

次世代を拓く安全技術と人・組織：産業安全を支える安全管理・安全情報共有システム

その他のタイトル	Safety technologies and people/organizations activities for the next generation : Safety management and safety information sharing system for supporting industrial safety
著者	中井 敦子, 田邊 雅幸, 鈴木 和彦
雑誌名	社会安全学研究 = Safety science review
巻	10
ページ	217-235
発行年	2020-03-31
URL	http://hdl.handle.net/10112/00020174

次世代を拓く安全技術と人・組織 ～産業安全を支える安全管理・安全情報共有システム～

Safety technologies and people/organizations activities for the next generation
—Safety management and safety information sharing system for supporting industrial safety—

安全・安心科学研究所

中 井 敦 子

Institute of Safe & Security Science

Atsuko NAKAI

日揮グローバル株式会社

田 邊 雅 幸

JGC Corporation

Masayuki TANABE

安全・安心科学研究所

鈴 木 和 彦

Institute of Safe & Security Science

Kazuhiko SUZUKI

SUMMARY

Ensuring a sustainable safety management system is a global issue and a social demand. In recent years, Risk Based Safety Management (RBSM) has become mainstream as a comprehensive management system for handling process safety in Oil & Gas industries. Nowadays, UK Safety Case concept was well established, and this concept is widely applied in various industries. Through this process, logical safety assurance approach was developed and introduced, named CAE (Claims, Arguments, and Evidences). In Japan, Oil & Gas industry operators keen to apply Risk Based Process Safety Management which is suggested by AIChE CCPS. However, actual implementation of RBPS is not straightforward since detailed approach is not well defined yet. The UK Nuclear Industry's Safety Case approach may be able to assist implementing Risk Based Process Safety Management System in the Japanese O&G industry. Furthermore, it has been developing work support and information sharing technologies in the industrial field by introducing DX (Digital Transformation) technology. This paper introduces topics to improve industrial safety using these two approaches, and discusses safety technologies and people / organizations that will support the next generation of plants.

Key words

RBPS, Safety Case, Management System

1. はじめに

現在の石油化学産業では、製品・品質の最適化、コスト削減を目的とする高度制御技術の導入が進められている。しかし、一方で技術継承の不足、現場オペレータの作業負担の増大が指摘されている。原子力発電や石油化学等大規模プラントの経年劣化は避けられない。全面的なリニューアルが遅れ、老朽化が進んでいる。これまで現場を支えてきた「人」が有し、培ってきた技術・知識はベテランのリタイアとともに去りゆき、このため運転員が異常の全体像を把握できず、危険発生時に適切な安全措置がとれないという問題が生じている。石油化学コンビナートにおける事故発生状況は依然として高く、企業・事業所における「現場の主體的な安全活動」、 「リスクマネジメント」、 「安全文化」の強化が求められている^[1]。

1.1 産業現場での取り組み

石油化学コンビナートでは、1970年前後に重大事故が多発したためコンビナート等保安規則の施行をはじめとする法改正が行われた。事業者側でも各種管理手法を取り入れたことにより重大事故は減少している(図1)^[2]。1980年以降産業現場において、指差呼称・ヒヤリハット・PKYT・小グループ活動などボトムアップ的安全活動と自主保安認定制度の拡充にとともに、ドキュメント/ルールの充実やリスクアセスメント等のトップダウン型の安全活動が実践されている。近年、デジタル技術の進歩や省人化ニーズにあわせて、自動化・IT技術推進による合理化・操業安定化も進んでいる^[3]。

しかし、2000年代に入ってから現在に至るまで、依然として事故は散発している。産業現場、特に石油・石油化学産業では多くの危険性物質を取り扱っており、ひとたび事故が起これば社

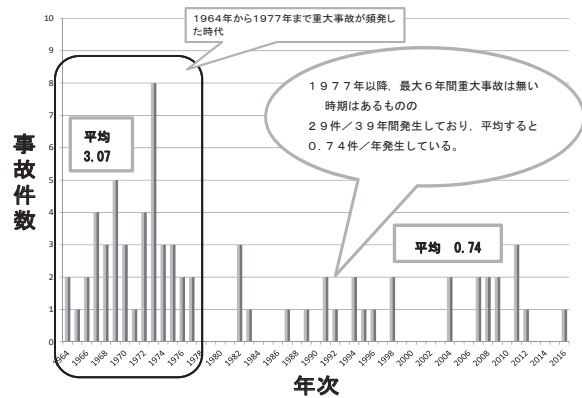


図1 重大事故年代別推移^[2]

会に与える影響が甚大である。さらなる事故低減の対策が必須である。

1.2 産業安全への課題

プラントの安全性確保の手段として、多重防御の考え方がある。AIChE(米国化学工学会)のCCPS(化学プロセス安全センター)により、独立防御層(IPL:Independent Protection Layer)の概念^[4]が提唱されたのをきっかけとして、システムティックな安全設計に関する議論が行われている。火災爆発、毒性物質漏洩などの事故を未然に防ぐために、安全計装システム(SIS:Safety Instrumented System)は重要であるが、多くが慣例化された情報(手続き)に基づいて決定、設置されている。安全計装システムの健全性やシステム全体に対する影響などは系統的に評価されないままとなっていた。安全系設計は、HAZOP手法などのリスク解析結果に基づく潜在危険の同定に始まり、プロセスの健全性水準の決定、運転段階における操作手順、あるいは定期的テスト、メンテナンスの頻度などの安全思想と系統的に関連付けられなくてはならない^[4]。

一方、経済産業省は、保安水準をより一層向上するため、産業保安規制のスマート化を推進している^[5]。リスクや企業の保安力に応じた「賢

い」安全規制（＝スマート保安）により、少ない国民コストで「ナショナル・ミニマムとしての安全」を確保するとともに、諸外国に先駆け、ヒトを補完するものとして、IoT、ビッグデータ、AI等の新技術も活用し、効率的かつ効果的な形で現場の自主保安力を高め、安全性と生産性（企業の「稼ぐ力」）両方の向上を図ろうとしている。

持続可能性のある保安体制の確保はグローバルな課題であり社会的要請である。近年、安全をリスクベースで全体管理する総合的マネジメントとしてRBSM（Risk Based Safety Management；リスクに基づく安全管理）が主流となってきている。そして産業現場ではDX（Digital Transformation）技術の導入による作業支援、情報提示・共有の仕組みを模索している。本稿では、この2つのアプローチによる産業安全向上への取り組みを紹介し、次世代プラントを支える安全技術と人・組織について検討する。

2. 英国原子力セーフティケース手法によるリスクベースプロセスセーフティマネジメントの実装

2.1 マネジメントシステム指針

元来、「安全」には多様な要素が含まれており、一つの基準で大別すると労働安全とプロセス安全（プロセスセーフティ）とに分類できる。これまで、労働安全面では「マネジメントシステム」を構成し管理するというガイドラインがOHSAS18001^{[6][7]}などで示されている。

労働安全だけでなく、プロセス安全についてもプロセスセーフティマネジメントとしてマネジメントシステムの枠組みをアメリカ化学工学技術者協会の化学プロセス安全センターが示しており、プラントの安全管理には労働安全マネジメントおよびプロセスセーフティマネジメントシステムの両輪が必要ということになる。

表1に労働安全、プロセスセーフティマネジメントに関するガイドラインの分布に関して筆者なりの理解をまとめる。

労働安全がプラントライフサイクルのすべての時期をカバーするイメージであるのに対して、プロセスセーフティマネジメントでは、US OSHA PSMが運転期間を主要なカバーエリアとしている。それに対して後述のセーフティケース系のプロセスセーフティマネジメントはプラントライフサイクル期間中の性能基準を管理するという技術的な考えが根底にあるため、適用期間がライフサイクル全域に渡っているイメージである。

しかし、この欧米発の労働安全やプロセスセーフティマネジメントシステムにしても、「マネジメントシステム」という考え方が概念的なガイドラインしか存在しないため、非常に入りやすく、効果的な実装へのハードルを上げている。

さらに近年、アメリカ化学工学技術者協会（AIChE）の化学プロセス安全センター（CCPS）はリスクベースプロセスセーフティマネジメント（RBPS）の概念およびガイドラインを示すに至っており、リスク観点でのプロセスセーフ

表1 プロセスセーフティ・労働安全マネジメントガイドラインの適用範囲

分類		設計	建設	運転	廃棄
プロセスセーフティ	技術面	UK Safety Case Regulation Risk Management Process など			
	ソフト面	NA		US OSHA PSM	NA
労働安全	技術面	UK CDM Design Risk Management Process など			
	ソフト面	NA	OHSAS 18001 など		

ティマネジメントシステムという一段階難易度の高いプロセスセーフティマネジメントシステムが必要という流れになってきている。この流れを受け、国内の事業者においてもRBPS実装のための議論が行われている。

本章では、「マネジメントシステム」という観点から具体的にRBPSを実装する際の重要なポイントについて議論したい。

2.2 マネジメントシステム

「マネジメントシステム」という概念に関して、OHSAS18001などを参照していくと、ポリシーから始まり、プラン、組織、コンピテンシー、マネジメントのPDCAサイクルなどの考えが述べられているが、実装するに際しての具体的な方策は述べられていない。

分かり易く解釈しようとする、マネジメントシステムとは謂わば、日常生活における交通安全規則やルールのようなものであると言えるかもしれない。まず交通安全規則の設定が必要であるが、加えてトップが真剣に取り組むと言う強い意気込み（コミットメント）を示し、啓蒙活動をすることで全体の意識向上を図り実効性を高める努力を行っている。さらに定期的に運用状況を確認し、変化に応じて規則の改定を行うなどの運営面も含め、全体としての取り組みから交通安全活動が成っている。運用面では加えて安全担当者の配置や組織、その権限設定なども重要な要素となる。

これを安全マネジメントシステムに置き換えると、事業所での操業において安全を確保するために必要な規則やルールと、その安全を守るために必要な体制・制度・規則・啓蒙活動などを含めた総合的な体制であると考えられる。

交通安全であれば対象が明確であるため、比較的「システム」を意識しやすいが、前述の通りプラントなどの事業所における安全性は

種々に渡るため必然的に分かりにくくなる。例えば労働安全やプロセスセーフティなどマネジメントする目的を明確にして、マネジメントシステムを構築するようになれば効果的なシステム構築が難しくなる。また、そもそもの組織の主目的（製品の製造など）を達成するための操業システムが運用されているはずであるので、その既存システムを最大限活用しながら要所を加えていくという注意深い組み込み方が望まれる。

2.3 CCPS RBPS

CCPSはリスクベースプロセスセーフティマネジメントとして20のエレメントからなるシステム構成を紹介している（図1参照）^{[8][9]}。20エレメントは以下となっている。

- Process Safety Culture
- Compliance with Standards
- Process Safety Competency
- Workforce Involvement
- Stakeholders Outreach
- Process Knowledge Management
- Hazard Identification and Risk Analysis
- Operating Procedures
- Safe Work Practices
- Asset Integrity and Reliability
- Contractor Management
- Training and Performance Assurance
- Management of Change
- Operational Readiness
- Conduct of Operations
- Emergency Management
- Incident Investigation
- Measurements and Metrics
- Auditing
- Management Review and Continuous Improvement

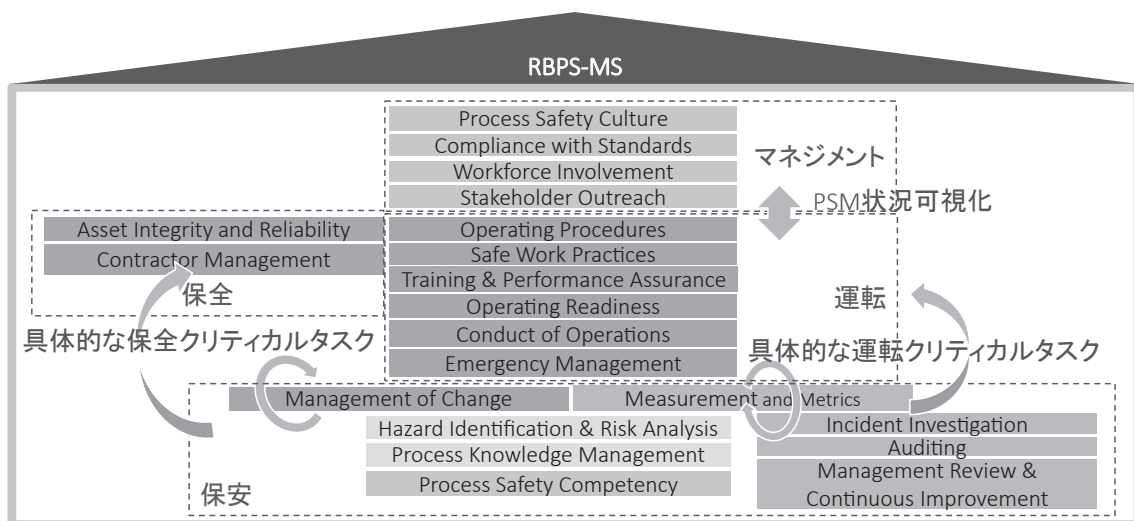
労働安全マネジメントシステムでも必要なマネジメントコミットメント系のエレメントに加えて、ハザードの抽出とリスクアセスメントや運転・保全系のエレメント、KPI・事故調査・レビュー・監査などのエレメントが並んでいる。実際に、「リスク」をベースとしてプロセスセーフティマネジメントシステムを構築する際には、単純に20個のエレメントを準備すれば良いのではなくそれらの関係性、および導入しようとしている事業者の組織構成なども考慮して「システム」としてどのように運用するかも考慮する必要がある。リスクベースの場合、リスク情報が他のほとんどのエレメントを下支えする情報を提供する位置づけであること、また例えばそれぞれのエレメントの運用を担当する運転チーム・保全チーム・保安チームはそれぞれ事業者内組織における部署が異なることが一般的であるという現実があるためである。

具体的には図2のようなトップマネジメント、運転、保全、保安（プロセスセーフティ）それぞれが受け持つエレメントが混在している中でそれぞれがどのエレメントを担当するかを明確

にすること。特に安全担当者がハザードシナリオを同定しリスク評価した上で、ハザードシナリオ・リスク削減情報を他部署に伝達し、これらに関連する運転や保全のクリティカルタスクを明確にすることにより、事業者の重点管理に反映させる仕組み作りが可能となる。また、リスクに影響を与える因子に関してはKPI（Key Performance Indicator）として設定し実効性を常に確認する仕組みや、リスク情報に影響を与えるであろう変更が生じた場合には適宜リスク情報を更新する変更管理の仕組みも安全管理上大変重要である。

リスク情報を実際にクリティカルタスクへ展開するためには、プラント設備内の個別構成機器タグナンバーレベルで緻密にハザードシナリオ（想定事故シナリオ）を抽出し、それぞれのシナリオの事故原因要素とリスク削減策のリスク削減効果を適切に評価することが必要である。

またリスクアセスメントを実施する際には、これまでの経験ベースの現実的なハザード同定（高発生頻度・低影響度）ではなく、低発生頻度ではあるが高事故影響のシナリオまでしっかり



効果的な制度設計, 教育・啓蒙 & 外部識者による定期的な実効性レビュー

図2 組織を考慮したRBPS-MSエレメント構成

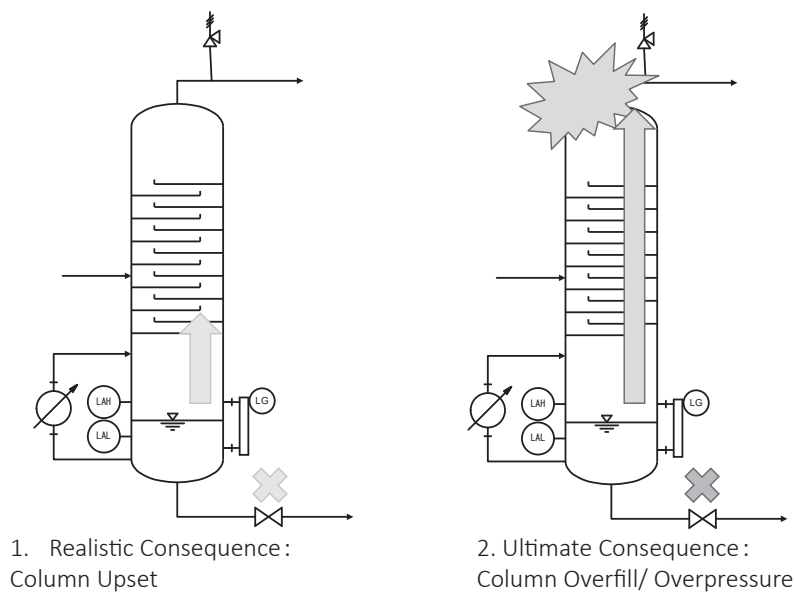


図3 リスクアセスメントで必要となるハザード同定タイプ

と抽出し安全策を評価する必要がある。過去の多くの大事故でこの低頻度シナリオが現実化していることは実証されているし、“リスク”の管理のためにはプラントに内在する正味のプロセスリスクの把握ができていなければならないためである。この意味で、リスクアセスメントを正確に評価できる担当者のコンピテンシーが重要となる。

一例として図3に、典型的な蒸留塔でのハザード抽出の仕方でも説明する。経験ベースでは、多くの場合、高頻度・低重大度の事象を経験しているため、蒸留塔液出口の液位調整弁が故障して出口閉塞になった場合の想定事故として、蒸留塔内部のトレーが液浮力により破損するところまでで止めている。経験あるオペレータは、その段階で異常な運転に気がついてきたし、設計者もまたそこまでいけば運転中のプロセス変動に気が付くはずと考えるためである（図3の Realistic Scenario）。一方で、通常運転時ではないものの、実際にBP テキサスシティの事故時には、蒸留塔のトレーが液に浸る程度では気が付かず、蒸留塔自体がオーバーフローすると

ころまで事象が進展している^{[10][11]}。BP テキサスシティでは安全弁が吹いた先のブローダウンドラムでの事故となったが、安全弁が吹いたという事実が、安全装置を考えない元々のプロセスリスクとしては、この蒸留塔が液の完全充填による圧力超過事故を起こしていてもおかしくはなかったことを示している（図3の Ultimate Scenario）。

実際のところ、BP テキサスシティの際には、多重の要因が絡んでおり、安全文化自体が問われているため、国内事業所でこのような事象が起こるかと言えば非常に可能性は低いと考えられる。一方で、その安全を支えてきた熟練の運転員が退職の時期を迎えてきているという危機感は今や業界共通のものである。これまでは信じられなかったような事故が生じてもおかしくない状況なのである。そのような状況を鑑みれば、元々持っているプロセスリスクを把握した上で、リスク観点で低頻度・高重大度の事故想定を行い、運転・保安・保安全管理に展開することがいかに重要か理解されよう。一度リスクがタグナンバーレベルで把握されれば、そこから

プロセスセーフティマネジメントシステムへの良質な情報として展開できる。

2.4 セーフティケース

リスクアセスメント部分を如何に実施するかについて、CCPS RBPS ガイドラインでは具体的な議論がなされていない。ただし、その他にもハザードアセスメント手法を解説したガイドラインは数多く存在するため参考にされたい。まずリスクアセスメントの手法としてHAZOPやSILと言った手法、もしくはQRAなどのリスク解析手法の採用が考えられるが、ここでは全体的なリスクアセスメントの考え方として、“セーフティケース”という考え方を紹介したい。

セーフティケースは1992年に英国の北海油田の操業に関して事業者が安全性を自ら証明するという枠組みを求めて制定された法規から始まった。今ではプラント以外の業種、例えば鉄道、航空業界（ナビゲーションシステム）、防衛産業など危険な運転が存在するものに広く使用されるようになってきたコンセプトである。以下に、セーフティケースの必要性が述べられている業界と関連図書を列記する。

- 航空業界（ナビゲーションシステム安全）：
 - EUROCONTROL Safety Case Development Manual
- 鉄道業界（安全性 & 稼働率）：
 - Railway Safety Case Regulations
 - Rail Yellow Book
 - IEC 62425/ EN 50129
- 自動車業界（システム安全）：
 - ISO 26262
- 原子力業界：
 - Nuclear Installation Act 1965
 - Nuclear Site License
 - ONR Safety Assessment Principles

このように業界を超えてセーフティケースコンセプトの採用が広がる過程で、“セーフティケース”を示すための技術が体系化されてきている。基本的な思想としては、安全性を保証（Assurance）するため、1) 体系的に全体像を示すこと、2) 論理的に安全性を導くこと、3) 安全上必要な要求の定義を明確にすること、が重要とされている。特に1)および2)に対しては、体系的かつ論理的に安全性を導く手法の一つとして、CAE（Claims（主張）、Arguments（立証）、Evidences（証拠）という理論分解アプローチが開発されている^{[12][13]}。3)に対してはIEC 61508/61511^{[14][15]}に代表される機能安全スタンダードで導入されているセーフティライフサイクルのコンセプトが良く説明している。

CAEアプローチは、Arnold社が防衛産業でのセーフティケース向けに取り入れたものである^{[7][8]}。“安全”を頂上とした階層的理論展開により安全を脅かす可能性がある項目を反証と証明からなる立証で支持し、この立証に必要な証拠をそろえることで、体系的かつ包括的に“安全”という解を導く論理手法である。CAEの網羅性を担保するためには、プラント内事故シナリオおよび設計思想に精通している必要がある。図4にプロセス安全をCAE分解する際の主要構造を示す。（実際の分解は想定事故シナリオごとなるため煩雑な分解となる。）

この主要な分解のサブ分解には、以下のよう
なキーワードでの分解も必要となる。

- マネジメントシステム（プラン・手順書・トレーニング等）
- 設計・運転管理・廃棄・スタートアップ・シャットダウン
- ハードウェア・ソフトウェア・人間系（ヒューマンファクター）
- プロセス/レイアウト設計思想
- プロセス安全・一般火災安全・労働安全

- 本質安全, 機能安全, 検知, コントロール, サポートシステム
- 通常状態, 異常状態 (設計ベース事故・想定外事故)

その中でも最も重要な想定事故シナリオの抽出・リスクアセスメントは, 具体的には, 以下のような手順となる.

- 1) リスク評価のクライテリア (そのバックグラウンド等の説明含む) を設定
- 2) 個々の設計ベースアクシデントシナリオを抽出
- 3) 設計ベースアクシデントの起因事象発生頻度を想定
- 4) 設計ベースアクシデントが発生した場合の影響度を評価
- 5) リスククライテリアに従ったリスクの評価と削減目標値の確認
- 6) リスクを目標値まで削減するための安全装置やクリティカルタスクを確認 (リスク削減度合いの妥当性の評価を含む) — この過程は Allocation of Function (AoF) と呼ばれ非常に重要なステップ
- 7) 削減されたリスクがクライテリアに入っていることの確認

この過程は HAZOP/SIL の流れと同じであるが, SIL が SIS に特化しているのに対して, この CAE による分解過程は, SIS 以外も含むすべての安全装置に対する機能要求を精査していく

ことになる. 設計ベースアクシデントシナリオごとにこのサイクルが実施される. すべての設計ベースアクシデントシナリオとリスク削減策が取りまとめられたリストをフォルトスケジュールと呼ぶ. 実際に放射性廃棄物処理のような簡単なプラント設備でも 500 件程度の設計ベースアクシデントシナリオが登録されるため, 複雑なケミカルプラント等になるとそのシナリオ数は膨大になってくると思われる. 煩雑である反面, 設計ベースアクシデントシナリオが明確となるため, 重点管理対象が具体的になることと, 算出されたシナリオごとの削減リスク値の合計値を見ることでそのプラントが持つ削減後のリスク値を確認することができるため, リスクベースでの保安・保安全管理を実装することが可能となる.

2.5 RBPS の実装

前述の通り, 事故原因と事故進展シナリオはプラント内に多数存在するが, それらを明確にしていくことにより, 運転安全管理と保安全管理に有効な情報となり得る.

更に, フォルトスケジュールをデータベースとして, 各設計ベースアクシデントシナリオに関連する機器, 配管などをプラントの保全データとリンクさせることで, 初期想定した故障頻度をアップデートしリスクの経時変化を確認しながら重点管理をかけていくという RBPS マネ

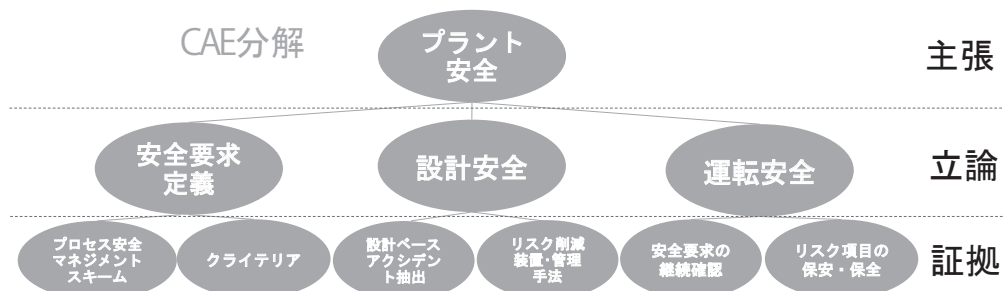


図4 CAE分解手法の概念図

ジメントシステムの実装が可能となる。例えば、アラームによる運転員のアクションをリスク削減策として設定した場合、運転手順書への追加、トレーニングなどに組み込むことで、現場側も重点管理ポイントを明確に把握することが可能となる。厳密なプロセスセーフティ事故シナリオ観点に基づくリスクベース運転・保安・保全のマネジメントシステム構築の中心的なツールとなり得る。

現在のところ運转向けのDCS情報を吸い上げた Plant Information Management System や設備保全管理向けのCMMSなどのシステムはあるものの、保安・プロセスセーフティ分野ではHAZOPのデータを基にしたリスクを組み込んだようなサポートシステムツールが存在していない。ここにフォルトスケジュールをベースとしたシステムを構築し運転・保全・保安（プロセスセーフティ）間をつなぐマネジメントシステムを構築することでこのコンセプトの実装が可能となる。

従来の保全計画でも安全観点の評価は行われており、保全の取り組みの一つとしてRBM（リスクベースメンテナンス）もあるが、保全プラン策定が主目的であるため、厳密なプロセスセーフティ事故シナリオ観点でのリスク評価というよりは、劣化による漏洩発生時点からの影響度評価を基礎としたものとなっている。保全から保安へのフィードバックによる経時リスク把握という試みはこれまでにはなかった。日揮グローバル社では、このRBPSマネジメントシステムとして、“CoreSafety™”（図5と図6にその概念図を示す）と呼ぶシステムツールを提供し、RBPS実装支援を行っている。“CoreSafety™”の導入により、運転・保安・保全の組織がリスク情報でつながり、より信頼性の高いリスクマネジメントシステムを構築できる（図7参照）。

一方で、前述の通り、マネジメントシステムは、ツールがあれば完成といった類のものではなく、リスクベースマネジメントシステムツールを正しく運用できる担当者・関係者のコンビ

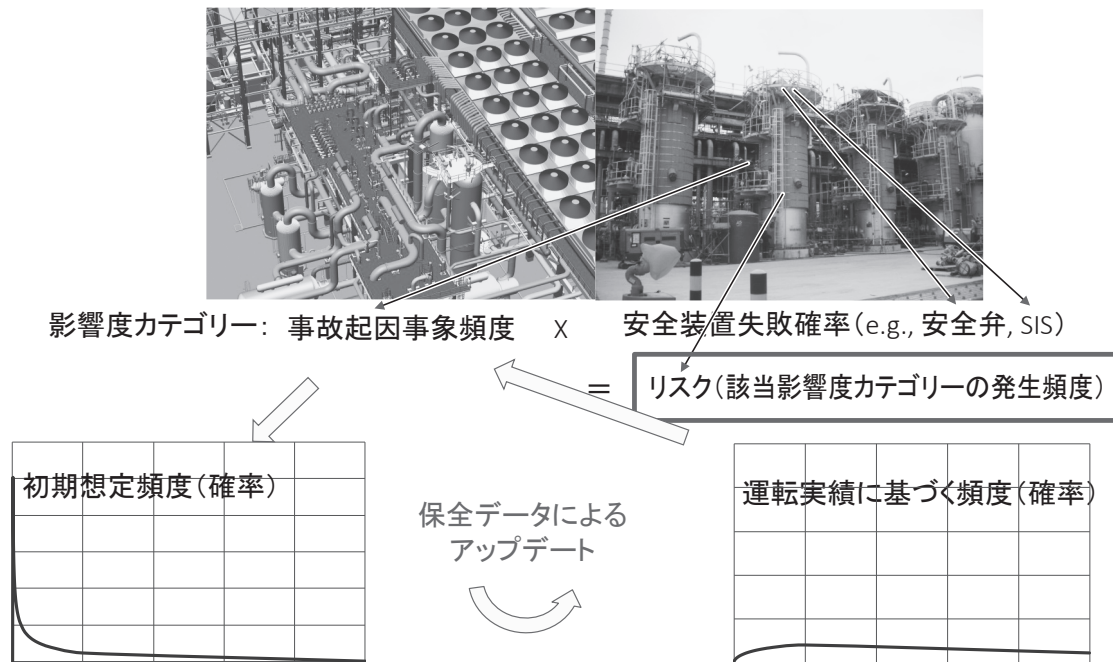


図5 保全データによるリスクアップデートイメージ図

テンシー教育や、組織内でのプロセスセーフティ担当部署の配置など、システムを運用するに当たって実効性が上がるような制度設計も合わせて考えなくてはならない。プロセスセーフティ担当は製造系かエンジニアリング系に配置される方がラインに近くなるため、組織内での影響力を上げやすいが、反面独立性が損なわれる部分もあり、まさに高い意識が求められることになる。教育システム、実効性の確認などは外部の知見のあるスペシャリストにより定期的な確認を行うことが望ましいであろう。

2.6 労働安全ライフサイクルマネジメント

セーフティケースと並行して存在するトレンドが、英国では法制化（CDM, Construction Design Management Regulation）されている。労働安全リスクを削減する設計管理要求の高まりである。プロセス安全に関しては事故シナリオの同定、リスクアセスメント、正当性証明というリスクマネジメントプロセスがよく知られているが、労働安全災害に関しても事前に事故シナリオを同定し、リスクアセスメントを行い、できる限りリスクを削減するような設計を考慮

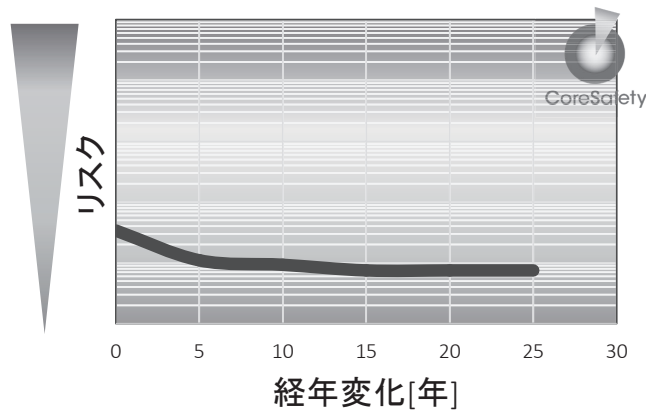


図6 リスク経年変化図

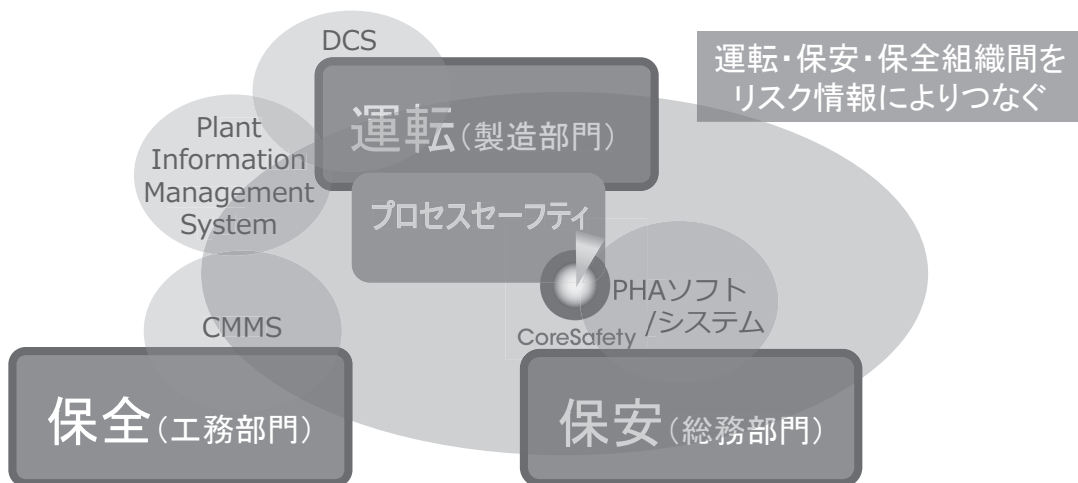


図7 RBPS システムと他システムの相関図

し、削減しきれなかった高リスク項目を建設業者や運転員に伝達するという仕組みが必要となってきた。従来の労働安全マネジメントシステムもリスクベース化されるというイメージである。

つまり、今後は労働安全マネジメントシステム・プロセスセーフティマネジメントシステムともにリスクベースでの管理が必要になる時代がくる可能性が高い。労働安全マネジメントとプロセスセーフティマネジメントを実施する担当者に求められる知見は違う部分が多いが、それぞれのマネジメントシステムを別々に回すと言うのは無駄も多いので、統合マネジメントシステムを構築することも一つの有効なオプションになると考えられる。統合リスクマネジメントプロセスのイメージ図を図8に示す。

プロセスプラントにおいては、プロセス安全リスクマネジメントプロセスの重要度が高い。今後増えてくるとされる再生可能エネルギー系インフラ開発（例えば洋上風力発電など）ではこのリスクマネジメントプロセスの中でも労働安全リスク管理の重みが大きくなっていくことになる。工事シーケンス・手順を押さえた上でヒューマンファクターレビューなどを実施することでハザードを同定しリスクアセスメント

を実施していくというプロセスを回していくこととなる。

2.7 コンピテンシーマネジメント

本章では、安全への要求が高まっている中、それを保証する方法として確立されてきたセーフティケースのアプローチを紹介した。その中でキーとなるのは、網羅性を体系的かつ包括的に示していく論理分解手法と想定事故および事故進展シナリオを明確に定義することである。これらを徹底することで、設計安全情報は運転中の事故リスクを効果的に管理する保安・保全マネジメントシステムに展開することができる。本稿においては技術アプローチに焦点を当てたが、技術的・論理的な安全証明の展開を包括する形で重要になるのが、全体のプラン・マネジメントシステム、そして担当者のコンピテンシーと言ったソフト的な部分である。

現在は、アメリカ化学工学技術者協会と英国化学工学会がプロフェッショナルプロセスセーフティエンジニアの認証・登録を行っており、こういった認証された専門性を有するものを担当者とするか、外部サービスとしてマネジメントシステムの実効性を確認するなどの手段も考えられるようになってきている。プロフェッシ

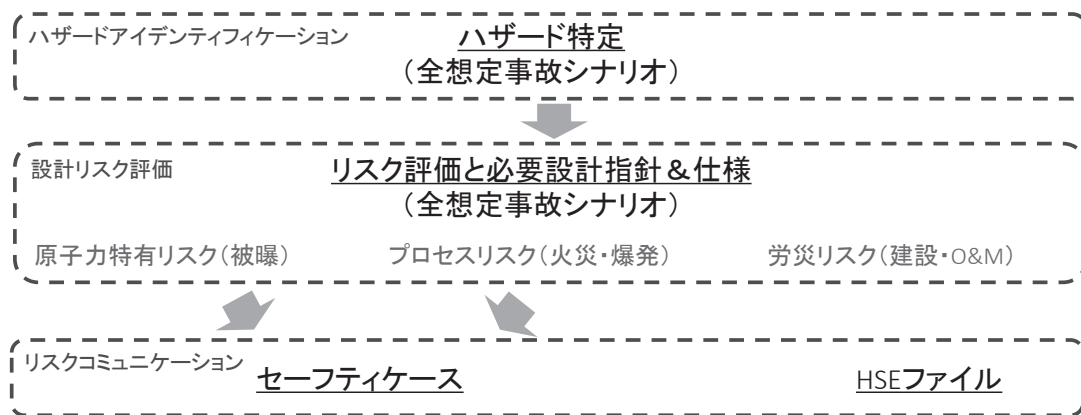


図8 労働安全・プロセスセーフティ統合リスクマネジメントプロセス

ショナルプロセスセーフティエンジニアの認証を得られたからと言って永続的に、その能力が認められると言うことではなく、日々技術の進歩や状況の変化がある中で、常に自身のコンピテンシーを維持・向上させる努力を続けることが求められている。リスク管理においても日々常にリスク削減の努力を怠らない姿勢を求めなのがリスクマネジメントプロセスの真に重要なポイントであると考え、コンピテンシーマネジメントなどのソフト面のベンチマーキングは難しいものであるが、前述の日揮グローバル社が提供している CoreSafety™ サービスにおいては英国化学工学会登録のプロフェッショナルプロセスセーフティエンジニアによるコンサルティングによりコンピテンシーマネジメントのサポートも行っている。世の中の、安全性への意識は一層高まっており、こういった要望に応えるためだけでなく、業界全体の安全性向上への絶え間ない取り組みを促すという意味でも RBPS の導入は真に価値のある取り組みである。

3. 安全性向上のための遠隔協働作業支援作業情報共有について

3.1 石油化学プラントの特徴と産業事故の発生要因

石油化学プラントの生産工程は、製品の精製のために複雑で長い工程が多い。中心となる反応工程から様々な副生物が生成され、多岐にわたる操作が必要となる。このため、石油化学プラントでは複雑な装置や配管が広い敷地内に密接に配置されている。配管やバルブ、タンクなど形状、形式が同一、異種同型の機器が多いため機器やバルブなどを識別しづらく、経験の浅い作業員の誤操作の要因となり得る。また熟練作業員であっても非定常作業時には緊張や判断ミスを起こしやすい。さらにプラント運転は分散制御システム（DCS）により制御され、必要

に応じて現場作業員との協働作業が行われるが、作業指示の多くは音声による指示であるためコミュニケーションエラーを起こしやすい。設備・機器の故障、トラブルの未然防止はもちろんだが、人のミスを防ぐ安全対策が必要である。

消防庁特殊災害室による平成30年度「石油コンビナート等特別防災区域の特定事業所における事故概要」^[16]によると特定事業所672カ所の事故総件数は398件で、地震によらない一般事故が314件（前年比62件増）、地震による事故が84件であった。一般事故の総件数は、平成元年以降最多であり死者1人（前年比1人増）、負傷者が33人（前年比18人増）であり継続的な事故未然防止の取り組みが重要である。事故の発生要因は人的要因によるものが133件（42.4%）、物的要因によるものが156件（49.7%）となっており、「腐食疲労等劣化」、「操作確認不十分」、「維持管理不十分」が主な要因である。経年劣化及び、省人化による一人当たりの仕事量の増加により、現場操作者の誤操作、誤判断が生じる可能性が高まっていることが懸念される。DX技術の導入による作業支援、安全対策が今後も一層期待される。

3.2 人的要因によるトラブル・事故の発生を防止するための遠隔協働作業支援と情報共有

本章では、現場操作者（以降、フィールドマン）と制御室で監視・遠隔操作を担当するボードマンにより共同して行なわれる弁およびポンプ等の機器を操作する現場作業を想定しPC、携帯端末を利用した作業の安全確保、作業支援について説明する。人的要因による事故には多様な背景が考えられる。制御室と作業現場は離れた場所にあり双方の作業状況を目視により確認することができない。さらに配管や機器の中を流れる危険性物質の状態を直接見ることができない。ボードマンとフィールドマンとの連絡に

は主にページングなどによる音声を用いられるが、音声による指示、連絡では、聞き間違いや思い込みによる誤判断、認知・確認ミスが発生し易い。また、現場作業に必要な情報をいつ、誰に提示するかといった情報の選別は人の経験で行われており、作業者の技量に頼った安全管理が行われている。今後、経験のある熟練作業者が不足することが考えられるため正しい情報が現場作業者に伝わる仕組みの構築が必要である。この目的のためにICT技術を活用した情報提示、共有により現場の状況が正しく複数の作業者に伝わる作業支援・作業情報共有システムの検討を行った。

3.3 石油化学プラント安全化支援

現場作業の多くは複数人の作業で行われる。作業における正確な情報伝達は作業を円滑に早く安全に進めるために不可欠である。情報ネットワークにより誤操作、誤判断の防止に必要なプラント操作情報を情報端末に提示する。システム化を行うにあたって次の機能を実装することを目指した。

- 現場作業情報提示と作業・プラント情報の共有
- 正確な操作対象機器を確認できる画像認識手法の提案
- 作業手順の標準化と作業における責任分担の明確化
- 作業安全のための現場作業者と運転員（制御室）のコミュニケーション支援
- 作業履歴の保存、共有による安全情報活用

次に、現場作業の操作手順書を情報端末に表示できるように標準化するための手法と操作開始前に操作対象を正確に確認できる画像認識機能について説明する。これらを情報端末に実装することにより作業情報提示・共有システムを構築した。本システムはプラントシミュレータ

と連動することによりプラント挙動を携帯端末から確認することを可能にした。システムの概要を図9に示す。

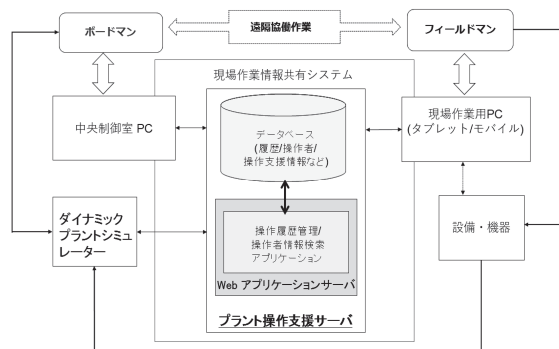


図9 システムの概要

3.3.1 操作手順書の標準化

製造現場では、作業の手順を間違う、誤操作、誤判断など人的要因による事故を防ぐための現実的な対応策として、SOP（Standard Operating Procedure；標準操作手順書）が多く用いられている¹⁷⁾。SOPには手順通りに操作を行えば熟練者、未熟練者に係わらず同じ結果が得られるように操作手順が記述されている。しかし、作業者のだれもが当然知っているはずの事柄は記載されないことがある。また操作のタイミングや操作時間、操作方法、操作人数等の詳細情報は記述されず経験のある作業員からの指示で作業が進行する。時には、操作手順を読まない、操作対象の誤認識が発生する等の危険性がある。このため従来の紙媒体による操作手順書を単に複写して情報端末に組込むだけでは、人的要因による事故を防止することは難しい。紙媒体に記述された操作手順書を人的要因による事故防止の視点から見直し、作業員の情報端末に組込むように標準化する必要がある^[17]。図10に示すようにSOP（標準作業手順書）に基づいて作業手順を分割する。その後、作業手順のモデル化を行いシステムに実装する。

操作手順書の内容に暗黙的に行われていて文章中には記載されていない情報も含めて再構成する。5W1H, 「Who (誰が)」, 「When (いつ)」, 「Where (どこで)」, 「What (何を)」, 「Why (なぜ)」, 「How (どのように)」に「Whom (誰に)」, 「How many (どれくらい)」を加えた6W2Hの考え方をを用いて操作内容を整理する。操作に要する時間が重要な場合には「How long」を考慮して6W3Hを用いる^{[17][18]}。さらに、ボードマンとフィールドマンに互いの相手の操作内容が混同して提示されることを防ぐために、操作分担者毎に操作内容を区分する。フィールドマンおよびボードマンに、誰がどのような操作をするのかを区別して提示し、責任分担を明確にする。そして、「Whom」を設けることによりボードマンとフィールドマン相互の連絡・指示の手順を明確にし、確認ミスや操作の抜け落ちを防止する。再構成された操作手順書はスプレッドシートを用いて操作の順番に従い表す。複数人作業のために操作手順書から再構築した作業モデルを図11に示す。図11は間接脱硫装置における減圧軽油供給停止による故障対応操作手順をもとにしている。

作業手順をモデル化することでボードマン、フィールドマンの役割分担と作業指示、確認などの情報の流れが明確になる。作業指示、機器確認、作業報告など人と人、人と設備・機器間の情報伝達が途切れたり間違ったりすると作業のやり直しや誤操作によるトラブルの原因となりうる。作業者が取り扱う情報は、プラント状態のように時間とともに変化し続ける情報と機器の設置場所、運転基準、過去の事例など多岐にわたる。音声による指示情報は時間とともに消えてしまうため携帯端末に標準化した作業手順やプラントの基本情報を提示する^[19]。

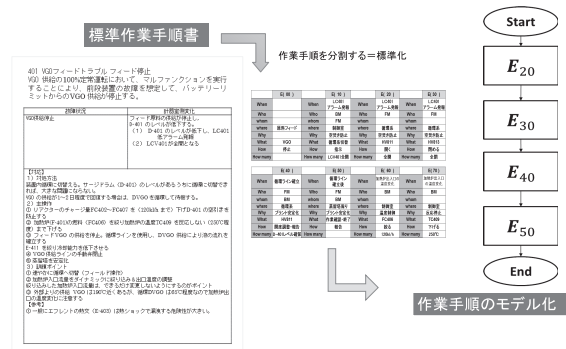


図10 SOPの標準化の流れ

作業の情報共有手順モデル：減圧軽油供給停止による故障対応操作

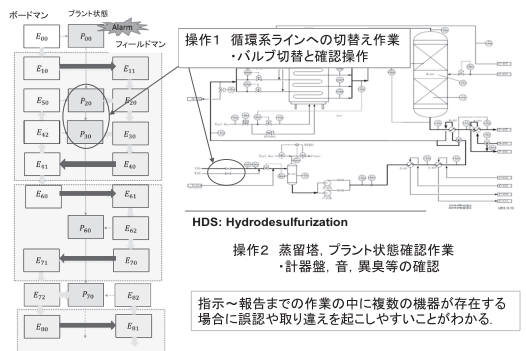


図11 作業の情報共有手順モデル

3.3.2 画像認識技術と作業情報提示

石油化学プラントの広い敷地内に密接に配置された類似した機器やバルブなどは識別しづらく、経験の浅い作業員の誤操作の要因となり得る。また熟練作業員であっても非常時時には緊張や判断ミスを起こしやすい。人的要因による事故を防ぐために拡張現実感技術（AR）を用いた操作支援システムが開発されている^[18]。AR技術とは、現実の映像にコンピュータの情報を追加することができる技術である。ARマーカーやICタグ等の補助機材を用いると多数の機器の中から操作対象を確認することができる。しかし、石油化学プラントには、温度、スペース等の制約により補助機材を取り付けることができない場所が多いという問題点がある。補助機材を用いることなく操作対象を確認でき

る手段として画像認識手法が考えられる^[17]。AR技術による操作対象機器の識別と画像認識手法を併用することで操作すべき正しい対象機器を識別しプラント運転員に必要な作業手順を提示する。ボードマンからフィールドマンへの指示は無線などを使った音声でのコミュニケーションによる定性的な指示である。聞き間違いや思い込みで間違った作業をすると事故に繋がりがねない。運転員がタブレットPCや携帯端末に搭載されたカメラを用いて現場で操作する機器を写すとシステムが正しい操作対象かそうでないかを識別し運転員に教示する。図12、図13に実装したシステム画面を示す。画面左側は作業手順表示、右側に画像認識画面となっている。図11のようにシステムがARマーカーにより操作対象機器を正しく認識したときは、機器の名称が画面に表示され画像認識画面のフレームは緑色で表示される。作業手順内の操作対象機器とカメラが認識した機器の名称が一致しない場合は図13のように画面のフレームは赤色で表示され、間違った機器を操作しようとしたことがわかる。図13はテンプレートマッチングにより作業対象機器を識別しているが、作業対象のバルブ（HV811）と異なったバルブ（HV813）をカメラがとらえたため画像認識画面のフレームは赤く表示されている。作業説明は必要に応じ

て参照することができるが、作業手順は操作を完了するごとに順次提示されるため、作業の見落としを防止できる。正確な作業手順・機器情報の提示は、作業員の安全を守るために有益である。作業履歴はサーバーに保存され安全情報として活用できる。

3.4 現場作業情報提示・共有による協働作業環境の構築

石油化学プラントの現場作業は、多くの場合、複数人による協働作業により進行する。ほとんどの作業手順書は複数人作業を対象に作成されていないため、作業員の役割分担を明確にした後に現場作業に必要な情報を提示する。また、リアルタイムの現場作業画像情報を共有することにより、ボードマンとフィールドマンの間の協働作業環境を構築した^[19]。本システムは、ダイナミックプラントシミュレータと携帯端末を連携し、プラントの挙動を再現する。作業現場でプラントシミュレータの情報を確認し、必要な運転情報を入力し仮想的にプラント操作を実施できる。ダイナミックプラントシミュレータはプラント挙動を再現することができるためこれを活用してプラント運転員の作業訓練に利用することができる。携帯端末にプラントデータを送信することで現場作業環境を利用した故障

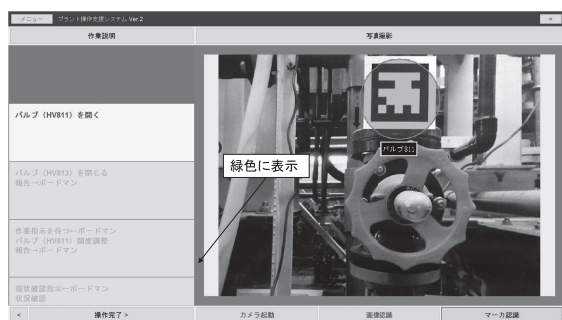


図12 プラント作業情報提示システム (ARマーカー認識)^[18]



図13 プラント作業情報提示システム (画像認識による識別)^[18]

対応訓練にも活用することができる。本システムを用いた現場作業の流れを図14に示す。このシステムを実装するには、化学プラントの運転に不可欠な情報を次のように明確にし、分類する必要がある^[19]。

- ① 操作手順やP & ID図などの標準情報
- ② リアルタイムで変化する現場作業画像（動的な情報）
- ③ 現場作業および制御室の作業に応じたプラント挙動情報
- ④ 作業進行のための双方向の情報伝達

ダイナミックシミュレータはサーバーを介して現場で使用する携帯端末との間で双方向通信を行う。図15にダイナミックシミュレータとプラント作業支援サーバーの連携について示す。また、図16は、作業支援・作業情報共有システムの画面である。フィールドマンは、カメラ付きタブレットPCなどの携帯端末を用いてプラントシミュレータで再現されたプラントの挙動を確認しながら作業を行う。ボードマンとフィールドマンはリアルタイムの現場画像を共有・確認しながら作業を実施する。作業支援・作業情報共有システムは、インターネットブラウザを用いてネットワークに接続された情報端末を持つ複数のユーザー間で利用できる。プラント運転において制御室から現場作業を直接見ることにはできないため、携帯情報端末を活用して正確な現場状況を確認し効率的で安全な作業が実施できる。

4. おわりに

4.1 事故の未然防止と安全技術

近年、日本の石油化学プラントでいくつかの重大な事故が発生したため、現場の労働者の知識とスキルが低下していることが指摘されている。事故の調査報告からこれらの事故の主な原因は、緊急時の人間の行動に関連しており、安

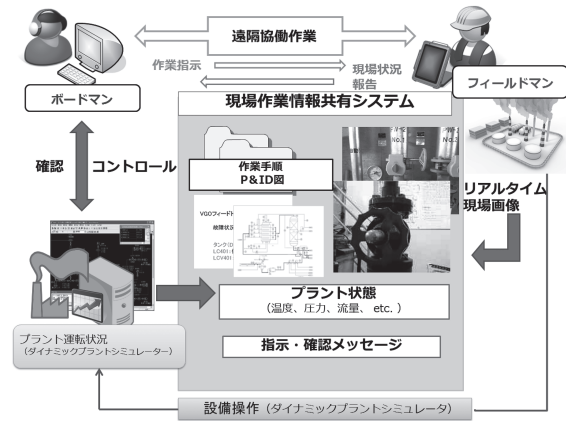


図14 システムを用いた作業の概要

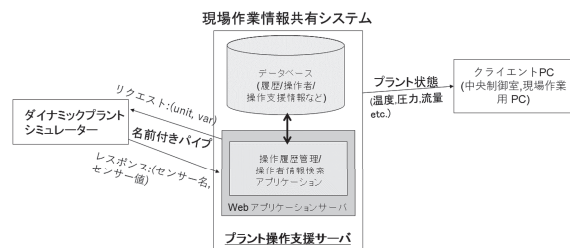


図15 ダイナミックシミュレータとの連携

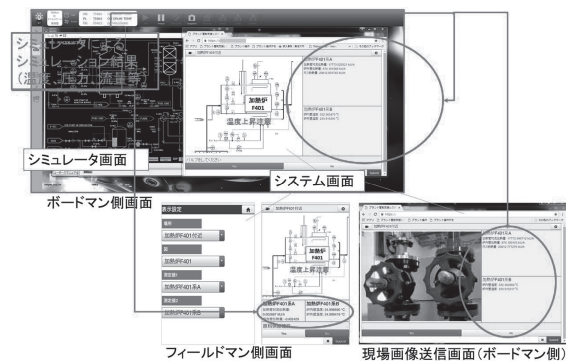


図16 作業支援・作業情報共有システム画面

全意識の低下が懸念されている。高度な技術開発と実際のプラントへの安全技術の導入による課題解決が期待されているが、これらの安全対策を実施するのは現場の作業員である。したがって、今後、チームでの事故/災害などの緊急対応能力を高めるための安全教育や訓練システムの充実が求められる。3章で説明した安全情

報共有システムでは、サーバークライアント方式を用い情報提示用の拡張現実（AR）、画像認識技術が適用され、ダイナミックプラントシミュレータによりプラントの動的挙動を記述した。このシステムの主な機能は、作業情報の選択と表示、プラントダイナミックシミュレータからのセンサーデータの取得と表示、リアルタイム画像の共有、およびテキストメッセージによる通信である。さらに、現場作業者は携帯端末を使用してプラントシミュレータを制御できる。ダイナミックシミュレータを中核とすることにより、プラント異常時に対してその異常伝播を解析する事が可能となり、拡張現実感技術により、緊急・異常時に必要な操作手順情報を提示できる。ダイナミックシミュレータは、今後のコンピュータの処理速度の向上・シミュレータの高度化など情報技術の発達により、プラントの動的挙動をより高速にモデル化することが可能となる。すなわち、シミュレーションを実行することにより、実プラントより早く異常の挙動を知ることができる。これにより、運転員は、実時間でプラントにおける異常挙動を予測、対応操作を決定し実施することが可能である。また、拡張現実感技術により実際のプラント設備上の画像に操作支援情報、作業支援情報を提示し、作業者間で共有する。この技術により、緊急時・異常時のプラント対応操作を決定、表示するとともに対応操作の是非が判断でき事故を未然に防ぐことが期待される。石油化学プラントでの携帯端末の利用にはまだ制約があるが、現場作業支援および現場の作業環境を用いた緊急時訓練などへの本システムの適用が望まれる。

4.2 次世代プラントへの進化と深化を支える安全管理

現在、我が国の製造現場は大きく変わろうとしている。製造現場の「ものづくり」は運転員

の技量に委ねられてきたが、すでに、長期安定化操業によりスタートアップやシャットダウンといった非定常操作を経験する機会も減少している。人材不足をカバーするため先進技術の導入はますます加速され、プラントの様相は大きく変わるであろう。しかし、設備老朽化による機器故障・コスト増大、技術の進歩により熟練運転員・作業員がこれまで経験していないトラブルの発生も想定される。産業現場には様々な「情報」が混在し、作業における情報の流れ（機械→人、人→機械←人、人→人→機械、など）が上手いかないとトラブル・事故につながる可能性がある。現場への先進技術導入のためには今持っている「情報」を整理し、どのような仕事（生活、製品、システムなど）をしたいのか十分に議論する必要がある。しかし現状では、新しい技術・モノを使うことが先行し、人の思考・思想は後付けになっているように感じられる。Big Data, AI, 機械学習などの技術を用いて多くの情報から、これまで知り得なかった情報を取り出すことができるようになった。しかし、これらの情報を「どのように使えばいいか」について答えを出すのは、人であり組織の役割である。急速な技術の進化から「深化」することが必要ではないだろうか。

人・組織がその機能を十分に活性化させるためにマネジメントシステムの重要性が広く認知されている。産業安全においても多くの企業で安全管理システム（Safety Management System）を導入している。「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（文部科学省 2004年4月）では、「安全とは人とその共同体への損傷、ならびに人、組織、公共の所有物に損害がないと客観的に判断されること^[20]」と定義されている。この報告書では、目指すべき安全・安心な社会の実現のために、①安全な状態を目指した不断の努力によりリス

クを社会の受容レベルまで極小化することで安全を確保する, ②危機管理システムを整備しリスクを極小化した状態を維持する, ③リスクが顕在化してもその影響を部分的に止め機能し続けられること, ④社会的に合意されるレベルの安全が継続的に確保され, 同時に安全確保に関わる組織と人々の間で信頼が醸成され, 安全を人々の安心へとつなげられることがその検討結果として報告されている。このように, 現在, すでに多くの企業で導入されている安全管理システム (Safety Management System) を支える概念は, 今後, 個社でなく社会全体で共有されていくであろう。特に原子力, 石油化学産業などの大規模プラントは常に膨大なエネルギーと危険性物質を取り扱っており, 社会安全実現のために最大限の努力を絶えず続けている。プラントの生産性向上, 安全確保のために様々な制度やシステムが設計され運用されており, 安全管理システムは, 人・組織が同じ目標である「安全」を達成するための基盤となっている。安全確保のためには設計段階において安全性が十分に考慮されているとともに, 人間が運用する際における安全が確保できている状態が必須であるが, 今後は2章で説明したように, 企業責任としてすべてのステークホルダーに「客観的に安全であると判断できる」仕組み, 自社の安全性を明確に説明できる安全管理が要請されている。

「安全」を実現するために一つの企業だけでできることには限界があり, これを突破するためには我々がどのような社会に生きていきたいかについて明確に意見を述べ実践できるようになることが重要となる。人間が果たすべき役割, 設備・技術に要求されることを整理したうえで安全管理システムを構築し, 次世代プラントへと進化することが必要となる。

参考文献

- [1] 経済産業省 (2014). 現場保安力維持向上基盤強化事業平成 26 年度報告書
- [2] 高圧ガス保安協会. コンビ則の事故原因の分析及びその事故防止対策のポイント. https://www.khk.or.jp/Portals/0/khk/hpg/accident/2018/2017_01_conbi.pdf (2020年1月10日確認)
- [3] 植田章夫, 宮田知秀, 平尾直也, 宮田栄三郎, 木下圭二, 渡辺哲, 中井敦子, 鈴木和彦 (2019). 「Risk Based Safety Management」への展望と石油化学企業における取組事例安全工学 Vol.58 No.5 pp.323-329.
- [4] AIChE/CCPS (2001). *Layer of Protection Analysis* Wiley-AIChE
- [5] 経済産業省 産業保安グループ 保安課 (2017). スマート保安の実現に向けて
- [6] OHSAS 18001 (2007). *Occupational health and safety management systems - Requirements*
- [7] OHSAS 18002 (2008). *Occupational health and safety management systems - Guidelines for the implementation of OHSAS 18001*
- [8] CCPS (2007). *Guidelines for Risk Based Process Safety* A John Willey & Sons, Inc., Publication
- [9] CCPS. <https://www.aiche.org/sites/default/files/docs/summaries/overview-of-risk-based-06-25-14.pdf> (2019年12月13日確認)
- [10] BP (2005). *Fatal Accident Investigation Report, Isomerization Unit Explosion Final Report*
- [11] U.S. Chemical Safety and Hazard Investigation Board (CSB) (2007). *Investigation Report, Refinery Explosion and Fire*
- [12] Adelard LLP (2012) *Weapons Operating Centre Approved Code of Practice for Electronic Safety Cases*
- [13] IAEA (2018). *Dependability Assessment of Software for Safety Instrumentation and Control Systems at Nuclear Power Plants*, https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/P1808_web.pdf (2019年12月13日確認)
- [14] IEC61508 (2005). *Functional safety of elec-*

- trical/electronic/programmable electronic safety-related systems*
- [15] IEC 61511 (2016). *Functional safety-Safety instrumented systems for the process industry sector*
- [16] 消防庁特殊災害室 (2019). 平成30年度石油コンビナート等特別防災区域の特定事業所における事故概要
- [17] 麓敦子, 梶原康博, 山崎勇二, 鈴木和彦 (2016). 画像認識を用いたプラント操作情報提示システム, 日本設備管理学会誌, Vol.28, No.2. 68-75.
- [18] Nakai A., Suzuki K. (2016). *Instructional Information System using AR Technology for Chemical Plants*, Chemical Engineering Transactions Vol.53, 199-204.
- [19] Nakai A., Kajihara Y., Nishimoto K., Suzuki K. (2017). *Information-sharing system supporting onsite work for chemical plants*, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Vol.50, pp.15-22.
- [20] 文部科学省 (2004). 「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 (2004年4月) https://www.mext.go.jp/a_menu/kagaku/anzen/houkoku/04042302.htm (2019年1月13日確認)

(原稿受付日：2020年1月7日)

