

# 高度自動化時代に求められるヒューマンファクター側面についての考察 - 石油・天然ガス開発産業を例に -

眞砂英樹（海洋研究開発機構） 長岡裕司（石油資源開発株式会社）

## 1. はじめに

石油・天然ガス開発は危険を伴う産業である。労働安全側面のみにとどまらず、石油・天然ガスと言う可燃性流体を扱う関係上、その制御の失敗は火災・爆発や重大な環境汚染につながる。1988年に英領北海パイパー油田で起きた掘削リグ Piper Alpha の爆発・炎上事故では死者 167 名にのぼり、本業界のみならず全産業界における安全管理の仕組みの大きな見直しが迫られた事故であったし、今世紀に入ってから、2010年のメキシコ湾における Deepwater Horizon の暴噴事故という史上最大の洋上原油流出事故が発生している。こうした事故の要因には、多くの場合ヒューマンファクターが絡んでいる。

今日、多くの産業分野で自動化が進められている。既に製造業ではファクトリー・オートメーションが一般的であるし、その波は建設・土木業等にも徐々に及びつつある。自動化のメリットはいろいろあるが、安全面から見た場合、稼働状態にある機械と人とを物理的に引き離すことで危険源への人の接触が起これないようにし、また人の誤判断・誤操作等による制御のミスを減らせるという利点がある。これらの産業と比較した場合、石油・ガス開発産業は未だ人の介在する作業の割合が多い。リグフロア（掘削機器の稼働する作業場）では、重機械と共に多くの掘削作業員が危険点近接作業を行っているし、掘削機器を操作するドリラーや現場監督は坑内状況や気象（洋上の場合には海象も）の変化に対してリアルタイムに対応を迫られ、しばしば自身の経験と勘による判断・決断を余儀なくされる。その為、石油・ガス開発の現場においては、前述の Piper Alpha の事故調査に基づく提言（Cullen, 1990）を受けて、他産業に先駆けて安全環境衛生（HSE）マネジメントシステムが導入され（E&P Forum, 1994）、リスクアセスメントに基づく綿密な作業手順と、それらを確実に実施できる為の教育訓練に多くの時間と資金を投じてきた。すなわち、安全の多くの部分が未だ人によって支えられていると言える。

しかしながら、この業界においても自動化の波は徐々に押し寄せており、将来的には他の産業同様、現場は無人化（少なくとも省人化）の方向に向かうであろうことは間違いない。そのような時代になった場合、必要とされる或いは問題となるヒューマンファクターの側面は、現在とは多かれ少なかれ異なったものとなるであろうことが想像される。本稿では、石油・ガス開発業界における自動化の現状に基づいて近未来における掘削現場の様子を安全面から予測し、そこで求められるヒューマンファクターの側面はどのようなものとなるのかについて考察してみたいと思う。

## 2. 石油・ガス開発産業の流れ

本論に入る前に、石油・天然ガスの開発事業の大きな流れを概説する（図1）。

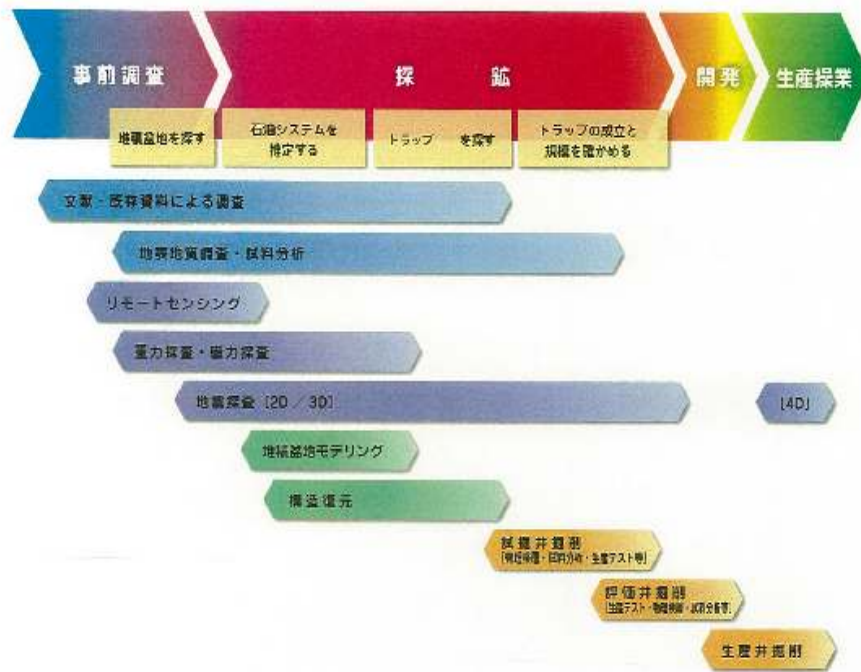


図1. 石油・天然ガス開発の一般的な流れ（出所：石油鉱業連盟刊「石油・天然ガス開発技術のしおり 2012年版」）

### 2.1 探鉱

#### 2.1.1 地質調査、物理探査

油・ガスが存在する為には、油・ガスを醸成する地層と、それらを貯留する地質構造（トラップ）とが不可欠である。このような地質環境について、地表地質調査やリモートセンシング等からある程度の当たりをつけたら、そこで重力・磁力探査や二次元／三次元の地震探査等を実施してトラップの解釈を行う。解釈された複数のトラップの中から、経済性評価により試掘に値すると判断されるプロスペクトを抽出する。

#### 2.1.2 試掘・探掘

抽出されたプロスペクトに対して実際に坑井（試掘井：exploration well）を掘削し、岩石サンプル（カッティングス、コア）や地層流体等から得た地質学的・地球化学的データや物理検層データを用いて油・ガス層の存在を確認する。試掘で油・ガスの胚胎が確認されたら、探掘井（exploitation well）を掘削して、油・ガス層の広がりを確認する。

#### 2.1.3 埋蔵量の評価

試掘及び探掘井の掘削により、油・ガス層の広がりが確認できたら、埋蔵量評価を行い、

商業的に開発・生産が可能かどうかの判断を行う。

## 2.2 開発

経済性があると判断されたら開発基本設計を行い、開発に移行する。開発にあたっては、石油・天然ガスの処理・貯蔵・輸送の為の施設・設備建設やパイプラインの敷設工事を行い、その後、生産計画に基づいた生産井の掘削が行われる。

こうして晴れて生産開始となるが、生産可能な期間は貯留層の大きさや油ガスの存在形態等に依存し、年数が経つ程、単位量当たりの採掘に係るコストは増大する。やがて採算に合うだけの採掘ができないと判断されれば、その坑井は役目を終えて廃坑される。

## 3. 石油・ガス開発産業における事故・災害要因の特徴

石油・天然ガスは、前述のような過程を経て開発・生産されるが、事前調査から試掘、開発・生産を経て廃坑に至る過程で、様々な安全上のリスクが存在し、しばしば重大な事故・災害も発生する。石油・ガス開発産業はもとよりグローバルな産業であり、それゆえ早い時期から世界的な業界団体（International Oil and Gas Producers: IOGP）が組織され、事故・災害に関しても先進国／途上国の区別や会社の規模等によらず一定基準で集計され、毎年統計が発行されている。IOGP が加盟企業に対して報告を求めている事故・災害は幾つかの 카테고リーに分かれているが、大別すると労働災害とプロセス災害である。プロセス災害とは、本来外に漏れてはいけぬ物質が流出し、人や環境に危害を与える種類の災害を言う。石油・天然ガス開発においてその最大のものは、坑井制御（ウェルコントロール）の失敗による油・ガスの暴噴と、その結果生じる甚大な環境汚染である。

### 3.1 プロセス災害

プロセス災害の内、最高ランクである Tier 1 に分類された重篤事故についての要因別の集計に着目した。因みに IOGP では Tier 1 を「一次容器から物質等が流出し、作業者の死亡や周辺住民の避難等の重大な結果に結びついたもの」と定義している。2017 年から過去 3 年間において、Tier 1 に分類されたプロセス事故はそれぞれ、254 件、192 件、192 件である。

IOGP では事故の要因を不安全状態と不安全行為とに大別した上で、更に細かいカテゴリーに分類している。表 1 に過去 3 年間の事故要因の内、上位のものを載せているが、まず不安全状態と不安全行為の比では、前者が圧倒的に多い。不安全行為の内訳を見ると、「判断・決断のミス」が最も多く、「手順の非意図的な逸脱」がそれに次ぎ、更に「ストレス・懸念による注意の逸れ」「機器設備等の誤操作・誤使用」と続く。これらをスリップ、ラプス、ミステイクのエラー分類に当て嵌めると、「判断・決断のミス」はミステイク、「ストレス・懸念による注意の逸れ」は主にラプスと考えられる。「手順の非意図的な逸脱」については、中分類が「作業手順」となっていることから、正しい手順を知らなかった（或

いは繰り返し行う内に、誤った手順を正しい手順と思い込んでいた)、すなわちミスメイクに分類される物と考えられる。「機器設備等の誤操作・誤使用」については、3つのエラーモードの全ての場合が考えられ、より詳細な内容の記述によらねば判断できない。

表 1. 石油・ガス開発業界における過去 3 年間に起きた重大プロセス災害の要因分析 (International Association of Oil & Gas Producers, 2018a より抜粋)。通常、1つの事故に対して複数の要因が特定されている。要因の特定は IOGP に報告を行った加盟企業によるもの。

大分類	中分類	小分類	2015	2016	2017	計
状態	機器設備等	保守点検整備不十分	50	49	60	159
状態	機器設備等	不適切な設計・仕様及び変更	55	42	42	139
状態	管理要因	危険源特定／リスクアセスメントの不備	41	40	47	128
状態	管理要因	作業手順の不備	37	44	30	111
状態	機器設備等	不備或いは欠陥のある機器等	32	30	39	101
行為	不注意	判断・決断のミス	30	23	16	69
行為	作業手順	手順の非意図的な逸脱	29	13	23	65
状態	防護装置	防護装置の不備・欠陥	23	26	16	65
状態	管理要因	教育・訓練不十分	16	20	21	57
状態	防護装置	警報／安全装置の不備・欠陥	27	20	10	57
状態	管理要因	監督不十分	10	15	17	42
状態	管理要因	コミュニケーションの不備	15	17	9	41
行為	不注意	ストレス・他の懸念事による注意の逸れ	16	7	7	30
行為	誤操作	機器設備等の誤操作・誤使用	9	6	9	24
状態	その他状態		40	38	25	103
行為	その他行為		31	59	20	110

### 3.2 労働災害

IOGP に報告された労働災害の内、過去 3 年間の死亡事故の要因についてプロセス災害と同様の分類に従って上位から並べたものを表 2 に示す。過去 3 年間における件数はそれぞれ 40 件、29 件、30 件であった。このうち、交通事故と第三者要因（テロ等）によるものを除き、更に要因が特定されていないものを除いたケースについて、要因別に分類した。

プロセス災害と比べると、不安全行為の割合が高い。要因の上位に「ハザード特定／リスクアセスメントの不備」「監督不十分」が挙げられているが、この2つは事故が起これると大抵挙げられるものの代表である。その下に「判断・決断のミス」「不適切な立ち位置」「危険情報の伝達不備」が続く。「不適切な立ち位置」とは、エネルギーの放出線上に立って作業を行っていたもので、「その瞬間うっかりそこにいた」ということも無いではないが、基本的にはその位置が危険という認識の欠如、すなわちミスメイクに相当すると考

えられる。同様に「危険情報の伝達不備」も、適切な情報の欠如によって作業者が危険認識を持つことなく作業を行ったと考えられることからミステイクに分類されよう。「手順の非意図的な逸脱」「機器設備等の誤操作・誤使用」については、前述の通りである。

表 2. 石油・ガス開発業界における過去 3 年間に起きた労働死亡災害の要因分析 (International Association of Oil & Gas Producers, 2016, 2017, 2018b より抜粋)。通常、1つの事故に対して複数の要因が特定されている。要因の特定は IOGP に報告を行った加盟企業によるもの。

大分類	中分類	小分類	2015	2016	2017	計
状態	管理要因	ハザード特定／リスクアセスメントの不備	9	10	9	28
状態	管理要因	監督不十分	8	8	10	26
行為	不注意	判断・決断のミス	8	9	8	25
行為	作業手順	不適切な立ち位置	6	11	7	24
行為	保護方策	危険情報の伝達不備	5	4	5	14
状態	管理要因	作業手順の不備	7	3	4	14
状態	管理要因	教育訓練／力量不十分	8	5	1	14
行為	作業手順	手順の非意図的な逸脱	7	2	4	13
状態	機器設備等	不備或いは欠陥のある機器等	5	3	4	12
行為	誤操作	機器設備等の誤操作・誤使用	4	3	4	11
状態	その他状態		35	14	11	60
行為	その他行為		21	16	9	46

#### 4. 石油・ガス開発産業における自動化の現状

人口の増加に伴って石油・天然ガスへの需要がますます高まっていく一方、身近にある採掘可能な石油・天然ガス資源は次第に減少し、開発の現場は人間の居住地域から遠く離れた、操業を行うのに非常に困難を伴う地域に偏在するようになってきた。陸域では砂漠地帯やジャングルの奥地、或いは零下数十度に達する極寒の地域等、海域であれば水深 1,500 m 以深の大水深エリア/超大水深エリアや極域等がその例である。そうした人間がアクセスするのに困難を伴う環境では、他の産業でも積極的に導入が進められているロボット技術が有効であり、石油・ガス開発産業においても徐々にではあるが浸透しつつある。

Shukla and Karki (2016a 及び 2016b) は、それぞれ陸域および海域での石油・ガス開発産業におけるロボット技術の導入状況のレビューを行った。それによれば、陸域においてロボット活用が最も進んでいる分野としては、施設・設備の検査に関するものが挙げられる。長距離間に敷設されたパイプラインや高所にある設備等を上空から監視する UAV (Unmanned Aerial Vehicle) や、タンクやパイプラインの内部に入り込んで内側から腐食、沈殿物の堆積、亀裂等を探査する ITIR (In-Tank Inspection Robot)、IPIR (In-Pipe Inspection Robot) 等が代表的である。この先駆的な例として、JFE エンジニアリング社は 1988 年にピグ装置

(IPIR の一種) を実用化し、1990 年代には米国アラスカ州アリエスカで同社開発の超音波検査ピグ (図 2) を用いて 1,200 km 超のパイプラインの管厚計測を 3 年かけて行い、極めて精度の高い結果を得ている。IPIR の中には、単に非破壊検査を行うのみならず、マニピュレータを有して熔接や切断等の作業を行うものもある。

洋上掘削においては、1960 年代辺りの比較的早い時期から ROV (Remotely Operated Vehicle) と呼ばれる有線型的水中ロボットが登場し、従来の作業形態を画期的に変えた。水深が浅ければダイバーが潜水して作業を遂行できるが、深い場所での作業では ROV がその能力を存分に発揮する。ROV は掘削作業中、海底面に設置された暴噴防止装置 (Blow-out Preventer: BOP) の操作等を行うほか、リグ設置に備えて海底面の状況を確認したり、海底地形図を作成する際にも使用される。後者の目的には、母船とケーブルで接続されておらず、プログラムされた航路を自律的に移動しながら広範囲の探査を行う AUV (Autonomous Unmanned Vehicle) もよく使用される。また陸域の場合同様、設備機器の検査・保守ロボットもよく使用される。とりわけ洋上プラットフォームは海水による腐食が激しく、潮流の状況によっては特定の箇所に大きな応力が掛かる。しかもそういった箇所は、目視点検ができない場合も多く、こうしたロボットが活躍する。更に最近では検査・探傷のみならず損傷個所の水中熔接を行うロボットも登場している。

Deepwater Horizon 事故の例を引くまでもなく、海域での油流出事故はしばしば重大な環境汚染につながる。海上に浮いた油濁については比較的簡単に除去作業が進められるが、海中内の油濁汚染の除去作業は非常な困難や危険を伴う。そうした目的でのロボットの活用についても研究が進められている。



図 2. JFE エンジニアリング社が開発した超音波検査ピグ  
(出所：JFE エンジニアリング株式会社パンフレット)

## 5. 自動化・機械化の未来とヒューマンファクター

前述のように、石油・天然ガス開発業界におけるロボット化・自動化技術の適用は今のところ施設・設備の検査に関するものが主であり、危険なリグフロア作業を人間に代わって行うような作業型ロボットの導入はまだ先であると思われる。Lund (2016) は、石油・ガス開発現場における自動化の進化度合いについて、完全マニュアル作業のレベル 0 から完

全自動作業（人の介在無く機械が状況判断し、勝手に掘削を行う）のレベル 5 まで 6 段階の分類を提示している。この分け方は、SAE International による自動車の自動運転技術のそれにはほぼ対応している。第 6 世代と呼ばれる現在の掘削リグは「レベル 3：複数の機械を予めプログラムされたシーケンスとマニュアル操作の組み合わせによって制御する」状態にあるとされ、レベル 4 は「計画時の想定状況から外れない限りは人の介入が無くとも機械が自律的に掘削をし続けるレベル」とされる。リグフロアで最も頻繁に行われる定常作業はドリルパイプの揚降管（パイプトリップ）であるが、これは降管時であれば既に降ろしたパイプの上に新たなパイプを継ぎ足して更に降下させる（揚管時はその逆）という作業で、パイプラックからリグフロア中央までドリラーが機械でパイプを掴んで運び、リグフロア上で作業者が軽く締めた後、別の機械で増し締めするという工程をたどる。これが Lund (2016)の言う「予めプログラムされた機械シーケンスとマニュアル操作の組み合わせ」であり、これをリグフロア作業者の手作業及びドリラーの機械操作無しに自動で行える状態が「レベル 4」の状態であると解釈される。これが実現されれば、少なくとも定常作業では作業者はリグフロアにいる必要がなくなり、労働災害の劇的な減少が期待される。また、特にプロセス災害においては「保守点検整備不十分」が事故の要因の筆頭であるが、ロボット技術による安全性向上は、この要因を大きく減じることになるであろう。

しかしながら、石油・ガス開発現場の特徴の一つである作業内容及び作業状況の多様性に鑑みると、仮に上記のような状況が実現されたとしても、1) 非定常作業が多く、全ての作業を自動化することは難しい、2) 坑内状況の正確な予測及び把握が難しいことから、作業計画が頻繁に修正・変更される、等の理由から、完全な自動化・無人化は難しいと考えられる。現在の掘削リグにおいては、マネジメントシステムに膨大な作業手順書を整備し、それらを理解し実施できるよう教育することによって安全を実現するというのが主流であるが、ロボット技術の導入によってルーティン作業から解放された場合、むしろ手順書に無い非定常な状況で、どのように危険を予測し、それらを制御しながら作業を行うかがより重要になると考えられる。現状でも労働災害・プロセス災害の双方で「判断・決断のミス」が要因の上位に挙げられているが、これらの能力を向上させることの重要性が相対的に増すと言えよう。すなわち、決められたことを決められた通りに実施する能力よりも、手順・やり方が決められていない事柄に対して適切に状況を判断し、それに対する対応を決断する状況処理能力が、作業員から監督者に至る全ての職位においてより強く求められるようになると考えられる。

この部分で役立つと考えられるのが人工知能（Artificial Intelligence: AI）による支援である。前章で記述した通り、AI を搭載しないロボット技術の導入さえなかなか進んでいない現状にあっては、AI の活用は更に先の話と思われるが、仮に導入された場合、石油・ガス開発現場、とりわけ安全の側面にどのような変化がもたらされるかについて考察してみたい。他産業分野における現在の AI の活用方法を参考にすると、AI の最も得意とするところは、センシングによって多数の母集団の中から或る特徴を有する個体を識別する能力であ

ると言える。それを支えるものはビッグデータと呼ばれる膨大な事例であり、それを基にして画像認識その他の方法で、ある閾値でパラメータを区切って確率統計的な処理をしている。一例を挙げれば、機器や生体の或る状態を「異常」と定義し、それらに共通するパラメータ群の特徴を抽出し、未知の対象にそれと同じ状態が検出されれば「異常」と判定する、というようなプロセスである。ただ、従来のデータベース検索と大きく異なる点は、このような経験を通じて AI 自身が自ら学習し、照合の精度を自ら高めていくことができる点にある。したがって、これらのプロセスの適用には、まず膨大な事例による AI の学習が不可欠である。石油・ガス開発産業において、それが可能な分野があるかを考えた場合、設備・設備の検査・診断等に関してはかなり有効に機能するであろうと思われる。しかしながら実際、比較的導入の進んでいるこの方面においても、IPIR が管内の亀裂を見落とししたことにより大規模な流出事故につながった事例も報告されており (e.g. Fowler and Gilbert, 2016)、まだまだ人間の管理/監視の併用が必要な段階であることが示されたと言えよう。

労働安全分野では、過去の事故・ヒヤリハット等のデータに基づいて事故に結びつきそのような状況を検出して警告を発したり、判断・決断を求められる状況で、各選択肢のリスクを定量的に提示するといった使い方が想定される。但し、ビッグデータと呼べる程の事例があるかという点については疑問である。更に石油・ガス開発産業で最も過酷な事故になり得る坑井制御の失敗（暴噴）については、圧倒的に事例数が足りない。発想としては、暴噴につながりそうな坑内状況の変化パターン（10～15 位）を AI に学習させ、そのパターンが現れたら自動的に（人の判断や操作無しに）BOP のバルブを閉めて坑井を遮断する、といった使い方があり得るが、そもそも BOP を閉じねばならないような状況に至った事例の数が少な過ぎることや、地層や気象・海象という自然環境が相手であり、各坑井毎の個体差が極めて大きいこと等から実用にはまだまだ遠いというのが現状である。無論、安全のみを考えればよいのであれば、不確実な状況では安全側に判断して有無を言わず遮断すれば良いのであるが、生産性・コストとの兼ね合いを考えると不必要なダウンタイムの増加は現実的ではない。生産性や作業性に悪影響を及ぼすような安全システムは間違いなく無効化されるのが、業種を問わず現場の常である。

AI 化に関して問題になると予想される別の側面は、AI の判断に起因する重大災害が発生した場合である。自動運転中の自動車が事故を起こした場合、責任の所在は運転者かメーカーかといった議論と同種の問題の惹起が予想されるが、石油・ガス開発の場合、事故の規模が巨大な物もある為、より重大な議論となる。人格を有していない AI に対してどこまで責任と義務を与えるべきかは今後大きな議論を呼ぶと思われる。また、熟練したドリラー等の現場技術者は坑内の異常を感覚的に察知し、ベストと思われる対処を半ば無意識的に行っている。掘削に関する一般論的な知識・技能教育は各社で行われているものの、使用するリグ/掘削機器や、操業地域・海域或いは地質等のローカルな特性の要素が大きく、これらを非言語的に理解し適応している、すなわち Hollnagel (2014) の言う "Safety-II" がかなり高度なレベルで日常的に行われているのがこの業界であると言えよう。このような状況



において AI の判断と熟練技術者の判断とが衝突することは容易に想像でき、そのような場合の取り扱いについて、責任論等を含めた制度的な整備も併せて進めていくことが不可欠である。また、現場技術者がそのように判断できるようになる為には相応の経験が不可欠であるが、自動化はそれらの経験を積む機会を減らす方向に作用することはジレンマである。仮想体験を通じた学習等によって、これらの能力を強化することも有効かも知れない。

## 6. おわりに

以上をまとめると、石油・ガス開発産業における自動化の未来予測とヒューマンファクターについて、以下のことが言えよう。

- 1) 設備・施設の検査・補修といった保全作業においては、人のアクセスが困難な場所を中心にロボット技術の導入が始まっており、今後も大いに促進されるものと思われる。また、画像診断等への AI の導入で、見落としや判断ミスが減ることも期待され、これらは特にプロセス災害の減少に大きく寄与すると考えられる。
- 2) リグフロアを中心とした作業安全の分野に関しては、ロボットによる作業支援の導入が予想されるが、掘削作業の多様性を考えると完全な自動化の実現は難しいであろう。自動化によって、スリップ、ラプスによる事故は大きく減少すると考えられ、またそもそも省人化されることで被害を受けるべき人の数も減少するものと期待される。
- 3) 一方で判断・決断のミス（ミステイク）による事故も多く、これについては自動化されてもある程度残ると考えられる。AI による判断・決断の支援はそれなりの効果が期待できるが、ビッグデータと呼べる程の事例数が集められないと難しい。特に暴噴につながる坑井制御に関する判断・決断については事例数が少な過ぎ、AI を使った自動制御の適用は、少なくとも当面は現実的ではない。
- 4) 以上に鑑みると、今後求められるヒューマンファクターの側面としては、より複雑で高次の問題についての処理能力の強化であると言える。したがって教育訓練の内容も、スキルベース、ルールベースの能力よりはナレッジベースの能力を高める方向にシフトさせていく必要がある。
- 5) 更に将来の話として AI が広く操業に関わるようになった場合、人の介入のタイミングや、人格を有していない AI の判断に人が介入して（或いは介入せずに）事故につながった場合の責任論については、今後大いに議論すべき課題である。

産業革命から連綿と続くテクノロジーの進化の歴史の中で、我々は今、全く別次元へと足を踏み入れようとしている。AI の登場は労働現場のフロントラインのみならず、更に上位の意思決定の場においても人の存在をより限定的なものへと変えつつある。このような流れの中であって、最終的な人の判断ないし介入が不可避な部分は何か、そこで要求される人の能力は何かについて今一度整理し直すことが必要である。これは全ての産業に共通する課題ではあるが、一方で産業分野独自の事情を十分に考慮することも重要である。

## 謝辞

本稿執筆に当たっては、石油資源開発（株）HSE 統括部 設備安全グループのラーマン・ミザヌル氏、津曲優樹氏、技術本部 開発技術部の平田綱勇氏、国内事業本部の葉茸真宝氏、日本メタンハイドレート調査（株） 技術部の松野郁右氏の 5 名から貴重なコメント/意見等を頂いた。この場を借りて謝意を表したい。

## 引用文献

- Cullen, H.W.D. (1990). The public inquiry into the Piper Alpha disaster. London: H.M. Stationery Office. pp. 488. ISBN 0101113102.
- E & P Forum (1994). Guidelines for the development and application of health, safety and environmental management systems. *E & P Forum Report*, 6.36/210.
- Fowler, T. and Gilbert, D. (2013). Oil-Pipeline Cracks Evading Robotic 'Smart Pigs'. *Wall Street Journal Online*, 16 Aug., 2016.  
<https://www.wsj.com/articles/oilpipeline-cracks-evading-robotic-smart-pigs-1376693730>
- Hollnagel, E. (2014). Safety-I and Safety-II: The Past and Future of Safety Management. CRC Press, Florida, pp. 200.
- International Association of Oil & Gas Producers (2016). Safety performance indicators – 2015 data – Fatal incident reports. *IOGP Data Series*, 2015sf.
- International Association of Oil & Gas Producers (2017). Safety performance indicators – 2016 data – Fatal incident reports. *IOGP Data Series*, 2016sf.
- International Association of Oil & Gas Producers (2018a). Safety performance indicators – Process safety events – 2017 data. *IOGP Data Series*, 2017p.
- International Association of Oil & Gas Producers (2018b). Safety performance indicators – 2017 data – Fatal incident reports. *IOGP Data Series*, 2017sf.
- Lund, P. (2016). Can robotics on rig floor make a difference in drilling performance? *The Well Blog – An Odfjell Well Services Blog*. 14 April, 2016. <https://blog.odfjellwellservices.com/can-robotics-on-rig-floor-make-a-difference-in-drilling-performance>
- 石油鉱業連盟 (2012)。技術のしおり 2012 年度版。
- Shukla, A. and Karki H. (2016a). Application of robotics in onshore oil and gas industry – A review part I. *Robotics and Autonomous Systems*, 75, 490 – 507.
- Shukla, A. and Karki H. (2016b). Application of robotics in offshore oil and gas industry – A review part II. *Robotics and Autonomous Systems*, 75, 508 – 524.