

日本機械学会 設計工学・システム部門 設計研究会

## JAXA基幹ロケットエンジン設計開発プロセスの情報化

宇宙航空研究開発機構 情報・計算工学センター  
大山 聖



## 自己紹介

### ■ 略歴

- 1972年12月 仙台生まれ
- 2000年3月 東北大学(中橋・大林研) 博士課程修了
- -2003年8月 NASA グレン研究所@オハイオ州クリーブランド
- 2003年9月 東北大学流体科学研究所
- 2003年10月- 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部
- 2005年10月- 宇宙航空研究開発機構 情報・計算工学センター(併任)

### ■ 専門

- 流体力学, 計算工学, 設計工学

# お話のアウトライン

---

- 我々の活動の背景と目的
- ロケット用バルブの設計開発プロセスの情報化
- ターボポンプインターフェース情報共有システムの開発
- エンジン開発プロセスの革新

## 我々の活動の背景と目的

---

# 宇宙航空研究開発機構(JAXA)

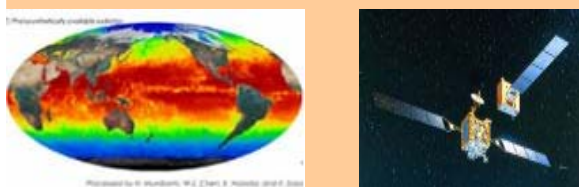
宇宙基幹システム本部(筑波)  
基幹ロケットの開発  
有人宇宙環境利用プログラム



宇宙科学研究本部(相模原)  
宇宙観測  
惑星探査



宇宙利用推進本部(筑波)  
人工衛星の開発



総合技術研究本部(調布)  
宇宙航空基盤技術



5

## 情報・計算工学センター(JEDI)

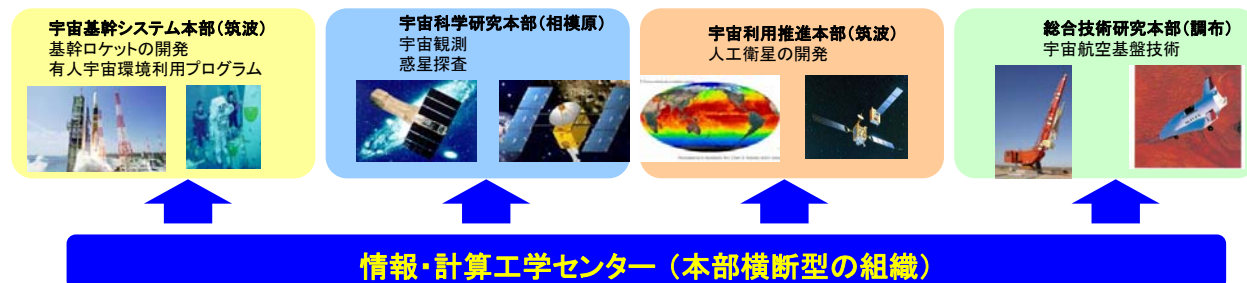
### 背景

- JAXAのプロジェクトへもっと積極的に数値シミュレーションを使う必要があった
- 数値シミュレーションが各本部でばらばらに行われており研究の効率が悪かった
- 人工衛星系の開発プロセスの情報化はそれぞれの人工衛星ごとにチームが分かれ、連携が十分になされてこなかった。
- 輸送系の開発プロセス情報化が相模原で行われており、筑波の人工衛星の開発プロセス情報化のチームと連携が十分になされてこなかった。

### 情報・計算工学センターの設立(2005年10月)

JAXAの持つ情報工学および計算工学をJAXA事業に有効に使う

情報工学・計算工学に関わる開発者・研究者の連携を図る



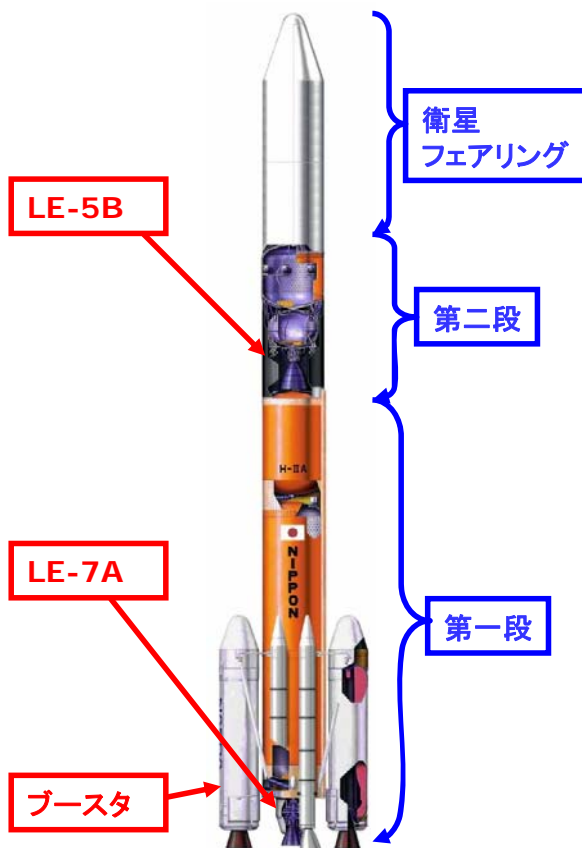
6

## ■ 2007年度の実施体制

- センター長: 藤井孝藏
- シミュレーション技術展開チーム
- プロジェクト課題対応チーム
- 計算機運用・利用技術チーム
- プロジェクト共通情報化チーム(人工衛星+輸送系(開発除く))
- **輸送系開発情報化チーム: エンジン開発プロセスの情報化**
  - チーム長: 藤井孝藏(兼任)
  - チーム長代理: 大山聖(兼任)
  - 本務2名, 兼任: 2名
- ソフトウェアエンジニアリングチーム
- 衛星設計支援システム開発チーム

7

## JAXA基幹ロケット H-IIA



### 特徴

- 2段式ロケット+固体ロケットブースター
- 静止トランスファ軌道への打ち上げ能力 3.8-5.8t
- 12回の打ち上げに成功(失敗1回)

問題点: 工場・射場において不具合があとを絶たない

- その大部分は設計に立ち戻るもので**コスト・スケジュール**に大きく影響  
(一日あたり数千万円, 打ち上げ一回あたり数百億円)
- 開発上流でシステム全体のバランスが十分検討されていないのが原因のひとつ(**開発プロセスの問題**)
- 特に, 推進系やエンジンで不具合が発生している

8

# ロケットエンジン開発プロセスの問題点

## ロケットエンジンの問題の多くは開発プロセスに起因

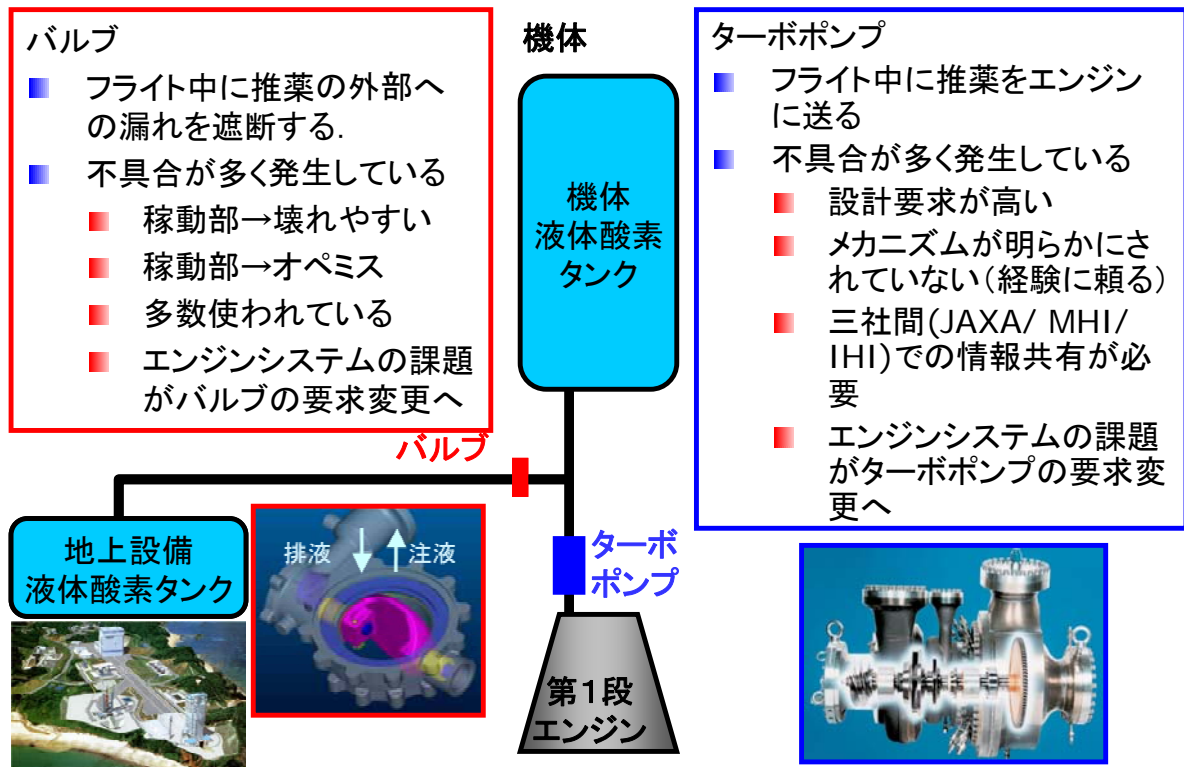
- ほぼ10年以上新規開発の間隔があくために設計ノウハウが失われていく
- コンポーネントごと、分野ごとなどで設計開発担当者が分かれており、これらの担当者間の情報共有が不十分・非効率
- 信頼性・性能・コストなどについてエンジンシステム全体のバランスを考慮しながら設計を行っていく仕組みが不足
- 数値シミュレーションが十分に利用されておらず、経験による設計、試験による実証に頼らざるを得ない



開発プロセスの革新が必要

9

## 近々に解決したい課題



バルブとターボポンプは緊急の対策が必要

10

# 我々の活動の目的と活動方針

世界一信頼性のあるロケットエンジンを日本で作る  
 そのために、最先端の情報技術を使って現在の設計開発プロセスを革新する

- バルブの不具合対策情報化やポンプインターフェース情報共有が緊急の課題であり、まずはそこに対処
  - バルブやポンプの設計開発プロセスの効率化・確実化
  - 現場の人たちの情報化に対する理解を得る
  - バルブ・ポンプインターフェースの情報化の活動で経験をつむ
- 上記活動ののち、エンジンの設計開発プロセスの革新に取り組む

# 我々の活動の目的と活動方針

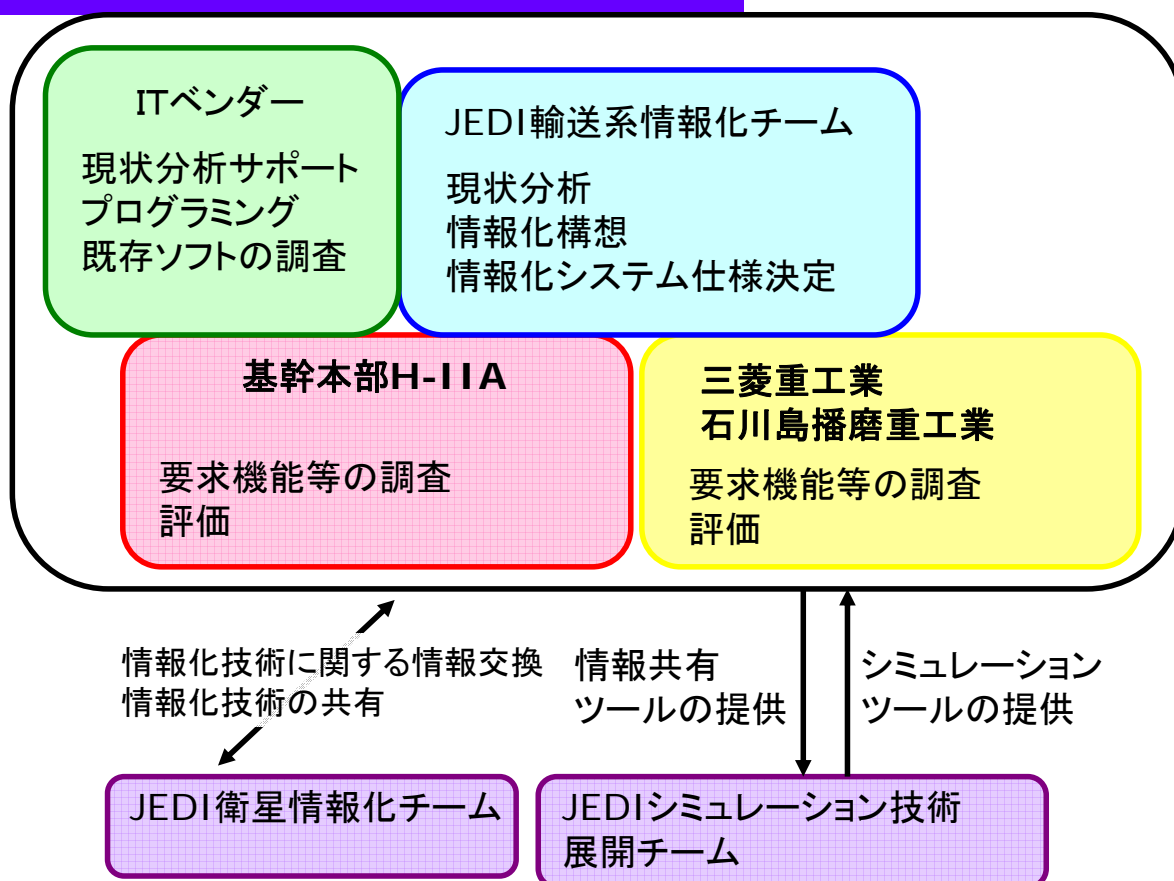
	FY17	FY18	FY19	FY20	FY21	FY22	FY23	FY24
バルブ情報化	分析	試作	本システム	実利用・広くJAXA事業に展開				
ポンプI/F 情報共有		分析	試作	本システム	実利用・広くJAXA事業に展開			
プロセス改革	バルブ・ポンプ・ 噴射器		分析	システム開発			実利用	
					エンジン 全体	本システム		

次期ブースタ  
エンジンLE-X

研究フェーズ

開発フェーズ  
(予定)

## エンジン開発情報化の実施体制



13

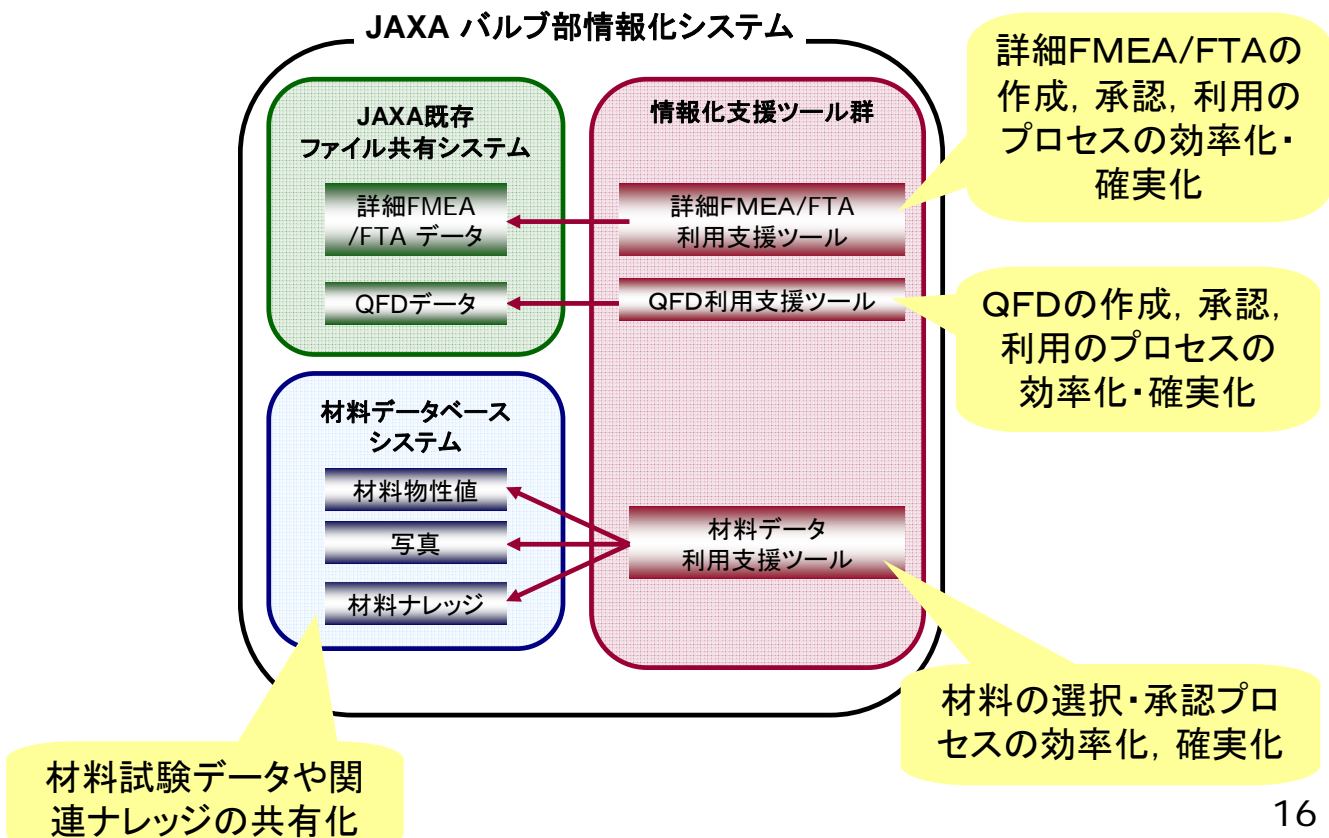
## バルブの設計開発プロセスの情報化

## 現状分析

- 現場にかかわる人の聞き取り調査
- これまで起こった不具合の再分析
  - なぜなぜ分析を行い, 不具合の根本原因を抽出
  - 抽出された根本原因について不具合の重要度をもとにランク付け
- 結果:
  - 詳細FMEAの情報共有・利用支援 (分析結果)
  - QFDの情報共有・利用支援 (分析結果)
  - 材料特性の情報共有・利用支援 (現場からの要求)
  - FTAの情報共有・利用支援 (現場からの要求)

15

## バルブ部情報化システム



16



## 詳細FMEA/FTA利用支援ツール 詳細FMEA (詳細故障モード影響解析)とは？

- 各部品について、故障モードを列挙し、発生可能性、システムへの影響度などからそれぞれの故障モードの重要度を算出
- 利点
  - それぞれの部品を設計する際に、気をつけなくてはならない故障モードがリスト化されており、考慮不足の可能性を削減

部品			機能	故障モード	不具合モードの原因	重要度				不具合事例	対処・課題	...	
レベル1	レベル2	レベル3				発生可能性	影響度	検知難度	重要度				
ライター	ケース		ライター機構の保持	外部力が着火機構に伝わる	ケースが壊れる	1	4	1	4				
	キャップ		酸素を供給する	酸素を供給しない	キャップの破損・変形	3	3	2	18				
					キャップのヒンジの破損	3	3	2	18				
			消火する	消火しない	キャップの破損・変形 キャップのヒンジの破損	3	3	2	18	4月23日に発生。被害大	ヒンジを強化した		
	着火部	回転ドラム	ライター機構の保持	外部力が着火機構に伝わる	キャップが壊れる	1	4	1	4				
	着火部	フリント(発火材)	フリントをこする	火花を出す	火花が出ない	回転ドラムがフリントに接しない	1	4	4	16			
						回転機構の破損 発火石が摩耗している	3	4	4	48			
	オイル供給部	綿芯	オイルを吸い上げる	オイルを吸い上げる	オイルが吸い上げない	回転ドラムがフリントに接しない	2	3	4	24			
						綿芯が切れた	1	4	4	16			
						オイルがなくなる	3	4	2	24			
		オイルタンク	オイルを保管する	オイルを保管する	オイルがなくなる	タンクの破損	1	4	1	4	1月1日に発生。ポケットがオイルで汚れた	タンク壁を厚くした	

## 詳細FMEA/FTA利用支援ツール 詳細FMEA を使った作業の問題点

- 部品や故障モードが多数あるため、巨大なリストになる
  - EXCELでは全体を俯瞰することができない
  - 文言の統一が難しい
  - リンクをたどるのが大変
- FTAを作成するための情報が含まれているのに、FTAと詳細FMEAが別々に作られている
- 判断基準などの追加情報が含まれていない

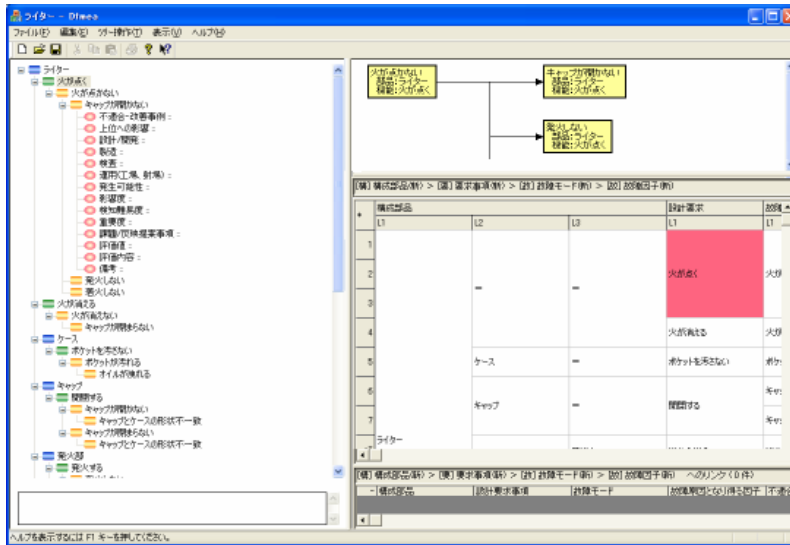
部品			機能	故障モード	不具合モードの原因	重要度				不具合事例	対処・課題	...	
レベル1	レベル2	レベル3				発生可能性	影響度	検知難度	重要度				
ライター	ケース		ライター機構の保持	外部力が着火機構に伝わる	ケースが壊れる	1	4	1	4				
	キャップ		酸素を供給する	酸素を供給しない	キャップの破損・変形	3	3	2	18				
					キャップのヒンジの破損	3	3	2	18				
			消火する	消火しない	キャップの破損・変形 キャップのヒンジの破損	3	3	2	18	4月23日に発生。被害大	ヒンジを強化した		
	着火部	回転ドラム	ライター機構の保持	外部力が着火機構に伝わる	キャップが壊れる	1	4	1	4				
	着火部	フリント(発火材)	フリントをこする	火花を出す	火花が出ない	回転ドラムがフリントに接しない	1	4	4	16			
						回転機構の破損 発火石が摩耗している	3	4	4	48			
	オイル供給部	綿芯	オイルを吸い上げる	オイルを吸い上げる	オイルが吸い上げない	回転ドラムがフリントに接しない	2	3	4	24			
						綿芯が切れた	1	4	4	16			
						オイルがなくなる	3	4	2	24			
		オイルタンク	オイルを保管する	オイルを保管する	オイルがなくなる	タンクの破損	1	4	1	4	1月1日に発生。ポケットがオイルで汚れた	タンク壁を厚くした	

FTAとしてみた場合  
回転ドラムの回転機構の破損  
→フリントから火花が出ない

# 詳細FMEA/FTA利用支援ツール

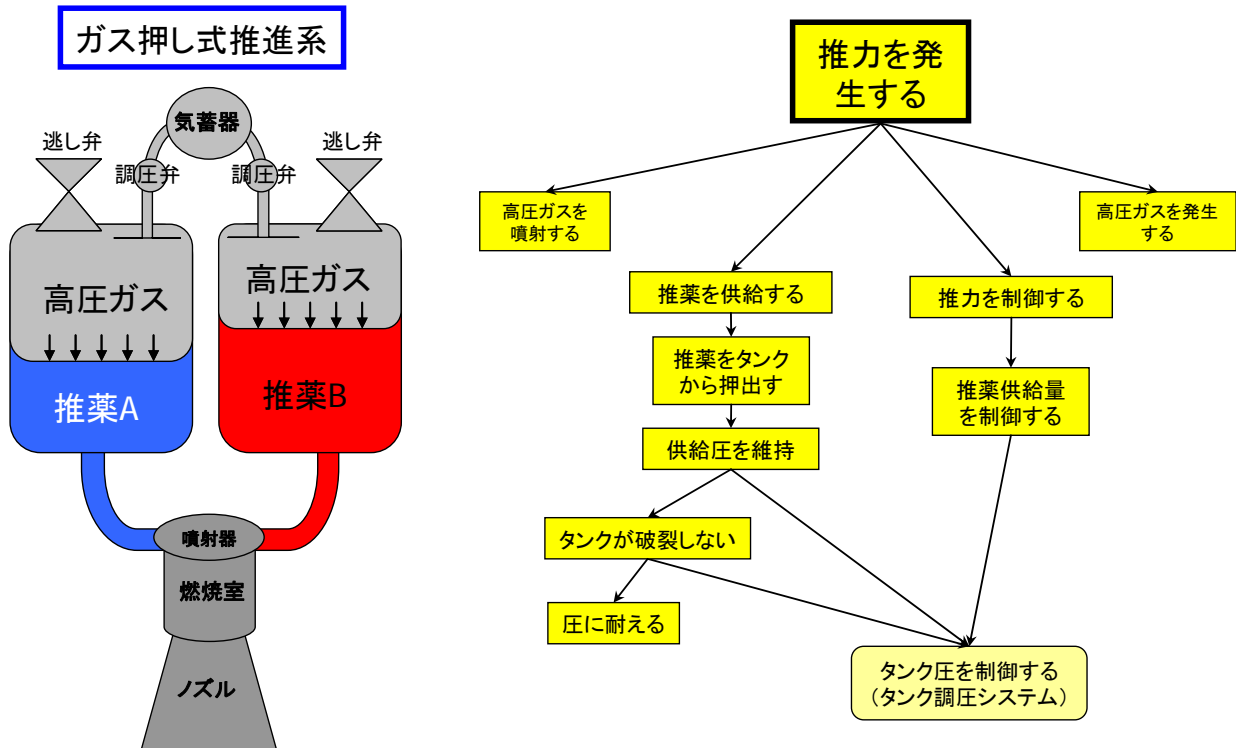
## 詳細FMEA/FTA利用支援ツールの特徴

- ツリー構造, リンク元同時表示で全体を把握しやすくした
- 過去の入力からの選択による文言統一
- 詳細FMEA形式とFTA形式の同時表示
- FTAをネットワークとして扱うことが可能
- 故障因子や対処ごとに判断理由などのナレッジ蓄積が可能
- ウィンドウズ用で導入が容易



19

## ネットワークの例



20

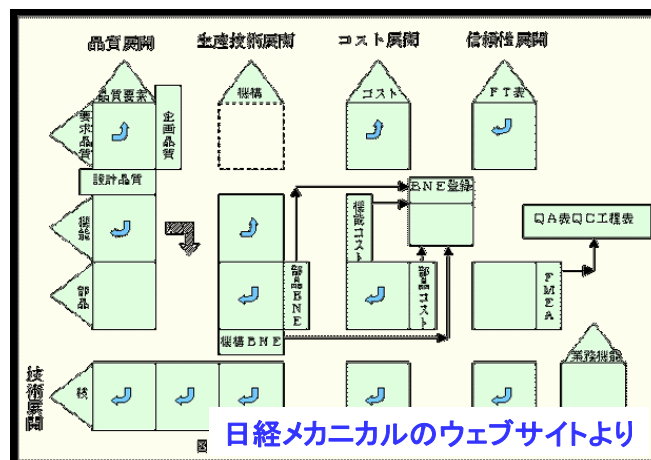
## QFD利用支援ツール QFD(品質機能展開)とは？

### 要求品質展開表

品質特性		1次数		燃料消費率	最高出力	エンジントルク	最小回転半径	燃料タンク容量	総排気量	安全性能		車体サイズ			車体重量	要求品質ウェイト集計
		1次数	2次数							衝撃吸収率	視界	全長	全幅	全高		
要求品質																
1次数	2次数															
速い	加速がよい				5	5				3						0.0079562
	コーナリングがよい															0.0556931
乗り心地がよい	車に酔わない														1	0.0178758
	広い											5	5	5		0.0893791
車内が広い	たくさん人が乗れること											5	5	3		0.1888836
	たくさん荷物が載せられること							3				5	5	5		0.0377767
安い	販売価格がやすい				1					5						0.4234434
	燃料代が安い				5											0.0846887
かっこいい																0.0156721
駐車場にとめやすい							5				3	5	5	3		0.0538095
長距離走れる					5											0.0248218
要求品質ウェイト集計1																
				0.047	0.066	0.004	0.03	0.027	0.24	0	0.018	0.207	0.207	0.153	0.002	

## QFD利用支援ツール QFD(品質機能展開)とは？

- 要求される品質に関する重要度を品質特性、機能、機構と展開していく手法  
機能からスタートしたり、コストや信頼性へ展開したりさまざまな利用方法がある



- 利点
  - 重要な要求品質に強く関係する機能・機構などを特定できる
  - 考慮の抜け項目を見つけ出すことができる
  - 複数の人でチェックすることができる
  - 設計者・製造者・利用者などの意見を総合的に取り入れることができる
  - 設計根拠を伝承することができる

# QFD利用支援ツール QFDのロケットバルブでの適用事例

## QFDの適用事例－注排弁



### 『要求品質』の重要度識別(AHP法)

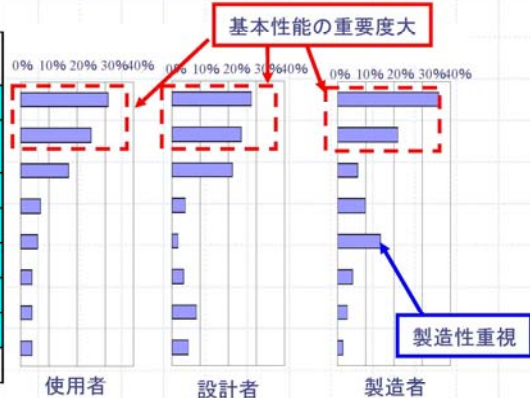
『要求品質』の重み付けにはAHP法を用いた。  
使用者、設計者、製造者でそれぞれ実施し、考えの差異が明確になった。

- 9 絶対重要
- 7 かなり重要
- 5 重要
- 3 少し重要
- 1 同等

AHP法(一対比較)

1次項目	幾何平均	ウェイト	確実に開閉する	確実にもれを防止する	丈夫である	操作しやすい	つくりやすい	整備しやすい	質量が小さい	価格が低い
確実に開閉する	3.27	28%	1	3	1	5	7	5	5	5
確実にもれを防止する	2.85	25%	1/3	1	3	5	7	5	5	5
丈夫である	2.49	22%	1	1/3	1	5	7	5	5	5
操作しやすい	0.55	5%	1/5	1/5	1/5	1	3	1	1/3	1
つくりやすい	0.24	2%	1/7	1/7	1/7	1/3	1	1/3	1/5	1/5
整備しやすい	0.48	4%	1/5	1/5	1/5	1	3	1	1/3	1/3
質量が小さい	1.01	9%	1/5	1/5	1/5	3	5	3	1	3
価格が低い	0.67	6%	1/5	1/5	1/5	1	5	3	1/3	1

各立場の考えの相違がわかった



沖田耕一, ロケット用バルブ開発で取り組む品質機能展開(QFD)手法,  
平成18年度 宇宙開発品質保証シンポジウム

各立場の『要求品質ウェイト』

# QFD利用支援ツール QFDのロケットバルブでの適用事例

## QFDの適用事例－注排弁



### 『品質特性』の抽出

『要求品質』の中から、バルブが有すべき『品質特性』を抽出し、関連性を整理した。(『品質表』)

⇒従来に規定していなかった『品質特性』に気付くことができた。

品質特性 展開		品質表																													
		バルブ基本要素項目例										追加要求項目(案)																			
要求品質 展開	1次	設計及び製作	特性	環境条件	機械的I/F	機能要求	流体I/F																								
	2次	外径寸度	弁駆動流体	弁駆動圧	周囲環境圧力	破壊圧力	ライン作動温度	開動作	開タイミング	閉タイミング	閉タイミング特性	流量(圧損)	内部漏洩シヤフト	外部漏洩駆動室	外部漏洩メイン	内部漏洩メイン	逆圧規定	動作寿命	重量	取付姿勢	振動衝撃加速度	高温・低温保存	材料	荷重	冗長化(機能)	断熱性能	コンタミ耐性	水撃	温度過渡		
確実に開閉する	スティックしない																														
	開度がばらつかない																														
	弁体の駆動力を保持できる																														
	確実にステータスがわかる																														
確実にもれを防止する	洩れが少ない																														
	フランケット圧を保持できる(保管時)																														
	コーマック圧なしで開保持できる(FLT時)																														
	漏洩を検知できる																														
	コンタミ混入に強い																														
丈夫である	耐環境性が高い																														
	部品が十分な強度を有する。																														
	保管中に錆びない																														
	使用流体で劣化しない																														
	過加圧に耐える																														
	流動中動作に耐える																														

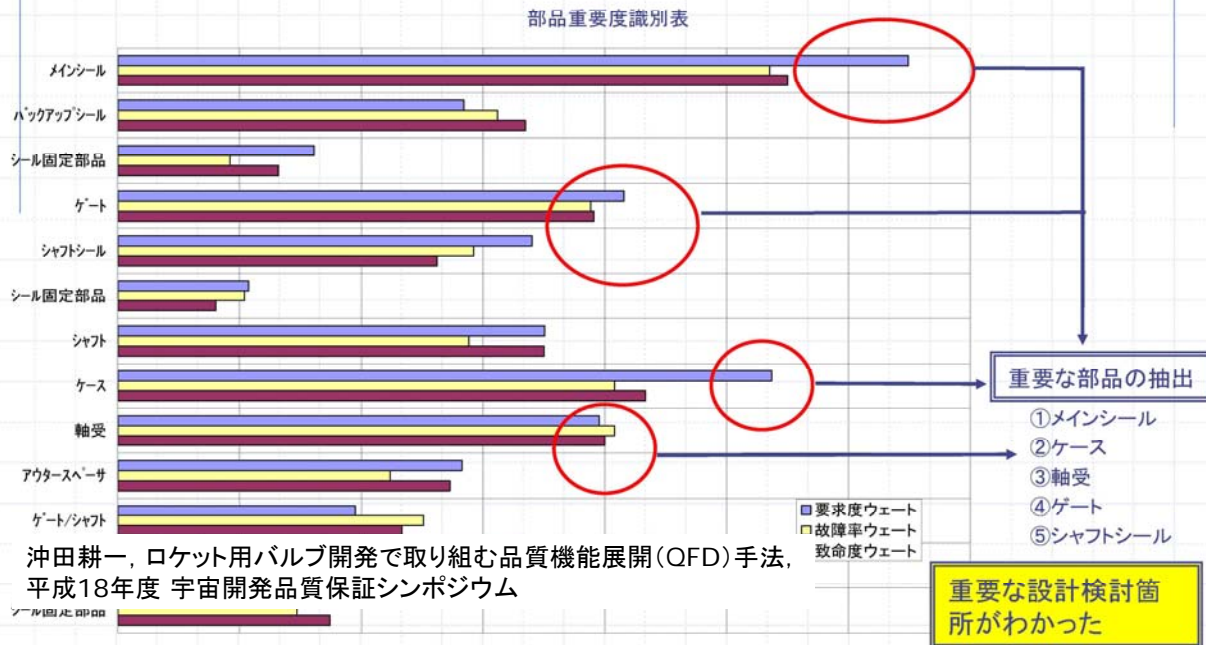
沖田耕一, ロケット用バルブ開発で取り組む品質機能展開(QFD)手法,  
平成18年度 宇宙開発品質保証シンポジウム

# QFD利用支援ツール QFDのロケットバルブでの適用事例

## QFDの適用事例－注排弁



『機構・部品』の重要度識別結果(要求度ウェイト、故障率ウェイト、致命度ウェイト)



25

## QFD利用支援ツール QFDをしている現場からでてきた問題点

	これまでのアプローチ	問題点
要求品質展開, 品質特性展開, など	みんなであつまってブレイン ストーミング→責任者が決める	ここはとくに問題なし
重要度の算出(AHP法)	アンケート用紙を作成し アンケートを関係者に配って アンケートに答えてもらい アンケートを集計	アンケート用紙の作成, アンケート用紙の回答, アンケート結果の集計 が面倒・ミスが生じる
マトリックスを使った マッピング	エクセルで作成	要求・品質→品質・機能 などへ 移行する際, 表の作り直しが面倒

- 現場の人のヒアリング→現場の要求の抽出・検討
- 必要とされる要求のほとんどはEXCEL
- 市販ソフトではJAXA内での要求のすべてはみたさない, 拡張性が低い

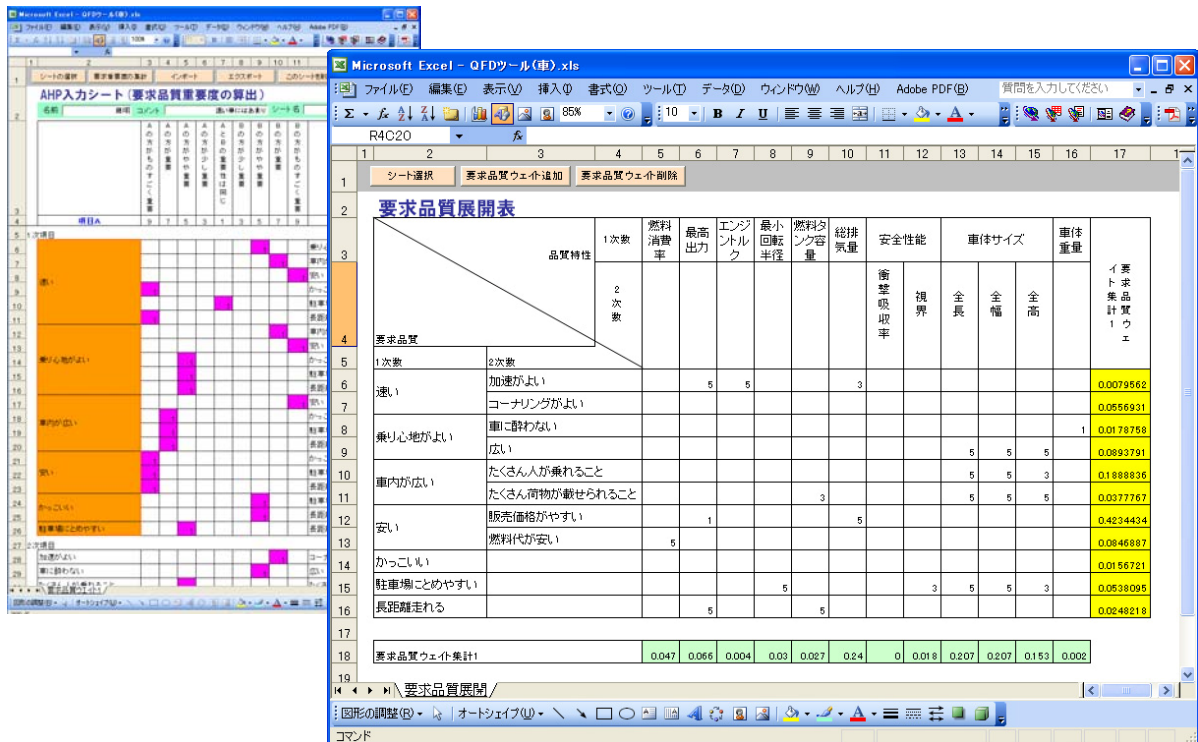
- エクセルのマクロを使って, JAXA独自のQFDソフトを開発

26

# QFD利用支援ツール

## QFD利用支援ツールの特徴

- 作業の自動化
- EXCELがあればよく、導入が容易



27

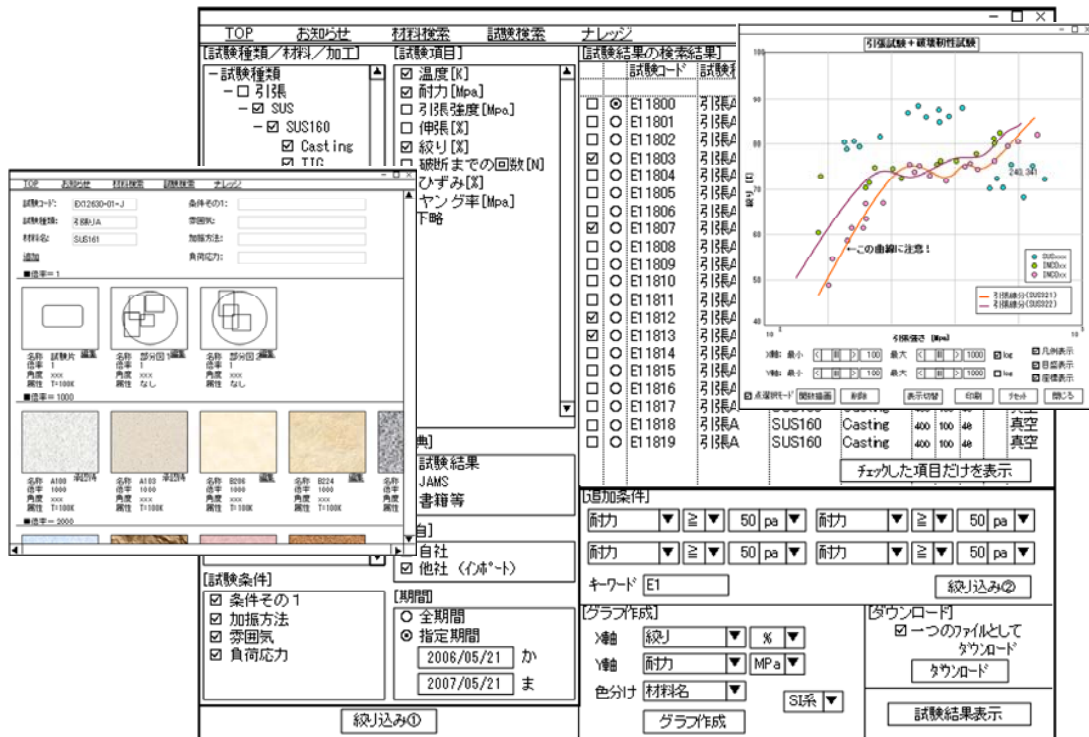
## 材料データベースシステムと材料データ利用支援ツール

### 特徴

- システム構成
  - 材料データベースシステム
    - データベース管理: PostgreSQL
    - WWWサーバー: Tomcat
  - 材料データ利用支援ツール
    - JAVA
- 材料名を入力すると材料特性が表示される
- 材料の使用条件を入力するだけで適切な材料を選択可能
- 材料特性をTEXT/EXCELシートの形でアップロードできる
- ナレッジを蓄積できる
- フリーソフトベースで維持費が小さい
- ブラウザがあれば利用可能なので導入が容易

28

# 材料データベースシステムと材料データ利用支援ツール ユーザーインターフェース



29

## バルブ部情報化試作システムに対する現場からの評価

- 詳細FMEA/FTA利用支援ツール
  - ツリー構造やリンク先がひとめでわかるようになり理解しやすくなった
  - ライセンス料不要, 特別な環境も不要で導入しやすい
- QFD利用支援ツール
  - 余計な作業が自動化されたので考えなければいけないところに時間を集中できるようになった
  - ボタンを押していくだけでQFDの一連の作業が行えるので, 使う人のハードルがかなり低くなった
  - ライセンス料不要, 特別な環境も不要で導入しやすい
- 材料データ利用支援ツール
  - 材料特性データを一元的に管理できるようになるので作業が楽になる
  - EXCELデータをアップロードできるので材料特性データの入力が楽になる
  - ライセンス料不要, 特別な環境も不要で導入しやすい



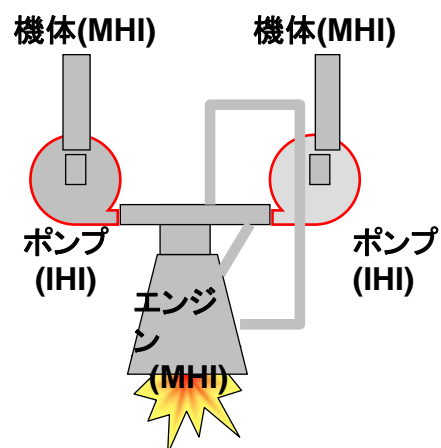
- バルブの不具合削減へ
- バルブ以外の設計開発へのスピノフ

30

# ターボポンプインターフェース情報の共有システム開発

## ターボポンプ開発プロセスの問題点

- 情報共有・情報伝達の非効率性・不確実性
  - 過去の設計開発ノウハウが伝承されていない
  - 企業間, JAXA内, JAXA・企業間の情報伝達が非効率・不確実 (メールベース)
- 形状データや数値シミュレーション結果の効率的な共有がなされていない
  - 企業間でデータのフォーマットが異なる
  - 3次元CADデータが使われていない

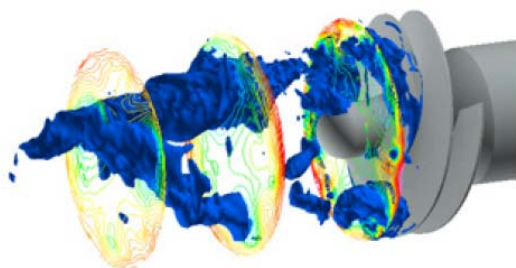




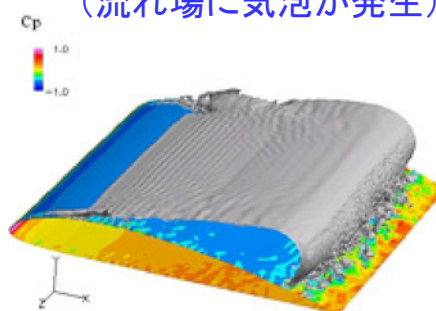
## ターボポンプ開発プロセスの問題点

- 数値シミュレーションが設計に十分に活かされていない
  - 数値シミュレーションが難しい・適材適所に使われていない
  - 格子生成に時間がかかる
- 信頼性を考慮した設計になっていない
  - Failure safeが設計に考慮されていない
  - 環境や工作のばらつきが設計に考慮されていない

インペラ逆流領域  
(3次元非定常流れ)



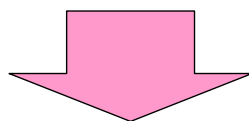
キャビテーション流れ  
(流れ場に気泡が発生)



33

## 方針

現在, LE-Xは研究フェーズ(概念検討)であり,  
平成25年度に開発フェーズ(基本設計以降)への移行を目指す

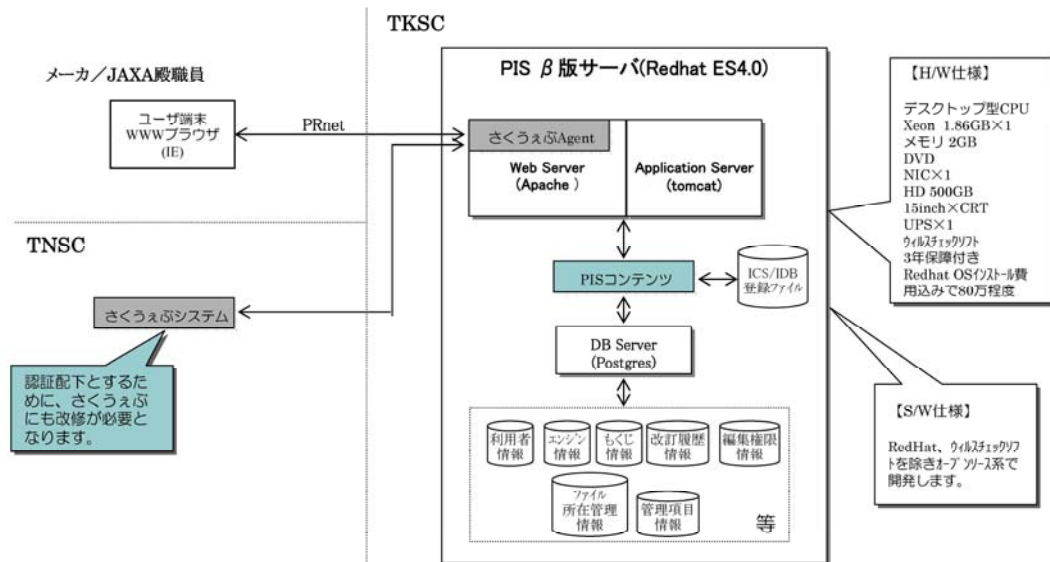


- 今年度はLE-Xの概念検討のための情報共有システムを開発
  - 概念検討ではテキスト, グラフなどのデータが中心
- 平成25年度までにLE-Xの開発フェーズから運用までを含めた情報共有システムを開発
  - 開発フェーズ以降ではテキストデータ, グラフなどの図の共有に加え, CADデータ, 解析データの効率的な共有も必要であると考えられる

34

## LE-X概念検討のための情報共有システム

- 概念設計に使われるインターフェース情報のJAXA/MHI/IHIでの電子的共有が目的
- JAXA既存のセキュリティ管理機能, データ処理システムを用いる
- 平成19年度末β版完成予定, 平成20年度リリース予定(当初計画どおり)
- 現在はシステム設計中.



35

## LE-X開発フェーズから運用までを含めた情報共有システム

- 開発フェーズから運用までに必要なインターフェース情報のJAXA/MHI/IHIでの電子的共有が目的
- 平成24年度完成予定, できた機能から順次リリース予定
- 今年度行っている作業
  - 既存の共有データの見直し
  - サーバ機能とツール機能の仕分け
  - 3次元CADデータおよび解析データの共有, データ変換機能の必要性, 運用方法などについての検討・整理



36

# エンジン開発プロセスの革新

---

## 方針と方法

---

### ■ 方針

- 既存開発プロセスの情報化ではなく、情報技術を利用した新しい開発プロセスを構築する

### ■ 開発プロセスの革新方法

- システムズエンジニアリング(SE)と情報技術をベースとした新しい設計手法への移行し、資源の有効配分、開発業務の革新的効率化、開発管理などを旨す
- 要素技術の体系化により研究と開発を一体化し、互いの有効利用を旨す
- 計算工学技術の有効な利用方法を明確化し、積極的に活用する
- これらを可能にする情報システムを開発する

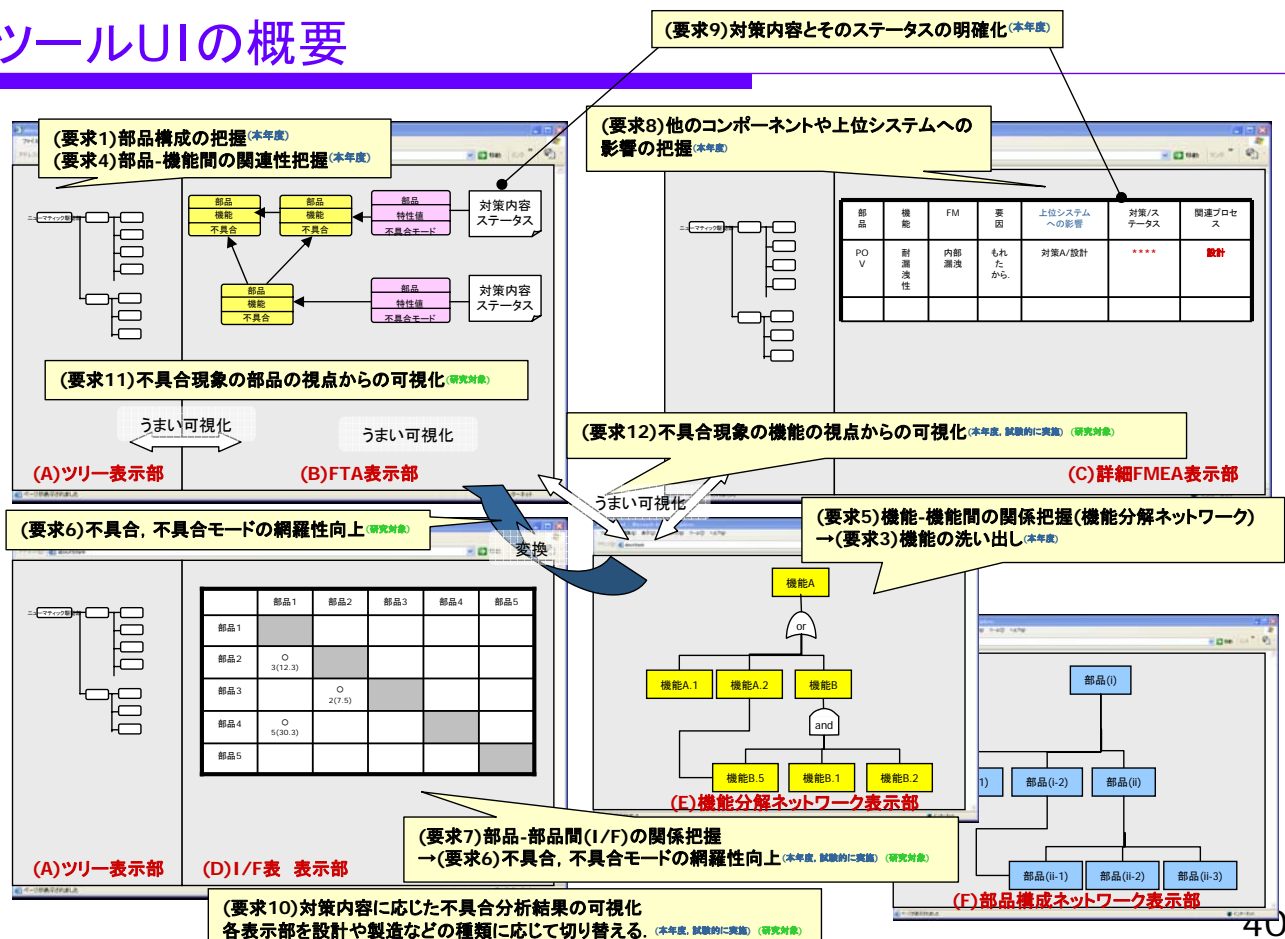
# 開発プロセスの革新に向けてかかえている課題

- システムズエンジニアリング手法のロケットエンジンへの適用方法についての検討・研究をどう効率的に進めるか？
  - SE技術(詳細FMEA, FTA, QFD, Event treeデータ, 機能分解木, 信頼性ブロック図など)を一体化したい
  - 機能分解木, FTAなどはツリーになるとは限らない(ネットワーク型)
  - 扱うデータが膨大である
  - 信頼性の定義が定まっていない
  - 故障モードの定義が定まっていない
- 既存ソフトの調査を抜けなく効果的に行う方法は？
 

現在は, インターネット, 口コミ等による情報収集  
→ソフトウェア会社との打ち合わせ

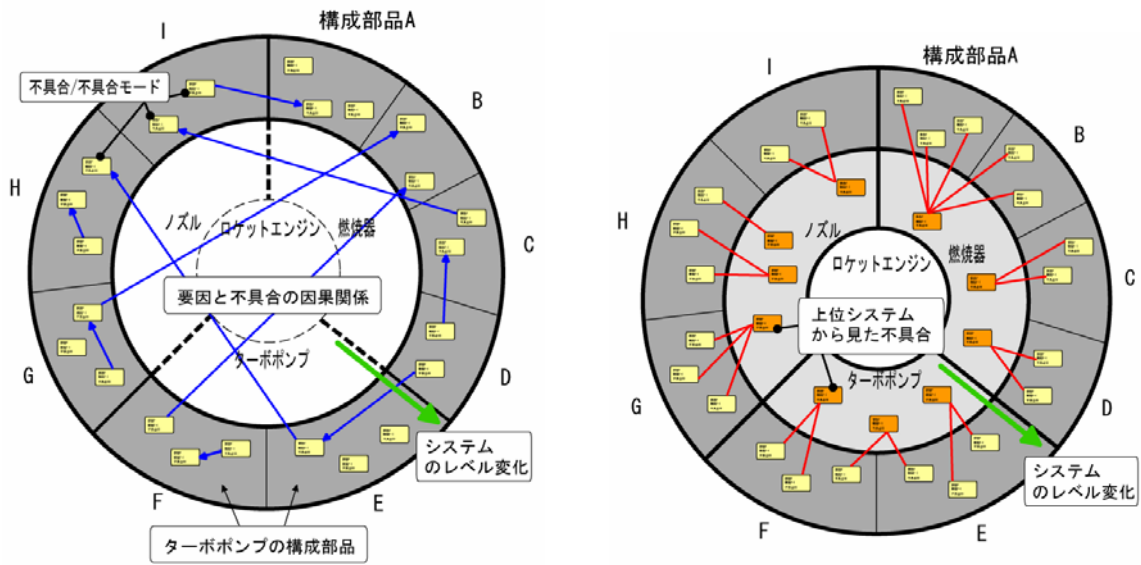
  - 時間がかかる
  - 十分に調査を行ったかどうかの判断が難しい

## ツールUIの概要



# 研究要素:不具合現象の部品の視点からの可視化

## FTAネットワーク表示部の工夫



# Appendix

# 参考文献

---

- LE-X... Akihide Kurosu, Nobuhiro Yamanishi, Naoki Tani, Okita Koichi, Akira Ogawara, Tadaoki Onga, and Masahiro Atsumi, "Study of Next Booster Engine LE-X in JAXA," AIAA-2006-4700, 42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, 2006.
- 詳細FMEA... H-IIAロケット再点検専門委員会報告書, 宇宙開発委員会調査部会, H-IIAロケット再点検専門委員会, 2004.
- FTA... 鈴木順二郎, 牧野鉄治, 石坂茂樹, FMEA・FTA実施法, 日科技連出版社, 2002.
- QFD... 赤尾洋二, 品質展開入門(品質機能展開活用マニュアル), 日科技連出版社, 1990.

# 謝辞

---

詳細FMEA/FTA利用支援ツール, QFD利用支援ツール, 材料データベースシステムおよび材料データ利用支援ツールの開発にあたり, プログラミング等でご協力いただいている(株)富士通長野システムエンジニアリングの皆様  
に謝辞を表す。