

世界のデブリ対策の進展状況

加藤 明

JAXA

Status of the World Space Debris Mitigation Activities

Akira Kato

Abstract

The world consensus has been made to mitigate debris generation by the "IADC Space Debris Mitigation Guidelines" and "UNCOPUOS Space Debris Mitigation Guidelines". But recent standards registered in NASA and European Code of Conduct for Space Debris Mitigation define more strict requirements. These tendency has been reflected in "ISO-24113 Space Debris Mitigation" established in 2010. JAXA is schedule to revise its "JMR-003 Space Debris Mitigation Standard" in order to coordinate with world trend.

and encourage international trade and launching services.

Key Words: Debris Mitigation, ISO standard, Break-up probability

1 概要

JAXAは平成8年にデブリ発生防止標準を制定して以来、同様な管理が世界的に徹底されるよう働きかけてきており、その成果がIADCガイドラインを通じて国連ガイドラインにも反映されている。しかし、今では欧米がこれらを越える厳しい規制を制定し、それが国際標準化機構(ISO)のデブリ関連規格にも反映されつつある。JAXAではこれら欧米の規制強化に呼応して「スペースデブリ発生防止標準(JMR-003)」を改訂して世界と同等なレベルで管理することを内外に表明しようとしている。この効果は、海外共同事業の円滑な推進や我が国の宇宙ビジネスの健全性をアピールすることに貢献すると期待している。しかし、同時に国際調整の場では過剰な規制化の流れに対しては現実的な対応をとるよう主張して規制化の速度を調整している。一方、国連では新たに「宇宙活動の長期的持続性を保証するための活動」が開始されている。我が国もこのような状況に配慮して、国レベルで安全・快適な社会への貢献、科学の発展への貢献に寄与する宇宙活動の振興と、それらを保証する軌道環境の保全をバランスよく指向する必要がある。

2 環境の状況

軌道上物体は地上から観測できるものは公表されていない物体を含めれば20,000個を超えている。これは一般に公開されている約16,000個の物体と、発生源が不明等の理由で公表されていない6,000~7,000個の物体の合計である。これらより小さな物体ははるかに多

く、例えば中国の破壊実験の直後には1cm級の破片が17万個発生したことが米国の高性能レーダで観測されている。デブリの増加傾向は収まる気配も無い。

このようなデブリの衝突は宇宙ステーションのみならず一般の衛星にとっても脅威である。1mm以下のデブリでも衛星のアルミ・ハニカム・パネルを貫通して内部に被害を当たる可能性がある。この防御の方法についてはJAXAでも重要な研究課題と捕らえているが、実際に微小なデブリがどれほど存在しているかは、各国で意見の分かれているところである。

デブリの発生原因は半数以上が爆発事故や破壊行為によるものであるが、長期的にみれば、国連デブリ低減ガイドラインでも言及されているように、将来のデブリ発生原因は軌道上物体同士が衝突してその破片が更に他の物体に衝突してデブリを増殖させる連鎖反応であるとの見解が欧米宇宙機関の見解である。

3. デブリ発生原因

2010年2月にESAが国連・宇宙空間平和利用委員会に報告したところによれば、地上から観測できる物体の59%が破砕破片、16%が放棄された衛星、12%が放棄されたロケット、7%が放出された部品などで残りの6%が運用中の衛星であるとのことである。米国はこれらの大筋の情報を世界に公開しているので我が国でも大体把握できるが、通常は運用中の衛星と放棄された衛星を区別するのは困難である。(図-1参照)

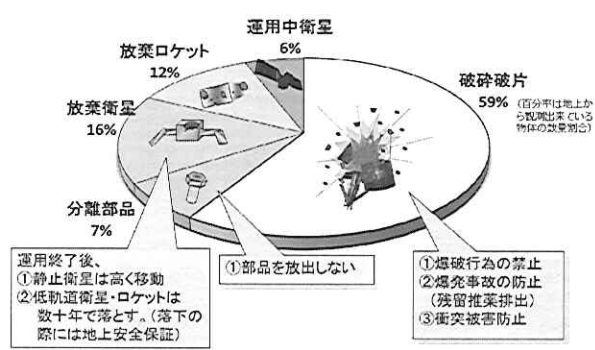


図-1 デブリの発生原因

4. 一般的デブリ対策

デブリ対策は当然前述の発生源に対応したものととなり、JAXA のデブリ発生防止標準では以下の対策を要求している。

- (1) 部品類の放出禁止
- (2) 破砕事故の防止、破壊行為の禁止
- (3) 運用を終了した衛星、ロケットを有用な軌道域から排除すること
- (4) 軌道から除去したロケット、衛星が落下した場合に地上に被害を及ぼさないこと、
- (5) 軌道上の衝突事故の防止

これらの要求の妥当性については世界的に共通の理解を得ている。JAXA ではこれらの対策のうち、軌道環境を加速的に悪化させる爆発事故の防止と、静止衛星の運用終了後の軌道変更（保護軌道域からの除去）を重視している。後者は、大気抵抗という自然の浄化力が働かない静止軌道域ではデブリは存在し続け、将来も除去は困難だからである。

5. 世界のデブリ対策の進展状況

JAXA では平成3年度よりデブリ問題の調査研究を開始し、平成5年度からデブリ発生防止標準の制定を目指した活動に移行した。そして、NASA が標準安全標準 NSS1740.14 : Guidelines and Assessment Procedures for Limiting Orbital Debris を平成7年に制定した翌年の平成8年に NASDA-STD-18「スペースデブリ発生防止標準」を制定した。

JAXA はこの取り組みを世界共通のものとするべく、政府を通じて平成11年2月の国連宇宙空間平和利用委員会に検討委員会の設置を提案したが、参加国からの賛同が全く得られなかった。当時米国は不必要な条約は不要であると述べており、デブリ対策は後進国が将

来の軌道環境の権益を確保するために不当に主張するものであるとの見解が一般的であった。JAXA は議論の場を国連から先進国政府系宇宙機関のデブリ研究者で構成する Inter-agency Space Debris Coordinating Committee(IADC)に移し、そこでデブリ対策標準書の整備を提案し、約3年の活動を経て平成13年にこれを「IADC スペースデブリ低減ガイドライン」の形で制定するに至った。

この間、米国は NASA と DoD に適用する「米国政府標準手順」を発行し、フランス CNES も同様の標準書を作成した。

一方、国連宇宙平和利用委員会(UNCOPUOS)では過去数年間に亘ってデブリ問題が取り上げられ、デブリ問題の解決の必要性については共通の認識が得られてはいたが、特に米国の消極的態度で、それ以上の進展が見られなかった。しかし、平成13年、米国は IADC ガイドラインの制定の見通しがたつと、それまでの態度を一変させて、IADC ガイドラインを国連でエンドースすることを欧州主要国と連名で提案し、これが受け入れられて検討が進み、平成19年の国連総会で「デブリ低減ガイドライン」として決議されるに至った。これは IADC ガイドラインの上位の概念的なレベルで提言されているものである。

これと並行して欧州では「デブリ低減に向けた欧州行動規範」を制定し、CNES、ESA、UK Space Agency、DLR 等が署名している。この要求の内容は IADC ガイドラインより更に厳しく、各要求に定量的要求を課している。固体モータのスラグの直径 (0.01mm 以下)、爆発事故発生率 (0.0001 以下)、廃棄処置の成功確率 (0.9 以上) 等が規制されている。

しかし、ESA は欧州行動規範に署名しながらも、産業界に適用するには困難が生ずるとして平成19年に ESA プロジェクトに対する要求として Director General's Office が「Space Debris Mitigation for Agency Projects」を発行している。ここには爆発発生確率や廃棄成功確率の規制はない。

一方、NASA は NPR 8715.6A (平成20年A改訂) と 8719.14 (平成19年) を制定し、要求内容を厳しく見直し、その適用方法について指針を示した。欧州行動規範と同レベルの要求であるが、固体モータスラグの規制が無いことと、爆発事故発生確率が 0.001 であることが異なっている。

平成22年、国際標準化機構は ISO-24113 「Space Debris Mitigation」を発行したが、その内容には欧米のこれらの動向が強く反映されている。JMR-003のB改訂ではこれらの世界の動きに合致するよう改訂される予定である。

以上の動きを図-2に示す。

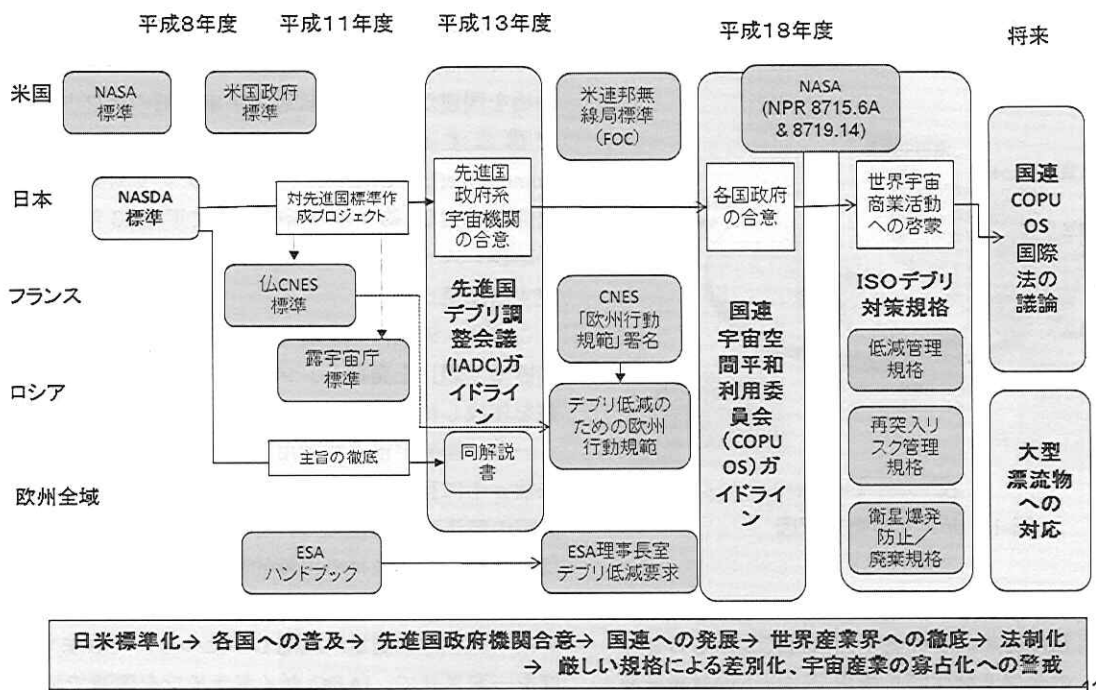


図-2 世界のデブリ対策規制の進捗状況

平成22年12月現在、IADC、国連、各国宇宙機関、国際宇宙機関が以下の文書を制定している。

- (1) IADC-02-01: IADC Space Debris Mitigation Guidelines, (Revised September 2007, Revision 1),
- (2) Space Debris Mitigation Guidelines of the COPUOS, United Nations Office (Resolution of 22 December 2007)
- (3) ISO-24113 Space Debris Mitigation (2010),
- (4) NASA-STD-8719.14: Process for Limiting Orbital Debris (Approved: 2007-08-28)
- (5) NPR 8715.6A: NASA Procedural Requirements for Limiting Orbital Debris, (Effective 19 February 2008)
- (6) European Code of Conduct for Space Debris Mitigation (28 June 2004, Issue 1.0)
- (7) Russia: National Standard on the Russian Federation, General Requirements on Space Systems for the Mitigation of Human-Produced near-Earth Space Pollution
- (8) ESA: Space Debris Mitigation for Agency Projects, ESA/ADMIN/IPOL(2008)2, Director General's Office (1 April 2008)

以上のデブリ対策標準の内容の比較を表-1に示す。

6. デブリ対策要求への適合性

デブリ対策要求は、基本的には安全審査の場にて設計フェーズの進展に合わせて審査しているが、技術の限界や信頼性優先の考え方から、完全には満足できないことはある。例えば以下の例がある。

- (1) 複数衛星打ち上げ時の上部衛星支持構体は必然的

に放出されることになる。これは不可避であり、軌道寿命が短いために国際的には問題にはなっていない。

- (2) 運用終了後の低軌道衛星の保護機軌道域（高度2000km以下）からの除去については、衛星に推進系を有しない場合には困難を伴う。改善努力が必要である。
- (3) 地上落下の安全性保証については、世界的にも解析の精度などの問題もあり、また構造上溶融しない金属を使用せざるを得ない場合があり、改善努力の過程にある。落下時に溶融しやすいタンク等を研究中である。

デブリ対策要求に完全に従うことができないのは世界共通の悩みであるはずである。米国国家宇宙政策（2006年版及び2010年版の両方）では「宇宙機、打上げサービス、試験・実験の調達及び実行において、ミッション要求とコスト効果の調和を図りつつ、米国政府軌道上デブリ低減標準活動に継続的に従う」と記されており、先のNASA-STD-8719.14においても「デブリ対策要求を満足させる際は、ミッション要求を満足させる必要性と資金管理の必要性の間で均衡を保たなければならないと理解されている。もし、あるデブリ対策要求がミッション要求、技術力、許容できないコストインパクトなどのために重大な矛盾を引き起こすならば、適切な理由と正当性を含めたデブリ・アセスメント・レポートを添付して、NASAプログラム・マ

ネジャーを通じてウェーブ申請することができる。」としている。

7. ISOデブリ低減規格とJAXAの対応

ISOは2010年にISO-24113 Space Debris Mitigationを制定した(表-1参照)。このISO-24113は包括的にデブリ対策を要求するが、この下位に多くのデブリ関連規格を制定することを計画している。これを図-3に示す。

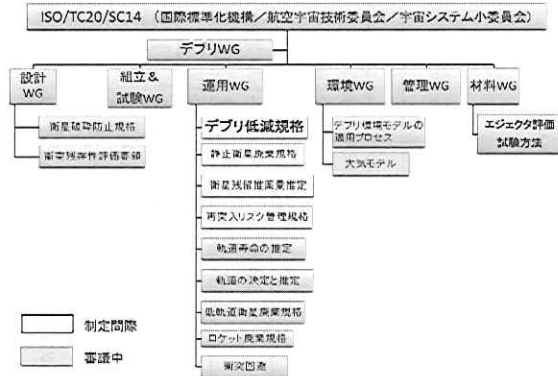


図-3 ISOの宇宙システム検討体制と計画中のデブリ関連規格体系

このISO-24113は、これまでのJAXAの標準、IADCガイドラインあるいは国連ガイドラインとも比較して以下の点で規制が強化されている。これらの規制が制定される過程ではわが国も実現性、検証可能性に関して疑義を表明し、修正案を要求してきたが、多数決の原則で不本意ながらも了解せざるを得ない部分もあった。それらの点への対処方法も含めて以下に説明する。

- (1) 火工品からの燃焼生成物が1mm以下に制限されている。これは分離ボルト等火工品からの燃焼生成物を制限するものである。我が国でも遵守可能である。
- (2) 固体モータからの残渣物で軌道環境を汚染しないよう規制が加わっている。これで静止軌道域と干渉する軌道への排出は規制されるが、低軌道への排出抑制は努力目標にとどまっている。この規制の議論の過程では軌道域への区別無く1mmの残渣物の放出が規制されるよう提案されていたが、米国同様我が国としても明確な定量的規制値を設けることは時期尚早であると主張した。残渣物の発生現象を地上で検証するためには軌道上での挙動を模擬することが必要であり、それは困難である。議論の結果、制し軌道については規制する必要があるが、低軌道での固体モータの使用は直接は制限されず、将来に向けて配慮する注意事項に留まることとなった。解析によれば1cm以下の残渣物であれば軌道高度800kmまでは早期の落下が確認できるのでコンプライアンスは確保可能と判

断できる。静止アポジックモータの使用は控えてはならない。

- (3) 運用中の破砕発生確率が0.001以下と明記された。これはデブリの衝突以外の内部原因による破砕の発生確率を制限するものである。電子部品について信頼度計算は可能であるが、エンジン、機械構造物、輸入品などについては爆発原因に限定して評価することは容易ではない。JAXAでは安全率が確保されている圧力容器等は信頼度を1.0とみなし、エンジン等の複雑なシステムについては当該システム全体の信頼度が適切に管理されていれば妥当と評価することで良いと考えている。この評価要領をISO規格にも反映するよう要求している。
- (4) 廃棄処分の条件付成功確率が0.9以上とされた。これはミッションの成功を条件として、廃棄成功確率を制限するものである。一般の衛星は運用終了後に直ちに廃棄するので、その間の信頼度の低下は小さいので問題は無い。運用終了後2年程度以上放置すると問題になる。ただし、ISOが提示する計算式には問題があると認識しているので、これはJAXA方式に変更するよう要求している。

8. 今後のJAXAの対応予定

JAXAが海外機関と共同事業を行う場合、JAXAの搭載機器やロケットがIADCガイドラインや国連ガイドラインに遵守することの説明が求められる。今後はこれらガイドラインに変わってISO規格への遵守が求められることが予想される。一方では、宇宙ビジネスの分野ではこのISO規格を適用することが発注者の健全性の傍証手段として用いられ、対策を徹底したシステムで排他的に市場占有率を高める動きが出てくる可能性もある。

JAXAではこのISO規格とJAXA標準文書との整合性を図り、世界と同等な管理体制の構築を目指し、海外との連携の姿勢を明確にしようとしている。JAXAがこのような姿勢を示すことで我が国産業界にも同様な意識が醸成され、我が国の宇宙ビジネスの健全性が海外にもアピールできるようになることを期待している。

JAXAは今後も国際調整の場では過剰な規制化の流れに対しては現実的な対応をとるよう主張して規制化の速度を調整しようとしている。

一方、国連では新たに「宇宙活動の長期的持続性を保証するための活動」が開始されている。我が国もこのような状況に配慮して、国レベルで安全・快適な社会への貢献、科学の発展への貢献に寄与する宇宙活動の振興と、それらを保証する軌道環境の保全をバランスよく指向する必要がある。

(2010年12月20日受付, 2011年5月1日受理)

表-1 各国宇宙機関のガイドラインの比較(1/2)

| | 低減策 | IADC ガイドライン | UN ガイドライン | ISO (ISO24113 及び関連規格) | NASA (NPR 8719.14) | 米政府基準 (and NPR 8715.6A) |
|-----------|----------------------|--|--------------------------|---|--|---|
| 宇宙 母体類 | 部品類放出抑制 | ○ | ○ (Rec-1) | ○ | (1) LEO: 1mm 以上の物体は、25 年以内に軌道減衰、かつ全体で 100 個×年以内 (2) GEO: 5 cm 以上の物体は、25 年以内に GEO-500km へ減衰 | > 5 mm, < 25 years |
| | 固体モータ残渣物 火工品 | | | ○ 燃焼生成物 < 1 mm | | |
| | 二次デブリの発生 破壊行為禁止 | ○ | ○ (Rec-4) | ○ | (1) 10 cm 超える破片は、100 個×年 (2) 1mm を超える破片は 1 年以下 (3) 1mm を超える破片と運用中の衛星への衝突確率は 24 時間以内 10^{-6} 以下 | |
| 衛星上宇宙 | 運用中の事故 | ○ | ○ (Rec-2) | ○ | ○ 一般的に要求 | ○ |
| | 残留推薬放出、バッテリーの処置、圧力容器 | ○ | ○ (Rec-5) | | ○ 一般的に要求 | ○ 一般的に要求 |
| | 大型物体衝突対策 小型物体衝突対策 | ○ | ○ (Rec-3) (CAM, COLA) | | < 0.001 (with > 10 cm) disposal success > 0.01 | |
| 衛星の地上運用 | リオービット距離 | 235 km + (1,000 · Cr · A/m) 離心率 < 0.008 | ○ (Rec-7) | 235 km + (1,000 · Cr · A/m) 離心率 < 0.008 成功確率 > 0.9 100 年間不干渉 | 235 km + (1,000 · Cr · A/m) 離心率 < 0.005 100 years 不干渉 成功確率 > 0.9 | > 36100 km (> 300km + GEO) |
| | GEO 下側保護域 | -200 km | | | GEO - 500 km | |
| | 保護域緯度範囲 | -15° 緯度 < 15 deg. | | -15° 緯度 < 15 deg. | | |
| | 軌道滞在期間短縮 | 推奨 (25 年以内を引用) | ○ (Rec-6) | 残存 < 25 年 成功確率 > 0.9 | 全期間 < 30 years, EOL 残存 < 25 years, 成功確率 > 0.9 | EOL 残存 < 25 年 |
| | 墓場軌道への移動 | 言及せず | | ○ | 2,000 km ~ (GEO-500 km) (exclude 19,100 - 20,200 km) | 2,000 - 19,700 km 20,700 - 35,300 km |
| その他 | 軌道上回収 | ○ | | | 10 年以内に回収 | 10 年以内に回収 |
| | 再突入時地上被害 デザイ | ○ | ○ (Rec-6) | ○ | ○ ($E_{ec} < 10^{-4}$), 衝突エネルギー > 15 J 考慮 | ○ ($E_{ec} < 10^{-4}$) |

記号) a: 軌道長半径, Cr: 太陽輻射圧係数, A/m: 面積質量比, Ec: 傷害予測数, EOL: 運用終了

注) 廃棄処置の成功確率は条件付確率 $P(D|M)$ は、 $P(D|M) = \frac{P(M \cap D)}{P(M)}$ ここで、 $P(M)$ は運用終了時点のバス部の信頼度、 $P(M \cap D)$ は廃棄操作系の操作完了時点の信頼度

表-1 各国宇宙機関のガイドラインの比較(2/2)

| 低減策 | デブリ低減に関する 欧州行動規範 | JAXA (JMR-003A) | RASA | ESA (April 2008) Space Debris Mitigation for Agency Projects |
|-----------|-------------------------------------|-------------------------|----------------------|---|
| 部品類放出抑制 | ○ | ○ | ○ | ○ (分離品は25年以内に落下) |
| 固体モータ残渣物 | スラグ<0.01mm (1mm 改定?) | | | スラグ<1mm |
| 火工品 | 同上 | | | 粒子<1mm |
| 二次デブリの発生 | ○(SD・DE-07) | ○ | ○ | |
| 破壊行為禁止 | ○(SD・DE-04) | ○ | 落下直前は許容 | ○ |
| 運用中の事故 | 破砕発生率<10 ⁻⁴ (SD・DE-05) | ○ | ○ | |
| 残留推薬放出 | ○ | ○ | ○ | ○ |
| バッテリーの処置 | ①圧力容器は、内圧<臨界圧の50% | | | |
| 圧力容器 | ②無害化は廃棄終了後1年以内に完了し、成功率>0.9 | | | 2か月以内に実施 |
| 大型物体衝突対策 | ○ | ○ (CAM, COLA) | リスクの評価 | リスクの評価 |
| 小型物体衝突対策 | 他の文書で防御対策推奨 | ○ | リスクの評価 | |
| リオビット距離 | 235 km+(1,000・Cr・A/m) 成功率>0.9 | 235 km+(1,000・Cr・A/m) | 235 km+(1000 Cr A/m) | 235 km+(1,000・Cr・A/m) 離心率<0.005 |
| GEO 下側保護域 | -200 km | -500 km 以下 | | |
| 保護域緯度範囲 | -15<緯度<15 deg | | | -15<緯度<15 deg |
| 軌道滞在期間短縮 | 残存<25年 成功率>0.9 | 25年以内に推奨 | 25年以内 | 25年以内 |
| 墓場軌道への移動 | ○ | ○ | | (Galileo orbit を除く) |
| 軌道上回収 | ○ | ○ | | |
| 再突入時地上被害 | ○(Ec<10 ⁻⁴) ただし、仏を除く | ○(Ec<10 ⁻⁴) | ○ (毒性物質) | ○(Ec<10 ⁻⁴) |
| テザー | | ○ | | |

記号：a：軌道長半径，Cr：太陽輻射圧係数，A/m：面積質量比，Ec：傷害予測数，EOL：運用終了
出典

- a) IADC-02-01: IADC Space Debris Mitigation Guidelines, (Revised September 2007, Revision 1),
- b) Space Debris Mitigation Guidelines of the COPUOS, United Nations Office (Resolution of 22 December 2007)
- c) ISO-24113 Space Debris Mitigation (DIS) (published by the end of 2010),
- d) NASA-STD-8719.14: Process for Limiting Orbital Debris (Approved: 2007-08-28)
- e) NPR 8715.6A: NASA Procedural Requirements for Limiting Orbital Debris, (Effective 19 February 2008)
- f) European Code of Conduct for Space Debris Mitigation (28 June 2004, Issue 1.0)
- g) JAXA-JMR-003A: Space Debris Mitigation Standard,
- h) Russia: National Standard on the Russian Federation, General Requirements on Space Systems for the Mitigation of Human-Produced near-Earth Space Pollution
- i) ESA: Space Debris Mitigation for Agency Projects, ESA/ADMIN/IPOL(2008)2, Director General's Office (1 April 2008)