LE-X エンジン技術実証の取り組み

宇宙輸送ミッション本部　宇宙輸送系推進技術研究開発センター
砂川英生

1. はじめに

JAXA では LE-7A に続く、次期基幹ロケット用の液体ブースターエンジン「LE-X」の研究開発を行っている。LE-X では無人使い捨てロケットへの適用に加え、将来の有人輸送へも発展可能な技術の獲得を目指している。そのため LE-X エンジンは性能・コスト・信頼性に対して高い目標を設定し、チャレンジングな技術項目を盛り込んでいる。

また、開発そのものを短期間かつ低コストで実施するためには、エンジンシステムの持つ故障モード及びリスクを的確に把握し、それらに応じた設計を実施する必要がある。このために、エンジン故障モードの確率論的評価を取り入れた開発手法のフィージビリティを本技術実証内で実施する計画である。

2. エキスパンダーブリードサイクル

LE-X エンジンには、エクスパンダーブリードと呼ばれるエンジンサイクルを採用する計画である。LE-7A エンジンで採用している 2 段燃焼サイクルと比較しエキスパンダーブリードサイクルは以下の利点がある。

- タービン駆動用のプリバーナーがなく、さらにバルブ、配管が少なくなることから、コスト及び信頼性の面で有利（部品点数少）
- タービン駆動ガスがLE-7Aでは水を含む燃焼ガスであるのに対し、LE-Xでは水素ガスであるため、確認試験ごとの水分除去のためのパージ時間を短縮することが可能
- プリバーナに係る高温・高圧部が無いことで各コンポーネントにかかる負荷が小さくなり、高信頼性が実現可能
- エンジン始動制御が燃焼室の熱交換によって自律的に行われるため、プリバーナやガスジェネレータの着火タイミングのずれや制御不能に伴う致命的な故障モードがなく、本質的に安全性が高い傾向

エクスパンダーブリードサイクルの成立性の鍵となるのは、液体水素ターボポンプ(FTP)および推力室（噴射器と燃焼室）である。これらのコンポーネントについては、平成 25 年度に実機大の単体試験を計画し、技術的な成立性について確認する計画である。

3. 高信頼性開発プロセス

日本が独自の有人宇宙輸送手段を持つか否かの議論をする際には、有人に求められる信頼性・安全性を確保するための開発費用が常に問題となる。実際これまでアメリカ等では膨大な試験回数により有人に求められる信頼性・安全性を作りこんでいる。しかし、日本が有人宇宙システムを開発する場合、アメリカ、ロシア、中国に続く 4 番手以降の後発であり、同様の力技の開発プロセスをなぞるのではなく、もっと効率的な独自の開発プロセスにより高い信頼性を実現させて、開発費用を抑える必要があると考える。

LE-X では「高信頼性開発プロセス」と呼ばれる開発手法の実現性を検証する計画である。高信頼性開発プロセスの考え方は、エンジン燃焼試験成功回数によって信頼度を算出するのではなく、現象把握に基づいた数値解析等を活用し設計段階にて信頼度を算出し、要素試験・エンジン試験のデータと解析予測を比較し解析の不確からしさを定量化し、信頼度を検証する。それにより信頼性確認のためのエンジン燃焼試験回数を抑え、開発費用の膨大化を抑制することが可能となる。

また各故障モードが持つ定量的リスク（＝故障確率×影響度）を算出することで、どの故障に対して冗長化を組むか等の方針が明確になり、効率的にリスクが低く安全性の高いシステムを設計することが可能となる。

4. まとめ

LE-X には様々な技術的チャレンジが盛り込まれ、要素試験・実機大試験を通じてそれらを実証する計画である。ここで獲得した技術はロケットエンジンにとどまらず機体や他のアプリケーションへも発展可能な技術であり、将来の日本宇宙開発の展望を切り開く先鞭となりうる成果創出を目指している。

参考文献

[1] 黒須明英、砂川英生、山西伸宏、小林悌宇他、LE-X エンジン技術実証の設計進捗について、第 55 回宇宙科学技術連合講演会(2011) 2E15

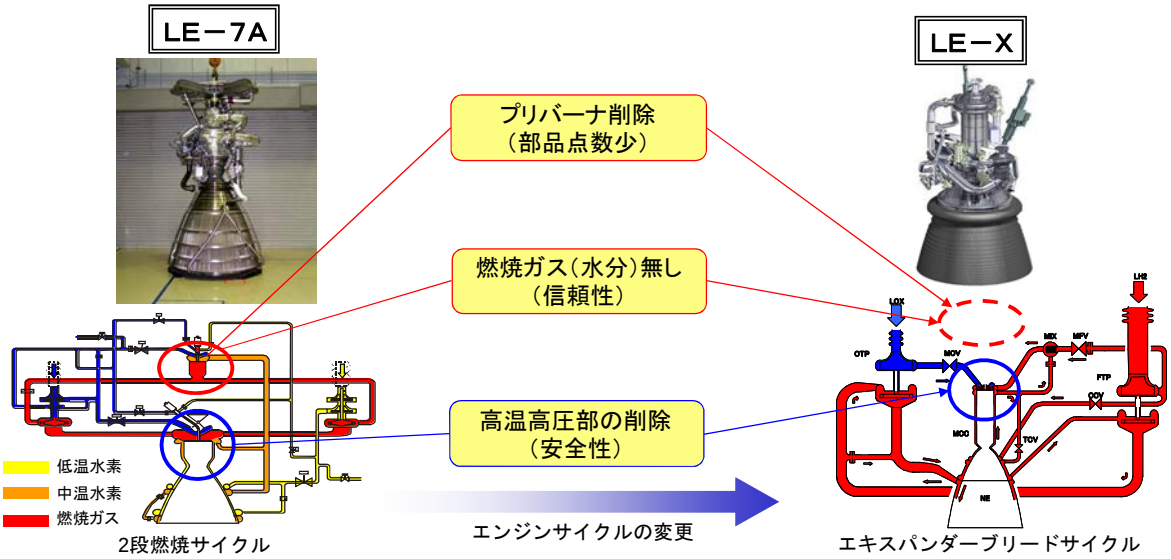
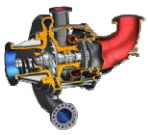


図 1　LE-7A と LE-X エンジンとの比較

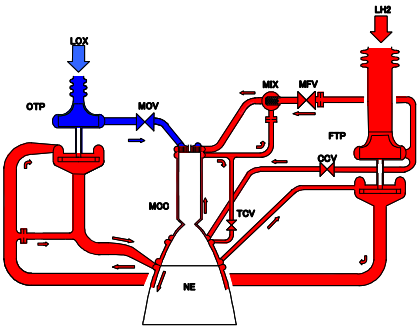
サイクル		ガスジェネレータ（GG燃焼ガス、ﾌﾟﾘﾊﾞｰﾅ燃焼ガスによりﾀｰﾋﾞﾝ駆動）	2段燃焼サイクル（プリバーナ）	フルエキスパンダー（FE）（燃焼室を冷却し昇温した水素ガスによりタービン駆動）	エキスパンダーブリード（EB）
性能	推力	◎ ﾀｰﾋﾞﾝﾊﾟﾜｰを自由に設定でき大推力を出しやすい	◎ ﾀｰﾋﾞﾝﾊﾟﾜｰを比較的自由に設定でき推力を出しやすい	△ ﾀｰﾋﾞﾝ圧力比が確保できないため推力限界数十トン	○ FEに比べ、大推力化が可能（ただし限界有り）
	ISP	△ ﾀｰﾋﾞﾝ駆動ｶﾞｽを捨てるためISPは低下	◎ 捨てるｶﾞｽ無く高燃焼圧化を比較的しやすい	○ 捨てるｶﾞｽ無いが高燃焼圧化が難しい	△ ﾀｰﾋﾞﾝ駆動ｶﾞｽを捨てるためISPは低下
安全性		△ 燃焼ガス温度をコントロールしてタービン駆動（制御安全）		◎ 燃焼室を冷却した水素でタービン駆動（本質安全）	
始動特性		△ 始動制御が必要		◎ 自律始動	
複雑性		○ 構成部品多く複雑	△ 構成部品多く複雑	◎ 構成部品少なくシンプル	◎ 構成部品少なくシンプル
運用性		△ エンジンパージ要	△ 高圧エンジンパージ要	○ エンジンパージ不要	○ エンジンパージ不要

図 2　エンジンサイクルの比較

Thrust（Vacuum）	1450 kN
Specific Impulse (Vacuum)	432 sec
Chamber Pressure	12.1 MPa
Mixture Ratio (O/F)	5.9
Nozzle Area Ratio	37:1
Rotational speed of FTP	40800 rpm
Rotational speed of OTP	16100 rpm


FTP

OTP



LE-X ENGINE CYCLE

図 3　LE-X エンジン仕様

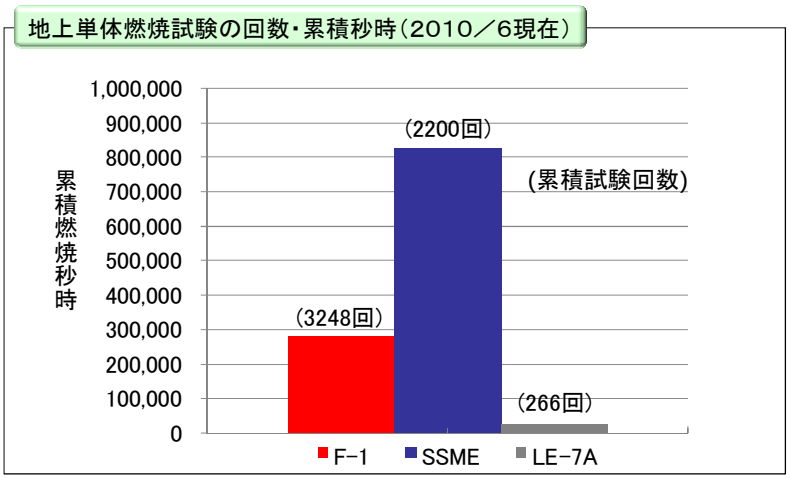


図 4　エンジン燃焼試験回数比較

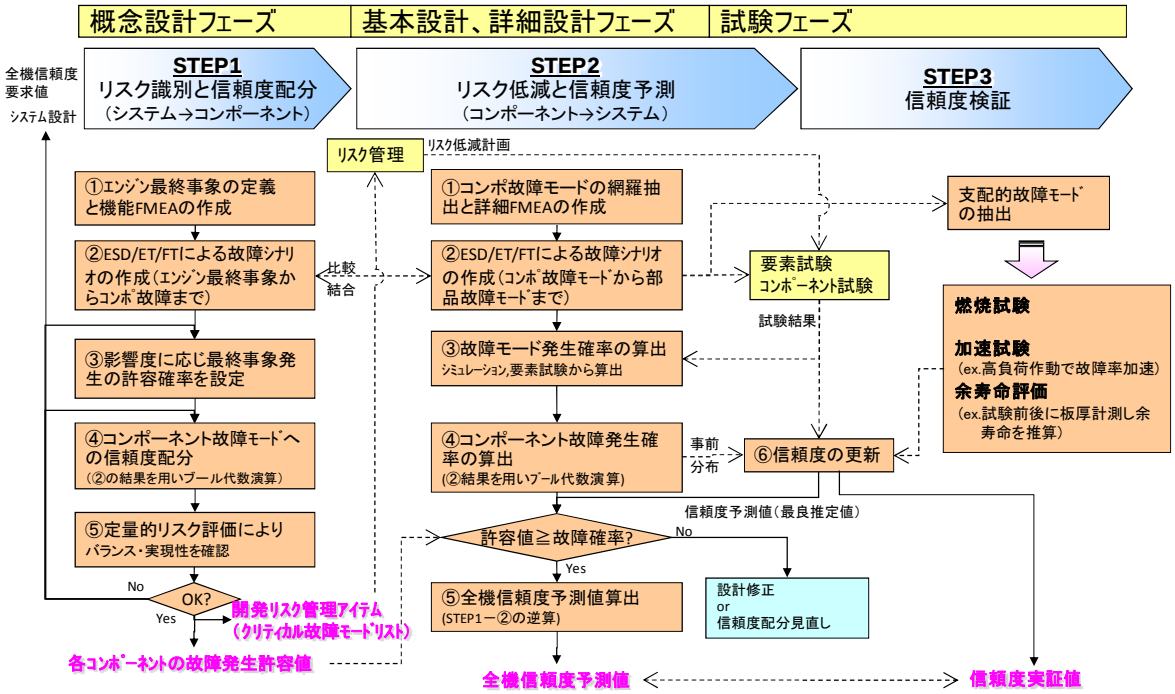


図 5　高信頼性開発プロセス概観