

安全安心社会研究

第 **11** 号

2024年3月



国立大学法人長岡技術科学大学

安全安心社会研究センター

巻頭言

安全安心社会研究センター センター長
門脇 敏

近年、我が国では地震が多発しており、広い範囲にわたり甚大な被害を被っている。今年の元旦には能登半島で最大震度7の地震が発生し、現在も復旧活動が続いている。

本学が設置されている新潟県長岡市においては、ここ20年間で、強い地震を5回も経験している。具体的には、

| | | |
|-------------|-----------|-----------|
| 2004年10月23日 | 新潟県中越大震災 | 長岡市最大震度7 |
| 2007年7月16日 | 新潟県中越沖地震 | 長岡市最大震度6強 |
| 2011年3月11日 | 東日本大震災 | 長岡市最大震度5弱 |
| 2011年3月12日 | 新潟・長野県境地震 | 長岡市最大震度5弱 |
| 2024年1月1日 | 能登半島地震 | 長岡市最大震度6弱 |

である。20年間で5回の強い地震を経験していることから、我々は地震を必ずしも稀な事象と考えることが出来ず、定期的に発生するものと仮定して、安全に係わる対策を立てる必要に迫られている。

機械類の安全関連制御システムに係る国際安全規格として、ISO 13849-1 (JIS B 9705-1)「機械類の安全性—制御システムの安全関連部—第1部：設計のための一般原則」が知られている。この規格に記載されているパフォーマンスレベルを参照すると、単位時間当たりの危険側故障発生 の平均確率 (PFHD) は、レベルaにおいて $10^{-5} \leq \text{PFHD} < 10^{-4}$ となっている。1年が約 10^4 時間であることから、大まかに見

積もると、長岡市での強い地震の発生確率はレベル a とほぼ同等と理解することが出来る。この確率は、地震における被害の甚大さを考慮すると、必ずしも小さくないものである。

これまでの安全対策において、地震については特別な扱い、つまり稀にしか発生しないであろうという仮定に基づいた扱いをしていた傾向がある。しかし、今後は、定期的に発生するものと仮定して、適切な安全対策を立案する必要がある。

この機会に、安全対策において、地震を十分に考慮して欲しい。これにより、我々の安全に対する意識がこれまで以上に高くなり、結果として、安全安心社会が構築されることになる。ここにおいて、我々は、安全安心社会の構築を切に願うものである。

内容目次

【巻頭言】

安全安心社会研究センター長 門脇 敏 i

【特集：燃焼安全】

1F 事故の水素爆発と現在の規制

原子力規制庁 西村 健 1

燃焼による災害(火災・ガス爆発)の現象解明とリスク低減

東京大学／東京理科大学 土橋 律.. 10

アンモニア燃料による発電技術

株式会社 I H I 藤森 俊郎 20

【客員研究員活動報告】

日本の食糧事情

今枝 幸博 33

労働安全衛生法の新たな化学物質規制

岩岡 和幸 35

| | |
|--------------------------------------------|----|
| 食品安全に求められる衛生設計 大村 宏之 | 37 |
| 急増するアニサキス食中毒 川瀬 健太郎 | 39 |
| 持続可能な Integration Goal 設定の試み 櫻井 剛 | 41 |
| 事故防止～論理学を適用して考える 杉本 旭 | 43 |
| 産業機器のリスクコミュニケーション 谷口 満彦 | 46 |
| 医療機器のアラーム 野沢 義則 | 48 |
| 働く人の安全・健康・ウェルビーイング 松浦 裕士 | 50 |
| 製品安全競争力の見える化について2 松田 利浩 | 52 |

| | |
|----------------------------------------|----|
| 安全をどう伝承するか 吉澤 厚文 | 54 |
| 令和4～5年度 安全安心社会研究センター主催の講演等の活動 | 56 |
| 長岡技術科学大学における安全安心社会の構築に向けた取り組み | 61 |

1F 事故の水素爆発と現在の規制

原子力規制庁 西村 健

1. 1F 事故を振り返る

東京電力福島第一原子力発電所（1F）の事故とは何だったかと問えば、地震と津波によってすべての電源を失った事故であると解される（図1）。これを起因として炉心溶融と原子炉建屋の水素爆発という厳しい事象に進展し、放射性物質が環境に拡散された。

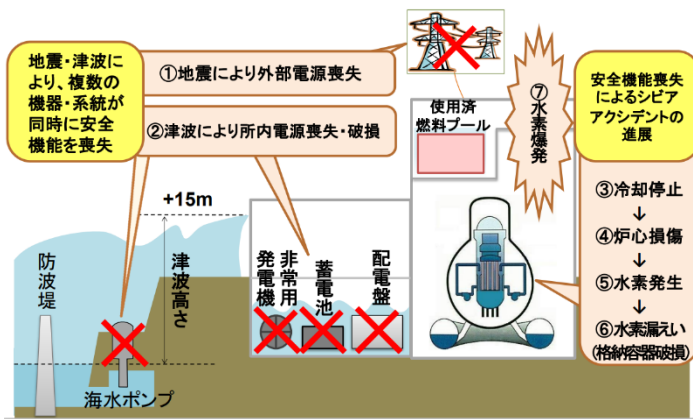


図1 東京電力福島第一原子力発電所事故の進展の概要¹⁾

原子力発電所には、様々なトラブルなどから重大な事故に進展しないように、数多くの安全設備が用意されている。例えば、炉心の冷却を目的とした非常用炉心冷却系と呼ばれる注水設備がある。注水にはポンプが必要であるから、この駆動のために外部電源や非常用発電機によって必要な電力を供給する。1F 事故ではこれらの電源が地震と津波によって失われた。その結果、炉心の冷却が出来なくなった。

冷却が出来なくなった炉心は、とても大きな水素の製造工場に変わる。炉心に装荷される核燃料は、二酸化ウランを焼結したペレットと呼ばれるものを、ジルコニウム合金で作られた鞘状の燃料棒被覆管（被覆管）に詰めたもので構成される。炉心の冷却が出来なくなり、冷却水から燃料棒が露出すると、核燃料の崩壊熱によって被覆管が加熱される。被覆管の表面温度が約 1000℃を超えたあたりから、ジルコニウムと水蒸気が化学反応を起こすようになり、被覆管のジルコニウムと酸素が結合し酸化膜ができる。その結果、水蒸気に含まれていた水素分子だけが気相中に取り残されるといったメカニズムである。

熱出力 3800MW 程度の沸騰水型原子炉 (BWR: Boiling Water Reactor) では、炉心に存在する全てのジルコニウムの水蒸気酸化によって 3 トンを超える水素が発生することが知られている²⁾。これを熱出力の比率にしたがって 1F の各号機に置き換えれば、表 1 のような水素の発生ポテンシャルがあることが試算できる。実際に 1F 事故での水素爆発に関与した水素の質量は明らかになっていないが、これまでに公表されている解析の検討例からはこのような発生ポテンシャルで十分足りるのではないかということがうかがわれる。このように炉心で発生した水素は、原子炉格納容器（格納容器）の継ぎ目のシーลが破損したことによって原子炉建屋に滞留して爆発を起こしたというのが、これまでに考えられている 1F での水素爆発の経緯である。

表1 炉心ジルコニウムの全量酸化により発生する水素量の目安

| | 参考文献 2) | | 福島第一原子力発電所 3) | | |
|-----------|-------------|-------------|---------------|---------|---------|
| | Typical PWR | Typical BWR | 1号炉 | 2~5号炉 | 6号炉 |
| 熱出力(MW) | 3600 | 3600 | 1380 | 2381 | 3293 |
| 水素量目安(kg) | ~1150 | ~3360 | ~1288** | ~2222** | ~3073** |

**簡単に熱出力比に比例して水素が発生すると仮定して筆者が試算したもの

現在の規制基準では、このような 1F 事故の経緯が分析されたことによって、電源の多重化や原子炉建屋での水素防護対策など、事故の前と比べれば多くの対策の設置を義務づけられている。筆者は、これらが相互に機能することによって安全性は事故前と比べても飛躍的に高くなったと考えている。同時に、誤解を恐れずに言えば、だからと言って危険性がすべて取り除かれた、リスク¹がゼロになったということではない。実現しているのは危険性やリスクを小さくすることである。

2. 原子力発電所と水素爆発のリスク

原子力発電所で水素爆発が起こるとなぜ困るのか。水素を含めたガス爆発に属する事故は世界規模で比較的頻繁に経験する。国内では名古屋、渋谷、札幌、新橋とガス爆発のニュースが飛び交ったことは記憶に新しいし、衝撃的なものでは 2020 年にレバノンの首都ベイルートで発生した化学工場の爆発事故があるだろう。これは、核爆発を除き人類が引き起こした史上最大級の爆発だったともいわれる⁴⁾。確かに映像の比較だけで考えれば、ベイルートの爆発規模は 1F で生じた

¹ 事象の「発生頻度」と事象が発生したことによる「影響の大きさ」の積と定義される。

水素爆発に比べても規模が大きいように見えるし、直接的に爆発で被害を受けた死者、負傷者等は比較にならないほど多かったということは事実である。

現在（本稿の執筆は2023年）のベイルートに目を向ければ、グラウンドゼロの爆発によってえぐれた地形と一部の取り残された建築物を除き、周辺地区はある程度の整理が進んでいるようである。他方、1Fについては、事故後10年を経てもなお爆発現場の片づけという意味では進みが緩やかである。この要因は一言で放射線の影響と言っても過言ではない。原子力発電所は環境への放射性物質の拡散を防止するために多重の壁によって閉じ込める設計思想をもつ。1Fの水素爆発で破壊された原子炉建屋もその役割を担う。このような建造物で水素爆発が起これば、放射性物質を閉じ込める壁が吹き飛ぶという機械的な被害に留まらず、放射線という見えない脅威による被害も同時に起こるだけでなく長期に渡りその影響が現場に残るということが、原子力発電所に特有の事情である。

先に説明したように、原子力発電所で水素爆発が起きるということは、基本的に炉心が何らかの形で損傷している状態にある。したがって、少なくとも原子炉格納容器の内部については炉心燃料から放出された放射性物質によって高い放射線レベルの環境となる。1Fのように原子炉格納容器の外側の原子炉建屋で水素爆発が起こるということは、水素だけでなくそれらの放射性物質も伴って漏れ出し、滞留していると考えの方が自然であり、爆発に伴ってこれらの放射性物質がサイト内外に放出される。その結果、人間が無防備に原子炉建屋周辺に近くことを困難にする。炉心が何らかの形で損傷している状態にあるということは、事故を収束させるための対策や作業を並行して進めなければいけない状態である。水素爆発によって建屋のコンクリート片が飛び散れば、周囲の作業員の負傷や準備した資器材の損傷など、二次

的な被害が大きくなることもまた 1F 事故の教訓である。だから、原子力発電所で水素爆発が起こることは困るのである。

水素爆発のリスクがないとは、水素爆発が起こらないか、起きたとして影響が無視できる範囲に留まるということのいずれかを指すと考える。水素爆発を起こさないためには、作らせない（可燃物）、混ぜない（酸素）、火をつけない（熱）、という燃焼の 3 要素のいずれかひとつでも満たせばよいのだが、原子力発電所においてこれを実現することはおそらく不可能と思われる。炉心が水素の発生源であり、長期的には放射線によって水が分解することでも水素は発生する。水素を作らせないということは、技術的にまだ実現できていない（技術開発は進められている）。火をつけないということも案外難しい。1F 事故では停電状態にあったから家庭で指摘されるような漏電などの着火源は存在しなかったと思われる。それでも何かの要因で着火し爆発した。専門家の中には静電気により着火したのではないかという意見もある。2001 年には中部電力浜岡原子力発電所の 1 号炉で配管破断に至る水素燃焼が発生した。この際、配管内面に付着していた貴金属が触媒として作用した可能性がある⁵⁾。このように滞留する水素がどのように着火するかは、水素が気体の中でも最も少ないエネルギーで着火する性質であるために種々要因がある。したがって、火はついてしまうと考える方が安全の観点では適切に見える。残るは混ぜないということであるが、結論から言えば支燃剤濃度（例：酸素）を低く維持するという対策は実際に採用されている。加えて、水素爆発が起きてても影響が無視できる範囲に留めるという観点で、可燃物（水素）と酸素を消費して量を削減するという要素も考えることが出来る。かつて、フィルムケースに充填した水素に火をつけて燃焼挙動を観察するという実験を中学校の理科の授業で経験した。授業で扱えるのだから当然実害はない。あえて極端に言えば、原子力発電所で問題にな

る水素についてもこれと同様になればよいということになる。このことが、1F事故の反省と教訓から現在の原子力発電所で取り入れられている水素爆発防止の対策の根幹になっている考え方と筆者は理解する。

3. 現行規制下での原子炉建屋の水素防護

原子力発電所の安全性を考えるうえで重要な視点到深層防護⁶⁾ (Defense in Depth) という概念がある。単純に言えば、安全のために幾重にも対策を施すという概念である。実際には、事故の進展のレベルに応じて多段階の対策を設定するが、原則として前段の対策に失敗した状態を前提として事故の防止や緩和を達成することが、採り入れられる対策には求められる。表2に原子力規制委員会が示す原子力発電所に対する深層防護の考え方を紹介する。第3層を簡単に言えば炉心損傷を防止するということである。原子力発電所では、炉心損傷を契機に大量の水素が発生するということであつたから、水素爆発によるリスクは第4層での課題として位置付けられる。

表2 原子力発電所における深層防護の概要¹⁾

| 深層防護の階層 | 概要 |
|---------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 第1層 | 通常運転状態からの逸脱と安全上重要な機器等の故障を防止することを目的として、品質管理及び適切で実証された工学的手法に従って、発電所が健全でかつ保守的に立地、設計、建設、保守及び運転されることを要求するもの。 |
| 第2層 | 発電所で運転期間中に予期される事象が事故状態に拡大することを防止するために、通常運転状態からの逸脱を検知し、管理することを目的として、設計で特定の系統と仕組みを備えること、それらの有効性を安全解析により確認すること、さらに運転期間中に予期される事象を発生させる起因事象を防止するか、さもなければその影響を最小に留め、発電所を安全な状態に戻す運転手順の確立を要求するもの。 |
| 第3層 | 運転期間中に予期される事象又は想定起因事象が拡大して前段のレベルで制御できず、また、設計基準事故に進展した場合において、固有の安全性及び工学的な安全の仕組み又はその一方並びに手順により、事故を超える状態に拡大することを防止するとともに発電所を安全な状態に戻すことができることを要求するもの。 |
| 第4層 | 第3の防護レベルでの対策が失敗した場合を想定し、事故の拡大を防止し、重大事故の影響を緩和することを要求するものである。重大事故等に対する安全上の目的は、時間的にも適用範囲においても限られた防護措置のみで対処可能とするとともに、敷地外の汚染を回避又は最小化することである。また、早期の放射性物質の放出又は大量の放射性物質の放出を引き起こす事故シーケンスの発生の可能性を十分に低くすることによって実質的に排除できることを要求するもの。 |
| 第5層 | 重大事故に起因して発生しうる放射性物質の放出による影響を緩和することを目的として、十分な装備を備えた緊急時対応施設の整備と、所内と所外の緊急事態の対応に関する緊急時計画と緊急時手順の整備が必要であるというもの。 |

現在取り入れられている水素爆発防止の対策は大きく分けて、①低濃度で燃やす、②希釈する、③排出するの3つのパターンがあり、適宜組み合わせられる。代表的な手段を挙げれば主に西日本に多く設置されている加圧水型軽水炉（PWR: Pressurized Water Reactor）では、格納容器の中の水素は「①低濃度で燃やす」対策が採られている。他方、東日本に多く設置されているBWRでは、格納容器内は「②希釈する」対策が採られている。この違いは格納容器が有する体積の違いによるところと考えられる。代表的な炉型の格納容器で見れば、両者には7倍程度の体積の違いがあるから、当然同じ質量の水素発生条件で達成する可燃性の気体組成も大きく異なる。この点で不利なのがBWRであり、PWRに対して小容積の格納容器であることから燃焼させた際の圧力・温度の影響が相対的に大きくなるため、不活性の窒素を格納容器内に充填して“酸素を”希釈して可燃状態に至らせないという対策が採られている。

4. まとめ

本稿では、2011年3月の東北地方太平洋沖地震をきっかけに発生した1F事故での水素爆発に関する考察と、事故から得られた反省と教訓がその後の原子力規制においてどのように活かされてきたかを概観して述べた。1F事故により多くのことを学び、これにより原子力発電所の安全性向上が進められてきたものとする。しかし、どれだけ安全性が高くなったとしてもリスクがゼロになることはなく、したがって常にリスク要因となることを探求し、適切な対策を当てていく取り組みを進めることが、安全安心な社会の実現において必要なことであると考える。

謝辞

本稿を結ぶにあたり、執筆のお誘いを頂いた門脇 敏教授には、このような機会を頂いたことに感謝いたします。また、これまで水素安全に関して共に議論をしてきたすべての同僚に感謝いたします。

参考文献

- 1) 原子力規制委員会、「実用発電用原子炉に係る新規規制基準の考え方について」、NREP-0002、(令和4年12月14日改訂)
- 2) IAEA, “Mitigation of Hydrogen Hazards in Severe Accidents in Nuclear Power Plants”, TECDOC-1661, 2011
- 3) 東京電力ホールディングス、「福島第一原子力発電所 設備の概要」(https://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/outline_f1/)
(最終アクセス令和5年10月)
- 4) Newsweek、「ベイルートの爆発事故は、核爆発を除いて人類が引き起こした史上最大級の爆発だった」、2021年3月24日
(<https://www.newsweekjapan.jp/stories/world/2021/03/post-95912.php>)
(最終アクセス令和5年10月)
- 5) 大野ら、「浜岡原子力発電所1号機 配管破断事故」、日本原子力学会誌、Vol. 44, No. 11、(2002)
- 6) IAEA, “Defence in Depth in Nuclear Safety”, INSAG-10, 1996

燃焼による災害(火災・ガス爆発)の 現象解明とリスク低減

東京大学／東京理科大学 土橋 律

1. まえがき

火災、爆発災害は古くから存在する災害であり、可燃性物質の燃焼により被害が発生するものである。爆発についてはここでは特に可燃性ガスにより発生するガス爆発に注目する。時代の変化とともに可燃性物質は変化してきたが、火災・ガス爆発災害は現在でも無くなることはない。しかし、火災・ガス爆発災害につながるハザードである可燃性物質が変化することによりその内容やリスクは変化している。近年では、例えば以下のような環境問題への対応による新たな火災・ガス爆発災害のリスクが発生していることは気になる点である。

- ・ スプレーの噴射剤や冷蔵庫の冷媒に使われていたフロン（難燃性）はオゾン層破壊作用や温暖化作用があるため、可燃性ガスに置き換えられ、そのためにガス爆発事故等が発生している。
- ・ 水素はカーボンフリーであるエネルギーキャリアとして、地球温暖化対策として導入が進められている。水素は燃焼しやすく燃焼速度も速いため火災・ガス爆発災害のリスクが増大する。この点についての詳細は、後段で説明する。

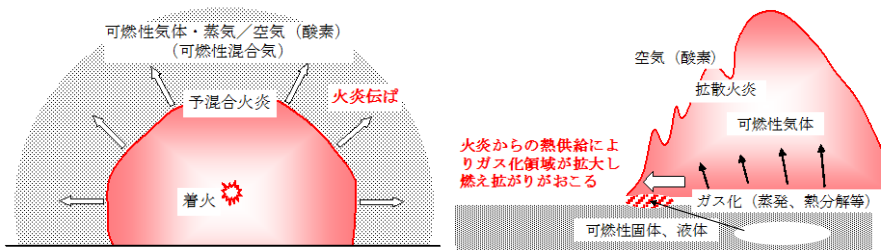
以上は、オゾン層破壊や地球温暖化の環境リスクを低減する活動により、火災・ガス爆発のリスクが新たに生じているとも捉えることができる。このような新たに生じたリスクを対抗リスクと呼ぶが、対抗リ

スクである火災・ガス爆発のリスク低減をはかり、総合的にリスクを下げる視点が必要である。

本稿では、予混合燃焼と拡散燃焼という燃焼の2形態の特徴を説明するとともに、水素に着目してガス爆発災害のリスク評価、対策について説明する。関係する資料は、参考文献に挙げておく[1-5]。

2. 燃焼の形態（予混合燃焼と拡散燃焼）

可燃性物質の燃焼は、可燃性物質と酸化剤（通常は空気中の酸素）が反応して発生する。燃焼反応の起こっている燃焼反応帯（火炎）は通常は気相に存在し、可燃性物質が固体や液体の場合でもそれらが蒸発や熱分解等で気化して発生した可燃性気体が火炎で反応している。可燃性気体と酸化剤（空気中の酸素）が火炎に供給される形態により、火炎は予混合火炎(A)と拡散火炎(B)の2種類に大別される(図1)。



A 予混合火炎の伝ば

B 拡散火炎の燃え広がり

図1 予混合火炎（燃焼）と拡散火炎（燃焼）の形態

A 予め混合された可燃性物質と酸化剤が燃焼する形態（予混合燃焼、予混合火炎）

- ・このような燃焼形態を予混合燃焼、形成される火炎を予混合火炎と呼ぶ
 - ・可燃性物質が液体や固体の場合には、気化した可燃性気体が酸化剤と混合して一定程度以上の予混合気体が形成された時に発生する。ガソリン等の蒸発しやすい液体では多量の可燃性気体が発生しやすい
 - ・火炎は未燃焼の可燃性混合気体中に燃え進む（伝ばする）
 - ・この形態では火炎は伝ばとともに高速に移動する
 - ・ガス爆発ではこの形態の燃焼が起きている
 - ・燃焼可能な混合媒体中を火炎が伝ばし終わると、この形態の燃焼は終了する（比較的短時間で終了する）
- B 可燃性物質と酸化剤の境界で燃焼が起こる形態（拡散燃焼、拡散火炎）
- ・このような燃焼形態を拡散燃焼、形成される火炎を拡散火炎と呼ぶ
 - ・可燃性気体のかたまりと、その周囲の空気（空気中の酸素が酸化剤となる）の境界に火炎が形成される
 - ・可燃性物質が液体や固体の場合には、蒸発、熱分解等で液体や固体の周囲に発生した可燃性気体の外側に火炎が形成される
 - ・可燃性気体と空気の境界に火炎が形成されるため、未燃焼媒質中に燃え進む（伝ばする）ことは無い（伝ば性は無い）
 - ・可燃性物質が蒸発、熱分解する領域が広がることで、燃焼範囲は広がってゆく（火炎伝ばと区別して燃え拡がりと呼ばれる）が、Aの形態の伝ばよりも移動は遅い
 - ・火災では主にこの形態の燃焼が起きている
 - ・可燃性液体や固体の気化により可燃性気体が供給され続ける場合には、長時間燃焼が継続する

- ・拡散火炎の火炎帯では、可燃性気体と酸素の分子拡散による輸送現象が燃焼反応の律速段階（拡散律速）となっているため拡散火炎と呼ばれている。乱流の存在下では拡散律速とならなくなるため、乱流時も含めて可燃性気体と酸化剤を予め混合しない火炎を非予混合火炎と呼ぶことがある

上述のように、可燃性物質が酸化剤と予め混合されている状態で燃焼したAの場合（予混合燃焼）にはガス爆発災害となり、予め混合されていないBの場合（拡散燃焼）には火災となることが理解できる。上述の内容を表1に簡単にまとめておく。

表1 予混合燃焼（火災）と拡散燃焼（火災）の比較まとめ

| | 予混合燃焼（火災） | 拡散燃焼（火災） |
|------|--------------------------------------|---------------------------------------|
| 形態 | 燃料と酸化剤は火炎に到達する前に混合している | 燃料、酸化剤が火炎の両側から別々に供給される |
| 律速過程 | 反応速度、熱移動速度が律速 | 拡散速度が律速 |
| 伝ば性 | 伝ば性ある 燃焼速度が定義される （火炎伝ば） | 伝ば性無い 燃焼部分の拡大は起る （燃え拡がり） |
| 例 | ブンゼンバーナーの内炎 ガス爆発時の火炎 | ろうそくの炎 火災時の火炎 |

3. 火災、ガス爆発災害の過程（シナリオ）とリスク

最近では危険性の評価として、よりの確・合理的な安全管理が可能となるリスク評価がしばしば用いられる。リスクは、想定される危険現象の「発生可能性」と、発生した場合に予想される「被害の大きさ」の双方を考慮して評価される。発生可能性が高く、予想される被害が大きい事象が最もリスクが高くなる。想定された現象の発生可能性や予想される被害の大きさを小さくする対策をとればリスクを小さくす

ることができる。火災、ガス爆発災害のリスク評価については、これらの災害の過程（シナリオ）を想定・設定し、そこで考えられる危険現象の「発生可能性」と「被害の大きさ」についてまとめることでリスク評価（リスクアセスメント）をおこなうこととなる。

3.1 ガス爆発災害の過程（シナリオ）と発生可能性、被害の大きさ

本稿では、特にガス爆発災害時についてのリスク検討について説明する。ガス爆発災害の一般的な過程（シナリオ）を図2に示す。図では、可燃性ガスが漏洩し、空気との混合ガスが形成された後、そこに着火して火炎伝播が起こる過程を想定している。

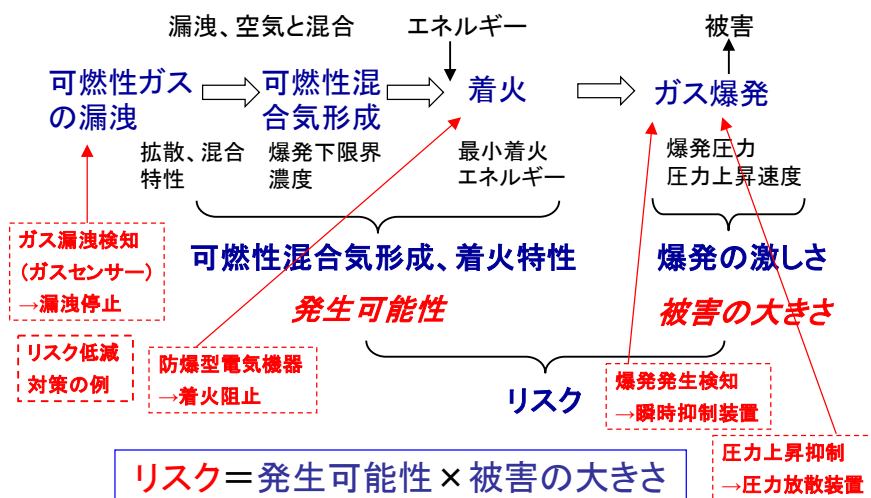


図2 ガス爆発の過程（シナリオ）とリスク評価

この一般的なガス爆発の過程（シナリオ）より、ガス爆発災害の「発生可能性」に強く関与するのは着火までの過程であり、「被害の大きさ」に関与するのは着火後の過程であることが分かる。ガス爆発災害の発生可能性と被害の大きさに関係する主要な現象をまとめると以下となる。

・「発生可能性」に関係する現象：

可燃性ガスの漏洩現象、可燃性混合ガスの形成現象、可燃性混合ガスへの着火現象 等

・「被害の大きさ」に関係する現象：

火炎伝ば現象、圧力上昇とそれによる破壊・破片飛散現象、圧力波（爆風）により被害が発生する現象、熱影響や焼損により被害が発生する現象 等

3.2 各ガスの特性値による考察

これらの、「発生可能性」および「被害の大きさ」については、関係する可燃性ガスの特性値から検討することができる。主要な特性値を表2にまとめた。水素の特性値に注目するが、比較として一般に広く用いられている可燃性ガスであるメタン（天然ガスの主成分）およびプロパン（LPGの主成分）の特性値も掲載した。

①発生可能性に関する特性

- ・爆発範囲（爆発限界）：爆発下限界濃度はプロパンよりは少し高いが、水素の爆発範囲は非常に広い。
- ・最小着火エネルギー：水素が桁違いに小さい。

以上より、他の2種類のガスに比較して、水素はガス爆発の発生可能性が大きくなる傾向があることが理解できる。

②被害の大きさに関する特性

- ・燃焼速度：水素が桁違いに速い。

- ・圧力上昇速度：水素が桁違いに大きい。
- ・燃焼熱、発熱速度：モル当たり（体積当たり）の燃焼熱はプロパンが一番大きく、水素が一番小さい。しかし、燃焼速度も考慮した単位時間当たりの発熱速度を、火炎の単位面積当たりで計算すると、水素が他より一桁大きくなる。
- ・爆風圧：ビニールハウスを使ったほぼ開放系の実験において、水素はプロパンに比べて数十倍爆風圧強度が大きくなる。

以上より、他のガスに比較して、水素はガス爆発発生時の被害が大きくなる傾向があることが理解できる。

このように、水素はメタンやプロパンに比較して、ガス爆発災害の「発生可能性」および「被害の大きさ」双方においてかなり大きくなり、リスクが大きくなる傾向があることが分かる。したがって、水素を新たに導入する場合には、十分なリスク評価とリスク低減対策を事前におこなうことが肝心である。

表2 各ガスのガス爆発災害のリスクに関する特性値

| ガス | 発生可能性 | | 被害の大きさ | | | | |
|------------|------------------|---------------|---------------|--------------------------------------|----------------|------------------------------|--------------------------------------------------|
| | 爆発範囲 (爆発限界) | 最小着火 エネルギー | 燃焼速度 (最大値) | 圧力上昇 速度, K _G -value | 燃焼熱 | 発熱速度 (層流火炎 単位面積 当り) | 爆風圧強 度 (27m ³ 突 撃最大値, 10m地点) |
| 水素 | 4.0 % - 75 % | 0.02 mJ | 2.6 m/s | 55 MPa m/s | 290 kJ/mol | 10 MJ/s m ² | 2.8 kPa |
| CNG メタン | 5.0 % - 15 % | 0.3 mJ | 0.4 m/s | 5.5 MPa m/s | 890 kJ/mol | 1.5 MJ/s m ² | |
| プロパン | 2.1 % - 9.5 % | 0.3 mJ | 0.4 m/s | 7.5 MPa m/s | 2200 kJ/mol | 1.6 MJ/s m ² | 0.09 kPa |

at unit area of
laminar flame front

ここで特に、水素のガス爆発発生時の「被害の大きさ」が他のガスより大きいのは、燃焼速度が速いことが影響している。図3に可燃性ガスと空気の混合気の燃焼速度を、濃度に対して示している。これを見ると、水素は、広範囲の濃度において燃焼速度が他の2つのガスより桁違いに速いことがお分かりいただけると思う。

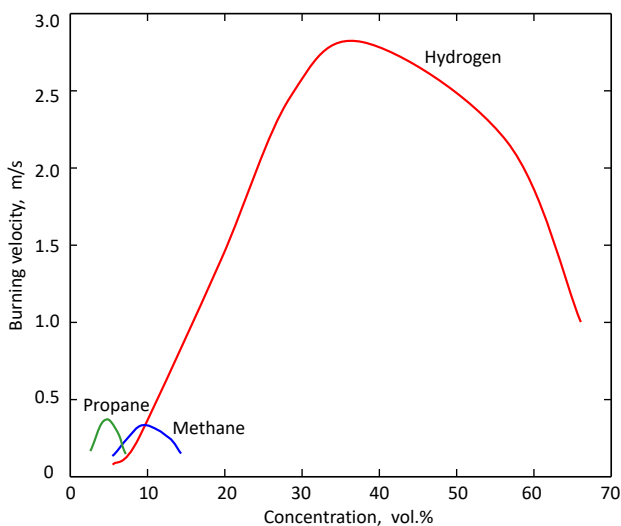


図3 各ガスの燃焼速度

3.3 リスク低減対策

評価されたリスクについては、事前に対策をおこなってリスクを低減することが安全確保をする上で有効である。可燃性ガスの使用を止めない限りリスクはゼロにならないので、目標はリスクゼロではなくリスクを許容レベル以下にすることとなる。このようなリスク低減を目指す安全管理の方法は、リスクマネジメントとも呼ばれる。具体的

なりリスク低減対策については、リスク評価の過程で出てきた「発生可能性」と「被害の大きさ」の原因となっている要因について対策することで実施することができる。例えば、以下のような対策が考えられる。

- ・漏洩ガスの検知→漏洩の停止
- ・防爆型電気機器の導入→電気機器による着火の阻止
- ・瞬時抑制装置の設置→爆発発生検知による爆発瞬時抑制
- ・圧力放散装置の設置→圧力放散による圧力上昇の抑制

これらは一例ではあるが、「発生可能性」や「被害の大きさ」を小さくしてリスク低減をはかるものである。これらについては、図2中にも記載してある。

4. まとめ

火災、ガス爆発災害は、燃焼現象により発生する災害であり、時代の変化とともに用いられる可燃性物質やその使用方法は変化するものの、無くなることのない災害である。本稿では、まずはそれらの現象を決める燃焼形態について説明し、火炎の伝ばおよび燃え広がり現象の違いなどについて簡単に説明した。

災害現象は、「発生可能性」と「被害の大きさ」を用いたリスク評価をおこなうことで合理的な評価と対策が可能となる。ガス爆発災害について、典型的なシナリオを例示してリスク評価の説明をおこなった。

可燃性ガスの特性値の検討から、水素はガス爆発災害のリスクが大きくなりやすいことが分かる。水素の導入には一層の安全配慮が必要である。

参考文献

- [1] 土橋律、「物質安全の基礎—その4：可燃性気体—」、安全工学、46-5、p. 322 (2007)
- [2] 土橋律、「災害防御のための燃焼制御技術 —火災・爆発安全への応用例—」、日本燃焼学会誌、Vol. 52、No. 160、pp. 101-106 (2010).
- [3] 土橋律、「火災・爆発現象とその危険性評価・防止対策」、バルブ技報、Vol. 25, No. 1, pp. 33-39 (2010)
- [4] R. Dobashi, “Studies on accidental gas and dust explosions” Fire Safety Journal, Vol. 91, pp. 21-27, (2017).
- [5] 土橋 律、「爆発安全の科学—ガス爆発と粉じん爆発のリスク評価—」、安全工学、59 卷 4 号、211-216 (2020).

アンモニア燃料による発電技術

株式会社 I H I 藤森 俊郎

1. はじめに

火力発電からの二酸化炭素排出量は、4.3 億トン（2019 年）と国内総排出量の 4 割を占め、その削減が強く求められている。一方、変動性再生可能エネルギーが大量導入された場合においても、需給調整、電力系統安定、さらには安全保障の面から、火力発電は必要である。温室効果ガス排出削減に向け、日本政府は「2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」を 2020 年 12 月に策定した⁽¹⁾。水素・アンモニア燃料は、成長が期待される重要分野と位置づけられ、2050 年で発電量の 10%を担い、それに先駆けて 2030 年に 1%導入開始することが想定されている。

アンモニアは、肥料、化学原料として世界で約 2 億トンが生産され、その約 1 割が船舶輸送により国際的に流通している⁽¹⁾。燃料として利用された場合には、製造プロセスのカーボンニュートラル化、大規模な貯蔵、輸送技術、さらにはアンモニアを燃料とする動力熱機関技術の実用化が必要となる。2014 年度から 2018 年度まで実施されたエネルギーキャリア、戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)において、日本が世界に先駆け、アンモニア燃料による発電技術開発を実施した⁽²⁾。その成果は、2021 年度より実施されているグリーンイノベーション(GI)基金による社会実装に向けた様々な開発へ進展している。

また、世界的にも注目度が高まり、複数調査機関によるアンモニア燃料に関する報告や研究開発が行われている⁽³⁾。

本稿では、燃料アンモニアバリューチェーンの構築と発電技術開発について、IHI の取り組みを中心に紹介する。

2. アンモニアバリューチェーン⁽⁴⁾

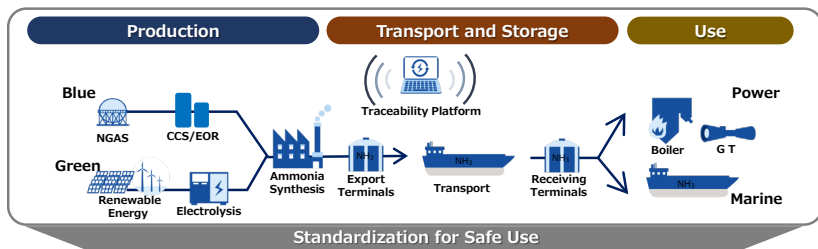
2.1 エネルギーキャリアとしてのアンモニア

再生可能エネルギーが豊富で安価な地域から日本へ水素を導入するには、船舶輸送が主となる。このため、水素の輸送媒体は、輸送効率から容積当たりのエネルギー保有量が高く、運用面や安全保障の観点から長期の貯蔵期間が可能であることが望ましい。液体アンモニアは、液体水素 (LH₂) に比較して、容積当たりに含まれる水素量は 1.7 倍、エネルギー量 (低位発熱量) は 1.5 倍となり、効率的な水素エネルギー輸送媒体である (表 1)。低温液体は、タンク内への自然入熱による気化が課題であるが、液体アンモニアの沸点は LH₂ や LNG に比べて大幅に高く、入熱量を抑えられ数カ月間のタンク貯蔵が可能である。

Table 1 Properties of major liquefied fuels

| 項目 | 液体 アンモニア | 液体水素 (LH ₂) | 天然ガス (LNG) |
|---------------|-------------|----------------------------|---------------|
| 沸点 (°C) | -33.4 | -252.5 | -161.5 |
| 液密度(kg/l) | 0.674 | 0.071 | 0.422 |
| エネルギー密度(MJ/l) | 12.5 | 8.5 | 21.2 |

低位発熱量ベース

Figure 1 Ammonia Value Chain ⁽⁴⁾

また、肥料、化学、冷媒、脱硝剤など多様な分野で利用されており、設備、運用の規格は整備されている。

燃料アンモニアの製造、輸送、利用までのアンモニアバリューチェーン（図1）の各々の概要を次節以降で説明する。

2.2 生産

アンモニアの原料となる水素は、天然ガス、石油、石炭などをガス化、水蒸気改質によるものが現状は大部分を占める。製造に伴い発生するCO₂は、天然ガス改質の場合には、改質ガス中に約6割、改質炉加熱ガス排ガス中に残りの4割が含まれる。それらを化学吸収により回収して再利用や地下貯留することで、製造に伴うCO₂排出量を除いたものをブルー水素と呼ばれる。天然ガスを原料とする水素製造では、現状1kgの水素製造で12~14kgのCO₂が排出されるが、IEAの技術ロードマップでは、2030年に7kg、2050年には1kg以下とする目標が示されている⁽³⁾。将来的には、再生可能エネルギーから水電解で製造されたグリーン水素が主体となると予想される。グリーン水素の製造コストに占める電力価格の割合は大きく、ブルー水素と同等の価格を達



Figure 2: Image of large-scale ammonia receiving terminal ⁽⁶⁾

成するには、約 3~4 円/kWh 以下の電力が必要とされ⁽³⁾、これを実現できる地域は、豪州、中近東、北アフリカ、南米などの再エネの適地となり、それら地域ではエネルギー輸出を見込んだプロジェクトが複数検討されている。また、水電解装置の価格も高く、大型化や大量生産、さらには技術開発によるコスト削減が必要である。

アンモニアの合成は、100 年以上前に開発されたハーバーボッシュ法により行われているが、高压高温環境を必要とする。革新技術として電気化学的手法を組み合わせたアンモニア合成技術などの研究が進められている⁽⁵⁾。

2.3 貯蔵、受け入れ設備（図2）

1 万立法メートル以上の大型平底円筒形タンクでは、 -33°C の冷凍アンモニアで大気圧での貯蔵となる。断熱性を高め、外部への漏洩を防ぐため、金属二重殻タンク式かPCタンク式に分かれ、後者はPC壁が防液堤を兼ねる。現行規格では、溶接後熱処理（PWHT）を不要とする板厚 38mm 以下で設計されるため、約 6 万立法メートルが容量限界となる。LNG 並みの 10 万から 20 万立法メートルの大容量タンク実現に

は、技術進展をふまえた基準の見直しや、新材料、さらには新工法による貯槽製造開発が必要となる。アンモニアタンクの材料開発では、アンモニアによる応力腐食割れ (SCC) の評価が重要であり、IHI ではオーステナイト相とフェライト相を含む二相ステンレスである SUS821L1 に注目し、独自の SCC 試験技術により評価を進め、良好な結果を得ている⁽⁶⁾。

また、既存の LPG/LNG タンクの転用、さらには用地確保を不要とする浮体式アンモニア貯蔵再ガス化設備搭載バージ (A-FSRB) の開発が進められている。

3. アンモニアを燃料とする発電技術

3.1 アンモニア燃焼特性⁽⁷⁾

アンモニアの燃焼総括反応式は、 $4\text{NH}_3 + 3\text{O}_2 \rightarrow 2\text{N}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$ で表され、完全燃焼では、窒素と水が最終生成物となる。可燃範囲は 15% から 28% vol で、断熱火炎温度は 2000K 程度で熱機関の燃料として十分である。燃焼速度は、メタンの 1 / 5 程度と遅く、燃焼器内の滞留時間が短いガスタービンでは、燃焼安定が課題となる。また、NO_x 生成については、アンモニア燃料中の窒素を由来とする生成が主体となる。アンモニアとメタンの燃焼反応解析で行った結果 (図 3) に示されるように、酸素過剰となる希薄状態 (当量比: $\phi < 1$) では、NO_x が大量に生成するが、燃料過剰となる ($\phi > 1$) では、ほとんど生成せず、アンモニアの大部分は窒素と水素に分解される。ただし、さらに当量比を高くすると、未燃アンモニアが残留するため、最適當量比での燃焼制御が必要となる。

アンモニア燃料の供給方法は、図 4 に示すように、液体供給、ガス供給、そして、アンモニア分解供給方式がある。液体供給方式は、機

器構成がシンプルとなる。ガス供給方式では、気化器が必要となり、3気圧程度の低圧では海水熱源で気化できるが、ガスタービンなど数十気圧の高圧供給が必要な場合には、沸点が高くなるため、より高温の熱源が必要となる。アンモニア分解方式は、一部または全量を触媒により水素と窒素に分解する方式であり、アンモニアの燃焼性や着火特性を改善することができる。一方、分解エネルギーは燃焼熱の20%が必要となり損失となる。分解触媒として、500°C以上の高温で分解するNiやCo触媒が、商業的には用いられ、分解反応炉は、自己熱分解方式や間接加熱方式がある。

3.2 アンモニア燃料ガスタービン発電技術⁽⁸⁾

IHIは、天然ガスとの混焼技術の開発から取り組み、ガス供給方式を採用してきたが、アンモニア専焼では、設備の簡便さや高速での出

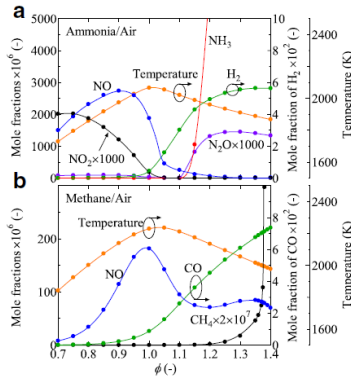


Figure 3 Relationship between equivalent ratio and emissions based on 1D analysis⁽⁷⁾ (a) Ammonia air flame (b) Methane air flame

力制御に優れる液体供給方式を採用した。図5に、ガスタービン燃焼試験設備の概要を示す。4.5立方メートルタンクから液体アンモニアは供給され、ガスおよび液の両方が供給可能である。産業用ガスタービンIM270（IHI製、定格出力2MW、遠心2段圧縮機、軸流3段タービン、シングルカン燃焼器）において、アンモニア燃焼技術の開発を進めた。

アンモニア燃焼器の概要を図6に示す。アンモニアの燃焼排出ガス特性を考慮し、過濃・希薄の2段燃焼方式により環境性能に配慮した技術開発を進めた。燃焼器上流の1段燃焼領域では、燃料過濃燃焼によりNO_x生成を抑制し、下流の2次燃焼領域では分解ガスと空気と混合燃焼させる。アンモニアは、中心のノズルから液体で噴射される。ガスタービン定格出力条件で、天然ガスからアンモニアの混焼率を上昇

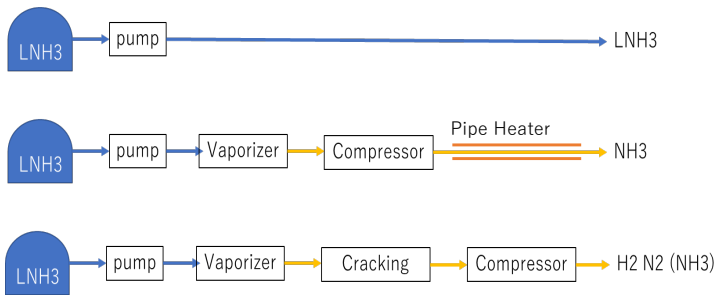


Figure 4: Ammonia Fuel Supply Method

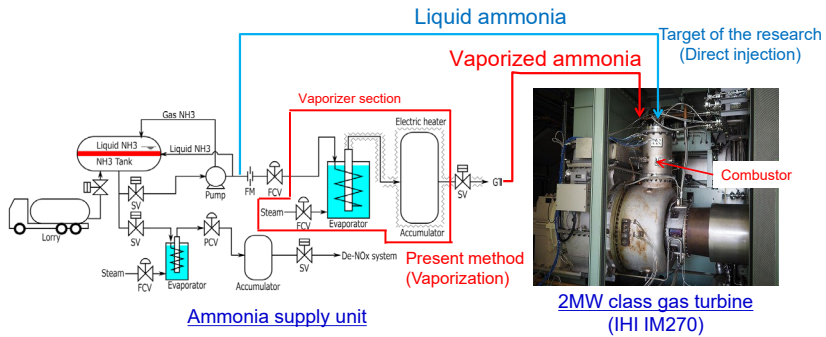
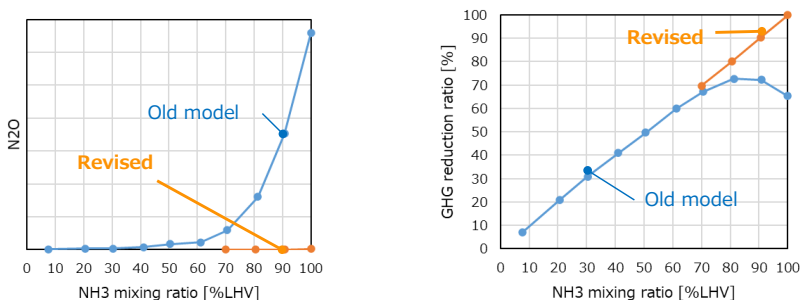


Figure 5 Ammonia gas turbine test facility ⁽⁸⁾

させて専焼まで変化させたときの、亜酸化窒素 (N_2O) と未燃アンモニアのタービン出口での排ガス測定結果を、図 7(a) に示す。図中には初期型と改良型燃焼器の結果が示されているが、初期型の燃焼器は、アンモニア混焼率 70% 以上で N_2O が排出した。 N_2O の地球温暖化係数 (GWP: Global Warming Potential) は 265 と高く、さらに混焼率を増加させると、 CO_2 排出量は減少するが、 N_2O 排出量の増加により GHG 排出量は削減しない (図 7 (b))。また N_2O の分解には、通常の脱硝触媒を用いることができず、より高い温度が必要となり、 N_2O の排出抑制が重要になる。改良型燃焼器では、アンモニア専焼状態まで N_2O の検出はなく、専焼による GHG 排出量削減率は 99% 以上を達成した。また、 NO_x については、通常のカスタマー脱硝装置により、横浜市の環境規制値を満たしている。

今後、長期耐久運転試験を実施した後、商品化を進める。また、2023 年 1 月に、事業用大型ガスタービンメーカーである General Electric 社とアンモニア専焼大型ガスタービン共同開発に関する覚書を締結し、

(a) N₂O emission concentration

(b) GHG reduction ratio

Figure 7 Ammonia-fired gas turbine test results ⁽⁸⁾

専焼技術のスケールアップ化を目指す。

3.3 アンモニア混焼石炭火力発電技術⁽⁹⁾

石炭火力発電は、資源の乏しい我が国にとって、安価で安定なエネルギー源であり、カーボンニュートラル化に向けたエネルギートランジションの段階では、必要である。石炭の一部をアンモニアで代替する火力発電は、大規模な GHG 排出削減効果が得られ、早期の燃料アンモニアバリューチェーン構築に寄与する。

石炭焚きボイラとアンモニア微粉炭混焼バーナの概略を図 8 に示す。石炭はアンモニアと同様に窒素分を燃料に含み、過濃・希薄 2 段燃焼法が、低 NO_x 化には有効であり、既に石炭専焼ボイラでは実用化されている。IHI 社内試験炉(燃焼容量：10MW)で実施した微粉炭アンモニア混焼と微粉炭専焼の排ガス中 NO_x 濃度と灰中未燃分割合の結果を図 9 に示す。横軸はボイラ運転で想定される空気過剰率で、アンモニア 20%混焼率における NO_x 排出量は、微粉炭専焼より同等または

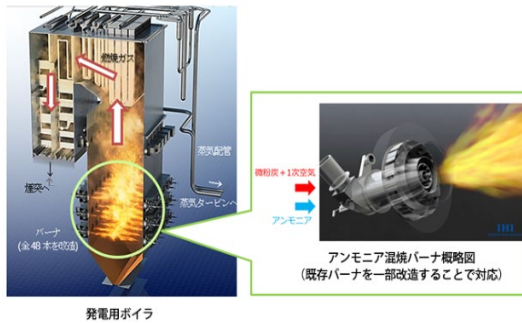


Figure 8 Ammonia-pulverized coal co-firing boiler and burner ⁽⁴⁾

低下し、石炭灰中未燃分は同等であった。アンモニア混焼によるボイラ収熱バランスを数値解析により検討し、設計許容値内であることを確認した。その他、発電プラントの様々な機器への影響や、アンモニア混焼への改造方法などの検討を行った。

これらの成果をもとに、JERA と IHI は、碧南火力発電所 4 号ボイラ（発電端定格出力、1000MW）においてアンモニア 20%混焼の実証運転を、2024 年に行う。主な改造工事は、アンモニア混焼バーナの外、アンモニア輸送船からアンローディング、配管、タンクそして海水気化設備などであるが、既存のボイラ耐圧部や排ガス処理、微粉炭供給設備は現状のままである。この発電プラントが年間稼働で消費するアンモニアは年 50 万トンで、これは国内消費量の半分弱に相当し、CO₂ 排出削減量は年 100 万トンとなる。

今後は、アンモニアの割合を高める高混焼率バーナや専焼バーナを開発し、様々なニーズに対応できる技術を確認する。アジア地域は、電力需要が今後も増加し、2000 年以降に建設された若い石炭火力発電プラントが多くある。経済成長と低炭素化を両立する技術として、こ

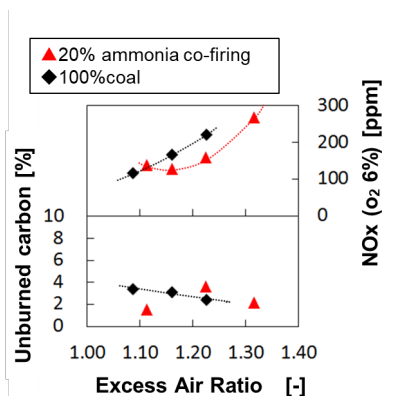


Figure 9 Emissions of ammonia-pulverized coal cofiring @IHI test furnace ⁽⁹⁾

これらの地域ではアンモニア混焼に対する関心が高く、複数の地域で実現に向けたF Sを進めている。国内で確立された技術は、2030年以降にこれら地域への展開が期待される。

4. 社会実装に向けて

アンモニア発電技術に関する国際的な標準化・基準化の取り組みについては、燃料アンモニアに興味をもつ国内外の180以上の団体が参加するクリーン燃料アンモニア協会(CFAA)⁽¹¹⁾において検討されている。また、貯蔵などのアンモニアを取扱う設備の設計や運用については、高圧ガス保安法や各種規定により規格、標準化されている。今後、大型貯蔵設備では新材料や新工法が必要となり、技術開発と共に標準化、規格化を日本がリードすることが、国際競争力を高めるために重要である。

5. まとめ

2024年は、アンモニア燃料による発電技術の社会実装が開始される。船舶機関エンジンについてもアンモニア燃料の適用は精力的に技術開発が進められており、アンモニア 80%混焼する 4 ストロークディーゼルエンジン（定格出力 2MW）を搭載したタブポート (A-TAG) を、2024年に横浜港において運用実証が行われる⁽¹⁾。

アンモニアによるエネルギーバリューチェーンは、エネルギーの船舶輸入に依存する我が国のカーボンニュートラル化に資する。この市場を創出するには、技術開発のみならず、標準化、さらには社会受容に向けた取り組みを進める必要がある。世界に先駆け、これを実現することで、エネルギー供給国や、アジア地域との連携ネットワークを形成し、世界の脱炭素化を主導できる。新たなビジネス創出の機会であり、また様々な分野の技術、スキル、ネットワークを持つプレイヤーの参画を期待する。

謝辞

ガスタービン燃焼試験結果については、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託業務 (JPNP16002/JPNP21020) の結果得られたものです。

参考文献

- (1) 資源エネルギー庁 燃料アンモニア導入官民協議会 中間とりまとめ (2021)
- (2) 科学技術振興機構, SIP 終了報告書 (2019)
- (3) International Energy Agency, Towards hydrogen definitions based on their emissions intensity (2023).
- (4) T. Fujimori, T. Suda, Ammonia Energy Value Chain for

Carbon Neutrality from Production to Utilization, IHI engineering review, 55-1 (2022)

(5) IHI プレスリリース, 水と窒素から CO₂フリーアンモニアを直接合成する技術開発を開始, (2022)

(6) 山田寿一郎, 榊原洋平, 大型アンモニアタンクの開発, 化学工学, 第86巻, 第12号 (2022)

(7) H. Kobayashi, A. Hayakawa, E. C. Okafor, Science and technology of ammonia combustion, Proc. Combust. Inst., 37 (2018) 109-133.

(8) 内田正宏, 伊藤慎太郎, 須田俊之, 液体アンモニア直接噴霧燃焼ガスタービンの開発, IHI 技報, 61-2 (2021) 24-28.

(9) 石井大樹, 大野恵美, 小崎貴弘, 伊藤隆政, 藤森俊郎, 排ガス NO_x 生成を抑制する微粉炭/アンモニア混焼技術の開発, 日本機械学会論文集, Vol. 86, No. 883 (2020)

(10) 一般社団法人クリーン燃料アンモニア協会 (greenammonia.org)

(11) 増田裕, 眞島豊, 相場宏樹, 宮内健太, 廣瀬孝行, 船用4ストロークアンモニア混焼機関の開発, 第34回内燃シンポジウム (2023)

日本の食糧事情

安全安心社会研究センター 客員研究員 今枝 幸博

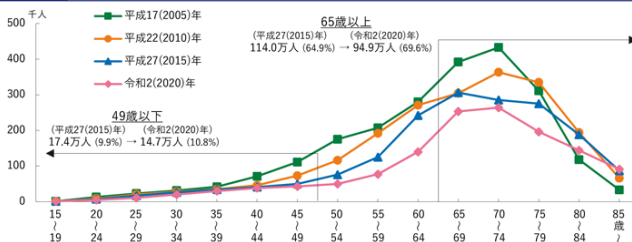
今回は労働での安全ではなく、安全保障の面での日本の食糧事情について考察してみた。

私は愛知県の郊外に在住している。殆どの人は近郊の会社に就職して生活をしている。その一方で実家では農業をされている方も少なからずみえる。私の家も父は第2種兼業農家として家庭を支えていた。

私は就職の傍ら、田植えと稲刈りの部分的な手伝いはしたが、その後兼業では引き継ぐことはできず、現在は水田の管理を委託している。他にも畑地が少しあるが、現状は雑草処理を行っているに過ぎない。

私の住む町内では私同様に営農をやめられた家と続けられている家があり、営農者はおおよそ60歳から75歳である。これは農林水産省が発表している統計と一致する。

図表 特-2 年齢階層別基幹的農業従事者数



資料：農林水産省「農林家センサス」、「2010年世界農林家センサス」（組替集計）

注：1) 各年2月1日時点の数値

2) 平成17(2005)年の基幹的農業従事者数は販売農家の数値

グラフ¹では2005年から2020年の間の年齢別基幹的農業従事者数を示しているが、一貫して60～80歳の層が担っている。この15年で農業従事者は39%減少している。今後は企業の定年が延長されることで、帰農する人数は減少することが考えられる。

これらから明らかなことは、10年、早ければ5年もすると小規模で地形の悪そうな圃場で営農する人はいなくなってしまうという事である。農業法人が補ってゆくとする考えもあるが、課題も多い。小規模営農者は自己所有の圃場で生産をしているが、法人経営を行う立場からすれば機械化の妨げになる地形や、小さな面積の飛び地では効率が悪い。結果的に圃場の条件が悪ければ生産農地では無くなって行く。

農業法人の鍵は法人代表になろうとする人材、及び継承者の確保である。若手が職業としての営農による所得に魅力があると考えられるための施策が欠かせない。現在では労働力の面でも既に海外からの技能実習生に依存していることは周知の事実である。

農業法人でのもう一つの問題点として、生産委託する地主側には雑草管理の他には何らメリットがないことである。農地を所有することは今や「負動産」になっている。

ここまで郊外での農業の実態を述べてきた。農業こそは食の安定確保の大前提で、最近のウクライナ情勢、パレスチナの問題をみても国際情勢が日本の食糧事情へ多大な影響を与えることを現実に体感している。また、肥料および種子・種苗も海外依存が高い。特に肥料は資源が偏在していることもあって特定国への依存率が高くなっている。これらの輸出禁止措置が発動された場合には、日本での農産物生産ができなくなってしまう。

私たちも日常の消費行動とその社会的影響を今一度考え直したい。

¹https://www.maff.go.jp/j/wpaper/w_maff/r3/r3_h/trend/part1/pdf/c0_2_01.pdf

労働安全衛生法の新たな化学物質規制

安全安心社会研究センター 客員研究員 岩岡 和幸

筆者は、化学会社に所属し産業安全や機械安全分野を専門として活動しているが、今回は化学安全に重要な法改正がある為、その内容について述べる。

現在、既存の化学物質は約7万種類あると言われ、毎年、1,000種類以上の物質が新規に届出され、少量新規化学物質は、年間17,000物質程度の届出があると言われている。また、図1は、2014～2022年における有害物質との接触による労働災害（型別）発生件数の推移である。毎年、約400件の災害が発生しており、現状維持の横ばい状態で減少傾向がみられないことがわかる。なお、この図は、統計上の性格からこの災害件数には“職業がん”などの発生件数は含まれていないものと考えられる。しかしながら、近年、印刷業における1,2-ジクロロプロパンによると考えられる胆管癌の多発事故や、化学工場におけるオルトトルイジンによる膀胱がんなど、国際的にも大きな問題となった深刻な労働災害が発生したことも記憶に新しい。そして、これら両物資はいずれも災害発生当時は通知対象物（SDSの交付義務の対象物質）ではあったが、いわゆる規制対象物質（特化則、有機則等の特別規則の規制の対象物質）ではなかったことに注目したい。

このように、有害物質数は増加し、化学物資災害が減らないことから、政府は、事業者にも自律的な管理を基軸とする規制を行うよう要求

することとなった。即ち、これはリスクアセスメントを強化するよう要求していることになる。そして、同時に以下のような管理体制の強化も図られる（抜粋）。

- ・リスクアセスメントが義務付けられている化学物質（以下「リスクアセスメント対象物」という。）の製造、取扱い又は譲渡提供を行う事業場ごとに、化学物質管理者を選任し、化学物質の管理に係る技術的事項を担当させる等の事業場における化学物質に関する管理体制の強化。

- ・事業者が自ら選択して講ずるべく露措置により、労働者がリスクアセスメント対象物にばく露される程度を最小限度にすることや、皮膚又は眼に障害を与える化学物質を取り扱う際に労働者に適切な保護具を使用させること、リスクアセスメントの結果に基づき健康診断を実施すること等の化学物質の自律的な管理体制の整備。

何れにせよ、しばらくは化学物質の安全性が重要視される時代になると筆者は考える。

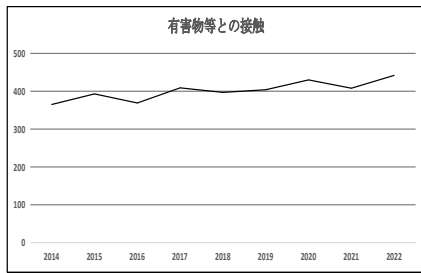
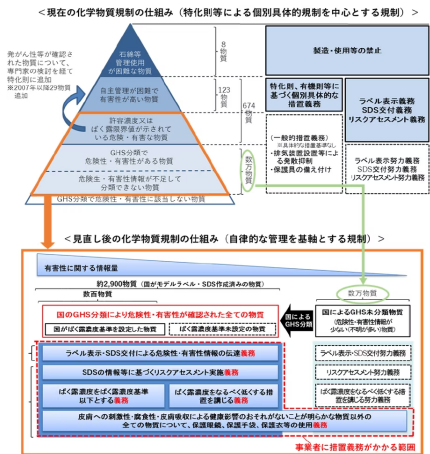


図1 有害物等との接触における労働災害発生状況（型別）
資料出所：厚生労働省；「労働者死傷病報告」による死傷災害発生状況より



労働安全衛生法の新たな化学物質規制
本改正の概要；労働安全衛生法の新たな化学物質規制より

食品安全に求められる衛生設計

安全安心社会研究センター 客員研究員 大村 宏之

食品安全を確保するための管理基準である HACCP システムは、我が国をはじめ多くの国々で、制度化されている。そして HACCP システムを包含するマネジメントシステム (FSMS) を運用する食品メーカーは多い。この代表的な FSMS の規格の一つに FSSC 22000 があり、本年の 4 月にスキームの Ver6 が公表された (図 1)。

昨年執筆した第 10 号の記事では、2020 年に GFSI が発行した、機械装置の衛生設計に関するベンチマーキングである、「スコープ J1 (図 2)」と「HACCP システム」の関連を紹介した。本稿では、スコープ J1 が影響したと思われるスキームが示す衛生設計について考察する。

1. FSSC 22000 に加わった新規要求

Ver. 6 へのアップデートによる変更は、複数に及ぶ。新規事項についてみると、品質管理、食品ロスへの対応などと共に、装置管理 (2.5.15) が加わっている。

この装置管理では、衛生設計、関連法令順守、顧客要求事項への適合を求めている他、機械の購買者は“仕様書”を定め、サプライヤーはその仕様を満たすことを証明しなければならないことを定める。

さて、“衛生設計”というどのような性能を想像されるだろうか？日本の食品衛生法を参考にすると、概ね次のようになるのではないだ

ろうか。「無毒性」「分解可能」「アクセスしやすい」「洗浄(殺菌)可能/洗浄しやすい」である。

「無毒性」は法令に準じた材料を使用し、「分解可能」は食品接触面を開放できる構造。「アクセスしやすい」は、手指で触れる構造を主に指す。しかし最後の「洗浄可能」は文書化された方法が必要になる。

2. 洗浄可能の証明とは

「洗浄可能性」を判定するためには、洗浄方法及び評価基準がどうしても必要になる。また、「洗浄しやすい」は相対的な性能になるので、何らかの基準との比較が不可欠になる。しかし食品衛生法には、洗浄性を評価する試験法、及び評価基準の考え方は見当たらない。

筆者らはこのような課題に対応するため、洗浄性評価試験の開発に10年前より取り組んでいる。パイプラインなどの閉鎖系については、すでに JIS B 9657 の附属書 A に定めた。現在は開放系の試験法開発に取り組んでいる。まとめ次第、皆様にご紹介したい。



図1 FSSC 22000Ver. 6



図2 DFSI スコープ J1

急増するアニサキス食中毒

安全安心社会研究センター 客員研究員 川瀬 健太郎

日本は四方を海に囲まれており、古くから漁業が発達し豊富な水産資源の宝庫である。衛生観念が高い国民性も相まって、食生活において魚介類の刺身や寿司など生で喫食することができ、海外からの観光客にも人気の高い料理となっている。生食文化を誇らしく思うと同時に、昨今急増しているアニサキス（写真）による食中毒の報道を見聞きし、注意喚起の重要性を感じている。アニサキス（学名：Anisakis）とは寄生虫（線虫）の一種で、形状は半透明、白色の細長い糸状で長さ2~3cm、幅1mm程である。食生活でもポピュラーなサバ、アジ、ササバに寄生したアニサキス幼虫



出典：東京都健康安全研究センター

ンマ、サケ、カツオ、イカなどの魚介類の主に内臓に寄生している。冷凍や加熱が不十分な刺身やマリネなどに生残したままの幼虫に気づかずに喫食し、体内に取り込まれると、虫体が胃粘膜や腸膜等に刺入するなどして激痛を伴うアニサキス症を引き起こす可能性があり、アレルギー反応が現れることもある。対策として、①瞬時死滅は

表1 食中毒統計にみるアニサキス症の発生状況

| 年 | 食中毒 | | アニサキス | | |
|------|-------|--------|-------|-----|-------------|
| | 事件数 | 患者数 | 事件数 | 患者数 | 食中毒事件数 |
| | | | | | に占める 構成比 |
| 2013 | 931 | 20,802 | 88 | 89 | 9.5% |
| 2014 | 976 | 19,355 | 79 | 79 | 8.1% |
| 2015 | 1,202 | 22,718 | 127 | 133 | 10.6% |
| 2016 | 1,139 | 20,252 | 124 | 126 | 10.9% |
| 2017 | 1,014 | 16,464 | 124 | 242 | 12.2% |
| 2018 | 1,330 | 17,282 | 468 | 478 | 35.2% |
| 2019 | 1,061 | 13,018 | 328 | 336 | 30.9% |
| 2020 | 887 | 14,613 | 386 | 396 | 43.5% |
| 2021 | 717 | 11,080 | 344 | 354 | 48.0% |
| 2022 | 962 | 6,856 | 566 | 578 | 58.8% |

※厚生労働省「食中毒統計資料」を基に筆者作成

70℃加熱、60℃以上なら1分の加熱。②マイナス20℃で24時間以上の冷凍である。魚を丸ごと1匹で購入する時は新鮮なものを選び、速やかに内臓を取り除き内臓を生で食べないことである。アニサキスは寄生した魚介類の鮮度が落ちると内臓から筋肉（可食部位）に移動する性質があるため、目視で発見したら除去する。クジラ等の消化管内にも寄生していること

から酸には抵抗性を持っており、酢、わさびや醤油に漬け込んでも死滅しない。

アニサキスは2013年から厚生労働省食中毒統計の病因物質として独立して集計されるようになったが、2022年には総事件数の過半数を占め第1位であった（表1）。実際には診療報酬明細書データを基に国立感染症研究所が試算したところ、年間7,000人以上が感染していると推計されている。病原微生物の増殖や飛沫、経口および接触で感染するノロウイルスなどと異なり、その性質上、大規模な集団感染事案は少ないが油断は禁物である。増加の一因として近年の温度管理システムの高度化、交通輸送網の発達と高速化により、魚介類とともにアニサキスも低温下で生きてまま運ばれるようになったことなどが挙げられる。

美味しい魚介料理を安全に楽しむために、食品事業者の適切な管理が不可欠であることのみならず、消費者側もアニサキスの特徴や注意点を知識として持つておくことも予防には重要であると考えます。

持続可能な Integration Goal 設定の試み

安全安心社会研究センター 客員研究員 櫻井 剛

私が携わる自動車分野の開発では、近年の、自動運転技術やモビリティ関連サービスの急速な進化が進んでおり、車とそこに搭載される電子制御ユニット（ECU）の開発だけではなく、周辺インフラや各種サービスの開発も活発に行われている。Software-defined vehicle (SDV) というバズワードに見る通り、ソフトウェアとコネクティビティの重要性はますます高まり、UN R155 および R156 に代表されるようなサイバーセキュリティおよびそれと不可分な関係にある更新に関する要求などから、開発活動も、製品の市場投入で一区切りとなるような形から、連続的・永続的なスタイルに変化しつつある。当然、収益モデルも変化せざるを得ないことから、サブスクリプション型ビジネスの推進も BMW 社などで進められる一方、New Jersey 州の法案のように当初から搭載される機能をサブスクリプション対象とすることを規制する動きもあるが [1]、本稿では紹介のみに留める。併せて、従来は売り切り型ビジネスを想定しハードコードされていた部分（更新不能な部分）についても、ソフトウェアの介入度合いを大きくすることで更新可能な範囲を拡大する動きも一部にみられる。

また、開発規模が大きくなり、多数の開発者が関わっているが、それぞれの成果物はいずれかの時点で integration のタイミングを迎えることとなる。機能安全規格で段階的 integration を要求されるまで

もなく [2]、実情としてもはやビッグバン型の一発 integration は不可能となっている。

さて、「integration」の終了条件 (integration goal) は何だろうか。ある英英辞書では「integrate」という動詞を「全体 (whole) を形作るために、他のものと組み合わせる」という主旨で説明しているが [3]、それだけでは終了条件を引き出すことはできない。

「Integration で形作る全体」を定義することが必要となる。安全要件もその一部となる。しかし、安易に設定した要件を integration 段階に合わせて段階的にブレイクダウンしても、得られる要件は検証不能などの問題となりがちであることから、ブレイクダウン過程を利用してトップレベルの要件を見直し改善することが求められる。

このことは要件導出では当然のことである。しかしながら、連続的・永続的な開発が前提となる場合にはそれだけでは十分ではない。要件達成を無理なく持続的に行うためには、継続的インテグレーション・デリバリー (CI/CD) のための環境整備支援はもちろんのこと、収益モデルによる支援など、これまでの「開発」よりも広いスコープを考慮した要件定義が必要となる (最近では BizDevSecOps などと呼ばれるものの一部でもある)。このことから、GSN [4] を用いた要件導出とリファインのための教育プログラムを作成し、また、そこで考慮が必要となる各種側面 (収益モデル構築など) の整理に努めている。

■参考資料

[1] <https://www.njleg.state.nj.us/bill-search/2022/A4519>

[2] ISO 26262-6:2018 Road vehicles -- Functional safety -- Part 6: Product development at the software level, clause 10.4.1

[3] Oxford English Dictionary による当時の検索結果

<https://www.oxforddictionaries.com/> (2018-12-31 時点)

[4] <https://scsc.uk/gsn>

事故防止 ～論理学を適用して考える

安全安心社会研究センター 客員研究員 杉本 旭

○事故は防ぐべきもの、リスクとして受け入れるものではない

「危なさと向き合おう」と題する愛知労働局のテキストで「日本の労働安全は欧米諸国と比べて特質であって、「安全」について今一度考えてみないか」とするまじめな提案があった。私も同感である。わが国の安全が帰納論(経験の積み上げ)であるのに対して、欧米は演繹論、特に真/偽を図る論理学を基本としている。わが国では“リスク”でさえ論理的説明のないレトリックである。国際規格の「安全とは受容できないリスクがないこと」に素直に従っていいだろうか。

安全には基本的にトップダウンの立場から安全対策を多面的に行う“順問題”と、ボトムアップの見方から、事故が起こる前に機械の運転を停止させるなど、“逆問題”とするアプローチがある。これらを曖昧にすると、どんなに災害が少なくても、正当な評価が得られない。違いは、欧米では、事故は基本的に偶然の出来事とは考えない。国際規格は、原因が論理的に検討されていないで生じる事故を“偶然”とは認めない。日本とは異なる制度の上に成り立っているのである。

○日本の安全は論理的に考えられてこなかった

さて、著者らが研究する安全の論理学は、事故防止(安全)の議論を論理的に行おうとするものである。論理学の最大の特徴は“対偶”の

概念であろう。たとえば基本命題：「A ならば B である」：が正しさはそのまま対偶：「B でなければ A でない」の正しさに委ねられる。これは対偶証明と呼ばれるが、安全の論理学では、真なる基本命題を先に立てて、対偶が“真”となる条件を求めるという方法が採られる。記号として、基本命題： $A \geq B$ 、対偶： $\neg B \geq \neg A$ と表すが、この関係性は、 $A \geq B$ が“真”であれば、 $\neg B \geq \neg A$ もまた“真”であるという対偶証明の原則によるところである。

欧米の安全の論理は明快である。基本命題： $A \geq B$ は原因 A が先にあって後から結果 B を生ずるという因果律をそのまま $A \geq B$ で表している。事故の原因 A を「運転」、結果 B を「事故」とすると、「運転中（原因）に事故（結果）を生ずる」とする命題に対して、対偶： $\neg \text{事故} \geq \neg \text{運転}$ は、「事故の前で運転を停止する」となる。対偶は事故への対応（安全）を示すが、論理的に、安全は事故前の運転停止に委ねられ、それ以外の対応は、安全の論理学では認められない。停止嫌いの日本人が、これまで安全の論理学を避けてきたのもうなずける。見直すべきわが国の安全の特質は押しなべて日本人の停止嫌いによると言っている。なお、基本命題は事故の原因から結果（事故）を評価する順問題、対偶が事故の結果から重要な原因を明らかにする逆問題に相当する。

○安全は自分の責任、事故は起こすも防ぐも自分の責任（対偶証明）

さて、事故はいつ起こるか分からないとされるが、人間は、もともと事故の前に停止して事故を防ぐ特性を持つと言える。事故が起こるとしたら、停止操作の遅れか、あるいは“事故の前”を知らせる準備が曖昧であるからである。「事故の前での運転停止」は、“自分のこと”と見なすすべての人に対して実効性を持つ。そのために欧州 ISO では危険状態と危険事象を導入している。「事故の前」を示す危険事象は特に重要だが、一人ひとりが自ら事故の前の停止させる要求は、ここで

言う“事故”を「死」と見て生き抜く生物の原理だと考えている。話を急がず、安全の観点から「事故の前」に関わる危険事象と対偶による「停止」に関わる危険状態について改めて紹介したいと思う。

産業機器のリスクコミュニケーション

安全安心社会研究センター 客員研究員 谷口 満彦

産業機器の開発・製作に関わる人たちとのコミュニケーションについて考察する。

まず産業機器の多くは、お客様のプロセスノウハウをファクトリーオートメーションの自動機として実現する個別設計のものが多い。汎用品のロボットを使ってもその周囲の機器は作りたいものに合わせた個別設計となる。

個別設計の設備で3 Stepの本質的安全設計方策を実施するにはお客様がほしい設備をしっかり把握することが重要になる。しかし機械設計者への情報として入ってくる情報は手厚いものではない。

影響の大きい情報を入手するチャンスは装置計画のかなりはじめのタイミングであることが多い。受注活動のタイミングで聞き出さないと手遅れとなることが現実に多々ある。例えば、スペースが決まった後では、必要な安全距離が確保できないため、別の方策を探らなければならないなどである。

この設備情報を聞き出すことを、ここでは「リスクコミュニケーション」ということにする。このリスクコミュニケーションに携わる人は、設備メーカーにあっては設計者に限らず、営業や購買の担当者が含まれる。

そのコミュニケーションの能力に対する一つの取組について紹介する。

まず第一歩は、リスクコミュニケーションに関わる人への機械安全の基礎教育である。そのためのテキストとしてタイプA、B規格の概要とお客様とのコミュニケーションの要点について記載した本格的なものを準備する。これを使って全社的教育的を実施し設備の安全に自分たちは全く関係が無いとの認識を払拭する。

次は、実際の設計の場面での活用である。前出のテキストは社内の中堅設計者を中心に作り上げた。そのため、自分たちの使いやすいものに仕立ててある。また彼らは実設計者からの質問にも答えられる実力がついた。これでキーマンの育成も同時にでき、あわせて安全を討議できるコミュニティーを形成できた。

このキーマンが関与する案件は、案件打合せ初期から設備の構成・配置、使用方法まで仕様打合せ上で取り上げ、これは安全設計の面での機械の制限に関する深掘りにつながる。また、これらは安全に関する情報のみならず、装置設計の基本情報であり装置性能から使い勝手（材料供給から点検保守、起きそうなトラブル）まで網羅し、装置価格やリスク分担、適用規格など様々な要素に触れる。

ここでのお客様とのコミュニケーションでは、安全の切り口から装置性能に関する重要情報を聞き出したり、逆に使い方に関わる現場の配列から安全に関するリスクにアプローチできることもある。

従来、安全に関わる設計は装置仕様と切り離して考える技術者が多かったが、この取組を通じて装置仕様と安全に関する機械の制限の切り口は、産業機器設計の共通の要素であることが強く意識できた。

ISO 12100は表題に「設計の一般原則」とあるように設計者の取り組みが主に取り上げられている。述べてきたようにリスクコミュニケーションにおける両輪として発注側使用者の役割は大きい。米国のANSI B11.0の2020年版では使用者も大きく取り上げている。一読されることをお勧めする。

医療機器のアラーム

安全安心社会研究センター 客員研究員 野沢 義則

第6号にて「病院に潜むおおかみ少年」というタイトルで生体情報モニタのアラームについて報告した。それから8年を迎えようとしている。しかし、当時の状況を明らかに改善できる決定的な手法が見つからない。今回も医療機器のアラームについて考えてみたい。

医療機器は年々進化し、壊れにくく信頼性が高まっている。そのため、医療機器の設計など製造側に基因するトラブルについての報告は減少した。しかし、医療機器の残留リスクでもある使用者側の問題が鍵となる。残留リスクは医療機器添付文書、取扱説明書で使用者に伝えられるが全ての使用者が熟読しているとは言えない。また、新型コロナウイルスの影響で研修会の開催や医療機器メーカーからの訪問による情報提供方法も様変わりしている。

医療機器のアラーム問題として、アラームを発する機器台数の多さも要因のひとつであるが、特定の機器（生体情報モニタ：心電図を24時間監視する機器）においては、アラームの発生頻度が桁違いに多い。A病院でアラーム解析を行った結果、17～27秒に1回の頻度で何らかのアラームが発生していたとの報告もある。このことを一般の方が耳にすると、アラームを頻回に発する医療機器に問題があると思われるかもしれない。しかし、生体情報モニタのアラームは、患者の急変を医療従事者に伝える重要な役割を担っている。では、急変がこん

なに多いのかと疑問が生じる。

結論から言うと、頻回に発生するアラームに医療従事者が対応しきれしていないことである。アラームの発生原因は「バイタルアラーム」と「テクニカルアラーム」に大別される。「バイタルアラーム」は本来の目的とする心臓の停止など患者急変時の発報、また、心拍数の上昇など管理値を超えた際に発報するようプログラムされている。一方、「テクニカルアラーム」は電波切れ、電池切れ、電極外れなど生体情報検出不能のサインである。医療従事者は「テクニカルアラーム」は医学的な問題とは切り離し無視する傾向にある。しかし、電波が届かない検出不能状態では、本来の目的である急変を検知できないのである。言わば生体情報モニタ未装着の状況とも言える。このことを如何に医療従事者に伝え意識を変えるようにと活動しているのが、モニタアラームコントロールチーム（以下 MACT）である。全国の医療機関が問題として取り上げ検討を行っており、当院においても2019年3月にMACTを結成し、医師、看護師、医療安全管理者、臨床工学技士など多職種で奮闘している。活動として機器整備や設定の管理、病棟のラウンドによる指導、アラーム解析など医療従事者の意識改革を目的に試行錯誤している。個人的には、「一層、アラームが無い方が自ら確認する（安全確認型）ためよいのではないか。」と思うこともある。しかし、多種多様な医療機器をすべて把握するには人間の能力を超えてしまう。アラームを検知しやすくするためタブレット端末や携帯端末に信号を転送するシステムも用いられているが、アラームを発する機器を更に増加させることにもなる。近い将来、AI技術の進歩により医療従事者の行動心理に近いアラーム解析機能がアラーム問題を解決してくれるのではないかと期待している。

働く人の安全・健康・ウェルビーイング

安全安心社会研究センター 客員研究員 松浦 裕士

今、私たちは気候変動、貧困、難民、ジェンダー平等など、大きな課題に直面しています。こうした状況の中で「ウェルビーイング」が注目を集め、将来に向けて重要な概念となっています。

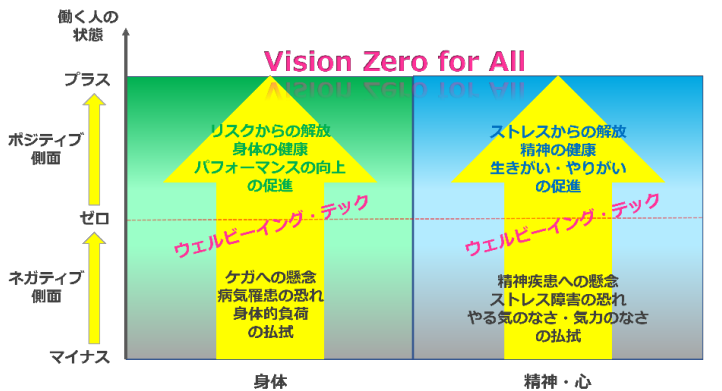
私が事務局長を務める一般社団法人セーフティグローバル推進機構では、「働く人のウェルビーイング」を特に重要視しています。「働く人のウェルビーイング」とは、働く人が身体的な安全が確保され、精神の健康が実現した上で、心の在り方としての生きがいややりがいを目指し、幸せを実現するとしています。さらに、働く人たちのウェルビーイングを向上させる技術手段として、「ウェルビーイング・テック」の普及と推進にも力を入れています。

企業がウェルビーイング・テックを開発・設計する際には、3つの技術要件を満たす必要があります。まず、①働く人の身体や精神・心にアプローチすることが求められます。次に、②単なるモノや利便性の提供を超えて、働く人の体験を通じて考え方や価値観の変化をもたらすことが必要です。最後に、③ウェルビーイングの維持・向上を確認するためには、②の裏付けとなるエビデンスの提供が不可欠です。

ウェルビーイング・テックは、これらの要件を満たす技術のことであり、アプローチ、効果、エビデンスの関係性が重要視されています。特に、労働安全衛生においては、2つのアプローチがあります。ネガ

ティブな側面は、「マイナスからゼロ」を目指し、身体的なリスクや精神的な負担を低減することに焦点を当てています。対照的に、ポジティブな側面は、「ゼロからプラス」または「マイナスからプラス」の状態に向けて進化させ、身体的な健康やパフォーマンスの向上、精神的な健康や生きがい、やりがいの促進に焦点を当てています。

また、ウェルビーイング・テックを活用するうえで、単なる便利さや使いやすさだけでなく、「仕事に誇りを感じる」や「やる気が出て楽しい」といった働く人の価値観や考え方の変化をもたらすことが重要です。しかしながら、現時点ではまだウェルビーイングを客観的で統一的な指標がないため、開発者や設計者は自らエビデンスを用意し、技術が要件を満たしているかどうかを判断する必要があります。最後に、将来の労働安全衛生においては、ネガティブな側面のアプローチとともにポジティブな側面のアプローチがますます重要になると考えています。



図：ウェルビーイング・テック

参考文献：実践！ウェルビーイング（日経BP）

製品安全競争力の見える化について2

安全安心社会研究センター 客員研究員 松田 利浩

昨年度、2022年度の本書において私は、「製品安全は競争力になり得るか」という課題についてその経緯と持論の概要を記し、製品安全競争力の数値化（見える化）について述べた。

本年度は、製品安全競争力に必要な要素は何かを一般的な商品の市場競争力を基礎として考察してみた。

1. 安全品質と安全性能:言うまでもなく安全競争力にとって安全品質や安全性能が高い製品は、高い価値を有するだけでなく顧客満足度が向上、そして安全競争力に寄与する。安全品質と安全性能は、安全競争力にとって最も基礎的な要素である。
2. 安心と信頼性:前項で述べたように安全品質と安全性能は、安全競争力にとって最も基礎的な要素なのに対し、安心は安全競争力によって最も重要な要素だと考える。安心の定義は諸説あるが、筆者が考える安心とは安全な状態が顧客にとって予測可能であり、その根拠の信頼性が高いと感じる状態を指すと定義づける。仮にこの定義が適切であれば、安心とは安全であることを信用できる者により明確な根拠に基づき保証されていること、及び万が一の場合には信頼できる者により（金銭的などにより）手当が確保されている状態により安心が達成される。例えば、対象製品が

第三者認証を取得していることや万が一の場合に備えた保険的留意が十分であることなどがこれに該当する。

3. 顧客ニーズへの適応性:安全品質と安全性能は、安全競争力にとって最も基礎的な要素であるが、一方過剰な安全性品質や安全性能は製品の使い勝手の低下を招いてしまいかねない。また、極めて趣味使いに近い製品の場合は、過度な安全性品質や安全性能の向上によりかえって所有欲の低下を招き、顧客の期待を低下される恐れもある。適切な顧客ニーズへの適応性は、安全競争力にとって必要な要素と言える。ただし、安全に対する顧客ニーズは、ターゲットとなる顧客層、その時代や地域、社会インフラとの関係、取り巻く社内状況によって変化する不安定な要素であることに注意する必要がある。
4. 製品価格:製品価格と商品競争力は強く関係する要素である。安全競争力も同様に安全性品質や安全性能に要するコストと顧客ニーズのバランスが悪い場合には、安全競争力に悪影響を及ぼす恐れがある。コストパフォーマンスやターゲットとなる顧客層の期待水準見極める必要がある。
5. 周知と普及:いくら革新的な技術であってもそれを顧客に適切かつ魅力的に価値や利点を伝えることができなければ競争力という観点では意味がない。競争優位性を強調するための周知活動と結果としての普及も重要な要素と言える。

以上、筆者が考える製品安全競争力に必要な要素を5つ書き出してみた。過不足や視点の違いなどが散見されると思うが、引き続き製品安全競争力の数値化（見える化）をテーマとして具体化や何らかの数式化を進めていきたいと考えている。

安全をどう伝承するか

安全安心社会研究センター 客員研究員 吉澤 厚文

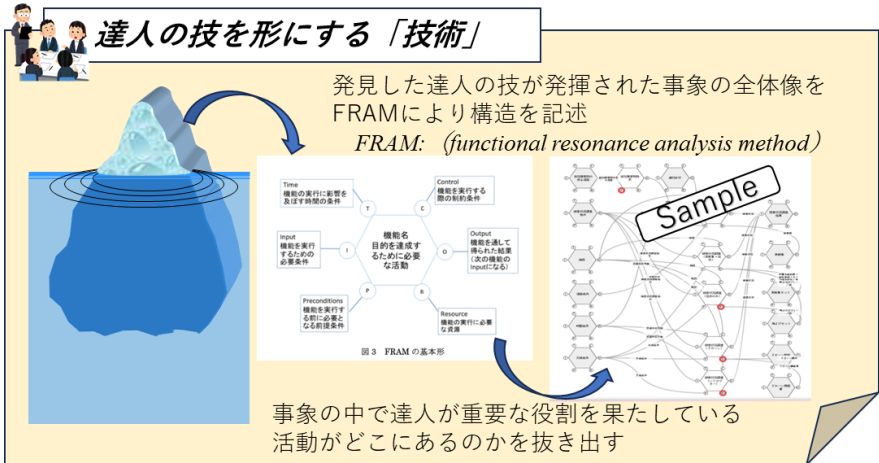
安全をどう確保するか、という課題に関し、安全を確保する能力を有する人たちの技術伝承に悩んでいる企業が多いのではないだろうか。我々は、この課題に対し、「達人の技伝承支援システム」を構築し、社会実装を始めており、今回はこのシステムの考え方について紹介する。

我々は、将来の安全を確保するうえで、主に過去のトラブルに学び再発防止に備える手法をとってきた。これは、ISO/IEC Guide 51 に示される「安全とは許容できないリスクがないこと(Safety-I)」を目標に、リスクが表出化したと考えられる事故からこのリスクを学び、除去または低減することで安全を確保しようとする手法である。

しかし、ここに一つ落とし穴がある。どの企業にも安全を確保するうえで欠かせない「達人」は存在しているであろう。しかし、達人は失敗事象を分析してもなかなか見えてこない。つまり、達人は、失敗が起きないように、または失敗した後の回復過程に様々な能力を発揮しているのである。このような行為群に焦点を当て評価することで、達人の発見やその能力の形式知化が可能となる。

我々は、「安全は変化する条件下で成功する能力(Safety-II)」であるとする考え方にに基づき、災害からの復旧に着目し、その中でどのような人や組織が回復行動をとったのかを分析した。この分析には、人の行動は因果律というよりは創発するもの（機能共鳴）であるとして

これを評価するために開発された FRAM (Functional Resonance Analysis Method) を用い、様々な活動群の中から、キーとなる活動を抽出する。



次に、抽出された活動を用いて、FRAM にある条件（時間、前提、制御、資源）を変動させるワークショップを実施する。災害対応は一事例でしかないため、その条件に変化を与えることで、達人の様々な引き出しを開けてもらい、変化する回答からその能力を見出すのである。

3 番目のステップでは、このようにして形式知化された能力を、どのようなプロセスで獲得してきたのか、本人へのインタビューで確認してゆく。最終ステップでは、企業の持つ人材育成プログラムと照合し、達人の能力の伝承性について診断する。

このような4つのステップで、具体的に表出化した達人の技から能力を形式知化し、伝承することが可能になる。少子高齢化により益々技術伝承の重要性が高まる中、このような技術を広く社会に貢献できる様社会実装してまいりたい。

令和4～5年度 安全安心社会研究センター主催の講演等の活動

▼ 安全安心社会構築会議

日 時：令和5年1月21日（土） 12：45～14：00

場 所：田町グランパークカンファレンス 302+303 会議室

- ・12:30 受付
- ・12:45 開会の挨拶
- ・12:50 客員研究員ショートプレゼンテーション、討論会議
- ・14:00 終了

▼ 第27回 特別講演会

日 時：令和5年1月21日（土） 14：30～17：15

場 所：田町グランパークカンファレンス 302+303 会議室

主 題：「航空安全とドローン安全」

【プログラム】

- ・14:15 受付

司会：安全安心社会研究センター 副センター長 木村 哲也

- ・14:30 開会の挨拶

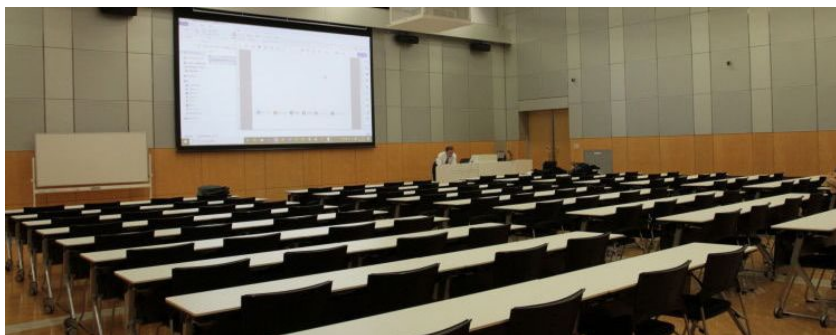
安全安心社会研究センター センター長 門脇 敏

- ・ 14:35 講演 1 題目：**航空安全**（耐空性維持）
講師：公益社団法人 日本航空技術協会 稲垣 充 様

- ・ 15:45 講演 2 題目：**ドローン安全**
講師：長岡技術科学大学 教授 木村哲也

- ・ 16:30 パネルディスカッション（ファシリテーター：木村）
テ ー マ：航空安全とドローン安全の融合
パネラー：稲垣様，センター客員研究員若干名

- ・ 17:15 終了



▼ 第28回 特別講演

日 時：令和5年7月1日(土) 13:00～17:00

会 場：田町グランパークカンファレス 401ホール

主 題：「**燃焼安全** —低炭素社会におけるエネルギーの
安定供給を目指して—」

低炭素社会を実現するには、エネルギー供給の低炭素化が

必要であり、水素やアンモニアなどの燃料が衆目を集めている。これらの燃料を安定に供給するには、製造、輸送、貯蔵、エネルギー変換などの際の安全確保が必須である。つまり、防火防爆などのいわゆる燃焼安全が非常に重要となる。ここでは、低炭素社会におけるエネルギーの安定供給を目指し、燃焼安全をテーマとして、産官学から講師を集めて講演会を催すものである。

【プログラム】

- ・ 12:30～ 受 付

- ・ 13:00～13:05 開会の挨拶
安全安心社会研究センター センター長 門脇 敏

- ・ 13:05～13:55 第1講 「アンモニア燃料発電の技術開発と
社会実装に向けた取り組み」
株式会社 IHI 藤森 俊郎 氏

- ・ 13:55～14:05 質疑応答

- ・ 14:15～15:05 第2講 「1F 事故の水素爆発と向き合って
～数値解析から眺めた一考察～」
原子力規制庁 西村 健 氏

- ・ 15:05～15:15 質疑応答

- ・ 15:25～16:15 第3講 「燃焼による災害（火災・爆発）の
現象解明とリスク低減」
東京大学／東京理科大学 土橋 律 氏

- ・ 16:15～16:25 質疑応答
- ・ 16:35～16:55 総合討論
- ・ 16:55～17:00 閉会の挨拶
安全安心社会研究センター 副センター長 木村 哲也

▼ 第29回 特別講演会

日時：令和4年12月2日（土） 13:00～17:00

会場：グランパークカンファレンス田町 401ホール

主題：「ドローンの社会実装とシステム安全」

【プログラム】

- ・ 12:30～ 受付
- ・ 13:00～13:05 開会の挨拶
安全安心社会研究センター センター長 門脇 敏
- ・ 13:05～13:55 第1講 未来洞察から見たドローン
社会実装の課題
一橋大学 鷲田 祐一 氏
- ・ 13:55～14:05 質疑応答
- ・ 14:15～15:05 第2講 無人航空機を活用した災害対応
慶應義塾大学 高橋 伸太郎 氏
- ・ 15:05～15:15 質疑応答

- ・ 15:25～16:15 第3講 海洋調査におけるシステム安全から
見たドローン社会実装の課題
海洋研究開発機構 眞砂 英樹 氏
- ・ 16:15～16:25 質疑応答
- ・ 16:35～16:55 総合討論
- ・ 16:55～17:00 閉会の挨拶
安全安心社会研究センター 副センター長 木村 哲也

◇ 情報交換会 ◇

- ・ 18:00～20:00 会場：SCHMATZ msb 田町



長岡技術科学大学における安全安心社会の構築に向けた取り組み

| 年 | 本学の動き | 社会全体の動き |
|---------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2001 (H13) | 機械安全工学寄附講座 設置 | 3月 平成 13～17 年度科学技術基本計画の理念として「安心・安全で質の高い生活のできる国」 5月 厚生労働省より「機械の包括的な安全基準に関する指針」 |
| 2002 (H14) | 4月 大学院機械創造工学専攻に「機械安全コース」創設 | |
| 2003 (H15) | | 5月 専門職大学院設置基準 機械安全の基本国際規格 ISO12100 (機械類の安全性—設計のための基本概念、一般原則) 発行 食品安全基本法公布 (7月施行) |
| 2004 (H16) | 3月 「機械安全コース」第一期生修了 | 4月 文科省「安全・安心な社会の構築に資する科学技術政策に関する懇談会報告書」 7月 新潟・福島豪雨 10月 新潟県中越地震 12月 ISO12100に基づき JIS B 9700 制定 |
| 2005 (H17) | | 安衛法が改正、リスク評価努力義務化 (翌4月施行) 4月 個人情報保護法施行 |
| 2006 (H18) | | 技術経営関係専門職大学院 10校により MOT 協議会発足 消費生活用製品安全法改正 危険性有害性調査の努力義務化 3月 厚生労働大臣がリスクアセスメントの実施による自主的な安全衛生活動の促進を図るための指針を公表 |
| 2007 (H19) | 10月 新潟中越沖地震震災復興シンポジウム | 5月 重大事故報告制度運用開始 7月 厚生労働省が「機械の包括的な安全基準に関する指針」を改正 新潟県中越沖地震 |
| 2008 (H20) | 3月 システム安全専攻第一期生修了 4月 安全安心社会研究センター発足 博士後期課程情報・制御専攻に「安全工学コース」 7月 新潟中越沖地震一周年震災復興シンポジウム | |
| 2009 (H21) | 9月 本センターに客員研究員制度 創設 | 9月 消費者被害を防ぐため、食品や製品の事故、クレームなどの情報を一元化した消費者庁発足 |
| 2010 (H22) | 3月 システム安全エンジニア認定委員会 (向殿政男委員長) との協力により「システム安全エンジニア資格制度」を創設、第一回試験を実施 | |
| 2011 (H23) | 3月 「安全安心社会研究」創刊 4月 大学院博士課程に「安全パラダイム | 1月 新燃岳噴火 3月 東日本太平洋沖地震 |

| 年 | 本学の動き | 社会全体の動き |
|---------------|------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| | 指向コース | 東京電力福島第一原発で事故発生長野県北部地震 4月 福島県浜通り地震 7月 欧州改正 RoHS 指令施行新潟・福島豪雨 8月 放射性物質汚染対処特措法 |
| 2012 (H24) | 3月 「安全安心社会研究」第2号発行小千谷市と原子力安全対策支援パートナー協定締結 4月 大学院修士課程に「原子力システム安全工学専攻」 | 4月 厚生労働省が、機械譲渡者等が行う機械に関する危険性等の通知の促進に関する指針を公表 7月 九州北部豪雨 9月 原子力規制委員会発足 12月 中央自動車道トンネル天井崩落事故 |
| 2013 (H25) | 3月 「安全安心社会研究」第3号発行 8月 高専生・教員を本学に招き「安全基礎工学」の講義を実施 | 2月 PM2.5 対策で国が暫定指針 4月 第12次労働災害防止計画（2013年度～2017年度）スタート 7月 原発の安全対策の新規制基準が施行山島根豪雨 8月 京都花火大会で露店爆発事故 気象庁が「特別警報」の運用を開始豪雨による広島市の土砂災害 10月 伊豆大島で土石流災害 ホテルなどで食材偽装の発覚相次ぐ |
| 2014 (H26) | 3月 「安全安心社会研究」第4号発行 10月 「生活空間の高度リスクマネジメントのためのエビデンス情報基盤構築」プロジェクト始動（JST / RISTEX） | 4月 厚労省が安全技術者への教育プログラムを提示。その中で、システム安全エンジニア有資格者は全てを修得しているとみなされた 6月 労働安全衛生法改正 消費者安全法、景品表示法の改正法が成立・公布 8月 広島土砂災害 9月 御嶽山噴火 11月 サイバーセキュリティ基本法が成立 |
| 2015 (H27) | 3月 「安全安心社会研究」第5号発行システム安全専攻修士が100名を超える 10月 システム安全アソシエイト第一回試験を実施 | 1月 内閣に「サイバーセキュリティ戦略本部」、内閣官房に「内閣サイバーセキュリティセンター（NISC）」が設置される 4月 子ども・子育て支援新制度スタート 5月 列島各地で火山活動活発化 8月 川内原発1号機が再稼働、原発ゼロ解消 9月 国連でSDGsが採択 10月 マンション傾斜、基礎工事のデータん発覚 |
| 2016 (H28) | 3月 「安全安心社会研究」第6号発行 8月 高専フォーラムにてシステム安全のワークショップを開催 9月 SSE 資格制度：システム安全サブエンジニア第一回試験を実施 | 1月 個人情報の保護に関する法律に基づき、個人情報保護委員会が内閣府の外局として設置される 4月 熊本地震 大分県中部地震 6月 改正労働安全衛生法施行 10月 マイナンバー制度スタート 11月 福岡・博多駅前の道路陥没 |
| 2017 (H29) | 8月 高専フォーラムにてシステム安全のワークショップを開催 | 1月 改正育児・介護休業法施行 3月 安全保障関連法が施行 |

| 年 | 本学の動き | 社会全体の動き |
|---------------|---------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| | 「高専教員・学生向け出張講演システム安全の基礎」を実施 | 7月 九州北部豪雨 |
| 2018 (H30) | 8月 高専フォーラムにてシステム安全のワークショップを開催 「高専教員・学生向け出張講演システム安全の基礎」を実施 | 8月 私大医学部で不正入試発覚相次ぐ 4月 第13次労働災害防止計画(2018年度～2022年度)スタート 7月 大阪北部地震 9月 北海道胆振東部地震 12月 改正出入国管理法が成立 |
| 2019 (R1) | 3月 「安全安心社会研究」第7号発行 8月 高専フォーラムにてシステム安全のワークショップを開催 「高専教員・学生向け出張講演システム安全の基礎」を実施 | 3月 厚生労働省 機能安全教育の通達 4月 働き方改革関連法が順次施行 6月 改正児童虐待防止法成立(翌年4月行) 8月 九州北部豪雨 |
| 2020 (R2) | 3月 「安全安心社会研究」第8号発行 「高専教員・学生向け出張講演システム安全の基礎」を実施 | 1月～新型コロナウイルス感染症(COVID-19)が世界的大流行 3月 新型コロナウイルス対策の特別措置法が成立 4月 改正民法、労働基準法改正(働き方改革関連)、改正健康増進法、改正意匠法(知的財産権等)などが施行 4～5月 緊急事態宣言(1回目)が発令 6月 「改正道路交通法」施行、「あおり運転罪」創設 7月 レジ袋有料化スタート 令和2年7月豪雨 8～9月 東京五輪1年延期 11月 中災防が労働災害防止団体や安全衛生関係団体と連携し、働く人の安全・健康を守るための安全衛生教育を支援 |
| 2021 (R3) | 3月 システム安全専攻修了生が200名を超える 4月 システム安全工学専攻に改組 9月 「安全安心社会研究」第9号発行 12月 KOSENフォーラム参加 | 2月 新型コロナウイルス感染症の医療者ワクチン接種始まる 7月 熱海で大規模な土石流 東京五輪開幕 12月 大阪ビル(放火)火災 |
| 2022 (R4) | 9月 システム安全工学専攻が工学教育賞を受賞 | 2月 北京五輪冬季最多メダル ロシア軍、ウクライナ侵攻 4月 知床半島沖で観光船沈没 7月 安倍晋三元首相銃撃され死亡 11月 サッカーW杯日本ドーハの喜劇 |
| 2023 (R5) | 1月 安全安心社会構築会議開催 3月 「安全安心社会研究」第10号発行 | 1月 新型コロナ5月から「5種」に引き下げ決定 4月 陸自ヘリ事故 5月 石川・能登で震度6強 新型コロナ「5類」移行 6月 LGBT理解増進法が成立 タイタニック見学潜水艇事故 7月 ビッグモーター不正請求 8月 福島第1原発処理水海洋放出開始 |

| 年 | 本学の動き | 社会全体の動き |
|--------------|-------|-------------------------------------------------------------------|
| | | ハワイ・マウイ島山火事 11月 北朝鮮偵察衛星打上成功 12月 大谷翔平ドジャース入史上最高10年 1015億円 |
| 2024 (R6) | | 1月 能登半島地震 羽田空港でJAK機と海保航空機衝突 |

◇ 編集後記

長岡技術科学大学 安全安心社会研究センター事務局 小林まゆみ

まずは「安全安心社会研究 11 号」の発行にあたり、ご多用にもかかわらずご寄稿くださいましたみなさまに感謝申し上げます。

2023 年 5 月、新型コロナウイルスが 5 類に分類され、同年 12 月センター特別講演会より会場への入場者数の制限はほぼなくなり、情報交換会も再開されました。ハイブリットでの開催も定着しつつありますが、ぜひ、会場へ足をお運びください。

2024 年は能登半島地震で始まり、羽田空港衝突事故をも招いてしまいました。ともすると災害や事故は他人事で、危険は隣にあることを忘れがちです。「安全安心社会研究」が安全を考えるきっかけになれば幸いです。

/// 令和5年度 安全安心社会研究センター組織 ///

センター長

長岡技術科学大学 システム安全工学専攻 教授 門脇 敏

副センター長

長岡技術科学大学 システム安全工学専攻 教授 木村 哲也

教員

| | | | |
|----------|---------------|--------|-------|
| 長岡技術科学大学 | 情報・経営システム工学専攻 | 教授 | 塩野谷 明 |
| 長岡技術科学大学 | 機械創造工学専攻 | 教授 | 上村 靖司 |
| 長岡技術科学大学 | 電気電子情報工学専攻 | 教授 | 岩橋 政宏 |
| 長岡技術科学大学 | 環境社会基盤工学専攻 | 教授 | 細山田得三 |
| 長岡技術科学大学 | システム安全工学専攻 | 教授 | 阿部雅二郎 |
| 長岡技術科学大学 | システム安全工学専攻 | 教授 | 三好 孝典 |
| 長岡技術科学大学 | システム安全工学専攻 | 教授 | 山形 浩史 |
| 長岡技術科学大学 | システム安全工学専攻 | 准教授 | 大塚 雄市 |
| 長岡技術科学大学 | システム安全工学専攻 | 准教授 | 張 坤 |
| 長岡技術科学大学 | システム安全工学専攻 | 准教授 | 北條理恵子 |
| 長岡技術科学大学 | システム安全工学専攻 | 実務家教授 | 坂井 正善 |
| 長岡技術科学大学 | システム安全工学専攻 | 実務家教授 | 津田 積善 |
| 長岡技術科学大学 | システム安全工学専攻 | 実務家准教授 | 宮地由芽子 |
| 長岡技術科学大学 | システム安全工学専攻 | 講師 | 佐藤 大輔 |
| 長岡技術科学大学 | システム安全工学専攻 | 助教 | 高橋 憲吾 |

事務局

| | | |
|----------|--------------|-------|
| 長岡技術科学大学 | 技術支援センター | 山田 修一 |
| 長岡技術科学大学 | 安全安心社会研究センター | 小林まゆみ |

令和5年度 安全安心社会研究センター客員研究員 <五十音順>

五十嵐広希 (東京大学)
 今枝 幸博 (村田機械株式会社)
 岩岡 和幸 (旭化成株式会社 延岡支社 環境安全部)
 越前屋 睦 (吉川鐵工株式会社)
 大賀 公二 (有人宇宙システム株式会社 安全開発・ミッション保証部 部長)
 大村 宏之 (社団法人日本食品機械工業会 事業部)
 奥田 真司 (奥田労働安全コンサルタント事務所 代表)
 川瀬健太郎 (日清オイリオグループ株式会社 人事・総務部付)
 櫻井 剛 (イーソル株式会社 ソフトウェア事業部及びガバナンス室(兼務) シニアエキスパート)
 杉本 旭 (長岡技術科学大学 名誉教授)
 野沢 義則 (八戸市立市民病院 医療技術局 局長)
 松浦 裕士 (日本認証株式会社 事業企画推進部)
 松田 利浩 (Office Co. Think 代表)
 吉澤 厚文 (東京電力ホールディングス株式会社 フェロー)

安全安心社会研究 [第11号]

令和6年3月 発行

長岡技術科学大学 安全安心社会研究センター

〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1

電話 0258-47-9856

発行責任者：門脇 敏

E-mail：info_safety@vos.nagaokaut.ac.jp

ホームページ：https://whs.nagaokaut.ac.jp/safety/



国立大学法人

長岡技術科学大学

Nagaoka University of Technology