資料7-2
研究開発局宇宙開発利用課
革新的将来宇宙輸送システム実現に向けたロードマップ検討会
（第7回）R3.3.24

革新的将来宇宙輸送システム実現に向けた課題について

令和3年3月24日

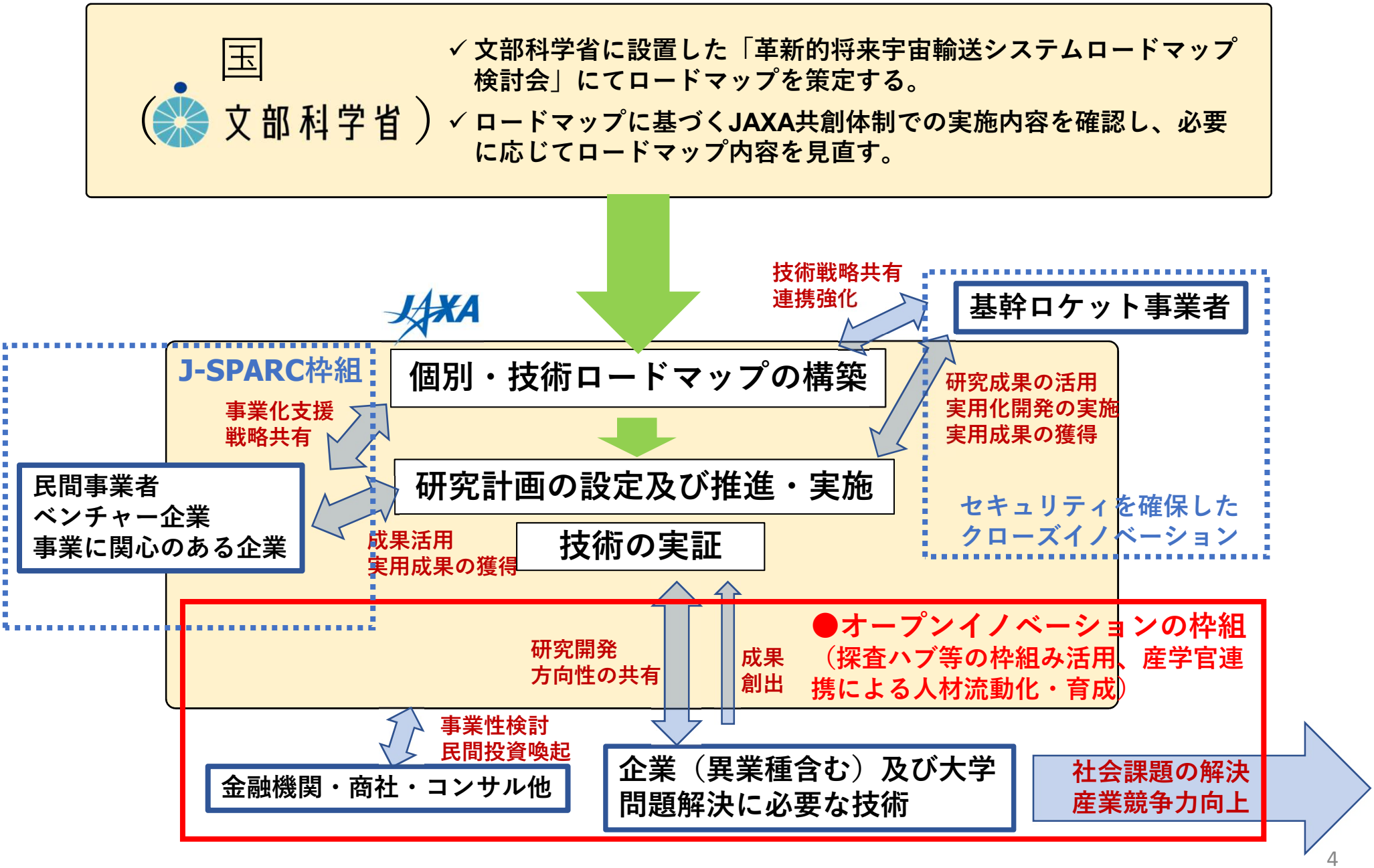
文部科学省 研究開発局 宇宙開発利用課
(国研)宇宙航空研究開発機構

目次

１．具体的な開発の進め方について
（１）オープンイノベーションでの共創体制について
（２）システム技術実証の進め方について
（３）官民役割分担について
（４）国際認証等における制度障壁について

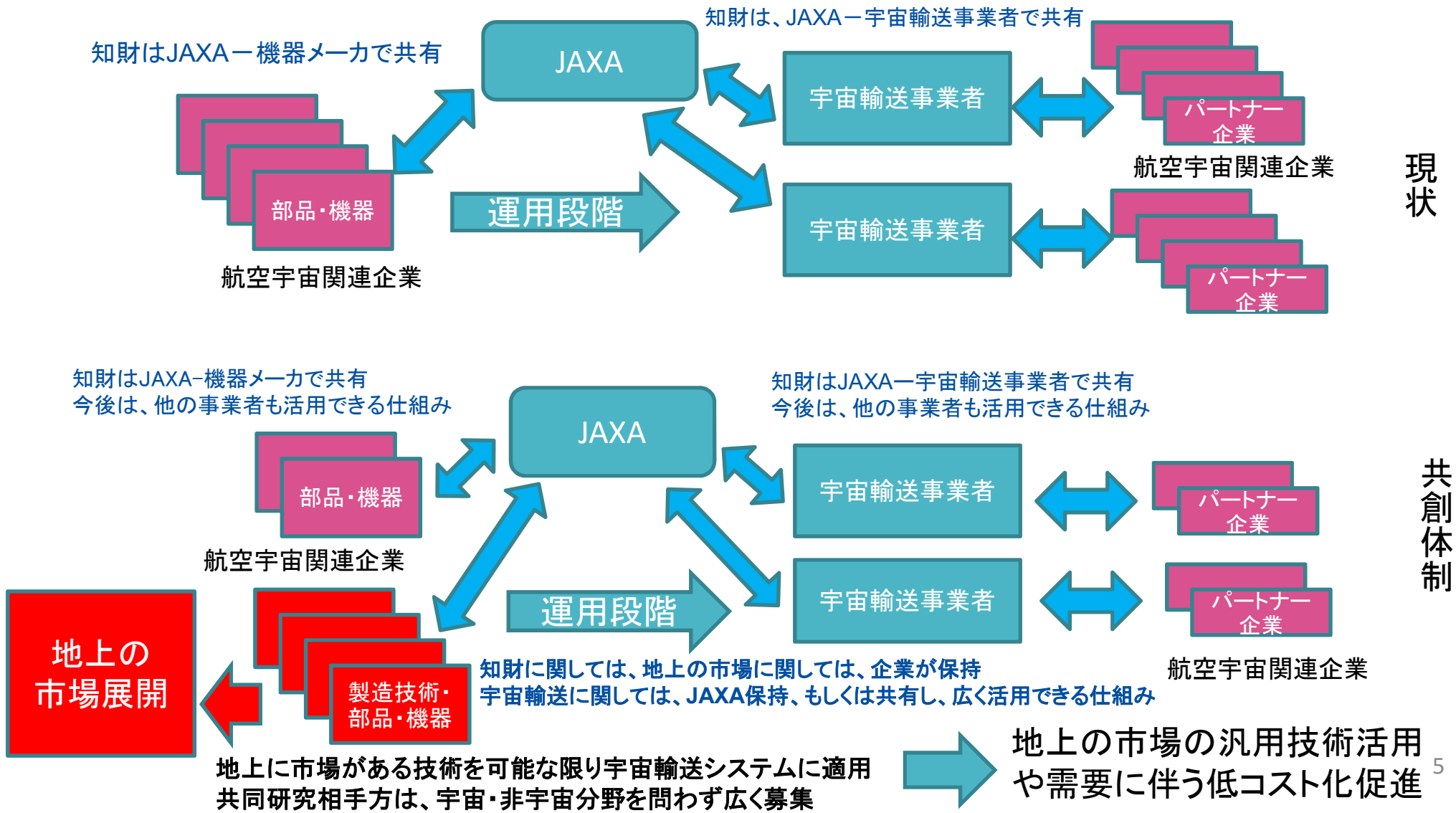
（1）オープンイノベーションでの共創体制について

革新的将来宇宙輸送システムの研究開発の共創体制案



オープンイノベーションによる共創体制の狙い

- 地上に市場がある技術（非宇宙企業が研究開発）の需要や低コスト性を生かしつつ研究開発によりスピンイン、低コスト化促進
- 宇宙輸送システム特有の高信頼性・厳しい環境条件・小型軽量など付加し、宇宙輸送事業者・非宇宙市場分野にスピンアウトし、市場価値向上



オープンイノベーションにおける共創体制と共同研究の違い

現状

- 共同研究契約
- 共同研究は、宇宙輸送システム適用に特化した研究
- 宇宙輸送特殊要求に基づく、技術を宇宙輸送システムに適用
- 共同研究相手方は唯一または他の相手方と比べ最適な者を研究者が選定（実態としては、これまで契約や協力の実績のある航空宇宙関連企業が多数）
- 部品材料に関して、ASTMなど航空宇宙仕様が原則
- 宇宙輸送システムに適用できる機器、部品を開発
- 知財に関しては、JAXA-航空宇宙関連企業（宇宙輸送事業者・機器メーカ）との共有➡共有知財は、研究開発目的の範囲で自由に利用できるが、他の事業者への活用が困難（共有相手の同意が必要）

共創体制

- 共同研究契約
- 共同研究は、地上の市場および宇宙輸送システム市場の2つ市場の活用が目的
- 地上に市場がある技術を可能な限り宇宙輸送システムに適用
- 共同研究相手方は、宇宙・非宇宙分野を問わず広く募集し、委員会で選定
- 部品材料に関して、車載部品、JIS規格など活用
- 宇宙輸送システム側で適用を工夫
- 知財に関しては、広く宇宙・非宇宙事業者に活用できる仕組みの確保

オープンイノベーションによる共創体制プロセス

地上の市場への参入も視野に入れた宇宙・非宇宙技術開発事業者

地上の市場へ

RFI／個別調査

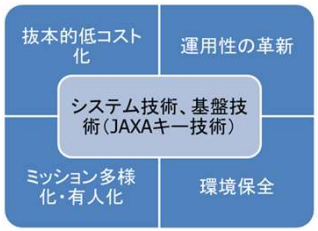
革新的宇宙輸送システムに必要な技術
（個別技術ロードマップ：抜本的低コスト化・再使用）

RFP要請

宇宙輸送事業者の要望集約
（基幹ロケット、ベンチャー）

選定委員会

技術マップによるJAXAが保持すべき技術の明確化



宇宙輸送事業者
（基幹ロケット、ベンチャー）

宇宙輸送市場へ

知財は原則非独占

JAXA共同研究開発／システム・飛行実証
（JAXA知財及び試験設備の活用）

RFP選定委員会は主に以下で構成
外部有識者･･･システム・技術の専門家　宇宙輸送含む
オープンイノベーションの外部専門アドバイザー（金融、コンサル他）
･･･地上ビジネスの活性化・デュアルユーティリゼーションの視点

連携する宇宙輸送事業者の明確化

参考）必要な革新的技術リストの例

- 開発スピード強化・開発費低減を実現するモデルベース開発技術

ユーザや競合他社の動向の変化への対応スピード強化や開発を低減するためにモデルベース開発技術をより一層推進

（例）サブシステム間インターフェースを適切にモデル化し、モデルベースによる部分検証、最終的な実験機による総合的な技術実証を実現する忠実度の高い物理モデル構築、デジタルツイン技術、シミュレーション技術

- 機体小型化・軽量化

再使用化において抜本的低コスト化を図るには機体小型化及び軽量化が必要不可欠（機体が大きくなると製造・運用コストは増加。また、軽量化できないと、打上要求に対して、機体は大型化。）

（例）部品数及び質量、サイズの最小化を目的にしたAM成型やニアネットCFRP一体成型を活用した設計技術、軽量な高推力かつ高比推力なエンジン設計技術

- 帰還フェーズの地上設備簡素化

再使用においては、これまでの打上げフェーズに加え、帰還、回収、再整備のプロセスが加わる。このため、新たに地上設備の付加が必要となることから、低コスト化のためには簡素化が必要不可欠。

（例）推薬消費を最小限にした帰還飛行・整備要素が少なく軽量な機体降着技術、衛星コンステレーションを活用したフライト中の安全確保技術など

- 機体再使用化・信頼性向上

再使用においては、これまでの打上げフェーズに加え、帰還、回収、再整備のプロセスが加わる。このうち、回収と再整備を低コスト化するために必要不可欠な技術。

（例）開発試験QTとフライト間点検・インフライトモニタ等による再使用性保証技術、ターボポンプの軸受・軸シール改良による長寿命化技術、帰還時を想定した自律飛行安全技術、着陸時の噴煙損失・振動などに対策を講じた機体通信技術、着陸時の衝撃及び遷音速時音響振動の緩和を目的とした機体設計技術

また、有人信頼性にも資する技術として、軽量なTPS製造技術，TPSと主構造の熱・強度配分を適正化するTPSシステム設計技術

参考）宇宙輸送及び民生用途で広く利用可能な技術の例

- 低コストでの宇宙輸送を実現する革新的宇宙輸送システムに貢献するとともに、民生用途としても広く応用可能な技術
  - 参考： 宇宙輸送システム特有の要求事項（目安） 低コスト、軽量、大気圧、表面温度（～約1000℃）、加速度（～約5G）、振動 等
- 技術案

中テーマ	狙い	小テーマ	関連キーワード
製造設計技術	新たな製造技術に対して、低コスト、品質維持及び軽量化を実現する最適製造設計	試作・評価	・DFAM、トポロジー最適化設計
製造技術	大型構造・精密部品の低コスト製造技術導入	低コスト中・大型構造製造技術	・ニアネット鋳造技術 ・CFRP一体成型技術 ・CFRP接着成型技術 ・大型3D造形技術 ・異形状タンク製造技術
		精密製造技術	・精密金属3D造形
熱・流体技術	宇宙輸送システム特有の要求に耐えうる新技術適用によりシステム全体を刷新	熱マネージメント技術	・再突入熱防護（材料） ・熱制御、熱輸送 ・耐熱センサ
		極低温液体製造・使用技術	・極低温流体蒸発率低減断熱材 ・部品・材料、接合方法 ・カーボンニュートラルメタン低コスト化
		極低温環境部品	・低コスト自緊シール ・電動バルブ用アクチュエータ ・温度・変位センサ ・液位計
液体エンジン低コスト化技術	地上産業技術活用によるエンジン製造費の低コスト化	軽量かつ低コストな部品	・極低温低コストソレノイドバルブ ・点火器 ・極低温複合材配管
搭載機器・アビオニクス	宇宙輸送システム特有の要求に耐えうる新技術適用によりシステム全体を刷新	電池	・高エネルギー密度 ・安全性
		通信	・地上－機体間通信 ・機体内無線通信 ・ワイヤレス電源／データ ・セキュリティ
		機構部品	・非火工品分離、低衝撃 ・摺動装置、潤滑部材 ・衝撃吸収・荷重干渉
		点検・異常/故障検知	・ヘルスモニタ(センサ/ロジック) ・故障診断・異常検知 ・画像による非破壊検査
点検・整備繰り返し使用	従来の使い切りシステムと要求が大きく異なる技術であり、適用可能技術を広く募集し低コスト化につなげる。	整備・補修	・構造体補修 ・耐熱塗布材 ・機体洗浄
		耐自然環境	・耐海水腐食 ・耐雨滴（材料/コーティング） ・風予測（地上風、高層風）

：低コスト化・軽量化製造技術及び再使用における組立・整備・点検の効率化技術

：使切りにも共通的な低コスト部品・材料・予測技術

（2）システム技術実証の進め方について

システム技術実証について、機体システムをインテグレーションする事業者をどのように選定するか。

例１．ステージゲート方式による競争的選抜（※）

ステージⅠ

（サブスケールレベルでのシステム実証（飛行実証含む））

ステージII

（フルスケールレベルでのサブシステムの技術実証（地上実証まで））

例２．JAXA含むALL-JAPANでの官民一体となった開発体制（官民企業等）

コスト低減を図りながら、将来宇宙輸送システムを確実に実現するには、どのような体制が適切か？

※ステージⅠ前の企画段階で、企業側の要望及びビジネスプランなどを踏まえながら、官需を含む政府のロードマップに反映、ベンチャーキャピタルなどの民間投資を促進する等。

※様々な技術を組み合わせて実現する宇宙輸送システムを開発する場合には、ユーザや競合他社の動向に左右されるため、官需及び民需の変化するボリュームゾーンや事業ターゲットに追随して研究開発内容も変化する。プロジェクトを成功させるには変化追従性（対応力）が重要であり、各ゲート／評価でプロジェクトを取捨選択するというより、評価により戦略や仕様などの変更が重要となる可能性がある。

※抜本的低コスト化という挑戦的なテーマに対し広い範囲から技術やアイデアを取り込んでいく観点から、優れた成果を上げた案件に対して懸賞金を支払うコンテストを設けることでイノベーションを加速する「アワード方式」の導入の可能性もある。

参考）NASA　商業乗員輸送開発の事例

- 目標
  - NASAの商業乗員輸送プログラム(CCP)は、国際宇宙ステーションと低地球軌道との間の安全で信頼性の高い費用対効果の高いアクセスを達成することを目標に、米国の商業乗員宇宙輸送能力の開発を容易にするために設立。

- バックグラウンド
  - CCPは、低軌道と国際宇宙ステーションとの間の輸送能力を設計し、開発している複数のアメリカ企業に投資。NASAは、人間の宇宙飛行能力の開発を支援することで、将来の商業輸送能力の基礎を構築。
  - 最終的には、安全で信頼性が高く、コスト効率の高い宇宙へのアクセスを確立することが目標。NASAの要件を満たすために輸送能力が認定されると、宇宙ステーションの乗組員のローテーションと緊急帰還の義務を満たすためにミッションを実施。
  - このプロセスを通じて、NASAと業界の両方がシステムの開発に時間、資金、リソースの投資を実施。NASAはまた、潜在的な新しい宇宙市場が創出されるにつれて、このプログラムを通じて経済成長の拍車に寄与。
  - このプログラムの取り組みを加速し、アメリカの人間の宇宙飛行能力のギャップを減らすために、NASAは宇宙法協定(SAA)で82億ドル以上を授与し、商業乗員統合能力(CCiCap)イニシアチブ、認定製品契約(CPC)、商業乗員輸送能力(CCtCap)の2つの商業乗員開発(CCDev)フェーズの下で契約を締結（次ページ参照）。
  - コマーシャルクループログラムは、主に打ち上げ場所であるフロリダ州にあるNASAケネディ宇宙センターに拠点を置いています。約200人がこのプログラムに参加しており、ヒューストンのジョンソン宇宙センターやアラバマ州ハンツビルのマーシャル宇宙飛行センターなど、他のNASAセンターでの作業にほぼ半数が関与。

ステージゲート方式により、5段階による選抜を行い、最終的に2社を選定。（次ページ参照）

参考）商業乗員輸送開発選定経緯

- CCDev 1
  - 第一段階の提案の採択。2010年に以下の5社が選定された。（総額50M$）
    - ブルーオリジン 3.7M$
    - ボーイング 18M$
    - パラゴン・スペース・デベロップメント 1.4M$
    - シエラ・ネヴァダ・コーポレーション 20M$
    - ユナイテッド・ローンチ・アライアンス 6.7M$

- CCDev 2
  - 第一段階の提案の採択。2011年4月18日に以下の4社が選定された。（総額270M$）
    - ブルーオリジン 22M$
    - ボーイング 92.3M$+20.6M$
    - スペースX 75M$
    - シエラ・ネヴァダ・コーポレーション 80M$+25.6M$
- CCiCap
  - CCDev 3相当、商業乗員統合能力 (CCiCap) は、提案の詳細の段階だった。2012年8月3日に以下の3候補が選定された。
    - ボーイング - CST-100 / アトラス V 460M$+20M$
    - スペースX - ドラゴン2 / ファルコン9 440M$+20M$
    - シエラ・ネヴァダ・コーポレーション - ドリームチェイサー / アトラス V 212.5M$+15M$

- 製品認証契約第1段階
  - 提案された製品の認証の第一段階。2012年12月10日に上記3候補が引き続き選定された。
    - ボーイング - CST-100 / アトラス V 9.9M$
    - スペースX - ドラゴン2 / ファルコン9 9.6M$
    - シエラ・ネヴァダ・コーポレーション - ドリームチェイサー 10M$
- 製品認証契約第2段階
  - 提案された製品の認証の第二段階。2014年9月16日に以下の2候補が選定された。
    - ボーイング - CST-100 / アトラス V 4.29B$
    - スペースX - ドラゴン2 / ファルコン9 2.6B$

（3）官民の役割分担について

（３）国の役割（官民の役割分担）

将来輸送システムを官民で開発し、官民双方のミッションを幅広く満たすシステムを構築する上では、研究開発段階及び運用段階で以下の点を念頭に置く必要がある。

【研究開発段階】
１．国と民間の研究開発費の分担（知財の持ち方にも係る）

２．官民の責任分担や研究開発の実施主体に留意しつつ、有人飛行等を含むリスクの高い研究開発については、国が引き続きリスクを取る必要があるのではないか。

３．我が国の宇宙輸送の自立性確保のために、国は引き続きキー技術を維持していく必要があるのではないか。（将来輸送システムで必要な技術を見極めた上で検討が必要）

【運用段階】
４．官需ミッションと民需のミッションの間で打上時期等でバッティングが生じた際の調整について（官需を優先するのか、それを担保するための方策が別途必要か）

５．機体システム以外のシステム（地上施設設備・打上安全管理）の主体、役割分担について（将来輸送システムの打上げ方式を見極めた上で検討が必要）

６．制度的障壁（法律、条約事項等）についての対応は将来輸送システムを開発する民間事業者から、官需、民需を含めた事業構想を聞き取り、予め官側において対応を検討する。（次ページ以降参照）

（４）国際認証等における制度障壁について

参考）米国法令における現状分析

- 米国では、FAA(Federal Aviation Administration, 連邦航空局)がパイロット・航空機・ロケット・飛行場・宇宙港などについて、licensesやcertificates等の申請受付や維持を担っている。
- FAAは宇宙に関連する項目については、**Public Safety（公衆安全）**に対してlicenseやcertificates等を適用しており、その対象には再突入運用や再使用機、有人も含まれる。
- 上記に関する法令はCFR(Code of Federal Regulation, 連邦規則集)に定められており、その中のTitle 14(以降14CFR) **PART 460に有人飛行に係る規定**がなされている。ここでは搭乗員の訓練やインフォームドコンセント、米国政府への損害賠償権放棄などを定めているが、技術的観点（有人機体の故障許容や安全率の要求など）は含まれていない。

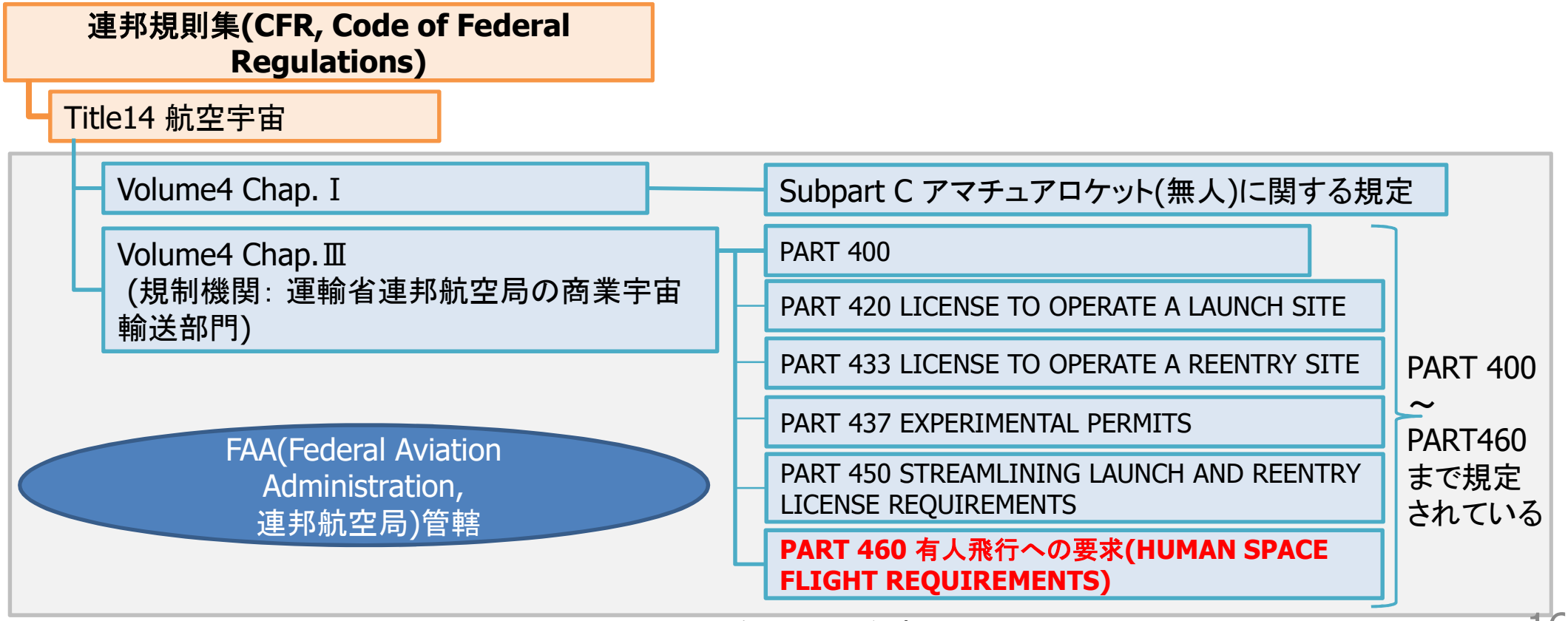
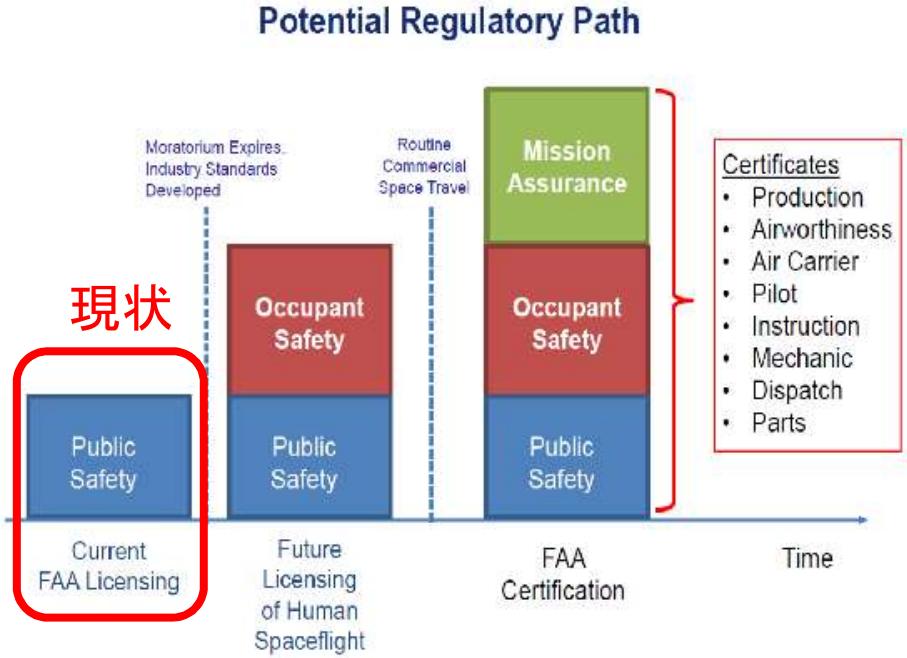


図. 米国法令とFAAの役割

参考）米国法令における今後の動向

- FAAは将来的に有人飛行のlicenseやcertificates等に関して、**搭乗員安全やミッション保証も含めた認証制度へと発展**していくことを想定している。



←出典：FAA
https://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/ast/advisory_committee/meeting_news/media/2016/apr/standards_working_group_report_mr_oscar_garcia.pdf

(以下、参考情報)

NASAの商業乗員輸送プログラム(Commercial Crew Program)要求・指導書（ISS有人輸送において、NASA、SPACE-Xは適用）を基に、将来的に政府が規則を制定する場合のたたき台として作成された"Recommended Practices for Human Space Flight Occupant Safety"が 2014年にFAAより参考資料として発行されているが、その中で設定を行っていない項目として識別されているのは以下の項目。

- 飛行参加者(Space flight participant)の医学的限界(医学的状態等の基準)
  ：リスクのインフォームと他者への脅威にならないことの確認を推奨する記載のみ
- 公衆安全と搭乗員(Occupant)の安全との統合化(関係性の整理)
  ：Future workとして識別
- 電離放射線(人体へのがんのリスクや子孫への影響)
  ： 長期に亘る健康への影響は対象外のため

参考）米国法令における現状分析-サブオービタル・P2P等-

【サブオービタル機】

- **サブオービタルに対しては、打上げと再突入に対する統合規定である14CFR PART 450が適用**される。
- 打上げ事業者が射場事業者も兼ねている場合には、射場に関するlicense(14CFR PART 420やPART433)も必要である。
- ただし、再使用型サブオービタル機の**研究開発目的**の打上げ・再突入については、**通常のlicenseとは異なり**、14CFRのPART 437に基づき審査・許可を行っており、experimental permitと呼ばれている。

【Experimental Permitについて】

- 新規仕様の再使用サブオービタル機の試験や搭乗者訓練等を実施しやすくするためのものであり、**licenseと比してより早期に、より少ない要求で許可を行う**制度である。なお14CFR PART 21の航空規定にある実験のcertificateに類似している。
- 対価や報酬のための財産や人を輸送してはならない。従って商業を目的として打上げ等を行う際は14CFR PART 450に従う。
- **1年間有効**であり、その期間中の特定のサブオービタル機体設計における**打上げ・再突入の実施数に対しての制約はない**。
- 本申請にあたっては、他に14CFRの申請手順(PART 413)、金融責任(PART 440)、搭乗員や飛行参加者がいる場合は(PART 460)等が適用される。

【P2P】

- 現状、**P2Pに関する規定は発行されていない**。米国でP2Pを運用するためのlicenseを取得した事業者はいない。