

J A E R I - M  
93-005

配管破断模擬試験  
(空気浸入実験結果)

1993年2月

武田 哲明・武仲 五月・菱田 誠  
江森 恒一・安掛 岳

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の間合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこみください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費領布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division, Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokaimura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1993

編集兼発行 日本原子力研究所  
印刷 ニッセイエプロ株式会社

## 配管破断模擬試験

(空気浸入実験結果)

日本原子力研究所東海研究所高温工学部

武田 哲明・武仲 五月・菱田 誠

江森 恒一・安掛 岳

(1993年1月5日受理)

高温ガス炉 (HTGR) の設計基準事故の1つに1次冷却系主配管破断事故がある。HTGR の1次冷却系配管破断時には、炉内のヘリウムが格納容器内に噴出し、炉内と格納容器内の圧力が均圧した後、破断口から空気が浸入することが予想される。この際、炉内に浸入した空気中の酸素により、反射体や燃料体等の黒鉛構造物が酸化し、炉内には化学反応を伴う複雑な多成分気体の流れが発生するものと考えられる。そこで、このような配管破断事故時の空気浸入挙動、炉内に生じる多成分気体の自然対流特性及び黒鉛構造物の酸化量等について調べるために配管破断模擬試験装置を製作した。本試験装置は、高温ガス炉を模擬した試験体とガスループから成り、試験体は4本の黒鉛流路を用いた模擬炉心部、セラミック製の模擬高温プレナム、模擬出入口管等から構成される。模擬炉心部の黒鉛流路は最高1200℃まで加熱することができる。

配管破断模擬試験装置を用いて行った空気浸入実験の結果から以下の知見を得た。

- (1) 模擬配管破断後の初期段階においては、空気が分子拡散と混合気体の非常に微弱な自然対流により試験体内に運ばれ、混合気体密度が大きくなると突然空気の自然循環流が発生した。また、酸化反応により発生した一酸化炭素及び二酸化炭素も分子拡散と混合気体の非常に微弱な自然対流によって試験装置内を輸送される。
- (2) 模擬炉心部が900℃を超える場合は、黒鉛と酸素の反応による一酸化炭素の発生量が多くなるが、発生した一酸化炭素と浸入してきた酸素とが気相で反応し、二酸化炭素が発生する現象が顕著に現れた。
- (3) 本試験装置においては、初期段階と呼んでいる模擬配管破断から空気の自然循環流が発生するまでの状態は数日間以上続いた。

Experimental Study on a Simulated Primary-pipe  
Rupture Accident of HTGR  
(Experimental Results of Air Ingress Behavior)

Tetsuaki TAKEDA, Satsuki TAKENAKA, Makoto HISHIDA  
Koichi EMORI and Takashi AGAKE

Department of High Temperature Engineering  
Tokai Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received January 5, 1993)

A primary-pipe rupture accident is one of the most critical design-base accidents of a high-temperature gas-cooled reactor (HTGR). When a primary coolant pipe of the HTGR ruptures, helium gas in the reactor blows out into the container and the primary cooling system reduces the pressure. After the pressures are balanced between the reactor and the container, air is expected to enter the reactor core from the breach. It seems to be probable that the graphite structures are oxidized by air and the complicated natural convection of multi-component gas mixtures with chemical reactions takes place in the reactor. Hence, it is necessary to investigate the air ingress process, the complicated natural convection of multi-component gas mixtures and the amount of the gases generated by the oxidation reactions. In order to investigate these phenomenon, therefore, we constructed an experimental apparatus simulating the reactor and the primary cooling system. A test model consists of a reactor core simulator, a top cover, a water cooled vessel, a coaxial pipe and so on. The reactor core simulator has four graphite pipes and a ceramic high-temperature plenum. The graphite pipes are heated by electric heaters up to 1200°C.

The major results obtained in the present study are summarized in the followings:

(1) During the early stage of the simulated pipe rupture in the present apparatus, air entered the test model by molecular diffusion and very weak natural convection of the gas mixture. After the density of the gas mixture in the test model gradually increased, the natural circulation of air was induced in the whole test model abruptly. The gases, carbon monoxide and carbon dioxide, generated by the oxidation reactions were transported by the molecular diffusion and by the very weak natural convection of the gas mixture during the early stage of this experiment.

(2) In case of the high temperature condition (more than 900°C) in the reactor core simulator, the amount of carbon monoxide produced increased with increasing of the graphite temperature. The carbon monoxide reacted with oxygen (carbon monoxide combustion) in the high temperature regions remarkably and produced carbon dioxide.

(3) The duration of the early stage, which is the period from the simulated pipe rupture to onset on the natural circulation of air, was about several days in this experimental apparatus.

Keywords: HTGR, Natural Convection, Molecular Diffusion, Graphite Oxidation

## 目 次

1. 序	1
2. 配管破断模擬試験装置の概要	2
2.1 試験体	2
2.2 ガスループ	3
2.3 電気計装系及び温度・濃度測定系	4
3. 実験方法	5
3.1 実験方法	5
3.2 ガス分析計の校正と各成分気体濃度の補正方法	6
4. 空気浸入実験結果	7
4.1 密度と各成分気体の濃度変化	7
4.2 試験装置各部の温度変化	10
5. まとめ	11
参考文献	12

## Contents

	Page
1. Introduction .....	1
2. Overview of an Experimental Apparatus Simulating the HTGR .....	2
2.1 Test Model .....	2
2.2 Gas Loop .....	3
2.3 Electrical Instrument and Measuring Systems for Temperature and Concentration .....	4
3. Experimental Procedure .....	5
3.1 Experimental Procedure .....	5
3.2 Calibration of O <sub>2</sub> , CO and CO <sub>2</sub> Detectors and Correcting Methods of CO and CO <sub>2</sub> Concentration .....	6
4. Experimental Results of Air Ingress Behavior .....	7
4.1 Gas Mixture Density and Each Component Gas Concentration .....	7
4.2 Temperature at Various Parts in the Test Model .....	10
5. Conclusion .....	11
References .....	12

## 1. 序

高温ガス炉の1次冷却系主配管が破断する事態が生じた場合には、炉内のヘリウムが格納容器内に噴出し、炉内と格納容器内の圧力が均圧する。このとき炉内にはヘリウムが存在し、破断口の下部には密度の大きい空気（実際には空気とヘリウムの混合気体）が存在するため、安定な密度成層を形成し、破断後すぐには炉内のヘリウムと格納容器内の空気とが置換されることはないと思われ。しかしながら空気は分子拡散によっても破断口から浸入するため、炉内に浸入した空気中の酸素により、反射体や燃料体等の黒鉛構造物が酸化し、炉内には化学反応を伴う複雑な多成分気体の流れが発生するものと考えられる。我々はこの状態を配管破断後の初期段階と呼んでいる。その後、時間の経過とともに混合気体の密度が徐々に大きくなり、突然空気（正確には空気とヘリウムの混合気体）の自然循環流が発生し、後期段階と呼ぶ状態に移行する。

これまで、このような1次冷却系主配管破断事故後の比較的初期段階に生じる自然対流の基本的な特性を調べるため、高温流路と低温流路で構成される逆U字管流路、及び高温ガス炉を簡単に模擬した実験装置を用いて、ヘリウムと窒素または空気からなる2成分気体の拡散と自然対流に関する実験と解析を行った[1]-[4]。その結果によれば、模擬配管破断後すぐには窒素または空気の自然循環流は発生せず、逆U字管の場合は約3時間後、配管破断予備実験装置の場合は約20～30時間後に自然循環流が発生した。また、模擬配管破断後の比較的初期段階においては、窒素あるいは空気の浸入過程は、拡散と非常に微弱な自然対流により運ばれることが分かった。さらに、高温ガス炉の炉心部を7本の黒鉛流路で模擬した逆U字型の実験装置及び逆U字管流路を用いて、実際に酸化反応がある場合の実験を行った[5]。その結果、空気の浸入過程については定性的には酸化反応がない場合とほぼ同様な挙動を示すこと、黒鉛流路部の温度が450℃以下の比較的低温の領域では空気の場合も窒素を用いた場合も自然循環流発生時刻はほぼ同じであるが、500℃以上（特に500℃から700℃の間）になると空気を用いた実験の方が早い段階で自然循環流が発生すること、600℃以上になると浸入する空気中の酸素はほとんど全量が消費され、700℃までは主に二酸化炭素が発生すること等が分かった。しかしながら、黒鉛管を含む模擬炉心部を金属材料（インコネル）を用いて製作したため、850℃以上の実験はできなかった。

以上のことから本試験装置についても模擬配管破断後の比較的初期段階においては分子拡散と非常に微弱な混合気体の自然対流により空気が装置内に浸入し、各部の混合気体密度が大きくなって、空気の自然循環流が突然発生することが予想される。また、本試験装置を用いた実験ではさらに長時間に渡る初期段階が存在すると考えられ、初期段階においてどのように黒鉛が酸化されるのか、あるいは後期段階における黒鉛の酸化量を調べるためにも、この初期段階の持続時間や空気の浸入挙動を知る必要がある。そこで、これまで行った基礎的な実験及び解析結果を考慮して、1次冷却系主配管破断及びスタンドパイプ破断事故時の空気浸入挙動及び多成分気体の流動並びに黒鉛の酸化量等を調べる実証試験装置（配管破断模擬試験装置）を製作した。本試験装置では、模擬炉心部の黒鉛部材を最高1200℃まで加熱して配管破断時の模擬試験を行うことが可能である。装置は模擬炉心試験体、出入口管、水冷压力容器から成る試験体、ガス循環系、ガス供給系、真空系、ガス圧力調節系から成るガスループ、冷却水系、ガスサンプリング系等から



構成される。またヒータ制御と各部温度、圧力、濃度を自動計測する計測制御系が設けられている。

配管破断模擬試験では、破断後の初期段階に発生する分子拡散と混合気体の微弱な自然対流や後期段階に発生する空気自然循環流及び黒鉛と酸素との酸化反応により発生する一酸化炭素や二酸化炭素の挙動並びにその発生量について調べることが目的である。この試験はさらに以下の2つの試験に分けることができる。1つは配管破断後の初期段階における各成分気体の分子拡散と混合気体の自然対流に関する空気浸入特性試験（空気浸入実験）であり、もう1つは配管破断後の後期段階（空気自然循環流発生後）における酸化反応を伴う炉内の熱流動特性試験（黒鉛酸化実験）である。前述のとおり、今回の空気浸入実験が最も時間を必要とし、またどのように自然循環流が発生して黒鉛が酸化されるかという点から考えると、重要な実験であることが分かる。そこで、まず配管破断事故時の比較的初期段階における空気浸入挙動並びに黒鉛酸化反応により発生する気体の挙動を調べた。以下ではこの空気浸入実験の結果について述べる。

## 2. 配管破断模擬試験装置の概要

配管破断模擬試験装置の主要仕様をTable 1, 全体写真をPhoto 1, フローシートをFig. 1に示す。試験装置は試験体とガスループに分けられる。試験体は模擬炉心試験体、中温・低温出口管、模擬入口管、模擬スタンドパイプ及び水冷圧力容器から構成され、ガスループはガス循環系、ガス供給系、真空系、ガス圧力調節系から構成されている。また、試験体とガスループを冷却する冷却水系、試験体各部の成分気体濃度を測定するガスサンプリング系及びヒータ制御と各部温度、圧力、濃度を自動計測する計測制御系が設けられている。

### 2.1 試験体

Fig. 2 に試験体の概略図を示す。試験体は模擬炉心試験体、中温・低温出口管、模擬入口管、模擬スタンドパイプ及び水冷圧力容器から構成される。模擬炉心試験体は、模擬炉心容器に収納された模擬炉心部、模擬高温プレナム、模擬サポートポスト、高温出口管等から構成される。模擬炉心部の概略図をFig. 3 に示す。模擬炉心部は中心領域流路1本、周辺領域流路3本の合計4本の流路で構成され、各流路はそれぞれ黒鉛流路管、セラミック流路管、流路管案内管及び加熱ヒータ等から構成されている。加熱ヒータは各流路について上下方向に3分割し、それぞれ温度制御が可能である。さらにこの4本の流路管の外側に周辺領域補償ヒータを設け、流路管全体を加熱することができる。Fig. 4 に流路管の概略図を示す。黒鉛流路管の寸法は、外径70mm、内径40mm、肉厚15mmで全長は800mmである。セラミック流路管の材質はアルミナ、全長は400mmで、内外径を黒鉛流路管と等しくした。このセラミック管と黒鉛流路管を接続して1本の流路管を構成する。さらにこの流路管を外径85mm、内径73mm、全長1250mmのアルミナ製の流路管案内管に挿入して、模擬炉心流路を構成した。

模擬高温プレナムは、内径400mm、外径460mm、高さ(内寸法)150mmのセラミック製の円筒容器

構成される。またヒータ制御と各部温度、圧力、濃度を自動計測する計測制御系が設けられている。

配管破断模擬試験では、破断後の初期段階に発生する分子拡散と混合気体の微弱な自然対流や後期段階に発生する空気自然循環流及び黒鉛と酸素との酸化反応により発生する一酸化炭素や二酸化炭素の挙動並びにその発生量について調べることが目的である。この試験はさらに以下の2つの試験に分けることができる。1つは配管破断後の初期段階における各成分気体の分子拡散と混合気体の自然対流に関する空気浸入特性試験（空気浸入実験）であり、もう1つは配管破断後の後期段階（空気自然循環流発生後）における酸化反応を伴う炉内の熱流動特性試験（黒鉛酸化実験）である。前述のとおり、今回の空気浸入実験が最も時間を必要とし、またどのように自然循環流が発生して黒鉛が酸化されるかという点から考えると、重要な実験であることが分かる。そこで、まず配管破断事故時の比較的初期段階における空気浸入挙動並びに黒鉛酸化反応により発生する気体の挙動を調べた。以下ではこの空気浸入実験の結果について述べる。

## 2. 配管破断模擬試験装置の概要

配管破断模擬試験装置の主要仕様をTable 1, 全体写真をPhoto 1, フローシートをFig. 1に示す。試験装置は試験体とガスループに分けられる。試験体は模擬炉心試験体、中温・低温出口管、模擬入口管、模擬スタンドパイプ及び水冷圧力容器から構成され、ガスループはガス循環系、ガス供給系、真空系、ガス圧力調節系から構成されている。また、試験体とガスループを冷却する冷却水系、試験体各部の成分気体濃度を測定するガスサンプリング系及びヒータ制御と各部温度、圧力、濃度を自動計測する計測制御系が設けられている。

### 2.1 試験体

Fig. 2 に試験体の概略図を示す。試験体は模擬炉心試験体、中温・低温出口管、模擬入口管、模擬スタンドパイプ及び水冷圧力容器から構成される。模擬炉心試験体は、模擬炉心容器に収納された模擬炉心部、模擬高温プレナム、模擬サポートポスト、高温出口管等から構成される。模擬炉心部の概略図をFig. 3 に示す。模擬炉心部は中心領域流路1本、周辺領域流路3本の合計4本の流路で構成され、各流路はそれぞれ黒鉛流路管、セラミック流路管、流路管案内管及び加熱ヒータ等から構成されている。加熱ヒータは各流路について上下方向に3分割し、それぞれ温度制御が可能である。さらにこの4本の流路管の外側に周辺領域補償ヒータを設け、流路管全体を加熱することができる。Fig. 4 に流路管の概略図を示す。黒鉛流路管の寸法は、外径70mm、内径40mm、肉厚15mmで全長は800mmである。セラミック流路管の材質はアルミナ、全長は400mmで、内外径を黒鉛流路管と等しくした。このセラミック管と黒鉛流路管を接続して1本の流路管を構成する。さらにこの流路管を外径85mm、内径73mm、全長1250mmのアルミナ製の流路管案内管に挿入して、模擬炉心流路を構成した。

模擬高温プレナムは、内径400mm、外径460mm、高さ(内寸法)150mmのセラミック製の円筒容器

で、上蓋には模擬炉心部の流路管、下面には高温出口管が接続されている。この容器を周辺領域補償ヒータと高温プレナム下部ヒータによって加熱する。また、プレナム内には黒鉛製の模擬サポートポストが挿入できるようになっている。高温出口管は模擬高温プレナムと中温出口管を接続するもので、内径69.3mm、外径80mm、長さ315mmのセラミック製円管である。

模擬炉心容器は模擬炉心部、模擬高温プレナム、高温出口管等を収納する直径800mm、高さ1519mmのステンレス製円筒容器である。容器内には模擬炉心部からの熱損失を極力少なくするために断熱材が充填されている。模擬炉心容器内から炉心部流路管、模擬高温プレナム、高温出口管内へ気体が漏洩しないような構造となっているが、下鏡部と模擬炉心容器の圧力を均圧させるために圧力導管を設け、セラミック製の流路管案内管、模擬高温プレナム、高温出口管を外圧から保護した。ただし、実験中は導管の途中に設けたバルブを閉じることによって、この圧力導管を通る漏れ流れを防いだ。

中温・低温出口管は高温ガス炉の2重管内管を模擬するものである。中温出口管は模擬炉心試験体の高温出口管とベローズフランジで接続され、水冷圧力容器の外側で低温出口管と接続されている。中温出口管の外側には銅管を巻き付けて水冷した。低温出口管は水冷圧力容器外側に接続された出口管で、上部にはガス循環系の高温ループと接続される高温ループ遮断弁が取り付けられている。外側には水冷用の銅管を巻き付け、下端には模擬配管破断弁を設けた。破断弁には全開にしたとき流動抵抗が大きくなるようにボール弁を使用した。また低温出口管には空気浸入流速を測定するために超音波流量計を取り付けた。

模擬入口管は高温ガス炉の2重管外管を模擬するもので、水冷圧力容器の下鏡部に接続されている。模擬入口管の2重管部の外管から約600mm水平に取り出して、そこから低温出口管と平行に直管部が設けられている。水平管取り出しフランジには、ガス循環系の低温ループと接続される低温ループ遮断弁が取り付けられている。模擬入口管の下端には低温出口管と同様に模擬配管破断弁を設け、さらに模擬入口管の外側にも水冷用の銅管を巻き付けて水冷した。

水冷圧力容器は模擬炉心容器を収納する圧力容器であり、原子炉圧力容器を模擬するものである。水冷圧力容器の外側は水冷用の銅管を巻き付けて水冷した。上鏡部の内半径は460mmで、頂部に模擬スタンドパイプが取り付けられている。上鏡部内には容積を少なくするために仕切板を設け、上鏡部と銅部のフランジ間に挟み込むような構造となっている。空気浸入実験の場合は、自然循環流を速く発生させるためにこの仕切板を取り付けて実験を行う。胴部の内径は920mm、模擬炉心容器の外径は800mmであり、胴部環状流路の流路幅は60mmである。下鏡部は高さ約120mm、直径920mmで、下部は模擬入口管と接続される2重管の外管が取り付けられている。

## 2.2 ガスループ

ガスループはFig.1に示すように、ガス循環系、ガス供給系、真空系、ガス圧力調節系より構成されている。真空系とガス供給系によって、試験体及びガスループ内を所定の気体（ヘリウムまたは窒素）に真空置換し、ガス循環系によって一定流量の気体を試験体に供給することができる。またガス圧力調節系により、試験体内の圧力を大気圧以上1.8kg/cm<sup>2</sup>G以下の任意の圧力に保持することが可能である。

ガス循環系は一定流量のヘリウムまたは窒素を試験体に供給するもので、試験体の低温出口管から冷却器に向かって流れる高温ループと、冷却器から試験体下鏡部へ流れる低温ループから構成される。ガス循環系及び試験体内の流れは、以下のようになっている。まず送風機を出た気体が流量計、低温ループ遮断弁を通り、試験体の下鏡部に流入する。試験体内では下鏡部から胴部環状流路、上鏡部を通り、模擬炉心部から模擬高温プレナム、出口管に向かう一巡の流れを形成する。低温出口管部の高温ループ遮断弁から流出した気体は、冷却器を通り送風機に戻る。このようにガス循環系では高温ガス炉の定格運転時の流動を模擬することが可能である。

高温ループは試験体の低温出口管上部に設けた高温ループ遮断弁から冷却器までの系統で、試験体から流出する高温の気体を常温まで冷却するためのループである。そして高温ループ遮断弁により模擬配管破断時に高温ループと試験体とを遮断する。低温ループはガス冷却器出口から試験体下鏡部の低温遮断弁までの系統で、ガス冷却器にて冷却された気体を試験体へ送り返すループである。このループには、送風機、層流型流量計、流量調節弁を設け、層流型流量計の出力を流量調節弁へ送ることにより、流量の自動制御を行うことができる。

ガス供給系は試験体及びガス循環系にヘリウムまたは窒素を供給する系統であり、減圧弁、安全弁、手動弁等から構成される。真空系は試験体及びガス循環系内をヘリウムまたは窒素に真空置換するための系統であり、試験体と模擬炉心容器断熱材部及びガス循環系から排気することができる。また装置内に一酸化炭素が発生する可能性があるため、屋外に排気できるようになっている。ガス圧力調節系は、ON-OFF式圧力調節計、遠隔操作弁、減圧弁、手動弁等から構成され、試験体内を大気圧から $1.8 \text{ kg/cm}^2 \text{ G}$ の範囲の任意の圧力に保持するための系統である。圧力調節の方法は試験体内の圧力を検出し、自動制御にて大気開放弁とガスポンペに接続されたガス供給弁をON-OFF操作することにより行う。

冷却水系は8系統からなり、試験装置内各部の壁温を一定温度に保持するとともに、中温出口管等の高温部分を冷却するためのものである。冷却水は、分配ヘッドから各系統へ送られ、各部を冷却した後、収集ヘッドから排水される。まず水冷圧力容器の冷却は3系統に分かれ、上鏡部、胴部、下鏡部を冷却する。下鏡部の冷却系統は模擬炉心容器下蓋も冷却している。出入口管は模擬入口管、中温出口管と低温出口管の3系統に分かれ、中温出口管の冷却系統には警報接点付遠隔指示型流量計が取り付けられている。ガス冷却器の系統には安全保護動作回路用フロースイッチが取り付けられ、高温ループ配管の冷却系統にも安全保護動作回路用フロースイッチが取り付けられている。

### 2.3 電気計装系及び温度・濃度測定系

配管破断模擬試験装置の電気計装系概念図をFig. 5に示す。主電源の電源盤内には電圧調整器、絶縁トランスを設けて、各ヒータに電源を供給している。ヒータ制御においては、各領域内の熱電対からの信号を温度調節計に取り込み、制御信号を電力調整器に出力している。温度調節計の制御は温度制御用コンピュータにより行うことができる。また2台のプログラマブルコントローラを用いて、ループ流量、試験体圧力、気体濃度、温度等の信号により補機類を制御している。実験データの収録処理においては、2台の32ビットコンピュータを用いて、データの収録、保存、

グラフィック処理等を行うことができる。また実験と並行して数値解析を行うことが可能であり、実験と解析結果を容易に比較検討することができる。

ガスサンプリング系は試験体各部の混合気体をガス分析装置内に設けたポンプにより吸引し、混合気体中の酸素、一酸化炭素(以下CO)、二酸化炭素(以下CO<sub>2</sub>)のモル分率、及び混合気体の密度を測定する系統である。実験装置内の流れを乱さないようにするため、サンプリング流量はできるだけ少なくするとともに、サンプリングした気体は吸引孔付近に戻した。流量は50ml/min以下であり、このとき吸引吐出孔付近の流速は約10cm/s以下である。ガス分析装置は酸素計、一酸化炭素計(以下CO計)、二酸化炭素計(以下CO<sub>2</sub>計)、密度計、吸引ポンプ、流量計、流量調節弁等から構成され、この装置を5台使用して、同時に5箇所の混合気体分析を行うことができる。各サンプリング点の切り換えは電磁弁で行うが、その開閉は手動でも自動でも操作することができる。また各分析装置には分析計の校正を行うために、ガス供給ラインと大気開放ラインを設けた。ガスサンプリング系の系統図をFig. 6に示し、ガスサンプリング点をTable 2に示す。No.1からNo.5までのサンプリング点は、それぞれの番号の分析装置に接続されている。No.6に関するサンプリング点は予備のサンプリング点で、必要な場合に分析装置に接続することができる。ガス濃度測定時には、サンプリング流量を抑えていることから測定に時間遅れが生じる。そこで、測定孔から検出器までの容積を求め、サンプリング流量で除してこの時間遅れを補正した。

前述のとおり、本実験では5台のガス分析計を用いてガス分析を行うため、同時に最大5点しかサンプリングできない。そこで、これまでの経験から最も適切であると考えられる以下の5点をサンプリング点として選んだ。

- ・ 中温出口管部 (サンプリング点No.1 - 2)
- ・ 高温プレナム部 (サンプリング点No.2 - 1)
- ・ 上 鏡 部 (サンプリング点No.3 - 1)
- ・ 環状流路部 (サンプリング点No.4 - 3)
- ・ 模擬入口管部 (サンプリング点No.6 - 1)

試験装置各部の温度測定は、R-, N-, K-type 熱電対で行った。温度測定点は全部で160点で、そのうちヒータ制御用のR-type 熱電対は16本、その予備が同じく16本、比較的高温(1000℃以上)となる箇所にはN-type 熱電対を30本、その他の98本はK-type 熱電対を用いた。ただし、黒鉛流路管は熱電対を含む流路管が交換可能であるため、熱電対にはK-typeを使用した。熱電対取り付け位置の概略図をFig. 7 (1)~(3)に示す。また計測点リストをTable 3 (1)~(3)に示す。

### 3. 実 験 方 法

#### 3.1 実験方法

実験は以下の方法で行った。まず初めに、循環ループを含む試験体内を真空引きし、ガス供給系によりヘリウムを充填した。模擬炉心容器内の中心、及び周辺領域流路はそれぞれ中心領域及び周辺領域主ヒータにより加熱し、高温プレナム部は周辺領域補償ヒータと高温プレナム下部

グラフィック処理等を行うことができる。また実験と並行して数値解析を行うことが可能であり、実験と解析結果を容易に比較検討することができる。

ガスサンプリング系は試験体各部の混合気体をガス分析装置内に設けたポンプにより吸引し、混合気体中の酸素、一酸化炭素(以下CO)、二酸化炭素(以下CO<sub>2</sub>)のモル分率、及び混合気体の密度を測定する系統である。実験装置内の流れを乱さないようにするため、サンプリング流量はできるだけ少なくするとともに、サンプリングした気体は吸引孔付近に戻した。流量は50ml/min以下であり、このとき吸引吐出孔付近の流速は約10cm/s以下である。ガス分析装置は酸素計、一酸化炭素計(以下CO計)、二酸化炭素計(以下CO<sub>2</sub>計)、密度計、吸引ポンプ、流量計、流量調節弁等から構成され、この装置を5台使用して、同時に5箇所の混合気体分析を行うことができる。各サンプリング点の切り換えは電磁弁で行うが、その開閉は手動でも自動でも操作することができる。また各分析装置には分析計の校正を行うために、ガス供給ラインと大気開放ラインを設けた。ガスサンプリング系の系統図をFig. 6に示し、ガスサンプリング点をTable 2に示す。No.1からNo.5までのサンプリング点は、それぞれの番号の分析装置に接続されている。No.6に関するサンプリング点は予備のサンプリング点で、必要な場合に分析装置に接続することができる。ガス濃度測定時には、サンプリング流量を抑えていることから測定に時間遅れが生じる。そこで、測定孔から検出器までの容積を求め、サンプリング流量で除してこの時間遅れを補正した。

前述のとおり、本実験では5台のガス分析計を用いてガス分析を行うため、同時に最大5点しかサンプリングできない。そこで、これまでの経験から最も適切であると考えられる以下の5点をサンプリング点として選んだ。

- ・ 中温出口管部 (サンプリング点No.1 - 2)
- ・ 高温プレナム部 (サンプリング点No.2 - 1)
- ・ 上 鏡 部 (サンプリング点No.3 - 1)
- ・ 環状流路部 (サンプリング点No.4 - 3)
- ・ 模擬入口管部 (サンプリング点No.6 - 1)

試験装置各部の温度測定は、R-, N-, K-type 熱電対で行った。温度測定点は全部で160点で、そのうちヒータ制御用のR-type 熱電対は16本、その予備が同じく16本、比較的高温(1000°C以上)となる箇所にはN-type 熱電対を30本、その他の98本はK-type 熱電対を用いた。ただし、黒鉛流路管は熱電対を含む流路管が交換可能であるため、熱電対にはK-typeを使用した。熱電対取り付け位置の概略図をFig. 7 (1)~(3)に示す。また計測点リストをTable 3 (1)~(13)に示す。

### 3. 実 験 方 法

#### 3.1 実験方法

実験は以下の方法で行った。まず初めに、循環ループを含む試験体内を真空引きし、ガス供給系によりヘリウムを充填した。模擬炉心容器内の中心、及び周辺領域流路はそれぞれ中心領域及び周辺領域主ヒータにより加熱し、高温プレナム部は周辺領域補償ヒータと高温プレナム下部

ヒータにより加熱して、模擬炉心流路管、高温プレナム壁温が所定の温度になるよう各々のヒータを制御した。循環ループを使用しない場合は、ループ遮断弁を閉じてループと試験体を切り離れた。その後、試験体内の各部温度が定常状態に達するまで放置した。また上鏡部、外胴流路部、模擬入口管及び低温出口管の外壁は冷却水により水温(12°C~25°C)に保った。各部温度が定常状態に達すれば、試験体内を0.05kg/cm<sup>2</sup>Gまで減圧し、ガスサンプリング系を起動させ、ヘリウム純度を調べた。断熱材部から水蒸気や不純物が発生し、黒鉛と反応してCOあるいはCO<sub>2</sub>が発生している場合は、低温出口管と模擬入口管の破断弁を片方ずつ開け、ガス供給系からヘリウムを試験体に供給して不純物を除去した。再度破断弁を閉じて、系の圧力を0.05kg/cm<sup>2</sup>Gに保ち、供給したヘリウムの温度が定常状態になるまで放置した。最後に、試験体内の圧力を大気圧まで減圧し、低温出口管と模擬入口管の破断弁を同時に開けて実験を開始した。

実験条件は黒鉛模擬炉心部を600°Cから1050°Cまでの範囲について約50°Cおきに設定した。黒鉛模擬炉心部の目標温度は以下の8ケースで、それぞれ600°C, 700°C, 750°C, 800°C, 900°C, 950°C, 1000°C, 1050°Cである。Table 4に、模擬配管破断直後の試験体各部の平均温度を示す。

### 3.2 ガス分析計の校正と各成分気体濃度の補正方法

本実験で用いたガス分析計は、実験の前後において指示値に多少のドリフトが確認されたため、毎回実験時には電圧信号出力に対するゼロ点とスパン点の校正を行った。今回の実験で用いた校正用の標準ガスをTable 5に示す。ガス分析計の校正は、サンプリング条件を実験時と等しくするため、ゼロガスまたはスパンガスを試験体に大気圧まで充填し、これらの気体を試験体からサンプリングすることによって行った。まず、ヘリウムとヘリウムベースの標準ガスを用いてゼロ点とスパン点の測定及び調整を行い、その後、窒素ベースの標準ガスを用いてガス分析計の出力を記録した。また、本分析計のCO計とCO<sub>2</sub>計について、スパンガスのベースガスに窒素を用いた場合は、ヘリウムを用いた場合に比べて約10%高い電圧出力を指示することが分かっている。そこで、CO及びCO<sub>2</sub>濃度については、以下の補正を行った。CO及びCO<sub>2</sub>計の電圧出力と成分気体濃度の関係を一次関数式(以下、校正式という)で表し、2種類のベースガスについて、各々校正式を作成した。各成分気体濃度は、これらの校正式を用いて以下のように求めた。まず実験装置内の混合気体をヘリウムと空気のみで2成分気体と仮定し、密度計から求めた混合気体密度より空気のモル分率を求める。

$$X_{\text{air}} = \frac{\rho - \rho_{\text{He}}}{\rho_{\text{air}} - \rho_{\text{He}}} \quad (1)$$

$X_{\text{air}}$  : 2成分気体と仮定した混合気体中の空気のモル分率

$\rho$  : 密度計から求めた混合気体の密度 [kg/m<sup>3</sup>]

$\rho_{\text{He}}$  : 20°C, 1atmにおけるヘリウムの密度 [kg/m<sup>3</sup>]

$\rho_{\text{air}}$  : 20°C, 1atmにおける空気の密度 [kg/m<sup>3</sup>]

空気中の窒素モル分率は約0.791であり、実際には空気とヘリウムの2成分気体は、窒素とヘリウムを含む多成分気体を意味するが、ここでは密度計から求めた空気のモル分率を窒素のモル分

率であると仮定し、式(2)より、CO<sub>2</sub>のモル分率を算出した。

$$X_{\text{CO}_2/\text{real}} = (1 - X_{\text{N}_2}) X_{\text{CO}_2/\text{He}} + X_{\text{N}_2} \cdot X_{\text{CO}_2/\text{N}_2} \quad (2)$$

$X_{\text{N}_2}$  : 窒素のモル分率 (=  $X_{\text{air}}$ )

$X_{\text{CO}_2/\text{real}}$  : CO<sub>2</sub>のモル分率

$X_{\text{CO}_2/\text{He}}$  : ヘリウムベースの校正式によるCO<sub>2</sub>のモル分率

$X_{\text{CO}_2/\text{N}_2}$  : 窒素ベースの校正式によるCO<sub>2</sub>のモル分率

COについてもCO<sub>2</sub>と同様な方法で、モル分率を算出した。

## 4. 空気浸入実験結果

### 4.1 密度と各成分気体の濃度変化

模擬炉心部を600℃に保持した場合(A-60)の混合気体密度の時間変化をFig.8.1に示す。模擬配管破断後、装置内各部の混合気体密度は時間の経過とともに増加し、この場合は約7.2日(173時間)後に空気の自然循環流が発生して、装置内が空気に置換されている様子が分かる。加熱側における出口管の密度が破断直後、急激に増加しているのは次のように説明できる。模擬配管破断直前においては、装置内にはヘリウムが充填されており、模擬炉心部と胴部環状流路との間には温度による密度差が生じている。この状態で配管破断させると、密度のアンバランスを防ぐため、瞬間的に空気を吸い込むことになる。しかしながら、空気は重い(常温でヘリウムの密度の約7倍)数10cm吸い込むと、破断前に生じていた密度のアンバランスは解消されてしまう。出口管のサンプリング点は破断弁から約100cm上方に位置するため、空気を吸い込んだ分だけ、測定点まで拡散する距離が短くなるので、比較的速く密度が上昇する。破断直後の空気とヘリウムの境界面付近では急な密度勾配が生じているが、その後は、主に分子拡散によってヘリウムと空気が移動するため、密度勾配は緩やかになり、密度の増加もゆっくりとした変化になる。

Fig. 8.2に酸素モル分率の時間変化を示す。高温プレナム部のモル分率は破断後5日頃まで低く抑えられている。これは黒鉛流路管下部で全ての酸素が黒鉛と反応し、モル分率がゼロとなっているために破断口から黒鉛管までの間に定常状態に類似した濃度分布が形成されていることによるものではないかと考えられる。しかしながら、5日を過ぎる頃から分子拡散に加えて、混合気体の微弱な自然対流による酸素の移動量が徐々に増加するため、モル分率は上昇する。一方、冷却側の模擬入口管においては、2日位までモル分率は増加しているが、その後は拡散と逆向きの混合気体の微弱な自然対流が強くなるため、逆にモル分率は減少している。胴部環状流路と上鏡部の濃度変化は、模擬入口管と同様な変化であるが、破断口からの距離が遠いため、モル分率はさらに低く抑えられている。またこの2点間の距離は1m以上離れているにもかかわらず、モル分率がほぼ等しいのは、胴部の環状流路に温度の異なる平行平板間に見られるような局所的な自然対流が発生し、拡散よりむしろこの局所的な自然対流によって酸素が運ばれるために環状流路部では温度分布が一様になっているのではないかと考えている。



率であると仮定し、式(2)より、CO<sub>2</sub>のモル分率を算出した。

$$X_{\text{CO}_2/\text{real}} = (1 - X_{\text{N}_2}) X_{\text{CO}_2/\text{He}} + X_{\text{N}_2} \cdot X_{\text{CO}_2/\text{N}_2} \quad (2)$$

$X_{\text{N}_2}$  : 窒素のモル分率 (=  $X_{\text{air}}$ )

$X_{\text{CO}_2/\text{real}}$  : CO<sub>2</sub>のモル分率

$X_{\text{CO}_2/\text{He}}$  : ヘリウムベースの校正式によるCO<sub>2</sub>のモル分率

$X_{\text{CO}_2/\text{N}_2}$  : 窒素ベースの校正式によるCO<sub>2</sub>のモル分率

COについてもCO<sub>2</sub>と同様な方法で、モル分率を算出した。

## 4. 空気浸入実験結果

### 4.1 密度と各成分気体の濃度変化

模擬炉心部を600℃に保持した場合(A-60)の混合気体密度の時間変化をFig.8.1に示す。模擬配管破断後、装置内各部の混合気体密度は時間の経過とともに増加し、この場合は約7.2日(173時間)後に空気自然循環流が発生して、装置内が空気に置換されている様子が分かる。加熱側における出口管の密度が破断直後、急激に増加しているのは次のように説明できる。模擬配管破断直前においては、装置内にはヘリウムが充填されており、模擬炉心部と胴部環状流路との間には温度による密度差が生じている。この状態で配管破断させると、密度のアンバランスを防ぐため、瞬間的に空気を吸い込むことになる。しかしながら、空気は重い(常温でヘリウムの密度の約7倍)数10cm吸い込むと、破断前に生じていた密度のアンバランスは解消されてしまう。出口管のサンプリング点は破断弁から約100cm上方に位置するため、空気を吸い込んだ分だけ、測定点まで拡散する距離が短くなるので、比較的速く密度が上昇する。破断直後の空気とヘリウムの境界面付近では急な密度勾配が生じているが、その後は、主に分子拡散によってヘリウムと空気が移動するため、密度勾配は緩やかになり、密度の増加もゆっくりとした変化になる。

Fig. 8.2に酸素モル分率の時間変化を示す。高温プレナム部のモル分率は破断後5日頃まで低く抑えられている。これは黒鉛流路管下部で全ての酸素が黒鉛と反応し、モル分率がゼロとなっているために破断口から黒鉛管までの間に定常状態に類似した濃度分布が形成されていることによるものではないかと考えられる。しかしながら、5日を過ぎる頃から分子拡散に加えて、混合気体の微弱な自然対流による酸素の移動量が徐々に増加するため、モル分率は上昇する。一方、冷却側の模擬入口管においては、2日位までモル分率は増加しているが、その後は拡散と逆向きの混合気体の微弱な自然対流が強くなるため、逆にモル分率は減少している。胴部環状流路と上鏡部の濃度変化は、模擬入口管と同様な変化であるが、破断口からの距離が遠いため、モル分率はさらに低く抑えられている。またこの2点間の距離は1m以上離れているにもかかわらず、モル分率がほぼ等しいのは、胴部の環状流路に温度の異なる平行平板間に見られるような局所的な自然対流が発生し、拡散よりむしろこの局所的な自然対流によって酸素が運ばれるために環状流路部では温度分布が一様になっているのではないかと考えている。

Fig. 8.3 に CO<sub>2</sub> のモル分率の時間変化を示す。黒鉛流路管下部で発生した CO<sub>2</sub> は上下の両方向に拡散するため、黒鉛構造物のない高温プレナム部や出口管部においても検出されている。また、容積の大きい高温プレナム部（面積比にして出口管の約33倍）は、出口管部よりモル分率は低く抑えられている。出口管においては約4日位まで、2%～3%の値を維持している。これは、破断口から CO<sub>2</sub> が大気に拡散して行くため破断口ではモル分率がゼロとなり、酸素とは逆の濃度分布が形成されていることによるものであると考えられる。4日を過ぎる頃から、混合気体の微弱な自然対流により下向きの拡散が抑えられるため、モル分率は減少し、空気の自然循環流発生直前では、出口管部において CO<sub>2</sub> は検出されなかった。高温プレナム部、上鏡部、胴部環状流路部の CO<sub>2</sub> モル分率を比較すると、まず高温プレナム部の値は、上鏡部に比べると濃度の上昇速度は緩やかである。これは、出口管部と同様に拡散と微弱な自然対流の向きが逆になっているためである。一方上鏡部は拡散と自然対流の向きが同じであるため、上昇速度は速くなっている。さらに拡散係数の影響も考えられる。Table 6 に CO と CO<sub>2</sub> についてヘリウムと窒素に対する2成分気体相互拡散係数を示す。CO、CO<sub>2</sub> とも同じ気体に対する拡散係数はほぼ等しいが、ヘリウムに対する拡散係数は、窒素に対するそれよりも5～6倍大きいことが分かる。すなわち窒素雰囲気（高温プレナム側）よりもヘリウム雰囲気（上鏡部側）の方が速く拡散することを意味している。上鏡部と環状流路部の濃度がほぼ等しいのは、酸素の濃度変化において述べたように環状流路部で発生している局所的な自然対流によるものである。

Fig. 8.4 に CO のモル分率変化を示す。図のように黒鉛管温度が約600℃ のときは、一酸化炭素はほとんど発生しない。空気の自然循環流発生直前に多少発生しているのが確認できるが、その値もせいぜい0.5%以下である。

Fig. 9.1～4 に模擬炉心部の温度を700℃に保持した場合(A-70)の混合気体密度、酸素、CO<sub>2</sub>、CO モル分率の時間変化を示す。密度及び各成分気体のモル分率の変化はA-60(600℃)の場合と大きな差は見られない。ただし、空気の自然循環流発生までの時間は短くなって、約6.7日(160時間)後に自然循環流が発生した。この場合も、CO はほとんど発生せず、空気の自然循環流発生後も1%以下であった。

Fig. 10.1 に模擬炉心部の温度が900℃(A-90)の場合の混合気体密度の時間変化を示す。密度変化についてはA-60(600℃)、A-70(700℃)の場合の結果と大きく異なる点はない。しかしながら、空気の自然循環流は、約5.6日(135時間)後に発生していることが分かる。酸素モル分率の時間変化をFig. 10.2に示す。高温プレナム部においては、混合気体の微弱な自然対流の影響が大きくなる50時間以降は酸素モル分率が徐々に増加し始めている。また、冷却側の模擬入口管部の酸素モル分率は、約30時間後にピークを迎え、それ以降は減少し始めている。A-60の場合に比べてこのピークに達する時間は短くなっていることが分かる。Fig. 10.3にCO<sub>2</sub>モル分率の時間変化を示す。A-70の場合に比べるとかなり発生量が増加している。特に加熱側の出口管部と高温プレナム部が顕著である。この理由は次のCOモル分率の時間変化を参照すると良く分かる。Fig. 10.4にCOモル分率の時間変化を示すが、環状流路部と模擬入口管部ではモル分率が上昇し、CO<sub>2</sub>の発生量が多い高温プレナム部と出口管部ではCOは検出されていない。一般に800℃以上になるとCOと酸素が気相で反応してCO<sub>2</sub>が発生することが知られている。すなわち、黒鉛流路管下部で発生したCOは高温プレナムへ拡散して行くが、プレナム内は約900℃に保持

されているため、出口管から浸入してきた酸素と気相で反応して $\text{CO}_2$ が発生することになる。そのため、高温プレナムや出口管においては $\text{CO}$ は検出されず、 $\text{CO}_2$ が検出されることになる。また出口管と高温プレナムの $\text{CO}_2$ 濃度変化の違いは次のように説明できる。模擬配管破断後の12時間頃までは、模擬炉心部に向かう混合気体の微弱な自然対流よりも下向きの拡散が強いため、出口管の $\text{CO}_2$ モル分率は増加する。そして、破断口から $\text{CO}_2$ が大気に拡散するので、下向きの拡散と自然対流がバランスして、しばらくの間定常的な濃度分布が形成される。その後は、徐々に対流が強くなるために、 $\text{CO}_2$ のモル分率は減少する。高温プレナムも黒鉛流路管の下部にあるため、 $\text{CO}_2$ モル分率は出口管部と同様な変化が見られると予想されたが、実際には、空気の自然循環流が発生する約6時間前まで増加し続けた。これは、出口管部が約 $10^\circ\text{C}$ に保持されているのに対して高温プレナムは $900^\circ\text{C}$ であり、出口管部では $\text{CO}$ の燃焼反応は起こらないことが原因であると考えられる。またTable 7に試験体各領域の等価直径、断面積等を示すが、出口管、高温プレナム、黒鉛流路管の面積比は、出口管を1とすると、1:3.3, 4:1.3となり、同じ微弱な自然対流でも流速が遅くなる分だけ拡散に対する影響が異なることもプレナムにおける濃度が減少しない原因の一つになっていると思われる。

模擬炉心容器を $1000^\circ\text{C}$ に保持した場合の混合気体密度の時間変化をFig.11.1に示す。模擬配管破断後、装置内各部の混合気体密度は時間の経過とともに増加し、この場合は約5.3日(128時間)後に空気の自然循環流が発生して、装置内が空気に置換された。各部の密度変化の様子は、A-60, A-70, A-90の場合とほぼ同じであった。

Fig. 11.2に酸素モル分率の時間変化を示す。A-90( $900^\circ\text{C}$ )の場合と同様に、高温プレナム部では、空気の自然循環流が発生する直前まで酸素モル分率は非常に低い値を示している。すなわち黒鉛流路管部で発生した $\text{CO}$ がプレナム部に拡散し、破断口から浸入した酸素と反応するために酸素が消費されている。冷却側の模擬入口管部の酸素濃度もA-90の場合とほぼ同じ変化であるが、高温側と低温側の温度差による密度差がA-90の場合に比べて大きくなり、それに伴う混合気体の自然対流も強くなるため、拡散による空気(酸素)の浸入量が減少し、モル分率は低く抑えられている。

Fig. 11.3に $\text{CO}_2$ モル分率の時間変化を示す。出口管部における $\text{CO}_2$ の濃度変化はA-90の場合と大きな違いはない。また高温プレナム部の $\text{CO}_2$ のモル分率は模擬配管破断後3日頃まではほぼ一定の値を保持しているが、その後徐々に大きくなり空気の自然循環流発生直前になって急激に減少している。上鏡部、環状流路部、模擬入口管部の濃度は破断後3日以降は増加せず、A-90に比べて全体的にモル分率は低い。

Fig. 11.4に $\text{CO}$ モル分率の時間変化を示すが、A-90では検出されなかった出口管と高温プレナム部において $\text{CO}$ が多量に検出されている。また上鏡部と環状流路部、模擬入口管部のモル分率もほぼ直線的に増加し、発生量もかなり多い。これら2つの図から、 $\text{CO}$ と $\text{CO}_2$ 及び酸素の挙動を類推すると、まずA-90の場合に比べて酸素/黒鉛反応における $\text{CO}$ の発生比が大きくなり、かなりの $\text{CO}$ が発生していることが考えられる。これは $\text{CO}$ の燃焼反応が起こっているプレナムや、出口管部においても $\text{CO}$ が検出されていることから分かる。酸素の供給量が十分でない3日頃までは、黒鉛管に到達する酸素の量も多くないのでプレナム内で消費される酸素及び $\text{CO}$ と発生する $\text{CO}_2$ 、黒鉛管部で消費される酸素と発生する $\text{CO}$ と $\text{CO}_2$ が微妙にバランスして $\text{CO}_2$ のモル分率

が顕著に増加しないと考えられる。また酸素の供給量が多くなる3日以降は、プレナム内でかなりの酸素がCOの燃焼反応により消費され、CO<sub>2</sub>のモル分率は急激に上昇し、COは減少する。このCOの減少が自然対流の影響も受けていることは、燃焼反応の起こらない出口管部のCOモル分率が減少していることから分かる。

Fig. 12.1～4に模擬炉心部の温度が1050℃の場合の混合気体密度、酸素、CO<sub>2</sub>、COモル分率の時間変化を示す。空気自然循環流発生までの時間は約5日(120時間)であった。密度及び酸素のモル分率については1000℃の場合の結果と大きな差異はない。CO<sub>2</sub>及びCOの濃度変化には、A-100(1000℃)の場合よりもさらにCOモル分率が増加し、CO<sub>2</sub>のモル分率が減少している。黒鉛の酸化反応におけるCOの発生比が大きくなっているものと考えられる。また、出口管部のCO<sub>2</sub>はほとんどがCOの燃焼反応によるものであると考えられ、A-100の場合には破断後3日頃まではほぼ一定であった出口管部のCO<sub>2</sub>モル分率は、高温プレナム部のCOモル分率が増加したことにより、この場合は逆に3日頃まで徐々に増加している。

#### 4.2 試験装置各部の温度変化

今回の実験では、黒鉛の酸化が重要な問題となることから、黒鉛流路管の温度をできるだけ均一にする必要があった。そこで、流路管を加熱するヒータは鉛直方向に3分割し、各々独立に制御した。Fig. 13に黒鉛流路管の軸方向温度測定結果の一例として、模擬炉心部を1000℃に保持した場合(A-100)の流路管軸方向温度分布を示す。図の上半分は中心領域、下半分は周辺領域流路管の軸方向温度を示し、○印は模擬配管破断直後、△印は空気自然循環流発生直前の温度を示している。セラミック流路管上部での熱損失が大きいため、セラミック部は一樣温度に保持できなかったが、黒鉛流路管部においては、ほぼ一樣温度を保持することができた。また、時間的にもほとんど一定温度を保っていることが分かる。特に中心領域流路のヒータは加熱量がほとんどゼロに等しいにもかかわらず、一定温度を保っているということから初期段階においては黒鉛の酸化反応による黒鉛管の温度上昇はないことが分かる。実際、空気自然循環流発生後は模擬炉心部を1000℃で制御しているにもかかわらず、約1200℃まで上昇し続け、ヒータ保護のために出口管部の破断弁を閉じ酸素の供給を止めるまで、温度は上昇し続けた。さらに、中心及び周辺領域の4本の流路管温度における差違は、ほとんど見られなかった。

Fig. 14に高温プレナムの壁温度とガス温度及び高温出口管部のガス温度の時間変化を示す。高温プレナムの壁温度は8点の算術平均、ガス温度はプレナム内4点の算術平均温度である。また、高温出口管部のガス温度は、プレナムの下方375mmの位置における管中心部の温度を示している。図より各々の温度は空気自然循環流発生まで、時間的にほとんど一定であることが分かる。空気自然循環流が発生するまでは、流れがほとんどない状態で熱伝達率も無限大であったため、ガス温度は壁温度にほぼ等しい値であった。しかしながら、自然循環流が発生すると、破断口から冷たい空気が浸入し、流れが生じるために熱伝達率も低下することからガス温度は急激に低下した。ただし、高温プレナム壁温度は、温度制御を行っているため、顕著な温度降下は見られなかった。

Fig. 15に模擬炉心容器側壁温度、すなわち胴部環状流路の内壁、及び環状流路のガス温度を

鉛直方向に積分平均した温度の時間変化を示す。模擬炉心部に断熱材を充填し、側壁の温度が高くなるように設計したが、模擬炉心部の温度が1000℃の場合は約250℃まで上昇した。側壁温度は時間の経過とともに低下し、空気の自然循環流が発生するまでの間に約50℃低下した。この温度低下により、環状流路部に発生する局所的な自然対流に影響を及ぼす可能性があるが、1000℃の実験の場合、環状流路部のRa数はかなり大きく ( $2.1 \times 10^4 < Ra < 9.6 \times 10^5$ )、温度低下による影響はないと考えられる。またガス温度についてはほぼ一定温度を保持していることが分かる。A-60(600℃)の場合、壁温の温度低下は約20℃であった。

Fig.16 に中温出口管と上鏡部及び下鏡部ガス温度の時間変化を示すが、これらのガス温度も時間的に一定温度を保っていることがわかる。上鏡部のガス温度は空気の自然循環流発生後、模擬炉心部の高温の気体が流入するため、急激に上昇している。一方下鏡部のガス温度は環状流路部で十分冷却されているため、自然循環流発生後も大きな温度変化は見られない。以上のように模擬炉心部を含むほとんどの箇所における壁温度及びガス温度は、空気の自然循環流が発生するまでの間は時間的に一定温度を保持していることが分かる。

## 5. ま と め

高温ガス炉を模擬した配管破断模擬試験装置を用いて、模擬配管破断後の初期段階における空気浸入及び多成分気体の挙動に関する実験を行った結果、以下の知見を得た。

1. これまでに行った基礎的な実験の場合と同様に、配管破断後すぐには空気の自然循環流は発生せず、本試験装置では模擬炉心部を1000℃に保持した実験でも自然循環流発生（後期段階の開始）までに約5日間要した。
2. 模擬配管破断後の初期段階は、分子拡散と非常に微弱な混合気体の自然対流によって空気が装置内に運ばれる。その後時間の経過とともに装置内の混合気体の密度が大きくなり、装置外の重い空気を十分吸い込むだけの浮力が発生した時点で、突然空気の自然循環流が発生する。
3. 黒鉛流路が600℃～700℃の場合は、酸化反応により発生する気体は主に二酸化炭素であり、一酸化炭素はほとんど発生しない。しかしながら、黒鉛流路が900℃以上になると、一酸化炭素が発生し、さらに一酸化炭素と酸素が気相で反応する一酸化炭素の燃焼反応が加わるため各成分気体の挙動は複雑なものとなる。1000℃を越えると酸素/黒鉛反応においてはかなりの一酸化炭素が発生し、二酸化炭素の発生は主にこの発生した一酸化炭素の燃焼反応によるものであった。
4. 各成分気体のモル分率分布は黒鉛温度によって大きく異なるが、消費される酸素の空気中のモル分率は約20%であり、発生した一酸化炭素、二酸化炭素のモル分率も20%以下であったことから、混合気体の密度には大きな影響を及ぼさなかった。

鉛直方向に積分平均した温度の時間変化を示す。模擬炉心部に断熱材を充填し、側壁の温度が高くなるように設計したが、模擬炉心部の温度が1000℃の場合は約250℃まで上昇した。側壁温度は時間の経過とともに低下し、空気の自然循環流が発生するまでの間に約50℃低下した。この温度低下により、環状流路部に発生する局所的な自然対流に影響を及ぼす可能性があるが、1000℃の実験の場合、環状流路部のRa数はかなり大きく ( $2.1 \times 10^4 < Ra < 9.6 \times 10^5$ )、温度降下による影響はないと考えられる。またガス温度についてはほぼ一定温度を保持していることが分かる。A-60(600℃)の場合、壁温の温度低下は約20℃であった。

Fig.16 に中温出口管と上鏡部及び下鏡部ガス温度の時間変化を示すが、これらのガス温度も時間的に一定温度を保っていることがわかる。上鏡部のガス温度は空気の自然循環流発生後、模擬炉心部の高温の気体が流入するため、急激に上昇している。一方下鏡部のガス温度は環状流路部で十分冷却されているため、自然循環流発生後も大きな温度変化は見られない。以上のように模擬炉心部を含むほとんどの箇所における壁温度及びガス温度は、空気の自然循環流が発生するまでの間は時間的に一定温度を保持していることが分かる。

## 5. ま と め

高温ガス炉を模擬した配管破断模擬試験装置を用いて、模擬配管破断後の初期段階における空気浸入及び多成分気体の挙動に関する実験を行った結果、以下の知見を得た。

1. これまでに行った基礎的な実験の場合と同様に、配管破断後すぐには空気の自然循環流は発生せず、本試験装置では模擬炉心部を1000℃に保持した実験でも自然循環流発生（後期段階の開始）までに約5日間要した。
2. 模擬配管破断後の初期段階は、分子拡散と非常に微弱な混合気体の自然対流によって空気が装置内に運ばれる。その後時間の経過とともに装置内の混合気体の密度が大きくなり、装置外の重い空気を十分吸い込むだけの浮力が発生した時点で、突然空気の自然循環流が発生する。
3. 黒鉛流路が600℃～700℃の場合は、酸化反応により発生する気体は主に二酸化炭素であり、一酸化炭素はほとんど発生しない。しかしながら、黒鉛流路が900℃以上になると、一酸化炭素が発生し、さらに一酸化炭素と酸素が気相で反応する一酸化炭素の燃焼反応が加わるため各成分気体の挙動は複雑なものとなる。1000℃を越えると酸素/黒鉛反応においてはかなりの一酸化炭素が発生し、二酸化炭素の発生は主にこの発生した一酸化炭素の燃焼反応によるものであった。
4. 各成分気体のモル分率分布は黒鉛温度によって大きく異なるが、消費される酸素の空気中のモル分率は約20%であり、発生した一酸化炭素、二酸化炭素のモル分率も20%以下であったことから、混合気体の密度には大きな影響を及ぼさなかった。

参 考 文 献

- (1) 武田, 菱田, 機械学会論文集B編, Vol. 55, No 517(1989), pp 2795-2799.
- (2) M. Hishida and T. Takeda, Study on air ingress during an early stage of a primary-pipe rupture accident of a high-temperature gas-cooled reactor, Nucl. Engrg. Des. Vol. 126 (1991), pp175-187.
- (3) 武田, 菱田, JAERI-M, 91-053.
- (4) T. Takeda and M.Hishida, Studies on diffusion and natural convection of two-component gases, Nucl. Engrg.Des. Vol.135(1992), pp341-354.
- (5) 武田, 菱田, 馬場, JAERI-M, 91-179.

Table 1 Main specification of the test model

1. Working fluids : Helium, Air(Nitrogen, Oxygen and other gases), Carbon monoxide and dioxide

2. Pressure :  $-1 \sim 1.8 \text{ kg/cm}^2\text{-G}$

3. Temperature :  $0 \sim 1200^\circ\text{C}$

4. Material of the test model

Flow pipe(graphite part) : IG-110(Toyo carbon)

Flow pipe(ceramic part), Flow guide pipe : Almina(Kyocera)

High-temp. plenum and High-temp. outlet pipe : Almina(Kyocera)

Barrel of the reactor core simulator and Middle-temp. outlet pipe : Stainless steel

Other parts : Carbon steel

5. Dimension of the test model

(1)Flow pipe

Graphite pipe : 40mm in inner diameter, 70mm in outer diameter and 800mm in length

Ceramic pipe : 40mm in inner diameter, 70mm in outer diameter and 400mm in length

Flow guide pipe : 4 pipes, 73mm in inner diameter, 85mm in outer diameter

1250mm in length

(2)High-temp. plenum : 400mm in inner diameter, 460mm in outer diameter

150mm in height

(3)Barrel of the reactor core simulator : 800mm in diameter and 1519mm in height

(4)Top cover : 460mm in radius

(5)Water cooled vessel : 920mm in inner diameter

(6)High-temp. outlet pipe : 69.3mm in inner diameter, 80mm in outer diameter

315mm in length

(7)Middle-temp. outlet pipe : 69.3mm in diameter and 500mm in length

(8)Inlet pipe : 69.3mm in diameter, 600mm in horizontal length and 500mm in vertical length

(9)Total height of the test section : 3750mm

6. Heater capacity

(1)Central pipe : 100V,  $2.3\text{kW} \times 3$  vertical parts

(2)Peripheral pipes : 100V,  $2.3\text{kW} \times 3$  vertical parts  $\times 3$  pipes

(3)High-temp. plenum : 75V, 3kW

(4)Reactor simulator : 200V,  $10\text{kW} \times 3$  vertical parts



Table 2 Position of gas sampling points

Sampling No.	Height*1(mm)	Sampling position
1-1	690	Low-temp. outlet pipe
1-2	1140	Middle-temp. outlet pipe
2-1	1641	High-temp. plenum
2-2	1641	High-temp. plenum
3-1	2790	Annular passage (upper part)
3-2	2840	Annular passage (upper part)
3-3	3040	Top cover (lower part)
4-1	2440	Annular passage (middle part)
4-2	2090	Annular passage (middle part)
4-3	1740	Annular passage (lower part)
5-1	1334	Bottom cover
5-2	1302	Bottom cover
5-3	690	Simulated inlet pipe (vertical pipe)
6-1*2	990	Coaxial pipe (outer pipe)
6-2*2	2090	Annular passage (middle part)
6-3*2	3040	Top cover (lower part)
6-4*2	3441	Top cover (central part)
6-5*2	3643	Top cover (upper part)
6-6*2	1740	Annular passage (lower part)
6-7*2	990	Simulated inlet pipe (horizontal pipe)

\*1 : From lower end of the simulated pipe-rupture valve (outlet pipe side)

\*2 : Spare sampling point

Table 3(1) Measurement points of temperature, pressure, flow rate and gas concentration

物理量	TAG NO	測定位置	測定子	測定範囲	出力処理系					出力形式	備考	
					記録	指示	調節	警報	保護			予測(SCAN)
温度	TR-G01	ループ配管針入口	K-type T/C	0 - 100 °C						CH - 101	DCmV	
	-											
	TR-G02	2重管ノズル内	K-type T/C	0 - 300 °C						CH - 102	DCmV	
	TR-G03	"	"	"						CH - 103	DCmV	
	-											
	TR-G04	下流部内	K-type T/C	0 - 300 °C				R-01		CH - 104	DCmV	
	TR-G05	"	"	"						CH - 105	DCmV	
	TR-G06	"	"	"						CH - 106	DCmV	
	TR-G07	"	"	"						CH - 107	DCmV	
	-											
	TR-G08	炉状容器	K-type T/C	0 - 300 °C				R-02		CH - 108	DCmV	
	TR-G09	"	"	"						CH - 109	DCmV	
	TR-G10	"	"	"						CH - 110	DCmV	
	TR-G11	"	"	"						CH - 111	DCmV	
	TR-G12	"	"	"						CH - 112	DCmV	
TR-G13	"	"	K-type T/C	0 - 300 °C					CH - 113	DCmV		
TR-G14	"	"	"	"					CH - 114	DCmV		
TR-G15	"	"	"	"					CH - 115	DCmV		
-												
-												

Table 3(2) Measurement points of temperature, pressure, flow rate and gas concentration

物理系	TAG NO	測定位置	測定子	測定範囲	出力処理系				出力形式	備考		
					記録	指示	調整	警報			保護	予-λ(SCAN)
温度	TIR-G16	上燃部内 λ温度-01	I-type T/C	0 - 300 °C	R-03	○			CH - 116	DCaY		
	TR-G17	" λ温度-02	"	"					CH - 117	DCaY		
	TR-G18	" λ温度-03	"	"					CH - 118	DCaY		
	TR-G19	" λ温度-04	"	"					CH - 119	DCaY		
	TR-G20	" λ温度-05	"	"					CH - 120	DCaY		
	TR-G21	" λ温度-06	"	"					CH - 121	DCaY		
	-											
	TR-G22	高温炉内 λ温度-01	N-type T/C	0 - 1200 °C	R-04					CH - 122	DCaY	予λ温度-01
	TR-G23	" λ温度-02	"	"						CH - 123	DCaY	予λ温度-02
	TR-G24	" λ温度-03	"	"						CH - 124	DCaY	予λ温度-03
	TR-G25	" λ温度-04	"	"						CH - 125	DCaY	予λ温度-04
	-											
	TIR-G26	高温出口管内 λ温度-01	N-type T/C	0 - 1200 °C	R-05	○				CH - 126	DCaY	予λ温度-01
TIR-G27	中温出口管内 λ温度-01	"	"		○				CH - 127	DCaY	予λ温度-01	
TR-G28	" λ温度-02	"	"						CH - 128	DCaY	予λ温度-02	
-												
TR-G29	冷却器入口 λ温度	I-type T/C	0 - 1000 °C	R-07						DCaY		
TRA-C30	冷却器出口 λ温度	"	0 - 100 °C	R-08		○	○			DCaY		
-												
-												

Table 3(3) Measurement points of temperature, pressure, flow rate and gas concentration

物理量	TAG NO	測定位置	測定子	測定範囲	出力処理系					出力形式	備考	
					記録	指示	調整	警報	保護			子→(SCAN)
温度	TR-G31	模擬入口管内ノ温度-01	K-type T/C	0 - 300 °C	R-09					CH - 129	DCmV	
	TR-G32	ノ温度-02	"	"						CH - 130	DCmV	
	TR-G33	低温出口管内ノ温度	K-type T/C	0 - 300 °C						CH - 131	DCmV	
	TR-G34	スタンバイノ温度	K-type T/C	0 - 100 °C						CH - 132	DCmV	
	TR-G35	高温出口管内ノ温度-02	K-type T/C	0 - 1200 °C						CH - 202	DCmV	→D/A=3%
-	-											
-	-											
-	-											
-	-											
-	-											
-	-											
-	-											
-	-											
-	-											
-	-											
-	-											

Table 3(4) Measurement points of temperature, pressure, flow rate and gas concentration

物理量	TAG NO	測定位置	測定子	測定範囲	出力形式					出力形式	備考
					記録	指示	制御	警報	保護		
温度	TICA-H01	中心領域 主ヒト-温度-01	R-type T/C	0 - 1500 °C	○	○	○	○	○	DCaV	(予備1本)
	TICA-H02	" 主ヒト-温度-02	"	"		○	○	○	○	DCaV	( " )
	TICA-H03	" 主ヒト-温度-03	"	"	"		○	○	○	DCaV	( " )
	TICA-H11	周辺領域 主ヒト-温度-1/01	R-type T/C	0 - 1500 °C		○	○	○	○	DCaV	( " )
	TICA-H12	" 主ヒト-温度-1/02	"	"		○	○	○	○	DCaV	( " )
	TICA-H13	" 主ヒト-温度-1/03	"	"	"		○	○	○	DCaV	( " )
	TICA-H21	周辺領域 主ヒト-温度-2/01	"	"	"		○	○	○	DCaV	( " )
	TICA-H22	" 主ヒト-温度-2/02	"	"	"		○	○	○	DCaV	( " )
	TICA-H23	" 主ヒト-温度-2/03	R-type T/C	0 - 1500 °C		○	○	○	○	DCaV	( " )
	TICA-H31	周辺領域 主ヒト-温度-3/01	"	"	"		○	○	○	DCaV	( " )
	TICA-H32	" 主ヒト-温度-3/02	"	"	"		○	○	○	DCaV	( " )
	TICA-H33	" 主ヒト-温度-3/03	"	"	"		○	○	○	DCaV	( " )
	TICA-H41	周辺領域 補償ヒト-温度-01	R-type T/C	0 - 1500 °C		○	○	○	○	DCaV	( " )
	TICA-H42	" 補償ヒト-温度-02	"	"	"		○	○	○	DCaV	( " )
	TICA-H43	" 補償ヒト-温度-03	"	"	"		○	○	○	DCaV	( " )
TICA-H51	蒸留7 以下 下階ヒト-温度	R-type T/C	0 - 1500 °C		○	○	○	○	DCaV	( " )	
-											
-											
-											
-											

Table 3(5) Measurement points of temperature, pressure, flow rate and gas concentration

物理量	TAG NO	測定位置	測定子	測定範囲	出力形式				出力形式	備考	
					記録	指示	割断	警報			保護
温度	TR-M01	セラミック回路管 温度-C/11	K-type T/C	0 - 1200 °C					CH - 133	DCaV	
	TR-M02	" 温度-C/12	"	"					CH - 134	DCaV	
	TR-M03	" 温度-P/11	"	"					CH - 135	DCaV	
	TR-M04	" 温度-P/12	"	"					CH - 136	DCaV	
	TR-M05	" 温度-P/21	"	"					CH - 137	DCaV	
	TR-M06	" 温度-P/22	"	"					CH - 138	DCaV	
	TR-M07	" 温度-P/31	"	"					CH - 139	DCaV	
	TR-M08	" 温度-P/32	"	"					CH - 140	DCaV	
	TR-M09	黒鉛回路管 温度-C0/01	K-type T/C	0 - 1200 °C					CH - 141	DCaV	
	TR-M10	" 温度-C0/02	"	"					CH - 142	DCaV	
	TR-M11	" 温度-C0/03	"	"				R-10 ○	CH - 143	DCaV	
	TR-M12	" 温度-C0/04	"	"					CH - 144	DCaV	
	TR-M13	" 温度-C0/05	"	"					CH - 145	DCaV	
	TR-M14	黒鉛回路管 温度-P1/01	K-type T/C	0 - 1200 °C					CH - 146	DCaV	
	TR-M15	" 温度-P1/02	"	"					CH - 147	DCaV	
	TR-M16	" 温度-P1/03	"	"				R-11 ○	CH - 148	DCaV	
	TR-M17	" 温度-P1/04	"	"					CH - 149	DCaV	
	TR-M18	" 温度-P1/05	"	"					CH - 150	DCaV	

Table 3(6) Measurement points of temperature, pressure, flow rate and gas concentration

物理量	TAG NO	測定位置	測定子	測定範囲	出力処理系				出力形式	備	考
					記録	指示	警報	保護			
温度	TR-W19	風船流路管 温度-P2/01	K-type T/C	0 - 1200 °C				CH - 151	DCmV		
	TR-W20	" 温度-P2/02	"	"				CH - 152	DCmV		
	TIR-W21	" 温度-P2/03	"	"	R-12	○		CH - 153	DCmV		
	TR-W22	" 温度-P2/04	"	"				CH - 154	DCmV		
	TR-W23	" 温度-P2/05	"	"				CH - 155	DCmV		
	TR-W24	風船流路管 温度-P3/01	K-type T/C	0 - 1200 °C				CH - 156	DCmV		
	TR-W25	" 温度-P3/02	"	"				CH - 157	DCmV		
	TIR-W26	" 温度-P3/03	"	"	R-13	○		CH - 158	DCmV		
	TR-W27	" 温度-P3/04	"	"				CH - 159	DCmV		
	TR-W28	" 温度-P3/05	"	"				CH - 160	DCmV		
	-										
	TR-W29	風船流路管 温度-1	K-type T/C	0 - 1200 °C		R-14		CH - 161	DCmV		
	TR-W30	" 温度-2	"	"		R-15		CH - 162	DCmV		
	TR-W31	" 温度-3	"	"		R-16		CH - 163	DCmV		
	-										
	TR-W32	高濃度ガス 上置温度-01	K-type T/C	0 - 1200 °C		R-17		CH - 164	DCmV		2700mV
TR-W33	" 上置温度-02	"	"				CH - 165	DCmV		2700mV	
TR-W34	" 上置温度-03	"	"				CH - 166	DCmV		2700mV	
-											
-											

Table 3(7) Measurement points of temperature, pressure, flow rate and gas concentration

物理量	TAG NO	測定位置	測定子	測定範囲	出力処理系				出力形式	備	考	
					記録	指示	調整	警報				保護
温度	TR-W35	高温炉内 側壁温度-01	K-type T/C	0 - 1200 °C	R-18				CH - 167	DCmV	ニケルシニケル	
	TR-W36	" 側壁温度-02	"	"					CH - 168	DCmV	ニケルシニケル	
	TR-W37	" 下壁温度-01	K-type T/C	0 - 1200 °C	R-19				CH - 169	DCmV	ニケルシニケル	
	TR-W38	" 下壁温度-02	"	"					CH - 170	DCmV	ニケルシニケル	
	TR-W39	" 下壁温度-03	"	"					CH - 171	DCmV	ニケルシニケル	
	TR-W40	水冷容器 (上机) 壁温-01	K-type T/C	0 - 100 °C					CH - 172	DCmV		
	TR-W41	" 壁温-02	"	"					CH - 173	DCmV		
	TR-W42	水冷容器 (断) 壁温-01	K-type T/C	0 - 100 °C					CH - 174	DCmV		
	TR-W43	" 壁温-02	"	"					CH - 175	DCmV		
	TR-W44	" 壁温-03	"	"					CH - 176	DCmV		
	TR-W45	" 壁温-04	"	"					CH - 177	DCmV		
	TR-W46	水冷容器 (下机) 壁温-01	K-type T/C	0 - 100 °C					CH - 178	DCmV		
	TR-W47	" 壁温-02	"	"					CH - 179	DCmV		
	TR-W48	" 壁温-03	"	"					CH - 180	DCmV		
	TR-W49	高温出口管 壁温		K-type T/C	0 - 1200 °C	R-20				CH - 201	DCmV	ニケルシニケル
	TR-W51	中温出口管 壁温-01		K-type T/C	0 - 1000 °C	R-21				CH - 203	DCmV	
	TR-W52	" 壁温-02		"	"					CH - 204	DCmV	
	TR-W53	" 壁温-03		"	"					CH - 205	DCmV	
	-											



Table 3(8) Measurement points of temperature, pressure, flow rate and gas concentration

物理点	TAG NO	測定位置	測定子	測定範囲	出力処理系					出力形式	備考
					記録	指示	警報	保護	予→(SCAN)		
温度	TR-W54	蒸気出口管 感温	K-type T/C	0 - 100 °C					CH - 206	DCmV	
	TR-W55	換気入口管 感温	K-type T/C	0 - 100 °C					CH - 207	DCmV	
	TR-W56	換気房心管 感温-01	K-type T/C	0 - 500 °C	R-22				CH - 208	DCmV	
	TR-W57	" 感温-02	"	"					CH - 209	DCmV	
	TR-W58	" 感温-03	"	"					CH - 210	DCmV	
	TR-W59	" 感温-04	"	"					CH - 211	DCmV	
	TR-W60	" 感温-05	"	"					CH - 212	DCmV	
	TR-W61	" 感温-06	"	"					CH - 213	DCmV	
	TR-W62	" 感温-07	"	"					CH - 214	DCmV	
	TR-W63	" 感温-08	"	"					CH - 215	DCmV	
TR-W64	" 感温-09	"	"					CH - 216	DCmV		
TR-W65	" 感温-10	"	"					CH - 217	DCmV		
TR-W66	スタンバイ管 感温	K-type T/C	0 - 100 °C					CH - 218	DCmV		
TR-W67	高温配管 感温-01	K-type T/C	0 - 500 °C					CH - 219	DCmV		
TR-W68	" 感温-02	"	"					CH - 220	DCmV		
TR-W69	" 感温-03	"	"					CH - 221	DCmV		
TR-C01	ガス冷却器 出口水温	K-type T/C	0 - 100 °C					CH - 222	DCmV		
TR-C02	中温出口管冷却水 出口水温	K-type T/C	0 - 100 °C					CH - 223	DCmV		

Table 3(9) Measurement points of temperature, pressure, flow rate and gas concentration

物理量	TAG NO	測定位置	測定子	測定範囲	出力処理系					出力形式	備考
					記録	指示	調節	警報	保護		
流量	FICA-001	ループ ガス流量	層流型	0 - 1540 l/min	○	○	○	○	○	DC 0-10V	
	FR-002	低温出口管 ガス流量	超音波式	0 - 10 m/s						CH - 230	
	FIRA-003	中温出口管 冷却水流量	面積式	0 - 15 l/min	R-23	○		○	○	DC 4-20mA	
	FIA-004	ガス冷却器 冷却水流量	"	0 - 50 l/min		○		○	○	接点	(項目指示型)
	FIA-005	高温配管 冷却水流量	"	0 - 15 l/min		○		○	○	接点	( " )
	FI-006	上頭部 冷却水流量	"	0 - 15 l/min		○					( " )
	FI-007	胴部 冷却水流量	"	0 - 50 l/min		○					( " )
	FI-008	下頭部 冷却水流量	"	0 - 15 l/min		○					( " )
	FI-009	模擬入口管 冷却水流量	"	0 - 15 l/min		○					( " )
	FI-010	低温出口管 冷却水流量	"	0 - 15 l/min		○					( " )
	-										
	-										
	-										
	-										
	-										
	-										
	-										
	-										
	-										

Table 3(00) Measurement points of temperature, pressure, flow rate and gas concentration

物理点	TAG NO	測定位置	測定子	測定範囲	出力特性				出力形式	備	
					記録	指示	調整	警報			保護
圧力	PI-001	送風機出口 圧力	ブドン管	-1 - 3 Kg/cm <sup>2</sup>	○					(現場指示型)	
	PI-002	ルーブ風量計 入口圧力	電子式圧力伝送器	-1 - 2 Kg/cm <sup>2</sup>	○				DC 4-20mA	(デジタル表示)	
	PI-003	水冷却器内 真空度	ピラニ管	10 <sup>-3</sup> - 20 Torr	○				DCmV		
	PICRA-004	水冷却器系 圧力-01	電子式圧力伝送器	0 - 0.1 Kg/cm <sup>2</sup>	R-24	○	○		DC 4-20mA	(デジタル表示)	
	PICRA-005	" 圧力-02	電子式圧力伝送器	-1 - 2 Kg/cm <sup>2</sup>	R-25	○	○	○	DC 4-20mA	(デジタル表示)	
	PI-006	" 圧力-03	ブドン管	-1 - 3 Kg/cm <sup>2</sup>		○				(現場指示型)	
	PI-007	真空ポンプ入口 真空度	ピラニ管	10 <sup>-3</sup> - 20 Torr		○			DCmV		
	PI-008	ルーブ内 真空度	ピラニ管	10 <sup>-3</sup> - 20 Torr		○			DCmV		
	PdI-002	送風機排程 (差圧)	ΔP-X	0 - 5000 mmHg		○					(現場指示型)
	-										
	-										
-											
-											
-											
-											
-											
-											

Table 3(II) Measurement points of temperature, pressure, flow rate and gas concentration

物理量	TAG NO	測定位置	測定子	測定範囲	出力処理系				出力形式	備考		
					記録	指示	調整	警報			保護	予→(SCAN)
濃度	O <sub>2</sub> R-001	出口管酸素濃度		0 - 25 %					CH - 231			
	O <sub>2</sub> R-002	高温プレナム酸素濃度		0 - 25 %					CH - 232			
	O <sub>2</sub> R-003	上燃部酸素濃度		0 - 25 %					CH - 233			
	O <sub>2</sub> R-004	環状流路酸素濃度		0 - 25 %					CH - 234			
	O <sub>2</sub> R-005	下燃部・模範入口管酸素濃度		0 - 25 %					CH - 235			
	COR-001	出口管CO濃度		0 - 50 %	R-26				CH - 236			
	COR-002	高温プレナムCO濃度		0 - 50 %	R-27				CH - 237			
	COR-003	上燃部CO濃度		0 - 50 %	R-28				CH - 238			
	COR-004	環状流路CO濃度		0 - 50 %	R-29				CH - 239			
	COR-005	下燃部・模範入口管CO濃度		0 - 50 %	R-30				CH - 240			
	CO1A-006	実験室内CO濃度	定電位電極式		0 - 150 ppm							
	CO <sub>2</sub> R-001	出口管CO <sub>2</sub> 濃度			0 - 25 %					CH - 241		
	CO <sub>2</sub> R-002	高温プレナムCO <sub>2</sub> 濃度			0 - 25 %					CH - 242		
CO <sub>2</sub> R-003	上燃部CO <sub>2</sub> 濃度			0 - 25 %					CH - 243			
CO <sub>2</sub> R-004	環状流路CO <sub>2</sub> 濃度			0 - 25 %					CH - 244			
CO <sub>2</sub> R-005	下燃部・模範入口CO <sub>2</sub> 濃度			0 - 25 %					CH - 245			
O <sub>2</sub> A-006	ルーブ内酸素濃度			0 - 25 %								

Table 3(12) Measurement points of temperature, pressure, flow rate and gas concentration

物理量	TAG NO	測定位置	測定子	測定範囲	出力処理系					出力形式	備考	
					記録	指示	調整	警報	保護			予-1(SCAN)
密度	DR-001	出口管 ガス密度		HOLD					CH - 246			
	DR-002	高温プレナム ガス密度		HOLD					CH - 247			
	DR-003	上箱部 ガス密度		HOLD					CH - 248			
	DR-004	環状流路 ガス密度		HOLD					CH - 249			
	DR-005	下箱部・模擬入口管 ガス密度		HOLD					CH - 250			
	-											
	-											
	-											
	-											
	-											
	-											
	-											

Table 3(3) Measurement points of temperature, pressure, flow rate and gas concentration

物理量	TAG NO	測定位置	測定子	測定範囲	出力処理系					出力形式	備考
					記録	指示	警報	保護	予-3(SCAN)		
電流	11-001	中心領域 主1-1-01 電流	CT	0 - 30A	○					ACamp	
	11-002	" 主1-1-02 電流	"	0 - 30A	○					ACamp	
	11-003	" 主1-1-03 電流	"	0 - 30A	○					ACamp	
	11-011	周辺領域 主1-1-1/01 電流	"	0 - 30A	○					ACamp	
	11-012	" 主1-1-1/02 電流	"	0 - 30A	○					ACamp	
	11-013	" 主1-1-1/03 電流	"	0 - 30A	○					ACamp	
	11-021	周辺領域 主1-1-2/01 電流	"	0 - 30A	○					ACamp	
	11-022	" 主1-1-2/02 電流	"	0 - 30A	○					ACamp	
	11-023	" 主1-1-2/03 電流	"	0 - 30A	○					ACamp	
	11-031	周辺領域 主1-1-3/01 電流	"	0 - 30A	○					ACamp	
	11-032	" 主1-1-3/02 電流	"	0 - 30A	○					ACamp	
	11-033	" 主1-1-3/03 電流	"	0 - 30A	○					ACamp	
	11-041	周辺領域 補償1-1-01 電流	"	0 - 75A	○					ACamp	
	11-042	" 補償1-1-02 電流	"	0 - 75A	○					ACamp	
	11-043	" 補償1-1-03 電流	"	0 - 75A	○					ACamp	
11-051	高燃炉以下部1-1-1 電流	"	0 - 50A	○					ACamp		
-											
-											
-											
-											

Table 4 Temperature results in the test model just after the simulated pipe rupture

Measured points	Run number	unit (°C)								
		A-60	A-70	A-75	A-80	A-90	A-95	A-100	A-105	
Middle-temp. outlet pipe (gas)	22.7	19.8	29.7	13.7	9.4	26.6	13.8	31.8		
Middle-temp. outlet pipe (wall)	23.0	20.3	30.0	13.8	10.4	24.2	23.5	31.1		
High-temp. outlet pipe (gas)	428.8	511.5	552.7	596.1	680.4	730.6	769.1	823.1		
High-temp. outlet pipe (wall)	442.1	522.7	562.0	602.8	684.5	732.4	771.1	814.9		
High-temp. plenum (gas)	563.3	658.0	705.0	763.0	859.9	888.0	949.1	996.3		
High-temp. plenum (wall)	559.8	685.9	734.1	737.1	853.4	932.2	981.1	1019.8		
Graphite pipes (wall)	607.7	708.2	757.7	806.7	907.1	955.7	1002.7	1045.7		
Graphite and ceramic pipes (wall)	564.1	656.3	704.9	733.1	843.6	890.0	909.3	977.1		
Top cover (gas)	80.7	88.2	101.6	92.9	98.9	118.1	122.6	131.5		
Annular passage (gas)	74.5	85.0	98.4	91.8	96.9	115.0	114.2	127.2		
Inner barrel (wall)	159.3	181.2	200.3	195.9	216.4	246.5	247.7	269.3		
Water cooled vessel (wall)	33.4	33.4	44.9	29.6	29.0	44.9	46.1	55.3		
Bottom cover (gas)	33.0	30.8	45.3	26.1	23.6	38.5	36.7	44.9		
Inlet pipe (gas)	22.6	19.7	29.6	13.6	9.2	22.5	22.1	29.1		
Inlet pipe (wall)	23.3	20.9	30.6	15.9	11.2	26.0	23.8	29.5		

Table 5 Calibration gases

Check point	Analyzer	Density meter	Oxygen analyzer	CO and CO <sub>2</sub> analyzer
Zero point		Helium	Helium	Helium
Maximum point		Air	Air	10%CO+20.1%CO <sub>2</sub> /Helium 9.86%CO+20.1%CO <sub>2</sub> /Nitrogen

Table 6 Mutual diffusion coefficient of CO<sub>2</sub> and CO

Diff. coef. Temperature	CO <sub>2</sub> -He (m <sup>2</sup> /s)	CO-He (m <sup>2</sup> /s)	CO <sub>2</sub> -N <sub>2</sub> (m <sup>2</sup> /s)	CO-N <sub>2</sub> (m <sup>2</sup> /s)
300K (27°C)	$6.01 \times 10^{-5}$	$7.12 \times 10^{-5}$	$1.57 \times 10^{-5}$	$2.04 \times 10^{-5}$
700K (427°C)	$2.47 \times 10^{-4}$	$2.90 \times 10^{-4}$	$6.82 \times 10^{-5}$	$8.63 \times 10^{-5}$
900K (627°C)	$3.75 \times 10^{-4}$	$4.40 \times 10^{-4}$	$1.04 \times 10^{-4}$	$1.31 \times 10^{-4}$

Table 7 Dimension of each part

Parts	Length(m)	Diameter(m)	Cross-sec. area(m <sup>2</sup> )	Volume(m <sup>3</sup> )
Low & mid.-temp. pipe	0.832	0.0693	$3.77 \times 10^{-3}$	$3.14 \times 10^{-3}$
High-temp pipe	0.299	0.0693	$3.77 \times 10^{-3}$	$1.13 \times 10^{-3}$
High-temp. plenum	0.150	0.400	0.126	$1.88 \times 10^{-2}$
Flow pipe	1.120	0.040	$1.26 \times 10^{-3} (\times 4)$	$1.41 \times 10^{-3} (\times 4)$
Top cover	0.320	0.920	0.665	0.213
Annular passage	1.471	0.060*1	0.162	0.238
Bottom cover	0.100	0.920	0.584	$5.84 \times 10^{-2}$
Coaxial pipe (outer)	0.332	0.0519*1	$2.09 \times 10^{-2}$	$6.94 \times 10^{-3}$
Inlet pipe (horizontal)	0.600	0.0693	$3.77 \times 10^{-3}$	$2.26 \times 10^{-3}$
Inlet pipe (vertical)	0.500	0.0693	$3.77 \times 10^{-3}$	$1.89 \times 10^{-3}$
Thermal insulation	-	-	-	0.499

\*1 : Equivalent diameter



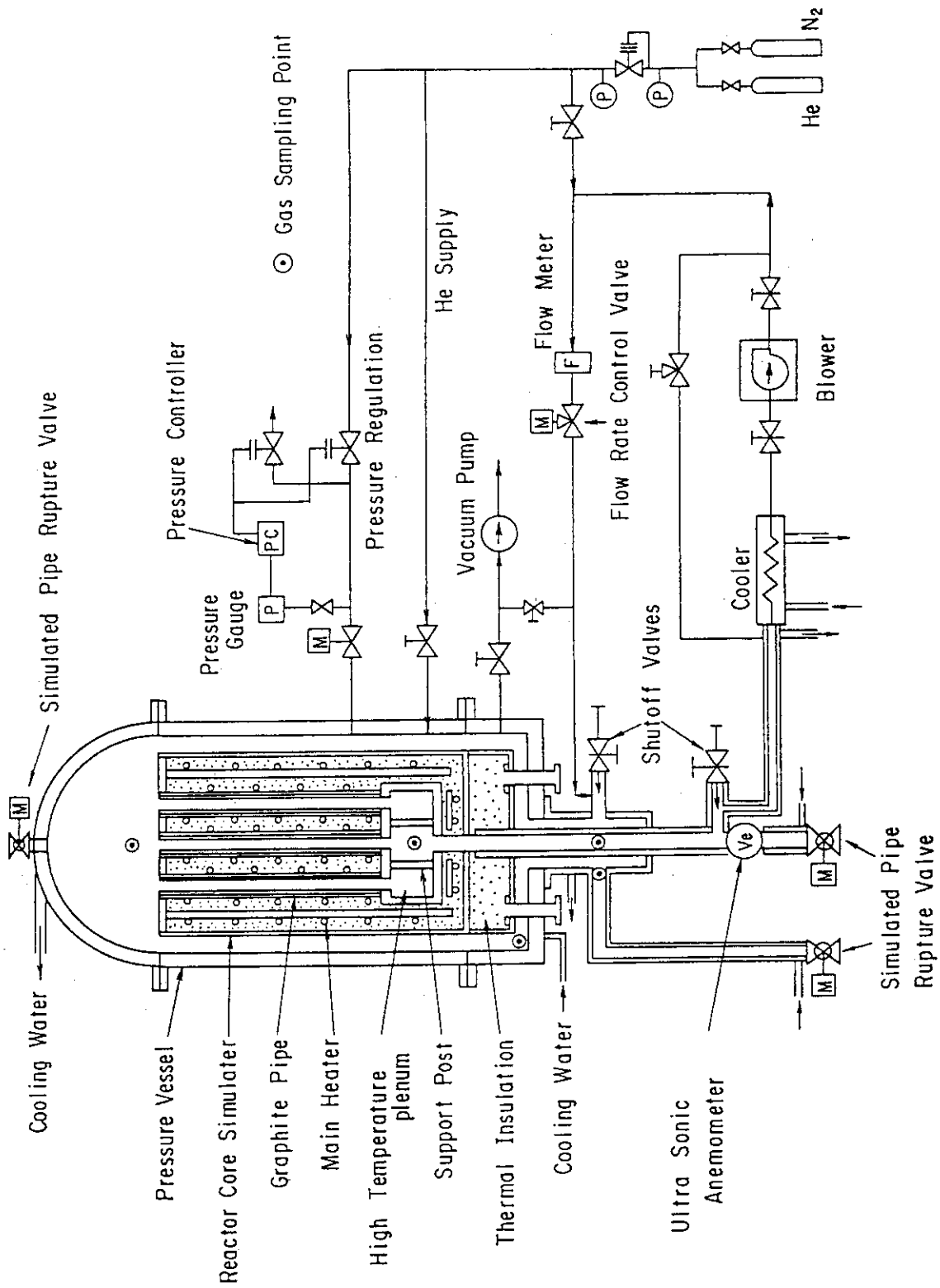


Fig.1 Schematic flow diagram of experimental apparatus

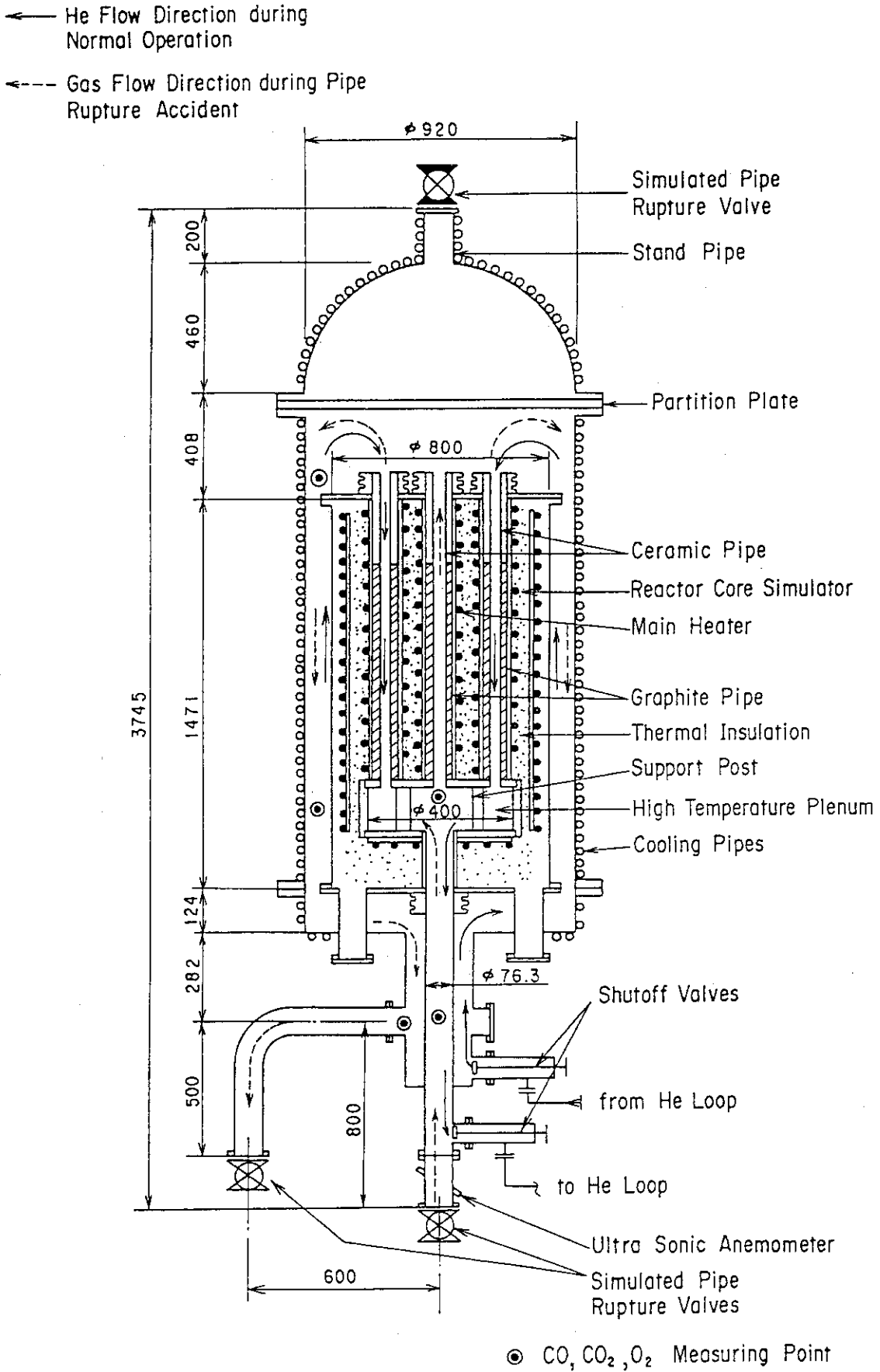


Fig. 2 Test model

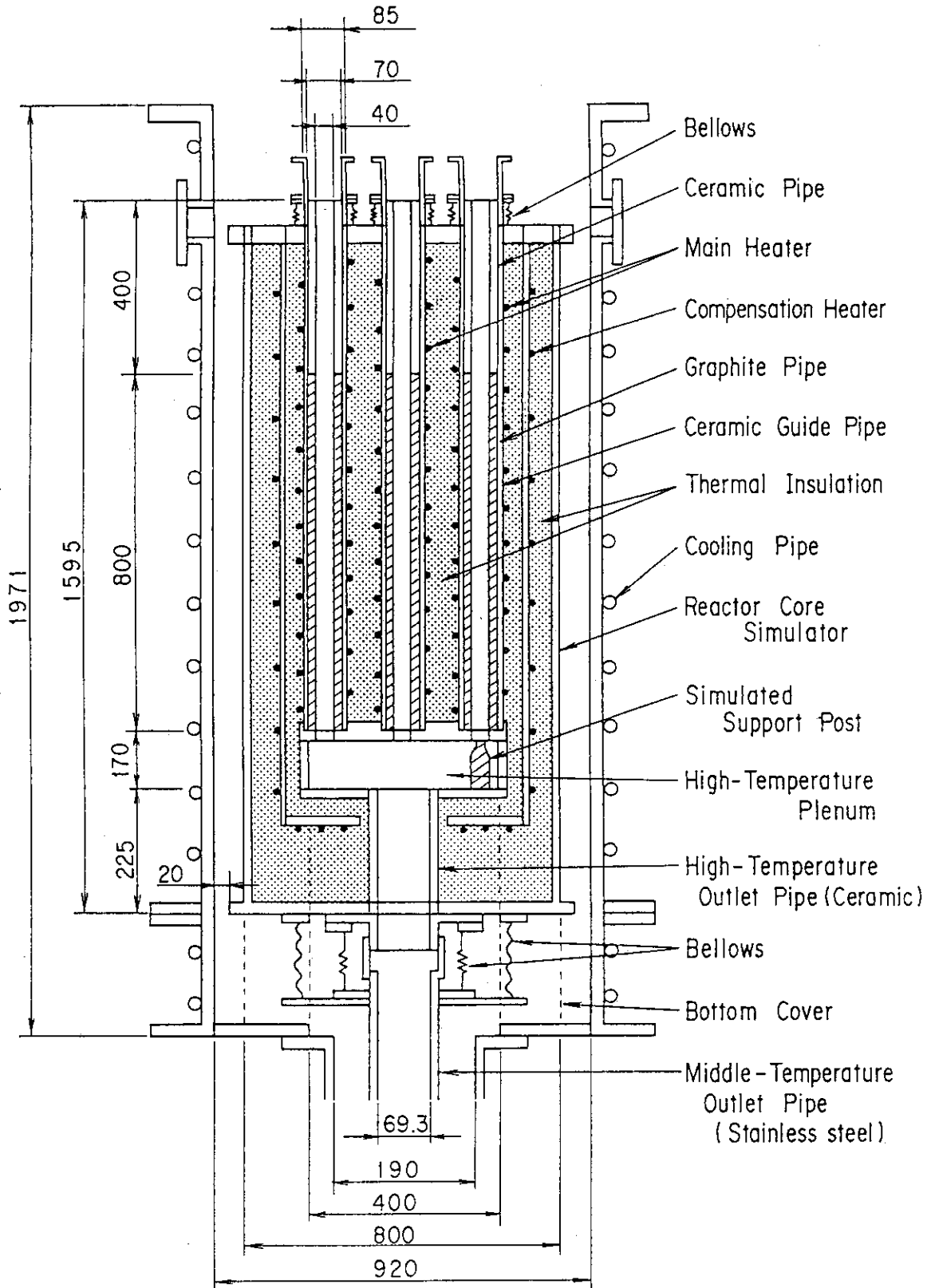


Fig.3 Reactor core simulator

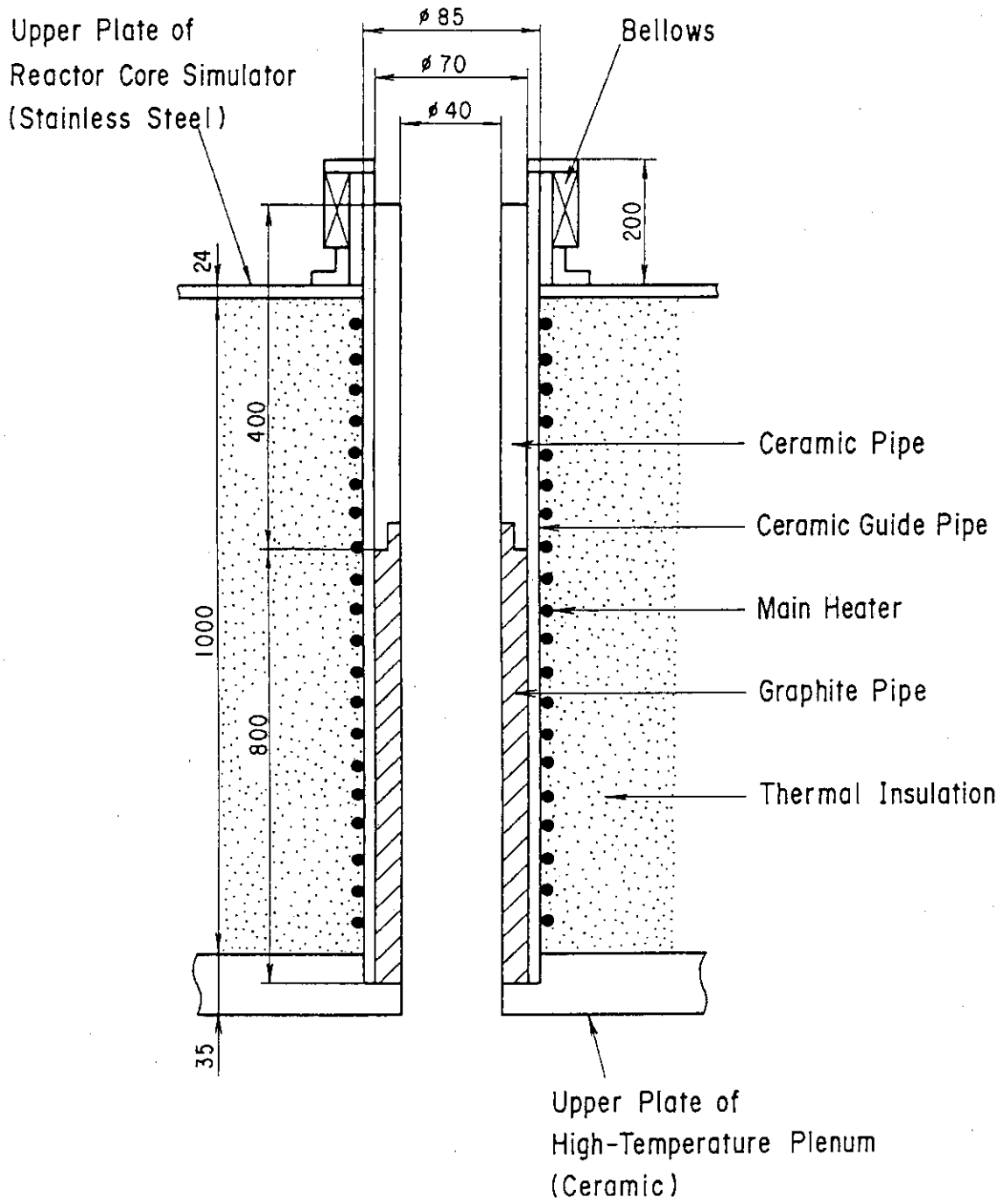


Fig. 4 Flow pipe

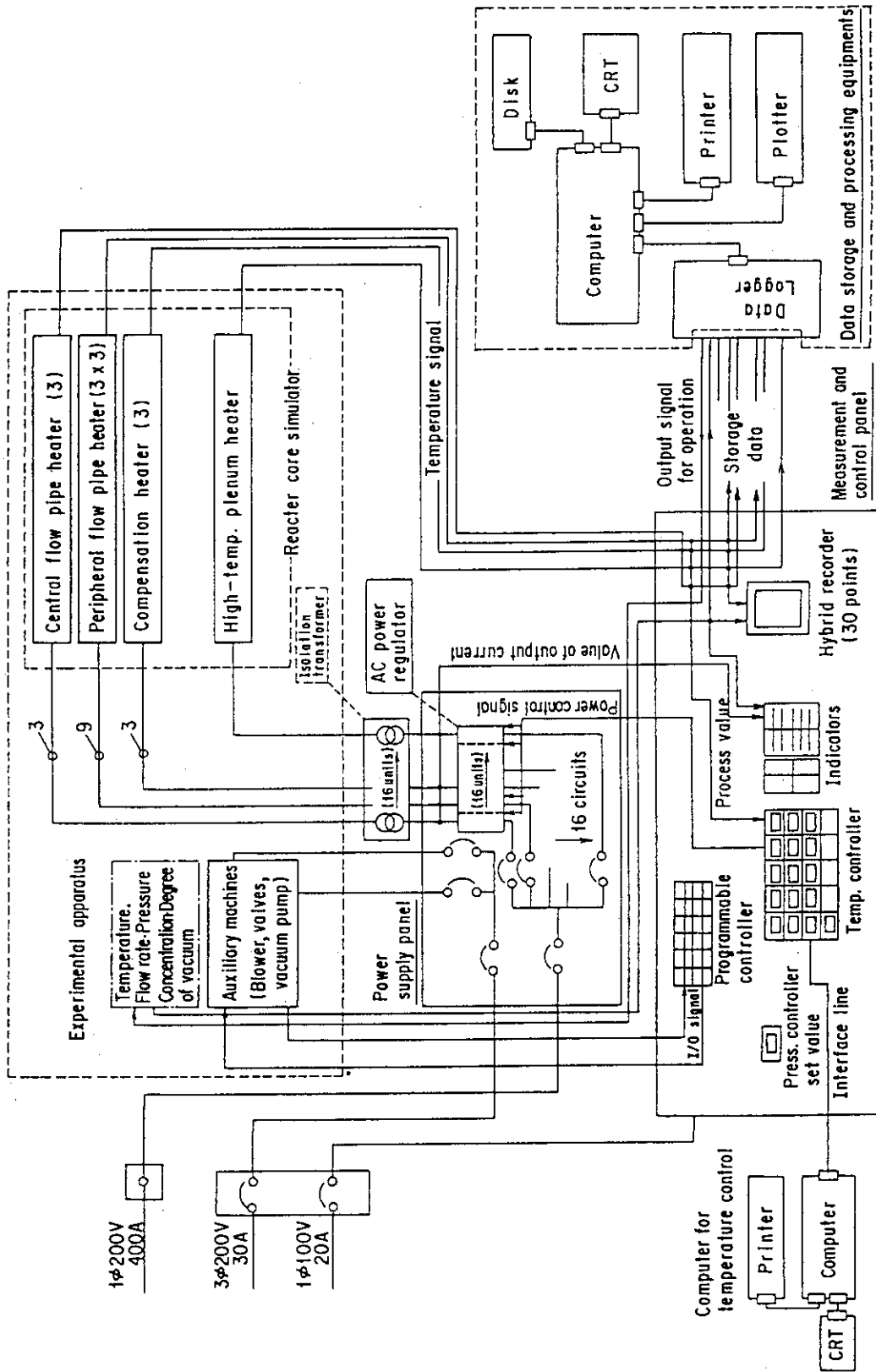


Fig. 5 Schematic drawing of electrical instrument

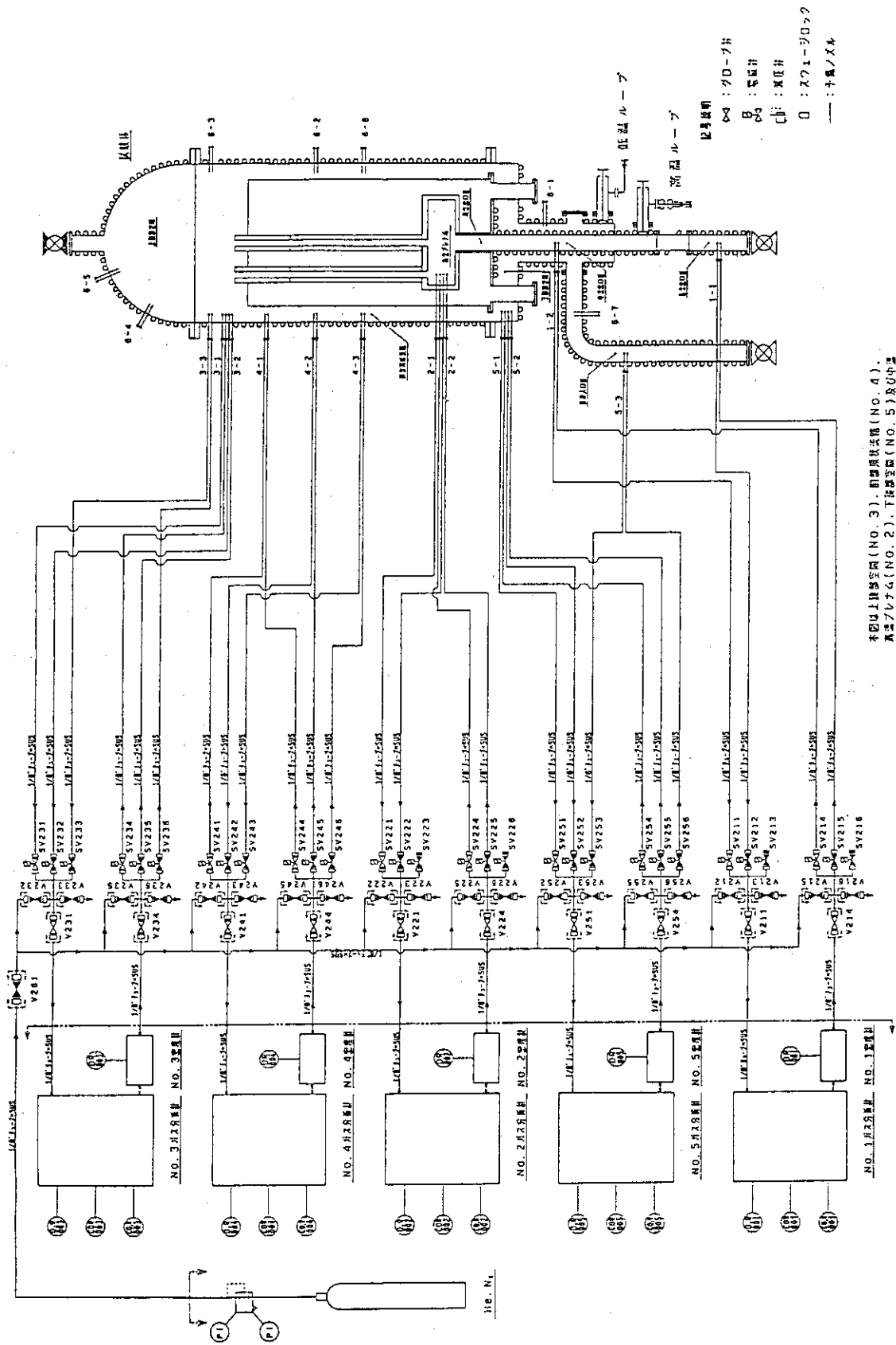


Fig. 6 Flow sheet of gas sampling system

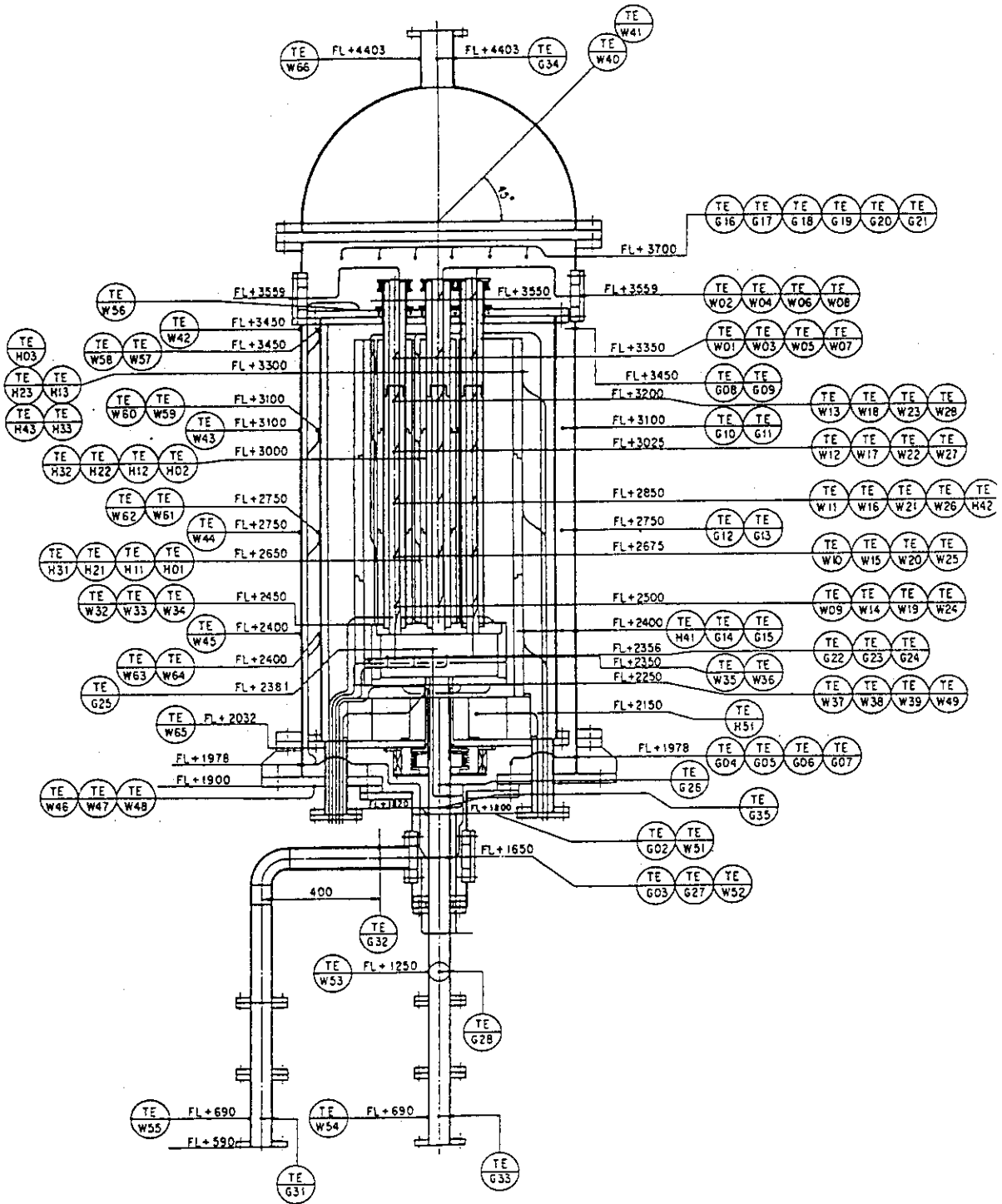


Fig. 7(1) Position of temperature measurement

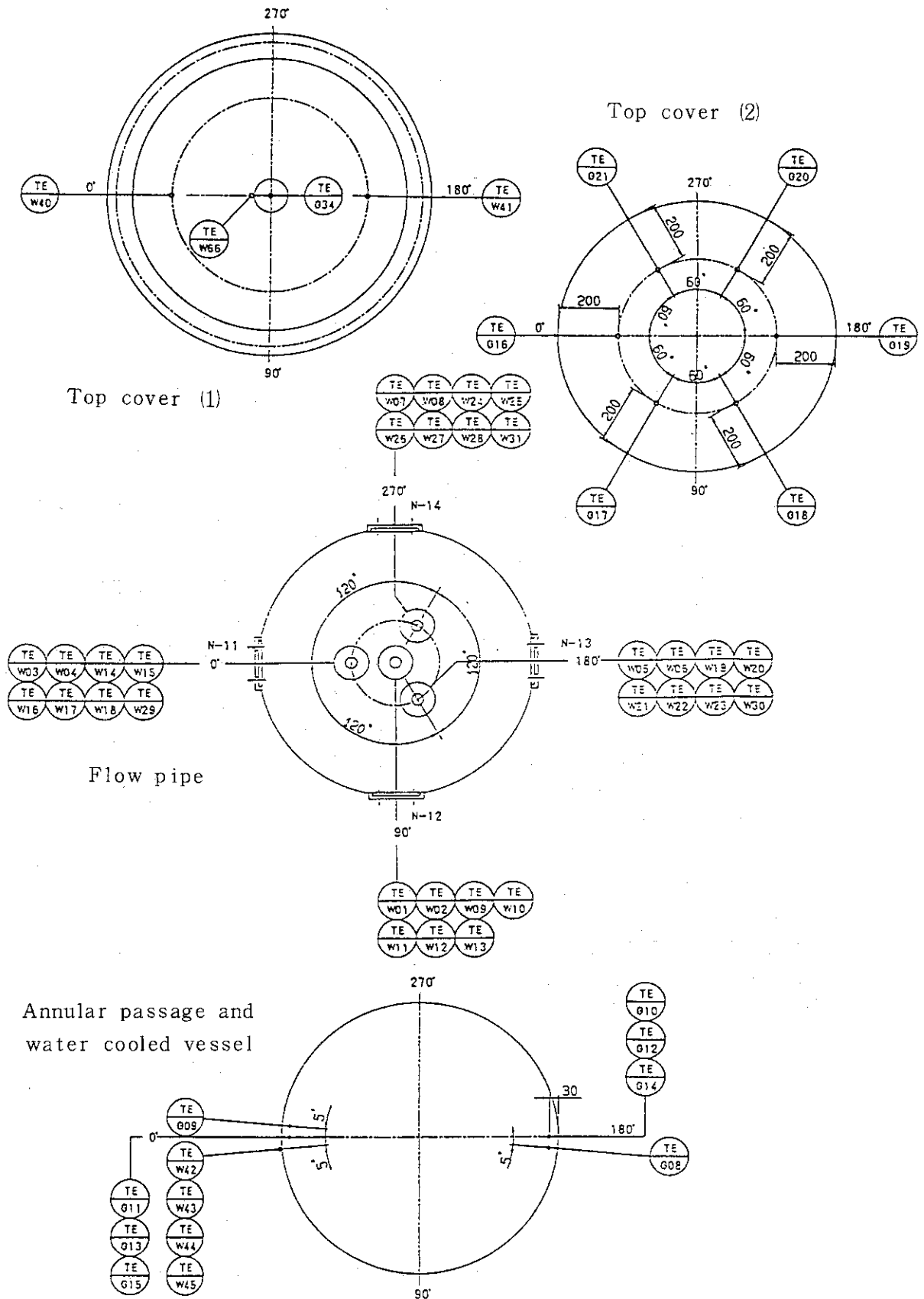


Fig. 7(2) Position of temperature measurement



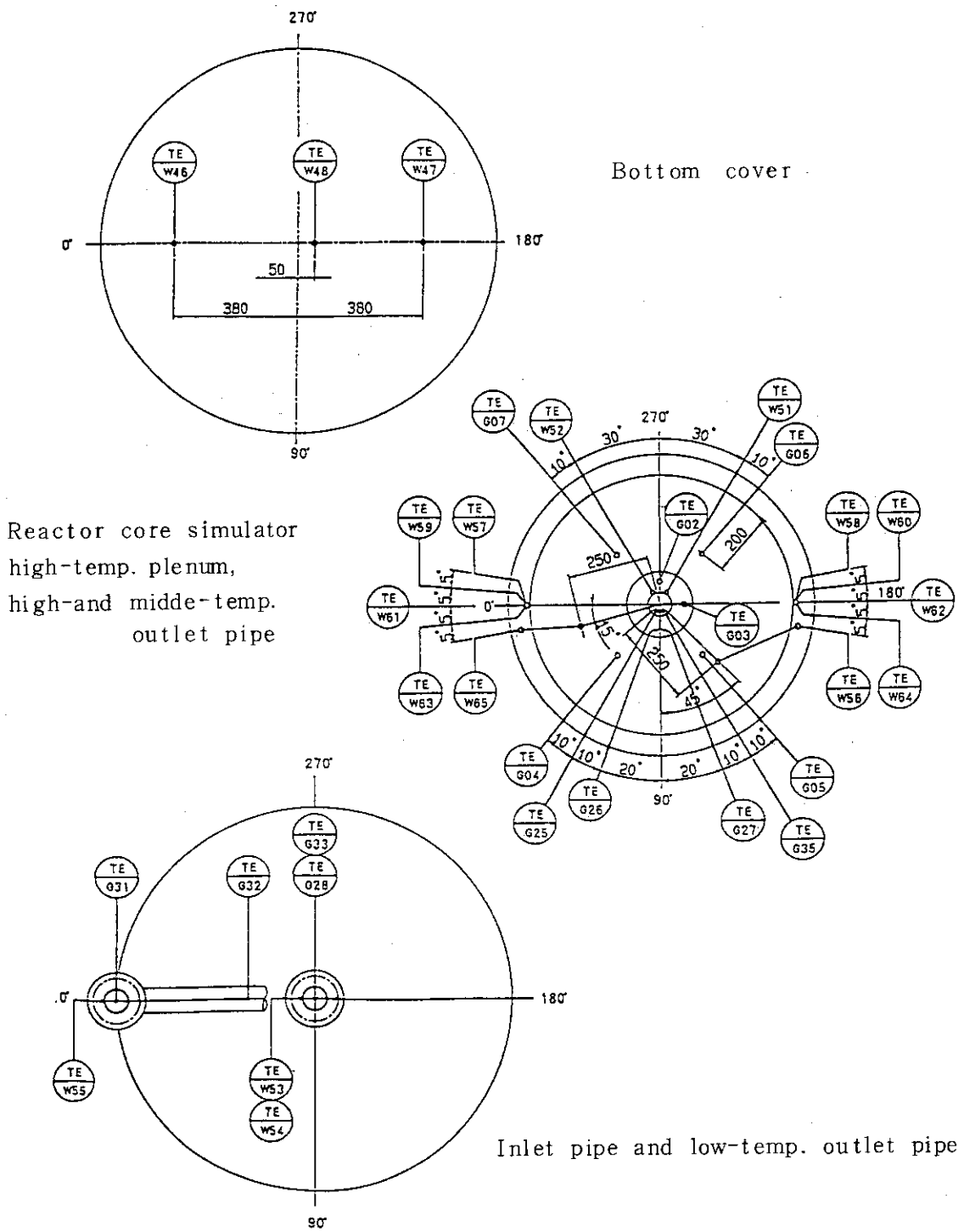


Fig. 7(3) Position of temperature measurement

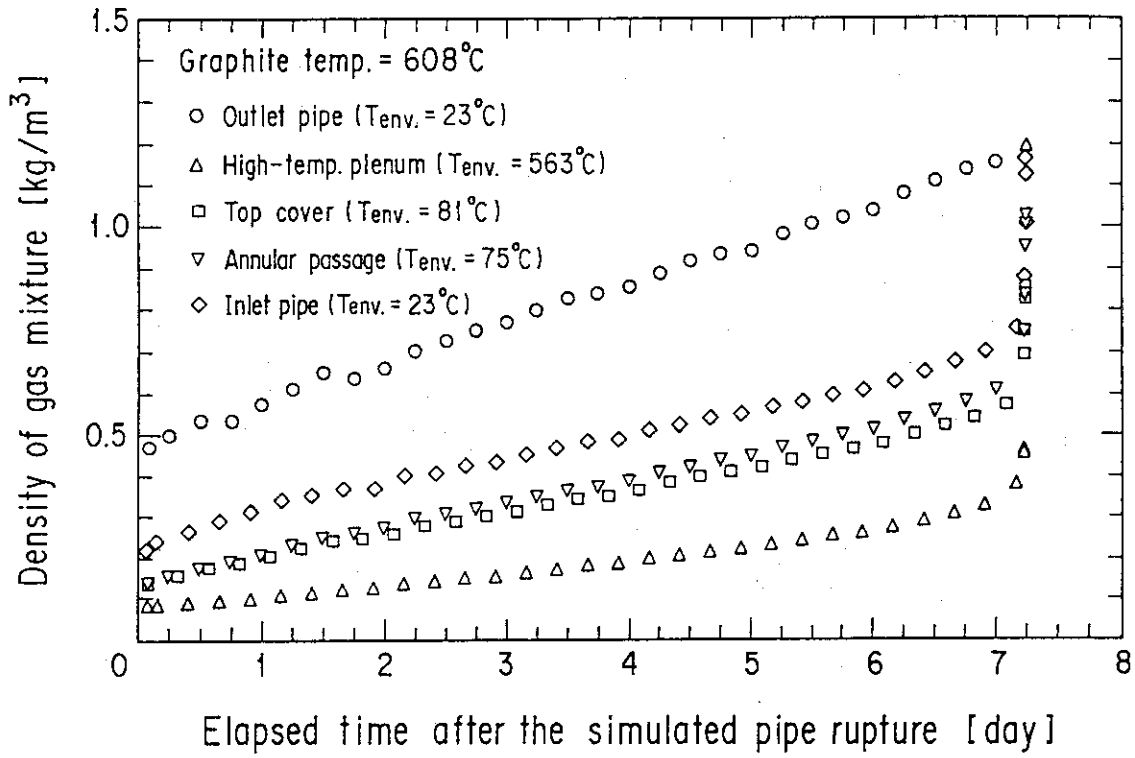


Fig. 8.1 Density changes of gas mixture (A-60)

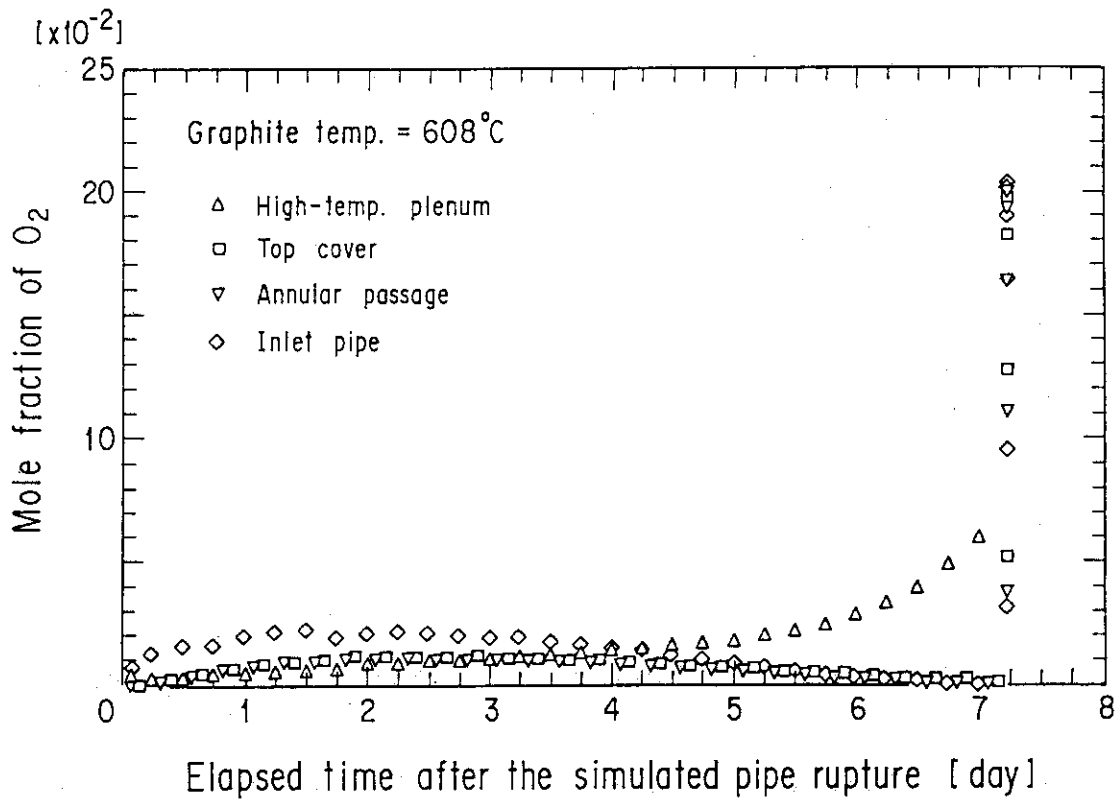


Fig. 8.2 Mole fraction changes of O<sub>2</sub> (A-60)

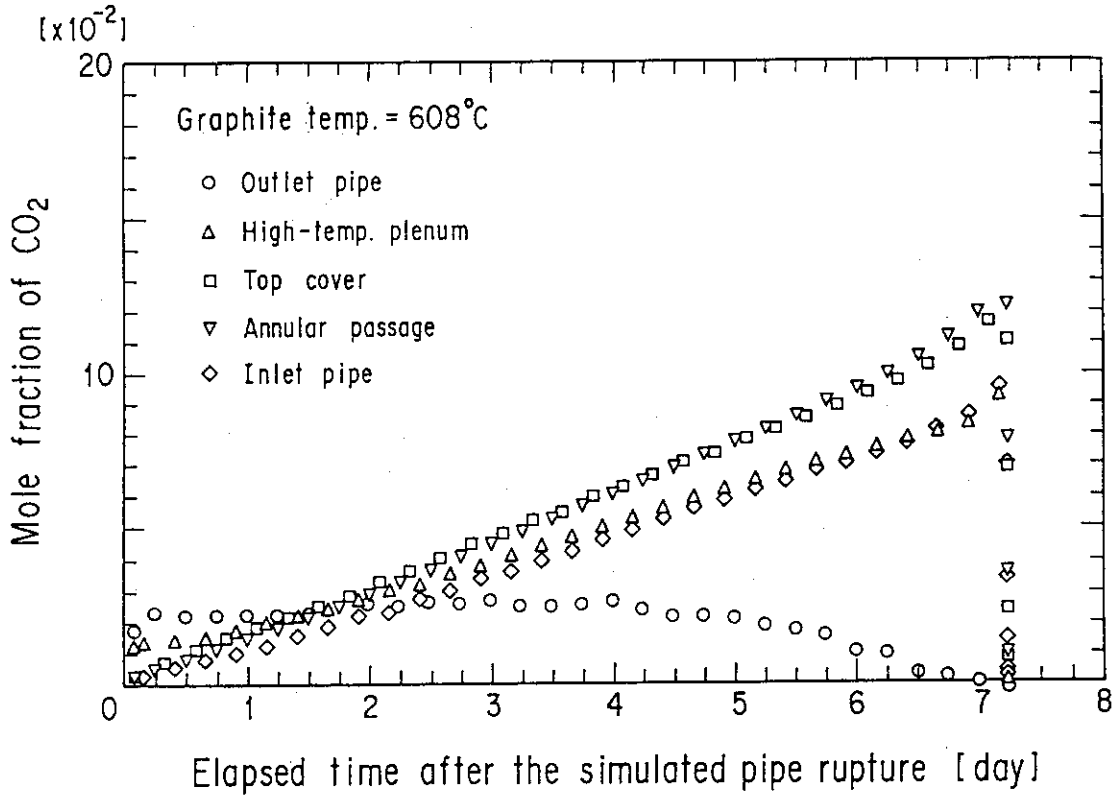


Fig. 8.3 Mole fraction changes of CO<sub>2</sub> (A-60)

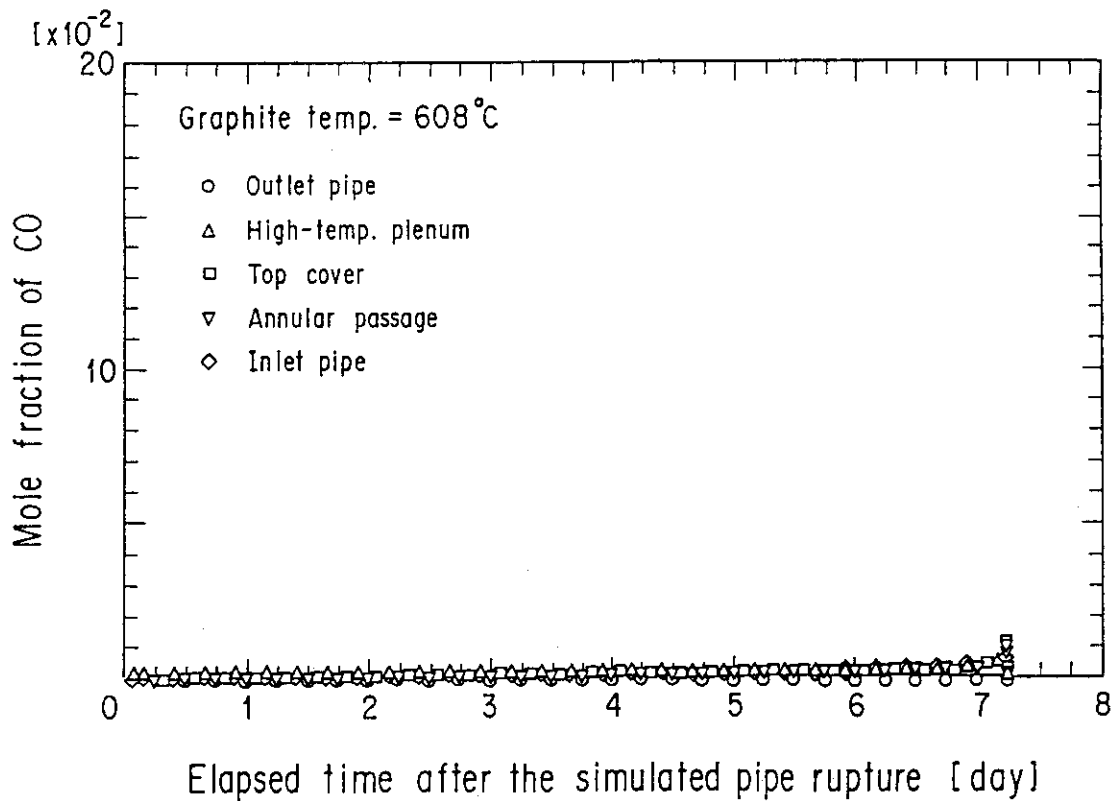


Fig. 8.4 Mole fraction changes of CO (A-60)

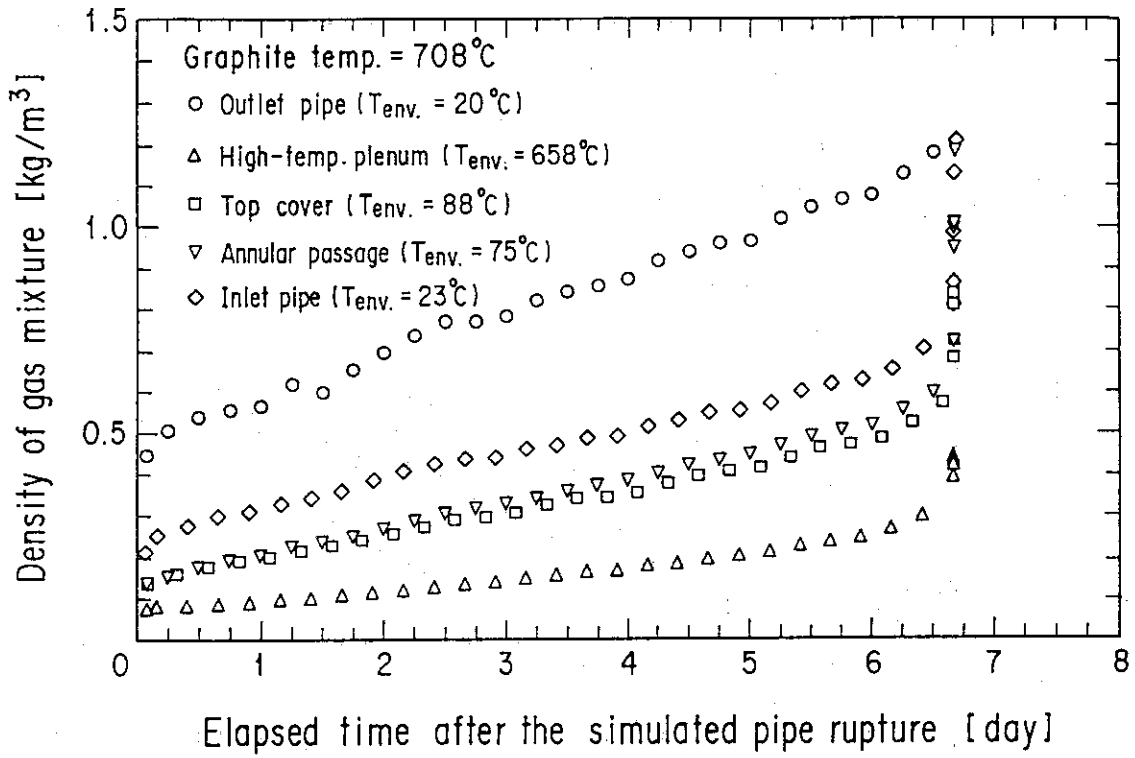


Fig.9.1 Density changes of gas mixture (A-70)

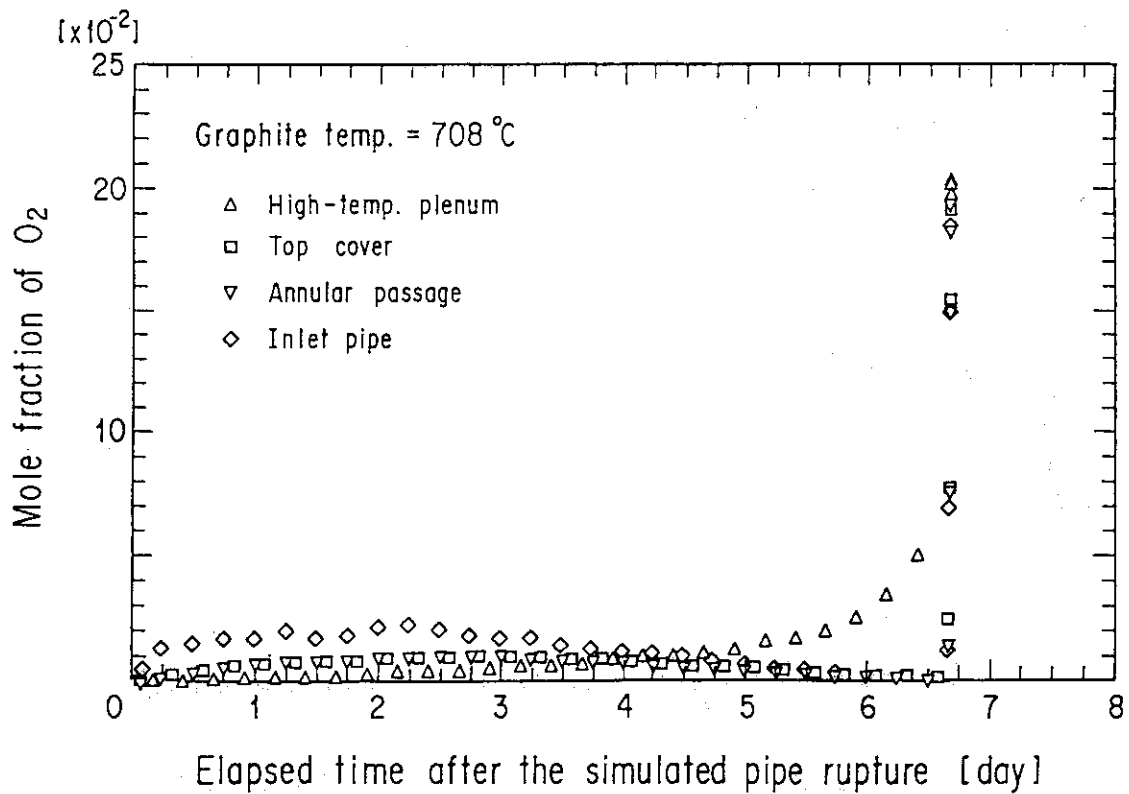


Fig.9.2 Mole fraction changes of O<sub>2</sub> (A-70)

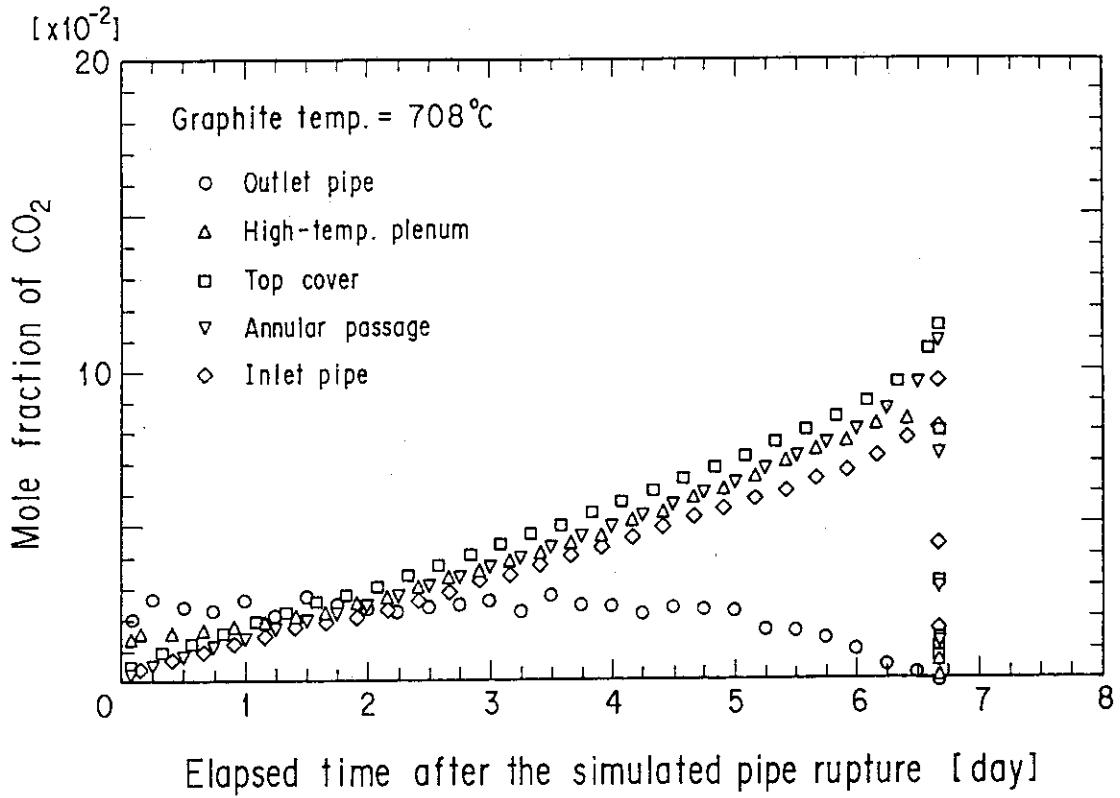


Fig.9.3 Mole fraction changes of CO<sub>2</sub> (A-70)

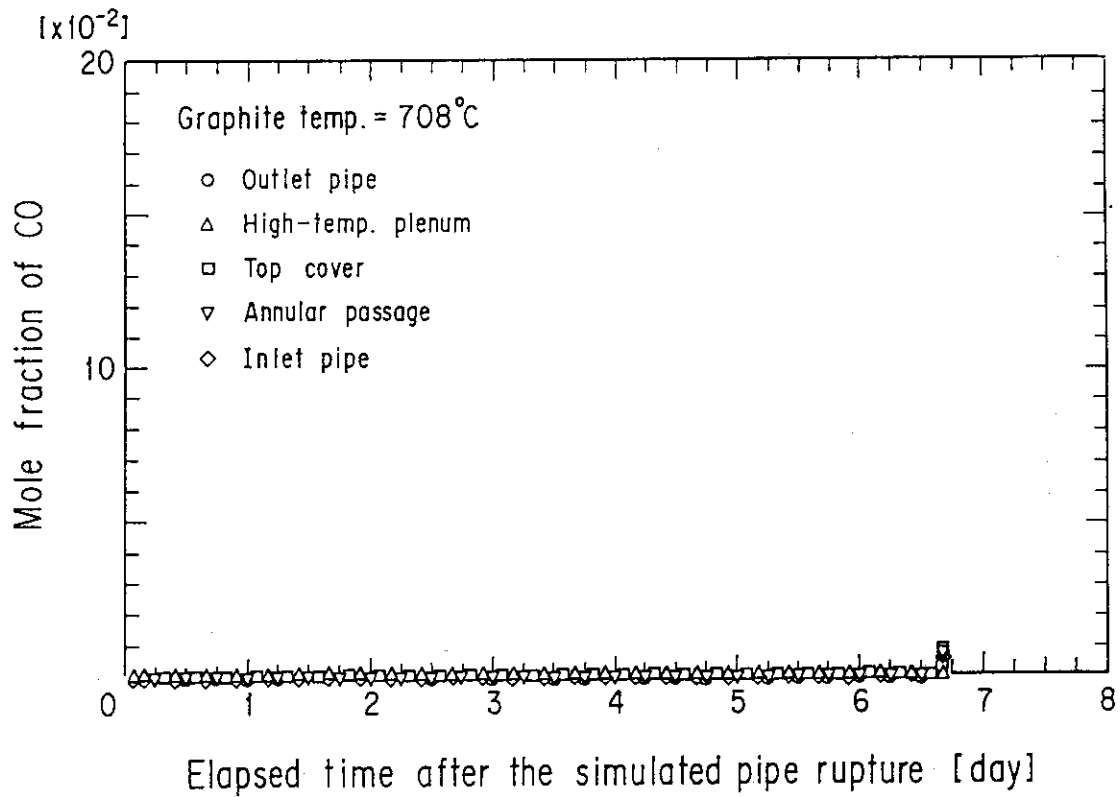


Fig.9.4 Mole fraction changes of CO (A-70)

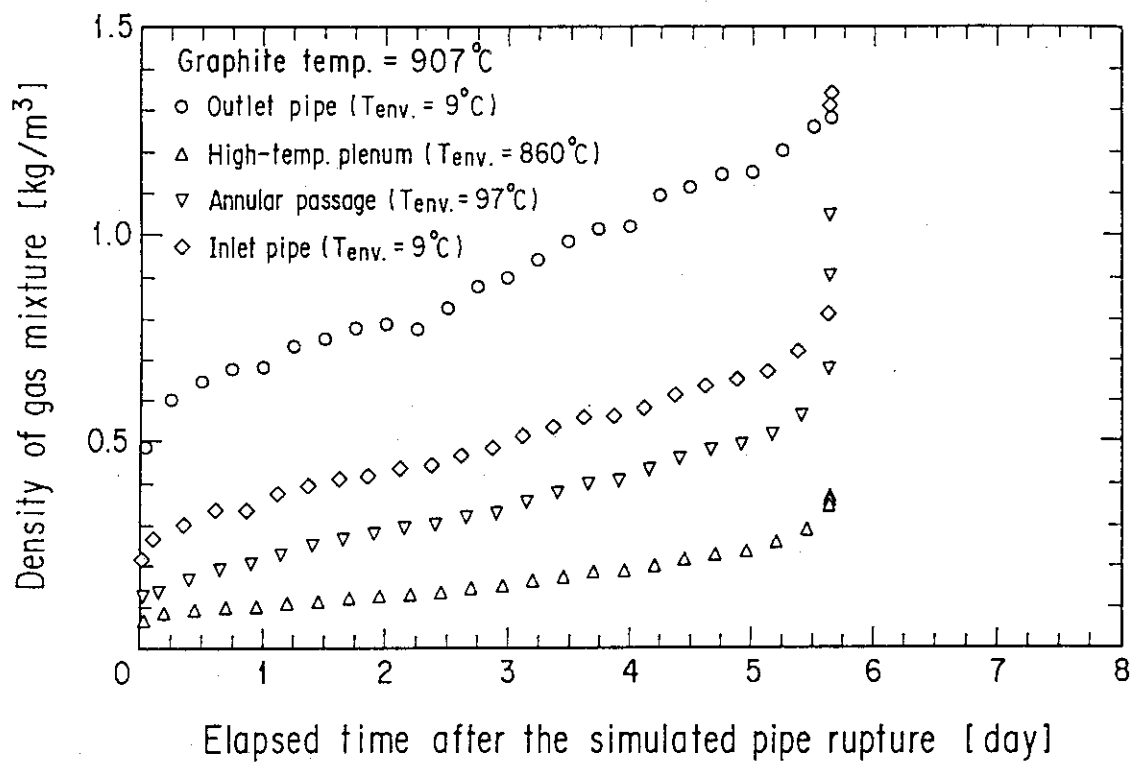


Fig. 10.1 Density changes of gas mixture (A-90)

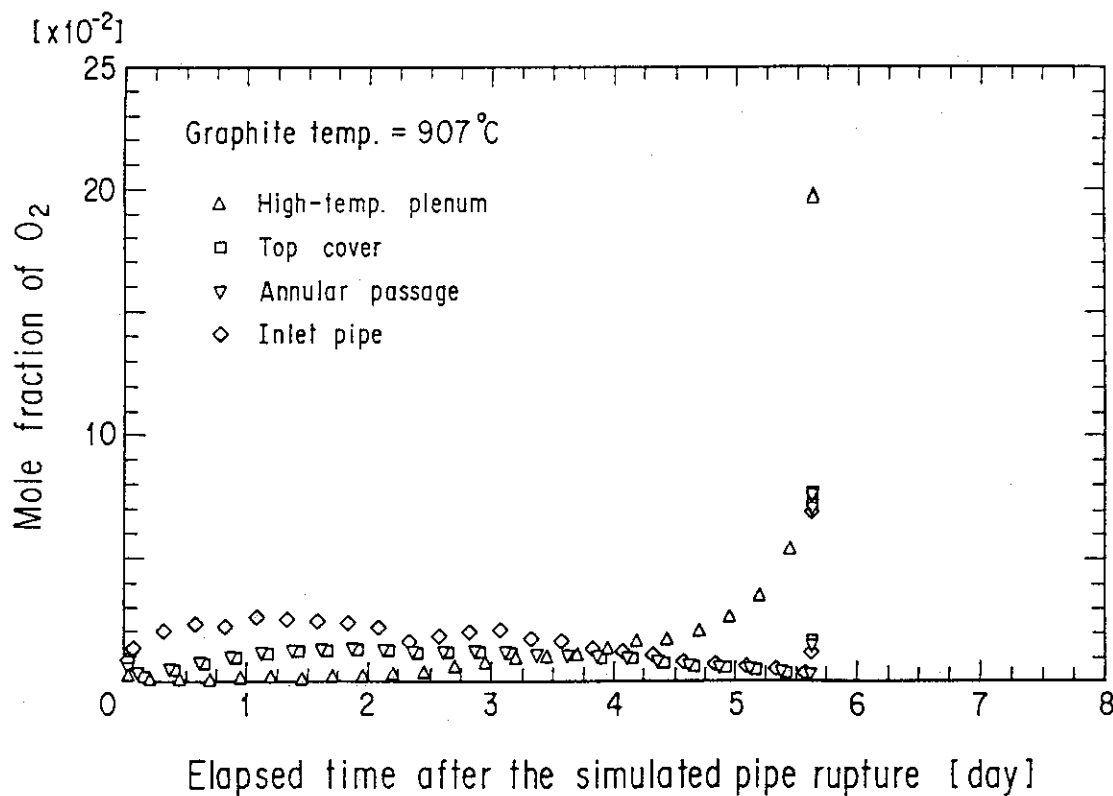


Fig. 10.2 Mole fraction changes of O<sub>2</sub> (A-90)

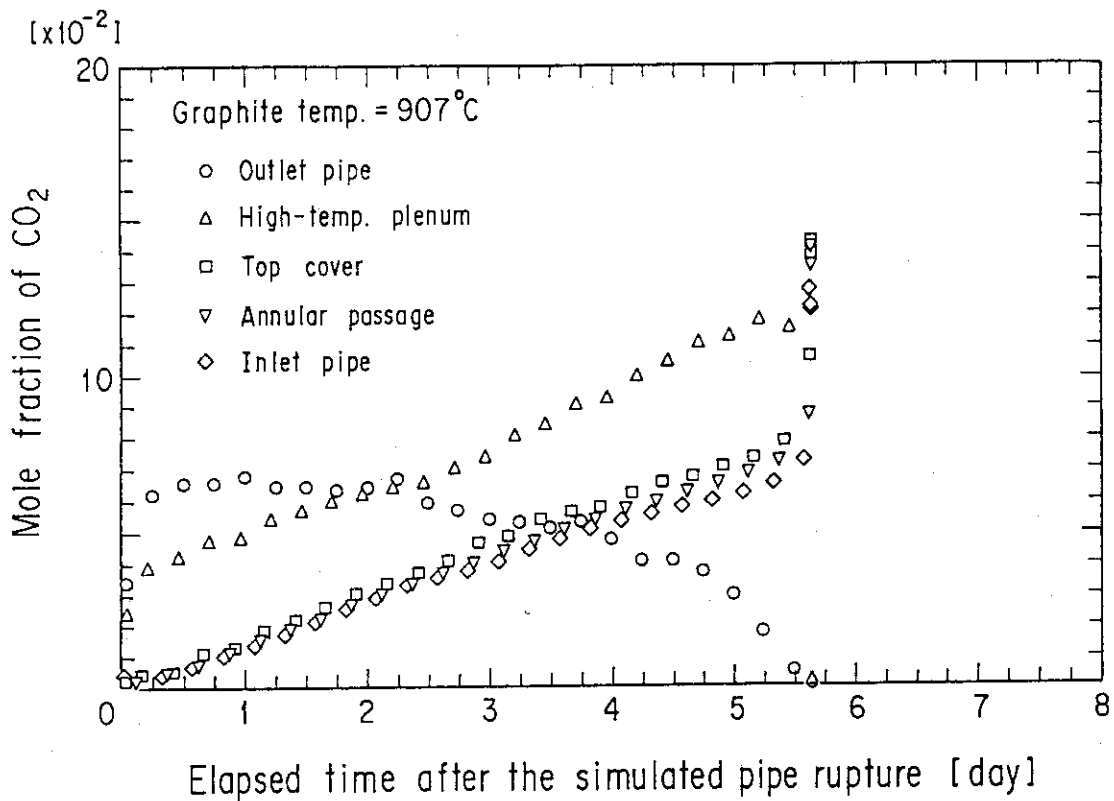


Fig. 10.3 Mole fraction changes of CO<sub>2</sub> (A-90)

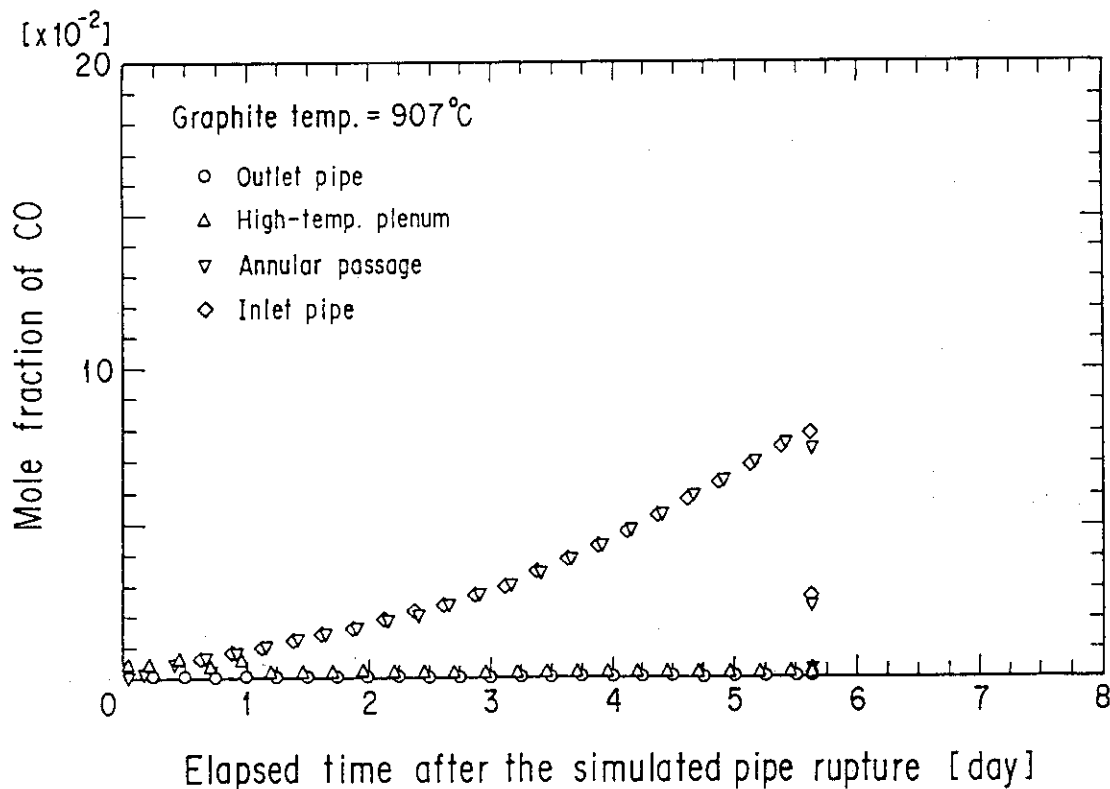


Fig. 10.4 Mole fraction changes of CO (A-90)

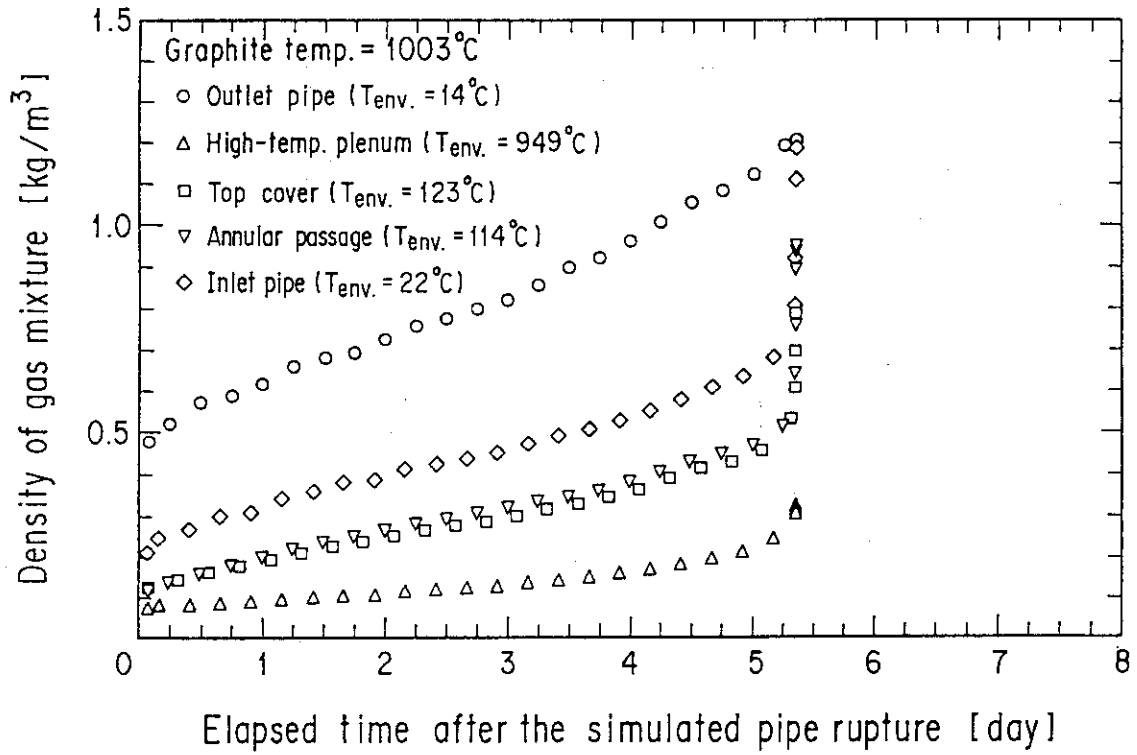


Fig.11.1 Density changes of Gas mixture (A-100)

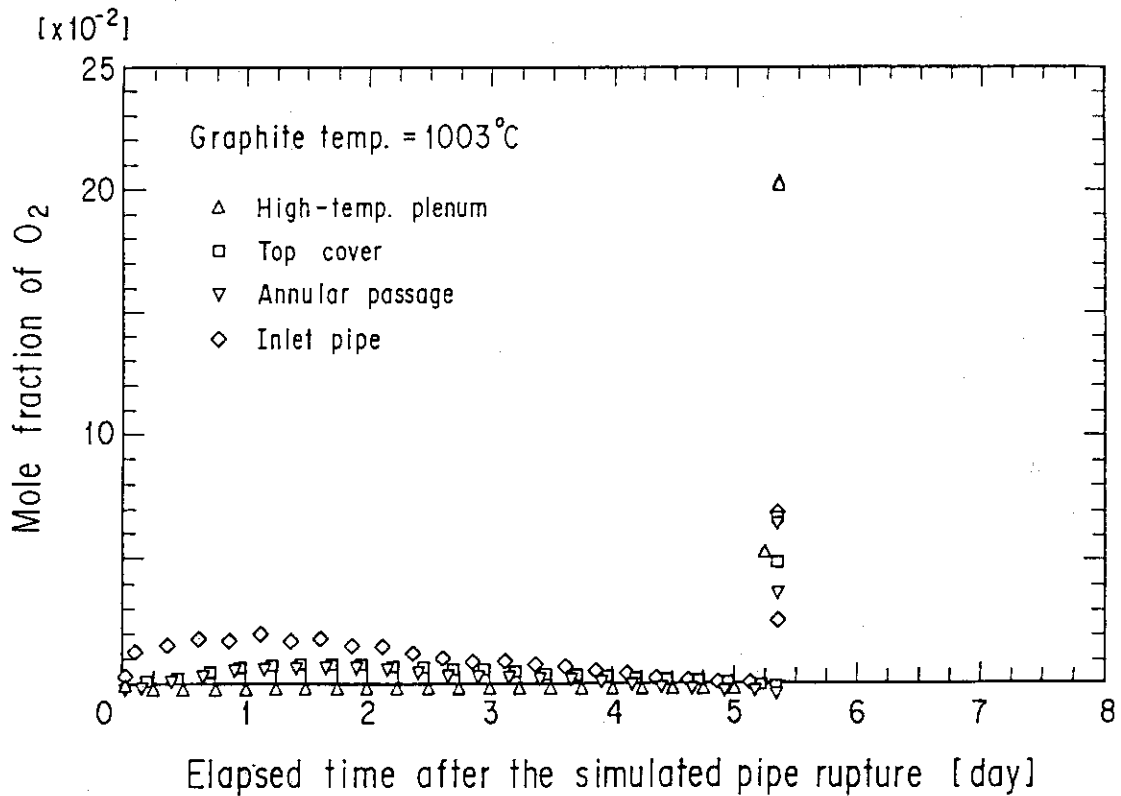


Fig. 11.2 Mole fraction changes of O<sub>2</sub> (A-100)



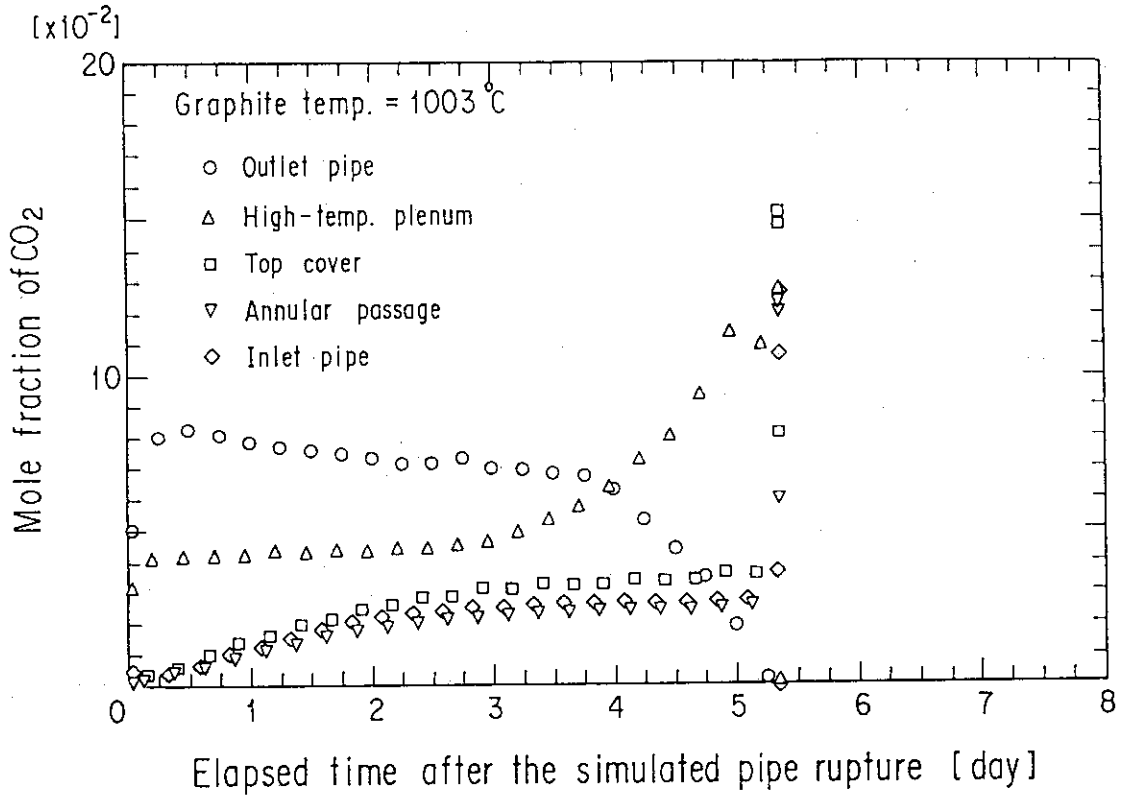


Fig. 11.3 Mole fraction changes of CO<sub>2</sub> (A-100)

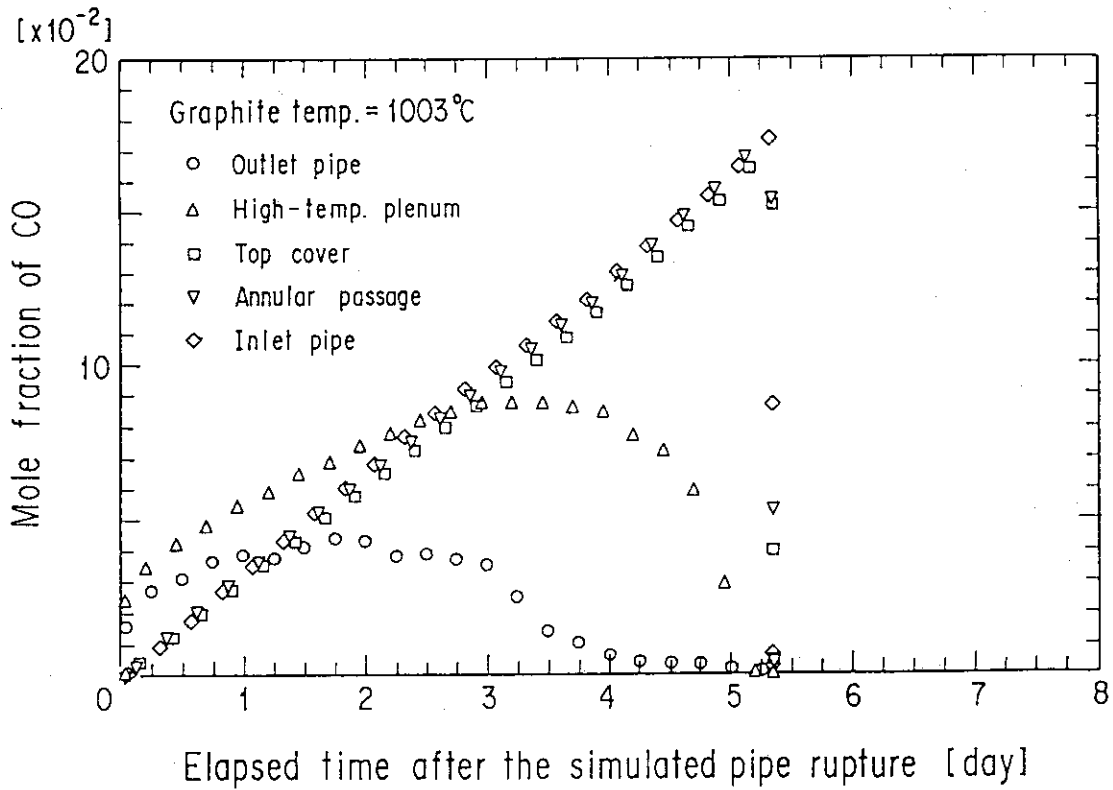


Fig. 11.4 Mole fraction changes of CO (A-100)

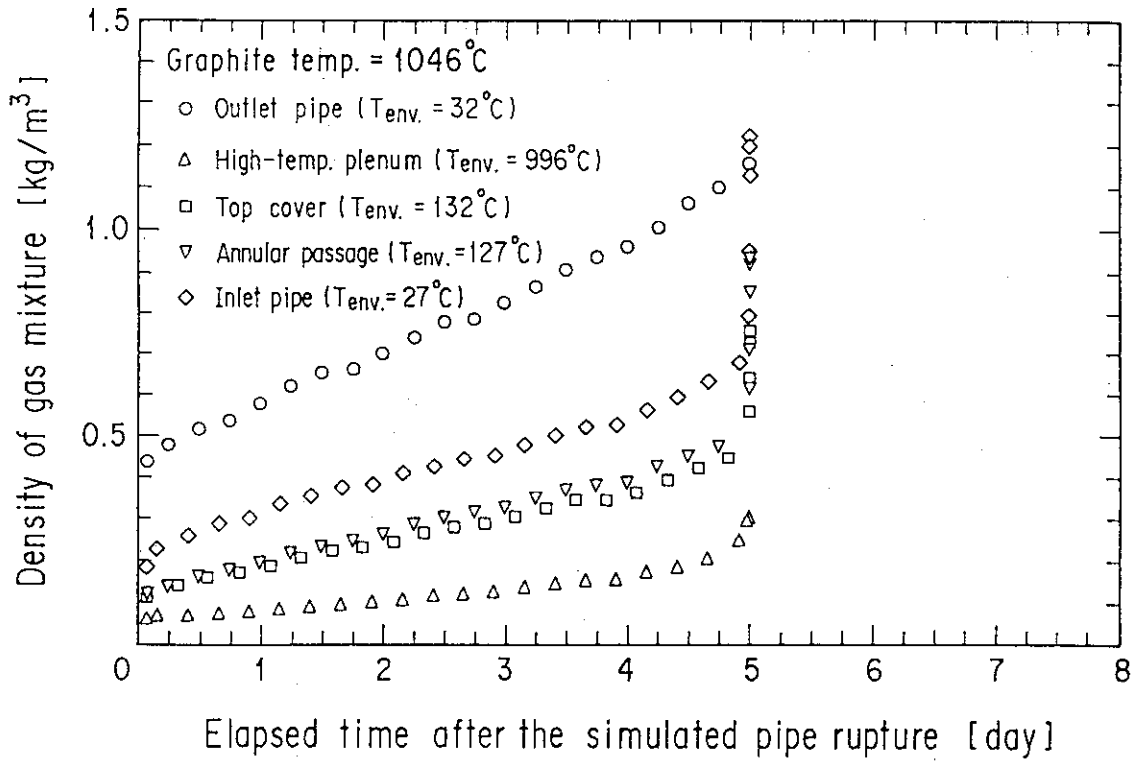


Fig. 12.1 Density changes of gas mixture (A-105)

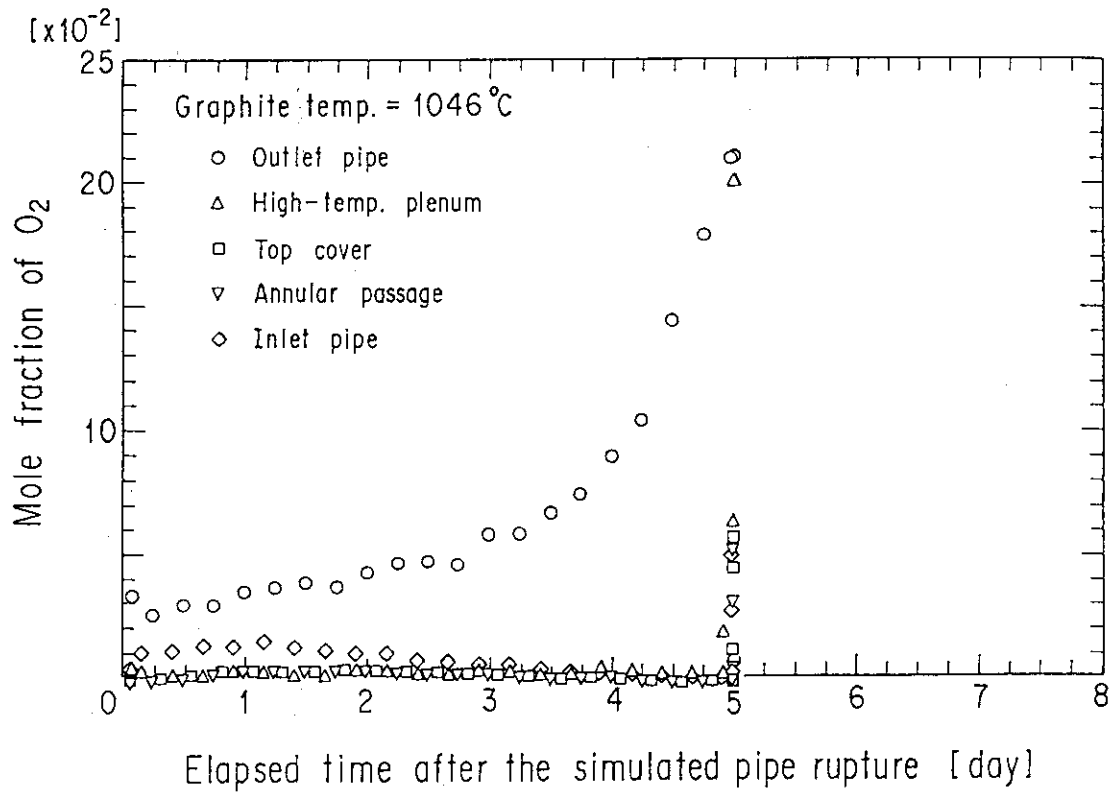


Fig. 12.2 Mole fraction changes of O<sub>2</sub> (A-105)

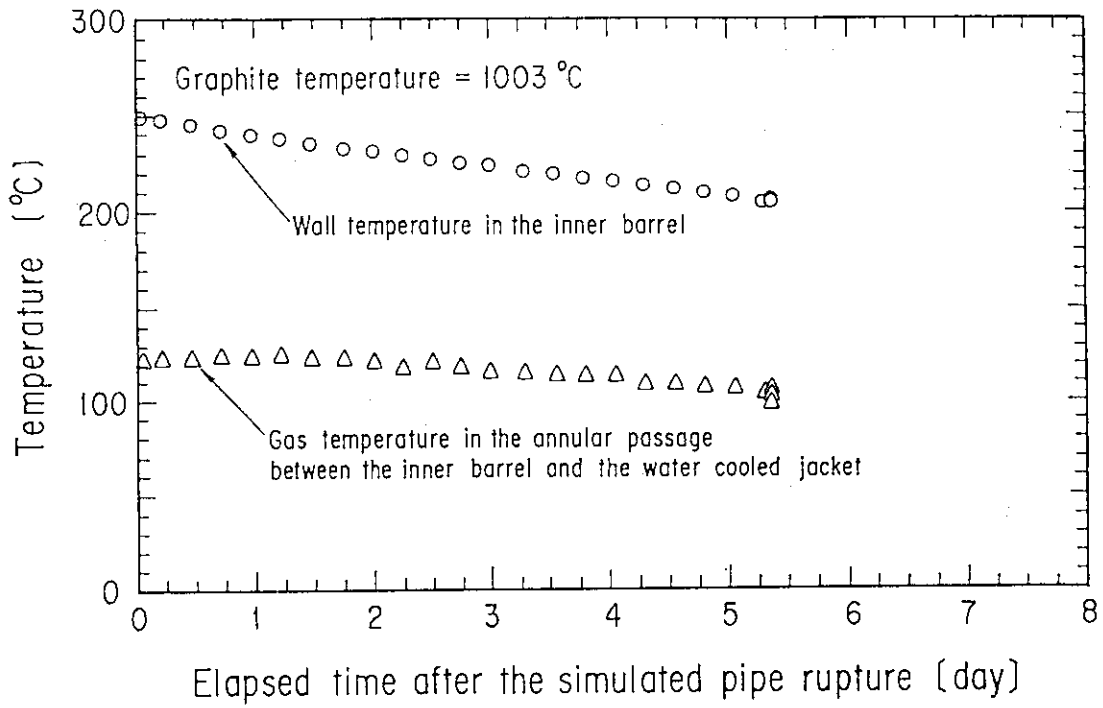


Fig. 12.3 Mole fraction changes of CO<sub>2</sub> (A-105)

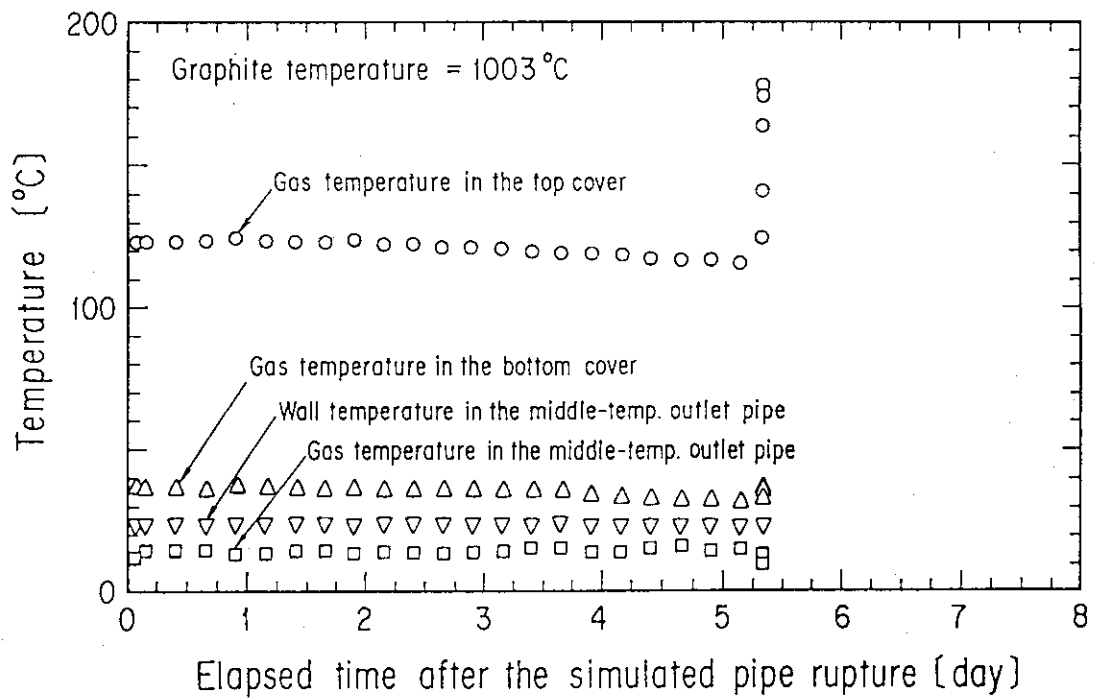


Fig. 12.4 Mole fraction changes of CO (A-105)

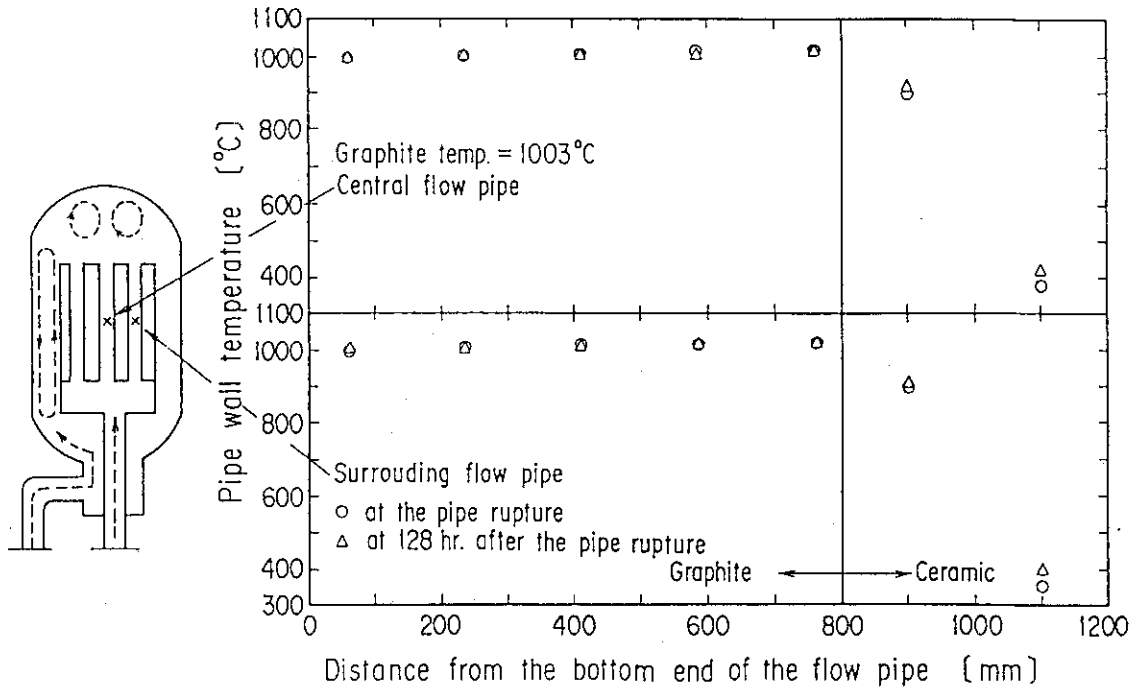


Fig. 13 Temperature distribution of the flow pipe

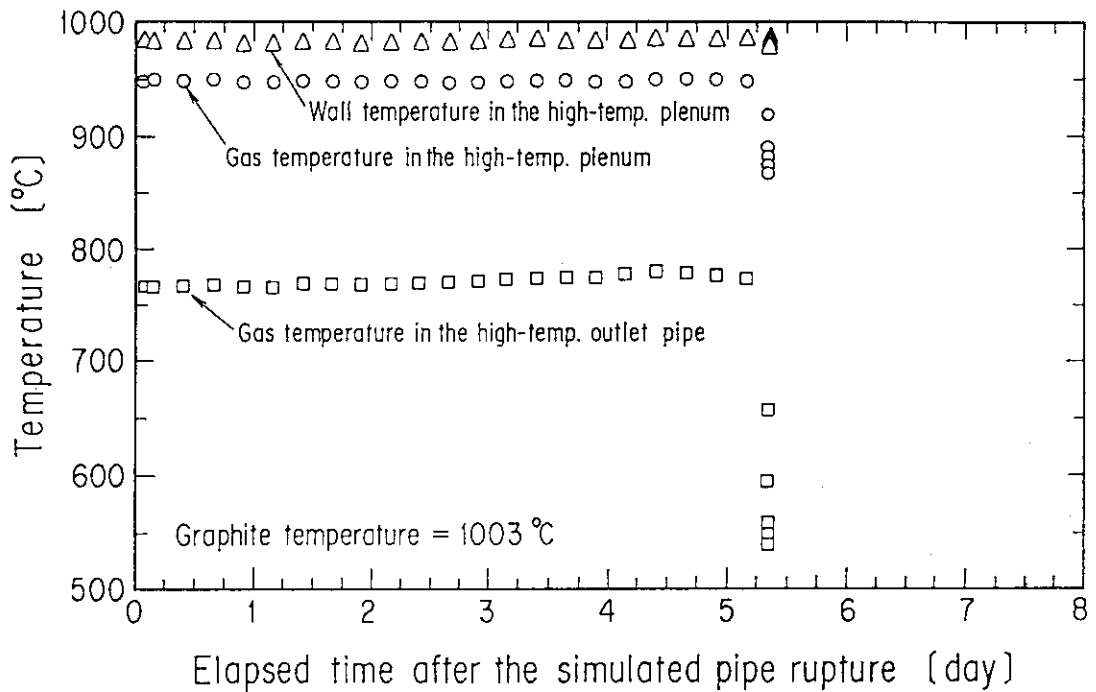


Fig. 14 Temperature changes in the high-temperature plenum and outlet pipe

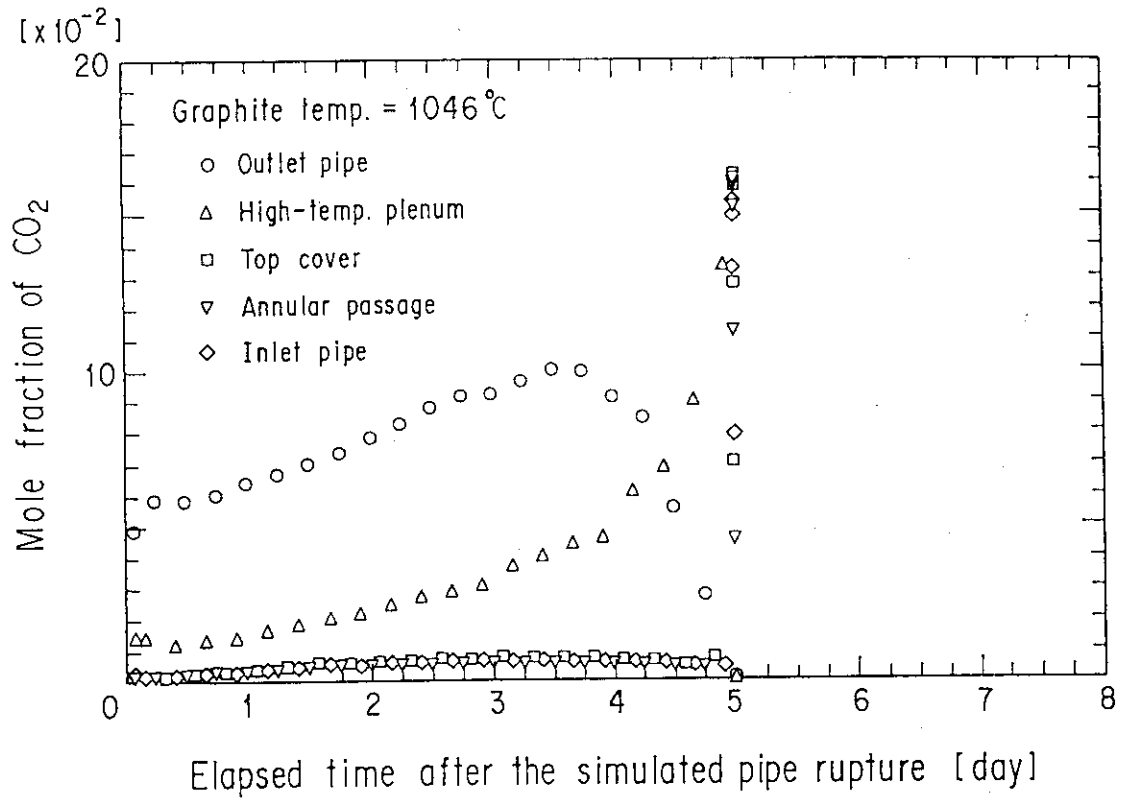


Fig. 15 Temperature changes in the annular passage and the inner barrel

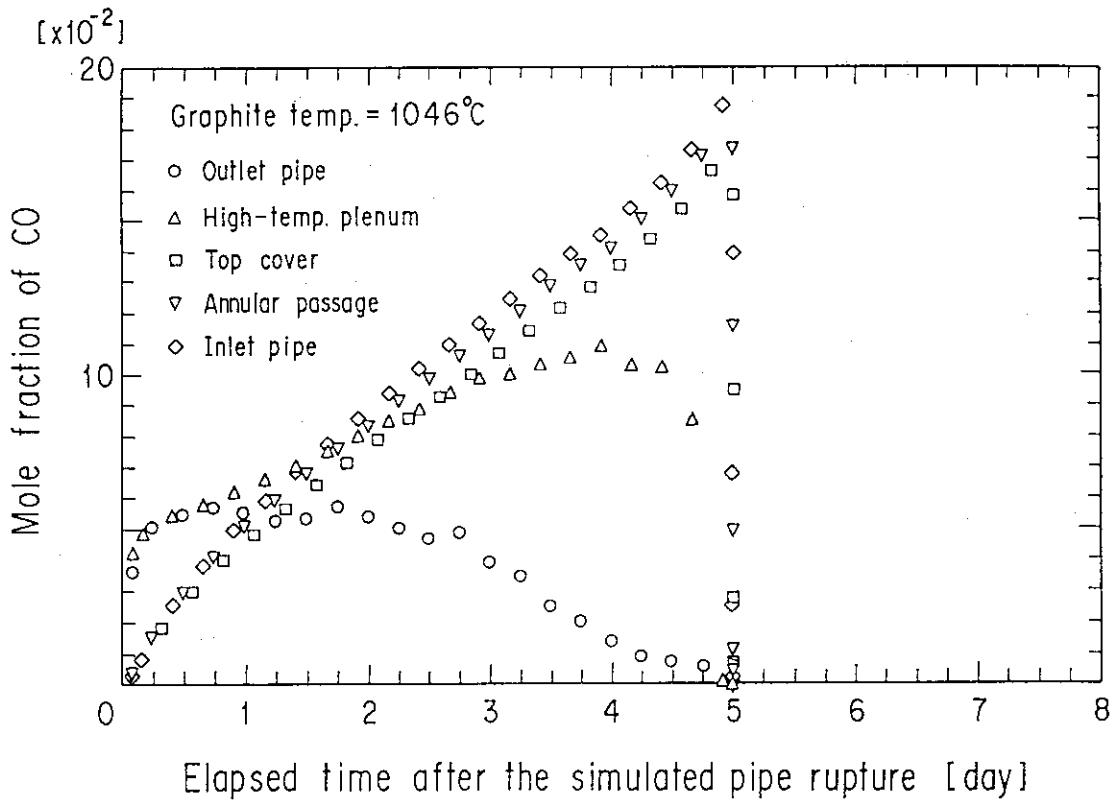


Fig. 16 Temperature changes in the top and bottom covers and the middle-temperature outlet pipe

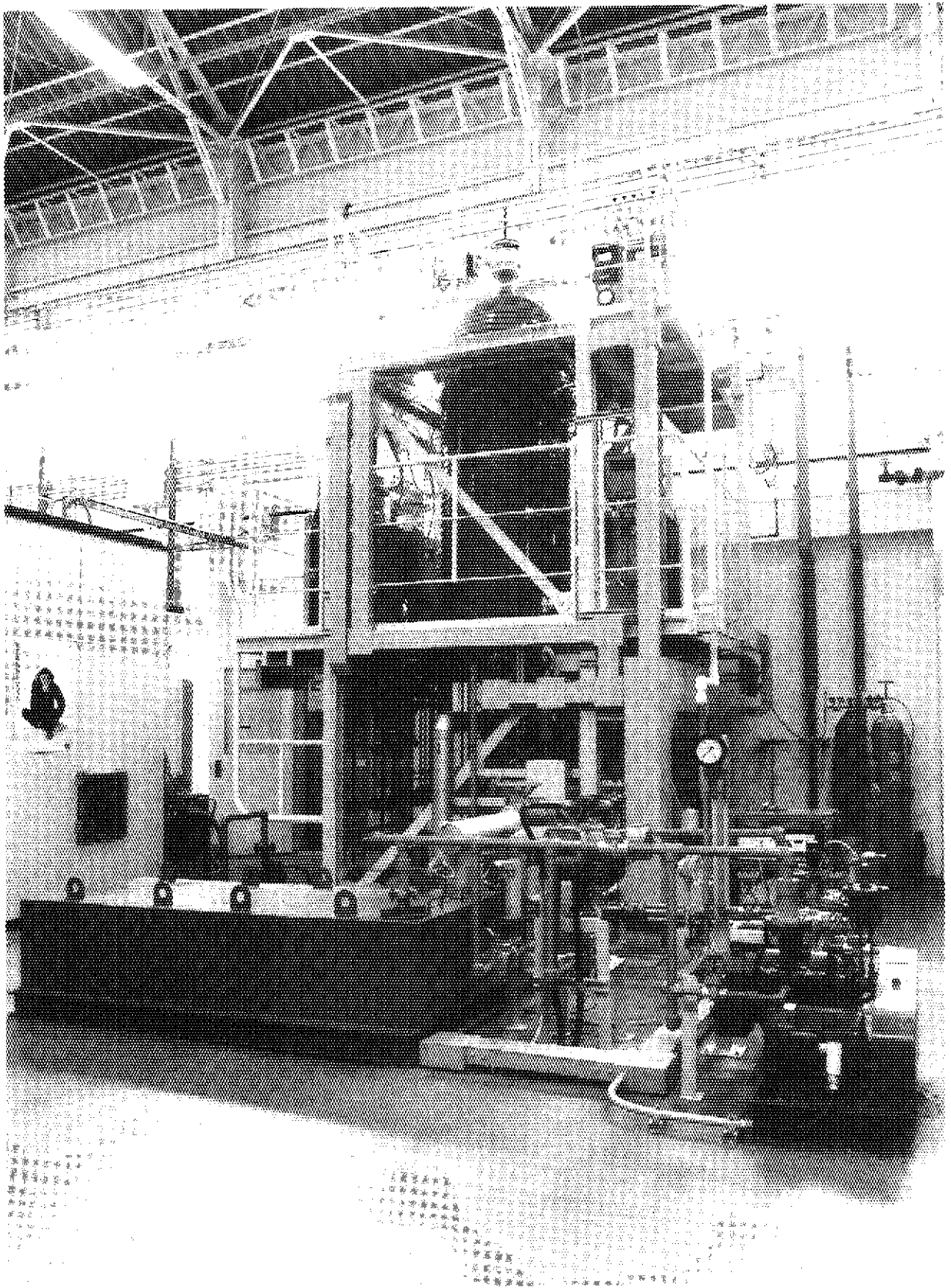


Photo. 1 Experimental apparatus