

産業設備の自然災害と防災

— Natech について —

大阪大学 大学院 工学研究科
(NPO) 産業防災研究所

石丸 裕 *Hiroshi Ishimaru*

1. はじめに

気温の上昇や集中豪雨の増加、広範囲な干ばつの発生などの気象現象の異変は、地球上の様々な場所で観察されるようになり、洪水や海面水位の上昇、森林火災の多発などによる人々の生活の場に対する物理的な影響だけではなく、食物や水産物などの生態系への影響も人類の生存への脅威として認識され、資源や食糧を巡っての新たな地域紛争の発生要因になるという危惧もされている。

また、このような気象現象だけではなく、火山の噴火、地滑り、地震、津波などの地殻変動などに伴う自然事象も毎年、地球上のどこかで、大きな災害をもたらしている。特に日本では、過去に周期的に発生してきた巨大地震に対する新たな発生確率が広く報道されるなどして、地震災害への社会的な懸念が、急速に高まっている。

産業界においても、国内外を問わず、自然災害による深刻な被害が繰り返し経験されており、生産設備の災害防止や災害時の対応に対する法規制の強化や、危険物を扱う施設への社会の関心の高まりなどへの対応も重要な経営課題となっている。こうした自然災害に対する産業防災は、以前には工場敷地内での防災が主たる関心事であったが、工場施設の被災の結果、生じる社会的影響に対する関心が高まり、工場の自然災害リスクや、リスク対応、法令に関わるコンプライアンス状況な

どの社会への説明（リスクコミュニケーション）も、社会と産業が理解しあって自然災害対応への共生をすすめるためにも必要となってきた。

2. 気象変動と自然災害の動向

1997年に京都で開催された COP3（気候変動枠組条約第3回締約国会議）では、地球温暖化対策としての温室効果ガス排出削減を掲げ191カ国と1地域（EU）が京都議定書を締約し、その後、2015年開催の COP21ではパリ協定において世界が工業化以前からの世界の平均気温の上昇を1.5℃以下に抑えるための努力を追求することに合意がなされた。

しかしながら、実際に気温の変動を気象庁のホームページにより確認すると¹⁾、1891年から2023年までの130年間における世界の平均気温は0.76℃/100年の割合で上昇しており、特にこの50年間での上昇速度の加速により、WMO（世界気象機関）は今後5年以内にパリ協定の目標値を超える可能性が高いと警告している。

日本の気温上昇幅は1.35℃/100年と世界の平均温度上昇率を大きく上回り、特に東京では2.6℃/100年と異常な値となっている。また海水温で見ると、全地球平均の上昇が0.62℃/100年であるが、日本近海は1.28℃/100年と、これまた大きく平均値を上回る。身近な

環境変化としても、最高気温が35℃を越える猛暑日の年間日数や、時間あたりの降水量が80 mmを超える豪雨の回数は確実に増加している。

自然災害の1900年以降の世界の発生件数²⁾を振り返ると、21世紀になって急増し、以降現在までほぼ同水準の発生数を示しており、経済的損失もほぼ発生件数と同じ傾向を示している。損害保険業界における自然災害に対する保障額も増加の一途をたどり、自然災害による損失補償問題に対する警戒も高まっている。地域毎の災害被害額はアジア(中国を含み日本は含まない)が31%、アメリカが28%、日本が17%となっている。2010年から2019年に収集された日本で発生した77件の自然災害の内訳は風水害と地震が共に33件と最も多く、特に地震被害の割合の大きさが世界と比較して際立っている。

3. 自然災害と Natech

Natech (Natural Hazard Triggering Technological Disasters) は、文字通り、様々な様相を呈する自然の脅威によりもたらされる技術・産業システムが受ける被害(技術的災害)を意味しているが、岸本によるとColorado大学の研究グループ(Natural Hazards Research and Applications

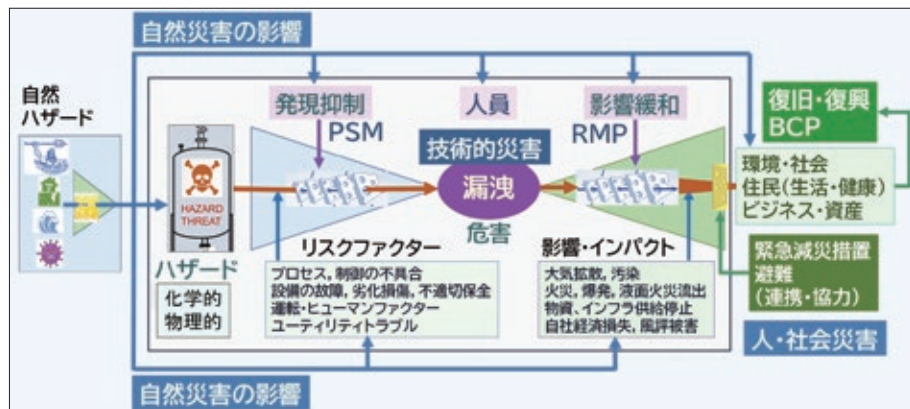
Information Center)のShowalterらが最初に用いた用語とのことである³⁾。彼らは1980年から約10年間にわたるアメリカで発生した技術的緊急事態をきたす自然災害の調査を行い、それらの事象の解析や行政機関の過去の対応などを評価している。彼らはそこで、自然ハザードと技術的ハザードの違いを明らかにすると共に、自然災害は必ずながしかの技術的災害を伴うことを指摘し、「災害を軽減するための一貫性があり、かつ受け入れ可能な方法」を見いだすためにna-techという概念を用いた⁴⁾。

その後2000年代になってヨーロッパでも洪水などの発生をきっかけにEU圏内での自然災害に関わる研究や調査が活発化し、セベソ指令にも自然災害への対応が要求される事となり、欧州委員会(EC)配下のJRC(共同研究センター)やOECD、国際連合なども協力して積極的にNatechの解析とそれへの対応策の提供などに取り組んでいる。

図1は化学産業を念頭に置いてNatechリスクの伝播プロセスと構造を示す⁵⁾。化学プラントに潜在する「ハザード」は、設備が保有している毒性、あるいは可燃性・爆発性などの物理的ポテンシャルを有する危険物である。こうした危険物が、図中に「リスクファクター」として例示された不適切なプロセスや設備の設計、設備の使用環境による損傷、

不適切な保全の実施、ミスオペレーションなどにより、設備・機器から漏えいする事態が「危害」である。漏えいした危険物による大気汚染の範囲や、健康被害を受ける人の数と範囲、火災の輻射熱や爆風圧が人と施設に対する物理的影響の範囲、経済的損失の規模などが「影響」とされている。ここで、危害の発生の可能性を低減するための措置(たとえばプロセ

図1 Natech リスクの伝播プロセスと構造



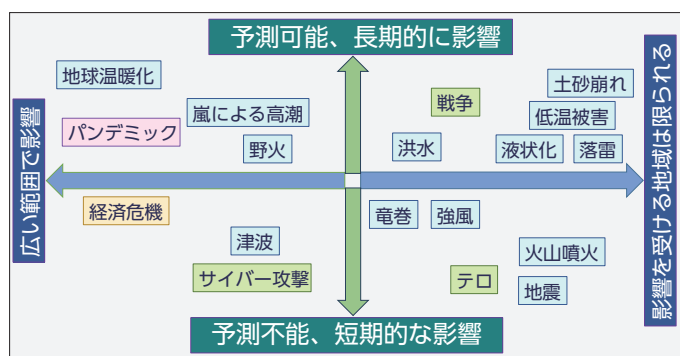
スの監視、設備の検査と予防保全、緊急遮断弁など)と、危害の影響を緩和するための様々な措置(防液堤、ウォーターカーテンの設置、避難など)を多重的に設置することで影響(リスク)を可能な限り低減させると言う仕組みが、現在のプロセス安全の枠組みである。

ここに自然災害などの外因性のハザードが作用すると、その物理的な作用(津波・洪水による浸水や波力、地震動による揺動・加速度など)により直接、設備に損傷被害が発生するだけではなく、図中に示した様に危害の発現や影響の拡大を制御するための様々な安全・防護のためのシステムや人の行動にも影響を及ぼす。また、工場の周辺社会や、工場の運用者自身も同時に自然災害による被害を直接受けている。こうした複合的な被災が被害の更なる拡大をきたすことになる。

4. 外因性のハザード

図2に外因性と考えられるハザードの例を、事象の発生の予測性・継続性、影響の範囲の2つの視点から分類して示した⁵⁾。図中の各自然ハザードはそれぞれ異なる特性を持ち、地域の地理的、季節的な要素もあるので横断的な対応を取ることは困難で個別対応が必要となっている。

図2 外因性と考えられるハザードの例



5. Natech の経験

化学物質に関わる事故のデータベースは、様々な機関により構築されている。これらのデータベースには自然災害が関与した事故も含まれているが、先に紹介したコロラド大学の Showalter らの調査⁴⁾や、EC-JRC が提供する e-NATECH⁶⁾は“Natech”に関心を持って収集されたものである。我々はこうしたデータベースから多くの示唆を得ることが可能であるが、ここでは日本で経験された2つの事例を典型的な Natech として、簡単に紹介する。

(1) 石油精製工場油漏えい火災事故

1964年新潟地震による石油精製工場の浮き屋根式大型原油タンクに、スロッシングによる原油の漏えいと、揺動した浮き屋根がタンク側板と衝突することで全面火災・ボイラーオーバーが発生した。タンク周辺には液状化が生じ、タンクの不等沈下と防液堤の破損、また噴出水と津波が相まっての一带の浸水をもたらし、これによりタンクから漏えいした油は浸水面上に浮遊し、更にこれに着火して水面油火災となって構外に拡がり、住居地区にも到達し民家にも延焼した⁷⁾。

(2) LPG タンクの火災事故

2011年東日本大震災、茨城沖地震において、メンテナンス後の水が張られていたLPG球形タンクの支柱のブレースが1回目の地震で損傷したため、2回目の地震により倒壊し、近隣のタンクと接続されていた複数の配管が損傷しLPGが漏えい、一帯が火災となりLPGが保有されていた周辺タンクではBLEVEが発生した。メンテナンスの際に比重の大きい水がタンク内に保有されることは設計(規制)

の想定外で、それに対する支柱の構造的な強度不足が主原因であった⁸⁾。

(3) その他

Natech はこうした大規模施設だけで発生するものではない。2018年7月の西日本豪雨では岡山県のアルミ製品鋳造工場が浸水し、溶融アルミニウムが水蒸気爆発をおこし、周辺家屋に被害が発生した。同じく2018年9月に発生した台風21号により、関西空港と本土を結ぶ橋脚に2591トンの船舶が漂流して衝突し、長期にわたり空港への連絡に支障が生じた。これも Natech の1つの形態と考えられる。2019年の台風19号による河川の氾濫では、福島県や長野県のめっき工場が浸水し、めっき浴からシアンが流出し周辺を汚染した。こうした工場は民家や田畑など人々の生活圏に隣接しており被害が大きくなる。

6. Natech に関わる法規制

(1) 日本の法規制

日本には自然災害に関して1961年に発令された災害対策基本法のもとに、災害予防、復興・復旧の立場から、災害の形態に応じた多数の法律が存在する。化学プラントが関わる産業防災分野に関わる法規制としては、**図3**

に示す様に内閣府に設置された中央防災会議が策定した国の防災基本計画を基に、都道府県及び市町村レベルで策定される地域防災計画が関与する。

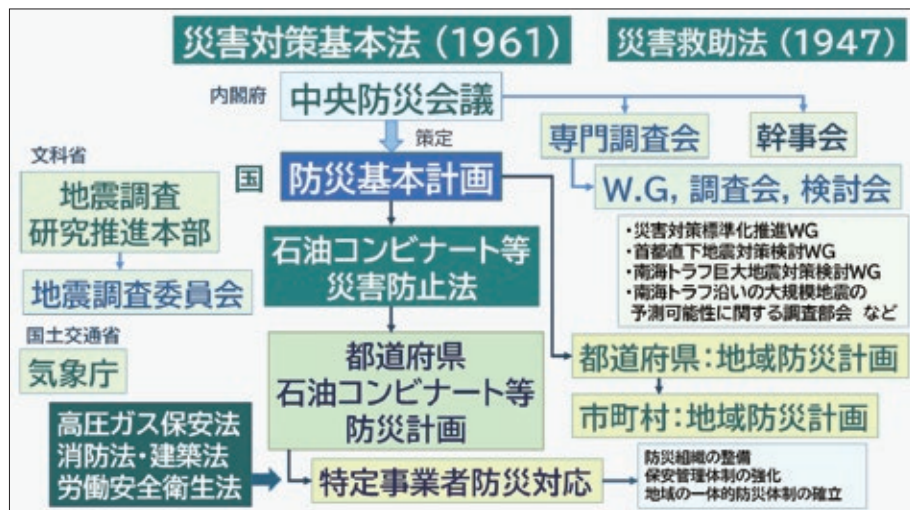
直接的には、石油コンビナート等災害防止法（以下、石災法）に基づいて都道府県レベルで作成される都道府県石油コンビナート等防災計画のもとに、石災法における特定事業者は法的に防災対応義務を負うことになる。また高圧ガス保安法、消防法は関連する施設に対して、それぞれ（危害）予防規定の策定を義務づけており、大規模地震対策、津波と地震に対する対応と来襲時の措置を織り込む事が求められている。要求される事項は政令、省令、告示、通知などにより詳細に指示されており、技術的な事項などについてはガイドラインなどの参照が求められている。また、内閣府の中央防災会議の基に設置された専門調査委員会、文科省の地震調査委員会、気象庁などからは災害に関わる情報発信がなされ、市町村から洪水ハザードマップや地震防災マップが公開されている。事業者はそれぞれ個別に、互いに独立した複雑な法規制に対応する必要がある、一方では法的な規制要求を満足すれば、災害対策は完璧であるといった風潮も認められる。ただ、こうした規制法や指針は過去の経験を経て改定がなされてお

り、科学技術の進歩を必ずしも先取りしているとは限らない。

(2) 海外の法規制

ヨーロッパ EU 加盟国においては、当初は、化学産業防災の要であるセブソ指令に自然災害は含まれていなかったが、2000年に発生したルーマニアの鉱山の有毒廃棄物を起源としたドナウ側流域の大規模汚染などをきっかけとして、2012年に改定された Direc-

図3 化学産業防災分野における法規制の構造と情報源



tive 96/82/EC：SEVESOⅢにおいて安全報告書で要求される「考えられる重大事故のシナリオとその発生確率または発生条件の詳細な説明」の中に「自然原因（natural cause）たとえば地震や洪水」を加えることが必要となった。これを受けてEU加盟各国は国内法を整備し、たとえばドイツでは排出規制法に関わる技術規則として洪水を対象としたTRAS310と、強風・積雪・凍結を対象としたTRAS320を策定している。

アメリカは、連邦規則40 CFR Part 68：Chemical Accident Prevention Provisions（いわゆるEPA-RMP）2024年3月の改定で、同法が要求する事前のProcess Hazard Analysisの項目に「不測の漏洩をきたしたり、また悪化させたりする可能性のある自然ハザード」が追加された。しかし、各州ではそれ以前からローカルな事情に応じて州法による規制が行われてきた。たとえば地震が多発するカリフォルニア州では、CCR Title 19, Division 2, Chapter 4.5：California Accidental Release Prevention (CalARP) Programに地震解析など外因性事象（自然災害）の解析が要求されている。

7. Natech リスクの アセスメント

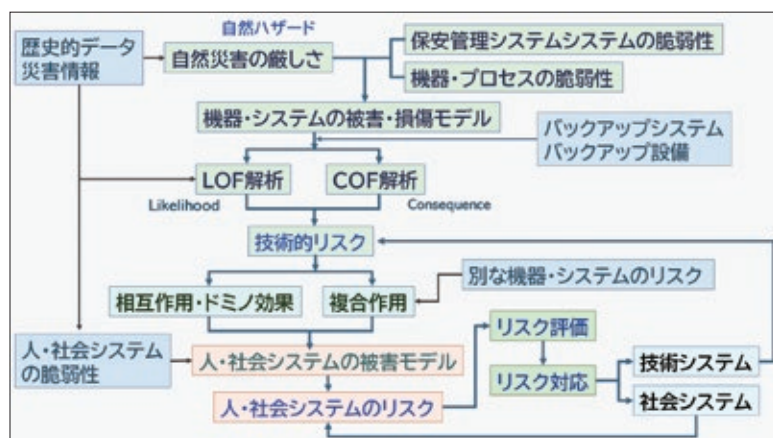
Natech のリスクは一般には自然ハザードの脅威の強さ、曝露される人・資産・環境の規模や範囲、被害を受けるシステムの脆弱性や回復力の3つの要素により決定されると言われている。しかし前述の様に Natech は個別に様々な特性を有しており、横断的に統一されたプロセスでリスクを分析するのは困難である。特に、自然災害の発生確率を議論するのは現実的とは思われないケースも少なくない。ごく一般的ナリスクアセスメントの方法として図4に示す様なプロセス⁹⁾を例示す

るが、技術的リスクと社会システムのリスクの関係など災害の性質や地域の事情などを基に新たに解析すべき項目も多い。EC-JRC のKrausmann らは Natech リスクを半定量的に分析するためのツールとして RAPID-N を提供している¹⁰⁾。筆者は図5に示す様な定性的な Natech リスクの分析プロセスを提案しているが、例え相対的であっても、多様な自然災害のリスクを統一的な基準で分析しランク付けをするのは、難しい課題であると言える。

8. Natech リスクへの対応、 マネジメント

一般的ナリスクの低減プロセスとして様々なシーンで用いられるのが ISO/IEC Guide 51で示された3ステップ法である。自然ハ

図4 Natech リスクのアセスメントプロセスの例



LOF：危害の発生頻度、COF：影響の強さ

図5 定性的な Natech リスクのアセスメント

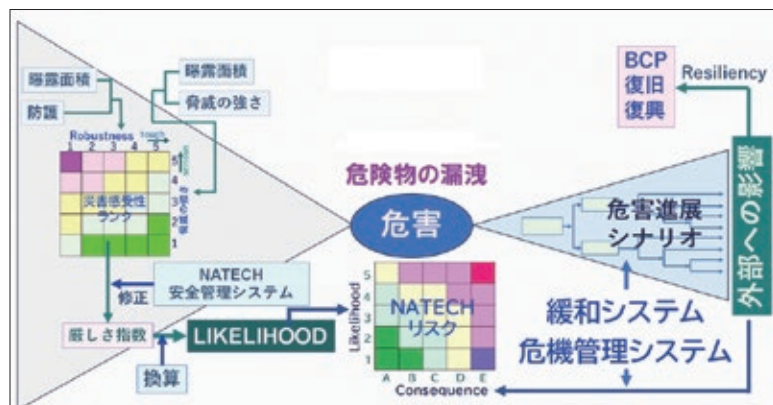


図6 Natech リスクの3ステップ低減方法

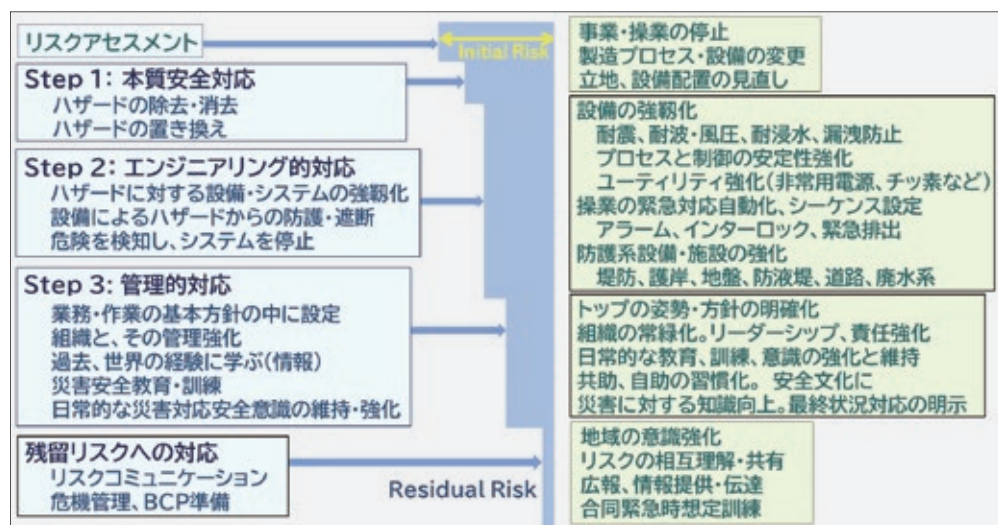
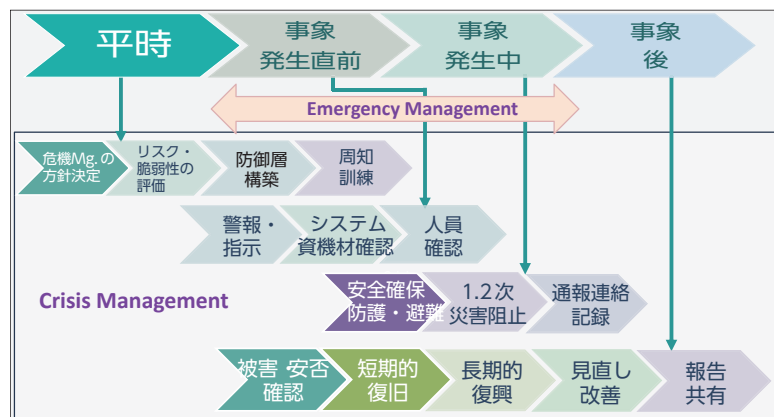


図7 自然災害に対する危機管理と緊急事態対応



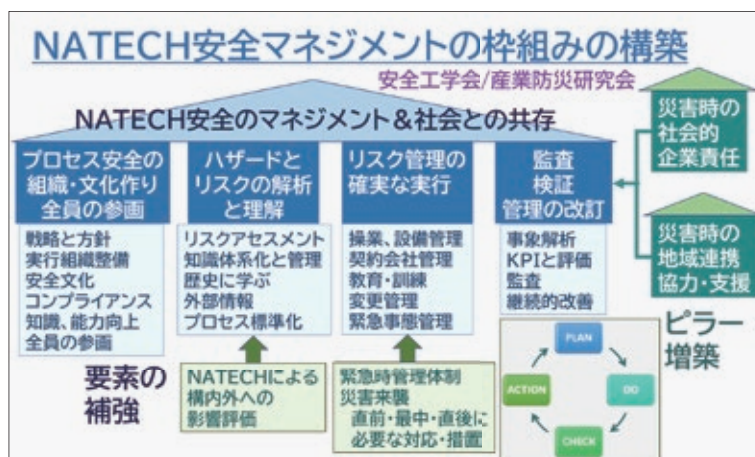
ザードの場合、第1ステップで実施されるハザードの除去や置き換えによる本質安全対応は困難な場合が多いが、図6に示す様なプロセス⁹⁾でリスク低減の実現を図る事は不可能ではないと思われる。また、図7に示す様に必要なリスク対応アクションを時間軸に沿って、平時の自然災害対応、自然災害来襲の直前、自然災害来襲中、災害が去った後の4ステップで示す方法は、現場には理解が容易で実用的であると思われる。化学プラントにおけるプロセス安全のマネジメントを構成する枠組みとしては、アメリカ

労働安全衛生庁（OSHA）が法的に要求する14要素からなる Process Safety Management（PSM）、アメリカ化学工学協会の化学プロセス安全センター（CCPS）が提案する20要素からなるリスク基準のPSMなどが良く知られている。さらにアメリカ環境保護局（EPA）は、工場外の環境や人への影響をコントロールするための要素を

加えた Risk Management Plan（RMP）の履行を事業者要求している。

安全工学会の産業防災研究会では Natech を想定した化学プラントのリスクマネジメントのために、既存のこうしたマネジメント要素の強化と、加えて工場内で発生した災害(危害)の周辺環境や社会への短・長期的影響についての詳細解析、災害来襲の直前、最中、後に必要な緊急事態措置、企業の社会的責任の検証、災害に対しての地域における連携と協力に関する要素などを織り込んだ図8に示す「強化された枠組み」を提案している⁹⁾。今後更に、この強化された Natech 安全マネジメントシステムのパフォーマンスを評価する指標の開発が必要である。

図8 NATECH 安全マネジメントのために提案された枠組み

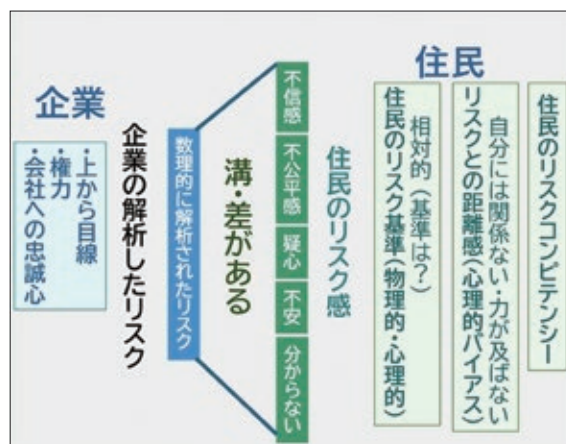


9. おわりに：Natech に関わる地域社会とのリスクコミュニケーション

前述の様に、自然ハザードは巨大なエネルギーを有し、かつ地震の様に発生を予知できない事象もある。また広範囲な地域が同時に危害に曝され、そこに立地する全ての工場、地域社会、インフラストラクチャーがともに被害を受け、新たな技術的、社会的、人的な災害の源にもなり得る。この様な巨大なリスクに対処するためには、工場と工場、工場と地域社会、地域社会の中、地域行政などが、単に「安全をアピール」するのではなく、お互いに「リスクを認識し、共有する」事が重要である。しかし、工場と住民の間には図9に示す様に、互いのリスク感や基準、リスクコンピテンシー※1などに溝や距離感が存在し課題も多い。また自然災害に対して地域の安全を護り、災害被害者の権利を保護するためには、行政の改革や、社会における災害コストの配分（費用だけではなく移住や Compact city 構想への取り組みなども含む）の議論も必要である。

一方では、現在はソーシャルメディアの隆盛により個人の感情が瞬時に増幅し過去のマスコミの枠を経ることなく拡大する。社会が、自然災害による個人的災害だけではなく、技術的災害と社会的災害それぞれのリスクを正しく理解し、正しく恐れて、共に備える事が重要であると思われる。

図9 企業-住民間の NATECH リスクコミュニケーションにおける課題



- urity in process industry of Japan under the NATECH case., 7th Global summit on process safety. Himeji, GSPS, CCPS-JSSE, 2023
- http://enatech.jrc.ec.europa.eu/（参照日：2025年7月10日）。
 - 白崎正彦：石油火災の経験，安全工学21，6，446-449，1982。
 - KHK：高圧ガス事故概要報告書，2011-078 LPG 球形貯槽の倒壊による火災爆発，https://www.khk.or.jp/Portals/0/resources/activities/incident_investigation/hpg_incident/pdf/2011-078r1.pdf（参照日：2025年7月10日）。
 - 石丸裕：NATECH とそのリスクマネジメント，安全工学63，6，360-366，2024。
 - JRC: RAPID-N: Rapid Natech Risk Assessment Tool, <https://rapidn.jrc.ec.europa.eu/>（参照日：2025年7月10日）。

参考文献

- 気象庁：気候変動ポータル，<https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/menu/>（参照日：2025年7月10日）。
- Our World in Data: EM-DAT, CRED/UCLouvain, 2024. <https://ourworldindata.org/grapher/natural-disasters-by-type>
- 岸本充生：NATECH（自然災害起因の産業事故）リスクの評価と管理，安全工学53，4，214-219，2014。
- P.S. Showalter, M.F. Myers: Natural disasters as the cause of technological emergencies, A review of the decade 1980-1989, Univ. of Colorado, 1982.
- H.Ishimaru: Management of safety and equipment integ-

いしまる へいさる

北海道大学工学部を卒業後、住友化学工業（株）（現 住友化学（株））に入社。生産技術センター所長（1999年）。住友ケミカルエンジニアリング（株）代表取締役社長（2006年）。2014年から現職。

※1
リスクコンピテンシー
組織や個人がリスクを適切に理解し、対応するための能力。