

宇宙でのコンタミネーション現象

第4回 九州宇宙環境技術交流会

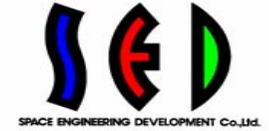
2007年8月22日

浦山文隆(宇宙技術開発株式会社)

SEDの特徴

- 特定のメーカー等に依存しない独立系の企業です。また、特長を持ったグループ企業を有し、協力してお手伝いをいたします。
- ロケットの打ち上げから人工衛星の追跡管制、さらに人工衛星の利用といったプロセスの流れの川上から川下に至る業務経験と、研究・開発・運用・維持といった幅のある業務経験に基づく、技術蓄積を有します。
- 特に教育に関しては、遠隔教育を通して自らが宇宙利用を率先して実行し、その有効性を実証しています。
- 「**Quality First**」を掲げ、高品質のサービス提供をモットーにしています。
- 宇宙関連メーカー殿とは常に良好な関係を維持し、ミッション達成のために、協力して業務を実施することが可能です。

宇宙技術開発株式会社 (SED) の概要



拠 点



主要実績

システム・エンジニアリング・サービス

- 追跡管制システムエンジニアリング
- ロケット飛行解析・飛行安全解析
- ロケット構造解析
- 宇宙環境解析 (放射線、デブリ、等)
- 地球観測等の衛星利用技術開発

システム開発と維持サービス

- 人工衛星テレメトリコマンドシステム
- 飛行安全管理システム (リアルタイムシステム)
- ロケットデータ (テレメータデータ) 管理システム
- 設備管理システム (データベースシステム)
- アンテナ受信状態監視システム
- 電力使用量監視システム
- 監視用ITVシステム

運用支援サービス

- 人工衛星追跡管制ネットワークの運用
- 人工衛星の追跡管制
- ロケット飛行安全管理
- 射場系等設備保全 (電波、電気、通信設備)
- 情報ネットワーク運用維持管理
- 情報システムの運用維持管理
- 地球観測衛星データ解析・処理

宇宙技術開発株式会社 (SED) の概要



関連企業等



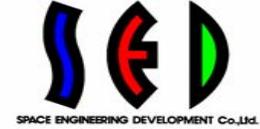
1. 宇宙でのコンタミネーション現象の実例
2. コンタミネーションとは
3. 分子状コンタミネーションの影響
4. 分子状コンタミネーション源
5. 分子状コンタミネーションの輸送
6. 分子状コンタミネーションの付着
7. 分子状コンタミネーション付着防止の一取組み
8. コンタミネーションに関する最近の研究動向
9. まとめ

宇宙でのコンタミネーション現象の実例 — 国際宇宙ステーション —



NASA提供

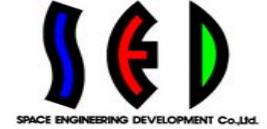
宇宙でのコンタミネーション現象の実例 － 国際宇宙ステーション －



アウトガス付着物

出典)C. E. Soares, R. R. Mikatarián, R. A. Scharf and E. A. Miles: INTERNATIONAL SPACE STATION FLIGHTS
1A/R- 6A EXTERNAL CONTAMINATION OBSERVATIONS AND SURFACE ASSESSMENT, Proc. of SPIE,
Vol. 4774, 2002.

宇宙でのコンタミネーション現象の実例 － 国際宇宙ステーション －



スラストプルーム付着物

出典) C. E. Soares, R. R. Mikatarian, R. A. Scharf and E. A. Miles: INTERNATIONAL SPACE STATION
FLIGHTS 1A/R-6A EXTERNAL CONTAMINATION OBSERVATIONS AND SURFACE ASSESSMENT, Proc.
of SPIE, Vol. 4774, 2002.

宇宙でのコンタミネーション現象の実例 ー スペースシャトル ー



スラスタからのプルーム衝突痕

出典)C. Soares, H. Barsamian and S. Rauer: Thruster Plume Induced Contamination Measurements
From the PIC and SPIFEX Flight Experiments, Proc. of SPIE, Vol. 4774, 2002.

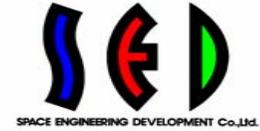
宇宙でのコンタミネーション現象の実例 — スペースシャトル —



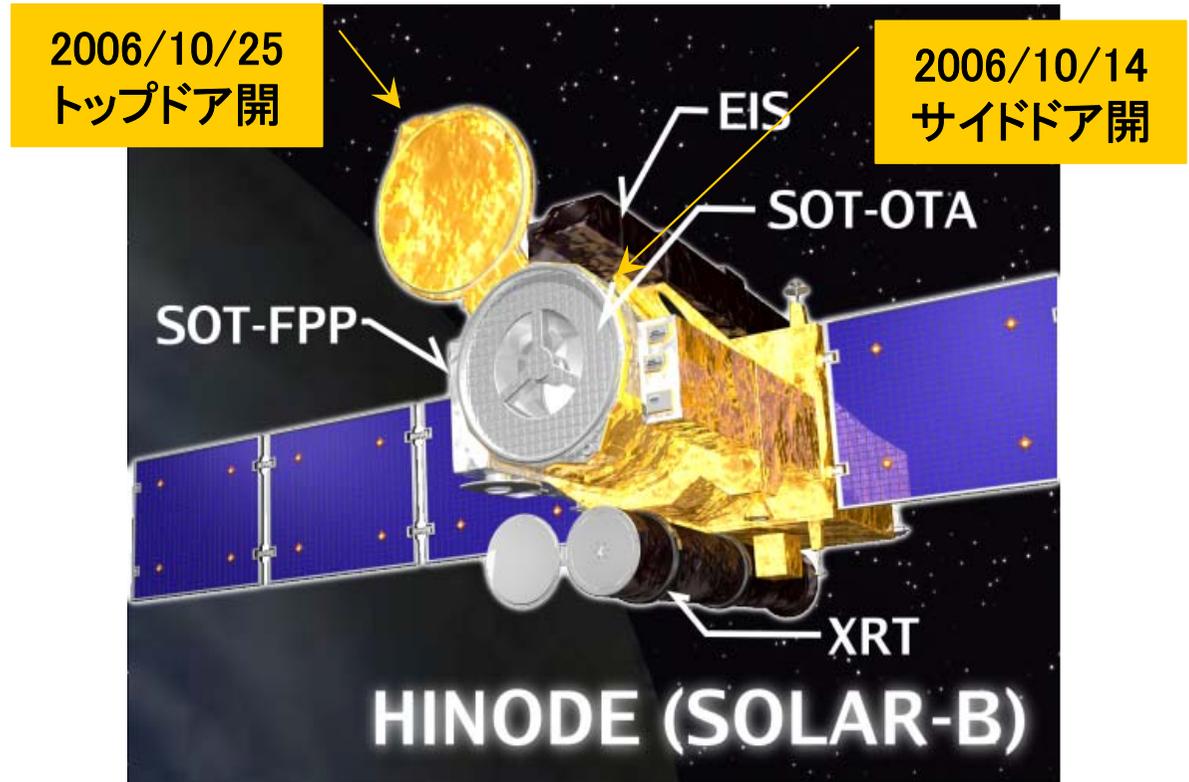
船内からの水の排出



宇宙でのコンタミネーション現象の実例 — 太陽観測衛星「ひので」 —



M-Vロケット7号機により
2006年9月23日6時36分
打上げ



SOT-OTA: 可視光磁場望遠鏡/光学望遠鏡

SOT-FPP: // /焦点面パッケージ

EIS : 極端紫外線撮像分装置

XRT : X線望遠鏡

宇宙でのコンタミネーション現象の実例 — 太陽観測衛星「ひので」 —

クリティカルなOTA光学機器

- 主鏡
- 副鏡
- コリメータレンズ

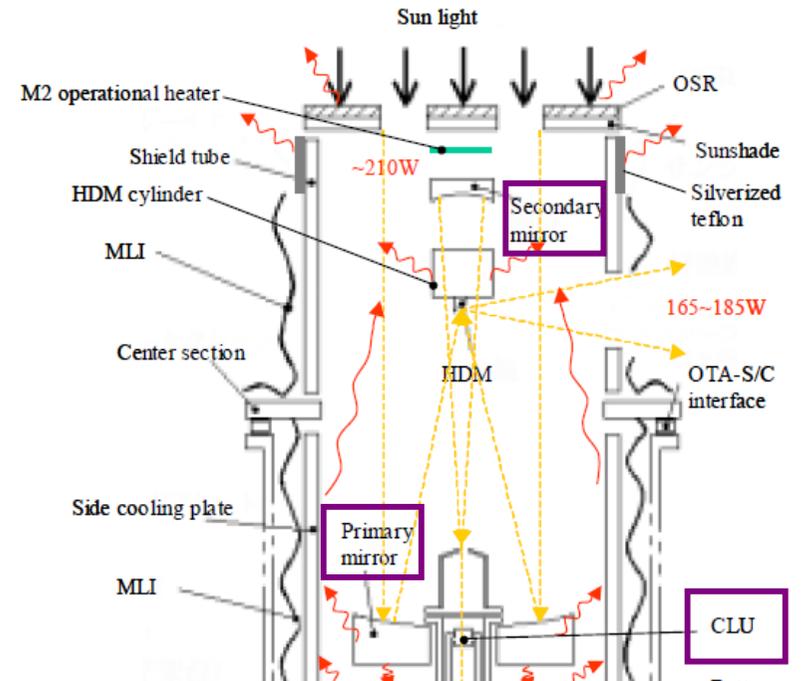
要求値

- $\alpha_{EOL} - \alpha_{BOL} = 0.05$

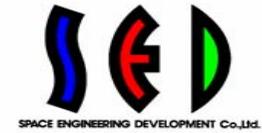
コンタミネーションによる劣化メカニズム

コンタミネーションの付着

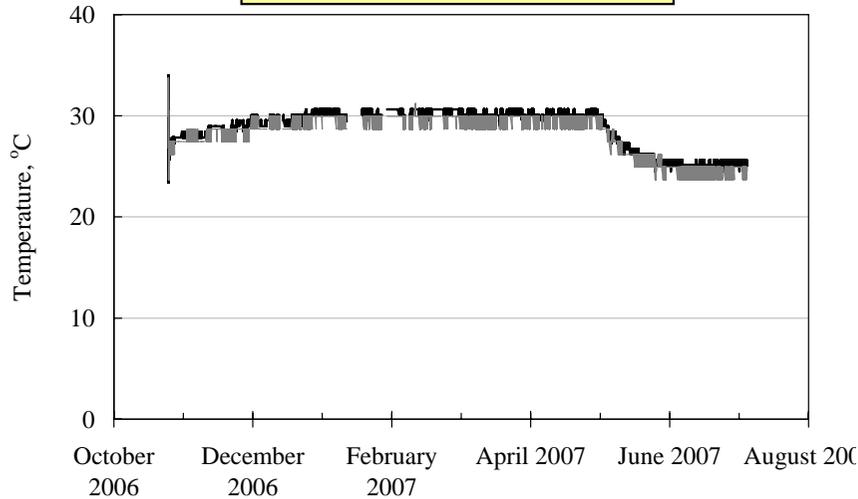
- ⇒ α の増加
- ⇒ 温度の上昇
- ⇒ 鏡の熱変形
- ⇒ **データの劣化, ミッション喪失**



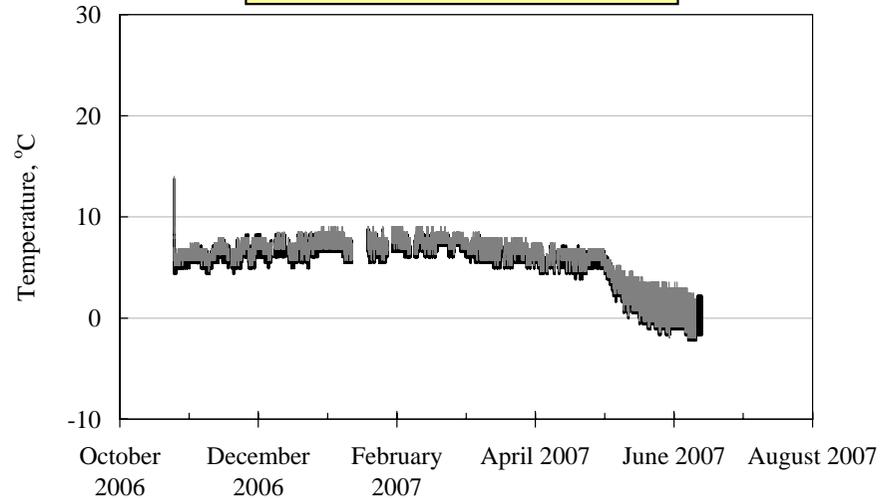
宇宙でのコンタミネーション現象の実例 — 太陽観測衛星「ひので」 —



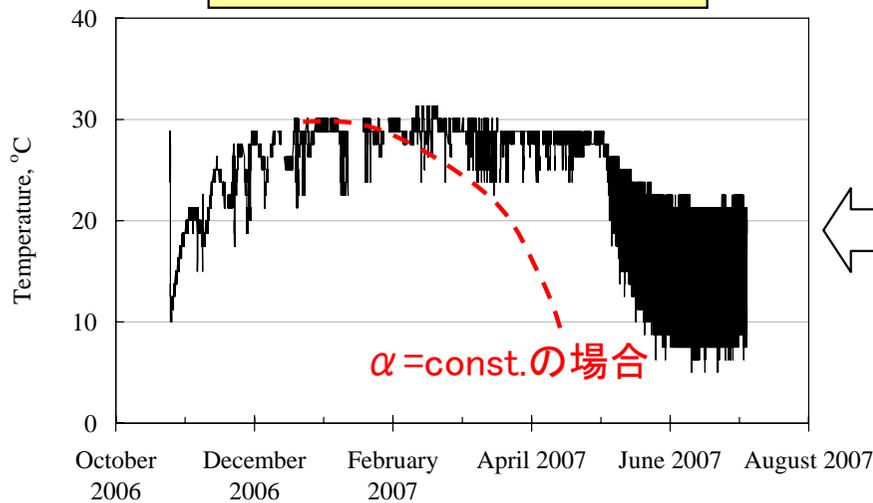
主鏡近傍の温度



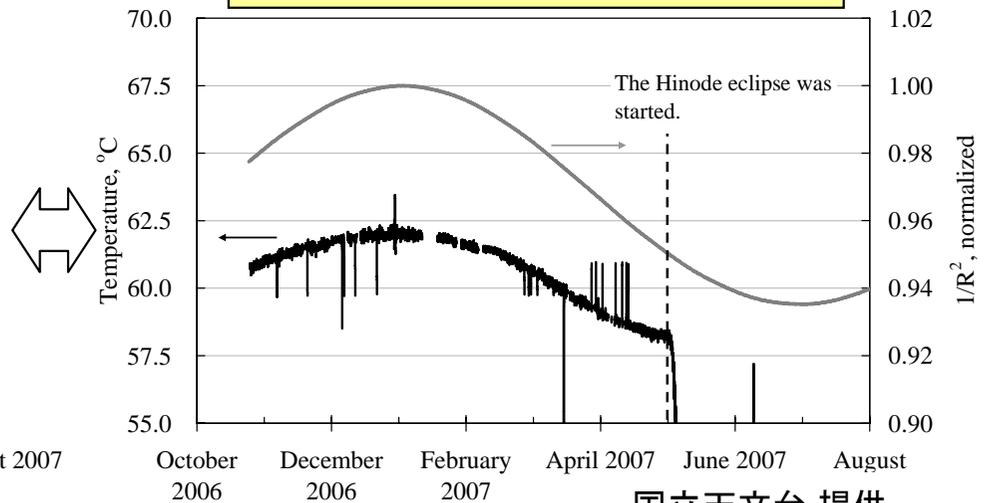
副鏡近傍の温度



排熱鏡近傍の温度



太陽電池パネルの温度



国立天文台 提供

➤ 分子状コンタミネーション

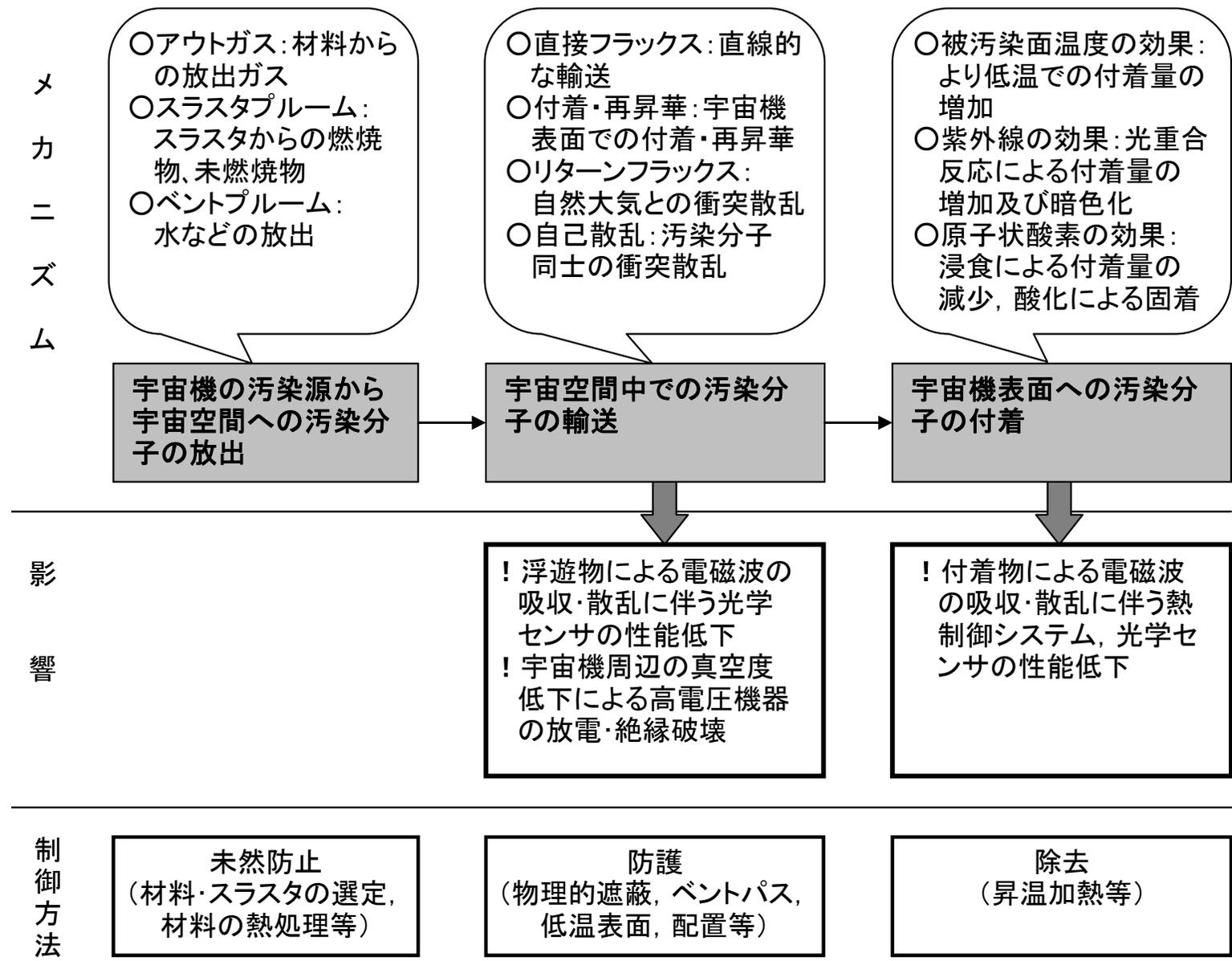
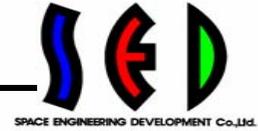
- ✓ 地上での有機物の吸着、真空中での脱着
- ✓ 真空中での有機材料中の低分子有機物の放出
- ✓ スラスタプルーム中の未燃焼物の放出
- ✓ 不純物を含んだ水の放出

➤ 粒子状コンタミネーション

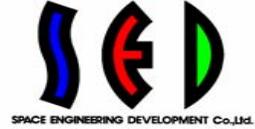
- ✓ 地上での砂・埃などの付着、打上げ時の振動環境下での放出・再付着
- ✓ 固体潤滑剤などの駆動機構からの放出

コンタミネーションとは

— 分子状コンタミネーションの主要メカニズム —



コンタミネーションとは — 分子状コンタミネーションの特徴 —

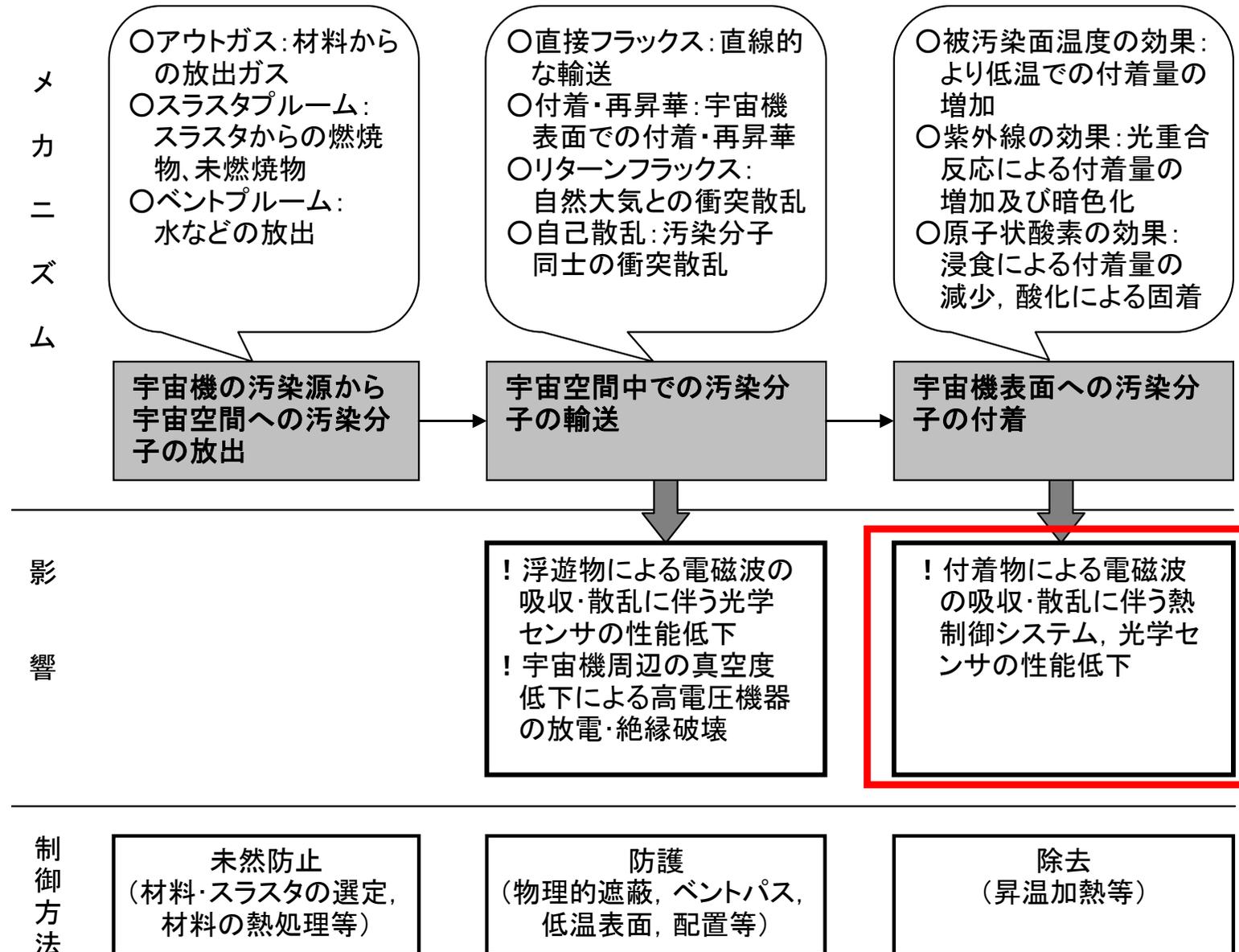


- コンタミネーション付着厚は数nm～数百nm(数分子層～数百分子層)程度の極めて少ない物理量である。
- 温度変動に伴う付着・再昇華、紫外線照射による光重合・光分解と暗色化、原子状酸素による浸食、固着等の宇宙環境との相互作用がある。
- 1つの材料から数種類のアウトガス成分が放出され、成分毎に熱的性質、光学的性質、化学的性質が異なる。

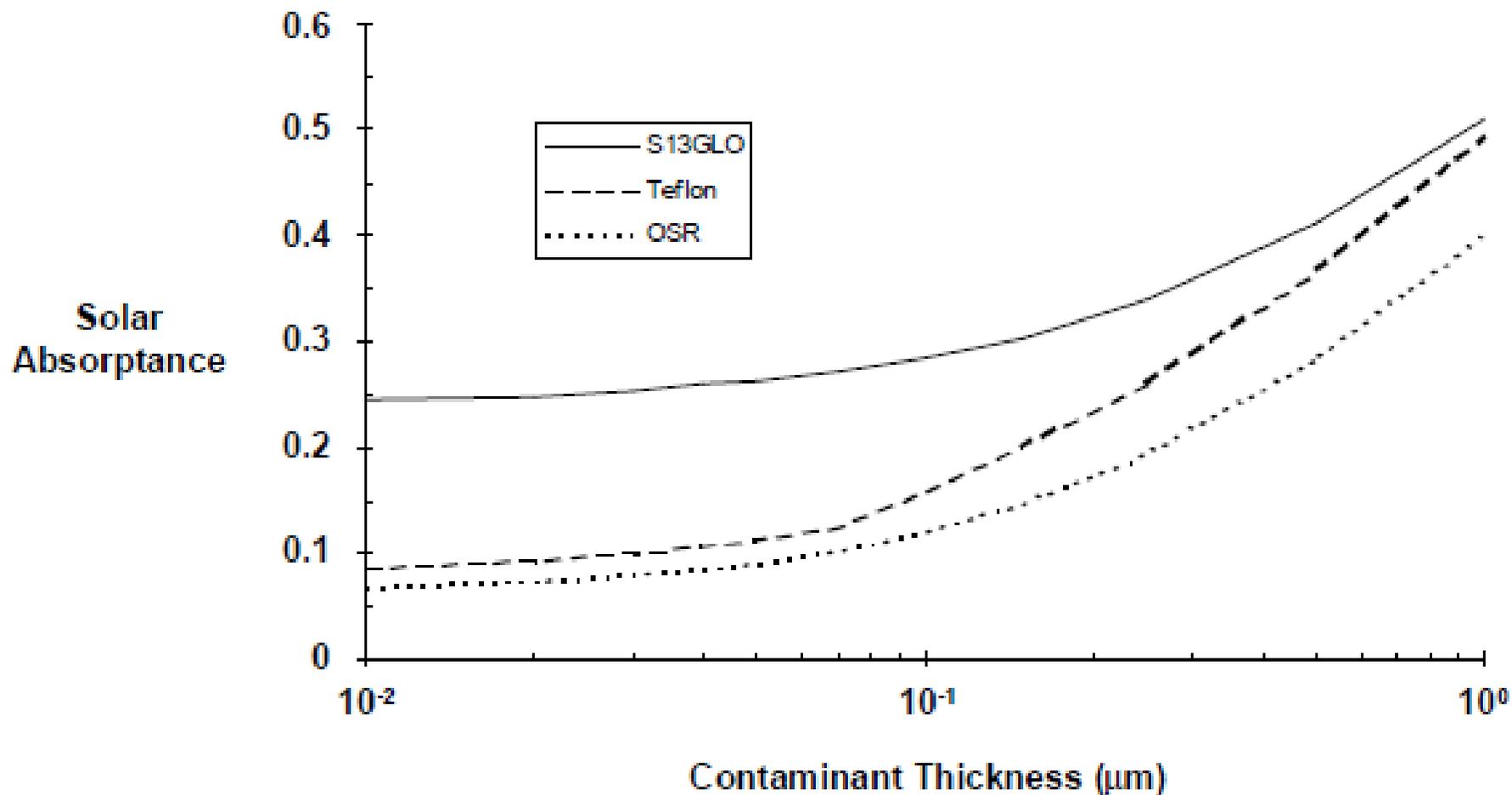
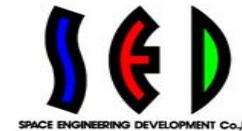
※一つの人工衛星には数十種類もの有機材料が使用される。

⇒ 多くの物理的・化学的プロセスが混在した極めて複雑な系である！

分子状コンタミネーション付着の影響

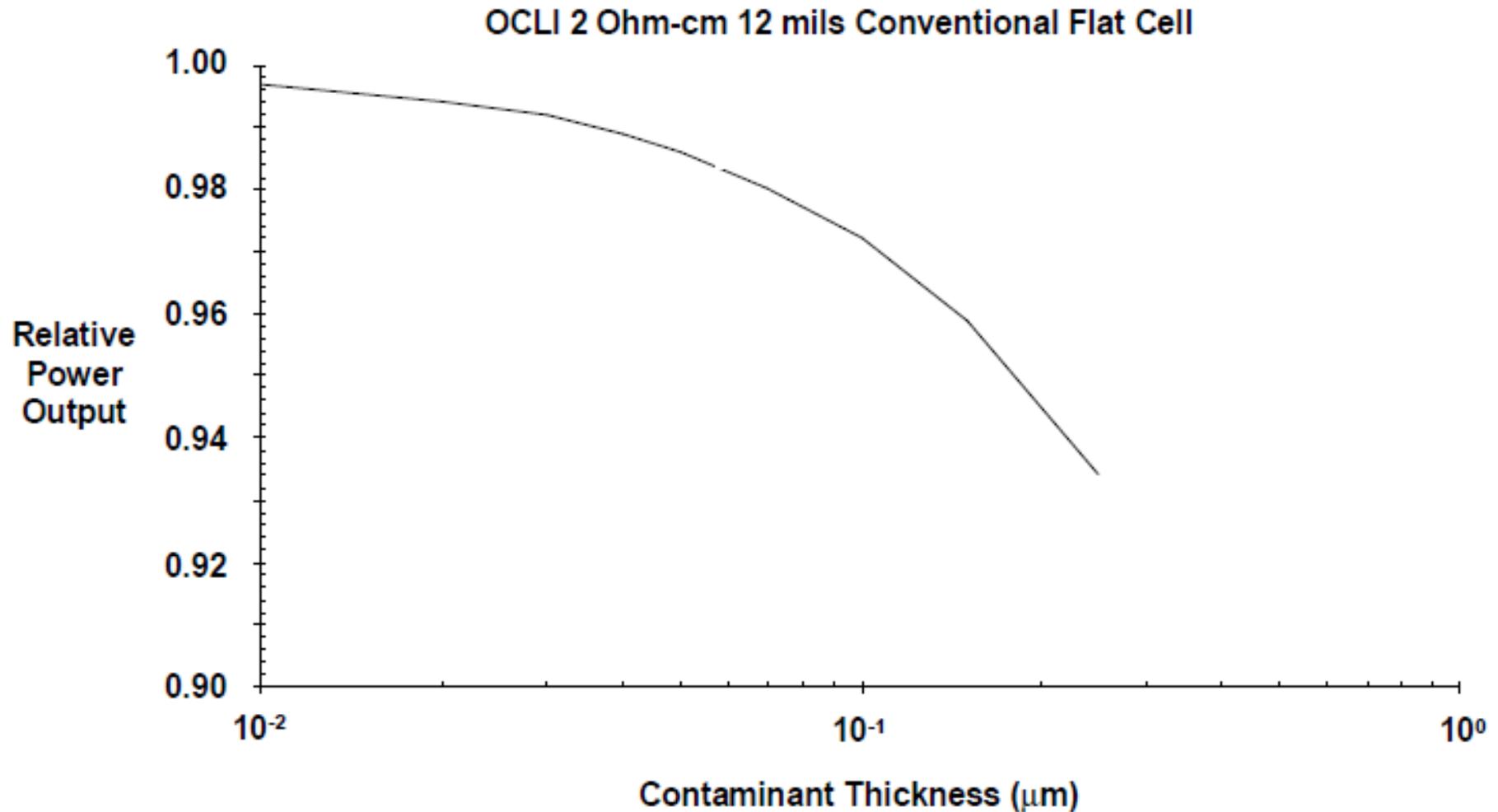


分子状コンタミネーション付着の影響 — 太陽光吸収率の増加 —



出典) A. C. Tribble, B. Boyadjian, J. Davis, J. Haffner and E. McCullough: Contamination Control Engineering Design Guidelines for the Aerospace Community, NASA CR-4740, 1996.

分子状コンタミネーション付着の影響 — 太陽電池セルの発生電力の低下 —



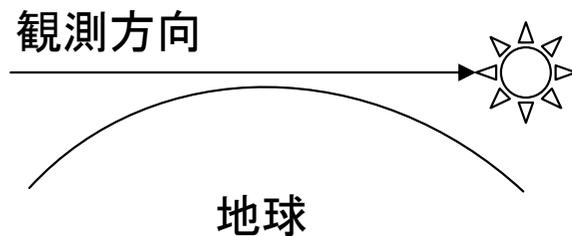
出典) A. C. Tribble, B. Boyadjian, J. Davis, J. Haffner and E. McCullough: Contamination Control Engineering Design Guidelines for the Aerospace Community, NASA CR-4740, 1996.

分子状コンタミネーション付着の影響 — 観測センサのスループットの低下 —



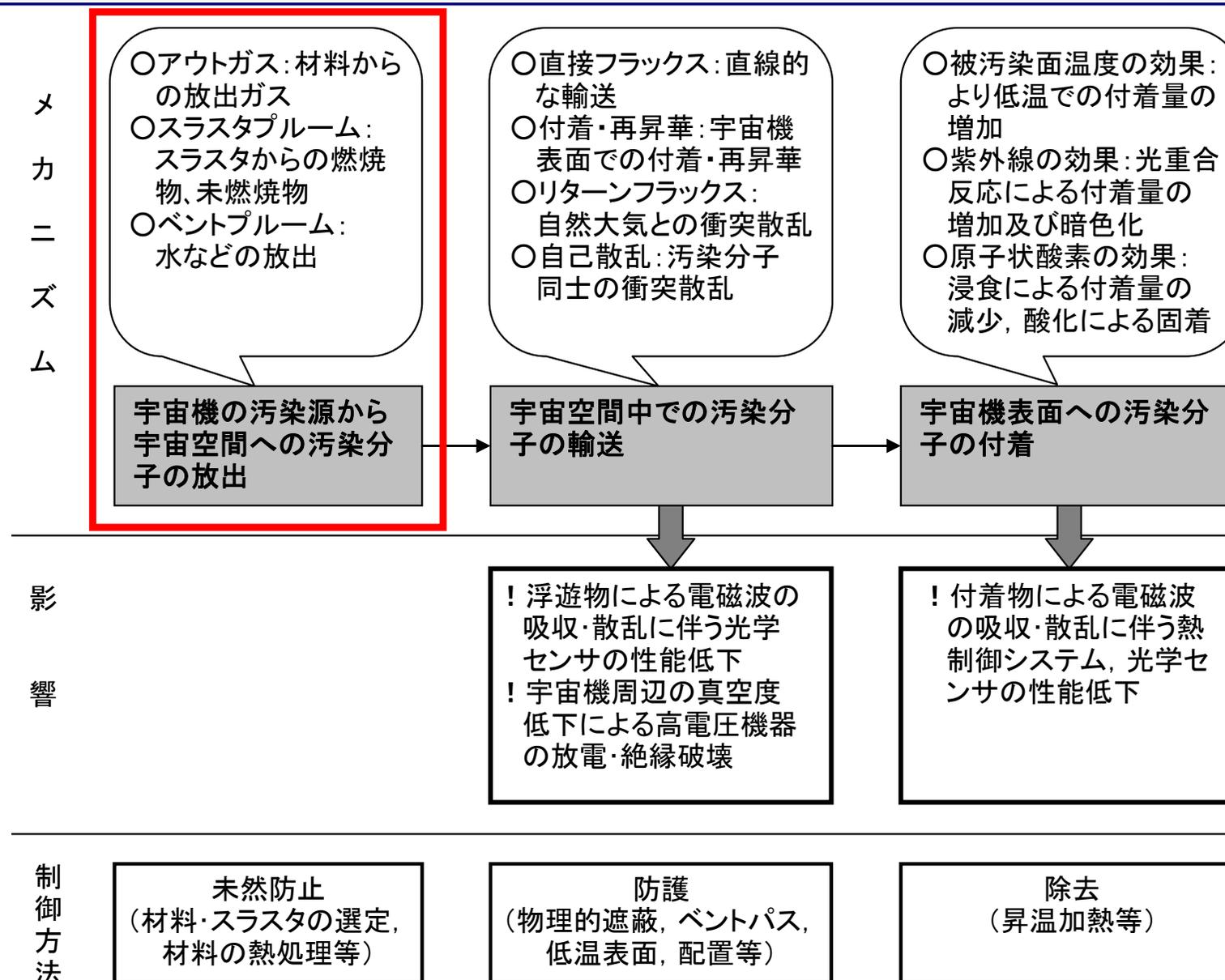
米国地球観測衛星SAGEのスループット変化

太陽掩蔽法による地球大気
の観測



出典) L. E. Mauldin III, and W. P. Chu: Optical Degradation due to Contamination on the SAGE/SAGE II Spacecraft Instruments, Proc. of SPIE Vol. 338, pp.58-64, 1982.

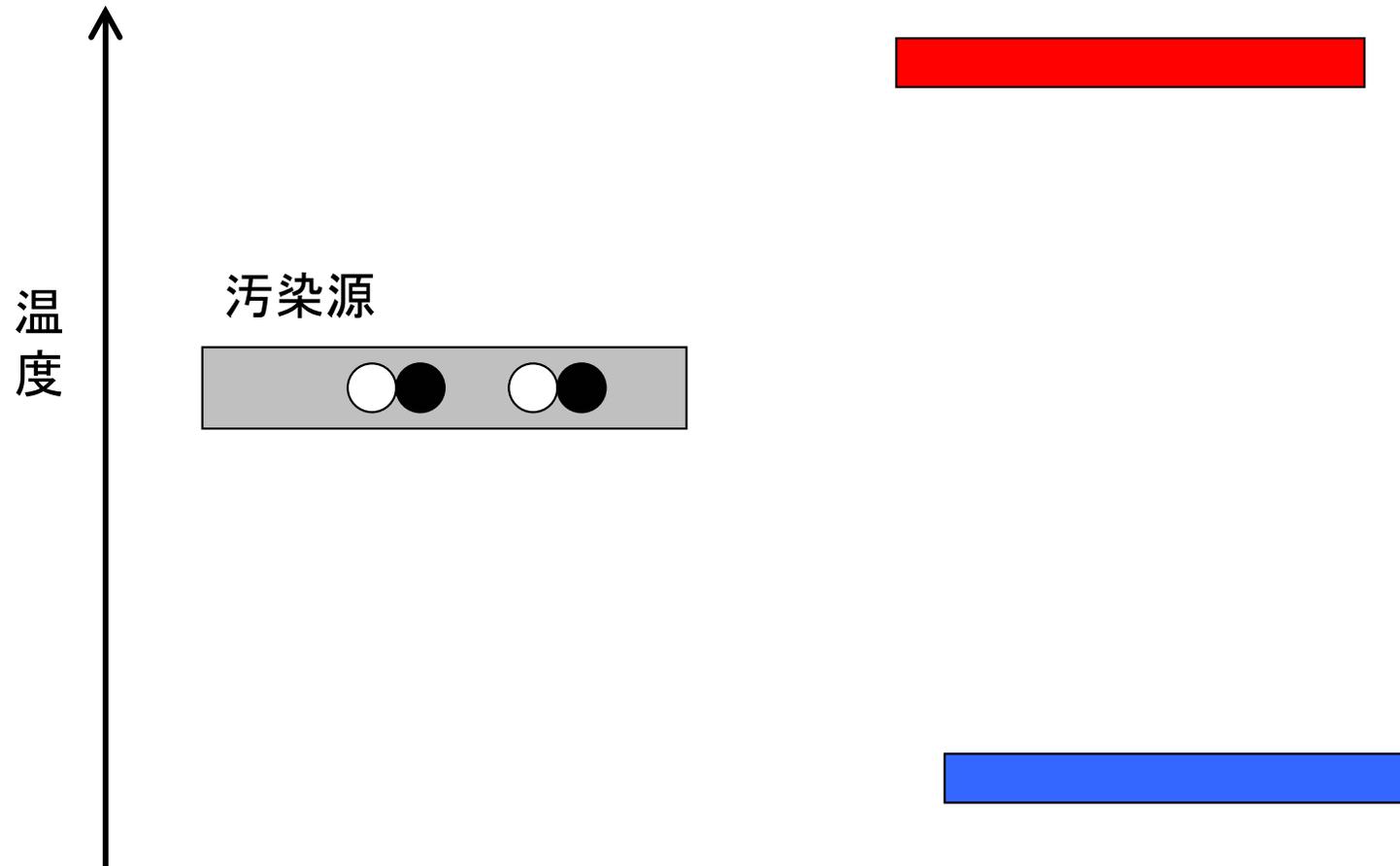
分子状コンタミネーション源



分子状コンタミネーション源 — 材料からのアウトガス —



熱真空環境下でのアウトガスの放出・付着

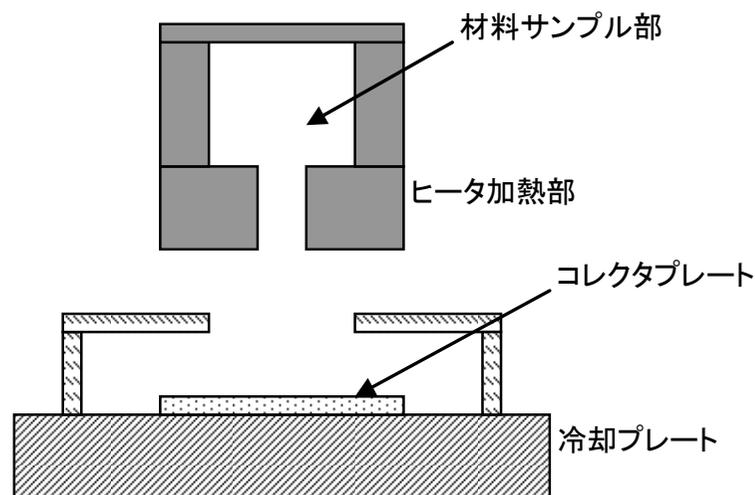


分子状コンタミネーション源 － 材料からのアウトガス －

ASTM E595の概要

試験名 : Standard test method for total mass loss and collected volatile condensable materials from outgassing in a vacuum environment

試験装置の概観



取得データ:

- ✓ TML (Total Mass Loss): 質量損失比(%)
[(試験前試料重量 - 試験後試料重量) / 試験前試料重量] × 100
- ✓ CVCM (Collected Volatile Condensable Material): 再凝縮物質質量比(%)
[(試験後コレクタプレート重量 - 試験前コレクタプレート重量) / 試験前試料重量] × 100
- ✓ WVR (Water Vapor Regained): 再吸水量比(%)
[(吸湿後試料重量 - 試験後試料重量) / 試験前試料重量] × 100

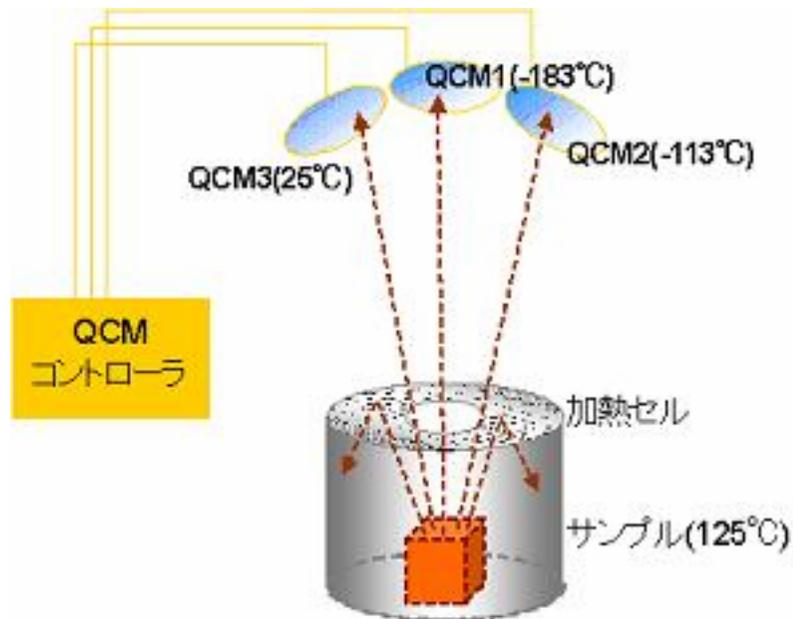
データ入手先:

- ✓ http://matdb1n.tksc.jaxa.jp/Outgas/OG_main_j.html
- ✓ <http://outgassing.nasa.gov/>

分子状コンタミネーション源 － 材料からのアウトガス －

ASTM E1559の概要

試験名 : Standard Test Method for Contamination Outgassing Characteristics of
Spacecraft Materials



JAXA提供

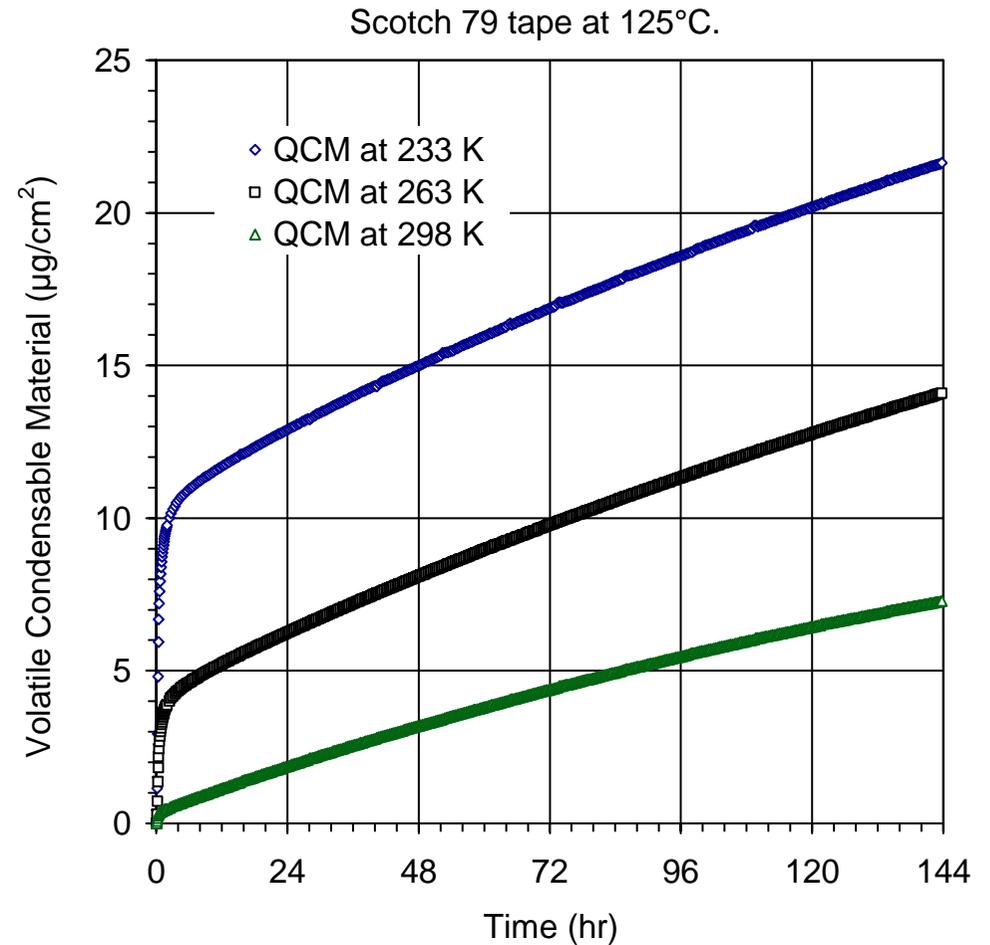
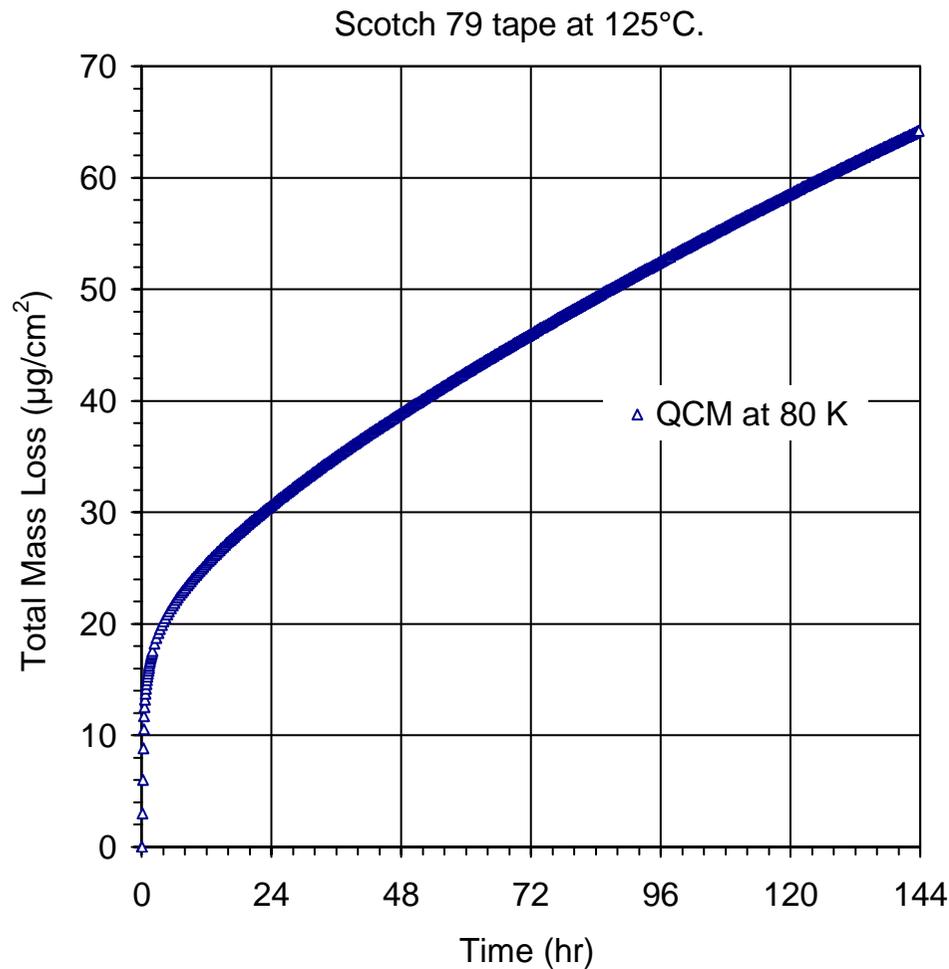
試験項目 :

- ✓ Isothermal test: 加熱セル、QCM 温度を一定に保持(120時間)。
- ✓ QCM thermogravimetric analysis (QTGA) test: 上記試験後、QCM 温度を一定速度で昇温。

分子状コンタミネーション源 — 材料からのアウトガス —



Scotch 79 TapeのASTM E1559等温試験データ

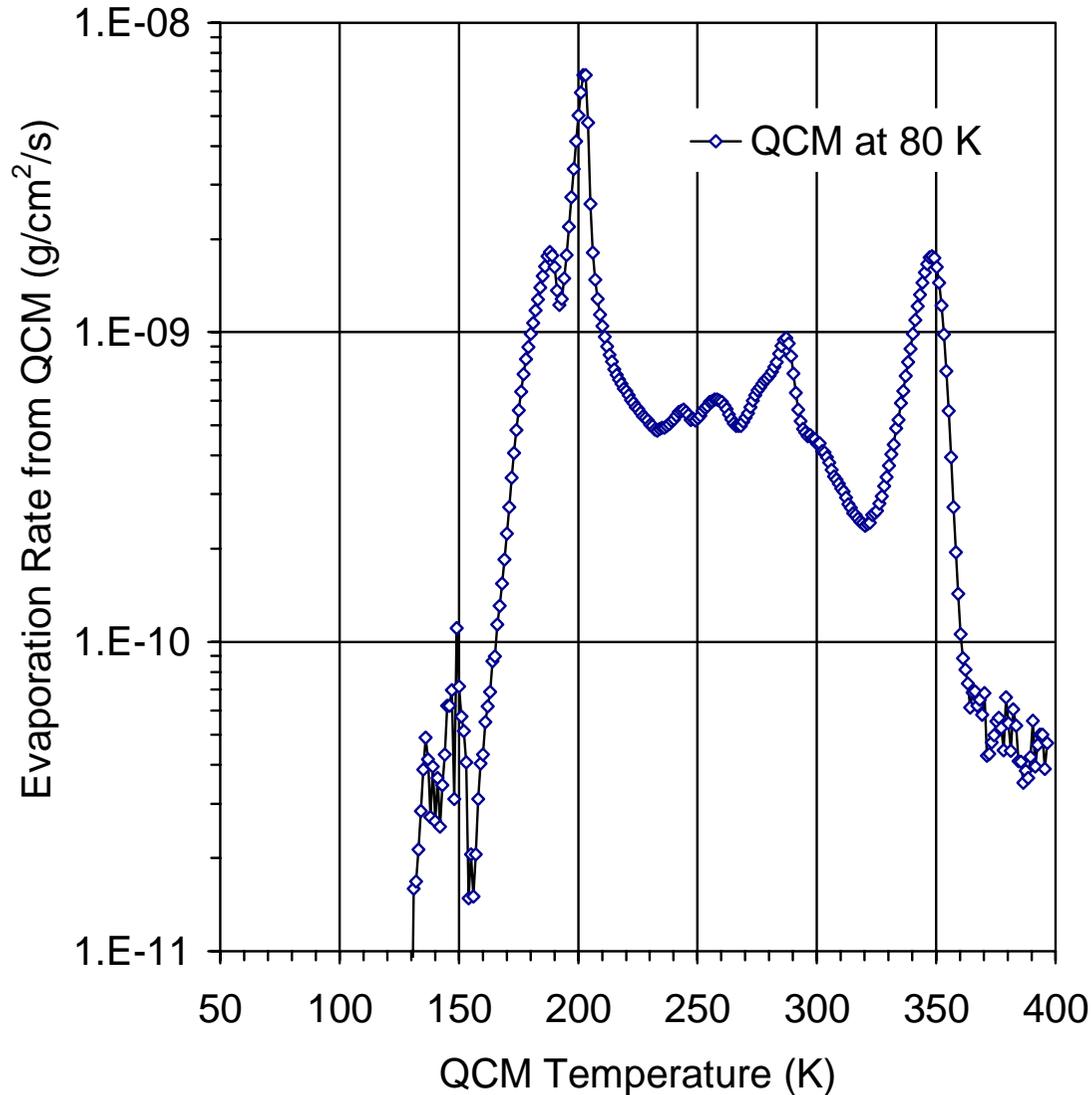


分子状コンタミネーション源 — 材料からのアウトガス —



Scotch 79 TapeのASTM E1559/QTGAデータ

QTGA after Scotch 79 tape at 125°C.

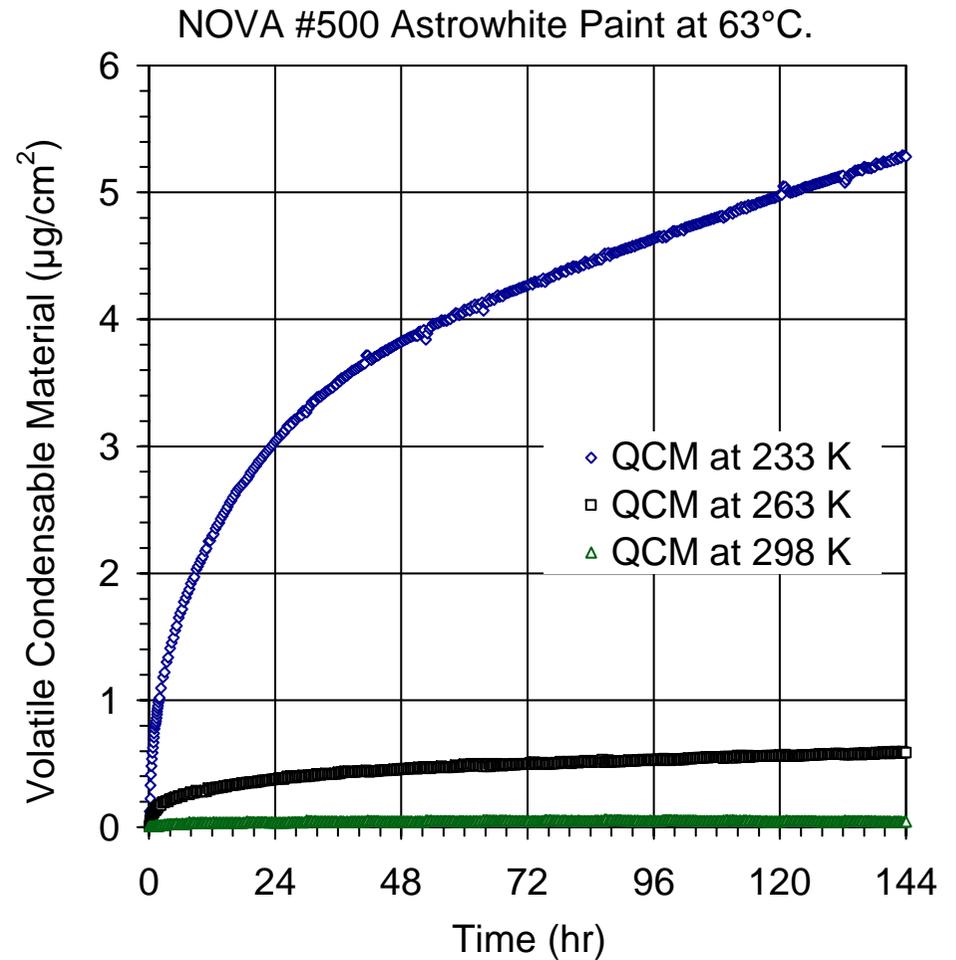
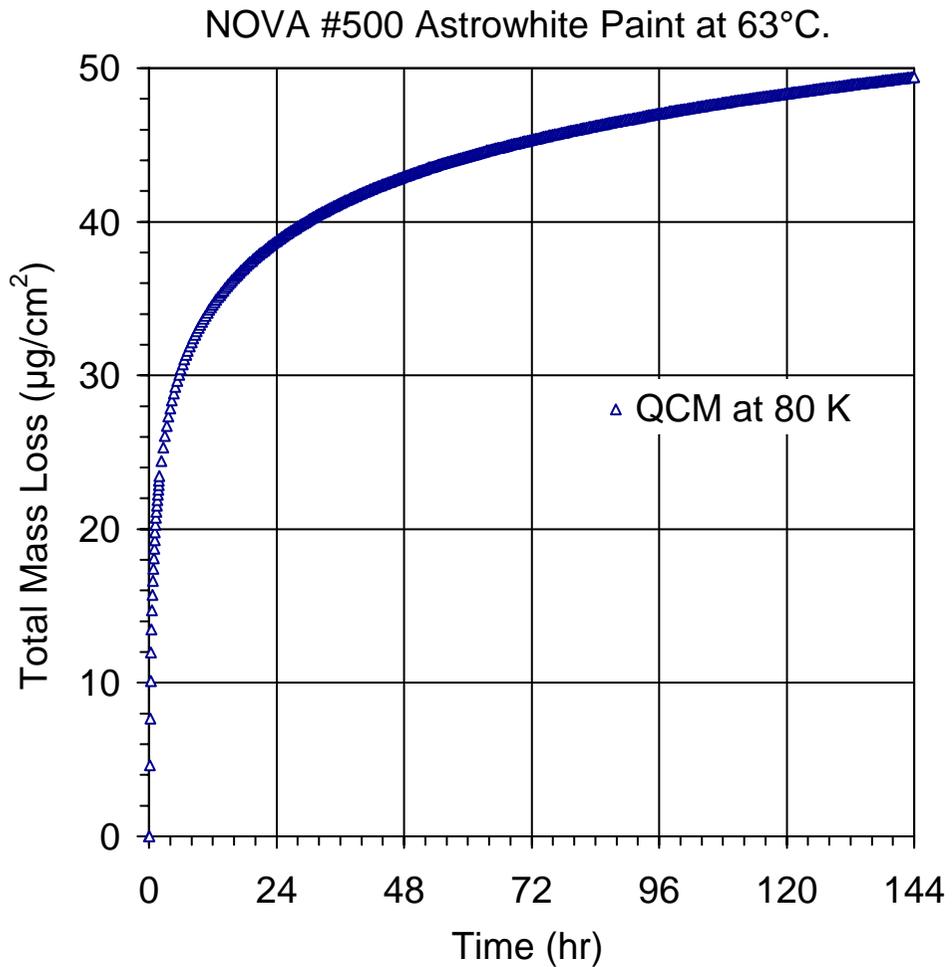


water	moderate
2-ethyl-1-hexanol	major
2, 2-dimethoxy-1,2-diphenyl-ethanone (UV absorber)	minor
phthalates (plasticizers)	minor
unidentified species	minor
2,6-di-tert-butyl-4-[(2-octadecyloxy-carbonyl)ethyl]-phenol	moderate

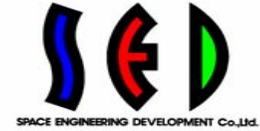
分子状コンタミネーション源 — 材料からのアウトガス —



NOVA #500 Astrowhite PaintのASTM E1559等温試験データ

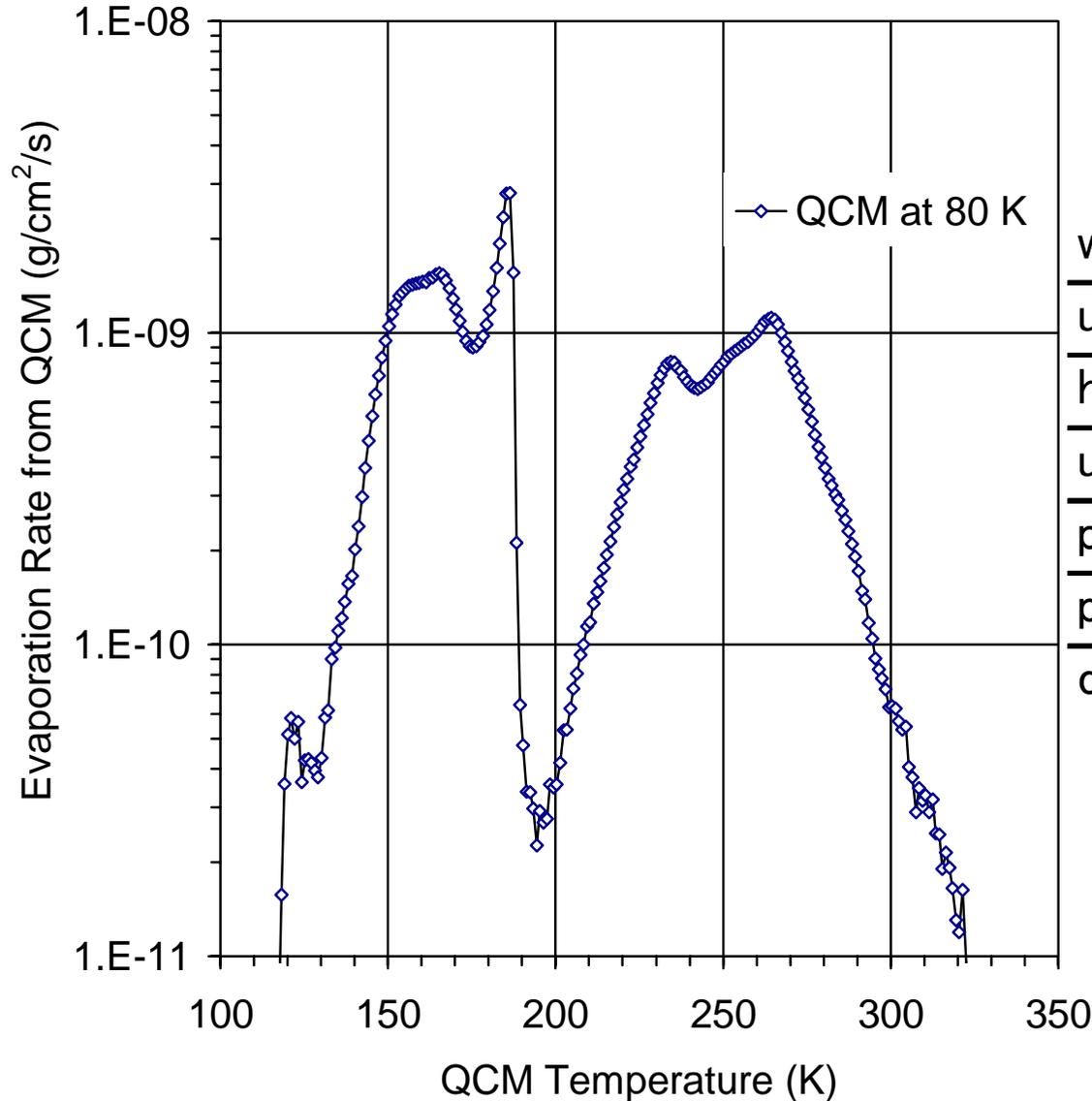


分子状コンタミネーション源 — 材料からのアウトガス —



NOVA #500 Astrowhite PaintのASTM E1559／QTGAデータ

QTGA after NOVA #500 Astrowhite Paint at 63°C.



water	major
unidentified species	minor
hydrocarbons	minor
unidentified species	minor
phthalates (plasticizers)	minor
polydimethyl silicones	moderate
diethylhexyl phthalate	minor

分子状コンタミネーション源 — 材料からのアウトガス —

コンタミネーション対策例

- 低アウトガス材料の採用
 - ✓ TML 1%以下、CVCM 0.1%以下(国際宇宙ステーションの場合)
- 真空チャンバ内での材料、コンポーネントのベーキング



真空槽A
(内径: 1.8m, 高さ: 4m)



真空槽B
(内径: 1.2m, 高さ: 0.65m)

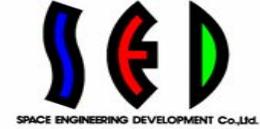


真空槽C (3台)
(内径: 0.6m, 高さ: 0.37m)

国立天文台 提供

- 軌道上でのコンポーネントのベーキング
 - ✓ 打上げから32日間のあいだ観測を実施せずに宇宙空間でベーキングを実施(「ひので」の場合)

分子状コンタミネーション源 — スラスタ —

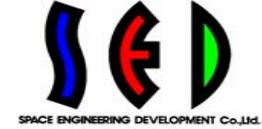


二液式スラスタからの液滴の生成

出典) J. Alred, P. Boeder, R. Mikatarian, C. Pankop and W. Schmidl: MODELING OF THRUSTER PLUME INDUCED EROSION, 9th ISMSE, 2003.

出典) H. Trinks: Experimental Investigation of the Exhaust Plume Flow Fields of Various Small Bipropellant and Monopropellant Thrusters, AIAA-87-1607.

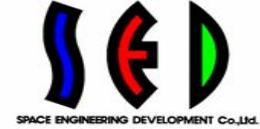
分子状コンタミネーション源 － スラスター －



コンタミネーション対策例

- スラスターの選択
 - ✓ 一液式スラスター:ヒドラジン
 - ✓ 二液式スラスター:モノメチルヒドラジン／非対称ジメチルヒドラジン、四酸化二窒素(NTO)
- 軌道上でのスラスターの運用制限
 - ✓ 観測開始以降、7年間のあいだスラスターを運用しない予定。「ひので」の場合)

分子状コンタミネーション源 － 水ベント －



宇宙空間への水の放出

出典)W. Schmidl, J. Alred, R. Mikatarian, C. Soares,
E. Miles, L. Howorth, L. Mishina and R. Murtazin: U.S. LAB
CONDENSATE VENT EXPERIMENT AND ANALYSIS, 9th ISMSE, 2003.

出典)D. GmbH: Flow of a water jet into vacuum, Acta
Astronautica (6), 1979, pp.1213-1226.

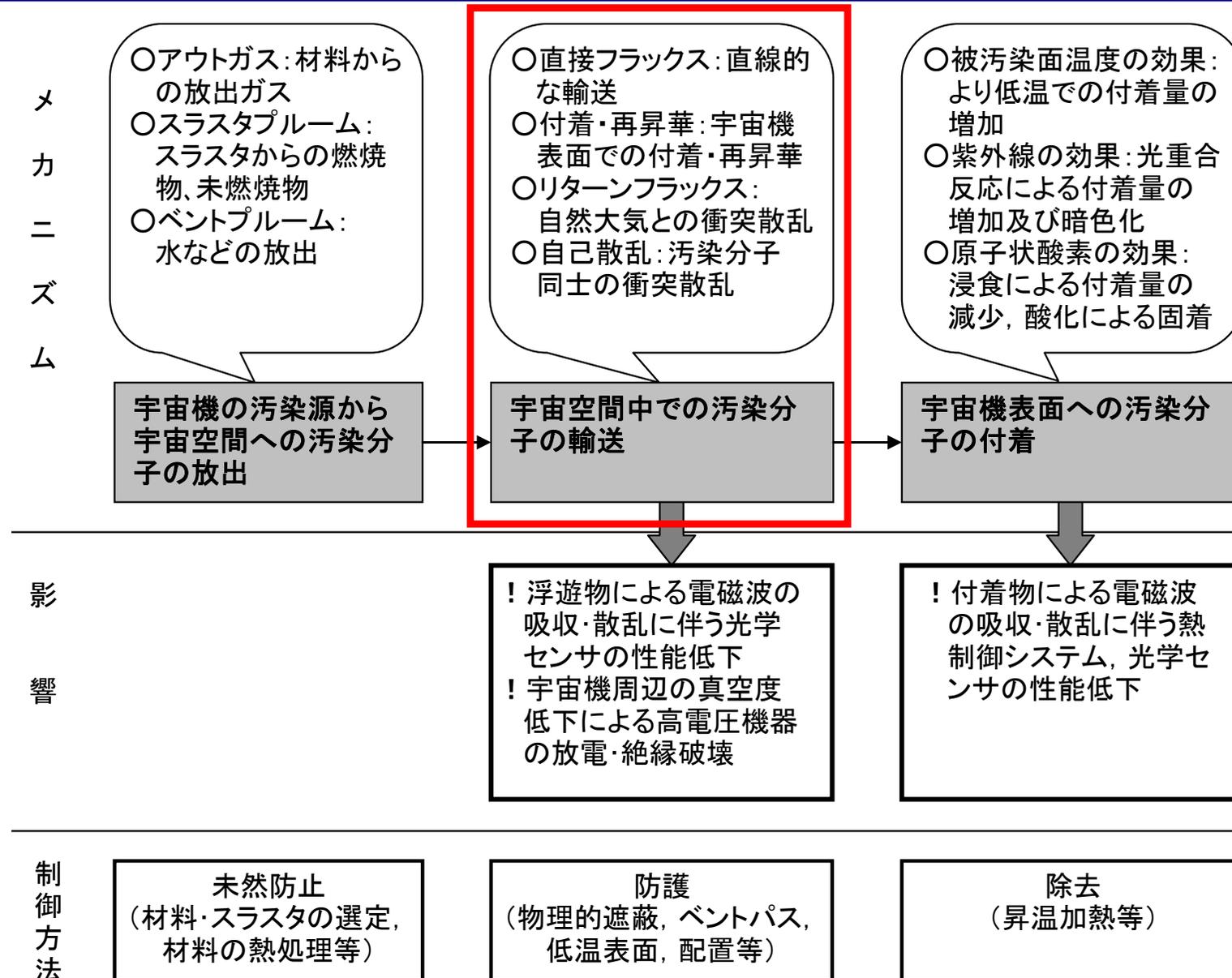
分子状コンタミネーション源 － 水ベント －



コンタミネーション対策例

- 軌道上での水ベントの運用制限
 - ✓ 「きぼう」船外実験プラットフォーム（JEM曝露部）取付以降、スペースシャトルのWaste Water Dumpを実施しない予定。（国際宇宙ステーションの場合）

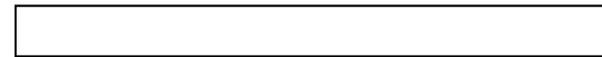
分子状コンタミネーションの輸送



分子状コンタミネーションの輸送 — 直接フラックス、付着・再昇華 —

直接フラックス

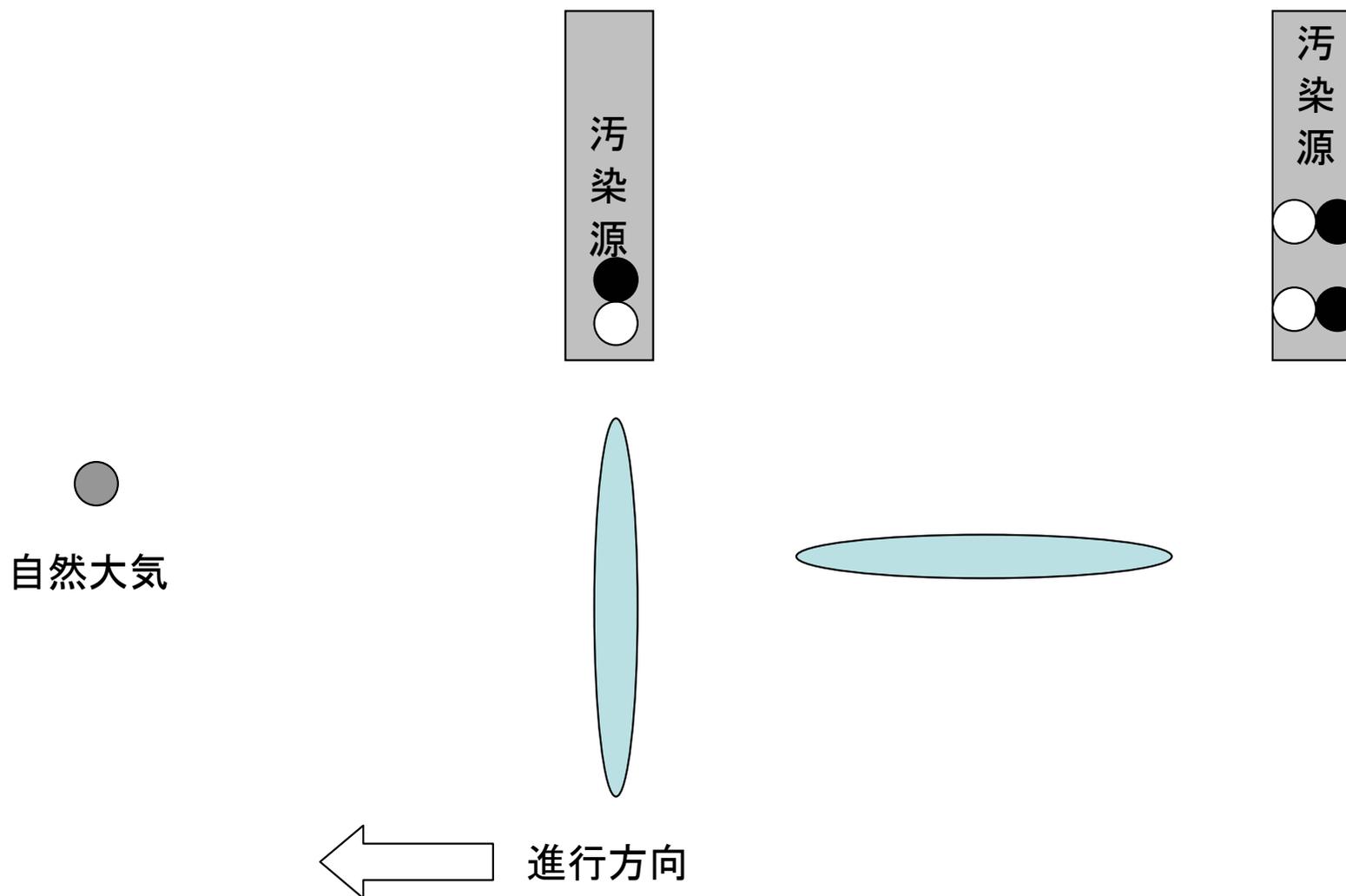
付着・再昇華



分子状コンタミネーションの輸送 — リターンフラックス、自己散乱 —

リターンフラックス

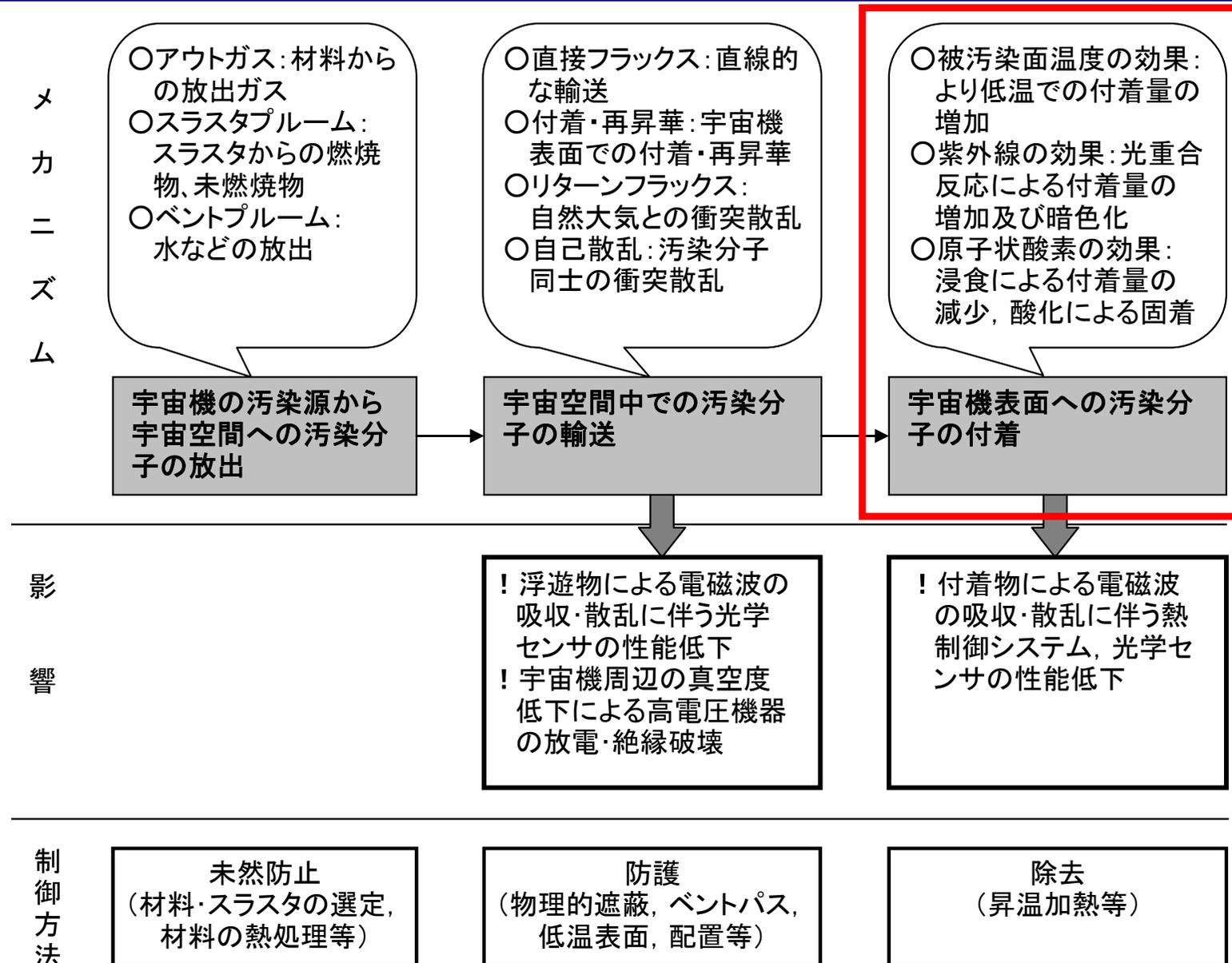
自己散乱



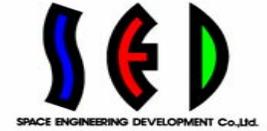
コンタミネーション対策例

- 物理的遮蔽
 - ✓ ドアにより望遠鏡内への汚染物質の流入を遮る。「ひので」、ハッブル宇宙望遠鏡の場合)
- ベントパス
 - ✓ ピンホールからアウトガス物質を放出させる。(多層断熱材MLI等)
 - ✓ サイドドア、ホールからアウトガス物質を放出させる。「ひので」の場合)
- 低温表面
 - ✓ クリティカル・コンポーネントよりも低温のプレートに汚染物質を集める。
- 汚染源とクリティカル・コンポーネントの幾何学的位置関係

分子状コンタミネーションの付着



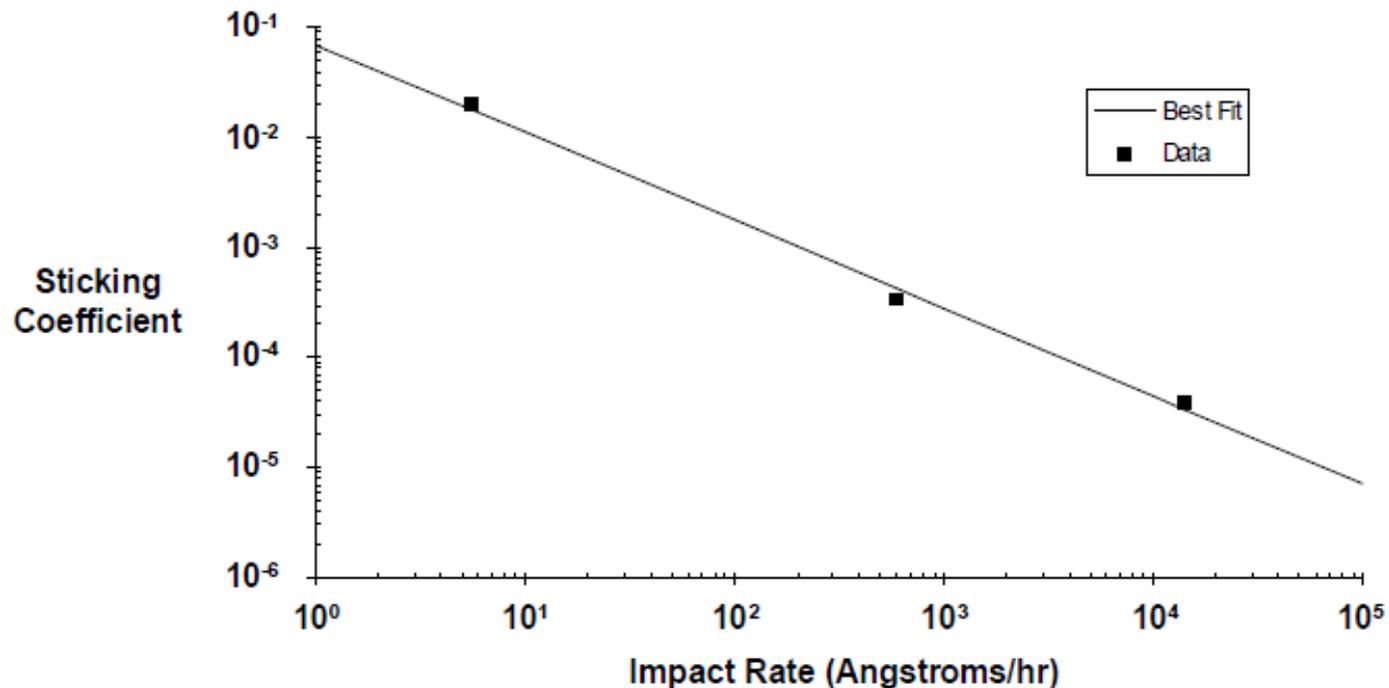
分子状コンタミネーションの付着 － 低温表面への付着 －



pp.22-26参照

分子状コンタミネーションの付着 — UVによる光化学反応付着 —

- 汚染物質(有機物)にUVを照射すると、光分解反応、光重合反応が発生する。
- UVを照射しない状態で付着しない汚染物質でも、UVを照射すると光重合反応により付着するようになることがある。
- 付着係数は、汚染物質入射フラックス、光子数、入射光波長、温度にも依存する。



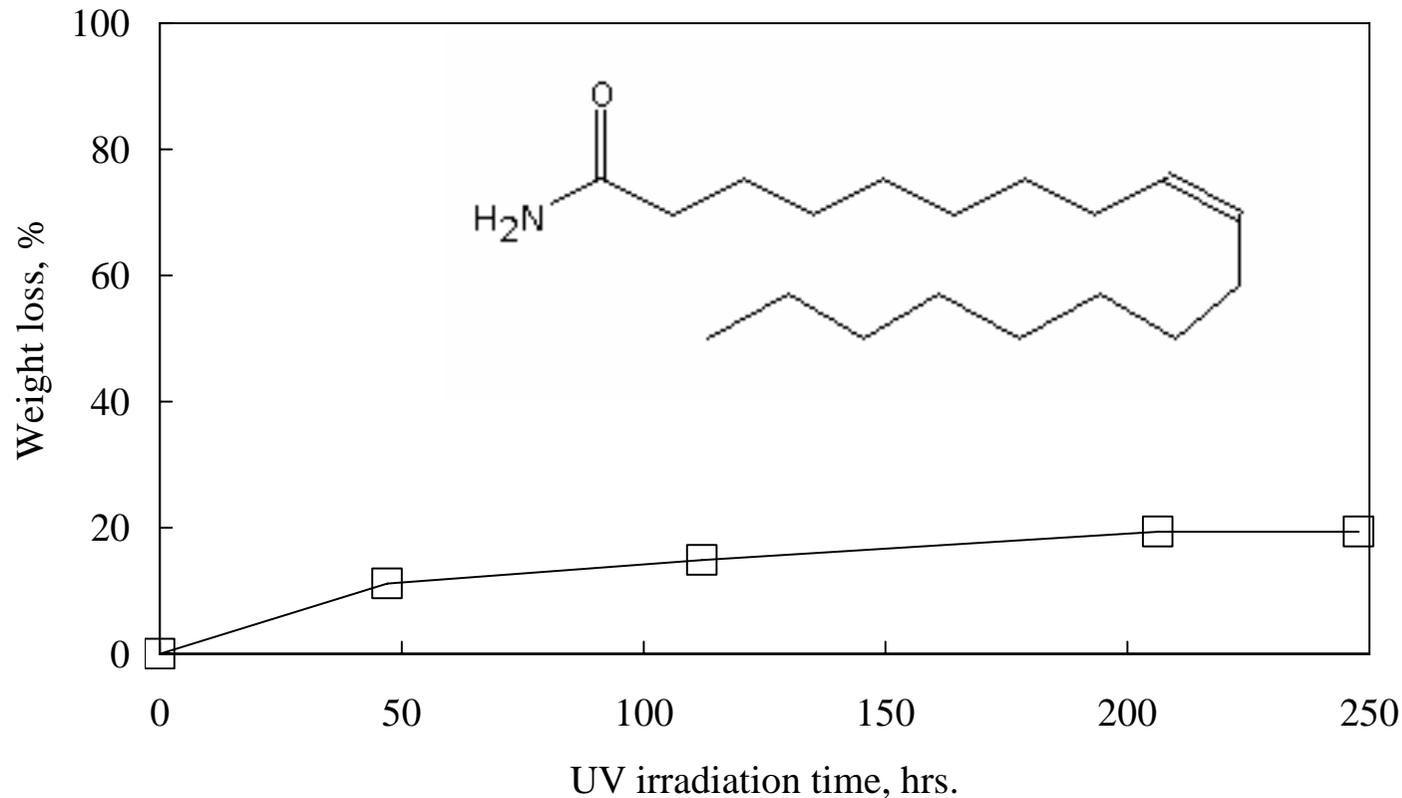
出典) A. C. Tribble, B. Boyadjian, J. Davis, J. Haffner and E. McCullough: Contamination Control Engineering Design Guidelines for the Aerospace Community, NASA CR-4740, 1996.

分子状コンタミネーションの付着 — UVによる付着物の暗色化 —

- 付着物(有機物)にUVを照射すると、付着物の重量減少が生じるが、透過率低下も生じる。

UV照射によるオレアミドの重量減少率

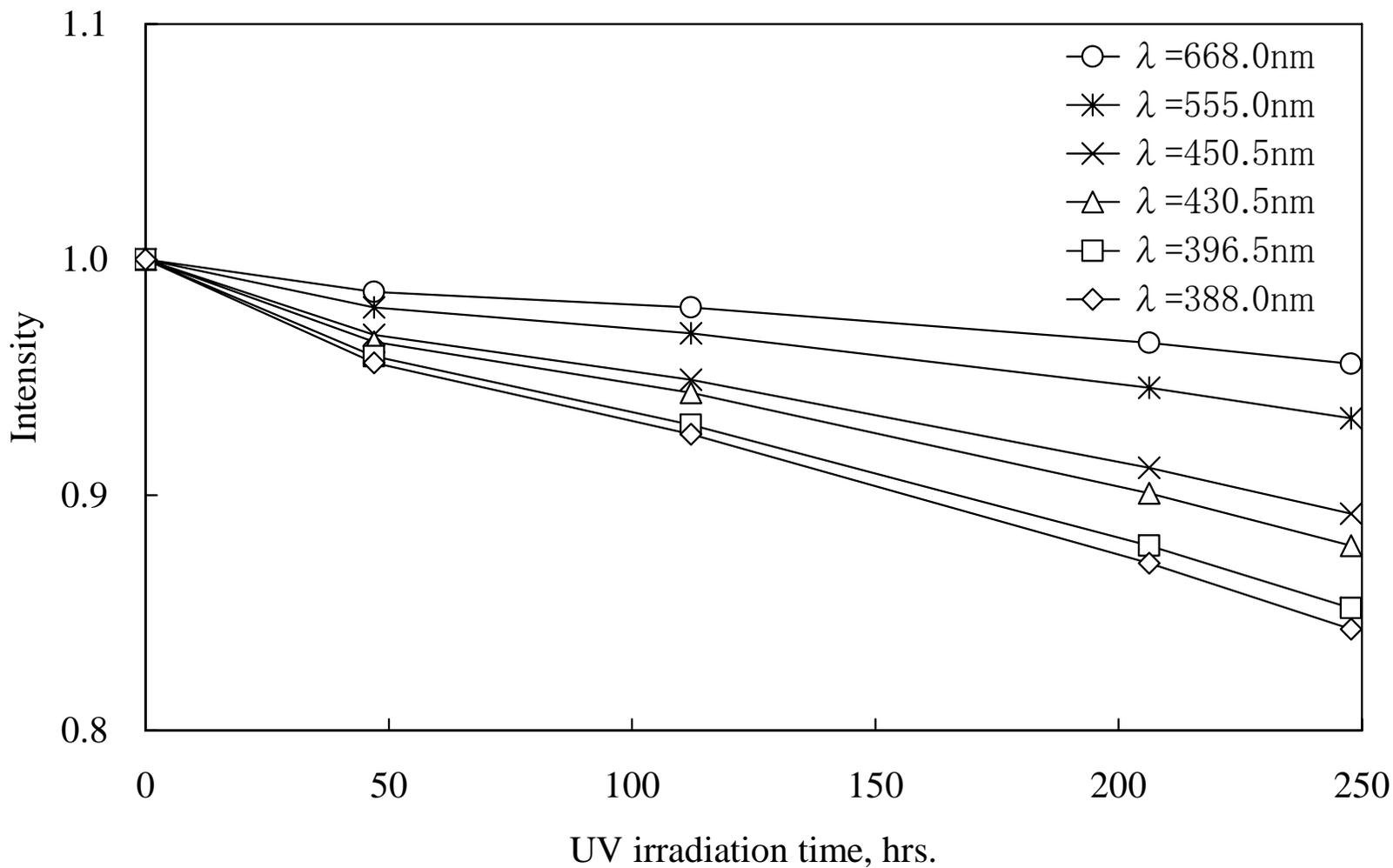
Oleamide on CaF_2 substrate



物質・材料研究機構 提供

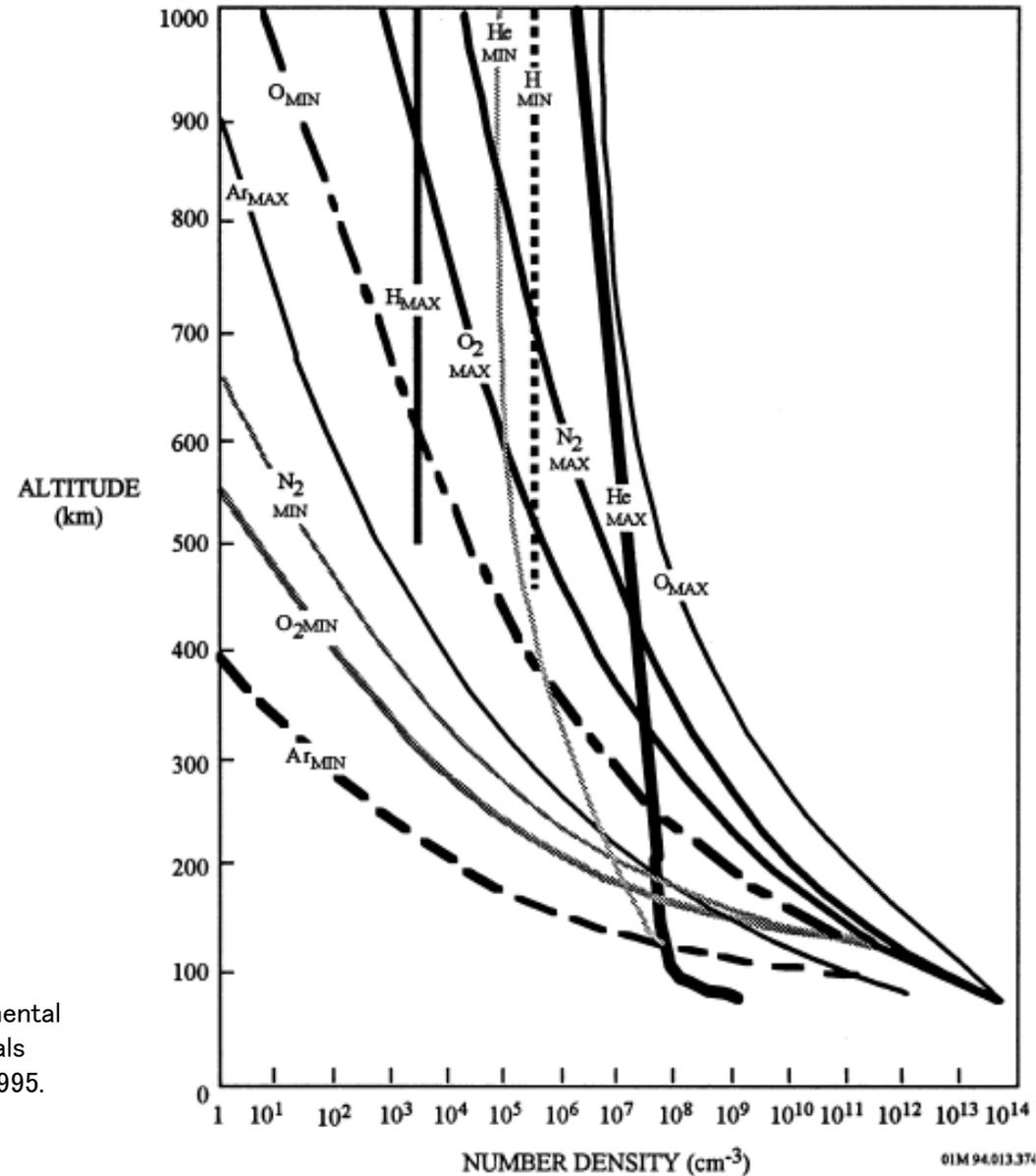
分子状コンタミネーションの付着 — UVによる付着物の暗色化 —

UV照射によるオレアミド/CaF₂基板の透過光強度変化



分子状コンタミネーションの付着 — 原子状酸素による浸食 —

- 地球低軌道(LEO)環境には、原子状酸素(AO)が存在する。
- 炭化水素等の付着物にAOが入射すると、付着物の酸化分解による浸食現象が生じる。



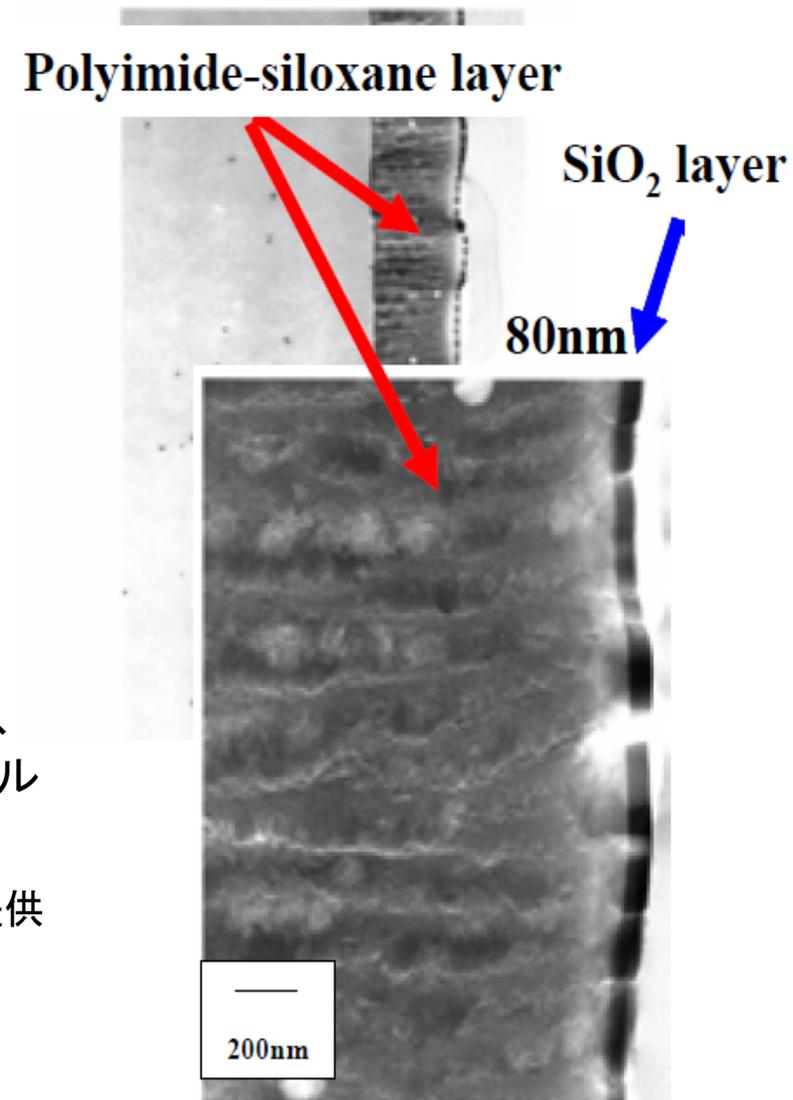
出典)E. M. Silverman: Space Environmental Effects on Spacecraft: LEO Materials Selection Guide, NASA CR 4661, 1995.

分子状コンタミネーションの付着 — 原子状酸素による酸化・固着 —

- しかしながら、シロキサンからなる付着物にAOが照射すると、 SiO_x となり固着することがある。

国際宇宙ステーション サービス
モジュールでの曝露材料サンプル
の断面

JAXA提供



コンタミネーション対策例

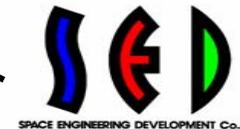
➤ 昇温加熱

- ✓ 低温のクリティカル・コンポーネントを室温付近まで昇温し、付着物を蒸発させる。（「ひので」、ハッブル宇宙望遠鏡の場合）

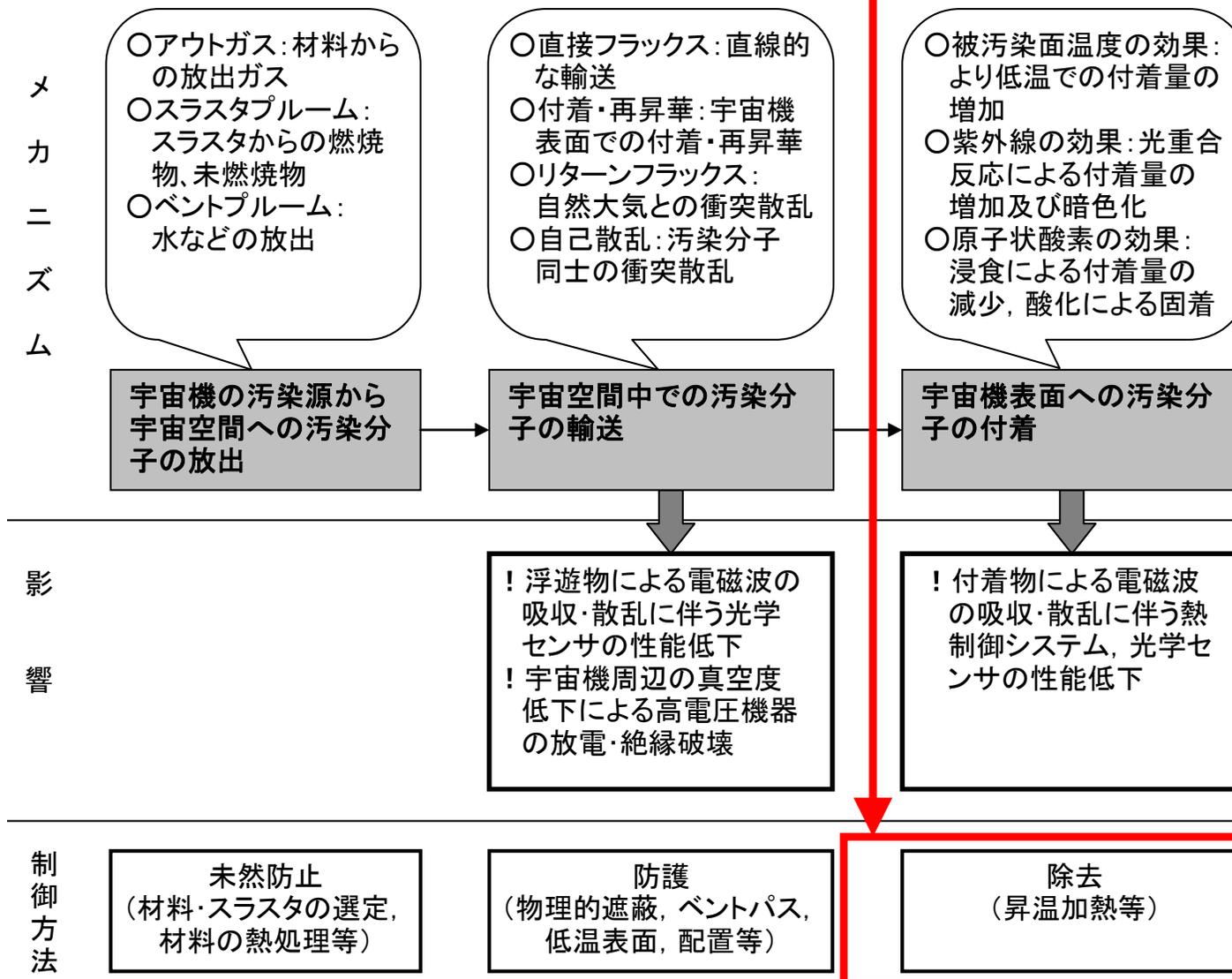
➤ 材料の選定

- ✓ 原子状酸素との反応による付着物の固着を避けるため、シロキサン・フリーの材料を極力用いる。（国際宇宙ステーションの場合）

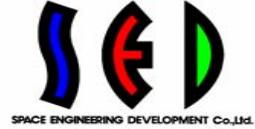
分子状コンタミネーション付着防止の一取組み



光触媒の適用可能性



分子状コンタミネーション付着防止の一取組み — 背景 —



➤ 光触媒の特長と可能性

- 宇宙に豊富にある太陽紫外線を有効活用することができる。
- 特別な機構を必要とせず、メンテナンスフリーである。
- 原子状酸素の存在しない静止軌道や月面等で活用できる。

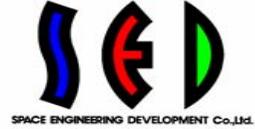
➤ 大気中での光触媒による有機物分解のメカニズム

- 半導体である光触媒に紫外線(UV)が当たると、価電子帯の電子が伝導体へと励起し、電子と正孔が生じる。
- 光触媒に吸着した酸素と水がそれぞれ電子と正孔に反応し、活性酸素及びヒドロキシラジカルが有機分子を酸化分解する。

➤ 宇宙での水の供給

- SFUでは打上げから約3ヶ月の間、質量分析計により水が検出され続けた。宇宙機自体が水の供給源となる。

分子状コンタミネーション付着防止の一取組み — 研究目的 —



分子状コンタミネーションに対する真空環境下での光触媒の有効性を確認する。

- 光触媒による代表的なアウトガス成分の重量減少効果
- コンタミネーション付着環境下での光触媒による光学的健全性の効果

分子状コンタミネーション付着防止の一取組み — 光触媒の合成 —



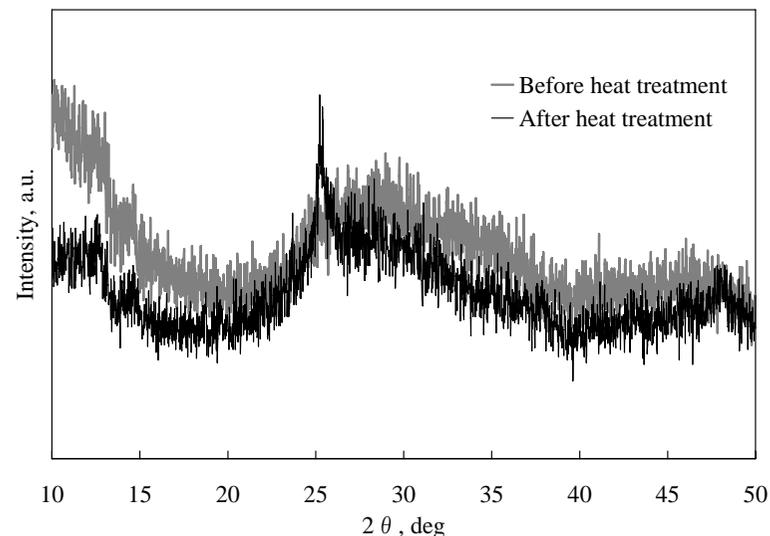
➤ 光触媒粒子の合成

- ✓ アナターゼ型TiO₂結晶とTi(OH)_xアモルファスの混合物
- ✓ 粒径100 μm以下、保水力10 wt%程度

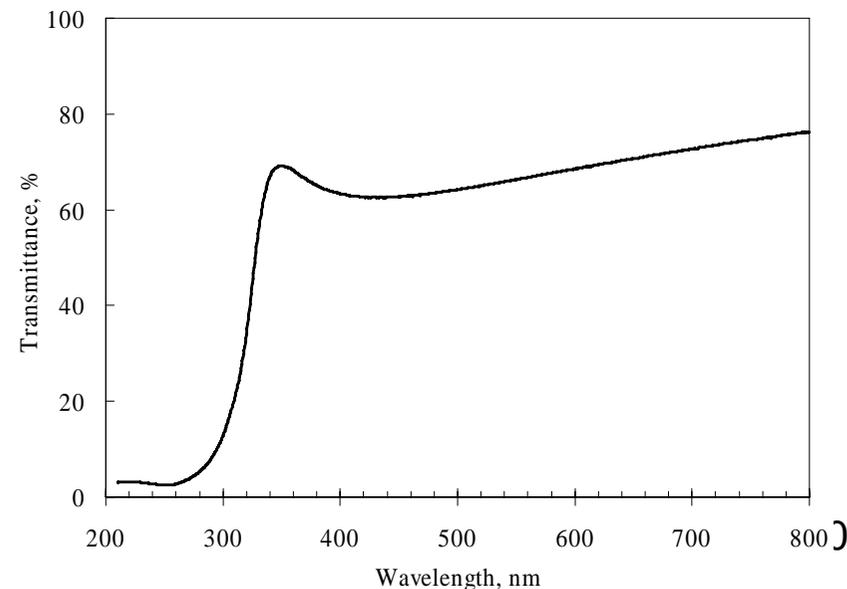
➤ 光触媒薄膜の合成

- ✓ ゼル・ゲル法による光触媒のコーティング
- ✓ アナターゼ型TiO₂薄膜、膜厚5 μm程度

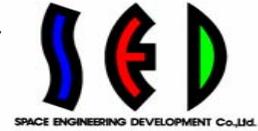
光触媒粒子のXRDパターン



光触媒薄膜のUV/VIS透過率スペクトル



分子状コンタミネーション付着防止の一取組み — 実験 —



➤ 光触媒

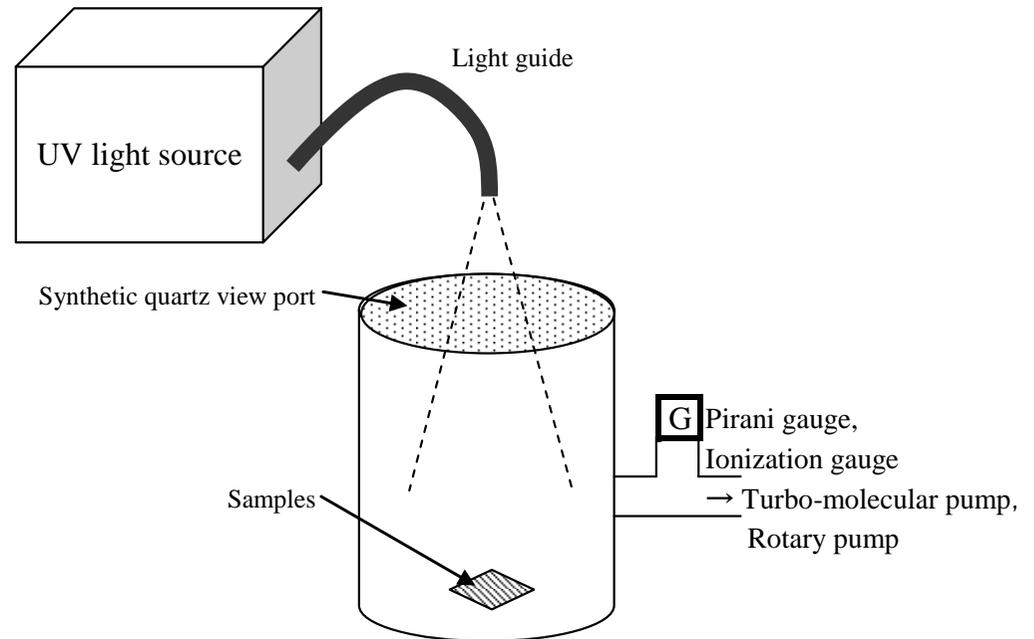
- ✓ 日本アエロジル P25 (TiO_2) 超微粒子 (平均粒径 21 nm)
- ✓ $\text{TiO}_2/\text{Ti}(\text{OH})_x$ 粒子
- ✓ TiO_2 薄膜

➤ 有機物

- ✓ スクアレン ($\text{C}_{30}\text{H}_{50}$)
- ✓ テトラメチル・テトラフェニル・トリシロキサン (MPS, $\text{C}_{28}\text{H}_{32}\text{O}_2\text{Si}_3$)
- ✓ オレアミド ($\text{C}_{18}\text{H}_{35}\text{NO}$)
- ✓ フタル酸ジエチルヘキシル (DEHP, DOP, $\text{C}_{24}\text{H}_{38}\text{O}_4$)

➤ 容器・基板

- ✓ シャーレ
- ✓ CaF_2 基板
- ✓ SiO_2 基板



光源: 200W水銀キセノン光源UVF-203S

波長245~475 nm、中心波長365 nm

真空度: $10^{-4} \sim 10^{-3}$ Pa

温度: 室温

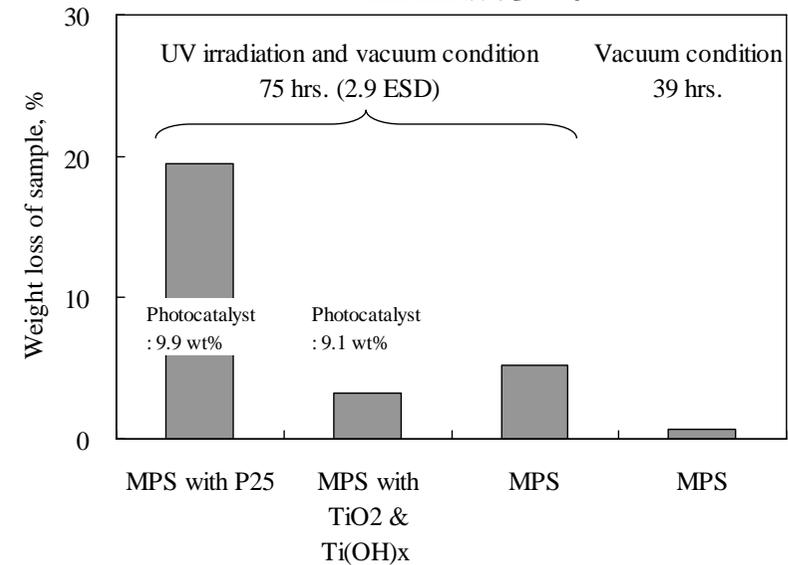
分子状コンタミネーション付着防止の一取組み — 実験結果 —



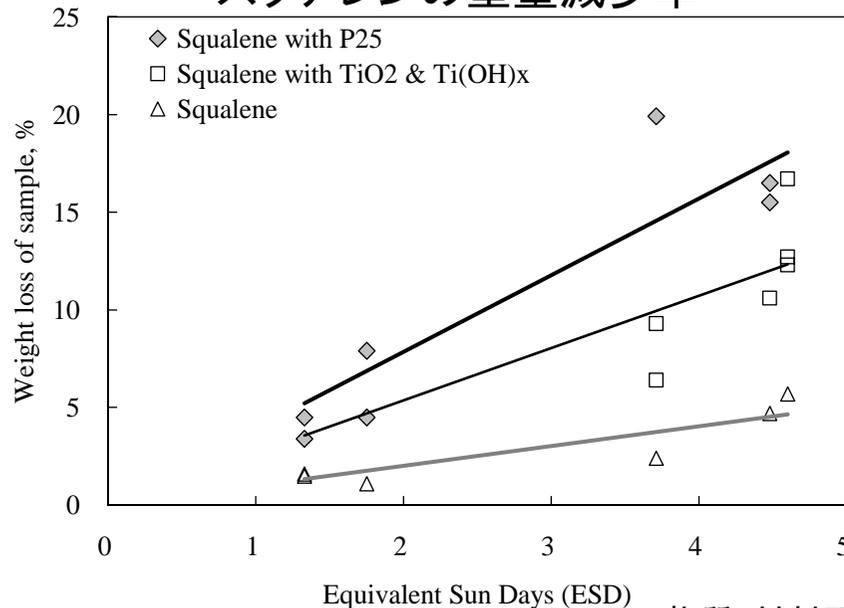
➤ 有機物の重量減少に対する効果

- ✓ P25超微粒子: スクアレン、MPS、オレアミドの重量減少に効果があることを確認した。
- ✓ $\text{TiO}_2/\text{Ti}(\text{OH})_x$ 粒子: スクアレン、オレアミドの重量減少に効果があることを確認した。

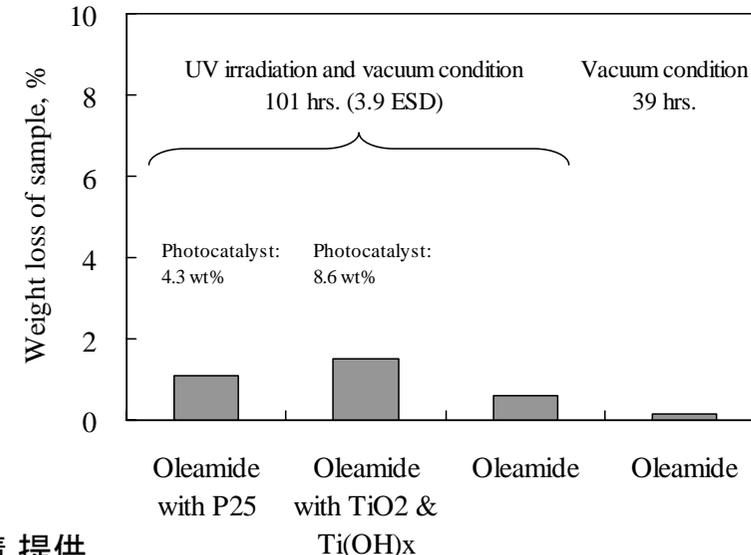
MPSの重量減少率



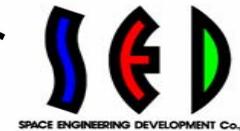
スクアレンの重量減少率



オレアミドの重量減少率

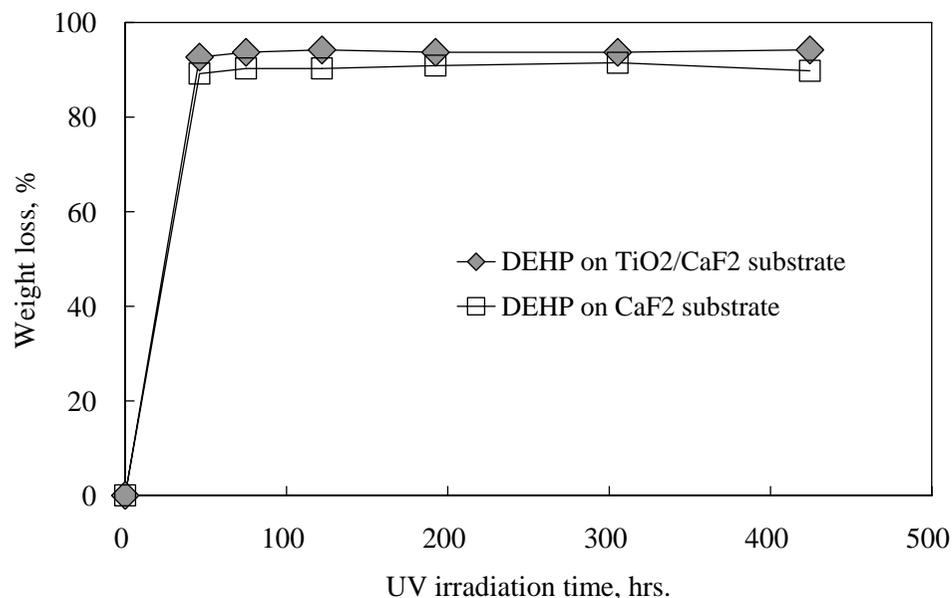


分子状コンタミネーション付着防止の一取組み — 実験結果 —

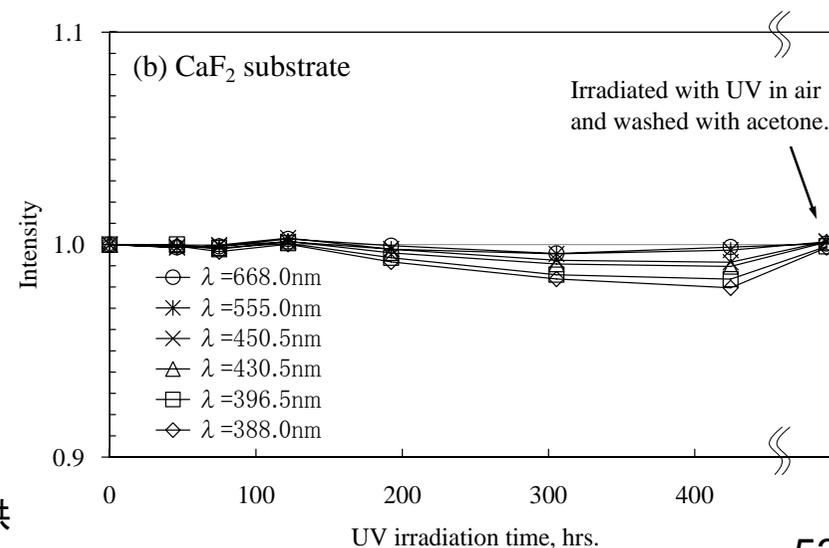
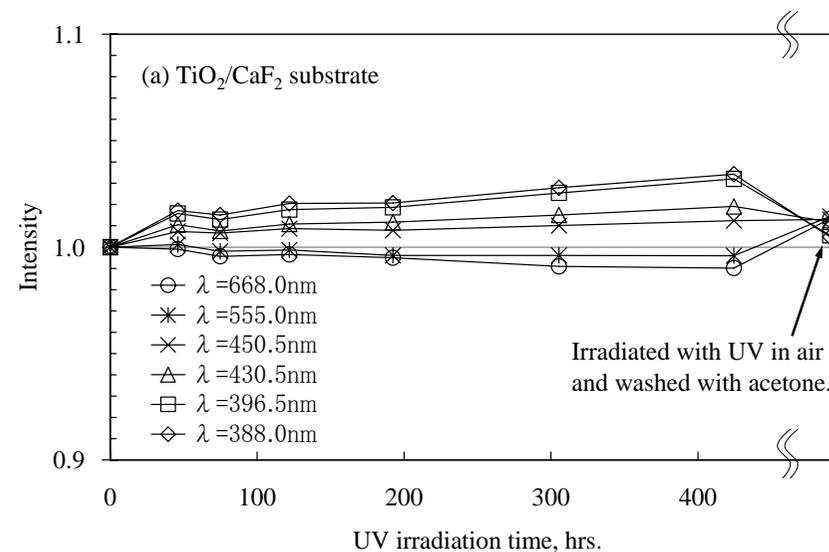


➤ 透過率に対する効果

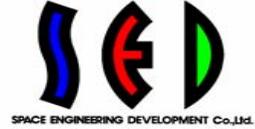
真空中でTiO₂薄膜は付着物を完全に分解できず、一部残留してしまったものが反射防止膜として作用した可能性がある。



物質・材料研究機構 提供



コンタミネーションに関する最近の研究動向 — 国外の取り組み —



- 米国Aerospace社：分子状コンタミネーションの付着形態（水玉状）に関する研究。
- 米国Boeing社：分子状コンタミネーションに対するVUVの効果（国際宇宙ステーション・プロジェクトの一環として実施）。
- 米国Swales Aerospace社：静止衛星GOESでの分子状コンタミネーションの影響評価。
- CNES/ONERA社：分子状コンタミネーションの数学モデル化、コンタミネーション解析ツールCOMOVAの開発。
- その他：粒子状コンタミネーションの光学的影響評価・除去技術の開発 等

コンタミネーションに関する最近の研究動向 — 国内の取り組み —



- JAXA総合技術研究本部：アウトガス測定試験、アウトガスレート測定試験の実施。
- JAXA総合技術研究本部、宇宙技術開発株式会社：分子状コンタミネーションの数学モデル化、国産初の軌道上コンタミネーション解析ソフトウェア **Japanese SPacecraft Induced Contamination Environment analysis software (J-SPICE)**の開発。（現在、国立天文台の協力の下、「ひので」フライトデータによる数値解析結果の評価を進めている。）
- JAXA/GoSatプロ：温室効果ガス観測技術衛星GOSATにおけるコンタミネーション管理。
- JAXA/試験センター：熱真空試験用チャンバのコンタミネーション管理。
- JAXA/ISAS：衛星搭載用QCMの開発。
- 物質・材料研究機構、長崎大学：光触媒による分子状コンタミネーション防止技術の研究。
- 神戸大学：汚染源としての原子状酸素の影響に関する研究。
- 三重大学：地球観測センサにおけるコンタミネーションの影響評価。

まとめ



- 宇宙でのコンタミネーション現象の実例：国際宇宙ステーション、スペースシャトル、「ひので」
- 分子状コンタミネーションの発生メカニズムとその対策
 - ✓ 影響：太陽光吸収率、発生電力、スループット
 - ✓ 汚染源：材料、スラスタ、ベント
 - ✓ 輸送：直接、付着・再昇華、リターンフラックス、自己散乱
 - ✓ 付着：温度、UV、AO
- 分子状コンタミネーション付着防止の一取組み：光触媒
- コンタミネーションに関する最近の研究動向