

JAERI-Tech
2000-036



JP0050377



再処理溶媒と硝酸との熱分解反応に関わる
エアロゾル発生試験
(受託研究)

2000年3月

塚本導雄・高田準一・小池忠雄・渡邊浩二・宮田定次郎*・西尾軍治*・村田幹生

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公開している研究報告書です。
入手の問い合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越してください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 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。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 2000

編集兼発行 日本原子力研究所

再処理溶媒と硝酸との熱分解反応に関わるエアロゾル発生試験
(受託研究)

日本原子力研究所東海研究所安全性試験研究センター燃料サイクル安全工学部

塚本導雄・高田準一・小池忠雄・渡邊浩二

宮田定次郎*・西尾軍治*²・村田幹生

(2000年3月3日受理)

再処理施設のセル換気系内において再処理溶媒（有機溶媒）と硝酸との異常化学反応に起因した爆発が起きた場合について、爆発規模とエアロゾル発生量の関係、及びセル換気系による放射性物質の閉じ込め効果を把握する試験を実施した。試験では、セル換気系実証試験装置のセル内に設置した反応容器に、純粋な溶媒並びに γ 線照射により劣化した溶媒とCeを混合した硝酸とを充填・密閉し、183℃まで加熱して爆発とエアロゾル発生を誘起させた。爆発により発生したCeエアロゾルは採取し、浮遊率や粒径分布を時間毎に測定した。さらに、質量濃度を実測してエアロゾルの沈降や沈着等による除去効果を調べた。その結果、噴出した溶媒ミストが急激燃焼を起こした場合、セル内に飛散するCeエアロゾルの初期 ($t=0$) 濃度は、3～600 [mg/m³] になることが判明した。しかしながら、爆発による温度上昇や圧力波の伝播は、セルやダクトで構成される換気系で十分に減衰するので、HEPAフィルタの健全性は確保され、セル換気系による放射性物質の閉じ込め効果は十分達成されることを確かめた。

本報告書は、電源開発促進対策特別会計法に基づき、科学技術庁からの委託によって原研が実施した研究の成果である。

東海研究所：〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2-4

* 財団法人 放射線利用振興協会

*² 財団法人 高度情報科学技術機構

Aerosol Generation Tests on Thermal Decomposition of Organic Solvent with Nitric Acid
in Nuclear Fuel Reprocessing Plants
(Contract Research)

Michio TSUKAMOTO, Junichi TAKADA, Tadao KOIKE, Koji WATANABE
Teijiro MIYATA*, Gunji NISHIO*² and Mikio MURATA

Department of Fuel Cycle Safety Research
Nuclear Safety Research Center
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received March 3, 2000)

Aerosol generation tests were conducted to investigate relation between scale of explosion and properties of generated aerosols and to verify confinement capability of the cell ventilation system in reprocessing plants for aerosols. The experimental parameters in explosive burning were contents of the solution (TBP/n-dodecane/nitric acid containing stable Ce), mass of the solution, adsorbed γ -ray dose, and trigger pressure of rupture disk. The solution was heated in a sealed vessel furnished with the rupture disk up to 183°C in the large scale Cell Ventilation Test Facility. From Ce aerosol measurements, data on the aerosol release rate, mass concentration and particle size were obtained. And time variation of concentration and particle size by settling and deposition was discussed. The maximum concentration at $t=0$ in each test ranged from 3 to 600 mg/m³, however, it was found that the pressure were effectively mitigated and the aerosols were confined by the cell, duct structures and HEPA filters, and integrity of the ventilation system was maintained.

Keywords : Reprocessing Plant, Organic Solvent, Nitric Acid, Explosive Burning, Aerosol,
Release Rate, Concentration, Particle Size, Ventilation System, Confinement

The work was carried out by Japan Atomic Energy Research Institute under the auspices of the Science & Technology Agency of Japan.

* Radiation Application Development Association

*² Research Organization for Information Science & Technology

目次

1. はじめに	1
2. 試験	1
2.1 試験装置	2
2.2 試験の項目と方法	4
2.2.1 劣化溶媒と硝酸との反応挙動を調べる試験	4
2.2.2 爆発（急激燃焼）の有無とエアロゾル濃度との関係を調べる試験	4
2.2.3 セル内に噴出したエアロゾルの粒径分布を調べる試験	4
2.2.4 硝酸水溶液の過濃縮による急激燃焼がエアロゾル放出に及ぼす影響を調べる試験	4
2.2.5 セル内に飛散した初期 ($t=0$) 液滴の粒径分布及び濃度を求める試験	5
2.3 試験の結果と考察	5
2.3.1 溶媒中の C_e 濃度について	5
2.3.2 劣化溶媒と硝酸との反応挙動	5
2.3.3 爆発（急激燃焼）の有無とエアロゾル濃度との関係	6
2.3.4 セル内に噴出したエアロゾルの粒径分布	6
2.3.5 硝酸水溶液の過濃縮による急激燃焼がエアロゾル放出に及ぼす影響	7
2.3.6 セル内に飛散した初期 ($t = 0$) 液滴の粒径分布、及び濃度解析	7
3. 結論	12
謝辞	13
参考文献	13
付録	32

Contents

1. Introduction	1
2. Experiment	1
2.1 Experimental Apparatus	2
2.2 Experimental Methods	4
2.2.1 Test on Reaction Behavior of Degraded Organic Solvent with Nitric Acid	4
2.2.2 Test on Relation between Aerosol Mass Concentration and Scale of Explosive Burning	4
2.2.3 Measurement of Particle Size Distribution of Aerosol Generated at Different Conditions	4
2.2.4 Test on Effect of Excessive Concentration of Solute in Nitric Acid upon Aerosol Generation Rate and Particle Size Distribution	4
2.2.5 Estimation of Mass Concentration and Size Distribution Droplets Formed by Explosive Burning at $t=0$ in the Cell	5
2.3 Results and Discussion	5
2.3.1 Ce Concentration in Organic Solution	5
2.3.2 Reaction Behavior of Degraded Solvent with Nitric Acid	5
2.3.3 Aerosol Mass Concentration and Scale of Explosive Burning	6
2.3.4 Particle Size Distributions of Aerosols and Their Time Variation	6
2.3.5 Effect of Excessive Concentration of Solute in Nitric Acid upon Aerosol Generation Rate and Particle Size Distribution	7
2.3.6 Initial Mass Concentration and Size Distribution of Droplets at $t=0$ in the Cell	7
3. Conclusion	12
Acknowledgement	13
References	13
Appendix	32

1. はじめに

我が国における再処理施設の安全審査指針では、安全設計の妥当性を確認する観点から、いくつかの設計基準事象（DBA）⁽¹⁾を選定し、評価すべき異常事象のひとつとして有機溶媒等による爆発事象が取り上げられている。この想定事象では、事故シナリオにおいてプルトニウム精製設備内の濃縮缶（開放系）にTBP 100 [g]が何らかの原因で流入し、硝酸との異常な化学反応を起こした場合、爆発事故に進展する恐れがあるとしている。そして、爆発が開放系の濃縮缶内で起きた場合には、プルトニウム精製設備の設置されたセル内に流出するガス量を0.5 [m³]とし、ガス中の最大エアロゾル濃度を100 [mg/m³]としている。一方、最近の事故例として1993年4月ロシアの再処理施設（トムスク-7）において、硝酸ウラン水溶液の貯槽内で溶媒劣化生成物、あるいは希釈剤不純物と硝酸との急激な熱分解反応によると考えられる破裂・爆発事故が発生した⁽²⁾。

原研では、従来から科学技術庁からの委託研究として再処理施設のセル換気系の安全性に焦点を合わせた実証試験を実施しており、DBAシナリオで想定されている溶媒と硝酸との異常化学反応に関わる試験を行ってきた。トムスク-7事故を契機に、さらに安全性実証試験を確実なものとするため、破裂・爆発時に発生するエアロゾルのソースタームを実証試験により把握することにした。この実証試験はエアロゾル試験と呼び、トムスク-7で起きた事故の教訓⁽³⁾を反映させるため、溶媒と硝酸との異常化学反応に起因する爆発が密閉容器内で発生し、容器が破裂した場合を考慮した。したがって、試験での爆発シナリオは、安全評価での事故シナリオを超えた範囲であることに注意されたい。

試験は、エアロゾルのもとになる放射性物質を模擬するため、安定核種Ceを用いて① γ 線照射により劣化させた溶媒（劣化溶媒）と硝酸との異常化学反応を調べること、②爆発によりセル内浮遊したエアロゾルの粒径分布や浮遊率（Ce浮遊重量/反応容器内のCe総重量）等を調べることを主たる目的とした。また、試験で得られたエアロゾルの粒径分布及び濃度の実測データ（固体エアロゾル）からセル内の初期浮遊液滴（ $t=0$ 、液体エアロゾル）の粒径分布を求め、セル内に浮遊したエアロゾル（液滴）の濃度減衰効果を把握した。なお、本稿でいう劣化溶媒とは、高崎研究所の γ 線照射装置により純粋な30 vol% TBP/n-ドデカンまたは100 vol% TBPに γ 線を2000 kGyまで照射し、劣化させたものである。

2. 試験

再処理施設では、燃料等の硝酸水溶液を加熱濃縮する濃縮缶の設計に際して、溶媒と硝酸との急激な熱分解反応を回避するため、熱的制限値（135℃）を設定している⁽¹⁾。試験では、密閉した反応容器を用いて、溶媒（又は劣化溶媒）と硝酸水溶液の混合溶液を電気ヒータにより、熱的制限値を大きく越える温度（～183℃）まで加熱した。加熱により生成した硝化溶媒等と硝酸との熱分解反応が促進すると、熱分解ガスと水蒸気が反応容器内に蓄積する。そして、反応容器内の圧力が設定圧力に達すると破裂板（ラプチャーディスク）が破裂し、熱分解ガス、水蒸気、及び溶媒ミストが第1モデルセル内（付録A2参照）に噴出し、エアロゾルとなる。第1モ

デルセル内には着火源（付録A 9 参照）があり、燃焼条件が満たされると溶媒ミストは着火する。この間に、第1ダクトにおいてエアロゾル濃度測定装置とエアロゾル粒径分別採取装置により、エアロゾル濃度と粒径分布のデータを取得する。また、セル換気系装置の各所では、圧力、温度、差圧、流量等のデータを収集する。

2. 1 試験装置

エアロゾル試験は、セル換気系実証試験装置にエアロゾル濃度測定装置とエアロゾル粒径分別採取装置を付加して実施した。付録A 1に「セル換気系実証試験装置」の鳥瞰図を示す。そして、付録A 2には、エアロゾル試験を実施した試験装置の模式図を示す。試験装置本体の主要な機器類の概要は以下のとおりである。

(1) 反応容器

反応容器は、再処理施設の蒸発缶を想定したもので内径約0.145mφ、胴長0.313m、容積約3ℓのSUS316製の小円筒形であり、30vol%TBP/n-ドデカン又は、100vol%TBPと硝酸水溶液（Ce(NO₃)₃含む）を充填・密閉して、電気ヒータによる加熱が行える構造である。付録A 3に反応容器の寸法及び圧力、温度センサーの位置を示す。

(2) 第1モデルセル

第1モデルセルは、決められた給気流量のもとで換気しており、底の中心部に反応容器を設置している。第1モデルセルは「再処理モデルプラント」の共除染工程のセルを1/4規模（容積）で模擬したもので内径3m、胴長約2.7m、容積約18.6m³のSUS304製の円筒形容器である。付録A 4に第1モデルセルの寸法及び圧力、温度センサーの位置を示す。

(3) 第1ダクト及び第2モデルセル

再処理モデルプラントのセルには換気を兼ねたスリーブが設置されており、セルに給気された空気は貫通スリーブを通り第2のセルに入る。第1ダクトはこの貫通スリーブを模擬したものであり、エアロゾル濃度測定装置とエアロゾル粒径分別採取装置の吸引ノズルが取り付けられている。第2モデルセルはこの第2セルを模擬したものである。第1ダクトは約0.4mφ×5mHの円筒ダクトであり、第2モデルセルは1.6mφ×4mLの容積7.4m³の横置円筒形容器である。第1ダクト及び第2モデルセルの寸法及び圧力、温度センサー位置を付録A 5に示す。

(4) 第2ダクト

第2ダクトは、第1モデルセル内の爆発で発生した圧力のダクト内伝播及び減衰を調べるための0.2mφの円筒ダクトであり、第2モデルセルから第3ダクトのミキサー合流点までの全長約12mからなる。第2ダクトの各寸法及び圧力、温度センサー位置を付録A 6に示す。

(5) 希釈ダクト

再処理施設の排気フィルタには、対象としたセル以外の多くのセルから大量の排気が流れ込

む。希釈ダクトは、これら他のセルから流れ込む排気流量を模擬するものである。この希釈ダクトは配管径0.6mで、流体の逆流を防止するための逆流防止ダンパーとエアフィルタから構成される。希釈ダクトの寸法と圧力、温度センサー位置及び第3ダクト及び排気ダクトの寸法と圧力、温度センサー位置を合わせて付録A7に示す。

(6) 第3ダクト

第3ダクトは、第2ダクトと希釈ダクトの合流点のミキサー部からフィルタチェンバまでの配管径0.6mのダクトである。

(7) エアフィルタ

フィルタ系は、モデルプラントと同一寸法のフィルタチェンバとHEPAフィルタから構成されている。フィルタエレメントは、ハーフサイズ(305mm^H×305mm^W×292mm^D)を使用する場合は前段当たり6個、フルサイズ(610mm^H×610mm^W×292mm^D)を使用する場合は前段当たり3個取り付けられる構造である。なお、フィルタチェンバには前後2段のフィルタエレメントが装荷できる。

(8) 排気ダクト

排気ダクトは、フィルタチェンバと排気ブロア及び煙突を結ぶ配管径0.6mのダクトである。

(9) 排気ブロア

排気ブロアは遠心式構造の排風機を採用した。

(10) 逆流防止ダンパー

逆流防止ダンパーは、第2ダクトからミキサーへ流れ込むガスが希釈ダクトの上流方向へ逆流することを防止するために、希釈ダクトがミキサーと結合する箇所に取り付けられている(付録A8参照)。

(11) エアロゾル濃度測定装置

本装置は実証試験装置の第1ダクトに設置して、ダクト中に浮遊するエアロゾル及びガスを濾材と吸着材によってエアロゾル成分とガス成分に分離してサンプリングする装置であり、高温のエアロゾルを含む流体を一定量(0~100Nℓ/min)に流量制御して吸引できる性能を有している。サンプリング流体は、ヒートトレース(200℃)された3.5mの導入配管を経てエアバス内のサンブラに至る。エアバス内は配管やバルブへのエアロゾル沈着を防ぐため加熱保持されており、3個のエアロゾルサンブラと1個のガス用サンブラが接続されている(付録A10参照)。エアロゾルサンブラにはフロロポアフィルタ(1枚)、ガス用サンブラには活性炭素繊維フィルタ(100mm t)がそれぞれ装填される。濾材(濾紙)及び吸着材に捕集されたエアロゾルの重量は電子天秤(島津製作所(製)AEL-40SM、検出限界:10μg)で測定

し、Ce重量については中性子放射化分析法（放射化分析と同じ、検出限界：約 $0.1 \mu\text{g}$ ）により定量する。

(12) エアロゾル粒径分別採取装置（カスケードインパクト）

本装置は、第1ダクト中を浮遊するエアロゾルをヒートトレース（ 200°C ）された5mの導入配管を経て多段（12段+バックアップ1段）の慣性衝突ノズルにより、衝突板上に $0.05 \sim 11 \mu\text{m}$ の範囲で粒子を分級して捕集させるアンダーセン型のロープレッシャーインパクトである（付録A11参照）。粒子濃度は衝突板の重量増加分を測定することにより求める。各衝突板に捕集されたエアロゾル中のCeは粒子径別（各段毎）に放射化分析を実施し、単位エアロゾル重量あたりのCe重量を求める。

2. 2 試験の項目と方法

試験は、溶媒の組成、溶媒量、及びラプチャーディスクの破裂圧力をパラメータとし、以下に示す方法で実施した。なお、試験条件等の詳細は表1に示す。

2. 2. 1 劣化溶媒と硝酸との反応挙動を調べる試験

溶媒の γ 線照射による劣化の有無は、試験での本質的なパラメータでないと考えられるが、エアロゾル発生に対する照射の効果を同時に求めるため実施した。試験では、未照射の30vol% TBP/n-ドデカン：1 ℓ 又は、2000kGy照射した30vol% TBP/n-ドデカン：1 ℓ とCeを含む硝酸水溶液1 ℓ を反応容器に貯えて密閉し、熱的制限値を越える温度（ $\sim 183^\circ\text{C}$ ）まで一定のヒータ電力で加熱した。

2. 2. 2 爆発（急激燃焼）の有無とエアロゾル濃度との関係を調べる試験

セル内で爆発が起った試験と起らない試験で、エアロゾル濃度測定装置及びカスケードインパクトによりセル内からエアロゾルのサンプリング試料を取り、この試料を定量分析してエアロゾル重量濃度を求める。

2. 2. 3 セル内に噴出したエアロゾルの粒径分布を調べる試験

本試験では、セル内に噴出した溶媒ミストが着火し燃焼した試験、溶媒ミストが着火しない試験及び開放容器内に貯えた硝酸水溶液が過濃縮した試験でセル内に噴出したエアロゾルの積算質量分布を実測し、中央径（積算百分率50%）や経過時間による分布の変化データを得る。

2. 2. 4 硝酸水溶液の過濃縮による急激燃焼がエアロゾル放出に及ぼす影響を調べる試験

開放系の反応容器に貯えた硝酸水溶液は、熱的制限値を越えて加熱すると過濃縮による沸点上昇を起し、硝化溶媒等の熱分解反応が急激に進行して急激な燃焼を起す。本試験では、急激燃焼時に発生するエアロゾルの濃度及び粒径分布を実測し、エアロゾル浮遊率を求める。

2. 2. 5 セル内に飛散した初期 ($t=0$) 液滴の粒径分布及び濃度を求める試験

試験で実測された粒径分布は、インパクトに衝突した固体エアロゾル（硝酸セリウム水和結晶）であり、セル内で初期 ($t=0$) に浮遊している液体エアロゾル（液滴）の分布ではないと考えられる。したがって、本試験では、セル内に浮遊したエアロゾルの濃度減衰に大きな影響を及ぼす液滴粒子の粒径分布を求める。

試験では、急激な熱分解反応に伴い発生する放射性エアロゾルの挙動を調べるため、模擬の放射性物質として $Ce(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$ を硝酸水溶液に混合した。ここでの硝酸水溶液は、再処理施設の燃料を模擬したものであるため、 Ce で代表した核種はプルトニウムとなる。模擬の放射性物質として Ce を選定した理由は、化学的性状が明らかで放射化分析による精度の高い定量が可能であり、加熱や噴出で容易に固体エアロゾルとなるためである。

硝酸水溶液の硝酸濃度は、硝酸（硝酸濃度 7 mol/l ）と $Ce(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$ を攪拌・平衡にした後、 $NaOH$ 滴定により測定した。測定の結果、試験で用いた水溶液中の硝酸濃度は $5.3 \sim 5.8\text{ mol/l}$ である。一方、溶媒は、 $Ce(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$ を平衡にした硝酸水溶液と TBP を適量とり、攪拌・平衡後に硝酸濃度を測定した。

2. 3 試験の結果と考察

エアロゾル試験で得られた主なデータを表 2 に示した。なお、本文中の表現でエアロゾル（ミスト+ Ce ）とあるのは、エアロゾル濃度測定装置やカスケードインパクトの濾紙及び吸着材で捕集した多種エアロゾルの総重量を実測した値である。エアロゾル（ Ce ）とあるのは、濾紙及び吸着材で捕集されたに Ce のみの値であることに注意されたい。

2. 3. 1 溶媒中の Ce 濃度について

試験前に反応容器内の有機相及び水相から試料を採取し、 Ce を定量分析した結果を表 3 に示す。分析の結果、 Ce は有機相に抽出され難いことが確認された。

2. 3. 2 劣化溶媒と硝酸との反応挙動

本試験では、純粋溶媒（未照射の $30\text{ vol}\% TBP/n\text{-ドデカン}:1\text{ l}$ ）又は、劣化溶媒（ 2000 kGy 照射した $30\text{ vol}\% TBP/n\text{-ドデカン}:1\text{ l}$ ）と Ce を含む硝酸水溶液 1 l を反応容器に貯えて密閉し、 $\sim 183^\circ\text{C}$ まで一定の速度で加熱した。試験（加熱）中の溶媒と硝酸との熱分解反応は、照射及び未照射試験ともに、自己加速的な激しい反応ではなかった（図 1 参照）。しかし、照射試験と未照射試験について反応容器内の圧力上昇を溶媒温度に対してプロットした図 2 で比較すると以下の事項が明らかになった。

- 1) 照射溶媒試験の圧力上昇開始温度は約 60°C で、未照射溶媒試験では約 120°C である。
- 2) 未照射溶媒試験では、 145°C 付近で硝化溶媒と硝酸との熱分解反応と考えられる圧力の上昇が見られた。以上の結果は、溶媒を 2000 kGy まで照射して硝酸と共に加熱すると、硝酸の熱分解に加えて照射によって生成した劣化物の熱分解反応が低温で開始し、熱分解ガスを発生させたことを示唆している（劣化生成物の詳細については、既報 JAERI-Tech 99-040, 宮田他“レッドオイルの合成と化学形同定”を参照されたい）。

2.3.3 爆発（急激燃焼）の有無とエアロゾル濃度との関係

図3と図4には、AERO1001（燃焼有り）とAERO1002（燃焼なし）でのセル内エアロゾル（Ce+ミスト）の重量濃度を時間に対して示した。また、図5と図6に放射化分析により求めたCe濃度の減衰曲線を示した。放射化分析により求めたセル内のCe濃度は、重量測定により求めた濃度より、やや低い値となった。濃度を経過時間毎に対数でプロットした減衰曲線はほぼ直線となった。この減衰曲線から、エアロゾル放出直後（ $t=0$ ）のCe濃度を実測値から外挿して求めると、セル内で燃焼が起った試験（AERO1001）では350[mg/m³]、燃焼の起らない試験（AERO1002）では10[mg/m³]である。両試験とも、Ceの仕込量及びラプチャーディスクの破裂圧力は同じ条件であったが、セル内のエアロゾル浮遊率は両者間で大きな違いを示している（表2、4参照）。この違いは、ラプチャーディスク破裂後に起きた溶媒の燃焼が原因になっていると考えられる。即ち、燃焼が起きた試験では、セル壁等に沈着した液滴に着火・燃焼による圧力の上昇が作用して液滴を再浮遊させたのではないかと考えられる。AERO1001の再現試験（AERO3001）では、重量測定で求めた初期（ $t=0$ ）エアロゾル（Ce+ミスト）濃度が1000[mg/m³]、初期Ce濃度が600[mg/m³]であることを確認した（図13と図16参照）。再現試験でエアロゾル（Ce）濃度が350[mg/m³]を越えた原因は、噴出溶媒の燃焼によりセル内の温度がAERO1001を大きく上回ったためと考えられる（表2の第1モデルセル内のピーク温度を参照のこと）。したがって、噴出した溶媒が規模の大きな燃焼を起こした場合、セル内に飛散するエアロゾル（Ce）の濃度は350[mg/m³]を上回ることが分かった。また、表4の結果は溶媒ミスト燃焼によるセル内の温度と圧力上昇が大きな試験ほどエアロゾル（Ce）の浮遊率が大きくなる傾向を顕著に表している。

2.3.4 セル内に噴出したエアロゾルの粒径分布

セル内に浮遊するエアロゾルは、破裂、爆発、過濃縮により発生する。したがって、発生機構が異なることに起因して、エアロゾルの粒径分布が影響を受ける可能性が考えられる。そこで、以下に示す試験を実施し、粒径分布等のソースタームに関するデータを得た。

- 1) セル内に噴出した溶媒ミストが着火し燃焼した試験（AERO3001）
- 2) 開放容器内に貯えた硝酸水溶液が過濃縮した試験（AERO3002）
- 3) セル内に噴出した溶媒ミストが着火しない試験（AERO3003）

各試験での反応容器内の圧力と温度の変化は図7～図9に、セル内の圧力上昇は図10～図12にそれぞれ示す。また、実測したエアロゾル（Ce+ミスト、Ce）の濃度は図14～図19に、エアロゾル（Ce+ミスト、Ce）の粒径分布は図19～図24にそれぞれ示す。

試験の結果、カスケードインパクトで捕集した試料を重量測定により求めたエアロゾル（Ce+ミスト）の粒径分布曲線は、全ての試験で対数正規分布になっていない。また、放射化分析により求めたCeエアロゾルの粒径分布も対数正規分布になってない。セル内で発生したエアロゾルの粒径分布が全て対数正規分布からずれている原因は、本試験のエアロゾル発生メカニズムが破裂、燃焼、凝縮等と複雑なためと考えられる。なお、対数正規分布を示す複数の分布を混合した場合、対数正規分布からずれてしまうことが多いことは既に知られているところである⁽⁴⁾。しかし、試験毎のCeエアロゾルの粒径分布は似た傾向を示し、粒径測定値からその重量の積算

百分率をプロットした点を直線で結ぶことにより求めた重量中央径（積算百分率50%）は、全て1 [μm] 近傍であり、サンプリング毎の分布も経過時間による変化が小さい結果を得た。即ち、粒径に対する積算質量分布は、溶媒ミストのセル内燃焼によると考えられる顕著な違いが見られない（図25参照）。いずれの試験でも粒径分布が似ている原因として、溶媒ミストの着火がラプチャーディスクの破裂から時間的に遅れ（ $\sim 0.1\text{s}$ ）があるため、着火前に液滴の粒径が決定していたためではないかと推定される。また、セル内の燃焼時間が $\sim 1.0\text{s}$ （VTRから）と短いことに起因して、粒径分布は着火による温度の上昇の影響を受けにくいことが考えられる。したがって、本試験における溶媒ミストの燃焼規模では、セル内に初期浮遊したエアロゾルの粒径分布に与える影響は少ないと考えられる。

2.3.5 硝酸水溶液の過濃縮による急激燃焼がエアロゾル放出に及ぼす影響

過濃縮試験では、開放系の反応容器に貯えた硝酸水溶液が、加熱による過濃縮で沸点上昇を起こし、溶媒の熱分解反応が急激に進行し、急激な燃焼が起きた（図8参照）。過濃縮による急激な燃焼で生じた第1モデルセル内の圧力上昇は、爆発（破裂）試験のそれと比べ非常に小さい（表2参照）。過濃縮試験の初期 C_e 浮遊率（ $t=0$ ）は、急激燃焼が起きたにも関わらず、燃焼を伴わない破裂試験のそれに近い0.02%であった（表4参照）。また、エアロゾル（ C_e ）の粒径分布も燃焼を伴わない破裂試験と同じ傾向にある（表2と図23参照）。これらのことから、過濃縮による溶媒の急激燃焼は、エアロゾル放出に重大な影響を及ぼさないことが分かった。

2.3.6 セル内に飛散した初期（ $t=0$ ）液滴の粒径分布、及び濃度解析⁽⁴⁾⁽⁵⁾

カスケードインパクトから得た粒径分布は、200℃でヒートトレースした導管を経てインパクトに衝突した固体エアロゾル（硝酸セリウム水和結晶）であり、セル内に初期浮遊している液体エアロゾル（=液滴）の分布ではない（付録A2を参照）。したがって、セル内に浮遊したエアロゾルの濃度減衰に大きな影響を及ぼす粒子の沈降速度、沈着速度を調べるためには、カスケードインパクトから得た粒径分布からセル内の初期液滴の粒径分布と平均粒径を知る必要がある。カスケードインパクトで実測した粒径分布は、全て対数正規分布からずれているため、セル内に浮遊した液滴の空気力学的個数、及び質量平均径は、実測値を解析することで導出した。

1) 本解析で使用した記号の説明

A_c : セル内部の面積 (=80.1 m^2)

A_f : エアロゾルが沈降した部分の面積 (m^2)

C_o : 反応容器内の水溶液中の C_e 濃度 (g/m^3)

C_p : 衝突板に付着した粒子の C_e 濃度 (g/m^3)

$C_{e,0}$: セル内の初期 C_e 気相濃度 (g/m^3)

C_e : ある時刻 t のセル内の C_e 気相濃度 (g/m^3)

C_c : Cunninghamの補正係数

$$= 1 + 2.514(\lambda / (d_w)_{av}) + 0.8(\lambda / (d_w)_{av}) \exp [-0.55((d_w)_{av} / \lambda)]$$

λ : 空気分子の平均自由行程 (=0.066 $\times 10^{-6}\text{m}$)

- C_i : *Jacobsen-Brock*による常数 (=3.31)
 b : " (=2.4)
 C_m : " (=1.0)
 D_p : 液滴の拡散係数 (m^2/s) : *Stokes-Einstein*
 D_i : i 段目の衝突板に付着した粒子の空気力学的粒径 (50%分離形) (m)
 d_i : セル内の i -液滴の空気力学的粒径 (m)
 $(d_w)_{av}$: 液滴の空気力学的質量平均径 (m)
 dT/dX : セル壁面の温度境界相における温度勾配 ($^{\circ}C/m$)
 F : セル内の換気流量 (m^3/s)
 g : 重力加速度 ($=9.8 m/s^2$)
 N : セル内に浮遊した液滴の全粒子数濃度 (個/ m^3)
 n_i : セル内に浮遊した i -液滴の粒子数濃度 (個/ m^3)
 k : ボルツマン定数 ($=1.38 \times 10^{-23} J/K$)
 k_g : 空気の熱伝導度 ($=10 \times 10^{-3} J/s mK$)
 k_p : 液滴の熱伝導度 ($=550 \times 10^{-3} J/s mK$)
 K_n : クヌッセン数 ($=\lambda / (d_w)_{av}$)
 T : 絶対温度 (K)
 t : 時間 (s)
 V_c : 第1モデルセルの体積 (m^3)
 V_s : 液滴の沈降速度 (m/s)
 V_d : 液滴の拡散沈着速度 (m/s)
 V_T : 液滴の熱泳動沈着速度 (m/s)
 $\Delta W_i/W$: 衝突板 i 段に付着した C_e の重量分率 (-)
 δ : セル内部の壁面上の拡散境界の厚さ (m)
 λ_c : 気相中の C_e 濃度の減衰係数
 μ : 空気の粘性係数 ($1.81 \times 10^{-5} N s / m^2$)
 ρ : 空気力学的粒径に対応した液滴の密度 ($=1.0 \times 10^3 kg/m^3$; 式中の $(d_w)_{av}$ が液滴の空気力学的質量平均径であるため)
 ρ_g : 空気の密度 ($=1.2 kg/m^3$)
 $\rho_P = C_e (NO_3)_3 \cdot 6 H_2O$ 結晶の密度 ($2.37 [g/cm^3]$) : 液浸法による実測値
 ν : 空気の動粘性係数 ($=0.25 \times 10^{-4} m^2/s$)

2) セル内に飛散した初期液滴の粒径分布の導出方法

(a) セル内に浮遊した液滴の粒径

セル内に浮遊した初期液滴の空気力学的粒径を求めるためには、まずインパクト衝突板上の固体粒子の C_e 濃度 C_P を下式によって求める。

$$C_P [g/m^3] = \rho_P \times \frac{C_e \text{の原子量}(=140.12)}{C_e (NO_3)_3 \cdot 6 H_2O \text{の分子量}(=434.12)} \quad (1)$$

セル内に浮遊している*i*-液滴の*C_e*濃度は反応容器内の*C_e*濃度 (*C₀*) に等しいので、*i*-液滴中の*C_e*重量はインパクタの*i*段の衝突板に付着した*C_e*重量に等しい。したがって、セル内の*i*-液滴は、全て*i*段の衝突板に付着すると仮定すると以下の式が成立する。

$$\underbrace{(\pi/6) d_i^3 n_i C_0 V_c}_{\text{破裂によってセル内に浮遊している } i\text{-液滴中の } C_e \text{ 重量}} = \underbrace{(\pi/6) D_i^3 n_i C_p V_c}_{\text{サンプリングされて } i\text{ 段の衝突板に付着した粒子の } C_e \text{ 重量}} \quad (2)$$

破裂によってセル内に浮遊している*i*-液滴中の*C_e*重量

サンプリングされて*i*段の衝突板に付着した粒子の*C_e*重量

したがって、(2) 式よりセル内の*i*-液滴の空気力学的粒径 *d_i* は

$$d_i = \left(\frac{C_p}{C_0} \right)^{1/3} D_i \quad (3)$$

(b) 液滴の初期粒子数濃度

初期 (*t* = 0) のときセル内に浮遊した*i*-液滴中の*C_e*濃度は、インパクタ*i*段目の粒子の*C_e*濃度に等しいので

$$\frac{\pi}{6} d_i^3 n_i C_0 = C_{g,0} \frac{\Delta W_i}{W} \quad \text{が成立する} \quad (4)$$

したがって、セル内に浮遊した*i*-液滴の粒子数濃度 *n_i* は

$$n_i = \frac{6 C_{g,0} (\Delta W_i / W)}{\pi d_i^3 C_0} \quad \text{である} \quad (5)$$

(c) 液滴の空気力学的個数平均径、及び質量平均径

エアロゾル試験で得た粒径分布は対数正規分布でない。したがって、対数正規分布の計算から液滴の空気力学的個数平均径を求めることはできない。そこで、セル内に浮遊した液滴の空気力学的個数平均径 (*d_c*)_{av} を (6) 式より求める。

$$(d_c)_{av} = \frac{\sum_i (n_i d_i)}{N} \quad (6)$$

一方、液滴の空気力学的質量平均径 (*d_w*)_{av} は (7) により求める。

$$(d_w)_{av} = \frac{\sum_i (\Delta W_i d_i)}{W} \quad (7)$$

上記の (1) ~ (7) 式を用いて試験における液滴の空気力学的粒径と個数平均径、及び質量平均径を求めた結果を表 5-1 ~ 表 5-2 に示す。AERO1001 は、気相中に初期浮遊した *C_e*

濃度が $C_{g,0} = 350$ [mg/m³]、反応容器内の水相中の C_e 濃度は $C_0 = 210$ [kg/m³] である。なお、表中の液滴の個数平均径と質量平均径の値は大きく異なることに注意されたい。

試験毎にカスケードインパクトで得たデータから算出した初期液滴の液滴個数平均径は、全て 0.1 [μm] 近傍であり、質量平均径は $2.3 \sim 3.6$ [μm] の範囲であった (表 5-2 参照)。

3) セル内のエアロゾル (C_e) 濃度の減衰

実測値から求めた C_e 濃度の減衰速度と初期液滴の粒径分布解析から導出した減衰速度 (液滴の空気力学的質量平均径をもとに算出) を比較し、液滴径が濃度の減衰に及ぼす機構を調べた。

(a) セル内気相の C_e 濃度の減衰

C_e 濃度の減衰式は次の式で表すことができる。

$$-V_c \times \frac{dC_g}{dt} = (F + V_s A_f + V_d A_c + V_T A_c) C_g \quad (8)$$

ここで、(8) 式を $t = 0$ 、 $C_g = C_{g,0}$ (初期の気相 C_e 濃度) の初期条件下で解けばセル内気相の C_e 濃度は

$$C_g = C_{g,0} \exp \left(- \frac{F + V_s A_f + V_d A_c + V_T A_c}{V_c} t \right) \quad (9)$$

で求められる。(9) 式中の右辺換気回数は

$$F / V_c = 1.67 \times 10^{-3} \text{ (s}^{-1}\text{)} \quad (10)$$

である。重力沈降速度 V_s はストークスの式を用いて

$$V_s = \frac{(\rho - \rho_g)}{18 \mu} (d_w)^2 g C_c \quad (11)$$

であり、重力沈降に起因した時定数はセル内の高さ H (2.5 m) 用いて、 $V_s A_f / H$ で求まる。

液滴がブラウン運動により、拡散して壁面に沈着する拡散沈着速度 V_d は

$$V_d = \frac{D_p}{\delta} = \frac{k T C_c}{3 \pi \mu (d_w)_{av} \delta} \quad (12)$$

であり、拡散沈着に起因した時定数は、セル内部の面積 A_c (80.1 m²) を用いて、 $V_d A_c / V_c$ で求まる。

セル気相と壁面の温度勾配のため、浮遊したエアロゾル粒子は熱泳動により壁に沈着する。液滴の熱泳動沈着速度 (V_T) を求めるには、*Jacobsen-Brock* の式を採用する。

$$V_T = \frac{3 \nu \{ (k_g/k_p) + C_t K_n + (4b/3) C_m K_n \{ (k_g/k_p) + C_t K_n - 1 \} \}}{2 T \{ (1 + 3 C_m K_n) (1 + 2 (k_g/k_p) + 2 C_t K_n) \}} \left(\frac{dT}{dX} \right) \quad (13)$$

(b) エアロゾルの移流、重力沈降、拡散沈着効果による t [s] 後のセル内の C_e 濃度の減衰

(b. 1) 移流効果による気相中の C_e 濃度の減衰

$$C_g = C_{g,0} \exp \left(- \frac{F}{V_c} \right) t \quad (14)$$

(b. 2) 移流効果に重力沈降効果が加わった場合の気相中の C_e 濃度の減衰

$$C_g = C_{g,0} \exp \left(- \frac{F + V_s A_f}{V_c} \right) t \quad (15)$$

(b. 3) 移流効果+重力沈降効果+拡散沈着効果の場合での C_e 濃度の減衰

$$C_g = C_{g,0} \exp \left(- \frac{F + V_s A_f + V_d A_c}{V_c} \right) t \quad (16)$$

(b. 4) 移流効果+重力沈降効果+拡散沈着効果+熱泳動沈着効果

$$C_g = C_{g,0} \exp \left(- \frac{F + V_s A_f + V_d A_c + V_T A_c}{V_c} \right) t \quad (17)$$

(b. 5) セル内に浮遊したエアロゾル (C_e) 濃度の半減期 ($t_{1/2}$)

$$\frac{1}{2} = \frac{C_g}{C_{g,0}} = \exp(-\lambda_c) t \quad (18)$$

$$t_{(1/2)} = 0.693 / \lambda_c \quad (19)$$

上記の (8) ~ (19) 式を用いてセル内に浮遊したエアロゾルの濃度減衰を解析した結果を表 6 に示す。

3) 初期 ($t=0$) 液滴の粒径分布と濃度減衰の解析結果

(a) セル内に初期浮遊した液滴の粒径分布について

AER01001において、 $t=0$ でセル内に浮遊する i -液滴の空気力学径 d_i を前記 (3) 式より求め、表 5-1 に示した。また、全ての試験で C_0 (反応容器水溶液中の C_e 濃度) $< C_p$ (衝突板に付着した粒子の C_e 濃度) のため、 d_i はインパクタで捕集された粒子径 D_i (50%分離径) より大きな値となった。したがって、初期液滴の質量平均径もインパクタの実測値を D_i でプロットした積算質量 (C_e) 分布から予想される粒径より大きな値となった。また、液滴の個数平均径は、質量平均径に比べ小さな値である (式 3 ~ 5 参照)。

(b) 照射溶媒がセル内に浮遊した初期液滴の粒径分布と濃度に与える影響

溶媒照射の有無はエアロゾル試験での本質的なパラメータでないが、密閉系で加熱した場合、圧力上昇開始時間が未照射溶媒のそれより早いため、照射の効果を調べる試験を実施した。その結果は、セル内への噴出液滴の粒径分布と濃度は未照射試験のデータと比べて違いがなく、照射

による溶媒の劣化がセル内に浮遊した初期液滴の粒径分布と濃度に影響ないことを確認した（図26と図27参照）。

(c) 液滴の沈降、沈着効果

セル内に噴出した溶媒が燃焼を起こした試験と起こさなかった試験でのエアロゾル（Ce）濃度の時間変化を実測した結果を図28と図29に示す。両図中の減衰カーブの勾配はほぼ等しい。これはセル内に浮遊したエアロゾル（液滴）の沈降、沈着等の速度が、溶媒燃焼の有無に関係なく同様であることを示している。また、試験毎に液滴の空気力学的質量平均径を求めて沈降、沈着速度を計算し、液滴の沈降、沈着がセル内気相のCe濃度の減衰に与える効果を図30～図32に示した。図中の沈降、沈着効果による減衰カーブと実測値より求めた減衰カーブの減衰係数（減衰勾配）は、ほぼ一致する。本解析では、壁面近傍の水蒸気の濃度勾配によって起きる液滴の拡散泳動による沈着効果は無視した。したがって、この効果を加えて解析を行えば最適な結果を得られたのではないかと考えられる。なお、図中の減衰カーブは、換気による移流効果とセル内の温度勾配による熱泳動沈着効果がセル内のエアロゾル濃度の減衰に作用したことを示している。

3. 結論

密閉容器内で溶媒と硝酸との異常化学反応が進行し、熱分解ガス等が蓄積し、圧力が上昇してラプチャーディスクが破裂した場合、あるいは開放容器内で硝酸水溶液の過濃縮による燃焼が起きた場合、セル内に飛散するエアロゾルの質量濃度は以下の範囲である。

- ①セル内の初期エアロゾル（ミスト+Ce）濃度（ $t=0$ ）： ~ 1000 [mg/m³]
- ②セル内の初期エアロゾル（Ce）濃度（ $t=0$ ）：3～600 [mg/m³]
- ③セル内の初期エアロゾル（Ce）浮遊率（ $t=0$ ）：0.02～6.7 [%]
- ④エアロゾル（Ce）濃度の半減期 $t(1/2)$ ：226～308 [s]

また、セル内に初期（ $t=0$ ）浮遊した液体エアロゾル（＝液滴）の粒径分布は計算の結果、以下の範囲である。

- ⑤液滴の空気力学的個数平均径：0.88～0.15 [μ m]
- ⑥液滴の空気力学的質量平均径：2.32～3.62 [μ m]

実証試験により、噴出した溶媒ミストのセル内燃焼が起きると、起きない試験よりエアロゾル濃度は約1桁大きい値を示すことを確認した。したがって、溶媒と硝酸との異常化学反応に起因した爆発（溶媒ミストの噴出）が燃焼を伴うか否かが、セル内に飛散する初期エアロゾルの質量濃度の決定に大きく関与していることが分かった。試験においてセル内の最大初期エアロゾル（Ce）の質量濃度は、3～600 [mg/m³] の範囲にあり、燃焼条件によっては事故シナリオで設定した最大初期濃度100 [mg/m³] を上回ることが判明した。ただし、急激な燃焼が発生しても温度の上昇や圧力波の伝播は、換気系ネットワーク内で十分減衰するので、HEPAフィルタの健全性は確保され、セル換気系による放射性物質の閉じ込め効果は十分達成されることを確かめた。また、セル内に浮遊するエアロゾル（Ce）の積算質量分布や初期浮遊した液滴の粒

径分布データが得られたことにより、再処理施設で想定される火災・爆発時の安全評価に必要とされるエアロゾルのソースタームを解明することができた。

実証試験で得られた多くの実証データは、「再処理施設の火災・爆発時におけるセル換気系の安全性解析コード (CELVA-1D)」のエアロゾル移行解析機能の検証に資した。

謝辞

この報告書は、科学技術庁から原研が委託された「再処理施設セル換気系安全性実証試験」の一環として実施した再処理溶媒と硝酸との熱分解反応に関わるエアロゾル発生試験の結果を纏めたものである。本試験の遂行にあたり、「再処理施設セル換気系安全性実証試験検討委員会 (金川昭委員長)」において、試験の計画、方法、結果のご検討を頂いた。ここに感謝いたします。

参考文献

- (1) 原子力安全委員会：“再処理施設安全審査指針”
- (2) 科学技術庁原子力安全局：“ロシアのトムスク再処理施設の事故に関する調査報告；原子力安全委員会月報第192号 (第17巻第9号)”
- (3) 西尾他：“トムスク-7再処理施設で発生した反応性物質を含む溶媒と硝酸の熱分解反応に関する反応速度と反応熱”、JAERI-Tech 96-56
- (4) William C.Hinds：“Aerosol Technology”，井上書院，412，(1985)
- (5) 西尾他：“再処理施設の火災・爆発時におけるセル換気系の安全性解析コード (CELVA-1D)”、JAERI-Data/Code 98-017

表1 溶媒と硝酸との熱分解反応に関するエアロゾル発生試験 (AERO試験) 条件

実験番号	実施年月日	溶媒相条件			水相条件		ラプチャードイスク設定圧力 (MPa)	口火の有無	吸収線量 (kGy)	備考
		溶媒	硝酸濃度 (mol/ℓ)	溶媒量 (ℓ)	硝酸濃度 (mol/ℓ)	水相量 (ℓ)				
(平成7年度) AERO-1001	H8. 2. 6	30vol%TBP/n-ドデカン	0.89 〔0.8〕	1.0	4.95 〔7〕	1.0	3	有	0	純粋溶媒の影響 Cc(NO ₃) ₃ :511 g/ℓ
AERO-1002	H8. 2.23	30vol%TBP/n-ドデカン	0.34 〔0.8〕	1.0	5.12 〔7〕	1.0	3	有	2000	劣化溶媒の影響 Ce(NO ₃) ₃ :566 g/ℓ
(平成8年度) AERO-2001	H8. 6.18	100vol%TBP	2.4 〔2.7〕	0.5	5.35 〔7〕	1.5	7	有	0	純粋溶媒(100%TBP)の影響 Ce(NO ₃) ₃ :441.6g/ℓ
AERO-2002	H8. 7.23	30vol%TBP/n-ドデカン	0.82 〔0.8〕	0.4	5.85 〔7〕	1.6	3	有	0	破裂圧力の影響 Ce(NO ₃) ₃ :419g/ℓ
AERO-2003	H8. 8. 8	100vol%TBP	2.68 〔2.7〕	0.5	5.6 〔7〕	1.5	7	有	2000	劣化溶媒(100%TBP)の影響 Cc(NO ₃) ₃ :395.5g/ℓ
AERO-2004	H8.11. 7	30vol%TBP/n-ドデカン	0.74 〔0.8〕	1.0	5.68 〔7〕	1.0	5	有	0	破裂圧力の影響 Cc(NO ₃) ₃ :372g/ℓ
AERO-2005	H9. 1.21	30vol%TBP/n-ドデカン	0.74 〔0.8〕	1.0	5.68 〔7〕	1.0	7	有	0	破裂圧力の影響 Cc(NO ₃) ₃ :477g/ℓ
(平成9年度) AERO-3001	H9.10.15	30vol%TBP/n-ドデカン	0.7 〔0.8〕	1.0	5.6 〔7〕	1.0	3	有	0	・AERO1001の再現試験 (LTP) 放出量の確認
AERO-3002	H9.11.13	30vol%TBP/n-ドデカン	0.64 〔0.8〕	0.5	5.2 〔7〕	1.5	-----	有	0	・過濃縮試験
AERO-3003	H9.11.28	100vol%TBP	2.24 〔2.7〕	0.5	5.32 〔7〕	1.5	7	有	0	・AERO2001の再現試験

注:〔 〕内の数値は計画濃度を示す。

表2 溶媒と硝酸との熱分解反応に関するエアロゾル発生試験の結果一覧

試験番号	AER03001	AER01001	AER02004	AER02005	AER02002	AER01002 2000kGy	AER02001	AER02003 2000kGy	AER03003	AER03002 (過濃縮)
溶媒組成	30%TBP/n- トデカン 1.0 1.0	30%TBP/n- トデカン 1.0 1.0	30%TBP/n- トデカン 1.0 1.0	30%TBP/n- トデカン 1.0 1.0	30%TBP/n- トデカン 0.5 1.5	30%TBP/n- トデカン 1.0 1.0	100%TBP	100%TRP	100%TBP	30%TBP/n- トデカン 0.5 1.5
RDの破裂圧 [MPa]	2.9	3.2	5.2	6.8	3.2	3.2	6.9	6.7	6.3	---
溶媒着火の有無	有り	有り	有り	有り	無し	無し	無し	無し	無し	有り
第1モジュールセル内の ピーク圧力 [kPa]	148	120	106	105	104	102	104	103	104	100
ピーク温度 [℃]	190	82	70	62	84	70	80	50	76	150
反応容器内のCe重量 *1 (溶媒+水相) [g]	180.2	224.0	169.6	125.0	270.7	265.5	286.1	258.8	300.6	318.7
第1モジュール内の初期 (t=0) Ce濃度 [mg/d]	600.0	350.0	250.0	150.0	40.0	10.0	10.0	8.0	5.0	3.5
" Ce浮遊量 [g]	11.4	6.7	4.8	2.9	0.76	0.19	0.19	0.15	0.10	0.07
" Ce浮遊率 [%]	6.3	3.0	2.8	2.3	0.28	0.07	0.07	0.06	0.03	0.02
*2 Ce濃度の減衰係数 λc [1/s]	2.39×10 ⁻³	2.56×10 ⁻³	2.54×10 ⁻³	2.74×10 ⁻³	3.07×10 ⁻³	2.65×10 ⁻³	2.25×10 ⁻³	2.765×10 ⁻³	2.47×10 ⁻³	2.59×10 ⁻³
*3 Ce濃度の半減期 [s]	289	271	273	253	226	261	308	251	280	268
Ccの積算百分率	対数正規分布でない 1.5近傍	対数正規分布でない 1.0近傍	対数正規分布でない 1.0近傍	対数正規分布でない 1.0近傍	対数正規分布でない 0.9近傍	対数正規分布でない 0.8近傍	対数正規分布でない 0.5近傍	対数正規分布でない 0.7近傍	対数正規分布でない 1.5近傍	対数正規分布でない 0.8近傍
Dp,0 [μm] (参考値)										

*1 反応容器内のCe重量 (溶媒+水相) [g] : 試験前に溶媒、水相から各々試料を採取し、放射化分析によりCeの定量を行った値である。

*2 Ce濃度の減衰係数 λc [1/s] : $C_t = C_{t=0} \cdot \exp^{-\lambda c \cdot t}$ より減衰係数 λc を求める

C_t = t秒後のCe濃度 [mg/d]

$C_{t=0}$ = 初期Ce濃度 (t=0) [mg/d]

t = 時間 [s]

*3 Ce濃度の半減期 t (1/2) [s] : $0.693 / \lambda c$

表3 反応容器に貯えた溶媒と水相中のCe濃度

試験No.	AERO 1001	AERO 1002	AERO 2001	AERO 2002	AERO 2003	AERO 2004	AERO 2005	AERO 3001	AERO 3002	AERO 3003
溶媒中のCe濃度 [g/ℓ]	14	5.5	2.1	1.4	7.5	9.6	15	0.23	7.4	1.1
水相中のCe濃度 [g/ℓ]	210	260	190	180	170	160	110	180	210	200

注：溶媒及び水相中のCe濃度は放射化分析により測定した。

表4 セル内でのエアロゾル (Ce) 浮遊率

試験番号	セル内燃焼の有無	試験前Ce 総仕込量	* ¹ 初期 (t=0) Ce濃度	* ² セル内の Ce浮遊量	* ³ 浮遊率
AERO1001 未照射溶媒	着火燃焼有り	224 g	350 mg/m ³	6.65 g	3%
AERO1002 2000kGy照射	無し	265 g	10 mg/m ³	0.19 g	0.07%
AERO3001 A1001再試験	着火燃焼有り	180 g	600 mg/m ³	11.4 g	6.3%
AERO3002 過濃縮試験	過濃縮後に燃焼	319 g	3.5 mg/m ³	0.07 g	0.02%
AERO3003 A2001再試験	無し	301 g	5.0 mg/m ³	0.1 g	0.03%

記：ラプチャーディスク破裂時には、反応容器内の溶媒と硝酸水溶液は全量セル内に放出した。

*¹セル内のエアロゾル重量濃度を実測し、外挿した値である

*²セル内のエアロゾル (Ce) 浮遊量=初期 (t=0) エアロゾル (Ce) 濃度×セル体積

*³エアロゾル (Ce) 浮遊率=(エアロゾル (Ce) 浮遊量/Ce総仕込量)×100

表5-1 カスケードインパクトによる分級粒径と初期 (t=0) 液滴の空気力学的粒径との関係
(AERO1001: 溶媒燃焼有り)

【カスケードインパクト】		衝突板上のCe 重量分率	浮遊液滴の 空気力学粒径	浮遊液滴の 個数濃度
分級No.	*1分級粒径 D _i [μm]			
BF	0.05 ≥	0.0026	0.077 ≥	1.807×10 ¹³
L4	0.05	0.0058	0.077	4.065×10 ¹³
L3	0.10	0.0093	0.154	8.130×10 ¹²
L2	0.18	0.0129	0.277	1.936×10 ¹²
L1	0.27	0.0168	0.415	7.458×10 ¹¹
7	0.47	0.0606	0.723	5.112×10 ¹¹
6	0.71	0.1199	1.092	2.934×10 ¹¹
5	1.00	0.2836	1.538	2.484×10 ¹¹
4	1.90	0.3739	2.922	4.774×10 ¹⁰
3	3.40	0.0619	5.228	1.379×10 ⁹
2	5.40	0.0206	8.303	1.147×10 ⁸
1	7.90	0.0168	12.148	2.977×10 ⁷
0	11 ≤	0.0155	16.914 ≤	1.018×10 ⁷
*1: ステージの代表粒径		液滴の個数平均径=0.11[μm] 液滴の質量平均径=2.68[μm]		

表5-2 カスケードインパクトによる分級粒径と初期 (I=0) 液滴の空気力学的粒径との関係 (AERO1002~AERO2005)

ステージの 代表粒径 D_i [μm]	AERO1002 (燃焼無) 液滴の粒径分布		AERO2001 (燃焼無)		AERO2002 (燃焼無)		AERO2003 (燃焼無)		AERO2004 (燃焼有)		AERO2005 (燃焼有) 浮遊した液滴	
	d_i [μm]	n_i [個/ m^3]	d_i [μm]	n_i [個/ m^3]	d_i [μm]	n_i [個/ m^3]	d_i [μm]	n_i [個/ m^3]	d_i [μm]	n_i [個/ m^3]	d_i [μm]	n_i [個/ m^3]
0.05 \geq	0.072 \geq	2.14E+12	0.079 \geq	1.60E+13	0.081 \geq	2.62E+12	0.082 \geq	2.62E+12	0.084 \geq	1.61E+13	0.095 \geq	7.92E+12
0.05	0.072	1.55E+12	0.079	8.28E+12	0.081	4.77E+12	0.082	2.58E+12	0.084	1.96E+13	0.095	1.55E+13
0.10	0.143	4.55E+11	0.159	9.70E+11	0.162	1.56E+12	0.165	8.70E+11	0.168	7.78E+12	0.191	5.16E+12
0.18	0.258	1.56E+11	0.286	2.55E+11	0.291	8.94E+11	0.297	2.28E+11	0.303	2.96E+12	0.343	1.53E+12
0.27	0.387	9.10E+10	0.429	1.97E+11	0.437	3.03E+11	0.445	1.40E+11	0.455	8.78E+11	0.515	5.46E+11
0.47	0.673	2.11E+10	0.747	3.11E+10	0.761	8.25E+10	0.775	2.02E+10	0.791	3.05E+11	0.896	2.18E+11
0.71	1.017	7.94E+09	1.129	6.33E+09	1.149	3.22E+10	1.171	4.72E+09	1.195	1.33E+11	1.354	1.02E+11
1.00	1.432	3.70E+09	1.590	1.94E+09	1.619	2.01E+10	1.650	1.84E+09	1.683	1.34E+11	1.907	8.06E+10
1.90	2.721	5.80E+08	3.021	3.11E+08	3.075	4.07E+09	3.135	5.82E+08	3.198	3.36E+10	3.624	1.73E+10
3.40	4.869	6.44E+07	5.405	4.11E+07	5.503	3.88E+08	5.609	8.98E+07	5.724	2.79E+09	6.484	1.92E+09
5.40	7.733	3.25E+06	8.585	1.03E+07	8.741	8.75E+06	8.909	3.57E+06	9.090	6.77E+07	10.299	3.69E+07
7.90	11.314	7.50E+05	12.559	3.80E+06	12.788	2.04E+06	13.033	8.09E+05	13.299	2.05E+07	15.066	1.13E+07
11 \leq	15.753 \leq	2.14E+05	17.488 \leq	7.29E+05	17.805 \leq	5.31E+05	18.148 \leq	2.31E+05	18.518 \leq	3.90E+06	20.978 \leq	2.34E+06
C_P [kg/m^3]	764.5		764.5		764.5		764.5		764.5		764.5	
C_o [kg/m^3]	260.0		190.0		180.0		170.0		160.0		150.0	
$C_{s.o}$ [mg/m^3]	10.0		10.0		40.0		8.0		250.0		150.0	
$(d_c)_{av}$ [μm]	0.098		0.135		0.135		0.113		0.133		0.148	
$(d_w)_{av}$ [μm]	2.320		2.637		2.637		2.824		3.216		3.619	

備考 d_i : 浮遊液滴の空気力学的粒径, n_i : 浮遊液滴の個数濃度, C_P : 衝突板上粒子の C_e 濃度, C_o : 水溶液中の C_e 濃度,
 $C_{s.o}$: セル内の初期 ($I=0$) C_e 濃度, $(d_c)_{av}$: 液滴の空気力学的個数平均径, $(d_w)_{av}$: 液滴の空気力学的質量平均径

表6 液滴の沈降、沈着がセル内気相のCe濃度減衰に与える効果

計算	30 vol% TBP/n-ドデカン試験					100 vol% TBP	
	AER01001 溶媒が燃焼	AER01002	AER02002	AER02004 溶媒が燃焼	AER02005 溶媒が燃焼	AER02001	AER02003
計算入力データ C _{g,0} :セル内初期Ce濃度 [mg/m ³] (d _w) _{av} :液滴の質量平均径 [μm] T:気相の温度 [K] ΔT:気相と壁の温度差 [°C] ΔX:温度境界層の厚み [m] C ₀ :反応容器内のCe重量濃度 [mg/l] V _r :水溶液体積 [ℓ]	350 2.68 573 100 0.001 2.24×10 ³ 1.0	1.0 2.32 343 60 0.001 2.65×10 ³ 1.0	40 2.64 348 55 0.001 1.81.4×10 ³ 1.6	250 3.22 343 50 0.001 1.69×10 ³ 1.0	150 3.62 333 50 0.001 1.25×10 ³ 1.0	1.0 3.20 353 60 0.001 1.92.1×10 ³ 1.5	8 2.82 323 25 0.001 1.77.5×10 ³ 1.5
1. 沈降、沈着速度 F:換気流量 [m ³ /s] V _s :液滴重力沈降速度 [m/s] V _d :拡散沈着速度 [m/s] V _T :熱泳動沈着速度 [m/s]	3.33×10 ⁻² 2.287×10 ⁻⁴ 6.135×10 ⁻⁶ 1.519×10 ⁻⁴	3.33×10 ⁻² 1.734×10 ⁻⁴ 4.274×10 ⁻⁶ 1.618×10 ⁻⁴	3.33×10 ⁻² 2.225×10 ⁻⁴ 3.783×10 ⁻⁶ 1.384×10 ⁻⁴	3.33×10 ⁻² 3.271×10 ⁻⁴ 3.028×10 ⁻⁶ 1.191×10 ⁻⁴	3.33×10 ⁻² 4.119×10 ⁻⁴ 2.596×10 ⁻⁶ 1.188×10 ⁻⁴	3.33×10 ⁻² 3.243×10 ⁻⁴ 3.128×10 ⁻⁶ 1.391×10 ⁻⁴	3.33×10 ⁻² 2.539×10 ⁻⁴ 3.267×10 ⁻⁶ 0.661×10 ⁻⁴
2. Ce濃度減衰係数 λ _c :実測値 [1/s] " : 移流効果 [1/s] " : 移流+重力沈降効果 [1/s] " : 移流+重力沈降+拡散沈着 [1/s] λ _c :移流+重力沈降+拡散沈着+熱泳動 [1/s]	2.521×10 ⁻³ 1.667×10 ⁻³ 1.758×10 ⁻³ 1.783×10 ⁻³ 2.391×10 ⁻³	2.596×10 ⁻³ 1.667×10 ⁻³ 1.736×10 ⁻³ 1.753×10 ⁻³ 2.401×10 ⁻³	1.105×10 ⁻³ 1.667×10 ⁻³ 1.756×10 ⁻³ 1.771×10 ⁻³ 2.325×10 ⁻³	2.465×10 ⁻³ 1.667×10 ⁻³ 1.798×10 ⁻³ 1.810×10 ⁻³ 2.287×10 ⁻³	2.733×10 ⁻³ 1.667×10 ⁻³ 1.831×10 ⁻³ 1.842×10 ⁻³ 2.318×10 ⁻³	2.218×10 ⁻³ 1.667×10 ⁻³ 1.796×10 ⁻³ 1.809×10 ⁻³ 2.366×10 ⁻³	2.813×10 ⁻³ 1.667×10 ⁻³ 1.768×10 ⁻³ 1.781×10 ⁻³ 2.046×10 ⁻³
3. t分後のCe濃度 (t = 60分) C _g :実測値 [mg/m ³] " : 移流効果 [mg/m ³] " : 移流+重力沈降効果 [mg/m ³] " : 移流+重力沈降+拡散沈着 [mg/m ³] C _g :移流+重力沈降+拡散沈着+熱泳動 [mg/m ³]	0.0500 0.8680 0.6240 0.5710 0.0640	0.0007 0.0198 0.0155 0.0145 0.0014	0.0006 0.0992 0.0720 0.0682 0.0093	0.0350 0.6190 0.3869 0.3704 0.0647	0.0080 0.3718 0.2054 0.197 0.0357	0.0033 0.0248 0.0155 0.0149 0.0020	0.0003 0.0198 0.0138 0.0131 0.0051
4. Ce濃度の半減期 t _{1/2} :実測値 [s] " : 移流効果 [s] " : 移流+重力沈降効果 [s] " : 移流+重力沈降+拡散沈着 [s] t _{1/2} :移流+重力沈降+拡散沈着+熱泳動 [s]	274.9 415.9 394.2 388.8 289.9	267.1 415.9 399.3 395.4 288.7	223.3 415.9 394.8 391.4 298.1	281.2 415.9 385.9 383.0 303.1	253.6 415.9 378.5 376.3 299.1	312.4 415.9 385.9 383.2 293.0	246.4 415.9 392.0 389.1 338.8

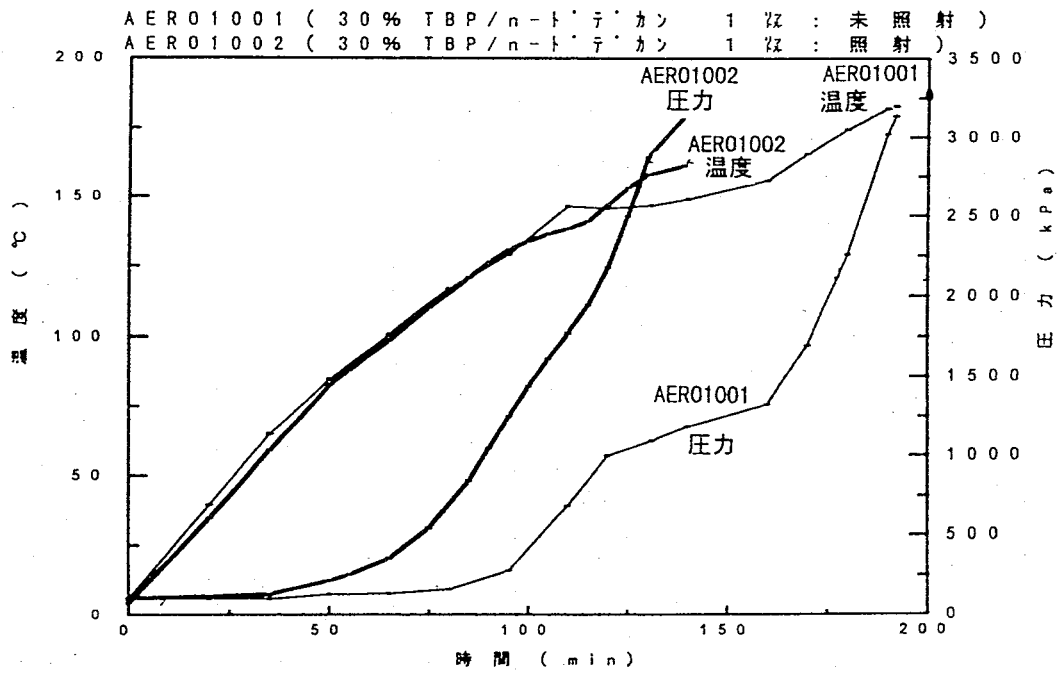


図1 照射、未照射溶媒試験での反応容器内の温度と圧力の変化

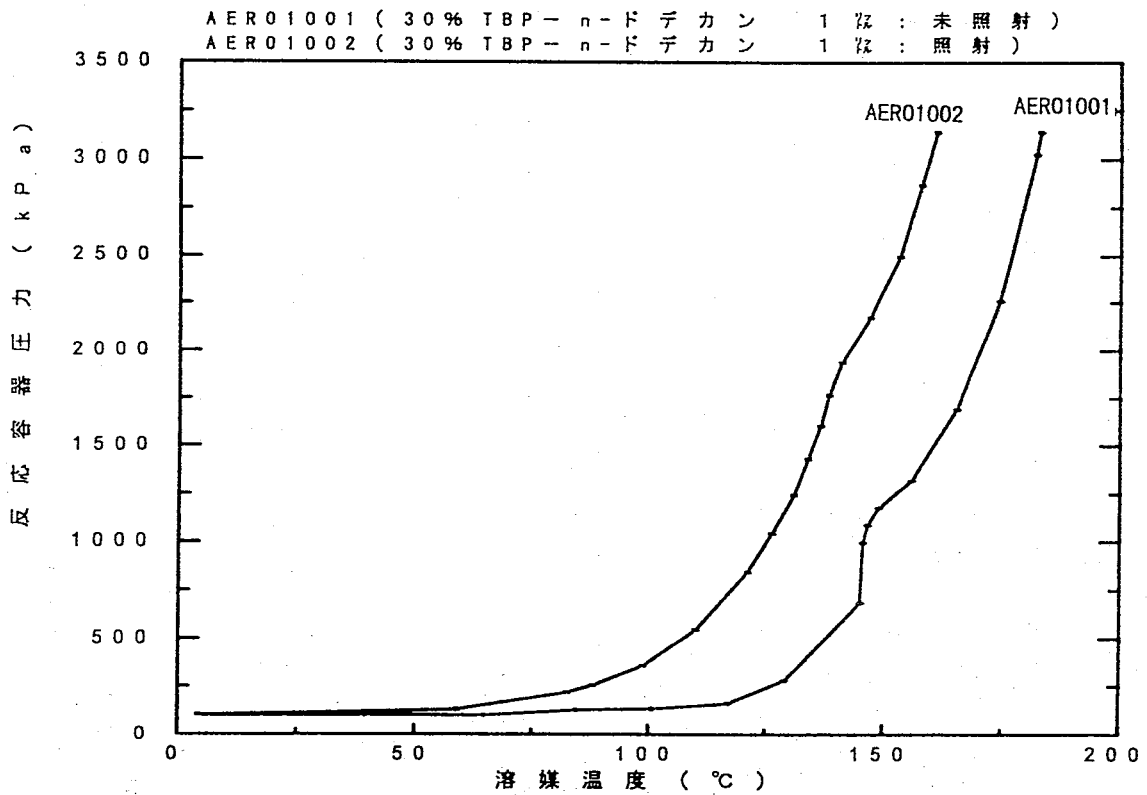


図2 照射、未照射溶媒試験での反応容器内の温度と圧力の関係

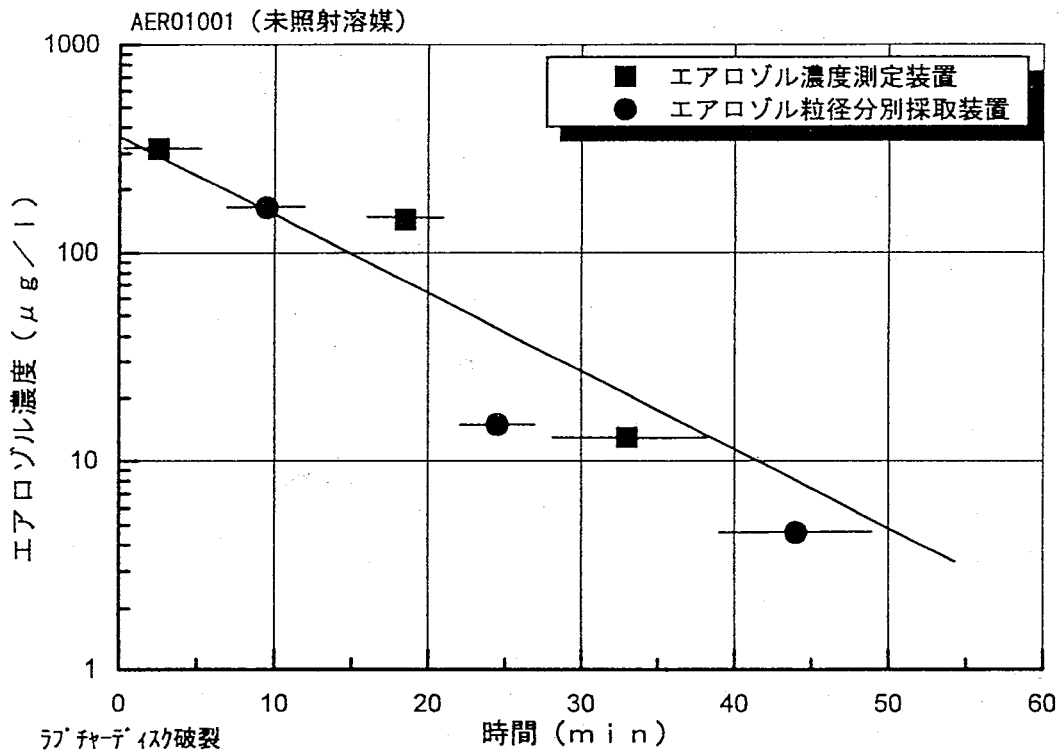


図3 AERO1001 (未照射) 重量測定によるエアロゾル (Ce+ミスト) 濃度の減衰

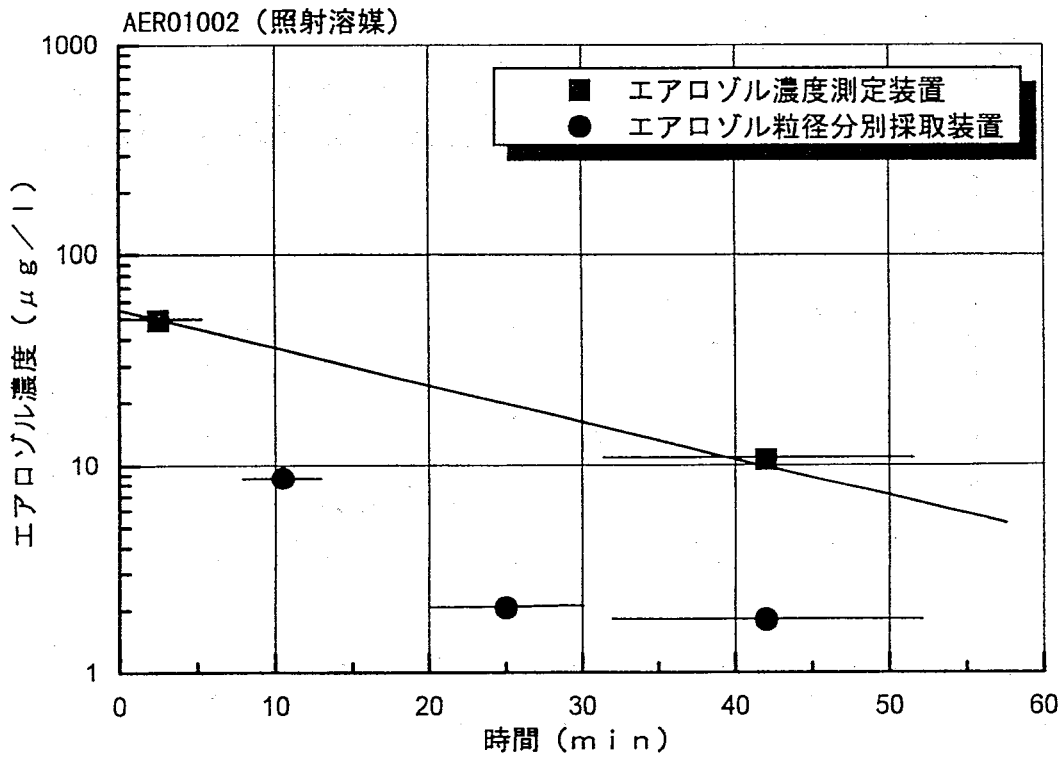


図4 AERO1002 (照射) 重量測定によるエアロゾル (Ce+ミスト) 濃度の減衰

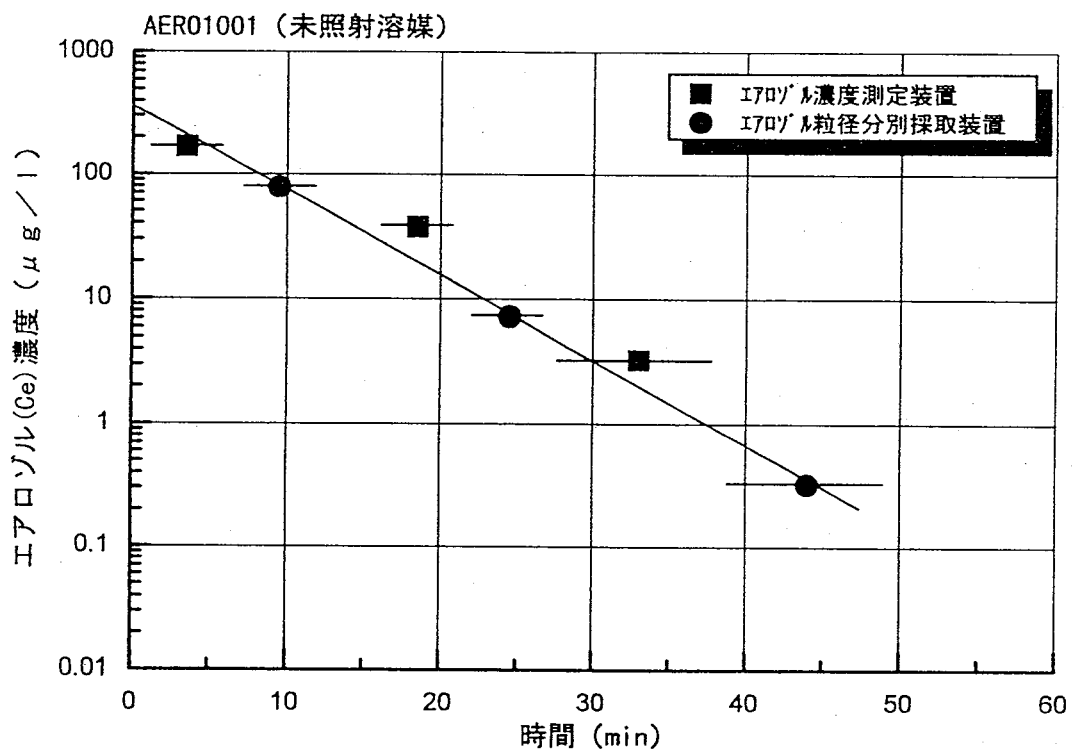


図5 AERO1001 (未照射) 放射化分析によるエアロゾル (Ce) 濃度の減衰

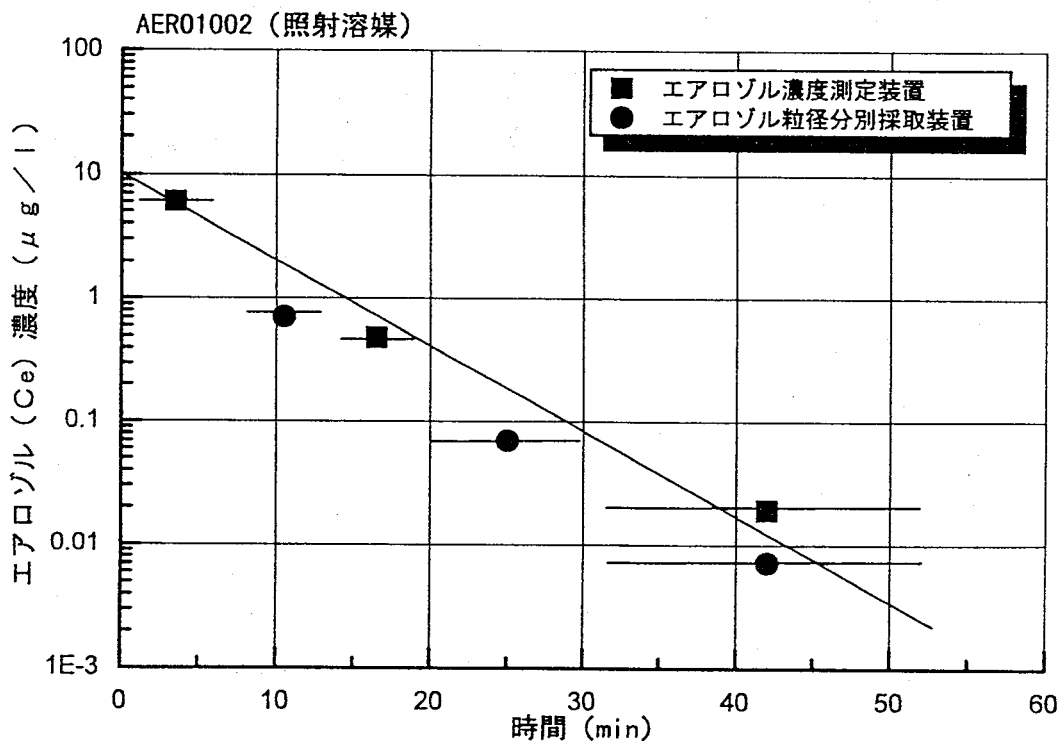


図6 AERO1002 (照射) 放射化分析によるエアロゾル (Ce) 濃度の減衰

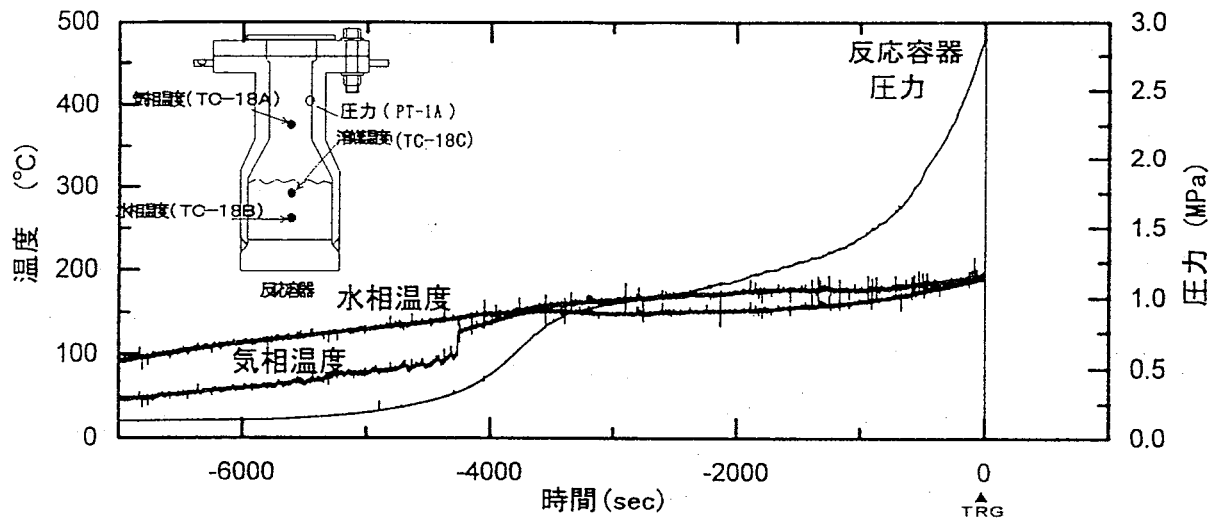


図7 AERO3001 反応容器内の温度と圧力の変化

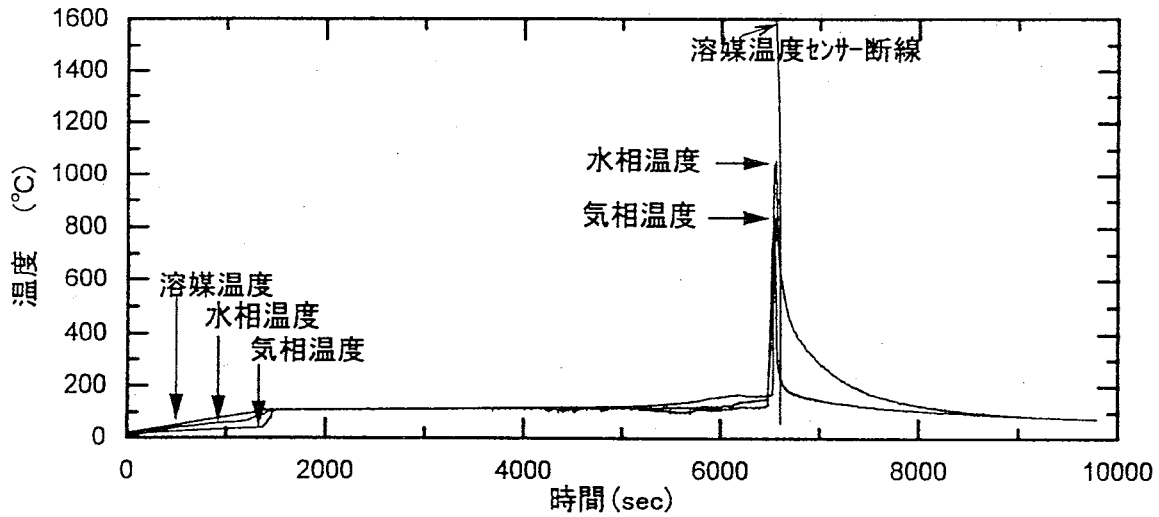


図8 AERO3002 反応容器内の温度の変化

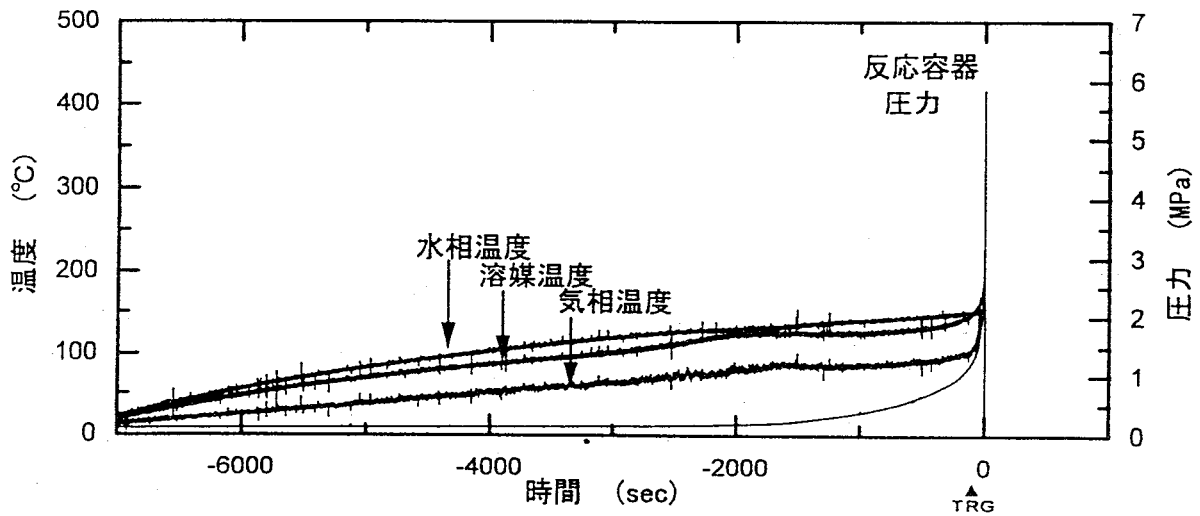


図9 AERO3003 反応容器内の温度と圧力の変化

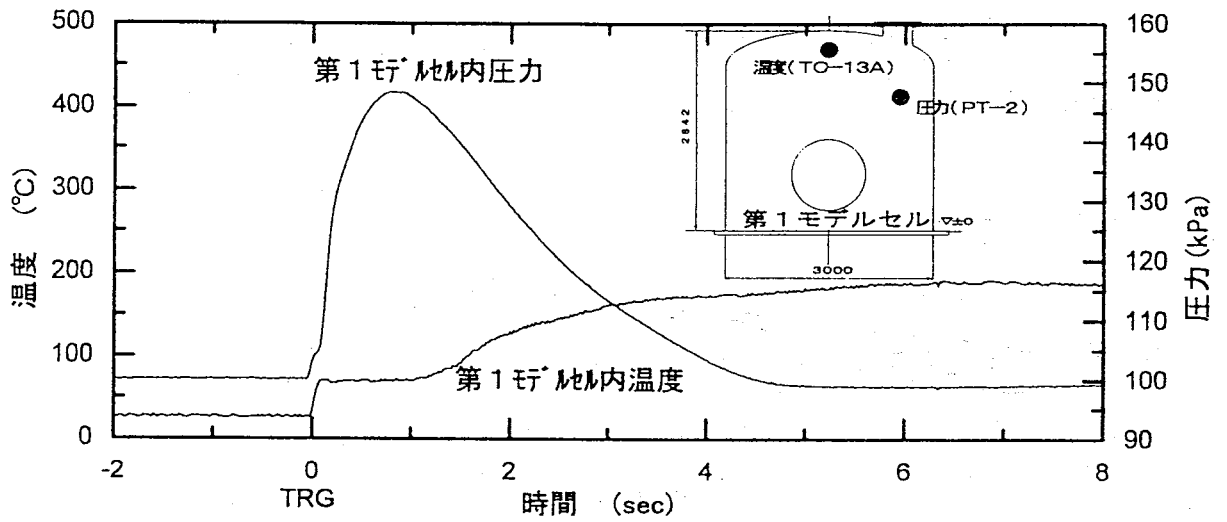


図10 AERO3001 第1モデルセル内の温度と圧力の変化

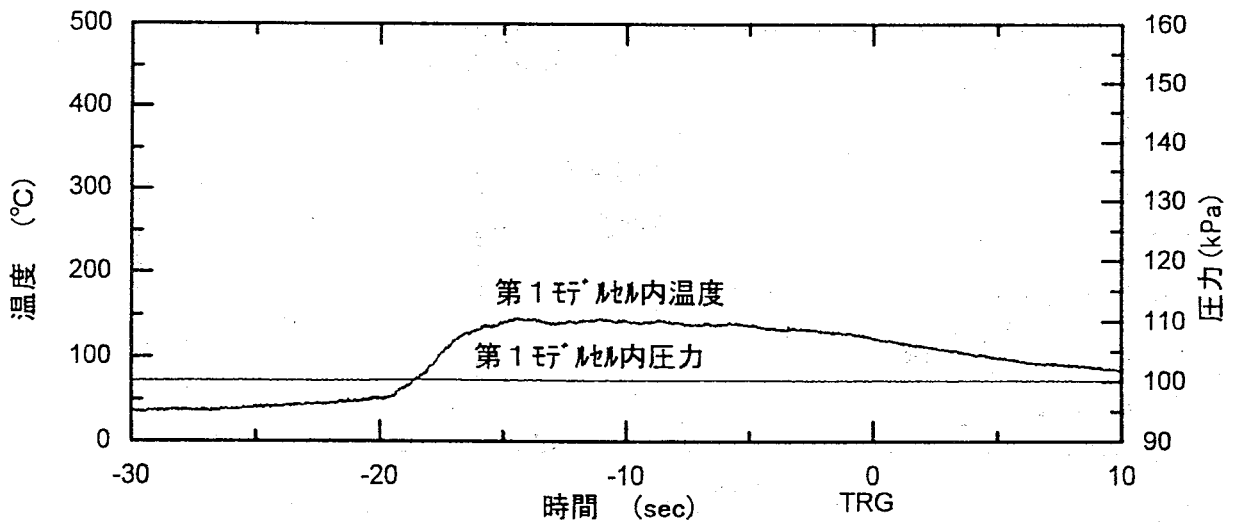


図11 AERO3002 第1モデルセル内の温度と圧力の変化

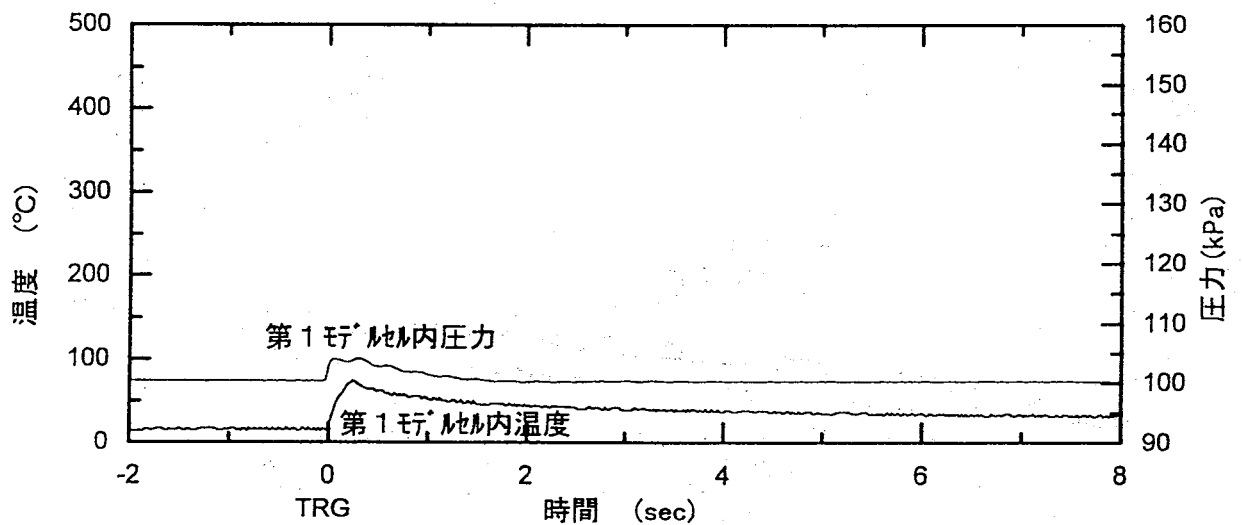


図12 AERO3003 第1モデルセル内の温度と圧力の変化

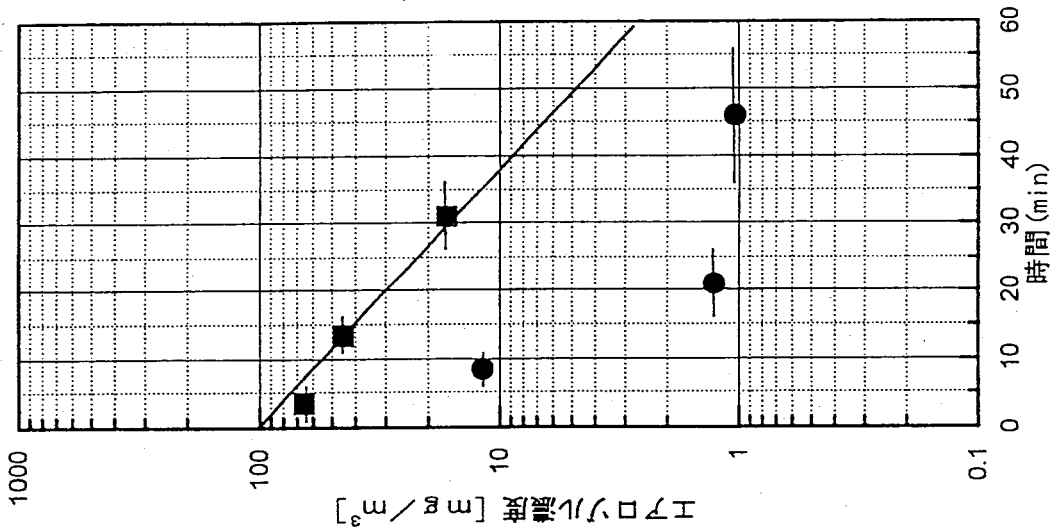


図13 AER03001 重量測定によるエアロゾル (Ce+ミスト) 濃度の減衰

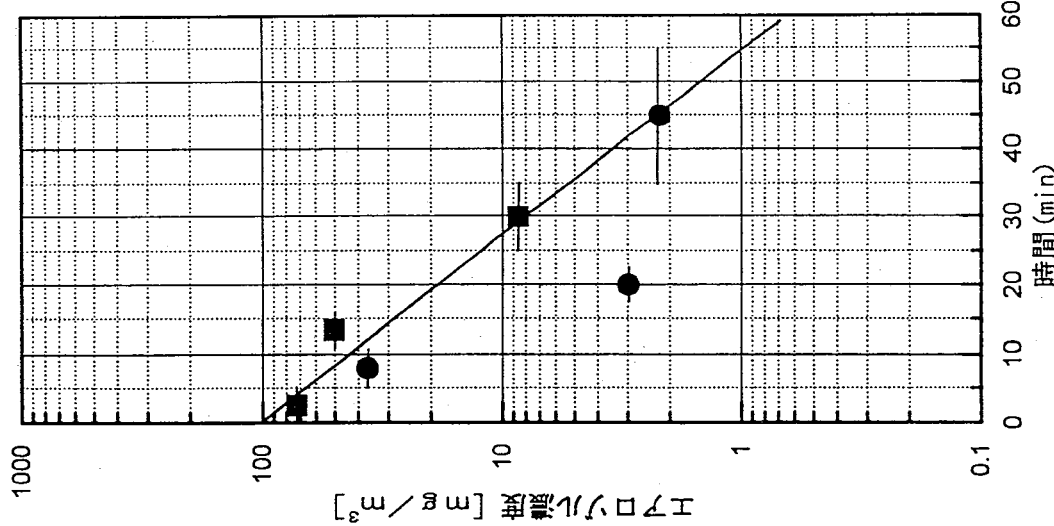


図14 AER03002 重量測定によるエアロゾル (Ce+ミスト) 濃度の減衰

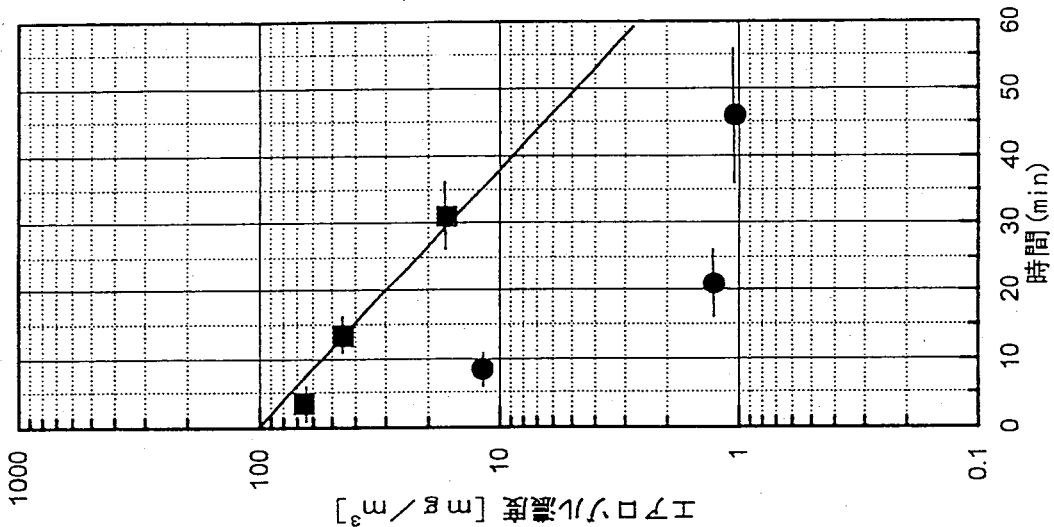


図15 AER03003 重量測定によるエアロゾル (Ce+ミスト) 濃度の減衰

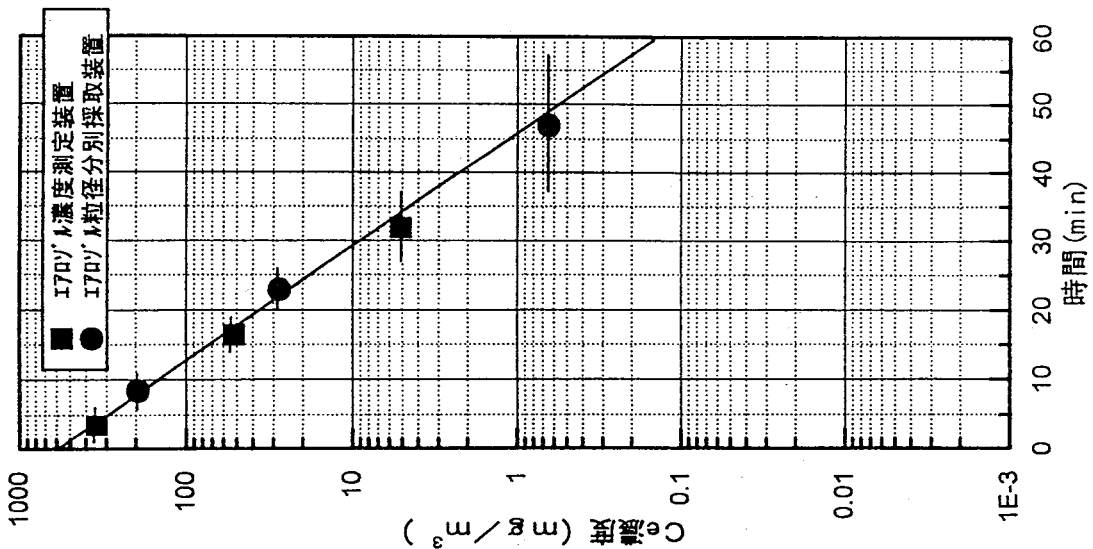


図16 AERO3001 放射化分析によるエアロゾル (Ce) 濃度の減衰

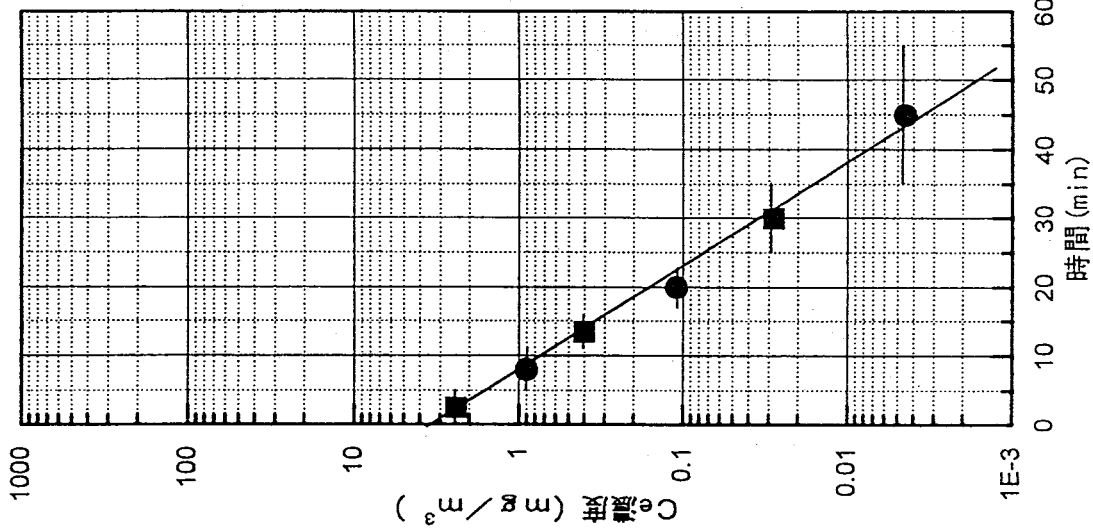


図17 AERO3002 放射化分析によるエアロゾル (Ce) 濃度の減衰

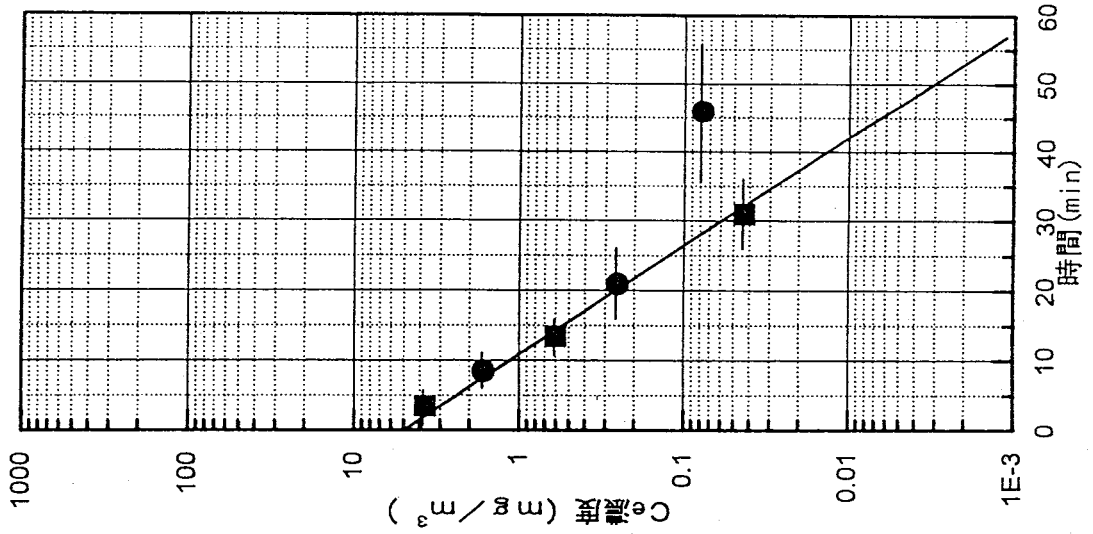


図18 AERO3003 放射化分析によるエアロゾル (Ce) 濃度の減衰

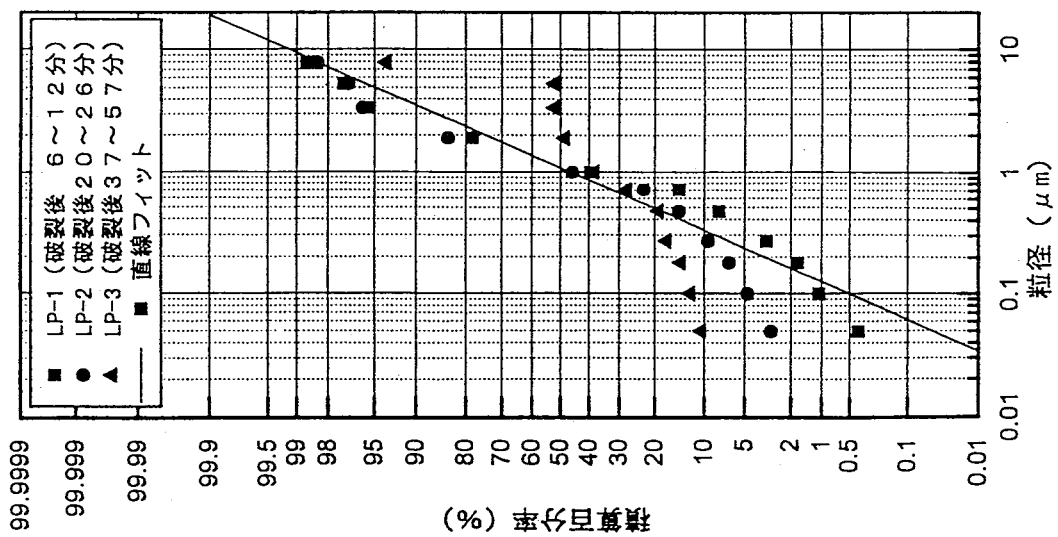
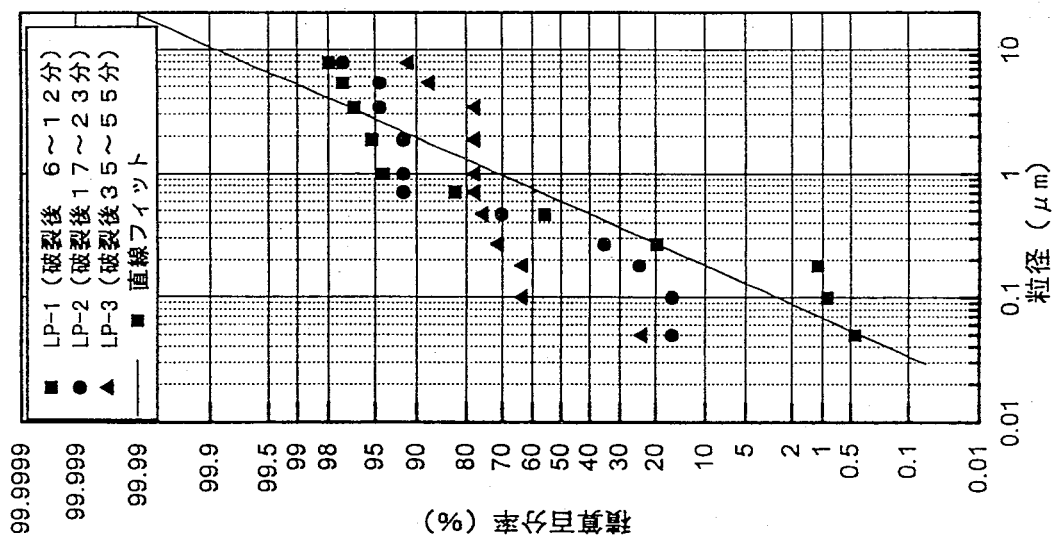
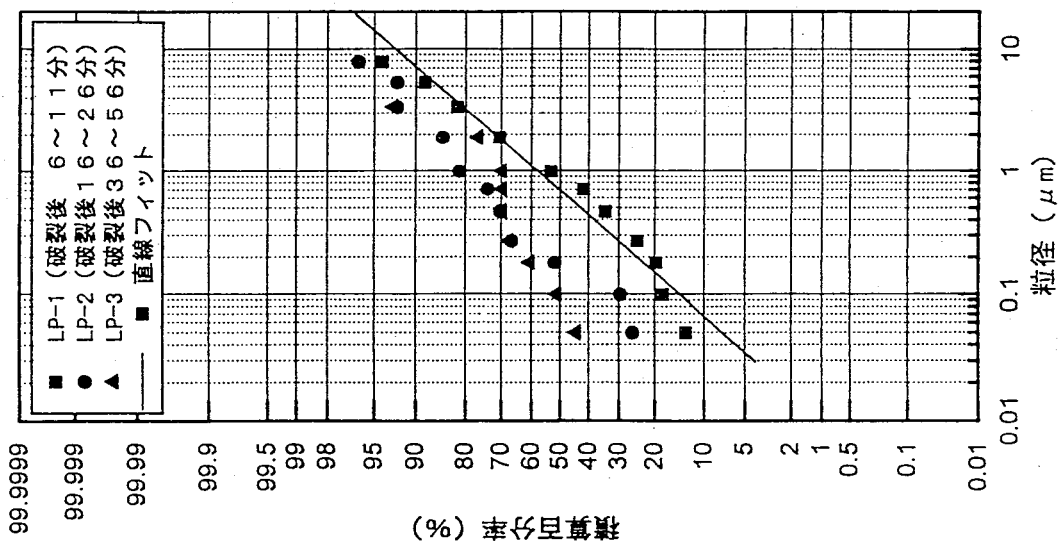


図19 AERO3001 重量測定によるエアロゾル (Ce+ミスト) の積算質量分布

図20 AERO3002 重量測定によるエアロゾル (Ce+ミスト) の積算質量分布

図21 AERO3003 重量測定によるエアロゾル (Ce+ミスト) の積算質量分布

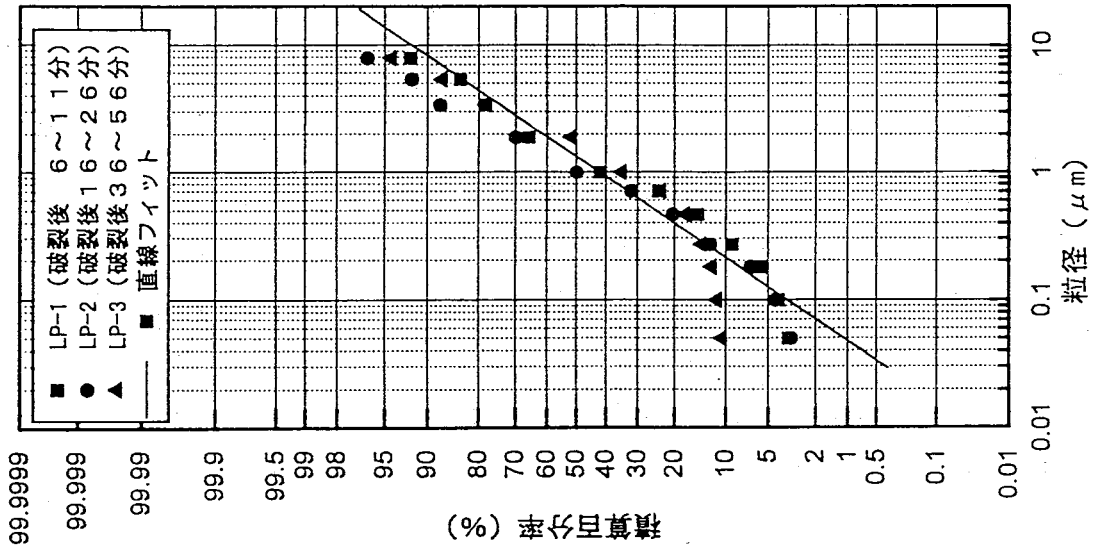


図22 AERO3001 放射化分析によるエアロゾル (Ce) の積算質量分布

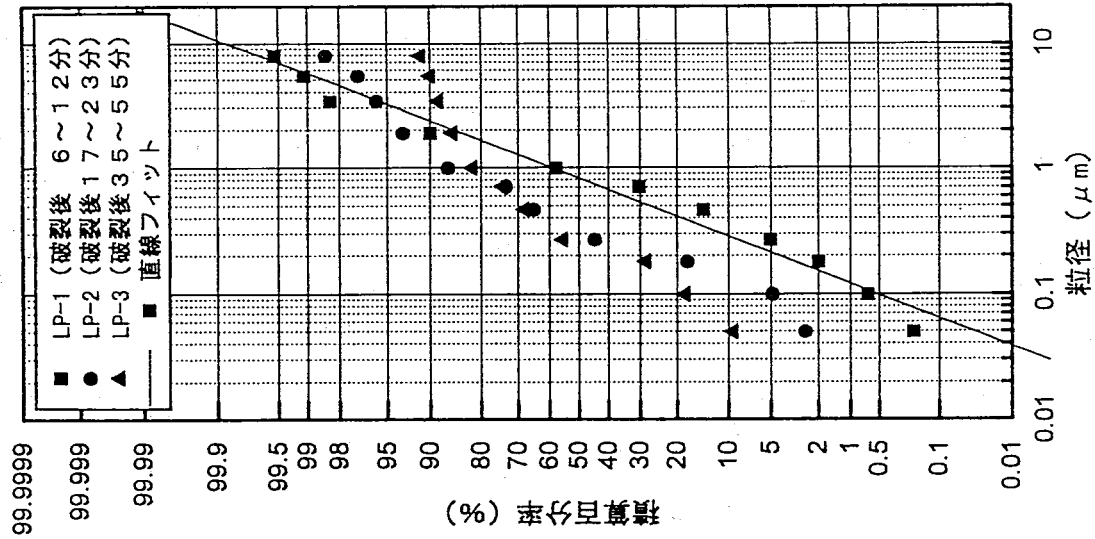


図23 AERO3002 放射化分析によるエアロゾル (Ce) の積算質量分布

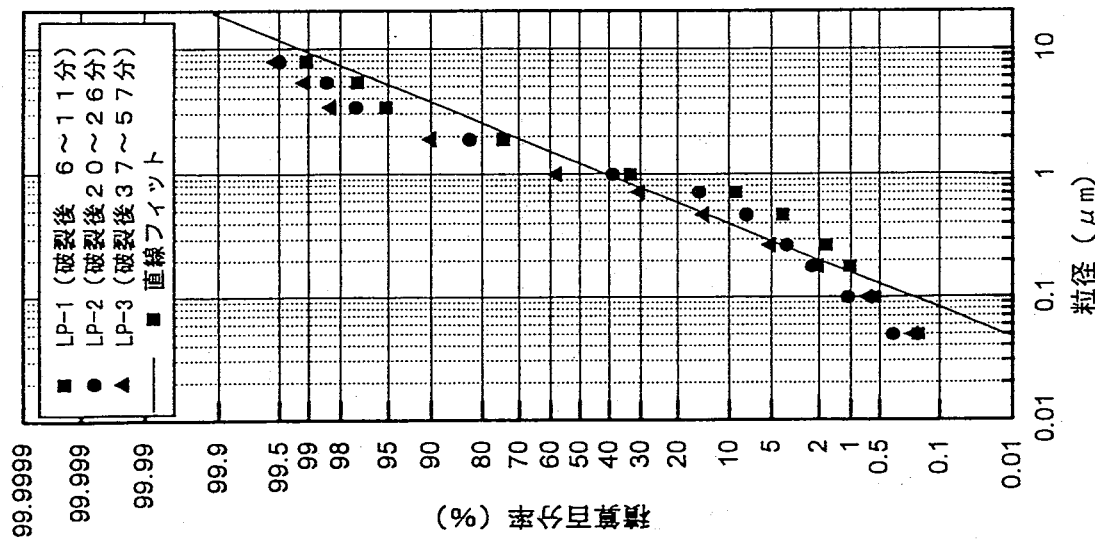


図24 AERO3003 放射化分析によるエアロゾル (Ce) の積算質量分布

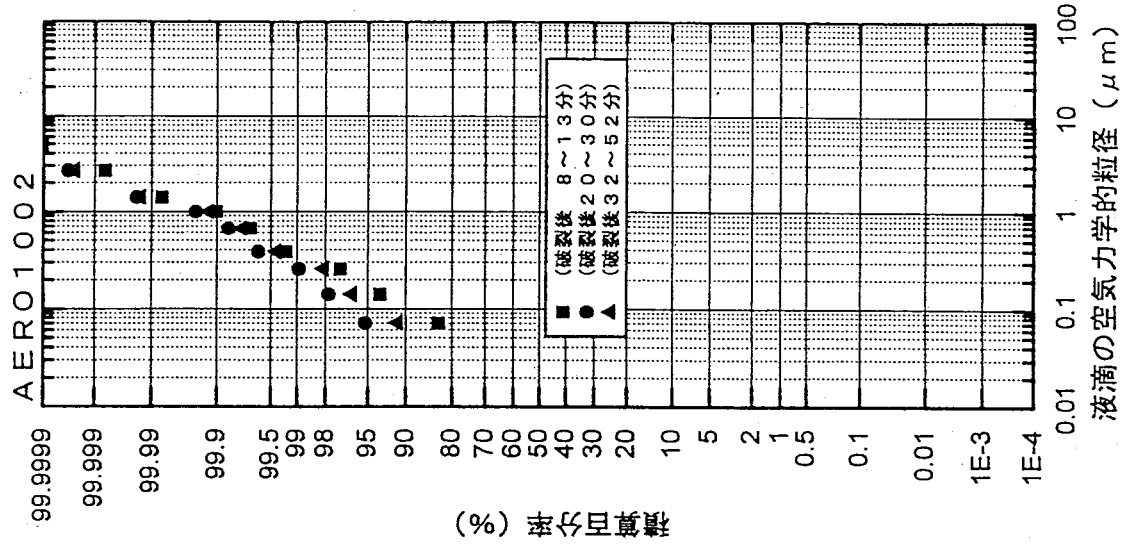


図25 噴出溶媒の燃焼の有無と Ceの積算質量分布との関係

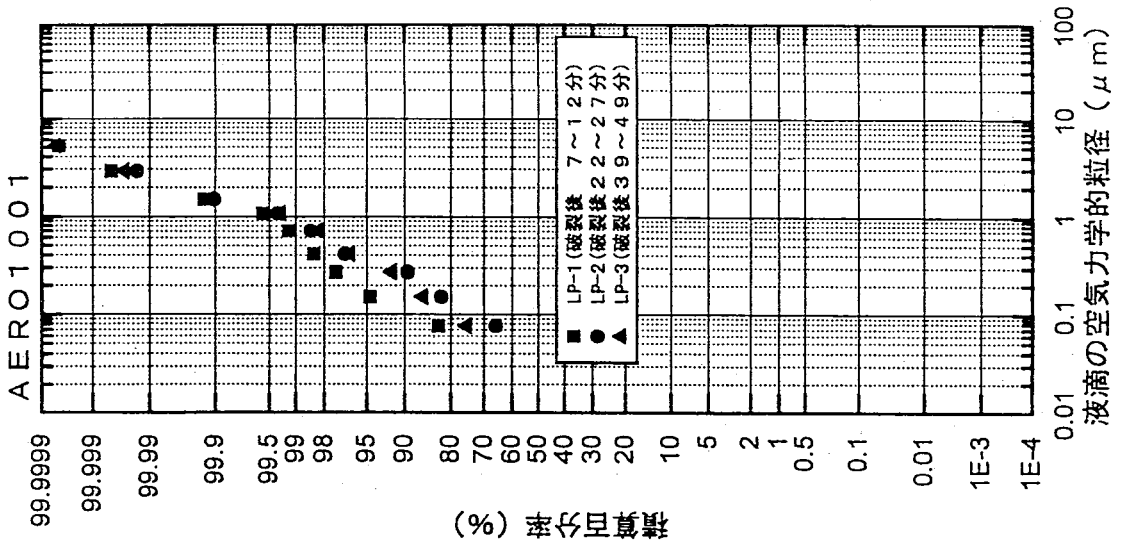


図26 AERO1001 セル内気相の初期 (t=0) 液滴の積算個数分布

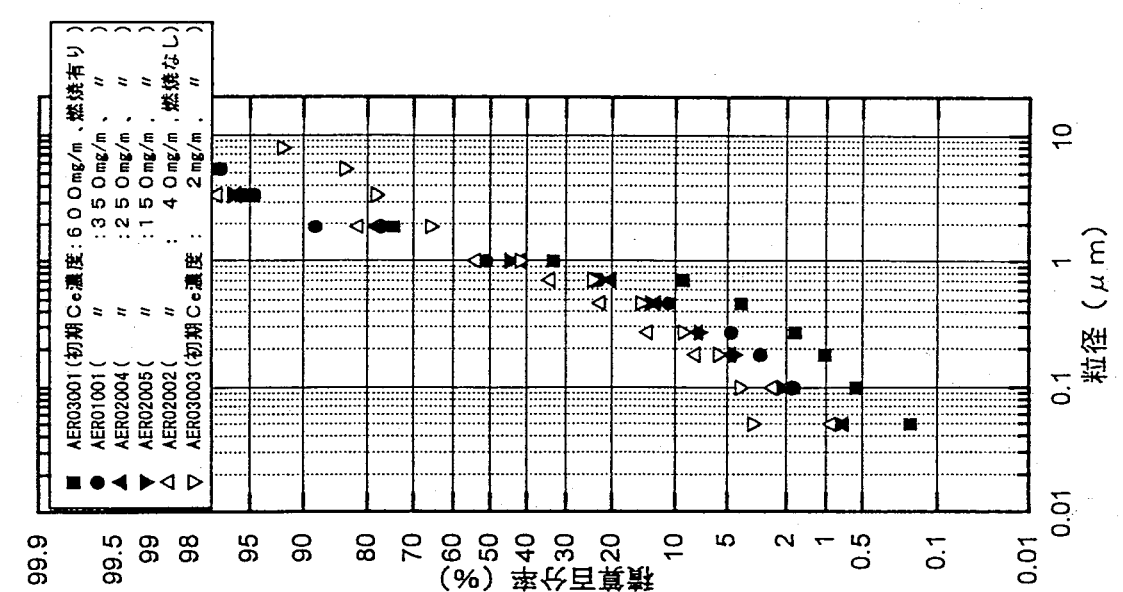


図27 AERO1002 セル内気相の初期 (t=0) 液滴の積算個数分布

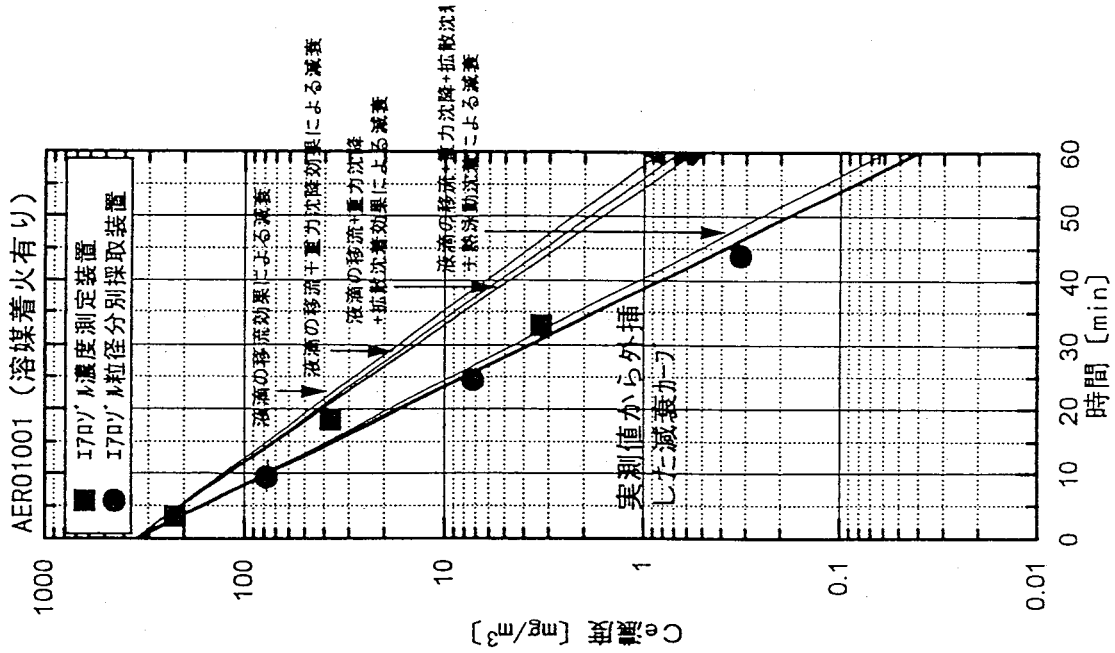


図 28 AER01001 (溶媒着火有り) 液滴の沈降、沈着効果による濃度減衰

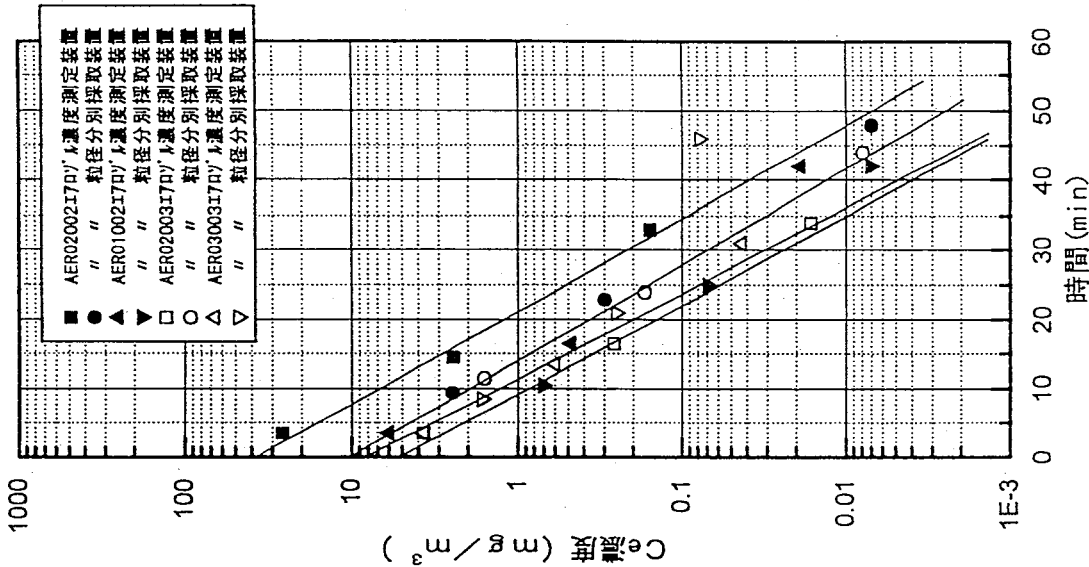


図 29 セル内のCe濃度の減衰 (噴出溶媒の燃焼無し)

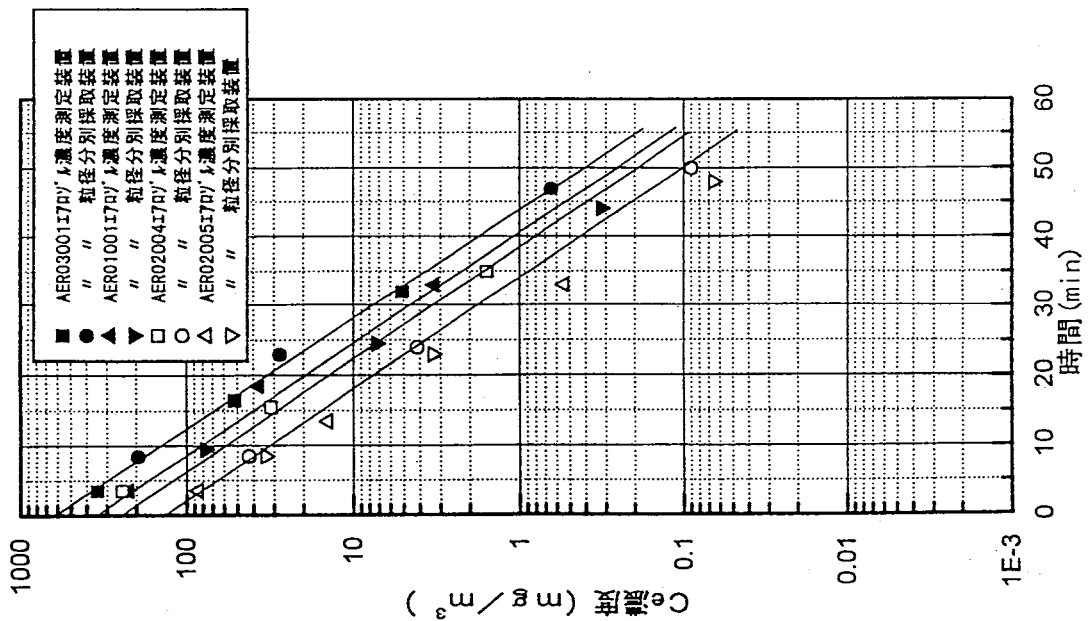


図 30 セル内のCe濃度の減衰 (噴出溶媒の燃焼有り)

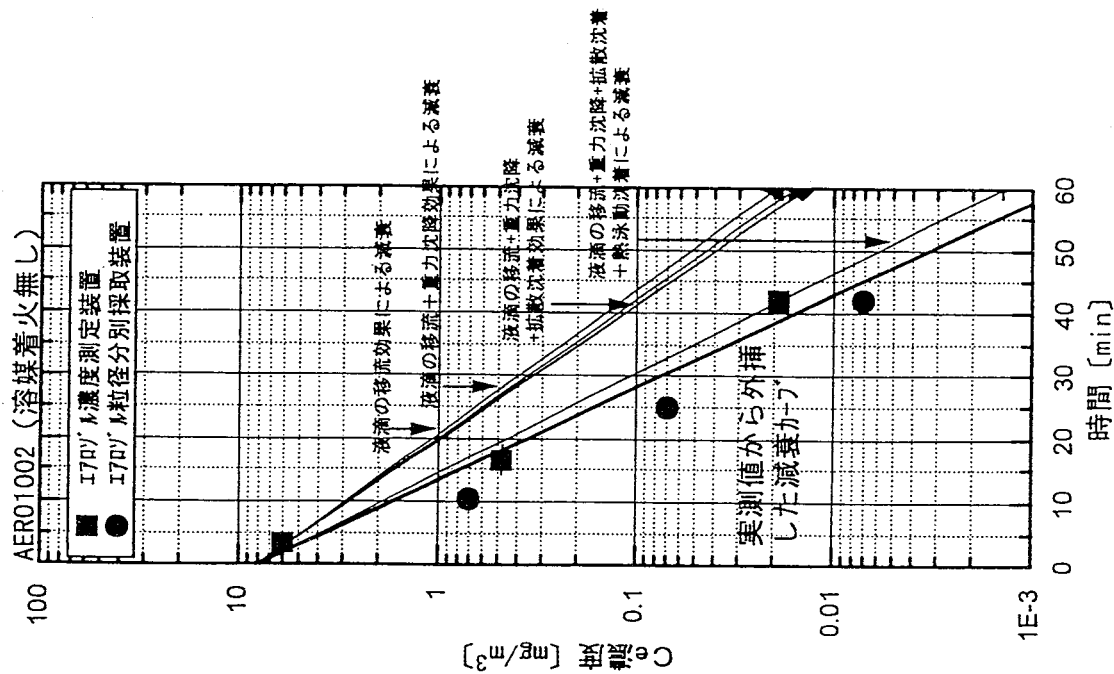


図31 AERO1002 Ce濃度の実測値と
液滴の沈降、沈着効果による濃度減衰

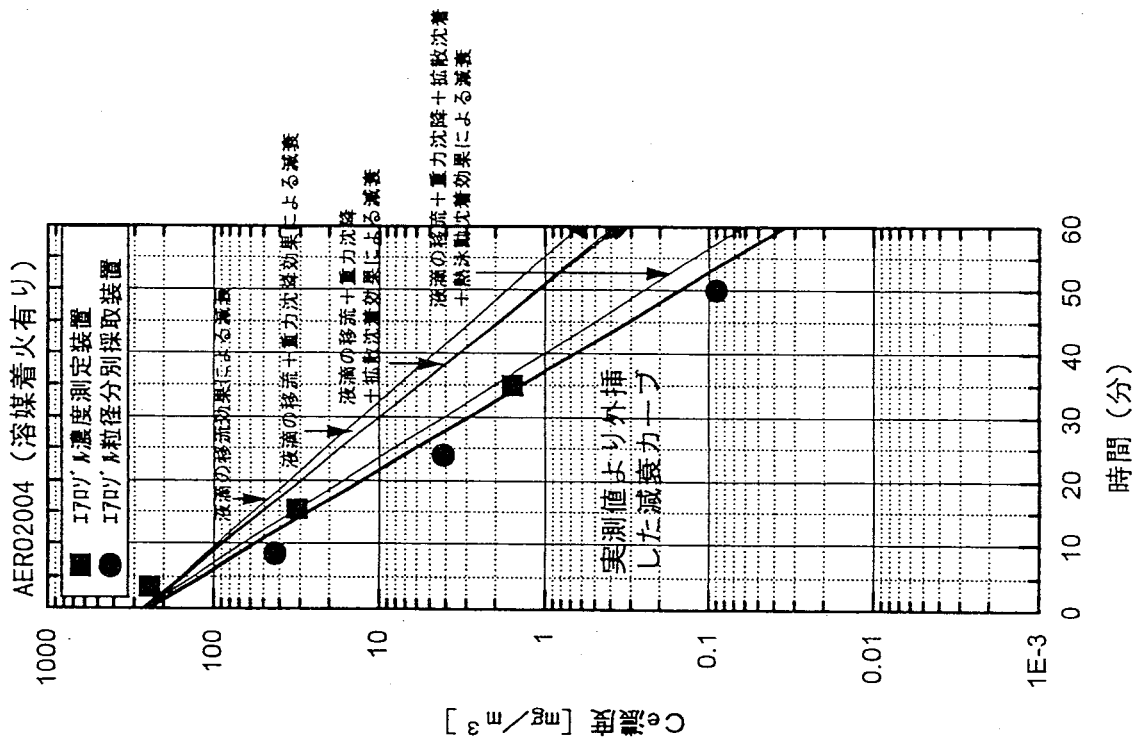
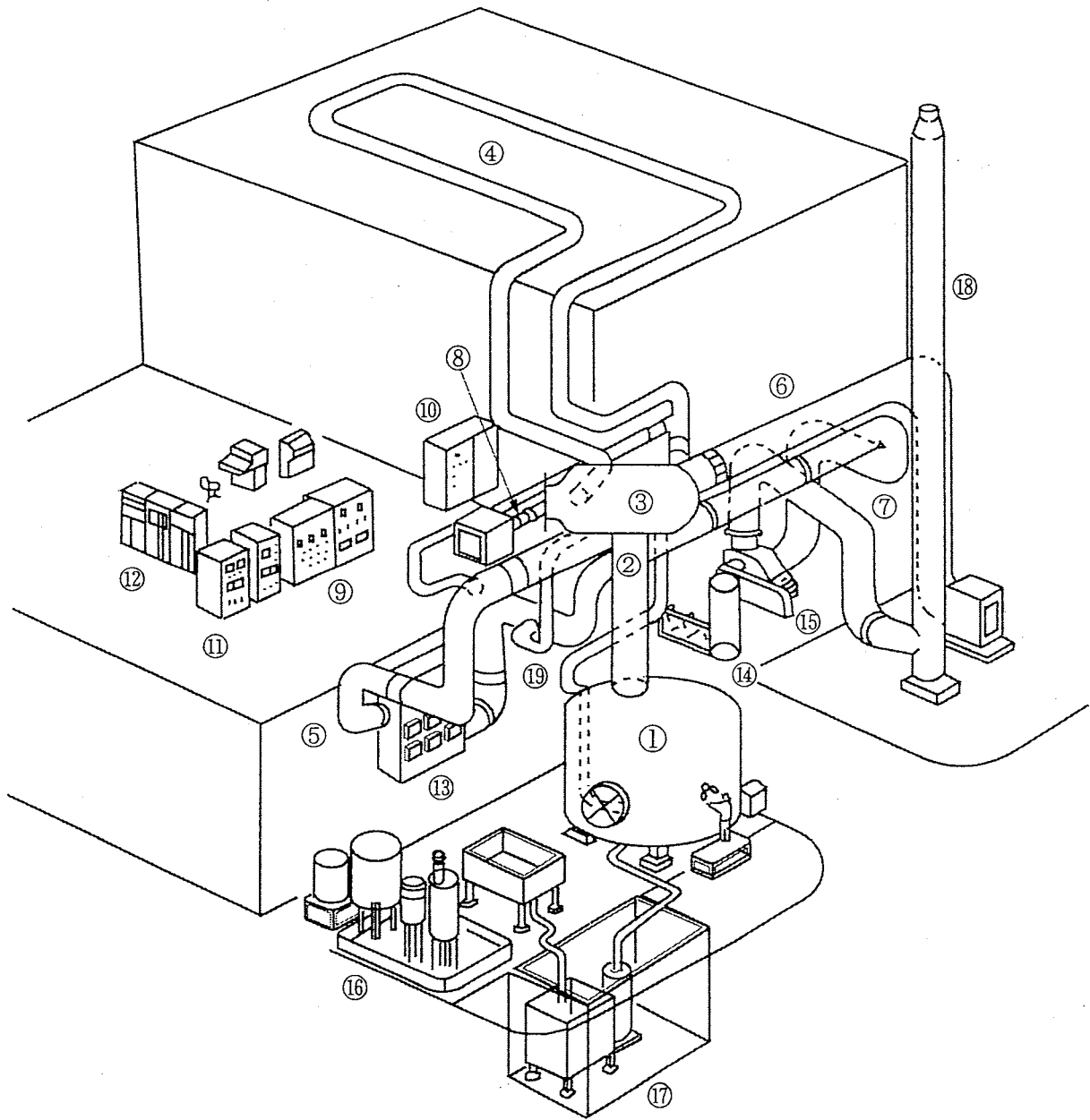


図32 AERO2004 Ce濃度の実測値と
液滴の沈降、沈着効果による濃度減衰

付録

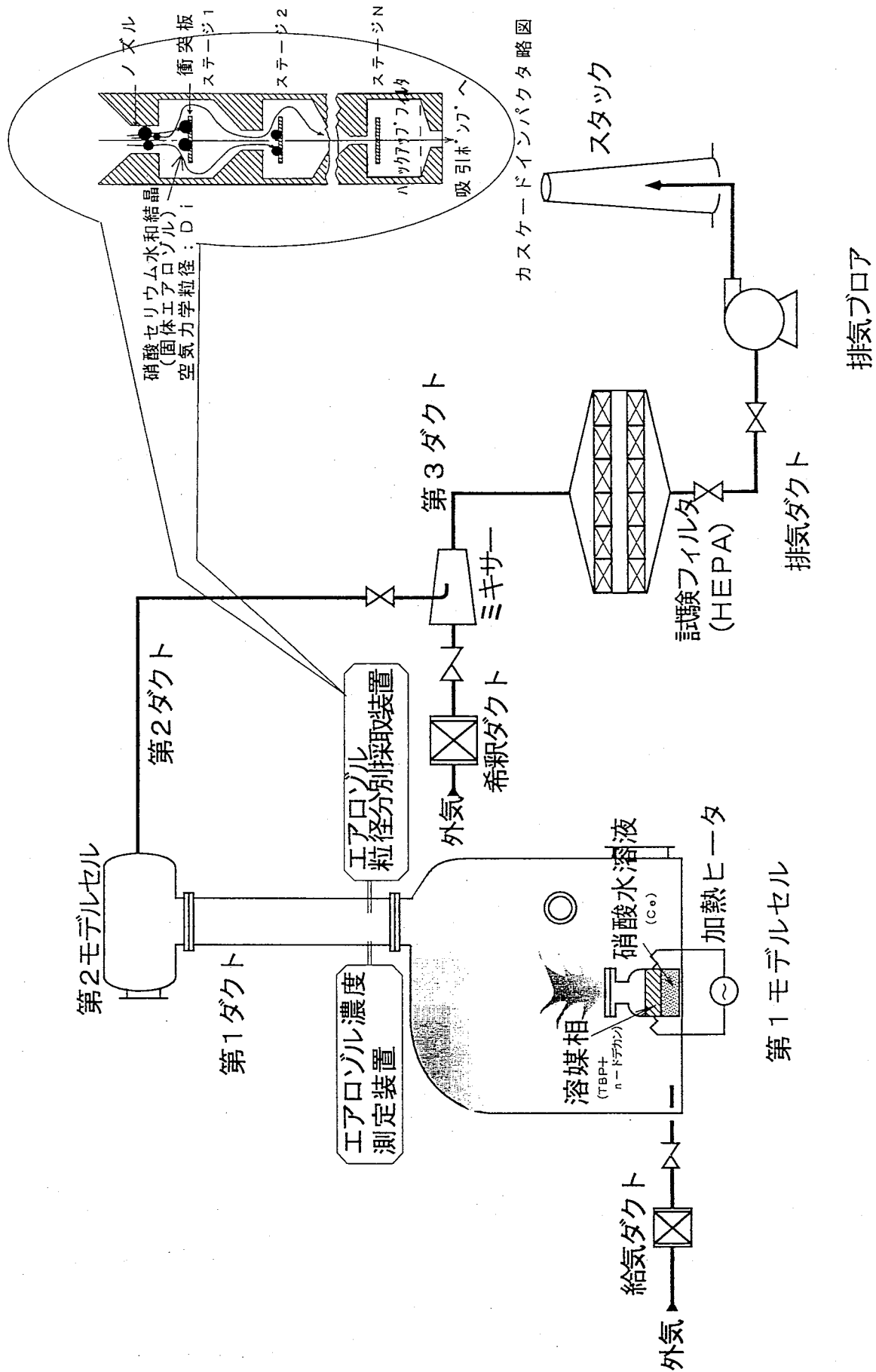
実証試験装置の鳥瞰図及び装置各部の寸法とセンサー配置を付録A1～A11に示す。

- A1 セル換気系実証試験装置の鳥瞰図
- A2 エアロゾル試験装置の模式図
- A3 反応容器内の寸法と圧力・温度センサー位置
- A4 第1モデルセル内の寸法と圧力・温度センサー位置
- A5 第1ダクト及び第2モデルセルの寸法と圧力・温度センサー位置
- A6 第2ダクトの寸法と圧力・温度・流量センサー位置
- A7 希釈ダクト、第3ダクト及び排気ダクトの寸法と圧力・温度・流量センサー位置
- A8 逆流防止ダンパーの構造
- A9 イグナイタの取り付け位置
- A10 エアロゾル濃度測定装置フローシート
- A11 エアロゾル粒径分別採取装置フローシート

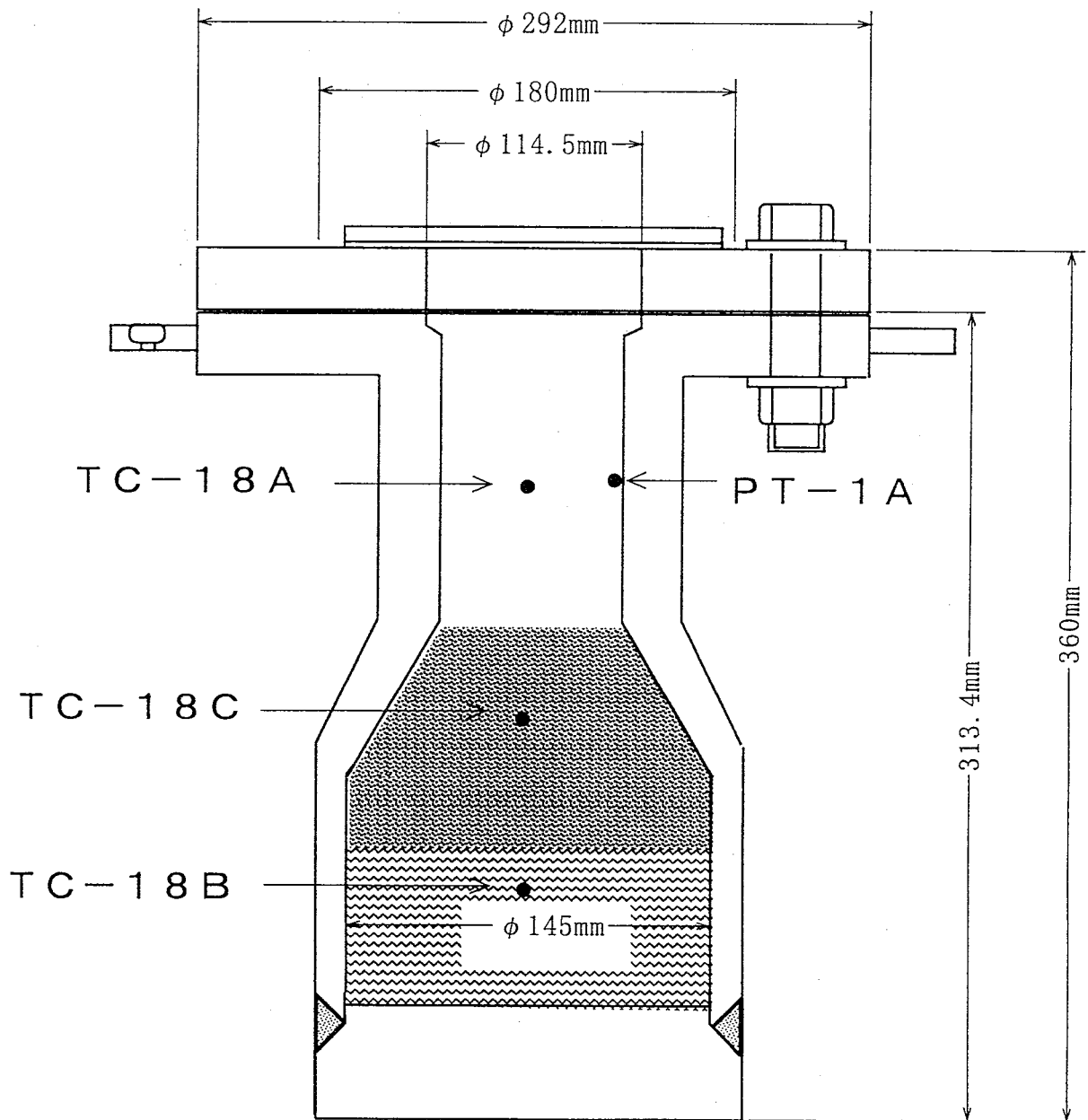


①	第1モデルセル	⑧	給気ダクト	⑮	排気ブロア
②	第1ダクト	⑨	低速プロセス計装系	⑯	水溶媒タンク類
③	第2モデルセル	⑩	動力盤	⑰	廃液処理系
④	第2ダクト	⑪	高速プロセス計装系	⑱	スタック
⑤	第3ダクト	⑫	データ収録装置		
⑥	希釈ダクト	⑬	フィルタチェンバ		
⑦	排気ダクト	⑭	圧縮空気供給装置		

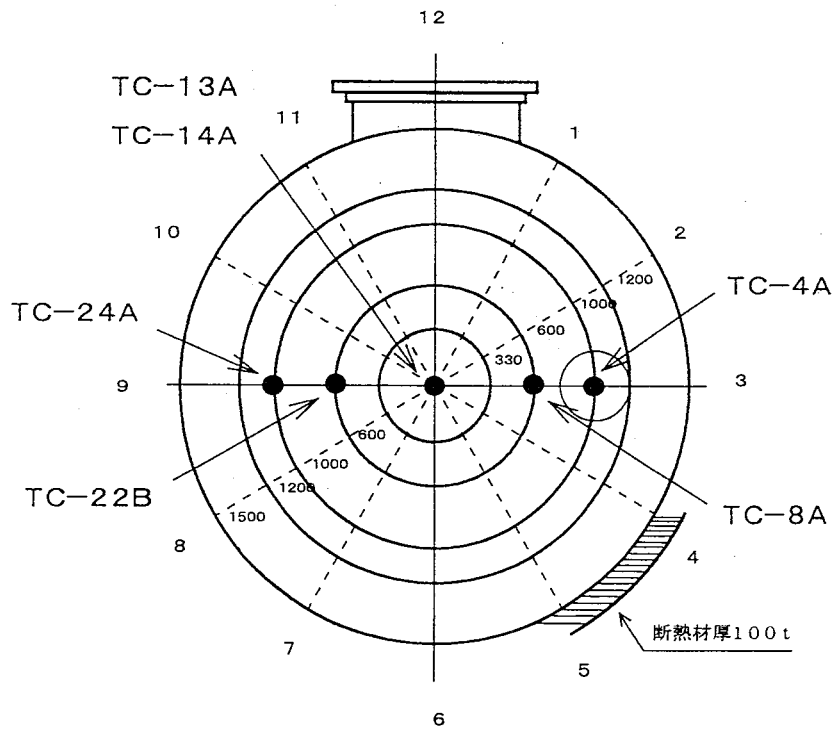
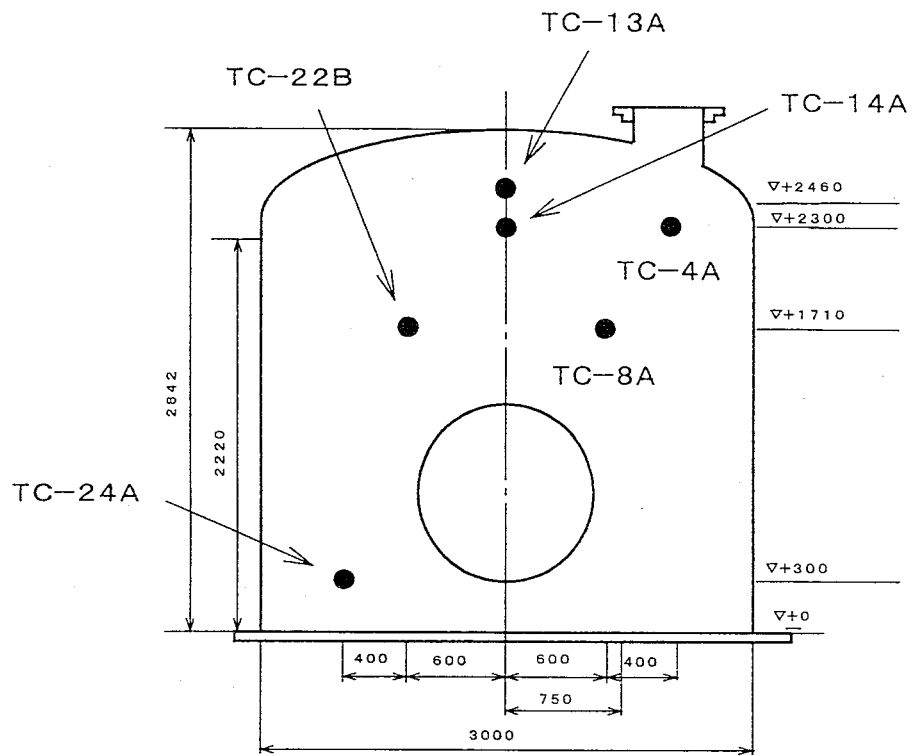
付録A1 セル換気系実証試験装置の鳥瞰図



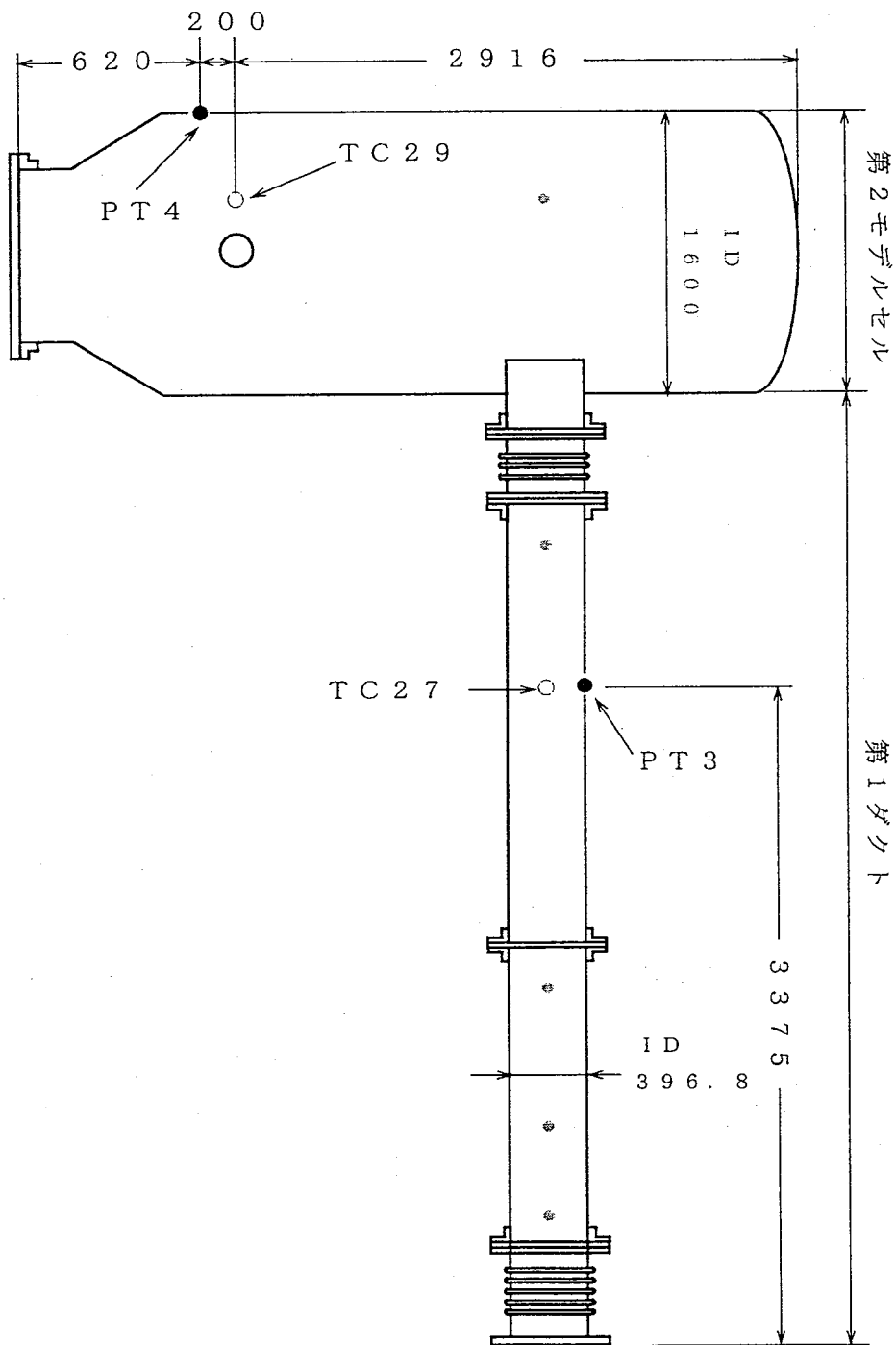
付録A 2 溶媒と硝酸の熱分解反応に関わるエアロゾル発生試験 (エアロゾル試験) 装置模式図



付録 A 3 反応容器の寸法と圧力・温度センサー位置

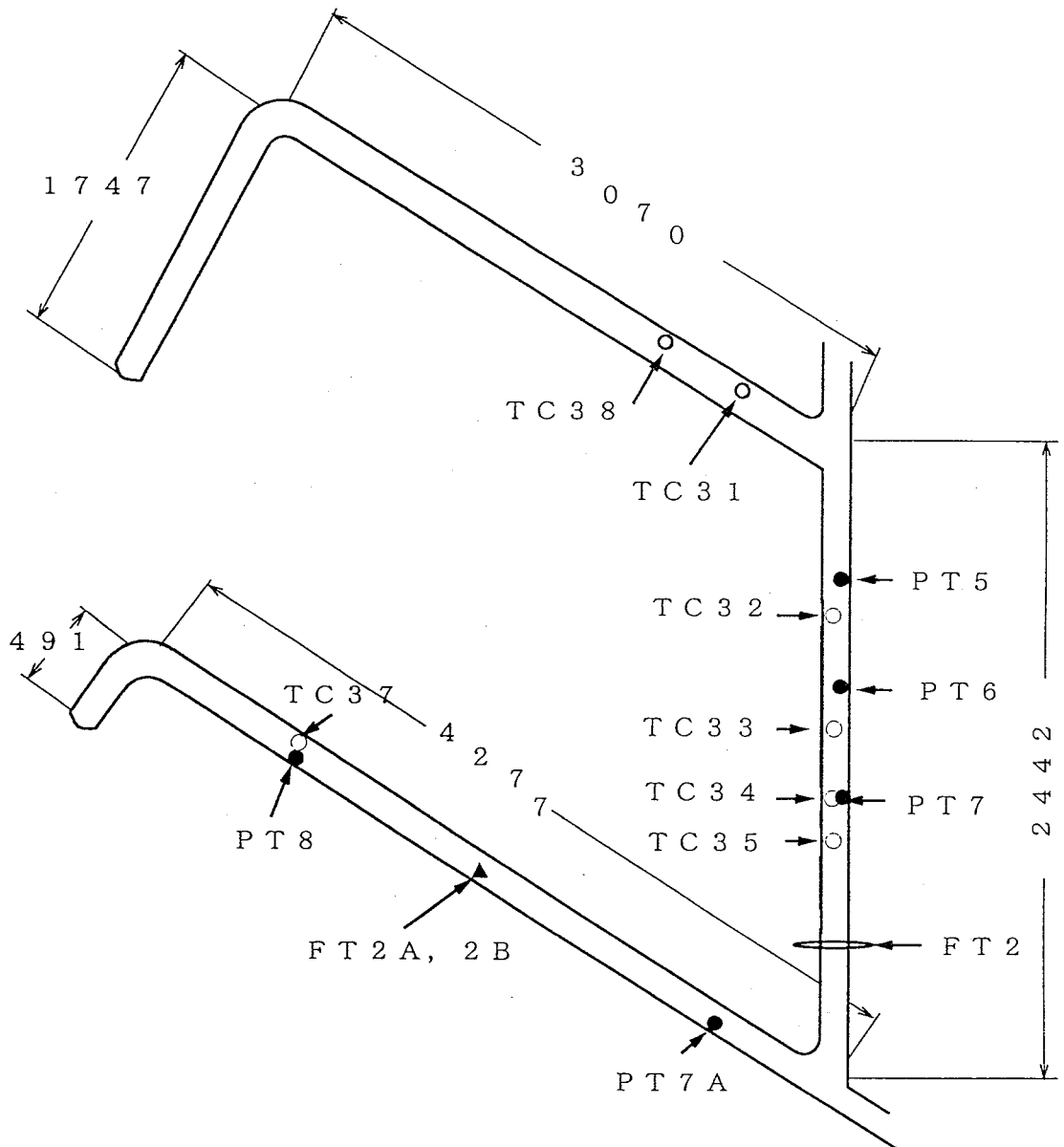


付録A 4 第1モデルセルの寸法と圧力・温度センサの配置

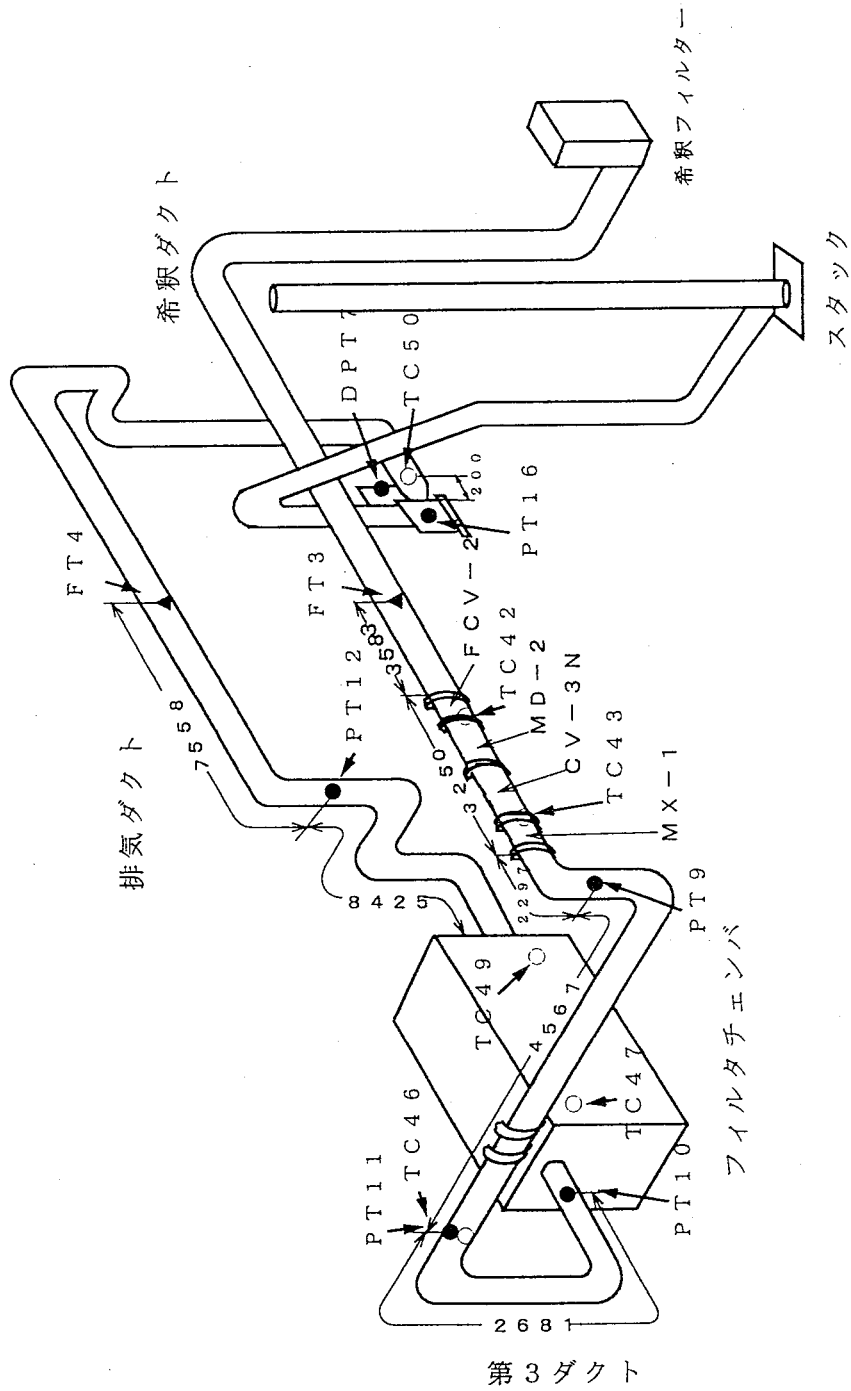


付録 A 5

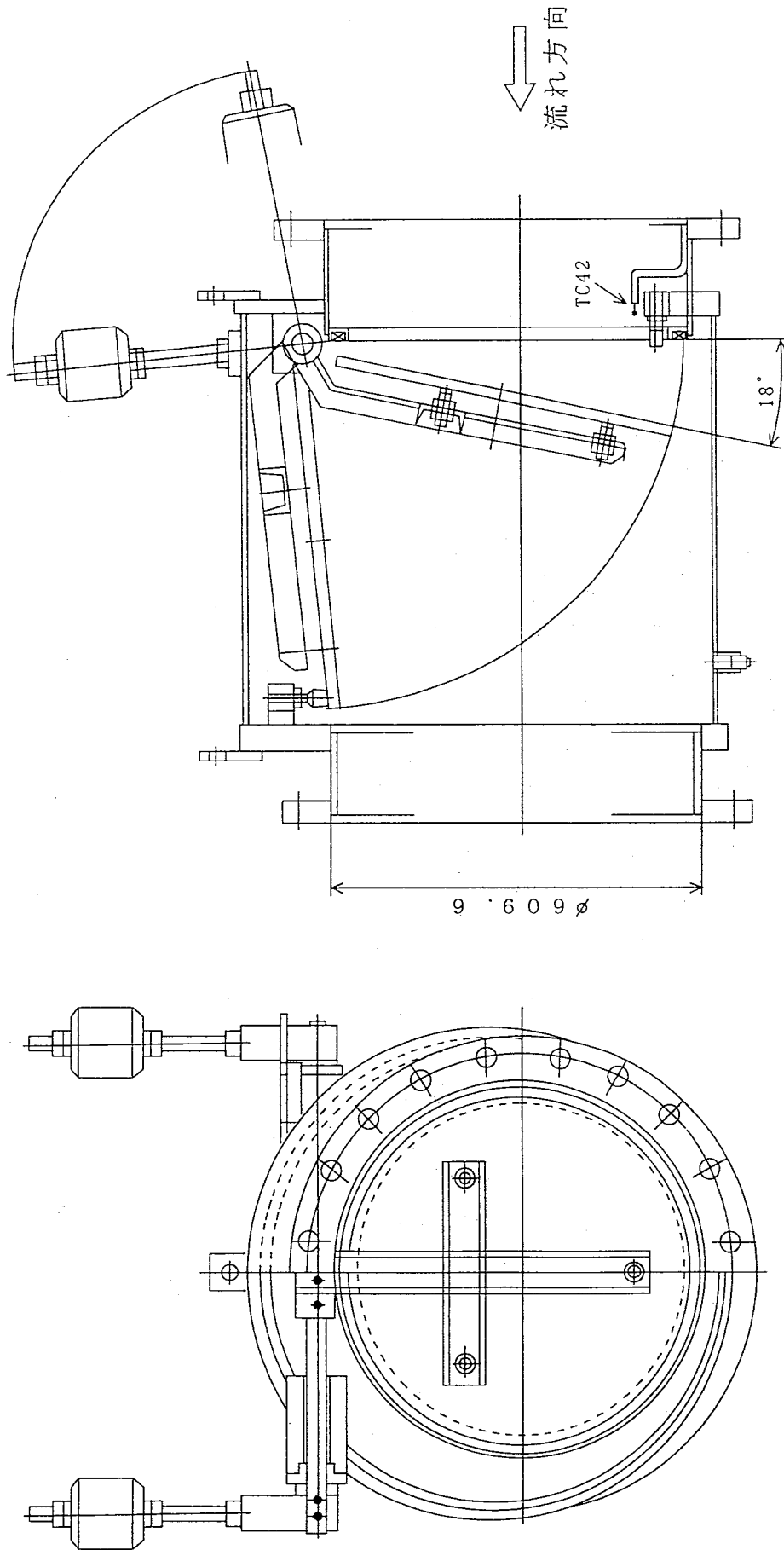
第1ダクト及び第2モデルセルの寸法と圧力・温度センサー位置



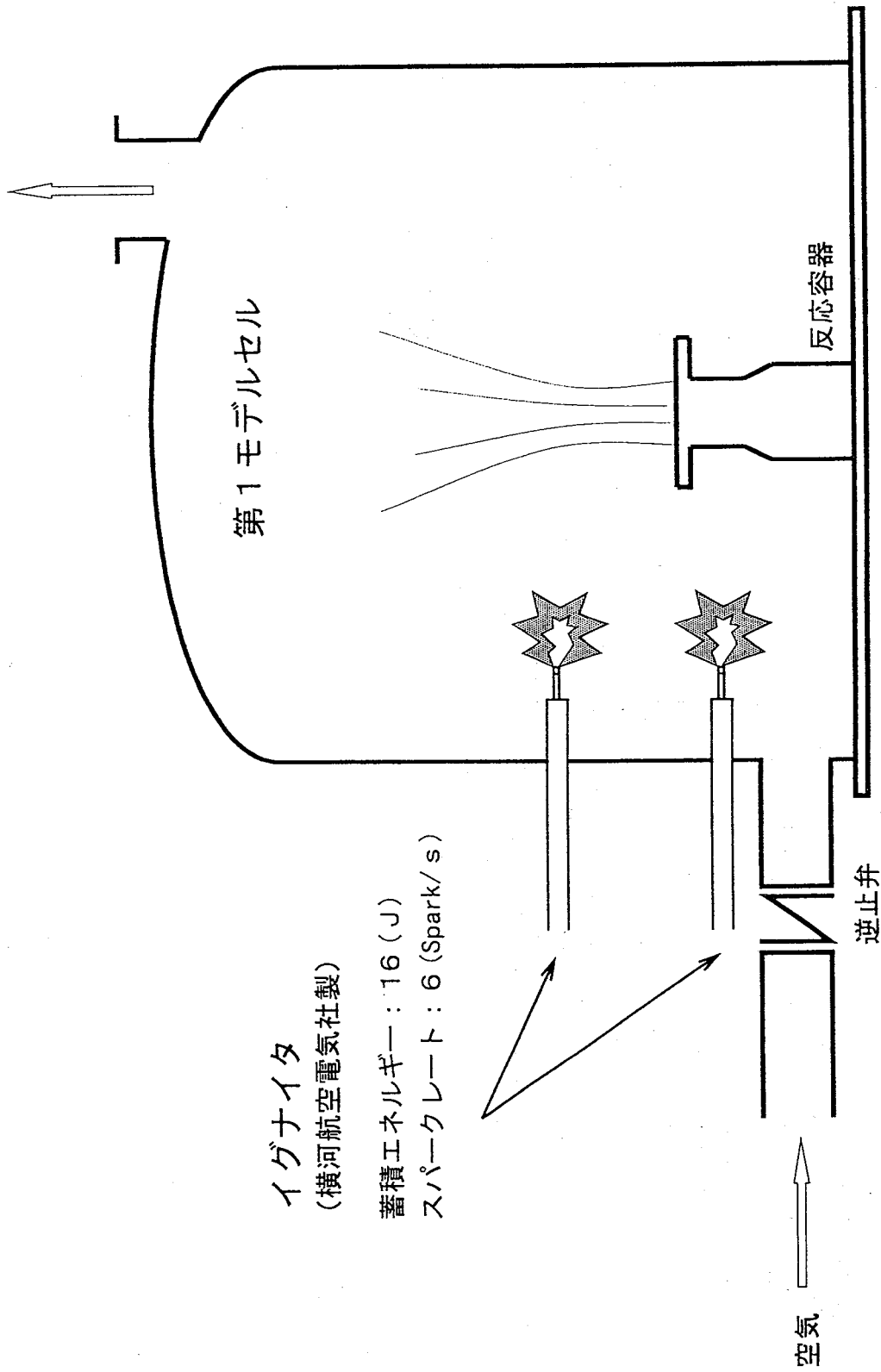
付録A6 第2ダクトの寸法と圧力・温度・流量センサーの配置



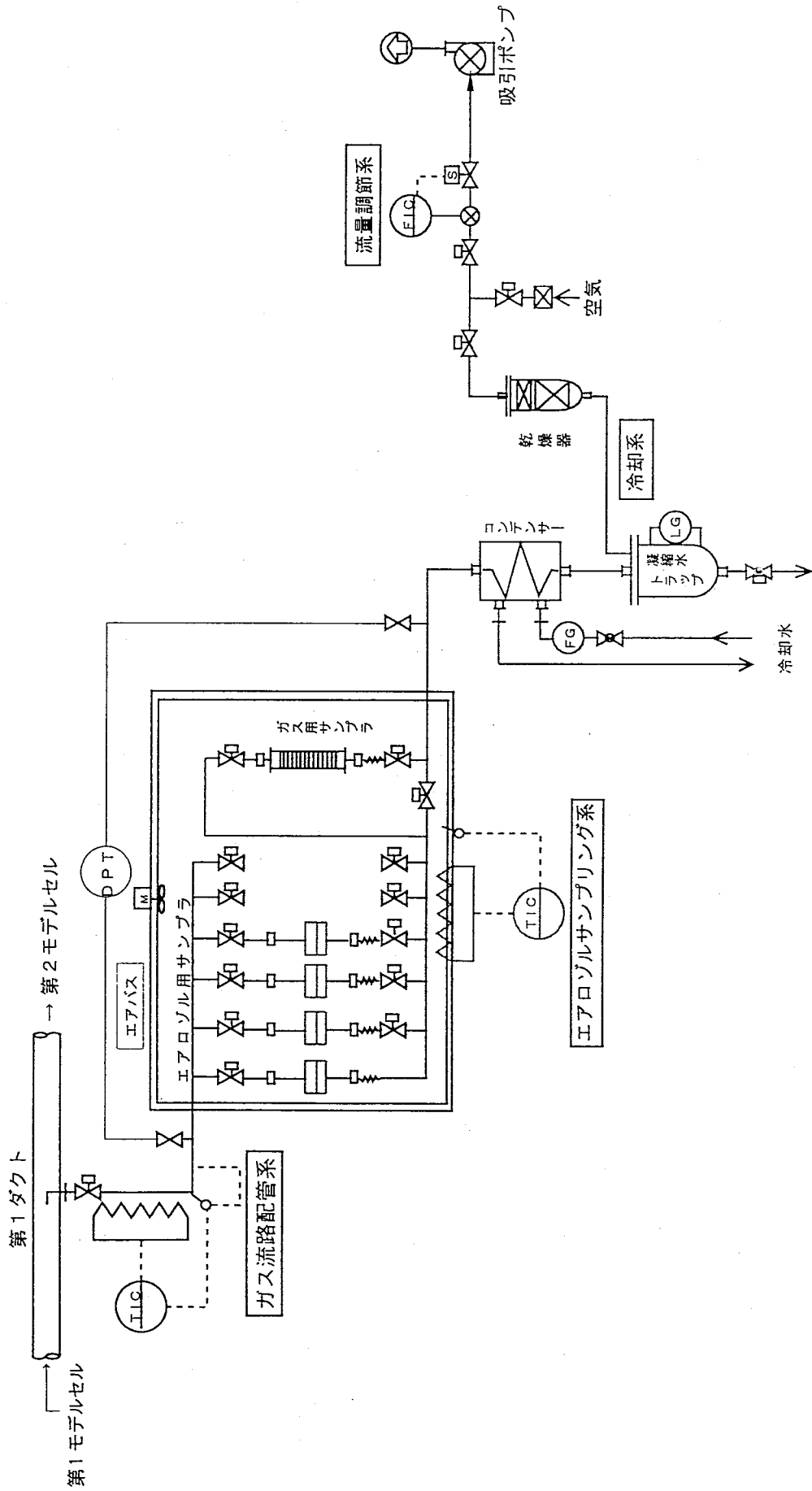
付録A 7 希釈ダクト、第3ダクト及び排気ダクトの寸法と圧力・温度・流量センサーの配置



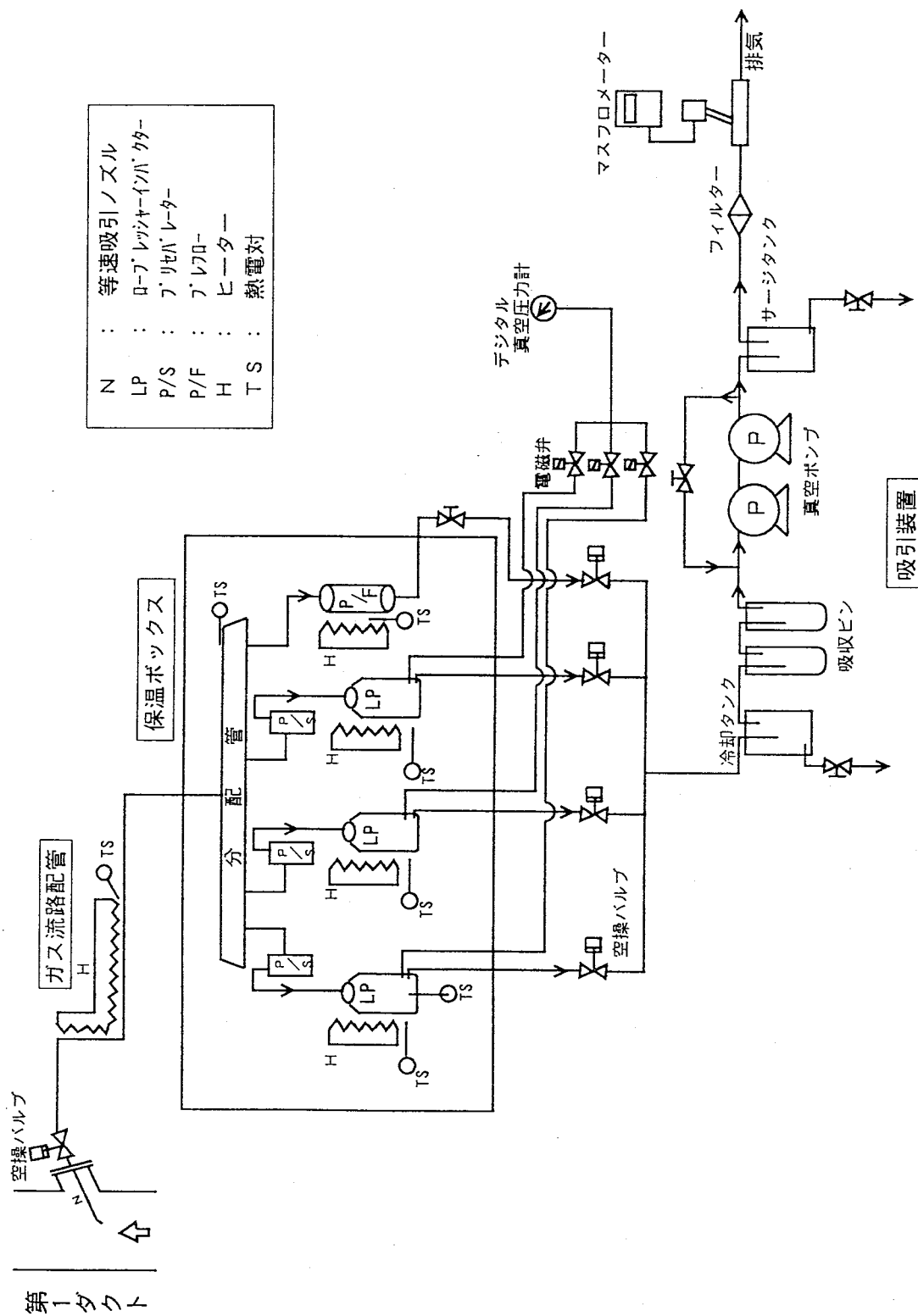
付録 A 8 逆流防止ダンパーの構造



付録A9 イグナイタの取り付け位置



付録A10 エアロゾル濃度測定装置フローシート



付録A11 エアロゾル粒径分別採取装置フローシート

This is a blank page.

国際単位系 (SI) と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分, 時, 日	min, h, d
度, 分, 秒	°, ', "
リットル	l, L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

1 eV = 1.60218 × 10⁻¹⁹ J
 1 u = 1.66054 × 10⁻²⁷ kg

表5 SI接頭語

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

表3 固有の名称をもつ SI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s ⁻¹
力	ニュートン	N	m·kg/s ²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N·m
工率, 放射束	ワット	W	J/s
電気量, 電荷	クーロン	C	A·s
電位, 電圧, 起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラド	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光度	ルーメン	lm	cd·sr
照射度	ルクス	lx	lm/m ²
放射能	ベクレル	Bq	s ⁻¹
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	Å
バ	b
バル	bar
ガリ	Gal
キュリ	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

1 Å = 0.1 nm = 10⁻¹⁰ m
 1 b = 100 fm = 10⁻²⁸ m²
 1 bar = 0.1 MPa = 10⁵ Pa
 1 Gal = 1 cm/s² = 10⁻² m/s²
 1 Ci = 3.7 × 10¹⁰ Bq
 1 R = 2.58 × 10⁻⁴ C/kg
 1 rad = 1 cGy = 10⁻² Gy
 1 rem = 1 cSv = 10⁻² Sv

(注)

- 表1-5は「国際単位系」第5版, 国際度量衡局 1985年刊行による。ただし, 1 eV および 1 uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里, ノット, アール, ヘクトールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは, JISでは流体の圧力を表す場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC閣僚理事会指令では bar, barn および「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

換算表

力	N (=10 ⁵ dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
	9.80665	1	2.20462
	4.44822	0.453592	1

粘度 1 Pa·s (= N·s/m²) = 10 P (ポアズ) (g/(cm·s))

動粘度 1 m²/s = 10⁴ St (ストークス) (cm²/s)

圧	MPa (=10 bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg (Torr)	lbf/in ² (psi)
	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 ³	145.038
力	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322 × 10 ⁻⁴	1.35951 × 10 ⁻³	1.31579 × 10 ⁻³	1	1.93368 × 10 ⁻²
	6.89476 × 10 ⁻³	7.03070 × 10 ⁻²	6.80460 × 10 ⁻²	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J (=10 ⁷ erg)	kgf·m	kW·h	cal (計量法)	Btu	ft·lbf	eV
	1	0.101972	2.77778 × 10 ⁻⁷	0.238889	9.47813 × 10 ⁻⁴	0.737562	6.24150 × 10 ¹⁸
	9.80665	1	2.72407 × 10 ⁻⁶	2.34270	9.29487 × 10 ⁻³	7.23301	6.12082 × 10 ¹⁹
	3.6 × 10 ⁶	3.67098 × 10 ⁵	1	8.59999 × 10 ⁵	3412.13	2.65522 × 10 ⁶	2.24694 × 10 ²⁵
	4.18605	0.426858	1.16279 × 10 ⁻⁶	1	3.96759 × 10 ⁻³	3.08747	2.61272 × 10 ¹⁹
	1055.06	107.586	2.93072 × 10 ⁻⁴	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 ²¹
	1.35582	0.138255	3.76616 × 10 ⁻⁷	0.323890	1.28506 × 10 ⁻³	1	8.46233 × 10 ¹⁸
	1.60218 × 10 ⁻¹⁹	1.63377 × 10 ⁻²⁰	4.45050 × 10 ⁻²⁶	3.82743 × 10 ⁻²⁰	1.51857 × 10 ⁻²²	1.18171 × 10 ⁻¹⁹	1

1 cal = 4.18605 J (計量法)
 = 4.184 J (熱化学)
 = 4.1855 J (15 °C)
 = 4.1868 J (国際蒸気表)
 仕事率 1 PS (仏馬力)
 = 75 kgf·m/s
 = 735.499 W

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270 × 10 ⁻¹¹
	3.7 × 10 ¹⁰	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58 × 10 ⁻⁴	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

