



JERG-0-002-HB002

スペースデブリ発生防止対策 設計・運用マニュアル
(ロケット編)

平成29年8月25日 制定

宇宙航空研究開発機構

免責条項

ここに含まれる情報は、一般的な情報提供のみを目的としています。JAXA は、かかる情報の正確性、有用性又は適時性を含め、明示又は黙示に何ら保証するものではありません。また、JAXA は、かかる情報の利用に関連する損害について、何ら責任を負いません。

Disclaimer

The information contained herein is for general informational purposes only. JAXA makes no warranty, express or implied, including as to the accuracy, usefulness or timeliness of any information herein. JAXA will not be liable for any losses relating to the use of the information.

発行

〒305-8505 茨城県つくば市千現 2-1-1

宇宙航空研究開発機構 安全・信頼性推進部

JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency)

目次

1. 目的.....	1
2. 関連文書と解析ツール等.....	2
2.1 技術標準.....	2
2.2 設計標準.....	2
2.3 その他関連文書及び解析ツール.....	2
2.3.1 全般.....	2
2.3.2 デブリ分布状態の把握.....	2
2.3.3 軌道寿命の予測.....	2
2.3.4 再突入残存解析.....	3
2.4 海外参考文献.....	3
3. デブリ対策要求へのシステム設計レベルでの対応.....	3
3.1 部品放出抑制策.....	4
3.1.1 概要.....	4
3.1.2 対策フロー.....	4
3.1.3 分離物体の識別と設計対策.....	5
3.2 破砕防止策.....	5
3.2.1 概要.....	5
3.2.2 対策フロー.....	7
3.2.3 破砕源の識別.....	7
3.2.4 設計対策.....	7
3.2.5 運用中の監視及び破砕防止処置.....	8
3.3 運用終了後の保護軌道域からの排除.....	8
3.3.1 概要.....	8
3.3.2 対策フロー.....	9
3.3.3 廃棄操作機能の付与.....	10
3.3.4 低軌道ミッションの場合の廃棄操作.....	10
3.3.4.1 廃棄方法の選択.....	10
3.3.4.2 軌道寿命の確認.....	10
3.3.4.3 廃棄計画.....	11
3.3.5 静止遷移軌道打ち上げミッションの場合の廃棄操作.....	11
3.3.6 静止軌道近傍からの直接投入の場合の廃棄操作.....	11
3.3.7 その他の超楕円軌道からの投入の場合の廃棄操作.....	11
3.4 再突入時の地上安全の確保.....	11
3.4.1 概要.....	11
3.4.2 対策フロー.....	12
3.4.3 再突入被害防止措置.....	13
3.4.3.1 被害の予測.....	13
3.4.3.2 設計対策- 熔融性の改善.....	13
3.4.3.3 設計対策- 再突入制御機能設計.....	14
3.4.4 落下通報.....	14
3.4.4.1 自然落下の場合.....	14
3.4.4.2 再突入制御の場合.....	14
3.4.5 監視及び緊急処置.....	14
3.5 有人システムとの衝突回避策.....	15

3.5.1	概要	15
3.5.2	運用対策	15
3.6	信頼性・品質保証	15
4.	ライフサイクルの各フェーズにおける管理	16
4.1	基本概念	16
4.2	概念検討フェーズにおける管理 (pre-phase A)	19
4.2.1	概論	19
4.2.2	デブリ関連作業	19
4.3	概念設計フェーズにおける管理 (phase A)	19
4.3.1	概論	19
4.3.2	デブリ関連作業	19
4.4	計画決定フェーズ (予備設計フェーズ phase-B)	20
4.4.1	概論	20
4.4.2	作業プロセス	20
4.5	設計フェーズにおける管理 (phase C)	20
4.5.1	設計フェーズでの配慮事項の例	20
4.5.2	前提条件	21
4.6	製作・試験フェーズにおける管理 (開発完了) (phase D)	21
4.6.1	開発の完了に向けた配慮事項	21
4.6.2	認定審査 (開発完了審査)	21
4.7	運用フェーズにおける管理 (phase E)	22
4.7.1	射場整備作業	22
4.7.2	飛行中の監視	22
4.8	廃棄フェーズにおける管理 (phase F)	22
4.8.1	実施内容	22
4.8.2	飛行後評価	22
5.	システム・レベルの配慮	23
5.1	ロケットのシステム設計	23
5.2	号機毎のミッション解析	23
6.	サブシステム/コンポーネント設計と運用	24
6.1	総則	24
6.2	デブリ関連技術と影響を受けるサブシステム	24
6.3	推進 (誘導制御用スラスタを含む) サブシステム	26
6.3.1	設計時に配慮すべきデブリ対策	26
6.3.2	推進系への対策	26
6.3.2.1	放出物の抑制	26
6.3.2.2	破砕防止	26
6.3.2.3	保護軌道域からの排除	26
6.3.2.4	再突入地上安全	27
6.3.3	機器設計上の配慮事項	27
6.3.3.1	液体ロケット式主エンジン	27
6.3.3.2	ガスジェット・スラスタ等補助推進系	27
6.3.3.3	推進薬タンク設計	27

6.3.3.4	高圧容器設計	28
6.3.3.5	バルブ、配管設計	28
6.3.3.6	エンジン・コントロール・アビオニクス	28
6.3.3.7	その他留意すべき事項	28
6.3.4	固体モータ	28
6.4	誘導制御系サブシステム	29
6.4.1	設計時に配慮すべきデブリ対策	29
6.4.2	誘導制御系への対策	29
6.4.2.1	保護軌道域からの移動	29
6.4.2.2	地上安全の確保（落下区域制御）	29
6.5	電源系サブシステム	30
6.5.1	設計時に配慮すべきデブリ対策	30
6.5.2	電源系への対策	30
6.5.2.1	破砕防止	30
6.5.2.2	保護軌道域からの排除	30
6.5.2.3	地上安全の確保	30
6.5.2.4	再突入制御	30
6.5.3	機器設計上の配慮事項	30
6.5.3.1	バッテリーの設計	30
6.5.3.2	電力制御／分配器、ケーブルの設計	31
6.6	通信系サブシステム	31
6.6.1	設計上配慮すべきデブリ対策	31
6.6.2	破砕防止	31
6.6.3	保護軌道域からの排除	31
6.6.4	再突入制御時の通信リンクの確保	31
6.6.5	再突入制御時の通信下限高度	31
6.6.6	機器設計上の配慮（電子機器の対応）	32
6.7	構造サブシステム	32
6.7.1	設計上配慮すべきデブリ対策	32
6.7.2	構体設計への配慮	32
6.7.2.1	デブリ放出の防止	32
6.7.2.2	落下時地上安全保障のための適正材料の選択等	32
6.7.3	機器設計上の配慮	32
6.7.3.1	構造サブシステム（構体、展開・分離機構等）	32
6.7.3.2	ダミーマス	32
6.8	指令破壊系サブシステム	32
6.8.1	設計で配慮すべきデブリ対策	32
6.8.2	破砕防止対策	33
6.8.2.1	ミスコマンドによる破砕の防止	33
6.8.2.2	爆破線の太陽加熱による破砕の防止	33

1. 目的

本書は「スペースデブリ発生防止標準(JMR-003)C版」の要求に合致するためにシステム・エンジニア、サブシステム・機器設計者、ロケット運用者がとるべき対策を整理したものである。

- (1) デブリ対策に係る、要求事項、勧告などを識別する。
- (2) それらの要求事項、勧告を満足させる方法を決定する。
- (3) 適用するデブリ対策を開発・製造ライフサイクルの早期に適用する。
- (4) デブリ低減要求に合致させるために、適切な信頼性・品質保証プログラムを適用すること。

本書は以下で構成される。

- (1) 第二章: デブリ対策を要求する文書類、設計・運用を支援する文書類及び解析ツールの紹介
- (2) 第三章: デブリ対策要求の趣旨説明と具体的設計・運用作業への反映事項、
- (3) 第四章: 開発ライフサイクルの各フェーズで遅滞なく配慮すべき設計・運用対策事項
- (4) 第五章: 質量配分や推進薬配分等システム設計上の配慮事項、
- (5) 第六章: 対策機能の各サブシステムへの配分及びその構成機器に要求される対策事項

表1-1にJMR-003C「スペースデブリ発生防止標準」の第5項が要求する設計・運用対策の概略を示す。詳細はJMR-003Cあるいはその解説書(JERG-0-002)を参照されたい。

表1-1 JMR-003C「スペースデブリ発生防止標準」の設計・運用対策要求の概略
(注:ロケットに適用しない要求は除外)

		低減策	JMR-003Cの要求の概要(宇宙機への要求を含む)
中 運 用 放 出 品		部品類放出抑制	部品類を放出しない。
		固体モータ残渣物	静止軌道には放出しない。 低軌道についても配慮する。
		火工品	燃焼生成物(1mm以上)を放出しない。
軌 道 上 破 砕		破壊行為禁止	破壊行為を意図的に実施しない。
		運用中の事故	偶発的破砕発生率が 10^{-3} を超えない
		運用終了後の爆発の防止	運用終了後に残留する潜在的破砕エネルギー源を除去するか、設計手段で爆発・破裂を防止する。(残留推進薬放出、圧力容器の破裂防止設計など)
衝 突	有人システムとの衝突回避	打上げ後、既定期間はロケット軌道投入機体及びペイロード、並びにその他の放出物が、運航軌道・位置が明確な有人システムと衝突しないように、打上げ時刻を調整する。	
定 常 運 用 終 了 後 の 処 置	静 止 衛 星 打 上 げ ミ ッ シ ョ ン	GTO と静止軌道保護域及び低軌道保護域との干渉回避	GTO の遠地点高度は静止軌道より200 km以上低くする。 近地点高度は軌道寿命25年以下になるように設定する。 (あるいは近地点高度を低軌道保護域より高く設定する。) (条件付き成功確率 > 0.9)
		静止衛星直接投入(静止軌道近傍の円軌道にてペイロードを分離する)の場合の静止軌道保護域との干渉回避	運用終了後に以下のように静止軌道より遠ざける。 ・235 km+ (1,000・Cr・A/m)に相当する高度 ・離心率 < 0.003 ・条件付き成功確率 > 0.9 ・100 年間不干涉
	低 軌 道 ミ ッ シ ョ ン	低軌道保護域からの除去	軌道寿命を25年以内とする。 (あるいは低軌道保護域より高く移動する方法もあるが推奨されていない。) (条件付き成功確率は0.9以上)
		再突入時地上安全	再突入物体の傷害予測数が目標値を超えないようにする。

上記を満足するためには、システム設計、サブシステム設計、機器設計の中で対処することになるが、ミッション要求、システム構成、プロジェクト資金などに大きな影響を与える判断については早期に方針を定め、ミッション要求の定義、システムの定義のフェーズに間に合わせる必要がある。

本書で扱うデブリ対策は以下で構成される。

- (1) 各段機体においてデブリ対策が可能になるシステム構成(軌道投入機体がデブリ低減要求に遵守できる構成とする。)
- (2) 部品類放出規制(部品の放出抑制、破砕防止を含む)
ミッション目的が軌道環境へ悪影響を与えないか評価し、問題があればミッション要求の分析及び定義の段階で、改善を提言することが望ましい。
- (3) 定常運用終了後の廃棄方法
運用を終了した低軌道宇宙機及びロケットは低軌道保護域(高度2,000 kmの高度範囲)あるいは静止軌道保護域(静止軌道高度±200 km)と干渉しないように移動することが求められる。
- (4) 再突入地上安全
廃棄の結果として再突入する宇宙機及びロケットについては、その傷害予測数を目標値以下にするか、落下破片の地上分散域を制限して再突入させることが望まれる。後者には多量の推進薬、推進系機器、制御系機器への機能要求が必要になる。
- (5) 打上げ時の有人システムとの衝突回避
打上げ後、既定期間はロケット軌道投入機体及びペイロード、並びにそれらからの放出物が、運用軌道、位置及び移動計画が明確な有人システムと衝突しないように、打上げ時刻を調整することが求められている。
- (6) 信頼性、品質及び安全保証
デブリ発生防止設計・運用は、信頼性、品質、安全性の保証が基本となっている。破砕事故の多くが信頼性・品質の不足から生じているように、この基本が保証されて初めて、デブリ対策設計・運用は有効なものとなる。

2. 関連文書と解析ツール等

2.1 技術標準

- (1) JMR-003:スペースデブリ発生防止標準
- (2) 「ロケットによる人工衛星等の打上げに係る安全対策の評価基準」、平成28年6月14日、科学技術・学術審議会 研究計画・評価分科会 宇宙開発利用部会

2.2 設計標準

- (1) JERG-0-002:スペースデブリ発生防止標準解説書
- (2) JERG-0-047:再突入機の再突入飛行に関わる技術基準
- (3) JERG-1-011B:人工衛星等打上げ用ロケットの飛行安全に関する基本要

2.3 その他関連文書及び解析ツール

2.3.1 全般

- (1) DEMIST デブリ評価支援ツール(JAXA研究開発部門第二研究ユニットが維持管理)
- (2) NASA-DAS (Debris Assessment Software) (<http://orbitaldebris.jsc.nasa.gov/mitigate/das.html>)
- (3) 同上利用マニュアル(JSC 64047: Debris Assessment Software User's Guide Version 2.0)
- (4) ESA-DRAMA (Debris Risk Assessment and Mitigation Analysis) (<https://sdup.esoc.esa.int>)
注: (<https://sdup.esoc.esa.int>)にてアカウントを取得し、ダウンロードに必要なライセンスを得る。
- (5) CAA-116012 DRAMA取扱説明書
- (6) JAXA-GEF-07001 UNCOPUOSデブリ低減ガイドラインと解説

2.3.2 デブリ分布状態の把握

- (1) ESA-MASTER (Meteoroid and Space Debris Terrestrial Environment Reference) -2009注:ESAのURL「<https://sdup.esoc.esa.int>」にてアカウントを取得し、ダウンロードに必要なライセンスを得る。あるいは安全・信頼性推進部のデブリ担当よりCD-ROMの貸与を受ける。
- (2) CAA-112001A: MASTER2009取扱説明書
- (3) NASA ORDEM (Orbital Debris Engineering Model) -3

2.3.3 軌道寿命の予測

- (1) 軌道寿命予測ツール(JAXA追跡ネットワーク技術センターが維持管理及び処理支援)

- (2) CAA-115024: 軌道寿命解析ツールプログラム解説書及び取扱説明書
- (3) DAS2 (NASA Debris Assessment Software version 2)
(<https://orbitaldebris.jsc.nasa.gov/Mitigation/das.html>)
- (4) CNES-STELA (Semi-analytic Tool for End of Life Analysis Software)
(<https://logiciels.cnes.fr/content/stela?language=en>)
- (5) CAA-116011 STELA取扱説明書
- (6) ESA-DRAMA-OSCAR (Orbital Spacecraft Active Remopval)
- (7) DEMIST デブリ評価支援ツール(JAXA研究開発部門第二研究ユニットが維持管理)

2.3.4 再突入残存解析

- (1) ORSAT-J 再突入溶融残存性解析ツール(JAXA安全・信頼性推進部維持管理)
- (2) CAA-116021 同上 取扱説明書
- (3) CAA-116022 同上 プログラム解説書
- (4) CAA-109029: 宇宙物体の再突入溶融解析マニュアル
- (5) CSA-111018: 再突入機の再突入飛行に関わる技術基準(JERG-0-047)解説書
- (6) ESA/DRAMA/SARA (Re-entry Survival and Risk Analysis)
- (7) CAA-116036: ESA再突入溶融解析ツールDRAMA/SARA取扱説明書

2.4 海外参考文書

- (1) 国連スペースデブリ低減ガイドライン (Space Debris Mitigation Guidelines of the COPUOS, United Nations Office, Resolution of 22 December 2007) (参考: JAXA-GEF-07001 UNCOPUOSデブリ低減ガイドラインと解説)
- (2) IADCスペースデブリ低減ガイドライン(IADC-02-01: IADC Space Debris Mitigation Guidelines, Revised September 2007, Revision 1)
- (3) ISOデブリ関連規格、技術レポート[表2-1参照]

表2-1 ロケット関連のISOデブリ規格一覧

1	全体	ISO 24113	Space debris mitigation requirements
		TR-20590	Space Debris Mitigation Design and Operation Manual for Launch Vehocle Orbital Stages
		TR-18146	Space Debris Mitigation Design and Operation Guidelines for Spacecraft
2	破砕防止	ISO 16127	Prevention of break-up of unmanned vehicle
3	廃棄	ISO 26872	Disposal of satellites operating at geosynchronous altitude
		ISO 16164	Disposal of satellites operating in or crossing Low Earth Orbit
		ISO 16699	Disposal of orbital launch stages
		ISO 27852	Estimation of orbit lifetime
4	再突入安全	ISO 27875	Re-entry risk management for unmanned spacecraft and launch vehicle orbital stages

3. デブリ対策要求へのシステム設計レベルでの対応

デブリ低減活動を包括的に達成するためには以下のステップがとられる。

- (1) デブリ関連要求 (JAXA/JMR要求、法令等)、勧告 (ITU勧告、国連ガイドライン等)、ベストプラクティス (JAXA設計標準、JAXA実施要領書等) を識別する。
- (2) それらの要求を遵守する手法、手順などを決断する。
- (3) 最終製品に適切なデブリ対策能力を保証するため、開発/製造ライフサイクルの早期に対策を講ずる。
- (4) デブリ低減要求への適合を保証するための適切な品質保証管理計画と認定プログラムを適用する。

上記の(1)に関連して、JMR-003C の各要求事項の背景、趣旨、遵守に必要な対応要領は、本書の他、2.2項に示すJERG-0-002「スペースデブリ発生防止標準解説書」等の文書に記載してある。

本項では以下に示すJMR-003Cの基本要件項目について漏れの無い対応をとるためのシステム・レベルの考え方を示す。各サブシステム及び機器レベルでとるべき対策は6項にまとめた。

- (1) 部品放出抑制策
- (2) 破砕防止策
- (3) 運用終了後の保護軌道域からの排除
- (4) 再突入地上安全の確保
- (5) 打上げ時の有人システム衝突回避策
- (6) 信頼性・品質保証

3.1 部品放出抑制策

3.1.1 概要

JMR-003Cの5.1項では、意図的・非意図的を問わず、運用中に物体を軌道に放出することを制限している。ロケットの設計・運用に関しては以下が適用される。その対策は実質上設計対策が全てである。後続のプロジェクトにも配慮して予期せずに出された物体の確認とその後のプロジェクトでの再発防止も念頭に置いた処置も推奨する。

5. デブリ低減策の計画及び実行
5.1 正常な運用で分離する物品の制限
5.1.1 機器・部品やその破片の分離抑制
(1) 分離後周回軌道に残る恐れのある締結具等分離物は技術的、経済的に重大な問題が無い限り放出しない設計とすること。
(2) 計画的に物体を放出するミッションでは、分離物の面積／質量比や軌道寿命等の特性から軌道環境への影響を評価すること。
5.1.2 燃焼生成物への配慮
(1) 火工品(固体ロケットモータ、イグナイタは除く)は、最大長さで1mmを超える燃焼生成物を地球周回軌道に放出しないように設計・使用しなければならない。
(2) 固体ロケットモータは、静止軌道保護領域に固形燃焼生成物の放出を避けるように設計・運用しなければならない。月・惑星、その他長楕円軌道投入ミッション等で、静止軌道域への影響が懸念されるとしてもその影響が限定的な場合については、個別に配慮する。
(3) 固体ロケットモータは、低軌道保護域を汚染する固形燃焼生成物の放出を回避する方法を考慮しなければならない。

「ロケットによる人工衛星等の打上げに係る安全対策の評価基準」の第IV章「飛行安全対策」では以下のように要求しているが、これらはJMR-003Cの要求に包含されている。

5 軌道上デブリの発生抑制
軌道上デブリ(軌道上における不要な人工物体)となるものの発生については、次のとおり対策をとるほか、設計段階から合理的に可能な限り抑制するように考慮すること。
(2) 分離機構等
ロケットの段間分離機構、ロケット・衛星間分離機構、衛星の展開部品については可能な限り破片等を放出しないように配慮すること。

3.1.2 対策フロー

部品の放出を防止するための対策フローを下表に示す。

表3.1-1 部品の放出を防止するための対策フロー

管理項目	大分類	主な作業
予防措置	分離物体の識別と設計対策	a) 軌道に残留する形態での物体の放出はしない設計とする。

		b) 非意図的に物体が放出される懸念がある場合は、設計上の問題を調査し、改善する。 c) 放出が不可避な場合は、その軌道寿命が25年以下であることを目指す。
是正処置	異常対応	a) 予期せぬ物体の放出が認められた場合は、その後の運用での再発を防止することが望ましい。

3.1.3 分離物体の識別と設計対策

放出する可能性のある物体には潜在的に以下がある。

(1) ミッション関連物体

- a) 推進系のノズル・クロージャ、投棄式固体モータ後方着火式イグナイタ
- b) 衛星・ロケット結合用クランプ・バンド
- c) 複数衛星打上げ時の上部衛星支持用構体(上部衛星搭載アダプター)

[注:放出が不可避な物体については、その軌道寿命を25年以下とする。軌道寿命の評価には2.3.3項の解析ツールが適用できる。]

(2) 火工品からの燃焼生成物

火工品の選定においては、構造破片は勿論、1mm 以上の寸法の燃焼生成物を放出しない製品を適用する。

(3) 固体モータからの燃焼生成物

欧州の規格では固体モータからの燃焼生成物の放出を規制する方向である。JMR-003CではISO 24113に準じて、静止軌道用アポジ推進系として固体モータを使用しないように求めている。低軌道に関しても規制が強化される方向であるが、アルミニウムを含む推進薬と埋没ノズルを適用すれば、スラグの発生の恐れは否定できない。一方では、世界的にも固体ロケットは運用されており、厳密な規制には無理がある。従って、ISO24113でも低軌道については厳密な要求にはなっていない。しかし、長期的には推進薬の非金属含有化などの処置が要求される傾向にある。いずれにせよ軌道に載らないスラグは問題にされていない。

3.2 破砕防止策

3.2.1 概要

JMR-003Cの5.2項では、「ロケット及び衛星」(以下「宇宙システム」)に対して、軌道上破砕の防止について規定している。

5.2 軌道上破砕の防止

以下の軌道上破砕を防止すること。

- (1) 運用終了後の破砕
- (2) 運用中の破砕
- (3) 意図的破壊行為

5.2.1 運用終了後の破砕の防止

用済み後の宇宙システムが破砕してデブリを発生することを未然に防止するために偶発的破砕の可能性が合理的に排除された設計を目指し、廃棄段階での最終マヌーバ終了後又は回収前に、偶発的破砕の原因を極力排除しなければならない。

具体的には以下を実施すること。

(1) 残留液体推進薬及び高圧流体に関する処置

- ① 用済み後の宇宙システムは、軌道変更マヌーバにおいて、液体推進薬及び高圧流体を破砕の原因とならないまでに使いきるか、排出すること。あるいは残留流体による破砕の可能性がないことが解析的に検証されること。このため、設計上は以下に配慮すること。
- ② 二液式推進薬のタンク及び配管系は、自己着火性推進薬の組み合わせの場合は特に、一部部品

等の不具合が推進の混合及び燃焼を招かないように設計すること。

- ③ 運用終了後、軌道変更マヌーバを完了した時点で、タンク／配管類に残留する推進薬を排出すること。二液式推進系で両方の推進薬が排出できない場合は、自己反応性の高い推進薬を優先的に排出すること。
- ④ 排出処理が不可能な場合は、入熱を考慮しても破裂の危険性が無い十分な安全性を持たせるか、内圧の上昇を制限するための手段を設けること。
- ⑤ 排出系統は凍結によって排出が妨げられないよう設計すること。

(2) 指令破壊系

- ① 火工品は太陽光等による温度上昇を考慮し、自然不発火保証温度に対して十分な余裕を確保すること。
- ② 指令破壊受信器は指令破壊の実行の可能性が無くなった時点で速やかに誤爆を防止する処置を行うこと。

(3) ホイール等の回転機器

ホイール等の回転機器は運用終了後に停止するものであること。

5.2.2 宇宙システムの運用中の破碎の防止

5.2.2.1 設計の確実性

宇宙システムが地球周回軌道上で運用中に破碎に至る不具合を起こさないよう適切な信頼性・品質管理がなされていることを設計審査等で確認すること。

原則として、宇宙システムの運用中の偶発的破碎発生率が0.001以下であること。

5.2.2.2 宇宙機の運用中の監視(参考:ロケットは適用外)

宇宙機の運用管制においては、デブリの大量発生に結びつく恐れのある推進系、バッテリー系、姿勢制御系等の異常の発生の監視を手順に含め、異常検知時には速やかな対策を採り得る体制を維持しなければならない。地上から少なくとも以下の計測項目について監視すること。

- (1) 推進薬残量を把握するためのタンク圧力、温度等
- (2) バッテリーの異常を監視するためのパラメータ(温度、起電圧等)
- (3) 姿勢制御系の異常を監視するためのパラメータ

5.2.2.3 不具合発生時のデブリ対策(参考:ロケットは適用外)

運用中の宇宙機に不具合が発生し、破碎を招く恐れがある場合、あるいは運用継続能力が失われると判断した場合は、回復の見込みがない限り、残留エネルギーの除去、早期落下、又は保護軌道域からの排除を検討し、可能な範囲で実施すること。ただし、保護軌道域からの排除操作が破碎を誘発する恐れがある場合は排除操作は実施しない。

5.2.3 意図的破壊行為の原則的禁止

軌道上で宇宙システムの破壊を実施してはならない。ただし、落下する宇宙システムの落下危険度を低減する目的で計画する低高度での破壊行為はこの限りではない。

「ロケットによる人工衛星等の打上げに係る安全対策の評価基準」の第IV章「飛行安全対策」は以下のようにより要求しているが、これらは上記のJMR-003Cの要求に包含されている。

5 軌道上デブリの発生の抑制

軌道上デブリ(軌道上における不要な人工物体)となるものの発生については、次のとおり対策をとるほか、設計段階から合理的に可能な限り抑制するように考慮すること。

(1) 軌道投入機体の破壊・破片拡散防止

- ① ロケットの軌道投入機体について、指令破壊用火工品の誤作動防止措置をとること
- ② 液体ロケットについて、可能な限り残留推進薬、残留ガス等を排出するとともに、排出が完了しない場合にも破壊することがないよう、内圧上昇に対して安全弁の設置等の措置を講じること

3.2.2 対策フロー

破砕の防止についての対策フローを下表に示す。

表3.2-1 破砕による環境悪化を防止するための対策フロー

リスク管理計画	大分類	主な作業
予防措置	破砕源の識別	運用中及び運用終了後に破砕する恐れのある機器を識別する。
	設計対策	(1) ロケット軌道投入機体のシステム内の破砕源について発生確率を求め、集計して破砕確率を管理する。破砕発生率が0.001以下となるように設計し、FMEAにて確認する。 (2) 廃棄後の偶発的破砕を防止する機能を付与する。 (3) 指令破壊系は誤指令や太陽加熱で非意図的な破砕を引き起こさないように設計する。
リスク検知	運用中の監視	宇宙機については破砕の兆候を検知するためにモニタ系が要求されているが、ロケットのモニタ系は破砕防止のためではなく、主として飛行安全の観点から整備されるのでその範囲で監視する。 飛行安全圏外に脱した後は、ミッション遂行及び再突入制御を含む廃棄操作の成功の観点から監視される。
運用処置	破砕防止処置	指令破壊受信機は、飛行安全圏外に出た時点でOFFとする。 破砕エネルギー源(残留推進薬、高圧ガスなど)は排出するか、運用終了後も破砕を発生させない設計とする。

3.2.3 破砕源の識別

ロケットに搭載される機器で破砕する可能性のある機器には以下がある。

- (1) 推進系機器等(ロケット・エンジン、固体モータ、タンク、加圧システム、バルブ、配管など)
- (2) 高圧ガス容器や他の関係機器(空圧作動系など)
- (3) バッテリ
- (4) 飛行安全用指令破壊系

3.2.4 設計対策

設計対策の多くはサブシステム・レベルか機器レベルで対応するものであるが、システム仕様に大きな影響を与える決断はシステム設計の段階で行うことが必要になる。

(1) 破棄行為の禁止

破片を発生する破壊行為は、再突入時の地上の人的被害や環境汚染を防止する目的以外は禁止される。

(2) 運用中の偶発的破砕事故

偶発的破砕発生率は0.001以下であると要求されるが、ロケット・エンジンなど構造が複雑で当該確率の算出が容易ではない場合、エンジンやスラスタの信頼度が世界的水準(大型エンジンであれば0.97、スラスタは0.94程度以上)であれば満足と認められる。(ISO-16127に準ずる)

指令破壊システムは、飛行安全圏外に脱した後は指令破壊受信機をOFFにしてミスコマンドによる破壊を防止する。

(3) 運用終了後の破砕の防止

JMR-003Cの5.2.1項に記載されている破砕防止措置のうち、ロケットに対する典型的な破砕防止措置は以下である。詳細は第6章にて解説する。

- ① 残留推進薬の排出
- ② 高圧ガスの排出
- ③ バッテリの信頼性確保
- ④ 指令破壊系のミスコマンドによる爆破及び爆破線の太陽加熱や電波干渉による爆発

上記①や②を実行するためには、排出ラインや弁を設け、設計排出弁の開状態を維持するた

めの電力量を確保できるようバッテリーの能力を設計することが必要である。

排出するための機構を持たせることがミッションの信頼性を損なうと判断される場合は、レギュレータのブリード弁で減圧するか、構造強度で保証する。

3.2.5 運用中の監視及び破砕防止処置

JMR-003Cの5.2.2.2項では「宇宙機の運用中の監視」を、5.2.2.3項では「不具合発生時のデブリ対策」を求めているが、これらはロケットには適用されない。飛行中の運用監視は飛行安全計画の一環として行われ、再突入制御を行う場合は、JERG-0-047「再突入機の再突入飛行に係る安全基準」の6.4項「再突入に向けた運用シーケンス」及び6.5項「再突入に向けた運用に必要なデータ収集及びコマンド送信」により、監視が求められる。

なお、飛行安全対策に関しては、「ロケットによる人工衛星等の打上げに係る安全対策の評価基準」の第IV章「飛行安全対策」が以下のように要求している。

2 打上げ時の状態監視、飛行中断等の安全対策

ロケットが故障した場合の落下物に対する安全を確保するため、次の手段等により、飛行中の状態監視を行い、必要な場合には飛行の中断が安全に行えるよう措置すること。

3.3 運用終了後の保護軌道域からの排除

3.3.1 概要

JMR-003Cでは以下のように、ロケット及び衛星に対して、定常運用終了後は有用な保護軌道域との干渉期間を短縮するために軌道寿命を短縮するか当該軌道域を避けた軌道に再投入することを要求している。

5.3 運用終了後の宇宙システムの保護軌道域からの排除

5.3.1 基本要素

運用終了後の宇宙システムは、その運用軌道特性などに応じて、軌道寿命の短縮、自然落下、軌道高度の変更、再突入、回収等の処分により保護軌道域との干渉を最小限に抑えるよう技術の現状等を踏まえた最大限の努力をすること。

これら運用終了後の宇宙システムの軌道変更を可能にするために以下に配慮して設計すること。

(1) 軌道変更が必要な場合の条件付廃棄成功確率

条件付廃棄成功確率は0.9以上でなければならない。信頼度計算を行わない開発方式の宇宙機では、廃棄制御も考慮して衛星の目標寿命を設定して設計することとする。

(2) 軌道変更用推進薬の確保

宇宙システムが所定の軌道変更を行えるように推進薬搭載量を設計で見込むこと。その際、推進系の性能誤差や推進薬量計測誤差に配慮した推進薬質量マージンを含めること。

(3) 推進薬量計測・監視システムの設計

宇宙機は、残留推進薬量が常時把握可能で運用終了時期の判断が遅滞なく行える推進薬計測・監視手段を備えること。特に静止ミッションの場合は、この計測手段により軌道変更量の予測が高精度で行えるものであること。

5.3.2 静止軌道域に対する運用終了後の処置

(1) 静止軌道近傍にて運用を終了する宇宙システムは、静止軌道上の宇宙機との衝突を避けるため、少なくとも以下の二つのいずれかを満足するような軌道に移動させること。

a) リオービット後の初期の離心率は0.003未満とすること。静止軌道高度上空の最低近地点高度 ΔH (km) は以下であること。

$$\Delta H = 235 + 1,000 \times C_R \times A / m \text{ [km]}$$

上式において

C_R : 太陽輻射圧係数

A : 宇宙機の有効断面積 (m²)

m : 宇宙機の質量 (kg)

b) 廃棄後の軌道のペリジ高度が静止高度より充分高く、長期的摂動力を考慮しても100年間静止軌道保護域と干渉しないこと。

(2) 静止軌道近傍を通過する長楕円軌道 (GTO等) の宇宙システムは、遠地点高度が静止高度より

200km低い軌道域と干渉しないように計画すること。

- (3) 静止ミッションのロケット用アポジ推進系は基本的には分離しない構造とすること。分離せざるを得ない場合は、前項の要求に準じた距離以上に離れた軌道に残すこと。分離の如何にかかわらず液体式アポジ推進系は、用済み後直ちに偶発的破砕原因を除去すること。

5.3.3 低軌道域に対する運用終了後の処置

低軌道保護域を通過する宇宙システムについては、運用終了後の低軌道保護域滞在期間をできるだけ短くすること。このため、以下のいずれかの処置をとること。ただし、地球への落下に関しては5.4項の要求に従うこと。

(1) 軌道寿命の短縮

運用終了後の宇宙機の軌道寿命が25年を超える場合は大気抵抗等軌道減衰効果を増強する手段により25年を満足させるか、25年以内に自然落下する軌道へ移動する等の処置を講ずること。

ロケットの軌道投入機体についてもこれに準ずること。

ただし、地球への落下に関しては5.4項の要求に従って地上の安全を確保すること。

(2) 自然落下

大気抵抗により25年以内に自然落下する場合はそのまま放置してもよい。ただし、地球への落下に関しては5.4項の要求に従って地上の安全を確保すること。

(3) 低軌道保護域に干渉しない高い高度への移動

(1)または(2)の要求が地上の安全確保の観点から適切でない場合及び運用高度の点から現実的でない場合は、運用中の宇宙機等との衝突を避けるため、低軌道保護域と干渉しない高い軌道に移動させること。

(4) 軌道上回収

(省略)

(5) 地上回収

(省略)

5.3.4 その他の中高度域に対する運用終了後の処置

12時間周期軌道域で運用する宇宙システムは、運用終了後に当該運用域との干渉を避けるよう移動すること。

3.3.2 対策フロー

保護軌道域の保全のための対策フローを下表に例示する。

表3.3-1 保護軌道域の保全のための対策フロー

管理項目	大分類		主な作業
予防措置	廃棄操作機能の付与		(1) 軌道変更や再突入制御に必要な機能・性能を付与する。また、そのための推進薬を搭載できる能力を付与する。 (2) 廃棄成功確率(ミッション成功を条件とした成功確率)は0.9以上とする。
	低軌道 打上げミ ッション	軌道寿命の推定	軌道寿命を推定する。
		廃棄計画	(1) 再突入させた場合の地上のリスク及び制御再突入の実現性を評価し、廃棄方法を決断する。 (2) 制御再突入を行わない場合は、軌道寿命が25年以内になるように廃棄マヌーバを計画する。
	静止軌道 打上げミ ッション	廃棄計画	(1) GTO軌道の場合、再突入させた場合の地上のリスク及び制御再突入の実現性を評価し、廃棄方法を決断する。 (2) 制御再突入を行わない場合は、保護軌道域との干渉の回避、軌道寿命の短縮に必要な廃棄マヌーバを計画する。

		(3) 静止軌道直接投入(ロケットを静止軌道近傍の円軌道に投入してそこから衛星をGEOに投入する方式)の場合は、静止軌道保護域より上方の軌道に再投入する。
運用処置	廃棄操作	再突入マヌーバあるいは軌道変更マヌーバを、計画したシーケンスで実施する。

3.3.3 廃棄操作機能の付与

衛星分離後の廃棄操作を可能にする機能を付与する。廃棄マヌーバは、主エンジンの再着火機能(通常燃焼あるいはアイドルモード燃焼など)を付与するか、姿勢制御用の補助推進器(スラスタ等)あるいは特別に付与する推進器を用いて実行される。いずれの場合も十分な推進薬が必要である。
[再突入制御を行う場合の機能については3.4項参照。]

廃棄成功率を0.9とする要求について、ロケットに対する要求はJERG-0-002の付録-1「スペースデブリ発生防止計画書(JAXA作成)」の「デブリ対策要求適合マトリクス(参考)」にて「適用除外」と記されているが、解説書本体には有効な解説が記されていない。この要求が初めて追加されたJMR-003のB改訂時点では5.3.1項にて「ペイロードの分離と廃棄操作が一連のシーケンスで実施されるロケットについては、信頼性保証プログラムの中で別に適正に管理すること」と明記していた*1。しかし、JMR-003のC改訂で、「条件付廃棄成功率はミッション終了時点から廃棄操作完了までの時間間隔の中で信頼度の低下が10%以下であることを要求するものである。ロケットの通常ミッションではミッション終了と廃棄処置が間断なく行われるので計算結果はゼロ%に近い・・・」との理由で削除された*2。ただし、ロケットの再突入制御については信頼度計算が必要になるので、それに関しては「解説書に記載する」となっている。

以上の趣旨は理解しにくいいため、今後JMR-003及びJERG-0-002の改訂に反映する。

注*1: JERG-0-002Bの付録-2「スペースデブリ発生防止標準B改訂変更内容の概要」の3.(1)④参照。

注*2: JERG-0-002Bの付録-3「スペースデブリ発生防止標準C改訂変更内容の概要」の2項②参照。

3.3.4 低軌道ミッションの場合の廃棄操作

3.3.4.1 廃棄方法の選択

低軌道保護域の廃棄操作の優先順位は以下の順序を推奨する。

- ① 自然落下(落下被害が目標値以内の場合)
- ② 落下点制御による再突入廃棄
- ③ 軌道寿命の短縮、その後、再突入廃棄(傷害予測数、地上環境汚染が許容される場合)
- ④ 廃棄軌道に移動

最終的に落下処分(①または③)する場合は、地上落下物による傷害予測数が目標値以下であることが基本である。傷害予測数が目標値以下とならない場合は、②の落下点制御を選択すべきである。④は①～③の手段のいずれもが実現困難な場合に最終的に選択するもので、積極的に採用しない。

なお、フランスの宇宙活動法の下位の技術規則では、すべてに優先して②の落下点制御を検討すべきで、それが不可能な場合は①や③を選択し、それらも実現困難な場合は④を選択するとしている。

3.3.4.2 軌道寿命の確認

軌道寿命の確認は、追跡ネットワーク技術センターが提供するISO準拠の軌道寿命予測ツールを使用して高精度に求めることができるが、解析精度に応じて解析時間も長時間化するので設計の進展に応じて解析ツールを適切に選定することが必要である。[JERG-0-002の5.3.3項の解説2参照] 簡易的にはNASA-DAS、DEMIST、STELA、ESA-DRAMA-OSCARなどで概略値を求めることができる。[2.3.3項参照]。ただし、これらには結果に差が出ることもあり、その原因は調査中である。なお、ESAのOSCARはESA独自の太陽活動モデルを用いており、NASAの太陽活動モデルを用いるJAXA系ツールやSTELAとは異なる結果となり、またGTOには適用できないことがわかっている。

3.3.4.3 廃棄計画

再突入制御については 3.4 項にて言及する。ここでは軌道寿命の短縮操作について述べる。

(1) 軌道寿命の短縮

運用軌道が低軌道保護域と干渉する場合は定常運用終了後に軌道を変更するかミッション計画を見直して最終高度を低く選定する。(空力抵抗増強装置を付与する例もあるが、通常は選択されない。)

衛星分離後に必要とする推進薬が確保できるように、ミッション解析にて調整する。

(2) 保護軌道域より高い高度への移動

軌道寿命短縮と高高度へのリオービットで同量の推進薬を必要とするのは運用高度 1400 km 程度であるから、この高度を超える衛星はリオービットで廃棄することが推進薬配分の観点からは有利であるといえる。しかし、この方法では長期的には軌道環境の改善にはならない。デブリ問題の解決のためには可能な限り落下させる方向で検討することが望ましい。

高度 2000 km 以上へのリオービットする場合は少なくとも 100 年間は保護域と接触しないことが求められる。

(3) 軌道変更機能の信頼性設計

廃棄マヌーバを行う場合の条件付き成功確率を 0.9 以上に確保することが要求されるが、軌道投入機体のシステムの信頼度が世界レベルであればこれを満足するものとみなされる。

空力抵抗増強装置等を用いる場合はこの信頼度を確保することが求められる。

3.3.5 静止遷移軌道打ち上げミッションの場合の廃棄操作

GTOへの軌道投入機体には、静止軌道保護域と低軌道保護域の両方の干渉に配慮が必要である。

静止軌道保護域の保全のためには、遠地点高度を静止軌道より200km低く設定するか、それが困難な場合は25年以内に静止軌道より500km低くなるように設定する。低高度保護域の保全のためには、近地点高度を軌道寿命が25年以内となるように設定するが、GTOの軌道寿命を正確に推定することは、打ち上げ時刻の変更などがあればとりわけ困難である。近地点の設定の際には、要求を満足する確率などとともに表記することが望ましい。【例：軌道寿命が25年以内になる確率が0.9となるよう近地点高度を200 kmとする。】

3.3.6 静止軌道近傍からの直接投入の場合の廃棄操作

この手法は、ロケット軌道投入機体が静止軌道のやや上方の円軌道に到達した後に宇宙機を分離し、宇宙機がそこから自力で静止軌道に移動する方法である。軌道投入機体は静止軌道保護域と長期的(100年以上)に干渉しない高度に放置(要すれば若干移動)されるので、静止軌道保護域の干渉はない。

3.3.7 その他の超楕円軌道からの投入の場合の廃棄操作

GTO 以外の超楕円軌道に宇宙機を投入する打上げミッションでは、GTO と同様な処置を推奨する。静止軌道と交差する超楕円軌道への放置は避けるべきである。

3.4 再突入時の地上安全の確保

3.4.1 概要

JMR-003Cでは、運用を終了した宇宙機が地上に落下する場合は、技術の現状及び海外の動向を踏まえつつ最大限の努力を行うように、以下のように規定している。

5.4 再突入／落下による処分に対する要求

5.4.1 地上安全の確保

宇宙システムについて、軌道寿命を短縮させる、あるいは自然落下に任せる場合は、地上の安全に考慮して以下の要求によること。

(1) 大気圏通過後の残存物(以下「残存物」という。)による落下危険度(傷害予測数)を打上げ前に予測すること。1回の落下について、傷害予測数が規定(JMR-003参照)以上となる場合は、安全な落下

<p>区域を設定して制御して再突入させることも含め、技術の現状及び海外の動向を踏まえつつ最大限の努力を行うこと。</p> <p>(2) 自然落下に任せる場合も制御して再突入させる場合も、落下危険度が十分小さくなるよう溶解率の高い構造を目指して、技術の現状及び海外の動向を踏まえつつ最大限の努力を行うこと。</p> <p>(3) 制御して大気圏に再突入させる場合には、JERG-0-047「再突入機の再突入飛行に係る安全基準」に従うこと。</p> <p>5.4.2 落下予測及び情報の公開</p> <p>JAXAは、JAXAの運用する宇宙システムについて、得られる軌道情報と解析技術の対応する範囲で落下軌道及び落下日時等を予測し、JAXAが別途定める最新の要領に沿って公開する。</p> <p>5.4.3 再突入(あるいは落下)前の爆破</p> <p>再突入(あるいは落下)に先立って爆破処分を行って地上の被害を最小化する場合、爆破の高度は、爆破破片がデブリとならないような充分低い高度で、かつ地表へ悪影響のない十分に高い高度で行うこと。</p> <p>5.4.4 塔載物による地上環境汚染の防止</p> <p>宇宙システムを地球に向けて落下させて処分する場合は、落下物に放射性物質、有害物、その他の地上環境汚染物質が含まれていないか、又はその影響が許容されるものであること。</p>

一方、「ロケットによる人工衛星等の打上げに係る安全対策の評価基準」の第IV章「飛行安全対策」は、再突入制御の場合について以下を要求している。これはJERG-0-047「再突入機の再突入飛行に係る安全基準」に従うことで満足できる。

<p>3 再突入機の再突入飛行の安全対策</p> <p>再突入飛行に関しては、以下に示す適切な方策を講じることにより、安全を確保すること。</p> <p>(1) 再突入着地予定区域の設定</p> <p>着地予定区域は以下のいずれかを満たすこと。</p> <p>① 陸地及びその周辺海域にないこと</p> <p>② 陸地及びその周辺海域に設定する場合には、当該国の了解を得ること</p> <p>(2) 再突入経路の設定</p> <p>正常飛行時には、(1)の着地予定区域に分散を考慮しても着地できるよう、再突入経路を設定すること。また、再突入飛行中の再突入機が制御できず、着地点分散域が着地予定区域から外れる場合についても、着地点分散域が人口稠密地域から可能な限り離れるよう再突入経路を設定すること。</p> <p>(3) 再突入飛行の可否判断の実施</p> <p>再突入飛行に際しては、次の情報等により再突入飛行の実施の可否を判断すること。</p> <p>① 軌道、位置、姿勢</p> <p>② 姿勢制御系機能</p> <p>③ 推進系機能</p> <p>4 航空機及び船舶に対する事前通報</p> <p>ロケット打上げ及び再突入機の再突入飛行に際して、航空機及び船舶の航行の安全を確保するため、打上げ前及び再突入飛行前の適切な時期に必要な情報が的確に通報されるよう措置すること。</p>
--

3.4.2 対策フロー

再突入による地上の被害を回避するための対策フローを下表に例示する。

表3.4-1 再突入地上安全に関する対策フロー

管理項目	大分類	主な作業
予防措置	被害の予測	軌道投入機体の再突入傷害予測数及び地上環境汚染の可能性について評価し、対策の要否を決定する。

	設計対策	(1) 傷害予測数及び地上環境汚染の規制を満足する設計とする。 (2) 傷害予測数が要求を満足しない場合は、設計による熔融率の向上を図るか、再突入制御機能を付与する。この機能は機体内のサブシステムのみならず、地上設備も対象となる。
リスク検知	落下通報	再突入制御を実行するに際しては、影響を受ける国々、並びに航空情報システム(NOTAM)、水路通報などの海上航行警報システムに対し、リスクを通報する。
運用時の対処	再突入の実施及び監視	再突入制御を行う場合は、再突入機能の健全性をモニタし、異常発生時には適切に対処する。

3.4.3 再突入被害防止措置

3.4.3.1 被害の予測

宇宙機の構造体及び搭載機器を対象に落下熔融解析を行い、傷害予測数を試算する。解析の手法や前提条件に関する厳密な規定はないが、2.3.4項(1)のツール及び関連マニュアルを適用することを推奨する。他の信頼し得るツールを適用することは妨げない。2.3.4項(6)や2.3.1項の(1)や(2)は簡易ツールであるから、概略値の把握に用いるのは良いが、最終的な評価には向かない。

傷害予測数が目標値を超えるときには構造面の設計対策で傷害予測数を低減する努力が望ましい。[例:ダミーマスの材質の見直し、複合材タンクの採用等]

設計上の改善を行っても傷害予測数が明らかに規制を超える場合(例:目標値を一桁以上超える場合)は勿論、超えない場合も破片の分散範囲を居住者のいない区域に設定するための再突入制御を計画することが望ましい。

再突入制御の採用の判断はハードウェアの詳細が決定される以前の概念設計フェーズで行われなければならない実際の設計に反映できない恐れがある。

3.4.3.2 設計対策- 熔融性の改善

制御再突入を実施する場合でも、制御の失敗確率などを掛け合わせれば、傷害予測数はゼロにはならない。よって、地上に落下させる宇宙システムは、傷害予測数を極小にするために、熔融促進設計を検討することが望まれる。熔融促進設計としては例えば以下の方策がある。

(1) 材料の選定

ベリリウム、チタン合金あるいはタングステンのように高融点、高比熱の材料の使用を控えることが望ましい。一般に、チタン製の推進薬タンク、気蓄器、モータケースはほとんどの場合地上に到達する。推進薬タンクなどはCFRP製の製品があるので、その適用を検討することが望まれる。宇宙機の場合は構造部材にベリリウムやチタンを用いて軽量化を図る事例もあるが、可能な限りステンレス材等で代替することが望ましい。ダミーマスにタングステンなどの難熔融性金属を用いることは推奨できない。ただし、一般には、高耐熱性、低膨張率、高比強度などの観点で材料選定上の制約があることは当然である。

下図はステンレスとチタンの典型的な熔融限界図である。正確にはミッション軌道に応じた解析が必要である。

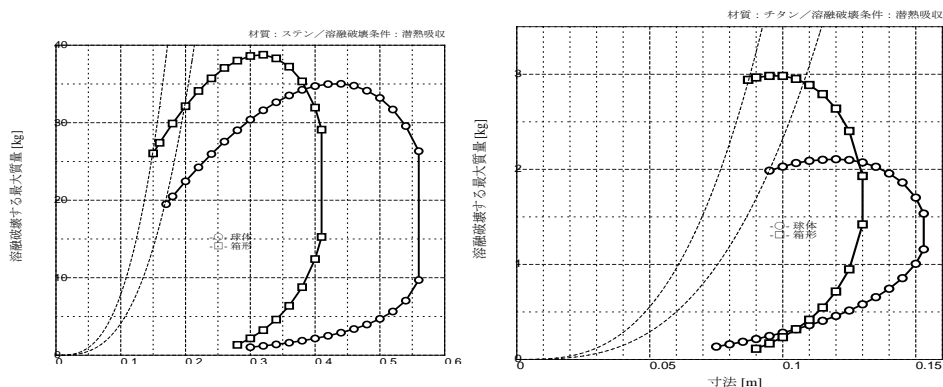


図3.4-1 典型的熔融限界図 [ステンレス材とチタン材の場合]

(高度78 kmで放出された場合の例)

(2) 構造壁の薄板化

板厚を再検討し、薄くすることが可能であれば溶融率が上がる。厚い板材は薄い板材の組み合わせとすれば、落下中に分散させることで溶融率を高めることができる。特に、ダミーマスは金属の塊にするのではなく、薄い板を組み合わせた形態にすることが望ましい。

(3) 配置の見直し

システム内部に配置された機器は周囲の構造壁が飛散するまで十分に加熱されない。気流に晒す構造とすれば溶融率は向上する。

JMR-003Cでは毒性物質による環境汚染を防ぐことも求めているが、ヒドラジン等の毒性推進薬は落下の途中に自己分解点以上に加熱されて消滅するか、飛散して拡散するケースが多いので大きなリスクにはならない。原子炉を搭載していない限り、通常は環境汚染に関する問題は発生しない。

3.4.3.3 設計対策- 再突入制御機能設計

傷害予測数が明らかに目標を満足しない場合は、公海など安全な落下域に誘導(コントロールドリフト)する。[注:落下しないように軌道上寿命を長期化(原子炉衛星は国際的にはこの方法が推奨されている)することが望ましい場合もあるが、通常宇宙機やロケットには適用されないであろうが、正式には安全審査会の決定事項である。]

再突入制御の場合の傷害予測数の指針は「再突入機の再突入飛行に係る安全基準(JERG-0-047)」が適用になる。

再突入制御を行うためには、推進系、姿勢制御系、通信系など複数のサブシステムに所定の仕様が求められるが、それは第6編でサブシステム毎に述べる。

地上設備への要求仕様は宇宙機との機能分担を図って決定されるが、地上からの追跡のためには、追跡可能性と時間的な運用可能性を開発初期段階で検証すること。

基本的には、ロケット側と地上側にはJERG-0-047の5項に記される機能が要求される。

3.4.4 落下通報

3.4.4.1 自然落下の場合

自然落下の通報に関する米国の見解は、「米国は公開可能なすべての宇宙物体の軌道特性を公開していることから、各国がこれを元に自主的にリスク管理を行うことが期待できる。よって、米国からの通報は不要と判断している」というものである。JAXAでは経営推進部が定める危機管理計画に従って公表の可否を判断し、政府と調整のうえ実施している。

自然落下の場合、落下時刻・区域を高精度に予測することは困難である。大雑把に言えば落下予測時刻には20%程度の誤差がある。これは単純には、再突入10時間前の予測には地球1周回分近くの誤差が存在することを意味する。

3.4.4.2 再突入制御の場合

再突入制御の場合については「ロケットによる人工衛星等の打上げに係る安全対策の評価基準」の第IV章「飛行安全対策」の要求の他、具体的実施方法については「再突入機の再突入飛行に係る安全基準(JERG-0-047)」に記されている。そこでは、所定の通報を行い、一般船舶の航行に支障を与える恐れがある海上浮遊物や、放置すると公共の安全に支障を与える恐れがある陸上落下物が発生する場合は、原則としてこれらを回収するように記載されている。

3.4.5 監視及び緊急処置

飛行中の監視は飛行安全の一環として行われるが、再突入制御を行う場合は、JERG-0-047「再突入機の再突入飛行に係る安全基準」の6.4項「再突入に向けた運用シーケンス」及び6.5項「再突入に向けた運用に必要なデータ収集及びコマンド送信」により、監視が求められる。

「ロケットによる人工衛星等の打上げに係る安全対策の評価基準」の第IV章「飛行安全対策」の3項(3)「再突入飛行の可否判断の実施」において、再突入飛行の実施の可否判断のために、① 軌道、位置、姿勢、② 姿勢制御系機能、③ 推進系機能の情報等を用いるように要求している。

異常が発生した場合の処置についてはコンテンジェンシープランを定め、運用要領に反映する。詳細はJERG-0-047「再突入機の再突入飛行に関わる技術基準」を参照のこと。

3.5 有人システムとの衝突回避策

3.5.1 概要

JMR-003Cではロケット及びそれから分離されるペイロード及びその他の分離物が有人システムと衝突することを避けるように要求している。打ち上げ後何日間までの安全を保証するかなどの詳細はJMR-003Cでは「JERG-1-007に定義される」と記載されているが、平成29年度時点では「JERG-1-011『人工衛星等打上げ用ロケットの飛行安全に関する基本要件』に定義される」と読み替える必要がある。JMR-003CにはD改定時に反映する。

以下はJMR-003Cの要求である。

5.5 軌道上衝突被害の最小化

5.5.1 ロケットの有人宇宙システムとの衝突防止

ロケットの打上げに際しては、JERG-1-007「射場飛行運用安全技術基準」に従い、ロケット、ロケットから分離した衛星及び其の他の分離物と、軌道上の有人宇宙システムが衝突しないように打上げ時刻を調整する。

「ロケットによる人工衛星等の打上げに係る安全対策の評価基準」の第IV章「飛行安全対策」は以下のように要求している。

6 軌道上の国際宇宙ステーション (ISS) 及びISS への有人宇宙船に対する安全対策

ロケットの打上げに際しては、軌道上において活動する者の生命の安全を確保するため、打上げ実施後に軌道上のISS 及びISS への有人宇宙船(以下合わせて「有人宇宙船」という。)がロケットの軌道投入機体及びその分離物からの安全を確保するための対応が可能と考えられるまでの間、当該有人宇宙船との衝突を回避する打上げ時刻を設定すること。

3.5.2 運用対策

JERG-1-011「人工衛星等打上げ用ロケットの飛行安全に関する基本要件」に従い、有人システムとの衝突を、打ち上げ時刻の調整によって回避することが要求される。公式には、軌道変更計画が提供される有人システムが対象となる。その他の有人システムについて実施することもあるが、マヌーバ計画が入手できない「いわば非協力有人システム」に対しては参考値扱いとせざるを得ない。

3.6 信頼性・品質保証

ロケット自身が安易にデブリ化しないように、また健全に廃棄処置を完遂できるように、十分な品質・信頼性を確保することが望まれる。デブリの発生防止には、品質・信頼性保証が最も基本的な対策である。現状では、信頼度解析やFMEAが必要になるのは廃棄信頼度の確保と偶発的破砕発生率である。

4. ライフサイクルの各フェーズにおける管理

開発ライフサイクルのフェーズ管理の例を図4-1に示す。

開発の初期フェーズから軌道環境の保全を重要な要素として認識し、その対策を含めてシステムの概念を構築し、それぞれの開発フェーズで対策手段を実現させていくことが望まれる。ライフサイクルの最終フェーズには「廃棄フェーズ」を明確に位置付け、軌道環境に与える影響を最小とする方策を盛り込む必要がある。

4.1 基本概念

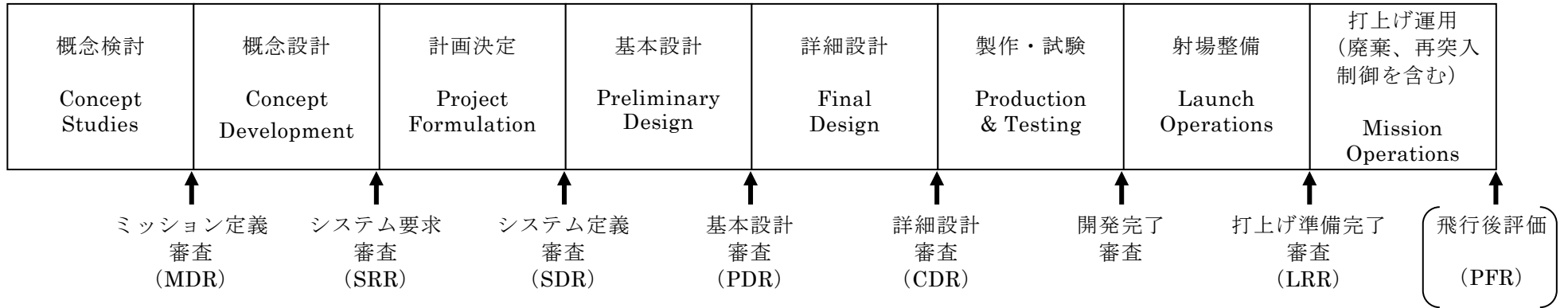
宇宙機のライフサイクルにおいてデブリ対策上必要な配慮は以下である。

- (1) 概念検討フェーズ(ミッション要求分析フェーズ:pre-Phase A)では打上げサービスのビジネス戦略に従って打上げ能力を初期設定する。デブリ低減要求は設計要求や法的制約と同様に、要求の一部として認識される。
- (2) 概念設計フェーズ(実現性フェーズ:phase A)は指定された目的(性能、価格、スケジュール)を満足するように複数の実現可能な概念を調査する作業を含む。主要なデブリ対策仕様が決定され、このフェーズで起草される技術仕様書に反映される。例えば、再突入制御機能などの機能要求や信頼性要求などシステム設計やコストに大きな影響を与えるデブリ対策方針が決断される。
- (3) 計画決定フェーズ(予備設計フェーズ:phase B)では、前のフェーズで決定されたシステム概念に基づいて、機能・性能、資源配分及び信頼性に重大な影響を与える主要なデブリ低減策の概念をシステム仕様書、運用計画書等に反映する。
- (4) 基本設計フェーズ(phase C)では、運用に供し得る製品を定常生産するために、設計の認定を得ることを目指す。全てのデブリ対策設計と運用手順が決定される。
- (5) 詳細設計フェーズ(phase D)では、製品の製造と客先への出荷を行う。製品の設計と製造工程が認定される。
[注:認定後の定常生産フローにおいては、射場出荷前審査においてコンフィギュレーション及び品質に関する審査が行われる。]
- (6) 運用フェーズ(phase E)の射場整備作業では、打上げ時刻は軌道上有人システムとの衝突の確率が規定値以下であることが確認され、問題があれば当該時刻が適切に再設定される。
- (7) リフト・オフ及びフライト中は別途定められた運用手順及び安全管理手順に従って監視、及び緊急時には所定の処置がとられるが、基本的には定められたシーケンスに沿って自動的に廃棄まで進行する。ただし、再突入制御を行う場合は別途定められた手順に従って実行が管理される。

以上のサイクルでデブリに関する特性を識別・実現し、フェーズ毎に審査を行い、品質・信頼性・安全性と同様にデブリ対策に配慮することが望まれる。

システム設計に影響を与えるデブリ対策項目とその解決方策のオプションの選択に関しては、5項に、サブシステムや機器レベルの作業については6項に示す。

<初号機（開発時）>



<2号機目以降(生産フェーズ)>

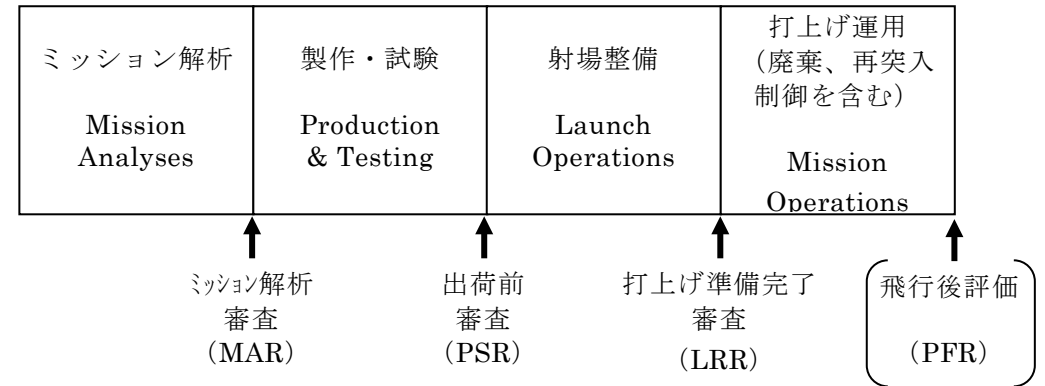


図 4-1 プロジェクトマネジメントのライフサイクルにおけるプロセス

表 4.1 各開発フェーズでの主要なデブリ関連作業

Phase Subjects	概念検討 概念設計 計画決定	基本・詳細設計 製造・試験(認定)	射場整備／運用準備 打上げ／飛行中	廃棄／飛行後評価
システム・レベルの作業	1) デブリ要求事項の抽出 2) デブリ関連設計・運用方針の設定 3) システム要求、システム仕様の設定	1) 推進薬配分決定 2) 質量配分決定 3) デブリ対策方針を運用文書に反映	1) デブリ対策運用方針を運用者に移管 2) デブリ対策運用を履行	1) 廃棄計画に沿った廃棄マヌーバを自動実施(保護軌道域からの排除、破碎防止、再突入制御等)
信頼性・品質保証	1) 信頼性・品質保証レベルの設定 2) 信頼性・品質保証プログラムの設定	1) 廃棄成功確率の保証、非破碎確率の保証等に係る信頼度配分		
放出物の抑制	1) 放出物対策方針の設定	1) 放出物対策設計		1) 飛行後評価にて、計画外の放出物のないことを、搭載カメラ画像、JSpOC データ等から確認
破碎防止	1) 破碎防止対策方針の設定	1) 破碎エネルギー源の特定、対策 2) 非破壊確率を設計に反映		1) 残留推進薬の廃棄確認
保護軌道域からの排除	1) 廃棄手段(廃棄マヌーバ等)の方針決定	1) 廃棄方針に沿った手段の設計 2) 必要推進薬を設計に反映		1) 廃棄マヌーバの確認
再突入安全	1) 再突入安全保証方針設定 2) 再突入残存性解析手法の確立 3) 再突入制御の実施の判断	1) 再突入制御手段の設計 2) 必要推進薬を設計に反映		1) 制御再突入を実施
有人システムとの衝突回避	1) 衝突回避方針の設定		1) 有人システムの運用情報を加味して、要すれば衝突回避のために打ち上げ時刻を変更	

4.2 概念検討フェーズにおける管理 (pre-phase A)

4.2.1 概論

ロケットの開発ではデブリ発生防止に配慮したシステム概念、システム構成、ミッション、打上方式、運用軌道、運用方法、廃棄方法を検討し、デブリ対策を実現するように配慮する。

概念検討フェーズの主要目的はミッション要求の分析と定義である。デブリ対策の観点からは以下の作業がある。

- (1) デブリ対策要求文書の識別
- (2) 破砕を誘発する不具合の防止を含むデブリ低減対策の実行を保証するための安全・信頼性・品質管理要求の識別

このフェーズでは、ミッション要求を実現するために必要な物理的・機能的要求が、地上設備、打上げ手段、ロケットシステム、運用計画などに配分される。

結果はミッション要求書にまとめられ、ミッション要求審査(MDR)に付議される。

4.2.2 デブリ関連作業

このフェーズは想定する期間内で有効となるシステム概念を次のフェーズで決定するに先立ち、輸送系に対するユーザ動向・要望のデータを取得、分析し、需要の見込みを設定してシステム要求を定義することである。

デブリ対策設計はロケットの開発計画（費用・スケジュール）に大きな影響を与える可能性があるため、要求分析の中でデブリ対策要求を漏れなく検討に加え、検討初期段階（概念検討段階）でロケットのシステム概念、運用コンセプトを決め、軌道環境への影響を評価し、把握しておく必要がある。

デブリ対策要求は、2.1項に記した以下の文書に記されている。

- (1) JMR-003:スペースデブリ発生防止標準
- (2) ロケットによる人工衛星等の打上げに係る安全対策の評価基準、平成28年6月14日、科学技術・学術審議会 研究計画・評価分科会 宇宙開発利用部会

以上のほか、近い将来には国内法規（宇宙活動法及びその下位の内閣府令）が整備される。国際的には国際条約（宇宙条約、損害防止条約）、勧告（ITUの静止軌道の保護）、国連決議文書（スペースデブリ低減ガイドライン及び子らから呼び出されるIADCガイドライン）、国際標準化機構の関連規格（ISO-24113等）がある。現在、国連デブリ低減ガイドライン、ISO-24113及IADCガイドラインは、JMR-003Cを遵守することで包含される。

4.3 概念設計フェーズにおける管理 (phase A)

4.3.1 概論

このフェーズのアウトプットは「システム要求書」にまとめられ、「ミッション定義審査」(SRR)に付議される。ロケットへのユーザ要求・需要、関連する制約を把握しつつ分析し、最適なシステムの概念を決定する。

- (1) デブリ対策の物体の放出抑制要求は、推進系の選択（固体モータ、液体ロケット・エンジン、ハイブリッド・エンジン等）に影響を与える。
- (2) 破砕防止要求は、安全設計概念（タンク設計による質量配分、安全係数、安全余裕などへの影響）と信頼性設計に影響を与える。
- (3) 廃棄要求は、段構成に係る基本的ロケット構成、及び各段への機能配分に影響を与える。
- (4) 再突入安全要求は、再突入制御を実施するためのサブシステム設計（耐放射線設計を含む）に影響を与える。

4.3.2 デブリ関連作業

デブリ対策の観点では、以下に配慮して要求事項に反映することが望ましい。

- ① 軌道投入機体にはペイロード分離後に軌道を変更する機能を持たせる。これは大型ロケットでは主エンジンの再着火機能と軌道変換用の推進薬の余裕で対処できる。軌道変更料が

少なれば補助推進系に機能を持たせることでも対処できる場合もある。軌道投入機体に固体モータを採用する場合は、別途軌道変更専用の推進系が必要となる。

- ② 固体モータの推進系は、スラグ発生の観点から少なくとも静止軌道と干渉するミッションでは用いない。低軌道ミッションには、アルミ等の金属を含まない推進薬の採用、吹流しノズルの採用などの改善処置が残されているが、現時点では現実的ではない。[注：欧州の規制から、世界的な傾向としては低軌道ミッションについても規制される方向にある。]
- ③ 分離する物体がある場合は、それらが長期的（25年以上）に軌道に残留する事態は避ける。（アレジモータの分離など）
- ④ 再突入した場合の地上の傷害予測数を最小とするよう設計するが、許容傷害予測を満足できない場合は勿論、満足できても可能な限り再突入制御機能を付与することが望まれる。

4.4 計画決定フェーズ(予備設計フェーズ phase-B)

4.4.1 概論

このフェーズではシステムへの要求を物理的・機能的特性へ変換し、その結果は「システム仕様書」、「サブシステム仕様書(案)」等に反映され、システム定義審査(SDR)(プロジェクト移行前審査)にて審議される。

システム及び主要サブシステムの基本的形態、物理特性、機能・性能特性などの主要コンフィギュレーション、運用概念、検証概念、プロジェクト・リソース(開発体制、資金、スケジュール)が全て決定されるので、デブリ関連設計・運用方針はこの時点でほぼ確定される。よって、機能・性能特性に負担の大きい再突入制御機能等の実装の要否についてはこのフェーズまでに判断を終了すべきである。システム設計・運用設計・運用方針はデブリ発生防止計画書に定義する。

4.4.2 作業プロセス

(1) デブリ対策要求事項の反映

デブリ対策設計・運用思想を設計仕様に反映する。特に以下の影響に配慮すること。

- a) 推進薬配分に、廃棄マヌーバ、再突入制御マヌーバに関する設計思想を反映すること。
- b) 地上安全保証対策

- ① 落下区域をコントロールして公海上に落下させるためには落下マヌーバ・シーケンスの検討とそれを実現するための推進系・姿勢制御系への機能要求が検される。落下マヌーバを行う際の地上管制・監視体制を含めた総合システムの検討も必要になる。
- ② 落下時の熔融を促進するためにチタン材やベリリウム材の使用を避けて、その代替材料・機器を適用するよう配慮し、要すれば代替機器(複合材タンク・気蓄器等)に関する研究開発を企画することが望まれる。

(2) 信頼性・品質保証の観点

異常に低い信頼性、衝突に対する異常な脆弱性はそれ自身にとって不利であるばかりではなく、異常が発生した場合は軌道環境に悪影響を与える。コストとの均衡を図りつつも、より大きな視点で保証方針を確立することが望まれる。

少なくとも、信頼度配分にてミッション達成確率、廃棄成功確率、破砕発生抑止確率が適正に保証される。

4.5 設計フェーズにおける管理 (phase C)

4.5.1 設計フェーズでの配慮事項の例

このフェーズでは「システム仕様書」及び「サブシステム仕様書(案)」等を受けて、システム要求を実現させるべく、コンポーネント、部品に至るまで仕様が決定され、設計が完了する。仕様書にはデブリ発生防止計画を実現するための機能・性能の要求、信頼度管理要求を含むことが望まれる。

設計フェーズで必要なことは、3 項の設計・運用思想に基づいて具体的デブリ対策案を検討し、設計面、運用面、インフラ面の課題を解決することである。

この過程で以下に配慮すること。

- (1) 信頼性・品質保証とリスク管理

不具合による破砕や、多量の推進薬を搭載したままの漂流は、多量のデブリの発生源となり得る。信頼性・品質保証は自らのためだけでなく他の健全な衛星のためにも望まれる。

(2) 破砕の防止と安全管理

② 破砕の主要な原因は、推進薬系の爆発、高圧容器の破裂である。これらに対しては基本的にはミッション保証の観点からの設計対策(推進薬混合の構造上の回避、高圧容器の強度保証等)及び信頼性・品質活動の徹底が第一である。

③ 定常運用終了後の破砕の防止策としては、推進系については二液混合の可能性を排除し、残留推進薬の排出を可能(凍結防止を含む)とすることが主な対策である。高圧容器については、LBB 設計の適用、用済み後の排出機構の付与などが望まれる。

(3) 分離物の抑制

軌道投入や運用開始の間に、宇宙機から部品類の放出(クランプ・バンド、ノズル・クロージャ、ヨーヨー・タンブラなど)が無いように設計する。

(4) 有人システムとの衝突回避体制

有人システムとの衝突確率の推定技術を確立し、有人システムの運航計画を入手し、衝突の恐れのない打ち上げ時刻にて打ち上げる体制を確保する。

(5) 定常運用終了後の廃棄処置

廃棄マヌーバを実施する場合に必要な推進薬量を見積もり、設計に反映する。ミッション終了後の廃棄操作をシーケンスに組み込む。

(6) 破砕防止措置

廃棄マヌーバ終了後の残留流体の排出操作をシーケンスに組み込む。

(7) 落下地上安全の確保

① 低軌道ミッションについては、落下時傷害予測数を見積もり、落下時の安全性を最大限に確保し、地上環境汚染も防止する。

② 落下時の地上リスクが無視できなければ、落下区域のコントロールを計画する。このためには落下の状況を推定し、誤差源、破片分散域等を推定し、落下マヌーバ・シーケンスを計画する。落下区域のコントロールを実現するためには、短秒時に大きな推力を発生させる推進系、十分な推進薬、低高度で姿勢を維持するための姿勢制御系の設計、電子回路の耐放射線性が必要になることがある。更に、落下マヌーバを行う際の地上管制・監視体制(外国局の支援)を含めた総合システムとしての検討が行われる。

4.5.2 前提条件

遅くともこのフェーズの開始までに以下が整備されている。

(1) デブリ対策の実現に必要な技術対策、運用対策、インフラ対策の識別

(2) 解析ツール及びモデルの導入・整備(デブリ発生防止評価ツール、軌道寿命解析ツール、衝突損傷解析ツール、落下溶融解析ツール、太陽活動予測ツール、大気モデル、世界人口分布モデル等)

(3) 解析に必要な技術データの整備(使用する材料の溶融解析に係る材料データ等)

4.6 製作・試験フェーズにおける管理 (開発完了) (phase D)

4.6.1 開発の完了に向けた配慮事項

適正な信頼性・品質保証プログラムによって製造工程が管理されるならば、製造・検証・製品確認に関して、デブリの観点からの特別な要求はない。このフェーズの完了時には製品が認定されている。

運用中の破砕防止のための異常監視手段管理、定常運用終了の決断条件、廃棄要領、その他次項(1)に含まれる設計情報を運用フェーズに移管する準備をすること。

4.6.2 認定審査(開発完了審査)

認定プロセスでは、最終的な設計・製造工程が試験・設計解析・デモンストレーションなどの手段を通じて検証される。

デブリの観点では以下が審査される。

a) 計画的分離・放出品の一覧

b) 軌道上破砕原因の一覧及び運用終了後のそれらの除去手順

- c) 破砕に繋がる異常の監視手順(可能な範囲で)
- d) 定常運用終了後の措置方針、運用への移管情報
- e) 自然落下させる場合はその被害予測、
- f) 落下区域の制御を行う場合の計画
- g) 落下制御する場合の運輸機関への警告体制
- h) 対有人システムとの衝突回避手順

4.7 運用フェーズにおける管理 (phase E)

4.7.1 射場整備作業

認定後、各打上げミッションの要求に対応してミッション解析が行われる。システム・コンフィギュレーションが識別され、機器の品質が確認され、射場整備作業に供される。

デブリ対策に関わる設計・製造結果が適切に運用手順に反映されたことを、通常の信頼性・品質保証プログラムの中で確認すること。

また、打上げ準備完了審査には以下を含めて確認すること。

- (1) デブリ発生防止計画とその実現状況
- (2) 計画的分離・放出品の一覧表
- (3) 初期推進薬搭載量と目的別の配分、
- (4) 運用時監視パラメータと計測精度、異常監視手順の対処方針(設計要求値)
- (5) 廃棄計画
- (6) 再突入制御計画(運輸機関への警告等を含む)

[注:JAXA基準 JERG-1-011「人工衛星等打上げ用ロケットの飛行安全に関する基本要件に従い、ロケット、ロケットから分離したペイロード及び其の他の分離物と、軌道上の有人宇宙システムが衝突しないように打上げ時刻を調整する。最新の軌道情報にて確認する必要があるため、打上げ準備完了審査(LRR)前に問題ないことを確認する。

[注:プログラムされたシーケンスに従い、デブリ低減作業を含めた打上げ及び飛行が進行する。]

4.7.2 飛行中の監視

(注:飛行中は、飛行安全計画に従った監視が行われる。デブリ対策の観点からは要求されない。)

4.8 廃棄フェーズにおける管理 (phase F)

4.8.1 実施内容

プログラムされたシーケンスに従い、廃棄マヌーバ及び残留推進剤の排出などが実施されることを確認する。

有制御再突入が行われる場合は、機体の健全性を監視しつつ、地上からの指令・支援を得て実施される。制御再突入を行う場合は3.4.3.3項にて触れる所定の監視を行う。

4.8.2 飛行後評価

飛行後評価の一環として、廃棄マヌーバ、残留流体の排出などのデブリ対策が計画に従って実施されたことが確認される。

運用中に計画外の放出物が認められた場合は、その事情が調査され、是正処置が次のフライトに反映される。

5. システム・レベルの配慮

5.1 ロケットのシステム設計

ペイロードの最大重量、投入軌道、射場や追跡管制局の地理的条件並びにその他の条件が定まったら、ロケットのシステム概念が検討され、更に、システム概念に影響するデブリ低減設計フィロソフィが検討される。以下が影響する課題である。

- (1) ロケット機体の段構成の決定には、保護軌道域との干渉、地上の傷害予測、破砕確率の最小化を考慮する。
- (2) 軌道投入機体には、廃棄マヌーバ、再突入制御機能を必要に応じて付与する。
- (3) スラッグを発生する固体モータを静止軌道域と干渉する用途に用いることは推奨されない。さもなければスラッグを発生させない推進薬を適用するか、埋没ノズルを避けるなどの処置をとる。
- (4) 地上に落下した場合に傷害予測数の目標値を満足しない軌道投入機体には、再突入制御機能を付与する。

一般にロケットは、1つの（シリーズの）機体の開発後、運用段階ではペイロード毎に打ち上げ要求に応じて機体構成上、及び運用上の相違が発生する。

5.2 号機毎のミッション解析

各号機毎に以下のデブリ関連事項を含めてミッション解析を行い、射場への出荷前審査までに審査する。

- (1) ペイロードの物理的特性とその投入軌道の再確認（軌道寿命、傷害予測数の変化の有無）
- (2) 廃棄計画
- (3) 飛行経路とフライト・シーケンス（指令破壊受信機の断、ペイロード分離後の衝突回避、軌道変更マヌーバ、残留流体の排出、再突入制御等）
- (4) 廃棄マヌーバや再突入制御に必要な量を含めた推進薬配分、

6. サブシステム／コンポーネント設計と運用

6.1 総則

本編では、デブリ対策に関連してサブシステム及び機器レベルに望まれる配慮事項を記述している。これらの配慮事項は、システム設計を受けて、デブリによる環境悪化の防止、デブリ衝突に対する防御及び地上安全に係る以下のデブリ対策手段毎に必要な機能・性能である。

- (1) 部品放出抑制策
- (2) 破砕防止策
- (3) 保護軌道域からの排除
- (4) 再突入地上安全の確保
- (5) 有人システムとの衝突回避策

本項では以下のサブシステムに分類して記述する。

- (1) 推進サブシステム
- (2) 誘導制御サブシステム
- (3) 電源サブシステム
- (4) 通信サブシステム
- (5) 構造サブシステム
- (6) 指令破壊サブシステム

6.2 デブリ関連技術と影響を受けるサブシステム

第3項では課題毎の対策フローをシステム設計のレベルで示したが、そこで要求・推奨される機能・性能を各サブシステムに如何に配分するかを本項で示す。概略を表6.2-1にまとめる。

表6.2-1 デブリ関連技術と影響を受ける宇宙機のサブシステム設計

番号	デブリ関連技術の名称	サブシステム					目的	
		推進 RCS	誘導制御	電力	通信	構造		飛行安全
1	分離放出品の低減(抑制) a) 展開・分離機構 b) スラッグ発生 c) 複数衛星打ち上げ時のアダプタ類	○				○ ○	部品の放出防止 燃焼生成物の発生防止	
2	軌道上破砕防止(運用中) a) 推進薬爆発、高压容器破裂 b) バッテリの破裂 c) 誤指令による指令破壊	○		○			○	破砕防止 破砕防止
3	軌道上破砕防止(運用終了後) a) 残留推進薬、高压ガス系による破砕 b) 指令破壊線の破砕	○					○	軌道環境保全 軌道環境保全
4	運用終了後の保護軌道域からの排除 a) 軌道変更機能 b) 残留推進薬の確保 c) 制御能力、電力確保	○ ○	○	○	○	○		廃棄マヌーバの保証 廃棄マヌーバの保証 破砕防止
5	地上安全 a) 熔融率向上 b) 毒性物質抑制 c) 再突入制御	○ ○ ○	○	○	○	○		地上傷害安全(材料選択) 地上環境保全(材料選択) 地上安全

注) RCS:リアクションコントロールシステム、

6.3 推進(誘導制御用スラスタを含む)サブシステム

6.3.1 設計時に配慮すべきデブリ対策

この項では、デブリ対策の観点から推進系の設計・運用に関して留意すべき事項についてまとめる。対象として、ロケット用エンジンと誘導制御用スラスタ(本来は誘導制御系であるが、技術分野の区分を尊重して本項に記載する)を含める。

本書では以下の推進系を意識する。

- ヒドラジンスラスタ
- 二液式エンジン(アポジエンジン、触媒型ヒドラジンスラスタ、二液式スラスタ)
- 固体モータ

推進系デブリ対策として配慮すべき事項は表6.3-1の○印の部分になる。

表6.3-1 推進系、誘導制御用スラスタに必要なデブリ対策の関係

	全系	主な構成要素			
		スラスタ	推進薬タンク	バルブ・配管類	固体モータ
部品放出防止	○				○(スラグ)
破砕防止	○	○	○	○	○
保護軌道域からの排除	○	○	○		
地上安全	○		○		
再突入制御	○	○	○		

6.3.2 推進系への対策

6.3.2.1 放出物の抑制

正常な運用における分離物はある限り放出しない設計とする必要がある。

以下が放出される懸念がある。

- (1) 固体モータは、推進薬に金属成分を含み、埋没ノズルを適用する場合は、スラグを排出する可能性があるため、GTOやGEO近傍で用いない。低軌道についても可能な限り用いないことが望ましい。
- (2) 補助推進系(アレჯモータ、レトロモータなど)は、軌道に長期的に残留する場合は特に、分離しない設計とする。

6.3.2.2 破砕防止

推進系の破砕モードには以下がある。運用中、運用終了後も含めて破砕防止対策が求められる。

- (1) エンジン、ガスジェットの作動中の不具合により爆発
- (2) 自己着火性推進薬(2液スラスタ)の燃料・酸化剤の混合による爆発(共通隔壁の損傷による爆発)
- (3) 気蓄器、推進薬タンク等の高圧タンクの爆発
- (4) 指令破壊系の不具合
- (5) 触媒式スラスタの触媒層ヒータの故障によるコールド・スタートによる破砕
- (6) 軌道離脱用固体モータ等の不具合

ペイロード分離後に残留推進薬や高圧流体などの破砕エネルギー源は排出するか、設計的に破砕しないことを保証する。

6.3.2.3 保護軌道域からの排除

宇宙機の運用終了後に必要な軌道変更を行うために推進系設計には以下が求められる。

- (1) 主エンジンあるいは補助推進系で廃棄マヌーバが実施できる機能を設計する。
- (2) 廃棄操作に必要な推進薬を確保できるようにミッション設計が行われる。

- (3) 安全で信頼性のある再着火ができるように設計する。
- (4) 電気系や他のサブシステムは廃棄マヌーバの実現に協力する。
- (5) 適切なタイミングで運用終了判断ができるように、高精度の残留推進薬管理ができること

6.3.2.4 再突入地上安全

推進系には再突入後に残存して地上に到達するものがいくつかある。液体ロケット・エンジンの構成要素、ステンレスやチタンで製造されたタンク、チタン製の圧力容器、大型のバルブ、固体モータのモータケースやノズルなどである。再突入で残存する物体を最小にする努力は払われるが、もし傷害予測数が目標値を満足しないのであれば再突入制御が計画される。

再突入制御を計画するならば、

- (1) 最終的噴射には短期的に大きな減速量を与えうる推進系を設計する。
- (2) 再突入制御のために長い時間が必要になる場合は、アビオニクスに耐放射線設計を行う。

6.3.3 機器設計上の配慮事項

6.3.3.1 液体ロケット式主エンジン

偶発的破砕発生率を0.001以下に抑えるにあたっては、エンジンの信頼性は支配的な要因である。液体大型のロケット・エンジンの偶発的破砕発生率を、他の不具合と切り離して独立に求めることは容易ではないため、エンジンの信頼度が世界的なレベル(例えば0.97程度以上)であれば、偶発的破砕発生率は0.001以下と判定して良いことがISO-16127に記されているので、それを適用することが可能である。

廃棄マヌーバを行うためには、再着火機能を望まれる。そうでなければ補助推進系で行うことになる。

6.3.3.2 ガスジェット・スラスタ等補助推進系

補助推進系は、姿勢・経路制御、コースト・フェーズ後の再着火前の推進薬セトリングのための加速、衝突回避のためのレトロ・スラスタなどに用いられる。

偶発的破砕発生率を0.001以下に抑える件については、6.3.3.1項のエンジンと同様に信頼度が世界的なレベル(スラスタは0.94程度以上)であれば、破砕確率は0.001以下と判定可能である。

[注：ある種のガスジェット・スラスタは、触媒層ヒータの故障によるコールド・スタート状態で破砕を起こすことがある。そのような場合はヒータの故障に対する適切な対応(FDIR等)が可能なように設計する。]

6.3.3.3 推進薬タンク設計

推進薬タンクの設計には以下を配慮することが望ましい。

(1) タンク容量の見積もり

タンク容量は通常のミッション運用に必要な推進薬に加えて、様々なデブリ関連要素を加味することが望まれる。低軌道宇宙機であれば例えば概念的には以下を確保することが望ましい。

$$\text{(推進薬量)} = \{ \text{(ミッション運用に必要な量のノミナル)} + \text{分散量} \} + \text{(廃棄マヌーバ用)} + \text{(コントロール・リエントリ用)} + \text{(無効推進薬量)} \} \times \text{(推進薬推定誤差分)} + \text{(マージン)}$$

(2) 再突入地上安全の確保

タンクの材質は、再突入で溶融することを考慮して選定することが望まれる。大型のステンレス製タンクやチタン製の小型タンクやモータケースは残存したものが発見されている。CFRPとアルミスキンのタンクが開発されているので、それを適用することも考えられる(国産化中)。

(3) 破砕防止

世界的に共通隔壁タンクは燃料と酸化剤の混合によって爆発する事例が多い。液体推進系の場合は混合防止のため、酸化剤タンクと燃料タンクは極力独立させ、隔壁で仕切った共通タンクは用いないことが望ましい。

(4) 残留推進薬の排出ラインの設置

運用終了後に極低温推進薬の気化による破裂事故が起きたことがある。運用が終了した段階で残留推進薬を投棄できる設計とする。あるいは昇圧による破裂がない設計とする。(投棄にあたっては凍結による閉塞や宇宙機の姿勢擾乱に配慮した設計とすること。)

[参考1:ブラダ式の小型タンクなどは排出機構を持たない場合が多いが、その十分な安全余裕が必要である。]

[参考2:自己着火性の推進薬のセットで、共通隔壁で仕切った一体型タンクを用いる場合は以下のリスクがある。]

- ① デブリの衝突で隔壁が損傷を受けて爆発する。(残留推進薬が完全排出できず、軌道に長期間存在する場合)]
- ② 隔壁の湾曲の内側と外側のタンクの圧力差が不適切な状態になると隔壁が破損する。
- ③ 長期間経過して隔壁が劣化/腐食した場合は推進薬の混合が懸念される。]

[参考3:排出機構の設計には以下の配慮が望まれる。]

- ① 排出に際の減圧で沸騰が起き、タンク破裂を誘発することがある。
- ② 排出の際の減圧で断熱膨張により周囲温度が低下し、排出機構を凍結させ、排出を妨げることがある。]

6.3.3.4 高圧容器設計

運用中の破砕の防止要求については、安全係数及び安全余裕が保証されている構造要素、安全弁やラプチャ・ディスクを有する圧力容器、LBB 設計が適用されている圧力容器は、適用範囲において、それぞれ偶発的破砕発生率はゼロと見なす。LBB 設計の圧力容器は想定外の急激な圧力上昇が無いことを前提とする。

運用終了後の破砕防止要求については、数年間以上軌道に放置される高圧容器(気蓄器、高圧推進薬タンクを含む)は運用終了後に排出できる設計とするか、レギュレータ・ブリードバルブなどで減圧されるまでの間、破裂しないことを保証する。(入熱を考慮しても破裂の危険性がない十分な安全性が確保されていること)。

当該容器がチタン製の場合は再突入後に残存して地上に到達することに配慮する。[6.3.3.3 項(2)参照]

6.3.3.5 バルブ、配管設計

バルブ、配管類については設計にあたり、以下の点に留意する。

- (1) 運用終了後に残留流体が投棄できるような機構とすること。配管に少量トラップすることは構造破壊を生じさせない程度であれば許容される。
- (2) 偶発的偶発的破砕発生率を 0.001 以下とする件については、エンジン、スラスタ以外のタンク加圧系などについては、バルブ類の配置、設計、品質(故障確率)に留意し、FMEA 等により爆発事象に至る確率を解析的に求めて、確認する。
- (3) 残留推進薬等の排出時の凍結・閉塞防止策を講じること。

6.3.3.6 エンジン・コントロール・アビオニクス

再突入制御を計画する場合は、6.3.2.4 (2)に記述したように、耐放射線設計が配慮される。

6.3.3.7 その他留意すべき事項

既に記述したように、大気中に落下させる場合には、大気中で熔融しない可能性のある高融点の材料は原則として使わない。もし、該当する材料があれば、リスト化して報告する。熔融度を高めるためには、代替材料使用の検討、落下時に細分化する工夫等を実施する。

大気に落下する際に大気、地上の環境、人に対して影響を与える可能性のある毒性物質は使わない。該当するものがある場合にはリスト化して報告する。

6.3.4 固体モータ

- (1) 物体の放出について

着火後に放出されるタイプのイグナイタの仕様は、それが周回軌道に残存するならば控えるべきである。

ノズル・クロージャも軌道に残存する場合は、控えることが望ましい。

アルミニウムなどの金属を含む推進薬を用いて、埋没ノズルを適用する固体モータはスラグを発生させることが報告されている。ISO-24113は、それらは少なくとも静止軌道に干渉する恐れがある軌道には適用しないように求めている。近い将来、低軌道に対しても同様な規制が加わる方向で議論が進められている。

(2) 破碎事故について

固体モータの推進薬インゴットの欠陥は爆発を誘発することがある。飛行前に地上にて非破壊検査により、内部に欠陥がないことを確認することが望ましい。

6.4 誘導制御系サブシステム

6.4.1 設計時に配慮すべきデブリ対策

本項では、ロケットに搭載される姿勢制御系、航法・誘導系（以下、まとめて誘導制御系とする）のデブリ対策について述べる。

誘導制御系は、制御器、センサ、アクチュエータ（スラスタ）等によって構成される。

配慮すべき事項は表6.4-1の○印の部分になる。

表6.4-1 誘導制御系に必要なデブリ対策の関係

	全系	主な構成要素		
		ジャイロ、センサ類	電子回路	アクチュエータ
保護軌道域からの排除	○	○		推進系の補助推進系の記述を参照
再突入制御	○	○		

6.4.2 誘導制御系への対策

6.4.2.1 保護軌道域からの移動

推進系を用いて廃棄操作を行う場合は、誘導制御系は位置・速度・姿勢を同定し、軌道の決定を支援し、推力ベクトルを制御してマヌーバ操作を実行する。

6.4.2.2 地上安全の確保(落下区域制御)

再突入制御を行う場合は、再突入開始点まで高精度で位置・速度・姿勢を同定しなければならない。必要に応じて地上設置の測距システムや衛星からのデータ提供の支援を受ける。これらの機能が必要となる。これはロケットの基本機能で実現できるが、再突入経路開始点に移動するまでに時間を要することから、耐放射線性に配慮が求められるであろう。

[注:JERG-0-047「再突入機の再突入飛行に関わる技術基準」に従えば、再突入はロケットの健全性が確認できた場合にのみ行う。燃焼開始信号にはインヒビットを設け、地上からの軌道離脱許可コマンドを受信するか、自律的に軌道離脱可能と判断した場合にのみ、燃焼開始信号のインヒビット解除を行うように設計する。]

6.5. 電源系サブシステム

6.5.1 設計時に配慮すべきデブリ対策

宇宙機に搭載される電源系は、電力発生、電気エネルギー蓄積、電力制御、電力分配の機能を有する機器によって構成されている。

電源系のデブリ対策として配慮すべき事項は表6.5-1の様になる。

表6.5-1 電源系設計時に配慮すべきデブリ対策(宇宙機)

	電源系	主な構成要素	
		バッテリー	制御／分配器／ケーブル
破砕防止	○	○	
保護軌道域からの排除	○(通常機能)	○	○(通常機能)
地上安全	○	○(残存)	
再突入制御	○(通常機能)	○	○(通常機能)

6.5.2 電源系への対策

6.5.2.1 破砕防止

破砕源としてはバッテリーがあり、過充電や過放電、温度上昇等で破裂しない設計であることが望まれる。[6.5.3.1項参照]

推進薬タンクの破砕防止のために残留推進薬を排出するためには、バッテリーは排出が完了するまで排出弁を開状態に保つのに必要な電力量を供給する。

6.5.2.2 保護軌道域からの排除

バッテリーは廃棄操作(及びその後の残留推進薬の排出操作)が完了するまでの必要な電力量を供給する。

6.5.2.3 地上安全の確保

再突入の際、電源系ではバッテリーケースが残存する可能性がある。再突入溶融解析の際に確認することが望まれる。

6.5.2.4 再突入制御

再突入制御に必要な電力を供給できるようバッテリー容量を設計する。

[注:再突入のためのエンジン燃焼または姿勢制御系スラスタ噴射終了までに必要な電力量を供給する。姿勢制御系スラスタを使用する場合、増速量発生時間が長くなるので注意を要する。また、ロケットの打上げ射場と衛星の投入軌道によっては、衛星分離後、ロケットの可視性が確保され安全な再突入燃焼を開始できる地点へ到達するまで地球を複数周回する場合がある。新規にロケット開発を行う際は、そのロケットの想定する各種ミッションに対して安全な再突入が可能なようにミッション時間を設定する必要がある。(例えば、東打ちでは衛星分離後直ぐに安全な再突入地点に到達するが、太陽同期軌道では衛星分離後2周回を要する場合であれば、設計時には2周回を見込んだミッション時間の設定が必要。ミッション時間はロケットの信頼性算出の基準時間にも影響する。)]

6.5.3 機器設計上の配慮事項

6.5.3.1 バッテリーの設計

バッテリーは以下の事項に配慮して設計・製造される。

- (1) 破裂を起こさないよう、十分な安全余裕のある強度と寿命を有する。
- (2) 異常な内圧の上昇と構造的破壊を引き起こさないよう、電氣的・機械的・熱的に適切な設計・製造が行われる。

- (3) バッテリの内圧の上昇を制限するためのラプチャ・ディスクやリリーフバルブを付加してバッテリーの破裂とそれに起因する機体の損傷を未然に防止できる設計とする。
- (4) デオービットやリオービット、残留エネルギーの排出(排出弁の開状態維持)、落下区域制御を計画する場合は、必要な電力を確保できる設計とする。
- (5) 再突入溶融解析の際に残存性を確認する。

6.5.3.2 電力制御／分配器、ケーブルの設計

基本的にはロケットに要求される基本機能で実現できるが、再突入経路開始点に移動するまでに時間を要することから、耐放射線性が必要になる。

6.6. 通信系サブシステム

6.6.1 設計上配慮すべきデブリ対策

通信系には計測・テレメトリ、コマンド、通信の機能が含まれる。通信系のデブリ対策として配慮すべき事項は表6.6-1の様になる。

表6.6-1 通信系設計時に配慮すべきデブリ対策(宇宙機)

	通信系	主な構成要素	
		計測・テレメトリ	コマンド、通信
破砕防止	○(通常機能)	○	
保護軌道域からの排除	○(通常機能)	○	
再突入制御	○	○	○(通常機能)

6.6.2 破砕防止

通信サブシステムに破砕エネルギー源はない。

運用中の破砕の兆候を検知する監視システムの要求については、飛行安全用監視システムに求められる以上のものない。

運用終了後の破砕については、残留推進薬の排出などに関する特別な要求はないが、排出バルブの開状態をモニタし、送信する機能があることが望ましい。

6.6.3 保護軌道域からの排除

長楕円軌道から軌道寿命を短縮する場合、信号レベル、ドップラ帯域について、落下区域制御／再突入時と同様の対応をする。

6.6.4 再突入制御時の通信リンクの確保

再突入制御の実施の間、通信・コマンドリンクを確保して、地上支援(経路監視)を可能にする目的から、軌道高度低下に伴う信号レベル変化やドップラ帯域を考慮して次の設計や運用を行う。

- (1) 再突入経路開始点に移動するまでに時間を要することから、耐放射線性に配慮する。
- (2) 再突入開始時点を決定し、健全性を監視することが求められるならば、必要な機能の健全性を監視する機能を付与する。
- (3) 再突入開始のコマンドを受ける場合は、受信に必要な機能を設ける。

6.6.5 再突入制御時の通信下限高度

再突入を実施する場合は、通信機器を利用する下限高度を定める。

例えば、機器側がドップラ帯域に対して135 Hzまで対応可能とすると、高度200 kmで50Hz 程であるので、機能的は問題なく対応できる。

6.6.6 機器設計上の配慮 (電子機器の対応)

ロケットに必要な基本的機能を有するならば、デブリ低減に関する特別な要求はない。

再突入制御を行う場合は耐放射線性が求められる。

6.7. 構造サブシステム

6.7.1 設計上配慮すべきデブリ対策

構体系には、構体(機器搭載パネル、段間結合、アダプタ等)、衛星展開機構、ダミーマス等を含む。デブリ対策として配慮すべき事項は、表6.7-1の様になる。

表6.7-1 構体系設計時に配慮すべきデブリ対策

	構体系	主な構成要素		
		構体類	衛星展開機構	ダミーマス
部品放出防止	○		○(締結具)	
地上安全	○(溶融設計)	○		○

6.7.2 構体設計への配慮

6.7.2.1 デブリ放出の防止

ロケットから分離放出される物体については以下の配慮が求められる。

- ① 上段の段間継ぎ手部、宇宙機搭載用アダプター及びモータ結合部については、爆発ボルト、クランプバンド等の締結具等を作動後に機外に放出しない構造とする。
- ② 分離した下段部を上段部に追突させない対策としては、ヨーウェイト、ヨータンブラなど外部に放出する方式は避け、推力発生装置等を採用する。
- ③ 複数ペイロード搭載時の下部アダプタは、不可避なものとして許容されてきたが、国際標準化機構では欧州側から、追加ペイロード1機に対してアダプタの破片は1個とする案が提示されている。

6.7.2.2 落下時地上安全保障のための適正材料の選択等

トラス(ストラット)類、ダミーマスなどの構造材は再突入後に残存する可能性が高い。溶融し易い材料が選定される。

6.7.3 機器設計上の配慮

6.7.3.1 構造サブシステム(構体、展開・分離機構等)

- (1) 展開分離機構に用いる爆管等の破片がデブリとなって放出されることを防止する。
- (2) 部材をやむを得ず放出する場合は軌道寿命が25年以下となる高度で実施する。
- (3) 再突入で溶融し易い材料の使用が推奨される。主構造を構成するトラス(ストラット)にチタン、ベリリウム等の高融点・高比熱の材料は残存する可能性が高いので、極力使用を避けるか、再突入時に細分化するよう工夫する。

6.7.3.2 ダミーマス

ダミーマス(予定していた相乗り衛星がキャンセルされた場合などに適用される)を設ける場合、落下の際の溶融性を向上させるために高融点・高比熱の材料の使用は極力を避け、一体の金属ではなく細分した小片を結合させた構成とすることが望まれる。

6.8. 指令破壊系サブシステム

6.8.1 設計で配慮すべきデブリ対策

デブリ対策として配慮すべき故障モードは表6.8-1の様に指令破壊用機器の計画外の作動による破砕である。

表6.8-1 指令破壊系設計時に配慮すべきデブリ対策

		指令破壊系	主な構成要素	
			破壊指令受信機	爆破線
破砕防止	ミスコマンド	○	○	
	異常爆発			○

6.8.2 破砕防止対策

6.8.2.1 ミスコマンドによる破砕の防止

指令破壊受信機は、飛行安全監視圏外を脱して不要となった時点でOFFとし、ミスコマンドや電波干渉による破砕を防止する。

6.8.2.2 爆破線の太陽加熱による破砕の防止

爆破線が太陽加熱で爆発する恐れがある場合は、熱シールドを設けてクックオフ温度以上に加熱されることを防止する。