

JAERI - M
94-024

配管破断模擬試験

(空気浸入実験結果2)

1994年3月

武仲 五月・武田 哲明・菱田 誠
安掛 岳・江森 恒一

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、お申しこしてください。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）で複写による実費頒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, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1994

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 株原子力資料サービス

配管破断模擬試験
(空気浸入実験結果 2)

日本原子力研究所東海研究所高温工学部
武仲 五月・武田 哲明・菱田 誠
安掛 岳・江森 恒一

(1994年1月31日受理)

高温ガス炉の設計基準事故に1次冷却系主配管破断事故がある。同事故時には、破断口から炉内へ空気が浸入し、黒鉛の酸化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、同事故時の空気浸入挙動、多成分気体の自然対流特性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、空気浸入実験を行った。その結果、模擬炉心部が等温の場合は配管破断から空気の自然循環流の発生まで数日間以上続くこと等がわかっている。今回は、さらに実機の事故に近い状態を模擬するため、模擬炉心部に温度分布をつけた場合と、時間とともに同部が冷却される場合の空気浸入実験を行った。その結果以下の知見を得た。(1) 模擬炉心部に温度分布をつけた場合は、等温である場合に比べて、空気の自然循環流が早く発生する傾向にある。(2) 模擬炉心部が時間とともに冷却される場合は、炉心の冷却速度が空気の自然循環流の発生の有無に関係している。

Experimental Study on a Simulated Primary-pipe Rupture
Accident of HTGR
(Experimental Results of Air Ingress Behavior 2)

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

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

(Received January 31, 1994)

A primary-pipe rupture accident is a critical design base accident of a High-Temperature Gas-cooled Reactor. At the accident it is expected that air enters into the reactor core from the breach and the complicated natural convection of multi-component gas mixtures with graphite oxidation takes place. In order to investigate these phenomenon, therefore, we constructed an experimental apparatus simulating the pipe rupture and performed air ingress experiments. As a result, it was known that in the isothermal cases the period from the pipe rupture to the onset of the natural circulation of air (the first stage) lasts for a few days.

In this report, in order to simulate the similar condition of the real plant, we report the non-uniform temperature cases and uniform-and-non-constant cases of the air ingress experiments. The results are as follows. (1) The period of the first stage of the non-uniform temperature cases is shorter than that of isothermal cases. (2) It owes the cooling speed of the reactor core, whether the natural circulation of air takes place or not.

Keywords: HTGR, Natural Convection, Molecular Diffusion, Graphite Oxidation, Primary Pipe Rupture Accident

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 温度・濃度測定系及び電気計装系	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	6
4.1 模擬炉心部に温度分布がある場合	6
4.2 模擬炉心部が時間に伴い冷却される場合	9
5. まとめ	11
参考文献	12

Contents

1. Introduction	1
2. Overview of Experimental Apparatus Simulating the HTGR	2
2.1 Test Model	2
2.2 Gas Loop	3
2.3 Measuring System for Temperature and Concentration and Electrical Instruments	4
3. Experimental Procedure	5
3.1 Experimental Procedure	5
3.2 Calibration of O ₂ , CO and CO ₂ Detectors and Correcting Method of CO and CO ₂ Concentration	6
4. Experimental Results of Air Ingress Behavior	6
4.1 In the Case with Temperature Distribution in the Reactor Core Simulator	6
4.2 In the Case with Cooling the Reactor Core Simulator	9
5. Conclusion	11
References	12

1. 序

高温ガス炉の1次冷却系主配管が破断した場合には、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。このとき炉内には密度の小さいヘリウムが存在し、破断口の下部には密度の大きい空気（正確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、破断後急激に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、予想される。しかしながら、空気は分子拡散によっても破断口から炉内に浸入するため、浸入した空気中の酸素により、減速材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、炉内を一巡する空気（正確には空気とヘリウムの混合気体）の自然循環流が突発的に発生し、後期段階と呼ぶ状態へ移行する。

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とから構成される逆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成る2成分気体の拡散と自然対流に関する実験と解析とを行った[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、窒素あるいは空気は、拡散と非常に微弱な自然対流によって運ばれることがわかった。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°C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°C以上（特に500°Cから700°C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°C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°Cまでは主に二酸化炭素が発生すること等がわかった。

さらに実機に近い事故象を模擬するために、模擬炉心部を1200°Cの高温に保持することができ、定格運転時のガスループも備えた配管破断模擬試験装置を設計、製作し、空気浸入実験を実施した[6]。その結果、模擬炉心部が900°C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た酸素とが気相で反応し二酸化炭素が発生すること、本配管破断模擬試験装置においては、空気浸入の初期段階が数日間以上続くことがわかった。但し、配管破断模擬試験装置の基礎的な特性をつかむため、模擬炉心部を空間的、時間的に温度一定とした場合のみの空気浸入実験しか行わなかった。

実機の原子炉では炉心に空間的溫度分布がついていたり、配管破断の事故時には格納容器内冷却パネル等により時間とともに炉心が冷却される可能性がある。炉心に溫度分布がある場合は配管破断事故時に炉心のチャンネル間相互に密度差が生じ自然対流が発生して、炉心の上下で気体の混合が起こり、炉心が等温の場合に比べて空気の自然循環流の発生が早期化する可能性が考えられる。また、炉心が時間とともに冷却される場合は、冷却に伴い炉心の気体が収縮すること、

またこの収縮に伴い破断口から空気が浸入することにより、炉心の混合気体の密度が大きくなり、炉心温度が時間的に一定である場合に比べて空気の自然循環流の発生が早くなる可能性がある。そこで、本報では炉心の温度変化が実機の事故事象に近い場合の空気浸入実験を配管破断模擬試験装置を用いて行い、炉内における黒鉛酸化反応により発生する気体の挙動及び空気の自然循環流発生時間の変化について調べた。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概略図をFig. 2.1に示す。また、主な仕様をTable 2.1に示す。試験装置は試験体とガスループに分けられる。さらに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. 2.2 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. 2.3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。本報で報告する実験の黒鉛流路管の材質は東洋炭素社製IG-110型、寸法は、外径70mm、内径40mm、肉厚15mmで全長は840mmとした。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。流路管の概略図をFig. 2.4に示す。

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ステンレス製の円筒容器で、内径900mm、外径940mm、高さは1500mm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

またこの収縮に伴い破断口から空気が浸入することにより、炉心の混合気体の密度が大きくなり、炉心温度が時間的に一定である場合に比べて空気の自然循環流の発生が早くなる可能性がある。そこで、本報では炉心の温度変化が実機の事故事象に近い場合の空気浸入実験を配管破断模擬試験装置を用いて行い、炉内における黒鉛酸化反応により発生する気体の挙動及び空気の自然循環流発生時間の変化について調べた。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概略図をFig. 2.1に示す。また、主な仕様をTable 2.1に示す。試験装置は試験体とガスループに分けられる。さらに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. 2.2 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. 2.3 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。本報で報告する実験の黒鉛流路管の材質は東洋炭素社製IG-110型、寸法は、外径70mm、内径40mm、肉厚15mmで全長は840mmとした。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。流路管の概略図をFig. 2.4に示す。

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ステンレス製の円筒容器で、内径900mm、外径940mm、高さは1500mm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ている。中温出口管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及び下端には超音波流速計と模擬配管破断弁を設け、さらに出口管の外側を水冷した。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。

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重管部外管から約600mm水平に取り出して、そこから中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中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には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、上鏡部と胴部のフランジ間に挟み込むような構造となっている。スタンドパイプ破断実験の時は、この仕切板を取り外して実験を行い、本報で述べるような主配管破断実験の場合は、自然循環流を早く発生させるために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。胴部には黒鉛流路管、模擬サポートポスト壁温測定用熱電対取り出しフランジが4つ設けられている。真空系、ガス供給系、圧力調節系配管も胴部に取り付けられている。下鏡部は高さ200mm、内径920mmの円筒形容器で、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。

試験体の冷却水系は6系統あり、上鏡部、胴部、下鏡部、模擬入口管、中温出口管、低温出口管をそれぞれ独立に冷却し、壁温度を一定に保っている。下鏡部の冷却系統は模擬炉心容器下蓋も冷却し、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。

2.2 ガスループ

ガスループはFig. 2.1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/cm²G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、試験体の中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ており、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が、本実験では配管

破断後の炉内と格納容器内の均圧時からの空気浸入挙動を対象としているため使用しない。

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と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1.8kg/cm²G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ベ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。

2.3 温度・濃度測定系及び電気計装系

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、二酸化炭素のモル分率、及び混合気体の密度を測定する系統である。ガスサンプリング系の系統図をFig. 2.5に、ガスサンプリング点をTable 2.2に示す。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、二酸化炭素計、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。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の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小さくしていることから、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。電磁弁から各測定孔までの距離をTable 2.2に示した。

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。熱電対取り付け位置の概略図をFig. 2.6(1)~(3)に示す。また計測点リストをTable 2.3(1)~(8)に示す。

前述の通り、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点しか混合気体をサンプリングできない。そこで、これまでの経験からもっと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 (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 (サンプリング点No. 6-1)

配管破断模擬試験装置の電気計装系概念図をFig. 2.7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これより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。

3. 実験方法

3.1 実験方法

まず、試験体内を真空引きし、ガス供給系によりヘリウムガスを充填した。模擬炉心容器内の中心領域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各流路管及び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。本実験では循環ループは使用しないので、ループ遮断弁は常に閉とした。その後、試験体内の各部温度が定常になるまで放置した。また、上鏡部、外胴流路部、下鏡部、模擬入口管及び低温出口管の外壁は冷却水により水温に保った。各部温度が定常状態に達した段階で、試験体内を0.05kg/cm²G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CO₂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/cm²G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、試験体内の圧力をほぼ大気圧まで減圧し、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。

本報で報告する実験は、模擬炉心部に温度分布がある場合と同部が時間に伴い冷却される場合の空気浸入実験である。温度分布がある場合では中心領域と周辺領域の主ヒーター制御温度に100°Cの差を設け、中心領域の目標値で1000°C、850°C、700°Cの3ケースを行い、それぞれB-100-90、B-85-75、B-70-60と実験No.をつけた。前報[6]より模擬炉心部がおよそ800°C以上になるとCOが顕著に発生することがわかっている。従って本実験では中心領域流路管、周辺領域流路管の両方からCOが発生する可能性のあるケース、中心領域流路管のみから発生する可能性のあるケース、COの発生のないと考えられるケースの3ケースを設定した。

また、時間に伴い冷却される場合では初期模擬炉心温度を1000°Cとし自然放冷1ケース、制御放冷については冷却速度を変えて2ケースを行い、自然放冷のケースを実験No. C-100A、制御放冷のケースを実験No. C-100B、C-100Cとした。

実験条件をTable 3.1に示す。また、模擬配管破断直後の試験体各部の平均温度をTable 3.2に示す。

・模擬入口管 (サンプリング点No. 6-1)

配管破断模擬試験装置の電気計装系概念図をFig. 2.7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これより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。

3. 実験方法

3.1 実験方法

まず、試験体内を真空引きし、ガス供給系によりヘリウムガスを充填した。模擬炉心容器内の中心領域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各流路管及び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。本実験では循環ループは使用しないので、ループ遮断弁は常に閉とした。その後、試験体内の各部温度が定常になるまで放置した。また、上鏡部、外胴流路部、下鏡部、模擬入口管及び低温出口管の外壁は冷却水により水温に保った。各部温度が定常状態に達した段階で、試験体内を0.05kg/cm²G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CO₂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/cm²G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、試験体内の圧力をほぼ大気圧まで減圧し、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。

本報で報告する実験は、模擬炉心部に温度分布がある場合と同部が時間に伴い冷却される場合の空気浸入実験である。温度分布がある場合では中心領域と周辺領域の主ヒーター制御温度に100°Cの差を設け、中心領域の目標値で1000°C、850°C、700°Cの3ケースを行い、それぞれB-100-90、B-85-75、B-70-60と実験No.をつけた。前報[6]より模擬炉心部がおよそ800°C以上になるとCOが顕著に発生することがわかっている。従って本実験では中心領域流路管、周辺領域流路管の両方からCOが発生する可能性のあるケース、中心領域流路管のみから発生する可能性のあるケース、COの発生のないと考えられるケースの3ケースを設定した。

また、時間に伴い冷却される場合では初期模擬炉心温度を1000°Cとし自然放冷1ケース、制御放冷については冷却速度を変えて2ケースを行い、自然放冷のケースを実験No. C-100A、制御放冷のケースを実験No. C-100B、C-100Cとした。

実験条件をTable 3.1に示す。また、模擬配管破断直後の試験体各部の平均温度をTable 3.2に示す。

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出力信号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 3.3に示す。ガス分析計の校正は、実験時とサンプリング条件を等しくするため、ゼロガスまたはスパンガスを試験体に大気圧にて充填し、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と調整を行い、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CO₂計について、スパンガスに窒素ベース標準ガスを用いた場合は、ヘリウムベース標準ガス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わかっている。そこでCO及びCO₂濃度については、以下の補正を行った。CO及びCO₂計の電圧出力と成分気体濃度との関係を一次関数式（以下、校正式と言う）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。

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

X_{air} : 2成分気体と仮定した混合気体中の空気のモル分率

ρ : 密度計から求めた混合気体の密度[kg/m³]

ρ_{He} : 20°C、1atmにおけるヘリウムの密度[kg/m³]

ρ_{air} : 20°C、1atmにおける空気の密度[kg/m³]

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CO₂のモル分率を算出した。

$$X_{CO_2/real} = (1 - X_{N_2}) X_{CO_2/He} + X_{N_2} \cdot X_{CO_2/N_2} \quad (2)$$

X_{N_2} : 窒素のモル分率(= X_{air})

$X_{CO_2/real}$: CO₂のモル分率

$X_{CO_2/He}$: ヘリウムベースの校正式によるCO₂のモル分率

X_{CO_2/N_2} : 窒素ベースの校正式によるCO₂のモル分率

COについてもCO₂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 模擬炉心部に温度分布がある場合

中心領域黒鉛流路管を1000°C、周辺領域黒鉛流路管を900°Cとし、模擬炉心部径方向に温度分布をつけた場合(B-100-90)の混合気体密度の時間変化をFig. 4.1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、このケースでは約5.2日（126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。

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出力信号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 3.3に示す。ガス分析計の校正は、実験時とサンプリング条件を等しくするため、ゼロガスまたはスパンガスを試験体に大気圧にて充填し、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と調整を行い、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CO₂計について、スパンガスに窒素ベース標準ガスを用いた場合は、ヘリウムベース標準ガス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わかっている。そこでCO及びCO₂濃度については、以下の補正を行った。CO及びCO₂計の電圧出力と成分気体濃度との関係を一次関数式（以下、校正式と言う）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。

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

X_{air} : 2成分気体と仮定した混合気体中の空気のモル分率

ρ : 密度計から求めた混合気体の密度[kg/m³]

ρ_{He} : 20°C、1atmにおけるヘリウムの密度[kg/m³]

ρ_{air} : 20°C、1atmにおける空気の密度[kg/m³]

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CO₂のモル分率を算出した。

$$X_{CO_2/real} = (1 - X_{N_2}) X_{CO_2/He} + X_{N_2} \cdot X_{CO_2/N_2} \quad (2)$$

X_{N_2} : 窒素のモル分率(= X_{air})

$X_{CO_2/real}$: CO₂のモル分率

$X_{CO_2/He}$: ヘリウムベースの校正式によるCO₂のモル分率

X_{CO_2/N_2} : 窒素ベースの校正式によるCO₂のモル分率

COについてもCO₂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 模擬炉心部に温度分布がある場合

中心領域黒鉛流路管を1000°C、周辺領域黒鉛流路管を900°Cとし、模擬炉心部径方向に温度分布をつけた場合(B-100-90)の混合気体密度の時間変化をFig. 4.1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、このケースでは約5.2日（126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。

Fig. 4.2に酸素濃度変化を示す。中温出口管における酸素濃度は時間とともに徐々に増加し、酸素が分子拡散と微弱な自然対流とによって模擬炉心部へ運ばれていることがわかる。また破断後約3.5日頃から、それ以前よりも急速にモル分率が大きくなり、混合気体の微弱な自然対流が強くなっていることがわかる。高温プレナム部におけるモル分率は破断後約3日頃までは低く抑えられている。これは黒鉛流路管下部ですべ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と考えられる。しかし、中温出口管部と同様に破断後約3.5日頃から徐々にモル分率が大きくなり微弱な自然対流が強くなっていることを示している。模擬入口管部の酸素は破断後約2日頃までわずかに検出されているが、混合気体の微弱な自然対流が強くなると浸入した酸素が模擬入口管の破断口へ押し戻される形となり、モル分率はほとんどゼロとなっている。また、上鏡部及び環状流路部は破断口から最も離れているため空気の自然循環流が発生するまで酸素は検出されていない。

Fig. 4.3にCO₂のモル分率の変化を示す。中温出口管のCO₂モル分率は破断後約3日頃までわずかず増加している。これはCO₂は黒鉛流路管部で発生しておりここから下向きの拡散が破断口から模擬炉心部へ向かう混合気体の微弱な自然対流よりも強いいためと考えられる。その後は混合気体の微弱な自然対流が強くなりCO₂のモル分率は減少する。また高温プレナム部のCO₂モル分率は、破断後約2日頃まで中温出口管部よりも小さくなっている。黒鉛流路管下部で発生したCO₂が高温プレナム部へ分子拡散で移動すると、高温プレナム部よりも下方にある中温出口管部の混合気体は密度が小さく高温プレナム部にある密度の大きいCO₂との間で置換が起きるのではないかと考えられる。中温出口管部には下方から空気が浸入し、中温出口管部の混合気体と置換されたCO₂が再度空気と置換されることも考えられるが、Table 4.1に示すように拡散係数の違いにより空気(N₂)とCO₂との置換速度はヘリウムとCO₂との置換速度よりも小さく、結果的に浸入した空気と炉内のヘリウムとの境界面に相当するものの近傍にCO₂が集まり、中温出口管の方が高温プレナム部よりもCO₂モル分率が大きくなるのではないかと予想している。また、高温プレナム部のモル分率がピークに達するのは破断後約5日頃で、中温出口管部よりも遅くなっている。これは中温出口管と高温プレナム部の断面積比が約1:33となっており、高温プレナム部における微弱な自然対流の流速は中温出口管部よりも非常に小さくなっているためと思われる。上鏡部、環状流路部、模擬入口管部のモル分率は破断から空気の自然循環流発生までよく似た変化を示している。これは胴部の環状流路部及び上下鏡部の空間に局所的自然対流が発生しており、この自然対流によってこれらの箇所の気体が混合されているためであると考えられる。

Fig. 4.4にCOのモル分率の変化を示す。中温出口管と高温プレナム部ではCOは検出されていないが、上鏡部、環状流路部、模擬入口管部では時間とともにモル分率が増加している。これは上鏡部等と高温プレナム部とで雰囲気温度が異なるためと考えられる。一般に800°C以上になるとCOが気相で酸素と反応しCO₂が発生することが知られている。高温プレナム部は約900°Cに制御されているために黒鉛流路管部から発生したCOが気相での酸化反応で消費されているのに対し、上鏡部等では雰囲気温度 (Table 3.2参照) が低いため発生したCOが反応せずそのまま残っているためだと思われる。上鏡部、環状流路部、模擬入口管部のモル分率が同じような変化を示しているのはCO₂の場合と同様に局所的な自然対流のためだと考えられる。

中心領域黒鉛流路管を850℃、周辺領域黒鉛流路管を750℃とし、模擬炉心部径方向に温度分布をつけた場合(B-85-75)の混合気体密度の時間変化をFig. 4.5に示す。混合気体密度の変化はB-100-90の場合とほとんど変わらない。但し、空気の自然循環流発生までの時間は長くなって、破断から約6.1日(147時間)後に自然循環流が発生した。

Fig. 4.6にB-85-75の酸素濃度変化を示す。全体の傾向はB-100-90と似ているが、破断後の数日間模擬入口管部のモル分率がB-100-90と比べると高い濃度で長時間検出されている。これはB-100-90と比べて模擬炉心部と環状流路部の温度差が小さく自然対流が弱いため、模擬入口管側から分子拡散によって浸入する空気の量が多いことが原因と考えられる。

Fig. 4.7にB-85-75のCO₂濃度変化を示す。B-100-90の場合と比べて上鏡部、環状流路部、模擬入口管部のモル分率が増加している。これは黒鉛の酸化反応でCO/CO₂比が小さく主にCO₂が生じるためである。Fig. 4.8にB-85-75のCO濃度変化を示すが、同様の理由でCOのモル分率はB-100-90よりも減少している。

中心領域黒鉛流路管を700℃、周辺領域黒鉛流路管を600℃とし、模擬炉心部径方向に温度分布をつけた場合(B-70-60)の混合気体密度の時間変化をFig. 4.9に示す。混合気体密度の変化は他のケースとほとんど変わらない。但し、空気の自然循環流発生までの時間はB-85-75よりも短くなって、破断から約5.9日(141時間)に自然循環流が発生した。この理由については後ほど述べることとする。

Fig. 4.10にB-70-60の酸素濃度変化を示す。全体の傾向は他のケースと似ているが、高温プレナム部のモル分率が空気の自然循環流発生直前までほとんどゼロを示している。これは他のケースに比べて、流路管相互の自然対流が強いためと考えられる。Table 4.2に各実験におけるヘリウムの密度を示す。この表からもわかるように流路管相互の温度差は同じでもB-70-60のケースが流路管相互の密度差が最も大きい。従って、B-70-60は中心領域で上昇流、周辺領域で下降流という流路管相互の自然対流が本報で述べる3ケースのうち最も強く、高温プレナム部まで浸入してきた酸素はこの自然対流によって上鏡部等の他の箇所へ分散されていると考えられる。

Fig. 4.11にB-70-60のCO₂濃度変化を示す。B-85-75の場合と比べて上鏡部でモル分率が増加、高温プレナム部で減少している。流路管相互の自然対流によって上昇流の起こっている中心領域には酸素を含む混合気体が流れて酸化反応が起き、周辺領域では酸素の少ない混合気体が下降するので上鏡部ではCO₂モル分率が高くなり、高温プレナム部では低くなるのではないかと考えられる。

また、Fig. 4.12にB-70-60のCO濃度変化を示すが、このケースではCOはほとんど検出されていない。

Fig. 4.13に模擬炉心部に温度分布がある場合とない場合の模擬炉心部温度と空気の自然循環流発生時間との関係を示す。この図より、B-100-90とB-85-75の空気の自然循環流発生時間は模擬炉心部の温度が一定の場合とほぼ等しいかわずかに短い、B-70-60は空気の自然循環流の早期発生が顕著である。これはTable 4.2に示す表からもわかるが、3ケースとも流路管相互に100℃一定の温度差をつけても、密度差は3ケースとも異なり特に絶対的に模擬炉心部の温度の低いB-70-60で流路管相互の密度差が最も大きく、模擬炉心内の自然対流が強くなっていると言える。従って、自然対流による混合効果も最も大きく模擬炉心内の温度が一定のケースに比べて、試験体内各部の密度の増加が早く、空気の自然循環流も早く発生するものと考えられる。

4.2 模擬炉心部が時間に伴い冷却される場合

模擬炉心部が時間に伴い冷却されるケースは、冷却速度を変えて3ケース行った。時間と炉心部の温度との関係をFig. 4. 14及びTable3. 1に示す。

実験No. C-100Aは模擬配管破断後、直ちに全てのヒータの電源を切り、模擬炉心部を自然放冷したケースである。Fig. 4. 15にC-100Aの混合気体密度変化を示す。Fig. 4. 14からわかるように破断後急激に模擬炉心部の温度が低下し、高温プレナム部、上鏡部、環状流路部で混合気体密度が大きくなり、模擬配管破断後約1日で高温側流路である高温プレナム部の密度が低温側流路である環状流路部よりも大きくなって安定した。このケースでは模擬炉心部の温度が約50℃になった段階で空気の自然循環流は発生しないと判断し、実験を終了した。また、中温出口管部では破断後約0.5日頃ほとんど室温、大気圧の空気と同程度まで混合気体密度が増加しているが、破断後約1.5日頃から減少している。これは破断後約1.5日頃から模擬炉心部の冷却速度が遅くなり、冷却に伴う空気の浸入よりも試験体上部からのヘリウムの拡散による影響が大きいためであると考えられる。

Fig. 4. 16にC-100Aの酸素濃度変化を示す。中温出口管部の O_2 モル分率は混合気体密度と同様な理由で、破断後約1.5日ごろから低下している。高温プレナム部の O_2 モル分率は破断後約1日まで増加しているが、その後一旦減少し再度増加している。これは高温プレナム部が破断当初高温（約1000℃）でしかも体積が大きいこと、模擬炉心部の冷却に伴う混合気体の収縮度が大きい。この収縮に伴い空気は中温出口管からも模擬入口管からも浸入するため、破断当初は高温プレナム部から位置的に近い中温出口管からの空気による O_2 モル分率の増加が見られ、その後模擬入口管からの空気浸入に伴い上鏡部等からのヘリウムの移動により O_2 モル分率が減少する。さらにその後は分子拡散によって空気が浸入しモル分率が増加すると考えられる。模擬入口管部では破断直後に O_2 モル分率が増加し、その後破断後約0.5日頃まで減少している。これは破断直後から模擬炉心部が冷却され一度模擬入口管から空気が浸入するが、破断後0.5日までは模擬炉心部の温度が高く黒鉛の酸化反応による CO_2 が発生し、さらに微弱な自然対流も存在するため、模擬入口管部の O_2 モル分率が減少する。同様な現象が上鏡部及び環状流路部でも観察されるはずであるが、実験ではその影響はあまり見られない。環状流路部と上鏡部に局所的自然対流が発生しているため、当該箇所の気体が充分混合され成分気体の濃度という観点から環状流路部と上鏡部は一個の空間と考えられる。この環状流路と上鏡部を合わせた空間は体積が大きいこと及び O_2 モル分率が絶対的に小さいことから黒鉛酸化反応及び微弱な自然対流の影響は小さいものと思われる。

Fig. 4. 17にC-100Aの CO_2 濃度変化を示す。破断直後模擬炉心部の冷却に伴い、中温出口管から浸入した空気によって黒鉛が酸化され高温プレナム部では CO_2 が検出されているが、その後破断後約0.5日頃から模擬炉心部が低温度になって黒鉛が酸化されなくなること及び中温出口管から空気が浸入してくることにより CO_2 モル分率が減少する。さらに破断後1日頃から再度モル分率が増加しているのは一度拡散と微弱な自然対流とによって上鏡部等に移動した CO_2 が模擬炉心部での混合気体の収縮に伴い高温プレナム部へ移動し検出されたものと思われる。

Fig. 4. 18にC-100AのCO濃度変化を示す。一般的に黒鉛温度が800°C以上の場合の酸化反応でCOが発生することが知られているが、本ケースでは模擬炉心部の冷却速度が速く、破断口から空気が浸入して模擬炉心部に達するまでに模擬炉心部が800°C以下になってしまうためCOはほとんど検出されていない。

実験No. C-100Bは模擬炉心部温度1000°Cから模擬配管破断後の降温を開始し、模擬炉心部を100°C一定に制御した場合の空気浸入実験A-100[6]の空気の自然循環流発生時間(128hr)で室温(20°C)まで降温するケースである。Fig. 4. 19にC-100Bの混合気体密度変化を示す。模擬炉心部の冷却に伴う混合気体の収縮によって破断口から空気が浸入し時間とともに試験体内各部の混合気体密度は大きくなっている。特に高温プレナム部では混合気体密度の増加が早く、破断後約5.7日で低温流路側である環状流路部等と密度が等しくなり安定し、この時点で模擬炉心部の温度は約60°Cであり空気の自然循環流は発生しないと判断し、実験を終了した。中温出口管部で破断後約4.5日頃から混合気体密度が小さくなっているが、これはC-100Aと同様試験体上部からのヘリウムの拡散によるものと考えられる。

Fig. 4. 20にC-100Bの酸素濃度変化を示す。全体的に傾向はFig. 4. 16のC-100Aの酸素濃度変化とほぼ同じであるが、高温プレナム部では破断後約2日まで酸素が検出されていない。この時点では模擬炉心部の温度は約650°C程度あり黒鉛の酸化反応に消費されていると考えられる。

Fig. 4. 21にC-100BのCO₂濃度変化を示す。破断直後模擬炉心部の冷却に伴い、中温出口管から浸入した空気によって黒鉛が酸化され中温出口管部と高温プレナム部ではCO₂が検出されているが、中温出口管部では空気の浸入に伴い徐々にモル分率が減少している。また、高温プレナム部では破断後約2日頃まで黒鉛の酸化によってモル分率が増加しているが、その後模擬炉心部が低温度(約600°C以下)になって黒鉛が酸化されなくなること及び中温出口管から空気が浸入してくることによりCO₂モル分率が減少する。さらに破断後3.5日頃から再度モル分率が増加しているのは一度拡散と微弱な自然対流とによって上鏡部等に移動したCO₂が模擬炉心部での混合気体の収縮に伴い高温プレナム部へ移動し検出されたものと思われる。上鏡部、環状流路部、模擬入口管部では破断後約3日ごろまで分子拡散と微弱な自然対流とによってモル分率が増加しているが、その後減少しているのは模擬炉心部が冷却され微弱な自然対流が弱くなり、さらに模擬炉心部の混合気体が収縮することによって、これらの箇所のCO₂が高温プレナム部等へ移動したためと考えられる。

Fig. 4. 22にC-100BのCO濃度変化を示す。破断後約0.7日頃までは模擬炉心部が850°C以上であるため上鏡部、環状流路部、模擬入口管部でモル分率が増加している。高温プレナム部でCOが検出されていないのは黒鉛流路管部から拡散でCOが移送されてきても高温であるため(黒鉛流路管とほぼ同温度)、COが気相で酸化されCO₂に変化しているものと考えられる。

実験No. C-100Cは模擬炉心部温度1000°Cから模擬配管破断後降温を開始し、模擬炉心部を1000°C一定に制御した場合の空気浸入実験A-100[6]の空気の自然循環流発生時間の2倍の時間(256hr)で室温(20°C)まで降温するケースである。Fig. 4. 23にC-100Cの混合気体密度変化を示す。本ケースでは破断後約5.1日で試験体内各部の混合気体密度が急激に変化し空気の自然対流が発生したことがわかる。他のケース(C-100A, C-100B)と違い、各部の混合気体密度は時間とともに増加し最終的に空気の自然循環流発生に至っている。これは空気の自然循環流発生時の模擬炉心部の温度が約550°Cであり、混合気体の収縮、黒鉛の酸化反応によるCO及びCO₂の発生に伴う混合気体密

度の増加と分子拡散及び微弱な自然対流とが適度にバランスし、空気の自然対流が発生する状況を作り出したと考えられる。本ケースによって時間に伴って模擬炉心部が冷却される場合は、冷却速度が速いと空気の自然循環流が発生しない場合があり、冷却速度が遅く自然循環流が発生する場合は同部が初期温度一定である場合よりも早く空気の自然循環流が発生することがわかった。

Fig. 4.24にC-100Cの O_2 濃度変化を示す。 O_2 濃度も他のケースと異なり中温出口管部と高温プレナム部でのモル分率は分子拡散と微弱な自然対流及び混合気体の収縮によって浸入する空気の影響で単純に増加するのみであり、模擬入口管部では分子拡散と混合気体の収縮によって浸入し破断後1.3日程度までモル分率が増加しているが、その後微弱な自然対流が強くなり模擬入口管側の破断口から空気が排出されモル分率が減少している。

Fig. 4.25にC-100Cの CO_2 濃度変化を示す。高温プレナム部のモル分率は破断後約4日頃まで増加し、その後減少している。配管破断後4日の段階で模擬炉心部の温度は約 $650^{\circ}C$ であり、黒鉛の酸化反応は続いていると考えられるため、モル分率減少の原因は分子拡散と微弱な自然対流による空気浸入であると考えられる。これは上鏡部、環状流路部、模擬入口管部のモル分率が破断後4日を過ぎても増加していることからわかる。

Fig. 4.26にC-100Cの CO 濃度変化を示す。 CO の濃度変化の傾向はC-100Bとよく似ている。ただし、本ケースでは模擬炉心部の温度が $800^{\circ}C$ 以上である時間がC-100Bに比べて長い上鏡部、環状流路部、模擬入口管部におけるモル分率はC-100Bよりも大きな値を示している。

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、模擬炉心部径方向に温度分布をつけた場合と配管破断後時間とともに模擬炉心部が冷却される場合の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) 模擬炉心部に温度分布がある場合は、同部が等温である場合に比べて空気の自然循環流が早く発生する傾向にある。またその傾向は流路管相互の温度差が一定でも模擬炉心部の温度が低い場合ほど顕著である。
- (2) 模擬炉心部が時間とともに冷却される場合は、その冷却速度が速いと空気の自然循環流が発生しない場合があり、冷却速度が遅く自然循環流が発生する場合は模擬炉心部が初期温度一定の場合よりも空気の自然循環流が早く発生する。

度の増加と分子拡散及び微弱な自然対流とが適度にバランスし、空気の自然対流が発生する状況を作り出したと考えられる。本ケースによって時間に伴って模擬炉心部が冷却される場合は、冷却速度が速いと空気の自然循環流が発生しない場合があり、冷却速度が遅く自然循環流が発生する場合は同部が初期温度一定である場合よりも早く空気の自然循環流が発生することがわかった。

Fig. 4.24にC-100Cの O_2 濃度変化を示す。 O_2 濃度も他のケースと異なり中温出口管部と高温プレナム部でのモル分率は分子拡散と微弱な自然対流及び混合気体の収縮によって浸入する空気の影響で単純に増加するのみであり、模擬入口管部では分子拡散と混合気体の収縮によって浸入し破断後1.3日程度までモル分率が増加しているが、その後微弱な自然対流が強くなり模擬入口管側の破断口から空気が排出されモル分率が減少している。

Fig. 4.25にC-100Cの CO_2 濃度変化を示す。高温プレナム部のモル分率は破断後約4日頃まで増加し、その後減少している。配管破断後4日の段階で模擬炉心部の温度は約 $650^{\circ}C$ であり、黒鉛の酸化反応は続いていると考えられるため、モル分率減少の原因は分子拡散と微弱な自然対流による空気浸入であると考えられる。これは上鏡部、環状流路部、模擬入口管部のモル分率が破断後4日を過ぎても増加していることからわかる。

Fig. 4.26にC-100Cの CO 濃度変化を示す。 CO の濃度変化の傾向はC-100Bとよく似ている。ただし、本ケースでは模擬炉心部の温度が $800^{\circ}C$ 以上である時間がC-100Bに比べて長い上鏡部、環状流路部、模擬入口管部におけるモル分率はC-100Bよりも大きな値を示している。

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、模擬炉心部径方向に温度分布をつけた場合と配管破断後時間とともに模擬炉心部が冷却される場合の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) 模擬炉心部に温度分布がある場合は、同部が等温である場合に比べて空気の自然循環流が早く発生する傾向にある。またその傾向は流路管相互の温度差が一定でも模擬炉心部の温度が低い場合ほど顕著である。
- (2) 模擬炉心部が時間とともに冷却される場合は、その冷却速度が速いと空気の自然循環流が発生しない場合があり、冷却速度が遅く自然循環流が発生する場合は模擬炉心部が初期温度一定の場合よりも空気の自然循環流が早く発生する。

参考文献

- (1) 武田、菱田、機会学会論文集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), pp 175-187.
- (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), pp 341-354
- (5) 武田、菱田、馬場、JAERI-M, 91-179.
- (6) 武田、武仲、菱田、他、JAERI-M, 93-005.

Table 2.1 Main specification of the test model

1. Working fluids: Helium, Air (Nitrogen, Oxygen and other gases), Carbon monoxide and dioxide
2. Pressure: $-1 \sim 1.8 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{G}$
3. Temperature: $0 \sim 1200^\circ\text{C}$
4. Material of the 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 and 1250mm in length
 - (2) High-temp. plenum: 400mm in inner diameter, 460mm in outer diameter and 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 and 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 model: 3750mm
6. Heater capacity
 - (1) Central pipe: 100V, 2.3kW \times 3 vertical parts
 - (2) Peripheral pipes: 100V, 2.3kW \times 3 vertical parts \times 3 pipes
 - (3) High-temp. plenum: 75V, 3kW
 - (4) Reactor simulator: 200V, 10kW \times 3 vertical parts

Table 2.2 Gas sampling position and length of pipe

Sampling No.	Sampling position	Height (mm)*1	Length of pipe (mm) (to analyzer)	Length of pipe (mm) (from analyzer)
1-1	Middle-temp. outlet pipe	690	2900	2950
1-2	Middle-temp. outlet pipe	1140	1900	1650
2-1	High-temp. plenum (center)	1641	2150	1650
2-2	High-temp. plenum (periph.)	1641	1800	2100
3-1	Annular passage (upper part)	2790	3750	2650
3-2	Annular passage (upper part)	2840	2750	2600
3-3	Top cover (lower part)	3040	230	2450
4-1	Annular passage (middle part)	2440	1550	1800
4-2	Annular passage (middle part)	2090	1350	1650
4-3	Annular passage (lower part)	1740	1700	1900
5-1	Bottom cover	1334	1900	2000
5-2	Bottom cover	1302	1950	1950
5-3	Simulated inlet pipe (vertical part)	690	4100	3900
6-1*2	Coaxial pipe (outer pipe)	990	3450	3420
6-2*2	Annular passage (middle part)	2090	—	—
6-3*2	Top cover (lower part)	3040	—	—
6-4*2	Top cover (central part)	3441	—	—
6-5*2	Top cover (Upper part)	3643	—	—
6-6*2	Annular passage (lower part)	1740	—	—
6-7*2	Simulated inlet pipe (horizontal part)	990	—	—

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

*2 : Spare sampling nozzle

Table 2.3 Measuring point list (1)

Item	TAG No.	Measuring point	Measuring device	Measuring range	Scan CH	Output form
Temperature	TR-G01	Loop flow meter inlet temp.	K-type T/C	0-100°C	CH-101	DC-mV
	TR-G02	Coaxtial pipe nozzle gas temp. No.1	K-type T/C	0-300°C	CH-102	DC-mV
	TR-G03	Coaxtial pipe nozzle gas temp. No.2	K-type T/C	0-300°C	CH-103	DC-mV
	TR-G04	Bottom cover gas temp. No.1	K-type T/C	0-300°C	CH-104	DC-mV
	TR-G05	Bottom cover gas temp. No.2	K-type T/C	0-300°C	CH-105	DC-mV
	TR-G06	Bottom cover gas temp. No.3	K-type T/C	0-300°C	CH-106	DC-mV
	TR-G07	Bottom cover gas temp. No.4	K-type T/C	0-300°C	CH-107	DC-mV
	TR-G08	Annular passage gas temp. No.1	K-type T/C	0-300°C	CH-108	DC-mV
	TR-G09	Annular passage gas temp. No.2	K-type T/C	0-300°C	CH-109	DC-mV
	TR-G10	Annular passage gas temp. No.3	K-type T/C	0-300°C	CH-110	DC-mV
	TR-G11	Annular passage gas temp. No.4	K-type T/C	0-300°C	CH-111	DC-mV
	TR-G12	Annular passage gas temp. No.5	K-type T/C	0-300°C	CH-112	DC-mV
	TR-G13	Annular passage gas temp. No.6	K-type T/C	0-300°C	CH-113	DC-mV
	TR-G14	Annular passage gas temp. No.7	K-type T/C	0-300°C	CH-114	DC-mV
	TR-G15	Annular passage gas temp. No.8	K-type T/C	0-300°C	CH-115	DC-mV
	TR-G16	Top cover gas temp. No.1	K-type T/C	0-300°C	CH-116	DC-mV
	TR-G17	Top cover gas temp. No.2	K-type T/C	0-300°C	CH-117	DC-mV
	TR-G18	Top cover gas temp. No.3	K-type T/C	0-300°C	CH-118	DC-mV
	TR-G19	Top cover gas temp. No.4	K-type T/C	0-300°C	CH-119	DC-mV
	TR-G20	Top cover gas temp. No.5	K-type T/C	0-300°C	CH-120	DC-mV
	TR-G21	Top cover gas temp. No.6	K-type T/C	0-300°C	CH-121	DC-mV

Table 2.3 Measuring point list (2)

Item	TAG No.	Measuring point	Measuring device	Measuring range	Scan CH	Output form
Temperature	TR-G22	High temp. plenum gas temp. No.1	N-type T/C	0-1200°C	CH-122	DC-mV
	TR-G23	High temp. plenum gas temp. No.2	N-type T/C	0-1200°C	CH-123	DC-mV
	TR-G24	High temp. plenum gas temp. No.3	N-type T/C	0-1200°C	CH-124	DC-mV
	TR-G25	High temp. plenum gas temp. No.4	N-type T/C	0-1200°C	CH-125	DC-mV
	TR-G26	High temp. outlet pipe gas temp. No.1	N-type T/C	0-1200°C	CH-126	DC-mV
	TR-G27	Middle temp. outlet pipe gas temp.1	N-type T/C	0-1200°C	CH-127	DC-mV
	TR-G28	Middle temp. outlet pipe gas temp.2	N-type T/C	0-1200°C	CH-128	DC-mV
	TR-G29	Gas cooler inlet gas temp.	K-type T/C	0-1000°C		DC-mV
	TR-G30	Gas cooler outlet gas temp.	K-type T/C	0-100°C		DC-mV
	TR-G31	Simulated inlet pipe gas temp. No.1	K-type T/C	0-300°C	CH-129	DC-mV
	TR-G32	Simulated inlet pipe gas temp. No.2	K-type T/C	0-300°C	CH-130	DC-mV
	TR-G33	Outlet pipe gas temp.	K-type T/C	0-300°C	CH-131	DC-mV
	TR-G34	Stand pipe gas temp.	K-type T/C	0-100°C	CH-132	DC-mV
	TR-G35	High temp. outlet pipe gas temp. No.2	N-type T/C	0-1200°C	CH-202	DC-mV
	TICA-II01	Central part main heater temp. No.1	R-type T/C	0-1500°C		DC-mV
	TICA-II02	Central part main heater temp. No.2	R-type T/C	0-1500°C		DC-mV
	TICA-II03	Central part main heater temp. No.3	R-type T/C	0-1500°C		DC-mV
	TICA-II11	Periph. part1 main heater temp. No.1	R-type T/C	0-1500°C		DC-mV
	TICA-II12	Periph. part1 main heater temp. No.2	R-type T/C	0-1500°C		DC-mV
	TICA-II13	Periph. part1 main heater temp. No.3	R-type T/C	0-1500°C		DC-mV
	TICA-II21	Periph. part2 main heater temp. No.1	R-type T/C	0-1500°C		DC-mV
	TICA-II22	Periph. part2 main heater temp. No.2	R-type T/C	0-1500°C		DC-mV
	TICA-II23	Periph. part2 main heater temp. No.3	R-type T/C	0-1500°C		DC-mV

Table 2.3 Measuring point list (3)

Item	TAG No.	Measuring point	Measuring device	Measuring range	Scan Ctl	Output form
Temperature	TICA-H31	Periph. part3 main heater temp. No.1	R-type T/C	0-1500°C		DC-mV
	TICA-H32	Periph. part3 main heater temp. No.2	R-type T/C	0-1500°C		DC-mV
	TICA-H33	Periph. part3 main heater temp. No.3	R-type T/C	0-1500°C		DC-mV
	TICA-H41	Periph. part comp. heater temp. No.1	R-type T/C	0-1500°C		DC-mV
	TICA-H42	Periph. part comp. heater temp. No.2	R-type T/C	0-1500°C		DC-mV
	TICA-H43	Periph. part comp. heater temp. No.3	R-type T/C	0-1500°C		DC-mV
	TICA-H51	High temp. plenum lower heater temp.	R-type T/C	0-1500°C		DC-mV
	TR-W01	Ceramic flow pipe temp. (central/1)	K-type T/C	0-1200°C	CH-133	DC-mV
	TR-W02	Ceramic flow pipe temp. (central/2)	K-type T/C	0-1200°C	CH-134	DC-mV
	TR-W03	Ceramic flow pipe temp. (periph. 1/1)	K-type T/C	0-1200°C	CH-135	DC-mV
	TR-W04	Ceramic flow pipe temp. (periph. 1/2)	K-type T/C	0-1200°C	CH-136	DC-mV
	TR-W05	Ceramic flow pipe temp. (periph. 2/1)	K-type T/C	0-1200°C	CH-137	DC-mV
	TR-W06	Ceramic flow pipe temp. (periph. 2/2)	K-type T/C	0-1200°C	CH-138	DC-mV
	TR-W07	Ceramic flow pipe temp. (periph. 3/1)	K-type T/C	0-1200°C	CH-139	DC-mV
	TR-W08	Ceramic flow pipe temp. (periph. 3/2)	K-type T/C	0-1200°C	CH-140	DC-mV
	TR-W09	Graphite pipe temp. (central/1)	K-type T/C	0-1200°C	CH-141	DC-mV
	TR-W10	Graphite pipe temp. (central/2)	K-type T/C	0-1200°C	CH-142	DC-mV
	TR-W11	Graphite pipe temp. (central/3)	K-type T/C	0-1200°C	CH-143	DC-mV
TR-W12	Graphite pipe temp. (central/4)	K-type T/C	0-1200°C	CH-144	DC-mV	
TR-W13	Graphite pipe temp. (central/5)	K-type T/C	0-1200°C	CH-145	DC-mV	
TR-W14	Graphite pipe temp. (periph. 1/1)	K-type T/C	0-1200°C	CH-146	DC-mV	
TR-W15	Graphite pipe temp. (periph. 1/2)	K-type T/C	0-1200°C	CH-147	DC-mV	
TR-W16	Graphite pipe temp. (periph. 1/3)	K-type T/C	0-1200°C	CH-148	DC-mV	
TR-W17	Graphite pipe temp. (periph. 1/4)	K-type T/C	0-1200°C	CH-149	DC-mV	
TR-W18	Graphite pipe temp. (periph. 1/5)	K-type T/C	0-1200°C	CH-150	DC-mV	

Table 2.3 Measuring point list (4)

Item	TAG No.	Measuring point	Measuring device	Measuring range	Scan CH	Output form
Temperature	TR-W19	Graphite pipe temp. (periph. 2/1)	K-type T/C	0-1200°C	CH-151	DC-mV
	TR-W20	Graphite pipe temp. (periph. 2/2)	K-type T/C	0-1200°C	CH-152	DC-mV
	TR-W21	Graphite pipe temp. (periph. 2/3)	K-type T/C	0-1200°C	CH-153	DC-mV
	TR-W22	Graphite pipe temp. (periph. 2/4)	K-type T/C	0-1200°C	CH-154	DC-mV
	TR-W23	Graphite pipe temp. (periph. 2/5)	K-type T/C	0-1200°C	CH-155	DC-mV
	TR-W24	Graphite pipe temp. (periph. 3/1)	K-type T/C	0-1200°C	CH-156	DC-mV
	TR-W25	Graphite pipe temp. (periph. 3/2)	K-type T/C	0-1200°C	CH-157	DC-mV
	TR-W26	Graphite pipe temp. (periph. 3/3)	K-type T/C	0-1200°C	CH-158	DC-mV
	TR-W27	Graphite pipe temp. (periph. 3/4)	K-type T/C	0-1200°C	CH-159	DC-mV
	TR-W28	Graphite pipe temp. (periph. 3/5)	K-type T/C	0-1200°C	CH-160	DC-mV
	TR-W29	Simulated support post temp. No.1	K-type T/C	0-1200°C	CH-161	DC-mV
	TR-W30	Simulated support post temp. No.2	K-type T/C	0-1200°C	CH-162	DC-mV
	TR-W31	Simulated support post temp. No.3	K-type T/C	0-1200°C	CH-163	DC-mV
	TR-W32	High temp. plenum upper wall temp. 1	N-type T/C	0-1200°C	CH-164	DC-mV
	TR-W33	High temp. plenum upper wall temp. 2	N-type T/C	0-1200°C	CH-165	DC-mV
	TR-W34	High temp. plenum upper wall temp. 3	N-type T/C	0-1200°C	CH-166	DC-mV
	TR-W35	High temp. plenum side wall temp. 1	N-type T/C	0-1200°C	CH-167	DC-mV
	TR-W36	High temp. plenum side wall temp. 2	N-type T/C	0-1200°C	CH-168	DC-mV
	TR-W37	High temp. plenum lower wall temp. 1	N-type T/C	0-1200°C	CH-169	DC-mV
	TR-W38	High temp. plenum lower wall temp. 2	N-type T/C	0-1200°C	CH-170	DC-mV
	TR-W39	High temp. plenum lower wall temp. 3	N-type T/C	0-1200°C	CH-171	DC-mV
	TR-W40	Pressure vessel top cover wall temp. 1	K-type T/C	0-100°C	CH-172	DC-mV
	TR-W41	Pressure vessel top cover wall temp. 2	K-type T/C	0-100°C	CH-173	DC-mV

Table 2.3 Measuring point list (5)

Item	TAG No.	Measuring point	Measuring device	Measuring range	Scan C/I	Output form
Temperature	TR-W42	Pressure vessel side wall temp. No.1	K-type T/C	0-100°C	CH-174	DC-mV
	TR-W43	Pressure vessel side wall temp. No.2	K-type T/C	0-100°C	CH-175	DC-mV
	TR-W44	Pressure vessel side wall temp. No.3	K-type T/C	0-100°C	CH-176	DC-mV
	TR-W45	Pressure vessel side wall temp. No.4	K-type T/C	0-100°C	CH-177	DC-mV
	TR-W46	Pressure vessel bottom cover temp. 1	K-type T/C	0-100°C	CH-178	DC-mV
	TR-W47	Pressure vessel bottom cover temp. 2	K-type T/C	0-100°C	CH-179	DC-mV
	TR-W48	Pressure vessel bottom cover temp. 3	K-type T/C	0-100°C	CH-180	DC-mV
	TR-W49	High temp. outlet pipe wall temp.	N-type T/C	0-1200°C	CH-201	DC-mV
	TR-W51	Middle temp. outlet pipe wall temp.1	K-type T/C	0-1000°C	CH-203	DC-mV
	TR-W52	Middle temp. outlet pipe wall temp.2	K-type T/C	0-1000°C	CH-204	DC-mV
	TR-W53	Middle temp. outlet pipe wall temp.3	K-type T/C	0-1000°C	CH-205	DC-mV
	TR-W54	Outlet pipe wall temp.	K-type T/C	0-100°C	CH-206	DC-mV
	TR-W55	Inlet pipe wall temp.	K-type T/C	0-100°C	CH-207	DC-mV
	TR-W56	Reactor core simulator wall temp.1	K-type T/C	0-500°C	CH-208	DC-mV
	TR-W57	Reactor core simulator wall temp.2	K-type T/C	0-500°C	CH-209	DC-mV
	TR-W58	Reactor core simulator wall temp.3	K-type T/C	0-500°C	CH-210	DC-mV
	TR-W59	Reactor core simulator wall temp.4	K-type T/C	0-500°C	CH-211	DC-mV
	TR-W60	Reactor core simulator wall temp.5	K-type T/C	0-500°C	CH-212	DC-mV
	TR-W61	Reactor core simulator wall temp.6	K-type T/C	0-500°C	CH-213	DC-mV
	TR-W62	Reactor core simulator wall temp.7	K-type T/C	0-500°C	CH-214	DC-mV
	TR-W63	Reactor core simulator wall temp.8	K-type T/C	0-500°C	CH-215	DC-mV
	TR-W64	Reactor core simulator wall temp.9	K-type T/C	0-500°C	CH-216	DC-mV
	TR-W65	Reactor core simulator wall temp.10	K-type T/C	0-500°C	CH-217	DC-mV

Table 2.3 Measuring point list (6)

Item	TAG No.	Measuring point	Measuring device	Measuring range	Scan CII	Output form
Temperature	TR-W66	Stand pipe temp.	K-type T/C	0-100°C	CII-218	DC-mV
	TR-W67	High temperature pipe wall temp. No.1	K-type T/C	0-500°C	CII-219	DC-mV
	TR-W68	High temperature pipe wall temp. No.2	K-type T/C	0-500°C	CII-220	DC-mV
	TR-W69	High temperature pipe wall temp. No.3	K-type T/C	0-500°C	CII-221	DC-mV
Flow rate	TR-W70	Gas cooler outlet water temp.	K-type T/C	0-100°C	CII-222	DC-mV
	TR-W71	Middle temp. outlet pipe outlet water	K-type T/C	0-100°C	CII-223	DC-mV
	FICA-001	Loop gas flow rate	Laminar flow typ	0-1540 l/min		DC 0-10V
	FR-002	Outlet pipe gas flow rate	Ultra sonic type	0-10 m/s	CII-230	DC 0-10V
	FIRA-003	Middle temp. out. pipe water flow rate		0-15 l/min		DC 4-20mA
	FIA-004	Gas cooler water flow rate		0-50 l/min		
	FIA-005	High temp. pipe water flow rate		0-15 l/min		
	FI-006	Top cover water flow rate		0-15 l/min		
	FI-007	Pressure vessel water flow rate		0-50 l/min		
	FI-008	Bottom cover water flow rate		0-15 l/min		
Pressure	FI-009	Simulated inlet pipe water flow rate		0-15 l/min		
	FI-010	Outlet pipe water flow rate		0-15 l/min		
	PI-001	Blower outlet pressure	Bourdon tube	-1-+3kg/cm ²		
	PI-002	Loop flow meter inlet pressure	Press. feeder	-1-+2kg/cm ²		DC 4-20mA
	PI-003	Press. vessel vacuum degree	Pilani gauge	10 ⁻³ -20Torr		DC mV
	PICR-004	Pressure vessel pressure No.1	Press. feeder	0-0.1kg/cm ²		DC 4-20mA
	PICRA005	Pressure vessel pressure No.2	Press. feeder	-1-+2kg/cm ²		DC 4-20mA
	PI-006	Pressure vessel pressure No.3	Bourdon tube	-1-+3kg/cm ²		
	PI-007	Vacuum pump inlet vacuum degree	Pilani gauge	10 ⁻³ -20Torr		DC mV
	PI-008	Loop vacuum degree	Pilani gauge	10 ⁻³ -20Torr		DC mV
PdI-002	Blower head	Bellows	0-5000mmAq			

Table 2.3 Measuring point list (7)

Item	TAG No.	Measuring point	Measuring device	Measuring range	Scan CH	Output form
Concentration	O ₂ R-001	Outlet pipe O ₂ concentration		0-25%	CH-231	DC 0-10mV
	O ₂ R-002	High temp. plenum O ₂ concentration		0-25%	CH-232	DC 0-10mV
	O ₂ R-003	Top cover O ₂ concentration		0-25%	CH-233	DC 0-10mV
	O ₂ R-004	Annular passage O ₂ concentration		0-25%	CH-234	DC 0-10mV
	O ₂ R-005	Inlet pipe O ₂ concentration		0-25%	CH-235	DC 0-10mV
	COR-001	Outlet pipe CO concentration		0-50%	CH-236	DC 0-10mV
	COR-002	High temp. plenum CO concentration		0-50%	CH-237	DC 0-10mV
	COR-003	Top cover CO concentration		0-50%	CH-238	DC 0-10mV
	COR-004	Annular passage CO concentration		0-50%	CH-239	DC 0-10mV
	COR-005	Inlet pipe CO concentration		0-50%	CH-240	DC 0-10mV
Density	CO1A-006	Experiment room CO concentration		0-150ppm		
	CO ₂ R-001	Outlet pipe CO ₂ concentration		0-25%	CH-241	
	CO ₂ R-002	High temp. plenum CO ₂ concentration		0-25%	CH-242	
	CO ₂ R-003	Top cover CO ₂ concentration		0-25%	CH-243	
	CO ₂ R-004	Annular passage CO ₂ concentration		0-25%	CH-244	
	CO ₂ R-005	Inlet pipe CO ₂ concentration		0-10%	CH-245	
	O ₂ A-006	Loop O ₂ concentration		0-25%		
	DR-001	Outlet pipe gas density		0-1.5kg/m ³	CH-246	
	DR-002	High temp. plenum gas density		0-1.5kg/m ³	CH-247	
	DR-003	Top cover gas density		0-1.5kg/m ³	CH-248	
	DR-004	Annular passage gas density		0-1.5kg/m ³	CH-249	
	DR-005	Inlet pipe gas density		0-1.5kg/m ³	CH-250	

Table 3.1 Experiment cases

	Exp. No.	Set value of heaters [°C]				cooling ratio
		Central area	Periph. area	Comp. heater	High temp. plenum area	
Temp. distribution cases	B-100-90	1000	900	900	900	/
	B-85-75	850	750	750	750	
	B-70-60	700	600	600	600	
Transition cases	C-100A	1000	1000	1000	1000	Natural cooling
	C-100B	1000	1000	1000	1000	-7.66°C/hr
	C-100C	1000	1000	1000	1000	-3.83°C/hr

Table 3.3 Calibration gases

Check point	Density meter	Oxygen analyser	CO and CO ₂ analyser
0 point	Helium gas	Helium gas	Helium gas
span point	Air	Air	10%CO+20%CO ₂ /He 10%CO+20%CO ₂ /N ₂

Table 3.2 Temperatures in the test model just after the simulated pipe rupture

unit : °C

Run number	B-100-90	B-85-75	B-70-60	C-100A	C-100B	C-100C
Middle temp. outlet pipe(gas)	5.4	3.6	3.8	10.6	12.7	12.2
Middle temp. outlet pipe(wall)	7.8	9.4	6.8	14.6	22.6	24.0
High temp. outlet pipe(gas)	681.2	547.8	430.7	776.7	770.1	768.0
High temp. outlet pipe(wall)	689.9	566.1	446.6	778.5	774.9	775.7
High temp. plenum(gas)	833.4	698.3	560.9	936.4	933.5	965.2
High temp. plenum(wall)	889.2	741.6	592.5	987.2	982.6	986.5
Graphite pipes (wall, central)	994.1	847.8	697.6	999.6	1002.6	1002.2
Graphite pipes (wall, peripheral)	907.7	765.6	613.2	998.2	1001.5	1001.0
Graphite and ceramic pipes(wall, central)	931.4	792.6	651.7	935.9	937.0	936.8
Graphite and ceramic pipes(wall, peripheral)	846.7	712.0	570.4	930.5	935.1	935.2
Top cover (gas)	102.0	90.9	68.0	94.2	127.8	128.4
Annular passage (gas)	100.6	85.2	60.8	112.8	127.1	131.2
Inner barrel (wall)	214.4	180.9	136.3	247.3	257.9	257.3
Water cooled vessel (wall)	25.0	26.6	15.2	35.9	51.8	52.5
Bottom cover (gas)	20.7	20.3	15.3	27.9	38.5	38.9
Inlet pipe (gas)	5.9	8.5	5.7	12.6	21.2	22.7
Inlet pipe (wall)	9.1	9.6	7.6	14.5	22.1	23.4

Table 4.1 Mutual diffusion coefficient

Temperature	CO ₂ -He (m ² /s)	CO-He (m ² /s)	CO ₂ -N ₂ (m ² /s)	CO-N ₂ (m ² /s)	Air-He (m ² /s)
300K (27°C)	6.01 × 10 ⁻⁵	7.12 × 10 ⁻⁵	1.57 × 10 ⁻⁵	2.04 × 10 ⁻⁵	7.15 × 10 ⁻⁵
700K (427°C)	2.47 × 10 ⁻⁴	2.90 × 10 ⁻⁴	6.82 × 10 ⁻⁵	8.63 × 10 ⁻⁵	2.91 × 10 ⁻⁴
900K (627°C)	3.75 × 10 ⁻⁴	4.40 × 10 ⁻⁴	1.04 × 10 ⁻⁴	1.31 × 10 ⁻⁴	4.42 × 10 ⁻⁴

Table 4.2 Density of helium gas

EXP. No.	B-100-90	B-85-75	B-70-60
Graphite temp. (center/periph.)	994.1/907.7°C	847.8/765.6°C	697.6/613.2°C
Density at graphite temp. and 0.1MPa (center/periph.)	0.0380/0.0408kg/m ³	0.0430/0.0464kg/m ³	0.0444/0.0543kg/m ³
Δρ (difference of density)	2.8 × 10 ⁻³ kg/m ³	3.4 × 10 ⁻³ kg/m ³	1.0 × 10 ⁻³ kg/m ³

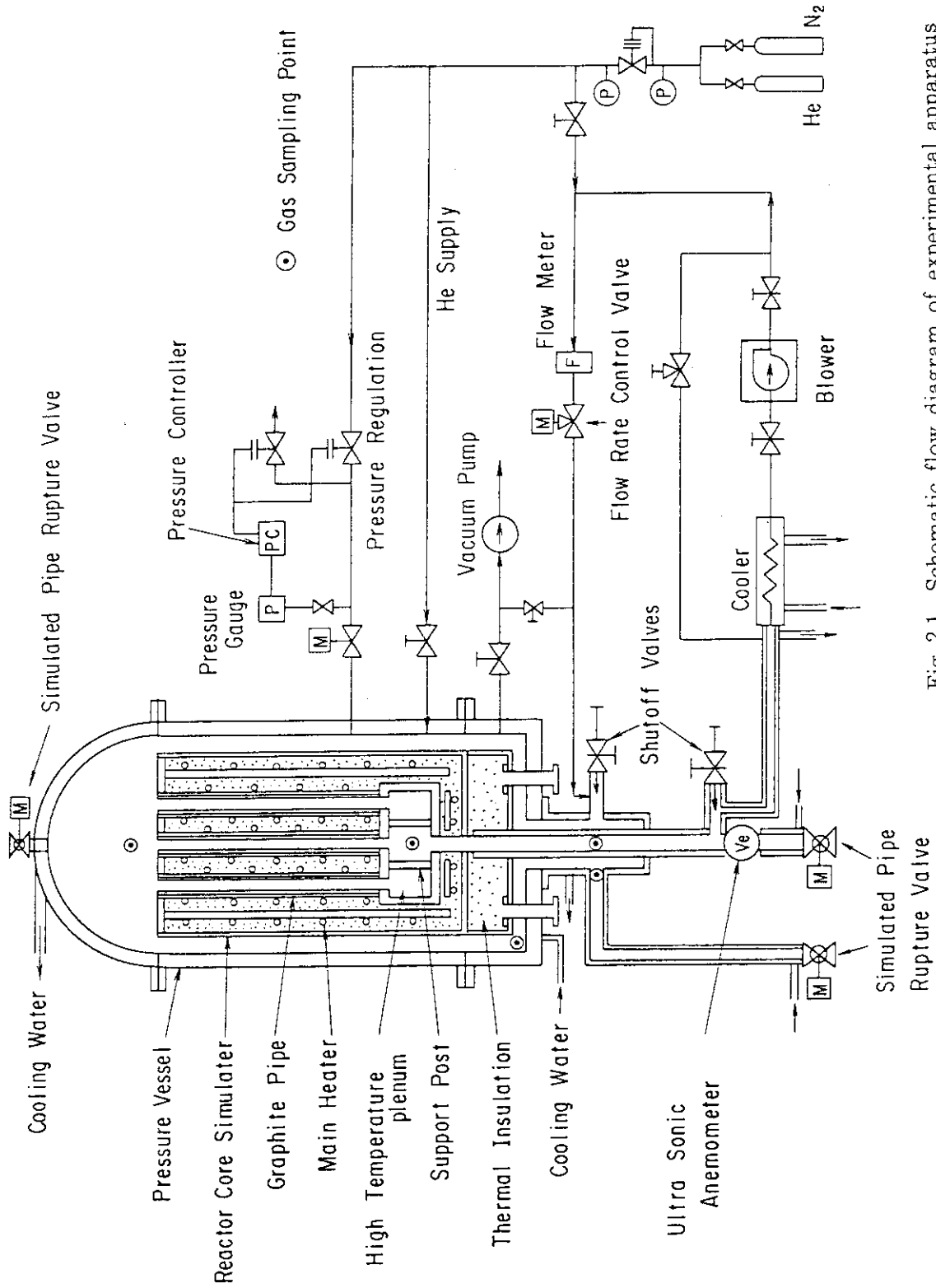


Fig. 2.1 Schematic flow diagram of experimental apparatus

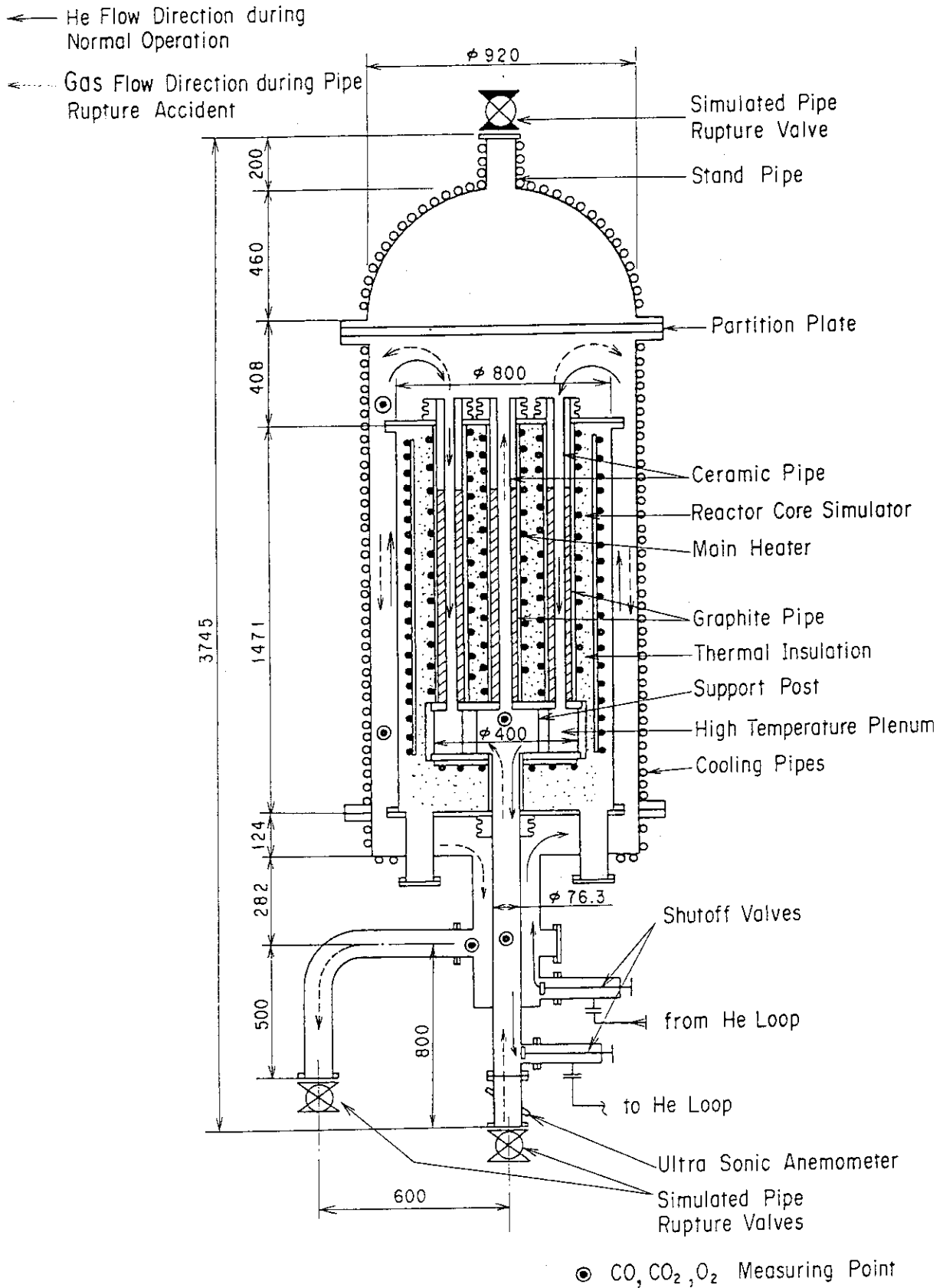


Fig. 2.2 Test model

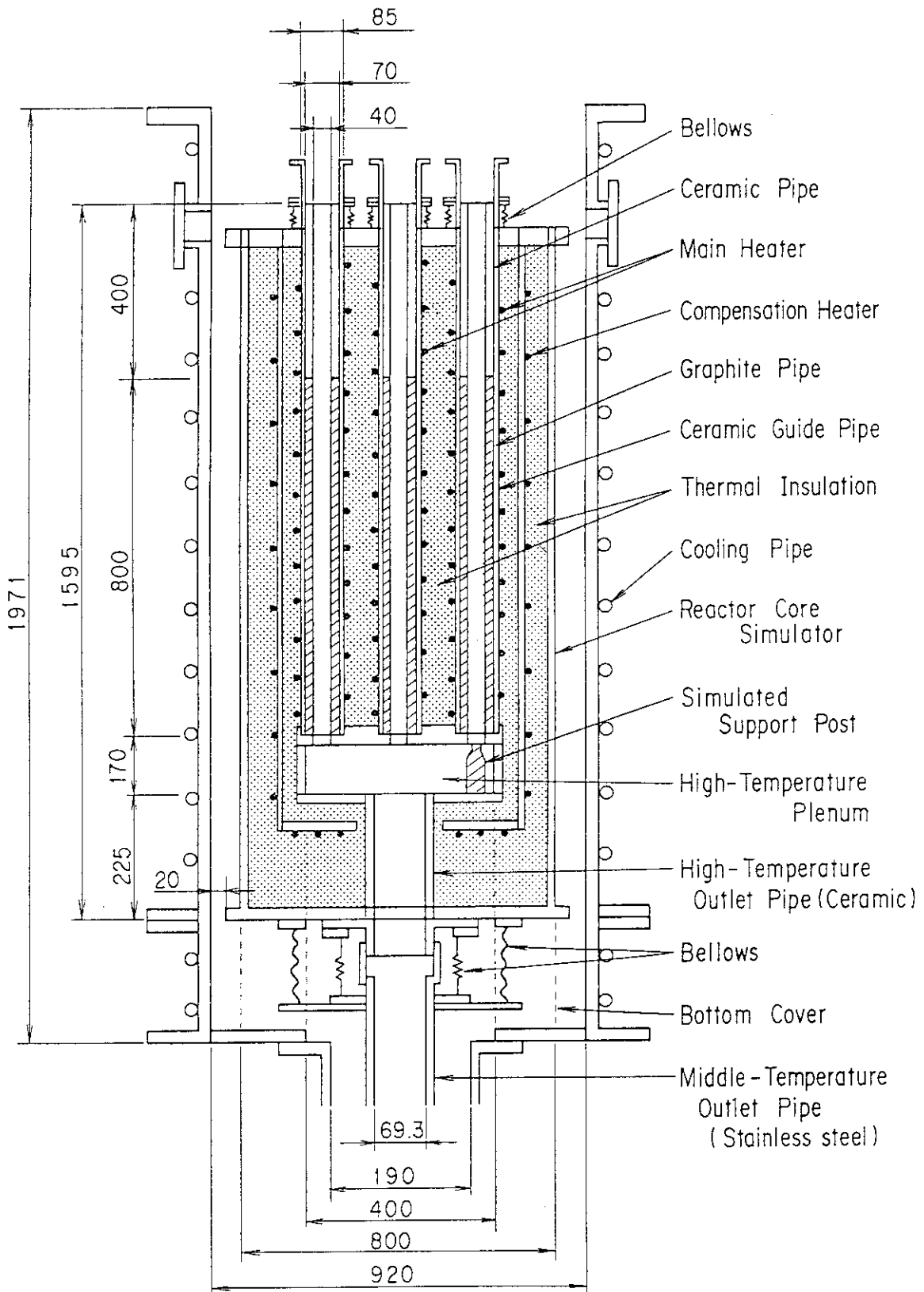


Fig. 2.3 Reactor core simulator

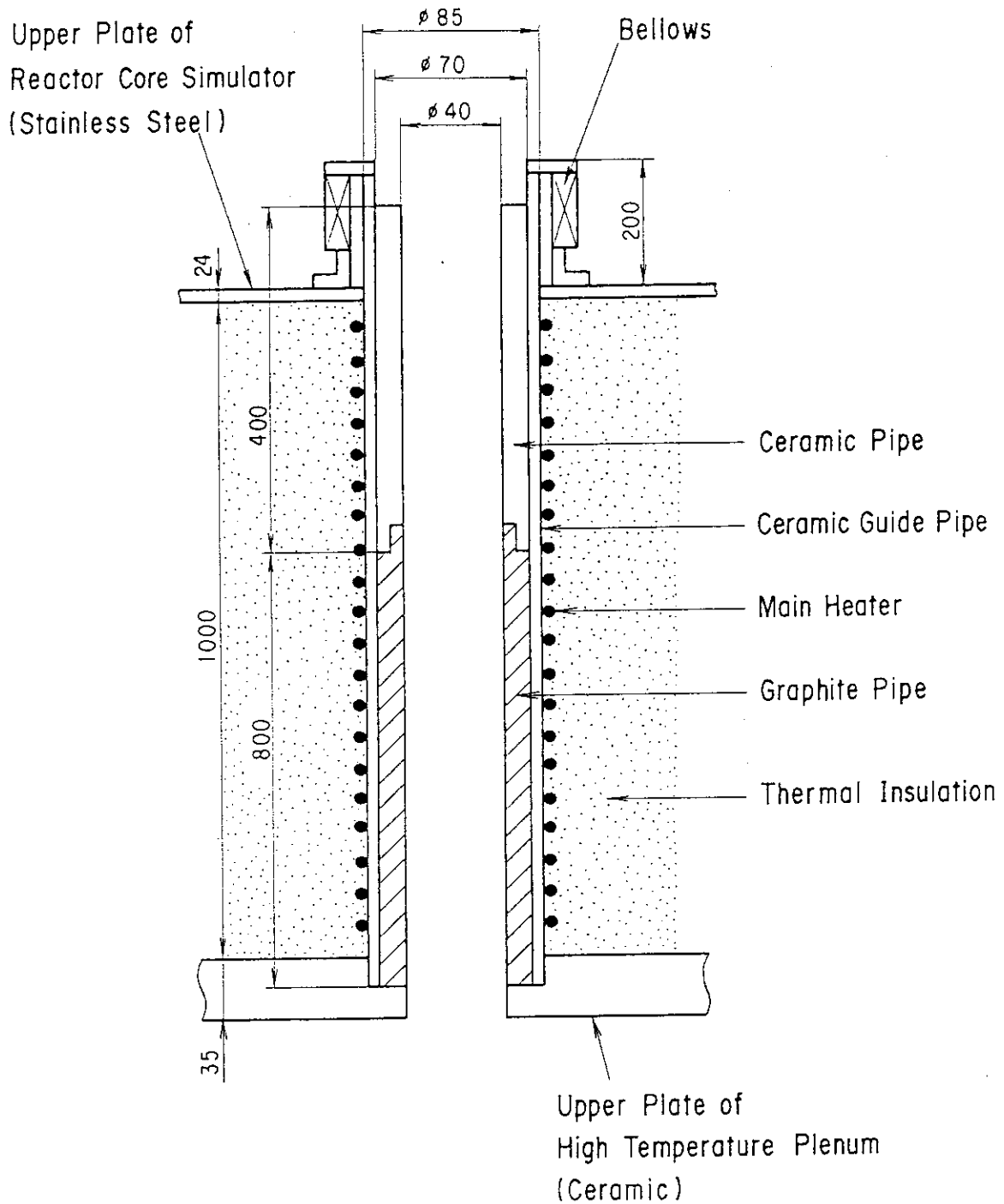


Fig. 2.4 Flow pipe

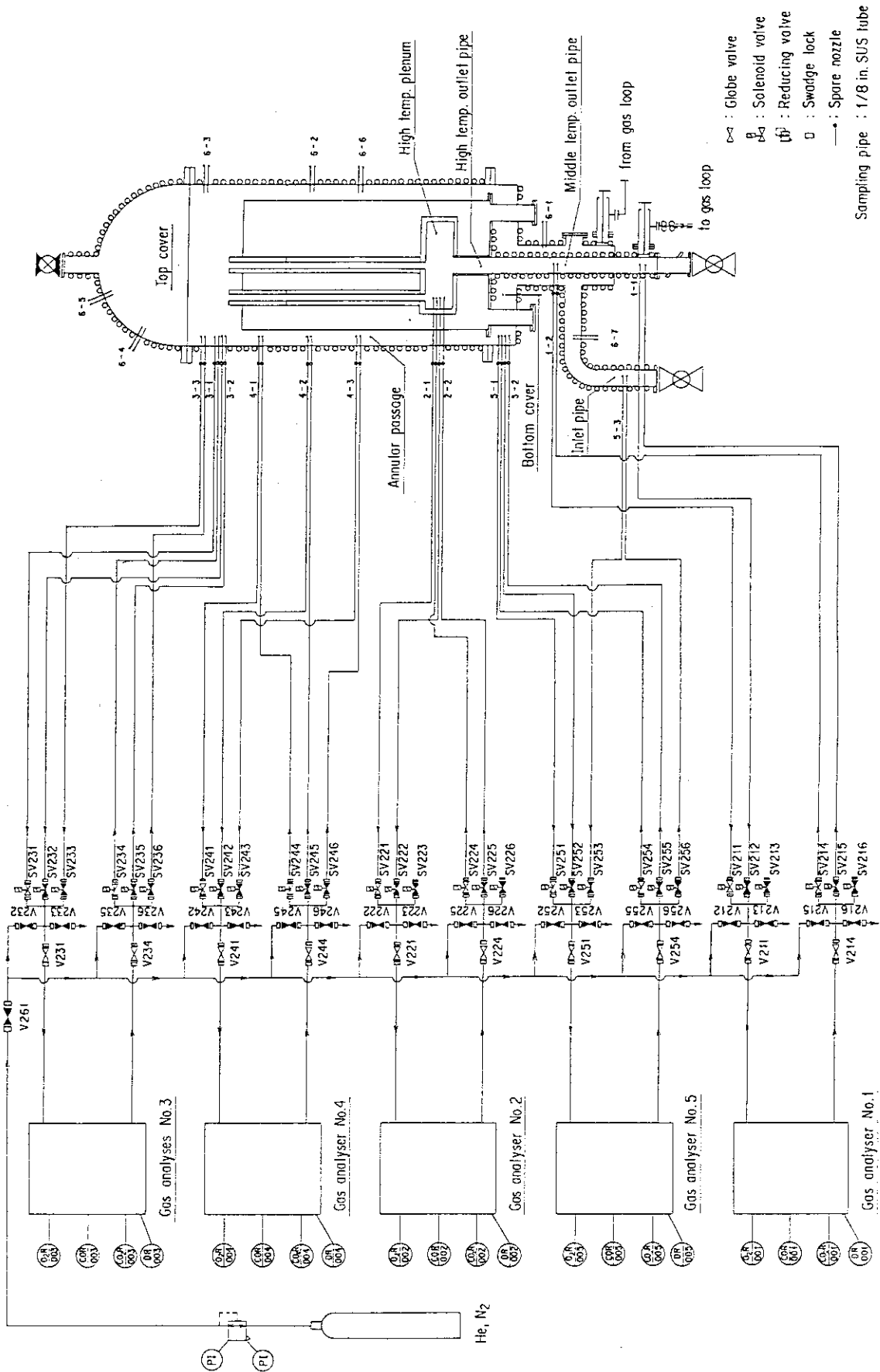


Fig. 2.5 Flow sheet of gas sampling system

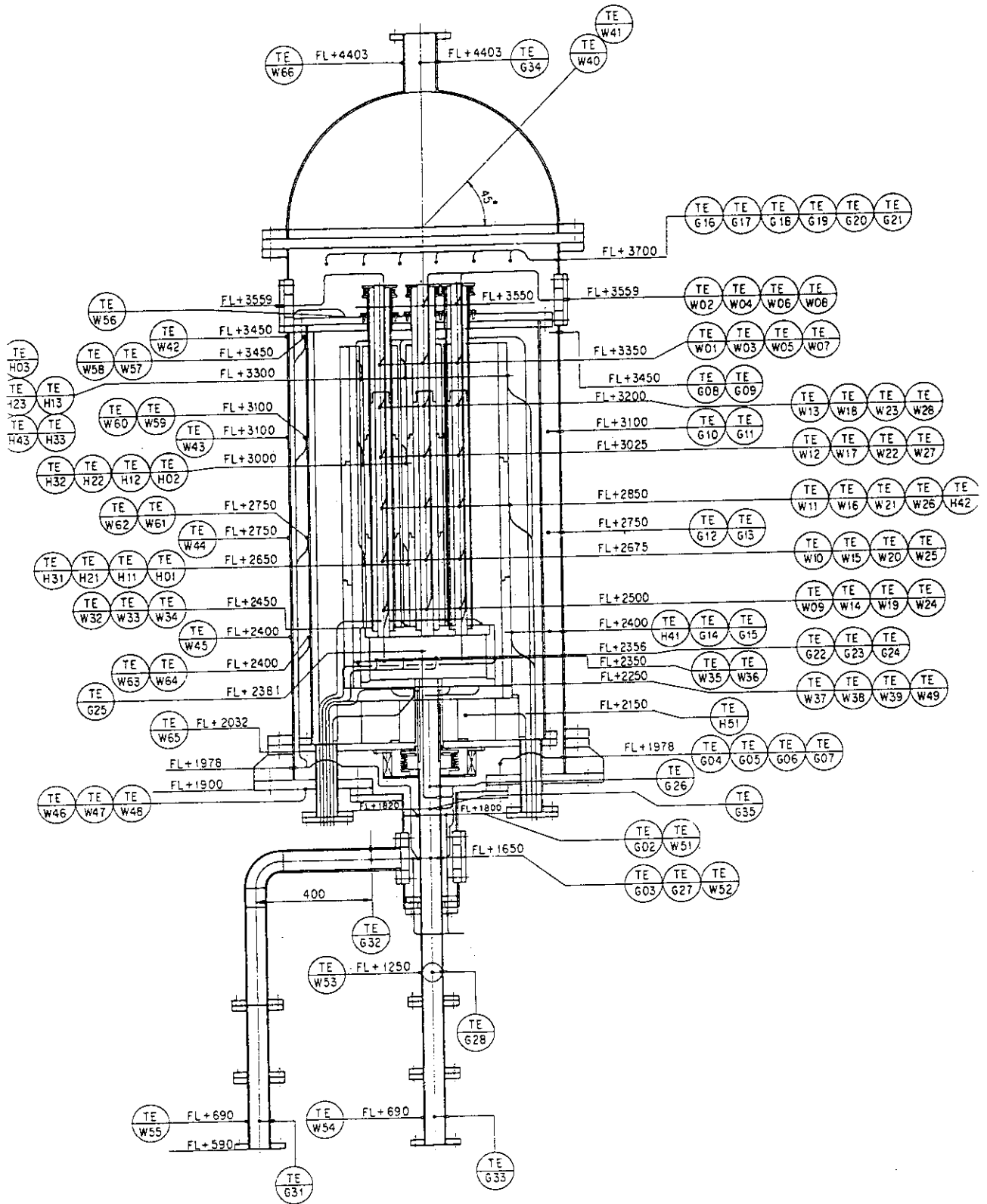


Fig. 2.6(1) Positions of temperature measurement

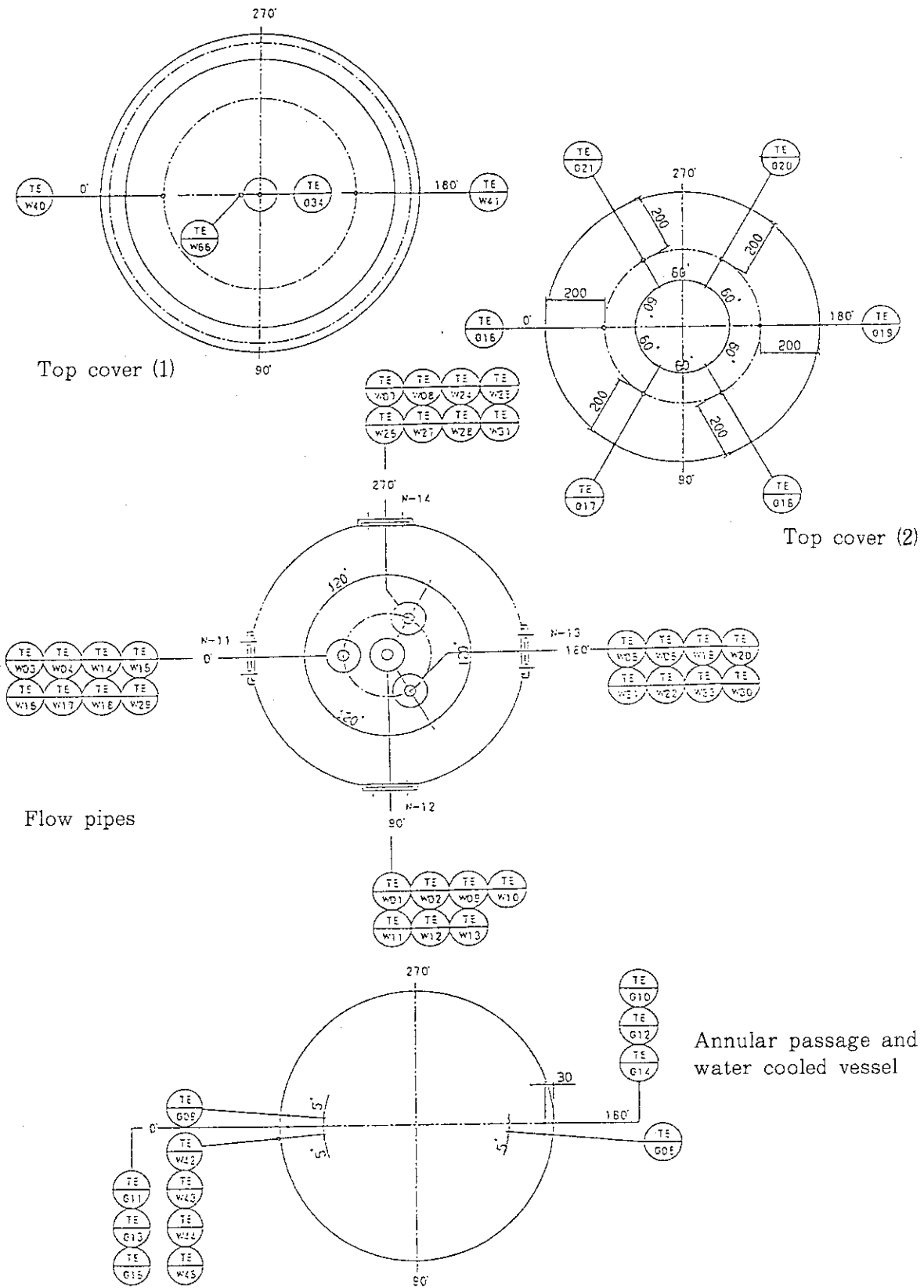


Fig. 2.6(2) Positions of temperature measurement

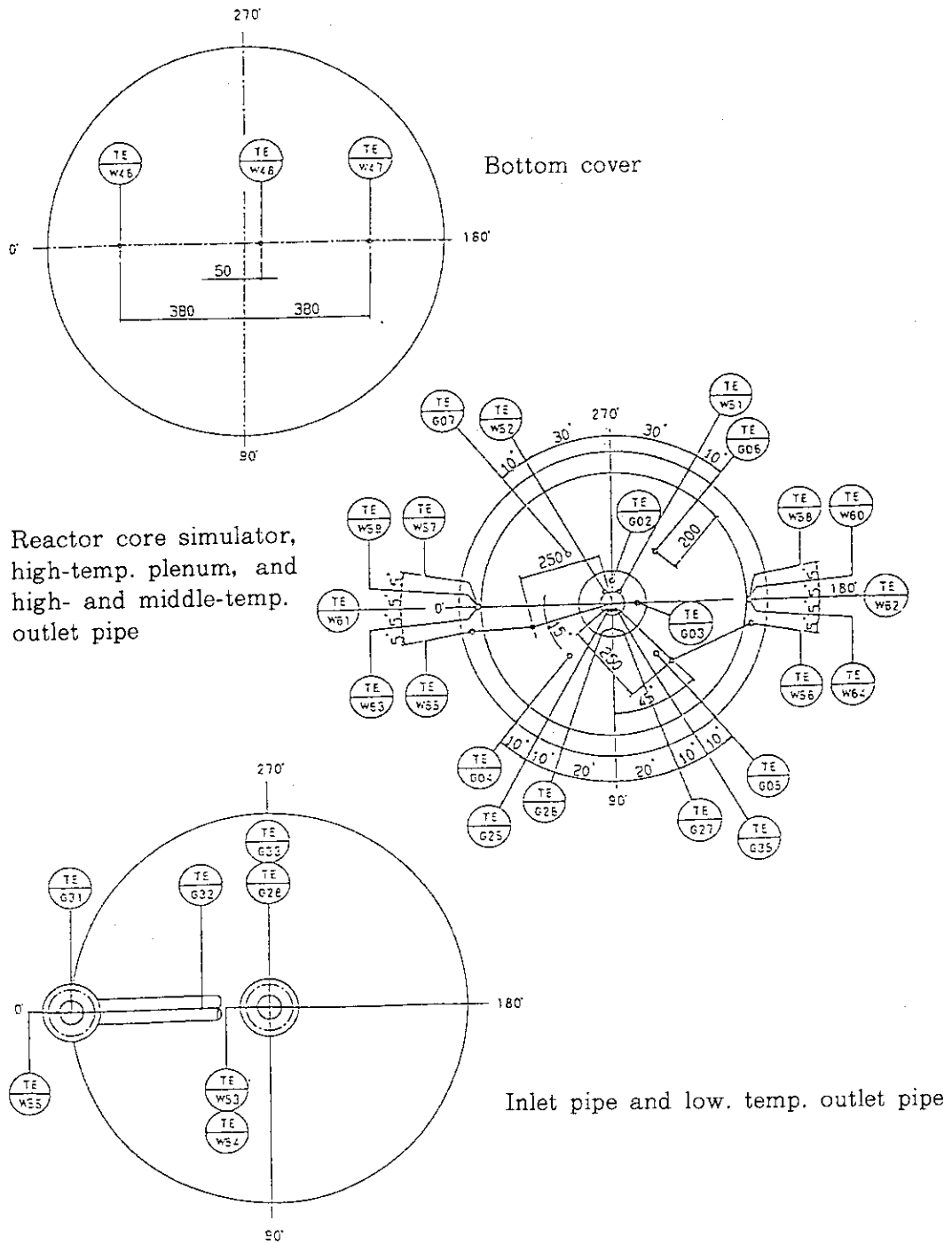


Fig. 2.6(3) Positions of temperature measurement

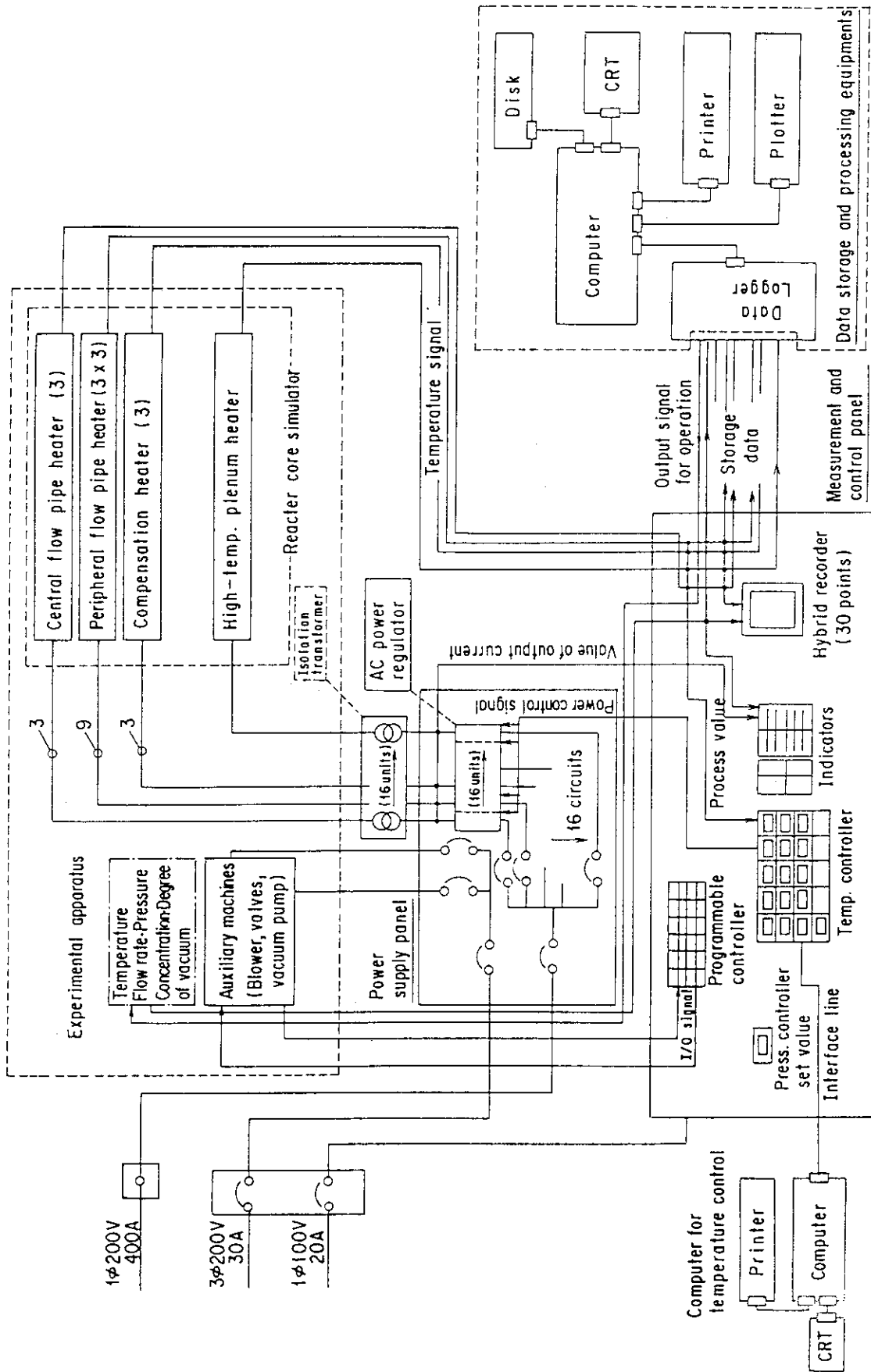


Fig. 2.7 Schematic drawing of electrical instrument

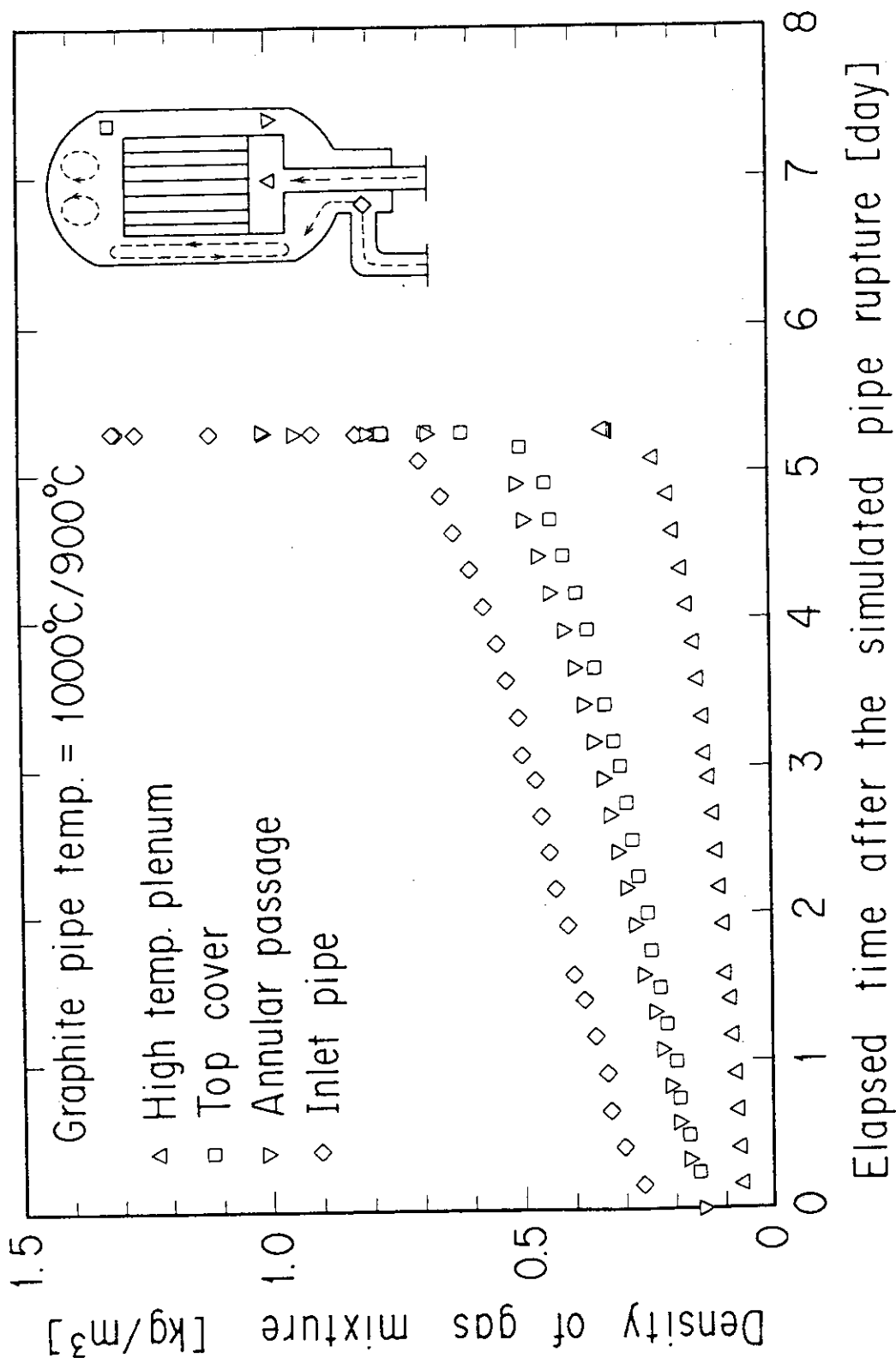


Fig. 4.1 Density changes of gas mixture (B-100-90)

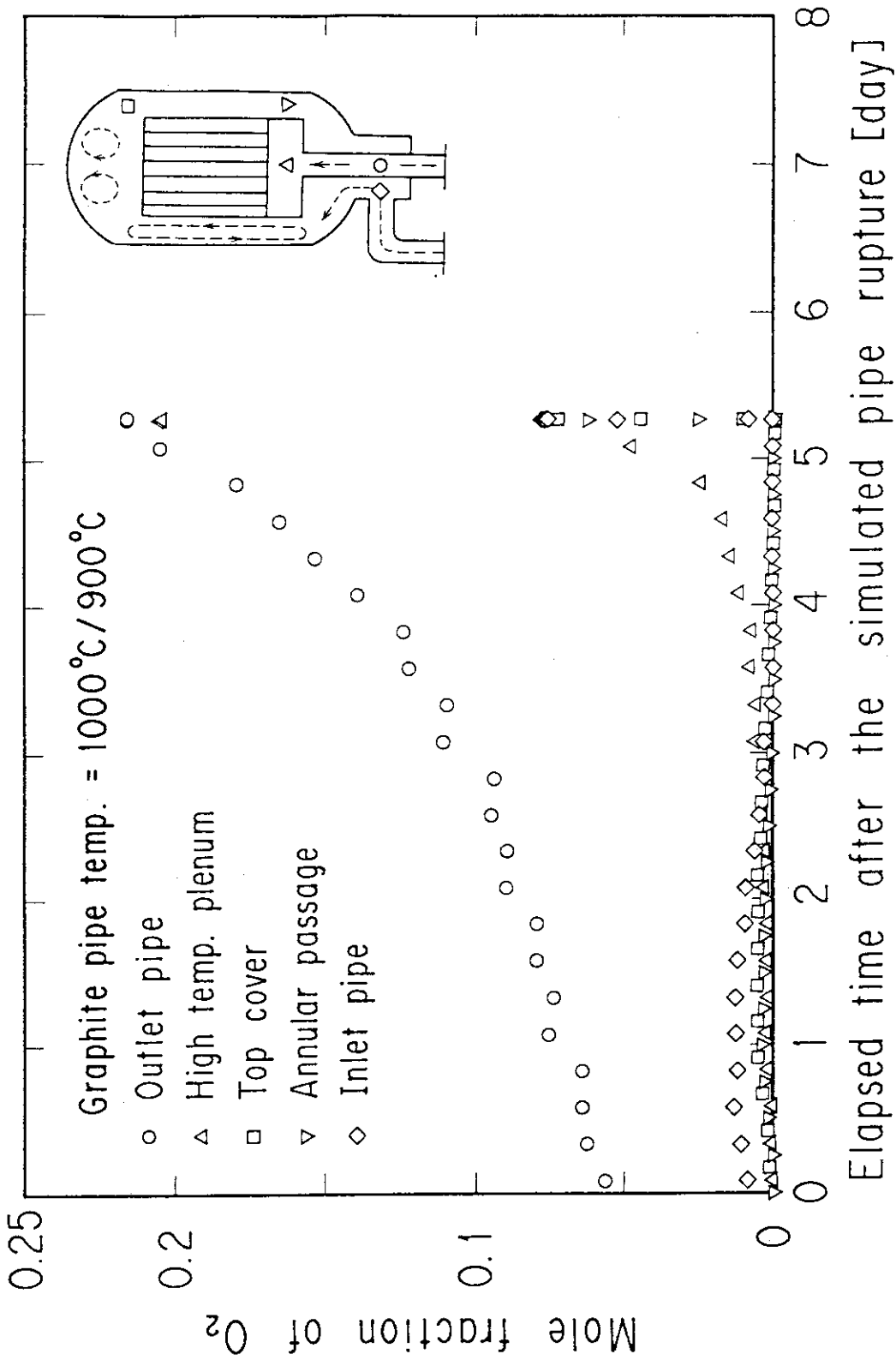


Fig. 4.2 Mole fraction changes of O₂ (B-100-90)

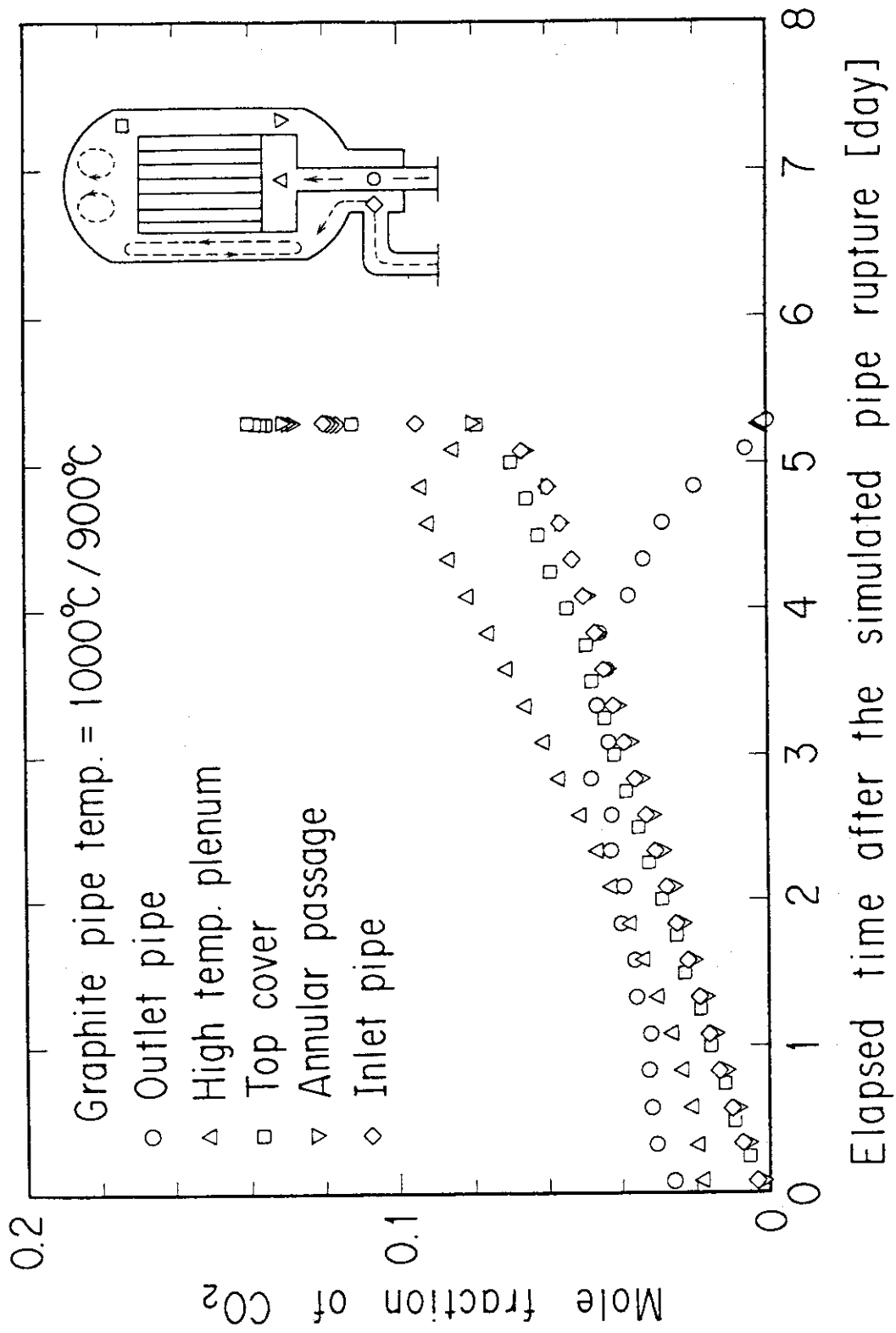


Fig. 4.3 Mole fraction changes of CO₂ (B-100-90)

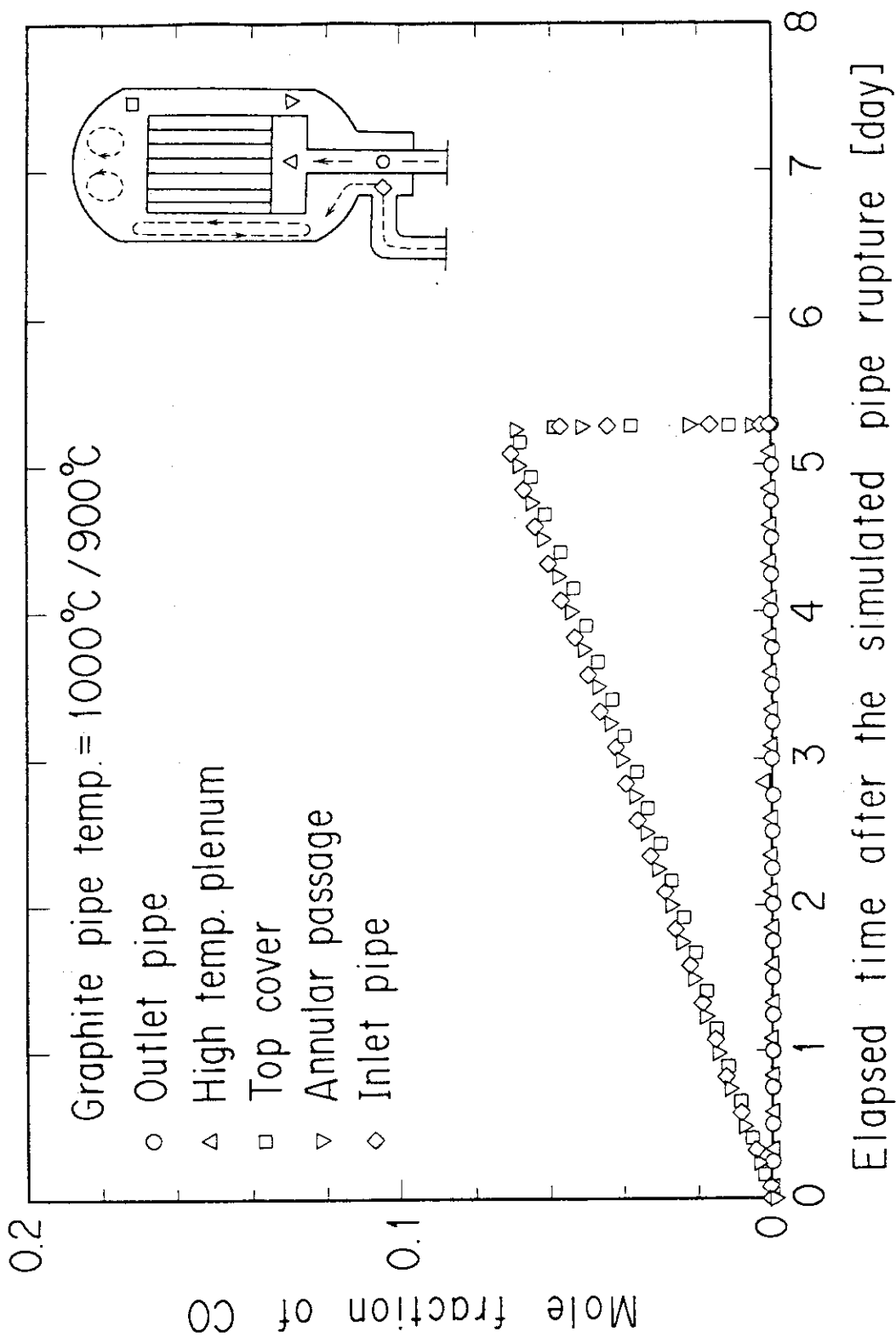


Fig. 4.4 Mole fraction changes of CO (B-100-90)

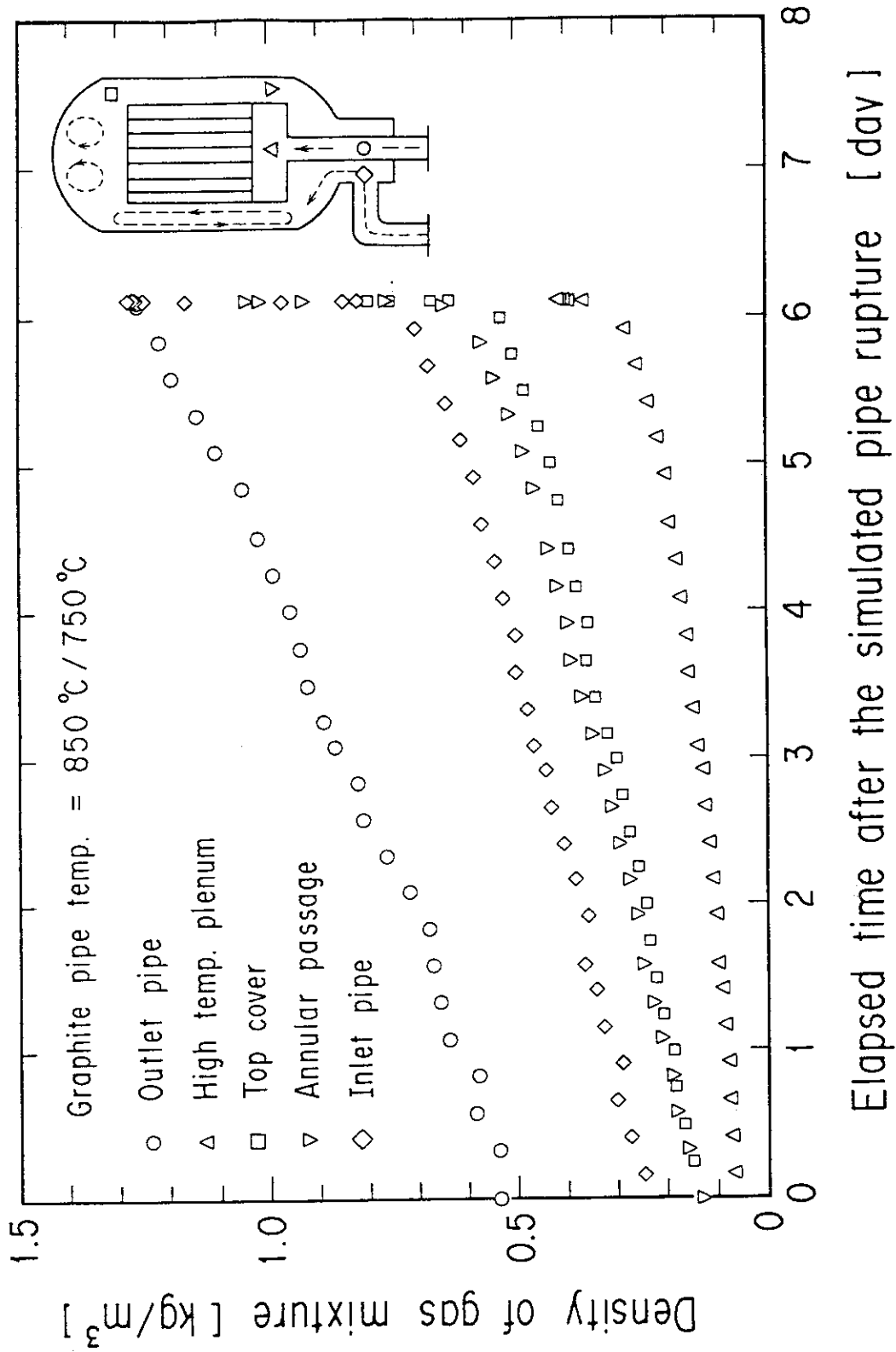


Fig. 4.5 Density changes of gas mixture (B-85-75)

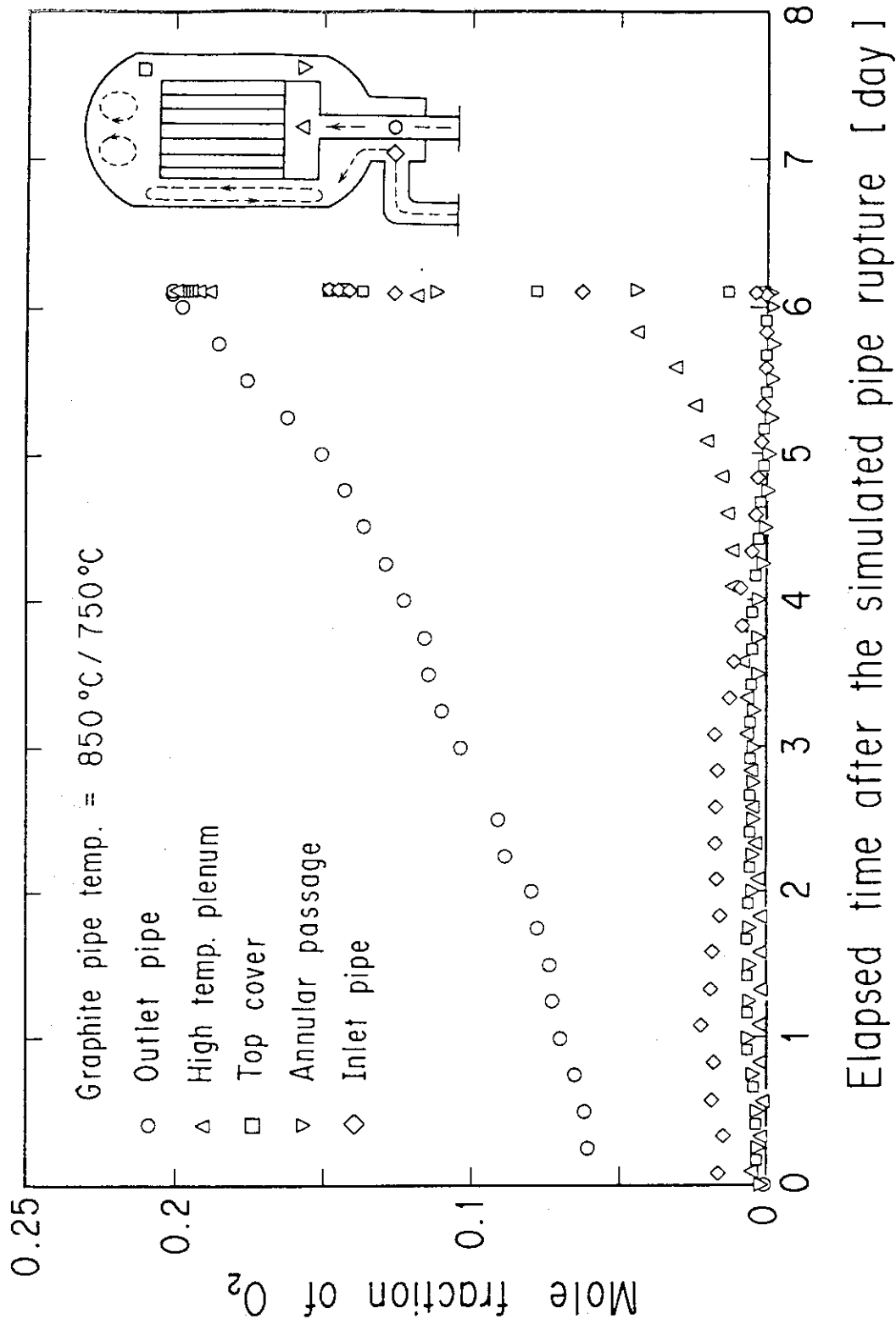


Fig. 4.6 Mole fraction changes of O₂ (B-85-75)

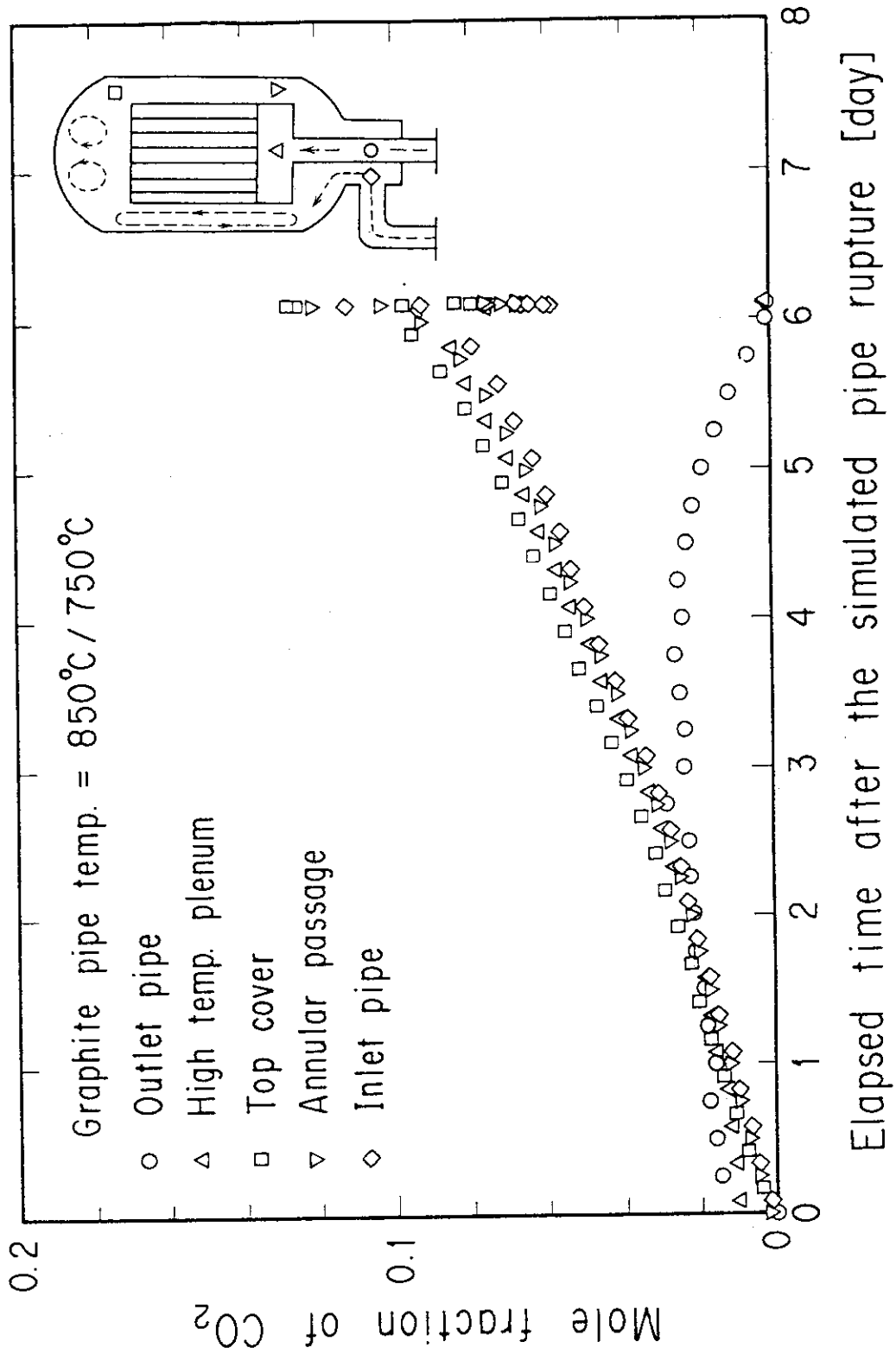


Fig. 4.7 Mole fraction changes of CO₂ (B-85-75)

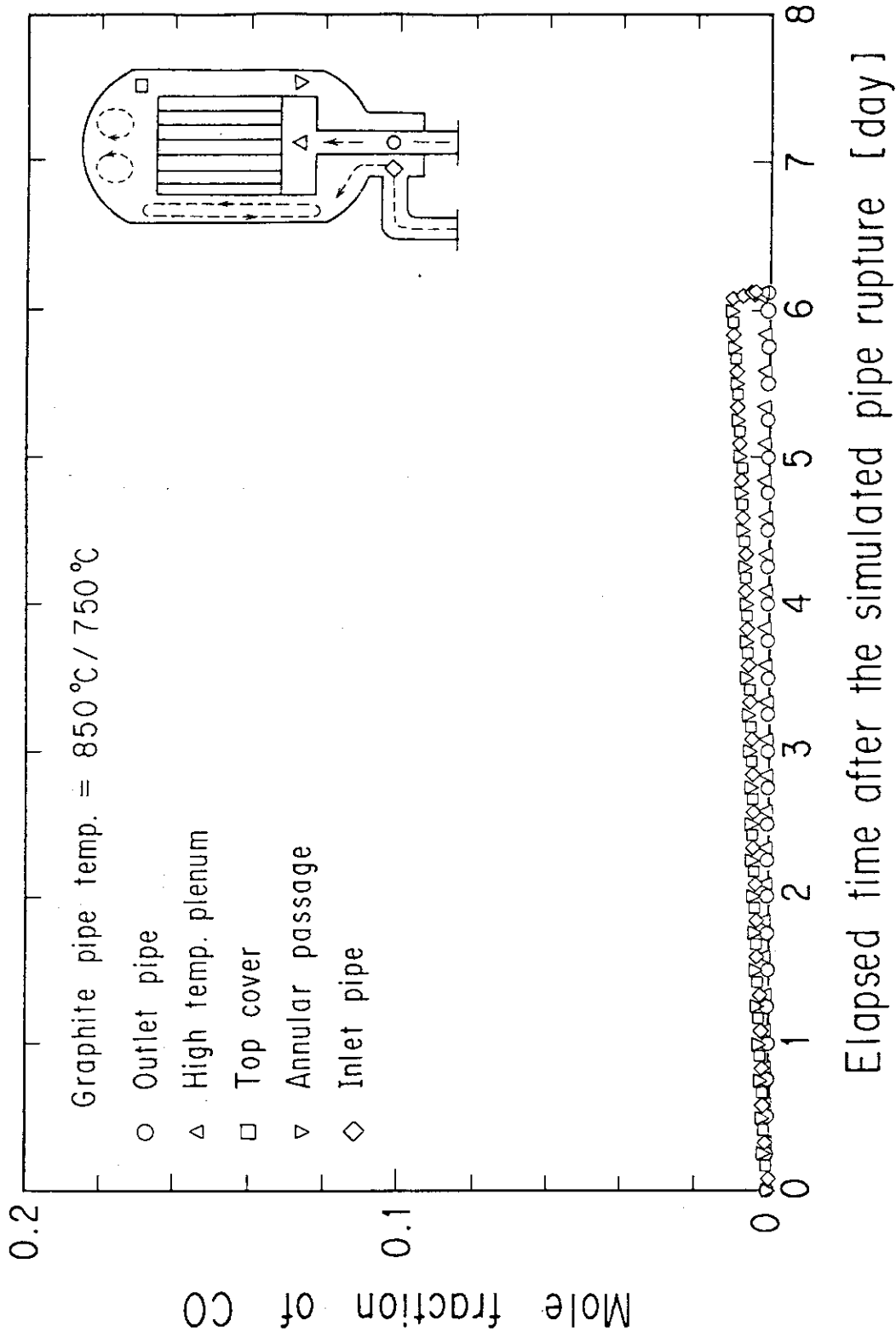


Fig. 4.8 Mole fraction changes of CO (B-85-75)

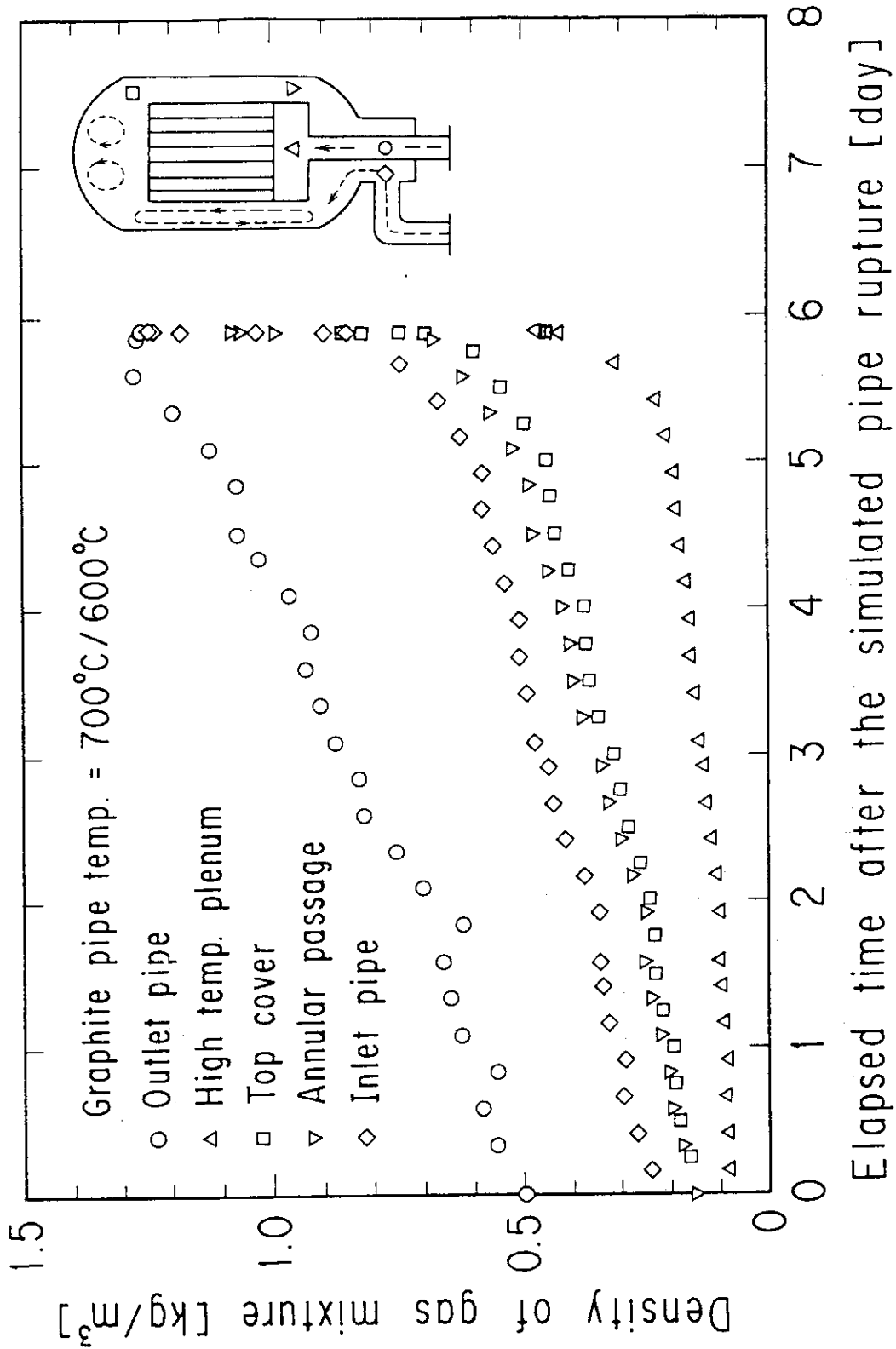
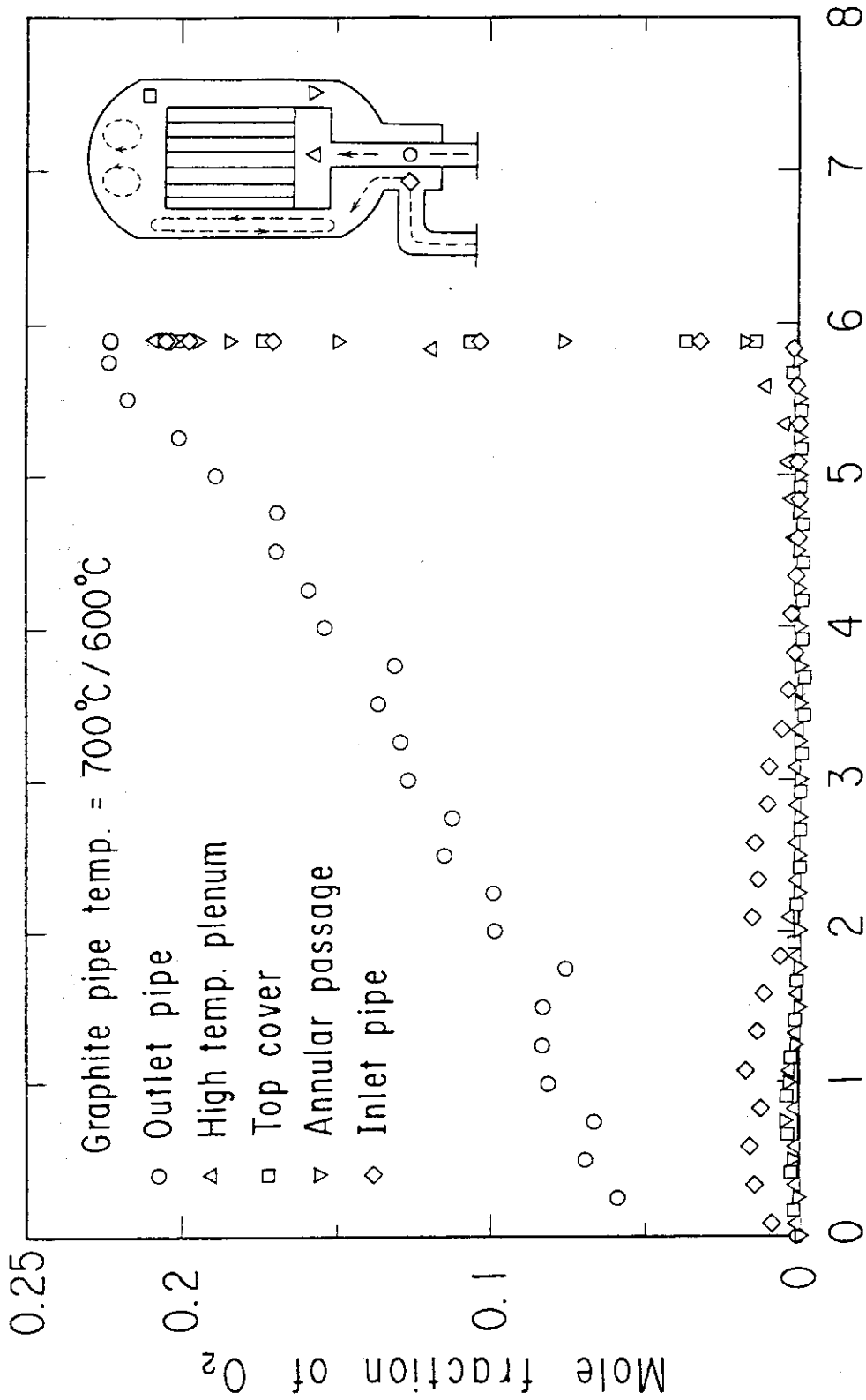


Fig. 4.9 Density changes of gas mixture (B-70-60)



Elapsed time after the simulated pipe rupture [day]

Fig. 4.10 Mole fraction changes of O_2 (B-70-60)

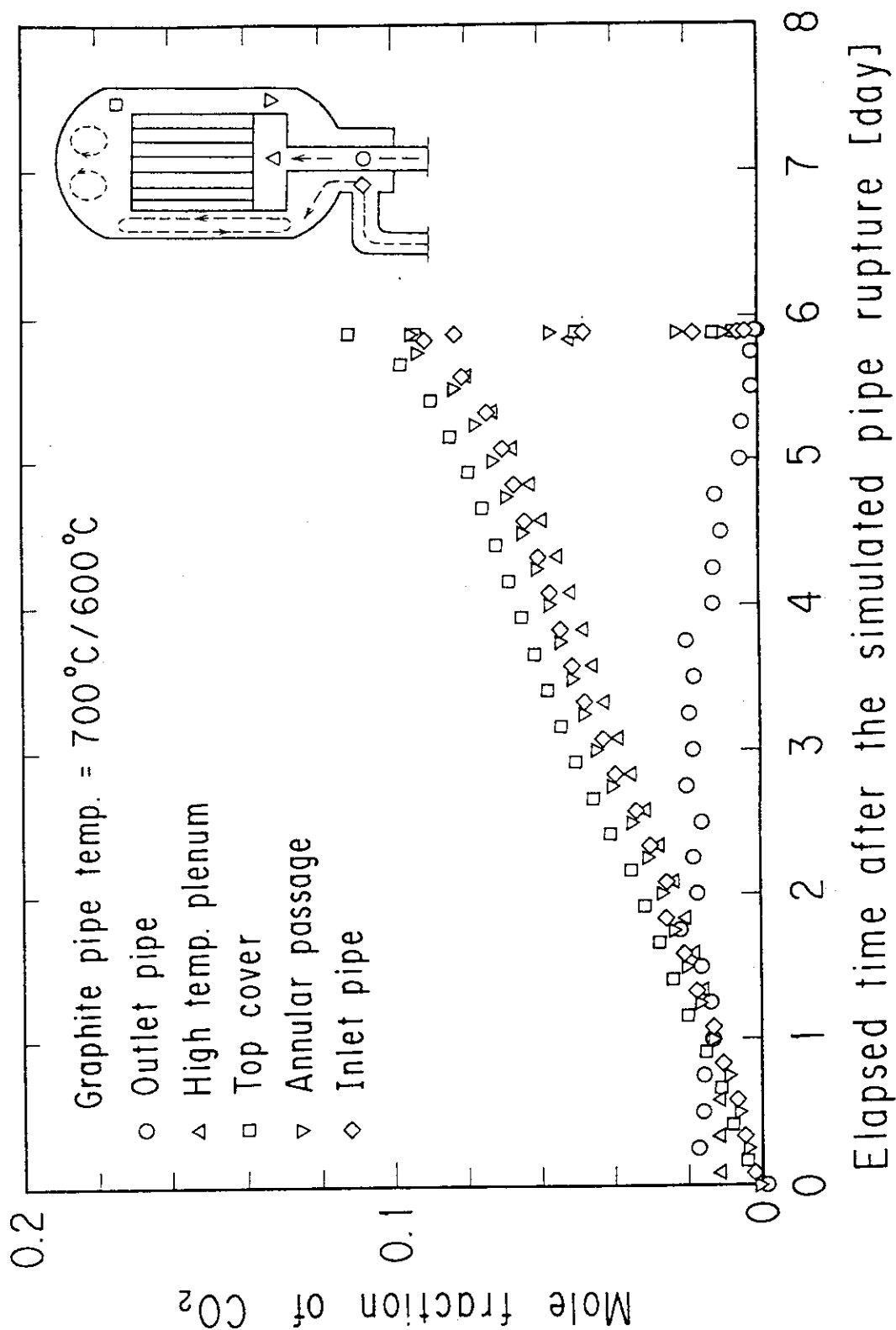


Fig. 4.11 Mole fraction changes of CO₂ (B-70-60)

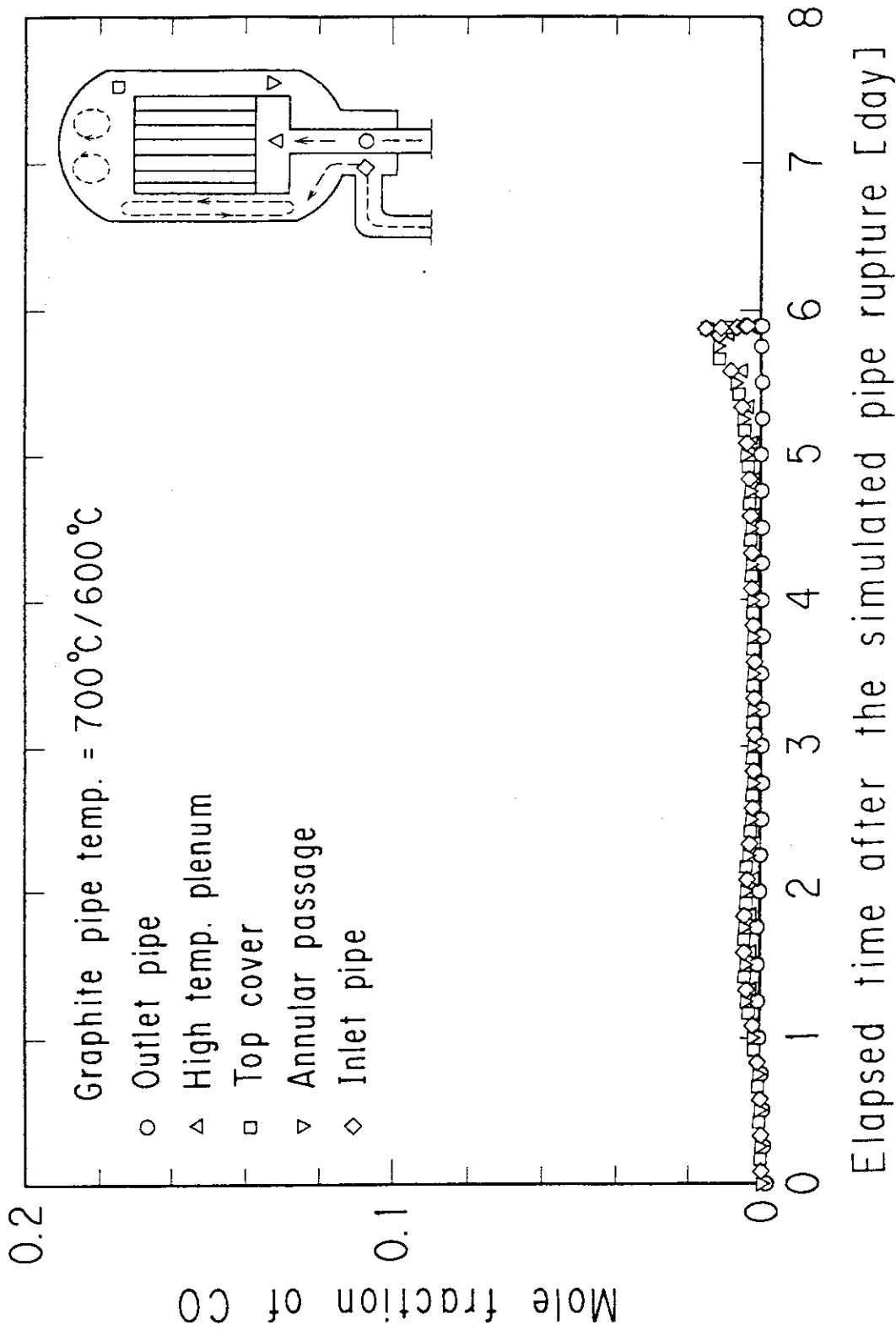


Fig. 4.12 Mole fraction changes of CO (B-70-60)

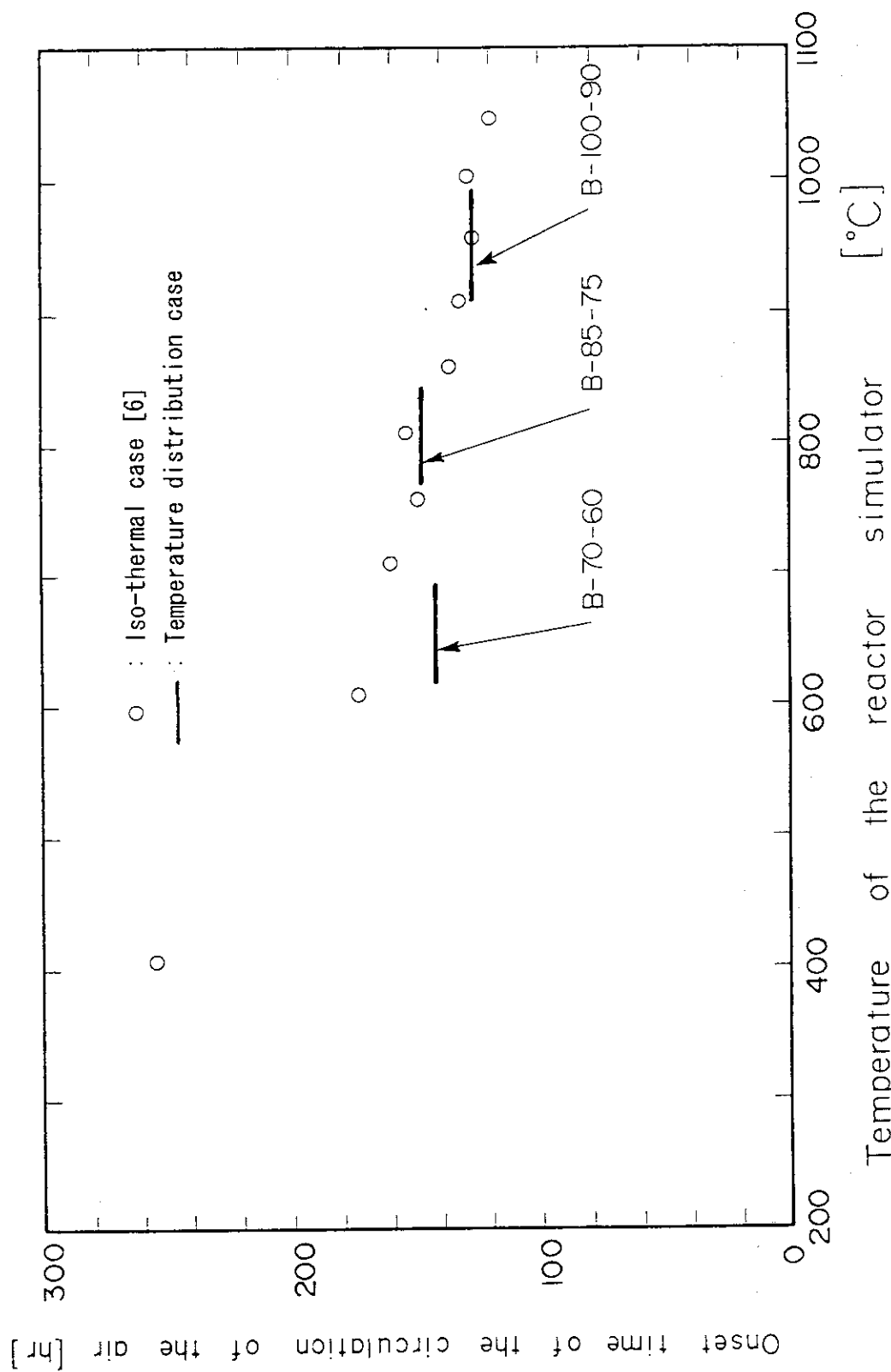


Fig. 4.13 Onset time of the circulation of each case

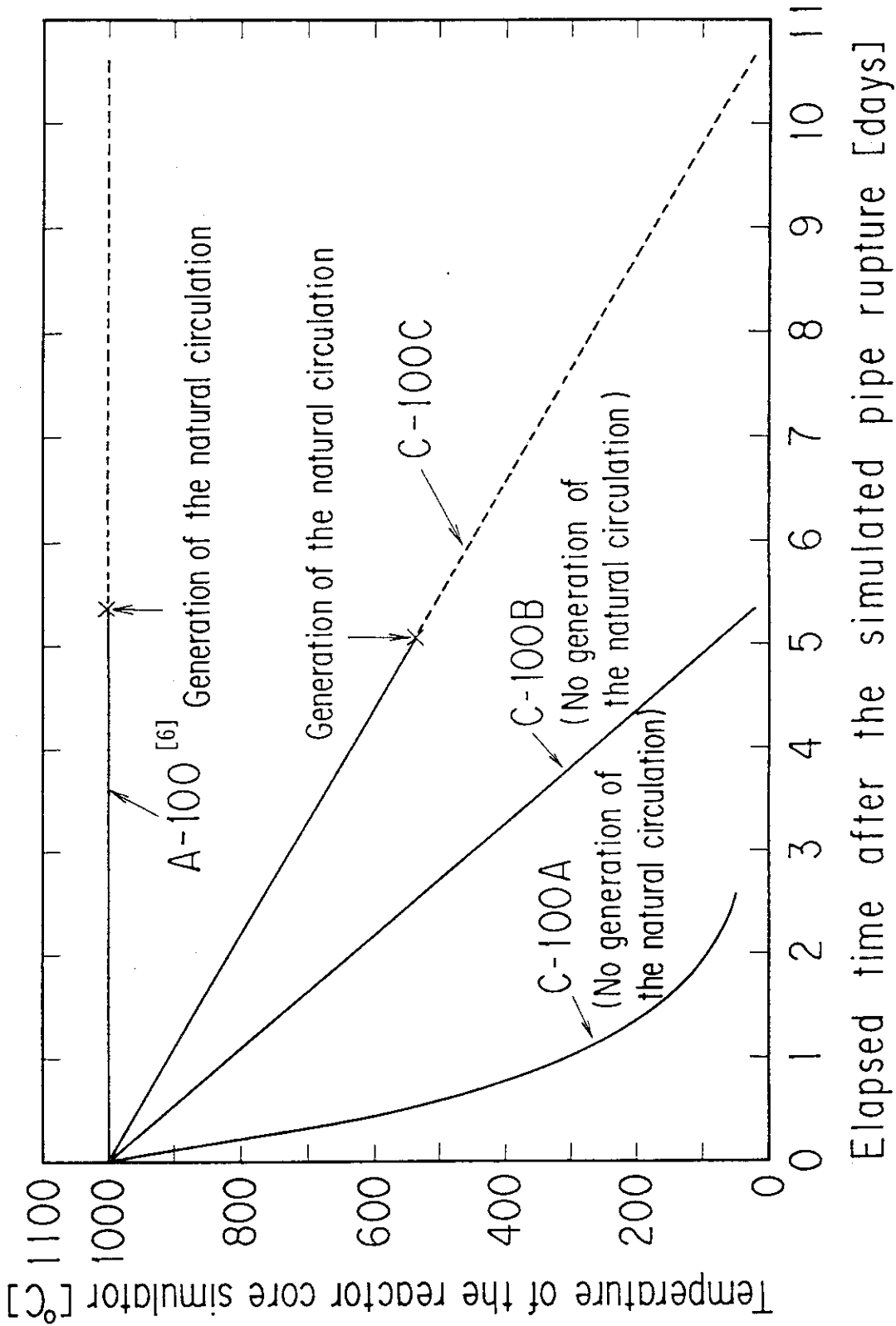


Fig. 4.14 Cooling ratio of reactor core simulator

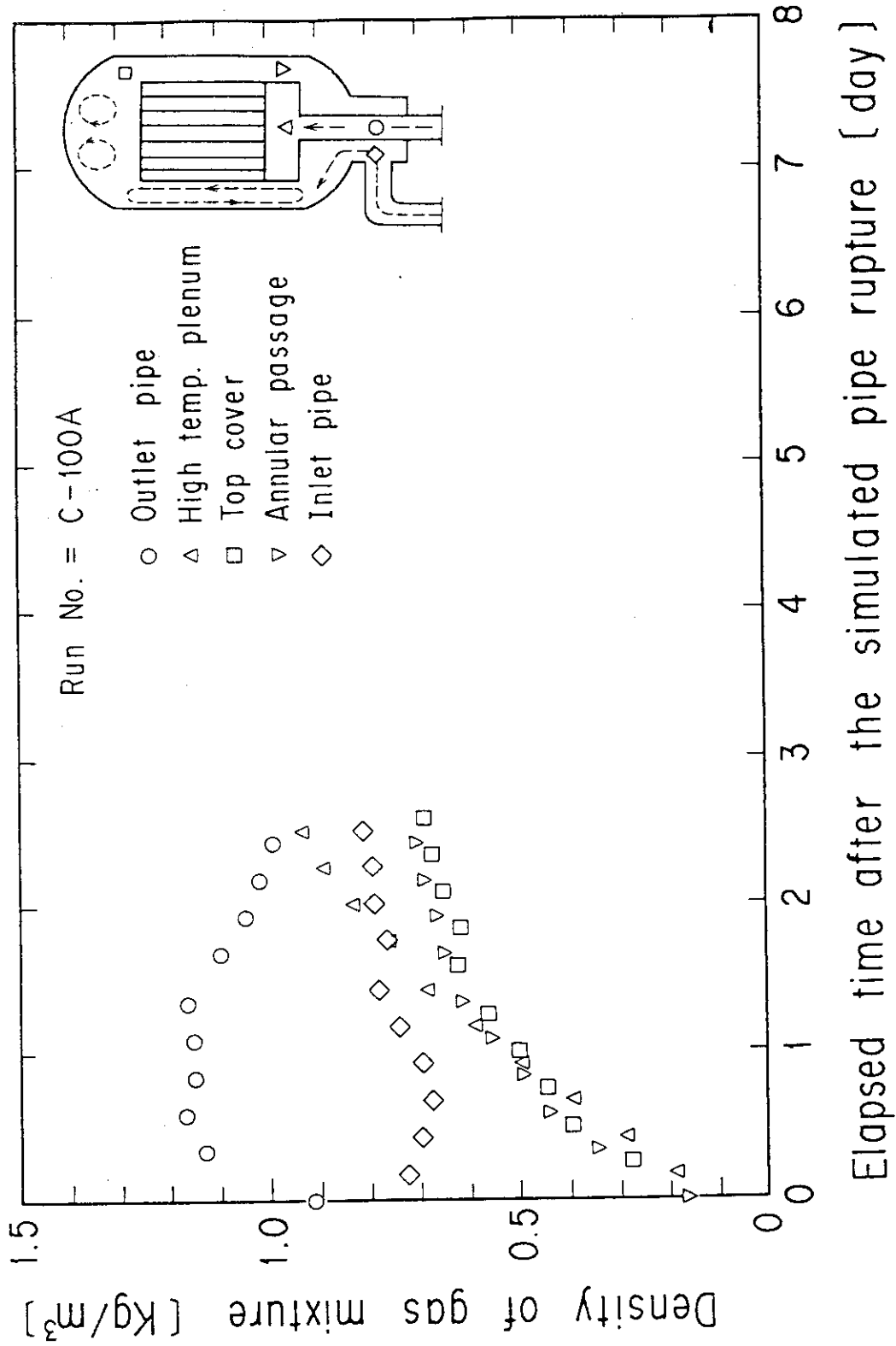


Fig. 4.15 Density changes of gas mixture (C-100A)

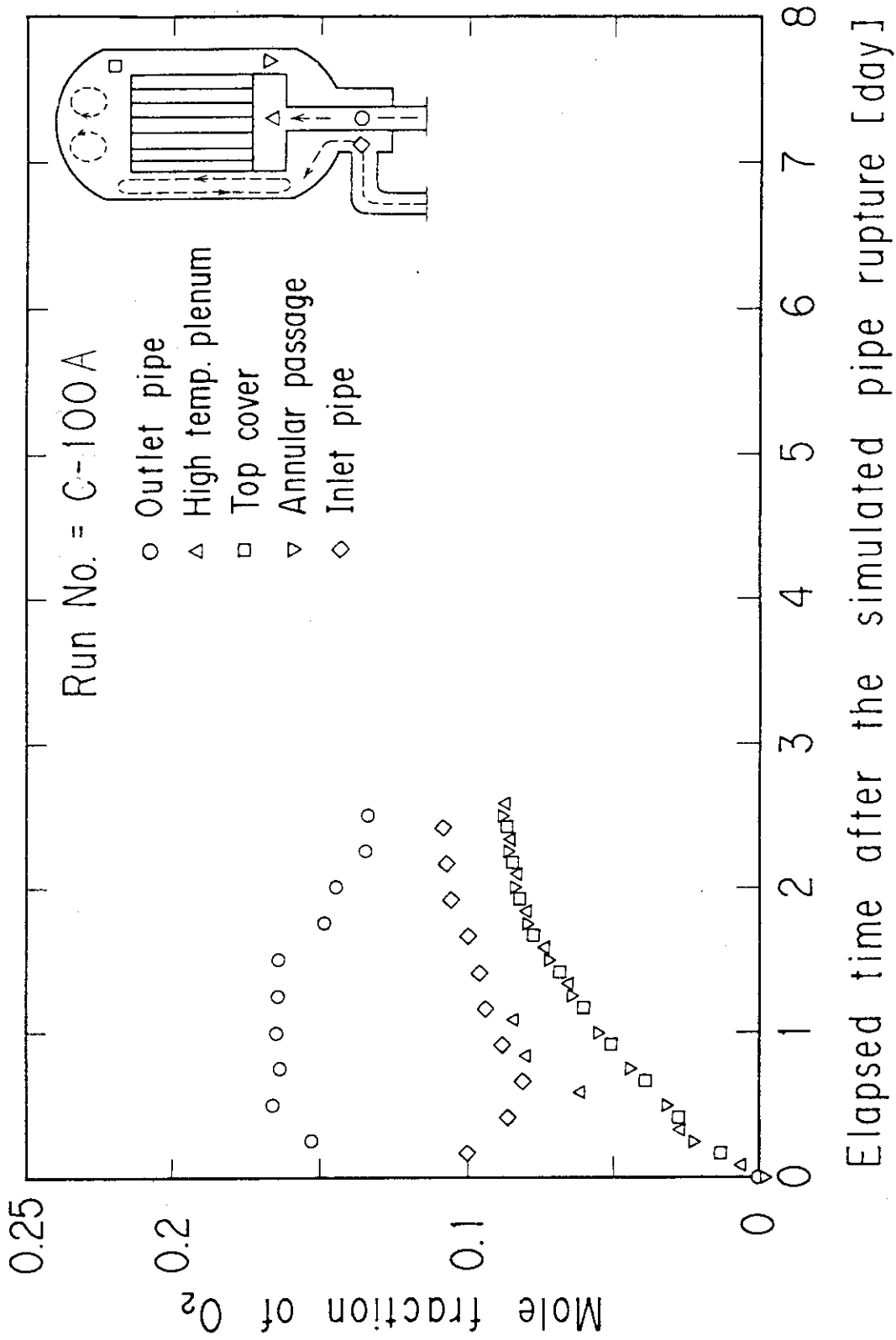


Fig.4.16 Mole fraction changes of O₂ (C-100A)

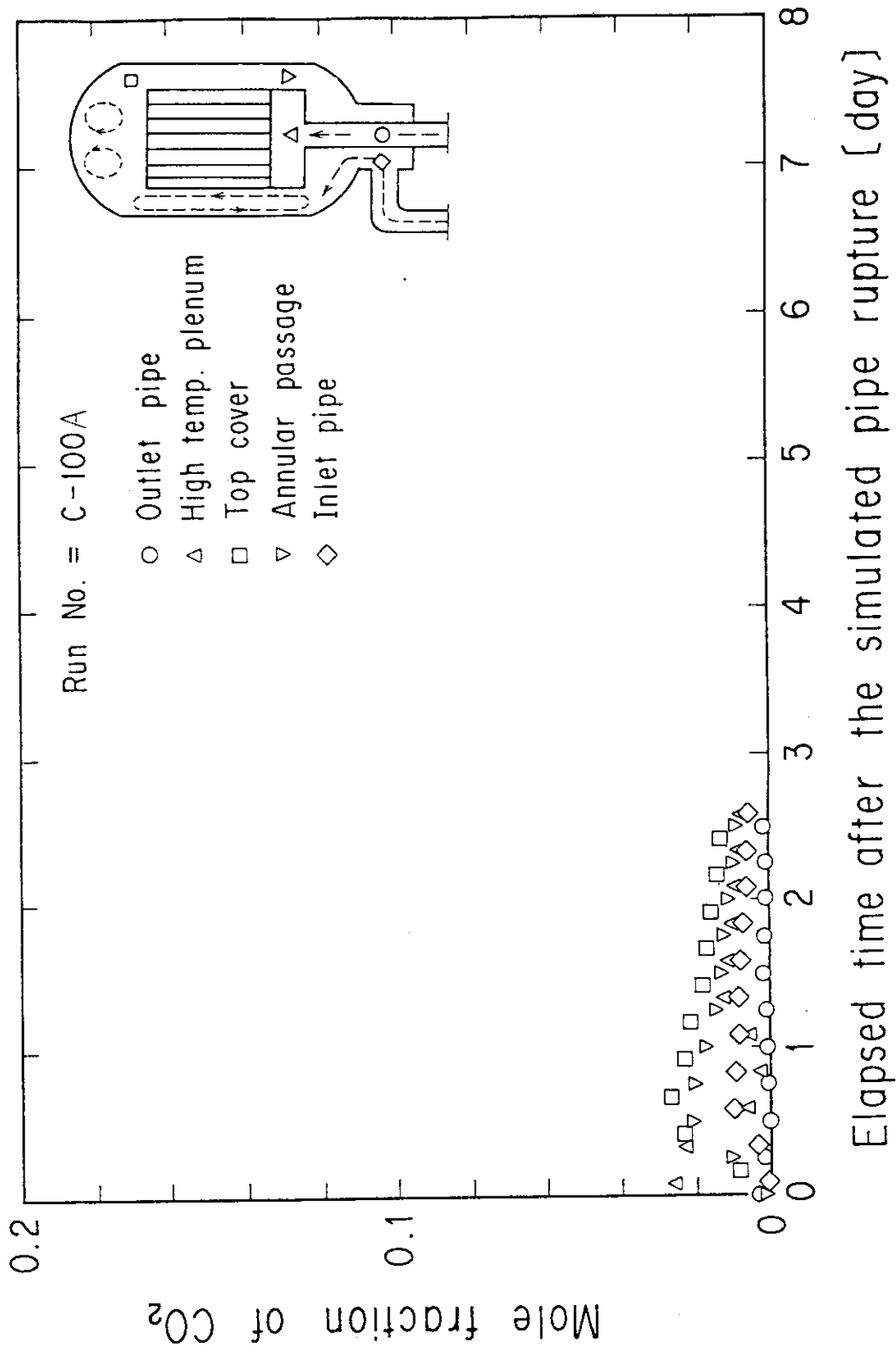


Fig. 4.17 Mole fraction changes of CO₂ (C-100A)

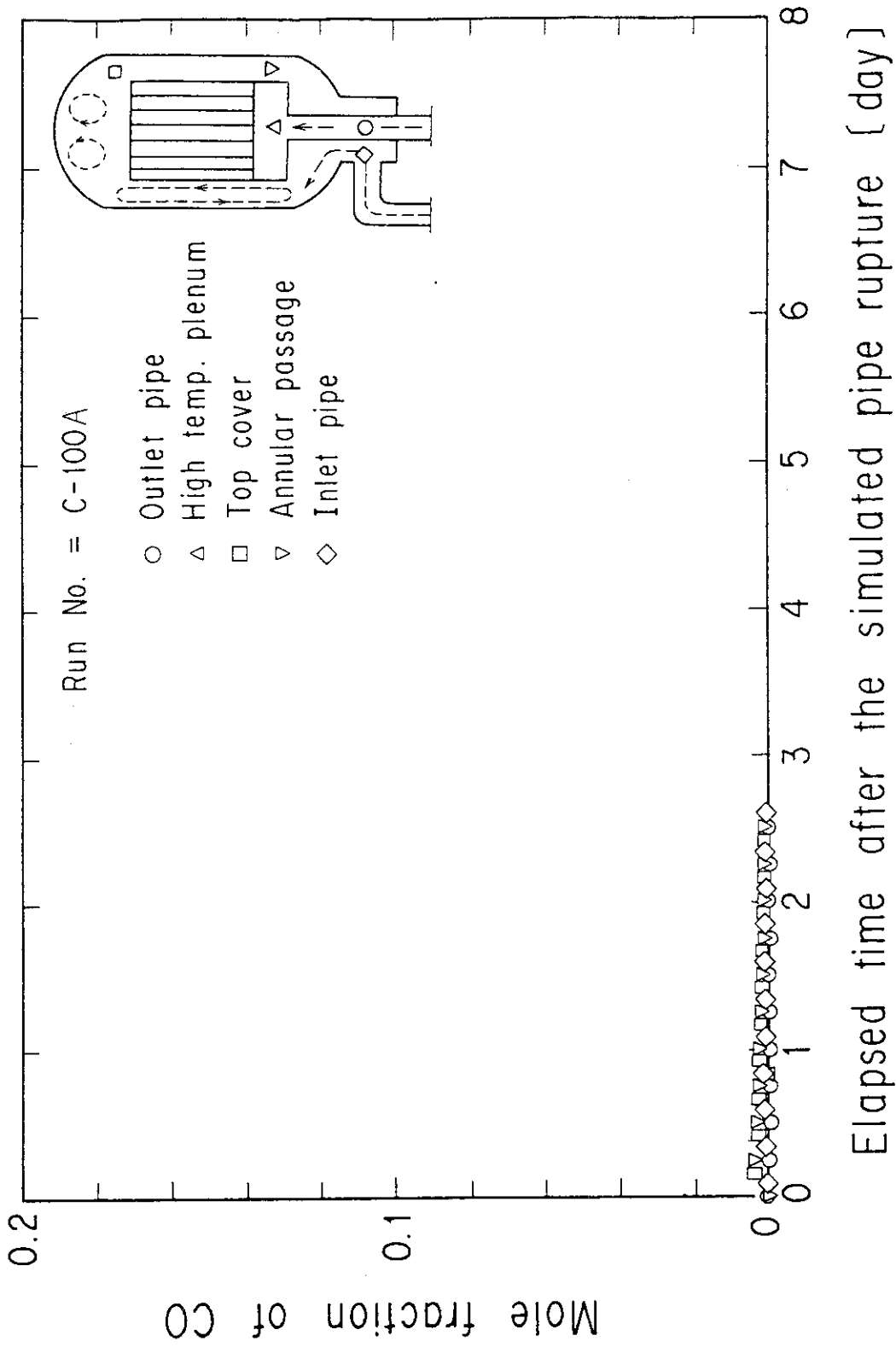


Fig. 4.18 Mole fraction changes of CO (C-100A)

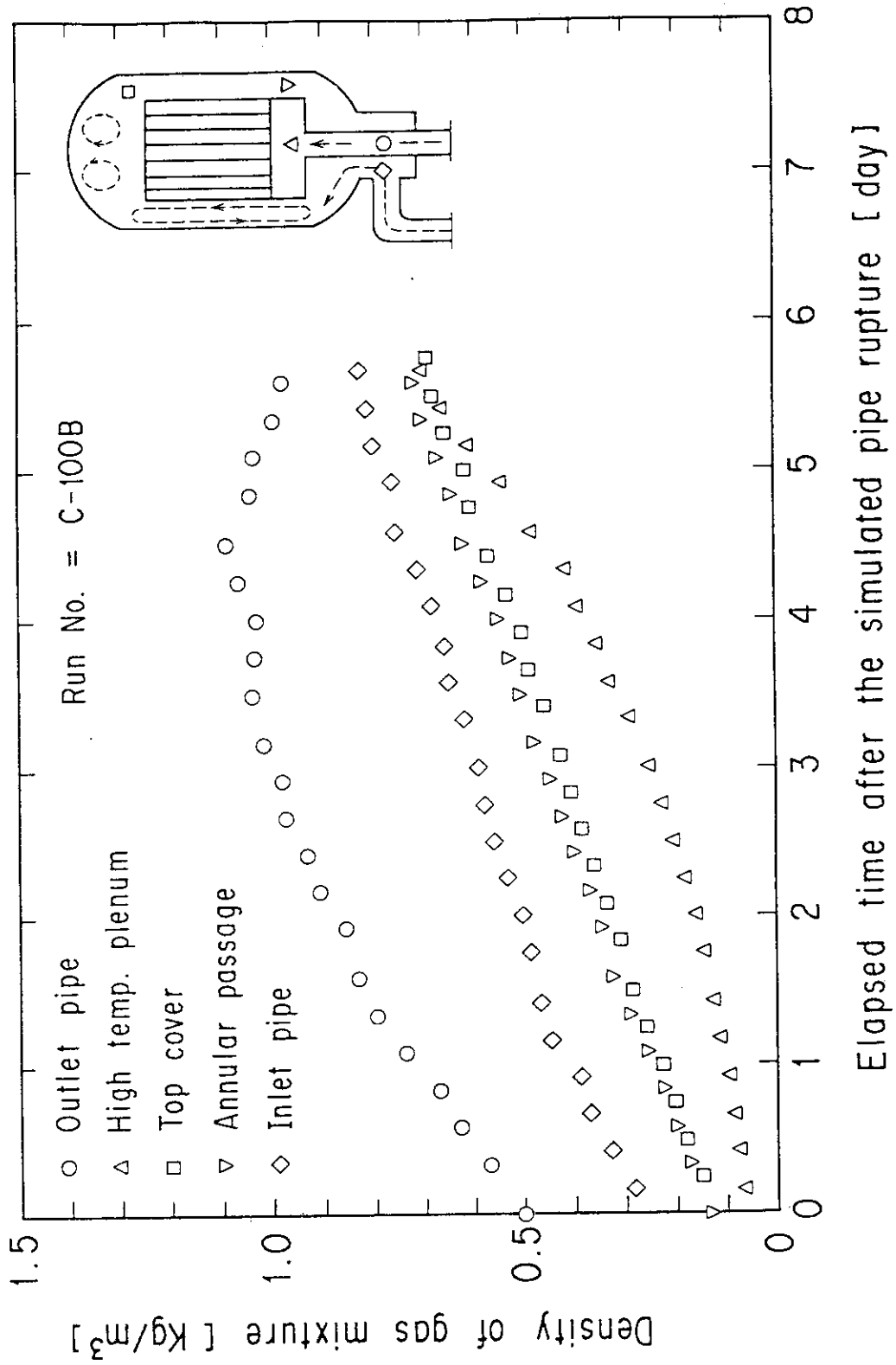


Fig. 4.19 Density changes of gas mixture (C-100B)

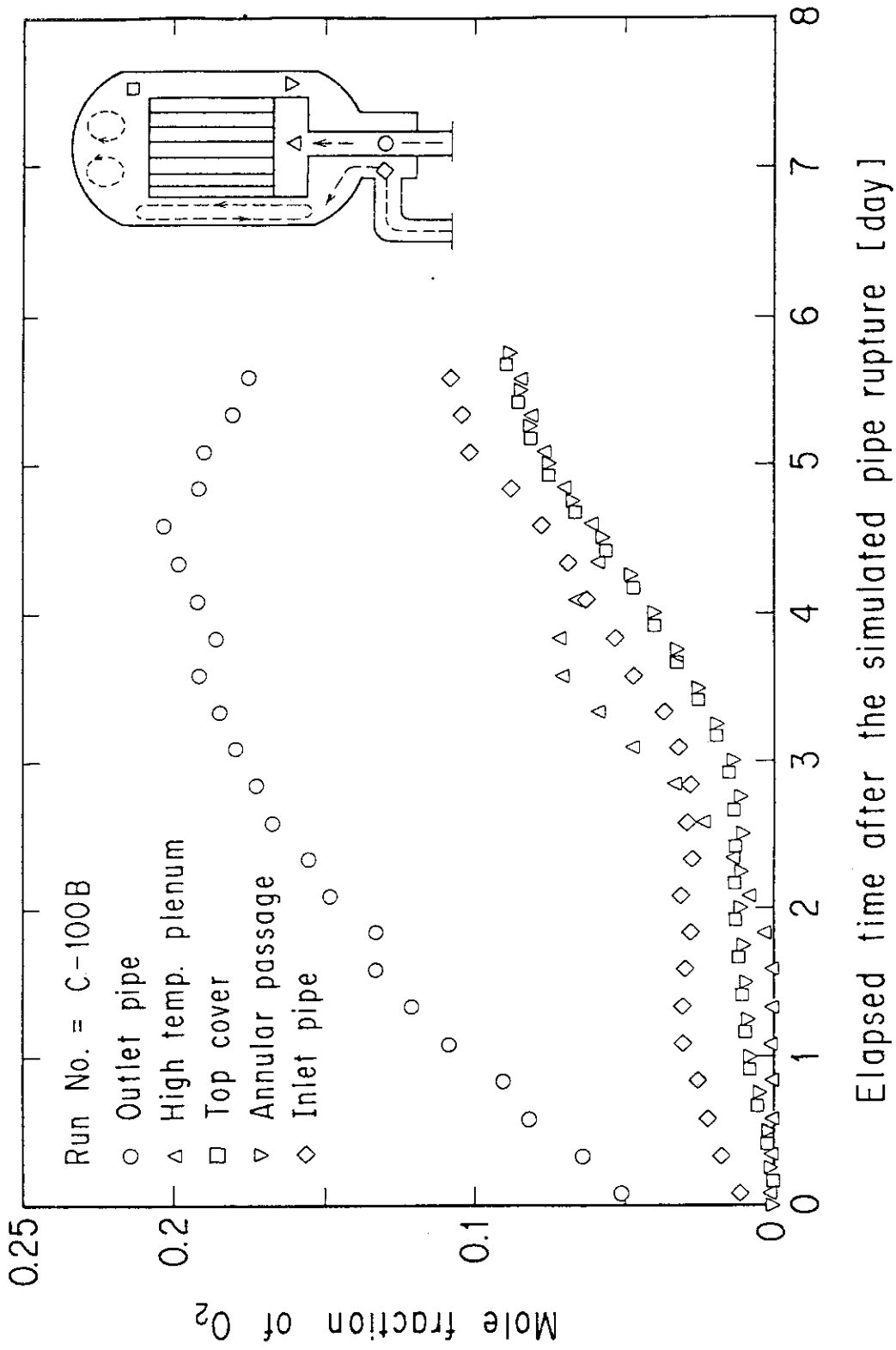


Fig. 4.20 Mole fraction changes of O₂ (C-100B)

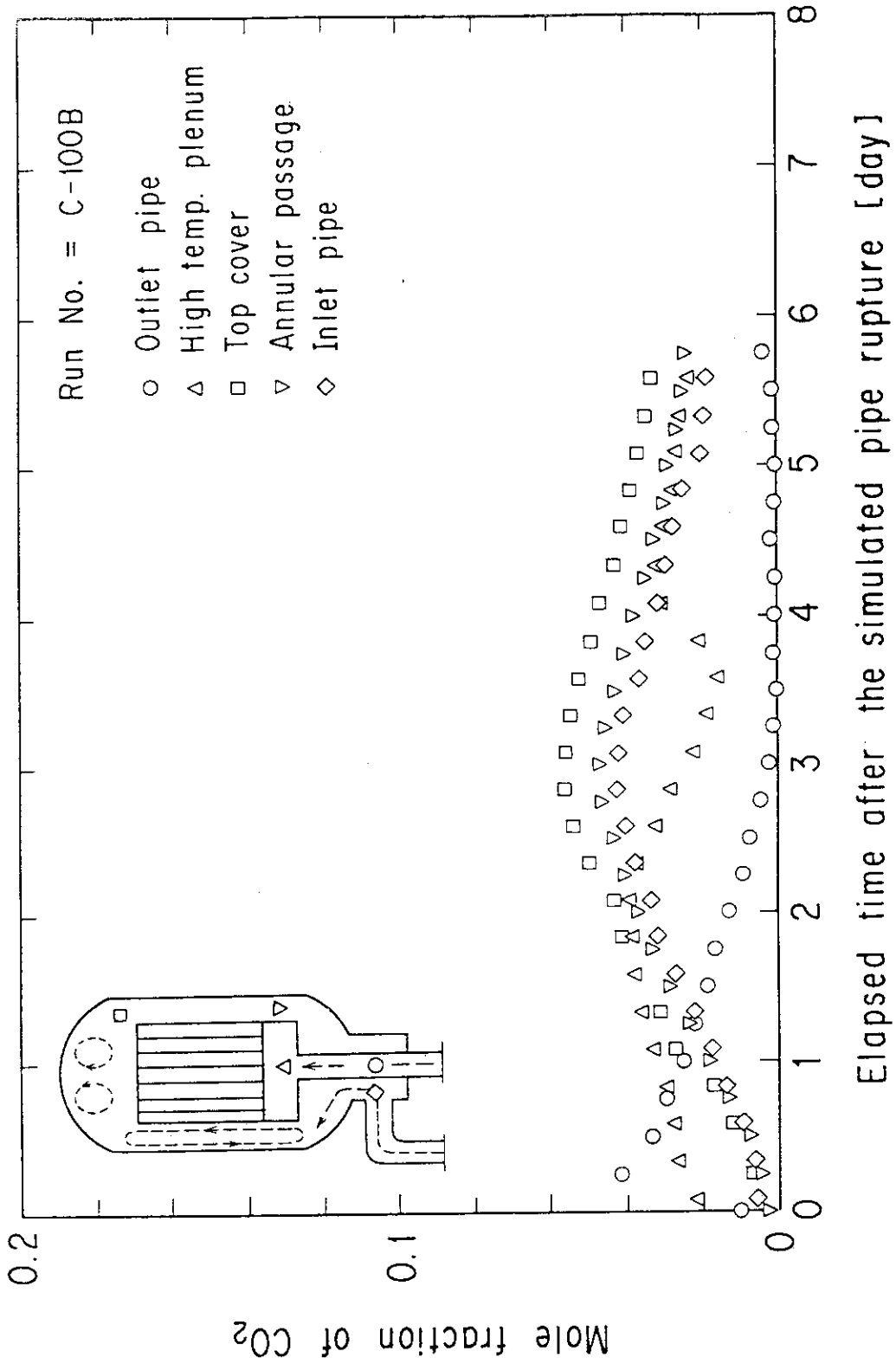


Fig. 4.21 Mole fraction changes of CO₂ (C-100B)

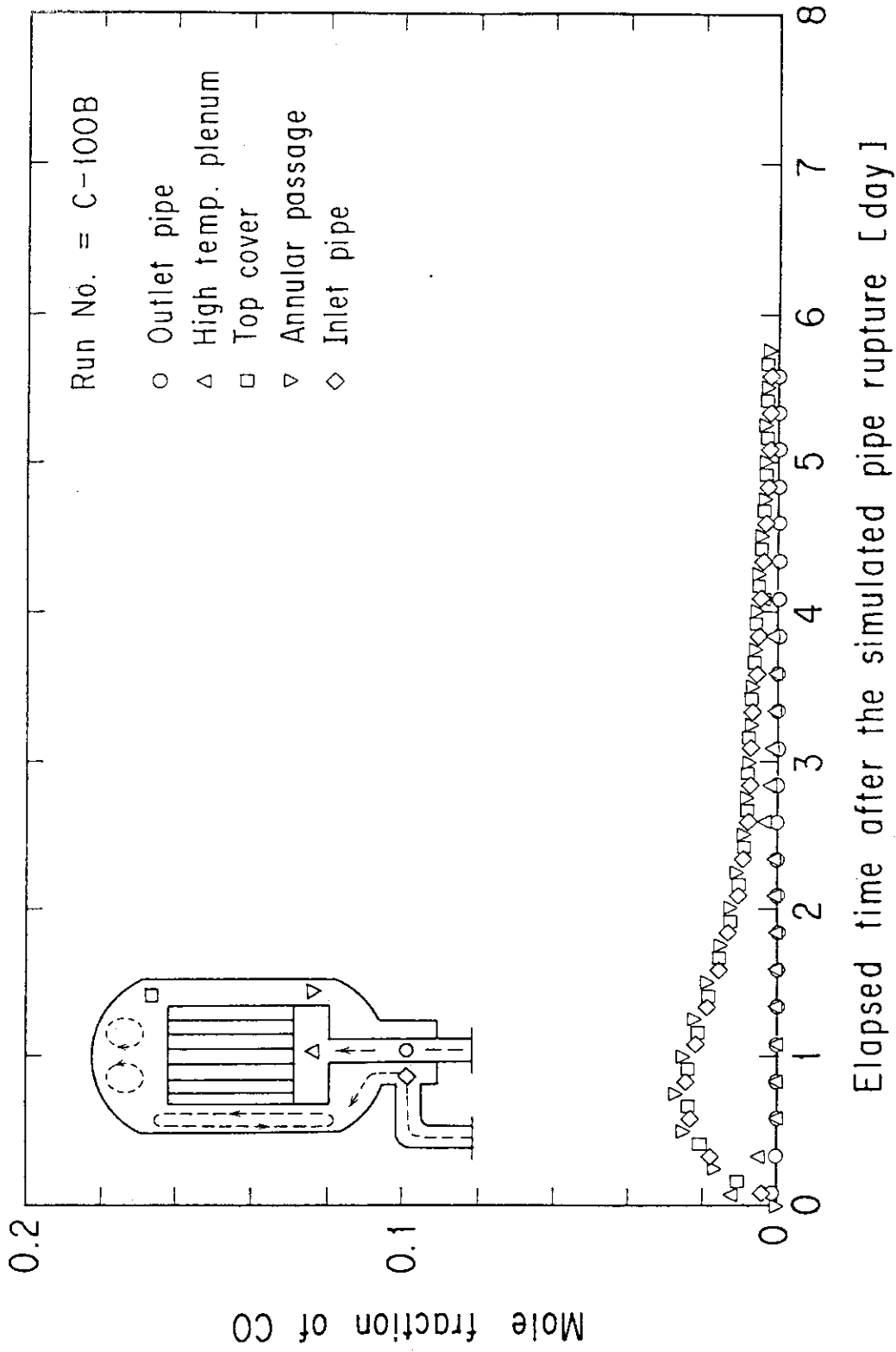


Fig. 4.22 Mole fraction changes of CO (C-100B)

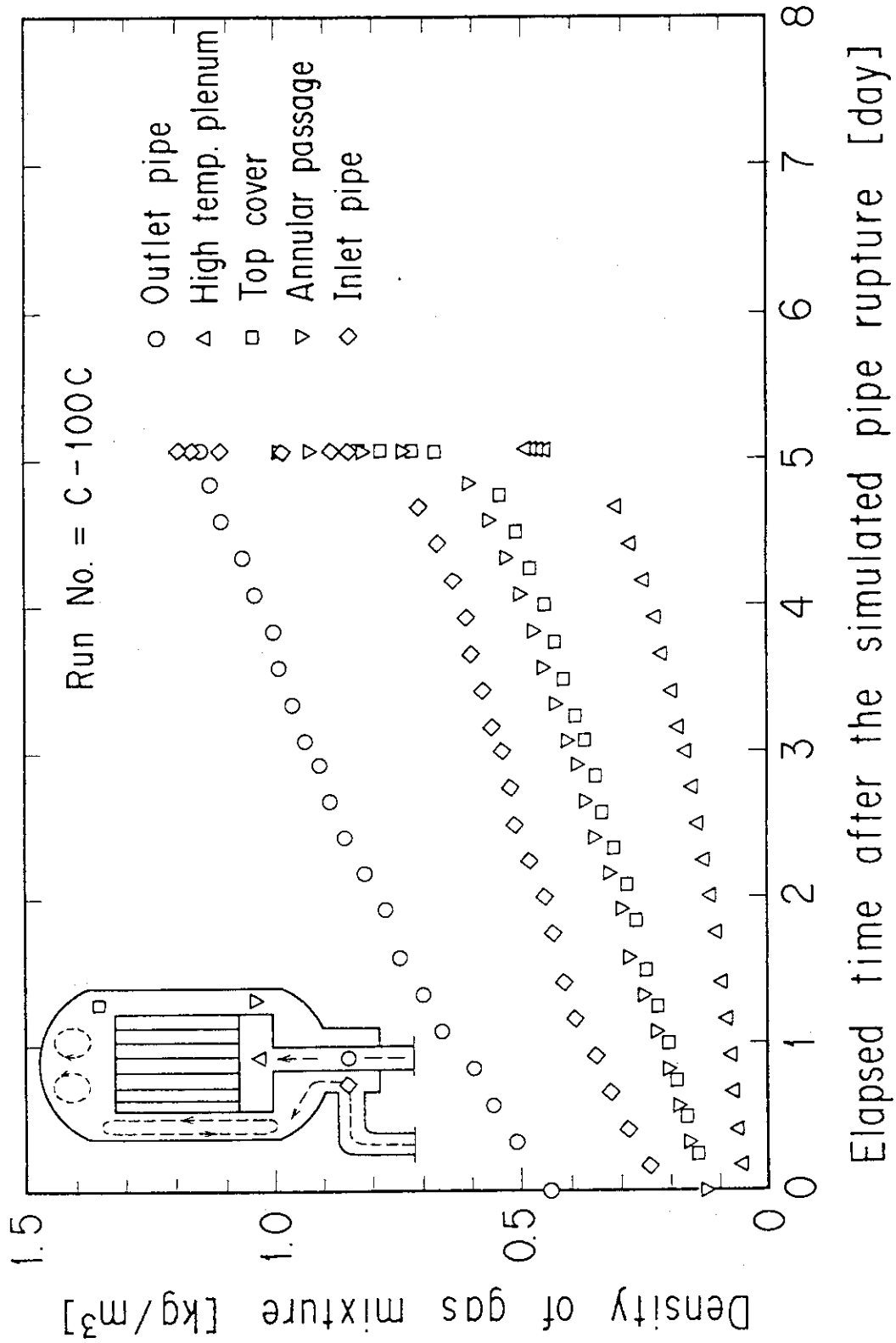
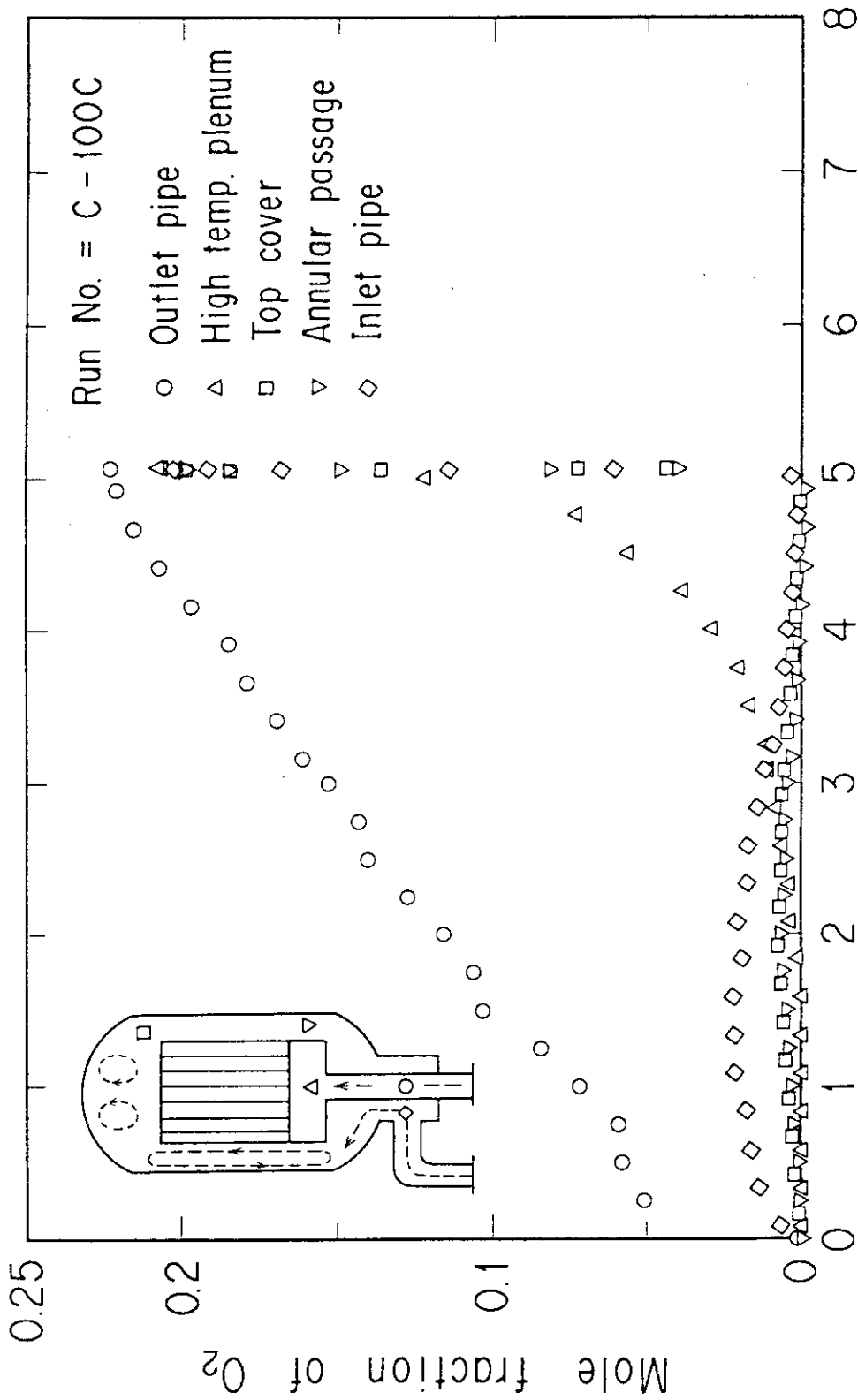


Fig. 4.23 Density changes of gas mixture (C-100C)



Elapsed time after the simulated pipe rupture [day]

Fig. 4.24 Mole fraction changes of O₂ (C-100C)

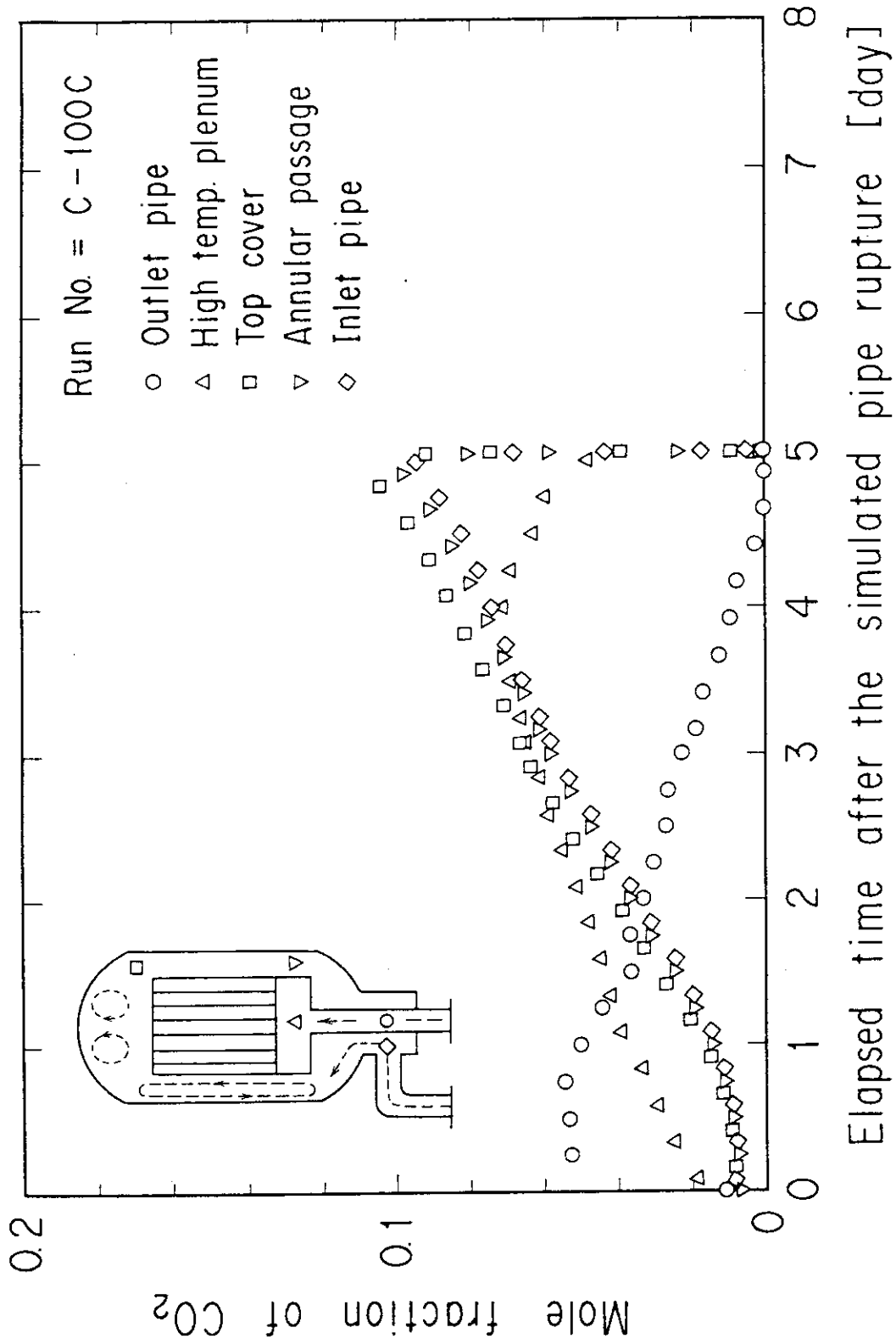


Fig. 4.25 Mole fraction changes of CO₂ (C-100C)

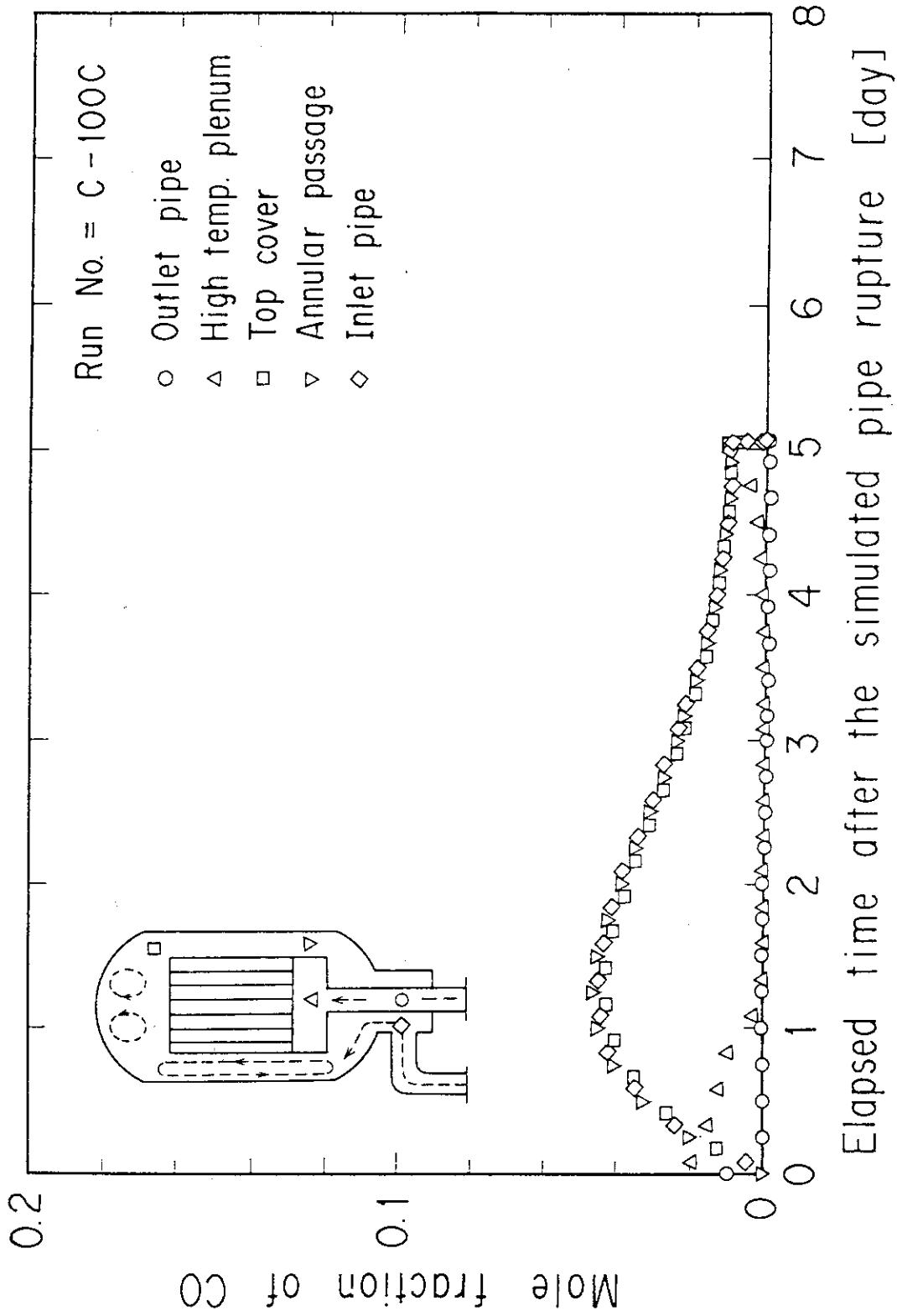


Fig. 4.26 Mole fraction changes of CO (C-100C)