

資料14-2

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14回) R4. 3. 9

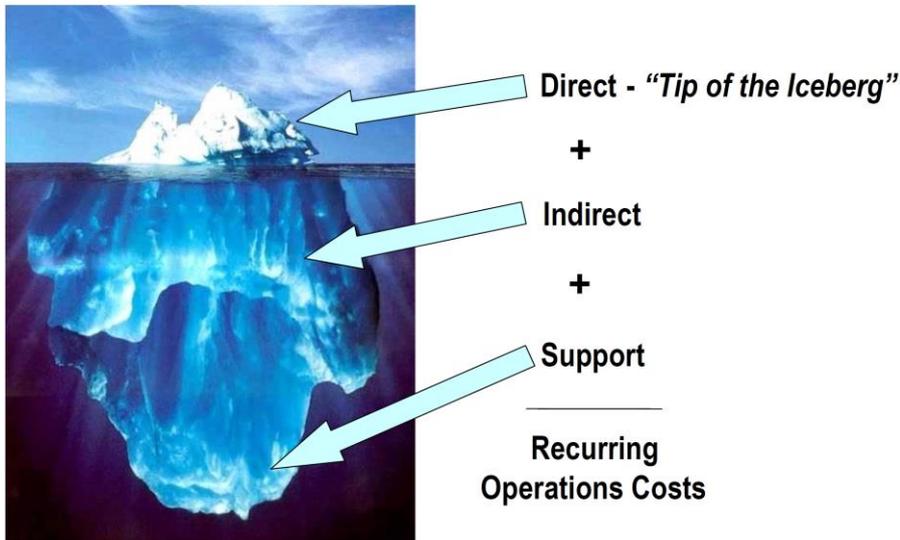
再使用型における点検整備・回収について -スペースシャトルの事例など参考-

令和4年3月9日

(国研)宇宙航空研究開発機構

スペースシャトルにおける点検整備 概要

- スペースシャトルの運用とインフラ -設計根本原因と影響のシステム分析-より抜粋
- 氷山は年間数十億ドル規模のコスト構造を示す。直接的に見える小さなコストの下には、はるかに大きな隠された間接的、固定的経費が存在。大きな間接的・固定的経費は、直接工数の作業を支え、打上作業など目に見える直接工数をより低減するために必要不可欠なものとなっている。
- この間接的、固定的経費は、信頼性の低いサブシステムの継続的な改良、安全やミッション保証のための解析や審査会対応などのために、多数の技術者を維持しなければならなかったものと思われる。(次ページ参照)



NASA/TP-2005-211519



Space Shuttle Operations and Infrastructure
A Systems Analysis of Design Root Causes and Effects

Carey M. McCleskey
Kennedy Space Center, Florida



スペースシャトル運用費全体像

■ 1994年のスペースシャトル運用予算の内訳(8回の飛行。最多は1985年の9回)

- 打上げや飛行後の機体整備などにかかる直接的な経費よりも、**計画・管理に分類される間接的・固定的な経費の割合が非常に大きい**(下表の赤枠: 全体の約44%)。

Generic Operations Function	FBS No.	Program Integration, Management Support, Institution & Network Support	Launch and Landing	Solid Rocket Motor (SRM) Project	External Tank (ET) Project	Orbiter Project and Logistics	Mission Operations	Solid Rocket Booster (SRB) Project	Space Shuttle Main Engine (SSME) Project	Crew Operations & Training	Launch Site Payload Support	Propellants (Cryos)	Total \$M FY94	Total (%)
Element Receipt & Acceptance	6.0	(A)	0.4	(A)	1.0	(A)	(A)	(A)	(A)	(A)	(A)	(A)	1.4	0.0%
Landing & Recovery	1.0	(A)	19.6	(A)	(A)	(A)	(A)	(A)	(A)	(A)	(A)	(A)	19.6	0.6%
Assembly & Integration	3.0/4.0	(A)	27.1	(A)	(A)	(A)	(A)	(A)	(A)	(A)	(A)	(A)	27.1	0.8%
Launch	5.0	(A)	51.5	(A)	(A)	(A)	(A)	(A)	(A)	(A)	(A)	(A)	51.5	1.5%
Offline Payload/Crew Processing	9.0	(A)	(A)	(A)	(A)	40.2	(A)	(A)	(A)	(A)	35.7	(A)	75.9	2.3%
Flight Element Turnaround	2.0	(A)	112.3	(A)	(A)	(A)	(A)	(A)	(A)	(A)	(A)	(A)	112.3	3.3%
Traffic/Flight Control	8.0	72.3	49.4	(A)	(A)	(A)	77.7	(A)	(A)	(A)	(A)	(A)	199.4	5.9%
Vehicle Depot Maintenance	7.0	(A)	1.5	(A)	(A)	108.3	0.0	53.7	74.0	(A)	(A)	(A)	237.5	7.1%
Spaceport Support Services	10.0	0.2	147.9	(A)	76.8	(A)	93.7	(A)	(A)	(A)	(A)	(A)	318.6	9.5%
Concept-Unique Logistics	11.0	0.9	0.7	337.0	263.6	177.8	(A)	46.2	(A)	(A)	(A)	16.5	842.7	25.1%
Transp. Sys. Ops Planning & Mgmt	12.0	848.7	209.1	67.2	31.0	25.0	121.2	52.1	51.3	71.8	(A)	(A)	1477.4	43.9%
Total (\$M FY94)		922.1	619.5	404.2	372.4	351.3	292.6	152.0	125.3	71.8	35.7	16.5	3363.4	100.0%
Percent		27.4%	18.4%	12.0%	11.1%	10.4%	8.7%	4.5%	3.7%	2.1%	1.1%	0.5%	100.0%	

(A) Costs for these items were found to be either negligible or not separately identified in the budget breakdown. Some budgeted items may be accounted for in other items.

Space Shuttle Hardware Flow

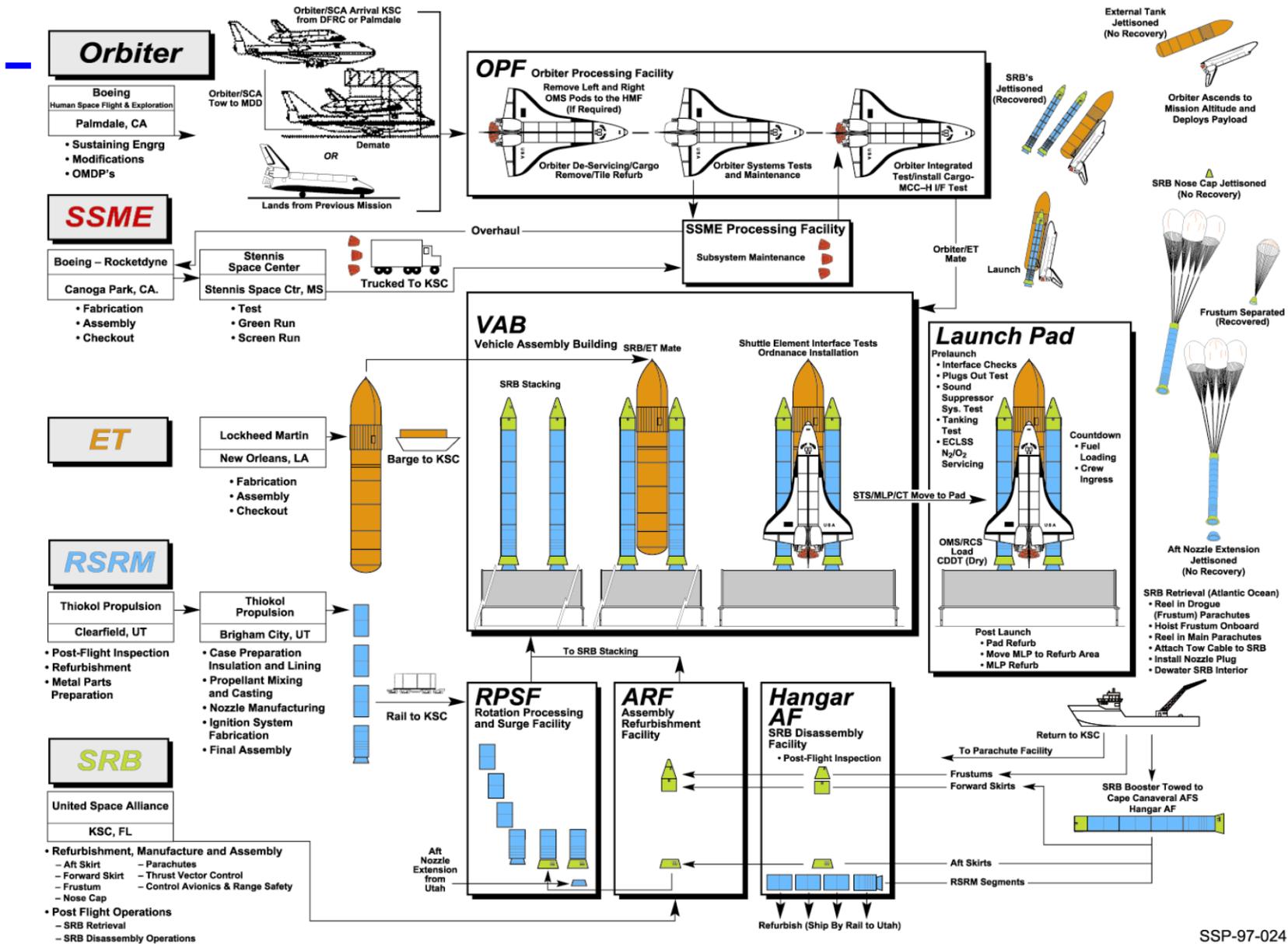


Figure 2. Space Shuttle Ground Processing Operations (ca. 1997)

プロセス毎の分析

- フライト部位の再整備作業が打上から再打ち上げ作業のうち全体の約56%を占めている。
- 再整備作業のうち、計画外のトラブルシューティングと修理のカテゴリで、総計29.56%を占め最大。このカテゴリの内訳は、サーマルプロテクションタイル作業が30%、システムコンポーネント、またはライン交換可能ユニット(LOU)のトラブルシューティングと交換作業が22%を占める。推進系および電気系、その他のシステムのトラブルシューティングと交換作業で残りの半分を占める。

Concentration of Space Shuttle Direct Work Content for 1997 Launches
(As measured by cumulative task-hours for eight processing flows)

		GENERIC DESIGN DISCIPLINE												Total (Task-hours)	Percentage	
		Structures, Mechanisms and Vehicle Handling	Liquid Propulsion	Thermal Management	Power Management	Safety Management & Control	Ground Interfacing Systems and Facilities	Payload Accommodations	Environmental Control and Life Support	Command, Control & Health Management	Communications	Guid, Nav & Ctl	Cockpit & Crew Cabin			
		ID	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11			12
GENERIC OPERATIONS FUNCTION	Flight Element Turnaround	A	57,843	33,606	42,514	30,025	17,318	5,825	11,894	13,632	3,703	3,159	1,888	1,729	223,136	55.98%
	Launch (C)	B	8,870	12,965	44	4,638	9,429	19,388	2,841	627	5,289	(A)	289	410	64,790	16.26%
	Flight Element Assembly (D)	C	39,718	9,085	2,691	427	317	613	173	221	3,343	292	301	(A)	57,181	14.35%
	Vehicle Integration	D	22,523	5,370	1,244	4,927	6,051	3,035	1,348	57	1,341	(A)	(A)	40	45,936	11.53%
	Flight Element Shipping, Receiving & Acceptance	E	5,303	1,558	100	54	(A)	72	(A)	(A)	32	(A)	(A)	(A)	7,119	1.79%
	Landing & Recovery	F	(B)	(B)	(B)	(B)	(B)	(B)	(B)	(B)	(B)	(B)	(B)	(B)	402	0.10%
	Total (Task-hours)		134,257	62,584	46,593	40,071	33,115	28,933	16,256	14,537	13,708	3,451	2,478	2,179	398,564	100.00%
Percent		33.69%	15.70%	11.69%	10.05%	8.31%	7.26%	4.08%	3.65%	3.44%	0.87%	0.62%	0.55%			

再整備(ターンアラウンド)作業分析

Table 8. Summary of Shuttle Orbiter Turnaround Work Content

Concentration of Space Shuttle Orbiter Turnaround Direct Work Content for 1997 Launches (As measured by cumulative task-hours for eight processing flows)			Generic Design Discipline											Grand Total	Percentage		
			Structures, Mechanisms, Veh Handling	Thermal Management	Propulsion	Power Management	Safety Management & Control (B)	Environmental Ctl & Life Spt	Payload Accommodations	Ground Systems & Facilities	Cmd, Ctl & Health Mngmt	Communications	Guid, Nav & Ctl			Cockpit & Crew Cabin	
FBS ID			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12			
Generic Operations Function	Turnaround Unplanned Troubleshooting and Repair	2.08	A	17,659	23,448	4,652	13,791	353	833	6	916	2,004	804	1,165	327	65,958	29.56%
	Vehicle Element Systems Servicing	2.04	B	11,284	12,579	8,429	8,880	283	2,656	424	4	829	112	155	931	46,566	20.87%
	Processing Support Systems and Functions (B)	2.07	C	1,075	24	7,252	304	13,454	7,137	(A)	2	25	48	10	48	29,379	13.17%
	Turnaround Inspection and Checkout	2.05	D	8,762	2,659	6,687	3,907	2,580	1,450	125	(A)	663	1,276	494	292	28,895	12.95%
	Vehicle Payload Accommodations Turnaround	2.06	E	5,106	1,687	(A)	69	18	431	11,210	5	9	8	(A)	115	18,658	8.36%
	Turnaround Facility and Equipment Periodic Maintenance	2.11	F	3,105	(A)	2,128	74	40	520	(A)	4,380	2	(A)	(A)	(A)	10,249	4.59%
	Removal of Access, Umbilicals and Closeout	2.10	G	5,219	1,534	971	36	438	32	102	(A)	(A)	141	(A)	(A)	8,473	3.80%
	Modifications and Special Tests	2.09	H	2,224	397	1,093	1,821	(A)	40	4	2	171	752	42	16	6,562	2.94%
	Vehicle Positioning, Connection to Services, Gaining Access, and Protection	2.02	I	2,769	186	1,065	116	17	189	23	120	(A)	18	22	(A)	4,525	2.03%
	Vehicle Element Safing	2.03	J	346	(A)	1,245	462	119	98	(A)	(A)	(A)	(A)	(A)	(A)	2,270	1.02%
	Facility Preps for Vehicle Turnaround	2.01	K	294	(A)	84	565	16	246	(A)	396	(A)	(A)	(A)	(A)	1,601	0.72%
Total (Task-Hours)			57,843	42,514	33,606	30,025	17,318	13,632	11,894	5,825	3,703	3,159	1,888	1,729	223,136	100.00%	
Percent			25.92%	19.05%	15.06%	13.46%	7.76%	6.11%	5.33%	2.61%	1.66%	1.42%	0.85%	0.77%	100.00%		

(A) System disciplines not showing dedicated concentrations of direct work. This should not be interpreted that no direct work occurs. Some of the tasks involving the design discipline may have been identified, for the purposes of this analysis, as being dominated by another discipline. Proper interpretation is that these items have no identifiable direct work concentrations relative to the total annual direct work content.

(B) A large contributor to the work accumulated in cell (C5) of the table is due to Orbiter/OPF purge circuit monitoring. While the task-hours accumulated are large, it should be noted that this work involves very little labor.

再整備（ターンアラウンド）の作業毎分析

- STS-81～87、STS-94の計8機の再整備作業毎の作業時間を分析。
- 同じ作業をしても、構造・機構系インテグレーション以外は、作業時間が大きくばらついている。
- これは、号機毎に再整備（交換や修理など）に必要な作業が異なっていることが大きな要因と推定される。

最も時間のかかった上位9項目を以下に記す。

項目	最短時間	最長時間
-構造、機構関連再整備	4,512 Hr	12,532 Hr
-熱制御系再整備	2,498	8,916
-構造、機構系組み立て	4,463	5,321
-液体推進系再整備	2,158	6,550
-電力制御系再整備	1,978	9,533
-構造、機構系インテグレーション	2,339	3,715
-地上設備打ち上げ作業	671	4,553
-飛行安全系再整備	905	3,628
-環境制御・生命支援系再整備	735	3,706
総計	37,347	73,151

Table 7. Space Shuttle Eight-Flow Direct Work Concentration

Operations Functions Associated with Design Disciplines (Table 6 Cells in Descending Order)			Eight (8) Flow Analysis Statistical Summary (Values in Cumulative Task-Hours)												
Table 6 Cell ID	Operational Functions for Generic Design Disciplines	Eight Flow (1997) Total	(OMDP)								Eight (8) Flow Min	Eight (8) Flow Max	Normal Flow Avg	Normal Flow Std Dev	Normal Flow 90% Conf Interval
			STS-81	STS-82	STS-83	STS-84	STS-85	STS-86	STS-87	STS-94					
A1	Structures, Mechanisms and Handling Systems Turnaround	57,843	5,850	12,532	6,211	6,340	8,781	5,057	8,560	4,512	4,512	12,532	6,473	1,633	1,015
A3	Thermal Management Systems Turnaround	42,514	3,674	8,916	2,498	4,590	8,138	5,070	5,544	3,409	2,498	8,916	4,703	1,837	1,142
C1	Structures, Mechanisms System Assembly and Flight Element Handling	39,718	4,828	4,857	5,063	5,195	5,321	4,893	5,098	4,463	4,463	5,321	4,980	283	176
A2	Liquid Propulsion Systems Turnaround	33,606	3,408	4,389	6,350	3,654	6,550	2,871	4,446	2,158	2,158	6,550	4,205	1,687	1,049
A4	Power Management Systems Turnaround	30,025	3,721	9,533	3,173	2,396	3,083	1,978	3,992	2,392	1,978	9,533	2,962	743	462
D1	Structures, Mechanisms System Assembly and Vehicle Integration Handling	22,523	2,791	2,988	3,015	3,715	2,751	2,339	2,502	2,478	2,339	3,715	2,799	464	288
B6	Ground Interfacing Systems and Facilities for Launch Operations	19,388	2,792	4,553	1,218	671	2,011	2,010	4,130	2,015	671	4,553	2,121	1,114	692
A5	Safety Management & Control Systems Turnaround	17,318	1,732	905	2,930	2,188	3,628	1,863	3,037	1,467	905	3,628	2,406	800	498
A8	Environmental Control and Life Support Systems Turnaround	13,632	808	3,706	1,881	735	1,919	1,546	1,941	1,296	735	3,706	1,418	494	307

運用とインフラのコスト増大要因(1)

- トップレベル設計根本原因を以下に抜粋した。
- 予期しないトラブルシューティングと修理
 - 飛行および地上システムの信頼性(すなわち、ハードウェア設計寿命と飛行要素の信頼性は、部品総数に関連して)。
 - 飛行および地上システムの複雑さ
 - 飛行安全目標、地上の安全と保守性のバランスをとるための効果的な手段の欠如
 - 設計是正措置と継続的改善を実施するための効果的な手段の欠如
- 複雑な組立、取り扱い、アクセス、および結合
 - フライト機体毎に、射点に装着されるサブシステムとコンポーネントの数が多い
 - 組み立てられたフライト機体のインターフェイスの数と複雑さ
 - 再利用可能なフライトモジュールについて再組立・構成を必要とするコンポーネントが多数、高頻度(SSME、OMS/RCSポッドなど)。
 - 組立てとアクセスを要する1回使用品や寿命制限部品の数が多い
 - 頻繁に発生する再組立作業、地上組立作業の増加

運用とインフラのコスト増大要因(2)

■ フライトシステムサービス

- 機体と地上の特別なインターフェイスを必要とする異なる流体の数と種類
- 定期的な除去、交換、および機能検証を必要とする期間限定アイテムの数 など

■ 実証済みのシステムの信頼性の欠如と機能検証作業

- 実証された運用信頼性の欠如
- 宇宙輸送システムのオペレーティング環境に対する固有の信頼性の欠如を克服するための設計上の過剰な冗長化(機能検証作業が増大)
- 機能検証を必要とする重要なフライト機能の数
- フライトシステム、地上システムともに、自動化されているものが少ない など

■ 過剰設備設備の整備と改修

- 地上システムの信頼性
- 頻繁な、定期的な打ち上げ環境に耐えるために地上打上システムの設計寿命の欠如。
- 地上の安全と保守性のバランスを取るための効果的な手段の欠如 など

運用等コスト増大要因が発生した課題のまとめ

『Space Shuttle Integration Lessons Learned』, Bo Bejmuk, Boeingより抜粋

■ 運用段階におけるコストドライバー

- 開発段階での運用要件の定義が不十分
 - 性能要件に集中するが、運用上の考慮事項はなかった
 - 運用コストに対して責任を負わない設計開発組織であった
 - 開発請負業者に対するインセンティブはごくわずかであった
- 複雑であり、多機能を有し、劣化していく機体の再利用コスト
 - すべての機能も監視する必要がある、不具合で壊滅的な事象を回避するために管理
 - 複雑なシステムの老朽化の再利用性は、性能と安全性を維持するために、常に十分な注意する必要
 - 複雑な紙システムは、あまりにも多くの組織によって「見られ」、操作のすべてのステップを支配

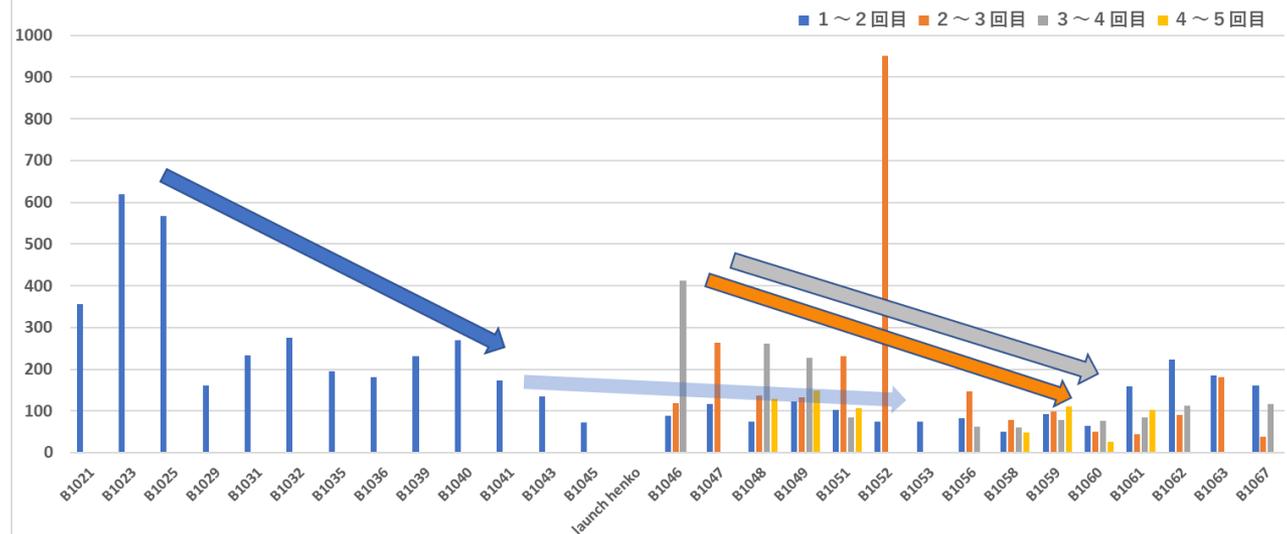
■ Lessons Learned

- 運用のコンセプトが開発前に定義されている必要がある
- 事業コンセプトをサポートする請負業者の要件を課す
- 開発段階で、設計者、地上操作、および飛行運用要件の間に継続性と統合が必要
- 複雑性により飛行運用コストが生み出される⇒ 複雑さを最小限に抑える
- 手動作業により、運用コストが増大⇒ 自動化の最大化
- 開発前の運用寿命を現実的に定義

スペースX社1段再使用における再整備期間の事例

- スペースX社のFalcon9は、打上運用の中で、再使用の1回目打上、2回目打上、3回目打上に対して、Merlinエンジンの性能向上や改良を実施しつつ、点検整備の改善を行い、徐々に再打上げまでの期間の短縮化
- SpaceXは、運用における想定外事象、補修などを前提に、信頼性を確保しつつ、実運用を通じて、経験と改善を繰り返すベストプラクティスを実践
- 現在では、1回目の再使用(再打上げ)は、356日から最短26日まで短縮化を実現。
- **日本においては、再使用の経験が乏しく、再使用の技術蓄積を得る飛行試験場や回収方策の構築が急務**

Falcon9のブースタ毎の再打上げ間隔日数

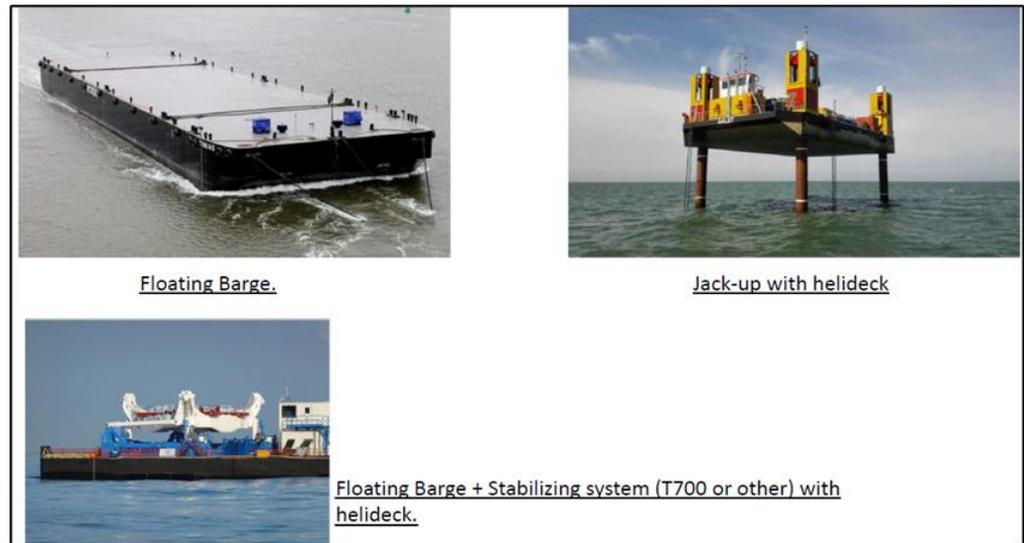


回収方策

- 経済性(打上能力)を最大化する海上回収が世界的な流れとなっている。
 - SpaceXは海上回収を実施し、回収船を整備(すでに機能向上した3式目を運用)
 - Blue Originは、海上回収を行う回収船の整備を計画中
 - 欧州においても海上回収を計画中



Space-Xの回収船



CNES回収検討例