

東京大学JAXA社会連携講座シンポジウム 2012年9月27日



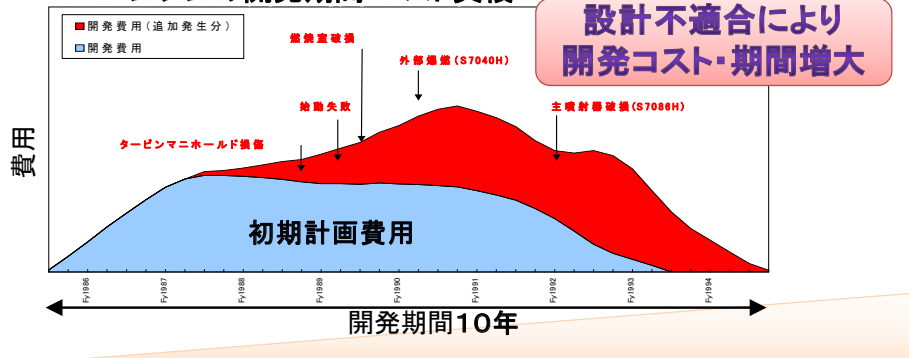
ロケットエンジンシミュレーションにおける 今後の展望

JAXA/JEDI
山西伸宏
根岸秀世, 谷洋海

従来のロケットエンジン開発プロセス



LE-7エンジンの開発期間・コスト実績



JAXA/JEDI(情報・計算工学センター)の目標

シミュレーション技術を始めとする情報化技術で
ロケットエンジン開発にイノベーションを起こす

JAXAシミュレーションの最終目標

シミュレーションによる設計技術を導入した 新たな開発プロセスで、将来の宇宙航空ミッションの 低コスト/短期間化・高性能/高信頼化を実現する世界へ

【設計評価におけるコスト低減の実現】

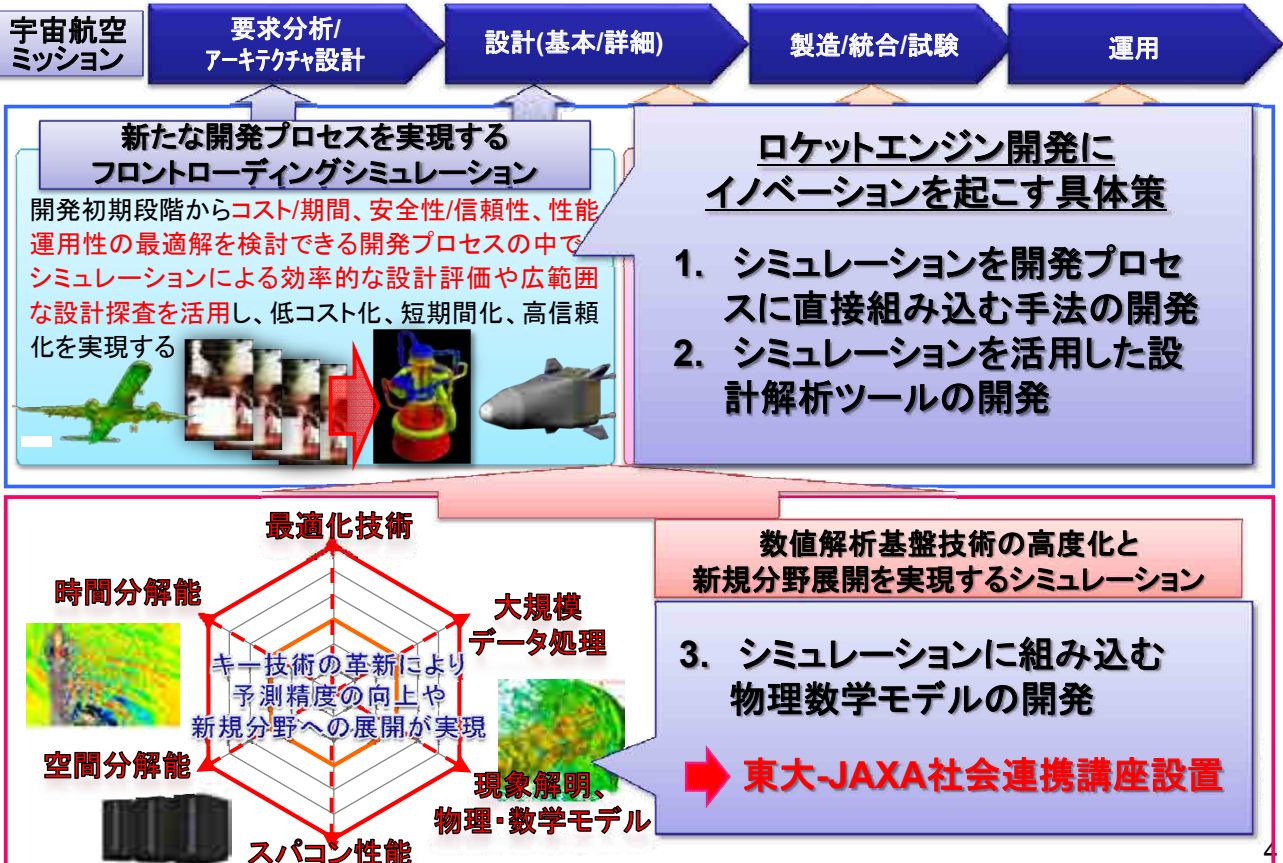
- 設計初期段階でシミュレーションにより潜在的な不具合因子を洗い出すことで、開発後期の事故を未然に防止し、不具合対策によるコスト・期間を削減する
- 膨大な回数の試験が必要な設計評価(例えば有人輸送ミッションに不可欠なロケットエンジン設計信頼度)にシミュレーションを活用することで、試験回数を減らし、コスト・期間を大幅に削減する

【広範囲な設計探索の効率化の実現】

- 試験では網羅できないほど広範囲に機体やエンジンの作動状況を予測することで、信頼性や安全性の正確な評価に貢献する
- 膨大な数のコンポーネントからなる全体システムを各コンポーネントごとに切り分けて作動状況を予測することで、複雑な全体システムの信頼性や安全性の評価の効率化を図る
- 人間の経験則の延長では導けない新しい設計値を効率的に探索することで、最適な設計解を提案する

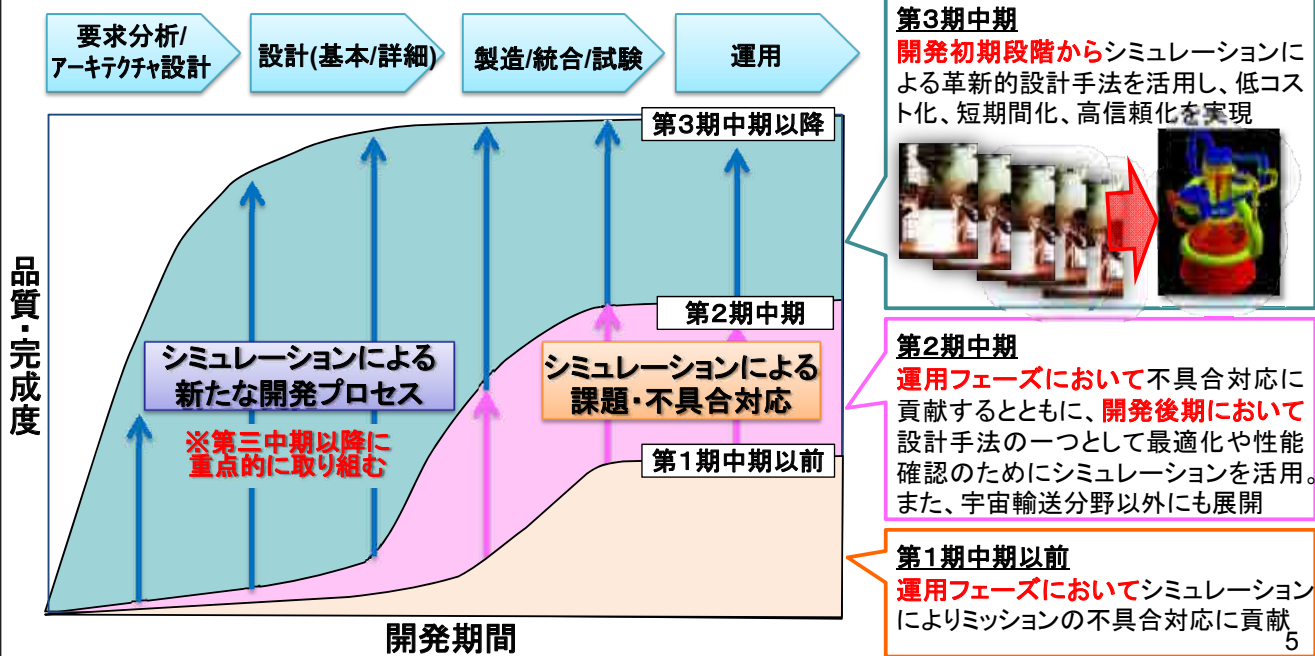


最終目標達成に向けた具体策



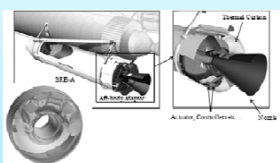
新たな開発プロセスの実現に向けたステップアップ

第1期中期ではシミュレーションによって、主に課題・不具合対応に貢献してきた。第2期中期ではこれらに加えて、漸く開発後期における設計手法の一つとして活用し始めている。第3期中期以降では、情報化技術を用いて開発初期段階からコスト/期間、安全性/信頼性、運用性の最適解を検討できる開発プロセスの中で、**フロントローディングなシミュレーションを実施し、ミッションの低コスト化、短期間化、高信頼化を実現**する。



第1期・第2期におけるステップアップ

【第1期中期】 運用フェーズにて課題・不具合対応に貢献



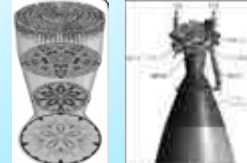
H-IIA/F6の事故原因究明



LE-7Aの改良開発



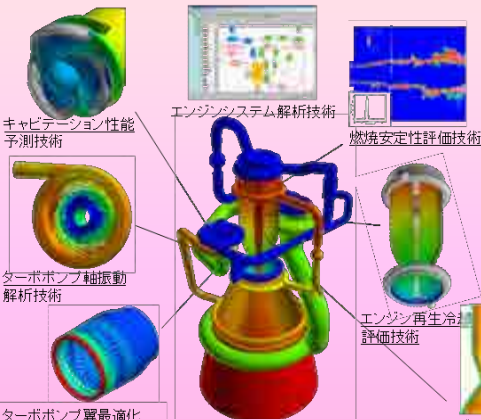
LE-5Bの改良開発



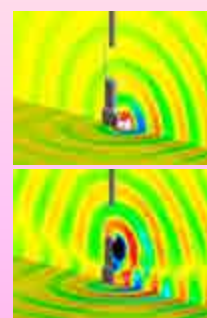
LNGエンジン燃焼器の開発

シミュレーション基盤技術の高度化、他分野への展開

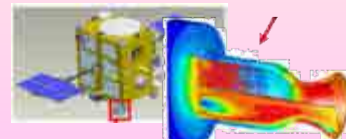
【第2期中期】 開発後期及び運用フェーズにおける課題・不具合対応に貢献 さらに、宇宙輸送分野以外への展開開始



LE-X解析ツールの開発



打ち上げ時音響解析
イプシロンロケット設計支援




あかつき軌道投入失敗原因究明



ASTRO-H熱環境・内圧予測

第2期までのツール開発達成状況

LE-Xプロジェクト支援
として実施した波及成果

システム解析技術		燃焼器系解析技術			供給器系解析技術			
設計解析技術	エンジンシステム解析	燃焼安定性評価	再生冷却性能評価	燃焼器寿命予測	ターボポンプ翼最適設計	キャビテーション性能予測	ターボポンプ軸振動解析	エンジン全系解析技術
								
第2期の目標	開発初期段階でシステム成立性を予測可能なツールの開発	実機燃焼器における燃焼振動発生予測及び発生までの余裕を評価するツールの開発	開発初期段階で燃焼器の再生冷却性能を予測可能なツールの開発	開発初期段階で燃焼器の寿命を予測可能なツールの開発	最適化技術を活用した高性能翼設計支援ツールの開発	開発初期段階にてキャビテーション不安定現象を予測するツールの開発	開発初期段階にて実液中のターボポンプ軸振動を予測可能なツールの開発	開発した7つの解析技術を統合しエンジンシステム全体のハザード評価を実現する
目標達成	達成 ・開発したツールでLE-X複数燃焼器化検討に適用 ・概念検討の標準ツールとして普及	達成 ・開発したツールをLNGエンジン設計に適用 ・開発したツールをLE-X設計に適用	達成 ・開発したツールをMHIへ技術導入 ・世界初のエンジン燃焼器熱-流体強連成解析を実現	達成 ・開発したツールでLE-5Bの損傷メカニズムを解明 ・相互検証でメーカ解析技術を高度化	達成 ・世界初の多段/非定常解析での翼最適化を実現 ・開発したツールをLE-X/FTP設計に適用	達成 ・世界最高レベルの性能予測ツールを実現 ・旋回キャビメカニズムを解明(世界初)	達成 ・世界的にも希少な軸振動解析手法を構築 ・LE-Xの軸振動過大リスクを評価	達成 ・世界初のエンジン全系高精度シミュレーションを実現 ・LE-Xのハザード事象評価に活用
輸送ミッション本部での評価	・これまでにない汎用的なエンジン概念検討ツールを構築し、輸送本部に展開されたことは評価する ・今後は非定常性能予測を実現するツール開発に期待する	・燃焼安定性はLE-9開発での最大リスクの1つであり、その定量的リスク評価が可能となるレベルまで本手法は 引き続き改良 されたい	・再生冷却性能はLE-9開発での最大リスクの1つであり、その定量的リスク評価が可能となるレベルまで本手法は 引き続き改良 されたい	・従来ツールではできない現象を再現し、LE-X等の設計・研究計画に反映した。定量的リスク評価が可能となるレベルまで本手法は 引き続き改良 されたい	・LE-X/FTPタービンの定性的な方針を得るという点で有効であった ・今後は定量的な効率予測にも期待する	・LE-Xのインデューサ設計にJEDIの成果が反映された ・より精度の高い定量的リスク評価のために 引き続き改良 されたい	・今中期の目標は達成見込みであるが、 引き続き改良 を希望 今後はメカシール、流体軸受、Squeeze-filmタンバなど動特性評価や多領域最適化での貢献に期待	・設計に使用するレベルには達していないが将来的なテンションを示した。今後は精度向上及び非定常への対応と設計への適用に向けた 改良に期待 したい
次期中期計画への展開	・開発の第17フェーズは終了する ・次の開発フェーズへの移行判断のため輸送本部を中心にツールの有効性を評価した上で、随時改良開発に対応	・開発の第17フェーズは終了する ・次の開発フェーズとして輸送本部が目指す定量的リスク評価を実現するために 改良開発を継続	・開発の第17フェーズは終了する ・次の開発フェーズとして輸送本部が目指す定量的リスク評価を実現するために 改良開発を継続	・開発の第17フェーズは終了する ・次の開発フェーズとして輸送本部が目指す定量的リスク評価を実現するために 改良開発を継続	・開発の第17フェーズは終了する ・次の開発フェーズへの移行判断のため輸送本部が中心にツールの有効性を評価した上で、随時改良開発に対応。	・開発の第17フェーズは終了する ・次の開発フェーズへの移行判断のため輸送本部を中心にツールの有効性を評価した上で、随時改良開発に対応。	・開発の第17フェーズは終了する ・次の開発フェーズへの移行判断のため輸送本部を中心にツールの有効性を評価した上で、随時改良開発に対応。	輸送本部が期待する実設計への適用と最終的にはシミュレーションによるエンジンQTの実現を目指し 改良開発を継続

7

7

第2期で得られた世界的成果例

ロケットエンジンEnd-to-Endシミュレーション

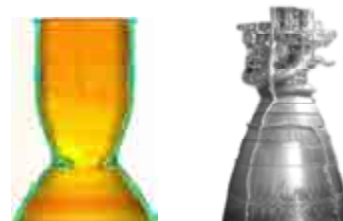
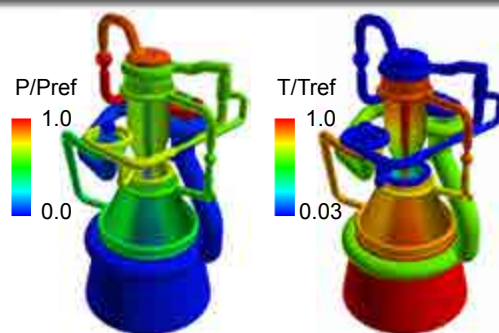
ロケットエンジン設計解析ツールを組み合わせ、従来実施が困難とされたエンジン全系の高精度シミュレーションを実現し、性能評価に貢献。さらに、システム全体のハザード評価に適用。

燃焼室スロット縮小の解明

改良型LE-5Bエンジンのエンジン試験で発生した燃焼室スロット縮小を対象に、非定常な熱・流体・構造連成解析を実現し、スロット縮小を解明。エンジン設計現場における設計解析技術の高度化へ貢献。

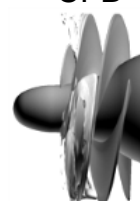
キャビテーション性能評価

キャビテーション不安定への流量の影響及びそのメカニズムについてターボ機械分野のトップジャーナルに掲載。さらに、CNESインデューサ共同研究に適用し、定量的予測精度は世界最高レベルであることを確認。



Exp.

CFD



8

第2期で得られたLessons Learned(1/3)

■ ツール開発

- プロジェクト支援に適用した際に機能不十分が発覚し緊急で機能追加が必要となった
→【教訓】実際のプロジェクト支援解析を想定したツール開発計画を策定する
- 世の中に物理モデルが存在しないものは結局最後まで検討できなかった
→【教訓】重要物理モデルは早期に選定し、存在しなければ東大社会連携講座や共同研究を活用して新たに構築する

■ ツール検証

- CFD検証専用の試験データがなく物理モデルまで踏み込む検証ができなかった
→【教訓】共同研究等を活用しCFD検証データ取得も含めてツール開発計画を検討する
- 試験データが存在するものでも質の低いものが多く、検証に苦労した
→【教訓】試験の概念検討に参加し、少しでも検証に有用な試験となるよう調整する
- 試験では可視化情報が乏しく、現象を十分に理解することができないままツール開発を余儀なくされた(特に燃焼器系解析技術)
→【教訓】試験ではなるべく可視化情報も取得するよう調整する

9

第2期で得られたLessons Learned(2/3)

■ 計算機環境

- JSS特別利用枠を申請しても必要十分な計算資源を利用することは困難であり、計算規模や内容に制約を受けた
→【教訓1】計画当初から計算規模は十分に考えておく
【教訓2】JAXA外の計算機の利用も検討する
- 特殊なアーキテクチャの計算機(JSS)向けに解析ツールの最適化をする必要があり、多くの追加費用と時間が必要となった
→【教訓】基盤となる計算機は極力標準的なものにする

■ 前/後処理

- 大規模や大量解析では格子作成、可視化など前/後処理作業に多くの時間が必要だった
→【教訓】解析ツールだけでなくその前/後処理も含めて効率的な仕組みを考える
- 計算規模が大きくなるに伴い計算機環境の制約で前/後処理ができないことが発生した
→【教訓】計算機環境は先の状況を見据えて十分な性能のものを調達しておく

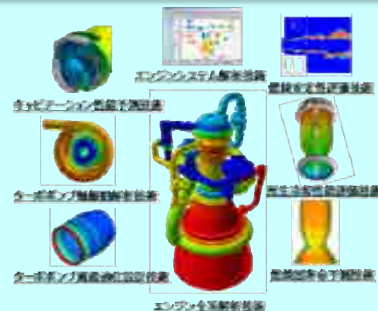
10

第3期のロケットエンジン解析技術の高度化

～開発した解析技術を新たな開発プロセスに活用～

1. 液体ロケットエンジン設計解析技術の維持・改良・適用

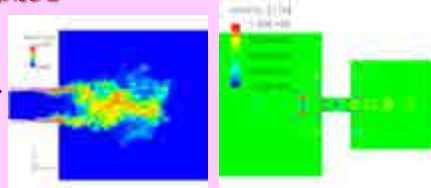
- 第二中期計画で構築した各種ツール・ノウハウの維持
- プロジェクトからの要望に応じた改良開発(必要に応じて随時)
- ロケットエンジンモデリング委員会の運営により、現社会連携講座で獲得された知見の維持・継承



～新たな開発プロセス実現に向けたさらなる技術開発～

2. 燃焼安定性評価技術

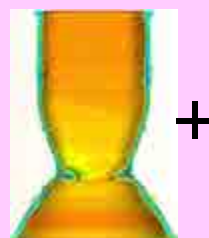
- 今中期に構築した各分析ツールを適用・高度化し、融合することで、燃焼安定性の定量的リスク評価を実現。
 - ・ 燃焼解析: サブスケール以上の実燃焼器解析実現と高度化
 - ・ 音響解析: 音響デバイス・噴射器等の評価の高度化・最適化
 - ・ 安定性評価手法: 上記2つを融合したリスク評価の実現



燃焼安定性評価解析ツール

3. 燃焼器性能・寿命評価技術

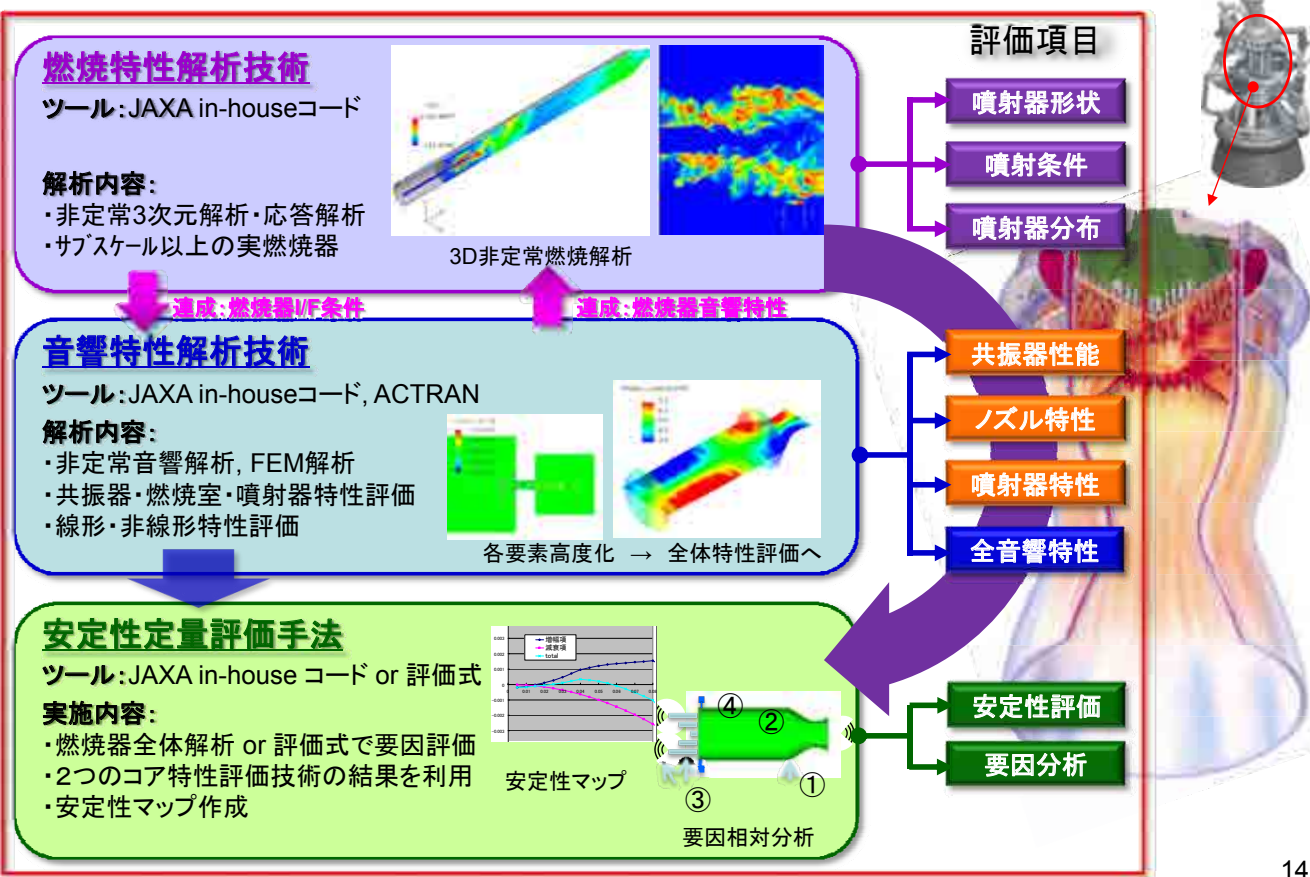
- 再生冷却及び寿命予測技術の更なる高度化を図る
(起動・停止過渡状態などの非定格作動状態も含む)
 - ・ 燃焼器寿命予測の高精度化
 - ➔ 【打ち手】再生冷却解析ツール、全系システム解析との連成実現
 - ・ 非定格作動状態(スロットリング、起動・停止過渡時)の予測実現
 - ➔ 【打ち手】亜臨界圧燃焼 & 伝熱解析技術の構築



燃焼性能・寿命評価解析ツール

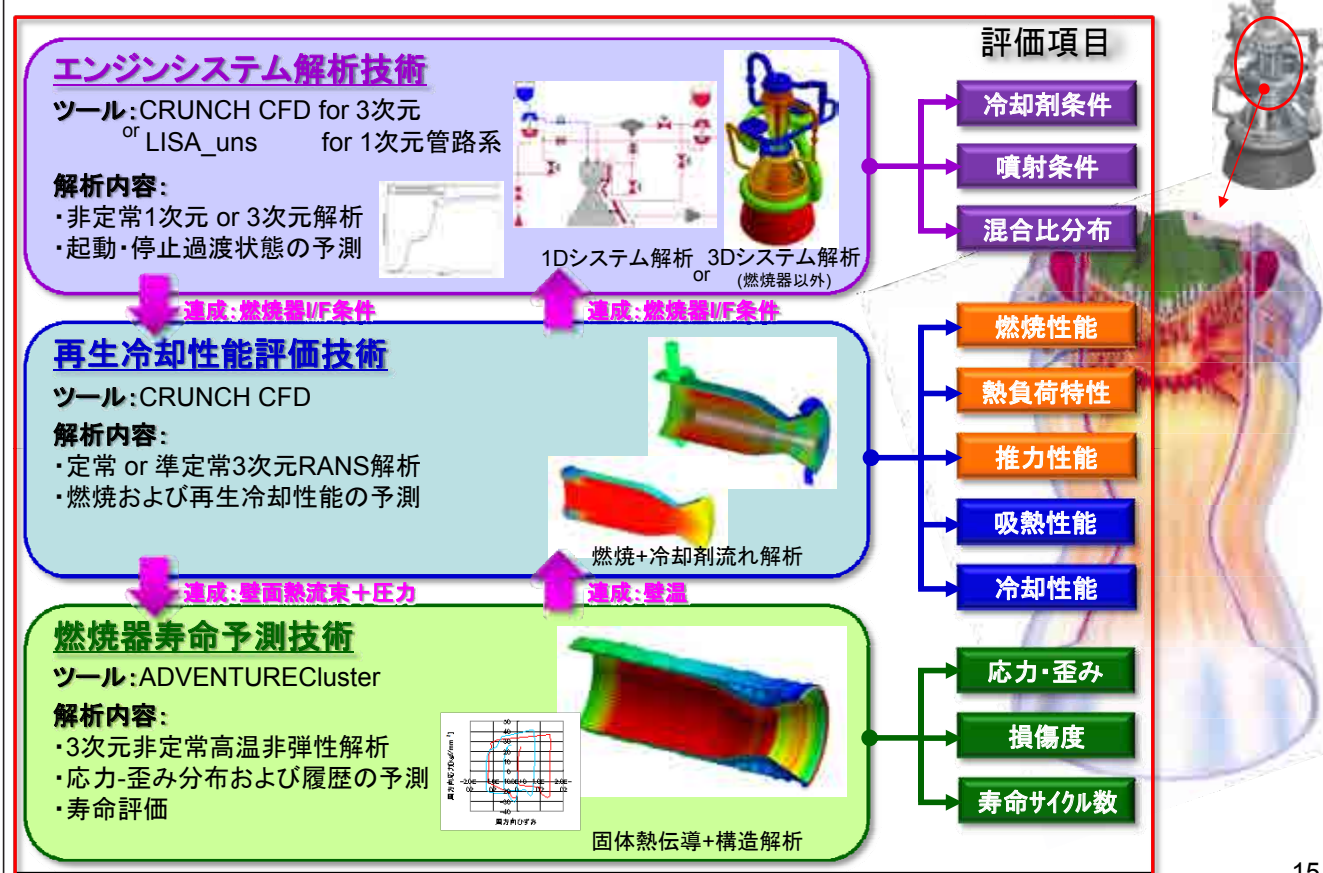
13

燃焼安定性評価技術; 目指す解析ツールのイメージ



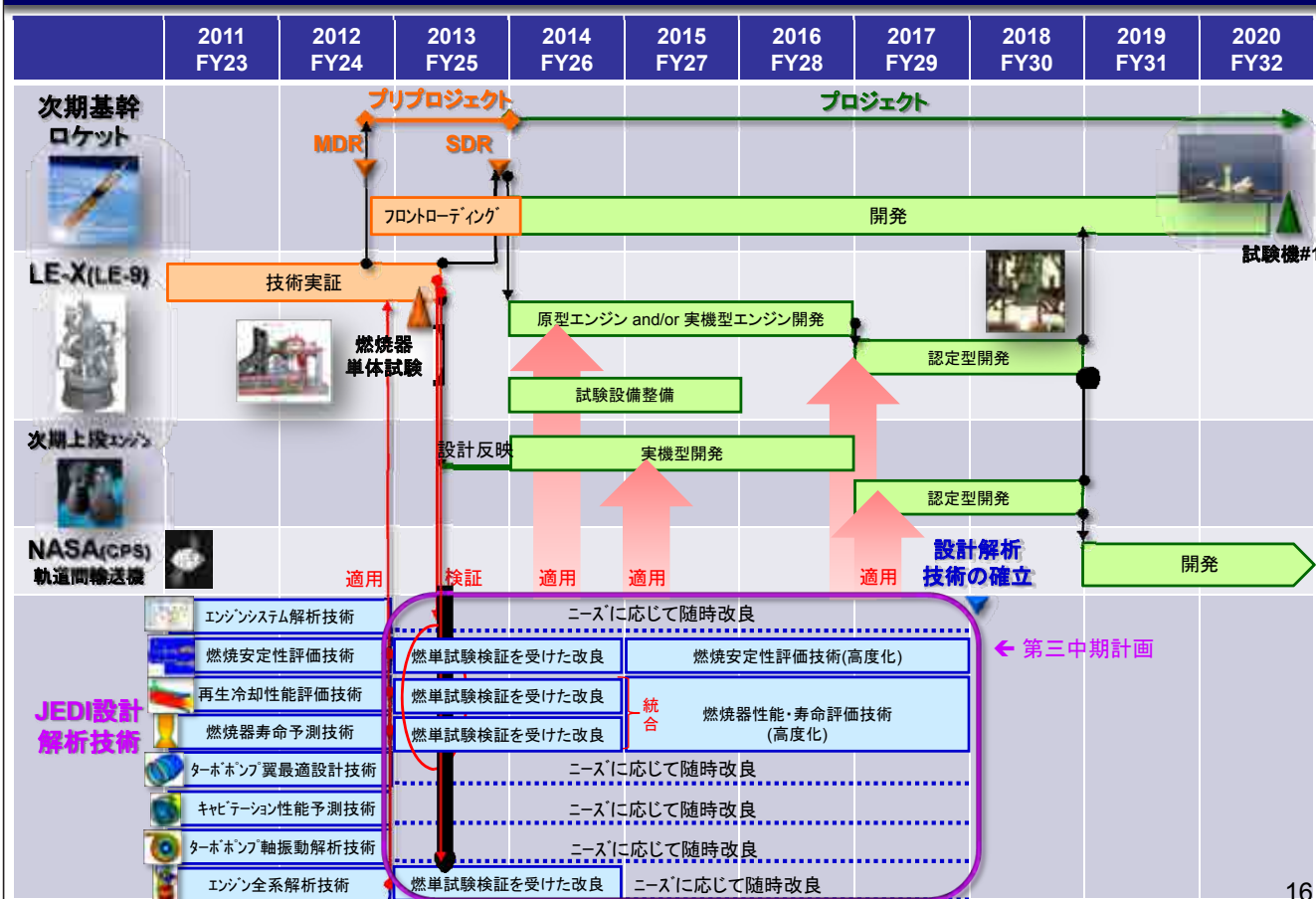
14

燃焼器性能・寿命評価技術; 目指す解析ツールのイメージ



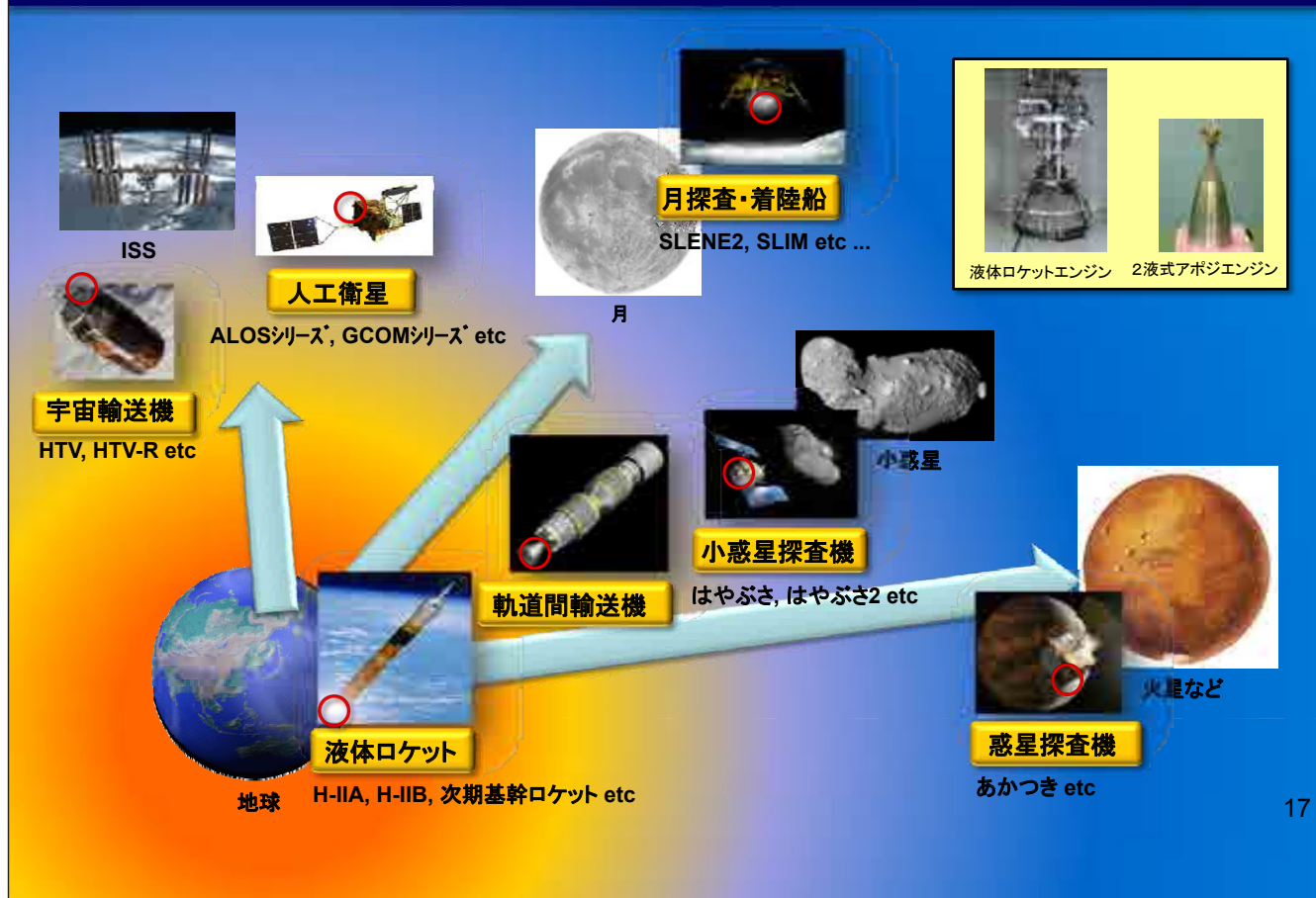
15

JAXA宇宙輸送ミッションへの貢献



16

JAXA将来ミッションへの貢献



17

ロケットエンジン開発にイノベーション
を起こす挑戦は続く...