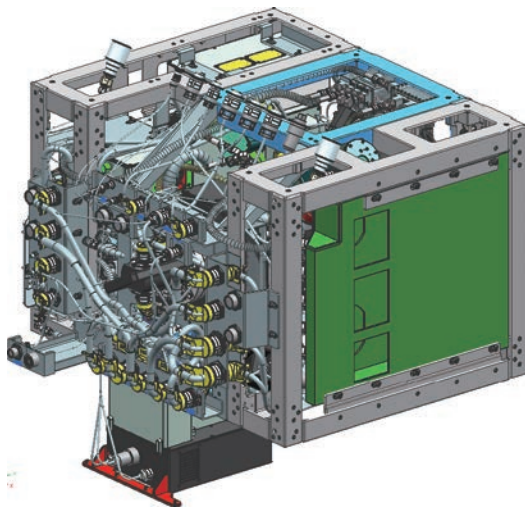


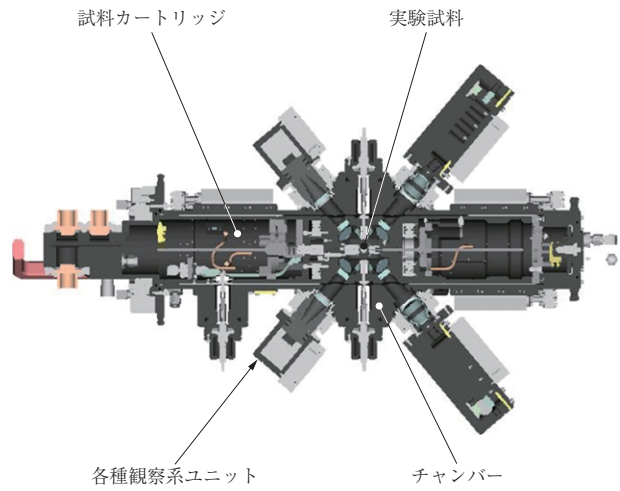
# 浮かせて溶かす！

## 非接触での溶融によってきれいな材料を作り、 地上では不可能な高融点材料のデータを得る 「きぼう」日本実験棟搭載用静電浮遊炉

地上では測定できなかった高融点の酸化物などの熱物性値取得や新材料開発への貢献、新規高機能物質の探索に活躍が期待される静電浮遊炉。2011年に開発に着手し、2015年8月、国際宇宙ステーションに搭載された。



「きぼう」日本実験棟搭載用静電浮遊炉  
590 × 887 × 787 mm (本体)  
+ 226 × 259 × 347 mm (UV ランプ部)



静電浮遊炉断面図

### 「きぼう」日本実験棟搭載用静電浮遊炉の特徴

静電浮遊炉 (Electrostatic Levitation Furnace : ELF) は、静電気力を利用し試料を浮かせた状態で溶かし固めることで、不純物の入らないきれいな材料を作ることが可能な材料実験装置である。

国際宇宙ステーション (ISS) には、3種類の浮遊炉、すなわち 2009年にアメリカ航空宇宙局 (NASA) が開発した音波浮遊炉 (Space-DRUMS)、2014年に欧州宇宙機関 (ESA) が開発した電磁浮遊炉 (EML)、そして「きぼう」日本実験棟に国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構 (JAXA) と株式会社 IHI エアロスペース (IA) が開発した静電浮遊炉 (2015年8月打ち上げ) が搭載されている。

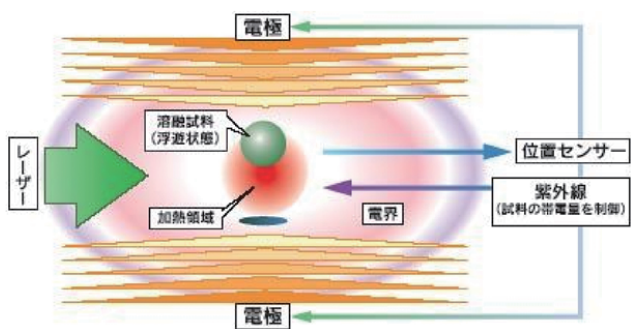
音波浮遊炉は低融点試料、電磁浮遊炉は導電性試料

の溶融に限られるが、静電浮遊炉はレーザー加熱により昇温し、静電気力により位置制御するもので、非導電性試料および高融点の試料も含め、全ての試料を溶融させることができる。

「きぼう」日本実験棟搭載用静電浮遊炉は、これまで地上実験で得ることができなかった高融点 (2000℃超) の酸化物などの熱物性値 (密度・表面張力・粘性など) を得ることが可能となった。

### 浮かせて溶かす技術

静電浮遊炉はほかの方式にはない試料を選ばない優位性がある反面、試料の位置制御など、ほかの方式よりも高度な技術が必要になる。地上用実験装置としては実用化に成功しているが、ISS 搭載に当たり発生する



©JAXA

静電浮遊の原理

Temperature	low (<500degC)	high (500-2000degC)	Ultra-high (>2000degC)
Material			
Conductive Materials (Metals, Alloys)	Space-DRUMS (NASA)	EML (ESA)	
Non-Conductive Materials (Oxides)			ELF (JAXA)

©JAXA

「きぼう」日本実験棟搭載用静電浮遊炉

「きぼう」日本実験棟搭載用静電浮遊炉の対応範囲

装置の大きさや電力の制限、有人に伴う安全設計などの制約から、さまざまな課題を克服する必要があった。

### 【試料の位置制御技術】

ほかの方式は、その原理から試料の位置制御が容易（試料の位置制御にフィードバック制御が不要）であるが、静電浮遊炉では高度な位置制御技術が必要となる。この制御を実現するには、試料の位置を検出する装置と、試料の位置を制御する電界を発生させる高電圧発生装置、高速フィードバック演算を実施するコントローラなどの開発が必要になる。

#### (1) 試料の位置検出

試料の位置を検出するには、対象とする高融点試料（例えば融点 3 200℃のホウ化ジルコニウム）が低温では発光しないことから、レーザー光による



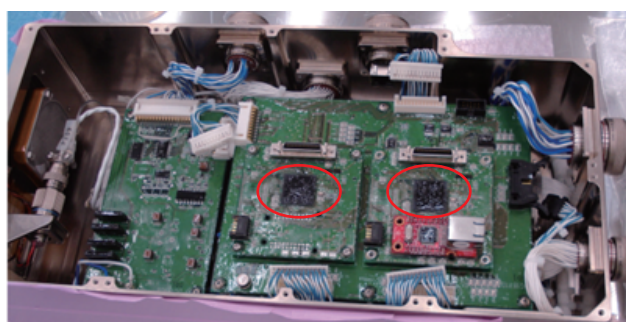
位置認識系の調査

バックライトで試料の影絵を作り出し、高速な検出器に映し込む必要がある。

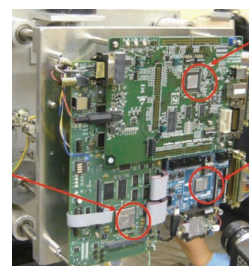
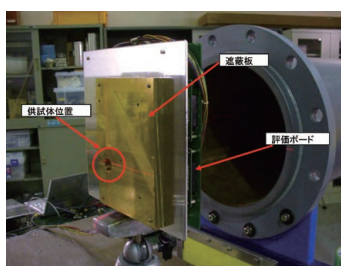
地上で使用しているヘリウム-ネオンレーザーは光学的に優れた特性を有するが、サイズが大きいため ISS 搭載に当たり半導体レーザーを採用した。また、光学系は地上技術を踏襲し、偏光フィルターによる光量調整機能を設けたものの、地上でしか調整できないようにしたため、周囲温度の変動により位置認識が困難になる問題が発生した。原因はレーザー光量の温度依存性に加え、熱応力による偏光フィルターのゆがみであることが分かり、光学系の固定方法変更などの対策のほか、地上からコマンドにより偏光フィルターをモーターで調整できる機能を追加した。

#### (2) 試料の位置制御コントローラ

小型化を図るため、ワンチップマイコン（一つの集積回路チップ上に CPU と RAM, ROM, 各種入出力装置などを搭載した処理装置）によるコントローラを設計し、地上および航空機実験での浮遊実証などによる開発を進めていった。ところが、放射線試験を実施したところ、搭載したワンチップマイコンが放射線に対して耐性が低いことが判明した。近年のワンチップマイコンは集積度が高く、電源電圧が低電圧化されているため、シングルイベントという放射線内の高エネルギー粒子の衝突により



位置制御コントローラ内のワンチップマイコン



放射線試験





加熱中のジルコニウム試料

発生する異常に弱いことが原因であった。ワンチップマイコンのなかにはシングルイベント耐性が高いものがあることが分かり、変更することで課題を克服することができた。

### 【試料の帯電量変化への対応】

静電浮遊炉は、試料を帯電させてから電圧を掛けることで発生する静電気力を利用している。スタート時は試料を電極に接触させることで帯電させ、高温時には熱電子による帯電を利用する。試料の温度上昇に伴い、試料表面の水蒸気や異物と一緒に帯電も減少するため、通常は紫外線（UV 光）を試料に照射させて光電効果で帯電を補給する。しかし、ISS に搭載できる UV 光源は小型のものに限られ、十分な帯電補給が行えない。

そこで試料を高温で焼く機能を設け、試料を把持した状態で加熱し、試料表面の水蒸気や異物を除去することで対応を図った。試料を加熱することで、地上試験で高融点試料（ジルコニウム、融点 1850°C）の浮遊熔融に成功し、加熱機能の有効性を実証することができた。

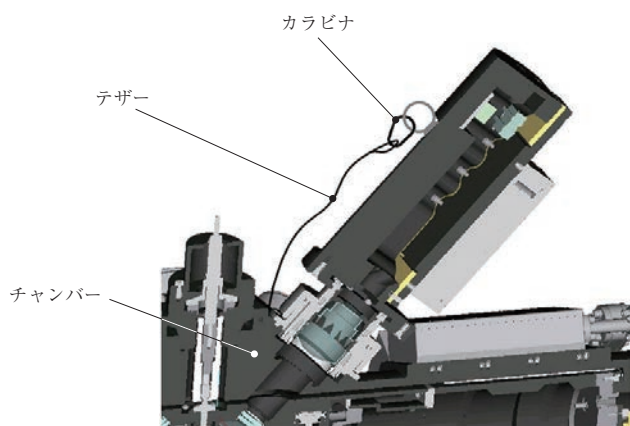
### 【有人に伴う安全設計】

ISS では宇宙飛行士（クルー）の安全を確保するには、厳しい安全審査をクリアする必要がある。例えば、原子力関係は五重の安全設計が求められるが、五つの安全装置は必ずしも独立していない。ISS の場合は、三重の安全設計と、三つの安全装置の厳格な独立性が求められるため、原子力関係と比較しても大変厳しい要求である。加えて、クルーの操作ミスも考慮する必要があることから安全設計は困難を極めたが、基本設計、詳細設計、検証結果の各段階の安全審査をクリアすることができた。

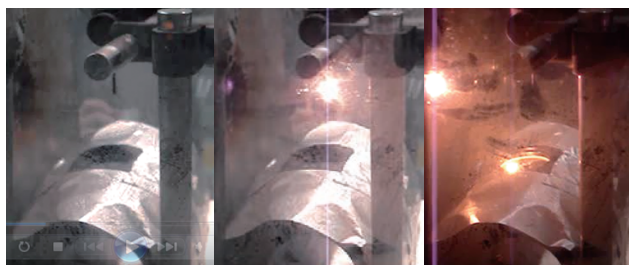
静電浮遊炉は、試料を加熱・熔融させる強力なレーザーを用いる。レーザー光はチャンバー内部のみに照射される設計であるが、故障した際には光源を交換する必要がある。交換中も含め、万が一にもクルーにレーザー光が照射されないようにすることはもちろん、溶けた高温試料が窓ガラスに衝突して割れたガラス片が外部に放出さ

	CCD カメラ, 放射温度計視野用	CMOS カメラ, 表面観察用	CCD カメラ, 外郭計測用
加熱前			
加熱開始			
熔融			
加熱終了			
凝固の瞬間/ 凝固時の潜熱 により発光			
凝固後			

浮遊→熔融→凝固するジルコニウム試料



チャンバー周囲機器の外れ防止用に追加したテザー



溶けた試料による窓ガラス割れ確認試験

れないようにするなど、いろいろなケースを想定した安全装置を用意し、安全設計を確立していった。

安全設計で特に苦労したのは、コンデンサーの毒性対策であった。静電気力を発生させる高速高電圧アンブは大きな電磁ノイズを発生してしまうため、高性能な電源フィルターが必須であるが、フィルターを小型化するには、どうしても湿式コンデンサーが必要になる。ところが、湿式コンデンサー内部の溶液が NASA に毒物と識別されてしまったため、万が一の

故障時でもクルーに悪影響がでないようにしなければならなかった。

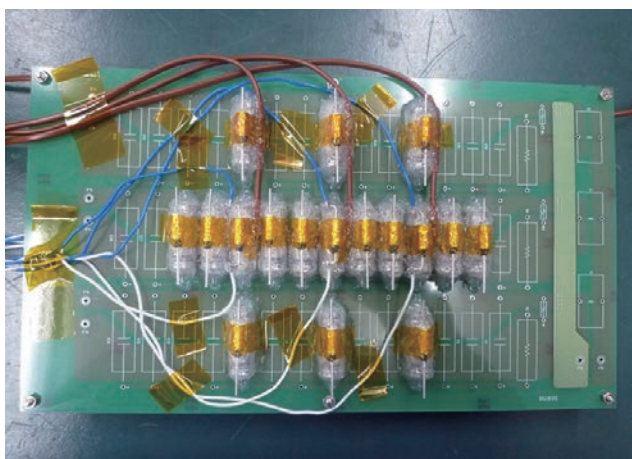
対策として、全てのコンデンサーに温度ヒューズを追加し、万が一コンデンサーが故障した場合でも、破裂する前に電源を OFF することができるようにした。しかしながら、湿式コンデンサーは 100 個近くあり、全てのコンデンサーに設置した温度ヒューズが、コンデンサーの破裂前に作動することを立証するために、確認試験を何度も実施する必要があった。

## 今後への期待

「きぼう」日本実験棟搭載用静電浮遊炉は、2015 年 8 月に ISS へ打ち上げられた。軌道上での実験装置の点検作業を経て、5 年間の運用に供する計画である。

静電浮遊炉を使用した実験で得られた熱物性値は、凝固や流動特性の現象を解析するうえで必要だ。シミュレーションに適切な熱物性値の取り込みが可能になることから、材料製造条件の設定精度を上げることができ、試作試験の削減、ひいては材料分野開発の加速が期待される。工業的に期待される分野としては、発電システム・航空機・自動車などのタービンブレード用超耐熱コーティング材料、光学材料、光通信材料、高速切削工具などの高硬度材料、青色レーザー素子などの電子材料が挙げられる。

静電浮遊炉による宇宙実験は、産業界の発展に大いに貢献した、と言われる日が来ることを期待する。



温度ヒューズの検証試験

## 問い合わせ先

株式会社 IHI エアロスペース  
宇宙技術部 宇宙利用技術室  
電話 (0274) 62-7676

<https://www.ihi.co.jp/ia/>