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¹

吉澤厚文², 大場恭子³, 北村正晴⁴

Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant caused a severe accident which released a large amount of radioactivity triggered by the Great East Japan Earthquake. The existing investigation reports of the accident prepared by several institutions pay attention only to the process which caused the accident but not much to the accident mitigation or the recovery process. This study focused on Unit 3 of Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, including its recovery process from the accident. Based on the public data, the time sequences for the recovery process between the accident occurrence and the state of cold shutdown were classified. Then, the groups of actions were sorted out in terms of ergonomics viewpoint. The important responses in the recovery process were identified and analyzed referring to the m-SHEL model. As a result, new lessons were learned from the accident case regarding the actions required for recovering from the accident.

東京電力㈱福島第一原子力発電所は、東日本大震災による電源喪失等によって、放射性物質を大量に放出する過酷事故に至ったが、その後冷温停止状態を達成した。しかし、福島第一原子力発電所事故に関するさまざまな機関による調査報告書は、事故に至った過程に着目している一方で、事故の拡大の防止や被害の減少についてはほとんど着目していない。本研究は、福島第一原子力発電所の3号機における、冷温停止状態達成までの過程に着目した。公開データに基づき、事故の発生から冷温停止状態達成に至るまでの時列を整理し、それらを人間工学的視点によって行為群を分類した上で、状況の回復に重要な意味をもつ対処をm-SHELモデルを援用して分析した。このようなアプローチにより、状況の回復に必要な行為に関する新たな教訓を得た。(キーワード：福島第一原子力発電所事故、3号機、事故調査、回復、高濃度汚染水、循環注水冷却、冷温停止状態、人間工学、社会技術システム、m-SHELモデル)

1. はじめに

急激な複雑化が進行しつつある社会技術システムに対し、「このような社会技術システムのリスクは、予見可能性、相互依存性などの観点から、未然防止は困難であり、かつ発生可能性をゼロにすることは現実的ではない」¹⁾という指摘がある。また、起きてしまった前例のない事象に対しても、「このレベルの脅威は適切に予期することは不可能であり、対処方策を予め準備しておくことは不可

能である」²⁾といった指摘もなされている。

このような中、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もなされている^{2,3)}。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⁴⁾。

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株式会社（以下、東京電力）福島第一原子力発電所（以下、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、事故の進展を阻止し、事態の改善、状

1 受付：2017年10月9日 受理：2018年5月9日

2 長岡技術科学大学安全安心社会研究センター
Research Center for Safe and Secure Society, Nagaoka University of Technology

3 日本原子力研究開発機構
Japan Atomic Energy Agency

4 ㈱テムス研究所
Research Institute for Technology Management Strategy (TeMS)
Co., Ltd.

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^{5,6)}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」⁷⁾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。

本研究は、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（压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⁸⁾まで」の行為群を、人（当事者・組織）と周囲のさまざまな構成要素との関わりを表す概念モデルであるm-SHELモデル⁹⁾を援用し、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。

2. 回復過程のデータソースと事象の概要、分析手法について

2-1. データソースおよび事象の整理

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、東京電力¹⁰⁾ (pp.178-203, 添付pp.90-103)、政府¹¹⁾ (pp.36-40, pp.363-366, 資料編pp.263-292) および国会¹²⁾ (pp.166-168) の事故調査報告書（以下、東電事故調、政府事故調、国会事故調）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¹³⁾（以下、収束道筋）、およびその進捗状況報告¹⁴⁾（以下、進捗報告）、ステップ2完了報告書¹⁵⁾、福島第一原子力発電所第1号機、第2号機および第3号機の原子炉への注水の維持に係る報告書¹⁶⁾（以下、注水維持報告）ならびに原子力安全・保安院「東京電力㈱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）」¹⁷⁾（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、なら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」¹⁸⁾（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¹⁹⁾、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²⁰⁾（以下、海江田調書）を参照し、補完した。

2-2. 事象の概要

2-1に示したデータソースに基づき、3号機の事象を俯瞰した図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（以下、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さまざま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かった「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。

最初を実現した「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

図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）

Fig. 1 Time series of unit 3 events from occurrence of the accident to the state of cold shutdown (The event of water injection into the reactor core).

では、東電事故調¹⁰⁾ (pp.279-291)、政府事故調¹¹⁾ (pp.202-204, 21)、国会事故調¹²⁾ (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。この時期はまだ压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。

2-3. m-SHELモデルによる分析

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⁹⁾。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さまざま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連しているため、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、最初に第1著者が行ったものを共著者で検討し、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、再度共著者で議論して行った。

- ①L-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
- ②L-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
- ③L-E(Environment)：L、Hを取り巻く環境とのインタラクション

④L-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

⑤L-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。

3. 回復過程の行為群とその整理

2-1のデータソースに基づき、2-2で示したPhaseごとに、回復過程における行為を整理する。また、2-3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。

3-1. 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さまざまな工夫として、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、当該系統を停止した(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、事故進展を防ぐことができた^{10,11)}。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、事故進展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)^{18,19)}。

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)²¹⁾。

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(③～⑤)¹⁰⁾(pp.279-291, pp.320-322),¹¹⁾(pp.202-204)。

3-2. 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, 本文3-1-2))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, 本文3-1-3)), 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、ならびに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)¹⁰⁾(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(③～⑤)。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)¹⁰⁾ (pp.279-291, pp.320-322), 21)。滞留水放出についてはさまざまな意見があるが¹²⁾ (p.282, pp.308-315, pp.323-330)、事故進展を防ぎ、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。

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、貯蔵するだけではなく、その浄化が検討された。さらには後述する「冠水冷却」が断念された後は、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、さまざま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)。

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システムの拡充 (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)¹⁸⁾。

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、実施およ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)²⁰⁾。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上で対策を考えるべきであるという海江田の思いもあり²⁰⁾、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¹³⁾。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。

3-3. 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なら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、压力容器底部の温度が概ね100℃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、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、压力容器下部の温度が9月以降100℃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⁸⁾。

4. 回復過程における教訓の導出

3章から、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。

3章の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1に示した。なお、表1には、3章の関連Phaseの情報も併せて記載している。

表内に記載した教訓①～⑭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) 「迅速な意思決定およ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, ③, ⑭を統合した。

ロ) 「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」：L-mのインタラクション①, ⑭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⑥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) 「リソースおよび時間余裕の確保」：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、①ならびに⑥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。

5. 考 察

5-1. 既存の事故調査およ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

表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

Tab. 1 Classified group of actions and deduced lessons by each interactions of m-SHEL model.

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, 本文3-1-1))	・ 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	a 時間余裕の確保
	高濃度汚染水をRW/Bに貯蔵 (Phase 2, 本文3-2-1))	・ 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, 本文3-1-1))	・ 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	b 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 (Phase1, 本文3-1-1)) ・ 原子炉への海水注入判断 (Phase 1, 本文3-1-1)) ・ 収束道筋の発表 (Phase 2, 本文3-2-4))	c 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, 本文3-2-2)) ・ 注水システムの電源や系統の変更 (Phase 2, 本文3-2-3)) ・ 集中監視システムの導入 (Phase 3, 本文3-3-2))	d 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, 本文3-1-1)) ・ 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, 本文3-1-1)) ・ 高濃度汚染水のRW/Bへの貯蔵 (Phase 2, 本文3-2-1))	e 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, 本文3-1-1)), Phase 3, 本文3-3-1)), Phase 3, 本文3-3-3)) ・ 高濃度汚染水処理設備の設置 (Phase 2, 本文3-2-2)) ・ 集中監視システムの設置 (Phase 3, 本文3-3-2))	f 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, 本文3-1-4))	g 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, 本文3-3-2))	
	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, 本文3-2-1))	・ RW/Bへの高濃度汚染水の貯蔵 (Phase 2, 本文3-2-1))	h 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, 本文3-1-4)) ・ RW/Bの滞留水放出の判断 (Phase 2, 本文3-2-1)) ・ 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, 本文3-3-3))	i 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, 本文3-2-4))	・ 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	j 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, 本文3-1-4)) 「収束道筋」による目標と計画の明示と関係者の共有 (Phase 2, 本文3-2-4)) 「進捗報告」による統合本部の監視と目標の変更 (Phase 2, 本文3-2-4)) システム変更を実施できる体制の構築	・ 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, 本文3-2-4)) ・ 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, 本文3-3-2)) ・ 高濃度汚染水対策等の新たなシステム要素の追設 (Phase 2, 本文3-2-1)), Phase 3, 本文3-3-2)) ・ 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	k 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
			m 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

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、どのように災害の進展を食い止め、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、Woods⁴⁾が指摘しているように、Second Storiesを引き出し、学習していくことが重要であろう。

5-2. 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、さまざまな議論がある。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²⁴⁾。

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進展防止や回復過程には、長期に亘りシステムの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進展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」¹²⁾ (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、「迅速な意思決定およびシステム変更を可能とする体制の構築」、「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」、「環境変化に応じた柔軟な代替手段の実施」および「リソースおよび時間余裕の確保」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さまざま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用い方は一般的とは言えないことから、Hollnagelらが提唱している良好事例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²²⁾の活用事例²³⁾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。

5-3. 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、人間工学的視点からの学習に必要な情報を読み取ることで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。

6. 結 論

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、「迅速な意思決定およびシステム変更を可能とする体制の構築」、「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」、「環境変化に応じた柔軟な代替手段の実施」、ならびに「リソースおよび時間余裕の確保」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、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。

今後も、ダメージからの回復過程における「人」の役割について、研究を進めていく予定である。

参考文献

- 1) 産業競争力懇談会：レジリエント・ガバナンス，研究会最終報告，2，2013，Retrieved May 13，2017，available from <http://www.cocn.jp/thema65-L.pdf>
- 2) Westrum R：第5章レジリエンス状況の類型化，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，57-67，2012
- 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：工学システムに対する社

会の安全目標，11，2014

- 4) Woods DD, Cook RI: Nine steps to move forward from error, *Cognition Technology & Work*, 4(2), 137-144, 2002
- 5) Yoshizawa A, Oba K, et al: Lessons learned from good practices during the accident at Fukushima Daiichi nuclear power station in light of resilience engineering, 13th IFAC/IFIP/IFORS/IEA symposium on analysis, design, and evaluation of human-machine systems, 245-250, 2016
- 6) 高橋信：福島第一原子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，33(4)，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：野田内閣総理大臣記者会見，平成23年12月16日，2011，Retrieved April 18，2017，available from <http://www.kantei.go.jp/jp/noda/statement/2011/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，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：最終報告書，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」の進捗状況について，2011，Retrieved June 8，2017，available from <http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/fl-roadmap/index-j.html>
- 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
- 19) 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>
- 20) 東京電力福島原子力発電所における事故調査・検証委員会聴取結果書：海江田万里聴取報告結果書(平成24年2月13日聴取)，Retrieved June 25，2017，available from http://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，68-70，327-344，2011
- 22) Hollnagel E, Woods DD: Epilogue, resilience engineering precepts. In Hollnagel E, Woods DD and Leveson N: Resilience engineering: Concepts and

precepts, 346-358, ASHGATE, UK, 2006

- 23) 吉澤厚文, 大場恭子, 他: 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, 54(1), 1-13, 2018
- 24) 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

著者情報

吉澤厚文 (よしざわあつふみ, 正会員, 連絡著者)

1983年東京工業大学総合理工学研究科修士課程修了, 修士(原子核工学専攻)東京電力㈱の勤務を経て現在日本原子力発電㈱フェロー, 長岡技術科学大学安全安心社会研究センター客員研究員, レジリエンスエンジニアリングを用い, 福島第一原子力発電所事故対応経験の形式知化に取り組んでいる。

日本人間工学会, 日本原子力学会, 日本機械学会, 日本MOT学会会員。

連絡先: atsufumi-yoshizawa@japc.co.jp

大場恭子 (おおばきょうこ, 正会員)

1998年慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科修士課程修了。金沢工業大学, 東京工業大学を経て, 2015年より日本原子力研究開発機構に勤務。福島第一原子力発電所事故後は, 福島県内外で対話活動に取り組んだ。専門領域: 技術者倫理, 原子力社会学, 日本人間工学会, 日本原子力学会, 電気学会, 科学技術社会論学会などの

会員。

北村正晴 (きたむらまさはる, 正会員)

1970年東北大学工学部助手, 1992年東北大学工学部教授, 2005年東北大学定年退職, 同大学名誉教授, 東北大学未来科学技術共同研究センター客員教授, 2012年株式会社テムス研究所代表取締役, 所長。専門領域: 原子力工学, レジリエンスエンジニアリングほか, 日本人間工学会, 日本原子力学会, 計測自動制御学会, ヒューマン

インタフェース学会などの会員。