

# 宇宙航空研究開発機構研究開発資料

## JAXA Research and Development Memorandum

---

### 成層圏プラットフォーム飛行船用再生型燃料電池の研究開発 — 1kW級再生型燃料電池モデルの地上評価試験 —

藤原 勉, 江口 邦久

2008年2月

宇宙航空研究開発機構  
Japan Aerospace Exploration Agency



宇宙航空研究開発機構研究開発資料

JAXA Research and Development Memorandum

成層圏プラットフォーム飛行船用再生型燃料電池の研究開発  
－ 1kW級再生型燃料電池モデルの地上評価試験－

Research and Development on Regenerative Fuel Cells  
for Stratospheric Platform Airship  
- Ground-based Testing of 1kW RFC System Models -

藤原 勉<sup>\*1</sup> 江口 邦久<sup>\*2</sup>

Tsutomu FUJIHARA<sup>\*1</sup> and Kunihisa EGUCHI<sup>\*2</sup>

- \* 1 航空プログラムグループ 無人機・未来型航空機チーム  
Unmanned and Innovative Aircraft Team, Aviation Program Group
- \* 2 (元) JAXA 航空利用技術開発センター, (現) 帝京大学工学部 機械・精密システム工学科  
(Old) Aeronautical Application Technology Center  
(Present) Department of Mechanical and Precision Systems Faculty of Science and Technology,  
Teikyo University

2008年2月

February 2008

宇宙航空研究開発機構

Japan Aerospace Exploration Agency



## 目 次

概要	1
記号・略号	1
1. はじめに	2
2. SPF飛行船用再生型燃料電池の概要	2
3. SPF飛行船用再生型燃料電池の技術課題	3
4. 研究開発の流れ	3
5. 1kW級地上電源運用評価用RFCモデルの設計・試験（平成11～14年度）	3
5.1 試験装置	4
5.2 装置系統及び各部機能	4
5.2.1 燃料電池ユニット	4
5.2.2 水電解ユニット	4
5.2.3 ガス／水貯蔵系	6
5.3 予備試験	6
5.4 統合サイクル試験と評価	7
5.4.1 湿度及びタンク内水分量	7
5.4.2 システム特性評価の課題	9
5.5 成果のまとめ	10
6. 一体型1kW級RFCモデルの試作・評価試験（平成14～15年度）	10
6.1 一体型1kW級RFCモデルの設計構想	10
6.2 システム運用シーケンス	11
6.3 水分管理系	11
6.3.1 燃料電池系統	11
6.3.2 水電解装置系統	11
6.4 温度制御系	11
6.4.1 燃料電池系統	11
6.4.2 水電解装置系統	11
6.5 運用補機電力	11
6.6 システム基本構成及び系統	11
6.7 一体型1kW級RFCモデルの運転試験	11
6.7.1 単体性能試験	11
6.7.2 10サイクル連続運転の試験結果	12
6.7.3 50サイクル連続運転の試験結果	12
6.8 システム一体化設計，運用方法及び制御ロジック等の問題点の抽出及び検討	12
6.9 成果のまとめ	13
7. 軽量化／耐環境化設計検討（平成16年度）	13
7.1 改良要素の評価試験結果	13
8. 搭載型1kW級RFCシステムの環境評価試験と運用評価試験（平成16～18年度）	14
8.1 搭載型1kW級RFCシステムの設計検討・製作	14
8.1.1 システム軽量化に関する検討	14
8.1.2 耐環境性に関する検討	14
8.1.3 気液分離方式の検討	14

8.1.4	水素/酸素循環方式の検討	15
8.1.5	配管繊維装方式の検討	15
8.1.6	電気・機械・熱的インターフェースの検討	15
8.2	搭載型1kW級RFCシステムの基本機能確認試験	15
8.3	低温環境評価試験	15
8.4	低温環境試験結果	16
8.5	熱モデル解析	17
8.5.1	解析の概要	17
8.5.2	解析モデル	17
8.5.3	解析結果	17
8.5.4	評価	18
8.6	傾斜揺動環境評価試験	19
8.7	揺動環境試験結果評価	21
9.	搭載型1kW級RFCシステムの運用評価試験及び設計検討（平成18年度）	21
9.1	運用評価試験	21
9.2	運用評価試験結果及び評価	22
9.2.1	水量低減試験の結果	22
9.2.2	水流量低減試験の結果	22
9.2.3	運用評価試験結果評価	23
9.3	取得データ評価	23
9.3.1	水タンク水量低減について	23
9.3.2	水流量低減について	23
9.3.3	複合運転について	23
9.3.4	限界運転について	24
9.3.5	継続運転時の検討	24
9.4	熱モデル解析	24
9.4.1	解析の目的	24
9.4.2	解析の概要	24
9.4.3	解析結果	24
9.4.4	解析による温度予測	25
9.4.5	解析結果まとめ	25
10.	RFC研究開発のまとめ	25
11.	RFCの研究開発の今後の課題	26
12.	今後の研究開発計画検討	26
13.	おわりに	27
	謝辞	30
	文献	30
付録1	燃料電池の種類	31
付録2	再生型燃料電池と二次電池の性能比較	31
付録3	RFCの基本構造と動作原理	32
付録4	成層圏プラットフォーム飛行船用1kW再生型燃料電池の研究開発経緯	33
付録5	湿度/水分量の計算	34

# 成層圏プラットフォーム飛行船用再生型燃料電池の研究開発 — 1kW級再生型燃料電池モデルの地上評価試験 — \*

藤原 勉\*<sup>1</sup>, 江口 邦久\*<sup>2</sup>

Research and Development on Regenerative Fuel Cells for Stratospheric Platform Airship  
- Ground-based Testing of 1kW RFC System Models - \*

Tsutomu FUJIHARA\*<sup>1</sup> and Kunihisa EGUCHI\*<sup>2</sup>

## Abstract

The R&D program of unmanned solar-powered stratospheric platform (SPF) airship has been conducted in Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA) since April 1998. The SPF airship has an important role on provision of a new infrastructure for telecommunication services and scientific earth observations. For the airship development, a combined power technology of solar cells (SC) and regenerative fuel cells (RFC) is viewed as one of key technical issues which will have to be solved on an R&D road to the SPF realization in future. The design targets for solar power technology demonstration have been definitely specified through ground-based research tasks after the SPF feasibility study, and a ground test model of 1 kW output RFC was evaluated to provide more detailed data in closed-flow RFC operations. Additionally, the onboard type RFC model of 1 kW was designed and fabricated for performance tests. This RFC model was tested, and the performance was evaluated to see the characteristics of the onboard type operation. Summarized herein are technical achievements from the RFC research in JAXA, and our future works are also described.

keywords: Stratospheric platform, Regenerative fuel cell, Solar power

## 概 要

太陽エネルギーで運用される無人の成層圏プラットフォーム (SPF) 飛行船の研究開発計画が1998年4月から宇宙航空研究開発機構 (JAXA) で実施されている。SPF飛行船は電気通信サービスと科学的な地球観測のための新しい基盤構築に重要な役割を持っている。太陽電池 (SC) と再生型燃料電池 (RFC) の結合電源技術は、将来のSPF実現の研究開発の途上で解決されなければならない鍵となる技術的な問題の1つと見られる。太陽エネルギーを用いたSPF電源技術実証のための目標は、SPFフィージビリティ・スタディの後に地上研究を通して求められた。そして1kW出力RFCの地上試験モデルを作り、より詳細なデータを提供するために評価された。さらに、1kW搭載型RFCモデルモデルが設計、製作され、その後評価試験が行われた。本報告は、これまでのJAXAのRFC研究と今後の研究課題についてまとめたものである。

## 記号・略語

RFC：再生型燃料電池

SPF：成層圏プラットフォーム

Vdc：直流電圧

FC：燃料電池

EC：水電解器

NL：ノルマルリッター

L：リッター

\* 平成20年1月21日受付 (received 21 January 2008)

\* 1 航空プログラムグループ 無人機・未来型航空機チーム

(Unmanned and Innovative Aircraft Team, Aviation Program Group)

\* 2 (元) JAXA航空利用技術開発センター, (現) 帝京大学理工学部 機械・精密システム工学科

((Old) Aeronautical Application Technology Center, (Present) Department of Mechanical and Precision Systems Faculty of Science and Technology, Teikyo University)

## 1. はじめに

高度約20kmの成層圏に長期滞空させて、通信・放送や地球観測・監視等に利用するための無人プラットフォーム飛行船の実現性に関して、平成10年度にフィージビリティ・スタディ<sup>1,2)</sup>が宇宙航空研究開発機構（当時の航空宇宙技術研究所）を中心として実施され、その実現のためには軽量・高性能な搭載型電源の開発が必須であることが示された。

そこでは次の3つの主要技術課題の解決が必要であるとされた。

- (1) 小型軽量のシステムであること
- (2) 成層圏環境での運用が可能であること
- (3) 3年間の連続運用が可能であること

これらの要求を満足できるもので、軽量化と実用化の面で最も優れたものとして「太陽電池＋水電解装置＋燃料電池」を組み合わせた電源システムが選定された（以後、「水電解装置＋燃料電池」を再生型燃料電池（RFC）と呼ぶ）。その中でも小型軽量タイプのRFCは、世界的に開発実績は皆無で、実現のためのハードルは極めて高いと考えられる。

本報告は、平成10年度から平成18年度にかけて実施された「成層圏プラットフォーム飛行船用再生型燃料電池の研究開発」の一環として製作された試験用RFCとその評価試験結果を中心にまとめたものである。

## 2. SPF 飛行船用再生型燃料電池の概要

成層圏プラットフォーム（SPF）飛行船に関するフィージビリティ・スタディにおいては、高度約20kmで耐風能力30m/s、定点滞空能力97%を有する高高度飛行船の概念設計検討が実施され、その機体規模は全長245m、総重量は32.4tonになると見積もられた。その重量配分を図1に示したが、電源・動力系の重量は全体の35%も占め、構造系と共に電源系の軽量化がシステム成立性の大きな鍵となることが分かる。

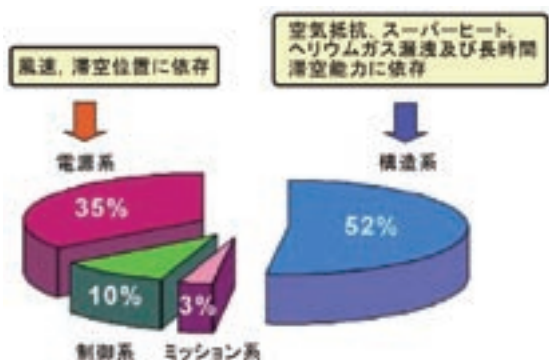


図1 SPF飛行船の重量配分（試算）

飛行船電源システムは搭載推進系統、浮力制御系統及びミッション機器に対して合計180kW（@270Vdc）の電力を3年間不休で供給することが要求され、これを実現するためには昼間の10時間は太陽電池<sup>3)</sup>、夜間の14時間は燃料電池<sup>4)</sup>による発電が基本となる。前述のように、SPF飛行船を成層圏の薄い空気（空気密度が地上の1/14）の浮力で浮かすため軽量化が必須であり、また、燃料無補給で長期運用する必要があることから、他と比べエネルギー密度（Wh/kg）が高くできるといわれるRFCと太陽電池の組み合わせが有望と考えられた。付録1に燃料電池の種類、付録2にRFCと二次電池の性能比較を示す。

RFCの動作原理は、昼間、太陽電池の発生電力を利用して燃料電池生成水を電気分解し、燃料（水素/酸素）を製造し、夜間にその貯えた燃料を使って燃料電池により発電を行うものである。即ち、エネルギーを電気の代わりに燃料形態で昼間に貯蔵し、夜間に発電を行う。付録3にRFCの基本構成と動作原理を示す。

SPF飛行船用の太陽電池と再生型燃料電池から構成される電源システムの概念を図2に示す。

- ①昼間は、太陽電池で発電した電力の一部を、飛行船の推進機や搭載機器に直接供給する。同時に、その余剰分を水電解装置に供給し、水タンクに貯蔵されていた水から水素及び酸素ガスを製造して、それぞれのタンクに貯蔵する。
  - ②夜間は、このガスを燃料電池に送って発電し、推進機や搭載機器に供給する。このときに生成した水は再びタンクに貯えられ、昼間の燃料製造に使用される。
- （①、②は図中の番号に対応）

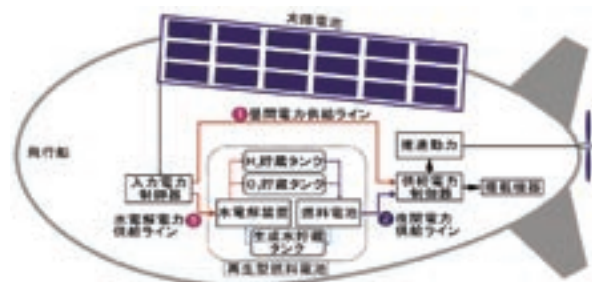


図2 SPF飛行船電源システムの構成

以上の繰り返しにより、飛行船の運用に必要な電力を昼夜連続して供給することができる。

フィージビリティ・スタディの結果等に基づき検討した成層圏飛行船用RFCの基本仕様を表1に示す。ここでは、30kW発電のユニットを組み合わせる必要の所要動力分（180kW）を搭載することを想定した。



表1 成層圏飛行船用RFCの基本仕様

出力	30kW(@100Vdc)/ユニット
エネルギー貯蔵量	420kWh(30kW×14h)/ユニット
運用シーケンス	充電 10時間 (昼間)
	発電 14時間 (夜間)
運転期間	最長3年間(実用機を想定)
運転環境	高度18~20km
	空気密度0.0889kg/m <sup>3</sup>
	気温-56.5℃, 気圧50hPa
重量	0.93トン/ユニット
エネルギー密度	450Wh/kg以上

### 3. SPF飛行船用再生型燃料電池の技術課題

SPF飛行船に搭載可能なRFC実現のための技術課題は以下ようになる。

#### (1) システム全体の軽量化の達成

通常の化学2次電池では実現困難な高エネルギー密度450Wh/kgを達成すること。

- ①構成部品及びシステムに関して、宇宙機器並みの燃料電池/水電解スタックの軽量化およびガス/水循環ポンプ、熱交換器等構成機器の軽量化、システム系統の簡素化。
- ②軽量構造・限界設計により、燃料貯蔵タンクの軽量化(薄型FWタンク採用)、コンパクト艙装・構造。
- ③高圧(運用圧力5MPa)・軽量の水電解スタックの実現。

#### (2) 成層圏環境で性能を確実に発揮できる機能系統、機器構成の構築

- ①成層圏環境運用(低温、揺動)において確実な気水分離/水分回収ができる軽量な気水分離器を実現し、燃料生成に不可欠な水分が確実(ほぼ100%)に集積・回収できる水分管理。
- ②成層圏の低温環境でRFC系統が凍結せずに最適な運転ができるための温度管理。

#### (3) サイクル運転の信頼性及び安全性の確保

- ①1,000サイクル(3年間)以上の連続運転が保証できるシステム運転の信頼性確保。
- ②システムの簡素化(ポンプ等動作機器数の低減)。
- ③飛行船における水素ガス取り扱い等に関する安全性基準の確立。
- ④太陽電池との組み合わせ機能の最適化。

### 4. 研究開発の流れ<sup>5)~18)</sup>

以上のような課題を克服するために、再生型電源系の

要素研究を実施することになった。

まずは平成11年度から平成13年度にわたってRFCの構成要素である「燃料電池」、「水電解器」、「燃料貯蔵タンク」及び「コントローラ」の順に個別に試作・整備した。

平成13年度には成層圏プラットフォーム飛行船技術実証機搭載を目的とした15kW級再生型燃料電池の概念設計を実施し、搭載に必要なエネルギー密度の実現性について検討・評価を実施した。

平成14年度には1kW級の地上電源運用評価用RFCモデルを完成し、基礎的な試験研究を開始した。また、上記の電源運用評価用RFCモデルによる試験結果をもとに、燃料電池/水電解器/その他構成部品を一体化した1kW級RFCパッケージモデルを設計・試作した。

平成15年度に、本モデルを使用して10サイクル(6時間/サイクル)の運転、50サイクル(1時間/サイクル)の運転を実施し、基本動作の運用確認、気液分離方式と保温方式の妥当性、及び繰り返しサイクル運転での電気特性の評価を行った。

これらをベースに平成16年度には軽量化/耐環境化のための要素試作を行い、低高度飛行時の運用評価が可能な搭載型1kW級RFCシステムの製作と評価試験を実施した。

平成17年度には、この搭載用試作システムによる飛行船運用時の環境を想定した揺動・傾斜姿勢での動作性能(燃料ガス製造、発電特性、水の挙動)の確認、及び低温環境での温度管理(保温、加温、排熱)の評価試験を実施した。

平成18年度には、システム軽量化とRFC温度制御性に影響する冷却水の容量、流量について評価試験を実施した。同時に、計算モデルによる熱解析や軽量化の再検討に基づき、搭載用15kW RFCユニットの概念設計の見直しを行い、エネルギー密度450Wh/kgの実現性について再評価を行った。

全体の流れを付録4に示す。

### 5. 1kW級地上電源運用評価用RFCモデルの設計・試験(平成11~14年度)

成層圏で発電を行うRFCの実用段階では、低温、低圧の成層圏環境下で長期のサイクル発電になり、このようなRFCを本格的に運用するのは当機構が国内初の試みであった。そのためRFC自体の開発はもとより、熱や気液2相流体の扱い(閉じた流体ループ系での気体と水の分離、水凍結防止等の熱流体管理)や、昼と夜の電力切換等を確実にし、成層圏環境での無人運転が可能で、かつ安全な運用に対する基準と管理技術の確立が必須となる。運用管理上の解決すべき多くの技術課題が挙げられるため、まずはRFCの構成要素である「燃

料電池」,「水電解器」,「燃料貯蔵タンク」及び「コントローラ」を平成11年度から順に試作・整備し,平成14年度に1kW級地上電源運用評価用RFCモデルを完成し,基礎的な試験研究を開始し,RFC運転手順及び運用上の問題解決に取り組んだ。

## 5.1 試験装置

試作した1kW級地上電源運用評価用RFCモデルは,図5.1.1に示すように,主に燃料電池,水電解器,水素/酸素の貯蔵タンクの3系統から構成される。



図5.1.1 1kW級地上電源運用評価用RFCモデル

この流路系には,水ポンプ,気水分離器,熱交換器等が含まれる。また,試験や特性評価に必要なモニター,計測制御のための圧力,温度,流量,電圧,電流等のセンサが必要な箇所に取り付けられる。

その設計の基本仕様は表5.1.1に示す通りで,燃料電池,水電解器は固体高分子膜(通称PEM)タイプ,燃料である水素と酸素の貯蔵にはCFRP製フィラメントワインディングタンクを使用し,貯蔵圧力は1MPa未満である。また,装置の整備と平行して実験のモニタリングやデータ処理の計算機プログラムも作製した。

本装置では,貯蔵タンク容量の制限から水電解による燃料製造3時間,燃料電池による発電2時間を最大運転時間とした。

なお,本報告で述べる各試験においては,水電解用電力は商用電力を直流変換して水電解スタックに印加し,燃料電池からの出力電力は電子負荷装置により放熱消費している。

表5.1.1 1kW級地上電源運用評価用RFCモデルの基本仕様

燃料電池出力	定格 1kW/110A
ガス供給圧力	0.2MPa
ガス消費量	GH2=12.3NL/min @1kW
	GO2= 6.2NL/min @1kW
運転温度	室温~80℃
水電解入力電力	定格 2.3kW/230A
運転圧力	~0.98MPaG
ガス生成量	GH2=8NL/min @2.3kW
	GO2=4NL/min @2.3kW
水消費量	6.25g/min
運転温度	40~70℃
ガス貯蔵タンク	容量:47L/個
	貯蔵圧力:1MPaG未満で運用 数量:水素用×4個,酸素用×2個
運用シーケンス	燃料電池モード;最大2時間
	水電解モード;最大3時間
重量	—

## 5.2 装置系統及び各部機能

装置の概略系統を図5.2に示す

### 5.2.1 燃料電池 (FC) ユニット

- (1) 水素は,水素供給圧レギュレータ,圧力コントローラ,外部加湿器を経てFCスタックへ供給される。水素の未消費分(約20%)を循環ポンプにより還流して使用する。
- (2) 酸素は,酸素供給圧レギュレータ,圧力コントローラ,サージタンクを経てスタックへ供給される。酸素の未消費分(約35%)を循環ポンプにより還流して使用する。
- (3) 発電時の生成水は,酸素ラインの気水分離器にて分離し,水貯蔵系ポンプで回収される。
- (4) 冷却水温度は,ヒータ制御及び熱交換部流量制御により,一定に保持する。冷却水の一部は,水素加湿に利用される。

### 5.2.2 水電解 (EC) ユニット

- (1) 電解水の供給は,酸素ラインの気水分離器(水循環流路)内の水位を検知し,消費による減少分の純水量をポンプにより補給する。
- (2) 水の循環は循環ポンプにより,冷媒を兼ねた電解用の水をスタックに常時供給するとともに,ヒータ電力と熱交換部通過流量の制御により,供給水温度を一定に保持する。
- (3) 生成する水素ガスは,気水分離器及び除湿器によ

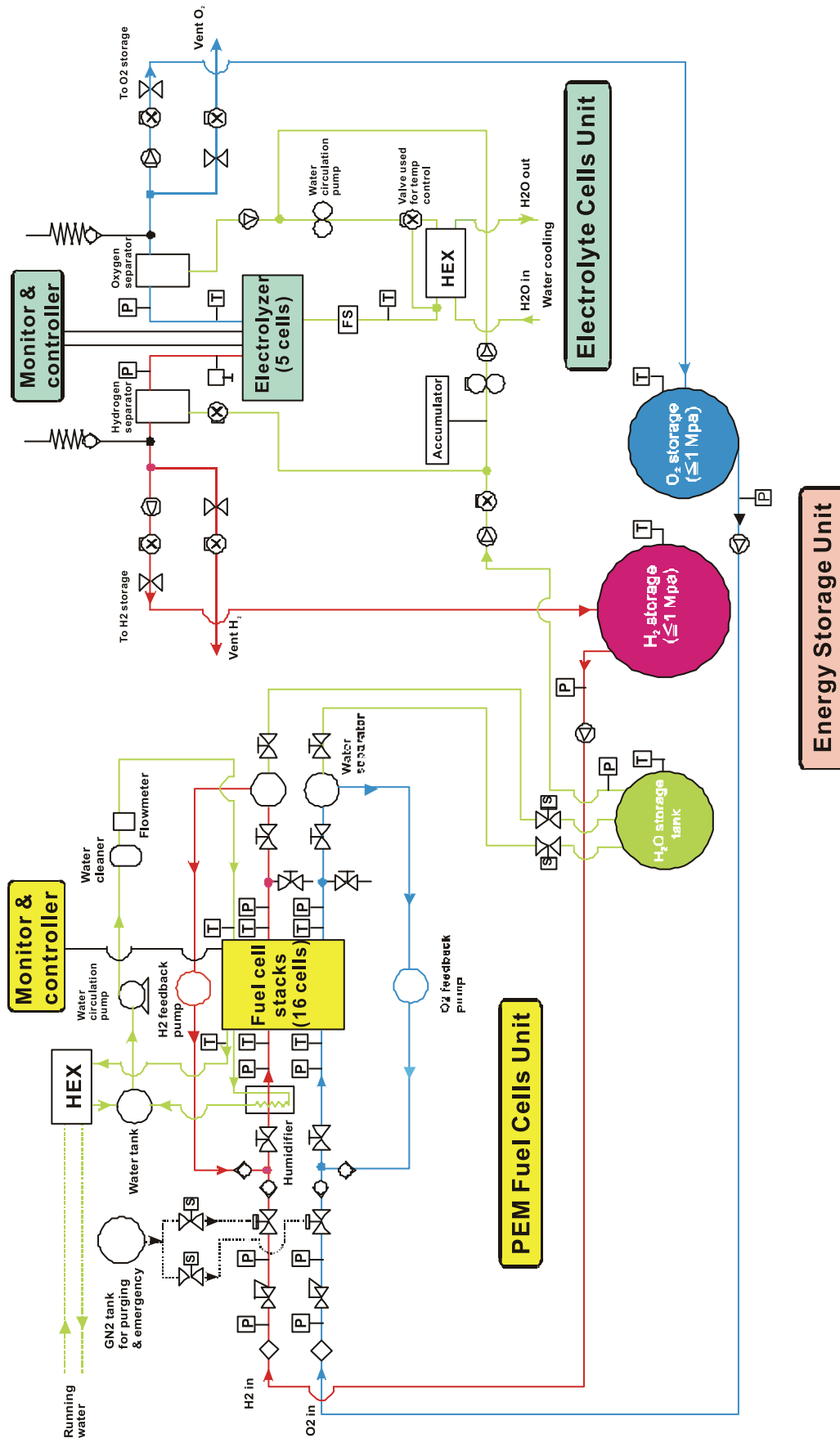


図5.2 1kW級地上電源運用評価用RFCモデルの概略系統

り、低露点（約5℃）の状態での貯蔵ガス系に送られる。水中への微量の溶存水素は2段式気水分離器により減圧脱気（大気圧）して排気する。

- (4) 生成する酸素ガスは、気水分離器及び除湿器により、低露点（約5℃）の状態での貯蔵ガス系に送られる。
- (5) 気水分離器、除湿器でトラップした水分は、ポンプあるいは差圧利用により水タンクへ回収し、蒸発分以外の水分損失を最小にする。

### 5.2.3 ガス/水貯蔵系

- (1) 水素ガス貯蔵系：貯蔵・供給ガスの共通流路部の湿度センサにより、系内水素ガス中の湿度を常時モニタする。流量計との組み合わせにより、水素貯蔵タンク内に入り出す水分（水蒸気）量の測定ができる。
- (2) 酸素ガス貯蔵系：貯蔵・供給ガスの共通流路部の湿度センサにより、系内酸素ガス中の湿度を常時モニタする。流量計との組み合わせにより、貯蔵タンク内に入り出す水分（水蒸気）量の測定ができる。
- (3) 水貯蔵系：イオン交換樹脂フィルタで燃料電池の生成水を回収時に濾過する。その生成水は水ポンプにより水タンク及び水電解装置に送られる。

### 5.3 予備試験

以下のデータ取得・評価試験を行った。

#### (1) EC基本パラメータ試験

水電解装置効率（セル電圧で評価）に与える圧力・温度の影響を調べた。圧力は0, 0.4, 0.8MPa, 温度はECスタック使用範囲で40～70℃まで行った。

#### (2) EC発生ガス湿度計測

発生ガス湿度条件として大気圧（0MPaG）時の湿度計測を実施し、計測・計算手法の確認と湿度レベル（除湿機能の効果）の把握を行った。

#### (3) FC基本パラメータ試験

燃料電池出力に与える圧力・温度の影響を調べた。なお、ガス循環と大気開放の場合の切り替えは、両側（水素側・酸素側）に対し同時に操作した。温度は40～70℃、圧力は0～0.1MPaで行った。

#### (4) 基本動作試験（FC-EC-タンク結合）

統合サイクル試験への移行前に、貯蔵タンク・流路系を含めた系統について、以下の確認試験を実施した。

#### (4) -1: FC負荷変動応答性

負荷電流の立上げ時間に対する出力電圧の応答性を確認した。その結果の一例を図5.3.1に示す。負荷電流を10Aから150A（定格出力）まで1秒で立ち上げ、FCスタック電圧の変化を調べた。図から明らかなように、急激な負荷変動時にも安定して電力を供給できることを確認した。

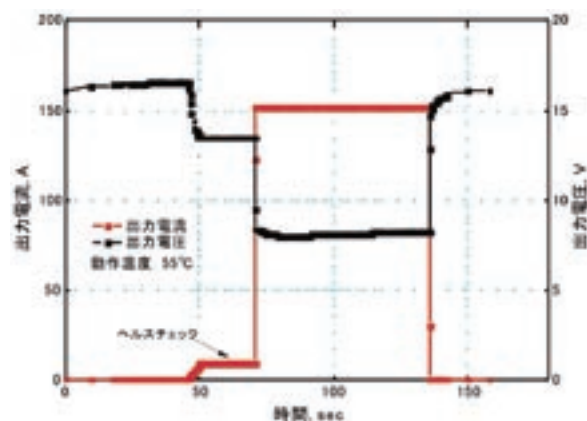


図5.3.1 FC負荷変動応答試験

#### (4) -2: EC入力電力変動応答性

入力電流の立上げ時間に対する出力電圧（スタック印加電圧）の応答性を確認した。図5.3.2は、入力電流を10Aから230A（定格入力）まで30秒で立ち上げた場合の、ECスタックの電流・電圧特性を示す。図から明らかなように、大幅な入力変動に対して、安定した動作をすることが確認できた。

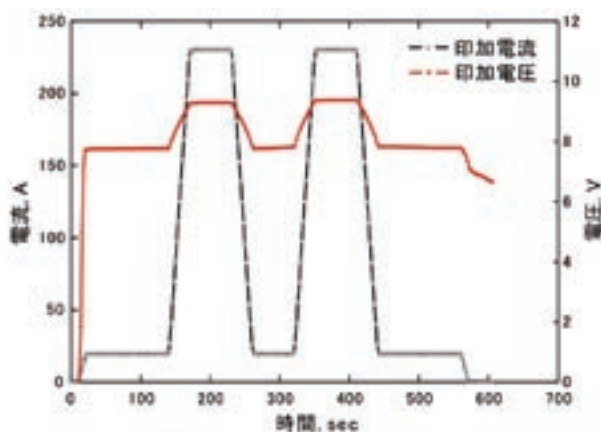


図5.3.2 EC入力変動応答試験

#### (4) -3: 予備試験（EC発生ガス貯蔵・水回収とFC生成水回収の機能確認）

統合サイクル試験前に、ECの発生ガスをタンクへ充填・貯蔵し、FCで消費する短時間（30分程度）の1サイクル予備試験を実施し、タンク圧力・温度を測定した。

図5.3.3にその予備試験 (70°C, 0.4MPa) の結果を示す。

FCの出力電力が徐々に上昇する現象は、主にFCスタックの温度変化や待機時に電極面に生成した水分の付着による有効反応面積の減少によるものと判断される。

EC入力パターン (実際のコマンドは電流) に正弦的变化を、FC負荷電力に一定値を前提とし、貯蔵と消費が同等量となるように動作時間を配分した。

統合サイクル試験での電力パターン設定には、ここで取得した圧力変化データを参考にした。

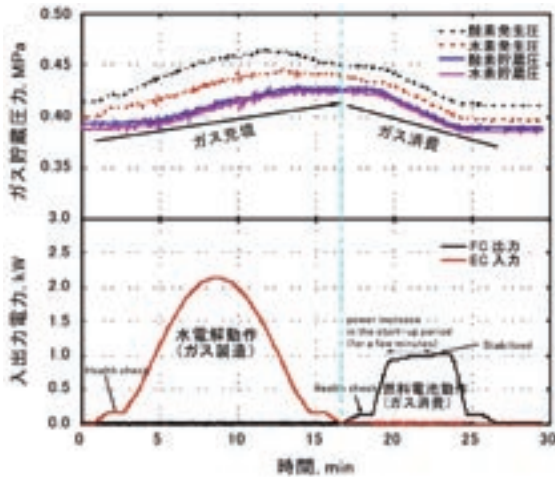


図5.3.3 ショートサイクル試験例

#### 5.4 統合サイクル試験と評価

前節の (1) ~ (4) の各試験の結果を踏まえた運転条件の調整後、繰り返しサイクルによるクローズド運転特性を取得した。図5.4にサイクル試験時の貯蔵圧力の変化を示す。

ここでは1日2サイクル程度の試験が実施可能となるようなFC / EC運転 (水電解による燃料製造3時間, 燃料電池による発電2時間) を基本の設定条件とした。貯蔵タンク圧力の変化が定常化するサイクル数 (10サイクル) を選択した。

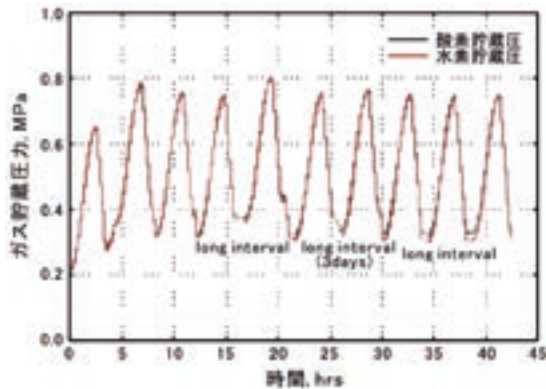


図5.4 サイクル試験時の圧力変化

試験開始から5サイクル目までのガス貯蔵圧力は安定していないが、これは、初期ガス圧力0.2MPaを0.3MPa迄上げて、残留ガス量に余裕を持たせるために何度か追加水電解工程を入れたためである。6サイクル目からは安定した貯蔵圧力となっている。

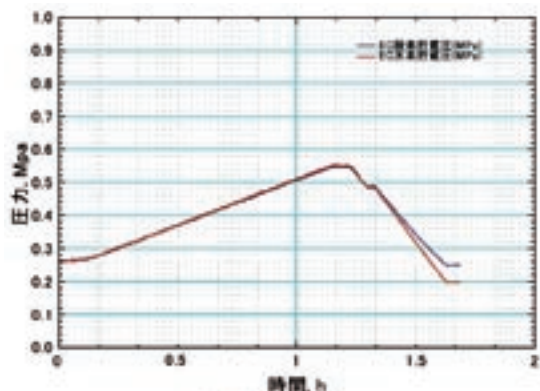
#### 5.4.1 湿度及びタンク内水分量

貯蔵タンク系の湿度計測により、電解生成ガスの除湿効果 (露点5°C程度) を確認するとともに、ガス貯蔵時の水分収支評価 (オンライン計測) を行った。

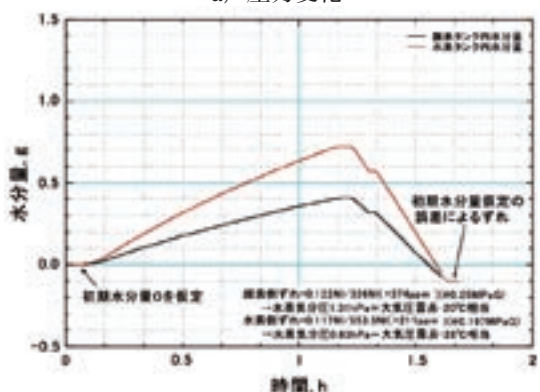
付録5に湿度、水分量の評価計算式を示す。

##### (1) 湿度 / タンク内水分量の評価

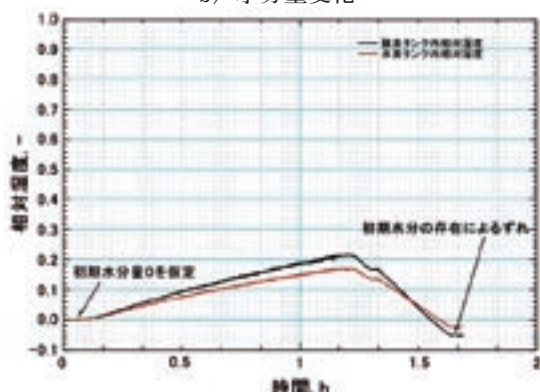
図5.4.1-1 a) ~ c) に最初のガス充填 / 放出によるタンク内圧力、水分量及び湿度の変化を示す。ここでは、データ処理上、初期水分量を0 (従って、湿度0) としている。厳密には、貯蔵タンク系設置時に置換・封入された水素ガスと酸素ガスの中にも微量の水分が含まれ、タンク圧力、温度等の条件によって相対湿度、水分量が0を若干下回る場合がある。実際、図5.4.1-1 a) の様に運転後の貯蔵圧力が初期圧力を下回る場合、b) の水分量は運転後に-0.1g程度となっている。



a) 圧力変化



b) 水分量変化



c) 湿度変化

図5.4.1-1 ガス充填/放出による貯蔵タンク内変化

このずれ（-0.1g程度）を濃度で評価すると、酸素側で374ppm、水素側で211ppmであり、貯蔵圧力を考慮して水蒸気分圧に換算するとそれぞれ1.31hPa、0.63hPaとなる。この分圧に対応する大気圧露点は酸素が-20℃、水素が-28℃であり、貯蔵タンク系設置初期のガス置換作業等（その後の試験での配管内への水蒸気流入も含む）により残留し得る量であると考えられる。なお、a)の圧力変化で後半に水素圧力の低下が大きくなっているのは、FC側の水素レギュレータ設定が過大で、FC流路系水素圧過剰となり、安全弁を通して水素が徐々に流出したためである。運転後にレギュレータを調整し、その後のクローズド運転に適正な設定とした。

(2) 全般的傾向

サイクル試験では、1サイクル当りに充填/消費できるガス量は貯蔵圧力にして0.45MPa程度であり、10サイクルではタンク容積に対して約40倍程度であるが、1サイクル当りの最大/最小の圧力比を2とすると、初期にタンク内に有ったガスは約1000分の1に薄められるので、ほぼ全量が入れ替わったと見なし得る。

図5.4.1-2に10サイクル試験時の水分量、図5.4.1-3に湿度の変化を示す。サイクル試験では水分量がほぼ一定範囲内で増減を繰り返していることが分かる。

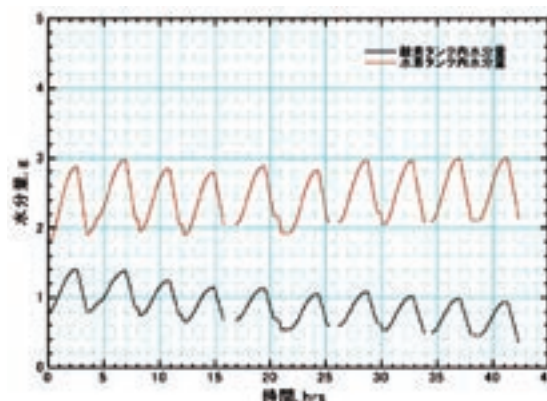


図5.4.1-2 タンク内水分量変化

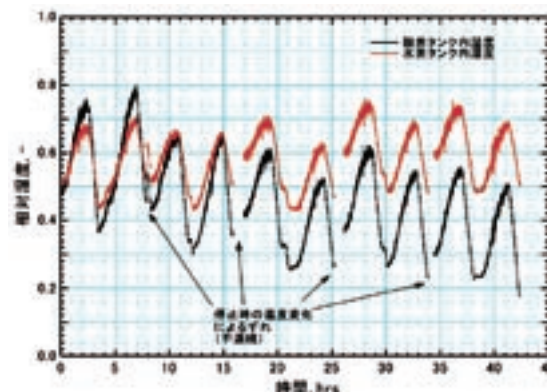


図5.4.1-3 タンク内湿度変化

相対湿度のサイクル変化を見ると、初期には水素/酸素がほぼ同じ変化を示しているが、途中から違いが見られ、水素側の湿度が高目（50～70%）に維持されている。水分量そのものは2～3g程度であり、標準状態換算の水蒸気では2.5～3.7NL程度（モル分率で0.4～0.6%程度）なので、ガス貯蔵に対して大きな影響を与えてはいないが、長期間の運用においては結露によりタンクなどに水が溜まる懸念される。

すなわち、運転時の貯蔵タンク温度は約25℃であったので、図5.4.1-3のタンク内湿度変化から10サイクル運転終了時の水素側湿度を約50%とすると、貯蔵温度

が13.7℃まで低下すると水素タンク内で微量ではあるが結露が生じる可能性がある。夜間等の運転停止期間（最長3日間の停止期間）に貯蔵温度がこの温度以下に低下するとタンク内で結露が生じるが、常温環境では一旦水滴となった水分はタンク内に滞留することになる。従って、貯蔵タンクを保温し、運転停止時の温度低下を防止する必要がある。

ところで、酸素側については、運転終了時の酸素側湿度を約20%とすると、露点は約0.4℃となるので、試験室内での運用においては結露の可能性は小さいと考える。図5.4.1-4に示すように、水素温度（タンク表面温度）は室温に近い挙動を示すのに対して、酸素側はこれよりも鈍い変化傾向となっており、測定場所による温度のばらつきが影響する。

温度差は2~3℃程度であるが、湿度評価の際には効きが強いため、誤差を生じる要因となる。

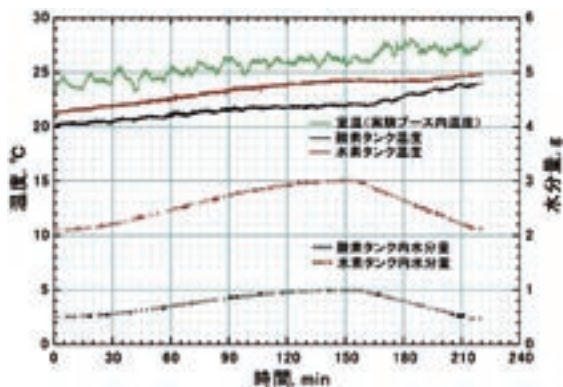


図5.4.1-4 タンク温度と室温の変化

#### (4) FC待機時のガス消費

流路系が常時実ガスで満たされているRFCでは、FCの待機時にも、電気回路が機械的に遮断されない場合に負荷に流れる微小電流による電氣的反応、スタック内の微量なクロスリークによる直接的反応によって、スタック内で微量のガスが消費されている。

今回の試験では、サイクル間で運転を行っていない期間のガス消費率を求めれば、直接的反応による微量のガス消費の程度がわかる。この消費率が大きいと、出力電力として有効利用できないガス量が多く、貯蔵タンク効率下がるので、その程度を知っておくことは、設計上重要である。

また、ガス流の無い状態で生じた生成水は、電極上で皮膜を形成したり、ガス流路中に滞留するので、負荷立ち上がりの際の速やかなガス交換を阻害する恐れがあるため、FC待機時や切り替え時の運転方法を検討する必要がある。

ここでは複数の温度条件が得られないため、運転停

止期間（＝室温環境）の減少率のみを圧力変化から求めると、水素ガス消費率は0.02NI/min程度（酸素はその1/2）となった。これは電流での消費に置き換えると、0.2A程度に相当する。

#### 5.4.2 システム特性評価上の課題

今回の試験結果について、データの詳細な解析と、シミュレーション計算との比較を行った。

##### (1) 貯蔵タンク水分収支

連続サイクルではデータ上、タンク内水分量が減少傾向を示した。これは、ガス流量の誤差（ゼロドリフト及び係数のずれ）により、収支計算に影響を与えていると考えられたが、流量データから、水素/酸素流量（積分平均値）の比（水素：酸素＝2：1）について大きな違いは見られなかった。

##### (2) 貯蔵タンク断熱特性

RFC試験時の貯蔵タンク温度・圧力データより、現タンクの断熱性が低いこと（実際は等温変化）、及び貯蔵タンクの断熱特性が運転圧力に大きく作用することが断熱シミュレーションとの比較で分かった。従って、熱の出入りを防ぐ断熱処理が必要と考えられる。解析ツールの設定パラメータや搭載型熱制御設計への反映が必要である。

##### (3) FC待機時の微小消費（実質効率に影響）

FC待機中の燃料消費量を正確に捉え、生成水分による特性変化の有無の確認が必要である。前述のとおり、FC出力の立ち上がりで出力が時間をかけて徐々に上がる現象は、主に温度変化によるもので、開放運転時よりも立ち上がりが鈍いことから、待機時に生成した水分の付着による有効反応面積の減少が一時的に起因していると考えられる。

##### (4) その他の課題

###### ① マスバランス（全系）

系外への損失の有無について評価が必要であり、その主な要因に水分の蒸発が挙げられる。本装置の水電解系の水タンクは大気解放となっているが、実際の場合、完全なクローズ系になり、蒸発損失はないと考える。

###### ② 総合効率

総合効率を高めるためには、補機類の消費電力を最小にする検討が必要になる。特に、ポンプの運用方法には十分な設計配慮を行うべきである。

## 5.5 成果のまとめ

本試験で得られた結果と知見は以下に要約される。

- (1) 燃料電池 (FC)、水電解器 (EC) の各々の単独性能試験を行い、温度、圧力の依存を含めた電気特性等を明らかにした。
- (2) 入力、負荷出力 (推進動力) を模擬して定常及び過渡的な運転試験を行い、急激な入出力変動に対応して問題なく動作することが確認できた。
- (3) 気水分離と生成ガス除湿能力の強化のための改修を行い、有効な水分回収方法の確認ができた。
- (4) 運転により、マスバランスに関するデータを取得した。
- (5) 貯蔵タンクの熱設計データの取得ができた。
- (6) 搭載型RFC設計・運用に必要な基礎データの収集ができた。
- (7) 運用方法及び制御ロジック等の基本システムが妥当であることが確認できた。

但し、EC電圧特性の低下のために、下記の評価項目が積み残しとなった。

- (1) FC/ECの定格一定格運転による最大充填試験 (0.2～0.98MPa) による運転特性。
- (2) EC入力 (太陽電池) 及びFC出力 (負荷) の変動パターンによる全般特性。

なお、EC特性低下に関して、試験装置から採取した水の分析結果では、一部にMg、Alイオン等が検出されており、EC電圧特性の低下はそれらの金属イオンに起因する可能性がある。

## 6. 一体型1kW級RFCモデルの試作・評価試験 (平成14～15年度)

成層圏プラットフォーム飛行船技術実証機搭載を想定した15kW級再生型燃料電池の概念検討 (平成13年度実施) と、前述の1kW級地上電源運用評価用RFCモデルによる試験結果を基に、図6に示すような燃料電池/水電解器/その他構成部品を一体化する1kW級RFCパッケージモデルを設計・試作し、平成15年度にそのモデルを使用して10サイクル (6時間/サイクル) の運転、50サイクル (1時間/サイクル) の運転を行い、基本システムの機能確認、空冷気液分離方式と相互保温方式 (FCあるいはEC動作時の排熱を利用して待機中の機器の保温を行う方式) の妥当性、自己加湿式FCスタックの適用評価、及び繰返しサイクル運転での電気出力特性の測定を行った。

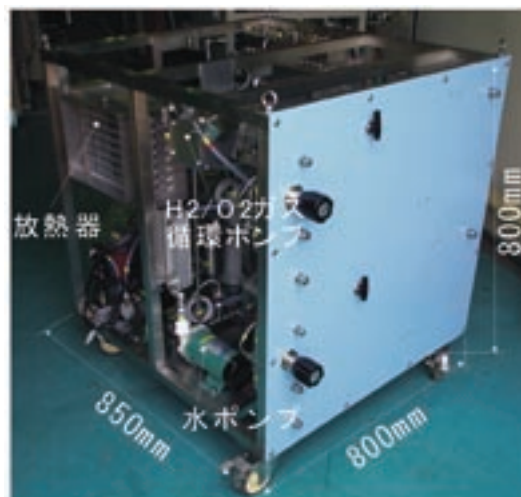


図6 一体型1kW級RFCモデルの外観

### 6.1 一体型1kW級RFCモデルの設計構想

以下の方針に基づき、モデルの設計を行った。

- (1) 燃料電池及び水電解装置を一体化する。
- (2) 基本機能システム/機器構成は搭載品と同等とする。
- (3) 構成機器・部品は既存品あるいは市販品等を使用する。
- (4) サイズ/重量には特に制約を設けず、機能要求を満足できる機装設計を行う。

ここでの試作の目的は「一体型再生型燃料電池システム基盤技術の確立」に限定しており、前述の地上試験モデル設計条件と搭載品仕様とは「基本機能システム/機器構成」は共通である。

表6.1に燃料電池スタック、水電解スタックの基本仕様を示す。

表6.1 一体型1kW級RFCモデル仕様

燃料電池出力	定格 1kW (@18Vdc)
ガス供給圧力	0.05～0.1MPaG
ガス消費量	水素 10NL/min (@1kW)
	酸素 5NL/min (@1kW)
運転温度	50～70℃
水電解入力電力	定格 1kW
運転圧力	～0.98MPaG
ガス生成量	水素 3.2NL/min
	酸素 1.6NL/min
水消費量	155cc/h @1kW
運転温度	40～70℃
運用シーケンス	燃料電池モード；最大1.2時間
	水電解モード；最大5.3時間
ユニット重量	約270kg (タンク、ガス含まず)



## 6.2 システム運用シーケンス（最大発電時間/必要充填時間）

既存の燃料タンク（水素用;47リットル2式/酸素用;47リットル1式）を使用するとタンク内に貯蔵できる最大水素ガス容量940NL,最大酸素ガス容量470NLとなる。燃料電池の必要ガス量から換算して1kW定格出力できる最大時間は約1.2時間となる。また、水電解装置のガス発生能力から上記燃料タンクをフル充填するためには定格入力で約4時間を要する。

搭載品においては、昼間10時間（水電解モード）、夜間14時間（燃料電池モード）が1サイクルの基本シーケンスとなるが、ここでは上述の最大発電時間や最大充填時間の制約から燃料電池の発電時間は1.2時間以下、水電解ガスの生成時間（充填時間）は5.3時間以下を1サイクル・シーケンスのベースライン（最大時間6.5時間）として各試験シーケンスとした。

## 6.3 水分管理系

### 6.3.1 燃料電池系統

燃料電池の酸素循環系に生成する水分を気水分離器において除去し、貯蔵する。1.2時間の発電において生成される水分量は約600cc程度となり、燃料電池の酸素気水分離器内に貯蔵する。

### 6.3.2 水電解装置系統

水電解装置水素ガス/酸素ガスの排気系統に残留する水分を気水分離器において除去し、再度水電解スタックに循環させる。回収された水分は循環水ポンプにより水電解スタックに再供給される。

## 6.4 温度制御系

### 6.4.1 燃料電池系統

燃料電池の酸素気水分離器が冷却水タンクを兼用しており、冷却水タンク内の水温は60℃の温度一定制御を行う。燃料電池の立ち上がり時には冷却水を燃料電池/水電解系に循環させ、ヒータ（0.5kW）により初期加温（40～50℃）を行う。規定温度に上昇後、燃料電池による発電を開始させる。燃料電池の定格発電時のスタックからの発熱量は0.64kWであり、この発熱は水電解系の保温に使用する。

### 6.4.2 水電解装置系統

水電解装置の温度制御も燃料電池酸素気水分離器内冷却水により行われる。水電解装置立ち上がり時には冷却水を燃料電池/水電解系に循環させ、ヒータ（0.5kW）により初期加温（40～50℃）を行う。規定温度に上昇後、水電解装置を起動させる。水電解装置の定格運転時の

スタックからの発熱量は0.41kWであり、この熱量は燃料電池系の保温に使用する。燃料電池保温後の余剰熱量は、冷却ファン（系統温度モニタにより動作）により外気に放熱する。

今回の試作モデルについて、詳細な熱解析は困難であることから、試験にて熱特性評価を行い、必要に応じた適切な対策（断熱対策/ヒータ追加）を行った。

## 6.5 運用補機電力

燃料電池系、水電解装置系及び温度制御系に必要な補機電力は、燃料電池動作時に290W、水電解動作時に164W以下を想定した。

今回、1kW出力に対して、低コスト部品採用のため補機電力が30%を占める。2.3kWの最大出力時には13%である。15kW出力の搭載品設計においては補機電力1kW（6.5%相当）を想定しており、今回の補機類の消費電力はそれに比べて大きい。従って、機器類の省電力化（→システム重量の軽量化）は開発の大きな課題の一つといえる。特にガス循環ポンプの消費電力は大きく、インバータ制御等の採用による省電力化を考える必要がある。

## 6.6 システム基本構成及び系統

電源運用評価試験装置による試験結果から、本モデルに対して以下のような要素の改良試作を行い、評価試験により機能・有効性の確認を行った。

- (1) 燃料電池酸素排気後の気液分離器を水タンクと共用する。
- (2) 燃料電池の生成水を水電解用水及び燃料電池/水電解装置冷却・保温用水に使用する。
- (3) 自己加湿式FCスタックを適用する。
- (4) 気液分離に低温外気を利用する。

## 6.7 一体型1kW級RFCモデルの運転試験

### 6.7.1 単体性能試験

再生型燃料電池システム試験を行う前に、主要構成部品である水電解部単独の性能確認（温度依存性の把握）、及び燃料電池の性能確認（圧力/温度依存性の把握）を行った。図6.7.1-1と図6.7.1-2に試験結果を示す。この結果、基本性能データが取得でき、サイクル試験に供しても問題のないことが確認できた。また、温度制御（排熱状況/保温状況）や気液分離（水分除去状況）等についても機能評価し、基本系統に問題がないことを確認した。

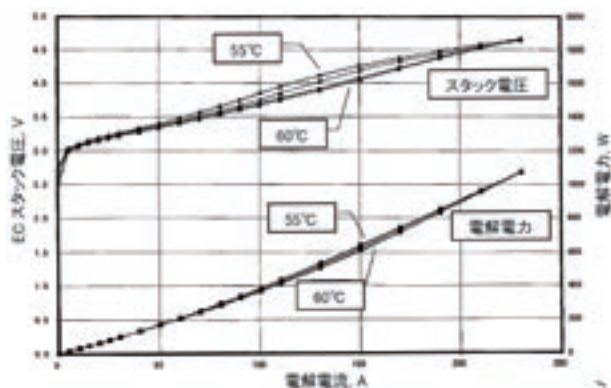


図6.7.1-1 水電解スタック性能試験

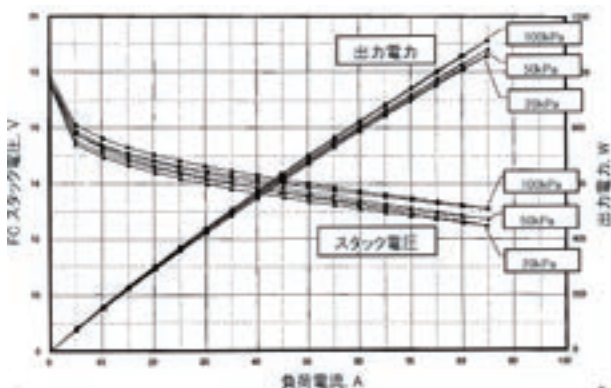


図6.7.1-2 60°C時燃料電池スタック性能試験

6.7.2 10サイクル運転の試験結果

再生型燃料電池の閉鎖系/自律運転性能を評価し、課題抽出するために図6.7.2に示すような10サイクルの運転試験を行った。タンク内圧力変動幅を最大に取るために運転シーケンスとしては、充電5時間/発電1時間と設定した。本来は、充電時間：発電時間＝1：1.4が実運用と同じ動作時間比になるが、既存水電解スタックの能力制約からこのようなシーケンスとなった。図から明らかのように、入出力と圧力のサイクル特性が安定し、再現性のあることが分かる。

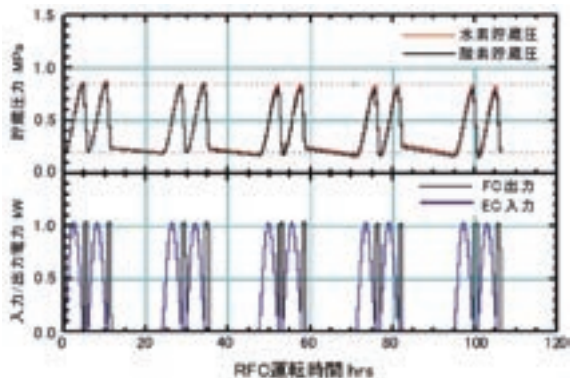


図6.7.2 10サイクル運転試験 (6時間/サイクル)

成果として、基本機能系統、空冷気液分離方式、相互保温方式の妥当性が確認できた。

6.7.3 50サイクル運転試験

連続サイクル数の増加による性能（システム効率含む）の評価、及び長期サイクル運転時の課題抽出をするために50サイクル運転試験を行った。図6.7.3にサイクル試験時の入力・出力特性を示す。

疲労蓄積を考慮して短期間での多数サイクル運転を狙い、運転シーケンスは充電50分/発電10分と設定した。図の結果から分かるように、サイクル数増加による性能劣化は認められなかった。

成果として、繰返しサイクル運転での電気特性の安定性が確認できた。

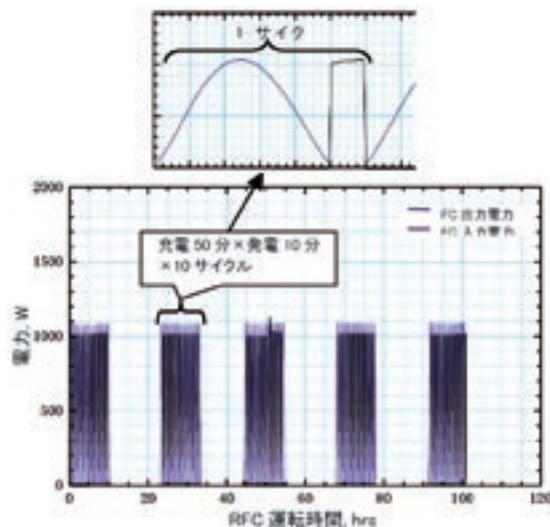


図6.7.3 50サイクル運転試験 (1時間/サイクル)

6.8 システム一体化設計、運用方法及び制御ロジック等の問題点の抽出及び検討

6.7.2の10サイクル運転試験の結果から、課題として自己消費によるガス損失の低減、空冷時の風量の適正配分、燃料タンクへの水分ロスの低減、及びセンサの信頼性向上を図り、搭載品設計に反映を行う必要が生じた。現状のRFC必須機能として下記のもの挙げられ、さらに共用化・簡素化を図ることが望まれる。

- (1) FC系；発電スタック，調圧弁，冷却水ポンプ，気水分離器，ガス循環機能
- (2) EC系；電解スタック，循環水ポンプ，補水ポンプ（気水分離器に溜まる水を水タンクへ移送ポンプ），気水分離器，液位モニタ
- (3) 熱制御系；熱交換機，放熱器，冷却ファン，比例制御弁，補助ヒータ
- (4) その他；水タンク，イオン交換器，各種センサ
- (5) 最適制御技術；RFCユニットは外部の入力電力

/負荷条件に応じて受動的な動作をするため、計測必須事項は、ガス流量、水流量、電流・電圧、温度、圧力、水位、湿度がある。

- (6) 安全確保の観点では、スタックの損傷・破壊につながる過大な差圧や入出力を防止するためにリミット設定と緊急停止・圧力開放等の制御機能が必要となる。

## 6.9 成果のまとめ

一体型1kW級RFCモデルの試作・評価試験の成果は以下ようになる。

- (1) 本モデルの系統により、燃料電池/水電解サイクルが基本的に成立することが確認できた。
- (2) RFCの閉鎖系/自律運転性能を確認し、課題を抽出するために10サイクル(6時間/サイクル)運転試験を実施し、基本機能系統の妥当性が確認できた。
- (3) サイクル数増加による性能劣化(システム効率等)の評価を行うために、50サイクル運転試験(1時間/サイクル)を行った結果、電気特性の安定性が確認でき、システム効率は30%であった。
- (4) 燃料電池動作時/水電解動作時の排熱授受による相互保温方式が有効に機能することが確認できた。
- (5) 自己加湿式FCスタックの適用性が確認できた。
- (6) これにより、設計手法の妥当性や運転・制御性(機械的・熱的・電氣的I/F含む)を評価し、搭載型RFCの基本要件を明らかにした。

## 7. 軽量化/耐環境化設計検討(平成16年度)

上記の一体型1kW級RFCモデルの設計では、軽量化/耐環境化が未考慮であった。SPF飛行船搭載のための軽量化/耐環境化の設計検討を行い、要素の改良試作による評価試験を行った。

- (1) 1kW級搭載モデル検討のための基本仕様の設定。
- (2) 現状270kg(システム390kg)から190kg(システム250kg)以下を狙う軽量化検討。
- (3) 温度環境-25℃(4km高度)~45℃(地上)、姿勢傾斜 $0 \pm 30^\circ$ を考え、これに対応できる熱設計/流路設計の実施。
- (4) モデル軽量化に必須の高効率熱交換器を備えた一体型気水分離方式の技術検討。
- (5) モデル軽量化に必須のポンプ循環に代わる燃料ガス循環方式の検討。
- (6) 水電解スタックの再検討。
- (7) 姿勢傾斜 $0 \pm 30^\circ$ で運用可能な配管・配管方式(水分の停留/逆流防止)の検討。

## 7.1 改良要素の評価試験結果

- (1) 気水分離装置:高効率熱交換一体型気水分離方式が有効に機能することを確認した。試験状況を図7.1-1に示す。
- (2) 水素/酸素循環装置:燃料電池部水素ガスと酸素ガスの戻り部にエジェクタを装備(旧モデルでは電気式ポンプ使用)し、その効果を確認した結果、冷却水流が十分活用でき酸素側循環系へのエジェクタ採用は有効であったが、水素循環系は吸引力が水素供給量のみで小さいため十分な循環量が得られなかった。従って、水素循環系は従来通りポンプを採用し今後の調査・検討課題とした。

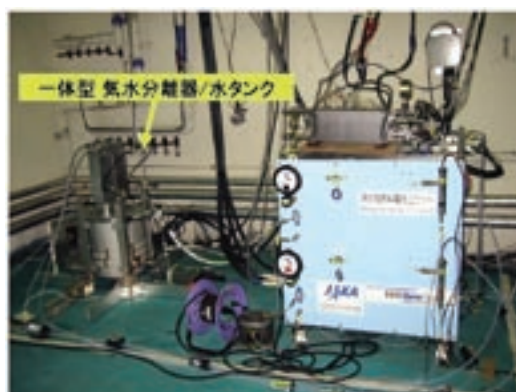


図7.1-1 気水分離装置の評価試験状況

- (3) 水電解スタック性能:図7.1-2に示すECは国産化、軽量化を狙って試作した水電解スタックで、要求仕様通りの動作性能が確認された。但し、重量は約26kgと、要求値20kgより若干重くなった。

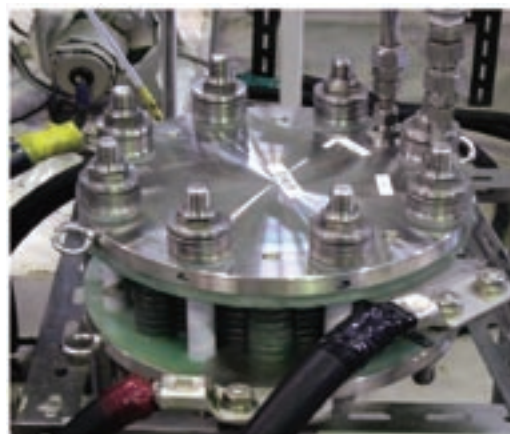


図7.1-2 性能試験中の試作水電解スタック

- (4) 試作スタックの電圧特性:温度ごとの電圧特性を図7.1-3に示す。動作温度が高くなると、電解電圧が低くなっていることが分かる。これは動作温度の上昇により、より低い電力で燃料ガスの製

造が出来ることを示している。図7.1-4には電解温度70℃の時のセル電圧を示す。セル1とセル8が他のセルよりも電圧特性が若干高く、これは、セルをスタッキング（積層組付）する時の締付け力が均一でないために生じると推定される。

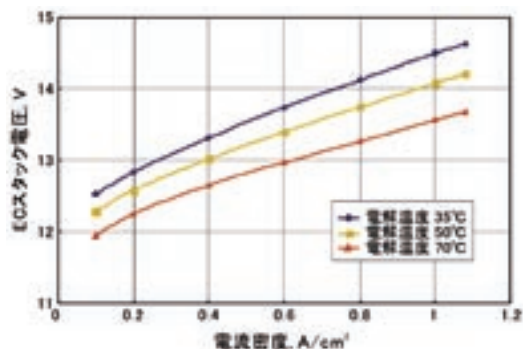


図7.1-3 試作ECスタックの電圧特性

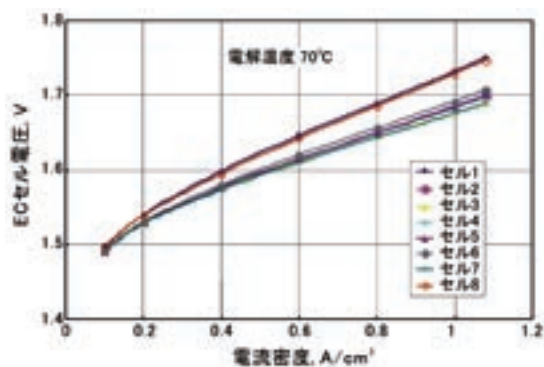


図7.1-4 試作ECスタックのセル電圧特性

## 8. 搭載型1kW級RFCシステムの環境評価試験と運用評価試験（平成16～18年度）

### 8.1 搭載型1kW級RFCシステムの設計検討・製作

平成15年度までに実施した地上運転評価試験及び搭載型RFCフィージビリティ・スタディの結果をもとに、平成16年度に軽量化/耐環境化するための要素試作・試験評価を実施し、飛行船ミッション搭載を想定した搭載型1kW級RFCシステムを製作した。その基本仕様を表8.1に示す。

表8.1 搭載型1kW級RFCシステム基本仕様

燃料電池出力	定格 1kW(@25Vdc)
ガス供給圧力	0.05～0.1MPa
ガス消費量	水素 10NL/min(@1kW)
	酸素 5NL/min(@1kW)
加湿方式	無加湿
運転温度	50～80℃
水電解入力電力	定格 3.5kW(15Vdc*230A)
運転圧力	～0.98MPaG
ガス生成量	水素 12.5NL/min
	酸素 6.3NL/min
運転温度	35～70℃
ユニット重量	190kg（タンク、ガス含まず）

製作した搭載型1kW級RFCシステムを用いて環境評価試験と運用評価試験を行い、成層圏プラットフォーム搭載用再生型燃料電池の軽量化/耐環境化設計手法の評価を行った。

本システムの設計・製作を行うに当たり、以下の検討を行った。

#### 8.1.1 システム軽量化に関する検討

平成14年度試作の一体型1kW級RFCモデル（重量270kg）から約80kgの重量低減を狙いに、熱制御部及び構造機装系を中心として軽量化を図った。

軽量化の方策として、最適な機器配置、主構造の軽量化、軽量・高効率気液分離器の採用、水素/酸素循環ポンプ代替方式の採用、及び軽量・高効率放熱器の採用が挙げられる。

#### 8.1.2 耐環境性に関する検討

燃料電池と水電解装置の運転最低温度を確保するために加温・保温・排熱方式の検討を行った。

運転温度の制限条件として、燃料電池の運転温度は50～80℃、水電解時の運転温度は35～70℃、RFC各部位の温度は0℃以上を保持し、水分の凍結を防いだ。

温度制御方式として、加温は電気ヒータ及び自己発熱（燃料電池排熱、水電解排熱）を利用した。保温は同上と断熱材を使用した。排熱は冷却水を介して低温外気（-25℃）との熱交換で行った。

#### 8.1.3 気液分離方式の検討

気液分離方式として、遠心力等物理的な力の利用、分離膜方式、冷却による水蒸気の液化分離等の候補が挙げられる。ここでは、従来から実績のある冷却による水蒸気の液化分離方式を採用した。

この場合いかに気液混合ガスを冷やして、脱水させる

かが大きな鍵となり、また同時に、気液分離後、露点がさらに下がらないようにする工夫が必要となる。

#### 8.1.4 水素/酸素循環方式の検討

旧モデルでは燃料電池部での水素/酸素循環のために循環ポンプを使用していたが、システム軽量化のために循環ポンプの軽量化あるいは軽量代替機の採用が必須である。宇宙航空用途の軽量循環ポンプは存在するが、高価であり、消費電力も発生する。そのため、ここではポンプ代替としてエジェクタを候補に選んだ。

#### 8.1.5 配管機装方式の検討

水分が各部位に充填されているため、システムの傾斜により外部への漏洩等が発生し、再生型燃料電池のシステム機能を損なう場合がある。想定される問題箇所として気液分離器、燃料電池関連配管部位があり、図面上の確認を実施した。

#### 8.1.6 電気・機械・熱的インターフェースの検討

以下のようなインターフェースを採用した。

- (1) 燃料電池発電を電源システム側へ出力する。
- (2) 水電解に必要な電力は電源システム側から供給を受ける。
- (3) 再生型燃料電池の補機電力は電源システム側から供給を受ける。
- (4) 再生型燃料電池の起動・停止信号は電源システム側から受け、ステータス信号を返信する。
- (5) 再生型燃料電池自身の異常による緊急停止/安全対策は再生型燃料電池側で対処する。
- (6) 再生型燃料電池のモニタ・データを電源システム側へ出力する。
- (7) 再生型燃料電池搭載システムは飛行船ゴンドラ内ミッションエリアに装備する。
- (8) 再生型燃料電池の排熱は、低温外気との熱交換にて行う。

### 8.2 搭載型1kW級RFCシステムの基本機能確認試験

8.1項の検討結果に基づき図8.2 (a) に示す搭載型1kW級RFCシステムを設計・製作した。図8.2 (b) はその鳥瞰図を示す。全備重量は、電源コントローラ等のノンフライト・アイテムを除き、250kgとなった。

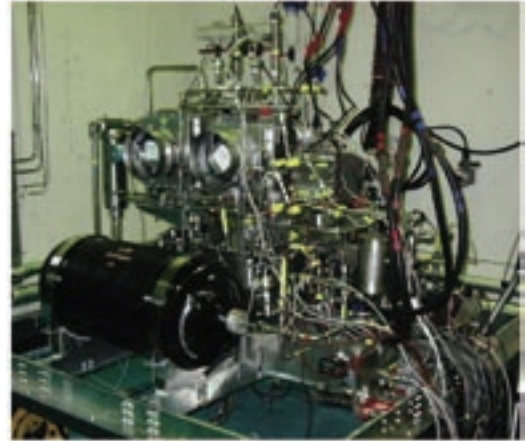


図8.2(a) 搭載型1kW級RFCシステム外観

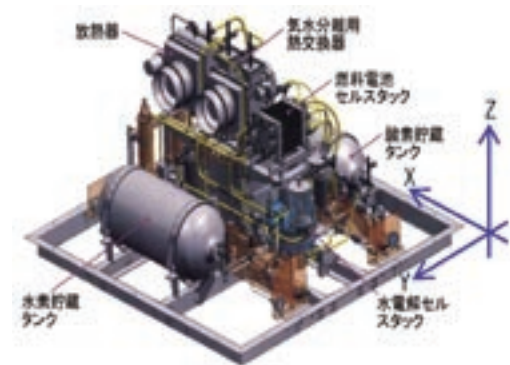


図8.2(b) 搭載型1kW級RFC鳥瞰図

また、このシステムで燃料電池部/水電解部単体特性試験、再生型燃料電池サイクル運転試験を行い、発電性能、水電解性能及び機能系統の妥当性が確認できたため、環境評価試験（低温、傾斜・揺動）と運用評価試験を実施した。

RFCの実用段階では、高度約20km（薄い空気密度）、平均低温 $-56.5^{\circ}\text{C}$ 、平均風速30m/sの成層圏環境下で長期にわたる昼夜のサイクル発電になる。

図8.2 (a) のRFCシステムについて、飛行船ミッション搭載を想定した環境評価試験を行い、システムの機能性能データを取得し、システムの水管理方式を評価し、成層圏プラットフォーム搭載用再生型燃料電池の耐環境化設計手法の妥当性の評価を行った。以下に評価試験項目ごとの成果の概要を示す。

### 8.3 低温環境評価試験

低温環境（大気圧）において上記システムのサイクル機能試験を行い、同時に上記システムの各部位の温度データを取得し、システムの温度管理方式を評価した。図8.3-1に試験系統図を示す。



図8.3-1 試験システム図

低温環境試験は、RFCシステムを図8.3-2に示すような断熱カバーで覆い、図8.3-3の低温環境コンテナ内に設置して-5、-20、-30℃の温度で行った。

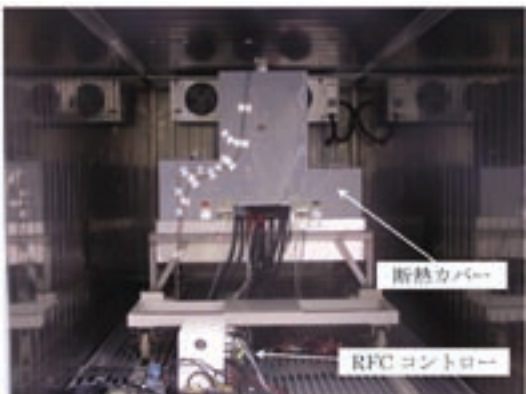


図8.3-2 断熱処理されコンテナに設置されたRFC



図8.3-3 低温環境試験用コンテナ外観

運転サイクル数は3サイクル(1サイクル/1時間)で、温度ごとに行った。1サイクル時の充放電プロフィールを図8.3-4に示す。

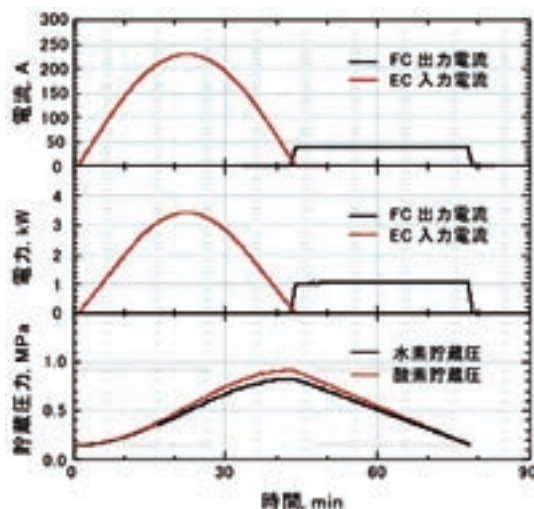


図8.3-4 試験中の充放電プロフィール

8.4 低温環境試験結果

温度ごとの試験手順はRFCに搭載されているファンにより断熱カバー内部の空気攪拌を行った状態で、通常の起動操作を行い、冷却水、循環水をヒータ保温により55℃までげた。冷却水、循環水温度が設定温度に達した後、コンテナ内の温度を試験温度(-5、-20、-30℃)まで下げ、充放電3サイクル運転を行った時の結果の一例を図8.4-1、図8.4-2に示す。

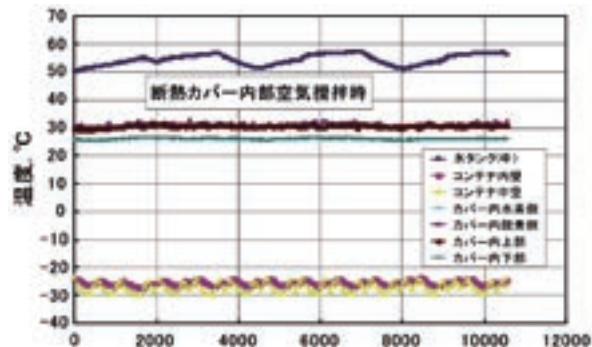


図8.4-1 -30℃時コンテナ内各部温度

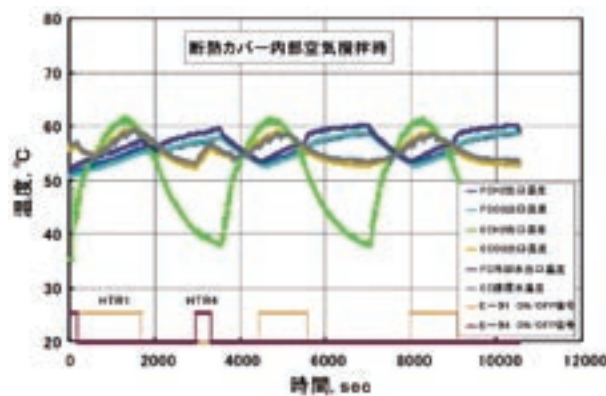


図8.4-2 -30℃時RFC各部温度

図8.4-1から分かるように,RFC断熱カバー外部温度(コンテナ内部)は約-30℃になっている。また,RFC運転時の排熱利用と断熱カバーの効果により,図8.4-2に示すように,RFC各部は40~60℃で温度保持されている。

8.5 熱モデル解析

8.5.1 解析の概要

環境温度,発熱量の異なった3つの試験結果を使用して飛行船搭載用燃料電池システムの熱解析モデルを構築し,表8.5.1に示す4つの熱解析を行った。

表8.5.1 熱解析内容

ケース	解析名
A-1	15℃(常温)下での循環水,冷却水運転
A-2	-30℃(冷凍庫温度)下での循環水,冷却水運転
A-3	-30℃下でのRFC動作運転
B-1	-50℃下でのRFC動作運転(解析予測)

8.5.2 解析モデル

解析モデルを図8.5.2に示す。

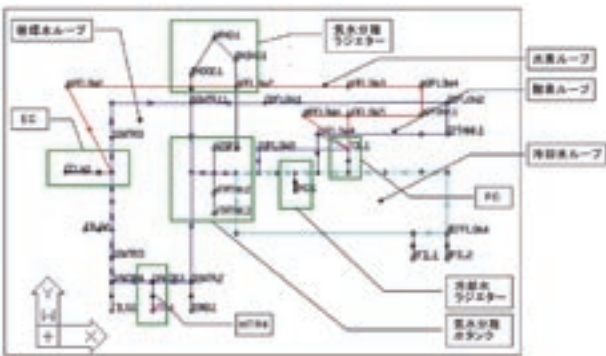


図8.5.2 解析モデル

本解析にはSINDAを使用した。簡易モデル(1次元モデル)ということでRFCユニット構成をベースに十数点のポイント熱マスで代表させ,マス間を熱的に接続している(熱伝達/熱伝導/熱輻射定数を入力)。3次元モデルを構築するとスタック内部での温度分布等も推定できる。

8.5.3 解析結果

表8.5.1に示した3つの試験結果と解析モデルによる計算結果を図8.5.3-1から図8.5.3-7に比較する。また,熱解析モデルを使用し,-50℃下でのRFC運転時の各部温度の予測結果を図8.5.3-8に示す。

(1) ケースA-1

試験件名:15℃(常温)下での運転

初期温度:15℃

境界温度:15℃(外気温度)

発熱状態:HTR1(450W),HTR2(450W),HTR4(450W),

合計1350W発熱

その他:断熱カバーあり

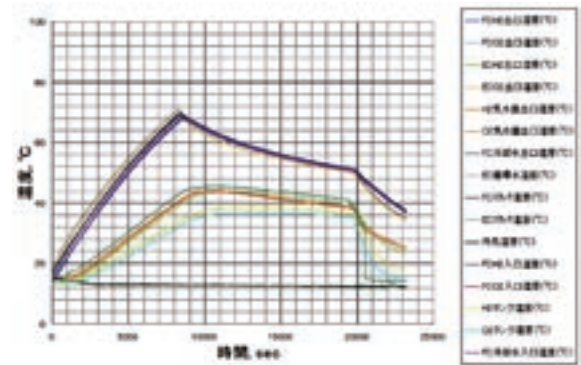


図8.5.3-1 15℃下での運転(試験結果)

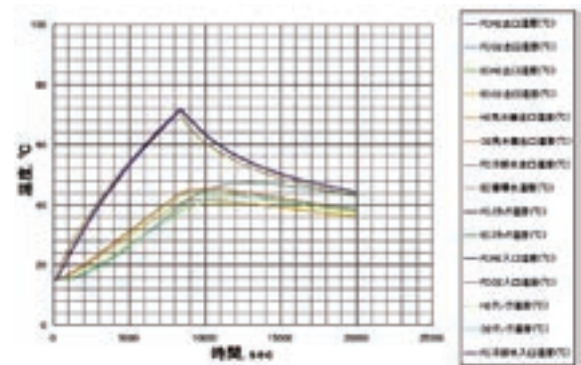


図8.5.3-2 15℃下での運転(解析結果)

(2) ケースA-2

試験件名:-30℃(冷凍庫温度)下での循環水,冷却水運転

初期温度:5℃

境界温度:5℃~-30℃(冷凍庫温度)

発熱状態:HTR1(450W),合計450W発熱

その他:断熱カバーあり

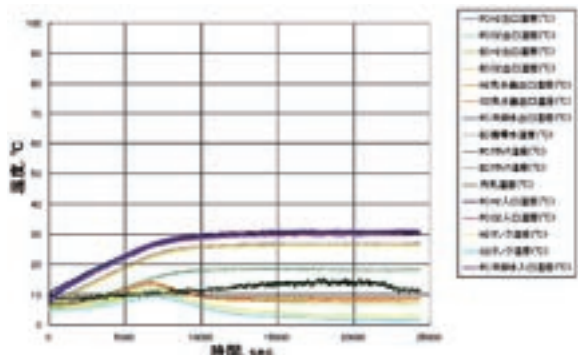


図8.5.3-3 -30℃下での運転（試験結果）

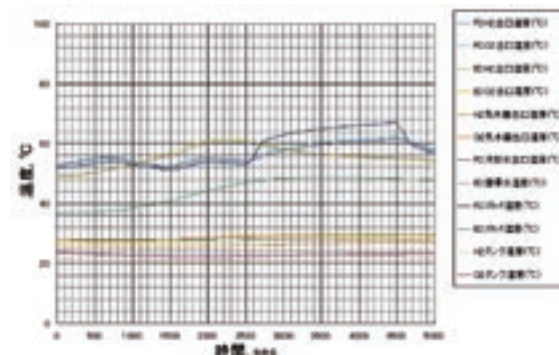


図8.5.3-7 -30℃下でのRFC運転（解析結果）

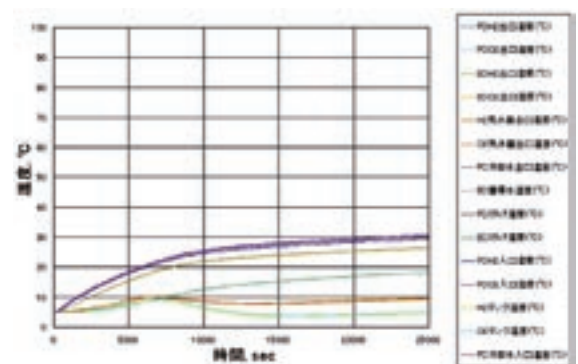


図8.5.3-4 -30℃下での運転（解析結果）

(3) ケースA-3

試験件名：-30℃下でのRFC運転

初期温度：0℃

境界温度：-30℃

発熱状態：

- その他：1) 循環水，冷却水を55℃まで上昇
- 2) HTR1 (450W), HTR2 (450W), HTR4 (450W) で循環水，冷却水温度を53～57℃で制御
- 3) 境界温度を0℃～-30℃まで降温（1時間内）

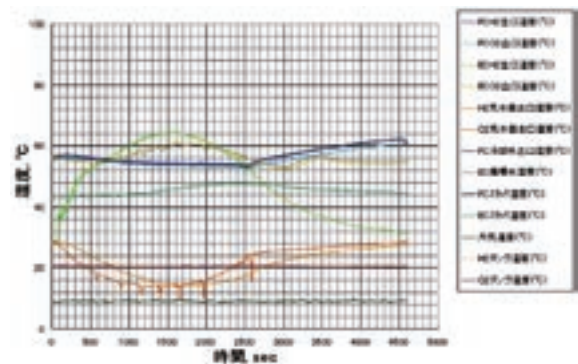


図8.5.3-6 -30℃下でのRFC運転（試験結果）

(4) ケースB-1；解析による温度予測

解析条件：-50℃下でのEC, FC動作運転（解析予測）

初期温度：0℃

境界温度：-50℃

その他：1) 循環水，冷却水を55℃まで上昇

- 2) ヒータ1 (450W), ヒータ2 (450W), ヒータ4 (450W) で循環水，冷却水温度を53～57℃で制御する。

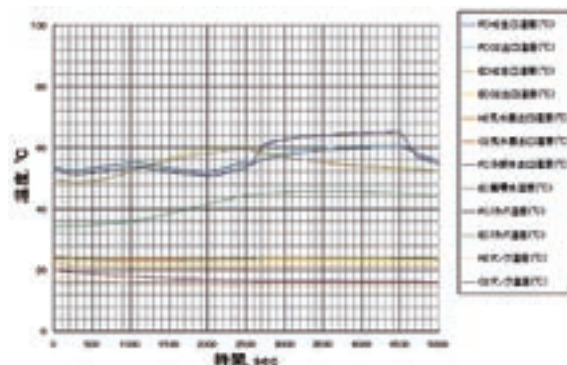


図8.5.3-8 -50℃下での解析予測

8.5.4 評価

(1) 温度均一性

低温環境試験では，断熱カバーの保温効果が十分あることの確認ができた。

一方，断熱カバー内部の温度格差がかなり大きく，長時間運用では運転許容温度範囲を逸脱（特に水温上限70℃以上）してしまうことが予想されたため，低温環境試験では，内部搭載FANを駆動し，断熱カバー内空気を攪拌することで，内部温度の均一化が図れるかを確認した。但し，これは大気圧での空気攪拌効果であり，低压状態ではその効果が低減すると考えられるので，別途，検討と評価が必要である。

(2) 低温環境試験結果評価

図8.4.1, 図8.4.2で示した低温試験の結果から明らか



なように、RFCは $-30^{\circ}\text{C}$ 環境下でも正常に動作することが確認できた。また、熱モデル解析の結果、 $-50^{\circ}\text{C}$ の低温においてもRFCは十分耐えうる設計であると判断できた。さらに、断熱カバー内空気を攪拌することで内部温度の均一化を図ることができ、繰返し充放電時の水温上昇を所定の運転温度内に抑えられることが確認できた。この方策を採用することで、さらに低温環境下での運転が期待できる。

低温環境試験は大気圧下での評価であり、成層圏飛行環境に比べ、対流の影響が大きい。このため、低圧環境下での熱特性データの取得を行い、熱モデル解析のバージョンアップが必要となる。

### (3) その他

図8.5.3-6と図8.5.3-7の比較において、水電解器の水素( $\text{ECH}_2$ )出口温度、水素( $\text{H}_2$ )の気水器出口温度、酸素( $\text{O}_2$ )の気水分離器出口温度が試験では大きく変化しているのに対して、計算ではほぼ一定になるのは、解析上、水の電気分解により発生した酸素ガス、水素ガスによる熱移動量の大きな変化が考慮されていないためと考える。

## 8.6 傾斜揺動環境評価試験

傾斜揺動環境(大気圧)下でシステムの運転を行い性能試験データを取得し、水管理方式の特性評価を行った。

傾斜試験は、搭載型1kW級RFCシステムのX軸、Y軸(図8.2 (b) 参照)に対してそれぞれ $\pm 30^{\circ}\text{C}$ の傾斜を与えた状態で運転を行い、電圧、温度特性などを測定した。図8.6.1に傾斜揺動試験の系統図を示す。試験実施時の写真(代表例)を図8.6.2に示す。

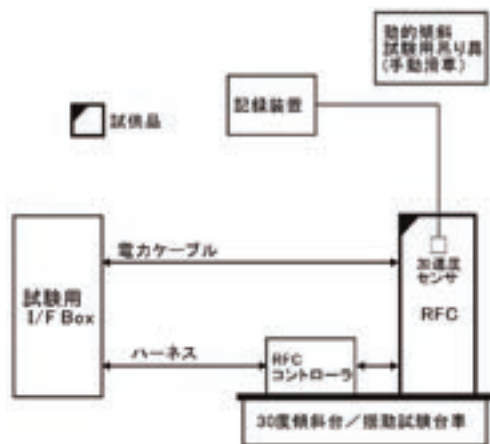


図8.6.1 傾斜揺動試験系統図



図8.6.2 X軸+ $30^{\circ}$ 傾斜試験

揺動試験は、RFCシステムを台車に乗せ、手動でX軸、Y軸方向に約0.1Hzの速さで移動させながら運転を行った。試験実施時の写真(代表例)を図8.6.3に示す。

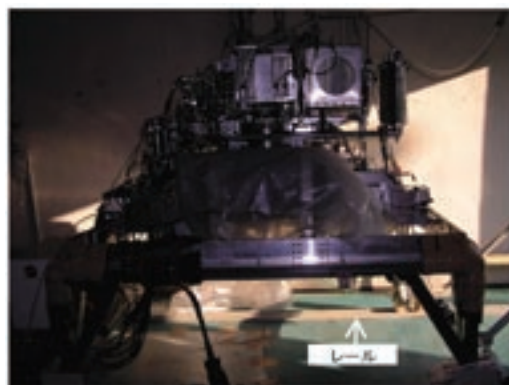


図8.6.3 X軸揺動試験

動的傾斜試験は、RFCシステムをロープを使って図8.6.2に示すようにX軸、Y軸に対し傾けた状態で、手動で $29^{\circ} \sim 30^{\circ}$ の角度を飛行船の運動モードを参考に決めた約0.5Hzの速度で上下動させながら運転を行った。

なお、試験中の充放電プロファイルは図8.3.4に示したプロファイルと同様である。周囲条件は、原則として室内温度、室内湿度とし、運転条件はRFCの通常の運転条件範囲内(運転温度、圧力、電流等)とした。

試験データの解析等により設計レビューを行い、実機搭載用再生燃料電池の設計見直しを行った。

取得データ(代表例)を図8.6.4～図8.6.13に示す。

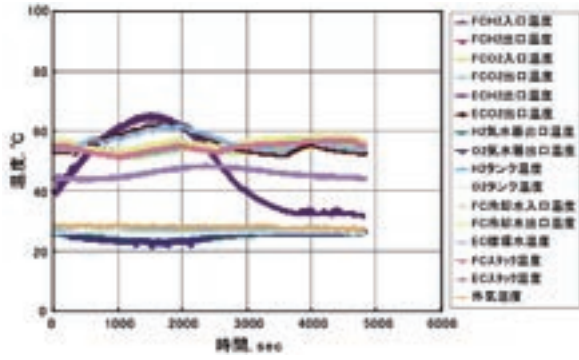


図8.6.4 水平時温度特性

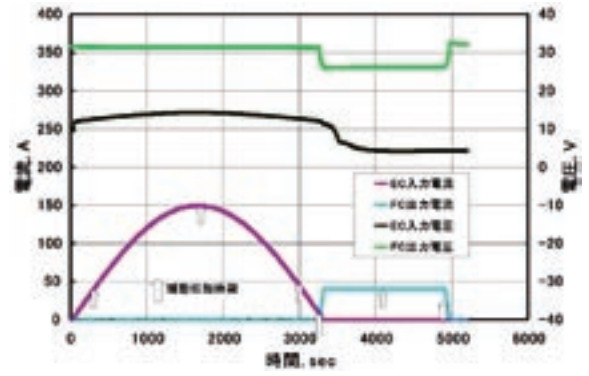


図8.6.8 Y軸揺動時電流・電圧特性

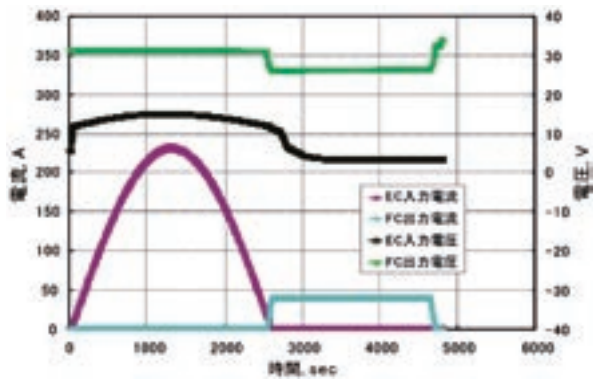


図8.6.5 水平時電流・電圧特性

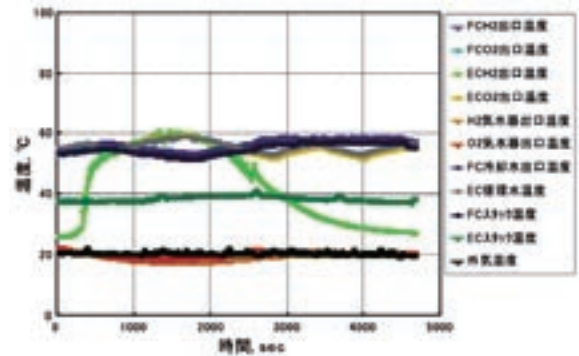


図8.6.9 +X軸動の傾斜時温度特性

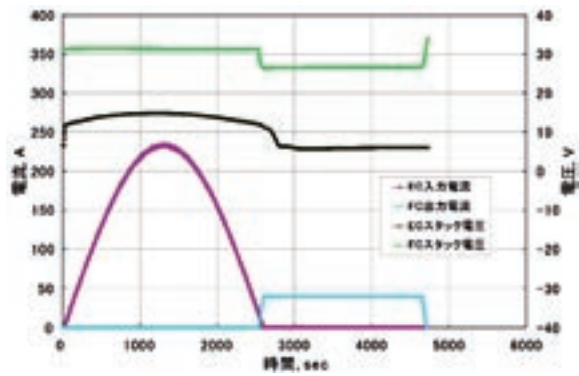


図8.6.6 -X軸30°傾斜時データ

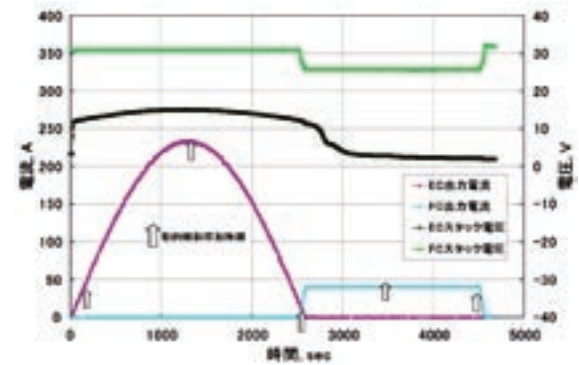


図8.6.10 +X軸動の傾斜時電流・電圧特性

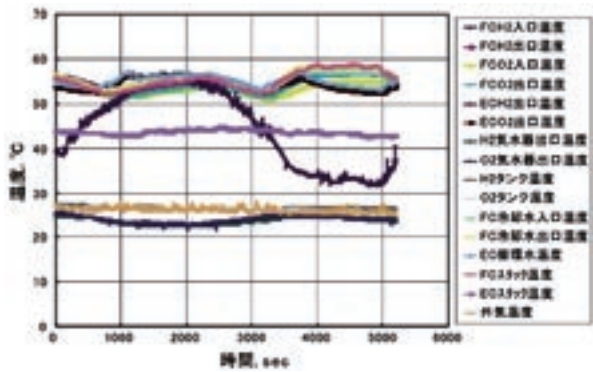


図8.6.7 Y軸揺動時温度特性

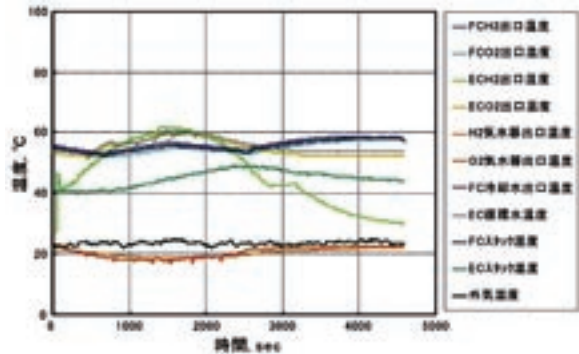


図8.6.11 -X軸動の傾斜時温度特性

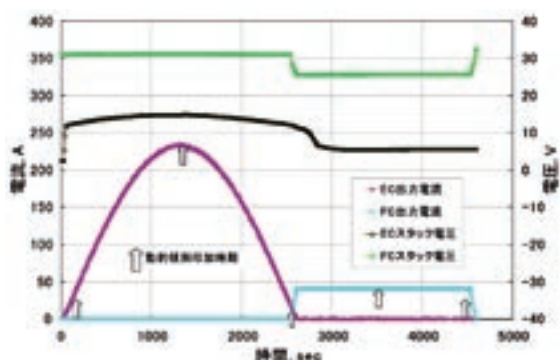


図8.6.12 - X軸動的傾斜時電流・電圧特性

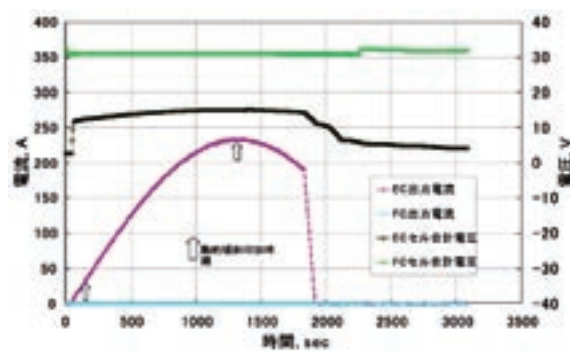


図8.6.15 - Y軸動的傾斜時電流・電圧特性

図8.6.6から図8.6.12に示す各試験においては、EC、FCの電圧特性、温度特性について、水平時の特性との差異は見られず、RFCシステムの機能系統が順調に動作していると確認できる。

一方、図8.6.13に示す+Y軸動的傾斜試験ではFCの電圧変化に異常が生じた。

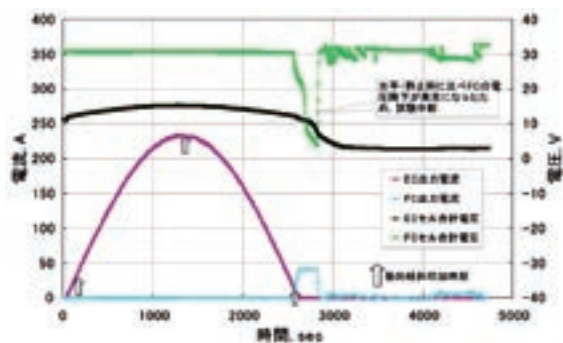


図8.6.13 +Y軸動的傾斜時電流・電圧特性

また、-Y軸動的傾斜試験では、図8.6.14に示すように水電解スタックの水素出口温度が上昇する問題が発生した。図8.6.15はその時の電流・電圧特性を示す。

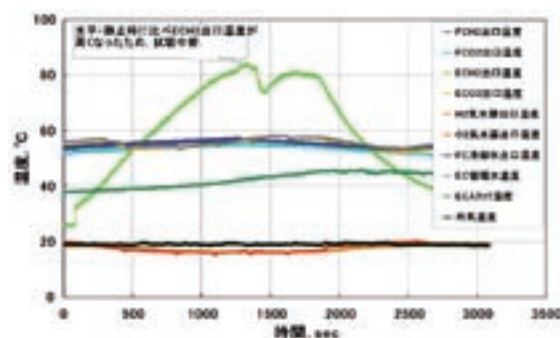


図8.6.14 - Y軸動的傾斜時温度特性

### 8.7 揺動環境試験結果評価

0.1Hzの揺動環境（図8.6.7、図8.6.8）には十分耐えうる設計であるが、30度の動的傾斜環境下では下記のような、いくつかの問題を生じた。

#### (1) 燃料電池スタックの排水設計（図8.6.13）

+Y軸方向について長期的な傾斜を継続した場合、燃料電池スタックからの排水が不十分になるために燃料電池セル電圧に大きな効果が発生する。これは、エジェクタの位置に起因するものであり、配管位置設計の見直しにより解決できる課題である。

#### (2) 水電解スタックの排ガス設計（図8.6.14）

-Y軸方向について長期的な傾斜を継続した場合、水電解スタックの水素出口温度が上昇することが判明した。これは、水電解スタック内の水が不均一（水素側減、酸素側増）になることに起因するものであり、飛行船搭載時の配慮（連続的に傾斜する方向をRFCのX軸方向とする）等により解決できる課題である。

## 9. 搭載型1kW級RFCシステムの運用評価試験及び設計検討（平成18年度）

### 9.1 運用評価試験

平成16年度に製作した搭載型1kW級RFCシステムを使用して、軽量化およびRFC温度制御性に影響する水タンク水量、FC冷却水流量、EC循環水流量について特性評価試験を行った。

図9.1に試験の系統図を示す。



図9.1 試験系統図

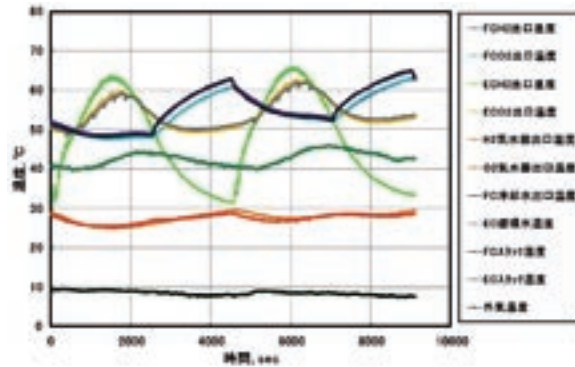


図9.2.1-3 水量2リットル時の温度特性

### 9.2 運用評価試験結果及び評価

#### 9.2.1 水量低減試験の結果

水量低減時の温度特性を図9.2.1-1～図9.2.1-3に示す。

#### 9.2.2 水流量低減試験の結果

水流量低減時の温度特性を図9.2.2-1～図9.2.2-4に示す。

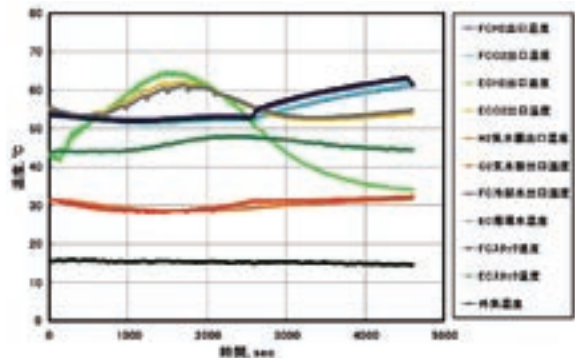


図9.2.1-1 水量14リットル時の温度特性

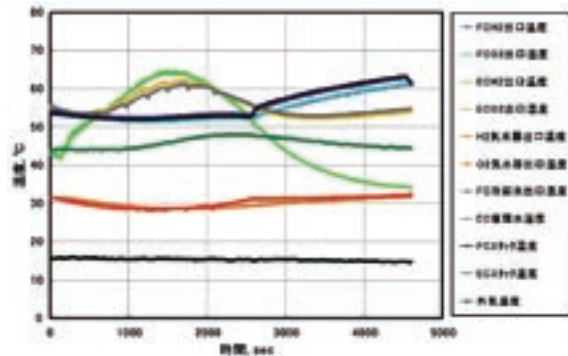


図9.2.2-1 水流量100% (冷却水12.1L/min, 循環水4.7L/min)

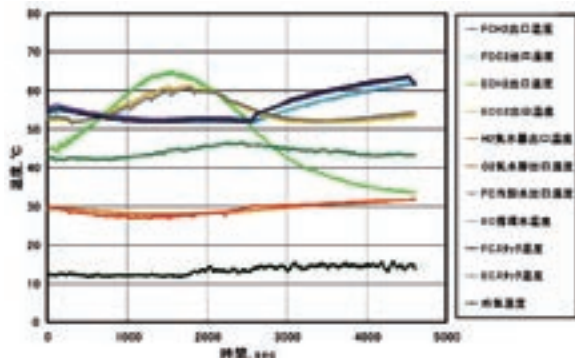


図9.2.1-2 水量8リットル時の温度特性

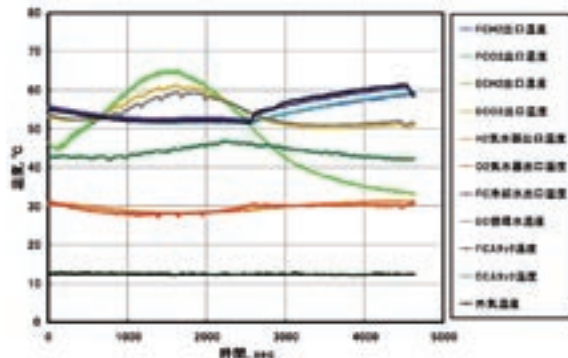


図9.2.2-2 水流量70%程度 (冷却水8.6L/min, 循環水1.3L/min)

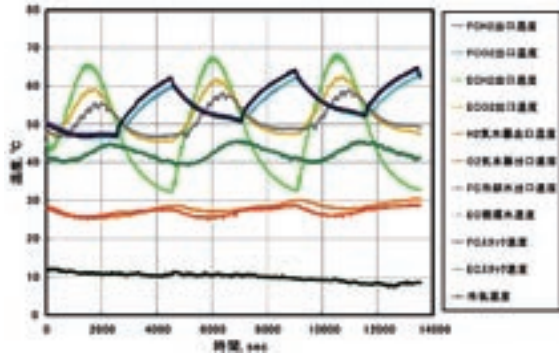


図9.2.2-3 複合運転（水量2L，冷却水流量100%（12.1L/min），循環水流量20%（1.3L/min））

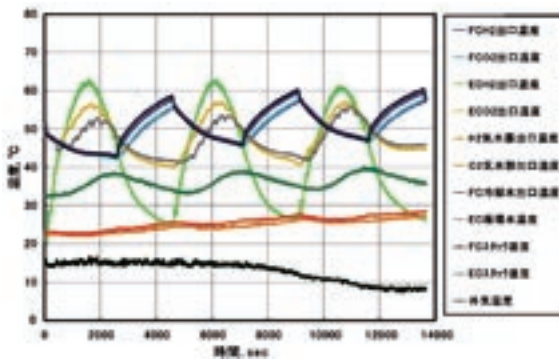


図9.2.2-4 限界運転（水量2L，冷却水流量70%（8.6L/min），循環水流量20%（1.3L/min））

### 9.2.3 運用評価試験結果評価

以上の試験結果より，再生型燃料電池の運転限界条件として，

- (1) 水タンク水量：ノミナル 14L→2Lに低減可
- (2) FC冷却水流量：ノミナル 12.1L/min→8.6L/min（ノミナルの約70%）で運用可
- (3) EC循環水流量：ノミナル 4.7L/min→1.3L/min（ノミナルの約30%）で運用可

であることが分かった。

以下，9.3項に試験データの評価を，9.4項に測定データに基づく熱解析計算の内容を示す。

## 9.3 取得データ評価

### 9.3.1 水タンク水量低減について

再生型燃料電池の仕様（表8.1）から水温上限は70℃である。

水タンク水量を14Lから2Lまで2Lごとに減量させた場合の水温は図9.3.1 (a) に示す通りで，上限温度は70℃以下であった。このことから，水タンク水量は2Lまで減量することができ，重量軽減につながる事が分かった。

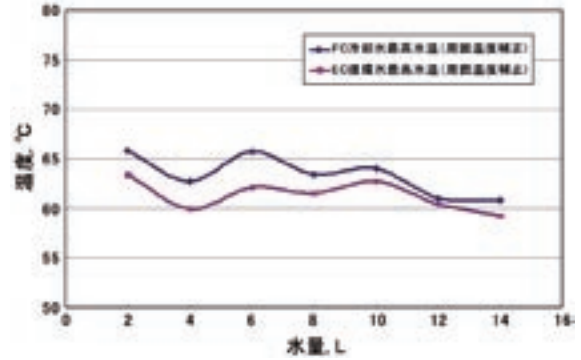


図9.3.1(a) 水量低減時最高水温

9.4項に示す熱解析では，水量を低減すると水温は上昇するが，これは，取得したときの周囲温度と初期水温が異なっているためである。その差をキャンセルする補正を行ったものを図9.3.1 (b) に示す。結果，FC冷却水水温とEC循環水水温ともに波うっているが，熱解析の傾向に一致する。これは取得したときにFC側，EC側が持っていた熱量のバランスが異なっていたためと考えられる。

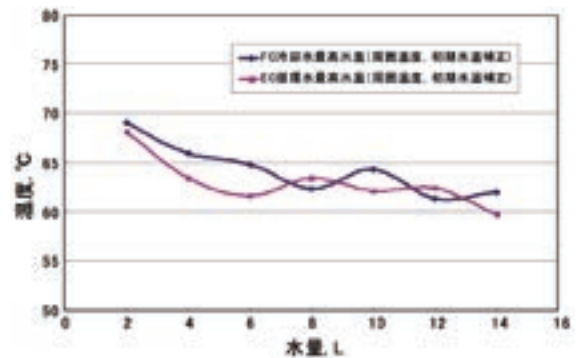


図9.3.1(b) 水量低減時最高水温（補正後）

### 9.3.2 水流量低減について

水流量を減少，即ち，FC冷却水流量70%，EC循環水流量30%にしても，温度的に顕著な差異は認められない。これは，9.4項の熱解析の結果とも一致する。従って，上記程度の水流量の減少は特に問題なく，可能である。

### 9.3.3 複合運転について

図9.2.2.3に示した複合運転について，サイクルを重ねた際の温度変化を図9.3.3に示す。

3サイクル目でほぼ定常温度に近く，この条件でサイクルを重ねても許容温度（70℃）以下での運転が可能と考えられる。

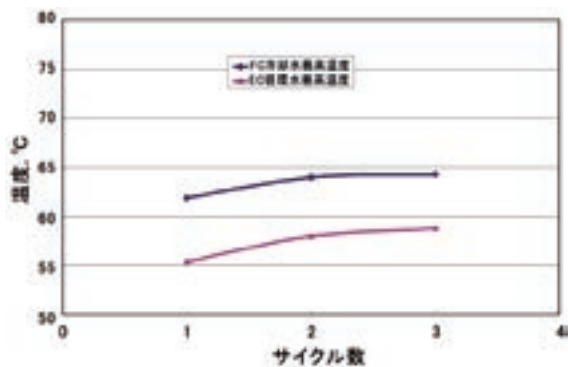


図9.3.3 複合低減運転温度変化

9.3.4 限界運転について

図9.2.2.4に示した限界運転について、サイクルを重ねた際の温度変化を図9.3.4に示す。

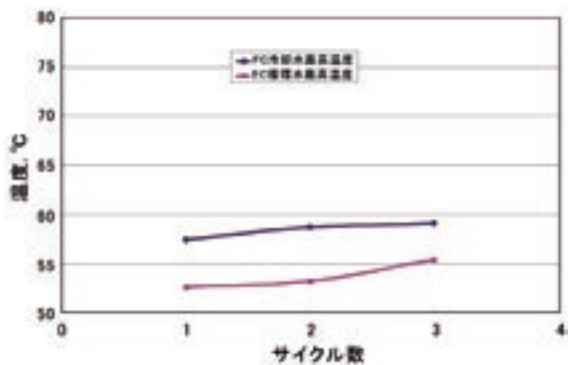


図9.3.4 限界運転温度変化

3サイクル目でまだ温度上昇しているが、図9.2.2.3に示した複合運転時に比べ、初期温度が低かったため、図9.3.3から予測するとサイクルを重ねても3サイクル目からさらに5°C程度上昇したところで、ほぼ定常温度に近いと見られ、この条件でサイクルを重ねても許容温度(70°C)以下での運転が可能と推定される。

9.3.5 継続運転時の検討

図9.2.2.4に示した限界運転について、燃料電池による1kW出力運転を継続した場合について、解析した結果を図9.3.5に示す。燃料電池の冷却水温度は、5時間後に約63°Cに達するが、その後、ラジエーターや水電解系統の排熱がまさり、下降に転ずる。最高温度が許容温度(70°C)以下であり、継続運転は可能である。

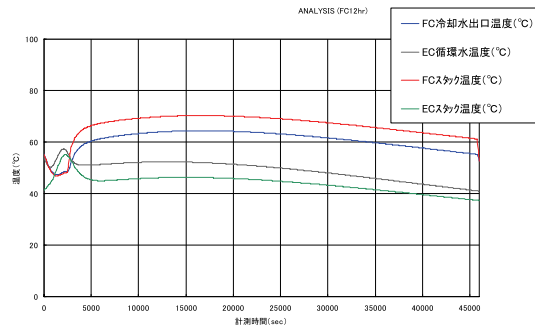


図9.3.5 継続運転時の温度上昇傾向

9.4 熱モデル解析

9.4.1 解析の目的

解析の目的は以下の通りである。

- (1) 飛行船搭載用燃料電池システムの小型化のため、タンク水量および循環水・冷却水の水量を低減した場合のシステム最高温度の変化を把握する。
- (2) 試験で得られた各部の温度を使用し解析モデルを構築する。
- (3) 構築された解析モデルを使用し、外気温度が変化した場合のタンク水量および循環水・冷却水の流量に対するシステムの最高温度の傾向を調べる。

9.4.2 解析の概要

試験結果との合わせ込みにより構築された解析モデルを使用し、外気温度が変化した場合のタンク水量および循環水・冷却水の流量に対する最高動作温度の傾向を調べた。

9.4.3 解析結果

試験結果と解析モデルによるシミュレーション結果を図9.4.3-1、図9.4.3-2示す。また、構築された熱解析モデルを使用し、外気温度が変化した場合のタンク水量および循環水・冷却水の流量に対するシステムの最高動作温度の特性を図9.4.3-3、図9.4.3-4に比較する。

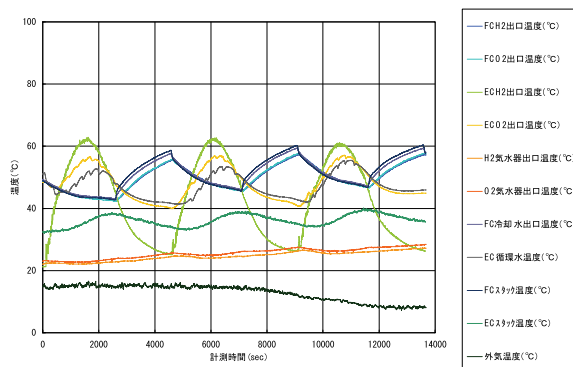


図9.4.3-1 10°C下でシステム限界運転 (試験結果)

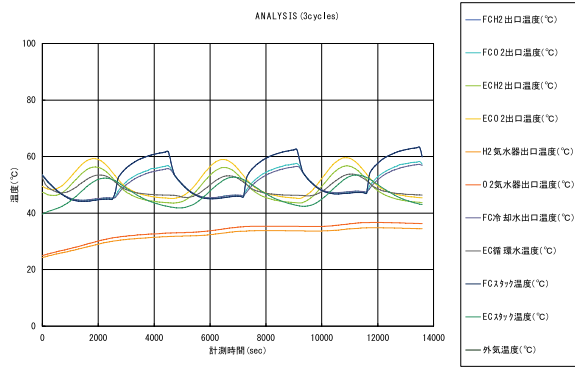


図9.4.3-2 10°C下でシステム限界運転（解析結果）

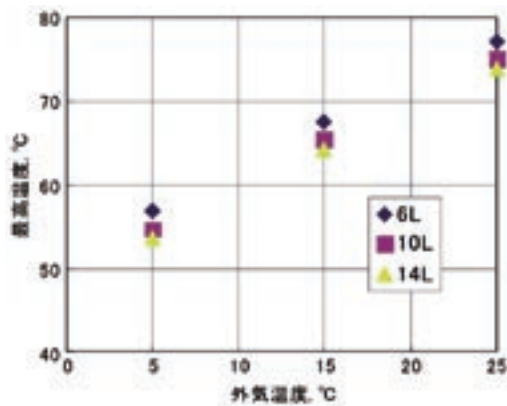


図9.4.3-3 水量を変化させた時の外気温度に対する最高温度の変化（解析結果）

#### 9.4.4 解析による温度予測

水量を変化させた時の外気温度に対する最高動作温度の変化は、図9.4.3-3に示すように、水量の減少により水温は0.5°C/L程度の割合で上昇する。流量を変化させた時の外気温度に対する最高温度の変化は、図9.4.4に示すように、水流量の減少による温度変化はほとんど認められない。

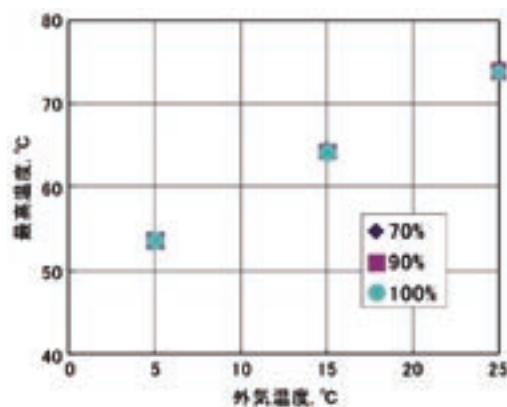


図9.4.4 流量を変化させた時の外気温度に対する最高温度の変化（解析結果）

#### 9.4.5 解析結果まとめ

平成17年度に製作された飛行船搭載型1kW級RFCシステムの熱解析モデルを基に、水量および水流量の低減によるシステム各部での温度予測を行い、試験結果との比較検証を行った。その結果、システムの最高動作温度を知る上で有効な解析モデリング手法を構築するとともに、水タンク水量を14Lから2Lまで、FC冷却水流量は、12.1L/minから8.6L/minまで、EC循環水流量は4.7L/minから1.3L/minまで減らせることが分かった。

### 10. RFC研究開発のまとめ

平成13年度の再生型燃料電池概念設計検討後、1kW級モデルを使用していくつかの試作評価試験をこれまで実施してきた。その成果の概要を以下にまとめる。

#### (1) 一体型1kW級RFCモデルの試作及び運転特性試験（平成14/15年度）

過去の研究では燃料電池及び水電解装置は各々独立システムとして構成させたモデルを使用して再生型燃料電池の基本システムによる原理確認試験を行った。ここで得られた基本システム系統及び運転手順/制御方式に基づき、飛行船搭載のために必要な燃料電池/水電解装置一体化設計を実施し、一体型1kW級RFCモデルを試作した。

本モデルを使用し、基本機能試験、サイクル試験（長周期；12h×10サイクル，短周期多サイクル；1h×50サイクル）を実施した。

試験の成果は以下である。

- ①燃料電池/水電解装置一体化システム機能系統ベースラインが確立した。
- ②長周期サイクル及び短周期多サイクル試験によって発電/充電効率（水回収観点による）がほぼ100%になるための方策を明確にした。
- ③自動サイクル運転手順及びロジックを確立した。

#### (2) 搭載型1kW級RFCシステムの試作及び環境評価試験（平成16/17年度）

一体型1kW級RFCモデルでの成果をもとに飛行船搭載を前提にした搭載型1kW級RFCシステムを試作した。燃料タンクを含めて搭載可能な重量である250kgになるように全体設計を実施した。実機のエネルギー密度のねらいは450Wh/kgであるが、搭載品試作第1段階として日程/費用が許容できる範囲内で最大限の軽量化・高性能化を図った。結果として15kW級RFC等価エネルギー密度は230Wh/kg程度を確保できた。

軽量化のために水タンク/気液分離器/熱交換器の一体設計，エジェクタの採用による重量ポンプの削除及び

配管・艀装・構造のコンパクト化設計の配慮を図った。

搭載型1kW級RFCシステムを使用して環境試験（傾斜姿勢、揺動運動、低温環境）を実施した。

結果評価は以下である。

- ① ±30°の傾斜姿勢において所定の自動サイクル運転が実施できた。
- ② 約0.1Hzの低周波揺動運動中において所定の自動サイクル運転ができた。
- ③ 約0.5Hzの動的傾斜運動中において所定の自動サイクル運転ができた。
- ④ -30℃～常温において所定の自動サイクル運転ができた。

以上の試験結果から、搭載型1kW級再生型燃料電池モデルは搭載品としての基本機能を有していることが確認できた。成果は以下のようにまとめることができる。

- ① 再生型燃料電池ユニットの搭載用システム機能系統が確立した。
- ② 飛行船打ち上げの動的環境でシステムが作動することが確認できた。
- ③ 再生型燃料電池の構成機器の自己発熱を有効活用することにより特に低温環境での保温に有効であることが確認できた。
- ④ ユニットの温度制御は断熱カバーによるユニット一体保温が効果的であることが確認できた。

### (3) エネルギー密度450Wh/kgの見通し

表10に示すように、成13年度での概念設計検討結果では1ユニット当たりの全備重量は540kg、ユニットエネルギー密度は400Wh/kgであったが平成18年度にはそれぞれ500kg、450Wh/kgとなり、飛行船システム側からの要求を満足できるものとなった。

## 11. RFCの研究開発の今後の課題

表11にこれまでの評価試験によって得られた再生型燃料電池の開発技術課題に対する達成内容及び今後の課題を示す。今後は、BBM原型モデルでの試作評価試験により以下について最終的な実現性の確認を行う必要がある。

### (1) 水分管理技術

これまでの評価試験により地上環境での確実な水分回収基盤技術は確立できた。今後、飛行環境での運用性を評価することが最優先課題である。特に、低温外気を利用した熱交換による気水分離機能を確実にし、飛行船運用時の揺動環境での実証評価が必須となる。

### (2) 温度管理

燃料電池及び水電解の最適な運転に必要な温度制御と排熱に関して、これまでの試験評価により温度制御方式の妥当性が確認できた。但し、温度管理にとって重要な課題として非運転モードでの温度制御が挙げられる。地上試験での熱制御方式の妥当性が評価されたが、飛行時の低温環境での実証評価が不可欠となる。

### (3) 耐環境性技術

温度/揺動環境での耐環境性及びユニット構造としての耐環境性の試験評価が必要である。

### (4) 安全設計基準の設定

RFCを飛行船（機）に搭載した実績はないため、搭載のための安全基準の策定が必要である。該当項目として、高圧ガス容器に関する安全基準、水素/酸素貯蔵に関する運用基準などがある。

### (5) システムの軽量化

現状特に水循環ポンプ、燃料電池/水電解スタック（高圧化含）、水素/酸素タンクの軽量化が重要な課題である。過去にこれらの軽量化に関して技術検討は進め、その技術的対策は得られている。早期に機器開発を開始することにより実現できる段階にある。

## 12. 今後の研究開発計画検討

これまでの1kW級RFCの地上モデル及び搭載型モデルの試作及び環境試験を含んだ各種評価試験の結果から搭載型15kW級モデルの概念設計がより明確になった。

今後の搭載用再生型燃料電池研究計画として以下を考える。

### (1) 成層圏環境評価試験

設計データ取得のための技術試験として環境試験を実施したが、実際の成層圏環境を模擬した条件での再生型燃料電池運転評価試験を実施する。成層圏環境として温度、気圧、振動条件を考える。特に低温・低圧条件をクリティカルと考える。また、排熱特性の評価により最適な熱交換器設計を検討する。

### (2) 軽量化モデル試作

今回の試作モデルのエネルギー密度は約230Wh/kgであるが、実機搭載では450Wh/kgが要求される。即ち、1/2の軽量化が要求され、その技術ハードルは高い。実機並みの性能である450Wh/kg達成の目処をつけるためには、その中間目標として350Wh/kg達成を狙った軽量



化モデル試作・試験なども考えられる。その発電出力は10～15kW級を想定する。試作モデルに対して上記(1)の成層圏環境試験を実施し、妥当性を評価する。これにより実機開発のフィージビリティが確定できると考えられる。

### 13. おわりに

平成10年度から平成18年度まで実施した、成層圏プラットフォームのための、再生型燃料電池の研究開発について、その概要をまとめた。

本研究開発においては、概念設計から始まり、要素試作とその組み合わせ、一体型システム試作、飛行船搭載型1kW級システム試作とその環境試験まで行い、これらの結果を用いて搭載型15kW級再生型燃料電池ユニットの概念設計を見直し、最終目標であるエネルギー密度450Wh/kgの達成にある程度技術的な見通しが得られたと考えられる。

今後は、実機レベルの概念設計を確認するための15kW級RFCユニットBBMモデルの試作・試験などに着手し、ユニット概念設計の確認により実機開発が実施可能であることを提示することが必要と考えられる。

表10 15kW級再生型燃料電池ユニット重量構成

No	システム部位／構成部品名称	平成18年度 検討結果 (kg)	平成13年度 検討結果 (kg)	平成13年度との差異の理由等
1	主要素系	341	358	－17
1-1	燃料電池スタック	30	35	余肉削除
1-2	水電解スタック	60	60	
1-3	GH <sub>2</sub> /GO <sub>2</sub> 貯蔵タンク	96	120	薄厚ライナー採用
1-4	水タンク（冷却水共用）	25	13	
1-5	燃料（純水）	100	100	材質Ti
1-6	冷却水	30	30	
2	補助容器系	23	14	＋9
2-1	H <sub>2</sub> ／水分離器（FC側）	0	0	気水分離不要
2-2	O <sub>2</sub> ／水分離器（FC側）	0	0	水タンクにて実施
2-3	H <sub>2</sub> ／水分離器（EC側）	11.5	7	材料Ti合金
2-4	O <sub>2</sub> ／水分離器（EC側）	11.5	7	材料Ti合金
3	ポンプ系	31	50	－19
3-1	冷却水ポンプ	6	10.5	小型化
3-2	H <sub>2</sub> 循環ポンプ	5	10.5	小型化
3-3	O <sub>2</sub> 循環ポンプ	2	10.5	エジェクタ化
3-4	供給水ポンプ（EC）	8	8	
3-5	循環水ポンプ（EC）	10	10.5	
3-6	ガス供給ポンプ（FC）	0	－	
4	熱制御系	5	36	－31
4-1	熱交換器	0	0	気水分離器が兼ねる
4-2	放熱器	0	27	特別な放熱が不要となった
4-3	送風機	5	9	軽量化
5	配管・艀装・構造系	72	72	±0
5-1	配管・バルブ類	30	36	配管簡素化
5-2	フィルタ類	12	9	フィルタ強化
5-3	架台構造	15	27	断熱構造分離
5-4	断熱カバー	15	0	
6	電気系	28	10	＋10
6-1	コントローラ	10	10	
6-2	センサ／ハーネス類	18	－	追加
	合計	500kg 450Wh/kg	540kg 400Wh/kg	－40

表 11 再生型燃料電池の開発技術課題に対する達成内容及び今後の課題

主要技術課題	現状の達成内容	達成度	今後の達成課題	達成時期
<b>1. 主要構成要素基盤技術開発</b>				
(1) 燃料電池スタック	15kW級スタック開発済み	◎	エンドプレート等の軽量化	原型モデル
(2) 水電解スタック	10気圧仕様スタック既存品あり	△	50気圧仕様化/軽量化	原型/実機モデル
(3) ガス循環ポンプ	民生既存品及びパッシブ循環方式	○	軽量化または削除(別循環方式の採用)	原型モデル
(4) 水循環ポンプ	民生既存品あり	△	軽量化	原型モデル
(5) 熱交換器/放熱器	民生既存品あり	△	軽量化/高効率化	原型モデル
(6) 燃料タンク	ロケット用軽量CFRP製燃料タンク技術有り	○	軽量ライナー材料の選定	原型/実機モデル
<b>2. システム基盤技術開発</b>				
(1) RFC 基本機能系統	(下記基本方式について1kWモデルで評価)		(見直し基本方式を原型モデルで評価する)	
① FC ガス供給/循環系	レギュレータ調圧/ポンプ・パッシブ循環方式	○	パッシブ循環方式の採用可否評価	原型モデル
② FC 気液分離系	外冷気による気液分離方式	○	小型化/水分の高回収率	原型モデル
③ EC 水供給/濾過系	ポンプ供給/陽イオンフィルター方式	○	高効率濾過方式の採用	原型モデル
④ EC 気液分離系	外冷気による気液分離方式	○	小型化/水分の高回収率	原型モデル
⑤ FC / EC 水保温・冷却系	冷却水排熱による保温/ヒータによる初期加温	○	熱バランス評価	原型モデル
(2) 系統機装軽量化				
① 配管機装・レイアウト	搭載型様式前提	△	軽量機装様式/軽量材料の採用	原型モデル
② 取り付け構造	搭載型様式前提	△	軽量構造様式/軽量材料の採用	原型モデル
③ エネルギー密度	約230Wh/kg (@30kW×14h相当)	△	約450Wh/kg (@30kW*14h)	実機モデル
(3) 耐環境性技術				
① 温度環境	-30℃~常温評価	○	-54℃~45℃	原型/実機モデル
② 振動環境	低周波/大振幅振動評価	○	低周波/大振幅振動対策	原型モデル
③ 姿勢	±30°傾斜評価	○	±30°傾斜対策	原型モデル
④ 低気圧環境	未実施	×	0.055気圧評価	1KW/原型モデル
(4) システム総合運用技術				
① 運用制御技術	完全自立運転/待機時低出力運転方式	○	運用方法の最適化	原型モデル
② 安全対策	高圧ガス基準/水素簡易防爆/GN <sub>2</sub> パージ	○	飛行船安全基準の制定(高圧ガス/水素/酸素)	原型モデル
③ 太陽電池との統合試験	太陽電池入力による水電解	○	太陽電池入力による水電解	原型モデル
④ 信頼性評価	50サイクル運転試験にて評価	○	約1000サイクル運転(2年間以上)	原型モデル

◎ 開発済み ○ 実証済み(性能向上が必要) △ 実証済み(既存品では実証。性能向上や今後の開発が比較的大) × 未実施

## 謝辞

本稿は、平成11年度から平成18年度にかけて行われた1kW級再生型燃料電池の研究開発成果である。本研究開発の実施に当たっては、株式会社アイ・エイチ・アイ・エアロスペースの岡屋俊一氏、篠崎 昇氏の多大なるご支援、ご協力をいただいた。ここに、厚く御礼申し上げる。

## 文献

- 1) Eguchi, K., et al.; Feasibility Study Program on Stratospheric Platform Airship Technology in Japan; 13<sup>th</sup> AIAA LTA Technology Conference, AIAA 99-3912; 1999-6.
- 2) Naito, H., Eguchi, K., Hoshino, T., et al.; Design Concept and Analysis of Solar Power Subsystem for SPF Airship Operations; 13<sup>th</sup> AIAA LTA Technology Conference, AIAA 99-3913; 1999-6.
- 3) 濱川圭弘；太陽電池；コロナ社
- 4) 電気学会・燃料電池発電次世代システム技術調査専門委員会編；燃料電池の技術；オーム社出版局
- 5) Eguchi, K., Yokomaku, Y. and Mori, M.; Overview of Stratospheric Platform Airship R&D Program in Japan; Proc. 14<sup>th</sup> AIAA LTA Technical Committee Convention; 2001-7.
- 6) Shinozaki, N., Okaya, S., Eguchi, K., and Harada, K.; Performance Analysis of Regenerative Fuel Cells for SPF Solar- Powered Airship; Proc. 14<sup>th</sup> AIAA LTA Technical Committee Convention; 2001-7.
- 7) 原田賢哉, 江口邦久, 鈴木隆男；成層圏プラットフォーム飛行船電源システムの設計指針；第3回成層圏プラットフォームワークショップ (SPSW2001), pp.95-103；2001-10。
- 8) 藤原 勉, 江口邦久；成層圏プラットフォーム再生型燃料電池システムの実験研究；航技研第39回公開研究発表会前刷集, pp.46-47；2001-12。
- 9) Fujihara, T. and Eguchi, K.; Experimental Work on Solar Regenerative Fuel Cells for SPF Airship; NAL Research Progress 2001, pp.13-14; 2002-3.
- 10) Eguchi, K., et al.; Key Considerations for SPF Airship Technology Demonstrator Design; Proc. 4<sup>th</sup> International LTA conference & Exhibition, Cambridge, UK; 2002-7.
- 11) 江口邦久；SPF飛行船搭載型電源技術の研究；第4回成層圏プラットフォームワークショップ (SPSW2003) 講演前刷集, pp.135-142；2003-2。
- 12) 江口邦久；成層圏プラットフォーム太陽電源システムの技術開発；日本機械学会2003年度年次大会；2003-8。
- 13) Eguchi, K. and Fujihara T.; Research Progress in Solar Power Technology for SPF Airship; NAL Research Progress 2002 to 2003, pp.6-9; 2003-9.
- 14) Eguchi, K., Fujihara, T., Okaya, S., and Shinozaki, N.; Research Progress in Solar RFC Technology for SPF Airship; 2003 Fuel Cell Seminar; US-DOE; 2003-11.
- 15) 江口邦久, 他；SPF飛行船用再生型燃料電池の開発計画と地上評価試験；第23回宇宙エネルギーシンポジウム, pp.84-88；2004-3。
- 16) Eguchi, K., et al.; Current Work on Solar RFC Technology for SPF Airship; 15<sup>th</sup> World Hydrogen Energy Conference (世界水素エネルギー会議), Yokohama, Japan; 2004-6.
- 17) 岡屋俊一, 篠崎 昇, 江口邦久, 藤原 勉；SPF飛行船搭載用再生型燃料電池の研究開発状況；第5回成層圏プラットフォームワークショップ (SPSW2005) 講演前刷集, pp.183-189；2005-2。
- 18) 藤原 勉, 佐々修一, 江口邦久, 岡屋俊一, 篠崎 昇；成層圏プラットフォーム飛行船用再生型燃料電池の開発；第49回宇宙科学技術連合講演会；2005-11。

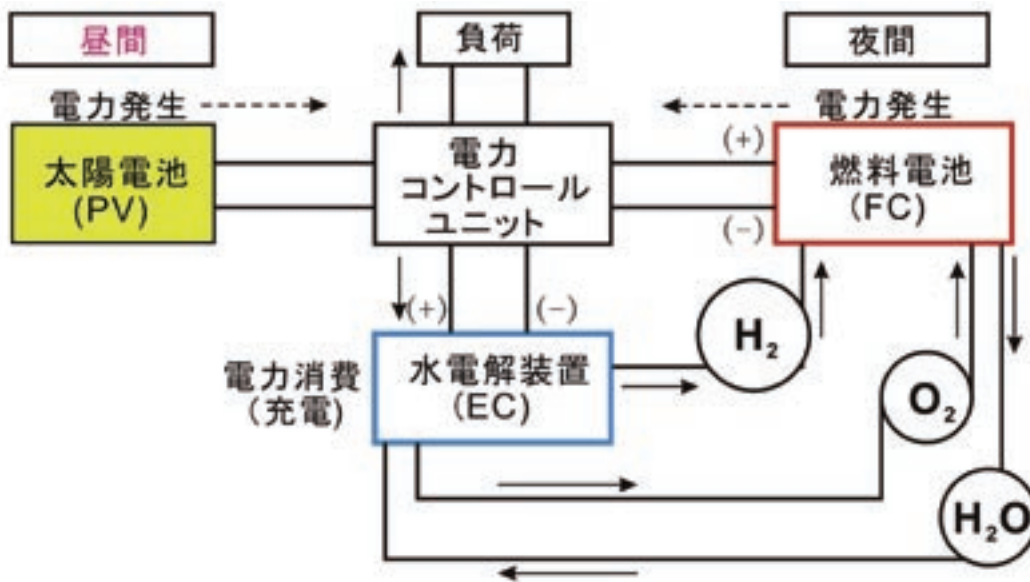
付録1：燃料電池の種類

種類	電解質	発電出力	動作温度	用途
固体高分子型 (PEFC)	固体高分子膜	～100kW	常温～80℃	携帯用, 自動車用, 家庭用など
リン酸電解質型 (PAFC)	リン酸	～1,000kW	160～210℃	業務用, 工業用など
溶融炭酸塩型 (MCFC)	溶融炭酸塩	1～10万kW	600～700℃	工業用, 分散電源用など
固体酸化物型 (SOFC)	安定化ジルコニア	1～10万kW	900～1000℃	工業用, 分散電源用など

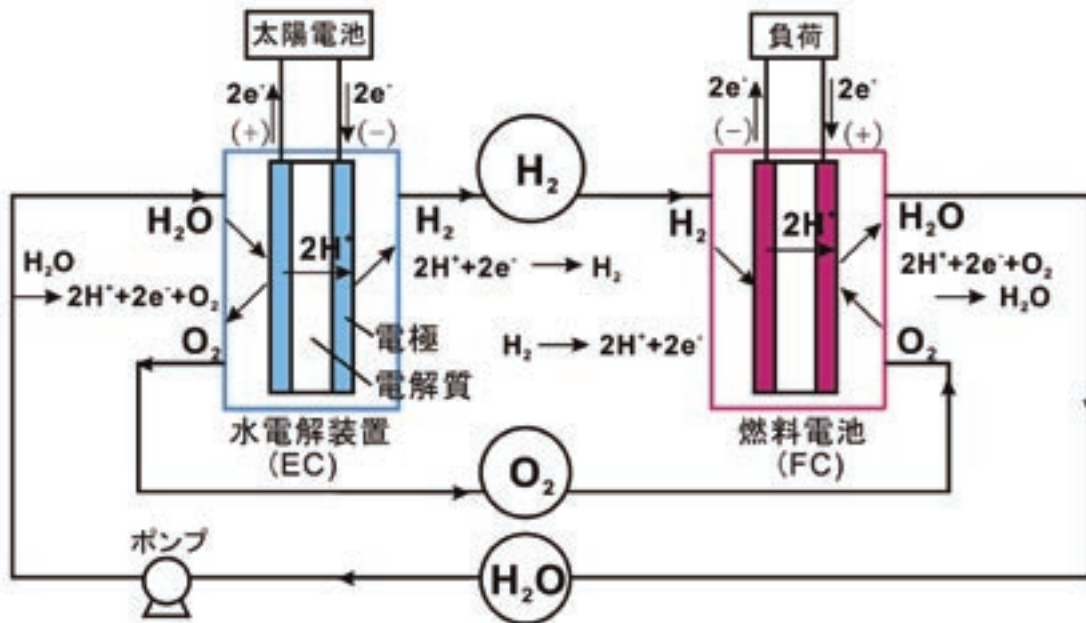
付録2：再生型燃料電池と二次電池の性能比較表

二次電池の種類	エネルギー密度 Wh/kg	備考
鉛電池	30～40	高信頼性, 効率, 寿命低い
ニッケル水素電池	40～50	HEV用実績大, 高温充電性に難
リチウムポリマー電池	50	
ウルトラキャパシタ	2～8	低内部抵抗, 高出力向き
リチウムイオン電池	120	高価, 次期HEV用
再生型燃料電池 (RFC)	230	高エネルギー密度 (JAXA開発, 15kW級RFC換算値, 2007.12月現在)

付録3：RFCの基本構造と動作原理



RFCの基本構成



RFCの動作原理

付録4：成層圏プラットフォーム飛行船用1kW再生型燃料電池の研究開発経緯

平成10～13年度 実用機電源 FS 1kW級地上電源運用評価用 RFC モデル試作/評価 15kW級実用システム概念設計	平成14～15年度 一体型1kW級モデル試作/試験	平成16年度 要素軽量化 搭載型1kW級 RFC システム試作	平成17年度 低温・揺動環境評価 (地上) / 太陽電池 (SC) ・再生型燃料電池 (RFC) 統合試験 (地上)	平成18年度 熱解析モデルの見直しと、搭載 RFC ユニットの概念設計の見直し
<p>●1kW級地上電源運用評価用 RFC モデルの特性評価</p>  <p>●15kW級実用システム概念設計</p> 	<p>●一体型1kWモデル試作/試験</p>  <p>空冷冷方式双水分離器                  空排熱授受による相互保温方式                  空自己加温式 FC スタック                  空一体化設計における基本機能系                  統、運用方法の妥当性評価                  空50 サイクル運転：閉鎖系/自律運                  転性能確認、連続サイクル運転                  による性能評価</p> 	<p>●軽量化のための要素試作/試験</p>  <p>●搭載型1kW級 RFC モデル試作と機能確認</p>  <p>空一体型双水分離器(熱交換機/気水分離器/水タンク)                  空水電解スタックの国産化                  空エンジンスタックガス循環 (小型・軽量化、補助動力低減)                  ⇒軽量化達成、230Wh/kg @15A@30°C 換算</p>	<p>●低温・揺動環境評価試験</p>  <p>空低温環境下での RFC 機能確認                  空傾斜・揺動環境下での RFC 機能確認、熱管理評価 ( @ -30°C )</p> <p>●SC・RFC 統合による SPF 電源系機能実証</p>  <p>傾斜環境試験 低温環境試験</p>  <p>SCユニット RFCシステム                  空制御装置の機能、RFC を含む系全体の正常動作を確認</p>	<p>●搭載型1kW級 RFC の運用評価試験</p>  <p>空冷却水流量を大幅に減らすことができることがわかり、軽量化のための技術データ取得                  空試験データに基づき冷却特性評価のための熱解析モデルのチューニングを実施</p> <p>●搭載型15kWRFC 原型モデルの熱解析・概念設計</p>  <p>空チューニングされた熱解析モデルに基づき搭載用 RFC ユニットの設計見直しを実施、目標エネルギー密度 450Wh/kg 実現の見通しが得られた。</p> <p>新 15kW RFC ユニット概念図</p>

## 付録5：湿度/水分量の計算

湿度/水分量の評価には以下の式を使用した。

## a. 飽和水蒸気圧

通常の温度領域 (0～100℃) での評価には簡便な Tetens 式を用いた。

また、初期水分量の誤差評価ではマイナス露点の値が必要なので、適用温度領域 (-100 [-50]～+100℃) の広い Goff-Gratch 式を用いた。

両者を比較した結果を下図に示す。厳密には高温側で Tetens 式の誤差が大きくなるが、実際上一致していると見なせる。

Tetens 式：

$$es = 6.11 \times 10^{(7.5t/(t+237.3))}$$

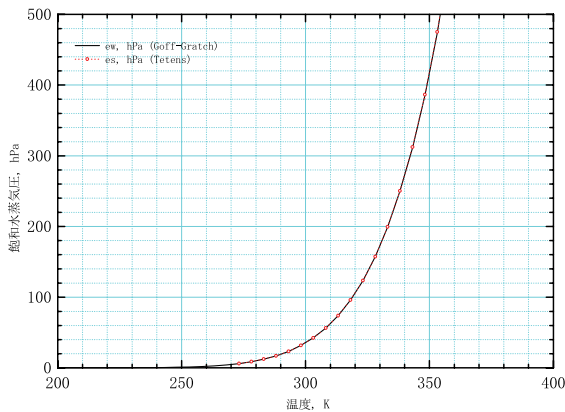
t：温度 [℃]

es：温度 t℃ における飽和水蒸気圧 [hPa]

Goff-Gratch 式：

$$\begin{aligned} \log_{10}ew &= -7.90298 \left\{ (373.16/T) - 1 \right\} + 5.02808 \log_{10} \\ & \left\{ (373.16/T) - 1.3816 \times 10^{-7} \left[ 10^{11.344|1 - (T/373.16)|} - 1 \right] + \right. \\ & \left. 8.1328 \times 10^{-3} \left[ 10^{-3.49149|(373.16/T) - 1|} - 1 \right] + \log_{10}1013.246 \right\} \\ ew &: -50^{\circ}\text{C} \sim 100^{\circ}\text{C} \text{ の水と熱力学的平衡状態にあると} \\ & \text{きの飽和水蒸気圧 [mb]} = [\text{hPa}] \end{aligned}$$

Tw：絶対温度 [K]



飽和水蒸気圧の計算

## b. 絶対湿度 (飽和条件)

1atm, t℃ における絶対湿度は次式で表される。(状態方程式から求められる)

$$a = 217 \times es / (t + 273.15)$$

a：絶対湿度＝単位体積 [1m<sup>3</sup>] の気体中に含まれる水蒸気の質量 [g]

es：飽和水蒸気圧＝E(t)

但し、タンクや配管内での水分評価には圧力・温度の補正 (体積の Nm<sup>3</sup> への換算) が必要である。

$$a' = 217 \times es / (t + 273.15) / (P + 0.101325) / 0.101325 / (273.15 / (t + 273.15)) \quad [\text{g/Nm}^3]$$

P：ゲージ圧力 [MPaG]

## c. 相対湿度 (センサ位置＝配管内)

貯蔵タンク系へ流入/流出するガスの相対湿度 rh [%] (及びガス温度 t [℃]) は温湿度センサの計測値を使用している。

## d. タンクへの水分流入量

水素/酸素ガスが貯蔵タンクへ流入する向きを正、流出する向きを負として、次式で評価した。

$$\dot{w} = (\dot{v}_{EC} - \dot{v}_{FC}) \times rh \times a' \times 10^{-5} / 60 \quad [\text{g/s}]$$

$\dot{w}$ ：水分流入量 [g/s]

$\dot{v}_{EC}, \dot{v}_{FC}$ ：EC側ガス流量及びFC側ガス流量 [NI/min]

## e. タンク内相対湿度；

貯蔵タンク内ガスの相対湿度 rh<sub>tank</sub> は次式で得られる。

$$rh_{\text{tank}} = w / (a' \cdot V_{\text{tank}}) \times 100 \quad [\%]$$

w：タンクへの水分流入量の積分値  $\int \dot{w} dt$  [g]

V<sub>tank</sub>：貯蔵タンク内ガス量 [Nm<sup>3</sup>]



宇宙航空研究開発機構研究開発資料 JAXA-RM-07-014

---

発行 平成20年2月29日

編集・発行 宇宙航空研究開発機構

〒182-8522 東京都調布市深大寺東町7-44-1

URL: <http://www.jaxa.jp/>

印刷・製本 株式会社 実業公報社

---

本書及び内容についてのお問い合わせは、下記にお願いいたします。

宇宙航空研究開発機構 情報システム部 研究開発情報センター

〒305-8505 茨城県つくば市千現2-1-1

TEL: 029-868-2079 FAX: 029-868-2956

---

©2008 宇宙航空研究開発機構

※本書の一部または全部を無断複写・転載・電子媒体等に加工することを禁じます。

