
シンビオ社会研究会研究談話会

2026年1月22日(木)14:00~

@京都大学治キャンパス本館5階(W503E)

「原子力AI学」

東京大学大学院工学系研究科原子力専攻社会連携講座「原子力AI学」

特任教授 出町 和之

研究室HP <http://demachilab.org>

目次

1. はじめに
2. 原子力AI学講座
3. 設備保全・マネジメントシステムへのAI応用に関する研究
4. 核セキュリティ・核物質防護システムへのAI応用に関する研究
5. 教育
6. まとめと今後の課題

1. はじめに

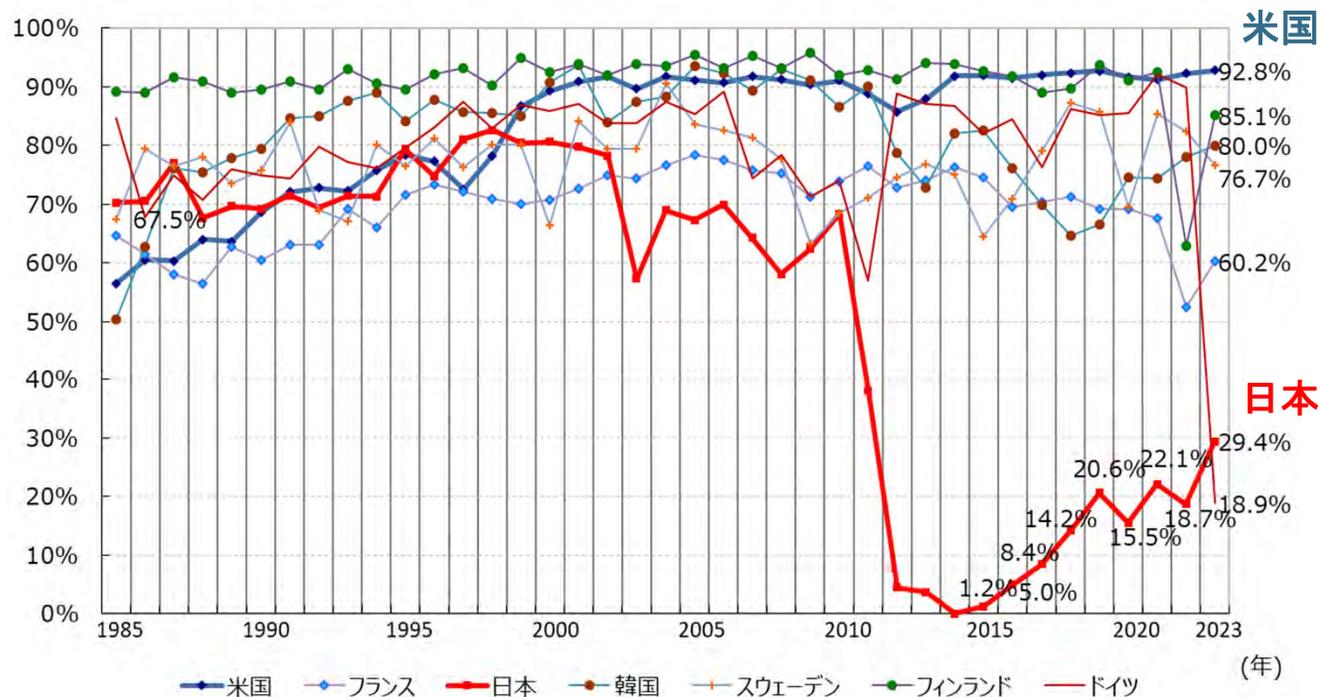
1.1 原子力発電へのOLM導入

米国における出力向上の取組み

- 精度向上型から開始
- 運転条件最適化と、設備拡張型(max20%)の出力向上
- 継続的な最適化
- **要因の一つはOLMの導入**

OLM導入のための技術課題

- リスク評価モデルの高度化
- 状態監視技術の信頼性向上
- 作業品質の維持と人材確保
- 作業負荷の標準化
- リスク管理措置の実装



主要原子力発電国における設備利用率の推移（エネルギー白書2025より）

OLM導入のための技術課題とは？

1. 状態監視技術の向上

- 異常の早期検知と同定技術の革新

2. 新たなリスク管理

- OLM導入による新たなリスク（サイバー、誤作動など）のを管理・最小化

3. 作業品質の維持

- OLM作業を担う人材の能力向上または補完

4. 作業負荷の低減

- 限られた人材リソースの適切な活用

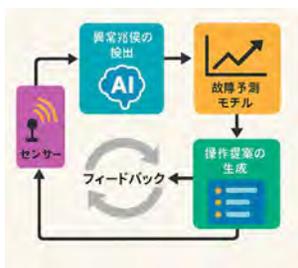
5. リスク評価モデルの高度化

- 従来の確率論的安全評価（PSA）を超えた、リアルタイムかつ動的なリスク評価モデルの構築

AI適用によるOLM導入の技術的課題への対応

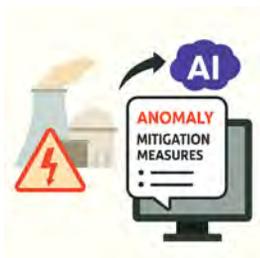
課題 1

① 異常機器を検知・同定するAIの開発



課題 2

② 正常回復策を提案するAIの開発



5) リスク評価モデルの高度化



1) 状態監視技術の向上

課題

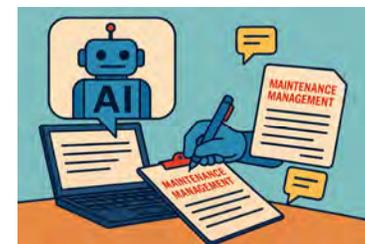
4) 作業負荷の低減

2) 新たなリスク管理

3) 作業品質の維持

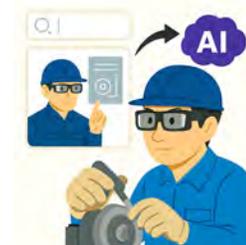
課題 3

③ 保守管理文書を生成するAIの開発



課題 4

④ 作業支援情報を提供するAIの開発



1.2 核セキュリティ：変遷を続ける脅威

~INFCIRC/225/Rev4

核テロの脅威

- ① 核兵器の盗取
- ② 核物質の盗取

9.11
多様化

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 RIの盗取(ダーティボム用)
- ④ 妨害破壊行為(原子力施設)

巧妙化

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

拡大

想定を超える脅威
(BDBT *1)

原子力発電所が戦争の舞台に(2022)



新たな脅威



露軍によるザポロジエNPP占拠

- 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は「**新たな脅威**」「**BDBT**」に対し**後れ**を取る

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

内部脅威者脅威への対策

内部脅威者(インサイダー)の脅威



核物質やRIの盗取



妨害破壊行為



機微情報盗取

- ITDB*¹レポート:約100件/年の殆どは**内部脅威者**
- **IAEA**も内部脅威者対策の重要性を指摘
 - 身上調査と2人ルールという**予防のみ**が現状
 - ⇒「**悪意行動**」そのものの**検知を強化**

*1: Incident and Trafficking Database by IAEA

*2: Central Alarm Station

「悪意行動」を検知するには？

- ✓ 現状：CAS *²等での監視カメラの**目視が主流**
- ✓ モニタ数が多く、見逃しなど**網羅性に課題**



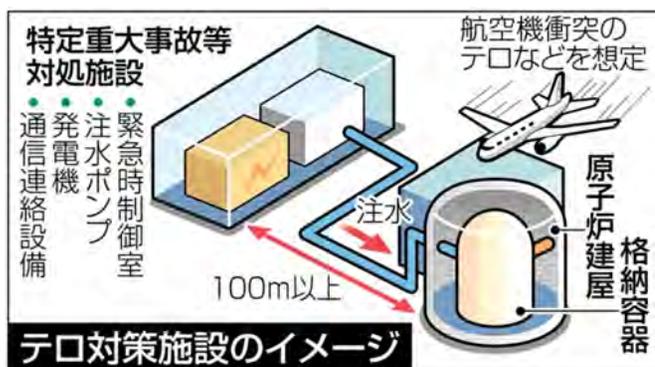
- **AIと目視の2段階検知**による多重化で強化：
 - 1段め：多数モニタ内の**悪意行動をAIが検知**
 - 2段め：検知された悪意行動を**目視確認**

課題5

内部脅威者「悪意行動」検知AIの開発

BDBTへの対策

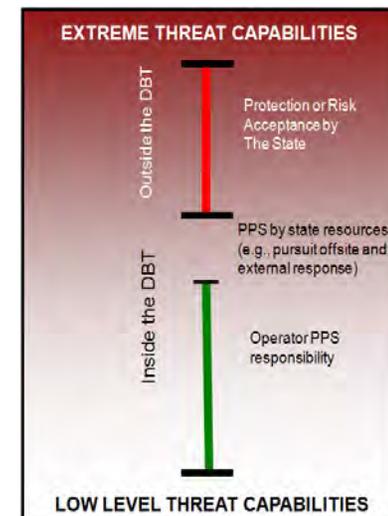
現状：
想定を超える脅威(BDBT)への
対策は「特重」で思考停止



意図的な航空機衝突への対応の新設

- BDBT*1は国の管轄だからと「特重」以外は対応していない
- そもそもBDBTシナリオは規模も種類も多すぎて何も決められない

しかし、「想定外でした」と二度と言わないためには、BDBTシナリオの想定はやはり必要



- 想定できるシナリオは、そもそも「想定外」ではない？
- ならば、**AIにBDBTシナリオ**を考えさせればよい

課題6

BDBTシナリオを生成するAIの開発

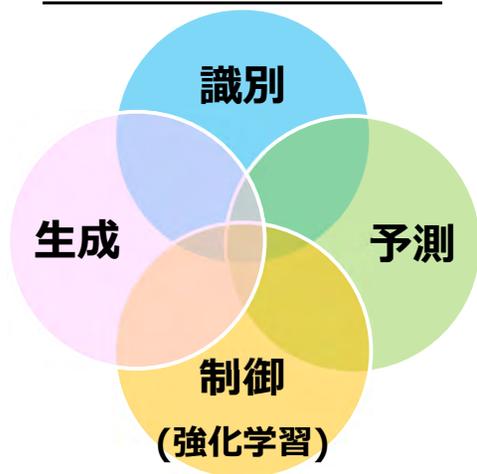
*1設計基礎を超える脅威
(BDBT: Beyond Design Basis Threat)

1.3 出町研究室のこれまでの原子力AI開発

通常のAI研究はどれか1つに閉じているが、

課題に対応するAI手法を、異種AI融合で開発

AIモデルの4分類



出町研で開発した原子力用AIモデル

目的	開発したAI手法	ハイブリッド
設備保全マネジメント	①異常機器の逆推定AI 課題1	● & ●
	④正常回復策提案AI 課題2	● & ●
	⑤作業支援情報提示AI 課題3	● & ●
	⑧保守管理文書生成AI 課題4	● & ●
	⑥廃炉プラント3D点群データCAD化	●
	核セキュリティ	③悪意行動検知AI 課題5
⑦BDBTシナリオ生成AI 課題6		● & ●
放射線医療	②2D腫瘍動画の3D動画へのリアルタイム変換と未来予測	● & ●

①～⑧の数字は開発された順

2. 原子力AI学講座

(1) 概要

- 資金出資元: 日立GEベルノバニュークリアエナジー株式会社
- 設置期間: 2025年7月1日～2028年6月30日(3年間)
- 経費額: 90百万円(基礎的経費 69百万円,研究支援経費21百万円)
- 担当教員: 岡本特任教授(兼務)、三輪特任准教授(兼務)、
出町特任教授
- 研究の目的: 原子力分野にAI 応用技術を導入することで、安全・セキュリティ・核物質防護の原子力3S を大きく改善すること
- 教育の目的: 3Sに適用すべきAI 応用技術を俯瞰的に捉え、最新のAI 知見を把握しつつ、必要かつ有益なAI技術を開発可能な人材の育成
- 期待される成果: 3Sの向上。特にセキュリティに関し、AI を応用したデータベース構築、および具体的に効果的な対策の構築。
さらに、原子力システムや核セキュリティに関するAI 応用などの先端的知識をもつリーダー人材の輩出
- 実施方法: 日立GEとの共同研究 (研究設備やソフトウェアを活用可)

(2) 3つの研究テーマ

- 原子力3Sに適用すべき、とくに実現性・安全向上性・収益性の高いAI技術(1)~(3)の開発&確立を目標とする。
- 以て、原子力プラントのGX/DX化と、持続的なイノベーション促進を実現させるための研究を進める。

(1)核セキュリティ・核物質
防護システムへのAI応用
に関する研究 **第3章**

課題5

課題6

(2)設備保全・マネジメン
トシステムへのAI応用に
関する研究 **第4章**

課題1

課題2

課題3

課題4

(3)事故時安全対応支
援システム

出町研では、

研究分野(1)(2)を主とし、課題1~6の高度化または開発にまず取り組み、さらに水平展開。

3. 設備保全・マネジメントシステムへの AI応用に関する研究

- 3.1 ①異常機器の逆推定AIの開発
- 3.2 ④正常回復策提案AIの開発
- 3.3 ⑤作業支援情報提示AIの開発
- 3.4 ⑧設備保全文書生成AIの開発

課題 1

課題 2

課題 3

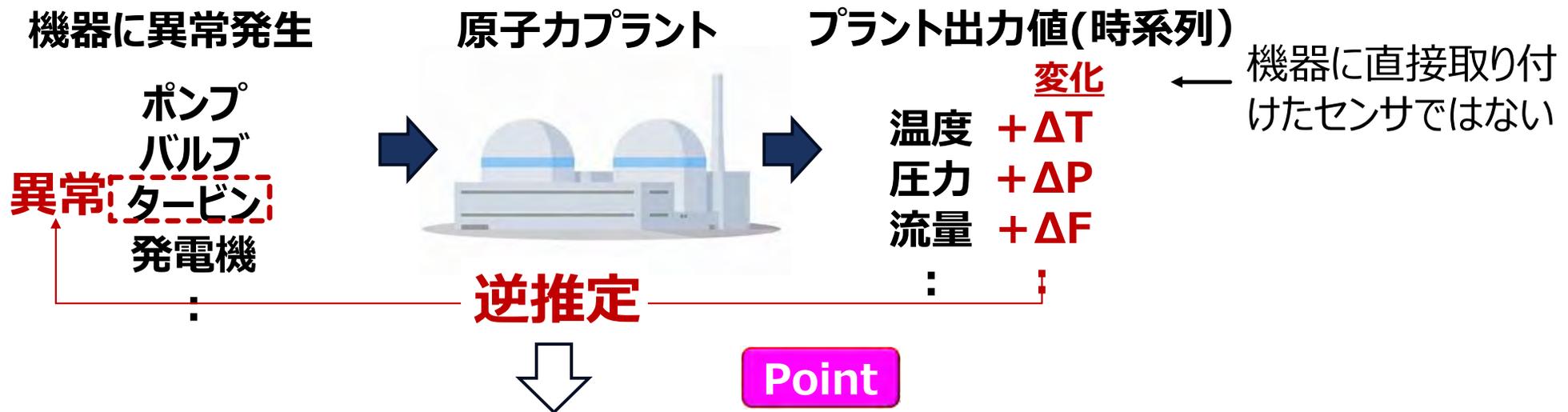
課題 4

3.1 ①異常発生機器の逆推定AIの開発

課題 1

もし、既存のプラント出力センサ値から異常発生機器を**逆推定**できれば、

- **予兆の段階**で機器の故障・異常を特定可能で**予防保全性能が向上**
- 対象機器に新たに大量のセンサ設置不要で**現実的**
- **OLM実現**に必要な「**状態監視技術の信頼性向上**」に貢献

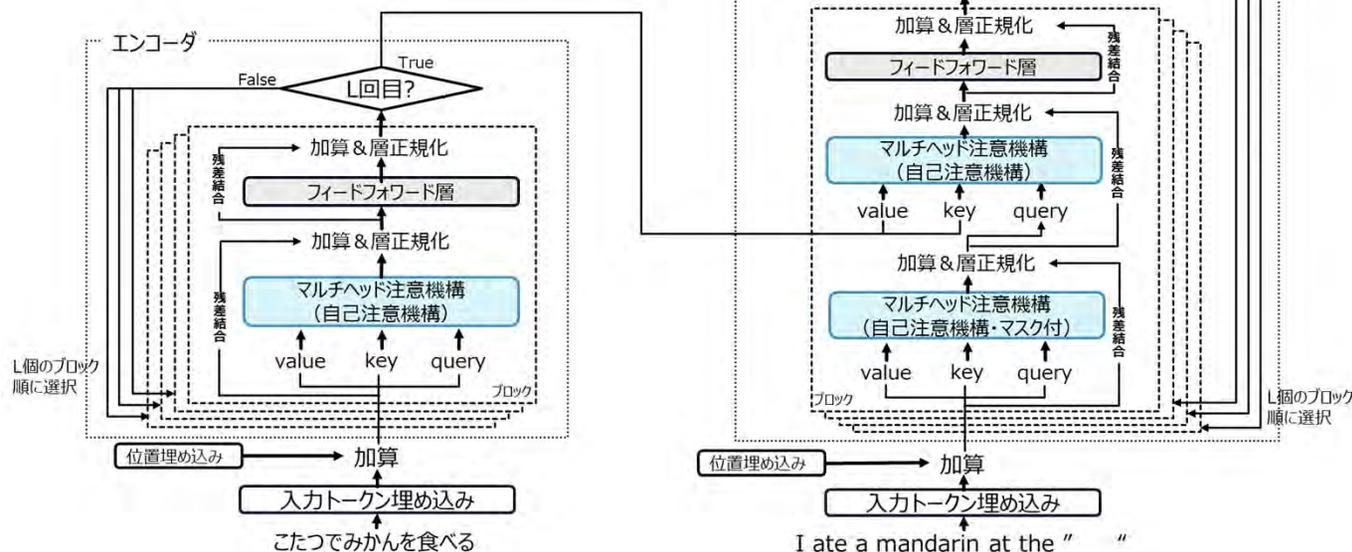


時系列データの**予測AI**に**生成AI(注意機構)**を組み合わせ、**逆推定精度を向上**

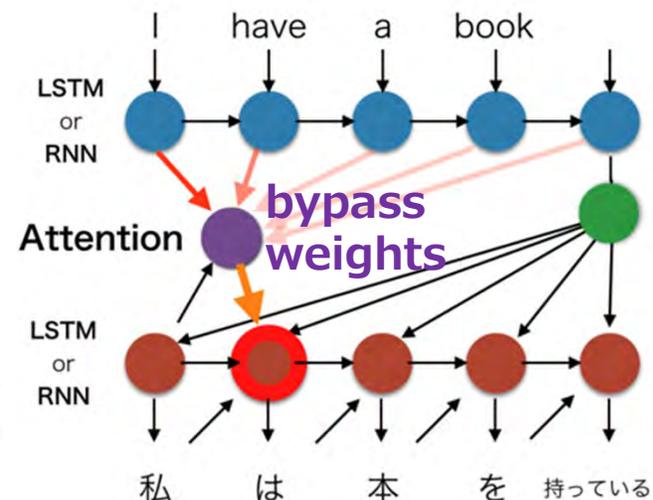
注意機構とは

- LLM（大規模言語モデル）におけるTransformer **生成** の根幹
- 注意機構とは、より精度の高い生成のために**重みのバイパス**を与える
- 本研究ではLLMではなく**時系列データの予測AI** **予測** に組み込んだ

Transformer architecture



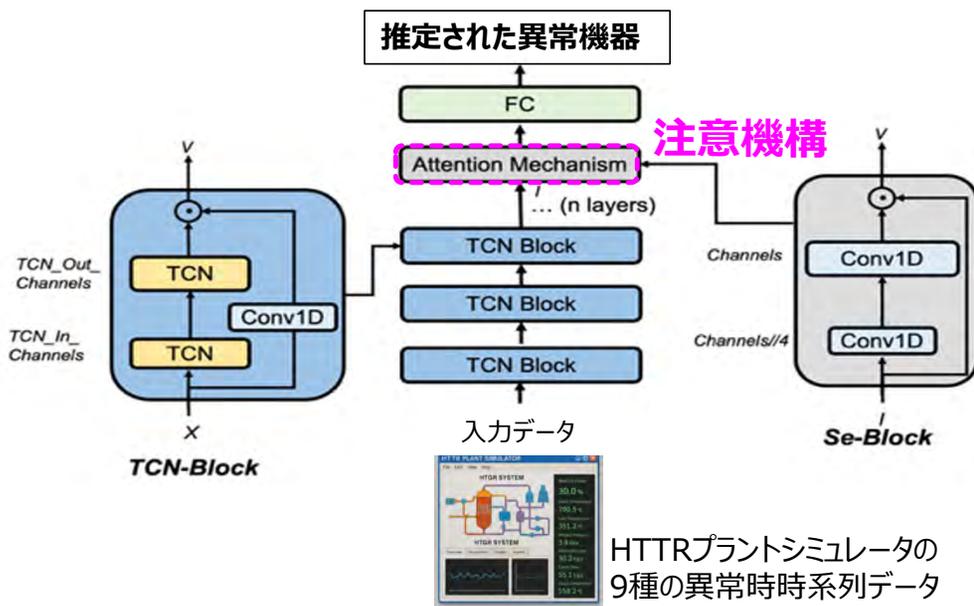
注意機構



異常機器逆推定(予測AI+注意機構)

- 本来はテキスト生成に使用する注意機構に、時系列データの異常の特徴に着目
- 他モデルとの性能比較^[1]のため、HTTRプラントシミュレータの9種の異常推定

最新の開発モデル：SE-TCN



他モデルとの推定性能比較(HTTRの9種の異常)

Model	F1	Pre	Rec
TimesNet	0.9367	0.9631	0.9118
Dlinear	0.9121	0.9589	0.8696
TCN	0.9566	0.9508	0.9625
TCN-SE	0.9460	0.9629	0.9297
TemTCN	0.9345	0.9358	0.9332
SE-TCN(提案モデル)	0.9607	0.9710	0.9507

現時点で最高の異常機器逆推定精度を達成

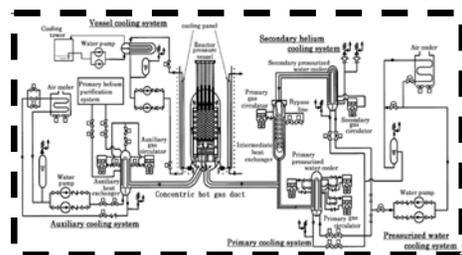
[1] F. Dong, S. Chen, K. Demachi, M. Yoshikawa, A. Seki, S. Takaya, "Attention-based time series analysis for data-driven anomaly detection in nuclear power plants," Nuclear Engineering and Design, 2023.

3.2 ④ 正常回復策提案AIの開発

課題 2

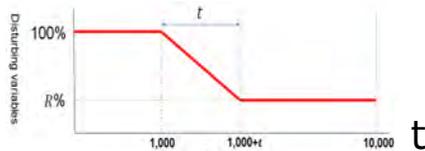
独自の **サロゲートAI** 予測 をまず開発し、プラントデータの予測を可能に

HTTR プラントシミュレータ (ACCORD)

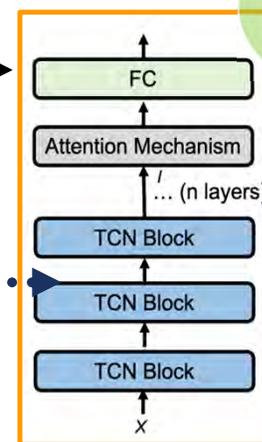


入力

任意の機器故障を入力



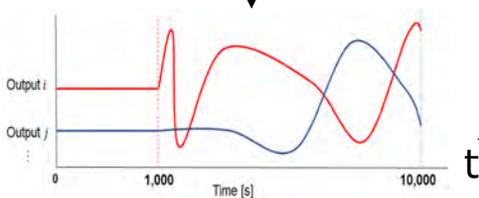
入力



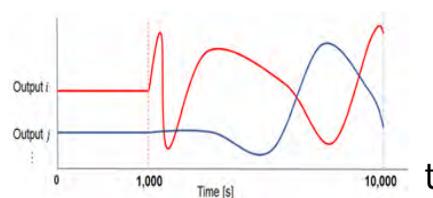
予測

誤差最小化を損失関数として学習

Output



誤差計算



独自のサロゲートAI

予測

ACCORDで計算された プラントデータの時系列 (正解値)

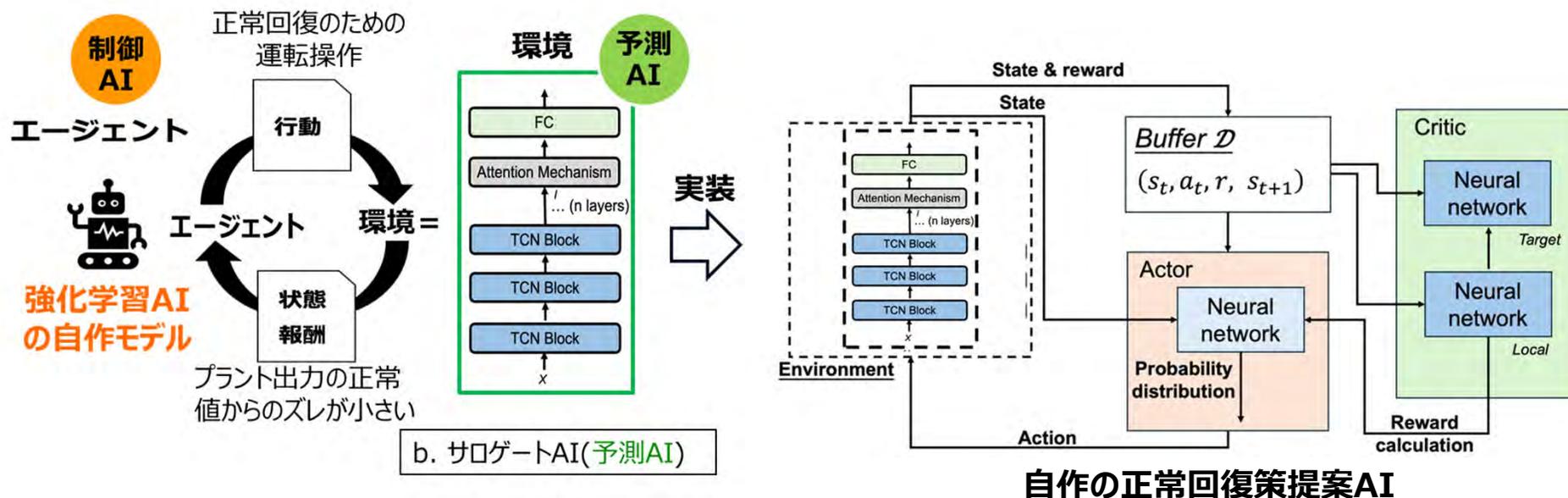
サロゲートAIに予測された プラントデータの時系列

- ACCORDより遥かに高速にプラントデータの計算が可能
- このため、**強化学習** 制御 における「環境」として適用

AIに正常回復策を提案させたなら？

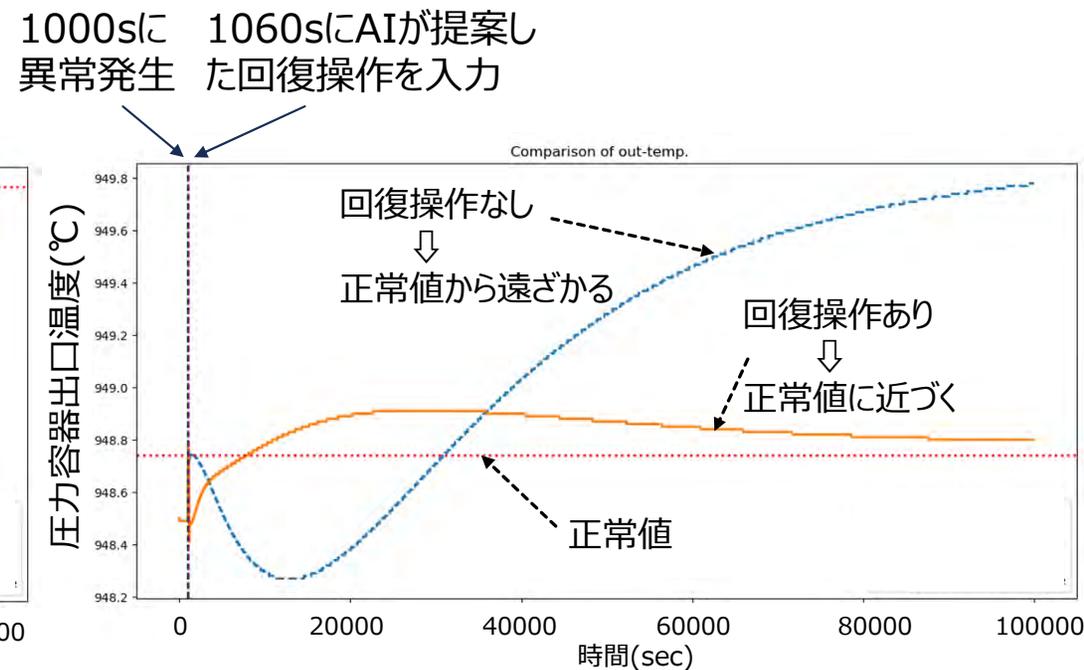
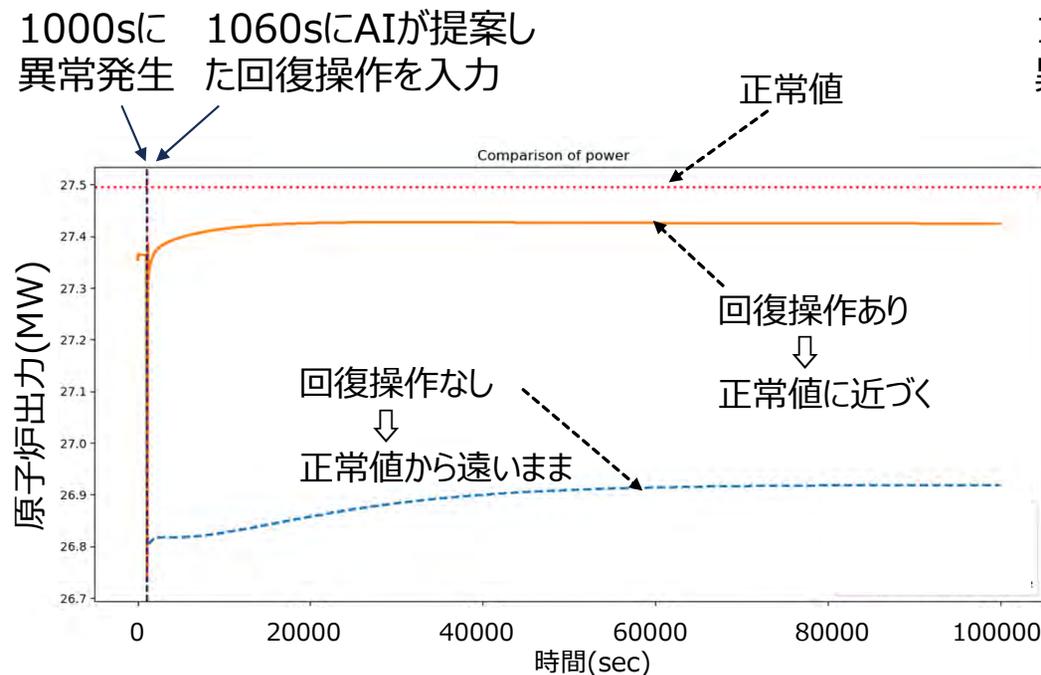
- OLM実施中の一時的なリスク増加に対する補償措置の一つに
- OLMの実現に必要な「リスク管理措置の実装」に貢献

自作のサロゲートAIと制御AI(強化学習)を組み合わせたAI



学習済みの正常回復策提案AIが提案した操作による回復の結果の例

- 異常発生後、プラントを正常に回復させる運転操作をAIが提案
- HTTRプラントシミュレータを用いた実験では、**正常状態に近づけることに成功**



3.3 ⑤作業支援情報提示AIの開発

課題 3

R3～中部電力共同研究

原子力発電所作業者の負担は小さい

遵守すべきルールが多い

➡ 作業者が習得する事項は膨大

進まぬ原子力発電所の再稼働

➡ 熟練者との現場経験等を通じた技術継承機会の減少

➡ HEリスク増加の恐れ

1)過去の熟練者動画



もし、AIが作業に役立つ情報1),2)を自動で選別し、作業中に教えてくれたら？

2)作業に関連するルールや手順

#	動作
1	シャフトを手回し、スムーズに回転する
2	オイルセパレータを手で押し込む。
3	オイルセパレータはプラスチックハンマーにて奥まで叩き込む。
4	ディフレクター側面のセットビスを六角レンチにて締め込む。
5	回転方向銘版が上にくるように取り付ける。
6	ベアリングカバーのボルト穴に六角ボルトを差し込み、六角レンチにて締めこむ。
7	スリング側面のセットビスを六角レンチにて締め込む。
8	スリング側面を奥に当ててから、少し手前に引く。
9	グランド押さえの丸い方をポンプ側にする。
10	ゴム手袋を使用してネバークスをシャフト全体に塗布する。
11	シャフトスリーブにシールリングとグランド押さえを移動させた後、軸方向に挿入し、しっかりとスリーブパッキンに押し付ける。
12	ボルトを両手で持って、奥までしっかり入っていることを確認する。
13	インベークキーはプラスチックハンマーにて叩き込む。
14	インベークキーを片口スリット片手ハンマーにて締め込む。
15	インベークキーをタガネと片手ハンマーにて折り曲げる。
16	スキミングにて間隙を確認する。
17	インベークキーはプラスチックハンマーにて叩き込む。
18	カップリングはプラスチックハンマーにて叩き込む。

HEリスク抑制によりOLMの実現に貢献

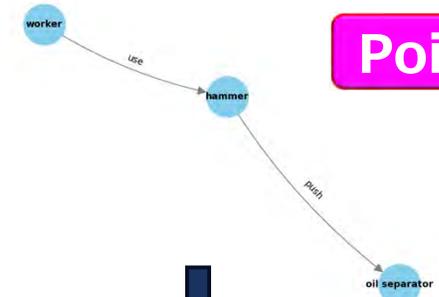
行動識別(識別AI) と 行動のグラフ化(生成AI) を水平展開して開発

①リアルタイムの手元作業を撮影



リアルタイムで撮影する手元作業

②作業内容をグラフに変換



Point

③手順文や熟練者動画のDB中からグラフが類似なものを検索

手順	作業手順文
1	シャフトを手回しし、スムーズに回転する。
2	オイルセレータを手で押し込む。
3	オイルセレータはプラスチックハンマーにて奥まで叩き込む。
4	オイルセレータ側面のセットビスを六角レンチにて締め込む。
5	回転方向を確認の上、よく取り付ける。
7	ベアリングカバーのボルト穴に六角ボルトを差し込み、六角レンチにて締め込む。
8	スリッガー側面のセットビスを六角レンチにて締め込む。
9	スリッガー-いったん奥に当ててから、少し手前へ引く。
10	グラント押込の方向を確認する。
11	ゴム手袋を使用してネバーシューズをシャフト全体に巻く。
12	シャフトスリーブにシーリングとグラント押込を移動させた後、軸方向に挿入し、しっかりとスリーブパッキンに押し付ける。
13	ボルトを両手で持って、奥までしっかり入っていることを確認する。
14	インベラーキーはプラスチックハンマーにて叩き込む。
15	インベラーヘッドを口スリッパとハンマーにて締め込む。
16	インベラーワッシャーを分取ハンマーにて取り除く。
17	インベラーキーにて確認を確認する。
18	インベラーキーはプラスチックハンマーにて叩き込む。
19	カップリングはプラスチックハンマーにて叩き込む。

作業手順文



過去の熟練者の作業(教育ビデオ)

⑤作業員のスマートグラスに表示して作業支援

④検索された動画や手順文をスマートグラスに送信

ポンプ分解点検作業の18手順では、熟練者動画と手順文をAIが全て正しく選択

7月26日（土）中部電力サイエンスフォーラム in 御前崎市民会館にて 来場の地元中学生を対象にデモンストレーション



ポンプ分解点検の代わりにおもちゃの独楽の組立を対象に

現在、Pipelineを改良中 (by D2学生)



Group 1



#	動作
1	シャフトを手回しし、スムーズに回転する
2	オイルセパレータを手で押し込む。
3	オイルセパレータはプラスチックハンマーにて奥まで叩き込む。
4	ディフレクター側面のセットビスを六角レンチにて締め込む。
5	回転方向銘版が上にくるように取り付ける。
6	ベアリングカバーのボルト穴に六角ボルトを差し込み、六角レンチにて締め込む。
7	スリンガー側面のセットビスを六角レンチにて締め込む。
8	スリンガーいったん奥に当ててから、少し手間に引く。
9	グラント押さえの丸い方をポンプ側にする。
10	ゴム手袋を使用してネバーシースをシャフト全体に塗布する。
11	シャフトスリーブにシールリングとグラント押さえを移動させた後、軸方向に挿入し、しっかりとスリーブパッキンに押し付ける。
12	ボルトを両手で持って、奥までしっかり入っていることを確認する。
13	インバーキーはプラスチックハンマーにて叩き込む。
14	インバーナットを片口スパナと片手ハンマーにて締め込む。
15	インペラーワッシャをタガネと片手ハンマーにて折り曲げる。
16	スキミゲージにて間隙を確認する。
17	インペラーキーはプラスチックハンマーにて叩き込む。
18	カップリングはプラスチックハンマーにて叩き込む。

Step4.“オイルセパレータはプラスチックハンマーにて奥まで叩き込む。”

物体検出タスク

```

json
{
  "task_name": "oil_separator_installation",
  "detection_classes": [
    "plastic_hammer",
    "oil_separator",
    "hand",
    "engine_block"
  ]
}
  
```

アルゴリズム Group 2

物体検出タスク



熟練者
動画



AGENT 1.2
事前学習



タスク適応モデル
YOLO-World



AGENT 2 認識

作業者
撮影動画

物体検出

検出
出力

AGENT 1.2: 事前学習 (ファインチューニングエージェント /Pre-Training & Fine-Tuning Agent)

「教師動画から専門知識を学び、
現場のカメラ動画に適用」

- 自動データセット生成
 - YOLO-Worldモデルを再訓練
- 完成した重みファイル

AGENT 2: 知覚エージェント (Perception Agent)

【ライブ】「現場の目」

- Smart Glass からリアルタイム動画フレームを入力
 - カスタムYOLO-Worldモデルで推論
- 各物体の検出結果

Point : 2つのエージェントによる協調

- Agent 1.1 (教育係): 専門知識をモデルパラメータとしてオフラインで結晶化。
 - Agent 2 (現場の目): オンラインで活動し、カスタムモデルを動画にリアルタイム適用。
- 分業の効果 : 高精度・高堅牢性をリアルタイムで実現。

アルゴリズム Group 3 ～シーングラフ生成と文章化～



AGENT 1.3: 機能定義エージェント (Function Definition Agent)

YOLO-Worldの生データは、物体間の空間・時間的關係を計算ルールで解析し、Scene Graphの“辺”として変換

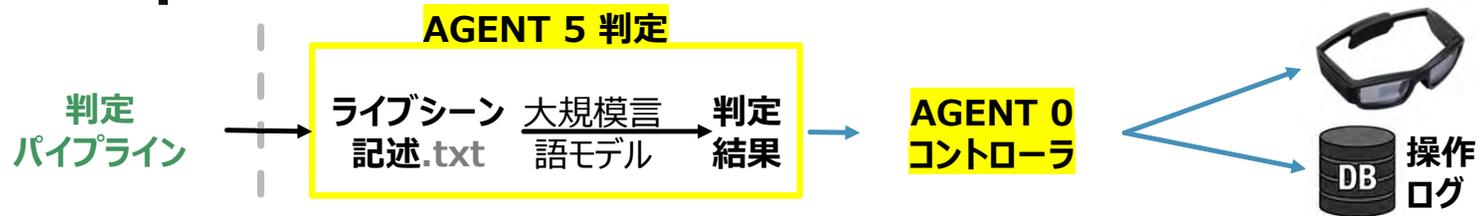
AGENT 3: 時空間解析エージェント (Spatio-Temporal Interpreter Agent)

「視覚情報のエンジニア」 Agent 2 が出力した無機質な検出ボックスのリストに、**時間と空間の文脈**を付加し、機械が推論できる形式である「**シーングラフ**」を構築

AGENT 4: シーン記述エージェント (Scene Description Agent)

「出来事を時系列で記録する書記官」 Agent 3 が出力する連続的なシーングラフのストリームを分析し、動作の段階的な変化を捉えた、きめ細かい時間序列のテキストログを生成します。

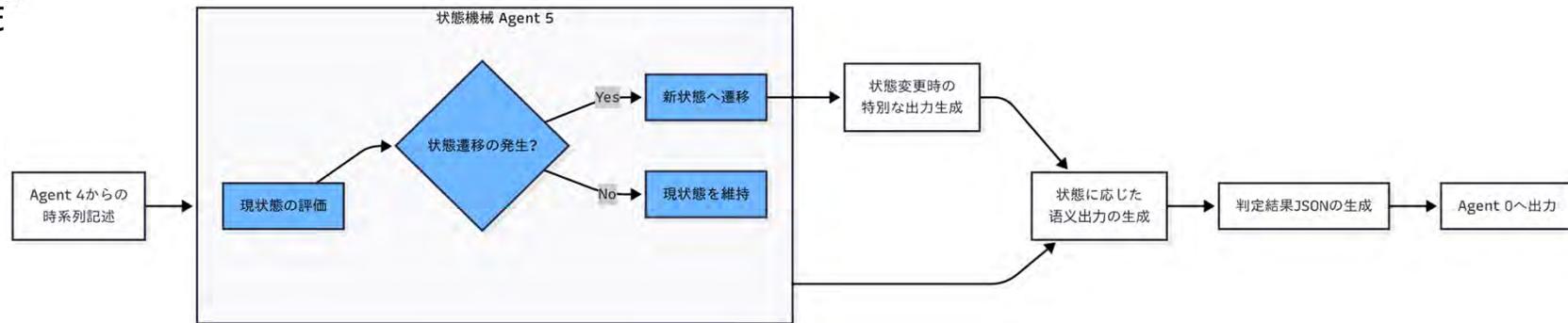
アルゴリズム Group 4



AGENT 5: 判定エージェント (Decision Agent)

「状況を継続的に監視する状態マシン」現在の作業状態を保持し、Agent 4の時系列入力力で更新・出力

- **状態マシン (State Machine)**: 作業ステップを状態で管理し、ルールやLLMで遷移を制御



AGENT 0: コントローラエージェント (Controller Agent)

- Smart Glassへの指令出力:
- DB操作ログへの記録:

状態ごとの出力具体例（案）

状態: 実行中 (IN_PROGRESS)

- **意味的出力:** “ハンマー打撃を検知しました。現在、油分離器はハマりつつあります（進行度: 約50%）。”
- **LLMの役割:** 現在の進行度を評価し、次のアクションを促す。

状態: 完了 (COMPLETED) (状態遷移時)

- **トリガー条件:** 油分離器の変位が止まり、所定位置に到達。
- **语义出力:** “手順が正常完了しました。油分離器が所定位置に確実に設置されています。次の工程に進んでください。”
- **LLMの役割:** 成功の最終確認と、次のステップへの移行を促す。

状態: エラー (ERROR) (状態遷移時)

- **トリガー条件:** 規定回数を超えても変位が進まない。
- **意味的出力:** “エラー: 油分離器が固着している可能性があります。打撃を中止し、状態を確認してください。”
- **LLMの役割:** エラーの根本原因を特定し、具体的な修正指示を生成する。

Agent 0 への出力形式

```
{  
  "current_state": "COMPLETED",  
  "previous_state": "IN_PROGRESS",  
  "judgment": "SUCCESS",  
  "reason": "油分離器の変位が停止し...",  
  "feedback": "手順が正常完了しました...",  
  "progress_estimate": 100,  
  "next_action": "次の工程に進んでください。"  
}
```

双エージェント協調と状態機駆動のリアルタイム解析機構を活用したアルゴリズムを提案した：

- 1. 知識の結晶化と適用**：専門知識をモデル化し、現場の目をリアルタイムに適用して高精度・高堅牢性を実現。
- 2. 状態機駆動の指導**：作業の流れを把握し、各段階で適切にフィードバック。
- 3. 操作者支援**：進行状況を把握でき、異常時には具体指示を即座に受信。

3.4 ⑧設備保全文書生成AIの開発 課題 4

(1)リアルタイムな文書化

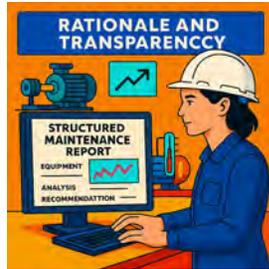
- 保全文書の即時生成
- 運転中でも遅滞しない



OLMの意思
決定の質を
向上

(2)判断の透明性と説明性

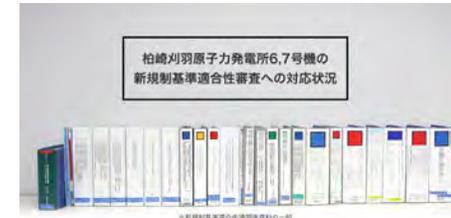
- 判断根拠の構造化
- 説明可能な根拠の提供



OLMの信頼
性が向上

(3)属人性の少ない文書化

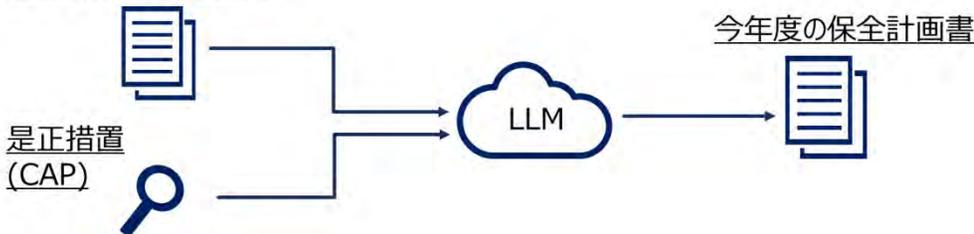
- 判断のばらつきを抑えた標準化
- 熟練知の継承も可能



新規制基準により増加する一途
の文書作成労務を軽減

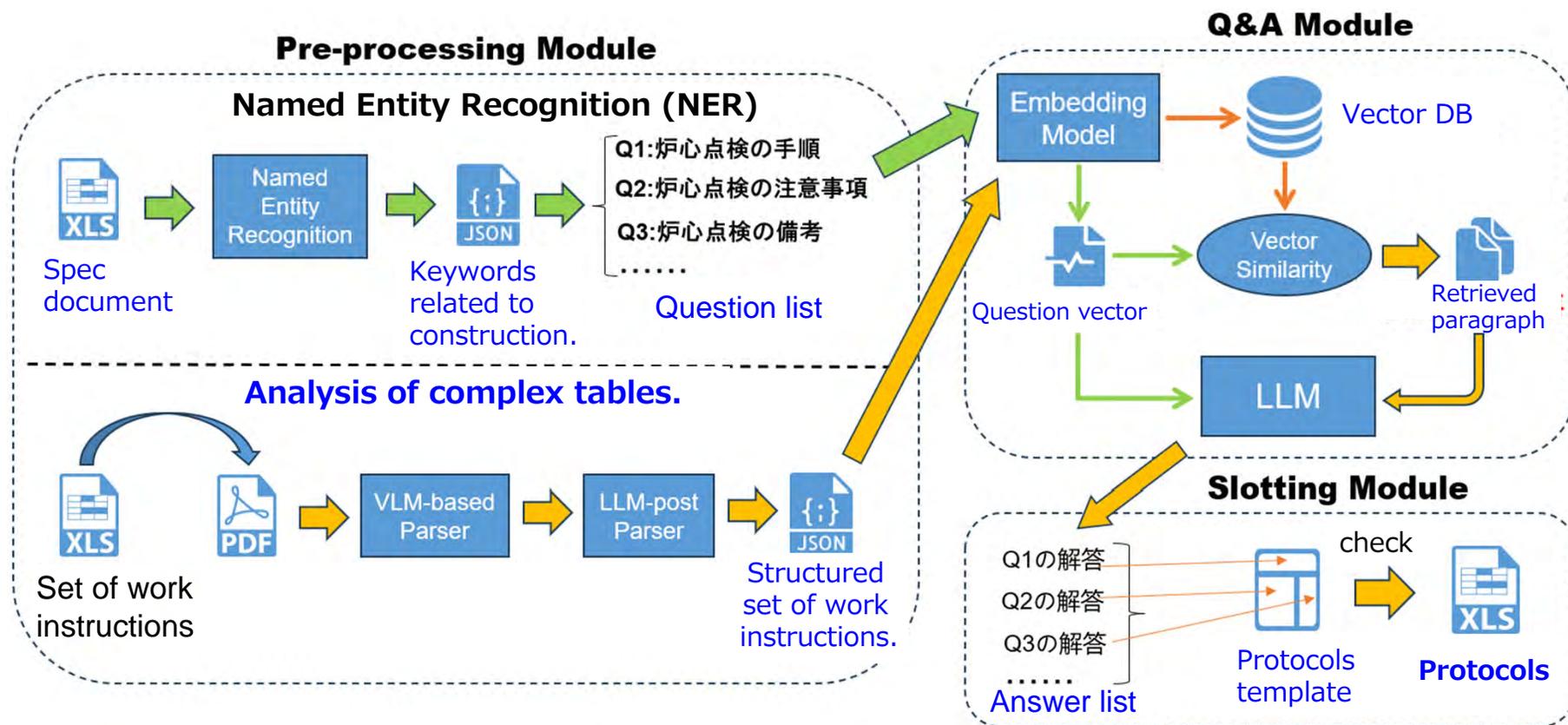
東京都PCB処理施設の2021年度保全計画の
AI生成には、シンプルなプロンプトで成功

昨年度の保全計画書



- 現在、関電プラント社との共同研究により、**複雑な**保全関連文書のAI生成モデルを開発中
- 最初のターゲットは**要領書**の作成

★複雑な保全関連文書生成のために設計したAIパイプライン（開発中）

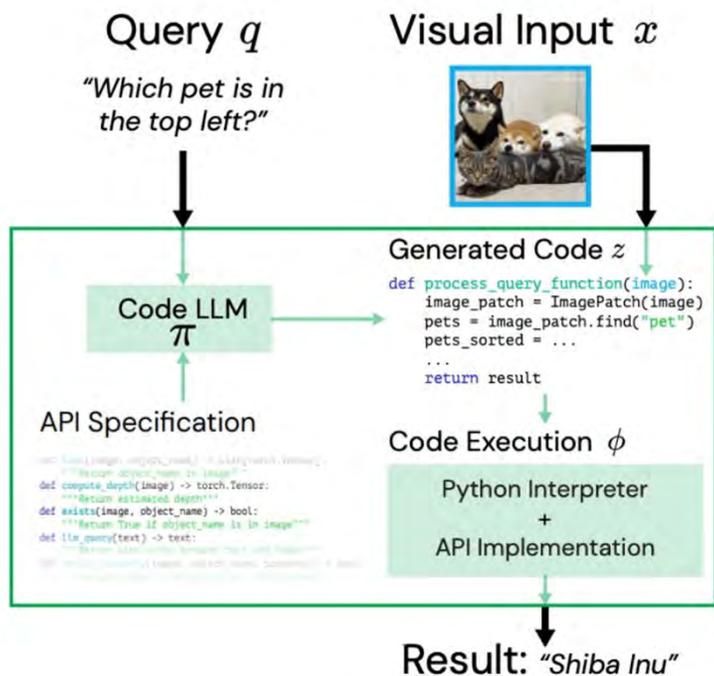


利点1：文書内の複雑な表の解析

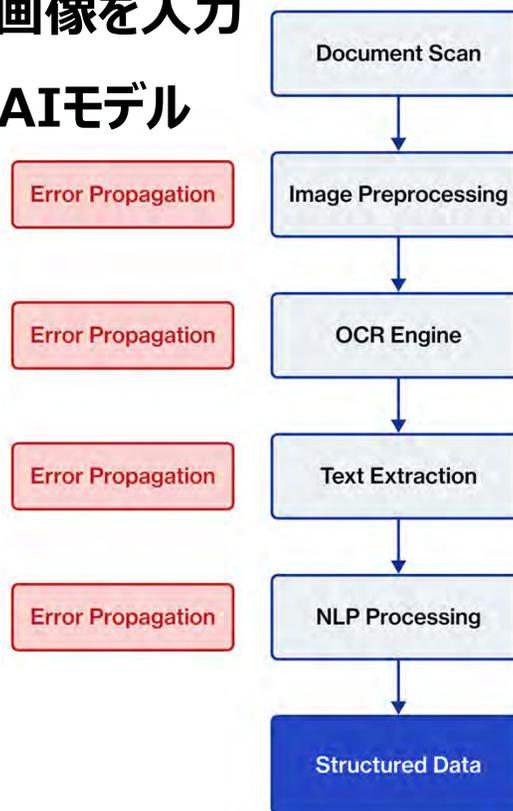
利点2：LLM生成コンテンツのテンプレートへの埋め込み

★文書解析への視覚言語モデルの活用（開発済）

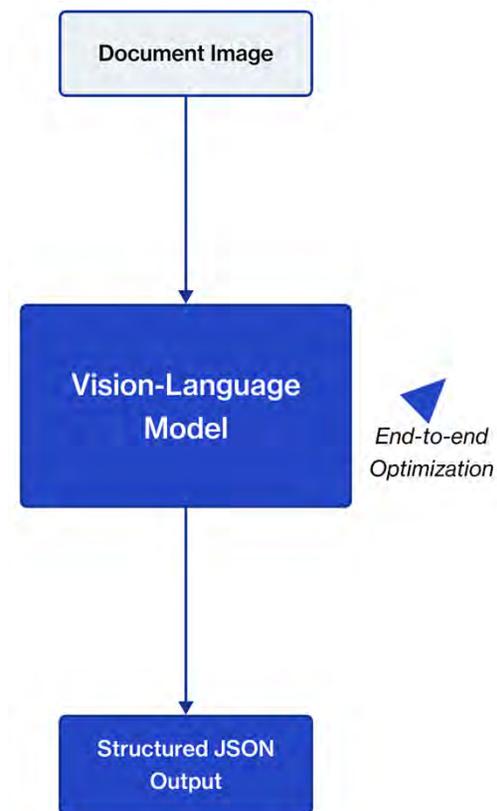
視覚言語モデル（VLM）：テキストと画像を入力としてテキストを生成するマルチモーダルAIモデル



視覚言語モデルの仕組み



(a) 従来型OCRパイプライン



(b) VLMベースのOCRモデル

★従来型OCRとVLMベースOCRの結果の比較（結果）

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
セルの結合			作業要領(手順)							
工事件名	MASKED						階層化ヘッダー			
No.	作業手順		注意事項			確認			備考	
1	作業準備		階層構造の題目			請負会社		関西電力		
	(1) ◎ 作業前読み合わせ					作責	品管	技術指導員	MASKED	

工事件名: MASKED
 MASKED
 作業要領(手順)
 No
 作業準備
 作業手順
 注意事項
 作責
 確認
 請負会社
 関西電力
 技術指導員
 品管
 考備
 (1) ◎ 作業前読み合わせ

**従来型OCR
パイプライン**

テキストのみ、
構造は喪失

**VLMベースの
OCRモデル**

構造化された
テキスト

```

1 作業要領 (手順)
2
3 工事件名: MASKED
4
5 <table>
6   <thead>
7     <tr>
8       <th rowspan="3">No.</th>
9       <th rowspan="3">作業手順</th>
10      <th rowspan="3">注意事項</th>
11      <th colspan="4">確認</th>
12      <th rowspan="3">備考</th>
13    </tr>
14    <tr>
15      <th colspan="3">請負会社</th>
16      <th rowspan="2">関 電</th>
17    </tr>
18    <tr>
19      <th>作責</th>
20      <th>品管</th>
21      <th>技術指導員</th>
22    </tr>
23  </thead>
24  <tbody>
25    <tr>
26      <td rowspan="2">1<br>◎</td>
27      <td rowspan="2">作業前読み合わせ<br>作業着手前打合せ<br></td>
  
```

MASKED

★ LLMに基づく文脈統合（開発済）

問題点：「4. エレベータ年次点検」が
(1)～(15) で、4ページにまたがる



提案：セクション単位に merge

4-(1)～4-(15)

ページ2

No.	作業手順
2	電圧確認 ① MASKED
3	電源開放の確認 ① MASKED
4	エレベータ年次点検 ① MASKED
	(2) MASKED
	(3) MASKED

ページ3

No.	作業手順
4	(4) MASKED
	(5) MASKED
6	(6) MASKED
	(7) MASKED
	(8) MASKED

ページ4

No.	作業手順
4	(9) MASKED
	(10) MASKED
	(11) MASKED
	(12) MASKED

ページ5

No.	作業手順
4	(13) MASKED
	(14) MASKED
	(15) MASKED
5	電源投入確認 ① MASKED
6	試運転 ① MASKED
	(2) MASKED
	(3) MASKED
	(4) MASKED

★ LLMに基づく文脈統合（結果）

結合後のJSON構造

```
{
  "doc_type": "作業要領",
  "work_name": "エレベータ年次点検",
  "document_id": "elevator_annual_inspection",
  "sections": [
    {
      "section_id": "4",
      "title": "エレベータ年次点検",
      "source_pages": [2, 3, 4, 5],
      "subsections": [
        { "...": "4-(1) ~ 4-(15) 見下" }
      ]
    }
  ]
}
```

入れ子のJSON構造

```
{
  "section_id": "4-1",
  "index": 1,
  "title": "機械室環境状態点検",
  "source_pages": [2],
  "procedure": ["a. ...", "b. ...", "c. ..."],
  "cautions": [],
  "remarks": ["..."],
  "confirm": { "請負会社_作責": "/", "請負会社_品管":
"/", "技術指導員": "/", "関電_委託員": "△" },
  {
    "section_id": "4-2",
    "index": 2,
    "title": "制御盤内各機器点検",
    "source_pages": [2],
    "procedure": ["a. ...", "b. ...", "c. ...", "d. ...", "e.
..."], ... (略)
  }
}
```

★文書間の関係性把握（開発中）

1. 文書構造分析

分析対象文書:

- 作業要領（手順） - エレベータ年次点検

文書には以下の主要カラム：

- **No.** - 手順番号
- **作業手順** - 作業内容
- **注意事項** - 注意すべき事項
- **確認** - 確認欄（複数のサブカラム）
- **備考** - 参照文書・補足情報

抽出された参照パターン

参考文書名	出典
使用部材点検チェックシート	備考欄
計量器点検チェックシート	備考欄
工具リスト	備考欄
ロープ式エレベータ定期検査報告書	備考欄
後片付けチェックシート	備考欄
機器点検チェックシート	備考欄
ホールドポイント	備考欄
4M / 3H日常業務管理シート	注意事項欄
作業実施要領書使用上の心得	注意事項欄
エレベータ判定基準表	備考欄／注意事項欄

★文書間の関係性把握（開発中）

作業要領（手順）の元構造（部分）

作業要領（手順）

作業名: エレベータ年次点検

(5 / 6)

No.	作業手順	注意事項	確認				備考
			請負会社		技術指導員	関電 (委託員)	
			作責	品管			
4	(13)ピット内各機器点検 a. MASKED b. MASKED	MASKED		/	/	△	・ロープ式エレベータ 定期検査報告書
	(14)各表示ランプ点検 a. MASKED	MASKED		/	/	△	・エレベータ 判定基準表
	(15)停電時管制運転装置点検 a. MASKED	MASKED 「エレベータ判定基準表」参照。					

★文書間の関係性把握（開発中）

2. 文書依存関係グラフ

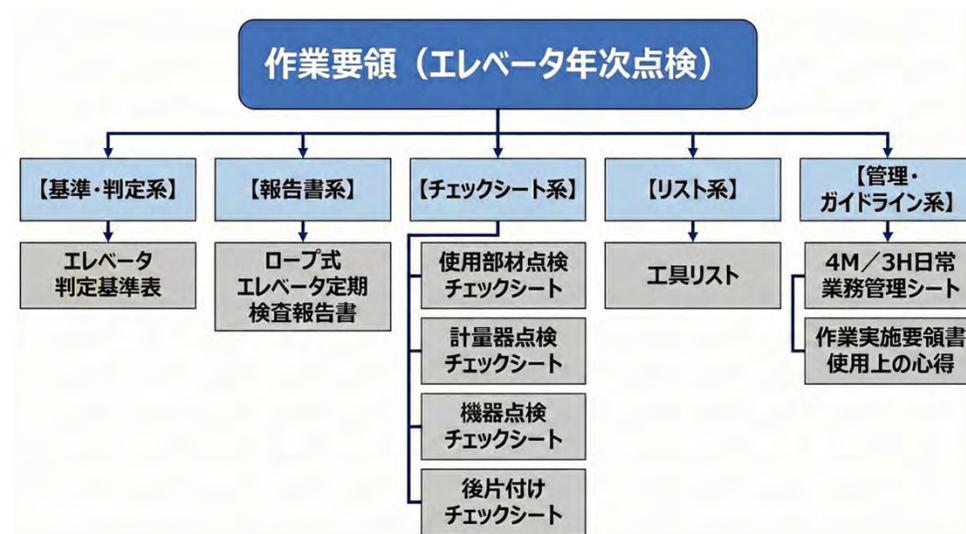
利点：

- 文書間の参照構造を直感的に把握できる
- 初期的な知識整理に有効

欠点：

- 同一文書がどの目的・判断のために参照されているかを表現できない
- 作業項目や点検対象との対応が不明確
- 検索精度・実用性が制限される

作業要領書の参考文書体系



doc-to-doc 関係だけでは不十分

★文書間の関係性把握（開発中）

3. 細分化の文書依存ナレッジグラフ（提案）

目的：

- 文書間の依存関係を細分化に構築する
- 作業手順を通じた文書間の関連性を可視化・検索可能にする。

手法：

- VLMで複雑表をMarkdown/JSONに解析
- LLMで文書の依存関係をナレッジグラフを構築（Node—Relationship—>Node）
- GraphML/Neo4jで関係を可視化

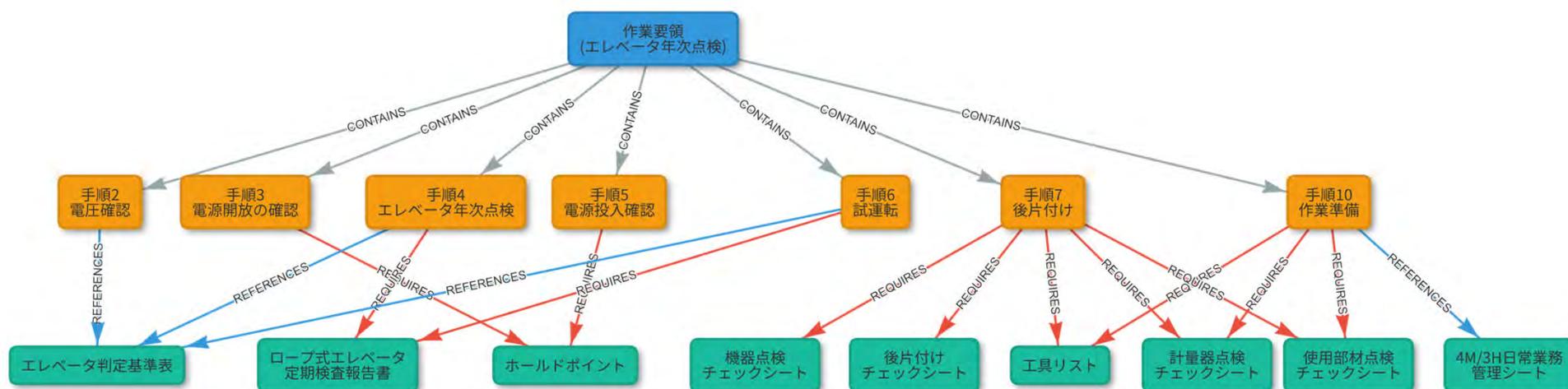


★文書間の関係性把握（開発中）

4. 分析対象文書の依存ナレッジグラフ（例）

構成要素：

- ノード（Nodes）：文書・作業手順・参考文書
- 依存関係（Relationship）：CONTAINS(包含)・REQUIRES(要求)・REFERENCES(参考)



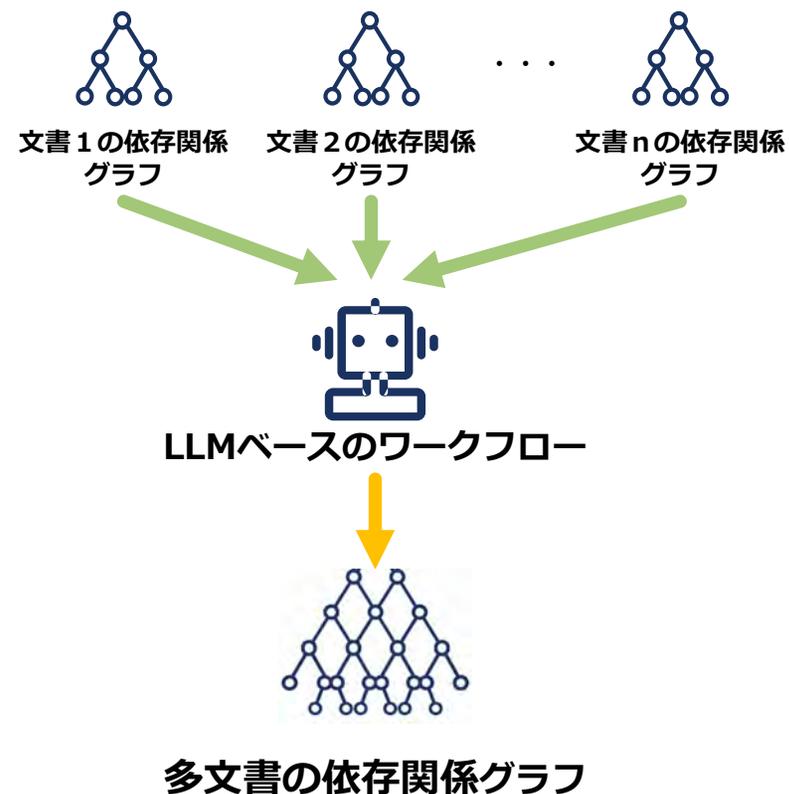
★複数の依存ナレッジグラフを融合（開発中）

1. 複数文書間ナレッジグラフの統合

- 文書ごとに生成された依存関係グラフの統一的表现
- ノード粒度（文書／ページ／手順）の整合性確保
- 冗長・矛盾する関係の統合処理

2. 依存関係抽出の信頼性

- LLM による関係推定の誤り・曖昧性
- 人手アノテーションによる評価指標の設計
- 高リスク工程における誤推論の抑制



まとめ

文書間の関係性把握は、

- VLM+LLM により、**セクション単位の細分化された作業手順で依存関係ナレッジグラフ**を構築可能
- 提案手法により、**単一文書内の参考依存性**を含めた可視化・検索が可能になる

今後の課題・展望

- 複数文書から生成された依存ナレッジグラフの **統合手法**
- 依存関係の **自動評価・誤り検出**
- RAG / 業務支援システムへの応用

4. 核セキュリティ・核物質防護システム へのAI応用に関する研究

4.1 ③悪意行動検知AIの開発

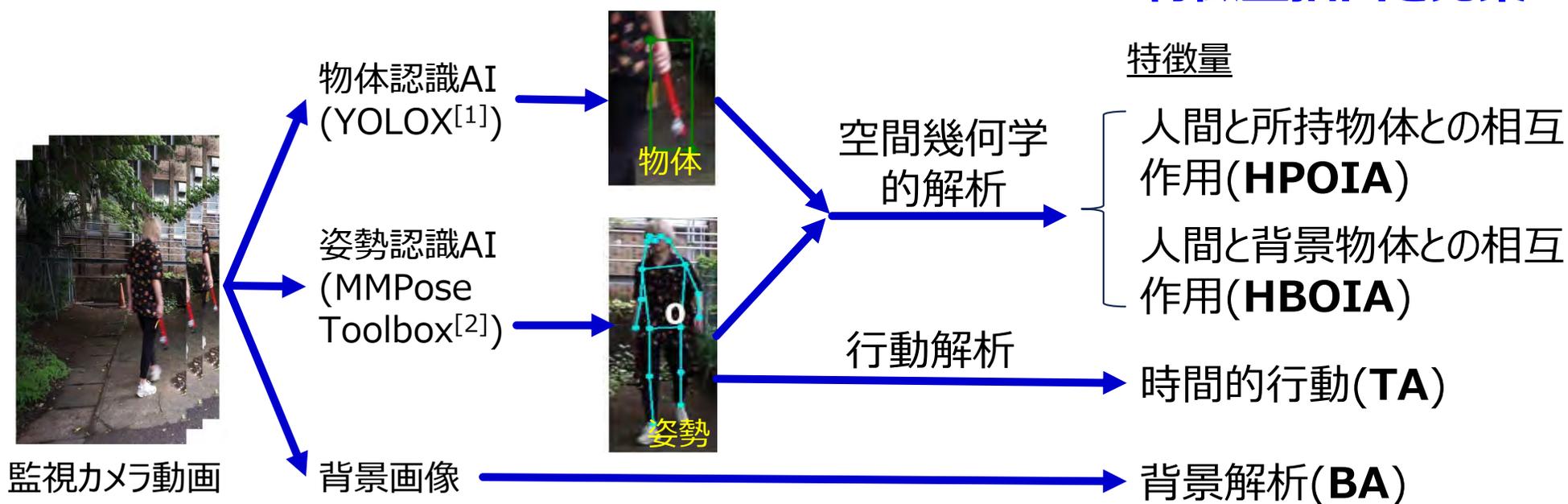
課題 5

4.2 ⑦BDBTシナリオ生成AIの開発

課題 6

特徴量抽出 行動識別(識別AI)

Point AIを用いた4種の特徴量抽出を提案



HPOIAS: Human-Portable Object Interaction Action
HBOIAS: Human-Background Object Interaction Action
TA: Temporal Action
BA: Background Analysis

[1] <https://github.com/open-mmlab/mmdetection>

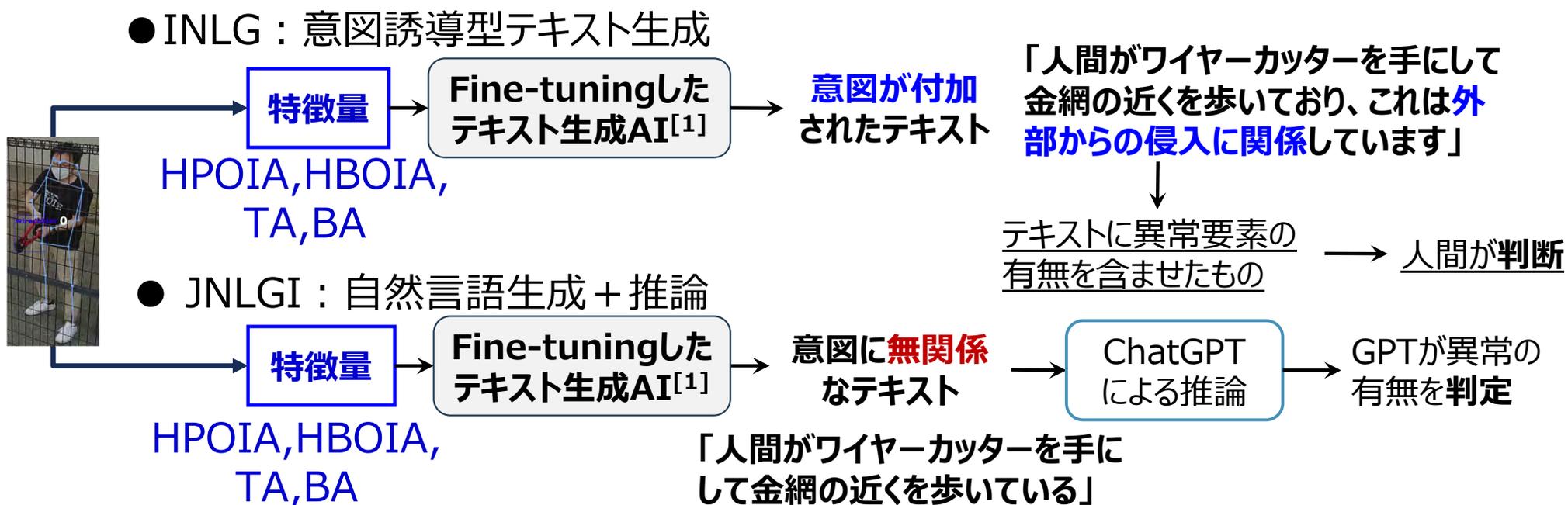
[2] <https://github.com/open-mmlab/mmpose>

行動のテキスト判定(生成AI)

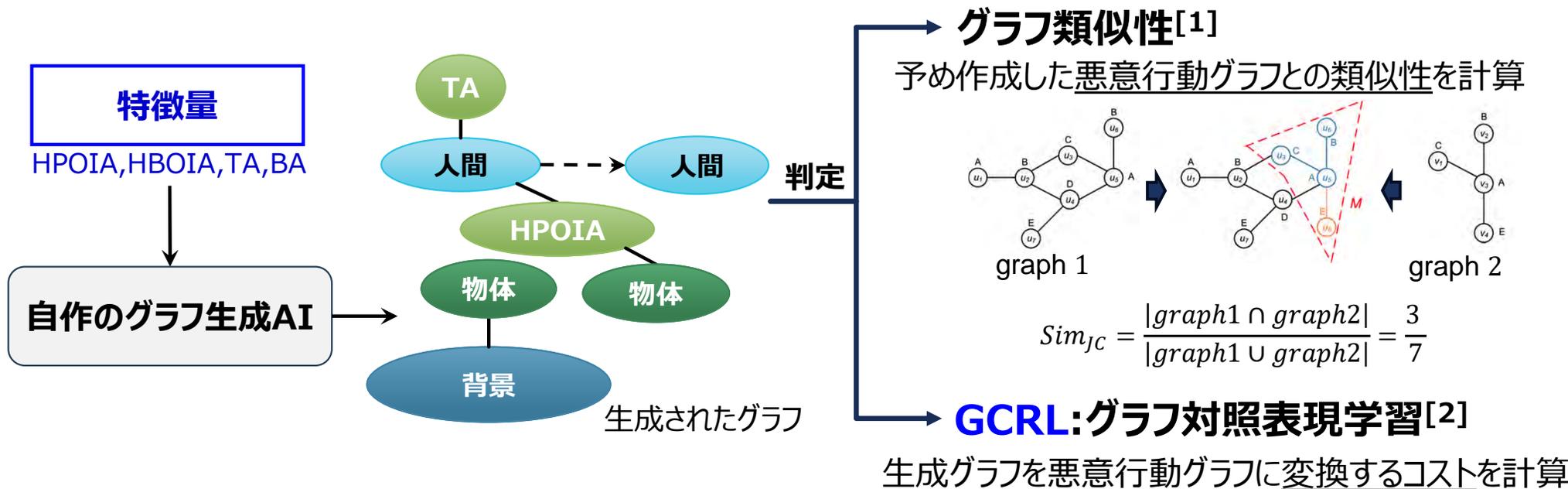
[1] EDACS, <https://github.com/marco-roberti/char-dtt-rareword>

- 4種の特徴量を入力とし、複雑な人間の行動を**テキスト(=文)**に変換
- 映像を「見た」人間の**脳**が、状況を「**文に要約して、文で判断**」することを模倣

Point



行動のグラフ判定(生成AI)



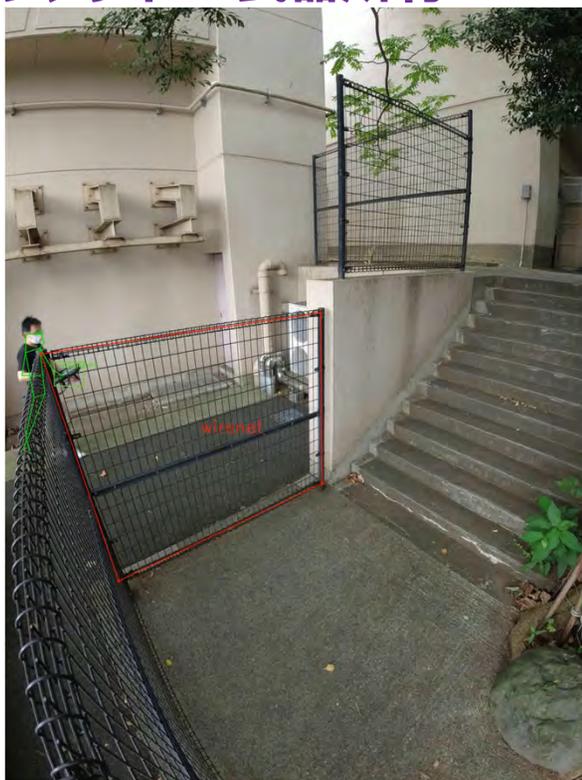
- 複雑な人間の行動の「**グラフ要約**」 **Point**
- 予め作成の悪意行為グラフとの類似性で比較

[1] Ullmann, Julian R. "An algorithm for subgraph isomorphism." *Journal of the ACM (JACM)* 23.1 (1976): 31-42.

[2] Sanfeliu, Alberto, and King-Sun Fu. "A distance measure between attributed relational graphs for pattern recognition." *IEEE* (1983): 353-362.

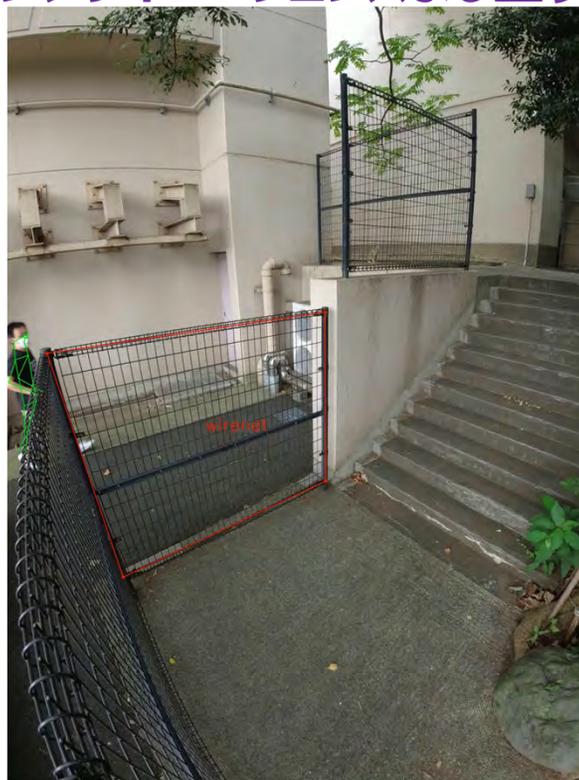
悪意行動判定の結果(テキスト判定JNLGIの場合)

シナリオ1: 武器所有



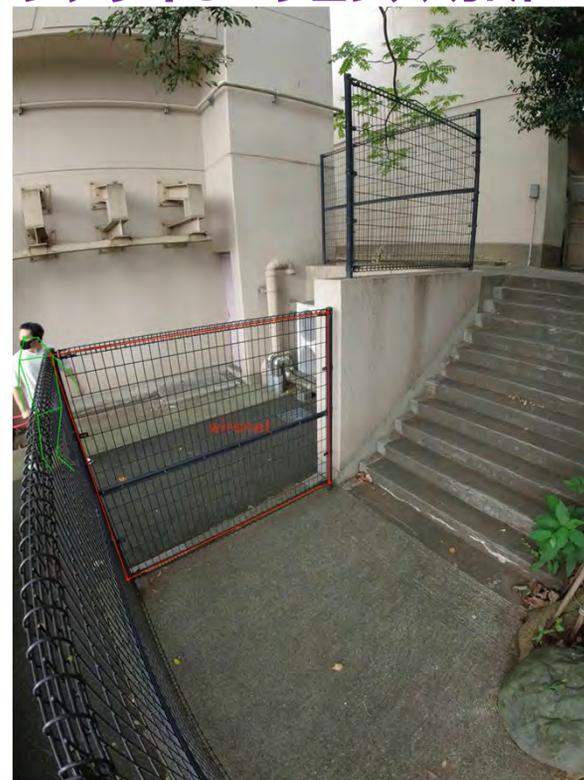
human is walking with a launcher in hand

シナリオ2: フェンスよじ登り



human is walking

シナリオ3: フェンス切断



human is walking

画像の下に悪意行動判定結果を表示 (正常時: 緑、異常時: 赤)

シナリオ4: ドア破壊



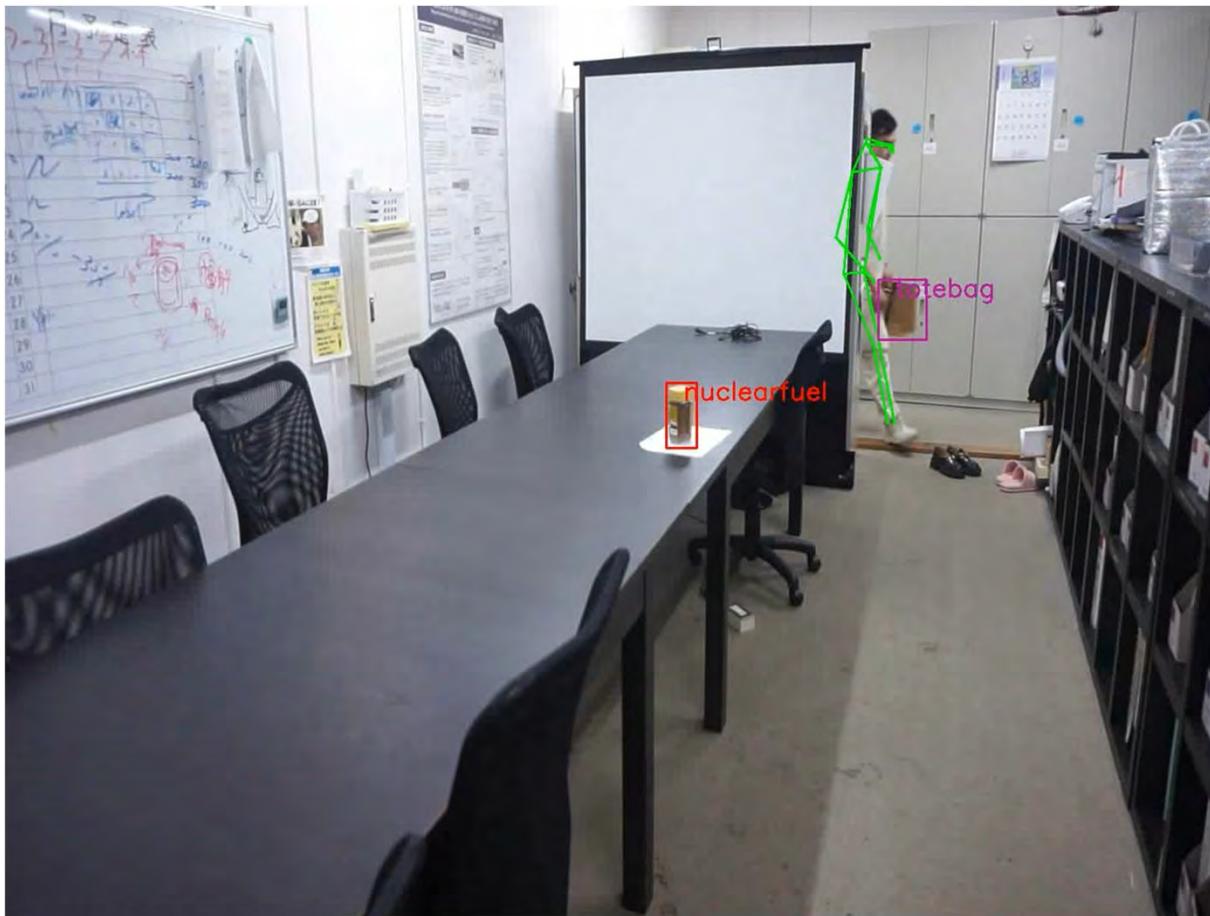
human is walking

シナリオ5: 核物質盗取



nuclearfuel exists in the background, and human is walking

シナリオ 6：核物質盗取 with トートバッグ



human is walking with a totebag in hand

各手法による悪意行動判定の正解率

型	手法	Precision	Recall	Accuracy	F1-score
動画重視 [従来手法]	フレームシーケンスの再構築	0.7241	0.6176	0.7083	0.6666
	未来フレーム予測	0.7617	0.8824	0.7917	0.8176
特徴量抽出 (人間解析)	データ判定	0.7143	0.9677	0.8194	0.8219
	テキスト判定 (JNLGI)	0.7250	0.9355	0.8194	0.8169
	グラフ判定 (GCRL)	0.8333	0.8065	0.8472	0.8197
	ハイブリッド判定 (2-stage)	0.7805	0.9412	0.8472	0.8534

2022年9月5-9日, ベルギー/ブリュッセルで開催の「核セキュリティへのAI応用」Workshopで講師

4.2 ⑦ BDBTシナリオ生成AIの開発

★ R5-6年度の開発：LLMではなく、**強化学習AI**とMAの連成

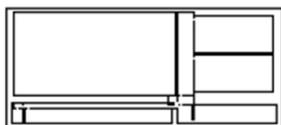
「想定外のシナリオ = BDBT」を、強化学習AI + マルチエージェントモデルの連携で、つくる



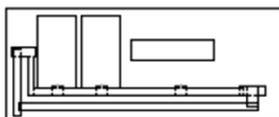
冷却系の破壊シナリオ

Step 0

B2F



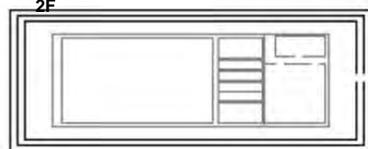
B1F



1F



2F



ログ：Standoffが放射線物質管理室を破壊
 ログ：Agent 3が浸和剤貯蔵室を破壊
 ログ：Agent 5が冷却剤供給室を破壊
 ログ：Agent 3が冷却剤圧縮室を破壊

← R5-6年度の反省点：

- ランダム移動の学習に時間が割かれた
- このため、「思いもよらない」想定外シナリオまでには至らなかった

★ **改良**：LLMベースの開発に変更

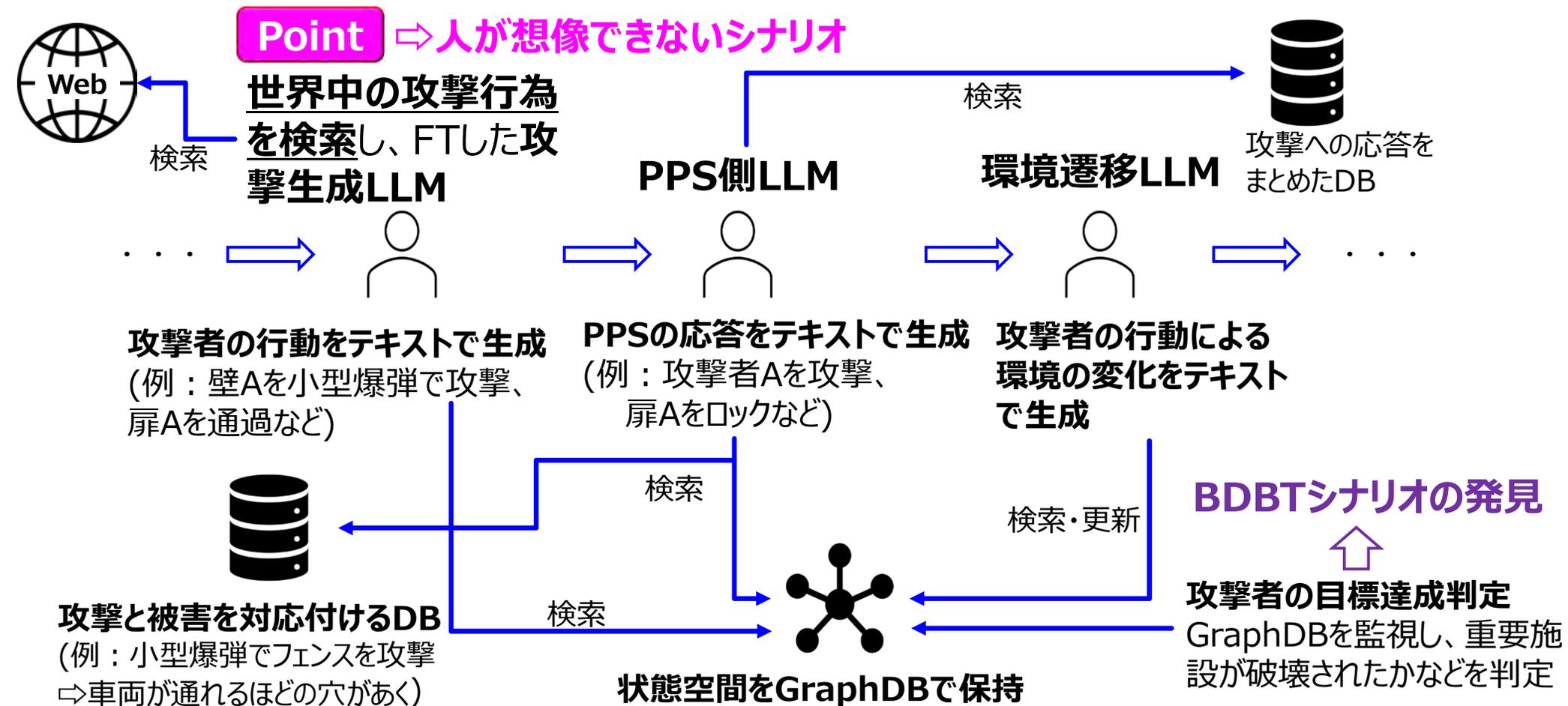
- 無駄な動きを省略
- 敵、PP、設備配置、所内人員など状態空間の特性をテキストのみで定義

★状態空間の特性をテキストのみで定義する、とは？

- シナリオ構築のためだけなら、建物やPPを詳細に状態空間上に配置することは不要と考えた
- テキストだけのため、設定 & 変更が容易というメリット
- BDBT以外にも水平展開可能（**緊急時避難計画生成**など）

ノード名	キー	バリュー
Attacker	description	Main attacker aiming to seize the control room.
	status	active
	initial_position	entrance
	target_area	radiation_control
	weapon	[rifle]
radiation_control	description	Central monitoring and control for radiation levels throughout the plant.
	security_level	5
	door_type	heavy_security_door
	door_status	locked

LLMを用いたテキストベースのBDBTシナリオ抽出手法（開発中）



③の開発状況

過去のテロ事件DB[1]を参照し、攻撃者の構成をLLMで自動生成する機能を実装

- 世界中の過去に起きたテロや暴動事件をまとめたデータベース[1]を活用
- テロDBから**ランダム**に事件の詳細や武器情報等を取得し、LLMに与えることで、**現実的かつ多様な攻撃構成（背景・人数・武器・人物像）**を生成

country_txt text	city text	summary text	attacktype1_txt text	weapsubtype1_txt text
United Stat...	Cairo	1/1/1970: Unknown African American assailants fired several bulle...	Armed Assault	Unknown Gun Type
United Stat...	Oakland	1/2/1970: Unknown perpetrators detonated explosives at the Pacifi...	Bombing/Explosion	Unknown Explosive Type
United Stat...	Madison	1/2/1970: Karl Armstrong, a member of the New Years Gang, threw...	Facility/Infrastructure Attack	Molotov Cocktail/Petrol Bomb
United Stat...	Madison	1/3/1970: Karl Armstrong, a member of the New Years Gang, broke...	Facility/Infrastructure Attack	Gasoline or Alcohol
United Stat...	Denver	1/6/1970: Unknown perpetrators threw a Molotov cocktail into an A...	Facility/Infrastructure Attack	Molotov Cocktail/Petrol Bomb

世界の過去のテロ事件DB

[1] START「Global Terrorism Database (GTD)」<https://www.start.umd.edu/data-tools/GT>

攻撃構成生成の実行結果

LLMに与えたデータ

地域		事件の概要	攻撃の種類	武器の種類
country_text	city_text	summary_text	attacktype1_txt	weapsubtype1_txt
China	Hotan	05/11/2015: An assailant threw an explosive device at a police checkpoint in Hotan town, ...	Bombing/Explosion	Unknown Explosive Type
China	Hong Kong	10/02/2017: An assailant set fire to the office of Bill Tang Ka-piu in Yat Tung Estate neigh...	Facility/Infrastructure Attack	Arson/Fire
China	Hong Kong	09/05/2019: Assailants threw petrol bombs at the home of Jimmy Lai Chee-ying, the foun...	Armed Assault	Molotov Cocktail/Petrol Bomb
China	Hong Kong	03/31/2020: Assailants threw five incendiary devices at the Tai Po Police Station in Tai Po...	Armed Assault	Molotov Cocktail/Petrol Bomb

エリアをアジア圏に限定した上で、ランダムに抽出

LLMが生成した攻撃構成

1人目

説明：高度な訓練を受けたリーダーであり、爆発物と重火器の専門家。原子力発電所の複雑なセキュリティ体制と重武装の警備員を突破する初期段階を指揮する。参考とした事件データにおける、爆発物を使用した攻撃の組織性や突破の困難性を考慮した役割。
武器："C4プラスチック爆弾", "アサルトライフル", "破城槌"

3人目

説明：管理区域に侵入後、冷却システムの直接的な物理的破壊に特化する。各システムが設置された部屋に進入し、システム本体に高性能爆薬や焼夷装置を仕掛け、完全に機能を停止させる。特に原子炉格納容器付近に設置された重要設備の破壊は、高い精度と冷静さを要する。参考とした事件データにおける施設への放火や破壊の実行者としての役割。
武器："C4プラスチック爆弾", "焼夷手榴弾", "ポータブルグラインダー"

2人目

説明：チームリーダーを支援し、警備員の制圧と追加のセキュリティ障壁の無力化を行う。侵入経路における監視と後方支援、そして緊急時の撤退ルート確保にも従事する。参考とした事件データに見られる武装襲撃の側面を取り入れ、直接的な脅威を排除する役割。
武器："アサルトライフル", "手榴弾", "フラッシュバン"

4人目

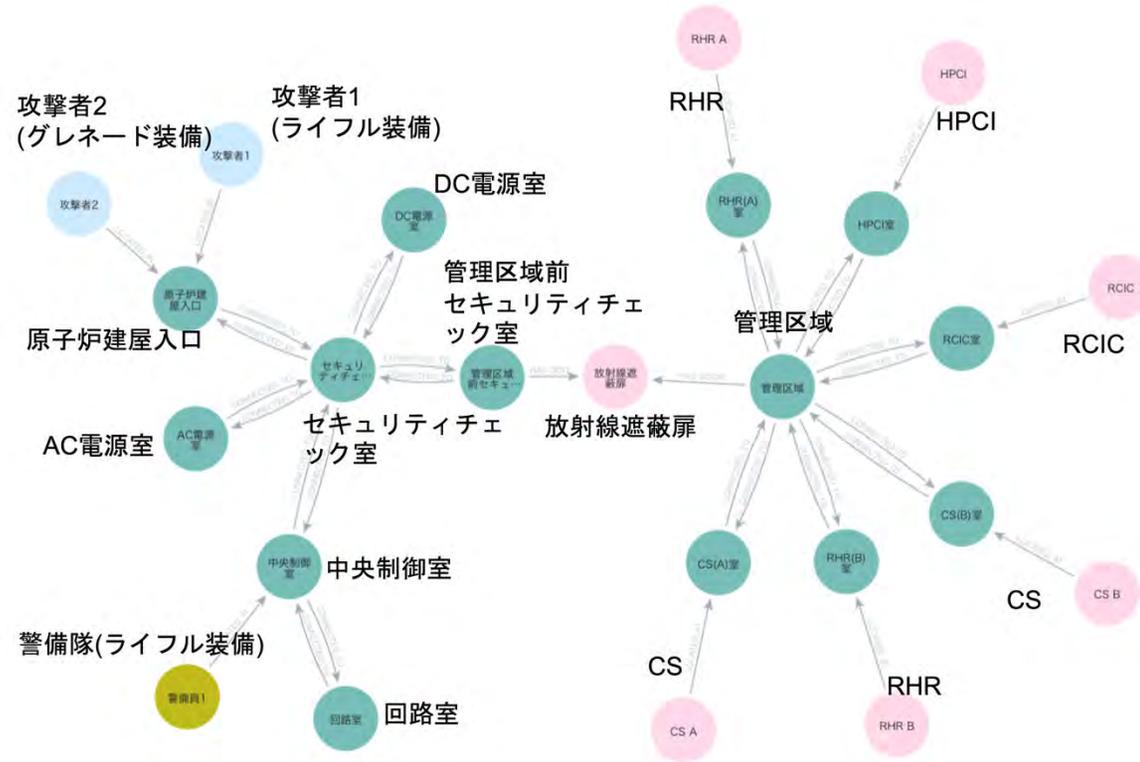
説明：システム破壊担当者を補助し、効率的な破壊活動を保証する。主要システムの損壊状況を確認し、必要に応じて追加の破壊工作を行うほか、配線や制御盤など、二次的なターゲットの破壊も担当する。また、万が一の事態に備え、予備の破壊工作具を携帯する。火炎瓶を使った事件の例から、追加的な破壊や混乱の誘発の役割。
武器："焼夷弾",
"ハッキングツールキット（制御盤用）", "金属切断ツール",
"Molotov Cocktail"

組織のタイプ：政治的イデオロギーに基づく過激派組織

目的：原子力施設への攻撃により社会に未曾有の混乱を引き起こし、世界の注意を引きつけることで、特定の政治的主張や大義を国際社会に向けて強烈に発信する。現状の政府、経済システム、または特定の社会問題に対する不満と怒りを表明し、抜本的な変革を要求する。

シミュレーション条件

- 攻撃側の構成：LLMが生成した構成。初期位置は原子炉建屋入口
- 攻撃者の目的：RHR・HPCI・RCIC・CSの破壊
- 警備隊：1人。ライフルを装備。初期位置は中央制御室
- 放射線遮蔽扉は分厚く鉛製で、ロックされている



シミュレーション対象のNPPの状態空間

シミュレーション結果

ターン	エージェント	行動	行動の根拠
1	攻撃者1	セキュリティチェック室へ移動	目標システムへ向かうため
	攻撃者2	セキュリティチェック室へ移動	目標システムへ向かうため
	攻撃者3	セキュリティチェック室へ移動	目標システムへ向かうため
	攻撃者4	セキュリティチェック室へ移動	目標システムへ向かうため
	警備隊	セキュリティチェック室へ移動	重要施設への侵入経路を監視するため
2	攻撃者1	管理区域前セキュリティチェック室に移動	次の障壁突破に備えるため
	攻撃者2	現在の部屋にいる警備員をアサルトライフルで制圧	警備員を排除し、次のエリアへ進むため
	攻撃者3	管理区域前セキュリティチェック室に移動	次の障壁突破に備えるため
	攻撃者4	管理区域前セキュリティチェック室に移動	次の障壁突破に備えるため
	警備隊	攻撃者1を攻撃	侵入者を阻止するため
3	攻撃者1	放射線遮蔽扉をC4で攻撃	管理区域への侵入経路を確保するため
	攻撃者2	管理区域前セキュリティチェック室に移動	次のセキュリティ障壁である放射線遮蔽扉の突破を支援するため
	攻撃者3	放射線遮蔽扉をC4で攻撃	チームリーダーを援護し、放射線遮蔽扉の破壊を加速させるため
	攻撃者4	放射線遮蔽扉を金属切断ツールで攻撃	放射線遮蔽扉の破壊を補助するため
	警備隊	行動不能	攻撃者1に注意を向けていたため、攻撃者2の攻撃に対応しきれずに無力化
9	攻撃者1	HPCIシステムを攻撃	主要な目的の一つ
	攻撃者2	RCICシステムを攻撃	主要な目的の一つ
	攻撃者3	HPCIシステムを攻撃	主要な目的の一つ
	攻撃者4	RCICシステムを攻撃	主要な目的の一つ

今後の展望

より複雑な状況の表現

- ドローン、内部脅威者といった新たな脅威の実装
- シミュレーションに含める建物やエリアを拡大する
 - 現状は原子炉建屋のみだが、原子力発電所全体を含める

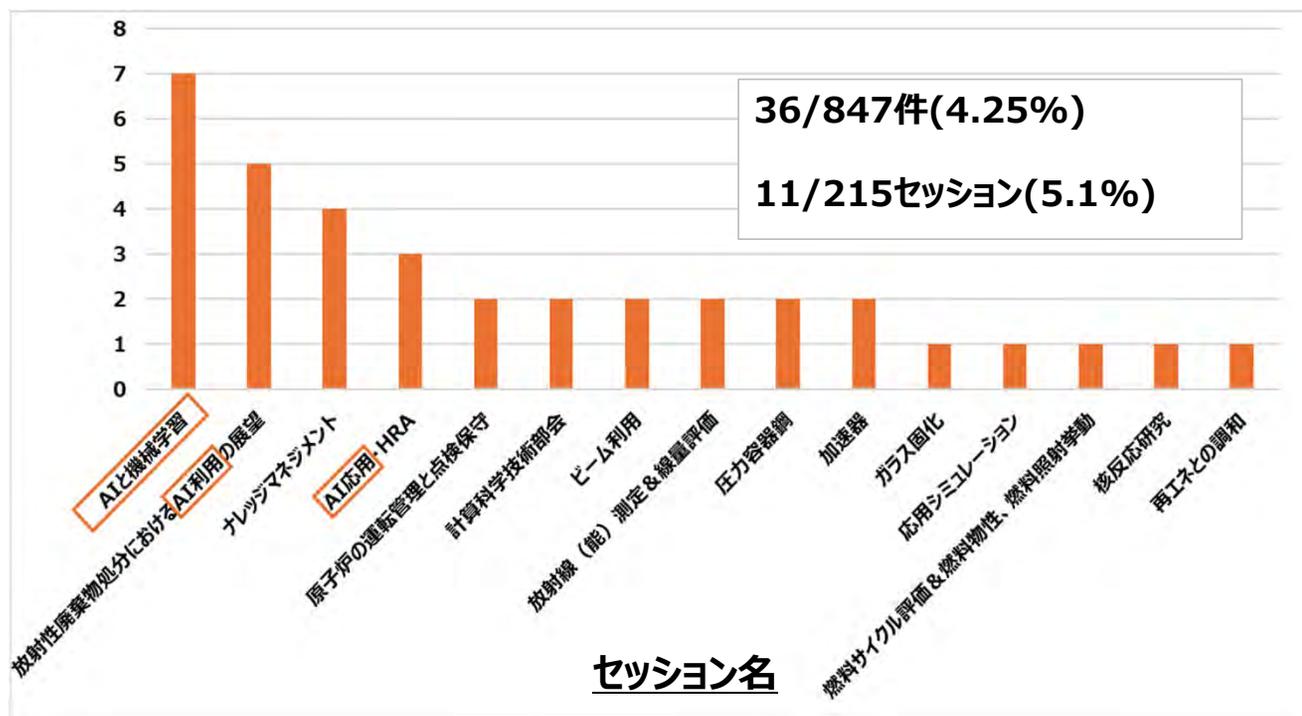
クラウドLLMからローカルLLMに移行

- 現在はクラウドのGeminiを用いているが、セキュリティ確保および高いカスタマイズ性を重視し、ローカルLLMへの移行を検討
- 必要であればLLMのファインチューニングにより、モデルを攻撃行動の生成に特化させる

5. 教育

日本原子力学会2025年秋の大会におけるAI関連研究

発表件数：抄訳に“AI”、“機械学習”等のワードを含む発表をカウント



- 36/847件(4.25%)、11/215セッション(5.1%)がAIに取り組んでいる
- 参考：ICONE32では約20/979件(2.04%)



原子力の「学」におけるAIへのまだまだ興味は薄い

- **とは言え、他産業でAIが導入が進んでいるから、原子力も取り残されずにAIを導入する、というのは本末転倒**
- AIの特性（網羅性、気付き、学習）に、安全を損なわずに安全&効率向上の可能性があるので、AI導入を検討するのが**本道**
- この本道を理解し、さらに原子力&AIの両方について高度で先端的な知を識るリーダー人材の輩出が必要

まずは、**AIの特性を理解し**、そのうえで原子力への活用への道を**自ら見出し**、かつ**道筋を立てられる人材**を

i. 修士・博士学生への
AI教育・研究指導

ii. 学部講義へのAI要素の
取り入れ(既に実施)を更に加速

iii. 民との共同研究・開発から
ニーズ・シーズを学ぶ※特に重要



課題1

課題2

課題3

課題4

課題5

課題6

6. まとめと今後の課題

まとめ

- **3Sに貢献する原子力AI学の構築と開発を、まずは6つの課題から。さらに水平展開(避難計画など)。**
- **原子力 & AIの両方を識るリーダー人材の養成**

今後の課題

- **国内外の様々な組織との連携強化**
 - ⇒ **まだ世に無い新技術開発 & 学びの機会**
- **最後はデータの豊富さが勝敗を分ける**
 - ⇒ **原子力AIのための教師データ活用の仕組み**

国内原子力産業はAI潜在力を有する

- 個別のAI研究・開発の事例は少なくない
 - 但し、**将来像**の共有がなく、五月雨式（できるところからやる）
 - よって導入のための**業界ルール**等もまだない
 - さらに、極めて**厳しい規制**と安全への**影響評価**の**労力**を懸念してAI導入に慎重
-
- しかし、**AI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
 - 保守管理データ等を長年にわたり豊富に蓄積した**原子力こそ、日本のAI拠点となる潜在力**

ご清聴ありがとうございました