

スペースデブリに関する取組について

(1 - 1) リスクの把握・予測・抑制とその対策について

2019年 3月 27日

国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構

スペースデブリの現状と対策の議論

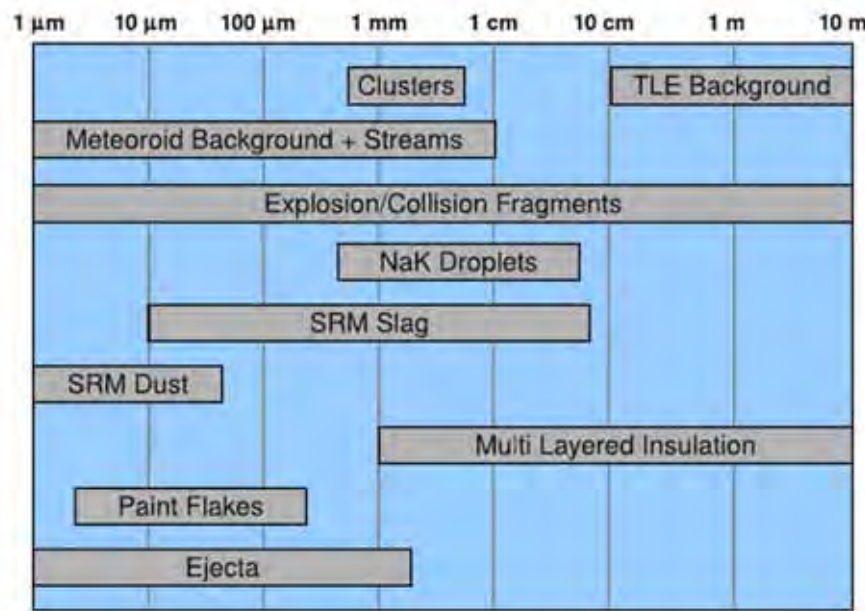
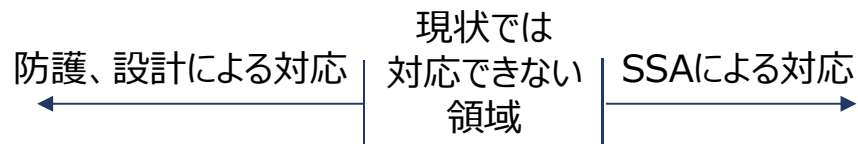
- ▶ 宇宙空間の安定的利用の確保と我が国の安全保障能力の強化のためスペースデブリ対策は喫緊の課題。
- ▶ カタログ化された軌道上物体は約19,521個(大きさ10cm以上、SpaceTrack.org,2019年3月25日)。
 - 世界全体で衝突回避運用は約100回／年程度実施されている。
 - より微小なミッション終了など致命的な故障に繋がるより微小デブリは50～70万個(大きさ1cm以上)。
 - ✓ 追跡、防護、除去が困難。宇宙機の破砕・衝突の未然防止が唯一の対応策。
- ▶ IADCなど国際的な議論の場では、近年の衛星コンステレーション構想を踏まえた対策が議論。
 - IADCガイドライン：ミッション終了後の廃棄(PMD)遵守率の明記(90%以上)等を検討中。
 - 衛星コンステレーション構想を考慮したガイドラインの検討。
(例：米SpaceX社が低軌道域(高度2000km以下)に約12,000機の通信衛星投入を計画。)

民間主体の規制・ルール化の活動

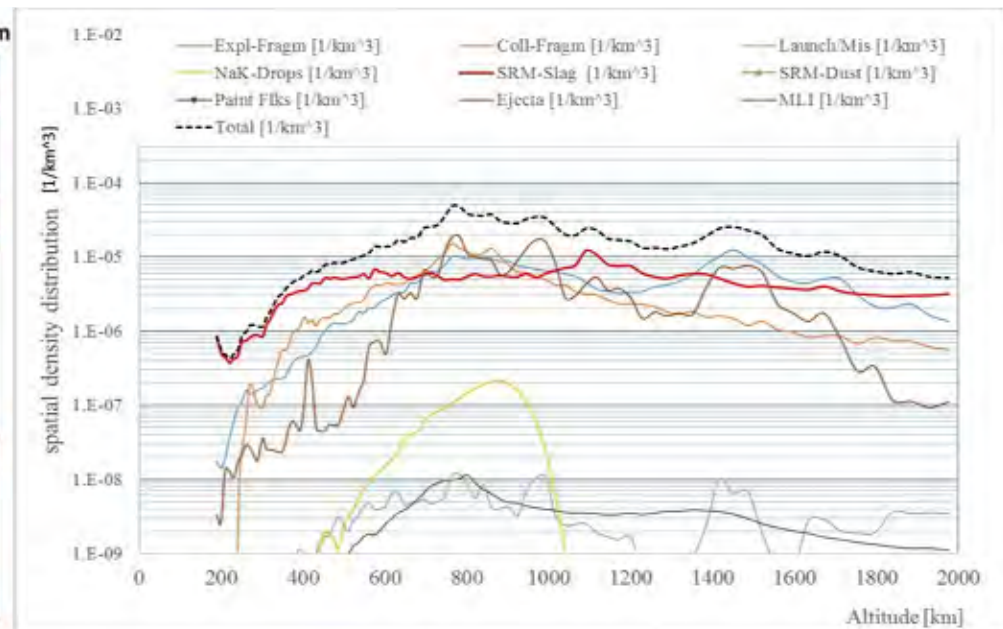
- ▶ WEF (World Economic Forum)
 - 欧州産業界を中心として、2019年度にスペースデブリ低減に取り組む衛星運用者のレーティング開始を目指して議論が進められている。
- ▶ CONFERS(The Consortium for Execution of Rendezvous and Servicing Operations)
 - 米国を中心に民間企業のみで構成されるコンソーシアム。
 - 軌道上サービスに関して民間企業が自己規制を確立し、ISOの国際標準に落とし込むことを目標に要求検討を進めている。

デブリ対策は監視すること、防護すること、低減することに大別される

- SSAはある程度以上の観測・追跡が可能なデブリの軌道を予測し、衝突予測に基づき宇宙機の回避運用を行うもの。
- SSAの技術開発の方向性は①軌道の予測精度を向上してより確度の高い衝突警報を出すこと、②より細かいデブリを観測できるようにしてSSAによる対応領域を拡大すること、③環境モデルを軌道上検証等により、改良していくこと。

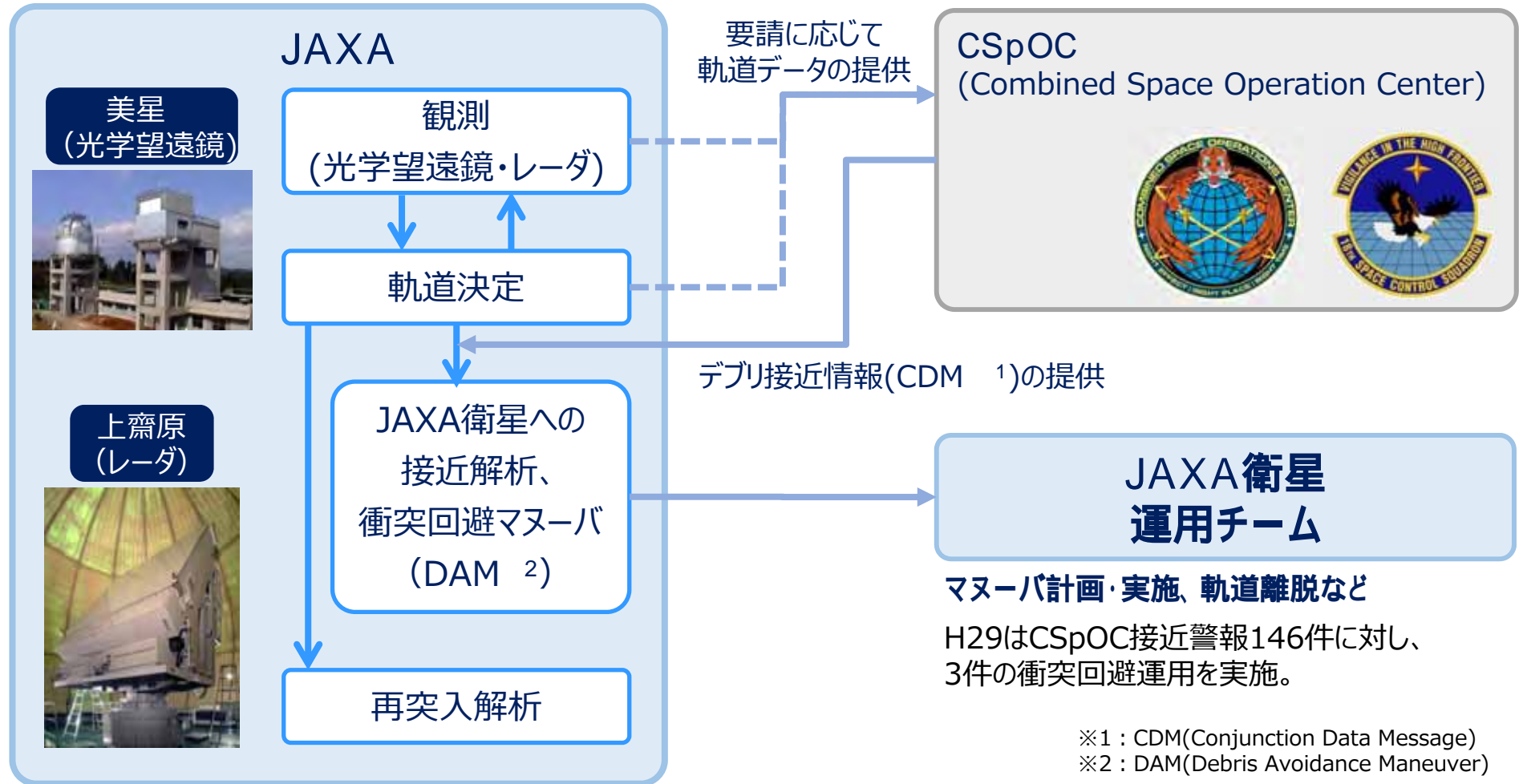


デブリの分類とその大きさ



モデルによる軌道高度に対する密度 (個数) 分布

宇宙空間の安定的利用のため、宇宙物体の軌道を把握、管理する
SSA（宇宙状況把握：Space Situational Awareness）の推進が重要



JAXAのSSAシステムプロジェクトチームは、2023年運用開始を目指して、レーダ及び解析システム（接近解析・再突入解析）の能力向上、光学望遠鏡の更新を進めている。

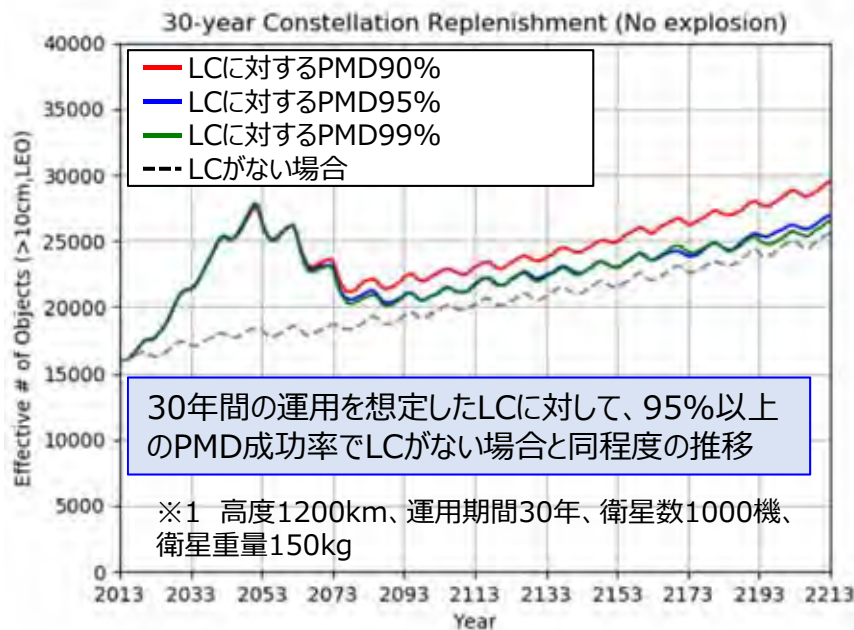
デブリ対策関連ツールは多岐に渡っており、我が国もツールを維持・改良していくことが重要

※JAXA調べ

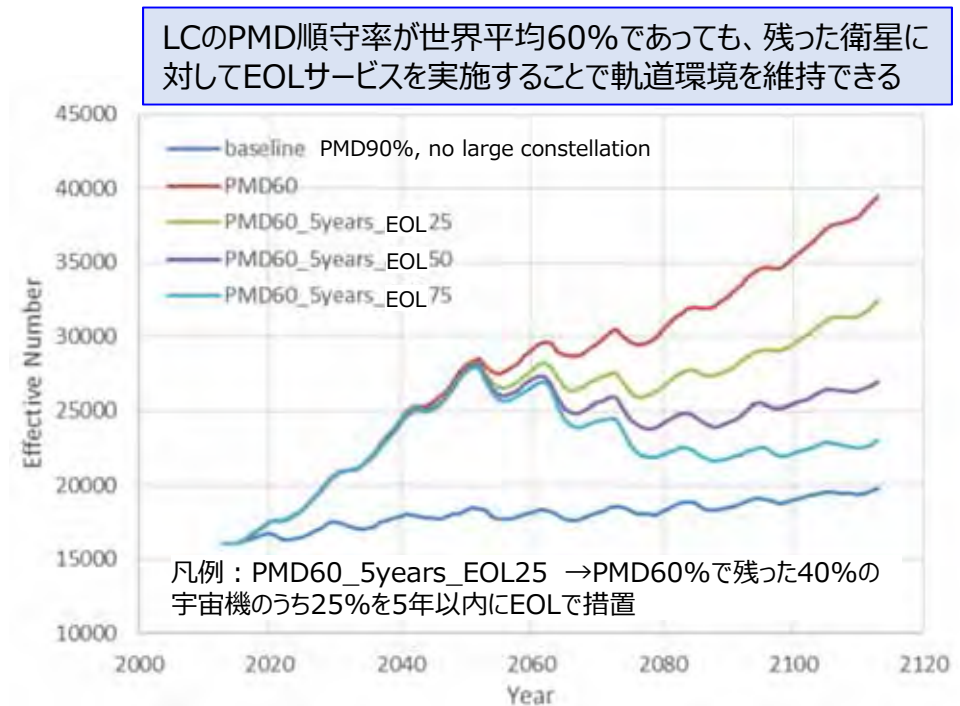
		JAXA	NASA	ESA	CNES	民間
状況把握 /環境予測	環境モデル		ORDEM	MASTER	無し	
	デブリ観測とカタログ維持	DONUTS	a.i. solutions社のS/W	GMV社のS/W DISCOS(データベース)	CAESAR	
	推移モデル	NEODEEM	LEGEND	DELTA	MEDEE	
軌道解析 /接近解析	簡易用途 (25年ルールへの適合などの軌道寿命評価等、基本的な要求適合性確認)	DEMIST	DAS	DRAMA/OSCAR	OPERA, CAESAR	欧州はGMV社製品またはCNESのCAESAR 米国系はSTK(AGI社)またはa.i. solutions社
	詳細軌道解析用途	DONUTS	a.i. solutions社のS/W	GMV社のS/W	STELA, CAESAR	欧州はGMV社製品またはCNESのCAESAR 米国系はSTK(AGI社)またはa.i. solutions社
溶融解析 /リスク評価	簡易用途(基本的な要求適合性確認)	DEMIST	DAS	DRAMA/SARA	DEBRISK	
	エキスパート用 (Object Oriented)	ORSAT-J	ORSAT	DRAMA/SARA	DEBRISK	
	エキスパート用 (Spacecraft Oriented)	研究中	不明	SCARAB	PAMPERO	
突 撃 影 響 解 析	防護性能評価	TURANDOT	BUMPER	ESABASE DRAMA/MIDAS	不明	
その他		ROE (HTV用制御再突入計画/監視ツール)			DOORS (制御再突入用マヌーバ計算ツール)	

PMD遵守率向上の代替策としてのEOLサービス¹実施の効果を検討

- JAXAの推移予測ツールによる解析では、ラージコンステレーション (LC) に対してはPMD95%以上が必要 (左図)
- そのPMD率が達成できない場合の代替手段として、EOLサービスはPMD順守率向上と同様の効果を持つ (右図)
 - ✓ PMD60%の遵守率に対して、運用終了 (EOL) 後5年以内に除去を想定し、その除去率の効果を検査
- 本推移予測ツールはIADC等の国際議論に必要なインフラとして改良を進めているものであり、現状は世界の先進的なツールに比べて遜色のないものであり、国際的に不利なルールが出来ないように議論に備えることができる



LCのPMD遵守率による違い

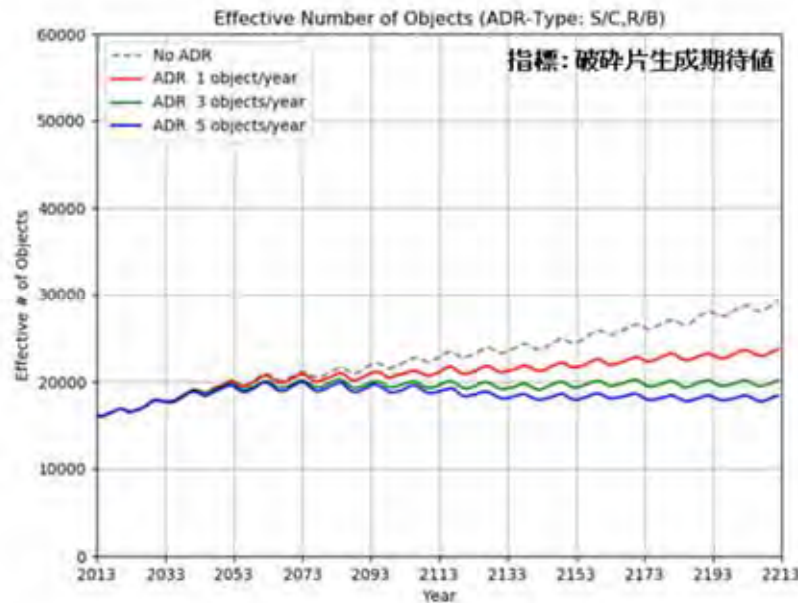


EOLサービスはPMD遵守率を高めるのと同等の効果

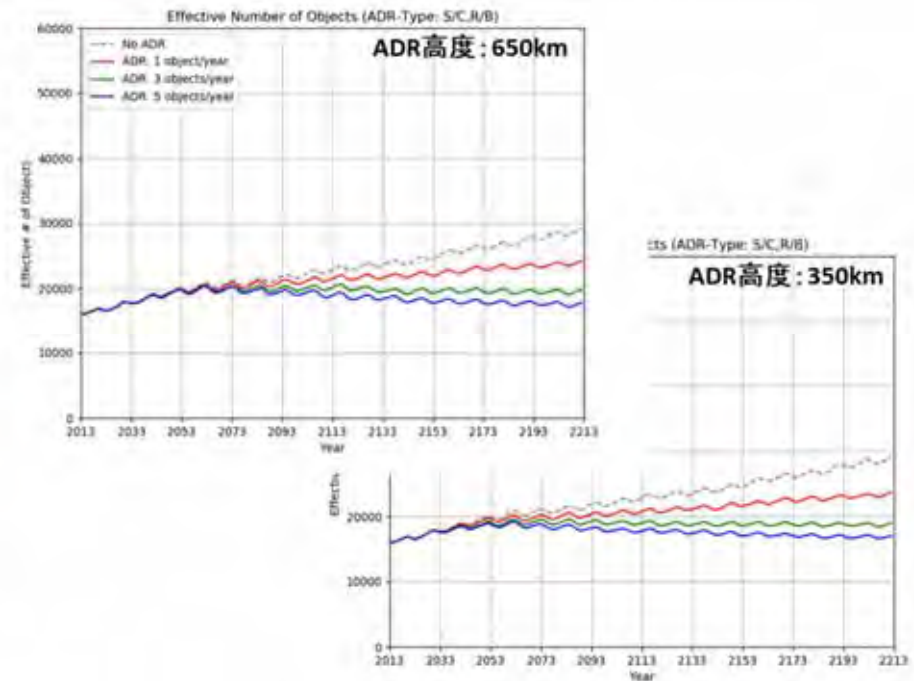
※1、EOL (End of Life) サービス : 今後打ち上げられる衛星等の宇宙機を対象に、ミッション終了後の軌道上措置 (軌道遷移や除去) をする事業

PMD順守率向上の代替策としてのADR事業 1 実施の効果

- 破砕片生成期待値を指標として解析
 - ✓ 指標上位から年間3機のADRにより現状維持が可能（左図）
 - ✓ 捕獲が行いやすいLEOの円軌道にあるロケット上段のみを対象とした場合でも、年間5機のADRで現状維持
- 軌道遷移させる高度の影響を解析
 - ✓ 25年投棄軌道（650km）で十分な効果（右図）⇒より低コストなADRミッションの実現が期待される



ADRの効果

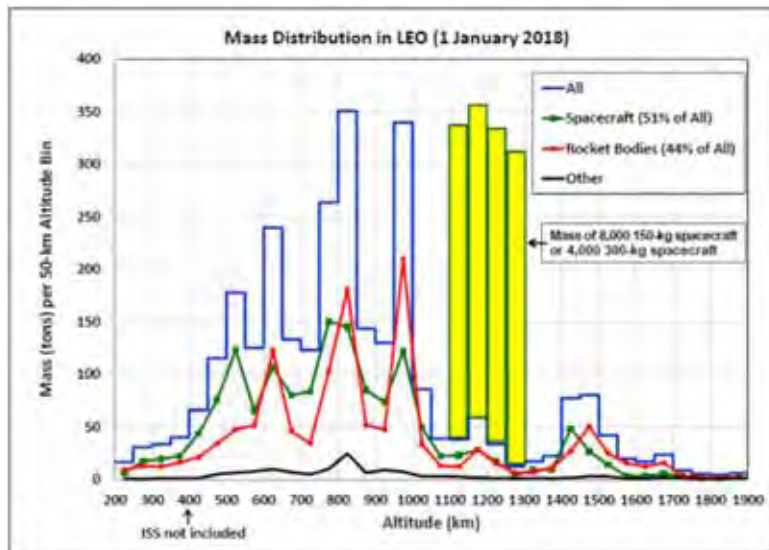


ADR投棄高度の比較

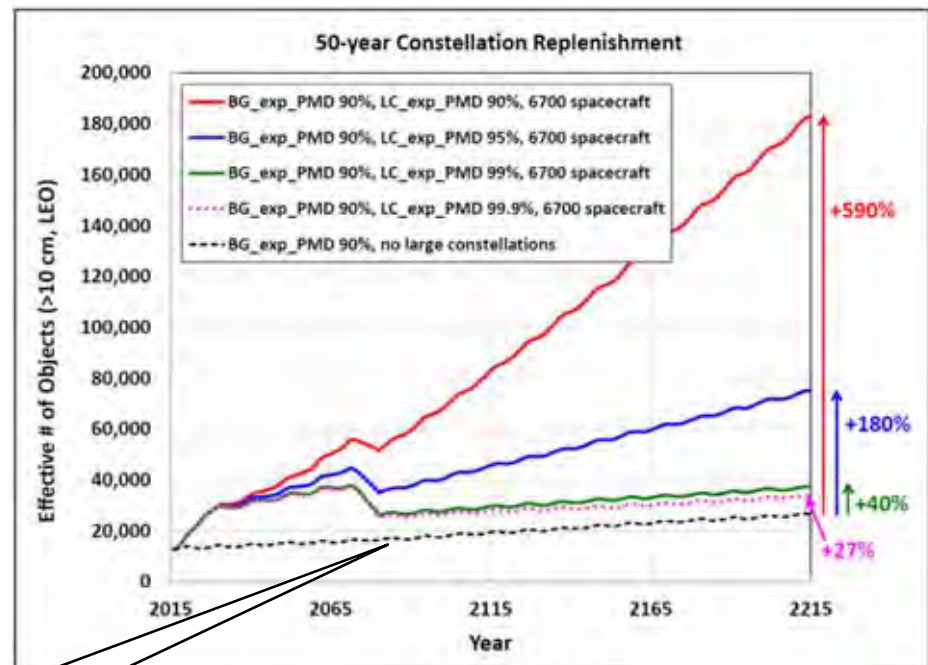
※1、ADR（Active Debris Removal）事業：既存のデブリを除去する事業（資料1-2におけるJAXAのデブリ除去構想の延長にある事業）

NASAのラージコンステレーション (LC) 投入によるデブリ推移予測の解析結果 1

- 高度1100~1300kmに150kgと300kgの衛星を合計8,300機投入された場合のインパクトを予測
- 個別の衛星は運用期間5年で新たな衛星に置き換え、コンステレーションとしては50年間運用するシナリオ



解析条件：コンステレーションの投入高度と機数の分布

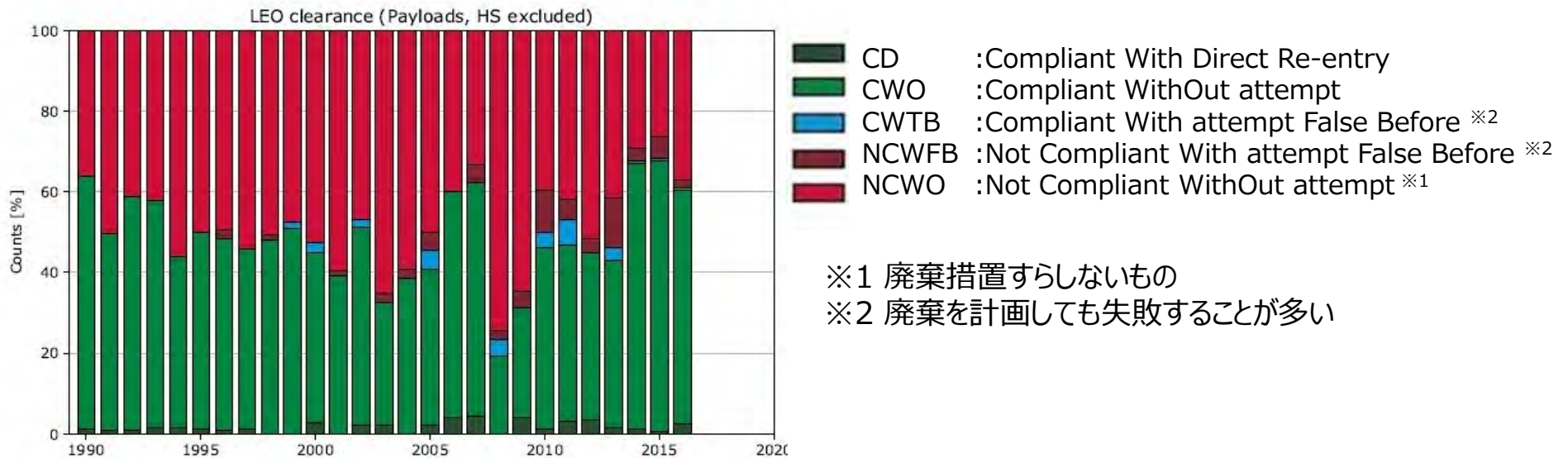


コンステレーションがない場合の推移予測 (PMD90%の場合)

コンステレーションが50年運用された場合
PMD99%以上 (緑) で基準と同程度
PMD90% (赤) では衝突回数は平均年3回起こる予測

IADCのデブリ低減ガイドラインは遵守率が低い

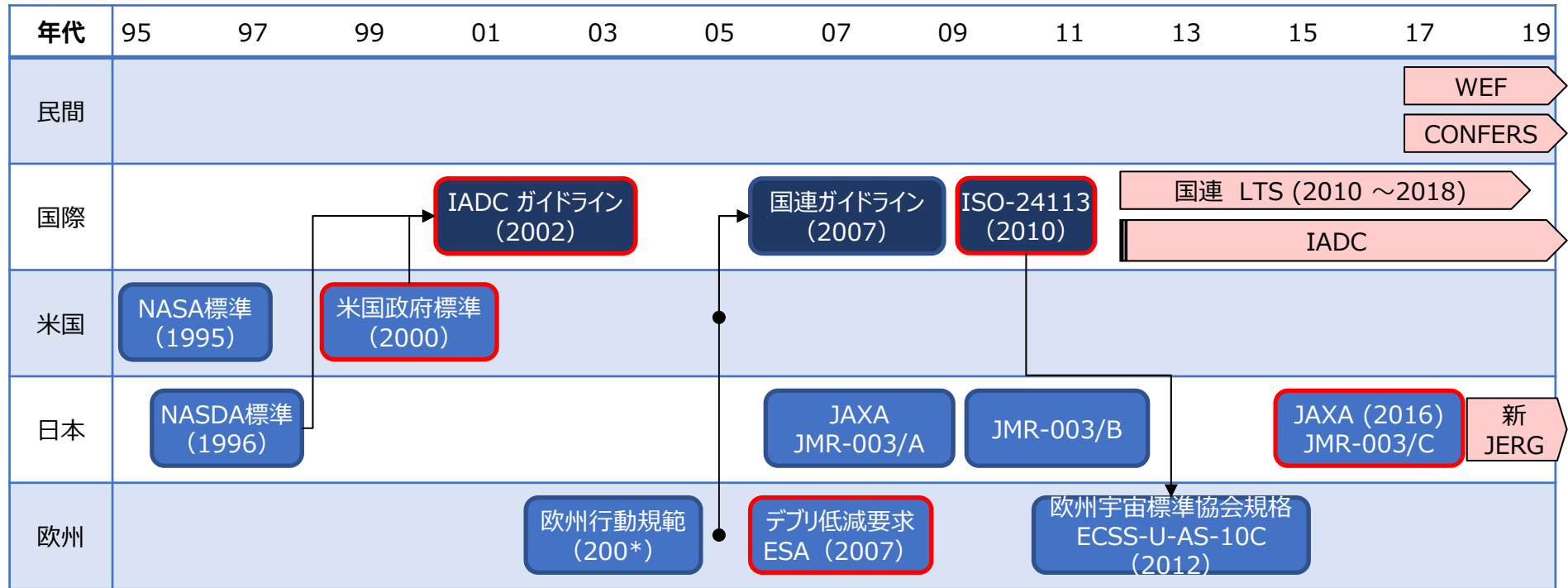
- 衛星を25年以内にLEO保護領域から排除するための廃棄措置については、約1/3の衛星が軌道変更の試みすらしていない(下図の※1)
- 軌道変更を実施しても失敗するケースが多い(下図※2)
- ただルールを作ればよいということではなく、ルールに実効性を持たせることが重要。また、ルールに実効性を持たせるタイミングは世界の動向と足並みを揃えることも重要。
- 我が国のロケット/衛星はJAXAのスペースデブリ発生防止標準(JMR-003C)により、IADCガイドラインよりも厳しい条件で設計・運用要求を設定。



LEOにおける運用後の廃棄の状況 (有人飛行を除く)

※ ESA Space Debris Office, "ESA's Annual Space Environment Report", 18 May 2018

(参考) デブリ低減ガイドラインにおける基準の比較



	運用中 放出品	軌道上破砕	衝突	運用後 (静止軌道)	運用後 (低軌道) 滞在期間	運用後 (LEO) 軌道上回収	運用後 (LEO) 再突入地上被害
ISO-24113	燃烧生成物 <1mm	破砕発生率<10 ⁻³		リターン235km 成功確率>0.9	残存25年以内 成功確率>0.9		○
IADC ガイドライン	○	○	○	リターン235km	残存25年以内推奨	○	○
米国政府 標準	規制>5mm 軌道寿命25年	○		>36100km (>300km+GEO)	EOL残存<25年 墓場軌道への移動	10年以内	E _c <10 ⁻⁴
ESA 要求	スラグ/粒子 <1mm	圧力容器等の対処 2ヶ月以内	評価	リターン235km	残存25年以内		E _c <10 ⁻⁴
JAXA JMR-003	燃烧生成物 <1mm	破砕発生率<10 ⁻³	○	リターン235km 成功確率>0.9	残存25年以内 成功確率>0.9	○	○