

# 航空機開発プロセスの革新に向けた MBSE適用について

2021.11.5

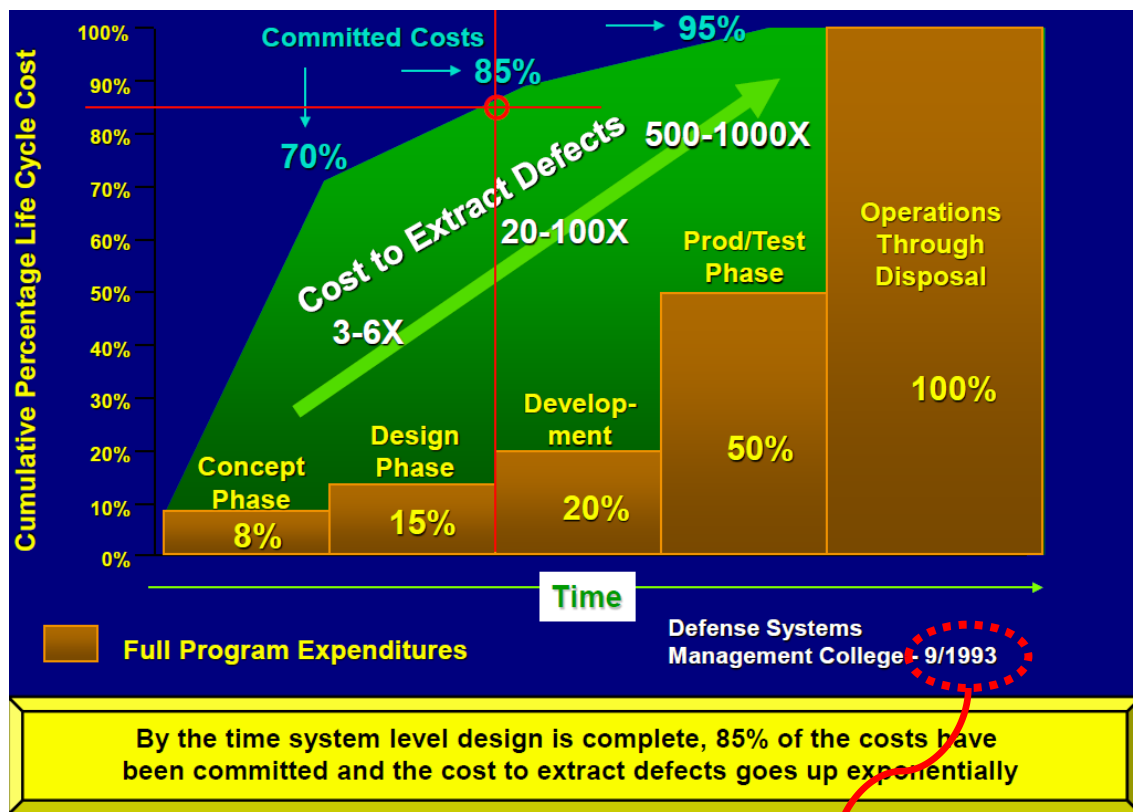
MBSE Project

三菱航空機株式会社

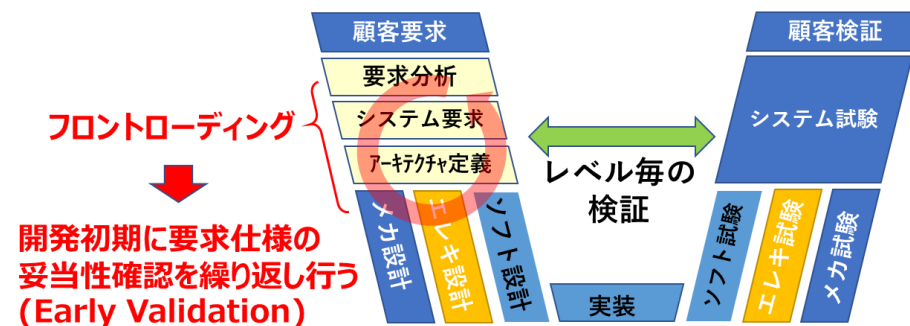
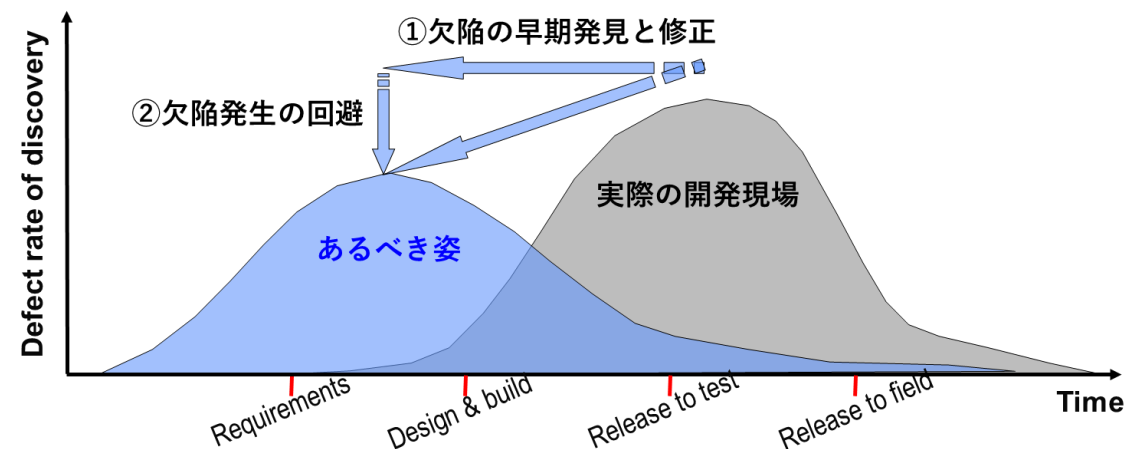
1. 航空機開発とシステムズエンジニアリング (SE)
2. Model Based SE (MBSE) の必要性
3. Boeingの取り組み (MBE/MBSE)
4. MITAC MBSEプロジェクトのご紹介
  - 4.1 目的
  - 4.2 概要
  - 4.3 試行例の紹介
5. まとめ (JAXAへの期待)

# 1. 航空機開発とシステムズエンジニアリング (SE)

- ライフサイクルコストの85%はシステムの設計要求・仕様が確定する時点で決定する。
- 要求仕様確定後の欠陥は、発見が遅れるにつれて、指数関数的なコスト増加を招く。
- **航空機開発におけるフロントローディング (SEのEarly Validation) の重要性は1990年代から認識されてきたが、2000年代以降も、多くのプロジェクトで実現できていない。なぜか?**



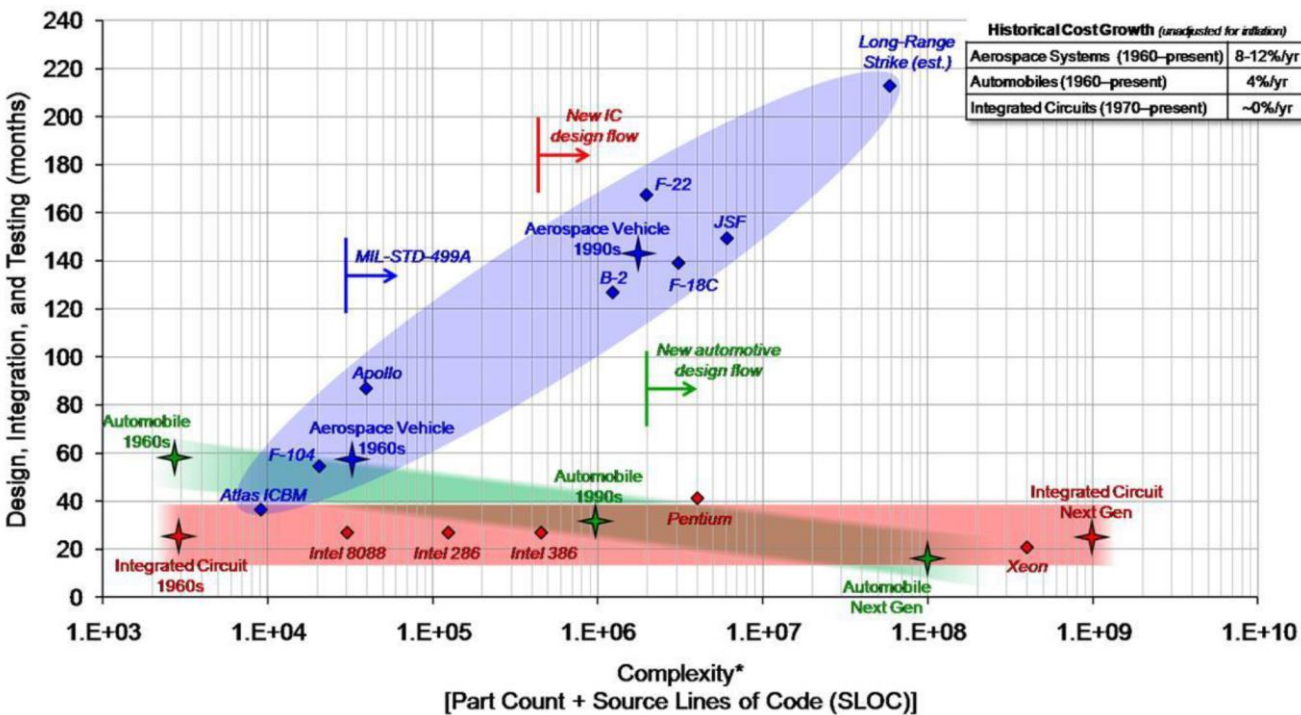
出典：Systems Engineering Revitalization: an Industry Perspective, DSP Conference, 8 March 2005, John B. Noblin



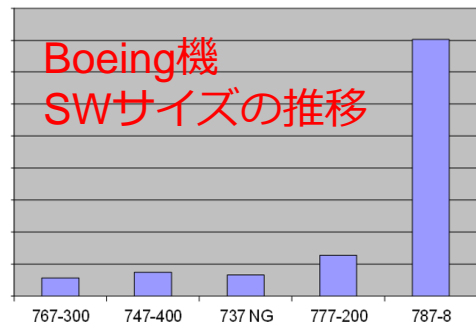
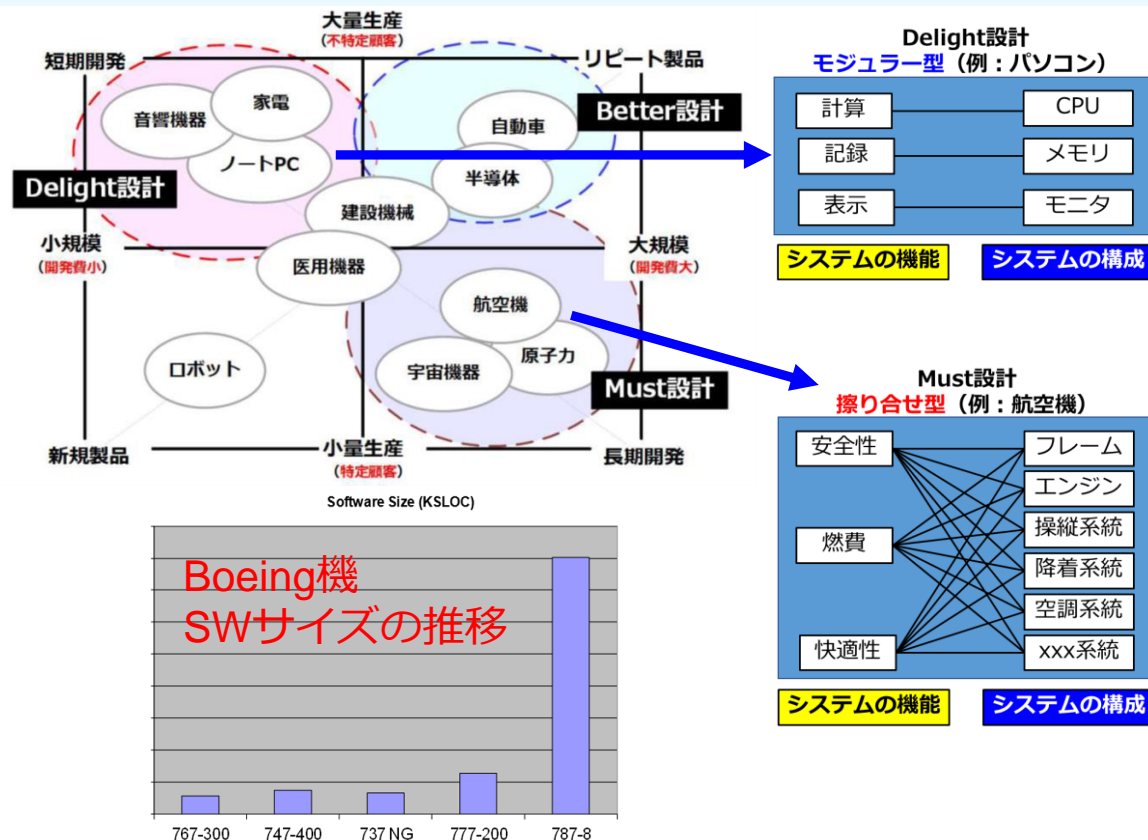
## SEのVプロセスにおけるEarly Validation

# 1. 航空機開発とシステムズエンジニアリング (SE)

- 1960年代以降、主要な工業製品のうち、航空宇宙機の開発期間・コストだけが顕著に増加
- 航空機はトラブルフリーが目標のMust設計。重量、コスト、性能の制約の中で、安心安全の極限追求が求められる。
- Must設計の航空機は、大規模なメカ・エレキ・ソフト複合システムであり、システムの機能と構成の対応関係が非常に複雑となることから、高度な摺り合せ設計が要求される。これがEarly Validationの実現を困難としている。
- 近年はメカの機能をエレキ（電化）・ソフトで置き換え、つながって多様化するIoT化も進み、システムの複雑化がより顕著



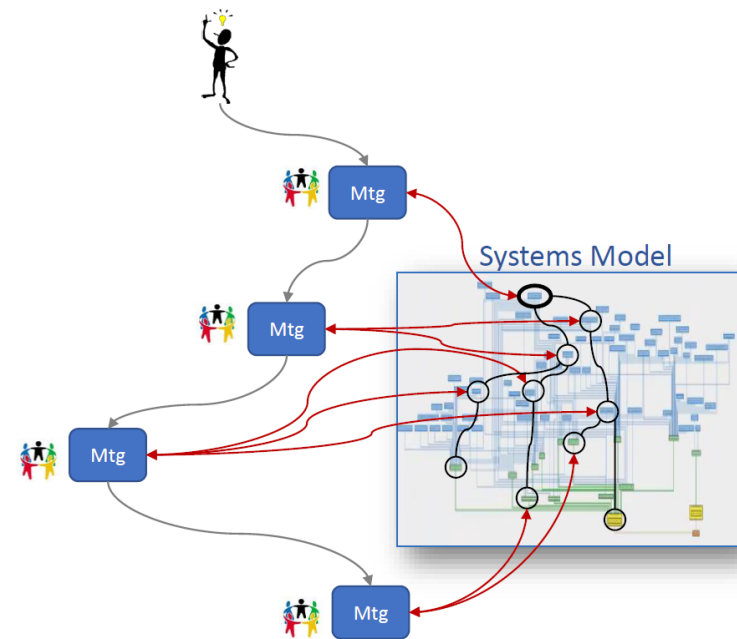
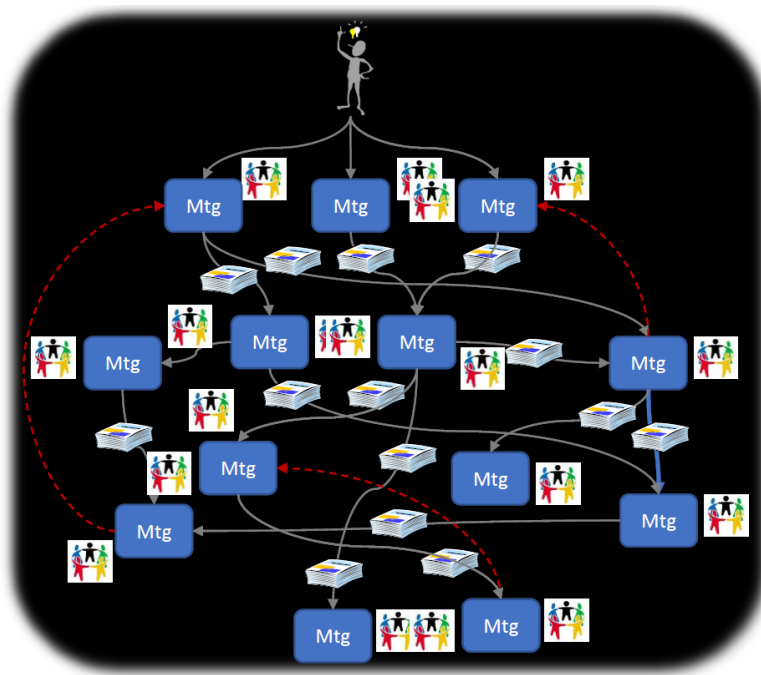
出典：Aerospace Industries Association, "Life Cycle Benefits of Collaborative MBSE Use for Early Requirements Developments," 2016.



出典：Daniel Fogarty, Boeing "MBSE and MBSA," FAA V&V Summit 2018.

## 2. Model Based SE (MBSE) の必要性

- 航空機システムのSW化・複雑化
  - 設計文書の増大、開発関係者の多様化 → コミュニケーションの限界
- Document Based SE → Model Based SEへの転換
- MBSEのシステムモデルは「情報の構造体」のこと。
  - 数値解析やシミュレーションを包含するが、そのものではない。



出典：”The Cobbler’s Kids Need New Shoes”, INCOSE PSE WS 2021

# 2. Model Based SE (MBSE) の必要性

MBSEではSEを適用した設計情報を視覚化し、文書解釈の齟齬回避とトレーサビリティを可能とする

## MBSEにおける「システムモデル」

- 活用用途に合わせて、**任意の情報のみを含んだ任意の形態の断面図**を抽出することが可能な**情報の構造体** = システムモデル
- システムの全容を「**決めた型の情報**」で表現
- 「**欲しい情報**」を「**欲しい形**」で「**欲しい時**」に「**決めた場所**」から取り出すことが可能
- 開発のさまざまなシーンで、**複数の部署や関係者とのコミュニケーションに活用**

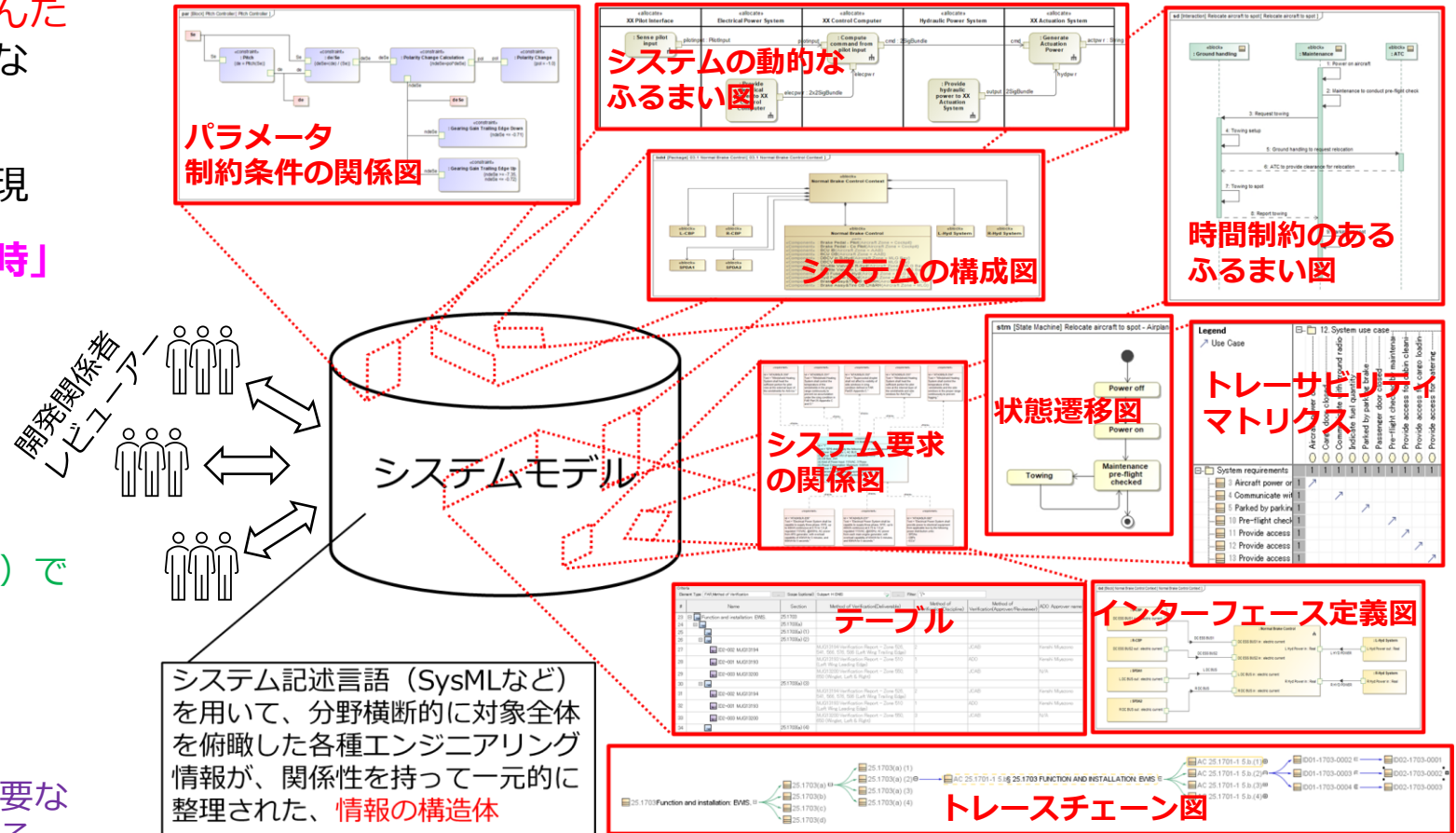
### 「決めた型の情報」

自然言語（文書）の曖昧な記述をモデル（図表形式）で一意に表現でき、関係者全員が同じ認識を持てる（Rigor = 厳密であること）

### 「決めた場所」

全ての情報の源は1つであり、単一の情報源から必要な情報を取り出すことにより、情報の一貫性を確保する（Single Source of Truth）

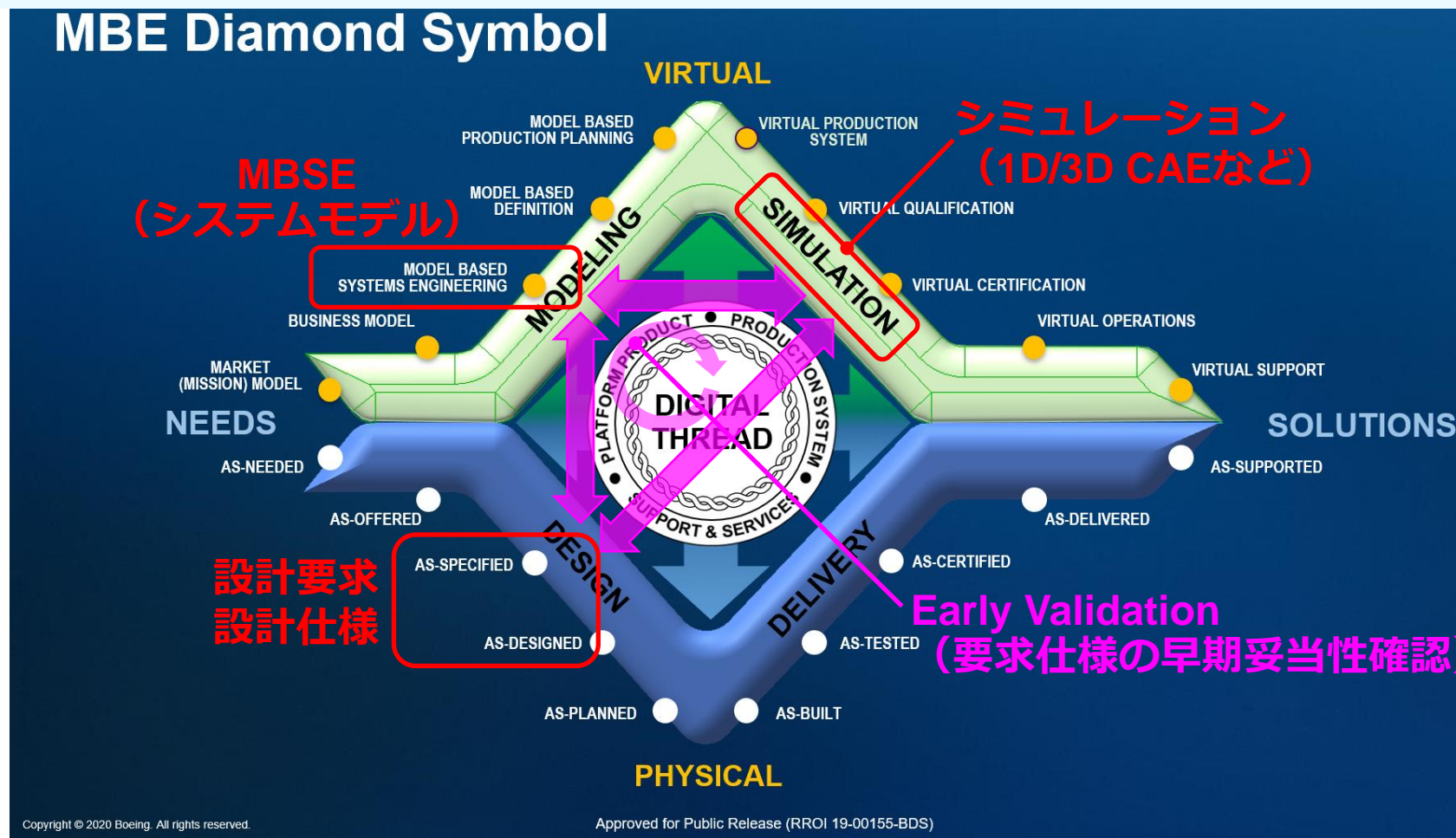
## システムモデル「決めた型」の一例



システム記述言語（SysMLなど）を用いて、分野横断的に対象全体を俯瞰した各種エンジニアリング情報が、関係性を持って一元的に整理された、**情報の構造体**

### 3. Boeingの取り組み (MBE/MBSE)

- BoeingのMBE構想でも、MBSEでシステムモデル (システムの全容を決めた型で表現) を構築し、その実現可能性をSimulationで早期に繰り返し確認・修正するプロセス (Early Validation) が上位にある。
- 真のデジタルツインの実現には、システムの全容と本質を「決めた型」で表現するシステムモデルが必須。



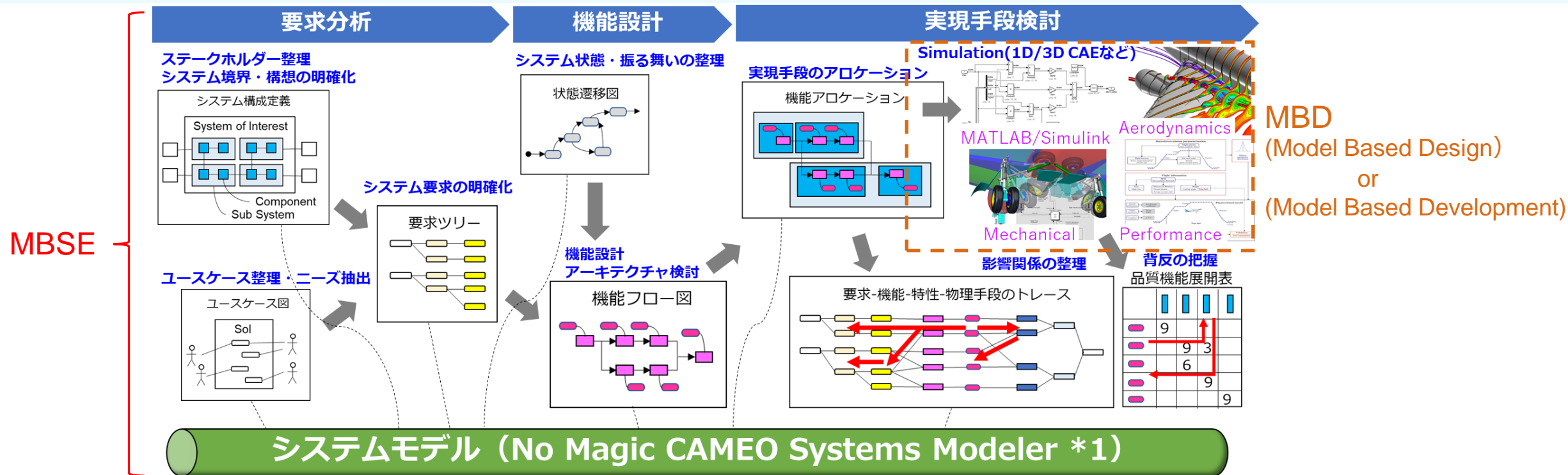
出典：Boeing, "The Model-Based Engineering (MBE) Diamond", INCOSE Workshop 2020

## 4. MITAC MBSEプロジェクトのご紹介



# 4.1 MITAC MBSEプロジェクトの目的

- MSJ開発資産（技術文書、データ、人材）を活用して、MBSEを適用した航空機開発プロセスを構築・試行する。
- プロセスの構築・試行を通して、MSJ開発資産を再利用できる形のシステムモデルに置き換え、完成機事業の再開に備える。
- MBSEガイドラインを整備し、MHIグループ全社に水平展開を図り、MHI各事業部のMBSE導入・人材育成を支援する。

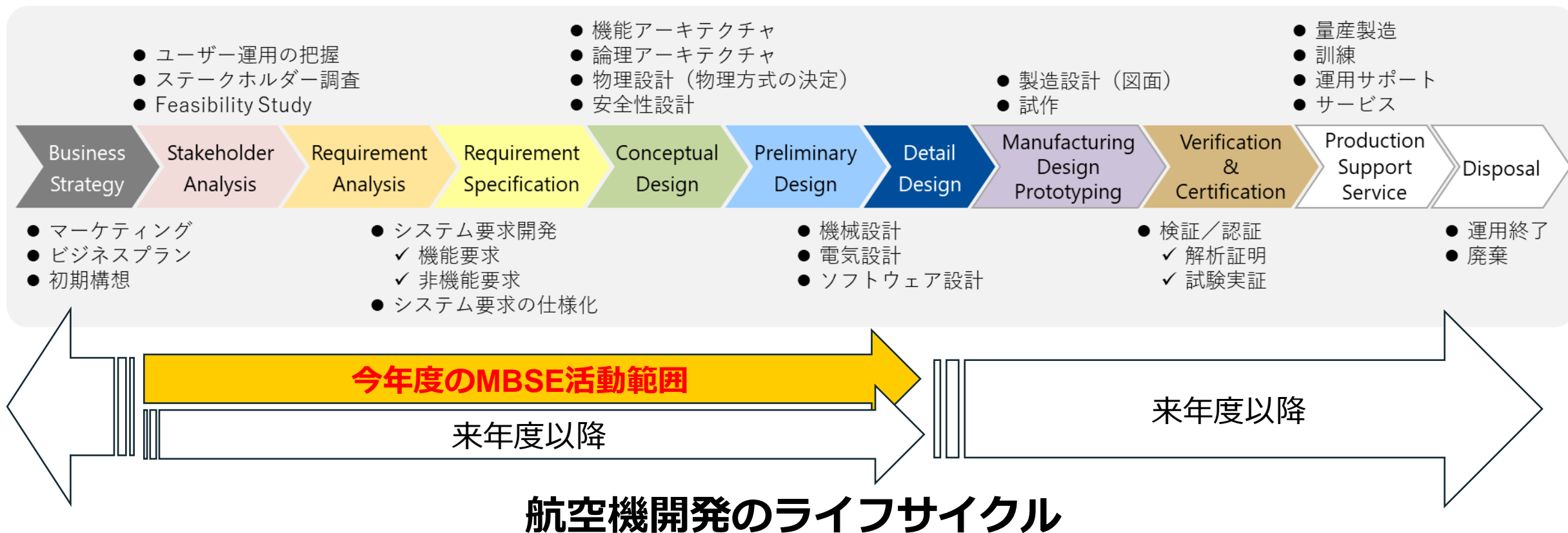


\*1: 現在はダッソー社のMagic Cyber Systems Engineerに名称変更

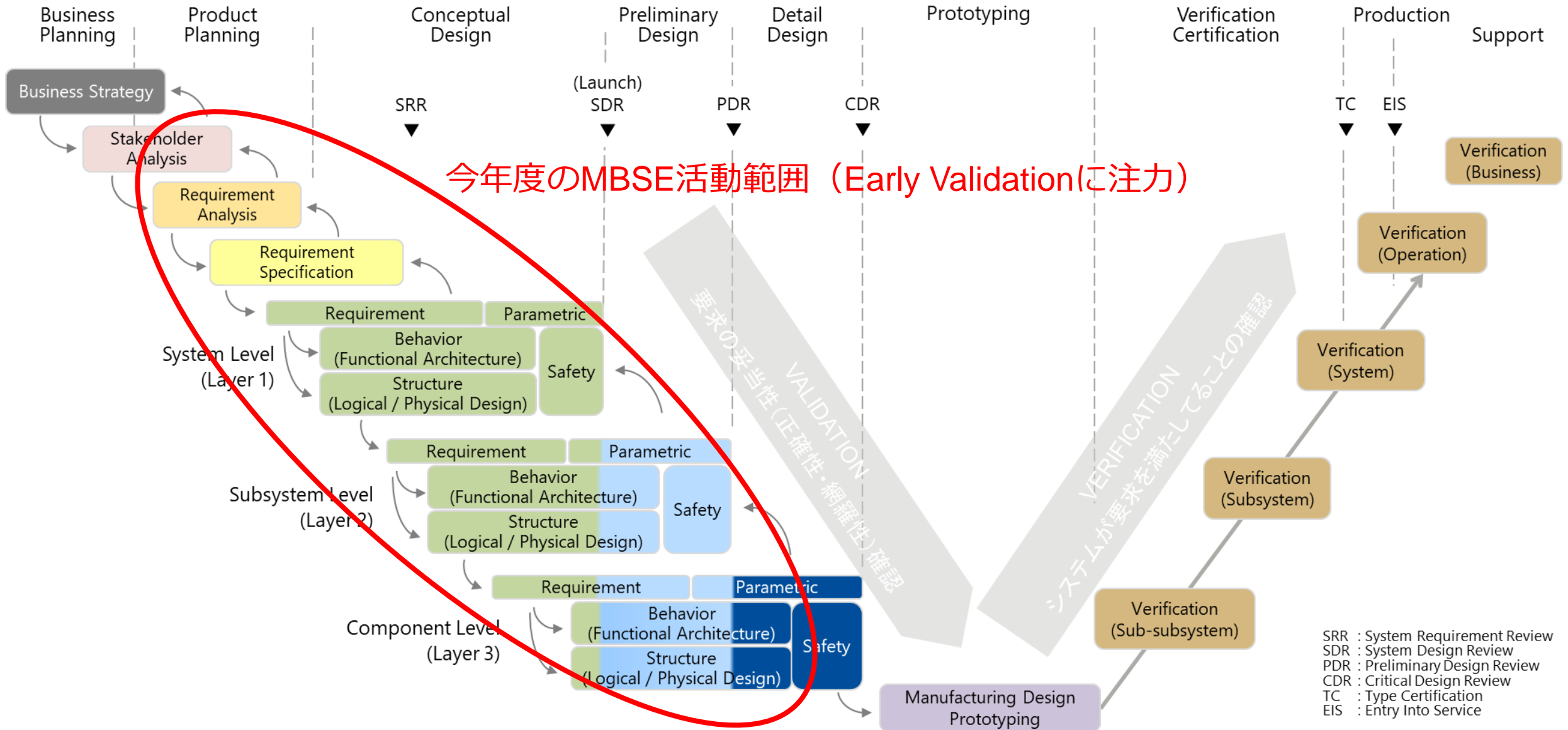


## 4.2 MITAC MBSEプロジェクトの概要

- 最終目標は航空機開発のライフサイクル全体の活動・情報を モデルも用いて 一元管理すること。
- 今年度（初年度）は開発上流工程を中心にMBSEを粗い粒度で試行中。
- 来年度以降は、製造、試験、量産、運用サポートなど、モデル化の範囲・粒度を段階的に拡大・深化させていく予定。



# 4.2 MITAC MBSEプロジェクトの概要

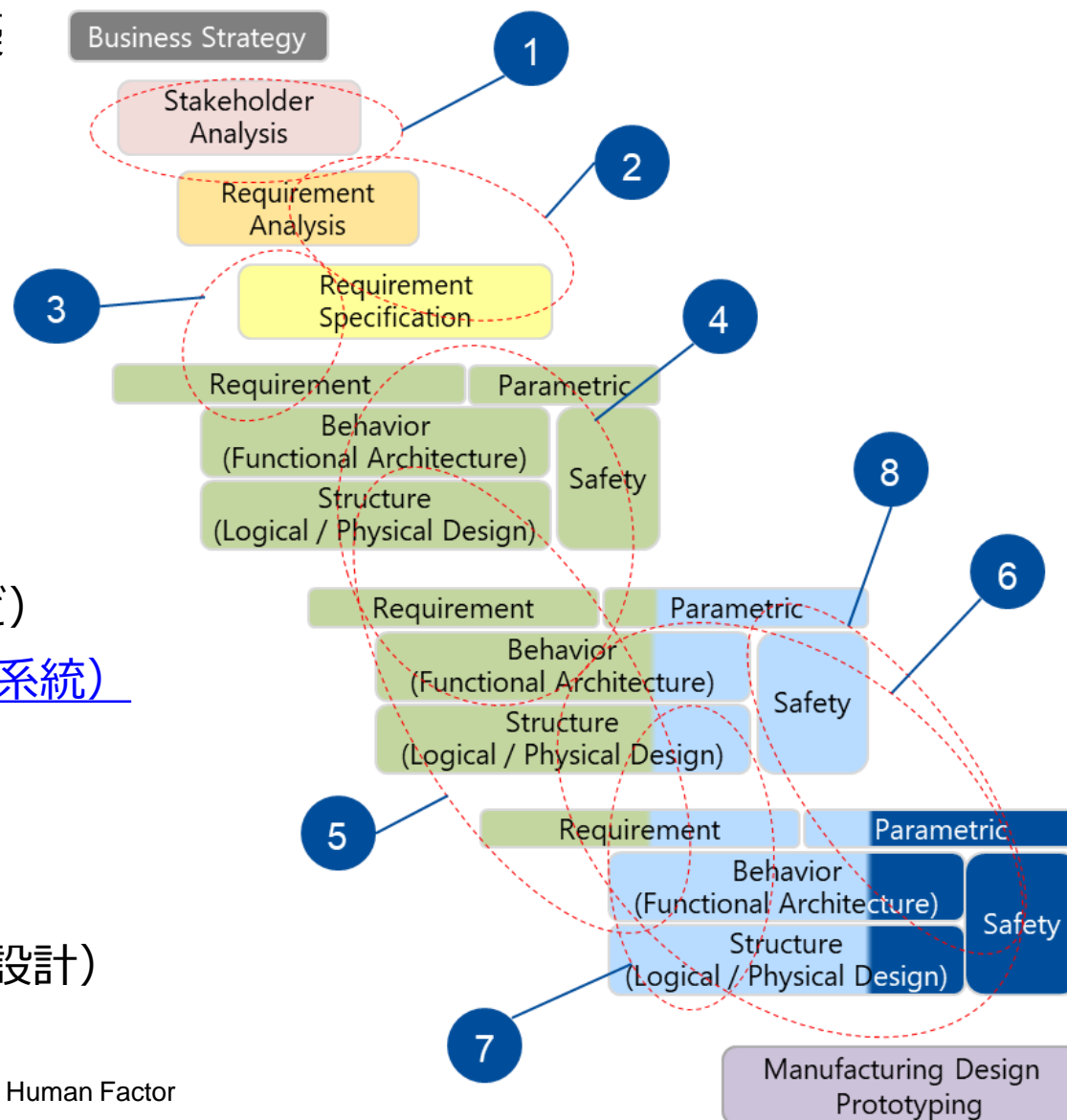


## 4.2 MITAC MBSEプロジェクトの概要

- 今年度は下記 8 つのテーマでMBSEプロセスの構築と試行を実施中。
  - 各テーマはMSJ開発で経験した問題・課題から選定
- テーマ4の取り組み状況を本日よりご紹介。

### <MBSE試行テーマ一覧>

1. ステークホルダー分析
2. システム要求分析／要求仕様
3. ステークホルダー要求（Regulation要求、HF要求など）
4. システムモデルとSimulink連携（ピッチコントロール系統）
5. システムArchitecting（ブレーキコントロール系統）
6. システムモデルを用いた故障伝播解析
7. モデルを用いたインターフェース定義
8. モデルを用いたシステム分離設計プロセス（配線配管設計）



## 4.3 MBSE試行テーマの紹介

システムモデルとSimulink連携（ピッチコントロール系統）

## 4.3 システムモデルとSimulink連携（ピッチコントロール系統）：目的

- MBSEのモデルがある一方で，制御則モデルや機体運動モデル（MBDのモデル）が存在する。
  - ✓ MBSEのモデルでシミュレーションができるというのが，実現象をシミュレーションできるわけではない。
  - ✓ MBSEのモデルはあくまでも，要求/機能/システムのアーキテクチャを検討するためのもの。
  
- 下記の要求に関する活動はMBDのモデルが必要。
  - ✓ 定量的なシステム要求の作成
  - ✓ 要求満足の定量的評価 ← **今回ご紹介する内容**
  
- MBSE（CAMEO）とMBD（今回はMatlab/Simulink）を連携させることで要求満足の評価を半自動化。

MBSE: Model Based Systems Engineering  
 MBD: Model Based Design  
 CAMEO: No Magic CAMEO Systems Modeler



## 4.3 システムモデルとSimulink連携（ピッチコントロール系統）：試行対象

- 今回題材としたサブシステムは飛行機のFlight Control System。
- 試行範囲を下記に限定した。
  - Pitch方向の制御
  - 要求はStick force per G（+1Gあたりパイロットが引かなければいけない操縦桿操縦力）  

$$\frac{\text{Stick force}}{\text{per G}}$$
  - Direct Mode（Degraded状態）の制御則  
制御Gainが固定値であり，速度や高度に依らない

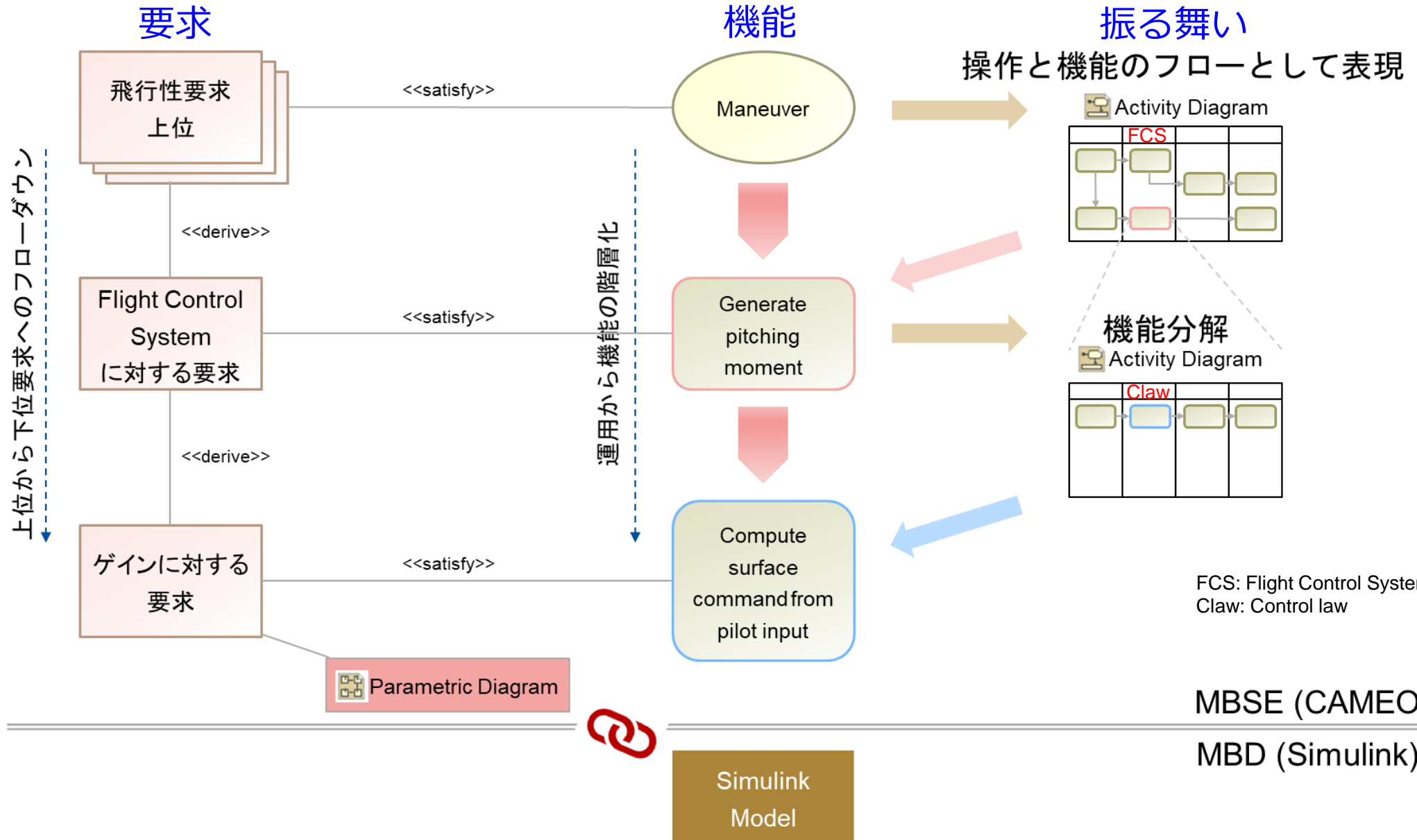


# 4.3 システムモデルとSimulink連携 (ピッチコントロール系統) : 要求と機能のフローダウン

System Level

Sub System Level

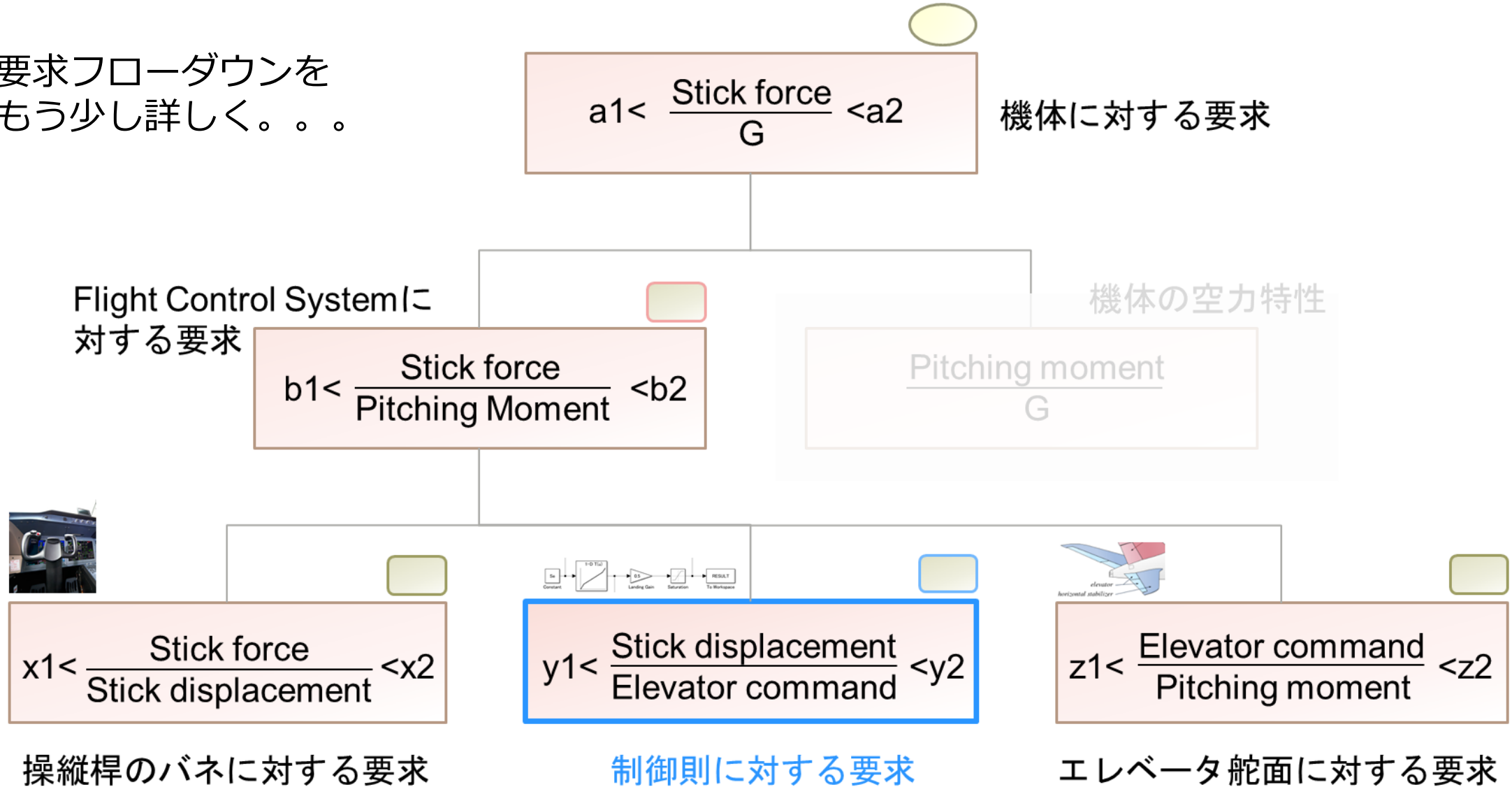
Component Level





# 4.3 システムモデルとSimulink連携 (ピッチコントロール系統) :要求フローダウンの詳細

要求フローダウンをもう少し詳しく。。。

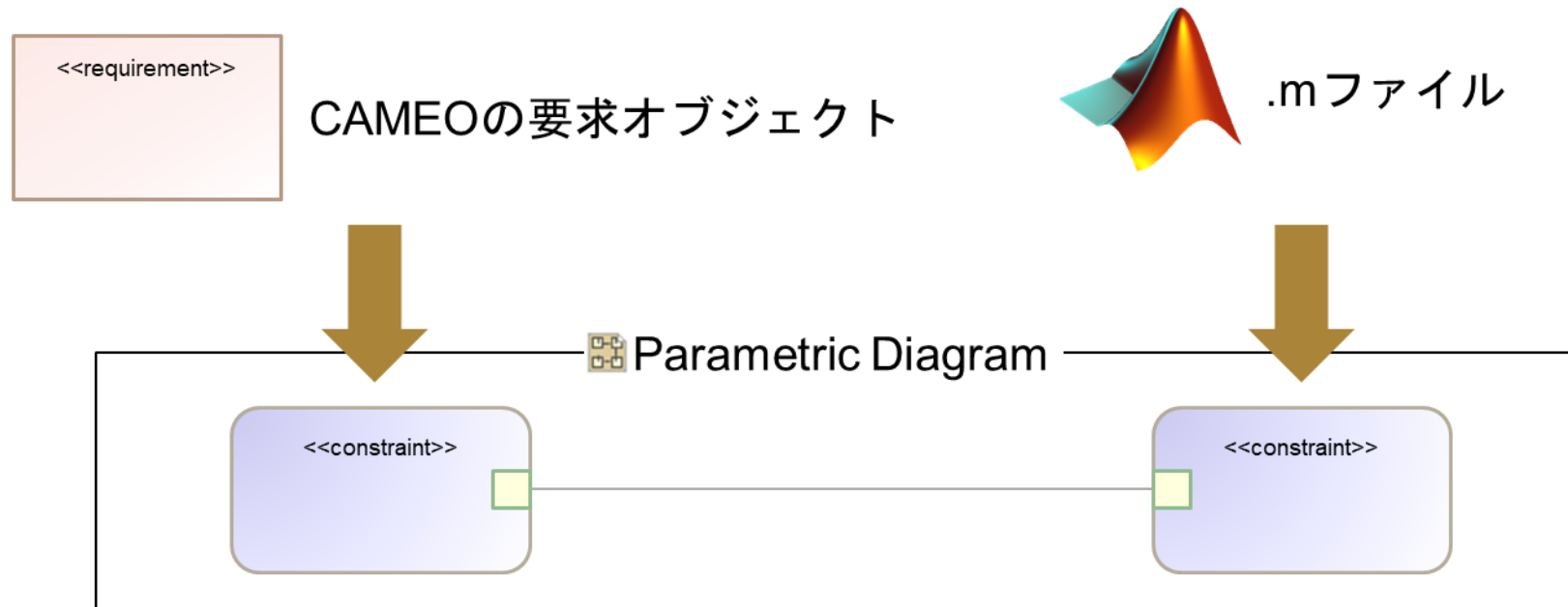


※Elevator command / Elevator deflectionも、要求として存在すべきだが、スペースの関係上省略

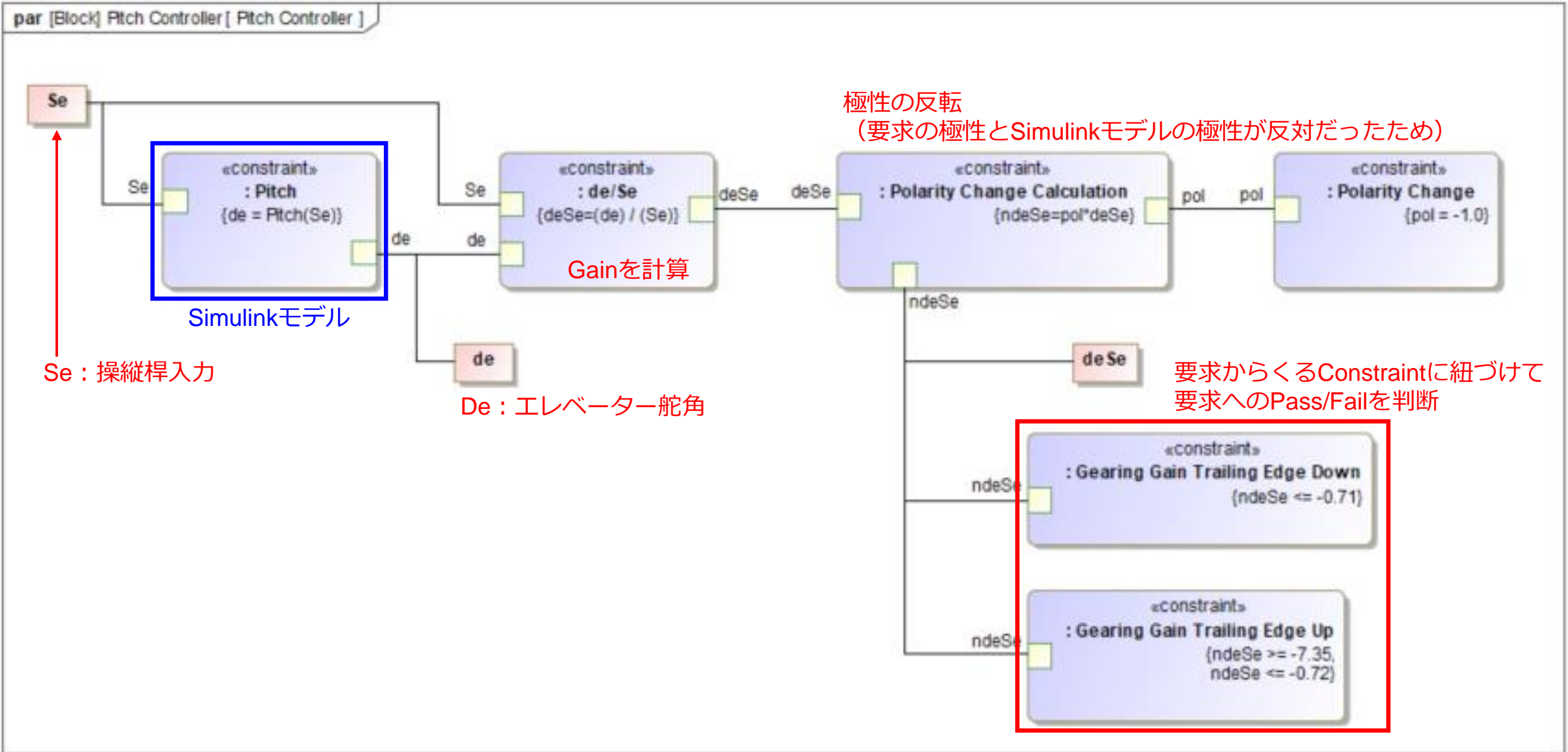
## 4.3 システムモデルとSimulink連携（ピッチコントロールシステム）：CAMEOとSimulinkの連携

- CAMEOとMatlab/Simulinkは、CAMEOのParametric Diagramを介して連携することができる。
- Parametric Diagramの中では、Constraintオブジェクトを使って、数値間の関係を定義する。
- 今回の紹介において、数値間の関係とは：

【CAMEO内の数値要求】と【Simulinkから出力される数値】との関係



# 4.3 システムモデルとSimulink連携 (ピッチコントロールシステム) :Constraintを紐づけ



# 4.3 システムモデルとSimulink連携 (ピッチコントロールシステム) :Simulation実行

Simulationを開始すると :

Name	Value
Pitch Controller	Pitch Controller@9057be2
Pitch {Out1 = Pitch(In1)}	Pitch@5e6fb5c1
In1 : Real	5.0000
Out1 : Real	4.2920
Fwd Polarity {Out1>0}	Fwd Polarity@2c47da41
Aft Polarity { Out1<0}	Aft Polarity@5ea134ad
de/Se {deSe=(Out1) / (In1)}	de/Se@7122c0de
Polarity Change {pol = -1.0}	Polarity Change@4a93e52d
Polarity Change Calculation {ndeSe=pol*deSe}	Polarity Change Calculation@161b8cc0
Gearing Gain Trailing Edge Down {ndeSe <= -0.71}	Gearing Gain Trailing Edge Down@120f7e36
ndeSe : Real	
x : Real	
Gearing Gain Trailing Edge Up {ndeSe >= -7.35, ndeSe <= -0.72}	Gearing Gain Trailing Edge Up@2113443b
ndeSe : Real	
x : Real	
de/Se	

値を変更すると  
Simulinkモデルを使っ  
て、計算が実行される

Value
Pitch Controller@9057be2
Pitch@5e6fb5c1
6.0000
5.1504
Fwd Polarity@2c47da41
Aft Polarity@5ea134ad
de/Se@7122c0de
Polarity Change@4a93e52d
Polarity Change Calculation@161b8cc0
Gearing Gain Trailing Edge Down@120f7e36
-0.8584
Gearing Gain Trailing Edge Up@2113443b
-0.8584
-0.8584

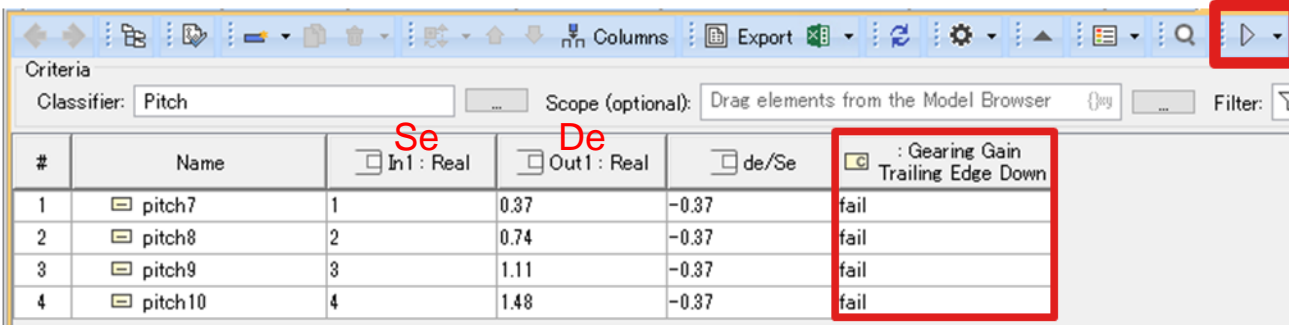
CAMEO中で  
Pass/Failを判定  
(緑 : Pass)

Failした場合は赤

Gearing Gain Trailing Edge Down@422b00e0
-0.3700
Gearing Gain Trailing Edge Up@5b57be0b
-0.3700
-0.3700

# 4.3 システムモデルとSimulink連携（ピッチコントロールシステム）：入力条件変更のバッチ処理

- インスタンステーブルを使うと、表形式で入力を変化させて一括でシミュレーションを実行可能
- Simulinkファイルをリアルタイムで変更しながらシミュレーションできる

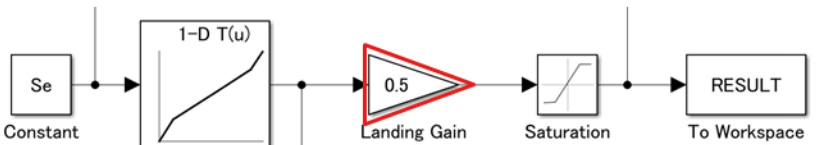


#	Name	In1: Real	Out1: Real	de/Se	Result
1	pitch7	1	0.37	-0.37	fail
2	pitch8	2	0.74	-0.37	fail
3	pitch9	3	1.11	-0.37	fail
4	pitch10	4	1.48	-0.37	fail


↑
↑
↑  
 入力値      出力値      ゲイン

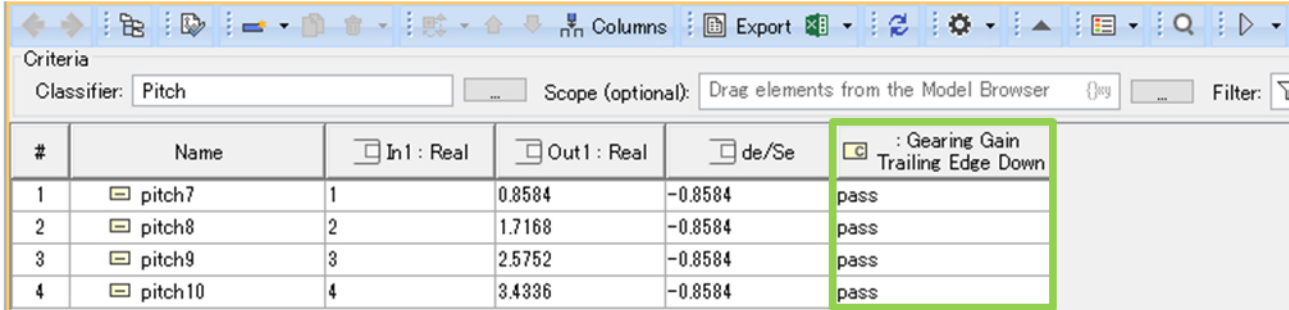
**Run with Behaviors**

Simulink Model (low gain)



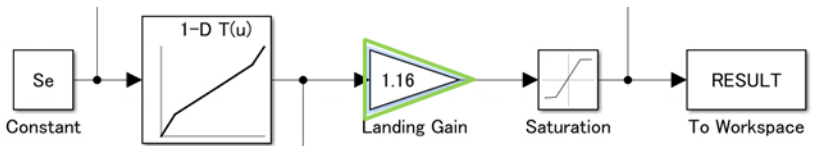
設計パラメータ





#	Name	In1: Real	Out1: Real	de/Se	Result
1	pitch7	1	0.8584	-0.8584	pass
2	pitch8	2	1.7168	-0.8584	pass
3	pitch9	3	2.5752	-0.8584	pass
4	pitch10	4	3.4336	-0.8584	pass

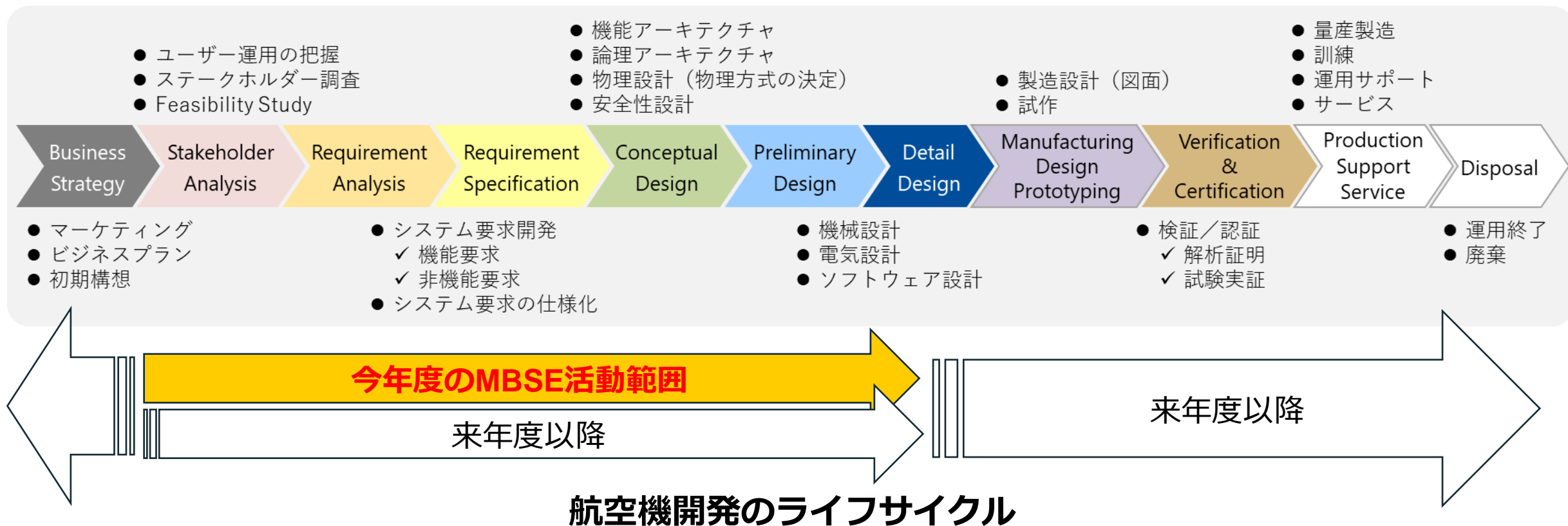
Simulink Model (modified gain)



- CameoとMatlab/Simulinkを連携させることで、要求のpass/fail判断が半自動化できる。
- ゲインの要求の導出元として、機動性（Stick force per G）の要求を最上位に置いたが、安定性の要求からも要求をフローダウンさせると、より制約条件が増える。
- 要求をフローダウンさせることで、同じ階層の機能のトレードスタディが可能になる。

# 5. まとめ

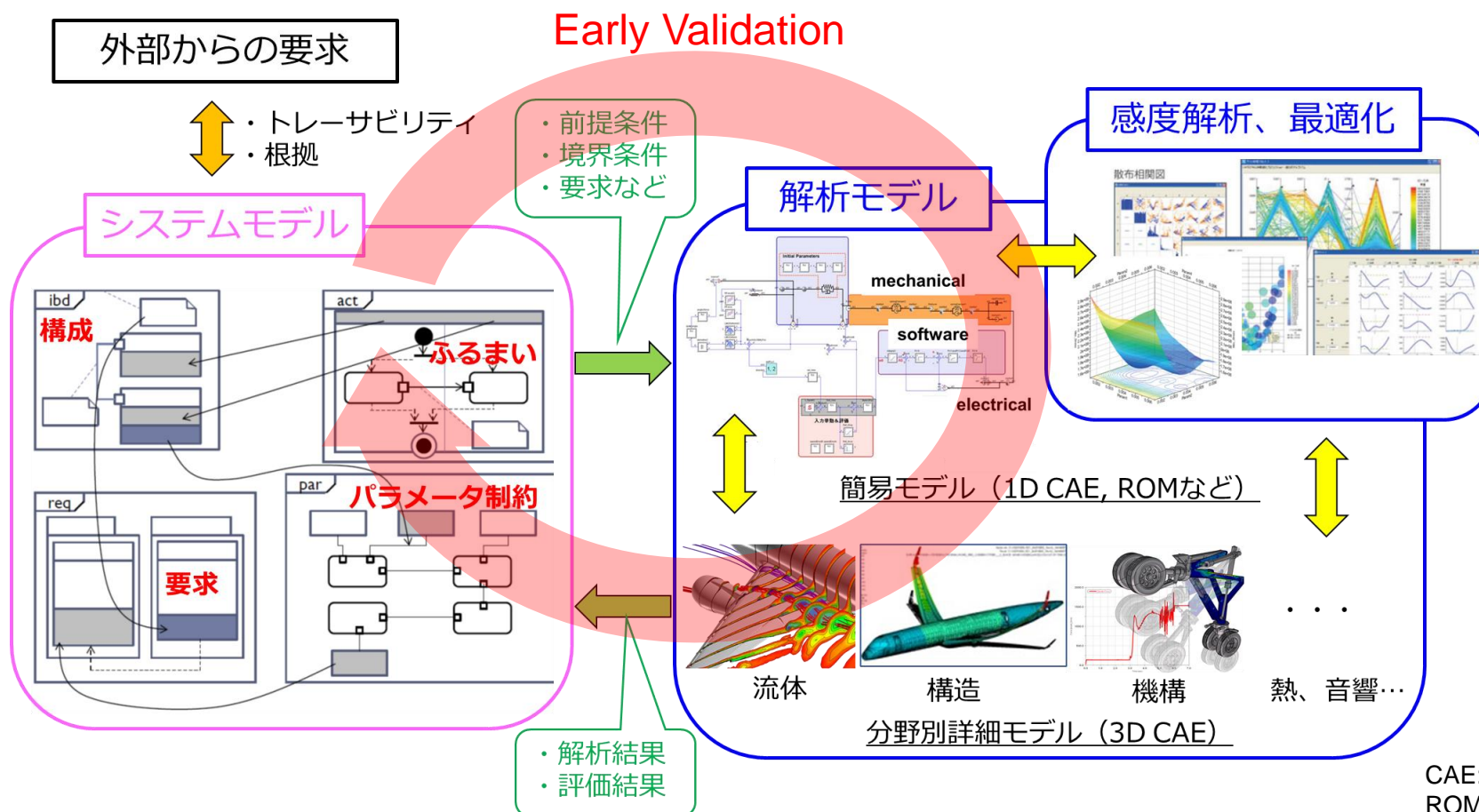
- MSJ開発資産（技術文書、データ、人材）を活用して、MBSEを適用した航空機開発プロセスの構築・試行を実施中
- 今年度はライフサイクルコストの大半を決める[Early Validationのプロセスに注力](#)
- 来年度以降は、製造、試験、量産、運用サポートなど、モデル化の範囲・粒度を段階的に拡大・深化させていく予定。



# 5. まとめ

## JAXAへの期待（航空機ライフサイクルDX）

- システムモデルと連携可能な、幅広い分野での高度な解析技術、最適化技術の研究開発  
 → 航空機開発プロセスで重要となる、Early Validationの強化（MBSE-MBD連携強化）



CAE: Computer Aided Engineering  
 ROM: Reduced Order Model



**MOVE THE WORLD FORWARD**

**MITSUBISHI  
HEAVY  
INDUSTRIES  
GROUP**