

資源エネルギー庁 電力・ガス事業部 原子力政策課 御中

令和3年度原子力産業基盤強化事業 報告書

Society5.0 の実現に向けた原子力デジタル産業基盤の構想

MRI 三菱総合研究所

2022 年 3 月 31 日

セーフティ&インダストリー本部

目次

1. はじめに.....	1
1.1 本事業の目的.....	1
1.2 実施内容	1
1.3 事業実施体制.....	3
2. 国内外のプラント産業におけるデジタル技術利活用状況に係る現状分析.....	4
2.1 Society5.0 実現に向けた原子力発電所のデジタル技術利活用に係る概念設計(グランドデザイン)にあたっての論点の整理.....	4
2.2 国内外のデジタル技術利活用事例の調査とデジタル技術導入事例集(候補集)の作成... ..	5
2.2.1 調査対象.....	5
2.2.2 国内原子力発電所への導入容易性・想定便益に係る簡易評価	6
2.2.3 技術事例一覧	9
3. 原子力発電所のデジタル技術利活用可能性(ポテンシャル)の分析.....	28
3.1 原子力発電所の有する様々なデータの整理.....	28
3.1.1 データ整理の考え方.....	28
3.1.2 データカタログ.....	29
3.2 原子力発電所現場の潜在的ニーズの整理.....	30
3.2.1 調査方法.....	30
3.2.2 現場ニーズ調査の結果.....	31
4. Society5.0 実現に向けた原子力発電所のデジタル技術利活用に係る概念設計(グランドデザイン)	33
4.1 原子力発電所のデジタル技術利活用に係るグランドデザイン素案の検討.....	33
4.1.1 検討会合の設置	33
4.1.2 検討体制	33
4.1.3 検討プロセス	34
4.1.4 検討会合の開催実績.....	35
4.1.5 グランドデザイン素案.....	36
5. 原子力発電所への活用が有効なデジタル技術利活用の要素技術の調査とシステムの提案.....	37
5.1.1 AI の開発環境	37

5.1.2 簡易なフレームワーク及び AI モデルの提案	37
5.2 若手人材育成の観点からの原子力人材の確保.....	41
別添資料.....	42

図 目次

図 1-1 本事業の実施体制	3
図 2-1 デジタル技術導入事例集(候補集)の検討プロセス	6
図 2-2 未来像イメージと技術事例の関係性	10
図 3-1 作業フロー	31
図 3-2 各業務プロセスにおけるデータの取扱い例	31
図 4-1 検討プロセスの全体像	35
図 4-2 本レポートの構造	36
図 5-1 状態監視・診断技術のための基本的なフレームワーク	38
図 5-2 カメラを利用した現場計器の指示確認のための基本的なフレームワーク	39
図 5-3 核セキュリティ・核物質防護に関する監視・出入管理のための基本的なフレームワーク	40

表 目次

表 2-1 原子力発電所のデジタル技術利活用に係る概念設計(グランドデザイン)のための調査の観点 と対象.....	4
表 2-2 デジタル技術利活用事例の調査対象.....	5
表 2-3 導入容易性の評価指標.....	6
表 2-4 導入容易性における総合評価例.....	7
表 2-5 便益の評価指標.....	8
表 3-1 原子力発電所のデータカタログ.....	29
表 3-2 現場ニーズ調査の整理結果.....	31
表 4-1 「原子力デジタル産業基盤構想に係る検討会合」の検討体制.....	34
表 4-2 検討会合の開催実績.....	35

1. はじめに

1.1 本事業の目的

原子力産業基盤強化事業は、持続可能な原子力産業基盤の実現に向けて、国内で原子力関連事業に取り組む事業者が、安全性・信頼性・効率性等の向上を追求する上での業界横断的な課題について、複数の事業者が連携して課題解決に取り組むことを目的としている。

このため本事業では、原子力産業基盤に係る課題に対処するひとつのアプローチとして、世界的に成長が著しいデジタル技術(Artificial Intelligence :AI、Internet of things:IoTを含む)に着目し、既存原子力産業とデジタル技術関連企業が協調可能な環境(原子力デジタル産業基盤)を構想することで、現在顕在化しつつある原子力産業に係る課題に対処し、将来にわたって既設原子力発電所の高い安全性と信頼性を維持した効率的な運転を支援する産業基盤の確実な維持・強化に資することを目的とする。

1.2 実施内容

上記目的に沿い、本事業では以下の項目を実施した。

(1)国内外のプラント産業におけるデジタル技術利活用状況に係る現状分析

Society5.0、Connected Industries(スマート保安を含む)に係る政策、Digital transformationに係る国内プラント産業動向、海外(主として米国)の研究開発動向等を踏まえ、Society5.0 実現に向けた原子力発電所のデジタル技術利活用に係る概念設計(グランドデザイン)にあたっての論点を整理した。

また、近年における国内外のデジタル技術利活用事例の調査を行い、「デジタル技術利活用事例集」としてまとめた。

(2) 原子力発電所のデジタル技術利活用可能性(ポテンシャル)の分析

これまで整理されてこなかった、原子力発電所の有する様々なデータ(構築物、系統及び機器(SSCs)より得られるプロセスデータのみならず、マネジメントを通して蓄積される文字データ、監視カメラ等から得られる画像データなど)を網羅的に整理し、「原子力発電所のデータカタログ」としてまとめた。

また、原子力安全の持続的な向上、核セキュリティの確保、効率的なデータ収集、業務プロセス効率化等、データ分析の観点から、現場の抱える課題意識(潜在的ニーズ)を収集整理し、データ利活用・デジタル技術適用による解決可能性を検討した。併せて、規制による制約の有無についても確認し、現実的なデジタル技術利活用可能性を分析した。

(3) Society5.0 実現に向けた原子力発電所のデジタル技術利活用に係る概念設計(グランドデザイン)

(1)及び(2)の検討結果を踏まえ、フィジカル空間とサイバー空間の高度に融合した社会における、原子力発電所のデジタル技術利活用に係るグランドデザイン素案をとりまとめた。

技術的な課題やビジネス上の課題について抽出整理するとともに、デジタル技術利活用により想定される便益についても整理した。

また、原子力産業全体の共通課題のうち特に対処すべき課題を特定するために、課題評価軸を検討した。

(4)原子力発電所への活用が有効なデジタル技術利活用の要素技術の調査とシステムの提案

(3)での検討結果を踏まえ、デジタル技術の既存および開発中の要素技術を調査し、課題評価軸に基づきそれら要素技術の性能を評価した。

上記の性能評価に基づき、原子力発電所への活用が有効だと考えられるシステム構築のための要素技術の組み合わせを提案した。

また、要素デジタル技術の組み合わせにより提案したシステムを原子力発電所へ適用した場合のシステムとしての成立性を評価し、十分な成立性が得られないと判断される要素デジタル技術についてはその代替となる新規デジタル技術の要求性能を整理した。

代替新規デジタル技術を含む提案システムの有効性を、既存の非デジタル技術に基づくシステムとの比較により信頼性・安全性・コスト等の点から評価した。

1.3 事業実施体制

本事業の実施体制を図 1-1 に示す。

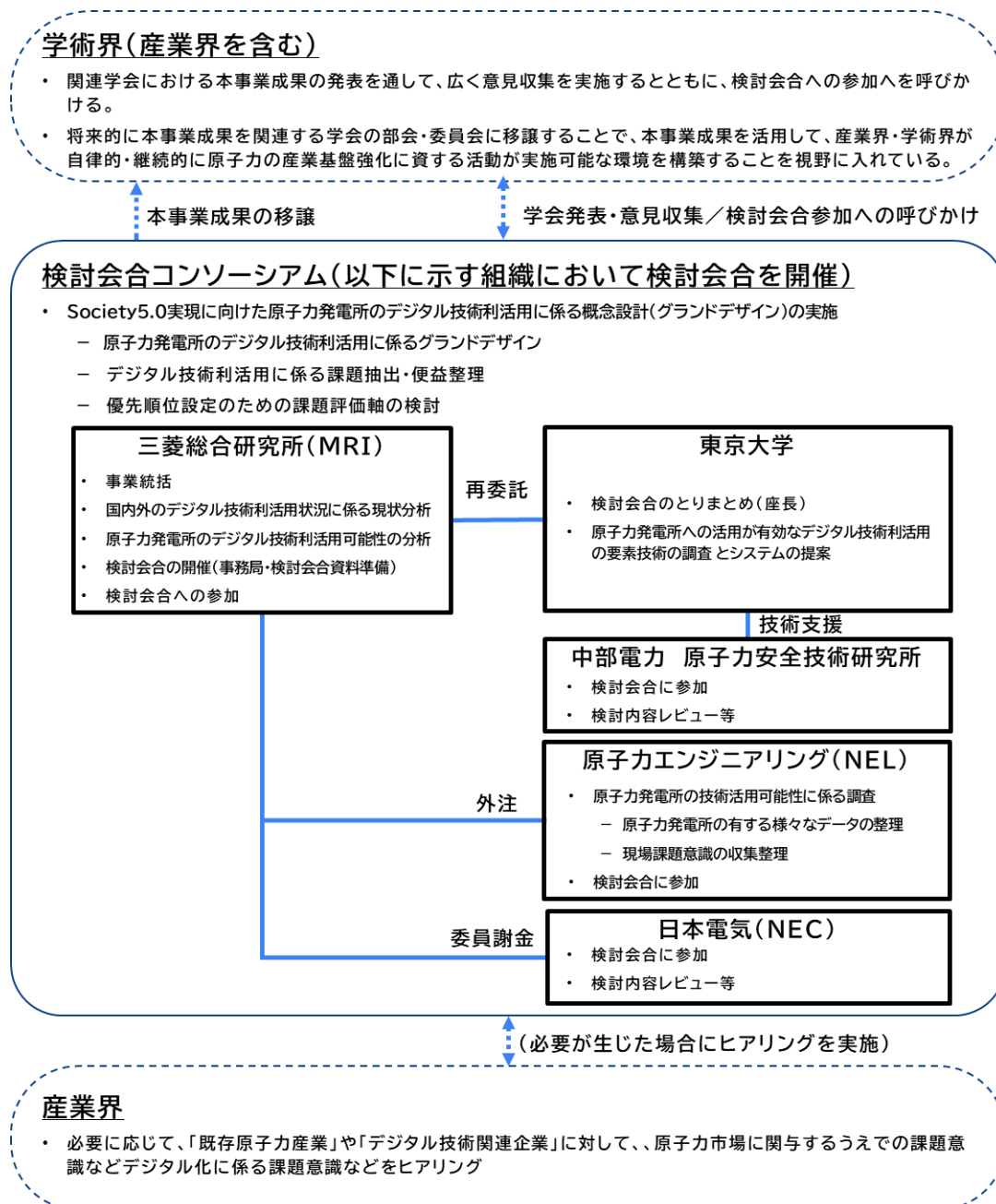


図 1-1 本事業の実施体制

2. 国内外のプラント産業におけるデジタル技術利活用状況に係る現状分析

2.1 Society5.0 実現に向けた原子力発電所のデジタル技術利活用に係る概念設計(グラウンドデザイン)にあたっての論点の整理

Society5.0 実現に向けた原子力発電所のデジタル技術利活用に係る概念設計(グラウンドデザイン)にあたっての論点の整理のため、Society5.0、Connected Industries(スマート保安を含む)に係る政策、Digital transformation に係る国内プラント産業動向、海外(主として米国)の研究開発動向等に係る情報を調査した。調査の観点と調査対象は表 2-1 に記載し、これらの調査対象の具体的な整理結果は、「4.Society5.0 実現に向けた原子力発電所のデジタル技術利活用に係る概念設計(グラウンドデザイン)」に示す。

表 2-1 原子力発電所のデジタル技術利活用に係る概念設計(グラウンドデザイン)のための調査の観点と対象

調査の観点	調査対象
原子力発電所のデジタル技術利活用に係るグラウンドデザイン素案の検討	・ 経済産業省、「AI・データの利用に関する契約ガイドライン」(2019 年) ・ 経済産業省、「DX レポート 2 中間取りまとめ」(2020 年) ・ 経済産業省、「DX レポート 2.1(DX レポート 2 追補版)」(2021 年) ・ 経済産業省、「デジタルトランスフォーメーションを推進するためのガイドライン(DX 推進ガイドライン)Ver. 1.0」(2018 年) ・ 経済産業省、「高圧ガス保安分野 スマート保安アクションプラン」(2020 年) ・ 経済産業省、「電気保安分野 スマート保安アクションプラン」(2021 年)等
原子力発電所のデジタル技術利活用による想定される便益の検討	・ NRC、「Role of Artificial Intelligence Tools in U.S. Commercial Nuclear Power Operations」(2021 年) ・ INL、「Automation Technologies Impact on the Work Process of Nuclear Power Plants」(2018 年) ・ DOE、「Light Water Reactor Sustainability Program Nuclear Power Plant Modernization Strategy and Action Plan」(2019 年) ・ OECD/NEA、「Nuclear Innovation 2050」等
原子力発電所のデジタル技術導入における課題の検討	・ NRC、「Role of Artificial Intelligence Tools in U.S. Commercial Nuclear Power Operations」(2021 年) ・ OECD/NEA、「Nuclear Innovation 2050」 ・ 経済産業省、「データの利用に関する契約ガイドライン産業保安版第 2 版」 ・ 経済産業省、「IoT セキュリティ対応マニュアル産業保安版(第 2 版)」 ・ 経済産業省、「プラント保安分野 AI 信頼性評価ガイドライン」 ・ 経済産業省、「プラントにおける先進的 AI 事例集」等

2.2 国内外のデジタル技術利活用事例の調査とデジタル技術導入事例集(候補集)の作成

2.2.1 調査対象

原子力発電所におけるデジタル技術利活用においては、導入までの様々な障壁が想定されるが、特に、経済的価値が不明瞭(投資効果が不明瞭)であること、何より導入実績が重要視されることが挙げられる。その課題への一つの対処として、デジタル技術導入モチベーションの向上に資することを目的として、国内他産業プラント、海外原子力プラント等で既に導入された、若しくは導入される見込みがある技術事例を調査し整理することが有効である。

本事業では、国内他産業プラントのデジタル技術導入事例としては、経済産業省が進めているスマート保安に係る事例を中心に、海外原子力プラントのデジタル技術導入事例(検討事例含む)としては、米国アイダホ国立研究所(INL)が作成した「Automation Technologies Impact on the Work Process of Nuclear Power Plants (原子力プラントのワークプロセスにおける自動化技術の影響)」レポートを中心に調査した。具体的な調査対象を表 2-2 に示す。

表 2-2 デジタル技術利活用事例の調査対象

調査分野	調査対象
国内他産業プラント	・ 経済産業省、「スマート保安先行事例集」(2017 年) ・ 経済産業省、環境共創イニシアチブ、野村総合研究所「令和2年度 産業保安高度化推進事業」(2021 年) ・ 石油コンビナート等災害防止 3 省連絡会議(経済産業省、厚生労働省、総務省消防庁)、「プラントにおける先進的 AI 事例集」(2020 年) ・ 石油コンビナート等災害防止 3 省連絡会議(経済産業省、厚生労働省、総務省消防庁)、「プラントにおけるドローン活用事例集」(2019 年) ・ 経済産業省 スマート保安官民協議会／高圧ガス保安部会資料(2021 年) ・ 経済産業省 スマート保安官民協議会／電力安全部会資料(2021 年) ・ 経済産業省 スマート保安官民協議会／ガス安全部会資料(2021 年) - 等
国内原子力プラント	・ 四国電力「統合型保修管理システム(Enterprise asset management: EAM)」、中国電力「大規模プラント故障予兆監視システム」等の国内原子力プラントにおけるデジタル技術導入実績等
海外原子力プラント	・ INL、「Automation Technologies Impact on the Work Process of Nuclear Power Plants」(2018 年) ・ IAEA、「Application of Wireless Technologies in Nuclear Power Plant Instrumentation and Control Systems.」(2020 年) ・ Palo Verde 発電所の CAP システムへの AI 活用等、海外原子力プラントにおけるデジタル技術導入実績 - 等

さらに、これら調査結果をもとに、デジタル技術に関する発電所現場ニーズ(公開情報ベース)、検討会合における委員意見・提供情報等を踏まえて、原子力発電所への導入可能性の高いデジタル技術事例集(候補集)として整理した。事例集(候補集)の検討プロセスを図 2-1 に示す。

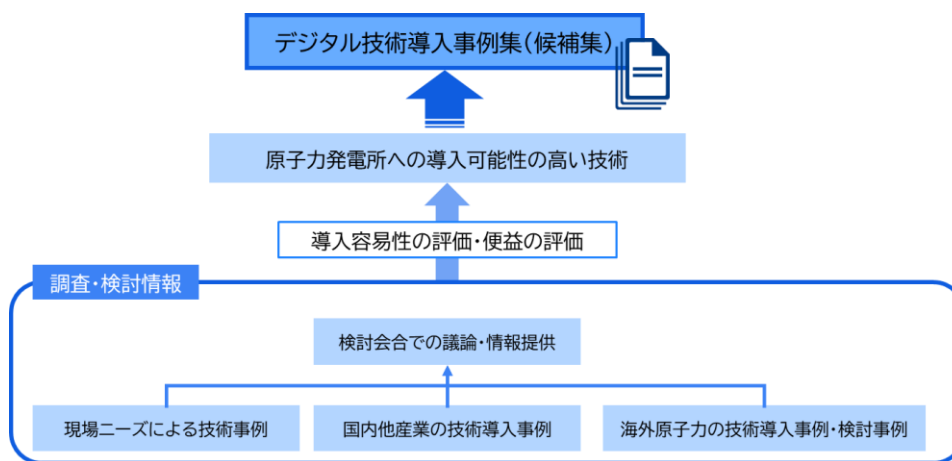


図 2-1 デジタル技術導入事例集(候補集)の検討プロセス

2.2.2 国内原子力発電所への導入容易性・想定便益に係る簡易評価

海外原子力産業、国内一般産業等で既に導入された、若しくは導入される見込みがある技術事例(検討中事例含む)に対して、「国内原子力発電所への導入しやすさ(導入容易性の評価)」と「想定される原子力発電事業者にとっての便益(便益の評価)」に係る簡易的な評価を実施した。

なお、海外原子力産業、国内一般産業等で既に導入された、若しくは導入される見込みがある技術事例(検討中事例含む)のうち、導入容易性の総合評価が“○”かつ経済性の便益が“○”、または導入容易性の総合評価が“◎”の事例を、国内原子力発電所への導入が比較的容易であり、かつ効果の高いデジタル技術(以下、「相対的に原子力発電所への導入可能性が高い技術事例」という)とした。

(1) 導入可能性の評価

導入容易性の評価は、事業者にとっての技術の導入のしやすさを評価するものである。本簡易評価では、表 2-3 に示すとおり規制対応・技術成熟度・導入コストの評価指標を設けた。

表 2-3 導入容易性の評価指標

分類	説明	評価軸
規制対応	許認可が必要か否か	○:許認可不要(届出のみはここに含む)
		△:許認可要、または対規制交渉要
		×:規制基準や法令の変更が必要
技術成熟度	当該技術が既存か、開発途上か	○:導入事例がある(海外原子力・一般産業)
		△:まもなく実証される、実証段階

		×:実現にはまだ遠い
導入コスト	調達費用、データ入力の手間等、投入する必要があるリソースの量	○:導入しようと思えば1社単独で導入可能
		△:できれば他社とコストシェアを考えたもの
		×:コスト的に無理がある

また、本検討では導入容易性における総合評価について、簡易的に表 2-4 に示す通り実施した。なお、本来的には個別技術・導入目的により総合的に評価されるものと考えられる。

表 2-4 導入容易性における総合評価例

No.	規制対応	技術成熟度	導入コスト	総合評価
1	○	○	○	◎:容易に導入・水平展開
2	○	○	△	○:メリットが導入コストより大きければ容易に導入
3	○	○	×	
4	○	△	○	△:メリットが導入コストより大きければ導入を検討
5	○	△	△	
6	○	△	×	
7	○	×	○	×:技術成立見通しが先に必要
8	○	×	△	
9	○	×	×	
10	△	○	○	△:メリットが大きければ導入を検討
11	△	○	△	
12	△	○	×	
13	△	△	○	
14	△	△	△	
15	△	△	×	
16	△	×	○	×:技術成立見通しが先に必要
17	△	×	△	
18	△	×	×	
19	×	○	○	△:メリットが極めて大きければ挑戦する場合もある
20	×	○	△	
21	×	○	×	
22	×	△	○	×:検討対象外
23	×	△	△	
24	×	△	×	
25	×	×	○	

26	×	×	△	
27	×	×	×	

(2) 便益の評価

便益の評価は、導入容易性の評価で抽出した技術を導入した場合に、期待される便益を簡易に評価するものである。本簡易評価では、表 2-5 に示すとおり、経済性(コストダウンの大きさ)、安全性、その他の便益(人材・パブリックアクセプタンス(PA)等)の評価指標を設けた。

なお、便益の評価では総合評価は実施していない。

表 2-5 便益の評価指標

分類	説明	評価軸
経済性	コストダウンに資する(社員の 人件費抑制や調達コスト削減)	○:コスト削減が期待できる
		△:コスト削減がある程度期待できる
		×:コスト削減が限定的
安全性	安全性向上に資する	○:安全性向上に有意に資する
		－:特になし
その他	人材育成・PA 等その他の便益 を有する	○:その他の便益を有意に有する
		－:特になし

2.2.3 技術事例一覧

本事例集(候補集)で取り上げている技術事例を以下に示す(計16 事例)¹。

相対的に原子力発電所への導入可能性の高い技術事例

1. テキストマイニングを利用した異常状態判断
2. 設計図書や運転・保全履歴のデータベース化・電子ワークフロー化(EAM)
3. 電子ワークパッケージ(タブレット利用含む)の利用
4. 無線周波数識別タグ(RFID)の利用
5. ドローン利用
6. カメラを利用した現場計器の指示確認(画像抽出)

国内一般産業・海外原子力産業において導入済み若しくは導入される見込みがある技術事例

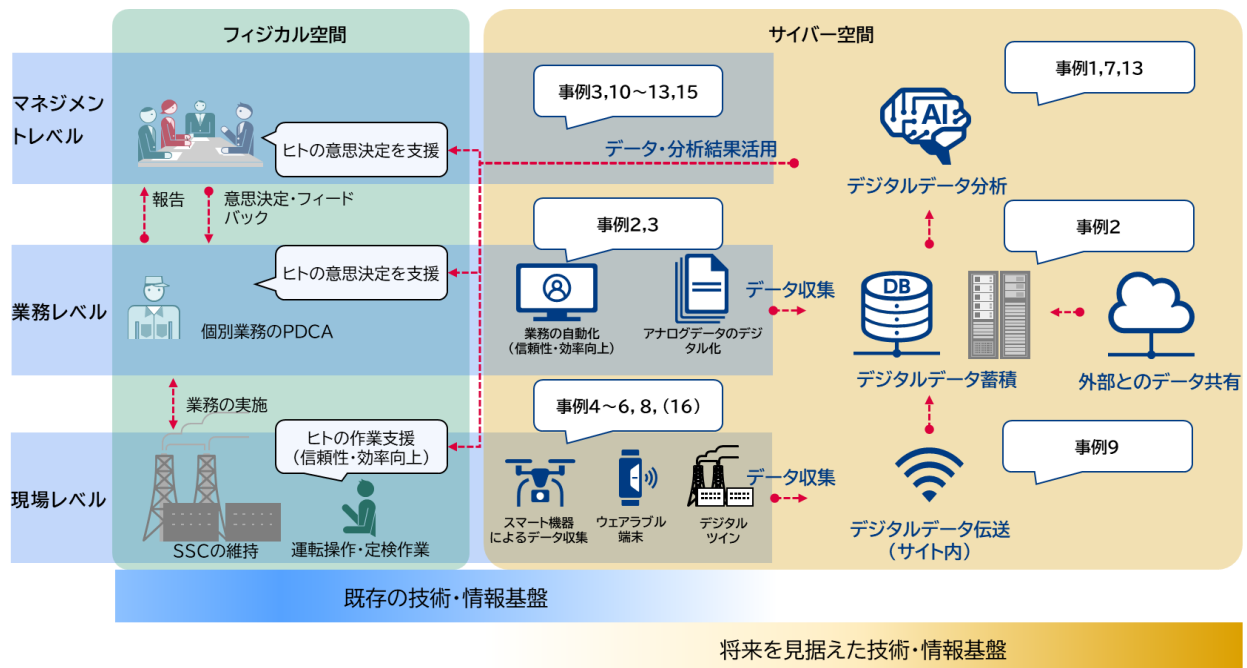
7. 状態監視・診断技術(AI 利用含む)の利用
8. センサの設置(IoT 機器・ワイヤレスセンサ等)
9. ワイヤレスネットワークの導入
10. 地図情報等を用いた災害対応
11. 空間マッピング技術の利用
12. 拡張現実(AR)技術の利用
13. 仮想現実(VR)技術の利用
14. 顔認証技術・行動監視技術・追跡技術の利用
15. 付加製造(AM)技術の利用

その他参考情報

16. 新たな検査技術

また、本事例集(候補集)で照会する技術事例と、原子力発電所がデジタル技術の利活用を通じて目指すべき未来像のイメージにおける、将来を見据えた技術・情報基盤との関連性を図 2-2 に示す。

¹ 調査した技術事例には、重複する技術事例も多く認められ、類似する技術事例をまとめた結果、計 16 事例となった。

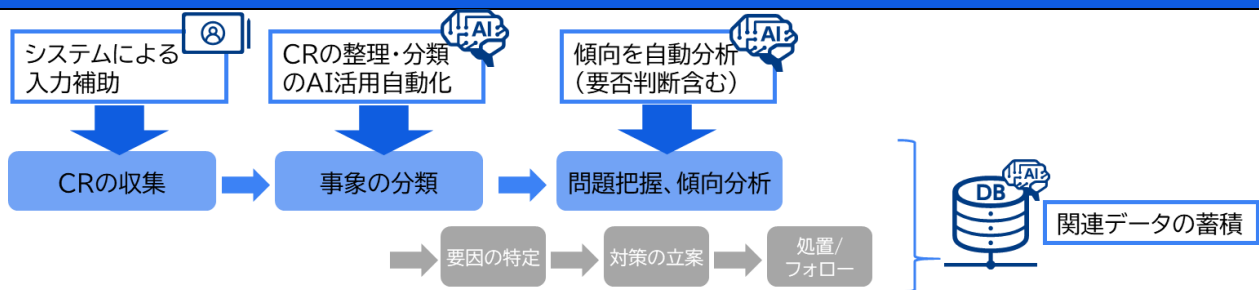


1. テキストマイニングを利用した異常状態判断	9. ワイヤレスネットワークの導入
2. 設計図書や運転・保全履歴のデータベース化・電子ワークフロー化(EAM)	10. 地図情報等を用いた災害対応
3. 電子ワークパッケージ(タブレット利用含む)の利用	11. 空間マッピング技術の利用
4. 無線周波数識別タグ(RFID)の利用	12. 拡張現実(AR)技術の利用
5. ドローン利用	13. 仮想現実(VR)技術の利用
6. カメラを利用した現場計器の指示確認(画像抽出)	14. 顔認証技術・行動監視技術・追跡技術の利用
7. 状態監視・診断技術(AI利用含む)の利用	15. 付加製造(AM)技術の利用
8. センサの設置(IoT機器・ワイヤレスセンサ等)	16. 新たな検査技術

図 2-2 未来像イメージと技術事例の関係性

(1) 相対的に原子力発電所への導入可能性の高い技術事例

1. テキストマイニングを利用した異常状態判断



CAP における AI 利用のイメージ図

概要

日誌情報や Condition Report (CR) 等に記載されている文字情報を解析し、異常状態の判断を実施したり、コード分類を自動で実施する技術。AI の反復的な学習により精度向上が期待できる。

国内一般産業・海外原子力産業における取組み事例の概要

- データマイニングを活用した異常処置(旭化成株式会社)ⁱ
過去の対応履歴データを参考に最新の日誌情報をテキストマイニングすると同時にプロセス情報を数値解析し異常状態を判断し、適切な対応措置を提案する。
- CAP システムへの AI 活用(Palo Verde 発電所)ⁱⁱ
状態報告書の文字情報(用語やテキスト、文脈)を解析することで、約 900 のコード分類のどれに該当するか候補を担当者に提示し、担当者の回答をもって確定する。この結果を AI が学習することで徐々に精度が向上する。

導入容易性の簡易評価

規制対応	○	(特記なし)
技術成熟度	○	(特記なし)
導入コスト	△	新たな AI 等を開発には、多くのコスト(社員人件費や調達コスト)を要する可能性がある。
総合評価	○	(特記なし)

便益の簡易評価

経済性	○	コストダウン(社員の人件費抑制や調達コスト削減)に大きく寄与する可能性がある。
安全性	○	潜在的な問題(リスク)を抽出できる可能性があり、適切なリスクマネジメントにより安全性の向上に寄与する可能性がある。
その他	—	(特記なし)

評価備考

導入容易性の総合評価が高く、経済性や安全性に係る便益が認められる。さらに、海外原子力発電所においても類似実績があることを踏まえると、相対的に原子力発電所への導入可能性の高い技術と考えられる。

2. 設計図書や運転・保全履歴のデータベース化・電子ワークフロー化(EAM)		
概要		
発電所での設備・保守管理に関する情報を統合化して、業務プロセスをデジタル化することで、システムにより、保全業務における意思決定(最適な保全方法の検討等)や、そのプロセスの迅速化や透明化等を支援する。信頼性重視保全は状態監視保全等を支援できる可能性がある。		
国内一般産業・海外原子力産業における取組み事例の概要		
● 設備保全統合管理システムによる保全業務プロセスの改善・合理化(東京電力 HD 株式会社)ⁱⁱⁱ 保全業務プロセスの改善・合理化(点検計画の立案、調達、検査・検収などの一連の業務の IT 化等)として、IT ソリューションである設備保全統合管理システムを導入している。 ● 統合型保修管理システム(四国電力株式会社)^{iv} 帳簿による業務プロセスを電子化して情報を共有化し、業務の進捗管理を確実かつ容易に実施する。蓄積した情報をもとに最適な保全方法の適用や、保修作業における PDCA サイクルの可視化により業務プロセスの改善に活用できる。 ● 保全システム(電子台帳データベース)の活用(JNC 石油化学株式会社)^v 設備保全管理システム(機器台帳や保全履歴を管理)、設備資料管理システム(図面や設計資料を管理)、設備診断支援システム(検査計画や検査結果を管理)のデータベースを連携させることで、設備台帳の入力作業や発注書作成を自動作成化し、導入前と比較して書類作成業務にかかる工数を 1/4 程度に削減した。		
		ほか類似実績多数
導入容易性の評価		
規制対応	○	(特記なし)
技術成熟度	○	原子力発電所での多数の導入実績がある。
導入コスト	△	新たにシステムを導入する場合には、多くのコスト(社員人件費や調達コスト)を要する可能性がある。ただし、既に多くの国内原子力発電所において導入実績がある。
総合評価	○	(特記なし)
便益の評価		
経済性	○	(特記なし)
安全性	○	(特記なし)
その他	—	(特記なし)
評価備考		
導入容易性の総合評価が高く、経済性の便益や安全性の便益が認められる。さらに、国内原子力発電所においても導入実績があることから、相対的に原子力発電所への導入可能性の高い技術と考えられる。		

3. 電子ワークパッケージ(タブレット利用を含む)の利用		
概要		
ワークパッケージとは、保守作業の範囲・目的、準備・確認作業、放射線安全や労働安全上の措置、作業手順、取扱説明書、ベンダーマニュアルなどを含む、現場作業に必要な情報がまとめられたパッケージである。 従来紙ベースでまとめられていたワークパッケージを電子化し、現場においてタブレットを利用してワークパッケージを確認可能とすることで、作業に必要な資料を容易に参照できるようになるとともに、デジタル上の入力・記録・情報共有等により、作業の効率化に期待ができる。		
国内一般産業・海外原子力産業における取組み事例の概要		
● 電子ワークパッケージによるイノベーション(Exelon 社)^{vi} 作業の手順や作業に必要な参考文書等を含む情報を電子的に管理し、モバイルデバイスから情報の読み込みを可能とするとともに作業記録を取ることができるようにした。紙のデータを電子化し効率化するとともに、ワークフローの効率を向上できる。 ● 製造現場へのタブレット端末の利用(住友化学株式会社)^v 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できる。また、設備状況を撮影した写真を共有できる。さらに、現場で作業メモをタブレット端末に入力することで、作業履歴の電子化を促進可能である。		
導入容易性の評価		
規制対応	○	防護区域内へのカメラ機能持ち込みは制限される場合が多く、規制対応が△評価となり得る。
技術成熟度	○	(特記なし)
導入コスト	△	電子ワークパッケージは、膨大な対象情報を電子化しそれを維持・更新するコストが常に生じる。
総合評価	○	(特記なし)
便益の評価		
経済性	○	情報の効率的な取得により、作業の効率化(コストダウン)に寄与すると考えられる。
安全性	○	適切な構成管理・文書管理を前提とすれば、電子化することで正確な情報に現場からアクセスできるようになり、作業の信頼性向上に資する。
その他	—	(特記なし)
評価備考		
導入容易性の総合評価が高く、経済性の便益や安全性の便益が認められる。さらに、海外原子力発電所においても導入実績があることを踏まえると、相対的に原子力発電所への導入可能性の高い技術と考えられる。		

4. 無線周波数識別タグ(RFID)の利用		
概要		
無線周波数識別(RFID)タグを機器・装備、文書等につけることで、装備の交換の迅速化や在庫管理の自動化、作業記録の効率化、品質管理の向上等、業務の効率化や安全性の向上につながる。例えば異物混入防止(FME)領域への物品持ち込み管理等にも利用可能。		
国内一般産業・海外原子力産業における取組み事例の概要		
● プラント定修工事の効率化(三菱ケミカル株式会社)^{vii} 製造プラントの定修工事において、RFID を用いて工事安全指示書の受付等を効率化することで、定修工事期間全体で約 6000 時間(4 プラント合計)の業務削減が可能となった。システム化を行うことで人為的ミスも防止し、品質向上にも寄与した。		
導入容易性の評価		
規制対応	△	安全機能を有する機器が近傍に存在する場合は、規制との調整が必要な場合がある。
技術成熟度	○	(特記なし)
導入コスト	○	(特記なし)
総合評価	○	(特記なし)
便益の評価		
経済性	○	利用方法次第ではあるが、国内一般産業の事例のように、業務効率化によるコストダウン(社員の人件費抑制や調達コスト削減)に期待できる。
安全性	○	FME 対策等への効果は期待できる。
その他	—	(特記なし)
評価備考		
導入容易性の総合評価が高く、経済性の便益や安全性の便益が認められる。相対的に原子力発電所への導入可能性の高い技術と考えられる。		

5. ドローン利用		
概要		
人の入域が制限される(高所・狭所・防爆・高線量エリア等)、または多額の費用を要する点検(足場設置などが必要な高所作業等)において、ドローンを利用して点検などを実施することで、点検の効率化を図る。 なお、既に国内原子力発電所においても導入実績がある。		
国内一般産業・海外原子力産業における取組み事例の概要		
● ドローンの活用による高所点検(関西電力株式会社)^v 火力発電所の煙道ダクトや石炭サイロ内部、配管等、地上 5～6m の高所にある箇所の不具合の確認にドローンを活用し、目視点検の代替とした。足場の架設作業が省略され、保全コストの低減も期待できる。 ● ドローンの活用による設備異常の点検(旭化成株式会社)ⁱ 高圧ガスプラントの設備内部の検査にドローンを活用することにより、高所・狭隙部の点検(割れや破断等の設備異常の目視代替)を効率化する。 ● 原子力発電所の冷却塔へのドローンの活用による点検(Septentrio 社)^{viii} ベルギーTihange 原子力発電所の冷却塔に対して、ドローンによる写真撮影を行うことで、1mmレベルの異常を特定できる詳細な 3D モデルを構築した。		
導入容易性の評価		
規制対応	○	(特記なし)
技術成熟度	○	(特記なし)
導入コスト	○	(特記なし)
総合評価	◎	(特記なし)
便益の評価		
経済性	○	高所・狭所・防爆エリア等の点検において工数削減を期待できる。
安全性	○	人がアクセスしがたいエリア等、作業制約を有する場所での点検が容易になり、早期異常検知ができるようになることで、原子力安全の向上に貢献する可能性がある。(また、人による高所作業をドローンにより代替することができ、作業安全に貢献する)
その他	—	(特記なし)
評価備考		
導入容易性の総合評価が高く、経済性の便益や安全性の便益が認められる。さらに、海外・国内原子力発電所においても導入実績があることを踏まえると、相対的に原子力発電所への導入可能性の高い技術と考えられる。		

6. カメラを利用した現場計器の指示確認(画像抽出)		
概要		
Web カメラ等のツール、ネットワークを通して得られた現場データを画像解析によりデジタル変換する技術である。AI を活用して、高精度にデータを取得する技術もある。現場点検や監視の省人化を実現するほか、熟練技術者の技術を遠隔から活用するということも可能となる。		
国内一般産業・海外原子力産業における取組み事例の概要		
● メーター自動読取りソフトウェア『計器読む像』(岩崎通信機株式会社)^{ix} ● 遠隔監視・指示・操作を用いた水力発電施設保安実証事業(山梨県企業局)^x 発電所へのカメラの設置や作業員へのウェアラブルカメラの装着に加え、取水口へのカメラの設置やリモート I/O・センサの設置を行うことで、Web 経由で多映像や詳細表示による状況把握や遠隔監視・制御を実施。省人化や蓄積データ情報の活用を可能とする。		
導入容易性の評価		
規制対応	○	カメラの通信が有線ではなく、撮像をワイヤレスで送受信する場合には、設置場所により規制対応が必要な場合がある。
技術成熟度	○	(特記なし)
導入コスト	○	(特記なし)
総合評価	◎	(特記なし)
便益の評価		
経済性	○	例えば、補助的設備の巡視点検等の点検データ取得等において、外注依存度が高い場合、調達コストの低減効果が見込める。
安全性	○	(特記なし)
その他	—	(特記なし)
評価備考		
導入容易性の総合評価が高く、経済性の便益や安全性の便益が認められる。相対的に原子力発電所への導入可能性の高い技術と考えられる。		

(2) 国内一般産業・海外原子力産業において導入済み若しくは導入される見込みがある 技術事例

7. 状態監視・診断技術(AI 利用含む)		
概要		
SSCs に設置したセンサから収集したデータを解析し、プラントの異常やその予兆を察知し、故障につながる可能性のある箇所の特定や故障発生前の早期補修を可能とする。さらに、センサ等の計測値を AI が推定する正常範囲からの逸脱を運転員に提示する等、より高度な状態監視・診断を実施する。画像データを AI で分析する活用方法もある。		
国内一般産業・海外原子力産業における取組み事例の概要		
● 異常予兆検知システム(中国電力株式会社)^v 設備に設置したセンサから収集したデータを解析することで、プラントの「いつもと違う」動きを察知し、故障につながる可能性のある箇所の特定や故障発生前の早期補修を可能とする。データの蓄積・分析により、点検間隔の延長が期待される。 ● ベテランのノウハウをしのぐ早期の設備・品質異常予兆検知(アズビル株式会社)^{xi} センサ等の計測値を AI が推定する正常範囲からの逸脱を運転員に提示することで、熟練運転員に依存した保安体制よりも高精度かつ早期に異常を検知する。異常検知により、設備の損傷を未然に防止し、事前に補修・交換の計画を立案できるため、保安作業が効率化できる。		
導入容易性の評価		
規制対応	○	(特記なし)
技術成熟度	○	(特記なし)
導入コスト	△	機器・系統ごとに判定方法のエンジニアリングが必要となり、結果として導入コストが高くなる可能性もある。
総合評価	○	(特記なし)
便益の評価		
経済性	△	保全方式を変更できない限り、追加的な常時監視コスト(人件費や調達コスト等)が発生するため、経済性の便益は大きくないと考えられる。計画外停止を防止できる場合にはコストダウンに貢献できる。
安全性	○	(特記なし)
その他	—	(特記なし)
評価備考		
導入容易性の総合評価が高く、加えて安全性に係る便益が認められる。また、国内原子力発電所等での導入実績を有する。しかし、経済的な便益は認められない点に留意が必要。		

8. センサの設置(IoT 機器・ワイヤレスセンサ等)		
概要		
バルブ、電動機などの機器類にセンサを設置し、運転を止めることなく、常時監視を実現する。さらに応用として、取得されたデータを用いて保全の効率化や高度化を実現する。		
国内一般産業・海外原子力産業における取組み事例の概要		
● スマートバルブ(昭和電工株式会社)[▽] プラント制御に不可欠なバルブ(調節弁)にセンサを搭載し、稼働を止めることなくデータ収集を可能にした次世代バルブを用いて、設備を稼働しながらバルブの状態を監視することで、状態基準保全への移行を可能とする。 ● 水力発電所遠隔モニタリング実証事業(長野県企業局)[×] 発電所に温度、振動等新たなセンサ類を設置し、機器情報のデータ化やトレンド管理、故障時等の状況を分析し、有用性を実証している。さらに、将来的には故障予知分析等の保守の効率化・高度化を目指している。		
導入容易性の評価		
規制対応	○	例えば、ワイヤレスセンサを利用する場合、安全機能を有する設備が近傍に存在する際などは、規制了解が必要になり得る(その場合は規制対応△)。
技術成熟度	○	(特記なし)
導入コスト	△	液位計等、単純なセンサの場合は導入コストも比較的小さい場合がある。
総合評価	○	規制対応が△の場合には、総合評価も△となる。
便益の評価		
経済性	○	従来、人が現場に出向いて計測していた場合は、工数削減に期待できる。
安全性	○	(特記なし)
その他	—	(特記なし)
評価備考		
経済性の便益や安全性の便益が認められる一方、対象とする構築物、系統及び機器によって、導入容易性の総合評価は変わりうる。		

9. ワイヤレスネットワークの導入		
概要		
ワイヤレスネットワークの活用により、位置の特定、センサや作業に必要な情報等への遠隔アクセスを可能とすることで、デジタル技術の導入に貢献する。		
国内一般産業・海外原子力産業における取組み事例の概要		
● 冷却ファンのオンラインモニタリングでの Wi-Fi 活用(Entergy 社)^{xii} アークソー・ワン原子力発電所(PWR)では、Wi-Fi ネットワークが整備されており、1 日 2 回、4 カ所の格納容器冷却ファンの振動に関するデータを伝送するシステムを構築している。作業員はより効率的な設備状態の監視が可能となり、故障の事前検知やメンテナンス活動の立案のために十分な時間を割くことが可能となった。 ● 状態監視における無線技術の活用(Luminant 社)^{xii} コマンチエピーク原子力発電所では無線インフラを構築し、合計 40 のセンサを用いて、発電プロセスや設備の状態監視を行っている。この無線インフラによりデータの取得を容易とするため、業務の効率化や信頼性の向上に貢献している。		
導入容易性の評価		
規制対応	△	伝送する情報が外部に盗取されない仕組みを合わせて導入する必要がある。
技術成熟度	○	(特記なし)
導入コスト	○	導入コストは有線の場合と比較すると安価な場合がある。
総合評価	○	(特記なし)
便益の評価		
経済性	△	ワイヤレスネットワーク単体でコストダウンに貢献することはないが、その他のデジタル技術の導入の前提となる場合がある。
安全性	○	(特記なし)
その他	—	(特記なし)
評価備考		
導入容易性の総合評価が高く、加えて安全性に係る便益が認められる。また、海外原子力発電所等での導入実績を有する。しかし、経済的な便益は認められない点に留意が必要。		

10. 地図情報等を用いた災害対応		
概要		
例えば、災害発生や障害発生時に、地図情報のデータと顧客情報等を連携させるとともに、進捗状況を一元管理することで災害復旧作業を見える化する。さらに、現場状況をモバイルデバイスでリアルタイムに更新することで計画検討や復旧作業の効率化を図るものである。		
国内一般産業・海外原子力産業における取組み事例の概要		
● 災害復旧システム(BRIDGE、OG-DRESS)(大阪ガス株式会社)^v 地図情報と顧客情報を連携させるとともに、進捗状況を一元管理することで災害復旧作業を「見える化」し、携帯電話によりリアルタイムで報告を行い、作業完了までの期間短縮や、復旧計画の早期立案が可能となった。		
導入容易性の評価		
規制対応	○	(特記なし)
技術成熟度	○	(特記なし)
導入コスト	△	(特記なし)
総合評価	○	(特記なし)
便益の評価		
経済性	×	日常業務のコストダウン(社員の人件費抑制や調達コスト削減)には寄与しない。
安全性	○	(特記なし)
その他	○	PA 活動として有効となる場合がある。
評価備考		
導入容易性の総合評価が高く、加えて安全性やPA 等に係る便益が認められる。しかし、経済的な便益は認められない点に留意が必要。		

11. 空間マッピング技術の利用		
概要		
例えば、デジタル上であらゆるデータを集約し、空間上にマッピングすることで、機器の識別や計画の策定等を遠隔化し、保守作業全般の効率化や性能向上につなげることができる。例えば、デジタル上の機器を選択すると、位置・直近の出来事・その他関連情報等の必要情報を入手できるようになる。		
国内一般産業・海外原子力産業における取組み事例の概要		
デジタルツインによる保全業務高度化(ENEOS 株式会社)ⁱ 設備関連データの連携による業務効率化を目的とし、製油所の既存装置にて 3D モデルを作成し、一部データの連携についてトライアルを実施中である。今後、データプラットフォームの構築や連携したデータを AI により解析し、保全計画の高度化を実現する。		
導入容易性の評価		
規制対応	○	(特記なし)
技術成熟度	○	適用対象・適用方法によっては開発中のものもある。
導入コスト	△	適用する場合のコストが高い可能性がある。
総合評価	○	(特記なし)
便益の評価		
経済性	△	(特記なし)
安全性	○	(特記なし)
その他	○	保守や運転等の技能伝承で適用可能と考えられる。
評価備考		
導入容易性の総合評価が高く、加えて安全性や広報・PA 等に係る便益が認められる。しかし、経済的な便益は認められない点に留意が必要。		

12. 拡張現実(AR)技術の利用		
概要		
例えば、AR 技術を利用可能なウェアラブル端末を用いて、保全作業時等に必要な情報を現実世界の情報に重ねて利用することで、意思決定の向上、安全性の向上(精度、徹底度、成功度の向上等)、業務の効率化につながる。		
国内一般産業・海外原子力産業における取組み事例の概要		
● 航空機工場での AR を用いた作業高度化(Boeing 社)^{xiii} 航空機の複雑な電気配線の取り付けに関して、これまで 2 次元の配線図を記憶し作業を行っていたが、AR を用いた、ハンズフリーなリアルタイムに 3D 配線図を表示可能とする技術を実証中。		
導入容易性の評価		
規制対応	○	(特記なし)
技術成熟度	○	適用対象・適用方法によっては開発中のものが含まれる。
導入コスト	△	(特記なし)
総合評価	○	(特記なし)
便益の評価		
経済性	△	コストダウン(社員の人件費抑制や調達コスト削減)は限定的と考えられる。
安全性	○	外観で判別可能な劣化診断等にも適用可能と考えられる。
その他	○	広報・PA 用の技術としても有効と考えられる。
評価備考		
導入容易性の総合評価が高く、加えて安全性や広報・PA 等に係る便益が認められる。しかし、経済的な便益は認められない点に留意が必要。		

13. 仮想現実(VR)技術の利用		
概要		
例えば、作業の実行前に遠隔で VR を用いてトレーニングしフィードバックを得ることにより、トレーニングの向上や現場作業の効率化・エラー低減等につなげることができる		
国内一般産業・海外原子力産業における取組み事例の概要		
作業者訓練や作業計画の検討・立案等を可能とする福島第一原子力発電所の VR(日本原子力研究開発機構)^{xiv} VR(仮想現実)技術を用いて、あたかも福島第一原発(1F)現場にいる感覚を体験できるシステムを構築。このシステムで作業者訓練や作業計画の検討・立案等を行うこと可能とする。		
導入容易性の評価		
規制対応	○	(特記なし)
技術成熟度	○	適用対象・適用方法によっては開発中のものもある。
導入コスト	△	適用する場合のコストが高い可能性がある。
総合評価	○	(特記なし)
便益の評価		
経済性	△	(特記なし)
安全性	○	(特記なし)
その他	○	保守や運転等の技能伝承等で適用可能と考えられる。
評価備考		
導入容易性の総合評価が高く、加えて安全性や広技術伝承等に係る便益が認められる。しかし、経済的な便益は認められない点に留意が必要。		

14. 顔認証技術・行動監視技術・追跡技術の利用		
概要		
例えば、核セキュリティ・核物質防護に関して、顔認証技術・行動監視技術・追跡技術を用いて防護区域内の監視等を実施することにより、セキュリティ品質を向上させることができる。		
国内一般産業・海外原子力産業における取組み事例の概要		
● 空港の搭乗手続きにおける顔認証システム(日本電気株式会社)^{xv} 国際線の搭乗手続きにおいて、登録した顔写真を用いて、その後のチェックイン、手荷物預け、保安検査、搭乗等において、従来必要だった搭乗券やパスポートの提示を省略し、“顔パス”で通過・手続きできるシステム。接触を最小限にするとともに、乗客・スタッフの手続きを効率化できる。		
導入容易性の評価		
規制対応	○	(核セキュリティ要件等の確認が必要)
技術成熟度	○	行動監視・追跡監視まで実施する場合は、データ取得精度・転送速度等の障壁がある。
導入コスト	△	(特記なし)
総合評価	○	(特記なし)
便益の評価		
経済性	△	追加的な常時監視コスト(人件費や調達コスト等)が発生するため、経済性の便益は大きくないと考えられる。 なお、内部脅威者の行動監視強化により、発電所現場での負担となっている2マンールの撤廃につながれば、日常的なコスト削減につながる可能性があるが、規制対応が必要と考えられる。
安全性	○	不安全行為の監視・警告により、定検工程にも影響を及ぼし得る労災リスク低減の可能性が考えられる。
その他	○	防護区域内の継続的な監視により、セキュリティ品質の向上に期待できる。
評価備考		
導入容易性の総合評価が高く、加えてセキュリティに係る便益が認められる。しかし、現状の運用を前提とすると、経済的な便益は認められない点に留意が必要。		

15. 付加製造(AM)技術の利用		
概要		
付加製造(AM:Additive Manufacturing)技術は、製造する物体の 3D モデルデータを高さ方向でスライスして、その断面の形状に合わせて一層毎に材料を積み重ねることで物体を製造する技術である。 大型の加工機械が必要なく、図面などのデータと必要な材料が現地に存在すれば、アジャイル的に製造することが可能となり、製品などの製造コストや納期の低減に期待ができる。また、製造中止品などのリバースエンジニアリング或いは代替製造法としても期待できる。		
国内一般産業・海外原子力産業における取組み事例の概要		
● AM(Additive Manufacturing)技術を用いた原子炉用部品(スパーサグリッド)の製造技術開発(Carnegie Mellon 大学、Westinghouse 社、Penn United 社)^{xvi} 研究開発段階ではあるが、次世代の原子力発電所の革新的な製造プロセスの開発として、原子炉の燃料集合体の一部であるスパーサグリッドの製造とその最適化等を実施している。 ● 3D プリント技術を用いたシンブルプロラグ製^{xvii} 実証段階として、2020 年 5 月、3D プリントにより製造されたシンブルプロラグが米バイロン原子力発電所 1 号機に適用されている。 ● 3D プリント技術を用いた航空機の部品製造(Materialise 社)^{xviii} 航空機の古い機体の改装・改良において必要なパネル等の機材を、3D プリント技術を用いて、品質を保持しながら、迅速に少量生産する。 なお、日本でも令和元年度より 3D プリンティングによる部品製造に関する技術開発が実施されており、加えて、国内での実用化に向け、日本機械学会(JSME)での規格化に必要なデータ取得等を検討中とされている。		
導入容易性の簡易評価		
規制対応	△	AM 技術により製造される部品等の適用場所によっては、規制との調整が必要な場合がある(クラス1, 2, 3機器・管・容器・支持構造物等)。 JSME 設計・建設規格、材料規格、溶接規格等に反映され、原子力規制庁による技術評価を受けた後、利用可能となる。 (クラス外機器への適用は比較的容易と考えられ、その場合は○)
技術成熟度	△	実証段階である。 (クラス外機器への適用は一般産業でも進んでおり、その場合は○)
導入コスト	○	(特記なし)
総合評価	△	現時点では、原子力事業者にとっての便益が大きければ導入検討する価値がある。 (クラス外機器への適用は比較的容易と考えられ、その場合は◎)
便益の簡易評価		
経済性	○	AM 技術によって部品製造コストが低下する場合、原子力事業者にとっては調達コスト低減に貢献する。 また、例えばある機器の構成部品が偶発的に破損し、その機器の復旧が完了するまでの間(構成部品を調達完了するまでの間)、プラントを停止しないといけない、若

		しくは出力を低下させないといった状況が発生した場合、発電所の現地で部品を製造することで、停止若しくは出力低下の期間を限定的なものとするができる。
安全性	○	AM 技術により製造する製品が高い信頼性を有することを前提に、発電所現地で AM 技術による部品製造を可能とすることは、偶発故障が発生した場合の対処能力を向上することができ、システムレベル・プラントレベルでの安全性・信頼性向上に貢献する。
その他	○	サプライヤー撤退、製造設備の撤去、特有の製造スキルを有する人材の退職等の影響で、国内サプライヤーが原子力発電に必要不可欠な部品が供給できない場合が想定され、それへの対処として有効(国内サプライヤーにとっての便益)と考えられる。
評価備考		
国内原子力発電所の安全上の重要度が高い機器などへの導入容易性の総合評価は低い一方、一般産業品と同等レベルの品質が要求される機器などへの導入は容易であると考えられる。 安全上の重要度が高い機器への導入が可能な場合は、原子力事業者にとっては経済性や安全性に貢献する便益が認められる。なお、安全上の重要度が比較的低い機器(一般産業と同等の品質が求められるもの)への導入する場合は、原子力事業者にとっての経済性や安全性に係る便益は限定的なものになると想定される。 一方で、国内原子力産業が抱える課題(例えば、サプライヤー撤退、製造設備の撤去、特有の製造スキルを有する人材の退職等)への対処として大変有効であり、特に国内原子力製品サプライヤーにとって、競争力確保、技術伝承といった便益が認められる。		

(3) その他参考情報

16. 新たな検査技術		
概要		
例えば、検査装置(カメラなど)を配備したpigや、ロボットを機器などに挿入する検査技術。測定範囲の制限を受けずに非破壊で配管内の減肉等を検査することを可能とし、これまでできなかった検査の高度化による安全性の向上や人の検査の代替による効率化を行う。		
国内一般産業・海外原子力産業における取組み事例の概要		
● インテリジェントpig検査技術の適用による加熱炉コンベクションチューブの信頼性向上(出光エンジニアリング株式会社)^{xix} インテリジェントpigを用いて、加熱炉チューブの全長検査(肉厚検査)を非破壊で実施することで、これまで検査できなかった部分も含めて検査を行い、信頼性向上に資する。 ● ボイラ伝熱管の高効率肉厚計測技術 ケーブルレスインナーUT(三菱重工業株式会社)^{xx} 火力発電プラントボイラの主要設備である節炭器管や再熱器管等の伝熱管では、外面からの局所的な磨耗減肉や広範囲にわたる腐食減肉の発生が懸念されるため、管の内側から肉厚を計測可能な超音波水浸法のケーブルレスインナーUTシステムを開発し、これらの損傷の的確な検出を可能とする。		
導入容易性の評価		
規制対応	○	(特記なし)
技術成熟度	○	基本的に原子力発電所に適用可能な新たな検査技術は多いと考えられるが、実施している検査ニーズ次第である。
導入コスト	○	(特記なし)
総合評価	◎	(特記なし)
便益の評価		
経済性	△	従来行っている検査からの代替としては、コストダウン(社員の人件費抑制や調達コスト削減)は限定的と考えられる。
安全性	—	(特記なし)
その他	—	(特記なし)
評価備考		
導入容易性の総合評価が高く、安全性の便益が認められ、基本的に原子力発電所に適用可能な新たな検査技術は多いと考えられるが、導入が有効かどうかは実施している検査ニーズ次第である。		

3. 原子力発電所のデジタル技術利活用可能性(ポテンシャル)の分析

3.1 原子力発電所の有する様々なデータの整理

原子力発電所へのデジタル技術導入にあたって、データ分析等の前提として必要な「現場に存在するデータ」に、どのようなものが存在するかを把握することが重要である。

原子力発電所における主たる業務は、基本的には法令要求に基づいていることから、法令において要求されている事項は何らかの形のデータとして原子力発電所に存在するという仮定のもと、法令調査によって原子力発電所で利用可能なデータの整理を進め、データカタログとして取りまとめた。

3.1.1 データ整理の考え方

原子力発電所の有する様々なデータを整理するにあたって以下の考え方に基づいてデータの抽出・整理を行った。

【原子力発電所の有する様々なデータの抽出】

- ・ 原子力発電所での業務(主たる業務)は法令要求に基づいている。従って、法令を調査し、ここで要求されている事項は何らかの形のデータとして原子力発電所に存在するという想定で整理した。調査対象とした法令、ガイドライン類は以下の通り。
 - ✓ 核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律(炉規法)
 - ✓ 実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則(炉規則)
 - ✓ 実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則(設置許可基準規則)
 - ✓ 実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則(技術基準規則)
 - ✓ 原子力施設の保安のための業務に係る品質管理に必要な体制の基準に関する規則(品管規則)
 - ✓ 発電用原子炉施設の設計及び工事の計画に係る手続ガイド
 - ✓ 保安規定審査基準
 - ✓ 原子力事業者等における使用前事業者検査、定期事業者検査、保安のための措置等に係る運用ガイド
- ・ 法令の落とし込みとして保安規定がある。保安規定は一部マスキングがあるものの公開されている(安全性向上評価届出書に添付されている)ため、業務分類の整理はこれを参考にした。

【データの整理】

- ・ データ整理のうち、現場SSCsデータについては「計画段階のデータ」「建設段階のデータ」「運転段階のデータ」で分類した。
- ・ 原子力発電所における利用可能なデータは、以下に示す分類が可能である。
 - ✓ 数字／文字／画像
 - ✓ デジタル／アナログ(主観的な判断)
 - ✓ 規制強弱(主観的な判断)
 - ✓ To-Be(理想)／As-Is(現状)／共有データ・外部データ(他プラントのデータや一般化され公開さ

れているデータ等)

3.1.2 データカタログ

原子力発電所のデータカタログを表 3-1 に示す。

なお、本データカタログの根拠情報(抽出・整理した全てのデータ情報)を別添資料 1 に示す。

表 3-1 原子力発電所のデータカタログ

区分	項目	概要	データ例	規制強弱
① 設計データ	設置許可段階のデータ	原子炉施設の設置及び変更について行政庁の許可を得るために必要なデータである。	・行政庁要求事項データ(法令条文) ・設置許可審査時データ(安全審査資料) ・設置許可申請書データ(設定許可申請書本文および添付書類)	弱 法令、設置許可申請書および審査資料は公開されている。(一部機密に係る事項は非公開)
	工事計画段階のデータ	原子炉施設の詳細設計が設置許可の基本方針等と整合していること、及び行政庁が定める技術基準を満足していることを示すデータである。	・行政庁要求事項データ(法令条文) ・施設区分毎の設計データ(寸法、材料、個数等)、基本設計方針、適用基準及び適用規格、工事の方法	強 法令、基準・規格及び工事計画(工事計画認可申請書)は公開されているが、原子炉施設の詳細設計データは機密に係る事項につき非公開である。
② 現場構成データ	工事データ	設備の設計に基づく工事の実施記録である。	・工事仕様書 ・基準適合性を確保するための設計結果と適合性確認状況一覧表 ・検査計画	強 原子炉施設の詳細設計データは機密に係る事項につき非公開である。
	検査データ	対象設備が工事計画に適合していることを確認するための検査(適合性確認検査)の実施記録である。	・検査要領書(検査目的、検査場所、検査範囲、設備概要、検査方法、判定基準、検査体制、不適合処置要領、検査手順、検査工程、検査用測定機器、検査成績書の事項) ・検査記録(検査年月日、検査の対象、検査の方法、検査の結果)	強 原子炉施設の詳細設計データは機密に係る事項につき非公開である。
③ 物理構成(現場)データ	運転に関するデータ	原子炉施設の運転管理に必要なデータである。	・プラント運転データ(熱出力、冷却材温度・流量等) ・プラント操作データ(機器動作確認・切替、水質管理等) ・プラント運転中における運転状況の記録(運転日誌等) ・事故・故障事例等の記録	強 一部公開データはあるが大部分のデータは非公開である。

	施設管理に関するデータ	原子炉施設の施設管理に必要なデータである。	・施設管理計画データ(施設管理方針、施設管理目標、保全プログラム、保全対象範囲、施設管理重要度、施設管理実施計画) ・施設管理記録データ(検査記録) ・施設管理評価データ	強 一部公開データはあるが大部分のデータは非公開である。
④ その他施設運営に係るデータ	規定類	原子炉施設の運営にあたって遵守すべき規定類のデータである。	・保安規定 ・核物質防護規定 ・その他社内規定類(運転手順書、作業手順書、業務要綱等)	強 保安規定は公開データであるが、核物質防護規定及びその他社内規定類は非公開である。
	原子力安全に関するデータ	原子炉施設の運営に係るデータのうち、原子力安全に関するデータである。	・教育訓練データ(教育計画、教材、教育記録) ・不適合・是正措置(CAPデータ、トラブル等管理記録データ) ・安全文化指標に基づく評価データ ・安全評価データ(安全性向上評価届出書)	弱 機密に係る事項につき非公開のデータを含むが全体として公開データが多い。
	核セキュリティに関するデータ	核燃料物質の防護措置に関するデータである。	・設備設計データ(区画図、設備および装置情報、情報システムセキュリティ対策および計画、緊急時対応計画) ・監視データ(監視設備からの出力データ、出入り管理データ、特定核燃料物質管理データ) ・点検データ(設備および装置の保守・点検記録、防護措置の定期評価結果)	強 核物質防護に係るデータは非公開である。

3.2 原子力発電所現場の潜在的ニーズの整理

原子力安全の持続的な向上、核セキュリティの確保、効率的なデータ収集、業務プロセス効率化等、データ分析の観点から、現場の抱える課題意識(潜在的ニーズ)を収集整理し、データ利活用・デジタル技術適用による解決可能性を検討する。併せて、規制による制約の有無についても確認し、現実的なデジタル技術利活用可能性を分析した。

3.2.1 調査方法

法令要求を具体的なルールとして落とし込んだ文書として保安規定がある。ここでは保安規定の内容を参考に、業務分類の整理、業務プロセスの調査を行い、次に各業務プロセスに関連するデータの取り扱いに基づき現場ニーズを整理した。作業の流れの例を図 3-1 に、各業務プロセスに関連するデータの取り扱いを図 3-2 に示す。

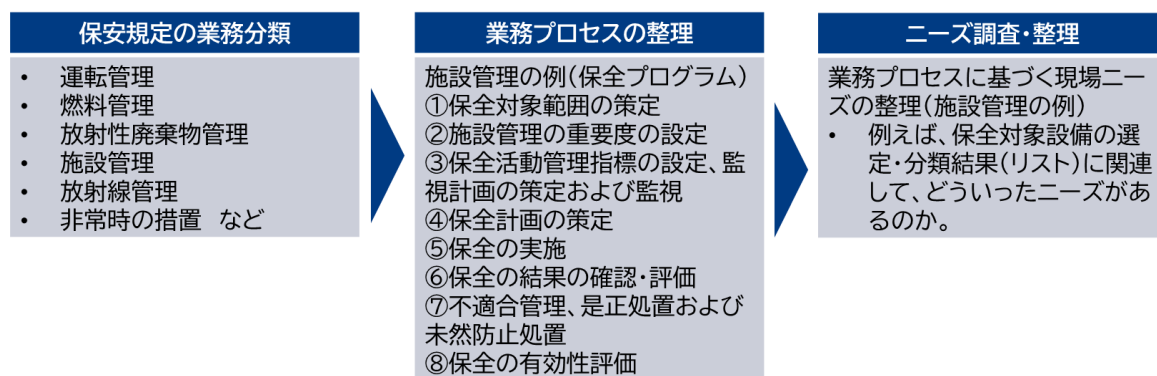


図 3-1 作業フロー

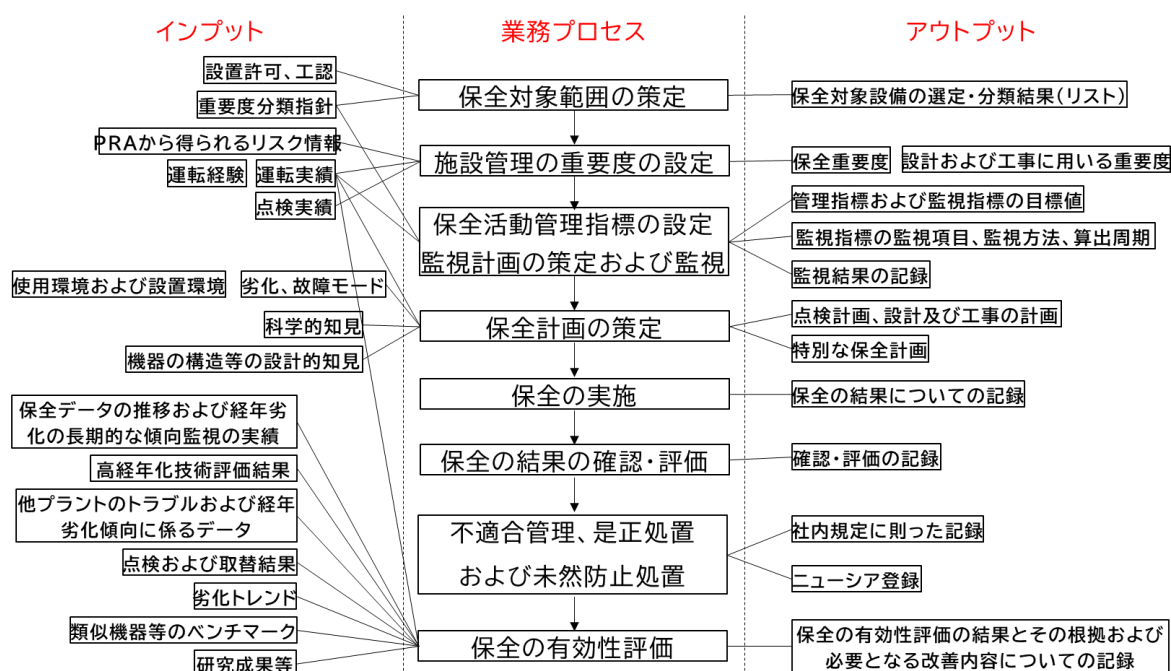


図 3-2 各業務プロセスにおけるデータの取扱い例

3.2.2 現場ニーズ調査の結果

現場ニーズ調査結果を業務区分毎に整理した結果を表 3-2 に示す。

なお、整理結果の根拠情報(抽出・整理した全てのニーズ情報)を別添資料 2 に示す。

表 3-2 現場ニーズ調査の整理結果

業務区分	技術概要	備考
運転管理	運転パラメータ(ビックデータ)をタイムリーに転送・分析することによる異常検知	
燃料管理	取替炉心設計における、取替体数の節約に資する燃料装荷パターン探索の自動化	
運転管理・施設管理	「いつもと違うこと」に気づく力(音、振動、臭い、計器の動き等)の育成を行うための教材作成	

施設管理 (構成管理含む)	原子炉施設の運転・保全に必要な監視・点検における、ドローンやロボット等での点検及びその自動化(危険箇所を含む)	
	原子炉施設の運転・保全に必要な点検記録(過去の記録類)における、施設管理業務を効率化するためのデータの紐づけ	
	現行の保全・構成管理・現場作業のために、設備に対し「設計要求」「設計結果」「工事实績」…等の関連情報が容易にアクセスできるような散在したデータの紐づけ	
	点検周期の延長、状態基準保全への移行に向けた保全高度化・最適化に向けた分析	保全の有効性評価そのものであり、正確には現場が期待するデジタル技術によるソリューションとは言い難いが、デジタル技術活用(点検データ利用)を前提とした評価を実施
	モバイル端末(タブレット等)の活用による現場でのデータ閲覧と対応高度化(迅速な対処)、データ登録(ウェアラブル端末を含む)	
品質保証	CAP システムの UI の高度化等によるデータ収集の効率化・自動収集	
	テキスト解析技術による CAP システムのスクリーニングの自動化	

4. Society5.0 実現に向けた原子力発電所のデジタル技術利活用に係る概念設計(グランドデザイン)

4.1 原子力発電所のデジタル技術利活用に係るグランドデザイン素案の検討

4.1.1 検討会合の設置

国内一般産業や海外原子力産業では、顕在化しつつある産業全体の課題への対処手段として、或いは既存原子力施設を持続的に活用していくための手段として、デジタル技術の導入を戦略的に進めている状況等も認められる。

一方、国内の原子力産業においては、

- ・ デジタル技術等を活用した個別の研究・技術開発の事例は多くみられるが、国内一般産業や、海外原子力産業(米国)のように、あるべき将来像を定義したうえで、デジタル技術の積極的導入に向けた集中的・効果的な研究・技術開発とはなっていない(有すべき技術情報基盤の土台が存在しない)。
- ・ 研究・技術開発にとどまっており、デジタル技術を積極的に導入するために考慮すべき原子力産業全体のルール等については、検討途上である(原子力以外の慣習等に対処するための基盤・文化がない)。
- ・ 新技術導入に際しての規制対応の予見性がない。

といった状況が認められ、現状、原子力発電所に容易にデジタル技術を導入できる状況にあるとは言えない。

以上の課題意識を踏まえ、

- ・ 原子力発電所におけるデジタル技術利活用に係る課題を整理し、
- ・ 抽出した原子力産業全体の共通課題等への対応方針を概念設計(グランドデザイン)し、
- ・ 共通技術基盤の構築及び指針の作成により原子力発電所へのデジタル技術実装への道筋を示す

ための、基本事項の検討・整理を通して、今後国内原子力産業及びデジタル産業が、今後積極的に、国内原子力発電所へのデジタル技術を導入するための“共通認識(目指すべき方向性・課題・対処方針に係る論点)”を構築することを目的に、「原子力デジタル産業基盤構想に係る検討会合」を設置した。

なお、2021年度の検討においては、「既存原子力発電所におけるデジタル技術の利活用」を検討の対象とし、建設段階・廃止措置段階は検討対象外とした。

4.1.2 検討体制

「原子力デジタル産業基盤構想に係る検討会合」の検討体制を表 4-1 に示す。

表 4-1 「原子力デジタル産業基盤構想に係る検討会合」の検討体制

役割	参加組織
主査	出町 和之 東京大学 大学院工学系研究科 原子力専攻 准教授 ^{注1}
委員	株式会社原子力エンジニアリング ^{注2}
委員	日本電気株式会社 ^{注2}
オブザーバ	経済産業省 資源エネルギー庁 原子力政策課
事務局	株式会社三菱総合研究所

注1:主査の技術支援として、中部電力原子力安全技術研究所様にもご協力いただいた。

注2:各参加企業より複数名委員として参加いただいた。

4.1.3 検討プロセス

本検討の主要な論点は以下の通りである。

＜前提＞あるべき姿(To Be)の検討・共有

- ✓ 原子力発電所のデジタル技術利活用によって達成されるべき姿とは何か。

＜あるべき姿に照らし合わせた現状把握フェーズ＞国内原子力産業の現状把握

- ✓ 国内原子力産業の外側では何が起こっているのか(論点・課題把握、事例調査)
- ✓ 原子力発電所におけるデジタル技術利活用にあたり、活用する資源(データ)が、どのようなものがあるのか。
- ✓ 現場ニーズはどのようなものがあるのか。

＜課題整理フェーズ＞原子力発電所へデジタル技術を導入するにあたって課題整理・類型化

- ✓ 技術上の課題は何か。
- ✓ 技術面に依らない、ルール(商習慣等)上の課題はあるのか。
- ✓ 特に業界全体として対処すべき課題の評価軸

＜対応方針検討フェーズ＞デジタル技術を導入するにあたっての共通課題への対処

- ✓ 類型化した技術毎の対応方針の検討
- ✓ 横断的視点(ルール等)への対応方針(案)
- ✓ 技術基盤・システムの提案・開発の提案

これら論点についての検討プロセス全体像を図 4-1 に示す。

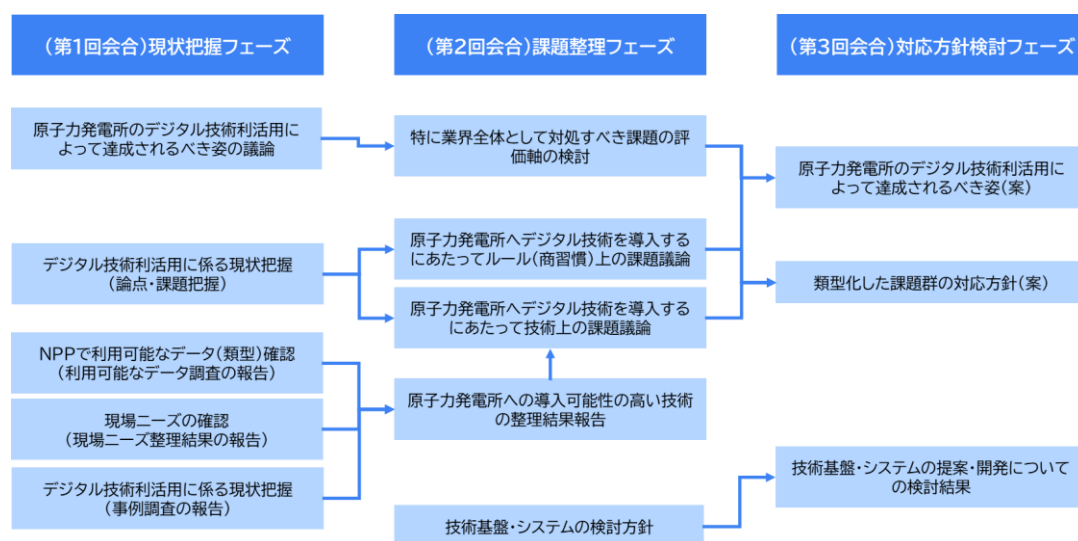


図 4-1 検討プロセスの全体像

4.1.4 検討会合の開催実績

検討プロセスの通り、キックオフミーティングを含む検討会合は計 4 回実施した。開催実績と主な議題を表 4-2 に示す。

表 4-2 検討会合の開催実績

	日時	主な議題
キックオフ ミーティング	2021 年 7 月 20 日(火) 13:00~14:50	- 令和 3 年度「原子力産業基盤強化事業」実施計画の概要について - 原子力デジタル産業基盤構想に係る検討会合の設置について - 令和 3 年度検討内容について - 文献調査計画及び参考資料について
第 1 回	2021 年 10 月 7 日(木) 13:00~15:50	- 原子力発電所に導入可能性の高い技術の検討のための調査報告 - 原子力発電所におけるデジタル技術利活用により達成されるべき姿 To Be の仮説検討 - デジタル技術の導入障壁に係る議論
第2回	2021 年 12 月 1 日(水) 13:30~16:00	「原子力発電所におけるデジタル技術利活用の未来像と課題整理」に係る議論 「原子力発電所への導入可能性の高い技術の整理結果(案)」に係る議論 「技術基盤・システム検討方針」の報告&意見交換 「レポート骨子(案)」に係る議論
第3回	2021 年 2 月 3 日(木) 9:00~12:00	「原子力発電所におけるデジタル技術利活用の未来像(案)」に係る議論 - 類型化した課題群の対処方針(案)」に係る議論

		・ 「技術基盤・システム検討結果」の報告&意見交換
--	--	---------------------------

4.1.5 グランドデザイン素案

第2章、第3章における調査結果、及び検討会合委員意見等をもとに、フィジカル空間とサイバー空間の高度に融合した社会における、原子力発電所のデジタル技術利活用に係る未来像(案)、技術的な課題や非技術的な課題の整理、原子力産業全体の協調領域として特に対処すべき課題の特定、対処方針(案)について、「研究レポート:Society5.0の実現に向けた原子力デジタル産業基盤の構想」(グラウンドデザイン素案)として取りまとめた。本レポートを別添資料3に示す。

本レポートの構成は図4-2に示す通りである。

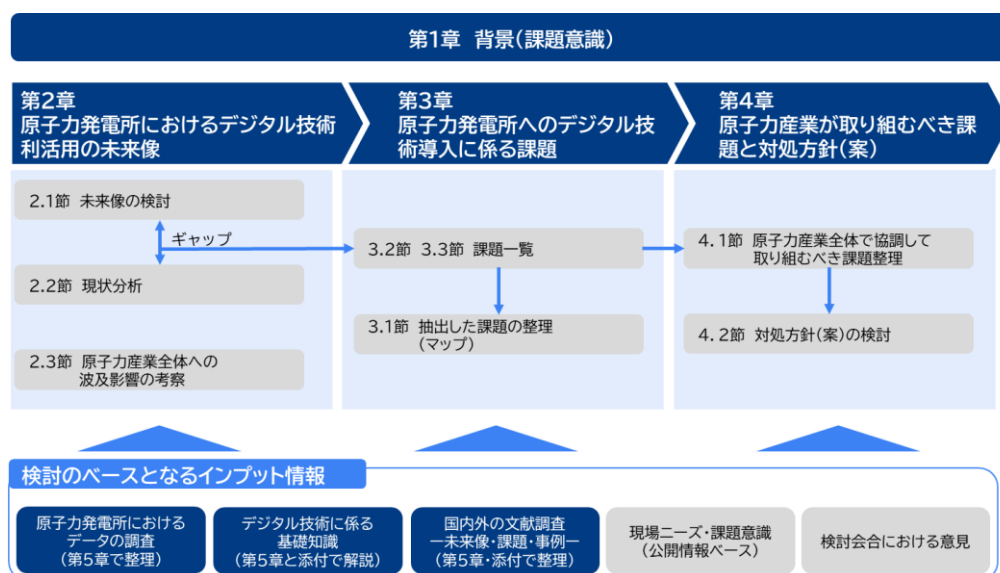


図 4-2 本レポートの構造

- ・ 第1章では、検討背景、検討目的、今年度検討体制を記載した。
- ・ 第2章では、国内外の取組みを参考に、日本における原子力発電所におけるデジタル技術利活用の未来像(案)を定義するとともに、未来像に対する現状分析の結果を整理した。また、原子力産業全体への波及影響についても整理検討した。
- ・ 第3章では、第2章の未来像及び現状分析の検討から抽出された、原子力発電所へのデジタル技術導入にあたって障壁となる事項(課題)をマップとして取りまとめ、その具体的な課題について解説した。
- ・ 第4章では、第3章で整理した課題のうち、特に協調領域として原子力産業・デジタル産業が注力すべき課題を特定し、さらに対処方針の案を取りまとめた。
- ・ 第5章では、第4章にて提示した課題の対処方針に沿った取組みを実施するに当たっての基礎的検討として、現在原子力発電所に存在する利用可能なデータの整理結果、原子力発電所への導入可能性を有する技術の候補、AI開発に係る基礎知識を整理した。

5. 原子力発電所への活用が有効なデジタル技術利活用の要素技術の調査とシステムの提案

4. Society5.0 実現に向けた原子力発電所のデジタル技術利活用に係る概念設計(グランドデザイン)での検討結果を踏まえ、デジタル技術の要素技術として、物体検出・セグメンテーション・姿勢推定などの画像認識技術、回帰モデルを用いた異常検知技術、自然言語処理技術等の典型的な AI(深層学習)手法を整理・評価した。さらに、原子力発電所への活用が有効だと考えられるデジタル技術利活用事例の検討・整理を踏まえ、「状態監視・診断技術(AI 利用含む)」、「カメラを利用した現場計器の指示確認」、「核セキュリティ・核物質防護に関する監視・出入管理」のシステムの検討を実施した。システムの検討においては、利用可能な AI モデルの調査・提案を行い、従来システムとの比較として信頼性・安全性・コスト等を評価した。

なお、詳細は、「研究レポート:Society5.0 の実現に向けた原子力デジタル産業基盤の構想」の添付資料「共通的な技術基盤・システムの提案」として取りまとめた。当該資料を別添資料3(添付資料5)に示す。

5.1.1 AI の開発環境

AI モデルの開発自体はたしかに少々難しい可能性がある。ここ数年の関連学術論文の著者の多くは中国人であり、原子力のみならず日本そのものが AI 研究に対して世界に後れをとっている。しかし、原子力に必要な AI は、モデル開発だけではない。モデルの開発と、それを組み込んだシステムの開発は別物として考えるべきである。

システムに求められる「入力データ」と「出力データ」が定まっていれば AI を組み込んだシステム開発は簡単である。現在では典型的なものだけでも画像:物体認識、セグメンテーション、姿勢、顔、表情、文字、音:音声認識、音源解析、回帰:時系列データ、未来予測、言語:分類、翻訳、応答、執筆、予測、などさまざまな AI モデルが開発されている。しかもその多くはネット上で公開され、なかには無償のものも少なくない。

原子力分野では熱流動解析や構造解析のために FEM が多用されてきた。なので、FEM そのものの性能向上を目指す研究と同時に、汎用 FEM コードを要素手法としてプラントシミュレーションや耐震解析のためのシステムを構築することも、原子力にとって重要な研究テーマとなっている。AI システム開発もこれと同様であり、さらに言うと、先述のように最新モデルがネット上でダウンロード可能であるということに加え、トラブル対策やサンプルコードなど多くのアドバイスも付随しているということを考慮すると、AI システム開発は FEM に比較しても恵まれた開発環境にある。

5.1.2 簡易なフレームワーク及び AI モデルの提案

このような恵まれた開発環境への知識が広がることで、原子力の AI に対する心理的ハードルが下がることに期待できる。その一助となるよう、①状態監視・診断技術、②カメラを利用した現場計器の指示確認、③核セキュリティ・核物質防護に関する監視・出入管理のための AI フレームワークと要素 AI モデルを以下に示す。

(1) 状態監視・診断技術(AI 利用)

状態監視・診断技術のための基本的なフレームワークを図 5-1 に示す。このフレームワークに必要な構造は比較的単純であり、まず計測値を時系列データ化し、時系列データ中で検出したい異常データ部分にラベル付け(アノテーション)をし、時系列データを入力、異常スコアを出力として、ラベル付けした異常データに対して高い異常スコアを出力するように RNN モデル(回帰モデル)を学習する。これにより、学習後の RNN モデルは、センサ等からのリアルタイム計測値に異常の特徴が含まれている場合に高い異常スコアを出力するため、異常を検知することが可能である。さらに、異常の種類別にラベル付けと異常スコアの学習をすることで、単なる異常の検知だけではなく異常の識別も可能となる。

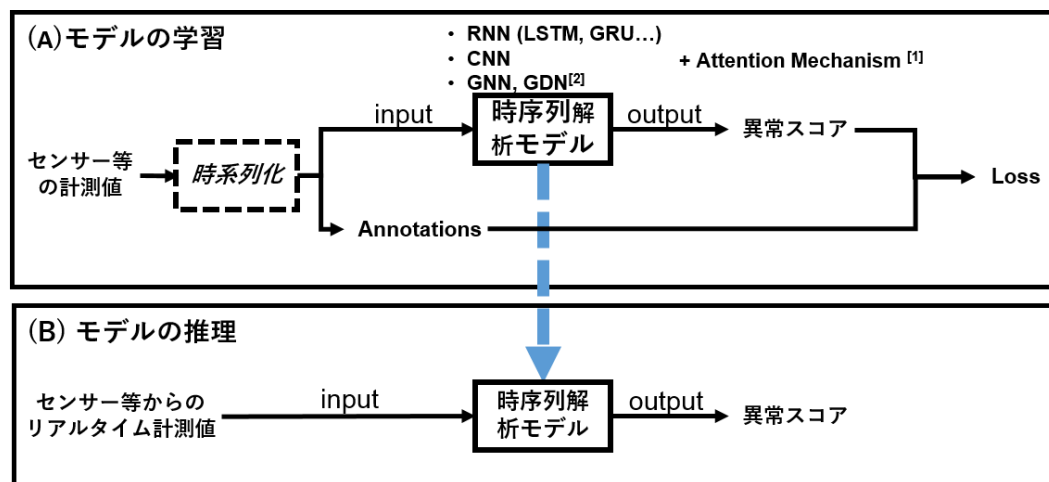


図 5-1 状態監視・診断技術のための基本的なフレームワーク

このフレームワークにおける時系列解析に利用可能なモデルの例として、TPA-LSTM²と Graph Deviation Network (GDN)³について紹介する。

TPA-LSTMとは時間的パターン注意および Long-Short-Term メモリ(Temporal pattern attention – Long Short Term Memory)のことであり、回帰モデルである LSTM に時間的パターン注意機構を追加することで、次回列解析の能力を向上させている。アテンション機構とは、入力されたデータのどこに注目すべきかを動的に特定する仕組みであり、並列化が容易である等の利点から自然言語を中心に発展した深層学習の要素技術の1つであるが、この手法ではこのアテンション機構を時系列解析に結び付けることで、時系列データの異常のパターンに着目して時系列予測の性能を向上させている。

また、GDNとは Graph Deviation Network の略称である。このモデルの特徴は、グラフ構造学習とグラフニューラルネットワークを組み合わせ、さらにアテンション機構を用いて時系列データを予測している点である。さらに、時系列予測のみでなくアテンションにより異常を検知する機能もすでに組み込まれており、状態監視・診断技術にそのまま適用可能である。

² Shih, Shun-Yao, Fan-Keng Sun, and Hung-yi Lee. "Temporal pattern attention for multivariate time series forecasting." Machine Learning 108.8 (2019): 1421-1441.

³ Deng, Ailin, and Bryan Hooi. "Graph neural network-based anomaly detection in multivariate time series." Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence. Vol. 35. No. 5. 2021.

(2) カメラを利用した現場計器の指示確認

カメラを利用した現場計器の指示確認のための基本的なフレームワークを図 5-2 に示す。このフレームワークに必要な構造も比較的単純である。まず圧力計などアナログ計器の数値指示部の画像を取得し、さらに計器が示す数値の正解値を書く画像にラベル付け(アノテーション)して学習データを生成する。

この学習データを使用して、画像データを入力すると正解数値を出力するように画像特徴抽出モデルを学習する。これにより、学習後の画像特徴抽出モデル計器指示の画像を入力するだけでその指し示す数値を人間が認識するかの様に認識し、デジタル数値として出力するようになる。

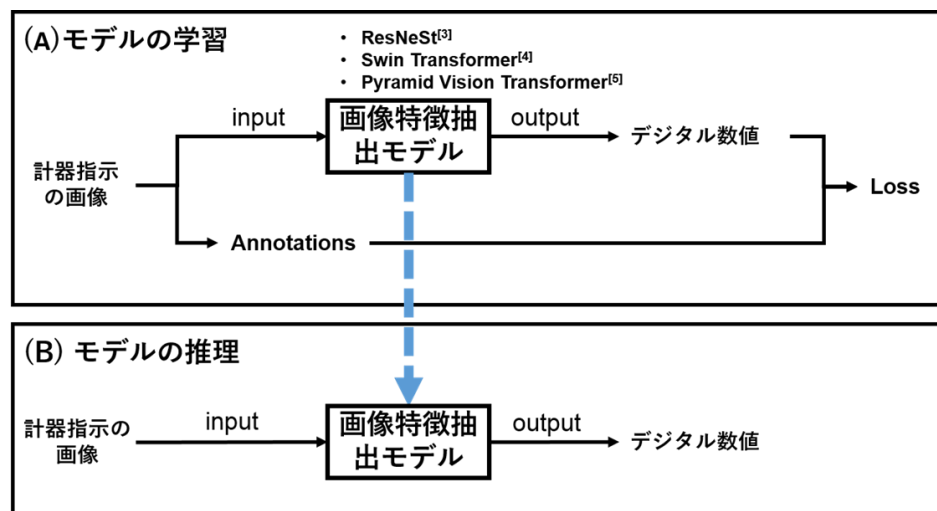


図 5-2 カメラを利用した現場計器の指示確認のための基本的なフレームワーク

このフレームワークにおける画像特徴抽出に利用可能なモデルの例として、ResNeSt⁴、SwinTransformer⁵、Pyramid Vision Transformer⁶を紹介する。

ResNeSt とは、グループ化とスプリットアテンション機構を組み合わせたモデルであり、画像分類、物体検出やセグメンテーション、さらには姿勢推定でも高い精度が得られている。

Swin Transformer とは、Shifted windows で計算される階層的 Transformer である。Transformer を Computer Vision に適用するためには、(検出対象)物体のスケールが大きく変化すること、テキストと比較して入力画像の解像度が高いことの2つの課題に対応する必要がある。このアーキテクチャは、画像サイズに対して線形の計算量を持ち、さらに画像分類・物体検出・セマンティックセグメンテーションなどのタスクで高い性能を有している。まず、画像はパッチ分割(Patch Partition)モジュールに入力される。入力が3チャンネルのRGB画像とすると、各パッチは $4 \times 4 = 16$ 画素で、各画素はR、G、Bの3値なので、フラット化した画像は $16 \times 3 = 48$ となり、パッチ分割後の画像形状は $[H, W, 3]$ から $[H/4, W/4, 48]$ に変化する。次に4段階のstageにて特徴マップが作成され、Swin Transformer ブロックに送られる。このブロックでは Windows Multi-head Self-

⁴ Zhang, Hang, et al. "Resnest: Split-attention networks." arXiv preprint arXiv:2004.08955 (2020).

⁵ Liu, Ze, et al. "Swin transformer: Hierarchical vision transformer using shifted windows." arXiv preprint arXiv:2103.14030 (2021).

⁶ Wang, Wenhui, et al. "Pyramid vision transformer: A versatile backbone for dense prediction without convolutions." arXiv preprint arXiv:2102.12122 (2021).

Attention(W-MSA)モジュールと Shifted Windows Multi-Head Self-Attention (SW-MSA) モジュール、すなわちオフセットのある W-MSA が導入されており、SW-MSA では特徴マップがサイズ $M \times M$ の個々の window に分割され、それぞれの window 内で個別に Self-Attention が実行されている。

Pyramid Vision Transformer とは、Transformer モデルを使用した、畳み込みのない物体認識ネットワークである。CNN バックボーンと同様に異なるスケールの特徴マップを生成する 4 つのステージを持ち、4 つの特徴マップ: F_1 、 F_2 、 F_3 、 F_4 （入力画像に対して 4、8、16、32 画素の stride を持つ）を得る。特徴ピラミッド $\{F_1, F_2, F_3, F_4\}$ を用いることにより、画像分類、物体検出、セマンティックセグメンテーションなどのタスクへの適用が容易である。

(3) 核セキュリティ・核物質防護に関する監視・出入管理等に用いる、顔認証技術・行動監視技術・追跡技術

核セキュリティ・核物質防護に関する監視・出入管理のための基本的なフレームワークを図 5-3 示す。ここでは顔認識モデルと学習済みの姿勢認識モデルを用いる。すなわち、不審者か否かを判定するために従業員の顔写真で顔認識モデルを学習し、学習後の顔認識モデルにより不審者か否かを判定する。そして不審者と判定された場合には、学習済み姿勢推定モデルにより不審者の座標を識別し、その座標が立ち入り禁止区域等に入ったらアラームを発報させる。

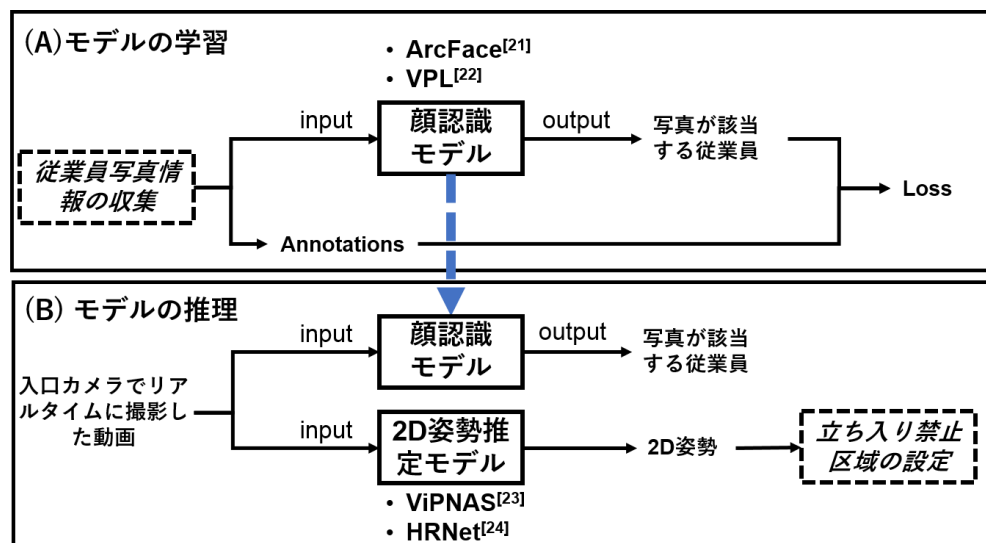


図 5-3 核セキュリティ・核物質防護に関する監視・出入管理のための基本的なフレームワーク

このフレームワークには一般的な顔認識モデルは姿勢認識モデルの適用が可能である。例えば顔認識モデルには ArcFace⁷や VPL(Variational Prototype Learning)⁸など、姿勢認識モデルには

⁷ Deng, Jiankang, et al. "Arcface: Additive angular margin loss for deep face recognition." Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2019.

⁸ Deng, Jiankang, et al. "Variational Prototype Learning for Deep Face Recognition." Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2021.

ViPNAS⁹や HRNet¹⁰などが挙げられる。

5.2 若手人材育成の観点からの原子力人材の確保

ここ数年の傾向として、大学教育の場において AI(深層学習)の研究テーマを志望する学生が増えており、その中の数%は原子力系の大学院専攻を志望する。しかし、原子力系の専攻に進学し AI 研究を頑張っている、といった原子力業界側には受け止める未来があるのか、学生も不安を感じている。

即ち、原子力そのものの未来像が見えず、原子力を前提とした AI 研究をそのまま自らのゴールとして描くことに困難を感じるのである。原子力系の専攻における学生の AI 研究は”つぶしが効く”AI スキルを身に着けるため、と割り切って取り組んでいる学生も多い可能性があり、原子力業界がこのままデジタル化や AI といった未来の姿を描くことができねば、せっかくの優秀な人材は全員、他分野に逃げていくばかりであろう。

しかし、既述のように、AI モデルは公開されているものも多く、実は取り組む際の技術的ハードル自体は高くない。残るは心理的ハードルだけである。しかも、AI システムを実用化できるか否かの鍵は技術そのものではなく、「いかに豊富な学習データを持っているか」であり、過去の保守管理データなどを豊富に蓄積している原子力業界こそが実は、日本の AI 開発の拠点となる潜在力を秘めているのである。

日本の有力な AI 開発・発信拠点となる未来像を原子力が描くことができれば、これに魅せられた若者たちを再び原子力に引き付けることに繋がる可能性がある。そのためにも原子力における AI 応用のあるべき姿を描くことは重要である。

⁹ Xu, Lumin, et al. "ViPNAS: Efficient Video Pose Estimation via Neural Architecture Search." Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2021.

¹⁰ Sun, Ke, et al. "Deep high-resolution representation learning for human pose estimation." Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2019.

別添資料

別添資料1:原子力発電所のデータ整理結果

別添資料 2:原子力発電所現場ニーズ整理結果

別添資料 3:研究レポート「Society5.0 の実現に向けた原子力デジタル産業基盤の構想」

- － 別添資料3(添付資料 1)商用原子力発電所に関する AI の役割に係る NRC のパブリックコメントの概要
- － 別添資料3(添付資料 2)国内一般産業や海外原子力産業におけるデジタル技術導入に係る取組み状況の概要
- － 別添資料3(添付資料 3)国内一般産業や海外原子力産業におけるデジタル技術導入に係る課題の概要
- － 別添資料3(添付資料 4)海外原子力産業における無線通信技術の導入実績の概要
- － 別添資料3(添付資料 5)共通的な技術基盤・システムの提案

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)
報告書

2022 年 3 月

株式会社三菱総合研究所
セーフティ&インダストリー本部

-
- i スマート保安官民協議会/第2回高圧ガス保安部会
(https://www.meti.go.jp/shingikai/safety_security/smart_hoan/koatsu_gas/002.html)
- ii 保全技術アーカイブ
(<https://mainte-archive.cloud/2020/08/ai4-cap-ai.html>)
- iii 東京電力株式会社、原子力安全改革プラン進捗報告資料
(http://www.nrmc.jp/report/_icsFiles/afieldfile/2017/08/08/09_Report_J.pdf)
- iv 四国電力 Web サイト
(https://www.yonden.co.jp/assets/pdf/corporate/ir/library/account/2010_ikata_anzen.pdf)
- v スマート保安先行事例集/経済産業省保安課
(https://www.meti.go.jp/policy/safety_security/industrial_safety/smart_industrial_safety/jireisyu_h29.pdf)
- vi Nuclear Engineering International, Exelon's e-work package
(<https://www.neimagazine.com/features/featureexelons-e-work-package-4755238/>)
- vii サトーホールディングス株式会社 Web サイト
(<https://www.sato.co.jp/case/mitsubishichemical.html>)
- viii Septentrio Web サイト
(https://www.septentrio.com/sites/default/files/cooling_towers_a4_new.pdf)
- ix 岩崎通信機器株式会社、カタログ(メーター自動読取りソフトウェア『計器読む像』)
(https://www.keisokuki-land.co.jp/files/keiki_yomuzou_V010.pdf)
- x 経済産業省、スマート保安官民協議会/第3回電力安全部会資料
(https://www.meti.go.jp/shingikai/safety_security/smart_hoan/denryoku_anzen/003.html)
- xi プラントにおける先進的 AI 事例集/石油コンビナート等災害防止 3 省連絡会議(総務省消防庁、厚生労働省、経済産業省)
(<https://www.meti.go.jp/press/2020/11/20201117001/20201117001-4.pdf>)
- xii IAEA, Application of Wireless Technologies in Nuclear Power Plant Instrumentation and Control Systems
(https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/P1869_web.pdf)
- xiii Boeing Web サイト
(<https://www.boeing.com/features/2018/01/augmented-reality-01-18.page>)
- xiv 日本原子力研究開発機構 Web サイト
(https://naraha.jaea.go.jp/facilities/details/VR_room.html)
- xv 日本電気株式会社 Web サイト
(<https://jpn.nec.com/safercities/transportation/airportdx/index.html>)
- xvi ARPA-E, "Additive Manufacturing of Spacer Grids for Nuclear Reactors",
(https://arpa-e.energy.gov/sites/default/files/CMU_FINAL%20Beuth%20Nuclear_Project_Presentation.pdf)
- xvii Westinghouse 社 Web サイト
(<https://www.westinghousenuclear.com/about/news/view/westinghouse-installs-first-of-a-kind-3d-printed-fuel-component-inside-commercial-nuclear-reactor>)
- xviii Materialise 社 Web サイト(<https://www.materialise.com/ja/cases/airbus-gets-on->

[board-3d-printing](#))

^{xix} 出光エンジニアリング株式会社、圧力技術 第 56 巻 3 号(2017)

(https://www.jstage.jst.go.jp/article/hpi/55/3/55_136/_pdf/-char/ja)

^{xx} 三菱重工業株式会社、三菱重工技報(2016)

(https://power.mhi.com/jp/randd/technical-review/pdf/index_49j.pdf)

Society5.0 の実現に向けた 原子力デジタル産業基盤の構想

2022年3月

原子力デジタル産業基盤構想に係る検討会合

はじめに

我が国の原子力産業へのデジタル技術活用は米国原子力産業・国内他産業の取組みに比べて“遅れている”ことが関連学会等で指摘されている。

この原因のひとつとして、厳しい規制基準(設置許可基準・技術基準)の存在などにより保守的志向が強くなってしまい、AI をはじめとした新技術導入に慎重になりすぎているのではないかと懸念される。また、福島第一原子力発電所事故から 10 年以上が経った今でも再稼働は遅々として進まずほとんどの労力を再稼働獲得に割かねばならない状況では、新規技術導入に取り組む余裕がなかったであろうことも容易に想像できる。さらにはこれ以外にも様々な要因が重なり合って、結果としてデジタル技術や AI という新規領域に対する心理的ハードルを原子力業界が築いてしまった可能性がある。

また、現状でも原子力業界の一部は原子力へデジタル技術や AI 導入を検討もしくは実施している例も認められるが、鬱蒼と茂った森の中でそれぞれがバラバラの方向を向かっているようにも感じる。

本レポートにより、原子力へのデジタル技術や AI 導入のあるべき姿とそれに向けた具体的な課題が見える化できた。これにより、業界共通の課題認識をもって前進する、スタート地点に立つことができるはずである。

2022 年 3 月

東京大学 大学院工学系研究科

原子力専攻 准教授

出町 和之

目次

1.	背景(課題意識)及び目的.....	1
1.1	背景.....	1
1.1.1	産業全体の構造変化.....	1
1.1.2	原子力産業に係る課題.....	1
1.1.3	既存原子力発電所の見通し	3
1.2	持続的な原子力産業の発展のための手段としてのデジタル技術の可能性	4
1.3	原子力デジタル産業基盤の構想.....	5
1.3.1	目的と位置付け.....	5
1.3.2	検討体制	6
1.4	本レポートの構造	6
2.	原子力発電所におけるデジタル技術利活用の未来像	8
2.1	原子力発電所における将来のデジタル技術の利活用の未来像(案)	8
2.1.1	未来像のイメージ(Concept).....	8
2.1.2	デジタル技術利活用による原子力発電事業者にとっての便益	9
2.2	原子力発電所におけるデジタル技術利活用に係る現状分析	10
2.2.1	未来像イメージに係る現状分析	10
2.2.2	期待する便益(デジタル技術利活用の目的)に係る現状分析.....	12
2.3	原子力産業全体への波及影響	13
2.3.1	原子力発電所におけるデジタル技術利活用による原子力産業全体への 影響	13
2.3.2	(参考:DXレポート 2.1)デジタル産業の姿/デジタル産業の構造と企 業類型	15
3.	原子力発電所へのデジタル技術導入に係る課題	17
3.1	デジタル技術導入に係る課題マップ	17
3.2	技術的な課題一覧.....	19
3.3	非技術的な課題一覧	20
4.	原子力産業が取り組むべき課題と対処方針(案)	23
4.1	原子力産業全体が協調して取り組むべき課題の整理	23
4.2	原子力産業全体が協調して取り組むべき課題の対処方針	24
4.2.1	基本的な対処方針(案).....	24
4.2.2	技術的な課題への対処方針(案).....	25

4.2.3	非技術的な課題への対処方針(案)	27
5.	原子力発電所へのデジタル技術等の導入に向けた基礎的検討	32
5.1	原子力発電所のデータカタログ	32
5.2	原子力発電所への導入可能性を有するデジタル技術	34
5.3	AI 開発に係る基礎知識	35
5.3.1	AI の開発環境	35
5.3.2	簡易なフレームワーク及び AI モデルの提案	35
5.4	若手人材育成の観点からの原子力人材の確保	38
	添付資料	40

図 目次

図 1-1 産業別就業者数の推移(第一次～第三次産業) 1951 年～2020 年 年平均	1
図 1-2 産業別就業者数の推移(主要産業大分類) 1951 年～2020 年 年平均.....	1
図 1-3 人材に係る課題	2
図 1-4 原子力産業からの撤退状況	2
図 1-5 プラント運転・保守に必要な技術力の維持に係る課題.....	3
図 1-6 国内原子力発電所の将来の設備容量の見通し	3
図 1-7 Society5.0 のしくみ	4
図 1-8 本レポートの構造	7
図 2-1 原子力発電所におけるフィジカル空間とサイバー空間の融合の概念図.....	9
図 2-2 DX に向けた 3 段階毎の現状分析	11
図 2-3 米国と日本における「コストダウン」の意味するところの違い	12
図 2-4 現在の原子力産業のステークホルダーマップ	13
図 2-5 デジタル社会とデジタル産業の姿	15
図 2-6 既存産業の業界構造とデジタル産業の業界構造	16
図 3-1 デジタル技術導入に係る課題マップ	18
図 5-1 未来像イメージと技術事例の関係性	34
図 5-2 状態監視・診断技術のための基本的なフレームワーク	36
図 5-3 カメラを利用した現場計器の指示確認のための基本的なフレームワーク.....	37
図 5-4 核セキュリティ・核物質防護に関する監視・出入管理のための基本的なフレームワーク	38

表 目次

表 1-1 「原子力デジタル産業基盤構想に係る検討会合」の検討体制.....	6
表 2-1 原子力発電事業者にとってのデジタル技術利活用による便益の整理結果.....	10
表 2-2 DX に向けた 3 段階	10
表 2-3 デジタル技術利活用によるコスト削減効果(簡易的な評価)	12
表 3-1 技術的な課題一覧(研究・技術開発を要すると考えられるもの)	19
表 3-2 非技術的な課題一覧(非技術的な課題と考えられるもの).....	20
表 4-1 原子力産業全体で特に注力して対処すべき課題の整理結果(技術的な課題)	23
表 4-2 原子力産業全体で特に注力して対処すべき課題の整理結果(非技術的な課題).....	23
表 5-1 原子力発電所のデータカタログ	32

Executive Summary

2050 年のカーボンニュートラルの実現に向けて、あらゆる産業が脱炭素社会に向けた競争環境下にあり、このトレンドへの対応成否も産業競争力に直結する。原子力産業も例外ではなく、今後厳しい産業間競争に打ち勝っていく必要がある。

国内の運転段階の原子力発電所は、2030 年、2050 年を見据えていくと、2030 年時点で 36 基（うち運転後 40 年を超えるプラントは 9 基）、2050 年時点で 23 基（うち運転後 40 年を超えるプラントは 20 基）であり、運転後 40 年を超えるプラントの割合はますます増加¹していくことになる。原子力発電所の運営にあたっては、一般的に経年とともに対処すべきことが多くなることから、2050 年に向けて、ますますプラントあたりに必要な人的・物的・資金的リソースが増加する可能性を有している。

これらを踏まえると、2050 年のカーボンニュートラルの実現に向けて、既存原子力発電所の最大限の活用を見込むのであれば、限りある国内リソースをより一層適切にマネジメントするための具体的な手段（方法論）の確立が求められていると言える。

国内一般産業や海外原子力産業では、顕在化しつつある産業全体の課題への対処手段として、或いは既存プラント施設の安全を前提とした持続的な活用手段として、デジタル技術の導入を戦略的に進めている状況等も認められる。国内の原子力産業においても、顕在化しつつある産業全体の課題への対処手段として、或いは既存原子力施設を持続的に活用していくための手段として、デジタル技術の導入は有効なひとつのオプションであると考えられるが、現状、国内一般産業や海外原子力産業と比較すると、国内原子力発電所に積極的にデジタル技術が導入されているとはいえない。

以上の背景を踏まえ、国内原子力産業及びデジタル産業が、今後積極的に、国内原子力発電所へのデジタル技術を導入するため“共通認識（目指すべき方向性・課題・対処方針に係る論点）”を構築することを目的に、「原子力デジタル産業基盤構想に係る検討会合」を設置し、論点の洗い出し・検討を行った。

本レポートは、国内外の文献調査、発電所ニーズの調査（公開情報ベース）、検討会合における委員意見を整理する形で取りまとめたものである。本レポートは、収集した情報を、目指すべき方向性・課題・対処方針毎に整理し、今後の国内原子力発電所へのデジタル技術の積極的な導入に向けた論点を明らかにするとともに、以下に示すような主要な結論を導いた。

- 未来像：国内外の取組み状況を踏まえると、原子力発電所はフィジカル空間とサイバー空間の高度融合を推進し、デジタルトランスフォーメーション（DX）の実現による顧客提供価値の最大化を目指すことが重要である²。これを実現するために、現場レベル、業務レベル、マネジメントレベルの状態を常に把握・監視・分析可能な、サイバー空間を対象とした新たな技術・情報基盤の構築が必要である。
- 主要な課題：原子力発電所へのデジタル技術導入（或いはサイバー空間を対象とした新たな技

¹ 第 24 回 総合資源エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会 原子力小委員会「資料 3 今後の原子力政策について（事務局提出資料）」をもとに記載

² 2019 年 7 月に取りまとめられた「DX 推進指標とそのガイダンス」では、「企業がビジネス環境の激しい変化に対応し、データとデジタル技術を活用して、顧客や社会のニーズを基に、製品やサービス、ビジネスモデルを変革するとともに、業務そのものや、組織、プロセス、企業文化・風土を変革し、競争上の優位性を確立する」と定義されている。

術・情報基盤の構築)に向けて、ビッグデータ構築、サイバーセキュリティ、人工知能(Artificial Intelligence:AI)/機械学習(Machine Learning :ML)の信頼性評価、人材確保、モチベーションといった主要な課題を特定した。

- 対処方針:特定した主要な課題への対処していくためには、前提として、「狙いを定め」、「スモールスタート」で、「コストシェア」しながら進めるための社会的な機能(議論・検討の場、実施体制)の構築が重要である。

また、今後の具体的なアクションに資する基礎的な検討として、既存原子力発電所に存在する利用可能なデータの整理結果、原子力発電所への導入可能性が高い技術の候補、AI 開発に係る基礎知識を整理した。

なお、前述の通り本レポートは国内外の文献調査、発電所ニーズの調査(公開情報ベース)、検討会合における委員の意見を整理する形で取りまとめたものであり、国内原子力産業の意見を網羅的に取込み、整理したものではないことに留意する必要がある。今後本レポートを議論の土台とし、急速に発展しているデジタル技術の動向を注視しつつ、国内既存原子力産業や他産業(デジタル産業)等の意見を多く収集し、ブラッシュアップしていくことが必要である。

1. 背景(課題意識)及び目的

1.1 背景

1.1.1 産業全体の構造変化

日本においては、少子高齢化が進むことによる将来的な労働人口の減少により、既存産業における技術・技能の衰退が指摘されている。近年の日本の産業構造(就労人口割合)を確認すると、二次産業(工業・鉱業・建設業等)は減少しつつある一方、三次産業(非製造業・広義のサービス業など)は増加傾向が認められる(図 1-1、図 1-2 参照)。

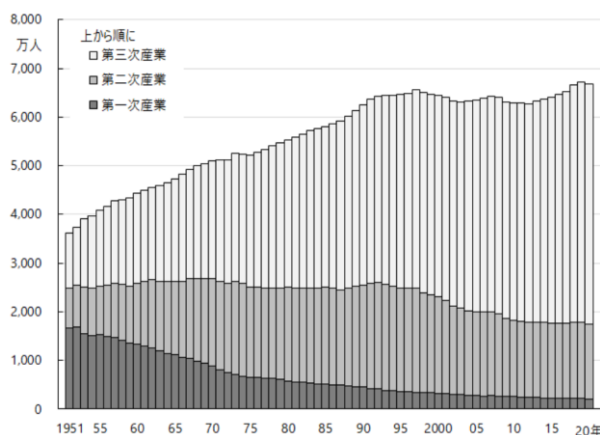


図 1-1 産業別就業者数の推移(第一次～第三次産業) 1951年～2020年 年平均
出所)独立行政法人労働政策研究・検収機構ホームページ、産業別就業者数、2022年1月27日閲覧

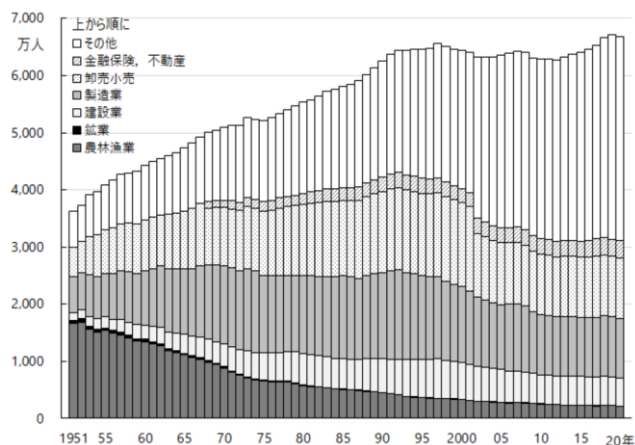


図 1-2 産業別就業者数の推移(主要産業大分類) 1951年～2020年 年平均
出所)独立行政法人労働政策研究・検収機構ホームページ、産業別就業者数、2022年1月27日閲覧

1.1.2 原子力産業に係る課題

原子力産業に目を向けると、東京電力福島第一原子力発電所事故以降、原子力発電所の新設は停滞し、さらに既運転プラントは大きく減少した。さらに、特にBWRプラントは2022年3月現在、依然として再稼働ができておらず、10年以上の長期停止となっている。これらの状況から、今後原子力発電所

の安全で信頼性の高い運転を実現する上で必要な、人的リソース(技能等)や物的リソース(製品や技術等)に係る供給上のリスクが懸念される。具体的な課題を以下に示す。

- ・ 製造業における就労人口割合が減少する中、原子力産業においても震災以降、原子力関連業務に従事する従業員は減少傾向であり、優秀な人材の原子力離れが懸念される(図 1-3 参照)。
- ・ 受注機会減少等の要因から、原子力特有の技術を有する企業が撤退する例も認められる(図 1-4 参照)。
- ・ 原子力産業においては、再稼働停滞・運転プラント減少による技術・技能の伝承機会の喪失といった課題も指摘されている(図 1-5 参照)。

原子力に関わる人材(産業)

- ・ メーカーにおいては、原子力関連業務に従事する従業員数は震災以降減少傾向。特に、大型設備の製造時に必要な溶接工・組立工・機械工などの高い技術を持つ技能職が大きく減少。
- ・ 原子力関連企業の就職説明会に参加する原子力系の学生はほぼ横ばいであるが、将来の原子力産業の見通しが見えない中で、非原子力系の学生の参加は大きく減少。原子力関係の学科・専攻(※)の数も減少傾向にある。
※学科・専攻名に「原子力」が含まれる学科・専攻。

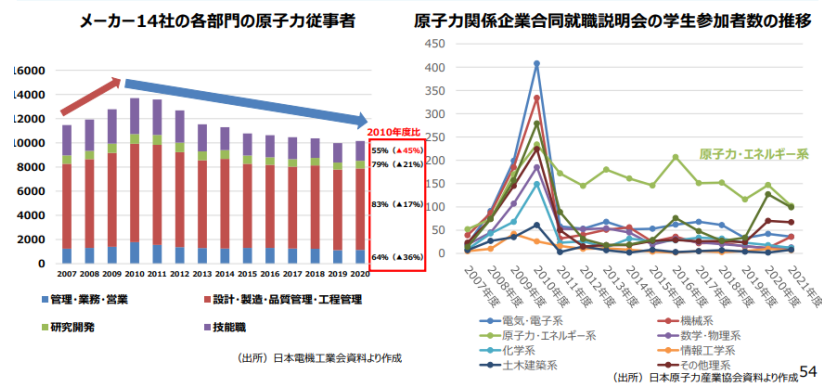


図 1-3 人材に係る課題

出所)第 21 回 総合資源エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会 原子力小委員会「資料 3 原子力政策の課題と対応について(事務局提出資料)」

原子力産業における環境の変化②

- ・ サプライヤーは、現在は安全対策工事で事業を維持しているが、**将来の事業見通しが立たない状況**。
- ・ **要素技術を持つ中核サプライヤー等の撤退**が相次いでおり、**サプライチェーンの劣化が懸念**される。
- ・ 国内で建設や製造の現場の空白期間が続くことによる**技術・人材の維持は喫緊の課題**。

原子力事業からの撤退

<大手企業>

- ・ 川崎重工業(廃止措置、発電所の保守管理等)
- ・ 住友金属工業、古河電機工業(燃料製造加工)
- ・ 明電舎(DCモータ)

<要素技術を持つ中核サプライヤー>

- ・ シルコプロダクツ(燃料部材)
2017年廃業
⇒ BWR用燃料被覆管部材は国内で調達できない状況に
- ・ 日本鉄鋼(圧力容器、タービン等部材)
2020年廃業
⇒ 原子炉圧力容器部材の供給企業は国内残り1社に

原子力産業界の売上げの推移

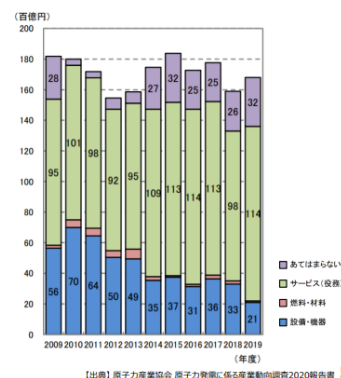


図 1-4 原子力産業からの撤退状況

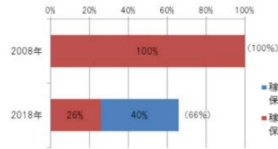
出所)第 4 回 産業構造審議会 産業技術環境分科会 グリーン・トランスフォーメーション推進小委員会/総合資源エネルギー調査会 基本政策分科会 2050 年カーボンニュートラルを見据えた次世代エネルギー需給構造検討小委員会 合同会合「資料1 エネルギーを起点とした産業の GX(グリーン・トランスフォーメーション)について(事務局提出資料)」

【課題⑤】プラントの運転・保守に必要な技術力維持

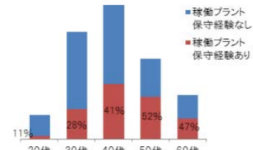
- プラントの長期停止により、**稼働プラントの運転・保守作業を経験する機会が減少**。
- 電力会社では、人員の融通や研修等により、**再稼働に備えて技術力を維持**している。

保守経験の低下の例

- ・ 保守・定検を行うA社では、2018年の**作業班長（各作業ごとの責任者）**は2008年に比べて**33%減少**している。



- ・ また、作業班長のうち、**稼働プラントの保守経験を有する者の比率も低下**している。



(出典) 日本原子力産業協会資料より

電力会社の技術力維持の取組例

- ・ **未稼働プラント（泊発電所）の運転員を稼働プラント（高浜発電所、伊方発電所）へ約2年間派遣し、当直勤務として経験を蓄積。**
- ・ 活きた現場として火力発電所に運転員・保修員を派遣し経験を蓄積
- ・ **海外プラントメーカーへの研修派遣等による技術レベル向上**
- ・ 教育訓練の充実（シミュレーター訓練、ベテラン社員によるOJT等）
- ・ 原子力安全推進協会（JANSI）による再稼働レビュー（先行プラントの知見を、後続プラントへ現場レベルで反映）

(出典) 電気事業連合会調べ

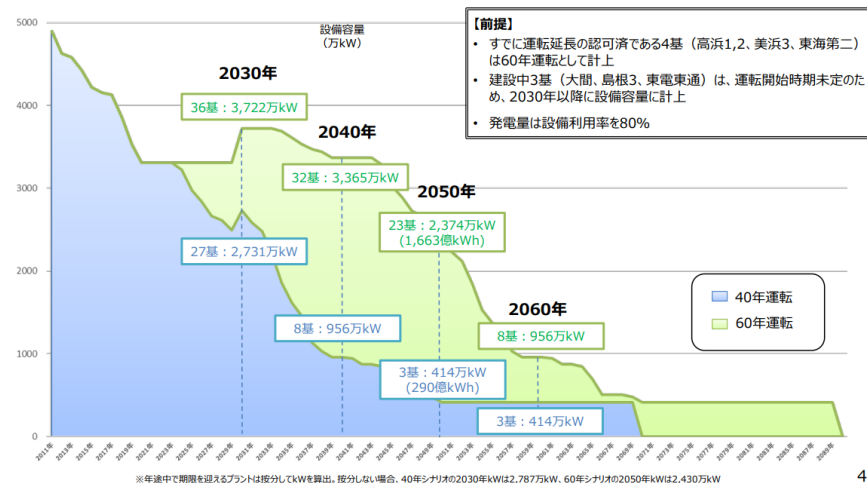
74

図 1-5 プラント運転・保守に必要な技術力の維持に係る課題

出所)第 21 回 総合資源エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会 原子力小委員会「資料 3 原子力政策の課題と対応について(事務局提出資料)」

1.1.3 既存原子力発電所の見通し

今後、2030 年、2050 年を見据えていくと、運転段階の原子力発電所は 2030 年時点で 36 基(うち運開後 40 年を超えるプラントは 9 基)、2050 年時点で 23 基(うち運開後 40 年を超えるプラントは 20 基)であり、運開後 40 年を超えるプラントの割合は、ますます増加していく(図 1-6 参照)。



※年途中で期間を超えるプラントは按分してkWを算出。按分しない場合、40年シナリオの2030年kWは2,787万kW、60年シナリオの2050年kWは2,430万kW

43

図 1-6 国内原子力発電所の将来の設備容量の見通し

出所)第 24 回 総合資源エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会 原子力小委員会「資料 3 今後の原子力政策について(事務局提出資料)」

国内の運転段階の原子力発電所においては、日々の安全確保活動に加え、10 年毎の評価、運開後 30 年以降の高経年化技術評価、主要機器の取替え、40 年超運転のための運転延長認可申請(特別点検を含む)等、経年とともに実施すべきことが多くなる。即ち、既存原子力発電所を維持していくだけ

でも、今後必要な人的・物的・費用的リソースは、現状維持若しくは増加する可能性を示唆している。

今後も持続的に既存原子力発電所を活用していくうえでは、今後も必要な人的・物的・費用的リソースを確保することが必要である。一方、1.1.3 節で述べたように、足元では人的リソースや物的リソースに係る供給上のリスクが懸念される。

既存原子力発電所の 2050 年のカーボンニュートラルへの貢献にあたっては、原子力産業は他産業との競争環境下にあることを踏まえると、限りある国内リソースを適切にマネジメントするための具体的な手段(方法論)の確立が求められる。

1.2 持続的な原子力産業の発展のための手段としてのデジタル技術の可能性

社会全体としては、第 5 期科学技術基本計画において、今後我が国が目指す未来社会の姿として、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(Society5.0)が提唱されており、その実現に向けた取組みが進みつつある。

令和 3 年 3 月に内閣府より提示された科学技術・イノベーション基本計画(案)³では、改めて我が国が目指す社会(Society5.0)が示されており、Society5.0 の実現に向けては、「サイバー空間とフィジカル空間の融合による持続可能で強靱な社会への変革」、「新たな社会を設計し、価値創造の源泉となる「知」の創造」、「新たな社会を支える人材の育成」が必要と指摘されている(図 1-7 参照)。

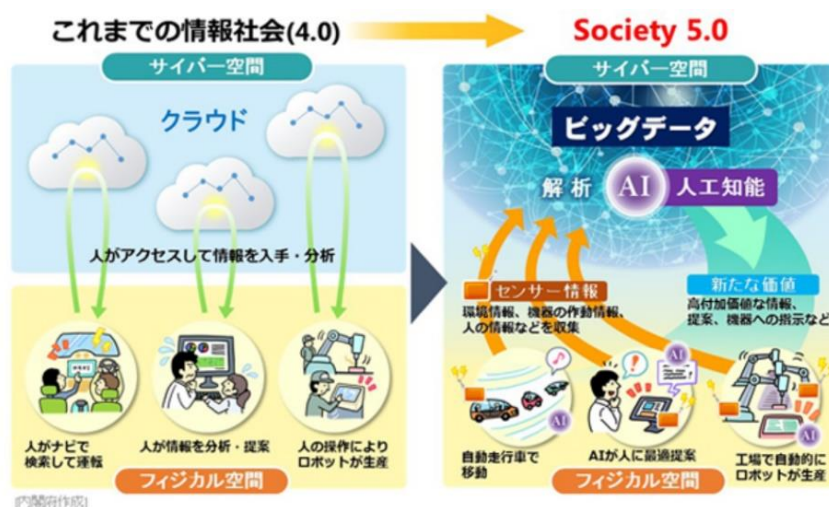


図 1-7 Society5.0 のしくみ

出所)内閣府、Society 5.0 Society 5.0 のしくみ、https://www8.cao.go.jp/cstp/society5_0/、2022 年 3 月閲覧

我が国の原子力産業は、1960 年代に第二次産業中心として商用化されたものであり、現在も産業構造の根本は変化していない。原子力発電所の継続的な安全性向上を実現するうえでは、当然に原子力発電所に安全上重要な機器等を供給する、第二次産業を中心とした既存原子力産業の維持は最も重要な課題の一つである。しかし、将来にわたって原子力発電所の安全性や信頼性の向上・高効率化・新たな価値創造(所謂イノベーション)を実現していくうえでは、我が国全体の産業構造の変化及び今

³ 科学技術・イノベーション基本計画(令和 3 年 3 月 26 日閣議決定)、2022 年 3 月閲覧、<https://www8.cao.go.jp/cstp/kihonkeikaku/6honbun.pdf>

後我が国が目指す未来社会を見据えた対処も重要である。

このように、特に近年割合が増加しつつある第三次産業(デジタル技術を含む情報通信産業)等を原子力産業に誘い込み、既存原子力産業との調和を図り、原子力産業全体を活性化させることも、持続的な原子力産業発展のための重要な論点である。

なお、国内一般産業では、Society5.0の実現を目指し、施設の老朽化・人材減少に対処する手段の一つとして、IoT等の活用により自主保安力の向上を図るための取組みが、官民により強力に推進されている。スマート保安官民協議会(高圧ガス保安分野・電力安全分野・ガス安全分野)においては、スマート保安⁴を実現したプラントの将来像を提示したうえで、官民はそれぞれのアクションを実行しており、注目すべき点としては、技術開発だけでなく、制度設計、Society5.0時代における安全の概念を含め、広く検討が進む点である。

海外原子力産業として米国に着目すると、2022年現在、米国エネルギー省は Light Water Reactor Sustainability (LWRS)プログラムの、Plant Modernization(プラントの近代化) pathway において、原子力発電所の運転モデルを変革するために、まず先端技術に基づく発電所運転・サポートの将来像を定義し、次に発電所の作業活動を個別に変革するために必要な技術を開発・実証する戦略を策定し、実現可能性が高い主要な分野を以下の通り分類している。

- ・ 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
- ・ 定検時の安全性と効率性
- ・ オンラインモニタリングと情報の統合
- ・ 統合されたオペレーション
- ・ 自動化されたプラント
- ・ ハイブリッド制御室(レガシーアナログ技術とデジタル技術のハイブリッド)

1.3 原子力デジタル産業基盤の構想

1.3.1 目的と位置付け

このように、国内一般産業や海外原子力産業では、顕在化しつつある産業全体の課題への対処手段として、或いは既存原子力施設を持続的に活用していくための手段として、デジタル技術の導入を戦略的に進めている状況等も認められる。

一方、国内の原子力産業においては、

- ・ デジタル技術等を活用した個別の研究・技術開発の事例は多くみられるが、国内一般産業や、海

⁴ スマート保安とは、①国民と産業の安全の確保を第一として、②急速に進む技術革新やデジタル化、少子高齢化・人口減少など経済社会構造の変化を的確に捉えながら、③産業保安規制の適切な実施と産業の振興・競争力強化の観点に立って、④官・民が行う、産業保安に関する主体的・挑戦的な取組のこと。具体的には、①十分な情報やデータによる科学的根拠とそれに基づく中立・公正な判断を行うことを旨として、②IoTやAIなど安全性と効率性を高める新技術の導入、現場における創意工夫と作業の円滑化などにより産業保安における安全性と効率性を常に追求し、③事業・現場における自主保安力の強化と生産性の向上を持続的に推進するとともに、④規制・制度を不断に見直すことによって、将来にわたって国民の安全・安心を創り出すこと

外原子力産業(米国)のように、あるべき将来像を定義したうえで、デジタル技術の積極的導入に向けた集中的・効果的な研究・技術開発とはなっていない(有すべき技術情報基盤の土台が存在しない)。

- ・ 研究・技術開発にとどまっており、デジタル技術を積極的に導入するために考慮すべき原子力産業全体のルール等については、検討途上である(原子力以外の慣習等に対処するための基盤・文化がない)。
- ・ 新技術導入に際しての規制対応の予見性がない。

といった状況が認められ、現状、原子力発電所に容易にデジタル技術を導入できる状況にあるとは言えない。

以上の課題意識を踏まえ、

- ・ 原子力発電所におけるデジタル技術利活用の未来像に照らして課題を整理し、
- ・ 抽出した原子力産業全体の共通課題等への対応方針を概念設計し、
- ・ 共通技術基盤の構築及び指針の作成により原子力発電所へのデジタル技術実装への道筋を示す

ための、基本事項の検討・整理を通して、国内原子力産業及びデジタル産業が、今後積極的に、国内原子力発電所へのデジタル技術を導入するための“共通認識(目指すべき方向性・課題・対応方針に係る論点)”を構築することを目的に、「原子力デジタル産業基盤構想に係る検討会合」を設置した。

ここで、既存原子力産業とデジタル産業が協調可能な環境の姿を、「原子力デジタル産業基盤」と定義する。

なお、2021年度の検討においては、「既存原子力発電所におけるデジタル技術の利活用」を検討の対象とし、建設段階・廃止措置段階は検討対象外とした。

1.3.2 検討体制

「原子力デジタル産業基盤構想に係る検討会合」の検討体制を表 1-1 に示す。

表 1-1 「原子力デジタル産業基盤構想に係る検討会合」の検討体制

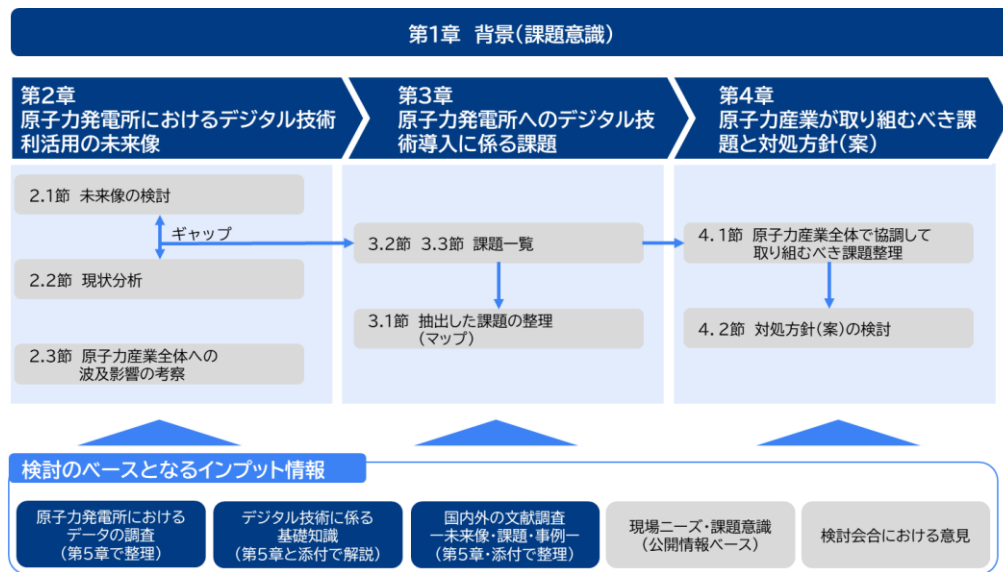
役割	参加組織
主査	出町 和之 東京大学 大学院工学系研究科 原子力専攻 准教授 ^{注1}
委員	株式会社原子力エンジニアリング ^{注2}
委員	日本電気株式会社 ^{注2}
オブザーバ	経済産業省 資源エネルギー庁 原子力政策課
事務局	株式会社三菱総合研究所

注1:主査の技術支援として、中部電力株式会社原子力安全技術研究所にもご協力いただいた。

注2:各参加企業より複数名委員として参加いただいた。

1.4 本レポートの構造

本レポートの構成は図 1-8 に示す通りである。



- ・ 第1章では、検討背景、検討目的、今年度検討体制を記載した。
- ・ 第2章では、国内外の取組みを参考に、日本における原子力発電所におけるデジタル技術利活用の未来像(案)を定義するとともに、未来像に対する現状分析の結果を整理した。また、原子力産業全体への波及影響についても整理検討した。
- ・ 第3章では、第2章の未来像及び現状分析の検討から抽出された、原子力発電所へのデジタル技術導入にあたって障壁となる事項(課題)をマップとして取りまとめ、その具体的な課題について解説した。
- ・ 第4章では、第3章で整理した課題のうち、特に原子力産業とデジタル産業との協調領域として注力すべき課題を特定し、さらに対処方針の案を取りまとめた。
- ・ 第5章では、第4章にて提示した課題の対処方針に沿った取組みを実施するに当たっての基礎的検討として、現在原子力発電所に存在する利用可能なデータの整理結果、原子力発電所への導入可能性を有する技術の候補、人工知能(Artificial Intelligence :AI)開発に係る基礎知識を整理した。

2. 原子力発電所におけるデジタル技術利活用の未来像

本章では、国内外の取組みを参考に、日本における原子力発電所におけるデジタル技術利活用の未来像(案)を定義するとともに、未来像に対する現状分析の結果を整理した。また、原子力産業全体への波及影響についても整理検討した。

なお、本検討にあたって、国内一般産業や海外原子力産業におけるデジタル技術導入に係る取組み状況の概要(目指すべき産業像、目標の設定状況およびデジタル技術導入の目的(期待する便益))を調査し、検討の参考とした。詳細は添付資料1、2、4を参照されたい。

2.1 原子力発電所における将来のデジタル技術の利活用の未来像(案)

第1章において言及したように、2050年のカーボンニュートラルの実現に向けて、既存の原子力発電所を最大限活用していくためのひとつのオプションとして、デジタル技術の利活用が挙げられる。原子力発電所のデジタル技術利活用に係る目指すべき方向性(未来像)は、以下の論点毎に検討を進めた。

- ・ 広く関係者と認識共有を進めるうえでは、未来像のイメージ(Concept)をビジュアルに示すことが重要である
- ・ Conceptの具体化のため、デジタル技術利活用による原子力事業者にとっての便益を示すことが重要である
- ・ 原子力事業者がデジタル技術を積極的に導入することに伴う、原子力産業全体への波及影響も考慮することが重要である

本節では、これら論点の検討会合における議論の結果を以下の通り整理した。

2.1.1 未来像のイメージ(Concept)

第5期科学技術基本計画において提唱されているSociety5.0、国内他産業と米国原子力産業の取組み状況を踏まえると、原子力発電所は、フィジカル空間とサイバー空間の高度融合(デジタル技術の利活用)の推進を通して、顧客提供価値を最大化(≒Digital Transformation)することが重要である。

ここで、原子力発電の顧客提供価値について、JEAC4111「原子力安全のためのマネジメントシステム規程」などを考慮すると、提供価値が電気等の製品の場合は契約者が顧客となり、提供価値が原子力安全の場合は国民及び利害関係者が顧客と定義できる。

原子力発電所における将来のデジタル技術の利活用の未来像として、原子力発電所におけるフィジカル空間とサイバー空間の高度融合のイメージ(Concept)を図2-1に示す。

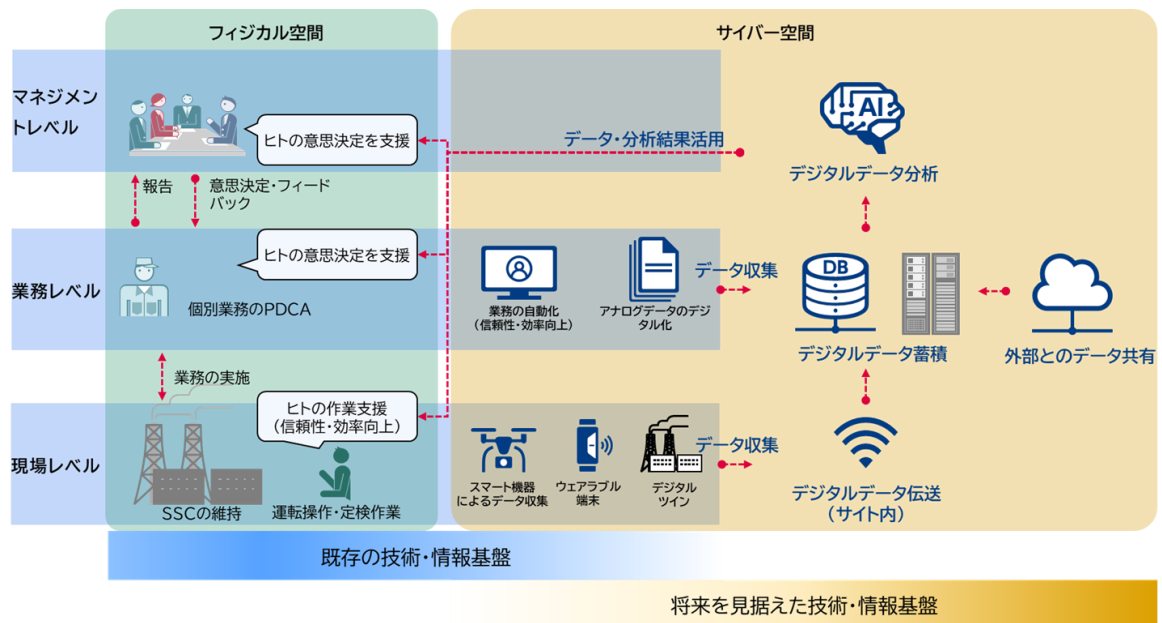


図 2-1 原子力発電所におけるフィジカル空間とサイバー空間の融合の概念図

図 2-1 に示す通り、現場レベル、業務レベル、マネジメントレベルの状態を、スマートツールやマネジメントシステムを介してデジタルデータを収集し、サイバー空間上で常に把握・監視・分析し、さらに分析結果を常にフィジカル空間上の現場、業務、マネジメントにフィードバック可能な状態を、目指すべき未来像とした。

この未来像を実現するための、新たな技術・情報基盤の定義と構築が必要であると考えられる。

2.1.2 デジタル技術利活用による原子力発電事業者にとっての便益

顧客提供価値の最大化を念頭に置くと、原子力発電事業者にとってのデジタル技術利活用の目的は、経済性の向上(発電電力量の増加や発電所全体の運営コストの削減)、安全性の向上、パブリックアクセプタンス(Public Acceptance:PA)や持続的人材確保等の事業基盤の維持強化が挙げられる。

- ・ (顧客として契約者を念頭におくと、)「経済性」という観点では、特にコスト削減への寄与が大きい業務分野として、「運転管理」、「施設管理(保全プログラム策定・構成管理)」、「燃料管理」、「核セキュリティ・核物質防護」、「原子力安全・品質保証(Corrective Action Program (CAP)運用を含む)」が挙げられる。
- ・ (顧客として国民及び利害関係者を念頭におくと、)「安全性」という観点では、特定の業務分野というより、各分野に共通する業務プロセス等、ヒトが介在する部分の信頼性向上を通じた安全性向上が期待されている。
- ・ (顧客として国民及び利害関係者を念頭におくと、)「事業基盤(特にパブリックアクセプタンス)」という観点では、特に関連する業務分野として、「非常時の措置(緊急時対応・防災等)」が挙げられる。

国内外の具体的な取り組みを含む、原子力発電事業者にとってのデジタル技術利活用による便益の整理結果を表 2-1 に示す。

表 2-1 原子力発電事業者にとってのデジタル技術利活用による便益の整理結果

経済性 (電力消費者(契約者) にとっての便益)	便益区分		便益の概要	具体的な国内外の取組み
	安全性 (公衆にとっての便益)	事業基盤 (立地地域の住民等 にとっての便益)		
○	○	—	発電電力量の増大	・ 長期サイクル運転を念頭に置いた、最適な点検間隔の設定に資する運転状態に係るデータ取得(保全の有効性評価) ・ 長期運転(LTO)を念頭に置いた、PLM30,40,特別点検の評価に資するデータ収集
○	—	—	コストダウン	【業務プロセス全体のコストの削減(コンプライアンスコストの削減も含まれる)】 ・ AI/MLツールやコスト削減効果の高い自動化(省人化)技術の特定と活用 ・ オンラインの設備管理とデータ分析技術を組み合わせた技術の開発 ・ プラントにおける様々なデータ(作業管理システム、スケジューリング、作業員ログ、CR等)を統合するデータウェアハウスの構築 ・ プラント情報の視覚化による作業員の訓練負荷軽減や作業員の洞察力の向上 ・ 運転モデルの変革に関する分析・計画のための業務分析・技術適用・ビジネスケース開発に資するツールセットの開発 【労働集約的作業コストの削減(定期検査等)】 ・ デジタル技術を用いた作業の補完や、機器や材料の健全性の高精度な監視
○	○	—	コストダウン	【日常業務に係る作業コストの削減(日常業務)】 ・ プラントデータ収集の自動化・遠隔化や、新たなセンサーの追加。
○	○	—	意思決定高度化	・ 膨大なデータの伝達高速化によるデータ利用高度化 ・ 高速な(無線)通信設備の整備
—	○	—	ヒトが介在することによる不確実さの排除	・ 業務プロセス全体へのAI/MLツール導入 ・ 技能・暗黙知の見える化 ・ データを活用した機械学習による運転員・作業員の支援(アドバイスシステムの開発)
—	○	—	サプライヤーの衰退・縮小への対処	・ 安全系・非安全系の全ての計装・制御システムを含む汎用的なアーキテクチャの開発と適用(規制の合理化への動きかけ) ・ アナログ技術(レガシー技術)とデジタル技術を組み合わせた制御室の開発
○	○	○	人材獲得	・ 産業全体では特にデジタル人材の獲得競争が繰り広げられている
—	—	○	パブリックアクセプタンス	・ 立地地域を含むステークホルダーの信頼に寄与する情報公開 ・ (例)立地地域を含むステークホルダーと事業者との新たな接点(プラットフォーム)が構築できる可能性もある

2.2 原子力発電所におけるデジタル技術利活用に係る現状分析

2.1 節で提示した未来像(案)に対する、国内原子力発電所におけるデジタル技術利活用に係る現状分析を実施した。検討会合における議論の結果を以下の通り整理した。

2.2.1 未来像イメージに係る現状分析

2.1.1 項では、未来像イメージとして「フィジカル空間とサイバー空間の高度融合(デジタル技術の利活用)の推進を通じた、顧客提供価値の最大化(≒Digital Transformation)」を提案した。

Digital Transformation (DX) に向けては、一般的に「Digitization」「Digitalization」「Digital Transformation」の3段階があるとされている(表 2-2 参照)。

表 2-2 DXに向けた3段階

Stage	解説
Digitization	・ アナログ・物理データのデジタルデータ化
Digitalization	・ 個別業務・製造プロセスのデジタル化
Digital Transformation	・ 組織横断/全体の業務・製造プロセスのデジタル化、“顧客起点の価値創出”のための事業やビジネスモデルの変革 ・ なお、2019年7月に取りまとめられた「DX推進指標とそのガイダンス」では、「企業がビジネス環境の激しい変化に対応し、データとデジタル技術を活用して、顧客や社会のニーズを基に、製品やサービス、ビジネスモデルを変革するとともに、業務そのものや、組織、プロセス、企業文化・風土を変革し、競争上の優位性を確立する」と定義されている

DX に向けた 3 段階、「Digitization」「Digitalization」「Digital Transformation」毎に現状を分析した結果を以下に示す(図 2-2 参照)。

- 全てのアナログ・物理データ(特に、過去の手書きメモ、イラスト、写真)のデジタイゼーション(digitization;特定業務のデジタル化)は困難。
- Enterprise Asset Management(EAM)の導入や Corrective Action Program(CAP)システムの導入等、局所的なデジタイゼーション(digitalization;個別業務プロセスのデジタル化)は認められる。
- デジタル技術により、社会課題解決や新たな価値・体験の顧客への提供が迅速になされる社会(≡Society5.0)、デジタル技術による顧客提供価値の最大化(≡Digital Transformation)までには至っていない。

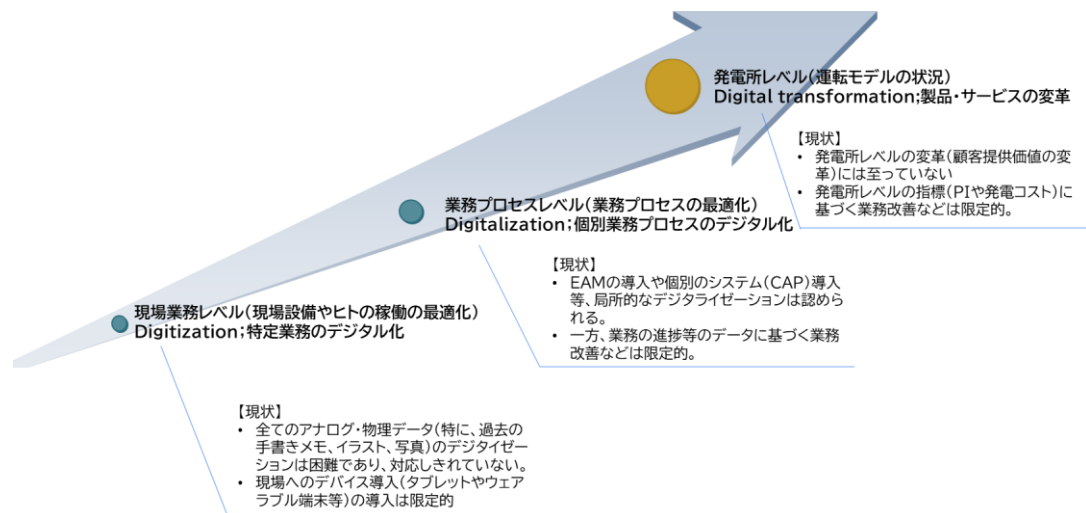


図 2-2 DX に向けた 3 段階毎の現状分析

国内の原子力発電所においては、Digitization、Digitalization に取り組みつつある段階であることから、業務プロセスや運転モデルデータに基づく各レベルの業務改善等は限定的であるといえる。また、当然ではあるが、原子力発電所の Digital Transformation が進んだ場合に想定される新たな脅威に対して、対処が十分でない可能性がある。

さらに、原子力産業の特徴として、リアリティ(フィジカル)を追求しているという点があるが、サイバーに移行していくときにはリアリティの拡張・拡大が重要になる。他産業ではフィジカル空間で実施すべき事項が少し曖昧だが、原子力は規制要件などで非常に厳密に定義されていることを踏まえると、原子力発電所ではフィジカル空間で実施すべき事項とサイバー空間で実施可能な事項を明確に線引きできるようにしていくことが特に重要であるが、現状それができていない。さらに、フィジカル空間で実施すべき事項とサイバー空間で実施可能な事項の線引きのためには、それを実施可能な力量を有する AI と原子力プラントの業務内容の両面の知見を有している人材が必要となる。

2.2.2 期待する便益(デジタル技術利活用の目的)に係る現状分析

発電所現場目線でのニーズ(期待する便益)は、第一にはコストダウンである。しかし、国内では多くの場合コストダウンは調達コスト削減を指す場合があり、社員の人件費抑制(人員削減)に係るニーズは弱い傾向にあることに留意が必要である(図 2-3 参照)。

米国におけるコストダウン(=社員の人件費を含む発電所全体の運営コストの削減)	
●	主に米国の調査結果などから、 デジタル技術導入の目的として、「コストダウン」が指摘 されている。
●	このコストダウンは、 発電所の運営に係る全てのコスト削減を意図しており、特に多くの割合を占める「人件費」を対象としている傾向が認められる。
●	このため、米国では人件費の削減を意図したAutomation technology(デジタルライゼーション)の導入検討事例が認められた。
日本におけるコストダウン(=調達コストの削減)	
●	一方、我が国における「コストダウン」は、一般論として 「調達コスト(業務委託費を含む)の削減」を指す場合が多く 、米国において目指しているコストダウンと意味合いが違う場合があるため留意が必要。
●	このため、 日本においては、「調達コスト(業務委託費を含む)の削減」を意図した内製化・自営化が進む傾向が認められ 、むしろ社員の負荷(人件費)は増加している可能性もある。
●	即ち、米国事例で認められたような“人件費削減を意図したAutomation technology”は、国内ニーズとマッチしていない可能性もある。

図 2-3 米国と日本における「コストダウン」の意味するところの違い

調査や検討会合での議論の結果、普段の運転(保全)の品質を高めて安全性を持続的向上させることはPAに貢献するものであり、現場ニーズにも認められた。しかしながら現場視点からは、手間の削減(品質向上)や調達コスト削減に関するニーズが多く、社員の人件費抑制(人員削減)や直接的な人材育成・PAに係るニーズは弱い傾向にあった。

今後の短期的なデジタル技術導入推進を念頭に置くと、国内では調達コスト低減に寄与する技術が導入されやすいと考えられる。一方、長期的な視点(既存原子力発電所の2050年のカーボンニュートラルへの貢献)を考慮すると、限りある国内リソースを適切にマネジメントするための具体的な手段として、人件費抑制に資する技術も重要である。

また、2.1.2 項にて示した便益と関連する業務分野を対象に、デジタル技術利活用によるコスト削減効果を簡易的に評価した。その整理結果を表 2-3 に示す。

表 2-3 デジタル技術利活用によるコスト削減効果(簡易的な評価)

業務分野	評価概要
運転管理	△: デジタル技術利活用による異常検知や要員の能力強化は、直接的に人件費・調達コスト削減には寄与しないが、プラントの信頼性向上に寄与することで、計画外停止(突発的に発生するコスト)防止に貢献する。
燃料管理	○: 取替炉心の安全性評価や取換炉心の燃料装荷パターンの分析などの業務について、内製化×デジタル技術の活用により燃料管理に係るトータルコスト(人件費+調達コスト)

	削減が期待できる可能性がある。なお、燃料運用の最適化(在庫管理の最適化)により調達コストが大きく削減できる可能性がある。
施設管理(保全プログラム策定)	○:例えば補助的設備の巡視点検などの点検データ取得等で外注依存度が高ければ調達コスト低減効果がある。 ○:保全プログラム策定等、必要なデータが散在しており、データ収集に係る作業量が膨大であるため、社員の人件費抑制に大きく貢献することが期待できる。 ○:信頼性重視保全の推進を通じたデジタル技術を活用した CBM 対象範囲拡大により、調達コストの削減に期待できる。
施設管理(構成管理)	○:現状の構成管理の作業量が膨大であるため社員の人件費抑制に大きく貢献することが期待できる。また、外注依存度が高ければ調達コスト低減効果がある。
非常時の措置	△:デジタル技術の活用により、合理的な要員育成を実現することで、訓練に要する時間が削減した場合は、社員の人件費抑制に期待ができる。
核セキュリティ・核物質防護	○:現在人に頼っている行為(機能)の一部をデジタル技術により代替できる場合は、その分の人件費削減(多くの場合外部委託費)の削減に期待ができる。
原子力安全(CAP 運用)	○:現状の作業量が膨大であるため社員の人件費抑制に大きく貢献することが期待できる。

【凡例】

○:コスト削減が期待できる

△:場合によってはコスト削減が期待できる

2.3 原子力産業全体への波及影響

2.3.1 原子力発電所におけるデジタル技術利活用による原子力産業全体への影響

原子力発電所におけるデジタル技術利活用による、原子力産業全体への影響を把握するために、図 2-4 に示す通り、現在の原子力産業のステークホルダーマップを整理した。

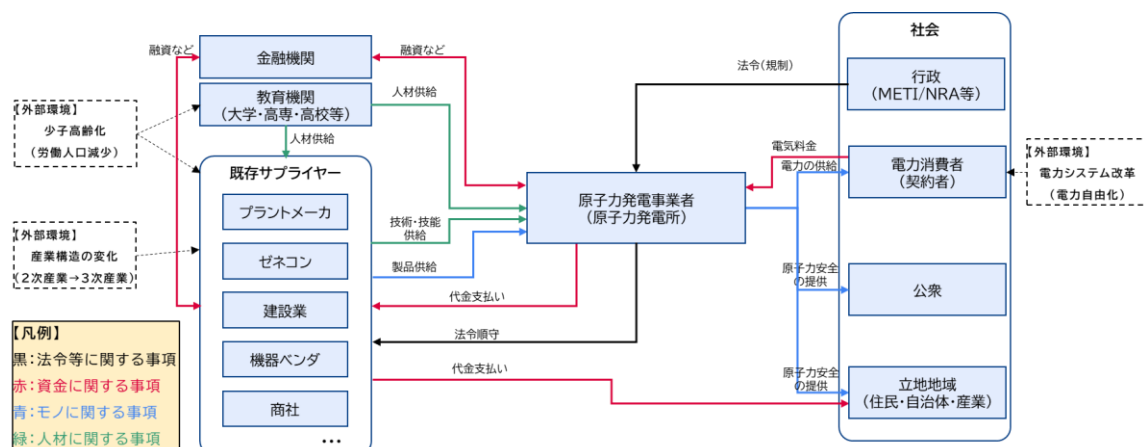


図 2-4 現在の原子力産業のステークホルダーマップ

ステークホルダーマップを踏まえると、既存原子力発電所の持続的活用（原子力産業の持続的発展）という観点では、以下の取組みが必要であると考えられる。

- ・ 原子力産業全体が、他産業との人材確保競争に勝ち、必要な人材を安定的に確保すること
- ・ 原子力産業全体が、産業の持続的成長の予見性を確保し、産業維持・強化に必要な資金を確保すること
- ・ 原子力発電事業者は、安全性・信頼性向上を実現するとともに、他電源との競争に勝ち、産業維持に必要な売電収益を得ること
- ・ サプライヤーが、原子力発電の安全性・信頼性向上及び原子力電源の競争力強化に必要な、知識・技術・技能及び製品の供給能力を維持強化すること

これを踏まえ、原子力発電所におけるデジタル技術利活用による、原子力産業全体への影響を以下の通り考察した。

原子力発電事業者への影響

- ・ 想定される便益は、表 2-1 に示すとおりである。
- ・ 一方、原子力発電事業者は、デジタル関連基盤（人材・設備等）の導入・維持に追加的な費用が発生する。

原子力産業全体への影響（持続的成長の予見性確保）

- ・ 原子力産業の資金の源泉は発電による売電収益である。原子力発電所でのデジタル技術利活用により期待される売電収益の確保は、原子力産業全体の持続的成長の予見性確保に貢献する。
- ・ デジタル技術の活用による「原子力発電所における運営コストが削減（電気料金の低下）」に伴い、単年あたりにサプライヤーに流れる資金が減少（既存の原子力産業が縮小する方向に進む）する可能性がある。
- ・ 一方デジタル技術利活用は、長期運転（運開後 40 年を超える運転）や長期サイクル運転の促進に期待できる。この場合、プラントライフ全体でサプライヤーに流れる資金の総量は増加する可能性がある。

既存サプライヤー・新規参入企業（デジタル企業）への影響

- ・ 原子力産業の既存サプライヤーは、デジタル技術等の活用により、伝承が困難な知識・技能・ノウハウ等が必要な製造プロセス変革の実現による、原子力の安全性・信頼性の向上又は競争力確保に必要な、知識・技術・技能及び製品の供給能力を維持強化できる可能性がある。
- ・ 原子力産業で要求される信頼性が高いことから、新規参入企業（デジタル企業）にとっては、原子力発電所への製品・サービスの導入実績が他産業で高く評価されることがある。このため、他産業への展開の際のアドバンテージになり得る。
- ・ なお、一般産業と異なり、原子力産業はそもそも求められる技術的ハードルがあり、また、高い品質や信頼性が求められる。それ故、開発の初期投資が大きくなり、それを乗り越えれば裾野が広

がるが、乗り越えるまでが難しい。また、原子力分野と同様に高度な品質・信頼性が要求される防衛分野、航空宇宙分野、インフラ分野等、水平展開先も限定的になる可能性があることには留意が必要。

原子力産業全体における安全性・信頼性を維持するために必要な人材の安定確保

- ・ 世界的に注目が集まるデジタル技術について、関連スキルを持つ人材の獲得競争が認められる。原子力発電所への適用可能性を示すことで、学生・社会人の人材確保に少なからず期待ができる（ひいては原子力技術の魅力向上に貢献）。
- ・ 一般論として、現状高度な技術を有する人材が、事務作業などの業務に多くの時間を費やし、本当にその技術が必要な業務に注力できていない場面も認められる。業務の効率化を通して、高度な技術を有する人材の効果的な活用に期待できる。
- ・ 宇宙・サイバー電磁波領域に代表されるような、近年注目される新たな脅威に対処可能な人材の獲得に期待ができる。

2.3.2 （参考:DX レポート 2.1）デジタル産業の姿／デジタル産業の構造と企業類型

既存原子力産業とデジタル産業が協調可能な環境（原子力デジタル産業基盤）の姿を構想する上では、デジタル産業の創出に向けた研究会が取りまとめている DX レポートが参考になる。

「DX レポート 2.1」には、“社会全体でデジタル化が進む中で、企業はこの不可逆的な変化に適応し、データとデジタル技術を駆使して新たな価値を生み出すことが求められている”こと、“デジタル社会の実現に必要な機能を社会にもたらすのがデジタル産業である”ことが記載とされている（図 2-5 参照）。

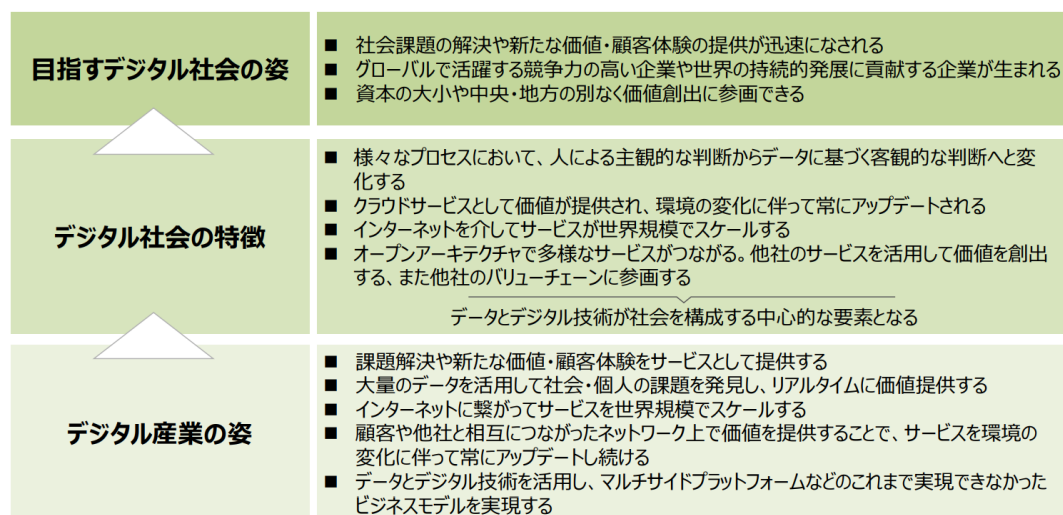


図 2-5 デジタル社会とデジタル産業の姿

出所) デジタル産業の創出に向けた研究会、DX レポート 2.1(概要)、2021 年 8 月

また、「DX レポート 2.1」には、デジタル産業の構造と企業類型として、“デジタル産業は、ソフトウェアやインターネットにより、グローバルにスケール可能で労働量によらない特性にあり、資本の大小や中央・地方の別なく、価値創出に参画できる”こと、“市場との対話の中で迅速に変化する必要性や、1

社で対応できない多様な価値を結びつける必要性から、固定的ではないネットワーク型の構造となる”ことが記載されている(図 2-6 参照)。

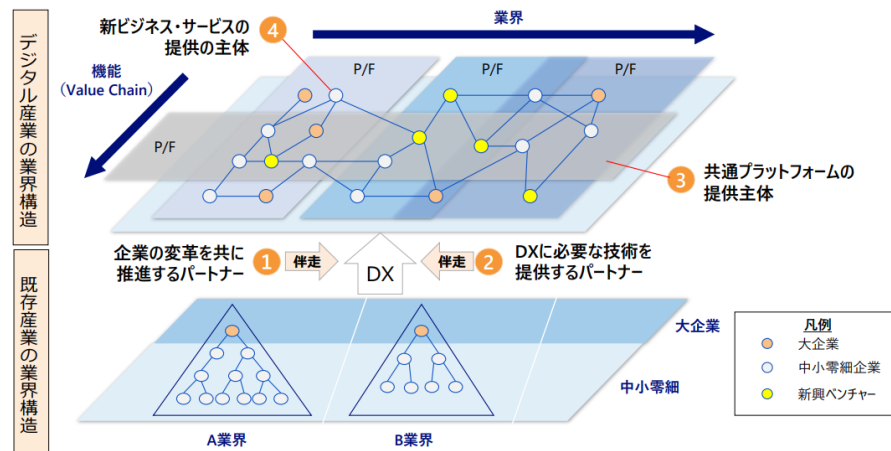


図 2-6 既存産業の業界構造とデジタル産業の業界構造

出所)デジタル産業の創出に向けた研究会、DXレポート2.1(概要)、2021年8月

そのうえで、デジタル産業を構成する企業は、その特色を踏まえて「①企業の変革を共に推進するパートナー」、「②DXに必要な技術を提供するパートナー」、「③共通プラットフォームの提供主体」、「④新ビジネス・サービスの提供主体」に類型化できるとされる。

原子力デジタル産業基盤を見極めるうえでは、これら類型化されたデジタル企業との関わり方を示していくことも求められる。

3. 原子力発電所へのデジタル技術導入に係る課題

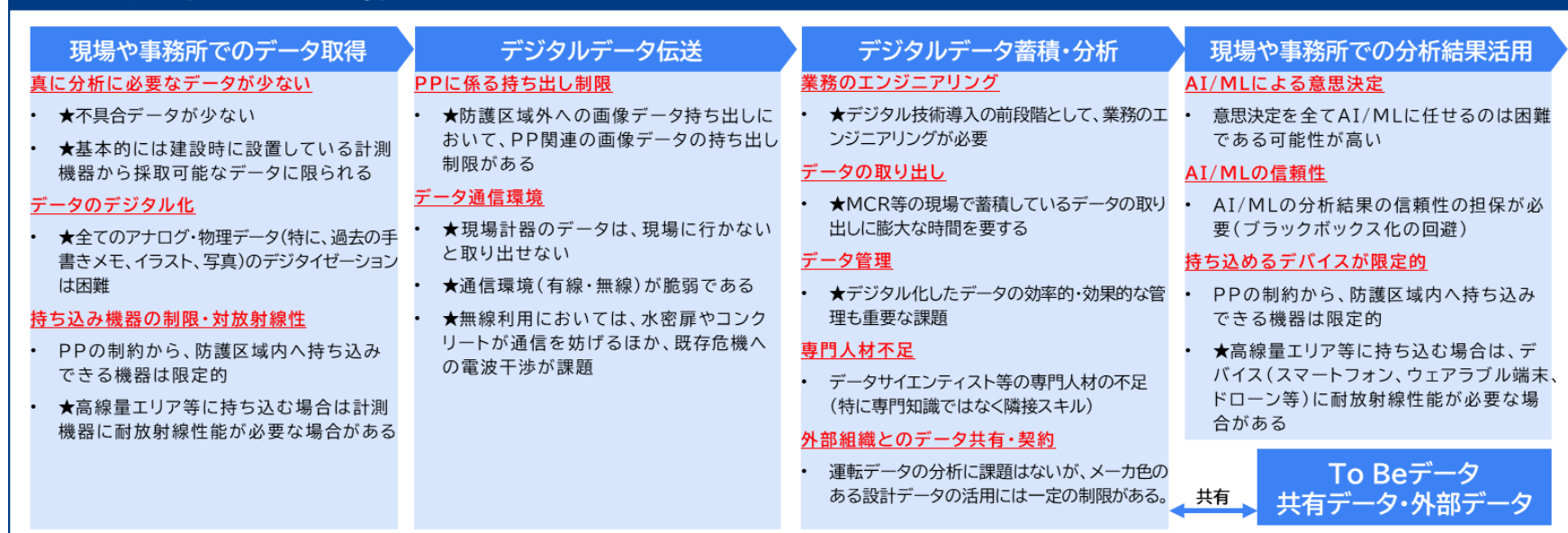
2 章の未来像及び現状分析の検討から抽出された、原子力発電所へのデジタル技術導入にあたって障壁となる事項(課題)をマップとして取りまとめ、その具体的な課題を整理した。

なお、本検討にあたって、国内一般産業や海外原子力産業におけるデジタル技術導入に係る課題の概要を調査し、検討の参考とした。詳細は添付資料1、3、4を参照されたい。

3.1 デジタル技術導入に係る課題マップ

抽出された、原子力発電所へのデジタル技術導入にあたって障壁となる事項(課題)について、データの流れ(Data Journey)を意識して、デジタル技術導入に係る課題マップを図 3-1 の通り整理した。

データの流れ (data Journey)



共通課題

人材確保

専門人材不足・デジタル素養の不足

- データサイエンティスト等の専門人材が不足(特に専門知識ではなくビジネスアナリシスなどの隣接スキルを持った人材が不足)。
- 既存の人材で専門知識・技能を有する人材いる場合でも、雑多な業務に追われ、真にその知識・技能が必要な業務に従事することができない

デジタル技術導入モチベーション

規制対応に係る不明瞭さ

- 安全機能を有する系統、機器及び構築物に関連する取組みは、規制との調整が必要不可欠であり最初に規制対応する事業者の負担が大きい
- ★既設設備の安全機能に影響がないことを証明することが必要な場合がある

文化的保守性(心理的障壁)

- 技術的には客観的なデータで正確性が担保されているが、人が確認する正確性を重要視するため、デジタルで代替できる分野についても人による作業が優先される傾向がある

サイバーセキュリティ

サイバーセキュリティの実践

- ★他産業での水準よりも高いサイバーセキュリティの実践が求められる
- より合理的かつ効果的なサイバーセキュリティの実践のために、データ分類やネットワークのセキュリティ要件の標準化を進めていくことが必要
- (今後ますます進化するサイバー攻撃に対処可能な人材の育成が必要である。)

経済的価値を目的としたデジタル技術利活用の動機付け

- 導入実績が何より重要
- 導入コストに対して得られる定量的メリットの提示が必要
- 大きなコストメリットがあっても、導入コストが大きければ、なかなか前に進まない

非経済的価値を目的としたデジタル技術利活用の動機付け

- 日景崎の価値(人材ポートフォリオ最適化やパブリックアクセプタンス等)の高度化も期待できるが、動機づけが難しい

【凡例】技術的な課題(研究・技術開発を要すると考えられるもの)には★をつけている。

図 3-1 デジタル技術導入に係る課題マップ

3.2 技術的な課題一覧

原子力発電所へのデジタル技術導入に係る課題(研究・技術開発を要すると考えられるもの)を表 3-1 の通り整理した。

表 3-1 技術的な課題一覧(研究・技術開発を要すると考えられるもの)

課題分類		課題の概要
大分類	データの流れ (data Journey)	
ビッグデータ構築	デジタルデータ取得	【真に利用可能なデータが少ない】 - 利用可能なデータは、基本的には建設時に設置している計測機器(センサ)から採取可能なデータに限られる。 - デジタル化された利用可能な不具合・故障データが少なく、強化学習等の利用が制限される。
		【データのデジタル化】 特に、過去の手書きメモ、イラスト、写真といったアナログ・物理データのデジタイゼーションは困難。
		【持ち込み機器の制限・対放射線性】 高線量エリア等に持ち込む場合は計測機器に耐放射線性能が必要な場合がある。
	デジタルデータ伝送	【PPに係る持ち出し制限】 防護区域外への画像データ持ち出しにおいては、核物質防護秘密を含む画像データの持ち出し制限がある(マスキング等を施せば持ち出し可能だが、常時データを伝送するのは困難)
		【データ通信環境】 - 現場計器のデータは、通信環境がない場合があり、現場に行かないと取り出せない場合がある。 - 通信環境(有線・無線)が脆弱である。特に無線通信環境は大量のデータ伝送に耐えられる容量がない。 - 原子力発電所への無線利用は一般産業と異なり、水密扉やコンクリートが通信を妨げるため、無線のカバー率が小さくなる。
	デジタルデータ蓄積・分析	【データの取り出し】 中央制御室等の現場で蓄積しているデータ取り出し装置が貧弱(マシン性能が低く、転送時間が多くなる)であり、蓄積データの取り出しに膨大な時間を要する。
		【データ管理】 デジタルデータを保管するだけにとどまらず、デジタル化

		したデータの効率的・効果的な管理も重要な課題として認識されている。
		【業務のエンジニアリング】 ・ デジタル技術導入の前段階として、業務のエンジニアリングが必要である
データ活用	分析結果活用	【持ち込めるデバイスが限定的】 ・ MCR 等の現場で蓄積しているデータ取り出し装置が貧弱であり、蓄積データの取り出しに膨大な時間を要する。
サイバーセキュリティ	(共通技術課題)	【サイバーセキュリティの実践】 ・ 他産業での水準よりも高いサイバーセキュリティが求められる。
既設設備等への影響	(共通技術課題)	【安全機能を有する設備に係る規制対応】 ・ 導入しようとするデジタル技術や導入場所によっては、既設設備の安全機能に影響がないことを証明する必要がある。

3.3 非技術的な課題一覧

原子力発電所へのデジタル技術導入に係る課題(非技術的な課題と考えられるもの)を表 3-2 の通り整理した。

なお、検討会合においては、「AI/機械学習(Machine Learning :ML)による意思決定」に関して、“全て機械に任せるのは非現実的であり、どこかで人の判断が必要になるため、その判断材料を AI で集めるのが効率的であると考えられる。また、機械と人の判断ができるものの境界が明らかになると有用ではないか。”との意見が認められた。

表 3-2 非技術的な課題一覧(非技術的な課題と考えられるもの)

課題分類		課題の概要
大分類	データの流れ (data Journey)	
ビッグデータ構築	デジタルデータ取得	【持ち込める計測機器の制限】 ・ 核物質防護上の制約から、防護区域内へ持ち込みできる計測機器(センサ)に制限がある。
	デジタルデータ蓄積・分析	【外部組織とのデータ共有・契約】 ・ 運転データ(As-is データ)を外部組織と共有し、外部委託のような形で分析することに課題はないが、メーカー色のある設計データ(To-be データ)の活用には一定の制限がある。
データ活用	分析結果活用	【AI/ML による意思決定】 ・ 意思決定を全て AI/ML に任せるのは困難である可能性が高い(場合によっては規制対応の必要性がある)。なおヒトの意思決定を支援する利用は問題ないと考えられる。 ・ ヒトの確認を排除する場合、不測の事態が発生した

		場合のバックアップが必要になる場合がある。
		【AI/MLの信頼性】 AI/MLの分析結果の信頼性の担保が必要である(ブラックボックス化の回避)。
		【持ち込めるデバイスが限定的】 核物質防護上の制約から、防護区域内へ持ち込みできるデバイス(スマートフォン、ウェアラブル端末、ドローン)に制限がある。
人材確保	(共通課題)	【専門人材不足・デジタル素養の不足】 - データサイエンティスト等の専門人材が不足している(特に専門知識ではなくビジネスアナリシスなどの隣接スキルを持った人材が不足)。 - 専門知識・技能を有する人材いる場合でも、雑多な業務に追われ、真にその知識・技能が必要な業務に従事することができないことがある。
サイバーセキュリティ	(共通課題)	【サイバーセキュリティの実践】 - より合理的かつ効果的なサイバーセキュリティの実践のために、データ分類やネットワークのセキュリティ要件の標準化を進めていく必要がある可能性がある。 (今後ますます進化するサイバー攻撃に対処可能な人材の育成が必要である。)
デジタル技術導入モチベーション	(共通課題)	【安全機能を有する設備に係る規制対応】 安全機能を有する系統、機器及び構築物に関連する取組みは、規制との調整が必要不可欠であり最初に規制対応する事業者の負担が大きい。
		【経済的価値を目的としたデジタル技術導入の動機付け】 - 一般に新導入には実績が何より重要視される(特に国内において、燃料・PP分野へのデジタル技術活用導入実績は少なく、デジタル技術導入に当たっての大きな障壁となっている)。 - 導入コストに対して得られる定量的メリットの提示が必要。 - 大きなコストメリットがあっても、導入コストが大きければ、なかなか前に進まない(実績があり、小さな投資で小さなコスト効果があるもの等から開始するアプローチが最善手)。
		【非経済的価値を目的としたデジタル技術導入の動機付け】 デジタル技術導入により、人材ポートフォリオ最適化やパブリックアクセプタンス(PA)の高度化も期待できるが、動機づけ(予算手当て)が難しい。
		【データ取得・分析の目的の明確化】 多様なデジタル技術活用の可能性(ニーズ)があるが、「目的」と「方法」が明確になっていない場合がある。データ取得・分析

		の目的を明確にすることが前提(技術的な課題で言及した「業務のエンジニアリング」とも関連する)。
		【文化的保守性(心理的障壁)】 ・ 技術的には客観的なデータで正確性が担保されているが、人が確認する正確性を重要視するため、デジタルで代替できる分野についても人による作業が優先され、デジタル導入が進まない傾向がある。

4. 原子力産業が取り組むべき課題と対処方針(案)

本章では、第3章で整理した課題のうち、特に協調領域として原子力産業・デジタル産業が注力すべき課題を特定し、さらに対処方針の案を取りまとめた。

4.1 原子力産業全体が協調して取り組むべき課題の整理

第3章において抽出された課題は、すべて一度に対処することが理想ではあるが、現実的にリソースの制約から優先順位の設定が必要である。また各課題の重要性(優先度)は同一ではなく、また、各課題は互いに関連する場合があることにも留意する必要がある。

このため、「デジタル技術導入に係る課題か否か」、「協調領域であるか」、「産業の維持強化に資するものか」という視点から、検討会合の議論を通して、原子力産業全体で特に注力して対処すべき事項(協調領域)の整理を行った。

原子力産業全体で特に注力して対処すべき課題の整理結果を、表4-1、表4-2に示す。

表 4-1 原子力産業全体で特に注力して対処すべき課題の整理結果(技術的な課題)

課題の大分類	データの流れ (data Journey)	課題の概要
ビッグデータ構築	データ取得	データのデジタル化
	デジタルデータ伝送	データ通信環境
	デジタルデータ蓄積・分析	データの管理 業務のエンジニアリング
サイバーセキュリティ	(共通課題)	サイバーセキュリティの実践

表 4-2 原子力産業全体で特に注力して対処すべき課題の整理結果(非技術的な課題)

課題の大分類	データの流れ (data Journey)	課題の概要
AI/ML の信頼性評価	分析結果の活用	AI/ML のみによる意思決定の適切性
		AI/ML の信頼性
人材確保	(共通課題)	専門人材不足・デジタル素養の不足
デジタル技術導入モチベーション	(共通課題)	経済的価値を目的としたデジタル技術導入の動機付け
		非経済的価値を目的としたデジタル技術導入の動機付け

4.2 原子力産業全体が協調して取り組むべき課題の対処方針

4.2.1 基本的な対処方針(案)

原子力発電所は巨大複雑系のシステムであり、デジタル化されていないものも含め歴史的に膨大なデータが存在する。また、改善の目的⁵、対象業務⁶、データ⁷、そしてそれらを統合するエンジニアリングには、非常に多くの組み合わせ等が存在する。それゆえ、闇雲にデジタル技術導入を始めることは得策ではないことは明白である。

このため、表 4-1、表 4-2 に整理した原子力産業全体で特に注力して対処すべき課題について、基本的な対処方針の案を、以下の通り取りまとめた。特定した主要な課題への対処していくためには、前提として、「狙いを定め」、「スモールスタート」で、「コストシェア」しながら進めるための社会的な機能(議論・検討の場、実施体制)の構築が重要である。

基本的な対処方針の案

課題への対処の基本的な考え方として、「狙いを定め」、「スモールスタート」で、「コストシェア」しながら進めることが重要であると考えられる。

- ・ 「狙いを定め」：改善の目的、対象業務、データ、そしてそれらを統合するエンジニアリングには、非常に多くの組み合わせ等が存在するため、導入コストに見合う効果が得られそうなものを見極めることが肝要である。
- ・ 「スモールスタート」：導入コストに見合う効果が得られそうなものを、並行して闇雲に実施するのではなく、投入できるリソースを勘案し、効果を実感しながら徐々に拡大していくべきであると考えられる。なお、「将来のより優れた技術への期待も意識しつつ、まず現状の技術で“とりあえずスタートする”」ことも含まれる
- ・ 「コストシェア」：サイバー空間に対応する技術・情報基盤は、今後新たに構築をしていくものであり、個社単独での構築では、投入できる時間と労力に限界がある。原子力産業全体において、共同体制や専業体制を構築することも考慮すべきである。
 - － 「共同体制」とは、関係者でコストをシェアして検討・実施することを指す。なお、共同実施体制として、既存原子力産業とデジタル産業とアカデミア、公官庁による体制を構築することで、原子力産業の強化に貢献する可能性がある。
 - － 「専業体制」とは、原子力発電事業者等のユーザが、専門性の高い検討課題を諮問することができる組織の構築を指す。特にサイバーセキュリティについては、原子力特有の事情(核セキュリティ)を考慮しつつ、専門家と協力することが肝要であると考えられる。

デジタル基盤の確立に向けた実施体制として、参考となる情報を以下に記載する。

⁵ 短時間化、低頻度化、省力化、自動化等を指す。なお、「効率化」というとそれらが全て入ってしまうので、より具体的にすべきである。

⁶ 原子力発電所における保守、運転、放射線管理等の業務を指す

⁷ 仕様書、測定値、評価値、運転・保守記録等を指す。具体的には、後述の「原子力発電所のデータカタログ」を参照されたい。

デジタル基盤の確立と共助のビジネスモデル

デジタル庁は、共通サービスを支えるデジタル基盤の確立にあたり、基盤の運営・構築を持続可能な形で担うのは、官単独でも事業者単独でも難しいことから、産学官全員が参加し、民を中心に管理・運営する共助(シェアードエコノミー型)のビジネスモデルが必要としている。

— デジタル基盤の確立と共助のビジネスモデル

- デジタル田園都市の実現には、データ連携基盤をはじめ、統合ID、認証など共通サービスを支えるデジタル基盤が必要。基盤の運営・構築を持続可能な形で担うのは、官単独でも、事業者単独でも難しい。官民学、全員が参加し、民を中心に管理・運営する共助(シェアードエコノミー型)のビジネスモデルが必要。
- ただし、そこを目指しても、国が自治体の取組をただ支援するだけでは、それを引き受ける特定事業者だけを利して終わる可能性も高い。このため、ハードウェアの共有、システムの共有、それを担う人脈の形成など、幾つかのアプローチから、民主導の共助のビジネスモデルの確立を、国自ら積極的に支援する。

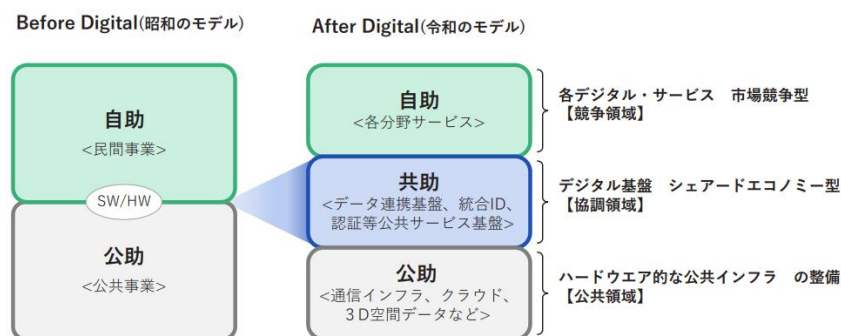


Fig. デジタル基盤の確立と共助のビジネスモデル

出所) 第一回デジタル田園都市国家構想実現会議(令和3年11月11日)、デジタル庁「デジタルから考えるデジタル田園都市国家構想」、[https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/digital denen/dail/siryou4.pdf](https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/digital%20denen/dail/siryou4.pdf)

4.2.2 技術的な課題への対処方針(案)

(1) ビッグデータ構築

前述の通り、デジタル化されていないものも含め歴史的に膨大なデータが存在する。一方、課題にも認められたように、大部分がアナログデータであること、発電所現場から常時情報を収集できる環境は十分に整備されていないこと等から、AI/ML 等によって分析可能なデジタルデータは少ない。AI/ML 等によるデータ分析を念頭に置くと、デジタル形式のビッグデータ構築が求められる。

しかし、前述の通り、ビッグデータ構築にあたっては構築そのものに労力(データ化のためのコスト)がかかることが明白である。このため、4.2.1 項に示す「基本的な対処方針の案」に沿った対応が有効であると考えられる。

なお、想定されるビッグデータ構築のステップは、以下の通りである。

1. 「対象業務」を選定する。
2. 「改善の目的」を明確化し、期待する効果(短時間化、低頻度化等)を定義する。
3. 選定した「対象業務」について「関連データ」を明確化する。
4. 「関連データ」を「どう蓄積」し「どう紐づけ」し「どう活用」すればよいか「技術判断(エンジニアリング)」する

5. 「データ取得」方法、「データ伝送」方法、「データ管理」方法を定める
6. アジャイル的に開発を進め、定義した効果を見極めながら、更なる手段の改善、更なる対象業務拡充を目指してPDCAを回す。

また、ビッグデータ構築に向けては、自社データのみならず、外部データの活用も重要である。この際、外部データとの共通・契約の考え方を整理しておくことも必要である。外部データとの共通・契約の考え方について、参考となる国内一般産業における取組みを以下に記載する。

国内一般産業における取組みの例(AI・データの利用に関する契約ガイドライン)

第四次産業革命が進展し、データが価値の源泉となる中、企業におけるデータ共有・利活用の更なる進展が期待されるところであるが、契約をめぐる課題として、①データや AI をめぐる契約について実務の蓄積が乏しいこと、②当事者間／関係者間で、認識・理解のギャップがあることから、当事者間／関係者間での共通の土台がないことによる多大な契約コストが発生するおそれや、データの保護や利益配分等に関して適切な内容が盛り込まれないまま契約が締結されるおそれがある。

このため 2019 年、データ契約や AI 開発・利用契約を締結するに当たっての当事者間／関係者間のギャップを埋め、契約コストを削減するとともに、契約による適切な権利義務の分配を促すため、AI・データの利用に関する契約ガイドラインが策定された。

このガイドラインをもとに、様々な産業分野のガイドラインが策定されている。(データの利用に関する契約ガイドライン産業保安版や、農業分野における AI・データに関する契約ガイドライン等)。

このような取組みは、外部データとの共通・契約の考え方として参考になり得る。

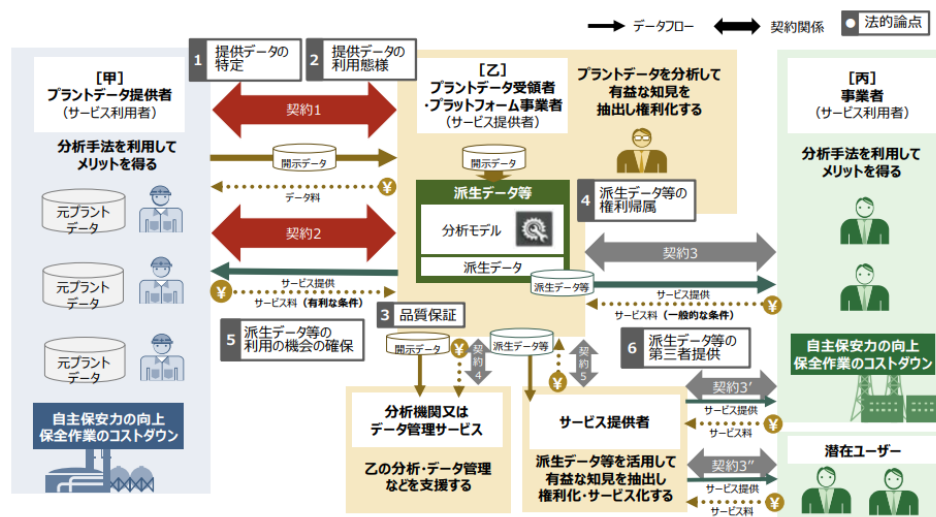


Fig. プラントデータ活用スキームのユースケース

出 所) データの利用に関する契約ガイドライン 産業保安版 第2版、
https://www.meti.go.jp/policy/safety_security/industrial_safety/sangyo/hipregas/files/20190425keiyakuGuideline.pdf

(2) サイバーセキュリティ

サイバー空間におけるセキュリティ確保は必須事項である。特に、原子力産業は一般産業と異なり、核物質防護秘密があり、セキュリティに係る極めて高度な要件が存在することに、留意する必要がある。

このため、国内他産業事例や海外原子力業界での事例を参考に、次のステップで検討を進めることが妥当と考える。

1. 原子力事業におけるセキュリティ上の要求事項を整理する
 2. 実際のプロジェクトにおいて、どうすればその要求事項を満足できるかを検討する
- サイバーセキュリティについて、参考となる海外原子力産業における取組みを以下に記載する。

海外原子力産業における取組みの例

LWRS プログラム 2021 年度計画では、Cybersecurity に関連する記載がある。ユーザが専門知見を有する専門家に諮問できる体制を構築できている点で、参考になり得る。

(記載の要旨)

パイロットプロジェクトの技術開発から生じるサイバーセキュリティの問題に対処するためのプロジェクトタスクが作成され、アイダホ国立研究所(INL)のサイバーセキュリティ専門家が、パイロットプロジェクトの技術をレビューし、サイバーセキュリティリスクを最小限に抑えるための適切な実践に関するレポートを提供した。

模擬サイバーセキュリティ評価チーム(CSAT)は、サイバーセキュリティ、IT、およびエンジニアリングの専門知識を代表するコンサルティング会社によって設立された。各パイロットプロジェクトの主任研究者は、それぞれのパイロットプロジェクトテクノロジーに関連するコンピューターと通信の側面を CSAT に提示し、CSAT は NEI08-09 評価基準に従ってそれらを体系的に分析した。

出所)Plant Modernization Technical Program Plan for FY-2021”, INL/EXT-13-28055 Revision 10, September 2020, DOE/NE, https://inldigitallibrary.inl.gov/sites/sti/sti/Sort_26801.pdf

4.2.3 非技術的な課題への対処方針(案)

(1) AI/ML の信頼性評価

「AI/ML の信頼性評価」については、適用技術と適用対象(設備、業務)によって、求められる信頼性の程度が異なるものと考えられる。それ故、4.2.1 項に示す「基本的な対処方針の案」が有効であると考えられる。

AI/ML の適用が「人間の支援」に留まるのであれば、その信頼性は多少欠けるところがあってもユーザの責任で適用すればよいと考えられるが、AI/ML を適用した業務の自動化(自動判定等を含む)に向けては、「信頼性を確立する」、「信頼性欠如した場合の対処方法を用意する」のどちらか、または両方の取組が必要になる。なお、まずは人間の支援から導入・評価を開始し、人間よりも信頼性が高いこと等を確認したうえで適用を進める戦略もあり得る。

AI/ML の信頼性評価について、参考となる国内一般産業における取組みを以下に記載する。

国内一般産業における取組みの例(石油・化学プラント保安分野の AI 信頼性ガイドライン)

AI(機械学習)は保安力・生産性を飛躍的に高める可能性を有しているが、AI プロジェクトを推進するには困難が伴う。AI プロジェクトを推進するにあたり、厳格な安全性が求められるプラントでは、適切に AI の信頼性評価を行い安全に対する説明責任を果たす必要がある一方で、その方法論が示

されていないことが、課題として認められる。

この課題への対応として、「石油・化学プラント保安分野の AI 信頼性ガイドライン」が作成され、プラント保安分野で AI(機械学習)を適用する場合に課題となる品質(=信頼性)の評価の方法論が整理されている。この点は、AI 信頼性評価の方法論として、参考になり得る。

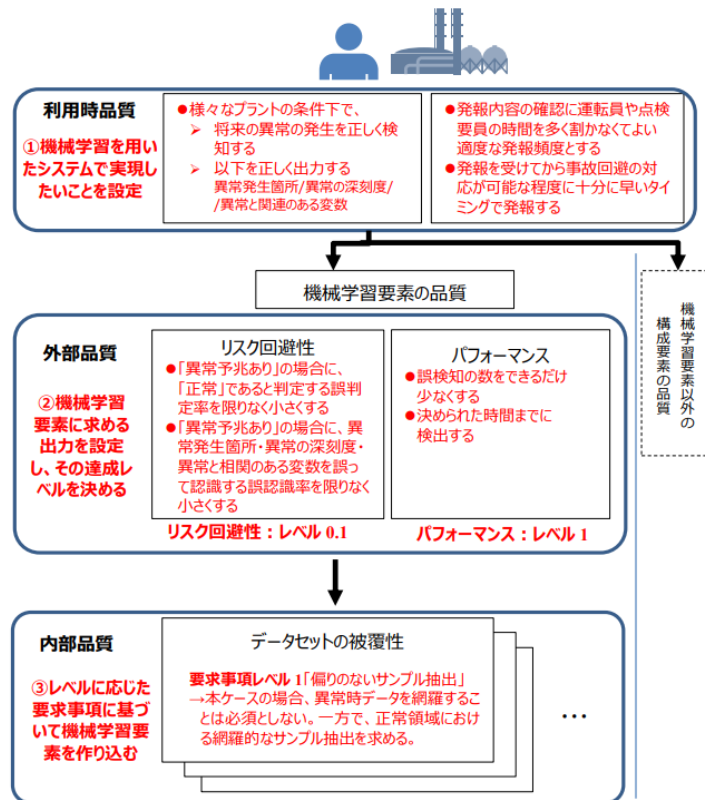


Fig. 信頼性評価の流れ(「異常予兆検知・診断」を例に)

出所)「プラント保安分野 AI 信頼性評価ガイドライン」、2020 年 11 月、石油コンビナート等災害防止3省連絡会議(経済産業省、総務省消防庁、厚生労働省)、
<https://www.meti.go.jp/press/2020/11/20201117001/20201117001-2.pdf>

(2) 人材確保

原子力産業における、デジタル素養を有する専門人材の確保に向けては、「デジタル素養を有する専門人材を確保する」ほか、「既存の人材に、デジタル素養を身に付けさせる」といった取組みが考えられる。

原子力産業に限らず巨大装置産業は業務規模が大きいことから、「既存の人材に、デジタル素養を身に付けさせる」ことが主となると思われるが、ある程度、「デジタル素養を有する専門人材を確保する」ことも重要になると考えられる。

デジタル素養を有する人材確保について、参考となる国内一般産業における取組みを以下に記載する。

国内一般産業における取組みの例

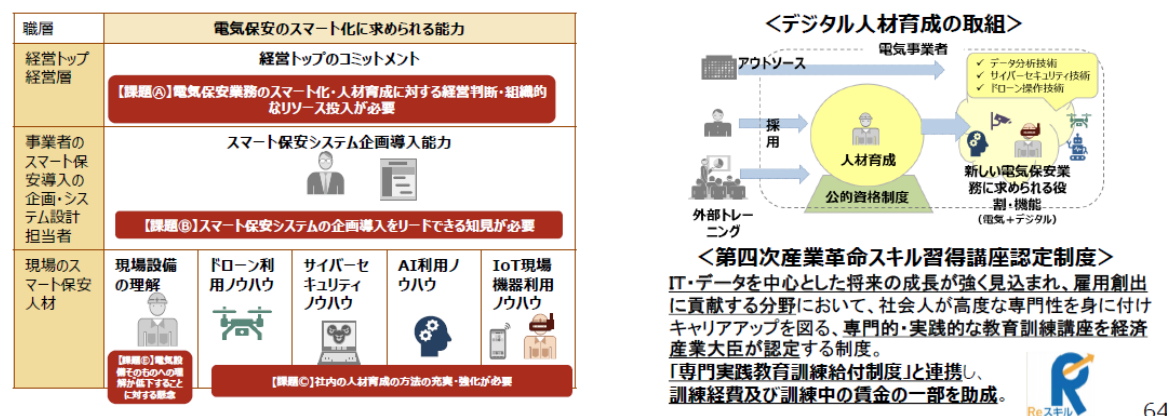
スマート保安官民協議会において、電気保安分野におけるアクションプランが策定され、人材育成の取り組みが示されている。

新しい電気保安の姿に基づいた、新しい電気保安体制・業務(スキル・役割・責任分担の再設計)を整理するとともに、必要な能力の補完方法についても言及している点で、参考になり得る。

4-2. 民の取り組み②人材育成

スマート保安の導入に当たっては、3つの職層において必要な能力が異なる。①経営層においては、**スマート保安の意義を理解し必要な経営判断をする能力**、②企画・システム設計担当者においては、**スマート保安の導入を企画し管理できる能力**、③現場の作業員においては、**スマート技術を実際に保安活動に使用するための各種ノウハウ**が必要。

そうした能力を補完するものとして、**デジタル人材の新規・中途採用**や、**ITベンダー等との共同事業、外部研修の活用**が有効。また、人材育成を通して、新しい電気保安業務に求められる技術(ドローン利用のノウハウやサイバーセキュリティノウハウ等)の価値が可視化。他方、保安のスマート化が進めば、現場出向が少なくなり、実機に触れることで習得していた電気設備そのものへの理解の低下も懸念されるため、対策が必要。



出所) スマート保安官民協議会、電気保安分野スマート保安アクションプランの概要、
https://www.meti.go.jp/shingikai/safety_security/smart_hoan/denryoku_anzen/pdf/20210430_1.pdf

(3) デジタル技術導入モチベーション

経済的価値を目的としたデジタル技術導入の動機付けにあたっては、4.2.1 項に示す「基本的な対処方針の案」を通して、徐々に原子力発電事業者の動機づけができる可能性がある。

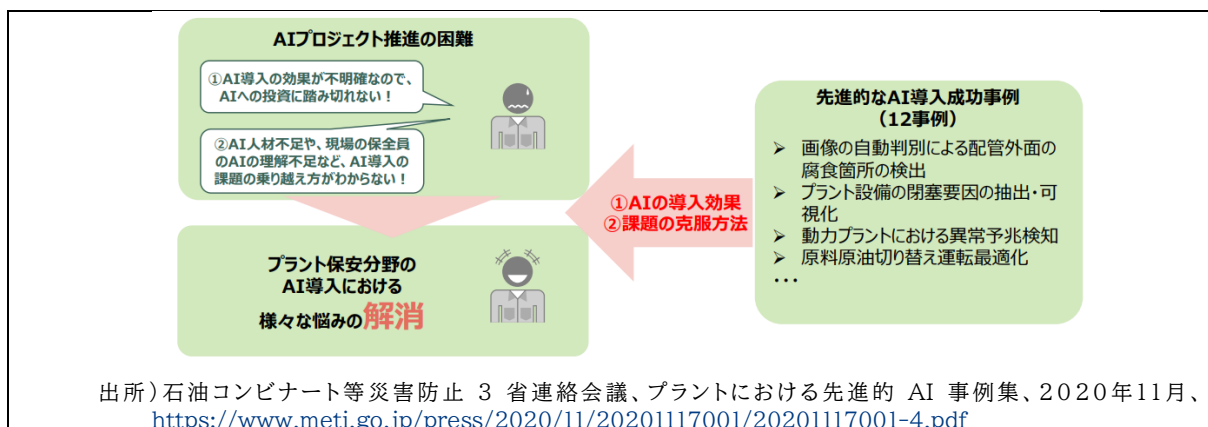
経済的価値を目的とした動機付けについて、参考となる国内一般産業における取組み、海外原子力産業における取組みを以下に記載する。

国内一般産業における取組みの例(プラントにおける先進的 AI 事例集)

AI(機械学習)は保安力・生産性を飛躍的に高める可能性を有しているが、AI プロジェクトを推進するには困難が伴う。AI プロジェクトを推進するにあたり、特に、①AI への投資効果が不明瞭であること、②AI 導入にあたって直面する課題(AI 人材不足、現場の保全員の AI 理解不足等)が大きすぎて、AI 導入に踏み切れない、という課題が認められる。

これら課題への対応として「プラントにおける先進的 AI 事例集」が作成され、「AI 投資決定時」、「AI 開発時」の事業者の課題解決へのヒントとして、事例ベースで、①AI の効果、②典型的な AI 導入の課題(AI 人材不足、目標設定の困難性など)の解決方法を具体的に示している。

投資効果が不明瞭であることへの対処として、効果や課題の解決方法を、具体的に示した事例集を整備している点で、参考になり得る。



海外原子力産業での取組みの例

LWRS プログラムのひとつとして、安全系に係るデジタル計測・制御系の近代化に向けたビジネスケース分析が実施されている。本研究は、ビジネスケース分析を可能にするプロセスと関連するビジネスケースツールを作成・実証することで、デジタルの安全システムのアップグレードを妨げる行き詰まりを打開することを目的としている。ビジネスケース分析自体の目的としては、そのようなアップグレードが経済的に正当化できることを示すことである。

ビジネスケース分析の手法(検討フロー)を、下図に示す。

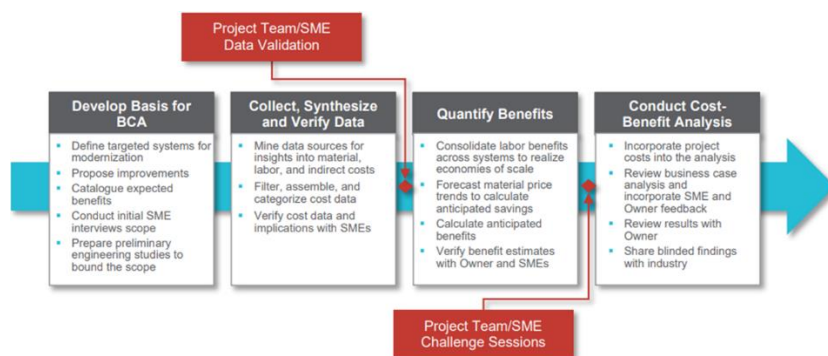


Figure 5: Business Case Analysis methodology.

出所) “Business Case Analysis for Digital Safety-Related Instrumentation & Control System Modernizations” INL/EXT-20-59371, August 2020, DOE/NE,
<https://www.osti.gov/servlets/purl/1660976>

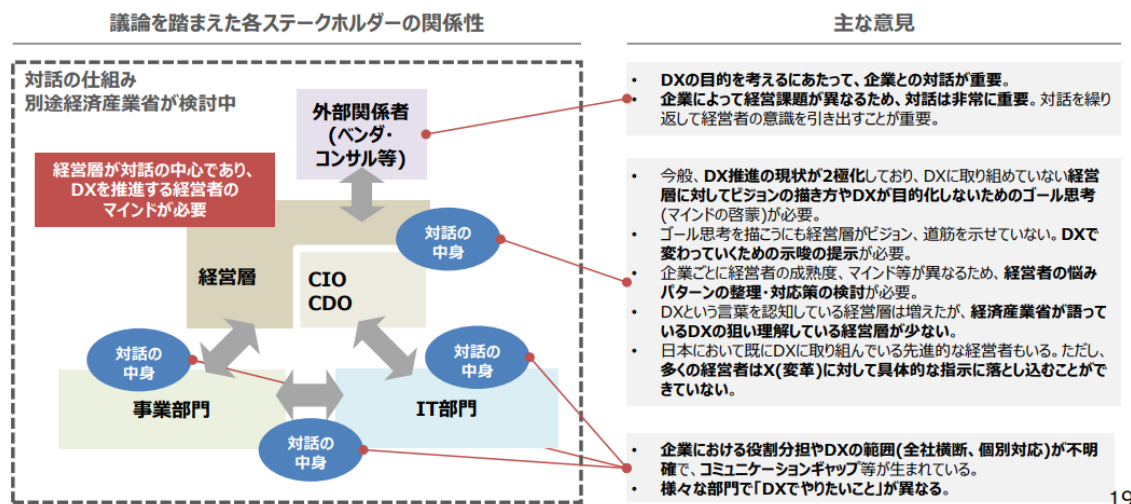
一方、非経済的価値(例えば、パブリックアクセプタンスなど)は、そのみで動機づけ(予算手当て)することは難しい。4.2.1 項に示す「基本的な対処方針の案」にて示した、「狙いを定める」ことにより、改善の目的の明確化に付随して動機づけができる可能性がある。

また、デジタル技術導入モチベーションに関しては、経営層(トップ)のコミットメントの重要性が各所で指摘されている点も留意しなければならない。

例えば、「デジタルトランスフォーメーションの加速に向けた研究会 WG1 全体報告書(2020年12月28日)」では、DX推進における課題が多くあげられる中、特に「DX の加速には経営層のマインドが重要であり、それらを社内外に発信・伝達するための対話が不可欠」とされ、また、「スマート保安先行事例集」では、「スマート化投資の成功要因」の分析結果の1つとして、「強いリーダーシップ」が挙げられている。

「デジタルトランスフォーメーションの加速に向けた研究会 WG1 全体報告書」の例

本報告書では、DX推進における課題が多くあげられる中、特に「DXの加速には経営層のマインドが重要であり、それらを社内外に発信・伝達するための対話が不可欠」とされた。



19

これを踏まえ、「DX 加速のための提言と施策」として、以下の通り「経営者への提言」が取りまとめられている。

経営層への提言

価値創造の源泉の変化に気づく

現状に危機感を持つ

行動に移す

対話の重要性を認識する

+

社外とも積極的に連携する

- 利益を生む源泉がデジタル空間に変わったことを認識すべし
- ビジネスモデルの変化により、デジタルディスラプターに価値を横取りされる可能性もある
- コロナ禍のように不確実な状況で事業を継続し、成長へつなげるには、DXが必須であると認識すべし
- “慣習やルールを打ち破って現状を変化させるチャンス”と捉えるべし
- ゴールを決め、ロードマップを描くことが、DXの第一歩である
- レガシー化させないためにアジャイルマインドで常に変革すべし
- DXは、まず経営者がビジョンを示すべし
- 情報システム部門など一部門に任せるのではなく、全部門で取り組むべく、対話に力を入れるべし
- 社外とも連携し、自社に不足しているスキルを補完することがDXにおける近道となる
- ただし外部へ“丸投げ”するのではなく、経営者はDXを自分事として捉え、自身でコントロールして推進すべし

出所) デジタルトランスフォーメーションの加速に向けた研究会 WG1 全体報告書(2020年12月28日)、
https://www.meti.go.jp/shingikai/mono_info_service/digital_transformation_kasoku/pdf/20201228_4.pdf

5. 原子力発電所へのデジタル技術等の導入に向けた基礎的検討

本章では、第4章にて提示した課題の対処方針に沿った取組みを実施するに当たっての基礎的検討として、現在原子力発電所に存在する利用可能なデータの整理結果、原子力発電所へ導入可能性の高い技術の候補、AI開発に係る基礎知識を整理した。

5.1 原子力発電所のデータカタログ

原子力発電所へのデジタル技術導入にあたって、データ分析等の前提として必要な「現場に存在するデータ」に、どのようなものが存在するかを把握することが重要である。

原子力発電所における主たる業務は、基本的には法令要求に基づいていることから、法令において要求されている事項は何らかの形のデータとして原子力発電所に存在するという仮定のもと、法令調査によって原子力発電所で利用可能なデータの整理を進めた。なお、法令要求を具体的なルールとして落とし込んだ文書として保安規定がある。保安規定の内容を参考に、業務分類の整理、業務プロセスの調査整理を行った。

整理したデータカタログを、表5-1に示す。

表 5-1 原子力発電所のデータカタログ

区分	項目	概要	データ例	規制強弱
① 設計データ	設置許可段階のデータ	原子炉施設の設置及び変更について行政庁の許可を得るために必要なデータである。	・行政庁要求事項データ（法令条文） ・設置許可審査時データ（安全審査資料） ・設置許可申請書データ（設定許可申請書本文および添付書類）	弱 法令、設置許可申請書および審査資料は公開されている。（一部機密に係る事項は非公開）
	工事計画段階のデータ	原子炉施設の詳細設計が設置許可の基本方針等と整合していること、及び行政庁が定める技術基準を満足していることを示すデータである。	・行政庁要求事項データ（法令条文） ・施設区分毎の設計データ（寸法、材料、個数等）、基本設計方針、適用基準及び適用規格、工事の方法	強 法令、基準・規格及び工事計画（工事計画認可申請書）は公開されているが、原子炉施設の詳細設計データは機密に係る事項につき非公開である。
② 現場構成データ	工事データ	設備の設計に基づく工事の実施記録である。	・工事仕様書 ・基準適合性を確保するための設計結果と適合性確認状況一覧表 ・検査計画	強 原子炉施設の詳細設計データは機密に係る事項につき非公開である。
	検査データ	対象設備が工事計画に適合していることを確認するための検査（適合性確認検査）の実施記録である。	・検査要領書（検査目的、検査場所、検査範囲、設備概要、検査方法、判定基準、検査体制、不適合処置要領、検査手順、検査工程、検査用測定機器、検査成績書の事項） ・検査記録（検査年月日、検査の対象、検査の方法、検査の結果）	強 原子炉施設の詳細設計データは機密に係る事項につき非公開である。

③ 物理構成 (現場)データ	運転に関するデータ	原子炉施設の運転管理に必要なデータである。	・プラント運転データ(熱出力、冷却材温度・流量等) ・プラント操作データ(機器動作確認・切替、水質管理) ・プラント運転中における運転状況の記録(運転日誌等) ・事故・故障事例等の記録	強 一部公開データはあるが大部分のデータは非公開である。
	施設管理に関するデータ	原子炉施設の施設管理に必要なデータである。	・施設管理計画データ(施設管理方針、施設管理目標、保全プログラム、保全対象範囲、施設管理重要度、施設管理実施計画) ・施設管理記録データ(検査記録) ・施設管理評価データ	強 一部公開データはあるが大部分のデータは非公開である。
④ その他施設運営に係るデータ	規定類	原子炉施設の運営にあたって遵守すべき規定類のデータである。	・保安規定 ・核物質防護規定 ・その他社内規定類(運転手順書、作業手順書、業務要綱等)	強 保安規定は公開データであるが、核物質防護規定及びその他社内規定類は非公開である。
	原子力安全に関するデータ	原子炉施設の運営に係るデータのうち、原子力安全に関するデータである。	・教育訓練データ(教育計画、教材、教育記録) ・不適合・是正措置(CAPデータ、トラブル等管理記録データ) ・安全文化指標に基づく評価データ ・安全評価データ(安全性向上評価届出書)	弱 機密に係る事項につき非公開のデータを含むが全体として公開データが多い。
	核セキュリティに関するデータ	核燃料物質の防護措置に関するデータである。	・設備設計データ(区画図、設備および装置情報、情報システムセキュリティ対策および計画、緊急時対応計画) ・監視データ(監視設備からの出力データ、出入り管理データ、特定核燃料物質管理データ) ・点検データ(設備および装置の保守・点検記録、防護措置の定期評価結果)	強 核物質防護に係るデータは非公開である。

なお、検討会合では、特に原子力発電所の現場において、分析可能なデジタルデータが少ない点(ビッグデータが構築されにくい環境)について、多く指摘された。原子力産業は一般産業と比較して、品質・信頼性の高い膨大な情報(データ)が存在することは事実であるが、分析目的にあったデータが必ずしも取得できているとは言えないことである。

しかし、原子力産業全体を俯瞰すると、一般産業と比較して、品質・信頼性の高い膨大な情報(データ)が存在するのは事実である。この事実は、データサイエンティスト等にとっては、魅力的な実践・適用のフィールドである。原子力業界へデジタル素養を有する人材を確保するためには、この点をアピールして

いくことも必要である。

5.2 原子力発電所への導入可能性を有するデジタル技術

原子力発電所におけるデジタル技術利活用によって、原子力発電所の安全性・経済性を向上させる可能性を有しているが、第3章において示した通り、原子力発電所のデジタル技術の導入には多くの課題意識が認められる。

特に、経済的価値が不明瞭(投資効果が不明瞭)であること、何より導入実績が重要視されることへのひとつの対処として、デジタル技術導入モチベーションの向上に資することを目的として、海外原子力産業、国内一般産業等で既に導入された、若しくは導入される見込みがある技術事例を、「原子力発電所への導入可能性を有するデジタル技術」として調査整理した。さらに、それら技術事例の原子力発電所への導入容易性と想定される原子力発電事業者にとっての便益について、簡易な評価を実施した。簡易な評価の結果は、報告書本文に記載している。

なお、「原子力発電所への導入可能性を有するデジタル技術」の整理結果は図5-1の通りである。

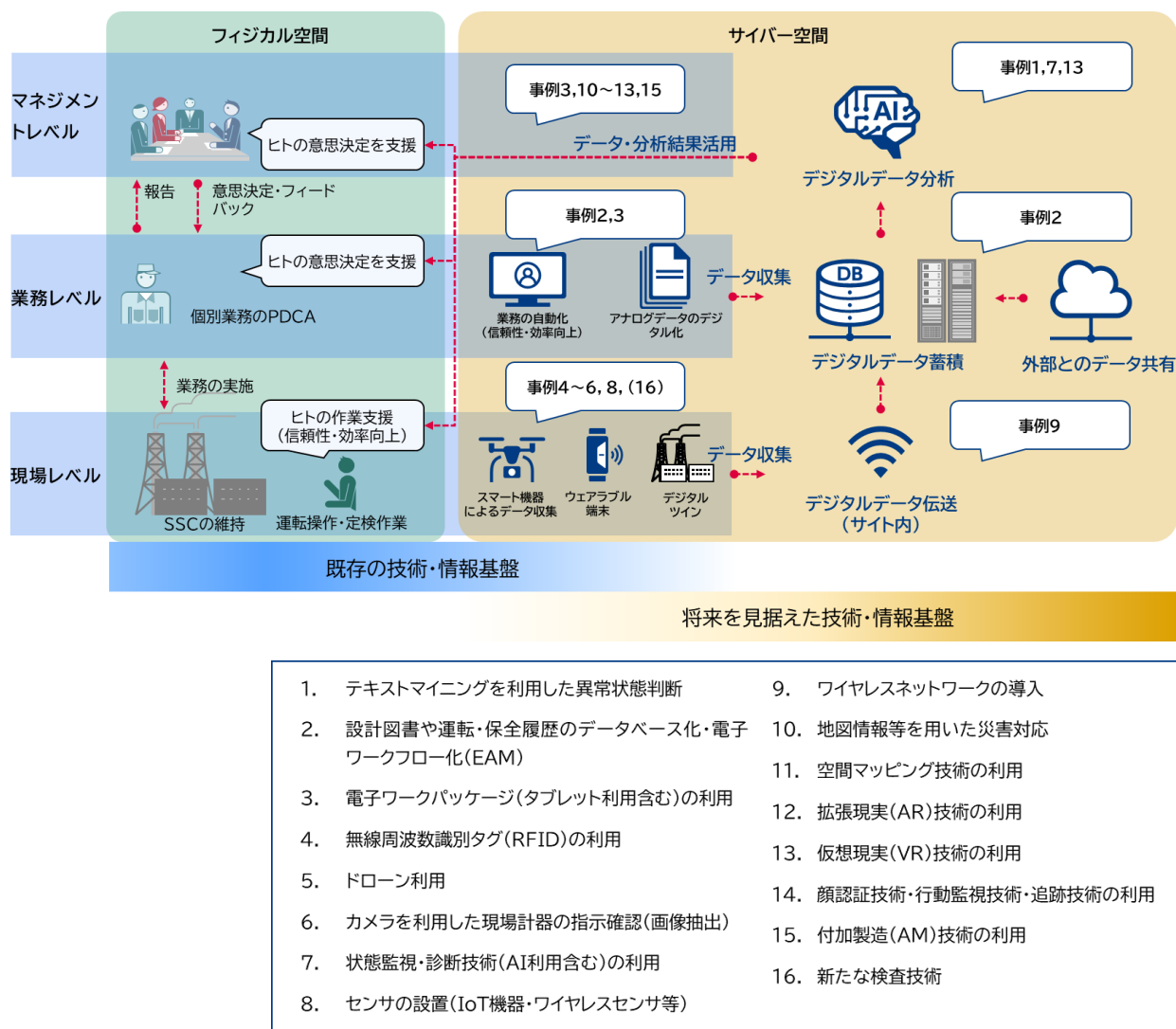


図 5-1 未来像イメージと技術事例の関係性

5.3 AI 開発に係る基礎知識

AI 開発に係る基礎知識として、現在の AI 開発環境、簡易なフレームワーク及び AI モデルの検討を実施した。

なお、詳細は添付資料 5 を参照されたい。

5.3.1 AI の開発環境

AI モデルの開発自体はたしかに少々難しい可能性がある。ここ数年の関連学術論文の著者の多くは中国人であり、原子力のみならず日本そのものが AI 研究に対して世界に後れをとっている。しかし、原子力に必要な AI は、モデル開発だけではない。モデルの開発と、それを組み込んだシステムの開発は別物として考えるべきである。

システムに求められる「入力データ」と「出力データ」が定まっていれば AI を組み込んだシステム開発は簡単である。現在では典型的なものだけでも画像：物体認識、セグメンテーション、姿勢、顔、表情、文字、音：音声認識、音源解析、回帰：時系列データ、未来予測、言語：分類、翻訳、応答、執筆、予測、などさまざまな AI モデルが開発されている。しかもその多くはネット上で公開され、なかには無償のものも少なくない。

原子力分野では熱流動解析や構造解析のために FEM が多用されてきた。このため、FEM そのものの性能向上を目指す研究と同時に、汎用 FEM コードを要素手法としてプラントシミュレーションや耐震解析のためのシステムを構築することも、原子力にとって重要な研究テーマとなっている。AI システム開発もこれと同様であり、さらに言うと、先述のように最新モデルがネット上でダウンロード可能であるということに加え、トラブル対策やサンプルコードなど多くのアドバイスも付随しているということを考慮すると、AI システム開発は FEM に比較しても恵まれた開発環境にある。

5.3.2 簡易なフレームワーク及び AI モデルの提案

このような恵まれた開発環境への知識が広がることで、原子力の AI に対する心理的ハードルが下がることに期待できる。その一助となるよう、①状態監視・診断技術、②カメラを利用した現場計器の指示確認、③核セキュリティ・核物質防護に関する監視・出入管理のための AI フレームワークと要素 AI モデルを以下に示す。

(1) 状態監視・診断技術(AI 利用)

状態監視・診断技術のための基本的なフレームワークを図 5-2 に示す。このフレームワークに必要な構造は比較的単純であり、まず計測値を時系列データ化し、時系列データ中で検出したい異常データ部分にラベル付け(アノテーション)をし、時系列データを入力、異常スコアを出力として、ラベル付けした異常データに対して高い異常スコアを出力するように RNN モデル(回帰モデル)を学習する。これにより、学習後の RNN モデルは、センサ等からのリアルタイム計測値に異常の特徴が含まれている場合に高い異常スコアを出力するため、異常を検知することが可能である。さらに、異常の種類別にラベル付けと異常スコアの学習をすることで、単なる異常の検知だけではなく異常の識別も可能となる。

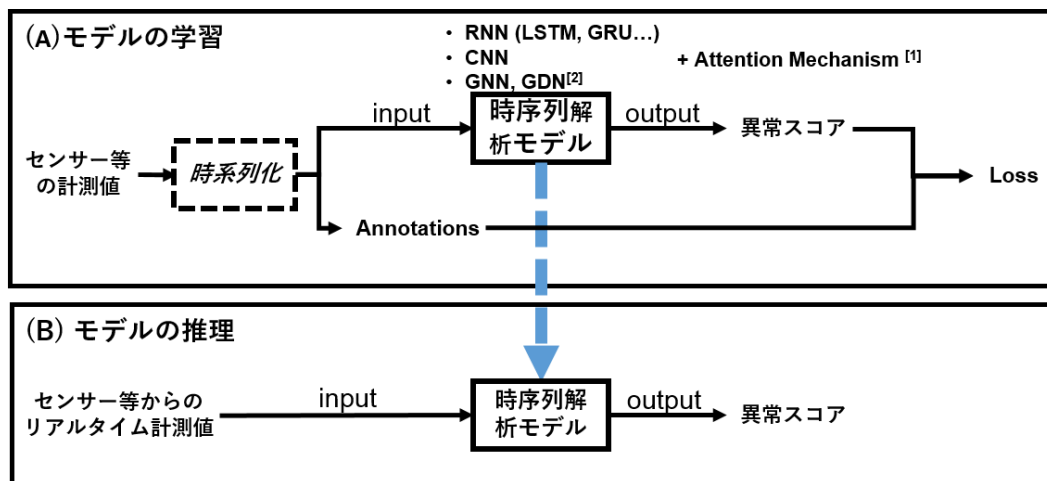


図 5-2 状態監視・診断技術のための基本的なフレームワーク

このフレームワークにおける時系列解析に利用可能なモデルの例として、TPA-LSTM⁸と Graph Deviation Network (GDN)⁹について紹介する。

TPA-LSTMとは時間的パターン注意および Long-Short-Term メモリ (Temporal pattern attention – Long Short Term Memory) のことであり、回帰モデルである LSTM に時間的パターン注意機構を追加することで、次回列解析の能力を向上させている。アテンション機構とは、入力されたデータのどこに注目すべきかを動的に特定する仕組みであり、並列化が容易である等の利点から自然言語を中心に発展した深層学習の要素技術の 1 つであるが、この手法ではこのアテンション機構を時系列解析に結び付けることで、時系列データの異常のパターンに着目して時系列予測の性能を向上させている。

また、GDNとは Graph Deviation Network の略称である。このモデルの特徴は、グラフ構造学習とグラフニューラルネットワークを組み合わせ、さらにアテンション機構を用いて時系列データを予測している点である。さらに、時系列予測のみでなくアテンションにより異常を検知する機能もすでに組み込まれており、状態監視・診断技術にそのまま適用可能である。

(2) カメラを利用した現場計器の指示確認

カメラを利用した現場計器の指示確認のための基本的なフレームワークを図 5-3 に示す。このフレームワークに必要な構造も比較的単純である。まず圧力計などアナログ計器の数値指示部の画像を取得し、さらに計器が示す数値の正解値を書く画像にラベル付け (アノテーション) して学習データを生成する。

この学習データを使用して、画像データを入力すると正解数値を出力するように画像特徴抽出モデルを学習する。これにより、学習後の画像特徴抽出モデル計器指示の画像を入力するだけでその指し示す数値を人間が認識するかの様に認識し、デジタル数値として出力するようになる。

⁸ Shih, Shun-Yao, Fan-Keng Sun, and Hung-yi Lee. "Temporal pattern attention for multivariate time series forecasting." Machine Learning 108.8 (2019): 1421-1441.

⁹ Deng, Ailin, and Bryan Hooi. "Graph neural network-based anomaly detection in multivariate time series." Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence. Vol. 35. No. 5. 2021.

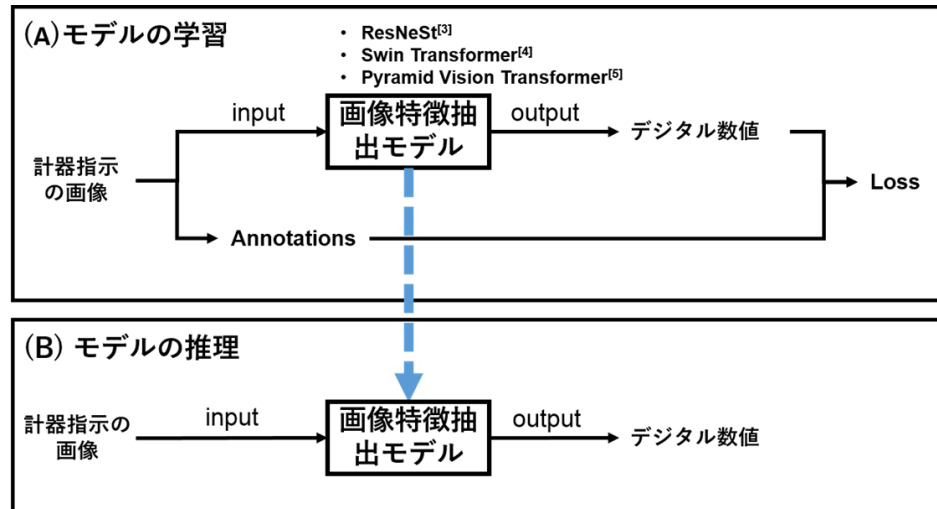


図 5-3 カメラを利用した現場計器の指示確認のための基本的なフレームワーク

このフレームワークにおける画像特徴抽出に利用可能なモデルの例として、ResNeSt¹⁰、SwinTransformer¹¹、Pyramid Vision Transformer¹²を紹介する。

ResNeSt とは、グループ化とスプリットアテンション機構を組み合わせたモデルであり、画像分類、物体検出やセグメンテーション、さらには姿勢推定でも高い精度が得られている。

Swin Transformer とは、Shifted windows で計算される階層的 Transformer である。Transformer を Computer Vision に適用するためには、(検出対象)物体のスケールが大きく変化すること、テキストと比較して入力画像の解像度が高いことの 2 つの課題に対応する必要がある。このアーキテクチャは、画像サイズに対して線形の計算量を持ち、さらに画像分類・物体検出・セマンティックセグメンテーションなどのタスクで高い性能を有している。まず、画像はパッチ分割(Patch Partition)モジュールに入力される。入力が 3 チャンネルの RGB 画像とすると、各パッチは $4 \times 4 = 16$ 画素で、各画素は R、G、B の 3 値なので、フラット化した画像は $16 \times 3 = 48$ となり、パッチ分割後の画像形状は $[H, W, 3]$ から $[H/4, W/4, 48]$ に変化する。次に 4 段階の stage にて特徴マップが作成され、Swin Transformer ブロックに送られる。このブロックでは Windows Multi-head Self-Attention(W-MSA)モジュールと Shifted Windows Multi-Head Self-Attention (SW-MSA) モジュール、すなわちオフセットのある W-MSA が導入されており、SW-MSA では特徴マップがサイズ $M \times M$ の個々の window に分割され、それぞれの window 内で個別に Self-Attention が実行されている。

Pyramid Vision Transformer とは、Transformer モデルを使用した、畳み込みのない物体認識ネットワークである。CNN バックボーンと同様に異なるスケールの特徴マップを生成する 4 つのステージを持ち、4 つの特徴マップ: F_1 、 F_2 、 F_3 、 F_4 (入力画像に対して 4、8、16、32 画素の stride を持つ) を得る。特徴ピラミッド $\{F_1, F_2, F_3, F_4\}$ を用いることにより、画像分類、物体検出、セマンティックセグメンテーションなどのタスクへの適用が容易である。

¹⁰ Zhang, Hang, et al. "Resnest: Split-attention networks." arXiv preprint arXiv:2004.08955 (2020).

¹¹ Liu, Ze, et al. "Swin transformer: Hierarchical vision transformer using shifted windows." arXiv preprint arXiv:2103.14030 (2021).

¹² Wang, Wenhai, et al. "Pyramid vision transformer: A versatile backbone for dense prediction without convolutions." arXiv preprint arXiv:2102.12122 (2021).

(3) 核セキュリティ・核物質防護に関する監視・出入管理等に用いる、顔認証技術・行動監視技術・追跡技術

核セキュリティ・核物質防護に関する監視・出入管理のための基本的なフレームワーク図 5-4 を示す。ここでは顔認識モデルと学習済みの姿勢認識モデルを用いる。すなわち、不審者か否かを判定するために従業員の顔写真で顔認識モデルを学習し、学習後の顔認識モデルにより不審者か否かを判定する。そして不審者と判定された場合には、学習済み姿勢推定モデルにより不審者の座標を識別し、その座標が立ち入り禁止区域等に入ったらアラームを発報させる。

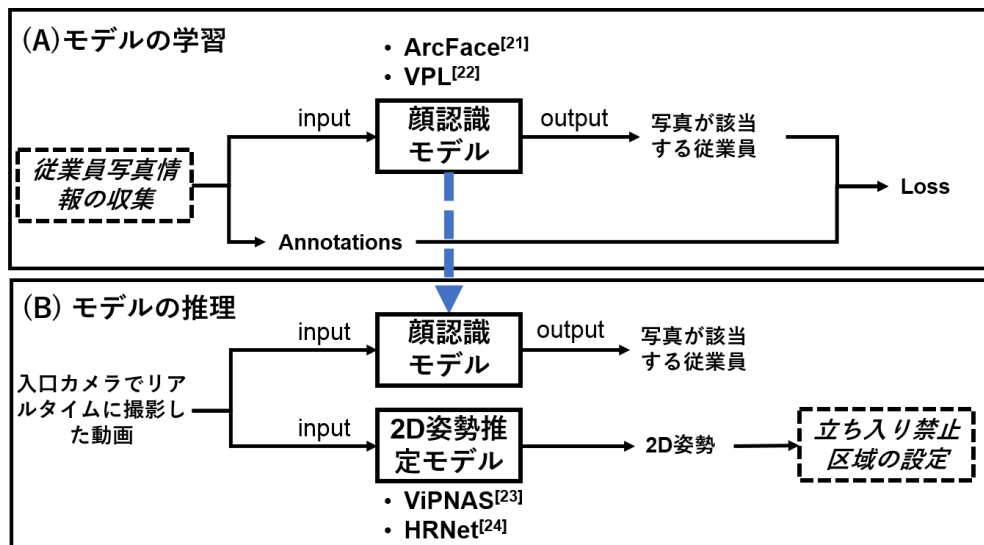


図 5-4 核セキュリティ・核物質防護に関する監視・出入管理のための基本的なフレームワーク

このフレームワークには一般的な顔認識モデルは姿勢認識モデルの適用が可能である。例えば顔認識モデルには ArcFace¹³や VPL(Variational Prototype Learning)¹⁴など、姿勢認識モデルには ViPNAS¹⁵や HRNet¹⁶などが挙げられる。

5.4 若手人材育成の観点からの原子力人材の確保

ここ数年の傾向として、大学教育の場において AI(深層学習)の研究テーマを志望する学生が増えており、その中の数%は原子力系の大学院専攻を志望する。しかし、原子力系の専攻に進学し AI 研究に取り組んでいても、いったい原子力業界側には受け止める未来があるのか、学生も不安を感じている。

即ち、原子力そのものの未来像が見えず、原子力を前提とした AI 研究をそのまま自らのゴールとして描くことに困難を感じるのである。原子力系の専攻における学生の AI 研究は”つぶしが効く”AI スキルを身に着けるため、と割り切って取り組んでいる学生も多い可能性があり、原子力業界がこのままデジタル化や AI といった未来の姿を描くことができねば、せつかくの優秀な人材は全員、他分野に逃げて

¹³ Deng, Jiankang, et al. "Arcface: Additive angular margin loss for deep face recognition." Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2019.

¹⁴ Deng, Jiankang, et al. "Variational Prototype Learning for Deep Face Recognition." Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2021.

¹⁵ Xu, Lumin, et al. "ViPNAS: Efficient Video Pose Estimation via Neural Architecture Search." Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2021.

¹⁶ Sun, Ke, et al. "Deep high-resolution representation learning for human pose estimation." Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2019.

いくばかりであろう。

しかし、既述のように、AI モデルは公開されているものも多く、実は取り組む際の技術的ハードル自体は高くない。残るは心理的ハードルだけである。しかも、AI システムを実用化できるか否かの鍵は技術そのものではなく、「いかに豊富な学習データを持っているか」であり、過去の保守管理データなどを豊富に蓄積している原子力業界こそが実は、日本の AI 開発の拠点となる潜在力を秘めているのである。

日本の有力な AI 開発・発信拠点となる未来像を原子力が描くことができれば、これに魅せられた若者たちを再び原子力に引き付けることに繋がる可能性がある。そのためにも原子力における AI 応用のあるべき姿を描くことは重要である。

添付資料

1. 商用原子力発電所に関する AI の役割に係る NRC のパブリックコメントの概要
2. 国内一般産業や海外原子力産業におけるデジタル技術導入に係る取組み状況の概要
3. 国内一般産業や海外原子力産業におけるデジタル技術導入に係る課題の概要
4. 海外原子力産業における無線通信技術の導入実績の概要
5. 共通的な技術基盤・システムの提案

Society5.0 の実現に向けた原子力デジタル産業基盤の構想

2022 年3月

原子力デジタル産業基盤構想に係る検討会合

商用原子力発電所に関するAIの役割に係るNRCの パブリックコメントの概要

Role of Artificial Intelligence Tools in U.S. Commercial Nuclear
Power Operations

Posted by the Nuclear Regulatory Commission on Apr 21, 2021

AI/ML導入に関する米国原子力産業他の主要な意見

区分		原子力産業組織の意見(NEI/米国事業者/メーカ(フラマトム))	(参考)AIベンダー意見
AI/MLツールの利用・開発状況等	AI/MLツールの利用・開発状況等	- 現在、保安分野(プラントレベルのパフォーマンスモニタリング)やCAP(傾向分析等)にて利用。 - 将来、設計、燃料管理、調達管理分野への適用も見込まれる。	電力会社とAIベンダーとが協力し、MCO予測ツールを開発。
	今後導入が見込まれるAI/ML手法	- 画像検出や自然言語処理、異常検出のための生成的敵対ネットワークのディープラーニングモデル - 予測、最適化、クラスタリング、回帰分析などのML手法 - データマイニング、コンテンツ分析ツール、決定木アプリケーション	など
	AI/MLツールの導入分野	- 様々な業務プロセス全般的に恩恵を期待。 - 運転管理や保安分野が特に期待しているほか、PPIにも期待。	AI/MLは設計、保安、燃料に焦点を当てるべきとの意見有。
想定便益・課題意識	期待する便益	運転管理、保安、PPのほか、業務プロセス全体へのAI/ML導入により、生産性向上や、施設とヒトの信頼性向上に期待。	保安や燃料管理分野が最も効果的という意見有。
	コストベネフィットの観点での課題	AI/MLの導入には大きな投資が必要である一方、その効果を定量的に示しがたいという点が共通認識。	文化的保守性や規制の制約から、開発コストが増加傾向と指摘。
	開発・実装の体制	NEIからは業界全体での取り組みの重要性を指摘。	—
	データセキュリティ	具体的な懸念が多く指摘されており、データ・セキュリティおよびガバナンス・プロトコルの必要性や、技術的にはデータ分類やネットワークのセキュリティ要件の標準化について指摘。	—
AI/MLに係る米国原子力産業のレベル	米国原子力産業の技術導入段階	- 米国原子力産業のAI/MLの技術導入段階は、5段階評価の下から2,3番目と捉えられている(Early majorityからLate Majority)。 - 規制の存在がイノベーションを阻害する原因との意見有。	原子力業界の文化的保守性がイノベーションの課題と指摘。
	原子力産業の知識レベル	- 原則事業者によって異なる(成熟レベルから初心者レベルまで様々) - 事業者によっては、データサイエンティスト等の専門家を配置したり、外部パートナーと協力関係を構築する場合がある。	AI/MLの専門知識でなく、ビジネスアナリシス等の隣接スキルが成熟していないと指摘。
その他AI/ML導入による影響	既存産業への影響	- 運用コストの削減により競争力を確保可能。 - 自動化により、ヒトの介在による“コンプライアンスコスト”低減を寄与し、規制コスト効率化やパフォーマンス向上を期待。	—
	安全規制への影響	- 規制機関がAI/MLを適用することにより、プラントの性能や課題をより効率的に分析することができ、NRCの検査の負担軽減を期待。 - AI/MLを適用による、外部ステークホルダーとの効率的でオープンなコミュニケーションを期待。	—

提出された意見の概要

- 産業大組織(NEI)・事業者(Xcel Energy、Next Era)・メーカ(Framatome)をベースに各ステークホルダーの意見を整理

出所) <https://www.federalregister.gov/documents/2021/04/21/2021-08177/role-of-artificial-intelligence-tools-in-us-commercial-nuclear-power-operations>

1. 設計、運転、保守、廃炉支援するAI/MLツールの利用・開発状況等

- 現在、保全分野(プラントレベルのパフォーマンスモニタリング)やCAP(自然言語処理)にて利用
- 将来、保全やCAP等の業務に加え、【設計】、【燃料管理】、【調達管理】分野への適用も見込む
 - 電力会社とAIベンダーと協力し、燃料の水分キャリアオーバー(MCO)を予測ツールを開発した事例も存在

業界団体(NEI)	原子力発電事業者 (Xcel Energy、NextEra)	メーカー(Framatome)
【利用中の技術】 ● 【保全】プラントのパフォーマンスモニタリング、複数パフォーマンスの変化の測定・分析。 ● 【CAP】自然言語処理(NLP)ベースのツールを用いたテキストレポート分析(重要な問題や傾向の特定) ● 【CAP】IBM Watson(AI製品)を使ったCRの分類	【利用中の技術】 ● 作業管理 ● CAP ● 機器の信頼性 (参考) ● NextEra社は1年以上前からAI/MLツールを導入 ● Xcel Energy社は、2021年後半よりCAPの支援に活用予定。	【利用中の技術】 ● 物理ベースのモデルを用いた計測器の逸脱から根本原因の特定(Metroscope、40以上のユニットに導入済み)
【開発中の技術】 ● 【保全】残存耐用年数を含む機器の状態ベースのメンテナンスおよびモニタリングツール(CBMツール) ● 【保全】作業のスクリーニング、スケジューリング、優先順位付けなどの作業管理アプリケーション ● 【調達管理】調達やサプライチェーンにおける、材料や部品の発注の最適化(調達管理最適化ツール) ● 【保全】簡単な作業指示書の作成、作業指示書の計画、スケジューリング、予知保全等 ● 【保全】機器の性能監視における、トレンド・相関関係の分析、アラーム ● 【CAP】ニューラルネットワークベース・自然言語処理を使用した、CRレビューの強化、潜在的なメンテナンスルールの機能障害の特定 ● 【保全】発見された状態コード、完了備考、コストデータ、メンテナンス頻度などの作業指示のレビュー、メンテナンス戦略の変更の提案 ● 【燃料管理】燃料について、BWRの水分キャリアオーバー、高温固有値(炉心の反応性)、オフラインからオンラインへの温度限界などの予測 ● 【保全】ローカルパワーレンジモニターの残存耐用年数の予測 ● 【設計】深層強化学習による原子炉設計の最適化	【開発中の技術】 ● データの合理的な視覚化や手作業の合理化	【開発中の技術】 ● 【保全・NDE】次世代の非破壊検査手法や手順の支援(AI/MLを供用開始前および供用開始後の検査手順に組み込むための、将来の性能実証および品質承認に必要なプロセスを確認中) ● 【設計】原子炉の運転を最適化しつつ、運転者の負担を軽減し、プラントの安全性を向上させる運転者支援予測システム(需要変化に応じた柔軟性を高めることを想定して開発中。)

2. AI/MLの導入により最も恩恵を受ける分野／最も恩恵を受けない分野

- 米国原子力産業は、様々な業務プロセスの効率化など、業務全般に恩恵が期待している。
 - 業務分類レベルでは、運転管理や保全分野が特に期待されているほか、PPについても信頼性向上が期待されている。
- なお、AIベンダーからは、「AI/MLは設計、メンテナンス、燃料に焦点を当てるべき。」との意見もある。

業界団体(NEI)	原子力発電事業者 (Xcel Energy、NextEra)	メーカー(Framatome)
ほぼすべての部分に潜在的なメリットがある。 ● 【運転管理】発電において、機器の故障やプラントの停止や出力低下につながるイベントの防止。 ● 【保全】AIによる予知保全や保全効率の向上。 ● 【運転管理&保全】プラント機器の性能の把握による、傾向の早期検知と警告。さらに、監視診断センターとの連携による、運転の重要なパラメータのモニタリングやメンテナンス計画のインプット。 ● 【業務全体】工数を削減できるプロセスの洗い出し。 ● 【保全】機器の問題報告(IR)レビューや予防保全のフィードバックへの適用による、改善点の探索。 ● 【保全・PP】コンピュータビジョン技術による、ビデオや写真の検査分析を支援し、問題点の特定。 ● 【PP】サイバーセキュリティの技術による、侵入分析や攻撃の識別の強化。	● 【運転管理&保全】逸脱状態の早期検知・アラート、運用／保守の効率化、システムおよびコンポーネントの性能監視、作業管理の改善 ● 【保全】(より長期的には)傾向把握のためのデータレビューの強化、サプライチェーンの効率化、メンテナンスプロセス、バックオフィスの自動化等	● 【保全】予知保全 ● 【保全・NDE】コンポーネントや配管システム(一次系を含む)のNDE(使用前および使用中) ● 【意思決定】人間の能力では処理しきれない大規模なデータストリームの統合を用いた、運転に関する意思決定 ● 【運転管理】半自律的または自律的な運転

3. AI/ML導入による具体的な便益

- 米国原子力産業は、運転管理、保全、PPのほか、業務プロセス全体へのAI/ML導入により、
 - 生産性向上による費用削減の効果が期待できる
 - 施設とヒトの信頼性向上による安定運転の実現も期待できると考えている。

- AIベンダーからは、保全や燃料管理分野が最も効果的という意見もある。

業界団体(NEI)	原子力発電事業者 (Xcel Energy、NextEra)	メーカー(Framatome)
● 【運転管理】より正確な予防保全により、運転員の負担軽減と、プラントの電力低下やシャットダウンを回避できる。 ● 【保全】長期的な資産管理計画の改善を支援する。状態に応じたメンテナンス戦略を支援し、機器等のリソースの配分を最適化する。 ● 【ヒトの生産性向上】膨大なセンサーベースのデータやテキストデータを処理し、実用的な洞察をインテリジェントに生成する。作業員の巡回、点検、予防保全のスケジューリングなど、繰り返し行う作業にかかるスタッフの時間を削減できる。	● 【保全】機器のデータ収集の自動化・予防保全の傾向分析支援 ● 【保全】機器のモニタリング・早期診断のためのモデル利用 ● 【ヒトの生産性向上】原子炉運転スタッフの生産性向上	● 【ヒトの生産性向上】既知の根本原因を正確に監視することで、定検や運転作業の一部を機能的に代替できる可能性がある。 ● 【保全】検査期間の延長に加えて、早期発見により部品の寿命を延ばし、性能を維持する。 ● 【保全・NDE】NDEにAI/MLを組み込むことで、予防保全(修理・交換活動を含む)が強化される。 ● 【保全】コンポーネントやシステムの劣化を早期検出することは、効率的な原子力発電の運転を支援できる。

以下AIベンダーの意見

- 設計と運転のAI/MLによる最適化は、膨大な累積効果をもたらす可能性があり、プラントの寿命期間中、全体的な運転コストを数パーセント単位で削減できる可能性がある。
- 設備メンテナンスの最適化は、オフラインの回数や期間を減らすことで、プラントの生産性を劇的に向上させ、年間の発電収入を増加させる可能性がある。
- 商業用原子力発電業界の人件費は、燃料の購入や停電などのコストがかかる項目に比べて圧倒的に少なく、技術者の時間を1週間節約することは、1つの燃料集合体の購入を回避することに比べて、1/400のコストの影響である。

4. 発電所マネジメントにおいて、今後導入が見込まれるAI/ML手法

- 以下に示す通り、様々なAI/ML手法が利用・開発されている。

業界団体(NEI)	原子力発電事業者 (Xcel Energy、NextEra)	メーカー(Framatome)
使用されている分野/方法の一部 - 画像検出や自然言語処理、異常検出のための生成的敵対ネットワークのディープラーニングモデル - 予測、最適化、クラスタリング、回帰分析などのML手法 データマイニング、コンテンツ分析ツール、決定木アプリケーション - 光学式文字認識 - IBM Watson仮想アシスタント(CR分類プロセス用) - 学習済みの人工ニューラルネットワークと自然言語処理(機器の信頼性向上プロセス) - 人工ニューラルネットワーク(教師あり学習)と深層強化学習	• 【人工ニューラルネットワーク】 プラントの設備や手順に関連する情報を検索するための人工ニューラルネットワーク・プラットフォーム • 【クラスタリング】 予防保全の範囲や頻度を最適化するための、クラスタリング・アルゴリズム • 【自然言語処理】 是正措置プログラムの傾向を把握するための自然言語処	• 【クラスタリング】 異常検出のためのクラスタリングアルゴリズム、隣接するデータや物理的に冗長なデータに基づき機器のエラーを修正するためのガウシアンアプローチなど。 • 【ベイズ法】 メトロスコープでは、物理モデル、専門家の知識、操作経験を活用して根本原因を見つけるベイズ法を採用。 • 挙げられた様々な手法に加えて、自己相関法もNDEとして検討されている。

以下、AIベンダーからの意見

- 畳み込みニューラルネットワーク(CNN)は、BWRの固有値予測に画期的な進歩が見られた。
- k-meansやDBSCANなどのクラスタリングアルゴリズムやその他の教師なし学習技術は、特徴の選択や次元の削減に特に有効。
- Transfer Learning(転移学習)は、多くの類似したシステムから得られたデータを使用して、データが少ない状況に適用できる一般化可能なモデルを構築する上で、非常に有用。
- 画像のデジタル化と画像認識は、圧力容器の内部にあるクラックを特定するために使用されている。
- 強化学習は、コア装荷と燃料サイクルの最適化に使用される。
- 幅広いAI/ML手法が使用されている。
- カバーされていない技術は説明可能なAI(XAI)である。XAIは、AI/MLの予測を知識のある人間に理解できるようにするモデルやアプローチの横断的なサブセット。原子炉の安全な運転に影響を与えるAI/MLモデルは、XAIと広範な安全性テストの両方が必要となるだろう。

5. AI/MLの開発と実装のための組織の取るべきアプローチ

- トップダウンアプローチ／ケースバイケースアプローチそれぞれ、メリット・デメリットが存在。
- NEIからは業界全体での取り組みの重要性を指摘。

業界団体(NEI)	原子力発電事業者 (Xcel Energy、NextEra)	メーカー(Framatome)
・EPRIやNEIのような組織との業界連携を利用することで、ベストプラクティスを業界全体で共有し、技術的・規制的な課題を強固で共通のアプローチで対処すると同時に、膨大な数の規制審査プロセスを削減できるため、業界全体の取り組みが重要な課題。 ・企業内でのトップダウン・アプローチの利点は以下の通り - ニーズを満たす1つの製品を選択できる。 - 分析にデータを使用することを促進し、標準化されたデータおよびソリューションのアーキテクチャを作成できる。 - 革新的なテクノロジーを安全に利用できるよう、企業レベルでデータガバナンスとセキュリティシステムを構築できる。 - 企業全体の共有リソースとして利用できるデータサイエンスの専門家を蓄積できる。 - 部門間でAI/ML適用の利用から得た知識や学んだOEを容易に共有できる。 - 企業全体で、多くのデータサイエンスの専門家、共有リソース、サポート組織を配置できる。戦略的な導入により、複数のアプリケーション間での一貫性、様々な社内組織/部門による労力の重複の回避、適切なリソース計画が可能になる。 - 契約企業への依存度が高いソフトウェアパッケージのスピンオフを最小限に抑えられる。 ・企業内でのトップダウンアプローチのデメリットは以下の通り - 市場投入までの時間を短縮できない。 - 常に変化し続けるテクノロジーに対してフレームワークが制限され、イノベーションを採用するのに長い時間を要する。 - イノベーションを起こす方法や真の価値提案に関して、従業員のインサイトが失われる可能性がある。	・Xcel Energy社は、提供価値をケースバイケースで評価する。これは重要なニーズを見直すための俊敏性を確保し、改善による利益を評価できる点で良い。 ・将来的にXcel Energy社は、規制の効率化として、外部の利害関係者との間でも、オープンで効率的なコミュニケーションが可能となる、共通規格の使用を検討することに前向きである。 ・NextEra社では、トップダウンのアプローチでコスト削減とビジネスの効率化を図る。プロジェクトの実施にはAGILEプロセスで、イノベーションとユーザーエクスペリエンスを最大化。	・ハイレベルで戦略的目標を立てる利点は、多くの手法が適切な研究と段階的な開発によって他分野にも一般化される可能性がある。一方で、ツールを構築するための専門家の知識に大きく依存するというデメリットがある。 ・トップダウンのアプローチをとることは、様々なデータストリームを相乗的に活用し、正確で実用的な保守・運転活動を行うためのロードマップを提供する点で強みがある。 ・しかし、AI/MLを段階的に統合するアドホックなアプローチにも利点があり、システムへの信頼性を高めることができる。

6. AI/MLに関して、原子力産業は現在、どのような技術導入段階にあるのか

- 米国原子力産業は、彼らのAI/MLの技術導入段階は、5段階評価の下から3, 4つ目と捉えられている(Early majorityからLate Majority)。
- 米国原子力産業からは、規制の存在がイノベーションを阻害する原因との意見もあり。
- AIベンダーからは、原子力業界の文化的保守性がイノベーションの課題と指摘もある。

業界団体(NEI)	原子力発電事業者 (Xcel Energy、NextEra)	メーカー(Framatome)
● 初期段階(Late Majorityのグループ) ● 一部はEarly AdoptersまたはInnovatorsの段階も存在。	● 早期に採用したと考えている。 ● 業界では、法律や規制上の要件で求められる形式や管理が原因で、イノベーションが課題となっている。	● 原子力産業の高度に規制された特殊な性質と、エネルギー市場の経済性を考慮すると、採用段階はEarly majorityからLate Majorityまでになる。 ● 現在米国のプラントがAI/MLツールの採用において他国に遅れをとっている理由の一つとして、原子炉の出力を自動的または自律的に調整する技術を禁止する法律がある。

以下、AIベンダーからの意見

- 大規模なレガシー企業は、AI/MLのような新技術の導入が遅れている。原子力産業の文化的保守性は深いものになっている。
- 業界にイノベーションをもたらす競争圧力を生み出しているのは、小規模なサードパーティのスタートアップ企業である。

The current technology adoption modelに基づくフェーズ(数字が若いほど、導入が進んでいる)

1. the innovator phase
2. the early adopter phase
3. the early majority phase
4. the late majority phase
5. the laggard phase.

7. 既存業務(ワークフロー管理や意思決定)にAI/MLを統合する際のツール開発・適用コストと便益をバランスさせるための課題

- 米国原子力産業としては、AI/MLの導入には大きな投資が必要である一方、その効果が定量的に示しがたいという点が共通認識。
- AIベンダーからコストよりもメリットが極めて大きいとの指摘がある一方、高レベルのリスク回避処置(文化的保守性)と規制の存在から、エンジニアリング・ビジネス上の制限が発生し、コストが増加傾向であると指摘。

業界団体(NEI)	原子力発電事業者 (Xcel Energy、NextEra)	メーカー (Framatome)
● 【効果の見えるさ】得られる利益が長期的なものもあるが、先行して大きな資金を投入する必要がある。 ● 【効果の見えるさ】人件費の効率化を見積もる必要がある。 ● 【実証の必要性】成功を証明するために慎重なプロトタイプ/パイロットプログラムを実施し、関係者のサポートを向上させる必要がある。 ● 【組織文化】開発後にこれらの革新的なツールを受け入れ、採用できる組織文化	● Xcel Energy社は可能性のある用途ごとに、ビジネスケースを作成して将来の潜在的な価値を判断	● 【効果の見えるさ】投資収益率の調査で利益を裏付ける、正確で信頼性の高い運用・保守コストのデータを取得すること。 ● 【大きな投資】知識ベースのAIについては、エンジニアリングの知識をモデルに組み込むための投資が必要である。 ● 【人材育成】AI/MLを維持するためには、専門的なスキルが必要となる場合があり、これは利用の利点とトレードオフの関係にある ● 【既存制度等への影響】NDEの検査手順の変更に伴うコストの生じる再認定等については課題

以下AIベンダーの意見

- AIベースのツールの開発・維持コストに比べ、メリットは桁違いである。
- AIベースのツールを用いて、計画外のシャットダウンを防ぐとともに1回の燃料装荷で数十の新燃料バンドルを節約しており、コスト低減額は数千万ドルで、開発費は50～100万ドルの範囲である。
- 高レベルのリスク回避と規制があるため、エンジニアリングやビジネス上の制限が加わり、開発コストが増加する。商業用原子力産業の文化的保守性と相まって、全般的な足かせとなっている。

8. 原子力発電産業におけるAI/MLの専門知識レベル

- 会社によって異なるが、電力会社では、データサイエンティスト等の専門家配置の必要性を認識している。
 - また、外部パートナーと知識や専門家提供に係る協力関係を構築する場合もある。
- AIベンダーは、原子力産業のAI/MLの専門知識レベルは熟練しているという意見も見られた一方、初心者という意見も見られた。
 - 特に、AI/MLの専門知識でなく、ビジネスアナリシス等の隣接スキルが成熟していないと指摘。

業界団体(NEI)	原子力発電事業者 (Xcel Energy、NextEra)	メーカー (Framatome)
● 業界により異なる。 ● 一部の電力会社では専門性を確保するために人員を配置しているが、常に変化する状況を認識しているスタッフを維持することは、課題。 ● 場合によっては、外部の団体(ベンダーや業界のリソース)が、AI/MLソリューション開発に必要な知識や専門家を提供することもある。	● Xcel Energy社は、人材を採用・育成しており、外部サポートとのパートナーシップから恩恵を受けている ● NextEra社には、AI/MLの専門家であるデータサイエンティストのチームがあり専門家のデータサイエンティストを抱える複数のベンダーと協力している。	● 異常を監視するためのクラスター分析のような分野は業界として初心者。 ● Framatome社はNDEの観点から、技術を熟知し、様々なAI/ML技術のベンダーを活用し、パートナーとなっている。

以下AIベンダーの意見

- 原子力産業は初心者の段階。電力会社は、AIの専門知識を持つ外部の組織にプログラムの実施を依頼している。国立研究所、特にアイダホ国立研究所は、AIと機械学習の優れたプログラムを有し、一部の電力会社を支援している。
- 原子力産業におけるAI/MLの専門知識は、全体的に熟達/熟練している一方で、必要とされるビジネスアナリシス、MLOps、組織変更管理などの隣接スキルは成熟していない。他産業でも同様である。保守主義とデータサイエンスに関連するスキルの低さが原因で、イノベーションのレベルが低下し、ビジネスに価値を提供する能力が損なわれている

9. AI/MLによる原子力産業への影響(競争力などの視点)

- 既存炉に活用することで、運用コストの削減に寄与し、他の(新規に建設される)カーボンフリー電源と比較して競争力を確保しやすいとの記載もある。
- また自動化により、ヒトが介在することにより発生するコンプライアンスコスト低減を寄与し、結果として規制コスト効率やパフォーマンスを期待している場合もある。

業界団体(NEI)	原子力発電事業者 (Xcel Energy、NextEra)	メーカー (Framatome)
• 信頼性の高いレベルで運転管理スタッフをサポートすることで、効率が向上し、コストが削減されるため、競合するカーボンフリーの発電源と比較して、原子力発電がより有利に位置づけられる。	• 自動化によりコンプライアンスコストを削減することで、規制等に関わるコスト効率とパフォーマンスの向上を得られ、競争力が向上すると考えられている。	• 堅牢なモニタリングや診断による運転・保守コストの削減は、化石発電と比較して大きな機会

10. AI/MLによる規制機関への影響(効率的な規制・監督コスト低減など)

- 事業者は、規制機関がAI/MLを適用することにより、プラントの性能や課題をより効率的に分析することができ、NRCの検査の負担も軽減され则认为している。
- また、外部ステークホルダーに対しても、AI/ML/自動化により、外部ステークホルダーともより効率的で、オープンなコミュニケーションが強化できると期待。

業界団体(NEI)	原子力発電事業者 (Xcel Energy、NextEra)	メーカー (Framatome)
● 機器の操作性の向上、プラントのイベントの減少、パフォーマンス指標の改善に基づき、安全監視に関連する効果を向上させることが期待される。	● 人工知能を活用してプラントの文書をレビューし、性能や文書の傾向を把握することで、プラントの性能や問題をより効率的に分析することができ、NRCの検査の負担も軽減される。 ● AI / ML / 自動化により、継続的にコンプライアンスを評価する機能が提供され、外部の利害関係者にとっても効率的で、オープンなコミュニケーションが強化される。	● リスク情報に基づく分類に合わせた診断が合理的に拡大すれば、検査の簡素化と保守延期の根拠を標準化し、監督を改善できるかもしれない。

11. 遠隔のオフサイトネットワークに保存されているような、原子力発電所の運転経験や設計情報に係るデータセキュリティに関する懸念

- サイバーセキュリティ、専有情報に関する懸念、輸出規制情報、データキュレーションの課題、発電所内でのWiFi接続などの具体的な懸念が指摘。
 - 特に、データ・セキュリティおよびガバナンス・プロトコルの必要性について言及。
- 技術的には、データの分類やネットワークのセキュリティ要件の標準化について言及。

業界団体(NEI)	原子力発電事業者 (Xcel Energy、NextEra)	メーカー (Framatome)
● 原子力発電所でAI/MLを使用する際には、サイバーセキュリティ、専有情報に関する懸念、輸出規制情報、データキュレーションの課題、発電所内でのWiFi接続などが懸念される。 ● 業界全体のデータを活用することで、より堅牢なAI/MLソリューションを提供できる可能性があり、そのためには適切なデータのセキュリティと管理が必要。 ● 遠隔地やオフサイトのネットワークに保存されたデータへの適用は、堅牢なデータ・セキュリティおよびガバナンス・プロトコルが必要。	● Xcel Energy社は新しいツールや機能の利用にあわせて、データ・情報に関する全体的なセキュリティを強化し続けている。 ● NextEra社はデータセキュリティを維持するために、サイバーセキュリティポリシーとインフラコントロールを実施している。	● サイバー侵入、輸出管理の喪失、そして世間や株主の認識による企業リスクが懸念。 ● データの分類やネットワークのセキュリティ要件を標準化することで、業界は利益を得ることができる。 ● 新たなNDE技術では転送を必要とせずにローカルでデータを処理する準備ができているエッジAIプラットフォームを模索しており、セキュリティのリスクを抑える。

以下AIベンダーの意見

- 運転データ、特に炉心に関するデータは非常に機密性が高く、規制されており、国内規制、国際的なデータの所在や輸出に関する法律、さまざまな原子力監督機関の追加要件などにより、データを集約しようとしても実現できないことが多い。技術的または法的に可能であっても、プラント固有のデータにアクセスできるような適切なデータ共有契約を結んでいる原子力企業はほとんどない。
- 結果、データ管理の大きなハードルに直面するため、AI/MLの技術的な障壁が高まり、価値を創出するまでの時間が長く、他の発電源や他の産業と比較してAI/ML開発のROIが低下する。

国内一般産業や海外原子力産業におけるデジタル技術導入に係る取組み状況の概要 (文献調査)

1 文献調査の目的

国内一般産業や海外原子力産業における、目指すべき産業像や目標の設定状況やデジタル技術導入の目的（期待する便益）を把握することを目的に、文献調査を実施した。

2 文献調査の実施方法

2.1 調査対象文献

日本の原子力発電所におけるデジタル技術利活用により達成されるべき姿（To Be）の仮説を設定するにあたっては、原子力特有の視点のみならず、日本が今後目指す未来社会（産業）像を踏まえた検討が重要となるため、これら 2 つの視点からの調査を実施した。

【日本が今後目指す未来社会（産業）像の視点】

日本が今後目指す未来社会像や産業像について言及されている以下の概念に係る情報などについても調査・整理を実施する。

- ・ Society5.0
- ・ Connected Industries
- ・ DX レポート 2
- ・ DX レポート 2.1
- ・ デジタルトランスフォーメーションを推進するためのガイドライン（DX 推進ガイドライン） Ver. 1.0
- ・ スマート保安

【原子力特有の視点】

原子力発電所におけるデジタル技術利活用の検討が進んでいる海外情報を中心に、それらの技術への期待について言及がある、以下の海外レポート等を中心に調査を実施した。

- ・ NRC, Role of Artificial Intelligence Tools in U.S. Commercial Nuclear Power Operations
- ・ INL, Automation Technologies Impact on the Work Process of Nuclear Power Plants
- ・ DOE, Light Water Reactor Sustainability Program Nuclear Power Plant Modernization Strategy and Action Plan)

2.2 調査内容

前述の調査対象文献を中心に、原子力発電所の運営（運転・保守他）に関してデジタル技術を活用することによって生じる「想定便益」やその対処方針（技術開発状況・導入事例等）について抽出・整理を行う。

3 文献調査結果

3.1 「Role of Artificial Intelligence Tools in U.S. Commercial Nuclear Power Operations」の概要

米国原子力規制委員会は、産業界から商用原子力発電所に関する AI ツールの役割に係る意見を募集した。米国原子力産業界の AI/ML ツールに対する意見（概要）を表 3.1 に示す。

表 3.1 米国原子力産業界の AI/ML ツールに対する意見（概要）

意見区分	原子力産業組織の意見 (NEI/米国事業者/メーカ（フラマトム）)	AI ベンダー意見
期待する便益 (ユーザーの便益)	・ 運転管理、保全、燃料管理、PP のほか、業務プロセス全体への AI/ML 導入により、生産性向上や、施設とヒトの信頼性向上に期待。 ・ 自動化により、ヒトの介在による“コンプライアンスコスト”低減に寄与し、規制コスト効率化やパフォーマンス向上を期待。	・ 保全や燃料管理分野が最も効果的という意見有。
期待する便益 (規制機関の便益)	・ 規制機関が AI/ML を適用することにより、プラントの性能や課題をより効率的に分析することができ、NRC の検査の負担軽減を期待。 ・ AI/ML の適用による、外部ステークホルダーとの効率的でオープンなコミュニケーションを期待。	・ —
AI/ML ツールの利用・ 開発状況等	・ 様々な業務プロセス全般的に恩恵を期待。 ・ 運転管理や保全分野が特に期待されるほか、PP にも期待。	・ AI/ML は設計、保全、燃料に焦点を当てるべきとの意見有。
	・ 【利用状況】 ・ 現在、保全分野（プラントレベルのパフォーマンスモニタリング）や CAP（傾向分析等）にて利用。 ・ 将来、設計、燃料管理、調達管理分野への適用も見込まれる。	・ 電力会社と AI ベンダーとが協力し、Moisture Carryover (MCO) 予測ツールを開発。

出所) US-NRC, Role of Artificial Intelligence Tools in U.S. Commercial Nuclear Power Operations をもとに MRI 作成

米国産業界（特に事業者）からは、AI ツールについて期待する便益として、「生産性向上」や「施設とヒトの信頼性向上」が挙げられ、業務プロセス全体に AI/ML（機械学習）ツールを導入することが期待されている。一方、AI ベンダーからは、保全や燃料管理分野が最も効果が期待できるとしている。

特に期待する業務分野としては、運転管理、保全、燃料管理、PP であった。また、将来的には、設計・燃料管理・調達分野への AI/ML（機械学習）ツール導入も期待されている。一方、AI ベンダーからは、設計・保全・燃料管理分野に焦点を当てるべきとの意見も認められる。

このように、デジタル技術利活用により実現したい姿のひとつとして、「コスト削減（生産性向上）」、「施設やヒトの信頼性向上」が挙げられ、業務プロセス全体に AI/ML（機械学習）ツールを導入することが期待されている。特にユーザー（事業者）が便益を期待する分野として、運転管理分野、保全管理分野、燃料管理分野、PP 分野が挙げられる一方、AI ベンダーとしては設計分野にも焦点を当てるべきとの指摘が認められる。

3.2 「Automation Technologies Impact on the Work Process of Nuclear Power Plants」の概要

米国の原子力産業は市場競争の激化により採算性の確保が極めて重要な課題となっている。特に規制の影響により運転維持費（O&M コスト）は燃料費の 2 倍となっている。

このため、米国原子力発電所においては積極的に O&M コスト削減に資する自動化技術

(Automation Technologies) を積極的に導入しており、特に、業務プロセスの主要ツールであるワークパッケージ¹の電子化 (eWP) が進められてきた。しかし、依然大部分の作業プロセスが自動化できないままに残っている。

このような背景を踏まえ本研究は、原子力発電所の O&M コストを大幅に削減できるプロアクティブな自動化技術を特定するために実施されたものである。

本研究の結果、3 つのコスト削減カテゴリー毎に自動化技術リストが作成された。

- ・ 【コスト削減効果の高い技術】としては、ドローン、電子ワークパッケージ、モバイルデバイス、プラントデータ統合、スマート機器、スマートスケジューリング、ワイヤレスネットワーク、ワイヤレスセンサー、作業データマイニング、作業リスクモデルなどがある。
- ・ 【コスト削減効果が中程度の技術】としては、拡張現実、画像情報抽出、モバイル機器評価ツール、無線周波数識別、空間マッピング、3 次元アニメーション、ビデオ記録、ビデオ監視、仮想現実、およびワイヤレスアクチュエータなどがある。
- ・ 【コスト削減効果の低い技術】としては、バーコード、電子タグ、画像異常検出、画像物体認識、全地球測位システム、インタラクティブオーディオ、動き認識、スマートツール、3 次元印刷、ビデオ通信ツール、Wi-Fi ポージング、無線ビーコンなどがある。

このように、デジタル技術利活用により実現したい姿のひとつとして「コスト削減」が挙げられ、業務プロセスの自動化が期待されている。業務プロセスの自動化の対処方針の 1 つとして、本研究にて特定されたコスト削減効果の高い技術を積極活用することが考えられる。

3.3 「DOE, Light Water Reactor Sustainability Program Nuclear Power Plant Modernization Strategy and Action Plan」の概要

LWRS の Plant Modernization Pathway (プラント近代化分野) では、デジタル技術を活用したイノベーション、効率化、ビジネスモデルの変革等による経済性向上に資する研究開発・技術開発を実施している。

具体的には、4 つの主要な領域 (I&C 近代化、制御室の近代化、プラント監視及び作業プロセスの自動化、プラント運転モデルの変革) における技術開発を実施しており、この 4 分野に取り組む大きな目的は、原子力発電所の長期的な持続可能性を確保するために必要な性能向上とコスト削減を行うことである。この報告書では、4 領域における具体的な取り組み内容と目的、その成果やアクションプランが整理されている。

性能向上とコスト削減に向けて、具体的には以下の取り組みが挙げられる。

- ・ 計装・制御システムの汎用的なアーキテクチャの開発
- ・ アナログとデジタルのハイブリット制御室の開発
- ・ オンライン設備管理技術の開発
- ・ プラントデータ収集の自動化・遠隔化・機械学習の活用
- ・ デジタル技術を用いたプラント作業の補完や機器や材料の健全性の高精度な監視
- ・ 運転モデルの変革に関する技術開発
- ・ プラントにおける様々なデータの統合

米国における、既存軽水炉にデジタル技術を活用するこれらの具体的な取り組みは、様々な業務分野におけるコスト削減、レガシーなアナログ技術の変革による性能向上等が見込まれ

¹ ワークパッケージとは、典型的には産業用メンテナンスを行うために必要な文書の集合体である。ワークパッケージには、フォームや手順書からエンジニアリング図面までが含まれている。数十年の間に、原子力発電所の作業工程は急激に増加し、原子力産業の主な財政的負担の 1 つになっている。

ており、我が国における原子力発電所におけるデジタル技術利活用により達成されるべき姿の先行事例として参考とすべきである。

3.4 「Nuclear Innovation 2050 (An NEA initiative to accelerate R&D and market deployment of innovative nuclear fission technologies to contribute to a sustainable energy future)」の概要

本プロジェクトは NEA が原子力産業への革新的技術導入のイニシアチブをとることを目的としている。その中で、デジタル技術はイノベーションの一つとして期待されている。

【原子力産業へのイノベーションの必要性】

原子力産業は 20 世紀から電力供給において重要な役割を担っている。さらに、世界的に脱炭素化が進められているなかで、低炭素エネルギーミックスを構成するうえで原子力の重要性は高まることが予想される。一方で、エネルギー政策を決定するうえで重要な観点として「価格」「エネルギー供給の安定性」がある。原子力産業においても、他エネルギーとの競争力を維持するために更なる向上が求められるが、ここ 30 年程度大きな技術革新がないという現状がある。

そこでイノベーションによって、高いレベルでの安全性を維持しながら安価に電力を提供することによって、将来のエネルギー市場で競争できる原子力技術の開発が期待される。また、原子力におけるイノベーションとして、他産業で実装されている技術の導入を加速させること、特に実証を通して導入の障壁を克服するための技術的解決策を検討することに取り組むとしている。

【デジタル技術の活用】

原子力で期待されるイノベーション技術のなかで、デジタル技術は重要な要素の 1 つに挙げられている。

デジタル技術の活用方法としては、ビッグデータ、ディープラーニング、人工知能技術を活用したデータの収集、管理、利用方法を改善することによる運用保守及び作業プロセスの最適化が挙げられている。

なお、本プロジェクトでの議論をもとに、2021 年に NEA と KAERI・KNS が主催となって全 4 回のウェビナーが開催された。特に、原子力への革新的な技術の導入として、データイノベーション・通信技術等のデジタル技術について議論された第 2~3 回の概要を以下に示す。

- 第 2 回 Using disruptive technology for nuclear safety applications

革新的な技術として、原子力運転の改善と原子力安全の継続的な強化のためのデータ駆動技術の適用と他産業分野におけるデジタル技術の導入から得た教訓について議論がなされた。また原子力産業や他産業における Industry4.0 の取組事例が提示されており、Society5.0 に向けて重要な観点となる議論

- 第 3 回 Data Innovations for the Future of Nuclear Safety

データ駆動型技術に光を当て、AI、AR、ビッグデータ、無線通信、IoT などのデータイノベーションの見通しに焦点を当てて議論された。また、他産業分野におけるデータイノベーション技術の導入から学んだ教訓が検討された。

また、原子力へのデータイノベーション技術の具体例として、「無線通信技術」「文書のアーカイブ化」が挙げられている。

このように本ウェビナーでは、ビッグデータ、ディープラーニング、人工知能技術を活用したデータの収集、管理、利用方法を改善することで、原子力安全の強化に加えて、業務の効率化がなされることが期待される。また、他産業では導入事例があるが、原子力産業は他産業と異なる独自性を有しているため、原子力特有の課題の明確化と取組が必要であるとされている。

3.5 Society5.0／Connected Industries／スマート保安

【Society5.0】

平成 28 年に閣議決定された第 5 期科学技術基本計画において、狩猟社会（Society 1.0）、農耕社会（Society 2.0）、工業社会（Society 3.0）、情報社会（Society 4.0）に続く、我が国が目指すべき未来社会の姿として、「Society5.0」が提唱された。「Society5.0」は、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（Society）とされる。

【Connected Industries】

経済産業省は平成 29 年、第 4 次産業革命による技術の革新を踏まえ、将来的に目指すべき未来社会である「Society5.0」を実現していくため、「Connected Industries」の概念を発表した。この「Connected Industries」とは、「モノとモノ」「人と機械」、「人と技術」、「企業と企業」、「人と人」、「生産者と消費者」など、国境や世代を超えたさまざまなつながりを、人工知能（AI）等によって新たな付加価値を生み出していく産業社会を指しているものであり、これらを通して産業競争力の強化及び国民生活の向上・国民経済の健全な発展を意図している。

【スマート保安】

①国民と産業の安全の確保を第一として、②急速に進む技術革新やデジタル化、少子高齢化・人口減少など経済社会構造の変化を的確に捉えながら、③産業保安規制の適切な実施と産業の振興・競争力強化の観点に立って、④官・民が行う、産業保安に関する主体的・挑戦的な取り組みのことを、スマート保安という。

具体的には、①十分な情報やデータによる科学的根拠とそれに基づく中立・公正な判断を行うことを旨として、②IoT や AI など安全性と効率性を高める新技術の導入、現場における創意工夫と作業の円滑化などにより産業保安における安全性と効率性を常に追求し、③事業・現場における自主保安力の強化と生産性の向上を持続的に推進するとともに、④規制・制度を不断に見直すことによって、将来にわたって国民の安全・安心を創り出すことである。

このように、データ駆動型社会（Society5.0）を踏まえ、設備の状態をデータによって常に把握・監視できる新技術を活用することで、安全性の向上のみならず、人手不足等の産業課題に適切に対処し、効率性向上や競争力強化を実現することが、日本が今後目指す未来社会（産業）像の 1 つと捉えることができる。すなわち、設備の状態をデータによって常に把握・監視・分析できる基盤の構築が、1 つの達成されるべき姿である。

3.6 DX レポート 2／DX レポート 2.1／DX 推進ガイドライン Ver. 1.0

DX 推進ガイドライン Ver. 1.0 において、いわゆる「デジタルトランスフォーメーション：DX」とは、「企業がビジネス環境の激しい変化に対応し、データとデジタル技術を活用して、顧客や社会のニーズを基に、製品やサービス、ビジネスモデルを変革するとともに、業務そのものや、組織、プロセス、企業文化・風土を変革し、競争上の優位性を確立すること」と定義されている。

さらに、DX レポート 2／DX レポート 2.1 において、DX をデジタイゼーション、デジタルイゼーション、デジタルトランスフォーメーションという 3 つの異なる段階に分解し、構造化している（図 4.1 参照）。



図 4.1 DX の構造

出所) デジタルトランスフォーメーションの加速に向けた研究会、DX レポート 2、令和 2 年 12 月

これをプラント産業に当てはめて考えると、アナログ・物理データのデジタル化により、データ蓄積環境を構築することを「デジタイゼーション」、デジタル技術を用いた個別の業務プロセスの最適化を通して組織全体の生産性を向上することを「デジタルライゼーション」、生産する製品・サービスのデジタル化により新たな顧客体験を提供することを「デジタルトランスフォーメーション」と整理することができる。

このようにデジタルトランスフォーメーションを踏まえ、デジタル技術により顧客に対して新たな価値・体験の提供を実現することが、日本が今後目指す未来社会（産業）像の 1 つと捉えることができる。即ち、その前提としてデジタイゼーション、デジタルライゼーションが重要であるといえる。

3.7 DX レポート 2.1（デジタル産業の姿／デジタル産業の構造と企業類型）

「DX レポート 2.1」には、“社会全体でデジタル化が進む中で、企業はこの不可逆的な変化に適応し、データとデジタル技術を駆使して新たな価値を産み出すことが求められている”こと、“デジタル社会の実現に必要な機能を生社会にもたらすのがデジタル産業である”ことが記載されている（図参照）

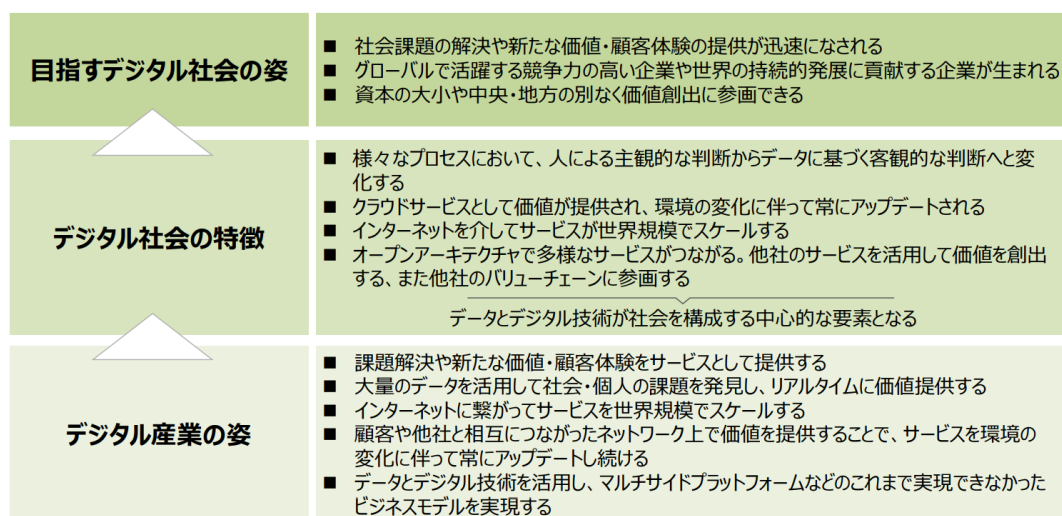


図 4.2 デジタル社会とデジタル産業の姿

出所) デジタル産業の創出に向けた研究会、DX レポート 2.1（概要）、2021 年 8 月

また、「DX レポート 2.1」には、デジタル産業の構造と企業類型として、“デジタル産業は、ソフトウェアやインターネットにより、グローバルにスケール可能で労働量によらない特性

にあり、資本の大小や中央・地方の別なく、価値創出に参画できる”こと、“市場との対話の中で迅速に変化する必要性や、1社で対応できない多様な価値を結びつける必要性から、固定的ではないネットワーク型の構造となる”ことが記載されている（図 4.3 参照）

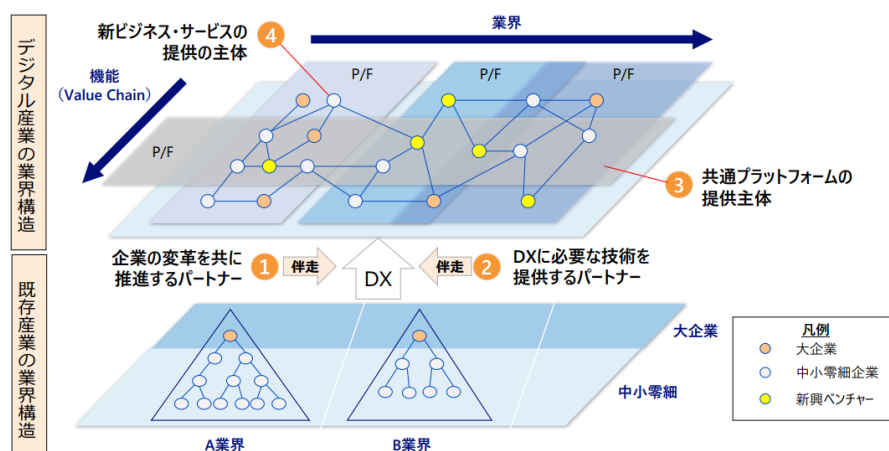


図 4.3 既存産業の業界構造とデジタル産業の業界構造

出所) デジタル産業の創出に向けた研究会、DX レポート 2.1（概要）、2021 年 8 月

そのうえで、デジタル産業を構成する企業は、その特色を踏まえて「①企業の変革を共に推進するパートナー」、「②DXに必要な技術を提供するパートナー」、「③共通プラットフォームの提供主体」、「④新ビジネス・サービスの提供主体」に類型化できるとされる。

以上

国内一般産業や海外原子力産業におけるデジタル技術導入に係る課題の概要 (文献調査)

1 文献調査の目的

今後デジタル技術利活用を促進する上で想定される課題を明らかにするために、国内外におけるデジタル技術利活用に当たって顕在化している（若しくは今後顕在化すると想定される）、課題を抽出・整理することを目的に、文献調査を実施した。

なお、この課題には技術上の課題のみならず、制度上の課題も含まれるものとする。

2 文献調査の実施方法

2.1 調査対象文献

日本国内の原子力発電所へのデジタル技術導入に当たって想定される課題仮説を設定するにあたっては、原子力特有の視点のみならず、デジタル技術を導入しようとする国・地域の制度（ルール）的な視点も重要となるため、これら 2 つの視点からの調査を実施する。

【原子力特有の視点】

国際的な原子力発電所におけるデジタル技術利活用に当たっての課題意識を把握するために、それらについての言及が認められる以下の海外レポート等を中心に調査を実施する。

- ・ NRC, Role of Artificial Intelligence Tools in U.S. Commercial Nuclear Power Operations
- ・ Nuclear Innovation 2050 (An NEA initiative to accelerate R&D and market deployment of innovative nuclear fission technologies to contribute to a sustainable energy future)

【日本の制度・ルール面での視点】

日本国内のプラント産業（非原子力産業）において顕在化しつつあるデジタル技術利活用に当たっての課題意識を把握するために、それらについての言及が認められる以下の会議に係るレポート等についても調査を実施する。

- ・ Connected Industries／スマート保安に係る議論
 - － データの利用に関する契約ガイドライン産業保安版第 2 版
 - － IoT セキュリティ対応マニュアル産業保安版（第 2 版）
- ・ 石油コンビナート等災害防止 3 省連絡会議での AI に係る議論
 - － プラント保安分野 AI 信頼性評価ガイドライン
 - － プラントにおける先進的 AI 事例集

2.2 調査内容

前述の調査対象文献を中心に、デジタル技術利活用によるデジタル技術を導入するうえで顕在化しつつある課題意識等について抽出・整理を行う。ここで、課題意識には国際的な技術課題のみならず、日本国内へのデジタル技術導入に向けての制度・ルール面での課題を含むものとする。

また、課題意識への対処方針（解決策）についても言及がある場合は、合わせて抽出・整理を行う。

3 文献調査結果

3.1 「Role of Artificial Intelligence Tools in U.S. Commercial Nuclear Power Operations」の概要

米国原子力規制委員会は、産業界から商用原子力発電所に関する AI ツールの役割に係る意見を募集した。米国原子力産業界の AI/ML ツール導入に対する課題意識（概要）を表 3.1 に

示す。

表 3.1 米国原子力産業界の AI/ML ツールに対する意見（概要）

課題意識区分	原子力産業組織の意見 (NEI/米国事業者/メーカ（フラマトム）)	AI ベンダー意見
データ・セキュリティ	具体的な懸念が多く指摘されており、データ・セキュリティおよびガバナンス・プロトコル（データ管理手続き）の必要性や、技術的にはデータ分類やネットワークのセキュリティ要件の標準化について指摘。	—
AI/ML に係る知識レベル (人材獲得・育成)	- 米国原子力産業の AI/ML の技術導入段階は、5 段階評価の下から 2,3 番目。 - 規制の存在がイノベーションを阻害する原因との意見有。	- 原子力業界の文化的保守性がイノベーションの課題と指摘。 - AI/ML の専門知識でなく、ビジネスアナリシス等の隣接スキルが成熟していないと指摘。
コストベネフィット	AI/ML の導入には大きな投資が必要である一方、その効果が定量的に示しがたい	文化的保守性や規制の制約から、開発コストが増加傾向と指摘。
開発・実装の体制	NEI からは業界全体での取り組みの重要性を指摘。	—

デジタル技術導入障壁として、技術面・非技術面の視点で分析すると、技術面では、「データ・セキュリティ」に係る懸念、データ分類やネットワークのセキュリティ要件の標準化の必要性について多く指摘があった。また、技術導入するための前提として、それらの技術を理解する人材の必要性についても指摘されており、特に AI ベンダーからは「AI/ML の専門知識でなく、ビジネスアナリシス等の隣接スキルが成熟していない」と指摘されている。

さらに非技術面では、事業者からは「AI/ML の導入には大きな投資が必要である一方、その効果が定量的に示しがたいこと」、AI ベンダーからは「原子力産業の文化的保守性や規制の制約」が AI/ML ツールの開発コストは増加傾向となっているとの指摘もあり、これは原子力産業特有の制度・商習慣上の導入障壁として考えられる。

このように、「技術面での導入障壁」としてデータ・セキュリティやデジタル人材の確保、「非技術面での導入障壁」として、コストベネフィット、文化的保守性や規制の制約が米国原子力産業では課題として指摘されており、対処方針として、業界団体（NEI）は業界全体での取り組みの重要性を主張している。

3.2 「Nuclear Innovation 2050 (An NEA initiative to accelerate R&D and market deployment of innovative nuclear fission technologies to contribute to a sustainable energy future)」の概要

本プロジェクトは NEA が原子力産業への革新的技術導入のイニシアチブをとることを目的としている。その中で、デジタル技術はイノベーションの一つとして期待されている。

【原子力産業へのイノベーションの必要性】

原子力産業は 20 世紀から電力供給において重要な役割を担っている。さらに、世界的に脱炭素化が進められているなかで、低炭素エネルギーミックスを構成するうえで原子力の重要性は高まることが予想される。一方で、エネルギー政策を決定するうえで重要な観点として「価格」「エネルギー供給の安定性」がある。原子力産業においても、他エネルギーとの競争力を維持するために更なる向上が求められるが、ここ 30 年程度大きな技術革新がないという現状がある。

そこでイノベーションによって、高いレベルでの安全性を維持しながら安価に電力を提供することによって、将来のエネルギー市場で競争できる原子力技術の開発が期待される。

原子力におけるイノベーションとして、他産業で実装されている技術の導入を加速させること、特に実証を通して導入の障壁を克服するための技術的解決策を検討することに取り組むとしている。

【デジタル技術の活用】

原子力で期待されるイノベーション技術のなかで、デジタル技術は重要な要素の1つに挙げられている。

デジタル技術の活用方法としては、ビッグデータ、ディープラーニング、人工知能技術を活用したデータの収集、管理、利用方法を改善することによる運用保守及び作業プロセスの最適化が挙げられている。

なお、本プロジェクトでの議論をもとに、2021年にNEAとKAERI・KNSが主催となって全4回のウェビナーが開催された。特に、原子力への革新的な技術の導入として、データイノベーション・通信技術等のデジタル技術について議論された第2~4回の概要を以下に示す。

- 第2回 Using disruptive technology for nuclear safety applications

革新的な技術として、原子力運転の改善と原子力安全の継続的な強化のためのデータ駆動技術の適用と他産業分野におけるデジタル技術の導入から得た教訓について議論がなされた。

- 第3回 Data Innovations for the Future of Nuclear Safety

データ駆動型技術に光を当て、AI、AR、ビッグデータ、無線通信、IoTなどのデータイノベーションの見通しに焦点を当てて議論された。また、他産業分野におけるデータイノベーション技術の導入から学んだ教訓が検討された。

原子力分野におけるデータイノベーション利用の増加は効率性・安全性の向上などの利点があるが、他産業で導入されている技術を原子力に導入する際には原子力特有の課題が生じるため、対応の必要性が提起されている。

- 第4回 Cyber security enhancements for nuclear safety applications

前回のサイバーセキュリティ強化に関して焦点を当て、データ共有技術の利用や、原子力セクターにおける接続性向上により生じるサイバーセキュリティリスクについて議論がなされた。また、サイバーセキュリティに関する規制の視点等の課題を取り上げて議論が行われた。議論内容の詳細は公開されておらず、概要の紹介にとどまっている。

本ウェビナーでは、他産業では導入事例があるが、原子力産業は他産業と異なる独自性を有しているため、原子力特有の課題に取り組む必要があるとされている。

また、原子力産業にデジタル技術を導入する際のコストは他産業の場合と比べて高くなるとされており、障壁となり得ることが言及されている。

3.3 「Connected Industries／スマート保安に係る議論」の概要

第4次産業革命が進展し、データが価値の源泉となる中、企業におけるデータ共有・利活用のさらなる進展が期待されている。

【産業全体の課題意識】

一方、データやAIをめぐる契約については、実務の蓄積が乏しいことや、当事者・関係者間での認識・理解のギャップ（データ所有権等）といった課題が認められ、当事者・関係者間で共通の土台がないことによる多大な契約コストが発生する恐れや、データの保護や利益配分等に関して適切な内容が盛り込まれないまま契約が締結されることが懸念されている。

また、データの利活用が必ずしも進展していない要因として、事業者の過剰な囲い込み意識やプライバシー保護の懸念等が背景にあると指摘されている。データは無体物であって民法上の所有権の対象ではなく、契約等私的自治の下で利活用に使われるものである。しかし、このようなデータの性質を踏まえて、適正かつ公平に契約でそうした定めがなされる例は必ずしも定着しておらず、実務上も手探りの状態にあり、とりわけ契約におけるデータの利用権限の明確化が急務となっている。

【産業保安分野の課題意識】

我が国の産業保安分野においても同様の課題意識が指摘されている。

これまで、「企業間でのデータ流通が十分には進んでいない」という課題も指摘されてきた。元来、プラントデータが、生産プロセス等各社固有の競争力に関わる情報やライセンス契約等による開示不可能な機密情報等、競争領域のデータを含むことが多いことから、プラント事業者がデータの提供に慎重な姿勢であったことがその背景にある。さらに、協調領域のデータであったとしても外部へのデータ提供には相応の作業を要するため、プラント事業者にとっては提供のための明確なインセンティブを見出すことができれば提供は困難であるということも指摘されており、様々な立場に配慮したデータ利用における事業環境整備が求められてきた。

さらに、これまでインターネット等ネットワークに接続していなかった機器が通信機能を持ち、ネットワークに接続する IoT (Internet of Things) が導入されつつあるが、「産業保安分野での IoT の活用においては、ネットワークを経由したプラントにおける「モノ」に影響を与えるサイバー攻撃の脅威が増大することが懸念」されている。プラントを構成する機器には長期利用されるものも多いが、IoT で利用される機器には耐用年数が短いものや処理能力に制約があるものがあり、これらにより構成される IoT システムは、プラントにおける産業保安の要件を踏まえつつ、IoT の特徴を考慮したセキュリティ対策の検討が必要であると指摘されている。

【産業保安分野の対処方針】

これらの課題への対処として、産業保安分野に特有の留意事項に配慮しながら、産業保安分野に特化したユースケースを設定しデータの利用上の留意点を説明した「データの利用に関する契約ガイドライン産業保安版（第2版）」や、産業保安において IoT を活用する際に、外部接続から制御システムを守り、プラントデータの信頼性を高めるためのセキュリティの考え方をまとめた「IoT セキュリティ対応マニュアル産業保安版（第2版）」が整備されている。

これらの課題意識は原子力でも同様な課題となることが想定され、その対処方針として、産業保安分野で実施された対応は参考になり得る。

3.4 「石油コンビナート等災害防止3省連絡会議での AI に係る議論」の概要

石油・化学プラントは人手不足対策や事故抑制のために AI を用いるニーズは強いものの、高度な安全性と説明責任が求められるため、AI の活用が進んでいなかった。そのため、経済産業省、総務省、厚生労働省が開催する「石油コンビナート等災害防止3省連絡会議」において、プラント保安分野における AI を導入する際の課題とその解決に資するための検討が行われた。

石油コンビナート等災害防止3省連絡会議の検討においては、AI を活用することでプラント保安を飛躍的に高度化できる可能性があるが、以下の課題意識から AI 導入は限定的であるとしている。

- ・ 【AI 信頼性評価上の課題】AI は保安力・生産性を飛躍的に高める可能性を有している

が、AI が安全性や生産性向上のために期待通りの品質を果たすこと（＝信頼性）を評価する体系が整備されていなかった。特に安全性が重要視されるプラント保安分野において、導入が進まない大きな原因の1つとなっている。

- ・ 【AI プロジェクト推進上の課題】AI は保安力・生産性を飛躍的に高める可能性を有しているが、AI プロジェクトを推進するには困難が伴う。特に、①AI によってどのような効果が得られるか分からないため投資に踏み切れない、②AI 導入にあたって直面する課題（AI 人材不足、現場の保全員の AI 理解不足等）の乗り越え方がわからない、といった障壁が認められる。

これらの課題意識に対応する形で、信頼性の高い AI の実装を進めるため、プラント保安分野に特化して AI の信頼性を適切に管理する方法として「プラント保安分野 AI 信頼性評価ガイドライン」が整備された。

また、プラント事業者、AI 開発事業者等の 12 の先進的な AI 導入成功事例により①AI の導入成果、②AI 導入における典型的な課題の克服方法を具体的に示した「プラントにおける先進的 AI 事例集」が整備された。

このように、「技術面での導入障壁」として、AI 信頼性評価手法が挙げられており、その対処として、「プラント保安分野 AI 信頼性評価ガイドライン」を整備するという点は参考となり得る。また米国原子力産業の例でも指摘された通り、「商習慣上の導入障壁」として、AI プロジェクト推進上の課題コストベネフィット定量化が困難なことや人材不足（力量不足）が挙げられており、その対処として、「典型的な課題の克服方法を具体的に示す事例集」を整備するという点も参考になり得る。

4 まとめ

以上の調査結果に基づき、デジタル技術利活用によるデジタル技術を導入するうえで顕在化しつつある課題意識等について抽出・整理を行った（表 4.1,表 4.2 参照）

表 4.1 調査結果サマリ（技術的課題）

No.	導入障壁（課題意識）	他産業等での対処状況	出所
1	サイバーセキュリティ （データ・セキュリティを含む）	・ 他産業での水準よりも高いサイバーセキュリティの必要性が指摘されているが、文献調査からは具体的な対処方針は確認できず ・ データ分類やネットワークのセキュリティ要件の標準化の必要性が指摘されているが、具体的な取り組みは確認できず。	3.1 節
2	IoT の特徴を考慮したセキュリティ対策	・ 産業保安において IoT を活用する際に、外部接続から制御システムを守り、プラントデータの信頼性を高めるためのセキュリティの考え方をまとめた「IoT セキュリティ対応マニュアル産業保安版（第 2 版）」が整備されている。	3.3 節
3	AI の信頼性評価	・ 信頼性の高い AI の実装を進めるため、プラント保安分野に特化して AI の信頼性を適切に管理する方法として「プラント保安分野 AI 信頼性評価ガイドライン」が整備されている。	3.4 節
4	運用保守及び作業プロセス全体の最適化のための、	・ 文献内では「データ駆動型技術¹を活用したデータの収集、管理、利用方法を改善することによる運用保守	3.2 節

¹データを元に次のアクションを決めたり、意思決定を行ったりすることを「データ駆動型アプローチ」という。データ駆動型技術において、データ分析の方法だけでなくデータ収集の方法から考察の対象となる。

	「データの収集～管理～利用全体の技術開発」の必要性	及び作業プロセスの最適化が必要」との問題提起にとどまっている。	
5	他産業で導入されている技術の放射線環境下の影響の考慮	ウェビナー内では問題提起にとどまっている。現時点では耐放射線性に焦点を当てた試験等はされていないと推定される。	3.2 節

表 4.2 調査結果サマリ（非技術的課題）

No.	導入障壁（課題意識）	他産業等での対処状況	出所
1	業界全体の取組みの必要性	業界団体（NEI）は業界全体での取組みの重要性を指摘	3.1 節
2	文化的保守性や規制の制約（マインド）	- ー（米国原子力産業では、市場競争の激化により採算性の確保が極めて重要な課題となっており、各社プロアクティブにコスト低減に資する技術導入をしているとの指摘もあるが、他産業に比べると AI 等の技術導入は遅れているとされる） - 原子力サプライチェーン全体での国際的な協力を期待。 - 安全系の計装・制御システムにおいて、規制と業界との調整により、規制のガイダンスの改訂等の規制の負担軽減を行う。	3.1 節 3.3 節
3	デジタル技術を理解する人材の確保（AI 人材不足、現場の保全員の AI 理解不足等）	- 新規人材採用・専門組織の設置、若しくは AI ベンダーとの協業にて対処する場合がある。 - AI/ML の専門知識のみならず、ビジネスアナリシス等の隣接スキルの必要性が指摘されているが、具体的取組みは確認できず。 - なお日本国内においては、課題への対処として「典型的な課題の克服方法を具体的に示す事例集」が整備されている	3.1 節 3.3 節 3.4 節
4	企業におけるデータ共有・利活用（企業間でのデータ流通含む）	- 産業保安分野に特有の留意事項に配慮しながら、産業保安分野に特化したユースケースを設定しデータの利用上の留意点を説明した「データの利用に関する契約ガイドライン産業保安版（第 2 版）」が整備されている。 - また、データの利用権限に関する契約ガイドラインも整備されている。	3.3 節
5	コストベネフィットの不透明さ	「典型的な課題の克服方法を具体的に示す事例集」が整備され、定性的に便益を示している	3.1 節 3.4 節

以上

海外原子力産業における無線通信技術の導入実績の概要 (文献調査)

1 文献調査の目的

原子力発電所内の通信環境の脆弱性や利用可能なデータの少なさ等が指摘されるなど、特にデータ収集・デジタルデータ伝送に係る課題が認められている。これを踏まえ、国内の原子力発電所内への無線通信技術の導入可能性（データ収集・デジタルデータ伝送に係る課題への具体的対応策）を模索することを目的に、原子力発電所における国際的な無線通信技術利用に係る考え方や、主に米国原子力発電所における無線通信技術の導入状況の文献調査を実施した。

2 文献調査の実施方法

海外の無線通信やデバイスの利用に関する調査については、以下の文献を主な対象とし、海外の無線通信に関する要求事項を調査するとともに、無線通信やデバイスの利用事例を調査し、海外の無線通信やデバイスの制限及び利用状況を整理する。

- IEC 62988:2018, Nuclear power plants - Instrumentation and control systems important to safety - Selection and use of wireless devices.
- EPRI JOURNAL, A Wireless Eye in Nuclear Power Plant (July 25, 2017)
- EPRI JOURNAL, PICKERING GOES WIRELESS (January 3, 2021)
- IAEA, Application of Wireless Technologies in Nuclear Power Plant Instrumentation and Control Systems.

3 文献調査結果

3.1 海外の無線通信に関する要求事項

IEC 62988:2018 は、国際電気標準会議（IEC）が技術報告書 IEC/TR 62918:2014 に基づき制定したものであり、タイトルのとおり、原子力発電プラントにおける安全上重要な計測制御システムの無線センサー等の選定と利用についての要求事項が提示されている。

表 3.1、表 3.2 に要求事項を整理したが、国際的にはカテゴリ C の機能（安全性の維持に直接寄与しない機能）は無線機器を利用しても良いが、より安全上重要な機能とは物理的に隔離することが求められる。

表 3.1 IEC 62988:2018 の主な要求事項

分類	要求事項
基本的事項	• 無線機器の使用は、IEC 61226 に準拠したカテゴリ C 機能（表 4.2 参照）を実行するシステムに制限する。 • 無線機器を使用した I&C システムは、カテゴリ A・B（表 4.2 参照）に属する I&C システムと物理的にも隔離する。 • 無線通信は、IEC62645:2019 に定めるセキュリティレベルの S1 及び S2 に属するシステムには適用しない。
無線アプリケーションシステム	• ネットワーク構成の決定に際しては、無線システムのアプリケーションと機能を考慮する。 • ネットワークは、負荷分散ルーティングアルゴリズムを実装し、ネットワーク負荷が情報の内容に依存しないようにするべき。

	- 通信速度に関して、通常速度目標と遅延時の許容範囲を設定しておく。 - 無線ネットワークの異常の検出と修正のための監視方法を設定する。 - ネットワーク及び接続デバイスの状態、ネットワークログを監視できるようにしておくとともに、パケット損失の許容率を定め、送信失敗データについては再送の可否を決めておく。 - 必要な場合は、無線機器は電池駆動としてよい。但し、アプリケーションの最小電池容量を設定するとともに、電池を交換できるようにシステムを設計する。 - 無線機器には、改ざんや損傷から保護されるための対処を講じる。また、重要な無線システムについては、意図的な電磁的干渉からの保護を検討する。
無線機器	- 無線機器には、機器の開発に適切な品質保証プログラムが使用された証拠が必要。 - 無線機器の選定にあたっては、性能特性および機能は、システム要件を満たすのに適しているかどうかを評価する。 - 無線機器に対して、電源・電池の状態、無線信号の質、データ転送速度、プロセッサの負荷・温度、通信記録を監視できるように対処しておく。 - 無線プロトコルは文書化されていること。
電波放射	- 無線機器の実装前に、電磁両立性に関する影響分析を実施する。 - 固定無線機器は、安全上重要な他機器との設置距離を定め、これを遵守して設置する。 - 移動無線機器も、安全上重要な他機器との距離を定め、これを遵守するよう管理する。 - アクセスポイントの場所は、電波干渉調査を踏まえて定める。アプリケーションに対する通信システムの保護要求事項を定める。 - 無線機器の周波数、電力レベル、スペクトル使用状況の監視を含め、スペクトル管理プログラムを文書化し、これに基づいて無線機器を管理する。 - どの機器も、利用場所全てで必要な情報全てに即時的にアクセスできること。
サイバーセキュリティ	- 無線通信は、原子炉のセキュリティ計画に合致した暗号化及び認証プロセスを使用する。 - セキュリティ監査のために、無線機器のメンテナンスデータ及び無線システムのプロセスデータを記録し、利用できるようにしておく。 - セキュリティ計画の作成に当たっては、ネットワーク各機器の接続形態を考慮する。 - 無線ネットワークを有線ネットワークに接続する場合は、フィルタリング機器を設置する。 - セキュリティ担当者は、接続の失敗や伝送遅延の確認、新しい機器の接続、機器の出力電力や放電率の監視を行う。
その他	- ハードウェアは IEC 60987:2007 の 5.4 及び IEC/IEEE60780-323、ソフトウェアは IEC 62138（カテゴリ C 機能用）の要件を満たす必要がある。 - 無線ネットワークの起動・シャットダウン、新機器の導入、欠陥機器の交換については、手順を文書化する。

出所：IEC 62988:2018 “Nuclear Power Plants - Instrumentation and Control Systems Important to Safety - Selection and Use of Wireless Devices”（2018）を基に三菱総合研究所作成

表 3.2 原子力発電所の安全上重要な機能の分類

カテゴリ	求められる機能	例
A	予測される事故が大規模な問題となることを防ぐとともに、原子発電所の安全性の達成や維持において主要な役割を果たす機能	- 原子炉の停止と臨界の回避 - 放射能汚染物の隔離 - 作業員への対応情報の提供 - 放熱器への熱伝導の減衰 - 事故時原子炉自動停止の支援
B	- カテゴリ A の機能を補完する機能 - 制御状態における動作に必要な機能 - 予測される事故が中規模の問題となることを防ぎ、制御状態に復帰するために必要な機能	- 使用済燃料プールの冷却 - 主冷却システムの分離 - 事故後の運転システム - 故障時の燃料取扱いの監視・制御 - 定常時原子炉自動停止の支援 - 事故時のプラントプロセス制御機能
C	原子発電所の安全性の達成や維持において補助的・間接的な役割を果たす機能	- 通常運転時のプロセス制御機能 - 事故後の各システムと機器の監視・制御 (問題発生の警告と放射性物質の放出の低減を含む) - 内部リスクの表出の回避 - 放射線放出や作業員被曝の可能性がある操作の通知 - 自然災害等の危険性の警告 - 緊急時対応計画実施の通知

出所：IEC 61226:2020 “Nuclear Power Plants - Instrumentation, Control and Electrical Power Systems Important to Safety - Categorization of Functions and Classification of Systems”を基に三菱総合研究所作成

3.2 米国における無線通信技術の研究開発状況及び導入実績

本節では、米国の無線通信技術の研究開発や導入状況の調査結果を整理した。

3.2.1 Wi-Fi ネットワークの導入（アーカンソー・ワン原子力発電所）

エンタジー社のアーカンソー・ワン原子力発電所（PWR）では、音声及びデータ通信用の Wi-Fi ネットワークが構築されている。2011 年に同発電所は、無線設備のサプライヤーと、無線技術の利用範囲を原子炉建屋内部にまで拡張するための研究開発を共同で実施した。原子炉建屋内部には、複数の無線振動監視システムと Wi-Fi アクセスポイントが設置された。エンジニアリングワークステーションに対して、1 日 2 回、4 カ所の格納容器冷却ファンの振動に関するデータを伝送するシステムを構築し、同発電所の 2 基両方に活用された。

新しい無線モニタリングシステムの設置により、メンテナンス作業員はより効率的な設備状態の監視が可能となり、それにより直前の故障の検知やメンテナンス活動の立案のために十分な時間を割くことが可能となった（図 3.1 参照）。

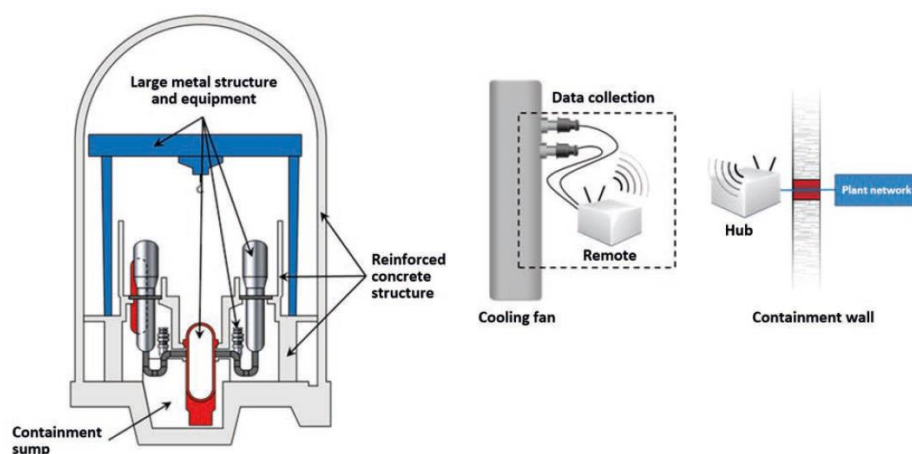


図 3.1 アーカンソー・ワン原子力発電所の Wi-Fi ネットワーク

出所) IAEA, Application of Wireless Technologies in Nuclear Power Plant Instrumentation and Control Systems.

3.2.2 IEEE 802.11 に準拠したワイヤレス技術の導入（コマンチェピーク原子力発電所）

ルミナント社が所有・運転するコマンチェピーク原子力発電所（PWR）では、米国で原子力発電所に無線技術が導入されるようになった 2000 年代の初頭から、他の発電所に先駆けて無線技術が用いられ、運転コストの低減と信頼性の向上に貢献している。同発電所では、合計 40 のセンサーを用いて、発電プロセスや設備の状態監視を行っている。

無線インフラは、無線アクセスポイントを連結する光学的バックボーンで構成され、無線機器も含め IEEE 802.11 に準拠している。同じインフラにおいて、音声やデータの通信、遠隔の動画監視・コントロールのための無線 LAN の接続も可能としている（図 3.2 参照）。

無線技術がなければ、作業員がデータを収集するためにプラントに赴く必要があるところ、無線インフラを利用することにより、コンピューターの前でデータを取得可能なため、一日最大 4 時間の業務時間が節約できると報告している。

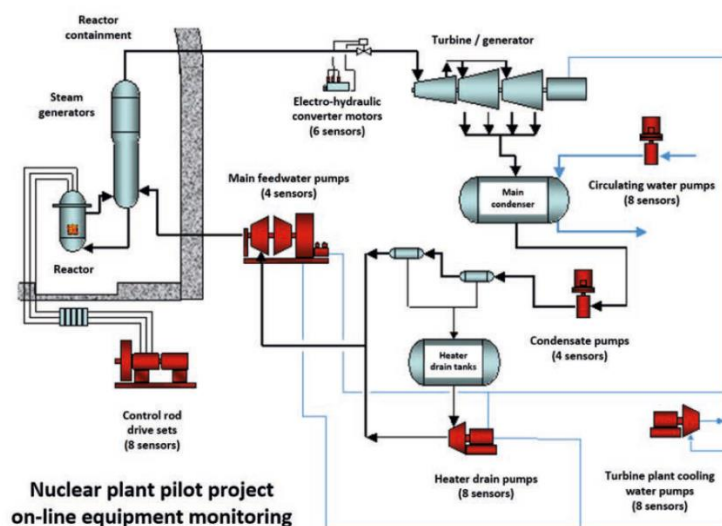


図 3.2 コマンチェピーク発電所の無線技術を用いた状態監視の系統

出所) IAEA, Application of Wireless Technologies in Nuclear Power Plant Instrumentation and Control Systems.

3.2.3 IEEE 802.15.4 に準拠したワイヤレスメッシュネットワークの導入（サンオノフレ原子力発電所）

サンオノフレ原子力発電所（PWR）では、無線技術を用いてモーター（発電機）の状

態を監視するシステムの導入可能性調査が実施された。モーター1 台の故障により、数日にわたって発電量が 20%低下するため、モーターの大規模な故障を回避する目的でリアルタイムのモーターの温度に関するデータの収集と分析が必要であった。

データの収集と分析には、新たな配線の敷設を避けられる、IEEE 802.15.4 に準拠したワイヤレスメッシュネットワークが選択された。

このシステムにより、プラントの運転者は即時的な対応を行うことが可能となり、プラントのライフサイクルを改善させつつコスト削減が可能となった。

3.2.4 EPRI のエンジニアリングガイドを活用した無線センサーネットワークの実証・導入（ピッカリング原子力発電所など）

オンタリオ・パワー・ジェネレーション社（OPG）は、EPRI の調査に基づき、ピッカリング原子力発電所でのパイロットプロジェクトの一環として、無線センサーネットワークを導入して試験を実施した。OPG 社にとっては、プラントの状態を継続的に監視し、分析と予知保全を行うことを目的としたプラント近代化に向けた重要な一歩となった。今後、センサーネットワークを大幅に拡大する予定で、これにより 36,000 時間の工数削減を見込んでいる。

OPG 社は、EPRI が実施した市販の無線センサーの調査¹をもとに、様々なオプションの機能や性能を検討した。OPG 社は EPRI のエンジニアリングガイド²を利用して、ピッカリング 5 号機の原子炉の 6 箇所に、計 12 個の無線センサーを設置した。4 か月間の試験の結果、センサーが機器の動作に関する情報を確実に収集・伝送でき、センサーがピッカリングの重要な機器の誤作動を引き起こさないことを実証した。

OPG 社はピッカリングに監視・診断（M&D）センターを設置し、アナリストが高度なパターン認識を用いてセンサーデータを分析し、機器が想定通りに動作しているか、異常が発生しているかを特定している。現在、ピッカリングでは多くの有線センサーを使用しているが、将来的にはピッカリング原子力発電所とダーリントン原子力発電所の機器を継続的に監視するために十分な数の無線センサーを配備し、M&D センターで保守・運用に関する知見を得ることを目指している。このためにはプラント内をより広くカバーして、より多くのデータの収取が必要となるため、有線のセンサーに比べてわずかなコストでデータを伝送可能な無線センサーが必要となった。OPG 社では、これらのセンサーを追加することで、オペレーション、メンテナンス、エンジニアリングの作業時間を約 36,000 時間短縮できると見込んでいる。

3.2.5 分散型アンテナシステムの実証・導入（クリスタルリバー原子力発電所・カトーバ原子力発電所など）

これまで米国の原子力発電所では、通信は従来の携帯型無線機、データは有線センサーに頼ってきた。現在では、Wi-Fi ネットワークの導入を検討しているプラントもあるが、プラントのインフラは非常に複雑であり、また、コンクリート壁の厚さから信号が伝わりにくく、複数のアクセスポイントを設置しても信号強度が急速に低下するなどの課題が認められていた。このため、EPRI では、LTE ネットワークと分散型アンテナシステムを利用して、電波を増幅・分散させる方法を研究している。このようなシステムは、大規模ホテル・地下鉄・トンネルなどで成功しているように、コスト効率の高い無線ソリューションとなり得ることが期待されている。

¹ Wireless Sensor Survey and General Specification

² Online Monitoring – Engineering Change Package Content for a Distributed Antenna System and Wireless Vibration Sensors

分散型アンテナシステムは、従来の Wi-Fi に比べて低い周波数で動作するため、より広く伝搬し、より広範囲に侵入することができる。これは、壁の厚さが厚く、鉄筋で埋め尽くされている原子力発電所では重要なポイントである。

さらに、漏えい同軸ケーブル（slotted coaxial cables）³を活用することで、分散型アンテナシステムを強化することが期待されている。このケーブルは、機器の周りや従来の無線信号が届かない領域にも通することができる。

分散型アンテナシステムの実現可能性については、2 つの廃止措置中の原子力発電所で検証された。補助建屋と格納容器において試験を実施した結果、より低い周波数を使用することで、少ない設備でより多くのカバー率を実現することができ、プラントの設計や構成が異なる原子力施設のニーズに対応できる柔軟性と信頼性を備えていることが確認された（図 3.3 参照）。

DISTRIBUTED ANTENNA SYSTEMS: BETTER WIRELESS COVERAGE WITH LOWER FREQUENCY

EPRI's evaluation of a distributed antenna system at the Crystal River nuclear plant revealed that lower frequency wireless signals penetrate power plant structures significantly better than higher frequency signals. This graphic compares signal coverage at 730 megahertz (left) with coverage at 2130 megahertz (right). The radiating cable

propagates the signal. Yellow and green areas have higher signal strength while red and blue areas have weaker strength. Distributed antenna systems have the potential to support automated equipment monitoring, voice communications, and other advanced digital technologies that the nuclear industry is adopting.



図 3.3 分散型アンテナシステムの実現可能性の検証（クリスタルリバー原子力発電所）
出所）EPRI JOURNAL, A Wireless Eye in Nuclear Power Plant (July 25, 2017)

また、カトーバ原子力発電所では、デューク・エナジー社がこの無線センサー技術を導入し、データをノースカロライナ州シャーロットに集約している。デューク・エナジー社は、この技術を使って機器の性能と健全性を密に監視するとともに、保守・点検作業の頻度を減らしている。

4 まとめ

国内の原子力発電所内への無線通信技術の導入可能性（データ収集・デジタルデータ伝送に係る課題への具体的対応策）を模索するために、原子力発電所における国際的な無線通信技術利用に係る考え方や、主に米国原子力発電所における無線通信技術の導入状況を把握することを目的として、文献調査を実施した。

結果、米国の導入事例（実績）はいずれも、効率的な状態監視と保全最適化によるコストダウンが導入目的であった。そして、状態監視高度化のために追加的に設備にセンサーを設置することが

³ 漏洩同軸ケーブルとは、同軸ケーブルの外部導体にスロットと呼ばれる孔を周期的に設けて、その孔をアンテナとして無線通信を行うことのできる同軸ケーブル型のアンテナである（伝送路とアンテナとの両方の機能をもつ特殊なアンテナ）。

必要であり、センサー追加設置に当たり、有線センサーに比べてわずかなコストで多くのデータを伝送可能な無線センサー・無線通信が採用されていた。なお、これらの実績は、安全上重要な機能を有する I&C に無線通信技術が導入されているわけではなく、さらに安全上の重要度が比較的低いと思われる設備に、制御系とは分離された形でセンサーが設置されている傾向が確認できた。

今後の Society5.0（デジタル化の進展）を踏まえると、常時データ収集・伝送・蓄積・分析・活用できる環境の構築は重要であると考えられる。一方、国内の原子力発電所では現時点で収集可能なデータだけでは分析に有用なデータは少なく、今後、追加的にセンサーを設置する必要性が生じる可能性がある。その際、無線通信技術の活用に注目が集まる可能性がある。

なお、分析結果は事務所だけでなく現場においても活用される可能性がある。米国事例で認められたような原子力発電所の現場から外部へデータを伝送するだけでなく、作業員などの人が持ち込んだデバイスに外部からデータを伝送する可能性も考えられ、国内においても無線通信設備の強化が必要となる可能性がある。

以上

共通的な技術基盤・システムの提案

2022年3月

原子力デジタル産業基盤構想に係る検討会合

1. 共通的な技術基盤・システムの提案

1.1. はじめに

経済産業省は、第4次産業革命による技術の革新を踏まえ Society5.0 を実現していくために「Connected Industries」の概念を提唱し、人工知能（AI）等を取り入れることによる産業競争力の強化や経済の健全な発展を意図している。しかし、我が国の原子力産業へのデジタル技術活用は米国原子力産業・国内他産業の取組みに比べて“遅れている”ことが関連学会等で指摘されている。この原因のひとつとして、厳しい規制基準（設置許可基準・技術基準）の存在などにより保守的志向が強くなってしまい、AI をはじめとした新技術導入に慎重になりすぎているのではないかと懸念される。また、福島第一原子力発電所事故から10年以上が経った今でも再稼働は遅々として進まずほとんどの労力を再稼働獲得に割かねばならない状況では、新規技術導入に取り組む余裕がなかったであろうことも容易に想像できる。さらにはこれ以外にも様々な要因が重なり合って、結果としてデジタル技術や AI という新規領域に対する心理的ハードルを原子力が築いてしまったように思えて仕方ない。

しかし、そのハードルは本当に高いのであろうか。AI モデルの開発自体はたしかに少々難しいかもしれない。ここ数年の関連学術論文の著者の多くは海外であり、実は原子力のみならず日本そのものが AI 研究に対して世界に後れをとっている。しかし、原子力に必要な AI は、モデル開発だけではない。モデルの開発と、それを組み込んだシステムの開発は別モノなのである。

AI を組み込んだシステム開発はどのようにすればよいのか。そのシステムに求められる「入力データ」と「出力データ」が定まっていれば答えは容易である。現在では典型的なものだけでも画像：物体認識、セグメンテーション、姿勢、顔、表情、文字、音：音声認識、音源解析、回帰：時系列データ、未来予測、言語：分類、翻訳、応答、執筆、予測、などさまざまな AI モデルが開発されている。しかもその多くはネット上で公開され、なかには無償のものも少なくない。既にツールは存在しており、これらを部品にして必要なシステムを組み立てればよい。

例えば有限要素法(FEM)と比較して考える。原子力分野では熱流動解析や構造解析のために FEM が多用されてきた。FEM そのものの性能向上を目指す研究と同時に、汎用 FEM コードを要素手法としてプラントシミュレーションや耐震解析のためのシステムを構築することも、原子力にとって重要な研究であることは理解しやすい。AI システム開発もこれと同様と考えればよい。さらに、上記のように最新モデルがネット上でダウンロード可能という点であることに加え、トラブル対策やサンプルコードなど多くのアドバイスも付随しているという点で、AI システム開発は FEM に比較しても恵まれた開発環境にあると言える。FEM を駆使してシステム開発をしていた時代に比べ、遥かに優しく便利になっているのが現代だ。

公開 AI モデルを見つけるのにポピュラーなものの一つが GitHub である。GitHub とは自分の作品（プログラムコードやデザインデータなど）を保存&公開できるウェブサービスであり、世界中の AI 研究者も自前で開発したモデルを GitHub で公開している。しかし、その使用には制限（使用料、商用利用不可など）が存在する場合もあり、注意が必要である。また、Google が提供しているクラウドコンピューティングサービスである Google Cloud Platform も一般的である。ここでは多様な AI プロダクトとサービスが提供されているため AI モデル構築と計算の両方を、自前の専用コンピュータを購入することなくプラットフォーム上で実施可能である。

このような恵まれた開発環境への知識が広がることで、原子力の AI に対する心理的ハードルが下がることに期待したい。その一助となるよう、1.2.ではまず、画像認識、回帰(Regression)モデルを用いた異常検知、自然言語処理のモデルの基礎を紹介する。1.3.節では、検討会合にて議論された原子力分野への適用が有効な AI 手法のうち、①状態監視・診断技術、②カメラを利用した現場計器の指示確認、③核セキュリティ・核物質防護に関する監視・出入管理を対象に、これらを実装する場合の簡単なフレームワーク、およびその中身となる AI モデルの例を紹介する。1.4.では、若手人材育成の観点からの原子力への AI 導入に対する期待と提言を記載する。

1.2. 深層学習の代表的なモデル

ここではまず、典型的な AI（深層学習）手法として物体検出、セグメンテーション、姿勢推定などの画像認識および回帰モデルを用いた異常検知について紹介した後、①状態監視・診断技術、②カメラを利用した現場計器の指示確認、③核セキュリティ・核物質防護に関する監視・出入管理のための AI フレームワークと要素 AI モデルを提案する。

(1) 画像認識(Image Recognition)

画像認識技術は画像分類・物体検出・セグメンテーションの 3 種類に分類できる。このうち画像分類は言葉通り画像を分類する手法であり、物体検出は画像内の物体の種類と位置を検出する手法、セグメンテーションとは画像の各ピクセルがどの物体の種類に属するかを検出する手法である。このうち物体検出モデルとセグメンテーションについて説明する。

i) 物体検出(Object Detection)

物体検出とは画像内の物体の種類と位置を検出する手法であり、複数種類の物体を 1 つの画像から検出することも可能である。R-CNN (Regional CNN) は深層学習を用いた物体検出の先駆けであり、

- 1) 画像を入力する
- 2) 画像の中から、物体が写っている領域の候補 (Region Proposal) を抽出する (約 2000 個)
- 3) CNN を用いてそれぞれの候補の特徴量を計算する
- 4) それぞれの領域に何が写っているか分類する

という手順で画像中の物体を検出する。当初の R-CNN は各項目で別々の学習が必要であったが、画像の入力から物体の検出まで一気に学習・推定ができる Faster R-CNN[1]が開発され、学習時間・メモリの消費量ともに大幅に削減された。

他にも有名なモデルとして YOLO [2]がある。YOLO とは「You Only Look Once(一度見るだけで良い)」という英文の頭文字をつなげて作られた造語で、処理速度は非常に早いという特徴を持ちリアルタイムでの検出が可能である。YOLO は、画像全体を予め分割されたグリッドごとで物体の種類と位置を求めるため R-CNN に比べると精度は落ちるものの、背景の誤検出を低くすることが可能である。

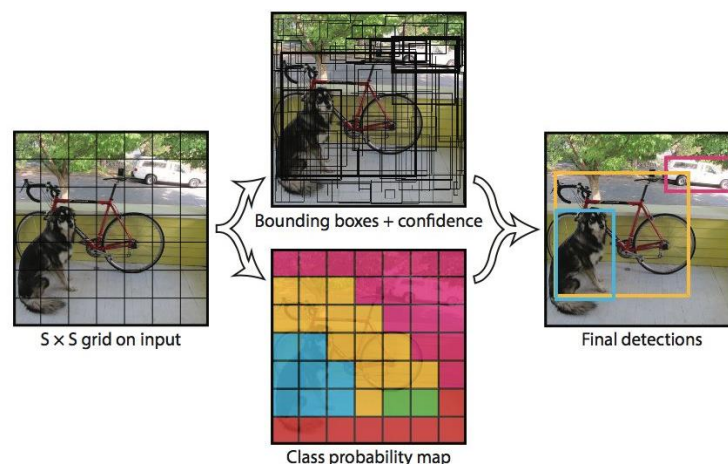


図 1. YOLO による物体認識の概要[2]

ii) セグメンテーション(Segmentation)

日本語で「区分」の意味をもつセグメンテーションは、ピクセル 1 つ 1 つに対しその属する物体をラベル付けする手法であり、セマンティック・セグメンテーション (Semantic Segmentation)、インスタント・

セグメンテーション (Instant Segmentation)、パノプティック・セグメンテーション (Panoptic Segmentation) の 3 種類がある。

セマンティック・セグメンテーションは画像上の全ピクセルを物体の種類に分類するため、同種類間で重なりがある場合には同一の領域として認識し、物体ごとの認識・カウントができない。代表的なモデルとして UNET[3]などがある。一方、インスタント・セグメンテーションは物体ごとの領域を分割し、かつ物体の種類を認識するため、重なりがある場合にも物体ごとの認識・カウントが可能である。ただし、RoI (Region of Interest) に対しセグメンテーションを行うため、全ピクセルに対してラベルを振ることは出来ない。代表的なモデルとして Mask R-CNN[4]などがある。

パノプティック・セグメンテーションは 2 つの手法の組み合わせであり、全てのピクセルにラベルが振られ、かつ数えられる物体に関しては個別の認識が可能である。代表的なモデルとして Panoptic Feature Pyramid Network[5]などがある。



図 2. セグメンテーションの種類。左：セマンティック、中：インスタンス、右：パノプティック

iii) 姿勢推定(Pose Estimation)

姿勢認識モデルとは、画像のデータからその画像データ内に写っている人を検知して、その人がどのような姿勢なのかを推定して関節にあたるジョイントと腕や足などの骨の部分にあたるボーンの状態を点と線を使って表示する技術である。GitHub でソースコードが公開されているモデルに HRNet(High Resolution Network)[6]や OpenPose[7]などがある。ここでは OpenPose について紹介する。

OpenPose とは Zhe Cao らが開発したライブラリで、畳み込みニューラルネットワーク (CNN) によって画像や静止画から画面上の人間の関節の位置を推定するライブラリであり、関節点の 2 次元座標を推定するモデルの中では有名なもののひとつである。複数人の関節を同時に検出できること、高速で動作することなどが特徴である。OpenPose での各段階における入出力の例を図 3 に示す。OpenPose は RGB 画像である(a)Input Image を最初の入力とし、まず CNN によって各関節がその座標に位置する信頼度を並べたマップ (b)Part Confidence Maps (信頼度マップ) と、隣接する関節をつなぐ骨格を表す 2 次元ベクトル場 (c) Part Affinity Fields, PAFs の 2 つを推定する。推定後、関節同士の結合である(d)Bipartite Matching を評価し、さらに貪欲法によって最終的に 2 次元上の人物ごとの関節の位置(e)Parsing Results を出力する。なお、OpenPose はあくまで 2 次元姿勢推定であり、現在、3 次元の姿勢を推定するモデルの開発研究が多く行われている。

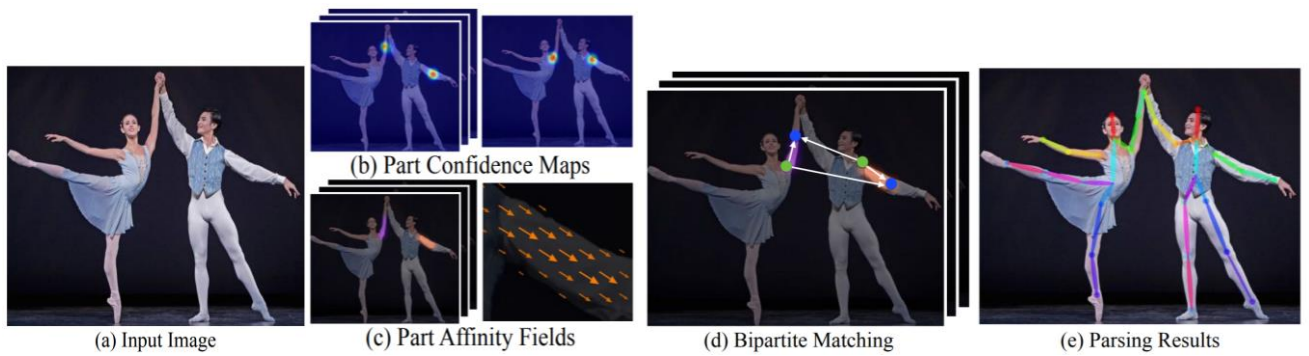


図 3. OpenPose での入出力の例 [7]

(2) 回帰(Regression)モデルを用いた異常検知

回帰問題とは、データの予測を行うことを意味し、回帰型ニューラルネットワークを RNN(Recurrent Neural Network)と呼ぶ。RNN は規則性やパターンがあるデータを学習することで、未知の時系列データが与えられたときに、そのデータの未来の状態を予測することができる。RNN の中で有名なモデルの一つが長・短期記憶ユニット(Long Short-Term Memory, LSTM)[8]などがある。

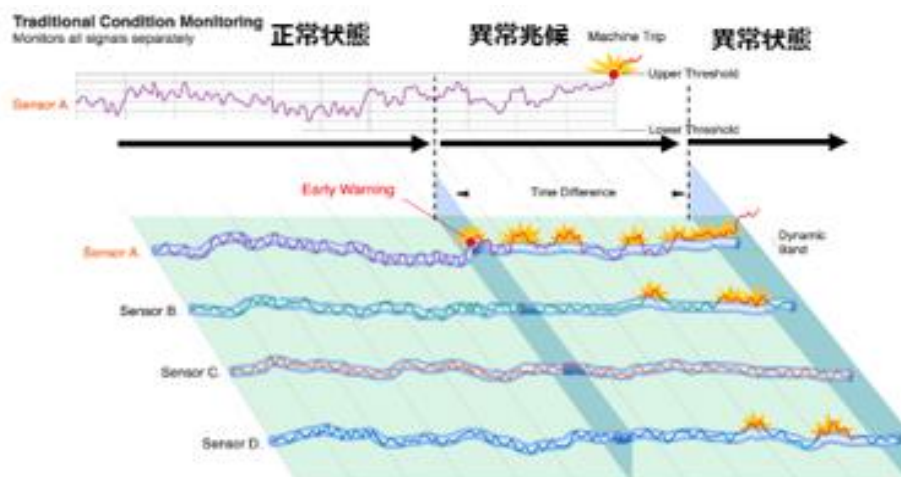


図 4. 異常検知の従来手法と深層学習による予測を用いた手法[6]

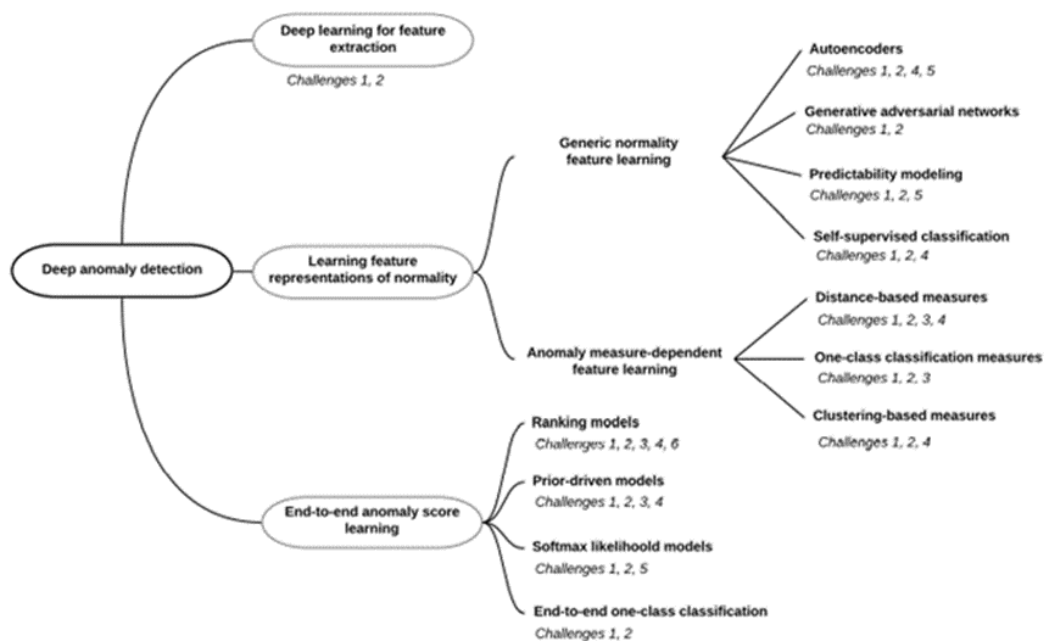


図 5. 深層学習を利用した異常検知手法の例[9]

回帰深層学習を原子力プラントに適用する研究で最も身近なものの一つが、プラント状態の異常検知手法への適用であろう。機器の状態を監視するために設置したセンサ類が計測するデータは、図 4 のように正常状態でも揺動成分がある。従来の異常検知では、この揺動成分の振幅より大きな値と閾値として定め、揺動成分＋異常成分が閾値を越えた場合を異常状態として判定する。このため異常兆候段階での成分は大きな閾値に遮蔽されて検知することが出来ず、故障に至ってしまう場合がある。

一方で深層学習を用いた異常検知は、揺動成分を含んだ正常データと異常データを学習するため、結果的に揺動成分を考慮した上での（差し引いた上での）異常の特徴を検知することができる。これにより、故障に至る前の異常兆候の発生した段階での検知が可能となる。

図 5 に深層学習を用いた異常検知手法の体系の例を示す[9]。畳み込みニューラルネットワークを利用して異常検知を行う手法[10]や、畳み込みニューラルネットワークと長・短期記憶(LSTM)を組み合わせたモデルを利用して異常検知を行う手法[11]では、生データから前処理を施すことなく異常の検知に成功しており、その精度も従来手法に比べて高い結果が得られている。実際、畳み込みニューラルネットワークを利用して異常検知を行う手法[10]や、畳み込みニューラルネットワークと長・短期記憶(LSTM)を組み合わせたモデルを利用して異常検知を行う手法[11]では、生データから前処理を施すことなく異常の検知に成功しており、その精度も従来手法に比べて高い結果が得られている。

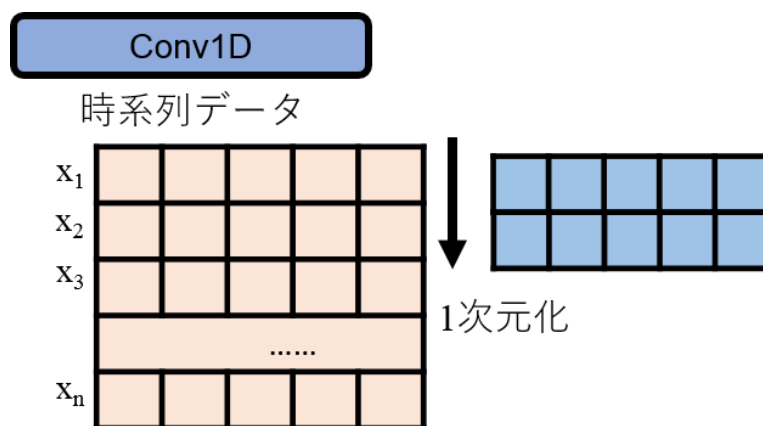


図 6. 1次元畳み込みニューラルネットワーク

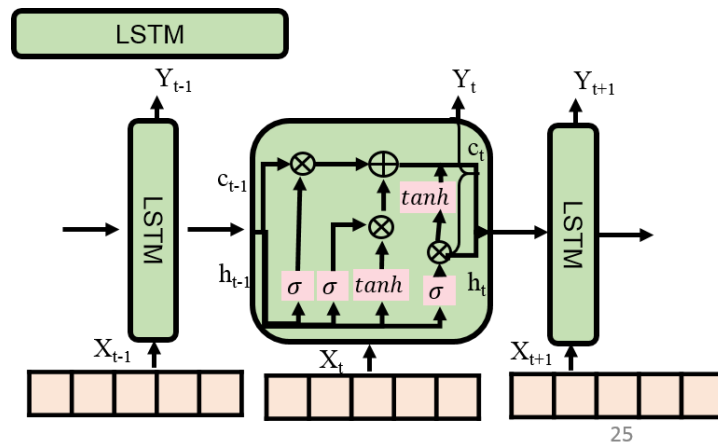


図 7. 長・短期記憶(LSTM)

(3) 自然言語処理

i) Transformer

自然言語処理とは、人間が使うため曖昧さを含む自然言語で書かれた膨大なテキストデータを、実用的に扱うためにコンピュータに処理させる技術の総称である。

Transformer とは「Attention is All You Need」という論文内で提唱されたモデルである。これまで開発された自然言語処理モデルでは **RNN** や **CNN** による単語や文の「予測」が主流であったが、2017 年に発表された **Attention** という機構を中心としたモデルが開発されたことで学習速度や精度が大きく飛躍した。

例えば **RNN** では、学習や予測において前回の出力結果を次の入力に利用するため、まとめて並列に学習することができずに学習時間が長くなる傾向があった。**Transformer** は入力ベクトルによって注意 (**Attention**) の重みを計算し、その重みに基づいて辞書オブジェクトから任意のベクトルを出力するモデルとなっている。これにより文の順序に寄らぬ学習が可能となり並列処理を導入できるようになった。

文献の記憶を大量の **Key(K)** とそれに対応する **Value(V)** に分離し、入力と **Key** の内積を注意の重み (**Attention**)(**Q**)、次元を d とすると、

$$Attention = softmax\left(\frac{QK^T}{\sqrt{d_k}}\right)V$$

と表される。これと **Value** の内積を計算する操作を各 **Key** について行うことで、重要度の高い **Value** が抽出されるシステムとなっている。**Key** と **Value** に分けて格納することで文脈を踏まえた学習ができるほか、**Key** と **Value** 間の非自明な変換によって高い表現力を得ることが可能となる。

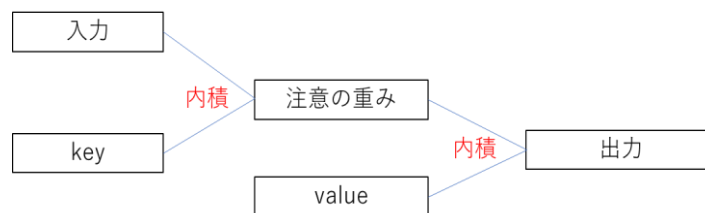


図 8. Transformer の計算

ii) BERT

BERT は 2018 年の論文「BERT: Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding」で発表され、主に Transformer の Encoder の部分を利用している。Transformer の Decoder 部分は使わずに、Encoder 部分のみを利用し、文章を抽象化した状態で利用できるようになるため、色々なタスクに応用することが可能になった。タスクの 1 つは Masked Language Model といい、文章の 15% の単語をランダムにマスクもしくは置換し、文脈から正解単語を予測するモデルである（図 9）。

問 my dog is [MASK] 答 my dog is hairy
問 my dog is apple 答 my dog is hairy

図 9. Masked Language Model のタスク

別のタスクの例として Next Sentence Prediction がある。これは 2 つの文に対して「2 文が隣り合っているか」を当てるタスクを学習するものであり、隣り合う文章 A と文章 B が与えられたとき、50% の確率で B を別の文章へと置き換える（図 10）。

問 男は[MASK]店に行った。彼は 1 ガロン[MASK]牛乳を購入した。 答 isNext
問 男は店に[MASK]。ペンギン[MASK]は飛べない鳥である。 答 notNext

図 10. Next Sentence Prediction のタスク

この手法を大量のテキストデータに適用することで BERT の事前学習は完了する。一度学習済みモデルが完成すれば、以降は少量のデータで転移学習するのみで多種多様な自然言語処理が可能となる。

BERT はまた、後述する Vision Transformer 等の基礎の部分になっている。

iii) Vision Transformer(ViT)

ViT は 2020 年の論文「An Image is Worth 16×16 Words: Transformers for Image Recognition at Scale」で発表された、CNN を全く使わずに Attention のみで構築されたモデルである。画像タスクでも同じく Attention の強みが利用でき、CNN では難しかった画像の離れた位置の情報も利用できるようになった。ViT に使われている Attention は画像のどこの部分に注目(Attention)するかを学習していく仕組みであり、例えば図 11 のようにノイズも混ざった画像全体から猫の種類を分類するよりも、Attention を加えることで、画像のどこに注目をすれば良いかも一緒に学ぶモデルである。



図 11. 左：猫を含む画、右：猫の Attention

1.3. 原子力分野への適用が有効な AI システムのフレームワークと AI モデル

(1) 状態監視・診断技術のためのフレームワークと AI モデル

図 12 に状態監視・診断技術のための基本的なフレームワークを示す。このフレームワークに必要な構造は比較的単純であり、まず計測値を時系列データ化し、時系列データ中で検出したい異常データ部分にラベル付け（アノテーション）をし、時系列データを入力、異常スコアを出力として、ラベル付けした異常データに対して高い異常スコアを出力するように RNN モデル（回帰モデル）を学習する。これにより、学習後の RNN モデルは、センサ等からのリアルタイム計測値に異常の特徴が含まれている場合に高い異常スコアを出力するため、異常を検知することが可能である。さらに、異常の種類別にラベル付けと異常スコアの学習をすることで、単なる異常の検知だけではなく異常の識別も可能となる。

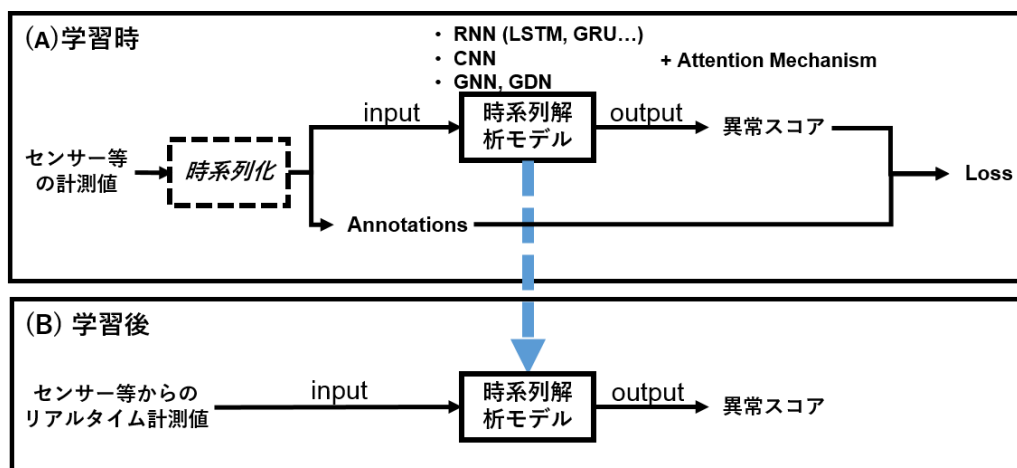


図 12. 状態監視・診断技術のための基本的なフレームワーク

このフレームワークにおける時系列解析に利用可能なモデルの例として、TPA-LSTM[12]と Graph Deviation Network (GDN)[13]について紹介する。

TPA-LSTM とは時間的パターン注意および Long-Short-Term メモリ (Temporal pattern attention – Long Short Term Memory) のことであり、回帰モデルである LSTM に時間的パターン注意機構を追加することで、次系列解析の能力を向上させている。アテンション機構とは、入力されたデータのどこに注目すべきかを動的に特定する仕組みであり、並列化が容易である等の利点から 自然言語を中心に発展した深層学習の要素技術の 1 つであるが、この手法ではこのアテンション機構を時系列解析に結び付けることで、時系列データの異常のパターンに着目して時系列予測の性能を向上させている。

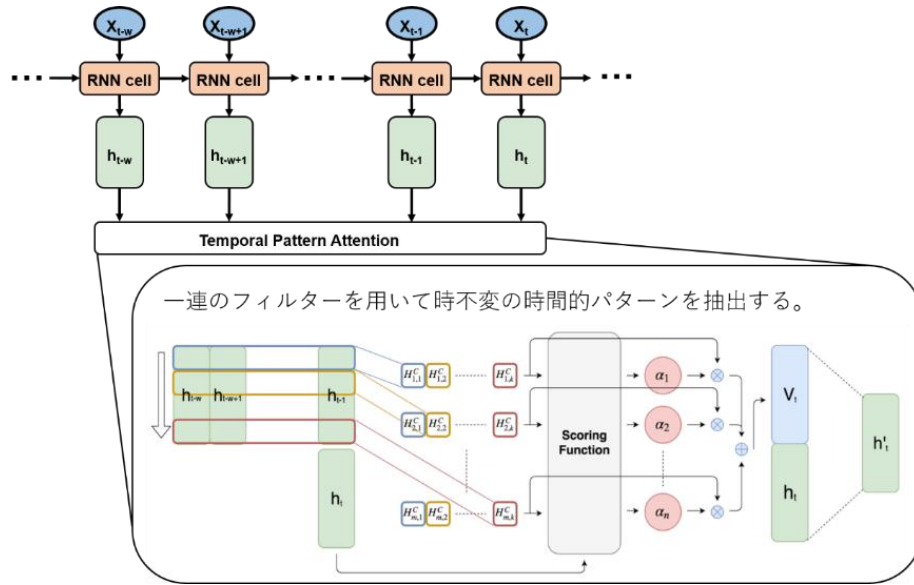


図 13. TPA-LSTM の構造

また、GDN[13]とは Graph Deviation Network の略称であり、その構造は図 14 のようになる。このモデルの特徴は、グラフ構造学習とグラフニューラルネットワークを組み合わせ、さらにアテンション機構を用いて時系列データを予測している点である。さらに、時系列予測のみでなくアテンションにより異常を検知する機能もすでに組み込まれており、状態監視・診断技術にそのまま適用可能である。

本提案技術については、前述した公開されているモデルやプラットフォームを利用して構築可能であり開発コストも大きなものでなく、計画外停止等を防止できる場合にはコストダウンや安全性向上に貢献できると考える。

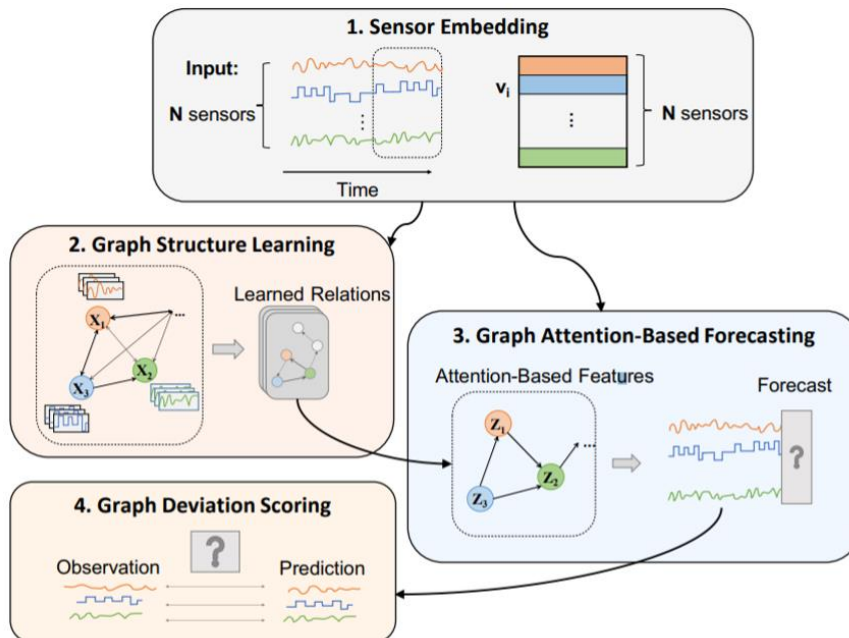


図 14. GDN の構造

(2) カメラを利用した現場計器の指示確認

図 15 にカメラを利用した現場計器の指示確認のための基本的なフレームワークを示す。このフレーム

ワークに必要な構造も比較的単純である。まず圧力計などアナログ計器の数値指示部の画像を取得し、さらに計器が示す数値の正解値を書く画像にラベル付け（アノテーション）して学習データを生成する。

この学習データを使用して、画像データを入力すると正解数値を出力するように画像特徴抽出モデルを学習する。これにより、学習後の画像特徴抽出モデル計器指示の画像を入力するだけでその指し示す数値を人間が認識するかの様に認識し、デジタル数値として出力するようになる。

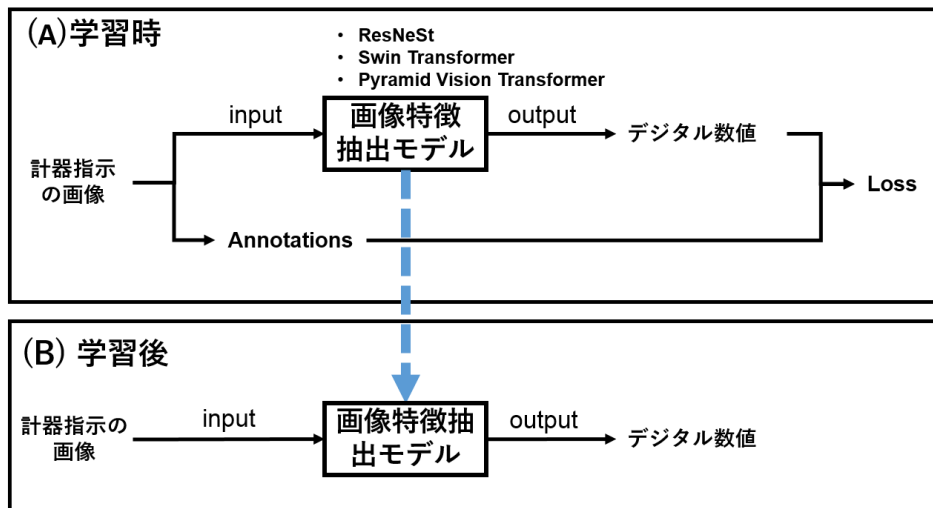


図 15. カメラを利用した現場計器の指示確認のための基本的フレームワーク

このフレームワークにおける画像特徴抽出に利用可能なモデルの例として、ResNeSt[14]、SwinTransformer [15]、Pyramid Vision Transformer [16]を紹介する。

ResNeSt[14]とは、図 16 のようにグループ化とスプリットアテンション機構を組み合わせたモデルであり、画像分類、物体検出やセグメンテーション、さらには姿勢推定でも高い精度が得られている。

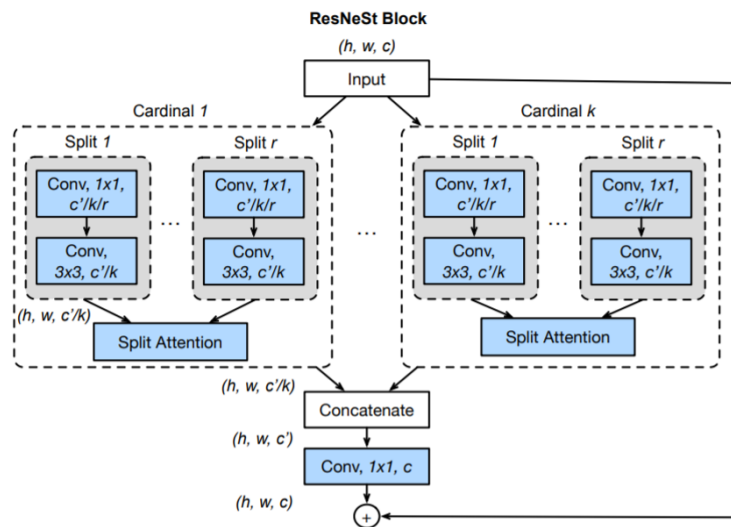


図 16. ResNeSt の構造

Swin Transformer[15]とは、Shifted windows で計算される階層的 Transformer である。Transformer を Computer Vision に適用するためには、（検出対象）物体のスケールが大きく変化すること、テキストと比較して入力画像の解像度が高いことの 2 つの課題に対応する必要がある。このアーキテクチャは、画像サイズに対して線形の計算量を持ち、さらに画像分類、物体検出、セマンティック・セグメンテーション

などのタスクで高い性能を有している。まず、画像はパッチ分割(Patch Partition)モジュールに入力される。入力が3チャンネルのRGB画像とすると、各パッチは $4 \times 4 = 16$ 画素で、各画素はR、G、Bの3値なので、フラット化した画像は $16 \times 3 = 48$ となり、パッチ分割後の画像形状は $[H, W, 3]$ から $[H/4, W/4, 48]$ に変化する。次に4段階の stage にて特徴マップが作成され、Swin Transformer ブロックに送られる。このブロックでは Windows Multi-head Self-Attention (W-MSA) モジュールと Shifted Windows Multi-Head Self-Attention (SW-MSA) モジュール、すなわちオフセットのある W-MSA が導入されており、SW-MSA では特徴マップがサイズ $M \times M$ の個々の window に分割され、それぞれの window 内で個別に Self-Attention が実行されている。

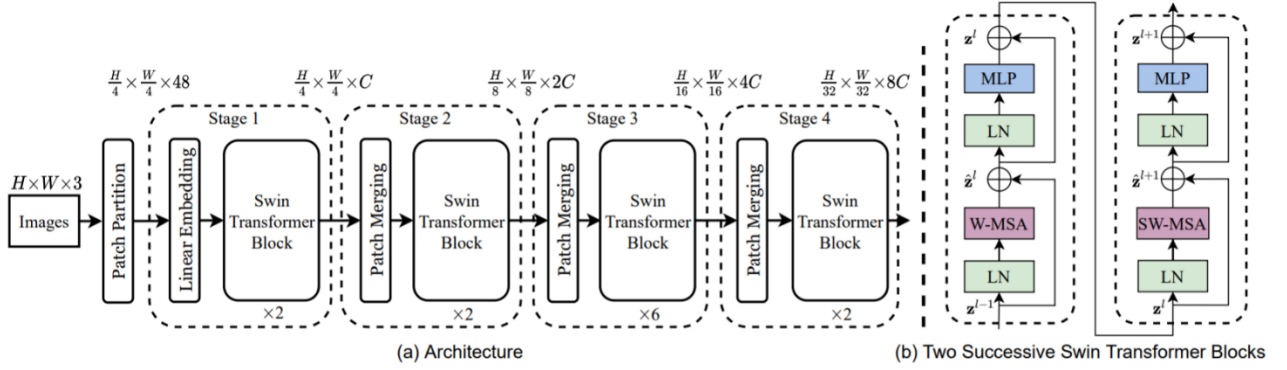


図 17. Swin Transformer の構造

Pyramid Vision Transformer[16]は、Transformer モデルを使用した、畳み込みのない物体認識ネットワークである。CNN バックボーンと同様に異なるスケールの特徴マップを生成する4つのステージを持ち、4つの特徴マップ: F_1 、 F_2 、 F_3 、 F_4 (入力画像に対して4、8、16、32画素の stride を持つ) を得る。特徴ピラミッド $\{F_1, F_2, F_3, F_4\}$ を用いることにより、画像分類、物体検出、セマンティック・セグメンテーションなどのタスクへの適用が容易である。

本提案技術については、前述した公開されているモデルやプラットフォームを利用して構築可能であり開発コストも大きなものでない。また、本提案技術は既存の人間系のシステムをAIに置き換えるものであり、妥当な正解数値の出力が可能となれば、安全性・信頼性について本来のシステムと本質的に同等であると考ええる。

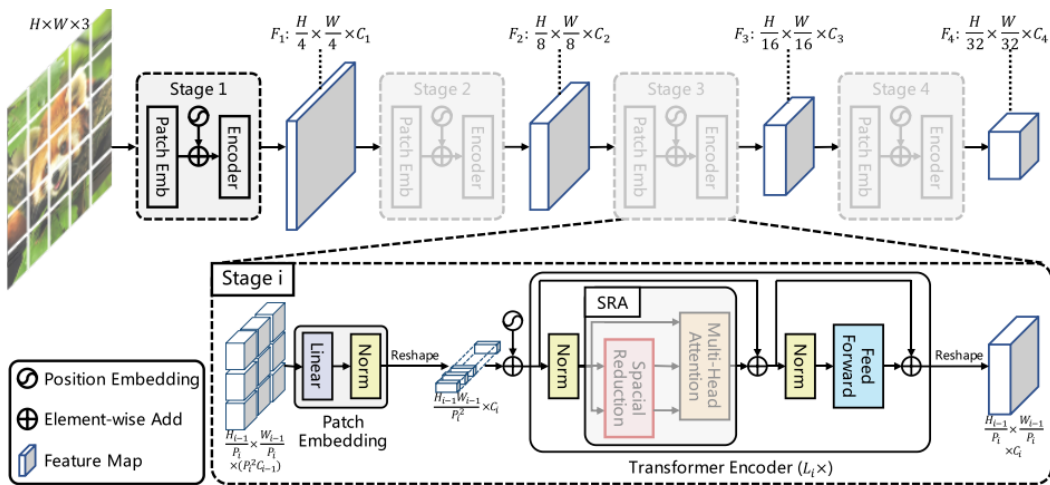


図 18. Pyramid Vision Transformer の構造

(3) 核セキュリティ・核物質防護に関する監視・出入管理

図 19 に核セキュリティ・核物質防護に関する監視・出入管理のための基本的なフレームワークを示す。ここでは顔認識モデルと学習済みの姿勢認識モデルを用いる。すなわち、不審者か否かを判定するために従業員の顔写真で顔認識モデルを学習し、学習後の顔認識モデルにより不審者か否かを判定する。そして不審者と判定された場合には、学習済み姿勢推定モデルにより不審者の座標を識別し、その座標が立ち入り禁止区域等に入ったらアラームを発報させる。

このフレームワークには一般的な顔認識モデルと姿勢認識モデルの適用が可能である。例えば顔認識モデルには ArcFace[17]や VPL(Variational Prototype Learning)[18]など、姿勢認識モデルには ViPNAS[19]や HRNet[6]などが挙げられる。

本提案技術については、前述した公開されているモデルやプラットフォームを利用して構築可能であり開発コストも大きなものでない。また、本技術は既存の人間系のシステムを AI に置き換えるものであり、妥当な判定の出力が可能となれば、安全性・信頼性について本来のシステムと本質的に同等であると考えられる。

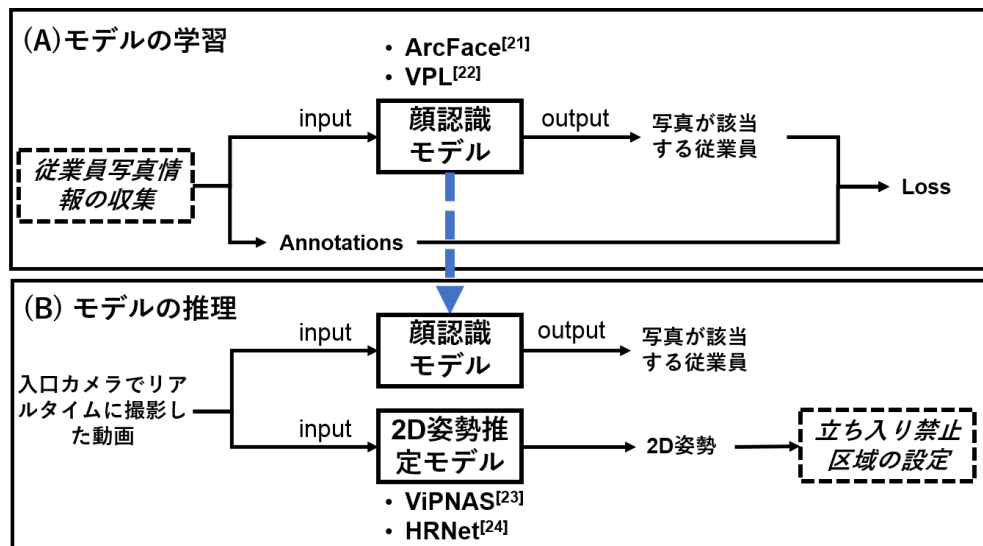


図 19. 核セキュリティ・核物質防護に関する監視・出入管理のための基本的フレームワーク

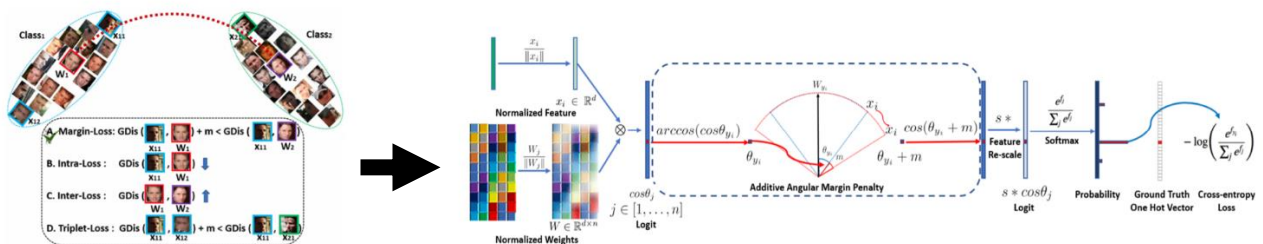


図 20. Arc Face の構造

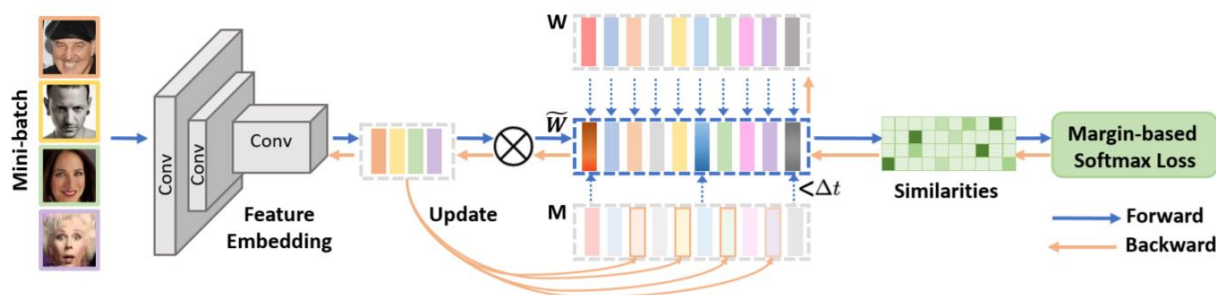


図 21. VPL の構造

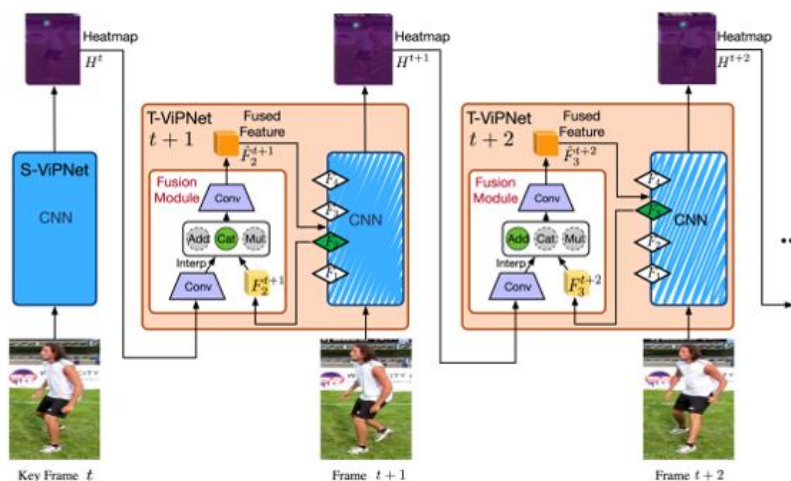


図 22. ViPNAS の構造



図 23. HRNet による姿勢認識結果の例

1.4. 教育面からの提言

ここ数年の傾向として、大学教育の場において AI（深層学習）の研究テーマを志望する学生が増えたように感じる。その中の数%は原子力系の大学院専攻を志望してくれている。しかし、原子力系の専攻に進学し AI 研究に尽力しても、原子力業界側に人材を受け止める未来があるのか、学生らも不安を感じている。すなわち、原子力業界そのものに未来像が見えず、原子力を前提とした AI 研究をそのまま自らのゴールとして描くことに困難を感じるのである。大学院における AI 研究は”つぶしが効く”AI スキルを身に着けるため、と割り切って取り組んでいる学生も多いのではないかと感じる。原子力業界がこのままデジタル化や AI といった未来の姿を描くことができねば、せつかくの優秀な人材は全員、他分野に逃げていくばかりであろう。

しかし、既述のように、AI モデルは公開されているものも多く、実は取り組む際の技術的ハードル自体は高くない。残るは心理的ハードルだけである。さらに、AI システムを実用化できるか否かの鍵は技術そのものではなく、「いかに豊富な学習データを持っているか」であり、過去の保守管理データなどを豊富に蓄積している原子力業界こそが実は、日本の AI 開発の拠点となる潜在力を秘めているのである。

日本の有力な AI 開発・発信拠点となる未来像を原子力が描くことができれば、これに魅せられた若者たちを再び原子力に引き付けることに繋がるであろう。そのためにもこの事業を通して原子力における AI 応用のあるべき姿を描いていきたい。

参考文献

- [1] <https://qiita.com/chobaken/items/3cb5f43ecff2d388f95b>
- [2] <https://qiita.com/miiuchu/items/12181952452aba73d6c1>
- [3] Olaf Ronneberger, Philipp Fischer, Thomas Brox, "U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation", arXiv:1505.04597v1.
- [4] K. He, G. Gkioxari, P. Dollár, and R. Girshick, "Mask r-cnn," in ICCV, 2017.
- [5] A. Kirillov, K. He, R. Girshick, C. Rother, and P. Dollar, "Panoptic segmentation", Computer Vision and Pattern Recognition(2019)
- [6] Sun, Ke, et al. "Deep high-resolution representation learning for human pose estimation." Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2019.
- [7] Glia Computing, OpenPose: Realtime Multi-Person 2D Pose Estimation using Part Affinity Fields
<https://www.glia-computing.com/blog/openpose-realtime-multi-person-2d-pose-estimation-using-part-affinity-fields/>
- [8] <https://axa.biopapyrus.jp/deep-learning/rnn/lstm.html>
- [9] Pang, Guansong, et al. "Deep learning for anomaly detection: A review." ACM Computing Surveys (CSUR) 54.2 (2021): 1-38.
- [10] Janssens, Olivier, et al. "Convolutional neural network based fault detection for rotating machinery." Journal of Sound and Vibration 377 (2016): 331-345.
- [11] Pan, Honghu, et al. "An Improved Bearing Fault Diagnosis Method using One-Dimensional CNN and LSTM." Strojnicki Vestnik/Journal of Mechanical Engineering 64 (2018).
- [12] Shih, Shun-Yao, Fan-Keng Sun, and Hung-yi Lee. "Temporal pattern attention for multivariate time series forecasting." Machine Learning 108.8 (2019): 1421-1441.
- [13] Deng, Ailin, and Bryan Hooi. "Graph neural network-based anomaly detection in multivariate time series." Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence. Vol. 35. No. 5. 2021.
- [14] Zhang, Hang, et al. "Resnest: Split-attention networks." arXiv preprint arXiv:2004.08955 (2020).
- [15] Liu, Ze, et al. "Swin transformer: Hierarchical vision transformer using shifted windows." arXiv preprint arXiv:2103.14030 (2021).
- [16] Wang, Wenhai, et al. "Pyramid vision transformer: A versatile backbone for dense prediction without convolutions." arXiv preprint arXiv:2102.12122 (2021).
- [17] Deng, Jiankang, et al. "Arcface: Additive angular margin loss for deep face recognition." Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2019.
- [18] Deng, Jiankang, et al. "Variational Prototype Learning for Deep Face Recognition." Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2021.
- [19] Xu, Lumin, et al. "ViPNAS: Efficient Video Pose Estimation via Neural Architecture Search." Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2021.