

水素エネルギーキャリア輸送の 社会総合リスクアセスメント書

2019 年 1 月 21 日

国立大学法人 広島大学

内容

0. 序章	1
1. 目的の設定	2
2. 主体、影響分野の整理	4
3. リスク特定	6
4. リスク分析	10
4.1 社会総合リスク全般	10
4.2 フィジカルリスク	18
5. 総合評価	25
6. リスク情報の活用	29
参考文献	31

0. 序章

本報告書は、広島大学・地球環境計画学研究室が作成した、「水素エネルギーキャリア輸送の社会総合リスクアセスメントガイドライン」を適用したものを取りまとめた報告書である。

「水素エネルギーキャリア輸送の社会総合リスクアセスメントガイドライン」は、横浜国立大学・リスク共生社会創造センターが作成した「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」を水素エネルギーキャリア輸送の特性を反映した形式で応用したガイドラインである。

「水素エネルギーキャリア輸送の社会総合リスクアセスメントガイドライン」に沿って行われた本報告書は、1章から6章までの計6章で構成されている。

1章は、本報告書の目的を設定する。目的を設定するため、アセスメント対象を導入段階における水素エネルギーキャリア輸送とした。ここでは、導入段階の主要な水素エネルギーキャリアとして、圧縮水素を取り上げる。また、アンモニアの輸送やガソリンと代替できる有機ヒドライドの輸送はすでに実績が多く、圧縮水素での輸送のリスク評価がより求められている。

2章は、導入段階における圧縮水素輸送に関連する主体と影響を整理した。

3章は、導入段階における圧縮水素輸送のリスク特定を行った。リスク特定では、社会総合リスクマトリックスを作成し、優先順位の高い分析すべきリスクを特定化した。

4章は、3章で特定化したリスクの分析を行った。リスク分析では、社会総合リスク全般とその内の一つであるフィジカルリスクに分け、行った。

5章は、4章のリスク分析結果を総合的に評価した。

6章は、本報告書の活用法について議論した。

1. 目的の設定

本報告書では、「水素エネルギーキャリア輸送の社会総合リスクアセスメントガイドライン」に基づいて、水素エネルギーキャリア輸送の社会総合リスクアセスメントを実施する。

社会総合リスクアセスメントを行う際に、目的の設定は最も重要でかつ最初のステップである。「水素エネルギーキャリア輸送の社会総合リスクアセスメントガイドライン」より「目的の設定は、技術システムによって達成したい社会目標を明確にする、およびアセスメントされたリスク情報を用いて何を達成するのかを明確にすることである。」とある。水素ステーションと水素エネルギーキャリア輸送で構成される水素ステーションシステムは、「水素エネルギーを安全かつ持続可能なコストで運用できる社会を構築すること」を目的として設定される。したがって、本報告書で取り上げる水素エネルギーキャリア輸送は水素ステーションシステムの一部であるため、水素ステーションシステムと同じ目的が設定される。したがって、本報告書の目的は、水素エネルギーを安全かつ持続可能なコストで運用できる社会を構築することである。

本報告書のアセスメント対象である水素エネルギーキャリア輸送を概観する。図 1.1 に水素エネルギーキャリア輸送の概要を示す。図 1.1 より、水素エネルギーキャリア輸送は水素供給から水素ステーションまでの水素エネルギーキャリアの輸送を担う。現在、日本において水素ステーションシステムにおける主要な水素エネルギーキャリアとして、圧縮水素、液化水素、有機ハイドライドが挙げられる。それらの輸送には、キャリアのタイプと水素の需給条件に応じた輸送方法が選択される。圧縮水素の場合、需給量が少ない計画・導入段階では、20MPa のトレーラー、ユニック車による工業地帯の近隣都市への道路輸送が主となる。ある程度の規模の需給量が想定される普及段階では、大量の液体水素を液体水素運搬で海外から輸入し、内航タンカーと大型ローリー車によって日本国内各地に輸送することが想定される。したがって、計画段階、導入段階、普及段階において、主となるキャリア、輸送法が大きくことなることが考えられる。

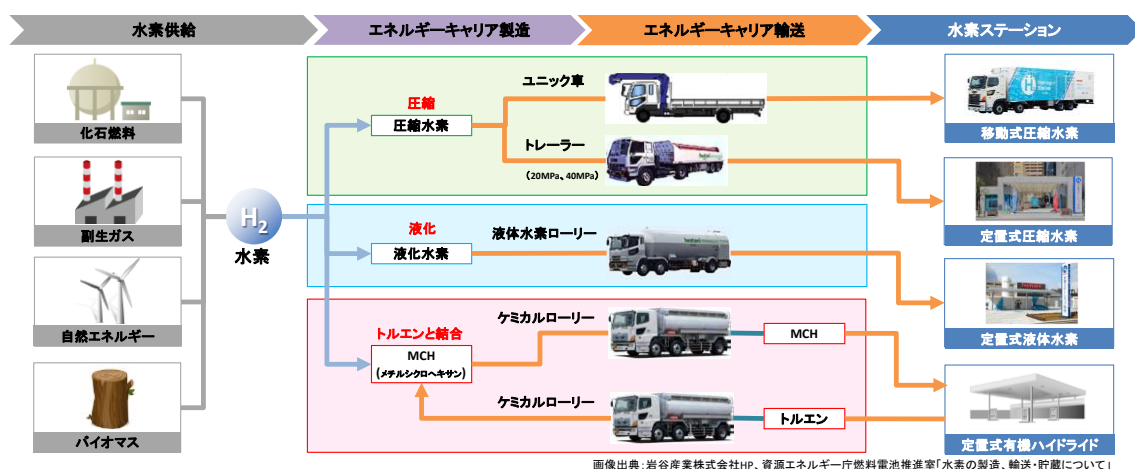


図 1.1 水素エネルギーキャリア輸送の概要

「水素エネルギーキャリア輸送の社会総合リスクアセスメントガイドライン」では、計画段階、導入段階、普及段階を明確にした上で、アセスメント時期を推奨している。本報告書執筆は計画段階と導入段階の間の時期と位置付けられる。「水素エネルギーキャリア輸送の社会総合リスクアセスメントガイドライン」より、本報告書は導入段階のアセスメント時期にあると定義される。そこで、本報告書は導入段階をアセスメント対象とする。また、図 1.1 より、導入段階における主要な水素エネルギーキャリアとして、水素需給の不確実性に対応できる圧縮水素が想定される。

以上より、本報告書は、水素エネルギーを安全かつ持続可能なコストで運用できる社会を構築することを目的に、導入段階における圧縮水素輸送を対象に社会総合リスクアセスメントを行う。

2. 主体、影響分野の整理

本章では、「水素エネルギーキャリア輸送の社会総合リスクアセスメントガイドライン」に沿って、導入段階における圧縮水素輸送に関連する主体、影響分野を整理する。

表 2.1 に導入段階における圧縮水素輸送に関連する主体を示す。基本的に、「水素エネルギーキャリア輸送の社会総合リスクアセスメントガイドライン」で整理された主体、個人/世帯、組織、地域、国家、世界を採用する(図 2.1)。導入段階における圧縮水素輸送に関連する主体として、表 2.1 の組織において、水素輸送特有の主体として、輸送車両製造事業者、水素輸送事業者、道路管理事業者、事故対応事業者、都市管理事業者、都市計画行政、道路管理行政、警察・消防行政を取り上げる。導入段階における圧縮水素輸送の場合、道路輸送が主となるため、道路と道路周辺に関わる主体が多い点が、特徴として挙げられる。また、道路サービスは公共サービスの一つであるため、道路管理の多くは行政によって担われている。そのため、今回の組織には、行政や公的な性格を有する企業の占める割合が多い。

表 2.1 導入段階における圧縮水素輸送に関連する主体

主体	詳細	備考
個人/世帯		沿道住民、歩行者、運転者、同乗者
組織	輸送車両製造事業者 水素輸送事業者 道路管理事業者 事故対応事業者 都市管理事業者 都市計画行政 道路管理行政 警察・消防行政	トレーラー、ユニック車の安全対策 圧縮水素の運搬 高速道路の管理 事故車両のレッカー移動 電力（沿道の電線）、鉄道（踏切、駅）の管理 街路樹、公園、歴史的建造物の管理 国道、県道、市道などの管理 交通制御・消火・救急活動災害
地域	水素エネルギーシステム導入地域 水素エネルギーシステム非導入地域	
国家	推進行政 規制行政	
世界		

3. リスク特定

「水素エネルギーキャリア輸送の社会総合リスクアセスメントガイドライン」より、目的の設定、主体、影響分野の整理、に続くステップが本章で行うリスク特定である。

2 章で整理した導入段階における圧縮水素輸送に関連する主体と影響分野の関係性からリスクを抽出する必要がある。「水素エネルギーキャリア輸送の社会総合リスクアセスメントガイドライン」は社会総合リスクマトリックスを作成し、その中で重要なリスクをアンケート調査・インタビュー調査により価値観などの基準を用いて特定化することを推奨する。本報告書では、関係者へのヒアリング調査、文献調査、専門家とのブレインストーミングによって、重要なリスクのみを対象にした社会総合リスクマトリックスを作成する。社会総合リスクマトリックスの作成に際して、図 3.1 に示す導入段階における圧縮水素輸送中の事故を想定した。リスクの定義は、「水素エネルギーキャリア輸送の社会総合リスクアセスメントガイドライン」に従い、ISO31000:2009（リスクマネジメントー原則及び指針）と同じ「目的に対して不確さが与える影響」であり、負だけでなく正の影響も勘案した。表 3.1 に社会総合リスクマトリックスのひな型を示す。表 3.1 中の「視点」が正負の影響を判断する「目的」に対応する。

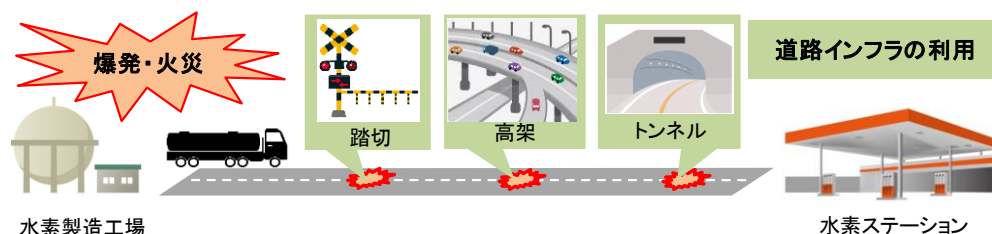


図 3.1 導入段階における圧縮水素輸送中の事故イメージ

導入段階における圧縮水素輸送の社会総合リスクマトリックスの作成結果を表 3.2、表 3.3、表 3.4 に整理する。表 3.2 は、導入段階における圧縮水素輸送の重要と考えられるリスクの数を示す。表 3.3、表 3.4 に主体内への影響と主体外への影響に分けて、表 3.2 で数え上げたリスクの内容を示す。

表 3.2 より、従来のフィジカルリスク（個人/世帯と人命/健康）以外に、多くのリスクが特定化されたことが分かる。さらに、表 3.2 より、導入段階における圧縮水素輸送のリスクを考える上で、重要な主体と影響分野が識別できる。例えば、重要な主体は組織である。2 章の表 2.1 より、導入段階における圧縮水素輸送の特徴として、道路と道路周辺に関わる多種多様な組織が存在することが確認できる。重要な影響分野は生活/生産活動である。図 3.1、表 3.3 より、圧縮水素輸送時の事故が、道路インフラを介して、多種多様な主体の生産活動に影響を与えていることが分かる。また、全体の傾向として、個人/世帯と組織に関しては主体内および主体外への影響は多数確認できるが、地域、国、世界に関しては主体内および主体外への影響は確認できないものが多い。これは、圧縮水素輸送は水素ステーションシステムの一部であり、単純に、地域、国、世界といった主体と直接的に関係することが少ない

ことが考えられる。

表 3.1 社会総合リスクマトリックスのひな型

		影響分野							
		主体内への影響				主体外への影響			
		フィジカル		生活/ 生産活動	人心	自然 環境	社会環境		
主体	視点	人命/ 健康	財産				政治/ 制度	経済	文化/ 科学技術
個人/世帯	豊かな生活の追及								
組織	組織目的・事業の 達成、継続								
地域	地方自治の確保、 構成員の福祉増進								
国	自治の確保、基本 的人権の尊重、公 共の福祉の確保								
世界	国際平和・安全の 維持、諸国の友 好、人権及び基本 的自由の尊重								

表 3.2 導入段階における圧縮水素輸送の社会総合リスクマトリックスの概要

		影響分野							
		主体内への影響				主体外への影響			
		フィジカル		生活/ 生産活動	人心	自然 環境	社会環境		
主体	視点	人命/ 健康	財産				政治/ 制度	経済	文化/ 科学技術
個人/世帯	豊かな生活の追及	1	1	1	5	1		1	1
組織	組織目的・事業の 達成、継続	6	7	21	11	4	7	8	8
地域	地方自治の確保、 構成員の福祉増進								
国	自治の確保、基本 的人権の尊重、公 共の福祉の確保			11	1				
世界	国際平和・安全の 維持、諸国の友 好、人権及び基本 的自由の尊重			2	1				

表 3.2 導入段階における圧縮水素輸送の重要なリスク（主体内への影響）

主体		影響分野	リスク内容
個人/世帯		人命/健康	事故による死亡・ケガ（住民・運転者・歩行者）
		財産	事故による所有財産の損失（住宅・自動車）
		生活/生産活動	事故後の避難・交通規制による行動制約
		人心	水素輸送に対する期待と不安、事故による死亡・ケガに対する不安、事故対応に対する不安、推進行政・専門家に対する不信、テロに対する不安
組織	輸送車両製造事業者	生活/生産活動	既存燃料輸送車両製造の維持、水素輸送車両製造の縮小
		人心	水素輸送車両製造に対する誇りと不安
	水素輸送事業者	人命/健康	事故による死亡・ケガ、過労による健康被害
		財産	事故による所有財産への損失（水素輸送車両）
		生活/生産活動	既存燃料輸送の維持、水素輸送の縮小事故賠償金支払による水素輸送事業の停止、事故対応失敗による水素輸送停止の継続、車両・乗務員不足による水素輸送の支障、不安定な水素輸送需要と増大する安全対策・事故対応費用による水素輸送事業の停止
		人心	水素輸送業務に対する誇りと不安
	道路管理事業者	人命/健康	事故対応時の死亡・ケガ（職員）
		財産	事故による所有財産への損失（道路インフラ）
		生活/生産活動	事故による道路サービスの低下、道路インフラ復旧・交通規制とその遅れによる道路サービスの低下の継続
		人心	道路サービスの低下に対する精神的負担、水素輸送事故対応に対する不安
	事故対応事業者	人命/健康	事故対応時の死亡・ケガ（作業員）
		財産	事故対応時の所有財産の損失（レッカー車）
		生活/生産活動	事故車両移動業務の縮小
		人心	水素輸送事故対応に対する不安
	都市管理事業者	財産	事故による所有財産の損失（路切・駅・電線）
		生活/生産活動	事故による鉄道・電力サービスの低下、鉄道・電力インフラ復旧の遅れによる鉄道・電力サービスの低下の継続
		人心	鉄道・電力サービスの低下に対する精神的負担、水素輸送事故対応に対する不安
	都市計画行政	人命/健康	避難誘導時の死亡・ケガ（職員）
		財産	事故による所有財産の損失（公園・街路樹）
		生活/生産活動	事故による住民サービスの低下、公園・街路樹復旧とその遅れによる住民サービスの低下の継続、事故後の避難誘導による行政サービスの低下、避難誘導の遅れによる行政サービスの低下の継続
		人心	住民・行政サービスの低下に対する精神的負担、水素輸送事故対応に対する不安
	道路管理行政	人命/健康	事故対応時の死亡・ケガ（職員）
		財産	事故による所有財産への損失（道路インフラ）
		生活/生産活動	事故による道路サービスの低下、道路インフラ復旧・交通規制とその遅れによる道路サービスの低下の継続
		人心	道路サービスの低下に対する精神的負担、水素輸送事故対応に対する不安
	警察・消防行政	人命/健康	事故対応時の死亡・ケガ（警察官・消防隊員）
		財産	事故対応時の所有財産への損失（パトカー・消防車両）
		生活/生産活動	交通制御・消火・救急活動の遅れによる混雑、死亡・ケガ被害の増大
		人心	被害増大に対する精神的負担、水素輸送事故対応に対する不安
国	推進行政	生活/生産活動	高圧水素輸送推進・支援の弱体化
		人心	水素技術で先端を行く日本への誇り
	規制行政	生活/生産活動	水素輸送に関わる規制の強化
世界		生活/生産活動	水素輸送に関わる規制の国際標準化、テロ対策の国際協力
		人心	テロに対する不安

表 3.3 導入段階における圧縮水素輸送の重要なリスク（主体外への影響）

主体		影響分野	リスク内容
個人/世帯		自然環境	個人が所有する自然環境への悪化（自宅の庭）
		経済	事故による行動制約・時間ロスによる機会費用の損失
		文化/科学技術	安全文化の習熟
組織	輸送車両製造事業者	政治/制度	新安全技術開発による規制緩和
		経済	収益の減少
		文化/科学技術	安全技術開発の推進、テロ・災害対策の導入
	水素輸送事業者	政治/制度	関連規則・法律（高圧ガス保安法・道路交通法等）の強化
		経済	収益の減少
		文化/科学技術	安全対策・事故対応の強化、テロ・災害対策の導入
	道路管理事業者	自然環境	道路周辺の自然環境の悪化（街路樹・緑地）
		政治/制度	既存燃料を前提とする道路関連規則・法律（道路交通法等）の水素輸送での 限界とそれによる混乱、道路関連規則・法律（道路交通法等）の見直し
		経済	収益の減少、道路インフラ復旧・安全対策・事故対応費用の増大、道路サービス低下による社会的費用の増大
		文化/科学技術	安全対策・事故対応の強化、テロ・災害対策の導入
	事故対応事業者	政治/制度	水素輸送関連規則・法律（高圧ガス保安法等）の見直し・強化
		経済	事故車両移動訓練・安全対策費用の増大
		文化/科学技術	事故車両移動訓練の強化、事故車両移動の安全対策の強化
	都市管理事業者	自然環境	踏切・駅・電線周辺の自然環境の悪化（緑地）
		政治/制度	関連規則・法律の見直し
		経済	収益の減少、鉄道・電力インフラ復旧・安全対策・事故対応費用の増大、 鉄道・電力サービス低下による社会的費用の増大
		文化/科学技術	テロ・災害対策の導入
	都市計画行政	自然環境	市街地の自然環境の悪化（公園・街路樹）
		政治/制度	地域防災計画の見直し
		経済	公園・街路樹復旧による行政費用の増大
		文化/科学技術	防災訓練の実施、導入テロ・災害対策の導入、ソーシャルキャピタルの増大
	道路管理行政	自然環境	道路周辺の自然環境の悪化（街路樹・緑地）
		政治/制度	既存燃料を前提とする道路関連規則・法律（道路交通法等）の水素輸送での 限界とそれによる混乱、道路関連規則・法律（道路交通法等）の見直し
		経済	収益の減少、道路インフラ復旧・安全対策・事故対応費用の増大、道路サービス低下による社会的費用の増大
		文化/科学技術	安全対策・事故対応の強化、テロ・災害対策の導入
	警察・消防行政	政治/制度	関連規則・法律の見直し
		経済	安全対策・事故対応・訓練費用の増大
		文化/科学技術	安全対策・事故対応の強化、テロ・災害対策の導入、消火・救助訓練の実施

4. リスク分析

本章では、導入段階における圧縮水素輸送に対するリスク分析の方法と結果を示す。ここでは、3章で特定した重要なリスクについて、二つの視点からリスク分析を行った。一つ目の視点では、社会総合リスクマトリックスの全範囲で出現した多種多様なリスク（社会総合リスク全般と呼ぶ）を対象にする。ただし、社会総合リスク全般は負の影響をもつリスクを対象とし、正の影響をもつリスクは対象外とした。二つ目の視点は、社会総合リスクマトリックスの中のフィジカルリスクに注目する。

4.1 社会総合リスク全般

4.1.1 社会総合リスク全般の分析方法

社会総合リスク全般を対象にリスク分析するため、化学プロセスの事故シナリオの特定化と定性リスク評価の方法である HAZID¹⁾を水素エネルギーキャリア輸送に合わせて拡張した Trans HAZID を用いる。Trans HAZID は事故シナリオの作成とリスクマトリックスの評価から構成される。

(1)事故シナリオの作成方法

事故シナリオは事故状況を説明したものである。Trans HAZID では事故遷移過程と事故発生環境を設定して、事故状況を関連するガイドワードを用いて説明する。図 4.1 の場合、事故発生環境と事故遷移過程を構成するガイドワード（高規格道路、一般道路、交通事故、車両整備不良、横転、爆発・火災、漏洩）を結び付けることで、表 4.1 で示される 8 件の事故シナリオを作成することができる。

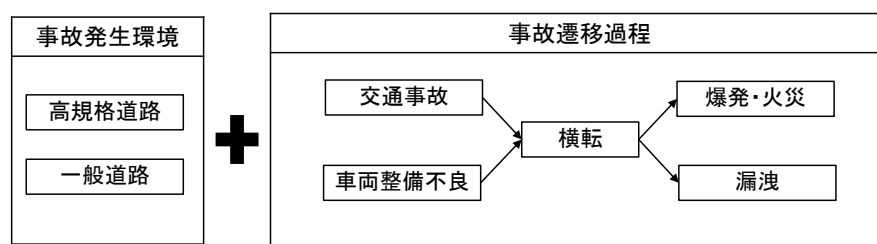


図 4.1 事故シナリオの作成のイメージ

表 4.2 事故シナリオ例

番号	事故シナリオ
1	高規格道路→交通事故→横転→爆発・火災
2	高規格道路→交通事故→横転→漏洩
3	高規格道路→車両整備不良→横転→爆発・火災
4	高規格道路→車両整備不良→横転→漏洩
5	一般道路→交通事故→横転→爆発・火災
6	一般道路→交通事故→横転→漏洩
7	一般道路→車両整備不良→横転→爆発・火災
8	一般道路→車両整備不良→横転→漏洩

従来 HAZID では、化学プロセスの内部事象、外部自称に関わるガイドワードを設定し、ガイドワードからブレインストーミングを通じて連想される事故シナリオを作成する。水素エネルギーキャリア輸送の場合、評価対象プロセスが空間に固定されず移動するため、事故発生において環境による影響が大きくなる。そこで、Trans HAZID では、環境要因を考慮するため事故発生環境に関連するガイドワードを事故統計から抽出する。さらに、道路を介することで、他車両の影響などが入り、事故状況は複雑になる。このような複雑性を適切に表現するため、ネットワーク理論の考えに基づいて、事故事例からガイドワードを抽出し、抽出したガイドワード間の関係性を事故遷移過程によって明らかにする。事故事例の不足により抽出できないガイドワードはブレインストーミングで補完した。

今回は導入段階における圧縮水素輸送の事故シナリオを作成するため、交通事故総合分析センターが提供する 2000 年から 2015 年における危険物輸送車の交通事故統計²⁾を用いて、圧縮水素輸送の事故発生環境に関連するガイドワードを抽出した（表 4.3 参照）。路線区分、時間帯、路面状態、道路形状、周辺状況の 5 つの事故発生環境タイプを定義し、計 18 個のガイドワードを抽出した。

表 4.3 圧縮水素の事故発生環境に関連するガイドワード

事故発生環境タイプ	ガイドワード	備考
路線区分	高規格道路	高速道路、バイパス等
	主要道路	主要な国道などの幹線道路
	その他道路	
時間帯	昼	
	夜	
路面状態	舗装（乾燥）	
	舗装（湿潤）	雨天
	舗装（凍結）	冬
	舗装（積雪）	雪
道路形状	交差点	
	トンネル	
	橋・高架	
	カーブ	
	踏切	
周辺状況	その他	
	市街地（人口集中）	繁華街、交通ターミナル、大規模集客施設、イベント会場等
	市街地（その他）	住宅地等
	非市街地	

さらに、高圧ガス保安協会が提供する事故事例データベース³⁾から 2000 年から 2015 年の日本における圧縮水素輸送と類似した危険物輸送の事故事例件例 149 件から表 4.2 に示される事故遷移過程に関連するガイドワードを抽出した。事故原因は 4 個、中間事象は 8 個、最終事象は 3 個、合計 15 個のガイドワードを抽出した。抽出したガイドワード間の関係性を示す事故遷移過程を図 4.2 に示す。表 4.4、図 4.2 より、圧縮水素輸送の事故事例の

特徴として、トレーラー（容器運搬車）を使用するため、事故後の容器散乱とそれに伴う事故拡大のプロセスが挙げられる。社会総合リスク的な視点から言えば、容器散乱を起点に、二次的な交通事故の発生、散乱した容器回収に手間取り、道路交通を遮断し、道路交雑の発生が考えられる。異なるエネルギーキャリアである液体水素輸送の場合、輸送車両としてローリーを使用するため、圧縮水素のような容器散乱は生じない。以上の圧縮水素輸送の事故遷移過程の分析は事象事例を基本にしているため、すべてのガイドワードを抽出できたかは不明である。そこで、専門家によるブレインストーミングより、テロと自然災害を原因事象ガイドワードとして抽出し、追加した。

表 4.4 圧縮水素輸送の事故遷移過程に関連するガイドワード

分類	ガイドワード
事故原因	交通事故（水素輸送車が第1当）
	交通事故（その他）
	積込積卸規定手順不履行
	車両，容器もしくはタンクの整備不良・点検不良・欠陥
中間事象	車両相互衝突
	道路周辺構造部との衝突
	水素輸送車横転
	水素輸送車転落
	車両火災（積載危険物漏洩によらない）
	容器散乱
	漏洩（容器本体もしくはタンク本体の破損）
	漏洩（安全弁，バルブ，配管，蓋）
最終事象	爆発・火災
	漏洩
	漏洩なし

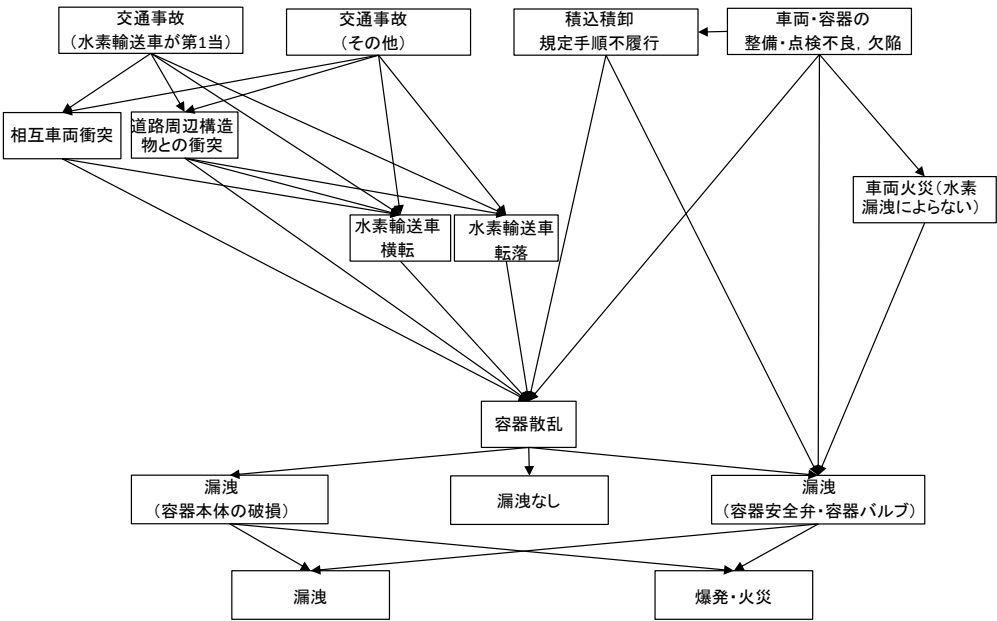


図 4.2 圧縮水素輸送の事故遷移過程

(2) リスクマトリックスの評価

(1)で作成した事故シナリオを、リスクマトリックスを用いて評価する。既往の液体水素輸送のHAZID研究¹⁾で使用されたリスクマトリックスとそのリスククライテリアを採用した。リスクマトリックスのひな型とリスククライテリアを表4.5に示す。表4.5のリスククライテリアとして、「High」に配置された事故シナリオは許容できないレベルのリスクをもつこと、「Medium」に配置された事故シナリオは許容できるが対策の検討が必要なレベルのリスクをもつこと、「Low」に配置された事故シナリオは許容できるレベルのリスクをもつこと、と解釈される。

従来 HAZID¹⁾は事故シナリオの発生頻度と影響度はブレインストーミングによって決定する定性リスク評価と位置付けられる。対して、Trans HAZID は発生頻度を事故事例・事故統計より定量的に推定し、影響度をブレインストーミングによって定性的に設定する半定量リスク評価と位置づけられる。さらに、Trans HAZID では、影響度において、フィジカルリスク以外の他の社会総合リスクの影響分野を考慮した点に特長がある。具体的には、表4.6より、社会総合リスクの影響分野である人命/健康、財産、生活/生産活動、人心、自然環境、政治/制度、経済、文化/科学技術を既存研究の影響度指標⁴⁾である People、Assets、Environment、Reputation と対応させた。ただし、社会総合リスクの影響分野は広いために、既存研究の影響度指標である Assets、Reputation の概念については拡大解釈を行っている。Assets の場合、元々の解釈である財産に加えて、事故による道路を介した関係主体の生産活動の低下（生活/生産活動）、生産活動の低下による減収（経済）を考慮できるように、解釈を拡大した。Reputation は元々の解釈は評判（風評被害）であるが、人心、政治/制度、文化/科学技術といった目に見えない影響分野を網羅できるように、解釈を拡大した。

表 4.5 リスクマトリックスのひな型

		影響度				
		C1	C2	C3	C4	C5
発生頻度	L5	Low	Medium	High	High	High
	L4	Low	Medium	Medium	High	High
	L3	Low	Low	Medium	Medium	High
	L2	Low	Low	Low	Medium	Medium
	L1	Low	Low	Low	Low	Medium

High は許容できないレベルのリスク、Medium は許容できるが対策の検討が必要なレベルのリスク、Low は許容できるレベルのリスク

表 4.6 社会総合リスクの影響分野と本影響度指標との対応

	人命/健康	財産	生活/生産活動	人心	自然環境	政治/制度	経済	文化/科学技術
People	○							
Assets		○	○				○	
Environment					○			
Reputation				○		○		○

表 4.7、表 4.8 に本リスクマトリックス評価で使用した影響度、発生頻度の尺度とその定義を示す。影響度、発生頻度の尺度とその定義は既存研究¹⁾⁴⁾のものを採用した。

表 4.7 影響度の尺度とその定義

尺度	People	Assets	Environment	Reputation
C5	Slight injury or health effect	Slight damage	Slight effect	Slight impact
C4	Minor injury or health effect	Minor damage	Minor effect	Minor impact
C3	Major injury or health effect	Moderate damage	Moderate effect	Moderate impact
C2	PDT or up to 3 fatalities	Major damage	Major effect	Moderate impact
C1	More than 3 fatalities	Massive damage	Massive effect	Massive impact

表 4.8 発生頻度の尺度とその定義

尺度	事故発生頻度L (/年)
L1	$L \leq 10^{-4}$
L2	$10^{-4} < L \leq 10^{-3}$
L3	$10^{-3} < L \leq 10^{-2}$
L4	$10^{-2} < L \leq 10^{-1}$
L5	$10^{-1} < L$

発生頻度の推定法について説明する。事故シナリオの発生頻度は、式(4.1)により推定される。

$$L_s = \lambda \times c_s \times \prod_{k \in N_s} p_{ks} \times \prod_l e_{ls} \quad (4.1)$$

ここで、 s は事故シナリオである。 L は発生頻度（件/年）、 λ は導入段階における日本全国の圧縮水素輸送の事故発生頻度（件/年）、 c は事故原因割合、 p は事故遷移過程におけるガイドワード間の遷移確率、 e は最終事象別事故発生環境割合、 k は水素輸送形態別事故遷移過程におけるガイドワード間の遷移数、 l は事故発生環境タイプであり、表 4.3 より 5 タイプ存在する。導入段階における日本全国の圧縮水素輸送の事故発生頻度は、消防統計⁵⁾と自動車検査登録情報協会の個別統計データ⁶⁾から推定される危険物輸送の事故発生頻度（件/台・km）に経済産業省のロードマップから想定される圧縮水素輸送量（台・km）を乗じることによって得られる。事故原因割合は、既存高圧ガス事故事例³⁾から推定した。ガイドワード間の遷移確率は、一様分布を事前分布、既存高圧ガス事故事例³⁾から得られる遷移確率を尤度とにおいて、ベイズ更新により推定した。最終事象別事故発生環境割合は既存交通事故統計²⁾から得られ、表 4.9 に整理する。

続いて、事故シナリオの影響度の設定法について説明する。事故シナリオの影響度は事故シナリオを記述する事故発生環境ガイドワードと最終事象ガイドワードに基づいて評価する。各事故シナリオにおいて People、Assets、Environment、Reputation の影響指標ごとの

総影響度ポイントを算定する。総影響度ポイントは、事故シナリオを構成する各ガイドワードに付随する個別影響度ポイントを総計することで得られる。続いて、各影響指標の総影響度ポイントから各影響指標の影響度尺度を決定し、各影響指標の中で一番高い尺度が、当該事故シナリオの影響度尺度とする。

表 4.9 最終事象別事故発生環境割合

事故発生環境タイプ	ガイドワード	爆発・火災	漏洩	漏洩なし
時間帯	昼	0.68	0.81	0.85
	夜	0.32	0.19	0.15
路線区分	高規格道路	0.12	0.06	0.03
	主要道路	0.57	0.52	0.37
	その他道路	0.31	0.42	0.60
路面状態	舗装（乾燥）	0.75	0.82	0.87
	舗装（湿潤）	0.20	0.15	0.12
	舗装（凍結）	0.03	0.02	0.01
	舗装（積雪）	0.02	0.01	0.01
路線形状	交差点	0.43	0.51	0.54
	トンネル	0.01	0.01	0.00
	橋・高架	0.02	0.01	0.00
	カーブ	0.14	0.04	0.04
	踏切	0.00	0.00	0.00
	その他	0.40	0.43	0.42
周辺状況	市街地（人口集中）	0.25	0.41	0.54
	市街地（その他）	0.20	0.25	0.23
	非市街地	0.55	0.34	0.23

続いて、事故シナリオの影響度の設定法について説明する。事故シナリオの影響度は事故シナリオを記述する事故発生環境ガイドワードと最終事象ガイドワードに基づいて評価する。各事故シナリオにおいて People、Assets、Environment、Reputation の影響指標ごとの総影響度ポイントを算定する。総影響度ポイントは、事故シナリオを構成する各ガイドワードに付随する個別影響度ポイントを総計することで得られる。続いて、各影響指標の総影響度ポイントから各影響指標の影響度尺度を決定し、各影響指標の中で一番高い尺度が、当該事故シナリオの影響度尺度とする。

事故発生環境ガイドワード、最終事象ガイドワードにおける個別影響度ポイント、総影響度ポイントと影響尺度の換算関係はブレインストーミングにより決定した。本報告書で利用した総影響度ポイントと影響尺度の換算表と最終事象ガイドワード別事故発生環境ガイドワード別の個別影響度ポイントを表 4.10、表 4.11、表 4.12、表 4.13 に整理した。

表 4.10 総影響度ポイントと影響尺度の換算表

総影響度ポイント	影響度尺度
$M \leq 11$	C1
$11 < M \leq 12$	C2
$12 < M \leq 13$	C3
$13 < M \leq 14$	C4
$14 < M$	C5

表 4.11 最終事象ガイドワード「爆発・火災」の
事故発生環境ガイドワード別個別影響度ポイント

事故発生環境ガイドワード		People	Assets	Environment	Reputation
時間帯	昼	2	3	1	1
	夜	2	2	1	1
路面状態	乾燥	1	1	1	1
	湿潤	1	1	1	1
	凍結	1	2	1	1
	積雪	1	2	1	1
道路形状	トンネル	3	3	1	3
	橋梁・高架	3	3	1	3
	踏切	3	3	1	3
	カーブ	1	1	1	1
	交差点	1	1	1	1
	その他	1	1	1	1
	高規格道路	3	3	1	1
	主要道路	3	3	1	1
	その他	1	1	1	1
周辺状況	市街地（人口集中）	3	3	1	3
	市街地（その他）	2	2	1	2
	非市街地	1	1	1	1

表 4.12 最終事象ガイドワード「漏洩あり」の
事故発生環境ガイドワード別個別影響度ポイント

事故発生環境ガイドワード		People	Assets	Environment	Reputation
時間帯	昼	1	2	1	1
	夜	2	1	1	1
路面状態	乾燥	1	1	1	1
	湿潤	1	1	1	1
	凍結	1	1	1	1
	積雪	1	1	1	1
道路形状	トンネル	2	2	1	2
	橋梁・高架	2	2	1	2
	踏切	2	2	1	2
	カーブ	1	1	1	1
	交差点	1	1	1	1
	その他	1	1	1	1
	高規格道路	3	3	1	1
	主要道路	2	2	1	1
	その他	1	1	1	1
周辺状況	市街地（人口集中）	2	2	1	2
	市街地（その他）	1	2	1	1
	非市街地	1	1	1	1

表 4.13 最終事象ガイドワード「漏洩なし」の
事故発生環境ガイドワード別個別影響度ポイント

事故発生環境ガイドワード		People	Assets	Environment	Reputation
時間帯	昼	1	1	1	1
	夜	1	1	1	1
路面状態	乾燥	1	1	1	1
	湿潤	1	1	1	1
	凍結	1	1	1	1
	積雪	1	1	1	1
道路形状	トンネル	1	1	1	1
	橋梁・高架	1	1	1	1
	踏切	1	1	1	1
	カーブ	1	1	1	1
	交差点	1	1	1	1
	その他	1	1	1	1
	高規格道路	1	1	1	1
	主要道路	1	1	1	1
	その他	1	1	1	1
周辺状況	市街地（人口集中）	1	1	1	1
	市街地（その他）	1	1	1	1
	非市街地	1	1	1	1

4.1.2 社会総合リスク全般の分析結果

導入段階における圧縮水素輸送の事故シナリオとして 31,758 件を作成した。作成した事故シナリオのリスクマトリックスの評価結果を表 4.14 に示す。評価結果より、許容できないレベルのリスクをもつ事故シナリオは存在しなかった。許容できるが安全対策の検討が必要なレベルのリスクをもつ事故シナリオは 140 件検出された。残りの 31,618 件の事故シナリオについては許容できるレベルのリスクと評価された。

本リスクマトリックス評価の特徴は、影響度指標において、従来のフィジカルリスク以外の多種多様な社会総合リスクを考慮した点である。そこで、社会総合リスクの中でフィジカルリスクに対応する影響度指標「People」のみで事故シナリオをリスクマトリックス評価した結果を、表 4.15 に示す。表 4.14 の社会総合リスク全般の場合、許容できるが安全対策の検討が必要なレベルのリスクをもつ事故シナリオは 140 件検出されたが、フィジカルリスクに限定した場合、許容できるが安全対策の検討が必要なレベルのリスクをもつ事故シナリオは 4 件まで減少した。つまり、136 件の事故シナリオに関しては、フィジカルリスク以外の影響度指標の影響が大きいことが分かる。

以上より、本社会総合リスク全般の分析結果より、従来のフィジカルリスクで検出できない、許容できるが安全対策の検討が必要なレベルのリスクをもつ事故シナリオを発見することに成功した。

表 4.14 導入段階における圧縮水素輸送のリスクマトリックスの評価結果：社会総合リスク全般

		影響度				
		C1	C2	C3	C4	C5
発生頻度	L5	1321				
	L4	3753	8	3		
	L3	6649	215	70		
	L2	7370	582	193	44	
	L1	9661	999	628	247	15

表 4.15 導入段階における圧縮水素輸送のリスクマトリックスの評価結果：フィジカルリスク限定

		影響度				
		C1	C2	C3	C4	C5
発生頻度	L5	1321				
	L4	3761	3			
	L3	6827	107			
	L2	7850	336			
	L1	10769	766	17		1

4.2 フィジカルリスク

4.2.1 フィジカルリスクの分析方法

前節 4.1 では、導入段階における圧縮水素輸送の社会総合リスク全般を分析した。さらに、フィジカルリスクについて分析を行い、許容できるが安全対策の検討が必要なレベルのリスクをもつ事故シナリオを確認した。前節の分析は、地域固有の空間特性を考慮しない、日本全国を平均化した半定量リスク評価にとどまっている。そこで、本節では、フィジカルリスクに着目し、空間特性を考慮した分析を行う。本フィジカルリスク分析では、地理情報システム（GIS）を活用することで、前節の社会総合リスク全般の分析で考慮できなかった空間特性を考慮した定量リスク評価を行った。ここでは、フィジカルリスクとして、圧縮水素の輸送時に事故が発生した際の周辺住民の死亡リスクを対象とする。

導入段階における圧縮水素輸送のケーススタディとして、2025 年の間の横浜市を対象にする。現在、横浜市では 4 か所のオフサイト型定置式圧縮水素ステーションが存在する。2025 年では、横浜市の水素ステーション数は増加せず、稼働率が増加すると仮定する。その 4 か所の圧縮水素輸送を対象に本フィジカルリスク分析を行う。

水素供給施設から水素ステーションまでの費用最小化になる輸送ルートを、交差点等（ノード）で分割した道路セグメント（リンク）単位で、式(4.2)に示すように事故シナリオの発生確率と影響度を乗じることで死亡リスク（/年）は推定される。

$$R_{is} = L_{is} \times C_{is} \quad (4.2)$$

ここで、 i はリンク、 s は事故シナリオ、 R は事故シナリオのリスク（/年）、 L は事故シナリオの発生頻度（件/年）、 C は事故シナリオの影響度（/件）である。今回、事故シナリオは単純に爆発事故と火災事故の二種類とする。ただし、ワーストシナリオを想定し、爆発・火災事故は大規模漏洩を前提とする。

米化学工学会化学プロセス安全センターの発行する危険物輸送リスク評価ガイドライン⁷⁾より、発生頻度 L は式(4.3)より与えられる。発生頻度の計算の特徴として、水素輸送車両が利用する道路の空間特性を考慮した点である。例えば、交通事故の発生に影響を与えそうな道路形状や交通量（正確には周辺車群の平均速度）の影響を定量的に反映させた。

$$L_{is} = \left\{ a \prod_k S_{ik} + (1 - a_i) \right\} \times b_s \times L_s \times D_i \times F \quad (4.3)$$

ここで、 i 、 k 、 s は、リンク、空間特性、事故シナリオである。 L 、 S 、 D 、 F は事故シナリオの発生頻度（件/台・km）、空間特性係数、リンク距離（km）、輸送頻度（台）である。 a 、 b は交通事故由来率、大規模漏洩規模割合である。事故シナリオの発生頻度は、消防統計⁵⁾と自動車検査登録情報協会の個別統計データ⁶⁾から推定される。リンク距離は水素供給拠点

から水素ステーションまでの費用最小輸送ルートと一般財団日本デジタル道路地図協会の提供するデジタル道路地図⁸⁾を GIS 上で重ね合わせた結果から得られる。空間特性係数は交通事故総合分析センターの提供する交通事故集計ツール²⁾より設定した。設定した空間特性係数を表 4.16 に示す。交通事故由来率は既存高圧ガス事故事例³⁾から得た。大規模漏洩規模割合は既存研究⁹⁾のイベントツリー解析の結果を引用した。

表 4.16 空間特性係数

空間特性		係数値
路線	一般国道	1.2
	主要地方道	0.7
	一般都道府県道	0.7
	一般市町村道	0.4
	高速自動車道	3.4
道路形状	交差点	0.5
	交差点付近	0.6
	単路（トンネル）	3.2
	単路（橋）	2.0
	単路（カーブ・屈折）	4.1
	単路（その他）	1.1
	踏切	12.8
地形	市街地（人口集中）	0.46
	市街地（その他）	0.69
	非市街地	1.79
周辺車群の平均速度 （交通量の代理指標）	停止中	0.3
	10km/h 未満	0.1
	20km/h 未満	0.2
	30km/h 未満	0.3
	40km/h 未満	0.8
	50km/h 未満	1.5
	60km/h 未満	2.5
	70km/h 未満	3.5
	80km/h 未満	4.7
	90km/h 未満	4.5
	100km/h 未満	5.4
	120km/h 未満	6.4
	140km/h 未満	9.7

続いて、影響度 C は既存研究⁹⁾を基に式(4.4)より推定した。

$$C_{is} = c_s \times A_s \times P_i \quad (4.4)$$

ここで、 i, s は、リンク、事故シナリオである。 A, P は事故シナリオ別の影響面積 (m^2)、対象リンク周辺（沿道）の人口密度 (人/ m^2) である。 c は事故シナリオによる致死率 (/人) である。沿道の人口密度は国土交通省が提供する国土数値情報データダウンロードサービ

ス¹⁰⁾より入手した。致死率は、式(4.5)より、火災、爆発のハザード関数から得られるプロビット値 Pr より求められる。

$$c = 50 \left[1 + \frac{Pr-5}{|Pr-5|} \operatorname{erf} \left(\frac{|Pr-5|}{\sqrt{2}} \right) \right] \quad (4.5)$$

今回使用した火災、爆発のハザード関数^{11,12)}は式(4.6)及び式(4.7)で与えられる。

$$Pr_{s=1} = -14.9 + 2.56 \ln(Q_{s=1}^{4/3} \times t_{s=1}) \quad (4.6)$$

$$Pr_{s=2} = -16.7 + 2.03 \ln(P_{s=2}) \quad (4.7)$$

ここで、 s は事故シナリオである（1 は火災事故シナリオ、2 は爆発事故シナリオ）。 Q は副射熱(kw/m²)、 P は爆風圧 (Pa)、 t は漏洩時間 (s) である。副射熱、爆風圧、漏洩時間は米国環境保護局が開発した ALOHA¹³⁾を用いて推定した。ALOHA の計算条件を表 4.17、表 4.18、表 4.19 に整理した。

表 4.17 ALOHA の計算条件：爆発・火災事故シナリオの共通パラメータ

パラメータ項目		入力値	出典
空間情報	対象都市	横浜市（北緯35度50分，東経139度38分に所属）	
	海拔	1.8	国土地理院，地理院地図
	その他	Offset from local standard to 0 hours GMT, サマータイムを考慮せず	
	建物情報	Single storied building	
	建物周辺状況	unsheltered building	
化学物質	対象物質	水素	
気象条件	風速	3.5	気象庁，過去の気象データ，横浜平年値
	風向	北	気象庁，過去の気象データ，横浜平年値
	相対湿度 (%)	67	気象庁，過去の気象データ，横浜平年値
	表面粗度	Urban or Fores	
	雲量 (%)	7	気象庁，過去の気象データ，横浜平年値
	気温 (°C)	15.8	気象庁，過去の気象データ，横浜平年値
	大気安定度	D	
	逆転層	なし	

表 4.18 ALOHA の計算条件：爆発事故シナリオのパラメータ

パラメータ項目	入力条件
漏洩量(kg)	17
漏洩条件	瞬間放出
漏洩口高さ(m)	0
vapor cloud への着火時間（1 秒~60 分）	Unkwon
爆発タイプ	爆轟

表 4.19 ALOHA の計算条件：火災事故シナリオのパラメータ

パラメータ項目	入力値
漏洩量(kg)	17
全長(mm)	3020
直径(mm)	436
圧力(Mpa)	45
内容積(L)	300
タンク内温度	常温
タンク内状態	ガス
漏洩口径(mm)	138

4.2.2 フィジカルリスクの分析結果

横浜市を対象にした導入段階における圧縮水素輸送の火災、爆発事故による死亡リスクの推定結果をリスク分布の形で整理したものを表 4.20 に示す。ここでは、リスククライテリアとして、ISO で検討されている死亡リスク基準 10^{-6} /年 (ISO (2018) Draft international standard ISO 19880-1, Gaseous hydrogen – Fueling stations –) を用いる。表 4.20 より、導入段階の横浜市において、4 か所の水素ステーションに圧縮水素を輸送する際に、1034 か所の道路が利用され、各道路における火災、爆発事故による沿道住民の死亡リスクの推定結果を見たところ、輸送ルート上でリスククライテリアである 10^{-6} /年を超える死亡リスクをもつ道路は存在しない結果が得られた。また、火災事故より爆発事故の方が高い死亡リスクをもつ傾向が得られたが、爆発事故の死亡リスクは低い値のため、両事故の死亡リスクを合算しても、リスククライテリアを超える値にならない。

表 4.20 横浜市を対象にした導入段階における圧縮水素輸送
の火災、爆発事故による死亡リスクの推定結果：リスク分布

死亡リスク (1/年)	火災事故のリンク (道路) 数	爆発事故のリンク (道路) 数
$10^{-6} \leq R$	0	0
$10^{-7} \leq R < 10^{-6}$	0	2
$10^{-8} \leq R < 10^{-7}$	0	163
$10^{-9} \leq R < 10^{-8}$	65	729
$R < 10^{-9}$	969	140

続いて、横浜市を対象にした導入段階における圧縮水素輸送の火災、爆発事故による死亡リスクの推定結果を空間分布の形で整理したものを図 4.3、図 4.4 に示す。両図ともに、海側にある水素供給拠点から北側の 3 か所の水素ステーションまで圧縮水素を輸送する際に輸送ルートが重なる道路が存在するが、当該道路において高いリスクは確認されなかった。導入段階から普及段階に移行し、水素ステーションの数が増加した場合、さらに圧縮水素から液体水素または有機ハイドライドにエネルギーキャリアが変更した場合、水素ステーションまでの輸送ルートの重複が増加し、結果として、火災、爆発、ガス拡散事故による死亡リスクが増加する可能性がある。ただし、導入段階における圧縮水素輸送に関してはフィジカルリスクにおいて十分許容できるレベルである結果が得られた。

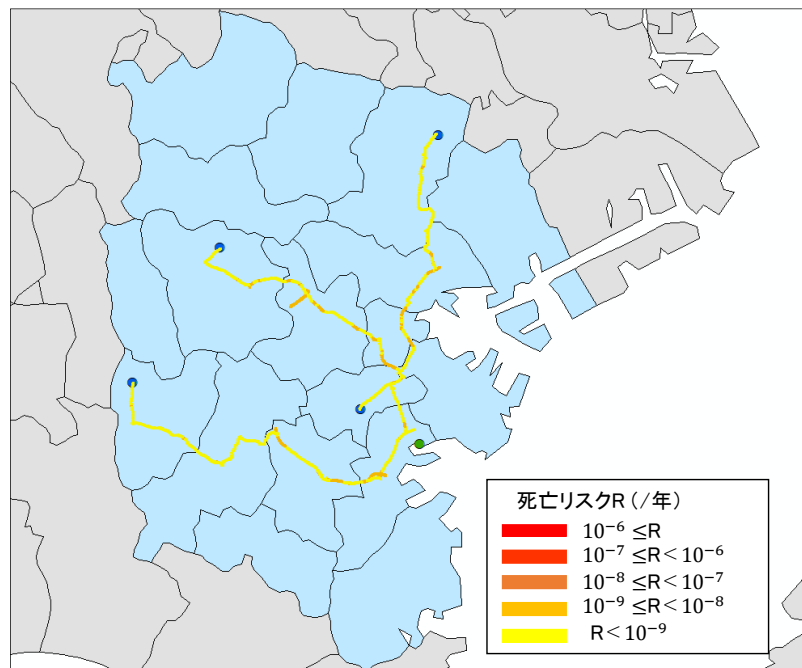


図 4.3 横浜市を対象にした導入段階における圧縮水素輸送の火災事故による死亡リスクの推定結果：空間分布

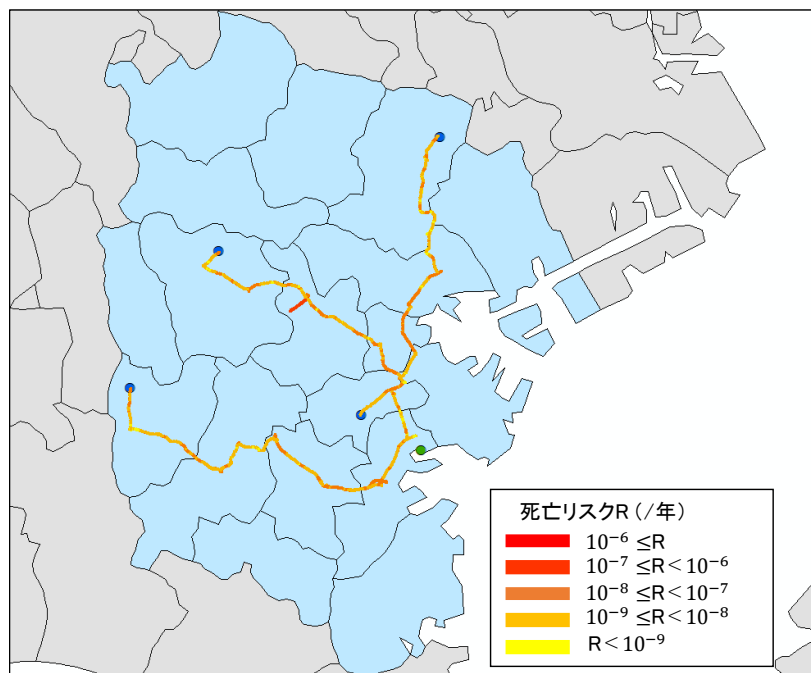


図 4.4 横浜市を対象にした導入段階における圧縮水素輸送の爆発事故による死亡リスクの推定結果：空間分布

5.総合評価

4章では、普及段階における圧縮水素輸送を対象に、社会総合リスク全般とフィジカルリスクという二つの視点から分析を行った。本章では、水素エネルギーキャリア輸送の社会総合リスクアセスメントガイドラインに沿い、両分析の総合評価を行う。前章のリスク分析と異なり、総合評価には体系だった方法はまだ確立していない。そこで、本章では、4章で行った社会総合リスク全般とフィジカルリスクの分析結果を総合的に評価し、必要に応じて追加のリスク分析を行うアプローチを採用した。

社会総合リスク全般の分析結果を表 5.1 に再度示す。表 5.1 より、普及段階における圧縮水素輸送に関して、許容できないレベルのリスクをもつ事故シナリオは確認されなかった。一方で、許容できるが安全対策の検討が必要なレベルのリスクをもつ事故シナリオが 140 件存在する。

表 5.1 導入段階における圧縮水素輸送のリスクマトリックスの評価結果：

社会総合リスク全般

		影響度				
		C1	C2	C3	C4	C5
発生頻度	L5	1321				
	L4	3753	8	3		
	L3	6649	215	70		
	L2	7370	582	193	44	
	L1	9661	999	628	247	15

今回の社会総合リスク全般の分析結果は、従来から議論されているフィジカルリスクに加えて、生活/生産活動、人心、自然環境、政治/制度、経済、文化/科学技術といった多種多様な影響分野を考慮している。しかし、社会総合リスクアセスメントにおいて、フィジカルリスクの重要性は変わらない。フィジカルリスクに限定した導入段階における圧縮水素輸送のリスクマトリックスの評価結果を表 5.2 に再掲する。表 5.2 より、フィジカルリスク限定のリスクマトリックス評価にもかかわらず、4 件の許容できるが安全対策の検討が必要なレベルのリスクをもつ事故シナリオが確認できる。

表 5.2 導入段階における圧縮水素輸送のリスクマトリックスの評価結果：

フィジカルリスク限定

		影響度				
		C1	C2	C3	C4	C5
発生頻度	L5	1321				
	L4	3761	3			
	L3	6827	107			
	L2	7850	336			
	L1	10769	766	17		1

そこで、4.2 節で実施した、リスクマトリックスで評価困難な輸送特有の空間特性を考慮したフィジカルリスクの分析結果を表 5.3 に再度示す。表 5.3 より、ISO が設ける死亡リスクに関するリスククライテリア 10^{-6} /年を超える事故が発生する道路は存在しないことが確認できる。したがって、本フィジカルリスク分析結果より、導入段階における圧縮水素輸送に関しては、そのフィジカルリスクは許容できるレベルであることが示された。以上より、導入段階における圧縮水素輸送に関してフィジカルリスクに対する安全対策を講じる必要性はとくにないと解釈できる。

表 5.3 横浜市を対象にした導入段階における圧縮水素輸送
の火災、爆発事故による死亡リスクの推定結果：リスク分布

死亡リスク (1年)	火災事故のリンク数	爆発事故のリンク数
$10^{-6} \leq R$	0	0
$10^{-7} \leq R < 10^{-6}$	0	2
$10^{-8} \leq R < 10^{-7}$	0	163
$10^{-9} \leq R < 10^{-8}$	65	729
$R < 10^{-9}$	969	140

以上の社会総合リスク全般とフィジカルリスクの分析結果より、導入段階における圧縮水素輸送に関してフィジカルリスクは許容できるレベルであるが、その他の社会総合リスクについては許容できるが安全対策の検討が必要なレベルであることがいえる。そこで、導入段階における圧縮水素輸送に対する安全対策について検討する。検討対象の安全対策を表 5.4 に示す。未然防止、被害拡大防止、両者に関わる安全対策をそれぞれ 4 個、7 個、19 個の計 30 個の安全対策を検討した。本報告書では、従来型の安全対策の強化に加えて、テロ・災害対策、都市・交通計画、輸送計画、IOT 活用などソフトな対策を中心に挙げた。各安全対策のリスクマトリックスの影響度指標である People、Assets、Environment、Reputation との対応関係を、表 5.4 に追記した。

表 5.4 導入段階における圧縮水素輸送に対する安全対策

安全対策		People	Assets	Environment	Reputation
未然防止	駐車場所への監視カメラ設置（車両盗難防止）		○		○
	ハンドルロックの実施等、車両盗難防止策の強化		○		○
	余裕をもった運行計画の策定	○			○
	ドライバーの労働環境改善	○			○
被害拡大防止	事故発生時の避難誘導体制の構築	○	○		
	事故発生時の連絡体制・関係機関との協力体制の構築	○	○		
	水素輸送車の事故を考慮した地域防災計画の策定	○	○		
	水素輸送車の事故を考慮した景観計画の策定（特に街路樹）		○	○	
	水素輸送車の経路を考慮した都市計画の策定		○	○	
	レッカー作業訓練の強化	○	○		
	高圧ガス保安法改正による安全対策の厳格化	○			
未然防止＋被害拡大防止	事故対応マニュアルの作成	○	○	○	○
	事故被害を拡大させる構造物（例：電線）の改修（例：地下化）		○	○	
	事故発生に伴う通行止めの影響緩和を目的とした渋滞対策			○	
	事故に伴う通行止め発生時の情報提供		○		○
	事故に伴う通行止め発生時の迂回路確保・誘導		○		○
	IOTを活用した事故処理（水素事故の適切な事故処理方法を現場作業員へリアルタイムで提供）	○	○	○	○
	水素輸送車両の通行時間帯とその他車両の通行時間帯の分離を目的としたTDM施策による交通需要マネジメント（ロードプライシングなど）			○	
	関係機関による水素輸送車テロを想定した訓練の実施	○	○		○
	警戒警備の強化	○	○		
	特殊部隊編成	○	○		
	事故発生時を想定した関係主体合同開催訓練の実施回数を増やす	○	○		○
	先進安全自動車の導入		○		○
	ドライバー教育の強化	○			○
	圧縮水素輸送容器の安全性・性能向上		○		
	先進的な安全機能を備えた車両開発		○		
	事故多発地点の道路改良工事	○	○		
	事故多発地点でのドライバーへ注意喚起	○	○		
	全水素輸送車の車両状態・運行情報を把握することのできる集中管制室の設置。車両が規定経路を逸脱した場合や車両に異常事態が発生した際には当該車両の乗務員へその旨を通知する。テロ等の発生に備え、強制的に水素輸送車両を停止させるシステムを備える。	○	○	○	○
	IOTを活用した輸送品質の向上（ドライバーに対して経路や積荷の情報をリアルタイムで通知。事故発生時には、ドライバーが適切な初期対応ができるような情報を提供する）	○	○	○	○

以上の安全対策を導入した場合、許容できるが安全対策の検討が必要なレベルのリスクをもつ事故シナリオ 140 件をリスクマトリックスで再評価した。その結果を表 5.5 に示す。表 5.5 より、表 5.1 で許容できるが安全対策の検討が必要なレベルのリスクをもつ事故シナリオ 140 件すべてが許容できるレベルのリスクをもつ事故シナリオになった。この結果から、表 5.4 で整理した安全対策は社会総合リスク全般の削減に有効であるといえる。

表 5.5 安全対策導入後の導入段階における圧縮水素輸送のリスクマトリックスの評価結果

		影響度				
		C1	C2	C3	C4	C5
発生頻度	L5					
	L4	11				
	L3	70				
	L2		41	3		
	L1				15	

以上より、導入段階における圧縮水素輸送の社会総合リスクアセスメントの総合評価より、許容できるレベルのリスクにおさえて、導入段階における圧縮水素輸送を行うには、表 5.4 で整理された安全対策が必要であるという結果が得られた。

6. リスク情報の活用

最終章である 6 章では本報告書の活用について議論する。「水素エネルギーキャリア輸送の社会総合リスクアセスメントガイドライン」より、本報告書の 1 章から 5 章までが社会総合リスクアセスメント部分にあたる。6 章はリスク対応と位置付けられる。リスク対応は社会総合リスクアセスメント結果を関係主体と共有化し、その上で社会総合リスクを許容できるレベルに下げるとの適切な安全対策を議論することが推奨される。本報告書の普及段階における圧縮水素輸送の社会総合リスクアセスメントの結果は大きく 2 点である。1 点目は、許容できるレベルのリスクにおさえて導入段階における圧縮水素輸送を行うには、追加的な安全対策が必要であるという知見である。2 点目は、具体的な安全対策を検討、提案した点である。

今後は、リスク対応のステップに移る。本報告書の成果を基に、関係主体が議論することが求められる。関係主体の議論において、本報告書の社会総合リスクアセスメントの結果に疑義が出た場合は、1 章から 5 章で使われた方法を各主体の視点から使用して、社会総合リスクアセスメントを行うことも可能である。また、各主体が独自で安全対策を検討したい場合、表 6.1 に示される実施主体情報を追加した安全対策リストが参考になる。以上より、本報告書の内容がリスク情報と関係主体によるリスク対応ステップで大いに活用されることが期待される。

表 6.1 導入段階における圧縮水素輸送に対する安全対策

安全対策		輸送 車両 製造 事業者	水素 輸送 事業者	都市 計画 行政	都市 管理 事業者	道路 管理 事業者	事故 対応 事業者/ 警察・ 消防
未然 防 止	駐車場所への監視カメラ設置（車両盗難防止）		○			○	
	ハンドルロックの実施等、車両盗難防止策の強化		○				
	余裕をもった運行計画の策定		○				
	ドライバーの労働環境改善		○				
被害 拡大 防止	事故発生時の避難誘導体制の構築		○	○		○	○
	事故発生時の連絡体制・関係機関との協力体制の構築		○	○		○	○
	水素輸送車の事故を考慮した地域防災計画の策定			○			
	水素輸送車の事故を考慮した景観計画の策定（特に街路樹）			○			
	水素輸送車の経路を考慮した都市計画の策定			○			
	レッカー作業訓練の強化		○				○
	高圧ガス保安法改正による安全対策の厳格化	○	○			○	○
未然 防止 ＋ 被害 拡大 防止	事故対応マニュアルの作成		○	○	○	○	○
	事故被害を拡大させる構造物（例：電線）の改修（例：地下化）				○		
	事故発生に伴う通行止めの影響緩和を目的とした渋滞対策					○	
	事故に伴う通行止め発生時の情報提供					○	
	事故に伴う通行止め発生時の迂回路確保・誘導					○	○
	IOTを活用した事故処理（水素事故の適切な事故処理方法を現場作業員へリアルタイムで提供）		○				○
	水素輸送車両の通行時間帯とその他車両の通行時間帯の分離を目的としたTDM施策による交通需要マネジメント（ロードプライシングなど）		○			○	
	関係機関による水素輸送車テロを想定した訓練の実施		○				○
	警戒警備の強化						○
	特殊部隊編成						○
	事故発生時を想定した関係主体合同開催訓練の実施回数を増やす	○	○	○	○	○	○
	先進安全自動車の導入		○				
	ドライバー教育の強化		○				
	圧縮水素輸送容器の安全性・性能向上	○					
	先進的な安全機能を備えた車両開発	○					
	事故多発地点の道路改良工事					○	
	事故多発地点でのドライバーへ注意喚起		○			○	
	全水素輸送車の車両状態・運行情報を把握することのできる集中管制室の設置。車両が規定経路を逸脱した場合や車両に異常事態が発生した際には当該車両の乗務員へその旨を通知する。テロ等の発生に備え、強制的に水素輸送車両を停止させるシステムを備える。		○	○		○	○
	IOTを活用した輸送品質の向上（ドライバーに対して経路や積荷の情報をリアルタイムで通知。事故発生時には、ドライバーが適切な初期対応ができるような情報を提供する）		○				○

参考文献

- 1) G. Hankinson et al, Qualitative risk assessment of hydrogen liquefaction, storage and transportation integrated Design for demonstration of efficient liquefaction of hydrogen (IDEALHY), 2013.
- 2) 交通事故総合分析センター「交通事故集計ツール」 <http://www.itarda.or.jp/shukei/>
- 3) 高圧ガス保安協会「事故事例データベース」
https://www.khk.or.jp/public_information/information/incident_investigation/hpg_incident/incident_db.html
- 4) Mohammad Yazdi, The Application of Bow-Tie Method in Hydrogen Sulfide Risk Management Using Layer of Protection Analysis (LOPA), J Fail Anal. and Preven, 2017
- 5) 消防庁 (2001-2015)「危険物に係る事故の概要」
- 6) 自動車検査登録情報協会「個別統計データ」
<https://www.airia.or.jp/publish/book/individual.html>
- 7) Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineering (CCPS) (2008): Guideline for Chemical Transportation Safety, Security, and Risk Management.
- 8) 一般財団日本デジタル道路地図協会「デジタル道路地図データ」
<http://www.drm.jp/map/index.html>
- 9) 国土交通省「国土数値情報データダウンロードサービス」 <http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/>
- 10) R. Gerbonim E. Salvador, Hydrogen transport systems: Elements of risk analysis, Energy 34 2223-2229, 2009
- 11) I. Mohammadfam et al : Safety risk modeling and major accidents analysis of hydrogen and natural gas releases: A comprehensive risk analysis framework, International Journal of Hydrogen Energy, 40, 13653-13663, 2015.
- 12) American Institute of Chemical Engineers (AIChE) : Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis Second Edition, 2000.
- 13) United States Environmental Protection Agency (EPA), ALOHA Software,
<https://www.epa.gov/cameo/aloha-software>

著作権者

国立大学法人 広島大学大学院
工学研究科 社会基盤環境工学専攻 地球環境計画学研究室
〒739-8527 広島県東広島市鏡山 1-4-1

利用に関する注意

本書の複製・転載、および記載内容に関するご意見・ご要望は、国立大学法人広島大学大学院工学研究科社会基盤環境工学専攻地球環境計画学研究室までお問い合わせください。

<問い合わせ先> Email: masa-fuse@hiroshima-u.ac.jp

本書は、戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）エネルギーキャリア「エネルギーキャリアの安全性評価研究」の成果です。
--