

原子力保全と核セキュリティのための AI技術応用

～原子力DXとAI応用～

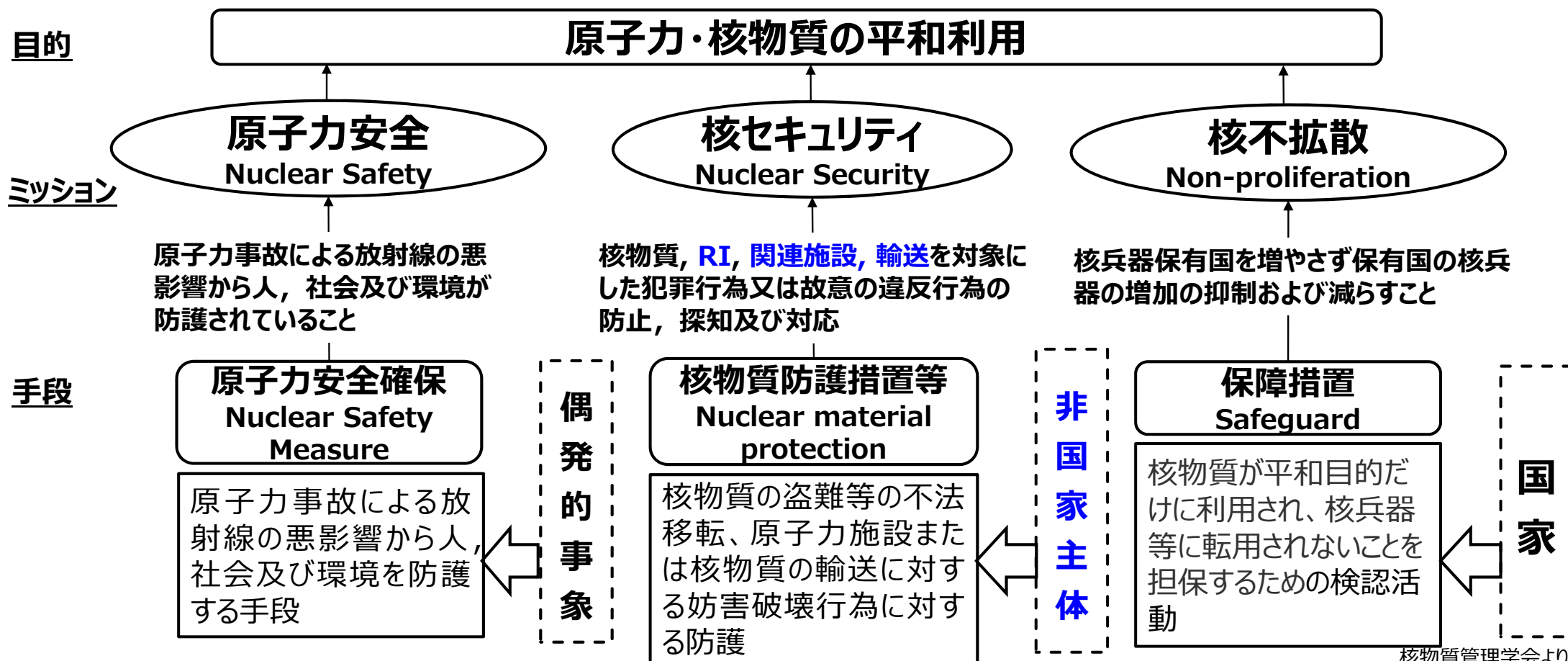
令和4(2022)年度第1回シンビオ研究談話会

2022年12月19日@京都大学宇治キャンパス



<https://www.demachilab.org/>

1. 核セキュリティと保全のためのAI技術



核不拡散、核物質防護からはじまり、核セキュリティへ

事象

対策



1968～ ハイジャック頻発

1974 インドの核実験成功

1986 チョルノービリ事故

1989 マルタ会談(冷戦終結)

1991 ソビエト連邦の崩壊

1994 バルト三国→露核兵器移送



2001 米国同時多発テロ

2003 カーンネットワーク(核の闇市場)

2011 福島第一原子力発電所事故

2014 露軍クリミナ侵攻、核攻撃準備

2016 ブリュッセル同時多発爆破

2022 ロシアによるウクライナ侵攻



東西冷戦時代
5カ国以外の核保有国
ソ連邦国家からの不信
旧ソ核物質密輸横行
消極的安全保障(NSA)

越境テロ現実化

原子力発電所 = テロの魅力的ターゲット、と認識

NSA撤回事例
NPPへのテロ未遂？

ザポリージャNPP占拠
想定を超える脅威
(BDBT*2)

1970 核拡散防止条約(NPT)発効

1975 INFCIRC/225発行*1

1978 NSGガイドライン発行

1987 核物質防護条約発効

1995 NPT無期限延期

1999 INFCIRC/225/Rev4発行

2002 米国NRC, B.5.b義務付け

2005 核物質防護条約改正

2007 核テロ防止条約発効

2011 INFCIRC/225/Rev5発行

2010-16 核セキュリティサミット

2021 核兵器禁止条約発効

2022 IAEA議長緊急声明

2022 NPT運用検討会議

核兵器の不拡散
核物質防護 (核兵器と核物質の盗取)
供給国からの核不拡散
不平等条約を敢えて承諾
NPPへの妨害破壊行為

安全・核セの共通性認識

核物質防護→(多様化と巧妙化) →核セキュリティ
世界が協力して対策
NPTへのプレッシャー

- 国家間の核不拡散 → 非国家主体(テロリスト)からの核物質防護 → テロが多様化・巧妙化し、核セキュリティへ
- 原子力発電所は3.11によりテロの魅力的なターゲットになり、2022年は国家による占拠という想定を超える事象 (パラダムシフト)
- 福島事故でも想定を超える事故が起きたが、その後、あらゆる事象への対策強化と、残る想定を超える事象へも備えを強化
- 核セキュリティと原子力安全は深層防護の概念や防止・検知・緩和・対応の段階性など共通性が高く、安全と同様に強化が可能
- 核セキュリティも、**新たな対策の強化と、想定を超える脅威への備えを強化**しなければならない。

*2:設計基礎脅威(DBT: Design Basis Threat)、 設計基礎を超える脅威(BDBT: Beyond Design Basis Threat)

*1:Information Circular (情報伝達)

変遷を続ける核セキュリティ脅威

~INFCIRC/225/Rev4

核テロの脅威

- ① 核兵器の盗取
- ② 核物質の盗取
- (③ 妨害破壊行為)



INFCIRC/225/Rev5

核テロ&社会テロの脅威

- ① 核兵器の盗取
- ② 核物質の盗取
- ③ ダーティボム用RIの盗取
- ④ 妨害破壊行為(原子力施設)



新たな脅威(手段)

- ① 内部脅威者
- ② サイバー攻撃
- ③ Stand-off攻撃



INFCIRC/225/Rev6 ?

想定を超える脅威

- ① 戦時の核セキュリティ
- ② BDBT※1のための核セキュリティ



*1設計基礎を超える脅威(BDBT:Beyond Design Basis Threat)

- 核セキュリティ脅威は現在進行形で多様化・巧妙化・拡大を続ける
- 一方、世界の核セキュリティ対策は「**新たな脅威**」「**想定を超える脅威**」に対し後れを取る
- 出町研の「**新たな脅威**」のための「**検知**」研究は、**新たな分野**であると認識されている

PPにおける検知：なぜ「検知」に着目したか

物理的防護(PP)の4段階: 抑止 → 検知 → 遅延(時間稼ぎ) → 対抗



敵を諦めさせる



不法行為の発見



時間稼ぎ



武力による制圧
(警察、軍)

- 従来の核セキュリティは外部侵入を重視し、**抑止に偏重**
- 検知は既存センサ技術を使用するのみ
- しかし、検知に失敗すると遅延・対抗も機能しないため、実は検知はPPの**ボトルネック**
- 「新たな脅威」に対する物理的防護が機能するためには、**検知の強化は重要**

*1: Incident and Trafficking Database by IAEA

*2: Central Alarm Station

a. 内部脅威者対策

- ✓ ITDB*1レポート:約100件/年の殆どに内部脅威者が関与
- ✓ 内部脅威者には出入り自由、検知が要
- ✓ 身上調査(自己申告)と2人ルールの**抑止のみ**
- ✓ 検知の現状: CAS*2の監視員が膨大な監視カメラ画像を肉眼監視:脆弱
- ✓ 「悪意行為」を第1スクリーニングして監視員をサポートする、検知の強化が必要
- ✓ 検知対象である「人間の行動」について、**最も多くの情報を含む媒体が画像 ⇒ 画像検知を採用**

b. サイバー攻撃対策

- ✓ サイバー空間の構造: NW層→制御層→物理層(機器)の3層で構成
- ✓ サイバー監視の現状: NW層のトラフィックとサーバ動作のみの**入口監視**で、**物理層侵入後の監視なし**
- ✓ 物理層侵入による不具合発生時、設備→制御→サイバーの順に原因調査、判明に**半日以上**を要する
- ✓ **早期検知の実現 ⇒ 物理層のサイバー攻撃検知が必要**

c. Stand-off攻撃対策

- ✓ ドローンやロケットランチャーによる長距離遠隔攻撃であり**抑止が無効**
- ✓ 受電設備やAM設備など、広範囲に亘る機能喪失を発生
- ✓ 現状:**唯一の対抗手段**は、日本では自衛隊の高出力マイクロ波照射装置
- ✓ ドローンが飛来する前に**スタンドオフ攻撃者を検知**することがカギ
- ✓ 検知対象である「人間の行動」について、**最も多くの情報を含むのが画像 ⇒ 画像検知が有効**

「新たな脅威」検知技術の拡がり

【原子力保全】

※機器異常検知技術をサイバー検知にも拡大

① 機器・プラント異常検知



【核セキュリティ検知】

② 物理層サイバー攻撃検知



③ 内部脅威者検知



④ スタンドオフ攻撃検知 (開発中)

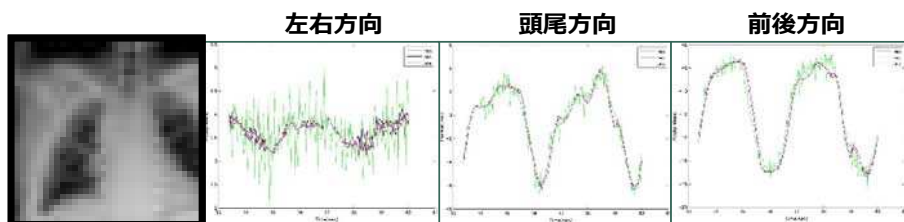


- 初期は主成分分析、画像処理、線形解析（モデル駆動型）
- 多様な状況に対応するため徐々にAIを導入（データ駆動型）

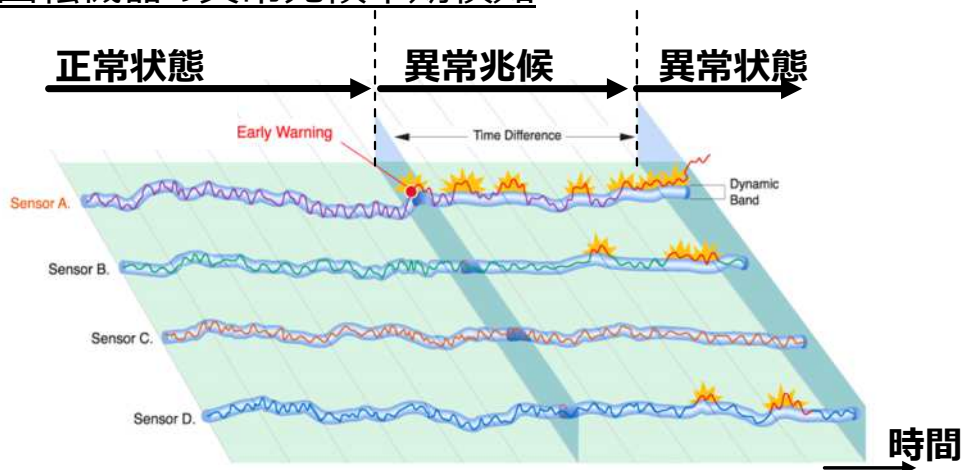
① 機器・プラント異常検知（保全）

線形手法：主成分分析を用いた未来予測

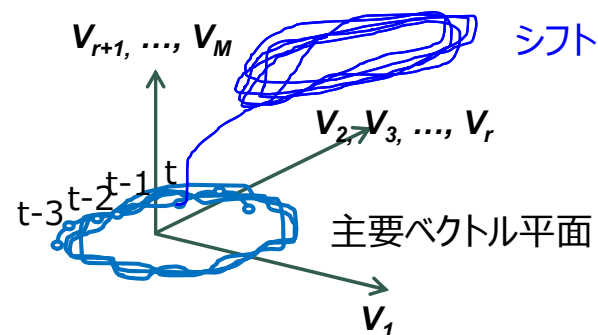
医学分野研究で開発した肺腫瘍の動態予測



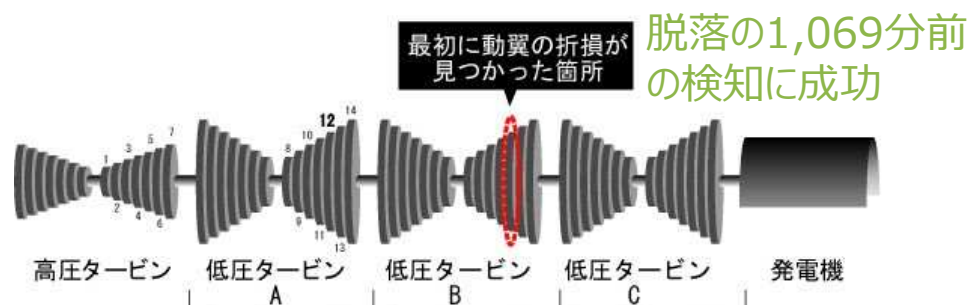
回転機器の異常兆候早期検知



時系列データの主要主成分ベクトル平面のシフトを検知することで、異常の兆候を早期検知する手法を開発



浜岡発電原子力電所低圧タービン翼脱落事故の振動センサデータ解析

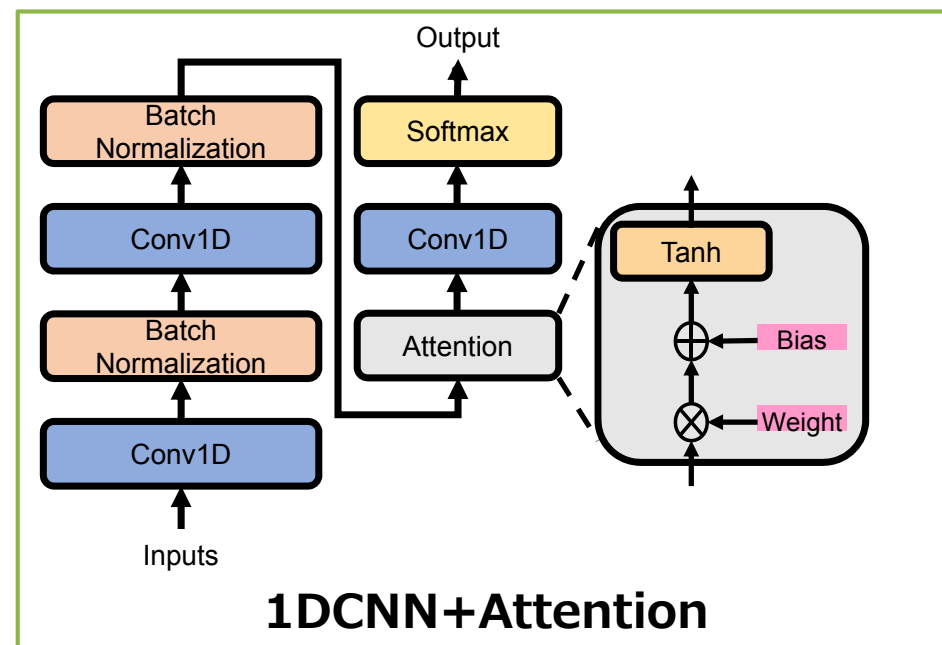
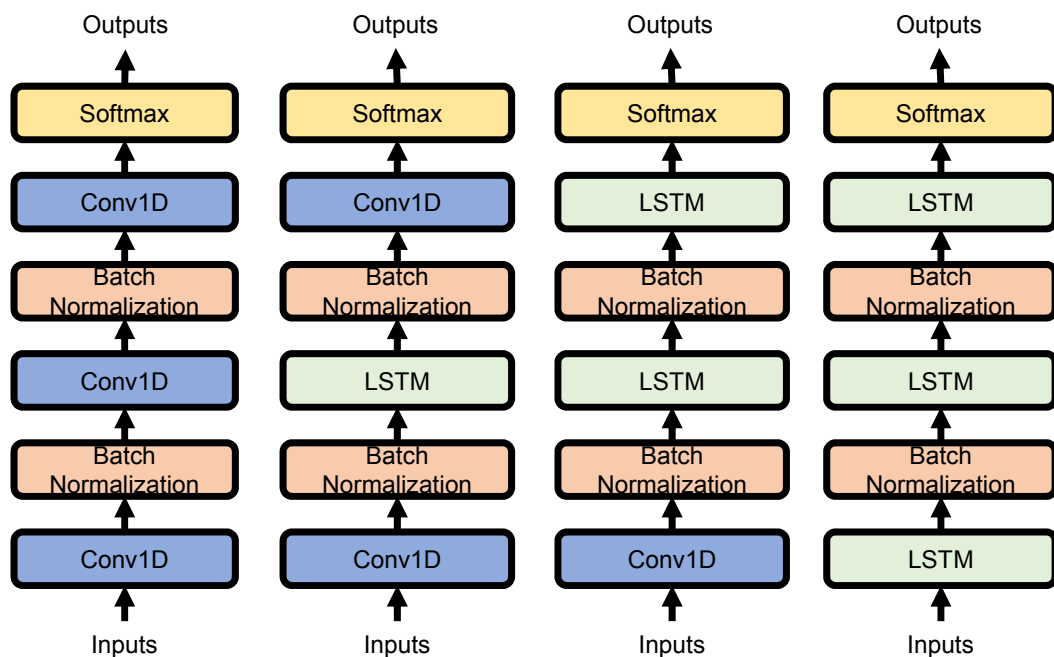


異常兆候の早期検知は可能だが、線形手法では異常の分類までは出来ない

Kazuyuki Demachi, "Movie Future Prediction Method by Combination of Principal Component Analysis and Singular Spectrum Analysis", Proc.of International Conference on Applied & Engineering Physics (2015)

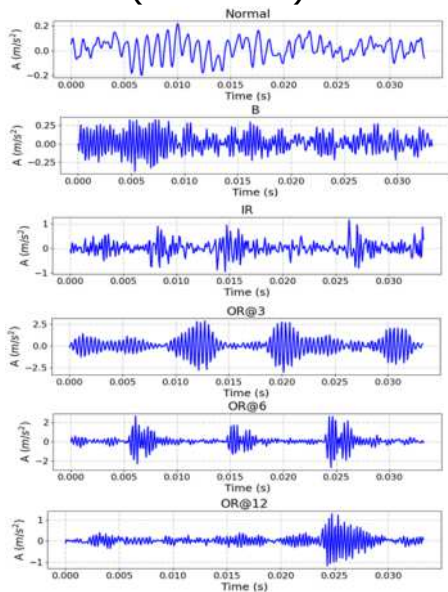
深層学習手法：過去の異常データを学習して現在の異常が過去のどの異常と類似するかを推定 = 異常の分類が可能

- 多くの深層学習モデルを開発し試行
- 既存モデルを用いるのではなく、それらを要素にさらに複雑な深層学習モデルに組み上げた
- 現状ではAttention(注意機構)を組み込んだモデルが最良のパフォーマンス
- 注意機構を時系列データの異常検知に適用するのはオリジナルのアイデア



○軸受故障の多クラス検知・分類

人工的に傷をつけた回転軸受の振動センサ値データセット(CWRU*1)



軸受の人工傷

- 従来手法：1つの異常の分類×5つの学習済モデル
- 本手法：5つの異常の分類×1つの学習済モデル
- 分類精度を維持したまま学習時負荷を大幅に軽減

*1:Case Western Reserve University

分類精度の比較

	m1	m2	m3	B	IR	OR@3	OR@6	OR@12	accuracy
従来手法	0.01	0.001		0.9880	1.0000	1.0000	0.9956	1.0000	0.9967
モデル1	0.01	0.0001	0.1						0.9967
モデル2	0.01	0.000001	0.1						0.9427

○プラント異常の多クラス検知・分類

プラントシミュレータACCORDを用いた高温ガス炉HTTRにおける仮想的異常発生時のプラントデータを学習 & テストデータに使用

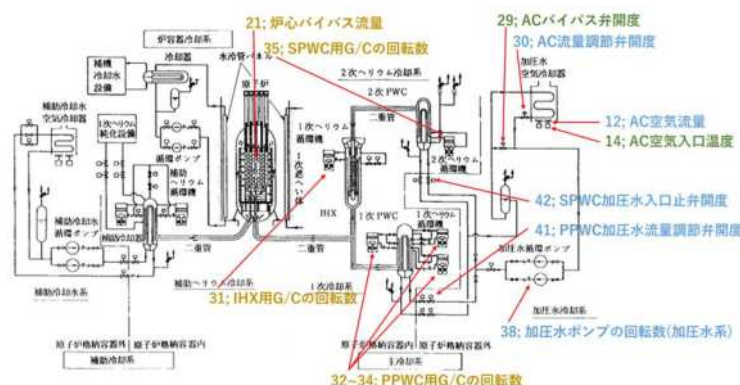
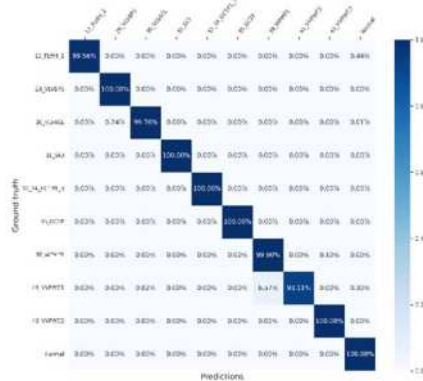


Fig. 2.4 Schematic diagram of cooling system for the HTTR

モデル5による9種類の異常の検知精度



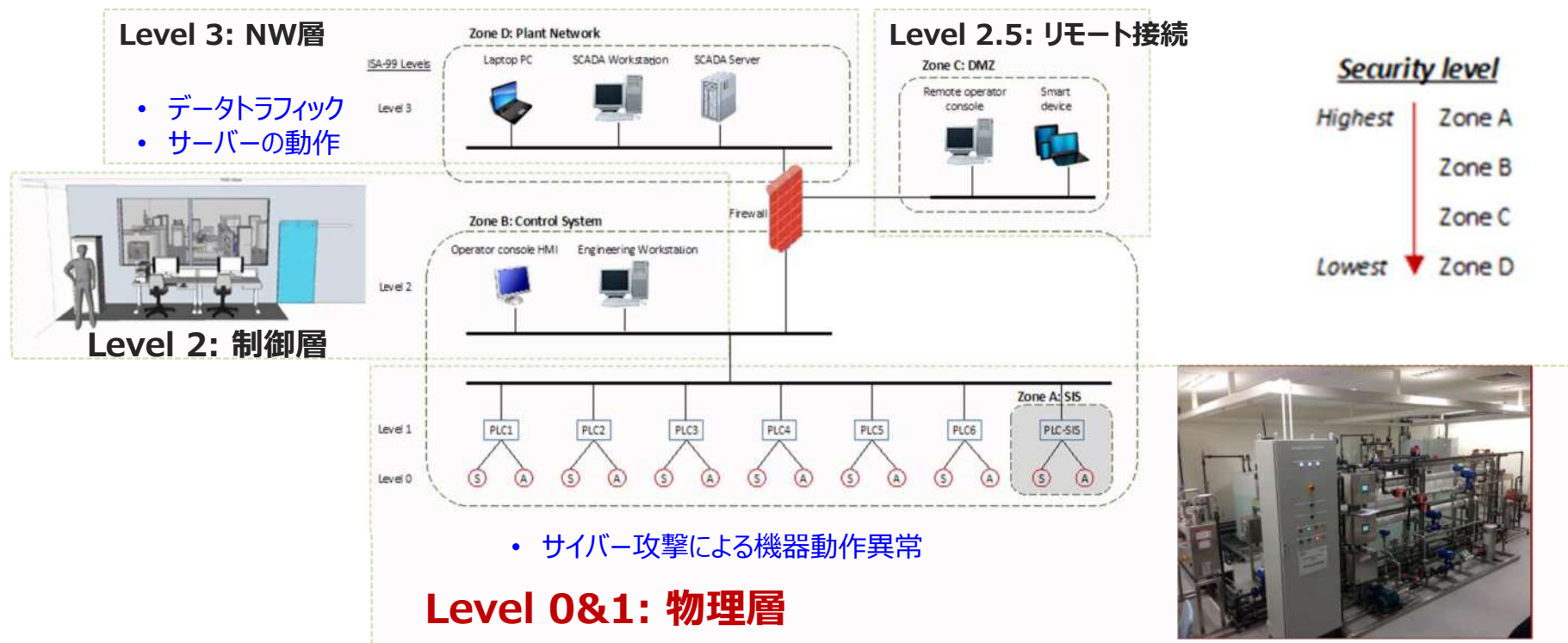
- HTTR主要機器の機能喪失時の異常検知と多クラス分類にほぼ100%の精度で成功

• D Miki, K Demachi, "Bearing fault diagnosis using weakly supervised long short-term memory", Journal of Nuclear Science and Technology, 2020
 • Kazuyuki Demachi, Tomoyuki Hori. "Preventive Detection of Equipment Abnormality from Condition Monitoring Signal Using Machine Learning", The 27th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE27) (2019)

② 物理層サイバー攻撃検知（核セ）

- サイバーテロは原子力発電所テロのなかで最も発生可能性の高い脅威
- 通常のサイバーセキュリティは、主にNW層のデータトラフィックとサーバー動作を監視
- 多重防護の観点から物理層侵入後のサイバーセキュリティが注目されている

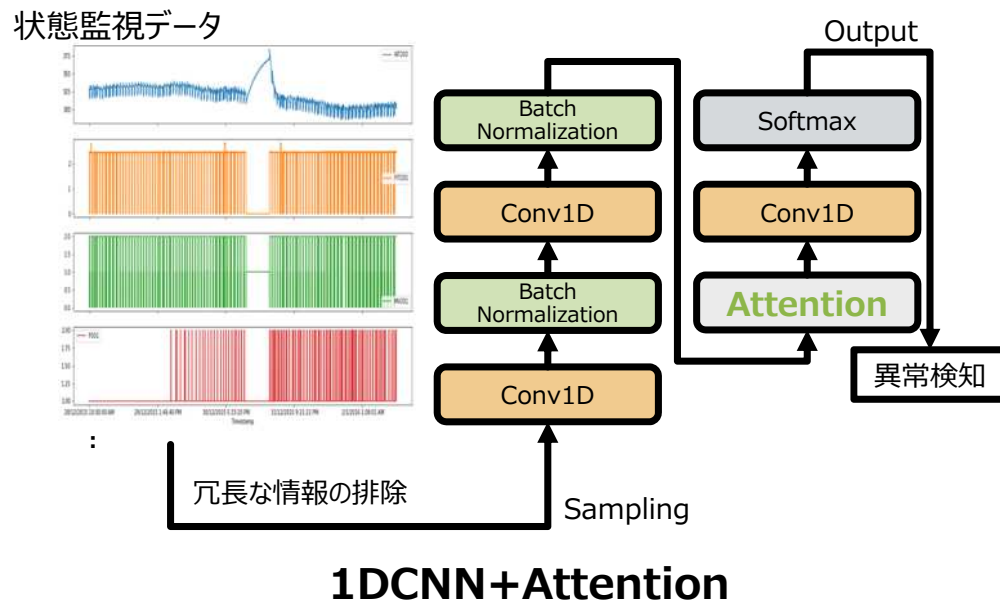
● 注意機構を用いて物理層上の機器の異常動作からサイバー攻撃の検知・分類を試みた



検知・分類手法

アテンション機構(注意機構)を使用した時系列信号データの異常検出による物理層サイバー攻撃検知手法の開発

Attentionを用いた時系列データ異常識別モデル



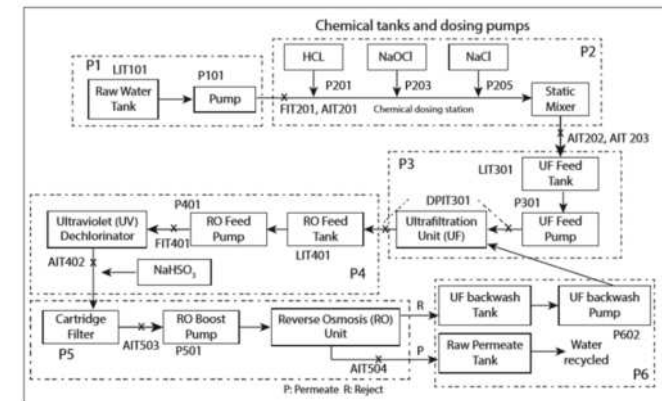
原子力プラントを対象としたサイバー攻撃時機器異常DBは現存せず、今後、プラントシミュレータを用いたDB整備を計画中

Feiyan Dong, Shi Chen, Kazuyuki Demachi. "An Attention-based Anomaly Detection Model for Ensuring Cyber Security in Nuclear Facilities", INMM 63rd Annual Meeting, July 24-28, 2022.

SWaT データベースを例題とした検知・分類

SWaT Dataset: <https://itrust.sutd.edu.sg/testbeds/secure-water-treatment-swat/>

- 最新水処理プラントの縮小レプリカから収集された
- サイバー攻撃時の機器反応をシミュレーションした51次元データ



サイバー攻撃分類精度

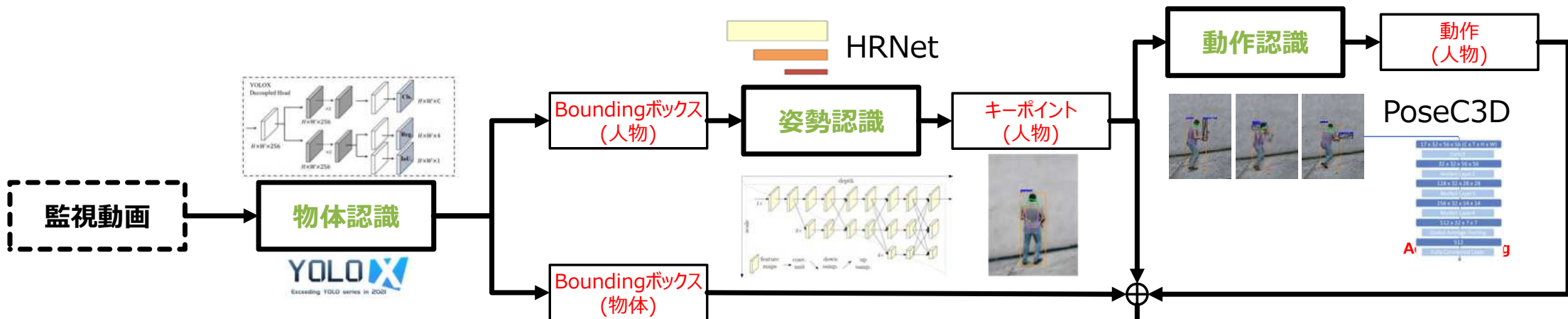
Time steps	Accucary (F1)
10	0.874
50	0.885
100	0.9002
200	0.8764
500	0.8162
600	0.8091

90%の精度

③ 内部脅威者検知 (核セ)

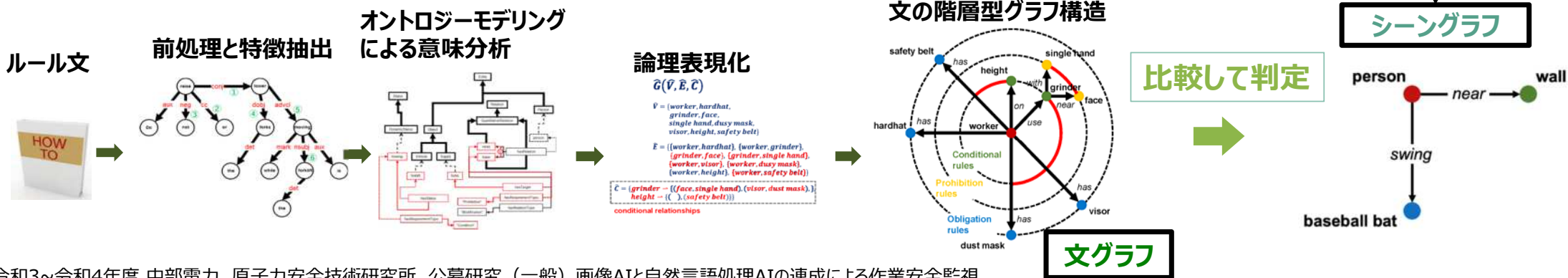
画像AIモデルを用いた悪意行為の検知手法の開発

= 物体認識 + 姿勢認識 + 動作認識 + 動作と物体の関係性解析 → シーングラフ

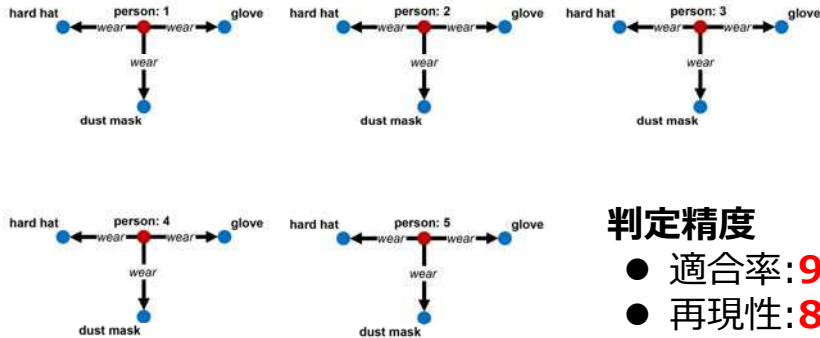


- 画像のScene Graphをリアルタイム生成
- 自然言語処理によるルールの文グラフとの比較により判定

- (人物, 近い, 壁)
- (人物, 振る, 野球バット)



● 動画のグラフ化と判定 (作業安全の例)



判定精度

- 適合率: **94.22%**
- 再現性: **85.45%**

● 核物質盗取模擬動画の判定



判定精度

- 適合率: **100%**
- 再現性: **64.71%**

Kazuyuki Demachi, Shi Chen, Yuki Yokochi, "Time series analysis for nuclear material theft identification using deep learning-based object detection and pose estimation", **Annals of Nuclear Technology(ANT)** 査読中

● CG動画 (悪意行為の例)



多様な動画を作成可能であり、撮影作業にかかる負担も無い。



Kazuyuki Demachi and Shi Chen, "Logical Representation of Rule Sentences for Malicious Acts Identification Using Natural Language Processing", **Journal of Nuclear Materials Management**, Volume 50, Number 2, June 2022, pp. 28-38(11)

④ スタンドオフ攻撃検知 – JAEA/ISCNと協力（核セ）

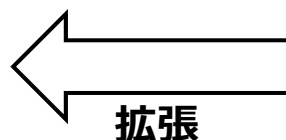
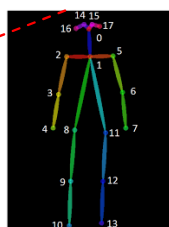
14



- 2014年10月～、フランスの7つの原子力発電所で13カ所・15回に及ぶ**ドローン接近事件**
- 2021年6月、イランの原子力関連施設に対し**ドローン攻撃**、ウラン濃縮用遠心分離機向けの部品製造施設で被害

現在進行中の研究開発協力

- 令和5年度より、ドローンカメラ画像からの悪意行為者検知



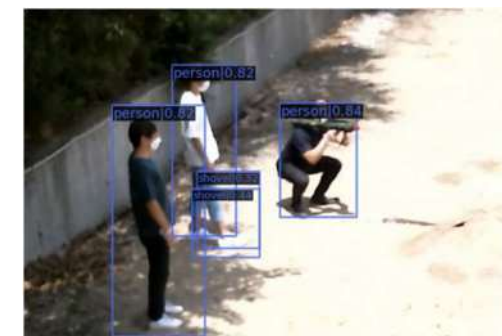
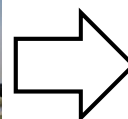
- 既存の研究計画：
ドローンに取り付けたガンマ線カメラによる広域放射線モニタリング



ISCN/PPフィールドにてテスト動画撮影(7/8)

- 1) ドローンに取り付けたRGBカメラにより上空から人物を検出
- 2) 検出した動作の同定
- 3) 悪意行為の有無の識別

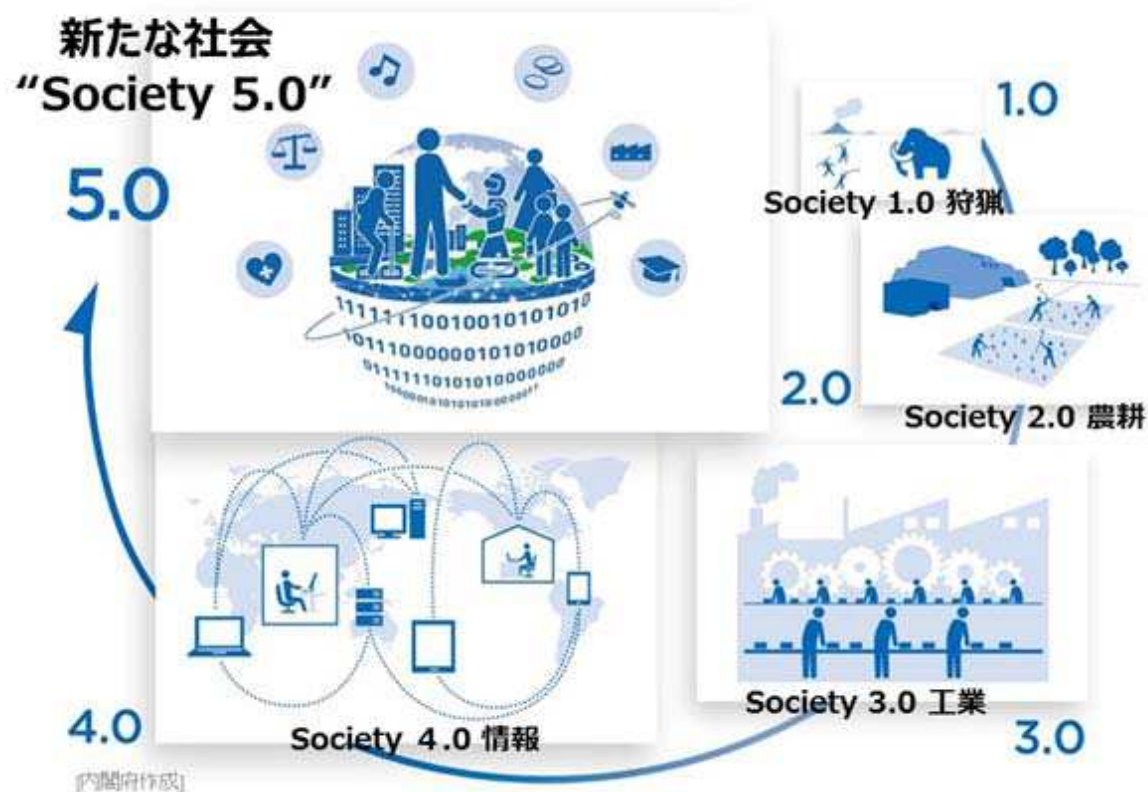
スタンドオフ攻撃検知



2. Society 5.0とDX(Digital Transformation)

Society 5.0とは

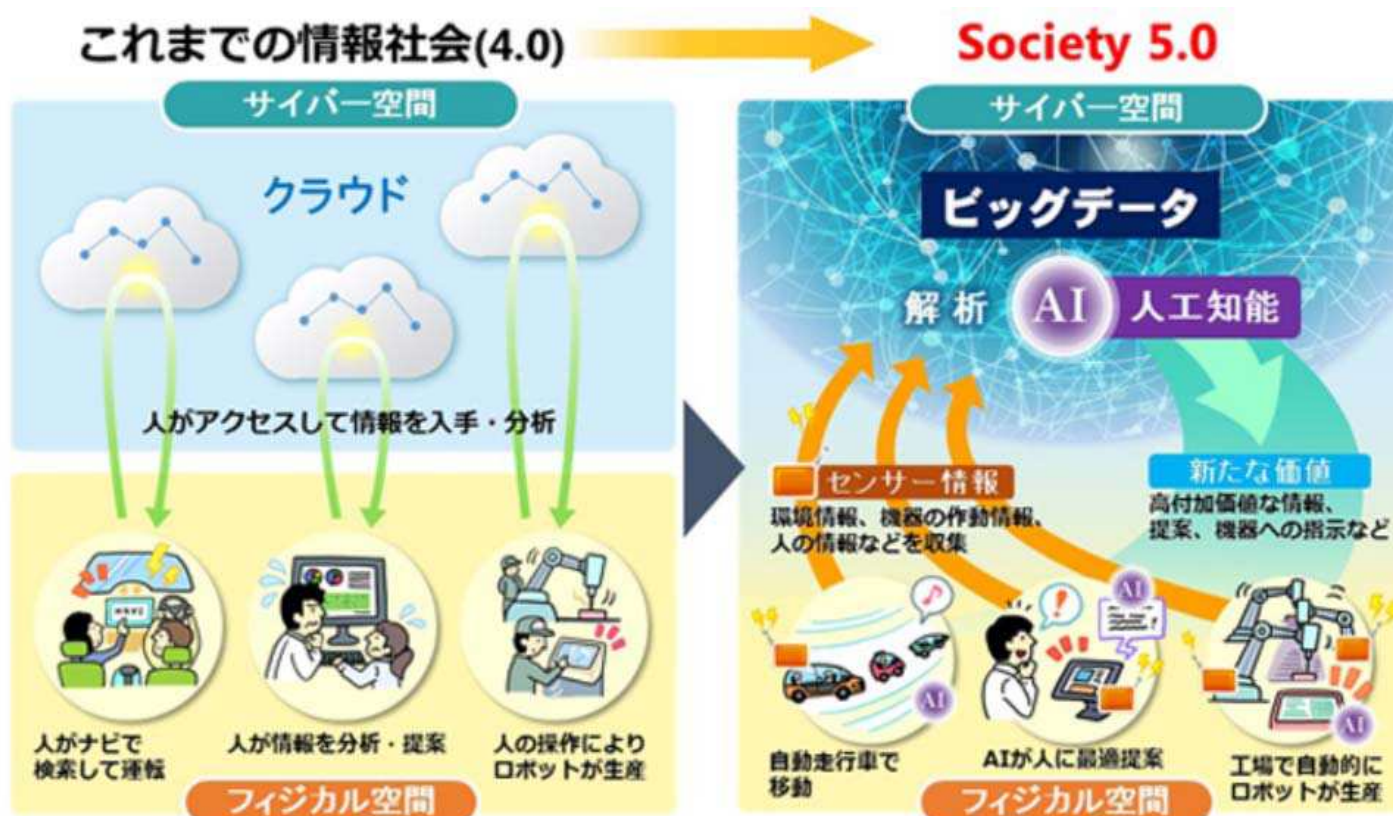
- 狩猟社会、農耕社会、工業社会、情報社会に続く、新たな社会



内閣府ホームページより：

https://www8.cao.go.jp/cstp/society5_0/

サイバー空間（仮想空間）とフィジカル空間（現実空間）を**高度に融合**させたシステムにより、経済発展と社会的課題の解決を両立する、人間中心の社会



- 人工知能（AI）が知性をもって人間のために働く社会？
- シングュラリティ
= 人工知能が人間の知能を超える転換点



内閣府ホームページより：https://www8.cao.go.jp/cstp/society5_0/

- **デジタル革新（DX）と多様な人々の想像力・創造力の融合**によって価値創造と課題解決を図り、自ら創造していく社会モデルのコンセプト
- 人はさまざまな制約から解放され、多様な生活や価値を追求する自由を獲得できる。
- 利便性や効率性の実現を主目的とするのではない

想像力・創造力

あんなこといいな、
できたらいいな



データ・デジタル世界だけ？

- 国連で採択された持続可能な開発目標（SDGs）の達成にも貢献できる概念

デジタルだけではない、
あんなこといいな、
できたらいいな



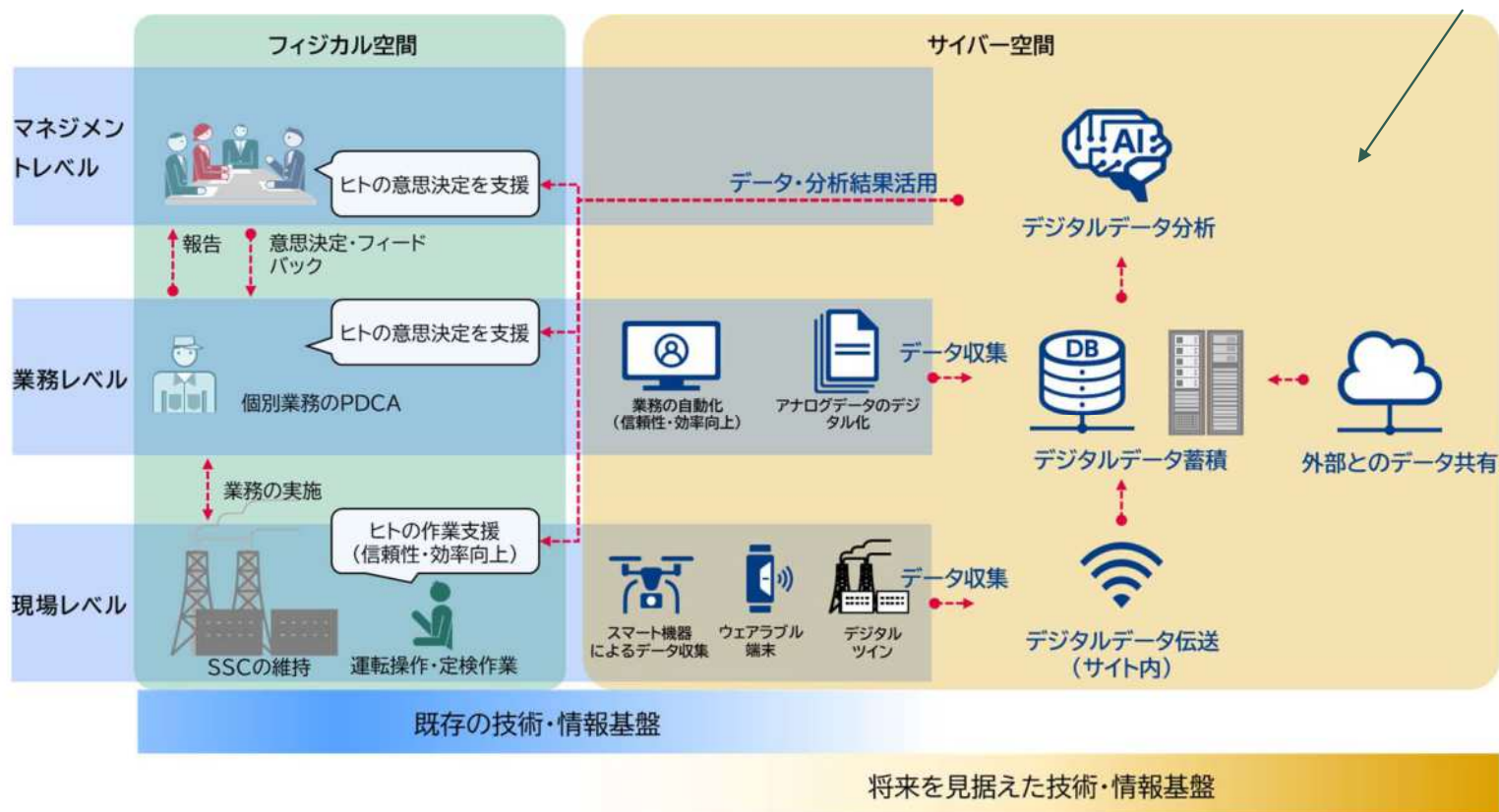
内閣府ホームページより : https://www8.cao.go.jp/cstp/society5_0/

DXの定義：

デジタル技術とデータの活用が進むことによって、社会・産業・生活のあり方が根本から革命的に変わること。また、その革新に向けて産業・組織・個人が大転換を図ること。

- デジタル(Digital)による**革新(Transformation)**、すなわちデジタルトランスフォーメーション
- 社会現象としての DX と企業の変革戦略としての DX
- 日本では、**Society5.0を実現するための手段**のひとつ

- **新しい製品やサービス、新しいビジネス・モデルを通して、**
 - **ネットとリアルの両面での顧客エクスペリエンスの変革を図り、**
 - **価値を創出し、競争上の優位性を確立すること”**
- ← ● **第3のプラットフォームを利用して、データをつなぎ、**



経済産業省：「デジタル・トランスフォーメーション」DXとは何か？ IT化とはどこが違うのか？

https://www.meti.go.jp/shingikai/mono_info_service/digital_transformation/pdf/20180907_02.pdf

<p>米国</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 巨大プラットフォーム企業が個人データを独占的に収集、急成長 • 一方で、旧産業が DX を遂げて業態を変え、競争力を維持 • データ関連の規制は緩やかだが、近年はプライバシー侵害や AI の悪用などへの懸念から企業自らデータや AI を適正活用
<p>中国</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 国家政策的な下支えにより、巨大テクノロジー企業が大規模にデータ収集、急成長 • 社会信用システムでの価値共有が広がるも、監視社会拡大の懸念も • 中国国外へのデータの越境移転については厳しい規制
<p>欧州</p>	<ul style="list-style-type: none"> • ドイツが Industry 4.0 を掲げ、製造業の高度化を中心に DX を推進 • EU 全体では、「欧州データ戦略」等でデジタル単一市場を構築 • 「GDPR（一般データ保護規則）」を施行するなど個人の権益保護を最重要視し、データポータビリティの考えも広まっている。
<p>ASEAN</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 解決すべき社会的な課題も多く、政策面の後押しも受けて、スタートアップが急速に発展するなどエコシステムを構築しつつある。

3. 原子力DXとは？

原子力プラントにおいて、様々なデータをつなぐことにより、

- ①人とモノとがつながり新しい価値 → SMRを中心とする街づくり？
- ②様々なニーズに対応 → 想定を超える環境・条件にも頑健な安全性？
- ③必要な情報が必要な時に → 安全管理業務のスマート化？
- ④人の可能性が広がる社会 → 家庭用原子炉？

原子力DXのあるべき姿を、まだ誰も知らない。
しかし、いくつかの企業はすでに取り組みを始めている。

東京大学原子力専攻(専門職大学院)の授業の演習問題として、原子力DXについて自由に考察してもらった。

すでにあるもの

- CAP自動化
- AIを活用した画像解析
- ドローンを用いた高所・危険箇所点検
- HMD (ヘッドマウントディスプレイ)
- 状態監視・診断技術 (火力発電所事例)
- プラント監視ソフトウェア
- 巡視点検アプリ
- 設計図書や運転・保全履歴のDB化
- デジタル技術を用いた教材作成

まだない?もの

- 文書支援 (ヒヤリハット、公文書添削、会議効率化)
- プラント運転支援
- 核セキュリティ支援
- 設備トラブル判断 (停止判断、保安規定)
- VRでプラントを視覚的に理解
- 避難計画に活用、スムーズな人の移動

CAP自動化

① IoTで新たな価値

01 新検査制度を踏まえた取り組み状況

浜岡原子力発電所における取り組みにおける課題や改善

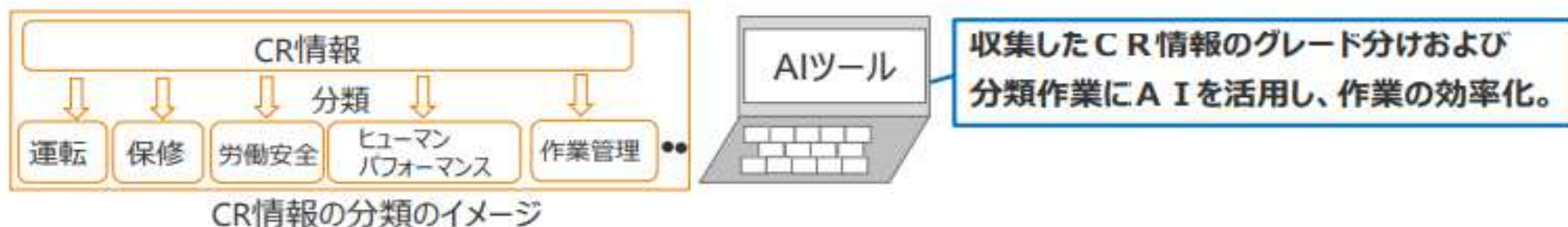


課題①：CR情報の件数は増加しており、CAPの運営に人手を要している。

改善に向けた取り組み

一例として、

- ・今年度よりAI等の活用によるCR情報のグレード分け、分類の自動化について取り組んでいく。
- ・CR情報を幅広く収集するため入力の手間を省く取り組みも行っている。

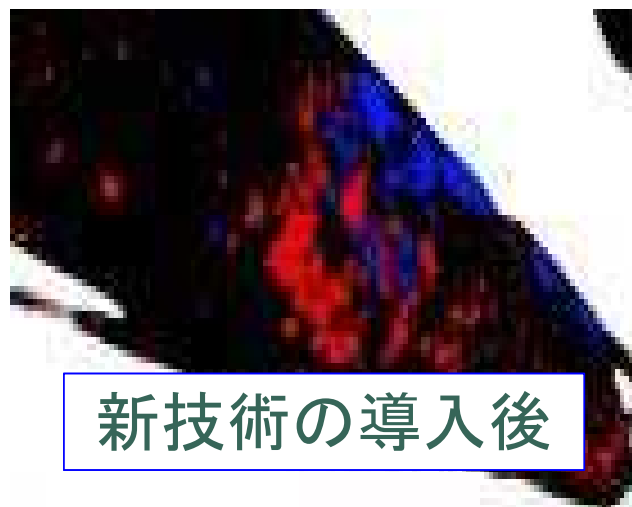


AIを活用した画像解析

① IoTで新たな価値



現状



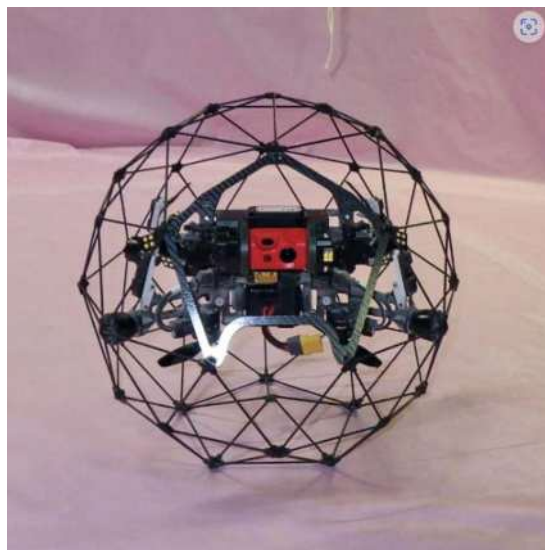
新技術の導入後

腐食検知のレベリング（土木部の研究状況）

腐食傾向のレベリングにより
設備の品質向上ができる。

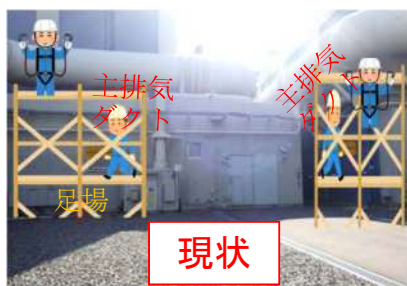
● ドローンを用いた高所・危険箇所点検

② イノベーションにより
様々なニーズに対応



中部電力は浜岡原子力発電所の設備点検で、ドローンの活用を進めている。3号機の放射性液体廃棄物貯蔵タンク内の目視点検について、ドローンの本格運用を開始。従来の人力で点検していた場合と比べ、作業量を大幅に削減できる。

作業員の負担軽減や安全性向上につながるほか、被ばく低減にも寄与。今後はタンク以外の設備点検に関しても、ドローンの活用を検討していく。



現状



新技術の導入後

例：主排気ダクト（高所）の外観点検

足場設置作業の低減により
点検コスト，労災リスクが低減できる。

● HMD（ヘッドマウントディスプレイ）



《Trimble XR10の外観》

北海道電力の火力発電所では、電力の安定供給に向けたトラブルの未然防止のため、定期的に設備の巡視点検を行っていますが、多岐にわたる設備の異常を早期に発見するためには、多くの経験とノウハウが必要となることから、巡視点検の技術を効率的に継承していくことが課題となっていました。

そこで、両社は、発電所員がこれまで職場内研修や実務により習得していた巡視点検に関する技術について、MRを活用して巡視ルートや点検内容を明確にすることで、業務の標準化・可視化ができる巡視点検アプリを開発しました。開発に際し、アプリの設計・開発およびプロジェクト管理の面でアクセンチュア株式会社の協力を受けました。

② イノベーションにより 様々なニーズに対応

- ゴーグル型、ヘルメット型、眼鏡型などがある。
- カメラやセンサー、ディスプレイが付属しており、様々なデジタルコンテンツを表示したり、操作することができる。

● 状態監視・診断技術（火力発電所事例）

③ 必要な情報が
必要な時に



I o Tを活用したオンラインモニタリング



現状



新技術の導入後

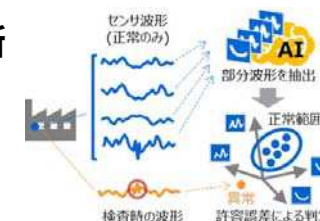
設備診断データ(振動等)の採取

オンラインモニタリングにより
設備の品質向上とデータ採取業務の省力化ができる。

A Iを活用した設備診断



現状



新技術の導入後

異常データの検知・分析支援機能

異常データの検知・分析支援により
設備の品質向上、業務の省力化ができる。

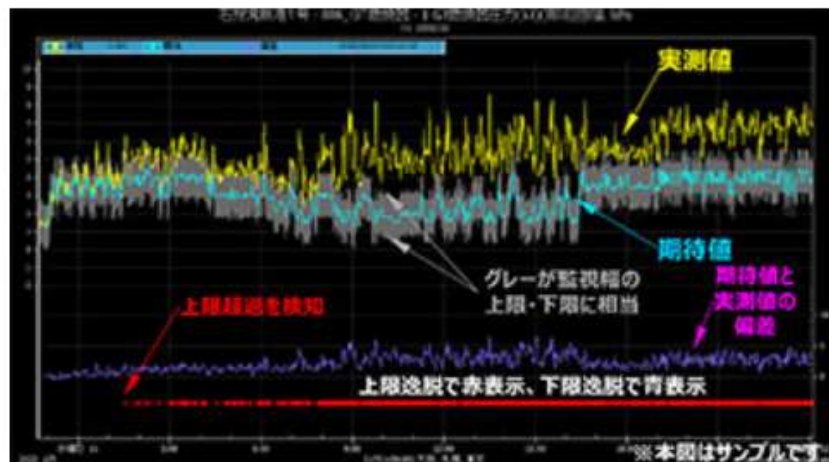
北海道電力株式会社とグループ会社の北海道総合通信網株式会社は、苫東厚真発電所構内において、ローカル5Gを活用した生産性向上や運転・保守の高度化に向けた実地検証を開始

● プラント監視ソフトウェア

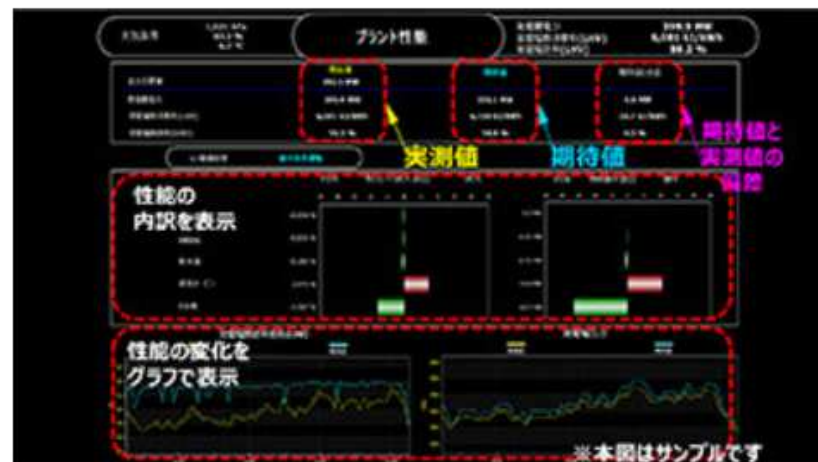
本取り組みは、東芝ESSのプラント監視ソフトウェア「EtaPRO™※1（エタプロ）」を活用しており、発電所の各設備に設置されているセンサーから得られる運転データをもとに、IoT・AI技術により算出された本来あるべき運転状態（期待値）と現在の運転状態（実測値）を比較することで、主要設備の不具合や性能低下の兆候を検知するものです。

従来、設備の不具合や性能低下の検知は、あらかじめ設定したしきい値に基づくアラート判定や約2年に1回実施する性能試験等により行っていましたが、当システムにより微細な運転状態の変化をリアルタイムにとらえることができるようになるため、これまでよりも早い段階で検知が可能となり、発電支障の未然防止・効率的な運転に寄与します。

③必要な情報
が必要な時に



《不具合の兆候監視機能》



《性能監視機能》

● 巡視点検アプリ



使用方法

- ◆ HoloLens 2内に表示された順路に沿って移動していくことで、現在地に対応した作業指示や参考資料を自動的にHoloLens 2に表示し、巡視点検をサポートします。
- ◆ 本巡視点検アプリの活用により、~~効率的な技術継承、設備の異常兆候の早期検知~~が可能となります。

③必要な情報
が必要な時に



- ✓ ディスプレイ上に現場パトロールのルート案内を3DCGで重ねて表示します。



- ✓ 確認すべき場所等に近づく、自動で確認ポイントや注意事項を記したデジタルコンテンツを表示します。

● 設計図書や運転・保全履歴のDB化

製造現場に導入したタブレット端末を通して資料を参照

③必要な情報
が必要な時に

RPAによる業務効率化の取組み

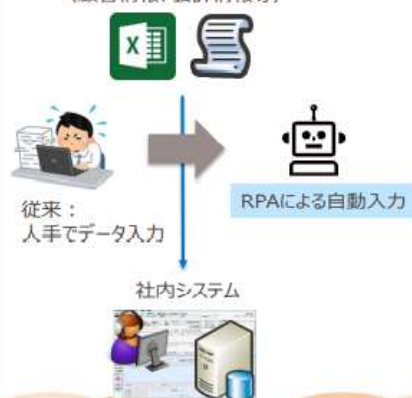
8

- データ入力作業等の定型化できる業務等について、昨年8月以降、順次、約1000台のロボットを導入
- 年間15万時間以上の業務を自動化済

社内システムへの入力作業の自動化

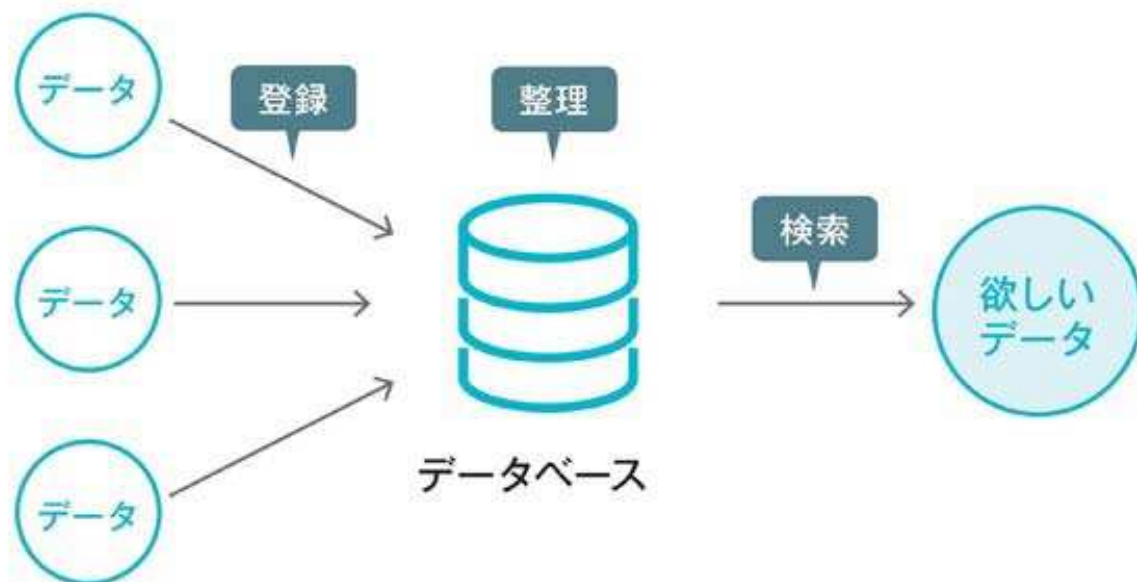
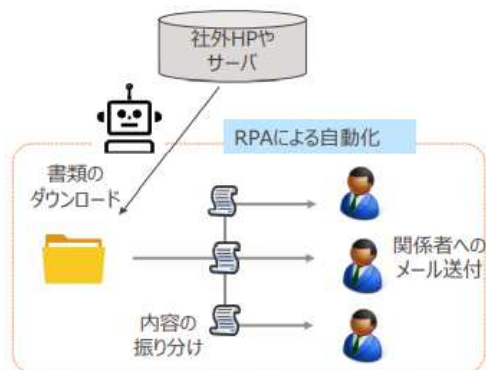
・社内システムへのデータ入力作業をRPAで自動化

エクセルや紙書類にあるデータ
(顧客情報、会計情報等)



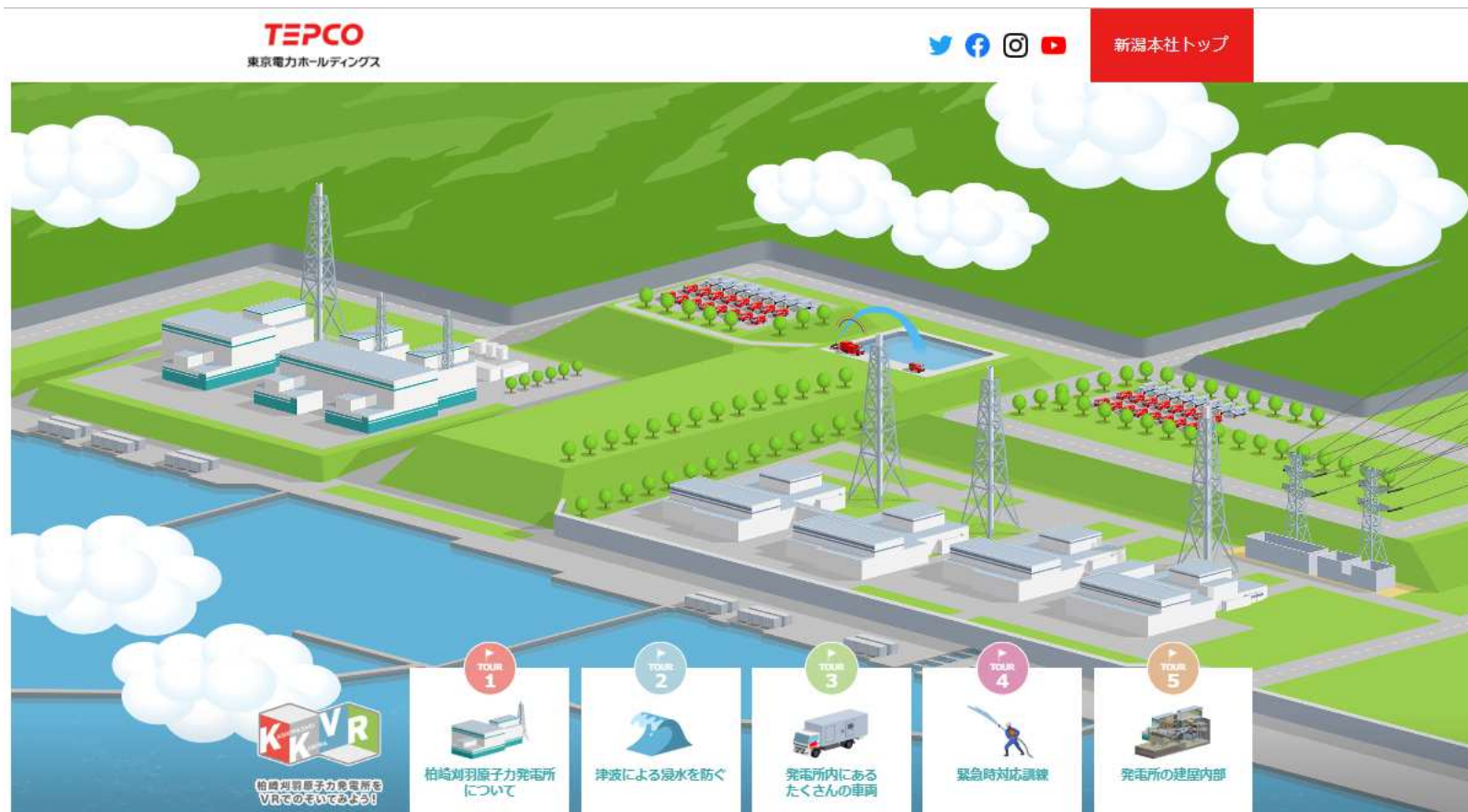
社外とのデータ授受業務等の自動化

社外からの「ファイルのダウンロード」や「内容の自動判別、関係個所へのメール送付」等の一連の業務をRPAで自動化



各社で図書のデータベースはあるが、データベースの整理や検索性能が悪い

● デジタル技術を用いた教材作成



④人の可能性が
広がる社会

KKVR 柏崎刈羽原子力発電所をVRでのぞいてみよう | 新潟本社・柏崎刈羽原子力発電所 | 東京電力ホールディングス株式会社 (tepcoco.jp)

資源エネルギー庁令和3年度原子力産業基盤強化事業

「Society5.0の実現に向けた原子力デジタル産業基盤の構想」事業

令和3年度の成果：原子力が取組可能 & 便益のあるDXを選別

技術テーマ	導入容易性				便益		
	規制 対応	技術 成熟	導入 コスト	総合 評価	経済性	安全性	その他
状態監視・診断技術	○	○	△	○	△	○	-
設計図書や運転・保全履歴のDB化	○	○	△	○	○	○	○
製造現場に導入したタブレット端末を通して資料を参照	○	○	△	○	×	○	-
ドローンを用いた高所・危険箇所点検	△	○	○	○	○	○	-
バルブ、液面計、電動機などの機器類にセンサを設置し、常時監視	○	○	△	○	×	○	-
災害対応：地図情報と進捗状況を一元管理し災害復旧作業が見える化。	○	○	△	○	×	○	○
状態報告書に対しテキストマイニングにより異常診断	○	○	△	○	○	○	-
設備・保守管理情報を電子化して統合し意思決定プロセスの迅速・透明化	○	○	△	○	○	○	-
AR（拡張現実）。必要な情報を現実世界の情報に重ね、業務の効率化	○	○	△	○	△	○	-
「いつもと違うこと」に気づく力（音、振動、臭い、計器動作等）の育成のための教材作成	○	○	○	◎	△	○	○
緊急時対応人材の育成のためのデジタル技術を用いた教材作成	○	○	○	◎	△	○	○
監視・出入管理等の情報の収集効率化及びデータ紐づけ	○	○	△	○	△	○	-
監視・出入管理等に用いる、顔認証技術・侵入監視技術・追跡技術	○	○	△	○	○	○	-
監視能力、緊急時対応能力の育成のためのデジタル技術を用いた教材作成	○	○	○	◎	×	○	○

米DOE研究・技術開発プログラム（LWRS）

- プラントの活動を個別に変革するために必要な以下の研究領域を設定。
 - ① 原子力発電所の現場作業員のヒューマンパフォーマンス向上
 - ② 定検時の安全性と効率性
 - ③ オンラインモニタリングと情報の統合
 - ④ 統合されたオペレーション
 - ⑤ 自動化されたプラント
 - ⑥ ハイブリッド制御室
- 他産業には遅れるものの、デジタル化を始動
- NRCによる原子力産業界へ「導入が有益なデジタル技術」の一斉アンケート、結果をweb公開

国内の原子力産業の現状

- 個別のデジタル技術研究・開発の事例は多い
- あるべき将来像を定義したうえでの集中的・効果的な研究・開発ではない（技術情報基盤の土台がない）
- 導入のための業界ルール等も全く考えられていない（原子力以外の慣習等に対処するための基盤・文化がない）
- 極めて厳しい規制や安全性への影響評価の労力とコストを懸念し、そもそも導入に慎重



- しかし、DX実用化の鍵は、「いかに豊富な教師データを持つか」が最後に勝敗を分けること
- 保守管理データ等を長年にわたり豊富に蓄積した原子力業界こそ、日本のDXの拠点となる潜在力

4. 原子力DXの課題とその解決策は？

各電力会社・メーカー社でDXへの取り組みはあるが、原子力ならではの困難もある

課題1：規制対応 → 新しい技術に対する原子力の規制が厳しいこと。

課題2：情報セキュリティ → NW環境の整備が困難(Wifi導入でノイズや情報漏洩)

課題3：人材不足 → 新技術の知見に乏しい（社内他部門でのDX導入も初耳など）

課題4：開発予算 → 導入コストが捻出できない（再稼働が遠いプラントは特に）

「課題 1 : 規制対応」への対策

- どの領域はDX化できるのか、どの領域は適用できないのかという整理
- 火力発電所やその他業界における最新の実績を調査して、原子力発電所に適用できる実績を整理する
- そのためのWGを設置
- 将来的に、WGで作成した資料を用いて、規制側とコミュニケーションを取る（規制委員会の技術情報検討会等）

「課題3：人材不足」への対策

そもそもとして、

- 昨今、AIなどに興味を持ち原子力系に進学する学生が増えているが、原子力に未来があるのか**不安**を感じ、**優秀な人材ほど他分野に離れていく**。
- 原子力DXの主な担い手となる学生を、**再び原子力に惹きつけねばならない**。

DXプラットフォームを、学生が主体的に参画できる人材育成の場として提供、

- 原子力DXのためのハード&ソフトインフラ整備
- 原子力DXを研究テーマに掲げる学生同士の情報交換
- 学生による研究開発成果のプラットフォーム上での共有
- Society5.0実現のためのボトムアップ効果



日本版DXの拠点として魅力度確保し、優秀な学生を再び原子力に惹きつける

「課題4：開発予算」への対策

第6期科学技術イノベーション基本計画 (第6期基本計画)

- Society5.0実現に向けた2030-2050の中長期計画
- JSTに10兆円大学ファンド

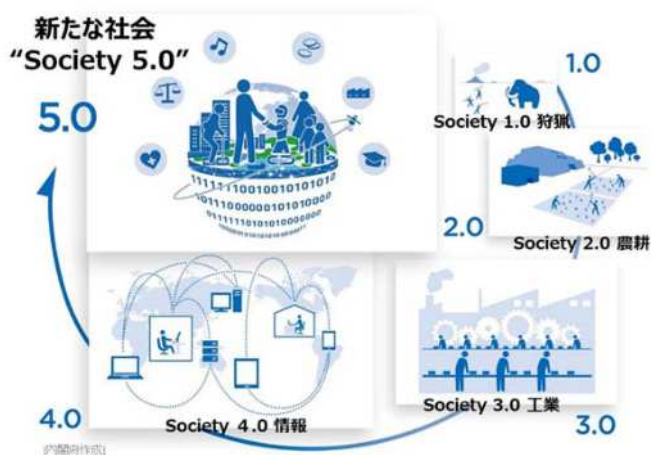
統合イノベーション戦略(MEXT)

- 10兆円規模の大学ファンドが牽引する異次元の研究基盤と大学改革
- 2024年度から運用目標益約3000億円を5~7大学に分配
⇒東工大と東京医科歯科大の統合

脱炭素に向けた次世代技術とイノベーション(資源エネルギー庁)

- 2050年のCNには原子力が必須、原子力には安全の確保が必須
- 2050年に向けたイノベーションのための3つの要請：
①セキュリティ維持、②パリ協定実現、③デジタル化への対応(Society5.0)

Society5.0



- 大学との連携し、10兆円ファンドを活用
- 連携講座など

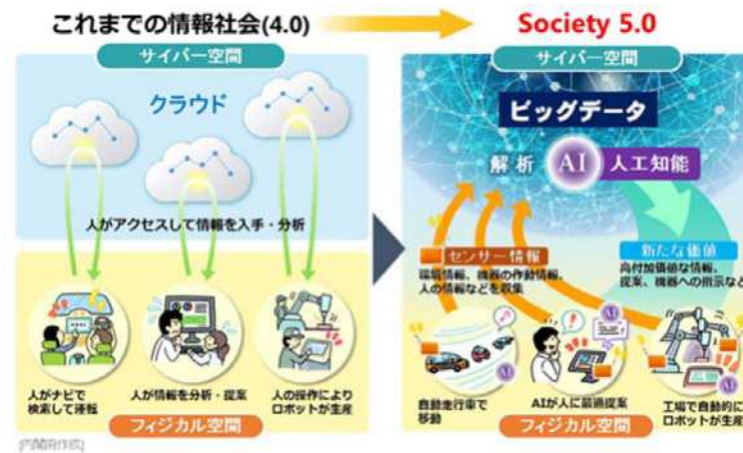
5. トップダウン型原子力DX

いまのDXは、本当にSociety5.0を満足しているか？

Q1. この内閣府の案は、DXを実現容易性を重視したブレークダウンに過ぎないのでは？



Q2. いまのDXは、せいぜい Society4.5なのでは？



Q3. 真のSociety5.0とは？

[No one knows]

ボトムアップ型DX (五月雨方式)

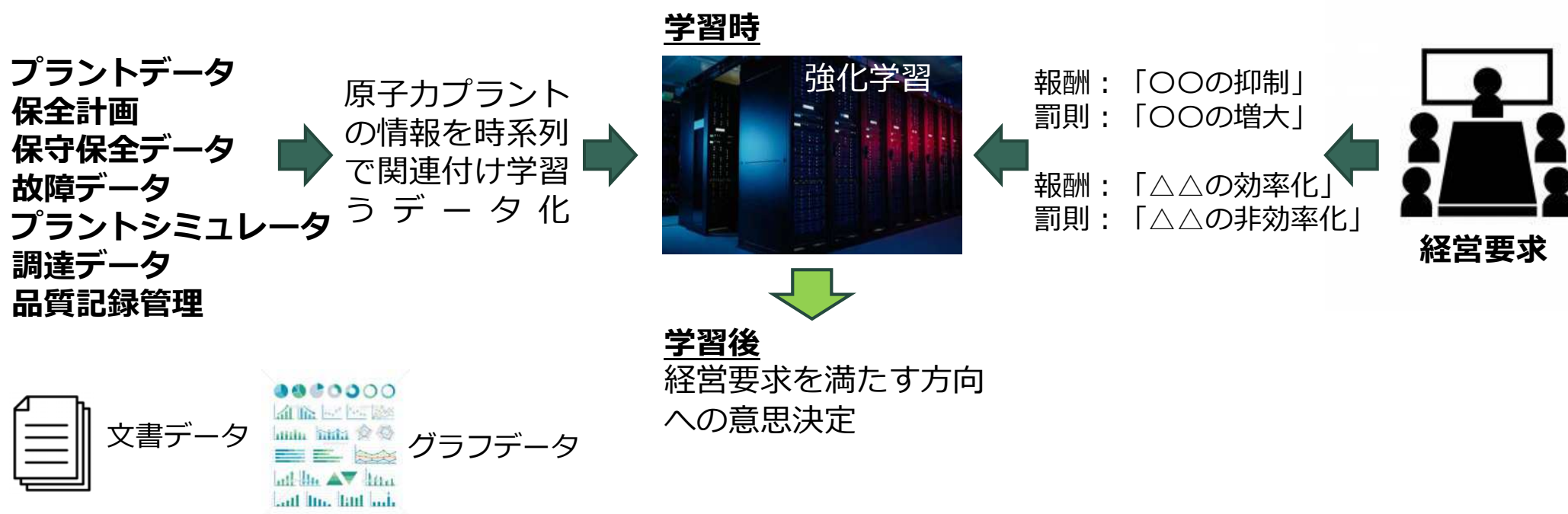
- 現状のほとんどのDX化の手段
- デジタルデータを使った個別業務の改良に留まっているのでは？
- せいぜい、Society4.5ではないのか？

トップダウン型DX (全体方式)

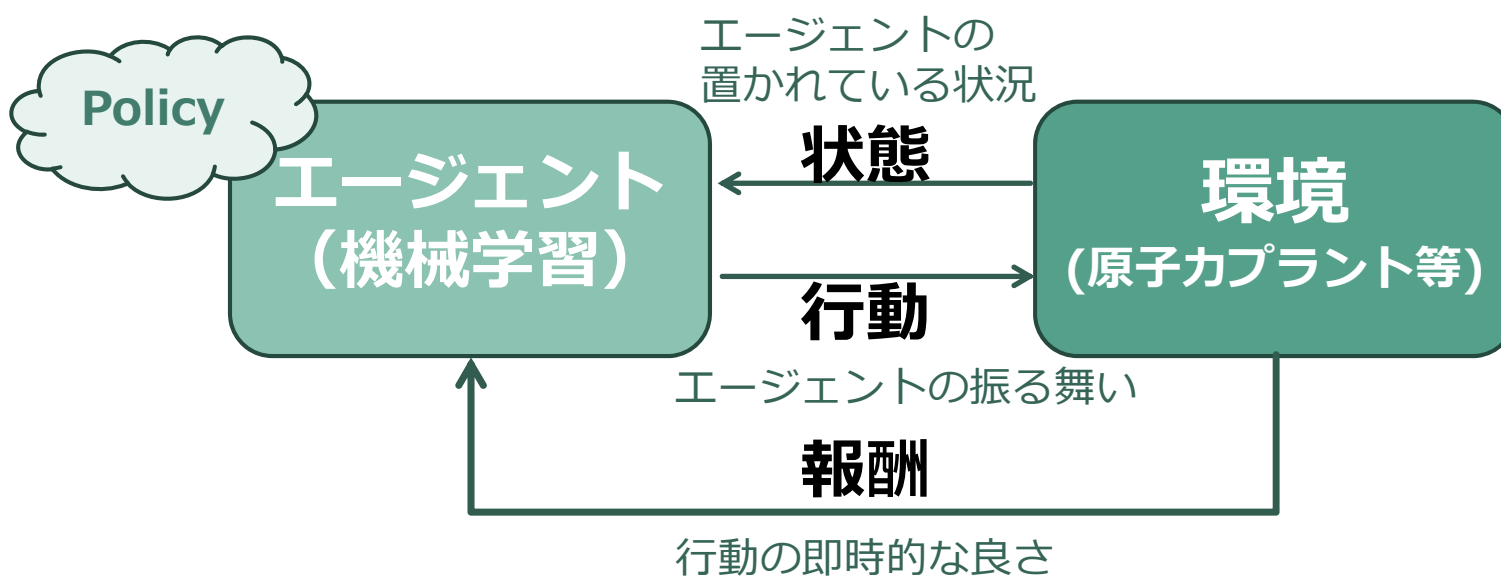
- 現状、全く見当たらない
- Society5.0に合致する
- 原子力に関わるあらゆる活動を包絡
- 異種データ同士をどう繋げるかが課題
- 重厚長大が難点、軽量化が必須

トップダウン型DX（全体方式）の概念

強化学習AIに原子カプラントのあらゆる情報を学習させ、経営要求に対して強化学習における「報酬」を設定することで、意思決定を自動出力させる



- 教師あり／なし学習とは異なり深層学習
- 自ら試行錯誤を繰り返し、適切な制御方法を学習していく



ボストン・ダイナミクスのAIロボット犬

6. 核セキュリティDX(案)

想定を超える脅威

- ① 戦時の核セキュリティ
- ② BDBT*1のための核セキュリティ



- 核セキュリティ脅威は現在進行形で多様化・巧妙化・拡大を続ける
- 一方、世界の核セキュリティ対策は「**新たな脅威**」「**想定を超える脅威**」に対し後れを取る

BDBTに対し、規制も事業者も互いに丸投げし責任回避

規制：航空機衝突などを想定した「特重」で思考停止

事業者：BDBT*1は国の管轄だからと「特重」以外は対応しない

脅威の規模も種類も多すぎて何も決められない(by インタビュー)



第1段階：机上訓練で「想定外でした」を減らす

- 検討すべき状況が多様過ぎるため、まずは、コストのかからない**机上訓練**
- できるだけ多様な状況を想定し、現能力でどこまで対応可能かを見極め



第2段階：机上訓練で「想定外でした」を減らす

- ◆ プラントシミュレータをサロゲート化、安全SAMと核セキュリティPPをRPG化
- ◆ エージェント = PRG、環境 = サロゲートAIとする強化学習モデルを開発
- ◆ BDBT時における、「人」と「ハード」の**最適対応案を提示**
- ◆ **充分に対応ができない状況**に対しても、影響緩和のための**最善案**

*1設計基礎を超える脅威(BDBT:Beyond Design Basis Threat)

「想定を超える脅威」への最適対応案提示システム

- 地道に開発してきた①～④の手法を、プラントシミュレータ&机上演習 & レジリエンス指標と結び付けることで、**想定を超える脅威への最適対応案を提示するための手法の提案**に繋がった
- それからしばらくして、2022年3月に露軍がザポリージャ発電所を占拠

(開発中)

① 機器・プラント異常検知



② 物理層サイバー攻撃検知



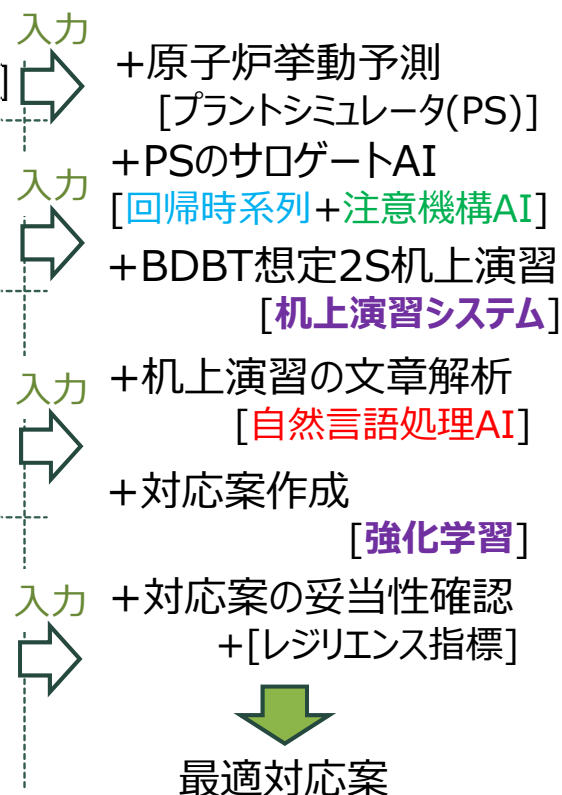
③ 内部脅威者検知



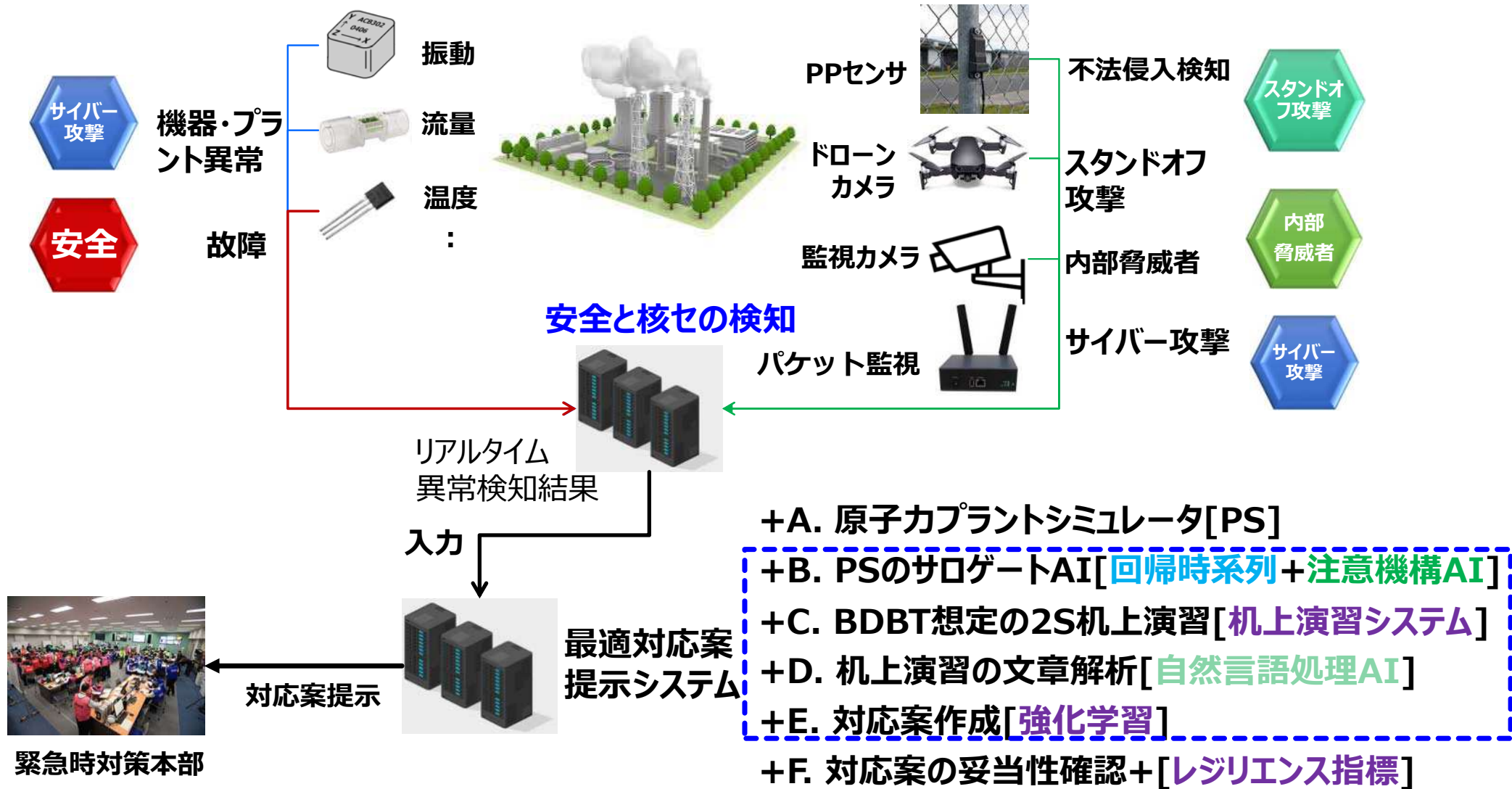
④ スタンドオフ攻撃検知 (開発中)



⑤ 最適対応案提示システム



強化学習を活用したBDBT時の最適対策提示システムの提案



○サロゲートAIモデルとは

- ◆物理モデルの入力&出力データを教師データとして学習し、再現できる
- ◆プラントシミュレータの十分な学習データがあれば、回帰時系列AIモデルの活用で技術的には難しくない
- ◆学習後の計算コストが低い（速い）というメリット



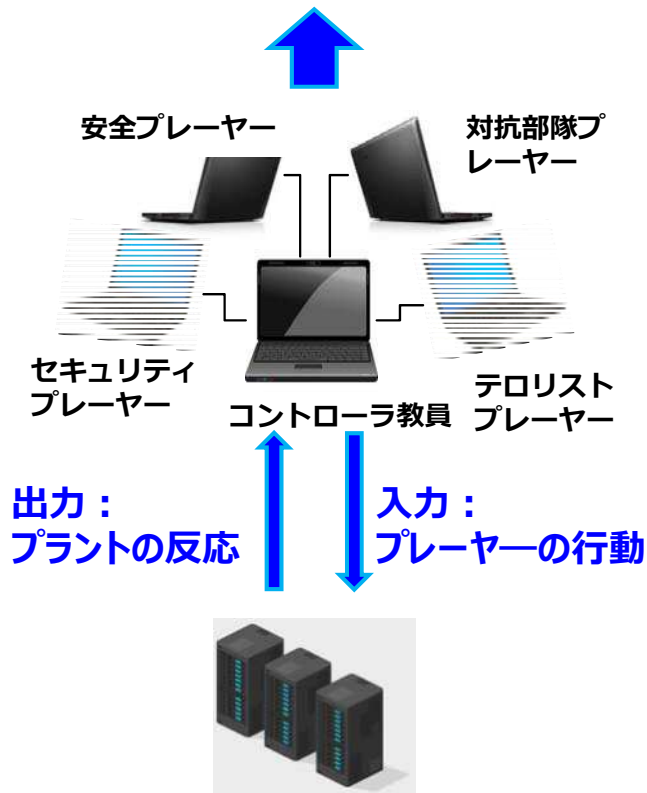
物体検出におけるアテンション機構の特徴量マップ (参考)

○注意機構AIを用いた時系列予測

- 入力データのどこに注目すべきか動的に特定するモデル
- 直近の過去のデータに縛られず、既存の回帰モデルに比べ高い成績

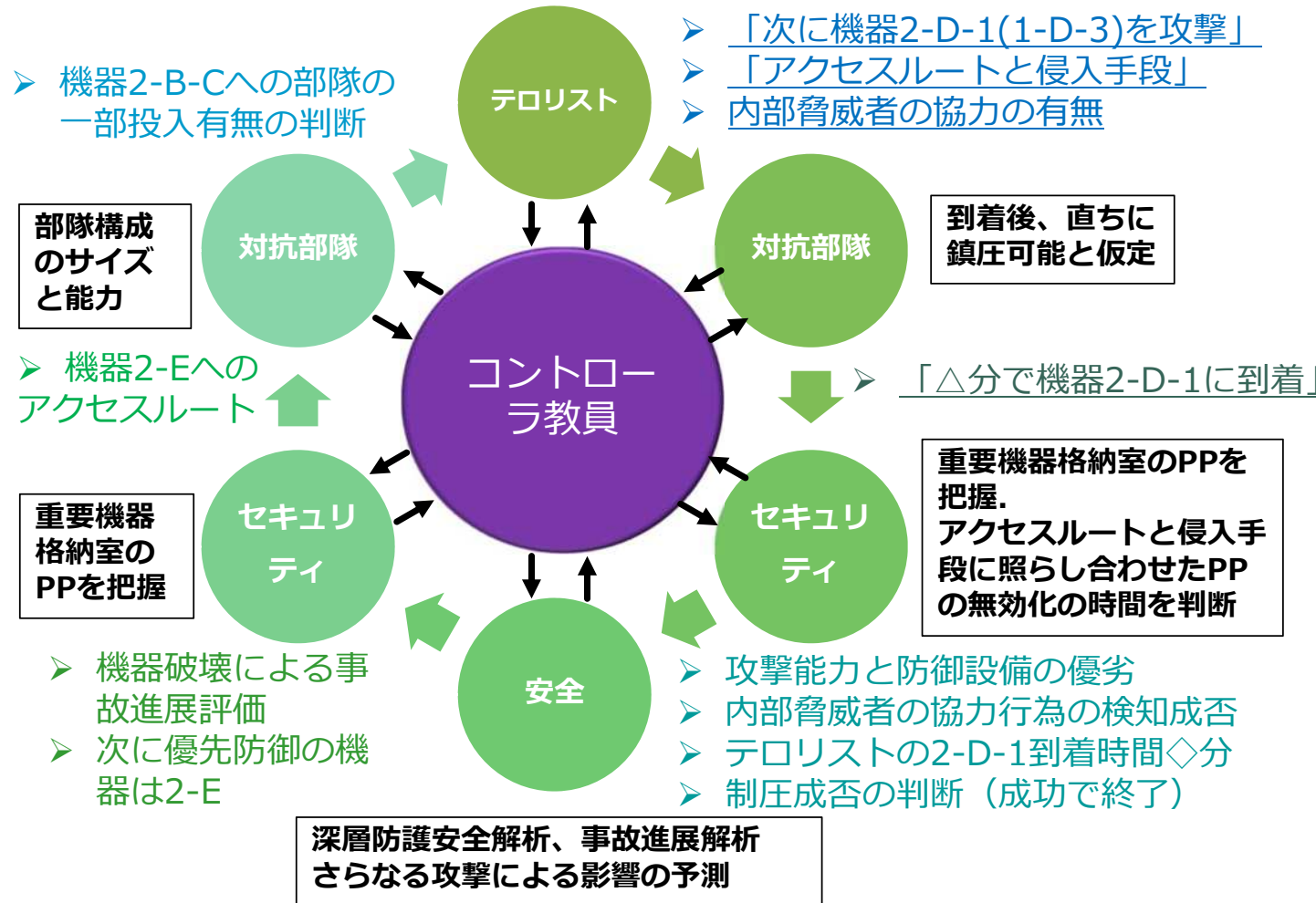
シーケンスが文の形で得られる

- 各プレイヤーの行動
- 対応の結果



B. PSのサロゲートAI

- 必ずしも最適な攻撃対象を選択するとは限らない
- 外部脅威者と内部脅威者の2種類がある



開発済みの「文情報のグラフ変化」手法を用い、机上訓練における各プレイヤーの行動と結果（文で表現）を要約

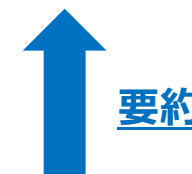
C. 2S机上演習[机上演習システム]



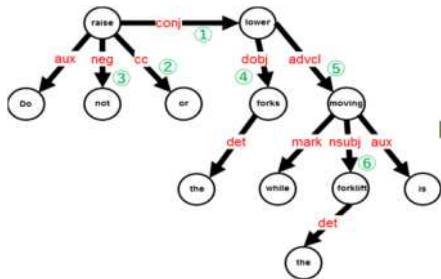
シーケンス：
 ・ 各プレイヤーの行動
 ・ 対応の結果

- 人間の脳は、文・文章を見聞きするとき、その文・文章が表現する状況をイメージし、同時に要約している。
- その人間の脳と同じ「文の要約」を、自然言語処理・オントロジーモデリング・論理表現化による実現
- 文を入力するだけで、その要約である（階層型）グラフ構造を出力する。

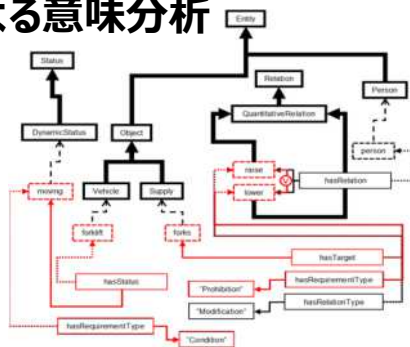
E. 対応案作成[強化学習]へ



前処理と特徴抽出



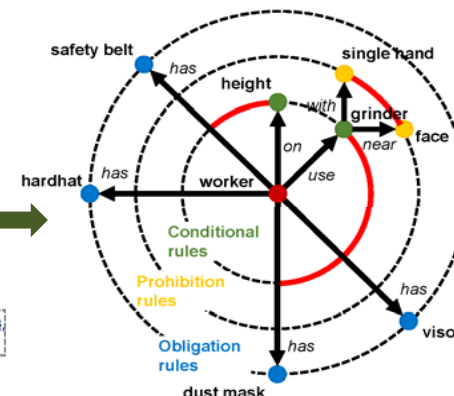
オントロジーモデリングによる意味分析



論理表現化

$\hat{G}(\hat{V}, \hat{E}, \hat{C})$
 $\hat{V} = \{worker, hardhat, grinder, face, single\ hand, dusy\ mask, visor, height, safety\ belt\}$
 $\hat{E} = \{\{worker, hardhat\}, \{worker, grinder\}, \{grinder, face\}, \{grinder, single\ hand\}, \{worker, visor\}, \{worker, dusy\ mask\}, \{worker, height\}, \{worker, safety\ belt\}\}$
 $\hat{C} = \{grinder \rightarrow \{(face, single\ hand), (visor, dust\ mask)\}, height \rightarrow \{(), (safety\ belt)\}\}$
 conditional relationships

文グラフ



E. 対応案作成[強化学習]

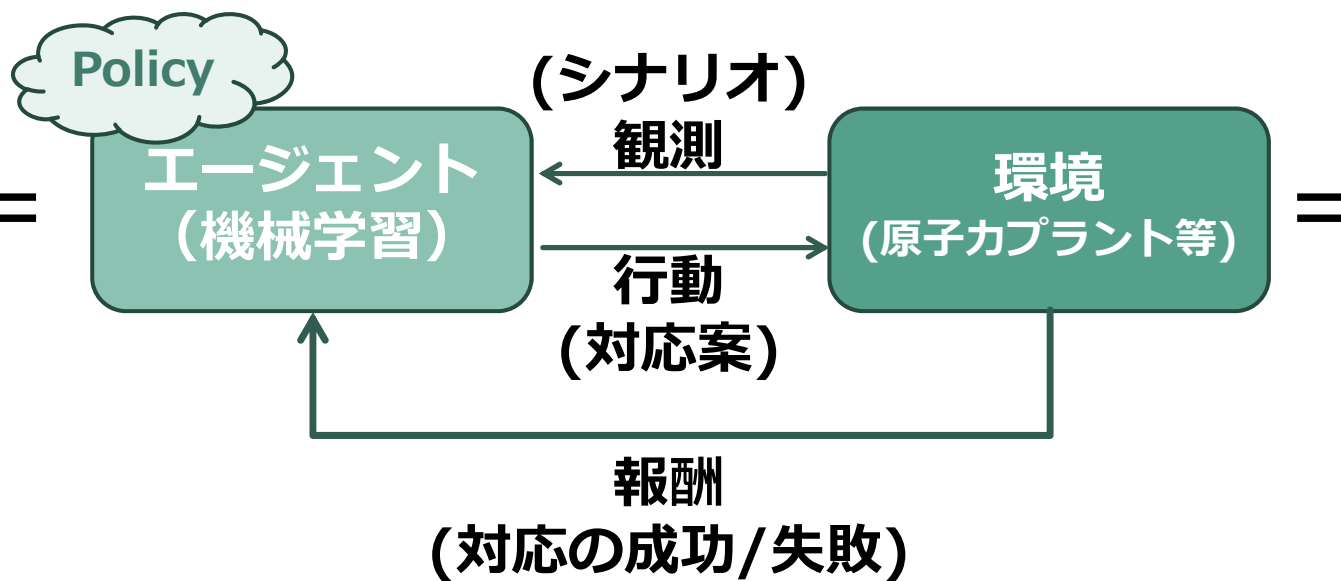
50

強化学習：

- ある**環境**内における**エージェント**が、現在の状態を観測し、取るべき行動を決定する問題を扱う機械学習の一種。
- 転ばない歩行ロボットが有名
- エージェントは行動を選択することで環境から報酬を得られ、
- 一連の**行動**を通じて報酬が最も多く得られるような方策 (**policy**) を学習する。

要約

- 各プレイヤーの行動シーケンス



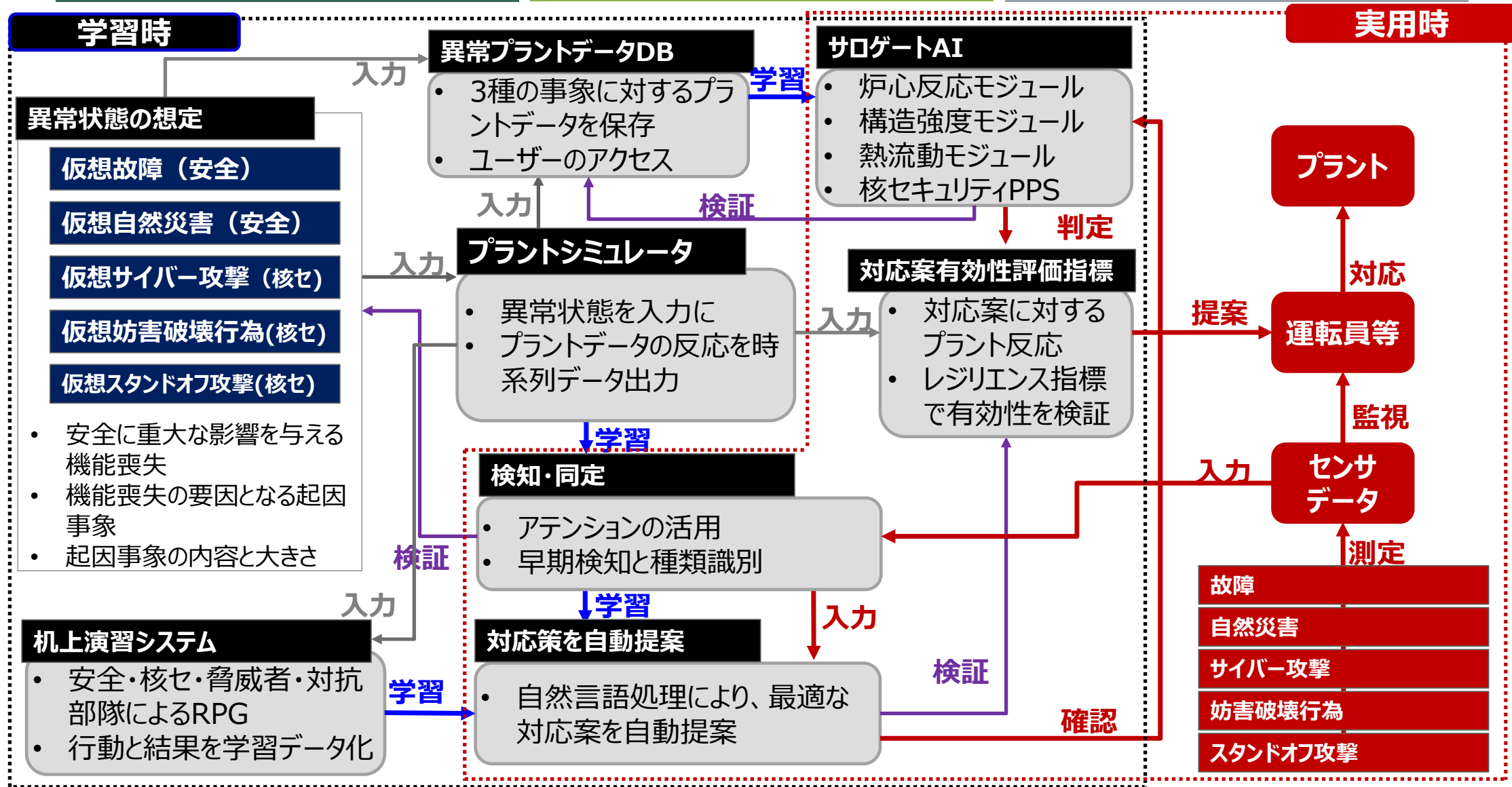
要約

- 対応の結果



東北エンタープライズ社HP

2.3 BDBT最適対応提示システムのアルゴリズム（案）



7. 結論：トップダウン or ボトムアップ？

- まずはできるところからボトムアップ式のDXを開発し、実績を積み、国民と規制からの信頼を得ることが大事
- 同時に、トップダウン式DXの開発も並行して進め、世界の原子力DXの基準を創造
- そのためには人材育成こそが最も必要
- 民間と大学との連携 ← 10兆円ファンドによる政府支援も

ご清聴ありがとうございました。