

原子力委員会殿ご説明資料

2025年12月16日(火)14:00~
@Teamsオンライン

AIによる保全の効率化

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>

1. はじめに

なぜAIを原子力に(Why)

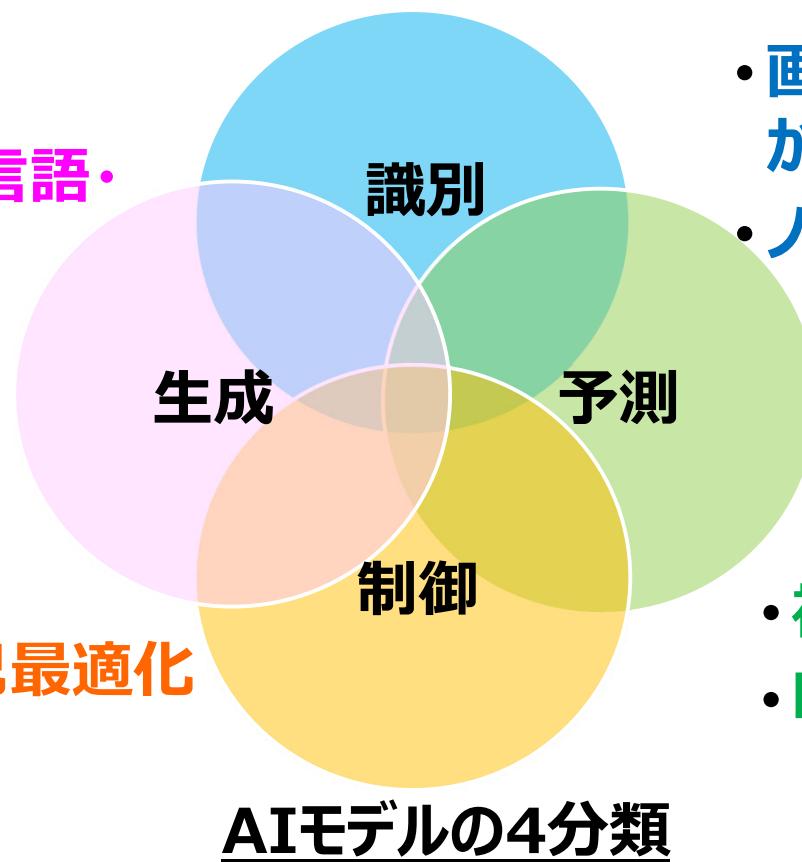
- ・ 他産業でAIが導入が進んでいるから、原子力も取り残されずにAIを導入する、というのは**本末転倒**
- ・ **AIの特性**：優れた網羅性、相関や微細な傾向の気付き、学習による最適化
- ・ AIの特性に、**安全性向上や安全を損なわずに経済性向上の可能性**があるからこそ、AI導入を検討するのが**本道**

AI(人工知能)とは？

人間の知的な働きをコンピューターで模倣・再現する技術

- 多様形式の生成：言語・画像・音楽
- 柔軟な変換

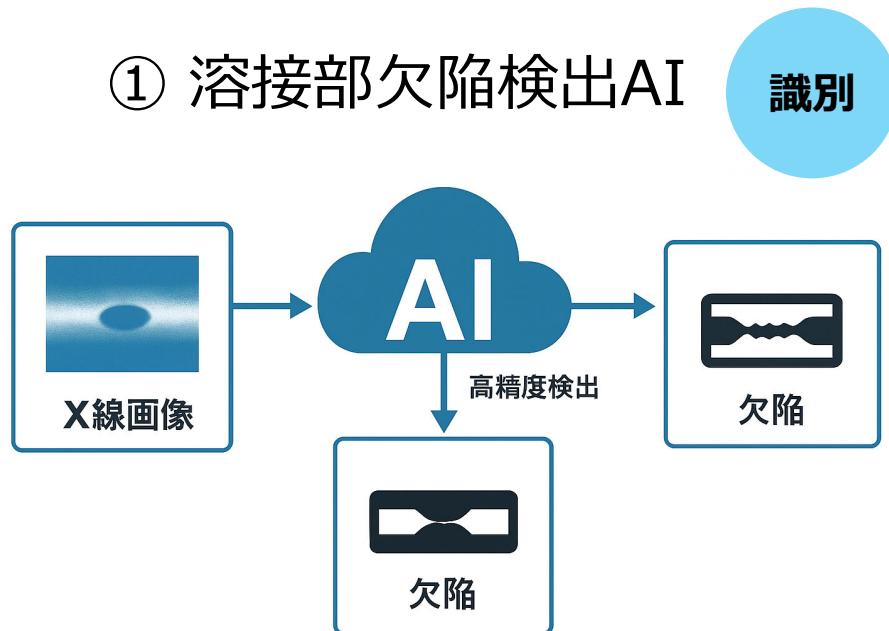
- 強化学習による自己最適化
- 動的応答



- 画像・音声・テキストの高速かつ正確な認識
 - ノイズ耐性
-
- 複雑なパターンの予測
 - 時系列データの予測

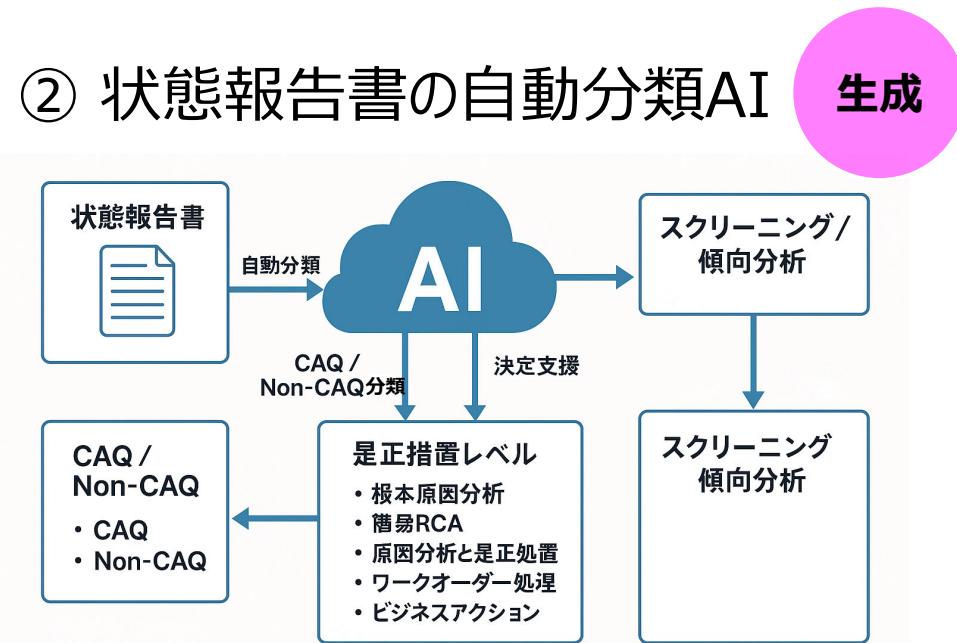
原子力業界はすでにAI活用に取り組み始めている

① 溶接部欠陥検出AI



識別

② 状態報告書の自動分類AI



生成

画像内のパターンや濃淡を
学習済みAIモデルが評価

状態報告書の自動分類・決定支援
を学習済みAIモデルが評価

CAP: Corrective Action Program (是正措置プログラム)

CAQ: Condition Adverse to Quality (品質に対する不利な状態)

③米国NRCが進めるARPA-E GEMINAプロジェクト

予測



- ・米国の原子力発電は高いパフォーマンスにも拘らず約1/4が財政難
- ・将来のSMRのO&M費の大幅削減をDigital Twinで実現したい

⇒ 9つのSMR開発拠点に対し、Digital Twin開発費を支援

加圧水型



VOYGR(NuScale Power)



SMR-160
(Holtec International)

水冷却炉



BWRX-300(GE Hitachi)

溶融塩冷却高温炉



KP-FHR(Kairos Power)

ナトリウム冷却高速炉



Natrium(TerraPower)

非水冷却



高温ガス炉

液体金属高速炉



Aurora(Oklo)

ヒートパイプ冷却高速炉



eVinci(Westinghouse)

マイクロ炉

極小高温ガス炉



BANR
(BWXT Advanced Technologies)

<https://www.jaif.or.jp/journal/study/smr/top.html>

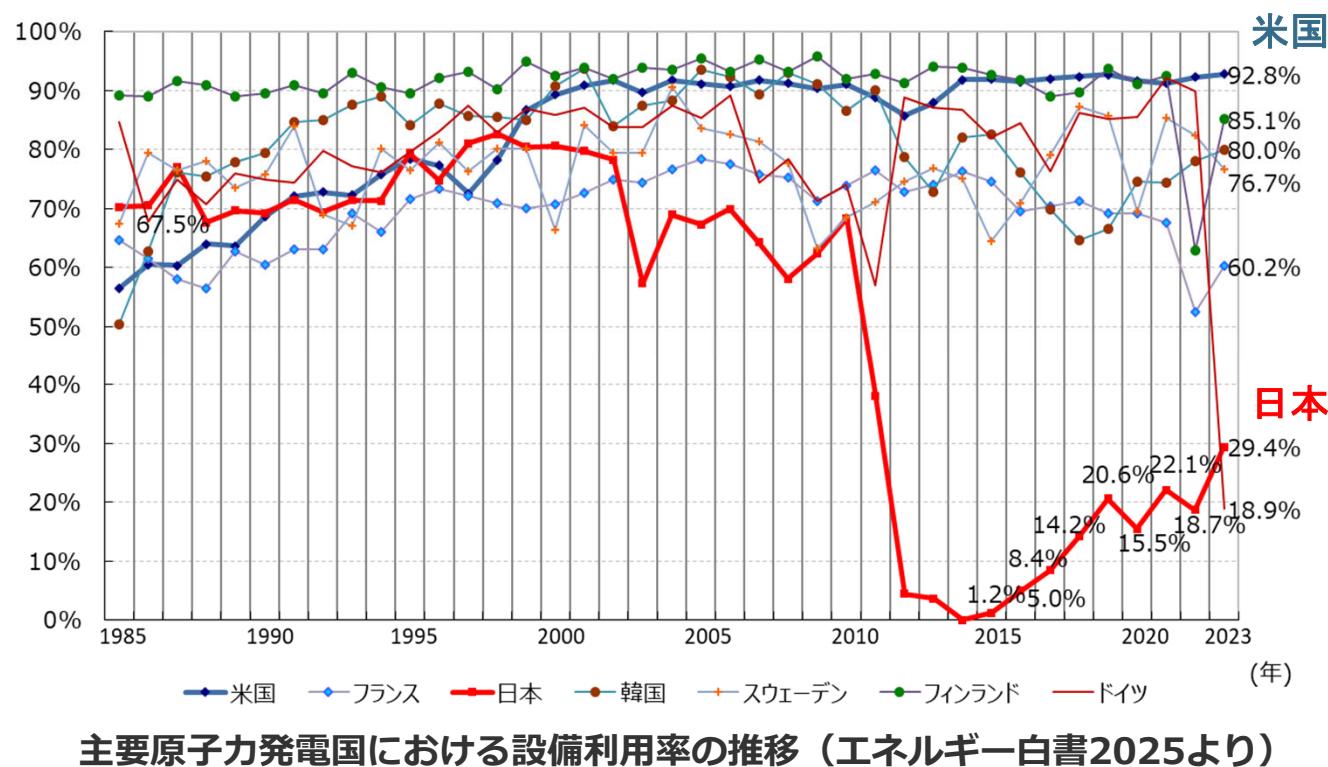
原子力発電へのOLM導入の必要性

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 課題とは？



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りスク評価モデルの構築

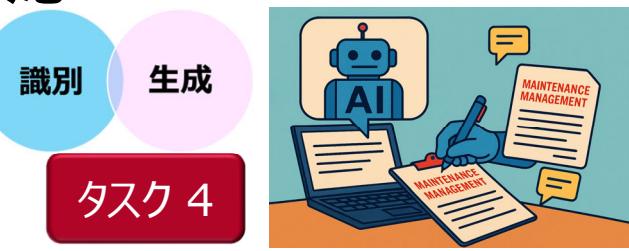
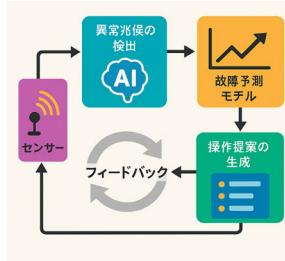
AI適用によるOLM導入の技術的課題への対応



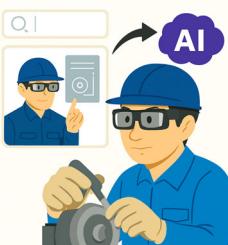
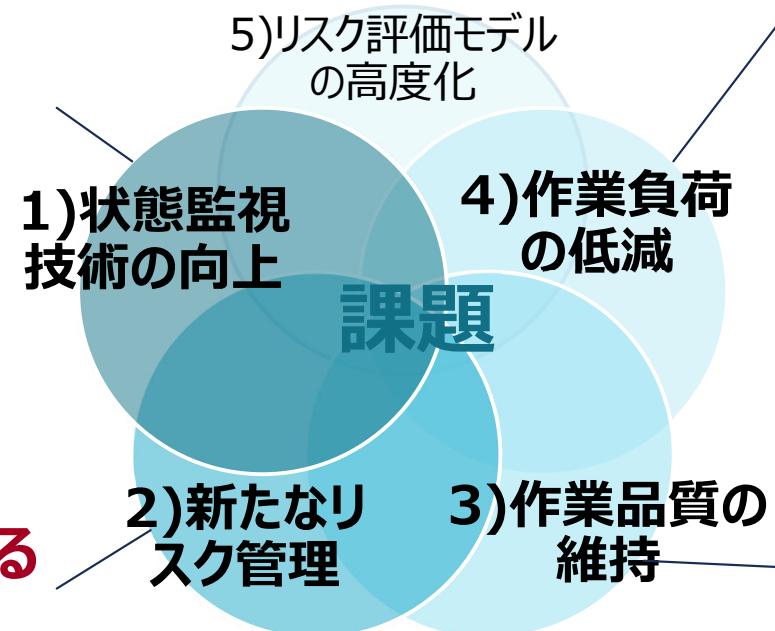
①異常機器を検知・
同定するAIの開発



②正常回復策を提案する
AIの開発



④保守管理文書を
生成するAIの開発



③作業支援情報を
提供するAIの開発



これら課題に対応するAI手法を、異種AI融合で開発



出町研で開発した原子力用AIモデル		ハイブリッド
目的	開発したAI手法	
設備保全マネジメント	①異常機器の逆推定AI ④正常回復策提案AI ⑤作業支援情報提示AI ⑧保守管理文書生成AI ⑥廃炉プラント3D点群データCAD化	タスク1 タスク2 タスク3 タスク4 ●
核セキュリティ	③悪意行動検知AI ⑦BDBTシナリオ生成AI	タスク5 タスク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

社会連携講座「原子力AI学」の3つの研究分野

連携先： 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)

(1)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

タスク1
タスク2

(2)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

タスク 5
タスク 6

(3)事故時安全対応支援システム

岡本孝司教授、
三輪修一郎准教授

出町研では、

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

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

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

タスク 1

タスク 2

タスク 3

タスク 4

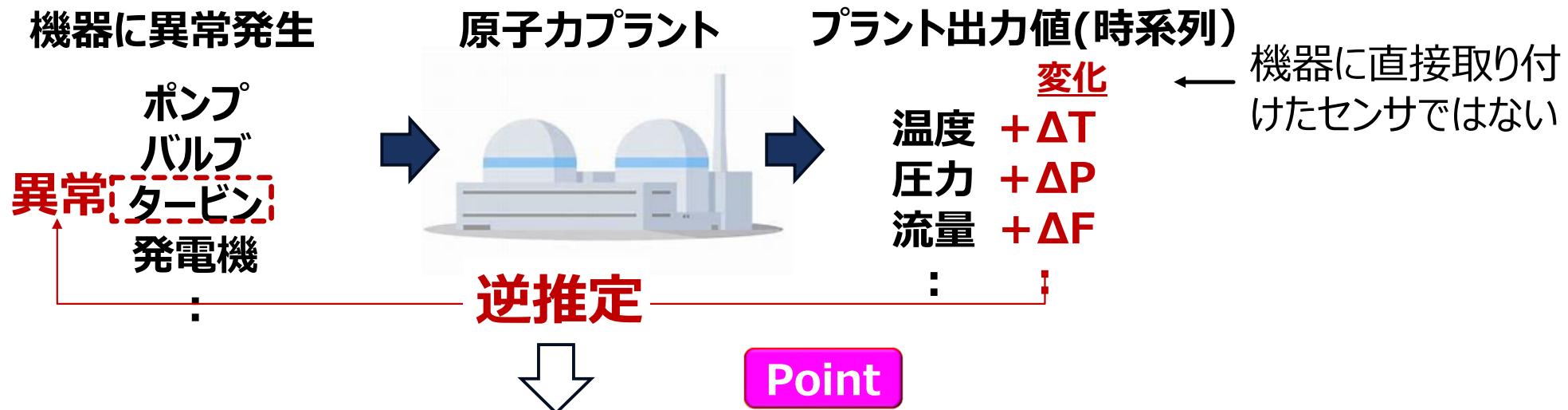
2.1 ①異常発生機器の逆推定AIの開発

タスク 1

13

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

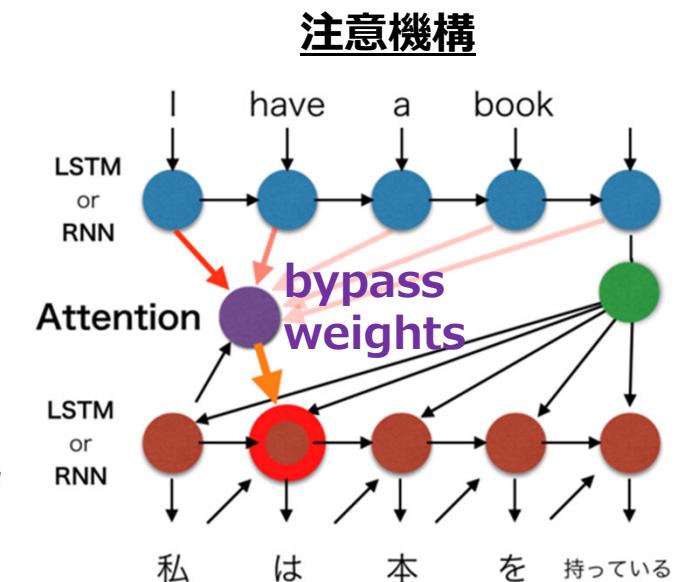
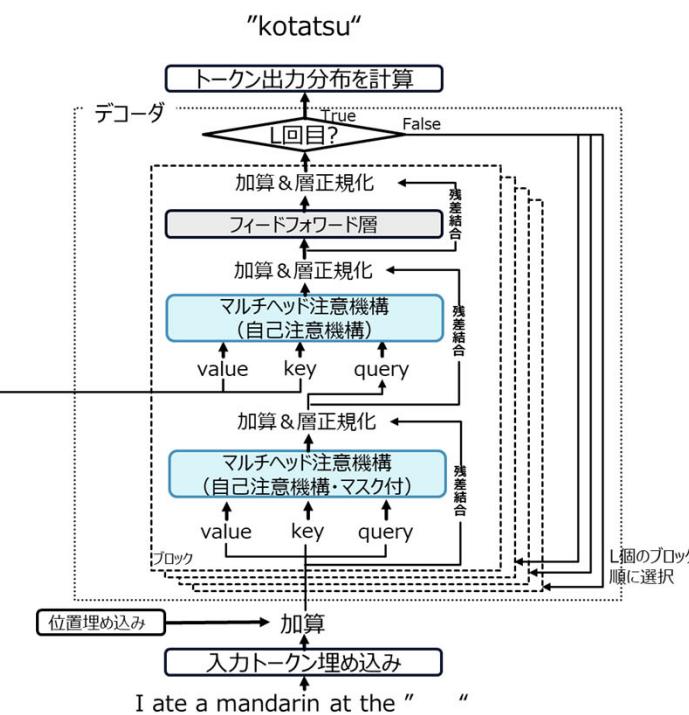
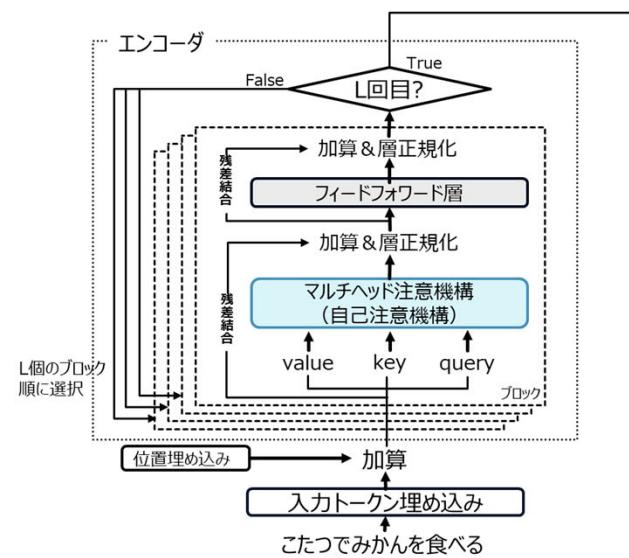


時系列データの**予測AI**に**生成AI(注意機構)**を組み合わせ、逆推定精度を向上

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

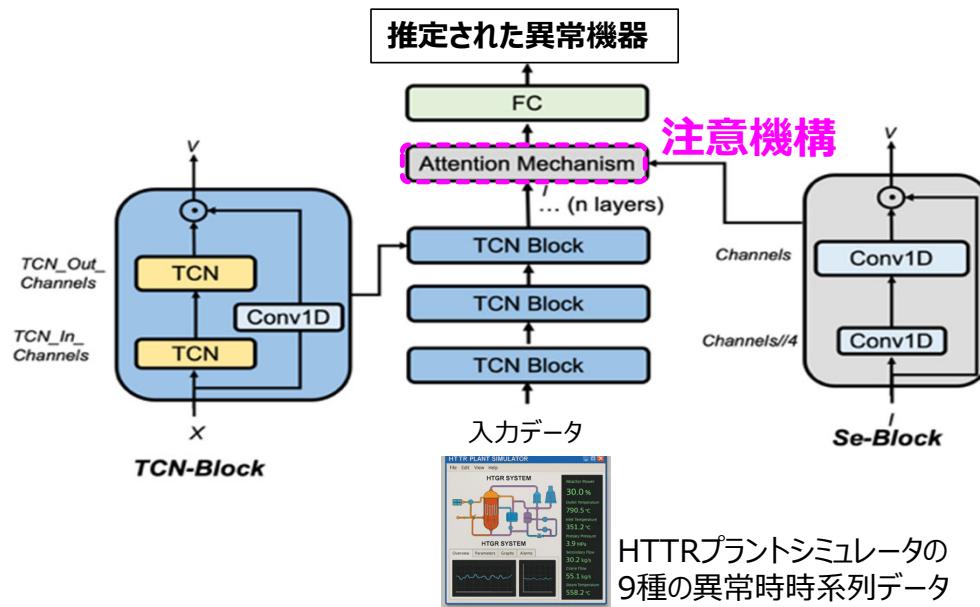
Transformer architecture



異常機器逆推定(識別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
Dlineaer	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



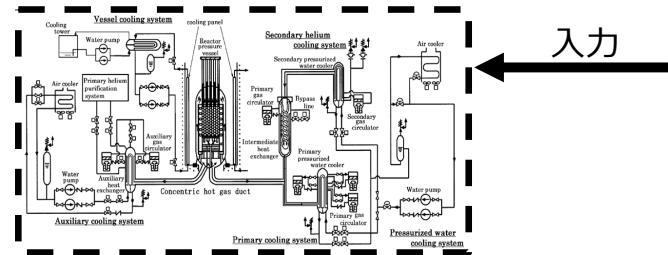
現時点で最高の異常機器逆推定精度を達成

[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.

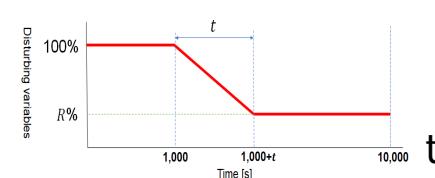
2.2 ④正常回復策提案AIの開発 タスク2

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

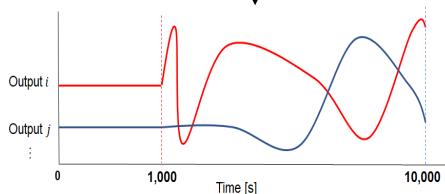
HTTR プラントシミュレータ (ACCORD)



任意の機器故障を入力



誤差最小化を損失
関数として学習

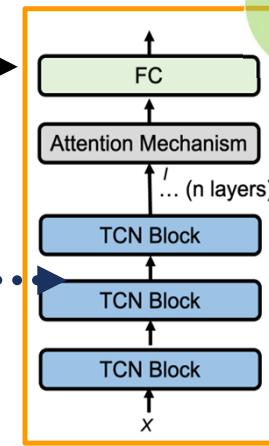


誤差計算

ACCORDで計算された プラントデータの時系列（正解値）

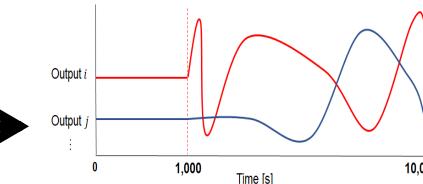
入力

予測



独自のサロゲートAI

予測



サロゲートAIに予測された プラントデータの時系列

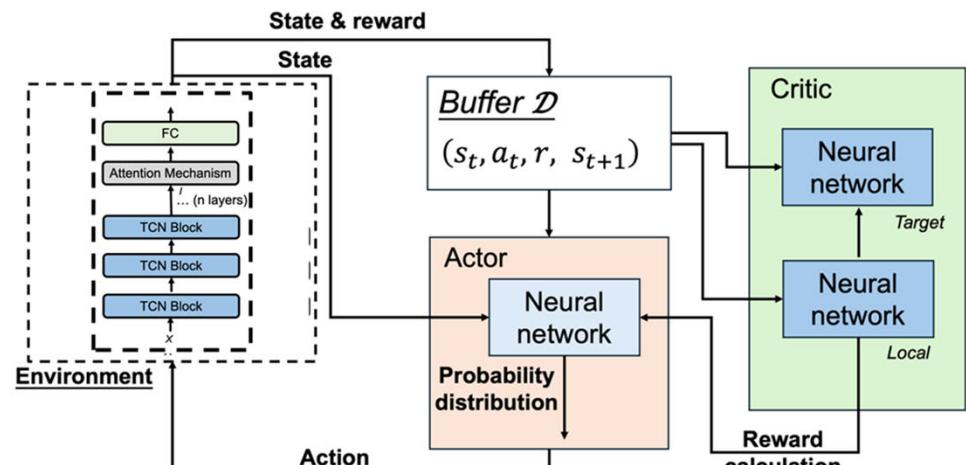
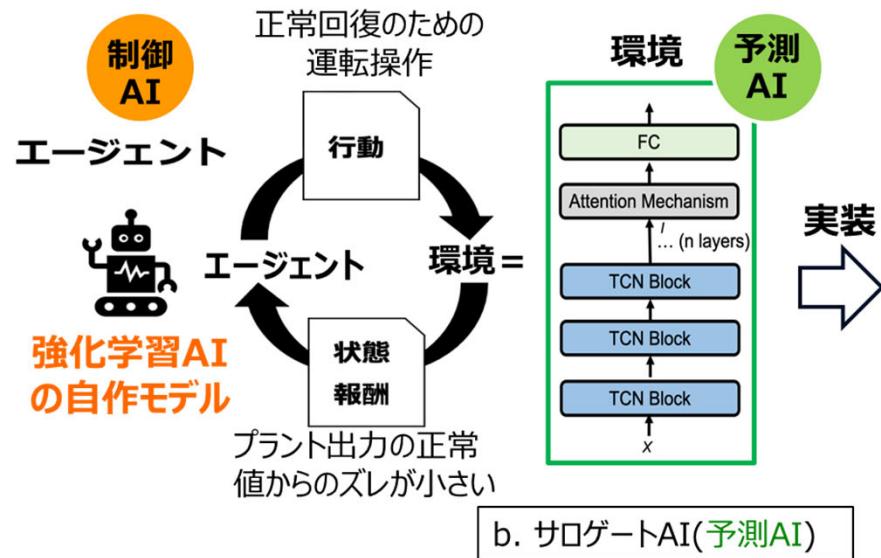
- ACCORDより遥かに高速にプラントデータの計算が可能
- このため、強化学習 制御 における「環境」として適用

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



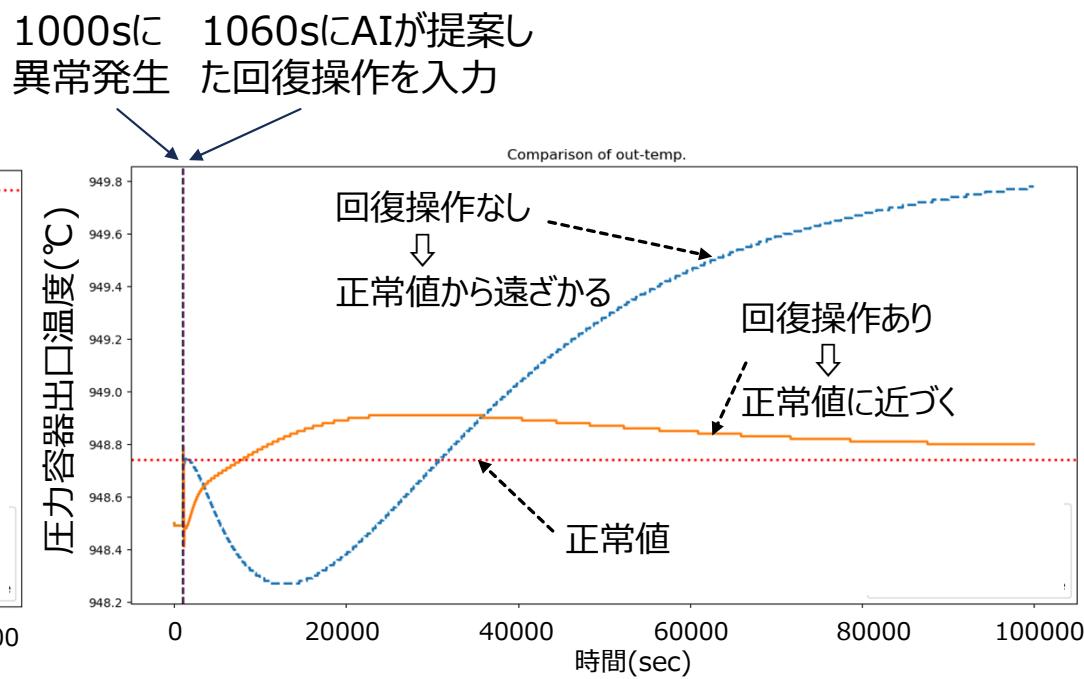
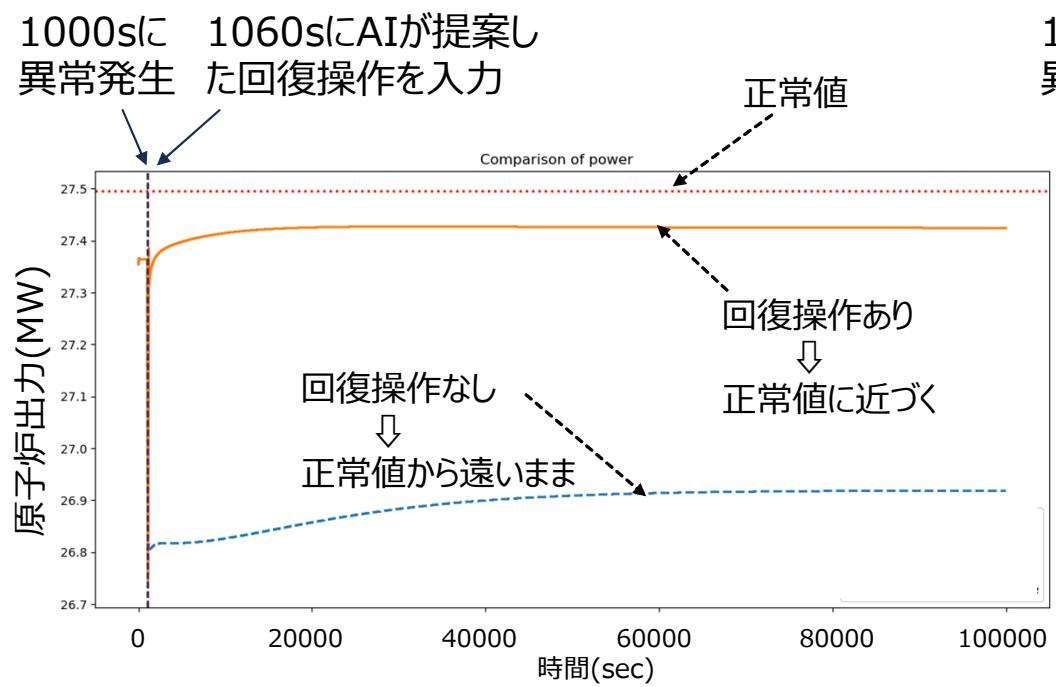
自作のサロゲートAIと制御AI(強化学習)を組み合わせたAI



自作の正常回復策提案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**



2.3 ⑤作業支援情報提示AIの開発 タスク3

19

R3～中部電力共同研究

原子力発電所作業者の負担は小さくない

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
した技術継承機会の減少

→ HEリスク増加の懼れ

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？

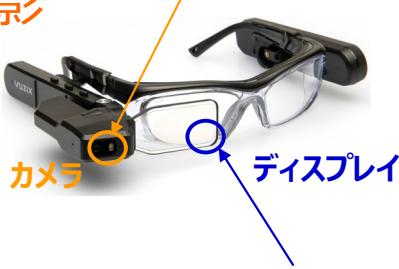
2)作業に関連するルールや手順

- # 動作
- 1 "シャフトを手回しし、スムーズに回転する。
 - 2 オイルセパレーターを手で押しこむ。
 - 3 オイルセパレーター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 回転方向路版が上にな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 スリッガーフレーム側面のセットビスを六角レンチにて締め込む。
 - 8 スリッガーいたん奥に当てるから、少し手間に引く。
 - 9 グラント押さえの丸い方をボンプ側にする。
 - 10 ゴム手袋を使用してネバーシーズ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、しっかりとスリープパッキンに押し付ける。
 - 12 ボルトを両手で持って、奥までしっかり入り込ませることを確認する。
 - 13 インハーネットはプラスチックハンマーにて叩き込む。
 - 14 インハーネットを片口スクリュードライバーにて締め込む。
 - 15 インハーフラッシャーをタガネと片手ハンドルにて折り曲げる。
 - 16 スキミゲージにて間隙を確認する。
 - 17 インベーナ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

⑤作業員のスマートグラスに表示して作業支援

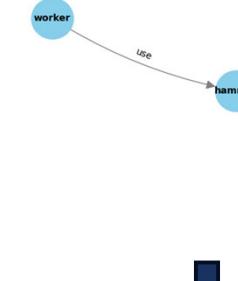
④検索された動画や手順文をスマートグラスに送信

#動作
1. ハンドルを手回し、スムーズに回転する。
2. ハンドルセイバーを手で押込む。
3. オイルセパレーター側面のセパレーターを奥まで叩き込む。
4. ティップクリーク側面のセパレーターを六角レンチで締め込む。
5. 回転方向路版が上にあるように取り付けする。
6. ベンチグリップのボルト穴に六角ナットを差し込み、六角レンチにて締めこむ。
7. スイングバー側面のセドスヌスを六角レンチにて締め込む。
8. スイングバーに奥に当たってから、少し手間で引く。
9. グラントを押さえるのいい方を左側に倒す。
10. 右手袋を使用してネバースピードシップ全体に塗布する。
11. ネバースピードシップをハンドルセイバーに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. ハンドルセイバーをハンドルセイバー側面に固定する。
13. ハンドルセイバーをハンドルセイバー側面に固定する。
14. イベラーキーはラバーカバーにて叩き込む。
15. イベラーカバーを片口ナットと片手ナットにて締め込む。
16. スミマージにて間際を確認する。
17. イベラーキーはラバーカバーにて叩き込む。
18. カッティングはブラスチックハマーにて叩き込む。

作業手順文

②作業内容をグラフに変換

Point

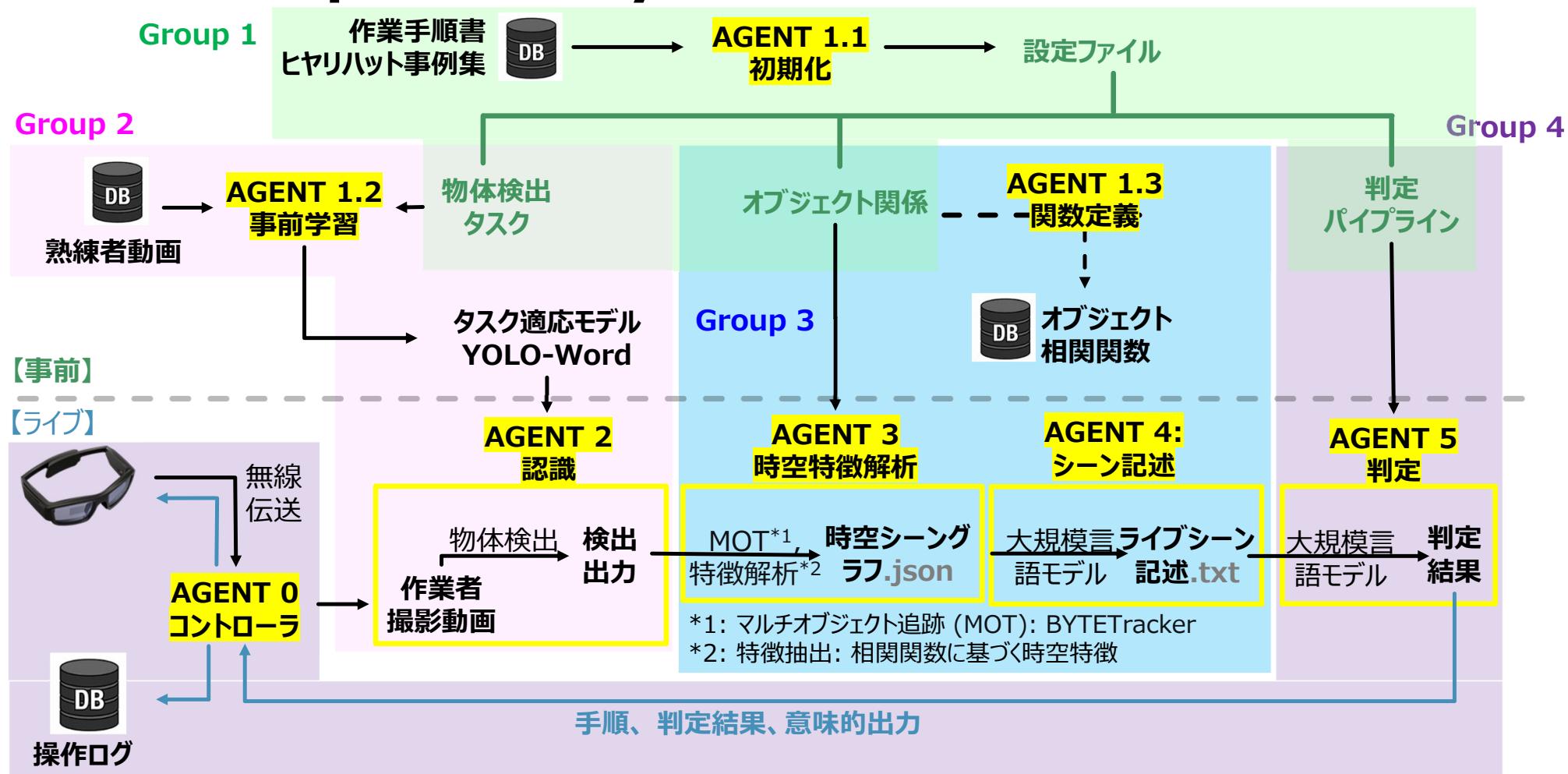


③手順文や熟練者動画のDB中からグラフが類似なものを検索

過去の熟練者の作業(教育ビデオ)

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

改良中のPipeline (by D2学生)



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

2.4 ⑧設備保全文書生成AIの開発 タスク4

23

(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

昨年度の保全計画書

是正措置
(CAP)



LLM



今年度の保全計画書

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

AIで2021年東京PCB処理施設の保全計画を生成してみた

```
{
  "2021年度の主な設備保全の実施項目": [
    {
      "設備名": "解体分別設備",
      "実施時期": "2021年度",
      "設備保全の内容": "ハンドリング装置昇降駆動部品交換、液中切断"
    },
    {
      "設備名": "破碎機",
      "実施時期": "2021年度",
      "設備保全の内容": "素子分別装置No.4搬送コンベア電動機について"
    },
    {
      "設備名": "予備洗浄装置",
      "実施時期": "2021年度",
      "設備保全の内容": "真空ポンプ1台について、メーカー推奨もあり、検討"
    },
    {
      "設備名": "洗浄設備",
      "実施時期": "2021年度",
      "設備保全の内容": "No.1/2脱水装置廻り自動弁8台と蒸留共用制御"
    },
    {
      "設備名": "加熱設備",
      "実施時期": "2021年度",
      "設備保全の内容": "No.3加熱設備一次凝縮器No.1チラーユニット圧力"
    },
    {
      "設備名": "水熱分解設備",
      "実施時期": "2021年度",
      "設備保全の内容": "反応器及び連絡管管台からの引出配管のうち、以上の減肉箇所は交換あるいは肉盛補修を行う。"
    },
    {
      "設備名": "排気処理設備",
      "実施時期": "2021年度",
      "設備保全の内容": "有機溶剤処理装置の吸着塔並びに同様の装置であるNS吸着槽の点検を水平展開で追加実施する。"
    },
    {
      "設備名": "計装設備",
      "実施時期": "2021年度",
      "設備保全の内容": "水熱分解設備のDCS制御部品の一部について更新を実施する。"
    }
  ]
}
```

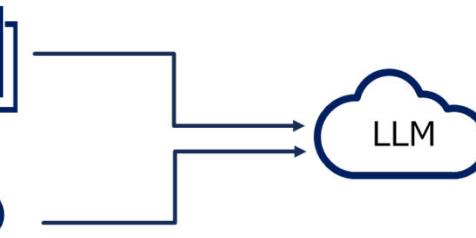
生成された計画は実際の保全計画書と完全に一致、

- ・是正措置を正しく反映していた、
- ・変更のない設備は除外されていた。

以下の構造が保守計画に有効であることが確認された。

昨年度の保全計画書

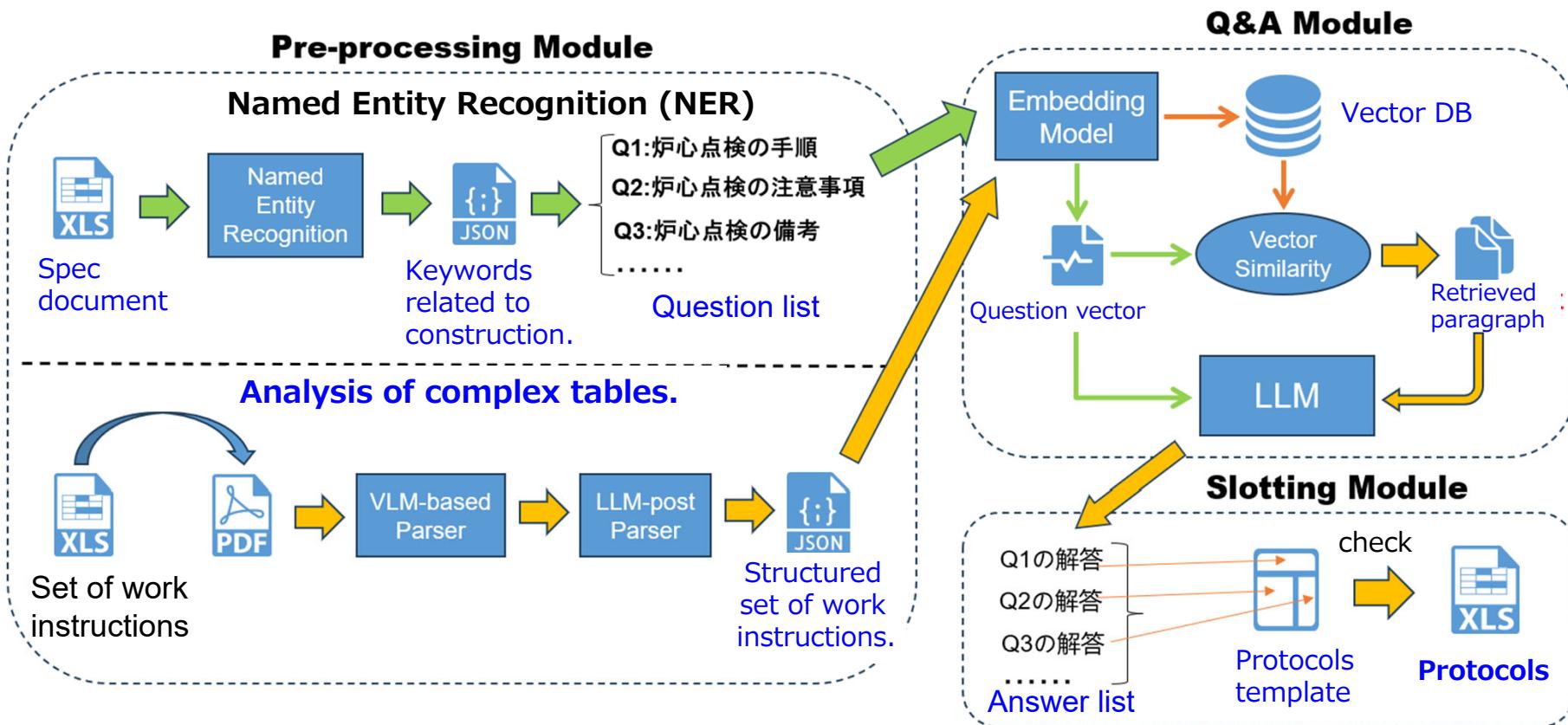
是正措置
(CAP)



今年度の保全計画書



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）

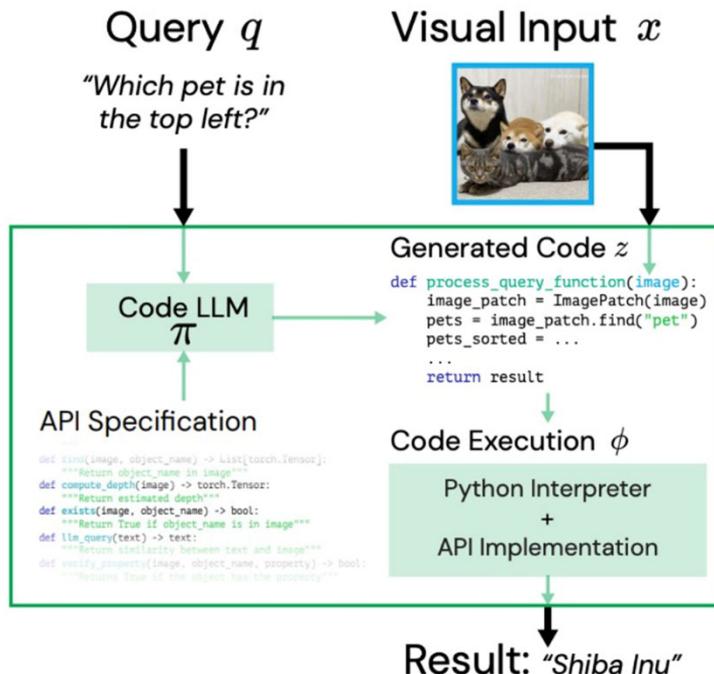


利点1：文書内の複雑な表の解析

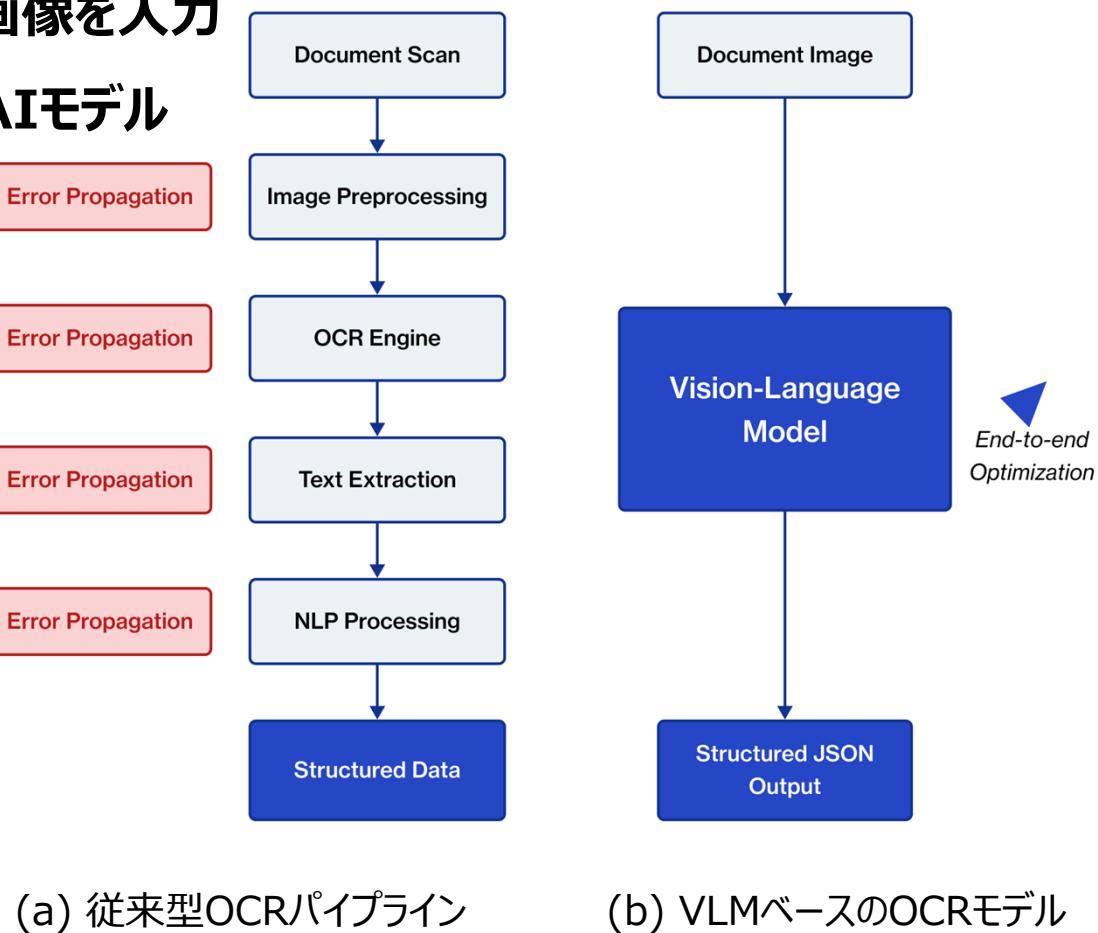
利点2：LLM生成コンテンツのテンプレートへの埋め込み

文書解析への視覚言語モデルの活用

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

セルの結合

工事件名	MASKED
No.	作業手順
1	作業準備 (1) ◎ 作業前読み合わせ

階層構造の題目

作業要領(手順)

- 工事件名: 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
- 品管
- 技術指導員
- 備考

階層化ヘッダー

確認		
請負会社		関西電力
作責	品管	技術指導員
MASKED		

**従来型OCR
パイプライン**

**VLMベースの
OCRモデル**

**テキストのみ、
構造は喪失**

**構造化された
テキスト**

```

1 作業要領 (手順)
2
3 工事名: 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">作業着手前打合せ<br>

```

3. 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

3.1 ③悪意行動検知AIの開発

タスク5

3.2 ⑦BDBTシナリオ生成AIの開発

タスク6

3.1 ③悪意行動検知AIの開発

29

内部脅威者脅威への対策の必要性

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

「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

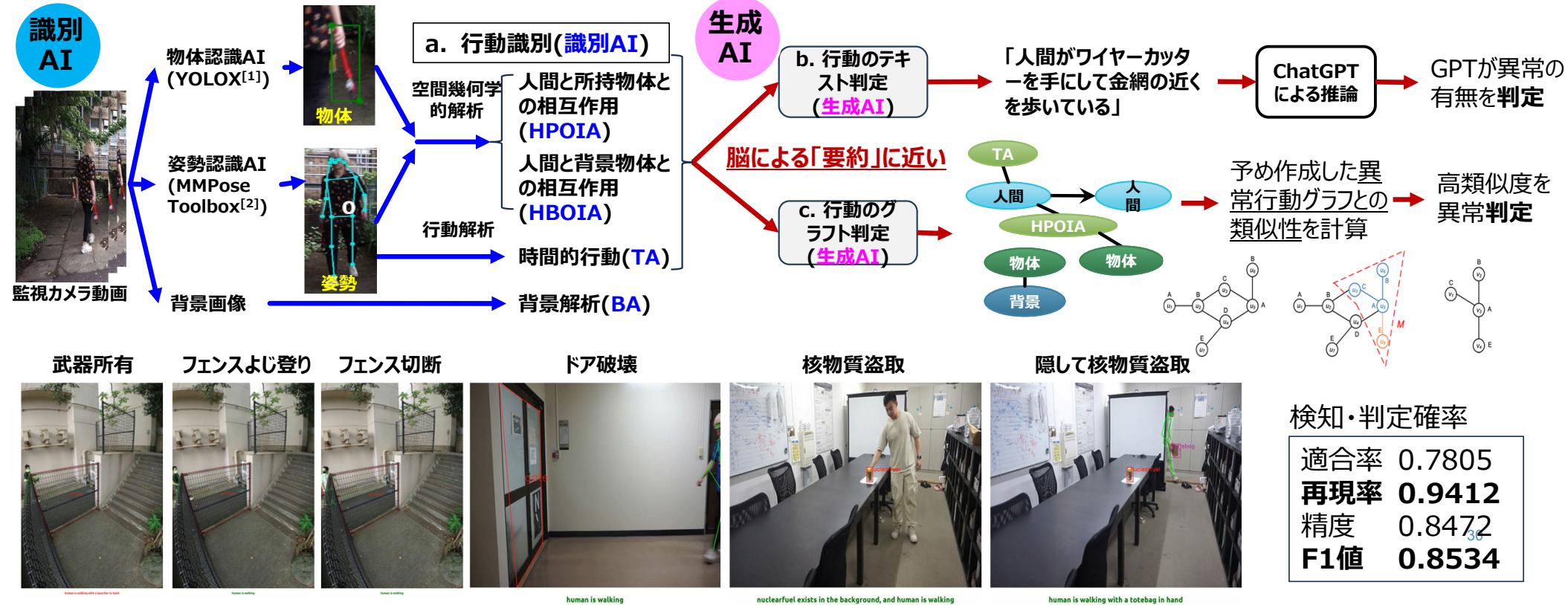
タスク5

内部脅威者「悪意行動」検知AIの開発

*1: Incident and Trafficking Database by IAEA

*2: Central Alarm Station

- 識別AIと生成AIとの融合モデルを開発し、
- 監視動画内の人行動をテキストとグラフ構造に変換
- 複雑な妨害破壊行為を高確率で判定・検知

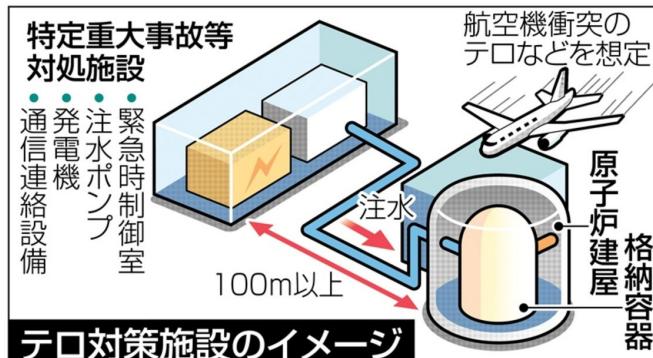


3.2 ⑦BDBTシナリオ生成AIの開発

BDBTへの対策

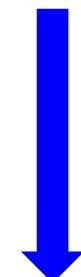
現状：

想定を超える脅威(BDBT)への対策は「特重」で思考停止



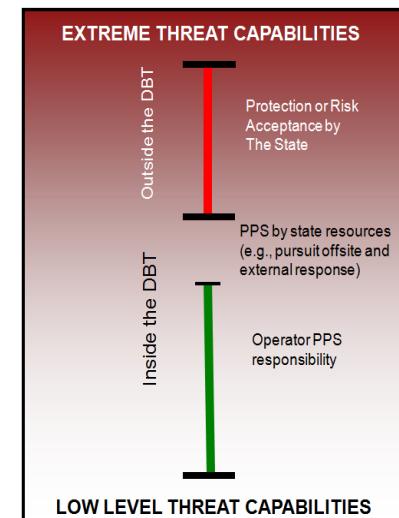
意図的な航空機衝突への対応の新設

- 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**



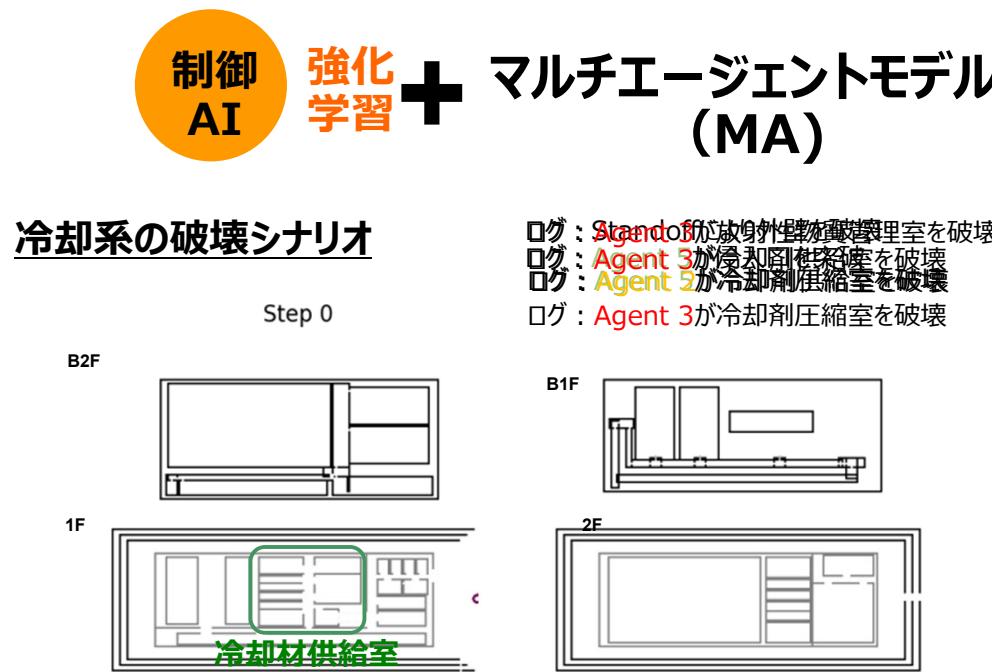
*1設計基礎を超える脅威
(BDBT:Beyond Design Basis Threat)

タスク6

BDBTシナリオを生成する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



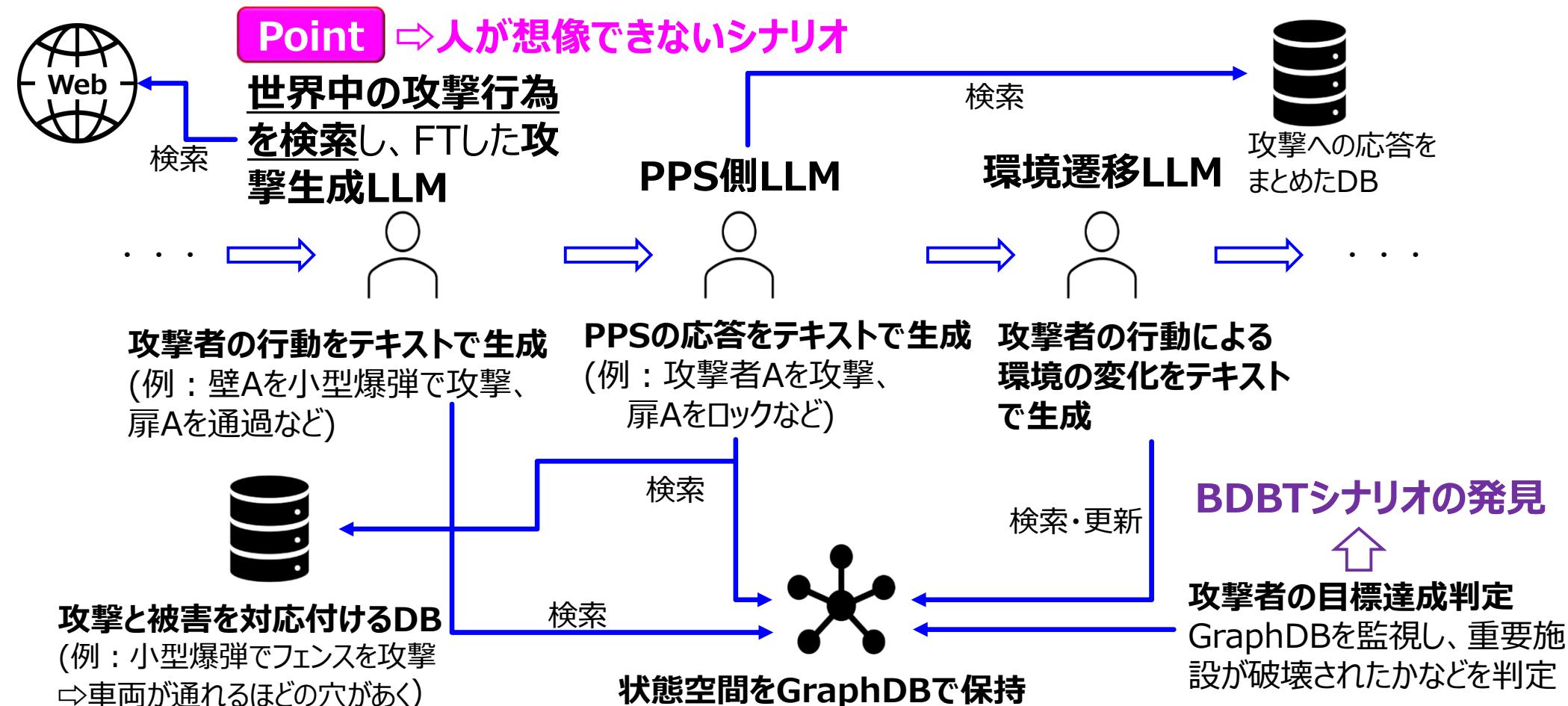
←R5-6年度の反省点：

- ・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

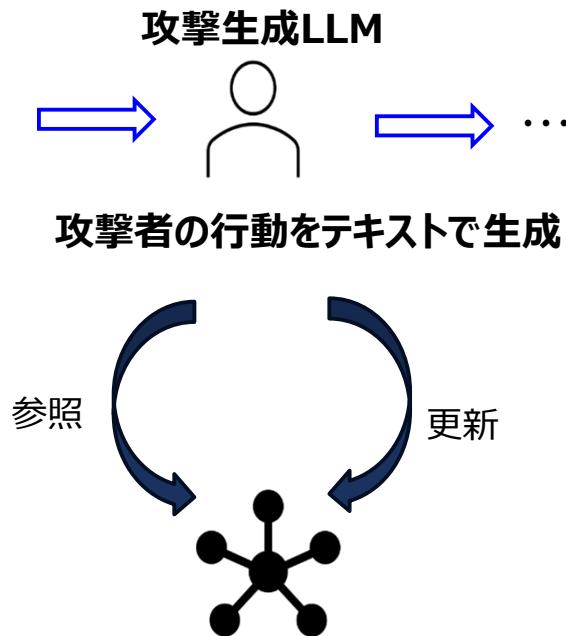
- 無駄な動きを省略
- 敵、PP、設備配置、所内人員など状態空間の特性をテキストのみで定義

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）



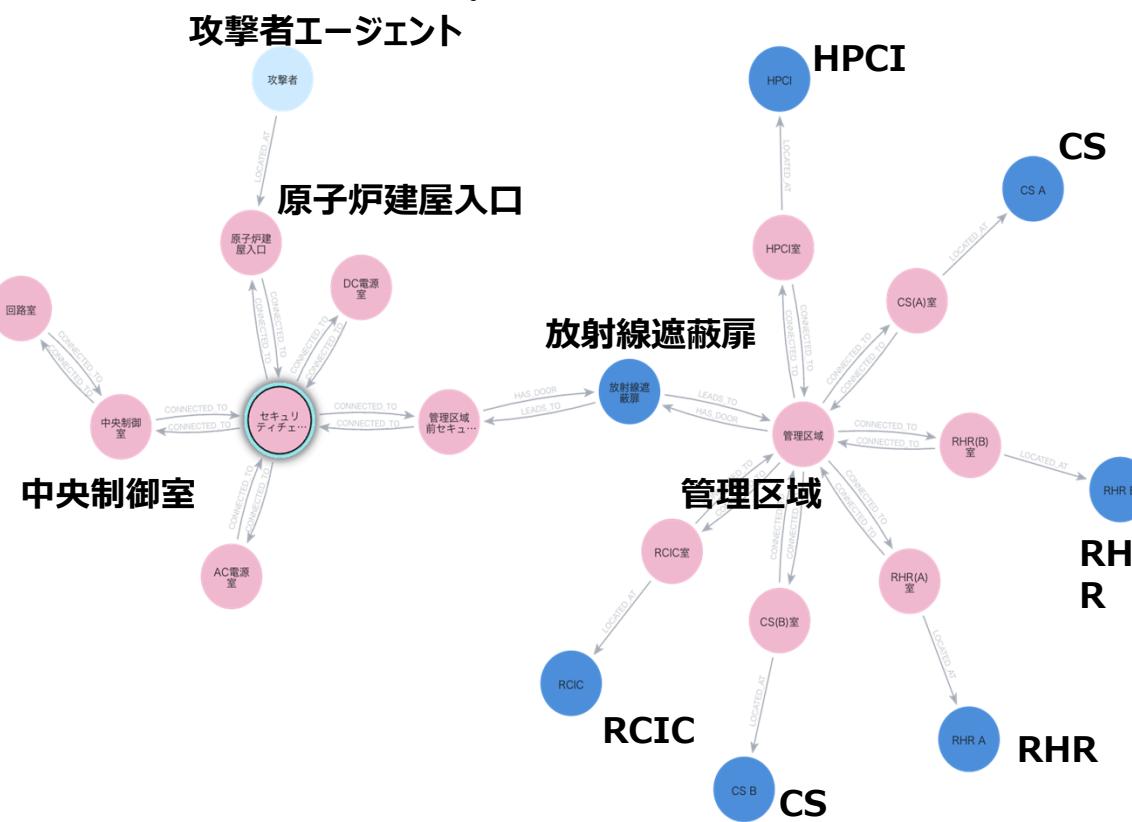
現在の開発状況

①LLMによる攻撃者の行動生成



状態空間をGraphDBで保持

②1Fをモデルにした原子炉建屋の内部構造をデフォルメしてグラフ化



4. まとめ

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**

追記

- いまは、GitHUB等で最新AIモデルが共有され、しかもソースコードや丁寧なTutorial付き。**知識を独占しない。そういう文化。**誰でも、明日からでも使える。
- 特にLLMは簡単（魔法の呪文のように言葉だけでOK）で、人が使いやすいように AI側から**歩み寄**ってくれている。**そういう時代。**
- LLMに限らず複数の**AIモデルを多様に組み合わせ**、自由な発想で多くの世の中にはない新しいAIを開発させるような**教育**が一番。結果的に**原子力への貢献**に繋がる。**そういう未来。**

ご清聴ありがとうございました