

連携大学院講義

(極超音速技術評価)

舞田正孝 教授

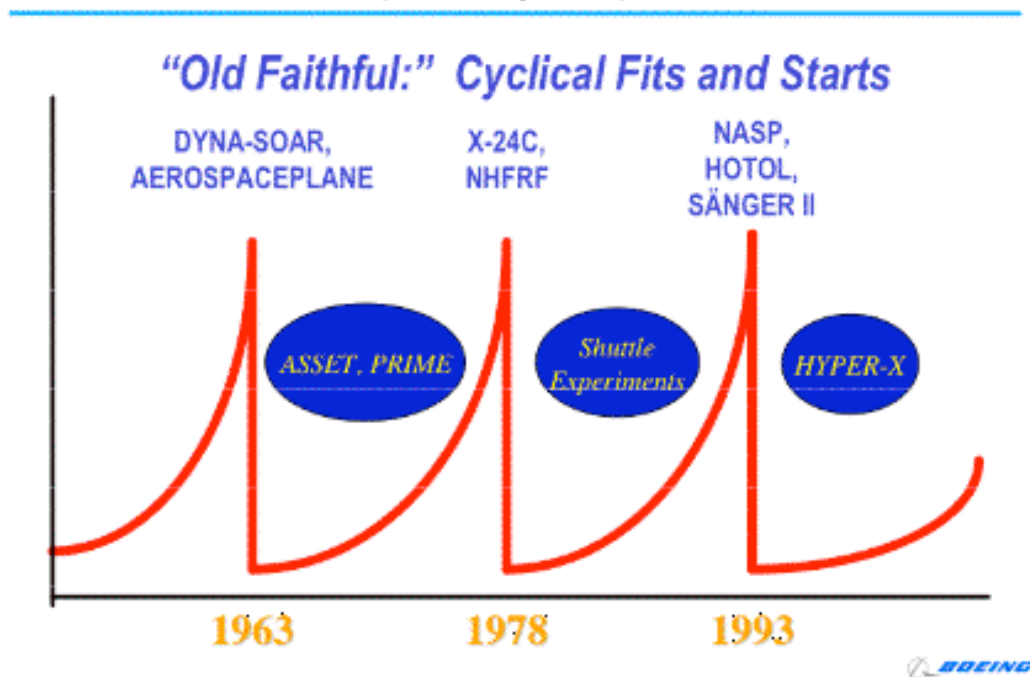
極超音速技術評価

極超音速技術の現状評価とシステム実現に向けての技術開発 Rationale に就いて、米国航空宇宙学会を中核にした委員会・HyTASP Committee:*Hypersonic Technologies & AeroSpace Plane*（米国以外からは欧州、ロシア、豪州、日本の国際委員が参画。国際委員は主に International Spaceplanes and Hypersonic Systems & Technologies Conference の代表委員ならびに各国の極超音速関係者により構成。）での共同検討を纏めるもの。

定常的な極超音速飛行は航空 Aviation の領域で、未だ達成されていないフロンティアの一つで在り、技術的に最も困難な領域でも在る。米国を中心にした40年以上に亘る極超音速技術開発の歴史を振り返れば、政治的、Bureaucratic な政策展開、予算問題等々に因る浮き沈みの連続とも言える。21世紀初頭の極超音速技術開発の状況は厳しい谷底の感が在る。

History of Hypersonics

(SAB Study, 2000)



こうした状況下で米国航空宇宙学会を中心に世界各国の専門家から構成される委員会 : HyTASP Committee が作業部会を設けて政策提言を纏める作業を行っている。

極超音速研究開発プログラムはヨーロッパ、ロシア、そして日本、オーストラリア等々でも推進されている。ロシアはこれまで何度か極超音速飛行試験を実施している。フランスは LEA プログラムに代表される次世代極超音速エンジンならびに先進材料の開発を行っている。オーストラリアは HyShot 等極超音速インフラの提供を積極的に試みている。イタリアは USV プログラムにより有翼形態のリエントリー・極超音速機の研究開発を推進している。日本 JAXA は長期ビジョンに於いて20年後に極超音速飛行実証を計画している。インドでは再使用スペースプレーン研究開発計画が立ち上げられている。予算的には大きな数値ではないが世界各国が長期的視点に基づき極超音速技術開発の重要性を的確に認識している。懸かる状況下に在って、米国 NASA は極超音速プログラ

ムの予算カットならびにこれに伴う有能な人材が離れつつ在る事は由々しき事態で在る。歴史を紐解けば NASA の航空プログラムが宇宙産業を育て、発展させた事実を認識すべきで在る。極超音速飛行は先端的航空宇宙技術であり、米国が Global Aviation の世界のリーダの役割を維持し、次世代の人材育成を可能とする鍵となる事は間違いない事実である。Woodrow Wilson 大統領が NACA を創設し、米国を世界の航空宇宙分野のトップに押し上げる原動力にした政策を学ぶべきである。

新宇宙政策の持続的推進にもこのプログラムは長期的観点で不可欠である。宇宙空間の何れのアクセスにも地球から低軌道への効率的輸送（地球～低軌道間で大半のエネルギーを消費）はその前提条件になる。この為の Airbreathin Hypersonic Vehicle の実現はその鍵で在る。安全保障問題で言うところの Prompt Global Strike, Long Range Strike, Operationally Responsive Space Access は正に懸かる技術に集約される。こうした DoD/USAF/DARPA のプログラム推進には NASA の支援が不可欠で在る。

今日の状況に至った極超音速プログラムを振り返ると、

1. 予算措置が特定の ambitious 過ぎるゴール設定の基に集中した事、
2. 技術成熟への impatience からプログラムが次々とキャンセルされ、critical path 技術の持続的な開発努力に欠けた、
3. Critical 技術開発ならびにその知識ベースはプログラムのキャンセルとともに枯渇した事、
4. 厳しい予算環境では不安定なプログラムに終止する事 (NASP X-30 ⇒ Venture Star X-33/34 ⇒ OSP/X-43+NGLT ⇒ CEV)
5. 駆け出しのプログラム NAI は NASA/DOD プログラムの寄せ集めの感が在り、発散傾向を危惧する側面が在る。

こうした状況の背景には極超音速技術開発の持続的な国家ビジョンと政策の実行「A sustained national vision and commitment to development of technologies critical to enabling hypersonic flight is lacking」が不可欠と言える。

HyTASP 委員会でのアクションアイテム：

1. Identify and assess state of the art of critical technologies, design processes and test capabilities for hypersonic vehicles
2. Gather available hypersonic technology and system development roadmaps from NASA, DoD and international organizations
3. Develop comprehensive roadmap for maturing critical technologies(to levels required for flight demonstration TRL=6 & Proto type operation TRL=7)
4. Develop actionable recommendations

極超音速システム実現の前提となる全ての重要技術を評価し、Critical/Enabling 技術として以下の 4 技術領域を特定した。(序列は重要度順)

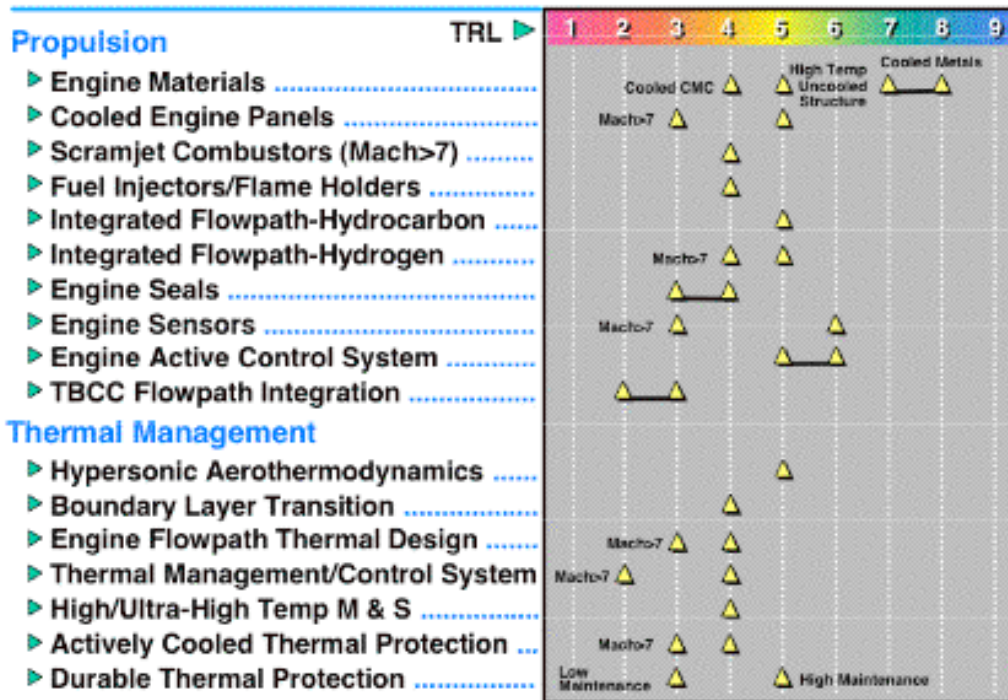
1. Propulsion
2. Thermal environment prediction, protection & management
3. Integral airframe structures & cryogenic tanks
4. Vehicle design, optimization and simulation

以下に評価解析の概要を参考までに示す。

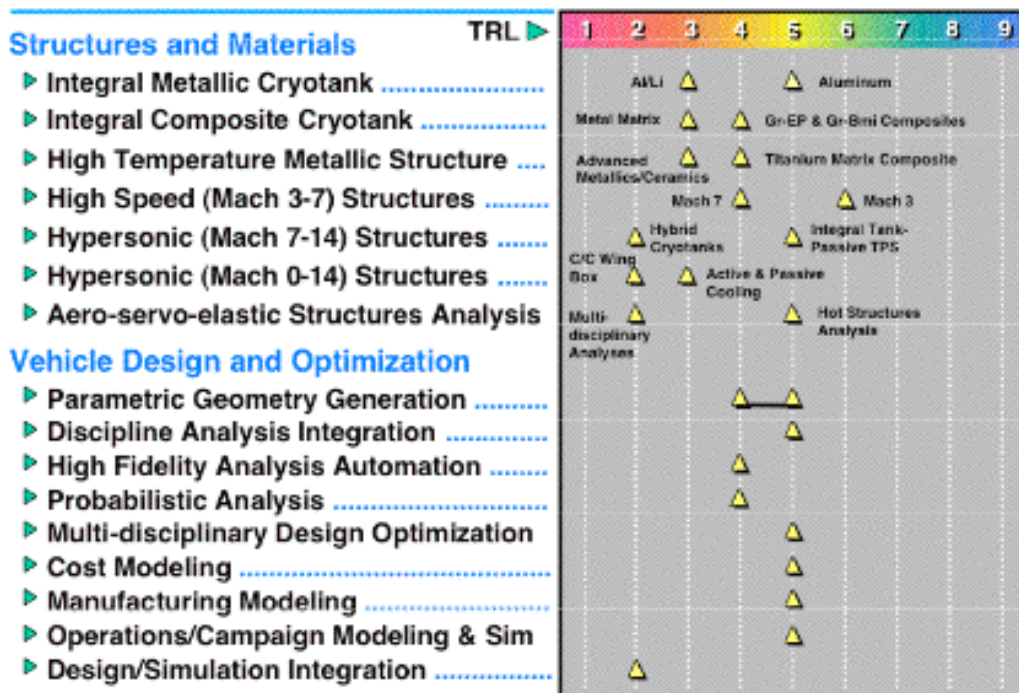
Technology Readiness Level (TRL) Descriptions Product, Process, Simulation

	TRL	Product	Process	Analysis/Simulation
Implementation	9	Actual System "Flight Proven" Through Successful Mission Ops.	Actual Process Proven Through Successful Operation by Program	Actual Models In Use By The Community
	8	Actual System "Flight Qualified" Through Test & Demo	Actual Process Completed and "Qualified" Through Test/Demo	Actual Models are validated against "Flight Qualified" data
Validation/ Verification	7	System Prototype Demonstration In an Operating Environment	Prototype Process Demo In a Program Environment	Prototype Model Validated Against Flight-Test Data
	6	System/ Subsystem Prototype Demo In a Relevant Environment	Process Prototype Demo In a Relevant Environment	Model Validated Against Relevant Ground-Test Data
Demonstration	5	Component Validation In Relevant Environment	Beta Version Key Elements Validated In Relevant Env.	Model Components Evaluated Against Relevant Data
	4	Component Validation In Laboratory Environment	Alpha Version Key Elements Validated Against Benchmark	Tools Assembled Into Package and Tested Against Hand Calcs.
Development	3	Critical Function of Characteristic Proof-of-Concept.	Alpha Version Operational In a Test Environment	Data Flow Diagrams, Tools Collection and Familiarization
	2	Technology Concept and/or Application Formulated	Requirements Document Approved By Customer	Methods and Algorithms for Similar Systems Identified
Proving Feasibility	1	Basic Principles Observed and Reported	Current Process Documents and Potential Savings Identified	System Characterized and Tool Needs Defined

Technology Readiness Assessment



Technology Readiness Assessment



Other Technologies Requiring Maturation

Technology	TRL	Status / Readiness Projection
Aerodynamics	5	Analysis & test methods mature, but validation remains difficult at hypervelocity speeds (Mach > 8)
Vehicle Control System	5	Closed-loop engine-airframe control systems being developed for X-43A, X-43C, HyFly and Waverider SED
Autonomous Flight	5	Leverage ongoing autonomous air/space vehicle R&D
Vehicle Subsystems	4-5	Being addressed by SLI/NGLT/Shuttle Upgrade
Crew Systems	6	Synthetic vision flight demo on NASA HSR Program
	2	Crew escape addressed by SLI / Shuttle Upgrade
Vehicle Health Mgmt.	4	Requires engineering development; Extend NASP, SLI and OSP work
Antennas/Sensor Windows	4	Exist for weapons; Development required for reusable apps.
Manufacturing	3-4	Manufacturing experience and infrastructure required to fabricate large, lightweight, non-circular structures from advanced high temperature materials is lacking
Ground Operations	2-3	SOV Ground Operations studies underway. Life cycle simulations including ground operations in planning stages for NGLT

Hypersonic Air-Breathing Propulsion TRL Assessment*

	Mach 0 - 4 Turbine Hydrocarbon	Mach 3 - 7 Hydrocarbon	Mach 3 - 7 Hydrogen	Mach 7 - 14 Hydrogen
Engine Performance & Operability				
Inlet	5	5-6	5-6	5
Isolator	N/A	5-6	5-6	N/A
Fuel Injectors/Flameholders	4 (AB)	5-6	6	4-5
Combustor	6	5	5-6	4
Nozzle	4-5 (TMS)	5-6	5-6	4
Integrated Flowpath	4 (including AB & TMS)	5	5	4
Structures & Materials				
Cooled Materials	5 (turbo-machinery)	7-8	7-8	4
Uncooled Materials	5	5	5	4
Cooling Panels	4 (nozzle & combustor)	5-6	5	3
Variable Geometry (e.g., seals)	4 to 6	4	4	3
Engine Subsystems				
Sensors	4 to 5	6	6	3
Valves	N/A	5	5	4
Pumps	N/A	6	6	5
Active Control System	4	4-5	6	5
Fuel to Air Heat Exchanger	3 to 4	N/A	N/A	N/A

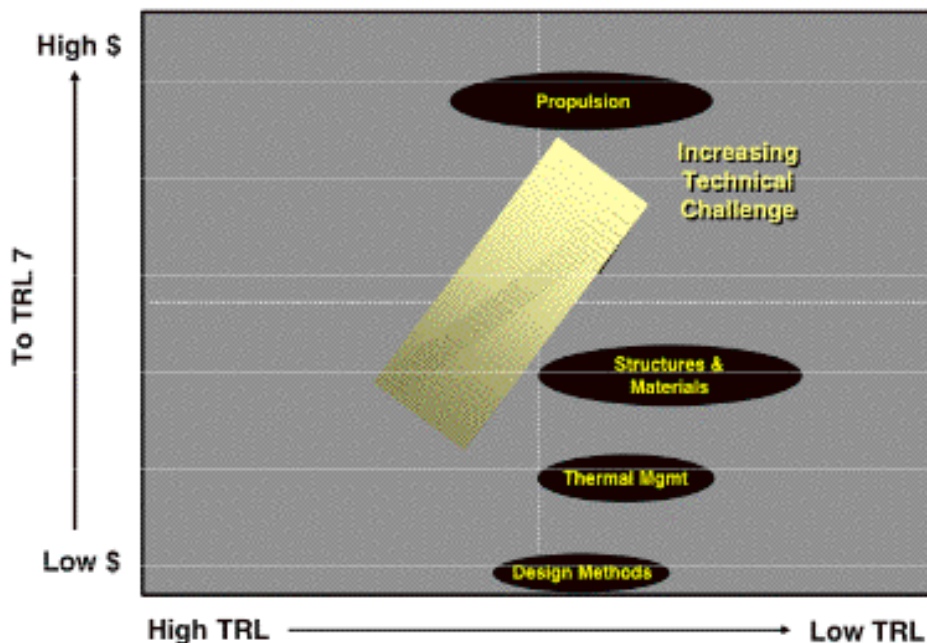
Notes: Items in parentheses reflect requirements for a TBCC system.

AB = afterburner

TMS = thermal management system

* Inputs from Chuck McClinton – NASA Langley, Robert Mercier - AFRL, Paul Bartolotta – NASA Glenn, Fred Billig – Pyrodyne (JHU/APL retired), Bill Imfeld – ASC retired, Allen Goldman and George O'Connor - Boeing Rocketdyne, Steve Beckel - Pratt & Whitney, and Kevin Bowcutt - Boeing

Required Maturation Investment is a Strong Function of Technology Category



懸かる現状認識、評価を踏まえて、今後の展開に不可欠な事項を纏めると、
Propulsion :

現行／計画中の DoD プログラム (HyTech, HyFly, SED) は Hydrocarbon エンジンを対象にした技術リスク低減を齎すもの。また、NASP, X-43A は Hydrogen エンジン開発の一定の基礎を創ったが、マッハ 8 以上のエンジン開発には多くの不確定要素がそのままになっている。即ち、燃焼器、エンジン性能、熱的耐久性のデータベースが不足しており、Vehicle 設計には不十分。既存の地上試験設備の能力ではエンジン開発が困難。現在の **Actively cooled engine flowpaths** の重量過多では宇宙アクセスへの適用が困難。航空機的オペレーションを可能にするエンジン **robustness** と性能は未だ達成されていない。現在の構想・計画されているプログラムには宇宙へのアクセス Vehicle を可能にする主題が欠如。

低速 Propulsion それ自体は、必ずしも飛行試験の必要は無いが、スクラムエンジンへの Transition、加速性能評価は飛行試験が不可欠。

スクラム以外の低速極超音速 **Combined Cycle:TBCC** (マッハ 6 程度) はエンジン構造・熱管理、重量、性能等のデータベースが不十分で在り、多くの研究開発が前提となる。

NASA/USAF の高速タービンエンジン開発を加速し、極超音速エンジンの低速系にインテグレート (+dual-mode ram/scram) する事が **logical follow-on**。

TBCC は、マッハ 5～6 程度に限定した Vehicle にはその重量性能に因って高速ターボ/Dual-mode Ram とのトレードオフの対象になる。

特に、HyTASP 委員会での提言は「マッハ 8 以上の高速推進システムの開発、地上試験設備の高度化、軽量耐熱材料構造技術の成熟が不可欠で在り、また複数プログラムにより構成される飛行試験計画により、**engine scale factor** 評価とともにエンジン性能、robustness、運用性の評価実証が不可欠で在る。」

Thermal Environment Prediction, Protection & Management :

本課題は境界層遷移の問題を含めて不確定要素が極めて大であり、従来の保守的な TPS/TMS 設計を余儀なくしている。機体レベルの熱設計は更に厄介な状態。先進的な全天候型、耐久性の在る TPS は未成熟 (TRL<6)、TMS/Control 要求の定義も不十分。また超高温材料を供給できるインフラは乏しい。これらの解決に向けて、国際的な連携により

1. BLT 予測の為の飛行試験実施、複雑な形状に適応可能な予測法の開発、BLT 予測を CFD ならびに設計解析ツールへのインテグレーションが必要、
2. UHTM/UHTC 等の開発の加速、
3. TPS をインテグレートしたタンク、Leading Edge、舵面、シール等の先進材料によるフルスケールモジュールの設計、試験、
4. 宇宙アクセス用材料、TCS 開発の要件を明確にし、開発を加速、する事を提言する。

Integrated Airframe Structure and Cryogenic Tanks :

現在軽量且つ信頼性の在る再使用の極低温タンクは存在しない。

複合材は **plagued by failures** であり、金属は再使用性能を保証するには重すぎる。非軸対象タンクは未だ設計・製造チャレンジな状態。**Integrated** 設計ツールも TPS、構造、タンク等をインテグレートし、互換性の在るツールとなっていない。地

上試験設備能力も、極低温燃料を入れた熱・荷重環境化でのタンク／機体システムの試験は可能でない。

懸かる状況を勘案すれば、1. 先進金属、複合材とのハイブリッド等の極低温タンク、イテグラルタンク等を含めた新たな先進構造方式の開発の着手、2. 飛行試験計画と調和した地上試験設備能力の高度化計画、3. Integrated Structure & TPS の熱・荷重解析評価システムの開発、等が極めて重要で在る。

Vehicle Design System :

多くの不確定性を有し、非線形現象、飛行特性に代表される様に Highly Integrated Nature の極超音速システム Vehicle を扱うには現在の設計解析ツールでは不十分であり、高度にインテグレートされた設計法（最適化）無しには運用性の在る極超音速システムの開発は不可能。（夫々個別に問題を扱っている場合が多く、更に幾つかの経験則の検証が不十分もしくは非成熟で在るため High Integrated Vehicle への適応が困難。MDO 設計システム開発の加速が重要。この主な要件は以下に参照。

Formulate, develop, integrate and validate advanced design methods:

- Parametric geometry generation system
- Automation of data transfer between analysis tools
- Automated execution of high fidelity computational analyses
- Multi-disciplinary design optimization techniques
- Probabilistic tools enabling SoS level risk assessment & mitigation
- Accurate cost modeling
- Integration of vehicle design/optimization and operations/mission simulation tools

因みに、過去研究開発が行われた、もしくは脚光を浴びた技術領域で在ったが、その後停滞し崩壊しかかっている技術領域を列記した。第一義的な技術領域では必ずしも無いが在れば極めて有用なもの。但し、モーフィング技術等は極めて futuristic では在る。

Potential Disruptive Technologies :

高信頼性の推力重量比の高いロケットエンジンに繋がる材料設計プロセス、高密度燃料開発（これらは All Rocket SSTO のみならず Airbreathing Vehicle の TOGW の低減を促す）

MHD（AJAX が代表例）の power generation, plasma generation.

ナノマテリアルをベースにした構造／TPS

Intelligent Self-Healing TPS

Morphable Structure（可変構造技術）

上記の評価分析、提言を要約すれば、

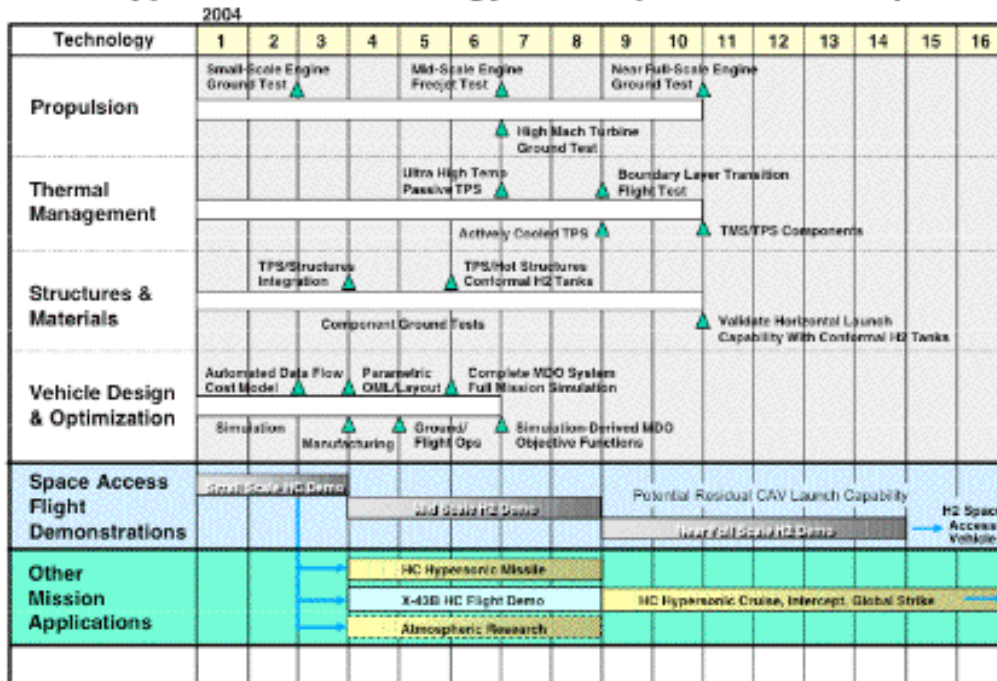
1. エアブリージング推進極超音速・宇宙アクセスを可能にする前述4つの Critical 技術の成熟が不可欠で在る。特に、Propulsion 開発は技術リスク、コスト低減、運用性能革新を齎す最も重要な Driver となる。次に重要なのが熱管理技術で在る。
2. 懸かる技術開発を推進する上で地上試験設備性能の高度化が必要である。特にマッハ8を超える Propulsion 試験、大型熱構造システム試験性能の整備が不可欠で在る。
3. Critical 技術のリスク低減、実証には飛行試験の実施が不可欠。特に3段階での step-up 方式による飛行試験は、コストと技術成熟のバランスのとれたプログラムを形成する。飛行試験の重点は、飛行環境での現象把握、スケール効果、システムインテグレーション性能評価に在る。
4. 現在計画されている NAI プログラムはスケール効果、システムインテグレーション性能評価・実証に重きが置かれているが、その前提となる前段階の Critical 技術開発への投資が不足している。但し、NAI は極超音速技術プログラムの為の重要なフレームワークとして位置づける事が可能で在る。
5. この為には、エアブリージング推進極超音速宇宙アクセス・Global Response 等を可能にする Critical 技術成熟プログラムの Initiative が緊要の課題で在り、産学官の連携による国際的視点を勘案したコンソーシアの整備、フレームワーク化が不可欠である。
6. Critical 技術開発は前述の重点技術(Propulsion, Thermal Management, Structures & Materials, and Design/Optimization)に特化すべきで在る。懸かる技術開発に於いては、最終的な Vehicle System ミッション性能要求とは直接的なリンクを極力避けるべきである。(Avoids feast or famine funding cycles) また、Critical 技術の他分野への技術波及等の off-ramps を可能にするプログラム構築も勘案すべきで在る。
7. 最後に重要な事は、Vehicle System 開発に於いて、Critical 技術が十分成熟する前に開始してはプログラムの失敗に終わる事を歴史的に学ぶべきである。

こうした技術開発を加速、推進するロードマップとして米国が計画するプログラム NAI: National Aerospace Initiative との対比で纏めた提案の一例（宇宙アクセスへの適応例）が次ページ以降のドラフトで在る。(HyTASP 委員会としては、今後、更に詳細に検討を加え、コンセンサスを纏め、国際的な視点も勘案し、Rationale、Roadmap 提言を用意する計画である。)

Flight Demonstrations

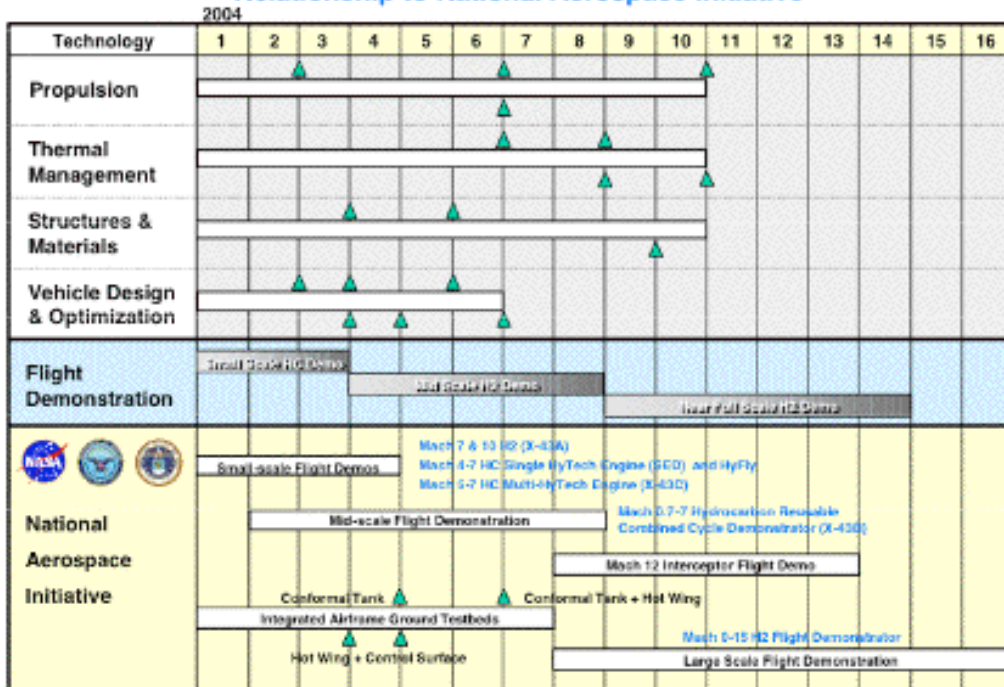
Scale (Rationale)	Small Scale	Mid Scale	Near Full Scale																												
	<ul style="list-style-type: none"> 1/10 cruiser or space access vehicle Full-scale missile demo 	<ul style="list-style-type: none"> ~1/3-scale engine Large enough for 1-4 minutes of engine data 	<ul style="list-style-type: none"> Near full-scale high speed engine Sub-scale flight vehicle Potential residual ops capability 																												
Speed Range (Propulsion)	Mach 3~4-7 <ul style="list-style-type: none"> Rocket boosted to air-breathing takeover Single flowpath Hydrocarbon fuel 	Mach 3~4-14 <ul style="list-style-type: none"> Rocket boosted (ICBM class booster) Single/multiple flowpaths Hydrogen fuel 	Mach 0-14 <ul style="list-style-type: none"> Low speed propulsion to ramjet/scramjet takeover Single/Multiple flowpaths Hydrogen fuel 																												
Vehicle/Demo Attributes	<ul style="list-style-type: none"> 5-10 vehicles tested at different conditions Recoverable, not reusable Several min. of data/flight Actively cooled engine Integrated VMS 	<ul style="list-style-type: none"> 3 vehicles, 6-8 flight tests Reusable Multiple, ~1-minute tests as vehicle decelerates Re-entry or depressed trajectory TBD 	<ul style="list-style-type: none"> 2 flight vehicles Reusable (unmanned) 1 or 2 stages, depending upon vision vehicle concept <ul style="list-style-type: none"> Horizontal takeoff Vertical launch 																												
Test Objectives	<ul style="list-style-type: none"> Characterize hypersonic environments Engine-airframe validation Airframe-TPS validation MDO validation 	<ul style="list-style-type: none"> First Mach 8-14 flight data Cryogenic hydrogen; cryotank-structures integration Some boundary layer transition data 	<ul style="list-style-type: none"> Confirm boundary layer transition prediction Validate integrated airframe, TPS & control system Demo engine cycle & mode transitions, stage separation and rapid turnaround ops. 																												
Schedule	<table border="1" style="margin-top: 5px;"> <tr> <td style="text-align: center;">Small Scale</td> <td colspan="3"></td> <td colspan="4" style="text-align: center;">Mid Scale</td> <td colspan="6" style="text-align: center;">Near Full Scale</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">1</td><td style="text-align: center;">2</td><td style="text-align: center;">3</td><td style="text-align: center;">4</td> <td style="text-align: center;">5</td><td style="text-align: center;">6</td><td style="text-align: center;">7</td><td style="text-align: center;">8</td> <td style="text-align: center;">9</td><td style="text-align: center;">10</td><td style="text-align: center;">11</td><td style="text-align: center;">12</td><td style="text-align: center;">13</td><td style="text-align: center;">14</td> </tr> </table>			Small Scale				Mid Scale				Near Full Scale						1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Small Scale				Mid Scale				Near Full Scale																							
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14																		

Hypersonic Technology Development Roadmap

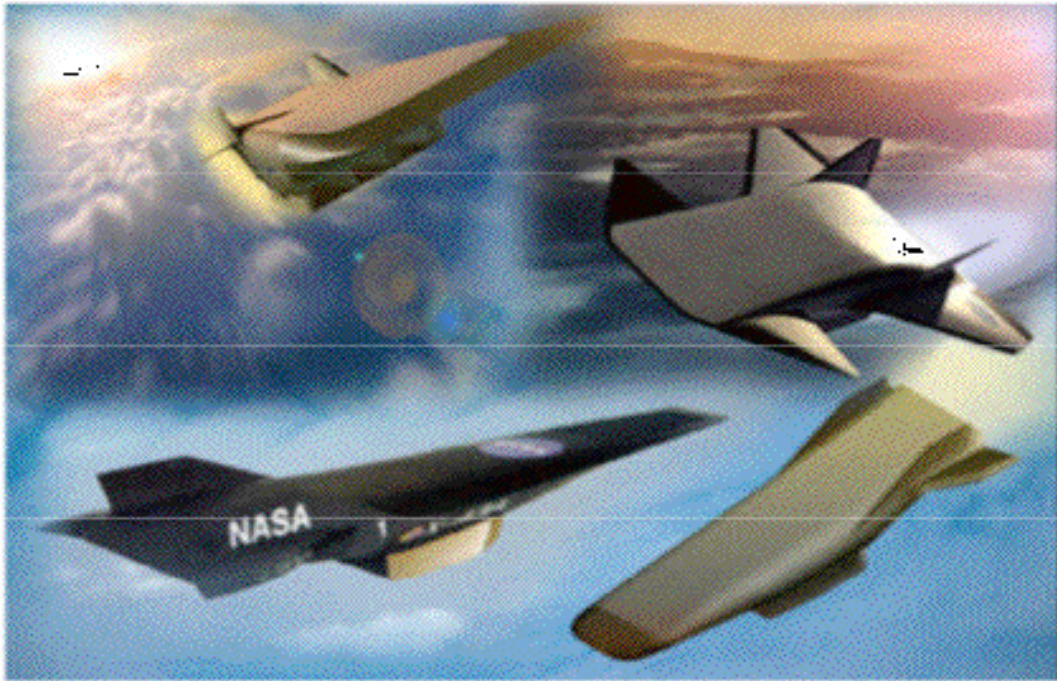


Hypersonic Technology Development Roadmap

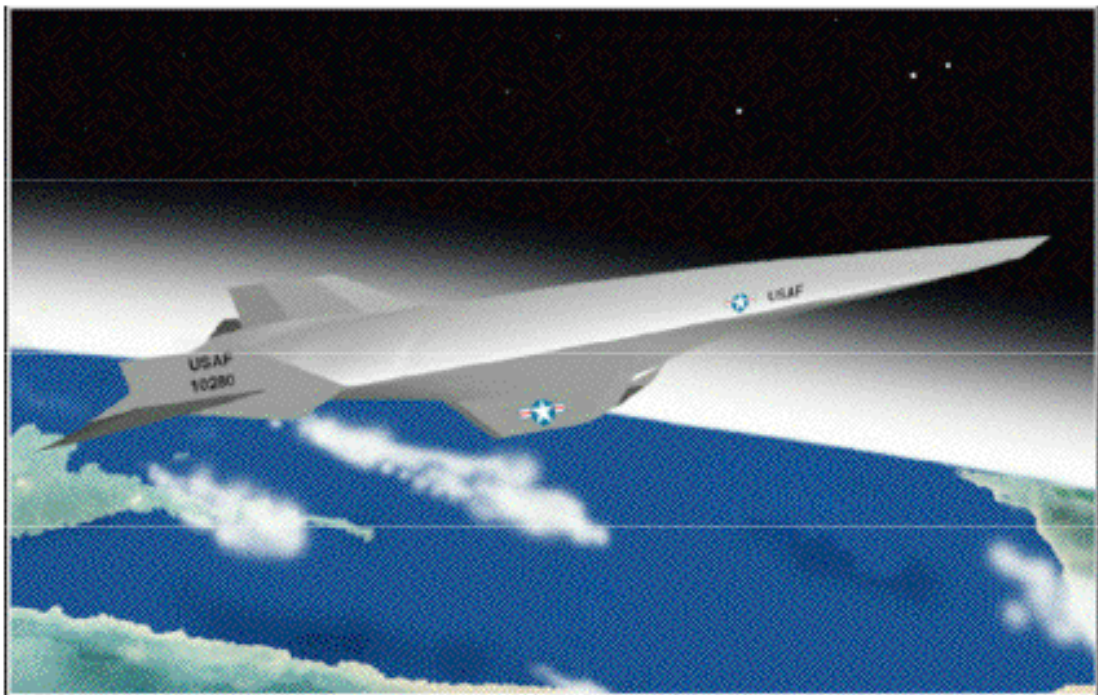
Relationship to National Aerospace Initiative



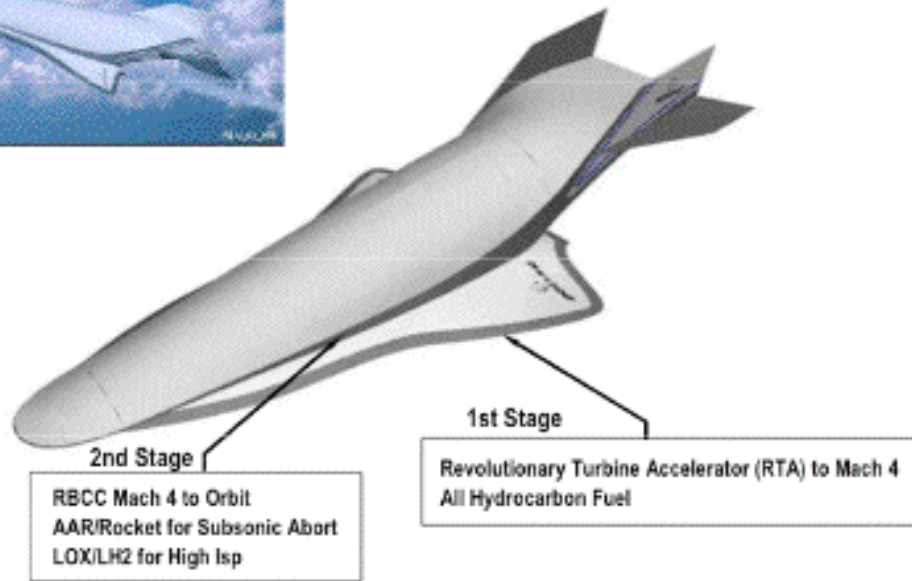
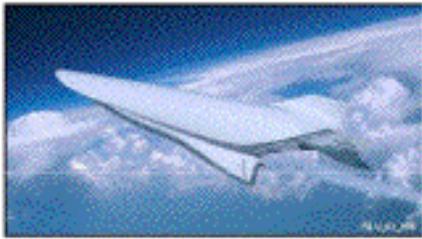
参考：



NASA Hyper-X

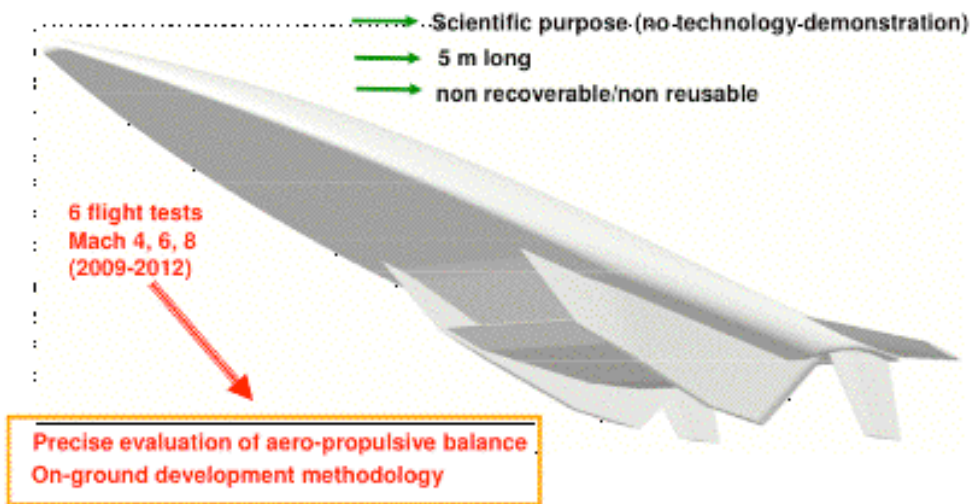


Mach 10 Global Striker



Boeing TSTO Baseline Concept

LEA Flight Test Program LEA



LEA Program