

「きぼう」日本実験棟における 燃焼実験の概要

2024年2月20日

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構
有人宇宙技術部門 きぼう利用センター

目次

1. ISS/「きぼう」の概要
2. 「きぼう」で行われている燃焼実験
3. 軌道上での燃焼実験の利点と多様な活用法
4. 利用できる実験装置
5. 燃焼実験プラットフォーム構想について
6. 軌道上実験の流れと注意点
7. 「きぼう」の利用制度について

1. ISS/「きぼう」の概要

- 国際宇宙ステーション(ISS)は、地上から約400km上空の地球低軌道上に建設された有人実験施設です。ISSには6名程度の宇宙飛行士が常時滞在しています。
- ISSの一部である「きぼう」日本実験棟は、日本が開発した初の有人施設であり、船内実験室、船外実験プラットフォーム等から構成されています。
- 船内実験室の内部には、実験装置やシステム機器を搭載するための「ラック」が複数設置されており、個別の実験装置への電力供給や地上との間の通信・制御機能等が提供されます。
- 「きぼう」の船内は完全な無重力ではなく、地上の重力(1G)の1万分の1程度の重力(微小重力)環境となっています。微小重力という特殊な環境を活かし、地上では実施が困難な様々な科学実験や技術実証が進められています。



Image by JAXA/NASA



Image by JAXA/NASA

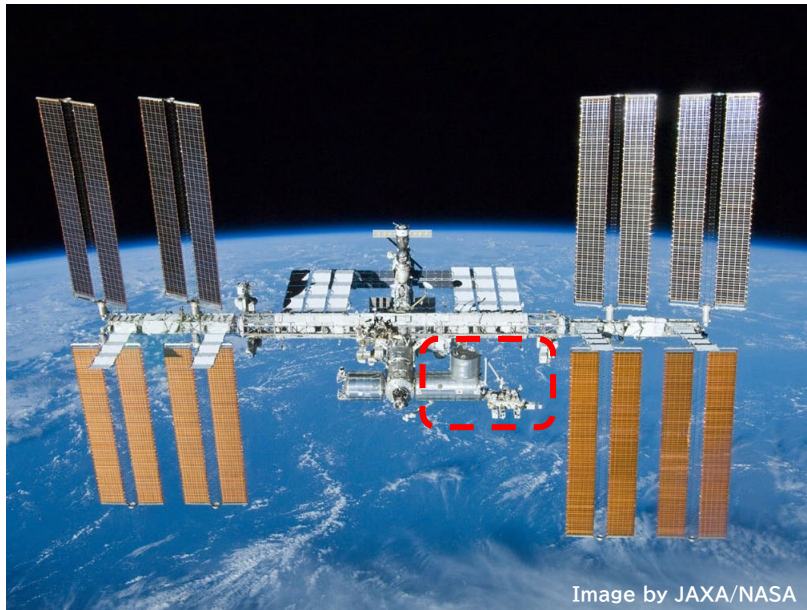


Image by JAXA/NASA

国際宇宙ステーション(ISS)(赤の破線枠内が「きぼう」)

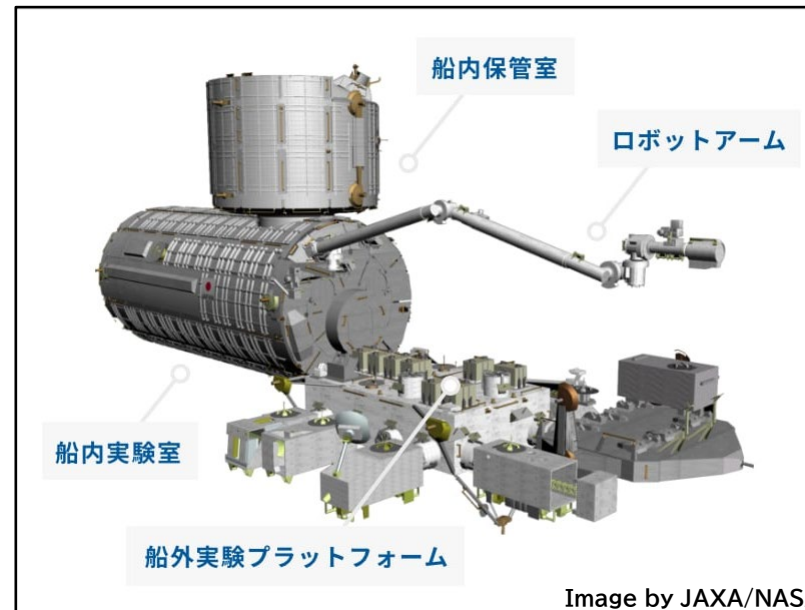


Image by JAXA/NASA

日本実験棟「きぼう」の構成

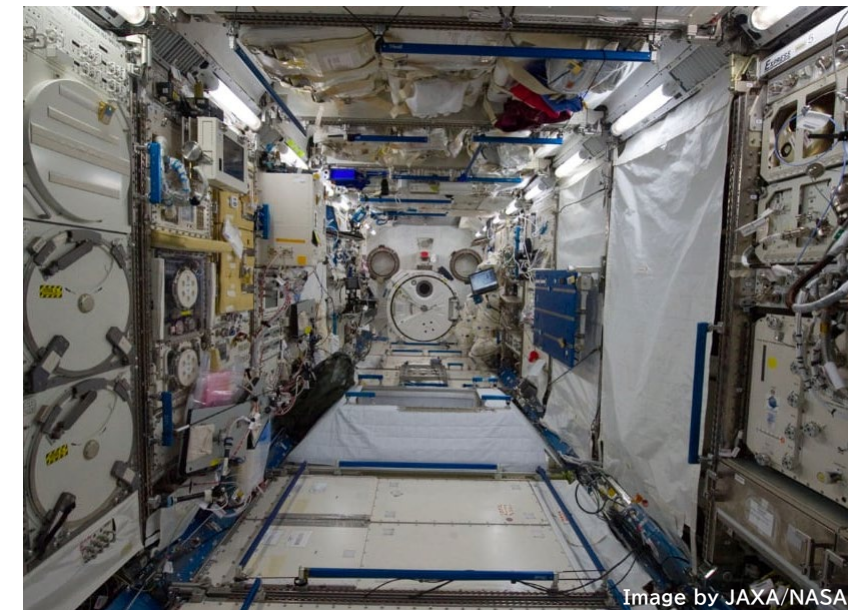
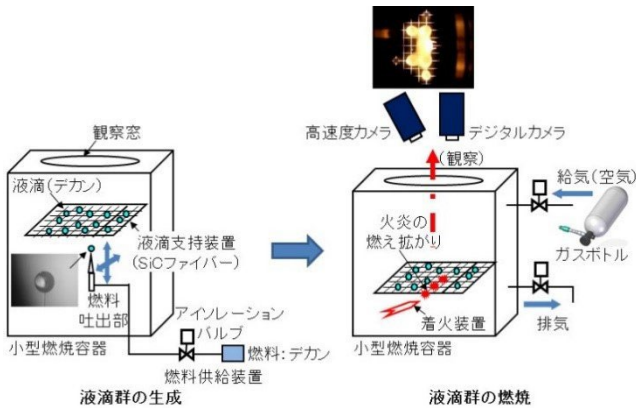


Image by JAXA/NASA

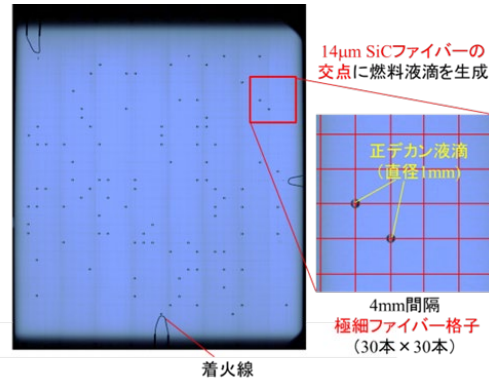
「きぼう」船内実験室の内部

2. 「きぼう」で行われている燃焼実験

- 「きぼう」では、これまで2つの燃焼実験が行われています。1つは液体燃料の燃焼実験「Group Combustion」、もう1つは固体材料の燃焼実験「FLARE」です。
- 2017年に実施されたGroup Combustionでは、直径1mm程度の液体燃料の滴(液滴)を平面上に配置し、液滴間を火炎が燃え広がる様子が観察されました。液滴の個数や直径、配置などを変えて、燃え広がり特性に与える影響が詳しく調べられました。
- 2022年から実施中のFLAREでは、宇宙船内特有の低速の周囲流条件下において、固体材料上の火炎燃え広がりが維持される限界酸素濃度が、様々な材質・形状の材料について調べられています。周囲流の方向や異なる雰囲気圧力の影響についてもデータが取得されています。

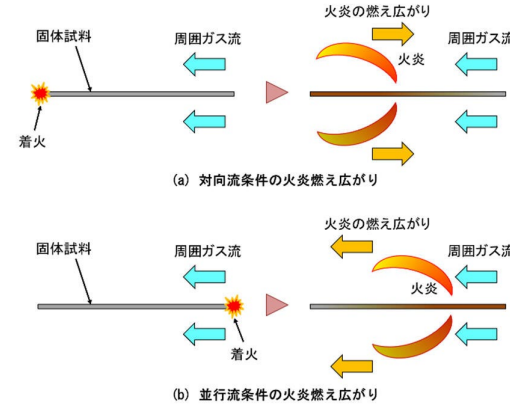


「きぼう」での実験の概略

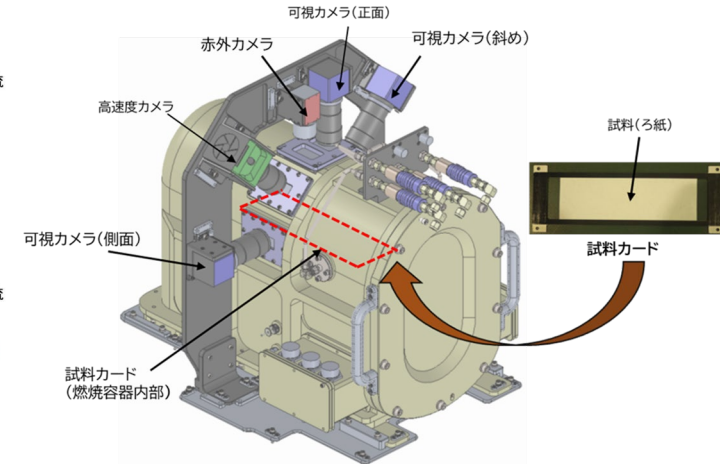


SiCファイバ格子に生成された燃料液滴のバックライト画像

Image by 山口大学/JAXA



材料上の火炎燃え広がり形態



様々なカメラによる観察方向



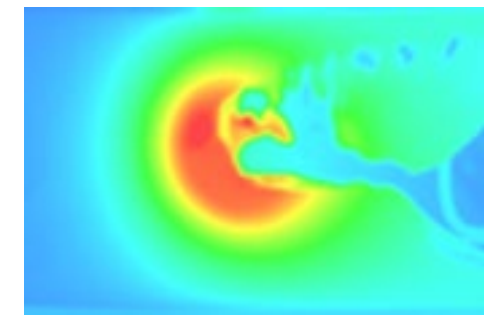
多数の燃料液滴群を燃え広がる火炎

Image by 山口大学/JAXA



薄い「ろ紙」試料上を燃え広がる火炎

Image by 弘前大学/岐阜大学/北海道大学/JAXA



赤外カメラによる試料表面温度分布

Image by 弘前大学/岐阜大学/北海道大学/JAXA

3. 軌道上での燃焼実験の利点と多様な活用法

➤ 軌道上での燃焼実験の利点

● 複雑な燃焼現象の単純化

微小重力環境では浮力対流が抑制され、静止雰囲気中での燃焼現象は等方的になります。例えば、燃料液滴の燃焼においては球対称の火炎が形成されます。軌道上実験結果(火炎径や液滴径の時間履歴等)を数値解析のリファレンスデータとして用いることで、空間的要因による計算負荷を軽減し、詳細な化学反応機構の構築・検証等が容易になります。

● 重力下では顕在化しない効果の観察

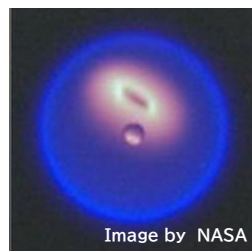
熱泳動や表面張力対流など、通常重力環境では浮力対流等に覆い隠され顕在化しない効果の影響を詳しく観察できるため、燃焼メカニズムのより高度な理解に繋がります。また、それらの実験結果に基づき、地上では着想が困難な新たな概念や理論の構築が可能となります。

● 宇宙特有の環境での燃焼特性データの取得

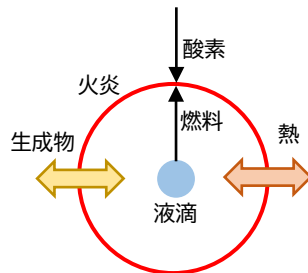
有人宇宙船内には換気等のために非常に低速(数cm/s程度)の空気流が存在します。地上では火炎近傍に30~40 cm/s程度の浮力対流が生じてしまうため、宇宙船内を模擬した条件での材料の可燃性試験は実施できません。軌道上では、宇宙特有の低周囲流速条件での材料の燃焼特性データが取得できます。これにより、宇宙火災安全性の向上に繋がる材料の可燃性評価技術の高度化や有人宇宙探査に向けた技術実証等が行えます。



(a) 通常重力 (b) 微小重力
異なる重力環境におけるろうそく火炎
Image by NASA



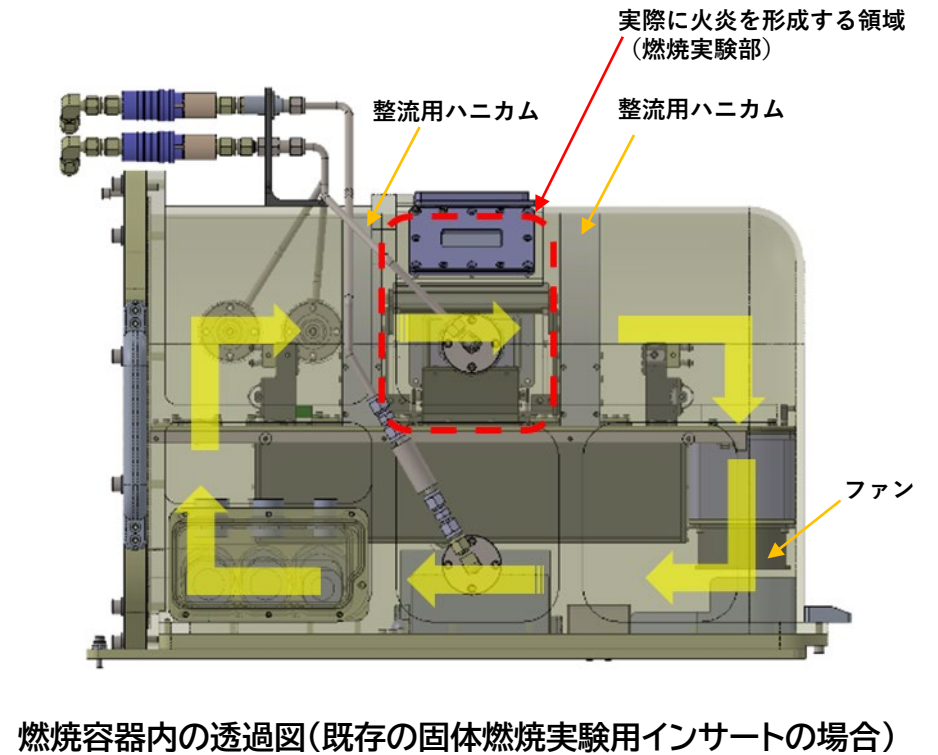
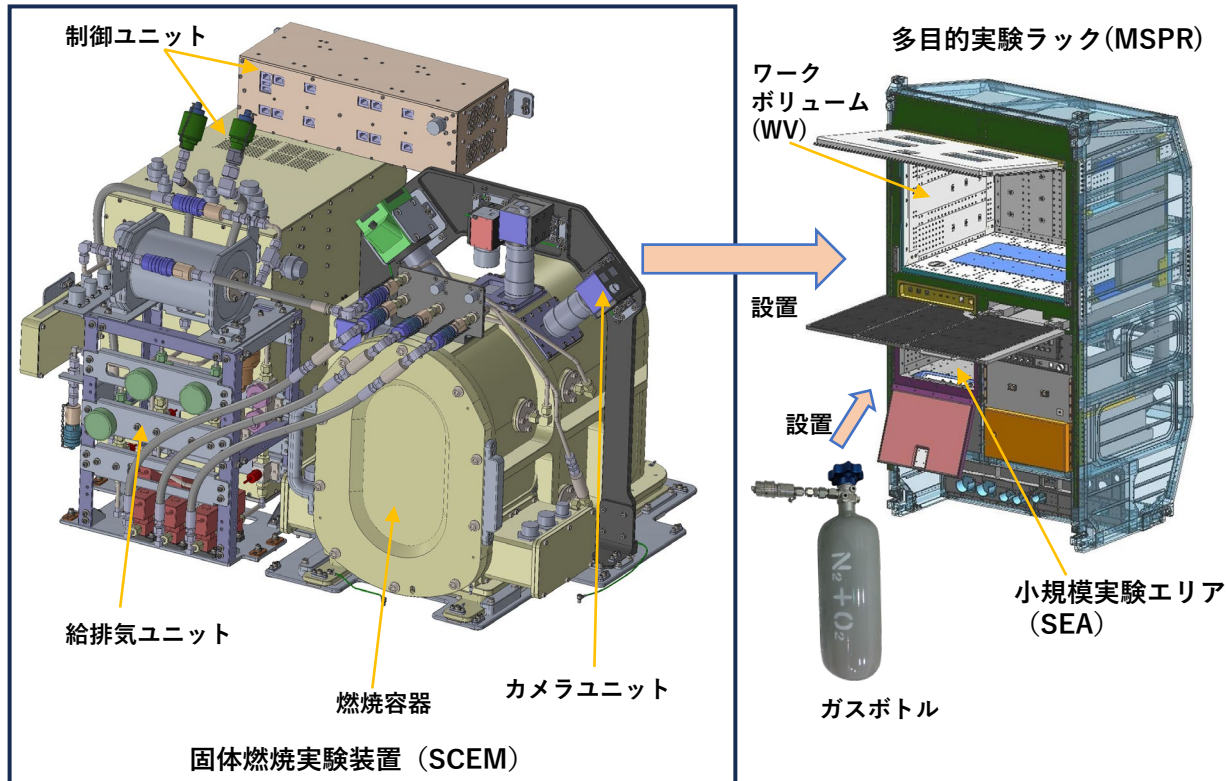
微小重力環境における液滴火炎(左)と燃焼メカニズム(右)



「きぼう」での燃焼実験の活用法(例)

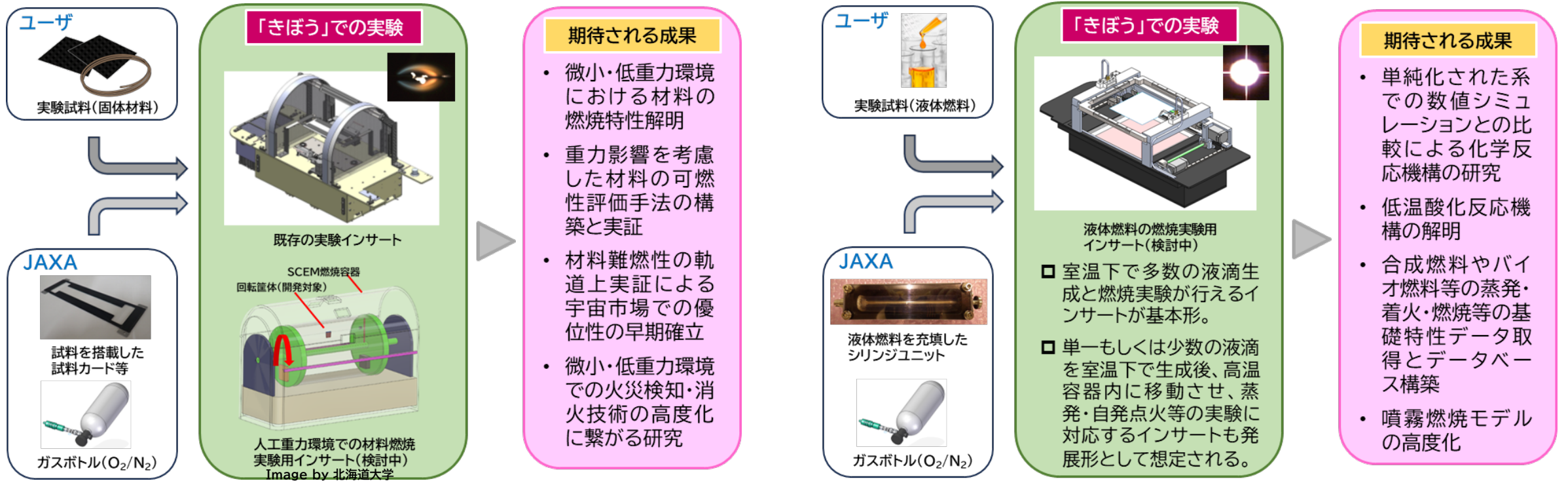
4. 利用できる実験装置

- 「きぼう」船内における燃焼実験のために、固体燃焼実験装置 (SCEM) を利用することができます。
- SCEMは、多目的実験ラック (MSPR) のワークボリューム (WV) に設置されます。燃焼容器には、小規模実験エリア (SEA) に設置されたガスボトルから酸素と窒素の混合ガスが供給されます。また、ISSから純窒素ガスの供給を受けることもでき、これらのガスを利用して燃焼容器内に必要な圧力と酸素濃度の雰囲気気を調製できます。燃焼実験後のガスは、「きぼう」のガス排気ラインを介してISS外に排出されます。
- 燃焼容器内に搭載する実験インサートは実験目的に応じて交換することができます。現時点では、固体材料の燃焼実験用の2種類が存在します。これらのインサートに搭載されているファンを駆動することにより、燃焼容器内部に循環流を形成することができ、2つの整流板の間に最大で25 cm/sまでの速度の強制流を形成できます。
- 燃焼現象は、燃焼容器周囲に設置される各種のカメラにより観察することができます。
- SCEM本体や実験インサートの詳しい仕様については、参考資料および以下をご覧ください。
<https://humans-in-space.jaxa.jp/biz-lab/experiment/pm/scem/>



5. 燃焼研究プラットフォーム構想について

- “プラットフォーム(PF)”とは、「きぼう」利用成果の最大化を図るために設定される、有望な領域の研究を支える研究開発基盤です。船内実験室や船外実験プラットフォームを利用する5つのPFが既に設定されており、燃焼研究分野は次期PF候補の1つとなっています。
- PF化された領域については、提供する実験サービスの定型化等による実験実施までの期間短縮、実施時期の定時制向上を図るとともに、利便性・サービスの向上・充実を目指します。
- FLARE実験のために開発された固体燃焼実験装置(SCEM)では、燃焼容器内部に搭載する実験インサートを交換して使用することが可能です。この特徴を最大限活用し、液体燃料の燃焼実験用インサートや、回転機構による遠心力で生成された人工重力環境での材料燃焼実験を行うためのインサート等を新たに開発する検討を進めています。
- PFとしての定型化実験サービスの対象とする内容については、以下に示すような2例を中心に現在検討しています。



固体材料の燃焼実験による宇宙火災安全性向上を目的とするPF(イメージ)

液体燃料の燃焼実験による燃焼技術高度化支援を目的とするPF(イメージ)

6. 軌道上実験の流れと注意点

宇宙実験の計画/準備/運用までの流れ

1) 実験の募集

全国の大学・研究機関・企業から、宇宙実験提案を期間を限定して募集。

2) 実験の選定

実験の内容、期待される成果などを踏まえてJAXAが選定を行う。

3) 試料・実験条件の検討

試料や燃焼ガスの毒性などを調べて安全性を評価するとともに、実験装置との適合性を確認し、実験提案者とJAXAの協力の下、詳細な実験条件を設定。

4) 宇宙実験の準備

SCEMの地上モデルを用い、各実験における動作検証などを実施。

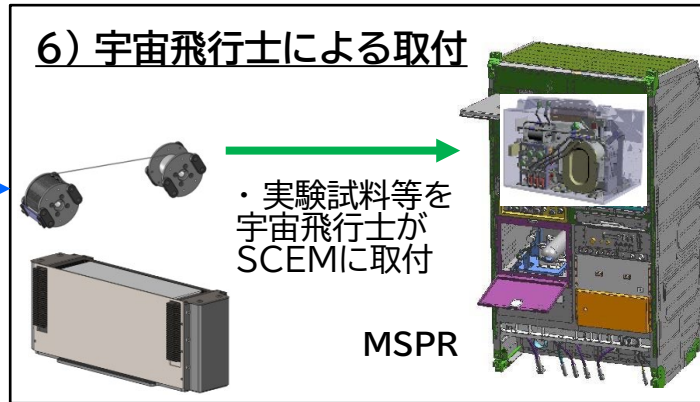
5) ISSへの打上げ

・ 梱包前までにユーザは試料製作
・ 梱包は打上の6～3カ月前が目安
・ 打上に必要な手続等はJAXA支援の下に実施



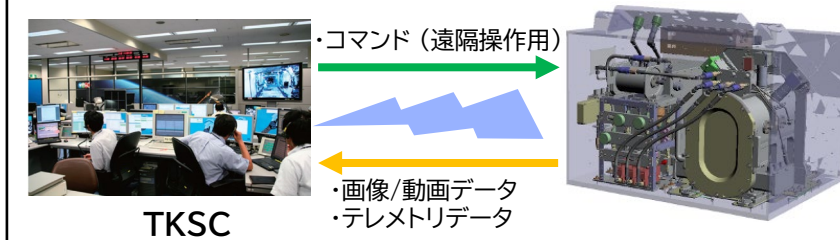
6) 宇宙飛行士による取付

・ 実験試料等を宇宙飛行士がSCEMに取付



7) 実験実施

・ 実験は筑波宇宙センター(TKSC)から遠隔操作で実施する。
・ 実験中のデータ(画像・動画、テレメトリ)は一度すべてTKSCで受信し、JAXA実験担当者から配信する。



注意点

項目	内容
毒性評価	実験試料本体、燃焼後の生成物(ガス/煤等)の化学物質はNASAによる毒性評価を要する。評価結果により、保管時の封入、燃焼後のガス/煤等の取扱いに制約が発生することがある。 ^{※1} 特に腐食性を持つ成分については注意を要し、結果により試料自体の使用が不可となることもある。 ^{※1} 例えば毒性レベル1では2重封入、毒性レベル2では3重封入が必要となる。
ガスリソース	N ₂ 以外のガスリソースについては、ユーザが用意する必要がある。 ^{※2} SCEMの実績として45%までの高濃度O ₂ とN ₂ の組み合わせは実績があるが、それ以外の組成、成分についてはSCEMおよびきぼう/MSPRに対する適合性評価が必要となる。 ^{※2} GN2はISSからMSPRを経由して供給される。

7. 「きぼう」の利用制度について

- 「きぼう」での燃焼実験については、現状、JAXAが発出する「きぼう」利用テーマ募集(①)に応募頂く必要があります。
- 燃焼研究分野の「きぼう」利用プラットフォーム(PF)化後は、PFが対象とする定型化実験サービスに合致する利用テーマについて、①とは別途、募集時期の予見性を高めたくてテーマ募集(②)を行うことを想定しています。

「きぼう」での燃焼実験を行いたい！

無償利用

(主に科学目的の実験テーマ)

① 科学研究テーマ募集

- JAXAが発出する「きぼう」利用テーマ募集に応募(募集時期は限定的)
- 科学や技術などの観点の評価(選考)を受ける
- 成果は原則公開

② 定型化実験テーマ募集(検討予定)

- 燃焼研究プラットフォームの定型化実験に合致する利用テーマの募集に応募(募集時期は限定的)
- 評価プロセスや成果の取扱い(原則公開)は、科学研究テーマ募集と同じ

③ 有償利用(未定)

実施に必要な経費をご負担頂き、JAXAが受託して実施します。成果を利用者が占有・非公開とすることができます。

※ 燃焼実験に関する有償利用について、現時点では対応しておりませんが、実験ニーズ調査の結果等も踏まえ、検討します。

本資料ならびに実験ニーズ調査に関するご質問やお問い合わせは、以下までお願い致します。

JAXAきぼう利用センター 燃焼実験ニーズ調査事務局

Kibo_combustion@jaxa.jp

(参考)SCEM本体の仕様

固体燃焼実験装置(SCEM)の主な仕様

項目	仕様	
サイズ / 容積	<ul style="list-style-type: none">・本体外寸・燃焼容器内寸・燃焼容器内容積	幅900 mm×高さ600 mm×奥行700 mm(MSPRへの搭載状態において) 幅220 mm×高さ374 mm×奥行548 mm 41.1 L (全容積)、36.4 L (被覆電線試料用実験インサート搭載時)、35.7 L (平板・棒状試料用実験インサート搭載時)
燃焼容器最大設計圧力 (MDP) ^{※1}	0.2 MPa abs	
燃焼容器対応酸素濃度	最大 45 %	
燃焼容器内温度(参考)	19 - 25℃程度(FLARE実験時の実績値)	
質量	・約160 kg	
使用できる実験試料 (材料燃焼実験)	<ul style="list-style-type: none">・平板、棒状試料・被覆電線試料	プラスチック、ゴム、紙、布、不織布などの有機材料、プラスチック系複合材料 プラスチック被覆銅線(ニクロム線)
観察装置	・次ページを参照	
計測機能(燃焼容器内)	<ul style="list-style-type: none">・圧力 2ch (0 - 200 kPa abs)・温度 3ch (-40~180 °C)・流速 1ch (0.125~2.5 m/s)・酸素濃度 1ch (0~40%)・二酸化炭素濃度 1ch (0~3%)	

※1 MDPとは、使用時に許容される最大圧力のことで、実験中(燃焼時も含む)にこの値を超過することのないようにする必要があります。

(参考)観察用カメラ

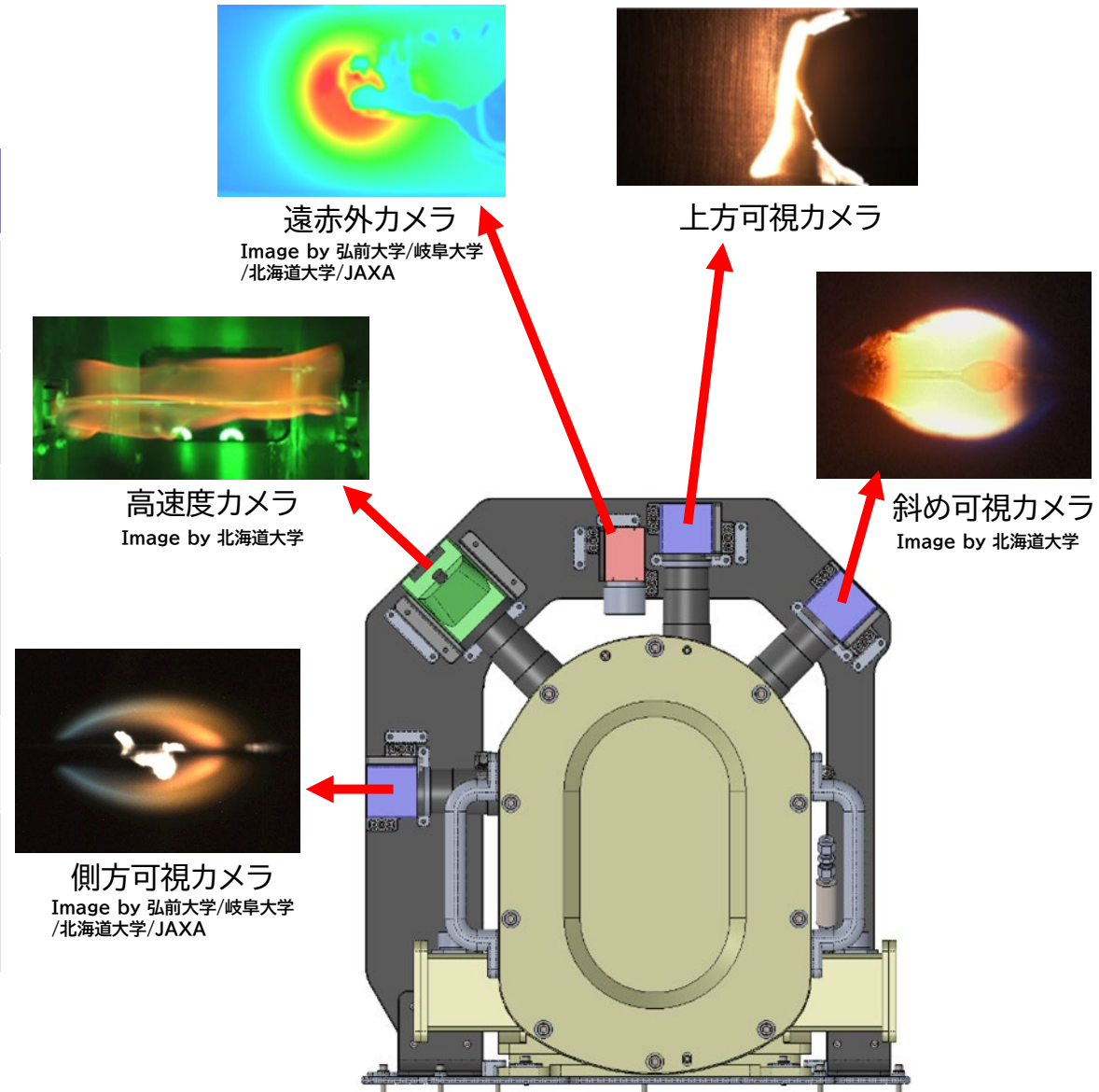
SCEMで利用できるカメラの種類と仕様※1

種類	観察波長	カラー	撮影周期 [fps]	備考
可視カメラ	可視光 (450 nm~)	フルカラー	20~30※2	解像度: 3296 x 2472 px
可視カメラ※3	可視光 (400 nm~)	フルカラー	10~23※2	解像度: 4096 x 3000 px
遠赤外カメラ	遠赤外光 (8~14 μm)	-	30	温度範囲: 20~500 °C
高速度カメラ	可視光 (400 nm~)	フルカラー	1,000(参考: 最大解像度時) 55,000(参考: 最速設定時)※2	使用実績値としては 2,000 fpsが最大
中赤外カメラ※3	中赤外光 (3~13 μm)	-	30	
近紫外カメラ※3	近紫外光~可視光 (160~900 nm)	-	1,000(参考: 最大解像度時)	イメージ・インテンシファイア及び高速度カメラと合わせて使用する想定

※1 各カメラの設置位置と使用時の組み合わせには一定の制約がある。

※2 撮影範囲との関係により上限値は変化する。

※3 今後の打上げ・搭載化を検討中のカメラ



各カメラの配置と取得画像例

(参考)被覆電線試料用実験インサート(1/2)

インサート説明：固体燃焼実験用インサートの内、電線試料用の実験インサート

試料種類：プラスチック被覆電線

使用方法：

- (1) 複数種類の電線試料の芯線を1本に接続し、試料リールに搭載された電線試料を使用する。
- (2) 試料送り機構により、電線試料の送り/巻取りは自動で行われる(下図の黄矢印)。
- (3) ファンによって試料長方向に強制流(下図の青矢印)を形成することが可能。
- (4) 着火用電熱線による被覆への外部着火(もしくは通電用電極を使用して芯線への電流印加による被覆の自着火)が可能。
- (5) カメラによる火炎位置情報に基づく試料送り速度の自動制御によって、カメラの視野範囲内に火炎を長時間定在化させることが可能。

ユーザ所掌：ユーザは被覆電線試料を準備し、JAXAが試料リールに搭載する。

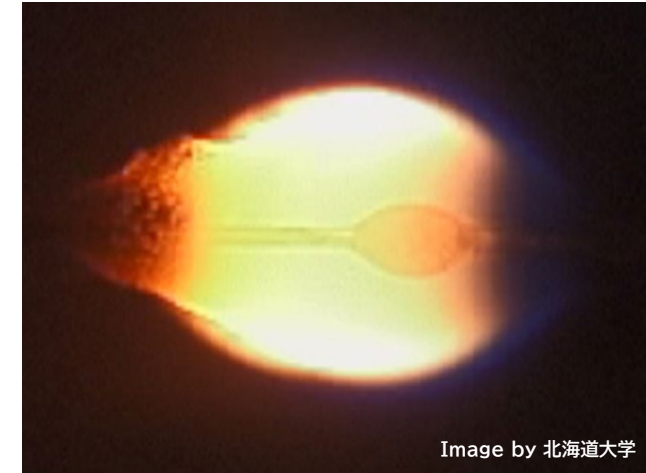
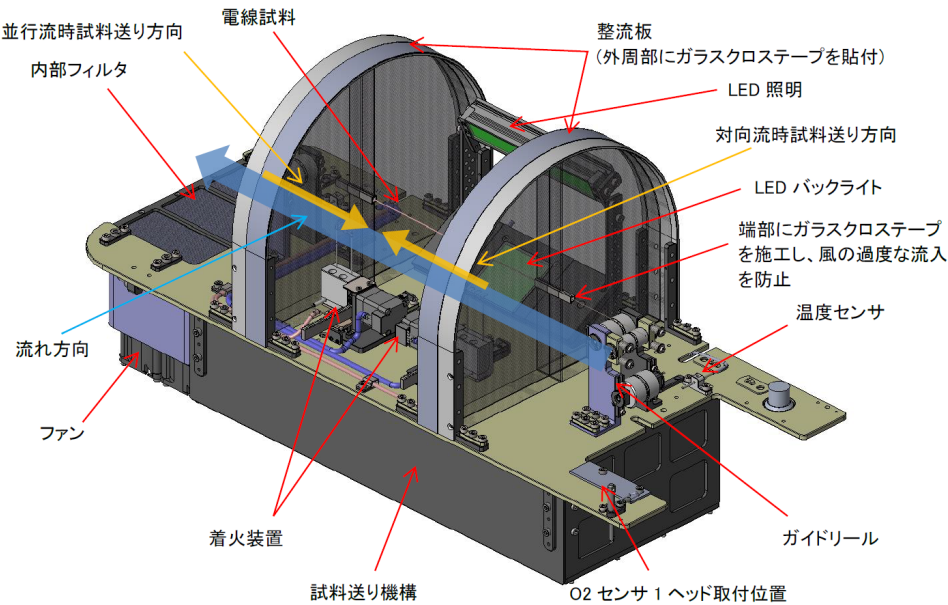
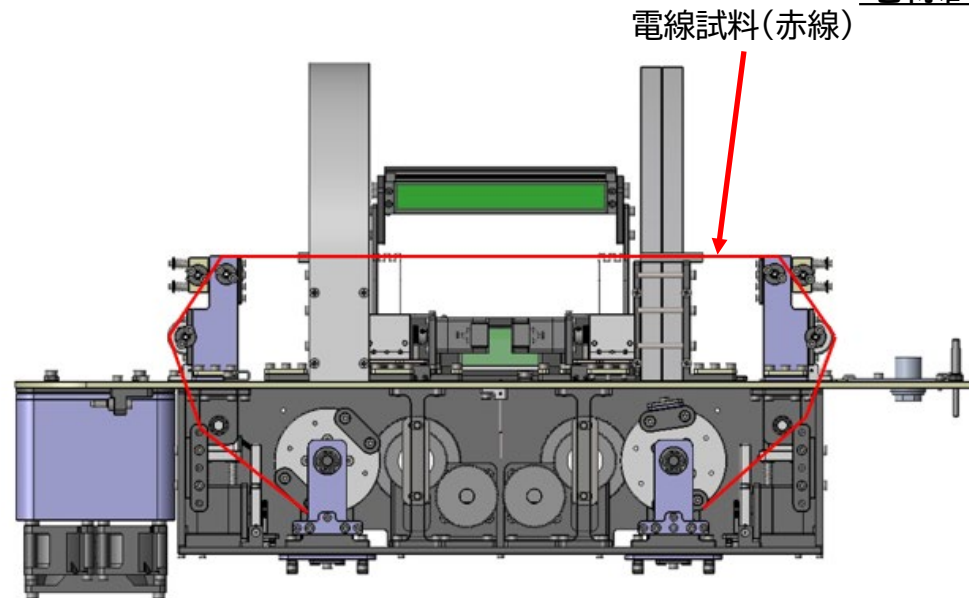


Image by 北海道大学

電線試料の燃え広がり火炎画像(例)

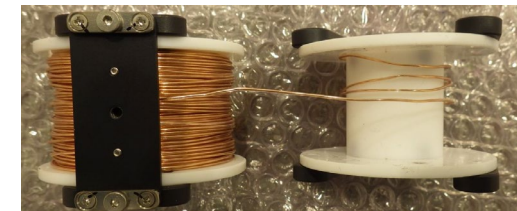


実験インサートの概要



試料送り機構

※ 電線試料の試料リールからの送り、巻取りは試料送り機構により自動で行う



試料リール

(参考)被覆電線試料用実験インサート(2/2)

実験インサート1の主な仕様

項目	仕様
サイズ	幅219 mm x 高さ 304 mm x 奥行 548 mm
質量	10.3 kg
燃焼実験部サイズ	幅220 mm×高さ 180 mm×奥行 158 mm
実験試料サイズ	直径：1.1 mm以下、長さ：最短3m、最長81 m以下
試料送り機構	<ul style="list-style-type: none">・ 保管用リールと回収用リール間で双方向の試料送りが可能・ 保管用リールと回収用リールの交換が可能・ 送り速度：0～10 mm/s・ 速度精度：±0.1 mm/s (600 s 間平均値に対して)・ 送り時の電線張力：0.5 kgf 以下
着火方法	<ul style="list-style-type: none">・ 着火用電熱線(上流側と下流側位置での着火を選択可能)・ 芯線への通電着火
通電着火仕様	<ul style="list-style-type: none">・ 通電電流：最大14.5 A・ 通電時間：0.1 s 単位で設定可能・ 被覆端部での着火防止用に消炎管設置
LED照明/バックライト	<ul style="list-style-type: none">・ 発光色：緑 (ピーク波長525 nm)・ 点灯/消灯/点滅、照度設定可能・ バックライトは高速度カメラ対向位置に設置
火炎定在化	電線試料の送り速度を制御し、火炎をカメラの視野範囲に維持することが可能
流速	<ul style="list-style-type: none">・ 設定範囲：0～24 cm/s

(参考)平板・棒状試料用実験インサート(1/2)

インサート説明：固体燃焼実験用インサートの内、平板・棒状試料用の実験インサート

試料種類：プラスチック、紙、布等の有機材料、プラスチック系複合材料

使用方法：

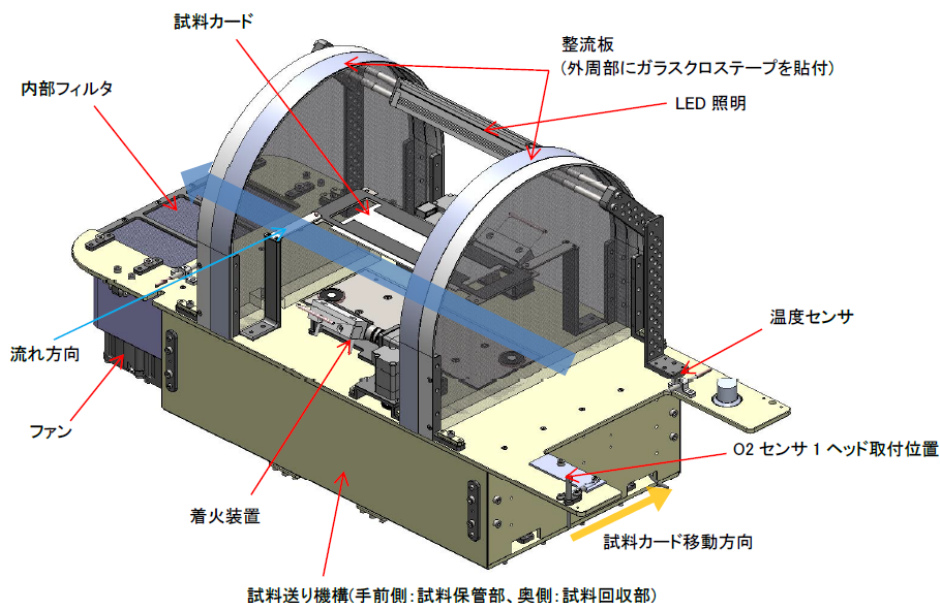
- (1) 試料は試料カードに搭載され、複数枚の試料カードが積層された状態で試料カードホルダに収納されている。
- (2) 試料送り機構によって、試料ホルダの最上部にある試料カードが燃焼実験位置に自動的にセットされる。
- (3) ファンによって試料長方向に強制流(下図の青矢印)を形成することが可能。
- (4) 着火用電熱線による試料端への着火が可能。
- (5) 燃焼実験後は、試料送り機構によって使用済み試料カードを回収ホルダへ自動的に回収する。

ユーザ所掌：ユーザは試料を準備し、JAXAが試料カードに搭載する。



平板試料の燃え広がり火炎画像(例)

Image by 弘前大学/岐阜大学/北海道大学/JAXA



実験インサートの概要



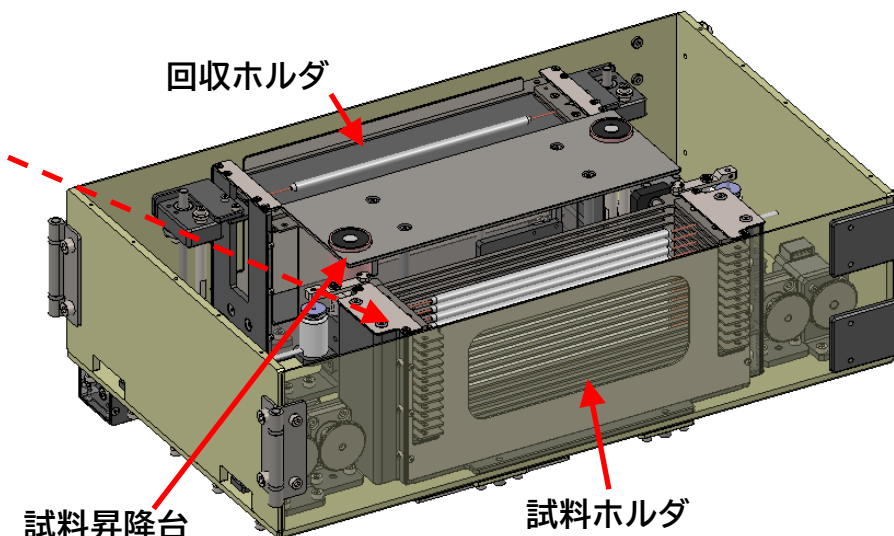
(a) 1試料/1試料カード形



(b) 2試料/1試料カード形

試料カード

※ 1枚の試料カードに2つの試料を並行して設置し、個別の燃焼実験を可能とする(b)は現在開発中。



※ 試料カードは試料ホルダ内に積層し、クルーは試料ホルダ単位で取り扱う。

(参考)平板・棒状試料用実験インサート(2/2)

実験インサート2の主な仕様

項目	仕様
サイズ	幅219 mm x 高さ 331 mm x 奥行 548 mm
質量	11.9 kg
燃焼実験部サイズ	幅220 mm×高さ 180 mm×奥行 18.4 mm
実験試料サイズ	幅50 mm以下×厚4 mm以下×長140 mm以下
試料カードホルダ	厚さ0.12 mm試料の場合、収容枚数は最大30枚 厚さ4 mm試料の場合、収容枚数は最大16枚 ※ 1枚の試料カードに搭載できる試料数は最大で2つ
試料送り機構	・ 保管ホルダ～燃焼実験部～回収ホルダへの試料カード移動が可能
着火方法	・ 着火用電熱線※1(平板試料用、棒状試料用) ※1 1枚の試料カードに並行設置される2つの試料への個別着火用電熱線は、現在開発中
LED照明	・ 発光色: 緑 (ピーク波長525 nm) ・ 点灯/消灯/点滅、照度設定可能
流速	・ 設定範囲: 0～25 cm/s

(参考)液滴燃焼実験用実験インサート(検討中)

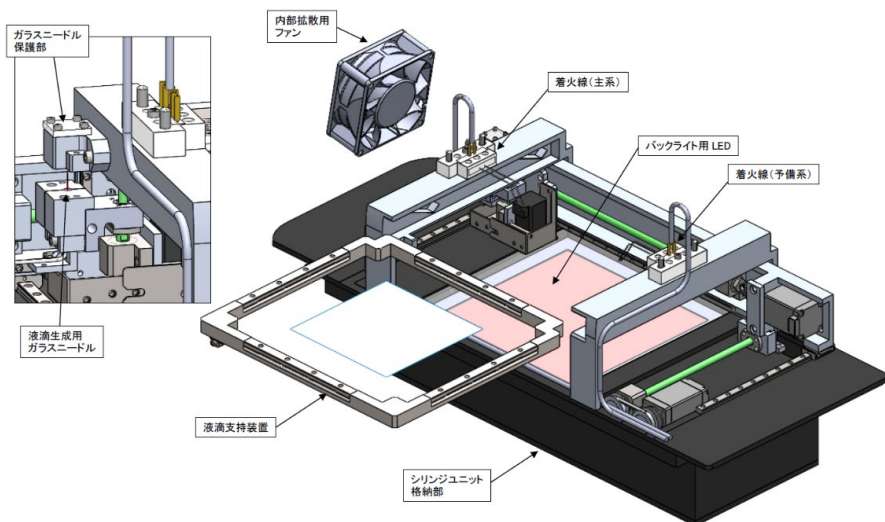
インサート説明：液滴燃焼実験用の実験インサート

試料種類：正デカン等、常温で液体の燃料

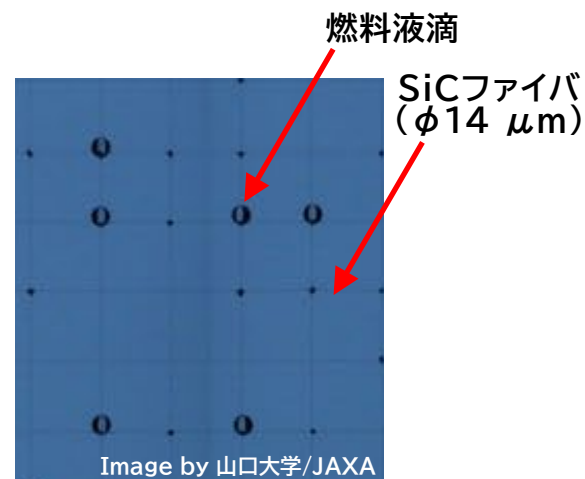
使用方法：

- (1) 液体燃料は脱気したうえでシリンジユニットに充填されている。貯蔵可能量は最大9 ml程度(安全性の制約により燃料種類により異なる)。
- (2) シリンジユニットとガラス管ニードルはチューブで繋がれており、シリンジ後部のプランジャをモータ駆動で押すことにより、ニードル先端から燃料を吐出し、液滴支持装置のSiCファイバ上に必要径の液滴を生成する。
- (3) ガラス管ニードルは3軸トラバース機構によって移動し、SiCファイバ上の任意の位置に液滴を生成可能。
- (4) 着火用電熱線の近傍に生成した液滴に着火させることで、複数液滴間の燃え拡がり挙動を観察する。
- (5) シリンジユニット、燃料供給チューブ等は交換できるため、異なる燃料を使用する実験も繰り返し行うことが可能。

ユーザ所掌：ユーザは液体燃料を準備し、JAXAがシリンジユニットに充填する。

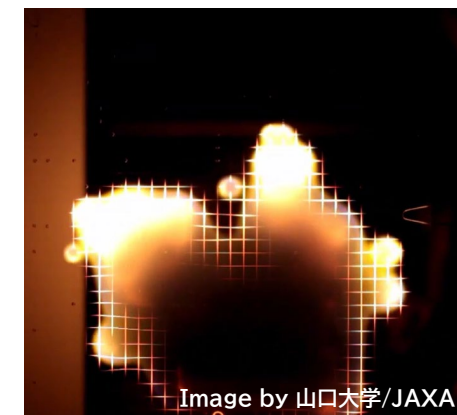


実験インサートの構成(案)



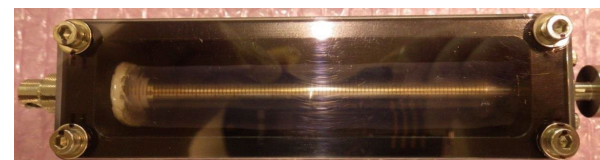
液滴生成画像(例)

※ LEDを背景としたバックライト画像により、生成された液滴径や、蒸発・燃焼中の液滴径の変化を高精度に計測することができます。



多数液滴間の火炎燃え拡がり画像(例)

ガラス管ニードル (先端径:φ70 μm程度)



シリンジユニット外観



ガラス管ニードル先端からの燃料吐出画像(例)

(参考)「きぼう」で実施済・今後予定されている燃焼実験

実験テーマ略称	実験テーマ名	研究代表者/所属	使用する実験装置	実施状況
Group Combustion	ランダム分散液滴群の燃え広がりや群燃焼発現メカニズムの解明	三上 真人 教授/ 山口大学	燃焼実験チャンバー(CCE)・液滴群燃焼実験供試体(GCEM)	完了済
L3-Flame	燃焼の限界に関する統一理論構築のための極低流速・低レイス数対向流火炎実験	丸田 薫 教授/ 東北大学	燃焼実験チャンバー(CCE)・極低速対向流火炎実験装置(L3-PO)	フライト実験準備中
FLARE	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	藤田 修 教授/ 北海道大学	固体燃焼実験装置(SCEM)	実施中
Group Combustion-2	ランダム分散液滴群の燃え広がりや群燃焼発現メカニズムの解明-2	三上 真人 教授/ 山口大学	固体燃焼実験装置(SCEM) (新規実験インサートの開発・利用を検討中)	フィージビリティスタディ実施中
FLARE-2	宇宙居住環境における固体材料の可燃性評価	高橋 周平 教授/ 岐阜大学	固体燃焼実験装置(SCEM)	フライト実験準備中
FLARE-3	様々な重力レベルの空間における固体材料の火災安全性評価手法の確立	橋本 望 教授/ 北海道大学	固体燃焼実験装置(SCEM) (新規実験インサートの開発・利用を検討中)	フィージビリティスタディ実施中
未定	微小重量場を用いた自発点火限界近傍における液滴列冷炎燃焼実験によるSAFの爆発ダイナミクス解明	田辺 光昭 教授/ 日本大学	固体燃焼実験装置(SCEM) (詳細は未定)	研究プロジェクト開始準備中

※ 各実験の詳細については、以下を参照ください。

https://humans-in-space.jaxa.jp/kibouser/subject/tag_04.html