

「平成 28 年度（第 12 回全体会議）特別講演会」レジュメ

日 時：2016 年 6 月 24 日（金）15:00～17:10
 場 所：日本技術士会荻手第 2 ビル 5 階 AB 会議室
 講演者：北村正晴 氏（株式会社テムズ研究所 代表取締役 所長、東北大学 名誉教授）
 演 題：「レジリエンスエンジニアリングの視点から見た東日本大震災時の原子力発電所の対応と教訓」
 司 会：井口 幹事
 参加者：46 名

1. はじめに

佐々木部会長より、講演いただく北村先生は本部会と長く関連があり、2008 年「原子力 eye」では「市民からみて信頼できる技術専門家の関与が重要である。中立的立場で公平に情報を提供してくれる専門家組織の必要性を感じている」と技術士に対する期待を述べておられ、震災以降の再稼働に対する市民の理解が得られないことについては、レジリエンスを入れながら説明する努力が必要とのご見解を頂いているところであるが、どのようにレジリエンスエンジニアリングを実装したらよいか等について先生より貴重な講演を賜るとの挨拶があった。

司会から講演者の略歴等の紹介があった。北村先生は 1970 年に東北大学大学院博士課程を終了後、1992 年に東北大学工学部教授に就任され、2012 年に東北大学退官後は、(株)テムズ研究所の代表取締役所長を務められている。原子力安全工学、計測工学、ヒューマンファクタ等を専門とされ、最近では科学技術コミュニケーションの実践研究や欧米研究者との協力の下レジリエンスエンジニアリングの実装の研究開発等をされている。

2. 講演の概要

はじめに

福島事故後装備されている機器の多様性だけで言えば安全は相当高まっていると確信できるが、それで不安を持っている方に納得いただけるのか、腹落ちするのかは別問題である。どう語るのかの前に安全をしっかり抑えておく必要がある。

レジリエンスは国交省にはなじみのある言葉、概念で、国交省の災害後の啓開作業の活動の中にレジリエンスの考えと同じものがある。これを体系的に、実現する方法論をまとめる必要がある。レジリエンスを実現する方法論をレジリエンスエンジニアリング (RE) といい、RE の応用により実現される安全の姿である Safety-II は従来の安全では足りなかったものを補っている。

グローバル社会のリスク懸念として、「社会は複雑になりすぎたので事故が起こるのは当たり前 (Charles Perrow)」、「不確実性が大きすぎて扱いにくく影響は全地球におよぶ (Ulrich Beck)」ことから、実態として市民の意識は変化していることが大事なポイントではないか。寺田寅彦は既に 1934 年に文明が進めば自然の暴力に対して脆弱性を持つことを警告していたが、現代は寺田先生の警告よりさらに文明が進んでいる。原子力に対する不安感、技術に対する不安感が底流にあって、その上に原子力の不安感がのっているという構造と考えられる。

自動車事故では、交通戦争といわれた過去と比べ、交通量は増加していることから考えると安全



はかなり高まっているが、それでよいかは別問題である。

技術自身に対する不安感に加え、技術の発展に伴い新しいタイプのリスク（ネットワーク・セキュリティ）が出現してきている。また、グローバル化社会に起因するパンデミック等のリスクも出てきた。

従来型の安全工学を超える方法論を考える必要があるのではないかという視点から、欧米の研究者を中心に「レジリエンスエンジニアリング」という新しい安全の方法論が急速に発展してきている。当初 RE を研究しはじめた頃は内容的には開発途上であった。開発途上の議論には試行錯誤が含まれるため無駄もあるが、その足跡は深い理解のための参考になるものである。

「安全」と「望ましい特性」

巨大防潮堤（岩手県田老町）は堅牢であったが想定を超える大津波に襲われた結果は残念ながら脆弱であった。南三陸町の防災庁舎もしかり。しかし、次のような事例(望ましい特性を有した例)もある。

- ・例 1：JR 東日本仙石線の指定避難場所で、内規に従って電車を停止し乗客約 40 人を誘導した結果、津波により数人が亡くなった。一方、内規通りではなく、「ここは高台だから車内にいた方が安全」との乗客の言葉に従った電車では、電車の周辺は水没したが全員が助かった。
- ・例 2：東北地方整備局では、地震発生直後にルールを逸脱しへりに緊急離陸を指示。ヘリパイロットから、大津波情報、被害の深刻さ情報第一報入手。この情報をベースに緊急啓開体制を構築するという対処策をとった。また職員を被災自治体に派遣してリエゾン活動に従事させ、国や関連各方面との連絡を効果的に推進させた。
- ・例 3：石巻日赤病院では、全職員が速やかに大被害を予見し、トリアージおよび治療準備を完了した。通常緊急来院は日に 60 件程度のところ、震災 2 日後には 1 日 1251 人の急患来院となった。ヘリでの来院 64 件、医療法的には許されない臨時増床措置で対処した。情報経路が機能せず、300 カ所を超える避難所の状態不明であったが、能動的に情報を収集したことで、来院患者の状況を予見した。4 月 11 日には通常の外来診療に復帰している。

これらの事例が示す「望ましい特性」には、的確な予見、緊急対処を提案、「復旧」から「啓開」への対処変更、人員・機材（リソース）確保、情報の能動的収集に行く決断、などが要素として含まれている。

「安全とは何か？」は学術的意味が未定義な論議である。総合科学技術会議が提唱した「安全安心社会」という概念はあいまいで、実務の現場で混乱さえもたらしている。どのような条件を満たせば「安全」が実現できるか、明確ではなく、また、安全は危険がないことの証明ではない。従来の「失敗着目型」安全の限界であり、人間・機械系としての「システム安全」を重視することや人間の認知特性や心理学、組織心理学などの面からも考察を高度化し、失敗事例だけでなく、成功事例にも着目した考察が必要であることが望まれ、これらから、レジリエンスエンジニアリングが登場してきた。

新しい「安全」：Safety-I と Safety-II

Safety-I は、望ましい状態を固定的に定義する。この考えのもとでは、原子力発電所の各装置、施設構造やその特性は確定的であり、期待される人間の行動も事前明示（マニュアル主義）されている。この視点では「うまくいかなかったこと」の原因究明が基本になる。

一方、Safety-II はダイナミックな危機回避や外乱対応を対象として考えており、システム（及びその環境）は不変ではなく変化を続けていることを前提としている。その変化に対応しつつ、システム動作を継続させることが望ましいとされるのであり、この視点では「うまくいったこと」の探究が求められる。

新しい「安全」概念 Safety-II

安全性の高いシステムにおいては、異常・故障1回に対しても、実は、多数の「正常」なミッション遂行がなされている。また、平常時のミッション遂行は（無事に見えても）様々な外乱や変動に適切に調整対処することで実現されている。失敗の原因究明により事故は減り、一定の効果を挙げている。しかし、失敗にだけ目を向けるのではなく、一見無事に（当たり前に）見えている成功事例には大事なものがある。

「想定されている」業務(Work-As-Imagined: WAI)と「実行されている」業務(Work-As-Done: WAD)は同じではなく、WADには調整が常に存在している。マニュアルはWAIについてのものがあるが、マニュアル通りでは現実の対処にならない。安全を徹底的に追求する航空機の整備での分野でも、北欧ではすべての必要資源や部品がそろわないと作業をしないのに対し、南欧では必要なものが完全にはそろわなくても作業を進めるというぐらい、マニュアルの捉え方は違う。

新しい安全の実現法～レジリエンスエンジニアリング

完全な形（望ましい安全性）を固定的に考えず、常に生じる外乱に適切に対応する能力の重要性を強調した概念として、Safety-IIを実現する方策がレジリエンスエンジニアリングである。対象システムもそのシステムを囲む環境も変化を続けており、変化していることが常態であるため、不完全な情報の下での判断で対応することとなる。完全情報条件下であれば意思決定は合理的に行なうことができようが現実にはそうはいかない。このため、現状維持という対応は、すでに失敗へのドリフトを始めている可能性が高い。

新しい安全の実現法～レジリエンスエンジニアリング

REでは次の基本4能力が必要になる。

- ・能力1：対処できる (Responding)：今直ちに何をすべきか知っている。
- ・能力2：監視できる (Monitoring)：対処に夢中にならずに事態の進行を何に注意を払って監視すべきか知っている。実データを見ながら兆候を察知する。
- ・能力3：予見できる (Anticipating)：さらにこの先どのような脅威と好機 (threat and opportunity) が出現しうるかを知っている。データと関係なく、未来を推測することが予見である。
- ・能力4：学習できる (Learning)：過去の成功と失敗双方からどんな教訓を引き出すのか知っている

また、4つの能力を機能させるための4つの要件は次の通り。

- ・要件1：変化への「気づき」(noticing)能力
- ・要件2：リソース（装置、機材、物資、人員など）の確保、配備、運用
- ・要件3：受動的+能動的（プロアクティブ）対応の重視。プロアクティブな対応には犠牲を伴う判断を、事後的に責めない文化が組織にも必要
- ・要件4：失敗事例だけでなく良好事例も対象とした学習

流れのある川にカヌーを漕ぐことと対応させると、4つの能力は理解しやすい。

REによる原子力発電所の対応分析 (1)学習・予見と1F事故回避可能性

津波や全電源喪失事故への警戒が欠如しており、このため「予見」ができなかった。その結果、適切な「対処」もできなかったのが実態であるが、「予見」が不十分でも、適切な「リソース」（電源車、バッテリー、予備海水ポンプ、防護服など）があれば「対処」可能だった。

「リソース」の不足が困難を一層大きくしていた。また、本来注意を向けるべき非常用復水器の動作状態や建屋内水素濃度など、決定的に重要なパラメータの「監視＝モニタリング」が機能不全だった。

苛酷事故を想定除外した背景には、他国の原子力発電所における事例（1999年仏ブライエ発電所の洪水浸水による全電源喪失事故、2004年インドネシア・スマトラ島沖大地震の津波によるインドのマドラス原発の海水ポンプ建屋へ海水侵入・タービン停止・原子炉緊急停止、米国NRC）の「学習」機能が欠けていたかもしれない。なぜ「学習」ができなかったのかという理由を、利益追求と評するのは単純すぎ、違う見方で見るべきである。

安全研究の権威 R.Cook、 D.D.Woods は、安全に関する重要な教訓が共有されない理由には **Distancing Through Differencing** というバイアスがあると指摘している。事故の報告に接した場合、「わが会社（わが国）はあんな会社（国）とは全然違う。あんな事故は起こりえない」という反応であるが、この反応は良く見かける現象でもある。この他、自分の信念に矛盾するような兆候は無視したくなる等のバイアスがある。これらのバイアス回避のためにも、体系的な方法論が必要であり、これが、REの大きな意義のひとつである。

REによる東電福島第一原子力発電所の対応分析 (2)事後の調査と学習への応用

次のようないくつかの事例が見られている。

- ・事例1：人身安全：地震発生時、敷地内には約6400名（内社員約750名）が業務に従事しており、放射線管理区域内にはその内約2400名が入域中であった。通常退域では迅速に避難できなかったが手続き省略という時宜を得た対処を実施している。対応を迫られている現場は余震と津波の恐怖下にあったが、事態を緩和できた背景に、この初期の事例による安心感が効いているのではないかと考えられる。
- ・事例2：タンカーの冲出し：当日石油タンクに重油を入れるためタンカーが港に停泊、パイプラインを通じて給油中に被災した。2日前、M7.2の地震がありTBMにより津波襲来時の手順を予め学習していたことで、津波の際に採りうる選択肢を共有していた。即座の判断と優れた操船によりタンカーは間一髪港湾を脱出した。遅れていたら、タンカーは陸に打ち上げられ火災が起き、結果的に原子炉側の活動の大きな妨げになっていた可能性が大きかった。
- ・事例3：5、6号機水素爆発の未然防止：停止していた4号機での爆発から、5号機での水素爆発も予見され、危機の迫る5、6号機の建屋にベントホールの工事を計画した。機材（リソース）は入手できたが作業は断られ、不慣れた東電社員で行おうとしたところ、地元工務店の所長が自発的に作業を引き受けてくれた。これまでの信頼関係による業務を超えた判断であったが、無事穿孔を完了。これによって現場は水素爆発を懸念することなく落ち着いて冷温停止を達成できたと聞いている。

他にも、免震重要棟（中越沖地震の教訓を反映、現場指揮所として極めて重要であった）、注水用の配管経路ラインアップ（プロアクティブな行動）、必要な機器の組織の壁を越えた運用など、優れた対応がなされている。ただ、このようなエピソードを美談で終わらせてはいけない。体系化して、方法論として、例えばリソースの配分とか学習に活用しないとならない。そうしないと知識が継承されにくくなる。

REによる原子力発電所の対応分析 (3)他の発電所

他の発電所では次のような状況であった。

- ・事例4（東京電力福島第二発電所）：地震で外部電源は1系統のみになったが（本来4系統あるが1系統は点検中）、海水ポンプが津波によって損傷し、原子炉からの除熱不可能になった。原子炉隔離時冷却系や復水補給水系といった、海水ポンプのサポートを必要としない系統を活用するなど、臨機応変に压力容器や格納容器の冷却を進めた。その間に損傷していた海水ポンプのモーター交換や仮設ケーブルの敷設を行い、海水ポンプを復旧したことで除熱が可能になり、全号機の冷温停止を実現できた。

- ・事例5（東北電力女川原子力発電所）：震源地に福島よりも近接している。2号炉は（起動後間もなかったのに）冷温停止状態を達成できた。外部電源は5系統中の1系統だけが機能を維持していたが、非常用ディーゼル発電機による電力供給が重要な意味を持っていた。津波が襲来したが敷地の高さが津波波高より高く、福島原発のような事態は免れている。設計段階での学習、予見が安全確保に貢献しているが、津波襲来後、2号炉設置のディーゼル発電機3台中2台が動作を停止してしまった。流入海水のポンプによる汲み出しを行ったが、ポンプ揚程不足には、中間に一時貯留場を設けて対処した。また、現場の作業担当者たちは、予備の土嚢の必要性を予見し、300個も作成する等、プロアクティブな対処がなされていた。

レジリエンスエンジニアリングと全体論的安全

RE を考えると見失いがちになるが、テクニカルスキル(専門能力)は大事であり、また、Non-technical skill(コミュニケーションやリーダーシップ等)も大事である。Attitude (変動に前向きに挑む態度、責任感、使命感)、Mental and physical health、リソースを含めた Environment (作業環境) を付加する必要もあるが、こういったものの総合が安全を達成することに繋がる。美談や Good practice で終わらずに、方法論にくみ上げることが大事である。

これらの諸手法が安全性の向上を目指して次々に導入されてきた歴史があるが、その結果、現場は「あれもこれも行うのは大変である」という認識を持つ場合もある。安全文化は掛け声ではなく、日々の行動に実装されないとならない。予見できることはなにか、学習できることはなにか、何を学べるかと考えることが大事で、こういったことが安全文化につながる

おわりに

「安全」問題は現代の最重要課題である。ただ、「技術と社会」の関係が難しくなっており、技術に懸念を持っている人もいる。「安全」についての定義さえあいまいな議論が横行しているが、狭い「安全」に限定されない「望ましい」特性を考える必要がある。この意味で、Safety-I から Safety-II へ考え方を変える必要があり、Safety-II の実現法がレジリエンスエンジニアリングである。多くの事例が、この提案を支持している。実装への可能性はすでにみえてきており、日常的にも活用される必要がある。失敗ばかり責めて陰鬱になるのではなく、優れた実践行為を見出して積極的にほめることで元気な安全を目指したい。

3. 質疑応答

- Q) 小さな変化と大きな変化でやるのが異なり、普段の方法論は大きな変化では通用しない場合もあるのではないかと
- A) 普段起こっていることであっても、それでよいか大丈夫かと予見しながら対処することは必要で、大きい場合は大きいなりに小さい場合は小さいなりに、しかし基本となるアプローチは同じ。
- Q) 畑村先生の成功へのパスとの違いは
- A) 失敗のプロセスにおけるリカバリの可能性を畑村先生は問われているが、途中にある良好事例に着目しているところで少し違う。注目する失敗に目を向けるのは極めて自然であり、失敗を指摘することを否定しているものではないが、RE はそれだけではなく、影で支えている良好事例に着目するというもの。
- Q) 規制庁でも取扱ったテーマであるが難しく、特に難しいのは、同一の組織が Safety I と II を同時に備えるのは難しいのではないかと議論であった。Safety II に特化した人間を配置するのが良いのではないかと思われるがどうか。良好事例のピックアップは難しく、原子力ではルール通りやるのが良好事例というとながら何が良好事例かということになるが、どういう視点を持てばピックアップできるのか。

A)大変動に対応するのも平常時に対応するのも基本は同じ。ルール 100%守れといわれると組織はダメになる。ルールは仮説・想定があって成立している。ルールをただ盲目的に守れというのは非人間的マネジメントとなる。前提が変わらなければ自動化すればよいが、実際には完全自動化では代替出来ないことは様々な分野で知られている。人工知能研究でも否定されている。ルールを守ることが良好事例なのでそこから教訓はないのではという見方は、捉え方・視点が違うかも知れない。全てを尽くすマニュアルはなく、**Safety I** と **II** 双方を視野に含めることが不可能とは思えない。原子力はマニュアル化が進んでいるが、マニュアル通りにはいかない場合があるので **RE** が必要。

Q)PRA に関して日本は事故が起こる確率というところに目が行くが、諸外国ではパラメータの変動を安全が全体として一定レベルを割らないようにという考えがもたれている。これは **Safety I** の範囲と考えてよいか。

A)PRA は技術者同士がシステム A とシステム B を比較して議論するには良い方法だと思うが、伝統的には人間のアクティビティをヒューマンエラーとしてしか見ていなくて、優れた創意に伴う対策のようなものが扱えていない。人間要素をいかに考えるのか **Good practice** をどう入れ込むのが課題ではないかと思われる。PRA は視点が、限られている。社会技術システムは人間系と機械系と切り離して議論できない。しかし PRA は切り離す、あるいは限定的である。社会技術システムの技術に重きを置いたものが PRA と思っている。

Q)1F は予見が出来なかったのではなく、予見をしようとすらしなかったのではないか

A)原子力ではとかく、やるやらないの 0 or 1 で考えがち。車のバッテリーで計装系につないだとか、空冷式の発電機とかの対応が取られたが、であればバッテリーや発電機を予め用意しておくとの対処が、防潮堤は無理でもはるかに安い費用で対処できることがあったのではないか。事故はほとんどの場合、事前に警告がある。100%対応すると思うから大変なのであって、経営会議を通さなくて良いようなコスト負担の少ない対応であってもなにかをしておけばと思う。



Q)単年度予算であるがゆえに不合理なことが起きていたりすることが科学的合理性を押さえつけるということは起きていないか

A)施設を改良しようとしても許認可が大変なのでそのままにしておこうということがある。こういう風土は変えないとならない。こういうことを放置して安全文化というのは筋違いと思っているが、言っても仕方がないので先のように付加的バッテリー導入とかの対応はどうかと思っている。高レベル放射性廃棄物の場合、スウェーデンの実施主体である SKB は長年その地域に勤めているという話がありそのことは当然だと思えるが、日本では人事で難しいという話を聞く。やってやれないことはないと思われるが、しかしその枠内でやるしかない。

Q)炉のメカニカルなレジリエンスはあったか。津波にやられたというのとやられていないというのとが違ってよく分からない

A)再起動できる健全性と閉じ込め機能までやられたかの 2 段階で考えるとすると、1 段階は議論があるところだが、2 段階まではいかないと思う。地震の加速度ガルだけで議論するのではなく破壊モードによって考えるべきではないかと思われる。



北村先生を囲んでの参加者の記念写真

以上