悪とはならないという前提条件の下で、温度制御能力を規定し、使用する熱電素子(サーモジュール)の仕様を決定した。実運用では、減湿材の性能が充てん後打上げまでの期間に水分を吸収し、低下するという問題が発生はしたが、エアーループ系の変更を行い、状況は改善された。それ以外は本装置は軌道上で順調に作動し、各種実験が予定通り実施された。

3. 実験装置の運用

打上げまでの装置の運用を大きく分けると、KSC(ケネディースペースセンタ)でのハードウェアの射場インテグレーションおよび生物試料準備と、MSFC(マーシャルスペースフライトセンタ)における搭乗員訓練およびPOCC(ペイロード管制センタ)運用に大別できる。この中で生物試料準備はライフ系特有の作業である。ハードウェアと異なり、生物試料は影響するパラメータが大変多く、また繊細なものが多い。そのため打上げまでの期間に2回のシミュレーションを

行い、問題点の洗い出しを行った。それらを打上げまでの限られた時間内でいかに解決するかという点が運用上では主要課題となった。また実運用では、軌道上実験と地上対照実験を的確にコントロールするためのKSC/MSFC間での情報連絡および連携プレイがキーポイントとなった。生物試料は、原則として打上げ間際に、シャトルに搭載され、打上げ時間が延期されれば、対応して生物試料の交換も必要となる。生物を取り扱う実験では、このような地上での特有な準備作業が運用では大きなウェイトを占めるのであり、この点を当初から念頭においておく必要がある。

なお、FMPTでは、打上げ前準備から始まり、打上げ、軌道上実験、帰還共に非常に順調に作業が進み、全12テーマの実験を終了、成果を得ることができた。また本稿で解説した主要な装置は、改良が加えられて、1994年7月打上げ予定であるIML-2(第2回国際微小重力実験室)ミッションにも搭載されることとなっている。

—特 集—

宇宙実験用実験装置の開発^{*1}

(材 料 系)

山 脇 敏 彦^{*2}・久 志 本 仁^{*3}

Key Words: Space Engineering, Production Engineering, Design, Testing

著 者 紹 介

山脇 敏彦

昭和30年生。東京都出身。昭和54年東京大学工学部精密機械工学科卒業。同年宇宙開発事業団入社。現在、宇宙環境利用システム本部宇宙実験グループ副主任開発部員。

JEM搭載用共通実験装置の開発に従事。日本ロボット学会会員。

久志本 仁

昭和23年生。東京都出身。昭和47年横浜国立大学造船工学科卒業。同年石川島播磨重工業(株)に入社。現在、航空宇宙事業本部宇宙開発事業部宇宙利用開発部課長。JEM利用運用システムの開発に従事。

用運用システムの開発に従事。

1. 実験装置概要

第一次材料実験(FMPT)の材料実験系(MEL)の実験装置は5台の汎用炉と6台の特殊実験装置からなり、22テーマの実験を7日間のフライトで行うように計画された。汎用炉は複数のテーマに対応でき、(1)1600°Cの高温まで加熱でき、溶融時に試料加圧ができる高温加圧型電気炉(LIF)、(2)一方向凝固ができる温度勾配型電気炉(GHF)、(3)試料の加熱、冷却を並行して行える連続加熱型電気炉(CHF)、(4)無接触で試料の溶融ができるイメージ炉(IMF)、(5)無容器で試料の溶融ができる音波浮遊炉(ALF)からなる。特殊実験装置は個別テーマのために開発された実験装置で、(1)3軸音場内に液滴を浮遊させ、その挙動を観察する液滴マニピュレーション実験装置(LDF)、(2)円柱状の自由表面を形成し、温度勾配を与えてマランゴニ対流を観察するマランゴニ対流実験装置(MCU)、(3)音場あるいは温度

^{*1} 平成6年3月28日原稿受理 Development of Space Experiment Equipment (Material Experiment)

^{*2} 宇宙開発事業団 Toshihiko YAMAWAKI

^{*3} 石川島播磨重工業(株) Hitoshi KUSHIMOTO

① サンプルコンテナ(1) (SSC-1)	⑮ 有機結晶成長実験装置 (OCF)
② イメージ炉駆動制御装置 (IMF-FDC)	⑯ 高温加圧型電気炉制御装置 (LIF-CE)
③ イメージ炉制御装置 (IMF-CE)	⑰ 高温加圧型電気炉本体 (LIF-MP)
④ イメージ炉本体 (IMF-MP)	⑱ 温度勾配型電気炉制御装置 (GHF-CE)
⑤ サンプルコンテナ(2) (SSC-2)	⑲ 温度勾配型電気炉本体 (GHF-MP)
⑥ PDB-1	⑳ 音波浮遊炉制御装置 (ALF-CE)
⑦ データレコーディングビデオテープレコーダー (DRVTR)	㉑ 音波浮遊炉本体 (ALF-LVT)
⑧ 中央制御装置 (CICE)	㉒ PDB-2
⑨ 連続加熱型電気炉制御装置 (CHF-CE)	㉓ 液滴マニピュレーション実験装置 (LDF)
⑩ 連続加熱型電気炉本体 (CHF-MP)	㉔ 特殊実験制御装置 (SECE)
⑪ 真空排気装置 (VPPE)	㉕ ブランクパネル
⑫ パイロット弁ユニット (PLVU)	㉖ 流体物理実験装置 (FPF)
⑬ アクセスパネル	㉗ 球結晶成長実験装置/金属微粒子生成実験装置 (CGF/GEF)
⑭ EPSP	㉘ ガス供給装置 (CGSE)
⑮ ベント管	㉙ アクセスパネル
⑯ ベントパネル	㉚ EPSP
⑰ ブランクパネル	

第1図 FMPT 材料実験システム

勾配を持った液体内の泡の挙動を観察する泡挙動実験装置(BBU), (4) 不純物縞のないシリコン球結晶を作る球結晶成長実験装置(CGF), (5) 金属の均一な微粒子の生成とその過程を観察する金属微粒子生成実験装置(GEF), (6) 大型の有機結晶を作るのと、その結晶成長過程を観察する有機結晶成長実験装置(OCF)からなる。

実験を効率的に行うためと、搭載スペースの制約のために、汎用炉については専用の制御装置、特殊実験装置については共通の制御装置が設けられ、さらに、並行運転される実験の優先度をコントロールしたり、スペースラブとのインタフェースを単純にするために中央制御装置が設けられた。試料加熱中の雰囲気制御、試料急冷あるいは真空弁等の駆動源として不活性

ガスが使用され、高圧ガスポンペを内蔵したガス供給装置や、炉内の高真空を得るため、および真空排気時間の短縮のために真空ポンプを内蔵した真空排気装置が設けられ各実験装置を支援した。TV モニタが必要な実験のためビデオテープレコーダも搭載された。以上の装置の他に、試料カートリッジを格納するコンテナ、電力分配装置等が NASA 提供の 2 台の実験ラックに搭載され(第1図)、一つのシステムを構成する形となった。

実験のリソースとして、電力、冷却水、冷却空気がスペースラブより供給される。信号のインタフェースとしては、時刻信号をスペースラブよりもらい、各制御装置からでる実験データは中央制御装置に集められ、スペースラブ、スペースシャトルを経由して地上に送られる。

冷却水配管、ガス配管、真空配管、冷却空気ダクト、消火管、および電線ケーブル類がラックの内部を縦横に走っていて、ガス配管、真空配管はラック上部の穴、パワーケーブルはラック下部の穴を通して、材料系の 2 台のラック間を行き来している。

クルーの負担をできるだけ軽くするように実験装置の操作は、試料のセット、電力の微調整、弁類の開閉といった操作以外はほとんど自動化されている。安全上クリティカルなデータは制御装置でチェックされ、異常と判断された場合は、自動的に安全処置がとられる。

2. 実験装置の開発

昭和 54 年より実験テーマ選定と共に各実験装置の要素開発試験が始まり、開発基礎試験、エンジニアリングモデル(EM)の製作試験、フライトモデル(FM)の製作試験と続き、装置としては昭和 63 年 3 月に宇宙開発事業団に納入された。スペースラブの通常のミッションでは搭載装置を NASA に運び、NASA の手でラックに組み込まれるが、材料実験系のラックは搭載装置が多く、ぎっしり詰まっていて、特に配管、配線類が複雑なため、ラックを NASA より運び、IHI 瑞穂工場でラック組込みを行った。搭載後、宇宙飛行士、NASA 担当者立ち会いのもと、ほぼフライトのタイムラインに沿って 7 日間昼夜ぶっ通しのシステム試験を実施した。平成 2 年秋にラック全体をケネディスペースセンター(KSC)に運び、NASA 側に引き渡された。その後の打ち上げ遅延により保管期間が延びたため、保守点検作業を行い、平成 4 年 2 月より打ち上げに向けての本格的な NASA のオンライン作業が始まり、日本側はこの NASA 作業を支援した。

装置の開発に当たっては、有人飛行のため安全性が

非常に重要視され、特に、シャトルのチャレンジャー事故以後は安全性要求が厳しくなり、設計変更が相次いだ。実験試料もクルーへの影響を考慮して何重にもシールされ、実験装置の割りには小さな試料となってしまった。冗長で取り付けていた各種センサー類も二重、三重の安全策に使用されたため、一つのセンサーが故障しても実験が出来なくなるという厳しいケースも想定され、部品の高信頼性が要求された。構造的には打ち上げの環境に耐えることと、小型軽量化が要求され、コンパクトで丈夫な装置となった。しかしながら、ラックの総重量は過去最大となり、ラックそのものの補強も追加された。NASA によるリソースの配分制限により制御装置の冷却は冷却水で行うことになり、コールドプレートを設定したため重量増加の大きな要因となった。使用材料はボルト 1 本に至るまで全てリストアップされ NASA の認定材料であるかどうかチェックされ、認定材料でないものに対しては、使用しても問題ないという論理的根拠が必要とされた。

実験のパラメータは EM および FM を使用した地上試験で決定され、信頼性を高めるため PROM に書き込まれた。これらのパラメータはあらかじめプログラム上で設定された微調整を除いて、フライト実験中は変更することは出来ない。電気炉では地上試験でパラメータの正当性が確認されたが、イメージ炉、音波浮遊炉、流体物理実験等の微少重力環境特有の現象に基づく実験では十分確認することは困難であった。

実験装置のラックへの搭載作業を国内で実施したため、NASA 側ではラックの取扱いに非常に神経を使った。輸送を含めたラックの取扱い要領については、要求を出して日本側の対策を審査し、品質管理体制については、工場にも赴き、品質監査(QA)を実施し、さらに、ラック搭載作業で使用するボルトの国内メーカーまで行き、品質管理方法に改善点を要求していった。

ラックに搭載した実験装置を KSC に運んだ後も、打ち上げが 1 年延び、当初計画より全体で約 4 年半も延びた。このため、KSC での NASA オンライン作業においても、O リング固着などによる駆動部の不具合等が続出したが、幸いにも、これらの不具合は打ち上げまでに、対策が採られた。また、打ち上げ間近になり、ブレーカスイッチが入らないという不具合も発生したが、これも NASA 側との必死の協力により、ぎりぎりに対応策がみつかり、万全の状態で打ち上げに臨むことができた。

FMPT の開発は装置の製作だけでなく、搭乗員の訓練、フライト時の実験運用管制とその訓練も実施された。

3. 実験装置稼働結果

フライトでは水漏れが生じたが無事修復され、予定されたすべての実験を実施することができた。実験運用管制所(POCC)で得られたダウンリンクデータは日本に持ち帰られ、再生された。リアルタイムのデータとロスタイムのデータがつぎはぎされて装置の稼働状況が詳細にチェックされた。

材料実験系の実験の半分を占める LIF, GHF, CHF の電気炉の実験は計画通りの温度プロファイルに制御でき、温度制御誤差、温度変動度等も計画値以内で非常に良好であった。LIF では試料熔融時にガス圧による試料加圧が実施され、試料加圧効果が確認できた。GHF では試料の温度勾配は直接計測できないがヒータ温度制御が計画通りに実施されたので地上の試験結果より所定の温度勾配が得られたものと考えられる。また、超音波による試料攪拌も正常に実施された。CHF においては、2 個ずつの試料を同時に加熱、冷却を行う試料同時処理機能は正常に動作し、炉の移動・回転もスムーズに行われた。合計 30 本の試料が処理され、限られた時間内で多量の試料を処理するという本電気炉の有効性が証明された。

IMF の実験では安定した熔融帯が形成され、結晶成長が実施された。試料回転機能は正常に機能し、ハロゲンランプ電力、ガス流量、炉内圧力等も正常に制御された。炉移動機能に関しても軌道上で適切な処置を施すことにより予定された全ての実験を実施することができた。加熱状況もビデオカメラによりモニターすることができた。

ALF の実験では周波数制御による定在波形成機能は正常に働いた。加熱中は浮遊試料の振動による定在波の乱れが地上で予測していたより大きかったため途中で試料が白金ケージに接触してしまったが、地上実験よりも透明度の高い試料が得られた。

特殊実験装置の多くは地上では十分な機能確認が原理的に困難であり、実験パラメータを精度よく確定できないため将来に課題の残った実験もあったが、装置としてはほぼ計画通りに作動した。LDF では音場内の液滴形成および切り離しが行われ、暫く液滴の挙

動が観察されたが、その後、液滴がスピーカに付着してしまった。以後の実験では液滴が付着したスピーカの音圧が低下し音場が乱れたため液滴を注入針に付けたまま実験を続行した。MCU では安定した自由表面が形成され、試料の温度勾配も形成された。試料の溶解、凝固も観察された。BBU では超音波セルで微細気泡の生成に苦勞をしたが、温度勾配セルでは所定の温度勾配が形成され、気泡の挙動が観察された。CGF では温度制御はあらかじめ設定されたプロファイルに沿って正常に実施され、温度変動度、赤外線センサーによる試料熔融確認等も計画通りであった。GEF では 4 個の実験球が処理され、試料である銀の蒸発現象が観察された。OCF の小型セルでは隔壁の栓が開かれ、スチールカメラによる撮影が行われたが、結晶成長は観察できなかった。また、大型セルでも隔壁の栓の開操作が不完全であったため試料の拡散が起こらなかった。

以上のごとく、装置の機能は 100% 発揮されなかったものもあるが、おおむね計画通りに稼働することができた。地上で実験パラメータを精度よく確定できない実験はフライトで調整できるようにするとか、落下塔や航空機実験等の微小重力での実験データの蓄積により解析精度を上げるとか、あるいは機能をより確実に発揮できるような機構にするとかが今後の課題であろう。

4. お わ り に

従来、スペースラブの実験では自動化された装置の成功率は 50~60% 程度といわれている。しかも、材料実験系の装置は従来になく複雑で、1 つのシステムを形成していることから、今回の宇宙実験の成功は装置の開発、搭乗員訓練、POCC 要員訓練等における周到な準備によるものであるとともに、水漏れの修復にもあるように、幸運にも恵まれたものと言える。

同じ型の高温加圧型電気炉は、この夏に打ち上げられた IML-2 に搭載され、さらに、FMPT の経験は現在計画されている宇宙ステーション計画に引き継がれている。