

E1

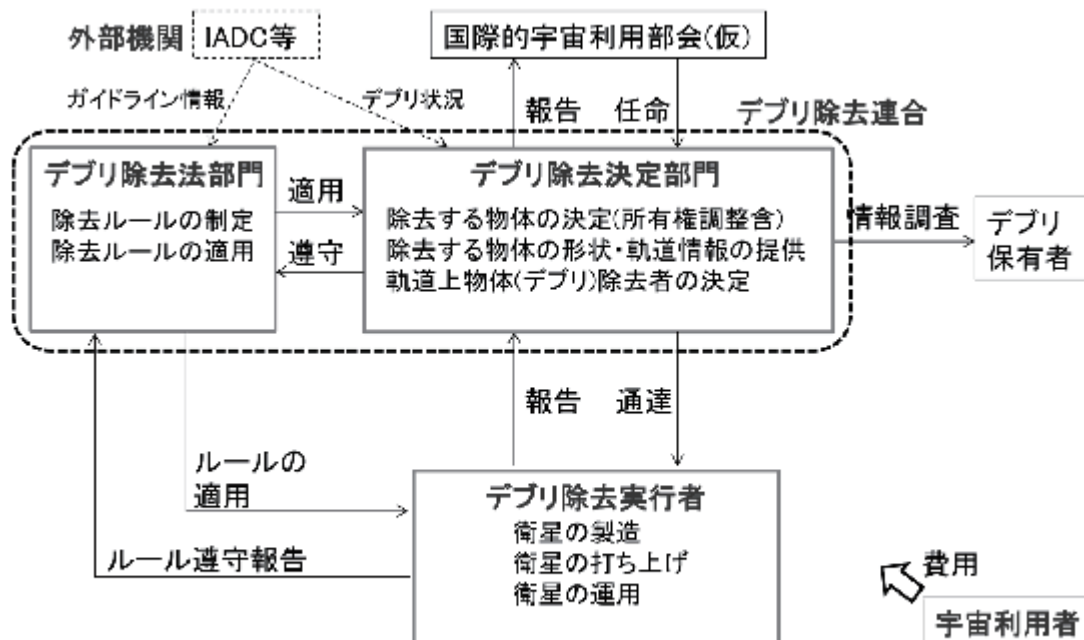
## デブリ除去のための国際枠組みの検討 Study of International Framework on space debris removal

○後藤大亮、辻田大輔、河本聡美(宇宙航空研究開発機構)、  
大塚聡子、神武直彦、狼嘉彰(慶應義塾大学大学院 SDM 研究科)

○Daisuke Goto, Daisuke Tsujita, Satomi Kawamoto (JAXA),  
Akiko Otsuka, Naohiko Kotake, Yoshihiko Ohkami (Graduate School of SDM, Keio University)

近年、各国のデブリ対策、および除去に向けた研究開発へ投入されるリソースは拡大しつつあり、宇宙環境保全のためのデブリ除去は必須であると世界各国が捉え始めている。我々は、人類の共通活動領域である宇宙の環境保全は国際協力の下に実施すべき課題であると捉え、最大の除去効果を定常的に得られるように導くことが可能となるような枠組みを検討した。本検討では、枠組みをシステムとして捉え、システムエンジニアリングの設計手法を活用し、要求分析・機能分析・機能配分・統合を行った。現行の国際的枠組みである温暖化ガスや INTELSAT 等をリファレンスモデルとして、枠組み構築過程、及び、枠組みの運用も考慮した。これらをまとめ、実現性の高いデブリ除去枠組み案を構築した。

Recently, many countries begin to invest much resource for developing the debris removal technologies. This indicates these countries acknowledge it is important to realize clean space environment by removing debris for future space utilization. However, currently, each is only carrying out engineering developments respectively. Since space should be shared by the entire human race, we consider the debris problem as a worldwide problem, not a country's one. Based on the awareness of the issue, we study establishing the international framework for space debris removal.



国際デブリ除去枠組み（組織）案

# デブリ除去のための国際枠組み の検討

Study of International Framework on Space Debris  
Removal

後藤大亮、辻田大輔、河本聡美(JAXA)

Daisuke Goto

Daisuke Tsujita

Satomi Kawamoto

大塚聡子、神武直彦、狼嘉彰(慶應SDM)

Akiko Otsuka

Naohiko Kohtake

Yoshihiko Ohkami

Keio Univ. SDM

第6回スペースデブリワークショップ

6<sup>th</sup> Space Debris Workshop in Japan

2014.12.17～19

1

## <注意事項>

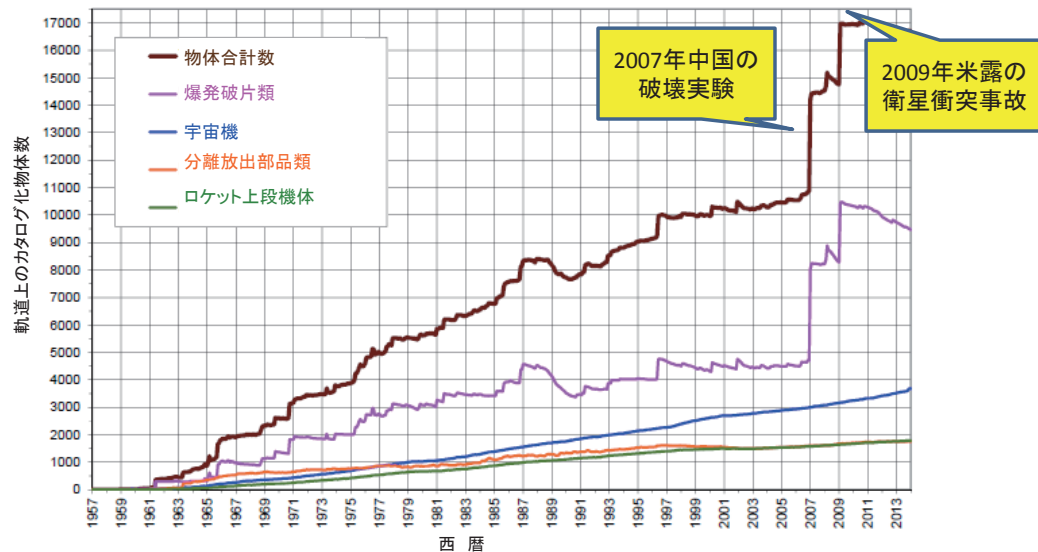
本発表は著者の関心、問題意識に基づいた検討結果であり、如何なる機関・組織の合意を得ているものではないことをご了承ください。

Notice!

This presentation is based on our voluntary activities, NOT JAXA's official opinion.

2

# 1.導入 Debris number Increasing



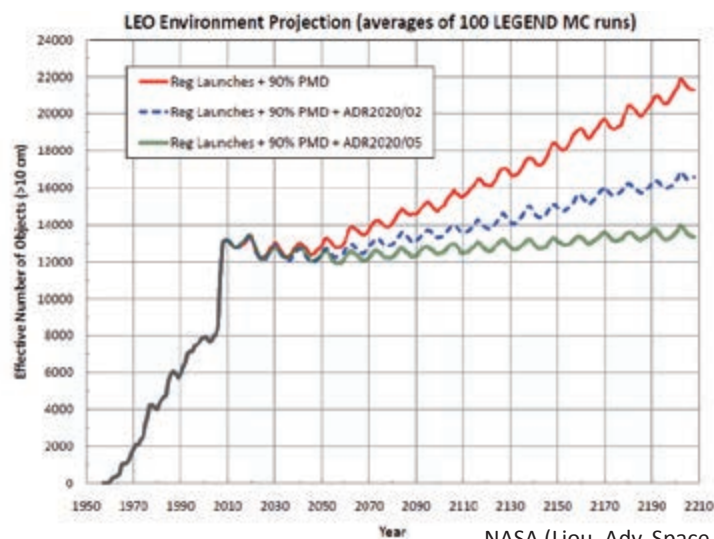
軌道上デブリ数は年々増加の一途を辿っており、IADCによるデブリ除去低減ガイドラインの提示、及び、デブリ除去ガイドライン作成着手、それに呼応して進む各国のデブリ除去研究開発へのリソース投入状況から、デブリ除去による宇宙環境保全は必須と世界各国が捉え始めている。

Realizing the Sustainable Space Environment

本発表では、現状を踏まえ、「**持続的な宇宙環境保全を実現する**」ことを要求として、システムエンジニアリングのシステム設計に基づく、デブリ除去枠組み構築検討結果を示す<sup>3</sup>

## 2.1 要求分析 What is necessary for Realizing Sustainable Space Environment (Debris) ?

環境保全、即ち、軌道上デブリ数の低減の為にできることは、「**デブリを発生させない**」、及び、「**デブリを除去する**」の2点である。この2点を実行した場合の解析結果を示す。



NASA (Liou, Adv. Space Res, 2011)

①デブリ低減ガイドラインを遵守してPMD(Post Mission Disposal)を90%以上の軌道上物体が満足して衛星爆発もゼロの場合、②ADRを年間5機以上、③持続的に実施すれば、軌道上デブリ数増加を防ぐことが出来る。

## 2.1 要求分析 Requirements to the framework

### ①デブリ低減ガイドラインを遵守(PMD 90%以上、爆発防止、等)

**Requirement 1: Debris mitigation guideline have to be obeyed. ex. PMD**

⇒[分析]

運用終了後の衛星／ロケット等は、宇宙先進国を中心にIADCの制定したデブリ低減ガイドラインに従って軌道遷移を行う傾向が進んでいる。現状、数10%程度の実施率であり、継続して当該ガイドラインの遵守を推奨し続ける必要あり。

### ②ADRを年間5機以上

**Requirement 2: More than 5 debris to be removed per year.**

⇒[分析]

ADRは各国が個々にデブリ除去技術開発を進めているが、その達成目標数値は各国別であり、共有されていない。また、宇宙は人類の活動領域であり、その環境保全の実施は、世界各国協調の下で実施することが望ましい。

### ③持続的

**Requirement 3 : Sustainable ADR activities by every major space actors.**

⇒[分析]

各国独自で実施している限り、各国の経済状況等によって、除去が実施されない事態が起こりえる。除去活動を各国が補間し合えるようにする為にも世界各国が協調して活動できる枠組みがあることが望ましい。

#### 【分析まとめ】

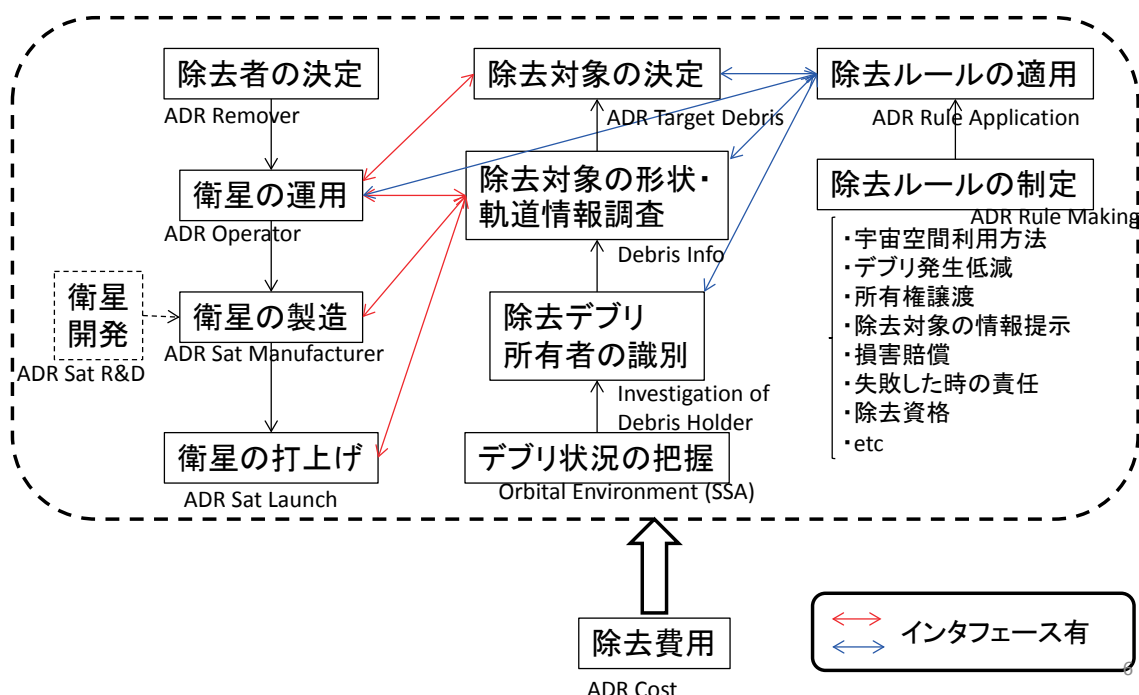
軌道上デブリ除去を推進する世界的な枠組みの構築が必要。本枠組みは、世界各国のソース状況に応じて、相互協力の下、最大の除去効果を定常的に得られるように導くものである。

International Framework is inevitable for sustainable ADR.

5

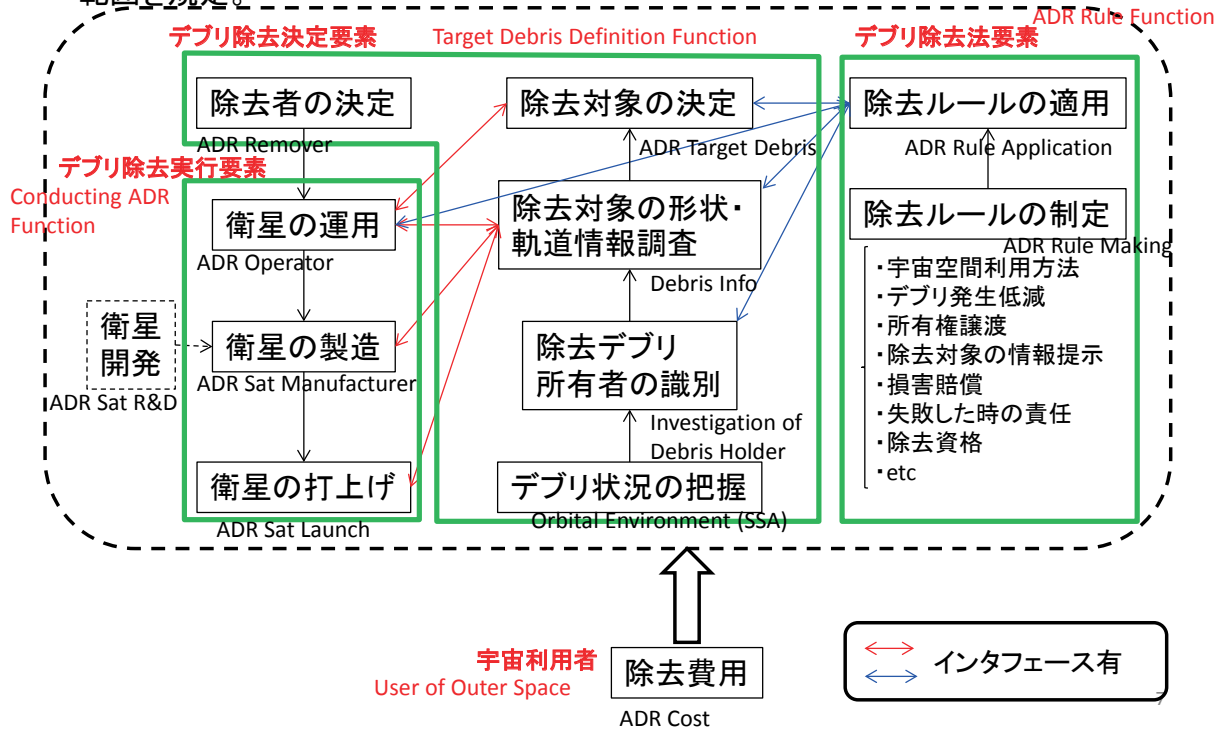
## 2.2 要求機能分析 Analysis of Requirement and function distribution

デブリ除去を行う上で必要なプロセスに基づき、枠組みへの要求機能を分析。



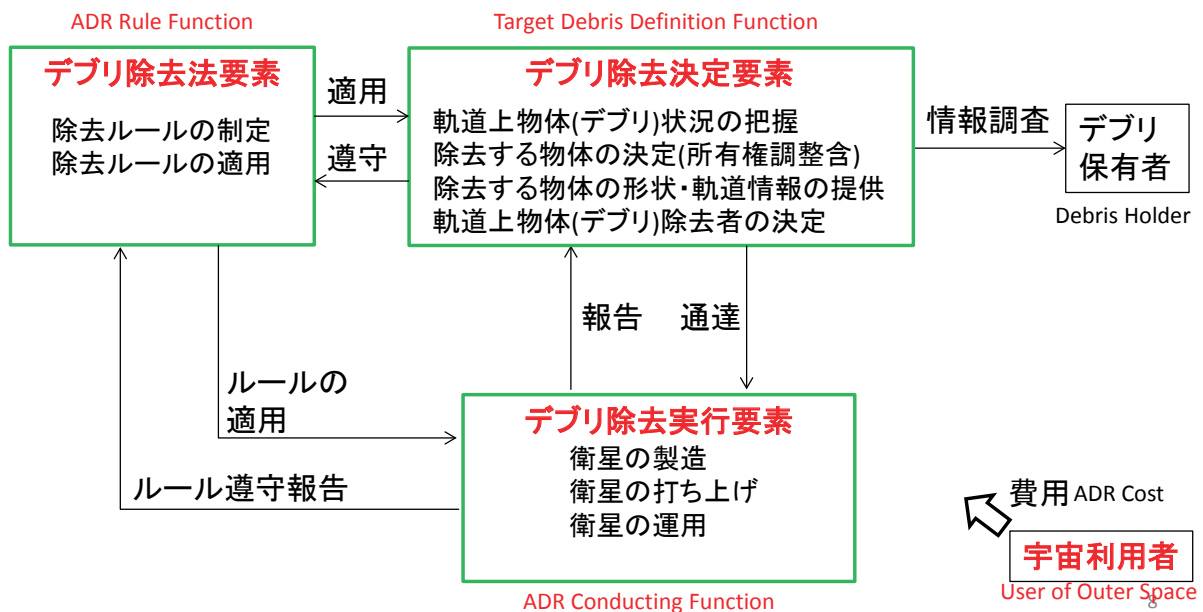
## 2.3 要求機能配分 Results of function distribution

インタフェース数が最小になり、実行要素と法要素は独立となるように機能配分の範囲を規定。



## 2.4 統合 Unity of function distribution

デブリ除去機能分析・配分検討結果から、世界的なデブリ除去枠組みの骨格として、以下の統合結果を得た。







## 2.5 統合結果の現実解(補足2) Notes 1

### ④資金調達 (ADR Cost)

#### ・民需ベースの可能性評価

(Is it possible to construct complete private cost bearing ? – Probably No.)

低コストデブリ除去技術の発展には、民間ベースでの競争が有効であるが、完全民需ベースの枠組みでデブリ除去費用を捻出することは現状困難と評価。

<理由> 例えば、現行の仕組みである軌道上衛星に対する保険に対して、デブリ損害保険の加入を義務付けて、その保険料をデブリ除去費用に割り当てることが考えられる。しかし、現時点では、軌道上衛星のデブリ衝突に伴う損害発生事例が少ない為、デブリ損害保険設定額は廉価にならざるを得なく、デブリ除去費用の原資になり得ない。同様に、打上げ費用にデブリ除去費用分をかさ上げする等のいくつかの手段があり得るが、いずれも適切に費用設定することは困難と考える。

( It might be necessary that the ADR Demand is provided by each country's governments. )

以上から、国を主体とし、国がデブリ除去の需要を作り出すことで、民間ベースでの競争を促進する枠組みが有効であると評価する。この観点から、**デブリ除去実施者は各国政府レベルとする**。但し、政府が委託した機関や民間企業も可とする。これにより、デブリ除去技術が軍事技術に極めて近いことにまつわる問題である、各国による国内産業育成・保護のための除去技術の国外流出や公開の歯止め等に関して、連合は何ら関与せずに実効的なデブリ除去を推進することが可能となる。

#### ・デブリ除去資金の調達方法

(The two cases of ADR cost payment, Case 1: Payed by the organization, Case 2 : Payed by the each governments)

「ケース1: 連合が参加国から資金収集して、除去指示した国へ必要資金を供与」と「ケース2: 除去指示された国の自国負担」の2ケースを比較評価。

11

## 2.6 資金調達方式 ADR Cost Payment Case:1

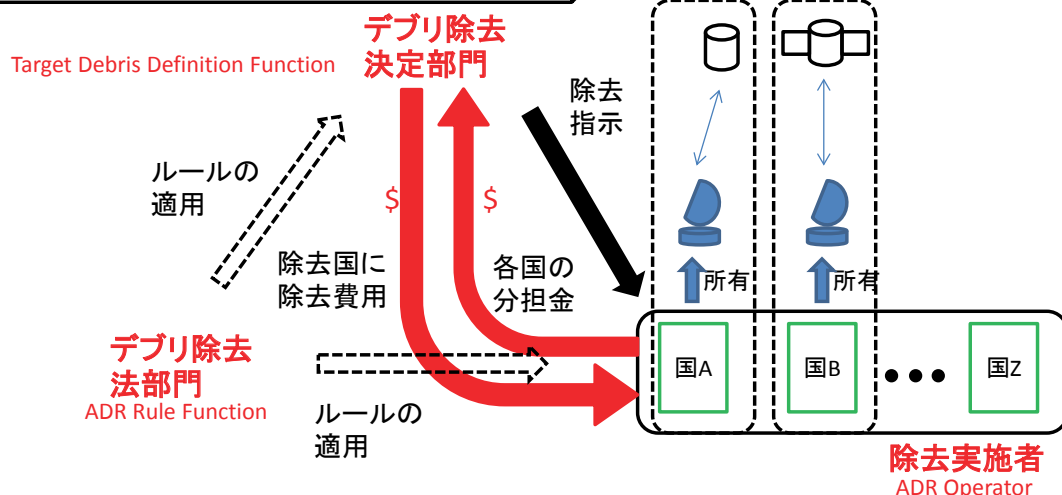
### <ケース1:資金集中型> Payed by the organization

<宇宙空間>

平和的無差別利用対象

評価: × (Negative)

各国に資金提供を強制的に求める為、予算面のみで言えば各国の宇宙予算が減り宇宙ビジネスを減速させる方向。また、提供資金額の設定は、各国で異なる軌道上デブリ所有数や経済状況等の様々な要素を勘案して調整する必要があり、難航する恐れがある。



12

## 2.6 資金調達方式

ADR Cost Payment Case:2

### <ケース2:資金分散型> Payed by the each governments

評価: ○ (Positive)

除去費用の工面方法は各国に委ねられている為、自由度が大きい。例えば、自国の宇宙機関で官ベースで開発する、民間委託してコスト最安を目指す、等の選択肢を持つことが可能。また、連合としても除去費用に関する調整を行う必要が無くなり、中立的な立場を確保できる。

<宇宙空間>  
平和的無差別利用対象

&lt;宇宙デブリ&gt;

@LEO @MEO @GEO

Target Debris Definition Function

デブリ除去  
決定部門

ルールの  
適用

除去  
指示  
Suggesting the  
ADR Number

デブリ除去  
法部門

ADR Rule Function

ルールの  
適用

除去  
指示

所有

所有

国A

国B

...

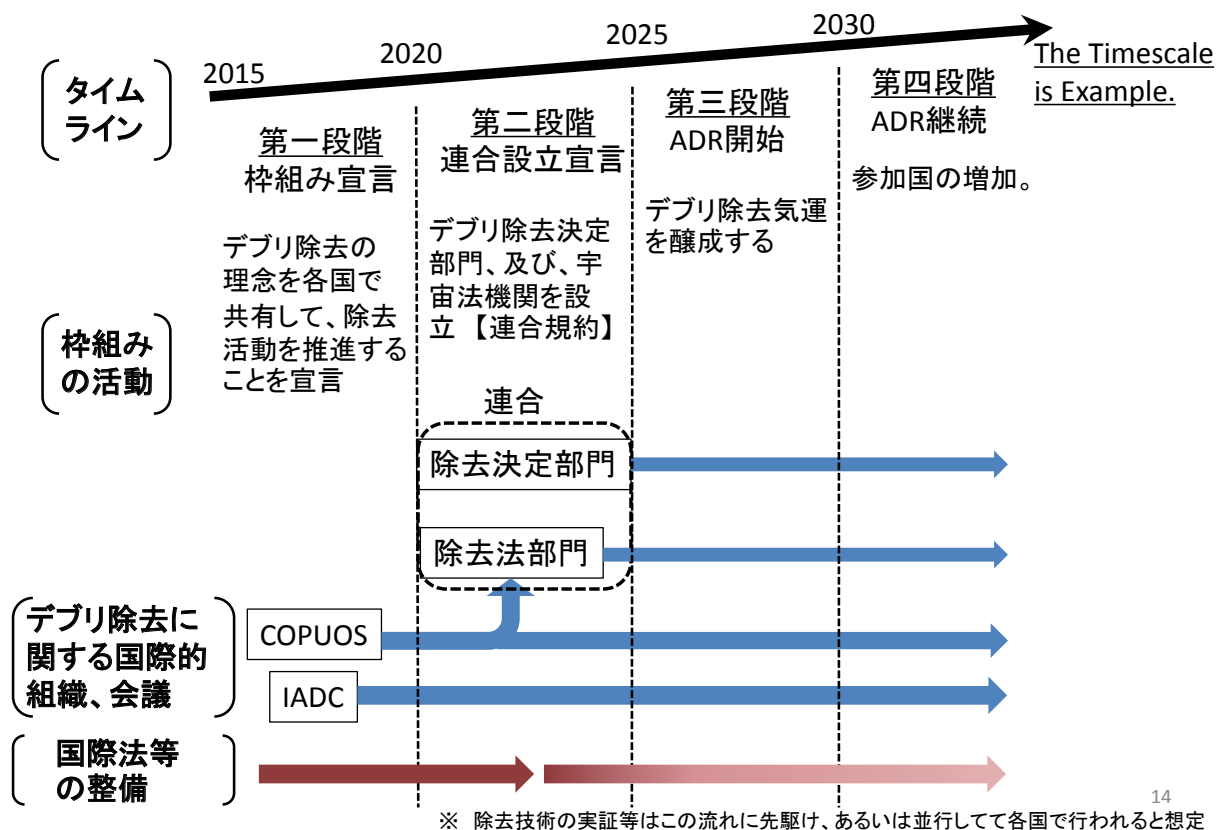
国Z

除去実施者  
ADR Operator

Each government can  
determine the ADR Operator,  
ex) Domestic Company, Space  
Organization, International  
bidding... etc

13

## 3. 段階的枠組み構築の考え方

Phased Approach of  
Framework Construction

14



## 4 デブリ除去連合の責任範囲

Responsibility of International  
ADR Organization

デブリ除去作業に伴う避けられない問題として、除去作業の失敗リスク、除去デブリの衛星衝突や地上落下等の潜在的リスク、除去対象デブリの所有権問題がある。各国個別に負うリスクとしては無視しがたく、また、所有権に関しては、一国では解決が困難なケースもあり、自国の所有デブリを除去するという選択肢に陥りがちになる恐れがある。そこで、世界機関である連合は、以下を規則とする。

### (1) 除去責任 (Responsibility to the Space Environment)

「持続的なデブリ除去活動を行い、宇宙環境保全を確保する。」

本規則により、参加国は連合の下、除去責任を負う、即ち、各国で除去責任を分担することになる。

### (2) 除去作業責任 (Responsibility to the ADR failure)

「除去対象デブリの除去作業に関して、失敗も含めて、デブリ除去連合がその全ての責任を負う。責任履行は国際宇宙法の規定に従う。」

本規則により、連合がデブリ除去作業の責任を全て負うことで、除去作業に伴うリスクを各国で分散できる

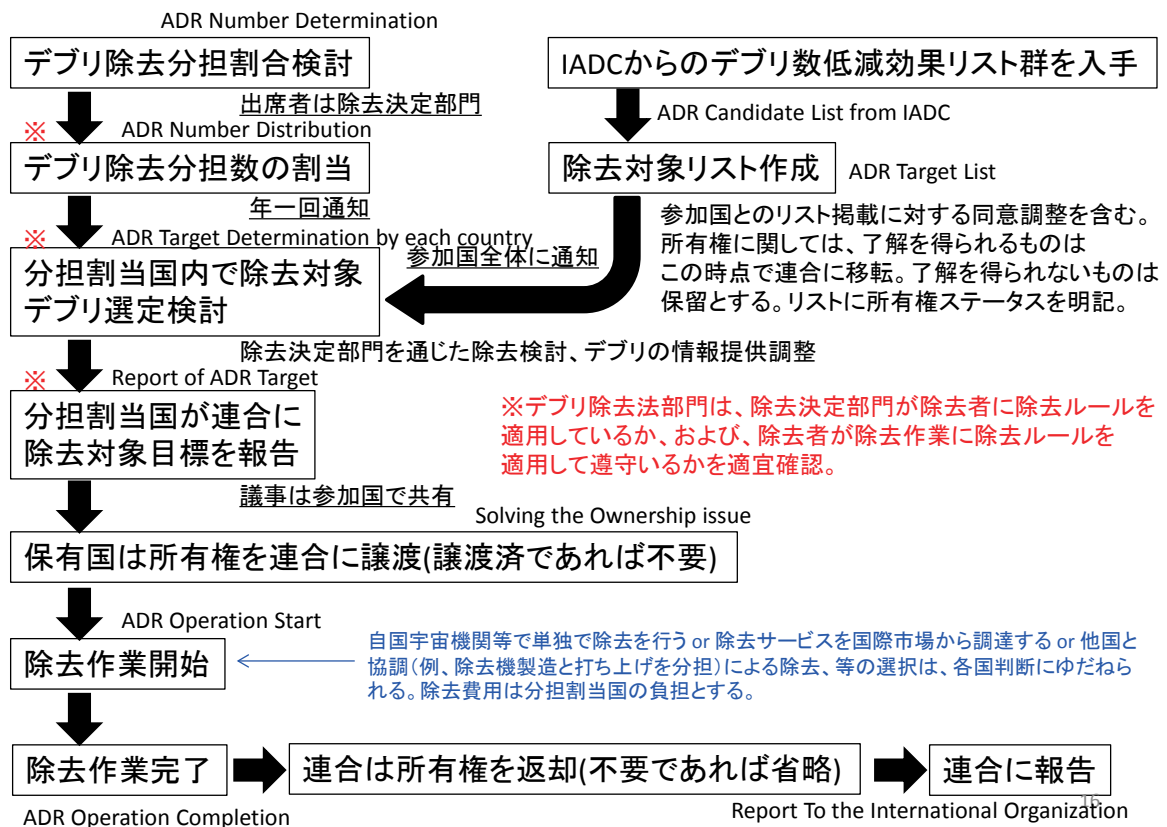
### (3) 所有権 (Ownership)

「連合の参加国は、除去に同意したデブリが除去対象に識別された場合は、その所有権を連合に無償譲渡しなければならない。所有権の譲渡に伴い、管轄権は連合に移転する。」

所有権保有者にとっては、譲渡すれば、当該デブリに関する責任は、連合に一切移管することが出来る。

## 5. 連合によるデブリ除去プロセス

Overall Process of ADR



## 6. コンプライアンスマトリクス

連合のデブリ除去要求に対するコンプライアンスマトリクスを示す。

No	要求	設計結果	評価
1	PMDを90%以上の軌道上物体が満足すること	左記要求を記載しているデブリ低減ガイドラインを、デブリ除去法部門にて、連合内の除去ルールとして制定することで、参加国の遵守を実現できる。 尚、枠組み構築の第一段階の「枠組み宣言」に、参加国はデブリ低減ガイドラインの遵守しなければならない、旨を明記することで、早期実現を目指す。	○
2	ADRを年間5機以上	・各国への除去分担割合を定める機能を除去決定部門が有することで、ADR5の設定を可能とする。 ・設定を実現する為には、宇宙先進国の連合への参加が必須である為、除去責任を連合が負うことで各国で責任分散ができる、特に既存デブリ保有者の宇宙先進国に有利な仕組みとした。	○
3	持続性	・デブリ除去責任を連合が負う仕組みにすることで、連合に各国が参加し続ける意義を設けた。 ・除去決定部門は除去指示をするだけで、除去方法等は各国に委ねることで、自由度を大きくして、受け入れやすい仕組みとした。 ・除去決定部門が除去指示に関して一括取り纏めすることで、各国の除去実施状況に応じて、適切に配分を決定し、除去負荷を分散可能にした。これにより、除去指示に対応が困難な状況に陥った国の脱退を防止する。	○

17

### 枠組み検討にあたり重視したポイント

#### ・ 各国が参加する意義を見出せる枠組み作り



(例1) 連合がデブリ除去に関する全責任を負うことで、除去リスクの分散を可能とする。

(例2) 連合に軌道上物体所有権を譲渡した時点から、連合が当該物体の責任を負う。

#### ・ リファレンスとなる他分野の枠組を参考



(例1) IADCをデブリ除去決定部門から敢えてはずした立ち位置とする。

※気候変動問題のIPCCと同様の考え方

(例2) 枠組み宣言→連合設立という段階的設立方式

※気候変動問題のCOPから京都議定書へとつながる流れ。 等

#### ・ 他分野の枠組の教訓を反映



(例) 各国政府／議会の反発を防ぐため、デブリ除去手段の選択について、中央集権的なやり方は避け、各国の努力にある程度委ねる枠組みとする。(リファレンスモデルである温暖化ガスにおいて、米国が京都議定書を批准しなかったことにより、COPでのCO2削減量が実効的意味をなさなかったことの教訓)

18

## まとめ

- 宇宙の環境問題(デブリ問題)のため、継続的なデブリ除去活動は必須である。そのためには、幅広い分野の技術的情報をベースとして、技術外の分野(社会, 経済, 国際関係等)を見据える必要がある。

In order to realize sustainable space environment (Debris Issue), the technical information as well as non-technical approach (social, economical and international affairs) is inevitable.

- システムエンジニアリングによってデブリ除去の国際的枠組みの検討を行い、現存する世界の機関, 仕組みを最大限活用して、近未来のあり得べき現実的な解に落とし込む作業を行った結果を示した。

With the systems-engineering-process, the idea of an international framework for ADR is studied.

- 本枠組み検討結果を現実のものとするべく、関係者一同検討を深めていく所存である。

Further discussions, investigations and activities are necessary for realizing the ADR framework.