

# 将来の有人宇宙開発における 火災リスク低減に向けた微小重力燃焼研究

小林 芳成 岐阜大学 工学部 機械工学科

## 自己紹介

こ ばやし よし なり  
**小林 芳成** 博士(工学)

2023年 岐阜大学 工学部 機械工学科 准教授

2018年 岐阜大学 工学部 機械工学科 助教

2018年 東京大学 大学院工学系研究科 航空宇宙工学専攻 博士課程 修了

2024年 独ブレメン大学 応用宇宙技術・微小重力センター(ZARM) 客員研究員

2016年 米カリフォルニア大学バークレー校 機械工学科 客員研究員



- **専門分野** 燃烧工学・航空宇宙工学
- **研究内容** 微小重力燃烧、航空宇宙推進、エネルギー変換、燃料生成、火災安全、非接触温度計測、自動車エンジン ほか

受賞対象となった研究業績 —将来の有人宇宙開発における火災リスク低減に向けた微小重力燃焼研究—

**01** 微小重力環境における可燃性ガスの点火現象に関する研究  
(東京大学・修士／博士課程)

**02** 可燃性被覆導線の燃え拡がり挙動のモデル化  
(米カリフォルニア大学バークレー校・客員研究員)

**03** 微小重力環境における固体材料の燃え拡がりに関する研究  
(岐阜大学・助教～現在)

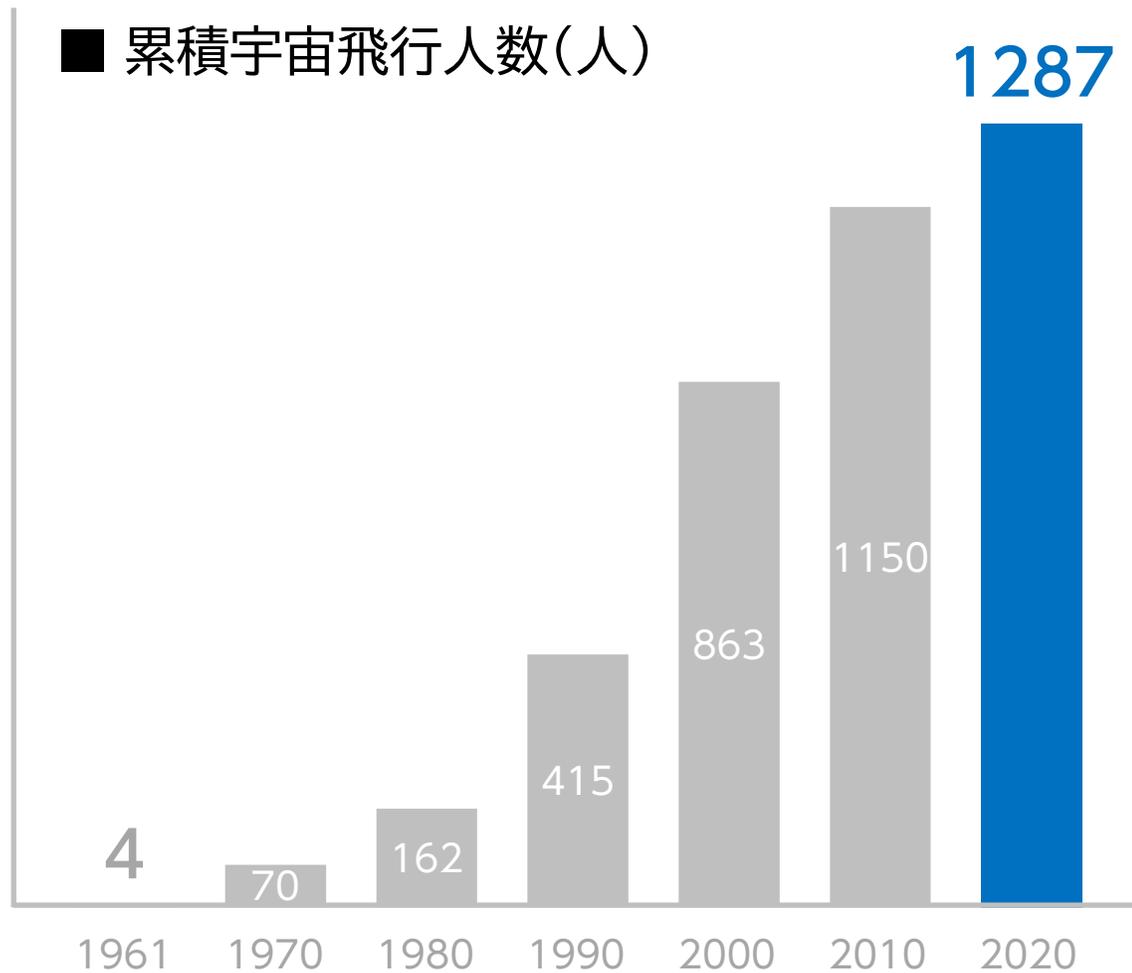
受賞対象となった研究業績 *—将来の有人宇宙開発における火災リスク低減に向けた微小重力燃焼研究—*

**01** 微小重力環境における可燃性ガスの点火現象に関する研究  
(東京大学・修士／博士課程)

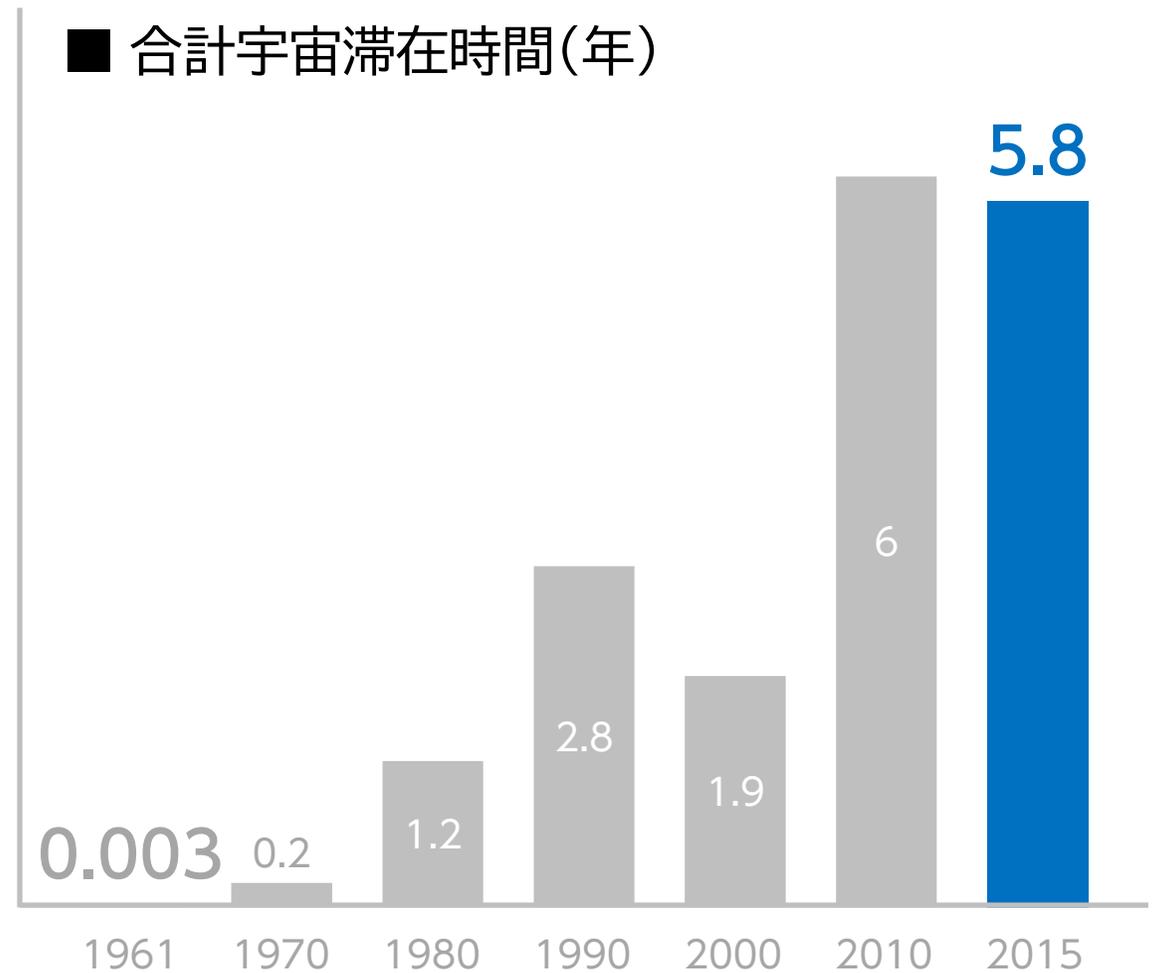
**02** 可燃性被覆導線の燃え拡がり挙動のモデル化  
(米カリフォルニア大学バークレー校・客員研究員)

**03** 微小重力環境における固体材料の燃え拡がりに関する研究  
(岐阜大学・助教～現在)

## 加速する有人宇宙開発

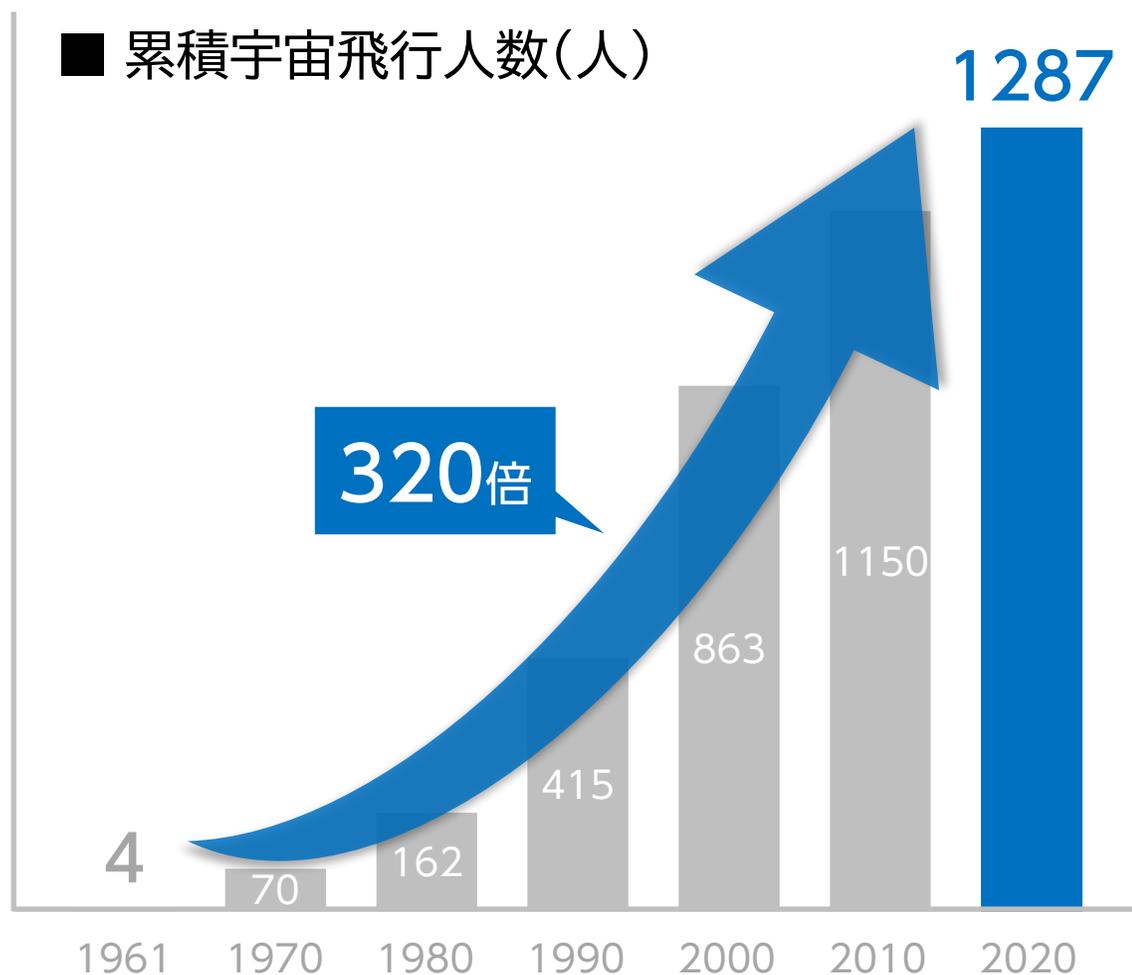


©Our World in Data: Cumulative number of human visits to space

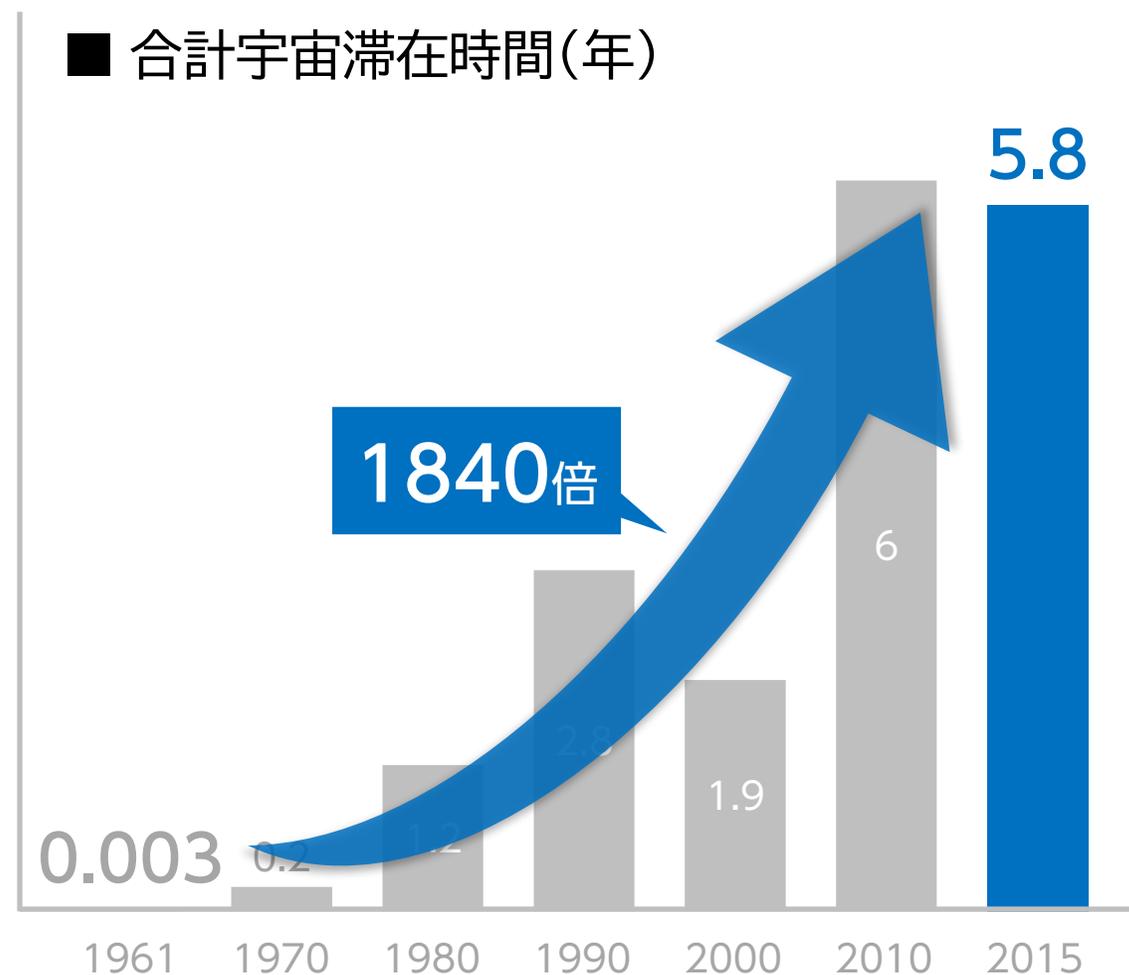


©A Niche in the Library of Babel: The Human Population of Space

## 加速する有人宇宙開発



©Our World in Data: Cumulative number of human visits to space



©A Niche in the Library of Babel: The Human Population of Space

## 加速する有人宇宙開発



©Our World in Data: Cumulative number of human visits to space

©A Niche in the Library of Babel: The Human Population of Space

## 加速する有人宇宙開発



©Our World in Data: Cumulative number of human visits to space

©A Niche in the Library of Babel: The Human Population of Space

# 有人宇宙飛行における三大インシデント



## 有人宇宙飛行における三大インシデント

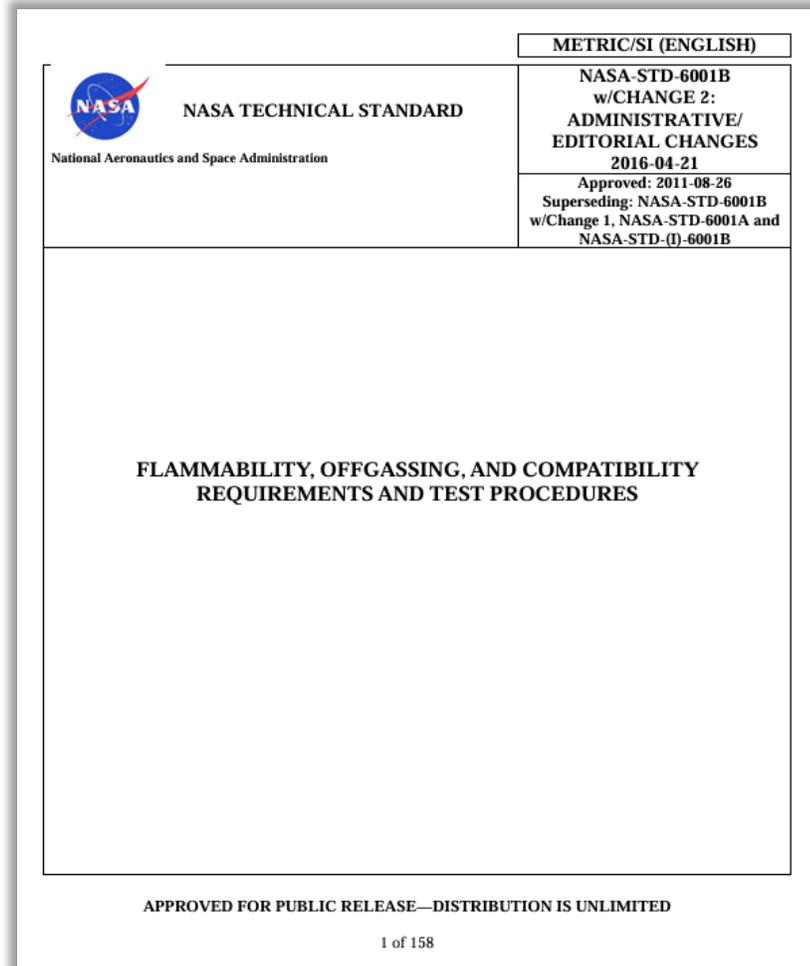


## 国際宇宙ステーション内の様子

多くの可燃物で溢れかえるISSの船内

一度火災が発生したら **延焼** は避けられない

## | 現行の火災安全対策 | 国際宇宙ステーションを例に



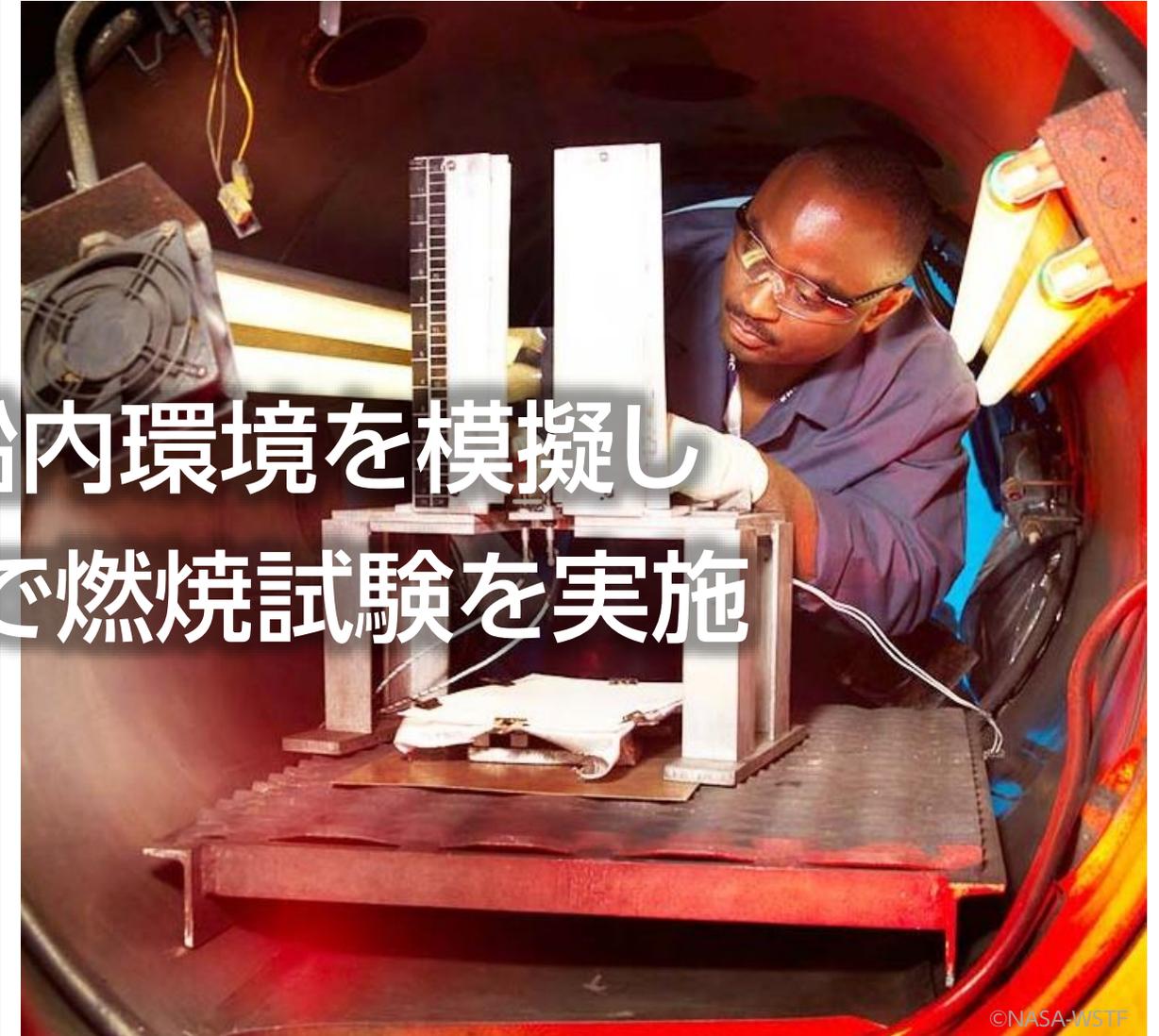
## NASA-STD-6001B

- NASAが規格した燃焼性評価試験
- 居住空間における材料・機器が対象
- 全18種類の評価試験の仕様が規定

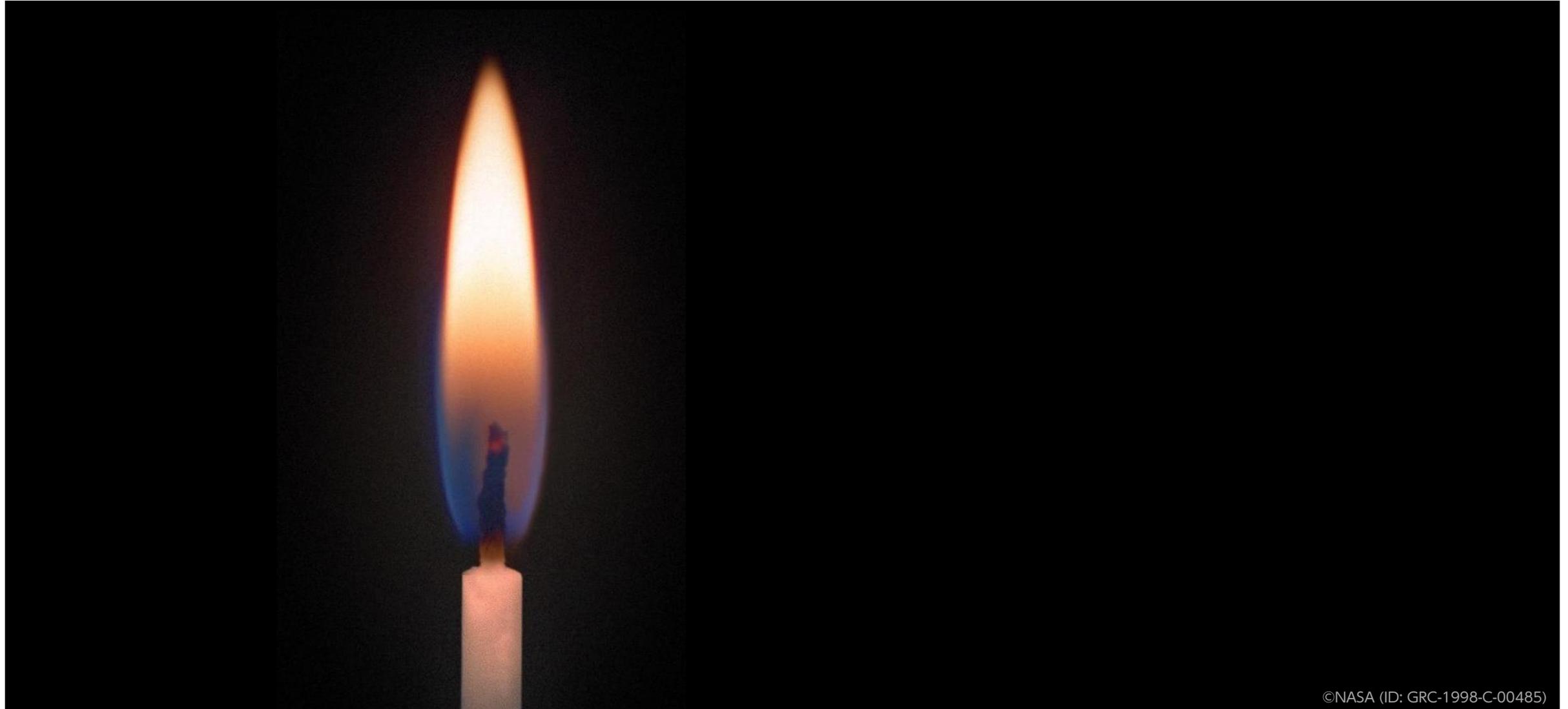


“信頼”と“実績”のある火災安全規格

## 現行の火災安全対策 | 国際宇宙ステーションを例に

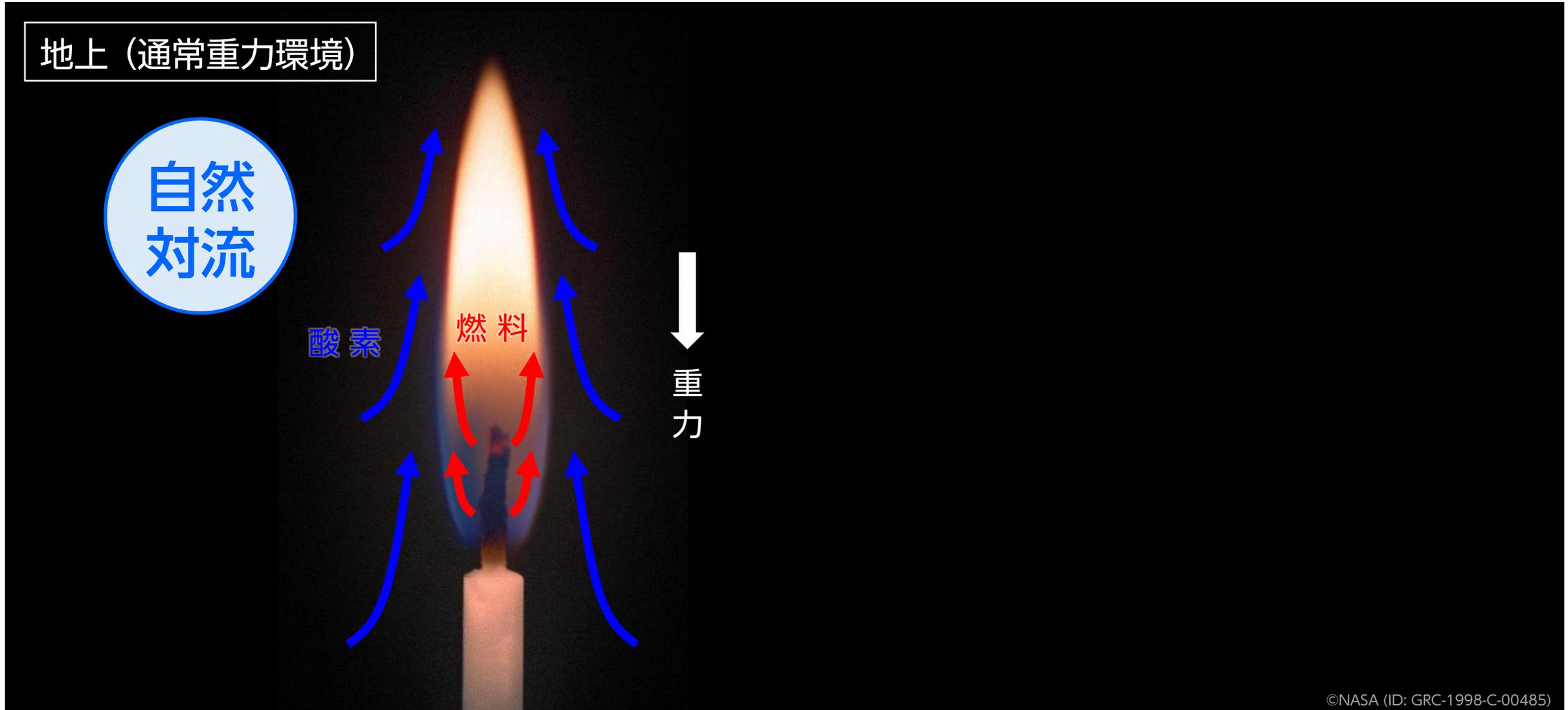


### 地上と宇宙での燃焼の違い | ろうそくの炎を例に



©NASA (ID: GRC-1998-C-00485)

## 地上と宇宙での燃焼の違い | ろうそくの炎を例に



# 地上と宇宙での燃焼の違い | ろうそくの炎を例に

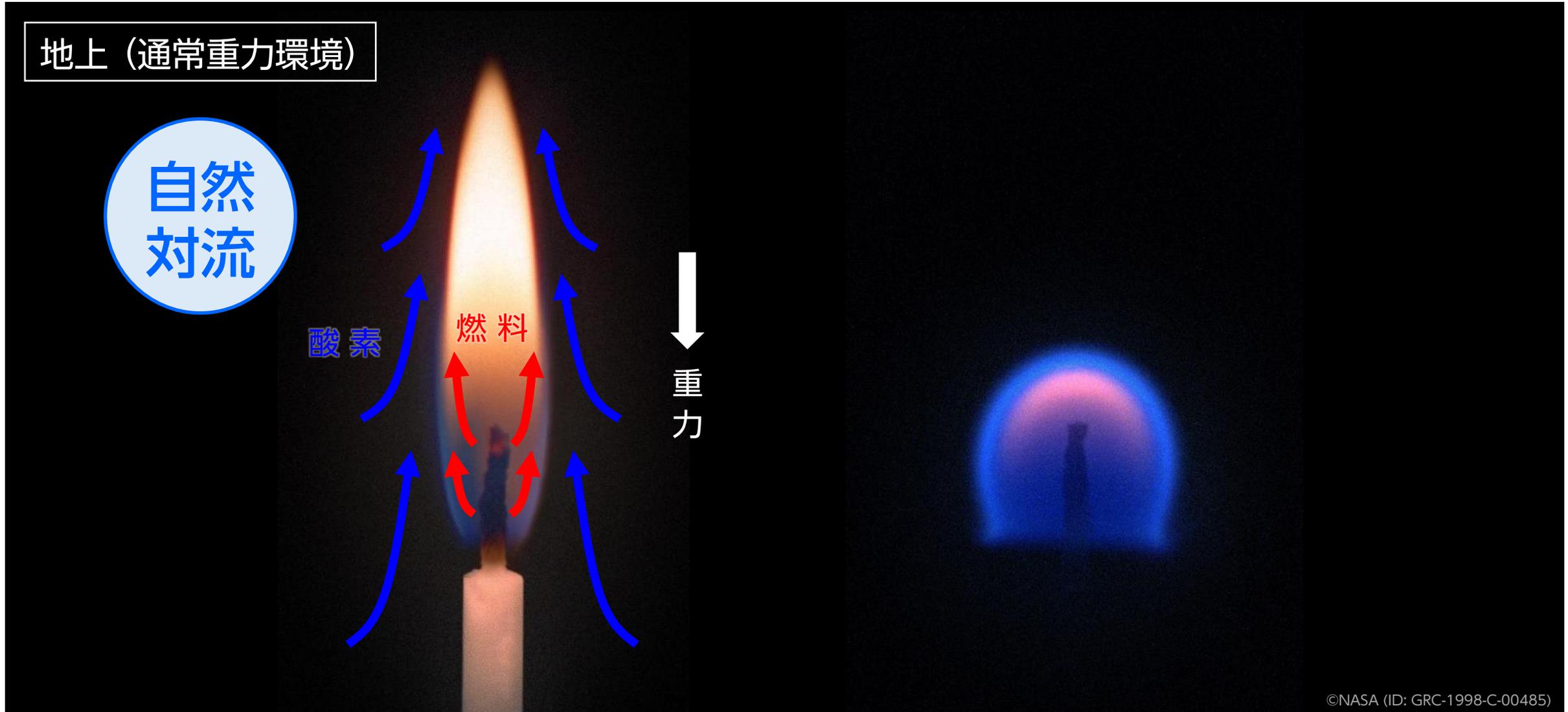
地上 (通常重力環境)

自然  
対流

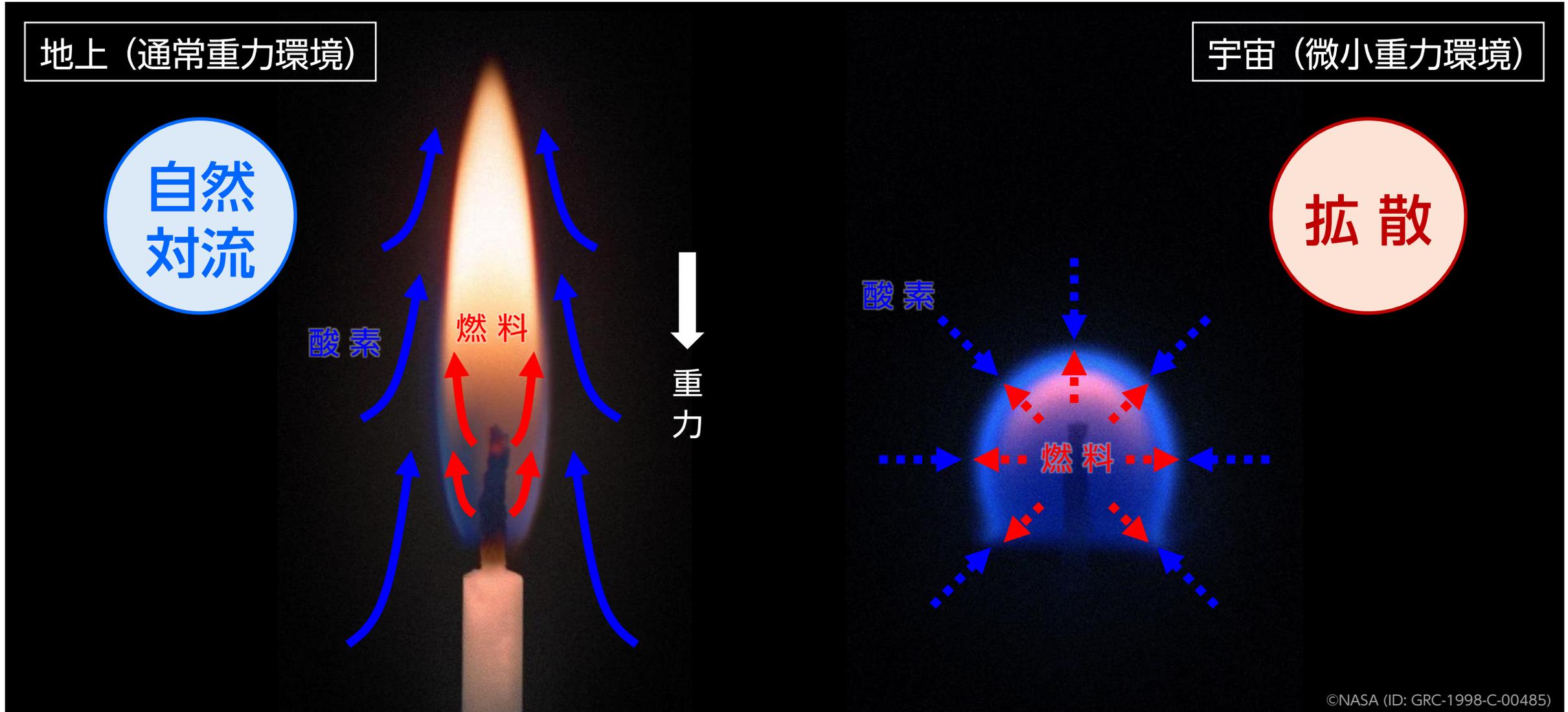
酸素

燃料

重力



# 地上と宇宙での燃焼の違い | ろうそくの炎を例に



## 地上と宇宙での燃焼の違い | ろうそくの炎を例に

地上 (通常重力環境)

宇宙 (微小重力環境)

自然  
対流

拡散

“地上”での燃焼性評価試験で  
“宇宙”での火災安全性を測れるのか？

酸素

燃料

重力

燃料

### NASA-STD-6001Bが抱える課題

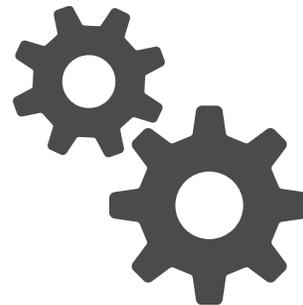
#### 課題 1



#### 実用性に欠ける 評価試験の仕様

評価試験は合格/不合格のみを決める仕様であるため、定量的な評価ができない。

#### 課題 2



#### 生産性の悪い 試験プロセス

同じ材料であっても、使用環境が異なれば、その都度評価試験を実施しないといけない。

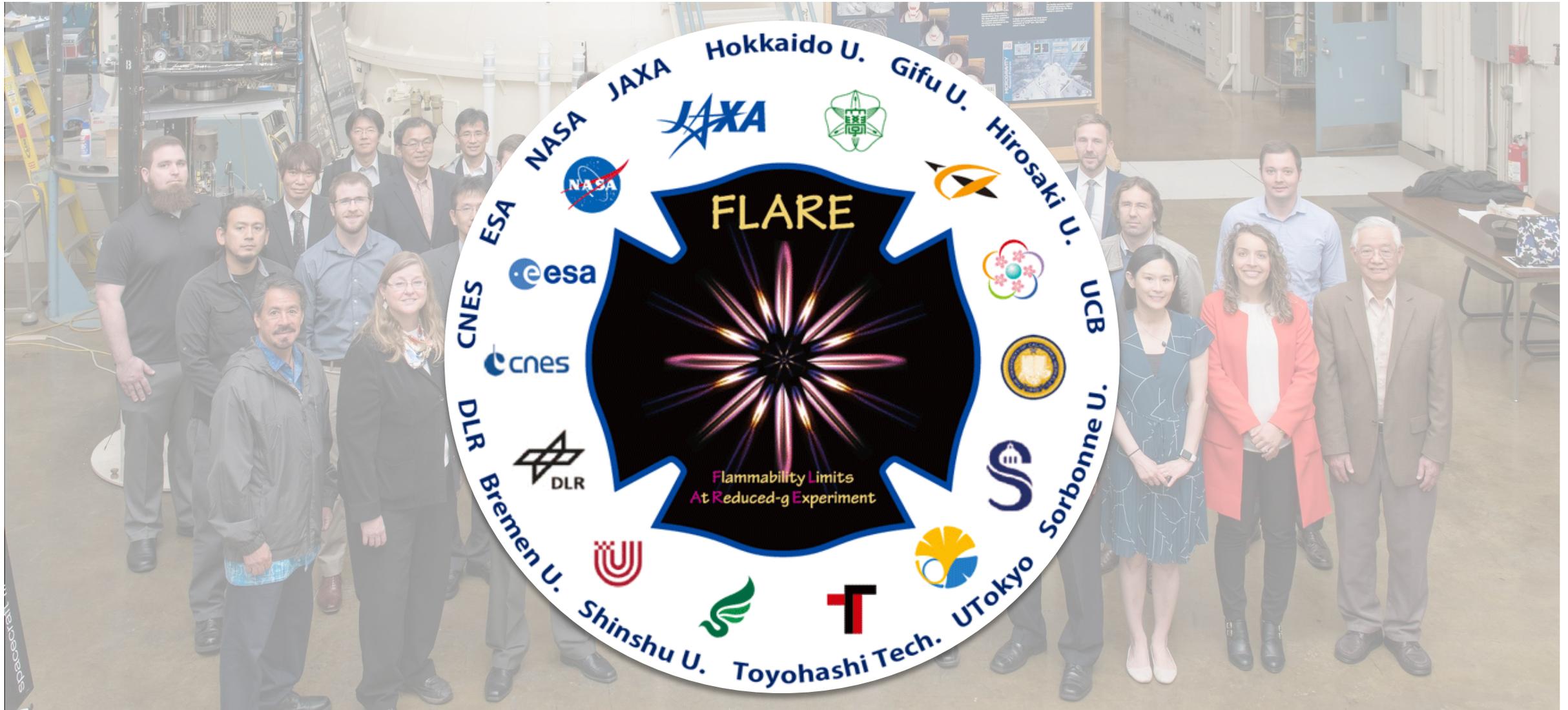
#### 課題 3



#### 試験実施機関が 限られる低い利便性

NASAの認証を受けた試験装置を使用しなければならず、民間で実施するのが難しい。

# 宇宙火災安全プロジェクト“FLARE”



## 宇宙火災安全プロジェクト“FLARE”

第3期「きぼう」利用重点課題(2012年採択)

### 火災安全性向上に向けた固体材料の燃焼現象に対する重力影響の評価

Fundamental Research on International Standard of Fire Safety in Space—Base for Safety of Future Manned Mission—

#### 研究 目的

- 固体材料の燃焼性が重力レベルによってどのように変化するか明らかにする
- 材料の宇宙での燃焼性に関する **国際評価基準** を作成する

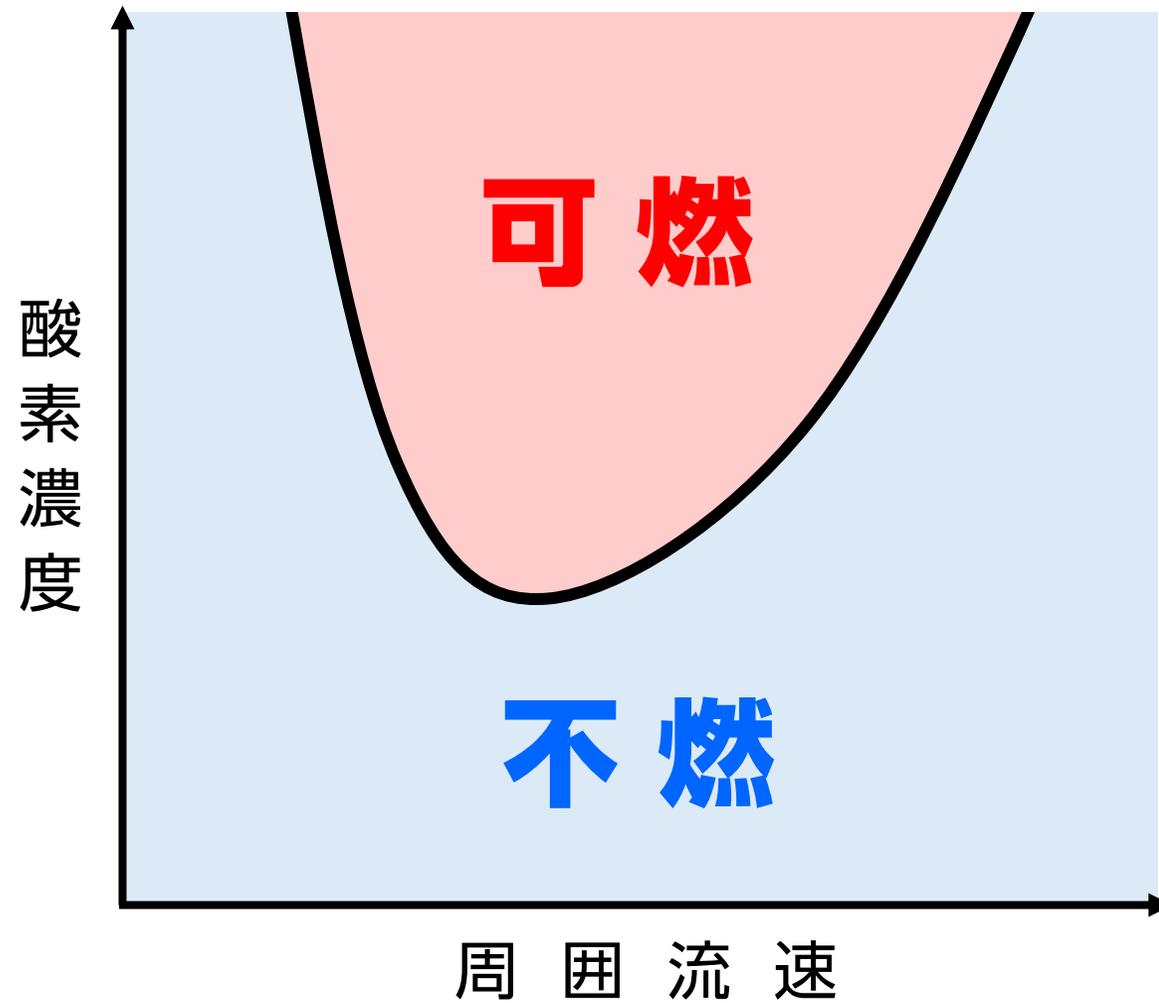
#### 実験 内容

ISS/日本実験棟「きぼう」に搭載した固体燃焼実験装置(SCEM)で、様々な材質・形状の固体材料に対して、広範な酸素濃度・流速条件で燃え拡がり燃焼実験を行う。

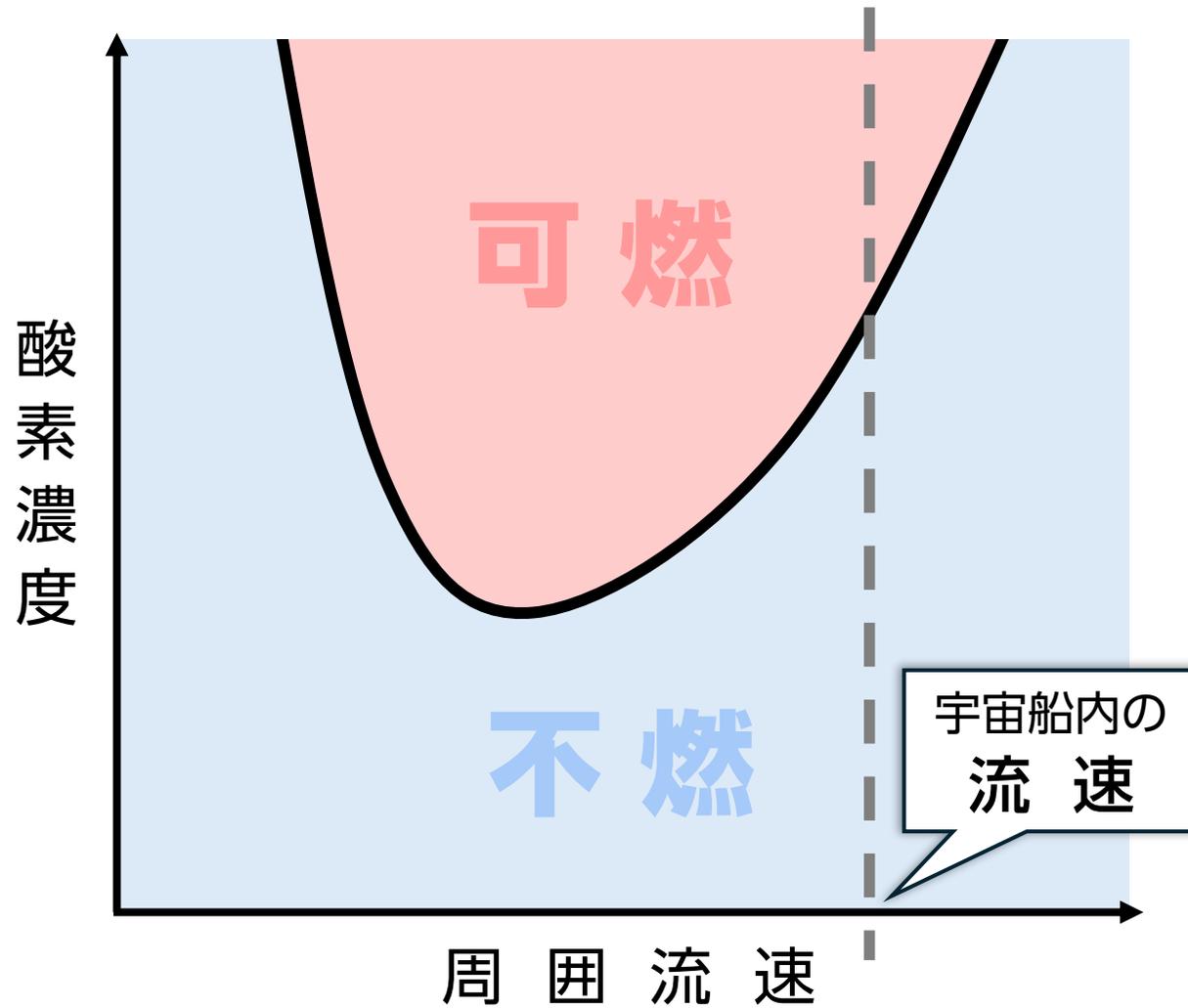
#### 研究 成果

- 長時間の微小重力環境により固体材料の燃焼限界に与える重力の影響を解明する
- 科学的な合理性を有する **“新・材料燃焼性評価手法”** を構築する

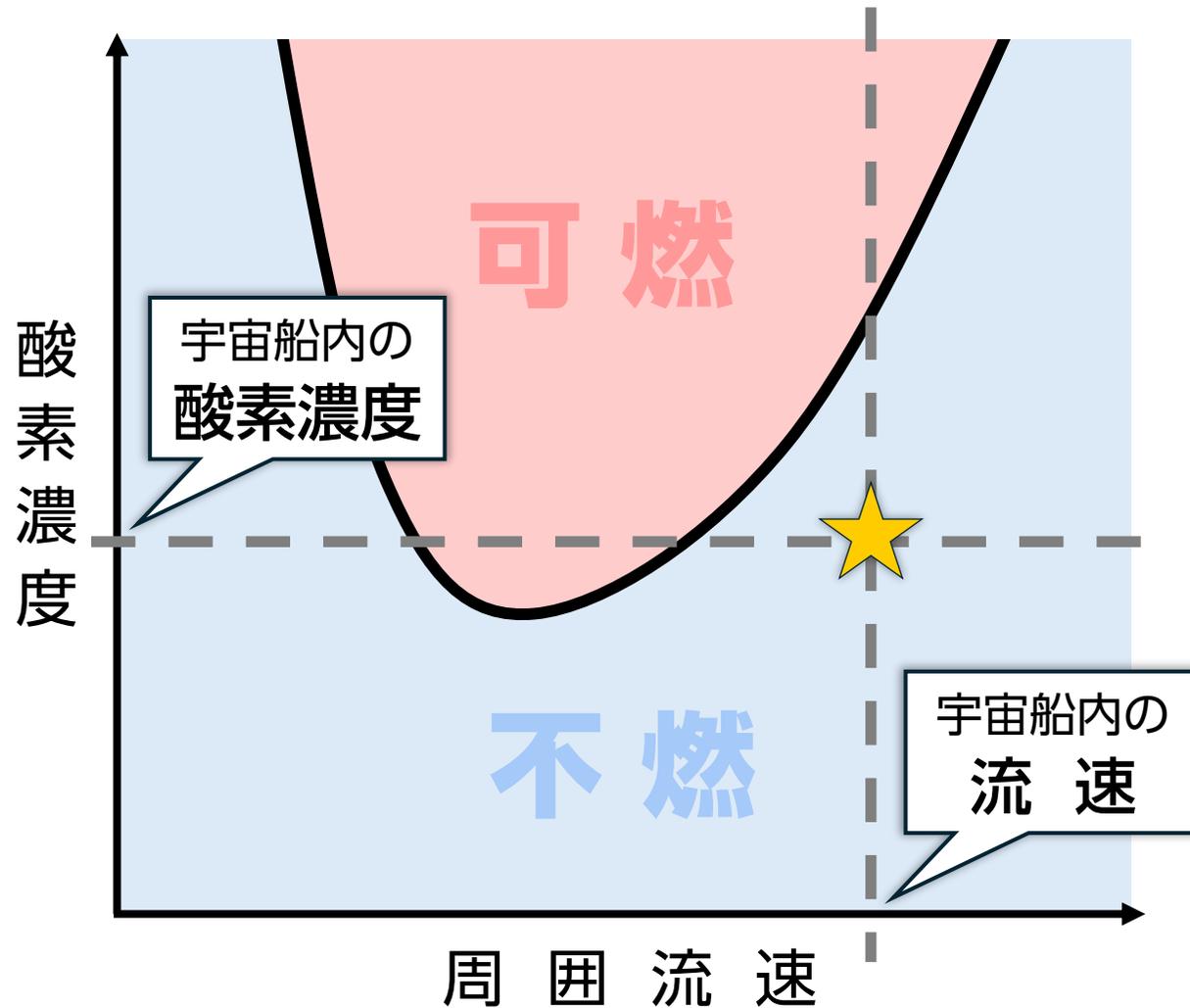
## 固体材料の可燃マップと消炎挙動



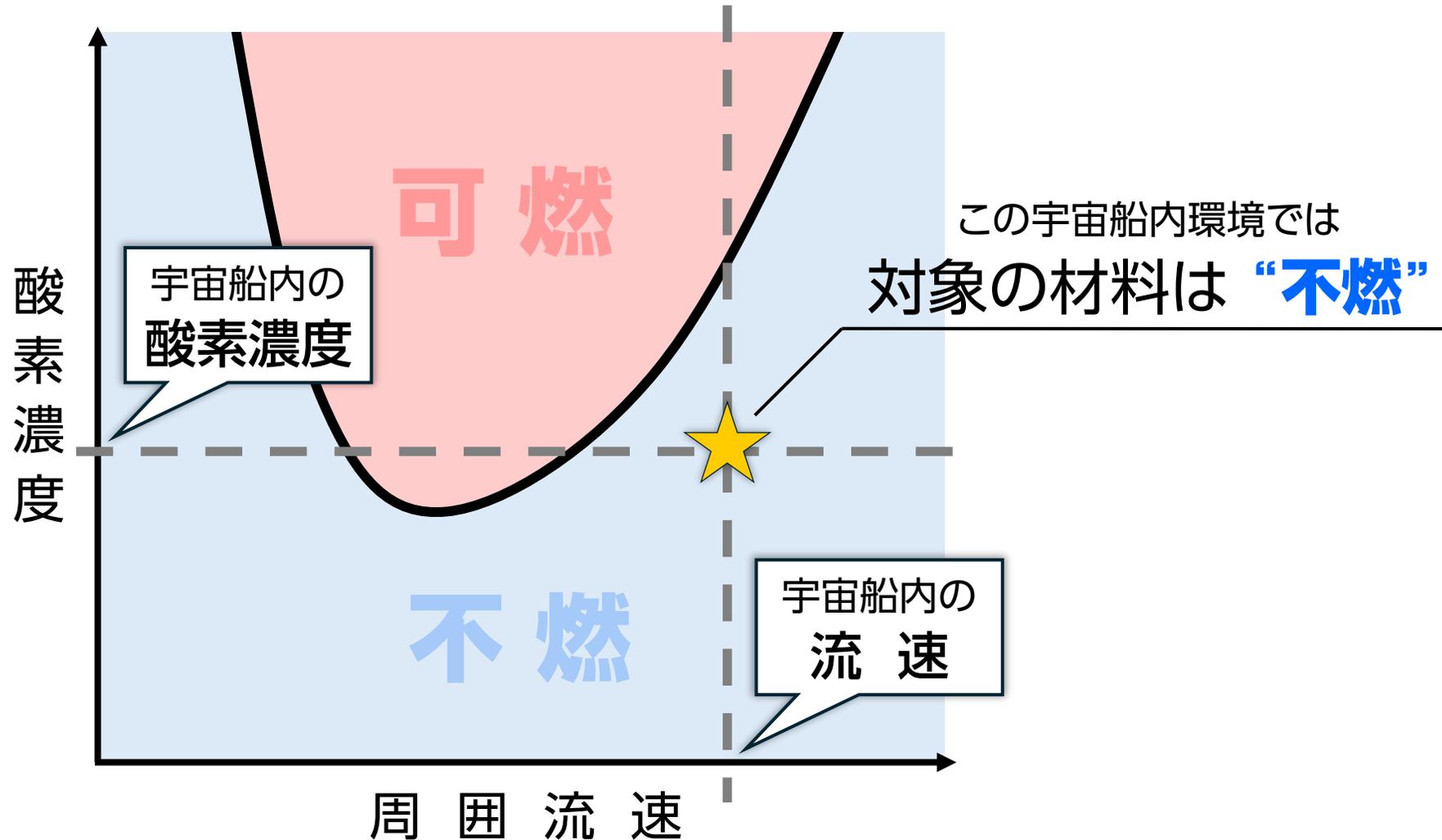
## 固体材料の可燃マップと消炎挙動



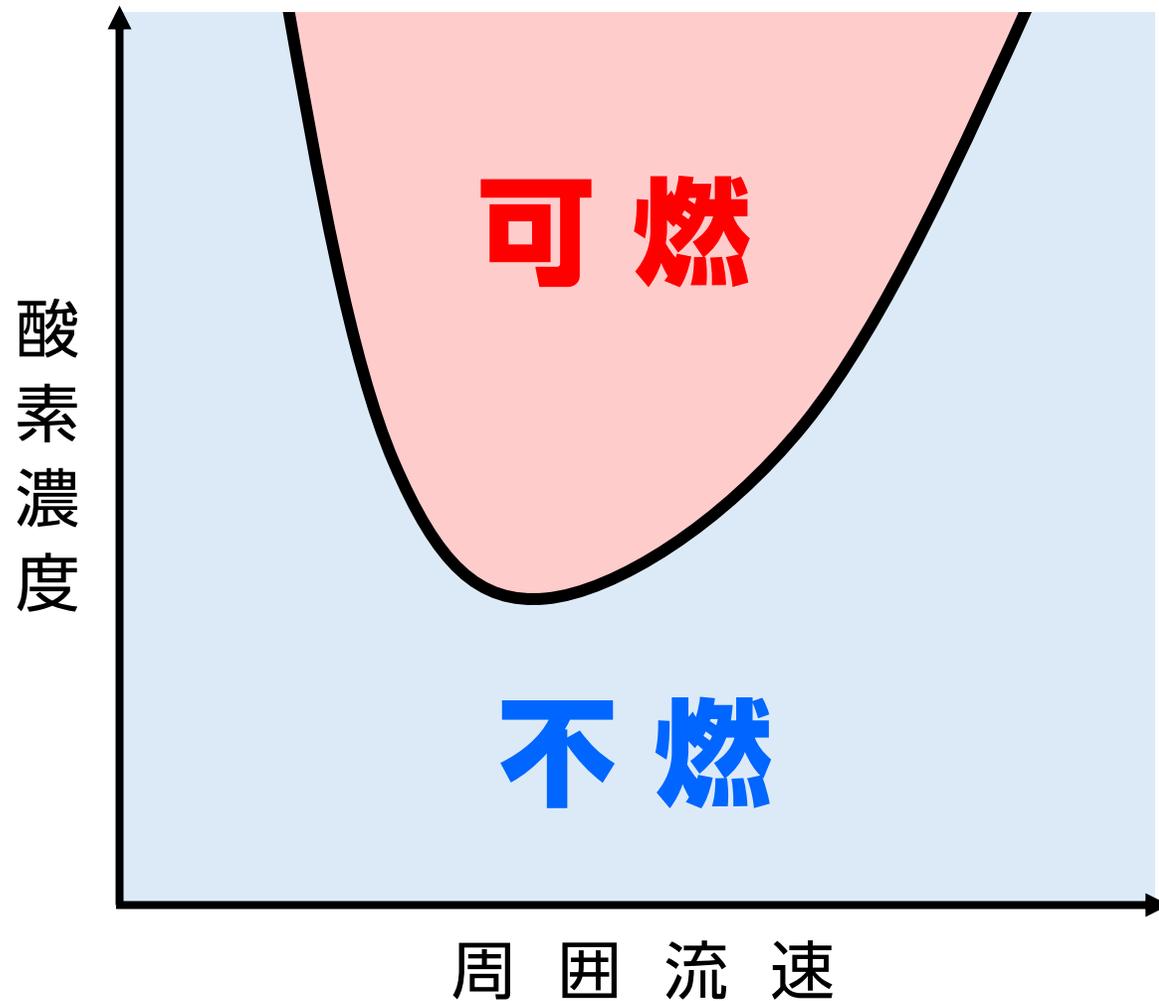
## 固体材料の可燃マップと消炎挙動



## 固体材料の可燃マップと消炎挙動



## 固体材料の可燃マップと消炎挙動



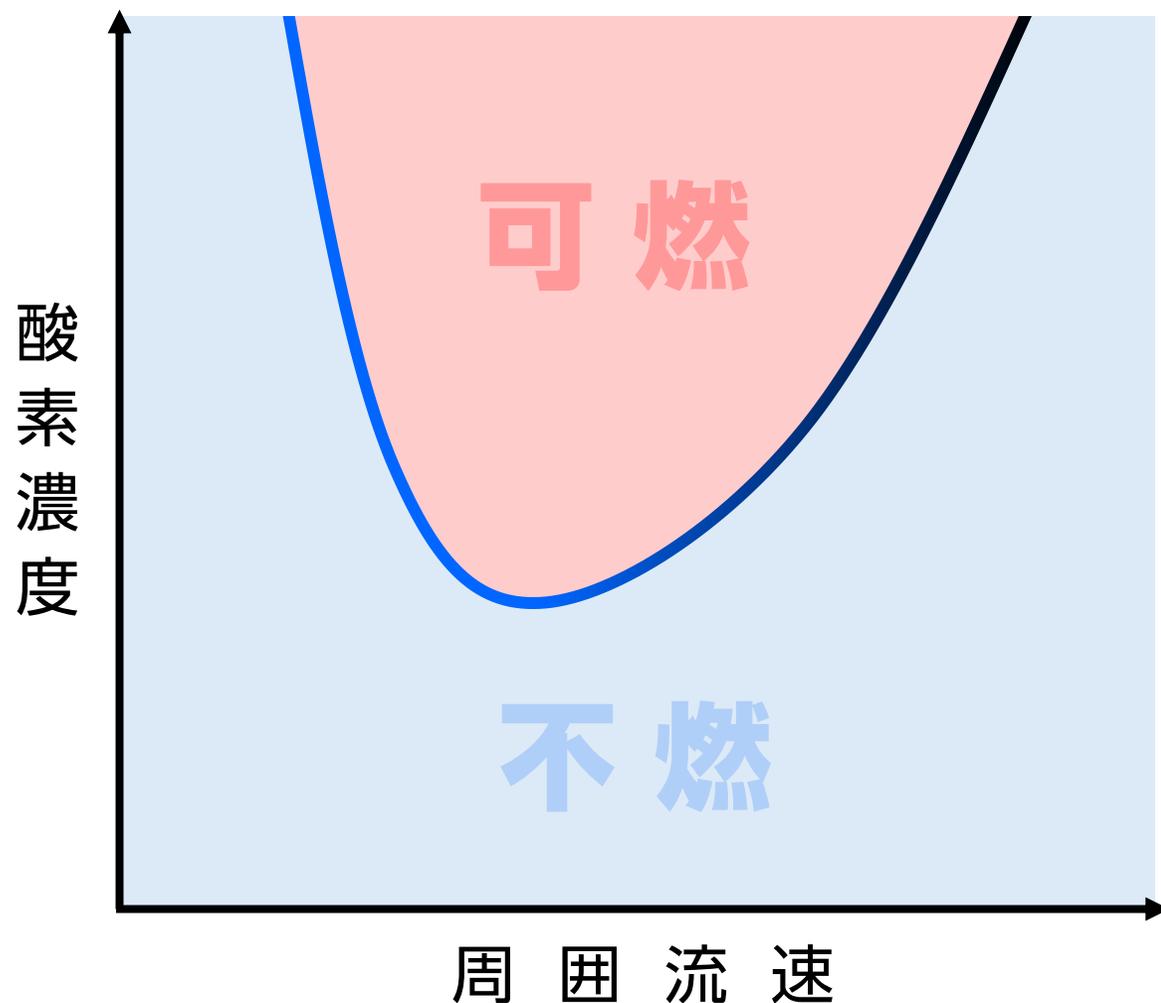
**低** 流速



**高** 流速

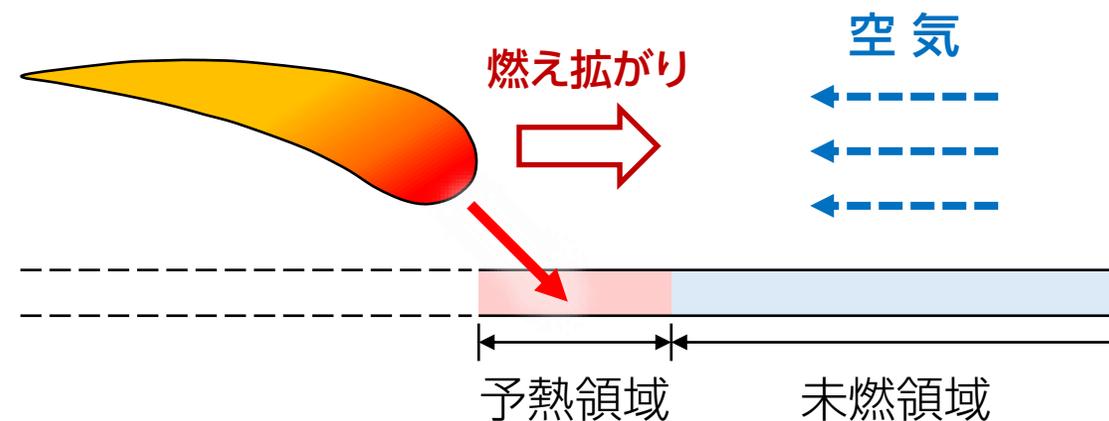


## 固体材料の消炎メカニズム

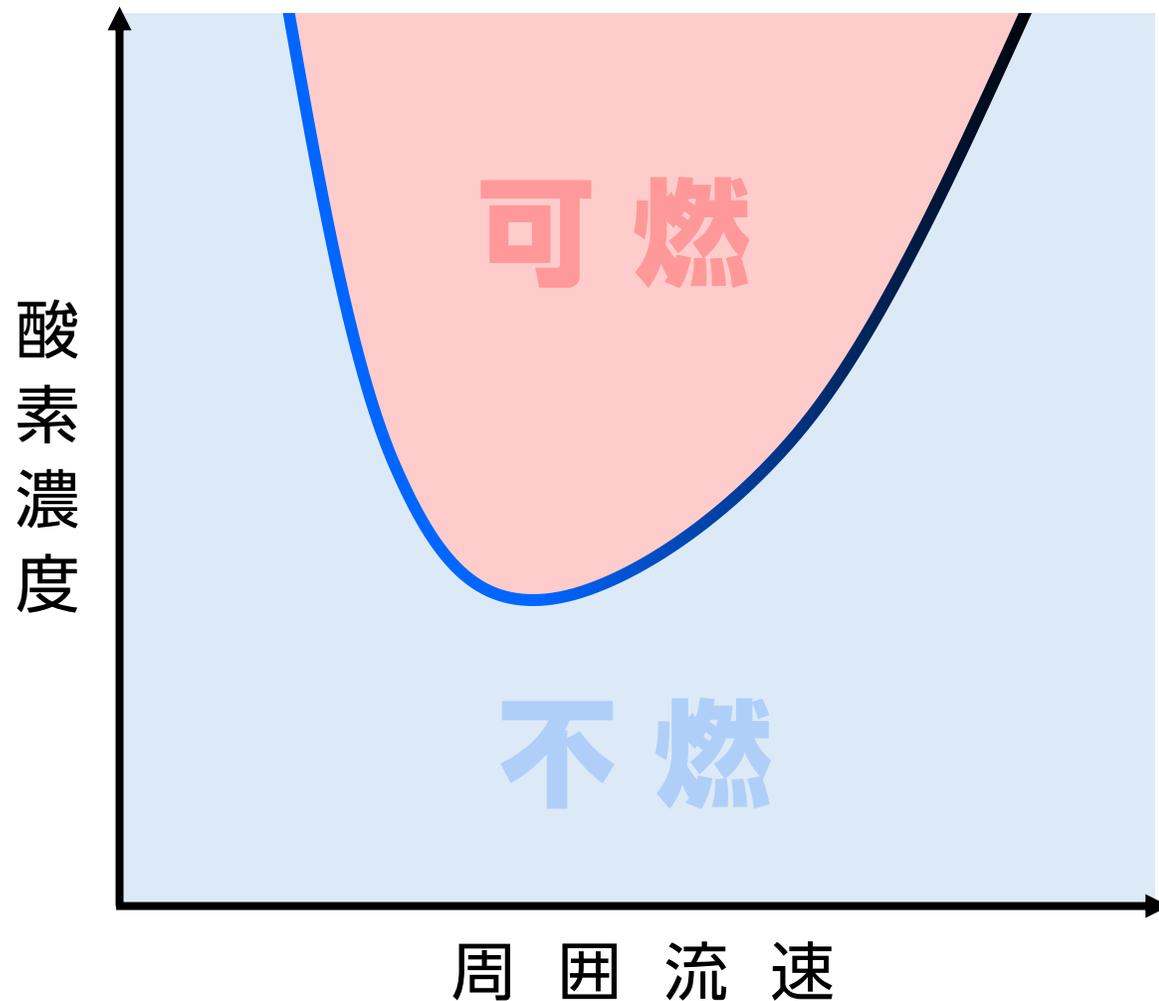


### ふく射消炎

火炎前方の予熱領域における **ふく射熱損失** に  
因って燃え拡がりが維持できず消炎する。

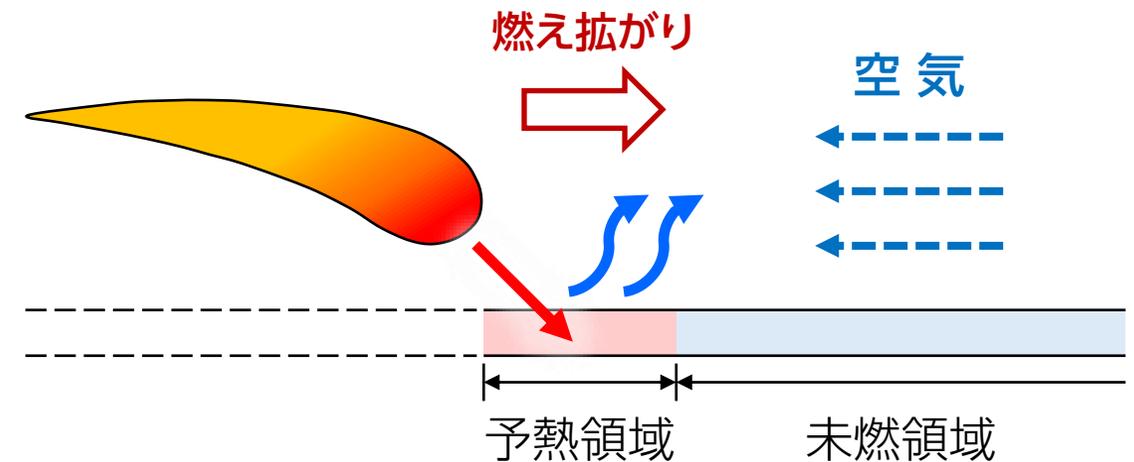


## 固体材料の消炎メカニズム

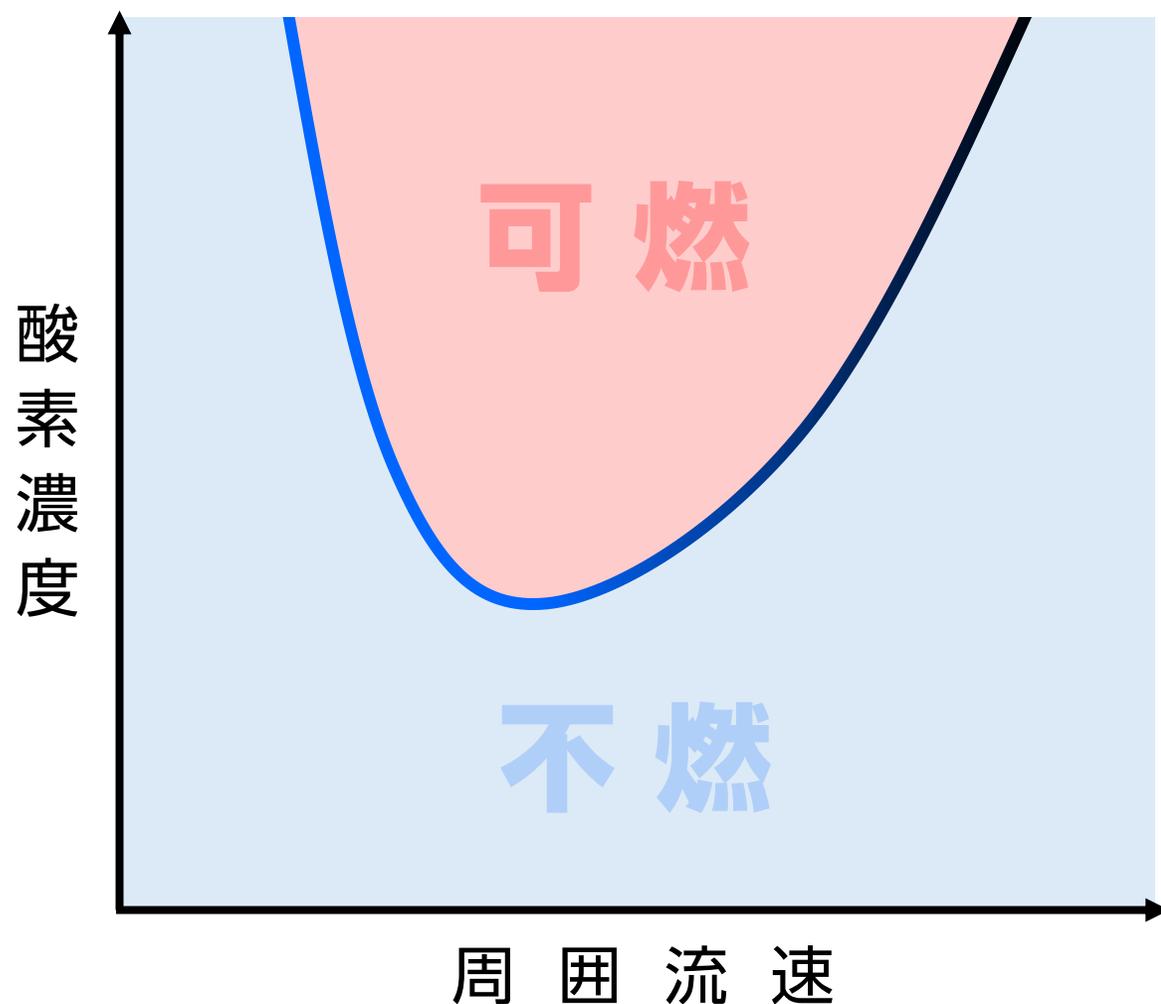


### ふく射消炎

火炎前方の予熱領域における **ふく射熱損失** に因って燃え拡がり維持できず消炎する。

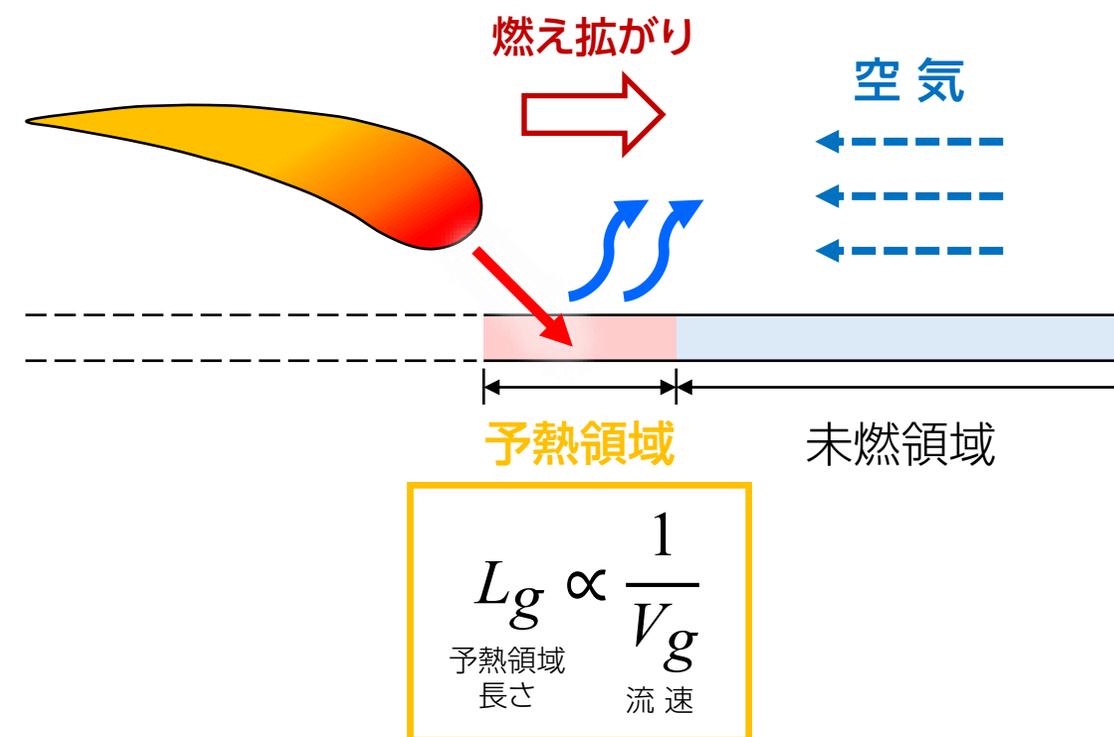


## 固体材料の消炎メカニズム

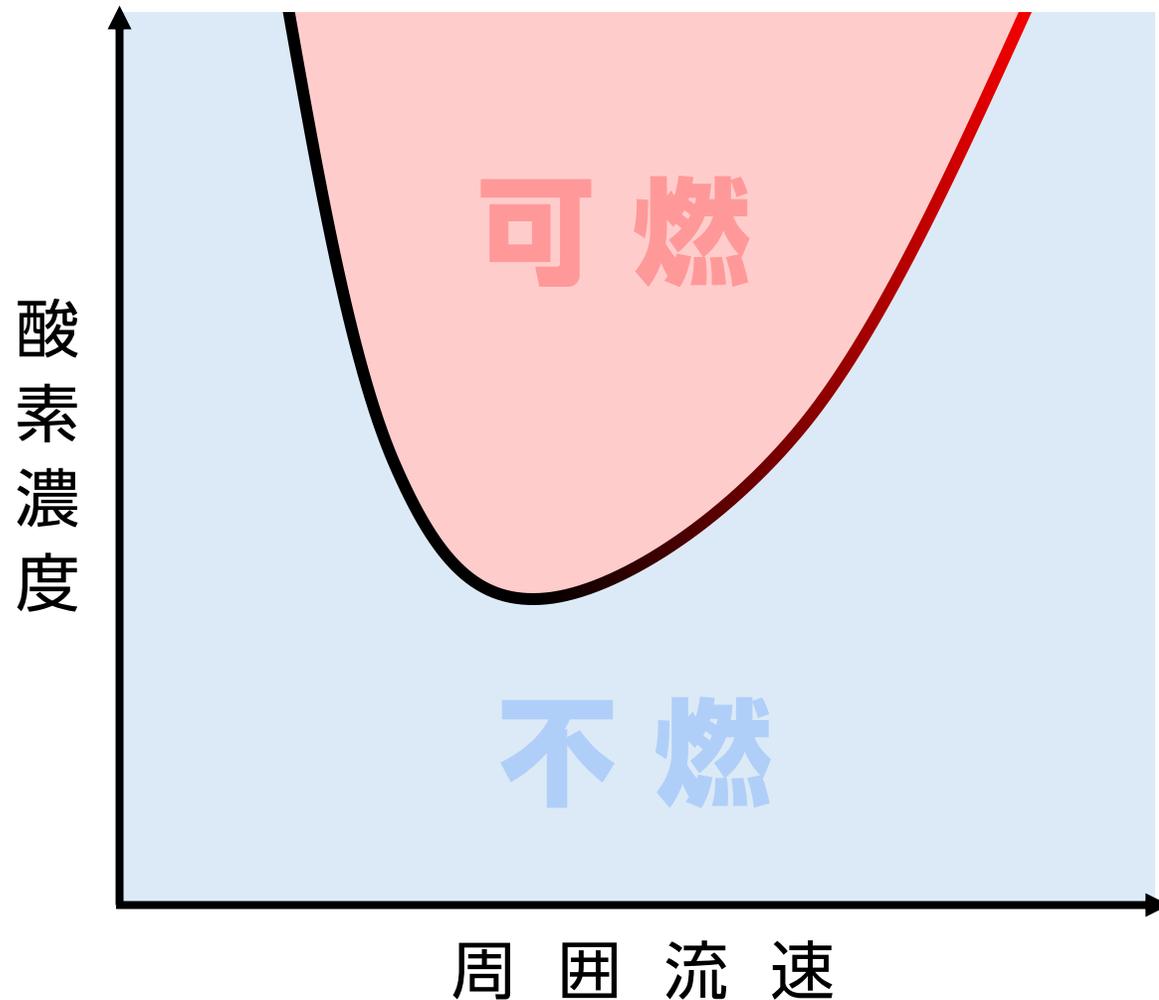


### ふく射消炎

火炎前方の予熱領域における **ふく射熱損失** に因って燃え拡がり維持できず消炎する。

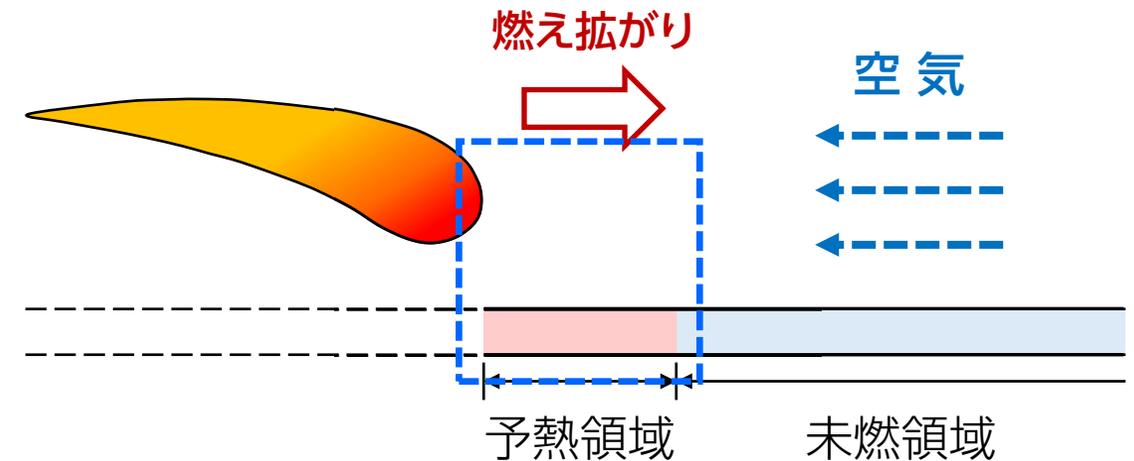


## 固体材料の消炎メカニズム

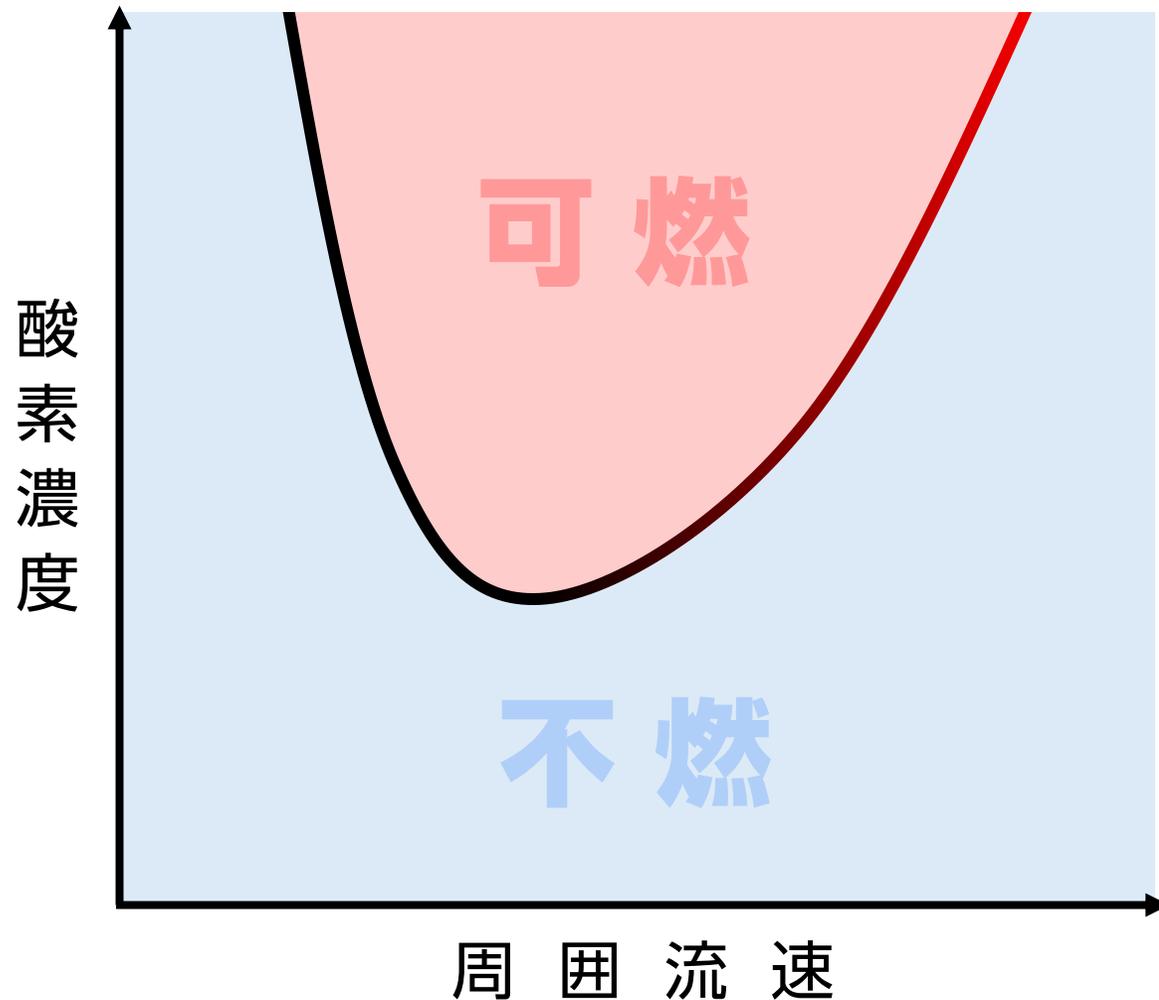


### 吹き飛び消炎

化学反応が完了する前に **可燃性ガスが掃気** されて十分な発熱が得られず消炎する。

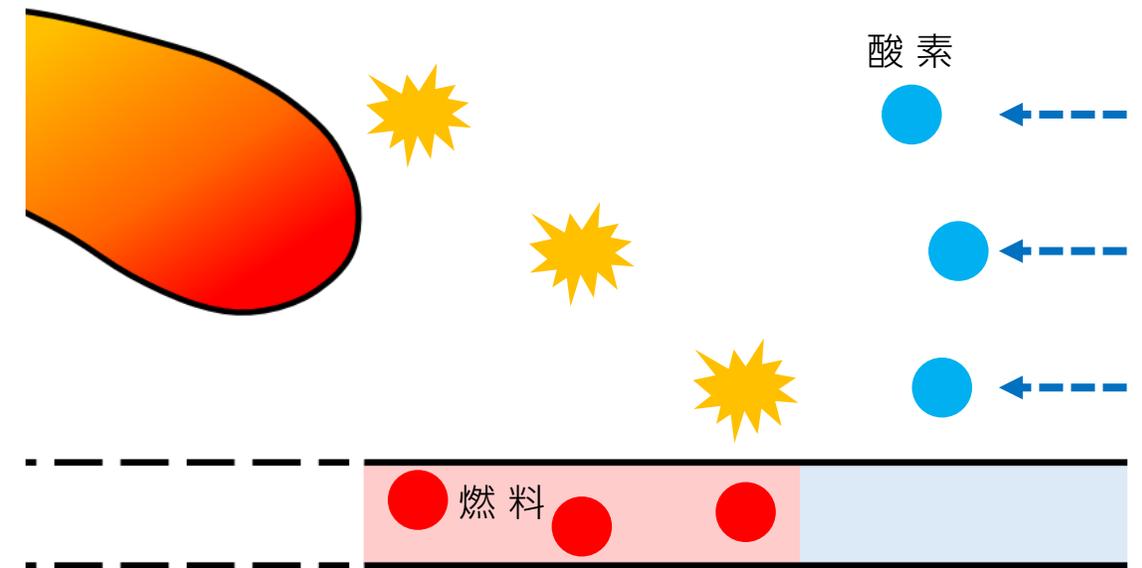


## 固体材料の消炎メカニズム

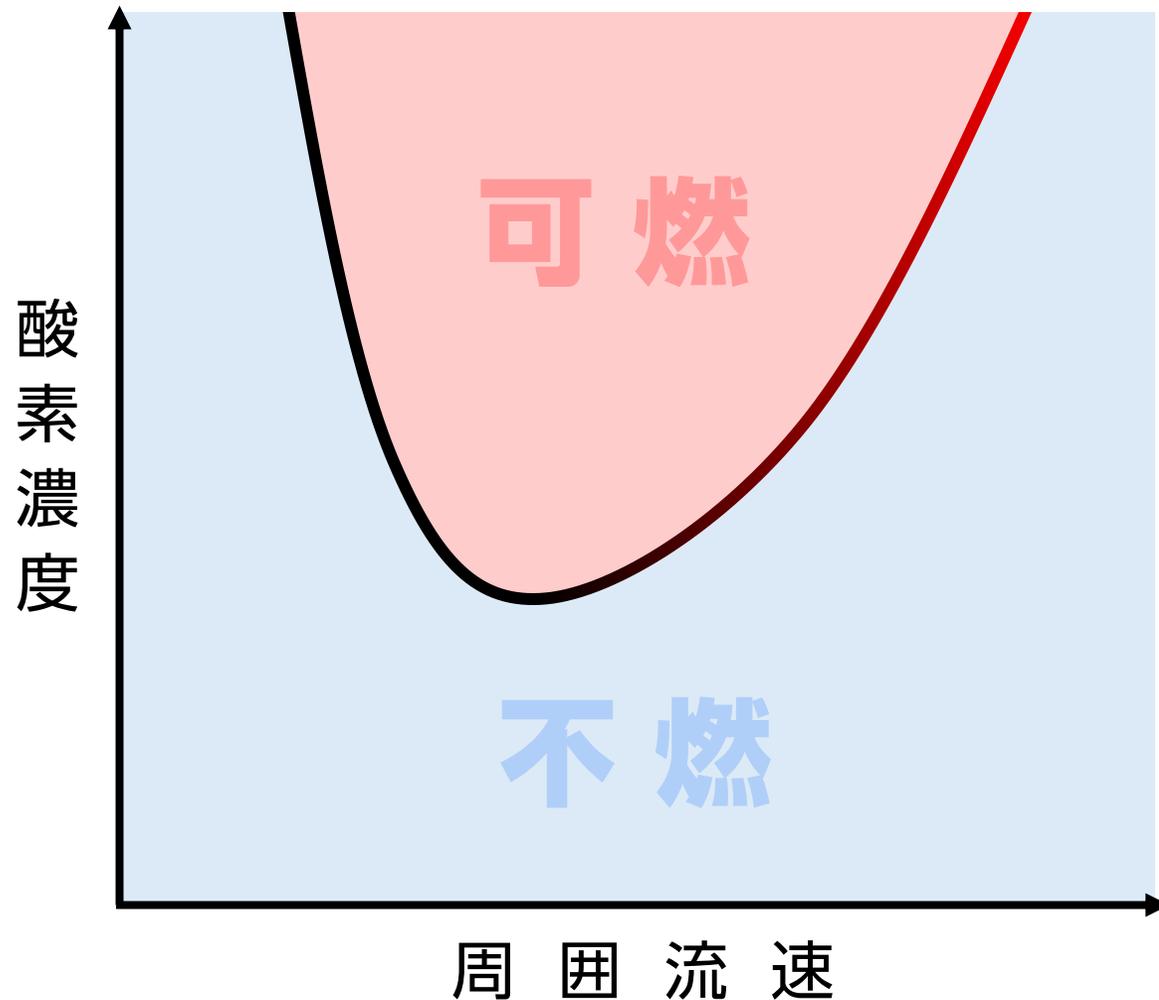


### 吹き飛び消炎

化学反応が完了する前に **可燃性ガスが掃気** されて十分な発熱が得られず消炎する。

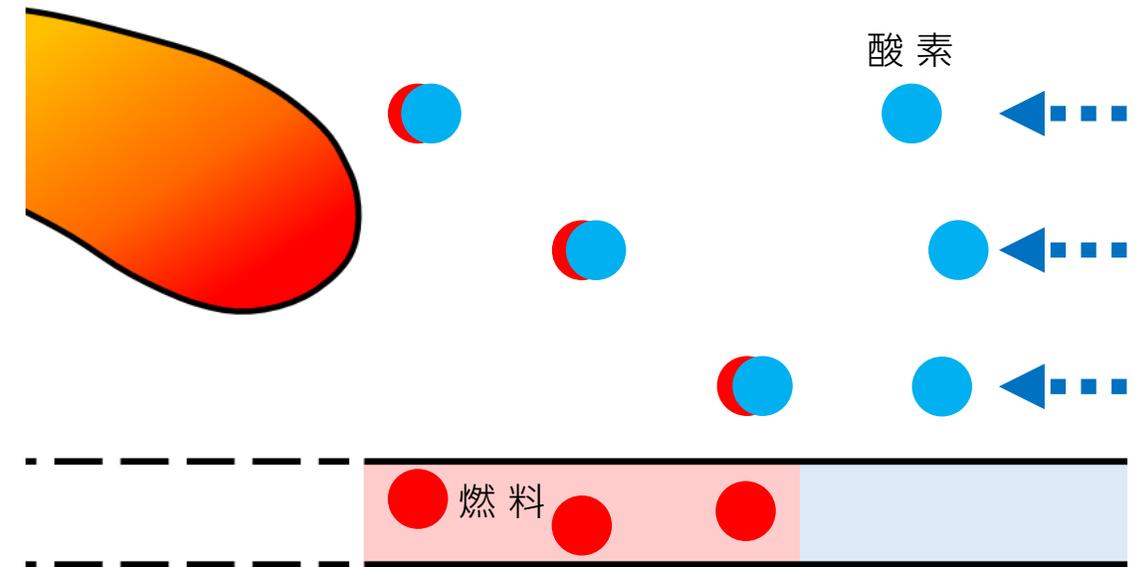


## 固体材料の消炎メカニズム

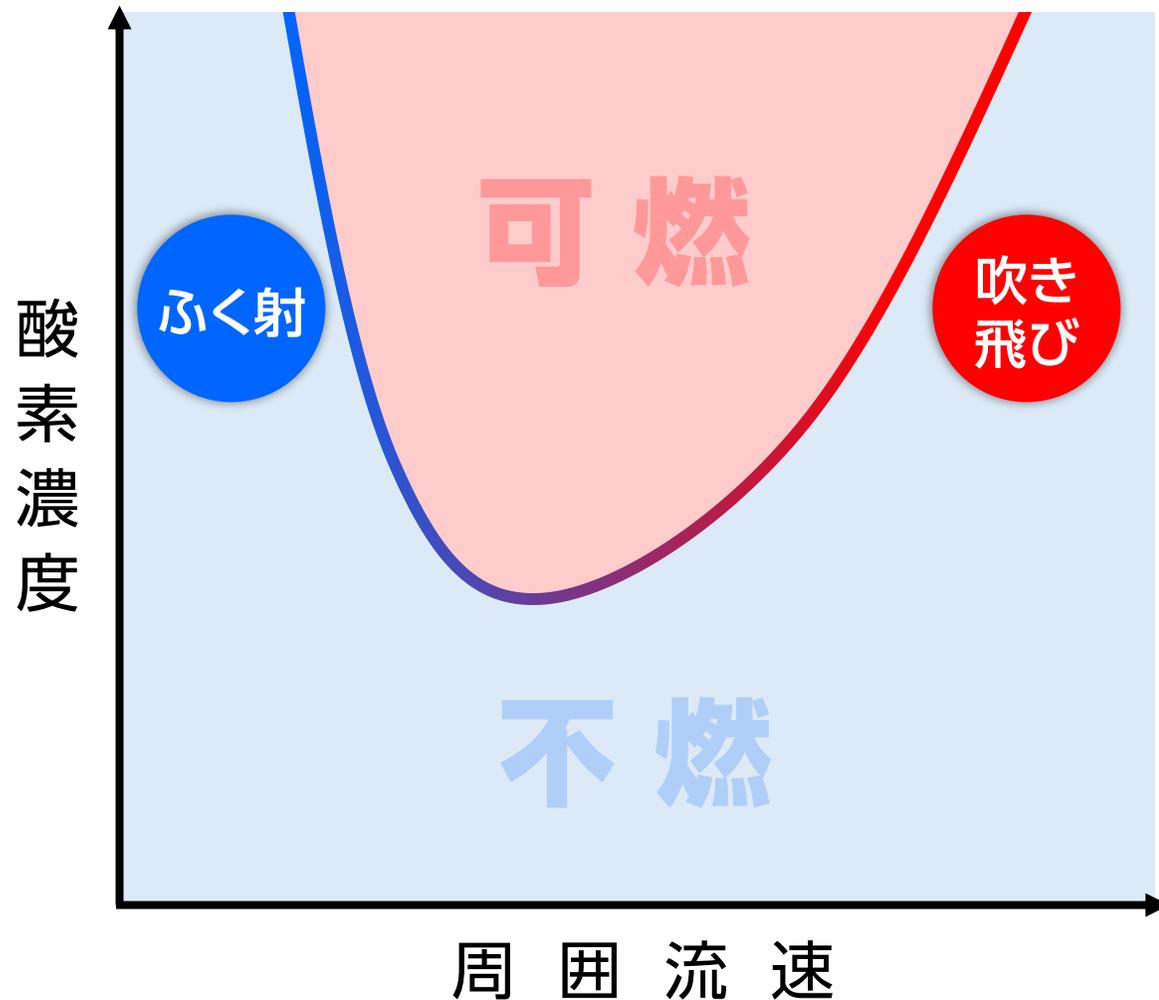


## 吹き飛び消炎

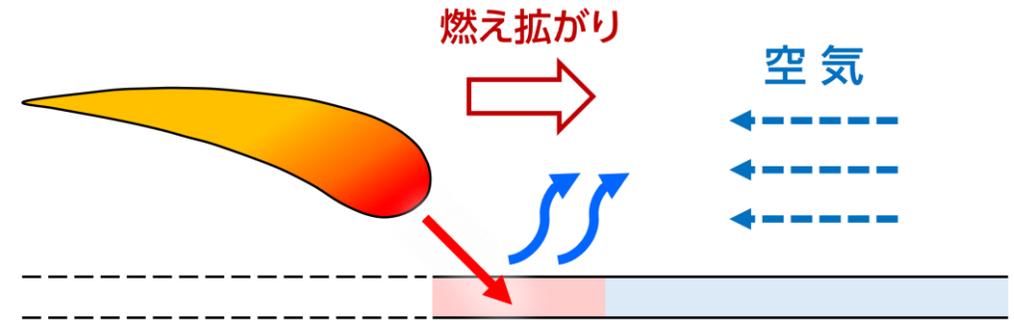
化学反応が完了する前に **可燃性ガスが掃気** されて十分な発熱が得られず消炎する。



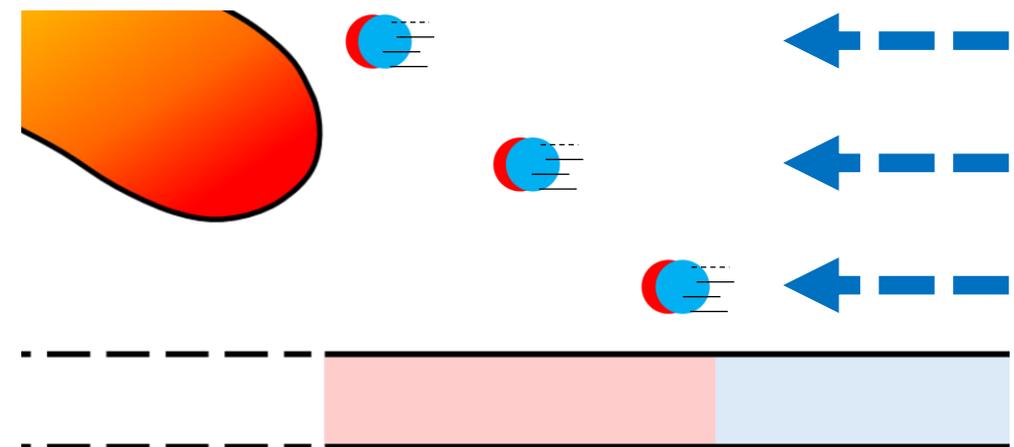
## 固体材料の消炎メカニズム



### ふく射消炎

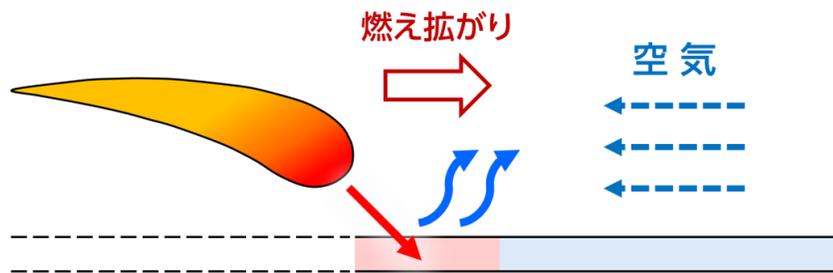


### 吹き飛び消炎



# ふく射・吹き飛び消炎限界の理論的導出

## ふく射消炎



### エネルギーバランス

材料の内部エンタルピー上昇

$$\rho_s c_s (T_v - T_\infty) V_f \tau = \lambda_g \frac{T_f - T_v}{L_{gy}} L_{gx} - \epsilon \sigma (T_v^4 - T_\infty^4) L_{gx}$$

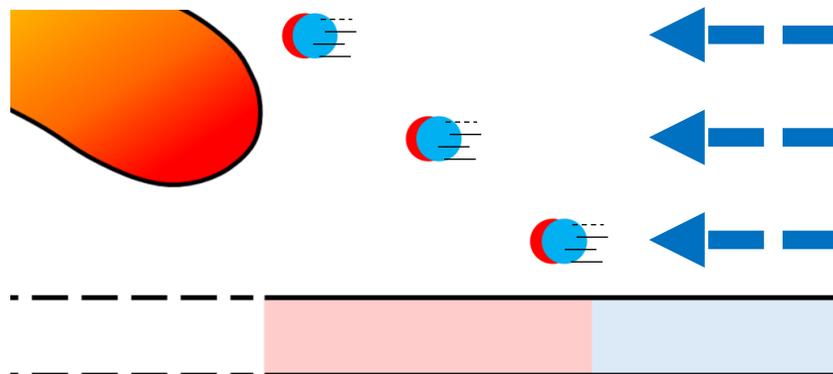
理論燃え拡がり速度  $V_{f,th}$  で割る

$$V_{f,th} = \frac{\lambda_g (T_f - T_v)}{\rho_s c_s (T_v - T_\infty) \tau}$$

$$\eta = 1 - \frac{\epsilon \sigma (T_v^4 - T_\infty^4)}{\rho_g c_g V_g (T_f - T_v)} \rightarrow 1 \text{ ふく射消炎}$$

*R<sub>rad</sub>*

## 吹き飛び消炎

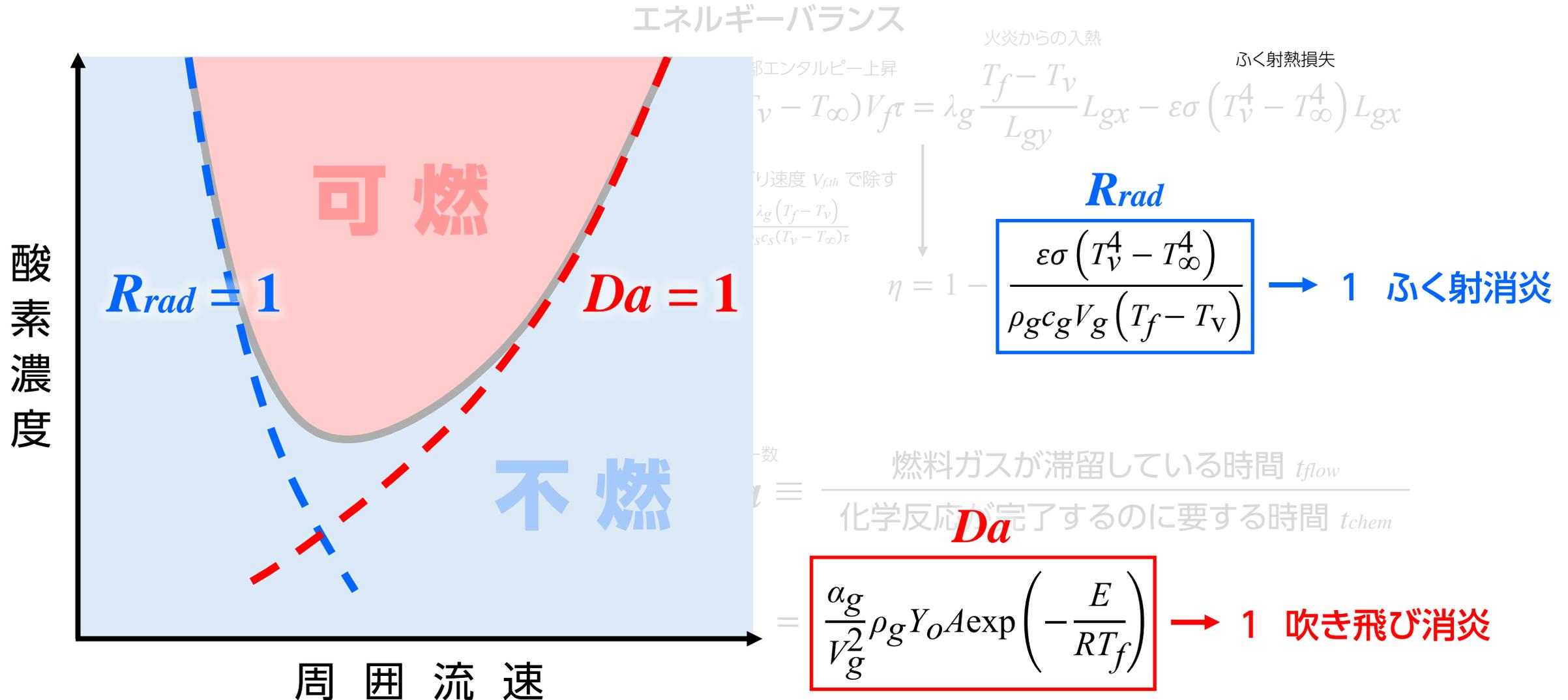


ダムケラー数

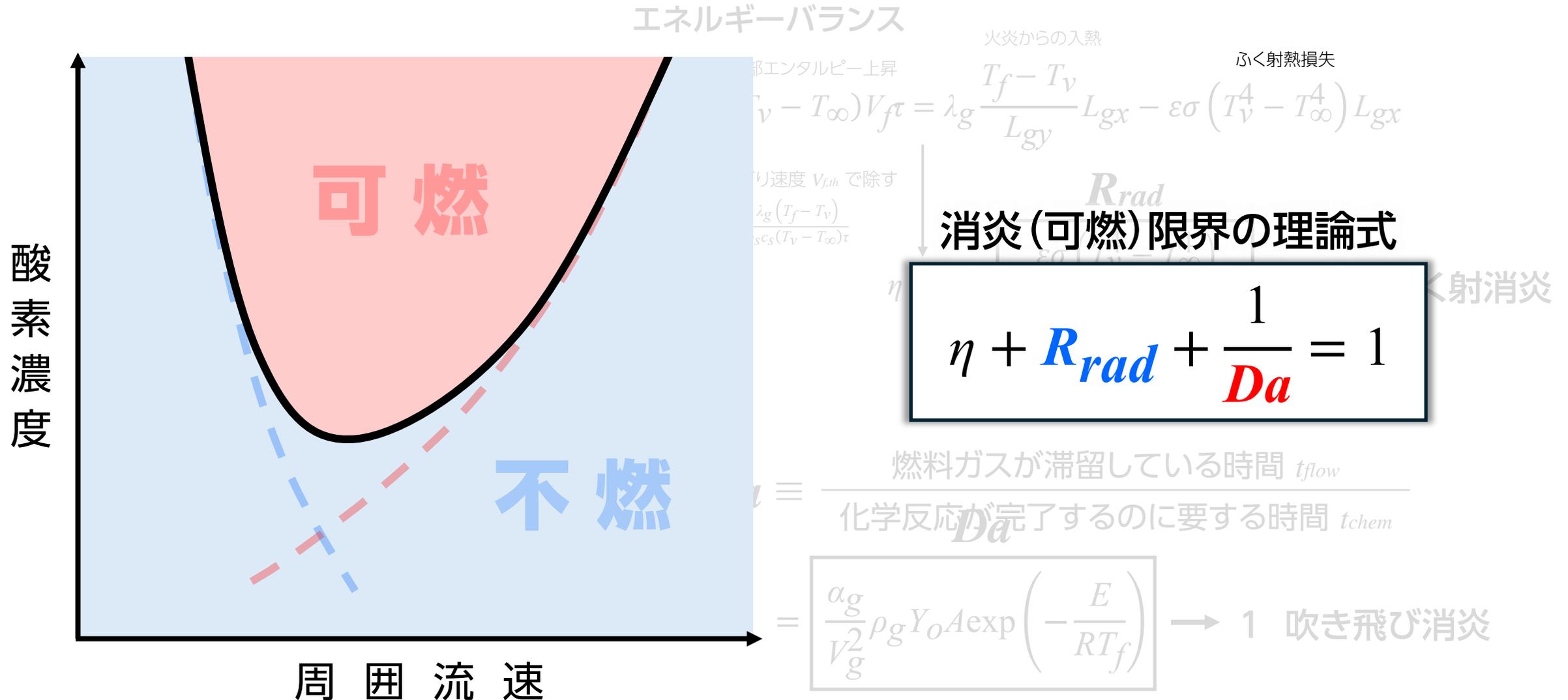
$$Da \equiv \frac{\text{燃料ガスが滞留している時間 } t_{flow}}{\text{化学反応が完了するのに要する時間 } t_{chem}}$$

$$= \frac{\alpha_g}{V_g^2} \rho_g Y_o A \exp\left(-\frac{E}{RT_f}\right) \rightarrow 1 \text{ 吹き飛び消炎}$$

## ふく射・吹き飛び消炎限界の理論的導出

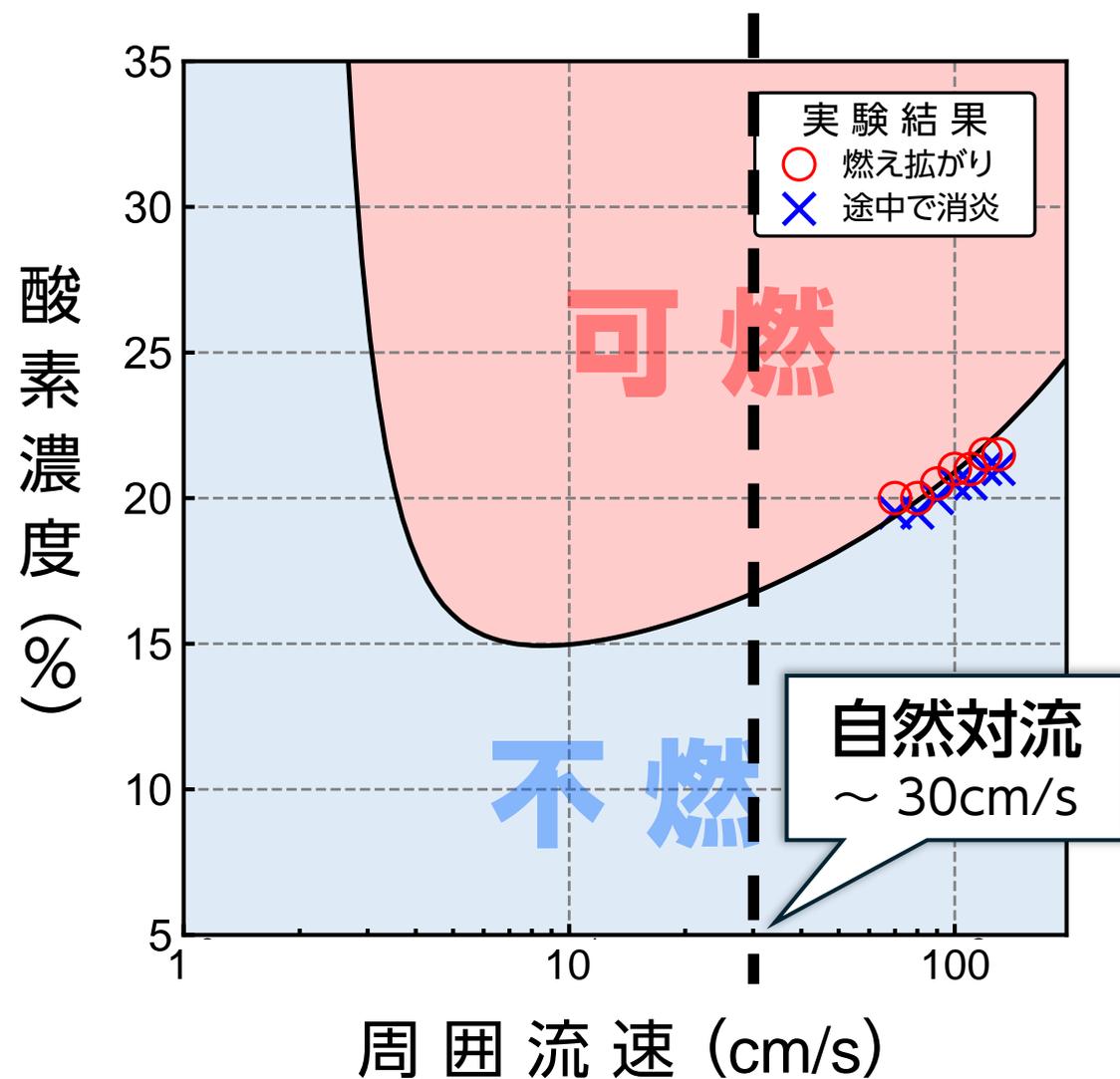


## ふく射・吹き飛び消炎限界の理論的導出

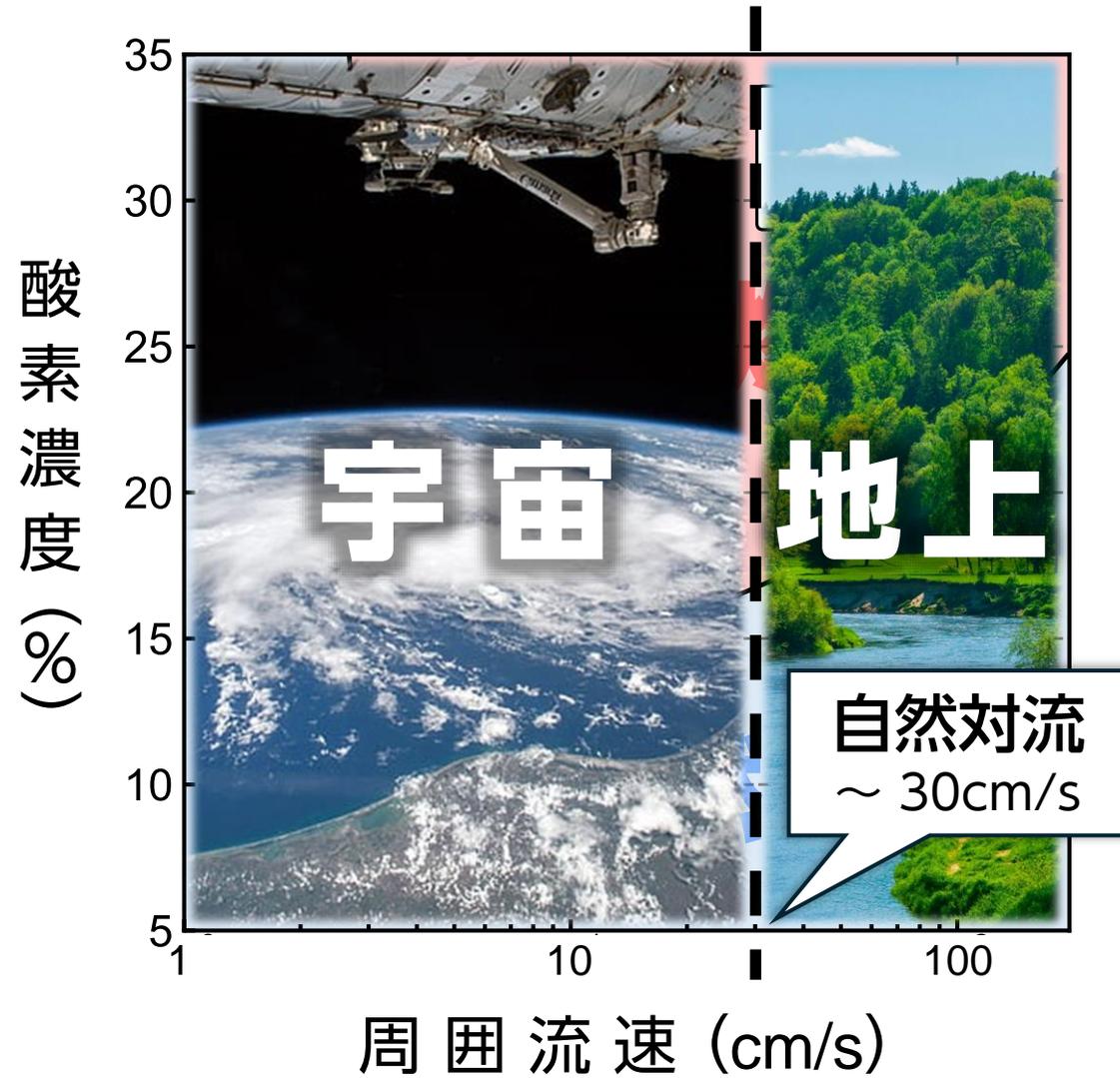




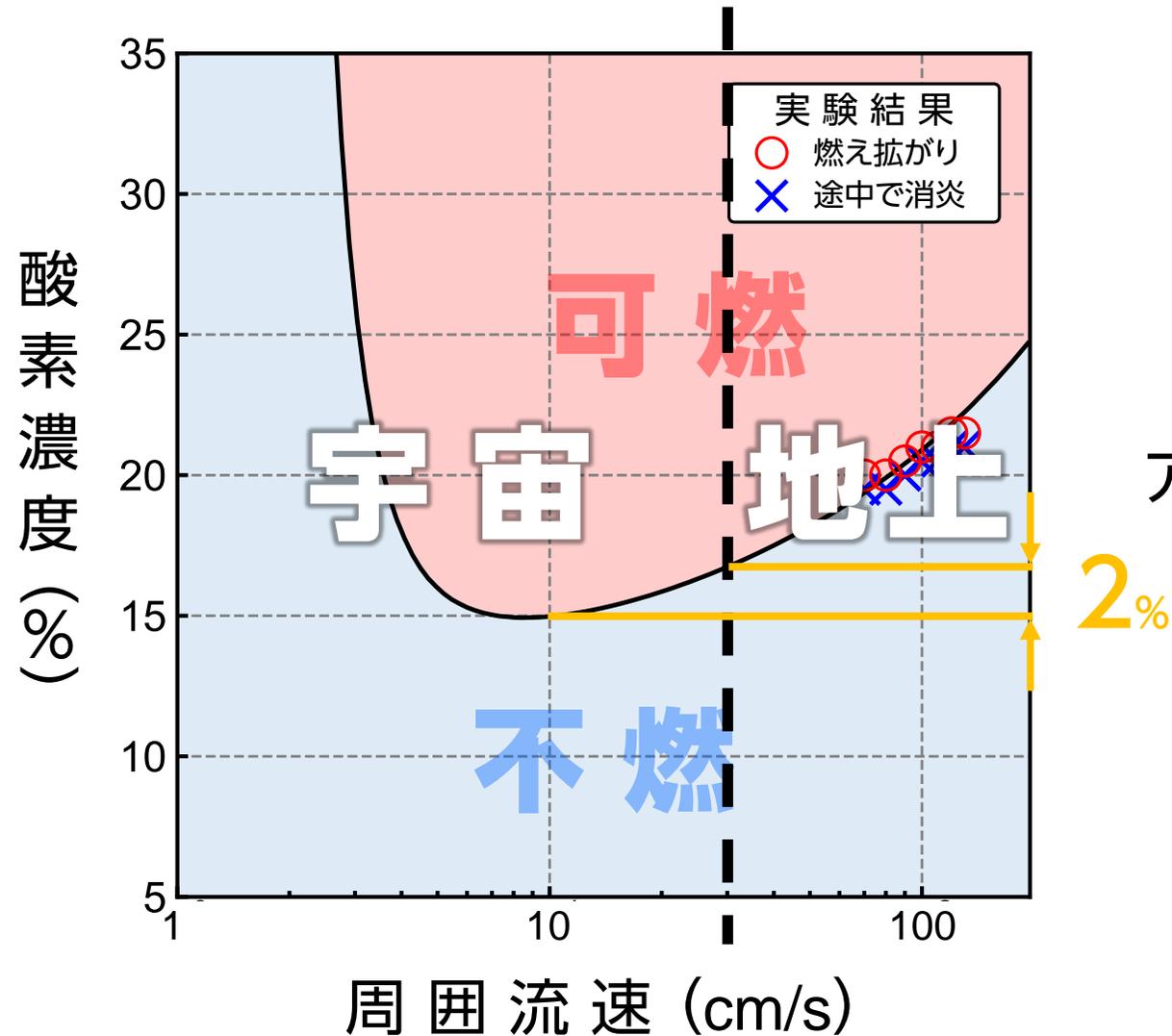
## 固体材料の可燃限界の予測 | アクリル樹脂を例に



## 固体材料の可燃限界の予測 | アクリル樹脂を例に



## 固体材料の可燃限界の予測 | アクリル樹脂を例に

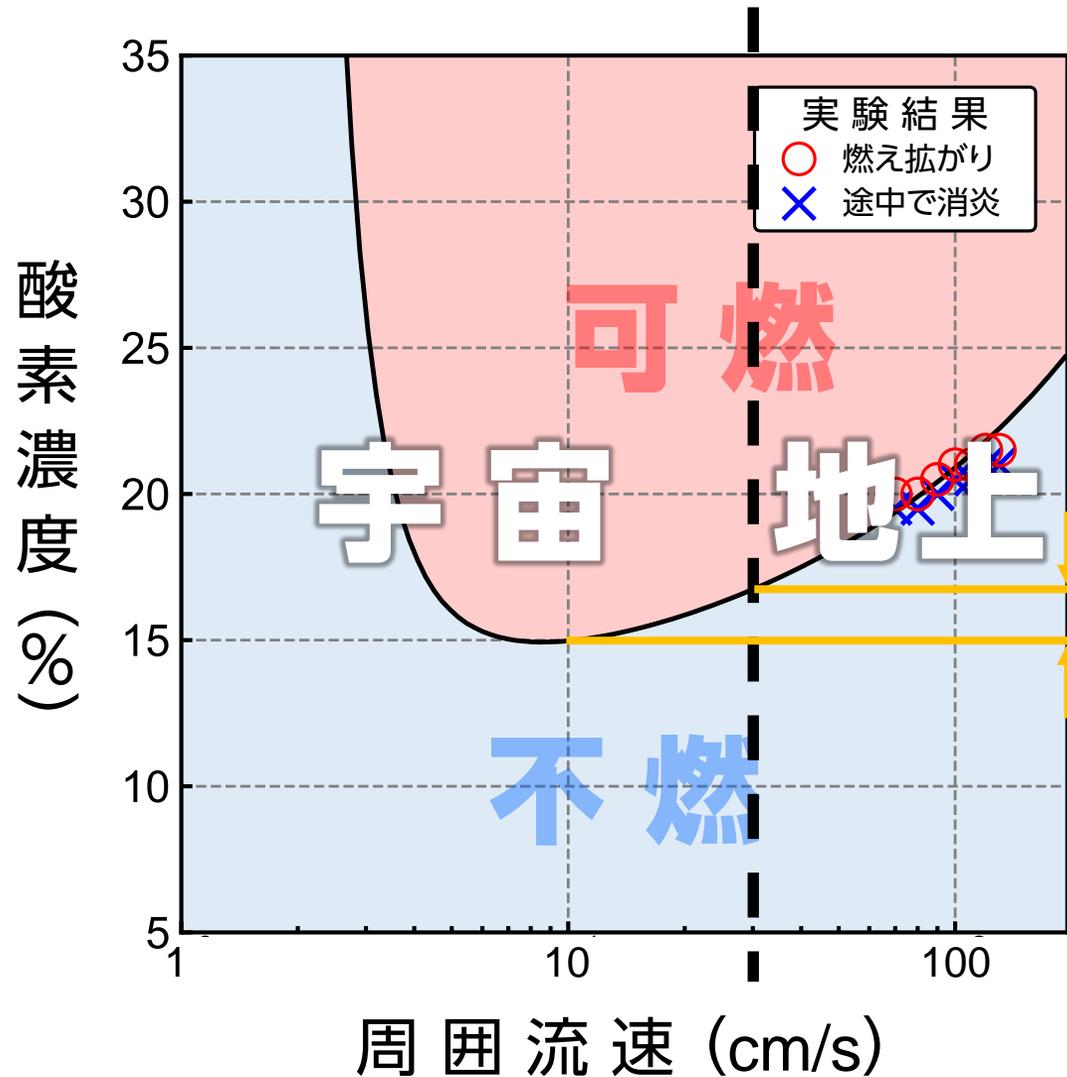


“可燃”領域における 最低酸素濃度 が  
地上よりも宇宙の方が低い



アクリル樹脂は 宇宙での燃焼性の方が高い

## 固体材料の可燃限界の予測 | アクリル樹脂を例に

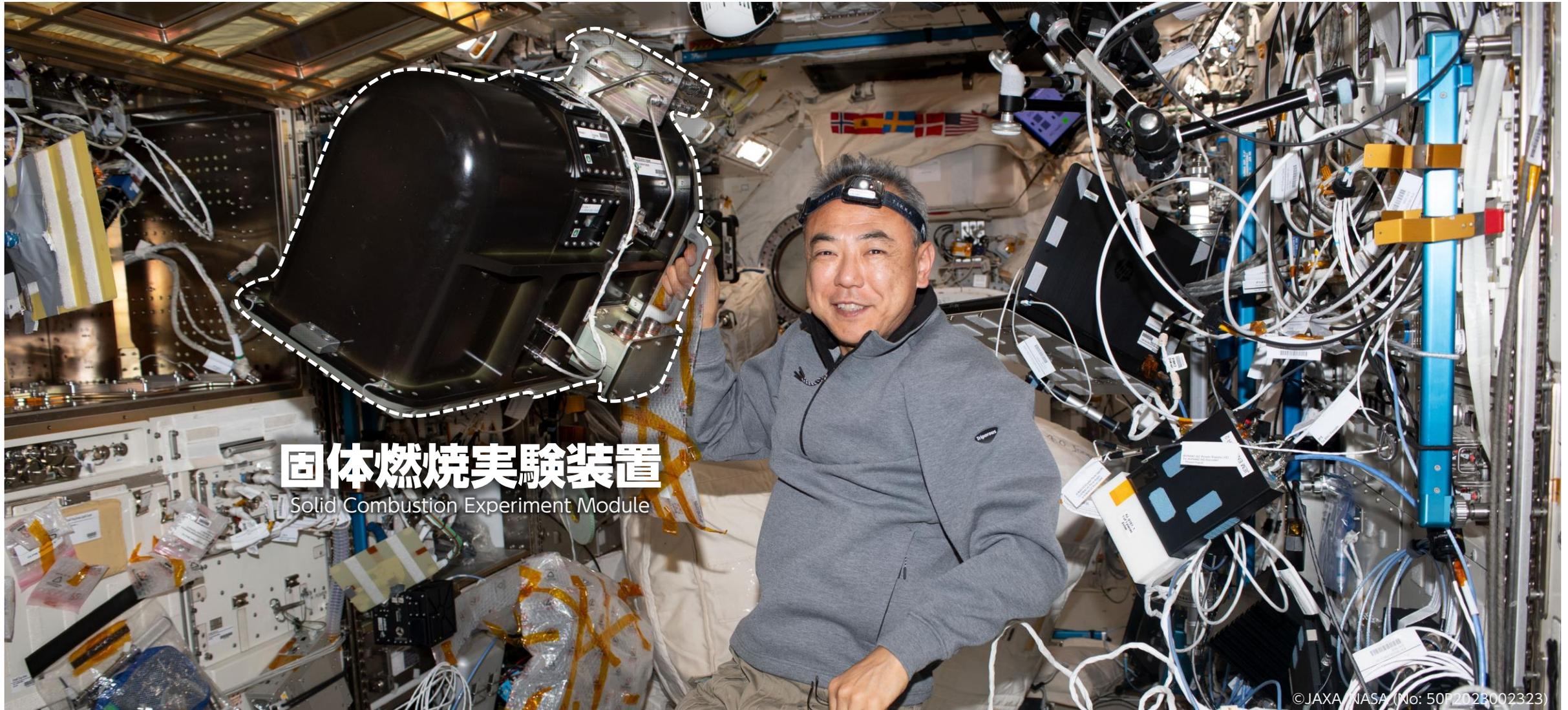


“可燃”領域における 最低酸素濃度 が  
地上よりも宇宙の方が低い

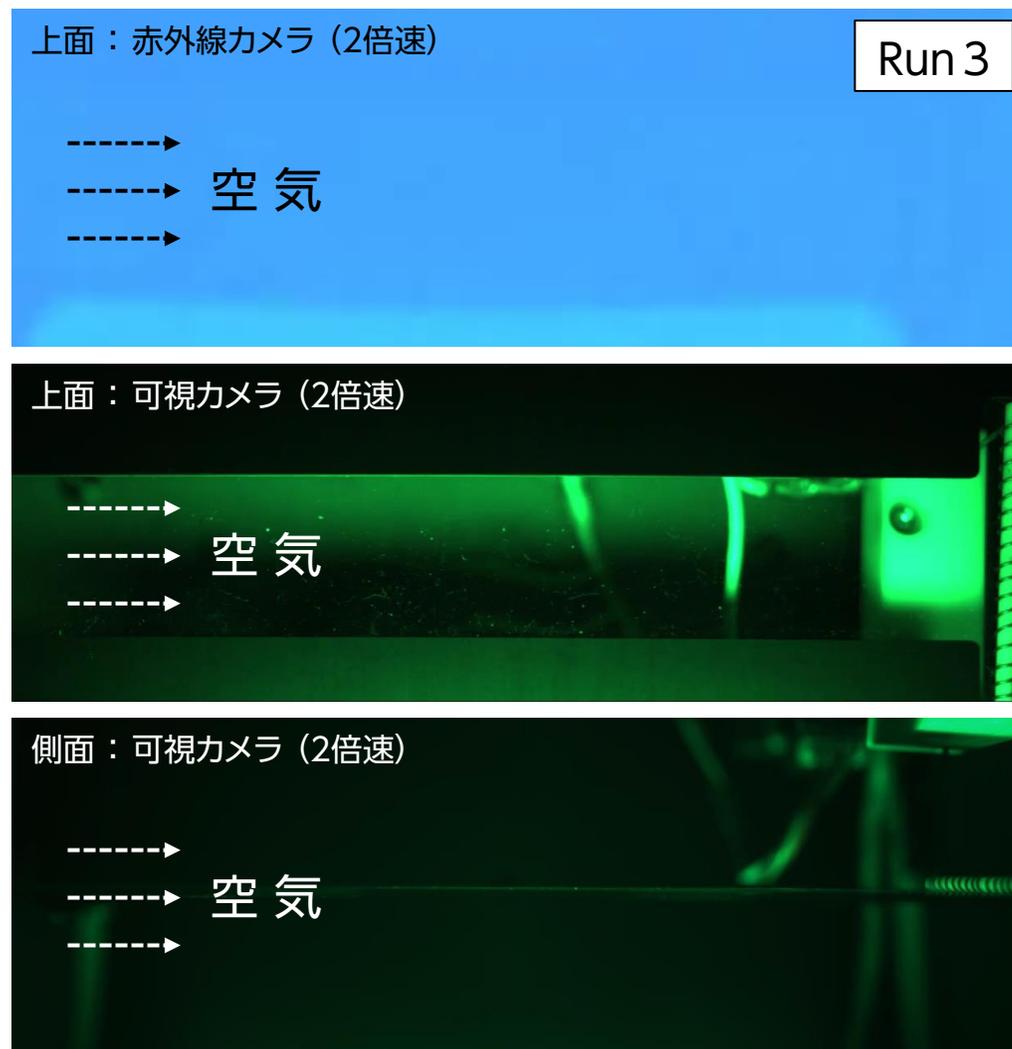
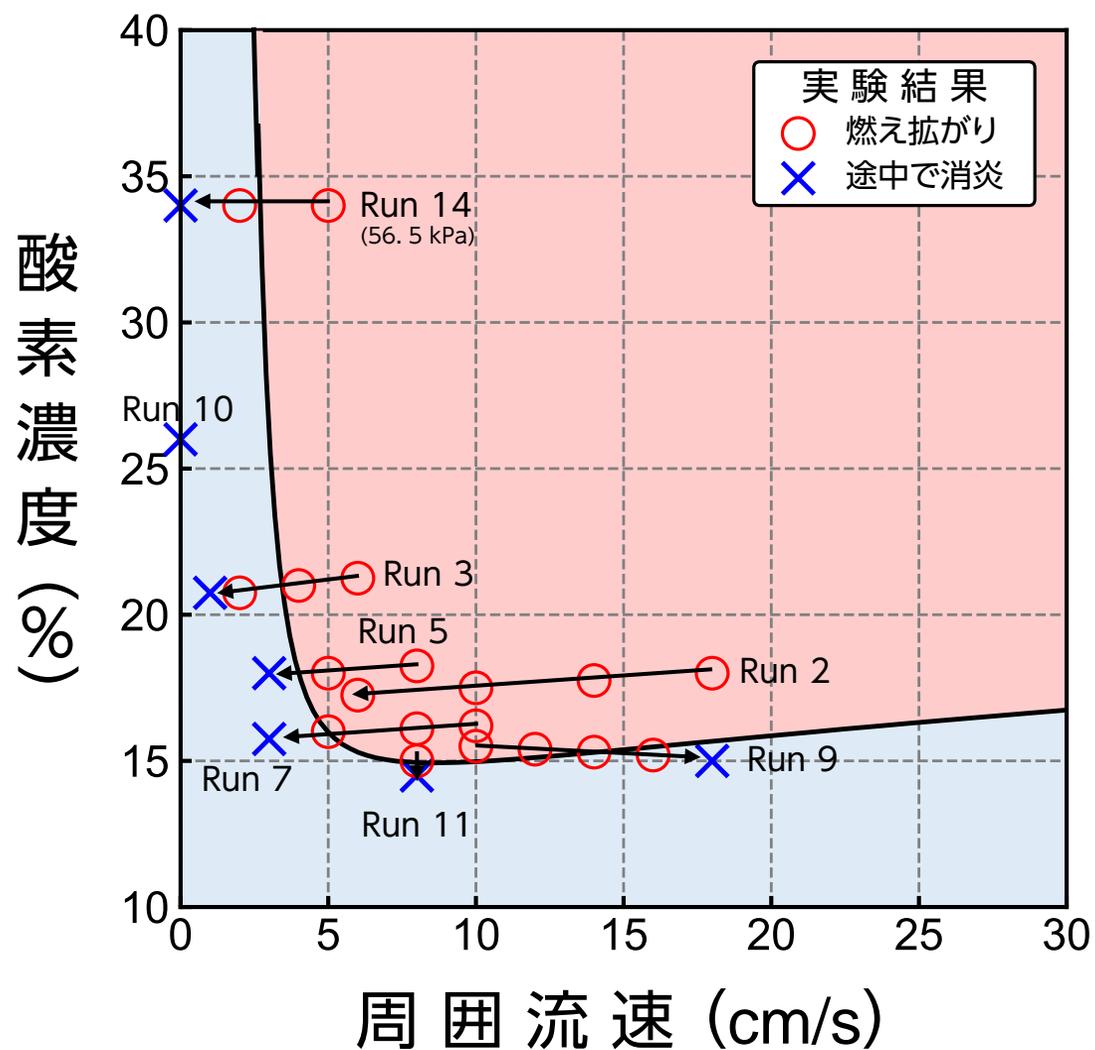
アクリル樹脂は 宇宙での燃焼性の方が高い

NASA-STD-6001Bが  
固体材料の宇宙における燃焼性を  
過小評価している可能性がある

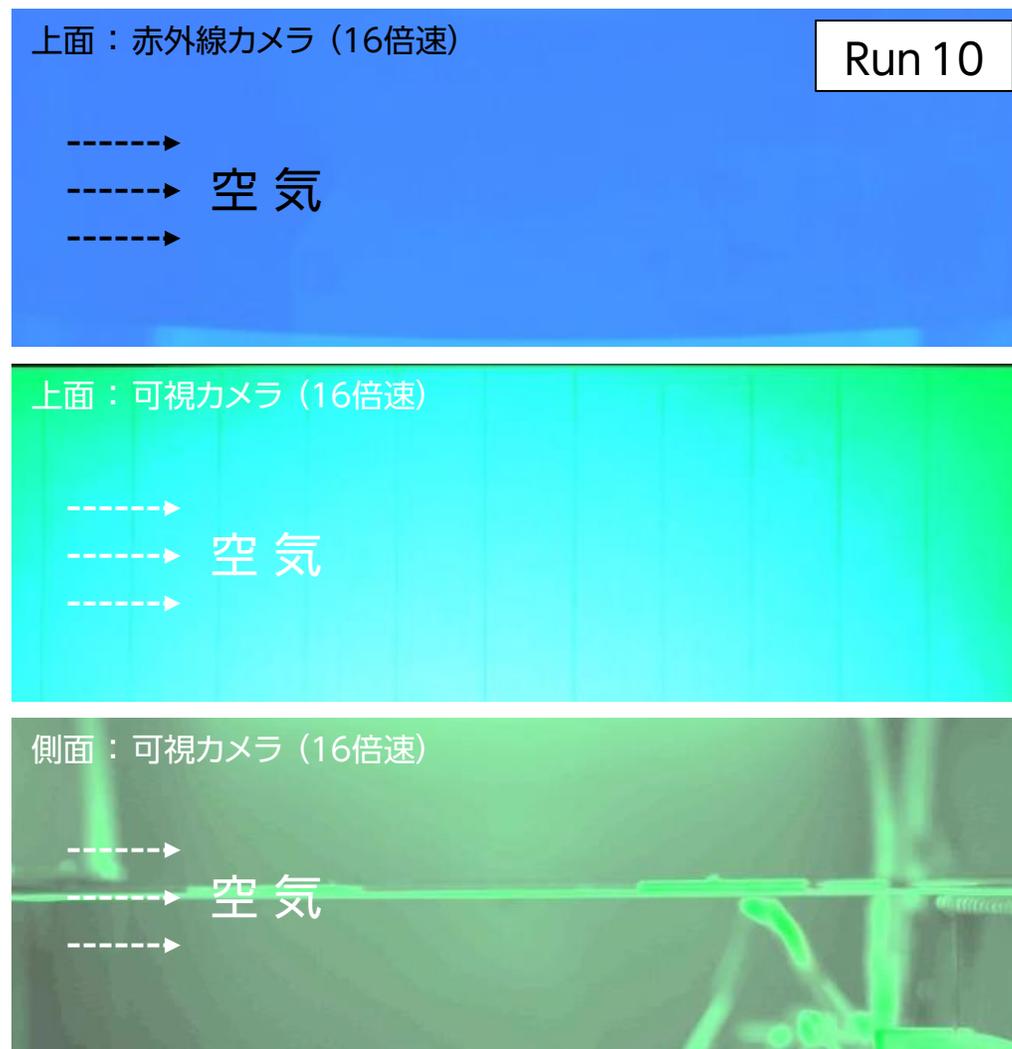
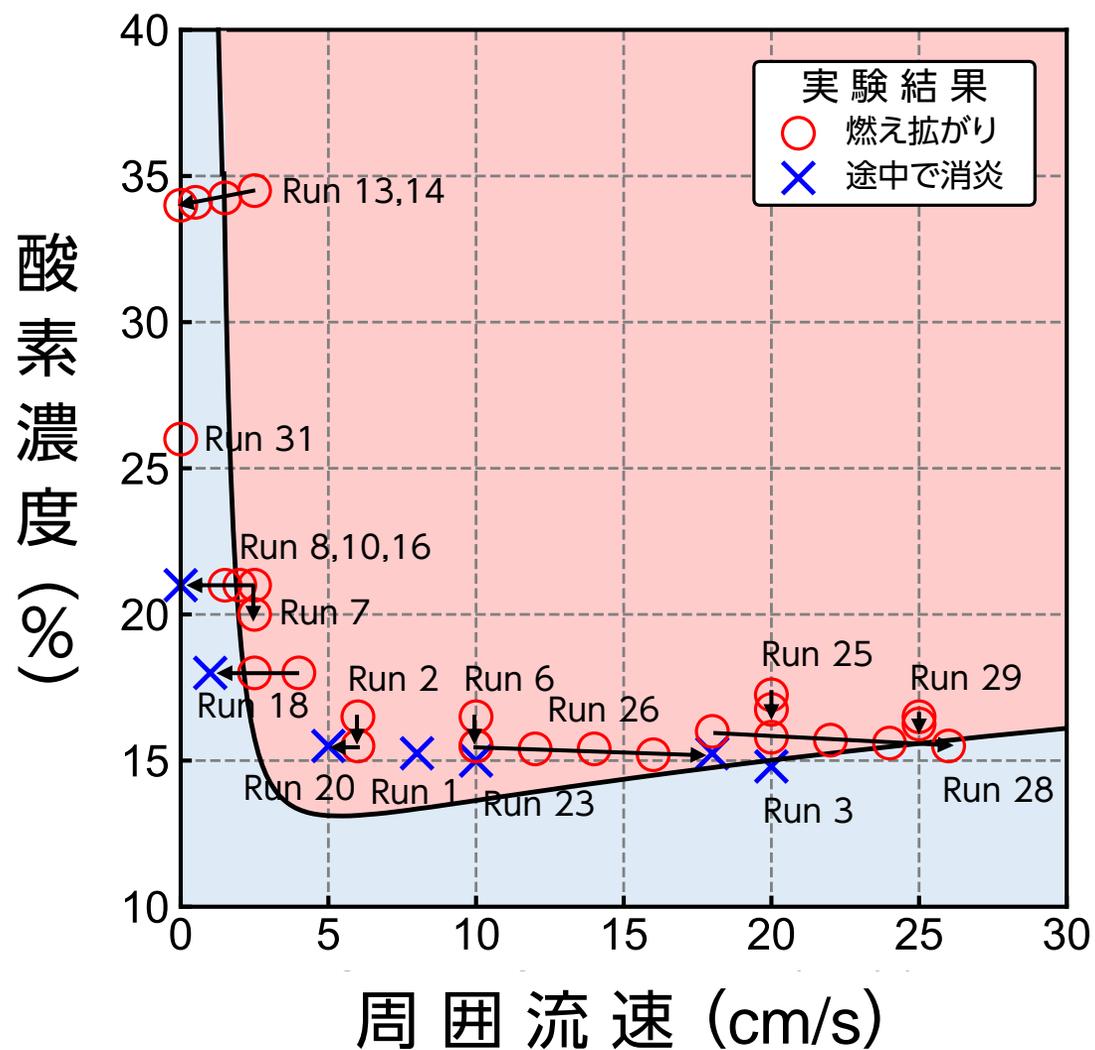
## ISS軌道上燃焼実験での理論検証



## ISS軌道上燃焼実験での理論検証 | アクリル樹脂



## ISS軌道上燃焼実験での理論検証 | ろ紙



## 今後の取り組み・抱負

- 本燃焼性評価法が **広範な材料** に対して適用できるのか検証する。  
⇒ **FLARE-2** (宇宙居住環境における固体材料の可燃性評価) では、FLAREプロジェクトでは扱わない材料の燃焼性を調査する。
- 本燃焼性評価法が **低重力環境** における燃焼性も予測できるのか検証する。  
⇒ **FLARE-3** では月面／火星探査を想定して、1/6Gや1/3Gなどの低重力環境における固体材料の燃焼性を調査する。



将来の持続可能な有人宇宙開発の実現に **“火災安全”** で貢献します

## 謝辞

- 宇宙科学奨励賞選考委員会の皆様ならびに宇宙科学振興会の関係各位に、選考および本日の表彰式を執り行っていただきましたこと、御礼申し上げます。
- 当研究室の主宰である **岐阜大学・高橋周平**先生 には、日頃より研究にのみならず、あらゆる面で多大なご支援を賜っております。深く感謝申し上げます。
- 大学院修士・博士課程の指導教員である **東京大学・津江光洋**先生、**中谷辰爾**先生 には、今もなお多くのご指導・ご支援を賜っております。感謝申し上げます。
- FLAREプロジェクトにおいてサポートして頂いているJAXAおよび関係機関の皆様ならびにメンバーの先生方に感謝申し上げます。

# 将来の有人宇宙開発における 火災リスク低減に向けた微小重力燃焼研究

小林 芳成 岐阜大学 工学部 機械工学科