

# 再利用可能なモータ制御ソフトウェア開発プラットフォームの構築



2022年05月25日

株式会社 IHI

技術開発本部 技術基盤センター 制御・センシンググループ

藤澤 翔太

# 目次

会社概要

電動化の取り組み

モデル活用の取り組み

背景・課題

事例紹介

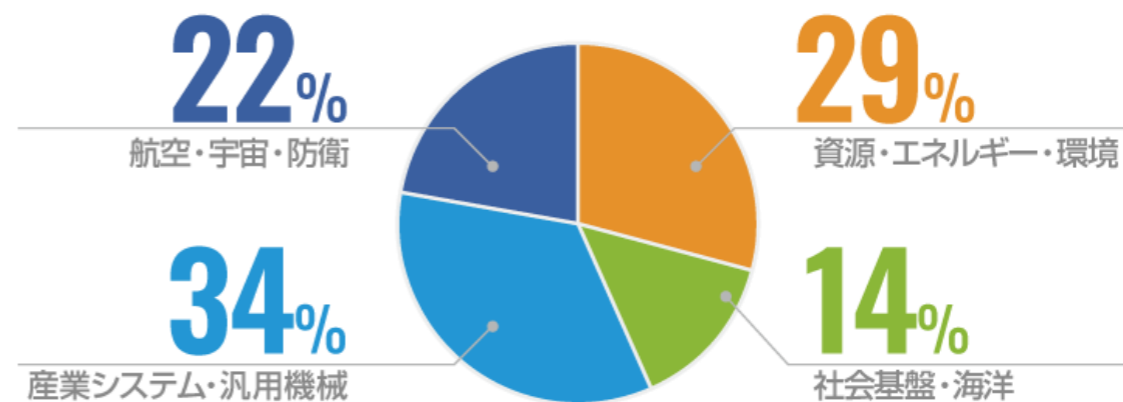
ソフトウェアプロダクトライン(SPL)開発

成果と今後の課題

## IHI グループ概要

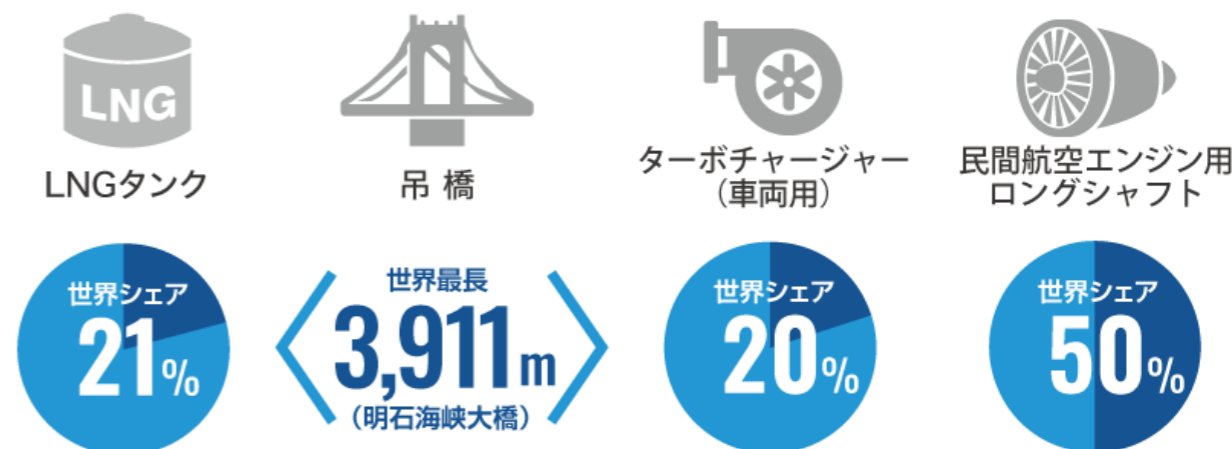
社名	株式会社IHI / IHI Corporation
本社所在地	〒135-8710 東京都江東区豊洲三丁目1-1 豊洲IHIビル
創業	嘉永6年(1853年)12月5日
資本金	1,071億円
主要事業	資源・エネルギー 社会インフラ 産業機械 航空・宇宙
売上収益 (連結)	11,129億円 (2021年3月期)
従業員数	7,796名 連結対象人員:29,149名(2021年3月末)

## 事業別売上高比率



2021年3月期

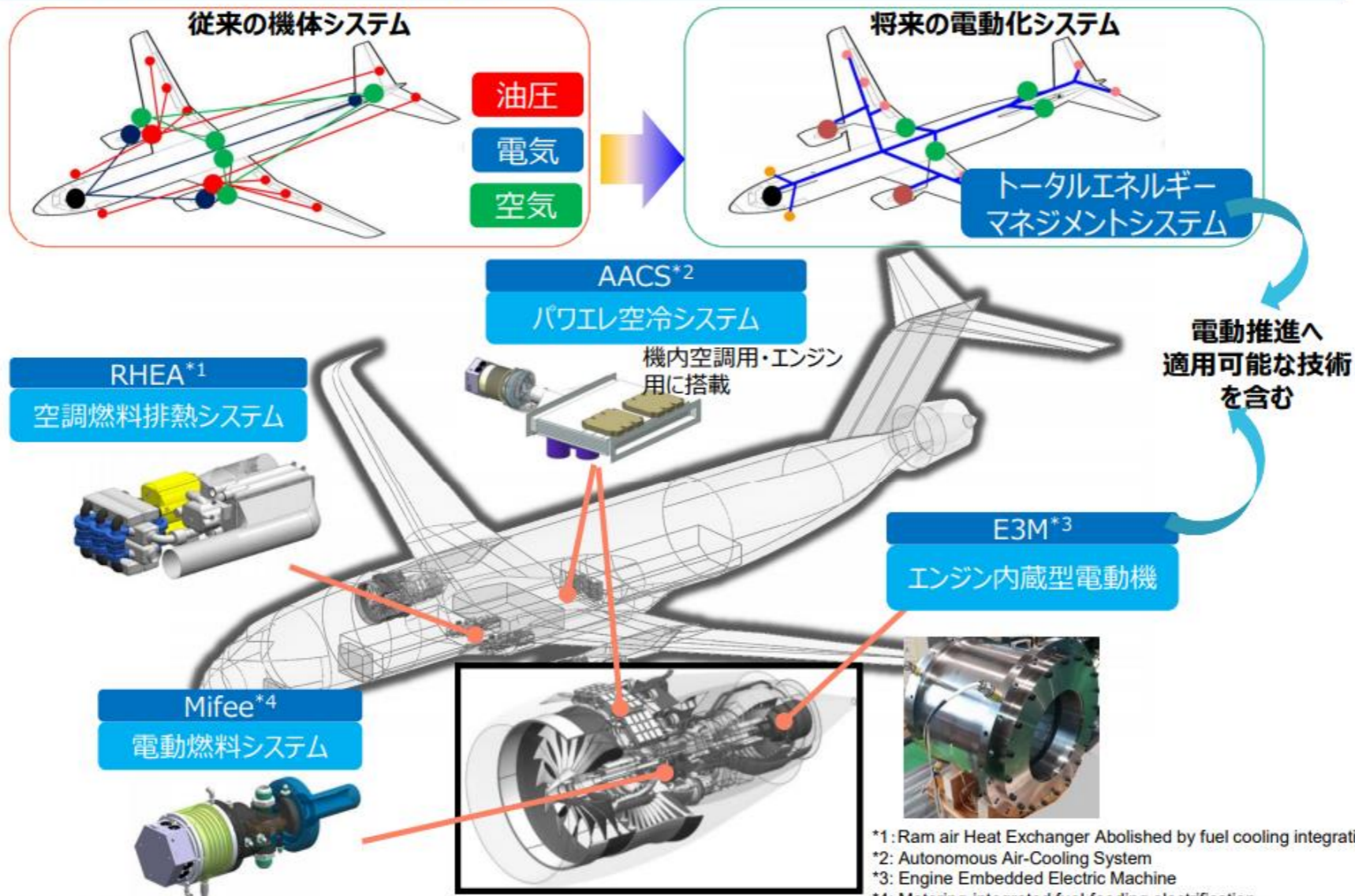
## 世界をリードする製品(一例)



出所: 第三者機関調査

2019年時点

## 航空機システム電動化：主な研究アイテム

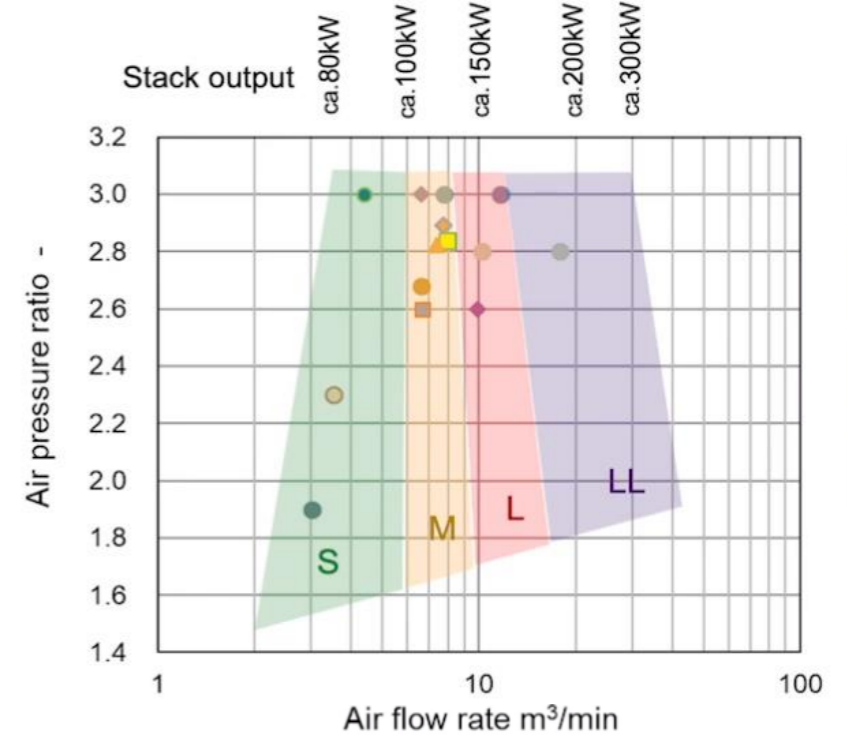
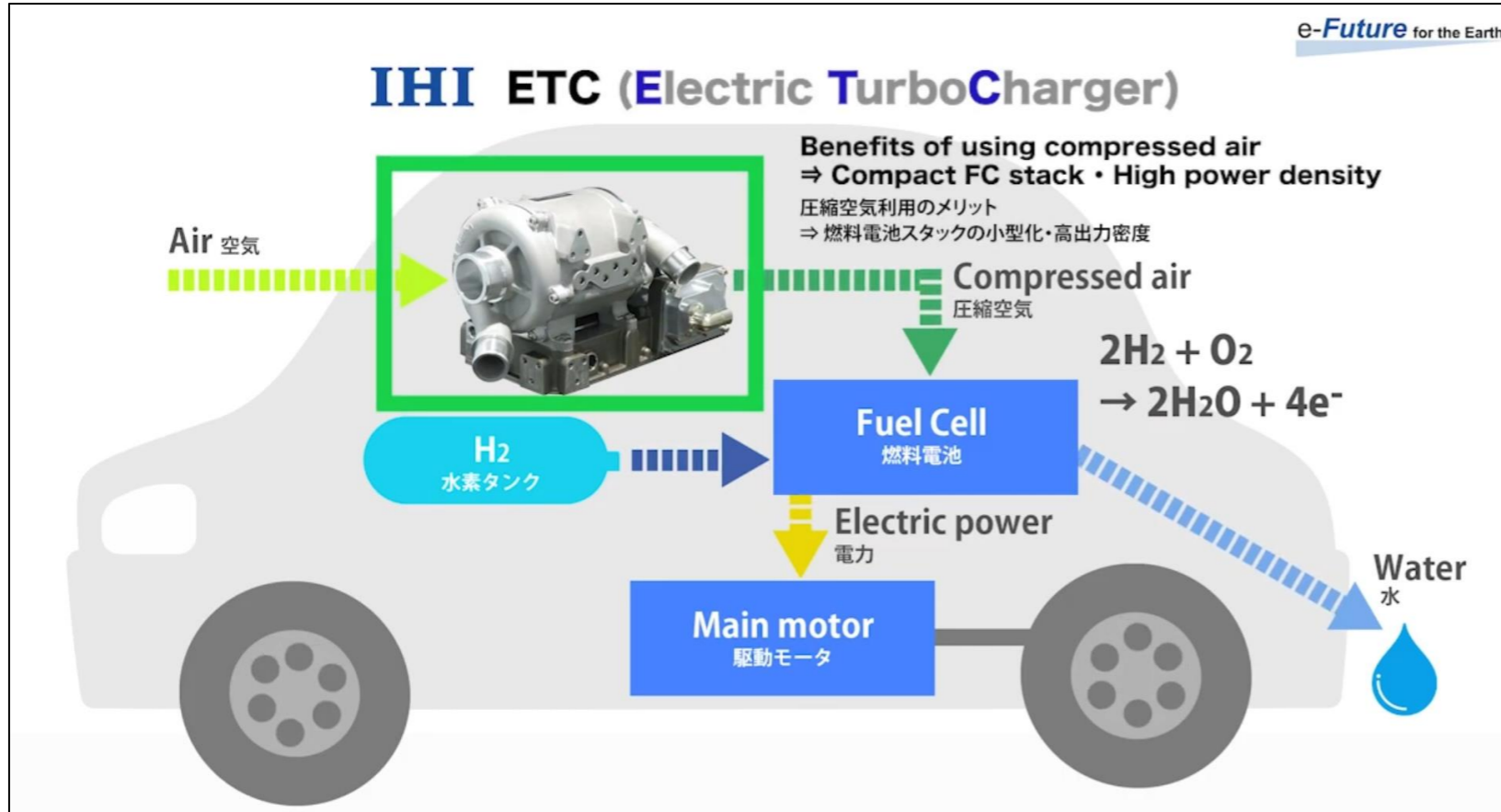


Copyright © 2021 IHI Corporation All Rights Reserved. — IHI Proprietary / Confidential Information —

\*1: Ram air Heat Exchanger Abolished by fuel cooling integration  
\*2: Autonomous Air-Cooling System  
\*3: Engine Embedded Electric Machine  
\*4: Metering-integrated fuel-feeding electrification

IRME21-424

8



### IHI ETC series

- S size (FC output ca.80kW)**  
Development completed 量産品
- M size (FC output ca.100kW)**  
Under development 開発中
- L size (FC output ca.150kW)**  
Under development 開発中
- LL size**  
(FC output ca.200-300kW)  
Using multiple ETCs 複数台使用  
Under development 開発中

MBD技術コンソーシアム(MBAC)

コアメンバーとしての活動

- モデル流通WG
- モデル作成規約WG
- MATLAB EXPO Japan 2021で紹介

航空機エンジン制御MBD

- 制御ロジック設計, MILS



航空機エンジン制御MBD

- エンジン制御SWの設計・実装・検証
- DO-178C, DO-331準拠のためのワークフロー
- 別セッションで紹介

車両用電動過給機

モータ制御MBD

- 制御ロジック設計, MILS



複数の電動機種向け

モータ制御MBD

- モータ制御SWの設計・実装・検証
- 本講演で紹介

## ■ 背景

- 電動製品(高速回転モータ)関連のプロジェクトが増加
- 社内に制御・ソフトウェア技術者が少ない



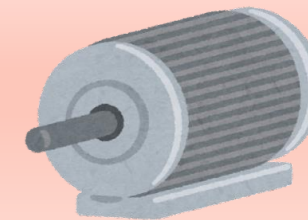
## ■ 事業上の課題

- モータ制御ソフトウェア開発において品質を担保しつつ開発効率を向上したい



## ■ IHIの電動製品の特徴

- モータ制御のベース部分は共通している
- 機種ごとのシステム要件の違いから制御手法に多くのバリエーションが存在



## ■ 電動製品の制御ソフトウェア開発戦略

- ソフトウェアの「固変分離」によって再利用性を向上する
  - **ソフトウェアプロダクトライン開発**
- 自動コード生成の活用

## ■ ソフトウェアプロダクトライン開発の概要

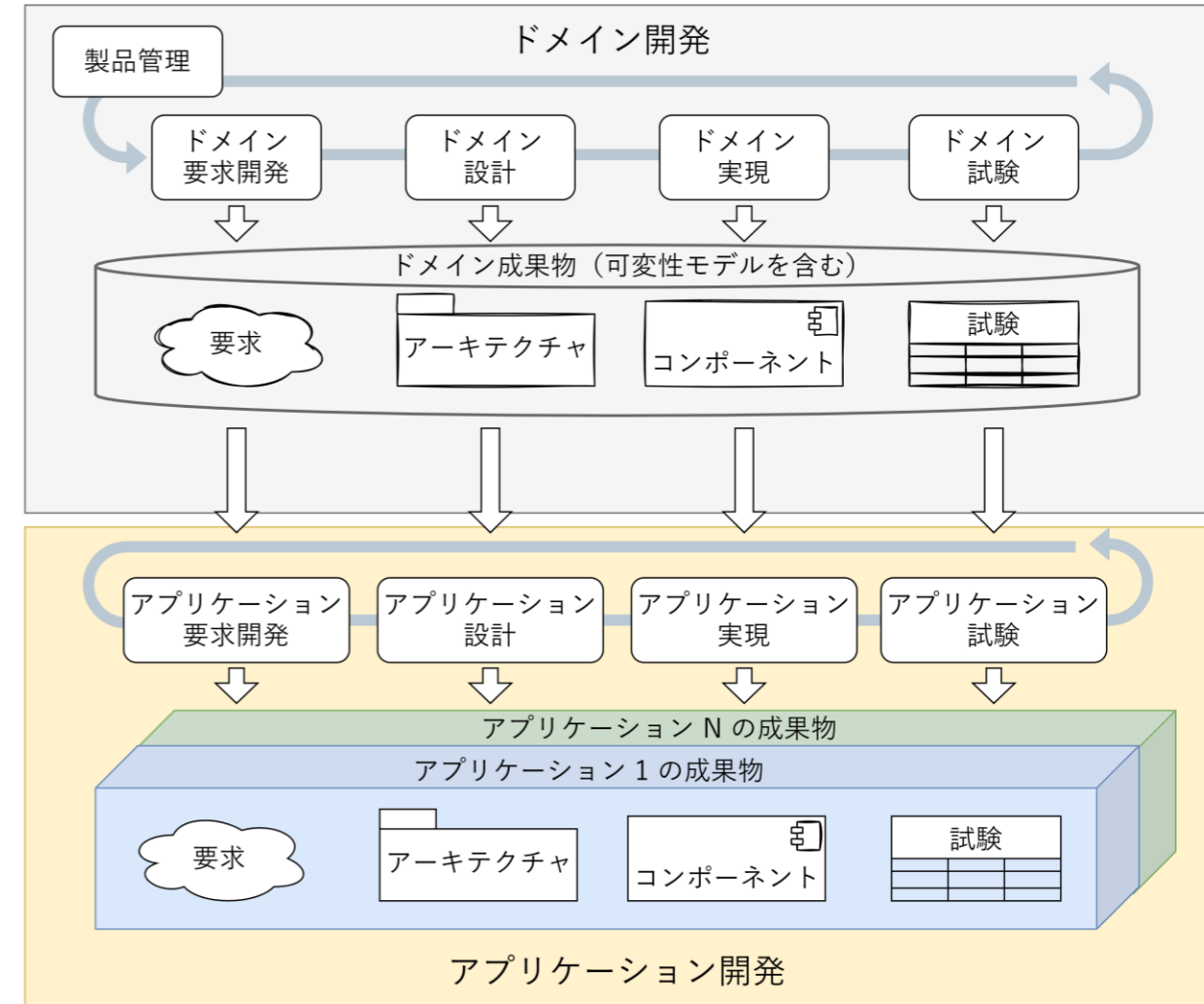
- ソフトウェア製品系列に対し開発プラットフォームを構築し(ドメイン開発), それを積極的に再利用して効率的に個別機種に対するソフトウェア開発を行う(アプリケーション開発)

### 1. ドメイン開発:

- ソフトウェア製品系列の**共通性**と**可変性**を定義
- 可変性を含む開発成果物を再利用性の高い形式で構築する

### 2. アプリケーション開発:

- ドメイン開発の成果物を再利用する
- ドメイン開発の成果物により達成できるものとアプリケーション要求の差分を識別・補完する



参考: クラウス・ポールら, ソフトウェアプロダクトラインエンジニアリング, エスアイビー・アクセス, 2009

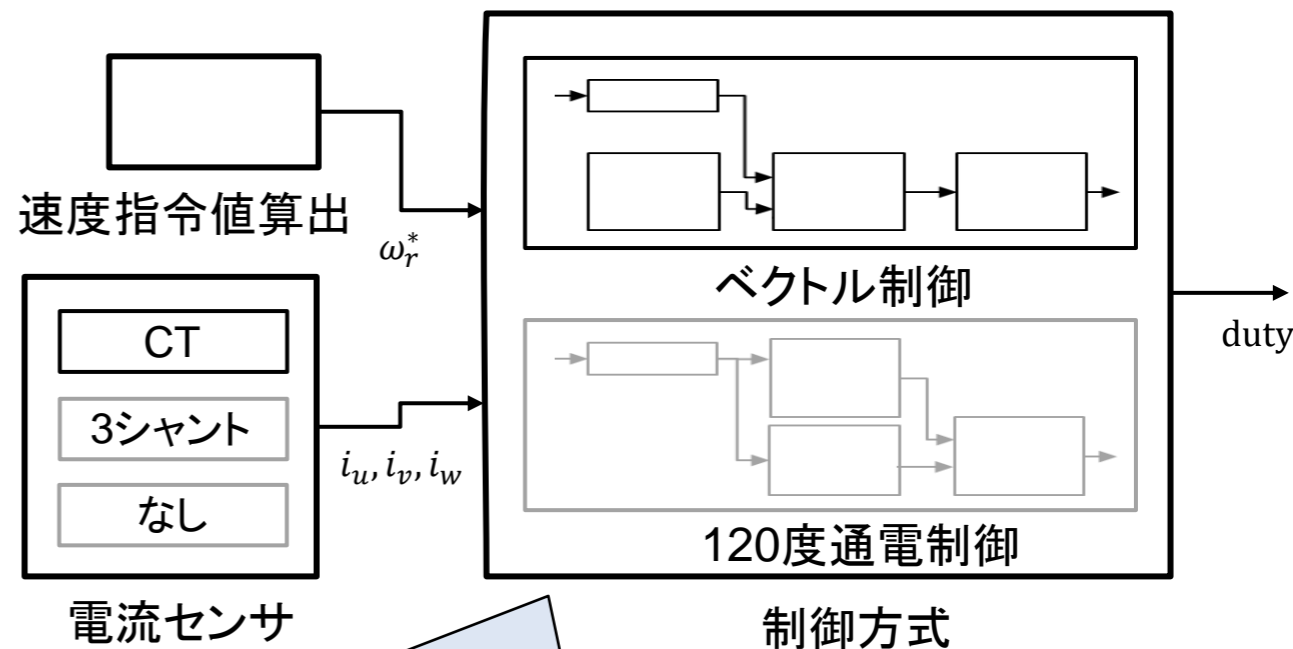


- 共通性: どの製品でも不変の機能
- 可変性: 機種ごとに特定の選択肢の中から選ぶことができる機能
  - 機能ごとに入出力が異なる場合があるため, その可変性を織り込んでアーキテクチャを設計する

		製品 A	製品 B	製品 C	分類
速度指令 値算出	(選択肢なし)	○	○	○	共通性
制御方式	ベクトル制御	○	○		可変性
	120度通電制御			○	
電流 センサ	CT *1	○			可変性
	シャント抵抗		○		
	なし			○	

**選択肢**

\*1: CT: Current Transformer



ベクトル制御と120度通電制御の入力は異なるためどちらの場合にも対応できるアーキテクチャにする必要がある

# 可変性の表現

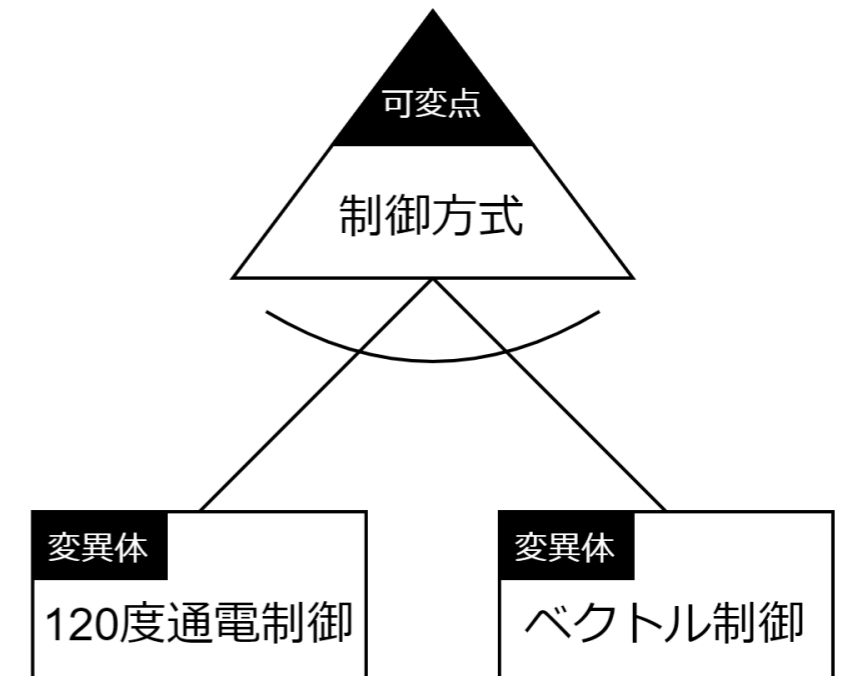
- 次に示す概念を用いて可変性を表現する
  - 可変点：特定の観点でまとめられたソフトウェアの可変部分
  - 変異体：可変点に対応する選択肢

		製品 A	製品 B	製品 C	分類
速度指令 値算出	(選択肢なし)	○	○	○	共通性
制御方式	ベクトル制御	○	○		可変性
	120度通電制御			○	
電流 センサ	CT *1	○			可変性
	シャント抵抗		○		
	なし			○	

可変点

変異体

\*1: CT: Current Transformer

可変性の  
図的表現

## ■ 可変性制約関係:

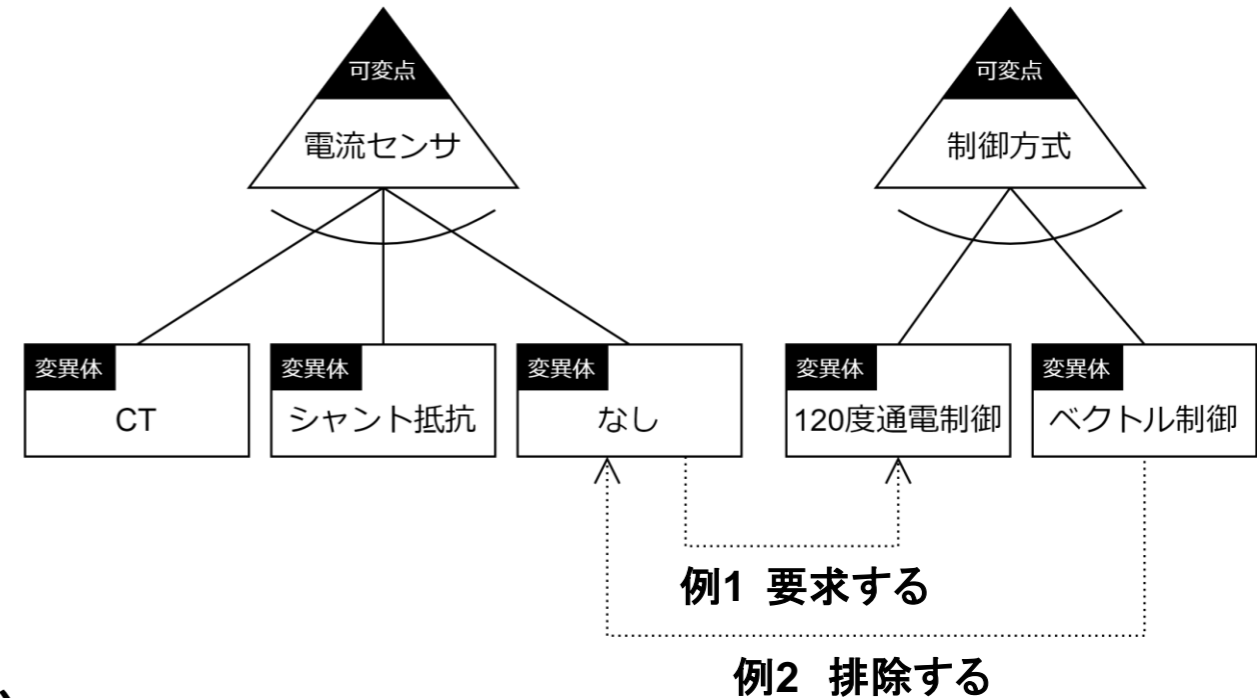
- 可変点・変異体間に存在する制約関係
- ある要素が他の要素を「要求する」／「排除する」の2パターンがある

### ➤ 例1: 変異体が変異体を要求する

- 電流センサとして”なし”を選択する場合、制御方式として”120度通電”を選択しなければならない

### ➤ 例2: 変異体が変異体を排除する

- 制御方式として”ベクトル制御”を選択する場合、電流センサとして”なし”を選択することはできない

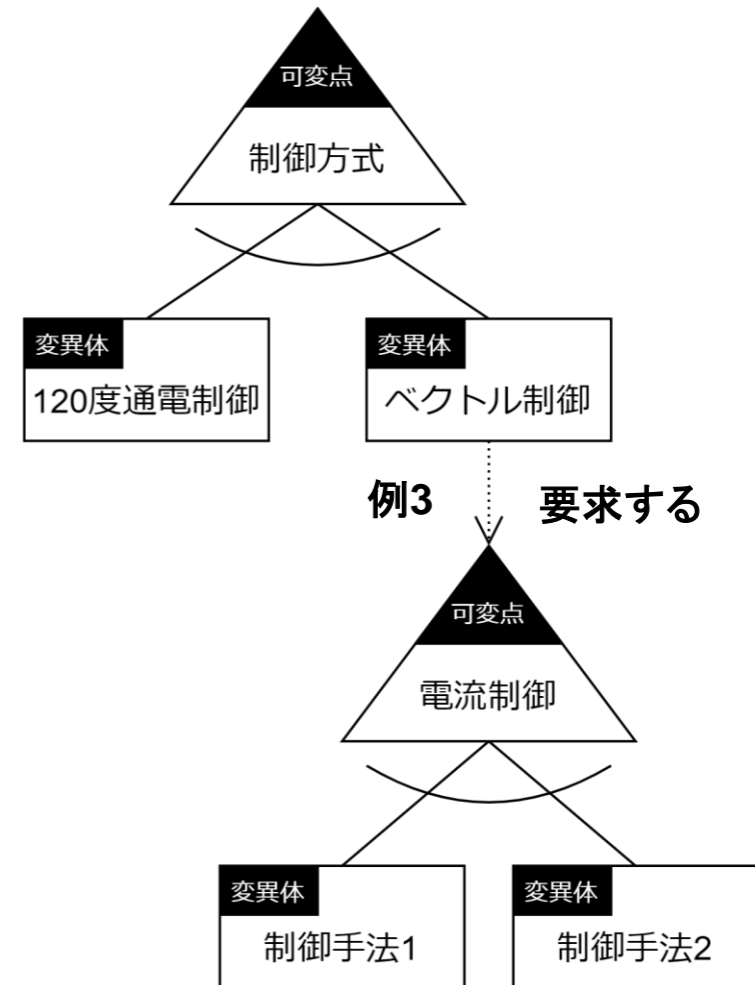


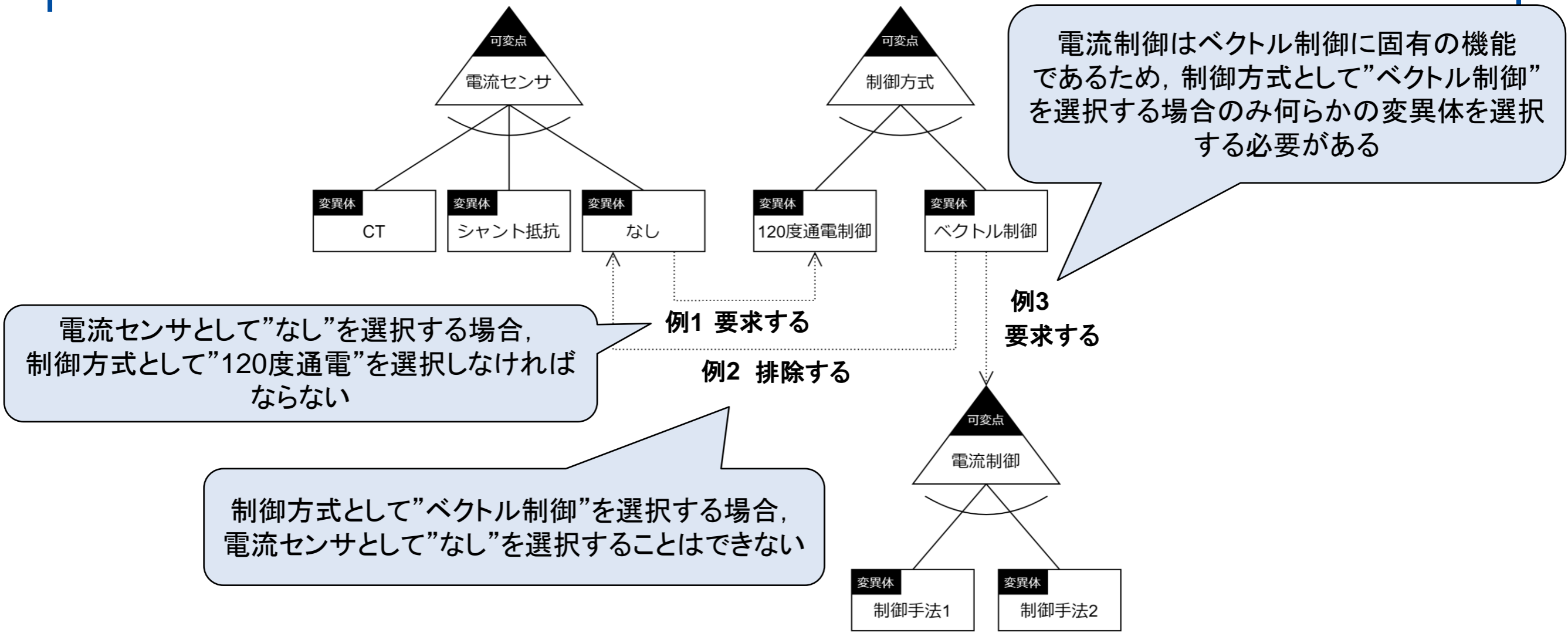
## ■ 可変性制約関係:

- 可変点・変異体間に存在する制約関係
- ある要素が他の要素を「要求する」／「排除する」の2パターンがある

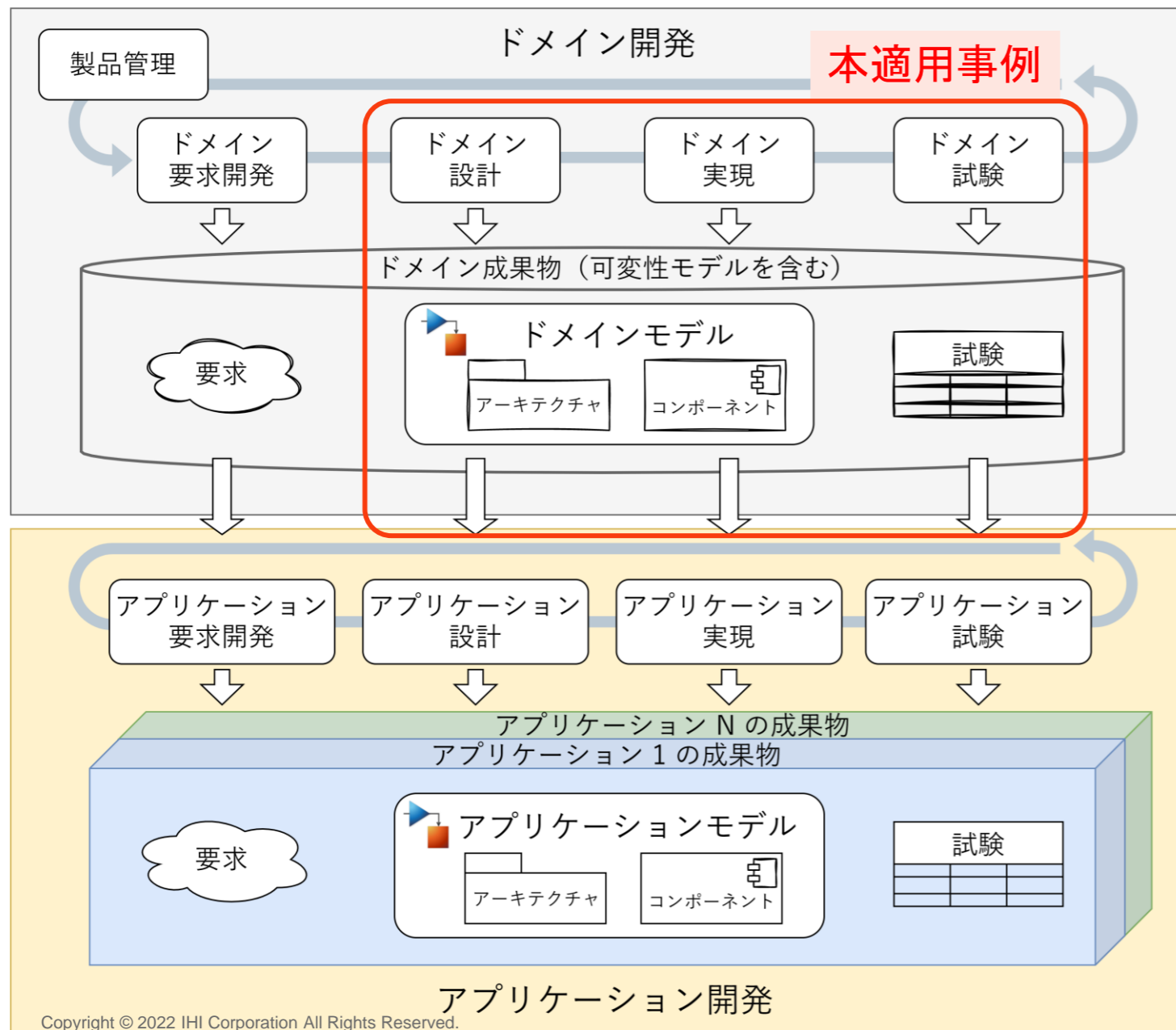
### ➤ 例3: 変異体が可変点を要求する

- 電流制御はベクトル制御に固有の機能であるため、制御方式として”ベクトル制御”を選択する場合のみ何らかの変異体を選択する必要がある

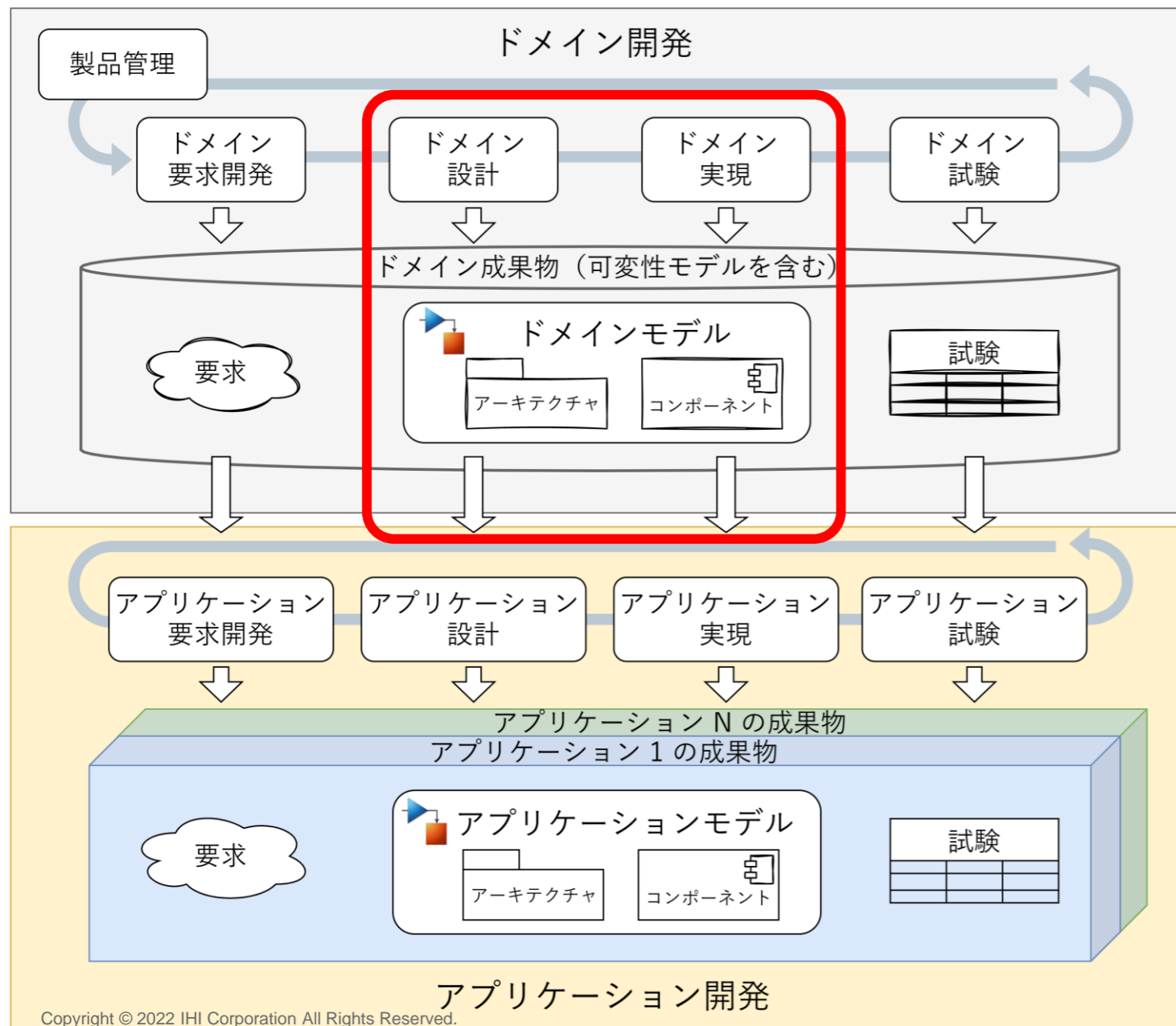




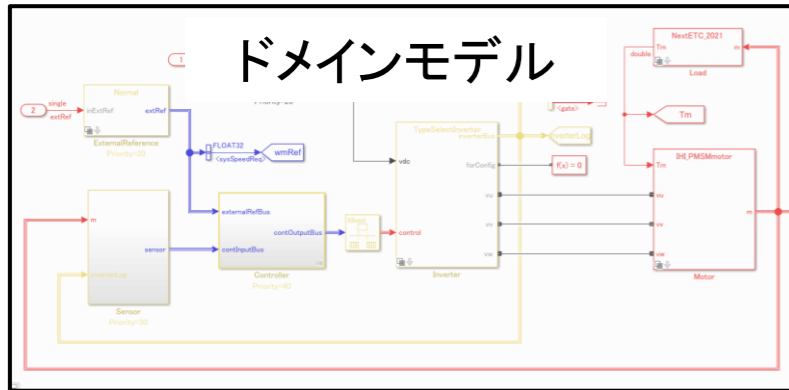
● 本事例では, 可変点:40個, 変異体:120個, 可変性制約関係:170本程度の規模



- 設計・実現はモデルを用いて実施
  - 設計・実装の成果物は「ドメインモデル」, 「アプリケーションモデル」と呼称
- 試験はシミュレーションで検証可能な項目についてテストシナリオの作成等をモデルを用いて実施



- 設計・実現はモデルを用いて実施
  - 設計・実装の成果物は「ドメインモデル」, 「アプリケーションモデル」と呼称
- 試験はシミュレーションで検証可能な項目についてテストシナリオの作成等をモデルを用いて実施



## 【ドメインモデル設計・実現】

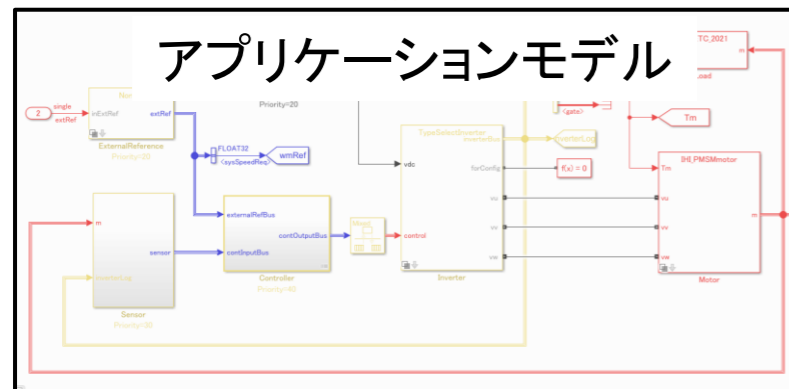
- ① 「可変性を網羅的に織り込んだモデルアーキテクチャ」を設計
- ② 可変性を選択可能なモデル実装
  - 変異体および「変異体の切り替え機構」を実現



## 【アプリケーションモデル設計・実現】

- ③ 可変性制約関係を分析し、適切な選択であるかを評価

個別機種の要求仕様に応じて可変点ごとに変異体を選択



シミュレーション・コード生成可能なアプリケーションモデルが作成される

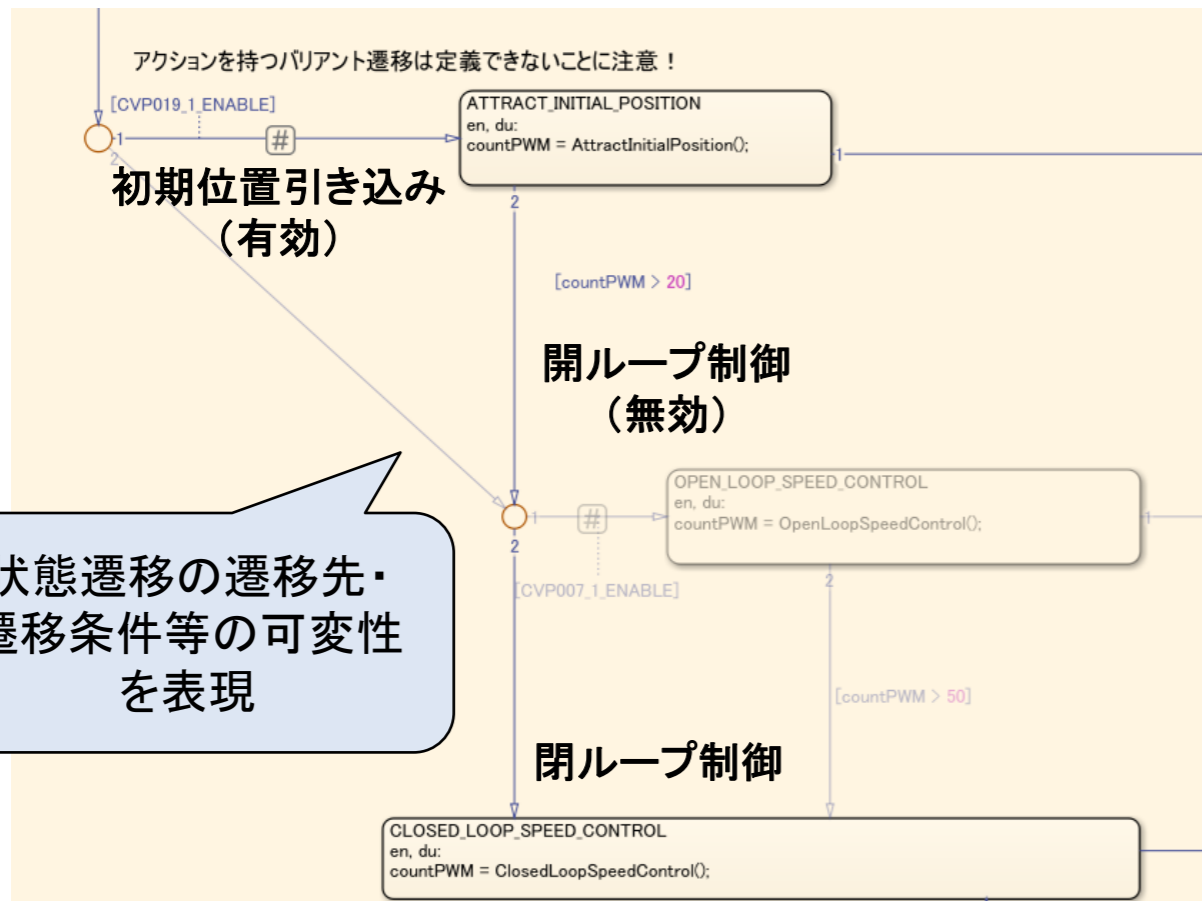


# ① 可変性を織り込んだモデルアーキテクチャ

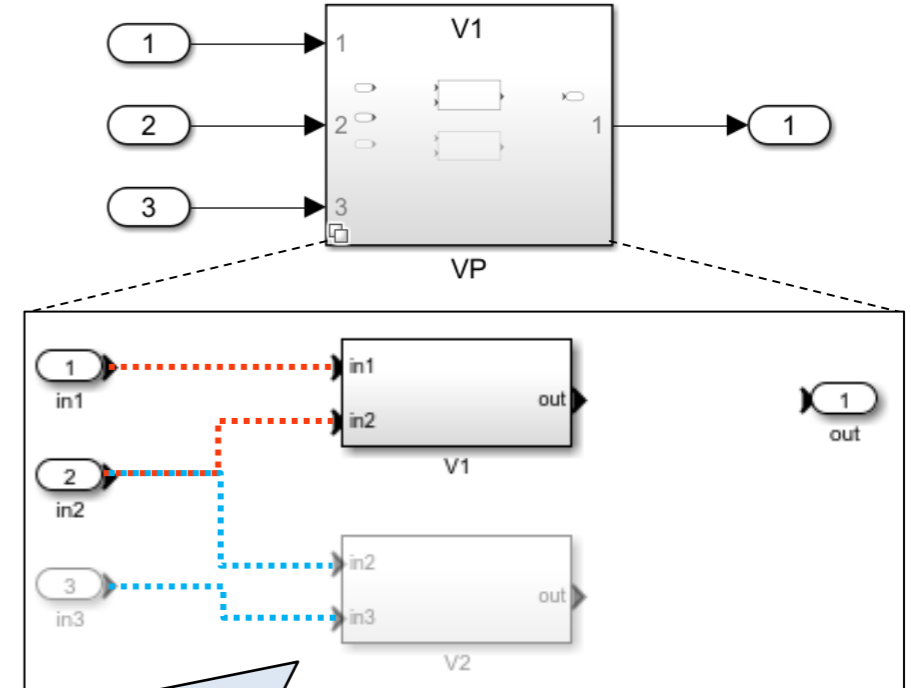
- Stateflow・Simulinkの機能である「バリエント遷移」および「バリエント サブシステム」を用いて可変性を表現

【関連製品】  
 ◆ Simulink®  
 ◆ Stateflow®

## バリエント遷移



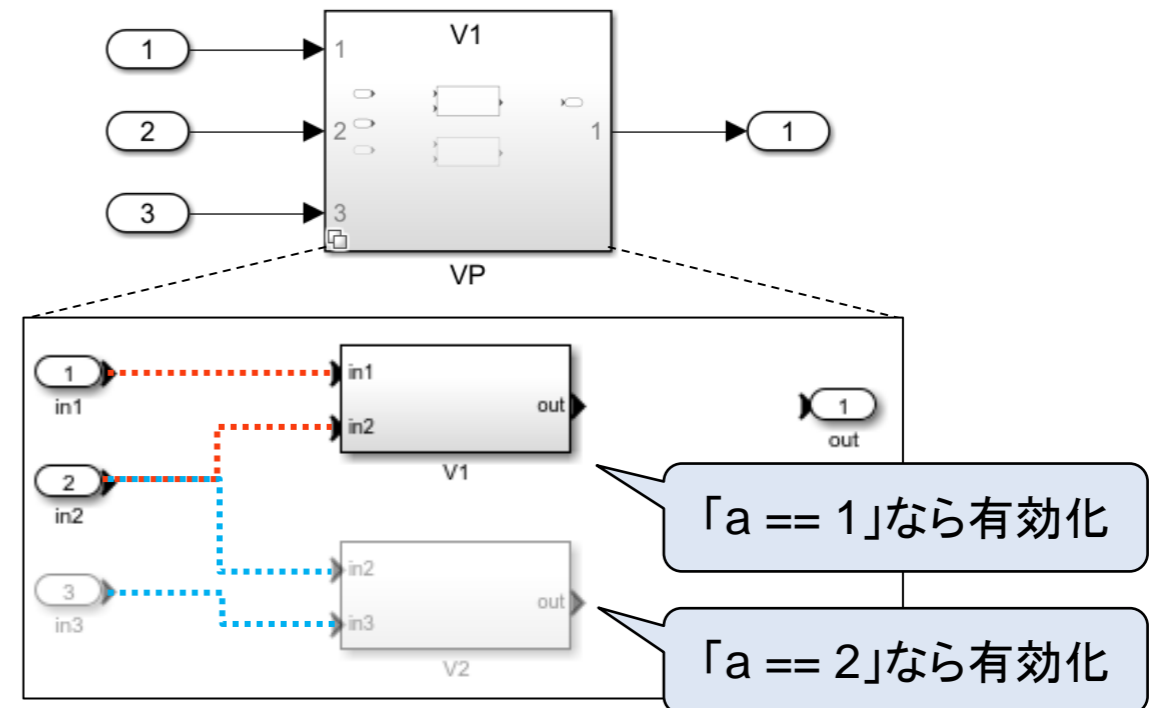
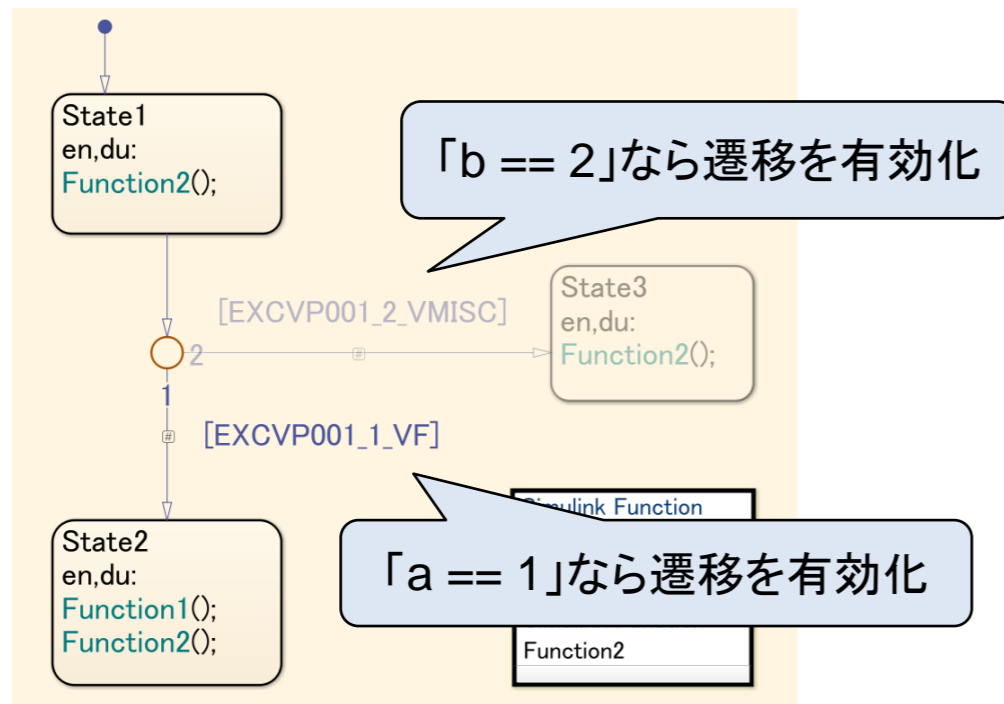
## バリエント サブシステム



## ② 可変性を選択可能なモデル実装

- Simulinkの機能である「バリエーション制御」によって変異体を選択
  - MATLABのコマンドウィンドウ上での「バリエーション パラメーター」(下図のa, b)への設定により「バリエーション遷移」・「バリエーション サブシステム」を制御
  - 個別の機種ごとに「バリエーション パラメーター」に対する設定をまとめた設定ファイルを用意しておくことで、アプリケーションモデルを構成することが可能

【関連製品】  
 ◆ Simulink  
 ◆ Stateflow



### ③ 可変性の選択に対する可変性制約関係の評価

【関連製品】  
◆ Simulink

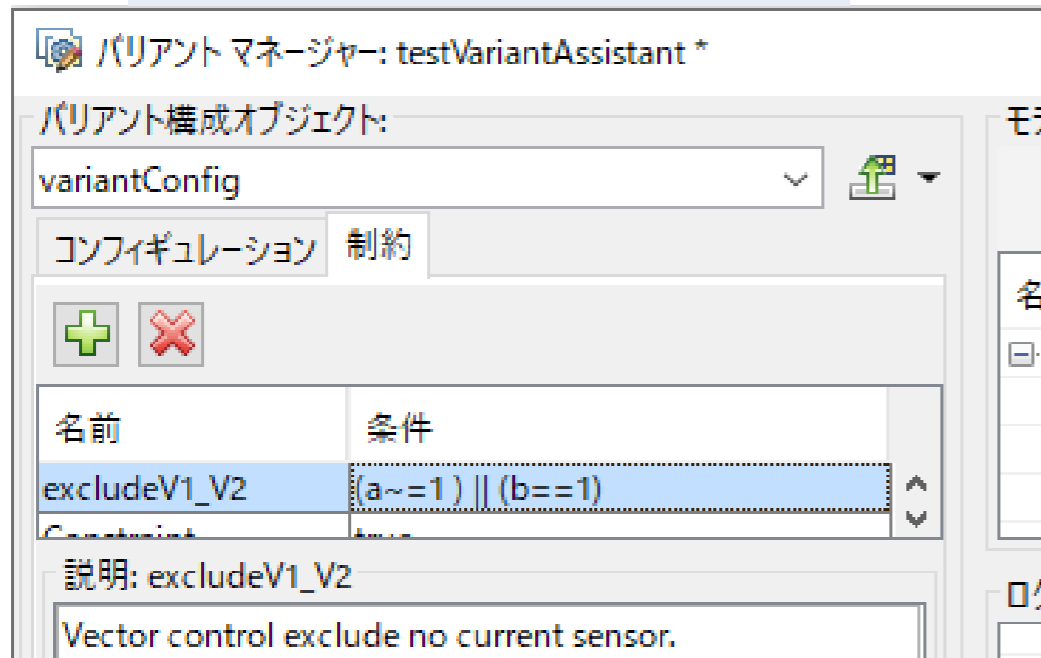
IHI

- Simulinkの機能である「バリエーション マネージャー」の「制約」で「バリエーションパラメーター」に対する制約を記述できる
  - 可変性制約関係を記述することでその制約を満たすか評価可能
- モデル更新時に制約関係を自動で評価し違反があれば通知する

#### 可変性制約関係の例

制御方式として”ベクトル制御”を選択する場合、電流センサとして”なし”を選択することはできない

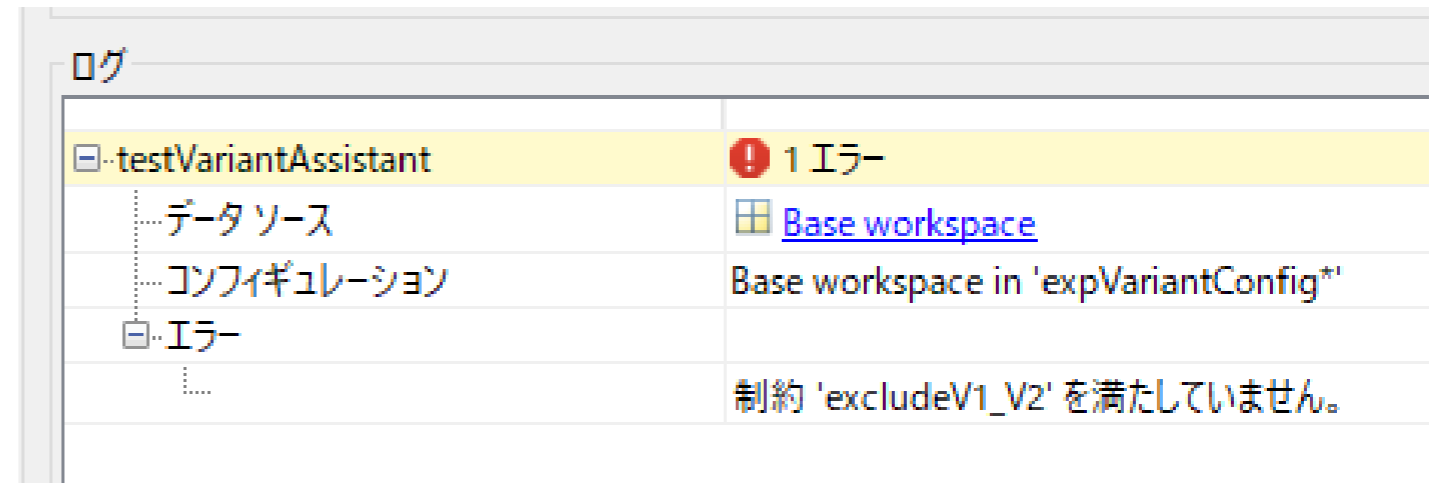
#### バリエーション マネージャー：制約



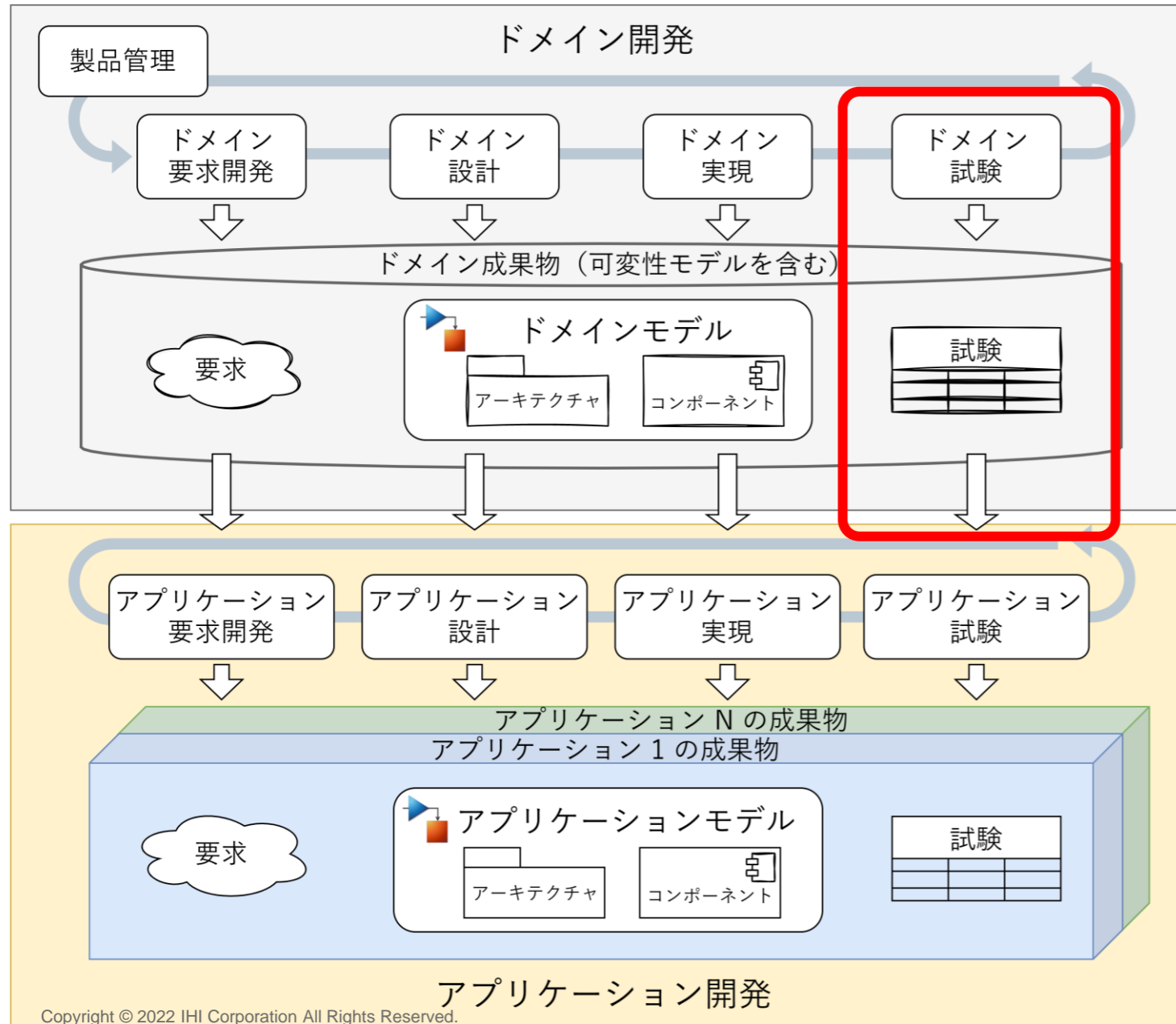
名前	条件
excludeV1_V2	(a~=1)    (b==1)

説明: excludeV1\_V2  
Vector control exclude no current sensor.

#### 制約関係を満たさない場合の通知



ログ	
testVariantAssistant	1 エラー
データソース	Base workspace
コンフィギュレーション	Base workspace in 'expVariantConfig'
エラー	制約 'excludeV1_V2' を満たしていません。



- 設計・実現はモデルを用いて実施
  - 設計・実装の成果物は「ドメインモデル」, 「アプリケーションモデル」と呼称
- 試験はシミュレーションで検証可能な項目についてテストシナリオの作成等をモデルを用いて実施

## ■ 単体テスト

- テスト入力を対象のブロックに入力し得られた出力が期待出力と一致しているかを検証
- 単一のシステムに対する開発の場合と同様

## ■ 統合テスト

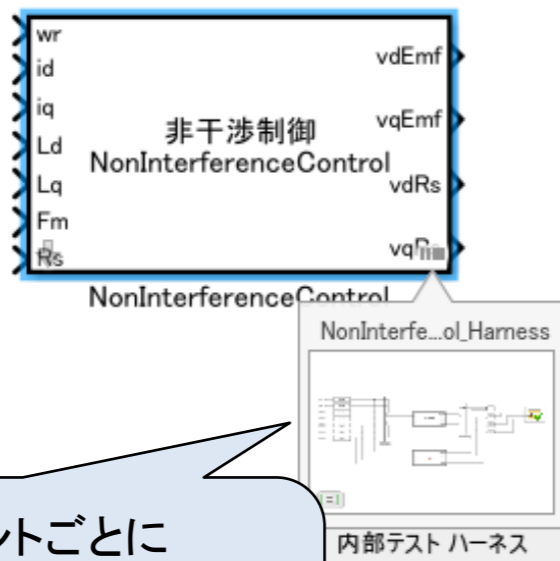
- 機種を特定しておらず可変性を含んでいるため網羅的に検証することは困難
- アプリケーション試験を効率的に実施できるように検証の準備を行う
  - テストシナリオ作成
    - アプリケーション開発において可変性が選択された後に効率的に検証が実施できるよう流用可能なテストシナリオを作成する
  - サンプルアプリケーションでのテスト
    - ドメイン開発の段階で検証を行うためにいくつかの機種を想定して検証する
    - 共通性の検証や可変性選択の手法の確認を早期に実施する

- 「テストハーネス」・「テストマネージャー」によりテストを構築 & 自動化
- カバレッジ計測を行い基準を満たしていることを確認

### 【関連製品】

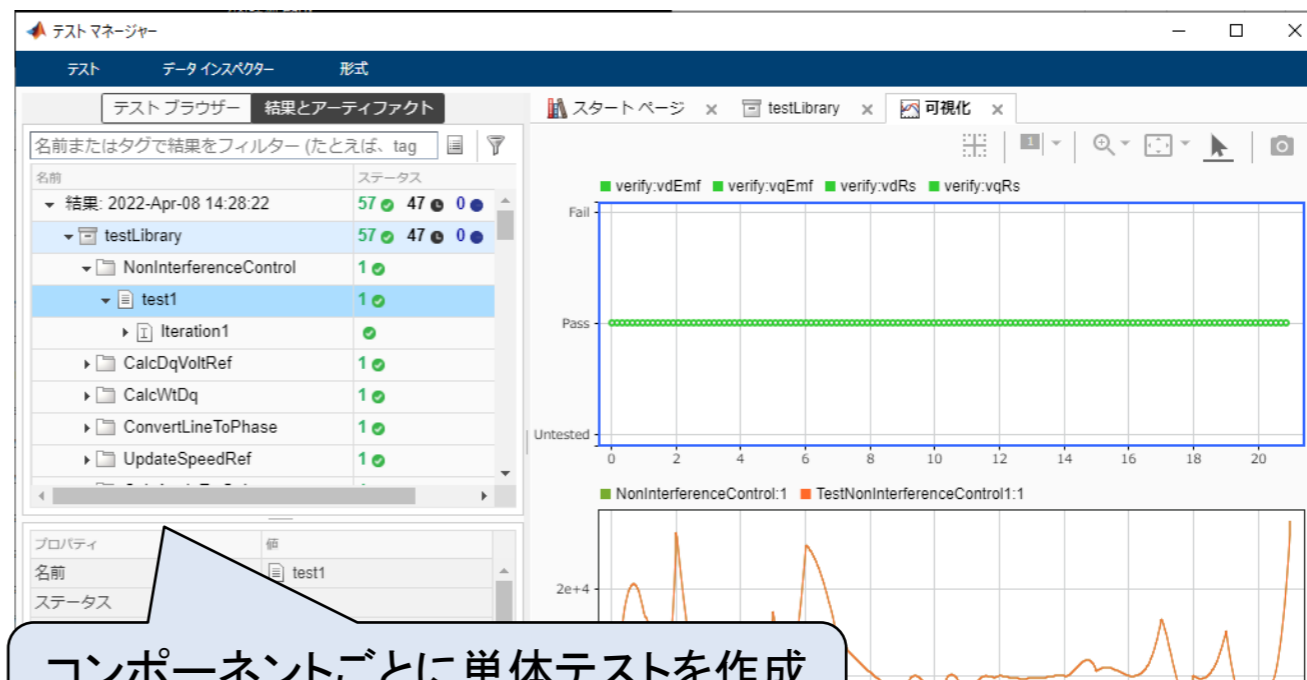
- ◆ Simulink® Test™
- ◆ Simulink® Coverage™

## テストハーネス



コンポーネントごとに  
紐づけてテスト用の  
シミュレーション空間を作成  
トレーサビリティの担保が可能

## テストマネージャー



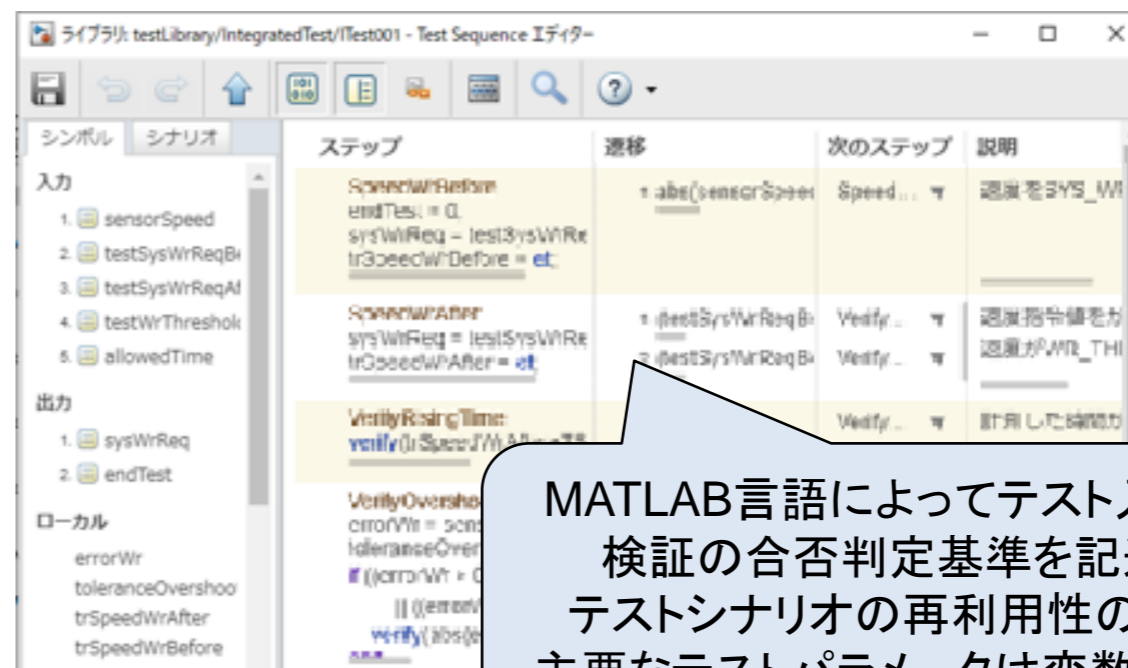
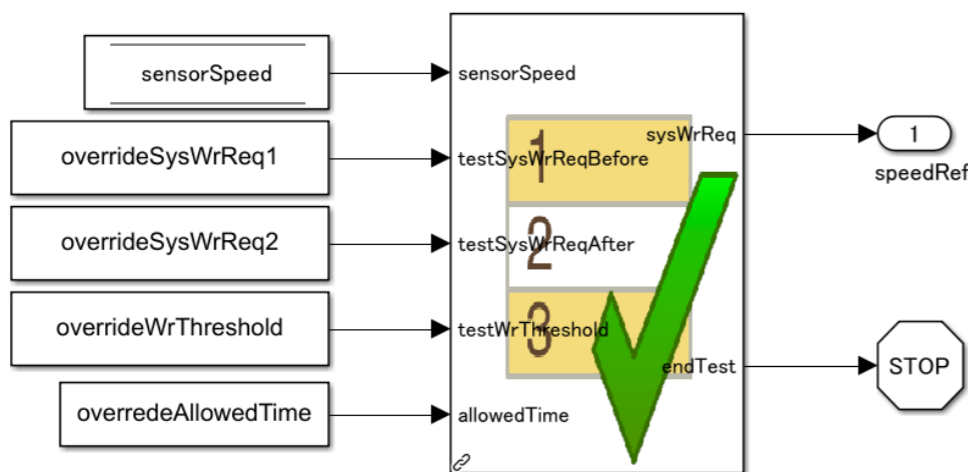
コンポーネントごとに単体テストを作成  
検証の自動化が可能

【関連製品】  
◆ Simulink Test

- 「テストマネージャー」によりテストを自動化
- アプリケーション開発で再利用できるように汎用的なテストシナリオを作成
  - テストシーケンスブロックを使用することで、複雑なテストパターンも記述可能

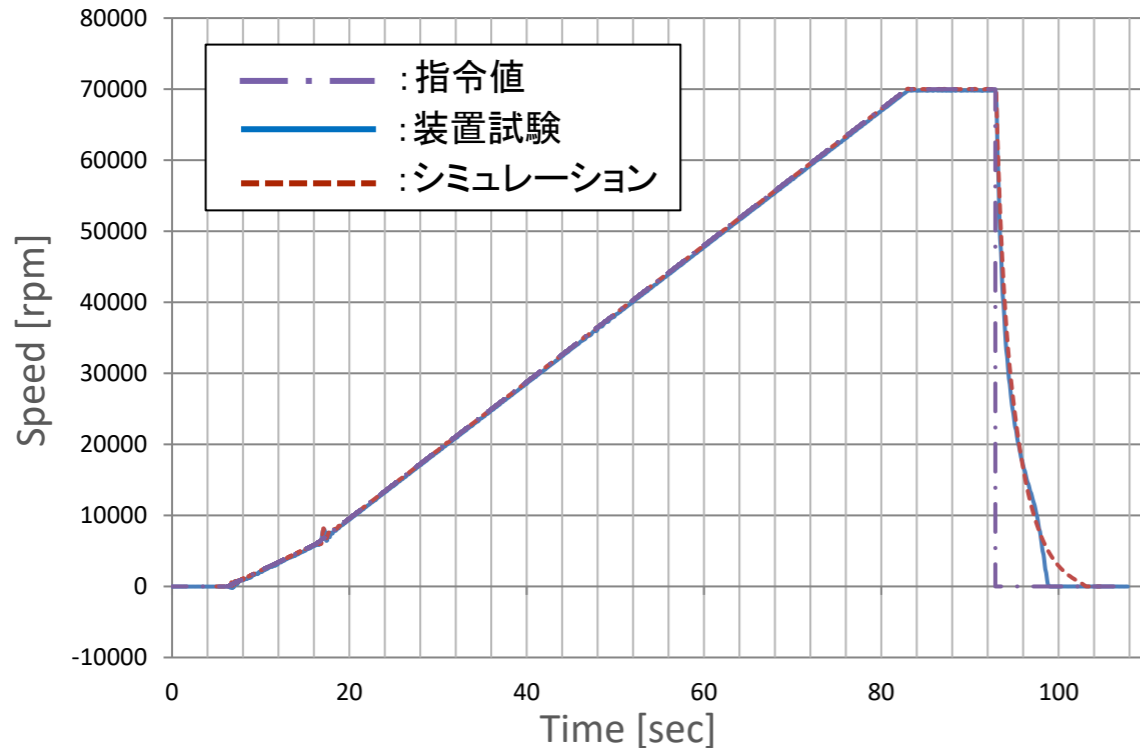
## テストシーケンスブロック

## ITest001 ##  
速度が速度指令値SYS\_WR\_REQ1に追従している状態で  
速度指令値をSYS\_WR\_REQ2に変更したとき、  
速度がWR\_THREになるまでの時間がTR\_MAX以内であるか検証する。  
さらに、オーバーシュートおよび整定時間の制約を満たすことを確認する。

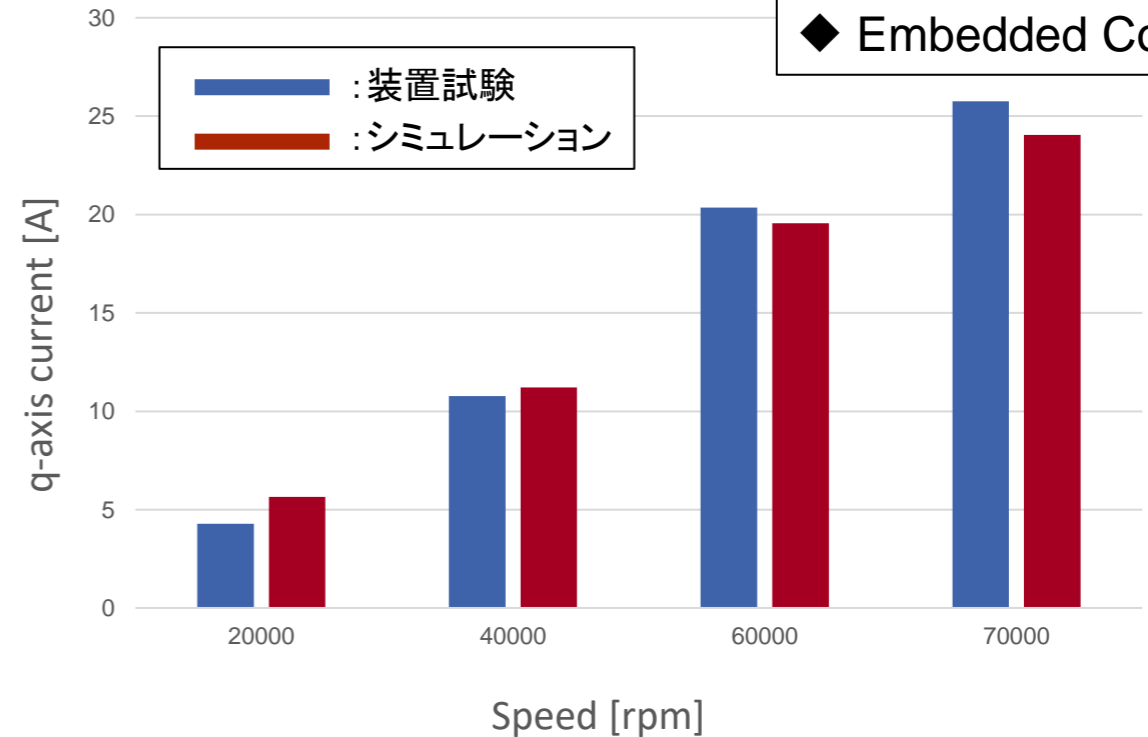


MATLAB言語によってテスト入力や  
検証の合否判定基準を記述、  
テストシナリオの再利用性のため  
主要なテストパラメータは変数にする

## ■ ドメインモデルの基となったモータ制御モデルでは自動生成→装置試験を試行



- 【関連製品】
- ◆ MATLAB® Coder™
  - ◆ Simulink® Coder™
  - ◆ Embedded Coder®



■ 制御アルゴリズムの検証やモータ制御系の簡易的な性能解析には十分な精度が得られている

■ 弊社技報にて報告

➤ [IHI技報 Vol.61 No.1 \(2021\) 高速モータの制御ソフトウェアに対するモデルベース開発手法の適用](#)



## 【まとめ】

- ソフトウェアプロダクトライン開発手法に基づき再利用性の高いモータ制御ソフトウェア開発プラットフォームをMATLAB/Simulinkを活用して構築した
  - 可変性を含む設計・実現にSimulinkを活用することで、可変性の選択・制約関係の検証が素早く実施可能なモデルを実装
    - 個別の機種に対するシミュレーション・コード生成可能なモデルを迅速に得られる
  - 検証についてSimulink TestなどのToolboxを活用することで、効率的に実施可能かつ流用性の高い資産を形成

## 【今後の課題】

- 具体的な製品向けにアプリケーション開発プロセスを実施
- 評価および改善点の抽出

ソフトウェアの再利用性向上により電動製品開発を促進させ  
低炭素社会の実現に貢献していきたい

## ■ 使用しているMATLAB/Simulink製品

### ● モデリング・シミュレーション

- MATLAB<sup>®</sup>
- Simulink<sup>®</sup>
- Stateflow<sup>®</sup>
- Simscape<sup>™</sup>
- Simscape<sup>™</sup> Electrical<sup>™</sup>
- Fixed-Point Designer<sup>™</sup>

### ● 検証

- Simulink<sup>®</sup> Test<sup>™</sup>
- Simulink<sup>®</sup> Coverage<sup>™</sup>

### ● コード生成

- MATLAB<sup>®</sup> Coder<sup>™</sup>
- Simulink<sup>®</sup> Coder<sup>™</sup>
- Embedded Coder<sup>®</sup>

### ● その他

- Control System Toolbox<sup>™</sup>

ご清聴ありがとうございました

