

人間工学に根差した安全衛生管理 — 安全衛生管理の基本的な考え方 —

石崎秀晴

(2021年7月16日受付；2021年11月4日受理)

Safety and Health Management Rooted in the Human Engineering - Basic Concept of the Safety and Health Management -

Hideharu ISHIZAKI

Abstract

This report explains the basic concept of the risk management. It consists of the risk assessment and the risk reduction measures and so on. And they are the essential processes in carrying out the safety and health management. The risk assessment procedure consists of processes such as identifying of products and work contents to be used, hazard identification, risk estimation and risk evaluation, and if the risk is unacceptable, the process of risk reduction measures is implemented. In addition, this report is also mentioned to methods for estimating and detecting hazards and risks before new development or work begins. The basic theories of the safety and health management are rooted in the ergonomics/human factors. The ergonomics/human factors is based on the idea of designing equipments, and systems, work environments, working practice, etc. with priority on a human being.

概要

本報告では、安全衛生管理を遂行する上で、本質的な作業であるリスクアセスメントやリスク低減措置などによるリスクマネジメントの基本的な考え方を説明した。リスクアセスメントの手続きは使用する製品や作業内容の特定、ハザードの同定、リスクの見積もりとリスク評価などのプロセスからなり、リスクが許容不可能な場合はリスク低減措置のプロセスが実施される。さらに、新規の開発や作業が開始される前にハザードやリスクを推定し検出する手法についても言及される。このような安全衛生管理の基本的な理論の源泉は人間工学に求められる。人間工学では人間優先で機器やシステム、作業環境、作業方法などを設計するという考え方に基礎を置いている。

1 Introduction

日本人間工学会 (Japan Human Factors and Ergonomics Society) [1] のホームページ (人間工学とは) には『人間工学は、エルゴノミクス (Ergonomics) やヒューマンファクター (Human Factors) とも呼ばれており、私たちの生活の中に定着しています。人間工学は、働きやすい職場や生活しやすい環境を実現し、安全で使いやすい道具や機械をつくることに役立つ実践的な科学技術です。』と記載されている。

人間工学の歴史的な背景を少し概説すると、1950年

代に創設された英国人間工学会 (Ergonomics Research Society of Great Britain) を中心として欧州で興った、労働者と職務の関係に焦点を置く労働科学的な学問分野であるエルゴノミクスと、同時期に米国で設立された Human Factors Society を拠点とする、機械と人間の接点 (マンマシンインターフェイス) に着目し機器操作における安全、能率の向上、負担、疲労軽減を目標に、機器や操作環境の人間の諸特性への適合を図ることを目的とする学問分野である、ヒューマンファクターに起源が求められる。両者は同一の学問分野と認識され1990年代に融合された [2]。

国際人間工学会 (International Ergonomics Association) においても2000年に主な研究領域を、作業姿勢・動作研究・筋骨格負担・作業環境・安全・健康などに関連する分野 (physical ergonomics), 人間とシステムの他の要素間のインタラクションに影響を与えるメンタルプロセスに関連する分野 (cognitive ergonomics), コミュニケーション・組織文化・社会技術システムの最適化に関連する分野 (organizational ergonomics) に定めてエルゴノミクスとヒューマンファクターを融合している [2-4].

国内では、松本亦太郎 [5] が初めて人間工学 (Human Engineering) の用語を米国から伝えたと田中寛一 [6] が述べている。二人は共に心理学者であるが、松本は作業、動作における一人の人間力 (man power) 測定・個人差の特定、人間力の有効な活用、練習の効果、疲労の研究、個々の指標の一般化による比較、業務に特殊化した研究などをテーマとして掲げた [5]。田中も作業、疲労、疲労と能率、作業時間と能率、休眠と能率、練習、作動 (作業) の外的条件、個人差などを掲げた [6]。それらは正しく今日の労働衛生に関する研究の嚆矢であったことが窺われる。

天文・宇宙観測の分野では、報告者が携わった範囲に限っても、標高4000 m～5000 mの高地に設置された望遠鏡や、入口から3.5 kmも分け入った地下坑道内の観測室、カラカラに乾燥した砂漠や湿度90 %以上の湿った実験室、埃だらけの吹き曝しの屋外や粒子のほとんどない極微粒子クリーンルームなど、通常とは極端に異なった環境において作業が実施されている。さらに、そのような作業場において、クレーン作業や、フォークリフト作業、有機溶剤作業、高所作業など有害危険な業務も行われている。このような特殊な環境における安全衛生管理はどのようにあるべきだろうか。

緒言の結びに、人間工学の訳語として (本報告のタイトルである) Human Engineering もなくはないが、現在ではErgonomics/Human Factorsがノーマルである。これは、通常Engineeringが作業対象を「物」とし「ものづくり」する分野であるが、安全衛生管理の作業対象は「人間」であり、業務に際して尊厳の存する人間に関わっていることを強調する意図で用いた。

本報告が安全衛生を推進する担当者には任務の確認、そのほかの人々には安全衛生の基本姿勢の理解の増進の参考となることを期待する。

2 Three Types of Managements

安全衛生管理のうち代表的なものとして、作業環境管理 (working environment control), 作業管理



図1: Three managements of occupational health.

(work practice management), 健康管理 (health care) がある。これらを労働衛生の3管理 (three aspects of occupational health practice [7]) という [2, 8, 9].

この3管理を三位一体として実践することで、安全で健康的な職場環境が実現され、高品質で高い生産性を誇る職場づくりにつながる [2].

この3管理に、総括管理 (労働衛生管理体制の確立: Establishment of Organization for Safety and Health Management) と労働衛生教育 (Safety and Health Education) を加えて5管理とすることもある [8].

作業環境管理とは、職場や作業現場などの作業場における作業環境中の有害要素 (化学物質や粉塵、その他のリスク) の状態を掌握し良好な状態に管理することであり、作業者の有害要素への曝露や作業負荷の軽減を果たす作業方法を定めて、これが適切に遂行されるようにするのが作業管理である。健康管理は、作業者個人の普段の健康の状態を把握し、異常を早期に発見し、元の健康状態に回復するための医学的および労務管理的な措置をすることである [8]. 労働衛生の3管理は、ここに掲げた順に推進することが必要である [2].

これらに加えられる労働衛生管理体制の確立 (総括管理) とは、事業者が安全衛生管理の重要性を認識した上で、これを推進する総括衛生管理者、衛生管理者、安全管理者、産業医などを指名し、それと共に安全/衛生/安全衛生委員会等を設置することにより安全衛生を進めるために必要かつ十分な機能が発揮できるような体制を整えることである [10].

労働衛生の3管理に加え、総括管理、労働衛生教育が一体となって進められる必要があり、特に作業者が、従事する作業環境や設備、取扱物質についての危険・有害性、それらの取扱方法などについて、十分な知識・技能を身につけていることが安全衛生の前提となる。よって、作業者が必要な知識・技能を習得し訓練する機会を設ける労働衛生教育が労働災害の防止を図ることをねらいとして展開される [10].

昨今 (原稿執筆時: 2021年) コロナ禍 (COVID-19)

の蔓延が収まらずリモートワークが推奨されている。厚生労働省のホームページ上に「在宅ワークの適正な実施のためのガイドライン」というパンフレット[11]が収録されており、その中に「VDT作業における労働衛生管理のためのガイドライン」（平成14年4月5日付け基発第0405001号）の抄録が参考資料として含まれる。これには作業環境管理、作業管理、健康管理（の順に）それぞれ心得ておくべき項目が示されている。（総括管理は含まれていないが）労働衛生教育にも触れられている。在宅ワーカーには一読を勧める。

3 Work Environment Elements

環境は人間の心身に大きな影響を与える。労働において、作業場の環境が作業者の健康に対して負担となったり、健康障害を発生させることもある。

作業環境に影響を与える要素、すなわち作業環境要素は一般作業環境要素と有害作業環境要素に分類される[2, 10]。

一般作業環境要素としては、①温熱環境、②空気環境（粉塵、ガスおよび蒸気）、③気積・換気、④視環境（採光、照明、彩色など）、⑤音環境、⑥作業空間、⑦作業負担、⑧休憩室などの設備などが挙げられる。

有害作業環境要素は、①有害化学物質（化学的因子）粉塵、金属、有害ガス、有機溶剤、酸、アルカリ、発癌物質、感作性物質、酸素欠乏、その他の無機・有機化合物、②有害エネルギー（物理的因子）高温、寒冷、異常気圧、騒音、振動、電離放射線、非電離放射線、レーザー光線、③有害生物（生物的因子）病原微生物、昆虫などが挙げられる[10]。

一般作業環境要素は、それ自体が直ちに作業者の健康に悪影響を及ぼすことはないが、快適性、安全性や長期に亘る健康レベルに関わってくることもある。また有害作業環境要素は、単独または複合して作業者に危害をもたらすことになる。

前述の通り、天文・宇宙観測の分野では一般作業環境要素の中にも通常とは大きく異なり直ちに作業者の健康や生存を脅かす恐れのある要素も含まれている。

4 Harm and Hazard

人の受ける身体的障害もしくは健康障害、または財産もしくは環境の受ける害を危害(harm)[12-15]という。

i) 危害の発生頻度は、ハザードへの曝露、危険事象(hazardous event)＝危害を引き起こす可能性のある事象)の発生と、危害の回避または制限の可能性を要素とする関数である。

例えば多種多様の有機溶剤はそれぞれ特有の有益な機能を発揮するが、人体にはそれぞれ固有の健康への障害[16]を生じ排出すれば環境へも危害を及ぼす。あるいは電気製品による感電、製造装置への巻き込み事故による圧迫や切断などと、システムには危害をもたらす要素が内在していることがある。このような危害の潜在的な源をハザード(hazard)[2, 9, 12-15]という。

5 Risk

リスク(resk)は、リスクマネジメントに関する国際的メタ規格である、ISO/IEC Guide51[12] *Safety aspects – Guidelines for their inclusion in standards*（安全側面－規格への導入指針[13]）により、combination of the probability of occurrence of harm and the severity of that harm（危害の発生確率およびその危害の程度の組合せ）と定義されている。

すなわち、リスクは危害の発生頻度（確率）と被害（危害）のひどさ（重大性）の関数(function)で表される(図2参照)ⁱ⁾。

一般に多くのリスク分析手法で、発生頻度と危害の程度をそれぞれ数段階に分類し、実際の頻度と重大性の組合せで定まる個々の危険事象を2次元マトリックスの要素に割り当てている。よってリスクの多寡の見積り結果はマトリックス上の位置で示される[2, 9]。

この際、危害の発生頻度と被害の重大性の間には、よく知られたハインリッヒ(H. W. Heinrich)の法則(1つの重傷や死亡事故が発生する前には、29件の軽傷災害と300件の軽微な事故が発生しているという経験則[2, 9, 14])か、それに類似した法則を暗黙に仮定することになる(この法則の定性的な傾向には異存はな

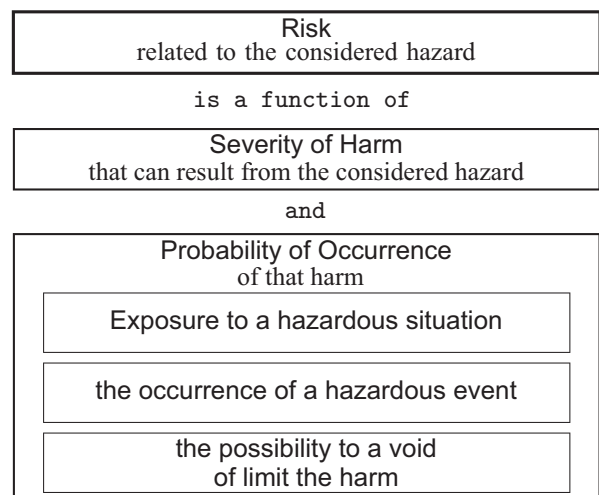


図2：Elements of Risk [12].

いであろう)。

すると、一般的な労働環境の場合、被害が重大で高い発生頻度の事象や、軽微で低頻度の事象は比較적少ないと予想される。よって多くの場合、実際に発生する危険事象は、マトリックスの対角線付近に集ると見込まれる。個々のリスクの高低(大小)は分野ごとの業務や作業の特殊性を考慮しつつ、マトリックス上の位置に重みを付けて評価される。

特殊な例として、宇宙(有人ロケット/衛星)開発分野では、リスクを構成する関数のパラメーターである発生頻度の重みをゼロとし、危害の重大性のみに依拠して、破局(Catastrophic Hazard)と判定される場合は2FT(2 Fault Tolerance: 2故障許容[17])設計を施すという考え方を採る。宇宙開発の特性を極限まで考察した結果であると推察され、分野や作業内容の特殊性に根ざした柔軟な対応の一例と考えられる。

6 Tolerable Risk

安全(safety)とは、freedom from risk which is not tolerable [12](許容不可能なリスクがないこと[13])と定義されている。これは、リスクが十分に小さい(望ましくはゼロの)状態ということであり、十分に小さいとは「許容不可能ではない」と認められることで、便益を考えるとそのくらいの危害は仕方がないと社会が合意するレベルのこととされる[9]。

有機溶剤作業を例にして考えると、リスクを完全に除去するには、有機溶剤の使用を止めて有害性のない(または少ない)物質へ転換することが第一の対策である[16]。そうすることが作業の効果を通減させたり、目的を妨げるなどで、有機溶剤の使用中止が不可能なときは、次善の対策として有害な作業工程・作業方法を改良し有害物発散の防止を図る。次善以下の対策として、有害物質を取り扱う設備の密閉化と自動化、有害な作業工程の隔離(遠隔操作)などの対策。それらも難しい場合は、局所排気装置やプッシュプル型換気装置の設置などが挙げられる[16]。

以上のように、リスクを除去したり低下させるためには設備投資などのコストを要する。現実的に局所排気装置の設置により①有害化学物質の拡散を防止することで、作業者の吸引をなるべく抑制する対策が広く行われている。これが「許容可能なリスク(tolerable risk [12, 13])」として社会が合意できる最低限のレベルと考えられる。

なお、ISO/IEC Guide51 [12]、JIS Z8051 [13]の安全に関する注意喚起を以下に引用する。

「安全」および「安全な」という用語の使用には注

意を要する。一般社会では、しばしば安全という用語は、全てのハザードから守られている状態と理解されている。しかし、正しくは、安全とは危害を引き起こすおそれがあると思われるハザードから守られている状態をいう。製品またはシステムには、あるレベルのリスクが内在している。「安全」および「安全な」という用語は、特に有益なその他の情報を伝えない場合には、形容詞としての使用は避けることが望ましい。

さらに「安全」および「安全な」の用語はリスクがないことを保証していると誤解されやすいので、可能な限り目的を示す用語に置き換えることが望ましい(例:安全ヘルメット→保護ヘルメット, 安全インピーダンス装置→保護インピーダンス装置, 安全床材→滑りにくい床材)。”

7 Risk Assessment

毎日、繰返されるルーティン的な作業では、どこにハザードが潜んでいるか、どのようなリスクが存在するか、当事者はある程度は認識している可能性が高いと考えられる。一方、初めて従事する一般作業環境や有害作業環境、あるいは慣れた作業環境でも非日常的な作業では熟練した作業者であっても、どこにハザードが潜んでいるのかとか、どのようなリスクが存在するのかといった見当が付き難いこともあるであろう。

初めての作業環境や作業内容の場合はもとより、熟練したルーティンワークであってもハザードを特定しリスクを具体的な言葉として認識することは存外に難しく、実際にリスクやハザードを見出し、特定しようとするときには戸惑いを感じる。

この点に関して、リスクを同定(risk identification)

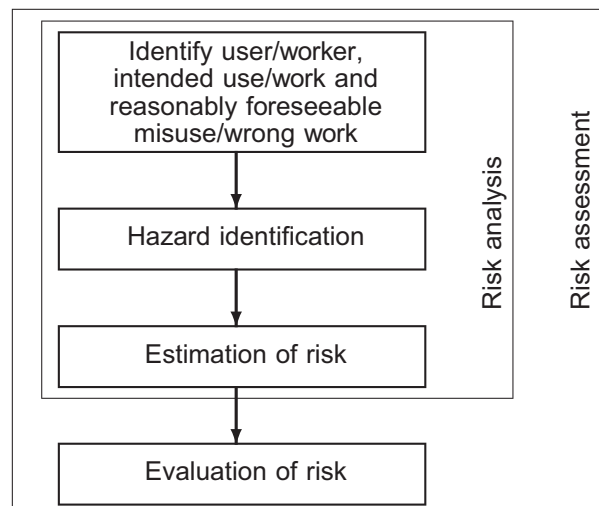


図3: Risk Assessment [12].

区 分	ハザード
機 械	重量、強度、空隙、凹凸、突起物、粘着物、回転体、移動物体
電 気	充電、通電部、静電気
生 物・化学	材料、塗料、細菌、昆虫や小動物
放 射 物	放射線、電磁波、光線、光の明滅
環 境 要 素	騒音、振動、温熱、湿度
人 間 工 学	不自然な作業姿勢、姿勢の拘束、過度の精神的ストレスを与える事象

表1：Example of Hazards [2].

する各種の分析手法[2, 9, 14, 15]が提案されており、原理的なプロセスがISO/IEC Guide51 [12], JIS Z8051 [13]に明示されている。その内容を解説する（図3参照）。

まず（作業や作業環境要素に不慣れな作業員や、たまたま居合わせた関係者、見学者など可能性がある全ての人を含めて）製品/システムによって危害を受けそうな使用者/作業員を特定した上で、製品/システムの意図する使用/作業方法を同定（identify）し、合理的に予見可能な誤使用/誤作業を同定する。

次に、システム/作業にはどのようなハザードが内在しているか同定する（hazard identification）。表1に業種や作業に関わらない普遍的なハザードの例[2]を示す。

そして、危害を頻度と重大性の関数として固有のリスクを見積もる（estimation of risk）。ここまでのリスク分析（risk analysis）である。

最後に、リスクが許容可能な範囲に抑えられているかを判定する手続によるリスク評価を行う。リスク分析とリスク評価を併せて、リスクアセスメント（risk assessment）という。

リスクアセスメントは、ほかにも多様な手法[18]が実施されており、Job Hazard Analysis [19]もリスクアセスメントと同義の用語である。

なお2016年6月以降、労働安全衛生法の改正により化学物質のリスクアセスメントが義務化[20]されている。本報告のリスクアセスメントは化学物質に限らず、あらゆる危害とハザードの同定を想定している。

8 Hazard Identification

課された作業やシステムの中からリスクやハザードを見出すために様々な技法が提案されている。代表的なものとしてFMEA, FTA, ETAなどが挙げられる。

FMEA（Failure Modes and Effect Analysis：故障モード影響解析）は、1950年代にNASAで初めて考案された手法であり、国内でも信頼性解析技法として広く用

いられている[14]。

FTA（Fault Tree Analysis：故障の木解析）は、1960年代に米国ベル研究所で開発されボーイング社が実用化し60年代後半から70年代前半にかけて実施されたアポロ計画でも採用された[14, 15]。

ETA（Event Tree Analysis：事象の木解析）は、1970年代に米国のある原子力発電所の安全研究において開発されたもので、当初はFTAの結果を整理して分かり易く表現するための手法として用いられたが、現在では広範な分野で部品・デバイス・機器・システムやマネジメントやトラブル救済策などと解析対象が広がっている[15]。

9 Risk Analysis

一例としてFTA [2, 9, 14, 15]について簡単に触れる。

FTAによる解析はFT図を描いて行われる。そこには現在、重大な事故や災害が発生したとして、その原因が過去のどのような状態から生じたかを論理的に探究する手続きが記載される[15]。

手続きを具体的に説明するために、報告者の体験を元に創作した、以下のシナリオを分析する：

実験室内で容量約200Lのクライオスタット（cryostat）を用いて冷却実験を実施した。冷却剤として多量の液体窒素（LN2）を注入した。クライオスタット内でLN2は（当初は）直ちに気化し、排出口に接続したホースを通して屋外へ排気された。暫くして排気ホースが一瞬で凍りつきホースが砕け散った（この時点でも排出窒素は気体であった）。直ちに実験は中止され、排気ドレインから窒素ガスを放出し、実験室の外気に接するシャッターが全開されて人的被害は辛うじて免れた。点検したところ、屋外のホースの先端には氷の塊ができて出口を塞いでいた。

この危険事象から、蒸発したN₂ガスの排出ホースの取り扱いにはハザードが潜んでいたことが分かる。事象としては、排出されたN₂ガスは氷点下数十℃であり、ホースは過冷却されていたため何らかの刺激により一気に全体が凍った（原因の推定1）。

あるいは、ホースの先端に大気中の水蒸気が冷却されて氷となって固着し、先端を塞いだために滞留したN₂ガスがホース全体を凍らせた（原因の推定2）の、いずれかと考えられ、この事象は暗転すれば、N₂ガスの大量噴出などにより人的な危害も想定されるリスクである。

そこで、FT図（図4）において「ホースが凍り砕け散った」を頂上事象（top event）に置く。

解析の始めとして直接の原因（1次原因）を列挙し、

中間事象 (intermediate event) とする。ここでは「ホースの一部が急激に凍り付き全体に広がった」と「出口からホース全体が凍った」を並列する。この二つの中間事象は、どちらかの一方が発生して頂上事象に至ったと考えられるので、OR 論理演算子で結合され頂上事象に接続される。

「出口からホース全体が凍った」中間事象は、さらに「出口の周囲に氷ができる」と「出口の監視が不十分」という中間事象に分解される。こちらの二つの中間事象は、どれか片方が成立しなければ上位の中間事象は防げた可能性があるため、AND 演算子で上位の中間事象と接続する。

さらに、下位の原因に分解する。通常は数段階の中間事象が置かれるが、ここでは説明を簡略化するために、直ちに基本事象 (basic event) を列記する。基本事象とは、論理的または構造的に考えて、これ以上は展開できない最下位に置かれる事象である。

1次原因である「ホースの一部が急激に凍り付き全体に広がった」の素因として「ホースはN₂ガスにより過冷却」と「外部刺激」をAND演算子で結合する。

「出口の周囲に氷ができる」の基本事象は「長すぎるホース」と「屈曲が多い」とした。これらは（複合しても）単独でもホース内におけるN₂ガスの圧力勾配に対して損失を大きくするのでガスのスムーズな流動を妨げ、出口からの排出に対する抵抗を大きくし氷ができ易くする。そこで、両者はOR論理演算子で結合される。

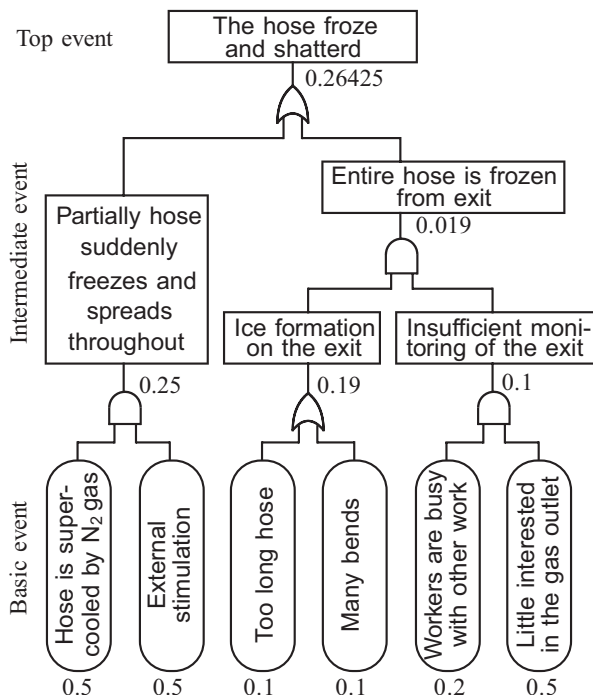


図4：An example of FTA.

「出口に対する監視が不十分」の要因は「作業者が他の作業に忙殺」と「ガスの排出への関心が乏しい」が挙げられる。天文観測の分野では、クライオスタットの排気口付近に氷が付着するという事象はCCDを用いた観測の際などでよく経験される現象であり想定外とはいえない。「他の作業に忙殺」されていたとしても、危険性を認識して十分な監視が必要であった。可能性に対する事前の検討が不十分であったと考えられる。これらは複合して上位の中間事象に発展したと考えられるのでAND論理演算子で接続する。

図4に記載されている数値は、それぞれの事象の発生頻度を表すのであるが、単発の作業（実験）であり統計的なデータがあるわけではないので、基本事象に対して、同様な作業10回に対して何回くらい発生（10人の作業者のうち何人が遭遇）するかを主観的に推定した。ここから上位の事象に向って頻度を計算する。

中間事象と頂上事象の発生頻度は論理演算子に対する計算式を当てはめて計算する。基本事象（下位の事象）の各要素の確率を P_1, P_2 とするとAND演算子で結合された結果の確率 R_{AND} は

$$R_{AND} = P_1 \cdot P_2$$

となる。

OR演算子の場合は確率 R_{OR} が

$$\begin{aligned} R_{OR} &= 1 - (1 - P_1)(1 - P_2) \\ &= P_1 + P_2 - P_1 \cdot P_2 \end{aligned}$$

である。

頂上事象の発生確率は、大まかに4回のうち1回以上となった。かなり高い頻度で発生する危険事象であるから、重大な危害が生じないように作業環境や作業方法を根本的に改善（risk control）する必要がある。

要素の数が3以上の場合やANDとOR以外の論理演算子を使うときなど、すべてブール代数の定義に従う。

説明したように、FTAは頂上事象から下位の事象へ分解するトップダウン方式の解析法であり、FMEAやETAはボトムアップの方法である[15]。

10 Risk Management

リスクが許容可能 (tolerable/acceptable) なレベルに留まる状態を達成するためには、それぞれのハザードについてのリスクアセスメント、およびリスク低減 (risk reduction) の反復プロセスが必要不可欠[12, 13]である (図5参照)。

図5の上半分は図3と同じである。同定された各々のハザードによって影響を受ける使用者/作業者のグループに対して (危害の頻度と重大性により) リスクを見積も (推定) する。

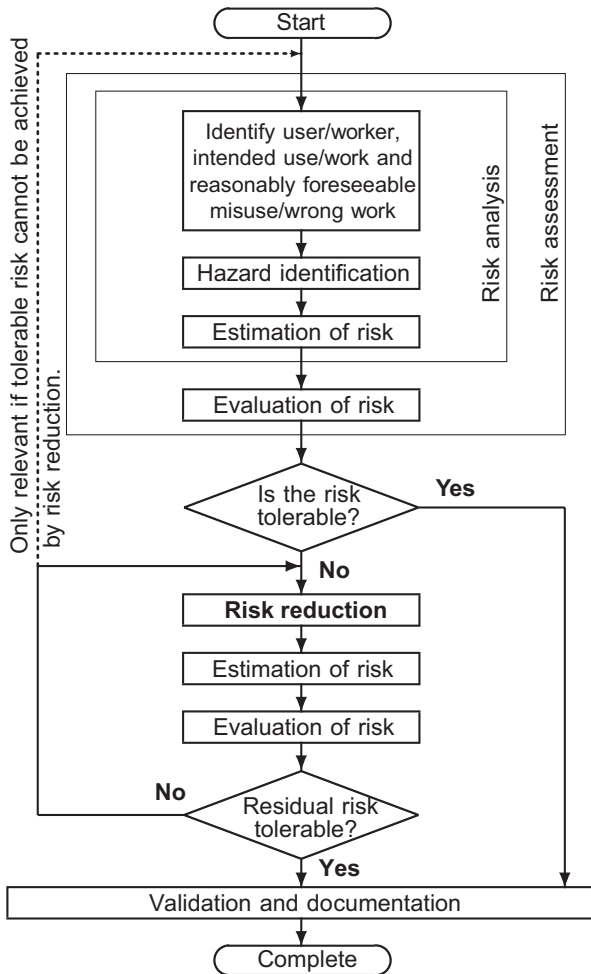


図5：Risk Management Process [12].

見積もられたリスクに対して、さまざまな使用者/作業者のグループ毎にリスクの大きさを評価する。グループが異なればリスクの重大性も変化する可能性がある。リスクの評価について次節に詳述する。

もし、リスクが許容可能でない場合は、リスク低減措置（risk reduction measure）、または、防護措置（protective measure）を許容可能になるまでプロセスを反復をする [2, 9, 12, 13].

11 Risk Evaluation

リスク評価、および、リスクマネジメント全体を遂行する手続である R-Map [14, 21] を簡単に説明する。

R-Map 法は日本科学技術連盟（日科技連）の製品安全研究会における製品安全性審査法の研究テーマとして1998年頃から安全上のリスク対策法であるリスクマップ（R-Map）法と称して研究されてきた [14].

R-Map 法は一般消費財（consumer products）を社会に供給（release）する際に、リスクを事前に評価するこ

とにフォーカスしている。リスクの見積と評価にはリスクマップを用いる（図6）。

マップは横軸が「危害の程度」を表し（0～IVの）5段階に、「発生頻度」は縦軸に採り（0～5の）6段階に分類される。

危害の程度は、英語表現に近い「なし・軽微・中程度・重大・致命的」の意味合いを人的な被害に即して表現したものである。

発生頻度は単位を「件/台・年」とし、製品1台当たり年間の発生件数を表わす。

リスクの事象を社会に受け入れ可能のレベルとして捉える場合、発生頻度のランク0のレベルを把握することが重要である [14]. R-Map では、交通災害・労働災害による死亡率は 10^{-6} 件/台・年レベル、化学工業： 10^{-5} 件/施設・年、医療機器： 10^{-6} 件/台・年、自動車： 10^{-7} 件/台・年とし、図6では家電： 10^{-8} 件/台・年を標準として採用している。これらの数値の根拠は（R-Mapの解析により得られたものであり詳しくは）文献 [14] を参照されたい。

見出された、それぞれの危害は図6上に分類（estimation of risk）されて配置される。リスクの大きさとしては、大きい順に「A3>A2>A1>B3>B2>B1>C」となる。このマトリックスは左下に原点をとる構成となっており、右斜上に向かうほどリスクが増大することが示される。A2,A1,B3,B2,B1,Cは、危害の程度と発生頻度が異なるものが、それぞれ複数、存在するがリスクの大きさとしては同一とみなされる。

図6で赤く塗りつぶされた部分（A領域）は、受け入れられない領域（intolerable region）であり、ハザードがもたらす危害の程度や発生頻度を減少することにより、他のリスク領域までリスクを削減（risk reduction）することが求められる。

黄色のB領域は、ALARP（As low As Reasonably Practicable）region と呼ばれ、新規の計画などにおいて原則

Probability of Occurrence	5	頻発する > 10^{-4}	頻発する Frequent	C	B3	A1	A2	A3	A 領域
	4	しばしば発生 10^{-4} - 10^{-5}	Probable	C	B2	B3	A1	A2	
	3	時々発生 10^{-5} - 10^{-6}	Occasional	C	B1	B2	B3	A1	
	2	わずかに起る 10^{-6} - 10^{-7}	Remote	C	C	B1	B2	B3	B 領域
	1	まず起きる 10^{-7} - 10^{-8}	Improbable	C	C	C	B1	B2	
	0	考えられない 10^{-8} - 10^{-9}	Incredible	C	C	C	C	C	
		件/台・年		None	Negligible	Marginal	Critical	Catastrophic	C 領域
				無傷	軽傷	通院加療	重症入院	死亡	
				0	I	II	III	IV	
				Severity of Harm					

図6：Symbolical diagram of R-Map [21].

的にこの領域のリスクが残ってはいはならない。例外的に許容されるのは、現在の技術では効用と切り離せない副作用が伴い、効用の方がリスクを上回っていたり、対策のコストが大きすぎると判断されるなどの場合である。リスク低減策（risk reduction measure）の実現性を考慮しながら、リスクを最小化させるべき領域である。

C領域が、他の受け入れられているハザードから生じるリスクと比較しても、危害の程度や発生頻度が低いと考えられる領域（broadly acceptable region）で、ここに到達することがリスク削減の目標となる。

12 Intended Use and Vulnerable Consumer

R-Mapでrisk analysisを始める際に、まずハザードマトリックスという表を作成する。

これは縦軸にハザードを、横軸に使用状況（作業内容）・形態を配置したマトリックスである。この表は、risk finding（hazard identification）を行う際に漏れないかを確認しながらハザードを検出することを目的とするツールである。また、見出された危険事象（hazardous event）、危険状態（人、財産または環境が、一つ以上のハザードにさらされている状況[13]＝

No. ハザード	作業内容・形態	A	B	C	D	E	F	G	H	I	合計
		準備作業P					組立作業A		試運転R	観測O	
		坑外			坑内					坑外退避	
		積込	トラック	作業工具	開梱	防塵	配線	クレーン	レーザー	遠隔監視	
		搬入	昇降リフト	運搬台車	真空ダクト	検査	クライオスタット	作業工具	真空	制御システム	
		荷降し	フォークリフト	保管棚	光学定盤	洗浄	急勾配	クリーンブース	冷却	入退室管理	
1	作業環境, 酸素欠乏/有毒ガス					1					1
2	作業環境, 火災/落盤/出水										0
3	作業環境, 降雪/高温/高湿/発汗/水分補給/作業服/騒音/換気							1			1
4	電気エネルギー, 電源/停電/漏電										0
5	電気エネルギー, 感電/電撃/放電										0
6	レーザー光線, 暴露/迷光/照射								1		1
7	熱エネルギー, 高温/低音/膨張										0
8	熱エネルギー, 気化/溶解/凝固										0
9	運動エネルギー, 速度/加速度/衝撃										0
10	位置エネルギー, 荷重/落下/転落	1						1			2
11	化学反応, 爆発/酸化/脆化										0
12	メカニカルパワー, 人力/動力/重力			1							1
13	物質, 塵/埃/摩耗粉										0
14	物質, 有害物質/有毒物										0
15	物質, 有機物/微生物										0
16	物質, シャープエッジ				1						1
17	人, 工具/装置の操作ミス				1						1
18	人, 連携動作/立ち位置のミス						1				1
19	人, 部外者の侵入/盗難/悪戯										0
20	その他									1	1
作業状況別 合計		1	0	1	2	1	1	2	1	1	10

表2：An example of Hazard Matrix.

hazardous situation [12]) の項目ごとの出現頻度を集計し、ハザード選定の妥当性の検証、ハザードの分割や統合といった操作にも役立つツールとなる。

R-Mapにおいては、ハザードマトリックスの出来栄の良否が最終結果を左右するので重要な作業とされる[14]。

報告者の所属プロジェクトは全体がKAGRAプロジェクト[22]に参画している。KAGRAプロジェクトが開始されて、神岡サイトに掘削中の坑道が貫通する直前の段階で、KAGRA Program Advisory Board (KAGRA評議会) から、Job Hazard Analysisの実施をリコメンドするという勧告を受けた[23]。

KAGRAではこの勧告に応えるべくリスクアセスメント手法の検討を経て、2014年にR-Mapをほぼ、そのまま採用することに決した。以下に、KAGRA安全委員会で取りまとめたJob Hazard Analysisのうち、報告者が所属するサブシステム（作業グループ）が実施した結果のレポートから、一部分を抜粋（および、統合して）例示する（表2参照）。

これは説明資料としての煩雑さを緩和するためであり、僅かに10項目程度のリスクについて検討するものであるが、オリジナルでは合計60項目のハザード／リスクが検討されている。

R-Map [14] のハザードマトリックスの縦軸・横軸に記載された「ハザード」と「使用状況（作業内容）・形態」は、対象とする製品・商品ごとに標準化されたカテゴリー分けであり、具体的なハザードや危害、リスクを見出す手懸りである。もし、表示された名称が適当でない場合は適切に変更する方がよい。総てのハザードを網羅する必要があるので「その他」というカテゴリーは必須である[14]（表2では「使用状況・形態」を「作業内容・形態」に修正している）。

使用状況・形態の選定に関しては、製品に使用される部品の選定から製造、出荷、販売、使用、破棄に至るまでの、その製品のライフサイクル総ての段階を包含するように項目名を列記する。これらの標準的な項目が選定され表示されている[14]。

この表を用いて、縦軸と横軸の各交点で予測される危害やリスクを発見する。すなわち（標準的な）ハザードと使用状況・形態の2方面からリスクを見出す（risk finding/hazard identification）のである。

製品や商品の使用状況とその形態を考える際には、製品もしくはシステムと共に提供される情報に従った使用、またはそのような情報がない場合は一般的に理解されている使用（意図する使用[13], intended use [12]) を想定する。

さらに、供給者側が意図しない方法によるが、容易に予測できる人間の行動によって引き起こされる製品

やシステムの使用は、合理的に予見可能な誤使用[13]（reasonably foreseeable misuse [12]）も考慮しなければならない。

なぜなら、年齢、理解力、身体的・精神的な状況または限界、製品の安全情報にアクセスできないなどの理由によって製品またはシステムからの危害のより大きなリスクにさらされている消費者（危害を受けやすい状態にある消費者[13], vulnerable consumer [12]) が存在するからである。

これらに限らず、われわれの携わる作業現場でも、あらゆる状況や作業環境要素、いろいろな背景を持っていたり、情報の収集や発信に対してリテラシーの異なる作業員や、たまたま居合わせただけの人も含めて想定しなければならない。

ハザードマトリックスの作成は、多様な環境や状況を想定しながら行う必要があり、決して簡単な作業ではない。ある程度の訓練や経験が必要であり、複数が集まってブレインストーミングすることから始めるのがよい[14]。

13 Risk Estimation

リスクを発見し特定する作業をR-Mapではリスクファインディングと呼ぶ。これはハザードマトリックスの縦横の各交点（のセル内）で発見し、想定される危険状況をできる限り詳述していく。これをリスクアナリシス表にまとめる。表3は前節で例示されたハザードマトリックス（表3）で発見された危険状況の内容を（簡単に）記述したリスクアナリシス表である。

表3の「作業内容・形態」欄は表2の横軸の項目A,B,...であり、「ハザード」は表2の縦軸の1,2,...を表す。最左欄の「記号」は、特定されたそれぞれの危険状況に対する固有な記号である。これは後で、リスクマップに記入するものであるからユニークな記号づけが不可欠である[14]。

ここでは、表2の作業内容・形態欄の準備作業（Preparation work）、組立作業（Assembly work）、試運転（engineering Run）、観測（Observation）の頭文字と1からの通し番号とした。

また（作業内容・形態の）その下にある、坑外、坑内…、および、その下部の単語は作業状況として思い当たる言葉をできる限り並べておくと、適切にハザードを見出す手掛かりとなる。オリジナルでは作業状況の分割や場合分け、および、関連する単語が、より多く書き込まれている。

リスクアナリシス表が完成したら、ハザードマトリックスの各交点ごとに発見された危険事象の出現数

記号	リスクファインディング		
	作業 内容 形態	ハ ザ ード	見出された危険状況 (hazardous situation)
P1	A	10	トラックからフォークで荷降し時バランスを崩し 落下、通行中の別の作業者が下敷き、重傷を負う
P2	C	12	多数の部品/装置を床に置いたり、持上げたりを繰 り返したため作業者が腰を痛める。
P3	D	16	真空ダクトの側で作業中、ダクトを潜る際に反対 側に隠れた装置の角に頭をぶつけて擦傷を負う。
P4	D	17	開梱作業で固定バンド/ダンボールの縁で、または カッターの扱いを誤り指に切り傷を負う。
P5	E	1	部品をアルコール洗浄していて気分が悪くなる。
A6	F	18	坑内で作業中に火災警報が発報（誤報）、慌てて避 難したため残留者がいたか/いないか不明だ。
A7	G	3	クリーブース内でクリーンスーツ/グローブ/マス クにヘルメット着用が義務、坑内は室温25℃、湿 度90%の環境下で作業者は激しく消耗した。
A8	G	10	クリーンブース2階の一部の手摺がない（クレーン 作業のため）部分から作業者が転落し重傷。
R9	H	6	レーザー作業中に迷光が目に入り網膜損傷。
O10	I	20	観測中は坑内に人を近付けずに遠隔操作、コアメ ンバーのみで遠隔監視しメンバーが疲弊した。

表3：Risk Analysis Table.

を集計して記載する。この作業は手間を要するのであるが、ここまで行ってきたリスクファインディングが適切（充分）であったか、漏れがなかったかを振り返る意味もある。

例えば、ハザードマトリックス上で空白の欄は危険状況がないのか発見できなかったのかのどちらかである。ここで、もう一度ほんとうにリスクがなかったのか検討を促すサインとなっていることに注目すべきである[14]。

また、数値が大きな欄は選定したハザードや使用状況（作業内容）・形態が適切でなかった可能性もある。その場合はリスクファインディングを初めからやり直す必要があり、ハザードや使用状況・形態（のいずれか/両方）を分割することも検討しなければならない。

次に、リスクの見積り（risk estimation）を行う。すなわち、見出された危険状況のそれぞれに対して発生頻度と危害の大きさを見積もるのである。この際、蓄積されたデータ[24, 25]や統計情報などを利用できるのであれば、それを用いる。

始めに作業上の事故やその他の事象の発生頻度を推定することを考える。十分なデータの蓄積がない場合や、新しい作業方法や作業環境要素のもとで行うときなどでは別の方法を工夫してみる必要がある。ここでは、現場での作業状況や環境要素などを勘案して定量的な見積りが可能か考えてみる。

まず、毎日、10人程度の人員で実施する作業を想定する。これを年間で40週、週5日間の勤務とする。す

ると年間の延べ人数が

$$10 \text{人/日} \times 40 \text{週/年} \times 5 \text{日/週} = 2 \times 10^3 \text{ 人/年}$$

この作業において事故やその他の事象が、どの程度の頻度で発生するか考える。例えば、

$$1 \text{ヶ月に1件の場合: } \frac{12}{2 \times 10^3} = 6 \times 10^{-3} \text{ 件/人・年,}$$

$$1 \text{年に1件の場合: } \frac{1}{2 \times 10^3} = 5 \times 10^{-4} \text{ 件/人・年,}$$

$$5 \text{年に1件の場合: } \frac{0.2}{2 \times 10^3} = 1 \times 10^{-4} \text{ 件/人・年,}$$

$$10 \text{年に1件の場合: } \frac{0.1}{2 \times 10^3} = 5 \times 10^{-5} \text{ 件/人・年,}$$

そして、

$$20 \text{年に1件では: } \frac{0.05}{2 \times 10^3} = 2.5 \times 10^{-5} \text{ 件/人・年}$$

となる。

これをそのまま発生頻度とするか、あるいはFTAと組み合わせ、これを基本事象の発生頻度とすると頂上事象の発生頻度が計算できる。

こうして得られた数値を、発生頻度0のランク（または、0～5のいずれかの段階）へ定性表現を考慮して最も適切な段階に置く。すると、他のランクの頻度は10倍ずつ異なるといった規則を与えれば総て数値表現できる。

これらの頻度の推定値は図6で示したような一般消費財に対するリスクの推定値とは異なると思われるが、それぞれの作業状態や作業環境要素に適した推定値であれば妥当性が認められる。さらにデータの蓄積を行い、数値化の精度や妥当性の向上を図ることが望ましい。

あるいは十分なデータがないときは、発生頻度については残念ながら定性的な推定しか方法がないと判断することもある。図6に示した定性表現や現場の作業の実情に沿った言葉による定性的な表現により頻度の段階を見積もるのも一法であろう[14]。

一方、危害の大きさに関しては表3に示した危険状況の文面に、人命に関わる内容や重軽傷を負うといった怪我の程度を明示した（または推定できる）表現が含まれており、これをより具体化すれば直ちに階層を見積もることができる。

14 Risk Control

R-Map法では、前節に示した方法で危害の大きさと発生頻度が推定できたとして、リスク見積りができれば図6に示すR-Mapにプロットすると、自動的にリスク

評価が完了する。

表2, 表3で示した例では, 発生頻度の推定は前節に記述した, 年間の延人数2000人の作業者が従事する作業で20年以上に亘って事故が発生しない場合をランク0レベル ($\leq 2.5 \times 10^{-5}$ 件/人・年) とした. 個々の危険事象の頻度は発生するまでの(20年未満の)期間を直感的に推定して求めた。

図7に表2, 表3に例示したR-Mapを示す. 図中に記入されている記号は表3で与えられた各危険状況に固有の記号であり, 以下の作業でも踏襲される。

ここで, A領域は許容できない領域(intolerable risk)でB領域はALARP領域, C領域が許容できる領域(tolerable risk: level of risk that is accepted in a given context based on the current values of society [12], 現在の社会の価値観に基づいて, 与えられた状況下で, 受け入れられるリスク[13])である。

したがって, A領域に置かれた危険状況に対してはリスク低減(risk reduction)など(図5の下半分)のプロセス群を施す必要がある. B領域に対しても可能な限りC領域を目指す努力が要請される. これらはリスクが許容可能となるまで反復されなければならないリスクコントロールプロセスである。

リスク低減を行うにあたっては遵守すべき原則が存在する. ISO/IEC Guide51 [12, 13]にはリスク低減の優先順位が, (a) 本質安全設計(inherently safe design), (b) ガードおよび, 保護装置(guards and protective devices), (c) エンドユーザー向けの情報(information for end users)と示されている。

R-Mapではこれを以下のように具体化している. ま

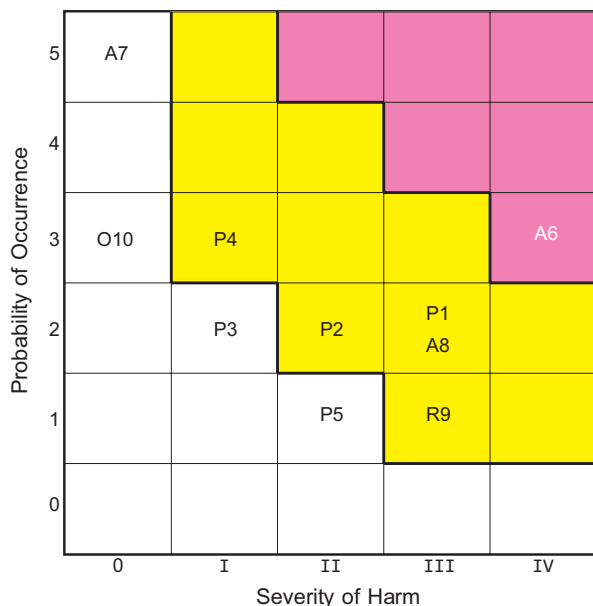


図7: R-Map before measures.

リスク低減レベル	具体的な方法	適用可能リスク領域	低減効果(セル数)		
			最大	通常	最小
① リスクの除去 (本質安全: 製品自身でリスク除去)	・運動, 位置, 熱, 機械, 電気, 化学, 電磁波, 音, 磁器などのエネルギーや, 放射性物質, 有害物質, 微生物, シャープエッジなどが及ぼす影響が, 人体に危害を加えるレベル以下にする	A B C	-4	-3	-2
② リスクの低減 (本質安全: 製品自身でリスク低減)	a. 発生頻度の低減 ・故障やミスをしてしても直ちに危険状態に至らない設計(フェイルセーフ, 冗長性, 多重化, 安全確認型) ・誤操作の確率低減(フールプルーフ, タンパープルーフ, 人間工学) ・隔離(立入禁止, 保護カバー, 操作部との分離, インターロック, 分離固定) ・安全率, ディレーティング, 信頼性, 難燃・断熱・絶縁・防水・防音材料 ・保守点検, 受け入れ検査, 評価試験, 重要部品・重要工程管理 b. 危害・障害の程度の低減 ・使用/発生エネルギーの低減 ・作用するエネルギーの低減(保護設置, フィルター, 距離)	(A) B C	-3	-2	-1
③ 安全装置 防護装置	・危険状態を早期に検出して遮断する…停止による拡大防止(過電流保護装置, 各種検出保護装置などの安全装置) ・防護装置, 保護眼鏡, 防護服…防護による拡大防止	B C	-2	-1	-1
④ 警報	・警報装置装置による異常検出 ・異常状態の人による発見のし易さと危険回避行動の容易性(速度の低減, 非常停止装置)	B C	-1	-1	0
⑤ 取扱説明 注意銘板	・使用者, 管理・監督者, 周囲の人などに対する注意, 警告 ・教育・訓練	(B) C	-1	0	0

表4: Principle of the reduction measure [21].

ず, 安全対策(リスク低減)の優劣を①～⑥の6段階のレベルとする(表4参照)。

①は, 本質安全設計である. これは製品自体から発生するリスクを除去することを求める. 表4では, 第1列にリスク低減レベル①～⑤までが表されており, それらに対する具体的な対策内容が第2列に示されている。

第3列は, それぞれのリスク低減レベルに対して, R-Map上の適用可能なリスク領域を示している. すなわち, A領域のリスクに対しては①が実施されるべきである(場合によっては, ②でもよいとされるが充分に説明が可能な根拠が必要であろう)。

①は, リスク低減に対しては最も効果的な対応であるから, もちろんB領域, C領域も選択が可能である. 右端の3列は, リスク低減の結果としてR-Map上を縦横(下, 左)に移動できる合計のセル数を表している. 普通は「通常」を選択し, 根拠が説明できる場合は「最大」や「最小」の移動量が適用できる。

本質安全設計とは、ハザードの除去および/または、リスクを低減させるために行う製品またはシステムの設計変更または操作特性を変更するなどの方策[12, 13], であるから（開発や実験、観測）作業に対しても装置・システムが人体に危害を加えるような部分（部品構成、薬剤）や、作業内容の除去として対応する。

②も本質安全設計であるが、これはリスクの低減を図るものである。具体的には、a発生頻度の低減と、b危害の程度の低減、のそれぞれ（いずれか一方）を実施する。対策後に移動できるR-Map上のセル数は当然、①よりは低下する。

③は、どうしても製品やシステム、作業内容からリスクを除去したり低減することが適わない場合、（危害をおよぼす恐れのあるハザードに対する）安全装置や保護装置の付加による対策である。この対策（低減措置）に対しては、A領域のリスクは選択できない。

①～③までの対策が、作業環境要素に対する改善である。したがって、作業環境管理の一環と捉えられる。この措置を実施したときは、これによって作業工程（作業内容）なども適宜に変更される（作業管理も副次的に伴うことになる）。

④と⑤は製品やシステムの本質に対する設計変更がなく、ほとんど人間（作業員）の対応に依存した措置

である。これらの対策では主に、作業員に対して、危険状態に接した場合の対応方法や注意事項を伝達し、または教育・訓練を実施したり、作業手順書や作業マニュアルに記載し徹底することになる。よって、作業管理のみの対応である。

ここで、作業環境の改善なしに作業員に対する作業管理ばかりが先行するような作業場では（作業マニュアルに、～しなければならない／～してはならない、～に注意して作業すること、等の記述ばかりであったら）、作業員に緊張や負担を強いて過度の精神的なストレスを与えることとなり、それ自体がハザードを増大させることに注意すべきである。

なお、⑥は表4には記載されていないが、何も対策しないということである。したがって、R-Map上ではC領域だけが選択可能であるが、セルの移動はない。

15 Risk Reduction

個々の見出された危険状況に対して、リスク低減策を計画する。ここでもKAGRAのJob Hazard Analysisの一連の例（表2、表3、図7）を挙げる。

表5は表3のリスクアナリシス表を右側に拡張し、そこ

記号	リスクファインディング			分析		評価	対策		対策後の評価			
	作業内容・形態	ハザード	見出された危険状況	危害の程度 0~Ⅳ	発生頻度 0~5	リスクの大きさ A~C	(必要な)対策レベル	対策内容	危害の程度	発生頻度	リスクの大きさ	(必要な)対策レベル
P1	A	10	トラックからフォークで荷下ろし時バランスを崩し落下、通行中の別の作業者が下敷き、重傷を負う。	ⅢⅠ	2	B2	②または③+④以上	トラックと倉庫等の搬入口周辺、通行者の歩道と入口を分離する。その境界線にバリケードを設置。	ⅢⅠ	0	C	⑥
P2	C	12	多数の部品／装置を床に置いたり、持ち上げたりを繰り返したため作業者が腰を痛める。	ⅡⅠ	2	B1	③または④以上	重量物はパレットに置きフォーク、ビシヤモンで移動。軽量物は保管棚を設置し腰より上段に置く。	I	2	C	⑥
P3	D	16	真空ダクトの側で作業中、ダクトを潜る際に反対側に隠れた装置の角に頭をぶつけて擦傷を負う。	I	2	C	⑥	坑内作業中はヘルメット着用。視界から遮られた所にある物を移動。物/装置の角に緩衝材を貼り付ける。	0	1	C	⑥
P4	D	17	開梱作業で固定バンド/ダンボールの縁で、またはカッターの扱いを誤り指に切り傷を負う。	I	3	B1	③または④以上	開梱作業では軍手やグローブ着用。	0	3	C	⑥
P5	E	1	部品をアルコール洗浄していて気分が悪くなる。	ⅡⅠ	1	C	⑥	局所排気装置内で洗浄。または、ノンアル・ウェットワイパー使用。	0	1	C	⑥
A6	F	18	坑内で作業中に火災警報が発報（誤報）、慌てて避難したため残留者がいたか/いないか不明だ。	ⅣⅠ	3	A1	①+③または②+③+④以上	作業場所毎に集合場所と避難リーダーを指定、本部と通信し連携を取りつつ団体行動で非難する。	ⅣⅠ	1	B2	②または③+④以上
A7	G	3	クリーンブース内でクリーンスーツ/グローブ/マスクにヘルメット着用が義務。坑内は室温25℃、湿度90%の環境下で作業者は著しく消耗した。	0	5	C	⑥	坑内に空調設備を導入。室温を20℃程度に保つ。除湿機もフル稼働し湿度を下げる。	0	2	C	⑥
A8	G	10	クリーンブース2階の一部の手摺がない（クレーン作業のため）部分から作業者が転落し重傷。	ⅢⅠⅠ	2	B2	②または③+④以上	取り外し可能な手摺を設置。または、クリーンブース仕様のペルブロックを人数分、設置する。	I	1	C	⑥
R9	H	6	レーザー作業中に迷光が目に入り網膜損傷。	ⅢⅠⅠ	1	B1	③または④以上	ハザード境界に防護壁設置。他の作業者も保護メガネ着用して進入。	ⅡⅠ	1	C	⑥
O10	I	20	観測中は坑内に人を近づけずに遠隔操作。コアメンバーのみで遠隔監視メンバーが疲弊した。	0	3	C	⑥	広くコミュニティ全体からシフトメンバーを募って負担を分担する。	0	1	C	⑥

表5：Risk Analysis Table after the measures.

に分析 (risk estimation) と評価 (risk evaluation)、対策 (risk reduction measure, protective measure)、および、対策後の評価の項目が追加され、記入されている。

リスク低減措置 (対策) が目指すゴールはリスクが受け入れ可能なレベルであるC領域である。ここを目指して、左側に向かって (横に) 危害の程度を低減するか、下側に向かって (縦に) 発生頻度の低減を図る。

この際、図6のA3の3はB領域まで3セル離れているという意味であり、B2の2はC領域まで2セルの (縦・横) の移動が必要なことに留意するべきである [21]。

対策内容は表4を参考に①本質安全設計 (製品/作業環境からリスクを除去)、②本質安全設計 (発生頻度の低減、危害・障害の程度の低減)、そして③安全装置、防護装置の設置などの対策を選択する。

④警報、⑤取扱注意などの対策は単独で選ばれるべきでなく、①~③の対策を実施した上で併用されることが望ましい。なぜなら、対策・措置に対する低減効果 (セル数) を見れば通常は④では僅かに1セルの移動に止まるから、対策 (リスク低減措置) としての効果が得られない。

対策後のR-Mapが図8である。図8を見ると未だにB領域 (A領域もあり得る) のリスクが残っている。これらを残留リスク (residual risk) という。

そこで、図5に示すように再度のリスク低減策を計画し、実施する反復プロセスのループへ移行し、すべてのリスクがC領域へ移動することを目指す。

ここで、表5に示すリスクの分析と対策結果について若干の補足を記す。

P3およびA7にあるように作業中はヘルメットを着用することで頭部の保護を図るのであるが、実際の作

業が進行する中で坑内では常に着用するべきか、作業中に限ることはできないのかの議論が繰り返し巻き起こりプロジェクトにおける課題の一つとなっている。安全性と共に快適性も安全衛生に大きく関わる要素であるから、一概には決めつけられないであろう。

A6のように火災報知器が誤報を発報することは、まれに起こる。一度、その状況となった際に、危険状況に記したような事態が生じ、後から、発報場所の現場確認や残留者探しに多くの時間と労力が費やされ問題となった。この事態の反省から、作業エリア毎に安全責任者 (責任を負うというより、避難の際のリーダーシップを担う担当者) が毎日の朝礼で指名され、任務を全うするようになった。また、作業エリア毎に集合場所が指定されており、本部 (施設長の指揮のもと、坑外の事務室に設置される) と連絡を取り合っており、状況の確認や作業者の点呼などが行われて、組織的に避難行動を取ることが徹底されている。なお、坑内と坑外の連絡手段はPHSが用いられている。

A7の環境要素は、作業が開始されてから暫くして生じた。開始当初は、気温20℃、湿度90%程度であったが、坑内の設備が徐々に充実 (防塵のための隔壁の設置や、レーザー機器、制御機器などがより多く稼働) するに至って徐々に中央エリア内の室温が上昇したのである。そこで、空調設備が導入されて気温20℃程度が保たれるようになった。このように、その他にも、作業環境は日進月歩で改善され続けている。

O10の状況はEngineering Runの際や、今日のコロナ禍 (COVID-19) の蔓延により、部外者はもとより、われわれのようなコアメンバーでさえ、出張が制限されている状況下でやむを得ず生じている可能性がある。実際の観測が開始される時期には、広くコミュニティから分担者を募ることは当然であるが、一方で、坑道や電源設備、ネットワークなどインフラの維持管理などはホスト機関の職員に負担が集中している懸念はある。

ここまでの作業で作成した、ハザードマトリックス (表2)、リスクアナリシス表 (表3、表5)、対策前 (図7) と後 (図8) のR-Map (あるいは作成されればFT図 (図4)) などをリスクアセスメントやリスクマネジメントに関する文書として保存しておく。ドキュメンテーションは、最終的にリスクマネジメントが完了したときにまとめて行うのではなく、ドキュメントが作成された都度に内容の妥当性を検討し、考察を加えて保存しておくべきである [14]。いったん、リスクマネジメントが完了した後も、リスクアセスメントは繰り返し実施し、リスクやハザードがないか、漏れや見落としがなかったか検討する必要がある。新たなリスクが出現することもあるだろうし、改善されたリスク

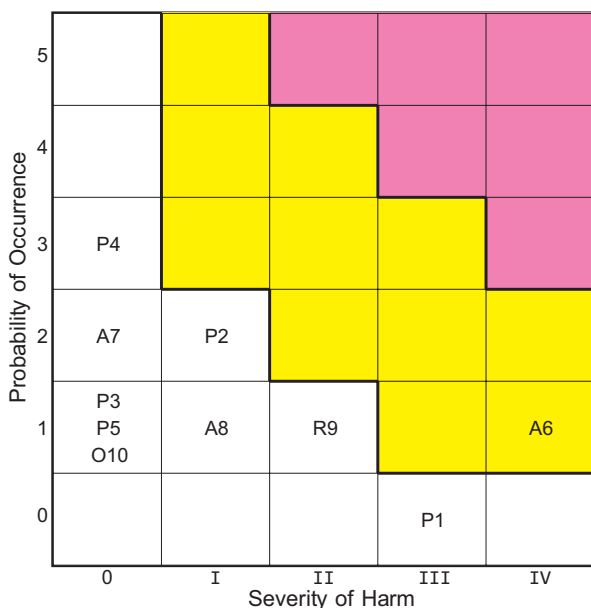


図8：R-Map after the measures.

やハザードも少しの時間の経過の後には許容できないリスクとみなされることもある。安全に対する要求レベルは変化することを認識しておきたい。

16 Human Error

ヒューマンエラーとは、「要求されたパフォーマンスからの逸脱[26]」と定義される。要求されたパフォーマンスとは、要するに「すべきこと」である。これは、命令、規則、社会規範、常識などで外的に定まっていることもあるし、また自分自身が「このようにやろう」と意図していることもある。それに対して、その人が実際に行ったことが結果的にミスマッチであることが、ヒューマンエラーとなる[2]。

ヒューマンエラーはなぜ起こるのかといえ、ば、「すべきこと」自体に無理がある、「すべきこと」は妥当でも「何か」が阻害している。「何か」は、環境の状態が良好でない（例：暗い、足場が悪い、コミュニケーションが悪いなど）と、本人の状態が悪い（例：体調不良、焦り、疲労、注意散漫など）が考えられる[9]。

逸脱状態（エラーの種類）は、必要なタスクやタスクのステップを行わなかった（ommission error：やり忘れ、やり飛ばし）、タスクを行っているが違うことをした（commision error：やり間違い）、本来やるべきでないタスクや行為をタスクに挿入している（extraneous act）、タスクの順序が違う（sequential error）、やることはやっているが、タイミングが早すぎ、または遅すぎ（time error）のように分類できる[2]。

エラーが生じてても、それをブロックできれば事故は防げる。ブロックは人によるもの（スポーツにおけるバックアッププレイ、ダブルチェック、周囲の人による注意喚起など）や、技術・システムによるもの（自動車の衝突防止装置、列車の自動停止装置、ヘルメットやエアバックのような保護具など）がある。

避けるべきは、ヒューマンエラーによる事故であるから、「エラーをしない対策」と「エラーを事故に結びつけない対策」の双方を講じる必要がある[9]。

ヒューマンエラーを説明するモデルはいくつか提唱されている。4M(5M)モデルは、

①man（人的要因）：本人の状態に関わること、

〔生理的状态〕疲労、体調、薬物の影響など。

〔心理的状态〕飽き、焦り、注意散漫など。

〔身体的状态〕身長、手先の器用さなど。

②machine（機械要因）：道具や設備機器の使いにくさ、不具合、不足など。

③media（環境要因）：作業マニュアル等の情報環境、照度や騒音、作業場所の広さ等の物理的環境、職場の

人間関係やコミュニケーション等の人間環境。

④management（管理要因）：man, machine, mediaに対する管理要因、教育訓練、監督配置、休憩配分などの使役に関わる状態。（さらに、すべきこと⑤mission（ミッション）それ自体が無意味であったり無理があることもあり、これも加える場合もある。）

ヒューマンエラーが起きた場合には、これらのいずれか一つ以上に問題があったと考えられる[9]。

SHELモデル（図9参照）は、航空機の運行乗務員のヒューマンエラーを理解するために提唱された。

L(liveware)：図の中央のLは当事者（パイロット）、下段のLは支援要員（副操縦士、管制官など）を示す。

S(software)：手順やマニュアルなどのソフトウェア。

E(environment)：明るさ、騒音などの環境。

H(hardware)：道具や設備などのハードウェア。

各要素は固定されておらず常に変動していると、その結果、中心のLと他の要素に隙間が空くとエラーが生じると説明される。SHELモデルと4Mモデルは本質的には同じものと理解され、4MのmediaがSHELの情報環境(S)、物理的環境(E)、人間環境(L)に相当している[9]。

SHELモデルに4Mのmanagementに相当するmを付加したモデルがmSHELである[9]。

医療用に提案されたP-mSHELは、患者(P: patient)の役割にも注目する[9]。

これらのモデルのシンボルが図9に示されているが、それぞれの特徴が象徴的に表されている。

ヒューマンエラーを回避する方法として、作業者が十分に注意することと、注意しなくても正しく使える機器を設計することが考えられる。人間工学(human engineering/human factors)では、後者の立場に立ち、人間の限界や特性に基づくシステム設計を目指す[9]。

現場における初歩的なステップとして、作業場での「～にくい」「～やすい」に注目してみる。人間には、視力、聴力、注意力、判断力、記憶力、巧緻動作力、体力、持久力など発揮できる能力に限界や特性がある。そこにヒューマンエラーを誘発するような原因(ハザード)が潜んでいると考える(表6参照)。

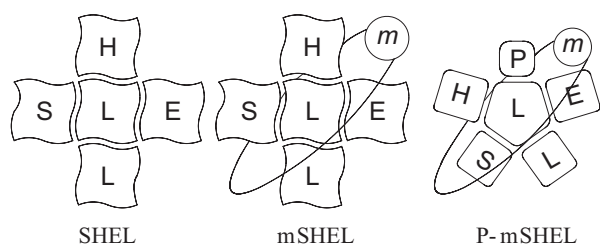


図9：Human Error Models [2, 9].

	「～にくい」, 「～やすい」の例	人間工学上の問題例
感覚	見にくい	部屋が薄暗い, 表示文字が小さい, ランプの点灯が薄暗い.
	聞きにくい	部屋がうるさい, 吹鳴音が小さい, 吹鳴音が高音すぎる.
	見つけにくい	背景に対してコントラストがなく目立たない, 目立つ色ではない.
	見間違いやすい	外観がそっくり.
判断	わかりにくい	説明が難しい, 迷路のような建物である.
	思い違いやすい	使用パターンが複雑, 例外が多い.
記憶	覚えにくい	覚えることが多い, 名称が似通っている.
	忘れやすい	やることが多い.
動作	押しにくい	ボタンが小さい, ボタンが重い.
	持ちにくい	取手が滑る, 手に食い込む, 引きずってしまう.
	歩きのにくい	通路が滑る, 通路が狭い, 履物が滑る.
	頭をぶつけやすい	頭上が低い, 頭上の突起物が目立たない.
	無理な姿勢になりやすい	腰を曲げないといけない, 背を伸ばさないと届かない, 重量物を持ち上げないといけない.
時間	タイミングが取りにくい	二人作業で“息が合わない”, スイッチを押しても反応(フィードバック)がない, あるいは操作後に機械が動き出すまでの時間が長いと, 不快感から再操作をしてしまう.

表6：Troubles that causes Error [9].

そこで, ～にくい, ～しやすい, あるいは, ちょっと怖い, 危ないといった感覚や気づきを大切に心に留めておき, 徐々に思考を深めてゆく. そしてこれをリスクアセスメントや作業環境の改善に結びつけることができれば, それが安全衛生管理の実践となる.

17 Summary

安全衛生管理を遂行する上で, 本質的な作業であるリスクアセスメントやリスク低減措置などによるリスクマネジメントの基本的な考え方を説明した.

リスク低減やリスク防護の措置によるリスクコントロールには優先順位があって作業環境管理, 作業管理, 健康管理の順に実施する必要がある. これを労働衛生の3管理という.

このような安全衛生管理の基本的な理論の源泉は人間工学に求められる. 人間工学では人間優先で機器やシステム, 作業環境, 作業方法などを設計するという考え方に基礎を置いている.

そこで, これを実践するため, リスクアセスメントの入り口である, 人に危害をおよぼす恐れのあるリス

クやハザードを見つけ出す手続きにも触れた. 天文・宇宙観測分野では深宇宙から届く微弱な信号を観測したいという要請に従って, それぞれの信号に最適化された観測サイトが選定される. これが人間にとって過酷な作業環境要素となる場合がある.

このような特殊な作業環境要素に対する個別的な言及は控えたが, それぞれの作業場において, その当事者らによって適切に安全衛生管理がなされているものと信ずる.

観測にとっての適地が人間にとって過酷な場所であるという, 一見すると矛盾をはらんでいるような事態に対して, 二者択一の選択をするようなことは避けたい. よくよく検討すれば, 両者にとってWin-Winの解決策が見つかるはずである. 人間工学に基づく安全衛生管理が問題解決に貢献することを期待する.

本報告では触れることができなかったが, 安全衛生管理をシステムティックに実践する方法として, 労働安全衛生マネジメントシステム[27, 28](Occupational Safety and Health Management System)がある. 組織的な実践を検討する際に, これを参考とされることを推奨する.

安全衛生管理を実践し続けることで, 安全で健康的な作業環境が実現し, なおかつ, 高品質で生産性も高い作業場が形成されるであろう. そのような職場が醸成されるためには, まず, コミュニケーションが活発で風通しのよいホワイトな風土が根付いていることが必要である.

謝辞

お名前を存じ上げない査読者様のご指摘に感謝申し上げます. 本報告で言及すべき点を示唆して頂いた.

都丸隆行教授には, 本報告の原稿をお読み頂き貴重なご意見を賜った. ここに記して厚く謝意を表す.

参考文献

- [1] <https://www.ergonomics.jp>, (accessed 2021-10-28).
- [2] 小松原明哲, 辛島光彦: 2008, マネジメント人間工学, pp. 1-186, 朝倉書店.
- [3] <https://iea.cc>, (accessed 2021-10-28).
- [4] International Ergonomics Association: 2006, IEA 50th ANNIVERSARY. <https://iea.cc/wp-content/uploads/2014/10/50th-Anniversary-Book.pdf>, (accessed 2021-10-28).
- [5] 松本亦太郎: 1920, 人間工学, 心理研究, **17**(100), 329-338.

- [6] 田中寛一: 1921, 能率研究 人間工学, 右文館.
- [7] Koshi, S.: 1996, A Basic Framework of Working Environment Control for Occupational Health in Japan, *Industrial Health*, **34**, 149–165.
- [8] 厚生労働省: 職場の安心サイト> 安全衛生キーワード> 労働衛生の3管理
https://anzeninfo.mhlw.go.jp/yougo/yougo28_1.html, (accessed 2021-10-28).
- [9] 小松原明哲: 2016, 安全人間工学の理論と技術, pp. 1–38, 丸善出版.
- [10] 中央労働災害防止協会: 2008, 新/衛生管理: 第1種用上, pp. 3–364, 中央労働災害防止協会.
- [11] 厚生労働省: 「在宅ワークの適正な実施のためのガイドライン」パンフレット
<https://www.mhlw.go.jp/bunya/koyoukintou/zaitaku/dl/100728-1.pdf>, (accessed 2021-10-28).
- [12] ISO/IEC: 2014, *Safety aspects — Guidelines for their inclusion in standards*, **GUIDE 51**.
- [13] 日本工業規格: 2015, 安全側面—規格への導入指針, JIS Z8051.
- [14] 日科技連R-Map研究会: 2004, R-Map 実践ガイドンス, pp. 1–203, 日科技連出版.
- [15] 益田昭彦, 青木茂弘, 幸田武久, 高橋正弘, 中村雅文, 和田 浩: 2013, 新FTA 技法, pp. 1–116, 日科技連出版.
- [16] 中欧労働災害防止協会: 2007, 新版 有機溶剤作業主任者テキスト, pp. 13–115.
- [17] 宇宙航空研究開発機構有人宇宙技術センター: 2013, 国際宇宙ステーション日本実験モジュール「きぼう」で獲得した有人宇宙技術, 宇宙航空研究開発機構特別資料, **JAXA-SP-12-015**, 33–38.
- [18] 厚生労働省: 職場の安心サイト> 安全衛生キーワード> リスクアセスメント
https://anzeninfo.mhlw.go.jp/yougo/yougo01_1.html, (accessed 2021-10-28).
- [19] U.S. Department of Labor Occupational Safety and Health Administration: 2002, **OSHA 3071: Job Hazard Analysis**.
<https://www.osha.gov/Publications/OSHA3071.pdf>, (accessed 2021-10-28).
- [20] 厚生労働省> …> 労働安全衛生法の改正について (ラベル・リスクアセスメント関係)> パンフレット等
<https://www.mhlw.go.jp/file/06-Seisakujouhou-11300000-Roudoukijunkyokuanzeneiseibu/0000099625.pdf>, (accessed 2021-10-28).
- [21] 経済産業省: 2011, リスクアセスメント・ハンドブック実務編
https://www.meti.go.jp/product_safety/recall/risk_assessment_practice.pdf, (accessed 2021-10-28).
- [22] <https://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp>, (accessed 2021-10-28).
- [23] Program Advisory Board (S. Witcomb, M. Iye, D. McClelland, B. Mours, T. Nakamura, G. Sanders, B. Schutz, A. Yamamoto): 2012, *Report of the KAGRA Program Advisory Board meeting, August 17–18, 2012*, **LIGO-L1200255-v1**.
- [24] 国立天文台: 各種委員会> 安全衛生委員会> 事故事例
http://kanribu.mtk.nao.ac.jp/committee/index.asp?ID=anzen_jikojirei.html, (accessed 2021-10-28).
 ※国立天文台内部ネットワークからのみアクセス可
- [25] 国立天文台: 各種委員会> 安全衛生委員会> ヒヤリハット事例
http://kanribu.mtk.nao.ac.jp/committee/index.asp?ID=anzen_hiyarihatto.html, (accessed 2021-10-28).
 ※国立天文台内部ネットワークからのみアクセス可
- [26] Meister, D.: 1971, *Human Factors: Theory and Practice*, pp. 21–56, Wiley-Interscience.
- [27] 厚生労働省: 職場の安心サイト> 安全衛生キーワード> 労働安全衛生マネジメントシステム
https://anzeninfo.mhlw.go.jp/yougo/yougo02_1.html, (accessed 2021-10-28).
- [28] U.S. Department of Labor Occupational Safety and Health Administration: 2016, **OSHA 3885: Recommended Practices for Safety and Health Programes**.
<https://www.osha.gov/Publications/OSHA3885.pdf>, (accessed 2021-10-28).