

ロケット開発最前線から ～宇宙開発の大航海時代を迎えて～

渥美 正博



2013.02.23

UNISECレクチャー

渥美 正博

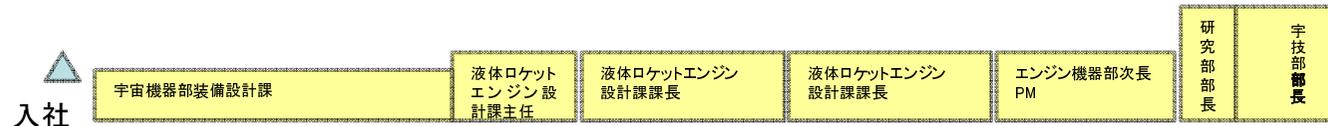
- 生まれ： 愛知県豊川市 育ち： 北海道千歳市(小2～中2)
 - 千歳がふるさと
 - 環境は良いし、空気、水、食べ物がおいしい
 - 毛蟹がカニだと思っていた
 - 天の川が見えるのは当たり前だと思っていた
 - 地域の人には暖かく、仲が良い（今も家を保有。夏、親は避暑へ）

- 父親の転勤で全国を移動（引っ越し回数 29回）
- 高校で初めて、同じ学校に入学し、卒業することができた
- 1985 東京大学工学系研究科航空学科修士
- 同年 三菱重工業(株)に入社

- 趣味： スキー、ゴルフ、テニス、日曜大工

自己紹介：略歴

1985 1990 1995 2000 2005 2010 2015



1994.2.4 H-II初号機



2001.8.29 H-IIA初号機



H-II/IIA

機体システム設計

LE-7A部品

LE-7A/5B
高信頼性化

LE-7トラブル対応



H-II8号機失敗
トラブル対応



連続成功へ

国際協業

日米共同開発MB-XX



米国RS-68部
品輸出



国際共同へ

中部電力事業

吸気冷却装置開発

- 世界最大級の液体空気製造装置
- 大型膨張タービン開発
- (酸素濃度85%液化試験も実施)

航空宇宙産業とは

航空宇宙産業は、他国と協調しながら構築する「国際ビジネス」



自動車産業は、自国の優れた技術力で開発し、発展をさせて、その競争力で競うビジネス

航空機は、多国間を結ぶ移動距離を持つ輸送手段

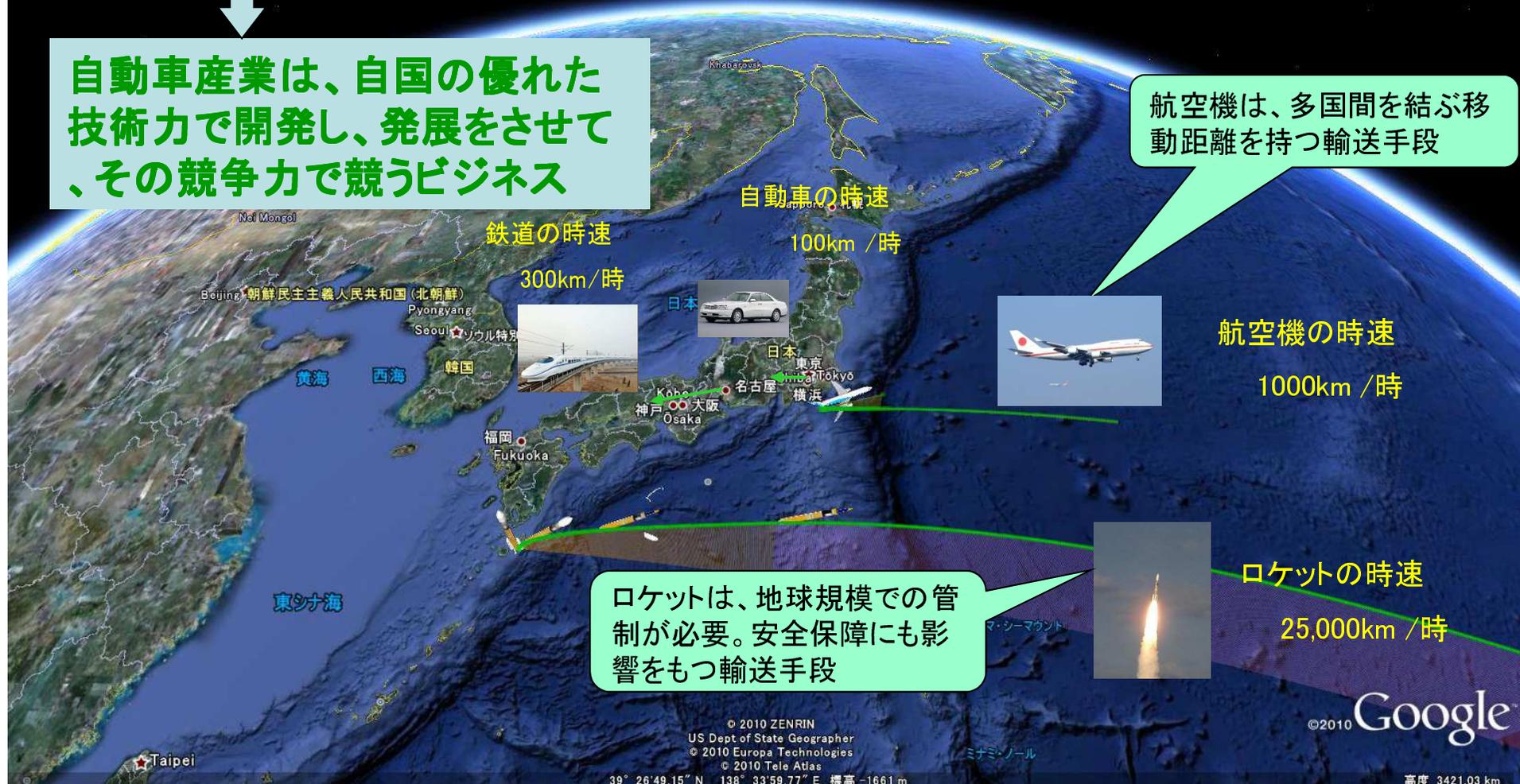
自動車の時速
100km / 時

鉄道の時速
300km / 時

航空機の時速
1000km / 時

ロケットの時速
25,000km / 時

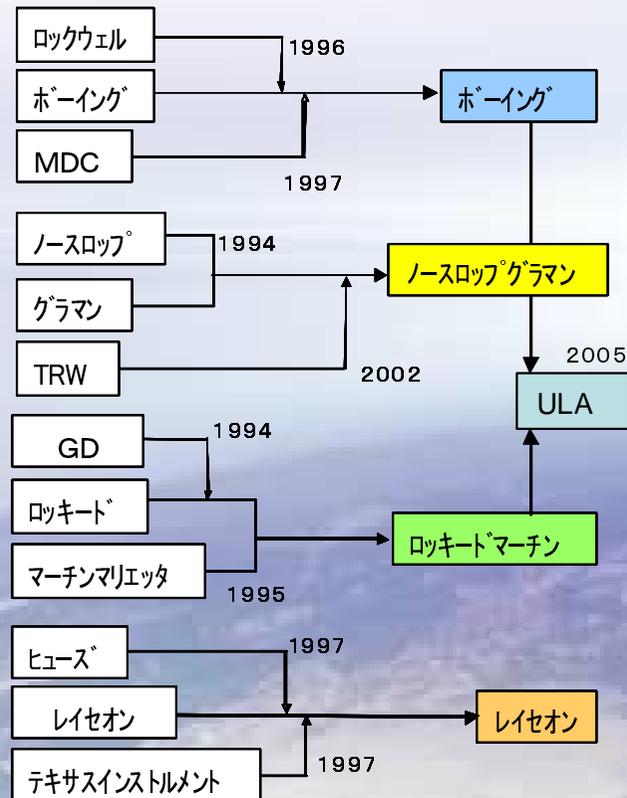
ロケットは、地球規模での管制が必要。安全保障にも影響をもつ輸送手段



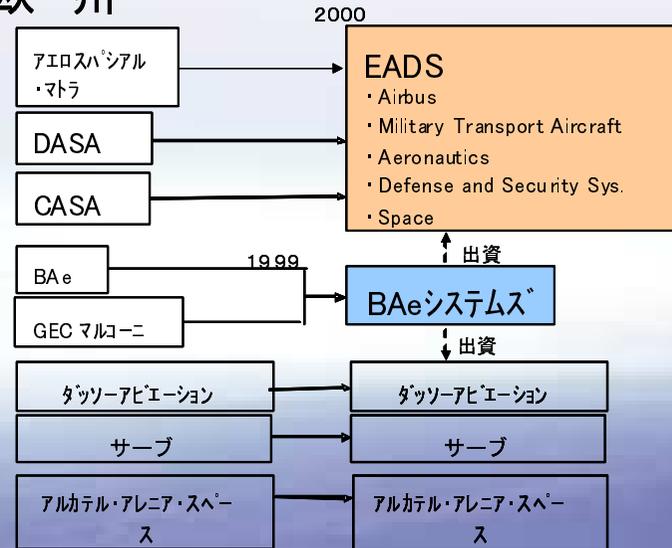
寡占化が進む航空宇宙産業

- ・ 航空分野： ボーイングとエアバスの複占
 - ・ 宇宙分野： 自国開発から国際協業へ(国際的な寡占化)、ロシア政策の影響、中国・インドの台頭 (各国の安全保障にも関わるため複雑な動きを見せる)
- ⇒ ポジショニングのとり方(国家戦略)が価値を生む

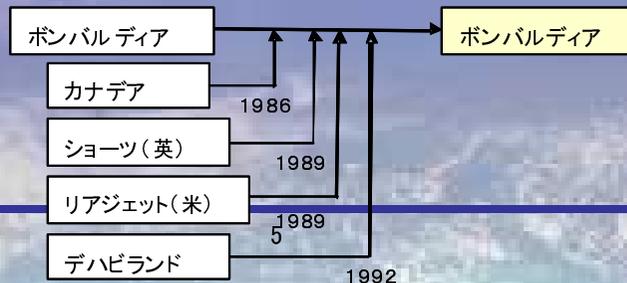
米国



欧州



カナダ



大航海時代： 輸送機関（船）と価値

- 西欧諸国に入る中国、インドなどの東方貿易は陸路に依存。→ イスラムの高い関税(アラブ人の権益)
 - 陶磁器、鉄製品、綿織物、香料、香辛料、絹
- ↓
- バスコダガマ： 喜望峰経由のインド航路の利用
→ ポルトガルにインドとの貿易権をもたらす

大きな利益が、輸送機関を伸ばし、その技術を成長させてきた

宇宙開発をもたらす価値(利益)は？

- 情報： 衛星により運用
 - 気象、通信、測位(GPS) etc
 - National Security
- 輸送： ロケット機関による
 - 衛星の軌道投入、ISS物資輸送(現状)
- エネルギー： 地球規模のエネルギー制御(将来)
 - 地球温暖化を踏まえ、大きなビジョンが必要



大航海時代のキャラック船
(サンタマリア号)

(c) Wikipedia



バスコダガマ

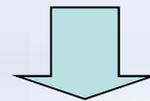
過去から現在へ ～LE-7エンジン開発より～



ロケットの品質を左右するもの

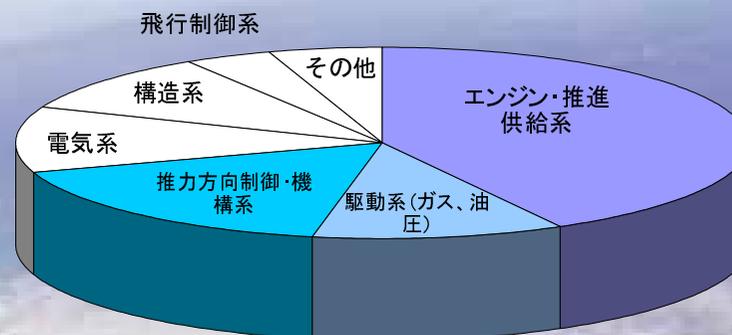
エンジン、バルブ類の信頼性確保がキー！

- 世界的に見てロケットの失敗は、エンジンなど推進系によるものが半数を占める。
- 日本では、過去にH-IIロケットシリーズで3回の失敗があったが、いずれもエンジン系に関わるものである。



これを克服して、H-IIAロケット13機連続成功＋H-IIB2機の打上成功達成！

ロケット失敗の故障確率



2005年FAA*レポートによる

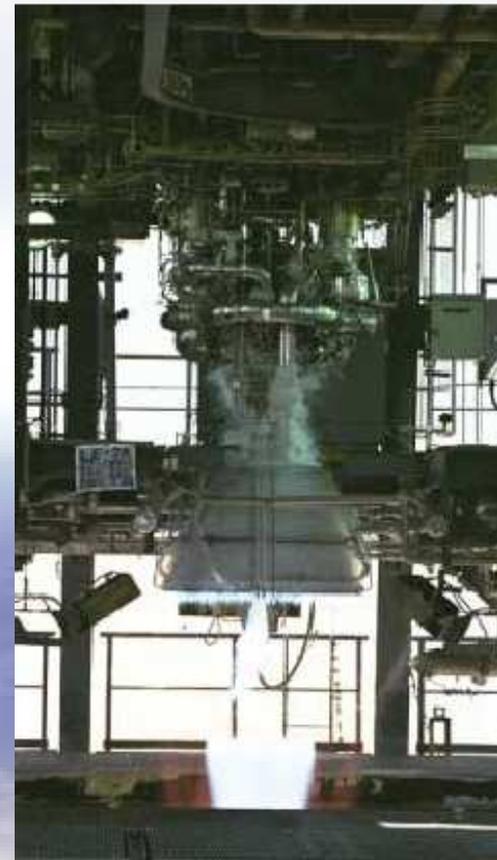
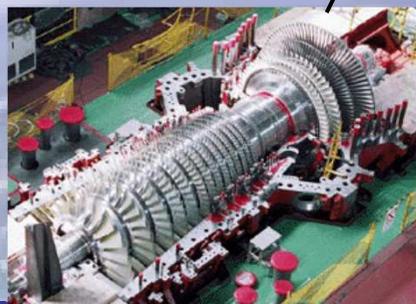
(* FAA: Federal Aviation Administration)

ロケットエンジンのパワーレベルは？

LE-7Aエンジンが発生するエネルギーは900MWで中規模発電所1基に相当する。これをφ1.8m×3.5mの機器から発生させ、しかも6秒後にはフルパワーで運転する必要があり、極限設計が求められる。

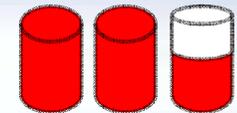


(c)Wikipedia



1秒間の燃料消費量は？

液体水素：
ドラム缶2.5本



液体酸素：
ドラム缶1本



(c)JAXA

23年前の出来事



エンジン破損事故の記事より



H3.8.10 エンジン部品の破損事故 (金谷社員死亡事故の記事より)



LE-7エンジン

液体水供給系
耐圧試験中に
破損した箇所
液体水供給系
配管

H3.8.19 日本経済新聞

次期国産ロケットエンジン破裂事故

まず原因の徹底究明を

【東京19日電】次期国産ロケットエンジン「LE-7」の半導体部で、耐圧試験中に液体水供給系配管が破裂し、試験員が死亡した事故の原因究明が急務とされている。三菱重工は、原因究明に当たって、まず原因の徹底究明を第一と見做している。三菱重工は、原因究明に当たって、まず原因の徹底究明を第一と見做している。三菱重工は、原因究明に当たって、まず原因の徹底究明を第一と見做している。

信頼性低下招く恐れ

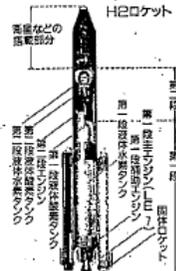
事業団 日程優先、試験緩和の検討

溶接部から破裂か

【東京19日電】次期国産ロケットエンジン「LE-7」の半導体部で、耐圧試験中に液体水供給系配管が破裂し、試験員が死亡した事故の原因究明が急務とされている。三菱重工は、原因究明に当たって、まず原因の徹底究明を第一と見做している。三菱重工は、原因究明に当たって、まず原因の徹底究明を第一と見做している。

H3.8.14 朝日新聞

H2ロケット エンジン部品また事故



H2ロケットエンジン「LE7」のトラブル

90年6月 富洲島内田市の宇宙開発事業団内田ロケット開発センターで、燃料試験中の液体水取用ターボポンプのタービン羽根が破損し、燃焼試験中に、液体水取用ターボポンプの回転数が上がりすぎた。90年7月 種子島の燃焼試験中、予備燃焼機（プリバーナー）に水素ガスを送る配管が水素が漏れて引火。90年8月 種子島の燃焼試験中、液体燃料ターボポンプ付近から出火、配管が吹き飛ばされ、試験員が死亡。91年5月 海田ロケット開発センターの供給系総合試験設備で爆発、高圧水素ガス配管が破損し、配管が吹き飛ばされ、試験員が死亡。91年6月 種子島の燃焼試験中、液体水取用ターボポンプ付近から水素漏れ。

技術者1人が死ぬ

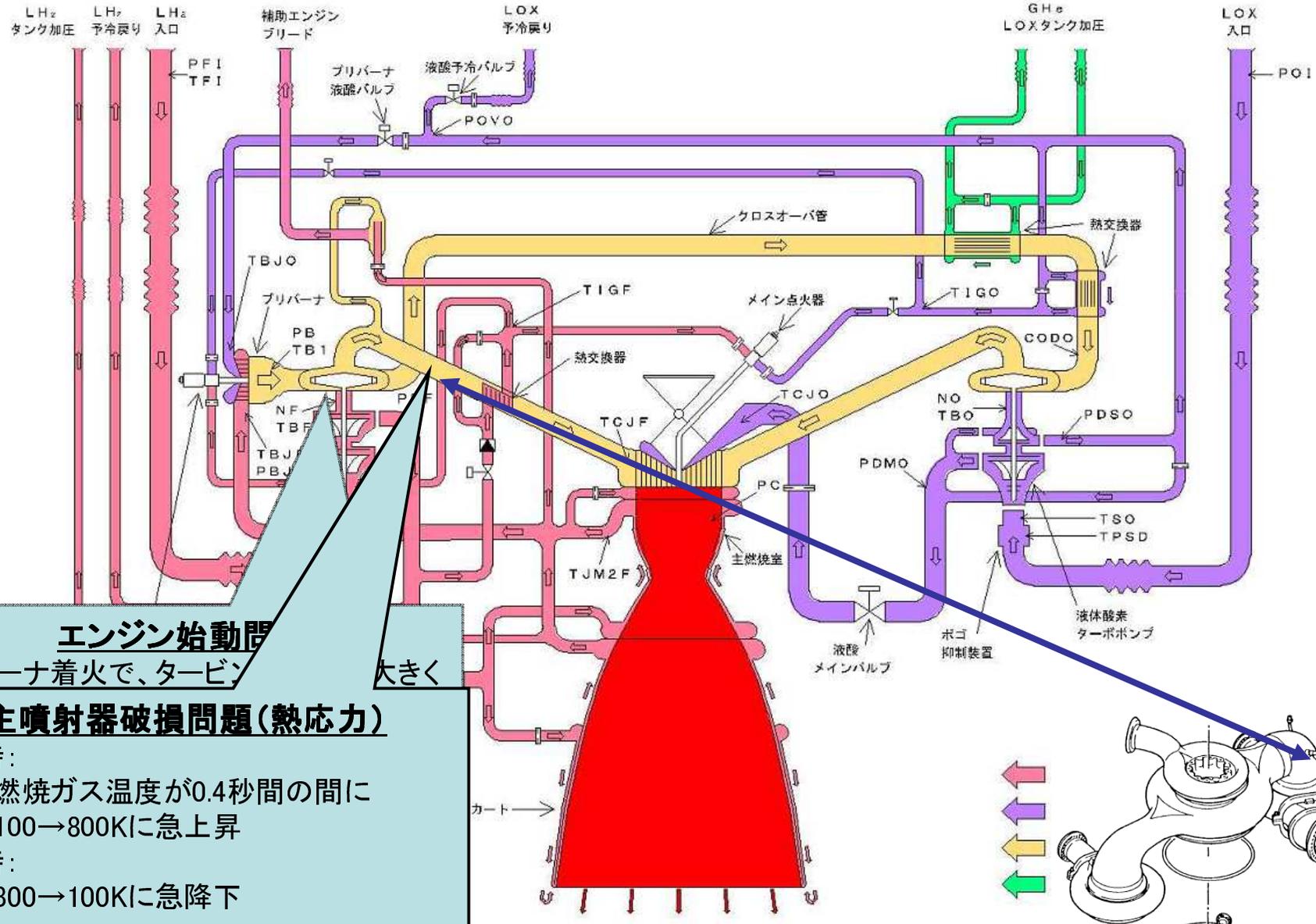
【東京19日電】次期国産ロケットエンジン「LE-7」の半導体部で、耐圧試験中に液体水供給系配管が破裂し、試験員が死亡した事故の原因究明が急務とされている。三菱重工は、原因究明に当たって、まず原因の徹底究明を第一と見做している。三菱重工は、原因究明に当たって、まず原因の徹底究明を第一と見做している。

日本の宇宙開発に影響必至

【東京19日電】次期国産ロケットエンジン「LE-7」の半導体部で、耐圧試験中に液体水供給系配管が破裂し、試験員が死亡した事故の原因究明が急務とされている。三菱重工は、原因究明に当たって、まず原因の徹底究明を第一と見做している。三菱重工は、原因究明に当たって、まず原因の徹底究明を第一と見做している。

H3.8.10 朝日新聞

LE-7開発を阻んだ2つの重大トラブル



エンジン始動時
 プリバーナ着火で、タービンが大きく

主噴射器破損問題(熱応力)
 始動時:
 燃焼ガス温度が0.4秒間の間に
 100→800Kに急上昇
 停止時:
 800→100Kに急降下

現物状況調査の重要性

▶ 燃焼試験1回で進む亀裂は1mmオーダー

・とても大きなビーチマーク

・ミクロ的にはディンプル

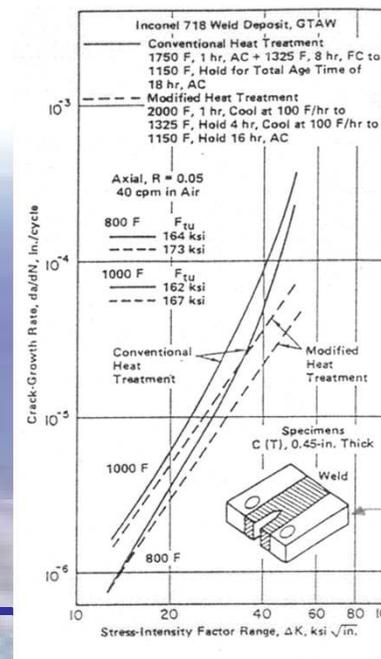
▶ 低サイクルと一発破壊の間



亀裂進展を如何に扱うか？
熱応力場をどのように評価するか？

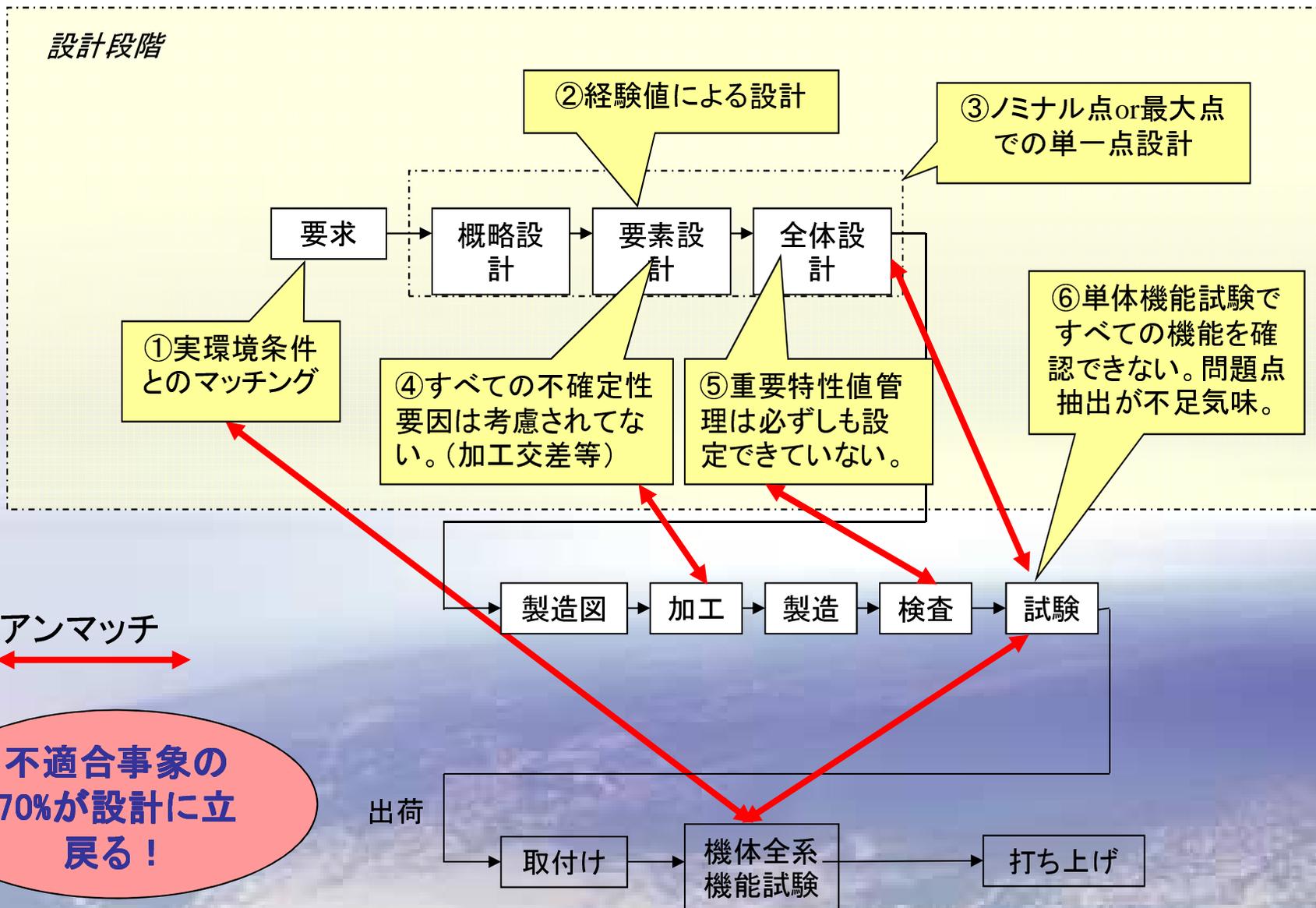
現物のエンジンの溶接部のありとあらゆる箇所を切断調査し、Formanの式をベースに、亀裂進展式を構築した。

燃焼試験による加熱で変色が段階ごとに進んでいる。



一般的な亀裂
進展データは役
に立たない！

設計に立ち戻る不適合事象



品質を作りこむ

- 構造評価方法の改善
- 破損部位の徹底的調査(破面観察等)
- 実工法で作ったテストピースで材料データを再取得



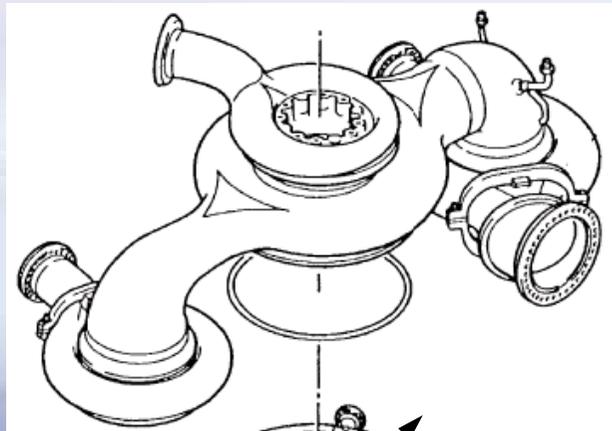
意識改革

“品質を全員参加で作ricoむ”

知っている ⇒ 確信を持つ



品質の良い溶接を行うには。
⇒ 溶接条件、治具、姿勢も重要



溶接部品のミスマッチ
溶接止端部の形状(応力集中)

初期欠陥をどう検査するか。
⇒ 前処理、検査の方法、姿勢も重要



ザイグロ検査で直視できる部位か

▶既知・未知に関わらず、トラブルの原因を自然現象として把握すること。**全体の挙動を統合してイメージすることが肝要。**

- 流体現象、燃焼現象などの始動・停止過渡時のダイナミックな変化
- これによって発生する熱応力による非弾性変形、亀裂進展
- 流体・構造・燃焼に伴う不安定現象など

▶加工・検査プロセスを理解せず、計測のばらつき、限界を知らないエンジニアも役には立たない。

▶トラブルシュートで役立たない対応

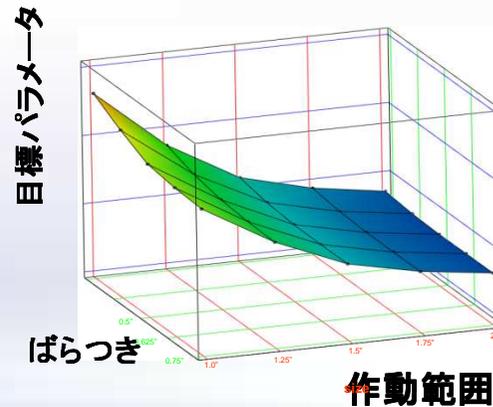
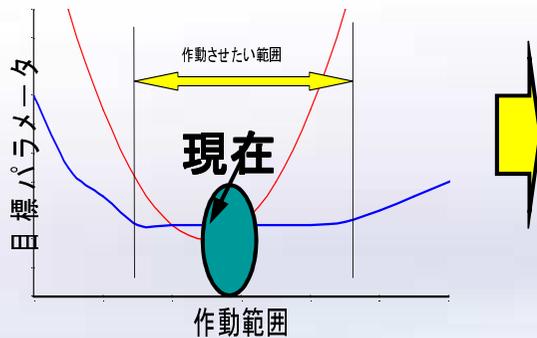
- FEM解析で応力を算出して評価はするが、現物・現場を見ない。
- しっかりと材料データを取って渡すが、どう設計するかは設計任せ。
- 溶接したCT試験片で亀裂試験データは取るが、溶接方向、熱処理、荷重の種類、破面観察に無頓着、・・・etc

▶応力解析、工法と金属特性、破面観察そして実機を模擬した要素試験による検証等、全体を見渡して総合的な判断をする姿勢、何より**現物・現場の観察**が重要。

▶最後は設計・工作・品証の関係者全員参加で、品質を作りこむ姿勢が決め手

ロバスト設計の導入

設計点から設計面へ



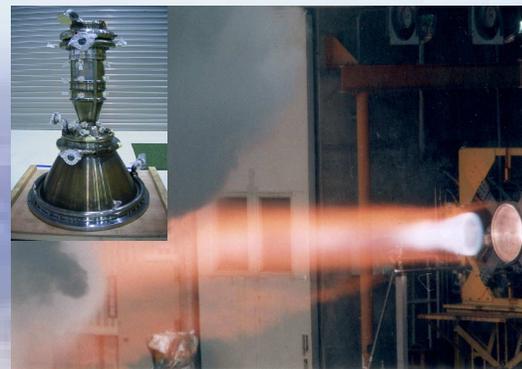
CAE技術の向上

計測技術の向上

•コンピュータ計算を信じないわけには行かない。
•が、何が、信じられるだろうか？

燃焼試験による モデル検証・同定

データ分析手法の向上
•多重回帰分析等

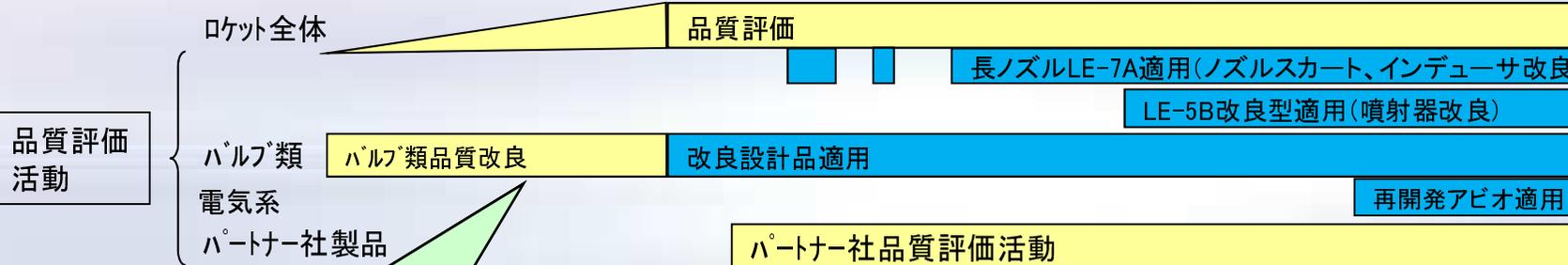
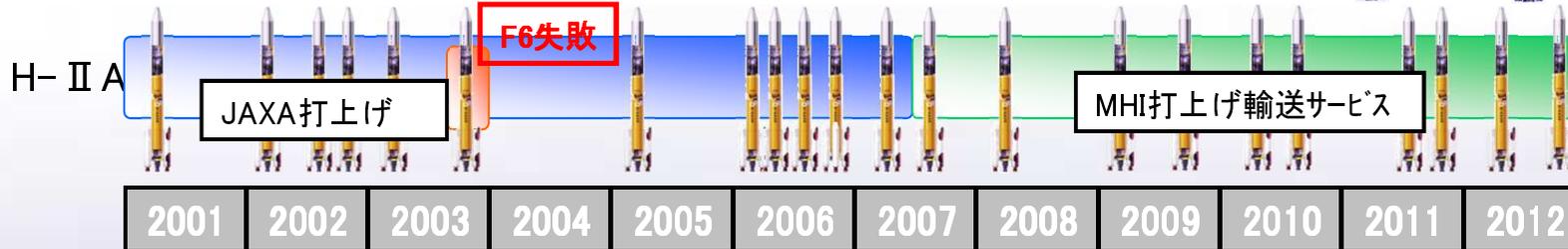


連続成功を支えるもの

-F7号機以降の連続成功: H-IIA 16機、H-IIB 3機

H-II A/Bの成功率: 96% > アリアン 94.5%

-“システムの変化(ばらつき、老朽化)~部品の挙動“を統合して、ロバスト化を図る不断の活動 ⇒ 上位システムの理解が不可欠



品質評価活動

バルブ類
電気系
パートナー社製品

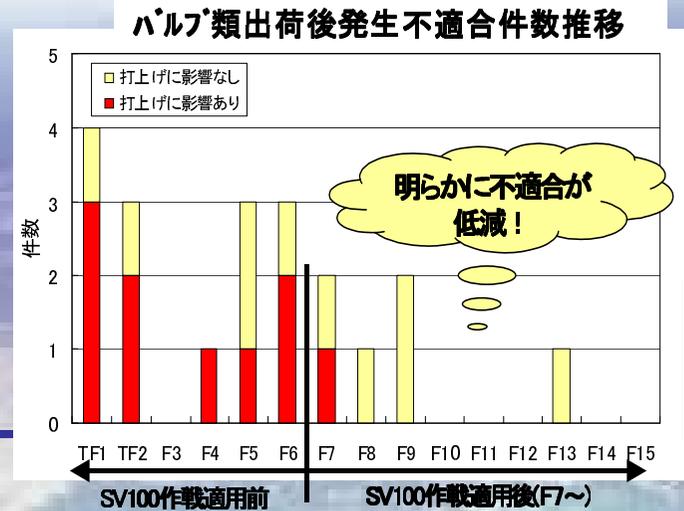
活動事例 : SV100作戦【名誘】
(Space Valve良品化100%)

①設計、製造文書、治工具類の徹底的な見直し、改善を実施

②重要値特性管理項目を洗い出し、トレンド管理(2σ管理)へ

LE-7A : 1892点、LE-5B : 518点
バルブ類 : 560点

成果



⇒ 以後、現在 (H-II B F3号機) まで不適合無し

でも、売れないH-IIAロケット



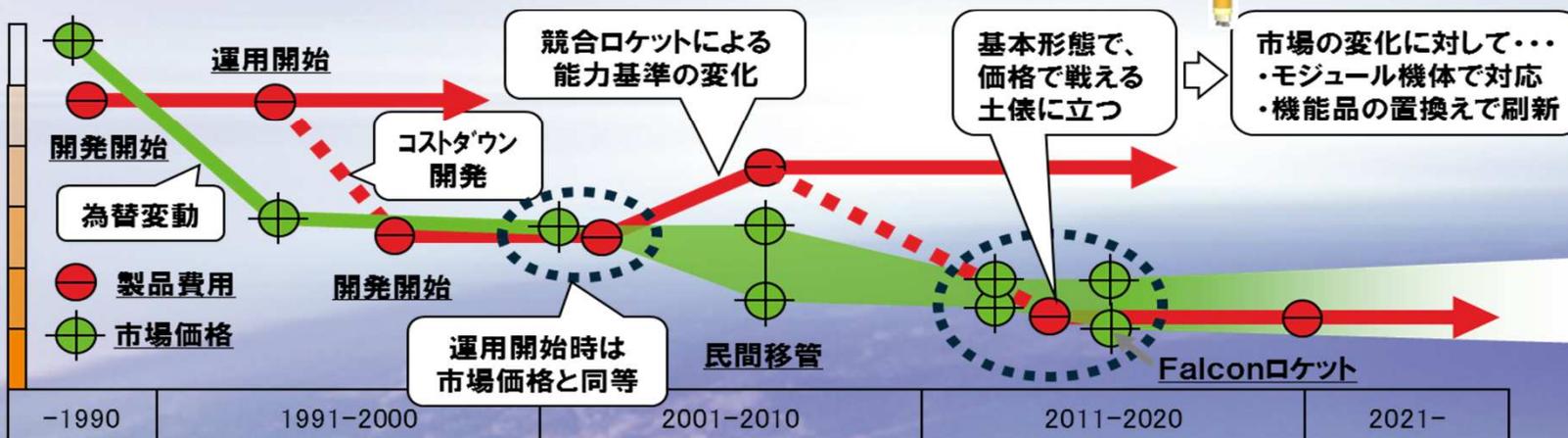
性能

打上能力



価格

トン当たり



市場状況
打上げサービス



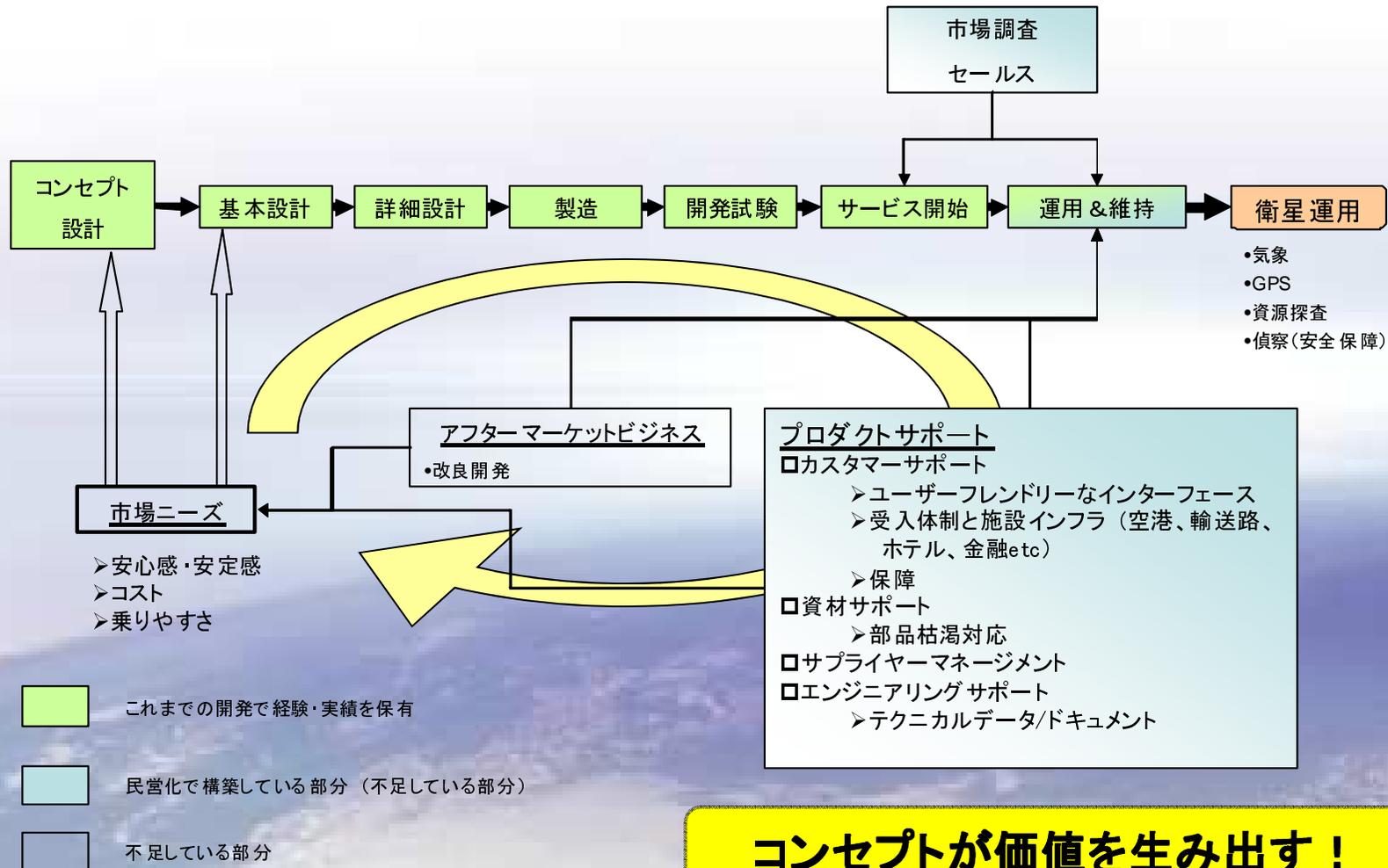
日本の宇宙開発サイクルの強み/弱み

・製品開発サイクルから見た強み、弱み

【強み】日本の開発技術レベル：世界トップクラス(開発初号機の成功率:100%)

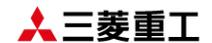
【弱み】サービス活動(2007年より民営化で開始)、コスト(量産機数が少ない)

・プロダクトサポートの充実と段階的な改良開発で、サイクルを回すことが日本ブランド構築の鍵



現在から未来へ

米国民間商業宇宙輸送：Space X



- Space X: Space Exploration Technologies社
- IT長者のElon Muskが創設した完全民間ベースの宇宙輸送機会社(平均年齢32才)
- 廉価なロケット開発を目指す(最高でも最新でもなく最適)

一番元気！



FALCON 1

- ・低軌道へ0.4トン
- ・5機打ち上げて2機成功



<http://www.spacex.com/falcon9.php>

FALCON 9

- ・低軌道へ12トン
- ・Falcon1の1段のエンジンを9機に増強
- ・2010.6初飛行
- ・2010.12Dragon宇宙船の打上げ/再突入に成功



ISS補給宇宙船
Dragon

米国民間商業宇宙輸送： OSC

- OSC: Orbital Science Corp.社
- 中小型宇宙輸送機を提供

サブオービタルも



<http://www.orbital.com/>

Pegasus

- ・L1011からの空中発射
- ・低軌道へ0.4トン
- ・40機打ち上げて37機成功



Taurus

- ・米国ICBMベース
- ・低軌道へ1.5トン
- ・8機打ち上げて6機成功



TaurusII

- ・ロシア製ロケットがベース
- ・低軌道へ5.5トン
- ・2011打上げ予定



ISS補給宇宙船
Cygnus

- Virgin Galactic社：
 - 格安の宇宙旅行を提供する打上げサービス会社
- 空中発射の宇宙機 (Spaceship2) を開発中
- 母機 (White Knight2) は開発済みで、現在試験飛行中



よくよく考えてみると・・・

元気な民間会社、その根っこに何がある？

- ・儲かっている？
- ・技術の基盤がある？
- ・国のバックアップがある？

**実績はない。
絶対の自信なんてあるわけない。
でも皆、コンセプトで勝負！**

では、自分たちが磨いてきた技術の価値って何だろう？

- ・システムの中で個々を捉える力 → 信頼性の基盤
- ・他にはないの？

**ビジネスはコンセプトで勝負！
では最後に宇宙輸送に求められるものは？**

負けてたまるか！未来をあきらめない！

◆ 次期基幹ロケット

■ 開発の狙い

- ・多様なニーズに対応できるシステム
- ・国際競争力確保(性能・価格)
- ・将来輸送系技術の獲得

モジュラー化により
ミッション対応力を強化

当社が検討している将来構想の一例



■ コンセプト

リーズナブルな価格

快適な乗り心地

希望時期に打上げ

技術に支えられた高い信頼性 (Reliable)

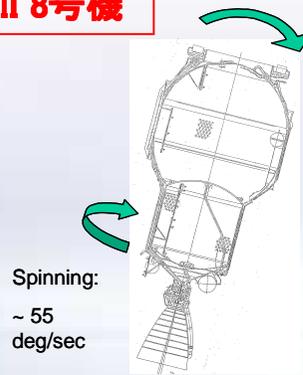
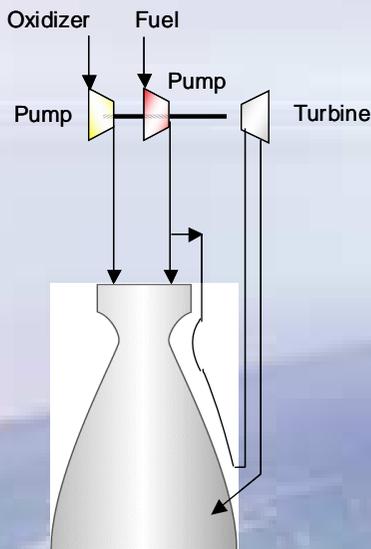


掲載している写真は各社やニュース提供会社のウェブサイトから引用

付加価値を生み出す武器： 本質安全性

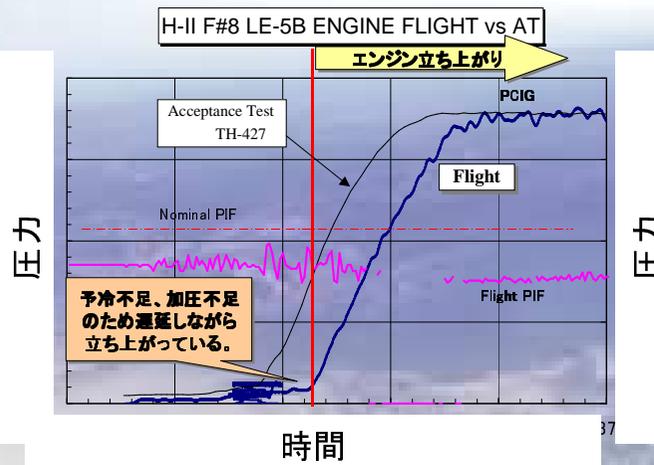
- ▶ H-II8号機／H-IIA6号機： 打ち上げ失敗。でも第2段は正常に始動していた
- ▶ 日本独自のエキスパンダーブリードサイクルに備えられていた本質安全性
通常エンジンは着火できないような悪環境でも、LE-5Bは正常に始動
- ▶ 米国で高い評価 → MB-XXエンジンの基盤

H-II 8号機



Tumbling:
~ 10
deg/sec

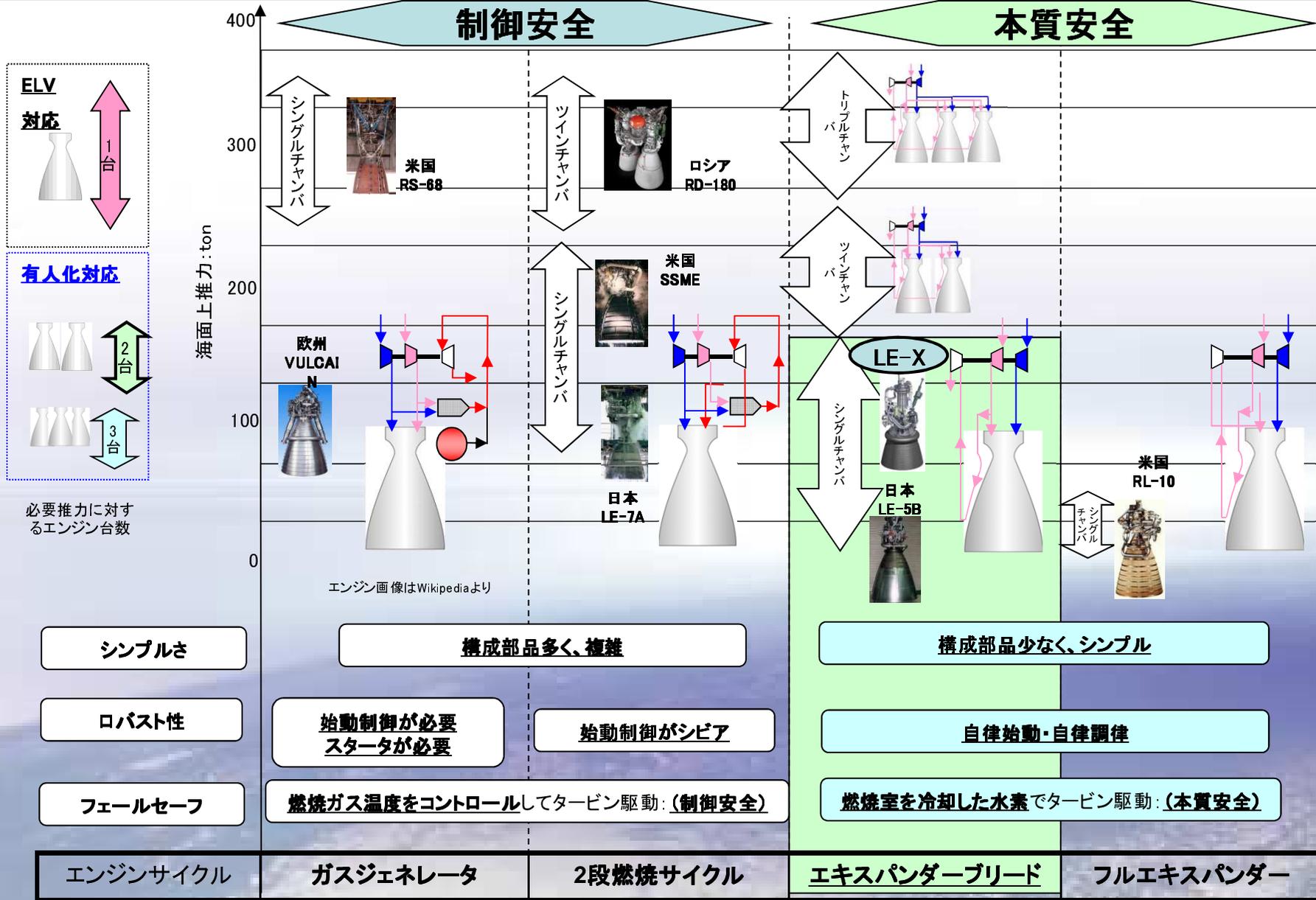
1段機体やSRBの失敗で2段は切り離されたものの極めて異常な回転状態
⇒ 一般にはエンジンは着火できない
(過去の諸外国のロケットでは、エンジン不着火が爆発を起こしている)



LE-5Bエンジンは非常な悪条件の中でも正常に立ち上がった。

世界に類のない
本質安全性と安定性
を実証

世界の推進系のポジショニング



本質安全な輸送系が宇宙事業を変える

・H-IIA/H-IIBロケット(日本の宇宙輸送基盤)の示したもの

己を知る

- 設備老朽化などの諸問題を毎号機解決しながら連続成功を続けている。
→ 着実な高信頼性改善活動の継続: 安定した宇宙事業基盤には必須
- 信頼性技術: H-IIA/B連続成功 + On-time打ち上げ
- 日本独自の第2段推進系: 本質安全性と高い安定性

・世界の輸送系の状況:

天地を知る

- インド、中国などの参入: 衛星打ち上げは国際競争で供給過多に
- 衛星の打ち上げ能力: 1990年以降、赤道打ち上げが国際的な標準に
→ H-IIA: 2段高度化で、打ち上げ能力を回復することが市場獲得上急務に
- 信頼性技術: 「ロケットの重大な不適合≡衛星の喪失」は変わらず
⇔ 一方、日本の技術は米国で高く評価され、主力ロケット(Delta4)の部品を輸出へ



・シンプルで本質安全な推進系 (爆発しない輸送系)



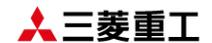
3つのR
★Reliable
★Robust
★Recovery



- ⇒ リカバリー可能な輸送系を実現
- ⇒ 衛星打ち上げ確度向上/衛星の回収
- ⇒ 真の有人化へ

・真に本質安全な推進系が、衛星市場構造を変える
・ " 有人宇宙活動の基礎を築く

北海道での講演より (2011.11)



宇宙事業をビジネスと捉える

ロケット打上げだけを見てはダメ
⇒ 真に価値を生み出すものは？

輸送に求められるもの： 最後は安全、安心

打上ロケット：
本当に安全な、爆発しない
(本質安全な)輸送システム

有人宇宙：民間に広がる可能性は

- 宇宙に年中住みたい人はほとんどいない。
- 多くは、地球を眺め、その素晴らしさを再認識したい。

HTV-R：
リエントリー技術実証

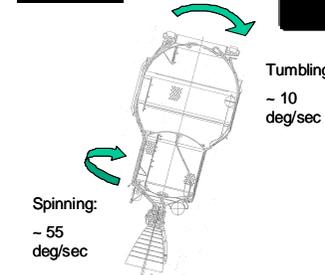
サブオービタル
⇒ TSTOへ

着陸基地：
(整備、輸送)

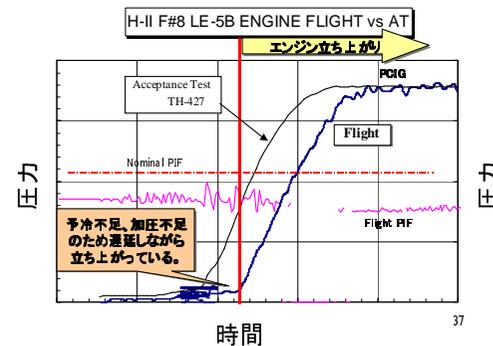
Space City
心に残る場所

+ 観光

H-II 8号機



1段機体やSRBの失敗で2段は切り離されたものの極めて異常な回転状態
⇒ 一般にはエンジンは着火できない
(過去の諸外国のロケットでは、エンジン不着火が爆発を起こしている)



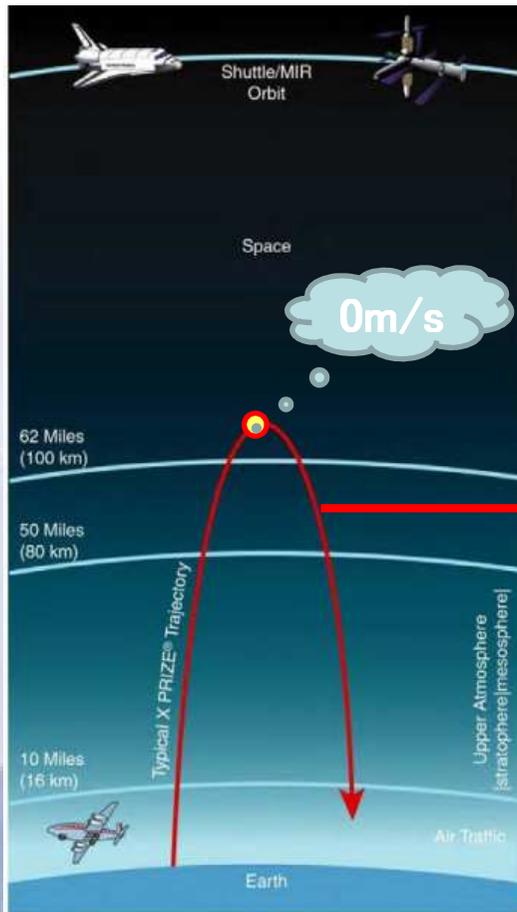
LE-5Bエンジンは非常な悪条件の中でも正常に立ち上がった。

世界に類のない
本質安全性と安定性
を実証

太陽同期打上げでは能力が
2倍に上がる

静止軌道打上げでは能力が
5-10%下がる。

◆一方で現在の弾道観光機と速度を比べると...



(c) X Prize Foundation

→ **約8km/s**

※理想増速量→加速できる力

※理想増速量 $\Delta V =$ 約10~12km/s
(上記速度に空気力や重力ロスを考慮)

【内訳】

1段: $\Delta V =$ 約6~9km/s

2段: $\Delta V =$ 約4km/s

→ **約1km/s** max

※必要増速量 $\Delta V =$ 約3km/s

弾道観光機では
能力が不足

ビジネスを考えるのであれば...

**再使用型宇宙輸送機
くらいの能力が必要**

再使用型宇宙輸送機：SSTOとTSTO

◆SSTO (Single-Stage-To-Orbit)

- ◎航空機ライクで最も理想的な形態
- ◎ただし燃料が全体質量の9割以上になる必要がある。
- …さらに、地上に帰還するための翼や熱防護材が必要。

現2段式ロケット
よりさらに軽く



(c) JAXA



加えて..



翼

(c) Lockheed Martin



熱防護材

(c) NASA

高度な軽量化技術が必要

技術的なハードルが高い

◆TSTO (Two-Stages-To-Orbit)

◎現ロケットと同じ、2段式

⇒さらに1段がエアブリーザのコンセプトもあり。



TSTOの例①：
全段ロケット推進



TSTOの例②：
1段エアブリージング推進



- ◎現航空機との親和性が高い
- ◎国際旅客ニーズにも対応可能性あり

**1段エアブリーザの大陸間高速旅客輸送
への転用がビジネスの可能性が高い**

価値を創造する人材の育成

▶プレゼンテーション能力

言いたいことを伝える
仲間を集める

簡単な一言で本質をつく、自分の言葉で
チームを作る

▶基礎力学の充実(材料、構造、流体、熱)

3つの検討力が必要* (下記参照)

- ◆5分で答える(基礎式)
- ◆1時間で答える(基礎式に基づくCAE技術)
- ◆1週間で答える(数値計算によるCAE)

現象を想像し、語る力: 実験の充実

・相互に関係があり、同時に育成すべき事項

・CAE以前に主力であった計算式の展開による解析の訓練が教育上のキー

▶インテグレーション技術力: 価値を生み出す技術力

目的(価値)に合わせて、本質をついた簡易式を導き、自在に駆使できる
総合力

▶経営学やゲーム理論

国としての補助金戦略、投資・利益もパラメータの1つ

***)最近のエンジニアの傾向: 一見優雅なコンピュータ解析に偏重しやすく、以下が欠点**

本質を忘れた設計:

設計品質の低下

解析時間の増大→開発速度の低下危険の危険性

開発時の設計変更:

硬直化して、変更に対応できなくなる欠点