

博士学位論文

Safety-II の概念を用いた緊急時対応力向上のための

学習システムの提案

—福島第一原子力発電所事故対応への適用による実証研究—

令和元年

吉澤 厚文

**A Proposal of Learning System Aiming to Improve  
Emergency Response by Applying Safety-II Concept  
- Research for Demonstration based on Analysis of Field Responding  
to Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident -**

**2019**

**Atsufumi Yoshizawa**

## 目 次

### 1 緒 論

### 2 研究の背景と目的

#### 2.1 原子力発電所における安全確保の道筋

#### 2.2 既往の学習システムの課題整理

##### 2.2.1 着目すべき行為群に対する課題

##### 2.2.2 データソースの課題

##### 2.2.3 教訓導出上の課題

##### 2.2.4 「人」の位置づけの課題

##### 2.2.5 課題の整理

#### 2.3 本研究の目的と概要

### 3 課題解決を実現する学習システムの構築

#### 3.1 提案する学習システムの概要

##### 3.1.1 課題解決に向けた方法論

##### 3.1.2 提案した学習システムの基本となる考え方

#### 3.2 評価手法の開発整備

##### 3.2.1 提案する学習システムにおける評価手法

##### 3.2.2 レジリエンスエンジニアリング 4 能力を用いた評価手法の整備

##### 3.2.3 ワークロード時間推移評価手法の開発

##### 3.2.4 Responding の背後要因モデルを用いた評価手法の開発

##### 3.2.5 m-SHEL モデルを援用した評価手法の開発

#### 3.3 実証事象の選定

#### 3.4 実証に用いるデータソースの収集

- 3.4.1 既存の事故調査のデータソース
- 3.4.2 他のデータソースとその活用方策
- 3.5 事象の概要と行為群の抽出
  - 3.5.1 1F3号機の「冷やす」機能回復事象
  - 3.5.2 行為群の抽出方法

## 4 実証結果

### 4.1 レジリエンスエンジニアリング 4能力を用いた評価

- 4.1.1 本節における評価の目的と評価手法
- 4.1.2 結果
- 4.1.3 考察
- 4.1.4 得られた成果

### 4.2 ワークロード時間推移評価手法を用いた評価

- 4.2.1 本節における評価の目的と評価手法
- 4.2.2 結果
- 4.2.3 考察
- 4.2.4 得られた成果

### 4.3 Responding の背後要因モデルを用いた評価

- 4.3.1 本節における評価の目的と評価手法
- 4.3.2 結果
- 4.3.3 考察
- 4.3.4 得られた成果

### 4.4 m-SHEL モデルを援用した評価手法による評価

- 4.4.1 本節における評価の目的と評価手法
- 4.4.2 結果

4.4.3 考察

4.4.4 得られた成果

## 5 考察

### 5.1 提案した学習システムの実証結果の評価

5.1.1 データソースの収集と着目する行為群の全体把握

5.1.2 因果律の仮説

5.1.3 「人」の位置づけ

5.1.4 現場の環境に合わせた評価

5.1.5 学習のあり方

5.1.6 提案した学習システムの有効性評価

### 5.2 提案した学習システムの汎用性評価

5.2.1 具体的な事例について

5.2.2 適用結果

5.2.3 適用結果の考察

5.2.4 提案した学習システムの汎用性に関する考察

### 5.3 教訓の実装に向けた試行

### 5.4 提案した学習システムの有効性評価と課題

5.4.1 提案した学習システムの有効性評価結果

5.4.2 提案した学習システムの課題

## 6 結論

## 謝辞

## 1. 緒 論

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<sup>1)</sup>, 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。また, 日本学術会議も事故後「工学システムに対する社会の安全目標」について報告をまとめているが<sup>2)</sup>, 目標と比較される各工学システムの安全の指標は, そのシステムの過去の実績にとどまらず, 環境等の変化, 潜在するリスクも考慮した将来の状況も含んだものである必要があることを指摘している。このような指摘の反映の一環として, 日本原子力学会では, 「リスク評価の理解のために」の中で, 経験できないような極稀な事故発生シナリオを把握しその対策の効果を検証するためのリスク論の活用の有効性を指摘するとともに, リスクの不確実さの中に未知の要因によるものも含めた様々な要因を取り込む検討等が行われている<sup>3)</sup>。

このような指摘は, これまでの安全を確保するための対応が, 主として実際に顕在化したリスクである事故から原因を同定し, 同様の事故の「未然防止」と「拡大防止」といったリスク除去を目的とした「学習システム」により実施されており, 「残余のリスク」についての対応が十分ではなかったことを意味している。すなわち, 東日本大震災で得られた重要な教訓のひとつが, 「残余のリスク」を放置せず掘り下げた検討を継続しなければならないことである。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)<sup>4)</sup>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。このような社会技術システムの安全は, ISO/IEC Guide51<sup>5)</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, さらに, この定義に基づき,

安全を確保する上で、許容できるリスクのレベルを決める安全目標の設定や、社会技術システムの保有している「残余のリスク」の定量化等が検討されている。

しかし、大規模・複雑化した社会技術システムは、その様相は大きく変化している。また、それによって「残余のリスク」の様相も変動している。そのため、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>6),7)</sup>、「残余のリスク」を含め、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を確保も必要である。北村<sup>4)</sup>や古田ら<sup>8)</sup>が指摘しているように、この「回復力の向上」は、受けたダメージの緩和や早期回復に必要な能力(レジリエンス)であり、「緊急時対応力」として求められるものである。「失敗」に着目してきたこれまでの事故からの学習では、「拡大防止」および「回復力の向上」を実現した能力に係る評価や教訓の導出は直接の対象とされてこなかったことから、それらに関す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。したがって、本研究では、「残余のリスク」である「不測の事態」のような極稀な発生シナリオによる事故に対しても、その緊急時対応力の向上を図るために、事故の「拡大防止」や「回復力の向上」に寄与した行為群に着目し、ここから教訓を導出、形式知化できる新たな「学習システム」を提案する。

本研究は、組織安全研究のパイオニアである Hollnagel の先行研究に基づいて実施した。Hollnagel は、顕在化した事故に着目することにより達成される安全に限界があるという問題意識のもと、「上手くいかなかったこと」を減らすことにより達成される安全の概念を“Safety-I”としたうえで、「上手くいったこと」を増やすことで達成する安全の概念“Safety-II”を提唱している<sup>9)</sup>。Safety-II の安全の概念は、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、災害を免れたことのみならず、減災や回復など様々な緊急時対応に着目する視点を与えている。本研究ではこの Safety-II の概念を適用し、Hollnagel

がいう「上手くいったこと」として、事故の「拡大防止」や「回復力の向上」に具体的に寄与した行為群を「回復等に寄与した行為群」として捉え、教訓を導出する学習システムを構築した。

学習システムは、Safety-II の概念を達成するための方法論であるレジリエンスエンジニアリングを参照している。レジリエンスエンジニアリングは、Safety-II の安全の概念を「システムが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」と具体化し、これを達成するために4つのコア能力(以下、4能力)である Learning, Responding, Monitoring, Anticipating を備える必要があるとしている<sup>10)</sup>。本学習システムは、この4能力の区分を用いた評価手法を基本とし、事象の時間的進展を考慮した4種類の評価手法から構成される。学習システムの実証として具体的に取り上げる事例は、1F 事故である。本事例は社会的に大きなインパクトを与えた事故であり、「不測の事態」に見舞われた対応が実際に行われたものであるとともに、様々な組織により既往の学習システムによる教訓が形式知化されており<sup>11-13)</sup>、多くの利用可能な公開情報が存在していることもその特徴である。当該事故は、原子力の安全を確保する上で必要な「止める」、「冷やす」、「閉じ込める」という3つの機能のうち、原子炉を「冷やす」機能が失われたことにより過酷事故に至ったが、この「冷やす」機能は緊急時対応の中で「回復」されている。多くの報告書等がこのような行為が「拡大防止」に繋がったことを指摘するとともに<sup>14-17)</sup>、約9ヶ月後の2011年12月16日には、安定的にこの「冷やす」機能の「回復」が達成されたとして、政府が「冷温停止状態達成」を宣言している<sup>18)</sup>。ここで実施された緊急時対応の中から、収集したデータソースを活用して「回復等に寄与した行為群」を抽出し、4種類の評価手法を用いることで緊急時対応力を高めるための教訓を形式知として導出する。これらを1F 事故対応の既存の事故調査により得られた教訓と比較検討する等の考察を行うことで、学習システムの有効性を実証する。また、この学習システムを他の事象に



適用した結果についても考察を行い、その実践可能性を評価する。

本論文の構成は、図 1-1 に示す通りである。第 2 章にて緊急時対応力を高めるための既往の学習システムについてその課題を明示し、第 3 章でこの課題解決を実現するための学習システムの具体的な手法を提示する。第 4 章において、この学習システムを用いて、1F 事故の中で 3 号機の事例について具体的な教訓の形式知化について実証する。第 5 章では第 4 章において得られた実証結果から、本研究の提案する学習システムの有効性や、他の事例への適用性について考察を行い、学習システムとしての評価を行う。第 6 章では、以上の結果を総括する。

なお、本研究で用いる「リスク」の定義として、前述した様々な取り組みが行われたことを踏まえた上で、安全の定義として引用している ISO/IEC Guide51 との整合性を考慮し、「人間の生命や経済活動にとって望ましくない事象の不確実さの程度およびその結果の大きさの程度の組み合わせ」を採用する。「残余のリスク」は、東京電力福島原子力発電所における事故調査・検証委員会の最終報告<sup>1)</sup>で用いられている用語であり、residual risk の意である。この翻訳語については、これ以外にも「残留リスク」や「残存リスク」といった用語が使われている例があるが、ここでは当該検証委員会の報告書にある「残余のリスク」を用いることとする。また、「行為」は現場で実施された行動、「事象」（例えば、3 号機の原子炉への注水、格納容器ベント、など）はプラント毎に特定の目的に対して実施された一連の行為及びこれに関連した機器の動作の結果を称している。なお、レジリエンスエンジニアリングの 4 能力の一つである「対処」は、能力を発揮した結果として実施された行為と定義する。また、「不測の事態」とは、技術的知見を持っても想定できなかった事態、または現実的な判断により想定から除外された事態、と定義する。

Safety-IIの概念を用いた緊急時対応力向上のための学習システムの提案  
 -福島第一原子力発電所事故対応への適用による実証研究-

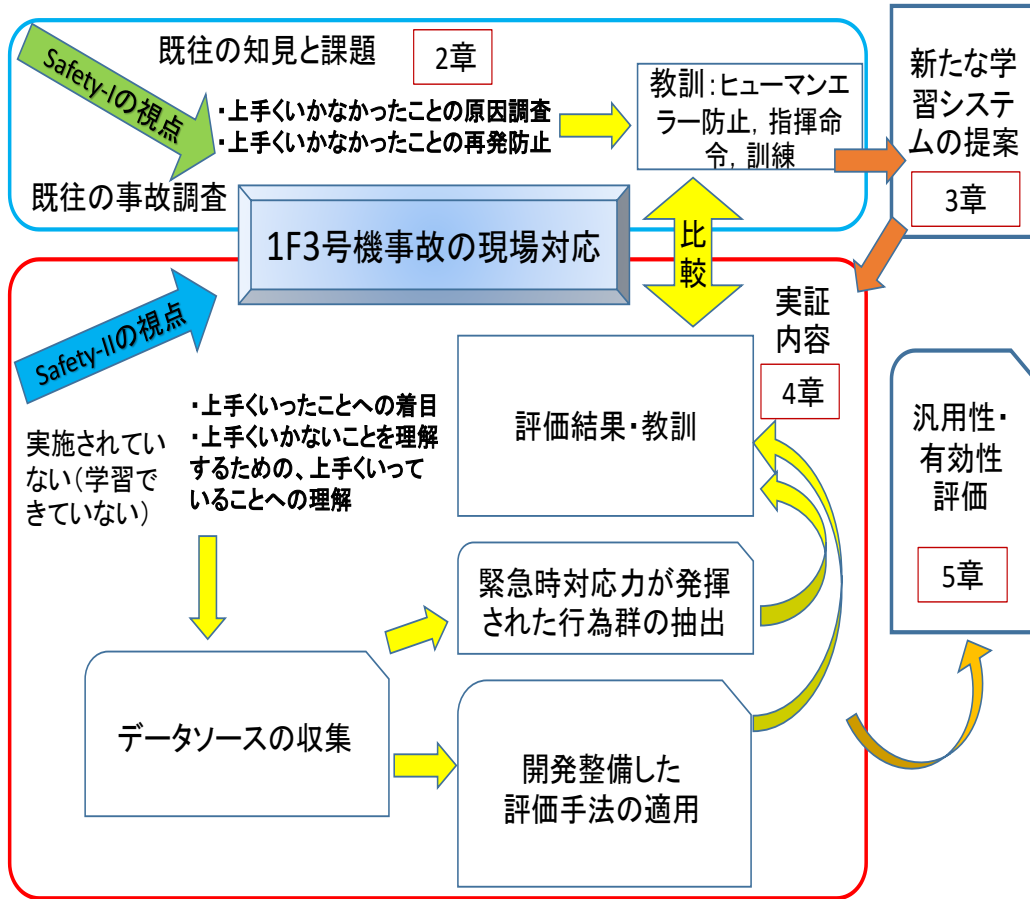


図 1-1 本論文の構成と学習システムの概要

## 第1章 参考文献

- 1) 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, pp. 412-414, 2012
- 2) 日本学術会議総合工学委員会工学システムに関する安全・安心・リスク検討分科会: 工学システムに対する社会の安全目標, 2014
- 3) 日本原子力学会:リスク評価の理解のために, 標準委員会技術レポート, AESJ-SC-TR011, 2015, 2016
- 4) 北村正晴:レジリエンスエンジニアリングが目指す安全 Safety-IIとその実現法, 電子情報通信学会基礎・境界ソサイエティ Fundamentals Review, Vol.8, No.2, pp.84-95, 2014
- 5) ISO (The International Organization for Standardization)/IEC (The International Electrotechnical Commission): ISO/IEC Guide 51, 2014
- 6) 産業競争力懇談会:序, 2013 年度研究会最終報告 レジリエント・ガバナンス, 2013, Retirieved February 1, 2019, available from <http://www.cocn.jp/report/thema65-L.pdf>
- 7) R. Westrum, 北村正晴[監訳]:第 5 章レジリエンス状況の類型化, レジリエンスエンジニアリング概念と指針, 日科技連, pp. 57-67, 2012
- 8) 古田一雄, 菅野太郎:レジリエンス工学の誕生と展望, システム/制御/情報, Vol. 60, No. 1, pp. 3-8, 2016
- 9) E. Hollnagel: Safety-I and Safety-II, The Past and Future of Safety Management, Ashgate, 2014
- 10) E. Hollnagel: Prologue, The Scope of Resilience Engineering. In Hollnagel, E., Pariés, J., Woods, D. D. and Wreathall, J., Resilience Engineering in Practice: A Guidebook, ASHGATE, 2011
- 11) 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
- 12) 東京電力福島原子力発電所事故調査委員会:国会事故調報告書, 2012

- 13) 東京電力:福島原子力事故調査報告書, 2012
- 14) 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, p.462, 2012
- 15) 東京電力福島原子力発電所事故調査委員会:報告書, pp. 193-195, 2012
- 16) INPO (Institute of Nuclear Power Operations): Special Report, Lessons Learned from the Nuclear Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, INPO 11-005 Addendum, p. 3, 2012
- 17) IAEA (International Atomic Energy Agency): Foreword by Yukiya Amano Director General, The Fukushima Daiichi Accident – Report by the Director General, 2015
- 18) 首相官邸:平成 23 年 12 月 16 日野田内閣総理大臣記者会見, 2011, Retrieved February 2, 2019, available from <http://www.kantei.go.jp/jp/noda/statement/2011/1216kaiken.html>

## 2. 研究の背景と目的

前章で示した通り、現代社会を支え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ている。すなわち、安全を確保することとは、リスクを同定し、そのリスクを許容可能なレベルまで除去または減少させることといえる。そのため、「事故」というリスクの所在が顕在化された事象が起きた後もその社会技術システムを利用し続けるためには、そのシステムの安全を確保できていることを社会に示すために、事故原因のリスクを同定し、それらを許容可能なレベルまで除去する必要がある。具体的に、社会技術システムのひとつである原子力発電所の安全がどのように確保されてきたのかについて次節で説明する。

### 2.1. 原子力発電所における安全確保の道筋

原子力発電所における安全確保の基本には、フォールトトレラント設計 (Fault tolerant design) が取り入れられており、システムの一部に起きた問題が、システム全体の安全に影響しないように考慮されている。また、原子力におけるその代表的な概念が「深層防護」である。深層防護は、原子炉の状態に応じて、安全確保のために目標とすべき層を設け、事故などの拡大防止、影響緩和を設計しているものである。このような多層バリア (ここでは、「異常・故障の発生防止」、「異常・故障の事故への拡大防止」、「著しい炉心損傷の発生防止」、「著しい炉心損傷に対する影響緩和」、「放射性物質の環境への大規模な放出に対する防災対策」の5層) を設定することで、前層の手段が機能しなくなった場合においても、次層の備えにより事象を食い止める対策によって、「不測の事態」に対する安全裕度を持たせる設計思想となっている<sup>2)</sup>。

ここで、原子力をはじめとした安全問題を、それらのシステムの有する複雑性との関係においていくつかの時代に区切り整理した古田のモデルを参照し<sup>3)</sup>、原子力の安全確保の道筋を振り返ってみる。1970年代までは、問題の発生源により「技術の時代」、「ヒューマン

エラーの時代」と位置付けられる。原子力発電所の配管等に発生した金属材料の応力腐食割れや、初期の燃料破損の原因となった水素化、フレットィング、水垢による腐食の促進、PCI(ペレットと被覆管の相互作用)などはこの「技術の時代」を代表する問題の発生源である。これらの課題は、発生した問題を技術に分析することで原因を追究し、克服されてきた。また、「ヒューマンエラーの時代」の代表例としては、1979年のスリーマイル・アイランド原子力発電所事故(TMI 事故)がある。この事故は、発電所で働く所員個人の行動が事故の原因のひとつとなっており、この事故の教訓により、以後はシビアアクシデント対策の実施と、「人は間違える」を前提とした設計が積極的に取り入れられるようになる<sup>4)</sup>。その結果、さまざまなヒューマンエラー対策が実施され、マン・マシン・インターフェースに対する設計上の考慮もなされるようになる。1986年に発生したチェルノブイリの事故は、「社会—技術の時代」の代表例とされる。つまり、問題の発生源が技術や個人といった単純なものではなく、社会—技術相互作用や組織間の関係不全が問題の発生源となっている。チェルノブイリの事故は、大量の放射性物質が放出されたことから、大量放出に至らないような設計について改めて検討されると同時に、深層防護の最終層の「大規模な放射性物質の放出にともなう人的被害の防止、環境回復」の検討が行われた。また、安全を考える基本姿勢としての安全文化が問われ、現在は、安全文化が原子力に携わる者すべての務めとして位置づけられている<sup>5)</sup>。1999年に発生したJCOの臨界事故は、組織的な規則違反が日常的に実施され、その結果発生した臨界事故の対応について、関連する組織間で十分な連携が取れず、大きな社会的混乱を生じる事態となった<sup>6)</sup>。これは、チェルノブイリの事故と同様に社会—技術相互作用や組織間の関係不全が問題の発生源となっている。本事故は、国内で初めて原子力の防災を必要とした事例であるが、関連する組織間の意思決定や施策の執行に様々な課題を残した。これらは後に「原子力災害対策特別措置法」の制定という形で教訓を含めて法制化され、各組織の役割分担、意思決定ルールやオフサイトセンターの設置など、組織間の役割や機能を明確にし、原子力防災に対する体制

を本格的に整備するきっかけとなっている。その後、2011年3月に発生した1F事故は、「レジリエンスの時代」の安全問題として整理できる。この事故は、想定外の事態に対する脆弱性が問題の発生源であった。すなわち、社会技術システムとして予め対応の想定が十分になされていなかった「不測の事態」となり、大規模な原子力防災が必要とされ大きな社会的混乱を生じる事態となったといえる<sup>7)</sup>。1F事故後に行われている主な対策は、事故の防止や影響低減を可能とした／したのであろう具体的な対応(電源車や常設代替電源等“汎用性の高い”機器等の設置, および原子炉減圧や原子炉・格納容器への代替注水等の機能の強化)と、火山や竜巻, テロといった一定レベル以上の影響を及ぼす外的誘因に対する備えである<sup>8)</sup>。

このように、原子力発電所の安全確保は、実際に生じた事故から学習し、そのリスクを許容可能なレベルまで除去または減少させることが繰り返されてきており、事故の学習も、事故の原因となったリスクを同定し、そのリスクを許容可能なレベルまで除去または減少することとして、「安全とは許容不可能なリスクがないこと」という定義に沿って行われてきた。しかし、東京電力福島原子力発電所における事故調査・検証委員会の最終報告にある「リスク認識の転換を求める提言」のとおり<sup>9)</sup>、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、という認識は広く共有されているものであると考える。このような提言への取り組みの一環として、日本原子力学会は1F事故に関する最終報告書の中で、前述した外的事象への対策の強化や過酷事故対策の強化といった提言に加え、原子力安全の目標の明確化と体系化への取り組み、深層防護の理解の進化と適用の強化等の提言を行っている<sup>10)</sup>。これらの提言を具現化した取り組みとして、原子力安全の基本的考え方<sup>11),12)</sup>が取りまとめられ、深層防護の進化やその実装の考え方が議論されるとともに、「残余のリスク」へどのように備えるべきなのか、といった観点から、リスク論の活用や不確かさへの備えの考え方などが議論されている<sup>13)</sup>。また、安全文化を高める観点からも組織運営やマネジメ

ント、リーダーシップへの重要性が再検討されており、IAEA は安全性に関わるリーダーシップやマネジメントの重要性をまとめている<sup>14)</sup>。また、日本電気協会では「原子力安全のためのマネジメントシステム規定 (JEAG 4111-2013) の適用指針」を改定し<sup>15)</sup>、平時からの組織のマネジメントに関する様々な改善に関する仕組みづくりの見直しが行われてきている。

## 2.2. 既往の学習システムの課題整理

### 2.2.1. 着目すべき行為群に対する課題

前節で述べた通り、原子力発電所の安全確保がどのようになされてきたかを述べたが、事故をはじめとした「上手くいかなかったこと」から学習し、そのリスクを低減する安全確保の在り方は、原子力発電所だけではない。安全を「許容不可能なリスクがないこと」と定義することで、システムの安全を確保するために、社会技術システム全般が、事故に潜む「上手くいかなかったこと」に着目し、その原因究明・再発防止をシステムとして行うことで、その安全を向上させてきた。特に運輸部門においては、主要国による事故調査の機関が常設化されており、英国では航空事故調査局が 1915 年に設立され1世紀に亘る歴史を有している<sup>16)</sup>。日本国内においても、輸送システムに関しては、運輸安全委員会設置法に基づき運輸安全委員会が設置され、輸送システムに関する事故調査を独自に実施しており<sup>17)</sup>、最近では医療事故に関しても、医療法が改定され、医療事故調査・支援センターが設置されるなど、他の社会技術システムにも適用されてきている<sup>18)</sup>。また、規制を通じて事業者に対して原因調査や措置等の事故報告の義務が課されている例は、原子力をはじめ電気通信事業など広範囲に及んでいる<sup>19)</sup>。このような歴史の中で、同様な事故発生 of 未然防止のために、事故に至る「上手くいかなかった」行為群を評価する手法は様々に確立されている。これらの評価手法は、PRA(Probabilistic Risk Analysis)やFMEA(Failure Mode and Effects Analysis), FTA(Fault Tree Analysis)に代表されるように、システムは要素に分解でき、事故は原因が因果律に従って伝搬した結果生じる「帰結



(resultant)」である、という考えに基づいている<sup>20)</sup>。

一方、2.1 節で原子力発電所を例に具体的に示した通り、大規模・複雑化した社会技術システムの様相は、常に変化しており、事故の原因となる問題の発生源も複雑かつ多様化している。この複雑性は今後ますます高まると考えられるが、このような複雑性の高まり対しては、すでに1F 事故以前より、社会技術システムの挙動に関する予見性の低下の可能性の指摘がなされている。例えば、Perrow は Normal Accidents のなかで、高度な技術を有する複雑なシステムは、複雑な相互作用等によりその性質上事故は不可避である、という概念を発表している<sup>21)</sup>。これは、複雑な社会技術システムにおいては、絶えず事故に結び付く潜在的要因が存在し、これらの顕在化は本質的に不確定で、これらを事前に予測することが困難である、と考えられるためである。さらに、内閣府では、東日本大震災前の平成21年度版防災白書の中で、社会環境の変化に伴って変化する災害リスクとして、①高齢化と災害脆弱性、②都市化の進展により高まる災害脆弱性、③コミュニティの構成変化と災害脆弱性、を指摘したうえで、「災害を取り巻く自然的、社会的な環境が変化中、これまでの統計や経験則が当てはまらないような災害が発生する可能性や、災害が発生した際に従来の対応では被害が増大する可能性も出てきている」という指摘を行っている<sup>22)</sup>。これらは古田の指摘する「レジリエンスの時代」における問題発生源と同様な指摘と言える。

しかし、第1章でも触れたように、1F 事故後、より具体的かつ複数の組織により、安全を確保の取り組みにおいて「残余のリスク」への対応が不十分だったとの反省に基づく、指摘や検討がなされている。すなわち、1F 事故は、既往のリスクを低減する Safety-I の概念に基づき安全を確保してきた社会技術システムにおける学習システム(Safety-I の概念に基づく学習システム)に対して、一つのパラダイム変換を求める災害といえるであろう。「レジリエンスの時代」における安全の確保に関しては、それ以前の時代と同様に「Safety-I の概念に基づく学習システム」によるリスクの低減は必要な取り組みであるが、そのみに注

力するのではなく、併せて「不測の事態」においても対応できる緊急時対応力を備えることが肝要となる。日本学術会議の「工学システムに対する社会の安全目標」に関する 2014 年報告<sup>23)</sup>にも示されているように、安全対策である「未然防止」、「拡大防止」、「回復力の向上」の視点から様々な取り組みがなされるべきであり、事故の「未然防止」と「拡大防止」を「上手くいかなかったこと」から学習する従来の学習のアプローチに加え、「不測の事態」は起こりえるという前提にも立ち、実際にダメージを受けた状況にあっても「拡大防止」と「回復力の向上」に係る能力をどのように確保・向上してゆくのかを考えなければならない。図 2-1 には、深層防護と安全対策、社会技術システムとの関係の概念を示した。事故の拡大防止や回復力の向上が必要な深層防護の範囲では、社会技術システムの中で社会的サブシステムの寄与が大きな領域であり、社会的サブシステムとしてこのような能力を高めてゆく必要があることが示されている。このような領域では、想定されるシナリオは複雑であるが、訓練は限定的な範囲での実施となる。緊急時対応力を向上させるには、実際の「不測の事態」で発揮された緊急時対応力の中で、「拡大防止」や「回復力」として「上手くいったこと」、すなわち「回復等に寄与した行為群」からの学習が必要となることが示唆される。

「回復等に寄与した行為群」からの学習を行う際、不可欠かつ重要となるのはヒューマンファクターの考え方である。1F 事故は、深層防護を代表とする既往の学習システムによって安全確保されていた現場にとって「不測の事態」であった。原子炉の監視機能や、外部電源、通信機能などが短時間に復旧不可能なダメージを受け、物流にも大きな支障が生じ、さらに、設備や手順が使用不可能、または一部しか使えない、といった状況に陥った。そのため、現場では、臨機に様々な行為が実施され、事故の拡大防止が実施された<sup>24)</sup>。このようなあらかじめ準備されたシステムや手順がそのまま使用できない可能性がある「不測の事態」において、事故の拡大を防ぎ、ダメージからの回復を計画し、実行できるのは、人の能力を置いて他にない。すなわち、「回復等に寄与した行為群」の評価においては、ヒューマンファクターからの評価が必要不可欠である。「不測の事態」における対処では、

十分かつ正確な情報が得られない等の不確実性や、取りうる選択肢にはいずれもリスクが存在する、といった事態も十分想定される。また、選択の意思決定は、その行為が将来どのような結果を生み出すのかについて答えが分からない中での判断を迫られる。また、リスクを避けるだけでなく、成功するための機会を獲得するための行為も必要になることも想定される。

このように、「Safety-I の概念に基づく学習システム」は、学習上の課題がいくつか存在する。すなわち、着目する事象が「上手くいかなかったこと」のみならず、「上手くいったこと」すなわち「回復等に寄与した行為群」もその学習対象に含める必要があること、リスクが同定できていない「不測の事態」に対応する緊急時対応力を高めるための学習が可能となるものであること、このような対応の中でヒューマンファクターとして人の様々な局面が評価対象とされるべきであること、である。

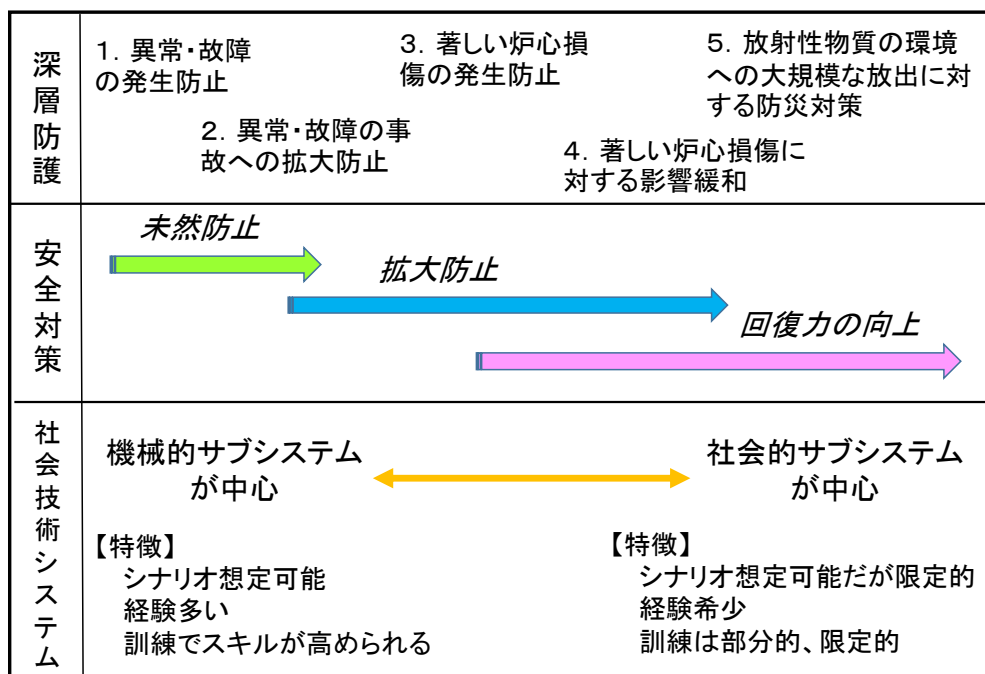


図 2-1 深層防護と安全対策，社会技術システムとの関係性の概念

## 2.2.2. データソースの課題

2.1 節に述べたとおり、既往の学習システムは、その結果が「上手くいかなかった」場合には、その原因を究明し、再発防止を図ることを目的として構築されているが、過去の事故すべてにおいて、「上手くいったこと」への着目がなされなかったわけではない。「不測の事態」に見舞われた危機的状況から、成功に導いた例としては、アポロ 13 号をトラブルの中地球への帰還を果たした事例<sup>25)</sup>、US エアウェイズ 1549 便の乗客を救ったハドソン川の中地球への帰還を果たした事例<sup>25)</sup>、US エアウェイズ 1549 便の乗客を救ったハドソン川の奇跡<sup>26)</sup>、福島第一原子力発電所が事故に見舞われる中プラントの安定停止に成功した福島第二原子力発電所の例<sup>27)</sup>など、「上手くいったこと」の分析も実施されている。しかしながら、これらはいずれもヒーロー的な人物の活躍により「上手くいった」結果として注目を浴びており、またそのような事例分析となっている。

一方、2004 年 10 月 23 日新潟県中越地震により発生した、東日本旅客鉄道株式会社（以下、JR 東日本）のとき325号の脱線事故は、既往の学習システムに対して重要な示唆を与えている。この事故は、当該列車が速度約 200km/h で走行中、新潟県中越地震（マグニチュード 6.8、最大震度 7）に遭遇し、非常ブレーキが作動し停止したが、10 車両中 8 車両が脱線した状態であった。国内の新幹線の脱線はこれが初めての事例であったことから、メディアでは「新幹線の安全神話も揺れた」等の報道がなされ、社会的には「失敗」事例として認識されている。しかしながら、事故後すみやかに、立ち上げられた航空・鉄道事故調査委員会の報告書<sup>28)</sup>では、脱線の原因として詳細な評価がなされると同時に、被害が大きく拡大しなかったことに関する要因として、「構造物に著しい損壊がなかったこと」との記載がある。ただし、その要因についての分析は行われなかった中、失敗学の創設者である畑村が、失敗学のメンバーとともに本事象を調査した結果として、本事象はさらに大惨事になっていた可能性があり、それを防いだ「成功事例」との見解を示している。すなわち、航空・鉄道事故調査委員会の報告書の「構造物に著しい損壊がなかったこと」の具体的な事例として、本車両が通過していた橋梁は地震により破損していた可能性があったが、

阪神淡路大震災及び三陸南地震の教訓により JR 東日本が独自に耐震補強工事を実施していたことにより、その路線の「残余のリスク」が低減されており事故の拡大防止が達成されていたという分析である<sup>29)</sup>。本事例は、事象をその結果により単純に色分けしている既往の学習システムの課題を明示している。すなわち、「事故」という「失敗」の結果からもたらされるバイアスを排除し、事象を構成する行為群全体を俯瞰した上で、教訓の導出が必要であることの指摘である。

福島第一原子力発電所事故に関しても、全体を俯瞰した評価を行う取り組みは少数ながら存在している。彦野らは、当時発電所の所長であった吉田の政府事故調聴取記録から、ノンテクニカルスキルに関する教訓の導出を試みており、課題及び「上手くいったこと」としての全体像の把握を試みている<sup>30)</sup>。また、出野は、政府の事故調査報告書についてレジリエンスエンジニアリング 4 能力を用いて分析し、組織レジリエンスを高めるための教訓導出を試みている<sup>31)</sup>。これらは事故対応の全体からできたこと、できなかったことの教訓を導出するアプローチであり、ヒューマンファクターの観点から広く事故を分析しようとする試みという観点から重要なアプローチであると考えられる。しかし、これらは主にその原因を究明し、再発防止を図ることを目的として集められた「上手くいかなかったこと」のデータソースに基づいた評価になっている。事象は様々な行為群から構成されているため、「上手くいったこと」、すなわち「回復等に寄与した行為群」を分析するには、事故対応を構成している行為群全体を評価できるデータソースの収集に基づいた評価が必要である。

### 2.2.3. 教訓導出上の課題

実際に事故が発生した場合、対処を行う中心的組織は事故発生現場の組織である。この組織は、自ら、そして外部の組織を巻き込みながら、事故に対処する。よって、「不測の事態」における緊急時対応力を高めるためには、実際に現場で事象に対処する組織が実践可能な形での教訓の導出が必要である。

しかし、事故後に行われる事故調査は、事故原因を究明するために因果律に従いシステムを要素に分解して評価を行う。また、「事故が発生した」というリスクの顕在化事象を評価のスタート点とするために、FTAに見られるように現場とは逆の時間をたどって評価が行われることになる。図 2-2 に事故調査の代表的なアプローチと、実際に現場で進展する事故対応との違いを示したが、事故調査のように、事故が起きた結果から時間を遡って評価する手法では、実際の時間軸で状況が変化する中で判断や対処を実施する現場の状況を再現できない。さらに、環境条件や時間的な作業密度等が表現できないため、限定された時間やリソース等で対処しなければならない現場の状況も理解が難しいであろう。そのため、事故調査では、システムの要素間の相互干渉が十分考慮されない一方で、簡素化されることが起きる等、各時間断面で得られていた情報と事故調査で行う際の情報量に大きな乖離に基づく、事故調査特有のバイアスが生じる<sup>32)</sup>。また、因果律が存在していても、Perrow が指摘するとおりの複雑な社会技術システムは単純に分解できず、結果から遡って原因を究明する手法は必ずしも正しい原因にたどり着かない恐れもある。

このように、事故の調査においては、因果律を拠り所とした時間を遡る形での原因究明が実施され、現場の対応とは異なる時間軸、環境条件の下で評価がなされるといったバイアスがかかるため、これらの影響をできるだけ排除し、実際に現場で事象に対処する組織が活用できる教訓導出を可能とする評価手法が求められる。

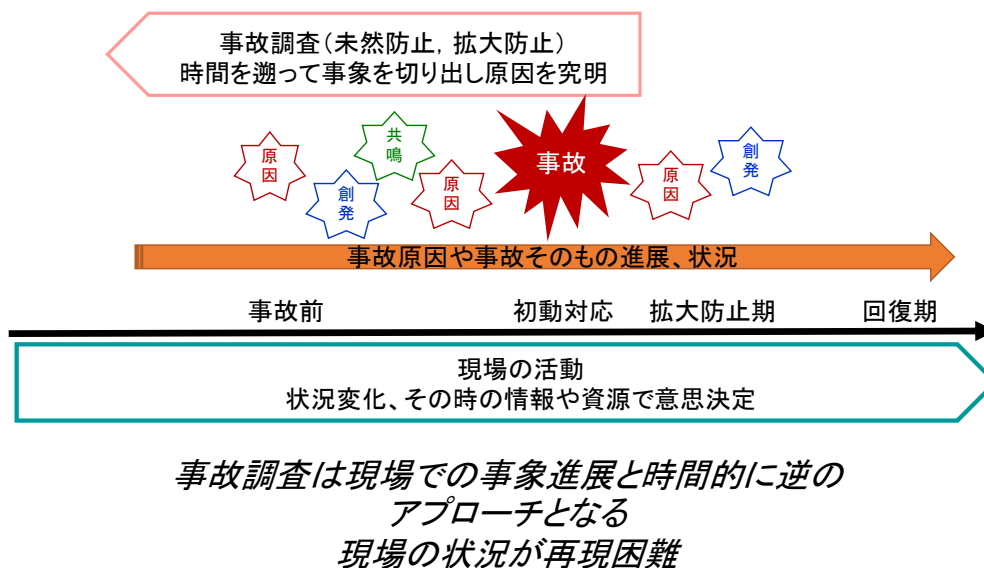


図 2-2 事故調査からの教訓導出上の課題

#### 2.2.4. 「人」の位置づけの課題

繰り返しになるが、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た結果、「事故」というリスクの所在が顕在化された事象が起きた後もその社会技術システムを利用し続けるためには、事故原因のリスクを同定し、それらを許容可能なレベルまで除去することが求められてきた。そのため、2.1 節で述べた通り、TMI 事故に代表されるような発電所で働く所員個人の行動が事故原因となると、「人は間違える」を前提とした設計が積極的に取り入れられるようになり、さまざまなユーザエラー対策が実施されてきた。社会技術システムにおいて、人もひとつの事故の原因として分析されるにあたっては、人や組織も機械と同様な一要素として機能を果たすものとして単純化され、要素としての分解が可能であるとされている。これは、リスクに着目した安全を確保する代表的な手法である PRA において、人は人的過誤率(HEP: Human Error Probability)

として位置づけられていることから理解できる。また、HEP を具体的に表現する方法として、さまざまな定量化手法が開発されてきた。機械と比べ、人のエラーを定量的に評価することは簡単ではない。例えば時間的要素、負荷、タスクの複雑性など、エラーを起こす様々な要素を抽出し、これらのパラメータについて、そのエラー可能性を表現するための研究が行われ、定式化されている<sup>33)</sup>。このように、これまでの安全の概念から導かれる「人」の姿は、システムの一要素として「システムの安全を脅かす要素」として位置づけられている。したがって、既往の学習システムの下では、人のエラーを減らすこと、あるいは、人をより優秀なパフォーマンスを示すシステム要素(例えば、機械)に置き換えることが、安全を高めるため方法として採られることになる。

ヒューマンエラーはヒューマンファクターの一つの要素ではあるが、ヒューマンファクターはより広い視点から評価される必要がある。氏田らは、システム安全学の中で具体的に下記の5点を挙げている<sup>34)</sup>。

- ① 人間行動の基本特性や意思決定メカニズムの解明
- ② ヒューマンエラーの分析・予測・防止と人間行動の信頼性評価
- ③ 人間と機械で構成されるシステムの設計と評価
- ④ 認知的・精神的活動も含めた人間の諸活動の支援
- ⑤ 人間の集団的・組織的・社会的行動特性の解明

「不測の事態」への対応という観点からは、これらを総合的に評価して行くことが重要であるが、特にこの分類の中では、①、④や⑤に着目し、人の持つ能力を最大限に引き出す必要がある。

人が関与するシステムでは、因果律による「帰結」のみならず、「創発(emergent)」や「機能共鳴(functional resonance)」といったモードで物事が生じる、という指摘もある<sup>35)</sup>。「創発」とは、「加法的なものではなく、個々の要素に関する知識によって予測可能でもなければ、それらの要素の還元もできない」<sup>35)</sup>形で現れるものであり、線形な因果関係の原理を用い



て説明することが不適切なものである。また、「機能共鳴」とは、「システムがある周波数においてより大きな振幅で振動する」ものであり、非線形な応答を示す。また、人を中心として様々な調整が行われる結果、システム内で依存性が生まれ、それを通じて機能の結合が生じると考えるものである<sup>35)</sup>。これらのモードは、システムが線形に要素に分解できる、因果律に従って、原因が事故につながる、とするモデルでは評価できないものである。また、人は事態の解決に向けた臨機な対応を行うことが可能であり、このようなプロアクティブな要素を導出するためには、着目する行為群から変更する必要がある。

人は、機械と異なり、心理的、生理的な状況により影響を受ける。「不測の事態」においても高い緊急時対応能力の発揮が期待できるような、潜在能力を高める教訓を導出するには、事故現場の状況等をできるだけ正確に再現し、これらを考慮したアプローチが実行できるための、新たなパラダイムの設定が必要である。「人」の位置づけや役割について学習するためには、ヒューマンファクターとしての様々な局面を評価し、因果律によらない人の振る舞いも表現できる評価手法を用いる必要がある。

## 2.2.5. 課題の整理

前項までに示した4つの課題に基づき、実際に現場で緊急時対応力を高めることを目的とした Safety-I の概念に基づく学習システムの課題を、下記のように再整理した。

- ① **データソースの収集と着目する行為群の全体把握**: 事故発生と、事故の拡大防止、回復に関わる緊急時対応は、対応している時間範囲が異なっている。事故調査では、この中で「未然防止」、「拡大防止」に関する「上手くいかなかったこと」に着目するが、緊急時対応は、主に「拡大防止」、「回復力の向上」に寄与した行為群に着目する必要がある。それぞれ着目する行為群やこれが実施されている時間帯が異なるため、より幅広い時間帯における対処全体についてデータソースを収集し、全体の行為群を把握したうえで評価していく必要がある。

- ② **因果律の仮説**: 事故の発生という事実から調査が実施され、時間を遡ったシステムの要素分解が実施された上で、因果律に基づいた原因が究明されるプロセスが標準となっている。多くの場合、これらは FTA 分析のように、上手くいかなかった結果につながったシステム要素が究明されることになる。複雑な社会技術システムが線形に要素に分解できるのか、といった課題が存在しており、特に「人」の行為に関しては、機能共鳴や創発といった対処の発生モードが指摘されていることから、このような評価手法ではその背景を説明することが困難であると考えられる。したがって、対処の発生モードが様々に存在するという前提の下、評価手法を構築してゆく必要がある。
- ③ **人の位置づけ**: 事故対応の中で、人は様々な対処を実施しているが、既往の事故調査では事故原因のひとつとしてヒューマンエラーというリスクに重点がおかれ、評価される。ヒューマンファクターには人の持つ様々な側面があり、事故の中でどのような対処がどのように発揮されていたのかを評価できる着眼点、評価手法が必要である。
- ④ **現場の環境に合わせた評価**: 事故調査では、②に示した因果律に基づき、システムを分解して評価しているが、実際にはそれぞれのシステム要素の対処が相互に干渉しつつ進められている。また、人の対処は、その作業負荷や、心理的・生理的な状況により影響を受ける。これは機械的なシステムとは大きく異なるところである。現場での対処については、より現実的に現場の状況を再現しつつ、実際に事故に対処する組織が実行できる教訓の導出を可能とする評価手法が必要である。
- ⑤ **学習のあり方**: 発生した「不測の事態」における対応の「上手くいかなかったこと」を学習し、これを設計や手順等にフィードバックする形で行われてきた既往の学習システムでは、「不測の事態」の領域を減らすことに貢献できるが、「残余のリス

ク」は引き続き存在する。そのため、「残余のリスク」である「不測の事態」がありえることを前提に、この領域で発生する可能性のある事象に対して有効な教訓の提供を可能とする学習システムが必要である。

### 2.3. 本研究の目的と概要

本研究の目的は、2.2 節に示した Safety-I の概念に基づく学習システムの課題に対し、「不測の事態」における緊急時対応力を高めるための教訓の導出・形式知化を可能とする新たな学習システムを提案することである。本学習システムの構築範囲を図 2-3 に示す。この学習システムは、前節に示した課題解決が可能な評価手法の開発整備、またその入力となる評価対象事象のデータソースの収集、着目する評価対象行為群の抽出といったプロセスを基礎とし、これらを用いて評価手法の適用による「教訓の形式知化」を行うものである。この学習システムを具体的事例で実証し、有効性を確認する。

本研究では、学習する対象事象として、社会技術システムの「不測の事態」の結果として発生した「事故」に着目し、Safety-II の概念に基づきその中で発揮された事故の拡大防止や回復力の向上に寄与した「回復等に寄与した行為群」から教訓を導出し形式知化する評価手法を整備開発することとした（Safety-II の概念に基づく学習システム）。そのため、データソースが充実しており、既往の学習システムからの教訓が形式知化されている福島第一原子力発電所の 3 号機に着目し、当該号機が事故により失われた原子炉を「冷やす」機能の回復に関わる「緊急時対応力」を分析対象とした。提案した Safety-II の概念に基づく学習システムにより形式知化された教訓は、Safety-I の概念に基づく学習システムから導出された教訓との比較検討、並びに他の事例への適用結果から考察を行い、その有効性を実証・確認する。

Safety-I の概念に基づく学習システムと、本研究で構築する Safety-II の概念に基づく学習システムの違いを図 2-4 に、また、着目すべき行為群と着目する内容の違いを表 2-1 に

示す。第 1 章で述べた「残余のリスク」への対応という観点からは、Safety-I の概念に基づく学習システムが、「上手くいかなかったこと」から「未然防止」と「拡大防止」を行うことに対し、本研究で提案する Safety-II の概念に基づく学習システムは、「回復等に寄与した行為群」に着目し、「拡大防止」と「回復力の向上」を目指すものである。

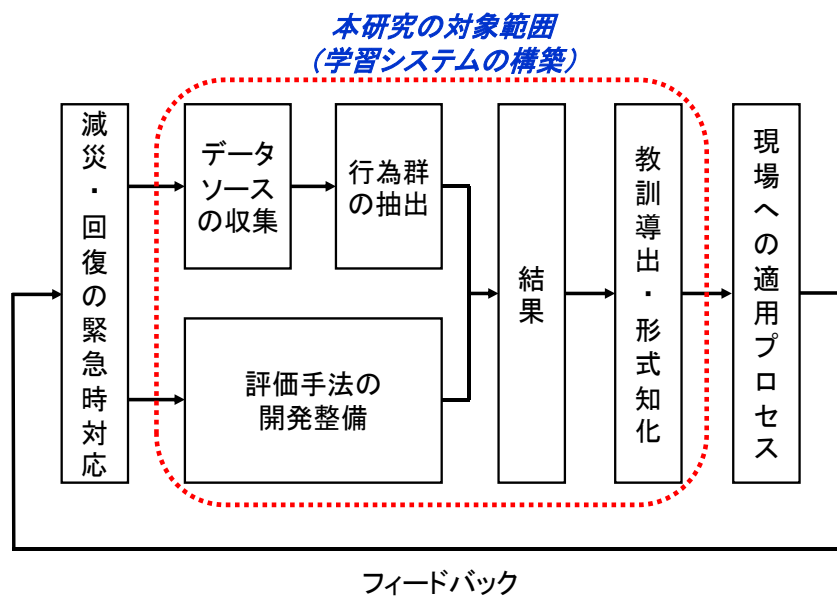


図 2-3 本研究の提案する学習システムの構築範囲

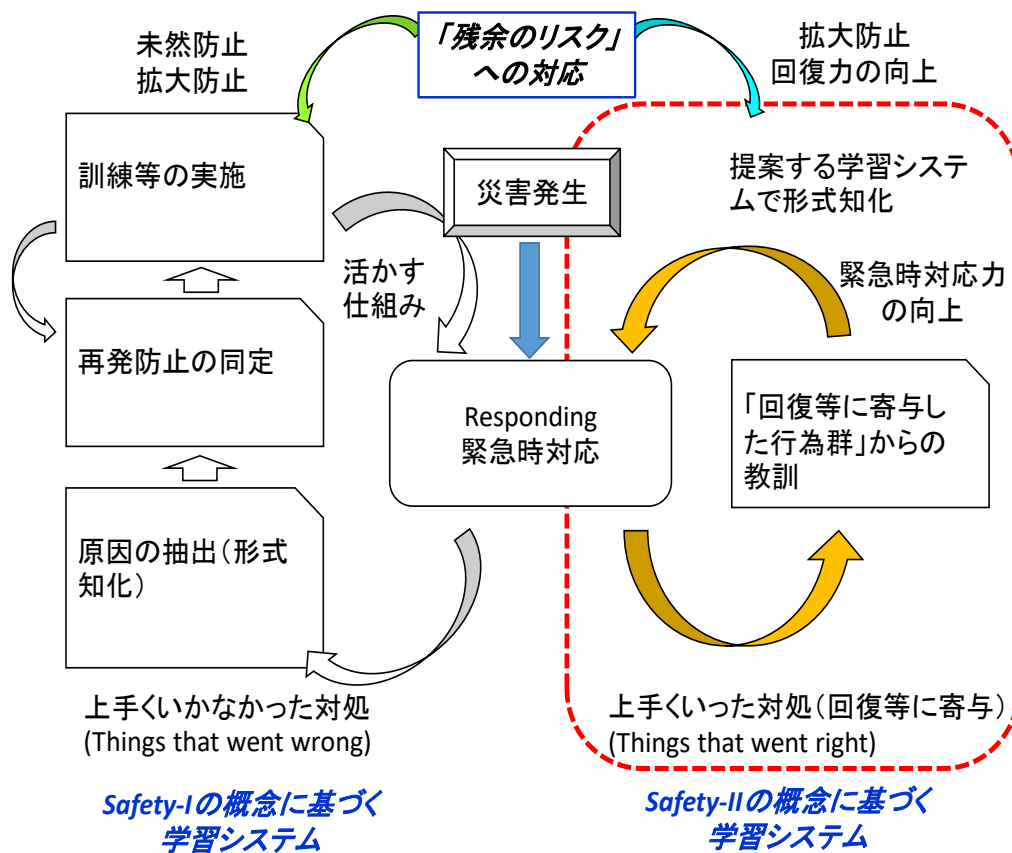


図 2-4 本研究が着目する緊急時対応力向上のための学習領域

表 2-1 学習システムの着目する行為群

行為群の区分	Safety-I の概念に基づく学習システムが着目する行為群	本研究で提案する Safety-II の概念に基づく学習システムが主として着目する行為群
未然防止	上手いかなかったもの	—
拡大防止	上手いかなかったもの	寄与したもの
回復力の向上	—	寄与したもの

## 第2章 参考文献

- 1) ISO (The International Organization for Standardization)/IEC (The International Electrotechnical Commission): ISO/IEC Guide 51, 2014
- 2) 日本原子力学会標準委員会:原子力安全の基本的考え方について, 第 I 編別冊, 深層防護の考え方, pp.40-73, 2013
- 3) 古田一雄:レジリエンス工学, 残留リスクにどう向き合えばよいのか, 経済産業省総合エネルギー調査会原子力の自主的安全性向上に関する WG 第 6 回会合資料 4, 2013
- 4) 原子力安全研究協会スリーマイル・アイランド原子力発電所事故調査専門委員会:スリーマイル・アイランド原子力発電所事故に関する調査報告書, 1981
- 5) 原子力規制委員会:原子力安全文化に関する宣言, 2015
- 6) 原子力安全委員会:ウラン加工工場臨界事故調査委員会報告, 1999
- 7) たとえば, 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
- 8) たとえば, 東京電力ホールディングス:事故から得た教訓と今後の対応, Retrieved February 1, 2019, available from [http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/outline/3\\_1-j.html](http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/outline/3_1-j.html) など
- 9) 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:最終報告書, pp. 412-414, 2012
- 10) 日本原子力学会:福島第一原子力発電所事故その全貌と明日に向けた提言—学会事故調最終報告書—, 丸善出版, 2014
- 11) 日本原子力学会標準委員会:原子力安全の基本的考え方について, 第 1 編別冊深層防護の考え方, 標準委員会技術レポート, AESJ-SC-TR005(ANX)2013, 2014
- 12) 日本原子力学会標準委員会:原子力安全の基本的考え方について, 第 1 編別冊 2 深層防護の実装の考え方, 標準委員会技術レポート, AESJ-SC-TR005(ANX2)2015,

2015

- 13) 日本原子力学会:リスク評価の理解のために, 標準委員会技術レポート, AESJ-SC-TR011, 2015, 2016
- 14) IAEA (International Atomic Energy Agency): Leadership and Management for Safety, General Safety Requirements, IAEA Safety Standards Series No. GSR Part2, 2016
- 15) 日本電気協会原子力企画委員会:原子力安全のためのマネジメントシステム規定 (JEAG 4111-2013)の適用指針, JEAG 4121-2015[2018年追補版], 2018
- 16) 運輸安全委員会:諸外国における事故調査機関について, 運輸安全委員会年報, 2015
- 17) 運輸安全委員会設置法, 昭和48年10月12日公布, 1973
- 18) 医療法, 第六条の十一, 平成29年6月14日公布, 2017
- 19) たとえば, 実用発電用原子炉の設置, 運転等に関する規則, 第百三十四条, 平成30年6月8日公布, 2018, 電気通信事業法施行規則第五十七条, 平成30年10月26日公布, 2018
- 20) E. Hollnagel, 小松原明哲[監訳]:社会技術システムの安全分析, 海文堂, 2013
- 21) C. Perrow: Normal Accidents -Living with High-Risk Technology-, Basic Books, 1994
- 22) 内閣府:平成21年度版防災白書, 2010
- 23) 日本学術会議総合工学委員会工学システムに関する安全・安心・リスク検討分科会:工学システムに対する社会の安全目標, 2014
- 24) 吉澤厚文, 大場恭子, 北村正晴:Safety-II を組み込んだ安全性向上方策の検討(2) —福島第一原子力発電所事故の現場対応の分析と教訓—, 日本人間工学会誌, Vol. 52, 特別号(日本人間工学会第57回大会講演集), pp. 368-369, 2016
- 25) H. Cooper, 立花隆[翻訳]:アポロ13号奇跡の生還, 新潮文庫, 1998
- 26) C. Sullenberger, 十亀洋[翻訳]:機長, 究極の決断, 静山社文庫, 2011

- 27) 高嶋哲夫:福島第二原発の奇跡, PHP, 2016
- 28) 航空・鉄道事故調査委員会:I 東日本旅客鉄道株式会社上越新幹線浦佐～長岡駅  
間列車脱線事故, 鉄道事故調査報告書, RA2007-8, 2008
- 29) 畑村洋太郎:想定外を想定せよ, NHK 出版, 2011
- 30) 彦野賢, 作田博, 松井裕子, 後藤学, 金山正樹:政府事故調聴取記録からのノンテク  
ニカルスキル教訓の抽出, INSS Journal, Vol. 23, pp.153-159, 2016
- 31) 出野利文:専門職学位論文 東電福島事故対応の組織レジリエンス, 神戸大学,  
2015
- 32) S. Dekker, 芳賀繁監[訳]:第 6 章 後知恵による責任追及, ヒューマンエラーは裁ける  
か, 東京大学出版会, 2009
- 33) A. J. Spurgin, シー・エス・エー・ジャパン[訳]:人の間違いを評価する科学—人間信頼  
性評価とは, 星雲社, 2013
- 34) 柚原直弘, 氏田博士:システム安全学, 海文堂, p. 262, 2015
- 35) E. Hollnagel, 北村正晴/小松原明哲[監訳]:Safety-I & Safety-II, 海文堂, 2015



### 3. 課題解決を実現する学習システム構築

#### 3.1. 提案する学習システムの概要

##### 3.1.1. 課題解決に向けた方法論

本研究では、2.3 節の研究目的に示した学習システムを構築するために、これまで暗黙知に止まっていた「回復等に寄与した行為群」からの学習プロセスを構築し、「不測の事態」における緊急時対応力を高めることを検討した。

「回復等に寄与した行為群」から学習をし、緊急時対応能力を高めるための全体の学習システムは、図 3-1 に示す通り複数のプロセスにより構成される必要がある。具体的には、「回復等に寄与した行為群」の抽出とそのデータソースの収集を行う「インプットデータ」、Safety-II の概念を用いて教訓を導出するための評価手法である「テンプレートの開発整備」、インプットデータをテンプレートに落とし込み学習を可能とするデータベースを作成し教訓の導出を行う「実証」、並びにこれらのプロセスを通じて Safety-I の概念に基づく学習システムの課題を解決し、汎用性、実装可能性や有効性を評価するプロセスである。

本研究では、この中の「テンプレートの開発整備」において、レジリエンスエンジニアリングを参照し、人の能力を評価できる 4 種類の評価手法を開発整備した。

また、このシステムを実証するために、事象として福島第一原子力発電所の事故を取り上げ、特に 3 号機の原子炉の冷却システムの回復過程に着目した。図 3-2 に本研究が着目する時間範囲について、事故調査の着目する範囲と比較して示した。事故調査では、事態が悪化するまでの期間に着目し、その原因を究明することを学習の範囲としているのに対し、本研究では、事象発生から、事故拡大を食い止める「冷やす」機能の暫定的な回復となる、海水による原子炉への注水システムが確立するまで(3 月 13 日)、および「冷やす」機能の本格的な回復を達成する冷温停止状態達成(12 月 16 日)までの期間を分析対象期間として確保する必要がある。

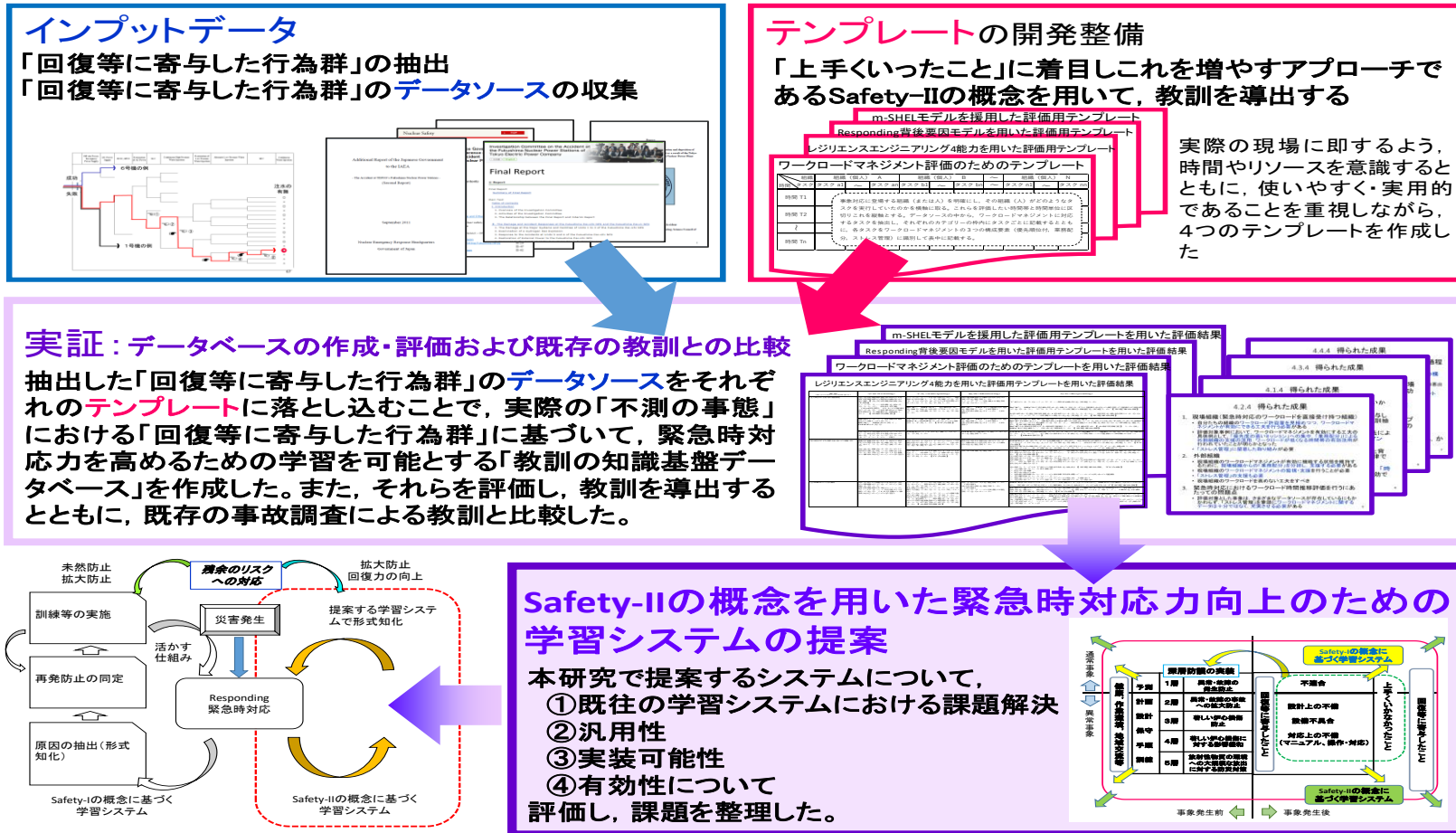


図 3-1 本研究が提案する学習システムの概要

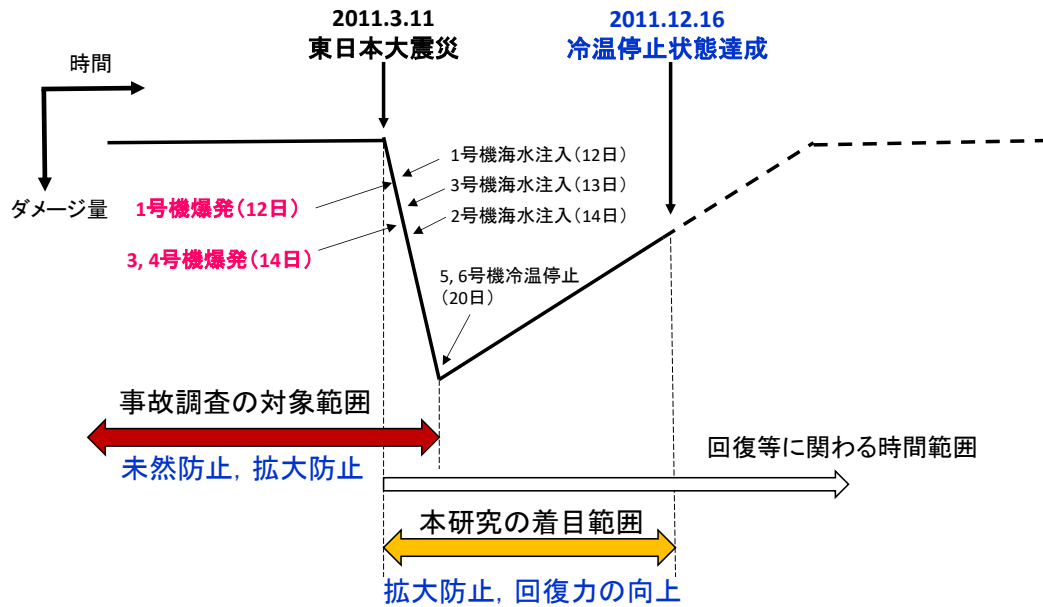


図 3-2 1F 事故の実証範囲と着目する行為群の時間的範囲

### 3.1.2. 提案した学習システムの基本となる考え方

前述した課題を解決し、形式知化を円滑に行うための知識整理の枠組みとして、「教訓の形式知化プロセス」を構築するために、先行研究より新たな概念と、これを実現するための手法を参照した。

具体的には、「上手くいったこと」に着目し、成功を増やすことで安全を高めようとする概念である”Safety-II”，並びに、これを実現するための方法論であるレジリエンスエンジニアリングについて、提唱されている内容をまとめるとともに、本研究でこれらをどのように参照し、「教訓の形式知化」を可能とする学習システムを構築したのかについて説明する。

#### 3.1.2.1. 新たな安全の概念 Safety-II について

事故を未然に防ぐことは重要である。そのためにシステムを理解し、リスクを同定してこれを低減する努力は欠かせない。しかし一方で、社会技術システムの複雑化が進む中、2.2.1 項に示した通り、システムの挙動を完全に理解することは困難であるとの指摘が多くなされている。この指摘に基づけば、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を前提にした安全の確保が求められる。このような指摘に対し、組織安全研究のパイオニアの一人である Hollnagel は、従来の安全の概念を“Safety-I”と定義した上で、システムを完全に理解することは困難であるという立場に立った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<sup>1),2)</sup>、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、リスクを同定しこれを低減する Safety-I の安全の目標と異なり、上手くいっていることを増やすことで達成されるものとしていいる。Safety-Iとは、一般的に用いられているシステムの安全の定義であり、日本学術会議<sup>3)</sup>もよりどころとしている ISO/IEC Guide 51 の「許容不可能なリスクがないこと」<sup>4)</sup>に基づき、達成する安全である。Safety-I の安全の目標は、リスクを低減することを前提に、上手くいかなかったこと(things that went wrong)に着目しており、これを可能な限り少なくしようとす

るため、安全管理の中心は、上手くいかなかったことが起きた場合に対応することに向けられる。

一方、Safety-II とは、安全を「変化する条件下で成功する能力」とであると定義して、達成する安全である。Safety-II の安全の目標は、成功する能力を高めるために、上手くいっていること(things that go right)に着目し、これを可能な限り多くしようとするため、安全管理の中心は、何かが起こる前に能動的に調整することに向けられる。

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おり、その特徴を表 3-1 に示した<sup>5)</sup>。それぞれの安全の概念には、上述した定義をはじめとした枠組を成すものと、枠組を補足する基本方針がある。Safety-I では、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。したがって、問題の発生は、何らかの原因が存在しているはずであり、これを見つけてその原因を除去する対応が主となって安全が確保される。この中で、人はヒューマンエラーに代表される安全を脅かす危険要因として位置づけられる。

しかし、Safety-II では、システムの挙動は完全に理解できず、結果をある時点で存在したパターンとして創発(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、システムが上手く動く理由は、人が作業条件に合致するように行動を調整しているからであり、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。

		Safety-I	Safety-II
安全の枠組	安全の定義	安全は許容不可能なリスクがないこと(状態)である。	安全は変化する条件下で成功する能力である。
	安全の目標	上手くいかなかったことが可能な限り少ないことである。	上手くいっていることを可能な限り多くすることである。
安全実現の基本方針	システムの理解	システムの挙動は理解でき、要素に分解可能である。	結果は特定の構成要素や機能へと遡ることができない。
	結果と原因	結果は因果律により生じた帰結(resultant)である。成功と失敗の原因は区別できる。	結果は因果律では説明できず、発現(emergent)したものである。成功と失敗の原因は区別できない。
	ヒューマンファクターの考え方	人はヒューマンエラーに代表される安全を脅かす危険要因である。	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。

Erik Hollnagel; Safety- I and Safety-II, ASHGATE, 2014等より作成  
「福島第一原子力発電所における冷温停止状態達成過程に着目した教訓導出」  
吉澤厚文、大場恭子、北村正晴、人間工学Vol.54, No.1, pp1-13,2018

表 3-1 安全の概念とその基本方針 (Safety-I, Safety-II)

### 3.1.2.2. レジリエンスエンジニアリング

(1)レジリエンスエンジニアリングと4能力<sup>6),7)</sup>

社会技術システムの設計にあたっては、予め十分にリスクを評価し、これがリスク制限を超えないように設計基準を設定し、これを満足するように設計するアプローチが取られてきており、基本的に設計基準を超えるような事態が発生した場合にまでその機能を保証することは求められていなかった。前述した Safety-II の安全の定義である「安全は変化する条件下で成功する能力である」とする考え方は、その変化する条件下として設計基準の範囲内であるかどうかを問うてはいない。その能力には、「残余のリスク」である「不測の事態」にどう対処するかについても包含した概念として定義されている。この Safety-II の安全の定義を展開し、これ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は、

システムは絶えず変化しており、これらの変動が適切に制御されていることによりシステムの安全が確保されているという考え方に立つものである。つまり、成功は人々がギャップ、ハザード、トレードオフ、多重の目的などが付きまとう世界において安全を創り出すために学習して適応化しているためであり、この成功がどのようにして得られているかを理解することが必要であると考え。これが「上手くいっていること」に着目する視点を与えるものである。また、このような特性は「レジリエンス」として「システムが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」と定義され、レジリエンスエンジニアリングの目的は、システムにレジリエンスをどのようにもたらすか、ということに帰着する。つまり、レジリエンスエンジニアリングは、システムの制御状態が「レジリエンス」を有する状況に維持されていることを目指すものである。具体的には、「ダメージを受けて通常の動作状態を維持できない場合、性能は低下させても動作は継続できる」、「破局的な状態は回避できる」、「状況が回復したら速やかに元の状態またはそれに準じる状態に復旧できる」といったダメージを受けた後のシステムの回復力を高めることも安全の目標として位置づけている。

このような制御状態を確保するためには、何が起こったのか(過去)、何が起こっているのか(現在)、何が起こりうるのか(未来)を知ることが必要であり、現在直面している状況に対処できなければならない。これをシステムの本質的な能力として、レジリエンスエンジニアリングでは下記のように4能力を詳細に定義している。

Learning: 学習できる。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: 対処できる。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: 監視できる。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する能力。

Anticipating: 予見できる。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する能力。

## (2)レジリエンスのポテンシャル(Resilience Potentials)の概念

レジリエンスエンジニアリングの目的は、上述したとおり、日常の脅威や好機の両方に対してレジリエンスエンジニアリング 4 能力を発揮することができること、にある。一方、機械要素がかなりの確率でその動作を確実に実施できるように、組織が同様にレジリエンスエンジニアリング 4 能力を発揮できるかについては議論があろう。Hollnagel は、“Safety-II in Practice”<sup>8)</sup>の中でこの課題に対して次のような考え方を提示している。すなわち、組織がレジリエンスに対する潜在能力を確立しマネジメントできていたとしても、レジリエンスの能力を発揮することを保証することはできないが、潜在能力を十分に持ち合わせていなければ、一貫してレジリエンスが発揮されるパフォーマンスを示すことはできない。本研究では、この Hollnagel の考え方を参照し、「不測の事態」においても「一貫してレジリエンスが発揮される」パフォーマンスを示す組織が有する能力を「緊急時対応力」として定義する。

表 3-2 にレジリエンスエンジニアリングの概説を示した。



レジリエンスエンジニアリング	「システムが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)を実現するために必要なダイナミックな特性を獲得するための方法論
レジリエンスエンジニアリングの4コア能力	何が起こったのか(過去)、何が起きているのか(監視)、何が起こりうるのか(予見)を知る必要があり、現在直面している状況に対処しなければならない 何が起こったのか知っている(学習: Learning) 何を注視すべきか知っている(監視: Monitoring) 何を予期すべきか知っている(予見: Anticipating) 現在直面している状況に処理できる(対処: Responding)
緊急時対応力	不測の事態においても「一貫してレジリエンスが発揮される」パフォーマンスを示す組織が有する能力

表 3-2 レジリエンスエンジニアリングの概説と緊急時対応力

### 3.2. 評価手法の開発整備

2.2.5 項で述べたとおり、「回復等に寄与した行為群」に着目し、その行為群を評価するためには、従来の評価手法をそのまま適用するのではなく、さまざまな形で現れる人の能力を評価できる手法を開発整備する必要がある。本章では、学習システムの中で、行為群を評価分析し、教訓を導出するための評価手法を開発整備する。

#### 3.2.1. 提案する学習システムにおける評価手法

緊急事態においては、その対応の様態が時間とともに変化することになる。したがって、時間軸を意識した上で、その緊急時対応の状況を踏まえた評価手法を検討する必要がある。具体的には、図 3-3 に示す通り、事故対応は「初期対応」と「中長期対応」に区分して考える。評価手法としては、2.2.5 項に述べたとおり、因果律のみならず、創発や機能共鳴といったモードでの行為が評価されなければならない。このような表現ができるの

は、システムを要素分解する方式の手法ではなく、人の認知活動を表現できる手法を用いることが有効である。

まず、初期対応では、外部からの本格的な支援が困難なタイミングで、現有するリソースやテンプレートを用いた臨機の対応が必要となる。これらをどのように組み合わせ、「不測の事態」に対応するのかについては、主に「現場の人」が中心となって事故の拡大防止を考え、実行する必要がある。このように現場の限られた人を中心とした「初期対応」を評価する手法としては、人の対応を評価する上でレジリエンスエンジニアリング、また、厳しい作業環境の中で集中するワークロードをどのように制御するのか、といった観点からワークロードマネジメントを参照した手法が活用できると考えられる。

また、初期の事故拡大防止モードから、受けたダメージからシステムを本格的に回復させる「中長期対応」のモードについて考えてみる。このモードでは、さまざまな組織が本格的にその対処に関与する形となり、またシステムは人とのインタラクションを経ながらリソースの供給を受けてその形を変え、回復過程が構築されることとなる。このようなモードの評価を行うには、人の評価が可能であるレジリエンスエンジニアリングが引き続き有効であると考えられる。ここでは、さらにレジリエンスエンジニアリング4能力のうち、Respondingに着目し、その背後要因をモデル化した手法を開発する。一方、レジリエンスエンジニアリングでは直接評価できない人やシステムとのインタラクションについて、ヒューマンエラーに関係する当事者と周囲の様々な構成要素との関連（インタラクション）を明らかにするモデルとして開発された m-SHEL モデルを援用し、そのインタラクションのカテゴリーを用いる手法を新たに開発する。

以上のようなカテゴリーを踏まえ、それぞれの具体的な評価手法の構築について、次節以降に述べる。

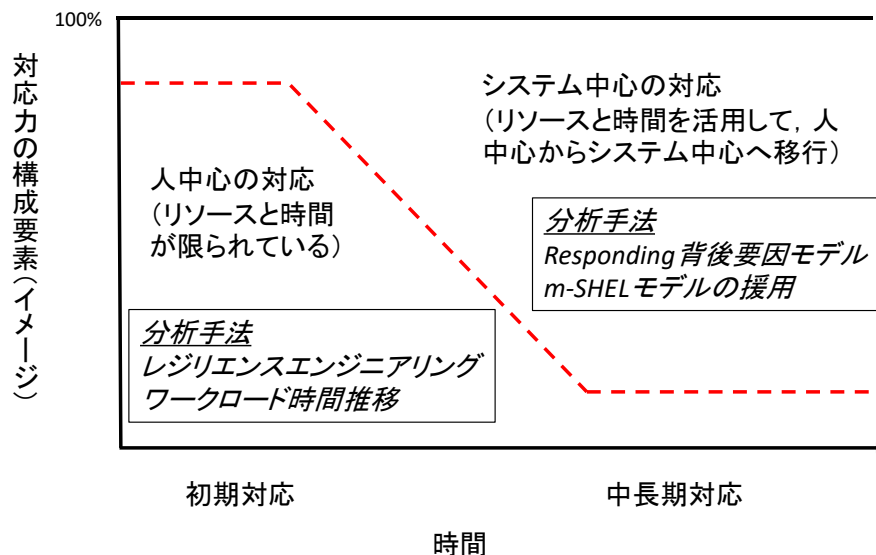


図 3-3 対応力の構成要素と評価手法の関係概念図

### 3.2.2. レジリエンスエンジニアリング 4 能力を用いた評価手法の整備<sup>9),10)</sup>

3.1.2 項に示したとおり, レジリエンスエンジニアリングは, Safety-II を具現化する手法として提唱されている。絶えず変動しているシステムにおいて, 受けた変動を吸収しシステムの動作目的を継続できる, 変動に対し性能は低下させても動作は継続できる, 破局的な状態は回避できる, 状況が回復したら速やかに元の状態またはそれに準じた状態に復旧できる, という能力を実現するために必要なダイナミックな特性を獲得するための方法論として位置付けられている。

また, レジリエンスエンジニアリングでは, この特性を高めるために, 「上手くいったこと」への着目と, 4 能力(Learning : 学習できる, Responding : 対処できる, Monitoring : 監視できる, Anticipating : 予見できる)を重視している。

また、レジリエンスエンジニアリング 4 能力は、最終的な Responding が、因果律によるものか、創発や機能共鳴によるものかという要因に関係なく、能力の発揮という形で評価が可能である。表 3-3 に、本手法を用いる際の評価用テンプレートを示す。行には、事故の中でとられた行為群全体の中から抽出された「回復等に寄与した行為群」を並べる。列には、その行為群の中で発揮された 4 能力が分類できるように能力ごとに箱を用意する。データソースからこれらの情報を分類して整理することで、それぞれの行為群の中でどのような能力が発揮されていたのかが明確にできる。

なお、レジリエンスエンジニアリングの 4 能力を用いた評価手法そのものは既に存在しており、その適用についても試行されているところである。具体的には、2.2.2 項に述べた出野の例<sup>11)</sup>や、日本原子力学会ヒューマン・マシン・システム研究部会の「ヒューマンファクターの観点からの福島第一原子力発電所事故の調査、検討」<sup>12)</sup>、原子力安全推進協会の福島第二原子力発電所の分析結果<sup>13)</sup>においても、事故事象が 4 能力を用いて評価されている例が示されている。出野や原子力安全推進協会の評価は、福島第一原子力発電所または福島第二原子力発電所の事故というものを一つの大きな行為群と捉えて評価を試みている。また、日本原子力学会ヒューマン・マシン・システム研究部会は、特に議論となっている 1 号機の注水に関する事項を一つの大きな行為群として評価が行われている。

これらの評価手法と本研究の評価手法との違いは、前項に示したとおり事故の行為群の全体を俯瞰した上で、着目すべき行為群を抽出している点や、より多くのデータソースからその行為群が行われた実際の現場の状況に即するように、時間やリソース等を加味したことである。すなわち、行為群を細かく切り出すことで、それぞれの行為群が実施された期間を明確にし、レジリエンスエンジニアリングに時間的な変化の概念を取り入れている点が特徴である。また、データソースの利用可能性も加味して他の評価手法を併用して評価を加える体系を構築していることで、より多面的な評価

が可能となっている。

表 3-3 レジリエンスエンジニアリング 4 能力を用いた評価用テンプレート

	学習(Learning)	予見(Anticipating)	監視(Monitoring)	対処(Responding)
回復等に寄与した 行為群A				
回復等に寄与した 行為群B				
}				
回復等に寄与した 行為群N				

レジリエンスエンジニアリングの4能力を列とし、データソースから事象を構成する行為群を明確にした上で「回復等に寄与した行為群」を行にとる。データソースから各行為群の中で実施された内容を4能力に分類して表中に記載する。

### 3.2.3. ワークロード時間推移評価手法の開発

#### 3.2.3.1. 評価手法の概念

「ワークロード (作業負荷)」の定義については、さまざまな議論が行われているが<sup>14)</sup>、日本工業規格 (JIS Z8501) にて、作業負荷、外的負荷 (work stress, external load) として「作業システムにおいて人の生理的・心理的状态を乱すように作用する外的条件や要求の総量」と定義されている<sup>15)</sup>。また、その測定手法は、メンタルワークロードに着目した開発がなされてきており<sup>16)</sup>、それらは、タスクの要求内容、時間配分、といった「作業の特徴」から負荷を測定する方法と、負担、疲労といった「人間側の反応」から負荷を測定する方法の二種類に分類できるとされる<sup>17)</sup>。

本研究では、すでに起きた事象のワークロードを分析するため、「人間側の反応」から負荷を測定する手法に必要な「負荷」や「疲労」の値を今から測定することはできない。そのため、「作業の特徴」側から負荷を評価する手法を参考にした。よって、本研究の対象である、発電所対策本部を含め TV 会議に参加している組織の主たる機能である、状況認識や意思決定をはじめとする人や組織の情報処理に関わる作業 (以下、タスク) に着目し、その内容を明らかにした。具体的には、ワークロ

ードを評価するために、TV 会議録の発話データの中から、単なる応答や現場の作業に関連しない報告等の発話を除き、タスクを抽出し、さらに、単一の発話の中に複数のタスクを要求しているもの（たとえば、複数の号機に関する指示を一回の発話で行っているもの）は、これらをタスクごとに分別した。これらを用いて、カテゴリごとに分別されたタスクを計測することで、ワークロードの推移を分析した。本研究で用いているアプローチは、対象データに対して適用可能であるとともに、近似的ながら「タスクの要求内容の量的表現」につながっており、「作業の特徴」側からワークロードを評価する手法として合理性を有している。

### 3.2.3.2. ワークロードマネジメントの構成要素に基づく整理

「ワークロードマネジメント」については、さまざまな研究があるが、緊急時対応のワークロードマネジメントに関しては、航空業界で体系化されているパイロットの訓練手法 Crew Resource Management（以下、CRM 手法）が参考になる<sup>18-21)</sup>。本研究では、すでに原子力分野に適合化し実績を有する CRM 手法のワークロードマネジメントの考え方を援用し、優先順位付け（Prioritization）、業務配分（Distribution）、ストレス管理（Stress Management）の分類を用いて整理した<sup>18),20)</sup>。なお、ワークロードマネジメントには「優先順位付け」とは別に「計画策定」を区分している例<sup>21)</sup>もあるが、本研究では「優先順位付け」は、計画策定を含めた広い概念であると考えた。「業務配分」には、自組織から他組織に業務を配分するものと、他組織からの業務の配分を受けるケースが存在しており、いずれもワークロードの総量に寄与する。そのため、これらを併せて「業務配分」としている。「ストレス管理」については、作業環境を含め、精神的あるいは身体的ストレスに繋がる項目としたが、作業そのものに関するタスクは「優先順位付け」、「業務配分」に分類して整理している。

### 3.2.3.3. ワークロードマネジメント評価のためのデータベース作成

ワークロードマネジメントの評価には、時系列データに基づく分析が必要である。そのために、例えば現場等の対応状況が時系列で記録されている TV 会議等のデータソースが存在している必要がある。

また、これらのデータにはワークロードとは関連しない情報も含まれているため、これらの中からワークロードに関連するデータを識別する作業手順が必要である。

本研究では、これらを実行するために、時系列データソースから 2 種類のデータベースを構築する。一つ目は「区分別発話データベース」である。これは発話内容のある一定の時間毎に区切り、その中でワークロードの関係するタスクを抽出し、これらをワークロードマネジメントの 3 つのカテゴリに分類するものである。これは発話内容をベースとしているため、いつ、どのようなタスクを、どのような組織が実施しているのか、を評価することが可能である。また、もう一つは「ワークロード統計データベース」である。これは、区分別発話データベースのタスクをカテゴリごとに定量化し、タスクの量的推移を区分ごとに時間推移として表現するためのものである。これにより、いつ、どのような組織が、どのようなタスク区分の業務をどの程度実施していたか、を評価することができる。

表 3-4 に本手法を適用する際に用いる評価用テンプレートを示す。列には、識別した組織または個人を上位区分とし、各組織または個人の受け持つタスクを下位区分として用意する。行には、ワークロードを評価したい時間帯を、評価する最小単位の時間単位で区分する。この表に、データソースから得られた各時間区分のワークロードマネジメントに対応するタスクを抽出し、ワークロードマネジメントの 3 つの構成要素（優先順位付、業務配分、ストレス管理）を識別して配分し、区分別発話データベースを作成する。作成された区分別発話データベースから、各組織ま

たは個人のタスク，時間区分ごとのタスク数をカウントし，ワークロード統計データベースを作成する。

表 3-4 ワークロードマネジメント評価のためのテンプレート

組織 \ タスク	組織 (個人) A			組織 (個人) B			～	組織 (個人) N		
	タスク a1	～	タスク an	タスク b1	～	タスク bn	～	タスク n1	～	タスク nn
時間 T1	事象対応に登場する組織 (または人) を明確にし，その組織 (人) がどのようなタスクを実行していたのかを列とする。これら进行评估したい時間帯と時間単位に区切りこれを行とする。データソースの中から，ワークロードマネジメントに対応するタスクを抽出し，それぞれのカテゴリーの枠内にタスクごとに記載するとともに，各タスクをワークロードマネジメントの3つの構成要素 (優先順位付，業務配分，ストレス管理) に識別して表中に記載する。									
時間 T2										
}										
時間 Tn										

### 3. 2. 4. Responding の背後要因モデルを用いた評価手法の開発

#### 3. 2. 4. 1. “Responding” を発揮する背後要因の抽出

レジリエンスエンジニアリング 4 能力の中で，現場で注目すべきものは「Responding: 対処できる」となる。ここでは，先行研究の調査並びに筆者の事故現場の体験に基づいて Responding の背後要因の構造化モデルを構築する<sup>22)</sup>。なお，Responding は個人で発揮されるものや組織として発揮されるものも存在する。本研究で分析を行った 1F 事故のデータソースは，基本的に組織としての Responding を発揮した結果を示したものとなっているため，本研究の分析も組織を基本とするが，個人としての評価を行っているものは，その旨補足を行う。

#### 3. 2. 4. 2. “Responding” の背後要因に関する先行研究

レジリエンスエンジニアリングの領域で Responding についての具体的な背後要



因を指摘している先行研究として、Hollnagel の RAG (Resilience Analysis Grid)<sup>23)</sup>、Heikkilä のレジリエンス向上特性 (Resilience Enhancing Properties)<sup>24)</sup>、小松原の RMS (Resilience Management System)<sup>25)</sup>がある。たとえば、Hollnagel は、RAG の中でそれぞれの能力を探るための質問群によりレジリエンスの測定を試みており、Responding については、検知、認識、対処の方法と力量、リソースといった内容を重視している。また、Heikkilä は、レジリエンスの能力一般として、知識とスキル (Capability)、前向きに対処する姿勢 (Motivation)、リソースや環境 (Condition) の必要性を指摘している。さらに、小松原は、1F 事故も踏まえ管理すべき要因として、前向きな態度 (Positive Attitude)、スキル (Technical Skill, Non-technical Skill)、健康 (Mental and Physical Health) を提案しており、Resilience Resource の必要性も指摘している。

#### 3.2.4.3. “Responding” の背後要因に関するモデルの作成

先行研究の調査から、Responding の背後要因として指摘されているものは、表現は異なっているものの、共通した要素も多いことが示された。本研究では、Responding を生む背後要因を、Attitude, Skill, Health, Working Environment としてまとめた。各要因について説明する。一般的に、有効な Responding を発揮するには、知識・認知や技能が必要であることは、組織が、Responding を発揮して欲しいと考える対象者に対して教育・訓練等を行っていることから理解できよう。ここでは、「知識や認知を含めた技能」を “Skill” とした。Skill は、レジリエンスエンジニアリング 4 能力のひとつである Learning に基づくところが大きい。「不測の事態」における Responding を考えた場合、この Skill をある程度備えていることは基本であり、ここでの分析はこれを前提とする。しかし、Skill を有している個人・組織であっても、対応姿勢が欠けていれば Responding の発揮は生ま

れない。したがって Responding に直接関与する要因として、Skill を備えた個人・組織の「対応姿勢」が重要となる。背後要因モデルの Attitude とは、このような姿勢を示すもので、「困難な状況下においても前向きに対処する姿勢、使命感」と定義できる。

一方、Responding の発揮をより確実にしていくうえで重要な要因には、個人の Health および組織が担う Working Environment がある。これらは、いかに充実していたとしても、Skill および Attitude がなければ Responding の発揮は生まれないが、「不測の事態」が顕在化した厳しい状況の中で、Responding が発揮されるには、安全を担う組織が「Skill や Attitude を支える要因」であるこれらについても理解し、醸成すべきであろう。Working Environment は、小松原が指摘する Resilience Resource（食料、水、トイレ、通信手段やロジスティック、作業に必要な設備や用具等）に加え、筆者の 1F 事故対応の経験から実感として得た、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・外的圧力などの総称とした。図 3-4 は、Responding に対するこれらの要因の貢献について、具体的な関係性を構造化したモデルである。

評価にあたっては、このモデルを評価用テンプレートに落とし込み、データソースを整理する。評価用テンプレートを表 3-5 に示す。まず、行にはデータソースから抽出された「回復等に寄与した行為群」を、行為群ごとに並べる。列には、各行為群の中に存在する対処(Responding)を書き出し、これを本項でモデル化した背後要因(Attitude, Skill, Health & Working Environment)に分類できるよう、4つの区分を用意する。このテンプレートに、データソースを振り分け、「回復等に寄与した行為群」を支えた背後要因を抽出し、教訓の導出に繋げるものである。

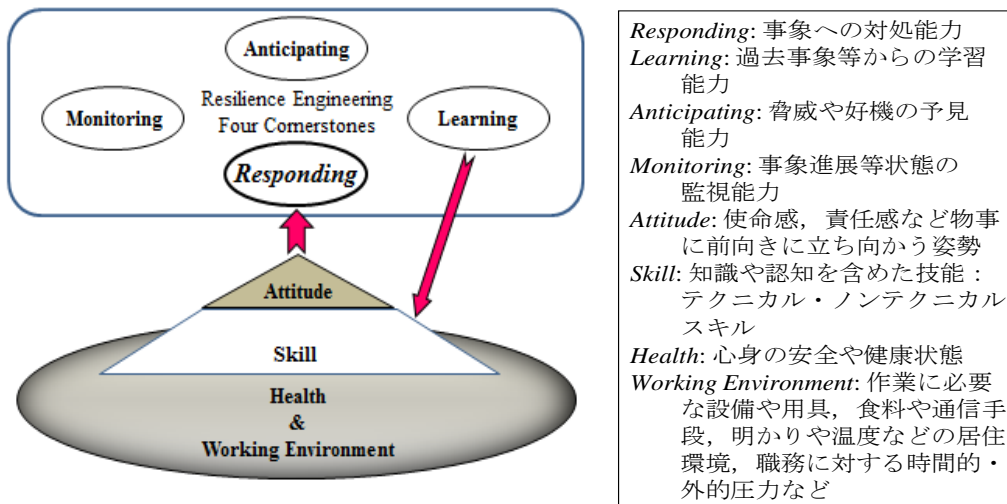


図 3-4 Responding の背後要因モデル

表 3-5 Responding 背後要因モデルを用いた評価用テンプレート

対処および背後要因 行為群	対処(Responding)	背後要因		
		Attitude	Skill	Health & Working Environment
回復等に寄与した行為群A				
回復等に寄与した行為群B				
}				
回復等に寄与した行為群N				

データソースの分類から「回復等に寄与した行為群」を抽出して行として並べる。各行為群の中で実行された対処，およびその背後要因である3要素を列とし，データソースから該当する箇所を分類して表中に記載する。

### 3.2.5. m-SHEL モデルを援用した評価手法の開発

#### 3.2.5.1. 回復過程の評価手法

既存の事故において設計または想定から大きく異なる状態となったシステムを回復させるには、さまざまな対応が求められる。特に、中長期的にシステムの回復を実施する際、それらを人間工学の目標でもある「システムにおける人間と他の構成要素のインタラクションを理解」<sup>26)</sup>する視点（以下、人間工学的視点）から学習することが必要である。それは、システムの状態も変化し、その環境も変化する中で、人や組織がこれらのインタラクションを制御しながら回復過程を構築してゆくからである。

この様な状態変化を創造する必要がある回復力を評価するためには、単に人の能力だけに着目した評価手法では表現が難しい。したがって、システムと人が相互にインタラクションを行いながら、これらがともに変化していく様を時系列に整理できる手法が必要となる。

まず、回復過程の時間的推移を区分する時間的要素の整理である。回復過程に関わるデータソースを収集して分析することで、そのシステムがダメージからどのように回復されているかを俯瞰し、それらを主要な工程ごとに時間を区切る作業である。この時間は、必ずしも絶対的な時間軸を意味するものではなく、ある一定の回復過程が構築される期間をまとめる必要がある。このようにして、回復過程をまずそのプロセスから時間的に分割する。

上記により時間的に分割された単位を用いて、次にその中でその様な回復行為が実施されていたのかを評価する。そのために、本研究では、人間工学的視点に基づく構成要素のインタラクションを表現する手法として、m-SHEL モデルのカテゴリーを援用した。すなわち、回復の中心となる組織や人と、それ以外の要素を5つのインタラクションカテゴリーに区分して、回復過程の創造を評価する。

m-SHEL モデルは時間的概念を含まないモデルであるが、このように時系列整理と合わせて評価手法を整備することで、長期に亘る回復過程の評価が可能となる。

### 3.2.5.2. m-SHEL モデルによる分析カテゴリー

本研究では、分析対象の事象を人間工学的視点から評価するための手法として、「人（当事者・組織）」とマネジメントを含めた「システムの他の構成要素」との関連（インタラクション）を簡略化して整理できる m-SHEL モデルを援用した<sup>27)</sup>。このモデルは、ヒューマンエラーに関係する当事者と周囲の様々な構成要素との関連（インタラクション）を明らかにするモデルとして開発されたものであるが、本研究ではそのインタラクション分割の考え方をを用いて、回復に寄与した行為群の整理に活用する。

本研究では、モデルの中心となる L (Liveware) は「現場で実際にシステムの他の構成要素とインタラクションを実施している人（当事者・組織）」である。さらに、L を取り囲んでいる S (Software), H (Hardware), E (Environment), L (Liveware) および m (management) は下記と定義し、整理した。しかしながら、それぞれの構成要素は相互に関係しているため、インタラクションは単純に整理できるものではなく、簡略化して整理できるモデルの特徴を活かしながら、相対評価的な視点に立って判断した。各インタラクションの整理の確定は、最初に筆者が行ったものを共同研究者で検討し、さらに、その結果を m-SHEL モデルに詳しい研究者に示し、フィードバックされたコメントを、再度共同研究者で議論して行った。

① L-S (Software) : 予め定められた、または新たに考案された手順や工程とのインタラクション

② L-H (Hardware) : システムの機械的要素、使用可能な機器のリソースとのインタラクション

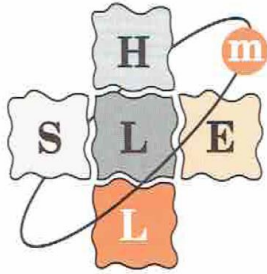
③ L-E (Environment) : L, H を取り巻く環境とのインタラクション

④ L-L (Liveware) : 現場で実際にシステムの要素とインタラクションを実施している人（当事者や組織）に、影響を与えている人や組織の活動とのインタラクション

⑤ L-m (management) : 目標設定やその進捗管理、成果のフィードバックとのインタラクション

なお、今回は人とシステムの要素とのインタラクションを評価対象としているため、L 自身の特性については分析対象から除外している。図 3-5 に概要を示す。

これらのインタラクションの区分を活用した評価用テンプレートを表 3-6 に示す。m-SHEL モデルのインタラクション区分を列とし、インタラクションの中をそのインタラクションが行われた期間である Phase 毎にまとめる。行としては、インタラクションの各 Phase にて実施された対処等をデータソースより分類し、これらから効果や結果を抽出できる欄を設けた。



モデルの中心となるL(Liveware)は「現場で実際にシステムの他の構成要素とインタラクションを実施している人(当事者・組織)」である。このLとこれを囲む各要素のインタラクションを右表のとおり整理した。  
(図は河野龍太郎「医療におけるヒューマンエラー第2版、医学書院より)

区分	インタラクションの内容
L-S(Software)	予め定められた, または新たに考案された手順や工程とのインタラクション
L-H(Hardware)	システムの機械的要素, 使用可能な機器のリソースとのインタラクション
L-E(Environment)	L, Hを取り巻く環境とのインタラクション
L-L(Liveware)	現場で実際にシステムの要素とインタラクションを実施している人(当事者や組織)に, 影響を与えている人や組織の活動とのインタラクション
L-m(management)	目標設定やその進捗管理, 成果のフィードバックとのインタラクション

図 3-5 m-SHEL モデルの概要

表 3-6 m-SHEL モデルを援用した評価用テンプレート

m-SHELモデルの インタラクション区分	行われた対処等	効果や結果	
Liveware-Softwareの インタラクション	Phase 1		
	}		
	Phase N		
Liveware-Hardwareの インタラクション	Phase 1	回復過程等、中長期的な 時間工程において実施さ れた内容を、節目ごとに <b>Phase</b> として区切り、各時 間工程の間に実施された 対処等を、m-SHELのイン タラクションのカテゴリ 5種類に分類する。これ らの中から効果や結果を 抽出する。	
	}		
	Phase N		
Liveware-Environmentの インタラクション	Phase 1		
	}		
	Phase N		
Liveware-Livewareの インタラクション	Phase 1		
	}		
	Phase N		
Liveware-managementの インタラクション	Phase 1		
	}		
	Phase N		



### 3.3. 実証事象の選定

1F 事故は、原子炉の安全を確保する「止める」、「冷やす」、「閉じ込める」機能のうち、「冷やす」、「閉じ込める」が十分に機能しなかった事故であり、まさに「不測の事態」における緊急時対応が行われた事象である。原子炉は、停止した後も崩壊熱が発生することから、継続して「冷やす」ことが必要だが、この機能を維持できなかったことにより、過酷事故に至り、大量の放射性物質を放出している。しかし、「冷やす」機能は失われた状態が継続していたわけではなく、その後さまざまな対処によって機能を回復し、現在に至っている。

この 1F 事故の調査は、既に複数の組織によって実施され、それぞれの事故調査報告書としてまとめられている（以下、既存の事故調査）。いずれの事故調査も調査の対象および範囲は、事故の未然防止が行われなかった背景から事故対応までと幅広い。しかし、調査の目的は、事故の原因の究明およびその検証<sup>28), 29)</sup>であり、事故の原因となったリスクを突き止め、それを除去することで安全が達成できるという考えに基づいている。そのため、事故対応に関する調査も、上手くいかなかった行為群を抽出し、その原因を究明し、再発防止策の提案が行われている。一方、1F 事故の「冷やす」機能の回復は、放射性物質の放出を防ぐことはできなかったが、このような行為によって、さらなる事故の拡大防止につながったと評価する指摘は複数の事故調査に記載されている<sup>30-33)</sup>。事故拡大が防止できなければ、さらなる放射性物質の放出に繋がっていた可能性もあった。しかし、いずれの事故調査も、なぜそのような行為を実行できたのかといった観点をもった、指摘の背景に関する分析や、教訓の導出は行っていない。

事故を未然に防ぐことは重要である。そのためにシステムを理解し、リスクを同定してこれを低減する努力は欠かせない。しかし、このように「不測の事態」における対応として、事故の拡大防止、ダメージからの回復に寄与した緊急時対応力が

どのように発揮されたのか、という知見を蓄積することも、また肝要である。

一方、適切な分析を行うには、現場でどのような行為がなされたかを把握できる利用可能なデータが存在していなければならない。これらの条件から、分析対象を、全交流電源喪失後、炉心溶融や水素爆発を起こしながらも、最終的に一時中断した炉心への注水を回復し、冷却能力を確立した3号機の「冷やす」機能の推移、並びに、3号機が安定的に冷却でき、「冷温停止状態」を達成した過程を評価対象とし、評価を行った。

### 3.4. 実証に用いるデータソースの収集

第2章で述べたとおり、同じ事故という事象を評価する上でも、その事象がどのような経緯をたどり発生しているのか、また回復しているのかを分析してゆく必要がある。複雑な社会技術システムの事象の進展は単純ではなく、多くの行為群や判断のポイントが存在する。この様な状況下において、事故調査で着目している行為群と、本研究で着目している行為群とは異なっている。そのために、本研究で分析を行った行為群等に関するデータソースは、事故調査を中心としたこれまでのデータソースではカバーできていないものが多く存在した。

以下にそれらの違いをまとめるとともに、Safety-II を目指すうえで、今後この学習システムを活用し緊急時対応力を高めてゆくために、緊急時対応を分析するためのデータソースの構築という観点から留意すべき事項についてまとめる。事実関係は、現場当事者だけが知り得る事実は含めず、公開されている報告書等のみを用いて整理した。

#### 3.4.1. 既存の事故調査のデータソース

一次データにアクセス可能な形で作成されている主要な機関が実施した事故調査、すなわち、東京電力の福島原子力事故調査報告書（以下、東電事故調）、東京電力福

島原子力発電所における事故調査・検証委員会の報告書（以下，政府事故調），および東京電力福島原子力発電所事故調査委員会の報告書（以下，国会事故調）では，本研究に関わる緊急時対応のデータソースの収集に関し，下記のような取り組みが実施されている。

① 政府事故調<sup>34),35)</sup>

- ・事故現場である福島第一原発及び福島第二原発のほか，主として地震・津波対策について検討するため，日本原子力発電株式会社東海第二発電所，東北電力株式会社女川原子力発電所，同社原町火力発電所，中部電力株式会社浜岡原子力発電所及び東京電力柏崎刈羽原子力発電所の視察
- ・東京電力，保安院，原子力安全委員会を始めとする関係事業者，関係機関から資料の提出を受けてこれを分析
- ・これらの役職員，構成員や，菅直人前内閣総理大臣を始めとする事故発生当時の閣僚，更には学識経験者等も含めて幅広く関係者のヒアリングの実施（ヒアリングを行った関係者の人数は772名，総聴取時間は概算で1,479時間）

② 国会事故調<sup>36)</sup>

- ・延べ1167人，900時間を超えるヒアリングの実施
- ・東京電力福島第一原子力発電所，及び第二原子力発電所，東北電力女川原子力発電所，日本原電東海第二発電所に対して9回に及ぶ視察の実施
- ・平成23（2011）年3月11日当時，福島第一原子力発電所において作業に従事していた方を対象とした従業員アンケートの実施（2415人の東京電力及び協力会社の方々からの回答を得た）

③ 東電事故調<sup>37)</sup>

- ・原子力事業者防災業務計画，操作手順書類等の事故前から使用されていた今回事故に関連するマニュアル類の調査・確認

- ・今回の事故時に採取された地震・津波のデータ、プラント挙動を示すチャート、警報発生記録等データ、その他採取・記録したプラントパラメータ、並びに事故時に記録された運転日誌、ホワイトボード等の記録類の調査・確認

- ・今回の事故時に採取されたデータをもとに実施した津波のインバージョン解析、地震応答解析、炉心損傷解析等の解析評価

- ・当社社員およびロボットによって実施した屋内外の主要設備に関する実地調査・聞き取り及び記録類による調査・事実認定

(発電所の災害対策要員を中心に延べ600名に聞き取りをするとともに各種記録類との突き合わせによる事実認定を実施)

### 3.4.2. 他のデータソースとその活用方策

今回の研究において、緊急時対応の分析を実施する際に、着目する行為群の違いやより現実に即した評価を行うために、上記報告書以外のデータソースを必要としている。その主要なものを、カテゴリーごとに示す。

① 「回復等に寄与した行為群」の抽出や、実際の作業における様々な相互干渉の分析に用いるデータ

「TV会議の発話内容」<sup>38),39)</sup> (以下、TV会議録)

3つの事故調査が参照しているが、公開されたのは事故調査公表後である。

当時の東電のTV会議システムは、東電の本店、1Fを含む3か所の発電所及びオフサイトセンターの東電ブースの5か所が常時連結され、必要に応じて発話が行われる運用となっていた。TV会議録は、マスコミに公開された1F事故対応の3月12日～14日のTV会議システムの発話をまとめたものである<sup>38)</sup>。その作業は人力によるものであるが、筆者らが直接アクセスできる一般公開されている時間帯の映像<sup>39)</sup>とTV会議録を比較することで、その信頼性を担保した。

なお、録画された TV 会議システムの内容は、東京電力の「内部における本店・各発電所等との意思・情報伝達の手段であり、公開を予定して録画していたものではない」<sup>40)</sup>が、「メディアの要請や社会的な関心の高さ等を総合的に勘案」<sup>40)</sup>し、「弁護士にもご意見を伺いながら経営として判断」<sup>41)</sup>した結果として、公開されている。東電は、公開にあたり、映っている事故後の厳しい環境の中で事故復旧にあたった職員から「映像や音声を公開することで個人が特定され、個人的な誹謗中傷や家族への影響を心配・不安に思う声」<sup>40)</sup>が挙がっている事実に対し、「最大限配慮することも会社の責任」<sup>40)</sup>と考え、「社員、個人や、その家族への誹謗中傷を避ける観点」<sup>41)</sup>から、「報道関係者の皆さまを対象とし、当社視聴室内での視聴」<sup>41)</sup>や「原則、氏名・役職等の個人が特定できる音声部分については、既に事故調査報告書にある当社役員等を除き、マスキング処理」<sup>41)</sup>を行うといった公開方法をとっている。また、本研究の実施にあたって、東電および岩波書店に TV 会議録の研究への利用の可否について確認し、了承を得ている。本研究で用いた参考文献 38 の TV 会議録は、上記により、報道関係者に公開された「2011 年 3 月 12 日 22 時 59 分から 3 月 15 日 0 時 6 分の TV 会議システムの映像記録と、東電が音声を文字起こした補助資料（東電作成記録）をもとに作成」<sup>38)</sup>されたものである。

「政府事故調査委員会による聴取結果」<sup>42-44)</sup>（以下、調書）

政府、国会の事故調査が参照しているが、公開されたのは事故調査公開後である。本研究では、2 名の調書を参照している。当時発電所長であった吉田の調書<sup>42), 43)</sup>（以下、吉田調書）は、彼が様々な局面でどのような状況認識をしていたのか、またどのように考えて判断を行っていたのか、といった根拠や背景が記されている。また、当時経済産業大臣であった海江田の調書<sup>44)</sup>（以下、海江田調書）は、主に長期的なシステムの回復過程における政府としての考え方や意思決定の背景についての情報が含まれている。

「福島第一原子力発電所・事故の収束に向けた道筋」<sup>45)</sup>（以下、収束道筋）、およびその「進捗状況報告」<sup>46)</sup>（以下、進捗報告）、「ステップ2完了報告書」<sup>47)</sup>

事故調査公表前に公表されたデータであるが、どの報告書も緊急時対応の分析対象としていない。回復過程におけるシステム変更の様々な取り組みが記されており、それぞれの時間断面における計画やその進捗、次ステップへのフィードバックなどに関するデータがそろっている。

## ② 意思決定者等の心境や、置かれた環境の分析に活用できるデータ

「不測の事態」において、緊急時対応を担い手が人や組織であるために、意思決定者をはじめとした人たちの置かれた環境や心境について慎重に分析を行う必要がある。これらの観点から有用と考えられるデータソースを示す。

「調書」<sup>42), 43)</sup>

緊急時対応の実際を行った関係機関責任者の調書であり、重要な意思決定の背景やその環境、心理的状況などについての情報が豊富に含まれている。しかし、基本的に「上手くいかなかったこと」の原因究明に着目した視点で質問が行われていること、個人としての調書であることから、多くの内容はいわゆる Safety-I の概念に基づくものとなっており、個人に関わるバイアスがあることも否定できない。「回復等に寄与した行為群」に関する記述は相対的にかなり少なくなっているが、吉田調書<sup>42), 43)</sup>には、報告書に直接記載されていない多くの事実が含まれている。

「全電源喪失の記憶」<sup>48)</sup>

事故に至った経緯のみならず、緊急時対応という観点から、実際に作業に携わったメンバーを中心に、インタビューを行い、事実関係をまとめている。したがって、Safety-I 並びに Safety-II の視点がともに含まれた内容となっている点の特徴である。また、事象の進展ごとに内容をまとめているため、行為群ごとに

関係者の発言を集めており、相互に矛盾するような個人バイアスが取り除かれ、事実に即したレポートとしてまとめられている。作業や意思決定に関わる作業環境、心理状況などを読み取ることが可能である。

「日本原子力学会事故調査報告」<sup>49)</sup> (以下、学会事故調)、「ヒューマン・マシン・システム研究部会報告書」<sup>50)</sup> (以下、HMS 報告)

直接関係者と接触をすることは行っていないが、学術的、人間工学的な観点から様々なデータ収集や考察を行っている点が特徴である。事故の拡大防止と関連の深い判断が行われた行為群について、時間経過に従いながら作業環境や心理状況などをできるだけ再現するために、必要なデータを収集するとともに、人間工学としてレジリエンスエンジニアリング、Crew Resource Management (CRM) といった手法を用いながら、分析が行われている。

### ③ 長期に亘る回復作業等に関して活用できるもの

「収束道筋」<sup>45)</sup>、「進捗報告」<sup>46)</sup>、「ステップ2完了報告書」<sup>47)</sup>

東京電力は、2011年4月17日に収束道筋を発表した。これは、廃炉に向けた工程であり、その後これを達成するために様々な取り組みが実施されてゆく。その取り組みは進捗報告として毎月発表され、その達成度合いや目標の修正などの管理が実施されている。これらの工程の中で実際に行われている行為の重要な部分は、廃炉というよりは原子炉の冷却、すなわち「冷やす」機能の再構築である。しかし、事故調査では、これらの内容は「廃炉工程」として取り扱われ、調査対象とはなっていない。「冷やす機能の再構築は、事故からの「回復」に関わる行為であり、極めて重要なプロセスである。この収束道筋、およびその進捗報告には、システムがどのように回復してきたのかといった事実は読み取ることができるものの、その回復過程の背景や意思決定の要素などを読み取ることが困難である。

「平成23年3月11日～12月31日の実績」(東京電力)<sup>51)</sup> (以下、東電実績)、福

島原子力発電所事故対策統合本部の議事録<sup>52)</sup>

上記収束道筋や進捗報告では読み取れないより詳細な実施状況や、意思決定の背景、数値データ等について、参照可能である。

#### ④ 事故調査後判明した事実に関する情報

「福島原子力事故発生後の詳細な進展メカニズムに関する未確認・未解明事項の調査・検討結果「第5回進捗報告」について」(東京電力)<sup>53)</sup>(以下、未解明調査)

事故調査は事故発生後約1年に亘り実施されているが、この間では判明しなかった、または異なる解釈を行っていた事実が後から判明しているものもある。その様な内容を継続的に評価し、後から判明した事実関係をまとめたドキュメントであり、事実の補足を行う上で重要な参考文献である。

### 3.5. 事象の概要と行為群の抽出

#### 3.5.1. 1F3号機の「冷やす」機能回復事象

##### 3.5.1.1. 注水機能の暫定回復までの経緯

本研究の対象事例である、3号機の暫定的な注水機能回復までの概要を述べる。

3号機は、東日本大震災による地震及び津波により、全交流電源が喪失したが、生き残った直流電源(バッテリー)により高圧注水機能をもつ機器を運転することで「冷やす」機能を維持した。しかし、使用していたバッテリーはいずれ枯渇すると予見されていたため、バッテリーの延命策と代替の注水手段の確保を並行して実施した。このバッテリーの延命策によって、高圧注水機能をもつ機器の運転を長期間維持できた。

だが、原子炉の圧力の低下に伴い、高圧注水系のタービンに機器破損が懸念される運転領域に至ったことから、これ以上高圧注水機能をもつ機器を運転し続けるこ



とは危険と考えた運転員は、原子炉を減圧して低圧の注水に切り替える判断をし、高圧注水機能をもつ機器を停止した。しかし、低圧の注水に切り替えるために必要な減圧が、バッテリーの容量不足から実施できなかったため、すぐに切り替えが行えず、原子炉への注水が途絶える結果となり、過酷事故に発展した。

一方、そのような状況下でありながらも、直流電源（バッテリー）の復旧等は実施され、減圧が可能となるとともに、消防車を注水用のポンプとして活用した、津波により建屋近傍に溜まった海水を水源とする注水系統が確立され、原子炉の「冷やす」機能が回復に至った。

表 3-7 に、1F 事故における 3 号機の冷却設備の状況を、図 3-6 に 3 号機事故及び注水回復までの経緯を示す。

表 3-7 福島第一原子力発電所 3 号機の冷却設備の状況

機能目的	名称	表記	主な機能	系統数	交流電源不要	津波後の機能*
高圧注水	高圧注水系 (High Pressure Coolant Injection System)	HPCI	原子炉圧力が低下しにくい配管破断等の際に、原子炉の蒸気でタービンを駆動するポンプにより冷却水を原子炉に入れる。非常用炉心冷却系の一つ。	1	○	直流電源で動作
	原子炉隔離時冷却系 (Reactor Core Isolation Cooling System)	RCIC	主蒸気が復水器で冷却できない場合などに原子炉の蒸気でタービンを駆動するポンプにより冷却水を原子炉に入れる。 HPCIの約1/10程度の流量。	1	○	直流電源で動作
高圧系代替注水	制御棒駆動系 (Control Rod Drive)	CRD	原子炉の出力を制御する制御棒の駆動を行う設備。緊急時には制御棒を急速に挿入する。	1		機能喪失
	ホウ酸水注入系 (Stand by Liquid Control System)	SLC	何らかの要因で制御棒を挿入できない場合のバックアップ装置。中性子吸収能力の高いホウ酸溶液を原子炉へ注入する。	2		電源喪失
減圧	逃がし安全弁 (Safety Relief Valve) (自動減圧機能/逃がし安全弁機能/安全弁機能)	SRV	原子炉圧力が上昇した際、压力容器保護のために自動、または手で蒸気を逃すための弁。非常用炉心冷却系の自動減圧装置としての機能も持つ。	8	○	直流電源で動作
低圧注水	炉心スプレイ系 (Core Spray System)	CS	冷却喪失事故時に炉心上部より冷却水をスプレイし冷却する装置。非常用炉心冷却系の一つ。	2		機能喪失
	残留熱除去系 (Residual Heat Removal System)	RHR	原子炉停止後の残留熱の除去や、浮上時に冷却水を注入して炉水を維持する装置。非常用炉心冷却系の一つ。	2		機能喪失
低圧系代替注水	復水補給水系 (Make-up Water System (Condensate))	MUWC	原子炉等で使われた水を浄化し、運転に必要なさまざまな水を供給する設備。アクシデントマネジメント(AM)上では原子炉への注水に利用できる。	1		電源喪失
	消火系 (電動駆動) (Fire Protection System)	FP	発電所内の消火系統で、モーター駆動のポンプを有する設備。アクシデントマネジメント(AM)として原子炉への注水に利用できる。	1		機能喪失
	消火系 (ディーゼル駆動) (Diesel Driven Fire Pump)	DDFP	発電所内の消火系統で、ディーゼル駆動のポンプを有し、モーター駆動が運転できない時に自動起動する。	1	○	直流電源で動作 ディーゼル駆動
自衛消防	消防車	消防車	平成19年7月に発生した新潟県中越沖地震の教訓として、発電所火災への即応体制の強化策として消火用に整備された。自衛消防隊員等により操作される。	3	○	エンジンにて動作、このうち1台のみ3号機で使用可能

東電事故調、政府事故調より作成

\*: 機能喪失は電源以外の設備機能も喪失しているものを示す

日付	時間	原子炉制御および注水状況	水源
2011年 3月11日	14:47	<b>地震による原子炉スクラム信号発信</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>原子炉自動停止</li> <li>タービン・発電機停止</li> <li>非常用ディーゼル発電機自動起動</li> <li>主蒸気隔離弁閉止</li> <li>外部電源喪失</li> </ul>	
	15:05	原子炉隔離冷却系手動起動 原子炉隔離冷却系，原子炉水位L-8にて自動停止	淡水：圧力抑制室，又は復水貯蔵タンク
	15:27	<b>津波襲来</b>	
	15:35		
	15:38	非常用ディーゼル発電機A，Bトリップ→全交流電源喪失	
	15:42	<b>原災法第10条該当事象（全交流電源喪失：SBO）と判断</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>SBOにより格納容器除熱機能喪失</li> </ul>	
	16:03	原子炉隔離時冷却系手動起動 <ul style="list-style-type: none"> <li>直流電源の延命策として，不必要な負荷の切り離し実施</li> </ul>	
3月12日	11:36	原子炉隔離冷却系自動停止 <ul style="list-style-type: none"> <li>原子炉水位低下</li> </ul>	
	12:35	高圧注水系自動起動（原子炉水位L-2）	淡水：復水貯蔵タンク
3月13日	2:42	高圧注水系手動停止 <ul style="list-style-type: none"> <li>消化ポンプ，消防車による消火系を用いた代替注水の準備</li> </ul>	
	5:10	<b>原災法第15条該当事象（原子炉冷却機能喪失）と判断</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>原子炉水位低下</li> </ul>	
	9:08頃	主蒸気逃し弁（逃し弁機能）により原子炉圧力容器減圧開始	
	9:25	消防車による淡水注入開始	淡水：防火水槽
	12:20	消防車による淡水注入終了	
	13:12	消防車による海水注入開始	海水：逆洗弁ピット
3月14日	1:10	消防車による海水注入中断 <ul style="list-style-type: none"> <li>ホースの取水位置を調整</li> </ul>	
	3:20	消防車による海水注入開始	海水：逆洗弁ピット
3月15日	11:01	<b>水素爆発</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>爆発により消防車やホースが損傷</li> </ul>	
	15:30頃	新しい海水注水ラインを構成し消防車による注水再開	海水：逆洗弁ピット
4月25日		淡水への切り替え	淡水：復水貯蔵タンク
6月27日		循環注水冷却システムの運用開始	淡水：高濃度汚染水浄化水
12月16日		<b>冷温停止状態の達成</b>	

図 3-6 3号機事故及び注水回復までの経緯  
 （東電事故調，未解明調査より作成）

### 3.5.1.2. 「冷温停止状態」達成までの経緯

定格出力で運転中であった3号機は、2011年3月11日の東日本大震災の地震発生により、原子炉が自動停止（止める）した。その後、外部電源を喪失したものの、非常用発電機が自動起動し、高圧で原子炉に注水する機能（高圧注水系）により原子炉の冷却（冷やす）を継続でき、原子炉内の放射性物質を様々な格納用のバリアの中に留める（閉じ込める）ことに成功した。

その後、津波によって、非常用発電機が停止し、海水冷却設備の機能が失われた。だが、この時点では、直流電源により運転可能な高圧系注水系による冷却が継続されている。しかし、2日後の13日に、使用可能であった高圧注水系が停止し、崩壊熱が出続ける原子炉を「冷やす」ことができなくなり、過酷事故に至った。その結果、「閉じ込める」機能も維持できなくなり、放射性物質の放出に至った。

一方、現場では、想定された手順等では実現できなくなった「冷やす」機能をなんとか回復し、確保しようとするさまざまな行為がなされていた。それらの行為群により、事故のさらなる拡大は阻止され、冷温停止状態達成に至った。

最初に実現した「冷やす」ための注水機能は、アクシデントマネジメントであらかじめ用意された原子炉への注水ラインを活用したものである。ただし、このシステムは、本来は消火機能のために配備されていた消防車を注水システムの要素として利用し、かつ津波により建物近傍のピットに溜まっていた海水を活用した暫定的なものであった。その後、注水の水源は海水から淡水に変更され、注水システムの信頼性向上が図られた。しかし、一方で注水により放射性物質を多量に含んだ「高濃度汚染水」の流出という新たな課題が発生した。この流出について、既存の事故調査は、放射性物質の環境放出として評価しているが、この高濃度汚染水に対しては、淡水注水が実施されている間に、貯蔵・浄化処理のためのシステム要素を追加するという対処が行われていることから、本研究では、政府事故調<sup>34),35)</sup>、国会事故

調<sup>36)</sup> , 東電事故調<sup>37)</sup>をデータソースとして, 注水と関連した評価を実施している。

さらに, その後, 処理水を原子炉に再び注水として活用する「循環注水冷却」システムへの変更がなされ, 原子炉の冷却性能を高めることができた。これらにより, 冷温停止状態の達成の宣言が実現した。

### 3.5.2. 行為群の抽出方法

3.4 節にて収集したデータソースを用いて, 3 号機の原子炉の冷やす機能の回復にそのような行為群が存在していたのかを明確にする。本研究では, 評価手法との関連において, ①冷やす機能ごとの時系列評価, ②冷やす機能の機器ごとの時系列評価, ③冷やす機能の信頼性向上に関わる時系列評価, の 3 種類の方法を用いて行為群を分類している。このようにして作成された行為群全体の時系列データを用いて, 様々な行為群の中から, 本研究が着目する緊急時対応力が発揮されている行為群を抽出する。

### 第3章 参考文献

- 1) E. Hollnagel, 北村正晴/小松原明哲[監訳]: Safety-I & Safety-II, 海文堂, 2015
- 2) E. Hollnagel, 北村正晴[監訳]: 日本語版に寄せて, レジリエンスエンジニアリング概念と指針, 日科技連, 2012
- 3) 日本学術会議総合工学委員会工学システムに関する安全・安心・リスク検討分科会: 工学システムに関する社会の安全目標, 2014
- 4) ISO (The International Organization for Standardization)/IEC (The International Electrotechnical Commission): ISO/IEC Guide 51, 2014
- 5) 吉澤厚文, 大場恭子, 北村正晴: 福島第一原子力発電所事故対応の分析に基づいた Safety-II の概念活用による安全性向上のための研究, 人間工学, Vol. 54, No. 1, pp.1-13, 2018
- 6) 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
- 7) E. Hollnagel, J. Pariés, D. D. Woods and J. Wreathall, 北村正晴・小松原明哲[監訳]: 実践レジリエンスエンジニアリング, 日科技連, 2014
- 8) E. Hollnagel: Chapter 1-4, Safety-II in Practice-Developing the Resilience potentials-, Routledge, 2018
- 9) E. Hollnagel: Prologue, The Scope of Resilience Engineering. In E. Hollnagel, J. Pariés, D. D. Woods and L. Wreathall, Resilience Engineering in Practice: A Guidebook, ASHGATE, 2011
- 10) 北村正晴: レジリエンスエンジニアリングが目指す安全 Safety-II とその実現法, 電子情報通信学会基礎・境界ソサイエティ Fundamentals Review, Vol.8, No.2, pp.84-95, 2014
- 11) 出野利文: 専門職学位論文 東電福島事故対応の組織レジリエンス, 神戸大学,

2015

- 12) 日本原子力学会ヒューマン・マシン・システム研究部会東京電力(株)福島第一原子力発電所事故調査検討小委員会:ヒューマンファクターの観点からの福島第一原子力発電所事故の調査,検討, pp.56-73, 2015
- 13) 原子力安全推進協会:東京電力(株)福島第二原子力発電所東北地方太平洋沖地震及び津波に対する対応状況の調査及び抽出される教訓について(提言), 2012
- 14) 青木和夫, 柳堀朗子:特集②人間工学国際規(ISO)とその最新動向(2)-SC1:人間工学の一般原則-, 人間工学, Vol. 50, No. 2, 2014
- 15) JIS (Japanese Industrial Standards) :Z 8501 :2007 (ISO 6385 : 2004) 人間工学-作業システム設計の原則, 2007
- 16) 芳賀繁:メンタルワークロードの理論と測定, 日本出版サービス, 2001
- 17) 藤垣裕子, 飯田裕康:メンタルワークロード概念の諸相,労働科学, Vol. 68, No. 11, pp.549-559, 1992
- 18) 日本原子力学会ヒューマン・マシン・システム研究部会東京電力(株)福島第一原子力発電所事故調査検討小委員会:ヒューマンファクターの観点からの福島第一原子力発電所事故の調査,検討, 2015
- 19) Civil Aviation Authority: Flight-Crew Human Factors Handbook CAP 737, Aviation House, pp.55-70, 2014
- 20) 石橋明, 狩川大輔, 高橋信, 若林利男, 北村正晴: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
- 21) 津田宏果, 飯島朋子, 野田文夫:行動指標を用いた CRM スキル計測手法の開発, 宇宙航空研究開発機構研究開発報告, JAXA-RR-09-001, pp.1-86, 2009

- 22) 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
- 23) E. Hollnagel: Safety-I and safety-II, The past and future of safety management, ASHGATE, pp.145-148, 2014
- 24) J. Heikkilä, T. Uusitalo, J. Lappalainen and E. Rantanen: Proactive and Flexible Safety Management-Resilience in Finland, 5th International Conference Workingonsafety.net, 2010
- 25) A. Komatsubara: Resilience Management System and Development of Resilience Capability on Site Workers, Proceedings of the Fourth Resilience Engineering symposium, pp.148-154, 2011
- 26) 日本人間工学会: 人間工学とは, Retrieved April 18, 2017, available from <https://www.ergonomics.jp/outline.html>
- 27) 河野龍太郎: 医療におけるヒューマンエラー第2版, 医学書院, pp.52-64, 2016
- 28) 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, p. 1, 2012
- 29) 東京電力福島原子力発電所事故調査委員会: 国会事故調報告書, p. 8, 2012
- 30) 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, pp. 447-448, 2012
- 31) 東京電力福島原子力発電所事故調査委員会: 国会事故調報告書, pp. 193-195, 2012
- 32) INPO (Institute of Nuclear Power Operations): Special Report on the Nuclear Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, INPO 11-005 Addendum, 2012
- 33) IAEA (International Atomic Energy Agency): Foreword by Yukiya Amano Director General, The Fukushima Daiichi Accident – Report by the Director General, 2015



- 34) 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:中間報告, 2011
- 35) 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
- 36) 東京電力福島原子力発電所事故調査委員会:国会事故調報告書, 2012
- 37) 東京電力:福島原子力事故調査報告書, 2012
- 38) 福島原発事故記録チーム[編], 宮崎知己, 木村英昭[解説]:福島原発事故東電テレビ会議 49 時間の記録, pp. 2-96, 岩波書店, 2013
- 39) 東京電力ホールディングス写真・動画集: Retrieved November 23, 2016, available from <http://photo.tepco.co.jp/date/2013/201303-j/130029-01j.html>
- 40) 東京電力ホールディングス:TEPCO ダイレクターテレビ会議録が映像の公開について , Retrieved February 1, 2019 , available from [http://www.tepco.co.jp/cc/direct/1211554\\_1992.html](http://www.tepco.co.jp/cc/direct/1211554_1992.html), 2012
- 41) 東京電力ホールディングス:東京電力からのお知らせー平成 23 年 3 月 16 日以降のテレビ会議映像の公開方針について, Retrieved February 1, 2019, available from <http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/info/12090601-j.html>, 2012
- 42) 内閣府:事故時の状況と対応について, 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 2011 年 7 月 29 日, Retrieved February 1, 2019, available from [https://www8.cao.go.jp/genshiryoku\\_bousai/fu\\_koukai/pdf\\_2/051.pdf](https://www8.cao.go.jp/genshiryoku_bousai/fu_koukai/pdf_2/051.pdf)
- 43) 内閣府:事故時の状況と対応について 4, 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 2011 年 8 月 8 日 2011 年 8 月 9 日, Retrieved February 1, 2019, available from [https://www8.cao.go.jp/genshiryoku\\_bousai/fu\\_koukai/pdf\\_2/077\\_1\\_4.pdf](https://www8.cao.go.jp/genshiryoku_bousai/fu_koukai/pdf_2/077_1_4.pdf)
- 44) 内閣府:事故対応全般について, 政府事故調査委員会ヒアリング記録海江田万里聴取結果書 2012 年 2 月 13 日, Retrieved February 1, 2019, available from [https://www8.cao.go.jp/genshiryoku\\_bousai/fu\\_koukai/pdf\\_2/542.pdf](https://www8.cao.go.jp/genshiryoku_bousai/fu_koukai/pdf_2/542.pdf)

- 45) 東京電力: 福島第一原子力発電所・事故の収束に向けた道筋, 2011, Retrieved June 8, 2017, available from <http://www.tepco.co.jp/cc/press/11041702-j.html>
- 46) 東京電力: 福島第一原子力発電所・事故の収束に向けた道筋(一覧), 2011, Retrieved June 8, 2017, available from <http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/fl-roadmap/index-j.html>, 2011
- 47) 原子力災害対策本部政府・東京電力統合対策室: 福島第一原子力発電所・事故の収束に向けた道筋ステップ2 完了報告書(その1)(改定2), 2011
- 48) 高橋英樹, 共同通信社原発事故取材班: 全電源喪失の記憶, 祥伝社, 2015
- 49) 日本原子力学会: 福島第一原子力発電所事故その全貌と明日に向けた提言—学会事故調最終報告書—, pp. 25-29, pp. 167-175, pp. 280-283, 丸善出版, 2014
- 50) 日本原子力学会ヒューマン・マシン・システム研究部会東京電力(株)福島第一原子力発電所事故調査検討小委員会: ヒューマンファクターの観点からの福島第一原子力発電所事故の調査, 検討, pp. 36-42, 2015
- 51) 東京電力: 平成23年3月11日～12月31日の実績, 2012, Retrieved June 8, 2017, available from [http://www.tepco.co.jp/nu-news/images/past\\_111231-j.pdf](http://www.tepco.co.jp/nu-news/images/past_111231-j.pdf)
- 52) 福島原子力発電所事故対策統合本部: 議事録, Retrieved June 11, 2017, available from <http://warp.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/3537352/www.nsr.go.jp/archive/nisa/gensai/files/zentai/zentai03.pdf>
- 53) 東京電力ホールディングス: 福島原子力事故発生後の詳細な進展メカニズムに関する未確認・未解明事項の調査・検討結果「第5回進捗報告」について, 添付資料(3-3) - (3-5), 2017, Retrieved February 1, 2019, available from [http://www.tepco.co.jp/press/release/2017/1470526\\_8706.html](http://www.tepco.co.jp/press/release/2017/1470526_8706.html)

## 4. 実証結果

本章では、第3章で提案した学習システムを「不測の事態」に対応した実事例に適用し、教訓の形式知化を実施する。事例には、3.3節に示した1F3号機の原子炉を「冷やす」機能の回復に着目し、評価を行った。

4.1節から4.4節までにおいて、事象の時間的スパンや特徴により、3.2節にて開発整備した4種類の評価手法を適用し、それぞれ評価結果をまとめている。

### 4.1 レジリエンスエンジニアリング4能力を用いた評価<sup>1)</sup>

#### 4.1.1 本節における評価の目的と評価手法

事故を未然に防ぐことは重要である。そのためにシステムを理解し、リスクを同定してこれを低減する努力は欠かせない。しかし一方で、第2章に述べた通り社会技術システムの複雑化が進む中、システムの挙動を完全に理解することは困難であるとの指摘もなされており、この指摘に基づけば、「残余のリスク」として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を前提にした安全の確保が求められる。このような指摘に対し、組織安全研究のパイオニアの一人である Hollnagel は、従来の安全の概念を“Safety-I”と定義した上で、システムを完全に理解することは困難であるという立場に立った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<sup>2),3)</sup>、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<sup>4)</sup>。Safety-IIの安全の目標は、リスクを同定しこれを低減する Safety-Iの安全の目標と異なり、上手くいっていることを増やすことで達成されるものとしている。

以上を踏まえ、本章では、分析対象事例に、利用可能な公開データが多く存在している1F事故の3号機の「冷やす」機能の推移を選定し、この事例に Safety-II の概念を当てはめ、さらなる事故の回復等に寄与した行為群を抽出し、抽出した行為

群を、レジリエンスエンジニアリングを用いて整理した。続いて、整理した結果に基づき、Safety-II の概念を取り入れたシステムの安全性向上について考察することで、従来の安全の概念である Safety-I の概念により調査されてきた 1F 事故対応から、従来とは異なる安全性向上のための学習のあり方を明らかにした。複雑化する社会技術システムにおいて安全を確保するために、事故対応における事故の回復等に寄与した行為群からの学習は、原子力のみならず社会に有益な示唆を与えるものとする。

#### 4.1.1.1 対象事象及び評価手法

本節では、3 号機の事故発生から暫定的な注水機能回復までの期間を評価対象とした。

3 号機は、東日本大震災による地震及び津波により、全交流電源が喪失したが、生き残った直流電源（バッテリー）により高圧注水機能をもつ機器を運転することで「冷やす」機能を維持した。しかし、使用していたバッテリーはいずれ枯渇すると予見されていたため、バッテリーの延命策と代替の注水手段の確保を並行して実施した。このバッテリーの延命策によって、高圧注水機能をもつ機器の運転を長期間維持できた。

だが、原子炉の圧力の低下に伴い、高圧注水系のタービンに機器破損が懸念される運転領域に至ったことから、これ以上高圧注水機能をもつ機器を運転し続けることは危険と考えた運転員は、原子炉を減圧して低圧の注水に切り替える判断をし、高圧注水機能をもつ機器を停止した。しかし、低圧の注水に切り替えるために必要な減圧が、バッテリーの容量不足から実施できなかったため、すぐに切り替えが行えず、原子炉への注水が途絶える結果となり、過酷事故に発展した。一方、そのような状況下でありながらも、直流電源（バッテリー）の復旧等は実施され、減圧が可能となるとともに、消防車を注水用のポンプとして活用した、津波により建屋近

傍に溜まった海水を水源とする注水系統が確立され、原子炉の「冷やす」機能が回復に至った。

このような作業の実施は、事故後限られた期間の中で実施されており、機械的システムが十分作動できず、人や組織の関与が支配的であったこと、外部とのやり取りが十分に行えない期間であったため、リソースやシステムの変更に関わるインタラクションは限定的であったことから、ここでは3.2節で開発整備した評価手法のうち、レジリエンスエンジニアリング4能力を用いた評価手法を適用する。

#### 4.1.1.2 データソース

対象とした事例に関わる行為に関しては、利用可能な公開データが多く存在していることも特徴である。事実関係は、既存の事故調査の視点を明確にするためにも、現場当事者だけが知り得る事実は含めず、公開されている報告書等のみを用いて整理した。事実の整理に主に活用したものは、関係者の意見聴取やプラントデータ等にアクセスが可能な形で作成されている、東電事故調<sup>5),6)</sup>、政府事故調<sup>7),8)</sup>、および国会事故調<sup>9)</sup>である。

また、学術専門家による評価である日本原子力学会（以下、学会事故調）<sup>10)</sup>、並びにそのヒューマン・マシン・システム研究部会の報告書<sup>11)</sup>（以下、HMS報告）も参照した。さらに、これら事実関係の補完資料として、上記の報告書の公開後、新たに公開されたデータであるTV会議の発話内容<sup>12),13)</sup>、吉田調書<sup>14),15)</sup>、東電の未解明問題に対するその後の調査結果<sup>16)</sup>（以下、未解明調査）も反映した。

これらに基づき、注水関連機器の状態遷移が理解できるように時系列にて整理し、対象事例の現場対応の行為群を俯瞰できる形に整理した。

#### 4.1.2 結果

本項では、データソースに基づき注水機能を持つ機器の状態推移に基づいた現場対応の行為群の時系列整理を行い、対象事例における事故の回復等に寄与した行為群の抽出を行うとともに、これらの行為群をレジリエンスエンジニアリング4能力によって整理した結果を示す。

#### 4.1.2.1 注水機能を持つ機器の状態遷移に基づいた現場対応の行為群の時系列整理

##### 1) 注水機能を持つ機器の津波後の状況

3号機には「冷やす」機能を有する機器やシステムは多重に存在していたが、対象事例において、「冷やす」機能の維持および回復に関連したものを抜粋し、表4.1-1に示した。この表は、本事例に係る津波後の機能の状況をまとめたものであると同時に、1F事故対応における3号機の初期状況を示したものである。

表 4. 1-1 3号機原子炉注水関連機能の津波後の状況

機能目的	名称	表記	主な機能	系統数	交流電源不要	津波後の機能*
高圧注水	高圧注水系 (High Pressure Coolant Injection System)	HPCI	原子炉圧力が低下しにくい配管破断等の際に、原子炉の蒸気でタービンを駆動するポンプにより冷却水を原子炉に入れる。非常用炉心冷却系の一つ。	1	○	直流電源で動作
	原子炉隔離時冷却系 (Reactor Core Isolation Cooling System)	RCIC	主蒸気が復水器で冷却できない場合などに原子炉の蒸気でタービンを駆動するポンプにより冷却水を原子炉に入れる。HPCIの約1/10程度の流量。	1	○	直流電源で動作
高圧系代替注水	ホウ酸水注入系 (Stand by Liquid Control System)	SLC	何らかの要因で制御棒を挿入できない場合のバックアップ装置。中性子吸収能力の高いホウ酸溶液を原子炉へ注入する。	2		電源喪失
減圧	逃がし安全弁 (Safety Relief Valve) (自動減圧機能/逃がし安全弁機能/安全弁機能)	SRV	原子炉圧力が上昇した際、压力容器保護のために自動、または手で蒸気を逃がすための弁。非常用炉心冷却系の自動減圧装置としての機能も持つ。	8	○	直流電源で動作
低圧系代替注水	消火系 (電動駆動) (Fire Protection System)	FP	発電所内の消火系統で、モーター駆動のポンプを有する設備。アクシデントマネジメント(AM)として原子炉への注水に利用できる。	1		機能喪失
	消火系 (ディーゼル駆動) (Diesel Driven Fire Pump)	DDFP	発電所内の消火系統で、ディーゼル駆動のポンプを有し、モーター駆動が運転できない時に自動起動する。	1	○	直流電源で動作 ディーゼル駆動
自衛消防	消防車	消防車	平成19年7月に発生した新潟県中越沖地震の教訓として、発電所火災への即応体制の強化策として消火用に整備された。自衛消防隊員等により操作される。	3	○	エンジンにて動作、このうち1台のみ3号機で使用可能

東電事故調、政府事故調より作成

\*：機能喪失は電源以外の設備機能も喪失しているものを示す

## 2) 機器の状態推移と現場対応の行為群の時系列整理

図 4. 1-1 は、注水に係る機器の状態遷移を時系列で整理した結果である。横軸の項目は、表 4. 1-1 に示した機器の中で、現場が復旧ないし利用を考えたものであり、縦軸は、時間の経過を示している。矢印は継続している行為である。

3月11日15:42の時点で、3号機は全交流電源を喪失したが、生き残った直流電源（バッテリー）を生かして RCIC、HPCI による高圧注水を続けることができた。しかし、バッテリーはいずれ枯渇することが予見されることから、交流電源で動かすことができる SLC（高圧系代替注水系の中で信頼性が高く、原子炉を「冷やす」機能としても活用できる）を、4号機側の設備を使って復旧することに着手する。

また、同時に、低圧注水系も必要になることが予見されることから、使用可能な設備の中から DDFP の使用を予見し、起動確認をする等、低圧代替注水の準備が行われた。ただし、DDFP は機器の信頼性が相対的に低いことから、起動が確認できたあとも、原子炉の減圧をすぐには行わず、信頼性の高い高圧注水系をできるだけ長期間使用する判断をした。併せて様々なバッテリー節約の工夫を実施している。

13 日になり、継続運転していた HPCI が、機器の健全性を損なう恐れのある運転領域に至ったことを受け、運転員は機器破損のリスクを予見し、停止させた(2:42)。この判断の背景には、運転員は原子炉の減圧および低圧系代替注水の準備が必要であることを認識していたが、現場で並行して行われていた低圧系代替注水の準備(ラインアップ)に十分な時間が割かれていたこと、および SRV 関連の制御機器のランプが点灯していたことから、これらが機能しないリスクは相対的に低いとの判断がある。しかし、通信機器が使用できないために、本来なら確認すべき準備の完了を、監視できない中での判断であり、SRV 関連の制御機器のランプも点灯はしていたものの SRV が作動するための十分なバッテリー容量は残っていなかった。そのため、原子炉の減圧、低圧代替注水への速やかな移行ができず、注水が中断する結果となった。このことから、HPCI の手動停止は、過酷事故の原因になったと評価されている。また、SLC の復旧作業は、減圧の実施と並行して実施されているが、1号機の原子炉建屋爆発の影響でケーブルが損傷しており、状況回避に間に合わなかった。なお、車のバッテリーの活用等により SRV による減圧が実施され、DDFP を使った淡水注入によって注水が再開されたのは、同日 9:08 である。しかし、水源となった淡水の水量が限られていたことから、津波で建屋近傍にたまった海水を、水源として利用する判断がなされ、12:20 から水源の切り替えを実施し、13:12 から海水による注水を開始した。



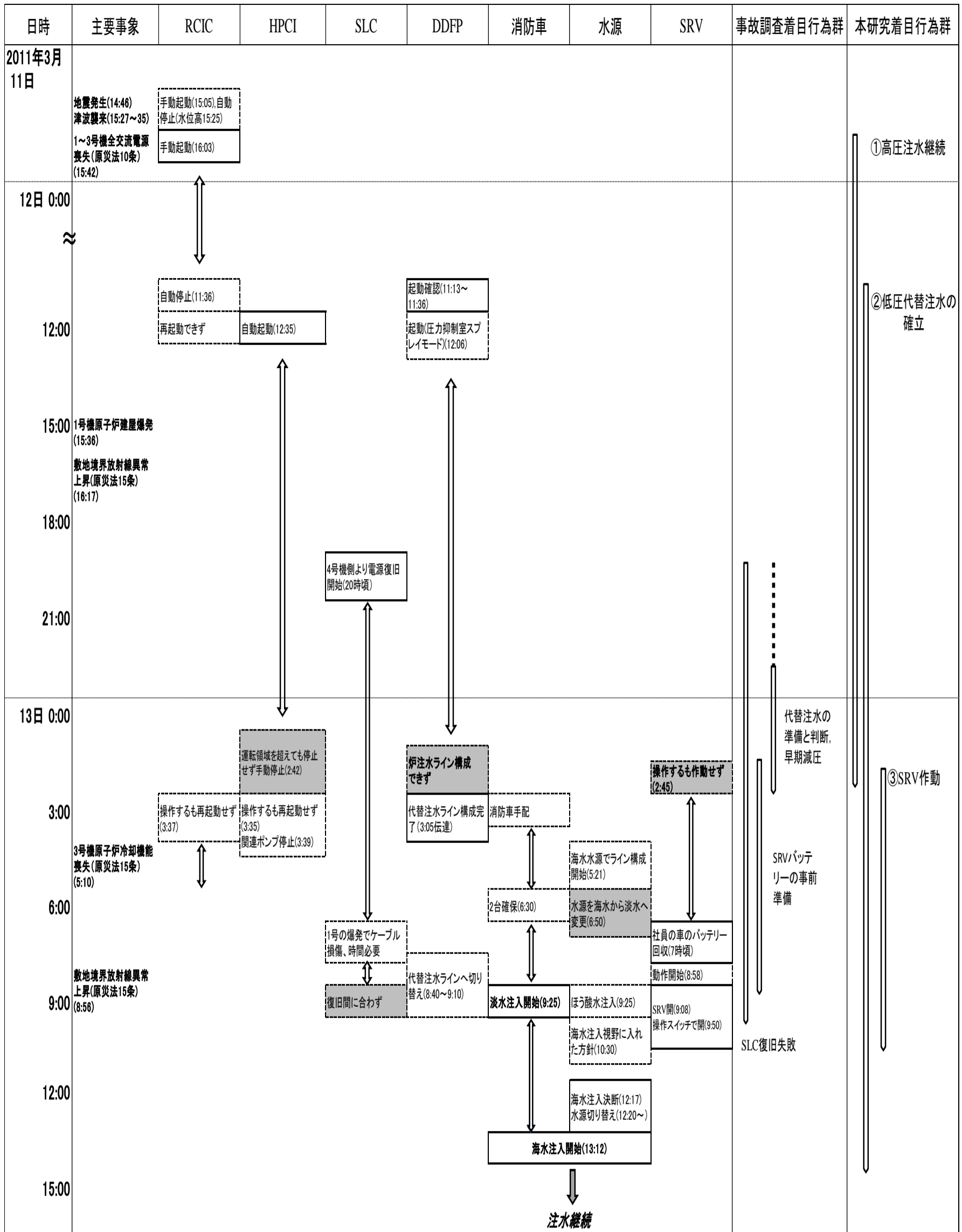


図 4.1-1 3号機原子炉への注水に係る機器の状態遷移の時系列並びに事故調査報告書と本研究が着目した行為

#### 4.1.2.2 事故の回復等に寄与した行為群の抽出

図 4.1-1 により整理された行為群を俯瞰し、本研究で着目する事故の回復等に寄与した行為群、すなわち回復等に寄与した行為群を抽出する。(番号は図 4.1-1 の本研究着目行為群の番号を指す) また、既存の事故調査が着目している行為群も図中に合わせて記載した。

図 4.1-1 を用いて事例を俯瞰すると、事故対応の中に、さまざまな行為群が存在していることが分かると同時に、その中で回復等に寄与した行為群は、事故の拡大を食い止める上で重要であった「冷やす」機能として、原子炉への注水の回復に貢献した行為といえる。すなわち、高圧注水系が継続して運転できていたこと、並びに低圧代替注水が確立したこととなる。したがって、「①高圧注水継続」を可能としたバッテリー消費の節約に係る行為群、「②低圧代替注水の確立」を行った消防車の活用および水源の多様化に係る行為群、が抽出される。また、低圧代替注水を行うためには原子炉の減圧が必要なため、「③SRV の作動」に関連した節電の追加措置、車のバッテリー収集・活用による減圧動作を実施した行為群も抽出される。

図 4.1-1 の右列に、既存の事故調査において注目されている行為群と、本研究が抽出した行為群を、それぞれがカバーする現場対応の時間範囲と共に示した。前述の通り、事故対応は、さまざまな行為群が存在しており、上手くいかなかった行為群と回復等に寄与した行為群の複合によって構成されているが、既存の事故調査は前者に、Safety-II の概念を活用した本研究が抽出した行為群は後者に着目している。そのため、同じ事例の行為群に対しても、異なる評価対象を選定していることが明らかとなった。

#### 4.1.2.3 レジリエンスエンジニアリング 4 能力による整理

図 4.1-1 に示した 3 号機の原子炉への注水に係る対応の中から、本研究が着目する 3 つの行為群を、表 3-3 に示したレジリエンスエンジニアリング 4 能力を用いた評価用テ

ンプレートを用い、整理した。結果を表 4.1-2 に示す。4 能力の整理に当たっては、最初に筆者が行ったものを所属の異なる研究者 3 名により議論を行った上で作成した。

1F 事故現場の設備は、大きなダメージを受けており、損傷した機器をそのまま復旧することは困難な状況であった。そのため、現場は、事象発生時に参照すべき手順である「事故時運転操作手順（事象ベース）」の「全交流電源喪失」<sup>17)</sup>及び「事故時操作手順（兆候ベース）」の「水位確保」<sup>18)</sup>に示されている通りに該当設備の復旧を行うことは困難であると「予見」し、関連機器の動作状況等を「監視」した。その結果、手順で想定している該当の機器の復旧ではなく、消防車、バッテリーなどを代替手段として有効に活用することで、機能確保を目指す「対処」をしている（②、③）。また、水源確保のように、様々な選択肢の試行錯誤の結果、選定したものもある（②）。

さらに、高圧注水継続により 3 号機の冷却が可能であった時間帯に、先行して事故対応が行われた 1, 2 号機の経験からの「学習」が、バッテリーや消防車の活用、海水の注水も「対処」に反映されている（②、③）。現場状況などから適切な「予見」を行うことで、充電設備の復旧に時間がかかると予見したバッテリーの長期使用の工夫（①）、淡水の水量が十分ではないと予見したことから、低圧系代替注水の水源の確保（②）などの「対処」が可能となった。

一方、①で実施されたバッテリー節約の「対処」は、高圧注水の長時間運転を可能としたことにつながっている。この高圧注水の長時間運転は、より緊急性の高かった 1 号機にリソースを回すことができたと評価される<sup>14)</sup>と同時に、事故調査後の知見として、このバッテリー節約が SRV の作動を早め（③）、早期に低圧系代替注水を回復させる（②）ことに貢献した可能性も指摘されている<sup>16)</sup>。

このように、レジリエンスエンジニアリング 4 能力によって、3 号機の原子炉への注水に係る個々の行為を整理することで、注水の回復に功を奏した現場で行われた様々な「対処」を明確にすることができた。

表 4.1-2 レジリエンスエンジニアリング 4 能力による着目行為の整理

事象 (数字は図4.1-1の行為群番号)	学習 (Learning)	予見 (Anticipating)	監視 (Monitoring)	対処 (Responding)
①高圧注水継続	全交流電源喪失時には直交流電源の節約操作が必要【全交流電源喪失手順】 バッテリー消費を抑えることで、設計容量(約4時間)以上の運転ができる(結果的に20時間以上運転を継続した)【未解明調査】	バッテリーは有限だが、電源が回復しても充電できるようになるまでには時間がかかることを予見した	関連機器の動作状況や表示を監視した バッテリー残量は監視できなかった	下記のようなバッテリー節約操作を実施した
	機器によって設備信頼性に違いがあり、RCIC, HPCIは高く、DDFPは劣る	RCIC, HPCIは、起動停止を繰り返す状況ではバッテリーを消費することを予見した	RCIC, HPCIの運転状態を監視した(計器) 水位計測を行った(計器)	RCIC, HPCIが起動停止を繰り返さずに運転水位の範囲で運転が継続できるよう、テストラインや流量の調整を実施した【東電事故調】  2系統ある監視装置を1系統にするともに、照明を最低限にするなど、バッテリー消費の最小化を実施した【東電事故調】
	注水の方法のひとつとして低圧系代替注水がある(アクシデントマネジメントの一環)	注水の優先順位をRCIC→HPCI→DDFPとするのが適切と予見した【TV会議】	RCIC, HPCIの運転状態を監視した(計器) 水位計測を行った(計器)	可能な限りRCICを使用した【吉田調書】 RCIC作動中に、運転員はRCICが停止しても次の注水手段であるHPCIをスムーズに起動できるように、制御盤に付箋を貼るなど準備を整えた【東電事故調】 RCICは20時間以上継続運転して、自動停止【未解明調査】した後、HPCIが起動し、注水を継続した【東電事故調】
②低圧代替注水の確立	減圧操作を行う前に低圧代替注水を確認させておくことが必要である	DDFPがいずれ必要となると予見した	DDFPが運転可能であることを監視した	DDFPを圧力抑制室スプレイモードで起動し、運転できることを確認した(しかし、必要な燃料の手配その現場への運搬に困難が伴った)【HMS報告】
	注水を確立するために消防車を使った海水注入も有効である(1号機の事故対応からの学習)	圧力が十分に下がらない可能性があることから、注水圧力を高める必要があることを予見した	低圧系代替注水のライン構成の状況および動作性を監視した	DDFPによるラインは構成したが、吐出圧が低いので、消防車を2台つなげて圧力を上げる方策を考案し、消防車の手配を実施した【TV会議】 消防車2台確保できたことから直列につないだラインを構成した現場では、まず海水を水源とするラインアップを構成した
③SRVの作動	原子炉の減圧は低圧系の準備ができてから実施すること 直流電源は車のバッテリーによって回復が可能である(1,2号機の事故対応からの学習)	淡水だけでは量が十分ではなく、水源として海水を想定しなければならないことを予見した【TV会議】	淡水残量を監視した	官邸の駐在者からの連絡で、水源を海水から淡水に切り替えるように指示がなされたことから、下記の状況に基づき切り替えを実施した【吉田調書】 ①使用できる淡水があった ②淡水には、ホウ酸を入れやすかった ③海水、淡水ともライン構成にかかる時間が想定できていたことから、切り替えに有する時間が少なく済むと考えられた(1号機とは状況が異なる)  水源としては下記の選択肢を検討【東電事故調、TV会議】 ・ろ過水タンク貯蔵水 ・防火水槽 ・貯水池の水 ・技能訓練センターの訓練用設備プールの淡水の運搬 ・自衛隊タンクローリー ・取水口のマンホールからの取水(海水) ・逆洗弁ピットに溜まった津波による海水
		バッテリーが有限であることから、節約が重要であることを予見した 社員の車のバッテリーが手配可能であることに気づいた さらなるバッテリーの調達が必要であると予見した HPCIは運転ができないだろうと判断し、節電をするために関連機器の電源を落とすことが有効であると予見した【未解明調査】	原子炉圧力を監視した(計器) 水位計測を監視した(計器) バッテリーの残量は監視できなかった	HPCI停止時にはバッテリー残量が十分ではなく、SRVが作動しなかったため、窒素ガス等を用いた駆動方法も検討したが成功せず【東電事故調】  社員の車のバッテリーを中央操作室へ搬入すると同時に、社員から現金を集め、車用のバッテリーを買い出しに行く等して、SRVを作動させる作業を実施した【TV会議】  運転員のバッテリー節約対策*が功を奏し、自動減圧系のロジックが成立したことで、SRVが操作可能になる9:50よりも前に複数のSRVが作動し(9:48頃)、減圧に成功した【未解明調査】 *運転員は、HPCIが停止後起動は困難と予見し、関連するポンプなどを停止し、バッテリーの負荷を下げ直流電源の消費を抑える操作を実施している

### 4.1.3 考 察

前章で得られた結果を、Safety-II の概念に含まれる安全実現の基本方針と比較検討するとともに、事故対応評価への Safety-II の概念活用および複雑化した社会技術システムの安全確保を目指した提案した学習の方策について検討した。

#### 4.1.3.1 Safety-II の安全実現の基本方針との比較検討

得られた結果から、表 4.1-3 に示した Safety-II の考え方の中に含まれている安全実現の基本方針について、Safety-I と比較検討する<sup>3)</sup>。

		Safety-I	Safety-II
安全の枠組	安全の定義	安全は許容不可能なリスクがないこと(状態)である。	安全は変化する条件下で成功する能力である。
	安全の目標	上手くいかなかったことが可能な限り少ないことである。	上手くいっていることを可能な限り多くすることである。
安全実現の基本方針	システムの理解	システムの挙動は理解でき、要素に分解可能である。	結果は特定の構成要素や機能へと遡ることができない。
	結果と原因	結果は因果律により生じた帰結(resultant)である。成功と失敗の原因は区別できる。	結果は因果律では説明できず、発現(emergent)したものである。成功と失敗の原因は区別できない。
	ヒューマンファクターの考え方	人はヒューマンエラーに代表される安全を脅かす危険要因である。	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。

Erik Hollnagel; Safety- I and Safety-II, ASHGATE, 2014等より作成  
「福島第一原子力発電所における冷温停止状態達成過程に着目した教訓導出」  
吉澤厚文、大場恭子、北村正晴、人間工学Vol.54, No.1, pp1-13,2018

表 4.1-3 安全の概念とその基本方針(Safety-I, Safety-II)

#### 1) システムの理解, 結果と原因

「システムの理解」をどのようにするかは、事象の「結果と原因」をどのように考える

かと強く関連しているので、併せて確認する。

表 4.1-2 に示したように、高圧注水継続 (①) によるレジリエンスエンジニアリング 4 能力による着目行為の背景の整理からは、高圧注水系設備に関する経験や深い知識が手順書の記載を補完し、さまざまな工夫が施され、バッテリーの長期使用が可能となっていた。また、機器の使用継続は、いずれ注水が停止するリスクを伴う判断であるが、すべての選択肢がリスクを伴う中で、機器の信頼性の知識による優先順位に基づいて実施された。これらは、「対処」の背景が明瞭であり、同定できる。

低圧代替注水の確立 (②) は、アクシデントマネジメントとして代替注水ラインを用いる手順書は存在したものの、表 4.1-2 に示したように津波によるシステムのダメージは大きく、本来使用すべきであったモーター駆動のポンプを有する FP による注水は困難であった。そのため、代替手段が必要となる中、2 台の消防車 (ポンプ車) を用いて注水を確認することができた。また水源には、さまざまな水源確保のアイデアが出され、試行の結果、津波によって建屋近傍に溜まった海水を用いている。本事象には、先行号機の対応からの短期学習も活かされているが、利用可能なリソースの使用目的を超えた活用を含め、状況判断の中から使用可能なリソースのポテンシャルを最大限引き出すアイデアが「創発」したと考えることが適切であろう。

SRV の作動 (③) は、最終的にバッテリーの回復によって実現したが、その過程では、窒素ガスを使った作動の可能性を試行するなど、単純なシステムの作動を超えた可能性の追求がなされている。また、バッテリー残量が監視できない中、手順書を超えた領域における SRV の作動の確認は困難であり、システムの状態を理解できない中で対処が求められた。ここでは、それ以前に実施されていたバッテリー節約行為が、功を奏した可能性が高い<sup>16)</sup>。つまり、HPCI を停止した後の再稼働に失敗したことによって、再稼働は困難であると判断した結果、高圧注水が可能で唯一の機器である HPCI とその周辺機器まで含めて電源を停止するというリスクを伴う判断がなされたことが、SRV 作動につながって

いる。したがって、SRV の作動は、システムの理解による帰結として得られたというよりは、さまざまな行為の複合体として「創発」した結果であると考えるのが妥当であろう。

このように、「システムの理解」の源となる「結果と原因」は、因果律が明確なものと、明確ではないものが存在している。このことから、Safety-II の特徴を、結果は特定の構成要素や機能へと遡ることができない、あるいは、因果律では説明できない、ということのみに見出す必要性はないことが明らかとなった。

## 2) ヒューマンファクターの考え方

行為群ごとに人が果たした役割をまとめる。

高圧注水継続 (①) における、バッテリーの節約は、全交流電源喪失の手順に関連する記載はあるが、何をどのように実施するか具体的な方策の記載はない<sup>17)</sup>。しかし、現場は、設備機器の復旧には時間がかかることを予見し (状況認識)、監視系を 1 系統に絞り込むといったリスクを伴う判断に代表されるような能動的な節約を実施した。このような状況認識やリスクを伴う判断には、人が主要な役割を果たしている。

また、低圧注水の確立 (②) では、本来使用すべきである低圧注水系の機器が、津波によって機能喪失し、早期の復旧は困難であると予見される中、いずれは低圧系代替注水機能をもつ DDFP が必要になると予見し、早い段階で起動可能であることを確認していた。しかし、TV 会議でも共有されているように、高圧注水系から DDFP への切り替えの時期は、機器の信頼性を考慮したものとなった。すなわち、相対的に機器信頼性の低い DDFP に頼ることは高リスクと考え、信頼性の高い高圧系の機器をできるだけ使い、これらが使用困難になった場合に DDFP に切り替える方針とした。また、切り替えた際は、消防車 (ポンプ車) を利用し、津波によって建屋近傍に溜まった海水を水源とした注水の回復もなされた。この海水注水は、原子炉へ腐食環境と不純物を持ち込むリスクがある判断であるが、事故対応を含む経験や先行事例からの学習を活かした、人の考案した対処で

ある。

SRV 作動 (③) は、先に実施した電源節約措置が功を奏しており、また社員の自動車のバッテリーを用いた機能復旧に代表されるような創発した対処がみられる。これらも人が主要な役割を果たしている。

以上より、回復等に寄与した行為群をレジリエンスエンジニアリングに基づき評価した結果、いずれの対処も人が重要な役割を果たしており、人が、「システムの柔軟性とレジリエンスの必要資源」であることを示している。

### 3) 事件事例から見た Safety-II の安全実現の基本方針

これまでに述べてきた内容から、回復等に寄与した行為群に着目した分析の結果を評価する。

本研究の事例においては、表 4.1-3 に示した安全実現の基本方針のうち、「システムの理解」および「結果と原因」は、Safety-I, Safety-II の区分がそれほど明確ではなく、回復等に寄与した行為群は、それぞれの特徴が併存していることが確認された。一方、「ヒューマンファクターの考え方」については、参考文献 3 に示されているものと同様の結果が本研究の事例からも得られており、人はシステムの安全を確保するための資源としての役割を担っていることが確認できた。

したがって、本研究の事例における Safety-II の基本方針の比較検討結果からは、「システムの理解」および「結果と原因」は Safety-II の特徴を明確に示していないが、「ヒューマンファクターの考え方」は、Safety-II の特徴を示す結果となった。

なお、「結果と原因」における成功と失敗の原因に関する仮説については、4.1.3.3 の 3) 項において考察する。

## 4.1.3.2 事故対応評価への Safety-II の概念活用

1) 本研究による評価と既存の事故調査における教訓の違い



一般的に、事故調査報告書は、事故からの学習によって、より高い安全を実現するための重要な教訓が形式知化されたドキュメントであり、さまざまな組織で活用されるものである。しかし、それらの多くは、Safety-I の概念に基づいており、1F 事故の既存の事故調査も、Safety-I の概念に基づいたものである。そのため、本研究の事例に対する政府事故調や国会事故調での指摘は、高圧注水系がいずれ停止することは「予見」でき早期の「対処」が必要であった、SRV も作動しないことは「予見」できた、DDFP は HPCI 手動停止前にラインアップを済ませるべきであった、回復の見込みがない SLC の回復にリソースを割くべきではなかった、といった内容となっている。これらは、指摘行為が単純なヒューマンエラーではないものの、レジリエンスエンジニアリング 4 能力で述べるところの「予見できる」や「対処できる」といった能力の発揮が「上手くいかなかった」といった指摘である。すなわち、Safety-I のヒューマンファクターの考え方の通り、「人」を「安全を脅かす危険要因」と考えている。

一方、前節で示したとおり、Safety-II の概念、すなわち回復等に寄与した行為群に着目し、対処に至った背景をレジリエンスエンジニアリングに基づき評価した結果では、いずれも人が柔軟かつ重要な役割を果たしていることが確認できた。すなわち、人を「システムの柔軟性とレジリエンスの必要資源」と考えられることを示している。

これらの結果は一見矛盾しているように見えるが、それぞれの安全の考え方によって着目する行為群が異なることにより、人に対する違った局面が示された結果であろう。Hollnagel も指摘しているが、もともと Safety-I と Safety-II はいずれも安全を確保するために必要な概念であり、対立するものではなく、相補的なものと理解する必要がある<sup>3)</sup>。そのため、本研究も、Safety-II の概念から事故対応を評価することで、既存の事故調査を補完する新たな教訓の導出可能性を示したといえる。このように人の能力という事故対応からのさらなる教訓の導出につながる新たな視点の提供が、Safety-II の概念活用の有用性の一つといえる。

## 2) Safety-II の概念を活用した学習の有用性

1F 事故前の備えが不十分だった一因として、過去の事例からの学習が、原因の究明と再発防止を行う Safety-I の概念によって行われてきたことによるとの指摘がなされている<sup>19),20)</sup>。具体例として、東京電力は、1999 年 12 月に起きた仏国ブレイエ発電所の洪水による電源喪失事故から、事故の直接原因である防止壁の強度設計に対して設計の妥当性を確認し、「監視」したが、これらの「学習」は、Safety-I の概念に基づくものであった。

一方、この事故を Safety-II の概念にも基づいて捉えられていたならば、災害が発生してしまった後の「事故の拡大を防止した」行為群からも学習がなされたであろう。具体的には、洪水で孤立する発電所での緊急時対応、侵入した水の排水や冷却設備の復旧<sup>21)</sup>といった設計を超えた事象への「対処」からの「学習」である。もしこのような学習が行われていたならば、1F 事故対応に生かすことができた可能性がある。

今後、このような事故対応の中の回復等に寄与した行為群から新たな「学習」を促す視点の提供も、Safety-II の概念活用の有用性の一つであるといえる。

### 4.1.3.3 事故対応からの提案した学習方策

システムは完全に理解できるものではないという立場に立って、複雑化した社会技術システムの安全を向上させるには、事故対応を理解し、そこから学習することが不可欠である。本節では、事故対応を理解し、既存の事故調査と異なる提案した学習の具体的な方策を検討した。

#### 1) ヒューマンファクターからの理解による学習

既に 1F 事故対応の「対処」を理解するための手法としてレジリエンスエンジニアリン

グを用いてその有効性を示した事例も存在しているが<sup>22),23)</sup>、本稿でも、人が適切な能力を発揮できた「対処」につながる背景について、レジリエンスエンジニアリング 4 能力によって整理した結果から検討する。

「学習」では、バッテリーの長期運転に代表される「設備に関する長期的に蓄積された知識や経験」、消防車や海水の注入に代表される「直前に実施された他号機での事故対応からの学習」が、有効に働いていたと考えられる。

また、「予見」や「監視」では、学習（設備に関する長期的に蓄積された知識や経験）に基づく機器復旧の見通しの判断、水源選択に見られる様々な選択肢の考案や、リスク認識にその能力が発揮されている。特に、本研究の事例では、判断の対象となる選択肢すべてにリスクが伴っていた。機器としての信頼性が高い高圧注水系を継続使用するか、減圧をして相対的に信頼性が低い低圧代替注水に切り替えるのかといった判断や、「冷やす」機能を回復するために原子炉に腐食環境や不純物を持ち込む海水を注入する判断などは、その典型例である。事故対応の回復等に寄与した行為群が、このような背景をもつことを理解する必要がある。

このように、事例におけるヒューマンファクターの理解にあたり、レジリエンスエンジニアリング 4 能力によって整理した結果に基づき考える手法を導入することは、対処に至った背景を理解することを可能とし、回復等に寄与した行為群の学習に結びつけることができる。

## 2) 「時間」と「リソース」をガイドワードとした学習

原子力発電所の事故は、事故発生当時、原子炉が運転中であったか否かで崩壊熱が異なり、その対応に要する迅速性が異なってくる。実際に、福島第一原子力発電所の 6 つの原子炉も、東日本大震災時に運転中であったか否かで、炉の悪化速度が異なっており、「時間」の有無はその対応に大きく影響した。また、対応にあたっては必要となるリソー

スが揃っていることが望ましいが、表 4.1-2 に示した通り、1F 事故現場では、リソースが限られていた。

このように、「時間」や「リソース」は事故対応に重要な影響を与えるが、レジリエンスエンジニアリングの先行研究でも同様な指摘がなされている<sup>24)</sup>。そのため、1F 事故対応の中から、「時間」と「リソース」に関する項目に注目し、このパラメータがどのように人の能力と結びついているのかを検討した。

まず、「時間」について検討する。図 4.1-1 に示されている通り、電源節約の効果により高圧注水系の運転が継続できている時間を使って、代替の高圧注水系や低圧注水系の選択肢（本来使用すべき低圧注水系の機器は機能喪失していたため、実際には低圧系代替注水の DDFP を使用）に対する準備がなされると同時に、必要なリソース（消防車、淡水、バッテリー）の追加手配も実施された。事故時の対応は、最初から方策を絞って行うこともあるが、結果が見えない中で、これから起こり得る可能性のあるさまざまを予見し、選択肢となる複数の対象に並行して対応しなければならないことも少なくない。その際、時間の余裕を確保できたならば、リソースを確保できることはもちろん、本研究の事例であれば、消防車や海水を使った注水システムを構築するなど、成功の可能性を高めるプロアクティブな対処を引き出すこともできる。このような対処は、よりよい結果を生み出そうとする現場の選択肢の数を増やしている。また、高圧注水系の運転を継続できた時間は、他号機の事故対応からの学習を生み、これを活用して注水システムの確立を実現した行為群もある。このように、「時間」がどのように確保されているか、利用されているかといった観点から検討することは、回復等に寄与した行為群を理解し、学習するにあたって、重要なガイドの役割を果たすことができる。

次に、「リソース」について検討する。1F 事故のように設計範囲を超えた事象への対応では、設計で考えられていた設備が使えない可能性は高く、代替手段を講じる必要が生じる。今回の事例では、低圧系代替注水の際に活用した消防車や海水は、システムのポン

プや淡水の代替手段として用いられた「リソース」であるが、本来の使用目的ではない。しかし、特定の目的の下、消防車が可搬型であったことや、TV 会議でも共有されているように建屋近傍に溜まった海水に、人が注目し、限られたリソースのポテンシャルを最大限に引き出したことで、回復等に寄与した行為を創発させた。このように、「リソース」がどのように確保されているか、利用されているかといった観点から検討することは、回復等に寄与した行為を理解し、学習するにあたって、重要なガイドの役割を果たすことができる。

以上のように、「時間」や「リソース」をガイドワードとして用いることにより、これらがどのように創発を含む対処につながっているかを明らかにし、回復等に寄与した行為の学習に結びつけることが可能であることを示した。

### 3) 安全性向上につなげるための学習の視点と手法

成功と失敗の原因は区別できないと捉える Safety-II では、失敗は、日常的パフォーマンスの予期しない組み合わせによって発生すると考える。そのため、失敗を理解するには、日常で上手くいっている行動を理解し、なぜ今回それが上手くいかなかったかを検討することが必要と述べられている<sup>3)</sup>。これを事故対応の分析に当てはめるならば、失敗（上手く行かなかった行為群）の理解は、上手くいっている行為群の理解に基づく必要がある。この考えを、本研究の事例から具体的に検討する。

回復等に寄与した行為群の背景は、1)や 2)に示したように、レジリエンスエンジニアリングを用いたヒューマンファクターからの理解や、「時間」と「リソース」をガイドワードとした学習を組み合わせた手法（以下、行為群理解のための手法）により理解を深めることが可能である。本研究の事例における回復等に寄与した行為群の背景には、リスクを伴う判断がみられた。

一方、本研究の対象事例のうち、既存の事故調査において、最も上手くいかなかったも

のとして取り上げられている行為群は、4.1.2.1にも示した高圧注水系 HPCI の停止に係る行為群である。この行為群について行為群理解のための手法を活用してみる。HPCI の停止の判断は、運転員が注水の中断につながるリスクよりも機器の破損リスクの方が大きいと「予見」したことに基づいているが、選択肢はいずれもがリスクを伴う判断であった。また、「時間」と「リソース」というガイドワードを用いてみると、「時間」からは、既に機器の破損が懸念される領域に入った運転が行われており、余裕がない状況であったこと、「リソース」からは、通信機器、並びにバッテリー残量を監視する「リソース」がなかったことが解る。そのため、低圧代替注水の準備や減圧の可能性といった「予見」を「監視」することができず、リスクを伴う判断が正確に行えていない「対処」となった<sup>8),13)</sup>。したがって、既存の事故調査で最も上手くいかなかったものとして取り上げられている行為も、回復等に寄与した行為群と同様にリスクを伴う判断の結果であること、さらに、「時間」、「リソース」というガイドワードを活用することで、使用可能な「時間」、情報取得に必要な「リソース」に課題があったことが示される。

このように、本研究で示した行為群理解のための手法は、回復等に寄与した行為群、並びに上手くいかなかった行為群の両方の理解に、活用できる手法であることが判った。さらに、回復等に寄与した行為群も上手くいかなかった行為群も共に「リスクを伴う判断」に依存しており、そのリスク認識が結果としての成功と失敗という違いにつながっていることも明らかとなった。後者は、結果としての成功と失敗の原因に違いがないとする Safety-II の安全実現の基本方針に合致している。

本研究で明らかにした事故対応の行為群理解のための手法は、結果に左右されない。そのため、Safety-II の概念は、事故対応調査を日常の安全性向上に貢献する「上手くいっていることへの理解」につなげる手法として活用できると考える。この手法の応用範囲は広いと考えられるが、さまざまな分野への展開は今後の課題である。

#### 4.1.4 得られた成果

本研究は、社会技術システムの複雑化が進み、システムの挙動を完全に理解できないとの指摘がある中、組織安全研究の Hollnagel が提唱している新しい安全の概念である Safety-II の概念を活用し、1F 事故対応から 3 号機の「冷やす」機能の推移の事例を選定し、分析した。1F 事故対応の既存の事故調査は、いずれも Safety-I の概念に基づいたものであるため、失敗や過誤に注目して分析されてきたが、同じ事例を「さらなる事故拡大を食い止めた」側面に着目することで、事故対応から安全性を向上する提案した学習の在り方を明らかにすることができた。

本研究で対象とした事故対応の事例の検討により、明らかになった重要な点は四点ある。一点目は、Safety-II の安全実現の基本方針のうち明確な特徴を示したヒューマンファクターの考え方をを用いることで、事故対応からさらなる教訓の導出につながる人の能力という視点を示したこと。二点目は、事故対応は、回復等に寄与した行為群、上手くいかなかった行為群の複合であり、それらにはいずれもリスクを伴った判断が含まれていることを明らかにしたこと。三点目は、回復等に寄与した行為群と上手くいかなかった行為群を、レジリエンスエンジニアリング 4 能力及び「時間」と「リソース」のガイドワードを用いた行為群理解のための手法で分析することで、これらの違いは、「時間」と「リソース」が影響していることを明らかにしたこと。四点目は、この行為群理解のための手法により、Safety-II の概念を用いて、事故対応調査を日常の安全性向上に貢献する「上手くいっていることへの理解」につなげる手法として活用できることを明らかにしたことである。

本研究は、「冷やす」機能を回復しなければ事故がさらに拡大する 1F 事故の対応事例を分析し、既存の事故調査の事故対応の捉え方と異なった視点をもつ、新たな安全性向上の学習の在り方を明らかにした。このような視点をもった学習は、原子力だけではなく、広く社会技術システムに必要であり、また応用できるものであると考える。

#### 4.1 節 参考文献

- 1) 吉澤厚文, 大場恭子, 北村正晴: 福島第一原子力発電所事故対応の分析に基づいた Safety-II の概念活用による安全性向上のための研究, 人間工学, Vol. 54, No. 1, pp.1-13, 2018
- 2) E. Hollnagel, , 北村正晴[監訳]: 日本語版に寄せて, 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
- 3) E. Hollnagel, 北村正晴/小松原明哲[監訳]: Safety-I & Safety-II, 海文堂, 2015
- 4) J. Pariès, J. Wreathall, Edited by E. Hollnagel: Prologue: The Scope of Resilience Engineering, E. Hollnagel, Resilience Engineering in Practice: A Guidebook, ASHGATE, 2011
- 5) 東京電力: 福島原子力事故調査報告書(中間報告書), 主に pp. 56-61, 別紙 pp. 30-38, 添付 pp. 7-8, 2011
- 6) 東京電力: 福島原子力事故調査報告書, 主に pp. 178-203, 添付 pp. 90-103, 2012
- 7) 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: 中間報告, pp. 170-192, 2011
- 8) 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, pp. 36-40, pp. 363-366, 資料編 pp. 263-292, 2012
- 9) 東京電力福島原子力発電所事故調査委員会: 国会事故調報告書, pp. 166-168, 2012
- 10) 日本原子力学会: 福島第一原子力発電所事故その全貌と明日に向けた提言—学会事故調最終報告書—, pp. 25-29, pp. 167-175, pp. 280-283, 丸善出版, 2014
- 11) 日本原子力学会ヒューマン・マシン・システム研究部会東京電力(株)福島第一原子力発電所事故調査検討小委員会: ヒューマンファクターの観点からの福島第一原子力発電所事故の調査, 検討, pp. 36-42, 2015
- 12) 東京電力ホールディングス: テレビ会議録画映像(事故発生～平成23年3月15日:113箇所) , Retrieved February 1, 2019 , available from <https://photo.tepco.co.jp/date/2013/201303-j/130029-01j.html>



- 13) 福島原発事故記録チーム[編], 宮崎知己, 木村英昭:福島原発事故東電テレビ会議 49 時間の記録, pp. 2-96, 岩波書店, 2013
- 14) 内閣府:事故時の状況と対応について, 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 2011 年 7 月 29 日, Retrieved February 1, 2019, available from [https://www8.cao.go.jp/genshiryoku\\_bousai/fu\\_koukai/pdf\\_2/051.pdf](https://www8.cao.go.jp/genshiryoku_bousai/fu_koukai/pdf_2/051.pdf)
- 15) 内閣府:事故時の状況と対応について 4, 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 2011 年 8 月 8 日 2011 年 8 月 9 日, Retrieved February 1, 2019, available from [https://www8.cao.go.jp/genshiryoku\\_bousai/fu\\_koukai/pdf\\_2/077\\_1\\_4.pdf](https://www8.cao.go.jp/genshiryoku_bousai/fu_koukai/pdf_2/077_1_4.pdf)
- 16) 東京電力ホールディングス:福島原子力事故発生後の詳細な進展メカニズムに関する未確認・未解明事項の調査・検討結果「第 5 回進捗報告」について, 添付資料(3-3)-(3-5), 2017, Retrieved February 1, 2019, available from [http://www.tepco.co.jp/press/release/2017/1470526\\_8706.html](http://www.tepco.co.jp/press/release/2017/1470526_8706.html)
- 17) 原子力規制委員会:第 12 章外部系統事故, 東京電力福島第一原子力発電所 3 号機事故時操作手順書(事象ベース), 東京電力株式会社福島第一原子力発電所の事故時運転操作手順書について, (12-4-1)-(12-4-5), Retrieved February 1, 2019, available from <https://www.nsr.go.jp/data/000122439.pdf>
- 18) 原子力規制委員会:5. 不測事態「水位回復」, 東京電力福島第一原子力発電所 3 号機事故時操作手順書(兆候ベース), 東京電力株式会社福島第一原子力発電所の事故時運転操作手順書について, (5-1)-(5-9), Retrieved February 1, 2019, available from <https://www.nsr.go.jp/data/000122446.pdf>
- 19) 東京電力:福島事故の総括および原子力安全改革プラン, pp. 13-15, 2013
- 20) INPO (Institute of Nuclear Power Operations), 日本原子力技術協会[翻訳]:福島第一原子力発電所における原子力事故から得た教訓, INPO 11-005 追録, pp. 32-33, 2012
- 21) A. Golbatchev, J. M. Mattèi, V. Rebour: Report on Flooding of Le Blayais Power Plant on 27

December 1999, EUROSAFE 2000, Forum for nuclear safety, 2000

- 22) 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
- 23) 日本原子力学会ヒューマン・マシン・システム研究部会東京電力(株)福島第一原子力発電所事故調査検討小委員会:ヒューマンファクターの観点からの福島第一原子力発電所事故の調査,検討, pp. 55-73, 2015
- 24) 小松原明哲:第 7 章レジリエンスはマネジメントされなくてはならない, C. P. Nemeth and E. Hollnagel, 北村正晴[監訳], レジリエンスエンジニアリング応用への指針, 日科技連, pp. 93-107, 2017

## 4.2 ワークロード時間推移評価手法を用いた評価<sup>1)</sup>

### 4.2.1 本節における評価の目的と評価手法

社会技術システムに緊急事態が発生した場合、その事態に直接対応する現場の対処が、最終的な被害の規模に影響を及ぼす。したがって、緊急事態を未然に防止する検討および対処を前提とした上で、さらなる取り組みとして、緊急事態の悪化を防ぎ、回復を早める現場（発電所）の対処のあり方、あるいはそれらの対処を行う能力である「緊急時対応力」を高める検討が必要である。

東日本大震災に端を発し、過酷事故に至った 1F 事故の対応にはさまざまな組織が関与していたが、緊急事態への直接的な対処を行ったのは発電所緊急時対策本部（以下、発電所対策本部）を中心とした現場の組織であった。緊急時に発電所が実施すべき対応は、原子力事業者防災業務計画にも規定されている発電所の対処に関する要求事項、すなわち、原子力防災組織の運営、通報及び連絡、応急措置の実施等である。中でも、応急措置の実施は、原子力災害の発生または拡大の防止を図るための措置に加え、警備および避難誘導、放射線影響範囲の推定および防護措置、医療活動、資機材の調達や輸送などといった、具体的な項目が挙げられている<sup>2-4)</sup>。発電所対策本部の緊急時対応力は、これらの要求事項を満足するように対処することで発揮されることになる。しかし、震災の影響や過酷事故が発生している現場において、作業員の安全を確保しながら、限定された人やリソースを活用し、刻々と変化する状況を監視・予見しつつ、時間制約の重圧下で緊急時対応力を発揮することは、極めて困難な課題である。

1F では、この原子力事業者防災業務計画に則り、緊急事態発生直後に発電所対策本部が設置され、以後は、この発電所対策本部が現場の指揮を執った。計器類や通信機器に多くの障害があり、現場の状況把握すら難しかった 1F 事故対応では、原子炉の状態の悪化に伴いワークロードが高まる中、発電所対策本部が、どの要求事項を優先するのか、あるいは、どのように人や時間を配分するかといったワークロードマネジメントを実施しなければなら

なかった。しかし、関係者の意見聴取やプラントデータ等にアクセスが可能な形で作成されている主要な機関が行った 1F 事故に関する調査（以下、既存の事故調査）は、事象を号機ごとに分割して評価する手法を用いており、様々なタスクが交錯するワークロードの実態の解明やワークロードマネジメントの評価は行なわれていない。

本節では緊急時態勢における現場の緊急時対応力の重要性に鑑み、「事故の原因」の究明を目的に、現場の対応も号機で区切った分析がなされている既存の事故調査では行われていなかった時間横断的な視点を取り入れ、発電所対策本部の対応状況をより現実的に再現した上で、緊急時対応力の向上方策について検討を行った。具体的には、時間経過に基づく発電所緊急対策本部の状況を把握できるテレビ会議システムの発話データを文字起こしした記録<sup>5)</sup>（以下、TV 会議録）を用いて、3.2.3 項で示したワークロード時間推移評価手法を適用し、発電所対策本部および関係する各組織のワークロードの実態（量や内容）を明らかにした。具体的には、表 3-4 のワークロードマネジメント評価のためのテンプレートを用いて、多くの要求事項の実施を担う発電所対策本部を中心として、緊急時対応力の向上につながる教訓や取り組みについて検討した。

#### 4.2.1.1 対象事象および時間帯

本章は、具体的な緊急時対応力が求められた事象である 3 号機の原子炉への注水回復を対象とした。時間帯は、3 月 13 日 2 時 42 分 HPCI（High Pressure Coolant Injection System）の停止による原子炉への注水の停止から、原子炉への注水を暫定的に回復することに成功した同日 13 時 12 分までを含む、13 日 0 時から、13 日 14 時までである。

まず、3 月 13 日 0 時の時点の体制および各号機の状況を、簡潔に説明する。1F では、東日本大震災の発生（2011 年 3 月 11 日 14:46）以降、福島第一原子力発電所の原子力事業者防災業務計画に規定された要求事項を実施していたが、13 日 0 時の時点には、緊急事態初期に実施しなければならない発令や設置、派遣といった行為は既になされており、設置された発電所対策本部によって、継続的な対応が実施されていた。また、本店では、一般災害

による非常災害対策本部並びに原子力災害による緊急時対策本部がすでに設置され、活動を行っていた。一方、オフサイトセンターでは、地震被害設備の復旧により 12 日 3 時 20 分より活動を開始し、電力ブースおよび原子力安全・保安院（以下、保安院）を事務局とした国の現地対策本部が設置されていたが、要員の参集が一部にとどまっており、住民避難を含めた重要案件の調整機関である原子力災害合同対策協議会（以下、合同対策協議会）は組織できていない状況であった。

各号機の状況は、以下の通りである。1 号機は、原子炉建屋の水素爆発（12 日 15:36）後、アクシデントマネジメント対策として用意されていた原子炉への低圧代替注水機能が、消防車と海水を用いた臨機の対応により暫定的に回復（12 日 19:04）していた。2 号機は RCIC（Reactor Core Isolation Cooling System）、3 号機は HPCI により原子炉へ注水できていた。4～6 号機は、震災時に定期検査中であったすべての燃料を使用済燃料プールに移動していた 4 号機と、すでに原子炉圧力容器中に燃料が装荷されていた 5、6 号機とでは状況は異なっており、5、6 号機は減圧して復水補給水からの注水を検討していた。なお、使用済燃料プールの冷却は、全号機で実施できていなかった。

図 4.2-1 に、今回の分析対象とした時間帯、およびその前後における各号機の主要な事象を記した。対応の中心になった 3 号機では、HPCI が停止（2:42）し、そのことが現地対策本部に約 1 時間後に共有（3:53）され、SLC（Stand by Liquid Control System、高圧注水系の代替手段の一つ）の回復と低圧代替注水が並行して準備され、最終的に低圧代替注水が実施された。しかし、水源となった淡水の量が限られていたことから、発電所対策本部長は水源を切り替えることを判断し（12:18）、12 時 20 分からの切り替え作業後、13 時 12 分以降は海水を水源とした注水システムが作動していた。

号機 月日	1号機		2号機		3号機		4号機	5号機	6号機
	原子炉注水	PCV ベント	原子炉注水	PCV ベント	原子炉注水	PCV ベント			
2011 3月12日		0:06 準備指示	RCIC 運転 継続		RCIC 停止 11:36			6:06 トップベ ント弁による 減圧	
		14:30 ベント確認		17:30 準備開始	12:35 HPCI 起動	17:30 ベント準 備指示			
13日	15:36 原子炉建屋水素爆発				2:42 HPCI 停止				
	19:04 海水 注入開始				9:08 減圧 9:25 消防車によ る淡水注入	8:41 ライン構 成完了			
14日			12:05 海水注 入準備	11:00 ライン 構成完了	海水注入へ構成 12:20変更	9:20頃 ベント 開始			淡水注入開 始(MUWC) 13:20
					13:12 海水注入 開始			6B DGによる MUWCポンプ 電源供給 20:48	
14日					1:10 3:20 海水注水 再開			SRVによる 5:00 減圧	
			海水注入ライ ン損傷	12:50 ベントラ インアップ再 構成	海水注水ライン 損傷 15:30 海水注入再開	11:01 原子炉建屋水素爆発	4:08 使用済燃 料プール温度 84°C確認	5:30 淡水注 入(MUWC)	14:13 使用済 燃料プール 注水開始

: A.M.     
 
 : 淡水注入  

 : 海水注入     
   : 対象期間

図 4.2-1 2011 年 3 月 12 日から 14 日までの各号機の状況と調査期間

#### 4.2.1.2 基本データ

本研究では、TV 会議録<sup>5)</sup>を用いて、分析手法で述べた評価を行うために、評価対象となる構造化及び定量化したデータベースを作成した。

当時の東電の TV 会議システムは、東電の本店、1F を含む 3 か所の発電所及びオフサイトセンターの東電ブースの 5 か所が常時連結され、必要に応じて発話が行われる運用となっていた。TV 会議録は、マスコミに公開された 1F 事故対応の 3 月 12 日～14 日の TV 会議システムの発話をまとめたものである。その作業は人力によるものであるが、筆者らが直接アクセスできる一般公開されている時間帯の映像<sup>6)</sup>と TV 会議録を比較することで、その信頼性を担保した。また、発電所対策本部の活動には、発電所対策本部内の閉じた活動や電話等による個別対応もあるが、TV 会議の録画時間が対象時間帯を網羅していること、重要な意思決定に関わるやりとりを確認できることから、TV 会議録が、発電所対策本部などの組織におけるワークロードの実態を最も合理的に反映しているデータであると判断した。

しかし、TV 会議録だけでは、会話の背景にある状況、すなわち事象の事実関係の把握は難しいことから、東電事故調<sup>2)</sup>、政府事故調<sup>7),3)</sup>、学会事故調<sup>8)</sup>、および日本原子力学会ヒューマン・マシン・システム研究部会の報告書<sup>9)</sup>（以下、HMS 報告）を活用した。また、考察のワークロードマネジメントの分析・評価には、1F 所長であり発電所対策本部長であった吉田の政府事故調査委員会による聴取結果<sup>10),11)</sup>（以下、吉田調書）も参照した。

#### 4.2.1.3 構造化及び定量化したデータベースの作成

表 3-4 のテンプレートを活用し、行にあたる組織やタスク、列にあたる時間の概念をどのように整理したのかについて述べる。

- (1) カテゴリー整理

組織は、テレビ会議システムの繋がっていた発電所対策本部、本店、オフサイトセンター・他発電所、および、直接 TV 会議はつながっていないが、間接的かつ頻繁に TV 会議録に登場する官邸・保安院の計 4 つに分けた。

次に、発電所対策本部について、対象時間帯開始時に実施していた原子力事業者防災業務計画の要求事項に従い、そのタスクを、①応急措置（号機ごとに規定された施設及び設備の応急復旧や原子力災害の発生または防止を図るための措置への対応）（以下、応急措置対応）、②対外的な情報発信に関わる対応（以下、情報発信対応）、③資機材の調達に関わる対応（号機ごとの調達を除く）（以下、資機材調達対応）、④放射能影響範囲の推定及び防護措置及び線量評価に関わる対応（以下、線量評価対応）、⑤前述①～④を除くサイト内の対応（医療活動等）（以下、その他サイト内対応）に整理した。さらに、タスク①は 1～6 号機の 6 つの小タスクで構成されている。表 4.2-1 に、1F の原子力事業者防災計画の要求事項に基づいた本研究の分析対象時間帯開始時の状況およびタスク分類の考え方を示した。

以上により、カテゴリーは、4 つの組織、さらに組織の 1 つである発電所対策本部におけるタスク①～⑤と①の小タスクによる計 13 カテゴリーとなった。



表 4.2-1 原子力事業者防災業務計画の要求事項に基づいた  
発電所対策本部の状況とタスク分類の考え方

原子力事業者防災業務計画における要求事項		分析対象時間帯開始時の状況 (2011年3月13日0:00)	タスクの考え方
(1)原子力防災組織の運営	a.緊急事態の発令	発令済	—
	b.発電所緊急時対策本部の設置	設置済	—
	c.緊急時対策要員の非常招集	招集済	—
(2)通報及び連絡	d.通報の実施等 (原災法10条)	実施済	
	e.情報の収集と提供	実施中	②対外的な情報発信に関わる対応
(3)応急措置の実施	f.警備および避難誘導	避難誘導は終了 警備は継続	⑤発電所内その他の活動
	g.放射線影響範囲の推定 および防護措置	実施中	④放射線影響範囲の推定および防護措置、 並びに線量評価に関わる係る対応
	h.医療活動	不明者の捜索実施中	⑤発電所内その他の活動
	i.消火活動	特になし	—
	j.汚染拡大の防止	実施中	④放射線影響範囲の推定および防護措置、 並びに線量評価に係る対応
	k.線量評価	実施中	④放射線影響範囲の推定および防護措置、 並びに線量評価に係る対応
	l.広報活動	実施中	②対外的な情報発信に係る対応
	m.応急復旧	実施中	①号機ごとの応急復旧や原子力災害の発生 または防止を図るための措置への対応
	n.原子力災害の発生 または防止を図る ための措置	実施中	①号機ごとの応急復旧や原子力災害の発生 または防止を図るための措置への対応
	o.資機材の調達及び輸送	実施中	③資機材の調達及び輸送に係る対応
	p.応急措置の実施報告	実施中	①号機ごとの応急復旧や原子力災害の発生 または防止を図るための措置への対応
q.原子力防災要員の派遣等 (オフサイトセンター)	派遣済, 要員は活動実施中	(オフサイトセンターの活動として整理)	
(4)緊急事態応急対策	r.緊急時態勢発令時の対応 (原災法15条)	実施中	②対外的な情報発信に係る対応
	s.原子力災害合同対策協 議会からの要請事項へ の対応と必要な意見 の進言 (オフサイトセンター)	オフサイトセンターに原子力災 害合同対策協議会が設置され ず、対応は未実施	—

## (2) ワークロードマネジメントの構成要素に基づく整理

「ワークロードマネジメント」については、さまざまな研究があるが、緊急時対応のワークロードマネジメントに関しては、航空業界で体系化されているパイロットの訓練手法 Crew Resource Management（以下、CRM 手法）が参考になる<sup>9), 12), 13), 14)</sup>。本研究では、すでに原子力分野に適合化し実績を有する CRM 手法のワークロードマネジメントの考え方を援用し、優先順位付け (Prioritization)、業務配分 (Distribution)、ストレス管理 (Stress Management) の分類を用いて整理した<sup>9), 13)</sup>。なお、ワークロードマネジメントには「優先順位付け」とは別に「計画策定」を区分している例<sup>14)</sup>もあるが、本研究では「優先順位付け」は、計画策定を含めた広い概念であると考えた。「業務配分」には、自組織から他組織に業務を配分するものと、他組織からの業務の配分を受けるケースが存在しており、いずれもワークロードの総量に寄与する。そのため、これらを併せて「業務配分」としている。「ストレス管理」については、作業環境を含め、精神的あるいは身体的ストレスに繋がる項目としたが、消防車など調達したものがなかなか届かない、作業が予想時間で完了しないといった作業そのものに関するタスクは「優先順位付け」、「業務配分」に分類して整理している。

このようなワークロードマネジメントの構成要素とその概念、分類した具体例として TV 会議録の抜粋を表 4.2-2 に示した。

表 4.2-2 ワークロードマネジメントの構成要素，概念と具体例

構成要素	分類の概念	具体例 <small>Reference7より引用。ただし、発言内のカッコは著者による加筆。</small>
優先順位付け	<ul style="list-style-type: none"> <li>優先順位の判断を行うにあたり、必要な状況認識に関するもの（プラントパラメーターや作業必要時間の予測、プラント状況推移の予測、作業の進捗確認等）</li> <li>何かの比較として優先するタスクを明確に示しているもの、順番や計画を示しているもの、またはその意思決定</li> </ul>	<p>「2号機は、現在、水位しかわかっていません。水位は+3700のままで変化しないです。それ以外はダウンスケールしていて、今、計器復旧中で見えませんが。」(11:23)</p> <p>「じゃあ、ちょっとその指示に従って、ろ過水だけで入れられるところからということだと、注水は遅れますけれど、それで順次行きます。」(6:47)</p> <p>「通報とプレスをしないとベント弁の操作はできませんので、よろしくをお願いします」(11:02)</p> <p>「やっぱり海水ポンプの調達が至近の問題だな、緊急課題だな。可搬の。」(11:17)</p> <p>「もう水が期待できないんだったら、海水からいっちゃおうか、もう。準備として。」(12:18)</p>
業務配分	<ul style="list-style-type: none"> <li>発電所緊急時対策本部等の組織が、他の組織に業務を分配しているもの。あるいは他の組織から業務を受けているもの</li> </ul>	<p>「（人が放射線管理区域外に出る汚染基準について）オフサイトセンター内におそらく放医研（放射線医学総合研究所）の先生がいらっしゃると思うんですね？ちょっと相談していただけないかというのが趣旨なんですけれども。」(4:31)</p> <p>「これちょっとうちで対応する余力がないんで、なんとかフォローしてほしいんだけど」(8:25)</p>
ストレス管理	<ul style="list-style-type: none"> <li>作業環境を含め、精神的あるいは身体的にストレスがかかっていると考えられるもの。</li> </ul>	<p>「これね、電話いつも官邸、つながらないんだよ。何とかできない？」(4:21)</p> <p>「そういう細かい質問は今されると困るんで。」(9:23)</p> <p>「免振重要棟の緊対室（緊急時対策室）のサーベイデータですが、70μSv/hから80μSv/hで若干50から上がってございますが、それ以上の上昇は確認されません。」(8:19)</p>

### (3) 区分別発話データベースの作成

(1)の13カテゴリーおよび(2)のワークロードマネジメントの3つの構成要素により、39の区分が出来上がった。続いて、TV会議録を1時間ごとに区切り、発話内容の中からタスクを抽出し、これをそれぞれの区分に振り分け、構造化された「区分別発話データベース」を作成する。

時間は1時間を単位としてまとめ、TV会議録に従い、一連の発話をブロックと考え、そのブロックの始まりの時間を代表時間として分類した。また、発話には、1回に複数の

タスクについて述べているものや、単なる受け答えなどタスクに関係のないものも存在する。ここでは、これらの発話内容からタスクに関連するものを抽出するとともに、タスク別に発話内容を必要に応じて分割し、先の39区分に振り分けたものを区分別発話データベースとしている。なお、本文中に引用している個別の発話に関する時間については、代表時間ではなくその発話時間を記載している。標準タイプレートを本事象に適用し、完成した区分別発話データベースのイメージを表4.2-3に示す。このデータベースは時間と区分ごとにまとめられたタスクの文字情報によるデータベースである。

表 4.2-3 区分別発話データベースのイメージ

組織	①発電所緊急時対策本部						⑥本店	⑦オフサイトセンター/ 他発電所	⑧官邸/ 原子力安全・保安院
	①応急措置（号機ごとに規定された施設及び設備の応急復旧や原子力災害の発生または防止を図るための措置への対応）		②対外的な情報発信に関わる対応		③資機材の調達に関わる対応（号機ごとの調達を除く）				
タスク	1号機	2号機	3号機	4号機	5号機	6号機			
時間									
	発話内容を、組織、タスク、号機に分けた後、ワークロードマネジメントの3つの構成要素（P：優先順位付、D：業務配分、S：ストレス管理）に該当するものを区分する								

#### (4) ワークロード統計データベースの作成

続いて、ワークロードの量的側面を分析するために、(3)にて作成した区分別発話データベースを用いてワークロードを定量化した「ワークロード統計データベース」を作成した。

本研究では、“ワークロード（外的条件や要求の総量）”を求めるうえで、区分されたタスクを1つの単位（カウント数）とし、区分別発話データベースの各時間帯における各区分のタスクのカウント数を用いて総量を求めた。この区分別発話におけるタスクの発現頻度をカウント数として定量化し、時間的な推移やタスク配分の変化を分析することでワークロードの量的側面の分析を行った。すなわち、「ワークロード統計データベース」は「区分別発話データベース」のタスクの発現頻度を、39区分に対して1時間ごとのカウント数の合計によって示したデータベースである。

### 4.2.2 結果

本章では、「ワークロード統計データベース」に基づき、組織やタスク、ワークロードマネジメントの構成要素におけるカウント数の比較や推移をまとめるとともに、「区分別発話データベース」を用いてカウント数の背景にある状況を分析した。

対象期間中のワークロードのカウント数の合計は 642 であった。各組織のカウント数は、発電所対策本部が 494 (77%)、本店が 83 (13%)、オフサイトセンター・他発電所が 27 (4%)、官邸・保安院が 38 (6%) である。また、発電所対策本部のカウント数 494 をタスクごとに見てみると、タスク①（応急措置対応）が 322 (65%)、タスク②（情報発信対応）が 32 (6%)、タスク③（資機材調達対応）が 51 (10%)、タスク④（線量評価対応）が 42 (9%)、タスク⑤（その他サイト内対応）が 47 (10%) であった。このことから、発電所対策本部のワークロードの中心はタスク①であるが、タスク②～⑤についてもワークロードが割かれていたことが示されている。

#### 4.2.2.1 発電所対策本部のワークロード

ワークロードのカウント数が最も多かった発電所対策本部のワークロードについてまとめる。

図 4.2-2 は、ワークロード統計データベースから、発電所対策本部について全タスクのワークロードのカウント数の合計を出し、ワークロードマネジメントの 3 つの構成要素別にその時間推移をまとめたものである。状況を理解しやすくするために、事故対応における主要な事象に関する発話を区分別発話データベースから抜粋し、併記した。図 4.2-2 からは、ワークロードは時間とともに変動していることがわかる。また、発電所対策本部のカウント数 494 には、優先順位付け、業務配分、ストレス管理の 3 つの構成要素すべてが確認された。その多くは優先順位付け 358 (72%) に割かれ、業務配分 103 (21%)、ストレス管理 33 (7%) の順となっていた。

図 4.2-3 は、発電所対策本部が実施していたタスク①の応急措置対応について号機ごとのワークロードのカウント数の時間推移を示したものである。ワークロードのカウント数は、合計 322 あり、そのうち 3 号機が 213 (66%)、2 号機が 70 (22%)、1 号機が 32 (10%) に対し、4~6 号機は合計で 7 (2%) にとどまっている。このことから、分析対象時間帯のワークロードは 3 号機が中心であるとともに、1~3 号機にほとんどワークロードが配分されていたことが分かる。また、これらの時間推移をみると、発電所対策本部の号機に対するワークロード配分先は、当初は 1 号機であったが、3 時以降は 3 号機が中心となり、9 時以降には 2 号機の対応の占める割合が高まるといった、変遷が示されている。特に、3 号機と 2 号機のワークロードは時間的に重なっていることが示されている。また、3 号機のワークロードのカウント数は、HPCI 停止を受け、注水の方策を検討し、そのうちのいくつかの選択肢が実施された 4 時台、減圧と低圧代替注水の実施やベント実施判断がされた 9 時台、淡水から海水への変更の指示が出された 12 時台、13 時台に、高いピークがみられる。

3号機以外のワークロードには、図4.2-2に示したように、2号機の格納容器ベントや計器の復旧および注水対策、原子力災害特別措置法（以下、原災法）15条の特定事象への対応（期間中2回発生；3号機原子炉冷却機能喪失5時10分、環境敷地境界放射線異常上昇8時56分）などがある。

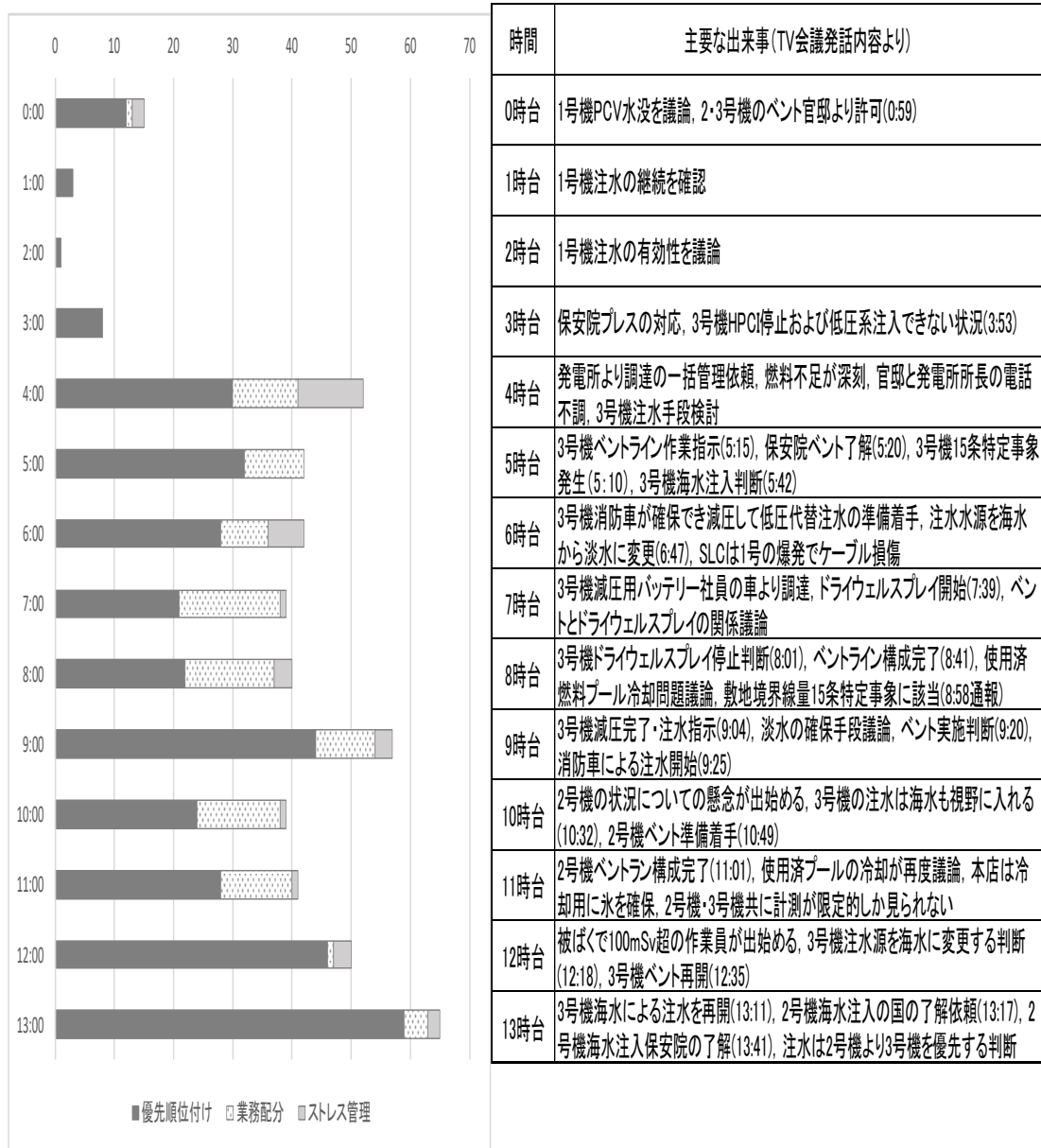


図 4. 2-2 発電所対策本部のワークロード時間推移と主要な出来事



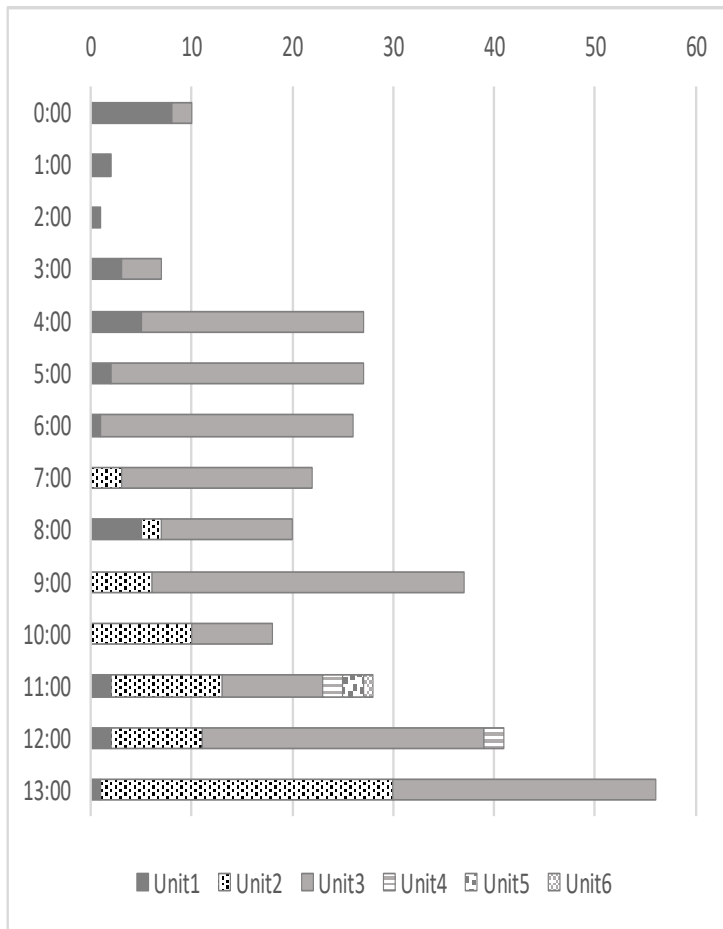


図 4.2-3 各号機のワークロード時間推移

#### 4.2.2.2 外部組織のワークロード

図 4.2-4 は、発電所対策本部以外の組織である本店、オフサイトセンター・他発電所、官邸・保安院のワークロードマネジメントの3つの構成要素の時間推移である。TV会議録の発話内容の分析から、外部組織も様々なワークロードが発生していると同時に、それらが時間とともに変化していることが示された。また、外部組織は図 4.2-4 に示される発電所対策本部のワークロードのカウント数と外部組織のワークロードのカウント数

の推移は、同じ動きではないが、対象時間帯の後半では、本店のワークロードのカウン  
ト数と発電所対策本部のワークロードのカウン  
ト数が、同じ時間帯に高くなっていた。

また、外部組織による緊急時対応は、業務配分されたもの、発電所対策本部のタスク遂  
行における有効なアドバイス等に加え、発電所対策本部のワークロードを高める結果を  
招いた要請やアドバイス等があった。表 4.2-4 には、外部組織の関与をこの 3 種類に分  
類し、「業務配分された主要なタスク」、「発電所対策本部へのアドバイス等の事例」、「発  
電所対策本部のワークロードを高めた事例」としてまとめた。

「業務配分された主要なタスク」とは、発電所対策本部がタスクの実施にあたり、その  
一部を外部組織に「業務配分」したものである。その内容は、資機材（リソース）の調達  
やその管理、外部電源や通信設備の修復、使用済燃料プールの冷却対策や自衛隊・他電力  
からの派遣者との調整など、幅広く多岐にわたっている。たとえば、3号機の注水の回復  
は、発電所対策本部のアイデアと、発電所対策本部から本店に「業務配分」された消防車  
等の調達が機能した好例である。このような「業務配分」に関わるワークロードのカウン  
ト数は、本店、オフサイトセンター・他発電所、官邸・保安院の順で多いことが確認され  
た。また、本店は発電所対策本部のワークロードが高くなっている 9 時以降に、多くの  
業務配分を受けている。

外部組織は、発電所対策本部に別の影響を与えていたこともわかった。これは、自らの  
「優先順位付け」に関わる活動である。その一つが表 4.2-4「発電所対策本部へのアドバ  
イス等の事例」である。例えば、現場における 3号機格納容器スプレイの停止や 3号機  
の注水の水源選択は、このようなアドバイスを受けて実施されていた。しかし、表 4.2-  
4「発電所対策本部のワークロードを高めた事例」に示したように、外部組織のアドバ  
イス等が発電所対策本部のワークロードを高めている例もあった。具体的には、マスコミ  
からの問い合わせ対応や官邸への電話連絡の要請、3号機注水の水源選択の優先順位付  
けなどである。

以上のように、本研究により、発電所対策本部と外部組織が、さまざまなインタラクションをとっており、これらが、発電所対策本部のワークロードに影響を与えていたことが明らかになった。

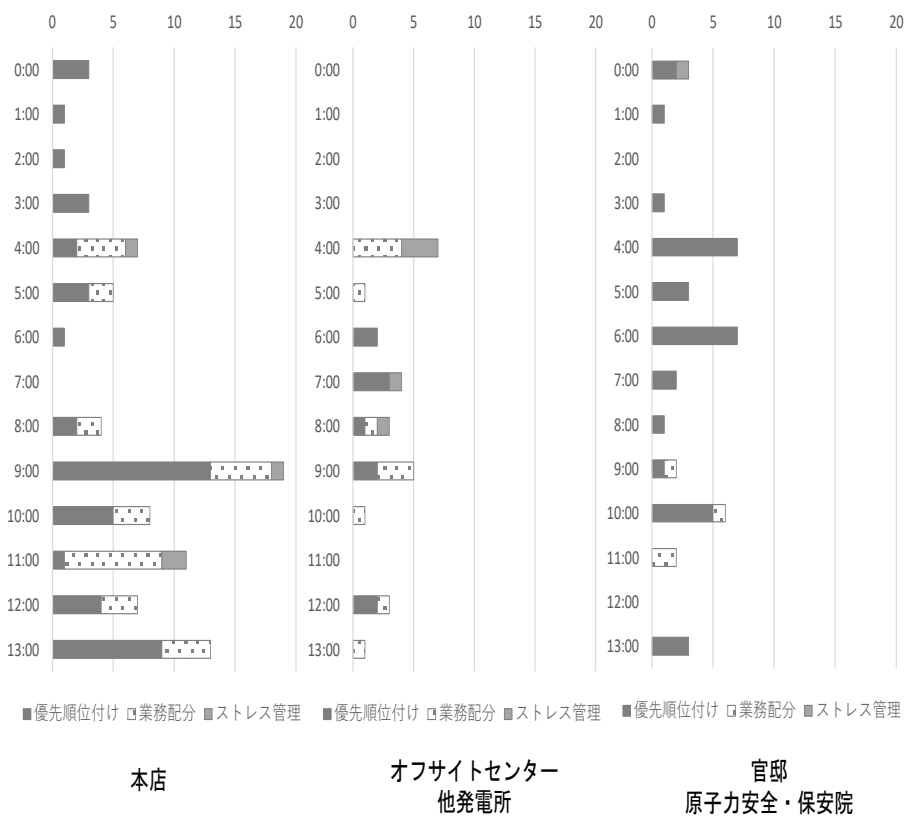


図 4.2-4 外部組織のワークロード時間推移

表 4.2-4 業務配分, アドバイスと発電所対策本部のワークロードを  
高めた事象 (外部組織)

外部組織	業務配分された主要なタスク	発電所対策本部へのアドバイス等の事例	発電所対策本部のワークロードを高めていた事例
本店	<p>消防車、電源車、変圧器、燃料、バッテリー、食料等の調達 (消防車、バッテリーは火力部門より)</p> <p>格納容器ベント (放射性物質放出) に係る関連個所の了解取得</p> <p>使用済燃料プール冷却のアイデア出し</p> <p>使用済燃料プール冷却用水の手配</p> <p>発電所内通信手段の復旧 (工務部門)</p> <p>外部電源の復旧 (工務部門)</p> <p>資材管理場所の選定 (小浜浜コルセンター)</p> <p>水素爆発回避のための方法検討 (ブローアウトパネル開放など)</p> <p>他電力からの派遣者の受け入れ</p> <p>格納容器ベント時の線量予測</p> <p>炉内水位低下の予測 (2号機)</p>	<p>高圧注水系の状態と原災法15条特定事象該当の判断</p> <p>格納容器ベントの国の了解取得</p> <p>長期的視点から見た交流電源復旧の必要性</p>	<p>外部組織への対応のための問い合わせ (原子力安全保安院、マスコミ)</p> <p>現場での実施状況の確認 (注水開始、ベント開始、ホウ酸水注入開始など)</p>
オフサイトセンター, 他発電所	<p>発電所の出入り管理 (汚染サーベイ、教育、防護用具装着)</p> <p>退出時汚染検査基準の見直し</p> <p>燃料、注水用水の調達 (自衛隊への依頼)</p> <p>通報連絡部隊の受け入れ (福島第二)</p> <p>自衛隊の調整窓口業務、アテンド</p> <p>使用済燃料プール冷却問題への対応</p> <p>他電力からの派遣応援者の対応</p>	<p>3号機ドライウェルスプレイと炉心損傷との関係 (炉心損傷に効果なし)</p> <p>使用済燃料プール冷却としての水冷却の提案</p> <p>1号機注水量と水位の不整合 (柏崎刈羽)</p>	<p>放射線管理要員増員の要請</p>
官邸, 原子力安全・保安院	<p>当面必要なものの手配 (リストアップを本店経由で依頼)</p> <p>消防車等の燃料の調達</p> <p>格納容器ベントの判断</p> <p>海水注入の判断</p>	<p>格納容器ベントの了解</p> <p>ラプチャーディスクを破壊しての早期格納容器ベントの可能性</p> <p>注水水源選択の優先順位付け (淡水を優先)</p> <p>3号機注水回復の優先順位付けに関する指導</p> <p>海水注入の了解</p> <p>バッテリーを活用した減圧の実施</p> <p>バッテリーを活用した高圧注水系の復旧</p> <p>早期格納容器ベントのための格納容器スプレイの停止</p> <p>格納容器漏洩の可能性 (線量の上昇から)</p>	<p>1号機プレス発表との整合性確認 (注水の状況、水位など)</p> <p>官邸への電話連絡の要請</p> <p>注水水源選択の優先順位付け (淡水を優先)</p> <p>3号機注水回復の優先順位付けに関する指導</p>

#### 4.2.2.3 ストレス管理について

ワークロードマネジメントの構成要素のうち、「優先順位付け」、「業務配分」は直接緊急時対応と関連するもので、明示的にその内容がTV会議録に示されるものであるが、「ストレス管理」は、緊急時対応者自身の管理である。ここでは、当該期間内に発生している具体的なストレス管理に関わる項目を明確にするために、区分別発話データベースよりストレス管理に関わる項目を抽出し、統計データベースから、それぞれのストレス管理の項目に関わるワークロードのカウント数を求めた。

ストレス管理に関わる項目は、6項目抽出され、ワークロードのカウント数は全体で44存在し、そのうち33(75%)を発電所対策本部が占めていた。ストレス管理の項目について、ワークロードのカウント数の多い順に示す。

A) 緊急時作業の被ばく管理（線量上限である100mSvへの接近または超過する作業員の管理，ヨウ素剤配布）

B) 官邸関係者との通信の不具合

C) 免震棟内の環境線量

D) 睡眠，食事，といった健康管理

E) 不明者の搜索

F) 外部からの細かな問い合わせへの対応

ワークロードのカウント数は、A)，B)，C)の合計が36（ストレス管理の81%）であった。

### 4.2.3 考察

本研究の結果を踏まえ、事態の悪化を防ぎ、回復を早める、現場の「緊急時対応力」を高めるワークロードマネジメントに必要な視点や検討について、優先順位付け、業務配分、ストレス管理の3つの構成要素に基づき、考察する。

#### 4.2.3.1 発電所対策本部のワークロードマネジメントに関する考察

##### (1) 「優先順位付け」と「業務配分」について

複合災害かつ複数ユニット同時災害である1F事故対応の現場対応を担う発電所対策本部には、全体のワークロードの77%が集中していた。ワークロードの分析結果に基づき、発電所対策本部のワークロードマネジメントについて考察する。

図4.2-3において、本研究の分析対象期間の発電所対策本部のワークロードは、4～6号機にはほとんど割り振らずに、1～3号機に集中させていることが示されている。さらに、時間的に見てみると、ワークロードの中心は3号機の対応に充てられているが、2号機のパラメータが把握できなくなる9時前後以降は、2号機と3号機の2つの号機の対応が同時に行われていた。

吉田調書には、発電所対策本部長が自らが指揮した発電所対策本部のワークロードマネジメントを振り返った発言がある。「やることは、水を入れるのと、格納容器の圧力を下げる、この2点、どの号機もその2点だけをやるんだと、これだけを言っていましたから」<sup>10)</sup>、「(前略)1号機はその時にベントだ、爆発だといろんなことがありましたら、とりあえずまずは1号機。次は3号機が止まったので、3号機。もちろん2号機も気にしていましたけれども、一応RCICが動いている、水位が確認できていて、それなりの水位であるということを頼りに2号機は最後だという順番で考えていました」<sup>11)</sup>。このような発言から読み取れる内容は、実行すべきことを絞り込み、指揮命令の混乱を防ごうとしていたことや、対応する号機自体に優先順位付けを行い対応のタイミングをずらして

いたということである。タイミングをずらすことができたのは、HPCI や RCIC を動作可能な限り活用し、当該号機の対応が本格的に必要なまでの時間を稼ごうと考えていたことによる<sup>10)</sup>。このような発言から、号機別のワークロードのカウント数の違いや推移は、発電所対策本部長が、ミッションをシンプルに絞り込んだ上で、最も厳しい状況にある号機に絞った対応に「優先順位付け」することで、有限のワークロードを有効に配分するといったワークロードマネジメントの結果と考えられる。

また、発電所対策本部の外部組織への「業務配分」の割合は、図 4.2-2 の通りである。表 4.2-4 の「業務配分された主要なタスク」に記したとおり、「優先順位付け」によって現場の対応から外れるタスクおよび、現場のワークロードの量的側面の検討により現場で実施することが困難であると考えられるタスクを、外部組織に「業務配分」していたと考えられる。

## (2) 発電所対策本部のマネジメント機能について

(1) で示した通り、発電所対策本部は、「優先順位付け」、並びに外部組織への「業務配分」といったワークロードマネジメントを意識的に実施していたと考えられる。

ワークロードは個人的な経験や専門知識、タスクの複雑さや困難さ、時間的圧力やその他の競合する要求事項等が決定要素となる。運輸業界を中心とした先行研究では、ワークロードがタスクの処理限界を超えている状況では、タスクのステップやタスク自体の失念、注意が狭い範囲に集中するといった特徴がみられると指摘されている<sup>15)</sup>。さらに、航空管制官の具体的な事例としては、目の前に思い付いたタスクしかできなくなる「スノー」(いわゆる、頭の中が真っ白になる状態)と呼ばれる状況<sup>16)</sup>になることも報告されている。

しかし、発電所対策本部は、区分別発話データベースから、例えば 3 号機の注水の回復に関して、(i) 設備の信頼性の高い SLC の復旧を優先すること、(ii) 低圧代替注水への

切り替えは少しでも注入圧力の高い消防車を用いたライン構成を行った後に減圧を行うこと、といった「優先順位付け」を行っていたことが確認できる。発電対策本部長は、吉田調書の中で、かなり混乱をしていたという発言をしており、本来のマネジメント能力が発揮できていないという自覚のある状態であったものの、このように、選択肢を考慮しつつ「優先順位付け」や「業務配分」ができていることから、「スノー」あるいは、タスクの欠落等といったワークロードが処理限界を超えた時に現れる状態には至っていなかったと考えられる。

混乱をしていたという自覚と、実際のワークロードが処理限界を超えている状況にまで至っていなかったという事実は、異なったことを言っているように感じられる。しかし、発電対策本部長が自らのマネジメントの状態を冷静に見ることができていたからこそ、発電所対策本部のワークロードが「スノー」モードにはならない状態で抑えられ、ワークロードマネジメントは辛うじて機能していたと考えられる。

緊急時対応において、発電所対策本部のマネジメント機能が重要であることは論をまたない。だが、緊急事態の中でその対応に追われる発電所対策本部が、自らのワークロードマネジメントの状態を客観的に評価し、その限界を認識できるかは、個々の能力にも依存するであろう。運輸業界を中心にノンテクニカルスキルをまとめている先行研究でも、過大なワークロードによる症状の理解や監視の重要性が指摘されている<sup>15)</sup>。そのため、外部組織が、ワークロードが過多になっている場合に発生する症状をよく理解し、発電所対策本部のワークロードマネジメントが機能している状態であるかどうかを監視することで、より良い状態になるために必要な方策を見つけ、対応するといった支援を積極的に行うことが必要と考える。

### (3) ワークロードの平準化について

図 4.2-2 から、ワークロードは時間とともに変動しており、4 時台から 13 時台までが



高いレベルで推移しているに比べ、0 時台から 3 時台までの間は低くなっていることがわかる。しかし、2, 3 号機の対応がいずれ必要になることは、当初より想定されており、このワークロードが低かった時間帯の活用の余地はあったと思われる。例えば、4 時台以降に発生している資機材の発注やその管理、発電所入域の教育や装備などは、前倒しすることが可能であったと考えられる。

ワークロードマネジメントする側は、常にワークロードを平準化することを意識し、工夫することが求められる。1F 事故対応においても、ワークロードが高い時間帯のワークロードのうち、ワークロードの低い時間帯に分散できたものはなかったか、あるいは外部組織が業務分担できるものがなかったのかの検討が必要である。

#### 4.2.3.2 外部組織のワークロードマネジメントに関する考察

##### (1) 発電所対策本部からの「業務配分」について

前節 2 項で述べた通り、発電所対策本部のワークロードは、外部に「業務配分」することによって、その高まりを抑えていたと考えられる。本研究の分析対象の時間内に外部組織に業務配分された内容は、表 4.2-4 に示した通り、人および資材等調達およびそれに関連するもの、事故進展予測、ベント等の判断と多岐にわたっていた。すなわち、外部組織が、これら多種多様な「業務配分」を分担実施できる能力を有することが、現場の緊急時対応力向上に繋がると考えられる。このことから、緊急時対応力向上のためには、それらの外部組織が「業務配分」された内容を分担実施できる能力を備えることはもちろん、自主的かつ迅速な実施を可能とするしくみの検討も必要である。

なお、これらの業務配分の中で、人の調達は、資材調達とは異なる複雑な調整が必要になることにも留意が必要である。1F 事故対応では、自衛隊や消防、他電力、東電内の他部署からの応援を受けているが、放射線被ばくに代表される原子力災害の特殊性やそれぞれの組織の安全確保の考え方に基づく調整は、新たなワークロードとなる。本事例で

は、本店やオフサイトセンターに、人の調達に関わる調整も含め「業務配分」されたことで、発電所対策本部のワークロードを押し上げずに済んでいた。

1F 事故後の原子力防災への取り組みの一つとして、例えば、原子力事業者が共同で原子力緊急事態支援組織を立ち上げ、無線ヘリなどの資機材の一括確保・維持や、訓練施設を用いた資機材の操作訓練、事業者との合同防災訓練などが実施されている<sup>17)</sup>。今後、これらを含め、「業務配分」のあり方や、外部組織のより積極的な現場の緊急時対応力向上への関与について、検討が必要である。

## (2) 「優先順位付け」について

外部組織は、自らの優先順位付けの一環として発電所対策本部に対するアドバイスや要請も行っていった（表 4.2-4）。1F 事故対応では、発電所対策本部の活動を俯瞰できる立場にある外部組織が、発電所対策本部の活動を補佐する有効なアドバイスを行っていた。3号機の原災法 15 条の特定事象に該当するかどうかの判断に関するアドバイスや、3号機格納容器スプレイのシビアアクシデント対応としての有効性へのアドバイスなどは、その代表例である。発電所対策本部では、これらのアドバイスを受け、3号機の 15 条通報や、格納容器スプレイを停止する判断が行われ、有効に機能した。

一方、3号機注水システムの水源選択にあたっては、発電所対策本部が一旦海水注入を判断した(5:42)後に、外部組織からの指示で淡水に変更(6:47)され、一旦淡水で注水が開始された(9:25)ものの、水源が十分でなく、途中で海水に水源切り替えを視野に入れるとし(10:32)、海水への切り替えを判断(12:18)している。これによりラインアップを淡水から海水に水源を変更する時間を経て、海水を水源とした注水が再開(13:11)されている。3号機の水源変更に関わるワークロードのカウント数は、注水に関わる発電所のワークロードのカウント数 135 のうちの 21 (16%) に相当しており、結果として 2号機の作業と時間的な干渉を生み、12時台、13時台の発電所対策本部のワークロードを押

し上げる要因となっている。

このように、緊急時対応力を高めるための外部組織の優先順位付けとして、発電所対策本部の活動を補佐するアドバイスの実施を、外部組織の重要な役割のひとつとして位置づけることが重要であるが、それらのアドバイスが発電所対策本部のワークロードを押し上げないような工夫が必要であろう。本件は、既往の事故調査でも現場の意思決定を外部機関が乱した例として指摘されている。一つの解決策の例として、本研究の分析では、発電所のワークロードのカウント数が全体の77%を占めるのに対し、本店は13%に止まっていることから、様々な組織からのアドバイスや要請の受け口を本店に一元化し、本店が一旦整理をしたうえで発電所に伝えるといった対応も、緊急時対応力を高めるための一つの方策として考えられる。

また、海水の注入や格納容器ベントについては、発電所対策本部は単独で判断を行っておらず、官邸や原子力安全・保安院の了解を得て実施している。本店は、積極的にこの了解の獲得を行っていた。特に、格納容器ベントに関しては、表4.2-2の優先順位付けの具体例にもあるように、国側の判断を得た後に、通報やプレスのプロセスを経ることが必要であるとされ、そのように実施されていた。このような重要な意思決定をスムーズに行えるような、実効性のあるルール作成や訓練等を通じた共通認識の確立も必要である。

### (3) 緊急時対応力を高めるための外部組織の役割のまとめ

以上のように、発電所対策本部および外部組織のワークロードマネジメントに関する考察により、外部組織に必要な機能として、発電所対策本部の「業務配分」を引き受けワークロードを下げる機能（本節(1)）、緊急時対応を俯瞰しアドバイスする機能および外部組織からのアドバイス等の整理を行う機能（本節(2)）、重要な意思決定に関わる支援機能（本節(2)）、そして発電所対策本部のワークロードマネジメントの監視改善機能（前

節(4)), の4点を挙げることできた。これらは、発電所の緊急時対応力を高めのために外部組織が検討すべき教訓である。1F事故後、原子力安全推進協会や原子力規制庁では、原子力事業者の防災訓練の有効性について様々な評価指標等を用意している<sup>18), 19)</sup>。例えば、原子力安全推進協会が示している緊急時対応能力の評価様式の例として挙げられている「業務集中の場合を想定し、優先順位を判断して活動を行うことが考慮されていること」、という分析の視点<sup>18)</sup>に、具体的に上記4項目の視点を加えることで、これらを実装する対応に繋げてゆくことが可能であると考ええる。

なお、外部組織には、1F事故時には組織されなかった合同対策協議会や、規制当局のように、独立したミッションに基づき活動する外部組織も存在する。これらの組織は、必ずしも発電所対策本部のワークロードの高低を考慮する必要のない外部組織である。しかし、現場の事故拡大の防止や回復に直接関わる組織である発電所対策本部が緊急時対応力を発揮することの重要性を鑑み、本研究を参考に、発電所への有効な要請や命令等のありかたを検討していただきたい。

#### 4.2.3.3 ストレス管理に関する考察

原子力発電所の緊急時対応のように、ハイリスクな現場での作業や、時間的圧力、高いワークロードは、ストレス要因となり、人や組織の緊急時対応力を低下させることが知られている<sup>20)</sup>。また、ストレスがワークロードの許容量を消費する要素である<sup>12)</sup>とされていることが、ワークロードマネジメントにおいて、「ストレス管理」を要素に加えている背景にあると考えられる。本研究の分析により抽出されたストレス管理項目は、6項目であったが、これらは、ワークロードマネジメントとして抑制すべき対象として考える必要がある。

##### (1) 直接的に低減可能なストレス管理項目

はじめに、比較的ストレス管理のワークロードが高かった「B) 官邸関係者との通信の

不具合」について考えてみる。官邸関係者との通信の不具合については、4時台に発電所対策本部長が官邸関係者に電話連絡を取るよう連絡を受け、連絡がつくまでに約20分費やしている。この間発電所対策本部長はその業務が実施できない状況が発生していた。これは緊急時対応力という観点から、明らかに大きな損失であったと言える。これはのちにホットラインを敷くことで解決しているが、このようなインフラ整備は事前準備も可能であり、直接的に低減可能なストレス管理項目である。

また、4.2.2.3で記したとおり、「F) 外部からの細かな問い合わせへの対応」といったストレスも抽出された。これは、外部組織が発電所対策本部のワークロードを高めている典型的な例であるが、緊急時対応力を高めるうえで、発電所対策本部のワークロードを抑制してゆくことが外部組織の機能である、という発想に即し、外部組織で対応するなどに改めることで、直接的に低減可能なストレス管理項目であると考えられる。

## (2) 直接的に低減が困難なストレス管理項目

ストレス管理項目には、直接的に低減が困難な心身のストレス管理項目も存在する。発電所対策本部は、緊急事態において、吉田も自分たちのことを「鼻つまみ者」<sup>11)</sup>と調書で述べているように、発電所の対応者は絶えず「発災者」としてのストレスと闘わなければならない。また、1F事故のような自然災害を伴う複合災害では、発電所で緊急時対応にあたる作業員は、自身の生命の危険や、その家族の安否についても大きなストレスを感じていたはずである(参考文献2, 現場の声)<sup>2)</sup>。小松原や吉澤らは、現場での対応力の背景に心身の健康に関する要素があると指摘しているが<sup>21), 22)</sup>、「発災者」、「生命の危険」や「家族の安否」に関わるストレスはこれに該当する。今回抽出できたストレス管理の項目の中でも、「D) 睡眠, 食事, といった健康管理」、「E) 不明者の搜索」は、心身のストレスに直接かかわる内容である。佐野らは、不明者の搜索や事故対応の中での危険な体験は、作業員に大変大きな精神的ダメージを与えているという指摘を行っており<sup>23)</sup>、「心

身のストレス管理」をマネジメントする重要性が示されている。また、原子力の緊急時対応の特徴である「A) 緊急時の被ばく管理」, 「C) 免震棟内の環境線量」についても、単に身体的健康上の問題のみならず、心のストレスにかかわる項目としても対応を検討すべき項目である。

ワークロードマネジメントとしては、現場の対応者のこれらのストレスを低減することが必要な行為である。一つの例として「食料」について考えてみる。学会事故調でも「食料」の充実の必要性を指摘しているが<sup>8)</sup>、これは事故対応の長期戦に備えた「量的」充実の指摘である。一方、ストレス管理として「食料」を考えてみると、それは単に「量的」充実に止まらず、緊急時対応力に結びつく「質的」な「食事」の提供を意味している。過酷な環境での作業を実施する自衛隊の場合にも、同様な指摘がなされている<sup>24)</sup>。このような視点は、「発災者」である発電所に対してこれまで十分に考慮されてこなかったものであり、発電所でも強調しにくいマネジメント項目であろう。したがって、ストレス管理に関わるワークロードマネジメントは、発電所対策本部はもちろんであるが、外部組織や社会が積極的にかかわってゆく必要がある項目として整理する必要がある。ストレス管理という視点をもって緊急時対応力の向上を考える必要があるという指摘は、本研究が導出する重要な教訓である。

### (3) ストレス管理の評価に関する課題

本研究では、ストレス管理の項目を区分別発話データベースから抽出し、発話の回数をカウントすることで、ワークロードとしてのストレス管理の評価を試みた。しかし、ストレス管理のような項目については、もともとTV会議での議論として積極的に発話されるテーマではないことに加え、作業に関わるタスクに比べその回数でワークロードを評価することに整合し難い項目であると考えられる。例えば、既存の事故報告書では、参考文献9に余震、明るさや線量といった環境因子との関連評価がある。今回の分析では線量

に関する因子は抽出できたものの、余震などの環境因子の抽出は困難であった。

また、「発災者」、「生命の危険」や「家族の安否」等に関わる精神的な負担は大きいと考えられるが、こちらもTV会議録からは「不明者の捜索」に関わる因子の抽出に止まっている。一方、既存の事故調査においても、この精神的な負担に関する情報収集や分析はほとんど行われておらず、わずかに参考文献2「現場の声」に示されているデータが存在する程度である。高いワークロード下で激しいストレスにさらされる場合に見られる症状の中で、行動指標（怒りや攻撃的になる、意気消沈する、など）、情動指標（恐怖、不安、パニック、など）<sup>20)</sup>は、外部からもある程度監視可能なものと考えられる。本店のような外部組織が、このような指標を理解し注意して監視することで、現地のワークロードマネジメントを改善し、緊急時対応力を高めることが可能であろう。また、ストレス管理に関わるデータの収集も課題である。例えば、地震発生当時約6400人いたとされる1Fサイトの作業員の避難行動、爆発による負傷者等への対応<sup>10)</sup>、現地の対応時における健康管理の実態やその評価など、ストレス管理に関するデータの収集や評価を充実させてゆく必要がある。これは、本研究のアプローチにより明確になった重要な教訓である。

なお、ストレス管理のより適切な評価手法やストレス要因の緩和策については、今後の研究課題として取り組みたい。

#### 4.2.4 得られた成果

本研究では、発電所対策本部の緊急時対応の実態を明確にし、同一時間内にどのようなタスクが実行されていたのかに着目し、その時間変化を分析することで、ワークロードマネジメントの観点から緊急時対応力の向上につながる教訓を導出した。

その結果、緊急時対応力を高めるために、発電所対策本部と外部組織が有すべき機能として、次のような項目を導出した。

発電所対策本部：ワークロードを直接受け持つ組織であり、その量も多くなる。自分た

ちの組織のワークロード許容量を見極めつつ、ワークロードマネジメントが有効に実施できる工夫を行う必要がある。その工夫の具体例として、「優先度の高いミッション」への集中、「業務配分」による外部組織の支援の活用、ワークロードの低くなる時間帯の有効な活用、といった要因が導出できた。また、「命の安全」、「発災者」に加え、さまざまなストレスに見舞われる現場の「ストレス管理」に留意した取り組みが必要である。

外部組織：発電所対策本部のワークロードマネジメントが有効に機能する状態を維持するために、発電所対策本部からの「業務配分」を分担することで支援するとともに、「ワークロードマネジメント」の監視・支援を行うことが重要である。さらに、発電所対策本部の重要な意思決定に関わる支援や、俯瞰的なアドバイス、発電所対策本部の「ストレス管理」支援といった機能も必要である。なお、支援にあたっては、外部組織自体が発電所のワークロードを高めない工夫を併せて行う必要がある。

事後の評価のために：事象に関わるデータベースが充実していることとは対照的に、ワークロードマネジメント、特に「ストレス管理」に関わる情報の収集や評価にはまだ改善の余地があり、この分野の研究開発等をより充実させる必要がある。



## 4.2 節 参考文献

- 1) 吉澤厚文, 大場恭子, 北村正晴: 福島第一原子力発電所における事故対応ワークロード分析に基づく緊急時対応力向上に関する研究, 日本原子力学会和文論文誌, Vol. 18, No. 2, pp. 55-68, 2019
- 2) 東京電力: 福島原子力事故調査報告書, 2012
- 3) 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
- 4) 東京電力: 福島第一原子力発電所原子力事業者防災業務計画, 2013
- 5) 福島原発事故記録チーム[編], 宮崎知己, 木村英昭: 福島原発事故東電テレビ会議 49 時間の記録, pp. 2-96, 岩波書店, 2013
- 6) 東京電力ホールディングス: テレビ会議録画映像(事故発災～平成 23 年 3 月 15 日:113 箇所 ) , Retrieved February 1, 2019 , available from <https://photo.tepco.co.jp/date/2013/201303-j/130029-01j.html>
- 7) 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: 中間報告, 2011
- 8) 日本原子力学会: 福島第一原子力発電所事故その全貌と明日に向けた提言—学会事故調最終報告書—, 丸善出版, 2014
- 9) 日本原子力学会ヒューマン・マシン・システム研究部会東京電力(株)福島第一原子力発電所事故調査検討小委員会: ヒューマンファクターの観点からの福島第一原子力発電所事故の調査, 検討, 2015
- 10) 内閣府: 事故時の状況と対応について, 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 2011 年 7 月 29 日 , Retrieved February 1, 2019 , available from [https://www8.cao.go.jp/genshiryoku\\_bousai/fu\\_koukai/pdf\\_2/051.pdf](https://www8.cao.go.jp/genshiryoku_bousai/fu_koukai/pdf_2/051.pdf)
- 11) 内閣府: 事故時の状況と対応について 4, 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 2011 年 8 月 8 日 2011 年 8 月 9 日 , Retrieved February 1, 2019, available from [https://www8.cao.go.jp/genshiryoku\\_bousai/fu\\_koukai/pdf\\_2/077\\_1\\_4.pdf](https://www8.cao.go.jp/genshiryoku_bousai/fu_koukai/pdf_2/077_1_4.pdf)

- 12) Civil Aviation Authority: Flight-crew human factors handbook CAP 737, Aviation House, pp. 55-70, 2014
- 13) 石橋明, 狩川大輔, 高橋信, 若林利男, 北村正晴: 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
- 14) 津田宏果, 飯島朋子, 野田文夫: 行動指標を用いた CRM スキル計測手法の開発, 宇宙航空研究開発機構研究開発報告, JAXA-RR-09-001, pp. 1-86, 2009
- 15) M. J. W. Thomas: Training and Assessing Non-Technical Skills-A Practical Guide-, CRC Press, 2018
- 16) 河野龍太郎: 航空管制におけるヒューマンエラーの実相, ヒューマンインタフェース学会誌, Vol. 3, No. 4, pp. 11-18, 2001
- 17) 日本原子力発電: 「原子力災害対策充実に向けた考え方」に係る当社の取り組みに関する進捗状況の報告について, 2017, Retrieved February 1, 2019, available from <http://www.japc.co.jp/news/other/2017/pdf/20171031.pdf>
- 18) 原子力安全推進協会: 原子力防災訓練ガイドライン, JANSI-EPG-01-初版, 2013
- 19) 原子力規制委員会: 第7回原子力事業者防災訓練報告議事録, 2017, Retrieved February 1, 2019, available from <http://www.nsr.go.jp/data/000204263.pdf>
- 20) R. Flin, P. O'Connor and M. Crichton, 小松原明哲[翻訳], 十亀洋[翻訳], 中西美和[翻訳]: 現場安全の技術—ノンテクニカルスキル・ガイドブック, 海文堂, 2012
- 21) A. Komatsubara: Resilience must be Managed: a Proposal for a Safety Management Process that Includes a Resilience Approach, Becoming Resilient, CRC Press, Vol. 2, pp. 97-111, 2016
- 22) 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

- 23) 佐野信也, 谷川武, 重村淳, 佐藤豊, 吉野相英, 藤井千代, 立澤賢孝, 桑原達郎, 立花正一, 野村総一郎:復興ストレスの諸相:福島原発勤務員のメンタルヘルス支援活動, 精神神経学雑誌, Vol. 114, No. 11, pp. 1274-1282, 2012
- 24) 下園壮太:折れないリーダーの仕事, 日本能率協会マネジメントセンター, pp. 57-64, 2017

### 4.3. Responding の背後要因モデルを用いた評価<sup>1)</sup>

#### 4.3.1. 本節における評価の目的と評価手法

安全の担い手でもある技術の担い手には、常に「許容不可能なリスクがない」と判断される安全の実現を目指し、社会に受容されるように、あるいは受容された後もリスクの低減化を図る必要と同時に、リスクの想定内外にかかわらず、リスクが顕在化した時に対応できる能力を向上させる必要がある。

1F 事故に際し、日本機械学会の福島第一原子力発電所事故からの教訓に学ぶ工学の原点と社会的使命検討委員会は、報告<sup>2)</sup>をまとめている。その中で、学会は、会員に「認識科学に立脚した設計科学」と「技術の社会技術化科学」の両方の視点に立脚した機械工学研究・教育と社会貢献を求め、これらをより具体的に人材育成という視点で検討した結論として、①「認識科学に立脚した設計科学」に指摘されるような技術システムに想定されるリスクの下で、システムが正常に作動するべく適切な設計基準を作成および実行する能力、②この設計基準を超えた残存リスクが顕在化しても受け入れがたい損害が発生しないような対応ができる能力、③「技術の社会技術化科学」で求められているような①および②を社会が理解するために必要な能力、に関する育成が必要と述べている。だが、機械学会報告の提言は、①および③に重きが置かれており、②については「設計基準を超えた残存リスクが顕在化しても受け入れがたい損害が発生しない」ようにするための対策について、「損害防止・軽減措置のバックアップ措置が必要となる場合もある。このような対策を繰り返すことにより、最後に残存リスクが受け入れ可能なレベルになるはずである。」と述べるに留まっている。

一方、1F 事故前の福島第一原子力発電所は、設計基準を超えた「残余のリスク」が顕在化した時の対応を全く行っていなかったわけではない。福島第一原子力発電所でも、設計基準を超えた残存リスクが顕在化した事象を想定し、ハードおよびソフト対策を行っていた。しかし、1F 事故は、「それらの想定を超えた残余のリスクが顕在化した設計基

準外事象（以下、想定を超えた設計基準外事象）」であった。事故の収束を目指した対応は、設計基準外事象が起きた時のために用意してあった非常用の機器等、損害防止・軽減措置のバックアップ措置も機能不全になる中で行われた。これに対し、機械学会の報告書にある「損害防止・軽減措置のバックアップ措置が必要となる場合もある。このような対策を繰り返すことにより、最後に残存リスクが受け入れ可能なレベルになるはずである。」との考えは、設計基準を超えた残存リスクが顕在化した状況は想定できることを前提に、損害防止・軽減措置のバックアップ措置を求めているように受け取れ、それらをしても尚起き得る可能性を否定できない「想定を超えた設計基準外事象」というリスクへの対応力についての検討は明示的になっていない。科学技術の高度化・複雑化が進み、リスクの予見も難しさが増す中、人材育成においてもリスクを想定しそれに対応するだけでなく、「想定を超えた設計基準外事象」が起きて、受け入れがたい損害が発生しないようにする対応能力の向上といった視点が必要ではないだろうか。

本節では、技術が社会に受け入れられるために必要となる人材の育成を目指し、「認識科学に立脚した設計科学」の視点と「技術の社会技術化科学」の視点に加えて、「設計基準を超えた残存リスクが顕在化しても受け入れがたい損害が発生しないような対応ができる能力」を備える人材育成について検討するものである。想定を超えた設計基準外の残存リスクが顕在化し、過酷事故に至った事例である 1F 事故に着目し、事故の影響が大きく現場が最大のダメージを受けており、そこから事故拡大の防止や回復に関わる中期的な時間範囲に着目し、レジリエンスエンジニアリングの 4 能力<sup>3)</sup>の中で 3.2.4 項に示した Responding の背後要因モデルを用いた評価手法も適用し、事故拡大を防いだ行為群の中から、技術システムの安全を担う人および組織に必要な要件に関する教訓を導出する。

#### 4.3.1.1. 事実関係のデータソース

本研究における事実関係の整理にあたっては、関係者の意見聴取やプラントデータ等にアクセスが可能な形で作成されている東電事故調<sup>4),5)</sup>、政府事故調<sup>6),7)</sup>、および国会

事故調<sup>8)</sup>を用いた。また、学術的な評価として、学会事故調<sup>9)</sup>、並びにそのヒューマン・マシン・システム研究部会の報告書 (HMS 報告)<sup>10)</sup>を参照した。

さらに、上記の報告書の公開後、新たに公開されたデータである、テレビ会議の発話内容 (TV 会議録)<sup>11)</sup>、当時発電所長であった吉田の政府事故調査委員会による聴取結果 (吉田調書)<sup>12),13)</sup>、東京電力の未解明問題に対するその後の調査結果 (以下、未解明調査)<sup>14)</sup>も反映している。

#### 4.3.1.2. 事象の選定と評価手法

第2章でも述べたが、本研究では、「設計基準を超えた残存リスクが顕在化しても受け入れがたい損害が発生しないような対応ができる能力」を持つには、システムの挙動のすべては把握できないという前提に立ち、時に想定を超えた設計基準外事象が起きても、受け入れがたい損害が発生しないような対応ができる能力を備えることが必要と考えている。そのため、実際の「想定を超えた設計基準外事象」となった現場で、どのような行為がなされたかを分析し、教訓抽出を試みる。

一方、適切な分析を行うには、現場でどのような行為がなされたかを把握できる利用可能なデータが存在していなければならない。これらの条件から、分析対象を、全交流電源喪失後、炉心溶融や水素爆発を起こしながらも、最終的に一時中断した炉心への注水を回復し、冷却能力を確立した3号機の事象とした。3号機は、原子炉への注水停止 (13日 2:42) から、13日 13:12 までに原子炉への注水を暫定的に回復することに成功しており、この間及び関係する現場の行為については、利用可能なデータが多く存在している。事象は、機器の状態遷移をまとめた上で、イベントツリーにて整理した。

なお、評価手法としては、それぞれの行為群における人の対処が発揮された背後要因を分析するために、表 3-5 に示した Responding の背後要因モデルを用いた評価用テンプレートを適用して評価する。

## 4.3.2. 結果

### 4.3.2.1. 事象の整理

東電事故調および政府事故調に記載された関連記述を参照し、本事象に係るプラントの機能とその略式名称、及びその機能の津波後の状況を表 4.3-1 にまとめた。津波による物理的破壊や交流電源の喪失で、多くの機器の機能が失われ、限定された機器（リソース）で対応しなければならない過酷事故対応の現場の状況が示されている。さらに、個々の事象の成功または失敗の生起順序に従ってイベントツリー形式に整理した結果を図 4.3-1 に示す。地震発生時の状況を初期値とすることで、3号機の震災後の推移と、1号機、6号機の推移の違いを明示した。1号機は、交流電源・直流電源ともに使用不能となり、3号機で使用可能であった高圧注水系に相当する機能を持つ機器を十分に稼働することができず、原子炉の冷却機能が早期に失われたため、3号機よりも早い段階で炉心損傷に至っている。一方、6号機は非常用電源が津波の被害を免れ利用可能であったため、この電源を利用すること等で原子炉冷却機能を確認し、炉心損傷に至ることなく停止に成功している。

イベントツリーを用いて3号機の注水に係る推移を説明する。文章中の番号は、図 4.3-1 に記載してある番号に該当するものであり、後述するレジリエンスエンジニアリングにより着目する行為群を示す。

はじめに、行為群①について述べる。震災直後、表 4.3-1 に示した通り 3号機は全交流電源喪失状態となった（3月11日 15:42 原子力災害対策特別措置法第10条通報事象）。しかしながら、直流電源が使用可能であったことから、これによる運転が可能な高圧注水系にて、原子炉への注水が実施された。この行為群ではその間に SLC の復旧を試みたが、1号機の爆発で電源ケーブルが損傷し、復旧が不可能となり断念している。行為群②は、長期に亘る高圧注水系の維持である。これは、高圧注水系を運転するうえで必要な直流電源の延命策をさまざま講じた結果として可能となったものである。行為群③は、

高圧注水系の停止である。原子炉の崩壊熱の減衰により原子炉圧力が低下傾向となり、HPCI の運転領域を超えた状態となっていたこと等から、運転員は 13 日 2:42 に当該系統を手動停止した。低圧注水系の復旧は目途が立たない状況であったため、運転員は直ちに原子炉減圧を行い、アクシデントマネジメントとして整備されていた DDFP による低圧代替注水に切り替えようとしたが、系統の切り替えが間に合わず、SRV による減圧も直流電源が不足しており作動しなかったことから、この時点で注水が中断する事態となった。その後、行為群④により、低圧代替注水は、DDFP や消防車により確立され、行為群⑤では、社員の車のバッテリー等を集め SRV の復旧対応（8:58 頃複数弁が作動）を実施している。主に行為群④、⑤により、低圧代替注水の実施（9:08 より）、淡水から海水への水源の切り替えによる継続的な原子炉への注水機能の回復（13:12）が達成された。

図 4.3-1 のイベントツリーによる整理により、現場の行為には、成功と失敗の両方が含まれていることが示されている。その中で、レジリエンスエンジニアリングで着目する行為群として抽出した各行為は、②、④、⑤が注水を成功に導いた行為群、①は信頼性の高い機器による注水を実現するための行為群（結果は伴わなかったが、ダメージからの回復を目指す状況において、機器の信頼性に優先順位をおいた判断は適切であることから注目した）、③は注水に関しては失敗につながっているものの、機器の保護に注目した評価では成功といえる行為群、である。図 4.3-1 に、これらの行為群と、事故調査報告書において取り上げられている行為群を合わせて示すことで、原因究明による再発防止を目的とする事故調査報告書と、成功や回復に係る行為群にも着目するレジリエンスエンジニアリングの視点を用いた本研究の違いを明確にすることができた。



表 4.3-1 3号機の原子炉への注水機能に関わる津波後の状況

機能目的	名称	表記	主な機能	系統数	交流電源不要	津波後の機能*
高压注水	高压注水系 (High Pressure Coolant Injection System)	HPCI	原子炉圧力が低下しにくい配管破断等の際に、原子炉の蒸気でタービンを駆動するポンプにより冷却水を原子炉に入れる。非常用炉心冷却系の一つ。	1	○	直流電源で動作
	原子炉隔離時冷却系 (Reactor Core Isolation Cooling System)	RCIC	主蒸気が復水器で冷却できない場合などに原子炉の蒸気でタービンを駆動するポンプにより冷却水を原子炉に入れる。 HPCIの約1/10程度の流量。	1	○	直流電源で動作
高压系代替注水	制御棒駆動系 (Control Rod Drive)	CRD	原子炉の出力を制御する制御棒の駆動を行う設備。緊急時には制御棒を急速に挿入する。	1		機能喪失
	ホウ酸水注入系 (Stand by Liquid Control System)	SLC	何らかの要因で制御棒を挿入できない場合のバックアップ装置。中性子吸収能力の高いホウ酸溶液を原子炉へ注入する。	2		電源喪失
減圧	逃がし安全弁 (Safety Relief Valve) (自動減圧機能/逃がし安全弁機能/安全弁機能)	SRV	原子炉圧力が上昇した際、压力容器保護のために自動、または手動で蒸気を逃がすための弁。非常用炉心冷却系の自動減圧装置としての機能も持つ。	8	○	直流電源で動作
低压注水	炉心スプレー系 (Core Spray System)	CS	冷却喪失事故時に炉心上部より冷却水をスプレーし冷却する装置。非常用炉心冷却系の一つ。	2		機能喪失
	残留熱除去系 (Residual Heat Removal System)	RHR	原子炉停止後の残留熱の除去や、浮上時に冷却水を注入して炉水を維持する装置。非常用炉心冷却系の一つ。	2		機能喪失
低压系代替注水	復水補給水系 (Make-up Water System (Condensate))	MUWC	原子炉等で使われた水を浄化し、運転に必要なさまざまな水を供給する設備。アクシデントマネジメント(AM)上では原子炉への注水に利用できる。	1		電源喪失
	消火系 (電動駆動) (Fire Protection System)	FP	発電所内の消火系統で、モーター駆動のポンプを有する設備。アクシデントマネジメント(AM)として原子炉への注水に利用できる。	1		機能喪失
	消火系 (ディーゼル駆動) (Diesel Driven Fire Pump)	DDFP	発電所内の消火系統で、ディーゼル駆動のポンプを有し、モーター駆動が運転できない時に自動起動する。	1	○	直流電源で動作 ディーゼル駆動
自衛消防	消防車	消防車	平成19年7月に発生した新潟県中越沖地震の教訓として、発電所火災への即応体制の強化策として消火用に整備された。自衛消防隊員等により操作される。	3	○	エンジンにて動作、このうち1台のみ3号機で使用可能

東電事故調，政府事故調より作成

\*：機能喪失は電源以外の設備機能も喪失しているものを示す



なっていたかをまとめたものである。なお, Responding の発揮を生む残りの要因のうち, Attitude については, 既存の事故調査報告において指摘はされていても, それらの指摘は個々の Responding ではなく, 全体の Responding の発揮に対するものであることから, 表 4.3-2 の整理からは除外し, 次項にて分析する。また, Health については, 事故後に現地に入った医師らによる報告<sup>15)</sup>から現場では大変厳しい状況であったことが想定されるが, 現時点で入手可能なデータでは Responding との関連を明確にすることは困難であるため, テンプレートの分析対象からは除外した。

ここでは, 図 4.3-2 並びに表 4.3-2 を参照して, Responding の発揮を生んだ背後要因のうち, 人材育成として考慮すべき Skill と Attitude に着目し, 教訓を導出する。また, Working Environment については人材育成に考慮すべき点について検討する。

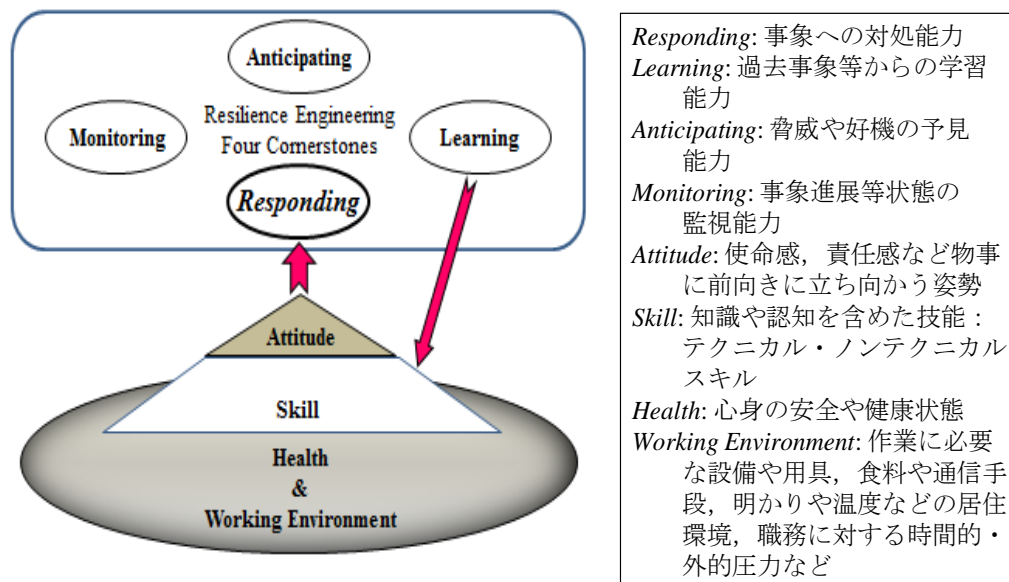


図 4.3-2 Responding の背後要因モデル

表 4.3-2 Responding の背後要因(Skill, Working Environment)の分類

事象 (数字は図4.3-1の行為番号)	Responding	Technical, Non-technical Skill	Working Environment
<b>SLCの復旧(①)</b> 結果して間に合わなかったが、信頼性の高い高圧注水の代替手段の確保のための努力	4号機における機器の損傷有無の確認作業の結果、使用可能な電源盤を見つけ、電源車を用いて通路の鉄扉を溶断するなどしてケーブルを敷設した【東電事故調】 SRVの作動まで、低圧系代替注水と並行して作業を継続した【東電事故調】 水源容量が少ないので、MUWC系の水源と合わせて復旧することを計画した(しかし、1号機の爆発でケーブルが損傷していることが分かり結果して使用できなかった)【TV会議】	高圧代替注水としてのSLC活用の判断 4号機機器の活用を考案 4号機機器の損傷の有無確認 電源車からのケーブル敷設(扉の溶断など) 水源MUWCとセットで復旧を計画	良かった点 ・免震重要棟の利用が可能(以下すべての事象共通) ・電源車(調達)、ケーブル(一部調達) ・扉溶断機器(協力企業のリソース) ・全交流電源喪失手順あり(ただし監視機能維持が前提) 悪かった点 ・津波によるがれき(以下すべての事象共通) ・1号機爆発後の屋外作業(以下すべての事象共通) ・社員2名不明(以下すべての事象共通) ・3号機の関連機器使用不能 ・1号機の爆発で電源ケーブル損傷
<b>高圧注水継続(②)</b> バッテリー消費の節約、時間を稼いだことによるプラントへの「対処」の充実	下記のようなバッテリー節約操作を実施した RCIC, HPCIが起動停止を繰り返さずに運転水位の範囲で運転が継続できるよう、テストラインや流量の調整を実施した【東電事故調】 2系統ある監視装置を1系統にするとともに、照明を最低限にするなど、バッテリー消費の最小化を実施した【東電事故調】 可能な限りRCICを使用した【吉田調書】 RCIC作動中に、運転員はRCICが停止しても次の注水手段であるHPCIをスムーズに起動できるように、制御盤に付箋を貼るなど準備を整えた【東電事故調】 RCICは20時間以上継続運転して、自動停止【未解明調査】した後、HPCIが起動し、注水を継続した【東電事故調】 DDFPを圧力抑制室スプレイモードで起動し、運転できることを確認した(しかし、必要な燃料の手配その現場への運搬に困難が伴った)【HMS報告】	機器の復旧に時間が掛かるという判断 省バッテリー運転の必要性認識(RCIC, HPCIは工夫をしないと起動停止を繰り返し、バッテリーを消費する、という知識) 省バッテリー運転の実施 機器の信頼性に関する知識(RCICを継続運転、代替手段であるDDFPは相対的に信頼性が低いという知識) 優先順位はRCIC、HPCI、DDFPの順と判断 DDFPの運転可能性確認の必要性認識(RCIC, HPCIはいずれ運転できなくなるという知識) DDFPの運転確認(圧力抑制室スプレイモード)	良かった点 ・高圧注水系制御用バッテリー使用可能(設計容量は4時間) ・全交流電源喪失手順あり(ただし監視機能維持が前提) 悪かった点 ・津波による関連機器被害甚大
<b>高圧注水の停止(③)</b> HPCIの運転状況(機器破損の可能性)、SRVの作動可能性、代替注水の確立などを考慮した注水の停止	下記の状況に基づき、HPCIを自動停止した【東電事故調】 ①HPCIの吐出圧が既に機器の運転領域を外れていたが、何らかの原因で停止していなかった(機器損傷の懸念大) ②高圧注水を停止した後に必要となる原子炉の減圧は可能であった(SRVの表示ランプが点灯) ③DDFPからの注入ライン切替操作は既に実施済みであった ※しかし、実際には、SRVを起動するのに十分なバッテリー容量は残っておらず、またDDFPからの注水ラインは構成が完成していなかった(当時現場作業員と操作員の直接の通信手段はなく誤認識が生じた) RCICおよびHPCIの起動操作を行ったが電源の枯渇で動作しなかったため、同型他号機を含め必要なバッテリー手配を検討するが、実現性がないと判断した(上記の高圧系注水の代替であるSLCの復旧作業も始めている)【TV会議】 SRVにて減圧を試みたが動作しなかったため、現場で駆動用の窒素ガスの供給を試みた(しかし、構造上操作はできなかった)【東電事故調】 DDFPを用いた注水ラインを完成した HPCIの起動が困難なことから、関連するポンプを停止し、バッテリーの負荷を下げた【未解明調査】 途中水位計が監視できなくなり、これを復旧するために、予め手配してあった広野火力から届いていたバッテリー(2V)を12個用いて24Vの電源を復旧した【東電事故調】(水位計復旧は実施できたが、HPCI自動停止のタイミングには間に合っていない)	HPCIは吐出圧力が低い領域で運転すると機器の破損の恐れがあるという知識 SRVの表示ランプは点灯しておりSRV自体の作動も可能であると判断(結果として誤り) HPCI停止前には低圧注水を確立しておく必要性を認識 通常の低圧注水系は使用不可能で、代替注水を考える必要性の認識 代替注水であるDDFPのラインは、作業開始から既に時間が経過しており、作業は完了していると判断(結果として誤り) 1、2号機の事故対応から、可搬型バッテリーで水位計回復可能との知識の獲得 バッテリーはいずれ必要となると予見し、手配を実施(広野火力からバッテリー入手済) HPCI復旧不可能と判断し関連機器を停止(これがバッテリーを保存し、SRVが早期に作動した可能性有)	良かった点 ・バッテリー手配済(広野火力より) ・水位不明手順あり(しかし、全交流電源喪失との同時対応は想定されていない) ・AM対応として注水の代替機能を整備 ・DDFP動作可能 悪かった点 ・現場と中央操作室の連絡手段使えず(使用可能無線電話数がきわめて限定) ・水位計監視できず
<b>低圧代替注水の確立(④)</b> 消防車の活用(2台直列)、水源の多様化、切り替え時のロスを抑え工夫	DDFPによるラインは構成したが、吐出圧が低いので、消防車を2台つなげて圧力を上げる方策を考案し、消防車の手配を実施した【TV会議】 消防車2台確保できたことから直列につないだラインを構成した現場では、まず海水を水源とするラインアップを構成した 官邸の駐在者からの連絡で、水源を海水から淡水に切り替えるように指示がなされたことから、下記の状況に基づき切り替えを実施した【吉田調書】 ①使用できる淡水があった ②淡水には、ホウ酸を入れやすかった ③海水、淡水ともライン構成にかかる時間が想定できていたことから、切り替えに有する時間が少なくて済むと考えられた(1号機とは状況が異なる)	AM対策としてFPラインから原子炉への注水が可能な設計になっているという知識 DDFPライン構成実施 DDFPのバックアップとして消防車が利用可能であるという学習(1号機事故対応から) 圧力を高めるために消防車2台直列で使用するという発想 逆洗弁ピットを注水源として活用するという発想(淡水、海水) 水源として、淡水と海水両方を視野(海水注入は1号機の事故対応から学習) 臨界防止の必要があり、ホウ酸水注入を決断(淡水と同時)	良かった点 ・消防車2台手配、利用可能(1台は1F, 1台は2F経由で柏崎刈羽の車) ・淡水の運搬手段(給水車、散水車、バキューム車) ・淡水水源としての防火水槽、貯水池の活用 ・津波による海水の活用(逆洗弁ピットに溜まった津波海水利用) ・注水の貯水槽としての逆洗弁ピットの活用 悪かった点 ・水位計表示合わず(広帯域、狭帯域で水位指示が異なった) ・十分な淡水が確保できず(海水への切り替えを余儀なくされる)
<b>SRV作動(⑤)</b> 節約の追加措置、車のバッテリー収集・活用による減圧動作	SRVを作動させるバッテリーが枯渇しており、社員の車のバッテリーを中央操作室へ搬入すると同時に、社員から現金を集め、車用のバッテリーを買い出しに行く等して、作業を実施した【TV会議】 運転員のバッテリー節約策が功を奏し、自動減圧系のロジックが成立したことで、SRVが操作可能になる9:50よりも前に複数のSRVが作動し(9:08頃)し、減圧に成功した【未解明調査】	SRVが作動しないのはバッテリーの枯渇と判断 125V直流電源が必要であり、車のバッテリーで代替可能との知識(1、2号機事故対応からの学習) 車のバッテリーの収集(社員の車、外部からの調達) 窒素ガスで作動させる可能性を検討(結果的に失敗) 運転員のこれまでのバッテリー節約操作が功を奏し、早期にSRVが作動した可能性	良かった点 ・バッテリーの調達(社員の車、購入資金) 悪かった点 ・バッテリー残量監視できず ・バッテリーを外したため現場に行く車が不足 ・時間的プレッシャー大

#### 4.3.2.3. 1F 事故への“Responding”に見る Skill

##### (1) 各行為群に含まれる Skill の分析

行為群①の SLC の復旧では、SLC が安全系であり信頼性が高く、高圧系の代替として期待できるという基本知識に加え、注入容量が少ないため別途水源を用意する必要があるといった設備の特徴を踏まえた Responding が発揮されている。電源を供給するために、ダメージを受けていない 4 号機設備の活用を進める Responding を発揮したが、1 号機の爆発で設備を復旧することはできなかった。既往の事故調査では、この SLC の復旧は無駄な作業だったのではないかと指摘があるが、本行為群の目的は、原子炉の減圧ができない可能性に備えたリスク対策であり、どの選択肢にもリスクが伴う中で、現場がさまざまなリスクの顕在化に備えようとする基本姿勢が伺える。ただし、1 号機の爆発後電源ケーブルの健全性を早期に確認していれば、復旧の是非の判断が早められた余地はあったと考えられる。

行為群②の高圧注水継続では、生き延びた直流電源で高圧注水をできるだけ長期間継続させるために、通常であれば注水系統が水位の回復／低下に伴い起動停止を繰り返し、バッテリーを消費するところを、テストラインなどを組み合わせることでバッテリー消費を回避した。加えて、監視系統もリスクを取って最低限の 1 系統に絞り込みを行っている。また、当該系統が注水に寄与できないと判断した後は、線量が高く厳しい環境の中で、周辺機器を含めて最大限負荷を落ととしている。このようなバッテリーの節約が、バッテリーの延命に繋がり、注水の継続や早期の減圧実施に寄与した。

行為群③の高圧注水の停止では、注水継続をしなければならない中、すでに運転領域を超えていた HPCI が破損するリスクが顕在化することを回避し、機器保護を行いつつ次の手段に切り替えるというシナリオを選択した。結果は、機器保護には成功したものの、次の注水手段への切り替えが実行できず、注水が停止するという

リスクが顕在化している。このリスクに対する Anticipating を実施できていただけに、その回避手段およびその準備状況を組織として共有するべきであった。

低圧の代替注水を確立する④の行為群では、③にて確立できなかった注水ラインを構築した。原子炉の圧力が下がりきらないリスクに対する適切な Anticipating が、注水圧力を高めるための消防車を直列につないだ注水ラインの構成という臨機の Responding の発揮に繋がっている。また、長期戦の Anticipating により、淡水から海水の切替えを含めた水源の確保の Responding が発揮されている。

また、行為群⑤の減圧操作に関しては、先行号機の事故対応に Learning を発揮し、直流電源確保対策として、社員の車のバッテリーを活用した Responding を臨機に発揮した。②でのバッテリー延命の応急策が功を奏し、減圧に成功するとともに、注水の確立を達成している。

(2)「想定を超えた設計基準外事象」における Responding の発揮に必要な Skill  
通常的设计事象、あるいは想定を超えない設計基準外事象の範囲では、「人」に求められる Skill は、定められた手順に従って誤りなく行動ができるかといったシステムを構成する一つの要素としての役割である。しかし、表 4.3-2 にまとめた通り、注水の回復という 1F 事故の現場対応の 1 つの事例を見ても、様々な選択肢について、リスクのトレードオフを限られた情報と時間の中で考慮しつつ、臨機に Responding を発揮したこと、時に実際にリスクが顕在化し、新たな対応を必要とする行為群も存在していることが確認できる。これらは、リスクを避けつつも成功を獲得するために、考えられる選択肢にそれぞれ注力しなければならない緊急時対応の実態を示しており、このような Skill は、通常的设计事象、あるいは想定を超えない設計基準事象において求められる Skill とは異なっている。政府事故調の委員長である畑村は、1F 事故現場で求められた Skill について、「(前略) 今回の事故で

は不適切な対応が多々あったが、他方、たとえば周囲にあった自動車のバッテリーをかき集めて応急の電源として計測器を動かし、必要最小限のデータを収集するなど、臨機の工夫と判断で事態を打開するための努力がなされた例も多い。そのような対応は、関与した人たちが、実現したい事柄に向けて自ら考え、判断し、行動することによって可能となったものである。」<sup>16)</sup>と述べているが、1F 事故の現場では、「想定を超えた設計基準外事象」に必須となる Skill を要した。

このような 1F 事故の事例を見ても、「想定を超えた設計基準外事象」における Responding には、既存の設備やマニュアルをそのまま適用できるか不確実であり、過酷な Working Environmentのもと、限られた時間の中で、状況判断に基づく創意の発揮などの応用動作も必要である可能性が高い。また、既存の設備やマニュアルが適用できない事象では、存在する選択肢のいずれもがリスクを伴うと考えるのが適切であろう。どちらもリスクを有している選択肢の中で、最善と考える選択肢を実行するには、その行為の実行 Skill と同時に、選択した行為のリスクの顕在化についても Anticipating を発揮し、目標とする成功を獲得するための手段を講じる Skill も同時に保有することが必要になるという、新たな教訓が導かれる。

#### 4.3.2.4. 1F 事故の“Responding”に見る Attitude とその要素

##### (1) 事故現場の行為者に関する記述

3 号機の注水回復事象の分析からは、多くの困難を伴う状況下において、システムが受けたダメージからの回復や更なる破局を防ぐために必要な能力を有していたのは「人」であったことがわかる。1F 事故について分析した INPO (Institute of Nuclear Power Operations) は、Special Report に、「想定外かつ複雑で多大なストレスを伴う状況にあって、発電所職員は、津波以降、重要な安全機能を復旧する作業において、個人の重要な責務、状況を回復しようとする力 (resilience)、創意

ある対処をした。地震と津波によって広範に荒廃し死亡者が出たにもかかわらず、家族の安否が不明だったことをはじめとして、悪天候、休息・食料・水の不足といった困難な状況下でこれらの対応が行われた。」<sup>17)</sup>と記しているが、このような指摘は、我々に改めて「人」の存在について考えることを求めていると受け止めるべきと考える。

さらに、当時現地の緊急時対策本部長は、吉田調書の中で、次のような発言をしている。「私は、ここの発電所の発電員、保修員は優秀だと思います。3発電所を見ても、今まで一番トラブルも経験していますから、肌身で、協力企業だけを使うのではなくて、自分からでも作業をしてきた経験がありますから、これだけのことをできたんだと思います。」、「(前略)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。」<sup>12)</sup>これらの発言には、トラブルをこれまでも多く経験し、緊急時への対応姿勢が鍛えられていた職員が存在や、高放射線量かつ建物が爆発するという危険な環境の中で、飛び散った高汚染のがれきの撤去や、原子炉への注水ラインを確保するための消防車の配備、ホースの敷設など、原子炉への注水を回復させるために作業員が見せた Responding の裏にある強い“Attitude”が滲み出ている。

しかしながら、既存の事故調査のように事故原因の究明に着目した分析では、上手くいかなかった事象が切り出されるために、人が犯したエラーや、判断を過った行為が取り上げられる。そのため、主要な報告書では、Attitudeに関する記述はあるものの、それらを「想定を超えた設計基準外事象」において安全を確保するための教訓として取り上げてはいない。一方、レジリエンスエンジニアリングの手法を参照し、背後要因を含めた事象の分析を行うことで、成功やダメージからの回復に着目する意義を明らかにすると同時に、緊急時における安全を支える人材に必要な



Responding や、それを支える “Attitude” の重要性を、教訓として導出することを可能とした。

## (2) Attitude の要素

表 4.3-2 の項目から Attitude を外したことからわかるとおり、Attitude は、設備操作の時系列からは直接読み取れない情報である。だが、1F 事故の現場は、12 日の 0:30 に現場調査中社員 2 名の所在不明を発表、15:36 には 1 号機の原子炉建屋の爆発およびこれに伴う負傷者の発生、16:17 には敷地境界放射線異常上昇（原子力災害対策法第 15 条通報事象）に至るという厳しい環境にあった。よって、Attitude は、発電所で行われたさまざまな Responding に共通していたと考え、1F 事故現場における行為者個人の心理的な表現に関するデータを収集した<sup>18),19)</sup>。これらを分析した結果から、Attitude の要素の抽出を行った。

運転員から「なにもできないなら、ここにいる意味があるのか」と問われた当直長が、「運転員が制御室を離れるということは、原子炉の制御を諦めるということである。すなわち、我々を信じて避難している地元の人たち、みんなの家族を見捨てるということだ。最後になんとかしなくちゃならないのは現場の近くにいるわれわれだ。だから簡単に離れるわけにはいかない。」と話し、深々と頭を下げたという事例がある<sup>18)</sup>。ここからは、「使命感」、「リーダーシップ」、「家族や友人を守りたいという思い」、「地元／地域への愛着」といった要素が抽出できる。また、「私は何でもやります。私は発電所に突っ込む覚悟です。何かやらなければならないことがあれば、遠慮しないで言ってください。最後は運転員の意地を見せたいんだ。」<sup>19)</sup>という言葉からは、「使命感」、「フォロワーシップ」、「誇り」といった要素が抽出できる。事故当時非番で避難していた運転員が、「12 日に避難しろということで、避難し始めたんですけど、やっぱりどうしても俺、会社が心配だからと言って、途

中で降りて歩いて戻った。シャットダウンを入れるのを手伝いに行ってくるから位に家族に言って。家まで歩いて、車に乗って発電所に向かった。」<sup>19)</sup> (といった報告があるが、ここからは、「使命感」や、自らの働く、あるいは過去に携わったプラントに愛情や愛着を持つことを意味する「マイプラント意識」といったものが読み取れる。さらに、協力企業の作業員も強いAttitudeを示している。「協力企業の社員さんが、社長からは戻るよう言われていたのに、我々みんな（東京電力社員）\*で何とか発電所を守るために一生懸命対応している姿を見て、「私は帰れない」と泣いて残ってくれた。」<sup>19)</sup>「プラントメーカーとしての使命と、（発電所長の）\*吉田昌郎があれだけ一生懸命がんばっているのに見捨てるわけには行かない。そんな思いでしたね。」<sup>18)</sup>といった言葉からは、組織を超えた「一体感」,「使命感」が強く表れている。（\*筆者の加えた注記）

このような現場の行為者の言葉から、Responding の発揮を生んだ背後要因のAttitudeとして、使命感、マイプラント意識・誇り、リーダーシップ・フォロワーシップ、一体感、家族や友人を守りたいという思い、地元／地域への愛着、という6つの要素が抽出できる<sup>20)</sup>。

#### 4.3.2.5. Working Environment の検討

Working Environment が「Skill や Attitude を支える要因」であり、技術システムの安全を担う組織はこれらについても理解し、醸成すべきものである。「想定を超えた設計基準外事象」が顕在化した1F事故の現場のWorking Environmentについて、レジリエンスエンジニアリングを参照し、検討する。

表4.3-2①に記載したとおり、現場のWorking Environmentを確保する上で要となった設備として、新潟県中越沖地震の教訓として設置された免震重要棟を挙げることができる。免震重要棟は、作業員を放射線や建物の爆発から防護し、食事、睡

眠の確保、医療の提供を可能とし、さらに棟内に設置された発電所対策本部が、TV会議システムを通じて本店本部やオフサイトセンター等と繋がったことから、事故対応に必要な連携を生む重要なコミュニケーションを図ることができた。これらのコミュニケーションが図れたことで実現できたことの一つが消防車を活用した海水注入である。このことから、直接事故対応を行わない免震重要棟の存在が、現場で発揮された Responding の背後要因にある Skill や Attitude を支えていたことは明らかであり、図 4.3-2 のモデルも理解できよう。

リソースに関しては、表 4.3-2 にも記載しているが、特に TV 会議の会話から十分でなかったものを抽出することができる。電源車や消防車等への燃料不足は代表的であるが、SRV を作動させるために車のバッテリーを活用したことから現場に行く車両が不足したこと、防護服が足りず現場作業に制約が出たことなど、人の能力を活かすためにも、リソースの充実は必要であることも重要な教訓の一つである。

さらに、既存の事故調査では対策が不十分とされているアクシデントマネジメントについては、低圧系代替注水の設備的対策、並びに手順が準備されていたことが、消防車や海水の活用といった人の創意の発揮と合わさり、原子炉への注水を実現した。このようにアクシデントマネジメントが有効に機能したことで注水が確保できたという評価は、「上手くいったこと」に着目するレジリエンスエンジニアリングの視点だからこそ導出できるものであろう。尚、アクシデントマネジメントの効果について、吉田も「アクシデントマネジメントで FP から原子炉に注水するというライン構成ができていなかったら、もうどうしようもなかったですね。」<sup>12)</sup>と発言している。

Working Environment は、適切な Responding の発揮に必要な Skill や Attitude に影響を与えるものである。よって、通常、どのような能力を育成すべきかという検討(人材育成)の対象にはならないが、技術システムの安全を担う組織が、Working

Environment を整えること，さらにいえば，Working Environment の重要性を認識し，適切な Working Environment を作れる人材を育成することが必要である。

本研究は，機械学会報告に基づいて検討していることから，Working Environment に関しての人材育成の考察は行わないが，「想定を超えた設計基準外事象」の備えには，Working Environment の重要性を十分に考慮する必要がある。1F 事故時も，事故現場で対応する者を加害者とみなし，Working Environment の充実に対して否定的な意見も散見されたが，事故の影響を小さくするためにも，事故収束や回復は必要な作業である。本研究の分析に基づき，Responding を十分に発揮できる Working Environment についての検討が必要である。

#### 4.3.3. 考察

前章までの評価を踏まえ，「想定を超えた設計基準外事象」において，適切な Responding を発揮できる人材育成について，個人が備えの主体となる Skill と Attitude についての教訓をまとめ，組織としての人材育成につなげるための考察を行う。

##### 4.3.3.1. 「想定を超えた設計基準外事象」における Responding の発揮に必要な Skill の育成

(1) 人の役割の再定義：過誤し得る存在から安全を実現する存在へ

第2章で述べたとおり，ISO/IEC Guide51 では安全を「許容不可能なリスクがないこと」と定義し，「危険 (Risk)」を許容可能なレベルまで取り除くことで安全を達成できるという前提の下，過去の事件事例等から，人はエラーを起こす「システムの安全性を脅かす要素」として位置づけている。そのため，安全のためにはヒューマンエラーの低減やオートメーション化が必要とされた。このような評価の中では，人は，「人的過誤率 (Human Error Probability)」という言葉に代表されるように，

過誤し得る存在として扱われている。さらに、機械学会報告の④「認識科学に立脚した設計科学」に指摘されるような技術システムに想定されるリスクに対して、その条件の下でシステムが正常に作動するべく適切な設計基準を作成および実行する能力の醸成の背景も、同じ考え方であろう。安全の実現には、適切な設計基準を作成した上で、実行の手順を定め、実行者となる「人」が手順に従った対処を精度よく実行できるための教育・訓練が有効となる。

しかし、ヒューマンエラーの防止は安全確保の上で必要であるが、人を過誤し得る存在として扱うような評価には、1F 事故現場でみられたような創意を發揮する対処の実行者であることは含まれていない。学会事故調も、過酷事故への対応であるアクシデントマネジメントにおいて、柔軟な対応の必要性を指摘しているが、本研究の目的である機械学会報告の⑤を実現させる「想定を超えた設計基準外事象が起きて、受け入れがたい損害が発生しないような対応ができる能力」を醸成するには、「人」を、過誤し得る存在としてだけでなく、創意を發揮した対処によって安全を実現する存在と位置づけ、その上でその創意の發揮を可能にする人材の育成と条件の整備を目指すべきであろう。

(2) 対処の選択基準の設定：いずれの選択肢もリスクがある中でどう意思決定すべきか

手順がなく、創意を發揮した対処が必要となるような想定を超えた設計基準外事象における安全の考え方も整理すべきである。たとえば、1F 事故現場において行われた判断の一つである原子炉への海水注入の判断（行為群④、⑤）と、3号機の HPCI 停止（行為群③）を比較してみよう。淡水が枯渇する中、プラントの再起を不可能とする海水注入に踏み切った前者は、原子炉の状態を改善することができた。他方、機器の保護と注水停止リスクのトレードオフの中で、機器の保護を優先した後者は、原子炉の状態悪化を招いた。このことから、この2つの行為は、いずれも事態を収

束、回復を目指した創意を発揮した対処であり、柔軟な対応事例であるにもかかわらず、政府や国会事故調の評価は大きく異なっている。リスクがある選択肢の中で行われる行為の結果は、その行為のみならずさまざまな要因の影響を受ける想定を超えた設計基準外事象が顕在化したときに柔軟な対応を求めるのであれば、人材育成の場では、その拠り所となる安全の考え方や指針を提示することが必要であろう。さらに、それを機械学会報告の◎で求めている「技術の社会技術化科学」の中で扱う必要もある。現在の事故調査のように、組織における行為の評価を、後から判明する結果によるものではなく、行為実施時の安全の考え方や指針に照らし合わせて行う方向にすることが、より多くの「想定を超えた設計基準外事象」において適切な Responding の発揮を生み出すために、肝要である。

具体的な指針の一例として、「上手くいったこと」への着目と、4能力の重要性を指摘しているレジリエンスエンジニアリングを参照する方法が考えられる。近年 Hollnagel は、レジリエンスエンジニアリングが目指す安全の概念として、「安全は変化する条件下で成功する能力」と定義し、人を「システムのしなやかさ、回復力に必要な資源」と位置づけると同時に、達成すべき目標を「許容される結果が最大化される状態」としている<sup>20)</sup>。これは、成功を高める原動力は「人」にあるという基本認識に基づいた概念であるが、1F 事故の現場で人や組織に必要とされた Responding に係る Skill を見事に表現している。

このような概念に基づいて「想定を超えた設計基準外事象」において適切な Responding を発揮できる人材の具体的な育成計画を考えるならば、結果ではなく、過程（プロセス）評価を用いることや、いかに事態を収束、回復を実現する柔軟な対応を見出すかといった観点が新たに導入されることになろう。本研究ではレジリエンスエンジニアリングの4能力のうち Responding に着目した評価を実施したが、他の4能力である Anticipating, Monitoring との連携も、リスクの顕在化に適切

な Responding を発揮する重要な視点となってくる。本研究のアプローチでもある、既存の事故報告書では扱われていなかった現場の多くの行為群への Learning の発揮も欠かせない要素である。

#### 4.3.3.2. Attitude の醸成

##### (1) 重要性の認識

これまで、原子力発電所の運転員の育成事業は、国際原子力機関（IAEA: International Atomic Energy Agency）の示すガイドラインに沿って実施されており、その中で、部下のやる気を引き出すのは上位職の役割とされてきた<sup>22)</sup>。しかしながら、本研究で Attitude として抽出された 6 つの要素は、上位職が単純に引き出せるものではない。福島第二原子力発電所の対応事例では、緊急時の作業員の家族の状況確認や、必要な措置を講じる必要性が指摘されているが<sup>23)</sup>、ここで示した Attitude の要素は、それらの位置づけをより明確に認識させるものでもある。

##### (2) 要素の理解と醸成プログラムへの留意点

1F 事故という、想定を超えた設計基準外事象において Responding を発揮した現場の行為者から抽出された Attitude の要素から、このような事象において Responding を発揮するための Attitude の醸成の検討をすれば、必然的に、組織として対応すべき地元との雇用関係や、個人としての要素も大きいと考えられる地域（発電所）での通常業務、生活を通じて時間をかけて培うことの重要性が見えてくる。現在はさまざまな分野で人材育成の必要性が問われ、それに呼応する教育プログラムが設計されているが、Attitude に関する人材育成は、日頃の職場環境、生活環境等総合的な活動の在り方に基礎があり、組織が直接実施できるものや、組織が個人をサポートしつつ間接的に達成するものが存在している。また、その醸成には時間を要することを理解する必要がある。これらは新たな教訓といえる。

### (3) 醸成範囲の検討

1, 3号機と同様な水素爆発への Anticipating の発揮により実施された, 5, 6号機原子炉建屋の水素排気用の穿孔事例では, 日常の業務の中で, 作業を実施した協力企業社員と東京電力社員との間に構築された信頼関係が, 緊急時の非常に厳しい環境下での作業遂行につながっている<sup>24)</sup>。この事例や 4.3.2.4 (2) で示した協力企業社員のエピソードから, Attitude の醸成を考慮すべき範囲は, IAEA の規定している発電所の運転員のみならず, 他の部門の電力職員や協力企業を含めて考えておくべきものであることも, 新たな教訓として導出できる。

#### 4.3.3.3. 既存の事故調査の教訓との違い

「事故の原因究明と再発防止」を目的とした既存の事故調査では, 人や組織に係るものとして, 災害時の体制, 訓練, 責任分担などが教訓として指摘されている。しかし, 「想定を超えた設計基準外事象」への適切な Responding を発揮する要素としては, 訓練や権限配分といった指摘に留まっているのが実態である。一方, 事故対応を, レジリエンスエンジニアリングを参照した本研究では, 成功や回復に係る行為群に着目した分析を行うことで, 「想定を超えた設計基準外事象」において Responding を発揮するためには, 強い Attitude と創意を発揮した対処ができる Skill が必要であることを教訓として導出した。これらは, 既存の事故調査の「失敗した行為群」に着目した分析の結果から導かれる教訓とは明確に異なっており, 同一事象からの新たな教訓の導出といえる。

このように, 既存の事故調査に加え, レジリエンスエンジニアリングの考え方を導入することで, 事故対応を, 失敗, 成功 (回復) といった行為群の集合体であるという視点で俯瞰的に捉えることができ, 総合的な Learning の涵養にも貢献できると考える。



#### 4.3.4. 得られた成果

本研究では、機械学会報告にある人材育成の課題のひとつである「想定を超えた設計基準外事象」に対し、残余のリスクが顕在化しても、受け入れがたい損害が発生しないような対応ができる能力を高めるために、想定を超えた設計基準外事象である 1F 事故の過酷事故対応に基づき、レジリエンスエンジニアリングの考え方をを用いて検討した。本稿の分析により、1F 事故の現場の対応は、さまざまな行為の総体であること、それらの行為には、成功したものも失敗したものもあることが明らかになると同時に、具体的に既存の事故報告書では注目されていない「事象の拡大を防いだ Responding」も明確にすることができた。また、そのような Responding のいずれもが、「人」の持つ柔軟な創意を發揮したものであることも明らかとなった。さらに、先行研究を踏まえて作成した背後要因の構造化モデルを用いることで、これらの Responding の背後要因が抽出でき、緊急時における Attitude の重要性を新たな教訓として導出した。Skill の具体例からは、「想定を超えた設計基準外事象」では、臨機に Responding を發揮する上でしばしばリスクを伴う判断が求められており、選択に伴うリスクに対し、適切に Anticipating を發揮し、それを Responding の發揮につなげることの必要性を教訓として抽出した。

これらの結果を用いて、今後も起こりうるであろう「想定を超えた設計基準外事象」に対し、人材育成として考慮すべき Attitude と Skill の要件を明確にした。得られた結果を人材育成に活かすために、Attitude を醸成する通常時における職場の業務環境への配慮、Skill として応用力を引き出すための新たな安全の概念や現場において行われるさまざまな行為の評価手法の必要性といった、既存の事故調査とは異なる新たな教訓の導出に成功した。このようなことから、既存の事故調査とレジリエンスエンジニアリングの視点は、事象分析において異なる着眼点を与え

ており，両方の視点からの教訓抽出アプローチが必要であることを明示した。

### 4.3 節 参考文献

- 1) 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
- 2) 日本機械学会福島原発事故の教訓から学ぶ工学の原点と社会的使命検討委員会: 報告「福島原発事故の教訓から学ぶ工学の原点と社会的使命～安全・安心社会構築に向けて～」, pp. 10-23, 2013, Retrieved February 1, 2019, available from <https://www.jsme.or.jp/shinsai3.11/wg4report.pdf>
- 3) E. Hollnagel and D. D. Woods: Epilogue, Resilience Engineering Precepts. In Hollnagel, E., Woods, D. D. and Leveson, N., Resilience Engineering: Concepts and Precepts, ASHGATE, pp. 347-358, 2006
- 4) 東京電力:福島原子力事故調査報告書(中間報告書), pp.56-61, 別紙 pp. 30-38, 添付 pp. 7-8, 2011
- 5) 東京電力株式会社:福島原子力事故調査報告書, pp. 178-203, 添付 pp. 90-103, 2012
- 6) 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:中間報告, pp. 170-192, 2011
- 7) 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, pp. 36-40, pp. 363-366, 資料編 pp. 263-292, 2012
- 8) 東京電力福島原子力発電所事故調査委員会, 国会事故調報告書, pp.166-168, 2012
- 9) 日本原子力学会:福島第一原子力発電所事故その全貌と明日に向けた提言—学会事故調最終報告書—, pp. 25-29, pp. 167-175, pp. 280-283, 2014
- 10) 日本原子力学会ヒューマン・マシン・システム研究部会東京電力(株)福島第一原子力発電所事故調査検討小委員会:ヒューマンファクターの観点からの福島第一原子

- 力発電所事故の調査,検討 pp. 36-42, 2015
- 11) 福島原発事故記録チーム[編], 宮崎知己, 木村英昭:福島原発事故東電テレビ会議  
49 時間の記録, pp. 2-96, 岩波書店, 2013
  - 12) 内閣府:事故時の状況と対応について, 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 2011 年 7 月 29 日, Retrieved February 1, 2019, available from  
[https://www8.cao.go.jp/genshiryoku\\_bousai/fu\\_koukai/pdf\\_2/051.pdf](https://www8.cao.go.jp/genshiryoku_bousai/fu_koukai/pdf_2/051.pdf)
  - 13) 内閣府:事故時の状況と対応について 4, 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 2011 年 8 月 8 日 2011 年 8 月 9 日, Retrieved February 1, 2019,  
available from  
[https://www8.cao.go.jp/genshiryoku\\_bousai/fu\\_koukai/pdf\\_2/077\\_1\\_4.pdf](https://www8.cao.go.jp/genshiryoku_bousai/fu_koukai/pdf_2/077_1_4.pdf)
  - 14) 東京電力ホールディングス:福島原子力事故発生後の詳細な進展メカニズムに関す  
る未確認・未解明事項の調査・検討結果「第 5 回進捗報告」について, 添付資料(3-  
3)-(3-5) , 2017 , Retrieved February 1, 2019 , available from  
[http://www.tepco.co.jp/press/release/2017/1470526\\_8706.html](http://www.tepco.co.jp/press/release/2017/1470526_8706.html)
  - 15) 佐野信也, 谷川武, 重村淳, 佐藤豊, 吉野相英, 藤井千代, 立澤賢孝, 桑原達郎,  
立花正一, 野村総一郎:復興ストレスの諸相:福島原発勤務員のメンタルヘルス支援  
活動, 精神神経学雑誌, Vol. 114, No. 11, pp. 1274-1282, 2012
  - 16) 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:委員長所感, 最終報  
告, p. 448, 2012
  - 17) INPO (Institute of Nuclear Power Operations), 日本原子力技術協会[翻訳]:福島第  
一原子力発電所における原子力事故から得た教訓, INPO 11-005 追録, p. 3,  
2012
  - 18) 共同通信社原発事故取材班, 高橋秀樹[編著]:全電源喪失の記憶, 祥伝社, pp.  
128-129, p. 195, 2015

- 19) 東京電力株式会社:別紙 2, 別添「現場の声」, 福島原子力事故調査報告書, 2012
- 20) 大場恭子, 吉澤厚文, 北村正晴, 福島第一原子力発電所事故をふまえた組織レジリエンスの向上(II) - Attitude の構成要因とその醸成 -, 日本機械学会 2014 年度年次大会予稿集, G2010103, 2014
- 21) E. Hollnagel: Safety-I and Safety-II, The Past and Future of Safety anagement, ASHGATE, pp.145-148, 2014
- 22) IAEA (International Atomic Energy Agency): Nuclear Power Plant Personnel Training and its Evaluation, Technical reports series No. 380, pp. 18-32, 1996
- 23) 川村慎一, 奈良林直: 東日本大震災における福島第二原子力発電所の緊急時対応の教訓を反映した原子力緊急時マネジメントシステムの改善, 日本原子力学会和文論文誌, Vol. 15, No. 2, pp. 84-96, 2016
- 24) 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

## 4.4 m-SHEL モデルを援用した評価手法による評価<sup>1)</sup>

### 4.4.1 本節における評価の目的と評価手法

リスクが顕在化した場合に備え、システムが回復（または状態の一層の悪化を回避）できる力を高めておくことの重要性についての指摘がなされている<sup>2),3)</sup>。たとえば、Woods らは、事故が起こったという結果をベースに原因の調査を行うアプローチを First Story とした上で、事故発生に関わる複雑な経緯、事故の拡大防止や回復に至る内容を Second Stories として、安全を高めるための Second Stories を引き出す必要性を指摘している<sup>4)</sup>。

しかし、過去の事故からの学習において、「回復を高める行為に注目した学習」は、ほとんど行われていない。たとえば、2011年に発生した東日本大震災の結果生じた東京電力 1F 事故に対する複数の組織による調査のいずれもが、放射性物質の大量放出という結果を招いた原因の究明と再発防止に力点が置かれた First Story の調査である。一方、事故の拡大を阻止し、事態の改善、状況の回復につながった行為（Second Stories）の存在は指摘されている<sup>5),6)</sup>が、それらに着目した分析は見られない。だが、リスクの発生可能性をゼロにできない中、リスクへの対処方策を予め準備しておくことが不可能であるならば、既存の事故において設計または想定から大きく異なる状態となったシステムを回復させた Second Stories を引き出し、それらを人間工学の目標でもある「システムにおける人間と他の構成要素のインタラクションを理解」<sup>7)</sup>する視点（以下、人間工学的視点）から学習することが必要である。

本節は、1F の 3 号機について、既存の事故調査の主たる分析対象である「冷やす機能を失った」事象を出発点に、「失った冷やす機能を回復し、冷温停止（圧力容器底部の温度が概ね 100℃以下になっていること、など）状態を達成する<sup>8)</sup>まで」の行為群を評価の対象とする必要がある。この間には、人と原子炉の冷却システムが

複雑にインタラクションを行い、原子炉の冷却システムも時間とともにその状態が変化しつつ回復過程を構成している。したがって、本節では 3.2.5 項にて示した m-SHEL モデル<sup>9)</sup>を援用した評価手法を用い、表 3-6 に示したそのテンプレートを適用して分析した。本分析に基づき、リスクが顕在化したシステムが回復を実現するための教訓の導出を試みる。

#### 4.4.1.1 本章で用いるデータソース

本研究で使用したデータソースは、関係者の意見聴取やプラントデータ等にアクセスが可能な形で作成されている既存の事故調査報告書、すなわち、東電事故調<sup>10)</sup>(pp. 178-203, 添付 pp. 90-103), 政府事故調<sup>11)</sup>(pp. 36-40, 363-366, 資料編 pp. 263-292)および国会事故調<sup>12)</sup>(pp. 166-168)の事故調査報告書を基本とした。

回復の過程における行為群に関しては、福島第一原子力発電所・事故の収束に向けた道筋<sup>13)</sup>(以下、収束道筋)、およびその進捗状況報告<sup>14)</sup>(以下、進捗報告)、ステップ 2 完了報告書<sup>15)</sup>、福島第一原子力発電所第 1 号機、第 2 号機及び第 3 号機の原子炉への注水の維持に係る報告書<sup>16)</sup>(以下、注水維持報告)並びに原子力安全・保安院「東京電力(株)福島第一原子力発電所の原子炉施設の安全確保状況について(ステップ 1 終了段階における評価)」<sup>17)</sup>(以下、保安院評価)の 8 種類の資料を用いている。さらに、冷温停止状態達成までの長期にわたる行為は、既存の事故調査報告書を除く 5 種類の資料より抽出した。なお、冷温停止達成状態までをカバーしたドキュメントには、行為の記載があっても、その実施時期が不明なもの、数値データがないもの、並びにその背景が明確でないものも存在した。そのため、東京電力の「平成 23 年 3 月 11 日～12 月 31 日の実績」<sup>18)</sup>(以下、東電実績)、福島原子力発電所事故対策統合本部の議事録<sup>19)</sup>、当時経済産業大臣であった海江田万里の東京電力福島原子力発電所における事故調査・検証委員会聴取結果書<sup>20)</sup>(以下、海江田調書)を参照し、補完した。

#### 4.4.1.2 事象の概要

上記データソースに基づき、3号機の事象を俯瞰した図4.4-1を作成した。これに従い、事象の概要について説明する。

定格出力で運転中であった3号機は、2011年3月11日の東日本大震災の地震発生により、原子炉が自動停止（止める）した。その後、外部電源を喪失したものの、非常用発電機が自動起動し、高圧で原子炉に注水する機能（高圧注水系）により原子炉の冷却（冷やす）を継続でき、原子炉内の放射性物質を様々な格納用のバリアの中に留める（閉じ込める）ことに成功した。

その後、津波によって、非常用発電機が停止し、海水冷却設備の機能が失われた。だが、この時点では、直流電源により運転可能な高圧系注水系による冷却が継続されている。しかし、2日後の13日に、使用可能であった高圧注水系が停止し、崩壊熱が出続ける原子炉を「冷やす」ことができなくなり、過酷事故に至った。その結果、「閉じ込める」機能も維持できなくなり、放射性物質の放出に至った。

一方、現場では、想定された手順等では実現できなくなった「冷やす」機能をなんとか回復し、確保しようとするさまざまな行為がなされていた。それらの行為群により、事故のさらなる拡大は阻止され、冷温停止状態達成に至った。

最初に実現した「冷やす」ための注水機能は、アクシデントマネジメントであらかじめ用意された原子炉への注水ラインを活用したものである。ただし、このシステムは、本来は消火機能のために配備されていた消防車を注水システムの要素として利用し、かつ津波により建物近傍のピットに溜まっていた海水を活用した暫定的なものであった。その後、注水の水源は海水から淡水に変更され、注水システムの信頼性向上が図られた。しかし、一方で注水により放射性物質を多量に含んだ「高濃度汚染水」の流出という新たな課題が発生した。この流出について、既存の事故調査は、放射性物質の環境放出として評価しているが、この高濃度汚染水に対して



は、淡水注水が実施されている間に、貯蔵・浄化処理のためのシステム要素を追加するという対処が行われていることから、本稿では、東電事故調<sup>10)</sup>(pp. 279-291)、政府事故調<sup>11)</sup>(pp. 202-204), 21)、国会事故調<sup>12)</sup>(p. 282, pp. 308-315, pp. 323-330)をデータソースとして、注水と関連した評価を実施している。

さらに、その後、処理水を原子炉に再び注水として活用する「循環注水冷却」システムへの変更がなされ、原子炉の冷却性能を高めることができた。これらにより、冷温停止状態の達成の宣言が実現した。

このように、事象の回復過程は、時間の経過とともにその状況が変化しているが、代表する項目の中でもっともシステムの変更と連動して変化している注水の水源と方式に着目し、下記の3つのPhaseに回復過程を区分した。

#### Phase 1：原子炉への淡水注水の確立まで

原子炉への淡水注水を確立した期間。原子炉へ注水することそのものが命題であり、まずは、海水を水源とした注水システムにより、「冷やす」機能を暫定的に回復した。その後、海水注水を継続しながら、燃料や機器等への影響を考慮し、水源を海水から淡水に切り替えた注水システムを構築した。

#### Phase 2：淡水注水と高濃度汚染水対策の検討

淡水を水源とする冷却を実施しながら、安定した注水と高濃度汚染水対策の検討を行った期間。新たに発生した高濃度汚染水の課題を、高濃度汚染水を浄化した処理水を冷却用に用いる循環注水冷却システムを構築することにより解決した。この時期はまだ圧力容器下部温度を十分に下げることができていない。

#### Phase 3：循環注水冷却システムの性能向上

高濃度汚染水対策により循環注水冷却システムが構築されたことを受け、以後はシステムの「冷やす」機能の性能向上を図り、安定的な注水を確保しつつ関連温度の低下を目指す管理を行い、冷温停止状態を達成した。

なお、図 4.4-1 には、回復過程の代表項目に加え、既存の事故調査が着目した行為群と、本研究が着目する行為群の時間的なカバー範囲についても記載した。

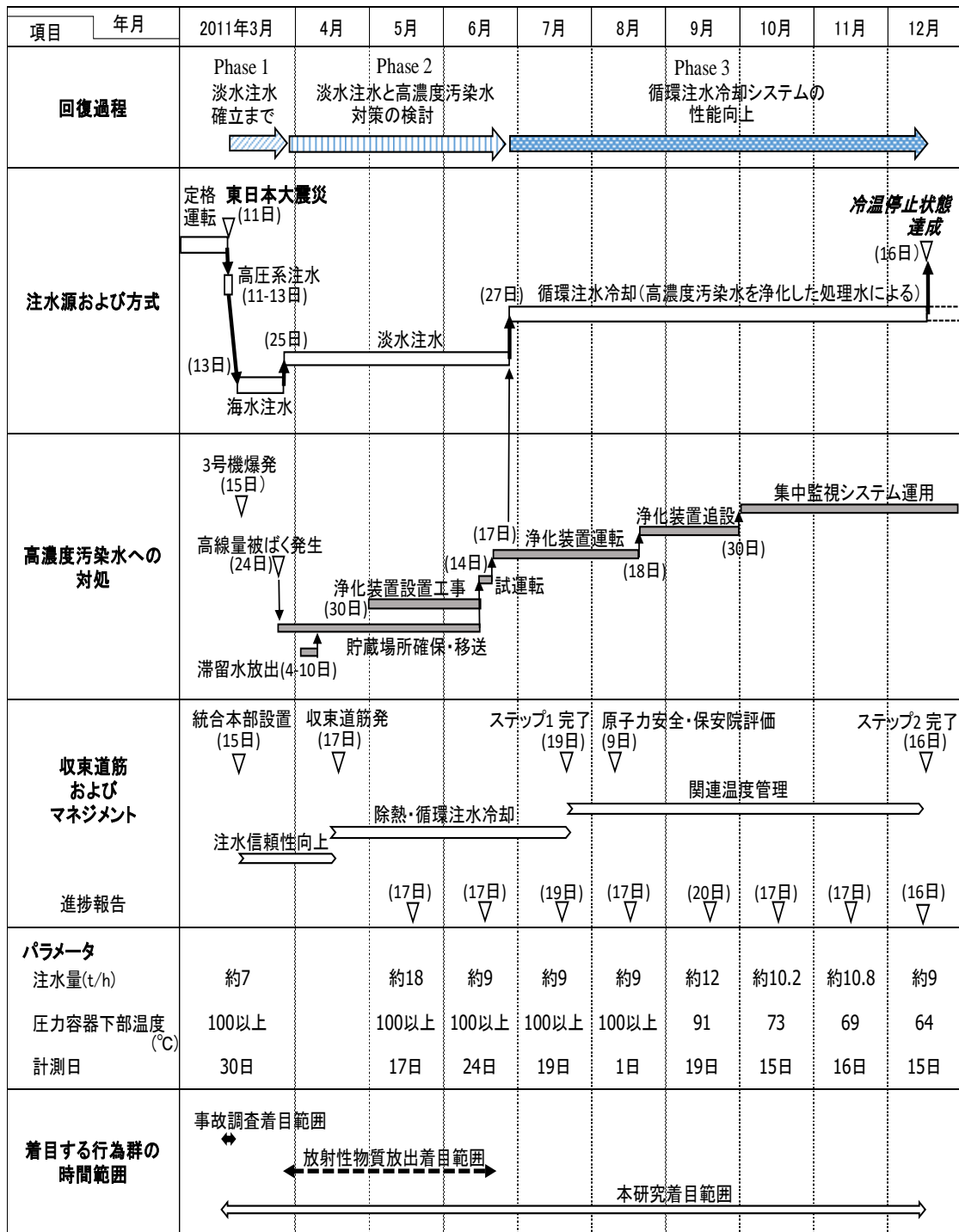


図 4. 4-1 3号機事故発生から冷温停止状態達成までの時系列整理  
(原子炉への注水事象)

## 4.4.2 結果

### 4.4.2.1 回復過程の行為群とその整理

本研究では、分析対象の事象を人間工学的視点から評価するための手法として、「人（当事者・組織）」とマネジメントを含めた「システムの他の構成要素」との関連（インタラクション）を簡略化して整理できる m-SHEL モデルを援用した<sup>9)</sup>。このモデルは、ヒューマンエラーに関係する当事者と周囲の様々な構成要素との関連（インタラクション）を明らかにするモデルとして開発されたものであるが、本研究ではそのインタラクション分割の考え方をを用いて、回復に寄与した行為群の整理に活用する。

しかし、m-SHEL モデルは時間的概念がないために、回復過程をその状況の変化によりいくつかの Phase に区分し、それぞれの区分ごとにインタラクションをまとめることで、状況変化を分析可能とした。具体的には、4.4.1.1 のデータソースに基づき、4.4.1.2 項で示した Phase ごとに、回復過程における行為を整理した。また、下記に示した番号によって、各行為が m-SHEL モデルの中心となる L (Liveware) とのどの構成要素によるインタラクションであるかを示した。

- ① L-S (Software) : 予め定められた、または新たに考案された手順や工程とのインタラクション
- ② L-H (Hardware) : システムの機械的要素、使用可能な機器のリソースとのインタラクション
- ③ L-E (Environment) : L, H を取り巻く環境とのインタラクション
- ④ L-L (Liveware) : 現場で実際にシステムの要素とインタラクションを実施している人（当事者や組織）に、影響を与えている人や組織の活動とのインタラクション
- ⑤ L-m (management) : 目標設定やその進捗管理、成果のフィードバック

#### 4.4.2.2 Phase 1：原子炉への淡水注水の確立まで

##### 1) 原子炉への海水注水の確立（注水源および方式）

3号機は、地震、津波により全交流電源を喪失したが（11日15:42、原子力災害対策特別措置法第10条事象に該当）、直流電源は利用でき、高圧注水系は使用可能であった。しかし、運転員たちは、直流電源はいずれ使用不能となる認識を共有しており、直流電源をできるだけ持続させるための様々な工夫として、最も電力の消費が大きいポンプの起動停止を避けるために、起動停止につながる水位変動を抑えるテストラインの活用や流量調整を実施した（①、②）。また、2系統ある監視装置を1系統に絞るといった、リスクを取った対応も行った（①）。

これらの工夫により、高圧注水系は設計をはるかに超えた長時間運転が継続でき、1号機と悪化に時間差が生まれている。だが、崩壊熱の減少に伴い徐々に原子炉圧力が低下したため、運転員は、原子炉で発生した蒸気をポンプ駆動源としている高圧注水系の機器の損傷を予見し、当該システムを停止した（13日2:42）（①、②）。この際、注水を継続するために必要な低圧注水系の稼働の前提となる原子炉の減圧が上手くいかず、切り替えに失敗したことから、過酷事故に至ったことは既存の事故調査の記述の通りである。

一方、現場では、過酷事故に至った後もさまざまな行為を実施しており、車のバッテリー等を活用した原子炉の減圧を成功することができた（①、②）。また、1号機への対処により、タービン建屋近傍に溜まっていた津波による海水を水源として利用できること、本来消火用に用意されていた消防車をポンプとして活用できることを学習し、アクシデントマネジメントで予め準備されていた消火系配管を用いた原子炉へ注水という対処をした（①）。これらの現場における創意により、同日

中に「消防車等を活用した海水注水」という注水ラインが確立し、原子炉への注水が再開した（13:12）（①，②）。この注水ラインは、14日の3号機の原子炉建屋の爆発により損傷を受けたが、危険かつ高線量環境下における作業員の対処の結果、同日中に復旧している（③）。

以上のように、この時点での原子炉を「冷やす」機能は、消防車で原子炉に海水を注水するという極めて暫定的なものではあるが、機能を回復できたことで、事故拡大を防ぐことができた<sup>10),11)</sup>。なお、既存の事故調査における3号機の注水に関する記述は、この時点で終わっている。

#### 2) 淡水注水の確立（注水源および方式）

海水の注水ラインの確立により、事故拡大を食い止めることができたが、海水は塩分を含んでいるため、構造物への腐食等の影響の考慮をしなければならない。そのため、できるだけ早い淡水への切り替えが必要であった。水源を淡水に切り替える作業は、3月25日に成功している（②）<sup>18),19)</sup>。

また、淡水への切り替えと同時に、信頼性を高めるための諸方策、それらのための体制の整備も行われた。これらにより、淡水注水システムが確立した（②）。

#### 3) 高濃度汚染水の流出（高濃度汚染水への対処）

3号機の原子炉の高レベルの放射能を含有した水（以下、高濃度汚染水）が流出し、作業員3名に高レベルの被ばくが発生した（③）（3月24日）<sup>21)</sup>。

#### 4) 「統合本部」の設置（収束道筋およびマネジメント）

1F事故時の原子力災害対策特別措置法では、原子力災害時の関係者間の情報共有、重要事項の調整を行う機能を、オフサイトセンター内に設置する原子力災害合同対策協議会が担う想定となっていた。しかし、1F事故時のオフサイトセンターは、地震や放射線のダメージによって多くの機能が失われており、センター内に設置する本協議会で情報共有や重要事項の調整を行うことは困難であった（③）。また、3号

機の原子炉建屋爆発後には、2号機が危険な状況となっており、更なる緊急事態も想定される状況であった。

このような事態を受け、協議会とは別の組織にて、情報収集や東京電力と政府間の直接的な意思疎通を図る必要があるとの認識が共有され、菅総理（当時）の提案で15日早朝より東京電力内に政府と東京電力が一体となった「福島原子力発電所事故対策統合本部」（以下、「統合本部」）が設置された。以後、この統合本部によって、本部会合によるプラント状況や作業進捗に関わる情報共有、複数の「特別プロジェクトチーム」による課題検討が実施されるなど、事故対応や回復過程に関わる作業の進捗が管理された（③、④、⑤）<sup>10)</sup> (pp. 279-291, pp. 320-322), 11) (pp. 202-204)。

#### 4.4.2.3 Phase 2：淡水注水と高濃度汚染水対策の検討

##### 1) 高濃度汚染水貯蔵場所の検討（高濃度汚染水への対処、パラメータ）

淡水による原子炉への注水システムの確立（Phase 1）後、本来であれば注水量を増やし、冷却を加速したい状況であった。しかし、高濃度汚染水問題が注水によって発生していると推定されたため（Phase 1）、注水量を制限せざるを得なかった（③）。

統合本部は、緊急課題である高濃度汚染水の環境への流出防止の特別プロジェクトチームとして、「タービン建屋排水回収・除染チーム」を立ち上げた（3月27日）。当チームによって、高濃度汚染水の保管場所として、容量が大きく、作業が容易、かつ貯蔵スペースのある既設設備が検討された結果、通常、運転中に発生する放射性廃棄物を処理する建物である集中放射性物質処理建屋（RW/B）が選定された（④）。

しかし、RW/Bの地下には、もともとRW/Bにあった放射性物質が混ざった津波によって流入した海水が滞留しており（以下、滞留水）、高濃度汚染水を貯蔵するには、滞留水を排水した上で防水工事を行う必要があった。しかし、滞留水の放射性

物質濃度は、法令で定める濃度を上回っていたため、統合本部は海洋への放出を許可しなかった (③) (4月1日)。

この統合本部による滞留水の海洋への放出不許可を受け、滞留水の移動を迫られた東京電力は、東日本大震災発災当時定期検査中であった4号機のタービン建屋への移送を開始した(2日)。しかし、同日のうちに2号機取水口付近より新たな高濃度汚染水の海への流出が確認されたこと、並びに4号機のタービン建屋が3号機と繋がっており、4号機への滞留水の移送が3号機の高濃度汚染水を増やす結果となったことから、発電所長は、緊急に別の貯蔵場所を確保する必要がある旨の発言をした(4日)<sup>10)</sup>(pp. 279-291, pp. 320-322)。この発言を受け、改めて統合本部で議論がなされた結果、当時の規制当局である原子力安全・保安院は、滞留水の海洋放出を「大きな危機を回避するためにやむを得ない」と評価した(③, ④, ⑤)。この評価により、滞留水の海洋放出が実施され(①, ③)(4日~10日)、RW/Bの防水工事(②)完了翌日の19日より、まず貯蔵容量の余裕がなかった2号機の高濃度汚染水の移送が開始され、5月17日より3号機からの移送が開始された(③)。

これらの対処によって実現した貯蔵スペースの確保は、高濃度汚染水の環境への放出抑制のみならず、高濃度汚染水の浄化設備を設置するための時間的裕度も生み出した(①)<sup>10)</sup>(pp. 279-291, pp. 320-322),<sup>21)</sup>。これは、「事故の拡大防止」や「回復力の向上」という観点からは、冷温停止状態達成に至る回復を目指した優先順位を考慮した判断(⑤)といえる。一方、滞留水放出についてはさまざまな意見がある<sup>12)</sup>(p. 282, pp. 308-315, pp. 323-330)。滞留水の放出というリスクを伴う判断において、高濃度汚染水の対策としては有効な対応となったが、レジリエンスエンジニアリングに照らして考えれば、滞留水の放出に伴う対外的なリスクの顕在化を予見し対処すべきであった。

2) 浄化設備の設置と「循環注水冷却」の達成(注水源および方式、高濃度汚染水



への対処)

高濃度汚染水は、貯蔵するだけでなく、その浄化が検討された。さらには後述する「冠水冷却」が断念されたあとは、高濃度汚染水を浄化した処理水を注水源とした冷却が検討された (①)。

その結果、4月30日には、高濃度汚染水の浄化ならびに浄化された処理水を冷却用の注水に用いる循環注水冷却システムの着工がなされた。しかし、様々な対処が必要とされ、設備の完成には2ヶ月弱を要した。浄化設備は6月14日からの試運転を経て、17日から運転され、循環注水冷却システムは6月27日より運用が開始された(7月19日進捗報告)(②)。循環注水冷却システムのイメージを図4.4-2に示す。

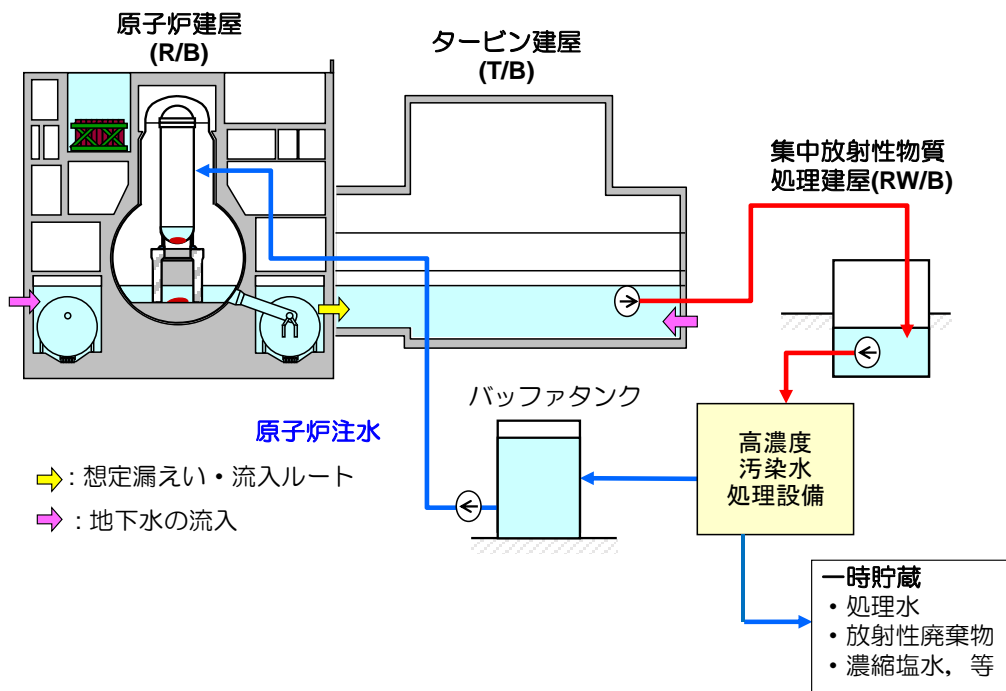


図 4.4-2 循環注水冷却システムのイメージ  
(東電事故調, 政府事故調より作成)

### 3) 注水量の安定 (パラメータ)

Phase 2 では、安定した注水量を確保できる注水システムの信頼性向上に関しても大きな進捗が見られた。特に、注水系のポンプや電源構成の大幅な見直しや、原子炉への注水をより効率的に実施するための注水系統の拡充(消火系から給水系に切り替え, 6月3日)は、その後のシステムの信頼性を高めるうえで重要な役割を果たしている(①, ②)<sup>18)</sup>。

### 4) 「収束道筋」の策定と冷温停止状態達成へのステップ(収束道筋およびマネジメント)

Phase 2 は、高濃度汚染水対策も含め、今後、事故に至った原子炉の安定化をどのように図るのかについての計画、実施及びその進捗を管理しようと試みられた時期でもある。それらの重要な指針が、4月17日に東京電力より発表された「収束道筋」であった。

この収束道筋の策定については、海江田調書の中に、当時の海江田経済産業大臣が4月1日頃より全体的な流れを考えたロードマップを策定しなければいけないと考え、東京電力と準備をしていたとの記述がある(④)<sup>20)</sup>。収束道筋発表に対しては、発表しても達成できなかった場合のリスク、短期間で発表することへのリスクといった指摘があったが、中長期的な展望を持ったうえで対策を考えるべきであるという海江田の思いもあり<sup>20)</sup>、発表に至っている(①, ④, ⑤)。

収束道筋では、冷温停止状態達成に向けたステップを2段階に区切り、「安定的に冷却できている(燃料域上部まで水で満たす:ステップ1(3ヶ月程度))」、「冷温停止状態とする(号機ごとの状況に応じて十分に冷却されている:ステップ2(3~6か月程度))」、という目標が設定された。以後は、毎月統合本部に現場の進捗状況の報告がなされ、報告の度に、進捗状況を踏まえた道筋の改定が実施された(④,

⑤)。

なお、収束道筋を発表した当初は、3号機は原子炉の燃料が格納されている圧力容器の外側にある原子炉格納容器ごと水に漬ける「冠水冷却」が目標とされていた<sup>13)</sup>。しかし、5月17日の進捗報告では、格納容器の健全性が十分ではなく冠水冷却が困難なことから、高濃度汚染水を処理し、原子炉の注水として再び利用する「循環注水冷却」を当面の目標として進めるよう、道筋の修正が行われている(④, ⑤)。また、「循環注水冷却」については、ステップ2の達成目標の一つに組み込まれているが、原子炉の冷却よりも汚染水全体の量を減らすことを主目的に位置づけている。

#### 4.4.2.4 Phase 3：循環注水冷却システムの性能向上

##### 1) 循環注水冷却の信頼性確保（収束道筋およびマネジメント）

Phase 3は、Phase 2において高濃度汚染水の循環注水冷却が確立し、注水システムの信頼性も高まったことから、原子炉の温度低下を目的とした冷却性能を高めることが重要な目標となった時期である。

7月19日の進捗報告では、「安定的に冷却できている（ステップ1の目標）」に対し、原子炉で発生している熱を安定的に除去できていること、循環注水冷却ができていること、注水の信頼性が確保されていること等から、目標が達成できた（ステップ1完了）と評価された(⑤)。一方、注水の信頼性について、原子力安全・保安院は、東京電力に文書を発出し、これまで暫定的に設置されてきた原子炉への注水システムの安全性評価の実施を求めた(8月2日)。これを受け、東京電力は、同月3日に注水維持報告を提出した(⑤)。この報告では、注水システムの設計方針として、崩壊熱を除去するために必要な注水量の確保、および機能喪失に至った場合の早期の機能回復を挙げている。また、系統構成については、外部電源や非常用

電源を利用できるポンプやバックアップとしての消防車の配備，注水ラインの多重性や耐震性も確保した設備の構築がなされていることを述べている (②)。この注水維持報告に基づき，原子力安全・保安院は，同月 9 日に，原子炉の冷却が安定的にできていることを確認したとする保安院評価を出した (⑤)。

## 2) 「集中監視システム」の設置 (高濃度汚染水への対処)

高濃度汚染水に対する追加の浄化設備が 8 月 18 日に運転を開始する中，注水システムの「監視」は広範化に加え，迅速性も求められるようになってきた (①)。

一方，現場で監視を行う作業員の被ばくも課題となっていた (③)。

これらを解決するために，現場の対応拠点である発電所内の免震重要棟内に，高濃度汚染水の処理状況を含む注水システム並びに冷温停止状態達成等に関連する温度を集中的に監視できる「集中監視システム」を設置することになり，9 月 30 日に完成した (10 月 17 日進捗報告) (①，②，③，⑤)。

## 3) 冷却の加速と冷温停止の達成 (収束道筋およびマネジメント，注水源および方式)

ステップ 2 の目標である「冷温停止状態」は，圧力容器底部の温度が概ね 100°C 以下になっていること，この条件を維持するために，循環注水冷却システムの中期的安全を確保していること，この条件を満たしていることと定義された (ステップ 2 完了報告) (④)。

図 4.4-1 に示した通り，Phase 3 では注水量を増加でき，また注水量増加に伴って原子炉の関連温度が低下しはじめた。その結果，圧力容器下部の温度が 9 月以降 100°C を下回るようになった (9 月 20 日進捗報告) (⑤)。さらに，注水の系統についても，Phase 2 にて確保された消火系，給水系に加え，炉心スプレイ系からの注

水も可能となり、より効率的かつ多重性を持った原子炉の冷却を行うことができるようになった（9月20日進捗報告）（②）。

これらにより、「循環注水冷却」を高い信頼性をもって実施し、原子炉の冷却を促進できるようになったことから、政府は、「冷温停止状態」の条件を満足できると判断し（④）、同年12月16日原子炉が冷温停止状態に達した（事故収束に向けた道筋のステップ2が完了した）、と宣言した<sup>8)</sup>。

図4.4-3に、Phase 1～3における3号機原子炉压力容器底部の温度推移<sup>22)</sup>を示す。

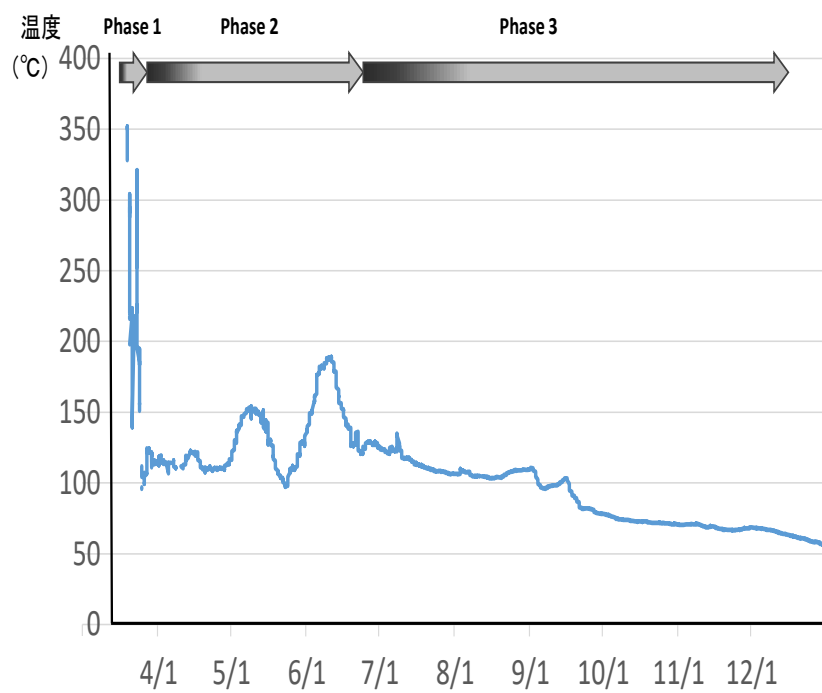


図 4.4-3 3号機原子炉压力容器底部の温度推移

#### 4.4.2.5 回復過程における教訓の導出

4.4.2.2～4.4.2.4 から、回復過程における行為群を m-SHEL モデルの 5 つのインタラクションに分類し、これらをもとに回復過程からの教訓を整理した。時系列に沿った記述より、回復過程の行為群を m-SHEL モデルの 5 つのインタラクションに分類し、これらを「行われた対処等」とそれによる「効果や結果」について区分した。それらの結果から、導出される教訓をまとめ、表 4.4-1 に示した。

表内に記載した教訓①～⑩について、さらに共通項をまとめ、回復過程全体から得られた教訓は、次の 4 つである。

イ) 「迅速な意思決定及びシステム変更を可能とする体制の構築」:体制の構築という観点から、①, ①, ⑩を統合した。

ロ) 「目標の明示及びその監視による回復過程のマネジメント」: L-m のインタラクション⑧, ⑩に、①を統合した教訓である。イ) により確立された体制等により、回復過程全体のマネジメントが実施された。

ハ) 「環境変化に応じた柔軟な代替手段の実施」: L-E のインタラクション⑧および⑨を行う要素として、④および⑤は必要であり、⑥も重要な役割を果たしていた。これらは一つのカテゴリーに統合できる。

ニ) 「リソース及び時間余裕の確保」: リソースと時間の確保は、回復過程における重要な要素であり、②並びに③を統合して一つの教訓とした。Phase 1, 2 の主に回復過程初期において、どのような対処が実行できるかに大きな影響を及ぼしている。

表 4. 4-1 m-SHEL モデルのインタラクションに整理した回復過程の  
行為群と導出される教訓

m-SHELモデル	行われた対処等	効果や結果	導出される教訓
①L-Sの インタラクション	直流電源の消耗の抑制(Phase 1)	・ 高圧注水系の長時間稼働による時間の創出 ・ より厳しい1号機の対応, 3号機の注水代替手段の確保	㉔ 時間余裕の確保
	高濃度汚染水をRW/Bに貯蔵(Phase 2)	・ 高濃度汚染水を貯蔵できたことで時間の創出 ・ 浄化装置の設置 ・ 循環注水冷却のライン構成 ・ 注水ラインの信頼性向上	
	先行号機の事故対応の学習(Phase 1)	・ 消防車を用いた海水の注水 ・ 車のバッテリーを用いた減圧操作	㉕ 先行する事故対応からの学習
	優先する達成目標に基づくリスクを取った判断	・ 監視系までも絞り込んだ電源節約(Phase 1) ・ 原子炉への海水注入判断(Phase 1) ・ 収束道筋の発表(Phase 2)	㉖ 常時とは異なる優先順位に基づく判断
	柔軟な変更を可能とする手順の策定	・ 高濃度汚染水の処理設備の追設(Phase 2) ・ 注水システムの電源や系統の変更(Phase 2) ・ 集中監視システムの導入(Phase 3)	㉗ システムの変更を前提とした柔軟な運用を可能とする手順の策定
②L-Hの インタラクション	本来の使用目的を超えた「人」の創意に基づいた活用	・ 減圧のための車のバッテリー活用(Phase 1) ・ 原子炉注水システム回復のための海水を用いた消防車による給水(Phase 1) ・ 高濃度汚染水のRW/Bへの貯蔵(Phase 2)	㉘ リソースの確保とその柔軟な活用
	ダメージを受けた機械的なシステムの状況に応じた変更（新たなシステム要素の追設）	・ 注水に係るシステムの信頼性向上(Phase 1, Phase 3) ・ 高濃度汚染水処理設備の設置(Phase 2) ・ 集中監視システムの設置(Phase 3)	㉙ システム変更を実施できる体制の確保
③L-Eの インタラクション	オフサイトセンターが被災し、原子力災害合同対策協議会の設置が困難と予見	・ 「統合対策本部」の設置(Phase 1)	㉚ 環境変化に応じた柔軟な代替手段の実施
	高放射線量下で、注水システムの巨大化、複雑化が、作業員の被ばくにつながるリスクを予見	・ 集中監視システムの導入(Phase 3)	
	高濃度汚染水の閉じ込めを優先し、放射性物質の含有量が相対的にはるかに少ない滞留水の放出(Phase 2)	・ RW/Bへの高濃度汚染水の貯蔵(Phase 2)	㉛ 常時とは異なる優先順位に基づく判断
④L-Lの インタラクション	意思決定に必要な関係者が参加した「統合本部」の設置	・ 高濃度汚染水の環境への放出抑制のための「タービン建屋排水回収・除染チーム」の設置による課題の一元管理、迅速な対処(Phase 1) ・ RW/Bの滞留水放出の判断(Phase 2) ・ 循環注水冷却確立後、関連温度の推移を見ながら注水量を細かく変化させ、冷温停止状態を達成(Phase 3)	㉜ 関係者の能力を最大限引き出す意思決定機関の設立
	「収束道筋」の発表とその修正(Phase 2)	・ 中長期的な原子炉の安定化を図る指針の内外への提示 ・ 2段階のステップを持つ短期的な目標の設定 ・ 統合本部からの定期的な報告とそれに基づく柔軟な目標の修正	㉝ 中長期的な目標設定に基づいた計画的な活動
⑤L-mの インタラクション	「統合本部」の設置(Phase 1) 「収束道筋」による目標と計画の明示と関係者の共有(Phase 2) 「進捗報告」による統合本部の監視と目標の変更(Phase 2)	・ 進捗報告による統合本部の監視により、必要に応じてタイムリーに目標を改定。具体例として、冠水冷却から循環注水冷却に目標を変更(Phase 2) ・ 高濃度汚染水の処理を含めた注水システムや関連温度を集中管理するシステムが追設され、人とシステムのインタラクションをリアルタイムで監視(Phase 3)	㉞ 目標の明示及びその監視による回復過程のマネジメント
	システム変更を実施できる体制の構築	・ 高濃度汚染水対策等の新たなシステム要素の追設(Phase 2, Phase 3) ・ 知恵を出し合い、意思決定を行い、それを実行することを可能とする一連の対処	㉟ システム変更を実施できる体制の確保のためのリソース配分



### 4.4.3 考察

#### 4.4.3.1 既存の事故調査及び回復過程に着目した教訓の特徴

既存の事故調査による教訓と、事故の中に存在する行為群を回復過程まで含めた評価によって導出した本研究の教訓を比較してみる。

最も大きな特徴は、「回復過程」に着目していることである。なぜ放射性物質の大量放出という結果を招いたのかに関する原因の究明と、再発防止に力点が置かれている既存の事故調査は、Woods らのいうところの First Story である。しかし、本研究では、既存の事故調査がほとんど取り上げていない事故発生に関わる複雑な経緯や事故の拡大防止や回復に至る Second Stories に注目し、それらを人間工学的な視点によって分析した。結果を出発点にその原因を究明する既存の事故調査に対し、人（当事者・組織）を中心にシステムの構成要素のインタラクションに注目した調査は、同じ行為に対してもより広い視野を持ち、導出された教訓も異なるだけではなく、汎用性が高い。

さらに、回復過程に着目したことから、対象とする期間にも違いがある。既存の事故調査の対象期間が 4 日間なのに対し、本研究の対象期間は、冷温停止状態達成に至る 12 月 16 日までの、約 9 か月間に及んでいる。これらにより、「事故の原因究明」に着目する既存の事故調査だけではカバーされない行為群の明示や評価が可能となった。

社会技術システムの安全を確保する上で、リスクの顕在化を防ぐ予防型のアプローチは必要である。そのためには、事故の結果に基づき、原因調査を行う First Story のアプローチは不可欠であろう。しかし、そのようなアプローチでは、背後にある複雑な状況への検討は行われず、結果に繋がる単純化されたシナリオ（例えば、ヒューマンエラー）による説明が構築されやすい。また、どのように災害の拡大を食い止め、回復したのかに関わる評価は不明瞭である。社会技術システムのリ

スクが顕在化した場合にシステムが回復できる力を高めるためには、Woods が指摘しているように<sup>4)</sup>、Second Stories を引き出し、学習していくことが重要であろう。

#### 4.4.3.2 人間工学的視点から見る回復過程

発生した事故に対し、その原因を究明し、再発防止の教訓を得る目的で行われている「事故調査」に、どのような内容を含めるべきなのかについては、様々な議論がある。たとえば、日本学術会議等においても、事故調査の在り方が検討され、提言も出されている。しかし、これらは事故の責任追及や情報公開等の影響で「事故の原因究明」が正確に行われないことへの懸念が発端となったものである<sup>23)</sup>。

本研究が対象とした 1F 事故は、事故原因となった部分を修理すればシステムが回復するといった単純なものではない。設計されていたシステムは大幅なダメージを受け、そのままでは事故が拡大する状況であった。さらに、高濃度汚染水といった新たな課題も発生しており、事故の発生過程に比してその拡大防止や回復過程には、長期に亘りシステム的大幅な変更や追加が必要であった。厳しい環境の中での対処が更なる事故拡大を防いだことに関しては、国会事故調の中に「(前略) 気概のある運転員の勇気と行動にも支えられ、危機にあった原子炉が冷温停止まで導かれた事実は特筆すべきである」<sup>12)</sup> (pp. 193-195) との指摘もなされている。だが、当該事故調査の中でも、どのように冷温停止状態が達成されたのかの評価や教訓の導出は行われていない。

本研究では、長期に亘るシステムの回復過程に着目し、重要な役割を果たした行為群の分析に、人間工学的視点の導入が必要と考え、m-SHEL モデルを援用し、人(当事者・組織)とシステムの構成要素のインタラクションの整理を試み、新たな教訓を抽出した。その結果、例えば、高濃度汚染水問題について、既存の事故調査が、放射性物質の放出という観点からの評価のみであるのに対し、冷温停止状態と

の関連について指摘し、異なる評価を行った。さらに、「迅速な意思決定及びシステム変更を可能とする体制の構築」、「目標の明示及びその監視による回復過程のマネジメント」、「環境変化に応じた柔軟な代替手段の実施」及び「リソース及び時間余裕の確保」といった、既存の事故調査とは異なる Second Stories に関わる新たな教訓を導出した。これは、前述の国会事故調の指摘に対する具体的な教訓でもある。

なお、本研究で用いた m-SHEL モデルは、もともとヒューマンエラーに関係する当事者と周囲の様々な構成要素との関係を明らかにするために開発された First Story の分析モデルである。しかし、本研究ではそのインタラクション分割の考え方をを用いて、回復に寄与した行為群の整理に m-SHEL モデルを援用し、Second Stories の評価を行った結果、既存の事故調査が指摘できなかった教訓が導出できた。このことから、m-SHEL モデルが教訓導出用の手法としても活用できる可能性を示すことができた。一方で、m-SHEL モデルのこのような使い方は一般的とは言えないことから、Hollnagel らが提唱している「上手くいったこと」に着目して回復する能力を高めるためのレジリエンスエンジニアリング<sup>24)</sup>の活用事例<sup>25)</sup>等、Second Stories をより適切に評価する手法について、検討が必要であろう。

#### 4.4.3.3 回復過程を含めたデータベースの体系的整理

回復過程を人間工学的視点によって分析することを試みた本研究の遂行にあたっては、関係するデータベースの課題も明示された。

本研究で分析対象とした3号機の原子炉注水回復に関わるすべての行為は、既存の事故調査がまとめられる2012年までの間に実施されたものである。しかし、既存の事故調査が対象としていない3月15日以降の行為群の公式な記録は、収束道筋、進捗報告、ステップ2完了報告書、注水維持報告等にデータソースが分散され

ており、報告書のように体系化されたデータベースになっていない。そのため、本研究のような分析・評価を行うには、まず必要なデータを揃えるために、現場の状況に詳しい者が時間と労力をかけて取り組まなければならなかった。

さらに、回復過程に関するドキュメントでは、実施された行為群の正当性や妥当性についての評価ではなく、できあがったシステムについての評価が目的とされていることから、行為群もその結果のみが記載されている。そのため、人間工学的視点である「人」が関与したインタラクションの背景を単純に読み取るこのできないものが多く存在した。

事故調査報告書は、「原因究明および再発防止」のための教訓を形式知化した文書として、広く活用される重要なドキュメントであると共に、貴重なデータベースにもなるべきである。すなわち、今後の事故調査においては、事故調査の評価の対象となるかどうかとは別に、本研究のように新たな知見の評価を可能とするデータベースを体系的に構築し、人間工学的視点を取り入れた分析を含む社会技術システムの信頼性向上に関わるベンチマークに活用できるよう配慮しておくことが肝要である。

#### 4.4.4 得られた成果

本研究は、1F 事故の 3 号機の回復過程における行為群に着目し、これらを m-SHEL モデルを援用して分析することで、設計から大きく異なる状態となったシステムの回復過程からの Second Stories の導出を試みた。その結果、「迅速な意思決定及びシステム変更を可能とする体制の構築」、「目標の明示及びその監視による回復過程のマネジメント」、「環境変化に応じた柔軟な代替手段の実施」、並びに「リソース及び時間余裕の確保」といった教訓を導出できた。

既存の事故調査が行っている First Story のアプローチは重要である。しかし、

社会技術システムが複雑化する中、「残余のリスク」の顕在化に備え、Second Stories のアプローチによる、システムが回復できる力を高めておくための教訓もまた必要である。本研究で導出した Second Stories は、First Story に着目していただけでは導出できなかったものである。

また、研究を進める中で、「学習」を支えるデータソースが分散し、かつ十分な内容となっていないことも明らかになった。事故調査における人間工学的視点を踏まえたデータベース構築も、Second Stories を引き出すうえでの課題である。

#### 4.4 節 参考文献

- 1) 吉澤厚文, 大場恭子, 北村正晴:福島第一原子力発電所における冷温停止状態達成過程に着目した教訓導出, 人間工学, Vol. 54, No. 3, pp.124-134, 2018
- 2) R. Westrum: Chapter 5 A Typology of Resilience Situations. In E. Hollnagel, D. D. Woods and N. Leveson: Resilience Engineering: Concepts and Precepts, ASHGATE, pp. 55-65, 2006
- 3) 日本学術会議総合工学委員会工学システムに関する安全・安心・リスク検討分科会: 工学システムに対する社会の安全目標, p. 11, 2014
- 4) D. D. Woods and R. I. Cook: Nine Steps to Move Forward from Error, Cognition, Technology and Work, No. 4, pp. 137-144, 2002
- 5) 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
- 6) 高橋信:福島第一原力発電所事故とレジリエンスエンジニアリング, エネルギーレビュー, Vol. 33, No. 4, pp. 15-18, 2013
- 7) 日本人間工学会: 人間工学とは, Retrieved April 18, 2017, available from <https://www.ergonomics.jp/outline.html>
- 8) 首相官邸:平成 23 年 12 月 16 日野田内閣総理大臣記者会見, 2011, Retrieved February 2, 2019, available from <http://www.kantei.go.jp/jp/noda/statement/2011/1216kaiken.html>
- 9) 河野龍太郎:医療におけるヒューマンエラー第 2 版, 医学書院, pp. 52-64, 2016
- 10) 東京電力:福島原子力事故調査報告書, 2012
- 11) 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

- 12) 東京電力福島原子力発電所事故調査委員会:報告書, 2012
- 13) 東京電力:福島第一原子力発電所・事故の収束に向けた道筋, 2011, Retrieved June 8, 2017, available from <http://www.tepco.co.jp/cc/press/11041702-j.html>
- 14) 東京電力:福島第一原子力発電所・事故の収束に向けた道筋(一覧), 2011, Retrieved June 8, 2017, available from <http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/fl-roadmap/index-j.html>, 2011
- 15) 原子力災害対策本部政府・東京電力統合対策室:福島第一原子力発電所・事故の収束に向けた道筋ステップ2完了報告書(その1)(改定2), 2011
- 16) 東京電力:福島第一原子力発電所第1号機, 第2号機及び第3号機の原子炉への注水の維持に係る報告書, 2011
- 17) 原子力安全・保安院:東京電力(株)福島第一原子力発電所の原子炉施設の安全確保状況について(ステップ1終了段階における評価), 平成23年8月9日, 2011
- 18) 東京電力:平成23年3月11日~12月31日の実績, 2012, Retrieved June 8, 2017, available from [http://www.tepco.co.jp/nu-news/images/past\\_111231-j.pdf](http://www.tepco.co.jp/nu-news/images/past_111231-j.pdf)
- 19) 政府・東京電力統合対策室:平成23年3月分議事概要, Retrieved June 11, 2017, available from <http://warp.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/3537352/www.nsr.go.jp/archive/nisa/gensai/files/zentai/zentai03.pdf>
- 20) 内閣府:事故対応全般について, 政府事故調査委員会ヒアリング記録海江田万里聴取結果書 2012年2月13日, Retrieved February 1, 2019, available from [https://www8.cao.go.jp/genshiryoku\\_bousai/fu\\_koukai/pdf\\_2/542.pdf](https://www8.cao.go.jp/genshiryoku_bousai/fu_koukai/pdf_2/542.pdf)
- 21) 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:中間報告, pp. 68-70, pp. 327-344, 2011
- 22) 東京電力ホールディングス:プラント関連パラメータ(水位, 圧力, 温度など)アーカイ

- ブ ( 2011 年 ) , Retrieved January 20, 2019, available from <http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/f1/pla/2011/index-j.html>
- 23) 日本学術会議人間と工学研究連絡委員会安全工学専門委員会:交通事故調査の在り方に関する提言, 2005
- 24) E. Hollnagel, D. D. Woods: Epilogue, Resilience Engineering Precepts, In E. Hollnagel, D. D. Woods and N. Leveson: Resilience Engineering: Concepts and Precepts, ASHGATE, pp. 347-358, 2006
- 25) 吉澤厚文, 大場恭子, 北村正晴:福島第一原子力発電所事故対応の分析に基づいた Safety-II の概念活用による安全性向上のための研究, 人間工学, Vol. 54, No. 1, pp. 1-13, 2018



## 5. 考察

本章では、第4章における1F3号機の事例を用いた実証結果を踏まえ、「残余のリスク」が顕在化した「不測の事態」からの学習システムの考察を行う。

図5-1に本論文で提案した学習システムの実証結果の概要を示す。第4章では、1F3号機の事例を用いて、既存の事故調査とは異なるSafety-IIの視点を用いた「回復等に寄与した行為群」からの教訓導出をするために、データソースを収集し、それらから得られた事故対応全体を構成している行為群全体から「回復等に寄与した行為群」を抽出し、開発整備した評価手法を用いて、教訓の導出（形式知化）の実証を行った。本章ではこれらの結果を踏まえ、研究目的に照らして考察を行うとともに、1F3号機以外の事例についてもこれを適用し、その汎用性を確認することで、本学習システムの有効性について実証・確認する。

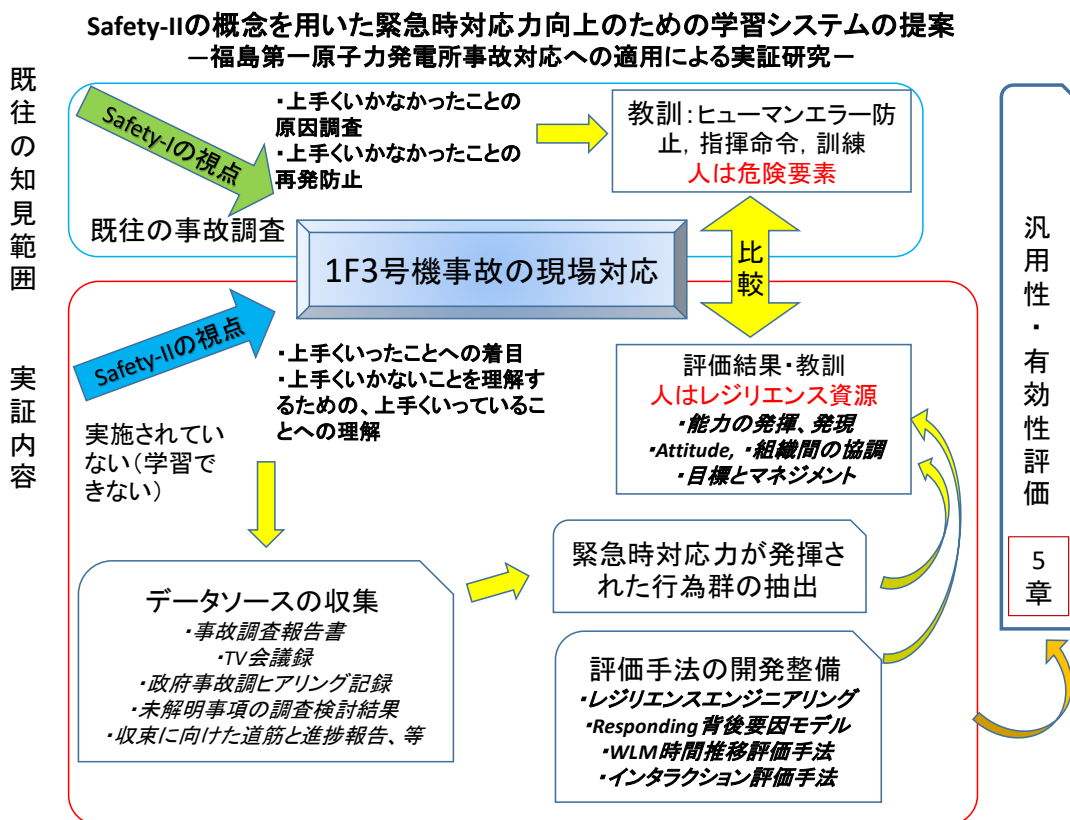


図5-1 本研究が開発してきた学習システムの実証結果の概要

## 5.1. 提案した学習システムの実証結果の評価

本研究で提案した学習システムの全体概要を図 5-2 に示す。

本節では、2.3 節に示した本研究の目的に照らし、2.2 節に示した具体的な課題について、第 4 章の検討結果を踏まえた考察を行う。

2.2 節に示した既往の学習システムの課題は、次の 5 点である。

- ① データの収集と着目する行為群の全体像把握
- ② 因果律の仮説
- ③ 人の位置づけ
- ④ 現場の環境に合わせた評価
- ⑤ 学習のあり方

### インプットデータ

「回復等に寄与した行為群」の抽出  
「回復等に寄与した行為群」のデータソースの収集

### テンプレートの開発整備

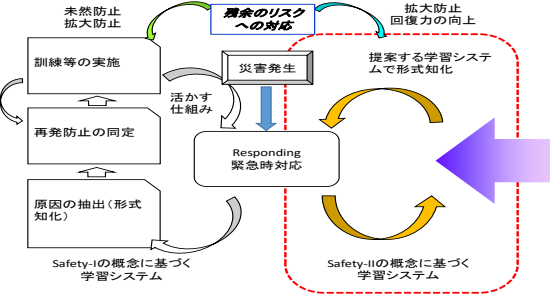
「上手くいったこと」に着目しこれを増やすアプローチであるSafety-IIの概念を用いて、教訓を導出する

m-SHELモデルを用いた評価用テンプレート  
Responding背後要因モデルを用いた評価用テンプレート  
レジリエンスエンジニアリング4能力を用いた評価用テンプレート  
ワークロードマネジメント評価のためのテンプレート

実際の現場に即するように、時間やリソースを意識するとともに、使いやすく・実用的であることを重視しながら、4つのテンプレートを作成した

### 実証：データベースの作成・評価および既存の教訓との比較

抽出した「回復等に寄与した行為群」のデータソースをそれぞれのテンプレートに落とし込むことで、実際の「不測の事態」における「回復等に寄与した行為群」に基づいて、緊急時対応力を高めるための学習を可能とする「教訓の知識基盤データベース」を作成した。また、それらを評価し、教訓を導出するとともに、既存の事故調査による教訓と比較した。



### Safety-IIの概念を用いた緊急時対応力向上のための学習システムの提案

本研究で提案するシステムについて、  
①既往の学習システムにおける課題解決  
②汎用性  
③実装可能性  
④有効性について  
評価し、課題を整理した。

図 5-2 本研究で提案した学習システムの概要

## 5.1.1. データソースの収集と着目する行為群の全体把握

### 5.1.1.1. データソースの収集

第2章で述べたとおり，緊急時対応力を高めるための教訓の導出・形式知化を可能とする学習システムでは，その事象がどのような経緯をたどり発生しているのか，また回復しているのかを分析してゆく必要がある。しかし，大規模・複雑化した社会技術システムの事象の進展は単純ではなく，多くの行為群や判断のポイントが存在しており，「未然防止」，「拡大防止」に関する「上手くいかなかったこと」に着目している既往の事故調査で着目している行為群と，「回復等に寄与した行為群」に着目した本研究では，必然的に着目している行為群が異なる。そのために，本研究で分析を行った行為群等に関するデータソースは，同じ事故を扱っているにも関わらず，既存の事故調査報告書等のデータソースでは網羅できていないものが多く存在した。今後，本研究で提案した学習システムを有効に活かしてゆくためには，上手くいった行為群に関わるデータソースの充実が欠かせないが，これは既往の事故調査に合わせて系統的に収集してゆく必要がある。

以下に既往の事故調査と本研究で必要とするデータソースの違いをまとめるとともに，入手したデータソースから，緊急時対応力を向上させることを目的とした分析を行うために必要となるデータ構築を行う観点，および必要となるデータソースそのものが包含している課題についての考察をまとめる。

#### (1) データ構築に関する考察

3.4節に示した通り，1F事故に関してはかなり多くのデータソースが利用可能であるが，既往の事故調査の中では上手くいかなかった行為群の背景として必要なものが詳細に収集されている。一方，本研究で着目している「回復等に寄与した行為群」に関するデータは十分とは言えず，現場の状況を理解するには難しい。4.1節

の分析で示した通り、現場の判断の多くは、選択肢すべてがリスクを伴う中で行われていた。そのため、緊急時対応の現場が、それぞれのリスクをどのように評価していたのかを理解した上で、その判断を評価することが望ましいが、そのためには、レジリエンスエンジニアリング 4 能力の評価を行うためのデータソースに加え、「時間」や「リソース」といったガイドワードを用いることで背景を理解した評価が有効であることを示した。よって、これらのガイドワードに関わるデータソースの収集も必要となる。4.1 節では、TV 会議録や調書のデータソースを用いて、現場で重要な判断が実施された背景要素を読み取ることを試み、これらを総合的に評価することでその時点での判断が行われた背景について考察した。しかしながら、4.4 節にて評価した事象の回復過程におけるデータソースは、ほとんどが既往の事故調査により収集されたデータとは別に存在していた。このことは、対象とした期間（2011. 3. 11 より 12. 16 まで）は、既存の事故調査報告が出される以前の期間であるが、「回復等に寄与した行為群」に着目した研究で必要となるデータは、既往の事故調査と着目する行為群が異なるため、収集されていなかったことを意味している。このような事故調査報告書におけるデータソースの偏りは、「回復等に寄与した行為群」に注目し、緊急時対応力を高めるための分析を行う上で支障となる。

以上に述べた具体的なデータソースの違いを図 5-3 に示す。「回復等に寄与した行為群」のデータソースの収集は、本研究で提案した学習システムにおいて極めて重要な要素であるが、本研究でそれらを収集できた背景には、対象とした事象に詳しい者の関与がある。今後は、事故評価の中で「回復等に寄与した行為群」のデータ収集の充実が必要である。

また、ヒューマンファクターの分析には、行為群を形成するその時の人の感情や生理的状況、環境要素についての評価も重要である。4.2 節に示したワークロードの評価では、作業に関わるワークロードのデータソースを TV 会議録により入手し

たが、ストレス管理に関わるデータソースは十分に入手することが困難であった。通常の事故調査では、TV 会議録のような映像を文字起こししたデータソースの存在は期待できない。人間の判断や行動が重要である以上、その時の生理的、心理的状況や、これらに影響を及ぼしている環境的な要素についてのデータ収集は不可避であり、今後これらの領域に関しても、どのようなデータを収集しておくべきなのかについて、学術的な議論が必要である。

以上の状況から、今後、緊急時対応力の向上も目指した事故評価を行うには、現状のデータ収集に加え、下記を留意する必要がある。

a) 緊急時対応における行為群を網羅するデータソース：緊急時対応における様々な行為群に関し、未然防止、拡大防止ができなかった行為群のみならず、「回復等に寄与した行為群」等、事故対応全体を構成している行為群について情報収集を実施すること。また、データ収集期間についても回復に関わる期間全体を網羅していること。

b) 人の生理的、心理的様相や、環境状況：現場における状況を理解した上で評価が行えるようにするために、情報収集、関係者の意見聴取を、行為群全体が網羅できる期間について実施すること。

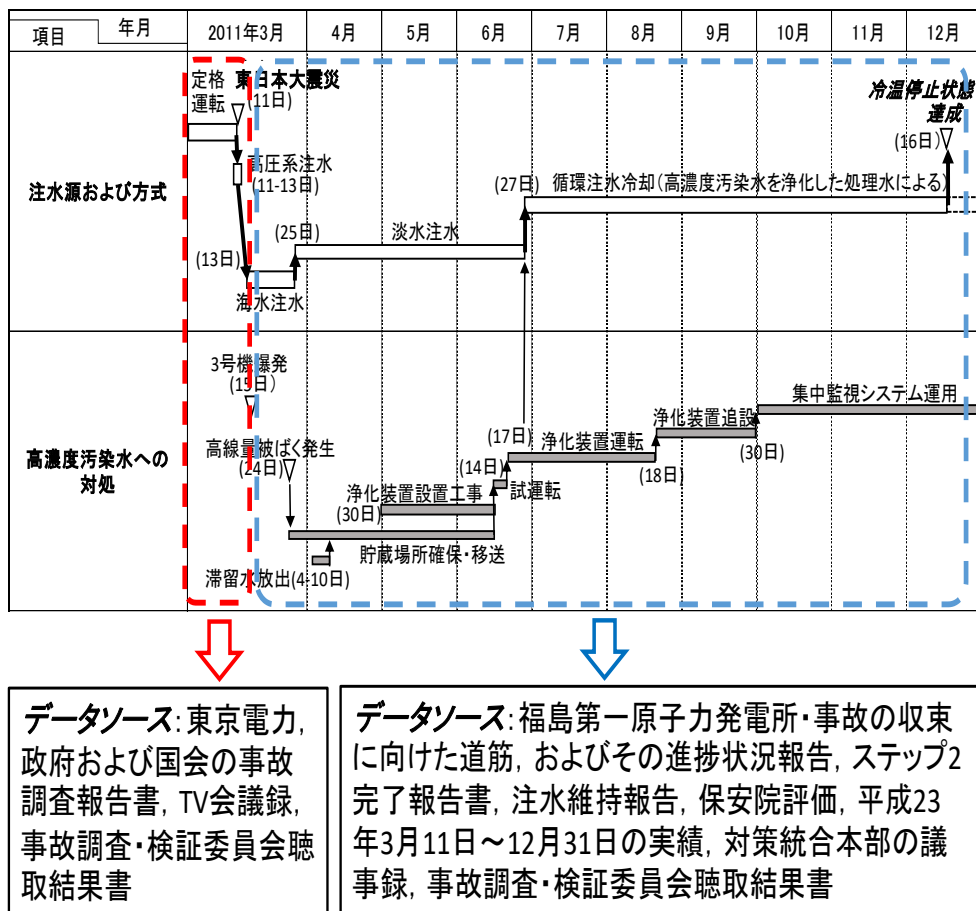


図 5-3 福島第一原子力発電所 3 号機の事故調査と回復過程とデータソースの違い

(2) 事故調査との関連におけるデータソースに対する議論と収集における課題

実際に行われた緊急時対応からの教訓導出においては、データソースの充実が欠かせない。本研究が対象とした 1F 事故の事例は、緊急時対応からの教訓導出としてみた場合、既往の事故調査におけるデータソースに偏りがあったものの、それ以外にも公開されているデータソースが点在しており、たとえば 3.4 節に示したような過去の原子力事故に比べ、データの充実度が高い事例である。

しかし、本研究はデータソースが公開されることによって実現したが、このよう

なデータソースの公開がなされていることがかえって今後には事故対応を行った当事者が発言を躊躇する状況を招き、本来、事故調査が目的とする原因究明の支障になる可能性があることが指摘されている<sup>1)</sup>。さらに、1F 事故では、政府事故調査委員会が、公開しないことを前提に行い、かつ本人も公開を望まないことを明言していたインタビュー結果<sup>2)</sup>である吉田調書が、内容を一部の報道関係者が誤った形で報道したことをきっかけに、国会でも議論がなされた上で、最終的に政府として判断が行われ、公表された<sup>3)</sup>。

このような前提や本人の意思が尊重されない公表は、日本学術会議が指摘している通り、インタビューの受け手が、自分あるいは所属する組織が不利になる発言は控えることに繋がること想定される。このようにデータそのものの入手ができなければ、分析するためのデータ構築も難しくなる。

「回復等に寄与した行為群」からの学習システムを実装してゆくためには、たとえば機微な情報へのアクセスを限られたメンバー(1F 事故では、事故調査委員会メンバー)に限り、しかしながらその分析結果は広く社会に公開するといったような、インタビューの受け手が安心して発言できる環境を確保すると同時に、それを社会が納得する方策が必要となる。そのためには、事故調査の中にこの学習システムを組み込み、事故調査の中で Safety-I, Safety-II 両面からの評価が可能なようにその範囲を拡張してゆくことも、一つの選択肢であると考ええる。

#### 5.1.1.2. 行為群の全体把握

1F3 号機の緊急時対応を詳細に分析することで、4.1 節、4.3 節に示した通り、「回復等に寄与した行為群」とそうでないものを識別することができた<sup>4),5)</sup>。(図 5-4, 図 5-5 参照)

また、4.4 節で評価したとおり、冷温停止状態達成まで着目すると、その回過程が



どのような工程により構成されていたのかが示された<sup>6)</sup>。(図 5-6 参照)

4.1 節の検討にて得られた図 5-4 では、システムの細かな構成機器に着目し、これらがどのような挙動を示していたのか、また、それに人がどのように関与していたのかを明確にした。これにより、現場で行われていた様々な行為を同一時間軸上に示すことができたこと、事故調査並びに本研究が着目する行為群の明確な違いを機器毎や時間毎に分類することができた。

4.3 節の検討により得られた図 5-5 では、システムの機能として分類した場合に、どのような行為群が形成されているのかを明確にした。その結果、1F3 号機の原子炉を冷やす機能の復旧において行われた作業がどのような行為群により形成されていたのかを機能別にまとめることができた。また、「上手くいかなかったこと」に着目して行われた既往の事故調査と、「回復等に寄与した行為群」に着目する本研究が評価対象としている行為群の明確な違いを確認できた。

さらに、4.4 節の検討により得られた図 5-6 では、原子炉の冷却システムの本格的な回復を行うまでの時間スパンに着目し、これらがどのような過程により構成されていたのかを明確にした。その結果、この回復過程は 3 つの Phase により構成されており、それぞれに特徴的な課題が存在していることが分かった。また、既往の事故調査と本研究が対象としている時間的なカバー範囲も大きく異なっており、これにより既往の事故調査のデータソースが総合的に収集されたものではない実態も明確になった。

これらの検討により、本対象事象がどのような行為群により構成されているのかを明確にするとともに、「原因の究明」を目的に Safety-I の概念に基づいて実施した既往の事故調査の評価対象行為群・時間帯と、Safety-II の概念に基づいて実施した本研究の着目すべき行為群・時間帯との違いが明確になった。すなわち、Safety-I が着目する「上手くいかなかった」行為群の評価は、事故が起こる以前にもさかのぼり、

その行為群の結果につながった原因を因果律に基づき分析しているのに対し、Safety-II が着目する「上手くいった」行為群の評価は、事故の拡大防止、回復といったプロセスに着目するため、事故後長期に亘りその行為群をトレースする必要があるという特徴の違いがある。

また、時間の推移と状況の変化を含めた検討を行うことで、レジリエンスエンジニアリングのように時間概念を直接含まない評価手法においても、評価する時間範囲を明確に区切ることができ、時間に伴った変化を分析することが可能となった。

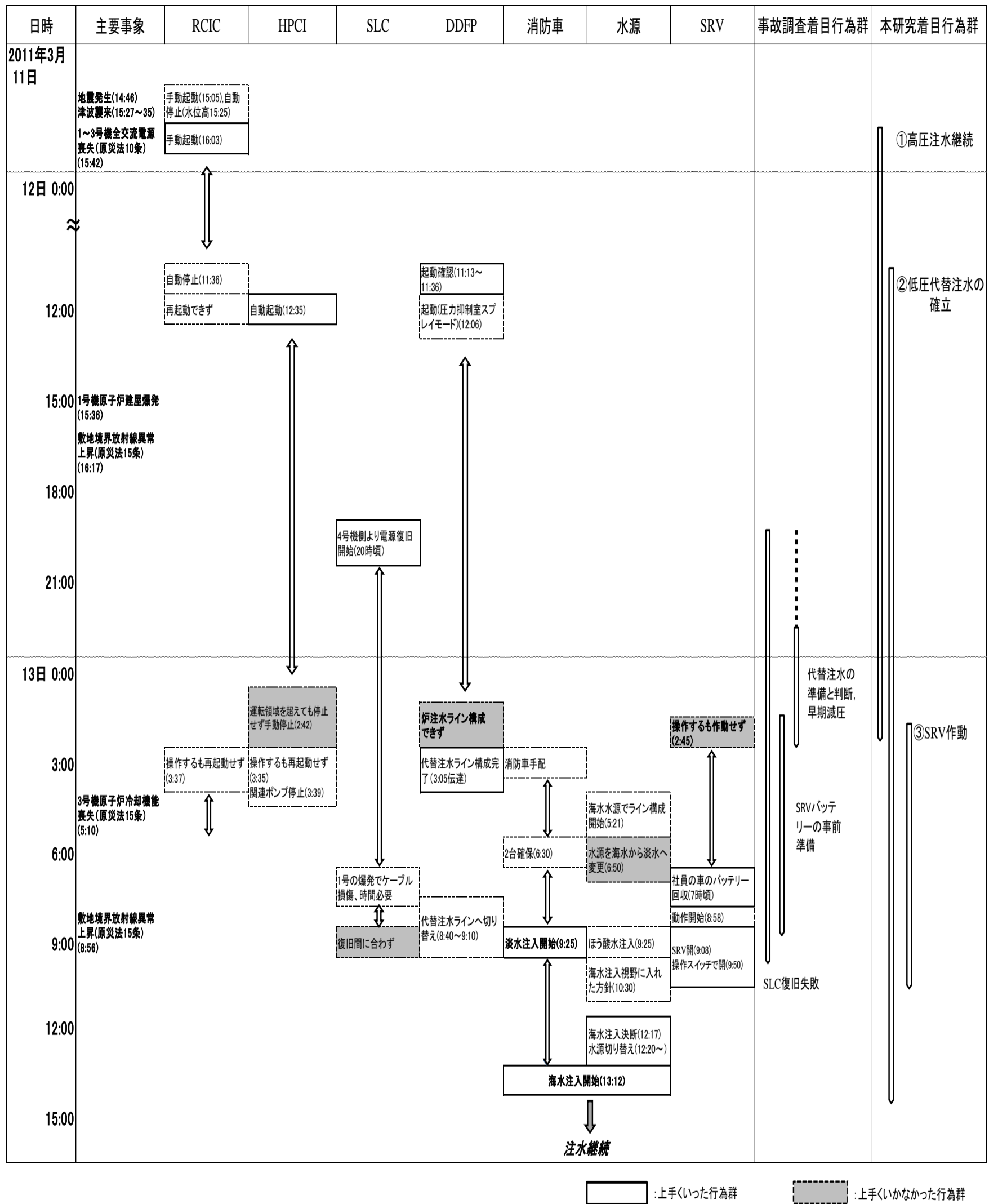


図 5-4 3号機原子炉への注水に関わる機器の状態推移の時系列並びに  
事故調査報告書と本研究が着目した行為の違い

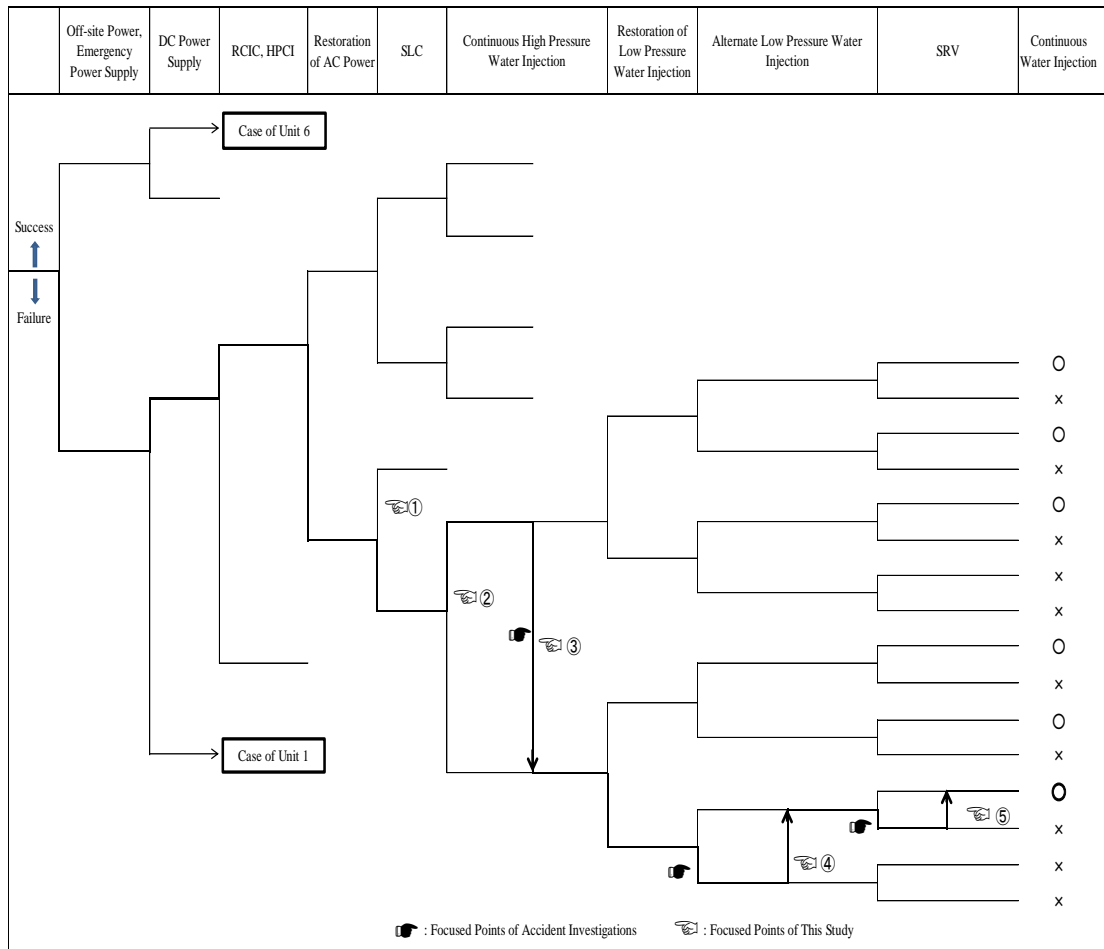


図 5-5 3号機原子炉への注水の回復に関わるイベントツリー  
事故調査の着目行為と本研究の着目行為の違い

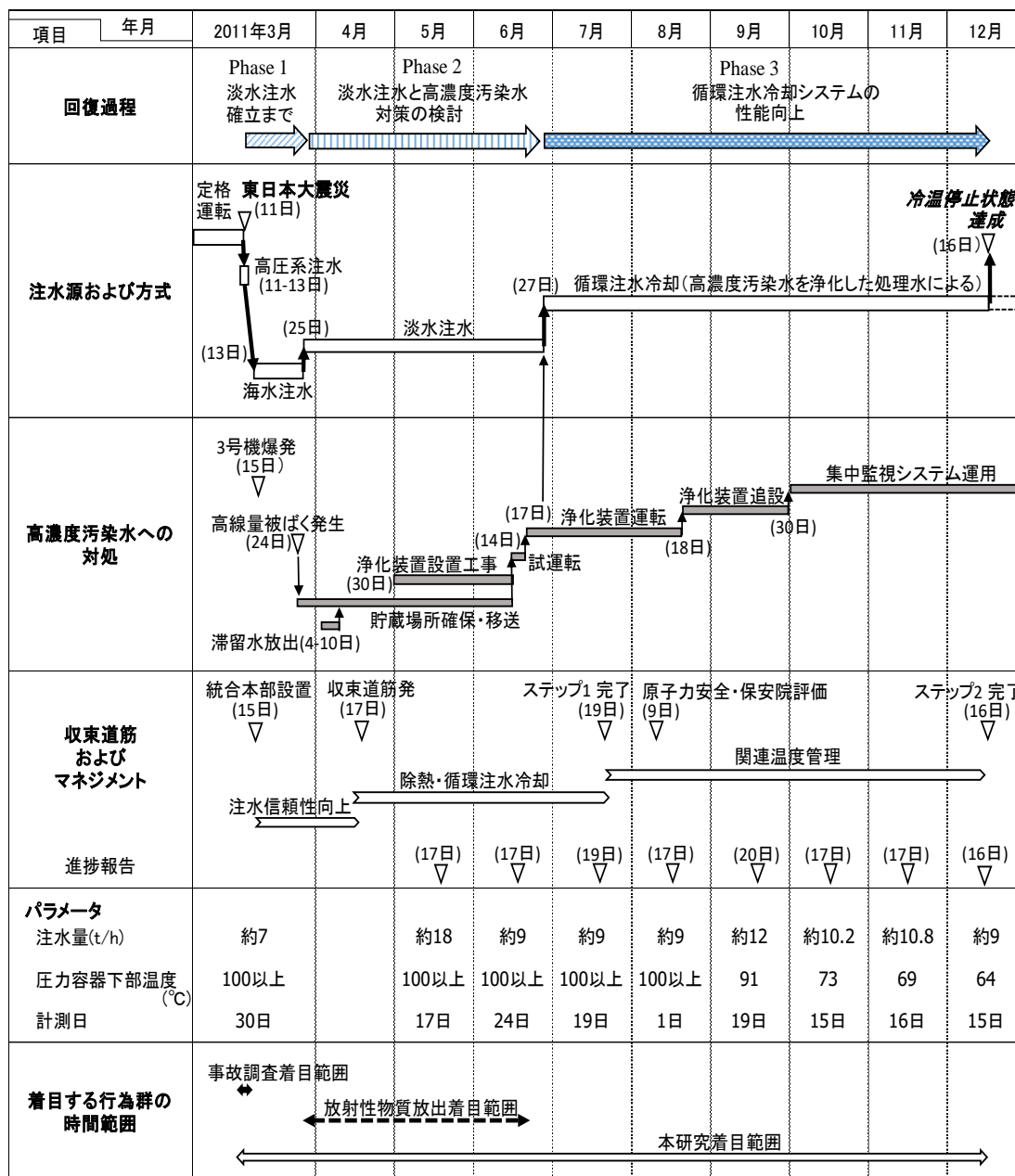


図 5-6 3号機事故発生から冷温停止状態達成までの時系列整理と、  
事故調査と本研究の着目範囲の違い

### 5.1.2. 因果律の仮説

2.2.1項や3.1.2.1で述べた通り、PRAやFMEA、FTAといった評価手法を用いて、事故に至る「上手くいかなかった」ことに着目して行われる既往の事故調査は、Safety-Iの概念に基づいている。事故という結果は、因果律によって生じた帰結(resultant)

である、すなわち、事故にはそれが起きた原因が存在するとする因果律の信条は、人々に受け入れられやすく、そのあとの再発防止を行う上でも実装がしやすい。しかし、4.1 節の評価でも示した通り、緊急時において様々な方策を考案し、実行していく中には、多くのアイデア出しや判断が必要となるが、判断の対象となるいずれの選択肢にもリスクを伴っており、判断が厳しいものであることが示されている。具体例として4.1.2 項にいくつかの事例を示しているが、原子炉の注水機能を暫定的に回復した消防車による津波により溜まった海水の注入という選択肢は、利用可能なリソースをその目的外使用まで含めて「冷やす」機能の回復を達成しようとする中で考案され「創発」したアイデアであるが、同時に原子炉内に不純物や腐食環境を持ち込む重大なリスクを伴うアイデアであった。判断は、「冷やす」機能の回復を優先したことによる。

4.4 節で評価した冷温停止状態達成までの回復過程におけるプロセスにおいても重要な課題に対する判断が行われている。原子炉への注水の結果発生した高濃度汚染水の対策である。この課題については、東京電力と政府が一体となった統合本部により、集中放射性物質処理建屋の機能を犠牲にし、この建屋に高濃度汚染水を貯蔵することで時間を稼ぎ、この間にこの汚染水を処理する設備を設置するといった判断がなされた。この判断も、限られた時間の中で何を優先すべきことを関係者が共有し、その中で創発したアイデアであると同時に、集中放射性物質処理建屋の機能を犠牲にして実現した冷温停止の実施において極めて重要な意思決定である。

本研究で開発整備した Safety-II の概念に基づく評価手法は、因果律では説明できない現場におけるアイデアや判断からも、教訓の導出を可能とした。さらに、緊急時対応力の発揮には様々なモードが存在する可能性が高く、これらをモードによらず教訓の導出が可能な学習システムが必要であることを確認したが、本研究で開発整備した学習システムは、因果律で説明が困難なモードにおける対処についても、評価が可能であることが示された。

また、Safety-I の概念に基づいて行われる既往の事故調査は、因果律の仮説と同様に、成功と失敗の原因は別であると考えられる異種原因仮説が前提となっている。しかし、4.1.3 項に示した、既往の事故調査において、3 号機の緊急時対応の中で最も間違っただ判断とされていた運転員による高圧注水系(HPCI)の停止は、既往の事故調査では「失敗」と評価されたが、その後の解析により、HPCI による原子炉への注水は運転員の停止判断の前には既に実質的に注入できていなかったことが判明した。そのため、運転員の停止判断は、むしろ機器の破損を防いだものと評価できる。このような事例から、異種原因仮説は、結果による後知恵バイアスの影響も強く受けていることが判る。

運転員はその時点で入手できた情報と限られた時間の中で最善の判断を行うものであり、その判断と結果の是非は必ずしも一致しない。事故の調査において、上手くいかなかった結果(失敗)に基づき、その結果には失敗特有の原因があると考えられることは、誤った教訓を導出する可能性が孕んでいることにも、留意する必要がある。

### 5.1.3. 「人」の位置づけ

前項で示した通り、Safety-I の概念に基づいて行われる既往の事故調査が用いている因果律や異種原因仮説は、緊急時対応における「回復等に寄与した行為群」の評価には必ずしも適していない。そのため、結果は因果律では説明できず創発(emergent)したものである、あるいは、成功と失敗の原因は区別できないと考える Safety-II の概念に基づく評価手法は有効である。

Safety-II では、失敗を、日常的パフォーマンスの予期しない組み合わせによって発生すると捉える。そのため、失敗を理解するには、日常で上手くいっている行動を理解し、なぜ今回それが上手くいかなかったかを検討することが必要と述べられている<sup>7)</sup>。この考え方を事故対応の分析に当てはめるならば、失敗(上手く行かなかった行為群)の理解は、上手くいっている行為群の理解に基づく必要がある。

この Safety-II の概念に基づき、「回復等に寄与した行為群」を理解する上で、従来の Safety-I のアプローチともっとも顕著な違いが表れるひとつが「人」の位置づけである。第 4 章の結果から導出される教訓では、「不測の事態」に遭遇した中で緊急時対応力を発揮し、事故の拡大防止や回復力の源泉として共通していたのは「人」である。さらに、4.3 節の評価では、1F の大変厳しい作業環境の中で、作業を実施した人たちの中には強い Attitude が発揮されていたことが示された。このような「人」は、人を「システムの安全を脅かす要素」として位置づけ、ヒューマンエラーに着目する Safety-I に基づく手法では評価できない。「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」と考え、人の持つポジティブな面に着目する Safety-II に基づく評価手法が必要である。

さらに、人のポジティブな面、緊急時対応であれば、人がより高い緊急時対応力を発揮するための背景についても着目し、教訓導出することが求められる。4.1 節で評価したとおり、「リソース」や「時間」が有効に活用できたかどうかは、結果に影響を及ぼしていた。3 号機の事例では消防車の配備や免震重要棟の設置といった事前の環境整備が、人の緊急時対応力を発揮させることに繋がった。しかし、「残余のリスク」が顕在化した緊急時対応は、予め想定していた通りではなく、現場の環境等に応じながら臨機の対応を考案し、計画し、実施しなければならない。本研究で導出した教訓は、臨機の対応を求められた場合に必要とされる人の能力に関わる要素に加え、このような対応を人に委ねることから必要となる様々な要素に関わる教訓も導出できている。具体的には、ヒューマンファクターの観点から、Attitude、ストレス管理、ワークロード、マネジメントといった事故調査とは異なる新たな切り口による緊急時対応力を高める必要性を指摘できたことは、評価手法の開発整備を含めた本研究の成果である。



#### 5.1.4. 現場の環境に合わせた評価

5.1.2 項にも述べた通り、既往の事故調査のように Safety-I の概念に基づいた学習システムでは、「上手くいかなかった行為群」に着目した教訓導出がなされるが、因果律や後知恵バイアスに基づく評価がなされる可能性が否定できない。また、5.1.1 項で述べた通り、「回復等に寄与した行為群」を評価するためには、既往の事故調査のデータソースでは網羅できない部分があることもわかった。

しかしながら、「残余のリスク」が顕在化することを前提とした緊急時対応力向上を目指すならば、実際に現場で緊急時の対応を行う組織が、臨機の対応を含めた実装できる教訓の導出が必要である。そのためには現場の対処が影響を受けていた「時間」や「リソース」、あるいは作業負荷や心理的・生理的な状況等の理解は不可欠であろう。本研究ではこの点を重視し、実際に現場で「不測の事態」に遭遇した際に役立つ教訓の導出を可能とするアプローチを導入している。

特に重要な点は、現場は時間とともに状況が様々に変化する点である。レジリエンスエンジニアリングの考え方自体には、時間変化を取り込む機能を有していない。そのため、3.2 節に示した通り、本研究では、緊急時対応の初期、すなわち、事故の拡大防止が重要なミッションであり、リソースが限られ、現場が中心となって対応をする必要がある時間帯と、リソースの補充が可能で、さまざまな組織とインタラクションを行いながら作業が実施できる回復過程とを区分し、異なる評価手法を用いて教訓の導出を行う仕組みを導入している。特に、事象発生直後では、現場組織には様々な負荷が集中することになり、これに優先順位をつけながら対処してゆく必要がある。このような時間とともに変化する状況変化を評価する手法として、4.2 節に示した CRM を援用したワークロードマネジメントの考え方を導入し、作業タスクを組織ごと、時間毎に分類し、それぞれの組織がどのようなワークロードを負っていたのかを明確にした。その結果からの教訓として、現場では様々なタスクを並

行して実施しており、このワークロードを効果的にマネジメントするための各組織の機能を定義にすることができた。また、1F 事故の中で、複数号機同時発災という厳しい環境条件が、現場の負荷にどのような影響を与えていたのかについて、既往の事故調査では明示できていなかったその状況を初めて可視化し、その推移を示すことに成功するとともに、負荷の制御方策について外部組織との関係性も含めて教訓の導出が可能となった。また、4.3 節では、新たに開発した Responding の背後要因モデルを用いて、極めて厳しい環境下で緊急時対応を実施する人たちの持つ Attitude について評価し、1F 事故の事例としてリーダーシップ・フォロワーシップ、地元／地域への愛着、マイプラント意識・誇り等 6 つの要素を抽出できた。

また、中長期的な回復の過程においては、4.4 節に評価を行った通り、この過程を重要なマイルストーンを明示することで 3 つのフェーズに区分し、それぞれの期間における行為群について評価することで、時間推移を考慮した回復過程の教訓を導出している。この回復過程においては、人とシステムが複雑にインタラクションを行って、人間工学的視点からこのインタラクションを m-SHEL モデルを援用して 5 つのカテゴリーに分けることで、より具体的な教訓の導出が可能となる評価手法を整備した。その結果、関係者の能力を最大限引き出す意思決定機関の設立や、常時とは異なる優先順位に基づく判断、リソースの確保とその柔軟な活用等、事故調査とは異なる特徴を持った教訓の導出が可能となった。特に、回復過程においては、対象となる社会技術システム自体が変貌するため、それに柔軟に対応できる組織体系やマニュアル体系を構築しながら進める必要があることが示された。

これらは、結果から時間を遡って評価するアプローチではなく、いずれも現場における時間推移に合わせた評価を行うことで、現場に適用可能な教訓の導出に繋がるものと考えられる。

## 5.1.5. 学習のあり方

### 5.1.5.1. 既往および本研究が提案する学習システムの本質的な違い

社会技術システムの中で、設備を中心とした機械的サブシステムは、設計基準事象をベースに組み上げられており、これを越えた事象をシステムがカバーすることは期待できない。したがって、既往の Safety-I の概念に基づく学習システムでは、システムを要素に分解しても、「不測の事態」に対応する要素を抽出することは困難であり、「なぜ不測の事態となってしまったのか」という課題に置き換えられ、学習されることになる。その結果、これが未知の領域で生じた事象なのか、技術的な想定は可能であったが設計に取り入れることが何らかの状況の元除外されていたのか、という評価軸で分析されることとなる<sup>8)</sup>。そのため、本研究で事例として取り上げてた 1F 事故についても、東電の「福島原子力事故の総括および原子力安全改革プラン」<sup>9)</sup>に示されるように、今回の「冷やす」機能の長期喪失に関しては、想定される事象として取り込める可能性があった機会を、様々な要因により活かすことができなかった、つまり、これは「不測の事態」ではなく、「ある程度想定して対処が可能な事象」であった、というのが学習システムの結論となっている。

しかし、第2章で述べたとおり、社会技術システムは複雑化しており、1F 事故が予測可能であったかどうかという議論とは別に、「残余のリスク」は存在するという前提で、「不測の事態」は起こりえる、という観点から安全を確保する方策を重ねてゆく必要がある。図 5-7 に、1F の事象を原子力の安全対策の基本である深層防護と現場で実際に行われた行為との関係について示した。深層防護として予め用意されていたものが作動せず、事故対応の中ではこの深層防護により期待されていた範囲を超えて、さまざまな行為が行われていたことが分かる。このような事象からどのように学習すべきなのかについて、図 5-8 に、Safety-I の概念に基づく学習システムと Safety-II の概念に基づく学習システムの特徴について原子力の深層防護を例に説明している<sup>10)</sup>。従来は、このような事故を受けて、設計として取り込めていなかったことも含め「上手くいかなかったこと」を想定の外に取り込み、

これを拡張・充実することがその学習のあり方であった(Safety-I の概念に基づく学習システム)。しかし、「残余のリスク」であるこの枠外の領域をなくすことはできないと考え、この領域が存在することを前提に、安全を高めてゆくのが Safety-II の発想である。前述した想定内に「上手くいかなかったこと」を取り込もうとする Safety-I の概念に基づく学習システムは、深層防護の設計範囲を拡張する形で学習がなされるが、本研究が提案するいわゆる Safety-II の概念に基づく学習システムは、「不測の事態」に対応するための「回復等に寄与した行為群」を学習し、この「不測の事態」そのものに備えようとするアプローチである。いずれも「残余のリスク」を低減するための取り組みであるが、学習システムとして着目する領域と、その取り込み方の違いが分かる。

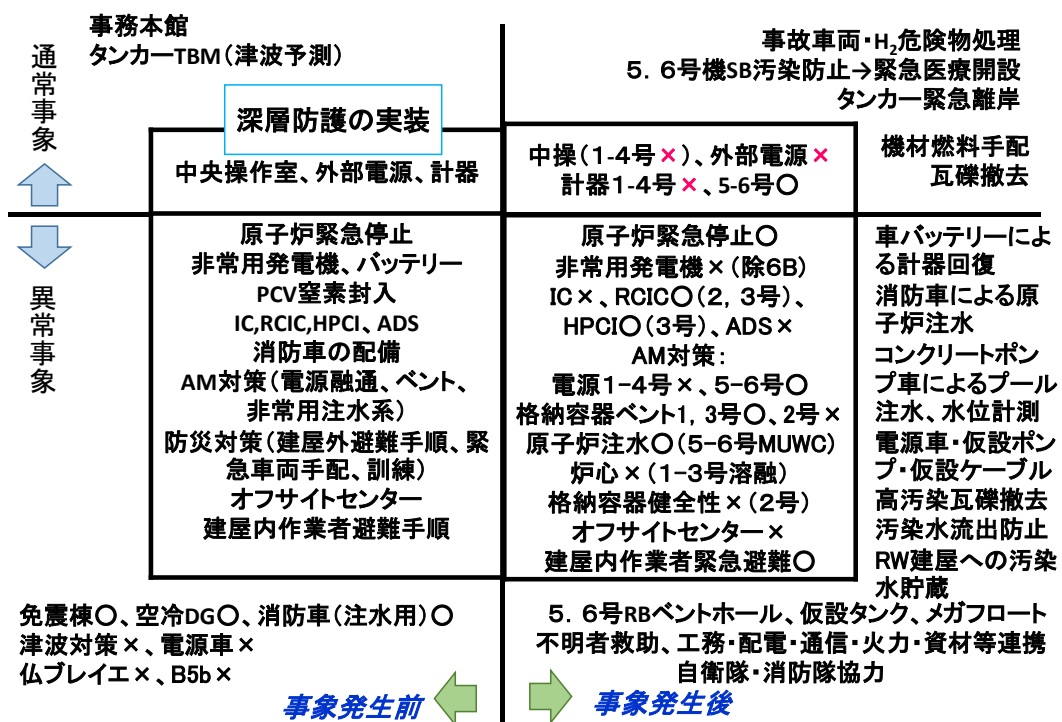


図 5-7 深層防護(当時)と1F 事故で行われた行為の関係性

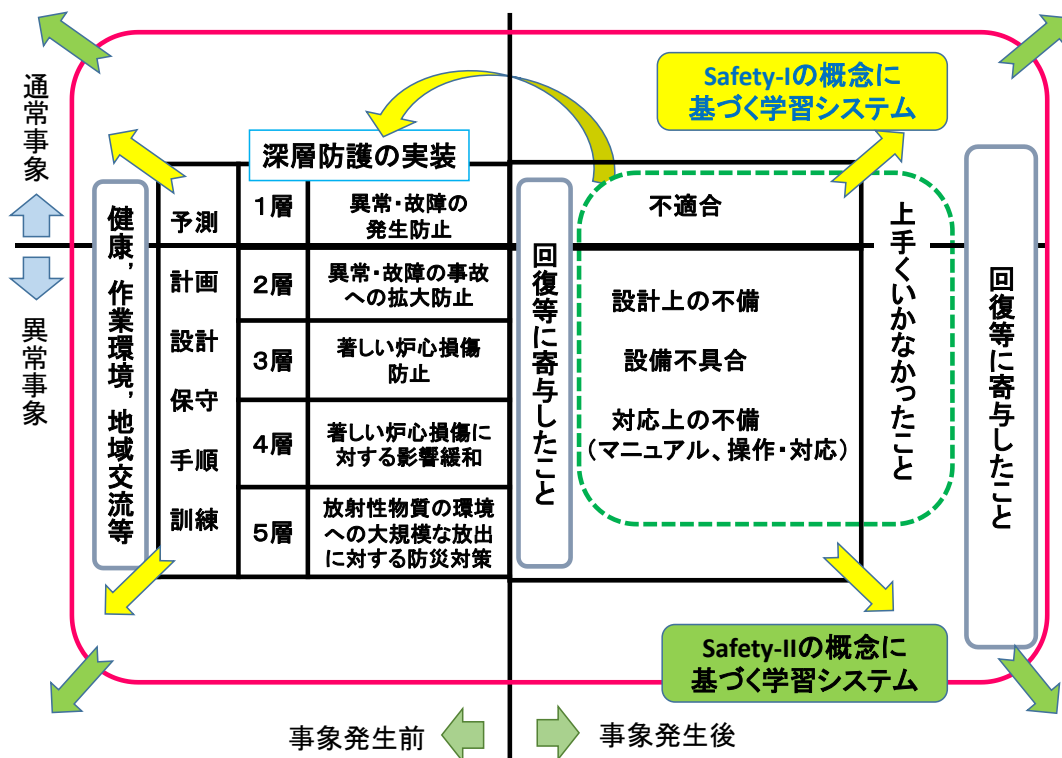


図 5-8 Safety-I, Safety-II の概念に基づく学習システムの特徴

### 5.1.5.2. Safety-II の概念に基づく学習システムの特徴

前述したとおり、Safety-I と Safety-II の概念に基づく学習システムは、その学習する対象領域が異なっており、得られる教訓も異なるものになると考えられる。

具体例として、4.1.3 項に示した 1999 年 12 月に起きた仏国ブレイエ発電所の洪水による電源喪失事故の例がある。東京電力は、事故の直接原因である防止壁の強度設計に対して設計の妥当性を確認し、「監視」したが、これらの「学習」は、Safety-I の概念に基づくものであった。一方、この事故を Safety-II の概念にも基づけば、災害が発生してしまった後の事故の「拡大防止」や「回復力の向上」といった行為群からも学習が必要となる。これは、洪水で孤立する発電所での緊急時対応、侵入した水の排水や冷却設備の復旧といった設計を超えた事象への「対処」からの「学習」である。

このように Safety-II の概念を適用すると、JCO 臨界事故における臨界状態から回復に関わる対処、チェルノブイリ発電所事故の石棺構築までの対処等も学習が必要な項目となることが理解できよう。このような学習が行われていたならば、1F 事故の緊急時対応力は当時と異なっていた可能性がある。

なお、本研究で提案した学習システムは、「残余のリスク」への備えとして「不測の事態」が発生した際の緊急時対応力を高める目的で構築したものであるが、Safety-II の概念は、さらに広く通常時において問題が顕在化しない状況 (a dynamic non-event) を創り出している「上手くいっていること」もその学習の対象としている。今後さらにその学習範囲を拡大してゆくことも必要なアプローチである。

#### 5.1.6. 提案した学習システムの有効性評価

提案した学習システムが実事例からどの程度教訓を導出できるかについては、そのデータソースの充実度に大きく依存する。1F3 号機の事例では、5.1.1.1 に示した通りいくつかの課題はあるものの、TV 会議録や各調書のように、時間に沿ったデータソースや判断等における詳細なバックグラウンドが評価できる膨大な公開ベースのデータソースが存在しており、これは他の事例とは大きく異なる。このような膨大な公開ベースのデータソースの存在が、本研究で開発・整備した評価手法に基づき、多くの教訓の導出に繋がったことは明らかである。

なお、この評価手法の有効性は、その評価手法により得られた結果が緊急時対応力を高める上で有効な教訓の導出に繋がったかどうかで評価することが妥当であると考え。表 5-1 に、本研究で新たに構築した学習システムにより形式知化された教訓のまとめと、既存の事故調査における教訓との違いについて示した。本研究で構築した学習システムにより形式知化された教訓とは、Safety-II の視点を用いて抽出した行為群に対し、本研究にて開発整備した評価手法を適用し、導出された教訓である。この表から、「上手くいかなかったこと」に着目した事故調査では、「不測の事態」に備える対策として、「不測の事態」となることを避

けることを中心とした上で、人や組織に対しては、災害時の体制、責任分担の整備とともに、訓練の充実を指摘している。これらはともに緊急時対応力を高めるために必要なアプローチであろう。しかし、「不測の事態」においては、1F 事故のように予め整備された意思決定システム(ここでは、オフサイトセンター)がその機能を果たせなかったり、訓練シナリオではカバーできない要素(ここでは、複合災害、複数ユニットの同時被災、対応の長期化、高濃度汚染水問題等の新たな課題、など)が存在したりすることはあり得るであろう。このような状況においてどのような対応が必要であったのかは重要な教訓となる。

本研究では、例えば既往の事故調査で「法的根拠のない意思決定の仕組み」として批判された「統合対策本部」が、高濃度汚染水対策に対する知恵出しや意思決定において、重要な役割を果たしており、冷温停止状態達成への貢献があったことについて指摘した。また、事故に立ち向かい、これを何とか食い止めようとする強い Attitude の必要性や、結果が分からない中でどの選択肢にもリスクが存在する厳しい判断を迫られる場合の対応の在り方など、実際の現場で遭遇するであろう状況において現実的な教訓を導出できている。

Attitude の重要性について指摘しているのも本研究から導出できた教訓の特徴である。現場で作業を続けるためには、強い Attitude が必要とされた。本研究ではこれらの背景についてさらに分析し、6つの要素を抽出しているが、これらは人材育成として活かしてゆくべき重要な要素となる。これらの要素の中には業務として単純に育成することが困難なものも含まれており、実際の作業を行う人たちの日常生活を含めた地域と職場の良好な関係がその基盤になることも新たな教訓である。このような教訓は事故調査の中からは導出できず、本学習システムが導出した重要な教訓となる。

また、現場の緊急時対応力を高めるために、最前線に立つ現場組織のワークロードといった要素の考慮や、ストレス管理の重要性など、人が「回復力や柔軟性に必要な資源」として行動するための要素について教訓の導出やデータソースに関わる課題の指摘ができた。これらは、現場組織のみならず、関連する様々な組織がその機能分担を持ちながら実行する

必要のある重要な要素であることを指摘した。また、3号機の原子炉への注水の暫定的な復旧までの同一の期間を評価した4.1節、4.2節では、異なる評価手法を用いることで現場の判断の背景に異なる要因があったことを明確にできた事例があった。具体的には、3号機の高圧注水系(HPCI)の継続使用の判断である。レジリエンスエンジニアリング4能力からは、この判断は他のシステムと比較し信頼性が高いHPCIを継続使用していたこと、またワークロードマネジメントによる評価からは、この判断は1号機の対応にワークロードを集中させるためのものであったこと、といった二つの背後要因が確認された。このように、評価手法にもそれぞれの特徴があり、これらを組み合わせることでより精度の高い評価ができる可能性があると言える。

このように、本研究により構築した学習システムは、前項で述べた通り事故を単に「設計やマニュアルに落とし込む」方式の学習システムとは異なるシステムになっており、「不測の事態」に備えるための教訓の導出を可能としていることが示された。



表 5-1 本研究で導出した教訓と事故調査で得られた教訓の比較

時期	評価手法	導出された教訓	3つの事故調査の評価
短期 事故進展 防止	レジリエンス エンジニアリ ングの4つの コア能力 (Learning, Responding, Monitoring, Anticipating)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・結果と原因には、因果律が明確なものとそうでないものが存在する</li> <li>・事象には上手くいった行為群とそうでないものが混在しており、いずれもリスクを伴う判断が行われていた</li> <li>・上手くいった行為群はいずれも人が「システムの柔軟性とレジリエンスの必要資源」として機能していた</li> <li>・4つのコア能力、並びに「時間」と「リソース」をガイドワードとすることで、行為群からの学習が効果的に実施できる</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・結果は因果律により原因が存在する</li> <li>・「予見」や「対処」の能力発揮が上手くいかなかったことが事故の原因</li> </ul>
短期 事故進展 防止	ワークロード マネジメント の3つの分類 (Prioritization, Distribution, Stress Management)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ワークロードマネジメントの観点から、現場組織と外部組織の受け持つ機能を明確化した</li> <li>・現場組織は、タスクの優先順位付、外部組織の活用、ワークロードの低い時間帯の有効活用が成功要因</li> <li>・特に外部組織は、適切な業務分担を行うとともに、現場組織のワークロードを監視する必要がある</li> <li>・ストレス管理は十分な配慮が行われていない分野であり、データ収集を含めた充実が必要</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・複数ユニットの同時発災、複合災害という表現は使用されているが、それがどのような影響を及ぼしていたのかの評価はされていない</li> <li>・評価は号機ごとに時系列を分割して実施されており、相互の干渉について分析できていない</li> </ul>
中・長期 事故進展 防止、回 復過程	レジリエンス エンジニアリ ング、 Responding背 後要因モデル	<ul style="list-style-type: none"> <li>・「想定を超えた設計基準外事象」への対応ではAttitudeが重要となる</li> <li>・1F事故の対応から、人材育成の要素となるAttitudeとして6つの要素を抽出、訓練だけでなく地域での生活等を通して育成される要素もある</li> <li>・人を「過誤しうる存在」として扱うだけでなく、創意工夫を引き出すための安全目標が必要</li> <li>・リスクを伴う判断が求められるが、選択に伴うリスクを予見した対処を発揮する必要がある</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・事故の教訓として、災害時の体制、訓練、責任分担を指摘</li> <li>・想定を超えた事象への対応としては、訓練や権限配分といった指摘のみ</li> </ul>
中・長期 回復過程	m-SHELモデルを援用した 5つのカテゴリ 評価 (Software, Hardware, Environment, Liveware, management)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・回復過程からの教訓導出は、事故調査とは異なる期間を長期に亘り評価が必要</li> <li>・回復過程では、人とシステムがインタラクションを行いつつ、システムは絶えず変化している</li> <li>・具体的な教訓として、①迅速な意思決定及びシステム変更を可能とする体制の構築、②目標の明示およびその監視による回復過程のマネジメント、③環境変化に応じた柔軟な他代替手段の実施、④リソース及び時間余裕の確保、を導出</li> <li>・なお、回復過程のデータは分散しており、体系的なデータ構築の必要性がある</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・事故調査では、回復過程のデータ収集、評価分析は行われていない</li> <li>・事故原因の究明として、人のヒューマンエラーに着目した分析を実施</li> </ul>

## 5.2. 提案した学習システムの汎用性評価

本研究において、1F3号機の事例をベースに第4章で実証した「回復等に寄与した行為群」からの学習システムについて、別の事例への適用を行い、その汎用性を評価する。

### 5.2.1. 具体的な事例について

東日本大震災時には、社会には様々な事例が存在していた。これらの事例の中から、Safety-IIの観点で学習システムの汎用性を評価する具体的な事例を抽出する。

事例は様々な存在するが、汎用性を評価するために、ここでは事故に至らずに「上手くいった」事例について提案した学習システムを適用する。下記に今回抽出した事例とその位置づけについて説明する。

なお、いずれのケースも1F3号機的事例に比較すると、データソースが限られていることから、ここではレジリエンスエンジニアリング4能力による評価手法を基本として評価を行うこととした。

#### ① 1F5号機の冷温停止達成について

原子力発電所の中には、福島第二原子力発電所、東海第二原子力発電所や女川原子力発電所のように、地震や津波の被害を受けても無事冷温停止を達成した例が報告されている。また、福島第一原子力発電所においても、5、6号機は冷温停止が達成できている。ここでは、事故が実際に発生しているサイト内において、3号機と同様に全交流電源喪失になりながらも、過酷事故に至ることなく冷温停止を達成した5号機に着目し、「回復等に寄与した行為群」の中から教訓を導出する。

#### ② 係留中船舶の人身災害ゼロについて

東日本大震災時に、津波に見舞われた船舶では、さまざまな被害が報告されているが、係留中船舶(1000t級)においては船員の被害が出ていない。これらの船舶は、さまざまな組織に属するものであるため、一組織の組織文化的な背景に左右されない、

社会技術システムとしての海運業に対する評価が期待できる。また、津波時には様々な緊急時対応力が発揮されており、どのように津波の危機に立ち向かったのかを分析評価し、船長他の判断や行動から教訓を導出する。

### ③ 東日本大震災時の東北新幹線脱線について

東日本大震災の地震を広域に受けた東北新幹線であったが、乗客に事故なく新幹線は停止できている。この中で、1 台の新幹線が脱線しているが、横転を免れ大事に至っていない。これは JR 東日本という単独組織の事例であるが、過去の記録がトレース可能であり、さまざまな「回復等に寄与した行為群」が存在していた。ダメージを受けても被害を最小限に抑えるための取り組みについて考察する。

## 5.2.2. 適用結果

### 5.2.2.1. 1F5 号機の冷温停止達成<sup>11-15)</sup>

プラント起動に向けた定期検査中(原子炉圧力容器の耐圧試験)であった 1F5 号機は、2011 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災時に、地震並びに津波により3号機と同様の全交流電源喪失となり、発生する崩壊熱を除去する「冷やす」機能の喪失に至った。1F では、1～4号機がシビアアクシデント、爆発を起こす中、5 号機は、同年 3 月 20 日に冷温停止を達成している。5 号機が「冷やす」機能を回復させ、冷温停止に至る過程を評価することで、緊急時対応力がどのように発揮されていたのかを評価し、教訓を導出する。

#### (1)対応の時系列

3 月 11 日、震災前 5 号機は定期検査のため、全制御棒全挿入した停止状態の中、原子炉圧力容器の耐圧試験を実施していた。地震による外部電源の喪失につづき、津波によって全交流電源の喪失および海水ポンプ等の冷却機能を維持するために必要な機器を被災した 5 号機は、原子炉の停止状態は維持できていたものの、燃料の崩壊熱の除去機

能を喪失した。原子炉が停止中であつたため崩壊熱の発生量は相対的に低かつたものの、炉内温度および圧力は上昇し、12 日未明より安全弁が作動し、圧力抑制室に高温蒸気が噴出し始めている。

時系列を以下の通り3つのフェーズに分割し、レジリエンスエンジニアリング4能力を用いて行為群の特徴を評価する。(図 5-9 参照)

#### ① 電源(Monitoring 機能)の確保(Phase1)

中央操作室では、交流電源の喪失により室内の照明を失っていたものの、直流電源により計測器による原子炉の状態監視は可能であつた(Monitoring)。ただし、直流電源の利用可能時間は限られていたことから、発電所で唯一電源供給が可能であつた 6 号機(5 号機の隣接プラント、中央制御室は同室)の非常用発電機から、アクシデントマネジメント対策によって準備されていた電源融通ライン、および仮設ケーブルを敷設し、原子炉の状態監視の維持を最優先に対応した(Responding)。

#### ② 原子炉注水機能の維持(Phase2)

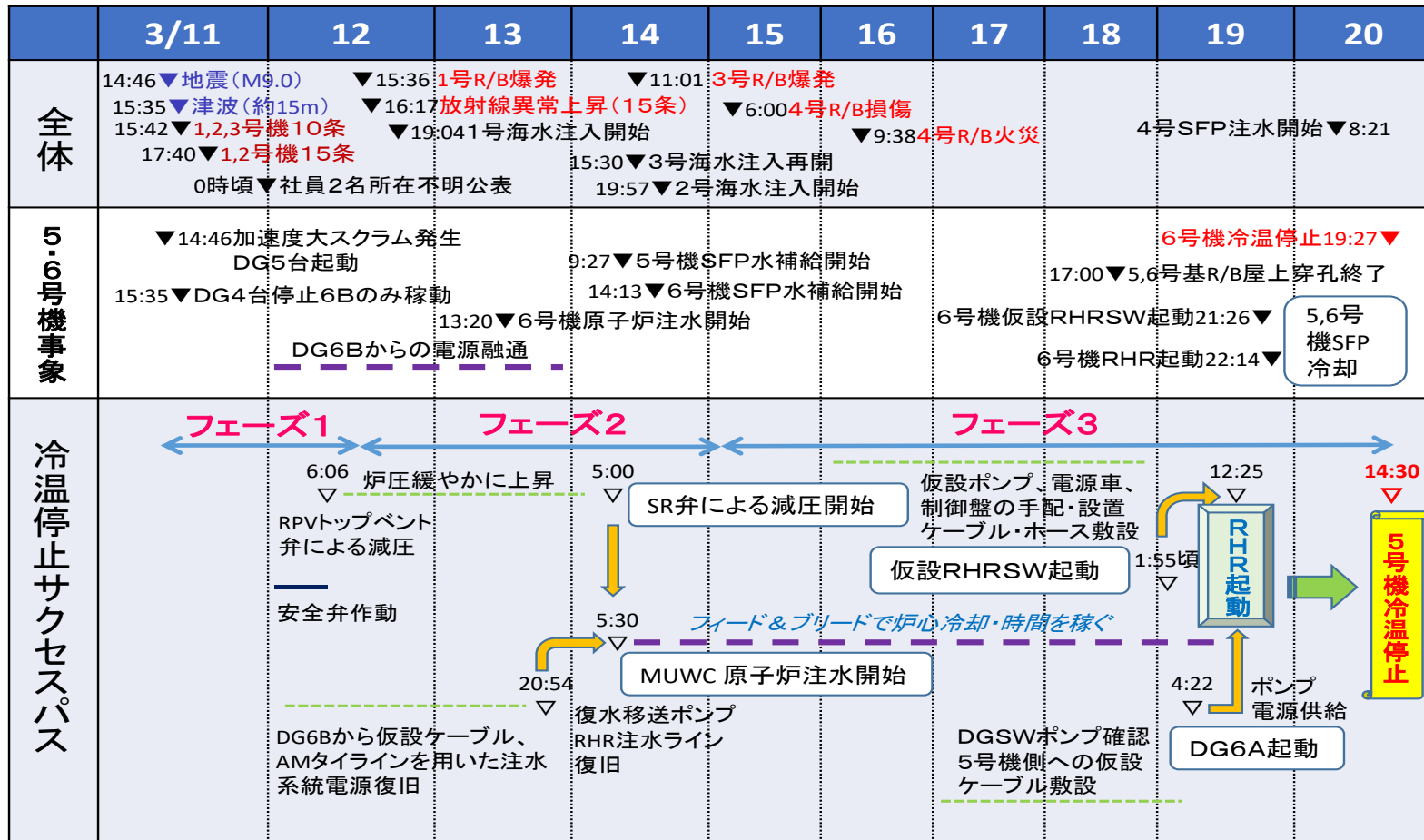
現場では、震災時、運転中であつた 1-3 号機に比べて対応の時間的余裕はあるものの、通常の冷却方式を行うために必要な設備を復旧するには時間がかかると認識し、別の対応が必要と予見した(Anticipating)。そのため、応急的な措置として、原子炉に注水・水位維持し、本格的な設備復旧まで時間を稼ぐ方針を立てることとし、具体的には、冷却機能の維持に必要な機器の復旧を待つ時間を維持するため、アクシデントマネジメント対策により準備されていた原子炉への注水を行うラインを構築するとともに、マニュアル通りに行かない原子炉の減圧を臨機の対応で実施し、原子炉への注水を行った (Responding)。

#### ③ 原子炉冷却の回復と冷温停止(Phase3)

原子炉の状態を計測しつつ、注水状態で冷却が維持できていることの確認をしていた(Monitoring) 運転員は、冷却機能を早期に回復する必要があることを予見し(Anticipating)、それを現場の共通認識とした上で、あらゆる選択肢を同時並行的に実施する必要性を認

知し、実行した(Anticipating, Responding)。具体的には、現場機器、仮設機器による復旧の両面から冷却機能回復を検討。現場、本店で人的リソースを増強し、役割分担が行われ、隣接する 6 号機の復旧とも並行して冷却機能回復を達成した(Responding)。最終的には、非常用発電機1台の現場における復旧および海水冷却用仮設ポンプ等持ち込みにより、同月 20 日に原子炉の冷温停止に成功した(Responding)。

レジリエンスエンジニアリング 4 能力を用いた評価手法によるテンプレートを用いた評価結果を、表 5-2 に示した。



東京電力 福島原子力事故調査報告書(H24.6.20)、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(H24.7.23)より作成

図 5-9 福島第一原子力発電所 5号機の冷温停止達成までの経緯

表 5-2 レジリエンスエンジニアリング 4 能力による評価手法による

1F5 号機の冷温停止達成についての評価

	学習(Learning)	予見(Anticipating)	監視(Monitoring)	対処(Responding)
電源の確保 (フェーズ 1)	・監視設備の電源は アクシデントマネジ メント対策で供給可 能	・全交流電源喪失と なり、直流電源はい ずれ使用不能とな る。そうなる監視 機能は失われる	・直流電源により計 器の監視は当面可能	・ 6 号機非常用電源 より、仮設ケーブル 敷設、アクシデント マネジメント対策に より準備された電源 融通により直流電源 に充電し、監視機能 を維持
原子炉注水機能の 維持 (フェーズ 2)	・原子炉への注水は アクシデントマネジ メント対策で選択肢 がある	・設備の復旧には時 間を要する、別の対 応が必要と予見		・ 応急措置としてア クシデントマネジメ ント対策により準備 されていた注水ライ ン構成を行うととも に、圧力容器減圧を 臨機応変に対応し、 時間を稼ぐ
原子炉冷却の回復と 冷温 (フェーズ 3)		・冷却機能の回復を 急ぐ必要がある	・注水状態で原子炉 の冷却が維持できて いることを確認	・冷却機能回復の選 択肢を並行して実施 ・現場機器の復旧と 仮設設備の外部から の持ち込みで冷温停 止を達成

(2)事例の分析・評価

本事例は、事前の準備を有効に活用しつつ、方針を持ち、臨機の対応を行ったことにより、安全が確保された事例である。Monitoring 機能を維持する電源を確保しながら、冷却機能の維持に成功したこの事例では、設備被害の状況等から復旧に時間がかかるという Anticipation の中、全交流電源喪失後も原子炉の Monitoring 機能を維持により、その結果に基づく冷静な対応に移行している。現場では、冷温停止という目標に向かい、他号機の水素爆発等で人的リソースも限られる中、実行可能な選択肢を洗い出し、優先順位をつけた Responding が行われている。また、そうした Responding の背後には、余震の続く中、高

温や高放射線下の危険な作業を実施した使命感、本社との協働による負荷分散 (Workload Management), あるいは過去の事例からの Learning によって準備されていたアクシデントマネジメント対策や、厳しい環境の中でも事故対応の実施が可能であった免震重要棟の存在が重要な機能を果たしている。この5号機の冷温停止は、それぞれの持ち場で創意工夫、臨機対応が積み上がった結果といえる。多くの報告書では、1F 事故の反省として、複数プラント立地やアクシデントマネジメント対策の問題点が取り上げられているが、5号機の冷温停止成功は、複数プラント立地およびアクシデントマネジメント対策によって達成できているといえる。

#### 5.2.2.2. 係留中船舶の人身災害ゼロについて<sup>15-17)</sup>

東日本大震災は、海運業に深刻な被害をもたらした。しかし、津波が押し寄せるなか、船員や船舶の安全確保に奔走した船員たちがいた。これらの船舶においては、今回の大震災により船舶に乗船した状態での船員の死亡等重篤な事故は報告されていない。本節では、原燃輸送株式会社により実施された、震災時に港に在泊していた船舶(1000t 以上の船舶(除漁船)31隻)について、公表されている結果から、緊急時対応についてレジリエンスエンジニアリング4能力を用いて分析を行う。(アンケートの数値は、回答者における割合を示す)

##### (1)震災時の対応

###### ① 発災時の船舶状況と津波に関する情報入手(Monitoring)

発災時には、岸壁係留中の殆どの船舶が荷役中(89%)または荷役準備中(11%)であり、乗船人員率が80%~100%の船舶が最も多く76%であった。荷役中であったため乗員が定員割れ又はそれを越える船舶も存在した。津波情報の入手先としては、TV・ラジオが最も多く(64%)、次いで港長・海上保安部署(25%)となっているが、回答のあったすべての船舶が何らかの形で津波情報を入手している。



## ② 津波予見と判断, 行動 (Anticipating, Responding)

船舶はその後, 緊急離棧(64%), 岸壁係留(14%)等の措置を採るが, この判断は地震発生および津波情報によるものが65%であり, 避難勧告や会社指示(13%)によるものを大きく引き離している。緊急離棧を実施した船舶については, 陸上支援が得られたものは59%に留まっている。また, 地震感知後離棧までに要した時間は1時間以内が殆ど(83%)であった。なお, 緊急離棧をした18件のケースのうち, 14件は成功裏に終了しているが, 残りの4件の船員は守られたものの, 船舶は乗揚げなどの海難にあっている。なお, このうち3件は入船着棧であり, 離棧に時間を要するものだった。

レジリエンスエンジニアリング 4 能力を用いた評価手法によるテンプレートを用いた評価結果を, 表 5-3 に示した。

表 5-3 レジリエンスエンジニアリング 4 能力による評価手法による

係留中船舶の人身災害ゼロについて

	学習(Learning)	予見(Anticipating)	監視(Monitoring)	対応(Responding)
震災時の状況	<ul style="list-style-type: none"> <li>船舶は津波に対して港湾外に脱出できれば安全が確保できる</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>ほとんどの船舶が荷役中(89%)または準備中(11%)</li> <li>乗船要員率80%~100%が76%</li> <li>津波情報の入手先：TV/ラジオ(64%)、港長/海上保安部署(25%)</li> </ul>	
避難行動	<ul style="list-style-type: none"> <li>訓練等により必要な避難乗船要員、所要時間を把握</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ほとんどの船長が津波を予想</li> <li>緊急離棧までの時間を予測</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>荷役状態、船員の配備、船のスタンバイ状況、離岸等への作業時間を監視</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>対応の判断、指示</li> <li>岸壁係留(14%)、緊急離棧(64%18件)、内14件成功、4件は船員は守られたが海難</li> <li>地震感知後離棧までの時間は1時間以内が83%</li> <li>海難に会った4件中3件は入船着棧</li> <li>荷役中の陸側設備がダメージを受け、緊急離棧に時間を要した</li> <li>港湾出口に船舶が集中し順番待ちとなり時間を要した</li> </ul>

(2)事例の分析・評価

本事例は、「不測の事態」に直面した時の緊急時対応による安全確保に関する教訓を提示している事例である。アンケート等からも明らかなように、岸壁係留中の船舶が荷役中である可能性は高く、発災時には、荷役中止、緊急離棧と立て続けに緊急対応に迫られることとなる。東日本大震災時には陸側の通信機器が電源、回線等により通信不能となった事例が多く、陸側との連絡が十分取れない中で自ら入手した不確実な情報を頼りに、船長が中心となって緊急時の措置を実施している。しかしながら、ほとんどの船長が津波を予見し(Anticipating)、次なる措置への移行を想定するとともに、荷役状況、船員の配備、船のスタ

ンバイ状況、離岸等への作業時間を監視し(Monitoring)、対応の指示、実施に移っている(Responding)。緊急離棧の時間が殆どのケースで1時間以内であったことを考えると、短時間に船長は判断を迫られ、船員は多くの作業を実施する状況になるため、実務能力(Skill)の高さが要求される。

震災の状況下で人身や船舶の安全を確保するうえで極めて重要なのは、緊急離棧に要する時間の推定(Anticipating)である。もちろん、発災後短時間の予測における津波到着時間の推定には大きな不確実性が存在するが、船長はこの両方をみながら船舶の対応を判断しなければならない。荷役中であつたが故に、陸側との設備の切り離しに要する時間が見積もりより長くなってしまった事例、緊急時訓練の経験から緊急離棧に要する時間を正確に把握できていた事例、港湾出口に船舶が集中し順番待ちになり予想外に時間を要した事例などが報告されており、中には乗揚げ等被災事例もあつた。いずれを選択するとしても「リスクを伴う判断(Sacrifice Judgement)」となることが想定される。

緊急離棧した事例では、情報共有、船長のリーダーシップを発揮して成功に導いた事例が報告されている。港湾における船の環境条件は、海象のみならず、荷役、積載、港湾や他船の状況など、これらの組み合わせは極めて複雑であり、その対応を予め細かくマニュアル化することは現実的でない。短時間に離棧を成功させるためには、方針の決定と作業の優先順位付けが不可避である。また、緊急離棧時間の短縮には、港湾への着船の向き(入船着け、出船着け)、船の離岸性能(バウスラスターの有無、推進システム能力など)、エンジンの暖気の有無等、あらかじめ対応可能な要件も明確になった。

### 5.2.2.3. 東日本大震災時の東北新幹線脱線について

JR 東日本の東北新幹線は、東日本大震災(2011年)において、営業運転中の列車すべてが脱線することなく停止し、乗客乗員の死傷者は出ていない。一方で、非営業運転中の新幹線のうち、試運転中の新幹線において脱線が発生した。しかし、死傷者はなく、大

きな逸脱や横転などのない状況で列車を停止させている<sup>18)</sup>。

試運転中であつた試第 7932B 列車は、車両検修員 12 名及び乗務員 1 名を乗せ、仙台総合車両所を定刻（14 時 40 分）に出発したが、仙台駅構内に進入中に、地震による強い揺れを感知し、直ちに非常ブレーキを使用した。列車の停止後、車内及び車外から列車を確認したところ、4 両目（車両は前から数え、前後左右は列車の進行方向を基準とする）の前台車の 2 軸が左に脱線していた。本節では、本列車脱線事故の脱線の被害が大きくならなかつた側面に着目し、レジリエンスエンジニアリングの手法を参照して分析を通じて、東日本大震災において「大きな外乱を受けたにもかかわらず大事故に至らない」「死傷者ゼロ」を実現した背景を明らかにする。

#### (1) 東日本大震災時の状況と対策実施契機<sup>19)</sup>

列車が速度約 72km/h で仙台駅構内に進入中、運転士は「平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震」による強い揺れを感じると同時に、地震発生時に列車を緊急停止させるシステムによる停止信号が車内信号機に現示されたのを認めたため、直ちに非常ブレーキを使用した。列車の停止後、車内及び車外から列車を確認したところ、4 両目の前台車の 2 軸が左に脱線していた。最大脱線値は、前台車第 2 軸の約 260mm である。車両は脱線した状況で停止しており、横転等はしていない。

運輸安全委員会では、本事故の調査報告をまとめており、脱線の原因を分析するとともに、脱線には至つたが人的被害の発生等の大きな被害を軽減した理由として、①早期地震検知システム、②脱線防止ガイドが機能したと推定されるとしている。

よって、本節では、震災前に行われた主な対策を、この二点に着目しその実施の契機となつた 2 つの地震に注目しながら分析する。

#### (2) 結果<sup>20), 21)</sup>

##### a) 阪神・淡路大震災（1995 年）後の対策

JR 東日本管内には被害はなかつたが、被害のあつた山陽新幹線を保有する西日本旅客

鉄道株式会社への応援等を通じて、被害を実感した社員も多かった。

#### ① 早期地震検知システム

海岸線から約 100km 離れている東北新幹線では、沿線地震検知システムに加え、海岸地震検知システムも用いた「耐震列車防護システム」を設置していた。

P 波検知地震計によるシステムの改善の必要性を学習(Learning)し、「早期地震検知システム」への改良を実施した(Responding)。

#### b) 新潟県中越地震後の対策

当地震では、長岡付近を通過中であった列車 1 本が脱線するも横転はせず、乗員・乗客の死傷者はゼロであった。運輸事故調査委員会は、脱線をした要因を分析し、結果をまとめているが、その結果ある程度の地震動を受けた場合の脱線を完全に防止することは困難、との結論に至っている。

#### ① 早期地震検知システム

脱線車両による摩擦熱により曲がりくねった線路を見て、スピードの持つエネルギーの怖さを実感し、さらに早く適切に列車を停止させる必要性を学習した(Learning)。

早期地震検知のために、鉄道総合研究所や気象庁との共同開発により、P 波検知方式を変更した(Responding)。

#### ② 脱線防止ガイド

国土交通省は、本新幹線の脱線事故を受け、平成 16 年に「新幹線脱線対策協議会」を設置し、JR の関係者等と脱線防止と脱線が生じた場合における事故の拡大防止について議論を始めていた(Learning)<sup>22)</sup>。この協議会は、「今回の事故に関して情報交換を行うとともに、施設面、車両面で当面とり得る対策の可能性等について、実務者レベルにおける検討を行う」ことを目標とされており(Responding, Anticipating)、その中で、脱線したまま横転せずに走り続けた車両を調査し、車両に設置してある排障器が脱線しても横転防止機能を果たすことを学習し(Learning)、レールからの逸脱防止ガイドの開発と車両への装着を実施し

た(Responding)<sup>22)</sup>。

レジリエンスエンジニアリング 4 能力を用いた評価手法によるテンプレートを用いた評価結果を、表 5-4 に示した。

表 5-4 レジリエンスエンジニアリング 4 能力による評価手法による  
東日本大震災時の東北新幹線脱線についての評価

	学習(Learning)	予見(Anticipating)	監視(Monitoring)	対処(Responding)
阪神淡路大震災 (1995年)後の対応	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 応援等を通じて被害を実感</li> <li>・ P波検知地震計によるシステム改善の必要性を学習</li> </ul>			<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 早期地震検知システムの改良を実施</li> </ul>
新潟県中越地震 (2004年)後の対応	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ スピードの持つエネルギーの恐ろしさを学習</li> <li>・ 「新幹線脱線対策協議会」にて脱線防止と脱線が生じた際の事故の拡大防止を議論、脱線したまま横転せずに走り続けた車両から排障器が横転防止機能を有することを学習</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 「新幹線脱線対策協議会」にて、取りうる対策の可能性を検討</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 鉄道総合研究所、気象庁と共同で早期地震検知システムの改良としてP波検知方式を変更</li> <li>・ 「新幹線脱線対策協議会」にて情報交換や検討を実施</li> <li>・ レールからの脱線防止ガイドの開発と車両への装着を実施</li> </ul>
東日本大震災時 (2011年)の状況				<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 緊急停止システム、脱線防止ガイドにより、脱線はしたが、被害が低減された</li> </ul>

## (2)事例の分析・評価

本事例は、JR 東日本における新幹線の地震対策をレジリエンスエンジニアリング 4 能力によって整理した結果、人による周到な事前対策により脱線を起こしてもそれ以上の事故の拡大防止を達成した事例であることがわかる。すなわち、東日本大震災において新幹線に脱線が発生しても横転等のそれ以上の事故に発展しなかったことは単なる偶然ではなく、

国土交通省並びに JR 東日本を含む関係者が、阪神淡路大震災および新潟県中越地震などの「起こったこと」から「上手くいかなかったこと」や「上手くいったこと」から適切な Learning を行い、路線安全の確保を目指した取り組みおよび車両の転倒防止を目指した取り組みを、適切なスピードで Responding できたことが背景にある。ここで保たれた安全は予防型の Safety-I と考えられるが、その背景には留意が必要である。この事例では、新潟県中越地震により発生した新幹線の脱線事例において、脱線を防ぐことに注力するのみならず、脱線が発生してもそれ以上の事故の拡大を防止するための仕組みとして、地震の早期検知と車両停止システムの開発と改良、横転防止装置の実用化を実施してきた結果であった。これは、事故の原因究明と再発防止といった「上手くいかなかったこと」に着目する運輸安全委員会の枠を超え、事故というものの中に「回復等に寄与した行為群」に着目して Learning を行うという、関係者の連携と準備が行われてきた結果(Learning, Responding, Anticipating)であると言える。したがって、一見 Safety-I により確保されたように見える本事象の背景には、proactive に人が作り上げた Safety-II の様相を多く含んだものであったことが示されている。

### 5.2.3. 適用結果の考察<sup>15)</sup>

上記3事象は異なる社会・技術システムの安全を確保した成功事例であり、またどのように成功を収めたのかには各々特徴がある。レジリエンスエンジニアリングを参照した分析結果から、下記のような共通点が見いだされる。

- ① JR 東日本の車輛脱線・転倒防止や、船舶の訓練経験、1F5号機事例のアクシデントマネジメント対策など、過去の事例からの Learning によって行われていた設備や手順等の事前準備、あるいはそれら準備によって培われた能力は、成功の土台となっている。備えの充実は災害の被害を軽減させる上で有効である。これは、複雑なシステムであっても、Safety-I(予防型)での対応が安全を確保する基礎となることを示している。

- ② しかしながら、非常時の対応は時間やリソースが限定されるため、必ずしも通常時、あるいはマニュアル通りにはいかないとの認識を関係者が共有しておくことが重要である。すなわち、通常および緊急時間問わず「マニュアル」は前提ではあるが、複雑な環境にさらされたシステムにおいては、安全を確保するために、マニュアル等の有効性のチェックが必要である。換言すれば、マニュアルはある条件の下で正しいテンプレートであり、使用する際その条件が満たされているかどうかの精査が重要である。
- ③ マニュアルを前提にしながら、その時の環境状況等に応じて臨機の対応が求められる際、その実行には人の能力(Responding)が不可欠であり、組織のレジリエンス能力として、組織構成員の臨機応変な対応力(Responding)を高めておく必要がある。Safety-I における備えを超えた領域では、Safety-II による対応が必要であり、海運の事例や 1F5 号機の事例では、臨機の対処により安全確保が確認できている。また、JR 東の事象では、過去に起きた「事故」の「回復等に寄与した行為群」からの学習が功を奏している。したがって、いずれも Safety-II の視点の重要性を示した事例であると言える。
- ④ 震災時には、優先順位に基づく限られた時間内での行動が要求されるが、場合によってはルールやマニュアル通りの対応が取れないことがあり得る。また、海運の事例や 1F5 号機の事例のように、不確かな情報の中での「リスクを伴う判断」が重大な意味や影響を与えることが少なくない。すなわち、事前に十分に準備をしつつも、それを超えた状況の中でも破局を防ぐ能力が求められる。マニュアル通りに行動できるかという習熟型の訓練のみならず、より現実に即した訓練等により、Safety-II を目指した緊急時対応力を高める取り組みが必要である。

#### 5.2.4. 提案した学習システムの汎用性に関する考察

- (1) 他の社会技術システムへの適用により得られた結果



上記 5.2.2 項にて評価を行った事例からも、「不測の事態」における「緊急時対応力」を高めるためには、事前にできる設備対策やマニュアル作り、訓練等の Safety-I に分類される備えは安全確保のうえで必要不可欠であることが示されている。さらに、それらを可能な限り備えた上で、Safety-II の視点を持った適切な Learning を積むこと、専門能力に裏付けられた技術的な Anticipating ができること、タイムリーな Responding ができることが重要であることが示された。これらの結果は、1F3号機の事故分析から得られた教訓と共通したものであると言える。

したがって、今後も「不測の事態」における対処がどのように行われたのかといった事例を注意深く抽出し、そこから教訓を導出することで、より一般化した教訓の導出や、各ケースに応じた対応に関するノウハウが蓄積できるものとする。

#### (2) 学習システムの他の社会技術システムへの適用の可能性

5.2.2 項の検討により、本研究で構築し 1F3 号機の事例で実証した学習システムについて、レジリエンスエンジニアリング 4 能力を用いた評価手法により、他の社会技術システムでの事例について適用を行った。その結果、ダメージを受けても減災、回復をどのように行うのか、といった観点からの教訓が導出でき、さらにこれらをより一般化した教訓として、5.2.3 項にまとめることができた。

このように、本研究で構築した学習システムは、「残余のリスク」に備えるために「回復等に寄与した行為群」を分析し、さまざまな社会技術システムに共通する教訓の導出が可能であることが示された。

### 5.3. 教訓の実装に向けた試行

Safety-II の概念により学習された項目は、最終的に組織に実装される必要がある。実装プロセスは、本研究の直接的なテーマではないが、「回復等に寄与した行為群」から実際の行動へのフィードバックを行うシステム全体を考えたとき、不可避なプロセスである。

Safety-I の概念では、因果律に従い原因を究明し、これを除去することが実装となるが、これに比して、Safety-II の成功拡張型の教訓の実装はより困難が伴う。それは、機能共鳴や創発といった要素展開が極めて困難なモードで発生するものを、予め組織に能力として準備させなければならないからである<sup>23)</sup>。

ここでは、一つの試みとして、Safety-II の視点からの学習結果を、どのように実装するのかについて、一つのフィールド実証の結果を考察する<sup>24)</sup>。

レジリエンスエンジニアリング4能力の内、Responding に着目し、この背後要因を分析することでこの能力を高めるための方法(実装)について検討を行った。ここでは、筆者が実施してきた原燃輸送(株)における実装に向けた活動を紹介するとともに、活動への参加者に活動実施後に行ったアンケートによる分析結果から、実装の可能性について検討した。

#### (1)Respondingの背後要因モデルに着目した実装方策の検討

筆者らは人の能力(Responding)に着目し、Responding の背後要因の構造モデル化について検討を行ってきた。その結果、4.3 節に示した通り、その背後要因をモデル化し、人材育成に関連した成功要因を抽出することができている。Responding の背後要因の構造モデルを図 5-10 に示す。

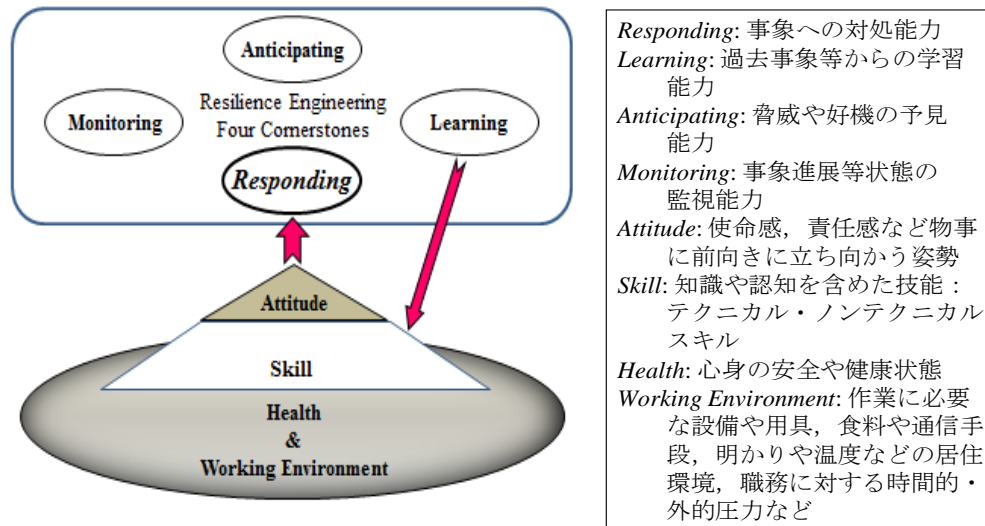


図 5-10 Responding の背後要因モデル

(2) Respondingを高めるための検討

1) 前述のモデルから, Responding を高めるためにはこれらの背後要因ごとの方策が必要であることが分かる。ここでは, 特に Responding に直接係っている Attitude に着目し, これを高める方策について検討を行った例について検討する。

2) 4.3 節で述べたとおり, 実際の1Fでの事例分析等から, Attitude にもいくつかの要素があることが分かっている。具体的には, 使命感, リーダーシップ/フォロワーシップや地元/地域への愛着等である。

3) 福島第一事故に関する報告書は数多く出されているが, 主要な報告の中でこの Attitude を高める方策を提言しているものは見当たらない。他方, 使命感等に関する先行研究は多く実施されているが, ここでは太田の承認とモチベーションの研究<sup>25)</sup>に注目した。

太田は、承認が強く人を動機づけるとして、出来るだけ具体的な事実や情報に基づいた上司からの承認が自己効力感を高め、内発的・外発的モチベーションにつながるとしている。

4) 原燃輸送(株)では、若手プロパー社員の人材育成プログラム(2014 年度)を活用し、組織学習や承認を通じて自己効力感の向上や仕事意欲の改善効果について検討・評価を行っている<sup>24)</sup>。

### (3) 実施内容

当該プログラムは、社長及び直轄の事務局により企画され、組織学習及び会社への改革提言を行う目的に賛同したクロスファンクショナルなプロパー社員 37 名により構成されており、課題図書、並びに社内外の講師による講義を受ける学習フェーズ、課題発掘ならびにその解決策を提言する改革プラン提言フェーズに分けられている。

参加者は小グループに分かれて活動を行うが、学習フェーズでは頻繁にシャッフルされる。学習フェーズの後半より、各人の問題意識をアンケートにより集約し、問題意識が共通する参加者を集め8グループに分かれて改革提案が行われている。改革提案はその場で経営層にて採否の判断が行われたが、全てその主旨が認められ、採用されている。

### (4) 活動の成果及び評価

研修実施後、参加者に活動を通じた変化についてアンケート調査が実施されており、設問は、自分自身、職場環境、会社に対する見方などに関する6項目の5段階評価、活動への満足度、及び自由記述により構成されている。回答は37名全員より得られている。

アンケートの結果、活動全般としては参加者の90%以上が参加したことに満足していると答えており、自分自身に対する認識が大きく変化しているとともに、会社に対する見方・考え方が好転している結果が示されている。

自由意見からは、今回の取り組みを通じ、部門間の交流が高まり、言いたいことが言える環境づくりがされたことや、提案内容が採用されたこと(承認)、またトップ自らが活動を起こしたことが評価されている。

これらから、Responding を高める上で、その背後要因をモデルにより理解することで、これを高めるための実装方策が具体的に可能となり、この例では自己効力感の向上を通じ、会社に対する見方や仕事意欲のアップにつなげることができていることが示されている。

本研究では、「回復等に寄与した行為群」からの学習システムの構築を目標としているが、これにより導出された教訓の実装といった次の課題に対応する際にも、今回構築した評価手法を有効活用できることが示されている。

#### 5.4. 提案した学習システムの有効性評価と課題

本研究にて構築した「回復等に寄与した行為群」からの学習システムは、福島第一原子力発電所事故に関する詳細なデータソースをベースに構築してきたが、5.2 節に示した通り、そのモデルそのものは他の社会技術システムへの展開も十分に可能であると考えられる。

「回復等に寄与した行為群」は意識して探さないと見つけることができない。それは、「上手くいかなかったこと」のように社会として注目され、見える化されない事象であるからである。したがって、本章で対象とした事例のように、「なぜ何も起きなかったのか」という Safety-II の視点を持ち、これがどのように「調整」されてきたのかを注意深く学習していくことが肝要である。

また、本研究では「回復等に寄与した行為群」からのフィードバックシステムの中で、教訓の導出までを行う学習システム構築を実施してきたが、実際にこれを緊急時対応力に取り込むためには、これらをどう実装するのか、といった課題が存在する。

これらのことから、本研究で構築した学習システムは、今回の原子力に関わる特定の社会技術システムのみならず、他の社会技術システムにおいても、緊急時対応力を高める上で、新たな視点の提供、そしてそこからの学習プロセスを構築することにおいて、実践可能であり、既存の学習システムにはない役割を提供できるものとする。

#### 5.4.1. 提案した学習システムの有効性評価結果

第4章に示した通り、提案した学習システムは、1F3号機の「不測の事態」に対して現場の時間推移等環境に合わせた評価を可能とし、緊急時対応力の向上に向け既往の学習システムからのアウトプットと明らかに異なる具体的な教訓の形式知化を行うことができることが実証された。この結果は、5.1節に示した通り、2.2.5項に示した既往の学習システムの課題に対して有効な教訓の導出を可能としている。また、5.2節に示した通り、他の事例への適用についても、緊急時対応能力に関し従来の知見とは異なる視点からの有効な教訓の導出が可能であったことが示された。この導出された教訓実装の一つの試みとして、今回4.3節で導出できた教訓の中で、Attitudeを高めるための取り組み例を示した。その結果、5.3節に示した通り会社の中で学習や新たな企画の提案といった行動を通じて、Attitudeが高められる可能性が確認できた。

以上より、本研究が提案する学習システムは、既往の学習システムの持っている課題を解決する有効かつ実践可能な学習システムであると評価できる。

#### 5.4.2. 提案した学習システムの課題

第1章で述べたとおり、「残余のリスク」対策としてこれを放置することなく、さらなる掘り下げた検討を確実に継続させるための制度が必要である、というのが政府事故調の指摘である。「残余のリスク」の「上手くいかなかったこと」から学習する仕組みは、2.2.1項に示した通り、法律や規制に基づいて学習システムが定着している点が重要である。「回復等に寄与した行為群」から学習する行為は、規制要求とするべき性格のものではないため、関係者が自主的に「事故」報告に合わせて学習システムを活かしてゆくことが肝要であるが、レジリエンスエンジニアリングの4能力の一つであるLearningという観点からも、今後社会で検討が確実に継続できるための体制の構築が必要である。また、この学習結果を継続的に蓄積

し、その知見を活用しやすい形に整理してゆく作業が必要である。

データソースの充実度と形式知化される教訓の量的、質的關係は大きい。第 4 章においても、さまざまなデータソースにより、行為群の全体像を分析するとともに、事実関係や感情、作業環境等の状況を把握できたことで、さまざまな教訓の導出が可能となった。しかし、データソースの量的、質的確保については、検索が発達した現在においても、事象に精通しているものの知識が必要である。また、分析における工学的な判断も教訓の導出には欠かせない。したがって、学習システムは分析する事象の知識をある程度有しているものが携わることが前提となっており、今後第三者が客観的に評価できるようなテンプレートの作成が必要と考える。また、今回開発整備した評価手法のほかにも、FRAM(Functional Resonance Analysis Method)等新たな手法の提案もなされており<sup>26)</sup>、「上手くいったこと」の評価手法の充実も重要な課題である。

## 第5章 参考文献

- 1) 日本学術会議人間と工学研究連絡委員会安全工学専門委員会:交通事故調査の在り方に関する提言, 2000
- 2) 例えば, 内閣府:事故時の状況と対応について, 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 2011年7月29日, Retrieved February 1, 2019, available from [https://www8.cao.go.jp/genshiryoku\\_bousai/fu\\_koukai/pdf\\_2/051.pdf](https://www8.cao.go.jp/genshiryoku_bousai/fu_koukai/pdf_2/051.pdf)
- 3) 鈴木貴子:いわゆる「吉田調書」を政府が公開したことに関する質問主意書, 内閣衆質 187 第 5 号, 安倍晋三・答弁第 5 号, 2014
- 4) 吉澤厚文, 大場恭子, 北村正晴:福島第一原子力発電所事故対応の分析に基づいた Safety-II の概念活用による安全性向上のための研究, 人間工学, Vol. 54, No. 1, pp.1-13, 2018
- 5) 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
- 6) 吉澤厚文, 大場恭子, 北村正晴:福島第一原子力発電所における冷温停止状態達成過程に着目した教訓導出, 人間工学, Vol. 54, No. 3, pp.124-134, 2018
- 7) E. Hollnagel, 北村正晴/小松原明哲[監訳]:Safety-I & Safety-II, 海文堂, 2015
- 8) 畑村洋太郎:「想定外」を想定せよー失敗学からの提言ー, NHK 出版, 2011
- 9) 東京電力:福島原子力事故の総括および原子力安全改革プラン, 2013
- 10) 吉澤厚文, 大場恭子, 北村正晴:Safety-II を組み込んだ安全性向上方策の検討(2)ー福島第一原子力発電所事故の現場対応の分析と教訓ー, 日本人間工学会誌, Vol. 52, 特別号(日本人間工学会第 57 回大会講演集), pp. 368-369, 2016
- 11) 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, pp. 85-127, pp. 323-336, 2012
- 12) 東京電力株式会社, 福島原子力事故調査報告書, pp. 206-215, 2012



- 13) 内閣府:事故時の状況とその対応について, 政府事故調査委員会ヒアリング記録尾形広志・河田賢二聴取結果書 2012 年 2 月 7 日, Retrieved February 1, 2019, available from [https://www8.cao.go.jp/genshiryoku\\_bousai/fu\\_koukai/pdf\\_2/539\\_1.pdf](https://www8.cao.go.jp/genshiryoku_bousai/fu_koukai/pdf_2/539_1.pdf)
- 14) 吉澤厚文, 國頭晋, 大場恭子, 北村正晴:福島第一原子力発電所事故をふまえた組織レジリエンスの向上(III)ー時間フローResponding 構造モデルによる 5 号機の事例分析と評価ー, 日本機械学会 2015 年度年次大会, No. 15-1, 2015
- 15) A. Yoshizawa, K. Oba, M. Kitamura: Extraction of New Lessons Learned from the Great East Earthquake 2011 with Resilience Engineering Methodology, Proceedings of the International Symposium on the Packaging and Transportation of Radioactive Materials (PATRAM2016), paper No. 3041, 2016
- 16) L. Yamaguchi, H. Yanagi, R. Nakaya: Lessons Learned from the Great East Earthquake and Investigation of Countermeasures”, Proceedings of the International Symposium on the Packaging and Transportation of Radioactive Materials (PATRAM2016), paper No. 3040, 2016
- 17) 吉澤厚文, 大場恭子, 北村正晴: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ー(4)海運業の事例にみるワークロードマネジメントについての考察ー, 日本原子力学会 2015 年春の年会予稿集, I-137, 2015
- 18) 運輸安全委員会:東日本旅客鉄道株式会社東北新幹線仙台駅構内列車脱線事故(平成 23 年 3 月 11 日発生)事故調査報告, 2013
- 19) 東日本旅客鉄道株式会社:東日本大震災対応記録誌, 2013
- 20) 航空・鉄道事故調査委員会: I 東日本旅客鉄道株式会社上越新幹線浦佐駅～長岡駅間列車脱線事故, 鉄道事故調査報告書, RA2007-8, 2007
- 21) 東日本旅客鉄道株式会社鉄道事業本部安全企画部編:東日本旅客鉄道株式会社

2013 安全報告書, 2013

- 22) 国土交通省鉄道局:「新幹線脱線対策協議会」の結果について, 2011, Retrieved January 20, 2019, available from <http://www.mlit.go.jp/common/000144351.pdf>
- 23) E. Hollnagel: Safety-I and Safety-II, The Past and Future of Safety Management, ASHGATE, 2014
- 24) 吉澤厚文, 松本敦史, 大場恭子, 北村正晴:レジリエンスエンジニアリングに基づく安全性向上方策の実装に関する検討(2)組織学習による社員の Attitude 向上を目指した取り組み, 日本人間工学会誌, Vol. 51, 特別号, 2015
- 25) 太田肇:承認とモチベーション, 同文館出版, 2011
- 26) E. Hollnagel, 小松原明哲[監訳]:社会技術システムの安全分析, 海文堂, 2013

## 6. 結 論

既往の学習システムは、リスク低減の観点から事故原因の究明と再発防止を行う Safety-I の概念に基き、「不測の事態」に襲われた実際の事例からの学習として、上手くいかなかった行為群に着目し、評価を行うことで教訓を形式知化してきた。本研究では、「残余のリスク」に備えるため、社会技術システムの緊急時対応力向上を目指し、Safety-II の概念に基づき、Safety-I では暗黙知に止まっていた事故の「回復等に寄与した行為群」に着目し、これらから教訓を導出する新たな学習システムの提案を行った。構築した学習システムは、関連する行為群の抽出、データソースの収集、評価手法の開発整備、およびこれらによる教訓の導出といったプロセスにより構成されている。特に、行為群を評価するための手法として、レジリエンスエンジニアリングを用いた手法を参照し、事象の進捗等に合わせた評価のできる 4 つの手法を開発整備した。この提案した学習システムを用いて福島第一原子力発電所 3 号機の事故対応を評価し、原子炉を冷やす機能の回復に関わる行為群からの教訓導出の実証、並びに他事例への適用等により、下記の結果を得た。

- ① 「残余のリスク」の低減に繋がる「不測の事態」における緊急時対応力の中で、「回復等に寄与した行為群」に着目し、この中から教訓を導出し形式知化する学習システムを構築した。
- ② 本学習システムを実事例に適用し、具体的な教訓の導出(形式知化)を実証することで、本学習システムが実践可能であることを示した。
- ③ 本学習システムの福島第一原子力発電所事故への適用により、既往の事故調査と本研究が導出する教訓の違いが明確になり、特に人の位置づけが大きく異なることを明確にした。

以上から、本研究が提案する学習システムは、既往のシステムと相補的に活用することにより、社会技術システムの緊急時対応力の向上に貢献するものと考えられる。なお、提案した学習システムの課題について、今後さらに研究を続けてまいりたい。

## 謝 辞

本論文は、筆者が東京電力在勤中に発生した 1F 事故に対し、当時現場のユニット  
所長(5, 6 号機)(発電所緊急時対策本部副本部長)として対応した経験をもとに、「不  
測の事態」における緊急時対応力を高めるための学習システムを提案するものです。

本研究成果は、2014 年より開始しこれまでに 100 回以上の検討を続けている「レ  
ジリエンスエンジニアリング研究会」における様々な議論をベースに構築していま  
す。レジリエンスエンジニアリングの第一人者であり、当該研究会にてさまざまに  
議論・ご指導をいただいた東北大学名誉教授北村正晴先生、論文作成にあたり多く  
の示唆に富む助言をいただいた日本原子力研究開発機構大場恭子先生に心より感謝  
いたします。

本論文をまとめるにあたり、ご指導いただきました長岡技術科学大学三上喜貴前  
副学長、主査の福田隆文教授、副査の高瀬和之教授、門脇敏教授、村上健太准教授、  
鈴木雅秀名誉教授には、的確なご指摘により論文内容を深めることができたことに  
感謝いたします

最後に、1F 事故対応の現場の責任者の一人として、現場で作業をいただいた多く  
の方々に感謝申し上げ、亡くなられた 2 名の東電社員および故吉田昌郎所長に哀悼  
の意を表するとともに、多くの皆様にご迷惑をおかけしているこのような事故を二  
度と起こさないために、本研究を役立ててゆく所存です。