

# 「人」から見た福島第一原子力発電所事故の教訓

## Safety-II, レジリエンスエンジニアリング

### ～ 社会技術システムの安全確保はどのように行われるべきなのか ～

日本原子力発電 フェロー 吉澤 厚文

\*\*\*\*\*

#### 1. はじめに

現代社会を支えている、エネルギー、輸送、金融、通信などのさまざまな工学システムは、社会技術システム (socio-technical system) と称され、技術に基盤を置く機械的サブシステムと、その運用を担う個人や組織に由来する社会的サブシステムの両者から構成されている。社会技術システムの安全には、ISO/IEC Guide 51<sup>1)</sup>の「安全とは許容不可能なリスクがないこと」という定義が広く用いられ、リスクを同定し、許容可能なレベルまで除去または減少させる努力が行われている。そのため、「事故」はリスクの所在が顕在化された事象と位置付けられ、事故原因の同定と再発防止に関する学習がなされてきた。

2011年に発生した東日本大震災に端を発した東京電力株式会社（以下、東電）福島第一原子力発電所事故（以下、1F事故）を受け、東京電力福島原子力発電所における事故調査・検証委員会（以下、政府事故調）は、その最終報告の中で「リスク認識の転換を求める提言」を行っており、広域にわたり甚大な被害をもたらす事故・災害の場合には、発生確率にかかわらずしかるべき安全対策・防災対策を立てておくべきである、と指摘している<sup>2)</sup>。すでに現在の社会技術システムのすべてのリスクを同定することは困難であるとの指摘も多くなされているように<sup>3)</sup>、リスクが顕在化しないよう「未然防止」に注力しつつも、「残余のリスク」が顕在化し、社会技術システムがダメージを受けた際に必要とされる事故の「拡大防止」および「回復力の向上」の視点に基づく安全の確保も必要である。

「失敗」に着目してきたこれまでの事故からの学習では、事故が発生した後の拡大防止や回復過程に

おける教訓は個人や組織の暗黙知として埋没し、緊急時対応力を高めるための学習としての活用がなされてこなかった。政府事故調も指摘している現場の踏ん張りはどこからきているのか、本稿は「拡大防止」や「回復力の向上」に寄与した行為群に着目し、安全のさらなる向上について述べる。

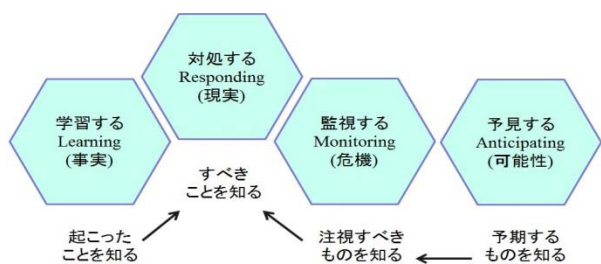
#### 2. Safety-I と Safety-II の安全概念<sup>4)</sup>と レジリエンスエンジニアリング<sup>5)</sup>

事故を未然に防ぐことは重要である。しかし、前章で述べた通り設計で想定していた状況を超える事象が起こり得ることも想定した、安全の確保も求められる。組織安全研究のパイオニアの一人であるHollnagelは、リスク低減型の安全概念を“Safety-I”と定義した上で、新たな安全の概念である、“Safety-II”という異なる定義を提言し、それを具現化する手法としてレジリエンスエンジニアリングを提唱している。Safety-IIの安全の目標は、システムはすべて理解できないことを前提に、成功を増やすことで達成されるもので、安全を「変化する条件下で成功する能力」とであると定義し、リスクのない「状態」としての安全とは異なり、「能力」という能動的な定義となっている点が特徴である。

このように、安全の定義が異なるSafety-IとSafety-IIでは、その概念を表すいくつかの重要な相違点が挙げられている。Safety-Iでは、PRA(Probabilistic Risk Analysis)に代表されるように、システムの挙動は理解できることが基本となっていることから要素に分解可能であり、問題は因果律に従いなんらかの原因の帰結として発生(resultant)するものであると考える。しかし、Safety-IIでは、システムの挙動は完全に理解できず、結果は因果律ではなく、ある時点で

存在したパターンとして発現 (emergence) したものであると考える。また、結果は特定の要素や機能へと遡ることができないもので、成功や失敗といった結果はその要因に違いがあるわけではないと想定されている。したがって、問題がどのように発生するかを理解するためには、上手くいっている行動を理解することが必要であり、その行動の源泉となる人は、システムの柔軟性とレジリエンスの必要資源であると位置づけられる。

また、Safety-II を具現化する手法として提唱されているレジリエンスエンジニアリングとは、システムに「想定された条件や想定外の条件の下で要求された動作を継続できるために、自分自身の機能を、条件変化や外乱の発生前、発生中、あるいは発生後において調整できる本質的な能力：レジリエンス」を獲得するための方法論として位置付けられ、そのために、良好事例への着目と、以下の4つのコア能力(the four cornerstones)を重視している。



The four cornerstones of resilience

図1 レジリエンスエンジニアリング4つのコア能力

(参考資料5より、一部筆者加筆)

**Learning:** 何が起こったのか、すなわち失敗と成功双方を含むさまざまな事例から、より高い安全を実現するために必要な事項を「学習」する能力。

**Responding:** 何をすべきか、すなわち混乱や外乱にどのように「対処」すべきかを知っており、現在直面している状況进行处理する能力。

**Monitoring:** 何を注視すべきか、すなわち、直近の脅威またはそれになりそうなものを適切に「監視」できる能力。

**Anticipating:** 何を予期すべきか、すなわち未来の時点で生じうる変化、混乱、圧力、およびこれらの結果などによってもたらされる事象の進展、脅威、好機などを適切に「予見」できる能力。

## 2. 現場体験と人の役割

筆者は、東日本大震災を福島第一原子力発電所ユニット所長(5・6号機)として現場で体験し、所員の安全確保をしながら、プラントの事故対応を実施しなければならない立場にあった。1F事故は大量の放射性物質を放出した大事故であった、という事実と、津波により失われた「原子炉を冷やす」という機能を回復させ、菅元総理らが指摘する更なる最悪シナリオ<sup>6)</sup>を回避した、という事実が存在する。後者が達成できたのは、極めて危険な環境の中での作業の積み重ねの結果である。電源喪失し、照明、通信、計装、モニタリング等の機能が大きく損なわれた発電所は、建物の爆発等プラント設計をはるかに超える中、放射線レベルも急上昇している環境であった。しかし、遵守を謳っていたマニュアルが全く役に立たない中で、強いプレッシャーの下、時間に追われながら、限られたデータから状況を推測し、知識と経験を頼りに対応を行わなければならなかった。このような過酷な状況下でありながらも、現場に踏みとどまり、自ら考え、社員の車のバッテリーを用いた計装の復旧や、消防車を活用した原子炉への注水、コンクリートポンプ車を活用した使用済燃料プールへの注水や水位測定、仮設の海水ポンプを活用した5・6号機の冷温停止など、様々な臨機に対応を行った作業員たちがいた<sup>7)</sup>。このような現場における作業や判断等のすべての行為は、限られたリソースの中で全て「人」が考え実践したものである。

福島事故に限らず、さまざまに形を変えてやってくる緊急時において、現場の「臨機な対応」は欠かせない。福島事故は、安全確保の重要な要素として、「大規模外乱を受けても破局的な被害を回避する」必要があること、そしてこれらが、最終的に「人の行為(Responding)」によって確保されるものであることを明示した。

レジリエンスエンジニアリングでは、このような能力をもつ「人」こそが「システムのしなやかさ、回復力に必要な資源」と位置づけている。このレジリエンスエンジニアリングにおける「人」の位置づけは、現場で臨機な対応をしていた作業員たちと、見事に一致する。

このように、レジリエンスエンジニアリングは、「人」に積極的に成功を拡張するための重要な役割を与える Safety-II を達成するための人間工学的な方

法論である。ただし、リスク除去型の Safety-I と対峙する概念ではなく、既にある程度高い安全が確保されている延長線において相補的に有効なものとするのが妥当である<sup>4)</sup>。

#### 4. 福島第一原子力発電所における事例

福島事故に関しては、これまでの多くの報告書が出されているが、その殆どが上手く行かなかったことを対象にして評価が行われている。前章で示したように、Safety-II やレジリエンスエンジニアリングが目指す安全は成功拡張型であり、成功により確保された安全に注目してみたい。

ここでは、現場の具体的な事例として、変化する条件下において危機の回避に成功したタンカーの緊急離岸（4. 1）、5・6号機原子炉建屋ベントホール穿孔（4. 2）、を紹介する<sup>8)</sup>。

##### 4. 1 事例1 タンカーの緊急離岸



図2 緊急離岸するタンカー(東電 HP より、円は筆者)

- ① 震災当日 5・6号機側バースにて重油タンカーがパイプラインを通じて給油を実施していた。
- ② 関係者は作業前にTBM (Tool Box Meeting) を実施し、2日前の地震と津波に着目し、津波襲来時の手順を確認していた。
- ③ 給油中に地震が発生したが、すぐに陸側の作業責任者(操船経験あり)および作業員は津波を予測し、船長と相談した。船長は津波に備えてタンカーを港湾から避難させる緊急離岸を判断した。尚、過去に緊急離岸訓練を実施したことはなかったが、緊急離岸手順は通常作業の延長上であることから船員は力量を備えていた。
- ④ 緊急離岸を実施する上でオイルフェンスの撤去が必要であったが、緊急性の観点から通常のボートによる撤去を断念し、切断した。

- ⑤ これらの判断、行為によりタンカーは本格的な津波来襲前の港湾脱出に成功した。

これらの行為が遅れていたら、津波で流出した重油タンクのように、タンカーがプラントの復旧作業に大きな支障をきたした恐れがあり、緊急離岸成功はその後の事故の対応に大きく貢献している。

##### 4. 2 事例2 5・6号機原子炉建屋ベントホール穿孔



図3 ベントホール穿孔作業(参考資料7より)

- ① 1・3・4号機の建屋が爆発する中、炉心冷却の最終ヒートシンクが確保できていなかった5・6号機の建屋の屋上に、爆発の可能性も予見してベントホール穿孔作業を計画した。ただし、作業は、爆発した建屋が間近に見える中、特に4号機の爆発の理由がわかっていない(当時)不気味さの下で行う必要があった。
- ② 東電建築グループは作業を大手ゼネコンに依頼したが、機材は入手できたものの、作業員の安全確保困難を理由に作業は断られる。
- ③ ②を受け、福島第一原子力発電所外にいた東京電力の社員が作業することとなった。社員が現場に向かう中、たまたま業務で長くお付き合いのある地元工務店の所長(現場からの避難途中)に会い、話しかけられ、経緯を説明したところ、機材の扱いに慣れている所長が自主的に作業を引き受けてくれた。
- ④ 所長と社員はともに作業現場へ向かい、線量の高い中、ベントホール穿孔作業を実施した。特に最後に穴を貫通させる場面では、建屋の爆発も頭を過ぎる中、チームワークで作業を完遂した。

この作業によって水素爆発の回避見込みが立ち、5・6号機の事故対応に大きな時間的余裕がもたら

された。安全確保はもとより5・6号機の冷温停止に向けた戦略の中で大きな意味を持つ事例である。

## 5. 福島第一原子力発電所における事例

### 5.1 対処能力(Responding)の背後要因

先の事例は、レジリエンスエンジニアリングの4つのコア能力のうち、主に対処能力(Responding)が発揮されたものである。レジリエンスの源泉はここにある。筆者らは、先行研究等からこのRespondingの背後要因について図4のようなモデルで表現している<sup>9)</sup>。ここで少しこのモデルについて説明してみたい。

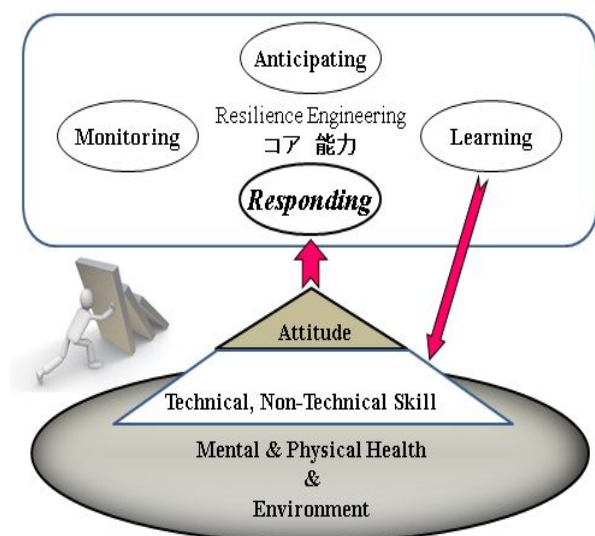


図4 対処能力(Responding)の背後要因モデル

実際に有効な行為を起こすためには知識・認知や技能が必要であるが、これらを十分に有している個人・組織であっても、対応姿勢が欠けていれば行為は生まれない。したがって、Respondingに直接関与する要素はこの「対応姿勢」であるといえる。ここでは、対応姿勢を「困難な状況下においても前向きに対処する姿勢、使命感」と定義し、“Attitude”と称している。また、実際の行為にはAttitudeを伴った知識・認知や技能が必要なことは明確である。ここでは、“Technical Skill”および“Non-technical Skill”を「知識や認知を含めた技能」として定義している。これらSkillは、レジリエンスエンジニアリングのLearningによる影響を強く受ける。

一方、AttitudeやSkillは様々な要素に支えられている。食料を含めた健康要件(Health)は言うまでも無いが、「作業環境」“Environment”は、道具やロジステ

ックといったリソースや、明るさ、気温等といった環境居住性、放射線防護、耐震などの作業者の安全を確保する建物の堅牢性、職務に対する時間的・外的圧力、等を総称したものと定義する。

### 5.2 事例分析

5.1の対処能力(Responding)の背後要因モデルを用いて、4.で紹介した事例分析を試みる。

タンカーの緊急離岸事例では、成功の重要な鍵はSkillにあり、緊急時のTechnical Skillは平時のものがそのまま活かされている。また、危険を予見する能力に優れ、手順の確認、リソース確保、指揮命令、優先順位付けとそれに沿った実行、リーダーシップといったNon-Technical Skillも十分に発揮されている。さらに、緊急事態の発生を予測し、それに備える対応へと速やかに切り替えがされているところに、感度の高さが表れている。加えて、緊急時の対応では、お互いに良く知り合ったメンバー間でのチームワーク、団結して事に当たる姿勢が発揮されている。

一方、5・6号機原子炉建屋ベントホール穿孔事例は、危機的な状況下での出会いが実作業に結びついており、Attitudeが際立っている。工務店の所長は、後日筆者のインタビューにて「ここで作業をしなかったら一生発電所に入る資格がなくなるとの想いで、これまでの信頼関係を大切に業務を超えた判断をした」と答えている。定期点検中であつた5・6号機の炉水位は確保できていたが、同じく定期点検中であつた4号機が爆発し、またその理由が判っていない中で、予見できない危険な作業を自ら進んで引き受ける「人」は、その場で急遽出現するものではなく、平時からの公私にわたる人間関係に基づく信頼感、一体感、使命感と考えるのが妥当であろう。

## 6. レジリエンスを高めるための考察及び提言

レジリエンスを高めるためのアプローチを考える上で重要なことは、その背後要因をつかみ、それらを強化してゆくことであろう。前章で示したモデルは、レジリエンスの源泉である対処能力(Responding)の背後要因を「見える化」したものであり、何を強化したらよいのかを考える上で重要な示唆を与えている。

Respondingは、構造図のとおりSkillが伴ったAttitudeにより生れ、危機的状況を乗り越える回復



力(レジリエンス)につながっている。したがって、直接的にはこの両要素に施策を実施する必要があるが、本稿ではAttitudeに着目してみたい。

これまで福島事故の教訓としてAttitudeを具体的に取り上げられた報告書は見当たらない。しかし、当時発電所長だった吉田昌郎(故人)の調書に、「・・・瓦礫の撤去、必要最小限の注水のためのホースの取替えだとか、注水の準備に対応してくれと頭を下げて頼んだんです。そうしたら、本当に感動したのは、みんな現場に行こうとするわけです。」という発言があるが、ここには彼を支えた現場作業員の強い使命感が滲み出ている<sup>10)</sup>。レジリエンスエンジニアリング手法を用いたことにより、新たな教訓として確認できたAttitudeの重要性は、このようなコメントからも理解することができる。

福島事故現場を支えたAttitudeは、筆者らの分析より少なくとも①使命感、②マイプラント意識・誇り、③リーダーシップ・フォロワーシップ、④一体感、⑤家族や友人を守りたいという思い、⑥地元/地域への愛着、といった6つの構成要因を持つと考えられる<sup>9)</sup>。ただし、これらは、事例2が示すように、平時から関係者の信頼感、一体感の影響が大きいと考えられるが、その醸成は瞬時にできるものではないことへの留意も必要である。

それでは、どのようにしてAttitudeを醸成すればよいだろうか。一つの方策として考えられるのは、訓練を通じたAttitudeの醸成である。航空業界でNon-Technical Skillの向上方策として実績のあるCRM(Crew Resource Management)訓練を原子力分野で実施したところNon-Technical SkillだけでなくAttitude(ここでは主に安全姿勢・意識)を高めた結果が報告されている<sup>11)</sup>。これらはAttitudeに対する特別な方策を採ることなしに、Skillを高める中でこれを達成しようとする試みであり、良好なRespondingを得る上で極めて有効なアプローチと考えられる。

また、東日本旅客鉄道株式会社の事故展示館<sup>12)</sup>のように、使命感を高めるために「事故」体験を活用する取り組みを行っているところも少なくない。

本展示館では、危機意識を向上させると共に、運行の安全確保が乗員および乗客の命に直結することを事故車両の実物を用いることで直接伝え、「命を守る」職場の使命感を高めることを目的のひとつとしている。また、単に実物を展示するだけでなく、事

故や事故対応経験者、あるいは実務経験者といったOBを活用しつつ現役を中心とした背景を説明できる「プロ」を育成し、現物を用いて、現場の言葉で、現場で踏ん張った人たちの経験を含めた研修を行っていることも特徴である。なお、事故車両はこの事故展示館の構想前から経営層の指示により保管されており、貪欲なレジリエンスエンジニアリングの学習能力(Learning)を伺わせる<sup>13)</sup>。

東電では、1F事故のアーカイブを集め、「東京電力廃炉資料館」を2018年にオープンさせている。実物の持つ意義を考えるならば、廃炉が進んでいる福島第一原子力発電所そのものを、事故を「語る」場として活用し、事故の風化を防止するとともに、世界の原子力関係者の安全意識を高める場として再生してゆく役割を担わせることも重要と考える。



図5 事故展示館(JR東日本安全報告書2014より)

## 7. まとめ

福島事故を体験し、「人」の役割の重要性を痛感した。複雑な社会技術システムの高度な安全確保において、最大限の予測とリスク除去は必要であるが、なおかつ不測な事態は排除しきれない前提に立ち、新たな安全概念Safety-IIの目指す、緊急時に臨機に対応できるレジリエンスを高めて行くアプローチも必要である。

本稿では、福島事故の現場事例分析も行いながら、近年注目されているレジリエンスエンジニアリングという方法論を用いて、Safety-IIを目指すためのアプローチについて取りまとめた。今後も、原子力、及びより多くの社会技術システムの安全性向上のために、貢献してまいりたい。

## 終わりに

過酷な状況下において事故対応に当たっていただいた多くの方々の支援に感謝申し上げます。

## 参考文献

- 1) The International Organization for Standardization / The International Electrotechnical Commission : ISO/IEC Guide 51, 2014
- 2) 東京電力福島原子力発電所における事故調査・検証委員会：最終報告，2012
- 3) C. Perrow : Normal Accidents -Living with High-Risk Technology-, Basic Books, 1994
- 4) E. Hollnagel : Safety-I and Safety-II, The Past and Future of Safety Management, Ashgate, 2014
- 5) E. Hollnagel, D. D. Wood and N. Leveson, 北村正晴[監訳]：レジリエンスエンジニアリング概念と指針，日科技連，2012
- 6) 政府事故調査委員会：ヒアリング記録，菅直人聴取結果書 平成 24 年 4 月 3 日，2012
- 7) 東京電力：福島原子事故調査報告書，2012
- 8) A. Yoshizawa, K. Oba and M. Kitamura: Lessons Learned from Good Practices During the Accident at Fukushima Daiichi Nuclear Power Station in Light of Resilience Engineering, Elsevier Science Direct, IFAC-PapersOnLine49-19(2016), pp. 245-250, 2016
- 9) 吉澤厚文, 大場恭子, 北村正晴: 人材育成の観点から見た福島第一原子力発電所の過酷事故対応の教訓, 日本機械学会論文集, Vol. 83, No. 856, 2017
- 10) 政府事故調査委員会：ヒアリング記録，吉田昌郎聴取結果書 平成 23 年 7 月 29 日，2011
- 11) 石橋明他：原子力発電分野における安全意識向上のための Crew Resource Management 概念に基づく訓練手法，日本原子力学会和文論文誌，Vol.9, No.4, pp.384-395, 2010
- 12) 片方善信：JR 東日本「事故の歴史展示館」について，日本機械学会誌，Vol.117, No.153, pp.12-13, 2014
- 13) 大場恭子他：Safety-II の実現に向けたレジリエンスエンジニアリングの導入(5)，日本原子力学会 2015 年春の年会予稿集, p.366, 2015