



JAEA-Research

2006-009



JP0650339

## 非凝縮ガス濃度測定装置の開発

Development of Measuring Apparatus for Noncondensable Gas Concentration

竹本 昌史 中村 秀夫 大和田 明彦 大崎 秀機

Masafumi TAKEMOTO, Hideo NAKAMURA, Akihiko OWADA and Hideki OSAKI

安全研究センター  
熱水力安全評価研究グループ

Thermohydraulic Safety Research Group  
Nuclear Safety Research Center

JAEA  
Research

March 2006

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは日本原子力研究開発機構が不定期に刊行している研究開発報告書です。  
本レポートの全部または一部を複写・複製・転載する場合は下記にお問い合わせ下さい。

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2-4  
日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課  
Tel.029-282-6387, Fax.029-282-5920

This report was issued subject to the copyright of Japan Atomic Energy Agency.  
Inquiries about the copyright and reproduction should be addressed to :

Intellectual Resources Section,  
Intellectual Resources Department  
2-4, Shirakata-shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1195, JAPAN  
Tel.029-282-6387, Fax.029-282-5920

©日本原子力研究開発機構, Japan Atomic Energy Agency, 2006

## 非凝縮ガス濃度測定装置の開発

日本原子力研究開発機構安全研究センター

原子炉施設安全評価研究ユニット

竹本 昌史、中村 秀夫、大和田 明彦<sup>+</sup>、大崎 秀機<sup>+</sup>

(2006年1月26日受理)

加圧水型原子炉の LOCA 時には、ECCS の蓄圧タンクから注水が終了した後、同タンクから1次系に加圧用の窒素( $N_2$ )ガスが流入する。ガスは圧力容器の頂部や蒸気発生器などに蓄積されるため、蒸気発生器伝熱管内での凝縮熱伝達が阻害され、蒸気発生器の2次側減圧による1次系の減圧が充分に行えない事態が生じ得る。これらの熱伝達、減圧阻害を解明する為には、蓄積した非凝縮ガスの濃度の定量的な把握が必要とされているが $N_2$ ガスの濃度を直接測定することは難しい為、測定例は見あたらない。

このような背景より、ROSA 計画大型非定常実験装置 (LSTF) の圧力容器や蒸気発生器に蓄積されるガス濃度が直接測定できる様にする為、蓄圧タンクの加圧ガスに空気を用いるとともに、ジルコニア酸素濃度計、タービンメータ等を組み合わせ、微少流量の高温、高圧状態の蒸気中の酸素濃度が計測出来る非凝縮ガス濃度測定装置を開発した。本報では本装置の概要、操作方法等を紹介するとともに、性能確認の為各種条件下で行った酸素濃度測定結果及び LSTF への適用性について報告する。

Development of Measuring Apparatus for Noncondensable Gas Concentration

Masafumi TAKEMOTO, Hideo NAKAMURA, Akihiko OWADA<sup>+</sup> and Hideki OSAKI<sup>+</sup>

Reactor Safety Research Unit  
Nuclear Safety Research Center  
Japan Atomic Energy Agency  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received January 26, 2006)

Nitrogen ( $N_2$ ) gas used for the pressurization of accumulator (ACC) tanks may flow into the PWR primary system during LOCA after the ACC coolant injection is completed. Since  $N_2$  gas may travel to and accumulates in reactor vessel top and U-tubes in steam generators (SGs), primary cooling and depressurization via SG secondary-side depressurization would become ineffective because of the degradation of condensation heat transfer in SG U-tubes. Quantitative measurement of gas accumulation is necessary to clarify the influences of gas onto such degradation in the heat transfer and thus the primary depressurization. However, direct measurement method of non-condensable gas concentration in steam has not been established.

An apparatus to directly measure gas concentration in high-temperature steam was developed to measure gas concentration in vessel upper head and SG U-tubes during LOCA experiments using ROSA/LSFT. The developed apparatus is primarily composed of zirconia oxygen sensor and turbine meter, enabling to deal with small amount of steam-gas mixture at high temperature when air is used to pressurize ACC tanks instead of  $N_2$  gas. This report describes the developed apparatus and its operation method with several test results for the confirmation of oxygen gas measurement capability and applicability of the apparatus to the ROSA/LSTF experiments.

Keywords: Noncondensable Gas Concentration,  $N_2$  gas, PWR Primary System, ROSA/LSTF, Steam Generators, LOCA

---

<sup>+</sup> Engineering Services Department, Nuclear Science Research Institute,  
Tokai Research and Development Center

## 目次

1.はじめに	1
2. 装置概要	2
2. 1 目的	2
2. 2 装置概要	2
2. 3 測定条件及び装置操作方法	4
2. 3. 1 測定条件の制御	4
2. 3. 2 装置操作方法	4
3. 標準ガスによる濃度計特性試験	9
3. 1 目的	9
3. 2 試験条件及び試験方法	9
3. 3 測定結果	9
3. 3. 1 圧力と濃度の関係	9
3. 3. 2 流量と濃度の関係	9
3. 3. 3 温度と濃度の関係	9
3. 4 考察	10
4. 蒸気中の酸素濃度測定	15
4. 1 目的	15
4. 2 測定条件	15
4. 3 測定方法	15
4. 4 測定結果	16
4. 4. 1 測定濃度	16
4. 4. 2 装置性能	16
4. 4. 3 計算濃度との比較	17
5. 大型非定常実験装置における酸素濃度測定	34
5. 1 目的	34
5. 2 測定条件	34
5. 3 測定結果	35
6. おわりに	48
謝辞	48

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Outline of Measuring Apparatus .....	2
2. 1 Objectives .....	2
2. 2 Measuring Apparatus .....	2
2. 3 Measuring Conditions and Operation Sequences .....	4
2. 3. 1 Setting of Measuring Conditions .....	4
2. 3. 2 Operation Sequences .....	4
3. Facility Characterization Test .....	9
3. 1 Objectives .....	9
3. 2 Test Conditions and Test Sequences .....	9
3. 3 Test Results .....	9
3. 3. 1 Pressure to Oxygen Concentration .....	9
3. 3. 2 Mass Flow Rate to Oxygen Concentration .....	9
3. 3. 3 Temperature to Oxygen Concentration .....	9
3. 4 Discussion .....	10
4. Oxygen Gas Measurement in High Pressure Steam .....	15
4. 1 Objectives .....	15
4. 2 Measuring Conditions .....	15
4. 3 Measuring Sequences .....	15
4. 4 Test Results .....	16
4. 4. 1 Measured Oxygen Concentration .....	16
4. 4. 2 Accuracy of Results .....	16
4. 4. 3 Comparison of Measured Oxygen Concentration with Calculated Values .....	17
5. Oxygen Gas Measurement in High Pressure Steam Using ROSA/LSTF .....	34
5. 1 Objectives .....	34
5. 2 Measuring Conditions .....	34
5. 3 Test Results .....	35
6. Summary .....	48
Acknowledgement .....	48

## 1. はじめに

加圧水型原子炉の LOCA 時には、ECCS の蓄圧タンクから注水が終了した後、同タンクから1次系に加圧用の窒素 ( $N_2$ )ガスが流入する。ガスは圧力容器の頂部や蒸気発生器などに蓄積されるため、蒸気発生器伝熱管内での凝縮熱伝達が阻害され、蒸気発生器の2次側減圧による1次系の減圧が充分に行えない事態が生じ得る。これらの熱伝達、減圧阻害を解明する為には、蓄積した非凝縮ガスの濃度を定量的に把握し、そのメカニズムを解明する必要がある。

ところが  $N_2$ ガスの濃度を直接測定する事は難しい為、ジルコニア酸素濃度計を用いて高温、高圧蒸気中に混合する酸素の濃度を測定する事の出来る非凝縮ガス濃度測定装置を試作するとともに、標準ガスの酸素濃度及び蓄圧タンクを用いた高温、高圧蒸気中の酸素濃度測定を実施し、装置の特性、操作方法を調べた。

さらに、本装置の適用例として ROSA 計画大型非定常実験装置(LSTF)の蓄圧タンクの加圧ガスを空気として注入させ、減圧過程における圧力容器及び蒸気発生器出口の蒸気中の酸素濃度を測定することにより、LSTF 実験への適用性について調べた。

## 2. 装置概要

### 2.1 目的

燃焼ガス中の酸素濃度測定に用いられているジルコニア酸素濃度計を用いて、高温、高圧の蒸気(圧力 2 MPa 以下、温度 493 K (220 °C)以下)中の酸素濃度を測定する装置を試作する。

以下に試作した装置の概要、その操作方法等について述べる。

### 2.2 装置概要

図2.2-1に装置の系統図を、図2.2-2に外観図を示す。系統図に示すように装置はジルコニア酸素濃度計、圧力制御弁、流量計、配管、配管ヒータ及びその制御装置などより構成されており、主な単体機器の仕様は以下の通りである。

#### (1) ジルコニア酸素濃度計 (計器 NO IFT3000)

フィッシャ・ローズマウント製 (WC3000NC)

仕様: 表2.2-1 参照

流体	燃焼ガス(ウェット分析可)
温度	973 K (700°C) 以下
圧力(耐圧)	0.35 MPa 以下
感度	0.01%
精度	指示値の±3% 又は 0.1%O <sub>2</sub> の大なる方
応答	3 秒以下

#### (2) 圧力制御弁 (計器 NO #1)

常用圧力が大気圧のジルコニア酸素濃度計を用いて、比較的高圧の蒸気(最大圧力 = 2 MPa)中の酸素濃度を測定する為、濃度計上流に減圧弁を設ける。又、実験の過程で、ジルコニア酸素濃度計の出力が計測時の全圧力の影響を受けることが分かったことから、出来るだけ酸素濃度計測値が全圧力によって影響を受けないようにする為、本弁は濃度計の周辺圧力が大気圧近傍で制御できる圧力制御弁とした。

#### (3) 流量計 (計器 NO FE001)

濃度測定時の蒸気とガスの混合気の流量を測定する為、流量計を濃度計下流に設ける。実機(ROSA/LSTF)への適用を想定すると、サンプリングによる流量は小さい事が望ましい為、大気圧近傍で微少流量の計測が可能な流量計としてタービンメータ(流体工業製、型式 FT4-8 又は FT6-8)を採用した。本流量計ではその機構上、蒸気の凝縮水滴混入を避ける必要がある。

仕様: 表 2.2-2 参照

型式	FT4-8	FT6-8
測定可能範囲	6~85 L/min	7~140 L/min
温度	423 K (150 °C) 以下	同 左

本装置の機能を満足させ、又流体条件(圧力、流量、温度変化)が酸素濃度へ与える影響を極力少なぐする為、各構成機器について以下の点に配慮した。

#### (a) 圧力制御弁

圧力制御弁による減圧後の濃度計の制御圧力は、ジルコニア濃度計の常用圧力(大気圧)に近く、且つ濃度計下流の配管圧損及びバルブ流量特性を考慮して、大気圧 + 2 kPaとした。

#### (b) 流量計

サンプリング量(測定流量)は LSTF 内での熱水力現象へ及ぼす影響を最小にする為、測定可能な範囲で少ない方が望ましい。そこでタービン流量計の仕様上の最小流量(FT4-8:6 L/min、FT6-8:7 L/min)を考慮し、測定流量範囲が 10 L/min 以上～30 L/min 程度となる様にした。その為の流量調整はバルブ開度により、配管系の圧力損失を調整することにより行った。

#### (c) 配管

各計器間の配管には下記の目的により、配管ヒータ(配管表面コイルヒータ)、ドレン弁、バイパス弁を設けた。

##### i) サンプリングノズルから圧力制御弁までの配管ヒータ及びドレン弁

サンプリングノズルから制御弁までの配管内の凝縮防止用に加熱ヒータ(TWE101)を設け、流体の飽和温度まで加熱する。又この配管内には、運転初期に予想される排水操作の為のドレン弁(VD1)を設けた。

##### ii) 圧力制御弁から濃度計までの配管ヒータ

圧力制御弁で濃度計測定部の流体圧力 = 大気圧 + 2 kPa に制御する時、減圧後の流体温度は同圧力に対する飽和温度(約 373 K (100 °C))近くまで低下する。この時、圧力制御弁から濃度計間の圧力損失は無視出来る程度である。一方、濃度計上流の配管内で凝縮を生じると、計測される混合気の濃度が変化することが考えられるため、減圧後の制御弁から濃度計の配管内において蒸気凝縮を防止する必要がある。さらに、凝縮液滴が下流のタービンメータを用いた流量計測に悪影響を与えることも懸念し、同メータの仕様上の最高使用温度 = 423 K(150 °C)である事を考慮して、圧力制御弁から濃度計までの配管中の流体を 373 K～423 K(100 °C～150 °C)程度まで加熱出来る配管ヒータ(TWE001、TWE002、TWE103)を設け、濃度計入口流体温度が 373 K～423 K となるように制御した。

##### iii) 濃度計から流量計までの配管ヒータ

配管内での凝縮によるタービンメータへの液滴の混入を防ぐ為、上記と同様に 373 K～423 K (100 °C～150 °C)まで加熱することが出来る配管ヒータ(TWE003)を設けた。

##### iv) 流量計バイパス弁 (V8)

濃度測定開始時において空気からサンプリング流体へバルブによる切り替え操作を行う時、濃度計内の高温空気が直接流量計へ流れないようにする為、又液滴を含むサンプリング流体が流量計へ入らないようにする為、流量計配管ラインにバイパス配管を設けた。

## 2. 3. 測定条件及び装置操作方法

### 2. 3. 1 測定条件の制御

測定に際し装置の各構成計器の適用範囲内で且つ圧力、温度、流量の変化が濃度に及ぼす影響を出来るだけ小さくする為、2. 2項の理由により制御(又は設定)範囲は以下とした。

- a) 圧力： ジルコニア酸素濃度計単体の常用圧力(大気圧)に近く、且つ濃度計下流の配管圧損及びバルブ特性を考慮して大気圧 + 2 kPa に制御する。
- b) 温度： 濃度計への液滴侵入防止及び流量計の仕様上の許容温度(423 K(150 °C)以下)を考慮し、配管ヒータ温度は濃度計入口流体温度(TE003)及び流量計入口温度(TE004) = 373 K～423 K(100 °C～150 °C)になるよう制御する。
- c) 流量： 流量計の仕様上の最低流量を考慮して、流量の測定範囲 = 10 L/min～30 L/min とする。

### 2. 3. 2 装置操作方法 (図2. 2-1参照)

非凝縮ガス測定装置を用いる場合の濃度測定方法は以下の通りである。

#### \*\*\* 濃度計起動

- 1) 濃度計起動準備 濃度計ヒータ起動
- 2) 起動準備後、流体配管へ冷却空気通気

#### \*\*\* ドレン操作

- 3) ドレン弁(VD1)開、元弁(V1)開
- 4) 蒸気を通し、ドレンを抜く
- 5) ドレン弁(VD1)閉、流量計前後弁(V6,V9)閉、濃度計入口弁(V4)開、流量計バイパス弁(V8)開

#### \*\*\* 制御圧力設定

- 6) 制御弁圧力(PE001)を大気圧+2kPaに設定

#### \*\*\* 酸素濃度計校正

ジルコニア酸素濃度計の校正には高酸素(O<sub>2</sub>)濃度のテストガスと低酸素(O<sub>2</sub>)濃度の標準ガスを用いて行なわれるが、ここでは 8% O<sub>2</sub> と 0.4% O<sub>2</sub> の2種類を用いて自動校正を行う。

#### \*\*\* 配管ヒータ温度設定及び昇温

- 7) 濃度計入口温度(TE003)及び流量計入口温度(TE004)が 373 K(100 °C)～423 K(150 °C)になるように配管ヒータを設定する。

#### \*\*\* 流量設定

- 8) 流量計バイパス弁(V8)閉、流量計へ通気。

#### \*\*\* 濃度測定開始

- 9) 測定終了後、コンプレッサーエアーにより流量計をエアーパージして終了する。

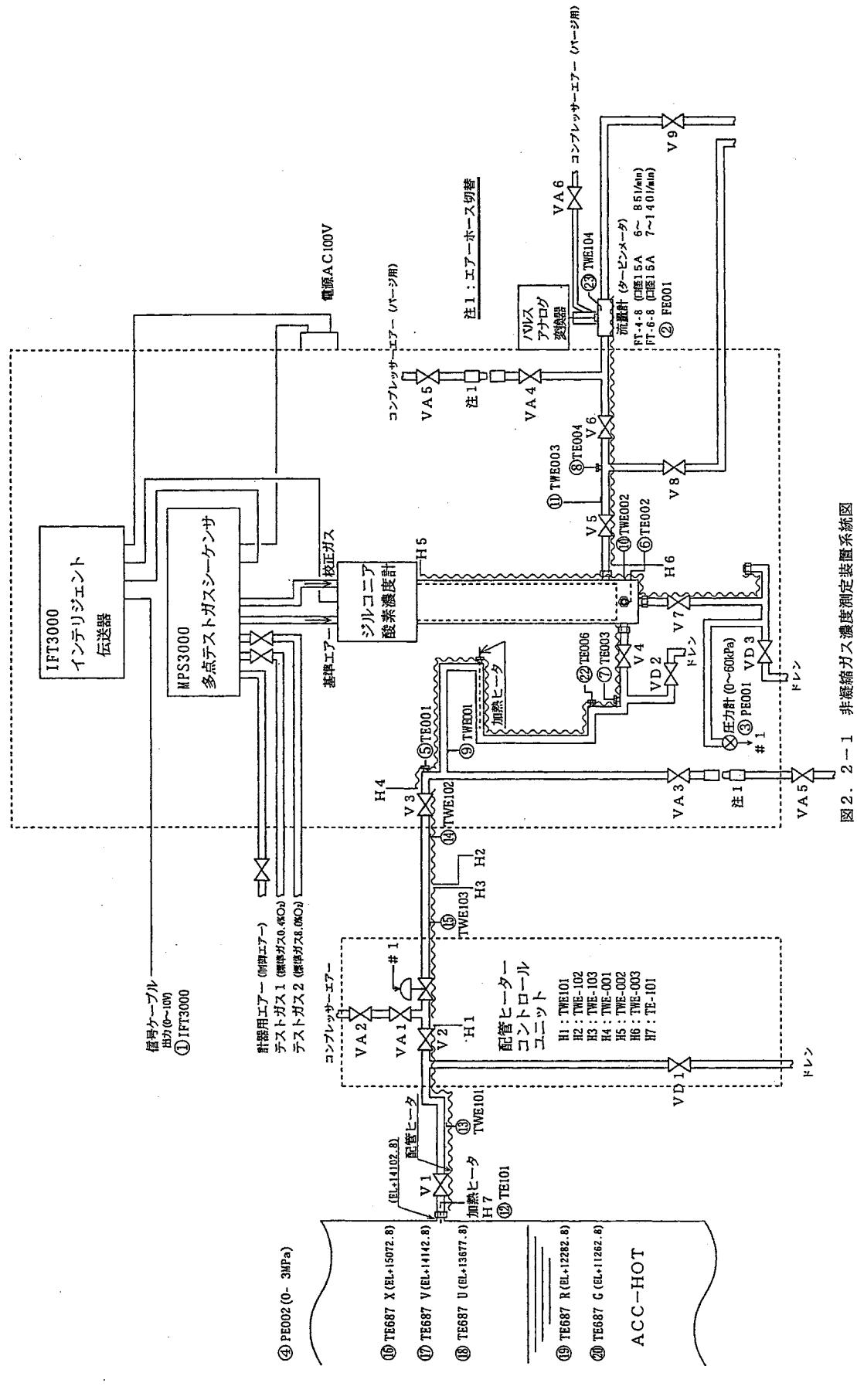


圖 2. 2-1 非凝縮力及濃度測定裝置系統圖

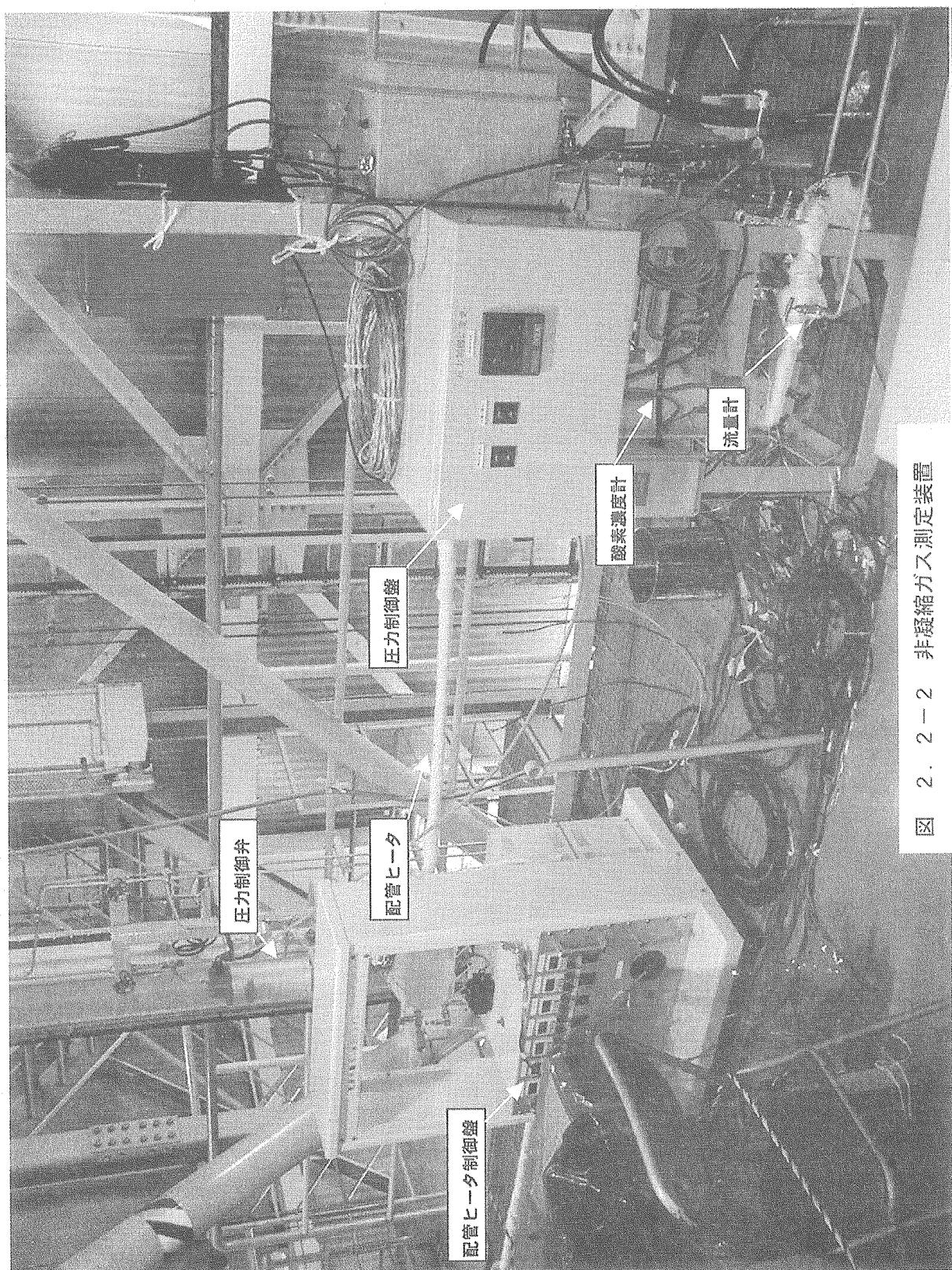


図 2. 2-2 非凝縮ガス測定装置

表 2.2-1 ジルコニア酸素濃度計

(フィッシャーロズマウントジャパン(株) "PRODUCT DATA SHEET106-300NH-J

## 仕様

SPECIFICATIONS ジルコニア酸素分析計 World Class 3000NH"より抜粋)

プローブ	HPS 3000フィールドインターフェース (オプション)
プロセス・ガス温度：10～700°C (バイパスパッケージ付980°C迄)	プローブとIFT 3000の距離が長い (45m以上) または防爆の場合使用。
セル応答速度：1 ms	
プローブ比較ガス流量 (オプション)	
：乾燥計装空気 (20.95%O <sub>2</sub> ) 0.9 ℥ / min	ケーブルス : NEMA 4X(IP65)
エアセット付属	オプション ; Class 1, Div.1 Group B
校正ガス：テストガス・キット P/N6296A27GO1	湿度 : 95%RH
0.4%O <sub>2</sub> (バランスN2) および8%O <sub>2</sub> (バランスN <sub>2</sub> ) ガス	周囲温度 : -30～60°C
校正ガス流量 : 2.25 ℥ / min	振動 : 5m/sec <sup>2</sup> , 10～500XYZ面
公称挿入長 : 0.45m, 0.91m, 1.83m, 2.74m, 3.66m	ケーブル長 (プローブ : 45m max.)
接ガス材料 : 316LSST	ブとHPS 3000の間)
概略出荷重量 : 457mm(18インチ)プローブ ; 24.97kg	電源 : 100/115/220V±10%Vac 50/60Hz
0.91m(3 フット)プローブ ; 27.24kg	消費電力 : 200VA
1.83m(6 フット)プローブ ; 29.94kg	概略出荷重量 : 5.44kg
2.74m(9 フット)プローブ ; 32.66kg	
3.66m(12 フット)プローブ ; 35.38kg	

## IFT 3000インテリジェント伝送器

ケーブルス : NEMA 4X (IP65)	MPS 3000多点テストガスシーケンサ (オプション)
湿度 : 95%RH	自動ガス校正に使用します。
周囲温度 : 0～50°C	
-30～50°C (ヒーター、サーモスタット付)	ケーブルス : NEMA 4X (IP65)
電源 : 100/115/220/V±10%VAC50/60Hz	湿度 : 95%RH
消費電力 : HPS 3000付 30VA	周囲温度 : -30～71°C
HPS 3000無し275VA	振動 : 5 m/sec <sup>2</sup> , 10～500XYZ面
レンジ : 現場にて選定可能一	校正周期 : 1 h～1 Y (IFT 3000付)
対数またはリニア特性、可変レンジ	校正時間 : 10S～20min (IFT 3000付)
二重レンジ、レンジ切換	校正後のバージョン時間 : 30S～20min (IFT 3000付)
レンジ ; 0～1%, 0～5%, 0～10%,	校正プローブ : 最大4ヶ
0～25%O <sub>2</sub>	配管長 (プローブと : 最大91m)
振動 : 5m/sec <sup>2</sup> , 10から500XYZ面	MPS 3000の間)
耐ノイズ性 : EMC規格、EN50 082-1, EN 055 011に適合	ケーブル長 (MPS : 最大303m)
アナログ出力 : 0～20mAADC、4～20mAADC、絶縁; 最大950Ω、	300とIFT 3000の間)
0～10DC、最小2KΩ、HARTプロトコール機能付	電源 : 100/115/220V±10%VAC 50/60Hz
指示 : 0.1%O <sub>2</sub> または読みの±3%	消費電力 : 15VA
(いずれか大きい方)	概略出荷重量 : 15.88kg
システムレスポンス : 3秒以下 (アンプ出力)	配管仕様 : 外径1/4" チューブ、
感度 : 0.01%O <sub>2</sub>	1/4" NPTバルクヘッド11ヶ
プログラマブル接点出力	
: 3点、Form C, 48Vmax, 100mAmax	
ディスプレイ : 1、0.8インチ高、3 digit、LED数値ディスプレイ	275 HART コミュニケータ (オプション)
オペレータインターフェイス	スマート機能付IFT 3000には別途275 HART コミュニケータが必要となります。
: デラックス仕様；	
4行40アルファベット数字、背面照明はLCD	
ディスプレイ 8キー付キーボード	
ディスプレイ専用型 : 4キ一般キーボード	
概略出荷重量 : 11.34Kg	

表 2.2-2 タービンメータ (流体工業(株) 製品カタログ "タービンメータ(FTシリーズ)より抜粋")

## 流量範囲

型 式	口 管	液 体 (L/min)		気 体 (Actual L/min)	
		10:1	最大測定範囲	10:1	最大測定範囲
FT2-8	15A(1/2B)	—	—	2.8~ 28	2.3~ 35
FT4-8		1~ 10	0.3~ 11	7~ 70	6~ 85
FT6-8		1.9~ 19	0.4~ 19	14~ 140	7~ 140
FT8-8		2.8~ 28	0.6~ 30	20~ 200	12~ 225
FT-08		3.8~ 38	0.8~ 38	28~ 280	14~ 280
FT-10	20A(3/4B)	4.8~ 48	0.8~ 56	35~ 350	17~ 425
FT-12		7.5~ 75	1.5~ 95	56~ 560	28~ 700
FT-16	25A(1B)	19~ 190	2.3~ 230	140~ 1,400	45~ 1,700
FT-20	32A(1 1/4B)	34~ 340	3.8~ 380	255~ 2,550	70~ 2,800
FT-24	40A(1 1/2B)	57~ 570	6~ 600	425~ 4,250	115~ 4,500
FT-32	50A(2B)	85~ 850	9.5~ 950	640~ 6,400	140~ 7,000
FT-40	65A(2 1/2B)	150~ 1,500	17~ 1,700	1,130~ 11,300	255~ 12,700
FT-48	80A(3B)	245~ 2,450	28~ 2,800	1,840~ 18,400	425~ 21,000
FT-64	100A(4B)	475~ 4,750	57~ 5,700	3,550~ 35,500	850~ 42,500
FT-80	125A(5B)	760~ 7,600	95~ 9,500	5,700~ 57,000	1,400~ 70,000
FT-96	150A(6B)	1,140~11,400	135~13,500	8,500~ 85,000	2,000~ 99,000
FT-128	200A(8B)	2,100~21,000	230~23,000	15,600~156,000	3,400~170,000
FT-160	250A(10B)	3,200~32,000	380~38,000	24,000~240,000	5,700~283,000
FT-192	300A(12B)	4,500~45,000	570~57,000	34,000~340,000	8,500~425,000

※上記の液体は1.2CSTの粘度に基づいてあります。

※上記の気体はAIR (1 Atm, 15°C)に基づいてあります。

## 一般仕様

精 度 (10:1)	直 線 性	±0.5% RD (水相当)	±1.0% FS (AIR相当)
	再 現 性	±0.3% RD (水相当)	±0.5% RD (AIR相当)
最 高 使 用 壓 力	35MPa (差圧測定法により異なります)		
使 用 温 度	-180°C~+300°C (型式により異なります)		
接 続	NPT, フレアーチューブ (MS-33656, 37°), ANSIフランジ, SAサニタリー		
標準材質	ハウジング・サポート	SUS316相当	
	ローダ	SUS430F相当	
	ペアリング	液 体	気 体
		・ボール・ペアリング (SUS440C) グラファイト・ジャーナル、カーバイト・ジャーナル	ボール・ペアリング (SUS440C)
ピッケ・オフ	R・F (標準)	-20°C~+150°C	
	マグネット (標準)	-30°C~+160°C	
	高温用マグネット (オプション)	-180°C~+300°C	

### 3. 標準ガスによる濃度計特性試験

#### 3. 1 目的

本装置の濃度計特性を把握する為、標準ガス(酸素濃度 21.03%、2.02%の2種類)を用い、濃度に及ぼす空気圧力、流量、温度の影響を調べる。又測定濃度と標準ガスとの比較によりシステムとしての本装置の濃度測定精度を調べる。

#### 3. 2 試験条件及び試験方法

酸素濃度の異なる2種類の標準ガスを用い、それらの圧力、温度、流量を2. 3. 1項で述べた一定範囲に制御する事により濃度と圧力、温度、流量との関係を調べた。

##### 1) 空気圧力と濃度測定

流量、温度をほぼ一定に保ち制御圧を大気圧 +1 kPa(又は +2 kPa)から +2 kPa → +3 kPa → +4 kPa へ変化させ、その間の濃度変化を測定した。

##### 2) 流量と濃度測定

圧力、温度をほぼ一定に保ち、流量計出口弁開度を調整する事により流量を変化させて濃度変化を測定した。流量は、21.03%濃度について 17~1 L/min まで、2.02%濃度について 24~10 L/min まで変化させた。

##### 3) 温度と濃度測定

圧力、流量をほぼ一定に保ち、配管ヒータ設定値を 21.03%濃度について 350 K(77 °C)~473 K(200 °C)、2.02%濃度について 370K(97°C)~423K(150°C) の間で変化させ、その間の濃度変化を測定した。

#### 3. 3 測定結果

##### 3. 3. 1 圧力と濃度の関係

21.03%酸素標準ガス

図3. 3-1 (圧力変化: 大気圧 +1~4 kPa)

流量、温度は図 3. 3-2 に示す。

2.02%酸素標準ガス

図3. 3-7 (圧力変化: 大気圧 +1~4 kPa)

流量、温度は図 3. 3-8 に示す。

##### 3. 3. 2 流量と濃度の関係

21.03%酸素標準ガス

図3. 3-3 (流量変化: 1~17 L/min)

圧力、温度は図3. 3-4に示す。

2.02%酸素標準ガス

図3. 3-9 (流量変化: 10~24 L/min)

圧力、温度は図3. 3-10に示す。

##### 3. 3. 3 温度と濃度の関係

21.03%酸素標準ガス

図3. 3-5 (温度変化: 350~473 K)

圧力、流量は図 3. 3-6に示す。

2.02%酸素標準ガス

図3. 3-11 (温度変化: 370~423 K)

圧力、流量は図3. 3-12に示す。

### 3.4 考察

測定結果からは、酸素濃度と流量、温度との間にある程度の相関が認められる。圧力と酸素濃度については大気を用いた時の両者の関係を図3.4-1に示すが濃度と圧力の間に明確な比例関係を確認出来る。本装置では圧力による濃度への影響を避ける為圧力制御弁を用い圧力一定条件下で測定を行う。

上記測定結果のまとめを表3.4-1に示す。表には酸素濃度範囲(A)として本装置で採用したジルコニア酸素濃度計単体の計器精度を考慮した場合の標準ガスの酸素濃度範囲を示している。測定した圧力、流量、温度の範囲において、酸素濃度の値はいずれもこれら計器精度を考慮した濃度範囲(A)の間にあることが分かる。本結果を図3.4-2及び図3.4-3に破線で示すと共に前章で示した圧力、流量、温度の制御範囲(圧力:大気圧+2kPa、流量:10L/min~30L/min、温度:373K~423K)を太線で示す。図よりこれらの範囲に制御することにより本装置の濃度を濃度計単体の精度内で評価出来る事が確認できる。

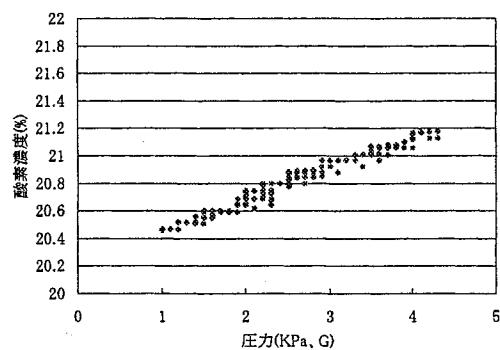


図 3.3-1 圧力と酸素濃度の関係  
(標準ガス  $O_2 = 21.03\%$ )

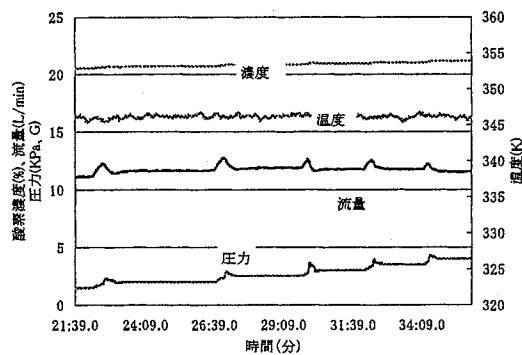


図 3.3-2 圧力と酸素濃度の関係(時間変化)  
(標準ガス  $O_2 = 21.03\%$ )

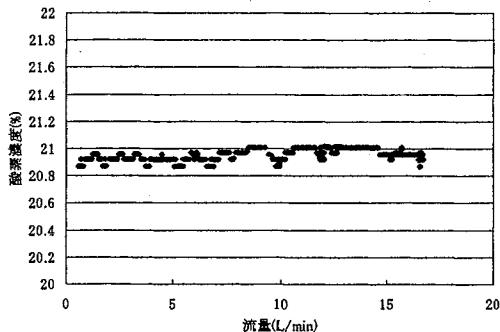


図3.3-3 流量と酸素濃度の関係  
(標準ガス  $O_2 = 21.03\%$ )

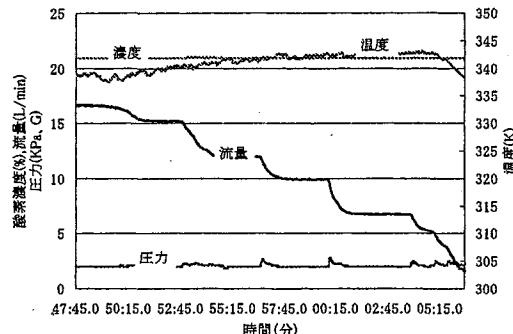


図3.3-4 流量と酸素濃度の関係(時間変化)  
(標準ガス  $O_2 = 21.03\%$ )

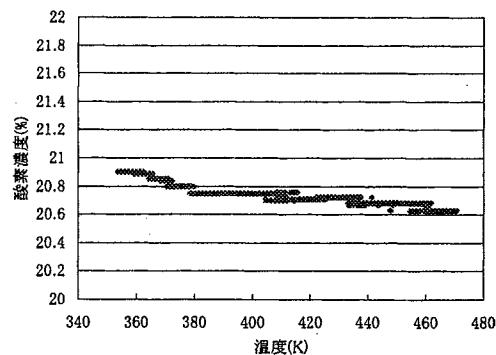


図 3.3-5 溫度と酸素濃度の関係  
(標準ガス  $O_2 = 21.03\%$ )

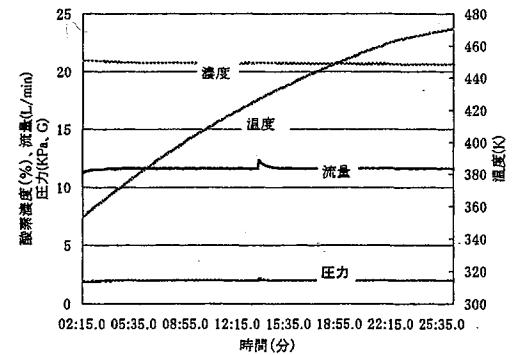


図3.3-6 溫度と酸素濃度の関係(時間変化)  
(標準ガス  $O_2 = 21.03\%$ )

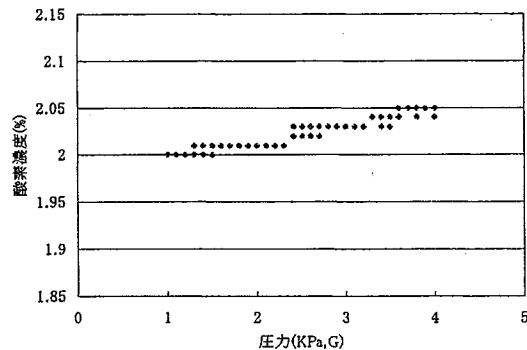


図 3.3-7 圧力と酸素濃度の関係  
(標準ガス  $O_2 = 2.02\%$ )

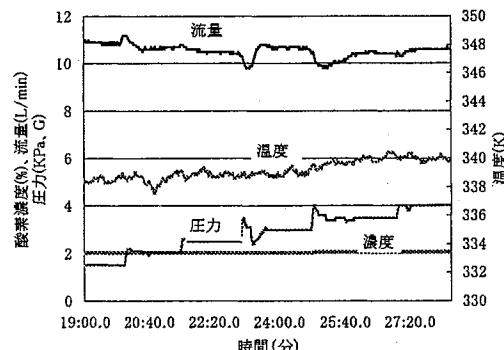


図 3.3-8 圧力と酸素濃度の関係(時間変化)  
(標準ガス  $O_2 = 2.02\%$ )

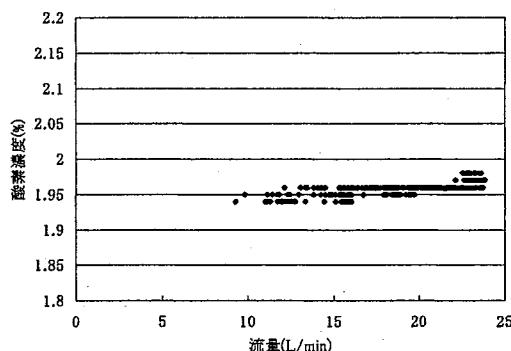


図 3.3-9 流量と酸素濃度の関係  
(標準ガス  $O_2 = 2.02\%$ )

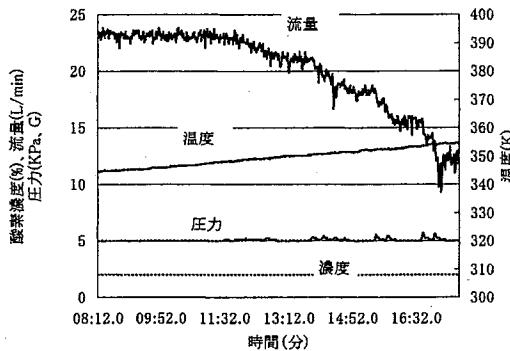


図 3.3-10 流量と酸素濃度の関係(時間変化)  
(標準ガス  $O_2 = 2.02\%$ )

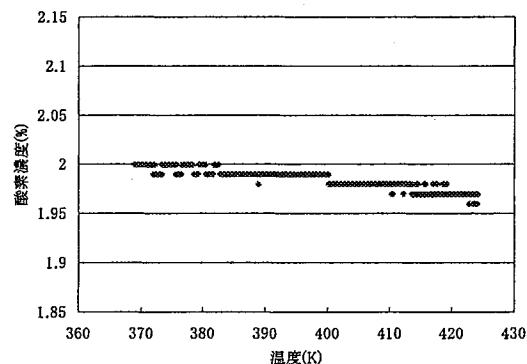


図 3.3-11 温度と酸素濃度の関係  
(標準ガス  $O_2 = 2.02\%$ )

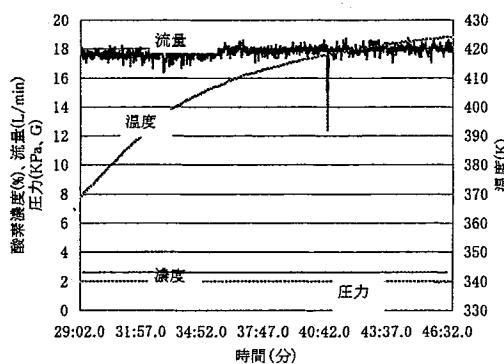


図 3.3-12 温度と酸素濃度の関係(時間変化)  
(標準ガス  $O_2 = 2.02\%$ )

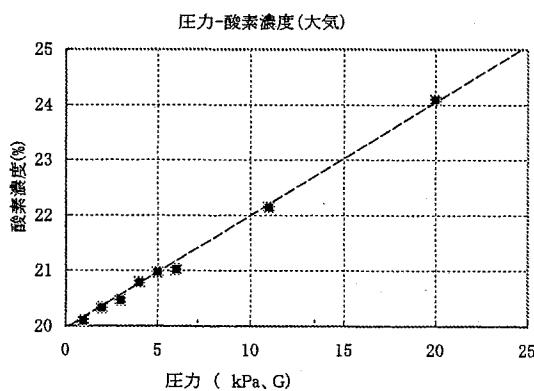


図3.4-1 壓力と酸素濃度の関係（大気）

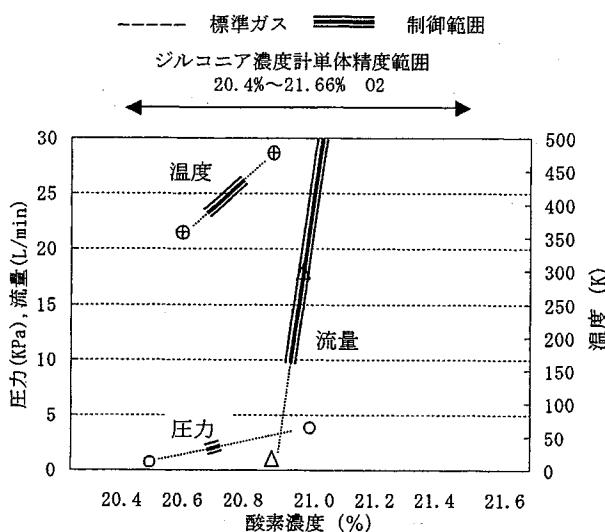
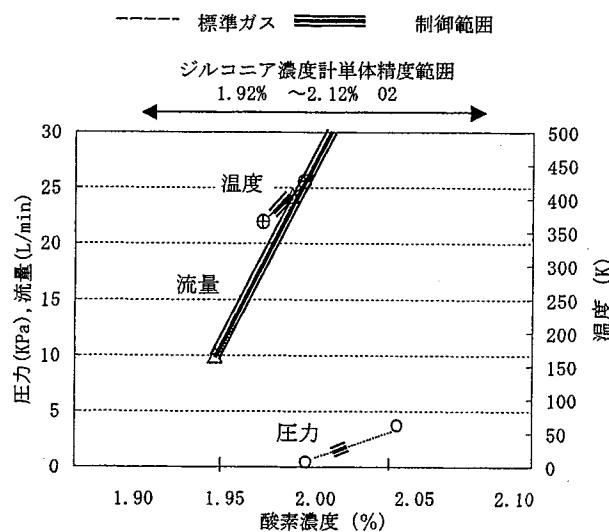
図3.4-2 酸素濃度と圧力、流量、温度の関係  
(標準ガス (21.03% O2) 使用)図3.4-3 酸素濃度と圧力、流量、温度の関係  
(標準ガス (2.02% O2) 使用)

表 3.4-1 圧力、流量、温度と酸素濃度の関係

標準ガス	酸素濃度		
		21%酸素標準ガス	2%酸素標準ガス
	基準酸素濃度(%)	21.03%	2.02%
ジルコニア濃度計計器誤差	計器誤差 1)指示値濃度の±3%	20.40%~21.66%	1.96%~2.08%
	2)±0.1%酸素濃度	20.93%~21.13%	1.92%~2.12%
	計器誤差を考慮した濃度範囲(A)	20.40%~21.66%	1.92%~2.12%
空気圧力と酸素濃度の関係	参照図	図3.3-1	図3.3-7
	圧力範囲	大気圧+1KPa~4KPa	大気圧+1KPa~4KPa
	酸素濃度変化	20.47% ~ 21.06%	2.00% ~ 2.05%
空気流量と酸素濃度の関係	参照図	図3.3-3	図3.3-9
	流量範囲	1L/min ~17L/min	10L/min ~24L/min
	酸素濃度変化	20.92% ~ 21.0%	1.94% ~ 1.98%
空気温度と酸素濃度の関係	参照図	図3.3-5	図3.3-11
	温度範囲	350K~ 473K	370K ~ 423K
	酸素濃度変化	20.62% ~ 20.90%	1.97% - 2.00%

#### 4. 蒸気中の酸素濃度測定

##### 4. 1 目的

前章では酸素濃度 21.03% 及び 2.02% の標準ガスを用いた試験を行い、圧力、温度、流量と濃度の関係を調べると共に、装置全体としてジルコニア酸素濃度計単体の精度を確保する為に許容される流体の変動範囲について検討した。ここでは本装置の目的である蓄圧タンク(以下 ACH タンクと称す)より発生させた高温高圧蒸気を用いて蒸気中の酸素濃度測定を行い、測定精度を含めて本装置の性能について検討する。

##### 4. 2 測定条件

測定条件を表4. 2-1及び表4. 2-2に示す(CASE A では流量計 FT4-8 を、CASE B では流量計 FT6-8 を用いた)。これらの条件は、大型非定常実験装置(LSTF)の LOCA 条件下で蒸気中の酸素濃度を測定する場合の蒸気圧力、予想される蒸気中の酸素濃度より決定した。表4. 2-1及び表4. 2-2中のタンク内初期空気圧力は、表の右欄に示す蒸気中の予想酸素濃度より4. 4. 3項に示す計算方法を用いて逆算して求めた値である。同表に示す様に、タンク圧力(全圧)が 0.2~2 MPa、タンク内初期空気圧力が 0.04~1.43 MPa(蒸気中の予想酸素濃度:2~15%)の条件下で酸素濃度、流量、濃度計位置の圧力、温度を測定した。

##### 4. 3 測定方法

蒸気源として ACH タンク(図4. 3-1)を用いて最高 2 MPa の高温、高圧蒸気を発生させ、以下の手順により蒸気中の酸素濃度を測定した。本装置を用いて蒸気中の酸素濃度を測定する場合、酸素濃度計起動時に酸素濃度計内に高温ガスが溜まる為、蒸気を通気する前に空気を用いて濃度計セル内を冷却しておく必要がある。その為、酸素濃度計へは最初に冷却空気を流しながら各種条件が整った後で蒸気を通気した。以下には冷却空気から蒸気への切り替えを含めた測定手順を示す。

手順(計器記号については図2. 2-1参照)

- 1) サンプリングノズルより約 1 m 下に ACH タンク内の水位を形成する。
- 2) ACH タンクの気相部にコンプレッサーより空気を入れ、所定の初期空気圧力(表4. 2-1及び表4. 2-2 参照)まで加圧する。
- 3) ACH タンク内ヒータで加熱し、所定の飽和温度、タンク圧力(表4. 2-1及び表4. 2-2 参照)まで昇温、昇圧させる。
- 4) 昇温、昇圧後温度、圧力が安定するまで一定時間保持。
- 5) 濃度計起動。
- 6) バルブ(VA1&VA2)より濃度計に冷却エアーを通気する。
- 7) 流量計前弁(V6)閉、バイパス弁(V8)開。
- 8) 制御弁圧力を 2 kPa に調整。
- 9) ジルコニア濃度計の自動校正を行う。
- 10) 配管ヒータ温度を設定後、起動させる。
- 11) バイパス弁(V8)閉、流量計前弁(V6)開。
- 12) 蒸気ドレン弁(DV1)閉、元弁(V1)開により蒸気を通気しドレン操作を行う。

- 13) ドレン操作完了後、冷却空気弁(VA1&VA2)を閉めた後(又は同時)に主管弁(V2)を開け、蒸気を濃度計と流量計に通氣する。
- 14) 流量、温度を確認後、濃度計測を開始する。

上記操作手順を図 4. 3-2 に示す。

配管内の蒸気凝縮による濃度計、流量計への水滴混入防止の観点より配管ヒータの温度設定は以下とした。

配管表面熱電対(図2. 2-1参照)	設定温度
TWE001(濃度計入口メタル温度)	423K (150°C)
TWE002(濃度計メタル温度)	423K (150°C)
TWE003(流量計入口メタル温度)	373K (100°C)
TWE101(圧力制御弁入口メタル温度)	483K (*210°C)
TWE102(圧力制御弁出口メタル温度)	483K (*210°C)
TWE103(圧力制御弁出口メタル温度)	483K (*210°C)
( * 最大蒸気圧 2 MPa の時の飽和温度)	

上記設定により測定中の酸素濃度計入口蒸気温度(TE001 及び TE003)は 373~423 K となるよう制御される。その時の配管各部のメタル温度の変化を例えれば CASE3A について図4. 3-3に示す。

#### 4. 4 測定結果

##### 4. 4. 1 測定濃度

酸素濃度計に蒸気を通気し、冷却空気との置換が完了した後の酸素濃度測定結果(酸素濃度、圧力、温度、流量)を図4. 4. 1-1~14に示す。

注 : CASE B については、図 4. 4. 1-14を除いて圧力計表示単位 = 1 kPa である為、瞬間的な 1 kPa 又は 3 kPa の変化は外乱によるものと考えられる。

##### 4. 4. 2 装置性能

###### (1) 計測精度について

装置全体の濃度測定精度をジルコニア酸素濃度計単体の測定精度として評価する為には、前章で示した様に、測定濃度が単体濃度計精度内に入るように圧力、流量、温度を一定範囲内に制御した状態で測定する必要がある。ここでは、本測定装置の制御弁、配管ヒータ、流量計が計画通り機能し、各々の値が所定の範囲内に制御されていることを確認する。

表 4. 4. 2-1には、図4. 4. 1-1~7より求めた各測定条件での圧力、温度、流量、酸素濃度測定値をまた、表4. 4. 2-2には図4. 4. 1-8~14より求めた各測定条件における圧力、温度、流量、酸素濃度測定値を示すがそれらの測定圧力、温度、流量変化を各々についてまとめるところになる。

表4. 4. 2-1

圧力	大気圧 +1.8~3 kPa
温度	417~427 K
流量	18~28 L/min

表4. 4. 2-2

大気圧 +1~3 kPa
411~423 K
14~17 L/min

これらの測定圧力、温度、流量変化に伴う濃度の変化は図3. 4-2及び-3に示す単体濃度計の精度内に入っている。

#### (2) 濃度計応答速度について

2. 2項に示されるジルコニア酸素濃度計単体計器の応答は3秒以下である。ここでは装置全体としてその応答性について検討する。すでに述べたように本装置を用いる場合、蒸気中の酸素濃度は事前に濃度計へ通気している冷却空気の元弁を閉めた後(又は同時)に蒸気弁を開け、濃度計に蒸気を流すことにより計測される。この時、図4. 4. 2-1~図4. 4. 2-4に見られるように、弁操作に伴う空気から蒸気への流れの変化により、瞬間に濃度計圧力が変化する(空気弁、蒸気弁開閉のタイミングにより圧力の上昇又は下降が見られる、又同時に流量の変化も認められる)。この時圧力指示値変化を時間遅れがないと考えると、濃度計応答遅れ( $\Delta T$ )は図4. 4. 2-5に示すように、圧力変化と濃度変化開始時刻の差と見る事ができる。図4. 4. 2-1~図4. 4. 2-4についてその差を求めるとき、2秒から4秒の間であり、他の測定結果についてもその応答遅れは4秒以下であった。

#### 4. 4. 3 計算濃度との比較

測定した酸素濃度に対し以下に示す手順により ACH タンク内の平均蒸気温度(3カ所の熱電対の平均値)より空気分圧を求め、計算により酸素濃度を推定した。その結果を測定値と比較し、図4. 4. 3-1~図4. 4. 3-14に示す。又その比較を纏めた結果を表4. 4. 3-1および表4. 4. 3-2に示す。時間的に変化が見られる濃度に対し、時間平均について比較した結果を図4. 4. 3-15に示すが、計算値は測定値に対し全体として低めの値を示しており両者の比で見た場合、低濃度域では-20%程度の差となるが、測定値との差は最大 1.25% O<sub>2</sub> と小さく測定濃度をよく推定している。

$$P = (\text{タンク全圧、絶対圧})$$

$$\text{タンク内の蒸気(気相部)温度 } T_g$$

$$\rightarrow P_{STM} = \text{タンク内飽和蒸気圧}$$

$$(P - P_{STM}) \times \text{空気の O}_2 \% = P_{O_2} (\text{酸素分圧})$$

$$P_{O_2}/P \times 100 = \text{計算濃度} (\%)$$

差の原因を考える時、測定値については測定装置濃度計の誤差を考慮する必要がある。一方、計算値についてみると、計算上 ACH タンク蒸気(気相部)温度として蒸気部分の3カ所の熱電対の平均温度を用いているが、この蒸気温度は、例えば CASE B1~B7 については図4. 4. 3-16~図4. 4. 3-22に見られるようにタンク内で均一でなく、3カ所の熱電対位置(X,V,U、図4. 3-1参照)により数 K の差が認められる。蒸気温度による計算濃度への影響を測定濃度との比率(=計算濃度/測定濃度)により表4. 4. 3-3に示すが、1~2 K の温度の違いにより 5~15% ( 約 1~2% O<sub>2</sub> 相当 ) の差が発生している。これらより両者の差はサンプリング部の蒸気温度の不均一、熱電対精度等に起因しているものと考えられる。

表 4. 2-1 ACH タンク 蒸気濃度測定条件(CASE A\_ )

	タンク圧力(MPa)	飽和温度(K)	初期空気圧力(MPa)	予想酸素濃度(%)
CASE A1	0.2	384.8	0.05	5
CASE A2	0.2	389.9	0.04	4.5
CASE A3	0.5	412.7	0.14	6
CASE A4	0.6	427.8	0.06	2
CASE A5	2.0	429.8	1.43	15
CASE A6	1.0	433.3	0.38	8
CASE A7	2.0	475.2	0.38	4

表 4. 2-2 ACH タンク 蒸気濃度測定条件 (CASE B \_ )

	タンク圧力(MPa)	飽和温度(K)	初期空気圧力(MPa)	予想酸素濃度(%)
CASE B1	1.18	404.5	0.86	15
CASE B2	1.92	454.7	0.78	9
CASE B3	2.04	480.4	0.28	3
CASE B4	0.20	386.2	0.05	6
CASE B5	0.21	387.4	0.05	6
CASE B6	0.46	414.0	0.08	4
CASE B7	1.16	449.9	0.26	5

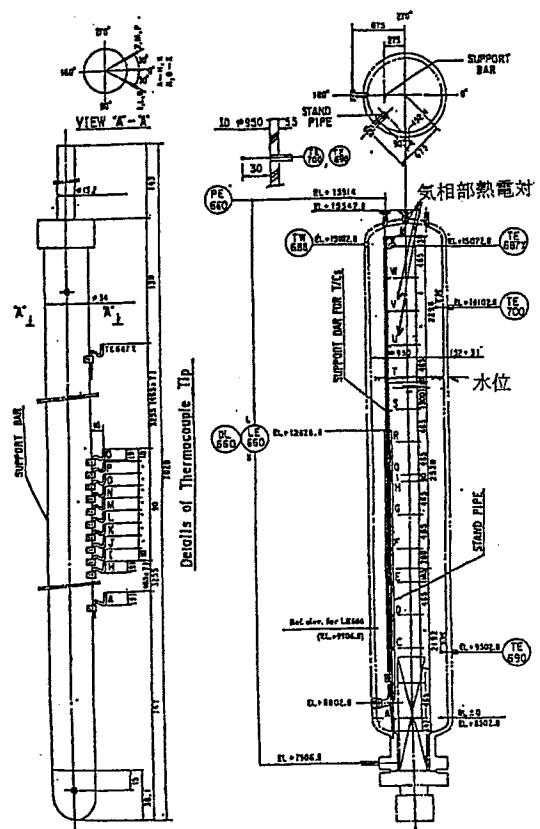


図4.3-1 ACHタンク

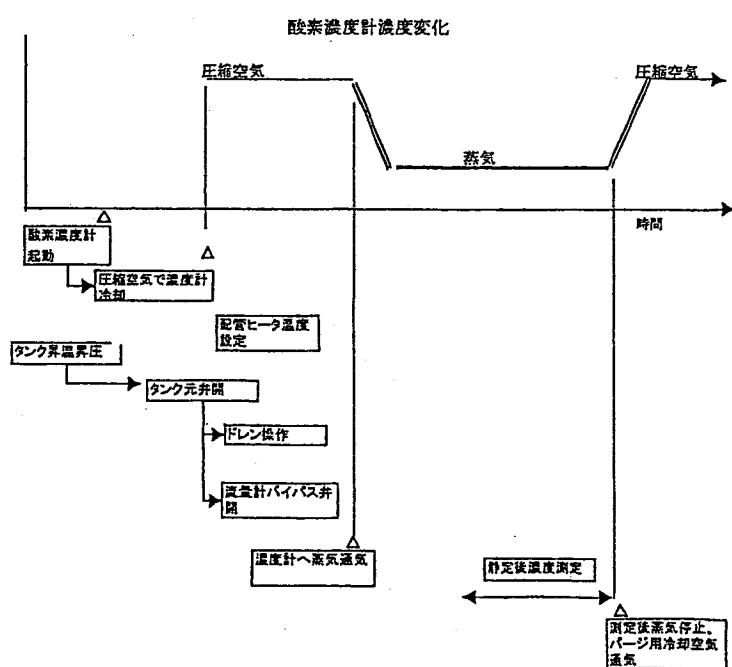


図4.3-2 濃度測定手順

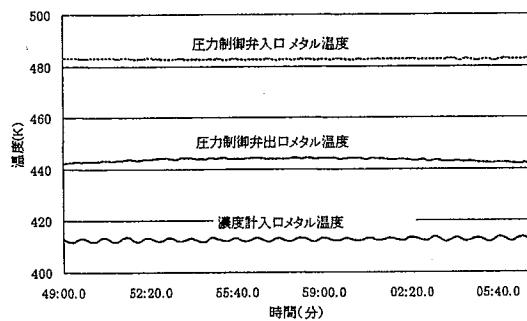


図4.3-3 配管メタル温度 (CASE A3)

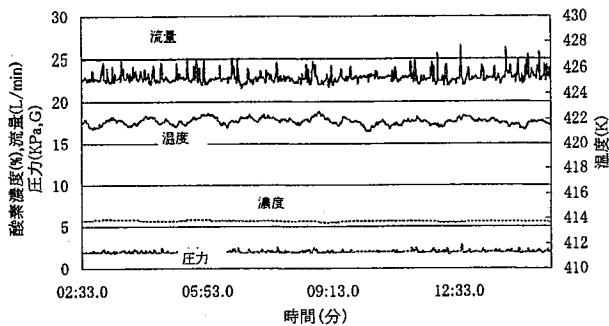


図4.4.1-1 酸素濃度測定データ(CASE A1)

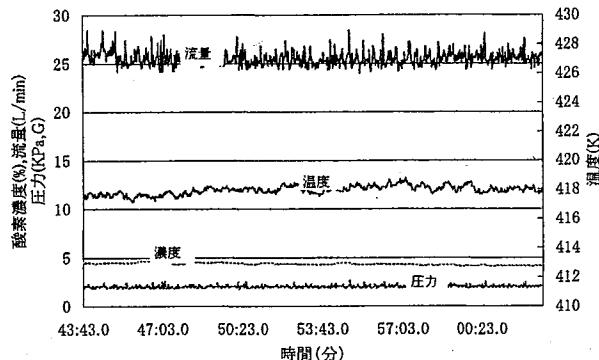


図 4.4.1-2 酸素濃度測定データ(CASE A2)

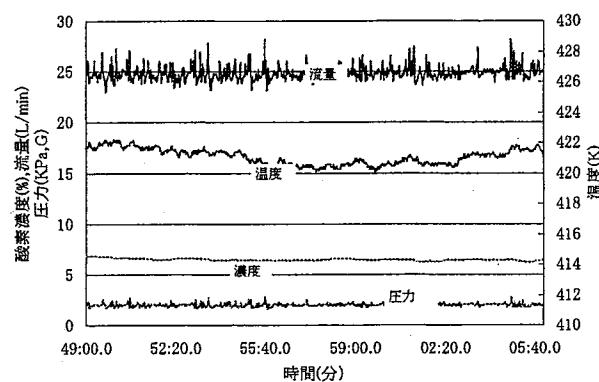


図 4.4.1-3 酸素濃度測定データ(CASE A3)

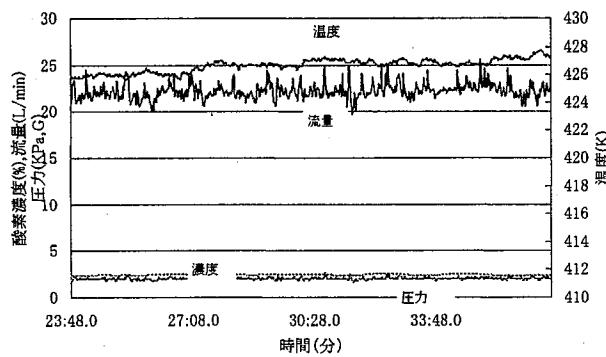


図 4.4.1-4 酸素濃度測定データ(CASE A4)

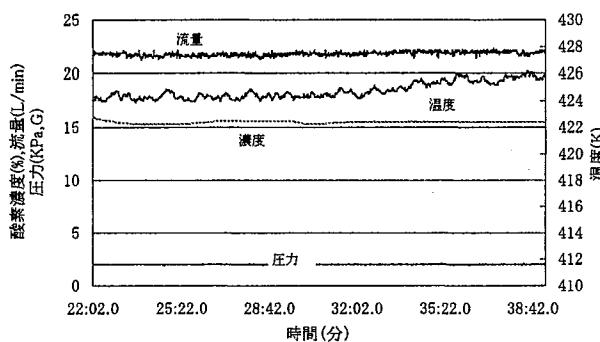


図 4.4.1-5 酸素濃度測定データ(CASE A5)

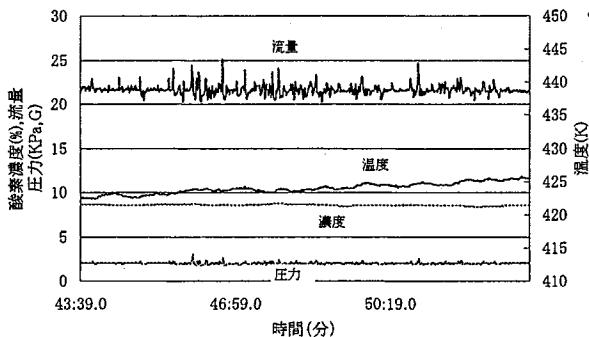


図 4.4.1-6 酸素濃度測定データ(CASE A6)

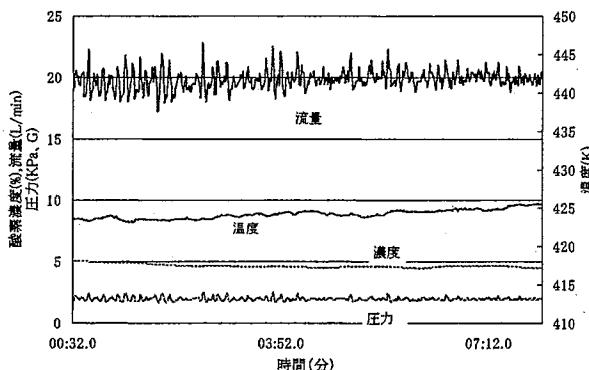


図 4.4.1-7 酸素濃度測定データ(CASE A7)

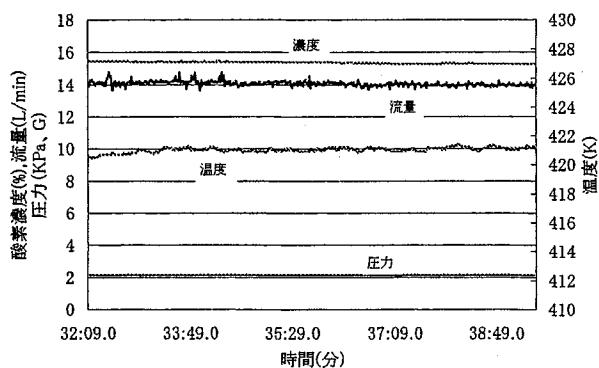


図4.4.1-8 酸素濃度測定データ(CASE B1)

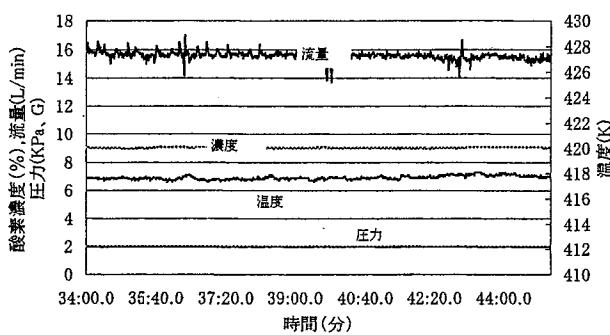


図4.4.1-9 酸素濃度測定データ(CASE B2)

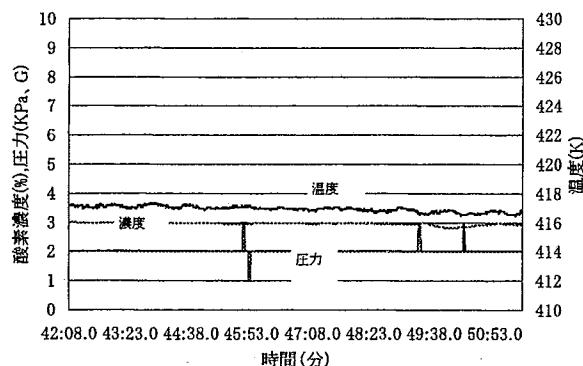


図4.4.1-10 酸素濃度測定データ(CASE B3)

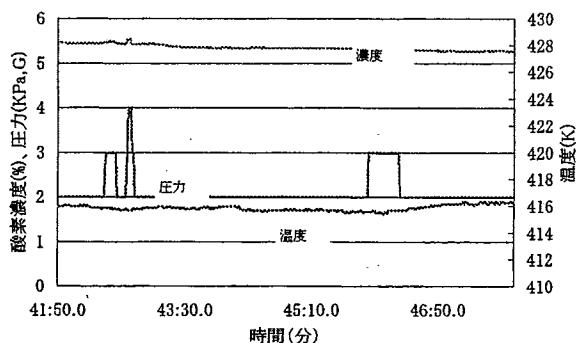


図 4.4.1-11 酸素濃度測定データ(CASE B4)

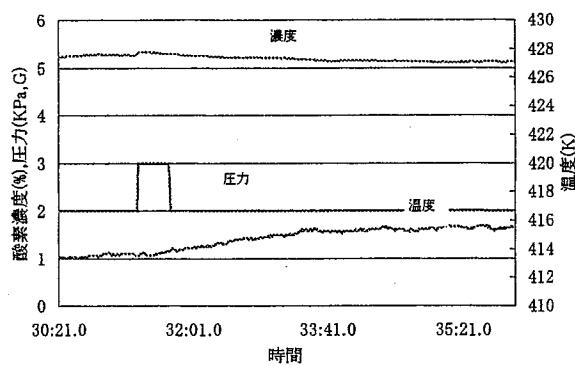


図4.4.1-12 酸素濃度測定データ(CASE B5)

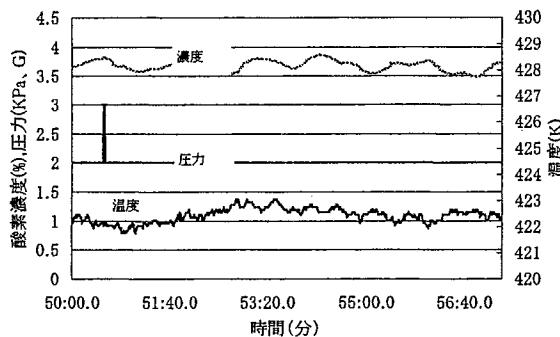


図4.4.1-13 酸素濃度測定データ(CASE B6)

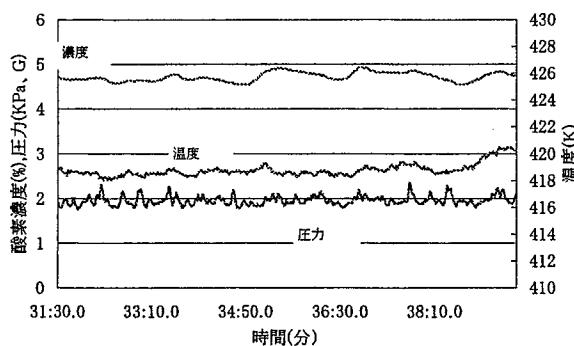


図4.4.1-14 酸素濃度測定データ(CASE B7)

表 4.4.2-1 性能確認結果(CASE A )

		CASE A1	CASE A2	CASE A3	CASE A4	CASE A5	CASE A6	CASE A7
タンク蒸 気条件	圧力(MPa)	0.2	0.2	0.5	0.60	2	1	2
	温度(K)	384.8	389.9	412.7	427.8	429.8	433.3	475.2
圧力	圧力制御弁によ る圧力制御	圧力設定値(KPa,G)	2	2	2	2	2	2
		濃度計圧力(KPa,G)	1.8~2.8	1.9~2.5	2~2.3	1.9~2.5	2.0~3.0	2.0~3.0
		弁開度(%)	88	89	62	48	7	30
		制御性				良		
温度	配管ヒータによる 温度制御	配管ヒータ設定値	390~423	390~423	390~423	390~423	390~423	390~423
		濃度計温度(K)	421~423	417~419	420~422	425~427	424~426	423~426
		流量計入口温度 (K)	404	395	397	398	398	400
		制御性				良		
流量	タービンメータ	L/min	22~26	24~28	24~28	20~25	21~22	20~24
濃度	ジルコニア酸素 濃度計	%	5.4~5.8	4.1~4.4	6.4~6.5	2.1~2.3	15.3~15.5	8.4~8.7
								4.5~5.0

表 4.4.2-2 性能確認結果 (CASE B )

		CASE B1	CASE B2	CASE B3	CASE B4	CASE B5	CASE B6	CASE B7
タンク蒸 気条件	圧力(MPa)	1.18	1.92	2.04	0.20	0.21	0.46	1.16
	温度(K)	404.5	454.7	480.4	386.2	387.4	414.0	449.9
圧力	圧力制御弁によ る圧力制御	圧力設定値(KPa,G)	2	2	2	2	2	2
		濃度計圧力(KPa,G)	1~3	1~3	1~3	1~3	1~3	1~3
		弁開度(%)	10	5	4	75	70	-
		制御性				良		
温度	配管ヒータによる 温度制御	配管ヒータ設定値	403~423	403~423	403~423	403~423	403~423	403~423
		濃度計温度(K)	421	418	416	416	411~413	422~423
		流量計入口温度 (K)	400	393	396	413	410	413
		制御性				良		381
流量	タービンメータ	L/min	13.9~14.7	13.8~17.0	-	-	-	-
濃度	ジルコニア酸素 濃度計	%	15.34~15.47	8.05~9.05	2.82~2.92	5.33~5.48	5.11~5.33	3.59~3.87
								4.55~4.93

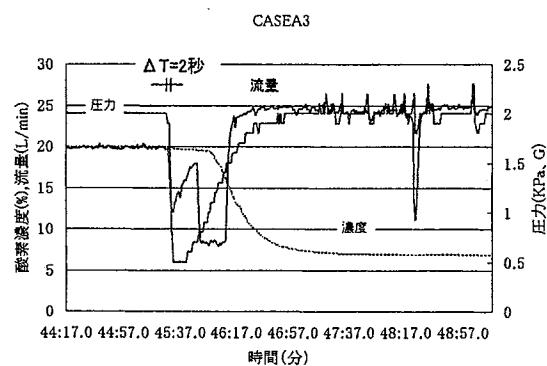


図4.4.2-1 バルブ切り替え時の酸素濃度変化(CASEA3)

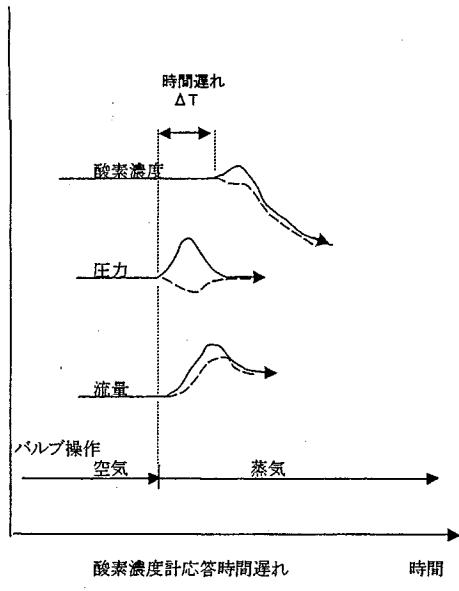


図4.4.2-5 酸素濃度応答

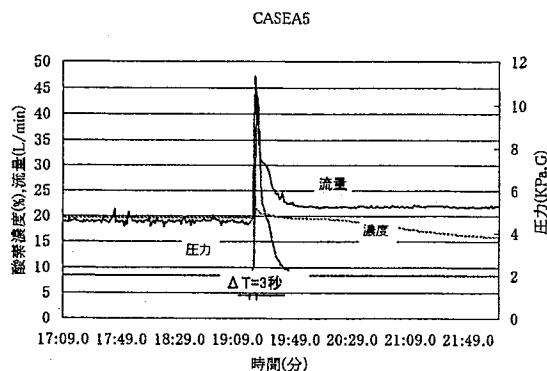


図4.4.2-2 バルブ切り替え時の酸素濃度変化(CASEA5)

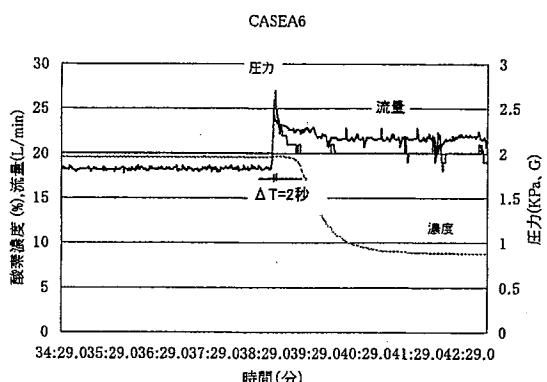


図4.4.2-3 バルブ切り替え時の酸素濃度変化(CASEA6)

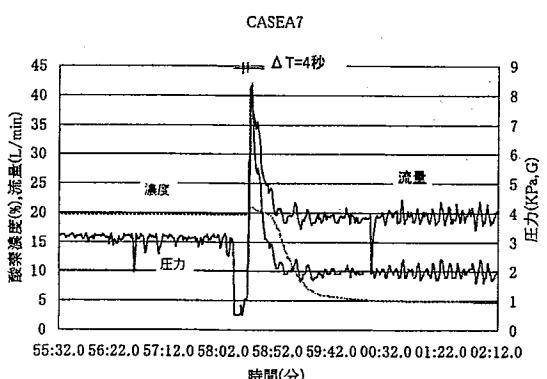


図4.4.2-4 バルブ切り替え時の酸素濃度変化(CASEA7)

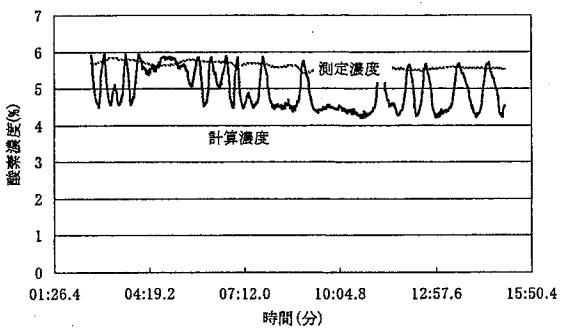


図4.4.3-1 濃度比較(CASE A1)

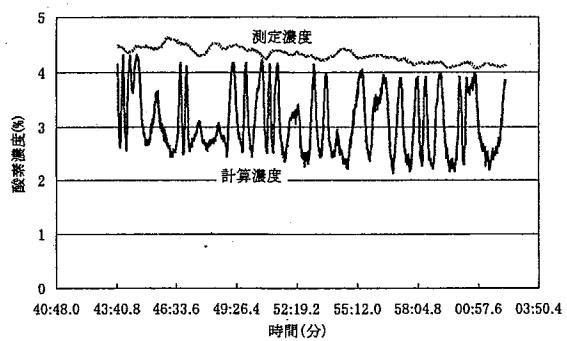


図4.4.3-2 濃度比較(CASE A2)

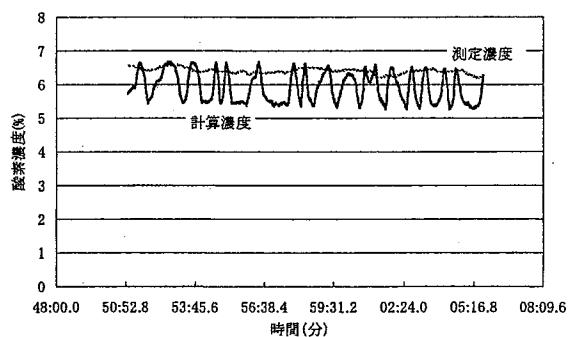


図4.4.3-3 濃度比較(CASE A3)

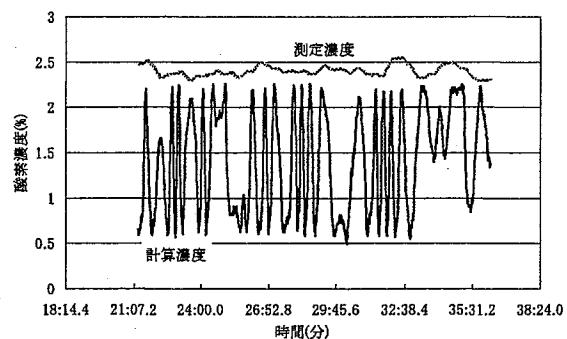


図4.4.3-4 濃度比較(CASE A4)

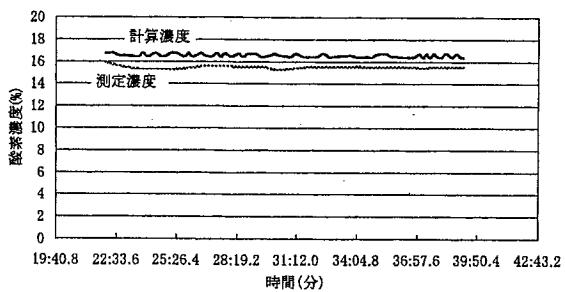


図 4.4.3-5 濃度比較(CASE A5)

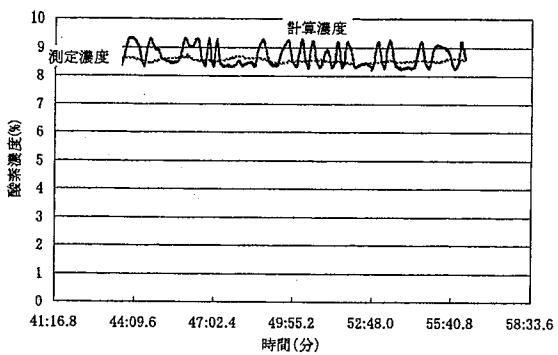


図 4.4.3-6 濃度比較(CASE A6)

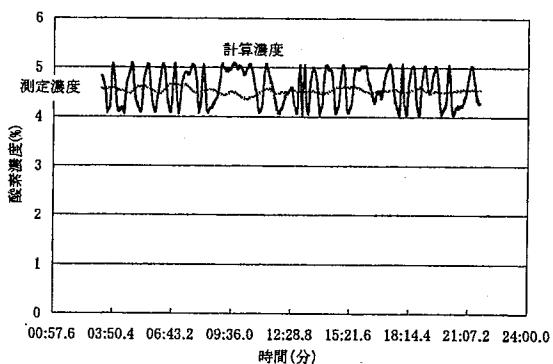


図4.4.3-7 濃度比較(CASE A7)

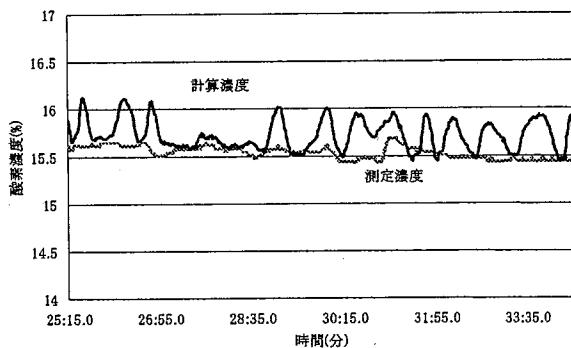


図 4.4.3-8 濃度比較(CASE B1)

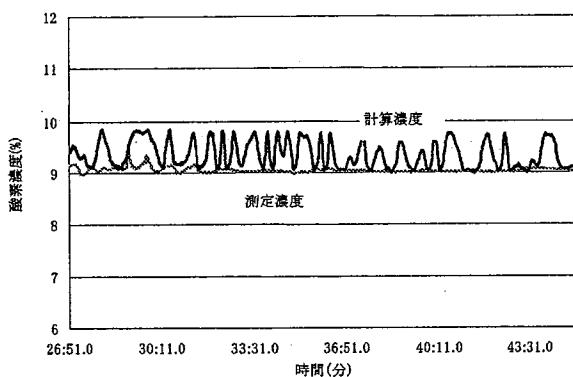


図4.4.3-9 濃度比較(CASE B2)

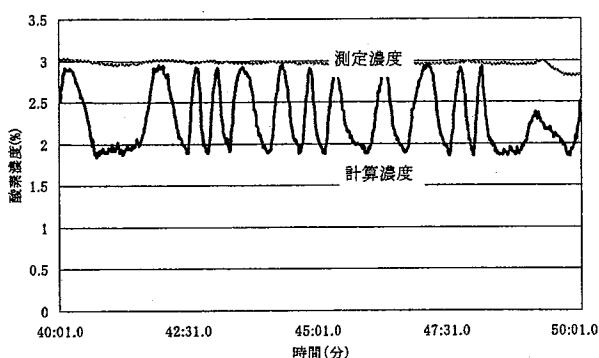


図 4.4.3-10 濃度比較(CASE B3)

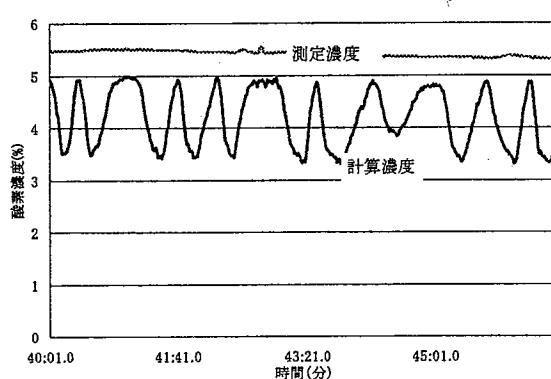


図 4.4.3-11 濃度比較(CASE B4)

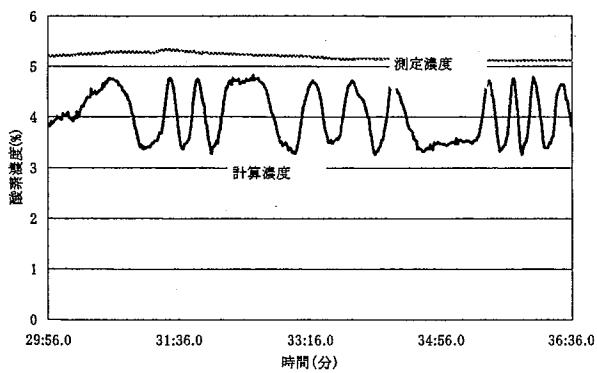


図 4.4.3-12 濃度比較(CASE B5)

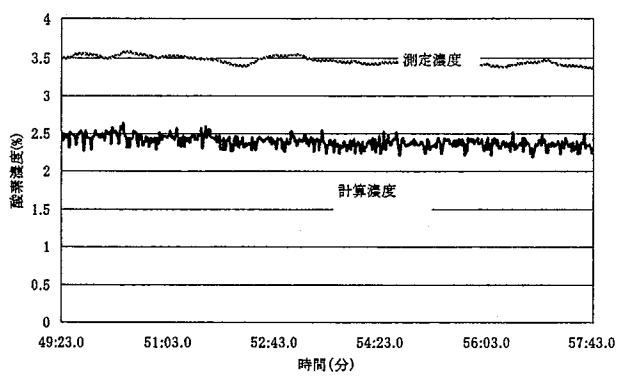


図 4.4.3-13 濃度比較(CASE B6)

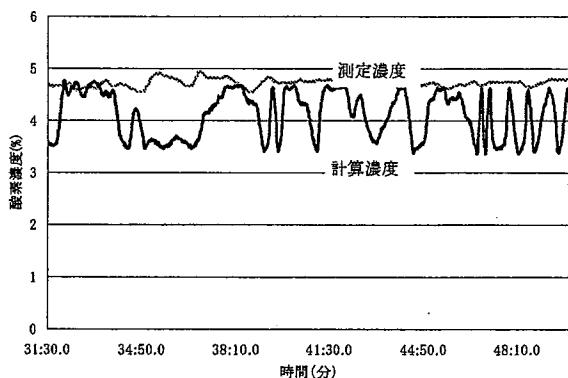


図 4.4.3-14 濃度比較(CASE B7)

表 4.4.3-1 測定濃度と計算濃度の比較 (CASE A)

図番		酸素濃度 (平均)	濃度差 (0.2%)
図4.4.3-1	濃度比較 (CASE A1)	測定濃度=5.64% 計算濃度=4.96%	-0.68
図4.4.3-2	濃度比較 (CASE A2)	測定濃度=4.31% 計算濃度=3.06%	-1.25
図4.4.3-3	濃度比較 (CASE A3)	測定濃度=6.41% 計算濃度=5.90%	-0.51
図4.4.3-4	濃度比較 (CASE A4)	測定濃度=2.40% 計算濃度=1.40%	-1.00
図4.4.3-5	濃度比較 (CASE A5)	測定濃度=15.48% 計算濃度=16.54%	1.06
図4.4.3-6	濃度比較 (CASE A6)	測定濃度=8.54% 計算濃度=8.70%	0.16
図4.4.3-7	濃度比較 (CASE A7)	測定濃度=4.53% 計算濃度=4.59%	0.06

表 4.4.3-2 測定濃度と計算濃度の比較 (CASE B)

図番		酸素濃度 (平均)	濃度差 (0.2%)
図4.4.3-8	濃度比較 (CASE B1)	測定濃度=15.63% 計算濃度=15.80%	0.17
図4.4.3-9	濃度比較 (CASE B2)	測定濃度=9.15% 計算濃度=9.43%	0.28
図4.4.3-10	濃度比較 (CASE B3)	測定濃度=2.94% 計算濃度=2.37%	-0.57
図4.4.3-11	濃度比較 (CASE B4)	測定濃度=5.38% 計算濃度=4.13%	-1.25
図4.4.3-12	濃度比較 (CASE B5)	測定濃度=5.22% 計算濃度=4.05%	-1.17
図4.4.3-13	濃度比較 (CASE B6)	測定濃度=3.50% 計算濃度=2.42%	-1.08
図4.4.3-14	濃度比較 (CASE B7)	測定濃度=4.69% 計算濃度=4.01%	-0.68

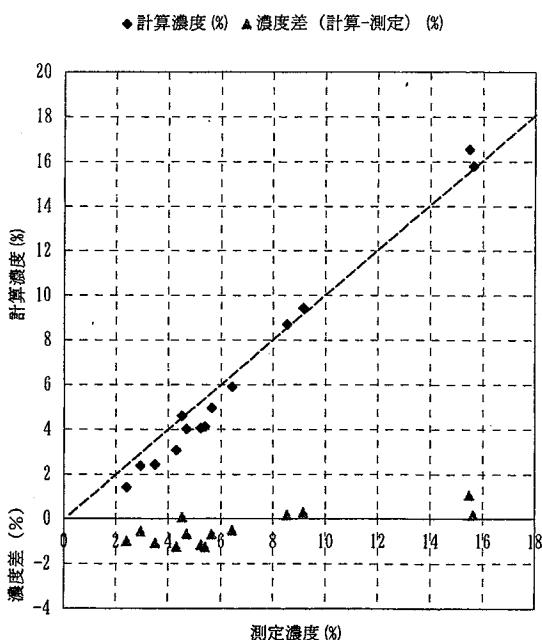


図 4.4.3-15 酸素濃度 (計算値との比較)

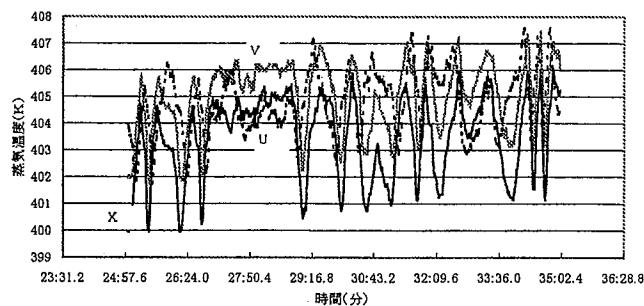


図 4.4.3-16 蒸気温度(CASE B1)

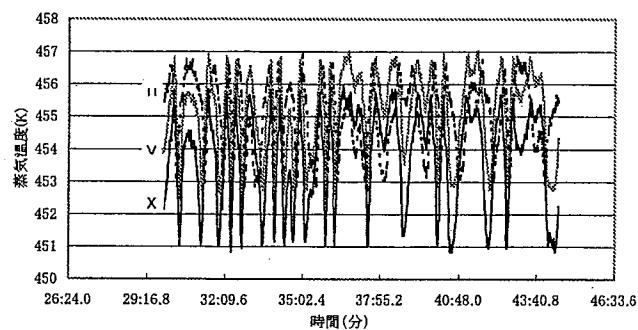


図 4.4.3-17 蒸気温度(CASE B2)

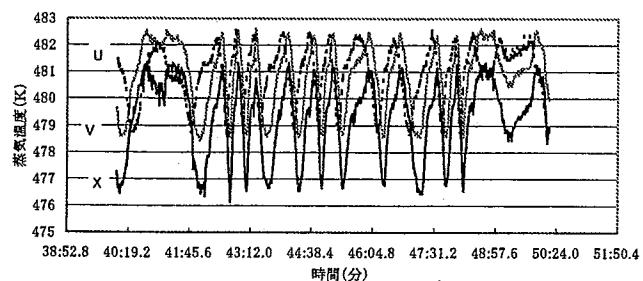


図 4.4.3-18 蒸気温度(CASE B3)

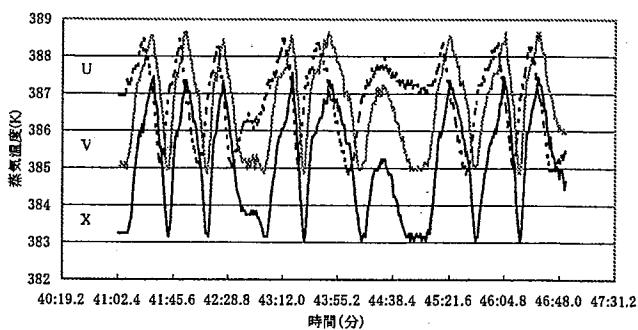


図 4.4.3-19 蒸気温度(CASE B4)

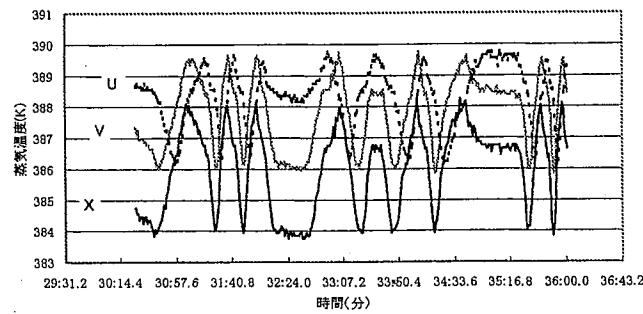


図 4.4.3-20 蒸気温度(CASE B5)

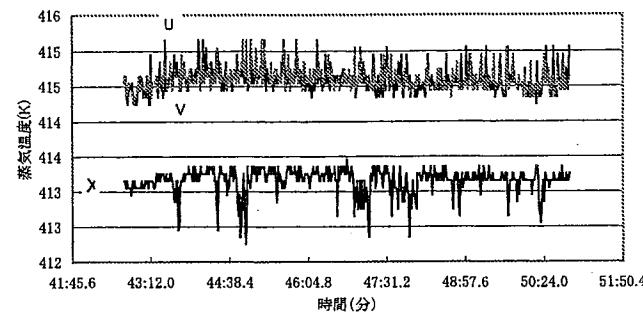


図 4.4.3-21 蒸気温度(CASE B6)

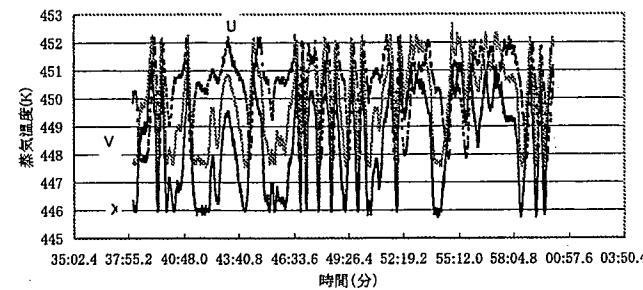


図 4.4.3-22 蒸気温度(CASE B7)

表4. 4. 3-3 蒸気温度と濃度比(計算/測定)

蒸 気 温 度 (K)						
		TE687X 上部温度計	TE687V 中間温度計	TE687U 下部温度計	X,V,Uの平均 温度	濃度比(計算濃度/測定濃度)
CASE B1	Max	406.05	407.45	405.25	405.08	X,V,Uの平均温度(b)採用 1.01 上部平均温度(a)採用 1.02
	Min	399.95	401.75	401.75	401.88	
	Ave	(a)403.54	405.06	404.73	(b)404.45	
CASE B2	Max	455.95	457.05	456.95	456.05	X,V,Uの平均温度(b)採用 1.03 上部平均温度(a)採用 1.04
	Min	450.65	452.45	452.75	452.85	
	Ave	(a)453.82	455.16	454.98	(b)454.66	
CASE B3	Max	481.35	482.65	482.65	481.72	X,V,Uの平均温度(b)採用 0.80 上部平均温度(a)採用 0.91
	Min	476.15	478.45	478.65	478.52	
	Ave	(a)479.32	480.91	480.97	(b)480.4	
CASE B4	Max	387.55	388.65	387.25	387.68	X,V,Uの平均温度(b)採用 0.77 上部平均温度(a)採用 0.88
	Min	383.05	384.85	384.85	384.92	
	Ave	(a)385.17	386.72	386.81	(b)386.23	
CASE B5	Max	388.25	389.75	389.75	388.68	X,V,Uの平均温度(b)採用 0.77 上部平均温度(a)採用 0.92
	Min	383.75	385.85	386.15	385.98	
	Ave	(a)386.00	387.84	388.32	(b)387.39	
CASE B6	Max	413.35	414.95	415.05	414.28	X,V,Uの平均温度(b)採用 0.69 上部平均温度(a)採用 0.86
	Min	412.45	414.25	414.25	412.75	
	Ave	(a)413.08	414.51	414.51	(b)414.03	
CASE B7	Max	451.45	452.65	452.25	451.37	X,V,Uの平均温度(b)採用 0.86 上部平均温度(a)採用 0.91
	Min	445.65	447.35	447.55	447.73	
	Ave	(a)448.81	450.20	450.22	(b)449.79	

## 5. 大型非定常実験装置における酸素濃度測定

### 5. 1 目的

大型非定常実験装置(以後 LSTF と称する)において蓄圧注入系から流入する N<sub>2</sub>ガスが圧力容器や蒸気発生器等にどの程度蓄積されるかを調べる為、蓄圧タンクの加圧ガスとして空気を用い、主に LSTF への適用性、装置の操作性に着目してサンプリング蒸気中の酸素濃度を測定した。

### 5. 2 測定条件

#### (1) 測定要領

LSTF 実験における蓄圧タンクからの空気注入ノズル位置及び蒸気中の酸素濃度測定ノズル位置を図 5. 2-1 に、測定時の写真を図 5. 2-2 に示す。実験に際しては破断 LOCA 時の一次系減圧過程を模擬する為、加圧器の RV(圧力逃がし弁)により一次側圧力を減圧させながら、ACH および ACC タンクより注入ラインを通じて ECCS ノズル(N-14/a,b)へ空気を流入させ、圧力容器上部ヘッド(以後 PV 頂部と称する)破断口ノズル(N-6/a)及び健全ループの蒸気発生器(以後 SG と称する)出口プレナム(N-8 ノズル)から蒸気をサンプリングし、各々の場所へ蓄積される蒸気中の酸素濃度を測定した。

LSTF への適用に当たり、濃度測定装置には気液二相流に含まれる液滴成分を分離する目的で、装置上流に以下に示す中空タンク(以後、気液分離タンクと呼ぶ)を追設した。サンプリング位置及び分離タンクを含めた LSTF に対する非凝縮ガス濃度測定装置系統図を図 5. 2-3 に示す。

#### (2) 気液分離タンク

LSTF のサンプリング蒸気はサンプリング位置により気液二相流の状態も予想されるが、一方本非凝縮ガス濃度測定装置においてはその機能上、酸素濃度計及びタービン流量計への液滴混入は避ける必要がある。そこで蒸気中の液滴成分を分離する目的で、サンプリングノズルと圧力制御弁の中間に中空タンクを設けた。この時、蒸気流入時のタンク内壁面への衝突効果及び気液の比重差による気液分離効果を期待して、内径 95 mm、全長 670 mm の中空タンクを採用した。このタンクの気液分離性能は ACH タンクを用いた以下の予備試験により確認された。

試験要領を下記(及び図 5. 2-4 参照)に示す。

- 1) 気液分離タンクおよびタンク上流配管には蒸気の凝縮防止の為、外面にヒータを設け、内部蒸気の飽和温度まで加熱する。
- 2) 液滴を含む気液混合状態の飽和蒸気がサンプリング出来るようにする為、ACH タンクの沸騰液面がサンプリングノズル位置より少し上になる様にして飽和状態にした後、蒸気をサンプリングした。この時 ACH タンクの蒸気条件は圧力 = 0.3 MPa(飽和温度 = 134 °C) とし、ACH タンク内が飽和状態に到達後、気液分離タンクを通して図 5. 2-4 に示すドレンノズル 1(気液分離タンク) およびドレンノズル 2 から蒸気をサンプリングしながら気液分離の状態を調べた。

上記試験の結果、目視により気液分離タンクのドレンノズル 1 からの液滴が認められる状態でもドレンノズル 2 からは液分を含まない乾き蒸気(ガス)のみ(液滴分離)の状態が観察され、タンクの気液分離性能が確認された。

## (3) 測定手順 (図5. 2-1 参照)

濃度測定手順は以下のとおりである。

- 1) 一次系圧力を 1.6 MPa に調整する。
  - 2) PV 下部破断弁 (AOV-300) により一次系水位を HL 下端まで排水する。
  - 3) 二次系圧力を RV 弁 (AOV-151, 181) 開閉により 1.6 MPa に制御する
  - 4) 二次系水位を 10.5 m まで給水する。
  - 5) ACH および ACC タンクの水位はスタンドパイプ上端とし、タンク圧力 = 1.6 MPa に昇圧。
  - 6) 炉心出力を一定(約 0.4~0.7 MW) に設定。
  - 7) 給水により二次側水位は一定(10.5 m) に保持する。
  - 8) SG-RV 開により二次系圧力を減圧し、もって一次系圧力を減圧する。  
ACH および ACC タンク内の空気は、一次系の圧力低下とともに一次系に進入する。
  - 9) SG-RV を開ける事により、圧力を 1.6 MPa より 0.2 MPa(目標) 毎に降下させ(注\*)、一定圧力にした状態で PV 及び SG のサンプリング元弁を切り替えて、各々酸素濃度を順次測定する。
- (注\*) 一次圧力は 1.06 MPa まで降下し、その後はほぼ一定となった為、結果的に 1.72, 1.39, 1.16 および 1.06 MPa の4段階の圧力レベルで測定した。

非凝縮ガス測定装置の操作方法は既出4. 3項と同様とした。

## 5. 3 測定結果

## (1) 酸素濃度について

酸素濃度測定時のLSTFの一次系減圧過程に於ける一次系、二次系の圧力、温度、水位の時間変化を図5. 3-1、図5. 3-2 及び図5. 3-3に示す。非凝縮ガス濃度測定装置によるサンプリング部の酸素濃度、流量及び濃度計部の温度、圧力は LSTF の一次系圧力 (PE300B-PR) が 1.72, 1.39, 1.16 および 1.06 MPa の各段階において3分～5分間測定した。濃度測定は各同一圧力レベルにおいて PV 及び SG 出口プレナムの両方についてサンプリングノズル元弁を切り替えることにより実施した。

PV 頂部 (N-6a ノズル) 及び SG 出口プレナム (N-8 ノズル) の各圧力レベル (CAS1~CAS5) における酸素濃度測定結果をそれぞれ図5. 3-4~図5. 3-8 に示す。図には PV 頂部蒸気から SG 出口プレナム蒸気を測定する場合の弁の切り替え時刻 (冷却空気～PV 蒸気～冷却空気～SG 蒸気) も示している。PV 蒸気から SG 出口プレナム蒸気への通気は冷却空気の切り替えを介して行う為、SG 出口プレナム蒸気の酸素濃度が安定するまでに5分程度を要していることが分かる。

酸素濃度は PV 頂部について流量は約 25 L/min、温度は約 490 K、SG 出口プレナムについて流量は 18~25 L/min、温度約 490 K、圧力は大気圧 +2 kPa と各状態ともほぼ制御され、安定した条件下で測定されている。酸素濃度については、PV 頂部では全ての圧力においてほぼ 0 (0.19~0.22%) であるが、SG 出口プレナムでは圧力降下と共に 0% 近傍より 17% 程度まで増加している。

次に図5. 3-4~図5. 3-8に示す SG 出口プレナム部の酸素濃度が静定(一定)した時刻における酸素濃度と、その時の一次系、二次系、サンプリングノズル位置の圧力、温度との関係を表5. 3-1に示す。表中の時間は濃度測定開始からの経過時間を示している。表5. 3-1に示す各測定値と濃度との関係を

図5. 3-9に示す。ここで表5. 3-1中の SG 出口プレナムの温度としては、出口プレナムの中にある温度計3点の内 Tag. NO TE-EX0650 の値を示しているが、他の2つの温度計(TE-EX0680、TE-EX0720)も含め、それらの温度は時間と共に図5. 3-10のように変化している。図5. 3-10中 CAS2～CAS5は図5. 3-4～図5. 3-8に対応した各圧力におけるSG濃度測定時間、▽は各区間で濃度が静定した時刻を示している。CAS2の区間を除き各温度は周期的に10 K程度変化しており、4章の ACH タンクの温度と同様の変動を示している。

次に4. 4. 3項に示す方法により今回の SG 出口プレナム部の酸素濃度を計算により推定しその比較を図5. 3-11～図5. 3-14に示す。図中の測定値は濃度が静定した時間帯の値を示している。温度変動に対応して計算濃度が変化している。一方表5. 3-1に示す測定値に対しタンクからの空気流入がない時(圧力 1.72 MPa)の初期状態の酸素濃度が 0 となるよう補正した後の値を補正前の値と併せて表5. 3-2 に示す。補正後の値をLSTFにおける値 ■、●として前章の図4. 4. 3-15に追加して測定値と比較した結果を図5. 3-15に示す。

計算濃度 5.44%の時に 3.5%O<sub>2</sub> の差が見られるがそれ以外の値については計算値と測定値の差は 2%O<sub>2</sub> 以下(最大 1.71% O<sub>2</sub>)であり4章の比較結果と同様、測定値をよく推定していると考えられる。

## (2) 酸素濃度計応答について

4. 3項と同様に図5. 3-4～図5. 3-8より空気から蒸気への弁切り替え時の圧力変化と濃度変化の時間差より求めた濃度計応答遅れ、ΔT を以下に示す。

図5. 3-4	図5. 3-5	図5. 3-6	図5. 3-7	図5. 3-8
CAS1PV	CAS2PV	CAS3PV	CAS4PV	—
4秒	10秒	7秒	4秒	
CAS1SG	CAS2SG	CAS3SG	CAS4SG	CAS5SG
5秒	3秒	4秒	3秒	3秒

4章で求めた最大4秒の濃度計応答遅れと比較すると本結果では最大10秒(3秒から10秒)の遅れが見られるがこの遅れは図5. 3-9に見られる減圧過程における圧力変化速度、酸素濃度変化速度から考えると装置性能上許容される範囲と考えられる。

## (3) 計測精度について

図5. 3-4～図5. 3-8に見られるように酸素濃度測定中の蒸気圧力、温度、流量は ACH タンクを用いた蒸気中の酸素濃度測定時と同じく、安定している。図に示す圧力、温度、流量の変化は圧力について大気圧 +2～3 kPa、温度について 480K～495K、流量について 17～24 L/min である。温度については3章で示した設定範囲を超えた結果となったが短時間であり計器使用上特に問題は発生しなかった(過昇の原因としては LSTF 用として本装置を設置した時配管長が多少短くなったことにより、同じ配管ヒータ設定値の下で温度が上がった為と推定される)。いずれにしても図3. 4-2及び-3から今回の圧力、温度、流量の変化範囲においても測定濃度は単体濃度計精度内であることが確認出来る。

#### (4) 装置性能について

今回の測定期間中に気液分離タンクには約0.5 Lの水が溜まっており、サンプリング蒸気は液分を含む二相流状態であったと考えられるもののタービン流量計は測定中問題なく作動し、流量も安定していたことから、蒸気中の液滴成分は分離タンク以降に混入していなかったと推定される。このことは本タンクにより気液分離がなされ、気液二相流状態の蒸気に対しても酸素濃度の測定が可能である事を示している。

前章及び本章の測定結果及び上記の検討結果より本装置の適用範囲及び条件をまとめると、以下のようになる。

サンプリング流体	蒸気(単相流又は二相流)
蒸気圧力	2MPa 以下
蒸気流量	17 L/min 以上
蒸気温度	480K 以下
計測精度	ジルコニア酸素濃度計単体精度(指示値の3%又は0.1%O <sub>2</sub> の大なる方)
濃度計応答	10秒以下

以上より、本非凝縮ガス濃度測定装置によりLSTFにおける破断LOCA時を想定した高温高圧下の蒸気中の酸素濃度を上記の適用範囲及び条件の下で測定できる事を確認した。

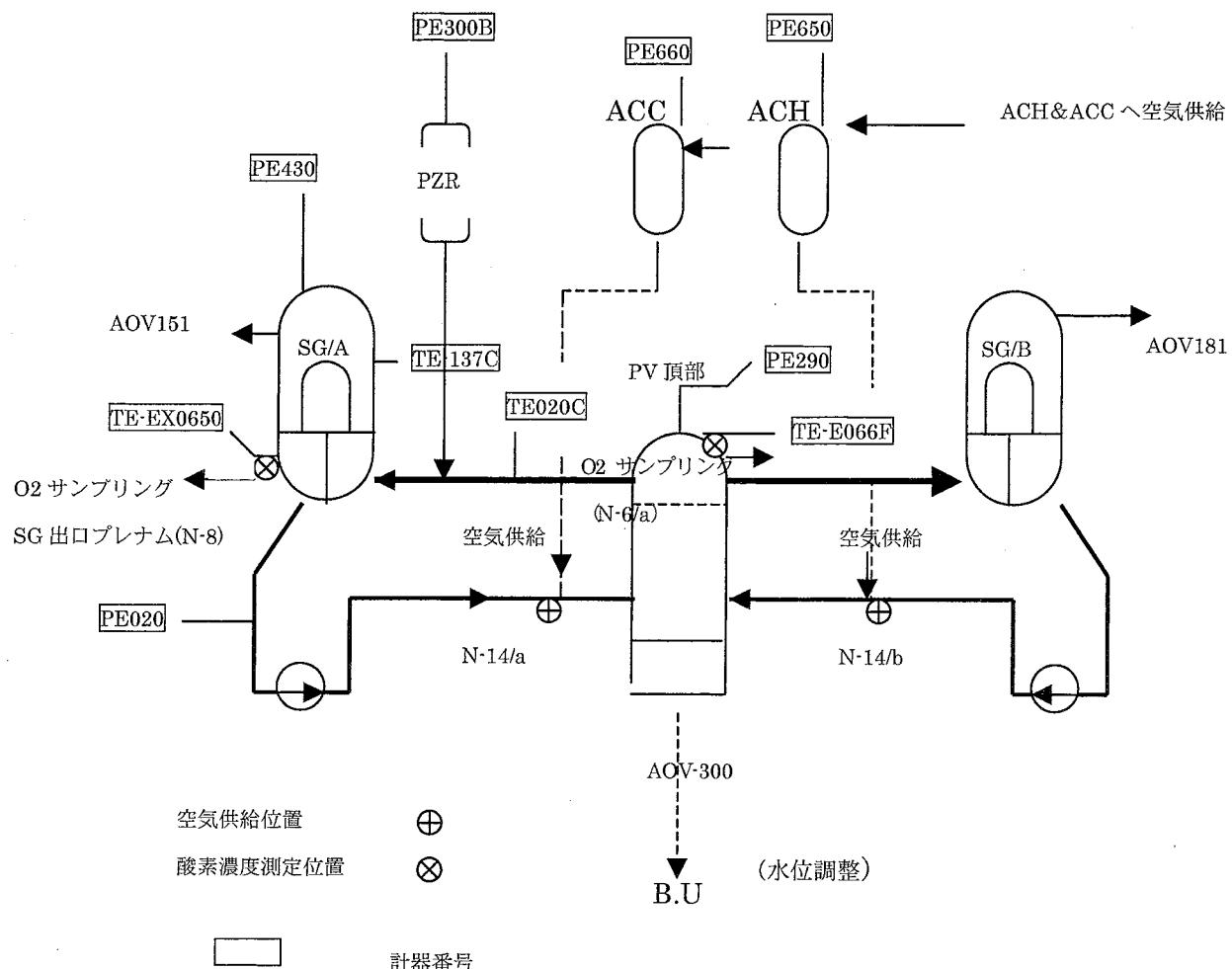
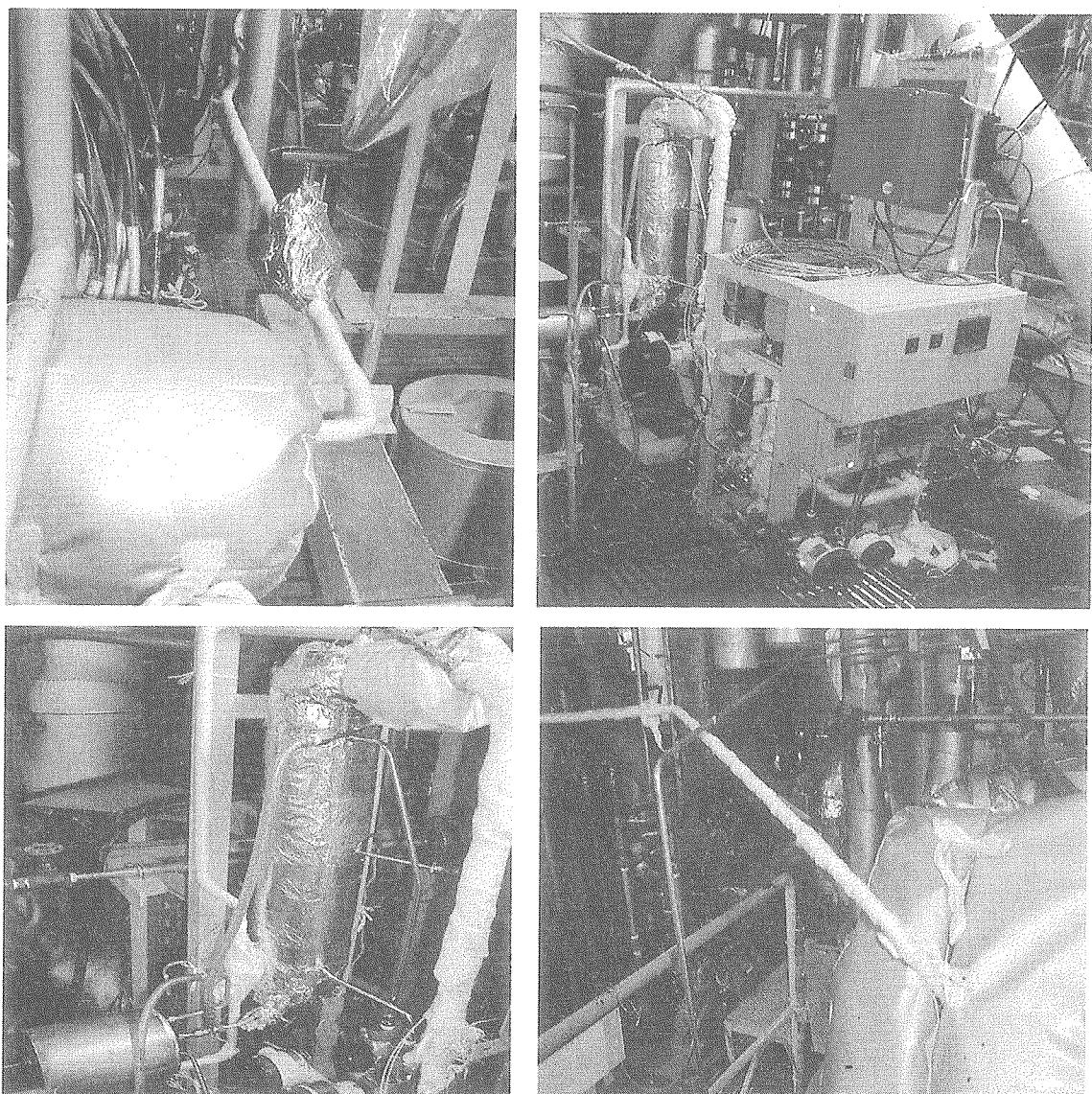


図 5. 2-1 非凝縮ガス濃度測定位置



左上：SG 出口プレナム N·8 ノズル

左下：気液分離タンク

右上：非凝縮ガス測定装置

右下：PV 頂部 N·6/a ノズル

図 5. 2-2 大型非定常実験装置を用いた非凝縮ガス測定

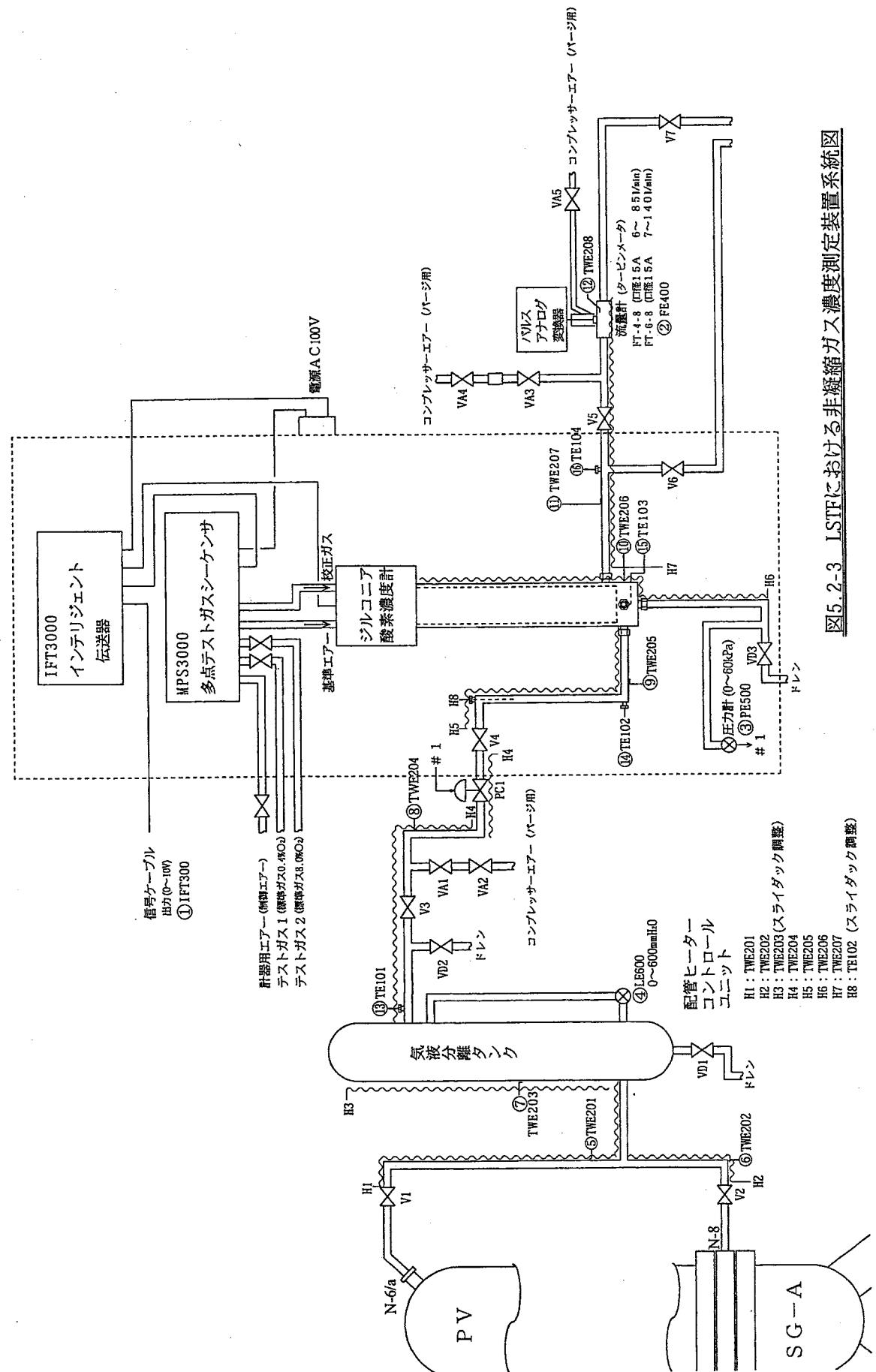


図5.2-3 LSTFにおける非凝縮ガス濃度測定装置系統図

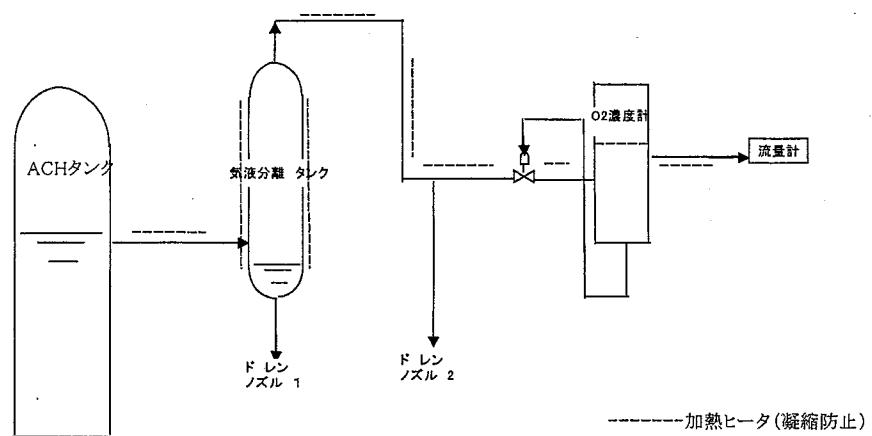


図 5.2-4 気液分離タンク性能確認試験

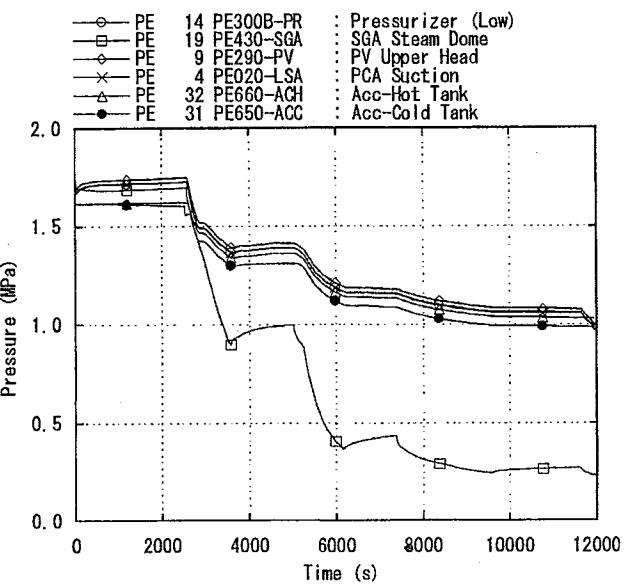


図 5.3-1 LSTF における圧力変化

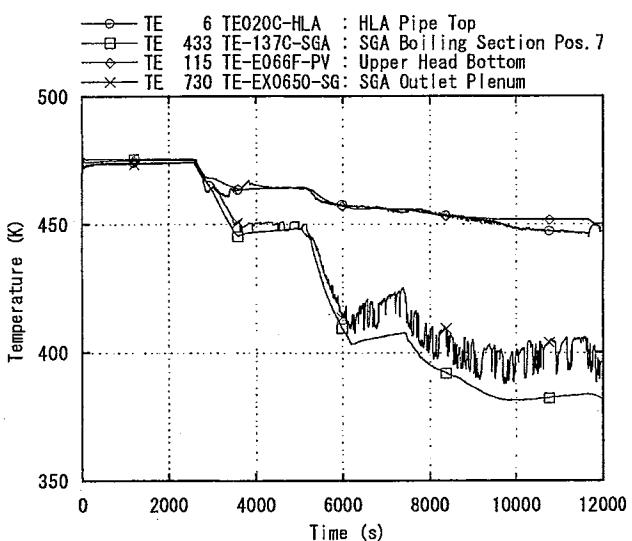


図 5.3-2 LSTF における温度変化

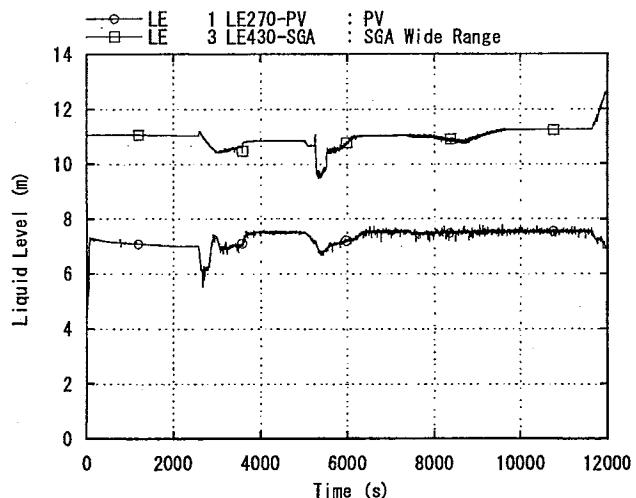


図 5.3-3 LSTF における水位変化

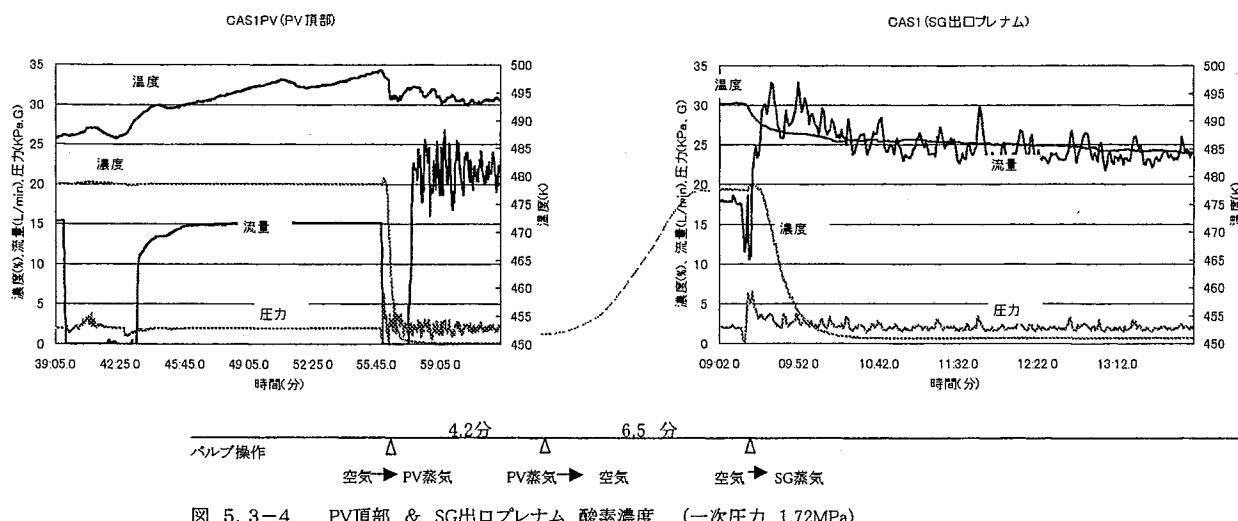


図 5.3-4 PV頂部 &amp; SG出口プレナム 酸素濃度 (一次圧力 1.72MPa)

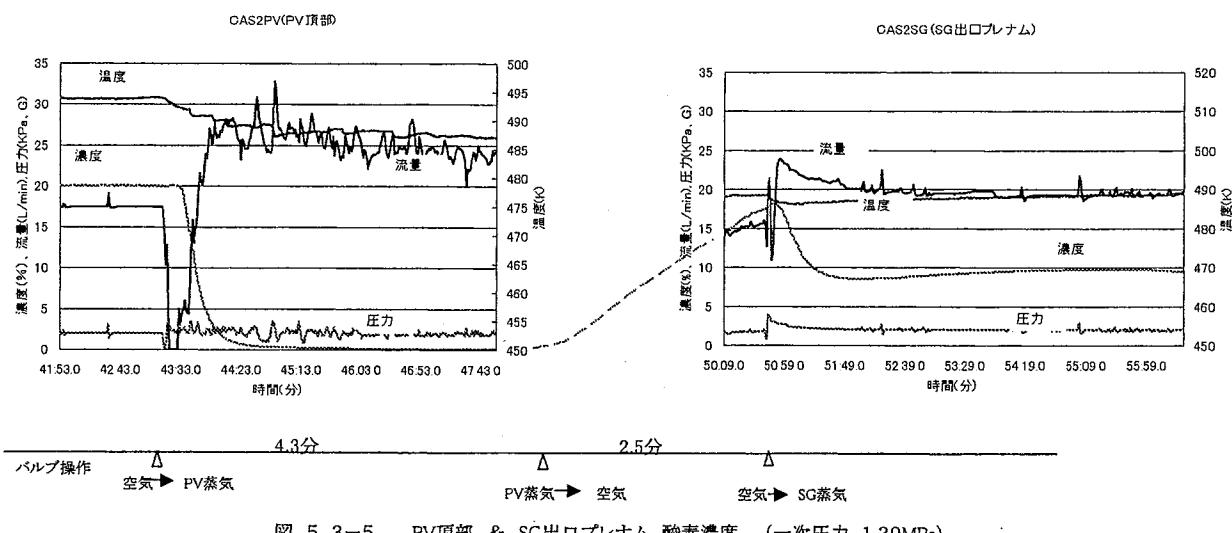


図 5.3-5 PV頂部 &amp; SG出口プレナム 酸素濃度 (一次圧力 1.39MPa)

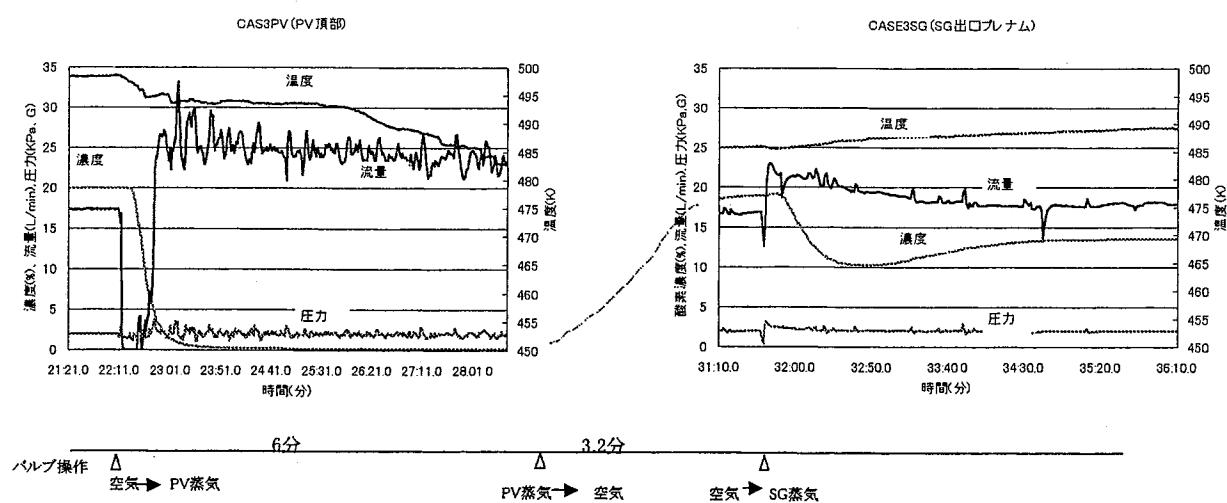


図 5.3-6 PV頂部 &amp; SG出口プレナム 酸素濃度 (一次圧力 1.16 MPa)

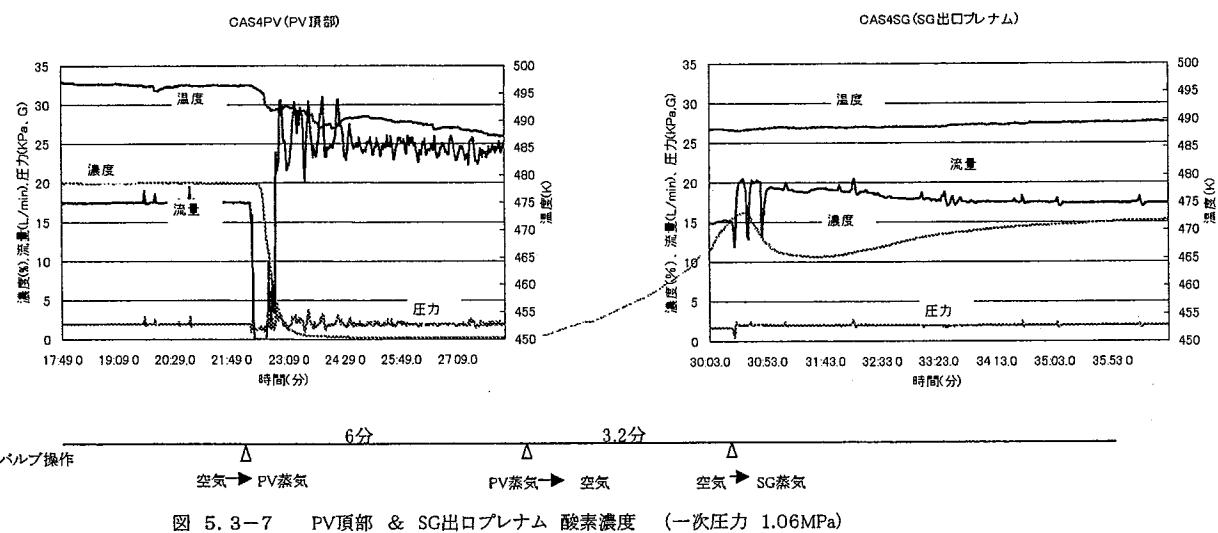


図 5.3-7 PV頂部 &amp; SG出口プレナム 酸素濃度 (一次圧力 1.06 MPa)

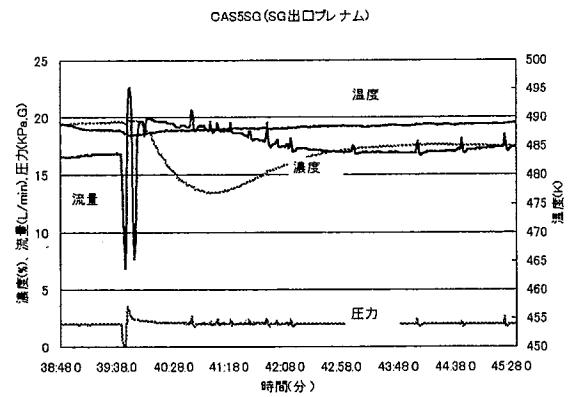


図 5.3-8 SG出口プレナム 酸素濃度 (一次圧力 1.06 MPa)

表 5. 3-1 一次系減圧過程における蒸気中の酸素濃度

測定条件		時間(秒) (*)	1次系		2次系		PV頂部(N-6/a ノズル)		SG出口プレナム(N-8ノズル)	
			PE300B MPa	TE020C K	PE430 MPa	TE-137C K	PE290 MPa	TE-E066H K	酸素濃度 %	PE290 MPa
CAS1PV	PV測定	1780	1.72	474.02	1.69	475.50	1.74	475.05	0.19	1.74
CAS1SG	SG測定	2440	1.72	474.11	1.69	475.53	1.75			1.75
CAS2PV	PV測定	4600	1.39	464.54	0.98	447.51	1.41	464.01	0.19	1.41
CAS2SG	SG測定	4980	1.39	464.27	1.00	448.32	1.41			1.41
CAS3PV	PV測定	6990	1.16	456.11	0.42	405.82	1.18	455.98	0.19	1.18
CAS3SG	SG測定	7430	1.16	454.97	0.43	407.17	1.18			1.18
CAS4PV	PV測定	10580	1.06	447.91	0.26	381.65	1.08	451.83	0.22	1.08
CAS4SG	SG測定	11060	1.06	447.44	0.27	382.40	1.08			1.08
CAS5SG	SG測定	11660	1.06	446.76	0.27	383.35	1.08	451.74		1.08

(\*)測定開始からの時間

PV: 圧力容器 SG: 蒸気発生器

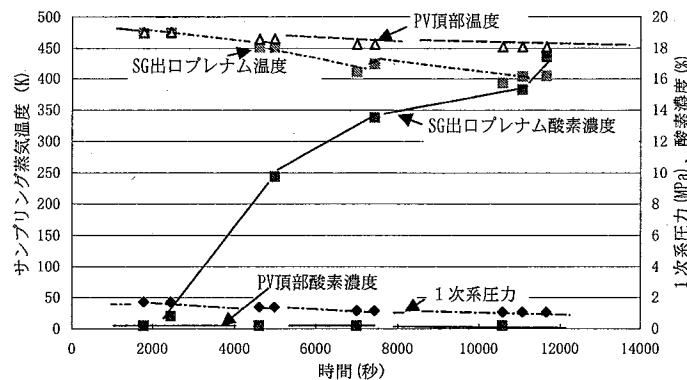


図 5.3-9 大型非定常実験装置 減圧過程における蒸気中の酸素濃度変化

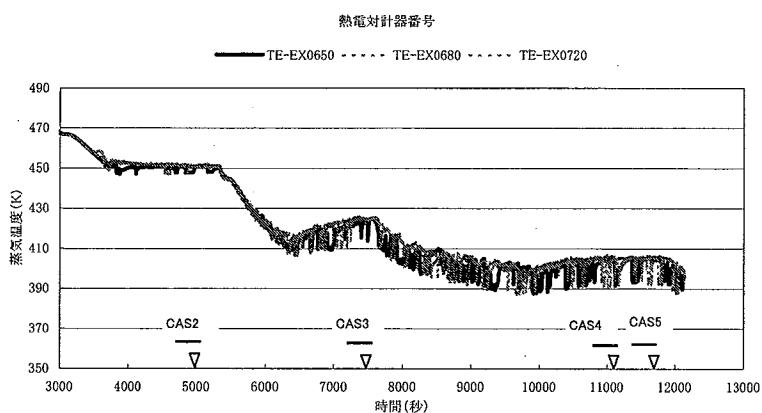


図 5. 3-10 SG出口プレナム温度変化

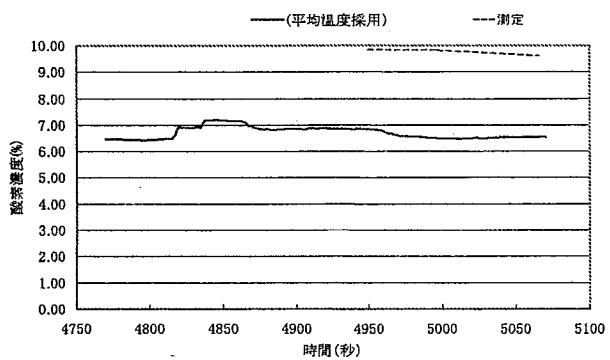


図 5.3-11 計算濃度(CAS2SG)

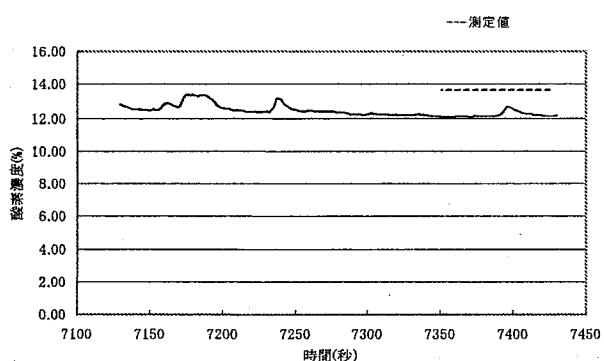


図 5.3-12 計算濃度(CAS3SG)

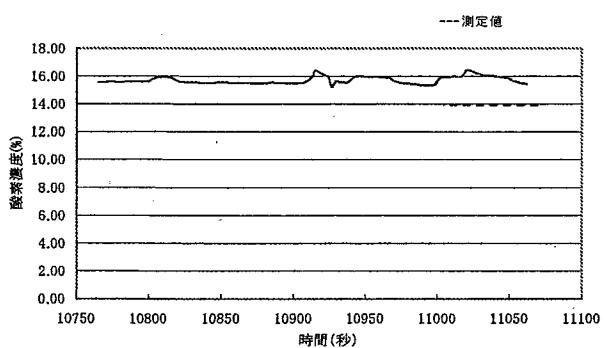


図 5.3-13 計算濃度(CAS4SG)

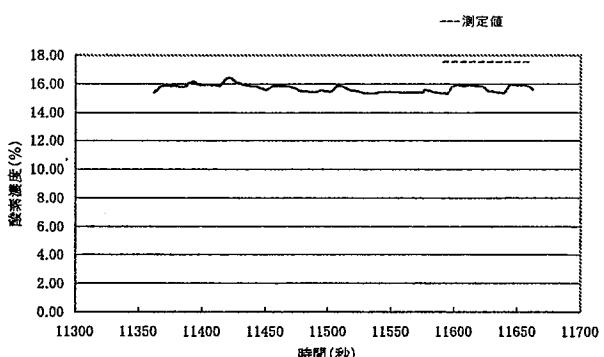


図 5.3-14 計算濃度(CAS5SG)

表5. 3-2 SG出口プレナム酸素濃度

時間(sec)	測定値(%)		計算値(%)	
	補正前	補正後	補正前	補正後
4980	9.75	9.01	6.71	5.44
7430	13.51	12.77	12.45	11.62
11060	15.30	14.56	15.72	15.22
11660	17.40	16.66	15.69	15.18

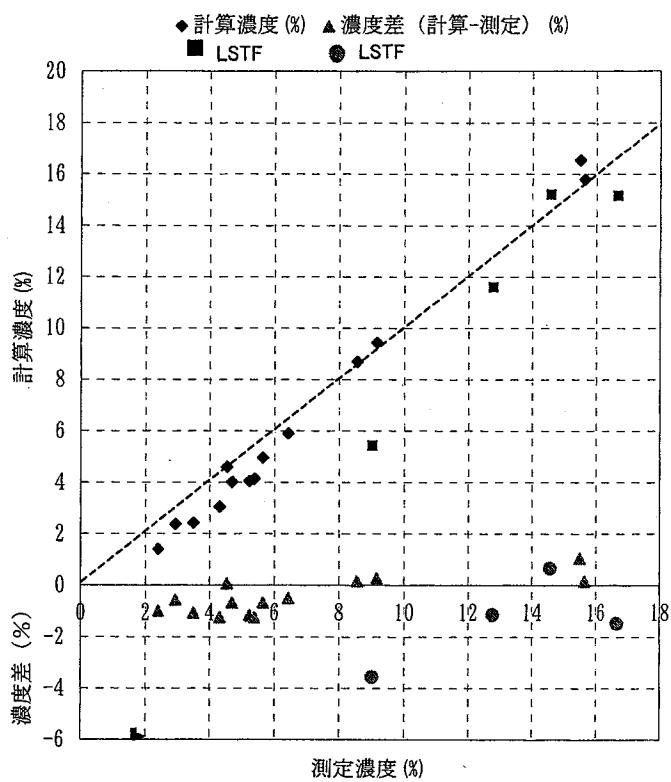


図5. 3-15 酸素濃度（計算値との比較）

## 6. おわりに

高温、高圧蒸気中の酸素濃度を測定することが可能な非凝縮ガス濃度測定装置を試作すると共に、標準ガス中の酸素濃度及び ACH タンクを用いた蒸気中の酸素濃度測定を行い、本装置の特性、操作方法を確認した。さらに、本装置の適用例として大型非定常実験装置を用いて ACH タンクより空気を注入させ、一次系減圧過程における PV 頂部、SG 出口プレナム部における酸素濃度を測定することにより実機への適用性を確認した。

今後は今回開発した非凝縮ガス測定装置を用いて小破断 LOCA 条件下で圧力部、蒸気発生器に蓄積される酸素濃度測定を行うことにより、非凝縮ガスによる熱伝達、減圧阻害過程の解明が期待される。

## 謝辞

本装置開発に当たり、実験装置の試作及び実験操作に多くの御協力を戴いた原子力エンジニアリング(株)、服部通氏、御代雅彦氏に謝意を表する。