


本研究は、原子力規制庁の令和６-８年度原子力規制研究技術基盤構築事業費補助金（原子力規制研究の強化に向けた技術基盤構築事業）の補助を受けたものである。



© JAMSS All Rights Reserved.

# 目次


1. 研究の背景と目的
2. 研究の全体計画（3か年）
3. 研究成果（STPA）
   - 3.1 適用手法
   - 3.2 令和6年度成果：STPAの適用
   - 3.3 令和7年度成果：STPAのHRA適用
   - 3.4 研究の成果と展望
4. 研究成果（FRAM）
   - 4.1 適用手法
   - 4.2 令和6年度成果：FRAMの適用
   - 4.3 令和8年度成果：FRAMの訓練評価適用
   - 4.4 研究の成果と展望
5. まとめ




© JAMSS All Rights Reserved.

# 1. 研究の背景と目的

- 原子力発電所では、事故・トラブルの対応をするため、多くの設備と多くの人がつながり複雑化している






© JAMSS All Rights Reserved.

# 1. 研究の背景と目的

- 宇宙分野も同じように、未知の環境に対応するため、多くのシステムと組織がつながり、複雑化している






© JAMSS All Rights Reserved.

# 1. 研究の背景と目的

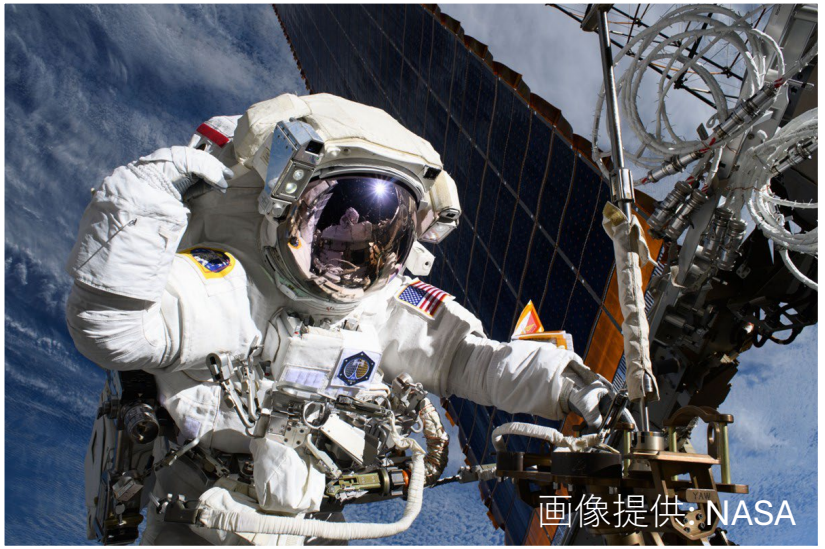
## 宇宙機システムの特徴

- 部品点数が極めて多く、システムが複雑
- 宇宙では実現象が見えず、状況把握が容易ではない（全てを地上でテストすることができない）
- 一品開発のため、データが十分でない
- 現在の技術では限界に近い設計（大きさ、重量等）を求められる一方で、何が起こるか予測が困難

**システム（ハード、ソフト、要員）の信頼性・安全性の向上が不可欠**

信頼性：定められた条件下でミッション期間中に機能・性能を発揮する能力
安全性：人的、経済的、社会的損害を与えうる事故の発生を防止する能力

- 開発の初期段階から、考えられるあらゆる危険事象(ハザード)を事前に整理し、対策を考えることが重要





© JAMSS All Rights Reserved.

# 1. 研究の背景と目的

課題：

- 原子力発電所をとりまく環境も、宇宙分野を取り巻く環境も同じように複雑であるため、多くの情報がさくそうし、うまく事故の全体像を把握できず、リスクが増加する恐れがある




Copilotで生成

- 高度で複雑な環境における情報伝達や指示の流れは、熟練者の経験に頼ってしまう傾向があり、熟練者のノウハウ（暗黙知）の伝承が重要であるが、伝承すべきことを特定しにくい



Copilotで生成

事故が発生した場合でも、冷静に対処できるようにするため、日ごろから訓練することが重要であるが、適切に訓練がされているか、訓練できていない「欠け」がないか特定しにくい



© JAMSS All Rights Reserved.

# 1. 研究の背景と目的

目的：

- 航空宇宙分野などで、システムや人・組織の関係がうまく機能しなくなるリスクを特定するために使用している、最先端の安全評価手法（STPA*, FRAM*）を適用

  - **STPA* を使って、複雑な人間・システム間の相互作用によって生まれる新しい事故シナリオ（「欠け」）を特定**

  - **FRAM*を使って、熟練者の長年の経験に基づくノウハウ（暗黙知）を抽出。さらに、ノウハウ（暗黙知）のためになる訓練シナリオの妥当性評価方法を構築**

* STPA: System theoretic Process Analysis
* FRAM: Functional Resonance Analysis Method



© JAMSS All Rights Reserved.

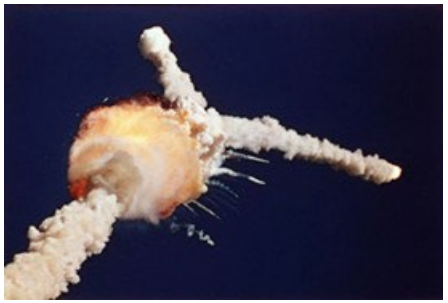
# 1. 研究の背景と目的

宇宙分野における最先端の安全評価手法（STPA*, FRAM*）例

- **STPA**
  - NASAスペースシャトル チャレンジャー事故要因分析

    部品故障の背後要因である組織間の意思疎通の洩れを発見
  - NASA火星探査機の事故要因分析

    故障を伴わず、未着陸時に着陸したとコンピュータが誤判断する状況を発見





出典：NASA

- **FRAM**
  - JAXA 天文観測衛星の事故要因分析

    観測精度を向上させる成功要因から姿勢制御のリスクを発見



出典：JAXA

X線天文衛星ASTRO-H軌道上外観図

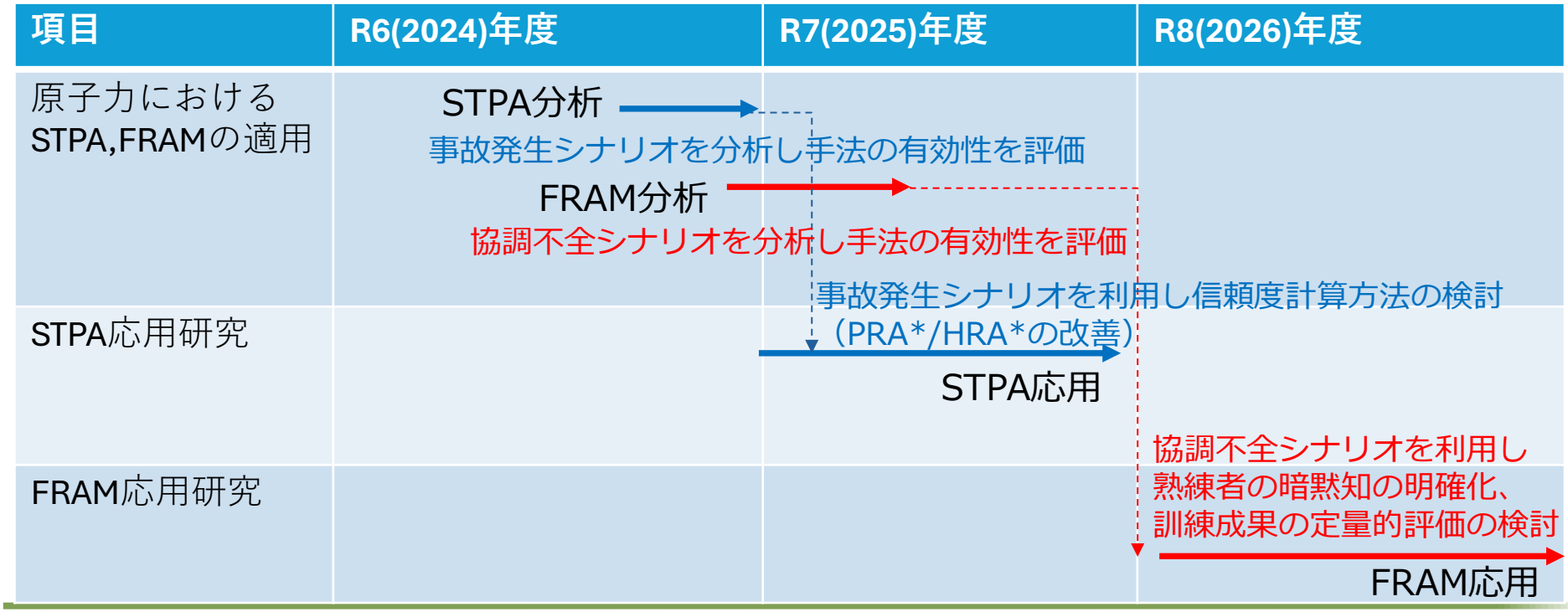
* STPA: System theoretic Process Analysis
* FRAM: Functional Resonance Analysis Method



© JAMSS All Rights Reserved.

# 2. 研究の全体計画（3か年）

- 1年目（令和6年度）：STPA,FRAMによるプラントや組織の適切なモデル化と設計やプロセスの改善につながる方法を研究
- 2年目（令和7年度）：STPAによる定量的リスク評価の精度を向上させる方法を研究
- 3年目（令和8年度）：FRAMによる事故対応訓練シナリオの定量的評価の方法を研究




* PRA: Probabilistic Risk Assessment
* HRA: Human Reliability Analysis



© JAMSS All Rights Reserved.

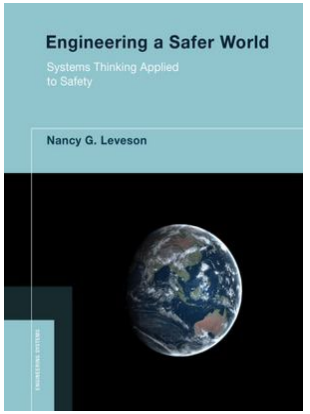
# 3. 研究成果（STPA）

## 3.1 適用手法

- STPA（System theoretic Process Analysis）：
  システム理論に基づく安全解析手法
  マサチューセッツ工科大学(MIT)のNancy.G.Leveson教授が、
  最新文献“Engineering a Safer World”の中で提唱

STPAは、複数のコントローラが介在する
複雑なシステムに対する安全解析手法

システムを構成するサブシステムやコンポーネントにおける
不具合の有無に関わらず、サブシステムやコンポーネントの
組み合わせによって発生する不具合に対する安全解析手法




Nancy.G.Leveson著
“Engineering a Safer World”



© JAMSS All Rights Reserved.

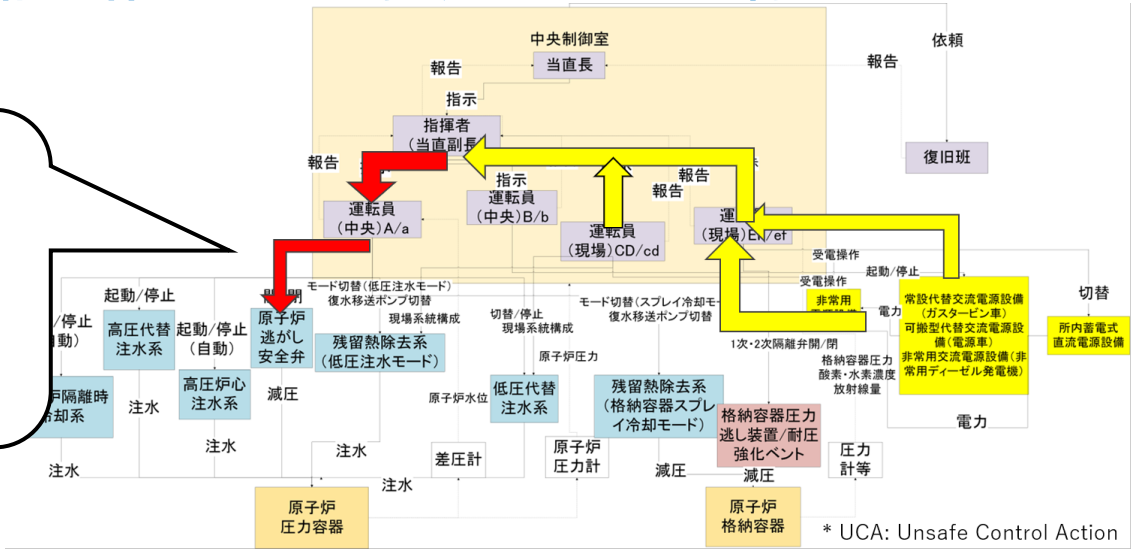
# 3. 研究成果（STPA）

## 3.2 令和6年度成果　STPAの適用

- 公開情報『重大事故等対策の有効性評価（BWR* のSBO*）』に記載されたシステム構成及び事故対応シーケンスに対して、STPAを実施し、**複雑な人間・システム間の相互作用による事故シナリオを特定**

**異なる制御ループ間の不整合の事例：**

**残留熱除去系による注水準備完了前に減圧してしまうと原子炉への注水が滞り、ハザードに至る。**




* BWR: Boiling Water Reactor（沸騰水型原子炉）
* SBO: Station Blackout（全電源遮断）

**原子力専門家コメント：**

- **STPAの試行結果は、既存のハザード解析よりも詳細かつ具体的なケースを分析できている。**
- **分析が詳細である分、対策の検討や有効性評価がしやすいメリットがある。**

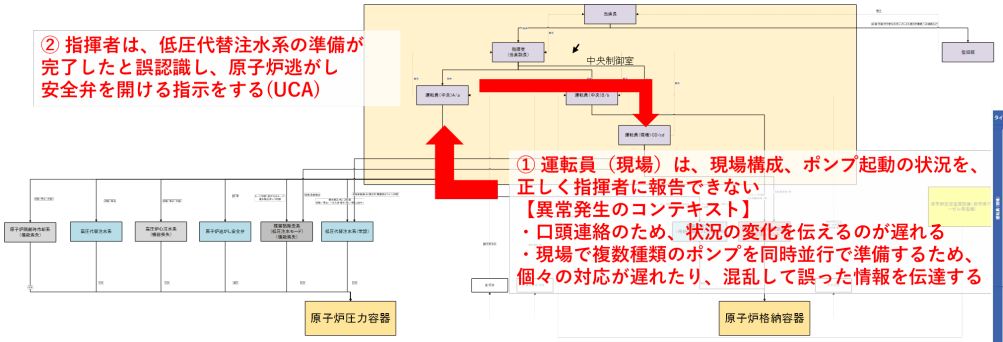


© JAMSS All Rights Reserved.

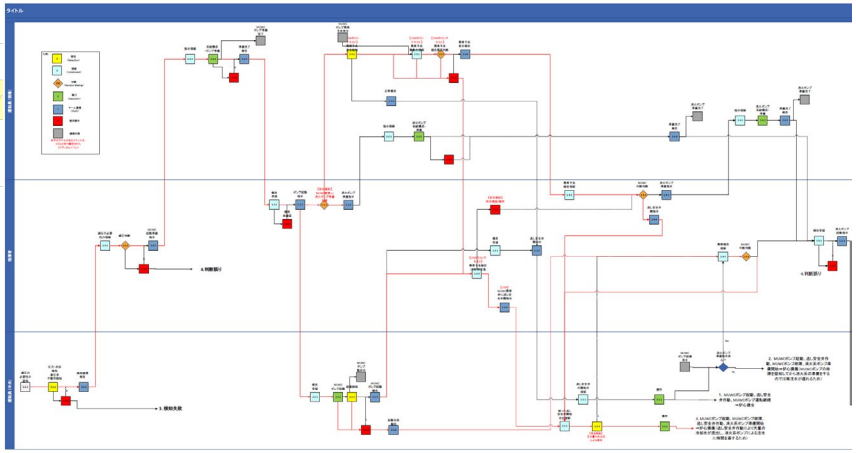
# 3. 研究成果（STPA）

## 3.3 令和7年度成果　STPAのHRA適用

- 従来のHRA＊（人間信頼性解析）手法IDHEAS-ECA*において、**STPAで分析した事故シナリオから、PIF＊(行動の背景)をシステマチックに導いて、ヒューマンエラー確率を計算**する方法を考案し試算を実施




**STPAで分析した事故シナリオを運転員応答ダイアグラムに変換し、詳細化された認知判断タスクごとのPIFとヒューマンエラー確率を計算**



＊ HRA : Human Reliability Analysis　　PIF：Performance Influence Factor
＊ IDHEAS-ECA : Integrated Human Event Analysis System for Event and Condition Assessment


© JAMSS All Rights Reserved.

## 3.4 研究の成果と展望

**成果：**

- STPAにより、多くの**設備や組織の連携を含めた事故シナリオの分析と具体的な対策**が検討ができた
- 識別された事故シナリオを他の**安全・信頼性に関する活動（HRA、実践的な訓練）への入力として活用**するプロセスの提案ができた

**以上から、STPA、およびSTPAのHRA適用は高度化・複雑化した原子力システムのリスク評価に対して有効であると考える**

**今後の展望：**

- STPAを用いることで、**次世代革新炉の想定外のリスク抽出**や**グレーデッドアプローチ（安全活動の重みづけ）に不可欠なリスクの情報**を提供できる

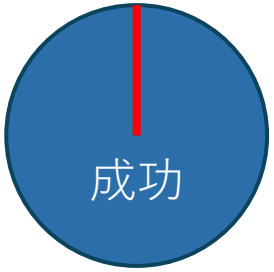


© JAMSS All Rights Reserved.

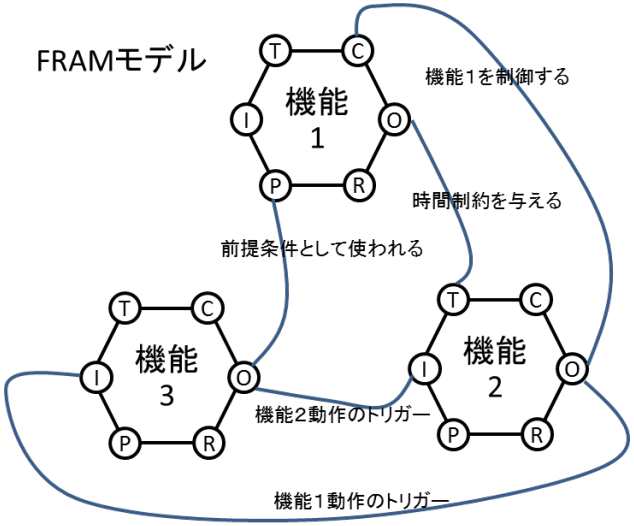
# 4. 研究成果（FRAM）

## 4.1 適用手法

- 機能間のインタラクションをモデル化
- システムが何故成功できるのかを考える（**成功要因を分析**）
- 成功要因を起点として、その裏に潜むリスク要因を識別




| 要素 | 説明 |
|---|---|
| I:Input | 機能の開始トリガーとなる入力 |
| P:Precondition | 機能の開始の前提条件となる入力 |
| R:Resource | 機能の実施に必要な資源となる入力 |
| T:Time | 機能の実施の制約となる時間情報 |
| C:Control | 機能の実施方法を変える制御入力 |
| O:Output | 機能の出力 |




**リスクを生じさせないための、**
**熟練者の成功要因である<u>ノウハウ（暗黙知）</u>を識別**



© JAMSS All Rights Reserved.

# 4. 研究成果（FRAM）

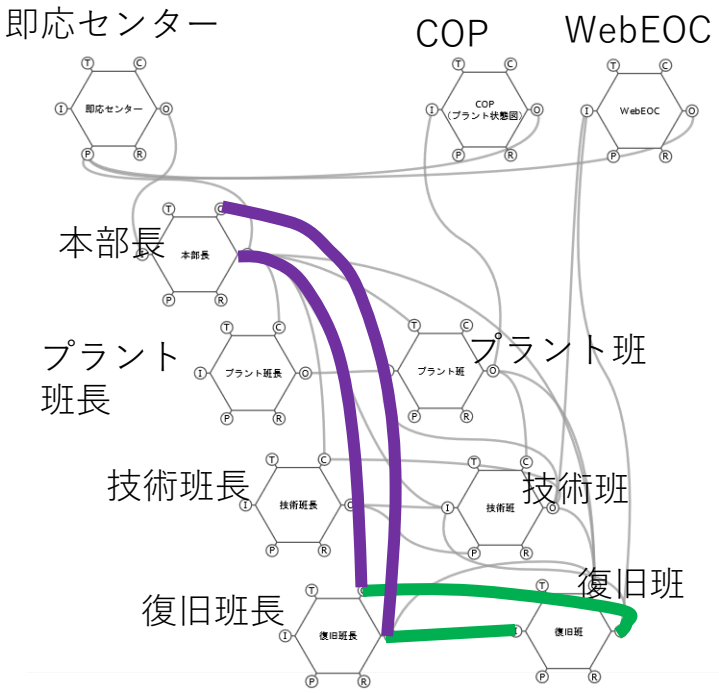
## 4.2 令和6年度成果　FRAMの適用

- FRAMを適用し、緊急時対策訓練に関与する**組織間のインタラクションの特徴を分析**

FRAMモデルの特徴：

- フィードバックループが２重に発生
- 班長一人で**ブリーフィング対応**と**班内対応**の両方を実施

**同時対応は困難な状況だが、班長は上手く対処**




**FRAMモデルから熟練者のノウハウ（暗黙知）が存在する箇所を識別**

[参考文献] 野本 秀樹 他，FRAM（機能共鳴分析手法）による成功学に基づく安全工学，SEC journal 14(1) 2018.



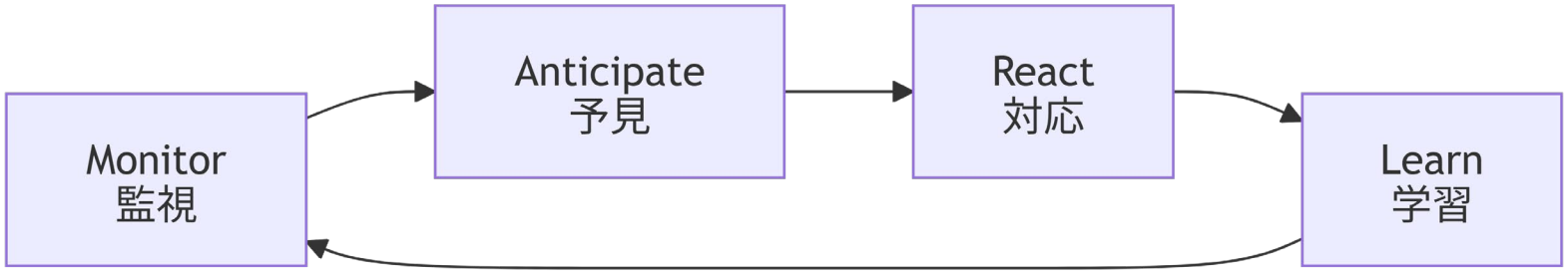
© JAMSS All Rights Reserved.

# 4. 研究成果（FRAM）

## 4.3 令和8年度成果　FRAMの訓練評価適用

- **レジリエンスエンジニアリングの４つの観点**と、**宇宙飛行士および運用管制官の訓練で必要となる能力を整理したSFRM（Space Flight Resource Management）**を参考に、**予期せぬ脅威や状況変化に対する熟練者のノウハウ（暗黙知）**を抽出するための方法を検討

| | |
|---|---|
| Monitor（監視） | 次の行動を行うために必要なことを認識・監視する能力 |
| Anticipate（予見） | 将来発生する脅威を予見・予測する能力 |
| React（対応） | 状況認識・脅威の予見結果を踏まえて対応・行動する能力 |
| Learn（学習） | 現在生じている事象からリアルタイムに教訓を抽出・学習する能力 |




[参考文献] Schmidt L.L et al., Space Flight Resource Management for ISS Operations, NASA Technical Reports Server (NTRS), 2010.



© JAMSS All Rights Reserved.

# 4. 研究成果（FRAM）

## 4.4 研究の成果と展望

**成果：**

- 宇宙分野の安全評価に活用している手法（FRAM）を適用することで、**組織のレジリエンス能力向上のために訓練すべき点（熟練者のノウハウ（暗黙知）を要する箇所）を識別**
- **FRAMにより抽出した認知・判断ポイントを起点として、レジリエンスの4つの観点とSFRMを参照した暗黙知の抽出方法を検討**

**今後の展望：**

- 熟練者の暗黙知を抽出し、**ノウハウ（暗黙知）を伝承するための訓練評価に活用可能な方法を検討**


© JAMSS All Rights Reserved.

# 補足：FRAMの活用

- 本研究ではFRAMを組織分析に適用したが、宇宙分野においては、**新規性の高い宇宙機システムの未知のリスクを識別**することにも活用している
- 原子力分野においても、次世代革新炉を見据え、**FRAMをリスク評価の根幹に据えて、種々の規制活動に活用**できる可能性のある手法であると考える

**FRAMはさらに高度化が予想される次世代革新炉の**
**リスクを幅広く把握でき、規制活動や緊急時対応**
**訓練等、幅広く活用が見込まれる**


© JAMSS All Rights Reserved.

# 5. まとめ

**研究全体の成果：**

- 宇宙等で適用される**安全評価手法（STPA、FRAM）を原子力に適用**し、**リスク分析や訓練の評価に有効**であることを確認
- **知見を手順書として蓄積**し、既存原子炉だけでなく次世代革新炉やその先の将来炉（月面宇宙炉）において更なる安全を確認する際に利用できるよう整理
- 手法の適用に際し、**社内及び外部専門家からなる体制**を構築

**研究の展開：**

- 手順書に基づく研修の実施や訓練の評価を通して、規制庁内や電力事業者の**人材育成に貢献**
- 本研究で残された課題や、次世代革新炉等を対象にした**安全評価に関する研究を今後も継続**することで、人材及び技術を維持


© JAMSS All Rights Reserved.