

自然ハザードに対する 原子力発電所の レジリエンスの考え方

糸井 達哉（東京大学）

高信頼性システムとしての原子力発電所 (議論の前提)

- 原子力発電所に代表される高信頼性システム
 - ✓ 社会に対して高い価値と巨大な影響力をもっているために高い信頼性と安全性を要求されるシステム
 - ✓ 高信頼性システムは、システムの特徴ゆえ、何もしなくても十分安全と考えられてきたが、福島第一原子力発電所事故も踏まえて、改めて、高信頼性システムにおける安全性に関する考え方を再検討する必要がある。
 - ✓ システムはある「環境」下に存在し、何らかの「目的」をもつ

安全問題の変遷

- 単純に技術的な問題から、社会 = 技術の相互作用、さらには想定していない状況に対する対処（レジリエンス）へと安全問題が拡張

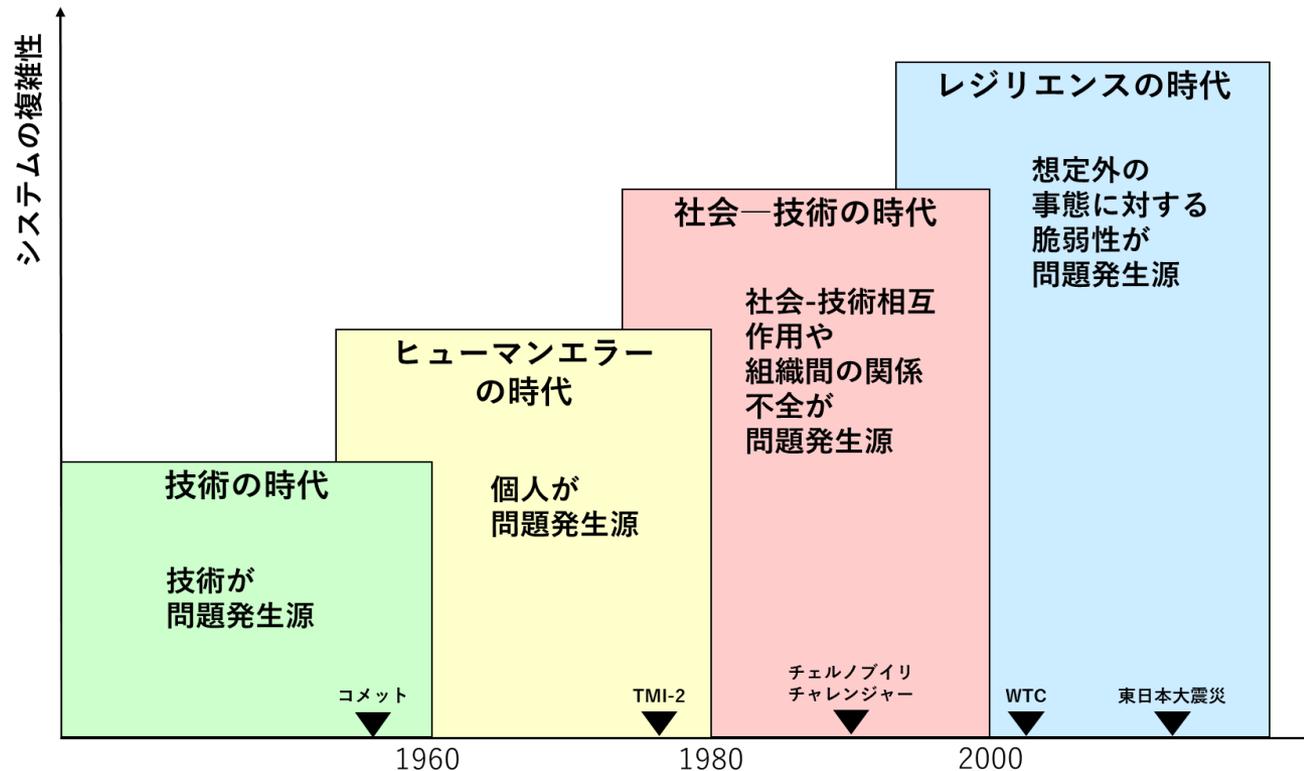


Fig.1 transition of issue of systems safety (Furuta, 2017)

レジリエンスとは？

- 辞書的な定義
 - ✓ 頑健性や弾性
- 工学的には、例えば地震工学では以下のように定義
 - ✓ 外乱の可能性を低減し、外乱が発生した場合には吸収し、外乱後に素早く回復するシステムの能力(Bruneau et al., 2003)
 - ✓ しかし、一般構造物や社会を対象としたレジリエンスの議論が中心であり、事故の頻度が極めて小さいことが求められる高信頼性システムに関する議論はあまりなされていないのが現状

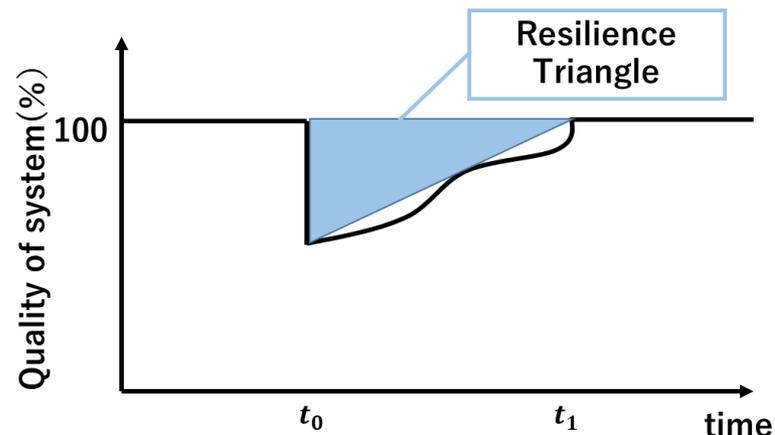


Fig.2 Resilience triangle

高信頼性システムとは何か？

- 巨大複雑系社会経済システム(日本学術会議, 2008)

- ✓空間的あるいは物理的あるいは社会的広がりが巨大であり、その中に内包される多数の要素の相互関係が複雑であり、かつ社会や経済に多大な影響を与えるシステムのうち、主たる構成要素が人工システムであるもの
- ✓高信頼性システムは、巨大複雑社会経済システムのひとつ

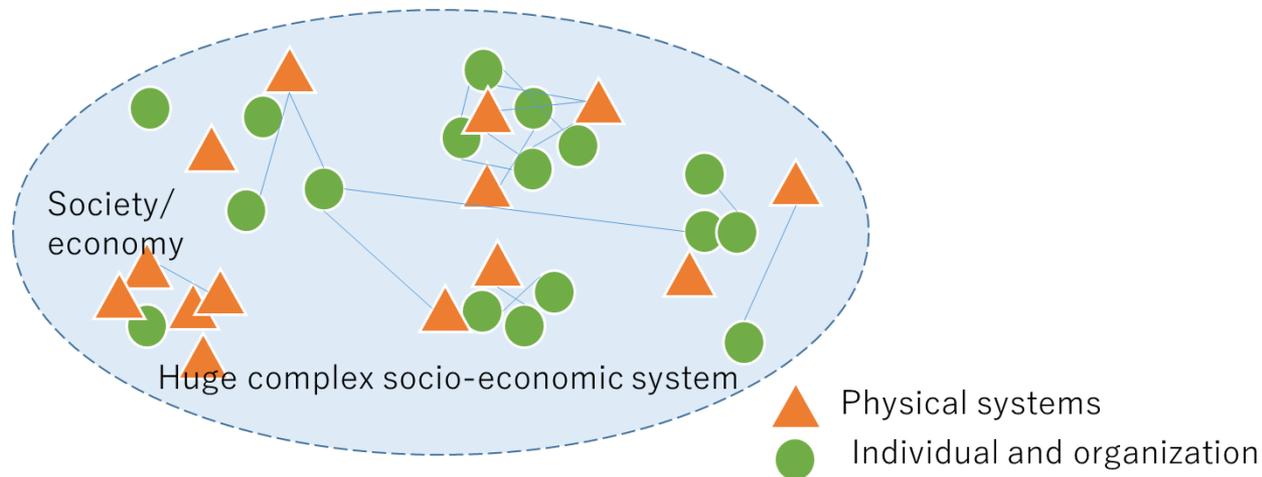


Fig.3 A huge complex socio-economic system

日本学術会議：巨大複雑系社会経済システムの創成力強化に向けて(2008)

これまでの議論における課題と本発表の目的

• 課題

- ✓ 巨大複雑系社会経済システムに対する自然ハザードの脅威を考慮せず
- ✓ 巨大複雑系社会経済システムという考え方は、複雑なシステムを複雑なものとして扱っているところが特徴であるが、「設計」時点での考察にとどまっており、「長期的運用」を含めた時間的の観点からの検討が少ない
- ✓ 高信頼性システムに対するレジリエンスの議論が少ない

• 目的

- ✓ 自然ハザードにさらされる高信頼性システムのレジリエンスについて、議論を行い、新たな考え方を示すとともに、本セッションのテーマであるリスク評価に対して論点と展望を提示すること

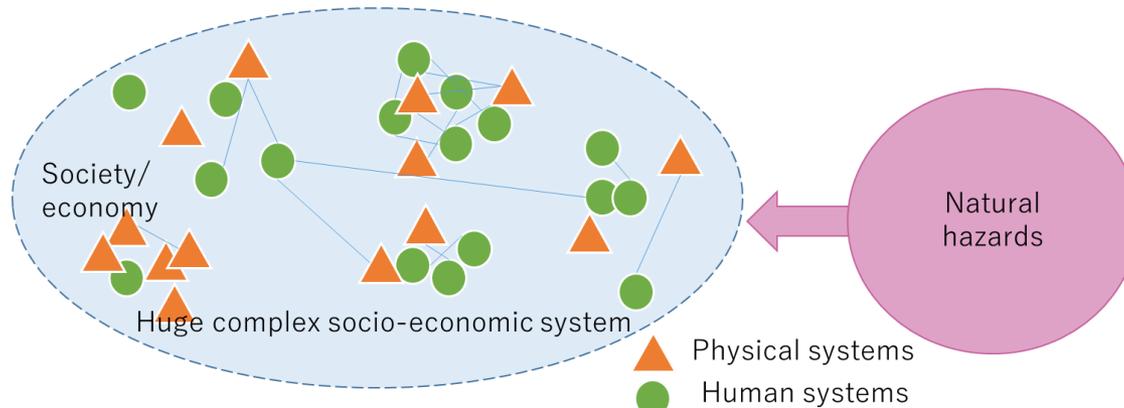


Fig.4 high-reliability system exposed to natural hazards

議論の際の視点

- 自然ハザードにさらされる高信頼性システムのレジリエンスについて、議論を行う際の3つの視点
 - ✓ 自然ハザードの特徴
 - ✓ 人工システムの分類
 - ✓ 安全マネジメントに関する考え方の変化

自然ハザードの特徴

- 自然ハザードや自然ハザードにさらされるシステムの特性
 - ✓ 自然ハザードに関する情報や知見には、不完全性（未知の部分が残る）が避けられず、その知見も日々更新・蓄積されていくもの
 - ✓ 稀ではあるが、過酷な状況にさらされる（環境が急激に変化する）。

既往研究におけるレジリエンス

- 既往研究に基づきレジリエンスの要素を整理
 - ✓レジリエンスは「システムの目的・目標を達成し続ける能力」と定義できる
 - ✓システムがレジリエントであるための要素としては、
 - 変化や外乱に対する認識として①学習、②監視、③予見
 - 変化や外乱に対する行動として④吸収、⑤適応、⑥再構築

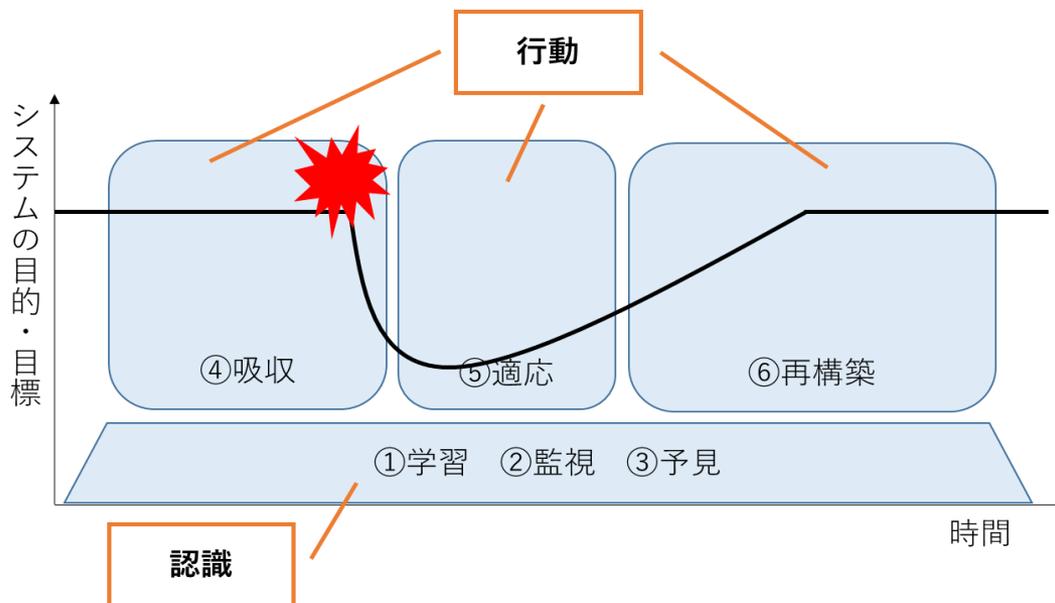


Fig.6 resilience elements in previous studies

原子力安全と深層防護／レジリエンス

- 深層防護は、福島第一原子力発電所事故後も重要であるとされ、レジリエンス概念が深層防護概念の拡張として議論されることも

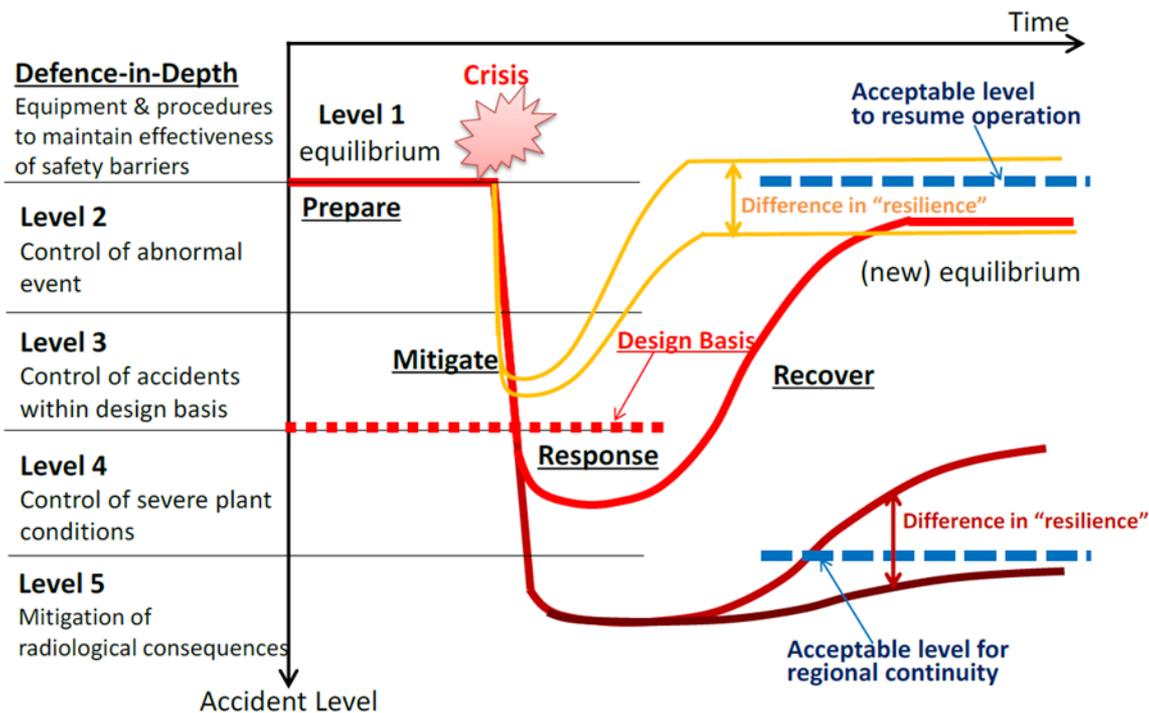


Fig.9 relationship between DiD and Resilience of NPPs
(Sekimura et al.,2014)

人工システムの分類（日本学術会議, 2008）

- 巨大複雑系社会経済システムの主たる構成要素である人工システムは、その目的および環境に関する情報の特性から3つのクラスに分類される
- 高信頼性システムは、その目的や環境が日々変化するためクラスIIIに属すると考えられる。
 - ✓ただし、日本学術会議の議論は、「設計」の議論に偏っており、「運用」の概念を適用すると、目的や環境の情報は予測できないことに加えて、変化し続けるものであり、共創的解探索とあった課題は、共創したのち、定期的に見直されることが必要となる

Table.1 Classification of systems

	目的に関する情報	環境に関する情報	中心課題
クラスI 完全情報問題	既知である	既知である	最適解探索
クラスII 不完全環境情報問題	既知である	予測できない	適応的解探索
クラスIII 不完全目的情報問題	予測できない	予測できない	共創的解探索

安全マネジメントに対する考え方の変化

- Safety-Iにおける安全の定義
 - ✓ 「許容できないリスクがないこと」
- Safety-IIにおける安全の定義
 - ✓ 「成功の数が可能な限り多いこと」

Table.2 Difference between Safety-I and safety-II (Hollnagel, 2014)

	Safety-I	Safety-II
安全の定義	失敗の数が可能な限り少ないこと。	成功の数が可能な限り多いこと。
安全管理の原則	受動的で、何か許容できないことが起こったら対応する。	プロアクティブで、連続的な発展を期待する。
事故の説明	事故は失敗と機能不全により発生する。 事故調査の目的は原因と寄与している要素を明らかにすることである。	物事は結果に関わらず基本的には同じように発生する。 事故調査の目的は、時々物事がうまくいかないことを説明する基礎として、通常どのようによくやっているかを理解することにある。

高信頼性システムとSafety-II

- 一般的な工学システム（従来）
 - ✓ 事故の都度原因を模索し、改善するというSafety-I的なアプローチにより、様々な問題を克服し、システムの安全性を向上
- 高信頼性システム
 - ✓ 上記のアプローチでは、安全性向上の機会が少なく、継続的安全性向上のためには、Safety-II的なアプローチが必須

General system



High-reliability system



Fig.5 difference of safety improvement between general systems and high-reliability systems

自然ハザードにさらされる 高信頼性システムのレジリエンス

- 「時々刻々変化する環境の変化を認識し、価値判断を下すとともに、行動するという一連の活動を通じて、システムの目的を保持する能力」と定義
 - ✓ 平常時と緊急時とに共通する概念

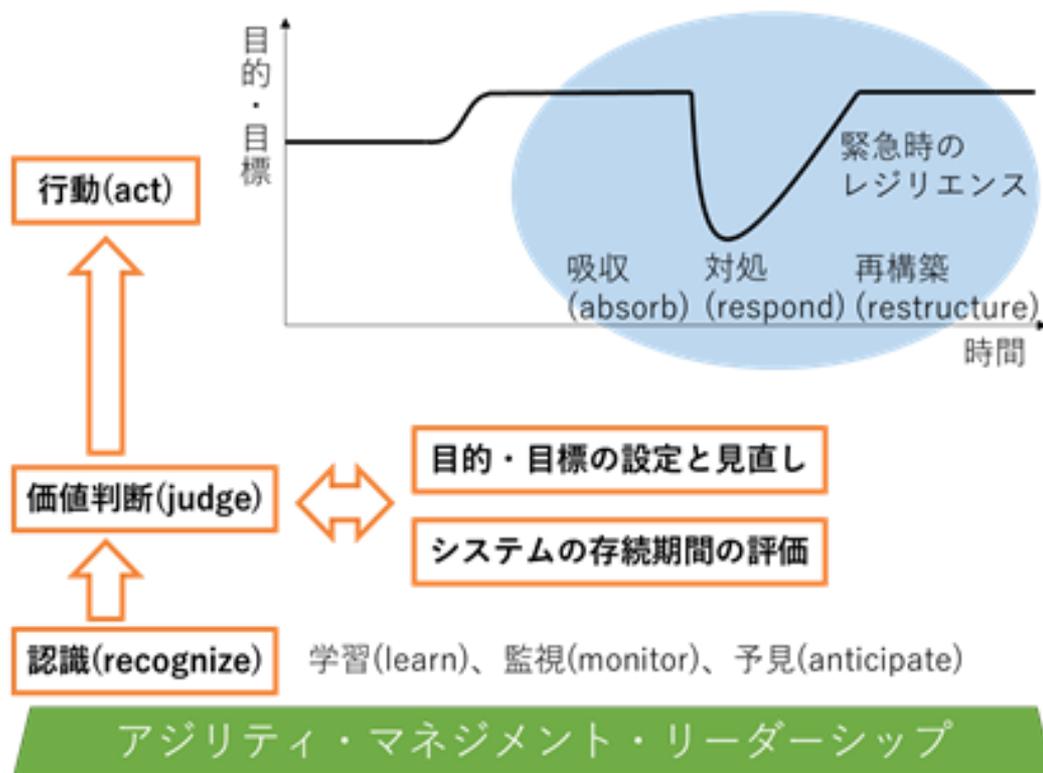


Fig.7 resilience elements of high-reliability systems

IAEA GSR Part 2 (2016)

- 継続的な安全性向上の為に必要な3つの要素：リーダーシップ、マネジメント、安全文化
- 「安全のためのリーダーシップ」とは、組織の構想、目標、戦略、計画及び目的を定めかつ統合すること、原子力安全の目的について、要員がこれを実施・約束するよう先導すること。また、基本安全原則を支持し、行動に係る期待事項を確立し及び強固な安全文化を醸成すること。

The Different between Leadership and Management

	Leadership Coping with change	Management Coping with complexity
What are we setting out to do?	1. Set Direction Develop a vision and strategies to achieve that vision; setting high but reasonable standards	1. Plan and Budget Develop detailed steps and timetables and allocate resources
How do we deliver results?	2. Align People Communicating direction to influence creation of teams and coalitions that understand vision and strategy	2. Organise and Staffing Establish a structure to achieve the plan; delegate authority and provide policies and procedures
What do we make it happen?	3. Motivate, Mentor, Inspire Energizing people to develop and overcome barriers to change	3. Control and Problem Solving Monitor and organize
What are the outcomes?	4. Produce Change Often to a dramatic degree, such as cultivating new services and new approaches	4. Produce Predictability and Order Consistently achieve budgets and targets

Source: MacKay (2008) based on materials in Kotter (2001)

レジリエンスの時代に関する再考

- レジリエンスの時代とは「変化に対応してシステムを変化させ続ける能力」が必要な時代とも言える

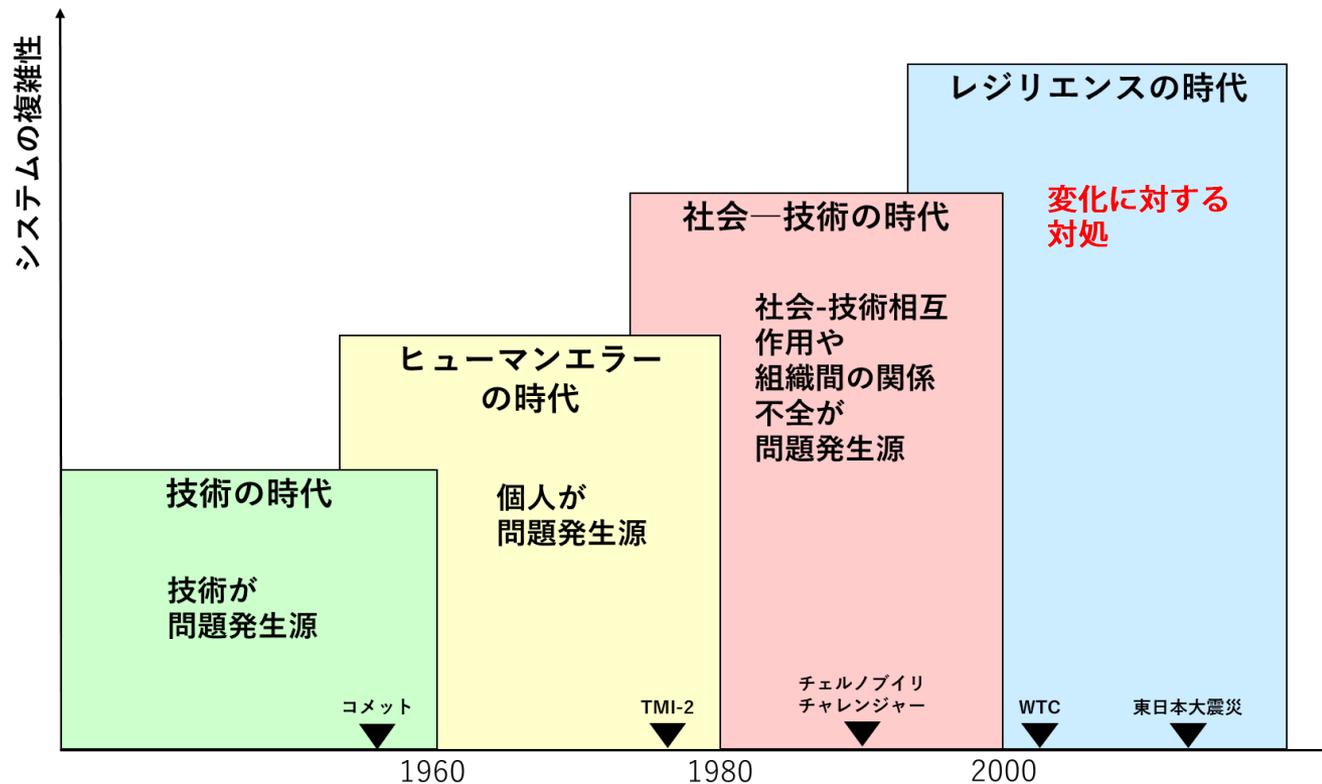


Fig.8 transition of issue of systems safety considering discussion in this study

OECD/NEA「福島第一原子力発電所事故： OECD/NEA原子力安全の対応と教訓」

- 安全の確保を「運転経験の評価と研究を通じて我々が学ぶことにつれて発展するプロセスである」とする。
 - ✓ 「運転の評価」を過去からの「学習」、「研究」を「監視」や未来の「予見」ととらえれば、提案したレジリエンスの要素のうち「認識」に相当する
- 本研究の提案に近い考え方は、世界各国における原子力安全に対する考え方としても広まりつつある。

まとめ

- 自然ハザードにさらされる高信頼性システムのレジリエンスの定義とその要素について考察
- 高信頼性システムのレジリエンスを「システムがその存続期間を通して目的・目標を保持する能力」と定義することを提案
 - ✓要素としては、これまで議論されてきたレジリエンスに必要な要素に加え、「目的・目標の設定と見直し」、「存続期間の評価」、「変化に対する「価値判断」が必要になることを示した。
- 原子力安全に関する国際的な議論も、提案したレジリエンス概念とも整合するものとして進展しつつある。

課題と展望

- 本講演で提示した観点が正しいとして、その観点で、リスク評価はどのように活用しうるのか？
- そのために、リスク評価に必要な要件とは何か？
 - リスク評価にも良いものと悪いものがある