
56. Anjali Joshi, Steven P. Miller, Michael W. Whalen and Mats P. E. Heimdahl, A proposal for model-based safety analysis, 24th Digital Avionics Systems Conference, 2, 13 (2005).
57. Anjali Joshi, Michael W. Whalen and Mats Per Erik Heimdahl. Model-Based Safety Analysis Final Report, National Aeronautics and Space Administration (2005).
58. Hoda Mehrpouyan, Model-based hazard analysis of undesirable environmental and components interaction, the independent (master) thesis of Linköping University (2011).
59. Hoda Mehrpouyan, Peter Bunus, and Tolga Kurtoglu, Model-based hazard analysis of undesirable environmental and components interaction, 2012 IEEE Aerospace Conference, 1-8 (2012).
60. Hoda Mehrpouyan, Peter Bunus, and Tolga Kurtoglu, A framework for model-based safety analysis of complex engineered systems, *Proceedings of Design 2012, the 12th International Design Conference*, 1753-1760 (2012).
61. Akram A. Abdellatif and Florian Holzapfel, Model Based Safety Analysis (MBSA) tool for avionics systems evaluation, 2020 AIAA/IEEE 39th Digital Avionics Systems Conference, 1-5 (2020).
62. 横浜国立大学 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).
63. 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).
64. 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 編, リスク共生学 先端科学技術でつくる暮らしと新たな社会, 丸善 (2018).
65. 横浜国立大学 先端科学高等研究院, 水素ステーションの社会総合リスクアセスメント書 (2019).
66. 高圧ガス保安協会, 水素スタンド関連事故情報, https://www.khk.or.jp/hydrogen/accident_information.html (2022年12月29日閲覧).
67. Jennifer X. Wen, Marta Marono, Pietro Moretto, Ernst-Arndt Reinecke, Pratap Sathiah, Etienne Studer, Elena Vyazmina, and Daniele Melideo, Statistics, lessons learned and recommendations from analysis of HIAD 2.0 database. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47, 38, 17082-17096 (2022).
68. Nel, THE KJØRBO INCIDENT (2019) <https://mb.cision.com/Public/115/2852735/8189422a0b076d6c.pdf> (Accessed on 12/29/2022).
69. Kayo Renato Da Silva Nascimento, Marcelo Hazin Alencar, Management of risks in natural disasters: A systematic review of the literature on NATECH events, *Journal of Loss Prevention in the*

Process Industries, 44, 347-359 (2016).

70. ナシーム ニコラス タレブ, ブラック・スワン(上)不確実性とリスクの本質, ダイヤモンド社 (2009).

71. ナシーム ニコラス タレブ, ブラック・スワン(下)不確実性とリスクの本質, ダイヤモンド社 (2009).

72. 伊里友一朗, 塩田謙人, 河津要, 三宅淳巳, 小森雅浩, 佐藤光一, 高井康之, 二宮貴之, 本格普及期における水素ステーションの包括的フィジカルリスク評価フレームワーク, 第52回安全工学研究発表会講演予稿集, 31-34 (2019).

73. Valerio Cozzani, Gianfilippo Gubinelli, Giacomo Antonioni, Gigliola Spadoni, and Severino Zanelli, The assessment of risk caused by domino effect in quantitative area risk analysis, Journal of Hazardous Materials, A127, 14-30 (2005).

74. Tomoya Suzuki, Kento Shiota, Jo Nakayama, Yu-ichiro Izato, and Atsumi Miyake, Overview of the risk assessments for hydrogen refuelling stations in Japan, Chemical Engineering Transactions, 90, 307-312 (2022).

75. Nees Jan van Eck and Ludo Waltman, Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping, Scientometrics, 84, 523-538 (2010).

76. Norsk Hydro ASA and DNV, Risk acceptance criteria for Hydrogen Refuelling Stations, European Integrated Hydrogen Project (2003).

77. A.J.C.M. Matthijsen and E.S. Kooi, Safety distances for hydrogen filling stations, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 19, 719-723 (2006).

78. Jeffrey LaChance, Risk-informed separation distances for hydrogen refueling stations, International Journal of Hydrogen Energy, 34, 5838-5845 (2009).

79. Jeffrey LaChance, Risk-informed separation distances for hydrogen refueling stations, International Journal of Hydrogen Energy, 34, 5838-5845 (2009).

80. Shigeki Kikukawa, Fuyume Yamaga, Hirotada Mitsuhashi, Risk assessment of Hydrogen fueling stations for 70 MPa FCVs, International Journal of Hydrogen Energy, 33, 7129-7136 (2008).

81. Shigeki Kikukawa, Hirotada Mitsuhashi, Atsumi Miyake, Risk assessment for liquid hydrogen fueling stations, International Journal of Hydrogen Energy, 34, 1135-1141 (2009).

82. Shigeki Kikukawa, Consequence analysis and safety verification of hydrogen fueling stations using CFD simulation, 33, 1425-1434 (2008).

83. Koos Ham, Alessia Marangon, Prankul Middha, Nico Versloot, Nils Rosmuller, Marco Carcassi, Olav Roald Hansen, Martino Schiavetti, Efi Papanikolaou, Alexandros Venetsanos, Angunn Engebø, Ju Lynne Saw, Jean-Bernard Saffers, Alain Flores, and Dan Serbanescu, Benchmark exercise on risk assessment methods applied to a virtual hydrogen refuelling station, International Journal of Hydrogen Energy, 36, 3, 2666-2677 (2011).

84. Zhiyong Li, Xiangmin Pan, and Jianxin Ma, Quantitative risk assessment on a gaseous hydrogen

- refueling station in Shanghai, *International Journal of Hydrogen Energy*, 35, 6822-6829 (2010).
85. Zhiyong Li, Xiangmin Pan, and Jianxin Ma, Quantitative risk assessment on 2010 Expo hydrogen station, *International Journal of Hydrogen Energy*, 36, 4079-4086 (2011).
86. Zhiyong Li, Xiangmin Pan, and Jianxin Ma, Harm effect distances evaluation of severe accidents for gaseous hydrogen refueling station, *International Journal of Hydrogen Energy*, 35, 1515-1521 (2010).
87. Makoto Hirayama, Hiroki Shinozaki, Naoya Kasai, and Tsutomu Otaki, Comparative risk study of hydrogen and gasoline dispensers for vehicles, *International Journal of Hydrogen Energy*, 43, 12584-12594 (2018).
88. Makoto Hirayama, Yusuke Ito, Honami Kamada, Naoya Kasai, and Tsutomu Otaki, Simplified approach to evaluating safety distances for hydrogen vehicle fuel dispensers, *International Journal of Hydrogen Energy*, 44, 18639-18647 (2019).
89. Naoya Kasai, Yuki Fujimoto, Ikuya Yamashita, and Hisashi Nagaoka, The qualitative risk assessment of an electrolytic hydrogen generation system, *International Journal of Hydrogen Energy*, 41, 13308-13314 (2016).
90. Pan Xiangmin, Li Zhiyong, Zhang Cunman, Lv Hong, Liu Shaojun, and Ma Jianxin, Safety study of a wind-solar hybrid renewable hydrogen refuelling station in China, *International Journal of Hydrogen Energy*, 41, 13315-13321 (2016).
91. Jo Nakayama, Hiroyuki Aoki, Tomohiro Homma, Nana Yamaki, and Atsumi Miyake, Thermal hazard analysis of a dehydrogenation system involving methylcyclohexane and toluene, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 133, 805-812 (2018).
92. Jo Nakayama, Junji Sakamoto, Naoya Kasai, Tadahiro Shibutani, and Atsumi Miyake. Preliminary hazard identification for qualitative risk assessment on a hybrid gasoline-hydrogen fueling station with an on-site hydrogen production system using organic chemical hydride, *International Journal of Hydrogen Energy*, 41, 18, 7518-7525 (2016).
93. 国立研究開発法人 産業技術総合研究所 安全科学研究部門, 水素ステーションとその周辺のリスク評価書 (2019).
94. M. Casamirra, F Castiglia, L. Corchia, M. Giardina, C. Lombardo, G. Messina, Risk analysis of the storage unit in a hydrogen refuelling station, *International Conference on Hydrogen Safety* (2007).
95. M. Casamirra, F. Castiglia, M. Giardina, C. Lombardo, Safety studies of a hydrogen refuelling station; Determination of the occurrence frequency of the accidental scenarios, *International Journal of Hydrogen Energy*, 34, 14, 5846-5854 (2009).
96. California Energy Commission, Failure modes and effects analysis for hydrogen fueling options, Consultant report, CEC-600-2005-001 (2004).
97. Alexandros G. Venetsanos, Thomas Huld, Paul Adams, and J.G. Bartzis, Source, dispersion and combustion modelling of an accidental release of hydrogen in an urban environment, *Journal of*

Hazardous Materials, A105, 1-25 (2003).

98. T. Tanaka, T. Azuma, J.A. Evans, P.M. Cronin, D.M. Johnson, and R.P. Cleaver, Experimental study on hydrogen explosions in a full-scale hydrogen filling station model, *International Journal of Hydrogen Energy*, 32, 2162-2170 (2007).

99. 武野計二, 橋口和明, 岡林一木, 千歳敬子, 串山益子, 野口文子, 高圧水素噴流への着火爆発および拡散火炎に関する研究, *安全工学*, 44, 6, 398-406 (2005).

100. Mohammad Dadashzadeh, Arshad Ahmad, and Faisal Khan, Dispersion modelling and analysis of hydrogen fuel gas released in an enclosed area; A CFD-based approach, *Fuel*, 184, 192-201 (2016).

101. Eunjung Kim, Jaedeuk Park, Jae Hyun Cho, and Il Moon, Simulation of hydrogen leak and explosion for the safety design of hydrogen fueling station in Korea, *International Journal of Hydrogen Energy*, 38, 1737-1743 (2013).

102. Christophe Proust, Didier Jamois, and Etienne Studer, High pressure hydrogen fires, *International Journal of Hydrogen Energy*, 36, 2367-2373 (2011).

103. L.C. Shirvill, T.A. Roberts, M. Royle, D.B. Willoughby, and T. Gautier, Safety studies on high-pressure hydrogen vehicle refuelling stations; Releases into a simulated high-pressure dispensing area. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37, 8, 6949-6964 (2012).

104. R.W. Schefer, E.G. Merilo, M.A. Groethe, and W.G. Houf, Experimental investigation of hydrogen jet fire mitigation by barrier walls, *International Journal of Hydrogen Energy*, 36, 2530-2537 (2011).

105. Pratap Sathiah and Chris M. Dixon, Numerical modelling of release of subsonic and sonic hydrogen jets, *International Journal of Hydrogen Energy*, 44, 8842-8855 (2019).

106. 武野計二, 高圧水素噴出火炎の特性と対策技術, *日本燃焼学会誌*, 52, 160, 121-129 (2010).

107. D.M.C. Cirrone, D. Makarov, and V. Molkov, Thermal radiation from cryogenic hydrogen jet fires, 44, 8874-8885 (2019).

108. T. Skjold, D. Siccama, H. Hisken, A. Brambilla, P. Middha, K.M. Groth, and A.C. LaFleur, 3D risk management for hydrogen installations, *International Journal of Hydrogen Energy*, 42, 7721-7730 (2017).

109. DNV GL, Process hazard analysis software - Phast, <https://www.dnvgl.com/services/process-hazard-analysis-software-phast-1675> (Accessed on 01/08/2020).

110. Katrina M. Groth and Ethan S. Hecht, HyRAM: A methodology and toolkit for quantitative risk assessment of hydrogen systems, *International Journal of Hydrogen Energy*, 42, 7485-7493 (2017).

111. G.P. Haugom and P. Friis-Hansen, Risk modelling of a hydrogen refuelling station using Bayesian network, *International Journal of Hydrogen Energy*, 36, 2389-2397 (2011).

112. Hans J. Pasman and William J. Rogers, Risk assessment by means of Bayesian networks; A comparative study of compressed and liquefied H₂ transportation and tank station risks, *International*

Journal of Hydrogen Energy, 37, 22, 17415-17425 (2012).

113. F. Castiglia and M. Giardina, Analysis of operator human errors in hydrogen refuelling stations: Comparison between human rate assessment techniques, International Journal of Hydrogen Energy, 38, 2, 1166-1176 (2013).

114. 新エネルギー・産業技術総合開発機構, 平成 17 年度～平成 21 年度成果報告書, 水素社会構築共通基盤整備事業 水素インフラ等に係る規制再点検及び標準化のための研究開発 水素インフラに関する安全技術研究 (2010).

115. 新エネルギー・産業技術総合開発機構, 「超高压水素インフラ本格普及技術研究開発事業」基本計画 (2018) <https://www.nedo.go.jp/content/100879356.pdf> (2022 年 12 月 29 日閲覧).

116. Tomoya Suzuki, Kento Shiota, Yu-ichiro Izato, Masahiro Komori, Koichi Sato, Yasuyuki Takai, Takayuki Ninomiya, and Atsumi Miyake. , Quantitative risk assessment using a Japanese hydrogen refueling station model, International Journal of Hydrogen Energy, 46, 11, 8329-8343 (2021).

117. 株式会社フジキン, 製品情報 自動グローブタイプストップバルブ(品番: C160-UH-7100-14.2-40-N28.5-CN)

https://www.fujikin.co.jp/product/products/detail.php?product_id=5008&category_id=116&series_id=1042 (2020 年 1 月 24 日閲覧).

118. 大和産業株式会社, 製品案内 超高压逆止弁(品番: HCV-5S) <http://www.e-yamato.co.jp/data/catalog/278.pdf> (2020 年 1 月 24 日閲覧).

119. 株式会社フジキン, 製品情報 手動グローブタイプニードルバルブ(品番: UH-7100L-14.2-40-N28.5-CN)

https://www.fujikin.co.jp/product/products/detail.php?product_id=5017&category_id=6&series_id=1045 (2020 年 1 月 24 日閲覧).

120. 大和産業株式会社, 製品案内 超高压ストレーナ(品番: HST-9) <http://www.e-yamato.co.jp/data/catalog/275.pdf> (2020 年 1 月 24 日閲覧).

121. 株式会社フジキン, 製品情報 手動アングルタイプストップバルブ(品番: UH-8100-14.2-40-N28.5)

https://www.fujikin.co.jp/product/products/detail.php?product_id=5031&category_id=61&series_id=1051 (2020 年 1 月 24 日閲覧).

122. Sandia National Laboratories, Methodology for assessing the safety of Hydrogen Systems: HyRAM 1.1 technical reference manual, SAND2017-2998 (2017).

123. Kaname Kawatsu, Tomoya Suzuki, Kento Shiota, Yu-ichiro Izato, Masahiro Komori, Koichi Sato, Yasuyuki Takai, Takayuki Ninomiya, and Atsumi Miyake. Dynamic physical model of Japanese hydrogen refueling stations for quantitative trade-off study between benefit and risk, International Journal of Hydrogen Energy, In Press (2022).

124. A.D. Johnson, H.M. Brightwell, and A.J. Carsley, A model for predicting the thermal radiation hazards from large-scale horizontally released natural gas jet fires, Institution of Chemical Engineers

Symposium Series, 134, 123-142 (1994).

125. Y. Xu, H.W.M. Witlox, and A.O. Oke, Jet Fire, Phast/Safeti 8.1 Technical Documentation (2015).

126. Crisis24, Belgium: Battery fire and toxic smoke in Drogenbos November 11 (2022) <https://crisis24.garda.com/alerts/2017/11/belgium-battery-fire-and-toxic-smoke-in-drogenbos-november-11> (Accessed on 12/29/2022).

127. Underwriters Laboratories, Four Firefighters Injured In Lithium-Ion Battery Energy Storage System Explosion - Arizona (2020).

128. Korea Industry & Technology Times, A series of fires broke out at LG Energy Solution battery-powered ESS facility (2021) <http://www.koreaittimes.com/news/articleView.html?idxno=105081> (Accessed on 12/29/2022).

129. The Guardian, Tesla big battery fire in Victoria under control after burning more than three days (2021) <https://www.theguardian.com/australia-news/2021/aug/02/tesla-big-battery-fire-in-victoria-burns-into-day-three> (Accessed on 12/29/2022).

130. EPRI, BESS Failure Event Database, https://storagewiki.epri.com/index.php/BESS_Failure_Event_Database (Accessed on 12/29/2022).

131. IEC, Electrical energy storage (EES) systems - Part 5-1; Safety considerations for grid-integrated EES systems – General specification, IEC TS 62933-5-1:2017 (2017).

132. IEC, Electrical energy storage (EES) systems - Part 5-2; Safety requirements for grid-integrated EES systems - Electrochemical-based systems, IEC 62933-5-2:2020 (2020).

133. Roberto Bubbico, Viviana Greco, and Carla Menale, Hazardous scenarios identification for Li-ion secondary batteries, *Safety Science*, 108, 72-88 (2018).

134. 大和田奨, 鈴木智也, 河津要, 塩田謙人, 中山穰, 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, 302-303 (2021).

135. Sandia National Laboratories, Grid-scale Energy Storage Hazard Analysis & Design Objectives for System Safety, SAND2020-9360 (2020).

136. F.J. Soares, L. Carvalho, I.C. Costa, J.P. Iria, J.-M. Bodet, G. Jacinto, A. Lecocq, J. Roessner, B. Caillard, and O. Salvi. The STABALID project: Risk analysis of stationary Li-ion batteries for power system applications, *Reliability Engineering & System Safety*, 140, 142-175 (2015).

137. DNV, Quantitative Risk Analysis for Battery Energy Storage Sites (2019) <https://www.dnv.com/Publications/quantitative-risk-analysis-for-battery-energy-storage-sites-154811> (Accessed on 12/29/2022).

138. DNV, Technical Reference for Li-ion Battery Explosion Risk and Fire Suppression (2020) <https://www.dnv.com/Publications/technical-reference-for-li-ion-battery-explosion-risk-and-fire-suppression-165062> (Accessed on 12/29/2022).

139. Xuning Feng, Mingguo Ouyang, Xiang Liu, Languang Lu, Yong Xia, and Xiangming He,

Thermal runaway mechanism of lithium ion battery for electric vehicles: A review, *Energy Storage Materials*, 10, 246-267 (2018).

140. Peizhao Lyu, Xinjian Liu, Jie Qu, Jiateng Zhao, Yutao Huo, Zhiguo Qu, and Zhonghao Rao, Recent advances of thermal safety of lithium ion battery for energy storage, *Energy Storage Materials*, 31, 195-220 (2020).

141. Guangxu Zhang, Xuezhe Wei, Xuan Tang, Jiangong Zhu, Siqi Chen, and Haifeng Dai, Internal short circuit mechanisms, experimental approaches and detection methods of lithium-ion batteries for electric vehicles: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 141, 110790 (2021).

142. Laura Bravo Diaz, Xuanze He, Zhenwen Hu, Francesco Restuccia, Monica Marinescu, Jorge Varela Barreras, Yatish Patel, Gregory Offer, and Guillermo Rein. Review—Meta-Review of Fire Safety of Lithium-Ion Batteries: Industry Challenges and Research Contributions, *Journal of Electrochemical Society*, 167, 090559 (2020).

143. Xuning Feng, Dongsheng Ren, Xiangming He, and Minggao Ouyang, Mitigating Thermal Runaway of Lithium-Ion Batteries, *Joule*, 4, 4, 743-770 (2020).

144. Yuqing Chen, Yuqiong Kang, Yun Zhao, Li Wang, Jilei Liu, Yanxi Li, Zheng Liang, Xiangming He, Xing Li, Naser Tavajohi, and Baohua Li. A review of lithium-ion battery safety concerns: The issues, strategies, and testing standards, *Journal of Energy Chemistry*, 59, 83-99 (2021).

145. Jiahao Liu, Jie Li, and Jinhui Wang, In-depth analysis on thermal hazards related research trends about lithium-ion batteries: A bibliometric study, *Journal of Energy Storage*, 35, 102253 (2021).

146. Xuning Feng, Languang Lu, Minggao Ouyang, Jiangqiu Li, and Xiangming He, A 3D thermal runaway propagation model for a large format lithium ion battery module, *Energy*, 115, 1, 194-208 (2016).

147. Dongsheng Ren, Xuning Feng, Languang Lu, Xiangming He, and Minggao Ouyang, Overcharge behaviors and failure mechanism of lithium-ion batteries under different test conditions, *Applied Energy*, 15, 323-332 (2019).

148. Zonghou Huang, Chunpeng Zhao, Huang Li, Wen Peng, Zheng Zhang, and Qingsong Wang, Experimental study on thermal runaway and its propagation in the large format lithium ion battery module with two electrical connection modes, *Energy*, 205, 117906 (2020).

149. 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*, 85, 873, 18-00172-18-00172 (2019).

150. Valeria Villa, Nicola Paltrinieri, Faisal Khan, and Valerio Cozzani, Towards dynamic risk analysis: A review of the risk assessment approach and its limitations in the chemical process industry, *Safety Science*, 89, 77-93 (2016).

研究業績

■国際論文発表

1. **Tomoya Suzuki**, Kento Shiota, Yu-ichiro Izato, Masahiro Komori, Koichi Sato, Yasuyuki Takai, Takayuki Ninomiya, and Atsumi Miyake, Quantitative risk assessment using a Japanese hydrogen refueling station model, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 46, Issue 11, pp. 8329-8343, 2021
2. **Tomoya Suzuki**, Yu-ichiro Izato, and Atsumi Miyake, Identification of accident scenarios caused by internal factors using HAZOP to assess an organic hydride hydrogen refueling station involving methylcyclohexane, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Vol. 71, Article 104479, 2021
3. **Tomoya Suzuki**, Kaname Kawatsu, Kento Shiota, Yu-ichiro Izato, Masahiro Komori, Koichi Sato, Yasuyuki Takai, Takayuki Ninomiya, and Atsumi Miyake, Quantitative risk assessment of a hydrogen refueling station by using a dynamic physical model based on multi-physics system-level modeling, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 46, Issue 78, pp. 38923-38933, 2021
4. **Tomoya Suzuki**, Kento Shiota, Jo Nakayama, Yu-ichiro Izato, and Atsumi Miyake, Overview of the risk assessments for hydrogen refuelling stations in Japan, Chemical Engineering Transactions, Vol. 90, pp. 307-312, 2021

■国内論文発表

1. **鈴木智也**, 伊里友一郎, 三宅淳巳, 水素ステーションにおける物理モデリングを用いたジェット火災の影響度解析, 第9回構造物の安全性・信頼性シンポジウム講演論文集, pp. 267-272, 2019

■国際学会発表

1. **Tomoya Suzuki**, Kaname Kawatsu, Kento Shiota, Yu-ichiro Izato, Masahiro Komori, Koichi Sato, Yasuyuki Takai, Takayuki Ninomiya, and Atsumi Miyake, Quantitative risk assessment using a Japanese hydrogen refueling station model, 9th International Conference of Hydrogen Safety 2021, Online Conference, Edinburgh, United Kingdom, September 2021
2. **Tomoya Suzuki**, Kaname Kawatsu, Kento Shiota, Yu-ichiro Izato, Masahiro Komori, Koichi Sato, Yasuyuki Takai, Takayuki Ninomiya, and Atsumi Miyake, Quantitative risk assessment of hydrogen refueling stations by using a dynamic physical model, 1st Renewable Hydrogen Energy Conference, Online Conference, Zagreb, Croatia, September 2021
3. **Tomoya Suzuki**, Sho Owada, Kaname Kawatsu, Jo Nakayama, Kento Shiota, Yu-ichiro Izato, and Atsumi Miyake, Thermal runaway propagation mechanism analysis of multiple lithium-ion

batteries, The 7th International Symposium on Energetic Materials and their Applications, Online Conference, Tokyo, Japan, November 2021

4. **Tomoya Suzuki**, Kento Shiota, Jo Nakayama, Yu-ichiro Izato, and Atsumi Miyake, Overview of the risk assessments for hydrogen refuelling stations in Japan, Loss Prevention 2022, Hybrid Conference, June 2022
5. **Tomoya Suzuki**, Kaname Kawatsu, Jo Nakayama, Yu-ichiro Izato, and Atsumi Miyake, Construction of multiphysics system-level model of a lithium-ion battery module and its application for risk analysis of battery energy storage systems, 2023 Spring Meeting and 19th Global Congress on Process Safety, Houston, Texas, March 2023

■国内学会発表

1. **鈴木智也**, 塩田謙人, 伊里友一郎, 小森雅浩, 佐藤光一, 高井康之, 二宮貴之, 三宅淳巳, 水素ステーションモデルの定量的リスクアセスメント, 第 53 回安全工学研究発表会, Web, 講演予稿集, pp. 71-74, 2020
2. **鈴木智也**, 河津要, 塩田謙人, 伊里友一郎, 小森雅浩, 佐藤光一, 高井康之, 二宮貴之, 三宅淳巳, 本格普及期に向けた水素ステーションの定量的リスクアセスメント, 安全工学シンポジウム 2021, Web, 講演予稿集, pp. 82-83, 2021
3. **鈴木智也**, 大和田奨, 河津要, 塩田謙人, 中山穰, 伊里友一郎, 三宅淳巳, 複合物理領域モデリングに基づく蓄電池システム熱暴走時の温度挙動予測, 第 54 回安全工学研究発表会, Web, 講演予稿集, pp. 217-218, 2021 **学生講演賞受賞**
4. **鈴木智也**, 大和田奨, 河津要, 塩田謙人, 中山穰, 伊里友一郎, 三宅淳巳, リチウムイオン電池モジュールのモデル化と熱暴走伝播シナリオのリスク分析への適用, 1DCAE・MBD シンポジウム 2021, Web, 講演予稿集, pp. 92-95, 2021
5. **鈴木智也**, 大和田奨, 河津要, 中山穰, 塩田謙人, 伊里友一郎, 三宅淳巳, システムレベルモデリングに基づくリチウムイオン電池モジュールの熱暴走発生確率算出手法の提案, 安全工学シンポジウム 2022, Web, 講演予稿集, pp. 328-329, 2022
6. **鈴木智也**, 大和田奨, 河津要, 中山穰, 塩田謙人, 伊里友一郎, 三宅淳巳, リチウムイオン電池モジュールのシステムレベルモデルを用いた断熱材による熱暴走発生確率低減効果の定量分析, 日本機械学会 2022 年度年次大会, 富山大学, 講演予稿集, J121-15, 2022
7. **鈴木智也**, 河津要, 中山穰, 伊里友一郎, 三宅淳巳, 水素および電気エネルギー関連システムを題材としたモデルベースドリスク分析の高度化, 第 55 回安全工学研究発表会, 鳥取, 講演予稿集, pp. 151-152, 2022
8. 大和田奨, **鈴木智也**, 塩田謙人, 伊里友一郎, 三宅淳巳, 大型蓄電池を用いたエネルギー貯蔵システムのリスクシナリオ特定, 第 53 回安全工学研究発表会, Web, 講演予稿集, pp. 63-64, 2020

9. 大和田奨, **鈴木智也**, 河津要, 塩田謙人, 中山穰, 伊里友一郎, 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, Web, 講演予稿集, pp. 302-303, 2021
10. 山口和真, **鈴木智也**, 河津要, 中山穰, 塩田謙人, 伊里友一郎, 三宅淳巳, システムレベルモデリングを用いた蓄電池モジュールの熱暴走シナリオ解析, 安全工学シンポジウム 2022, Web, 講演予稿集, pp. 326-327, 2022
11. 山口和真, **鈴木智也**, 河津要, 中山穰, 塩田謙人, 伊里友一郎, 三宅淳巳, 蓄電池モジュールの 1DCAE モデルを用いた複合故障に起因するリスクシナリオ特定, 日本機械学会 2022 年度年次大会, 富山大学, 講演予稿集, J121-14, 2022
12. 山口和真, **鈴木智也**, 河津要, 中山穰, 伊里友一郎, 三宅淳巳, 複合物理領域・システムレベルモデリングを用いた蓄電池モジュールにおける熱暴走発生条件の特定, 第 55 回安全工学研究発表会, 鳥取, 講演予稿集, pp. 155-156, 2022

■解説・総説

1. **鈴木智也**, 伊里友一郎, 三宅淳巳, 本格普及期に向けた水素ステーションの定量的リスクアセスメント, *Explosion*, Vol. 31, No. 3, pp. 184-187, 2021
2. **鈴木智也**, 伊里友一郎, 三宅淳巳, 本格普及期における水素ステーションの包括的フィジカルリスク評価, *Safety Engineering*, Vol. 206, pp. 15-19, 2022

■依頼講演

1. **鈴木智也**, 大型蓄電池を用いたエネルギー貯蔵システムの定量的リスク分析に向けた 1D モデルの活用, *NWC CAE World 2022*, 東京, 2022

■採択

1. 共同研究推進プログラム「課題 C」, 複合物理領域-非因果モデリングに基づくプラントシステムの革新的ダイナミックリスクアセスメント手法の構築, 2020 年度
2. 日本学術振興会特別研究員 DC2, 複合物理-非因果モデルに基づく先端技術システムの革新的リスクアセスメント手法の構築, 2021 年度~2022 年度

謝辞

本研究の成果は、多くの方々のご指導、ご支援、ご協力により得られたものです。ここに深く感謝の意を表します。

責任指導教員である横浜国立大学大学院環境情報研究院 副学長理事 三宅淳巳教授には、深い愛情に根差した多くのご高配、激励を賜ると共に、自身の研究および自分自身と誠実に向き合う機会を常に与えていただきました。研究モチベーションが低下した時期に居室に伺った際には、ご自身のご経験から様々なお話をいただき、大変温かいお言葉の数々に大きな活力を頂きました。本研究のみならず、人生観や生き方に至るまで大いに学びのある研究室生活を送ることができました。心より御礼申し上げます。

指導教員である横浜国立大学大学院環境情報研究院 大矢勝教授および澁谷忠弘教授には、本研究について、2回の人工環境特別ワークショップおよび博士論文予備審査会、本審査会において大変貴重なご質問、ご意見、ご助言を賜りました。心より御礼申し上げます。

横浜国立大学客員教授/特定非常利活動法人 リスク共生社会推進センター理事長 野口和彦教授には、本研究について専門的な見地から終始懇切丁寧なご指導を賜りました。ディスカッションの際に頂いたご意見、ご指摘は、毎度重たい宿題を渡されるような厳しさを伴うものでしたが、自身への激励と期待の証左であると受け止め必死に向き合うことで、自身を大いに鍛え上げることができました。心より御礼申し上げます。

横浜国立大学大学院環境情報研究院 伊里友一朗准教授には、都度研究相談の機会を賜り、心が折れそうなときにも、幾度となく道を照らし導いていただきました。また、本研究についてのみならず、博士課程へ進む人間としてのあるべき姿、生き方や考え方について、幅広い側面から学び取ることができました。心より御礼申し上げます。

研究室ゼミにてご一緒させていただいた、越光男教授、半井豊明教授、竹花立美教授、金東俊准教授、稗貫峻一助教には、本研究について、研究室ゼミでのディスカッションを通して数々の貴重なご意見、ご助言を賜りました。心より御礼申し上げます。

中山穰助教、塩田謙人助教、藤田道也助教には、本研究について数々のご意見、ご助言を賜ると共に、本研究についてのみならず、当研究室の博士課程学生として果たすべき役割について叱咤激励いただき、成長を見守っていただきました。心より御礼申し上げます。

新エネルギー・産業技術総合開発機構からの受託研究における共同研究チームでご一緒

させていただいた、一般財団法人 石油エネルギー技術センター 二宮貴之様、小森雅浩様、佐藤光一様、河島義実様、および一般社団法人 水素供給利用技術協会 高井康之様には、共同研究の進捗会議でのディスカッションを通して、その知識や知見、考え方などについて大いに学び取ることができました。心より御礼申し上げます。

本研究の一部は、「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『低炭素社会実現のための社会シナリオ研究事業』」および日本学術振興会特別研究員奨励費「JSPS 科研費 21J15335」の助成を受けたものです。ここに記して感謝申し上げます。

宇宙航空研究開発機構/横浜国立大学リスク共生社会創造センター 非常勤講師 河津要氏には、本研究を進めるにあたって大変重要なご知見、ご助言を賜りました。類似の研究に取り組む博士課程の同期生として、励まし合いながら3年間共に学ぶ機会を得ることができ、大変貴重な経験となりました。心より感謝申し上げます。

横浜国立大学三宅・伊里研究室所属の学生の皆様には、3年間の研究活動において、ゼミおよびグループゼミでの議論などを通して、有意義なご質問、ご指摘、ご意見、ご協力をいただきました。また、後輩諸君の研究指導を通して、自身としても人間的に大きく成長することができました。心より感謝申し上げます。

3年間の研究活動中、私を精神的に常に支え励ましてくれた多数の友人たちと、私の進学意思を尊重し干渉せず最後まで見守ってくれた家族に、心より感謝申し上げます。

最後に、3年間の研究活動中に私に関わってくださった全ての方々と、三宅・伊里研究室に与えていただいた素晴らしい研究環境に、改めて心より感謝申し上げます。

以上