



日本原子力研究開発機構機関リポジトリ
Japan Atomic Energy Agency Institutional Repository

Title	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
Author(s)	吉澤 厚文, 大場 恭子, 北村 正晴
Citation	人間工学,54(1),p.1-13
Text Version	査読後
URL	https://jopss.jaea.go.jp/search/servlet/search?5061758
DOI	https://doi.org/10.5100/jje.54.1
Right	日本人間工学会



Japan Atomic Energy Agency

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¹

吉澤 厚文², 大場 恭子³, 北村 正晴⁴

The two approaches as the concepts to ensure safety of the complicated socio-technical systems have been proposed by Hollnagel. They are the safety concepts called “Safety-I” to reduce risks and “Safety-II” to expand successes. The resilience engineering is suggested as the methodology to achieve Safety-II. The study analyzes the recovery of the water injection of Unit 3 based on the resilience engineering, focusing on the fact that preventing further progress of the accident case in Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant which has been evaluated for extracting risk factors. Based on those results, the study has clarified the method of learning to enhance safety which has a different view from existing accident investigation.

複雑化した社会技術システムの安全を確保する概念として、Hollnagel は 2 種類のアプローチを提言している。すなわち、リスクを低減する Safety-I 並びに成功を拡張する Safety-II という安全の概念である。また、Safety-II 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が提唱されている。本研究は、これまで失敗や過誤に注目して分析されてきた福島第一原子力発電所事故対応の「さらなる事故進展を食い止めた」側面に着目し、レジリエンスエンジニアリングを用いて 3 号機の注水回復の事例を分析した。その結果から、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安全性向上の学習の在り方を明らかにした。

(キーワード: 福島第一原子力発電所事故, Safety-II, 事故調査, レジリエンスエンジニアリング, コア能力, Responding, 学習, 時間, リソース)

1. はじめに

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）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^{1),2)}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、さらなる事故進展を食い止められたと評価する指摘は複数の

1 受付:****年**月**日 受理:****年**月**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 株式会社テムス研究所
Research Institute for Technology Management Strategy
(TeMS) Co., Ltd.

1 事故調査に記載されている^{3),4),5),6)}。事故進展が食い止
2 められなければ、さらなる放射性物質の放出に繋がっ
3 ていた可能性もあった。しかし、いずれの事故調査も、
4 なぜそのような行為を実行できたのかといった観点
5 をもった、指摘の背景に関する分析や、教訓の導出は
6 行なっていない。

7 事故を未然に防ぐことは重要である。そのためにシ
8 ステムを理解し、リスクを同定してこれを低減する努
9 力は欠かせない。しかし一方で、社会技術システムの
10 複雑化が進む中、システムの挙動を完全に理解するこ
11 とは困難であるとの指摘もなされている^{7),8)}。この指
12 摘に基づけば、設計で想定していた状況を超える事象
13 が起こり得ることを前提にした安全の確保が求めら
14 れる。このような指摘に対し、組織安全研究のパイオ
15 ニアの一人である Hollnagel は、従来の安全の概念を
16 “Safety-I”と定義した上で、システムを完全に理解する
17 ことは困難であるという立場に立った新たな安全の
18 概念である、“Safety-II”という異なる定義を提言し^{9),10)}、
19 それを具現化する手法としてレジリエンスエンジニア
20 リングを提唱している¹¹⁾。Safety-II の安全の目標は、
21 リスクを同定しこれを低減する Safety-I の安全の目標
22 と異なり、上手くいっていることを増やすことで達成
23 されるものとしている。

24 以上を踏まえ、本研究は、分析対象事例に、利用可
25 能な公開データが多く存在している 1F 事故の 3 号機
26 の「冷やす」機能の推移を選定し、この事例に Safety-
27 II の概念を当てはめ、さらなる事故進展を食い止めた
28 行為群を抽出し、抽出した行為群を、レジリエンスエ
29 ンジニアリングを用いて整理した。続いて、整理した
30 結果に基づき、Safety-II の概念を取り入れたシステム
31 の安全性向上について考察することで、従来の安全の
32 概念である Safety-I の概念により調査されてきた 1F
33 事故対応から、従来とは異なる安全性向上のための学
34 習のあり方を明らかにした。複雑化する社会技術シス
35 テムにおいて安全を確保するために、事故対応におけ
36 る事故進展を食い止めた行為群からの学習は、原子力
37 のみならず社会に有益な示唆を与えるものとする。

39 2. 研究に用いた方法と事象の概要

40 2-1. Safety-I, Safety-II の概念とレジリエンスエンジニ 41 アリング

42 1) Safety-I, Safety-II の概念¹⁰⁾

43 前章で述べたとおり、Hollnagel は、社会技術システ
44 ムの安全を確保するために、Safety-I と Safety-II とい

45 う 2 種類の安全の概念を提案している。

46 Safety-I とは、一般的に用いられているシステムの安
47 全の定義であり、日本学術会議¹²⁾もよりどころとして
48 いる The International Organization for Standardization and
49 the International Electrotechnical Commission (ISO/IEC)
50 Guide 51 の「許容不可能なリスクから解放されている
51 こと」¹³⁾に基づき、達成する安全である。Safety-I の安
52 全の目標は、リスクを低減することを前提に、上手く
53 いかなかったこと(things that went wrong)に着目してお
54 り、これを可能な限り少なくしようとするため、安全
55 管理の中心は、上手くいかなかったことが起きた場合
56 に対応することに向けられる。

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

64 このように、安全の定義が異なる Safety-I と Safety-
65 II では、その概念を表すいくつかの重要な相違点が挙
66 げられており、その特徴を表 1 に示した。それぞれの
67 安全の概念には、上述した定義をはじめとした枠組を
68 成すものと、枠組を補足する基本方針がある。Safety-
69 I では、システムの挙動は理解できることが基本とな

71 表 1 Safety-I, Safety-II の概念の比較
72 Tab. 1 Safety concepts comparison between
73 Safety-I and Safety-II

		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から解放されていること(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。

74 参考文献10より著者作成

1 っていることから要素に分解可能であり、問題は因果
2 律に従いなんらかの原因の帰結として発生 (resultant)
3 するものであると考える。したがって、問題の発生は、
4 何らかの原因が存在しているはずであり、これを見つ
5 けてその原因を除去する対応が主となって安全が確
6 保され、この中で、人はヒューマンエラーに代表され
7 る安全を脅かす危険要因として位置づけられる。

8 しかし、Safety-II では、システムの挙動は完全に理
9 解できず、結果は因果律ではなく、ある時点で存在し
10 たパターンとして発現 (emergence) したものであると
11 考える。また、結果は特定の要素や機能へと遡ること
12 ができないもので、成功や失敗といった結果はその要
13 因に違いがあるわけではないと想定されている。した
14 がって、問題の発生は、日常的パフォーマンスの予期
15 しない組み合わせによるものであり、問題がどのよう
16 に発生するかを理解するためには、日常上手くいって
17 いる行動を理解することが必要となる。システムが上
18 手く動く理由は、人が作業条件に合致するように行動
19 を調整しているからであり、人はシステムの柔軟性と
20 レジリエンスの必要資源であると位置づけられる。

21 22 2)レジリエンスエンジニアリング^{11),14)}

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

32 また、レジリエンスエンジニアリングでは、レジリ
33 エント特性を高めるために、良好事例への着目と、以
34 下の4つのコア能力を重視している。

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

38 Responding : 対処できる。何をすべきか、すなわち混
39 乱や外乱にどのように対処すべきかを知っており、現
40 在直面している状況进行处理する能力。

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

44 Anticipating : 予見できる。何を予測すべきか、すな
45 わち未来の時点で生じうる変化、混乱、圧力、および
46 これらの結果などによってもたらされる事象の進展、

47 脅威、好機などを適切に予見できる能力。

48

49 2-2. 事例の概要およびデータソース

50 1)事例の概要

51 本研究の対象事例である、3号機の暫定的な注水機
52 能回復までの概要を述べる。

53 3号機は、東日本大震災による地震及び津波により、
54 全交流電源が喪失したが、生き残った直流電源 (バッ
55 テリー) により高圧注水機能をもつ機器を運転するこ
56 とで「冷やす」機能を維持した。しかし、使用してい
57 たバッテリーはいずれ枯渇すると予見されていたた
58 め、バッテリーの延命策と代替の注水手段の確保を並
59 行して実施した。このバッテリーの延命策によって、
60 高圧注水機能をもつ機器の運転を長期間維持できた。

61 だが、原子炉の圧力の低下に伴い、高圧注水系のタ
62 ービンに機器破損が懸念される運転領域に至ったこ
63 とから、これ以上高圧注水機能をもつ機器を運転し続
64 けることは危険と考えた運転員は、原子炉を減圧して
65 低圧の注水に切り替える判断をし、高圧注水機能をも
66 つ機器を停止した。しかし、低圧の注水に切り替える
67 ために必要な減圧が、バッテリーの容量不足から実施
68 できなかったため、すぐに切り替えが行えず、原子炉
69 への注水が途絶える結果となり、過酷事故に発展した。
70 一方、そのような状況下にあいながらも、直流電源
71 (バッテリー) の復旧等は実施され、減圧が可能とな
72 るとともに、消防車を注水用のポンプとして活用した、
73 津波により建屋近傍に溜まった海水を水源とする注
74 水系統が確立され、原子炉の「冷やす」機能が回復に
75 至った。

76 なお、本研究では、「行為」は現場で実施された行
77 動、「事象」(例えば、3号機の原子炉への注水、格納
78 容器ベント、など) はプラント毎に特定の目的に対し
79 て実施された一連の行為及びこれに関連した機器の
80 動作の結果を称している。なお、レジリエンスエンジ
81 ニアリングのコア能力である「対処」は、能力を発揮
82 された結果として実施された行為と定義する。

83

84 2)データソース

85 対象とした事例に関わる行為に関しては、利用可能
86 な公開データが多く存在していることも特徴である。
87 事実関係は、既存の事故調査の視点を明確にするため
88 にも、現場当事者だけが知り得る事実は含めず、公開
89 されている報告書等のみを用いて整理した。事実の整
90 理に主に活用したものは、関係者の意見聴取やブラン
91 トデータ等にアクセスが可能な形で作成されている、

1 表 2 3 号機原子炉注水関連機能の津波後の状況
2 Tab. 2 Status of unit 3 related functions of injecting water into the reactor core after the tsunami attack
3

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、または手動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

4
5 東京電力の福島原子力事故調査報告書^{15),16)}(以下、東
6 電事故調)、東京電力福島原子力発電所における事故
7 調査・検証委員会の報告書^{17),18)}(以下、政府事故調)、
8 および東京電力福島原子力発電所事故調査委員会の
9 報告書¹⁹⁾(以下、国会事故調)である。
10 また、学術専門家による評価である日本原子力学会
11 (以下、学会事故調)²⁰⁾、並びにそのヒューマン・マ
12 シン・システム研究部会の報告書²¹⁾(以下、HMS 報
13 告)も参照した。さらに、これら事実関係の補完資料
14 として、上記の報告書の公開後、新たに公開されたデ
15 ータであるTV会議の発話内容^{22),23)}(以下、TV会議)、
16 当時発電所長であった吉田の政府事故調査委員会に
17 よる聴取結果^{24),25)}(以下、吉田調書)、東電の未解明
18 問題に対するその後の調査結果²⁶⁾(以下、未解明調査)
19 も反映した。
20 これらに基づき、注水関連機器の状態遷移が理解で
21 きるように時系列にて整理し、対象事例の現場対応の
22 行為群を俯瞰できる形に整理した。
23
24 **3. 結 果**

25 本章では、データソースに基づき注水機能を持つ機
26 器の状態推移に基づいた現場対応の行為群の時系列
27 整理を行い、対象事例における事故進展を食い止めた
28 行為群の抽出を行うとともに、これらの行為群をレジ
29 リエンスエンジニアリングの4つのコア能力によっ
30 て整理した結果を示す。
31 **3-1. 注水機能を持つ機器の状態遷移に基づいた現場**
32 **対応の行為群の時系列整理**
33 1)注水機能を持つ機器の津波後の状況
34 3号機には「冷やす」機能を有する機器やシステム
35 は多重に存在していたが、対象事例において、「冷や
36 す」機能の維持および回復に関連したものを抜粋し、
37 表2に示した。この表は、本事例に係る津波後の機能
38 の状況をまとめたものであると同時に、1F 事故対応
39 における3号機の初期状況を示したものである。
40
41 2)機器の状態推移と現場対応の行為群の時系列整理
42 図1は、注水に係る機器の状態遷移を時系列で整理
43 した結果である。横軸の項目は、表2に示した機器の

1 中で、現場が復旧ないし利用を考えたものであり、縦
2 軸は、時間の経過を示している。矢印は継続している
3 行為である。
4 3月11日15:42の時点で、3号機は全交流電源を喪
5 失したが、生き残った直流電源（バッテリー）を生か
6 してRCIC、HPCIによる高圧注水を続けることができ
7 た。しかし、バッテリーはいずれ枯渇することが予見
8 されることから、交流電源で動かすことができるSLC
9 （高圧系代替注水系の中で信頼性が高く、原子炉を

10 「冷やす」機能としても活用できる）を、4号機側の
11 設備を使って復旧することに着手する。また、同時に、
12 低圧注水系も必要になることが予見されることから、
13 使用可能な設備の中からDDFPの使用を予見し、起動
14 確認をする等、低圧代替注水の準備が行われた。ただ
15 し、DDFPは機器の信頼性が相対的に低いことから、
16 起動が確認できたあとも、原子炉の減圧をすぐには行
17 わず、信頼性の高い高圧注水系をできるだけ長期間使
18 用する判断をした。併せて様々なバッテリー節約の工

19

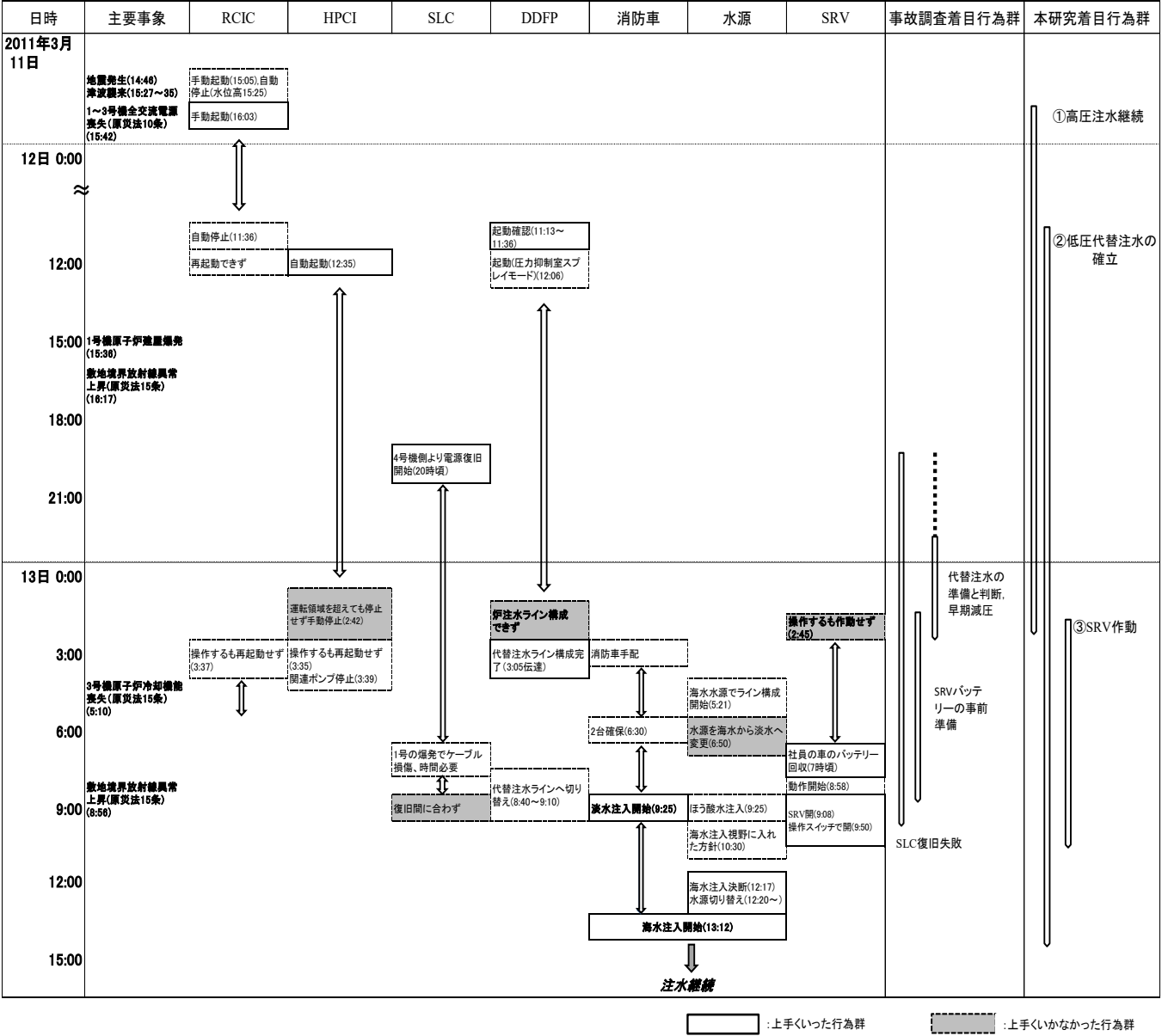


図1 3号機原子炉への注水に係る機器の状態遷移の時系列並びに事故調査報告書と本研究が着目した行為
Fig.1 Time series of unit 3 systems related with injecting water into the reactor core and focused responses by accident investigation reports and this research

1 夫を実施している。
2 13 日になり、継続運転していた HPCI が、機器の健
3 全性を損なう恐れのある運転領域に至ったことを受
4 け、運転員は機器破損のリスクを予見し、停止させ
5 (2:42)。この判断の背景には、運転員は原子炉の減圧
6 および低圧系代替注水の準備が必要であることを認
7 識していたが、現場で並行して行われていた低圧系代
8 替注水の準備（ラインアップ）に十分な時間が割かれ
9 ていたこと、および SRV 関連の制御機器のランプが
10 点灯していたことから、これらが機能しないリスクは
11 相対的に低いとの判断がある。しかし、通信機器が使
12 用できないために、本来なら確認すべき準備の完了を、
13 監視できない中での判断であり、SRV 関連の制御機器
14 のランプも点灯はしていたものの SRV が作動するた
15 めの十分なバッテリー容量は残っていなかった。その
16 ため、原子炉の減圧、低圧代替注水への速やかな移行
17 ができず、注水が中断する結果となった。このことか
18 ら、HPCI の手動停止は、過酷事故の原因になったと
19 評価されている。また、SLC の復旧作業は、減圧の実
20 施と並行して実施されているが、1 号機の原子炉建屋
21 爆発の影響でケーブルが損傷しており、状況回避に間
22 に合わなかった。なお、車のバッテリーの活用等によ
23 り SRV による減圧が実施され、DDFP を使った淡水
24 注入によって注水が再開されたのは、同日 9:08 であ
25 る。しかし、水源となった淡水の水量が限られていた
26 ことから、津波で建屋近傍にたまった海水を、水源と
27 して利用する判断がなされ、12:20 から水源の切り替
28 えを実施し、13:12 から海水による注水を開始した。

30 3-2. 事故進展を食い止めた行為群の抽出

31 図 1 により整理された行為群を俯瞰し、本研究で着
32 目する事故進展を食い止めた行為群、すなわち上手く
33 いった行為群を抽出する。（番号は図 1 の本研究着目
34 行為群の番号を指す）また、既存の事故調査が着目し
35 ている行為群も図中に合わせて記載した。

36 図 1 を用いて事例を俯瞰すると、事故対応の中に、
37 さまざまな行為群が存在していることが分かると同
38 時に、その中で上手くいった行為群は、事故の進展を
39 食い止める上で重要であった「冷やす」機能として、
40 原子炉への注水の回復に貢献した行為といえる。すな
41 わち、高圧注水系が継続して運転できていたこと、並
42 びに低圧代替注水が確立したこととなる。したがって、
43 「①高圧注水継続」を可能としたバッテリー消費の節
44 約に係る行為群、「②低圧代替注水の確立」を行った
45 消防車の活用および水源の多様化に係る行為群、が抽

46 出される。また、低圧代替注水を行うためには原子炉
47 の減圧が必要なため、「③SRV の作動」に関連した節
48 電の追加措置、車のバッテリー収集・活用による減圧
49 動作を実施した行為群も抽出される。

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

61 3-3. レジリエンスエンジニアリングの 4 つのコア能 62 力による整理

63 図 1 に示した 3 号機の原子炉への注水に係る対応の
64 中から、本研究が着目する 3 つの行為群を、レジリエ
65 ンスエンジニアリングの 4 つのコア能力によって整
66 理した。結果を表 3 に示す。4 つのコア能力の整理に
67 当たっては、最初に第 1 著者が行ったものを所属の異
68 なる著者 3 名により議論を行った上で作成した。

69 1F 事故現場の設備は、大きなダメージを受けており、
70 損傷した機器をそのまま復旧することは困難な状況
71 であった。そのため、現場は、事象発生時に参照すべ
72 き手順（テンプレート）である「事故時運転操作手順
73 （事象ベース）」の「全交流電源喪失」²⁷⁾及び「事故時
74 操作手順（兆候ベース）」の「水位確保」²⁸⁾に示されて
75 いる通りに該当設備の復旧を行うことは困難である
76 と「予見」し、関連機器の動作状況等を「監視」した。

77 その結果、手順で想定している該当の機器の復旧では
78 なく、消防車、バッテリーなどを代替手段として有効
79 に活用することで、機能確保を目指す「対処」をして
80 いる (②, ③)。また、水源確保のように、様々な選択
81 肢の試行錯誤の結果、選定したものもある (②)。
82 さらに、高圧注水継続により 3 号機の冷却が可能で
83 あった時間帯に、先行して事故対応が行われた 1, 2
84 号機の経験からの「学習」が、バッテリーや消防車の
85 活用、海水の注水も「対処」に反映されている (②,
86 ③)。現場状況などから適切な「予見」を行うことで、
87 充電設備の復旧に時間がかかると予見したバッテリ
88 ーの長期使用の工夫 (①)、淡水の水量が十分ではな
89 いと予見したことから、低圧系代替注水の水源の確保
90 (②) などの「対処」が可能となった。

1 表3 レジリエンスエンジニアリング4つのコア能力による着目行為の整理
2 Tab.3 Classified results of focused responses based on four cornerstones of resilience engineering

事象 (数字は図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流電源の節約操作が必要【全交遊電源喪失手順】 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
		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】
	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	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、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】
	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）	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】
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立させておくことが必要である	圧力が十分に下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
	注水を確立するために消防車を使った海水注人も有効である（1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 ・防水水槽 ・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） ・逆洗弁ビットに溜まった津波による海水
③ SRV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）	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	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が手配可能であることに気づいた		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】
		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】		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（9:08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

3
4
5 一方、①で実施されたバッテリー節約の「対処」は、
6 高圧注水の長時間運転を可能としたことにつながっ
7 ている。この高圧注水の長時間運転は、より緊急性の
8 高かった1号機にリソースを回すことができたと呼
9 ばれる¹⁶⁾と同時に、事故調査後の知見として、この
10 バッテリー節約がSRVの作動を早め（③）、早期に低
11 圧系代替注水を回復させる（②）ことに貢献した可能
12 性も指摘されている⁴⁾。
13 このように、レジリエンスエンジニアリングの4つ
14 のコア能力によって、3号機の原子炉への注水に係る

1 個々の行為を整理することで、注水の回復に功を奏し
2 た現場で行われた様々な「対処」を明確にすることが
3 できた。

4

5 4. 考 察

6

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

12

13 4-1. Safety-II の安全実現の基本方針との比較検討

14

15 3-3 にて得られた結果から、表 1 に示した Safety-II
16 の考え方の中に含まれている安全実現の基本方針に
17 ついて、Safety-I と比較検討する。

18

19 1) システムの理解、結果と原因

20 「システムの理解」をどのようにするかは、事象の
21 「結果と原因」をどのように考えるかと強く関連して
22 いるので、併せて確認する。

23 表 3 に示したように、高圧注水継続 (①) によるレ
24 ジリエンスエンジニアリングの 4 つのコア能力によ
25 る着目行為の背景の整理からは、高圧注水系設備に関
26 する経験や深い知識が手順書の記載を補完し、さまざ
27 まな工夫が施され、バッテリーの長期使用が可能とな
28 っていた。また、機器の使用継続は、いずれ注水が停
29 止するリスクを伴う判断であるが、すべての選択肢が
30 リスクを伴う中で、機器の信頼性の知識による優先順
31 位に基づいて実施された。これらは、「対処」の背景が
32 明瞭であり、同定できる。

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

47 SRV の作動 (③) は、最終的にバッテリーの回復に
48 よって実現したが、その過程では、窒素ガスを使った
49 作動の可能性を試行するなど、単純なシステムの作動
50 を超えた可能性の追求がなされている。また、バッテ
51 リー残量が監視できない中、手順書を超えた領域にお
52 ける SRV の作動の確認は困難であり、システムの状
53 況を理解できない中で対処が求められた。ここでは、
54 それ以前に実施されていたバッテリー節約行為が、功
55 を奏した可能性が高い²⁶⁾。つまり、HPCI を停止した
56 後の再稼働に失敗したことによって、再稼働は困難で
57 あると判断した結果、高圧注水が可能で唯一の機器で
58 ある HPCI とその周辺機器まで含めて電源を停止する
59 というリスクを伴う判断がなされたことが、SRV 作動
60 につながっている。したがって、SRV の作動は、シス
61 テムの理解による帰結として得られたというよりは、
62 さまざまな行為の複合体として「発現」した結果であ
63 ると考えるのが妥当であろう。

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

70

71 2) ヒューマンファクターの考え方

72 行為群ごとに人が果たした役割をまとめる。

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

81 また、低圧注水の確立 (②) では、本来使用すべき
82 である低圧注水系の機器が、津波によって機能喪失し、
83 早期の復旧は困難であると予見される中、いずれは低
84 圧系代替注水機能をもつ DDFP が必要になると予見
85 し、早い段階で起動可能であることを確認していた。
86 しかし、TV 会議でも共有されているように、高圧注
87 水系から DDFP への切り替えの時期は、機器の信頼性
88 を考慮したものとなった。すなわち、相対的に機器信
89 頼性の低い DDFP に頼ることは高リスクと考え、信頼
90 性の高い高圧系の機器をできるだけ使い、これらが使
91 用困難になった場合に DDFP に切り替える方針とし
92 た。また、切り替えた際は、消防車 (ポンプ車) を利

1 用し、津波によって建屋近傍に溜まった海水を水源と
2 した注水の回復もなされた。この海水注水は、原子炉
3 へ腐食環境と不純物を持ち込むリスクがある判断で
4 あるが、事故対応を含む経験や先事例からの学習を
5 活かした、人の考案した対処である。

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

10 以上より、上手くいった行為群をレジリエンスエン
11 ジニアリングに基づき評価した結果、いずれの対処も
12 人が重要な役割を果たしており、人が、「システムの
13 柔軟性とレジリエンスの必要資源」であることを示し
14 ている。

16 3)事事故例から見た Safety-II の安全実現の基本方針

17 これまでに延べてきた内容から、上手くいった行為
18 群に着目した分析の結果を評価する。

19 本研究の事例においては、表 1 に示した安全実現の
20 基本方針のうち、「システムの理解」および「結果と原
21 因」は、Safety-I、Safety-II の区分がそれほど明確では
22 なく、上手くいった行為群は、それぞれの特徴が併存
23 していることが確認された。一方、「ヒューマンファ
24 クターの考え方」については、参考文献 10 に示され
25 ているものと同様の結果が本研究の事例からも得ら
26 れており、人はシステムの安全を確保するための資源
27 としての役割を担っていることが確認できた。

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

33 なお、「結果と原因」における成功と失敗の原因に
34 関する仮説については、4-3 の 3)項において考察する。

36 4-2.事故対応評価への Safety-II の概念活用

38 1) 本研究による評価と既存の事故調査における教訓 39 の違い

40 一般的に、事故調査報告書は、事故からの学習によ
41 って、より高い安全を実現するための重要な教訓が形
42 式化されたドキュメントであり、さまざまな組織で
43 活用されるものである。しかし、それらの多くは、
44 Safety-I の概念に基づいており、参考文献 1, 2 にも示
45 されている通り、1F 事故の既存の事故調査も、Safety-
46 I の概念に基づいている。そのため、本研究の事例に

47 対する政府事故調や国会事故調での指摘は、高圧注水
48 系がいずれ停止することは「予見」でき早期の「対処」
49 が必要であった、SRV も作動しないことは「予見」で
50 きた、DDFP は HPCI 手動停止前にラインアップを済
51 ませるべきであった、回復の見込みがない SLC の回
52 復にリソースを割くべきではなかった、といった内容
53 となっている。これらは、指摘行為が単純なヒューマ
54 ンエラーではないものの、レジリエンスエンジニアリ
55 ングの 4 つのコア能力で述べるところの「予見できる」
56 や「対処できる」といった能力の発揮が「上手くいか
57 なかった」といった指摘である。すなわち、Safety-I の
58 ヒューマンファクターの考え方の通り、「人」を「安全
59 を脅かす危険要因」と考えている。

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

67 これらの結果は一見矛盾しているように見えるが、
68 それぞれの安全の考え方によって着目する行為群が
69 異なることにより、人に対する違った局面が示された
70 結果であろう。Hollnagel も指摘しているが、もともと
71 Safety-I と Safety-II はいずれも安全を確保するために
72 必要な概念であり、対立するものではなく、相補的な
73 ものと理解する必要がある¹⁰⁾。そのため、本研究も、
74 Safety-II の概念から事故対応を評価することで、既存
75 の事故調査を補完する新たな教訓の導出可能性を示
76 したといえる。このように人の能力という事故対応か
77 らのさらなる教訓の導出につながる新たな視点の提
78 供が、Safety-II の概念活用の有用性の一つといえる。

80 2)Safety-II の概念を活用した学習の有用性

81 1F 事故前の備えが不十分だった一因として、過去
82 の事例からの学習が、原因の究明と再発防止を行う
83 Safety-I の概念によって行われてきたことによるとの
84 指摘がなされている^{29),30)}。具体例として、東京電力は、
85 1999 年 12 月に起きた仏国ブレイエ発電所の洪水によ
86 る電源喪失事故から、事故の直接原因である防止壁の
87 強度設計に対して設計の妥当性を確認し、「監視」し
88 たが、これらの「学習」は、Safety-I の概念に基づくも
89 のであった。

90 一方、この事故を Safety-II の概念にも基づいて捉え
91 られていたならば、災害が発生してしまった後の「事
92 故の進展を食い止めた」行為群からも学習がなされた

1 であろう。具体的には、洪水で孤立する発電所での緊
2 急時対応、侵入した水の排水や冷却設備の復旧³¹⁾とい
3 った設計を超えた事象への「対処」からの「学習」で
4 ある。もしこのような学習が行われていたならば、1F
5 事故対応に生かすことができた可能性がある。

6 今後、このような事故対応の中の上手くいった行為
7 群から新たな「学習」を促す視点の提供も、Safety-II
8 の概念活用の有用性の一つであるといえる。

10 4-3. 事故対応からの新たな学習方策

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

19 1) ヒューマンファクターからの理解による学習

20 既に 1F 事故対応の「対処」を理解するための手法
21 としてレジリエンスエンジニアリングを用いてその
22 有効性を示した事例も存在しているが^{32),33)}、本稿でも、
23 人が適切な能力を発揮できた「対処」につながる背景
24 について、レジリエンスエンジニアリングの 4 つのコ
25 ア能力によって整理した結果から検討する。

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

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

43 このように、事例におけるヒューマンファクターの
44 理解にあたり、レジリエンスエンジニアリングの 4 つ
45 のコア能力によって整理した結果に基づき考える手
46 法を導入することは、対処に至った背景を理解するこ

47 とを可能とし、上手くいったことの学習に結びつける
48 ことができる。

50 2) 「時間」と「リソース」をガイドワードとした学習

51 原子力発電所の事故は、事故発生当時、原子炉が運
52 転中であったか否かで崩壊熱が異なり、その対応に要
53 する迅速性が異なってくる。実際に、福島第一原子力
54 発電所の 6 つの原子炉も、東日本大震災時に運転中で
55 あったか否かで、炉の悪化速度が異なっており、「時
56 間」の有無はその対応に大きく影響した。また、対応
57 にあたっては必要となるリソースが揃っていること
58 が望ましいが、表 2 に示した通り、1F 事故現場では、
59 リソースが限られていた。

60 このように、「時間」や「リソース」は事故対応に重
61 要な影響を与えるが、レジリエンスエンジニアリング
62 の先行研究でも同様な指摘がなされている³⁴⁾。そのた
63 め、1F 事故対応の中から、「時間」と「リソース」に
64 関する項目に注目し、このパラメータがどのように人
65 の能力と結びついているのかを検討した。

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

90 次に、「リソース」について検討する。1F 事故のよ
91 うに設計範囲を超えた事象への対応では、設計で考え
92 られていた設備が使えない可能性は高く、代替手段を

1 講じる必要が生じる。今回の事例では、低圧系代替注
2 水の際に活用した消防車や海水は、システムのポンプ
3 や淡水の代替手段として用いられた「リソース」であ
4 るが、本来の使用目的ではない。しかし、特定の目的
5 の下、消防車が可搬型であったことや、TV 会議でも
6 共有されているように建屋近傍に溜まった海水に、人
7 が注目し、限られたリソースのポテンシャルを最大限
8 に引き出したことで、上手くいった行為を発現させた。
9 このように、「リソース」がどのように確保されてい
10 るか、利用されているかといった観点から検討するこ
11 とは、上手くいった行為を理解し、学習するにあたっ
12 て、重要なガイドの役割を果たすことができる。
13 以上のように、「時間」や「リソース」をガイドワー
14 ドとして用いることにより、これらがどのように発現
15 を含む対処につながっているかを明らかにし、上手く
16 いった行為の学習に結びつけることが可能であるこ
17 とを示した。

19 3)安全性向上につなげるための学習の視点と手法

20 成功と失敗の原因は区別できないと捉える Safety-
21 II では、失敗は、日常的パフォーマンスの予期しない
22 組み合わせによって発生すると考える。そのため、失
23 敗を理解するには、日常で上手くいっている行動を理
24 解し、なぜ今回それが上手くいかなかったかを検討す
25 ることが必要と述べられている¹⁰⁾。これを事故対応の
26 分析に当てはめるならば、失敗（上手く行かなかった
27 行為群）の理解は、上手くいっている行為群の理解に
28 基づく必要がある。この考えを、本研究の事例から具
29 体的に検討する。

30 上手くいった行為群の背景は、1)や2)に示したよう
31 に、レジリエンスエンジニアリングを用いたヒューマ
32 ンファクターからの理解や、「時間」と「リソース」を
33 ガイドワードとした学習を組み合わせた手法（以下、
34 行為群理解のための手法）により理解を深めることが
35 可能である。本研究の事例における上手くいった行為
36 群の背景には、4-1 1)のシステムの理解、結果と原因や
37 4-2 1)の本研究による評価と Safety-I の概念に基づく
38 既存の事故調査における教訓の違いにおいて記した
39 通り、リスクを伴う判断がみられた。

40 一方、本研究の対象事例のうち、既存の事故調査に
41 おいて、最も上手くいかなかったものとして取り上げ
42 られている行為群は、3-1 にも示した高圧注水系 HPCI
43 の停止に係る行為群である。この行為群について行為
44 群理解のための手法を活用してみる。HPCI の停止の
45 判断は、運転員が注水の中断につながるリスクよりも
46 機器の破損リスクの方が大きいと「予見」したことに

47 基づいているが、選択肢はいずれもがリスクを伴う判
48 断であった。また、「時間」と「リソース」というガイ
49 ドワードを用いてみると、「時間」からは、既に機器の
50 破損が懸念される領域に入った運転が行われており、
51 余裕がない状況であったこと、「リソース」からは、通
52 信機器、並びにバッテリー残量を監視する「リソース」
53 がなかったことが解る。そのため、低圧代替注水の準
54 備や減圧の可能性といった「予見」を「監視」するこ
55 とができず、リスクを伴う判断が正確に行えていない
56 「対処」となった^{18),23)}。したがって、既存の事故調査
57 で最も上手くいかなかったものとして取り上げられ
58 ている行為も、上手くいった行為群と同様にリスクを
59 伴う判断の結果であること、さらに、「時間」、「リソー
60 ス」というガイドワードを活用することで、使用可能
61 な「時間」、情報取得に必要な「リソース」に課題があ
62 ったことが示される。

63 このように、本研究で示した行為群理解のための手
64 法は、上手くいった行為群、並びに上手くいかなか
65 った行為群の両方の理解に、活用できる手法であるこ
66 とが判った。さらに、上手くいった行為群も上手くい
67 なかった行為群も共に「リスクを伴う判断」に依存し
68 ており、そのリスク認識が結果としての成功と失敗と
69 いう違いにつながっていることも明らかとなった。後
70 者は、結果としての成功と失敗の原因に違いがないと
71 する Safety-II の安全実現の基本方針に合致している。
72 本研究で明らかにした事故対応の行為群理解のた
73 めの手法は、結果に左右されることがない。そのため、
74 Safety-II の概念は、事故対応調査を日常の安全性向上
75 に貢献する「上手くいっていることの理解」につなげ
76 る手法として活用できると考える。この手法の応用範
77 囲は広いと考えられるが、さまざまな分野への展開は
78 今後の課題である。

80 5. 結 論

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

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

20 本研究は、「冷やす」機能を回復しなければ事故が
21 さらに進展する原子力発電所における事故対応の事
22 例を分析し、既存の事故調査の事故対応の捉え方と異
23 なった視点をもつ、新たな安全性向上の学習の在り方
24 を明らかにした。このような視点をもった学習は、原
25 子力だけではなく、広く社会技術システムに必要であ
26 り、また応用できるものであると考える。今後は、導
27 出できた教訓等について他分野の研究者とも議論を
28 進め、様々な社会技術システムでの検証を行うととも
29 に、人間工学の更なる発展につなげていきたい。

30 参考文献

- 31 1) 東京電力福島原子力発電所における事故調査・検
32 証委員会：最終報告書, 1, 2012
33 2) 東京電力福島原子力発電所事故調査委員会：報告
34 書, 8, 2012
35 3) 東京電力福島原子力発電所における事故調査・検
36 証委員会：最終報告書, 462, 2012
37 4) 東京電力福島原子力発電所事故調査委員会：報告
38 書, 193-195, 2012
39 5) INPO (Institute of Nuclear Power Operations) : Special
40 report, Lessons learned from the nuclear accident at the
41 Fukushima Daiichi nuclear power station, INPO 11-
42 005 Addendum, 3, 2012
43 6) IAEA(International Atomic Energy Agency) :
44 Foreword by Yukiya Amano Director General, The
45 Fukushima Daiichi Accident – Report by the Director
46

47 General, 2015

- 48 7) Westrum, R : 第 5 章レジリエンス状況の類型化,
49 Hollnagel, E., Woods, D.D. and Leveson, N., 北村正
50 晴監訳, レジリエンスエンジニアリング概念と指
51 針, 日科技連, 57-67, 2012
52 8) 産業競争力懇談会：レジリエント・ガバナンス,
53 研究会最終報告, 2, 2013, Retrieved May 13,
54 available from <http://www.cocn.jp/thema65-L.pdf>
55 9) Hollnagel, E. : 日本語版に寄せて, 北村正晴監訳,
56 レジリエンスエンジニアリング概念と指針, 日科
57 技連, 2012
58 10) Hollnagel, E. : Safety-I & Safety-II, 北村正晴／小松
59 原明哲監訳, 海文堂, 2015
60 11) Hollnagel, E. : Prologue, The Scope of Resilience
61 Engineering. In Hollnagel, E., Páris, J., Woods, D. D.
62 and Wreathall, J., Resilience Engineering in Practice :
63 A Guidebook, ASHGATE, UK, 2011
64 12) 日本学術会議総合工学委員会工学システムに関
65 する安全・安心・リスク検討分科会：工学システ
66 ムに関する社会の安全目標, 2014
67 13) The International Organization for Standardization and
68 the International Electrotechnical Commission : Safety
69 aspects - guidelines for their inclusion in standards,
70 Guide51 Chapter 3.14, 2014
71 14) 北村正晴：レジリエンスエンジニアリングが目指
72 す安全 Safety-II とその実現法, IEICE Fundamentals
73 Review Vol.8 No.2, 90, 2014
74 15) 東京電力：福島原子力事故調査報告書, 中間報告
75 書, 主に 56-61, 別紙 30-38, 添付 7-8, 2011
76 16) 東京電力：福島原子力事故調査報告書, 主に 178-
77 203, 添付 90-103, 2012
78 17) 東京電力福島原子力発電所における事故調査・検
79 証委員会：中間報告書, 170-192, 2011
80 18) 東京電力福島原子力発電所における事故調査・検
81 証委員会：最終報告書, 36-40, 363-366, 資料編 263-
82 292, 2012
83 19) 東京電力福島原子力発電所事故調査委員会：報告
84 書, 166-168, 2012
85 20) 日本原子力学会：福島第一原子力発電所事故その
86 全貌と明日に向けた提言, 学会事故調 最終報告
87 書, 25-29, 167-175, 280-283, 丸善出版, 東京, 2014
88 21) 日本原子力学会ヒューマン・マシン・システム研
89 究部会 東京電力(株)福島第一原子力発電所事故
90 調査検討小委員会：ヒューマンファクターの観点
91 からの福島第一原子力発電所事故の調査, 検討,
92 36-42, 2015

1 22) 東京電力ホールディングス写真・動画集 :
 2 Retrieved November 23, 2016, available from
 3 [http://photo.tepco.co.jp/date/2013/201303-j/130029-](http://photo.tepco.co.jp/date/2013/201303-j/130029-01j.html)
 4 [01j.html](http://photo.tepco.co.jp/date/2013/201303-j/130029-01j.html)
 5 23) 福島原発事故記録チーム編, 宮崎知己, 木村英昭
 6 解説: 福島原発事故 東電テレビ会議 49 時間の
 7 記録, 2-96, 岩波書店, 東京, 2013
 8 24) 政府事故調査委員会, ヒアリング記録: 吉田昌郎
 9 聴取結果 平成 23 年 7 月 29 日(2011), 事故時の状
 10 況とその対応について, Retrieved November 23,
 11 available from [http://www.cas.go.jp/jp](http://www.cas.go.jp/jp/genpatsujiko/hearing_koukai/051_koukai.pdf)
 12 [/genpatsujiko/hearing_koukai/051_koukai.pdf](http://www.cas.go.jp/jp/genpatsujiko/hearing_koukai/051_koukai.pdf)
 13 25) 政府事故調査委員会, ヒアリング記録: 吉田昌郎
 14 聴取結果 平成 23 年 8 月 8, 9 日(2011), 事故時の
 15 状況とその対応について 4, Retrieved November
 16 23, 2016, available from [http://www.cas.go.jp/jp/](http://www.cas.go.jp/jp/genpatsujiko/hearing_koukai/077_1_4_koukai.pdf)
 17 [genpatsujiko/hearing_koukai/077_1_4_koukai.pdf](http://www.cas.go.jp/jp/genpatsujiko/hearing_koukai/077_1_4_koukai.pdf)
 18 26) 東京電力ホールディングス: 福島原子力事故発生
 19 後の詳細な進展メカニズムに関する未確認・未解
 20 明事項の調査・検討結果「第 5 回進捗報告」につ
 21 いて, 資料 3-3, 3-4, 3-5, 2017, Retrieved January 23,
 22 2018, available from [http://www.tepco.co.jp/press/](http://www.tepco.co.jp/press/release/2017/1470526_8706.html)
 23 [release/2017/1470526_8706.html](http://www.tepco.co.jp/press/release/2017/1470526_8706.html)
 24 27) 原子力規制委員会: 東京電力株式会社福島第一原
 25 子力発電所の事故時運転操作手順書について, 東
 26 京電力福島第一原子力発電所 3 号機事故時操作手
 27 順書(事象ベース), 全交流電源喪失, (12-4-1)-(12-
 28 4-5), Retrieved November 23, 2016, available from
 29 <https://www.nsr.go.jp/data/00122439.pdf>
 30 28) 原子力規制委員会: 東京電力株式会社福島第一原
 31 子力発電所の事故時運転操作手順書について, 東
 32 京電力福島第一原子力発電所 3 号機事故時操作手
 33 順書(兆候ベース), 水位確保, (5-1)-(5-9), Retrieved
 34 November 23, 2016, available from [https://www.nsr.](https://www.nsr.go.jp/data/000122446.pdf)
 35 [go.jp/data/000122446.pdf](https://www.nsr.go.jp/data/000122446.pdf)
 36 29) 東京電力: 福島事故の総括および原子力安全改
 37 革プラン, 13-15, 2013
 38 30) INPO (Institute of Nuclear Power Operations) : Special
 39 report, Lessons Learned from the Nuclear Accident at
 40 the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, INPO
 41 11-005 Addendum, 32-33, 2012
 42 31) Golvatcev, A., Mattei, J. M., Rebours, V. : Report on
 43 flooding of Le Blayais power plant on 27 December
 44 1999, EUROSAFE 2000, International forum for
 45 nuclear safety, Germany, 2000
 46 32) 吉澤厚文, 大場恭子, 北村正晴: 人材育成の観点

47 から見た福島第一原子力発電所の過酷事故対応
 48 の教訓, 日本機械学会論文集, Vol.83, No.856, 2017
 49 33) 日本原子力学会ヒューマン・マシン・システム研
 50 究部会 東京電力(株)福島第一原子力発電所事故
 51 調査検討小委員会: ヒューマンファクターの観点
 52 からの福島第一原子力発電所事故の調査, 検討,
 53 55-73, 2015
 54 34) 小松原明哲: 第 7 章レジリエンスはマネジメント
 55 されなくてはならない, Nemeth, C. P. and Hollnagel,
 56 E., 北村正晴監訳, レジリエンスエンジニアリン
 57 グ応用への指針, 日科技連, 93-107, 2017

著者情報



吉澤厚文 (よしざわあつふみ)

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(株)の勤務を経て現在日本原子力発電(株)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)

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(2016 年よりクロスアポイント制度により長岡技術科学大学准教授を兼務)。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, 電気学会などの会員。



北村正晴 (きたむらまさはる)

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