

Natech（自然災害起因の産業事故）リスクの評価と管理

きし もと あつ お
岸 本 充 生†

自然災害起因の産業事故は Natech と呼ばれ、自然災害と産業事故の間をつなぐ新しい分野として研究が進められている。本稿では Natech 概念を紹介するとともに、前半において、Natech 文脈における、リスクとレジリエンスの概念を整理するとともに、Natech リスク評価のプロセスやスコープの拡大について概説した。後半では、重要な事故を起点として、主に専門家の認知が変化し、法規制ギャップの調査が実施され、その結果に基づき、法規制が更新される、というサイクル・モデルを紹介するとともに、戦後の Natech 規制の更新の歴史的経緯を、このモデルを念頭に置きながら、屋外石油タンク、高圧ガス施設、石油コンビナートを対象に整理した。

キーワード：Natech、リスク評価、レジリエンス、法規制、サイクル・モデル

1. Natech というコンセプト

Natech とは、自然災害起因の産業事故（natural-hazard triggered technological accidents）の略称である。Natech 研究は近年、欧州を中心に活発に行われている。Natech 概念が初めて提案されたのは 1992 年の米国である¹⁾。しかしその後の研究の中心は欧州に移った。欧州で Natech 概念が注目されたきっかけの 1 つは、2002 年にチェコ共和国で起きた洪水の際に化学工場から 400 kg の塩素が流出した事故であった。ところが日本ではまだこの概念の知名度はほぼゼロで、2009 年に OECD が実施した加盟国アンケートでは日本からは回答さえ無かった。Natech の特徴は 2 つある。1 つは、機械の故障やヒューマンエラーを原因とする通常の産業事故とは異なり、自然災害という外的要因によって引き起こされるため、リスク評価とリスク管理を検討するには学際的なアプローチが必要となる点である（図 1）。もう 1 つは、カスケード効果あるいはドミノ効果と呼ばれる、複合的、連鎖的な

影響を持つという側面である。これは有害化学物質の漏洩を通して発生しやすい。東日本大震災でも多く見られ、タンクから流出した重油による火災の被害は大きかった。

Natech 概念が重要なのは、気候変動、途上国での産業化・都市化、新規技術の普及、社会の複雑性・相互依存性といった理由から、今後ますます Natech が増えることが想定されるにも関わらず、対応する行政組織、法規制、研究機関、研究者などが、自然災害系と産業事故系に分断されていて（実際はその中でもさらに細分化されている）、機動的・組織的な対応がとれていないからである。もちろん、Natech は概念としては新しいが事象としては工業化以来すでに多くの事例があり、東日本大震災はその典型例の 1 つである。福島第一原子力発電所の事故も 1 つの Natech である。しかし、Natech リスク特有の評価や管理のための方法論はまだ開発途上である。経済協力開発機構（OECD）の化学事故作業部会（WGCA）でも Natech に注目し、2012 年 5 月に初めての Natech ワークショップをドイツ、ドレスデンで開催した²⁾。

本稿では、Natech リスクを取り上げ、様々な新しいアプローチからリスク対応枠組みを再構築するための方法論を紹介する。第 2 節では、リスクとレジリエンスの定義を確認したうえで、Natech リスク特有のリスク評価枠組みを取り上げる。その際には上で挙げたような学際的な特徴を強調したモデルを検討する。第 3 節では事故などの事象が、専門家の認知を変え、その後の規制変化につながり、リスクレベルが低下するが、また別のイベントが起こるとまた規制変化につ



図 1 Natech の位置づけ

† 東京大学公共政策大学院 政策ビジョン研究センター：
〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1
E-mail：kishimoto@pp.u-tokyo.ac.jp

ながるというサイクル・モデルを適用して、Natechを起因とする近年の屋外石油タンク、高圧ガス施設、石油コンビナートにおける法規制対応の経緯を整理することを試みた。第4節では残された課題を整理する。

2. リスクとレジリエンス

2.1 リスク概念

Natech 分野のリスク評価は、第1節で述べたように、自然災害分野のリスク評価と機械やシステムのリスク評価の双方の知識が必要となる。機械分野などにおいて規格の中に安全に関する側面を扱う際のガイドであるガイド51では、リスクとは「危害の発生確率及びその危害の程度の組合せ」と定義される³⁾ (ISO/IEC 2014)。これは式1のように表現できる。

$$\text{Risk} = f(P, S) \quad (\text{式1})$$

P: Probability (危害の発生確率)

S: Severity (危害のひどさ)

これに対して自然災害リスクは式2のように定式化される⁴⁾。

$$\text{Risk} = f(H, E, V) \quad (\text{式2})$$

H: Hazard (ハザード: 人間のコントロールの及ばない外的要因, 自然災害の場合は発生確率もここに含まれる)

E: Exposure (曝露: 災害が影響を及ぼす地域に住む人間の数などで表現される)

V: Vulnerability (脆弱性: 作用の強度と機能喪失確率の関係を示したフラジリティ曲線で表現される)

式1と式2はどのような関係にあるのだろうか。式2のハザード概念から発生確率部分(F)を差し引いた部分と、E(曝露)とV(脆弱性)を掛け合わせると、「被害の大きさ(D)」になる。被害推定として発表されるものがこれにあたる。すなわち、式2は式3のように表現できる。これは実は式1と同じである。

$$\text{Risk} = f(F, D) \quad (\text{式3})$$

F: Frequency (ハザードの発生頻度)

D: Damage (被害の大きさ)

2.2 レジリエンス概念

近年、特に防災の分野においてレジリエンス(resilience)という概念が注目を集めている。レジリエンスは、災害が発生したあとの回復力だけに焦点が

当てられることもあるが、事前と事後の両者を含んだ概念である。アルゴンヌ国立研究所は「擾乱に対して、予期し、抵抗し、吸収し、反応し、適応し、回復するための主体(例えば、もの、組織、コミュニティ、地域)の能力」と定義している⁵⁾。レジリエンス概念の本質は、式3の第2項である「被害の大きさ(D)」部分の革新にある。すなわち、図2のように、被害の大きさがこれまで一次元(長さ)で表現されていたものを、時間軸を入れて二次元(面積)で評価しようとするものである。

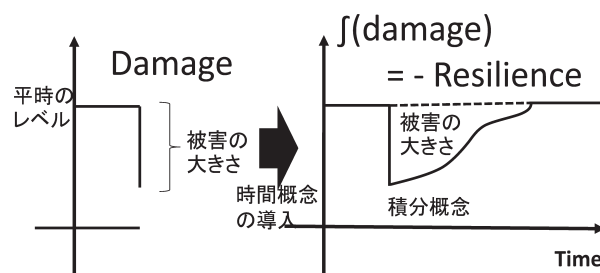


図2 レジリエンス概念の導入⁴⁾

レジリエンスは、図2右側の三角形の部分の面積をできるだけ小さくすることと定義できる。産業事故の被害は可逆的な部分が多く、定量化になじみやすい。そのために、レジリエンスを定量化することが比較的容易な部分である。事業継続計画(BCP: business continuity plan)はまさにNatechが発生した際にこの三角形部分を最小化するための事前準備である。

2.3 Natech リスク分析枠組み

欧州ではNatech事故事例を集めたデータベースも整備されつつあり、それらのケーススタディに基づき、化学プラント事故において用いられている定量的リスク評価(QRA: quantitative risk assessment)の枠組みを拡張させる形で、Natech特有のリスク評価・管理枠組みの開発が進められている。Natechの場合は、自然災害のハザードの発生確率については統計学的リスク評価手法を用い、産業事故の側面には工学的リスク評価手法が適用される。Natech特有のリスク評価や管理のための方法論はまだ開発途上である。これまで欧州で研究されてきた対象は、主に、地震、洪水、落雷という三分野であった。津波に関するデータは不足しており、リスク評価方法論の検討も遅れていることから、欧州のNatech研究者の、東日本大震災における津波被害に対する関心は非常に高い。提案されているNatechリスク評価の一般的な手順は次のとおりである⁶⁾。

1. 自然事象の特定(その頻度と強さ)
2. 対象とする施設の特定・リスト化

3. 被害状態と参照シナリオの特定（イベントツリー作成）
4. 被害確率の推計（施設の被害モデルの作成）
5. 参照シナリオの帰結の評価（帰結分析モデルの作成）
6. 起こりうる組み合わせ事象の特定
7. 各組み合わせの発生頻度 / 確率の計算
8. 各組み合わせの帰結の計算
9. リスク指標の計算

Natech リスク評価のスコープは、図 3 のように、物理的被害によって環境中に漏洩した有害化学物質の火災や爆発といった急性影響、及び、ヒト健康や生態系への慢性影響、そして、ビジネスや経済への影響までを評価対象に含めることも可能だろう。このような理学から経済学まで含む広い枠組みが Natech に対しては必要である。

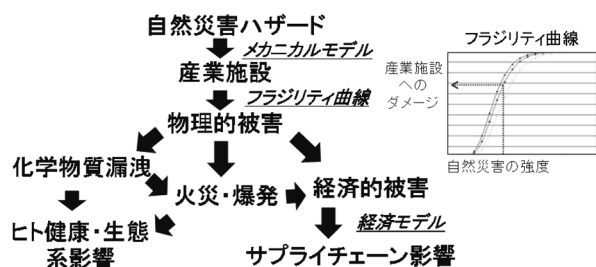


図 3 拡張版 Natech リスク分析枠組み

3. 事故・認知・規制変化のサイクル・モデル

3.1 サイクル・モデル

安全に関する法規制はこれまで、事故や事件の発生を受けて、専門家あるいは一般人のリスク認知が変化し、既存法規制の不備（法規制ギャップ）を埋めるための施策が新たなアジェンダに浮上する結果、法規制が新設・改正される、あるいは、組織の新設や改革に至るというサイクルを繰り返してきた。これは特に Natech に顕著である。一般的には、図 4 のようなサ

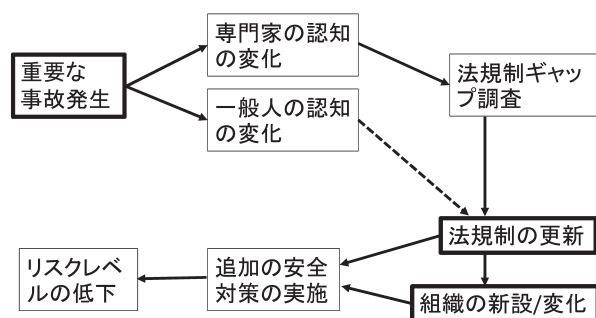


図 4 重要イベントを起因とするサイクル・モデル概念図（一般的な場合）

イクル・モデルが想定されるだろう。Natech の場合は図 5 のように主に専門家のリスク認知の変化を通して、法規制ギャップの調査が実施され、その答申に基づき、法規制が更新される、というサイクルを繰り返してきた。このようなトリガーとなる事故や事件は、注目イベント（focusing event）と呼ばれる⁷⁾。東日本大震災ももちろんこれに該当する。

牛海綿状脳症（BSE）問題で食品安全委員会が新設されたり、東日本大震災で原子力規制庁及び委員会が新設されたりするなど、非常に大きな事件や事故では、一般人の認知の変化を通して、組織の新設 / 変化にまで至ることもあるが、Natech 文脈ではそこまでに至ったケースは少なく、図 5 のような枠組みが適切だろう。本節では屋外石油タンク、高圧ガス施設、石油コンビナートを取りあげ、サイクル・モデルに沿って 2013 年までの法規制の変化を整理するという試みを行った。

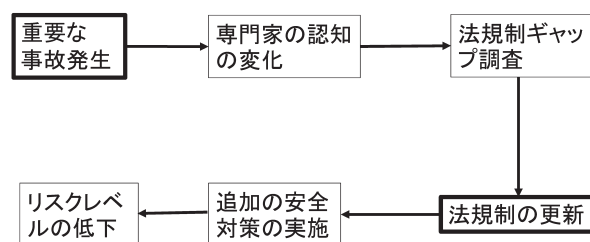


図 5 重要イベントを起因とするサイクル・モデル概念図（Natech の場合）

3.2 屋外石油タンク

3.2.1 はじめに

消防法上の屋外タンク貯蔵所の技術基準は、1959 年に公布された「危険物の規制に関する政令」（政令第 306 号）の第 11 条に「屋外貯蔵タンクは、総理府令で定めるところにより、地震又は風圧に耐えることができる構造とすること」とされ、同年の総理府令（総理府令第 55 号）において、屋外貯蔵タンクが地震および風圧に耐えることができる構造が規定された。

3.2.2 重要な事故：その 1

最初の重要な事故は Natech ではないが、1974 年 12 月に、岡山県水島コンビナートの屋外タンク貯蔵所の底板の一部が破損して大量の油が漏洩した案件である。この事故を受けた法規制の更新は 2 度実施された。1 つは、1977 年の大幅な技術基準の強化である（政令第 10 号）。対象は、貯蔵量が 1 000 kL 以上の屋外タンク貯蔵所で、これらを「特定屋外タンク貯蔵所」と定義し、技術基準（「新法」）が定められた。しかし、この基準は既存不遑及とされたため、新法に適合していない既設の特定屋外タンク貯蔵所（「旧法タ

ンク」が存在することとなった。そのため、2つ目の規制変化として、1994年に、旧法タンクの耐震性の向上を図るために技術基準が強化され、貯蔵または取扱う最大数量が10 000 kL以上のものは2011年12月末までに、1 000 kL以上10 000 kL未満のものは2015年12月末までに、「新法」基準に適合するように改修を行うことが義務付けられた（政令第214号、附則第7項第1号及び第2号）。

3.2.3 重要な事故：その2

1995年1月に発生した阪神・淡路大震災では、タンク本体に関してはタンク側板の座屈が、基盤や地盤の強度に関するものとしてはタンク基盤の沈下、地盤の亀裂、防油堤の破損などの被害が生じた。そのため、再び法規制の強化が議論され、1999年、貯蔵量が500 kL以上1 000 kL未満の屋外タンクを「準特定屋外タンク貯蔵所」と規定し、その基盤・地盤およびタンク本体に係る技術基準が強化され、同時に、新たな基準に適合していない既設の「旧法準特定屋外タンク貯蔵所」に対しても、2020年3月末までに改修することが義務付けられた（政令第3号、附則第2項第1号）。

3.2.4 重要な事故：その3

2003年9月に発生した十勝沖地震では、苫小牧において、石油タンクの火災、浮き屋根の沈没、大量の油の溢流などの被害が生じた。石油タンクの火災は、内容液と地震動の共振現象であるスロッシングが原因とされた。容量1 000 kL以上の特定屋外貯蔵タンク283基中、164基のタンクで何らかの被害が認められた。2003年10月には、「石油コンビナート等防災体制検討会・屋外タンク貯蔵所における技術基準等検討部会」が設置され、2つの法規制の改正が実施された。1つは、旧基準の屋外タンク貯蔵所について、1994年及び1999年の政令改正により定められた改修期限を、特定屋外タンクについては2年、準特定屋外タンクについては3年繰り上げるよう関係政令が改正され、2004年から施行された（消防危第77号）。もう1つは、特定屋外貯蔵タンクの浮き屋根に関する技術基準が2005年に整備された（消防危第14号）。その後、固定屋根式の屋外貯蔵タンクの内部にある浮き蓋に対する技術基準も2012年に施行された。

3.2.5 重要な事故：その4

2004年12月に発生したスマトラ島沖地震によるインド洋大津波による石油貯蔵施設への被害を受けて、消防庁に「危険物施設の津波・浸水対策に関する調査検討会」が設置され、2009年に報告書が公表された。屋外貯蔵タンクの津波被害は「滑動」から発生する可能性が高いことが分かり、津波対策としては「滑動」

の防止が最重要であることから滑動を防止するための対策の手順が示された。これは自主的な対策を検討するための技術的資料と位置づけられた。

3.2.6 重要な事故：その5

2011年3月に発生した東日本大震災を受けて、消防庁で検討会が設置され、報告書が公表された。タンクの津波被害については、タンク本体と付属配管ともに被害を受けたケース、タンク本体は被害がないものの付属配管が被害を受けたケース、タンク本体と付属配管ともに被害がないケースに整理され、津波浸水深が3 m未満の場合、タンク本体および付属配管への被害は発生していないことが分かった。現行の耐震基準はおおむね妥当であると評価された。これを受けて、2013年、耐震基準に適合していない準特定屋外貯蔵タンクと特定屋外貯蔵タンクの浮き屋根の耐震確保のために、所有者等が自主的に取り組むべき事項の提言がなされた（消防危第197号）。

3.3 高圧ガス施設

3.3.1 はじめに

屋外貯蔵タンクの規制体系は複雑であり、タンクの中身によって規制担当省庁および法規制が異なる。前節の石油タンクが、消防庁により消防法のもとで監視されているのに対して、高圧ガスタンクは高圧ガス保安法のもとで経済産業省により監視されている。

3.3.2 重要な事故：その1

高圧ガス設備等に対する耐震設計は、1981年に策定された「高圧ガス設備等耐震設計基準（昭和56年10月26日通商産業省告示第515号）」に基づいている。震度と加速度で表現される「第一設計地震動」に加えて、1964年の新潟地震による製油所のタンク火災を受けて、地表面における地動速度と地動変位で表現される「第二設計地震動」（長周期地震動）が規定された。しかし対象は新規設備のみであり、1982年3月31日以前に許可を受けて設置された設備は対象外であった。しかし、これらに対しては、1982年から1984年までに複数の通達（法的拘束力はない）が出され、都道府県が、事業者に対して、高圧ガス設備の耐震性能の点検を行い、一定程度の耐震性能を有していなければ事業者に対して改修を求める指導を行うことになった。

3.3.2 重要な事故：その2

1995年1月に発生した阪神・淡路大震災において、液化石油ガスの貯槽施設からLPガスが漏洩した事故が生じたことを受けて、通商産業省（当時）は、耐震設計基準の見直しを行い、1997年に「高圧ガス設備等耐震基準の一部を改正する件」（平成9年通商産業省告示第143号）を公布した。見直しの要点は、

1) 配管系の耐震基準の策定, 2) 第二設計地震動についての規定の追加, である。

3.3.3 重要な事故：その3

2003年に発生した十勝沖地震において、長周期地震動による製油所の火災が発生したことから、2003年から経済産業省委託事業で高圧ガス保安協会が「石油精製業保安対策調査 石油精製プラント地震対策調査研究」委託調査事業を実施した。2007年度には具体的な第二設計地震動の地域区分の見直しと算出式の修正、および、平底円筒貯槽の算定応力のモーメント算出式の修正が提案された。2009年12月に、高圧ガス部会の下に「高圧ガス設備等耐震設計基準等小委員会」が設置され、2010年3月に改正案がまとまった。東日本大震災後にパブコメを経て、2011年10月31日に耐震設計基準の一部を改正する告示が公布され、2012年4月1日に施行された。

3.3.4 重要な事故：その4

2011年3月に発生した東日本大震災では、一部の高圧ガス設備において、火災・爆発等が発生したほか、津波浸水区域において高圧ガス容器の流出等の被害が発生した。高圧ガス部会では、2011年7月から、地震と津波による被害状況を調査するとともに、今後の高圧ガス分野における地震・津波対策のあり方について検討が行われた。5回の審議を経て、2012年4月、報告書「東日本大震災を踏まえた高圧ガス施設等の地震・津波対策について」が公表された。地震については、3件発生した球形貯槽のブレース（脚部の筋交い）破断を除けば、耐震設計基準は十分な効果を有していたと判断された。そのため、ブレースの評価方法の検討が進められ、2013年12月に耐震設計基準の一部を改正する告示が交付された。津波対策については、最大クラスのものには設備等の破損や流出を完全に防止することは、技術的にも経済的にも困難であるため、周辺自治体等に情報提供を行うことが勧告された。

3.4 石油コンビナート

3.4.1 はじめに

高度経済成長下において、危険物単体に加えて石油コンビナート全体としての災害対応の必要性が認識され、消防庁は1966年には消防審議会に対して「石油コンビナート地帯を含めた特殊災害に対処すべき方策」について意見を求めた。翌年の答申には、「地震、津浪、台風等によっても、一般市街地の場合と異なる態容の大災害が発生する可能性がある」と指摘された。消防庁は1970年に「石油コンビナート地帯防災対策要綱」を定めた。化学工場における爆発火災事故の頻発を受けて、消防審議会はさらに1973年、「石油

コンビナート地帯等の防災対策に関する意見」を提言した。

3.4.2 重要な事故：その1

1974年12月に発生した岡山水島コンビナートの重油タンク破壊事故により、法整備の必要性が改めて取り上げられた。関係9省庁からなる「コンビナート防災問題事務連絡会議」が開催され、既存の関係法律の改正について検討が行われたが、新法が必要であるという結論に至り、「石油コンビナート等災害防止法」が1975年に公布され、翌年施行された。一定以上の石油または高圧ガスを集積している地域を、特別防災区域として2011年までに85地区が指定されている。特別防災区域を有する都道府県は防災計画を作成することになったため、消防庁は1994年に「石油コンビナートの防災アセスメントの策定指針」を公表した。

3.4.3 重要な事故：その2

1995年に発生した阪神・淡路大震災では、あらためて地震を想定した防災計画の重要性が認識され、1998～1999年に調査研究が実施され、上記の「策定指針」は、2001年に「石油コンビナートの防災アセスメント指針」に改訂された。示された手順は以下のとおりである。通常の事故の場合は（1）から、Natechについては（0）から始める。

- （0）想定する自然災害のハザード（地震動や液状化の程度）を評価。
- （1）イベントツリー解析手法を用いて、災害が発生・拡大していくシナリオを、施設に設けられた安全装置や防災設備を考慮のうえ想定。
- （2）イベントツリーに確率値を与え、平常時及び地震時における災害の発生確率を推定。
- （3）漏洩、火災、爆発などの災害が発生した場合の影響の大きさを推定。
- （4）災害の発生確率と影響の大きさの推定結果をもとに、災害リスクを総合的に評価。
- （5）総合的な評価結果に基づき、防災対策の優先順位や対策の基本的事項を検討

3.4.4 重要な事故：その3

東日本大震災では、防災アセスメント指針で具体的な取扱いが示されなかった津波によって大きな被害を受けたことなどを踏まえて、防災アセスメント指針を見直すために、2012年7月、「石油コンビナート等における災害時の影響評価等に係る調査研究会」が設置され、4回の会議を経て、2013年3月に報告書（指針の改訂案を含む）が発表された。また、消防庁の「東日本大震災を踏まえた危険物施設等の地震・津波対策のあり方に係る検討会」の最終報告書では、危険物施設及び石油コンビナート施設の被害状況の調査結果が

報告され、被災地域に所在する全危険物施設の約1.6%が被災し、石油コンビナート施設においても特定防災施設等及び防災資機材等に被害が発生したことが明らかにされ、石油コンビナート施設等における地震・津波対策のあり方についての提言がまとめられた。これらを受けて、消防庁では、防災アセスメント指針の改訂と同時並行で、2012年7月から「石油コンビナート等防災体制検討会」を開催し、5回の検討を経て2013年3月に公表された報告書では、都道府県の防災計画や事業所の防災規程への、大規模災害の想定、防災体制の強化、災害時の情報共有などを盛り込むことが提言された。

4. お わ り に

日本は自然災害が多く、産業活動が盛んであるがゆえに、数多くのNatechを経験することは必然である。本稿ではとりあげなかったが、事業者のNatech対策としては、ハードな対策以外にも、株主や消費者といったステークホルダー向けの自主的な対応が考えられる。1つは、有価証券報告書のリスク情報への記載である。日本では「企業内容等の開示に関する内閣府令」の施行により、2003年4月以後に開始する事業年度から、企業に対してリスク情報の開示が義務付けられるようになった。2つ目は、事業継続計画（BCP）の策定である。内閣府から「事業継続ガイドライン」の第一版が2005年、第二版が2009年に発表され、現在、2013年改訂の第三版が公表されている。その3.2節に、リスクマッピングも含めた「リスクの分析・評価」が取り上げられている。国際標準化機構（ISO）の社会セキュリティ技術委員会（TC223）において、2012年にBCP関連の2つの規格が発行されている。3つ目は、保険や金融といった間接的な方法である。経済的リスクの保険を通じたリスク移転は現時点では

限定的である。低頻度巨大災害は商業保険になじみにくい面があることは否めない。

謝 辞

本研究は、国際緊急共同研究・調査支援プログラム（J-RAPID）「複雑化する世界におけるNatech（自然災害と技術の相互作用）リスクの低減に関する学際的研究：日本の経験から学び、iNTeg-Riskプロジェクト・NaTech分野の手法を応用（INTERNATECH）」の助成を受けたものです。

参 考 文 献

- 1) Showalter, P. S. and Myers, M. F. Natural disasters as the cause of technological emergencies: a review of the decade. Natural Hazards Research and Applications Information Center, University of Colorado, Boulder (1992)
- 2) OECD. Report of the Workshop on Natech Risk Management (23-25 May 2012, Dresden, Germany) . Series on Chemical Accidents No.25. Joint Meeting of the Chemicals Committee and the Working Party on Chemicals, Pesticides, and Biotechnology. Organisation for Economic Co-operation and Development (2013)
- 3) ISO/IEC. Guide 51: Safety aspects Guidelines for their inclusion in standards, Third edition. International Organization for Standardization, International Electrotechnical Commission (2014)
- 4) 岸本充生, 自然災害リスクの評価, 災害の経済学, pp.47-62, 中央経済社 (2013)
- 5) Carlson, L., Bassett, G., Buehring, W., Collins, M., Folga, S., Haffenden, B., Petit, F., Phillips, J., Verner, D., and Whitfield, R., Resilience: Theory and Applications. Argonne National Laboratory (2012)
- 6) Renni, E., Basco, A., Busini, V., Cozzani, V., Krausmann, E., Rota, R. and Salzano, E., Awareness and mitigation of NaTech accidents: Toward a methodology for risk assessment. Chemical Engineering Transactions. 19: pp.383-389 (2010)
- 7) Birkland, T. A., Focusing events, mobilization, and agenda setting. Journal of Public Policy 18 (1) , pp.53-74 (1998)