

機械設備の安全は、どこへ向かうのか ～機械安全の過去、現在、未来～

明治大学名誉教授
向 殿 政 男

Where is the Safety of Machinery and Equipment Going?
～ Past, Present and Future in Safety of Machinery ～

by Masao Mukaidono

1. まえがき

機械設備の安全確保の全体像について、例えば、その設計、製造、運用、保守・点検、修理、廃棄等の各段階を包括して安全の在り方を概観し、これまでの歴史を振り返り、現状を把握することについて、未来の予測を伴って述べることは、極めて有意義なことであろう。しかし、この小さな総説ではそのことはほとんど不可能であろうし、まして筆者の力の到底及ぶところではない。ここでは、「機械安全」という機械類の安全の分野に限って、その技術的な側面から、過去、現在、そして未来を考えてみることにする。

ボイラーは機械ではないだろうという反論はあり得るかもしれないが、明らかに機械設備といえる。これまでのボイラーの安全確保の在り方は、現在では常識となっている各分野の安全確保の体制（安全基準、安全設計、安全規制、安全審査・認証、安全管理体制、安全における保険の役割、等々）を築き上げてきた先達である。そして、機械安全にも極めて大きな影響を及ぼしてきた。従って、ここでは、機械安全に重きをおいて、労働安全衛生の観点も含めながら解説することにする¹⁾。

注) この解説は、2020年11月12日の日本ボイラー協会主催の全国工作責任者大会での講演¹⁾の中からまとめたものである。労働安全衛生の世界的動向の具体的な内容については省いている。

2. ボイラーは、機械設備の安全の先駆者

機械設備の安全にとってボイラーは先達者であると述べたが、この観点から、ボイラーの安全の歴史を簡単に振り返ってみよう。現在、電気エネルギーに基づく第二次産業革命の次の第三次情報革命に引き継ぎ、IoTやAIなどのICT（情報通信技術）による第四次産業革命に突入したと喧伝されている。第四次であるか否かは後の世の人びとが決めるべき課題であろうが、動力機械に起因する第一次産業革命は、明らかに1700年代のジェームス・ワットによる蒸気機関の製作から始まっている。人力を超えた蒸気という科学の力を得た人類は、これまでにない莫大なエネルギーを用いて機械設備を動かし始めた。英国から始まったこの産業革命により、世界的に産業が飛躍的に発展した。ジェームス・ワットはその原理を用いて、現在ではあらゆるところで利用されているボイラーを開発した。ところが、1800年代に入るとボイラーの爆発事故が頻発することになる。ボイラーの圧力が増すに従って、破裂事故により多くの死者を出すようになった。これが機械安全における技術的な対策のはじめと考えると良いのではないだろうか。

ボイラーの破裂事故を防ぐには、圧力壁の材質、耐圧力の研究という材料・物理的な安全対策（本質安全対策）と、ある圧力以上になると蒸気を逃がす安全弁の設置という機械的な安全装置の技術

開発が行われた。また、技術的な取組と同時に、ボイラーの検定基準の策定、その監視、認証という組織的な取組が始まった。このように、ボイラーを安全な設備にすることから機械設備の安全の確保の歴史が始まる。モノの本によると、船舶検査法に基づいてボイラーの設計、および運転圧力に関する技術基準が制定されたのは1872年であり、同じ年に、ドイツでボイラーの定期的検査を行うための初の蒸気ボイラ検査協会が設立されたと記されている。

現在では常識となっている安全確保のための基本的な制度と体制は、ボイラーによって先鞭をつけられたとあってよい。すなわち、安全技術基準を定め、安全の資格者制度を定め、定期的に検査をし、常に監視をする、そして登録性能検査機関を定め、保険制度を整備する等々である。このような歴史に沿って、我が国のボイラーの安全を担う日本ボイラ協会は、安全確保のために、技術、組織、人間を包括して、総合的な取組を整備してきており、現在に至るまで、改善し、継続・維持していることは敬意に値する。ボイラーは、他産業の安全確保の見本になる使命を担っている。一方で、出来上がっている体制や技術に安住し過ぎると、新しい技術や規格の導入が遅れ、結果的に時代の流れに取り残され、ひいては現場の作業員の労働災害を劇的に減らす機会を見逃す恐れがあり得る。

次なる方向として、時代に対応し、世界の潮流を先取りして、先端的にこれまでの安全確保の体制を改良していくことを期待したい。そのために、本稿で紹介する新しい安全の技術が参考になれば幸いである。

3. 機械安全の国際規格と包括安全基準

労働現場での安全の確保のためには、機械設備の安全化は至上命令である。なぜならば、労働の現場での災害の多くが、例えば、巻き込まれ、引き込まれ等の機械設備に起因する事故だからである。危ない機械を人間の注意に任せて使うことでは、いくら人間に注意喚起しても、いくら教育を施しても、なかなか事故は減らないことは、長い間の経験で実感されていた。それは、「人間は、

間違えるものである」からである。従って、ここで得た結論は、「人間の注意の前に機械設備側をまず安全化する」ということであった。

ここで、現在、機械設備の安全の基本となっている機械安全の国際安全規格の発足までの足取りを簡単に振り返ってみよう。機械設備に基づく長い災害の歴史を通して、いかに機械設備側を安全化するかという技術的な知見を経験的に蓄積し、それを機械類の設計段階での規則類として蓄積し続けてきたのはイギリスであった。そこでの基本的な考え方は、人間は間違えるものであるということとともに、「機械設備は壊れるものである」という事実にも基づいている。そこで、機械設備の設計段階において、壊れた場合には安全側になるように、また、できるだけ壊れづらく信頼性高く設計するように、ということであった。それが英国の安全規格としてまとめられていった。そこには、長い間に事故の経験によって蓄積された、機械の安全設計に関する知識が蓄積されており、これを欧州全体の規格とすべきであるという声が上がった。CEN（欧州標準化機構）において技術委員会CEN/TC114（機械類の安全性）が設置されたのは1985年であり、1991年に欧州規格EN292（機械類の安全性）として制定された。同年の1991年に、世界標準としても制定を検討すべきであるという声のもとに、ISO（国際標準機構）に技術委員会ISO/TC119（機械類の安全性）が設置された。いわゆるISOとCENとの間のウーン協定により、即座に翌年の1992年にISOで技術報告ISO/TR12100（機械類の安全性）が発行され、国際安全規格への制定の議論が加速された。筆者はこの頃からISO/TC199の国内審議団体の委員として国際会議に参加し始めたが、各国の利害が絡み、なかなか国際規格としてまとまらなかったことを覚えている。遂に、2003年にISO 12100（機械類の安全性—設計の一般原則）²⁾として国際安全規格としてまとめられ、発行されることになった。これは、我が国ではJIS B 9700として制定されている。なお、その後この安全規格は、リスクアセスメントの規格と一緒にあって、ISO 12100（機械類の安全性—設計の一般原則、リスクアセスメント及びリスク低減）となっている。

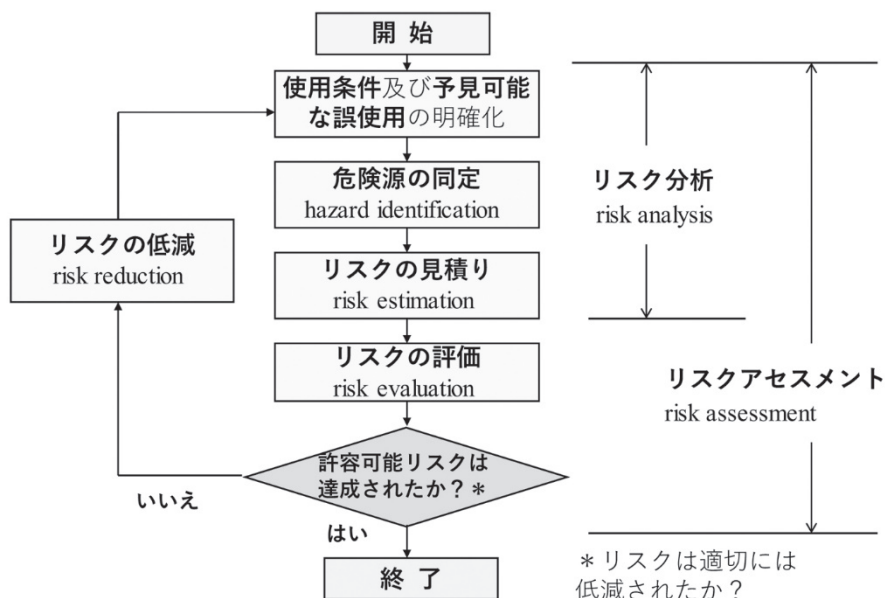


図1 リスクアセスメントの手順

これらの詳しい内容については、参考文献^{2)～5)}を参照されたい。

我が国では、厚生労働省でいち早くこの機械安全に関する国際安全規格の世界的な流れをつかみ、技術報告 (ISO/TR12100) の段階から検討に入り、職場での機械類の安全基準とすべく、2001年6月1日に「機械の包括的な安全基準に関する指針」の発行が検討された。我が国は、労働安全衛生法の発行についても英国より2年早く、労働安全衛生マネジメントシステムの指針についてもILO (国際労働機関) より早く発行した歴史を持っており、機械類の安全規格の労働現場への導入も早めに検討された。しかし、残念ながらこの時の指針は通達に終わり、有効性を発揮することはできなかった。しかし、その後も我が国では機械設備の巻き込まれや引き込まれの災害が絶えず、ISO12100の設計基準を満たしていれば、80%以上の死亡災害が防げたとの調査報告があり、2006年に労働安全衛生法の一部が改正されて「危険性又は有害性等の調査等 (いわゆるリスクアセスメント)」が導入され、再度、改定された「機械の包括的な安全基準に関する指針」⁶⁾が発行されて、現在に至っている。

4. 機械安全における基本原理

「機械の包括的な安全基準に関する指針」および「ISO12100機械類の安全性—設計の一般原則、リスクアセスメント及びリスク低減」の具体的な内容については原資料を参照していただくこととして、そこに横たわる多くの基本原理の中から、ここでは、「リスクアセスメント」、「スリーステップメソッド」及び「隔離の原則、停止の原則」の三つを取り上げてみよう。

「リスクアセスメント」については、すでに多くの人はご存知のことであるが、その基本的考え方は、ISO/IECガイド51にある図1のリスクアセスメントの手順に示されている。

簡単に説明しよう。まず、(1) 機械設備の使用条件を明確にしなければならない。ここでは、普通の人がやりそうな誤使用、いわゆる「合理的に予見可能な誤使用」は、もはや誤使用といっけなくて、最初からそれを明確にしておいて、予防の対象とせよとしている。そして、(2) すべての危険源 (ハザード) を見出し、(3) それぞれのハザードごとにそのリスクの大きさ、すなわち危害の発生確率と危害のひどさの組み合わせからリスクの大きさを見積り、(4) そのリスクがどのレベルの大きさかを評価する。そして、(5) 許容

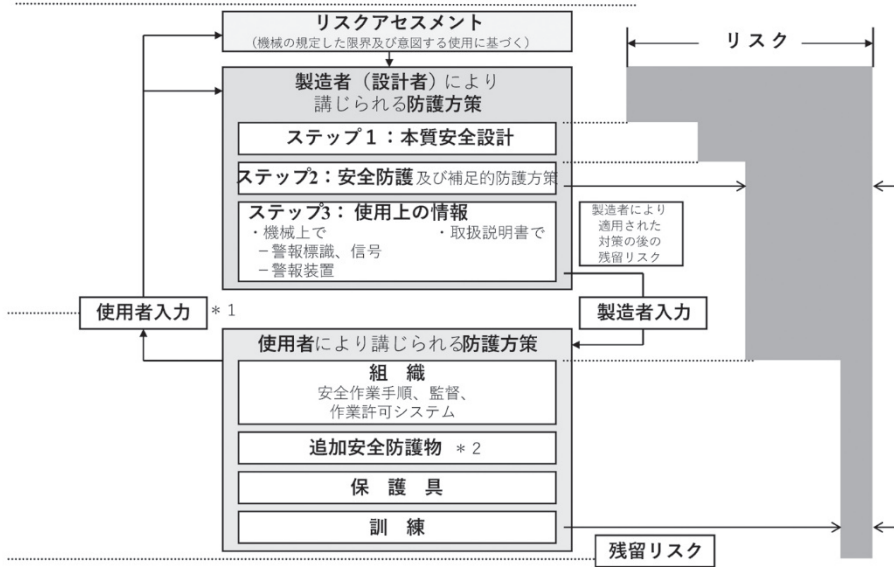


図2 スリーステップメソッド

可能なリスクになったか、すなわち適切にリスクが低減されているかを判定する。(6) 許容可能なリスクが達成されたならば、安全として終了をし、そうでなければ、(7) 大きなリスクを持つ危険源から、そのリスクが許容可能になるまでリスクの低減方策を施す。これをすべての危険源に対して行い、残っている許容可能なリスクを残留リスクとしてその情報を開示する。そして、以上のステップをリスクアセスメントの結果として文書化しておくという考え方である。リスクアセスメントは、事故の未然防止のための科学的、体系的、論理的、網羅的な手法であるといえる。

次の基本原理は「スリーステップメソッド」である。リスクアセスメントの手順の中でのリスク低減策には、施すべき順番がある。最初にやることは、(1) 本質的安全設計によるリスク低減方策であり、それでも残ったリスクに対しては、(2) 安全防護方策を施すことである。防護柵やいわゆる安全装置はここに入る。それでも残ってしまったリスクは、(3) 使用上の情報として、警告表示をしたり作業者にマニュアルを渡したりして、安全確保を使用者に委ねる、という三段階である。この順番でリスク低減方策を施さねばならないということである。なお、ここで、本質的安全設計によるリスク低減とは、付加的な装置などを用い

ないで、本体そのものを安全に設計せよということである。すなわち、(1) はじめから危険源が無いように設計せよ（危険源の削除）、(2) 危険源のエネルギー等を下げて事故が起きてても危害の酷さを小さくするように設計せよ（危害のひどさの低減）、(3) 危険源に人間が近づかなくて済むように設計せよ（危害の頻度の低減）、(4) 修理等の非定常作業をしなくて済むように信頼度高く設計せよ（危害の頻度の低減）などをいう。

以上の関係を図示したものが図2である。この図からわかるように、設計者側のリスクアセスメントのステップ3による使用上の情報は使用者に渡され、使用者は、組織を組み、訓練をし、追加安全防護物や保護具を用いて自分の身の安全を守る手順となる。

ここで紹介したリスクアセスメントとスリーステップメソッドは設計段階での考え方であるが、労働安全では、機械設備の設計よりも設置および運用が主である。実は、リスクアセスメントには設計段階、設置段階および運用段階の三つがあり、考え方は同じであるが、具体的な実施内容はそれぞれ異なっていると考えている。ここで、機械設備の設置とは、通常インテグレータと呼ばれる立場の人達が行う業務であるが、我が国では明確な立場は確立されていない場合が多く、通常は製造

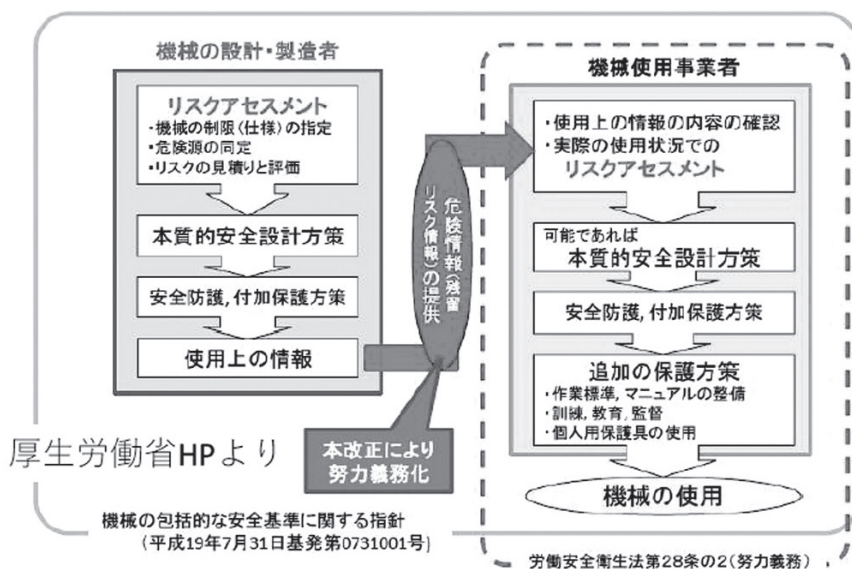


図3 機械の設計・製造者と機械使用事業者におけるリスクアセスメント

者が行うか、またはユーザが行う場合が多い。厚生労働では、このような事情を踏まえて、製造者が行うリスクアセスメントと使用者が行うリスクアセスメントとを分けており、図3はその関係を明らかにしている。すなわち、設計・製造者が設計段階でのリスクアセスメントを行い、そこで得られた3段階目の使用上の情報を危険情報（残留リスク情報）として機械使用事業者に渡すように努力義務化され、使用者側は、それに基づき使用者としてのリスクアセスメントを行って機械の使用をすることになっている。さらにその後、使用者側で得られたヒヤリハットや事故の情報を機械の設計・製造者にフィードバックするように指針が出されている。

機械安全のもう一つの基本原則に、「隔離の原則、停止の原則」がある。労働災害が発生するのは危険源と人間とが接触するからであり、両者を隔離しておけば、すなわち機械が動いているときには、人間が近づけないようにガードなどで隔離しておけば事故は起こらない。これが隔離の原則である。また、人間が機械に近づくとときには、機械を止めておけば、人間は傷つくことはない。これが停止の原則である。これらが確実に守られていれば、確かに事故は起きない。しかし、現実には、人間はついうっかり、または意図的にルール

を無視することがあるし、機械設備は故障する。保守、点検、修理、教示等では、機械と人間とは一緒にならざるを得ない。実際の労働災害は、ほとんどがこのような非正常作業で起きているのはご存じのとおりである。

5. 機械安全設計技術の変遷

ICT（情報通信技術）の進歩で、これまで出来なかったことがいろいろな分野で可能になりつつある。具体的には、IoT（Internet of Things）、AI（人工知能）、ビッグデータ、ロボット、ドローン等々が、コンピュータパワー、インターネット技術の圧倒的な進歩のおかげでいろいろな夢が可能にしつつある。一方で、繋がることによって、また大量データの操作によって、さらには人工知能の悪用等によって、新しいリスクが生まれてきているのも事実である。

機械安全の世界では、人間と機械とが一緒になって作業することで、もっとフレキシブルな生産をしたい、ものづくりにおいて人間を大切にしよう、もっと作業のやりがいを上げたい、その上で稼働率と生産性を高めて、安全性と生産性を両立させたい、という希望は常に存在していた。しかし、隔離の原則、停止の原則に基づいて機械と人間とを時間的、空間的に分離しては、このこ

とは実現できない。ところが、最近のICTの発展でこれらの夢の実現性が見えてきたといえる。それが、ここで紹介する新しい安全の技術のSafety 2.0であり、新しい安全の思想である協調安全である。この両者を紹介する前に、機械安全設計技術の歴史を概観してみよう（図4）。

当初、危ない機械設備を人間の注意だけで守っていた時代があった。これをSafety 0.0と呼ぶことにする。Safety 0.0の時代は、安全機能を発揮していたのは人間自身であり、その基本原則は、「自分の身は自分で守る」であった。安全は、人間の教育・訓練、管理、作業マニュアル等のみに頼っていた時代である。次が現在の機械安全の時代である。技術により機械設備側をまず安全化して、残ったリスクを人間が注意して安全を守る時代である。これがSafety 1.0で、安全機能は、技術と人間で発揮される。具体的な内容は、前述のISO12100や包括安全基準で示したような設計技術で安全を確保するものである。Safety 1.0の中にも、電気信号による制御安全やコンピュータによる機能安全のように、いくつかの進歩のステップがある。その次が、現在向かおうとしているSafety 2.0の時代である。ここでは、IoT、AI、クラウド、ビッグデータ等のICT技術を安全機能の発揮そのものに使うのが特徴である。このSafety 2.0がSafety 1.0と根本的に異なる理由は、デジタルデータを用いたコミュニケーションにより、機械設備側だけでなく、人間や環境・組織等も含んで総体的に一緒になって、協調して安全を確保するところにある。

6. Safety 2.0と協調安全

Safety 2.0とは、ICTの技術を用いて、人、モノ、環境が互いに、高度に情報（データ）を共有し、ステークホルダの全体を巻き込んで、効果的かつ効率的に安全を構築することである。Safety2.0に至って初めて、技術（自然科学）、人間（人文科学）及び環境・組織（社会科学）が一体となっており、お互いの情報を共有して安全を確保することができるようになった。このように、人とモノと環境・組織が協調、調和して安全を構築する概念を協調安全（コラボレーション・セーフティ）と



- 危ない機械設備(コスト、機能、性能、納期等重視)
を人間が注意して使う・自分の身は自分で守る時代
⇒Safety 0.0

- 機械設備を安全化する・機械安全技術の時代
⇒Safety 1.0

- 人とモノと環境が協調して構築される安全、
協調安全(コラボレーション・セーフティ)と呼ぶ
⇒ Safety 2.0

図4 機械安全設計の変遷

呼ぶことにする。協調安全という新しい安全の概念を実現する技術的な側面がSafety 2.0であるといえる。

それでは、Safety 2.0で何が新しくできるようになるのであろうか。現在、安全の各分野で挑戦中、開発中であり、全体像が見えるのはこれからであろう。例えば、人間にウェアラブル端末やRFID等をつけて、個人の体調やバイタルデータ、および資格、能力、経歴等のデータを機械側や環境側に発信する。機械設備側からはシステムの現在の状況を発信し、見える化してわかりやすくするとともに、使用者等の状況に応じた知的な対応をする。例えば、初心者や高齢者にはゆっくり動いてあげたり、必要ならばぶつからないように避けて行動したりする。環境・組織・制度等の側からは、物理的環境状況、規制・制度的データ等の各種の必要なデータをデータベースから検索して使用者に知らせる。これらの情報共有を通して、三者が協調して、総合的、全体的に判断して安全を管理するといったことが可能になると期待される。一つの例を図5に示す。この図は、広範な建築現場で働く作業員に対して、管理者が集中管理を行っているもので、例えば、熱中症対策として各作業員のバイタルデータに基づき、クラウドを通して作業員に休息指示を出したり、各クレーンの危険区域に作業員が入る場合には、クレーンに停止命令を出したりする等の例を示したものである。人の体調、構造物や部品の状態をIoTによって常に監視することで、安全や不安全に見える化

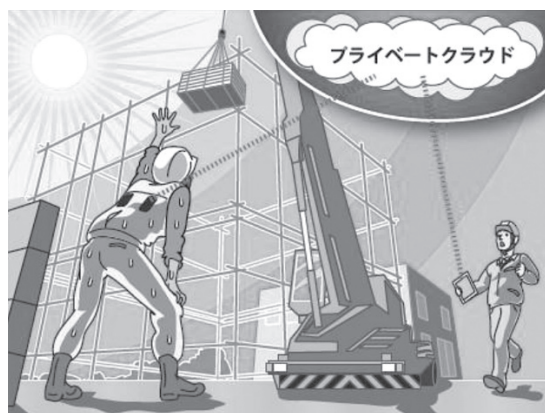


図5 Safety 2.0～常時監視と安全の見える化～

する例である。

7. 人間と機械とを含んだ新しい思想

機械安全の歴史の流れの中から見て、Safety 2.0や協調安全はどのように位置づけられるのであろうか。これまでの機械安全の話は、ほとんどが設計者側が安全を組込む話であり、使用上の情報を提供することで、最後の安全の確保は使用者に任せてしまい、設計者の責任の範囲外であった。

一方、労働安全では、図3からわかるように、使用者側は、使用上の情報と設計者側のリスクアセスメントの結果をもらって、改めて運用段階のリスクアセスメントを行っていた。簡単にいえば、機械設備側の設計安全（機械安全）と、使用する利用者側の運用安全（労働安全）とが分離されていたのである。ところが、ICTによる情報共有によって、機械設備側と使用者側とが一緒になって安全確保が行えるようになってきた。設計者は使用者の情報をもらいながら安全を確保するように最初から機械を設計し、使用者は機械側に情報提供しながら機械と一緒に安全を確保するという、設計者と使用者と（そして環境・組織等とが）一緒になって安全を確保するという新しい枠組みが出現したことになる。従って、今後は、人間と機械設備と環境・組織とを含んだような新しい安全設計思想が必要ないってくる。これが協調安全という新しい安全設計思想である。このことを、安全技術の面からスリーステップメソッドに絡めて図6に示す。コンピュータを用いた機能安全は、

主として付加的に付けられた安全関連部であり、従来のスリーステップメソッドの第2ステップである安全防護方策に属する。Safety2.0はICTを用いてシステムを安全に制御するという見方をすれば、Safety 2.0は決して本質的安全設計ではなく、機能安全と同様に従来のステップ2に対応していると考えられる。しかし、Safety 2.0が機能安全と異なるところは、第3ステップの使用上の情報の提供にもかかわっていることである。それだけでなく、実際の運用段階である作業による安全方策にも直接関連していることである。安全設計の立場から言うと、機械設備の安全設計だけでなく、使用する作業者の安全も含んだ設計をする必要が出てくる。この点から言えば、Safety 2.0は、従来の機械安全の設計を含んだ、さらに広い範囲の安全設計を意味していることになる。安全設計という観点からは、一段と進んだ広範囲の設計となる。この新しい安全設計の思想である協調安全は、まだ始まったばかりである。

8. あとがき

機械安全の視点から機械設備の安全技術の過去、現在、未来を考えてみた。ボイラーの安全に関しても、ここで紹介したSafety 2.0や協調安全の考え方が着実に浸透し始めていると思われる。しかし、ICTの技術を考えもなしに安全に使うことは、かえって新しいリスクを生じさせる可能性がある。ぜひボイラーの業界でも、過去の安全技術の歴史を踏まえて、着実に、しかも積極果敢にSafety 2.0、および協調安全という新しい安全の技術と考え方に挑戦していくことを期待したい。

最後に、機械設備の安全は何のためにあるかという、もちろん最も大事な目標は、労働災害の撲滅にある。蒸気機関は当初、石炭で熱を得ていたために炭鉱産業が盛んになり、過酷な労働と不安全な職場に対する労働安全の課題が大きくなり、労働安全衛生についても、ボイラーから近代的な歴史が始まったといえよう⁷⁾。この労働安全衛生に関しても最近、ビジョン・ゼロ (Vision Zero) 活動^{8) 9)} という世界的な動きが出てきており、我が国は、これについても世界と歩を合わせて進んでいく必要があることを述べておきた

設計者による安全方策（スリーステップメソッド）

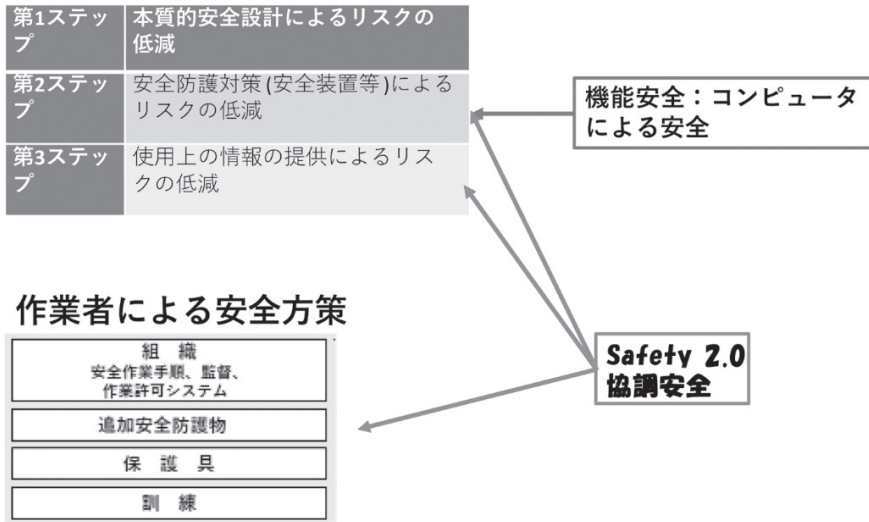


図6 安全方策におけるSafety 2.0と協調安全

い。

〈参考文献〉

- 1) 向殿政男, 機械設備の安全は、どこへ向かうのか～機械安全の過去、現在、未来～ 全国工作責任者大会 特別講演, 日本ボイラ協会, 2020-11-12.
- 2) ISO 12100 (JIS B 9700: 機械類の安全性—設計の一般原則, リスクアセスメント及びリスク低減).
- 3) 向殿政男監修, 宮崎浩一, 向殿政男著, 機械安全, 日本規格協会, 2007-6.
- 4) 向殿政男, 機械システムの安全性—国際安全規格と日本の現状—, 安全工学, Vol.41, No.1, pp.2-9, 安全工学協会, 2002-2.
- 5) 向殿政男, 機械システムの安全性, 一包括安全基準とわが国の課題—, 安全工学, Vol.41, No.2, pp.72～78, 安全工学協会, 2002-4.
- 6) 機械の包括的な安全基準に関する指針 改正案 (mhlw.go.jp).
- 7) 中央労働災害防止協会(編), 安全衛生運動史, 中央労働災害防止協会, 1984.
- 8) 藤田俊弘, 世界における新たな安全の潮流 Vision Zero (ビジョンゼロ), 安全と健康, Vol.20 No.8 ,pp.31-37, 中央労働災害防止協会, 2019-8.
- 9) 向殿政男, 労働安全衛生における世界的動向～Vision Zero活動～, 全国産業安全衛生大会 研究発表集 (札幌), 2020-10.