

デジタルトリプレットが開く これからのものづくり

東京大学大学院工学系研究科

人工物工学研究センター 教授 梅田 靖

目次

- デジタル化によるものづくりの変化
- デジタル・トリプレット
 - デジタル・トリプレットの考え方
 - 金型加工の例
- D3LF@RACE

メガトレンドと我が国の製造業の対応(1)

- **Industrie4.0, Industrial Internet:** 我が国からは新しいものづくりの在り方を発信できなかった
 - － 標準化を通じた、企業間をまたがるネットワーク化、情報化に追従できていない、企業の壁を越えられなかった
 - － 工場の中で、必要なものは既に全て自動化され、デジタル化されている
 - » しかし、外に繋がっていない
 - » 個社のやり方を自動化、情報化したので、汎用的なフレームワーク、プラットフォームを作れなかった
 - » デジタル化から価値を産み出し切れていない
- **SDGs, パリ協定, Circular Economy:** 環境問題/持続可能性への対応、および、それをイノベーションに結びつけようとする本気度が違う。日本は、おざなり、後追い、規制追従型。例えば、経営の意思決定への浸透、各事業への浸透が弱い
- **GAFA、アリババなどのプラットフォーマーの覇権:**
 - － 我が国発のプラットフォーマーが出てこない？
 - － プラットフォーマーに高品質な「部品」を供給することが我が国の製造業にとって取るべき道なのか？

メガトレンドと我が国の製造業の対応(2)

- 新興国メーカーの台頭: 大量生産競争での敗北。思い切った施策を打ててない
- アジア市場: **そこそこの品質で安い製品**が求められているが、対応できていない
 - ー 東南アジアでは、サムスンが圧倒的に格好良いと思われている(日本製は地味だが信頼性が高い)
- 個人的な所感
 - ー 過去の蓄積、遺産が大きすぎて素早く動けない(スクラップアンドビルドができない)
 - ー 現状維持。潜在的に大きな可能性がある デジタルベースの製造業に転換できない
 - ー 高品質な製品、意識の高い高技能な作業者、「我が社のものづくり」に高いプライドを持っている



- 資本主義の非物質主義的転回
 - 狭義の「ものづくり」にこだわりすぎたのが失われた30年の理由
 - 企業経営へのサステナビリティの取り込み
- 製品価値から企業価値へ

Industrie4.0

- ドイツ工学アカデミー(Acatech)とドイツ連邦教育科学省が2011年に発表
- 工場内の設備、工場、サプライチェーンを繋げて、機械同士でネゴシエーションしてモノづくりを行う
 - IoT, ICT, AI, etc.
- ポイントは、**Cyber Physical Systems:**
 - 情報空間と物理世界が密に連携しているシステム
 - 物理世界の情報を情報空間に上げ、処理した上で、物理世界を制御する

➡ **それが今や**
・人中心

・Sustainabilityへの貢献

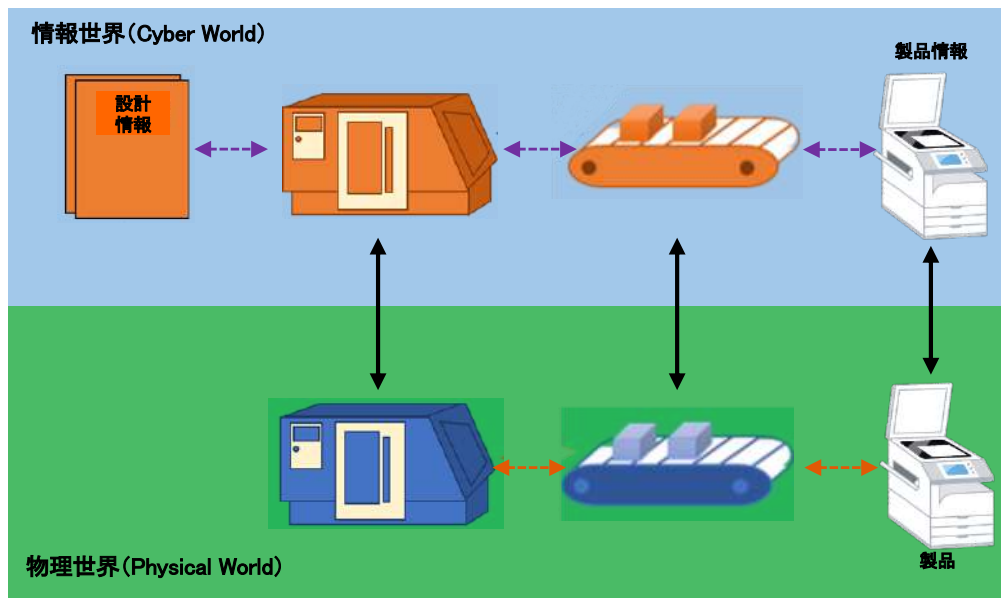


Industrie 4.0

[<https://www.kaercher.com/us/inside-kaercher/newsroom/kaercher-stories/industry-4-0.html>]

Digital Twin

- **Digital Twin**: Industrie4.0の柱の一つであり、Cyber Physical System (CPS)の一形態。サイバー世界に、実世界の1対1のモデルを構築
- [典型的な利用方法] 上級エンジニアが生産システム開発時に、サイバー世界上で様々な状況をシミュレートし、それに基づき、システム設計、運用条件を決定

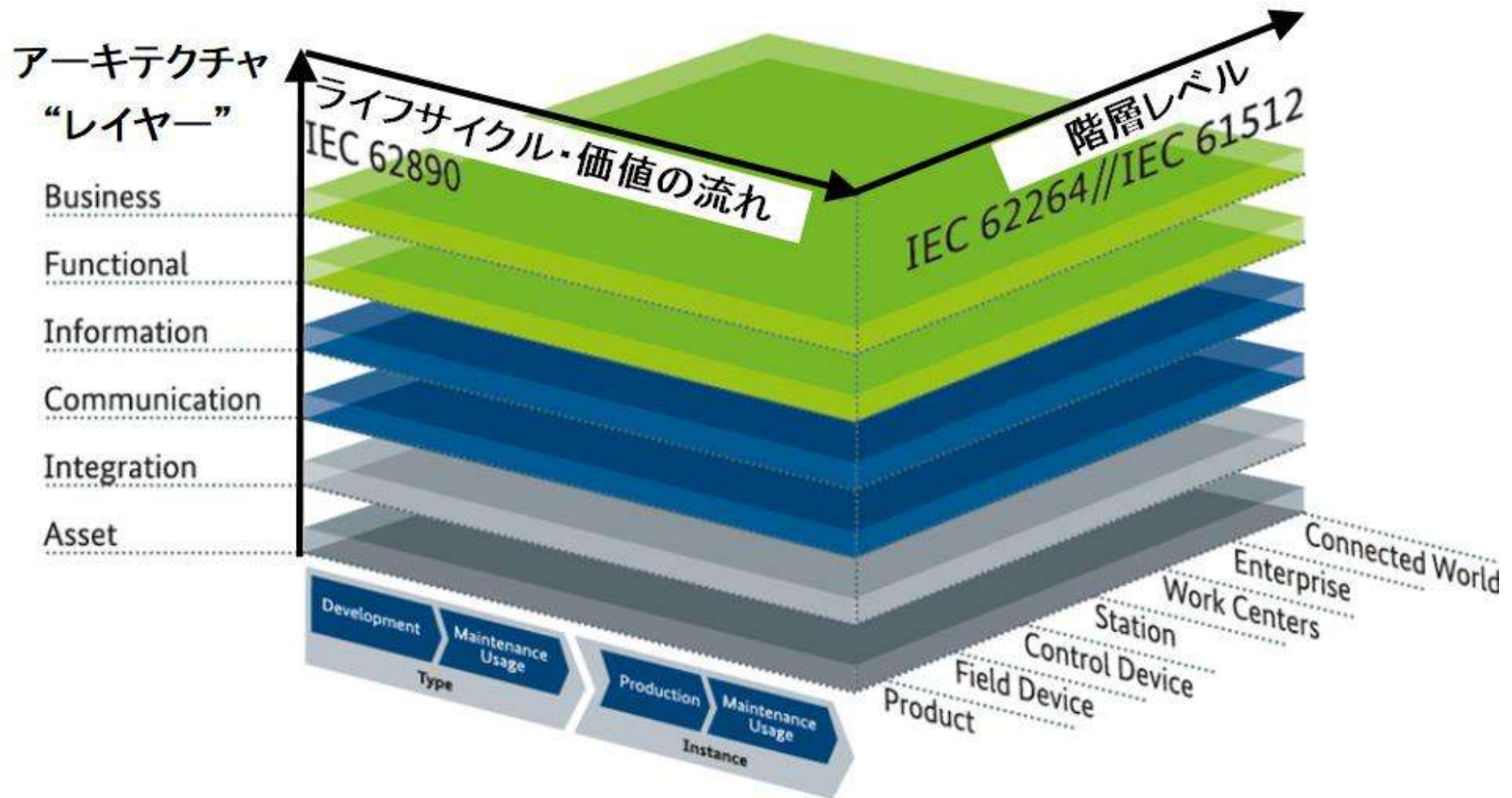


日本企業におけるデジタル化

- 典型的なパターン
 - 工作機械にIoT機能を追加し、沢山のログデータを収集できるようになっていることは、広く普及
 - しかし、それを使ってどう価値を産み出せば良いのかはよく分からない...
- 一方で、先進企業は動き始めているがやっぱり先頭は走れていない...
 - FANUC Field system
 - 三菱電機 Edgexcross
 - 機器間の接続、情報の流通経路としてのプラットフォームにはなっている
 - シーメンス、ダッソーのように豊富なソフトウェア群でエンジニアリングチェーン全体を支援するプラットフォームにはなっていない

Reference Architecture Model Industry 4.0 (RAMI4.0)

11



[Plattform Industrie 4.0]

なぜ標準化か？

- 生産工程においても、**すりあわせ** から **モジュラー** への移行を起こそうとしている
 - 直接的には、旧東欧の低賃金への対抗措置としての「自動化」
 - 付加価値向上 (Mass Customization、生産の柔軟化) としての「つながる」
 - **デジタル × モジュラー × アーキテクチャ** で勝負しようとしている
- ↑ **トップダウン思考**

» 結果として、我が国のものづくりを担う人達にとって不得意分野

今後の前提条件

- デジタル化とネットワーク化の急速な展開
 - (「ものづくりの歴史上、最大の変革」(北大 小野里教授))
 - バリューチェーンのトレーサビリティ個体管理、出荷後の個体管理、ライフサイクル全体のモニタリングが進展
 - ➡ **超ライフサイクルマネジメント**(全ての製品の状態がリアルタイムに把握できる)
- 変化する消費者の価値観：**所有価値から使用価値へ**
- 製品だけでなく、**製品・サービスシステムの設計、生産が前提**となる
- Mass Customizationのさらなる発展。さらには、Cocreation、FabLabのようなユーザが主導するものづくりが進展

目次

- デジタル化によるものづくりの変化
- デジタル・トリプレット
 - デジタル・トリプレットの考え方
 - 金型加工の例
- D3LF@RACE

どうすれば良いのか？

- 「高品質品の大量生産」に代わるものづくり戦略が必要
 - 日本メーカの強みを新しい器 (IoT, CPS, AI, ...)に盛り直す

「高品質なものづくり」: 高品質な製品、不良品のないきめ細かなものづくり、製造工程での改善、コストダウン

- 生産システム技術者への新しい教育の必要性
 - デジタル化された生産システムにおいては、作業者は、物理世界に加えてサイバー世界を活用して、あらゆるエンジニアリング活動(例:生産システムの計画、設計、開発、構築、運用、メンテ、カイゼン、撤収)を実施しなければならない
 - » 生産工学の現状の教育カリキュラムが古すぎる
 - » 生産科学に加えて、デジタル技術とシステム思考が必要

デジタル・トリプレット(D3)

- 背景

- Industrie4.0は、トップダウンアプローチ
 - » トップダウンの意思決定
 - » 生産ラインは余裕を持った造りで、そうそうは変わらない
 - » 極力自動化
 - » CPPS (Cyber Physical Production System)(工場に適用したCPSという意味)に現場で手を加えることは恐らく想定していない



- 日本の強み
 - » 現場の熟練者、生産技術者の質の高さ
 - » 日々のカイゼン
 - » 常にムダ取りをして、日々成長する生産ライン

- 目的

- 製品ライフサイクル全体にわたって、技術者・技能者の問題解決、価値創造を支援
- 現場の技術者の知識、判断を形式知化
- 現場の技術者がデジタル・トリプレット自体をどんどんカイゼン



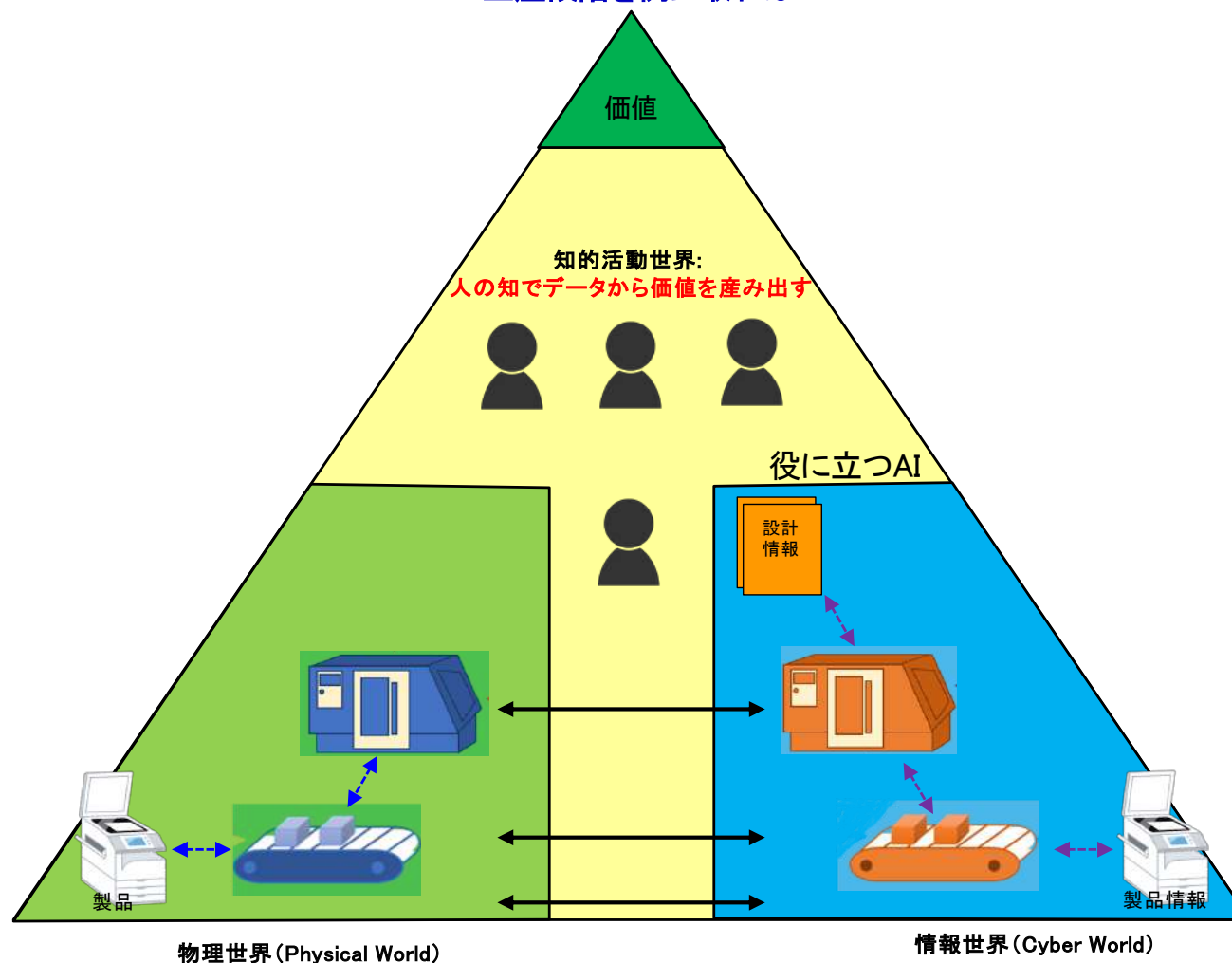
人間中心のデジタル時代のものづくり

デジタル・トリプレット(D3)のイメージ

ライフサイクルにわたるエンジニアリング活動の統合的支援

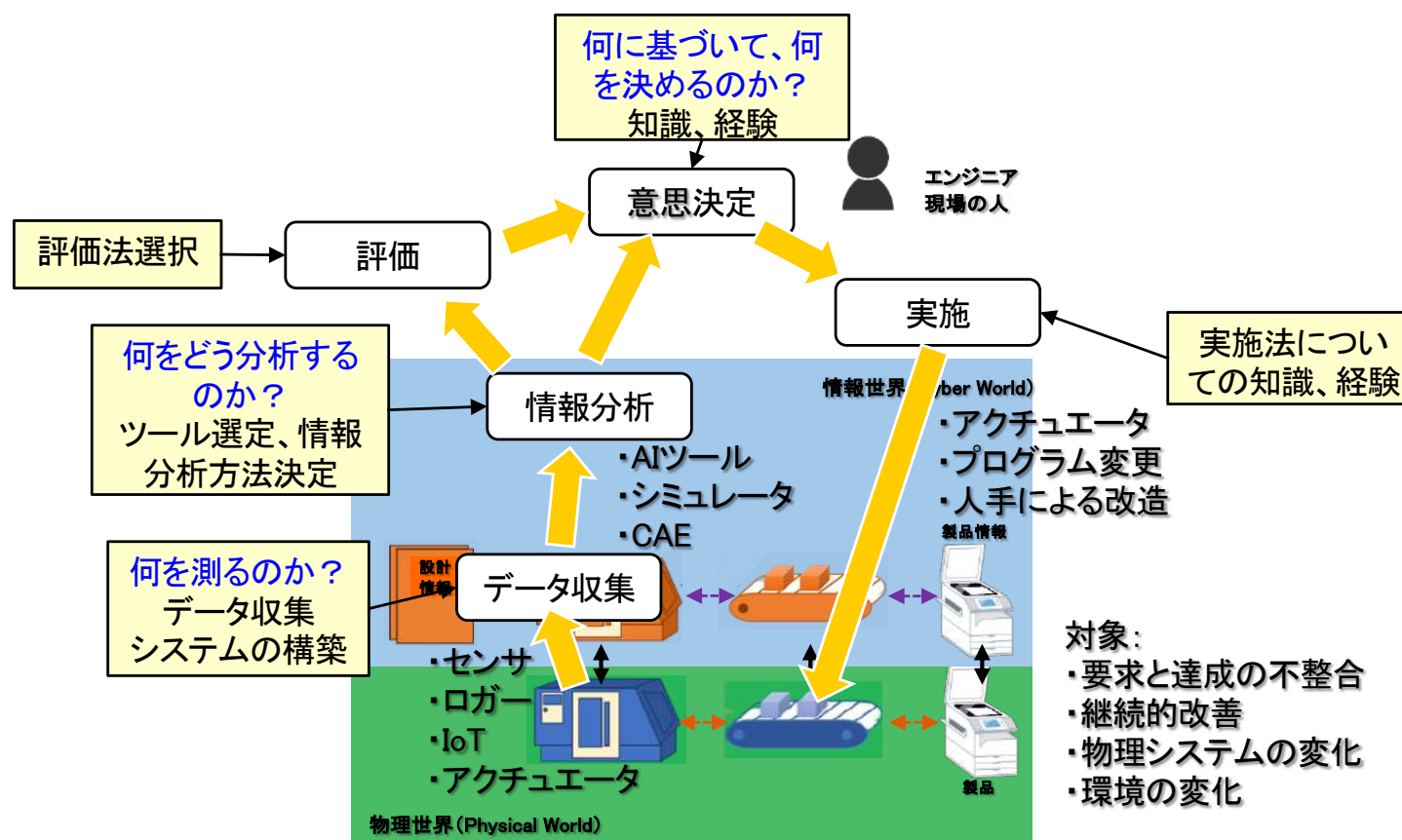
設計 ⇄ 生産 ⇄ 使用 ⇄ メンテ ⇄ 再生産 ⇄ 循環

生産段階を例に取れば



デジタルトリプレット上の エンジニアリングサイクル

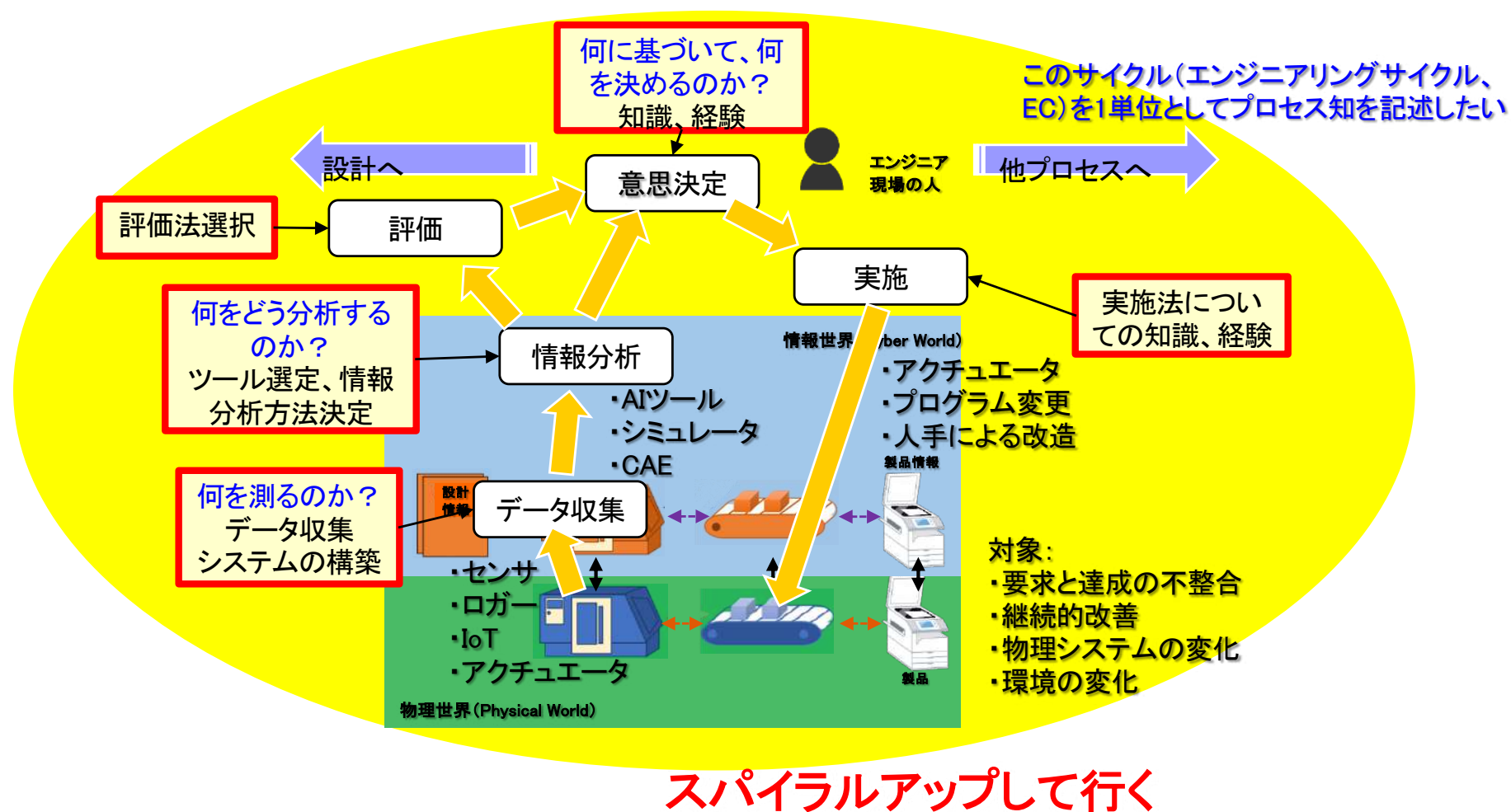
- 技術者、現場の熟練者は、デジタル情報を中心にエンジニアリング活動を行う
- エンジニアリング活動にはD3自体の開発、改善活動を含む
→日本型生産システムは常に向上し続けるシステム



人の知でデータから価値を産み出す

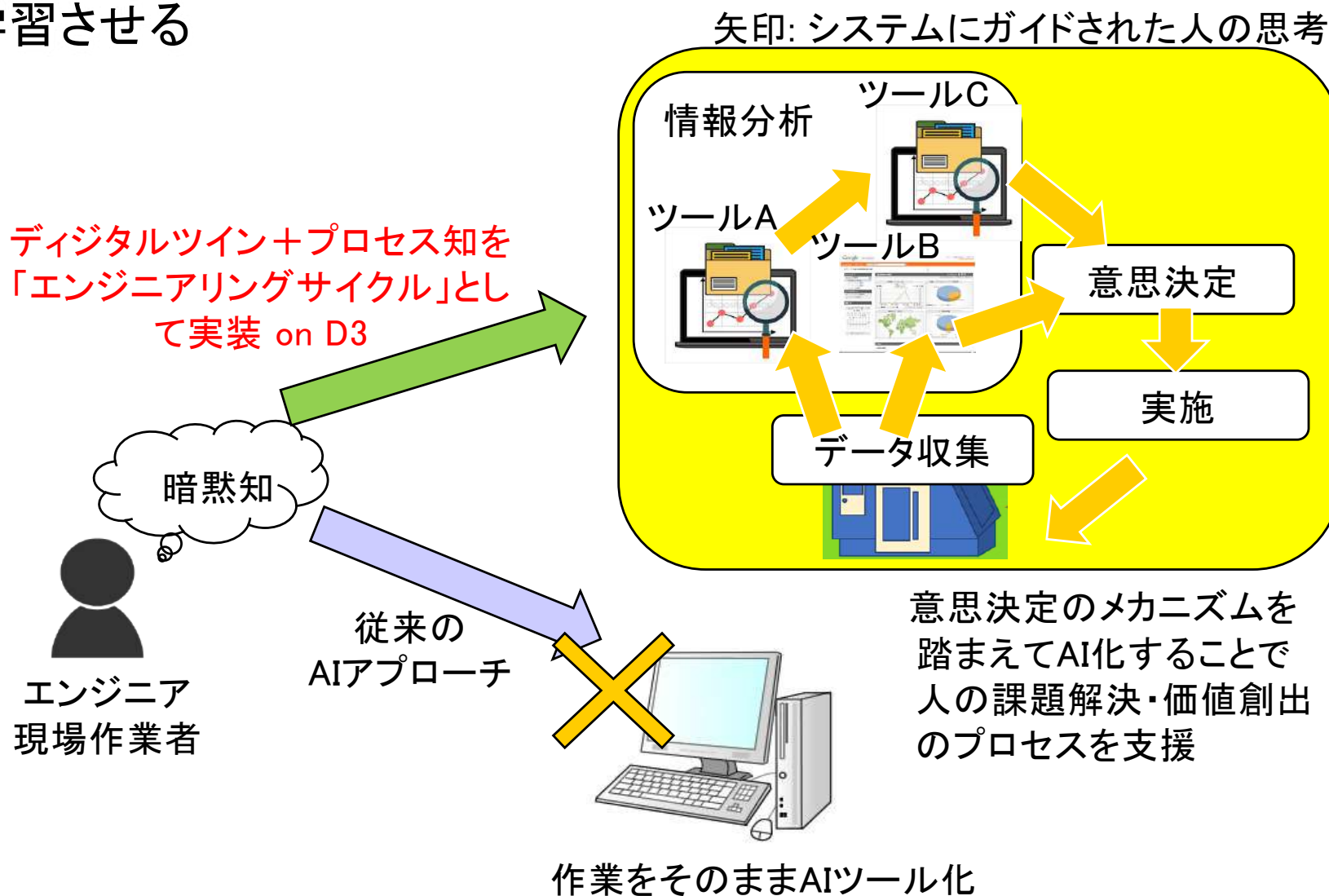
学すべき重要なプロセス

- 創意工夫をデジタルの文脈で、それが例えば自動化、カイゼン



ここで考えている作業支援

- ヒトの熟練知・暗黙知を、実作業の中でインクリメンタルな形でAIに学習させる



何を支援したいのか？

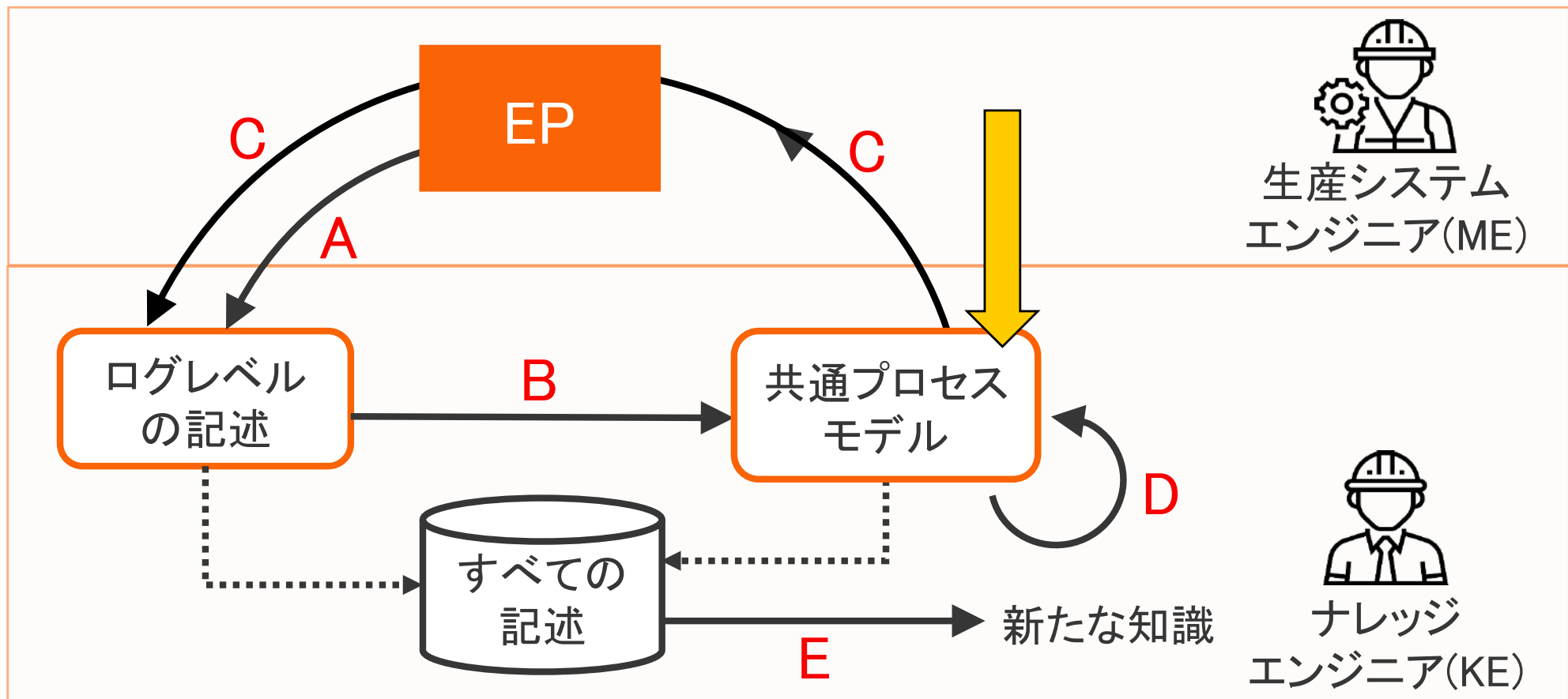
- Industrie4.0は安定運用状態：自動で、フレキシブルに生産し続ける
 - － そのための構成技術、標準、アーキテクチャ
- ➡ そこは継承する
- どこを狙いたいのか
 - － CPPSシステムの開発、設計、立ち上げ
 - － 通常運転: Industrie4.0で
 - － CPPSのメンテナンス、カイゼン

目次

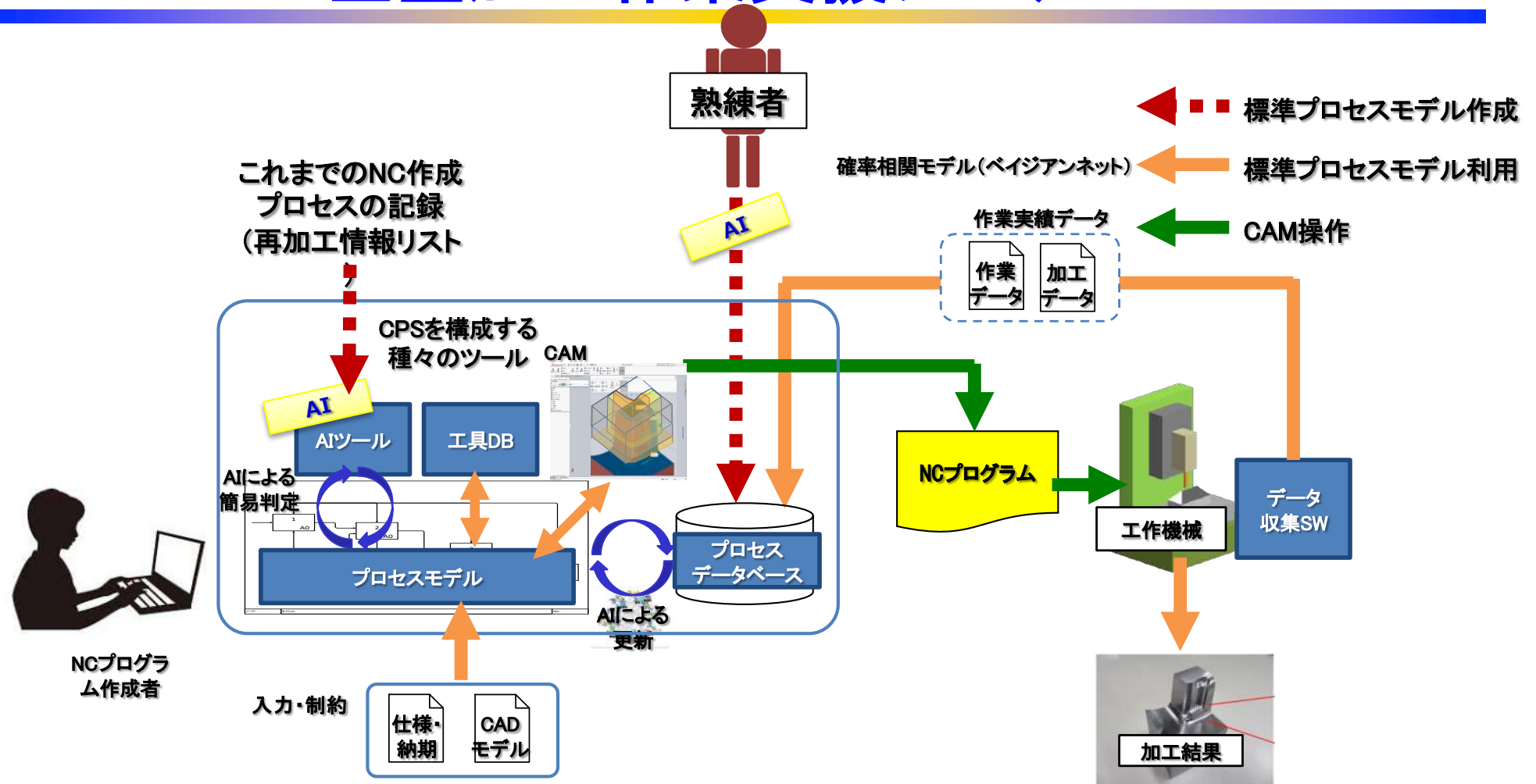
- デジタル化によるものづくりの変化
- デジタル・トリプレット
 - デジタル・トリプレットの考え方
 - 金型加工の例
- D3LF@RACE

エンジニアリングプロセスの記述

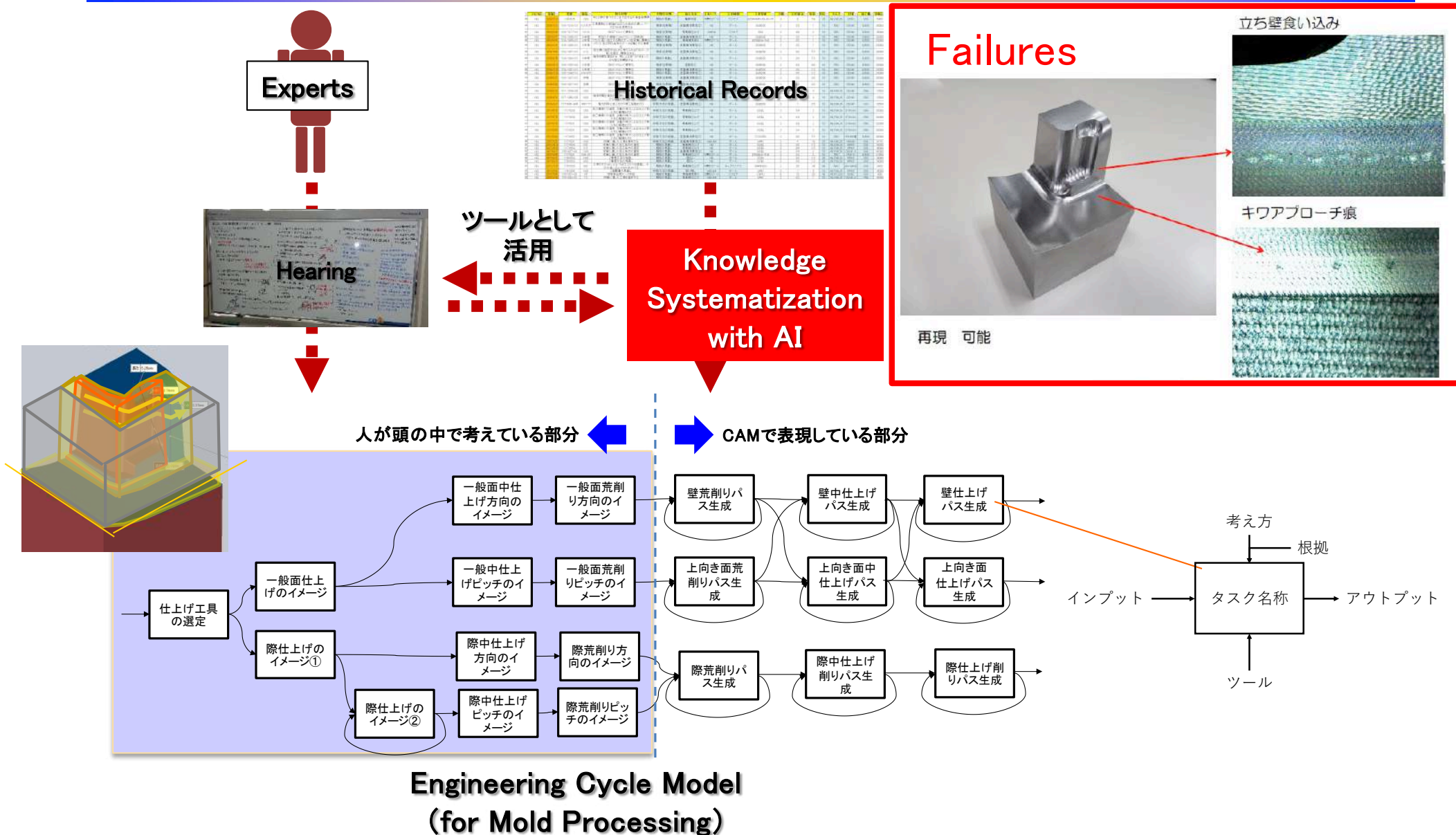
- ログレベルの記述: 行われたことを記述したDescriptiveな記述
- 共通プロセスモデル: どのように行ふべきかを記述したPrescriptiveな記述



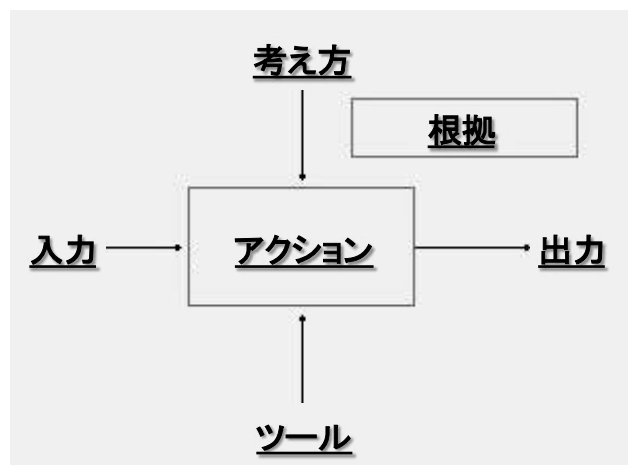
金型加工作業支援システム



射出成形金型製作プロセスにおけるエンジニアリングサイクルの抽出



プロセス記述言語PD3 (Process Modeling Language For D3)

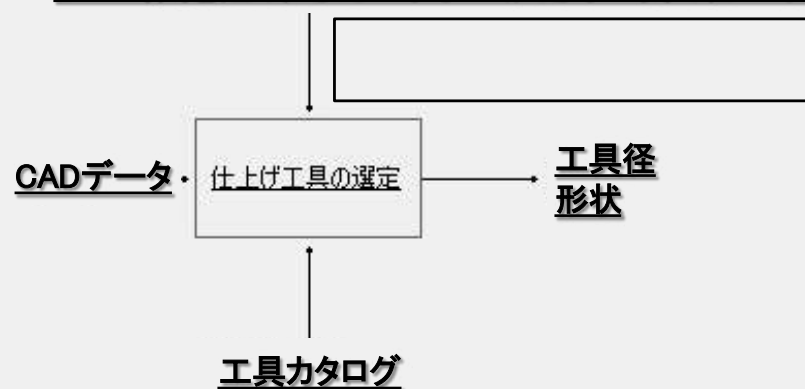


- 入力・出力: データを指す。あるアクションの出力が他のアクションの入力になりプロセスネットワークを構成。
 例: CADデータ、センサデータなど
- ツール: タスクを行う上で使うもの。
 例: CAMソフト、マシニングセンタなど
- 考え方: タスクにおける出力の決定をどのように考えて行うべきか。
 例: 工具摩耗を抑えるようにパスを決定
- 根拠: 出力の決定を行った理由。
 例: 工具摩耗を抑えるように、刃のあたる個所が広く分布するようにした

標準プロセス

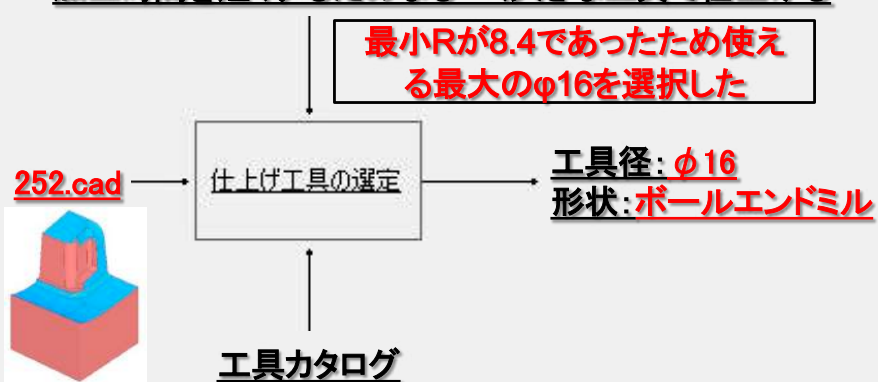
実作業プロセス

加工時間を短くするためなるべく大きな工具で仕上げる

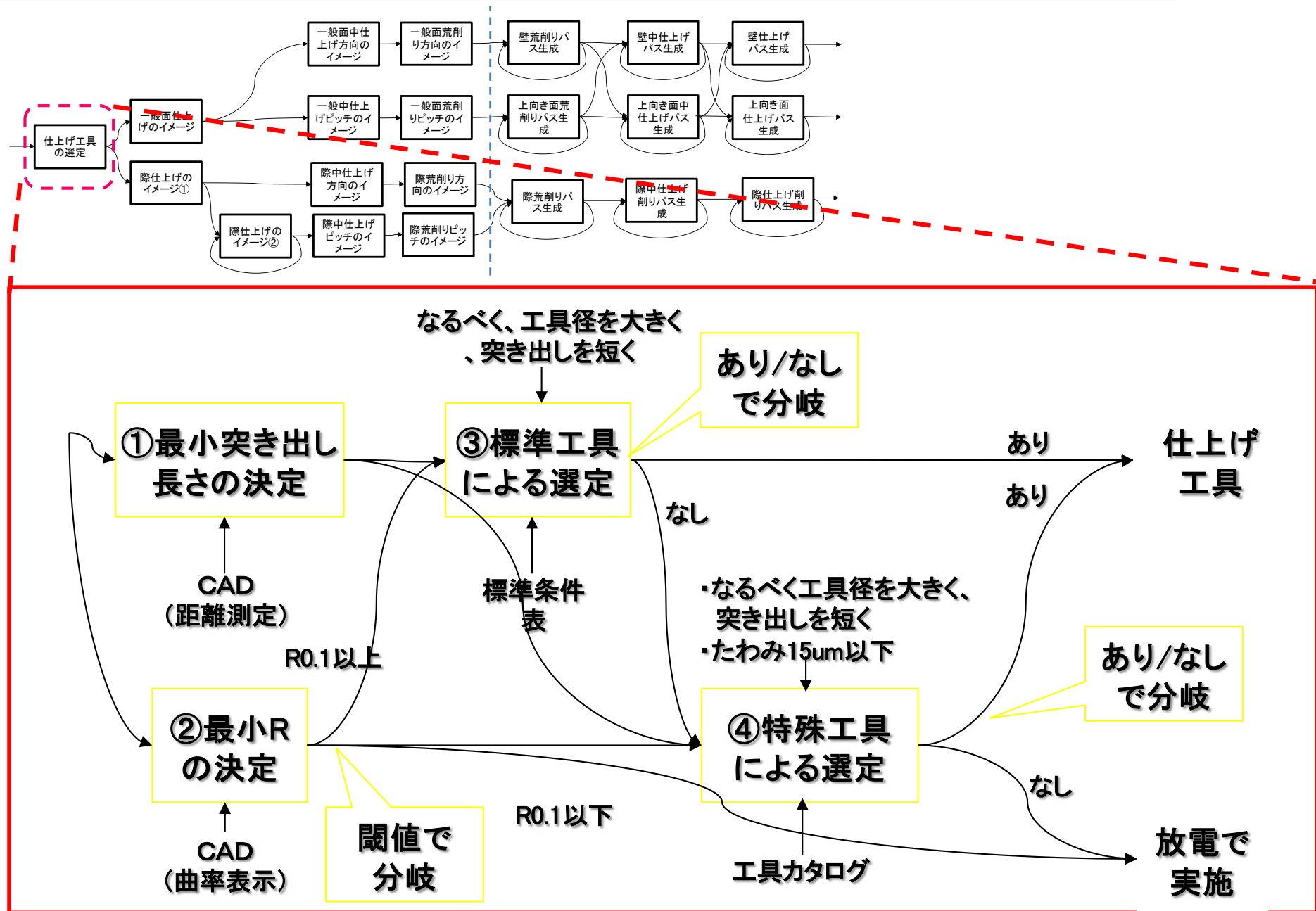


実行

加工時間を短くするためなるべく大きな工具で仕上げる



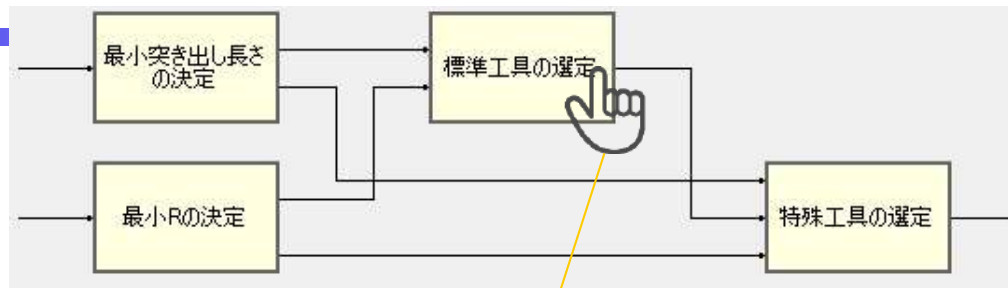
標準プロセスモデル(金型加エプログラム作成)の詳細



標準プロセスモデルに基づく作業支援

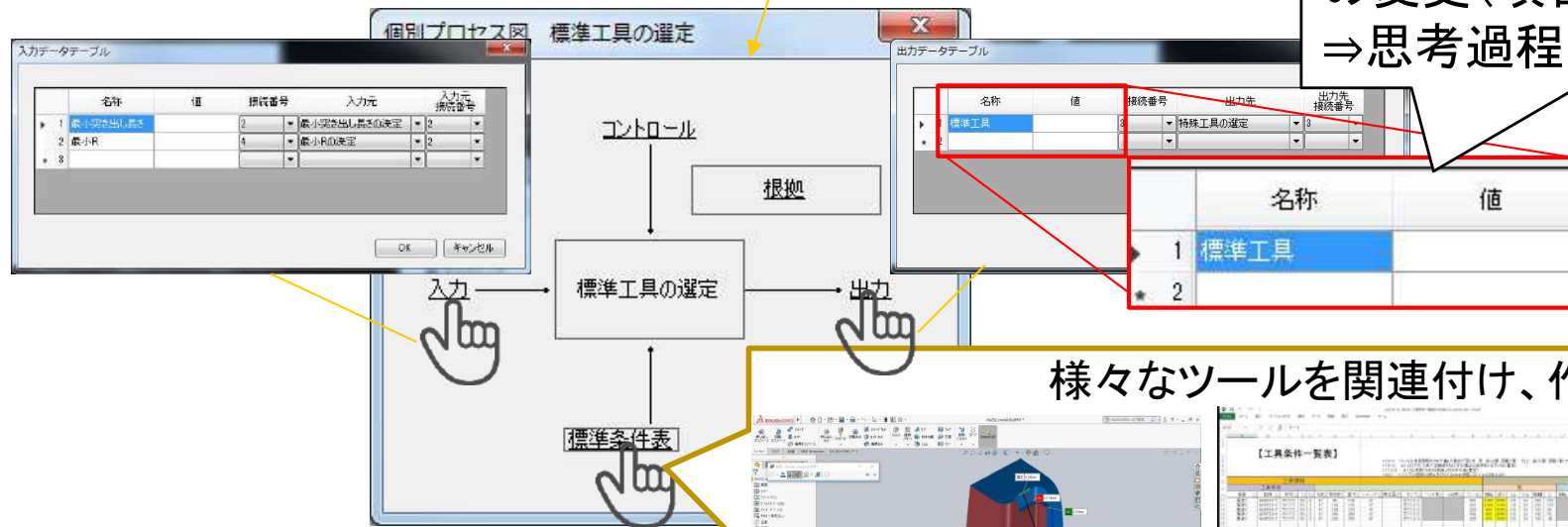
30

全体プロセス図：作業の全体像を確認



仕上げ工具の選定の
支援システム上の実装

個別プロセス図：個別の作業の入出力や考え方を確認



作業履歴や、プロセスモデル
の変更(項目追加)を記録
⇒思考過程の履歴を保存

PMLFD3による記述を用いた
作業支援システム

様々なツールを関連付け、作業支援

CAD/CAM

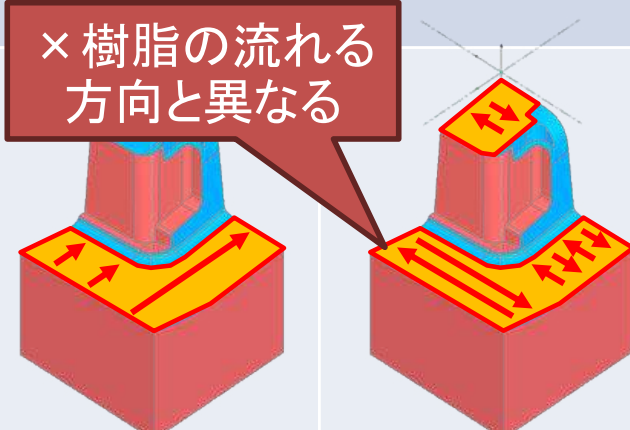
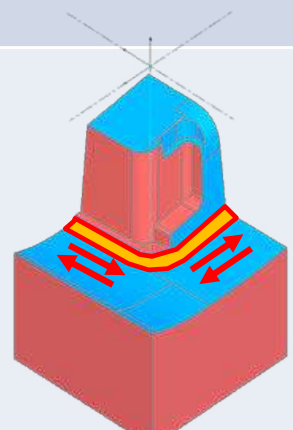
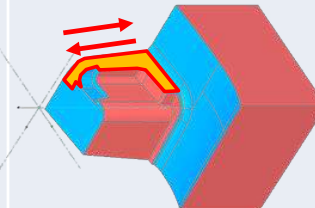
標準工具一覧表 (EXCEL)

工具メーカー
カタログ (PDF)

パイロットスタディ

× 工程数が少なく、
各工程での工具負荷大

■ 非熟練者による加工工程（支援システムなし）

	工程1	工程2	工程3	工程4	工程5
内容	荒加工	中仕上げ	仕上げ	仕上げ	仕上げ
加工イメージ		× 樹脂の流れる方向と異なる 			 ワークの向き を変更
使用工具	直径16mmラジアスエンドミル	直径12mmボールエンドミル	直径12mmボールエンドミル	直径7.5mmボールエンドミル	直径16mmラジアスエンドミル

× 適切な工具径が
選択されていない

■ 熟練者の評価

- ① 工具の選択が適切ではなく、図面通りの加工ができない
- ② 工程数が少なく、各工程での工具負荷が大きく、加工面の仕上がり品質が悪い

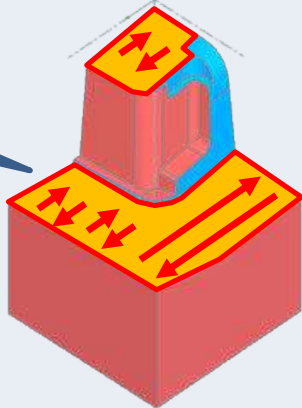
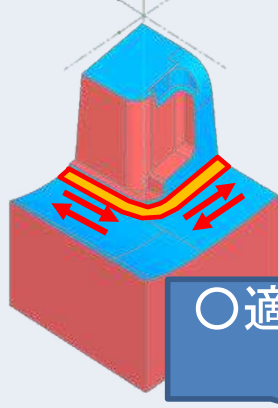
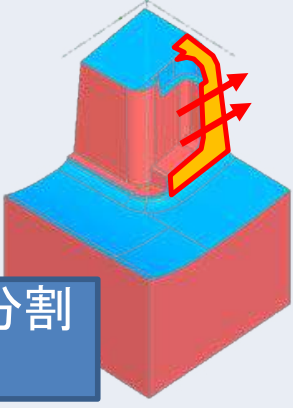
適切な加工工程に至るまで相当な試行錯誤が必要

パイロットスタディ

○工程分割により
工具負荷小

×加工順序が不適切
干渉の可能性あり

■非熟練者による加工工程（支援システムあり）

	工程1	工程2～3	工程4～5	工程6～7	工程8～9
内容	荒加工	中仕上げ/ 仕上げ	中仕上げ/ 仕上げ	中仕上げ/ 仕上げ	中仕上げ/ 仕上げ
加工 イメージ		○樹脂の流れる 方向に加工 			
使用工具	直径16mmラジ アスエンドミル	直径12mmボー ルエンドミル	直径4mmボー ルエンドミル	直径1mmボー ルエンドミル	直径4mmボー ルエンドミル

○適切に加工エリアを分割
適切な工具を選択

■熟練者の評価

- ①図面通りの形状が加工できている
- ②工程数が増え、工具負荷を考慮している
- ③工程の順序がおかしい
(工程8～9は、工程2～3の次であるべき)

■支援システムによる効果

- 全体プロセス表示により工程の流れを理解
- 個別プロセスの「考え方」により選択判断を理解
- モデルに記述がなく支援不足となり、改善なし

支援システムにより、適切な加工工程に近づいていることを確認。

→ 試行回数低減、非熟練者への知識伝達の見込みを得た

若干の考察(1)

- 熟練者の暗黙知を計算機上に形式知化しようとする試みはこれまでも数多くあった
 - シンボルグラウンディング問題



Cyber空間上のデータやソフトウェアの操作としてグラウンディングできた

- 記号とデータの結合は有力なアプローチ
- 自動化できるタスクから逐次自動化(ソフト化、AI化)してゆき、人の判断が必要なタスクと混在させたプロセス記述となり、それ自体が日々カイゼンされて行く

CPPSとしてのDigital Triplet

- デジタル・トリプレットは、サイバーフィジカル生産システム (Cyber Physical Production System) の一形態
 - ただし、デジタル・トリプレットは、生産の自動化を目的としている訳ではなく、技術者を支援したい
 - ここでは、CPPSで言うところのサイバー世界を以下の2つに敢えて分けている
 - » デジタル・ツイン: 物理世界のモデル化
 - » 知的活動世界: 人間がデジタル・ツインを使って様々な問題解決を行う場
- デジタル・トリプレットは、技術者が自発的にエンジニアリングサイクルを構築し、価値を創造するような環境を提供したい

目次

- デジタル化によるものづくりの変化
- デジタル・トリプレット
 - デジタル・トリプレットの考え方
 - 金型加工の例
- D3LF@RACE

Learning Factory [Abele et al. 2017]

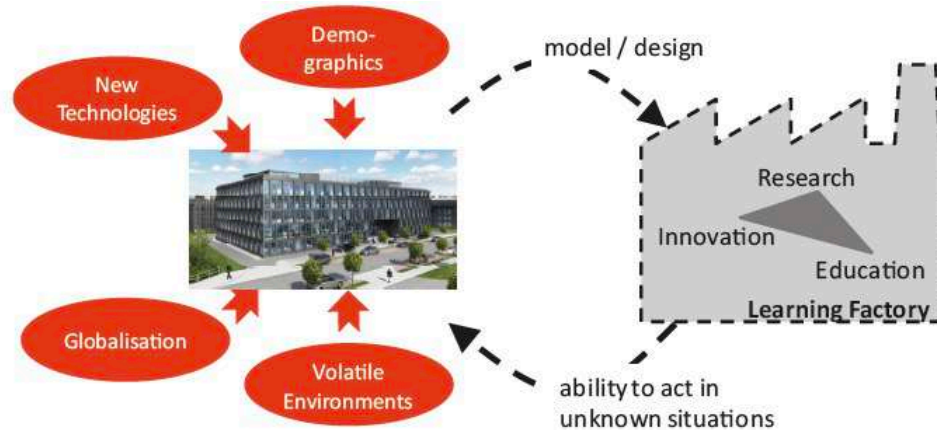


Fig. 2. The learning factory as a model of a real factory—incorporating the three poles of the “knowledge triangle” [11].

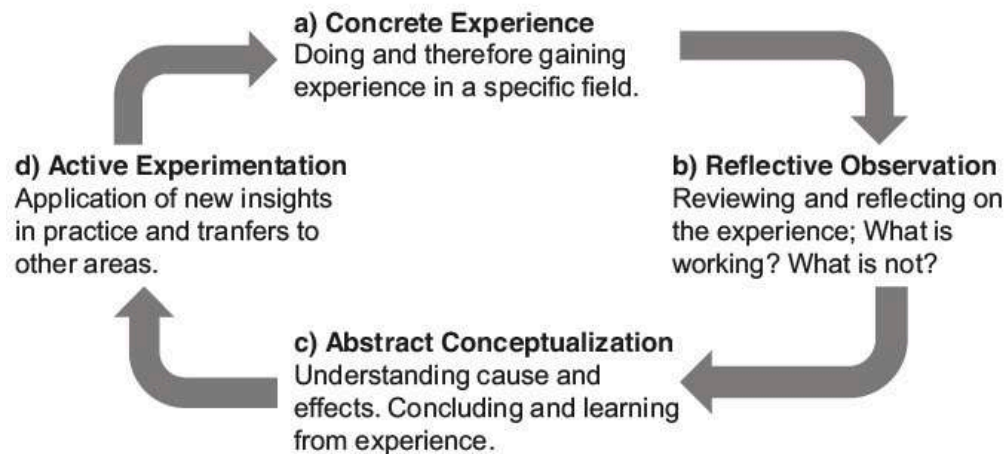


Fig. 6. Kolb's experiential learning cycle [181].

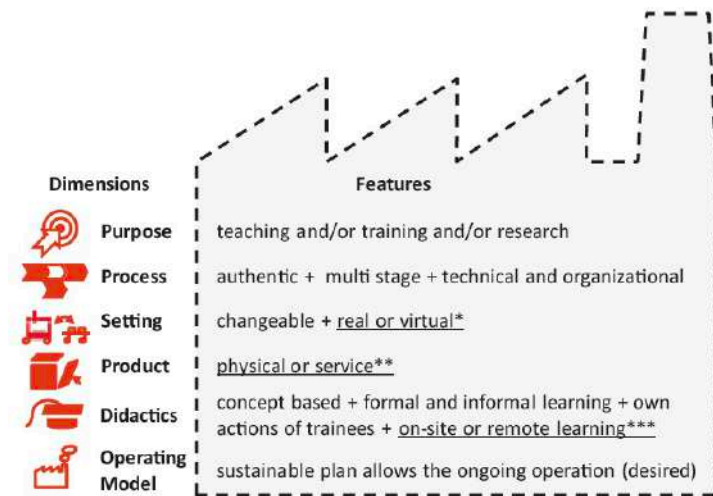


Fig. 9. Key characteristics of learning factories.



Fig. 11. The learning factory CiP at TU Darmstadt [238].

Learning Factoryの例[Abele et al. 2017]

- 大学

- PTW at TU Darmstadt
- The Learning and Innovation Factory (LIF) for Integrative Production Education at Vienna University of Technology
- LPS Learning Factory at Ruhr University of Bochum
- learning factory LSP at IWB, TU Munich
- IFA learning factory at the University of Hannover
- Lean Lab at NTNU (ノルウェー)
- learning factory for advanced Industrial Engineering (aIE) at IFF, University of Stuttgart
- Intelligent Manufacturing Systems (IMS) Center at Windsor (カナダ)
- “Mini-Factory” at the University of Bolzano (イタリア)
- KTH XPRES Lab. (スウェーデン)
- Bayer and TU Berlin built up a learning factory for process optimization

- 企業

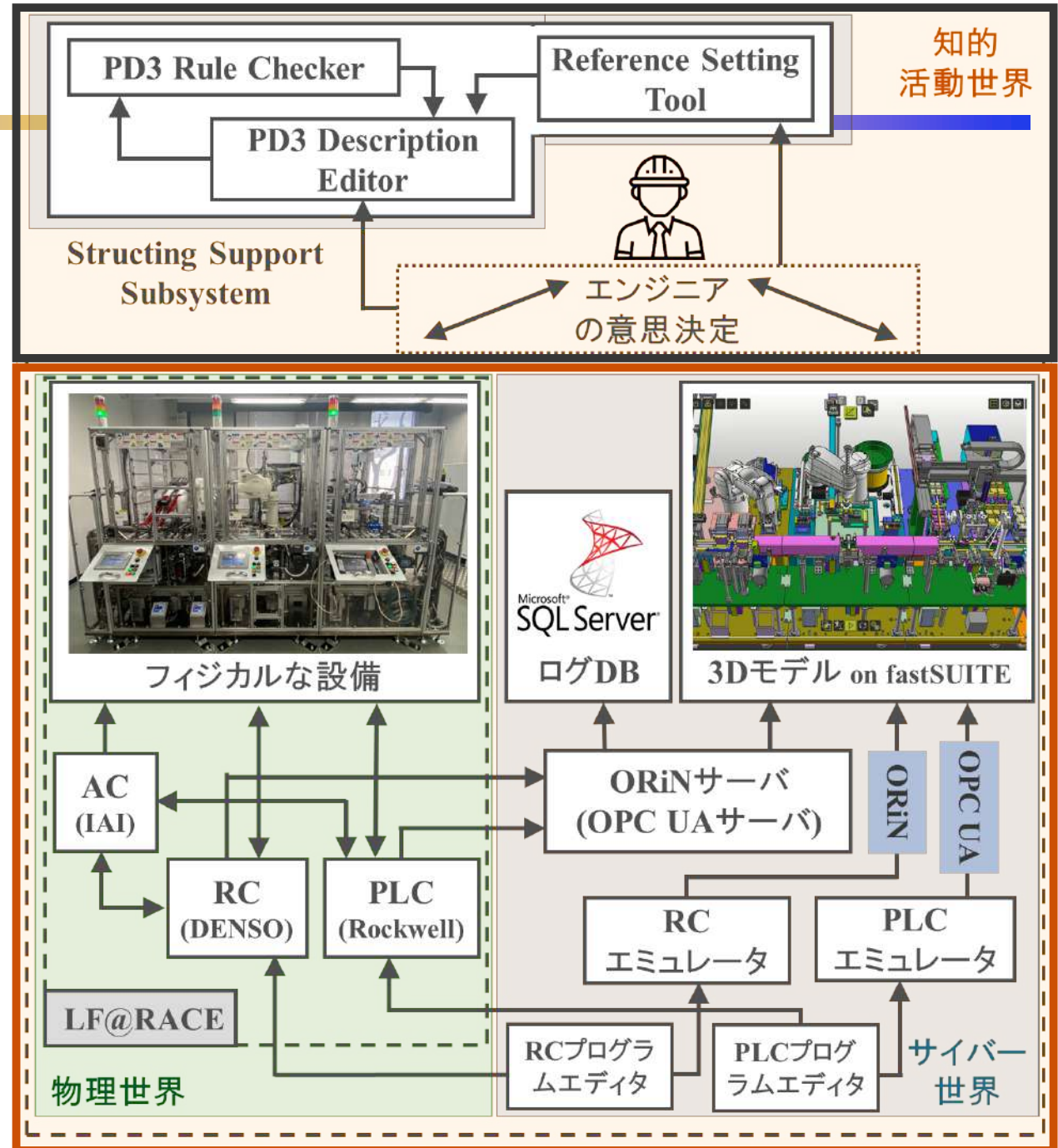
- Chrysler World Class Manufacturing Academy in Michigan, USA
- the BMW learning factory VPS (Value-Oriented Production System) Center (ミュンヘン)
- McKinsey & Co. developed a global network of learning factories

Learning Factory at 人工物工学研究センター



構築したD3LF@RACE

39



構築したLF@RACE

6軸ロボッ
ト



スカラロボッ
ト



直交ロボッ
ト



12の作業プロセスを持つ
レゴカー自動組立ラ
イン

- ベルトコンベアで運搬されるパレット上で、**3つのロボット**が組立や検査作業を実行
- 3種類コントローラが機械の動きを制御
 - Robot Controller(**RC**)
 - Programmable Logic Controller(**PLC**)
 - Actuator Controller(**AC**)



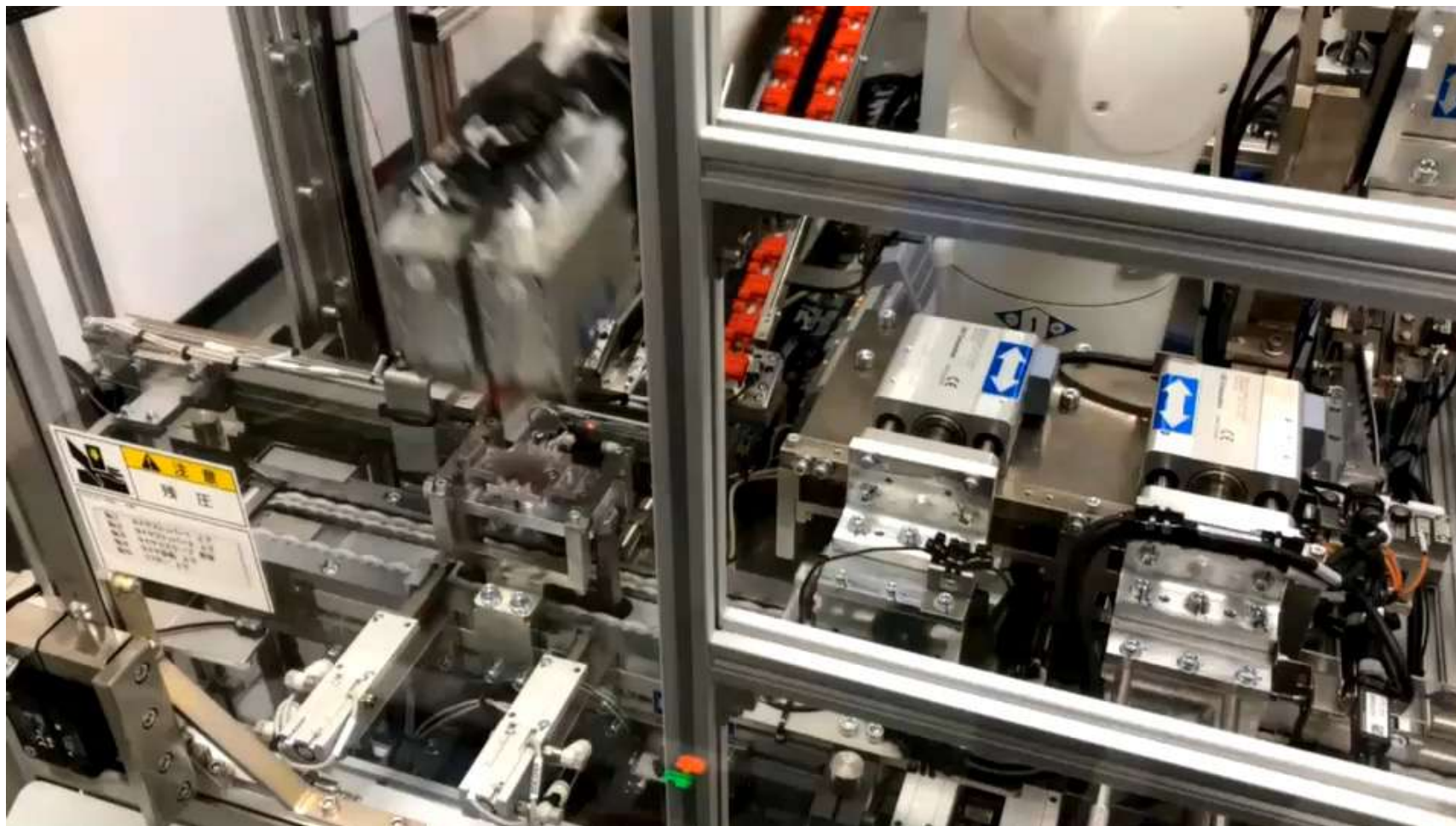
完成品
のレゴ

構築したLF@RACE

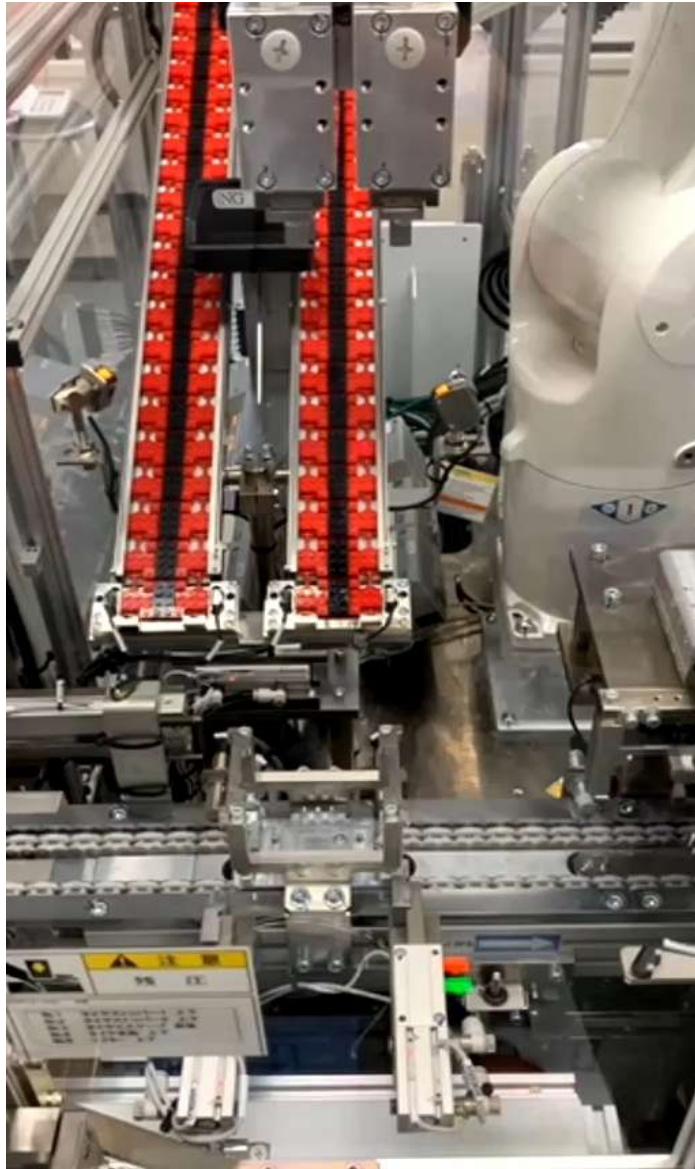
- 9つの教育モードを用意
 1. ベース部品の移し替え位置のずれ発生
 2. タイヤの組み付け不良の発生
 3. ロボットのスタートタイミングの遅延
 4. タイヤ圧入時の寸法不良による不良品の発生
 5. ルーフ部品供給時の投入ミスによる設備停止
 6. パレット高さの計測不備によるルーフ高さの寸法誤判定
 7. パレット待ち時間の発生によるロス時間の発生
 8. ワークの有無を確認するセンサーの誤確認による設備停止
 9. 設備の安全カバーを開けた際の全設備での非常停止

構築したLF@RACE

- 通常運転の様子(※2倍速)

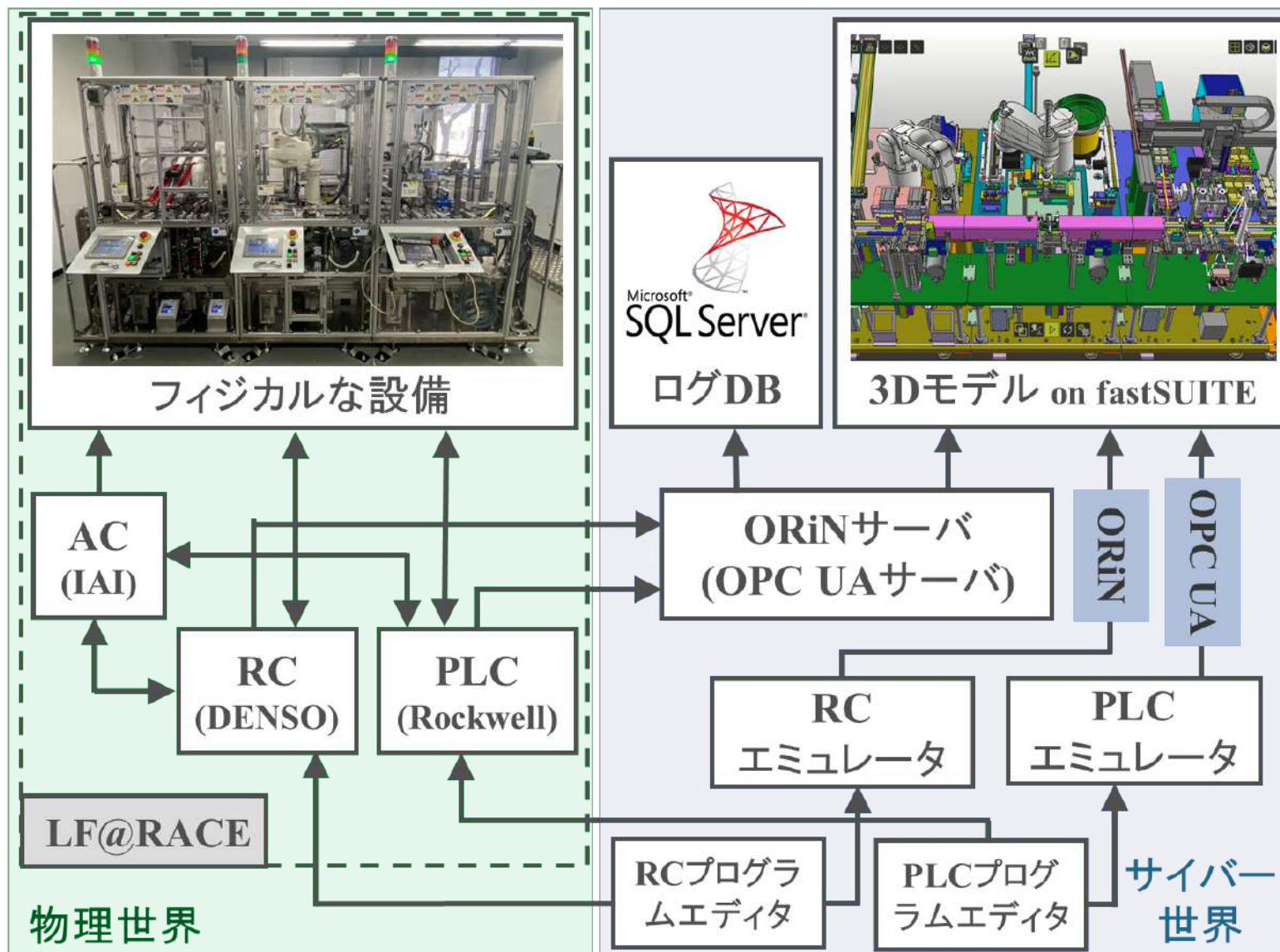


構築したLF@RACE

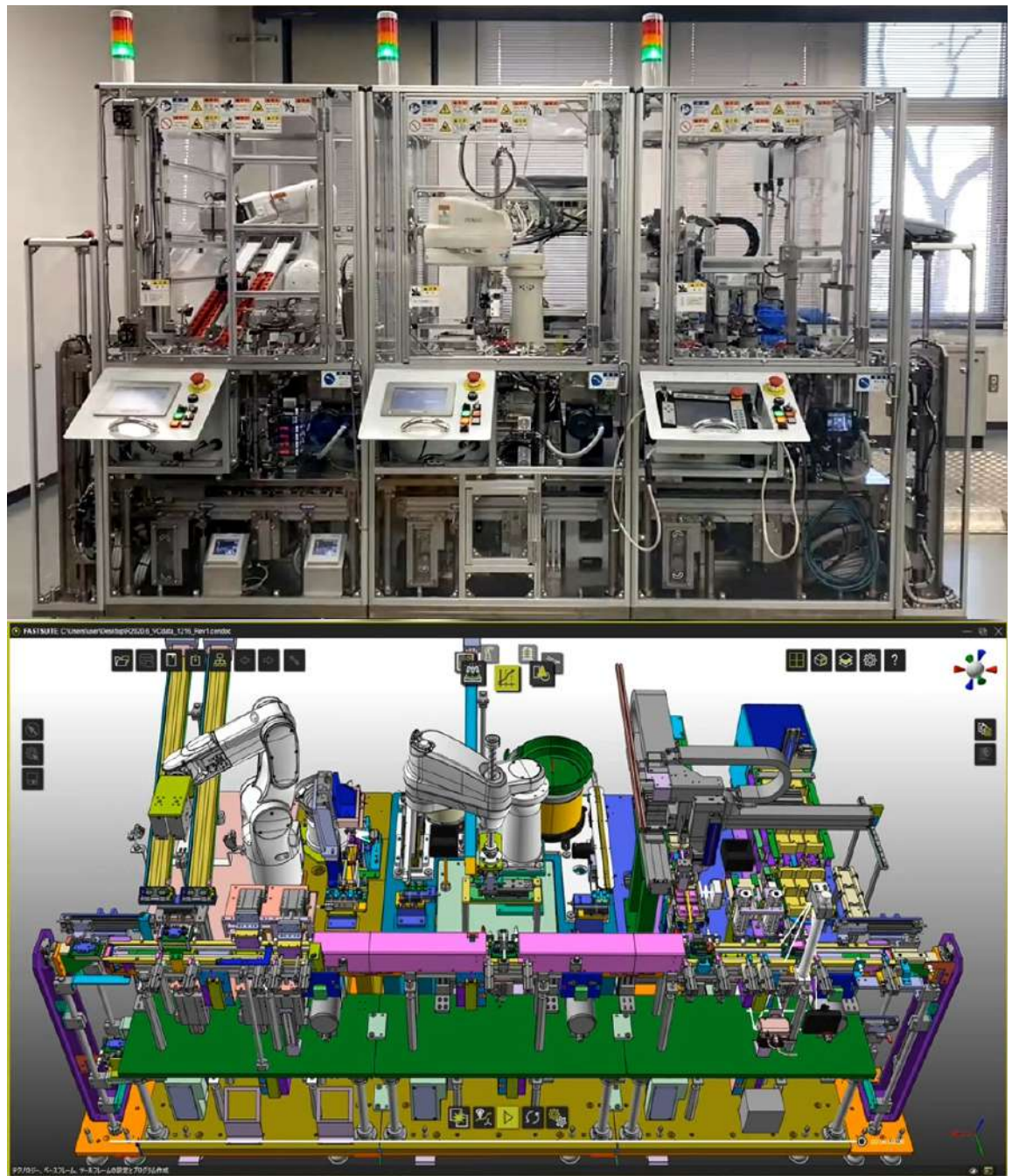


- 教育モード1:
ベース部品の移し替え
位置のずれ

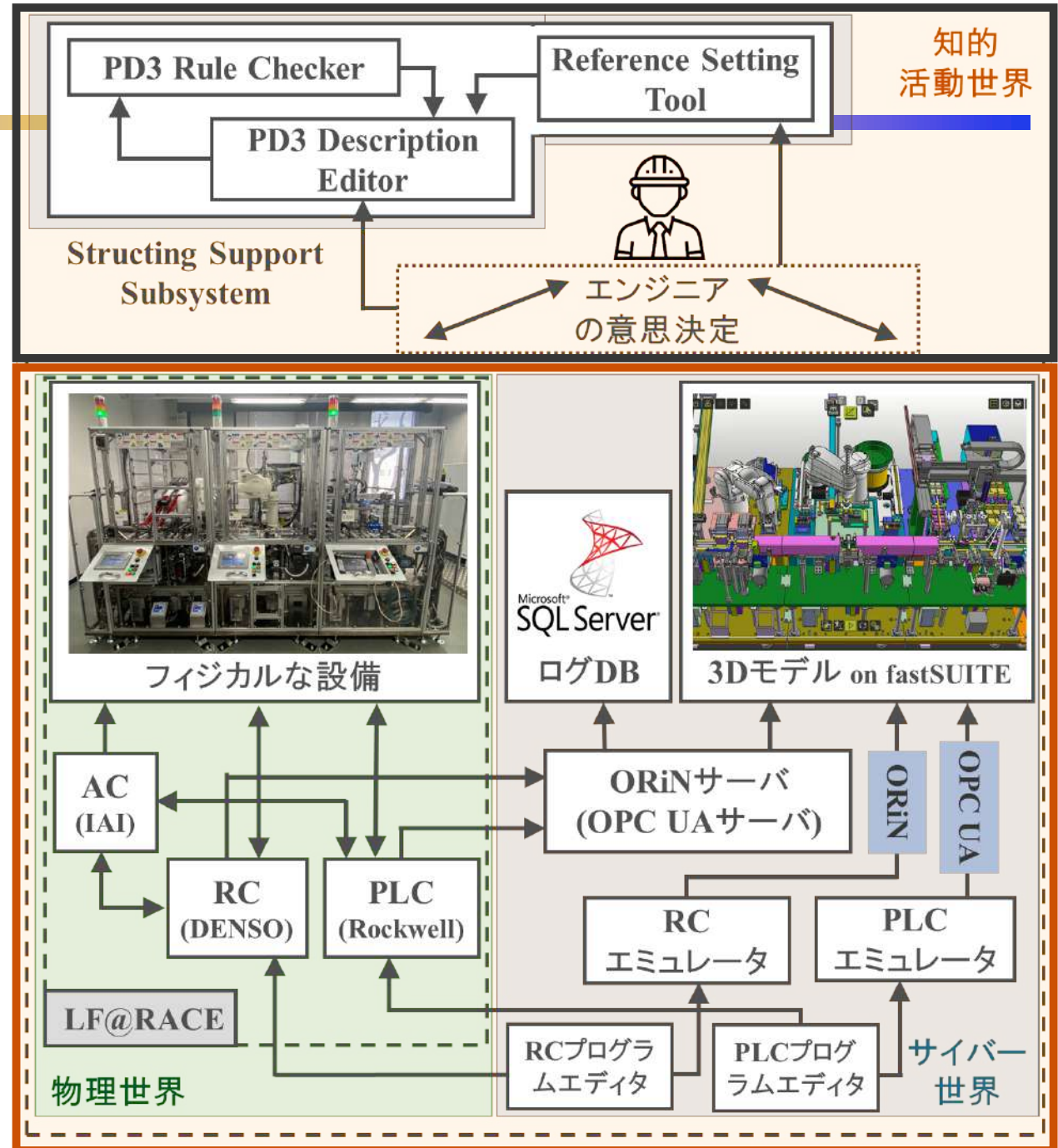
構築したD2



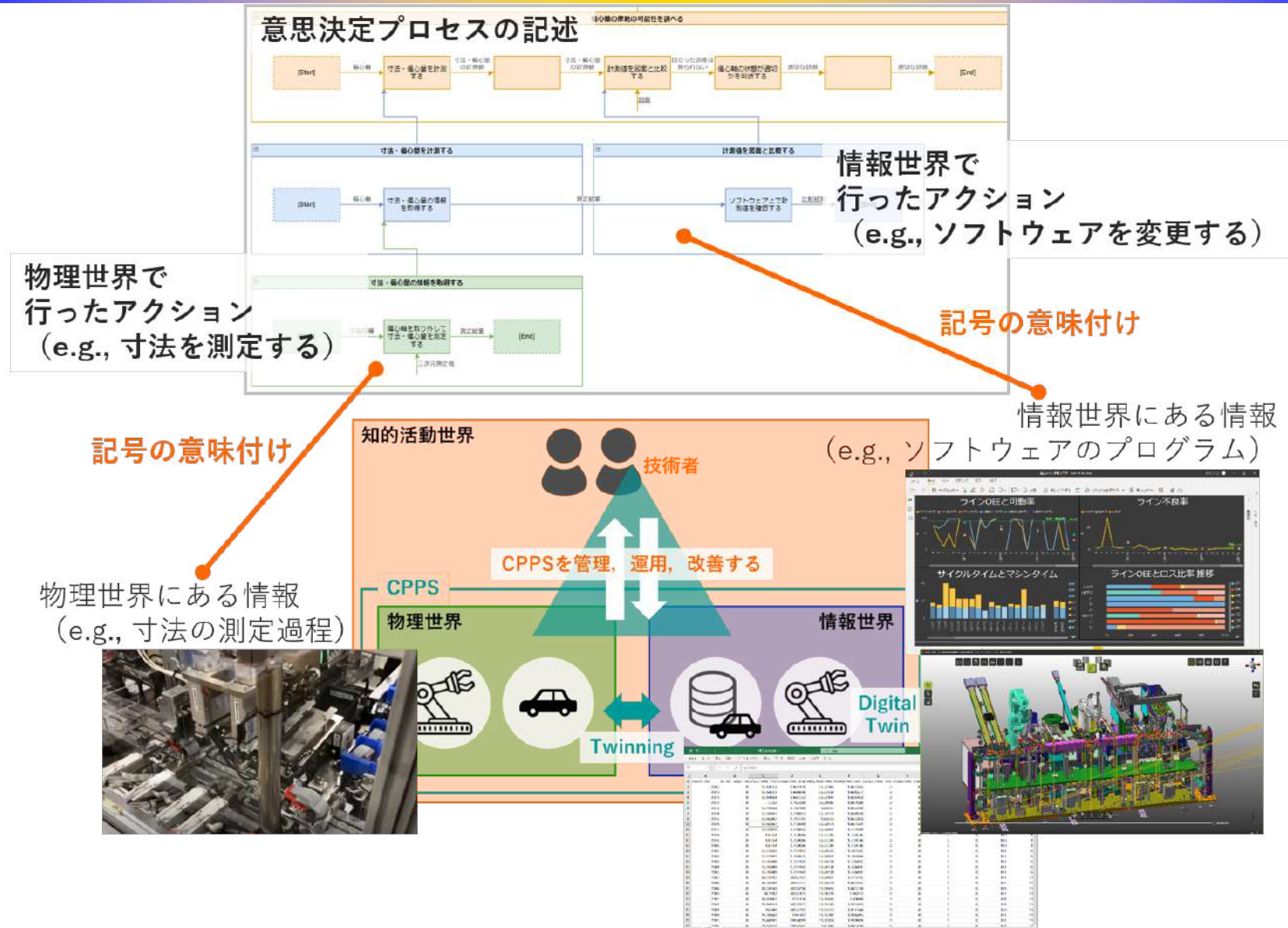
リアルタイムに連
動して動くD2



構築したD3LF@RACE

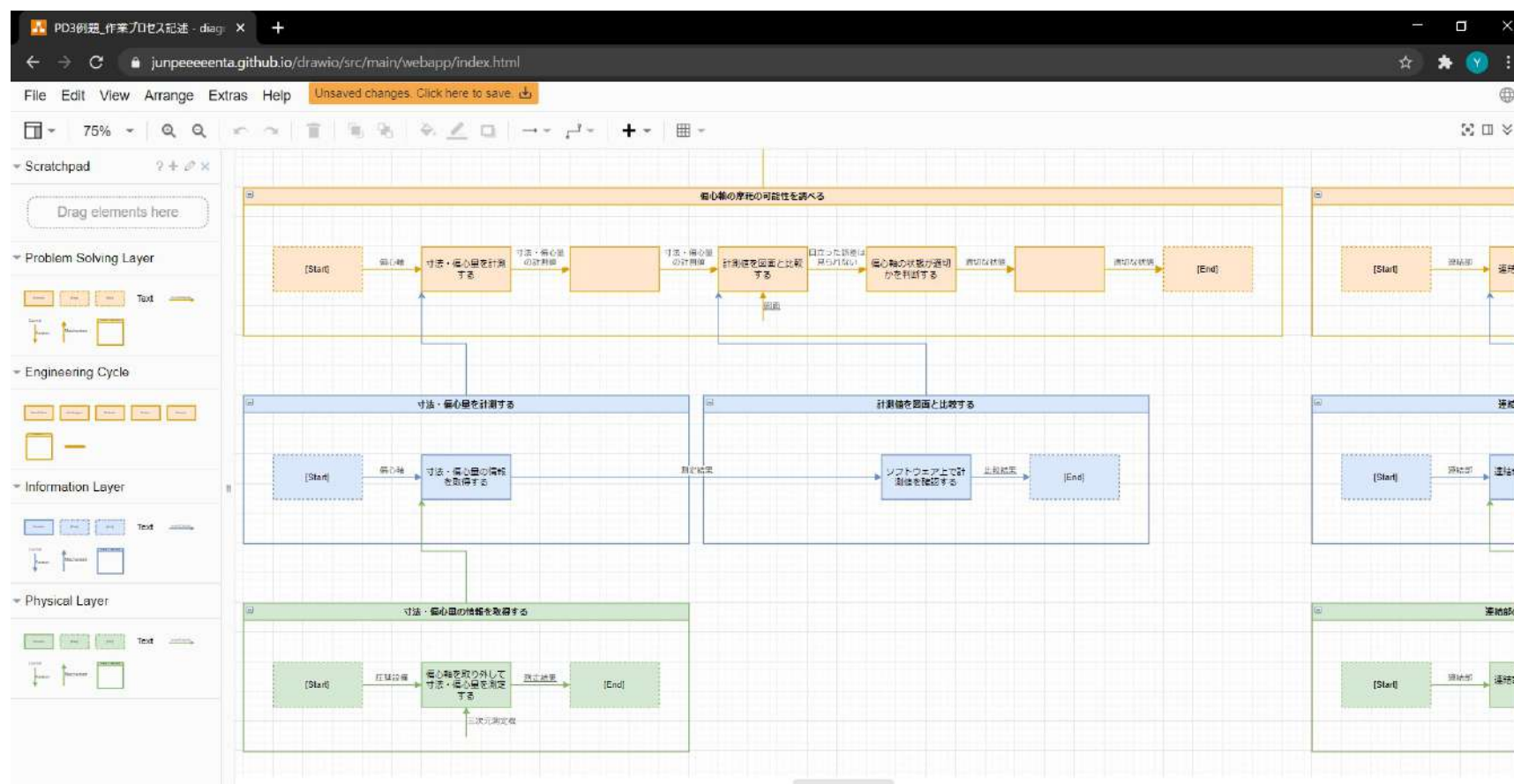


D2との接続



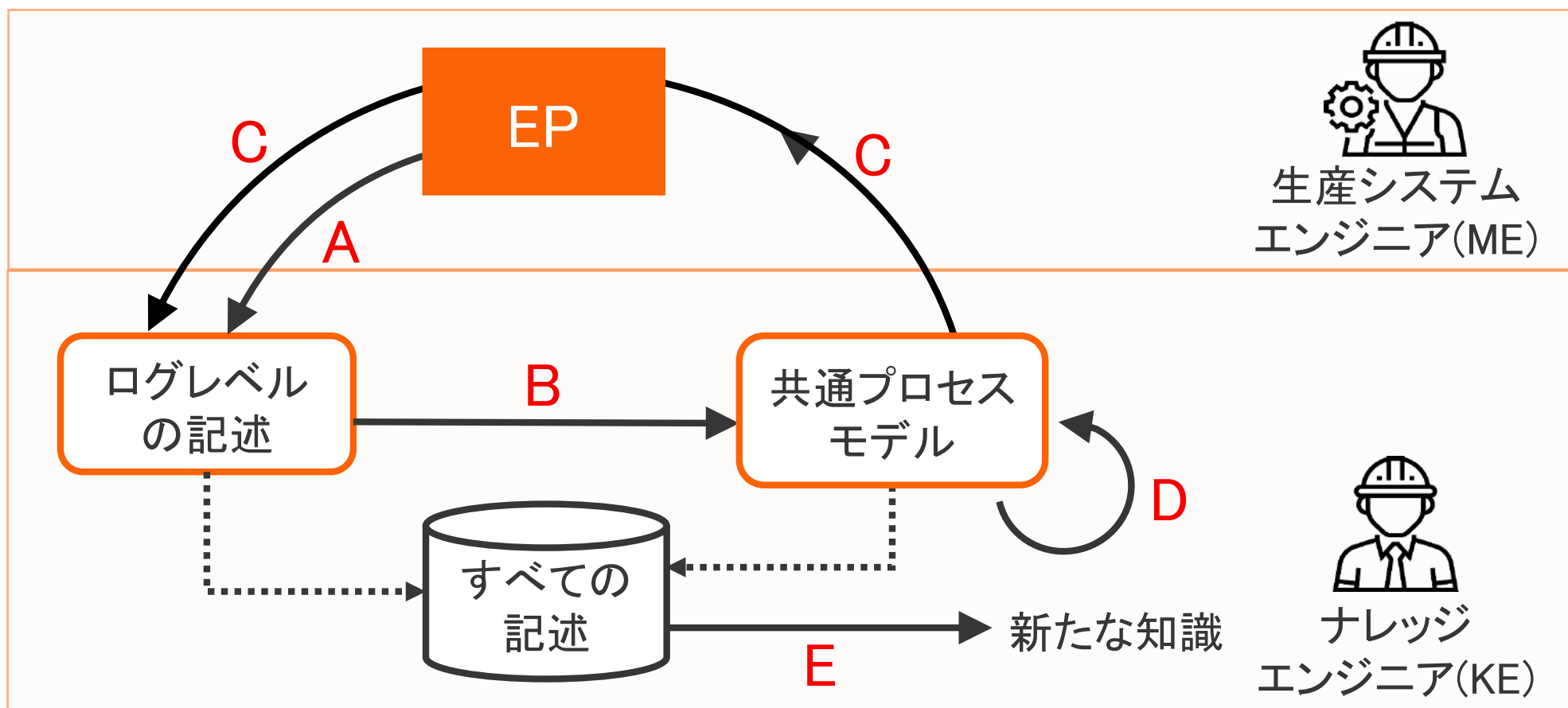
PD3 Description Editor

- PD3による意思決定プロセスの記述を支援するツール
 - mxGraphというJavaScriptの作図ライブラリをベースに実装した



エンジニアリングプロセスの記述

- ログレベルの記述：行われたことを記述したDescriptiveな記述
- 共通プロセスモデル：どのように行ふべきかを記述したPrescriptiveな記述



典型的な使い方

- 教育モード(不具合)を仕込んでおく or 単純に正常状態で動かし、生産性を向上させる
- 1. LFの状態を確認する(実物、ログデータ、3Dシミュレータのオンラインモード)
- 2. 問題を発見し、解決策を考える
- 3. 解決策の検討(3Dシミュレータのオフラインモード)
- 4. 解決策の決定、実施(PLCのプログラム変更)(未実施)
- 以上のプロセスを全てPD3で記録して、自己点検、エキスパートとの比較、マニュアル化・・・

ケーススタディ

Jumpei Goto



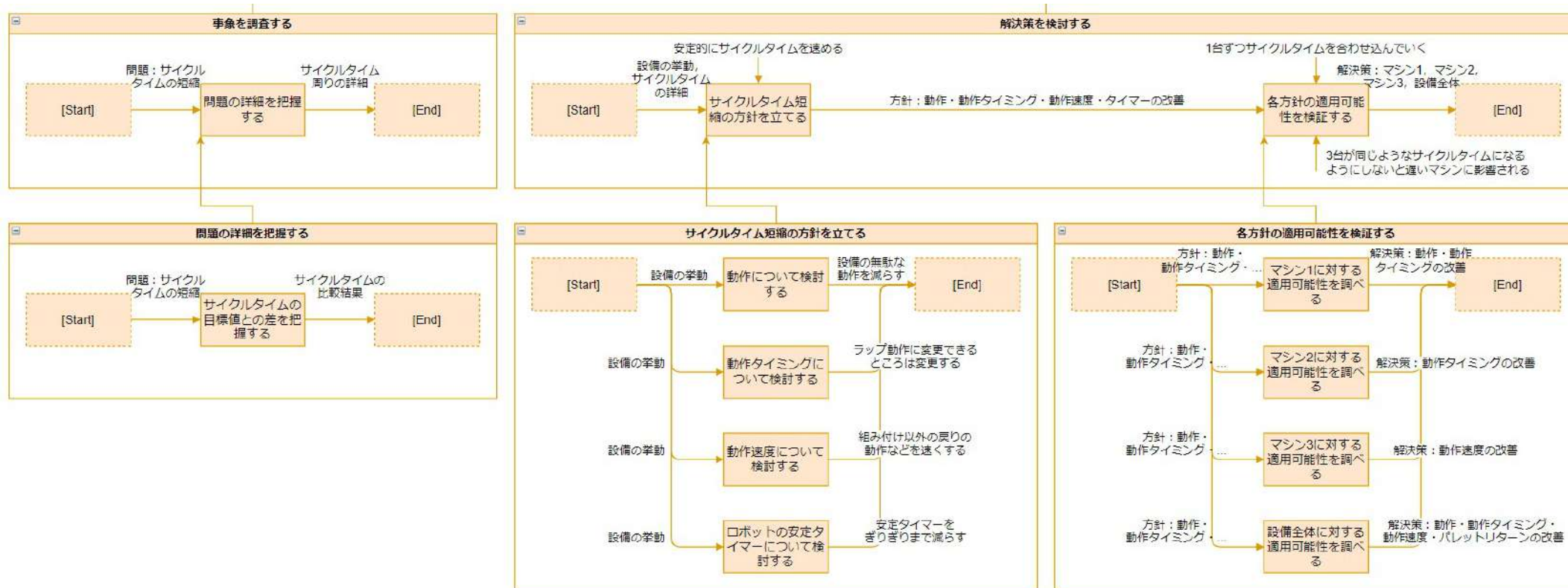
ケーススタディ - 結果

- 意思決定プロセスの抽出
 - 被験者1と2は想定していた2つの解決策を含むそれぞれ7個, 12個の解決策を導出した
- 意思決定プロセスの記述
 - 被験者1, 2それぞれの意思決定についてサイクルタイムを確認し, 被験者によって異なるサイクルタイムの短縮方針 (e.g., 動作距離の短縮) をいくつか発想し, マシンの挙動を観察して適用可能な方針を決定するプロセスを記述した

意思決定プロセスの記述 - 被験者1



全体の流れ



On going projects

- 自動組立ラインの不具合発見&回復
- 自動組立ラインの生産効率向上
- 金型製造工程のスケジューリング
- プラントの巡回点検のノウハウ抽出
- 生産工程設計のノウハウ抽出
- ...

まとめとメッセージ

- デジタル革命(Digital Transformation)時代におけるものづくりの在り方について議論した
- 「デジタル・トリプレット」という考え方を紹介した
- デジタル・トリプレットに基づくLearning Factoryの試みを紹介した
- メッセージ
 - 生産科学・技術、および、新しいデジタル科学・技術の深い知識を学びつつ、それを活用して、新たな価値を創造する能力を高めることが重要かと思います

Acknowledgement

- 本研究の一部は、NEDO JPNP18002、経産省産学連携デジタルものづくり中核人材育成事業、文科省科学研究費JP19H02037の補助を受けています

ご清聴ありがとうございました