

非凝縮ガス濃度測定装置のLSTF実験への適用

Application of Measuring Apparatus for Non-condensable Gas Concentration
to LSTF Experiment

上脇 忠義* 大和田 明彦 竹田 武司 中村 秀夫

Tadayoshi KAMIWAKI*, Akihiko OWADA, Takeshi TAKEDA
and Hideo NAKAMURA

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

July 2008

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)
より発信されています。

独立行政法人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
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail: ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail: ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2008

非凝縮ガス濃度測定装置の LSTF 実験への適用

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

上脇 忠義*、大和田 明彦⁺、竹田 武司、中村 秀夫

(2008 年 5 月 7 日受理)

加圧水型原子炉(PWR)の冷却材喪失事故(LOCA)時には、非常用炉心冷却系(ECCS)の蓄圧注入系タンクから注水後、加圧用の非凝縮性ガスが一次系に流入する。同ガスが蒸気発生器(SG)伝熱管に蓄積すると凝縮熱伝達が劣化し、SG 二次側減圧による一次系冷却の阻害要因となる。一方、PWR の LOCA 及び過渡を模擬する ROSA 計画大型非定常試験装置(LSTF)実験では、非凝縮性ガスが減圧に及ぼす影響を定量的に把握する必要があるため、非凝縮性ガスに空気を用いてジルコニア酸素濃度計により水蒸気中のガス濃度を直接計測する装置を開発してきた。

今回、本ガス濃度測定装置を LSTF 実験に適用するため、同装置を改良して LSTF に設置すると共に、蓄圧注入系タンクの加圧ガスとして空気を用いた実験を実施し、SG 二次側減圧過程においてガスが通過すると思われる圧力容器頂部及びガスが蓄積する SG 出口プレナム部の酸素濃度を直接計測した。

本報では、本ガス濃度測定装置の改良点などを紹介すると共に、性能確認試験及び LSTF を用いた SG 二次側減圧模擬試験で得られた酸素濃度測定結果を報告する。

Application of Measuring Apparatus for Non-condensable Gas Concentration to
LSTF Experiment

Tadayoshi KAMIWAKI^{*}, Akihiko OWADA⁺, Takeshi TAKEDA and Hideo NAKAMURA

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

(Received May 7, 2008)

Non-condensable gas for the pressurization of accumulator (ACC) tanks of emergency core cooling system may flow into the primary system during loss-of-coolant accidents (LOCAs) in a pressurized water reactor (PWR) after the ACC coolant injection is completed. Since the non-condensable gas may travel to and accumulate in steam generators (SGs) U-tubes, primary cooling and depressurization *via* SG secondary-side depressurization would become ineffective because of degradation in the condensation heat transfer in the SG U-tubes.

Since quantitative measurement of gas concentration is necessary to clarify the influences of non-condensable gas on the depressurization in ROSA/LSTF experiments that simulate PWR LOCAs and transients, an apparatus using a Zirconia oxygen sensor has been developed to directly measure the gas concentration in steam by introducing air as the non-condensable gas for the ACC pressurization. This apparatus is improved and applied to LSTF experiments where the gas concentration is measured directly in vessel upper head where gas may pass through with steam and in SG outlet plenum where gas accumulates.

This report describes the improvement of the apparatus and the results of oxygen gas measurement characterization tests and the LSTF secondary-side depressurization experiments.

Keywords: Non-condensable Gas Concentration, PWR, LSTF, Steam Generator, LOCA, Depressurization, Zirconia Oxygen Sensor

⁺ Engineering Services Department, Nuclear Science Research Institute, Tokai Research and Development Center

^{*} Sumimec Engineering Inc.

目 次

1. はじめに	1
2. 酸素濃度測定装置	2
2.1 装置概要	2
2.2 装置構成機器	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. 性能確認試験	23
3.1 標準ガスによる酸素濃度測定	23
3.1.1 目 的	23
3.1.2 測定条件及び測定方法	23
3.1.3 測定結果	23
3.2 蒸気中の酸素濃度測定	24
3.2.1 目 的	24
3.2.2 測定条件	24
3.2.3 測定方法	24
3.2.4 測定結果	25
4. 大型非定常実験装置(LSTF)実験における酸素濃度測定	53
4.1 目 的	53
4.2 実験条件	53
4.3 酸素濃度測定方法	53
4.3.1 測定要領	53
4.3.2 測定条件の制御	53
4.3.3 測定手順	54
4.4 測定結果	55
4.4.1 酸素濃度	55
4.4.2 計算値との比較	58
5. おわりに	77
謝 辞	77
参考文献	77

Contents

1. Introduction.....	1
2. Oxygen Gas Measuring Apparatus.....	2
2. 1 Outline of Measuring Apparatus	2
2. 2 Apparatus Component	2
2. 3 Measurement Conditions and Operation Sequences.....	4
2. 3. 1 Setting of Measurement Conditions.....	4
2. 3. 2 Operation Sequences	4
3. Measurement Characterization Test	23
3. 1 Standard Oxygen Gas Measurement	23
3. 1. 1 Objectives	23
3. 1. 2 Measurement Conditions and Sequences	23
3. 1. 3 Measurement Results	23
3. 2 Oxygen Gas Measurement in Steam	24
3. 2. 1 Objectives	24
3. 2. 2 Measurement Conditions	24
3. 2. 3 Measurement Sequences	24
3. 2. 4 Measurement Results	25
4. Oxygen Gas Measurement in Steam in LSTF Experiment	53
4. 1 Objectives	53
4. 2 Test Conditions	53
4. 3 Oxygen Gas Measurement Sequences	53
4. 3. 1 Measurement Outline	53
4. 3. 2 Setting of Measurement Conditions	53
4. 3. 3 Measurement Procedures	54
4. 4 Measurement Results	55
4. 4. 1 Oxygen Gas Concentration	55
4. 4. 2 Comparison between Measurement and Calculation	58
5. Summary.....	77
Acknowledgement	77
References	77

図 表 リ ス ト

表2. 2-1	ジルコニア酸素濃度計仕様
表2. 2-2	流量計(微小流量伝送器)仕様、外形図及び成績表
表3. 1-1	標準ガス濃度測定
表3. 2. 2-1	ACH タンク蒸気濃度測定条件
表3. 2. 2-2	測定濃度と計算濃度との比較(NO.1 装置)
表3. 2. 2-3	測定濃度と計算濃度との比較(NO.2装置)
表3. 2. 2-4	測定濃度と計算濃度との比較(ローズ M 装置)
表3. 2. 2-5	測定酸素濃度と計算濃度との比較(グラフ化)
表4. 4. 2-1	測定濃度と計算濃度との比較
表4. 4. 2-2	測定濃度と計算濃度との比較(グラフ化)
図2. 2-1A	酸素濃度測定装置(NO.1、NO.2 装置)系統図
図2. 2-1B	酸素濃度測定装置(ローズ M 装置)系統図
図2. 2-2	酸素濃度測定装置組立図
図2. 2-3	酸素濃度測定装置概観図
図2. 2-4	酸素濃度計容器
図2. 2-5	圧力調整弁外形図
図2. 2-6	気液分離器
図2. 2-7	ガス取出管加熱器(ヒータ)
図2. 2-8	ガス加熱器(ヒータ)
図3. 1. 3-1	標準ガス(5.017%)測定結果(NO.1 装置)
図3. 1. 3-2	標準ガス(5.017%)測定許容誤差範囲(NO.1 装置)
図3. 1. 3-3	標準ガス(5.017%)測定結果(NO.2装置)
図3. 1. 3-4	標準ガス(5.017%)測定許容誤差範囲(NO.2装置)
図3. 1. 3-5	標準ガス(5.017%)測定結果(ローズ M 装置)
図3. 1. 3-6	標準ガス(5.017%)測定許容誤差範囲(ローズ M 装置)
図3. 1. 3-7	標準ガス(5.142%)測定結果(NO.1 装置)
図3. 1. 3-8	標準ガス(5.142%)測定許容誤差範囲(NO.1 装置)
図3. 1. 3-9	標準ガス(5.142%)測定結果(NO.2装置)
図3. 1. 3-10	標準ガス(5.142%)測定許容誤差範囲(NO.2装置)
図3. 1. 3-11	標準ガス(5.142%)測定結果(ローズ M 装置)
図3. 1. 3-12	標準ガス(5.142%)測定許容誤差範囲(ローズ M 装置)

- 図3. 2. 2-1 ACH タンク
- 図3. 2. 4-1 蒸気(1MPa-14%)中の酸素濃度測定結果(NO.1 装置)
- 図3. 2. 4-2 蒸気(1MPa-14%)中の酸素濃度測定結果と計算値との比較(NO.1 装置)
- 図3. 2. 4-3 蒸気(1MPa-14%)中の酸素濃度測定結果(NO.2装置)
- 図3. 2. 4-4 蒸気(1MPa-14%)中の酸素濃度測定結果と計算値との比較(NO.2装置)
- 図3. 2. 4-5 蒸気(1MPa-14%)中の酸素濃度測定結果(ローズ M 装置)
- 図3. 2. 4-6 蒸気(1MPa-14%)中の酸素濃度測定結果と計算値との比較(ローズ M 装置)

- 図3. 2. 4-7 蒸気(1.5MPa-5%)中の酸素濃度測定結果(NO.1 装置)
- 図3. 2. 4-8 蒸気(1.5MPa-5%)中の酸素濃度測定結果と計算値との比較(NO.1 装置)
- 図3. 2. 4-9 蒸気(1.5MPa-5%)中の酸素濃度測定結果(NO.2装置)
- 図3. 2. 4-10 蒸気(1.5MPa-5%)中の酸素濃度測定結果と計算値との比較(NO.2装置)
- 図3. 2. 4-11 蒸気(1.5MPa-5%)中の酸素濃度測定結果(ローズ M 装置)
- 図3. 2. 4-12 蒸気(1.5MPa-5%)中の酸素濃度測定結果と計算値との比較(ローズ M 装置)

- 図3. 2. 4-13 蒸気(0.8MPa-15%)中の酸素濃度測定結果(NO.1 装置)
- 図3. 2. 4-14 蒸気(0.8MPa-15%)中の酸素濃度測定結果と計算値との比較(NO.1 装置)
- 図3. 2. 4-15 蒸気(0.8MPa-15%)中の酸素濃度測定結果(NO.2装置)
- 図3. 2. 4-16 蒸気(0.8MPa-15%)中の酸素濃度測定結果と計算値との比較(NO.2装置)
- 図3. 2. 4-17 蒸気(0.8MPa-15%)中の酸素濃度測定結果(ローズ M 装置)
- 図3. 2. 4-18 蒸気(0.8MPa-15%)中の酸素濃度測定結果と計算値との比較(ローズ M 装置)

- 図3. 2. 4-19 蒸気(1.5MPa-2%)中の酸素濃度測定結果(NO.1 装置)
- 図3. 2. 4-20 蒸気(1.5MPa-2%)中の酸素濃度測定結果と計算値との比較(NO.1 装置)
- 図3. 2. 4-21 蒸気(1.5MPa-2%)中の酸素濃度測定結果(NO.2装置)
- 図3. 2. 4-22 蒸気(1.5MPa-2%)中の酸素濃度測定結果と計算値との比較(NO.2装置)
- 図3. 2. 4-23 蒸気(1.5MPa-2%)中の酸素濃度測定結果(ローズ M 装置)
- 図3. 2. 4-24 蒸気(1.5MPa-2%)中の酸素濃度測定結果と計算値との比較(ローズ M 装置)

- 図3. 2. 4-25 蒸気(1MPa-8%)中の酸素濃度測定結果(NO.1 装置)
- 図3. 2. 4-26 蒸気(1MPa-8%)中の酸素濃度測定結果と計算値との比較(NO.1 装置)
- 図3. 2. 4-27 蒸気(1MPa-8%)中の酸素濃度測定結果(NO.2装置)
- 図3. 2. 4-28 蒸気(1MPa-8%)中の酸素濃度測定結果と計算値との比較(NO.2装置)
- 図3. 2. 4-29 蒸気(1MPa-8%)中の酸素濃度測定結果(ローズ M 装置)
- 図3. 2. 4-30 蒸気(1MPa-8%)中の酸素濃度測定結果と計算値との比較(ローズ M 装置)

- 図4. 3-1 酸素濃度測定位置図

- 図4. 4. 1-1 圧力変化と酸素濃度測定データ

- 図4. 4. 1-2 PV 頂部酸素濃度測定データ
- 図4. 4. 1-3 SGA 出口プレナム部酸素濃度測定データ(1回目)
- 図4. 4. 1-4 SGA 出口プレナム部酸素濃度測定データ(2回目)
- 図4. 4. 1-5 SGA 出口プレナム部酸素濃度測定データ(3回目)
- 図4. 4. 1-6 SGA 出口プレナム部酸素濃度測定データ(4回目)

- 図4. 4. 1-7 SGB 出口プレナム部酸素濃度測定データ(1回目)
- 図4. 4. 1-8 SGB 出口プレナム部酸素濃度測定データ(2回目)
- 図4. 4. 1-9 SGB 出口プレナム部酸素濃度測定データ(3回目)
- 図4. 4. 1-10 SGB 出口プレナム部酸素濃度測定データ(4回目)

- 図4. 4. 1-11 PV 頂部酸素濃度測定装置温度(PV 頂部出口～圧力調整弁)
- 図4. 4. 1-12 PV 頂部酸素濃度測定装置温度(圧力調整弁～流量計)
- 図4. 4. 1-13 SGA 酸素濃度測定装置温度(SGA 出口～圧力調整弁)
- 図4. 4. 1-14 SGA 酸素濃度測定装置温度(圧力調整弁～流量計)
- 図4. 4. 1-15 SGB 酸素濃度測定装置温度(SGB 出口～圧力調整弁)
- 図4. 4. 1-16 SGB 酸素濃度測定装置温度(圧力調整弁～流量計)

- 図4. 4. 2-1 (計算)酸素濃度
- 図4. 4. 2-2 PV 頂部の測定酸素濃度と計算濃度との比較
- 図4. 4. 2-3 SGA 酸素濃度と計算濃度との比較(全体)
- 図4. 4. 2-4 SGA 酸素濃度と計算濃度との比較(9000 秒以降)
- 図4. 4. 2-5 SGA 酸素濃度と計算濃度との比較(一回目)
- 図4. 4. 2-6 SGA 酸素濃度と計算濃度との比較(二回目)
- 図4. 4. 2-7 SGA 酸素濃度と計算濃度との比較(三回目)
- 図4. 4. 2-8 SGA 酸素濃度と計算濃度との比較(四回目)

- 図4. 4. 2-9 SGB 酸素濃度と計算濃度との比較(全体)
- 図4. 4. 2-10 SGB 酸素濃度と計算濃度との比較(9000 秒以降)
- 図4. 4. 2-11 SGB 酸素濃度と計算濃度との比較(一回目)
- 図4. 4. 2-12 SGB 酸素濃度と計算濃度との比較(二回目)
- 図4. 4. 2-13 SGB 酸素濃度と計算濃度との比較(三回目)
- 図4. 4. 2-14 SGB 酸素濃度と計算濃度との比較(四回目)

This is a blank page

1. はじめに

加圧水型原子炉(PWR)の冷却材喪失事故(LOCA)時には、非常用炉心冷却系(ECCS)の蓄圧注入系タンクから注水が終了した後、同タンクから一次系に加圧用の窒素(N_2)ガスが流入する。ガスが蒸気発生器(SG)の伝熱管に蓄積されると凝縮熱伝達が阻害され、SG 二次側減圧による一次系冷却が充分に行えない事態が生じ得る。これらの熱伝達や減圧の阻害過程を解明するためには、蓄積した非凝縮性ガス濃度とその分布を定量的に把握する必要がある。

原子力機構では、ROSA 計画大型非定常実験装置(LSTF)を用いて上記の様な PWR の LOCA や過渡の模擬実験を行い、ガスの分布や濃度を評価してきているが、その方法は主に温度計測に基づいて飽和水蒸気中のガス濃度を算出するものである。ここでは、ガス中の蒸気の状態変化などによる計測誤差を排除できなかった。そのため、経路を通過しかつ SG などに蓄積されるガス濃度を直接測定できるように、蓄圧注入系タンクの加圧ガスに空気をを用いると共に、ジルコニア酸素濃度計を用いて水蒸気に混入するガスの濃度を直接計測する非凝縮ガス濃度測定装置を 17 年度に開発し、「JAEA-Research 2006-009 非凝縮ガス濃度測定装置の開発」⁽¹⁾ (以下、既報告書と称す。)にまとめた。同装置では、系の水蒸気-ガス混合気を小流量でバッチサンプリングないし連続サンプリングし、高温、高压状態の蒸気中の酸素濃度を直接計測する。LSTF を用いた LOCA 模擬実験を通じて、非凝縮性ガスは一次系圧力約 1.6MPa 以下で一次系に流入することが明らかになっていることから、本ガス濃度測定装置の使用圧力は 2MPa 以下とした。

既報告書では、今後の課題として、開発した非凝縮ガス濃度測定装置を LSTF⁽²⁾実験へ適用し、小破断 LOCA 条件下で圧力容器(PV)頂部及び SG に蓄積される酸素濃度測定を通じて、非凝縮性ガスによる熱伝達、減圧阻害過程の解明を行うことを挙げた。

今回、同装置を LSTF 実験へ適用するにあたり、一次系の中で最も多く非凝縮ガスが蓄積すると予想される 2 基の SG(SGA、SGB)出口プレナム部及びガスが通過すると思われる PV 頂部を測定することにした。これら 3 箇所を同時に測定するために 17 年度に開発した装置を PV 頂部での測定に用い、新たに 2 基の装置を製作して SG 出口プレナム部での測定に適用した。

なお、新規製作にあたり、気液分離器を小型化して系からジルコニア酸素濃度計までの流路体積を小さくしてレスポンスを高めると共に、微少水蒸気流量の計測に用いる高温用タービンメータを、小型オリフイス式微少流量計に変更して結露による不具合の可能性を排除するなど、種々の改良を加えた。このような改良により、構成機器類を比較的小型のフレーム内に集約化し、持ち運びを容易にすることができた。

本報では 3 基の測定装置を同時に LSTF 実験へ適用し、非凝縮性ガスによる熱伝達、減圧阻害過程の解明に必要なデータを得たのでその結果を報告する。なお、これら 3 基の測定装置を LSTF 実験へ適用するにあたり、単体での性能確認試験を実施したのでその結果を併せて報告する。

2. 酸素濃度測定装置

2.1 装置概要

本酸素濃度測定装置は、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 2MPa 以下、温度 493K (220℃)以下]中の酸素濃度を測定する装置である。

今回新しく製作した2基の酸素濃度測定装置には、取り扱い易さなどを考慮して、横河電機株式会社製の酸素濃度計を採用した。これらの酸素濃度測定装置(以下、NO.1 装置、NO.2 装置と称す)のうち、NO.1 装置は SGA 出口プレナム部、NO.2 装置は SGB 出口プレナム部での測定に用いた。

また、17 年度に開発したローズマウント社(米国)製の酸素濃度計を用いる酸素濃度測定装置(以下、ローズ M 装置と称す)は、PV 頂部での測定に用いた。

以下に、新規製作した装置の概要、改良点及びその操作方法などについて述べる。

2.2 装置構成機器

図 2.2-1A に新規製作した酸素濃度測定装置の系統図、図 2.2-2 に組立図、図 2.2-3 に外観図を示す。また、図 2.2-1B にローズ M 装置の系統図を示す。

新規製作した酸素濃度測定装置は、ローズ M 装置と同様、酸素濃度計、圧力調整弁、流量計、配管、配管ヒータ及びその制御装置から構成されている。

主な単体機器の仕様及び本装置の機能を満足させ、また流体条件(圧力、流量、温度変化)が酸素濃度へ与える影響を極力少なくするため、各構成機器について以下の様に種々の改良を加えた。

(1)ジルコニア酸素濃度計

横河電機株式会社製

型式 検出器 NO:ZR22G、変換器 NO:ZR402G

仕様(表 2.2-1 参照)

測定対象	燃焼排ガス及び混合ガス(可燃性ガスを除く)		
測定方式	ジルコニア式		
測定ガス温度	973 K(700℃)以下		
測定ガス圧力	-5～+250kPa		
再現性	F.S の±0.5% (0-25vol% O ₂ 未満のレンジ)	25%×0.005=±0.125%	} ±0.375%
直線性	F.S の±1% (0-25vol% O ₂ 未満のレンジ)	25%×0.01=±0.25%	
応答時間	5 秒以内 90%応答		

本酸素濃度計は密封容器内に納められ、容器内へ流入した蒸気中の酸素を測定する構造となっている(図 2.2-4 参照)。

(2)圧力調整弁

ローズ M 装置と同じ仕様(図 2.2-5 参照)の圧力調整弁を採用した。酸素濃度計を用いて蒸気(最大圧力 2MPa)中の酸素濃度を測定するため、酸素濃度計上流に減圧弁を設けた。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から、できる限り酸素濃度が全圧力によって影響を受けないようにす

るため、本弁は酸素濃度計の周辺圧力が 3kPa(ゲージ圧)未満で制御可能な圧力制御弁とした。

(3) 流量計

酸素濃度測定時の流量を測定するため、流量計を酸素濃度計下流に設けた。LSTF 実験への適用を考慮すると少量のサンプリングが望ましいため、大気圧近傍で微量流量の計測が可能な流量計としてオリフィス型微量流量伝送器を採用した。

圧力調整弁にて 2kPa(ゲージ圧)に減圧した結果として、10～30L/min となる流量であれば蓄圧注入系(ACH、ACC)タンクの初期封入圧が 4.51MPa と高圧であるため、蓄圧注入系タンク内の流量換算は約 1/43.8 即ち 0.23～0.68L/min と小さく、影響は軽微である。

ローズ M 装置の流量計はタービンメータ式であり、タービンに水滴が付着すると回転不能になる不具合が実験中度々発生した。そのため、オリフィス型の流量計に変更し、実験中不具合などは無く正常に作動した。

横河電機株式会社製

型式	微量流量伝送器 EJ115-DSL200B-10DB
仕様(表 2.2-2 参照)	
測定可能範囲	10.3～32L/min(空気換算)
許容接液温度	120℃(393K)[ただし、短時間の場合 130℃(403K)]
使用圧力	2.7kPa[abs]以上

(4) 気液分離器

機能上、酸素濃度計及び流量計への液滴混入は避ける必要があるため、既報告書で効果が確認された気液分離器(内径 42.6mm、全長 500mm の中空タンク)を設けた。なお、流路体積を小さくしてレスポンスを高めるため小型化を図った。また、気液分離器下端には初期操作時に予想されるドレンを除去するためのドレン弁(V-6)を設けた(図 2.2-6 参照)。

(5) 配管

ローズ M 装置に比べて構成機器をフレーム内に集約化したことにより、配管取り廻し、ヒータ取り付け位置などが多少異なる。なお、装置内配管サイズは共通とし、内径は 7.53mm(外径 9.53mm×肉厚 1mm)を使用した。

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)、ドレン弁を設けた。

1) サンプリングノズルから圧力調整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圧力調整弁までの配管内の凝縮防止用に加熱ヒータ(H1)を設け、流体の飽和温度以上に加熱する(図 2.2-1A、図 2.2-2、図 2.2-7 参照)。

2) 圧力調整弁から酸素濃度計までの配管ヒータ

圧力調整弁で酸素濃度測定部の蒸気圧力=2kPa(ゲージ圧)に制御する時の減圧後の蒸気温度は同圧力に対する飽和温度[約 374K(101℃)]近くまで低下すると予想される。配管内の蒸気凝縮

防止及び流量計の仕様上の許容温度＝403K(130℃)を考慮して、圧力調整弁から酸素濃度計までの配管中の蒸気を 393～413K(120～140℃)程度まで加熱可能な配管ヒータ(H3、H5)を設け、酸素濃度計入口流体温度が 393～413K(120～140℃)となるように制御した(図 2.2-1A、図 2.2-2、図 2.2-8 参照)。

3) 酸素濃度計から流量計までの配管ヒータ

流量計の許容温度 403K(130℃)を考慮して、流量計出口温度(TE5)＝383～403K(110～130℃)となるように制御可能な配管ヒータ(H10)を設けた(図 2.2-1A 参照)。

2.3 測定条件及び装置操作方法

2.3.1 測定条件の制御

既報告書に示すローズ M 装置の試験結果から、圧力、温度及び流量を下記の範囲内で制御された状態で酸素濃度を測定することで、酸素濃度計単体の測定精度内で評価可能であることが判った。

(1) 圧力 :適用圧力範囲は 2MPa 以下の蒸気とする。

酸素濃度計容器内の圧力は 2kPa(ゲージ圧)に制御する。

(2) 温度 :ガス濃度に影響を与える凝縮を避けるため、サンプリング部から圧力調整弁まではサンプリング蒸気の飽和温度以上に制御し、圧力調整弁以降は減圧後の飽和温度以上に制御する。また、流量計の仕様上の許容温度 403K(130℃)を考慮し、配管ヒータ温度は流量計入口温度(TE5)＝383～409K(110～136℃)となるように制御する。

(3) 流量 :流量の制御範囲＝10～30L/min とする。

LSTF 実験への影響を極力小さくするため、少量のサンプリングが望ましい。圧力調整弁にて 2kPa(ゲージ圧)に減圧した結果として、流量が 10～30L/min であれば蓄圧注入系タンクの初期封入圧が 4.51MPa と高圧であるため、ACH タンク内の流量換算は約 1/43.8 即ち 0.23～0.68L/min と小さく、影響は軽微である。

2.3.2 装置操作方法

非凝縮ガス測定装置を用いた酸素濃度測定方法は以下の通り(図 2.2-1 参照)。

〈 酸素濃度計起動 〉

(1) 酸素濃度計起動準備、酸素濃度計ヒータ起動

(2) 起動準備完了後弁(V-8)開により濃度計に圧縮空気を通気し、圧力調整弁(V-3)圧力を 2kPa(ゲージ圧)に調整する。

〈 ドレン操作 〉

- (3) ドレン弁(V-6)開、元弁(V-1)開
- (4) 蒸気を通しドレンを抜く
- (5) ドレン弁(V-6)閉、酸素濃度計入口弁(V4)開、流量計前後弁(V-4、V-5)開

〈 制御圧力設定 〉

- (6) 圧力調整弁(V-3)を2kPa(ゲージ圧)に設定
- (7) スパンガス(20.84%O₂)でスパン校正後、ゼロガス(0.9861%O₂)でゼロ校正を自動で行う。

〈 配管ヒータ温度設定及び昇温 〉

- (8) サンプリングノズル部から圧力調整弁までは飽和蒸気温度以上に昇温する。
- (9) 圧力調整弁以降は2kPa(ゲージ圧)の飽和温度101℃(374K)以上に制御する。
- (10) 流量計入口温度(TE5)が383～403K(110～130℃)となるように、配管ヒータを設定する。

〈 流量設定 〉

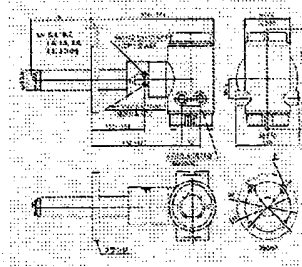
- (11) 流量が10～30L/minの範囲であることを確認する。
- (12) 測定終了後、圧縮空気により流量計をエアークリーニングして終了する。

表2.2-1 ジルコニア酸素濃度計仕様

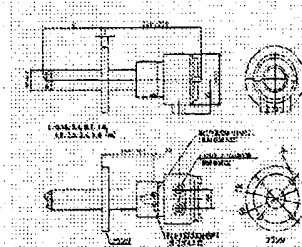
SPECIFICATIONS 仕様

測定対象	酸素濃度計: 燃焼排ガス及び混合ガス中(可燃性ガスを除く)の酸素濃度 高温濃度計: 空気中の水蒸気(vol%)
測定方式	ジルコニア式
測定範囲	表示 O ₂ : 0~100vol% O ₂ 表示 H ₂ O: 0~100vol% H ₂ Oまたは0~1.000kg/kg表示 %相対湿度、露点
出力	O ₂ : 0.5~0.100% O ₂ の範囲で任意設定(1vol%単位) または0~100%設定可 H ₂ O: 0.25~0.100vol% H ₂ Oまたは 0.0.200~0.1.000kg/kgの範囲で任意設定
測定ガス圧力	O ₂ : -5~+250kPa H ₂ O: -5~+20kPa
試料ガス温度	一般用 0~700°C 高温用 0~1400°C
検出器挿入長	一般用 0.4m, 0.7m, 1.0m, 1.5m, 2.0m, 2.5m, 3.0m 高温用 1.0m, 1.5m
出力信号	4~20mA DC
接点出力 (ZR202G 2点 ZR402G 4点)	接点容量 30VDC 3A, 250VAC 3A 常時動接、常時非動接選択可能、上下限警報には、デレイ機能、 ヒステリシス機能設定可能、1.異常、2.校正中、3.レンジ切替アンサー バック警選択可能
異常検出内容	セル異常、セル温度異常、アナログ回路異常、 デジタル回路異常、校正異常
校正方法	手動校正、半自動校正、自動校正
検出器構造	屋外設置型、防雨構造 NEMA4X/IP65
変換器構造	屋外設置型、防雨構造 NEMA4X/IP65
周囲温度	検出器 -20~+150°C 変換器 -20~+55°C
電源	100~240 VAC 50/60Hz
特 性	
線arity	O ₂ : ±0.5% (設定レンジ最大値) H ₂ O: ±1% (設定レンジ最大値)
ドリフト	ゼロ、スパン共、O ₂ : ±2% (設定レンジ最大値)/月、 H ₂ O: ±3% (設定レンジ最大値)/月
応答速度	90%応答 5秒以内

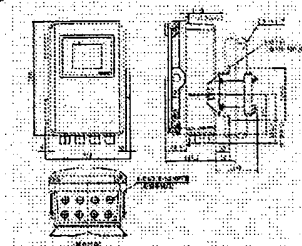
■一体型酸素濃度計/高温濃度計 ZR202G



■分離型検出器 ZR222G



■分離型変換器 ZR402G



General Specifications

微小流量伝送器

■ 概要

RI115形微小流量伝送器は、差圧伝送器に微小径のオリフィスを内蔵させた微小流量測定に適した流量計です。

オリフィスには、穴径0.508 mmから6.350 mmのものまで8種類あり、この穴径の選択と差圧伝送器の差圧測定スパンの組み合わせにより、広範囲な微小流量の測定が可能です。

伝送器の出力信号は、流量に対応した4~20 mA DCです。

また、BRAIN TERMINALまたはCENTUM-CSなどの相互通信により、リモート設定、モニタリングなどを行うことができます。

■ 標準仕様

測定範囲：

カプセル	差圧スパン	水換算流量 ℓ/min	空気換算流量 Nm ³ /min
L	1~10 kPa (100~1000 mmH ₂ O)	0.016~7.2	0.44~198
M	1.3~130 kPa (130~13000 mmH ₂ O)	0.018~26.0	0.50~716
H	14~210 kPa (1400~21000 mmH ₂ O)	0.058~33.0	1.65~910

T01.EPS

出力信号：

4~20 mA DC 2線式

異常時の出力信号（バーンアウト）：

CPU異常時；

HIGH側：110%(21.6 mA DC)以上…固定

センサ、アンプ異常時；

HIGH側：110%(21.6 mA DC)…出荷時設定

LOW側：-2.5%(3.6 mA DC)

通信ライン条件：

電源電圧…18~42 V DC*

負荷抵抗…250~600 Ω、ケーブル抵抗を含む

電源電圧と負荷抵抗との関係は図1を参照

通信距離…2 km*、CEVケーブル使用の時

負荷容量…0.22 μF*以下

負荷インダクタンス…3.3 mH*以下

動力線との間隔…15 cm以上

受信抵抗に接続される受信計器の入力インピーダンス

…2.4 kHzに於いて10 kΩ以上

*一般、耐圧防爆形の場合

精度：

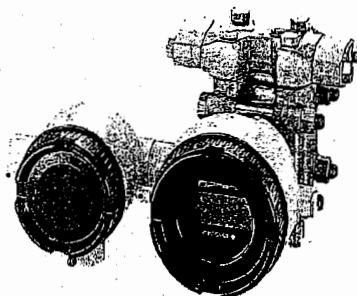
スパンの±5 %

周囲温度：

-40~85 °C(一般形)

-30~80 °C(内蔵指示計付)

耐圧防爆、本質安全防爆形は「付加仕様」参照



接液温度：

-40~120 °C(一般形)

耐圧防爆、本質安全防爆形は「付加仕様」参照

周囲湿度：

5~100 % RH(40 °Cの時)

使用圧力：

2.7 kPa abs以上

最大使用圧力は、形名、コード一覧参照

大気圧以下の場合は図2参照

電源電圧変動の影響：

±0.005 %/V(21.6~32 V DC 350 Ω)

取付：

2Bパイプ取付

姿勢誤差：

440 Pa/90°

ダイアフラムと平行方向の変位に対しては影響なし。

保護等級：

JIS C0920防浸形, IP67, NEMA4

防爆構造：

TIIS防爆形

適合規格：労働安全衛生法 告示16号

電気機械器具防爆構造規格

TIIS耐圧防爆形(Ex do IIC T4X)

周囲温度が50 °C以上の場合、最高許容温度75 °C

以上の外部配線を使用する。

合格番号：TC13810(指示計なし)

TC13811(指示計付き)

表2. 2-2(2/4) 流量計(微小流量伝送器)仕様、外形図及び成績表

TIS本質安全防爆形 (i3aG4)

BARD-800形安全保持器を使用する。ただしBARD-400形安全保持器との組合せも可能です。

合格番号:

	BARD-800 との組合せ	BARD-400 との組合せ
ア레스タなし	T56212	T54512
ア레스タ (付加仕様/A) 付	T56213	

T30.EPS

注: TIS防爆は労働防爆のことで、従来通称としてJIS防爆と称していたものです。

他の防爆規格は「付加仕様」参照ください。

電源接続口:

「形名およびコード一覧」参照

プロセス接続口:

「形名およびコード一覧」参照

接液材質:

ダイアフラム、カバーフランジ、プロセスコネクタ、
ベントプラグ、マニホールドおよびオリフィス

…「形名およびコード一覧」参照

カプセルガスケット…テフロンコーティングSUS316L

プロセスコネクタガスケット…PTFE(テフロン)

締付ボルトナット材質:

「形名およびコード一覧」参照

伝送部ケース:

アルミニウム合金鋳物

塗装:

ポリウレタン樹脂焼付塗装

フロスティホワイト(マンセル2.5Y 8.4/1.2相当)

…伝送部ケース

ディーアプシーモスグリーン(マンセル0.6GY 3.1/2.0相当)

…伝送部カバー

内蔵指示計:

LCDデジタル指示計(オプション)

ダンピング時定数:

(伝送部とカプセルの時定数を加算)

伝送部時定数…0.2~64秒 9段階 設定可能

カプセル	L	M	H
時定数 (秒)	約0.7	約0.5	約0.3

T02.EPS

外部ゼロ調整機構:

連続可変

ゼロ調整軸を回す速さに応じてゼロ点の遷移量に変化する。分解能: スパンの0.01 %

ゼロ点遷移可能範囲:


負方向遷移量、正方向遷移量とも、測定レンジの下限値および上限値が各カプセルの測定範囲を越えない範囲で設定可能

タグプレート:

SUS304ステンレス鋼ねじ止め

質量:

9.8 kg(2Bパイプ取付用ブラケット付)

EMC適合規格:  N200

AS/NZS CISPR11

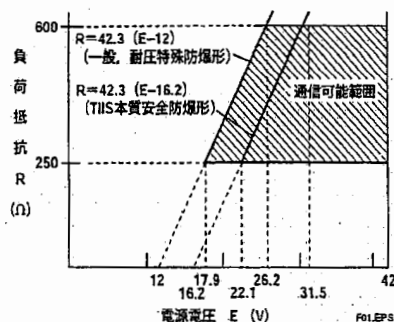


図1. 電源電圧と負荷抵抗の動作可能限界の範囲

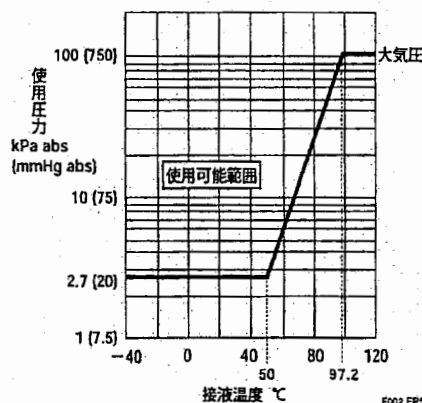


図2. 使用圧力と接液温度

測定範囲(概略値)

	オリフィス 穴径 (mm)	Lカプセル	Mカプセル	Hカプセル
水 換算最大 流量範囲 ℓ/min	0.508	0.016~0.049	0.018~0.177	0.058~0.225
	0.864	0.046~0.145	0.053~0.52	0.173~0.67
	1.511	0.134~0.42	0.152~1.52	0.50~1.93
	2.527	0.36~1.15	0.41~4.09	1.34~5.2
	4.039	0.92~2.9	1.02~10.2	3.4~13.0
	6.350	2.3~7.2	2.6~26	8.5~33
空気 換算最大 流量範囲 Nℓ/min	0.508	0.44~1.40	0.50~5.0	1.65~6.4
	0.864	1.30~4.10	1.46~14.6	4.8~18.5
	1.511	3.7~11.7	4.2~42	14.0~54
	2.527	10.3~32	11.8~118	39~150
	4.039	25~79	29~291	96~370
	6.350	63~198	72~716	235~910

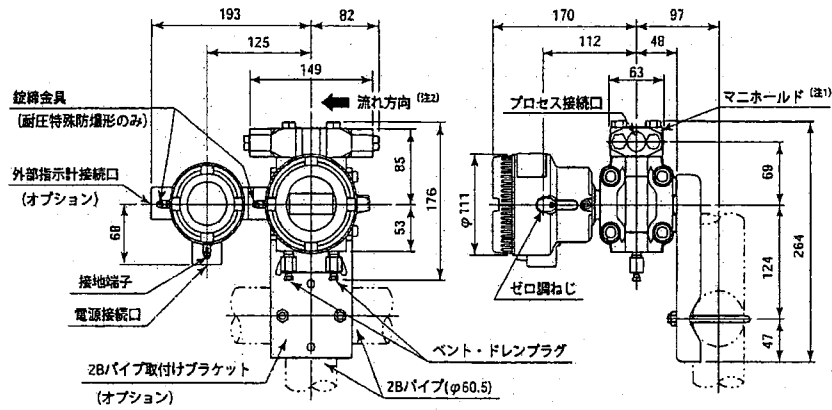
T04.EPS

表2. 2-2(3/4) 流量計(微小流量伝送器)仕様、外形図及び成績表

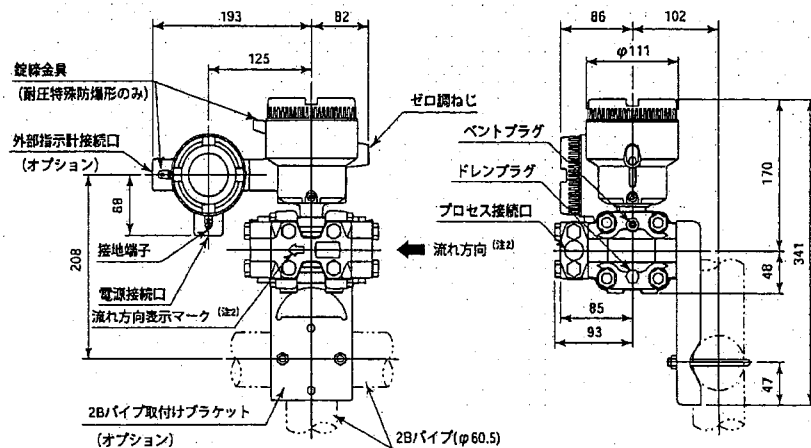
■ 外形図

● EJ115垂直配管接続形

単位: mm



● EJ115水平配管接続形



F05.EPS

注1: 伝送器取付方向コード1を選択した場合、マニホールドとベント・ドレンプラグの位置は上図とは逆になる(マニホールド位置は下側となる)。

注2: 付加仕様コードL(左高圧)を選択した場合、流れ方向は上図とは逆になる。(左から右方向)流れ方向表示マークも逆向き(←)となる。

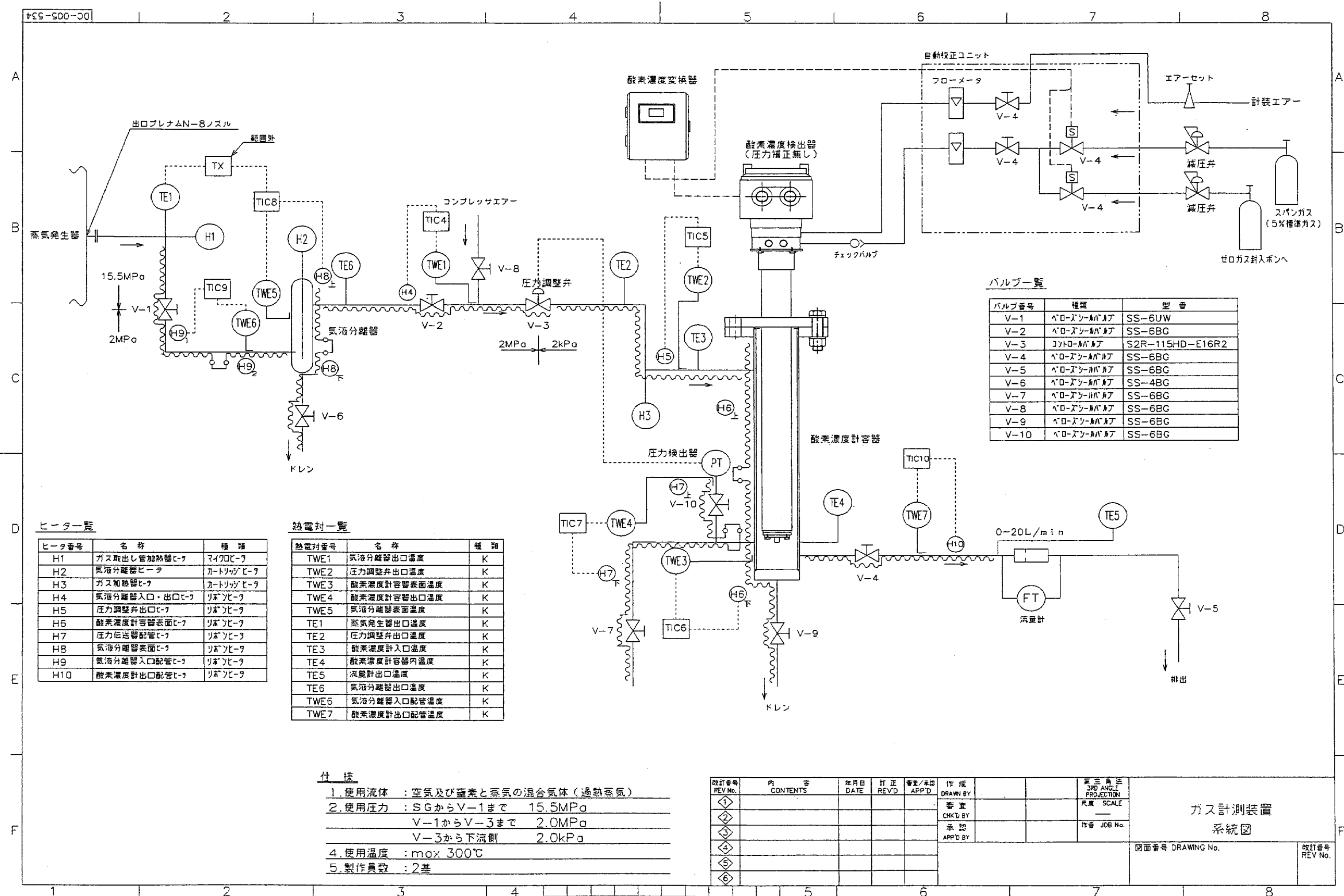


図2. 2-1A 酸素濃度測定装置(No.1, No.2装置) 系統図

ガス計測装置系統図

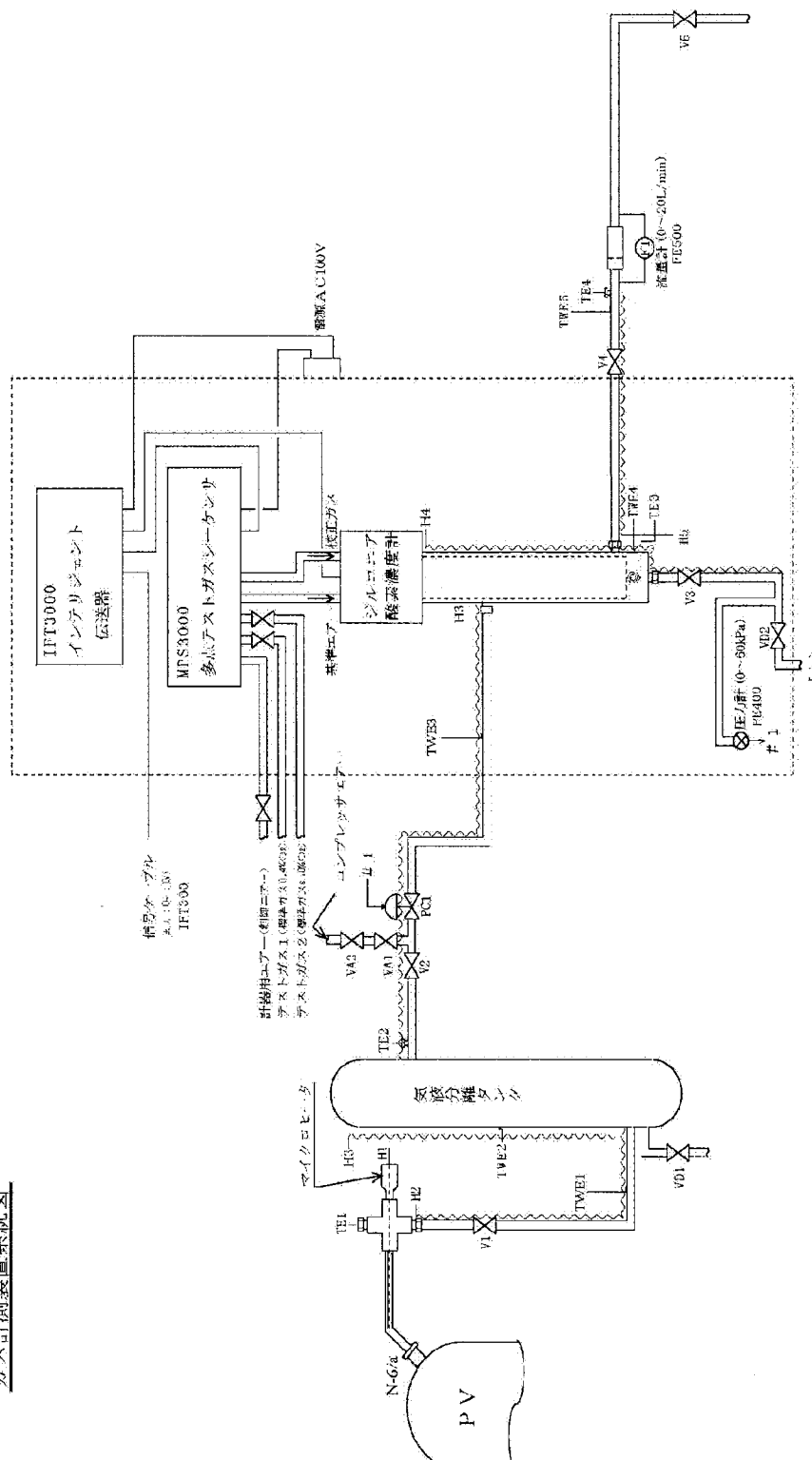


図2.2-1B 酸素濃度測定装置(ローズM装置) 系統図

This is a blank page

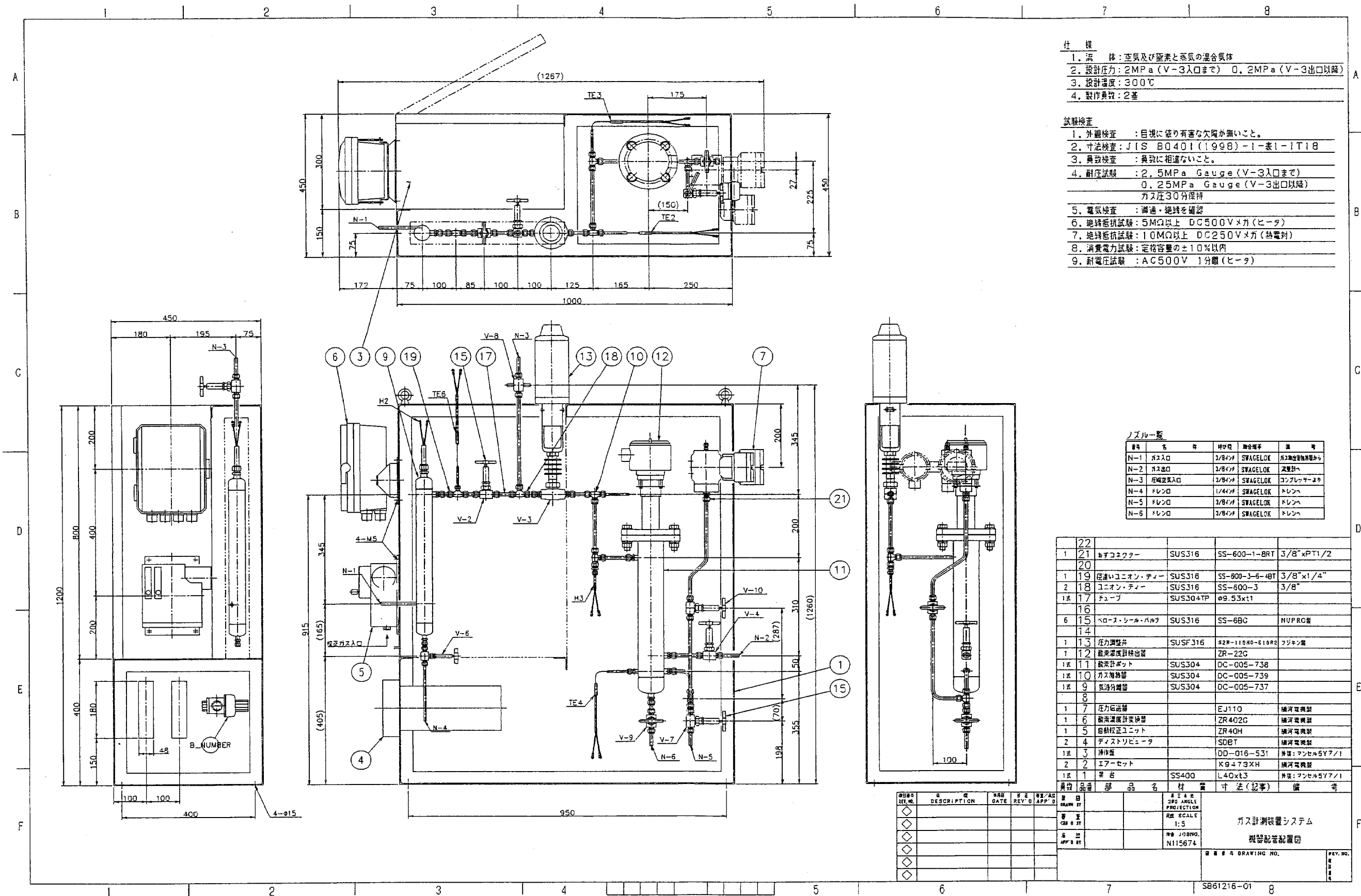


図2. 2-2 酸素濃度測定装置 組立図

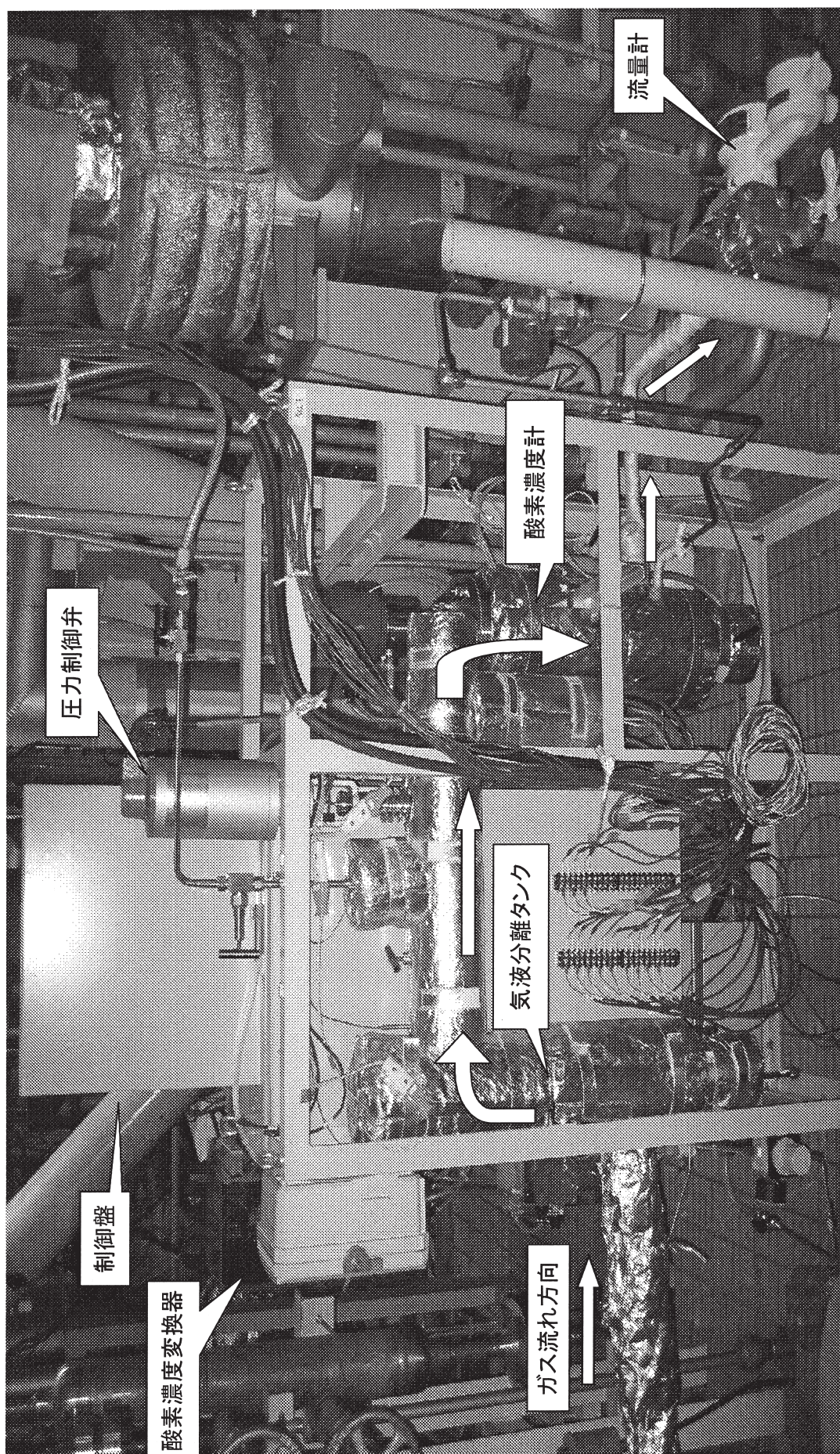


図2. 2-3 酸素濃度測定装置概観図

□ 寸法測定個所をしめす

名称：(酸素濃度計容器)

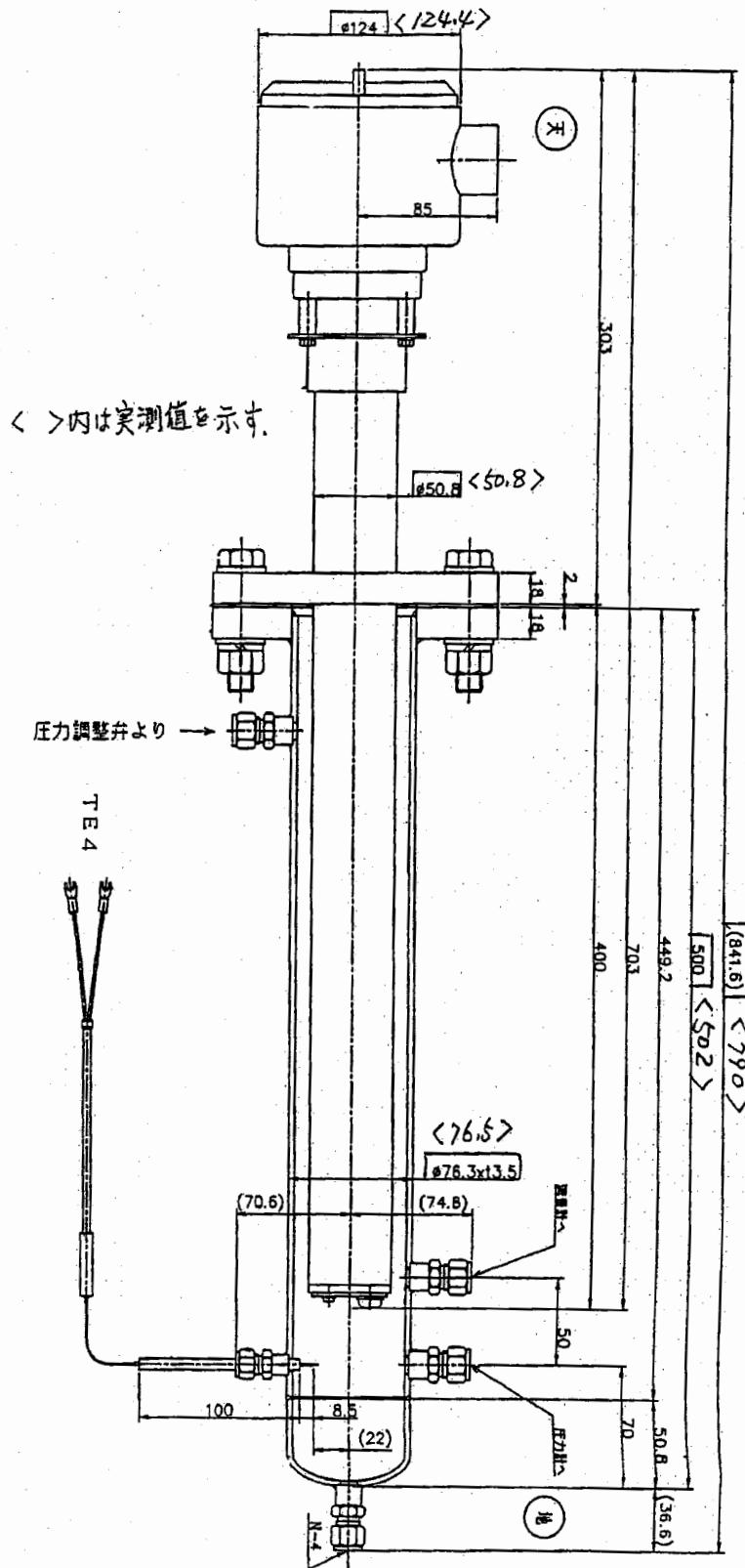
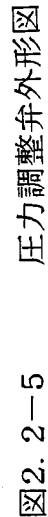
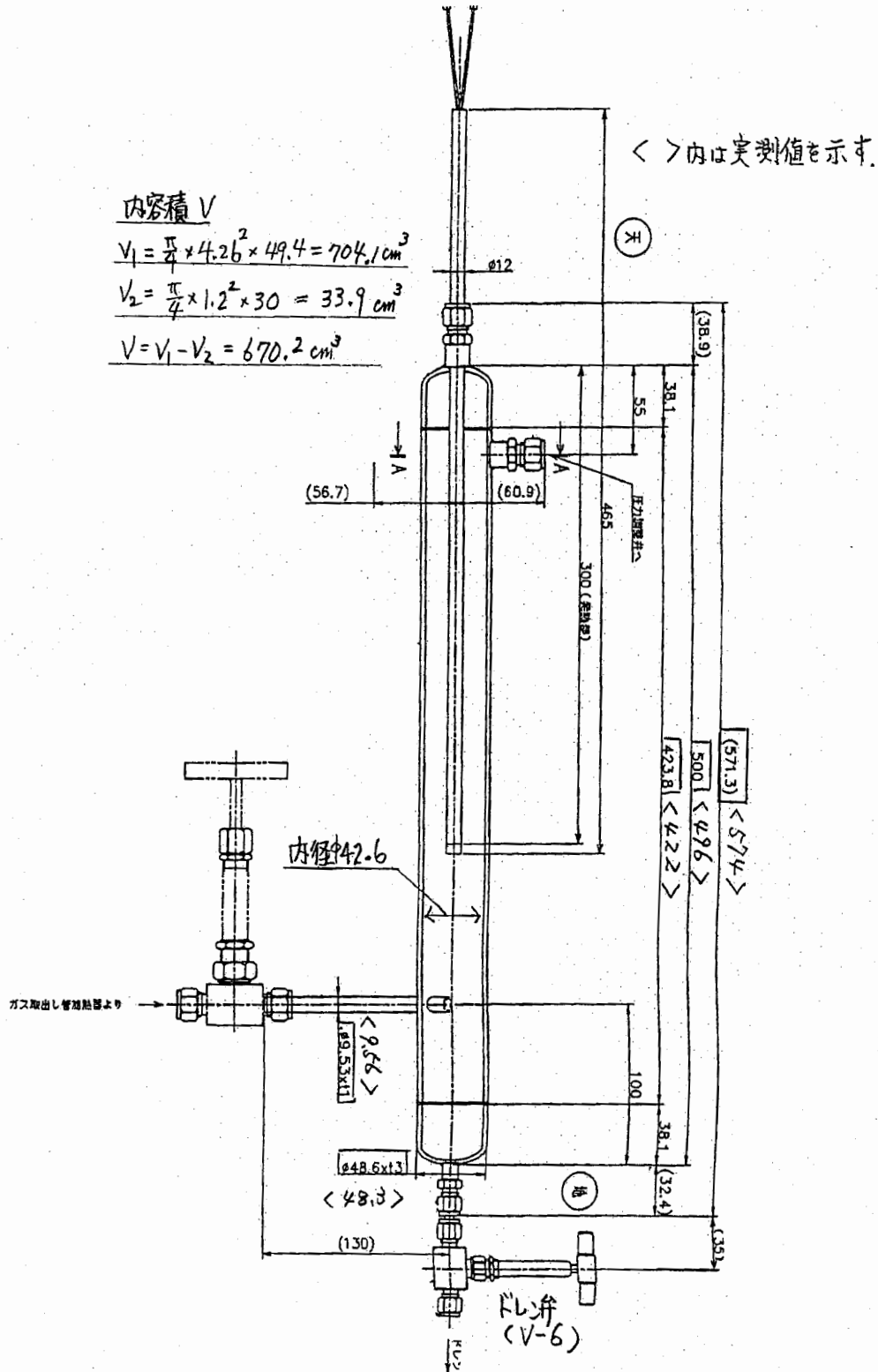


図2.2-4 酸素濃度計容器



□ 寸法測定個所をしめす

名称：(気液分離器)



☐ 寸法測定個所をしめす

名称：(ガス取出管加熱器)

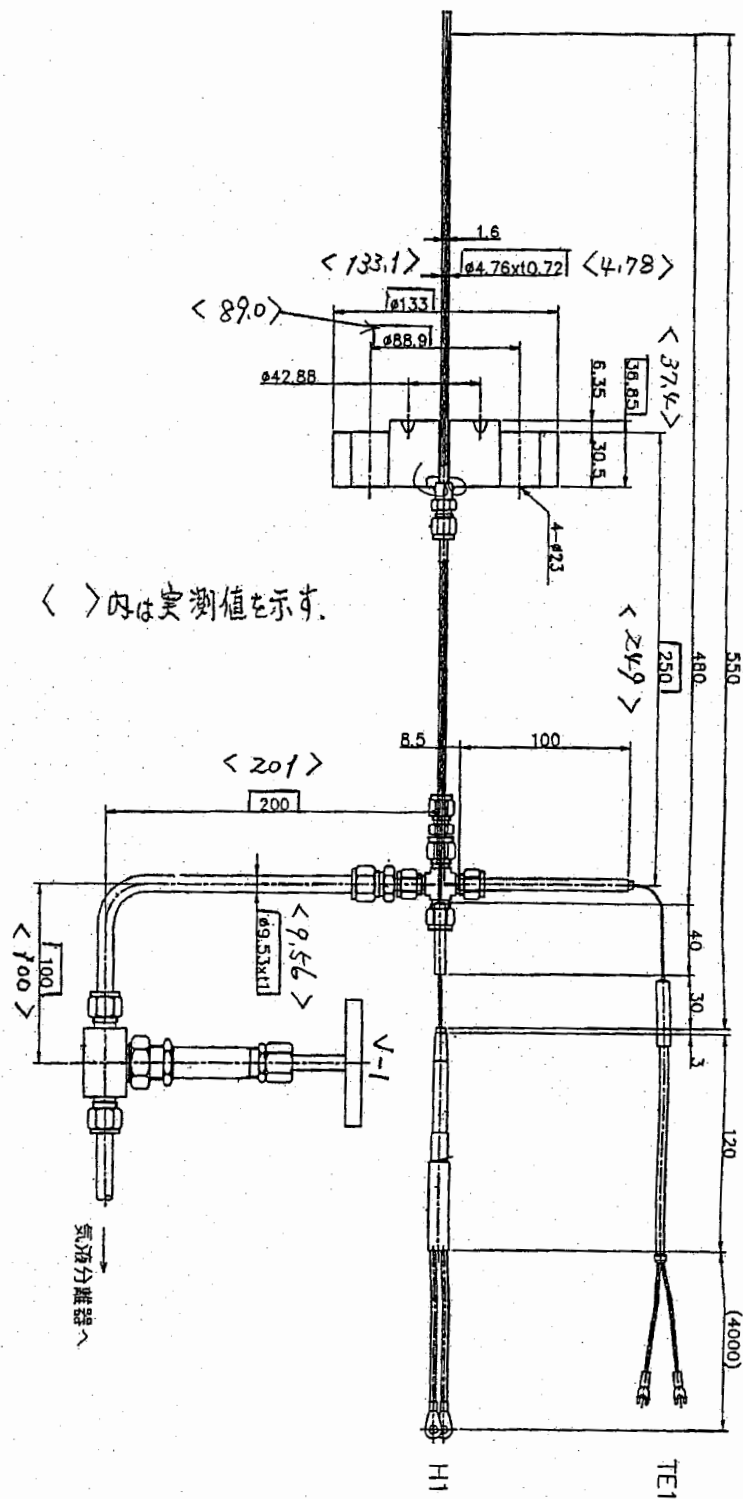


図2.2-7 ガス取出管加熱器(ヒータ)

□ 寸法測定個所をしめす

名称:(ガス加熱器)

< >内は実測値を示す。

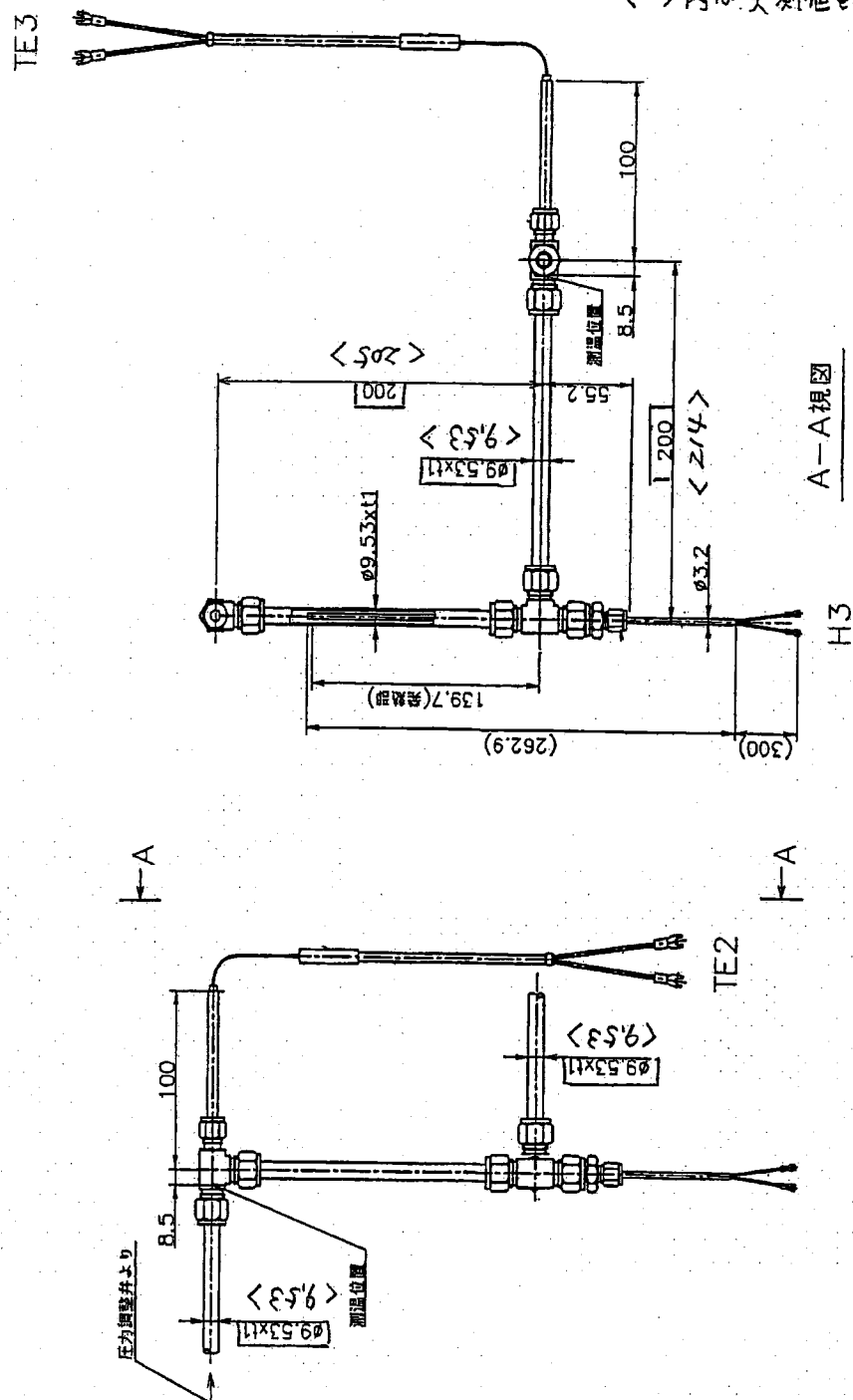


図2. 2-8 ガス加熱器(ヒータ)

3. 性能確認試験

3.1 標準ガスによる酸素濃度測定

3.1.1 目的

今回新しく製作した 2 基の酸素濃度計の特性を把握するため、酸素濃度が既知である標準ガスを用いて酸素濃度を測定し、標準ガスとの比較により酸素濃度計単体の測定精度を確認する。

3.1.2 測定条件及び測定方法

酸素濃度 5.017%の標準ガスと 5.142%の標準ガスを用いそれらの圧力、流量を 2.3.1 項で述べた一定範囲に制御することにより酸素濃度を測定した。なお、標準ガスは常温であるため温度制御は行っていない。

3.1.3 測定結果

(1) 酸素濃度 5.017%の標準ガス測定

測定結果を(図 3.1.3-1～図 3.1.3-6)及び表 3.1-1 に示す。図 3.1.3-1 に NO.1 装置の測定結果を示す。濃度計容器圧力は 2kPa(ゲージ圧)に制御され、流量(平均 16.3L/min)は 2.3.1 項に示す制御範囲 10～30L/min にあり、適正な条件下で測定ができた。図 3.1.3-2 に示す NO.1 装置の測定データと許容誤差範囲から、測定酸素濃度は濃度計単体の許容誤差範囲内であることが確認できた。

図 3.1.3-3 に NO.2 装置の測定結果を示す。濃度計容器圧力は 2kPa(ゲージ圧)に制御され、流量(平均 18.9L/min)は 2.3.1 項に示す制御範囲 10～30L/min にあり、適正な条件下で測定ができた。図 3.1.3-4 に示す NO.2 装置の測定データと許容誤差範囲から、測定酸素濃度は濃度計単体の許容誤差範囲内であることが確認できた。

図 3.1.3-5 にローズ M 装置の測定結果を示す。濃度計容器圧力は 2kPa(ゲージ圧)に制御され、流量(平均 18.9L/min)は 2.3.1 項に示す制御範囲 10～30L/min にあり、適正な条件下で測定ができた。図 3.1.3-6 に示すローズ M 装置の測定データと許容誤差範囲から、測定酸素濃度は濃度計単体の許容誤差範囲内であることが確認できた。

(2) 酸素濃度 5.142%の標準ガス測定

測定結果を(図 3.1.3-7～図 3.1.3-12)及び表 3.1-1 に示す。図 3.1.3-7 に NO.1 装置の測定結果を示す。濃度計容器圧力は 2kPa(ゲージ圧)に制御され、流量(平均 14.9L/min)は 2.3.1 項に示す制御範囲 10～30L/min にあり、適正な条件下で測定ができた。図 3.1.3-8 に示す NO.1 装置の測定データと許容誤差範囲から、測定酸素濃度は濃度計単体の許容誤差範囲内であることが確認できた。

図 3.1.3-9 に NO.2 装置の測定結果を示す。濃度計容器圧力は 2kPa(ゲージ圧)に制御され、流量(平均 13.7L/min)は 2.3.1 項に示す制御範囲 10～30L/min にあり、適正な条件下で測定ができた。図 3.1.3-10 に示す NO.2 装置の測定データと許容誤差範囲から、測定酸素濃度は濃度計単体の許容誤差範囲内であることが確認できた。

図 3.1.3-11 にローズ M 装置の測定結果を示す。濃度計容器圧力は 2kPa(ゲージ圧)に制御され、流量(平均 17.0L/min)は 2. 3. 1 項に示す制御範囲 10～30L/min にあり、適正な条件下で測定ができた。図 3.1.3-6 に示すローズ M 装置の測定データと許容誤差範囲から、測定酸素濃度は濃度計単体の許容誤差範囲内であることが確認できた。

本標準ガス測定試験により、何れのガス濃度測定装置についても濃度計単体の許容誤差範囲内の精度で測定可能であることが確認できた。

3. 2 蒸気中の酸素濃度測定

3. 2. 1 目 的

前節では酸素濃度が既知の標準ガスを用いた試験を行い、酸素濃度計単体の測定精度について確認した。次に、ACH タンク(ループ B の蓄圧注入系タンク)で発生させた高温高压蒸気を用いて蒸気中の酸素濃度測定を行い、新規製作した酸素濃度測定装置の性能を確認する。なお、ローズ M 装置の性能も併せて確認する。

3. 2. 2 測定条件

表 3.2.2-1 に示す CASE1～CASE5 の計 5 条件で測定した。これらの測定条件は、LSTF を用いた LOCA 模擬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 3.2.2-1 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下記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 0.8～1.5MPa、タンク内初期空気圧力が 0.143～0.573MPa(蒸気中の予想酸素濃度 2～15%)の条件下で酸素濃度、流量、濃度計容器内の圧力、温度を測定した。

○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(図 3.2.2-1 参照)内の平均蒸気温度(3カ所の熱電対:TE687X、TE687V、TE687U の平均値)からタンク内飽和蒸気圧(P_{STM})を求めて酸素分圧及び計算濃度を推定した。

$$\begin{array}{l}
 \left\{ \begin{array}{l}
 P = (\text{タンク全圧、絶対圧} = PE650 - ACC) \\
 \text{タンク内の蒸気(気相部)温度 } T_g = (TE687X + TE687V + TE687U) / 3 \\
 \hspace{15em} \rightarrow P_{STM} = \text{タンク内飽和蒸気圧} \\
 (P - P_{STM}) \times \text{空気の } O_2\% = P_{O_2} \text{ (酸素分圧)} \quad (\text{空気の } O_2\% = 20.946\%) \\
 P_{O_2} / P \times 100 = \text{計算濃度}\%
 \end{array} \right.
 \end{array}$$

3. 2. 3 測定方法

蒸気源として ACH タンク(図 3.2.2-1 参照)を用いて最高 1.5MPa の高温高压蒸気を発生させ、以下の手順により蒸気中の酸素濃度を測定した(計器記号については図 2.2-1A 参照)。

(1) サンプリングノズルより約 1m 下に ACH タンクの水位を形成する。

- (2) ACH タンクの気相部に圧縮空気を入れ、所定の初期空気圧力(表 3.2.2-1 参照)まで加圧する。
- (3) ACH タンク内をヒータで加熱し、所定の飽和温度、タンク圧力(表 3.2.2-1 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) 酸素濃度計起動。
- (6) 弁(V-8)より酸素濃度計に圧縮空気を通気する。
- (7) 流量計前弁(V-4)及び後弁(V-5)開。
- (8) 圧力調整弁圧力を 2kPa(ゲージ圧)に調整。
- (9) 酸素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)蒸気ドレン弁(V-6)開、元弁(V-1)開により蒸気を通気しドレン操作を行う。
- (12)ドレン操作完了後、空気弁(V-8)を閉めた後に主管弁(V-2)を開け、蒸気を酸素濃度計と流量計に通気する。
- (13)流量、温度を確認後、酸素濃度測定を開始する。

3. 2. 4 測定結果

(1)CASE1の場合

図 3.2.4-1 に NO.1 装置による全圧 1MPa で酸素濃度予測 14%の蒸気での測定結果を示す。2 回測定を行い、何れも濃度計容器圧力は 2kPa(ゲージ圧)に制御され、流量(17~18L/min)は 10~30L/min の範囲にあり、適正な条件下で測定がなされたことが確認できる。図 3.2.4-2 に示す NO.1 装置による全圧 1MPa で酸素濃度予測 14%の蒸気での測定結果と計算値との比較から、両者は良く合致している。

図 3.2.4-3 に NO.2装置による全圧 1MPa で酸素濃度予測 14%の蒸気での測定結果を示す。2 回測定を行い、何れも濃度計容器圧力は 2kPa(ゲージ圧)に制御され、流量(17L/min)は 10~30L/min の範囲にあり、適正な条件下で測定がなされたことが確認できる。図 3.2.4-4 に示す NO.2装置による全圧 1MPa で酸素濃度予測 14%の蒸気での測定結果と計算値との比較から、両者は良く合致している。

図 3.2.4-5 にローズ M 装置による全圧 1MPa で酸素濃度予測 14%の蒸気での測定結果を示す。2 回測定を行い、何れも濃度計容器圧力は 2kPa(ゲージ圧)に制御され、流量(18~21L/min)は 10~30L/min の範囲にあり、適正な条件下で測定がなされたことが確認できる。図 3.2.4-6 に示すローズ M 装置による全圧 1MPa で酸素濃度予測 14%の蒸気での測定結果と計算値との比較から、両者は良く合致している。

(2)CASE2の場合

図 3.2.4-7 に NO.1 装置による全圧 1.5MPa で酸素濃度予測 5%の蒸気での測定結果を示す。1 回測定を行い、濃度計容器圧力は 2kPa(ゲージ圧)にほぼ制御され、流量(18~19L/min)は 10~30L/min の範囲にあり、適正な条件下で測定がなされたことが確認できる。図 3.2.4-8 に示す NO.1 装置による全圧 1.5MPa で酸素濃度予測 5%の蒸気での測定結果と計算値との比較から、両者はほぼ合致している。

図 3.2.4-9 に NO.2装置による全圧 1.5MPa で酸素濃度予測 5%の蒸気での測定結果を示す。1 回測

定を行い、濃度計容器圧力は 2kPa(ゲージ圧)にほぼ制御され、流量(16～17L/min)は 10～30L/min の範囲にあり、適正な条件下で測定がなされたことが確認できる。図 3.2.4-10 に示す NO.2 装置による全圧 1.5MPa で酸素濃度予測 5%の蒸気での測定結果と計算値との比較から、両者はほぼ合致している。

図 3.2.4-11 にローズ M 装置による全圧 1.5MPa で酸素濃度予測 5%の蒸気での測定結果を示す。1 回測定を行い、濃度計容器圧力は 2kPa(ゲージ圧)に制御され、流量(18～19L/min)は 10～30L/min の範囲にあり、適正な条件下で測定がなされたことが確認できる。図 3.2.4-12 に示すローズ M 装置による全圧 1.5MPa で酸素濃度予測 5%の蒸気での測定結果と計算値との比較から、両者に少し乖離は見られるがほぼ合致している。

(3) CASE3の場合

図 3.2.4-13 に NO.1 装置による全圧 0.8MPa で酸素濃度予測 15%の蒸気での測定結果を示す。2 回測定を行い、何れも濃度計容器圧力は 2kPa(ゲージ圧)に制御され、流量(16～17L/min)は 10～30L/min の範囲にあり、適正な条件下で測定がなされたことが確認できる。図 3.2.4-14 に示す NO.1 装置による全圧 0.8MPa で酸素濃度予測 15%の蒸気での測定結果と計算値との比較から、両者は良く合致している。

図 3.2.4-15 に NO.2 装置による全圧 0.8MPa で酸素濃度予測 15%の蒸気での測定結果を示す。2 回測定を行い、何れも濃度計容器圧力は 2kPa(ゲージ圧)に制御され、流量(16～17L/min)は 10～30L/min の範囲にあり、適正な条件下で測定がなされたことが確認できる。図 3.2.4-16 に示す NO.2 装置による全圧 0.8MPa で酸素濃度予測 15%の蒸気での測定結果と計算値との比較から、両者に 1 回目は乖離があるが 2 回目は良く合致している。

図 3.2.4-17 にローズ M 装置による全圧 0.8MPa で酸素濃度予測 15%の蒸気での測定結果を示す。2 回測定を行い、何れも濃度計容器圧力は 2kPa(ゲージ圧)に制御され、流量(16～17L/min)は 10～30L/min の範囲にあり、適正な条件下で測定がなされたことが確認できる。図 3.2.4-18 に示すローズ M 装置による全圧 0.8MPa で酸素濃度予測 15%の蒸気での測定結果と計算値との比較から、両者はほぼ合致している。

(4) CASE4の場合

図 3.2.4-19 に NO.1 装置による全圧 1.5MPa で酸素濃度予測 2%の蒸気での測定結果を示す。2 回測定を行い、何れも濃度計容器圧力は 2kPa(ゲージ圧)にほぼ制御され、流量(16～17L/min)は 10～30L/min の範囲にあり、適正な条件下で測定がなされたことが確認できる。図 3.2.4-20 に示す NO.1 装置による全圧 1.5MPa で酸素濃度予測 2%の蒸気での測定結果と計算値との比較から、両者に少し乖離が見られる。

図 3.2.4-21 に NO.2 装置による全圧 1.5MPa で酸素濃度予測 2%の蒸気での測定結果を示す。2 回測定を行い、何れも濃度計容器圧力は 2kPa(ゲージ圧)にほぼ制御され、流量(16～17L/min)は 10～30L/min の範囲にあり、適正な条件下で測定がなされたことが確認できる。図 3.2.4-22 に示す NO.2 装置による全圧 1.5MPa で酸素濃度予測 2%の蒸気での測定結果と計算値との比較から、両者に少し乖離が

見られる。

図 3.2.4-23 にローズ M 装置による全圧 1.5MPa で酸素濃度予測 2%の蒸気での測定結果を示す。2 回測定を行い、何れも濃度計容器圧力は 2kPa(ゲージ圧)にほぼ制御され、流量(18~19L/min)は 10~30L/min の範囲にあり、適正な条件下で測定がなされたことが確認できる。図 3.2.4-24 に示すローズ M 装置による全圧 1.5MPa で酸素濃度予測 2%の蒸気での測定結果と計算値との比較から、両者に少し乖離が見られる。

(5) CASE5の場合

図 3.2.4-25 に NO.1 装置による全圧 1MPa で酸素濃度予測 8%の蒸気での測定結果を示す。1 回測定を行い、濃度計容器圧力は 2kPa(ゲージ圧)にほぼ制御され、流量(18~19L/min)は 10~30L/min の範囲にあり、適正な条件下で測定がなされたことが確認できる。図 3.2.4-26 に示す NO.1 装置による全圧 1MPa で酸素濃度予測 8%の蒸気での測定結果と計算値との比較から、両者はほぼ合致している。

図 3.2.4-27 に NO.2装置による全圧 1MPa で酸素濃度予測 8%の蒸気での測定結果を示す。1 回測定を行い、濃度計容器圧力は 2kPa(ゲージ圧)にほぼ制御され、流量(18~19L/min)は 10~30L/min の範囲にあり、適正な条件下で測定がなされたことが確認できる。図 3.2.4-28 に示す NO.2装置による全圧 1MPa で酸素濃度予測 8%の蒸気での測定結果と計算値との比較から、両者はほぼ合致している。

図 3.2.4-29 にローズ M 装置による全圧 1MPa で酸素濃度予測 8%の蒸気での測定結果を示す。1 回測定を行い、濃度計容器圧力は 2kPa(ゲージ圧)に制御され、流量(18~19L/min)は 10~30L/min の範囲にあり、適正な条件下で測定がなされたことが確認できる。図 3.2.4-30 に示すローズ M 装置による全圧 1MPa で酸素濃度予測 8%の蒸気での測定結果と計算値との比較から、両者はほぼ合致している。

なお、上記測定中は経路内の凝縮を避けるため経路は飽和温度以上に制御されていた。時間的に変化が見られる濃度に対し、時間平均値と比較した結果を表 3.2.2-5 に示す。低濃度域では計算値は測定値に対し低めの値を示しているが、測定値との差は最大 1.08%と小さい。

計算濃度は ACH タンク内の酸素濃度を推定しているが、測定濃度は濃度計容器内の酸素濃度を測定しているので ACH タンク出口から濃度計容器までの配管経路内を通過する時間差がある。そのため、この時間差を考慮して同じタイミングでの濃度を比較している。時間差は圧力によって異なるので表 3.2.2-2~3.2.2-4 に記す。ローズM装置がNO. 1、NO. 2装置に比べて時間差が大きい理由は、ローズM装置の気液分離タンクは内径 95mm、長さ 670mm と容量が約 7 倍であることによる。

測定値と計算値との差の原因を考える時、測定値についてはガス濃度計の誤差を考慮する必要がある。一方、計算値については、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、タンク内で均一でなく、3カ所の熱電対位置(X、V、U、図 3.2.1-1 参照)により数 K の差が認められる。これは、全圧を測定している圧力計精度($\pm 0.0539\text{MPa}$)及び熱電対精度($\pm 2.75\text{K}$)などに起因しているものと考えられる。

表 3. 1-1 標準ガス濃度測定

図番	装置名	測定時間 (秒)	制御圧力(k Pa) ゲージ圧	流量(L/min)	測定濃度(平均) (%)	標準ガス濃 度(%)	濃度差(測定-標準) (%)	許容誤差(%)
図3. 1. 3-1	NO.1装置	534	1.99	16.3	4.93	5.017	-0.08	±0.375
図3. 1. 3-2								
図3. 1. 3-3	NO.2装置	582	2.00	18.9	5.06	5.017	0.05	±0.375
図3. 1. 3-4								
図3. 1. 3-5	ローズM装置	630	2.00	18.9	5.06	5.017	0.05	±0.375
図3. 1. 3-6								
図3. 1. 3-7	NO.1装置	360	2.00	14.9	5.03	5.142	-0.11	±0.375
図3. 1. 3-8								
図3. 1. 3-9	NO.2装置	300	2.00	13.7	5.01	5.142	-0.13	±0.375
図3. 1. 3-10								
図3. 1. 3-11	ローズM装置	120	2.00	17.0	5.30	5.142	0.15	±0.375
図3. 1. 3-12								

表 3. 2. 2-1 ACH タンク 蒸気濃度測定条件

CASE NO.	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 1	1.0	331.6	0.332	14
CASE 2	1.5	458.9	0.358	5
CASE 3	0.8	397.4	0.573	15
CASE 4	1.5	466.7	0.143	2
CASE 5	1.0	449.8	0.573	8

表 3. 2. 2-2 測定濃度と計算濃度との比較 (NO.1装置)

CASE NO.	図番(測定回)	装置名	測定時間 (秒)	測定濃度(平均) (%)	計算濃度(平均) (%)	予想酸素濃度(%)	濃度差(測定濃度-計 算濃度)(%)
CASE 1	図3. 2. 4-2(一回目)	NO.1装置	1062	13.57	13.55	14	0.02
	図3. 2. 4-2(二回目)	"	496	13.28	13.27	14	0.01
CASE 2	図3. 2. 4-8	"	1806	5.05	4.64	5	0.41
CASE 3	図3. 2. 4-14(一回目)	"	856	16.86	16.71	15	0.15
	図3. 2. 4-14(二回目)	"	640	16.70	16.80	15	-0.10
CASE 4	図3. 2. 4-20(一回目)	"	532	2.57	1.88	2	0.69
	図3. 2. 4-20(二回目)	"	538	2.58	1.74	2	0.85
CASE 5	図3. 2. 4-26	NO.1装置	1974	9.42	9.11	8	0.31

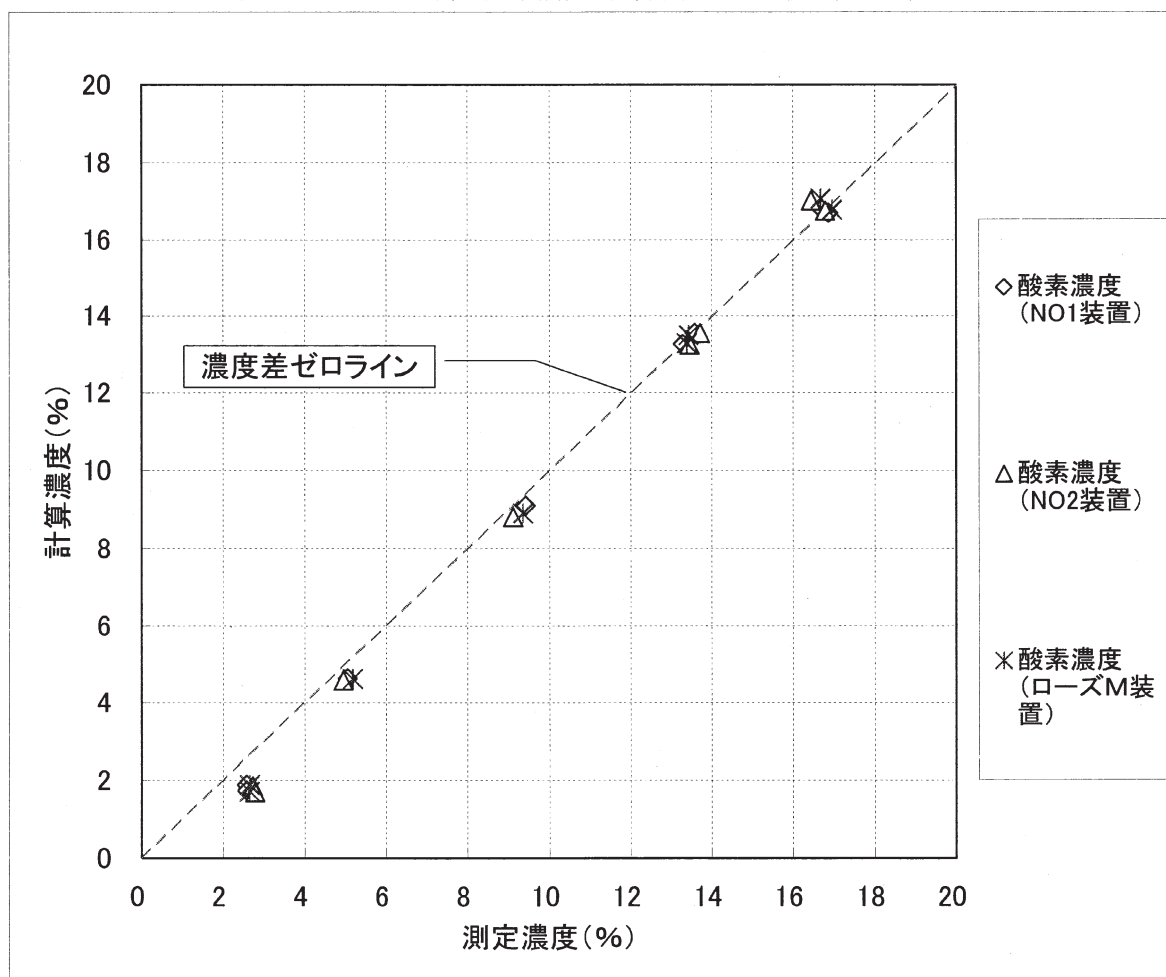
表 3. 2. 2-3 測定濃度と計算濃度との比較 (NO.2装置)

CASE NO.	図番(測定回)	装置名	測定時間 (秒)	測定濃度(平均) (%)	計算濃度(平均) (%)	予想酸素濃度(%)	濃度差(測定濃度-計 算濃度)(%)
CASE 1	図3. 2. 4-4(一回目)	NO.2装置	1033	13.71	13.55	14	0.16
	図3. 2. 4-4(二回目)	"	468	13.45	13.25	14	0.20
CASE 2	図3. 2. 4-10	"	1302	4.95	4.58	5	0.37
CASE 3	図3. 2. 4-16(一回目)	"	483	16.44	17.02	15	-0.58
	図3. 2. 4-16(二回目)	"	781	16.78	16.76	15	0.03
CASE 4	図3. 2. 4-22(一回目)	"	472	2.72	1.85	2	0.87
	図3. 2. 4-22(二回目)	"	407	2.78	1.70	2	1.08
CASE 5	図3. 2. 4-28	NO.2装置	2146	9.10	8.81	8	0.30

表 3. 2. 2-4 測定濃度と計算濃度との比較 (ローズM装置)

CASE NO.	図番(測定回)	装置名	測定時間 (秒)	測定濃度(平均) (%)	計算濃度(平均) (%)	予想酸素濃度(%)	濃度差(測定濃度-計 算濃度)(%)
CASE 1	図3. 2. 4-6(一回目)	ローズM装置	830	13.44	13.50	14	-0.06
	図3. 2. 4-6(二回目)	"	347	13.38	13.29	14	0.09
CASE 2	図3. 2. 4-12	"	1399	5.18	4.63	5	0.56
CASE 3	図3. 2. 4-18(一回目)	"	580	16.68	17.07	15	-0.40
	図3. 2. 4-18(二回目)	"	213	16.95	16.78	15	0.17
CASE 4	図3. 2. 4-24(一回目)	"	437	2.65	1.88	2	0.77
	図3. 2. 4-24(二回目)	"	362	2.64	1.71	2	0.93
CASE 5	図3. 2. 4-30	ローズM装置	2401	9.35	8.91	8	0.45

表 3. 2. 2-5 測定酸素濃度と計算濃度との比較 (グラフ化)



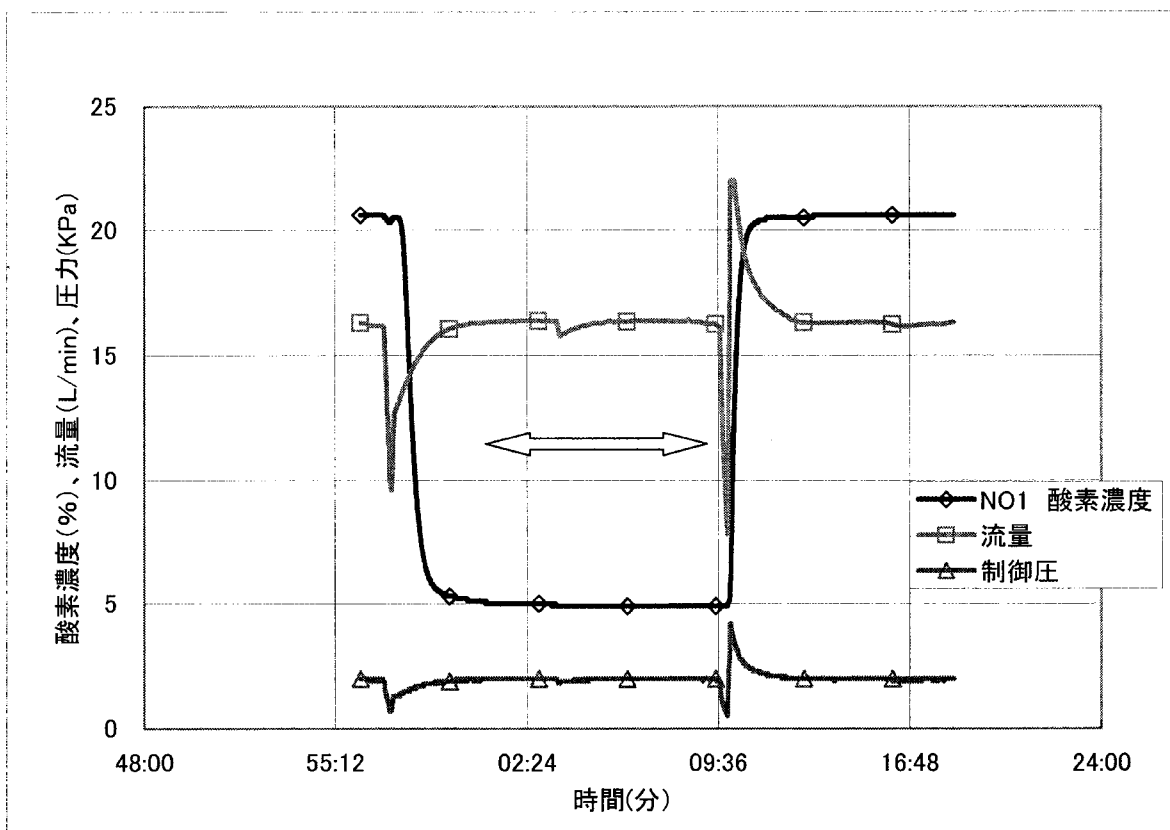


図 3. 1. 3-1 標準ガス(5. 017%)測定結果(NO.1装置)

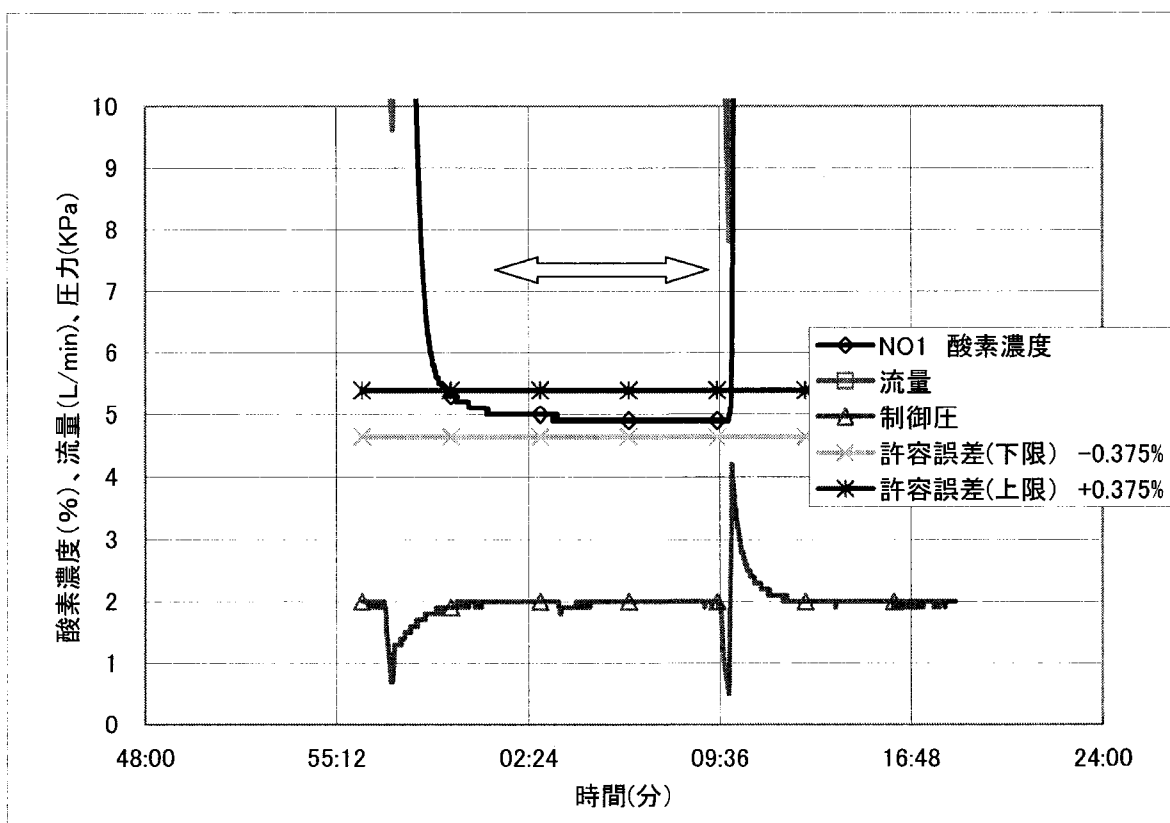


図 3. 1. 3-2 標準ガス(5. 017%)測定許容誤差範囲(NO.1装置)

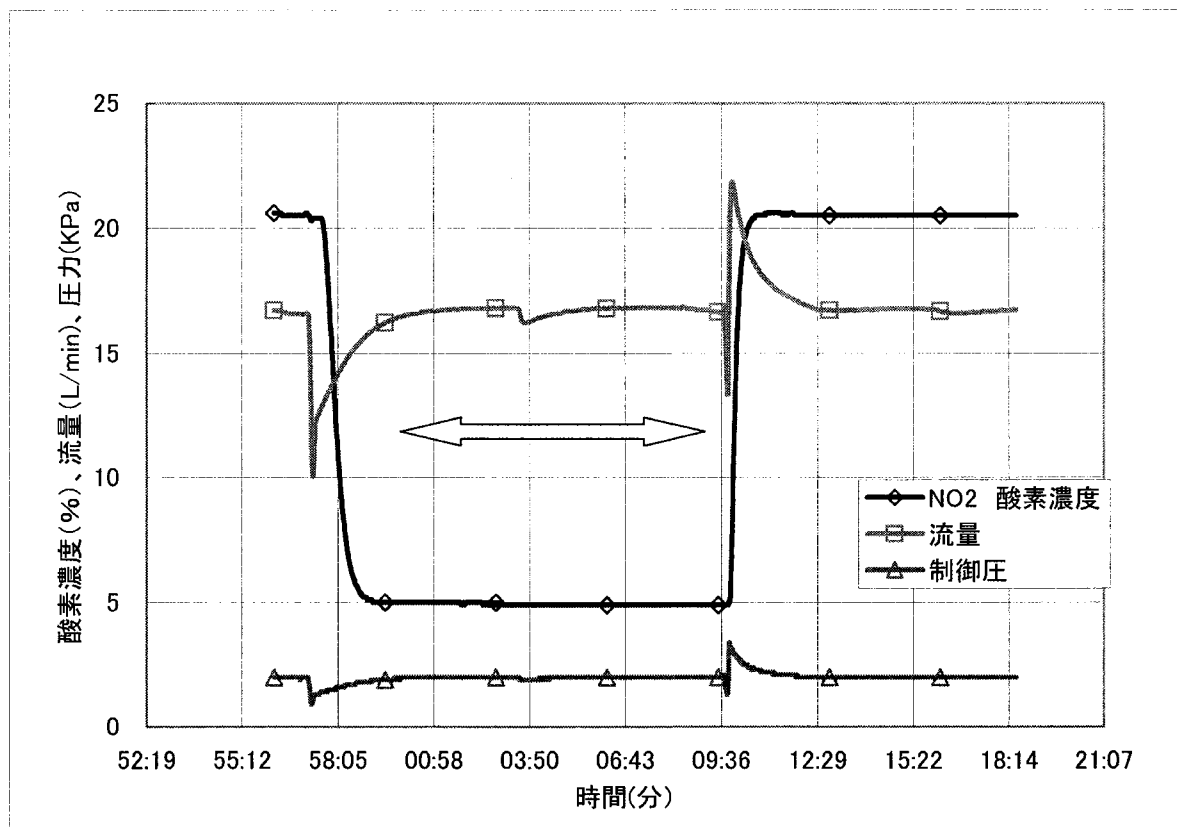


図 3. 1. 3-3 標準ガス(5. 017%)測定結果(NO.2装置)

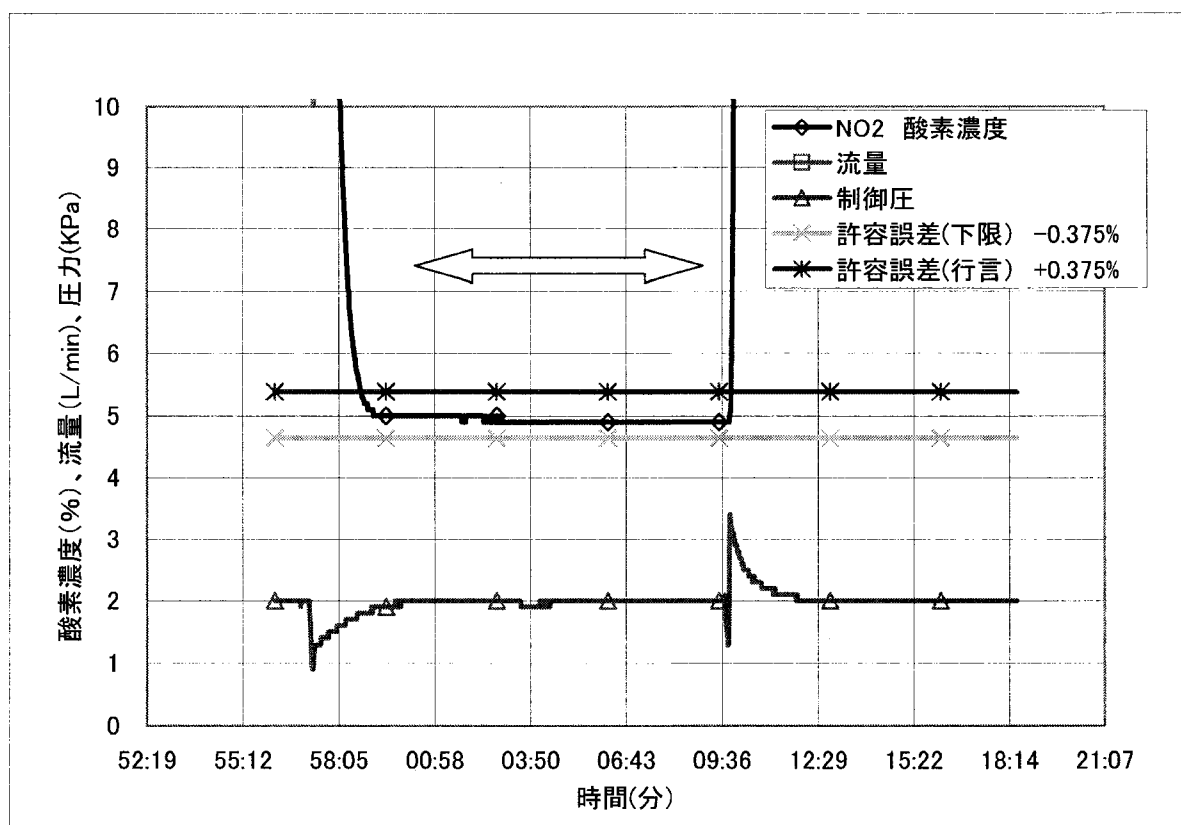


図 3. 1. 3-4 標準ガス(5. 017%)測定許容誤差範囲(NO.2装置)

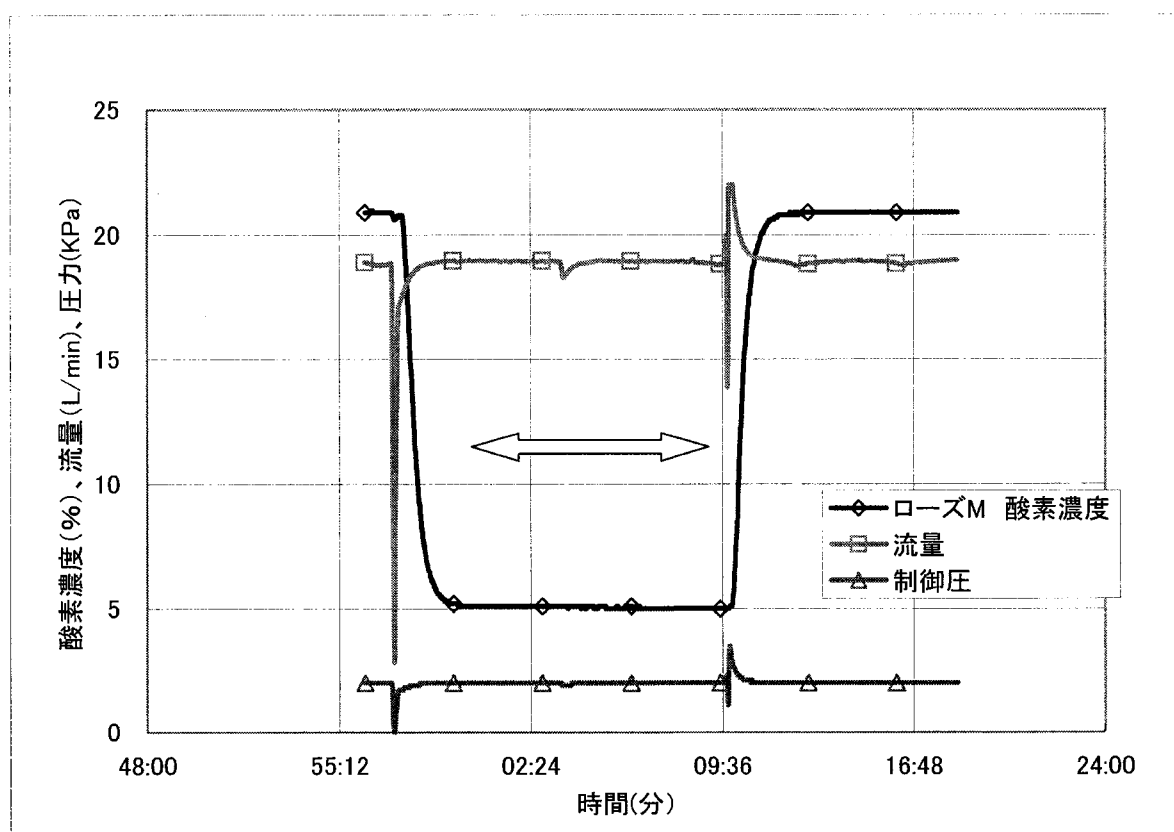


図 3. 1. 3-5 標準ガス(5. 017%)測定結果(ローズM装置)

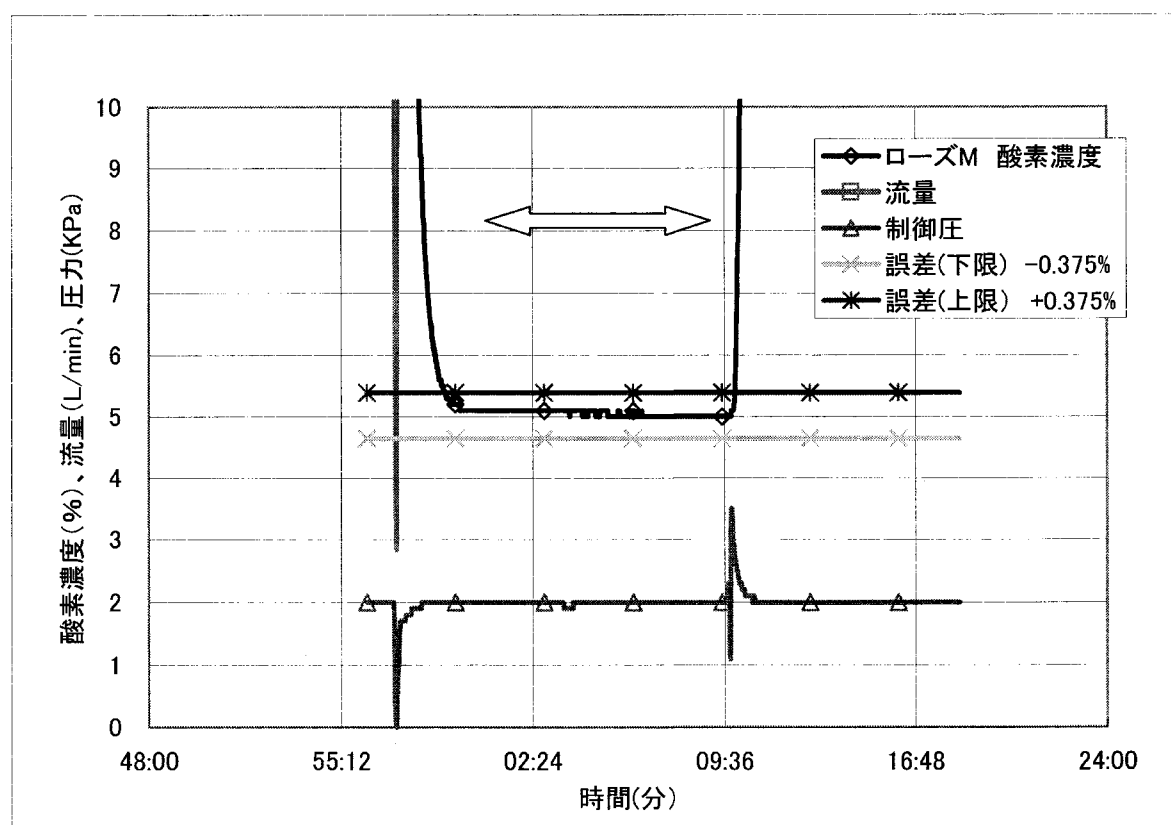


図 3. 1. 3-6 標準ガス(5. 017%)測定許容誤差範囲 (ローズM装置)

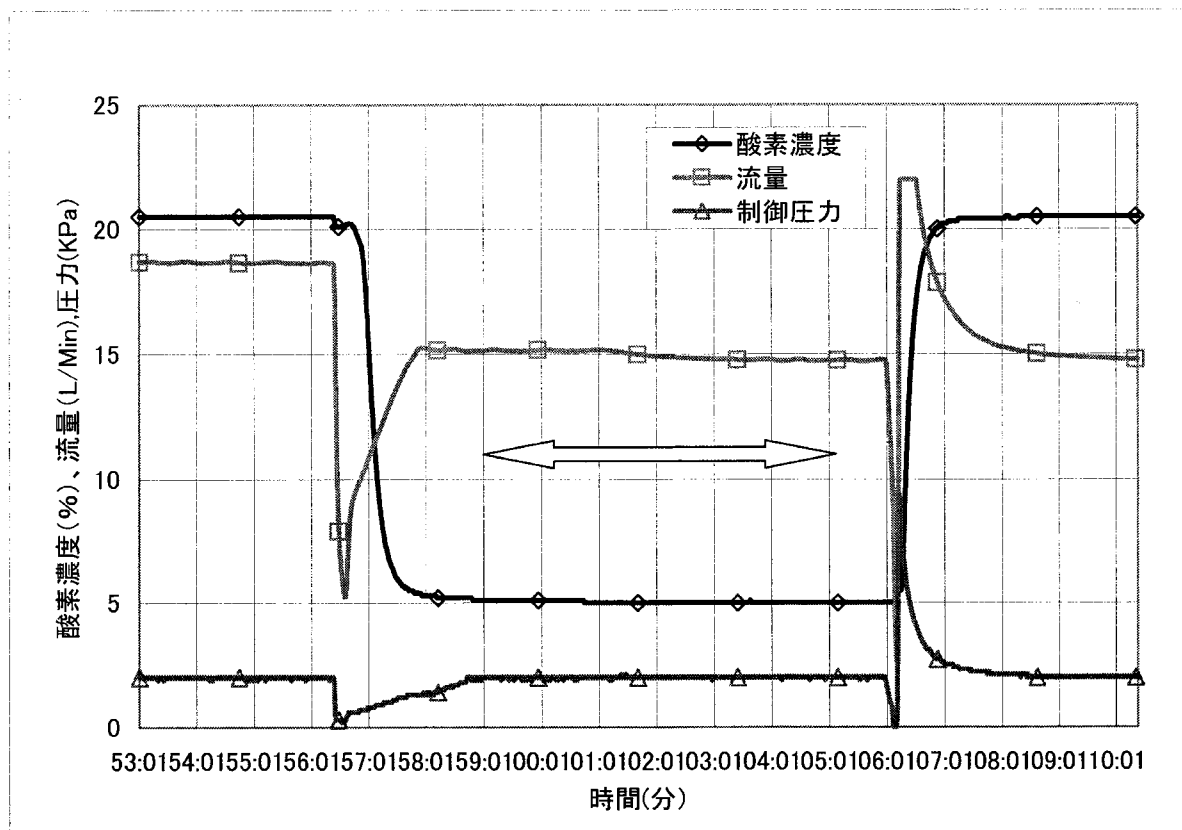


図 3.1.3-7 標準ガス(5.142%)測定結果(NO.1装置)

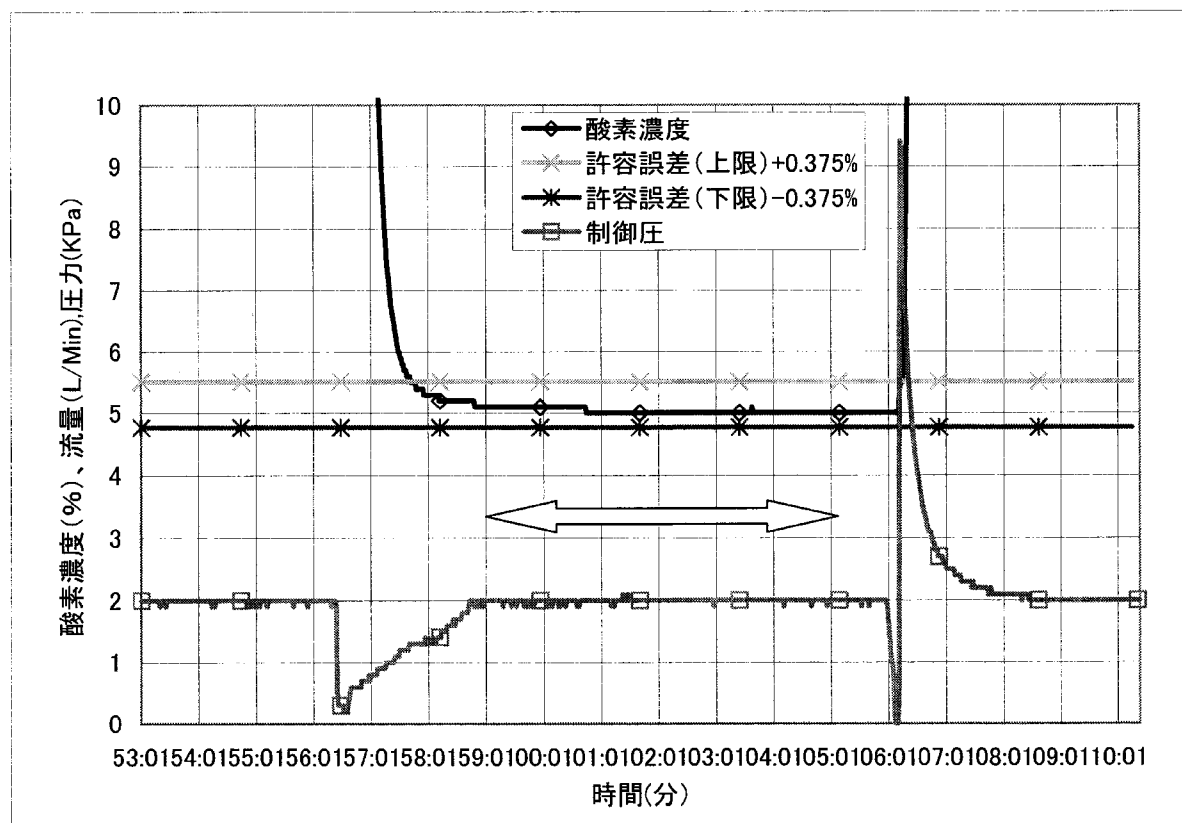


図 3.1.3-8 標準ガス(5.142%)測定許容誤差範囲(NO.1装置)

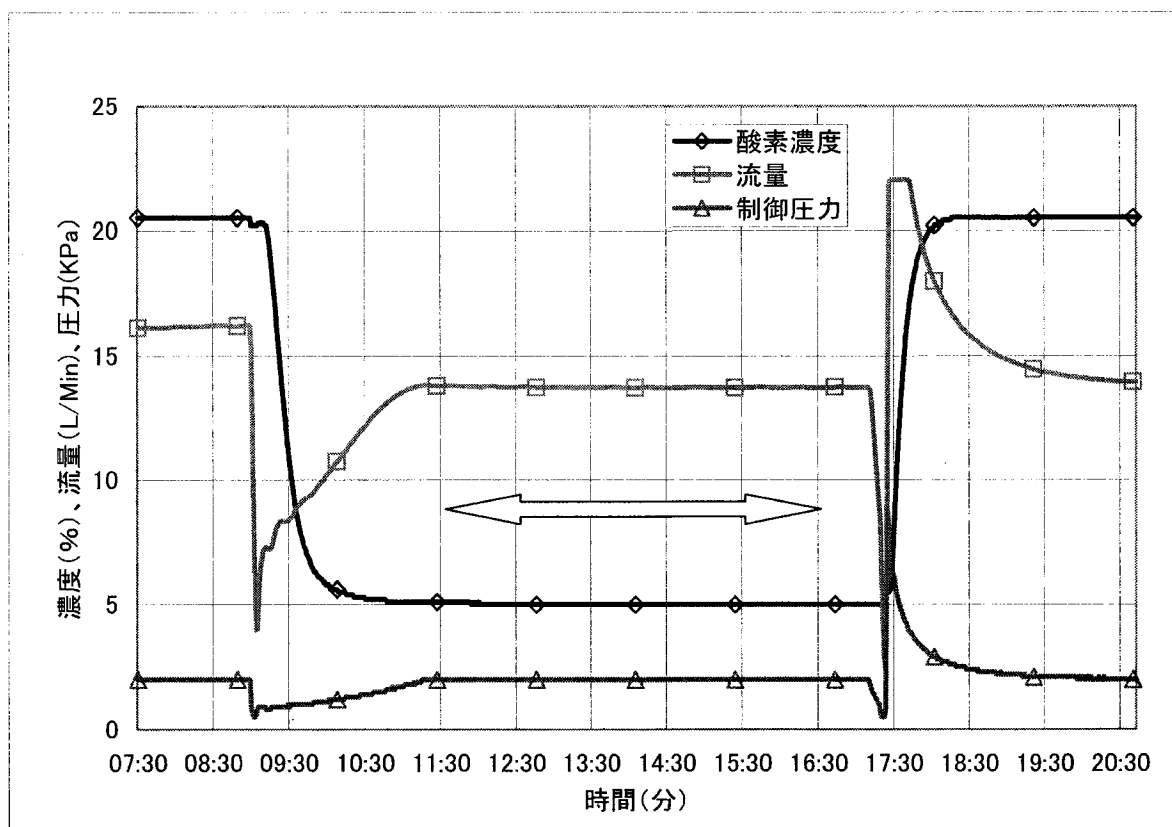


図 3. 1. 3-9 標準ガス(5. 142%)測定結果 (NO.2装置)

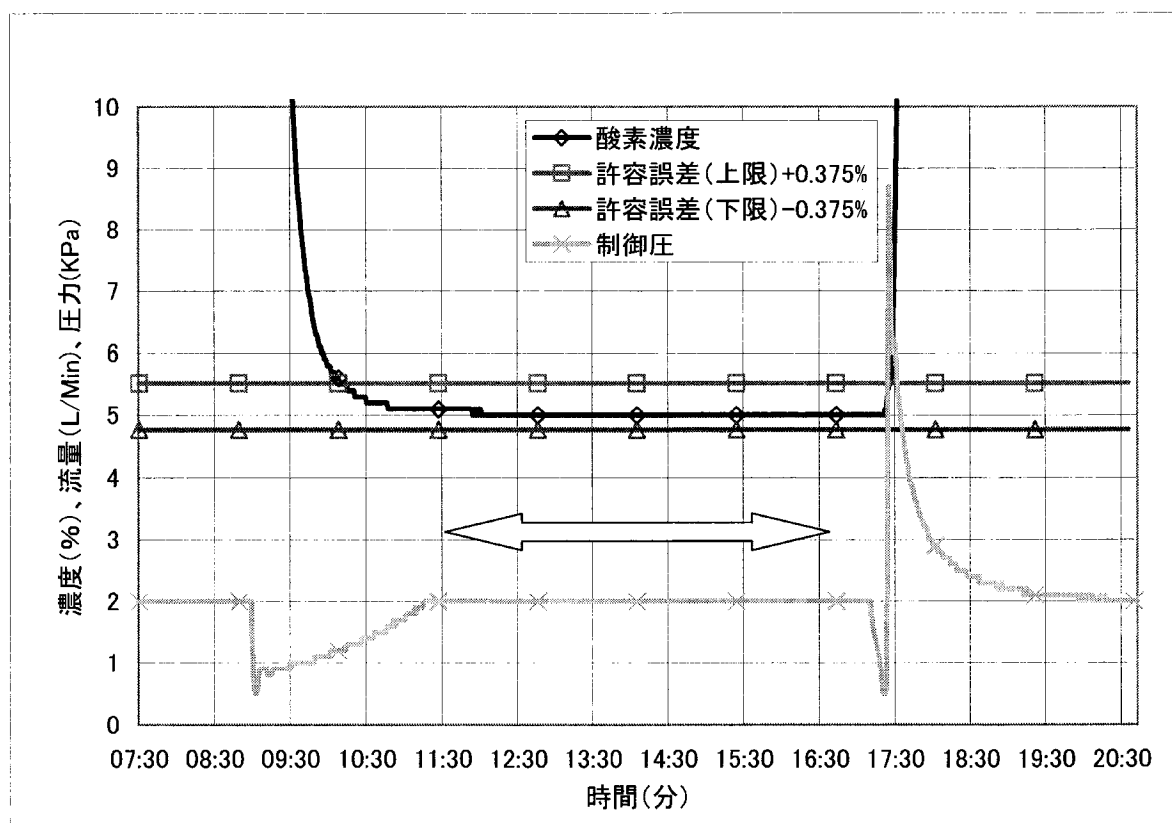


図 3. 1. 3-10 標準ガス(5. 142%)測定許容誤差範囲 (NO.2装置)

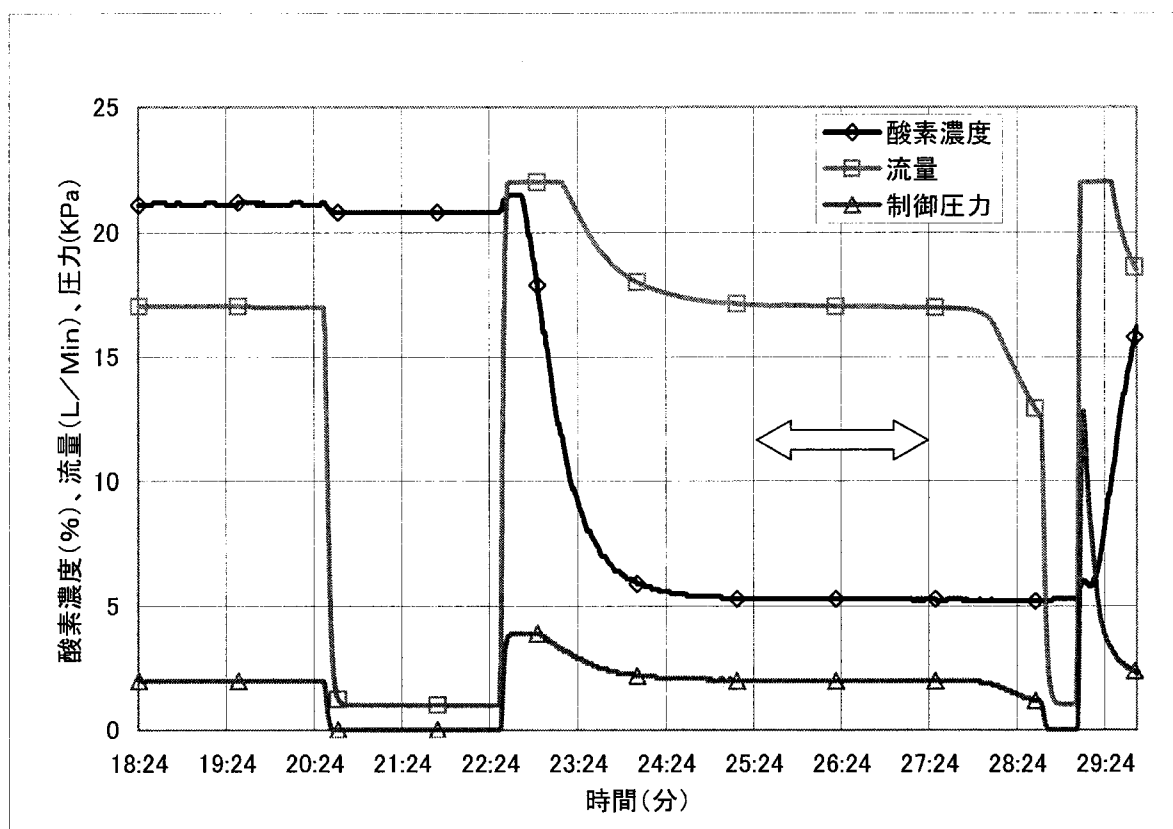


図 3. 1. 3-11 標準ガス(5.142%)測定結果(ローズM装置)

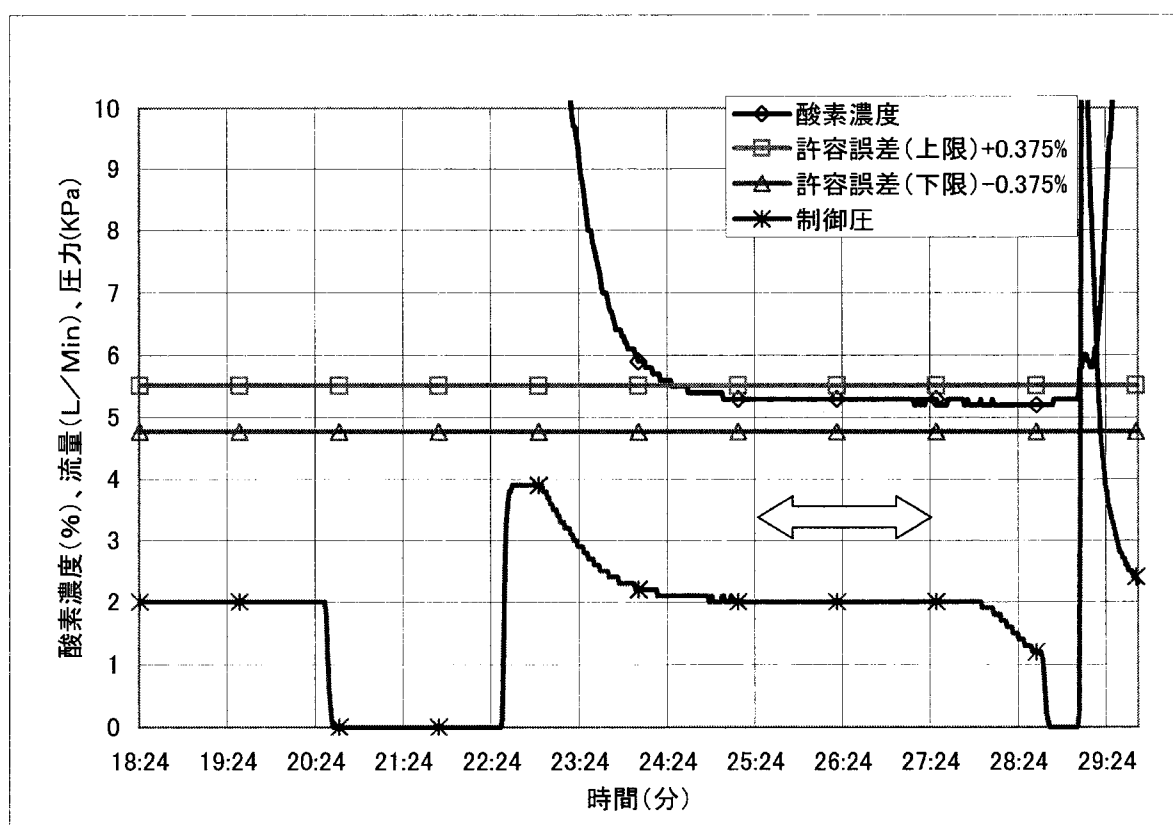


図 3. 1. 3-12 標準ガス(5.142%)測定許容誤差範囲 (ローズM装置)

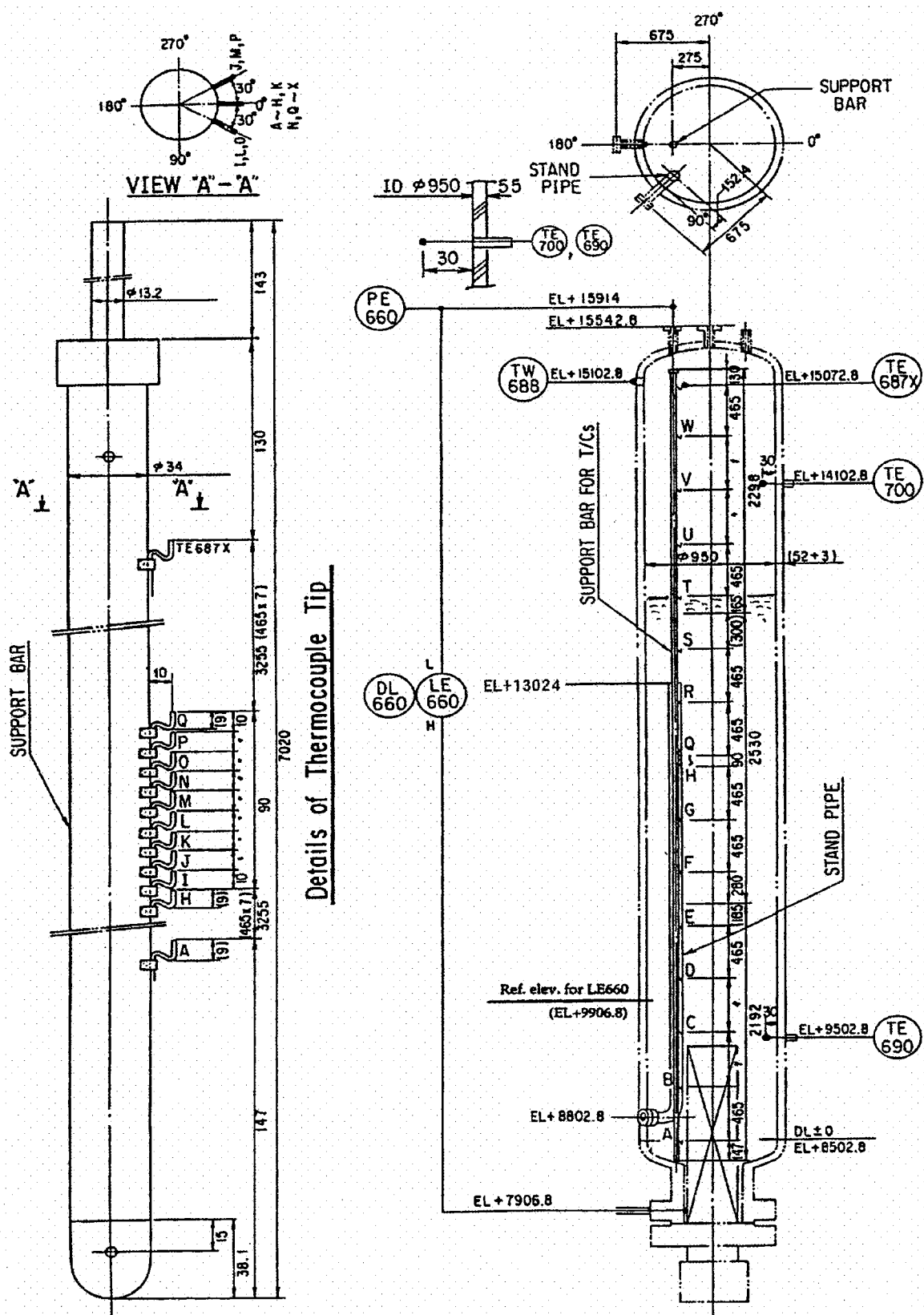


図 3.2.2-1 ACH タンク

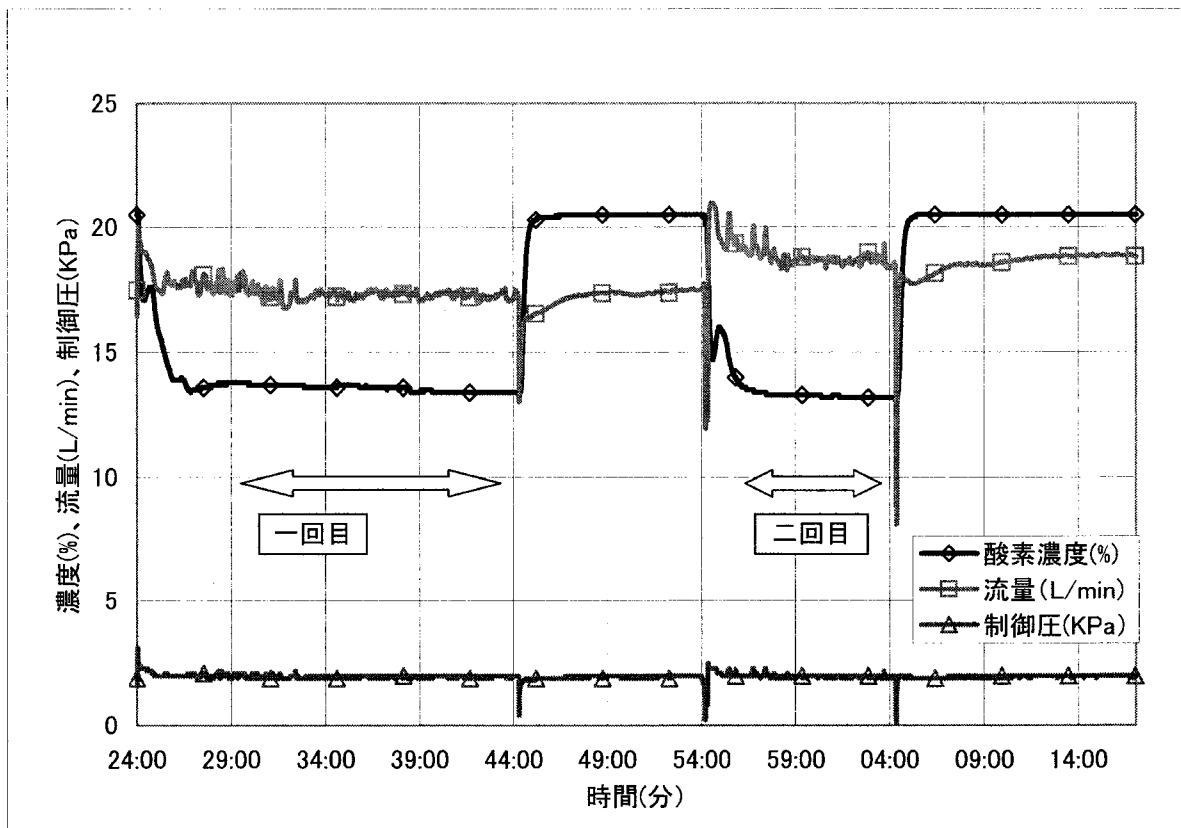


図 3. 2. 4-1 蒸気(1MPa-14%)中の酸素濃度測定結果(NO.1装置)

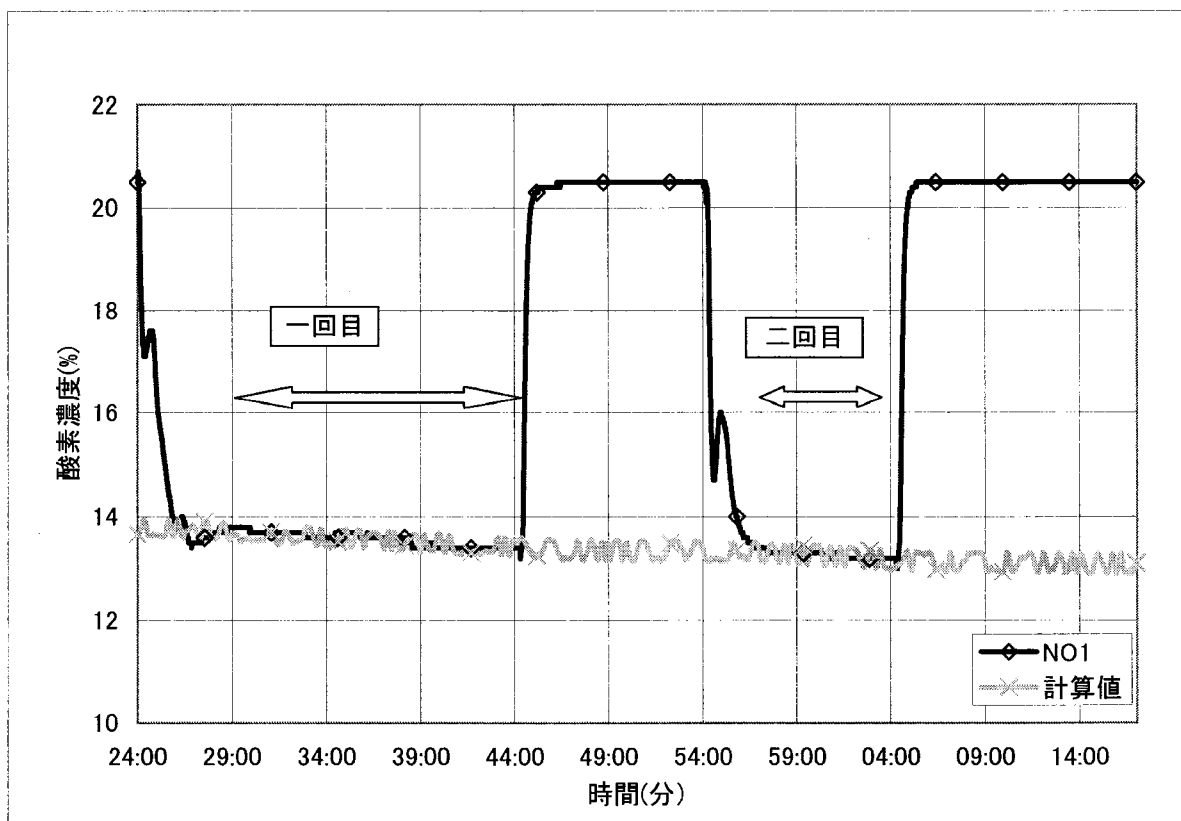


図 3. 2. 4-2 蒸気(1MPa-14%)中の酸素濃度測定結果と計算値との比較 (NO.1装置)

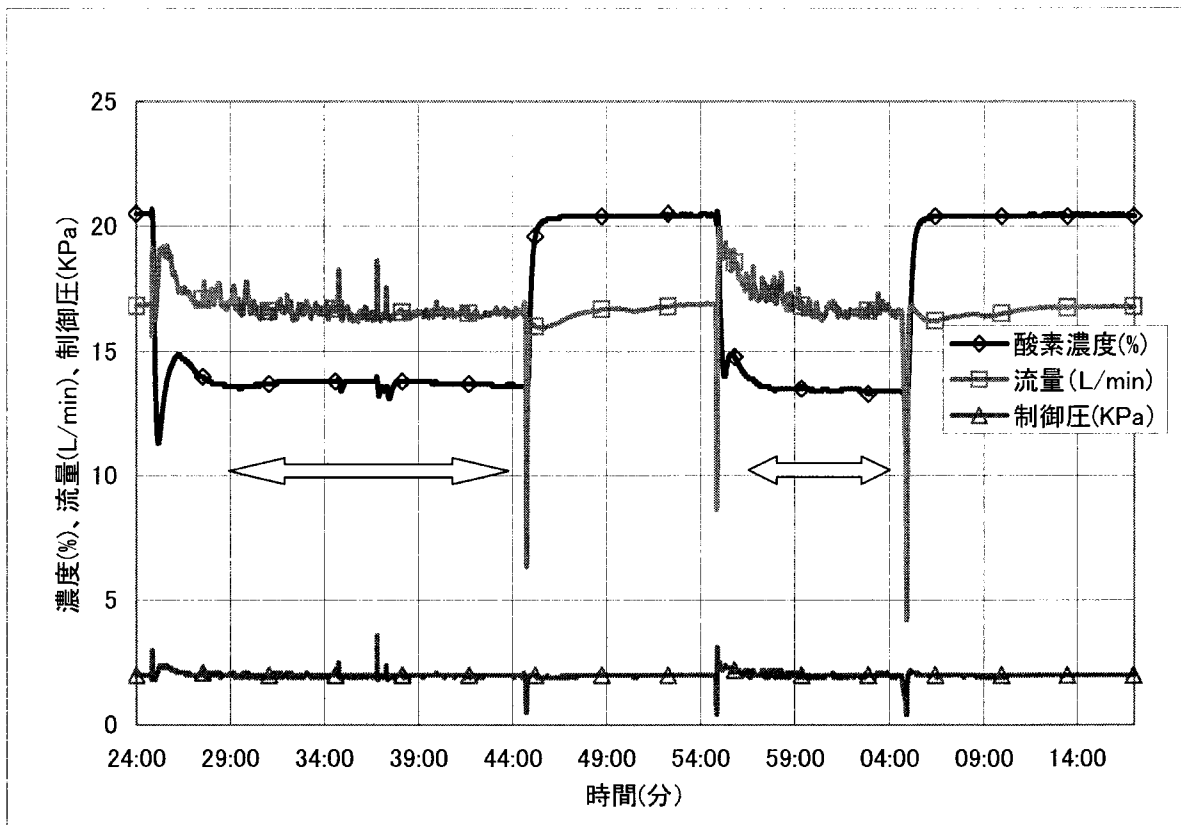


図 3. 2. 4-3 蒸気(1MPa-14%)中の酸素濃度測定結果(NO.2装置)

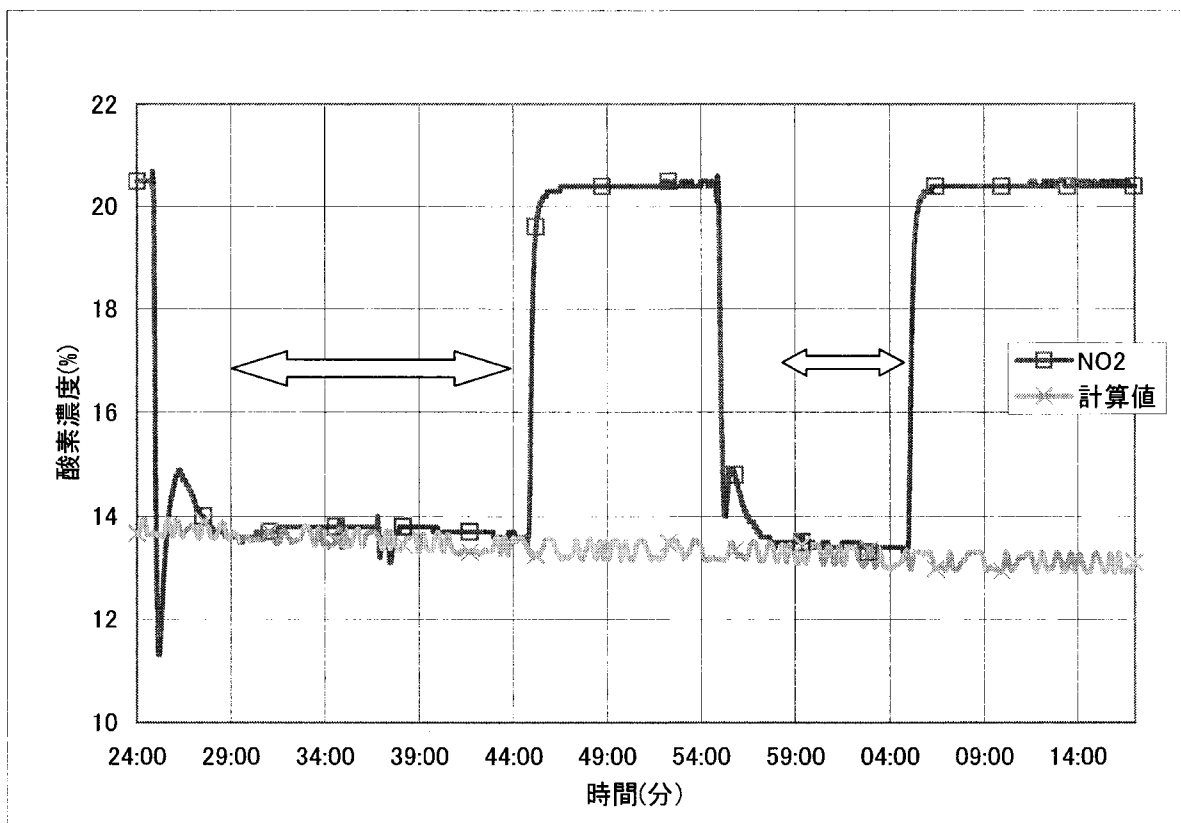


図 3. 2. 4-4 蒸気(1MPa-14%)中の酸素濃度測定結果と計算値との比較 (NO.2装置)

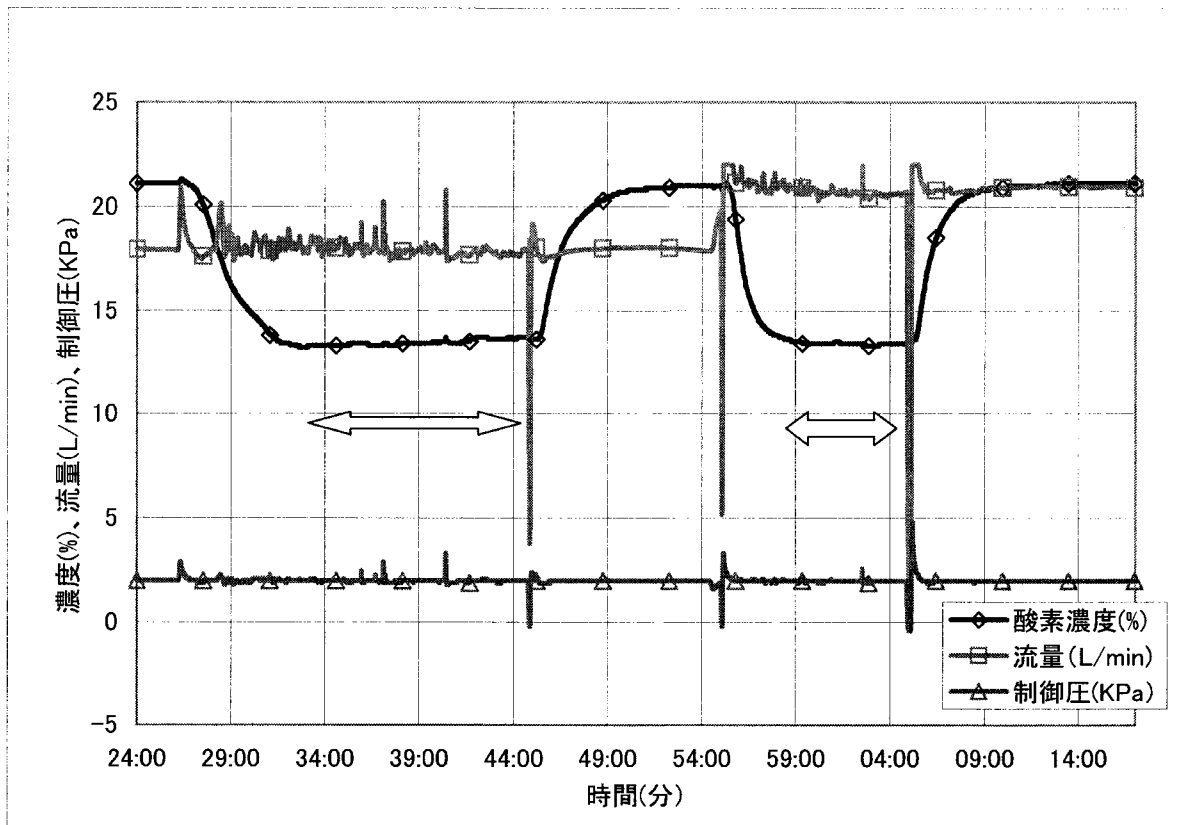


図 3. 2. 4-5 蒸気(1MPa-14%)中の酸素濃度測定結果(ローズM装置)

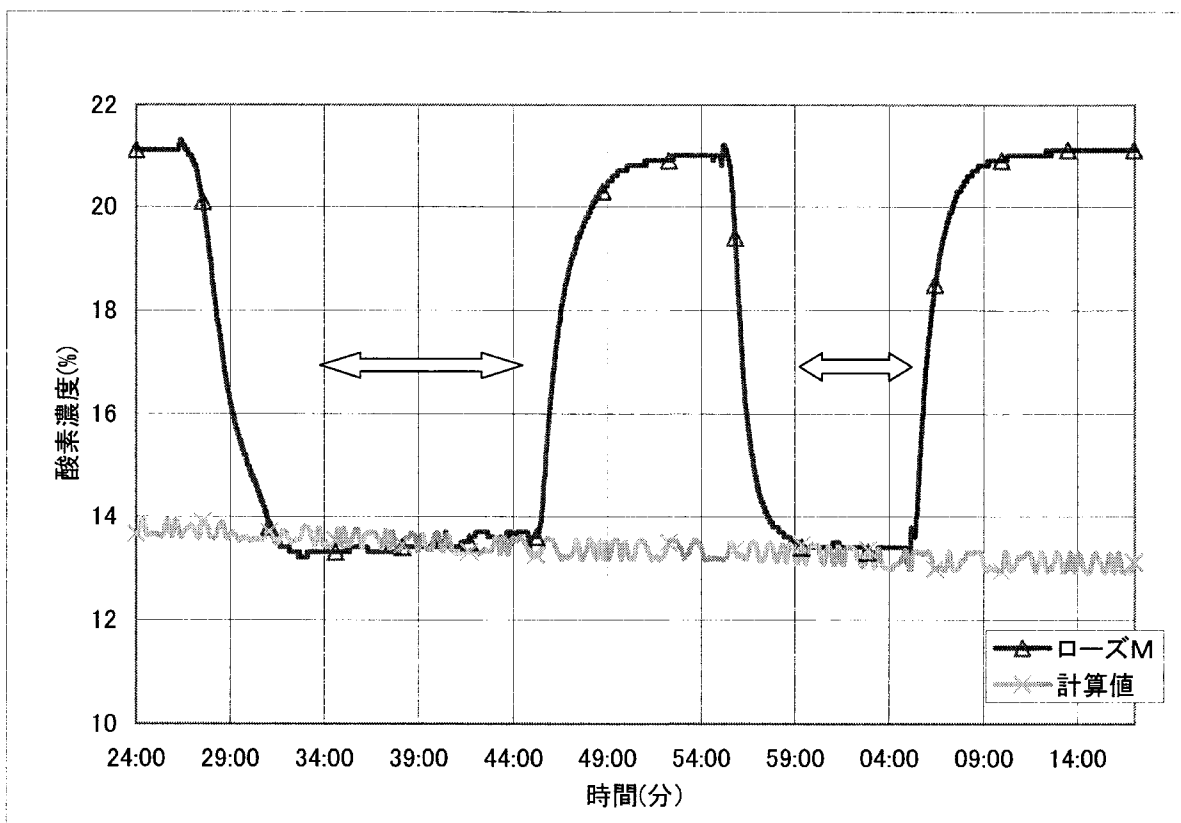


図 3. 2. 4-6 蒸気(1MPa-14%)中の酸素濃度測定結果と計算値との比較(ローズM装置)

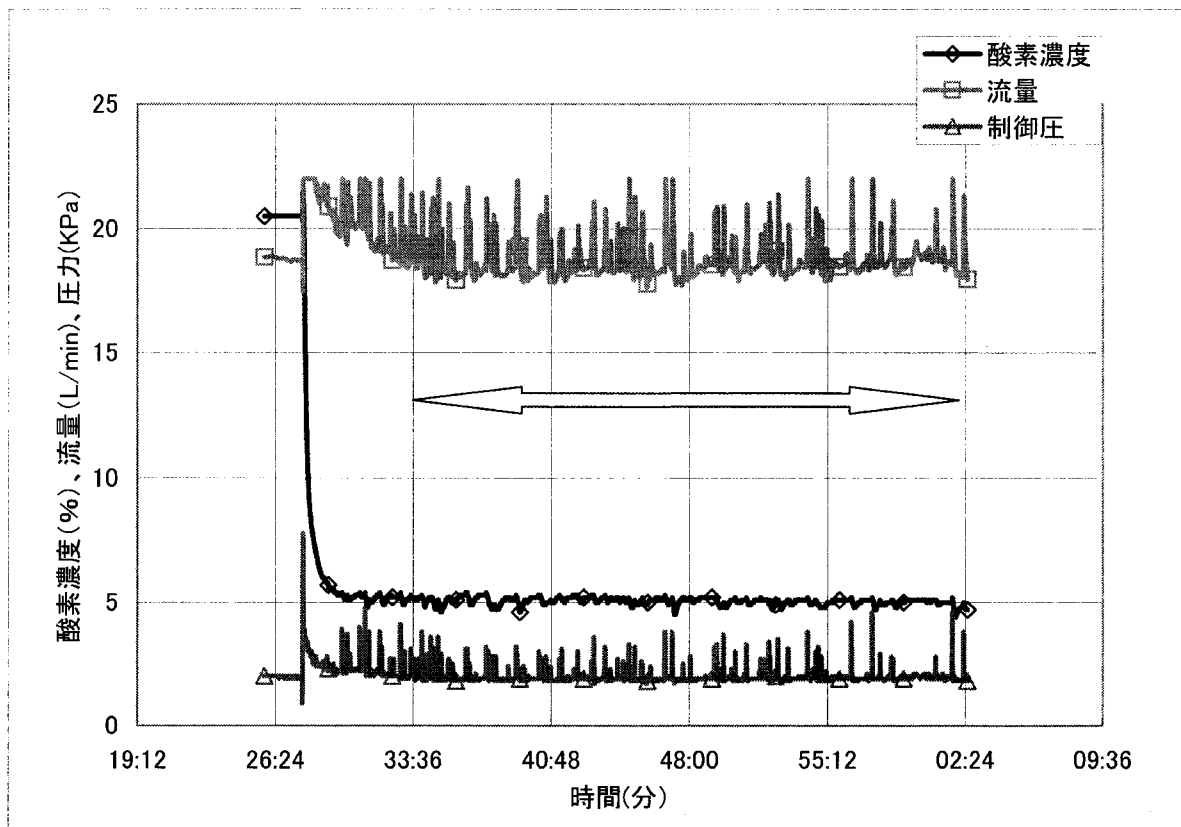


図 3. 2. 4-7 蒸気(1.5MPa-5%)中の酸素濃度測定結果(NO.1装置)

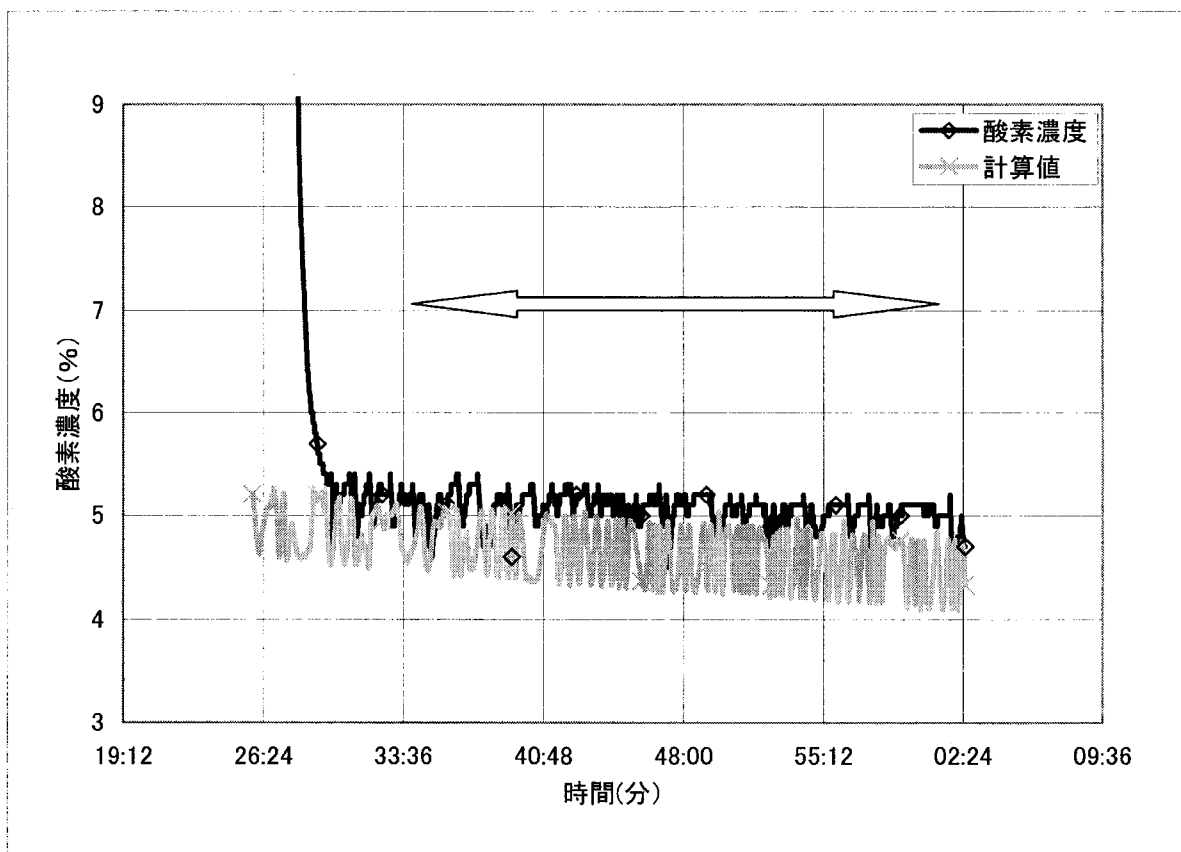


図 3. 2. 4-8 蒸気(1.5MPa-5%)中の酸素濃度測定結果と計算値との比較 (NO.1装置)

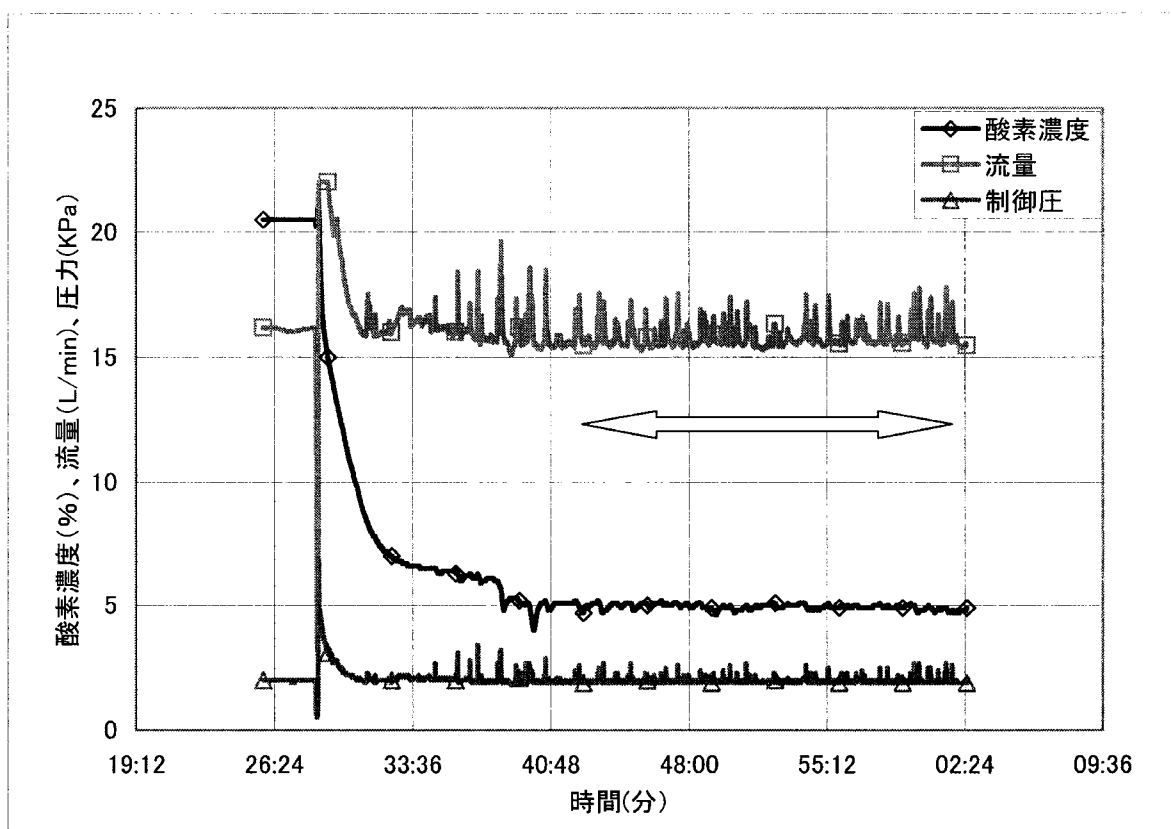


図 3. 2. 4-9 蒸気(1.5MPa-5%)中の酸素濃度測定結果(NO.2装置)

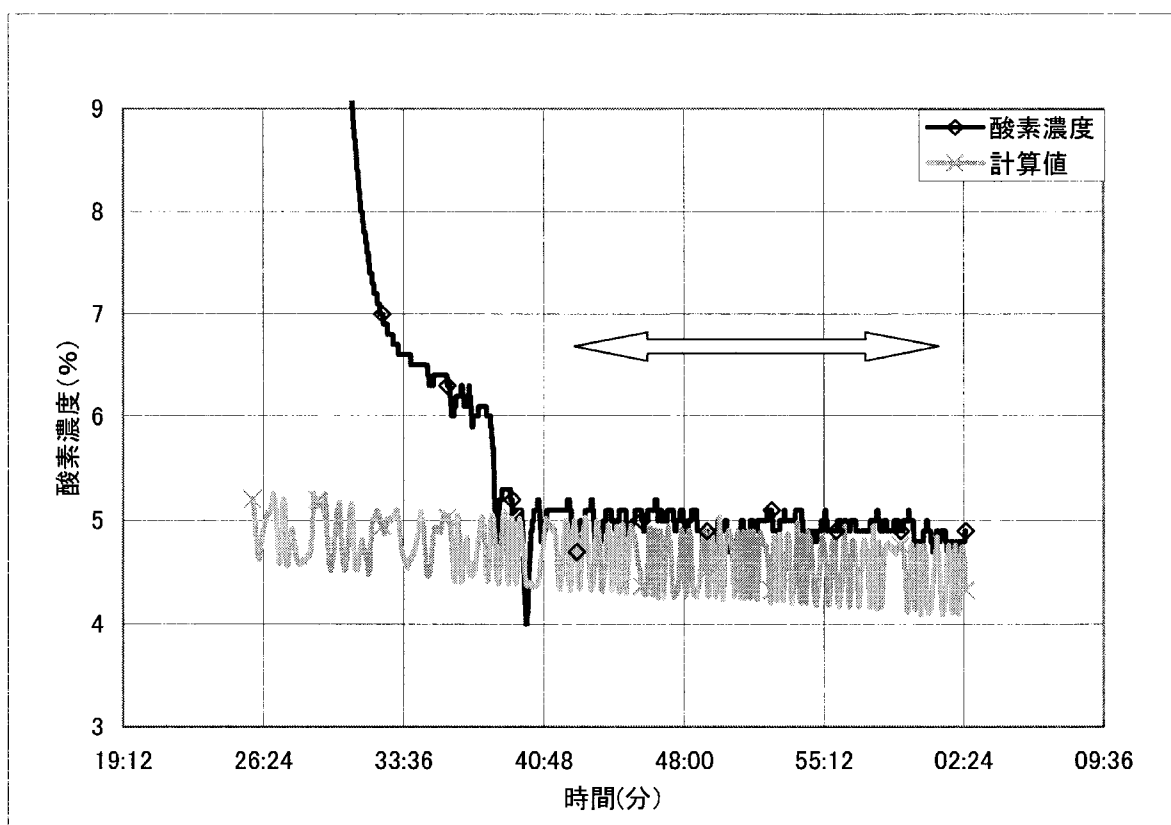


図 3. 2. 4-10 蒸気(1.5MPa-5%)中の酸素濃度測定結果と計算値との比較 (NO.2装置)

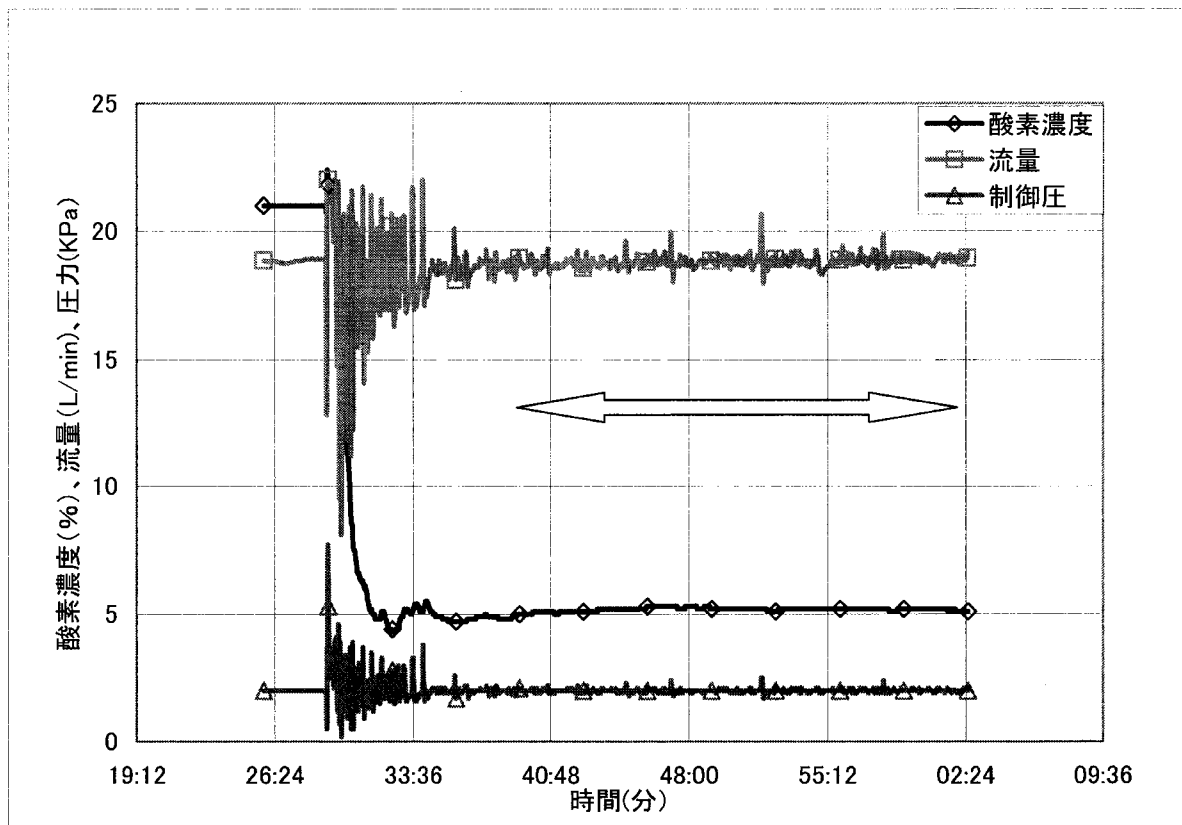


図 3. 2. 4-11 蒸気(1.5MPa-5%)中の酸素濃度測定結果(ローズM装置)

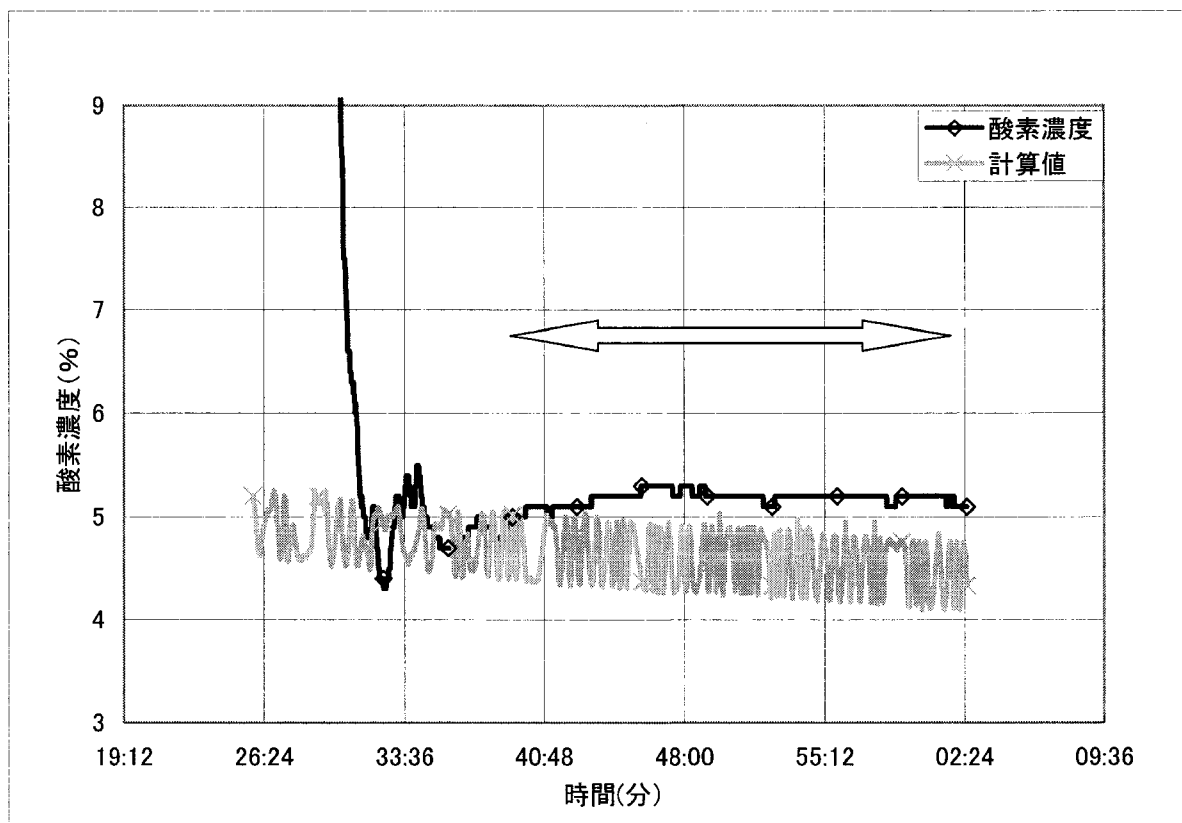


図 3. 2. 4-12 蒸気(1.5MPa-5%)中の酸素濃度測定結果と計算値との比較(ローズM装置)

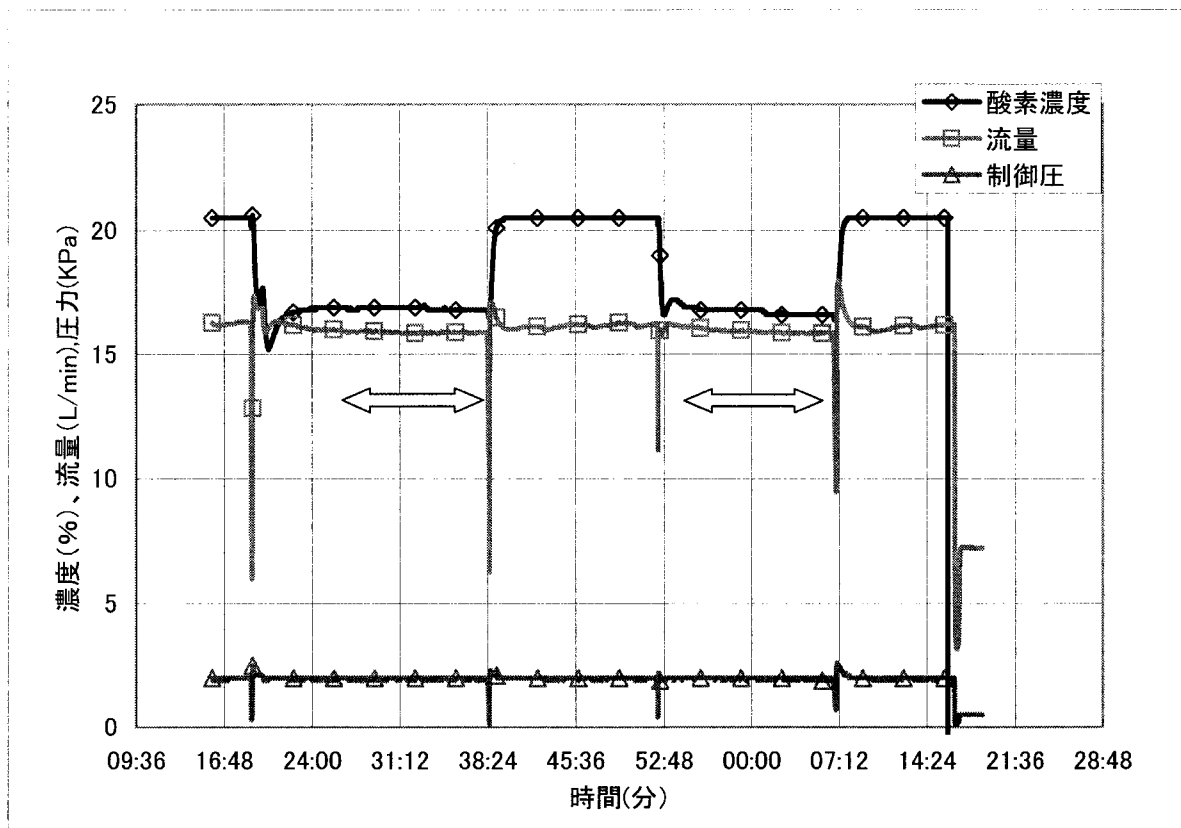


図 3. 2. 4-13 蒸気(0.8MPa-15%)中の酸素濃度測定結果 (NO.1装置)

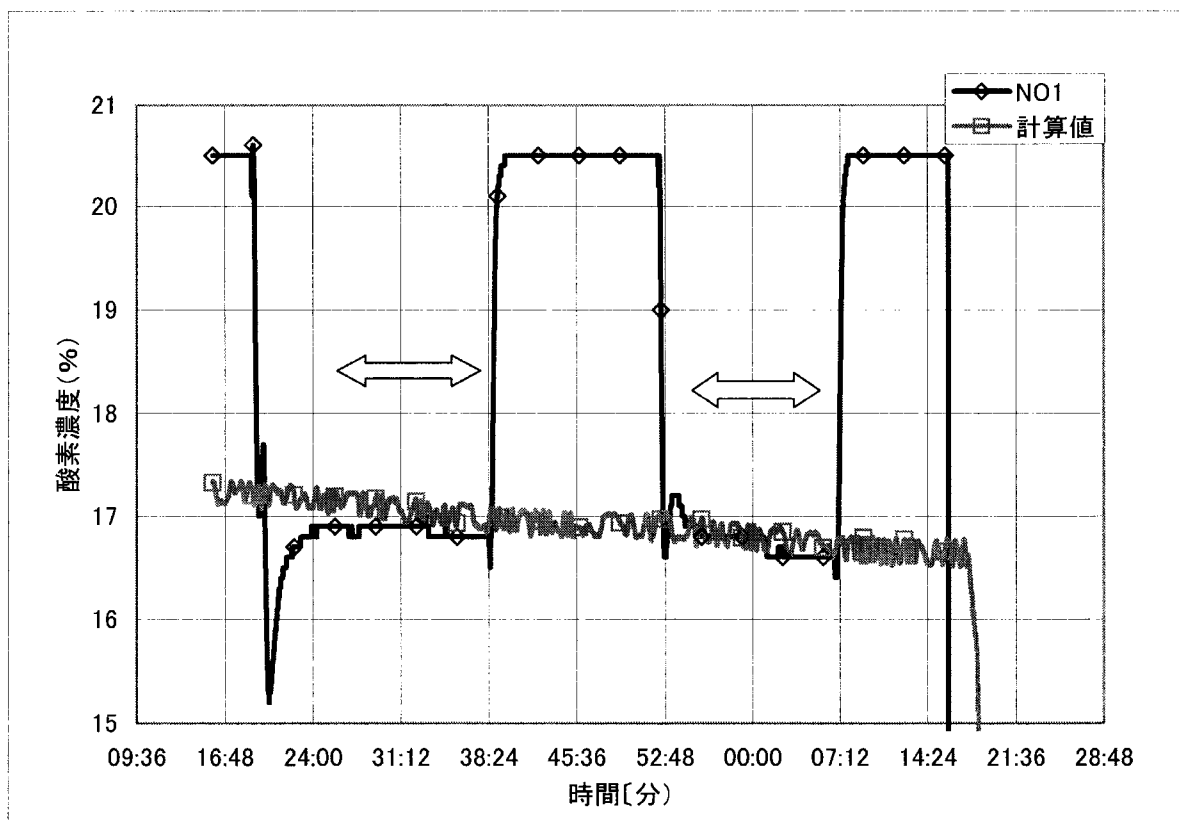


図 3. 2. 4-14 蒸気(0.8MPa-15%)中の酸素濃度測定結果と計算値との比較 (NO.1装置)

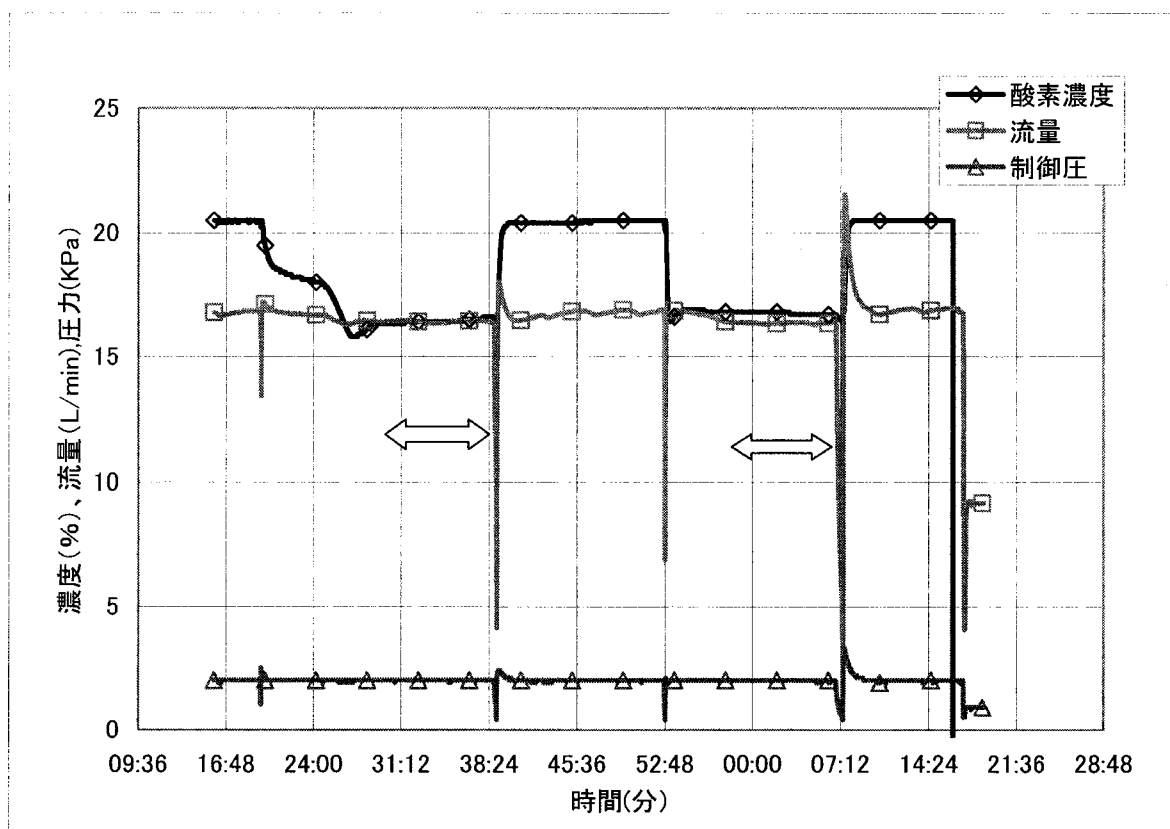


図 3. 2. 4-15 蒸気(0.8MPa-15%)中の酸素濃度測定結果(NO.2装置)

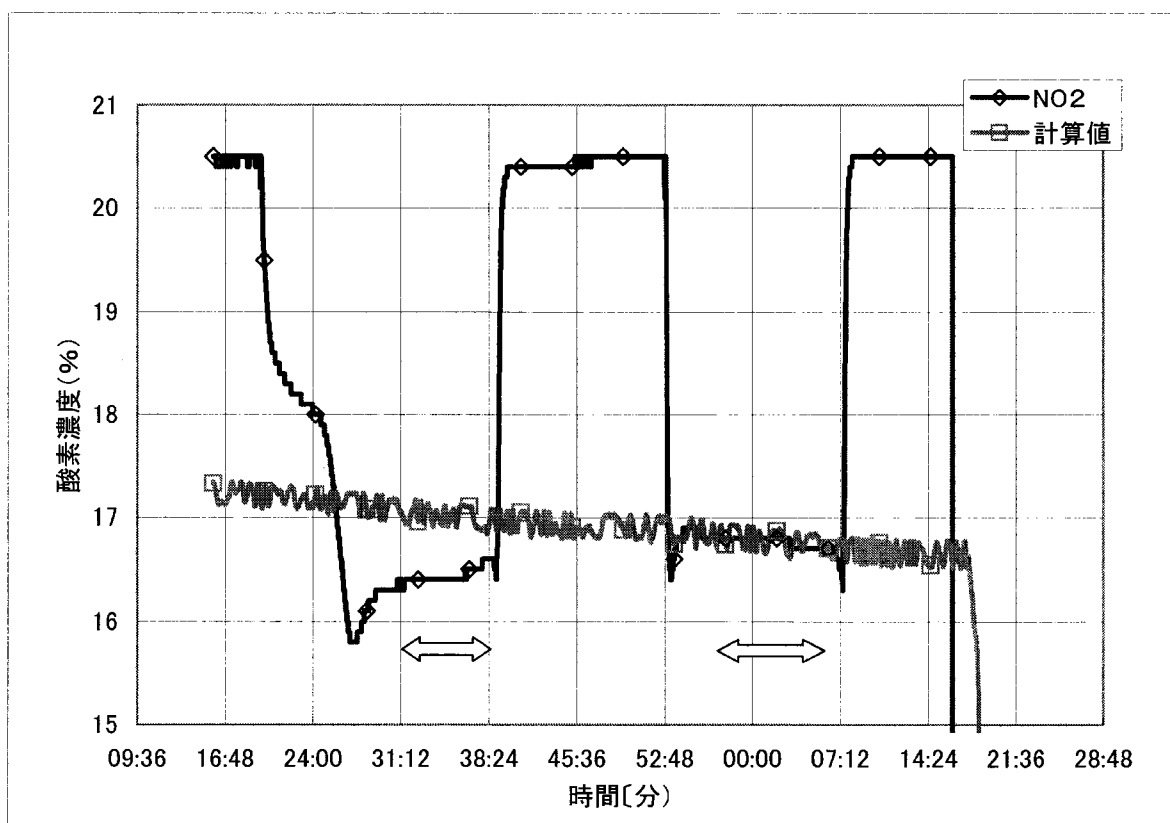


図 3. 2. 4-16 蒸気(0.8MPa-15%)中の酸素濃度測定結果と計算値との比較 (NO.2装置)

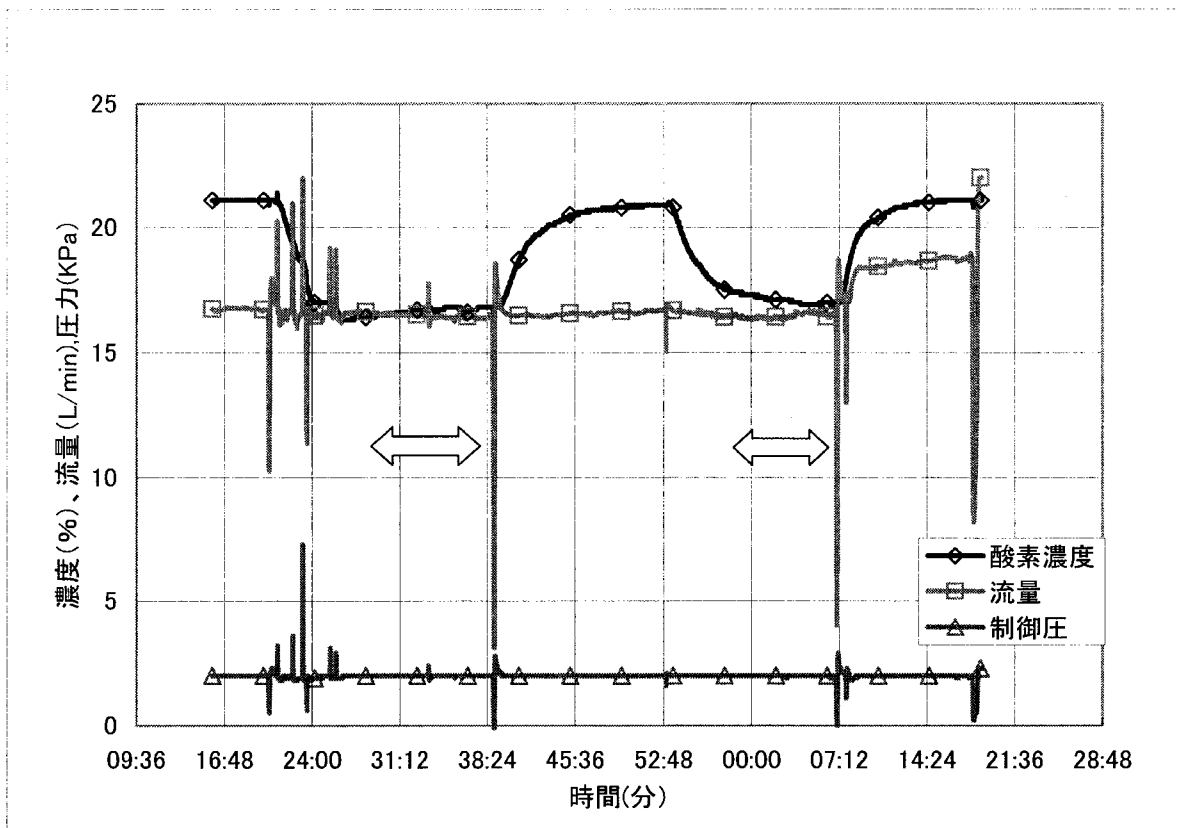


図 3. 2. 4-17 蒸気(0.8MPa-15%)中の酸素濃度測定結果(ローズM装置)

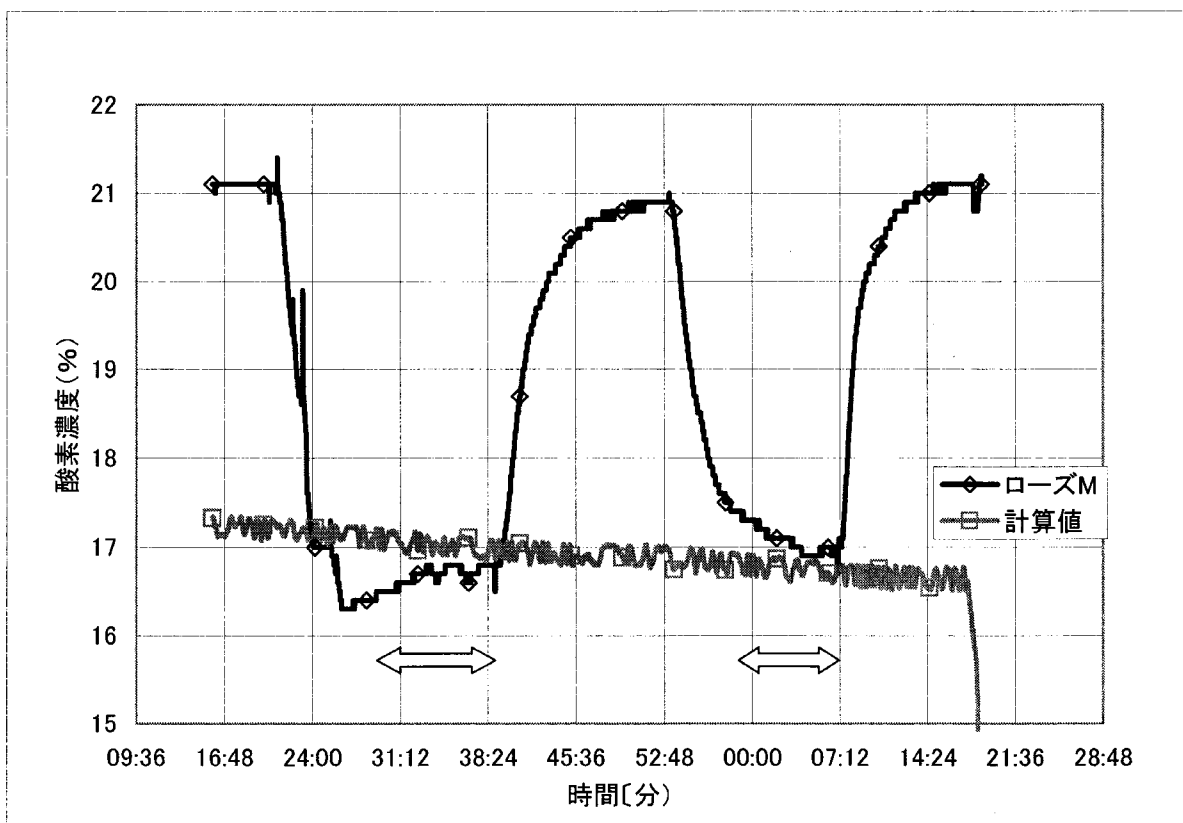


図 3. 2. 4-18 蒸気(0.8MPa-15%)中の酸素濃度測定結果と計算値との比較(ローズM装置)

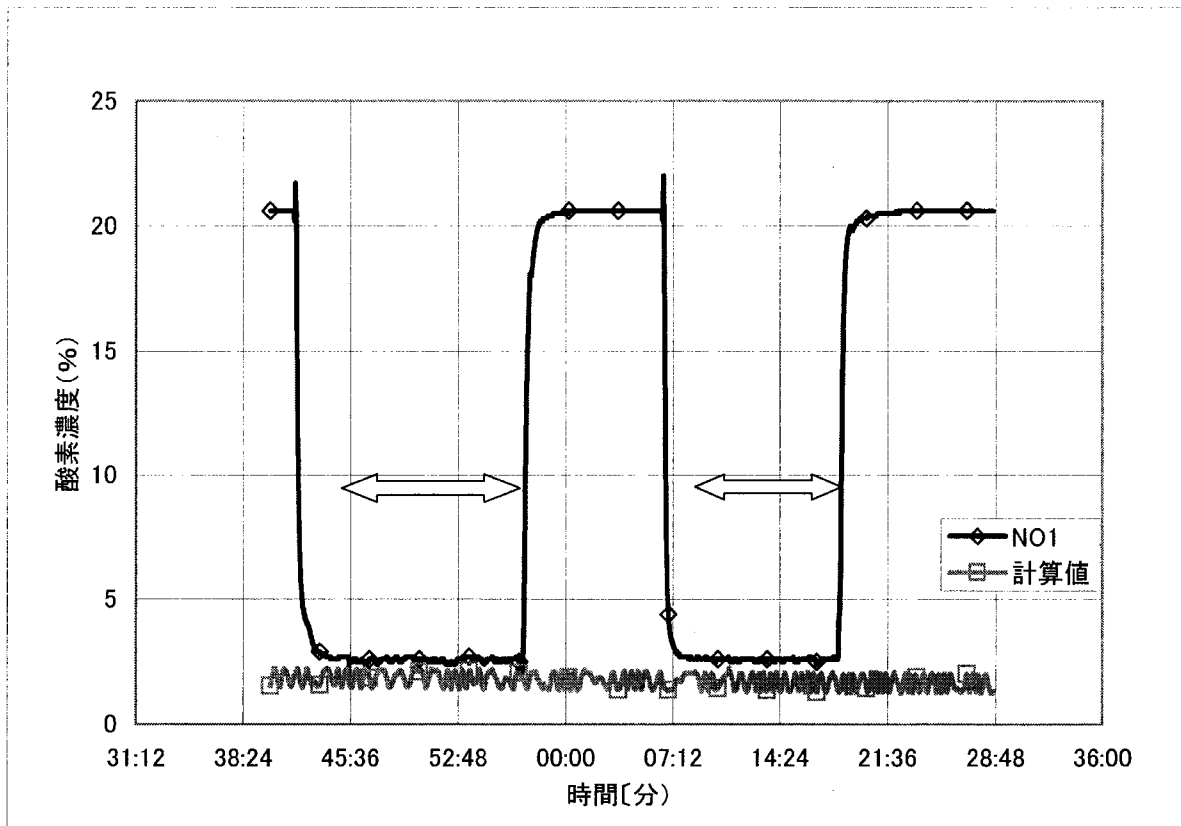


図 3. 2. 4-19 蒸気(1.5MPa-2%)中の酸素濃度測定結果 (NO.1装置)

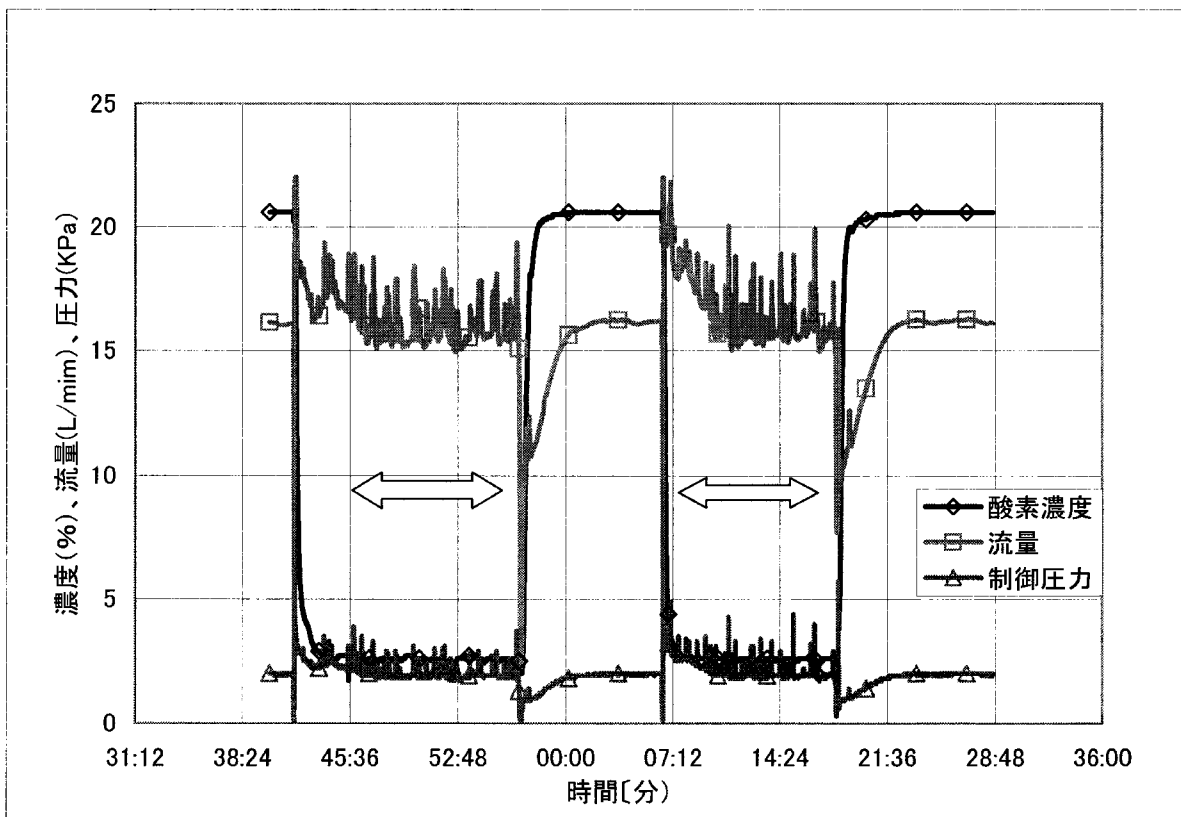


図 3. 2. 4-20 蒸気(1.5MPa-2%)中の酸素濃度測定結果と計算値との比較 (NO.1装置)

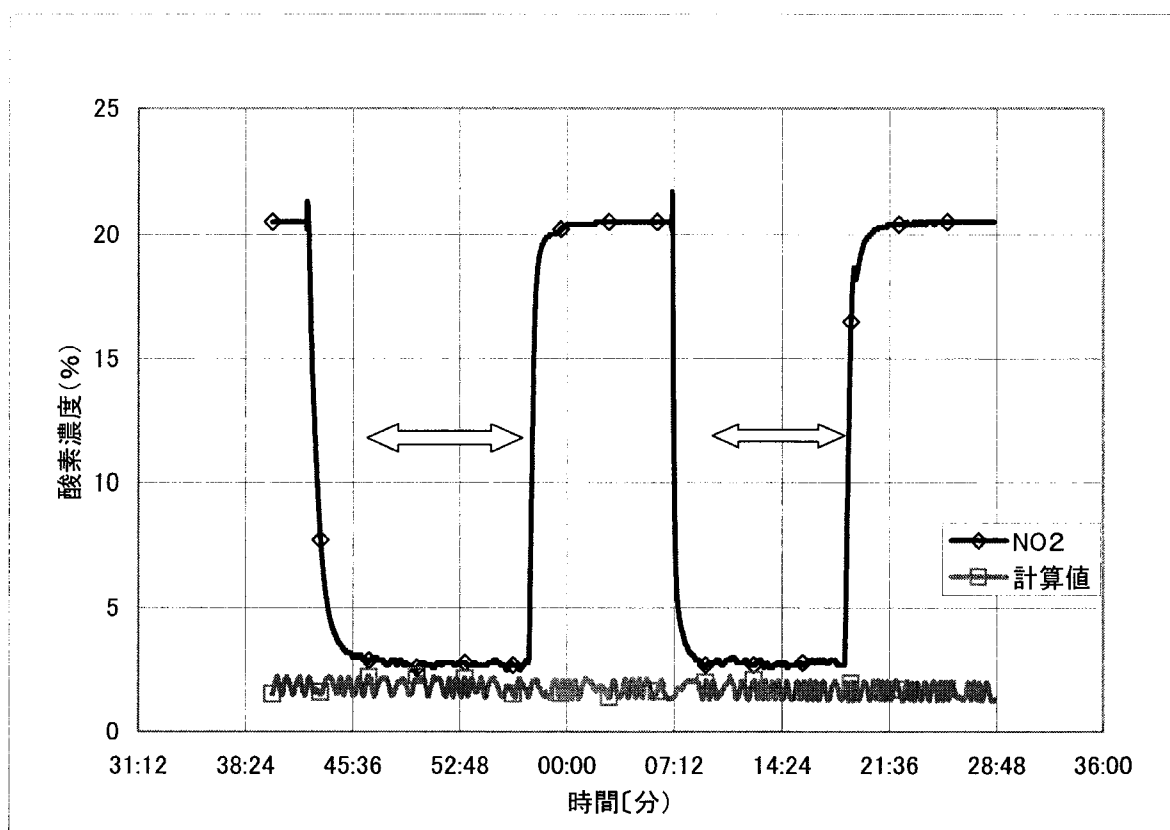


図 3. 2. 4-21 蒸気(1.5MPa-2%)中の酸素濃度測定結果(NO.2装置)

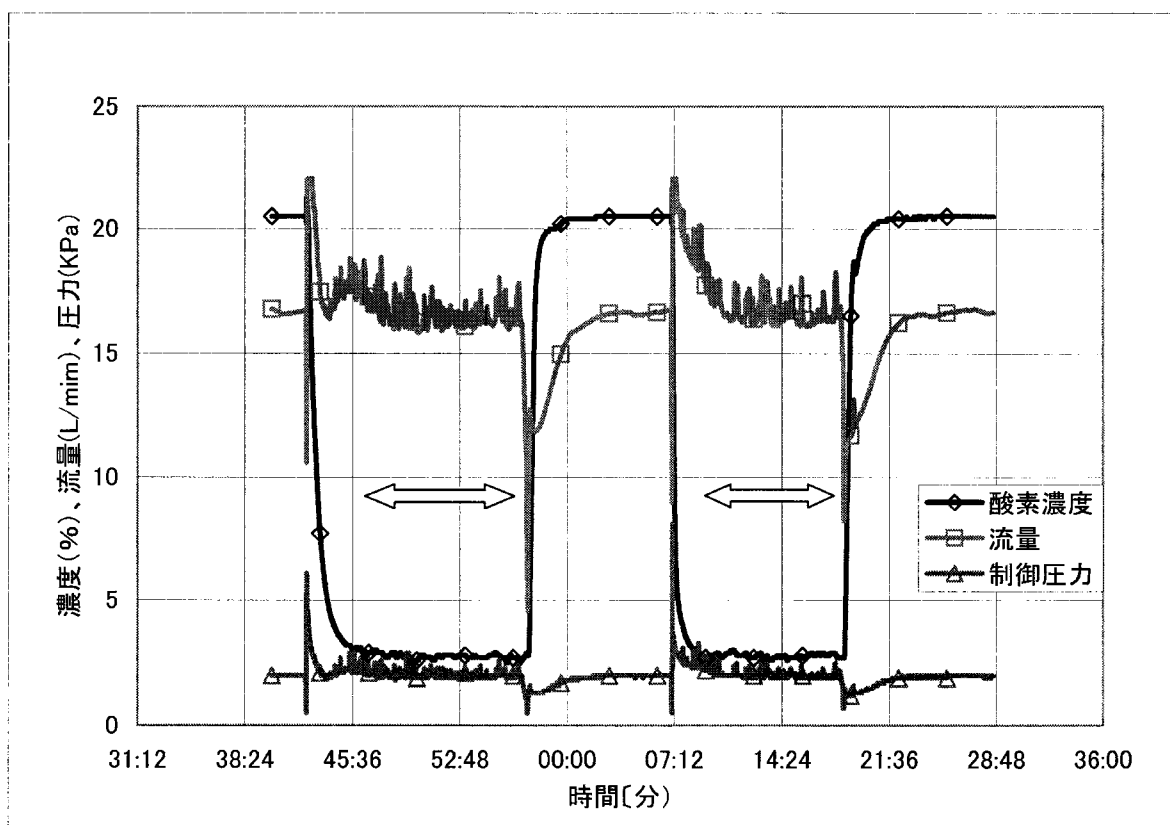


図 3. 2. 4-22 蒸気(1.5MPa-2%)中の酸素濃度測定結果と計算値との比較 (NO.2装置)

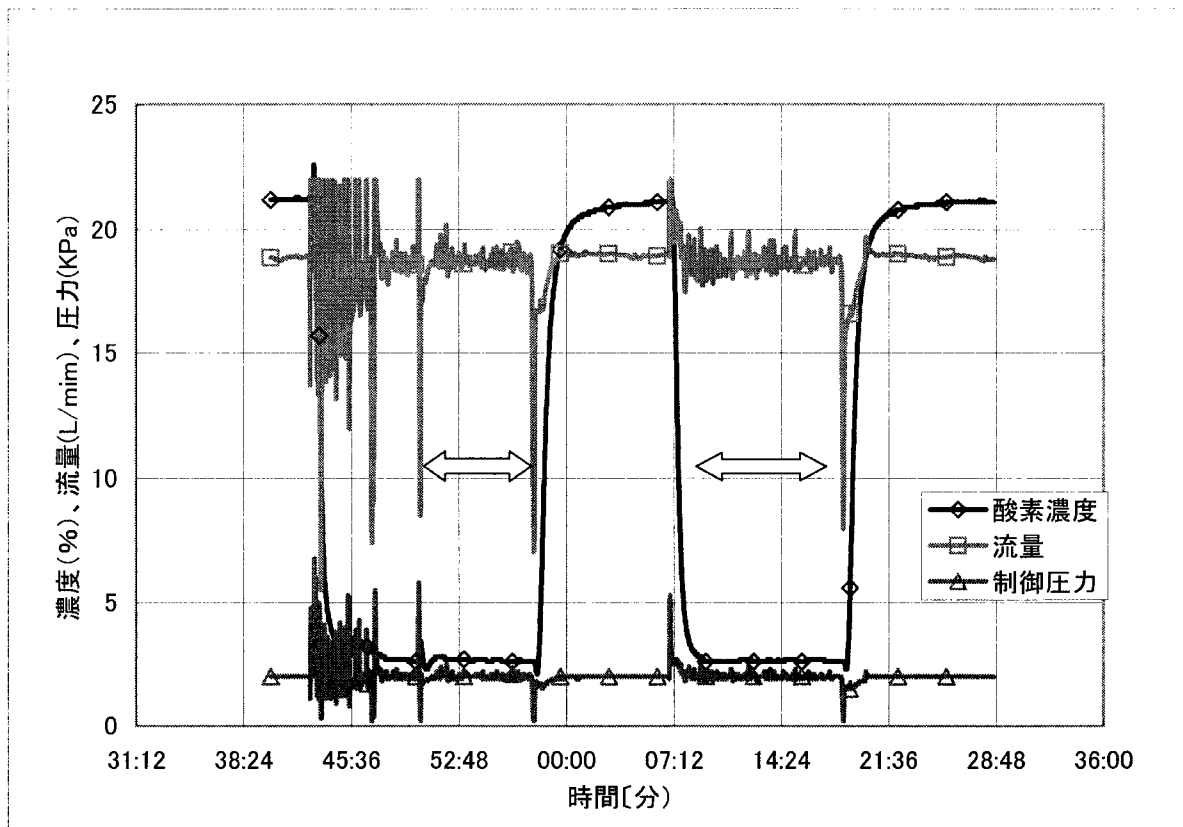


図 3. 2. 4-23 蒸気(1.5MPa-2%)中の酸素濃度測定結果(ローズM装置)

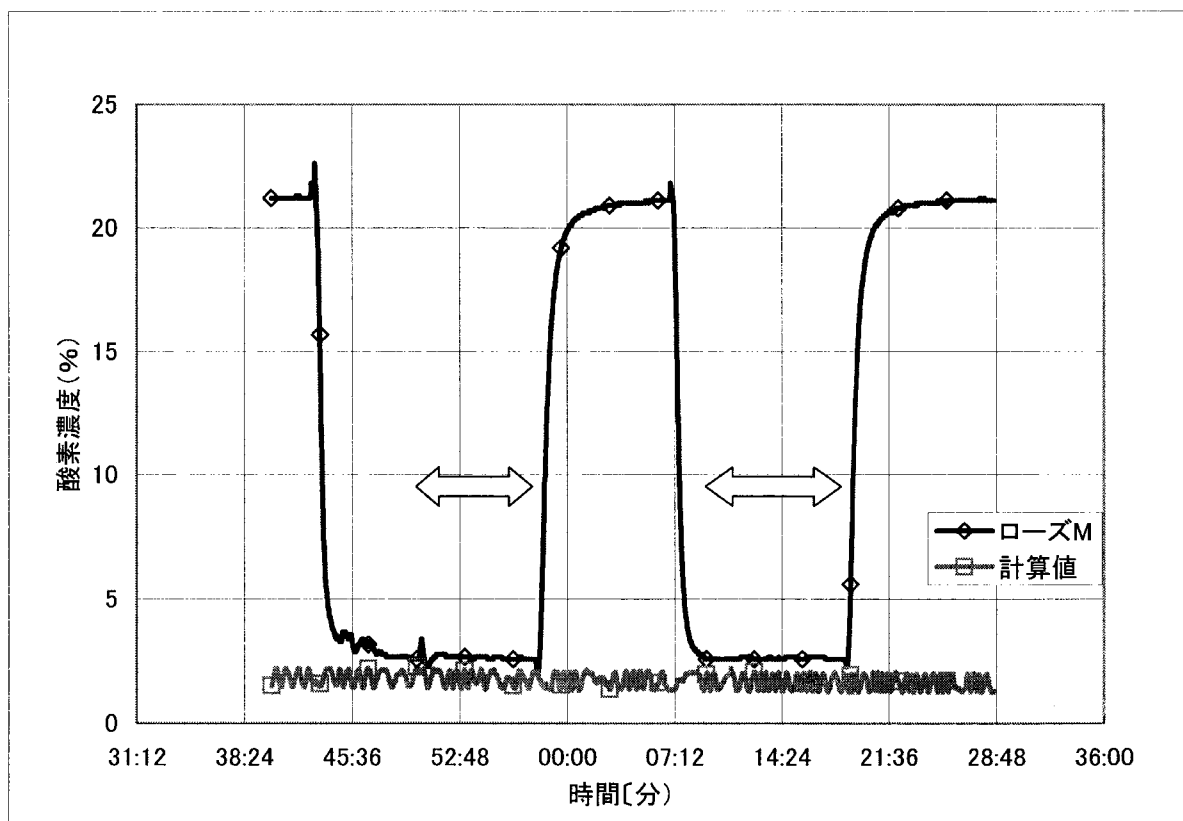


図 3. 2. 4-24 蒸気(1.5MPa-2%)中の酸素濃度測定結果と計算値との比較(ローズM装置)

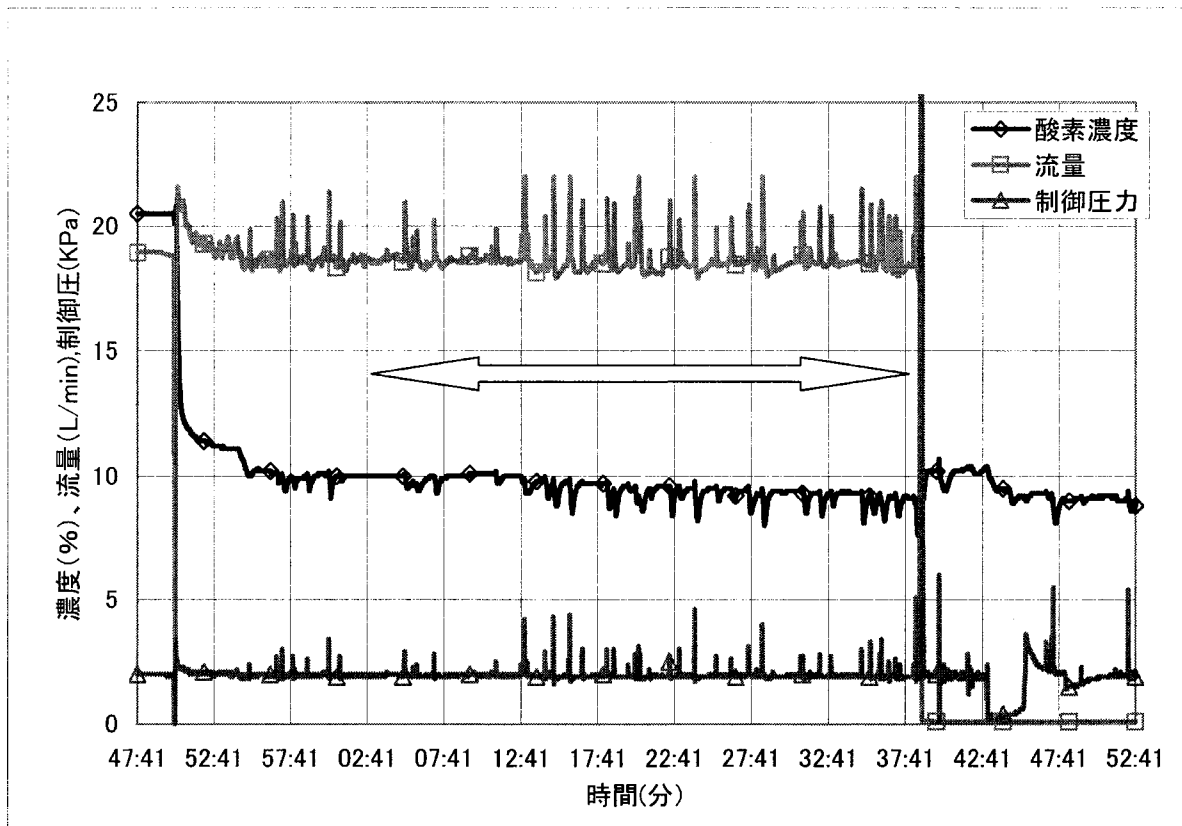


図 3. 2. 4-25 蒸気(1MPa-8%)中の酸素濃度測定結果 (NO.1装置)

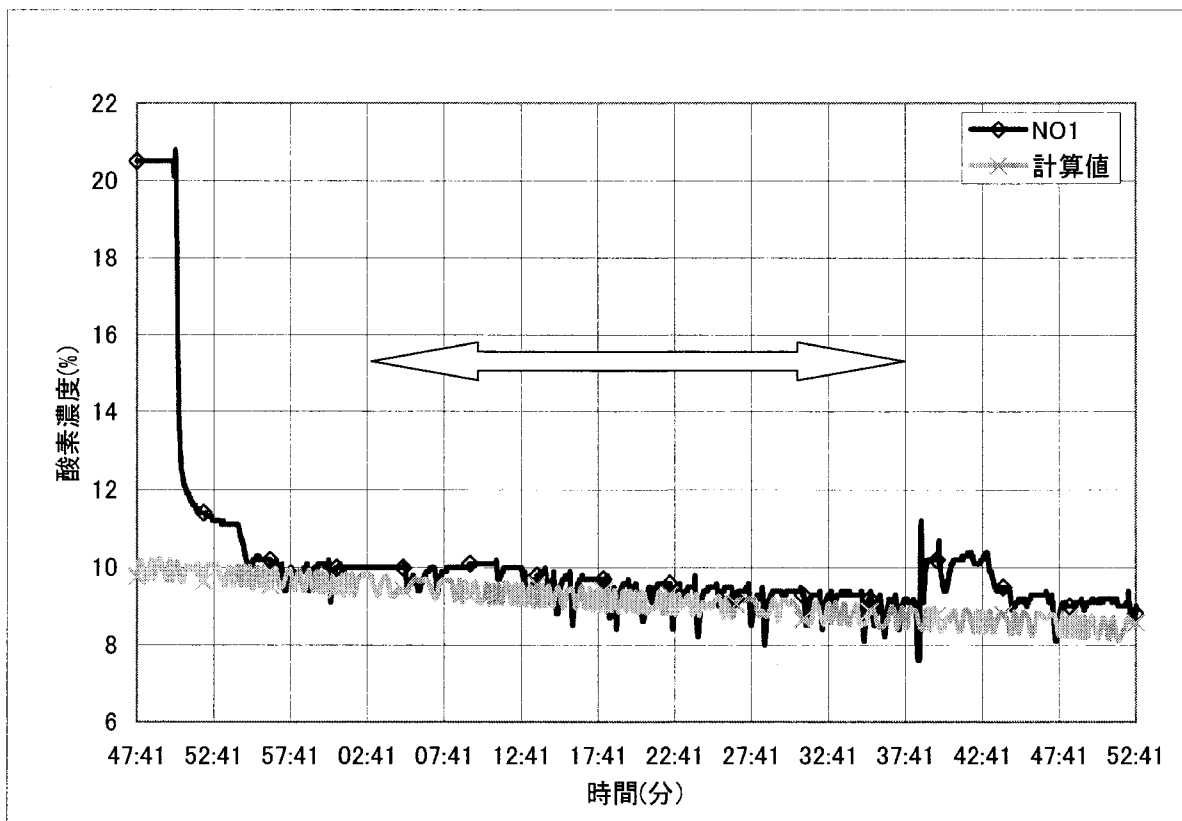


図 3. 2. 4-26 蒸気(1MPa-8%)中の酸素濃度測定結果と計算値との比較 (NO.1装置)

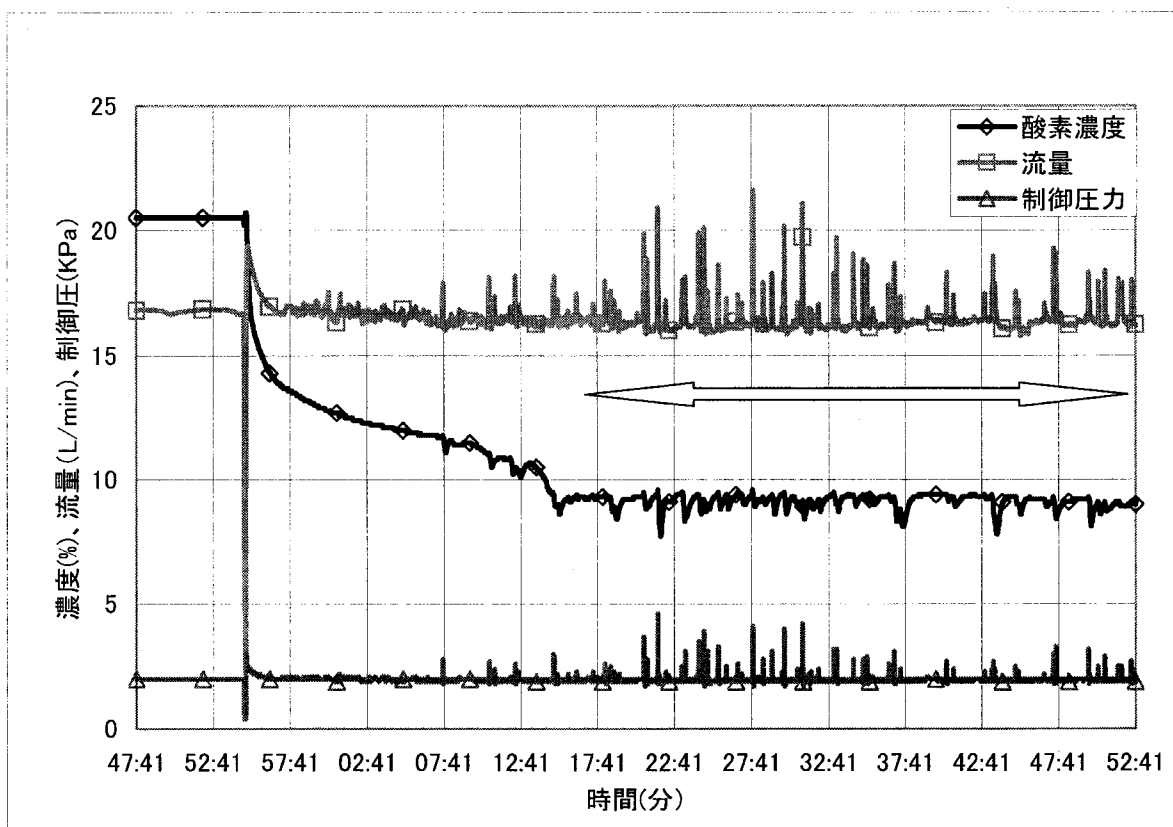


図 3. 2. 4-27 蒸気(1MPa-8%)中の酸素濃度測定結果 (NO.2装置)

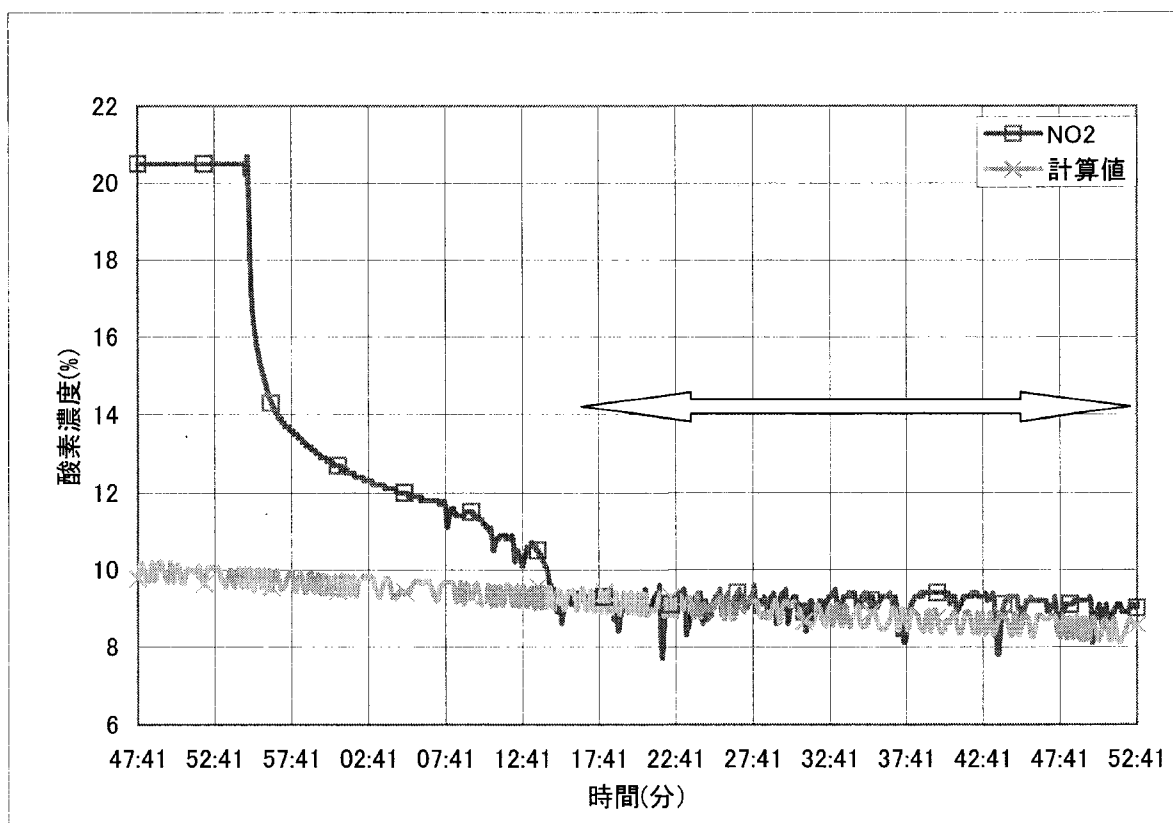


図 3. 2. 4-28 蒸気(1MPa-8%)中の酸素濃度測定結果と計算値との比較 (NO.2装置)

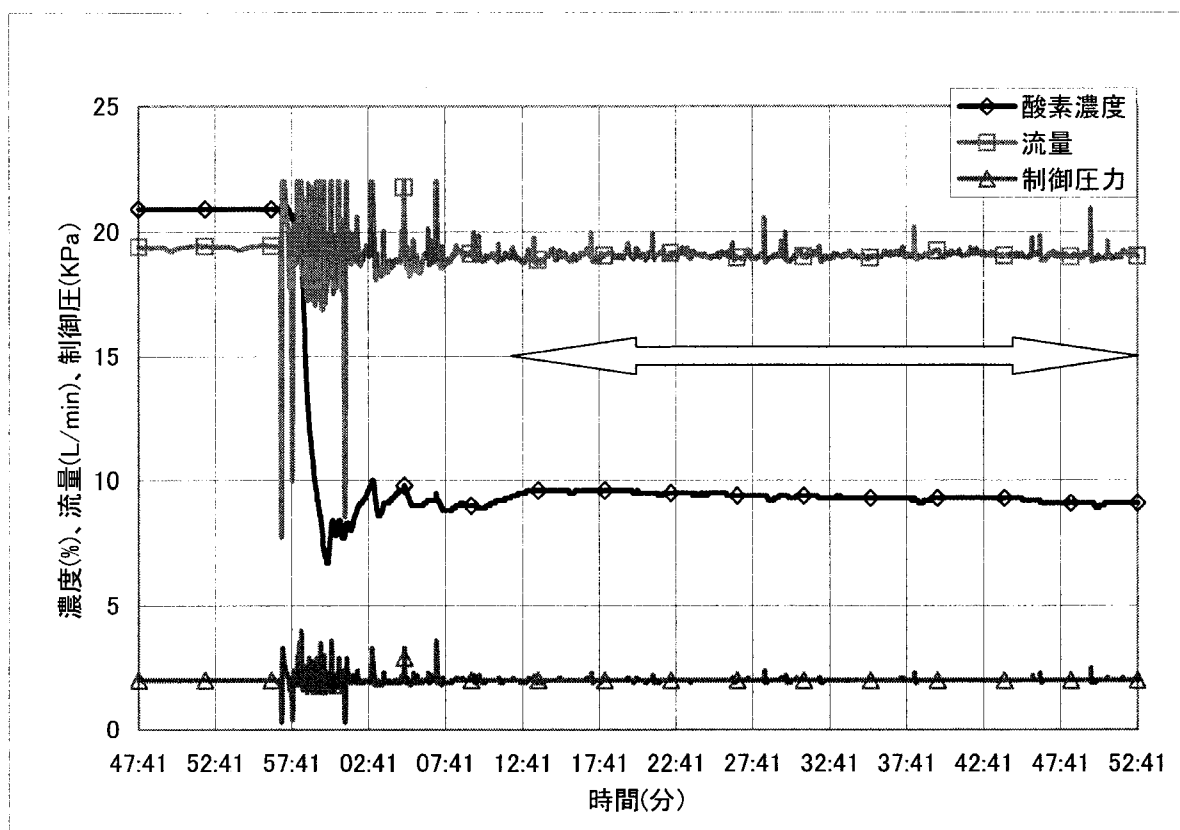


図 3. 2. 4-29 蒸気(1MPa-8%)中の酸素濃度測定結果(ローズM装置)

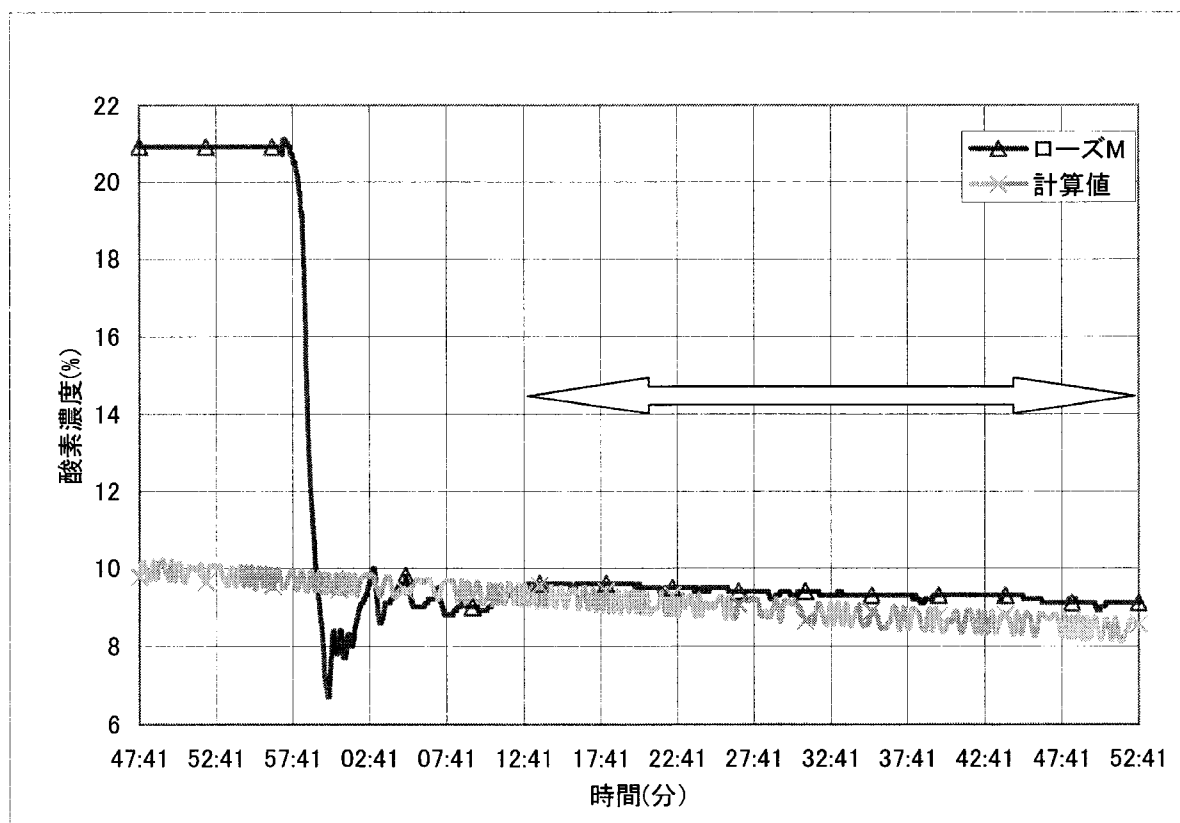


図 3. 2. 4-30 蒸気(1MPa-8%)中の酸素濃度測定結果と計算値との比較(ローズM装置)

4. 大型非定常実験装置(LSTF)実験における酸素濃度測定

4.1 目的

標準ガスを用いた性能試験及び ACH タンクで発生させた高温高压蒸気中の酸素濃度測定を行い、本酸素濃度測定装置の性能が確認できたことから、LSTF を用いた SG 二次側減圧模擬実験へ適用し、PV 頂部及び 2 基の蒸気発生器(SGA、SGB)出口プレナム部のサンプリング蒸気中の酸素濃度を測定した。

4.2 実験条件

LSTF の主な実験条件は次の通り。

- 1) 高压注入系、低压注入系の全故障を仮定
- 2) 定格運転状態(初期条件)の設定後、コールドレグ小破断 LOCA の模擬により実験を開始
- 3) 破断位置:コールドレグ横向き、破断面積:0.5%、破断オリフィス口径:7.2mm
- 4) アクシデントマネジメント(AM)策として SG 逃し弁(オリフィス口径:16.2mm)全開(両ループ共)による SG 二次側減圧を安全注入設備(SI)作動信号(一次系圧力:12.27MPa)発信後 10 分に開始
- 5) AM 策開始と同時に両ループに補助給水を開始する。補助給水量は約 0.7kg/sとする。
- 6) 蓄圧注入系の注入流量比は2:2とする。なお、窒素ガスの代わりに空気で蓄圧注入系タンクを加圧する。
- 7) 蓄圧注入系作動終了後 SG 出口プレナム部については、当該差圧を監視しつつ、蒸気サンプリングが可能になってから 15 分程度の間隔で酸素濃度計測を数回繰り返す。また、PV 頂部については SG 安全弁全開後速やかに開始し、酸素濃度を連続計測する。
- 8) 大気圧近傍での SG 伝熱管を介した二相自然循環流動を実現するため、一次系圧力が 2MPa に低下直後 SG 安全弁を全開(両ループ共)とする。

4.3 酸素濃度測定方法

4.3.1 測定要領

LSTF 実験における蓄圧注入系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 4.3-1 に、測定時の写真を図 2.2-3 に示す。ACH 及び ACC タンクより非凝縮ガス供給ラインを通し、非常用炉心冷却系(ECCS)ノズル(N-14/a,b)へ空気を注入させ、PV 頂部破断口ノズル(N-6/a)及び健全ループの SG 出口プレナム(N-8 ノズル)から蒸気をサンプリングし蓄積される蒸気中の酸素濃度を測定した。

サンプリング位置及び気液分離器を含めた LSTF に対する酸素濃度測定装置系統図を図 2.2-1A 及び図 2.2-1B に示す。

4.3.2 測定条件の制御

既報告書に示すローズ M 装置の試験結果から、各構成計器の適用範囲内でかつ圧力、温度、流量の変化が酸素濃度に及ぼす影響を出来るだけ小さくするため、制御(または設定)範囲は以下とした。なお、これらの条件下で測定すれば酸素濃度計単体の測定精度内であることが判った。

- (1) 圧力 :適用蒸気圧力範囲は 2MPa 以下とする。
酸素濃度計容器内の圧力は 2kPa(ゲージ圧)に制御する。
- (2) 温度 :ガス濃度に影響を与える凝縮を避けるため、サンプリング部から圧力調整弁まではサンプリング蒸気の飽和温度以上に制御し、圧力調整弁以降は減圧後の飽和温度以上に制御する。また、流量計の仕様上の許容接液温度 393K (120℃)を考慮し、配管ヒータ温度は流量計入口温度 (TE5) =383~393K (110~120℃)となるように制御する。
- (3) 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=10~30L/min とする。LSTF 実験への影響を極力小さくするため、少量のサンプリングが望ましい。圧力調整弁にて 2kPa(ゲージ圧)に減圧した結果として、10~30L/min となる流量であれば 1.6MPa と高圧である LSTF 内の流量換算は約 1/16 即ち 0.63~1.9L/min と小さく、影響は軽微である。

4.3.3 測定手順

濃度測定手順は以下の通り(図 2.2-1A 参照)。

〈 実験前に実施する内容 〉

- 1) 元弁 (V-1) 及び気液分離出口弁 (V-2) が閉じていることを確認する。
- 2) 酸素濃度計を起動する。
- 3) 弁 (V-8) 閉により濃度計に圧縮空気を通気し、圧力調整弁 (V-3) 圧力を 2kPa(ゲージ圧)に調整する。
- 4) 酸素濃度計の自動校正を行う。スパンガスによりスパン校正後、ゼロガスによりゼロ校正を行う。
- 5) 配管ヒータを温度設定後起動させる。

〈 実験中に実施する内容 〉

以下の 1)~5)の操作を PV 頂部、SG 出口プレナム部について次のタイミングで実施する。

- PV 頂部⇒ 一次系圧力 2MPa で SG 安全弁開後速やかに開始し、酸素濃度を連続計測する。
- SG 出口プレナム部⇒ SG 出口プレナム差圧が 4kPa を超え、蒸気サンプリングが可能になってから 15 分程度の間隔で酸素濃度計測を数回繰り返す。

- 1) 排気ドレン弁 (V-6) 及び元弁 (V-1) 開により蒸気を通気し、ドレン操作を行う。なお、当該部が蒸気相である場合次に進むが、液相である場合 V-6 及び V-1 を閉じる。
- 2) 冷却空気弁 (V-8) を閉じた後、気液分離器出口弁 (V-2) を開け、蒸気を濃度計と流量計に通気する。
- 3) 約 5 分間酸素濃度を測定し、酸素濃度値が安定することを確認する。
- 4) 測定終了後、元弁 (V-1) 及び気液分離出口弁 (V-2) を閉じる。
- 5) 弁 (V-8) 開により濃度計に圧縮空気を通気し、圧力調整弁 (V-3) 圧力を 2kPa(ゲージ圧)に調整する。
- 6) 測定終了後、圧縮空気により流量計をエアークリーニングして終了する。

4.4 測定結果

4.4.1 酸素濃度

図 4.4.1-1 に LSTF の一次系・二次系圧力並びに PV 頂部、SGA 及び SGB 出口プレナム部の酸素濃度測定結果を示す。

PV 頂部は一次系圧力が 2MPa 以下となった時点で、排気ドレン弁 (V-6) 及び元弁 (V-1) 開により蒸気を通気し、ドレン操作を行うことで気相状態であることが確認されたので、約 3000 秒から実験終了まで連続して測定を行った。

SGA 及び SGB 出口プレナム部は当該差圧から気相状態と予想される時点で、排気ドレン弁 (V-6) 及び元弁 (V-1) 開により蒸気を通気し、ドレン操作を断続的に 5 回繰り返し気相状態になったことが確認できたので約 9400 秒から実験終了まで断続的に 4 回測定を行った。ただし、3 回目測定後炉心出力をゼロにした状態で 4 回目を測定した。

(1) PV 頂部の酸素濃度

図 4.4.1-2 に PV 頂部の酸素濃度、濃度計容器圧力及び流量を示す。約 3000 秒から連続して測定し、酸素濃度は 0.20～0.21% とほぼゼロであった。

酸素濃度測定中の濃度計容器圧力は 2kPa (ゲージ圧) に制御され、流量 (約 12L/min) は 10～30L/min の範囲内にあり、適正な条件下で測定がなされた。

また、凝縮を避けるため図 4.4.1-11 に示すように、PV 出口温度 (TE1-PV)～気液分離器出口温度 (TE2-PV)～圧力調整弁の蒸気温度は PV 頂部飽和温度以上に制御されている。

さらに、図 4.4.1-12 に示すように、圧力調整弁出口温度 (TWE3-PV)～酸素濃度計容器内温度 (TE3-PV)～流量計入口温度 (TE4-PV) は圧力調整弁以降の飽和温度以上に制御され、かつ流量計入口温度 (TE4-PV) は流量計の許容温度 (403K) 内に制御されている (図 2.2-1B 参照)。

これらの測定条件は 4.3.2 項の測定条件を満足しているので、本酸素濃度は酸素濃度計単体の測定精度内であると考ええる。

なお、PV 頂部のガス濃度がほぼゼロであった理由は、SG 二次側減圧により上部ヘッド底部が減圧沸騰し上部ヘッド部に蒸気が生成されたためガスが侵入できず、ガスはコールドレグ→ダウンカメラ→ホットレグ漏洩流路→ホットレグ→SG へ流れたものと推定される (図 4.3-1 参照)。

(2) SGA 出口プレナム部の酸素濃度

図 4.4.1-3 に SGA 出口プレナム部の 1 回目の酸素濃度、濃度計容器圧力及び流量を示す。9535～9895 秒 (6 分間) の酸素濃度測定中の濃度計容器圧力は 2kPa (ゲージ圧) に制御され、流量 (約 12L/min) は 10～30L/min の範囲内にあり、適正に安定した条件下で測定がなされ、酸素濃度は 7.5～9.4% (平均 8.7%) であった。

また、経路内での凝縮を避けるためサンプリング蒸気温度を飽和温度以上に保つ必要があるが、図 4.4.1-13 に示すように、SGA 出口温度 (TE1-SGA)～気液分離器表面温度 (TWE5-SGA)～気液分離器出口温度 (TE6-SGA)～圧力調整弁の蒸気温度は SGA 出口プレナム平均温度以上に制御されている。なお、図中 SGA 出口温度 (TE1-SGA) が上下に大きく脈動した理由は、気相状態の確認のために気液分離器のドレン弁 (V-6) を開閉したことによるものである。

さらに、圧力調整弁以降の経路についても凝縮を避けるため減圧後の飽和温度 (378K) 以上に保つ

必要があるが、図 4.4.1-14 に示すように、圧力調整弁出口温度(TE2-SGA)～酸素濃度計入口温度(TE3-SGA)～酸素濃度計容器内温度(TE4-SGA)～流量計入口温度(TE5-SGA)は飽和温度以上に制御され、かつ流量計入口温度(TE5-SGA)は流量計の許容温度(403K)内に制御されている。

これらの測定条件は4. 3. 2項の測定条件を満足しているので、本酸素濃度は酸素濃度計単体の測定精度内であると推定される。

図 4.4.1-4 に SGA 出口プレナム部の 2 回目の酸素濃度、濃度計容器圧力及び流量を示す。10850～11100 秒(4 分 10 秒間)の酸素濃度測定中の濃度計容器圧力は 2kPa(ゲージ圧)に制御され、流量(約 10L/min)は 10～30L/min の範囲内にあり、適正に安定した条件下で測定がなされ、酸素濃度は 10.0～10.7%(平均 10.2%)であった。

また、図 4.4.1-13 及び図 4.4.1-14 に示すように、1 回目と同様経路内での凝縮を避けるためサンプリング蒸気温度は飽和温度以上に保たれ、かつ流量計入口温度(TE5-SGA)は流量計の許容温度(403K)内に制御されている。

これらの測定条件は4. 3. 2項の測定条件を満足しているので、本酸素濃度は酸素濃度計単体の測定精度内であると推定される。

図 4.4.1-5 に SGA 出口プレナム部の 3 回目の酸素濃度、濃度計容器圧力及び流量を示す。12000～12200 秒(3 分 20 秒間)の酸素濃度測定中の濃度計容器圧力は 2kPa(ゲージ圧)に制御され、流量(約 10L/min)は 10～30L/min の範囲内にあり、適正に安定した条件下で測定がなされ、酸素濃度は 10.5～10.8%(平均 10.6%)であった。

また、図 4.4.1-13 及び図 4.4.1-14 に示すように、1 回目、2 回目と同様経路内での凝縮を避けるためサンプリング蒸気温度は飽和温度以上に保たれ、かつ流量計入口温度(TE5-SGA)は流量計の許容温度(403K)内に制御されている。

これらの測定条件は4. 3. 2項の測定条件を満足しているので、本酸素濃度は酸素濃度計単体の測定精度内であると推定される。

図 4.4.1-6 に SGA 出口プレナム部の 4 回目の酸素濃度、濃度計容器圧力及び流量を示す。13150～13335 秒(3 分 5 秒間)の酸素濃度測定中の濃度計容器圧力は 2kPa(ゲージ圧)に制御され、流量(約 10L/min)は 10～30L/min の範囲内にあり、適正に安定した条件下で測定がなされ酸素濃度は 9.0～9.6%(平均 9.2%)であった。

また、図 4.4.1-13 及び図 4.4.1-14 に示すように、1 回目～3 回目と同様経路内での凝縮を避けるためサンプリング蒸気温度は飽和温度以上に保たれ、かつ流量計入口温度(TE5-SGA)は流量計の許容温度(403K)内にほぼ制御されている。

これらの測定条件は4. 3. 2項の測定条件を満足しているので、本酸素濃度は酸素濃度計単体の測定精度内であると推定される。

(3) SGB 出口プレナム部の酸素濃度

図 4.4.1-7 に SGB 出口プレナム部の 1 回目の酸素濃度、濃度計容器圧力及び流量を示す。9600～9900 秒(5 分間)の酸素濃度測定中の濃度計容器圧力は 2kPa(ゲージ圧)に制御され、流量(約 14L/min)

は 10～30L/min の範囲内にあり適正に安定した条件下で測定がなされ酸素濃度は 8.1～8.5% (平均 8.3%) であった。

また、経路内での凝縮を避けるためサンプリング蒸気温度を飽和温度以上に保つ必要があるが、図 4.4.1-15 に示すように、SGB 出口温度(TE1-SGB)～気液分離器表面温度(TWE5-SGB)～気液分離器出口温度(TE6-SGB)～圧力調整弁の蒸気温度は SGB 出口プレナム平均温度以上に制御されている。なお、図中 SGB 出口温度(TE1-SGB)が上下に大きく脈動した理由は、SGA 出口温度同様、気相状態の確認のために気液分離器のドレン弁(V-6)を開閉したことによるものである。

さらに、圧力調整弁以降の経路についても凝縮を避けるため減圧後の飽和温度(378K)以上に保つ必要があるが、図 4.4.1-16 に示すように、圧力調整弁出口温度(TE2-SGB)～酸素濃度計入口温度(TE3-SGB)～酸素濃度計容器内温度(TE4-SGB)～流量計入口温度(TE5-SGB)は飽和温度(378K)以上に制御され、かつ流量計入口温度(TE5-SGB)は流量計の許容温度(403K)内に制御されている。

これらの測定条件は4. 3. 2項の測定条件を満足しているので、本酸素濃度は酸素濃度計単体の測定精度内であると推定される。

図 4.4.1-8 に SGB 出口プレナム部の 2 回目の酸素濃度、濃度計容器圧力及び流量を示す。10900～11100 秒(3 分 20 秒間)の酸素濃度測定中の濃度計容器圧力は 2kPa(ゲージ圧)に制御され、流量(約 10L/min)は 10～30L/min の範囲内にあり、適正に安定した条件下で測定がなされ酸素濃度は 8.1～9.1% (平均 8.7%) であった。

また、図 4.4.1-15 及び図 4.4.1-16 に示すように、1 回目と同様経路内での凝縮を避けるためサンプリング蒸気温度は飽和温度以上に保たれ、かつ流量計入口温度(TE5-SGB)は流量計の許容温度(393K)内に制御されている。

図 4.4.1-9 に SGB 出口プレナム部の 3 回目の酸素濃度、濃度計容器圧力及び流量を示す。11900～12200 秒(5 分間)の酸素濃度測定中の濃度計容器圧力は 2kPa(ゲージ圧)に制御され、流量(約 12.5L/min)は 10～30L/min の範囲内にあり適正に安定した条件下で測定がなされ酸素濃度は 6.9～7.4% (平均 7.2%) であった。

また、図 4.4.1-15 及び図 4.4.1-16 に示すように、1 回目、2 回目と同様経路内での凝縮を避けるためサンプリング蒸気温度は飽和温度以上に保たれ、かつ流量計入口温度(TE5-SGB)は流量計の許容温度(403K)内に制御されている。これらの測定条件は4. 3. 2項の測定条件を満足しており、本酸素濃度は酸素濃度計単体の測定精度内であると推定される。

図 4.4.1-10 に SGB 出口プレナム部の 4 回目の酸素濃度、濃度計容器圧力及び流量を示す。13100～13300 秒(3 分 20 秒間)の酸素濃度測定中の濃度計容器圧力は 2kPa(ゲージ圧)に制御され、流量(約 10L/min)は 10～30L/min の範囲内にあり、適正に安定した条件下で測定がなされ酸素濃度は 6.3～7.5% (平均 6.7%) であった。

また、図 4.4.1-15 及び図 4.4.1-16 に示すように、1 回目～3 回目と同様経路内での凝縮を避けるためサンプリング蒸気温度は飽和温度以上に保たれ、かつ流量計入口温度(TE5-SGB)は流量計の許容温度(403K)内に制御されている。これらの測定条件は4. 3. 2項の測定条件を満足しており、本酸素濃度は酸素濃度計単体の測定精度内であると推定される。

4. 4. 2 計算値との比較

図 4.4.2-1 に 3. 2. 2 項に示す方法により今回の PV 頂部、SGA 及び SGB 出口プレナム部の酸素濃度を計算により推定した結果を示す。なお、計算濃度は PV 頂部、SGA 及び SGB 出口プレナム部内の酸素濃度を推定しているが、測定濃度は濃度計容器内の酸素濃度を測定しているので各出口から濃度計容器までの配管経路内を通過する時間差がある。そのため、この時間差を考慮して同じタイミングでの濃度を比較している。時間差はローズ M 装置の場合 141 秒、NO. 1 装置の場合 17 秒、NO. 2 装置の場合 16 秒となる。

3. 2 節での ACH タンクを用いた性能確認試験結果と比較する場合、全圧を計測する圧力計の精度誤差が ACH タンクの場合 $\pm 0.0539\text{MPa}$ 、LSTF 実験の場合 $\pm 0.1077\text{MPa}$ と大きいため、測定値と計算値との乖離はより大きくなることが予想される。

(1) PV 頂部での測定酸素濃度と計算濃度との比較

測定した酸素濃度に対し、以下に示す手順により PV 頂部の蒸気温度より空気分圧を求め、計算により酸素濃度を推定した。

$$\left\{ \begin{array}{l} P = (\text{PV 頂部の全圧、絶対圧} = \text{PE290-PV}) \\ \text{PV 頂部の蒸気(気相部)温度 } T_g = \text{TE-E066F} \quad \rightarrow \quad P_{\text{STM}} = \text{PV 頂部の飽和蒸気圧} \\ (P - P_{\text{STM}}) \times \text{空気の } \text{O}_2\% = P_{\text{O}_2} (\text{酸素分圧}) \quad (\text{空気の } \text{O}_2\% = 20.946\%) \\ P_{\text{O}_2}/P \times 100 = \text{計算濃度}\% \end{array} \right.$$

図 4.4.2-2 に PV 頂部の計算濃度と測定値との比較を示す。測定値 0.20～0.21% に対して計算値は約 2.5% と乖離が大きい。しかし、計算値は PV 頂部の全圧を用いており、その圧力計精度 ($\pm 0.1077\text{MPa}$) に最も大きく影響される。圧力計精度を考慮した計算誤差上限及び下限との比較から、測定値は計算値の誤差範囲内にあることが判る。

(2) SGA 出口プレナム部での測定酸素濃度と計算濃度との比較

測定した酸素濃度に対し、以下に示す手順により SGA 出口プレナム部の蒸気温度より空気分圧を求め、計算により酸素濃度を推定した。

$$\left\{ \begin{array}{l} P = (\text{SGA 出口プレナム部の全圧、絶対圧} = \text{PE010-SGA}) \\ \text{SGA 出口プレナム部の蒸気(気相部)温度 } T_g \quad \rightarrow \quad P_{\text{STM}} = \text{SGA 出口プレナム部の飽和蒸気} \\ \text{圧} \\ (P - P_{\text{STM}}) \times \text{空気の } \text{O}_2\% = P_{\text{O}_2} (\text{酸素分圧}) \quad (\text{空気の } \text{O}_2\% = 20.946\%) \\ P_{\text{O}_2}/P \times 100 = \text{計算濃度}\% \end{array} \right.$$

図 4.4.2-3 に実験開始から終了までの SGA 出口プレナム部の計算濃度と測定値との比較を示す。計算値は SGA 出口プレナム部の全圧を用いており、その圧力計精度 ($\pm 0.1077\text{MPa}$) に最も大きく影響されるため、圧力計精度を考慮した計算誤差上限及び下限も示す。測定値は 1 回目を除いて計算誤差上限近くにあることが判る。

図 4.4.2-4 に 9000 秒以降の 4 回の比較を示す。図 4.4.2-5 に示す 1 回目の測定値平均 8.7% に対し計算値平均は 8.2% であり、その差は 0.5% と良く合致している。図 4.4.2-6 に示す 2 回目の測定値平均 10.2% に対し計算値は 7.7% であり、その差は 2.5% となる。図 4.4.2-7 に示す 3 回目の測定値平均 10.6% に対し計算値は 7.2% であり、その差は 3.4% と大きい。図 4.4.2-8 に示す 4 回目の測定値平均 9.2% に対し計算値は 7.8% であり、その差は 1.4% とほぼ近い。

(3) SGB 出口プレナム部での測定酸素濃度と計算濃度との比較

測定した酸素濃度に対し、以下に示す手順により SGB 出口プレナム部の蒸気温度より空気分圧を求め、計算により酸素濃度を推定した。

$$\left\{ \begin{array}{l} P = (\text{SGB 出口プレナム部の全圧、絶対圧} = P_{E150-SGB}) \\ \text{SGB 出口プレナム部の蒸気(気相部)温度 } T_g \rightarrow P_{STM} = \text{SGB 出口プレナム部の飽和蒸気圧} \\ (P - P_{STM}) \times \text{空気の } O_2\% = P_{O_2} (\text{酸素分圧}) \quad (\text{空気の } O_2\% = 20.946\%) \\ P_{O_2}/P \times 100 = \text{計算濃度}\% \end{array} \right.$$

図 4.4.2-9 に実験開始から終了までの SGB 出口プレナム部の計算酸素濃度と測定値との比較を示す。計算値は SGB 出口プレナム部の全圧を用いており、その圧力計精度 ($\pm 0.1077\text{MPa}$) に最も大きく影響されるので圧力計精度を考慮した計算誤差上限及び下限も示す。測定値は計算誤差範囲内であることが判る。

図 4.4.2-10 に 9000 秒以降の 4 回の比較を示す。図 4.4.2-11 に示す 1 回目の測定値平均 8.0% に対し計算値平均は 7.3% であり、その差は 0.7% と良く合致している。図 4.4.2-12 に示す 2 回目の測定値平均 8.7% に対し計算値は 7.3% であり、その差は 1.4% となる。図 4.4.2-13 に示す 3 回目の測定値平均 7.2% に対し計算値は 7.0% であり、その差は 0.2% と良く合致している。図 4.4.2-14 に示す 4 回目の測定値平均 6.7% に対し計算値は 6.3% であり、その差は 0.4% と良く合致している。

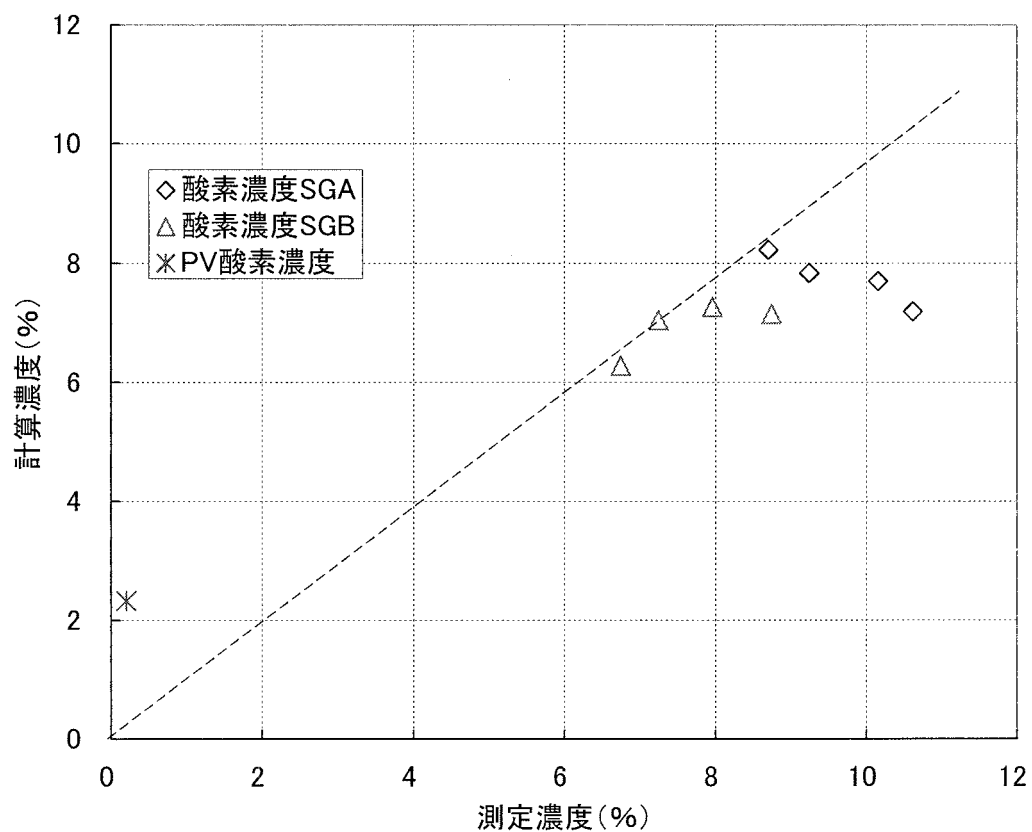
表 4.4.2-1 右欄に示す測定濃度と計算濃度との濃度差は SGA2 回目に 2.5%、3 回目に 3.6% の差が見られる。それ以外の値については 1.6% 以下であり、3.2 節の比較結果より乖離は大きい、測定値をほぼ推定していると考ええる。

測定値と計算値との差の原因を考える時、測定値についてはガス濃度計の誤差を考慮する必要がある。一方、計算値については、SG 出口プレナムの温度として 3 カ所の熱電対の平均温度を用いているが均一ではない。これは、サンプリング部の蒸気温度の不均一、圧力計精度及び熱電対精度などに起因しているものと考えるが、圧力計精度の影響が最も大きい。

表 4. 4. 2-1 測定濃度と計算濃度との比較

図番	測定場所	測定時間 (秒)	測定濃度(平均) (%)	計算濃度(平均) (%)	濃度差 (測定濃度-計 算濃度)(%)
図4. 4. 2-2	PV頂部	9000	0.20	2.33	-2.12
図4. 4. 2-5	SGA出口プレナム(一回目)	360	8.70	8.23	0.47
図4. 4. 2-6	〃 (二回目)	250	10.15	7.71	2.45
図4. 4. 2-7	〃 (三回目)	200	10.62	7.20	3.42
図4. 4. 2-8	SGA出口プレナム(四回目)	185	9.24	7.84	1.40
図4. 4. 2-11	SGB出口プレナム(一回目)	300	7.96	7.27	0.69
図4. 4. 2-12	〃 (二回目)	200	8.74	7.15	1.59
図4. 4. 2-13	〃 (三回目)	300	7.25	7.05	0.20
図4. 4. 2-14	SGB出口プレナム(四回目)	170	6.74	6.28	0.46

表 4. 4. 2-2 測定濃度と計算濃度との比較(グラフ化)



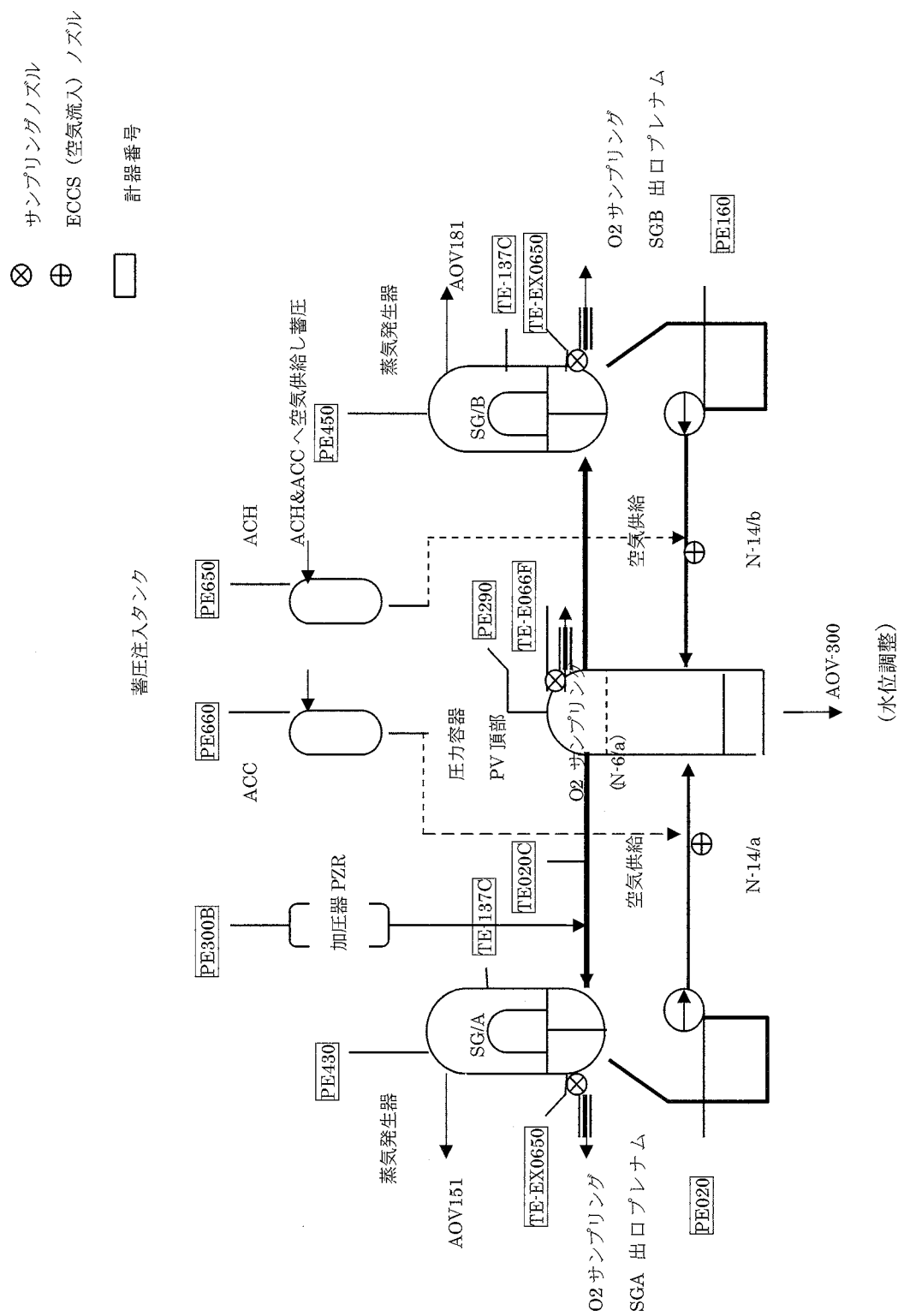


図4.3-1 酸素濃度測定位置図

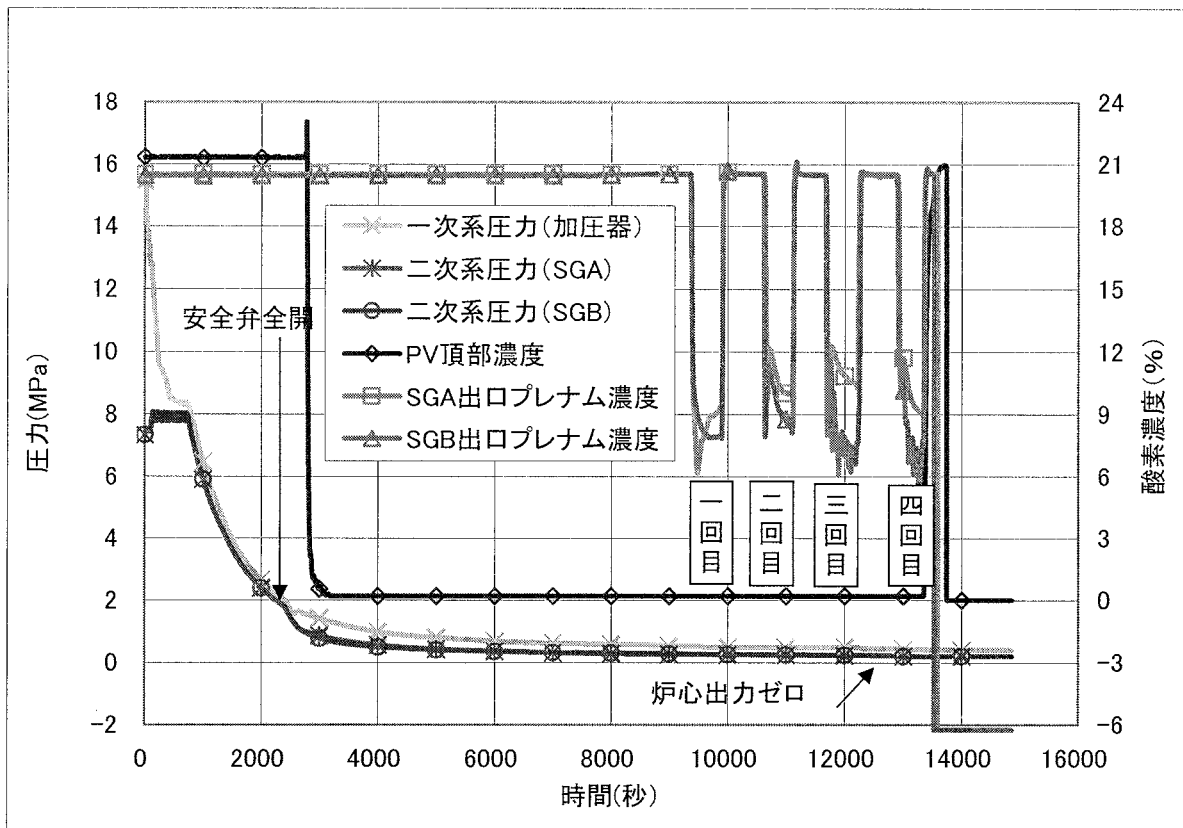


図 4. 4. 1-1 圧力変化と酸素濃度測定データ

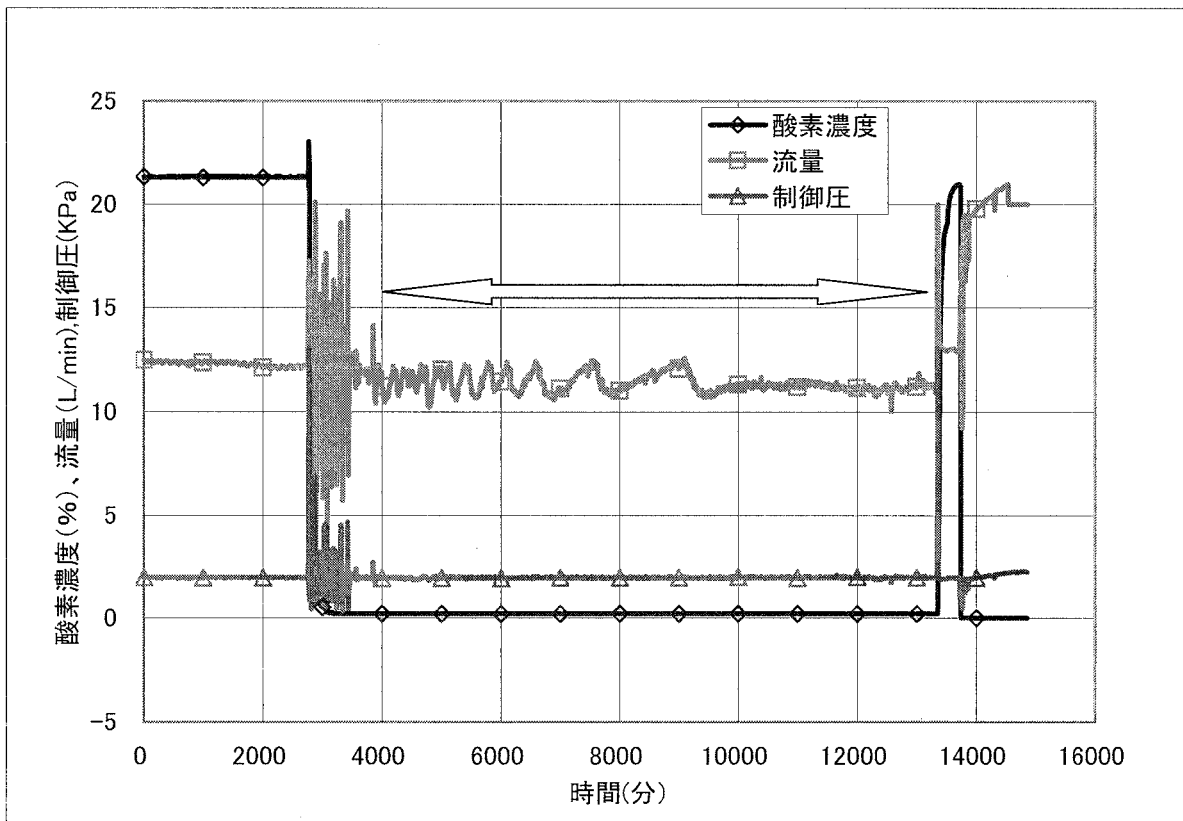


図 4. 4. 1-2 PV頂部酸素濃度測定データ

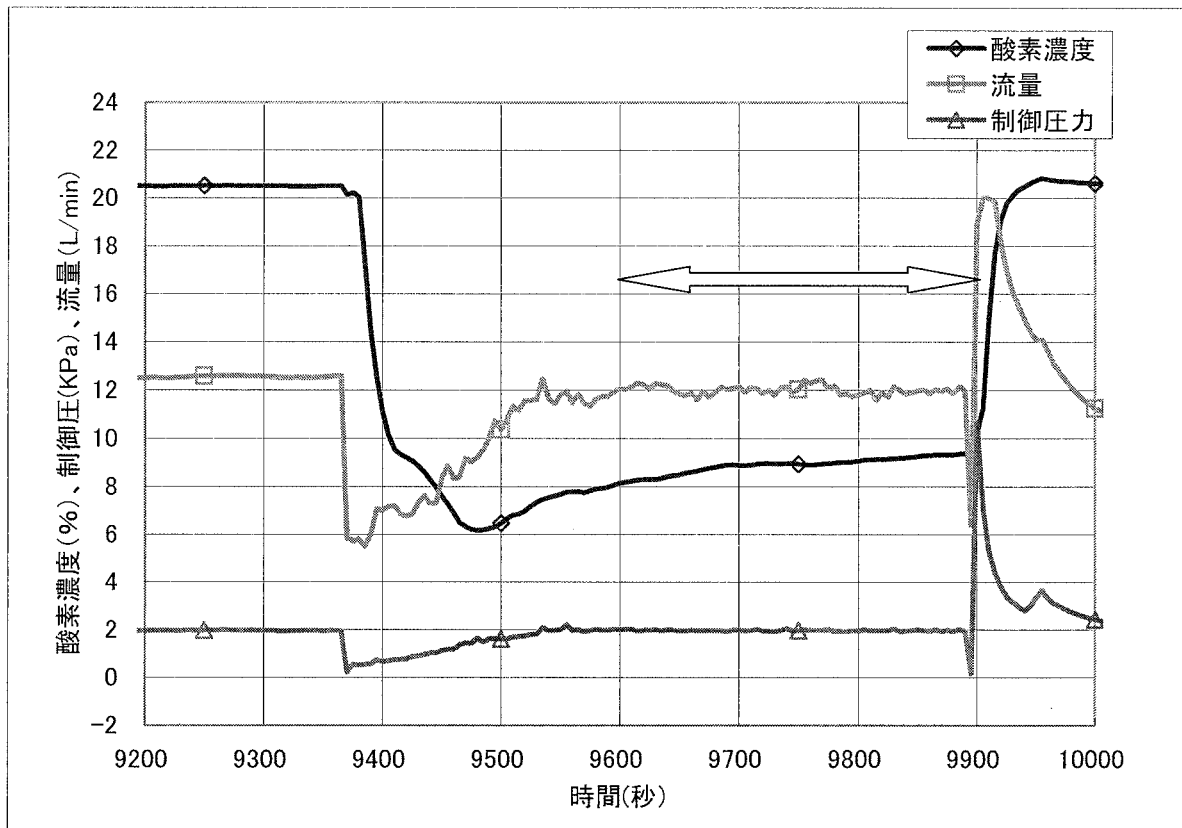


図 4. 4. 1-3 SGA出口プレナム部酸素濃度測定データ(1回目)

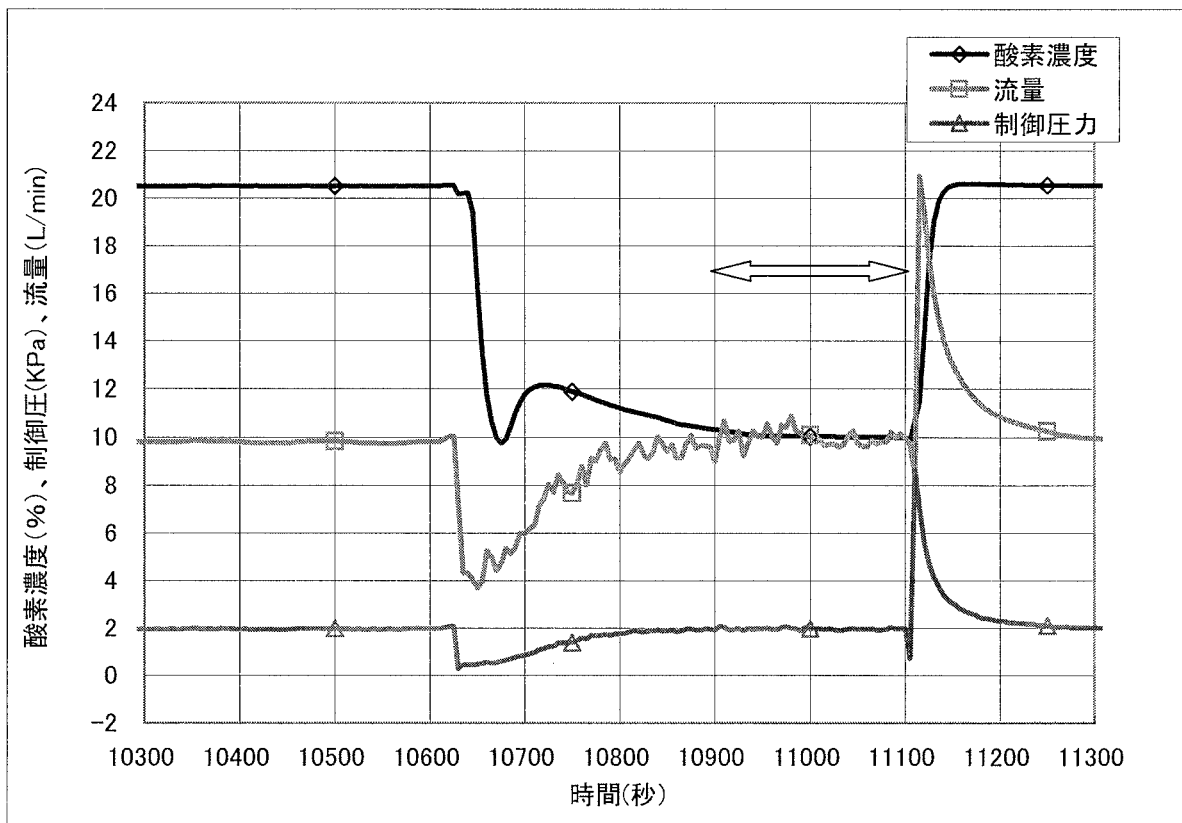


図 4. 4. 1-4 SGA出口プレナム部酸素濃度測定データ(2回目)

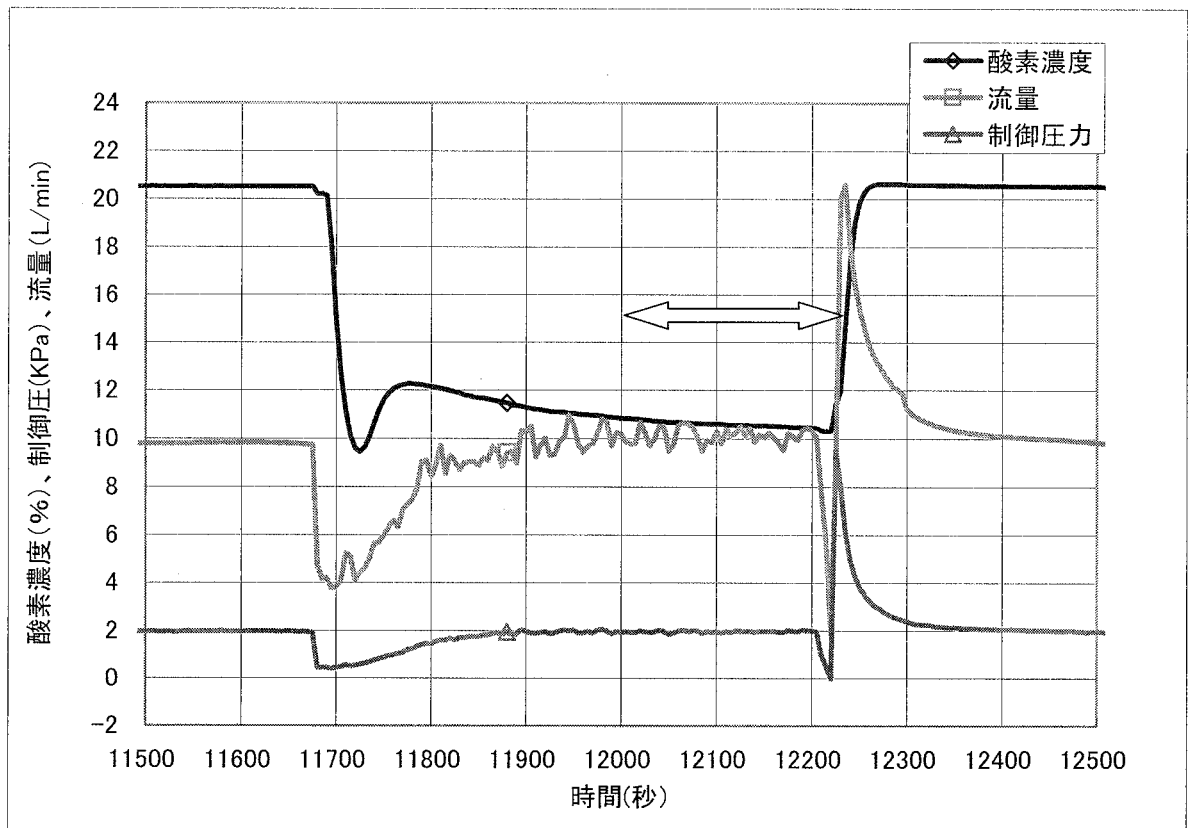


図 4.4.1-5 SGA出口プレナム部酸素濃度測定データ(3回目)

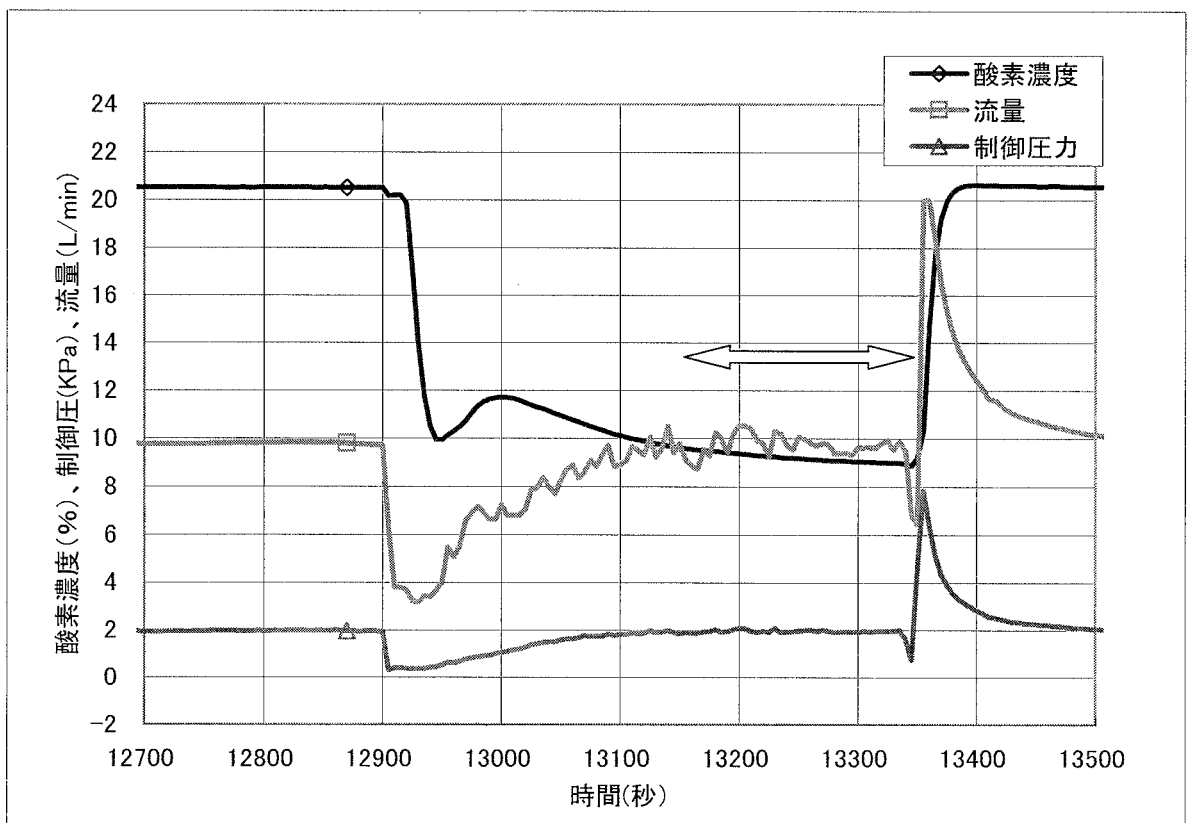


図 4.4.1-6 SGA出口プレナム部酸素濃度測定データ(4回目)

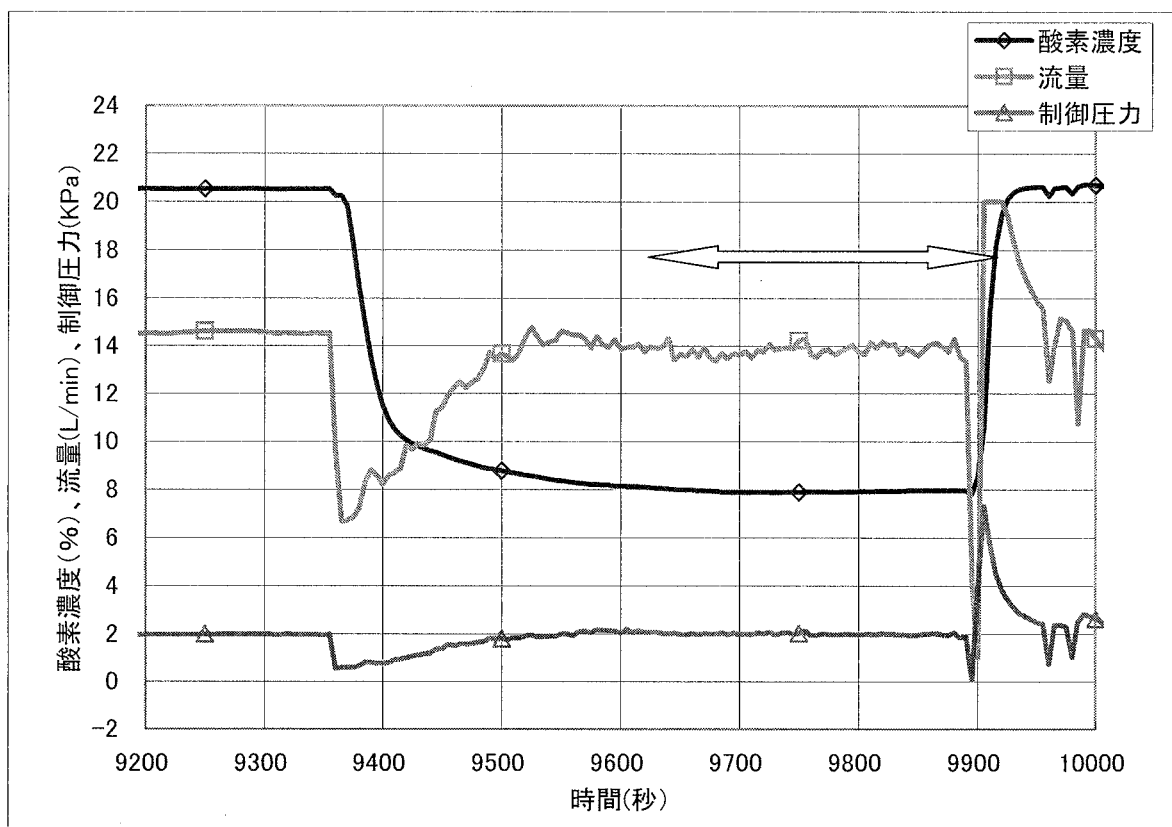


図 4. 4. 1-7 SGB出口プレナム部酸素濃度測定データ(1回目)

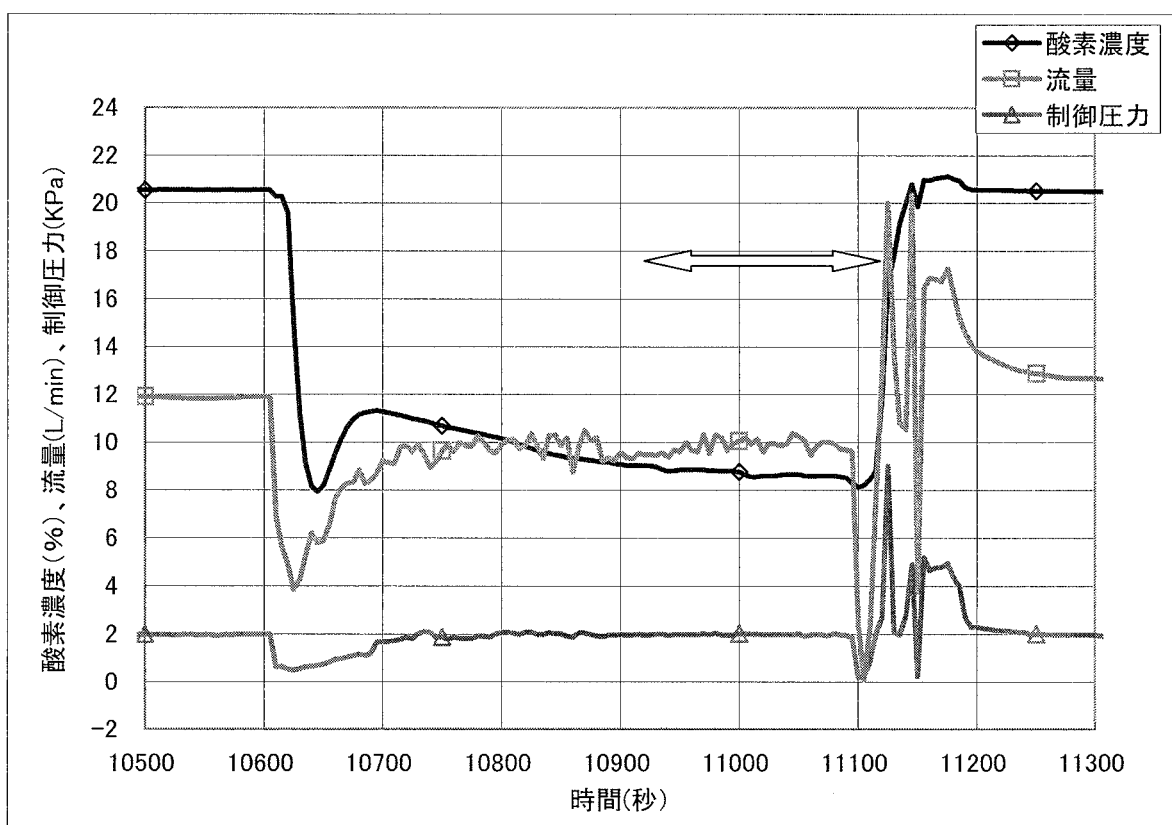


図 4. 4. 1-8 SGB出口プレナム部酸素濃度測定データ(2回目)

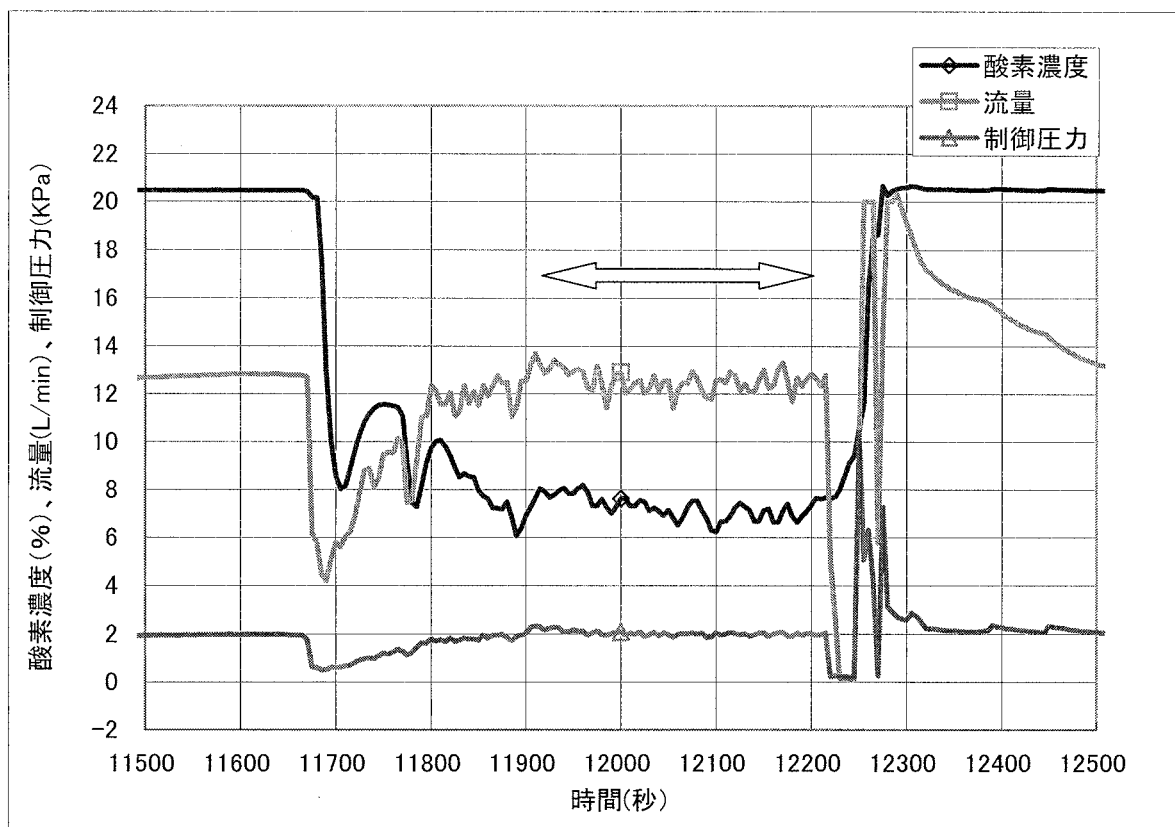


図 4. 4. 1-9 SGB出口プレナム部酸素濃度測定データ(3回目)

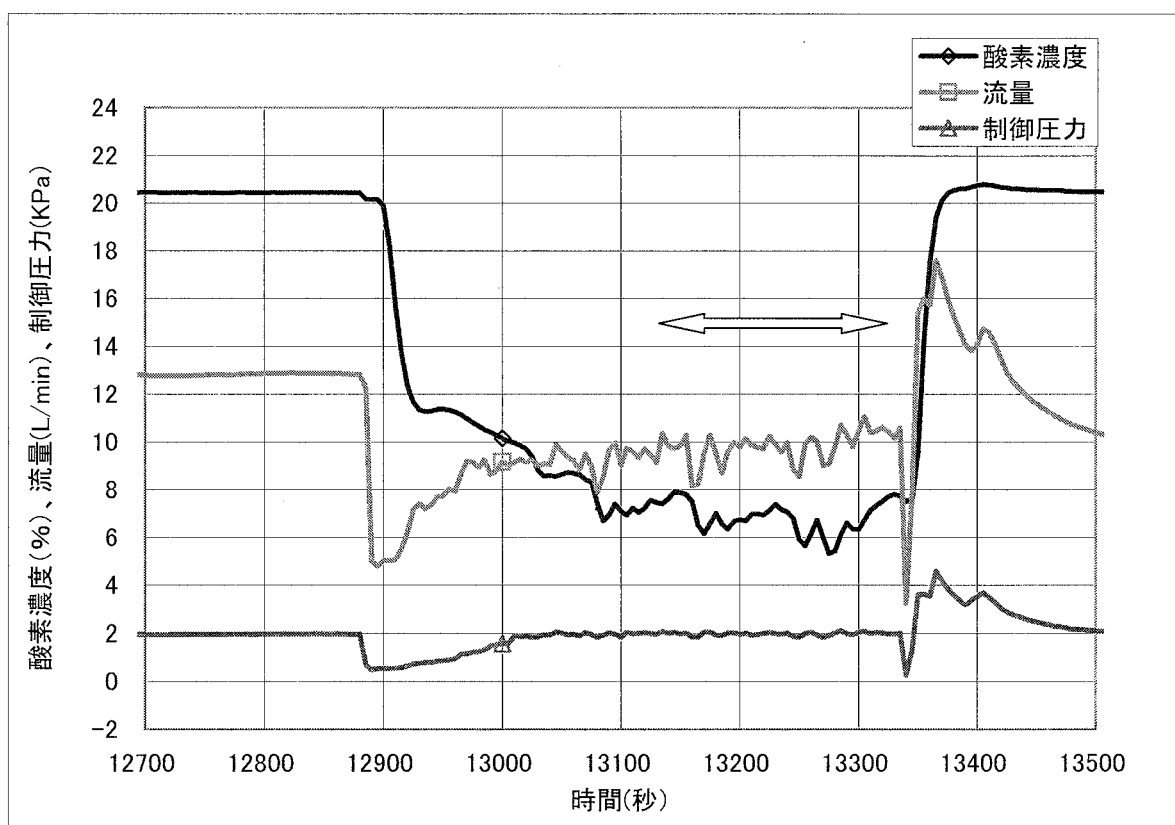


図 4. 4. 1-10 SGB出口プレナム部酸素濃度測定データ(4回目)

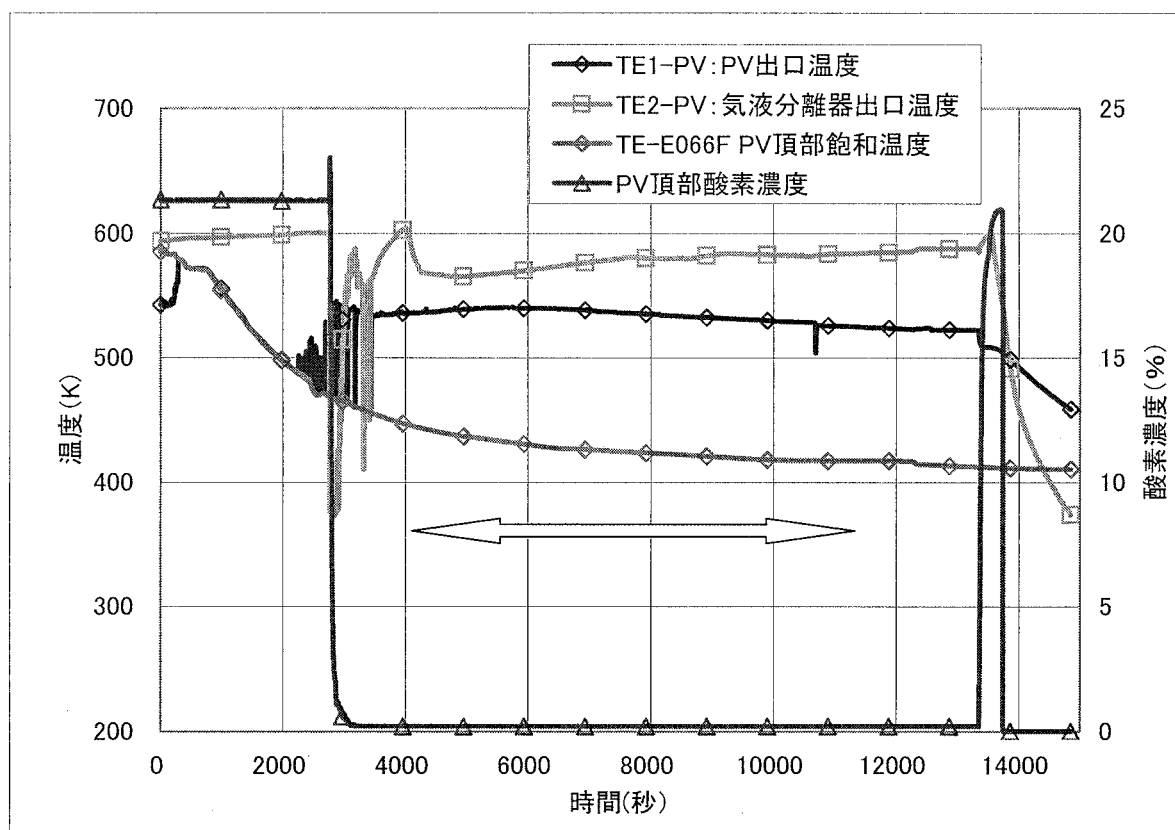


図 4. 4. 1-11 PV頂部 酸素濃度測定装置温度(PV頂部出口～圧力調整弁)

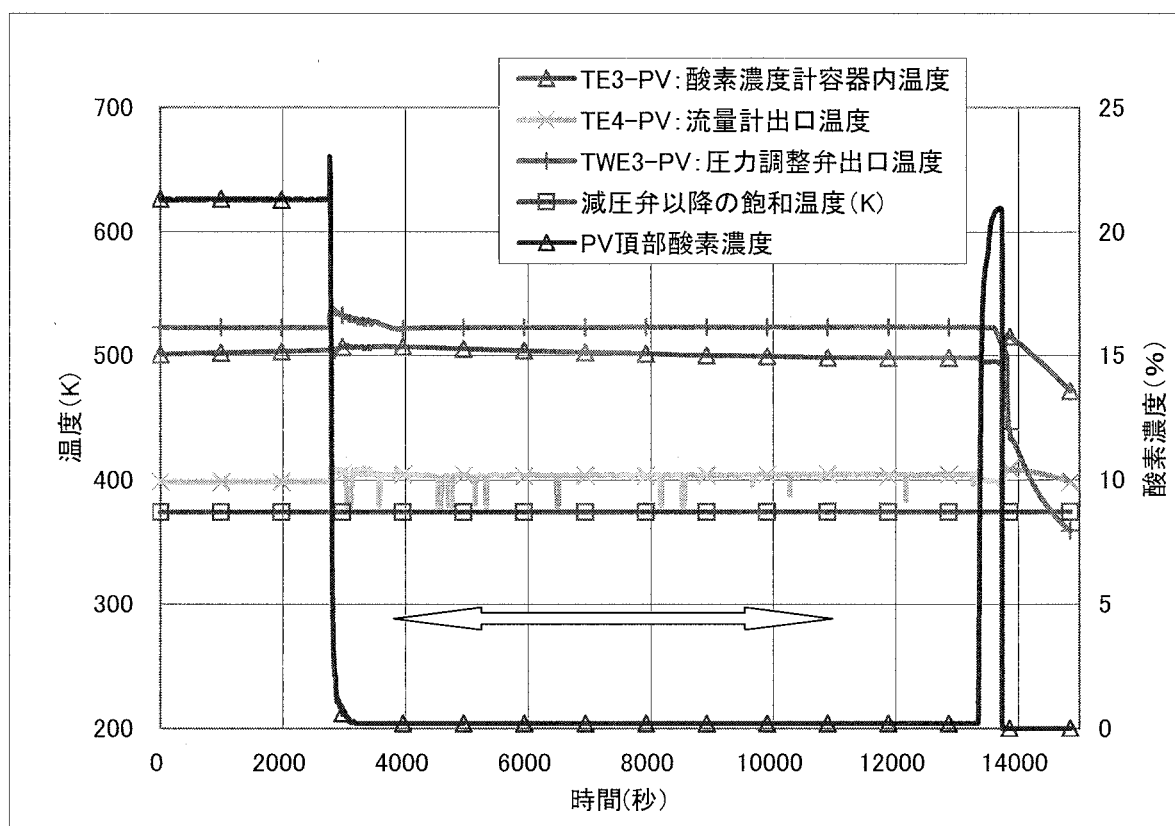


図 4. 4. 1-12 PV頂部 酸素濃度測定装置温度(圧力調整弁～流量計)

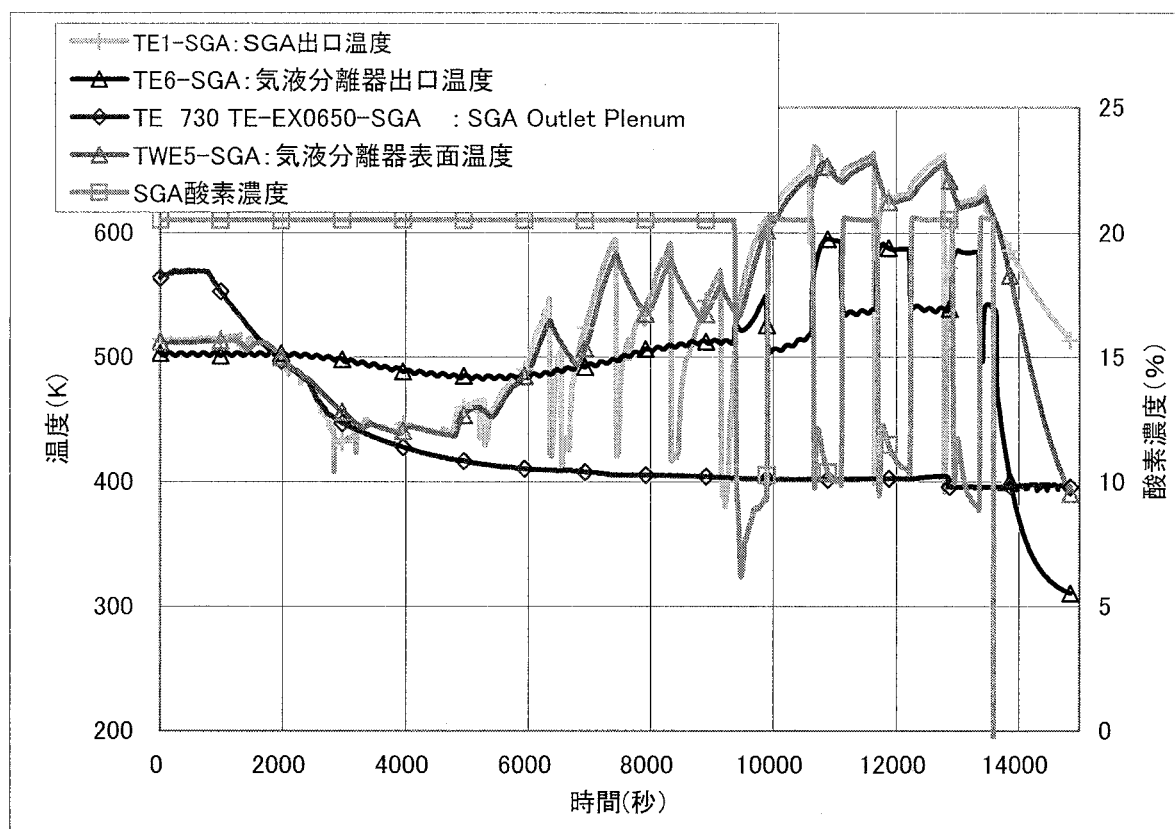


図 4. 4. 1-13 SGA酸素濃度測定装置温度(SGA出口～圧力調整弁)

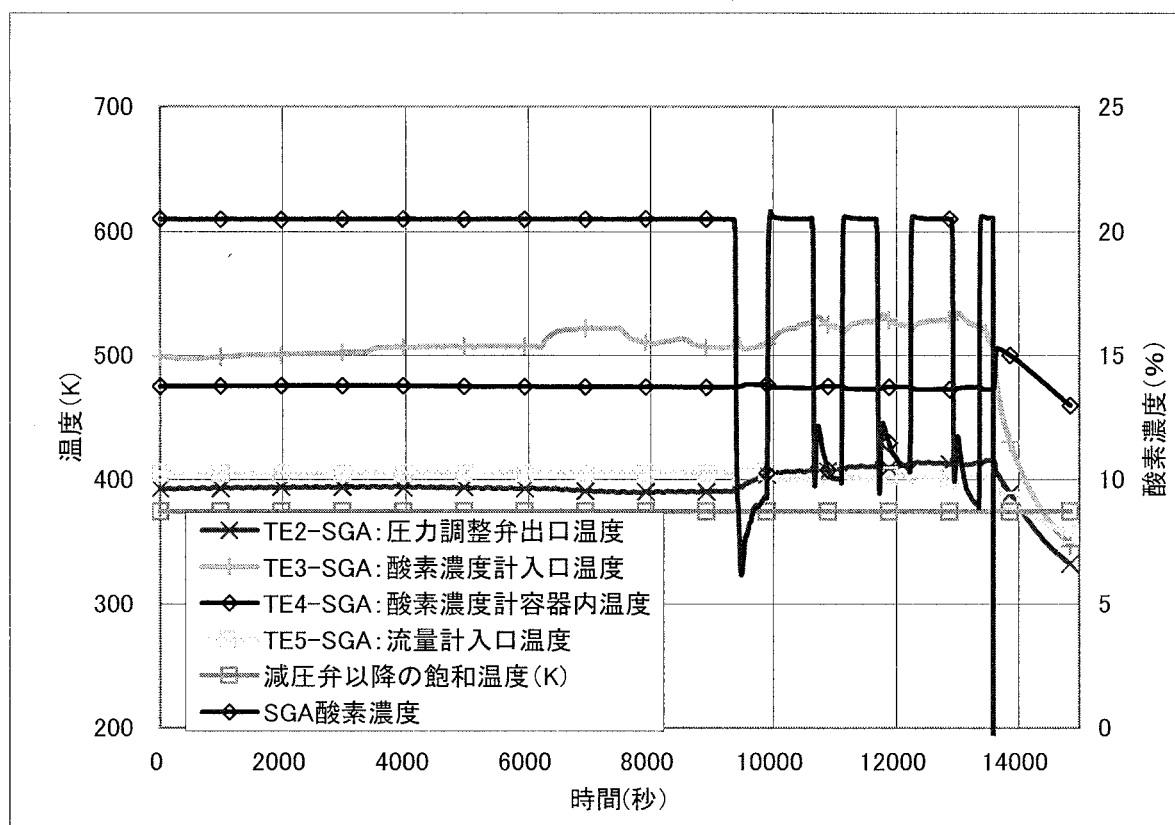


図 4. 4. 1-14 SGA酸素濃度測定装置温度(圧力調整弁～流量計)

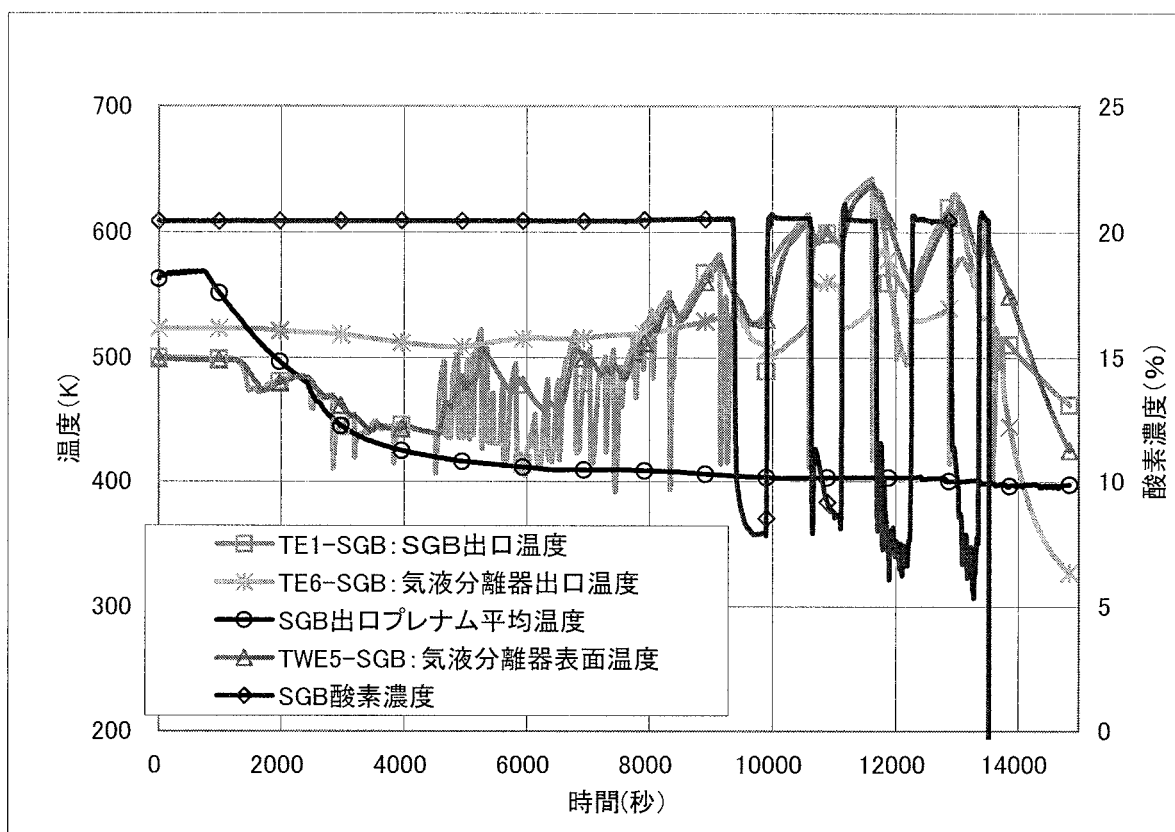


図 4. 4. 1-15 SGB酸素濃度測定装置温度(SGB出口～圧力調整弁)

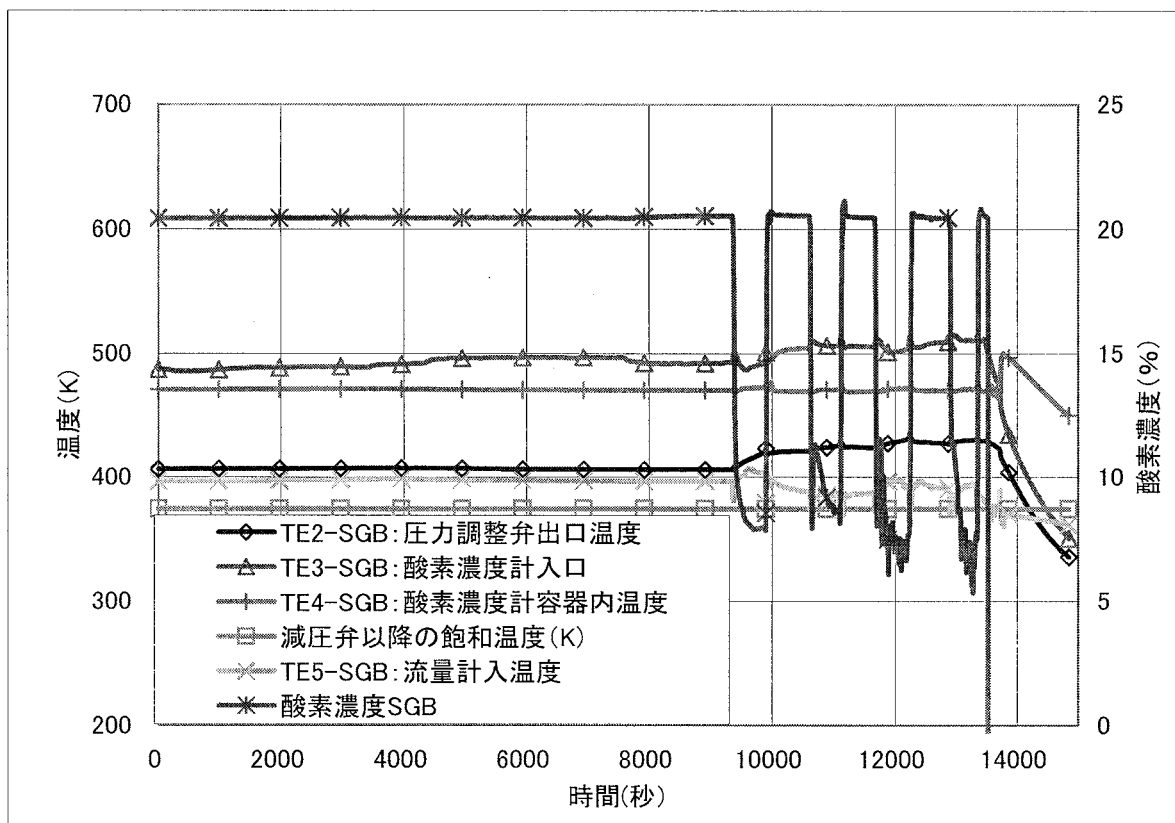


図 4. 4. 1-16 SGB酸素濃度測定装置温度(圧力調整弁～流量計)

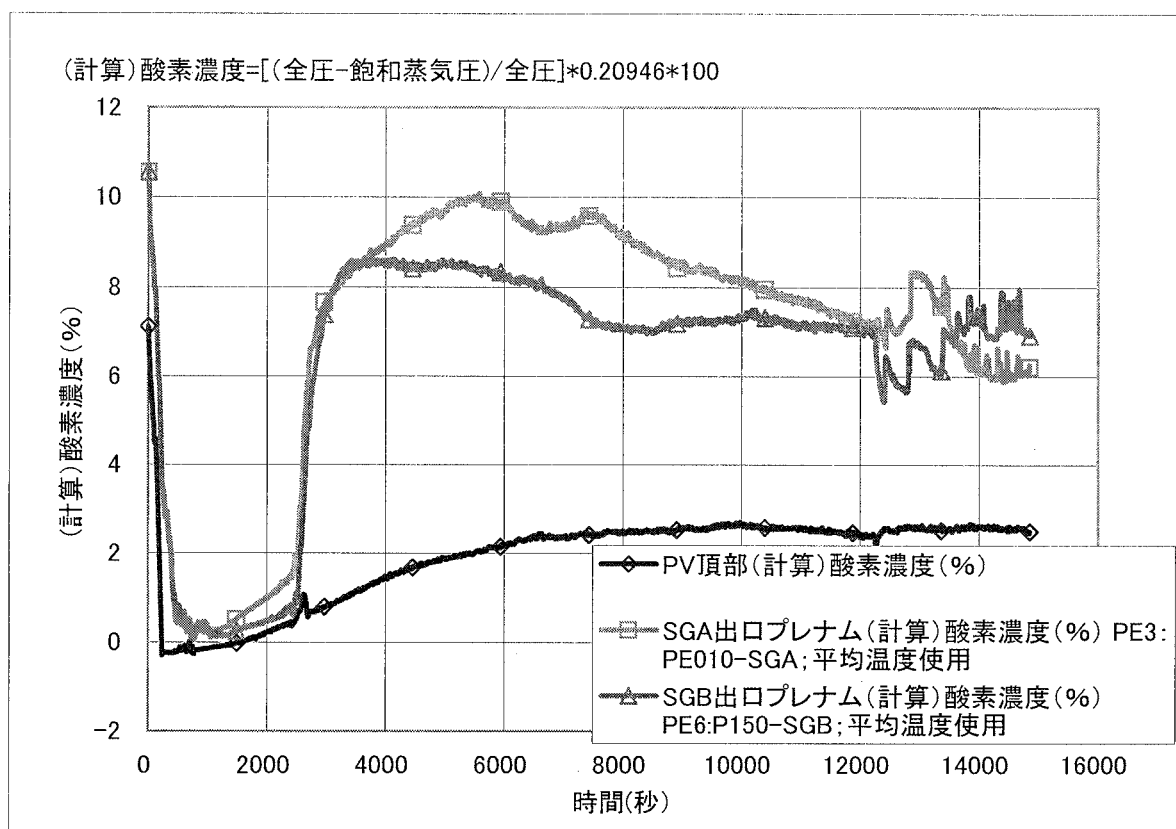


図 4. 4. 2-1 (計算)酸素濃度

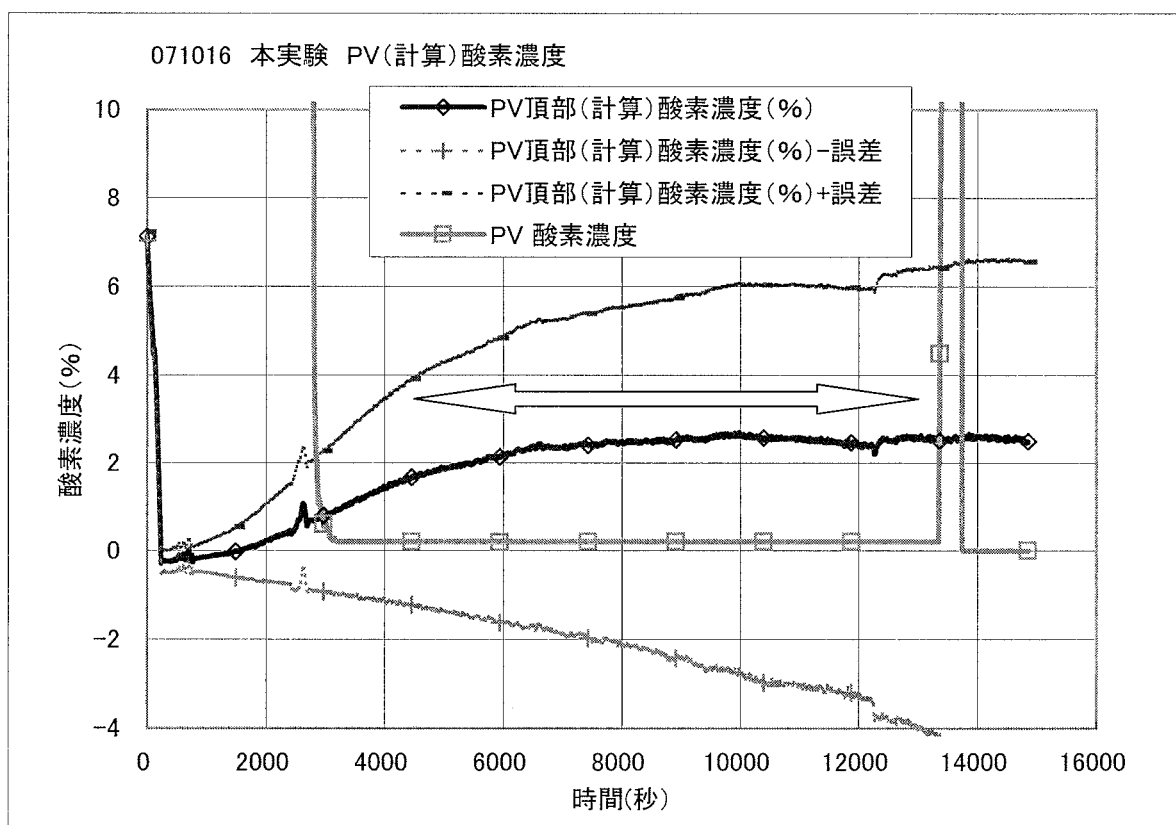


図 4. 4. 2-2 PV頂部の測定酸素濃度と計算濃度との比較

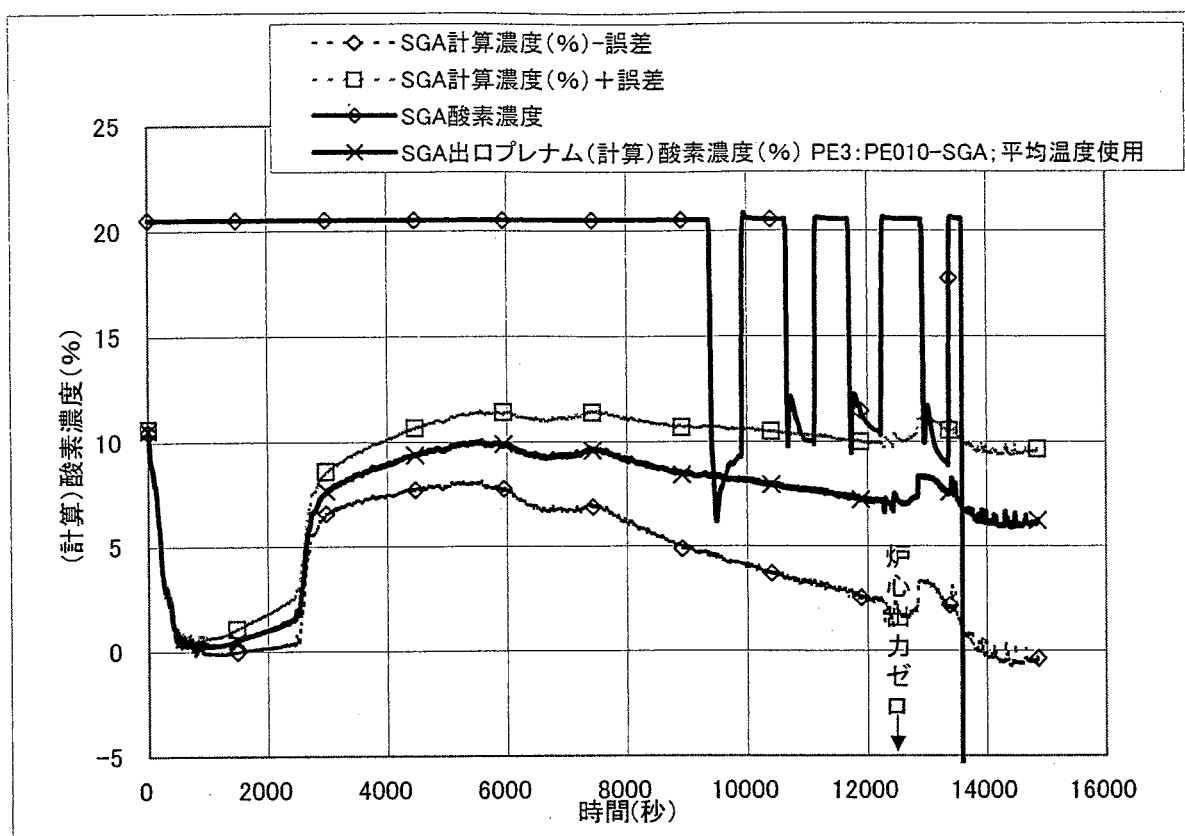


図4. 4. 2-3 SGA 酸素濃度と計算濃度との比較(全体)

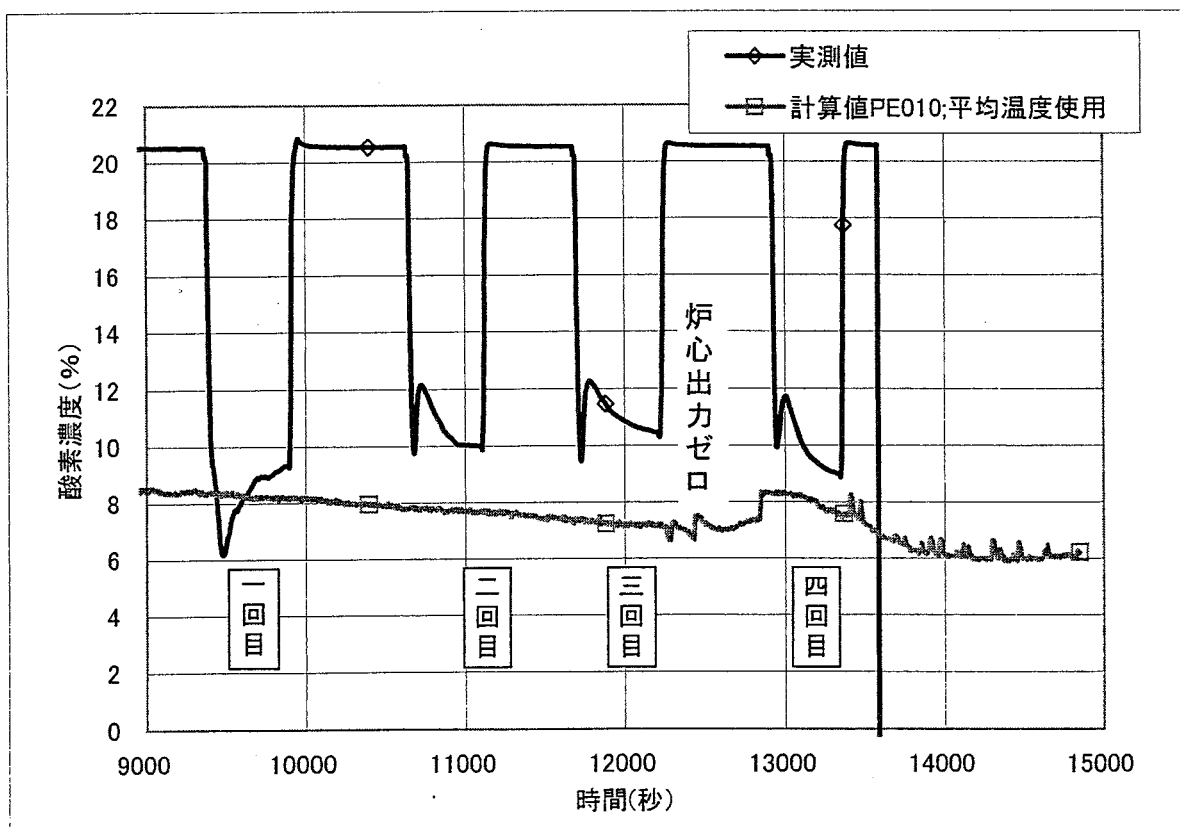


図 4. 4. 2-4 SGA酸素濃度と計算濃度との比較(9000秒以降)

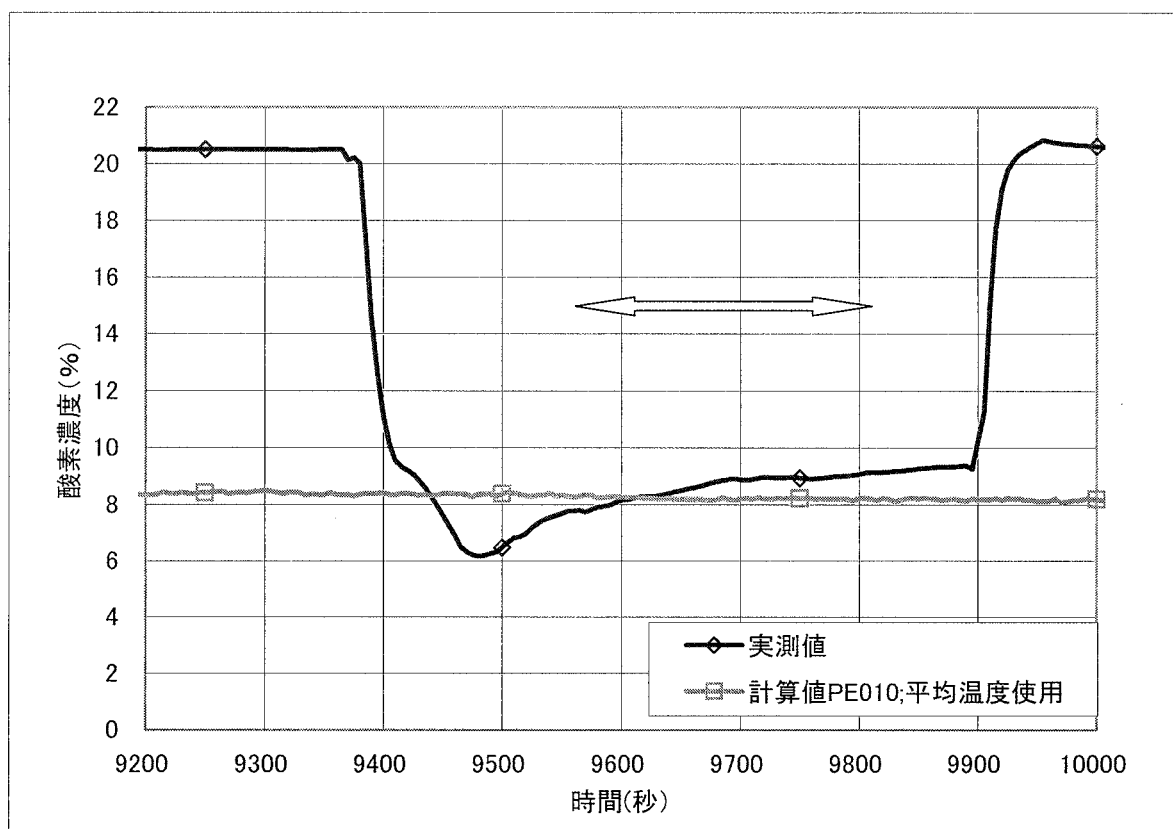


図 4.4.2-5 SGA酸素濃度と計算濃度との比較(一回目)

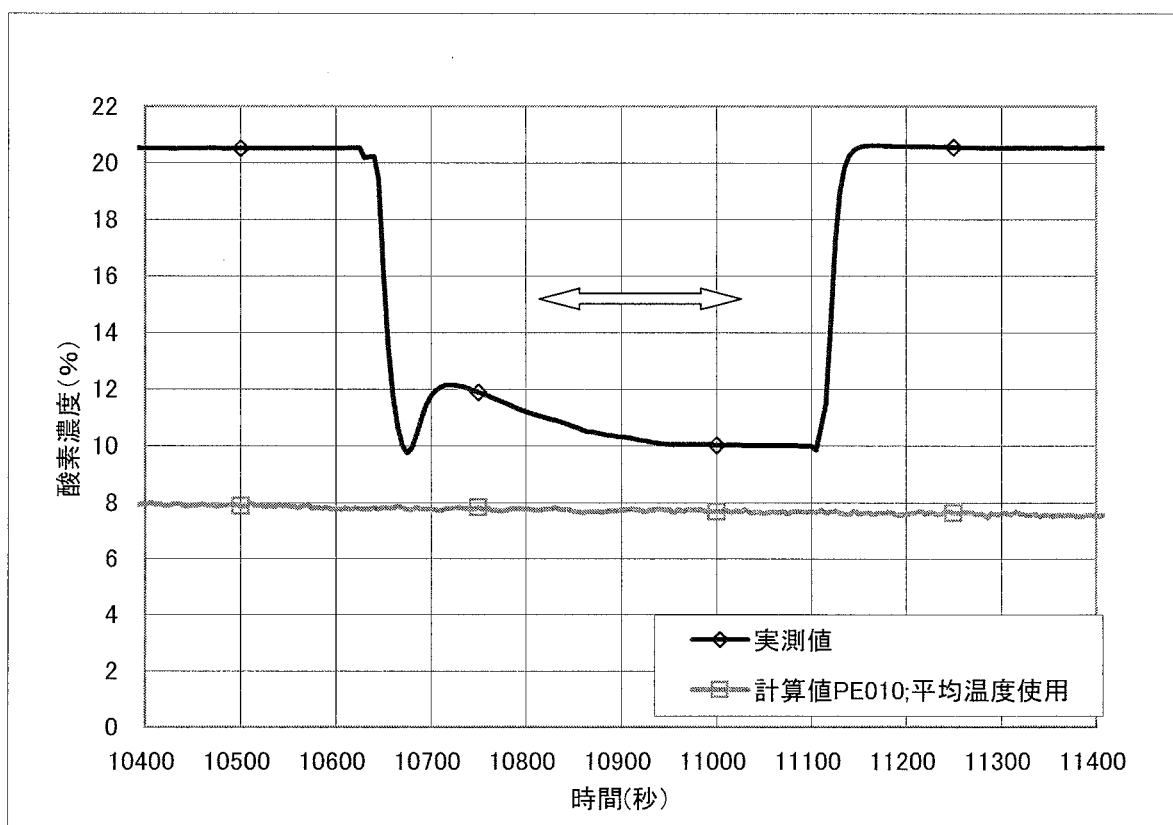


図 4.4.2-6 SGA酸素濃度と計算濃度との比較(二回目)

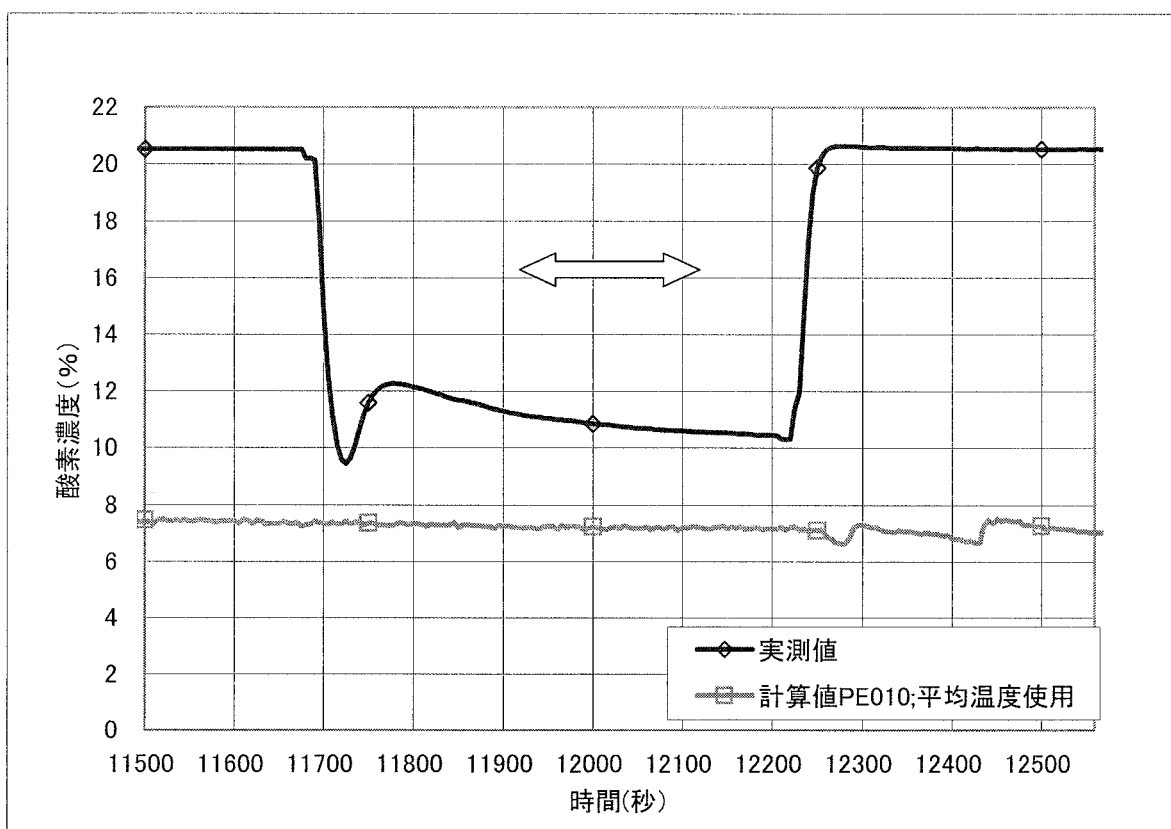


図 4. 4. 2-7 SGA酸素濃度と計算濃度との比較(三回目)

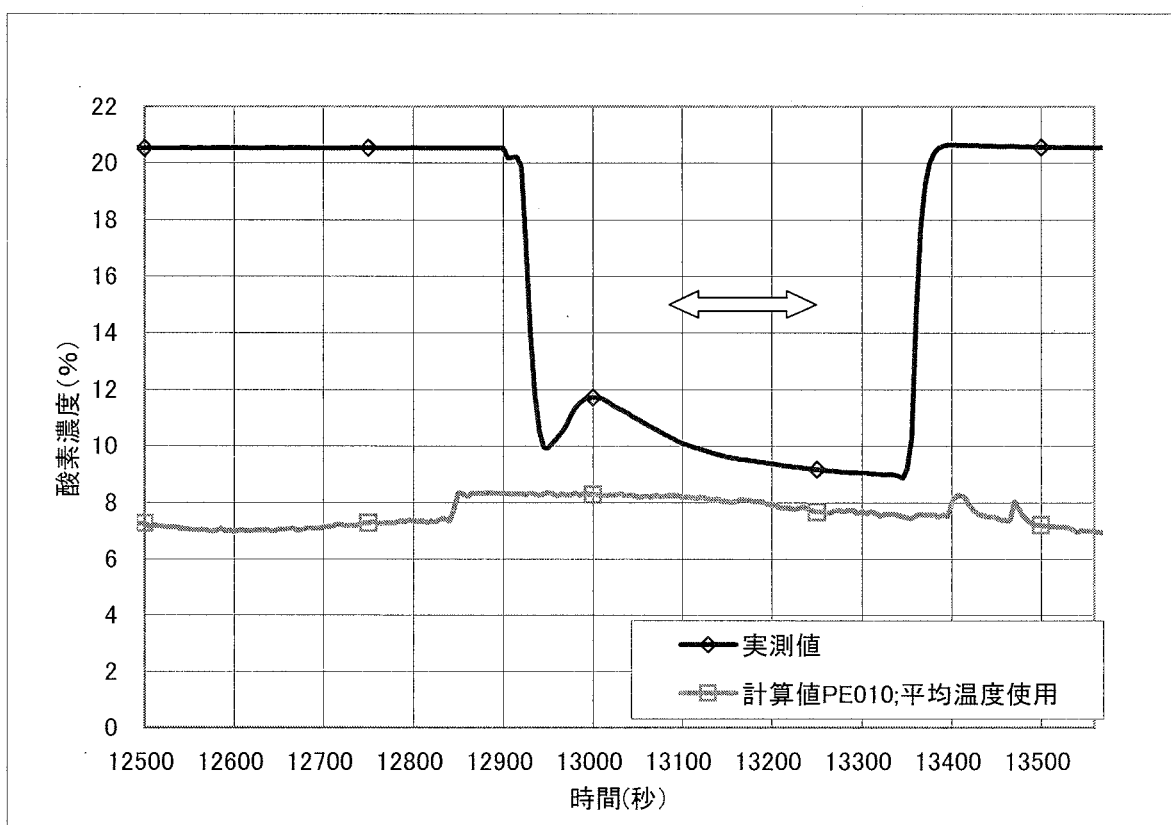


図 4. 4. 2-8 SGA酸素濃度と計算濃度との比較(四回目)

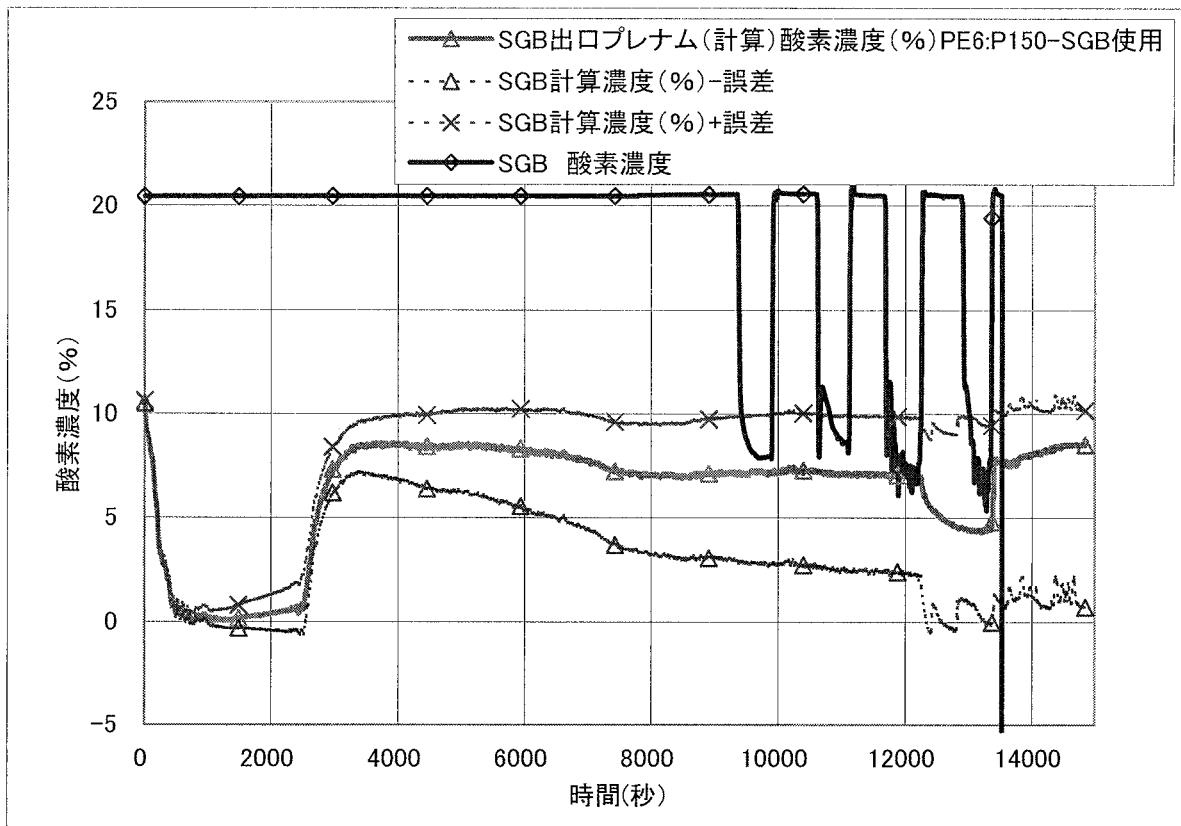


図 4. 4. 2-9 SGB酸素濃度と計算濃度との比較 (全体)

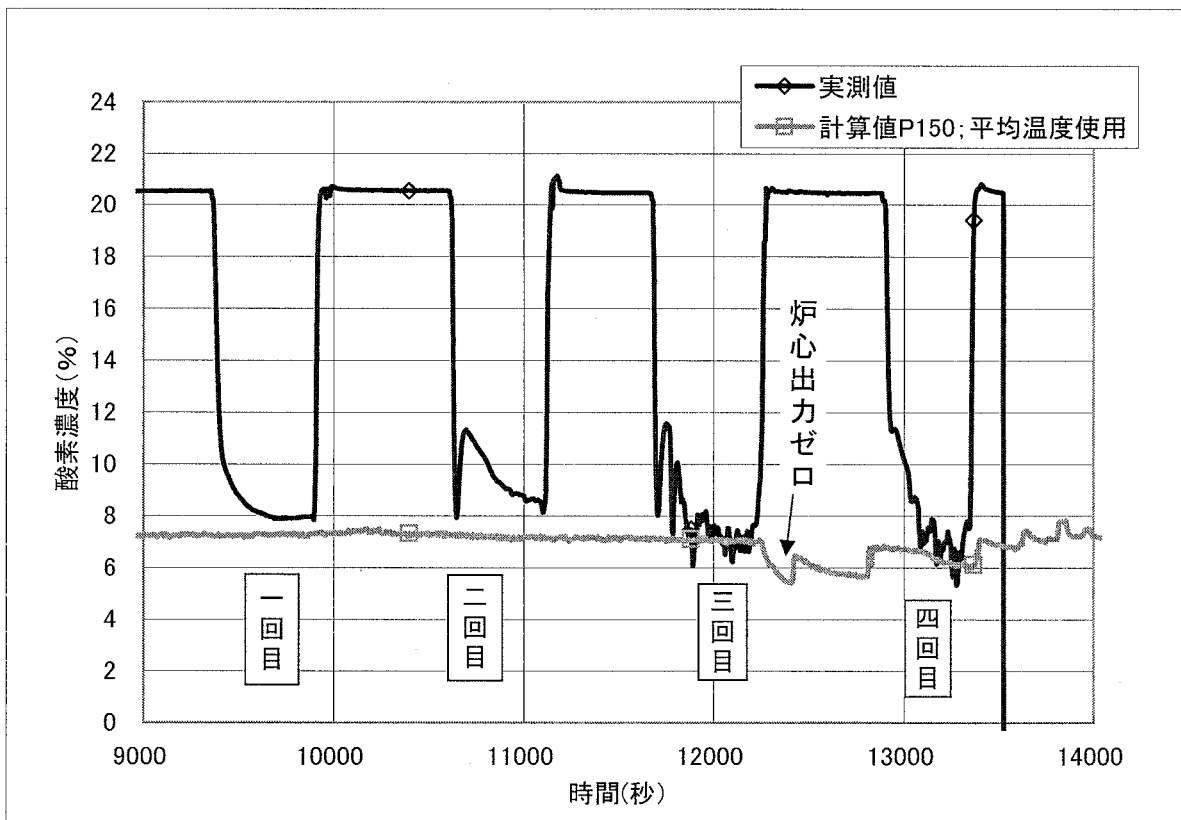


図 4. 4. 2-10 SGB酸素濃度と計算濃度との比較 (9000秒以降)

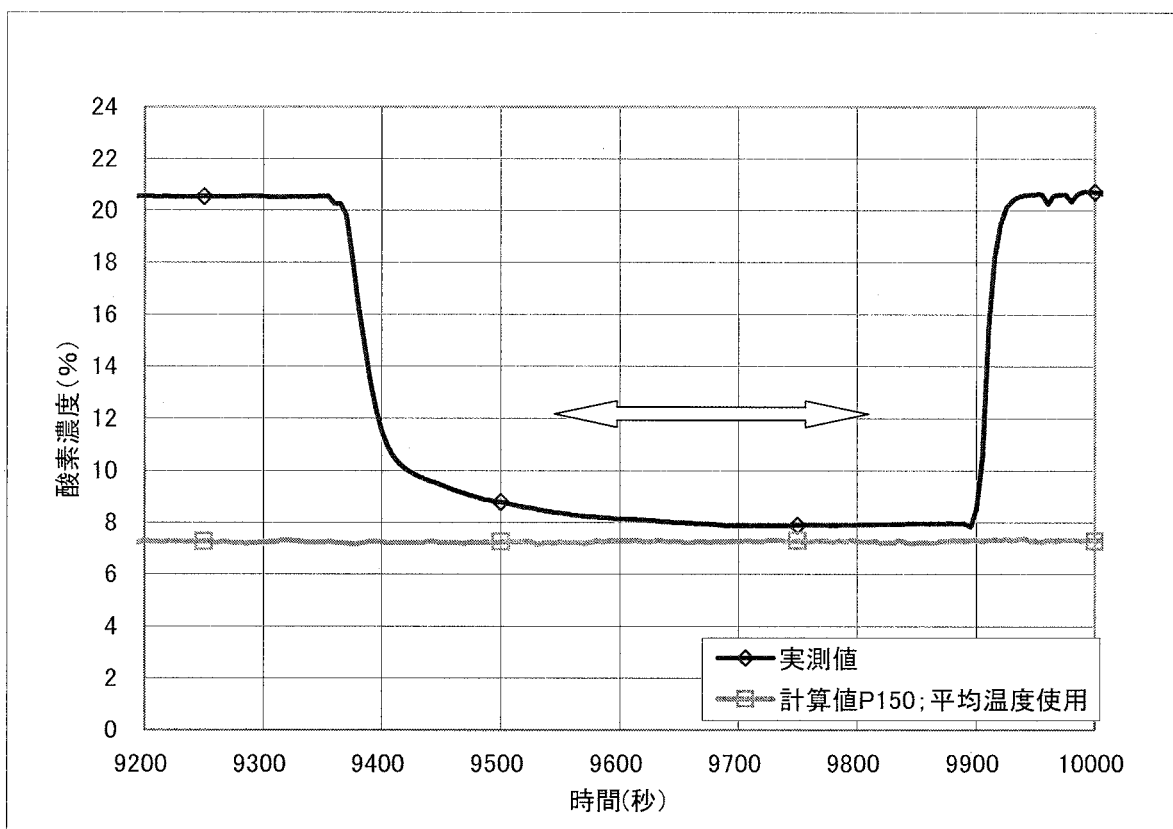


図 4. 4. 2-11 SGB酸素濃度と計算濃度との比較(一回目)

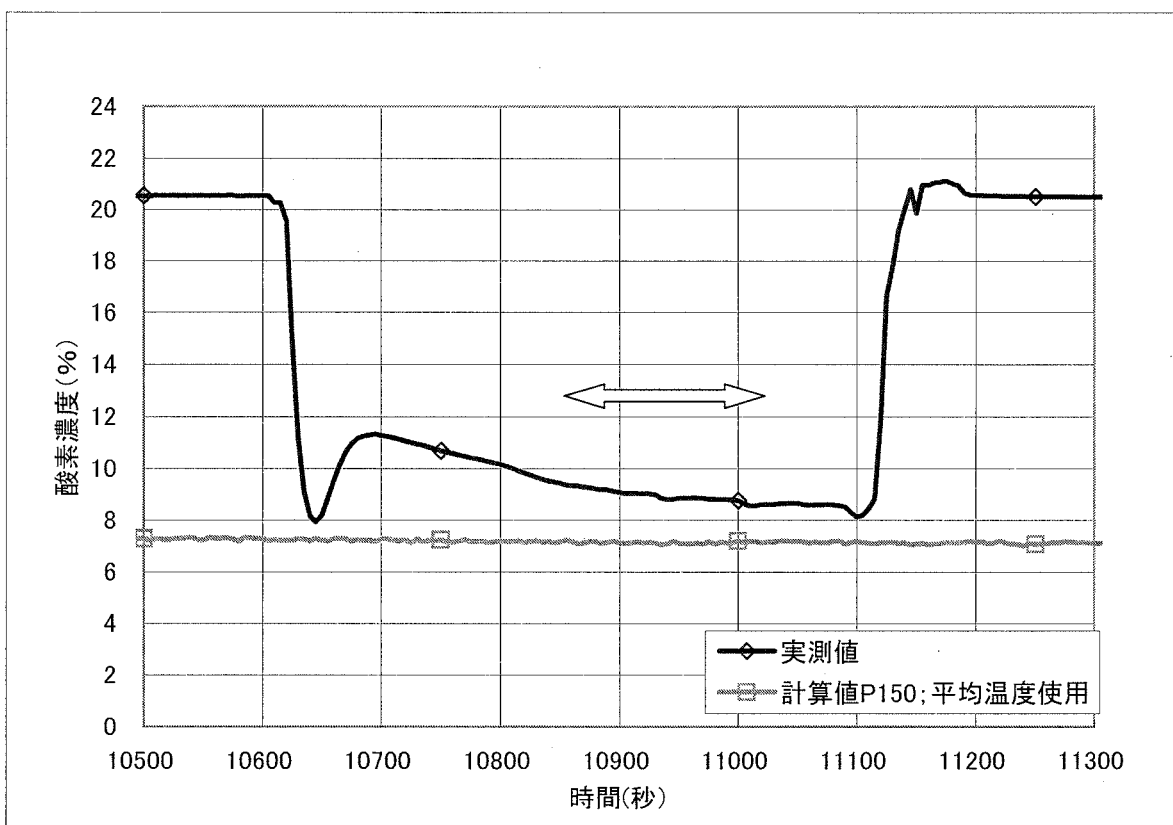


図 4. 4. 2-12 SGB酸素濃度と計算濃度との比較(二回目)

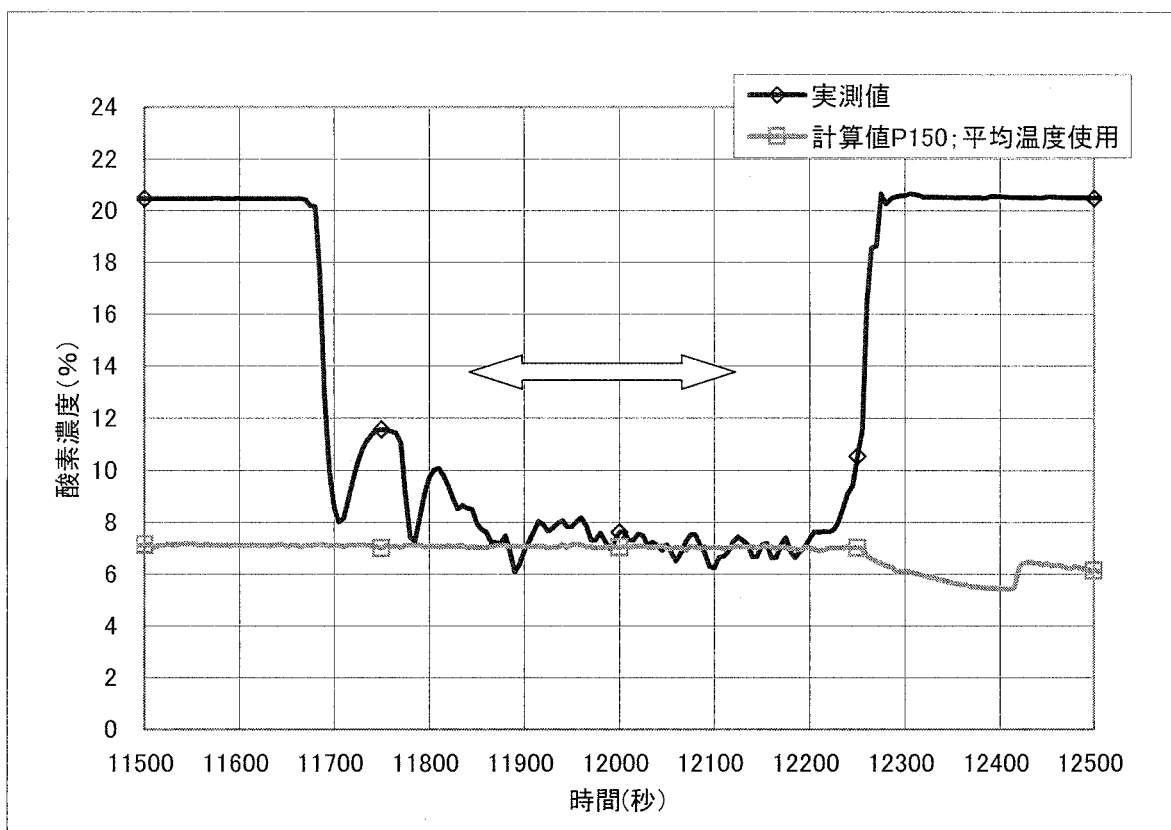


図 4. 4. 2-13 SGB酸素濃度と計算濃度との比較(三回目)

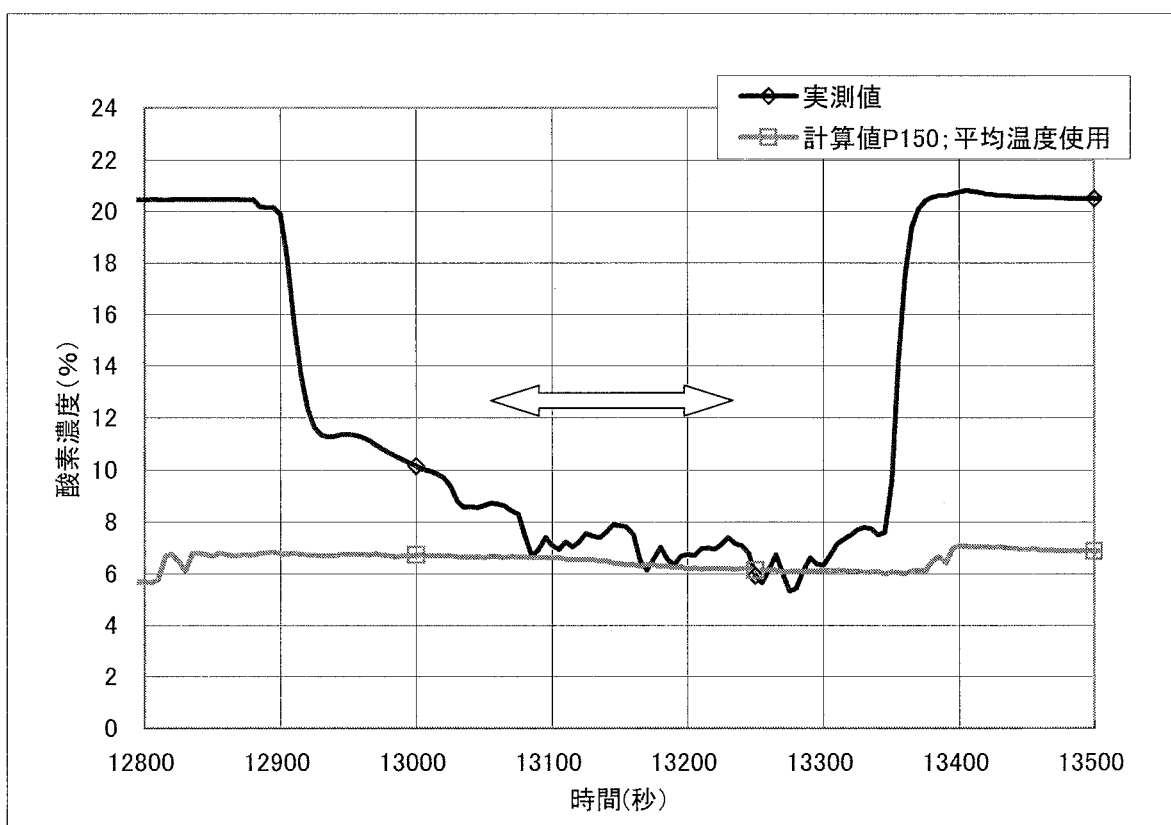


図 4. 4. 2-14 SGB酸素濃度と計算濃度との比較(四回目)

5. おわりに

今回、大型非定常実験装置(LSTF)実験に非凝縮ガス濃度測定装置を適用するにあたり、新たに2基の装置を製作した。新規製作の装置では、気液分離器を小型化して系からジルコニア酸素濃度計までの流路体積を小さくし、レスポンスを高めると共に、微少水蒸気流量の計測に用いる高温用タービンメータを、小型オリフィス式微少流量計に変更して結露による不具合の可能性を排除するなど、種々の改良を加えた。さらに、17年度に開発した装置と共に、標準ガスを用いた酸素濃度測定及び蓄圧注入系(ACH)タンクを用いた蒸気中の酸素濃度測定を行って、性能を確認した。その結果、酸素濃度 5.017%の標準ガスの測定においては 4.93~5.06%であり、計測精度は酸素濃度計単体の精度 $\pm 0.375\%$ 以内であることを確認した。さらに、ACHタンクを用いて蒸気中の酸素濃度測定を行い、計測値は計算値と良く合致することを確認した。

これらの装置をLSTF実験に適用して、小破断LOCA条件下蒸気発生器(SG)二次側減圧過程における非凝縮性ガスによる一次系減圧阻害の解明に必要なデータを得るため、压力容器(PV)頂部及び2基のSG(SGA、SGB)出口プレナム部での水蒸気-ガス混合気中の酸素濃度を測定した。その結果、PV頂部はほぼゼロ、SGA出口プレナム部は8~10%、SGB出口プレナム部は7~8%であり、蓄圧注入系タンクから放出されたガスのほとんど全部がSG伝熱管や出口プレナムに蓄積したことなど、減圧阻害の解明に有益なデータを得た。

謝 辞

本実験装置の製作に御協力頂いた助川電気工業(株)及び性能確認実験などに多くの御協力を戴いた工務技術部小川 政行氏並びに服部 通氏、御代 雅彦氏をはじめとする原子力エンジニアリング(株)の関係各位に謝意を表する。

参考文献

- (1) 竹本昌史,中村秀夫、大和田明彦、大崎秀機、非凝縮ガス濃度測定装置の開発、JAEA-Research 2006-009、日本原子力研究開発機構、(2006)。
- (2) The ROSA-V Group, ROSA-V Large Scale Test Facility (LSTF) System Description for the Third and Fourth Simulated Fuel Assemblies. Report JAERI-Tech 2003-037, Japan Atomic Energy Research Institute, (2003)。

This is a blank page

国際単位系（SI）

表 1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表 2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立方メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	毎メートル	m ⁻¹
密度（質量密度）	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
質量体積（比体積）	立法メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
（物質量の）濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率	（数の）1	1

表 5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 ²⁴	ヨタ	Y	10 ⁻¹	デシ	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ⁻²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ⁻³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ⁻²¹	ゼプト	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト	y

表 3. 固有の名称とその独自の記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン ^(a)	rad		m・m ⁻¹ =1 ^(b)
立体角	ステラジアン ^(a)	sr ^(c)		m ² ・m ⁻² =1 ^(b)
周波数	ヘルツ	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m・kg・s ⁻²
圧力，応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ ・kg・s ⁻²
エネルギー，仕事，熱量	ジュール	J	N・m	m ² ・kg・s ⁻²
工率，放射束	ワット	W	J/s	m ² ・kg・s ⁻³
電荷，電気量	クーロン	C		s・A
電位差（電圧），起電力	ボルト	V	W/A	m ² ・kg・s ⁻³ ・A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	m ⁻² ・kg ⁻¹ ・s ⁴ ・A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² ・kg・s ⁻³ ・A ⁻²
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V	m ⁻² ・kg ⁻¹ ・s ³ ・A ²
磁束	ウェーバ	Wb	V・s	m ² ・kg・s ⁻² ・A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg・s ⁻² ・A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² ・kg・s ⁻² ・A ⁻²
セルシウス温度	セルシウス度 ^(d)	℃		K
光束	ルーメン	lm	cd・sr ^(c)	m ² ・m ⁻² ・cd=cd
照射（放射性核種の）放射能	ベクレル	Bq	lm/m ²	m ² ・m ⁻⁴ ・cd=m ⁻² ・cd
吸収線量，質量エネルギー分与，カーマ線量当量，周辺線量当量，方向性線量当量，個人線量当量，組織線量当	グレイ	Gy	J/kg	m ² ・s ⁻²
	シーベルト	Sv	J/kg	m ² ・s ⁻²

- (a) ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なった性質をもった量を区別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形作るときいくつかの用例は表 4 に示されている。
- (b) 実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号“1”は明示されない。
- (c) 測光学では、ステラジアンの名称と記号srを単位の表し方の中にそのまま維持している。
- (d) この単位は、例としてミリセルシウス度m℃のようにSI接頭語を併って用いても良い。

表 4. 単位の中に固有の名称とその独自の記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘力のモーメント	パスカル秒	Pa・s	m ⁻¹ ・kg・s ⁻¹
表面張力	ニュートンメートル	N・m	m ² ・kg・s ⁻²
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg・s ⁻²
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m・m ⁻¹ ・s ⁻¹ =s ⁻¹
熱流密度，放射照度	ラジアン毎平方秒	rad/s ²	m・m ⁻¹ ・s ⁻² =s ⁻²
熱容量，エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg・s ⁻³
質量熱容量（比熱容量），質量エントロピー（比エネルギー）	ジュール毎平方メートル	J/K	m ² ・kg・s ⁻² ・K ⁻¹
熱伝導率	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg・K)	m ² ・s ⁻² ・K ⁻¹
体積エネルギー	ジュール毎メートル	J/m	m ² ・s ⁻² ・K ⁻¹
電界の強さ	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ ・kg・s ⁻²
体積電荷	ボルト毎メートル	V/m	m・kg・s ⁻³ ・A ⁻¹
電気変位	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ ・s・A
誘電率	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² ・s・A
透磁率	ファラド毎メートル	F/m	m ⁻³ ・kg ⁻¹ ・s ⁴ ・A ²
モルエネルギー	ヘンリー毎メートル	H/m	m・kg・s ⁻² ・A ⁻²
モルエントロピー，モル熱容量	ジュール毎モル	J/mol	m ² ・kg・s ⁻² ・mol ⁻¹
照射線量（X線及びγ線）	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol・K)	m ² ・kg・s ⁻² ・K ⁻¹ ・mol ⁻¹
吸収線量	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ ・s・A
放射強度	グレイ毎秒	Gy/s	m ² ・s ⁻³
放射輝度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ⁴ ・m ⁻² ・kg・s ⁻³ =m ² ・kg・s ⁻³
	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² ・sr)	m ² ・m ⁻² ・kg・s ⁻³ =kg・s ⁻³

表 6. 国際単位系と併用されるが国際単位系に属さない単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	′	1′=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	″	1″=(1/60)′=(π/648000) rad
リットル	l、L	1 l=1 dm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t=10 ³ kg
ネーバ	Np	1 Np=1
ベル	B	1 B=(1/2) ln10 (Np)

表 7. 国際単位系と併用されこれに属さない単位で SI 単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.60217733(49)×10 ⁻¹⁹ J
統一原子質量単位	u	1 u=1.6605402(10)×10 ⁻²⁷ kg
天文単位	ua	1 ua=1.49597870691(30)×10 ¹¹ m

表 8. 国際単位系に属さないが国際単位系と併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
海里		1 海里=1852m
ノット		1 ノット=1 海里毎時=(1852/3600) m/s
アール	a	1 a=1 dam ² =10 ² m ²
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
バール	bar	1 bar=0.1 MPa=100kPa=1000hPa=10 ⁵ Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1 nm=10 ⁻¹⁰ m
バイン	b	1 b=100 fm ² =10 ⁻²⁸ m ²

表 9. 固有の名称を含むCGS組立単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn・s/cm ² =0.1 Pa・s
ストークス	St	1 St =1cm ² /s=10 ⁻⁴ m ² /s
ガウス	G	1 G ≡10 ⁻⁴ T
エルステッド	Oe	1 Oe ≡(1000/4π) A/m
マクスウェル	Mx	1 Mx ≡10 ⁻⁸ Wb
スチルブ	sb	1 sb =1cd/cm ² =10 ⁴ cd/m ²
ホト	ph	1 ph=10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal =1cm/s ² =10 ⁻² m/s ²

表10. 国際単位に属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R = 2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
X線単位		1X unit=1.002×10 ⁻⁴ nm
ガッ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
ジャンスキー	Jy	1 Jy=10 ⁻²⁶ W・m ⁻² ・Hz ⁻¹
フェルミ		1 fermi=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1 metric carat = 200 mg = 2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリ	cal	
マイクロン	μ	1 μ =1μm=10 ⁻⁶ m

