

JAERI-Tech  
98-026



WIND計画における配管内  
FPエアロゾル挙動解析  
(受託研究)

1998年7月

日高昭秀・丸山 結・柴崎博晶・前田章雄・原田雄平  
長嶋利夫\*・吉野丈人\*\*・杉本 純

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刊している研究報告書です。  
入手の問合せは、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）で複写による実費領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, 1998

---

編集兼発行 日本原子力研究所  
印 刷 日立高速印刷株式会社

WIND計画における配管内FPエアロゾル挙動解析  
(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原子炉安全工学部

日高 昭秀・丸山 結・柴崎 博晶・前田 章雄

原田 雄平・長嶋 利夫\*・吉野 文人\*\*・杉本 純

(1998年6月2日受理)

配管信頼性実証試験（WIND）計画の配管内エアロゾル挙動試験に対する解析では、原研が独自に開発しているFPエアロゾル挙動解析コードART及びその参照コードとして位置付けている米国サンディア国立研究所のVICTORIAコードを用いて、WIND試験の解析と個々の解析モデルの検証を行っている。それらの一環として、WIND計画で実施した配管内FPエアロゾル実証試験（WAD 4 及び 5 試験）の解析及びWIND計画で将来試験を予定しているBWR高圧シーケンスにおける逃がし安全弁ライン内でのFPエアロゾル挙動解析を実施した。その結果、以下の知見が得られた。WAD 4 及び 5 試験で観測されたCsIの沈着量の多い部分は、ART及びVICTORIAコードによりほぼ適切に再現された。CsIガスの凝縮／再蒸発挙動に関して、VICTORIAは凝縮量を過大評価し、ARTの方が実験結果により近い量を予測した。両コードの凝縮／再蒸発モデルについてさらに検証が必要である。今回の分析では、配管接続部におけるCsI沈着量を測定しなかつたが、当該部における沈着量は比較的大きくコードの検証に有用であることから、今後のWIND試験ではその部分の沈着量も測定することとした。逃がし安全弁ラインへのエアロゾルの主要な沈着機構は乱流沈着である。沈着したFPからの崩壊熱により、BWRの逃がし安全弁ラインの温度は300K程度上昇する可能性があるが、構造材である炭素鋼の融点よりもまだかなり低いので破損には至らないと考えられる。

---

本報告書は、電源開発促進対策特別会計法に基づき、科学技術庁からの受託によって行っ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

\* ㈱三菱総合研究所

\*\* 東芝アドバンストシステム㈱

Analysis of FP Aerosol Behavior in Piping in WIND Project  
(Contract Research)

Akihide HIDAKA, Yu MARUYAMA, Hiroaki SHIBAZAKI, Akio MAEDA,  
Yuhei HARADA, Toshio NAGASHIMA,\* Takehito YOSHINO \*\* and Jun SUGIMOTO

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

(Received June 2, 1998)

In the analyses of aerosol behavior test in piping in WIND (Wide Range Piping Integrity Demonstration) project at Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI), ART code developed by JAERI and VICTORIA code developed by Sandia National Laboratories are used to perform WIND test analysis and to validate the models in the both codes. It is noted that VICTORIA code is supposed to be used as reference code of ART at JAERI. As a part of these activities, WIND Aerosol Deposition tests (WAD4 and 5) and FP aerosol behaviors in safety relief valve (SRV) line during BWR high pressure sequence which will be performed in future WIND experiment were analyzed with ART and VICTORIA codes. The present analyses showed that the portion and mass with relatively large amount of cesium iodide (CsI) deposition observed in WAD4 and 5 tests were reasonably reproduced by ART and VICTORIA codes. A difference was found in condensation and revaporization behaviors of gaseous CsI between the two codes. VICTORIA overestimated the condensed mass of CsI vapor while ART reproduced better the experimental data than the VICTORIA calculation. Further investigation is needed for this issue. Although the deposition mass at the pipe connection part in WAD4 and 5 experiments was not measured, the mass at that portion will be measured from next experiment because relatively large amount of CsI could be deposited there and the

---

The work was performed under contract with Atomic Energy Bureau of Science and Technology Agency of Japan.

\* Mitsubishi Research Institute, Inc.

\*\* Toshiba Advanced Systems Corporation

measurement is considered to be useful for code verification. The predicted principal aerosol deposition mechanism in SRV line is turbulence. Temperature of SRV line could increase by about 300 K by decay heat from deposited FPs. However, the SRV line made of carbon steel would not be failed because the predicted temperature is still far lower than the melting temperature of carbon steel.

**Keywords :** WIND Project, FP Aerosol, ART Code, VICTORIA Code, Safety Relief Valve Line, WAD4 Test, WAD5 Test, Turbulent Deposition, Condensation, Revaporization

This is a blank page.

## 目 次

|  |    |
|--|----|
| 1.はじめに .....                           | 1  |
| 2. ART及びVICTORIAコードの概要 .....           | 3  |
| 2.1 ARTコード .....                       | 3  |
| 2.2 VICTORIAコード .....                  | 4  |
| 3.WIND実証試験解析 .....                     | 7  |
| 3.1 概要 .....                           | 7  |
| 3.2 解析条件 .....                         | 7  |
| 3.3 解析結果 .....                         | 9  |
| 4.BWR逃がし安全弁ライン解析 .....                 | 14 |
| 4.1 概要 .....                           | 14 |
| 4.2 解析条件 .....                         | 14 |
| 4.3 解析結果 .....                         | 16 |
| 4.4 崩壊熱の計算 .....                       | 17 |
| 4.5 崩壊熱による配管温度上昇の推算 .....              | 19 |
| 5.まとめ .....                            | 21 |
| 謝　　辞 .....                             | 22 |
| 参考文献 .....                             | 22 |
| 付録A WAD 4 試験解析用ART入力データ .....          | 60 |
| 付録B WAD 4 試験解析用VICTORIA入力データ .....     | 62 |
| 付録C WAD 5 試験解析用ART入力データ .....          | 68 |
| 付録D WAD 5 試験解析用VICTORIA入力データ .....     | 70 |
| 付録E BWR逃がし安全弁ライン解析用ART入力データ .....      | 76 |
| 付録F BWR逃がし安全弁ライン解析用VICTORIA入力データ ..... | 78 |

## Contents

|   |    |
|---|----|
| 1. Introduction .....   | 1  |
| 2. Outlines of ART and VICTORIA Codes .....                                       | 3  |
| 2.1 ART Code .....  | 3  |
| 2.2 VICTORIA Code .....   | 4  |
| 3. Analysis for WIND Experiment .....   | 7  |
| 3.1 Outline .....   | 7  |
| 3.2 Analytical Conditions .....   | 7  |
| 3.3 Analytical Results .....  | 9  |
| 4. Analysis for BWR Safety Relief Valve Line .....                                | 14 |
| 4.1 Outline .....   | 14 |
| 4.2 Analytical Conditions .....   | 14 |
| 4.3 Analytical Results .....  | 16 |
| 4.4 Decay Heat Calculation .....  | 17 |
| 4.5 Estimation of Piping Temperature Increase by Decay Heat .....                 | 19 |
| 5. Summary .....  | 21 |
| Acknowledgments .....   | 22 |
| References .....  | 22 |
| Appendix A ART Input Data for WAD4 Test .....                                     | 60 |
| Appendix B VICTORIA Input Data for WAD4 Test .....                                | 62 |
| Appendix C ART Input Data for WAD5 Test .....                                     | 68 |
| Appendix D VICTORIA Input Data for WAD5 Test .....                                | 70 |
| Appendix E ART Input Data for Analysis of BWR Safety Relief Valve Line .....      | 76 |
| Appendix F VICTORIA Input Data for Analysis of BWR Safety Relief Valve Line ..... | 78 |

# 1. はじめに

シビアアクシデント時には、機器類の誤動作や運転員の誤操作が重なることにより、炉心が過熱し、安全評価上重要なヨウ素やセシウムなどの核分裂生成物 (FP; Fission Products) が炉心から放出される。これらのFPは、従来考えられていたような気体ではなく、ヨウ化セシウム (CsI) や水酸化セシウム (CsOH) などの化合物となり、微粒子 (エアロゾル) として原子炉冷却系内を浮遊し、その多くは配管内に沈着する。一方、配管は、炉心からの過熱蒸気や沈着したFPが持つ崩壊熱により加熱され、その信頼性が損なわれる可能性がある。また、一旦冷却系配管に沈着したFPエアロゾルが自己の崩壊熱により再蒸発したり、急速な流れにより再浮遊して格納容器内に放出されることにより、ソースタームに影響を与える可能性がある。さらに、事故を終息し影響緩和を計ることを目的とした注水等によるアクシデントマネジメントを確実に実施するためには、配管は想定される熱負荷に対して十分な耐性を有し、配管破損までに十分な時間的余裕があることを実証する必要がある。

このため、日本原子力研究所（以下、原研）では、平成5年度以降、配管信頼性実証試験 (Wide Range Piping Integrity Demonstration; WIND) 計画<sup>1)</sup>を開始した<sup>1)</sup>。WIND計画では、シビアアクシデント時の軽水炉の冷却系配管の信頼性を実証するため、配管に対する熱源となり得るFPエアロゾルの各種配管内における沈着挙動を調べる配管内エアロゾル挙動試験を行うとともに、熱負荷等を受けた配管の挙動と耐性を明らかにするための配管高温負荷試験を実施している<sup>2)</sup>。

このうち、配管内エアロゾル挙動試験では、種々の熱水力条件下において、ヨウ素及びセシウムの主要な化学形と考えられているCsI及びCsOHのエアロゾルを配管試験体に導入し、エアロゾルの沈着、再蒸発、再浮遊等の挙動を調べることとしている。また、エアロゾル挙動試験に対する解析計算では、原研が開発したARTコード<sup>3),4)</sup>（化学反応は考慮できないが配管断面内の熱流動の取扱い可能）、及びその参照用コードとして米国NRCが開発したシビアアクシデント時FP挙動解析コードVICTORIA<sup>5)</sup>（化学反応を考慮できるが配管断面内の熱流動の考慮不可）を用いることとしている。

WIND計画の配管内エアロゾル挙動試験解析では、シビアアクシデント時に炉心から放出されたFPの配管への沈着量を把握とともに、沈着したFPからの崩壊熱量を定量的に評価すること、また、実証試験の解析を通して、種々の事故条件に対してFP沈着量を精度良く予測する解析モデルの整備と検証を行うことを目的としている。その解析作業の一環として、WIND実証試験 (WAD4及び5試験) の配管内における模擬FPエアロゾ

---

<sup>\*</sup>）本件は、科学技術庁からの委託を受けて実施した「配管信頼性実証試験」である。

ル挙動に関する解析をART及びVICTORIAコードを用いて実施し、両コードの解析モデルの適応性及び妥当性の検討を行った。また、WIND計画で将来試験を予定しているシビアアクシデント条件下でのBWR高圧シーケンスに於ける逃がし安全弁系ライン内のFPエアロゾル挙動の解析をART及びVICTORIAコードを用いて実施した。そして、配管へのFP沈着量、沈着したFPからの崩壊熱量、配管温度の上昇の程度等について予測を行った。ただし、逃がし安全弁系ラインの熱水力境界条件及びFP濃度等については、MELCORコード<sup>6)</sup>を用いた類似解析<sup>7)</sup>の結果を使用した。

濃度等の両コードの解析モデルの適応性及び妥当性の検討を行った。

本報告書では、1) ART及びVICTORIAコードの概要について述べた後、2) WIND実証試験解析、及び3) BWR逃がし安全弁ライン内のエアロゾル挙動解析の結果、さらに本解析を通して得られた解析モデルの妥当性及びその限界、今後さらにモデルの検証が必要な現象について述べる。

## 2. ART及びVICTORIAコードの概要

### 2.1 ARTコード

ART (Analysis of Radionuclide Transport)<sup>3), 4)</sup>コードは、シビアアクシデント時の冷却系及び格納容器内のFP移行挙動を解析するために、リスク評価解析用として原研のソースターム評価解析コードTHALES-2<sup>8)</sup>の1モジュールとして開発された計算コードである。ARTコードの主な特徴として、1) 格納容器系のみならず1次系での放射性物質移行挙動を扱うこと、2) 気相のみならず液相の流れによる放射性物質移行挙動を扱うこと、3) 炉心溶融事故時に多量に発生するエアロゾルの挙動を現実的かつメカニスティックに扱うこと、が挙げられる。ARTコードは、シビアアクシデント時のFP移行挙動を解析するために、図2.1に示すように種々の物理現象をモデル化している。以下、個々の物理現象に対するARTコードのモデルを述べる。

#### (1) FP及びエアロゾルの輸送

気体状FP及びエアロゾルについては、気体の流れによる輸送を取扱う。また、気体が液相へ流入する場合のスクラビング効果も考慮している。液相中に溶け込んでいるFPについては液体の流れによる輸送を取り扱い、液体が気相へ流出する場合のフラッキング効果（細かい液滴となって気相中に浮遊）も考慮している。また、エアロゾルの質量及び粒径の違いにより沈着や凝集の速度が異なるため、エアロゾルを10程度の質量クラスに分類して取扱う。

#### (2) 気体状FPの沈着

気体状FPの自然沈着過程として、気液分配（気液両相間移行）、化学吸着、凝縮、自然対流下の拡散による沈着を考慮している。

#### (3) エアロゾルの沈着・成長

エアロゾルの自然沈着については、拡散、熱泳動、拡散泳動、重力沈降、強制対流（層流・乱流）による沈着過程を考慮している。エアロゾルの成長については、気体状FPのエアロゾルへの凝集によるものと、エアロゾル間の凝集によるものを考慮している。エアロゾルの凝集については、Brown運動、重力沈降の速度差、乱流による凝集過程を考慮している。

#### (4) 工学的安全施設による除去

工学的安全施設による雰囲気中の気体状FP及びエアロゾルの除染については、スプレイ、フィルタ及び圧力抑制プールによるものを考慮している。スプレイによる除染について、気体状FPでは気液分配、エアロゾルではさえぎり、慣性衝突、拡散、拡散泳動による効果を考慮している。フィルタによる除染は、区画間フィルタと再循環フィルタの両方が考慮できる。圧力抑制プールによる除染は、プール水によるスクラビングの効果が考慮できる。スクラビングについては、気泡中の気体状FPの気液分配、エアロゾルの拡散、重力沈降による効果を考慮している。

#### (5) 放射性壊変

FPの放射性壊変を考慮できる。エアロゾルの一成分であるFPが放射性壊変し、気体状FPとなる場合についても考慮している。さらに、ARTコードは、壁面及びエアロゾル表面上に凝縮したFPの再蒸発、壁面及び床面に沈着したエアロゾルの圧力容器及び格納器破損に伴う急激なガス流による力学的な再浮遊についても考慮することができる。

ARTコードは、多成分エアロゾルを形成する種々の化学種の挙動を扱う。対象としている化学種は、Kr、Xe、I<sub>2</sub>、Cs、CsI、CsOH、Te、Sr、Ba、Ru、Mo、La（以上はFP）及びH<sub>2</sub>Oである。また、便宜上、燃料（UO<sub>2</sub>）、炉心構成物質（Zr、Sn、Fe、Ni、Mn）及びコンクリート成分（非凝縮性ガスを除く）については、これらをまとめて一つの化学種として取扱う。ARTコードでは、プラントの熱水力学的情報（例えば、1次系及び格納容器の圧力、温度、水蒸気／水素の流量等）は入力によって与える。また、炉心部及びコリウムからの化学種の発生種の発生率についても同様に入力で与える。

## 2.2 VICTORIAコード

VICTORIAコード<sup>⑤</sup>は、シビアアクシデント時のFP放出及び原子炉冷却系内のFP挙動を解析するために、米国サンディア国立研究所で開発された。本コードは燃料からのFP放出、FP蒸気及びエアロゾルの移行、FPの化学的挙動等を含めた一連の解析が可能である。以下に本コードにおける主要プログラムの概要を示す（図2.2）。

#### (1) 燃料からのFP放出

VICTORIAではFP放出をUO<sub>2</sub>結晶粒内とその外側の領域に分けて計算する。結晶粒からのFP放出として2つのモデルを用意している。1つはBoothモデルと呼ばれ、結晶粒を等価円と仮定し、拡散によって結晶粒界まで移行して放出されるFPを計算する。もう一つはMatthews and Wood'sモデルで、結晶粒内を2つのセルに分割し、結晶粒内の気泡も

考慮した詳細モデルである。この2つのモデルの選択はユーザが指定する。 $\text{UO}_2$ 結晶粒外へのFP放出は、結晶粒界、燃料/被覆管ギャップ、被覆管、構造物表面の領域に分けてそれぞれモデル化されている（図2.3）。

## (2) キャリアガス及び気体状化学種の輸送

キャリアガス及びその中に含まれる気体状化学種の輸送は、質量保存則に基づいて計算する。キャリアガスの温度、流速及び気体状化学種の発生率は入力データによって与えられる。輸送をモデル化しているのは、計算で設定した各セルの軸方向、半径方向と構造材表面である。構造材表面に厚さ $500\ \mu\text{m}$ の膜を仮定する（図2.4）。この膜内において構造材との化学反応計算で使用するための境界層内のガス濃度が計算される。化学形が変化することによる濃度の変化も計算される。構造材表面膜は床、壁、天井として定義することができる。

## (3) エアロゾル挙動

VICTORIAではエアロゾルの移行挙動に関してWheatleyによって開発されたCHARMモデル<sup>9</sup>を用いている。このモデルは単独計算セル内のエアロゾル挙動を扱っており、セル内の熱水力条件等はあらかじめ算出されたものが計算条件として与えられる。ここで扱うエアロゾルは単一の組成からなり、凝集や沈着、あるいは隣接するセルへ移行する。

エアロゾルの沈着機構としては重力沈降、乱流、層流、ブラウン運動、熱泳動、流れの不規則性による慣性沈着を考慮している。さらにエアロゾル挙動として再浮遊と再蒸発も扱っている（図2.5）。エアロゾルの再浮遊モデルはORNLのART（Aerosol Resuspension Test）での実験データに指指数法則を適用したものに基づいている。再浮遊効果をモデル化するために以下の仮定がなされている。すべてのエアロゾルの構造材表面への付着力は同じであるとする。すなわち再浮遊率はエアロゾルの組成、構造材の性質に依存しない。一度エアロゾルが沈着すれば、すでに沈着しているエアロゾルと瞬時に同化する。それゆえ、再浮遊したエアロゾルの組成は、再浮遊した部分と同じ組成になる。再浮遊したエアロゾルは、同じセル内のエアロゾルと同じ質量分布を持つ。これはVICTORIAが沈着後のエアロゾル粒径分布の情報を持たないのでこの仮定が必要である。以上が再浮遊モデルにおける仮定である。エアロゾルの凝集過程としてはブラウン運動、重力、せん断力、慣性力を考慮している（図2.6）。

## (4) FP崩壊熱の計算

崩壊熱の計算はエアロゾルの再蒸発を扱うために重要である。VICTORIAでは崩壊熱のデータを原子炉停止後からの時間の関数として各元素ごとに持っている。崩壊熱のモデル化における仮定は以下の通りである。各元素は同一の拡散および輸送特性を有して

いる。したがって相対的な存在量は原子炉冷却系内で全て同じである。この仮定により局所的な崩壊熱は、沈着した元素の質量および炉停止後からの経過時間の関数として記述される。ガンマ線により発生した熱は構造材表面で吸収される。原子炉冷却系内では循環流が存在する可能性があるが、個々のセル内部では循環流は起こらない。すなわち崩壊熱が発生する領域では、全てのセルで一次元的な流れである。構造物の内部は一様な温度であり、同様に沈着したFPの内部も一様な温度である。断熱材および構造材の熱伝導率は温度に依存しない。構造物の外表面の雰囲気温度は一定である。ガスへの熱伝達が及ぼすガス温度への影響は考慮しない。ガスと構造物との間のふく射は無視できる。原子炉冷却系の断熱材の中の隙間でのふく射の損失は無視している。

## (5) 化学的挙動

VICTORIAにおける化学計算の基本はGibbs自由エネルギーを基にした熱力学的化学平衡を計算することである。高温の条件のもとでは平衡は瞬時に達成されると仮定することができる。VICTORIAでは化学平衡計算のために288の化学種（110のエアロゾル種、178のガス種）のGibbs自由エネルギーをデータとしてもっている。化学的観点からエアロゾルと凝縮相、あるいは蒸気とガス相を同一と仮定している。VICTORIAで化学平衡を仮定していないのは、 $\text{UO}_2$ の酸化反応、ジルコニウムの酸化反応、Te及び、 $\text{CsOH}$ の構造材への化学吸着である。気相中のFPの化学種の分圧が沈着しているFPの温度に対する飽和蒸気圧よりも低ければ再蒸発し、逆に高ければ表面上に凝縮する。

### 3. WIND実証試験解析

#### 3.1 概要

WIND計画の配管内エアロゾル挙動試験では、1996年度にWAD4及び5試験が実施された<sup>2)</sup>。両試験における配管内熱水力条件はほぼ同等であるが、WAD4試験ではキャリアガスとしてアルゴンガスのみを使用し、WAD5試験では過熱蒸気とアルゴンガスの混合気体を使用しており、キャリアガスの違いによるCsIエアロゾルの挙動の差を把握することが両試験の目的である。

WAD4及び5試験における配管内面へのFPエアロゾル付着量をARTおよびVICTORIAコードを用いて評価する。計算で使用する配管内部の熱水力条件、流入するFP核種の条件等については、当該実験の設定・境界条件を参考にして決定する。計算で得られた沈着量は、CsとIの元素毎にそれぞれ測定値と比較する。また、ARTコードとVICTORIAコードによる解析結果の比較を行う。

#### 3.2 解析条件

##### (1) 配管部分の形状

特性試験における配管の形状を図3.1に、セル分割図を図3.2に示す。

|         |  |
|---------|--|
| 配管内径 d  | 0.1063[m]                                |
| 配管全長 L  | 5.0[m] : 2m + 1m + 2m (沈着部 + 接続部 +挙動試験部) |
| 流路断面積 A | 0.00887[m <sup>2</sup> ]                 |
| 材質      | SUS316                                   |

配管は直管で水平に設置されている。

##### (2) 配管部分の熱水力条件

本解析では、実験条件および測定結果を参考にして各ケースごとに、以下に示すように配管内部の熱水力条件を設定した。

###### ① WAD4試験

配管構造材温度、ガス温度およびガス流速について表3.1、表3.2及び表3.3に示すように与えた。解析モデルにおけるセルごとの熱水力条件は、これらの値を内挿、外挿して設定した。設定された熱水力条件を図3.3、図3.4及び図3.5に示す。ガス圧力は大気圧に等しいとして、0.101[MPa]と設定した。

## ② WAD5試験

配管構造材温度、ガス温度およびガス流速について表3.4、表3.5及び表3.6に示すように与えた。解析モデルにおけるセルごとの熱水力条件は、これらの値を内挿、外挿して設定した。設定された熱水力条件を図3.6、図3.7及び図3.8に示す。ガス圧力は大気圧に等しいとして、0.101[MPa]と設定した。

## (3) 流入エアロゾル

流入させるCsIエアロゾルの粒径分布を測定値に基づいて以下のように設定した。

WAD4試験：エアロゾルソースの平均半径：  $1.0 \times 10^{-6}[\text{m}]$   
 標準偏差（幾何標準偏差）： 1.5

WAD5試験：エアロゾルソースの平均半径：  $1.2 \times 10^{-6}[\text{m}]$   
 標準偏差（幾何標準偏差）： 1.7

ART及びVICTORIAコードの計算では、エアロゾルの質量クラスとして、 $1.0 \times 10^{-18} \sim 1.0 \times 10^{-9}[\text{kg}]$ までの範囲を10個のクラスに分割した。

## (4) FPに関する初期条件の設定

CsIエアロゾル蒸気の初期濃度は0kg/m<sup>3</sup>、CsIエアロゾルの流入量は、各試験ごとに以下のように設定した。

WAD4試験：40分間  $0.0247 \times 10^{-3}\text{kg/s}$

WAD5試験：40分間  $0.01024 \times 10^{-3}\text{kg/s}$

## (5) キャリアガス

WAD4試験：アルゴンガス（流入量： $2.0\text{Nl/s} = 2.0 \times 10^{-3}\text{m}^3/\text{s}$ ）

WAD5試験：水蒸気+アルゴンガス（流入量： $0.804\text{g/s} + 1.0\text{Nl/s} = 1.0 \times 10^{-3}\text{m}^3/\text{s}$ ）

ただし、キャリアガスの濃度は、ガス温度、圧力分布（大気圧条件）より設定した。

## (6) その他

- ・ VICTORIAコードによる解析では、相変化等の化学反応および構造材との反応を考慮した。
- ・ ARTコードによる解析では、CsIをガスとして流入させ、飽和蒸気圧を越える分が単一核形成でエアロゾル化すると仮定した。

- VICTORIAでは熱泳動計算で使用する温度境界層の厚さは、配管の直径をキャリアガスの流動条件から決まるNusselt数で除することによりプログラム内部で算出されるが、ARTでは入力データで設定する必要がある。両コードの比較を簡単化するために、VICTORIAコードで計算されたNusselt数を参考にして、ARTコードの温度境界層の厚さを設定した。**図3.9**にWAD4試験に対してVICTORIAコードが計算したNusselt数分布を示す。これから算定される温度境界層厚さは約1cmとなる。

#### (7) 入力データ

WAD4試験解析用のART及びVICTORIAコード入力データを付録A及び付録Bに、WAD5試験解析用のART及びVICTORIAコード入力データを付録C及び付録Dに示す。

### 3.3 解析結果

WAD4及びWAD5試験に対して、VICTORIAコードを用いて1ケースづつ、ARTコードを用いて2ケースづつの解析を行った。**表3.7**に解析ケースを示す。VICTORIAコードでは、エアロゾルの粒径分布として測定値を入力しても、温度とエアロゾルの濃度で決定される粒径分布となる。これに対してARTコードは、入力データによって計算で用いるエアロゾルの粒径分布を変更することができる。このため、ARTコードの計算では、エアロゾル粒径分布を測定値と等しく設定したケースを基本ケース、VICTORIAの結果に一致させたケースを感度解析として計算を行った。これにより、両コードのエアロゾルの粒径分布を一致させ、それ以外のモデルの差が両計算の結果に与える影響を調べることとした。

#### (1) VICTORIAコードによるWAD4試験解析

##### ① 気相中CsIガス／エアロゾルの濃度分布

気相中のCsIガス／エアロゾルの濃度分布を**図3.10**に示す。高温の上流側ではほとんどがガス状であるが、中流付近から温度の低下に伴ってエアロゾルが形成されている。セル番号14以降は配管の壁温度とガス温度が一時的に上昇するため、エアロゾル濃度が減少し、ガス濃度が上昇した。

##### ② セシウム及びヨウ素の沈着密度分布（2400秒後）

2400秒後のセシウム及びヨウ素の沈着密度の計算結果を実験結果と共に**図3.11**に示す。上流部における沈着量を若干過小評価したが、計算結果は実験結果にほぼ一致した。

##### ③ エアロゾルの平均沈着速度分布

エアロゾルの粒径分布で重みづけしたエアロゾルの平均沈着速度分布を**図3.12**に示

す。主な沈着機構は熱泳動であり、中央の低温の接続配管部では、重力沈降が主な沈着機構として予測された。

#### ④質量クラスごとのエアロゾルの沈着速度分布

セル番号7（上流）、15（中流）、19（下流）における質量クラスごとのエアロゾルの沈着速度分布を図3.13～図3.15に示す。重力沈降はエアロゾルの粒径が大きくなるほど沈着速度が大きくなり、熱泳動は粒径にあまり依存しない。セル番号15で熱泳動が計算されていないのは、配管壁温度の方がガス温度よりも高いことによる。

#### ⑤質量クラスごとのエアロゾルの数密度分布

セル番号7（上流）、15（中流）、19（下流）におけるエアロゾルの数密度分布を図3.16～図3.18に示す。下流に行くに従って、エアロゾルの凝集機構等によりエアロゾルの粒径が少しづつ成長しているのがわかる。

#### ⑥エアロゾルの質量中央径分布

エアロゾルの質量中央径分布を図3.19に示す。測定されたエアロゾルの質量中央径は $2.0 \times 10^{-6}[\text{m}]$ であることから、VICTORIAの計算結果は、測定値の約半分であり、過小評価となった。

### (2) VICTORIAコードによるWAD5試験解析

#### ①気相中CsIガス／エアロゾルの濃度分布

気相中のCsIガス／エアロゾルの濃度分布を図3.20に示す。高温の上流側ではほとんどがガス状であるが、中流付近からガス温度の低下に伴ってエアロゾルが形成されている。セル番号14以降は配管の壁温度とガス温度が一時的に上昇するため、エアロゾル濃度が減少し、ガス濃度が上昇した。全体的な傾向はWAD4試験とほぼ同じである。

#### ②セシウム及びヨウ素の沈着密度分布（2400秒後）

2400秒後のセシウム及びヨウ素の沈着密度の計算結果を実験結果とともに図3.21に示す。上流部における沈着量の過小評価がWAD4試験の場合よりも顕著になった。それ以外の計算結果は実験結果にほぼ一致した。上流部（1.5m付近）で過小評価となった原因は、試験後に流した純アルゴンにより、沈着したCsIが再蒸発、再配置した可能性がある。

#### ③エアロゾルの平均沈着速度分布

エアロゾルの粒径分布で重みづけしたエアロゾルの平均沈着速度分布を図3.22に示す。主な沈着機構は熱泳動であり、中央の低温の接続配管部では、重力沈降が主な沈着機構として予測された。全体的な傾向はWAD4試験とほぼ同じである。

#### ④質量クラスごとのエアロゾルの沈着速度分布

セル番号8（上流）、15（中流）、19（下流）における質量クラスごとのエアロゾルの沈着速度分布を図3.23～図3.25に示す。重力沈降はエアロゾルの粒径が大きくなるほど沈着速度が大きくなり、熱泳動は粒径にあまり依存しない。セル番号15で熱泳動が計算されていないのは、配管壁温度の方がガス温度よりも高いことによる。

#### ⑤質量クラスごとのエアロゾルの数密度分布

セル番号9（上流）及び19（下流）におけるエアロゾルの数密度分布を図3.26及び図3.27に示す。数値計算の収束に若干問題があり、WAD4試験で見られたエアロゾルの凝集機構等によるはっきりしたエアロゾルの成長は予測されなかった。

#### ⑥エアロゾルの質量中央径分布

エアロゾルの質量中央径分布を図3.28に示す。測定されたエアロゾルの質量中央径は $2.4 \times 10^{-6} [\text{m}]$ であることから、VICTORIAの計算結果は測定値の約4分の1であり、過小評価となった。

### (3) ARTコードによるWAD4試験解析

ARTコードを用いた解析では、実験で測定されたエアロゾルの質量中央径と幾何標準偏差を用いる基準ケース（ケースA）と、VICTORIAで計算されたエアロゾルの質量中央径と幾何標準偏差を使用する感度解析ケース（ケースSA）を実施した。

#### ①気相中CsIガス／エアロゾルの濃度分布

気相中のCsIガス／エアロゾルの濃度分布に関するARTコードの基本ケース、感度解析ケースの結果をVICTORIAコードの結果とともに図3.29に示す。両コードの計算結果はほぼ一致した。セル番号5、6においてエアロゾル濃度の立ち上がりに若干差が見られるが、これは両コードのCsI蒸気圧モデルにわずかな差があるためである。ARTの基本ケースの方が感度解析ケースよりも配管中央部でガス濃度が高いが、基本ケースの方が粒径が大きく重力沈降による沈着が多く予測された結果、再蒸発によりガス濃度が上昇したことによる。

#### ②セシウム及びヨウ素の沈着密度分布（2400秒後）

2400秒後のセシウム及びヨウ素の沈着密度の計算結果を実験結果とともに図3.30に示す。ARTコードの方がVICTORIAコードに比べて、上流部における沈着量の増加、配管接続部における沈着量の減少を適切に再現した。ARTの基本ケースの方が感度解析ケースよりも沈着量が全体的に多いが、基本ケースの方が粒径が大きく重力沈降による沈着量が増加したことによる。ARTとVICTORIAコードの差の原因は、CsIガスの凝縮／再蒸発挙動に関して両コードのモデルに差があることに起因している。すなわち、ARTの計算では、化学吸着で付着したもの以外はすべて再蒸発の対象となるが、VICTORIAの計

算では壁から5mmの厚さに設定されたフィルム内の各元素の熱化学平衡を考慮して再蒸発分が計算される。傾向としては、ARTの方が再蒸発しやすいモデルとなっている。

### ③ エアロゾルの平均沈着速度分布

エアロゾルの粒径分布で重みづけしたエアロゾルの平均沈着速度分布を図3.31に示す。VICTORIAコードとARTの感度解析ケースは、粒径分布が一致しているのほぼ同等の結果となった。ARTコードの基本ケースは、大きな粒径分布を反映して、特に重力沈降速度が大きく予測された。

### ④ 質量クラスごとのエアロゾルの沈着速度分布

セル番号7（上流）、15（中流）、19（下流）における質量クラスごとのエアロゾルの沈着速度分布を図3.32～図3.34に示す。両コードの結果はほぼ一致していると言える。なお、ARTコードの基準ケースと感度解析ケースでは沈着速度が一致したため、基準ケースのみをプロットした。両ケースの一致は、熱水力条件が不変であれば、沈着速度はエアロゾルの質量のみの関数になり、たとえ粒径分布を変えても沈着速度は変化しないことによる。

### ⑤ 質量クラスごとのエアロゾルの数密度分布

セル番号9（上流）、15（中流）、19（下流）におけるエアロゾルの数密度分布を図3.35～図3.37に示す。ARTとVICTORIAコードで計算されたエアロゾルの数密度分布について、両者に差が見られた。これは、ARTコードの計算では、核形成により生成されたエアロゾルは、コードで設定した最小の質量クラスに配属されると仮定しているのに対し、VICTORIAコードでは、生成されたエアロゾルは、その直後に対数正規分布を有した平衡状態のエアロゾルの分布と等しいと仮定していることによる。ARTコードの基本ケースでは、コードの最小質量クラスを測定値に一致させた。このため、ARTによって計算されたエアロゾルの粒径の方がVICTORIAのそれよりも大きく計算された。ARTコードの感度解析ケースで計算された粒径分布は、VICTORIAコードの計算結果とほぼ一致している。

### ⑥ エアロゾルの質量中央径分布

エアロゾルの質量中央径分布を図3.38に示す。ARTコードの感度解析ケースで計算された質量中央径とVICTORIAコードの計算結果はほぼ一致している。

## (4) ARTコードによるWAD5試験解析

### ① 気相中CsIガス／エアロゾルの濃度分布

気相中のCsIガス／エアロゾルの濃度分布を図3.39に示す。両コードの計算結果はほぼ一致した。セル番号7、8においてエアロゾル濃度の立ち上がりに若干差が見られるが、これは両コードのCsI蒸気圧モデルにわずかな差があるためである。ARTの基本ケース

の方が感度解析ケースよりも配管中央部及び下流部でガス濃度が高いが、基本ケースの方より粒径が大きく重力沈降による沈着が多く予測された結果、再蒸発によりガス濃度が上昇したことによる。

#### ②セシウム及びヨウ素の沈着密度分布（2400秒後）

2400秒後のセシウム及びヨウ素の沈着密度の計算結果を実験結果とともに図3.40に示す。ARTコードの方がVICTORIAコードに比べて、上流部における沈着量の増加、配管接続部における沈着量の減少を適切に再現した。ARTの基本ケースの方が感度解析ケースよりも沈着量が全体的に多いが、基本ケースの方が粒径が大きく重力沈降による沈着量が増加したことによる。ARTとVICTORIAコードの差の原因は、CsIガスの凝縮／再蒸発挙動に関して両コードのモデルに差があることによる。

#### ③エアロゾルの平均沈着速度分布

エアロゾルの粒径分布で重みづけしたエアロゾルの平均沈着速度分布を図3.41に示す。VICTORIAコードとARTの感度解析ケースは、粒径分布が一致しているのでほぼ同等の結果となった。ARTコードの基本ケースは、大きな粒径分布を反映して、特に重力沈降速度が大きく予測された。

#### ④質量クラスごとのエアロゾルの沈着速度分布

セル番号7（上流）、15（中流）、19（下流）における質量クラスごとのエアロゾルの沈着速度分布を図3.42～図3.44に示す。両コードの結果はほぼ一致していると言える。なお、ARTコードの基準ケースと感度解析ケースでは沈着速度が一致したため、基準ケースのみをプロットした。両ケースの一致は、熱水力条件が不变であれば、沈着速度はエアロゾルの質量のみの関数になり、たとえ粒径分布を変えても沈着速度は変化しないことによる。

#### ⑤質量クラスごとのエアロゾルの数密度分布

セル番号9（上流）、19（下流）におけるエアロゾルの数密度分布を図3.45及び図3.46に示す。ARTとVICTORIAコードで計算されたエアロゾルの数密度分布について、両者に差が見られた。この原因は、WAD4試験解析で説明した理由と同じで、両コードのエアロゾル生成モデルの差に起因する。ARTコードの基本ケースでは、コードの最小質量クラスを測定値に一致させた。このため、ARTによって計算されたエアロゾルの粒径の方がVICTORIAのそれよりも大きく計算された。ARTコードの感度解析ケースで計算された粒径分布は、VICTORIAコードの計算結果とほぼ一致している。

#### ⑥エアロゾルの質量中央径分布

エアロゾルの質量中央径分布を図3.47に示す。ARTコードの感度解析ケースで計算された質量中央径とVICTORIAコードの計算結果はほぼ一致している。

## 4. BWR逃がし安全弁ライン解析

### 4.1 概要

BWRのシビアアクシデント時における原子炉圧力容器から圧力抑制プールへの逃がし安全弁 (Safety Relief Valve; SRV) ラインへのFP付着量をVICTORIAコードおよびARTコードを用いて評価した。事故シーケンスとして、原子炉冷却系が高圧に保たれるTQUXを選択した。TQUXシーケンスは、主蒸気隔離弁 (Main Steam Isolation Valve; MSIV) 閉止を伴う過渡事象を起因事象とし、原子炉スクラムには成功するが高圧ECCSの作動に失敗、さらに、原子炉冷却系の減圧に失敗し、低圧ECCSが使用できずに炉心損傷、ついには格納容器破損に至るシーケンスである。

### 4.2 解析条件

逃がし安全弁ライン部分の熱水力境界条件、流入するFP核種等の条件は、1995年に実施したMELCORコード<sup>6)</sup>による熱水力の解析結果等<sup>7)</sup>を参照して設定した。

#### (1) 配管部分の形状

Browns Ferry (BWR) 壴<sup>10)</sup>の逃がし安全弁ラインの形状を図4.1に示す。

|        |                                |
|--------|--------------------------------|
| 流路内径 d | 0.2372[m]                      |
| 流路全長 L | 25.00[m] (垂直部10m、水平部10m、垂直部5m) |
| 流路面積 A | 0.04419[m <sup>2</sup> ]       |
| 材質     | 炭素鋼                            |

なお、曲管部分の曲率半径は、JISハンドブック：配管（B2312付表5）を参考にして、配管中心線位置で381mmであるものとして扱った。

#### (2) 配管部分の熱水力条件

本解析では、MELCORコードの解析結果<sup>7)</sup>に基づき、以下に示すように逃がし安全弁ラインの熱水力条件を設定した。なお、解析対象時刻は、115分後（リング1、2燃料棒溶融、CsI濃度高）とした。

##### ①蒸気温度

逃がし安全弁ラインの入口及び出口温度ともに800Kと設定した。ただし、推定にあたっては、逃がし安全弁ラインの蒸気入口温度は蒸気ドームの蒸気温度と等しく、また、

逃がし安全弁ライン内の蒸気流速が非常に速いことを考慮して、逃がし安全弁ラインの入口及び出口の蒸気温度は等しいと仮定した。

## ②構造材温度

構造材の温度分布は、上流ボリュームである蒸気ドームの構造材温度や逃がし安全弁ラインの壁面温度に関するMELCORコードの結果を参照して、上流部600[K]、下流部400[K]と設定した。この温度分布が配管に沿って直線的に分布しているものとする。設定した構造材の温度分布を図4.2に示す。

## ③ガス流速

MELCORによる解析結果を参照して、弁開設時の流速は250.0[m/sec]（事故開始後115分）、弁開設時間は2分（120秒）とした。

## ④ガス圧力

逃がし安全弁の開設定圧7.86[MPa]と閉設定圧7.36[MPa]の平均である7.61[MPa]とした。

## ⑤ガス比容積および密度

水蒸気の比容積を0.046618[m<sup>3</sup>/kg]、水蒸気の密度を21.451[kg/m<sup>3</sup>]（7.61[MPa]、800[K]、115分後）とした。

## (3) 想定するFP核種

本解析では、FP核種としてCsIおよびCsOHを想定した。また、エアロゾルの粒径について、以下のように設定した。

エアロゾルソースの平均半径：  $3.1824 \times 10^{-7}[\text{m}]$

標準偏差（幾何標準偏差）： 1.997

質量クラス：  $1.0 \times 10^{-18} \sim 1.0 \times 10^{-9}[\text{kg}]$ までの範囲を10個のクラスに分割

## (4) FPに関する初期条件の設定

逃がし安全弁ライン内のキャリアガス中のFP蒸気の初期濃度は、上流側の蒸気ドーム部分FP蒸気の濃度と同じであると仮定する。FPの流入条件に関しては、解析開始時点における着目するボリュームの上流ボリュームである蒸気ドーム部分でのFP蒸気および、FPエアロゾルの濃度（質量濃度）に流速および断面積を乗じて算出し設定した。

MELCORによる解析から、115分後における、蒸気ドーム内のCsIガスの質量は0.1kg、CsIエアロゾルの質量1.0kgである。蒸気ドームの体積は、252.7m<sup>3</sup>であり、逃がし安全ラインの断面積0.05075[m<sup>2</sup>]、及び流速として250.0[m/s]（115分後）を考慮すると、逃がし

安全ラインへのCsI流入量は、以下のようなになる。

$$\begin{aligned} \text{CsIガス流入量} &: 4.37 \times 10^{-3}[\text{kg/s}] \\ \text{CsIエアロゾル流入量} &: 4.37 \times 10^{-2}[\text{kg/s}] \end{aligned}$$

また、115分後における、蒸気ドーム内のCsガスの質量は1.0kg、Csエアロゾルの質量10.0kgである。蒸気ドームの体積は、 $252.7\text{m}^3$ であり、逃がし安全弁ラインの断面積 $0.05075[\text{m}^2]$ および流速として $250.0[\text{m/s}]$ (115分後)を考慮し、Cs(原子量:132.9)をCsOH(分子量:149.9)に換算すると、逃がし安全弁ラインへのCsOH流入量は、以下のようになる。

$$\begin{aligned} \text{CsOHガス流入量} &: 4.93 \times 10^{-2}[\text{kg/s}] \\ \text{CsOHエアロゾル流入量} &: 4.93 \times 10^{-1}[\text{kg/s}] \end{aligned}$$

#### (5) 解析モデル

ART及びVICTORIAコードでモデル化した逃がし安全弁ラインのセル分割図を図4.3に示す。

### 4.3 解析結果

以上の解析条件を考慮して、ART及びVICTORIAコードの入力データを作成し、120秒間の計算を実施した。BWR逃がし安全弁ライン解析用のARTコードの入力データを付録Eに、VICTORIAの入力データを付録Fに示す。

#### (1) 気相中のガス／エアロゾル濃度分布

VICTORIA及びARTコードによって計算された気相中のCsIガス／エアロゾル濃度分布を図4.4に示す。気相中のCsOHガス／エアロゾル濃度分布を図4.5に示す。図中において、AはARTコードの計算結果、VはVICTORIAコードの計算結果、cはエアロゾル状、gが気体状であることを意味している。CsI、CsOH共にそれらのほとんどがエアロゾル状であり、ガス状のものはわずかであることが予測された。

#### (2) CsIおよびCsOH沈着密度分布

CsIおよびCsOHの沈着密度分布を図4.6に示す。CsOHの沈着密度の方がCsIのそれに比べて約1桁大きいが、これはガス中のCsOHとCsI濃度の差を反映している。曲管部において、沈着量のわずかな増加が見られた。

### (3) エアロゾルの平均沈着速度分布

エアロゾルの平均沈着速度分布を図4.7に示す。両コードによって計算された主要な沈着機構は乱流沈着である。曲管部において、慣性による沈着速度が上昇している。また、ARTはセル番号5以降において、水蒸気の凝縮に起因する拡散泳動による沈着を予測したが、VICTORIAは拡散泳動をモデル化しておらず、その寄与を計算しなかった。

### (4) エアロゾルの沈着速度分布

セル番号6及び10におけるエアロゾルの沈着速度分布を図4.8及び図4.9に示す。両計算はほぼ一致しているが、乱流沈着速度及び拡散泳動による沈着速度に差が見られる。

### (5) エアロゾルの数密度分布

エアロゾルの数密度分布を図4.10に示す。ARTコードによって予測された計算結果に比べてVICTORIAの結果の方が、エアロゾルの分布が大きい方へシフトしている。これは、ARTコードの計算では、核形成により生成されたエアロゾルは、コードで設定した最小の質量クラスに配属されると仮定しているのに対し、VICTORIAコードでは、生成されたエアロゾルは、その直後に対数正規分布を有した平衡状態のエアロゾルの分布と等しいと仮定していることによる。このため、VICTORIAによって計算されたエアロゾルの粒径の方がARTのそれよりも大きく計算される傾向がある。

### (6) エアロゾルの質量中央径分布

両コードによって計算されたエアロゾルの質量中央径分布を図4.11に示す。上述と同様の理由により、VICTORIAによって計算されたエアロゾルの質量中央径の方がARTのそれよりも大きくなつた。両モデルの妥当性について、さらに検討を行う必要がある。

## 4.4 崩壊熱の計算

ARTコードまたはVICTORIAコードでは、計算された配管内面に付着するFP付着量分布と事故発生時からの経過時間から、配管に付着するFPの崩壊熱を算定することができる。VICTORIAコードでは、炉運転停止から0~20時間後までの崩壊熱換算表を用意している。崩壊熱換算に際しては、親核種のみではなく、娘、孫娘核種以下の崩壊熱まで考慮するため、新たな崩壊の連鎖は考慮する必要はない。換算表は炉緊急停止直前の炉出力によって、正規化されている。したがって、炉出力値を与えることで、任意の炉に対する計算が可能となる。VICTORIAコードでは、正規化計算を以下に示す2段階で行う。

## (1) 第1段階；炉運転停止直前の崩壊熱量算出

炉運転停止直前の熱出力を算出する。この値をもとに、換算表にしたがって、第2段階において単位熱出力あたりから核分裂生成物ごとの崩壊熱を見積る。本解析で対象としたBrowns Ferryプラントの停止時炉出力は  $3.440 \times 10^6 \text{ kW}_{\text{TH}}$  である。

## (2) 第2段階；ある炉停止後時間における単位質量当たりの崩壊熱量算出

ヨウ素によって生成される総崩壊熱量を、燃料中の初期質量で除して、質量あたりの崩壊熱量を設定する。解析対象時刻は、炉停止後115分後であり、換算表内の崩壊熱データ（1.5時間後；1.6W/kW、2.0時間後；1.5W/kW）を使用して、次式のように対数補間により求める。

115分後（1.92時間後）

$$10^{\left\{ \log 1.6 + \frac{1.92-1.5}{2-1.5} (\log 1.5 - \log 1.6) \right\}} = 1.516 \text{ W/kW}_{\text{th}}$$

したがって、停止時の炉出力からヨウ素によって  $5.22 \times 10^6 \text{ W}$ （115分後）発熱する。停止時のヨウ素の量（Inventory）は  $1.660 \times 10^4 \text{ g}$  であるので、崩壊熱としては  $314.5 \text{ W/g}$ （115分後）となる。

同様に、セシウムによる発熱量は、次式によって求めることができる。

$$10^{\left\{ \log 0.23 + \frac{0.42}{2-1.5} (\log 0.15 - \log 0.23) \right\}} = 0.1606 \text{ W/kW}_{\text{th}}$$

したがって、停止時の炉出力からセシウムによって  $0.552 \times 10^6 \text{ W}$ （115分後）発熱する。停止時のセシウムの量（Inventory）は  $2.070 \times 10^5 \text{ g}$  であるので、崩壊熱としては  $2.67 \text{ W/g}$ （115分後）となる。

以上の手順により、各セルごとに配管内面へのヨウ素およびセシウムの崩壊熱発熱による熱流束を算出することができる。この結果は、配管高温熱負荷解析における解析条件として考慮することができる。

## 4.5 崩壊熱による配管温度上昇の推算

VICTORIAコードにより算出された逃がし安全弁ライン配管内面へのFPエアロゾルの沈着量に基づいて、崩壊熱及び配管の温度上昇を概算した。

### (1) 崩壊熱への換算

ヨウ素の崩壊熱は、VICTORIAコードの換算式によると、 $314.5\text{W/g}$  (115分後)、セシウムの崩壊熱は、 $2.67\text{W/g}$  (115分後) となる。FPエアロゾル挙動解析により求められたヨウ素およびのセシウムの沈着量を崩壊熱に換算し、それぞれ配管内面への熱流束に換算したものと図4.12に示す。逃がし安全弁ライン配管入口部における配管内面へのヨウ素による熱流束は、 $q = 30\text{kW/m}^2$ 、セシウムによる熱流束の最大値は $q = 5\text{kW/m}^2$ となった。

### (2) 配管の最高温度の推算

図4.13に示すような伝熱解析モデルを用いて、配管構造物中の最高温度を推定した。

#### ①配管外面での熱収支

配管外面では、配管雰囲気（ドライウェル雰囲気）と自然対流熱伝達および輻射熱伝達があるものと仮定した。伝熱工学資料第3版<sup>11)</sup>によれば、空気雰囲気にある鉛直円管外面の熱伝達率 $h$ は、鉛直平板の式を用いて次式のように算定される。

$$h = N_{um} \frac{\lambda_\infty}{d}$$

$$N_{um} = K_1 (G_r \text{Pr}_\infty)^{1/4}$$

$$G_r = g\beta d^3 (t_w - t_\infty) / \nu_\infty^2$$

$$K_1 = \frac{3}{4} \left\{ \frac{2 \text{Pr}_\infty}{5(1 + 2 \text{Pr}_\infty^{0.5} + 2 \text{Pr}_\infty)} \right\}^{0.25}$$

ここで対象とする配管については、上式のパラメータを設定すると以下のようになる。

$$t_\infty = 330K, t_w = 600K$$

$$g = 9.8m/s^2, d = 0.2736m$$

$$\nu_\infty = 0.196 \times 10^{-4} m^2/s$$

$$\text{Pr}_\infty = 0.71$$

$$\lambda_\infty = 0.0247 kcal/mhK$$

これらの数値を代入して、熱伝達率を計算すると、

$$h = 4.6 \text{ kcal/m}^2\text{hour}^\circ\text{C} = 0.0053 \text{ kW/m}^2\text{K}$$

となる。したがって、ここでは以下のようないくつかの条件を与えることとする。

配管雰囲気温度 : 330[K]

自然対流熱伝達率 :  $4.6 \text{ kcal/m}^2\text{hour}^\circ\text{C} = 0.0053 \text{ kW/m}^2\text{K}$

ふく射率 : 0.8

## ②配管内面での熱収支

配管内面では、沈着したFPの崩壊熱による発熱を考慮する。配管内面に沈着したヨウ素およびセシウムによる発熱を考慮して、大きさ35kW/m<sup>2</sup>の熱流束を与える。

## ③配管の物性

配管材料である炭素鋼の物性値を表4.1に示す。

以上の条件を用いて、汎用有限要素法解析コードABAQUSを用いて非定常熱伝導解析を実施した。計算された配管の最高温度の時刻歴を図4.14に示す。逃がし安全弁ラインの最高温度は900Kを若干上回ると予想されるが、炭素鋼の融点(>1673K)に比べると十分に低いので逃がし安全弁ラインの健全性は維持されると考えられる。さらに予測精度を高めるためには、拘束条件等を考慮した詳細解析を行う必要がある。

## 5. まとめ

WIND計画の配管内エアロゾル挙動解析において、原研が開発しているFPエアロゾル挙動解析コードART及び米国サンディア国立研究所で開発されたVICTORIAコードを用いて、WIND計画で実施した実証試験（WAD4及び5試験）の配管内FPエアロゾル挙動に関する解析を実施するとともに、BWR高圧シーケンスにおける逃がし安全弁ライン内のFPエアロゾル挙動計算を実施した。その結果、以下の知見が得られた。

### (1) WIND実証試験解析

- ・ WAD4及び5試験で得られたCsIエアロゾル沈着分布は、ART及びVICTORIAコードによりほぼ適切に予測された。
- ・ CsIガスの凝縮／再蒸発挙動に関して、VICTORIAは凝縮量を過大評価し、ARTの方が実験結果により近い量を予測した。両コードの凝縮／再蒸発モデルについてさらに検証が必要である。
- ・ エアロゾル粒径分布として実験値と予測結果を用いて沈着計算を行った場合、その影響は無視できる程度であったが、下流部における再蒸発量計算に若干影響が見られた。
- ・ 実験で観測されたアルゴン霧囲気中よりも水蒸気霧囲気中においてエアロゾルがより成長する現象は、両コードの現行モデルでは再現できなかった。今後、メカニズムの解明が必要である。
- ・ WAD4及び5試験の分析では、配管接続部におけるCsI沈着量を測定しなかったが、当該部における沈着量は比較的大きくコードの検証に有用であることから、今後のWIND試験ではその部分の沈着量も測定することとした。

### (2) BWR逃がし安全弁ラインの解析

- ・ TQUXシーケンス時の逃がし安全弁ラインへのCsOH、CsIエアロゾルの主要な沈着機構は乱流沈着である。
- ・ 沈着したFPからの崩壊熱により、逃がし安全弁ラインの温度は300K程度上昇する可能性があるが、構造材の融点よりもまだかなり低いので破損には至らないと考えられる。
- ・ 本解析におけるARTとVICTORIAコードのエアロゾル沈着機構に対する解析モデルは、拡散泳動を除いてほぼ同等である。
- ・ 拡散泳動をモデル化しているARTは、それをモデル化していないVICTORIAに比べて、露点以下の配管への沈着量を約2倍に見積もった。
- ・ 逃がし安全弁ラインにおけるFPエアロゾル挙動を予測する際は、拡散泳動によるエアロゾル沈着を考慮する必要がある。

## 謝辞

本報告書をまとめるに当たっては、原子炉安全工学部の秋元正幸部長、阿部清治次長の御指導と助言を賜りました。ここに、深く感謝の意を表します。また、図表作成にご協力いただきましたITJ（株）の桧山美奈さん、加藤悦子さん、奈良岡妙子さんに厚くお礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) 橋本、他、「配管信頼性実証試験計画（1）配管内エアロゾル挙動試験及び配管高温負荷試験」B38、1994年秋の大会予稿集(1994).
- 2) 柴崎、他、「WIND計画における水平直管内へのCsIエアロゾル沈着試験」日本原子力学会、1998年春の年会予稿集(1998).
- 3) 石神、坂本、小林、梶本、「炉心溶融事故時FP移行挙動解析コードARTの使用手引き」JAERI-M 88-093 (May 1988).
- 4) M. Kajimoto, et al., "ART Mod2 for the Analysis of Radionuclide Transport; Model Description and User's Manual," to be published as JAERI-Code report.
- 5) T. J. Heames, et al., "VICTORIA, A Mechanical Model of Radionuclide Behavior in the Reactor Coolant System Under Severe Accident Conditions," NUREG/CR-5545 SAND90-0756 Rev.1 Sandia National Laboratories (December 1992).
- 6) R. M. Summers, et al., "MELCOR Computer Code Manuals," NUREG/CR-6119 (1995).
- 7) A. Hidaka, et al., "Source Term Analyses with MELCOR1.8.3," to be published as JAERI-Research report in 1997.
- 8) M. Kajimoto, et al., "Development of THALES-2, A Computer Code for Coupled Thermal-Hydraulics and FP Transport Analyses for Severe Accident at LWRs and Its Application to Analysis of FP Revaporization Phenomena," Proc. Int. Topical Mtg. on Safety of Thermal Reactors, Portland, pp.584-592 (1991).
- 9) C. J. Wheatley, "CHARM, A Model for Aerosol Behavior in the Time Varying Thermal-Hydraulic Conditions," NUREG/CR-5162 SAND88-0745 Sandia National Laboratories (August 1988).
- 10) Tennessee Valley Authority, "Browns Ferry Nuclear Plant, FSAR," DOCKET 50259 (1970).
- 11) 日本機械学会、「伝熱工学資料、改訂第4版」1986年10月

表3.1 構造材温度分布 (WAD4)

| 位置 [m] | 配管温度 [°C] |
|--------|-----------|
| 0      | 650.      |
| 0.13   | 708.      |
| 0.41   | 999.      |
| 0.715  | 866.      |
| 1.02   | 731.      |
| 1.325  | 598.5     |
| 1.63   | 488.5     |
| 2.3    | 400.      |
| 3.13   | 414.      |
| 3.41   | 700.      |
| 3.715  | 604.      |
| 4.02   | 507.      |
| 4.325  | 416.5     |
| 4.63   | 342.      |

表3.2 ガス温度分布 (WAD4)

| 位置 [m] | 配管温度 [°C] |
|--------|-----------|
| 0.0    | 613.      |
| 0.13   | 679.2     |
| 0.41   | 872.8     |
| 0.715  | 814.      |
| 1.02   | 737.5     |
| 1.325  | 674.8     |
| 1.63   | 629.8     |
| 2.3    | 417.      |
| 3.13   | 414.      |
| 3.3875 | 582.      |
| 3.6925 | 539.      |
| 3.9975 | 528.      |
| 4.3025 | 494.      |
| 4.6075 | 449.      |

表3.3 流速分布 (WAD4)

| 位置 [m] | 流速 [m/s] |
|--------|----------|
| 0.0    | 0.731    |
| 0.13   | 0.786    |
| 0.41   | 0.946    |
| 0.715  | 0.897    |
| 1.02   | 0.834    |
| 1.325  | 0.782    |
| 1.63   | 0.745    |
| 2.3    | 0.570    |
| 3.13   | 0.567    |
| 3.41   | 0.706    |
| 3.715  | 0.670    |
| 4.02   | 0.661    |
| 4.325  | 0.633    |
| 4.63   | 0.596    |

表3.4 構造材温度分布 (WAD5)

| 位置 [m] | 温度 [°C] |
|--------|---------|
| 0.0    | 650.0   |
| 0.13   | 646.0   |
| 0.41   | 962.5   |
| 0.715  | 866.0   |
| 1.02   | 748.0   |
| 1.325  | 687.5   |
| 1.63   | 625.0   |
| 2.3    | 413.4   |
| 3.13   | 400.0   |
| 3.41   | 700.0   |
| 3.715  | 604.0   |
| 4.02   | 510.0   |
| 4.325  | 464.0   |
| 4.63   | 415.0   |

表3.5 ガス温度分布 (WAD5)

| 位置 [m] | 温度 [°C] |
|--------|---------|
| 0.0    | 600.0   |
| 0.13   | 626.0   |
| 0.41   | 804.5   |
| 0.715  | 824.5   |
| 1.02   | 772.3   |
| 1.325  | 730.5   |
| 1.63   | 685.8   |
| 2.3    | 470.4   |
| 3.13   | 400.0   |
| 3.3875 | 553.0   |
| 3.6925 | 554.0   |
| 3.9975 | 545.0   |
| 4.3025 | 519.0   |
| 4.6075 | 483.0   |

表3.6 流速分布 (WAD5)

| 位置 [m] | 流速 [m/s] |
|--------|----------|
| 0.0    | 0.721    |
| 0.13   | 0.742    |
| 0.41   | 0.889    |
| 0.715  | 0.906    |
| 1.02   | 0.863    |
| 1.325  | 0.828    |
| 1.63   | 0.791    |
| 2.3    | 0.614    |
| 3.13   | 0.556    |
| 3.41   | 0.682    |
| 3.715  | 0.683    |
| 4.02   | 0.675    |
| 4.325  | 0.654    |
| 4.63   | 0.624    |

表3.7 実証試験解析／解析ケースおよび解析条件

| 対象試験ケース | ケース      | 解析コード    | 解析条件概要   |
|---------|----------|----------|--|
| WAD4    | caseV    | VICTORIA | ガスソース入力  |
| WAD5    | caseV    | ↑        | ガスソース入力  |
| WAD4    | caseA    | ART      | 平均半径： $1.0 \times 10^{-6}$ m／幾何標準偏差：1.5<br>ガスソース入力                             |
| WAD5    | caseA    | ↑        | 平均半径： $1.0 \times 10^{-6}$ m／幾何標準偏差：1.7<br>ガスソース入力                             |
| WAD4    | caseA/SA | ↑        | VICTORIAの結果を参考にして設定<br>平均半径： $0.5 \times 10^{-6}$ m<br>幾何標準偏差：1.954<br>ガスソース入力 |
| WAD5    | caseA/SA | ↑        | VICTORIAの結果を参考にして設定<br>平均半径： $0.3 \times 10^{-6}$ m<br>幾何標準偏差：1.875<br>ガスソース入力 |

表4.1 炭素鋼の物性値

| 密度：7850 kg/m <sup>3</sup> |                                |             |
|---------------------------|--------------------------------|-------------|
| 温度<br>K                   | 熱伝導率<br>kW/m <sup>2</sup> secK | 比熱<br>kW/kg |
| 300                       | $43.0 \times 10^{-3}$          | 0.465       |
| 500                       | $38.6 \times 10^{-3}$          | 0.528       |
| 800                       | $27.7 \times 10^{-3}$          | 0.622       |

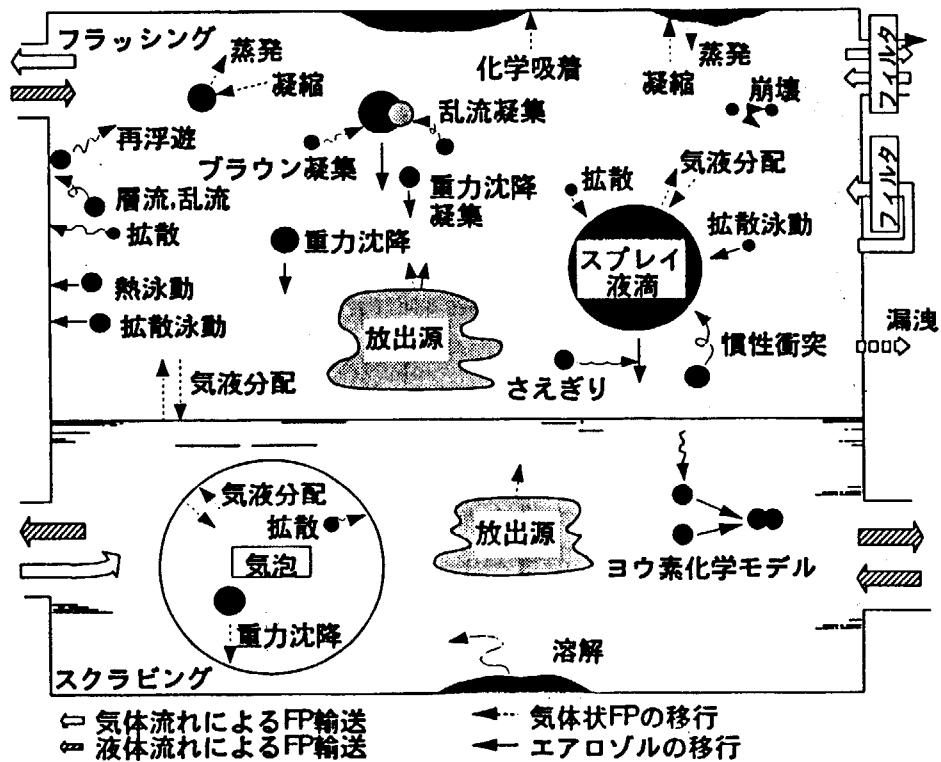


図2.1 ARTコードでモデル化しているFP移行挙動の模式図

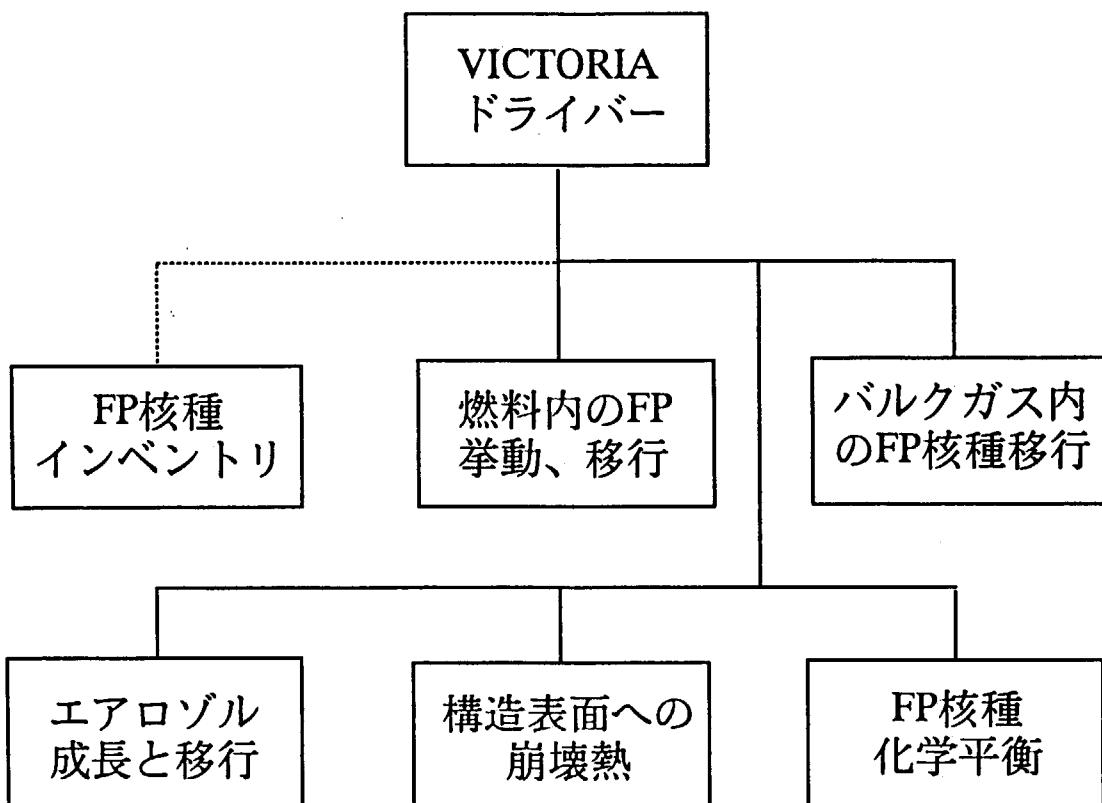
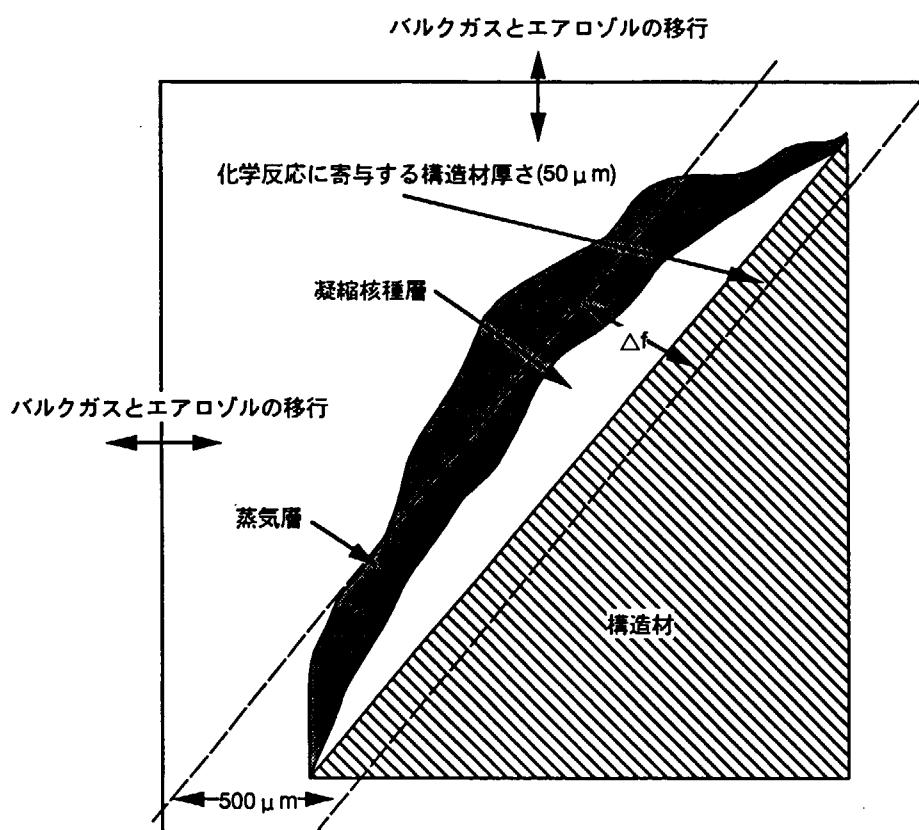
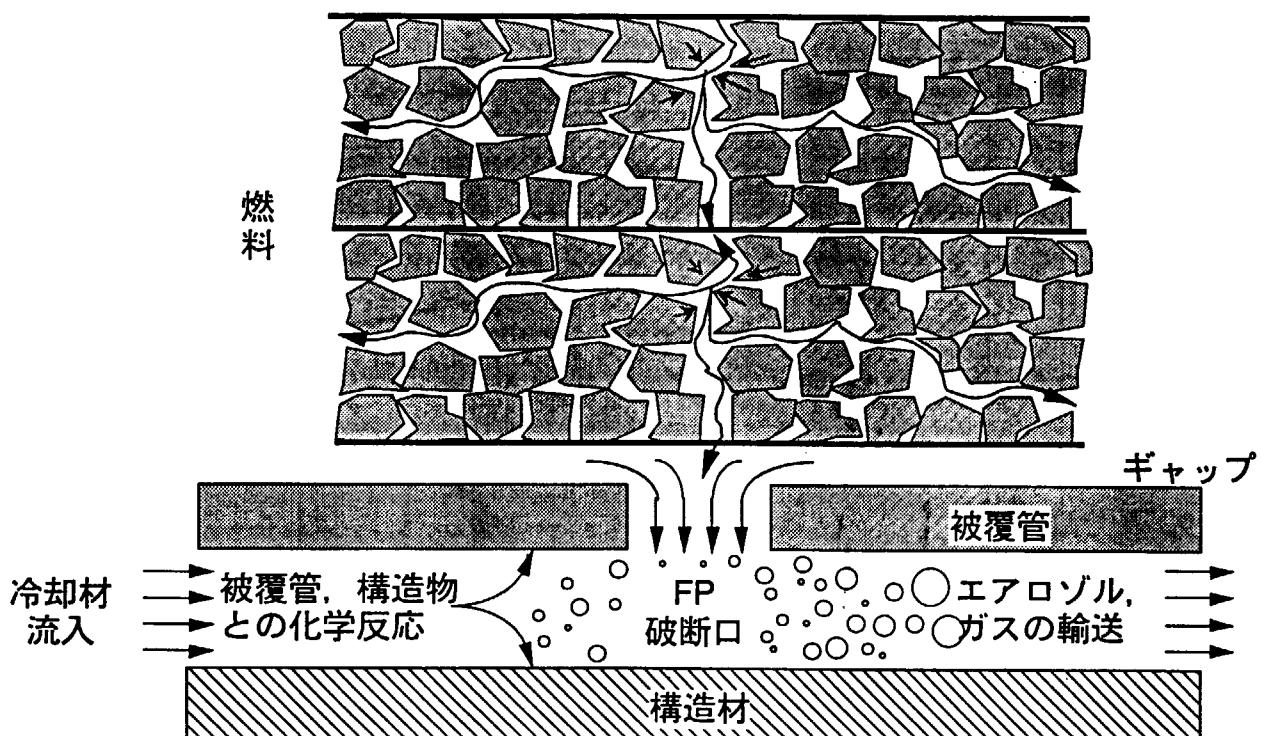


図2.2 VICTORIAコードの主要プログラム構成



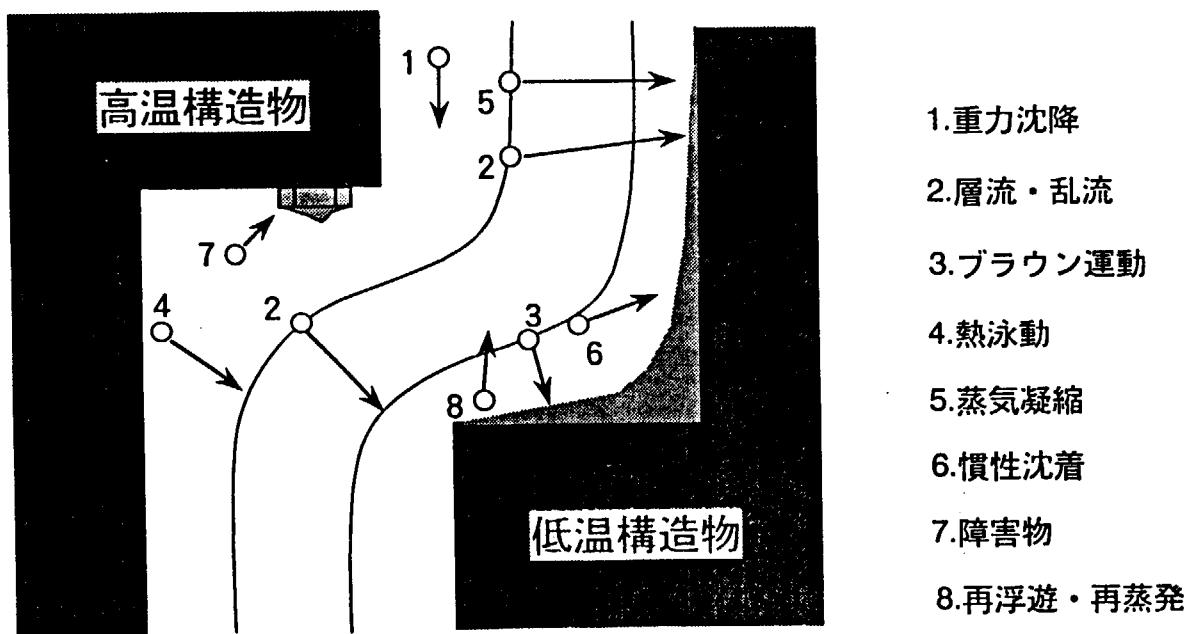


図2.5 VICTORIAで考慮しているエアロゾル沈着・再浮遊機構

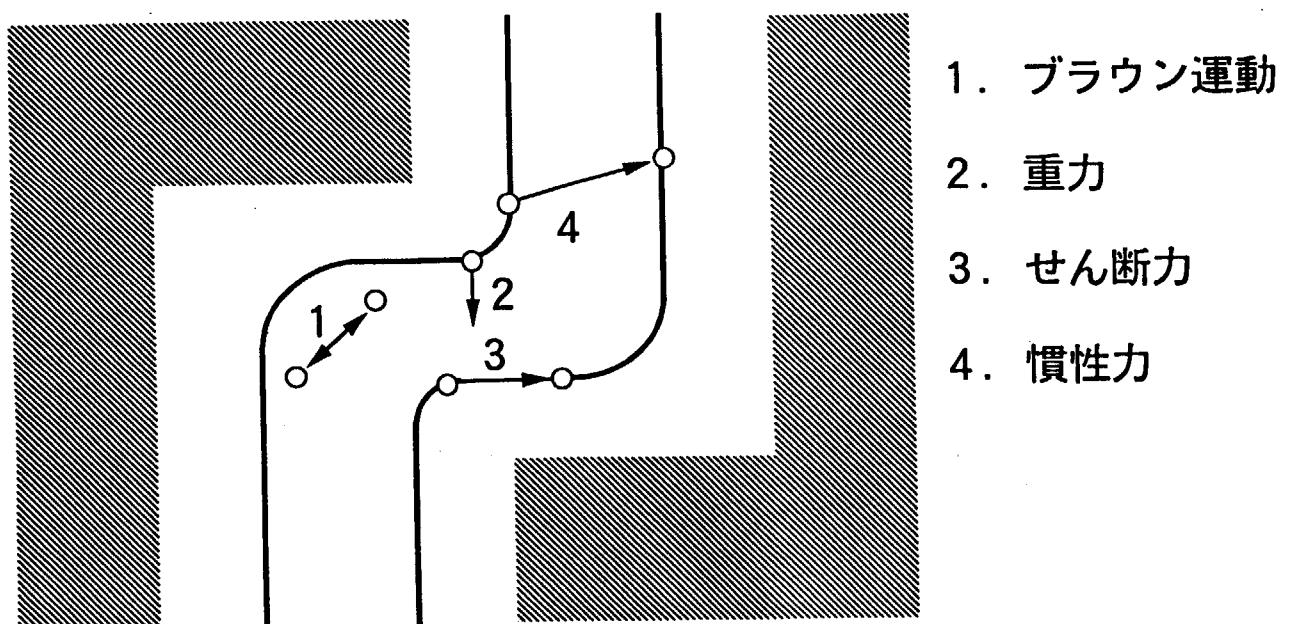


図2.6 VICTORIAで考慮しているエアロゾル凝集機構

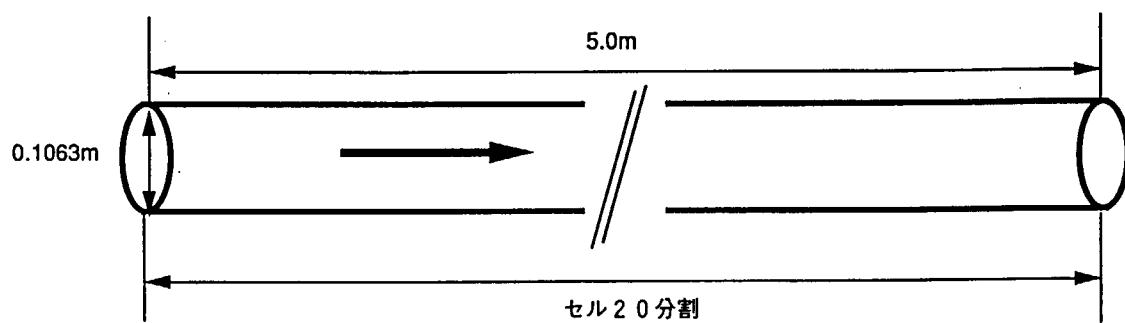


図3.1 実証試験配管

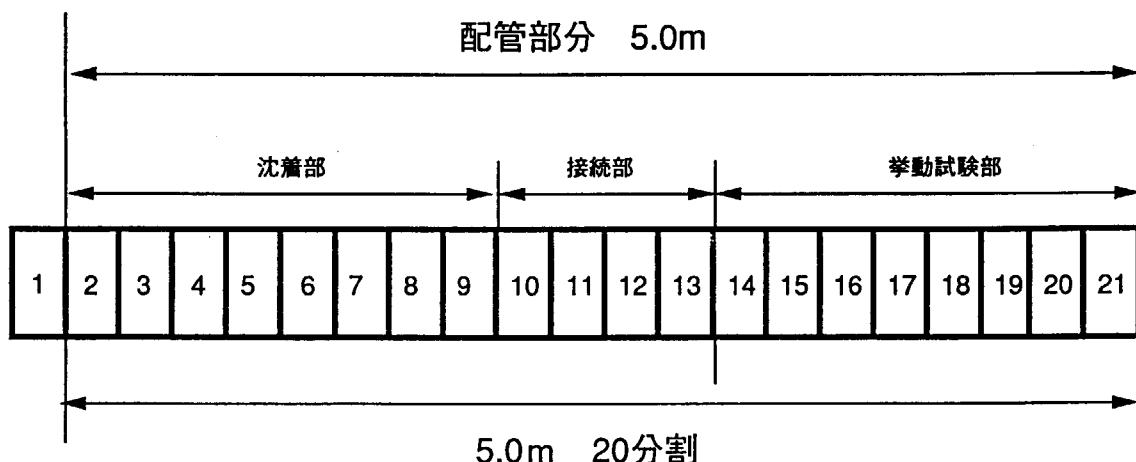


図3.2 セル分割図

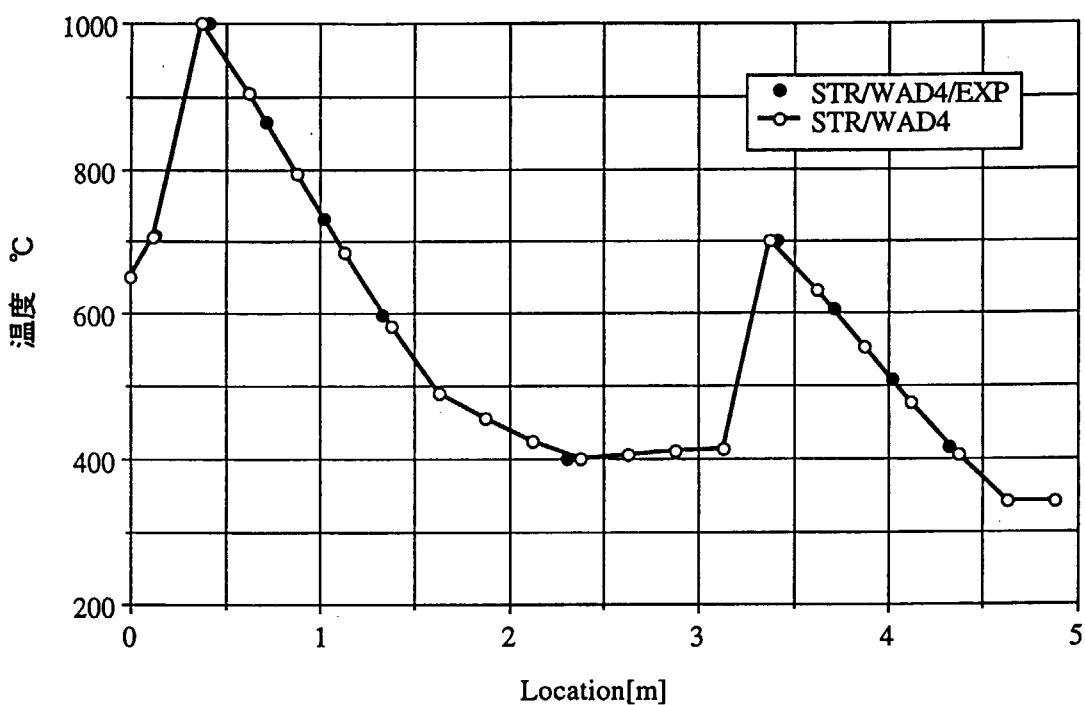


図3.3 配管構造材温度分布／WAD4

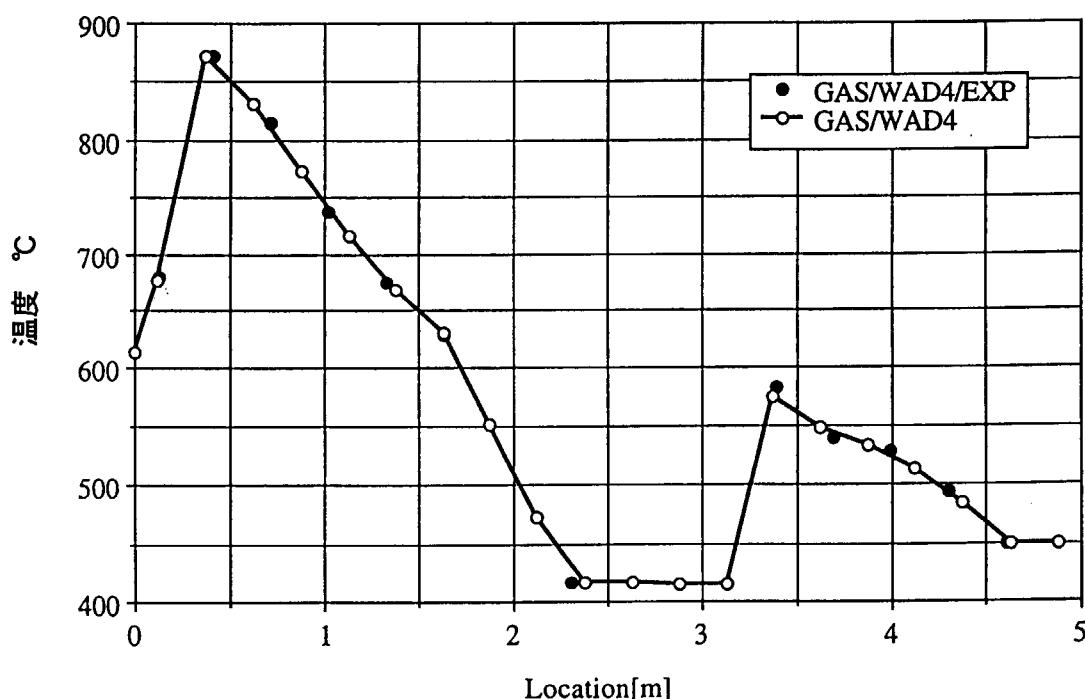


図3.4 ガス温度分布／WAD4

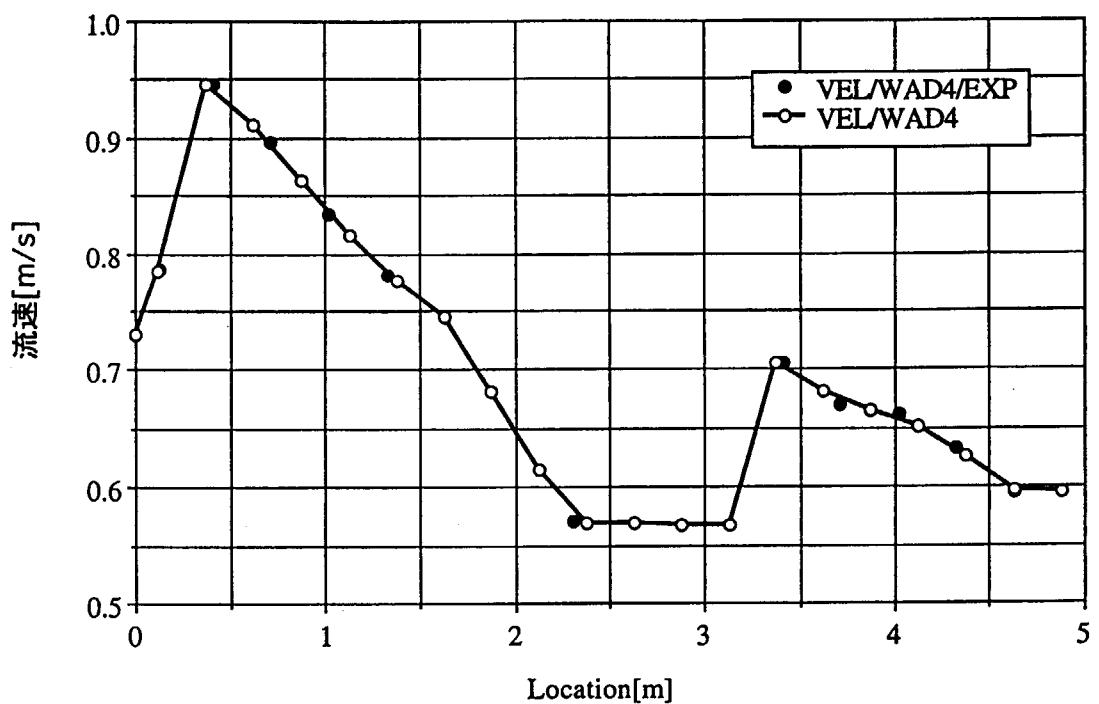


図3.5 流速分布／WAD4

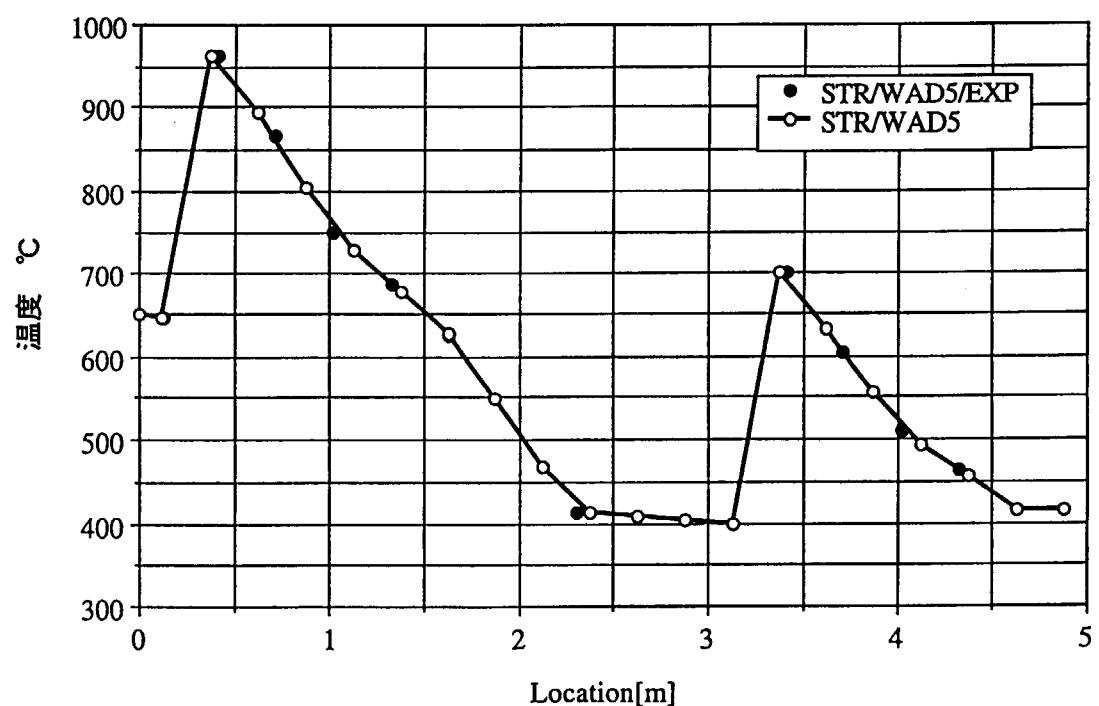


図3.6 配管構造材温度分布／WAD5

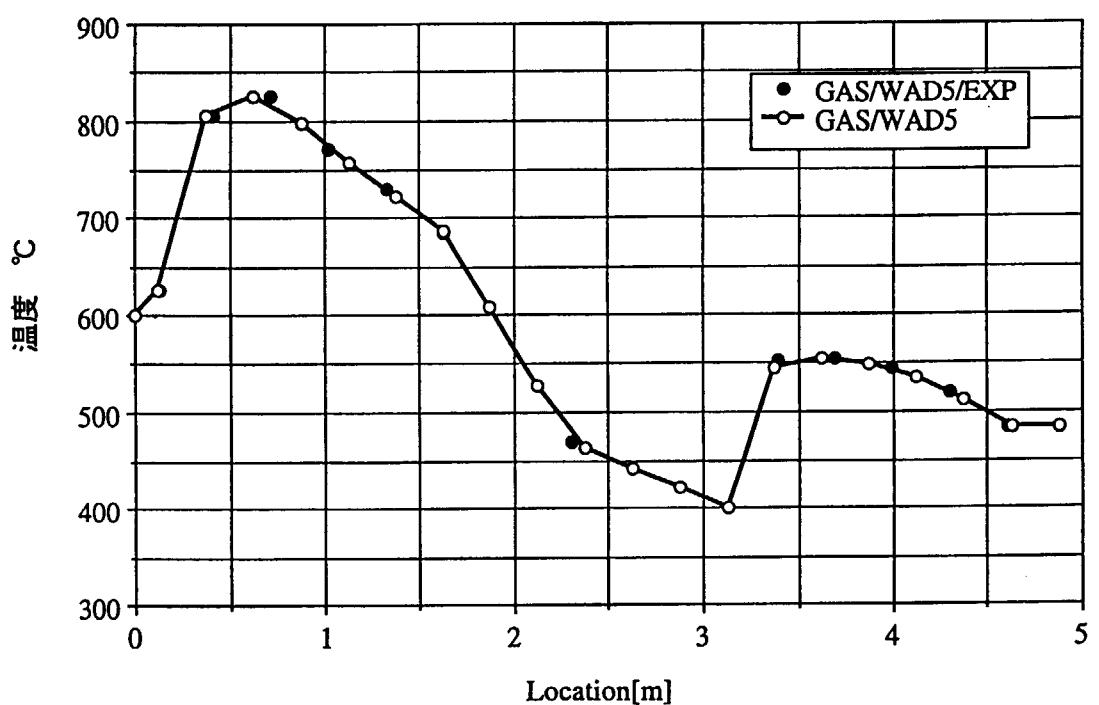


図3.7 ガス温度分布／WAD5

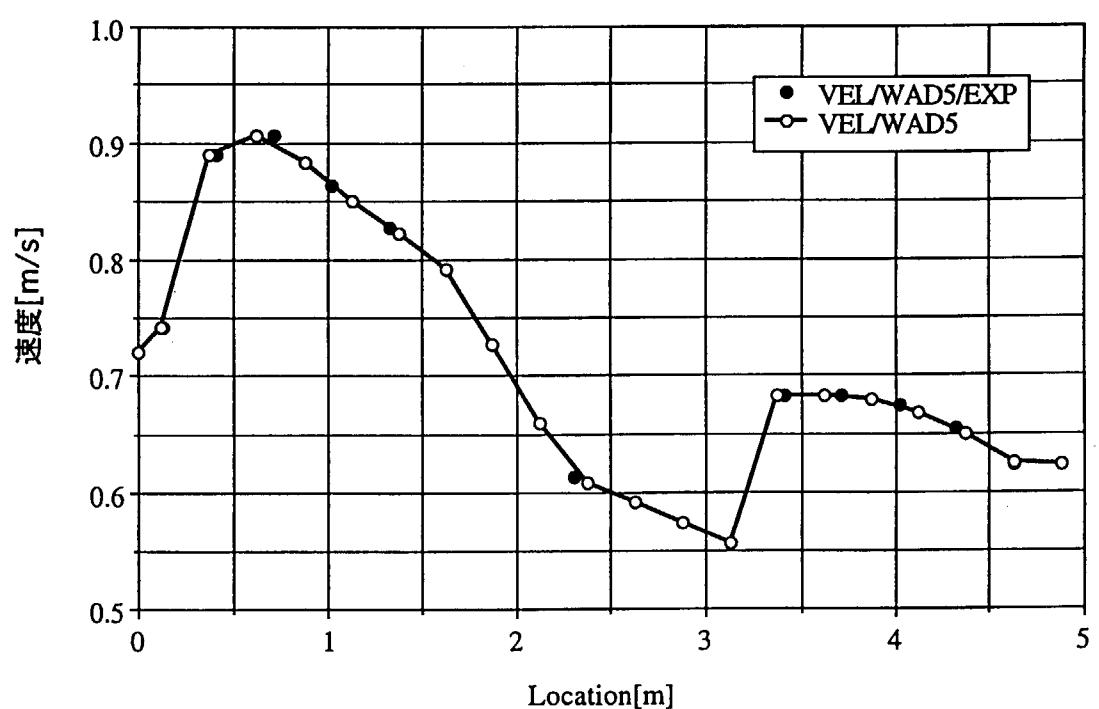


図3.8 流速分布／WAD5

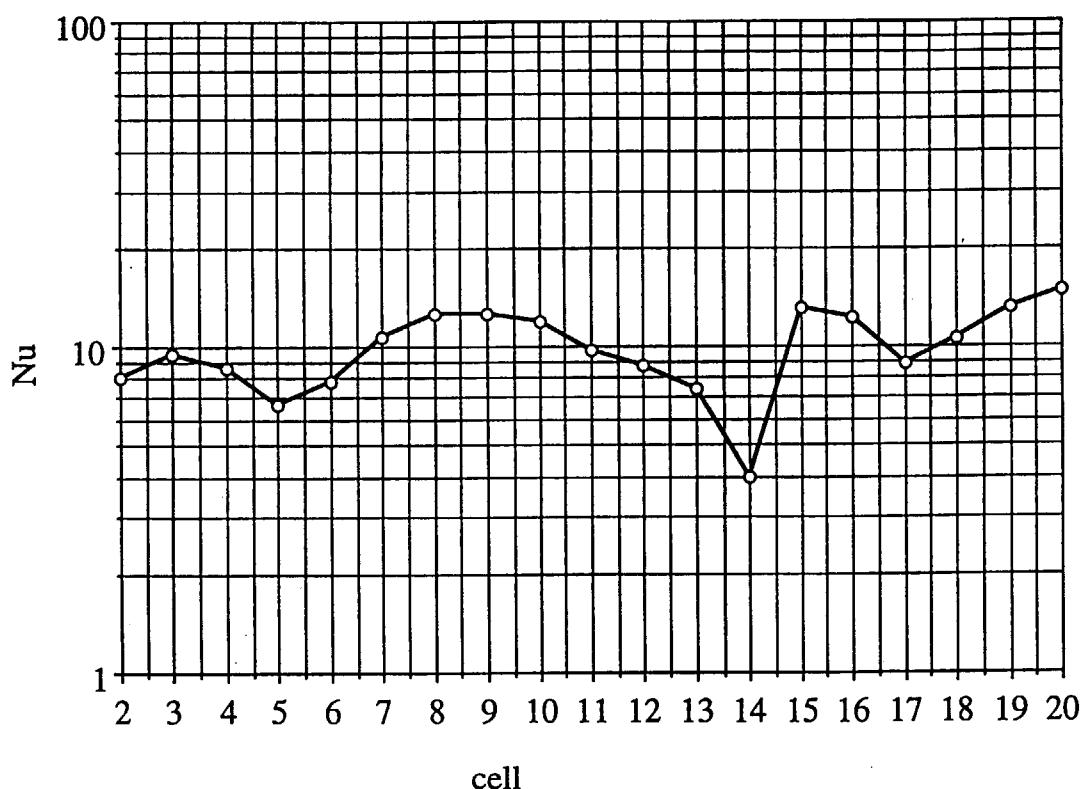
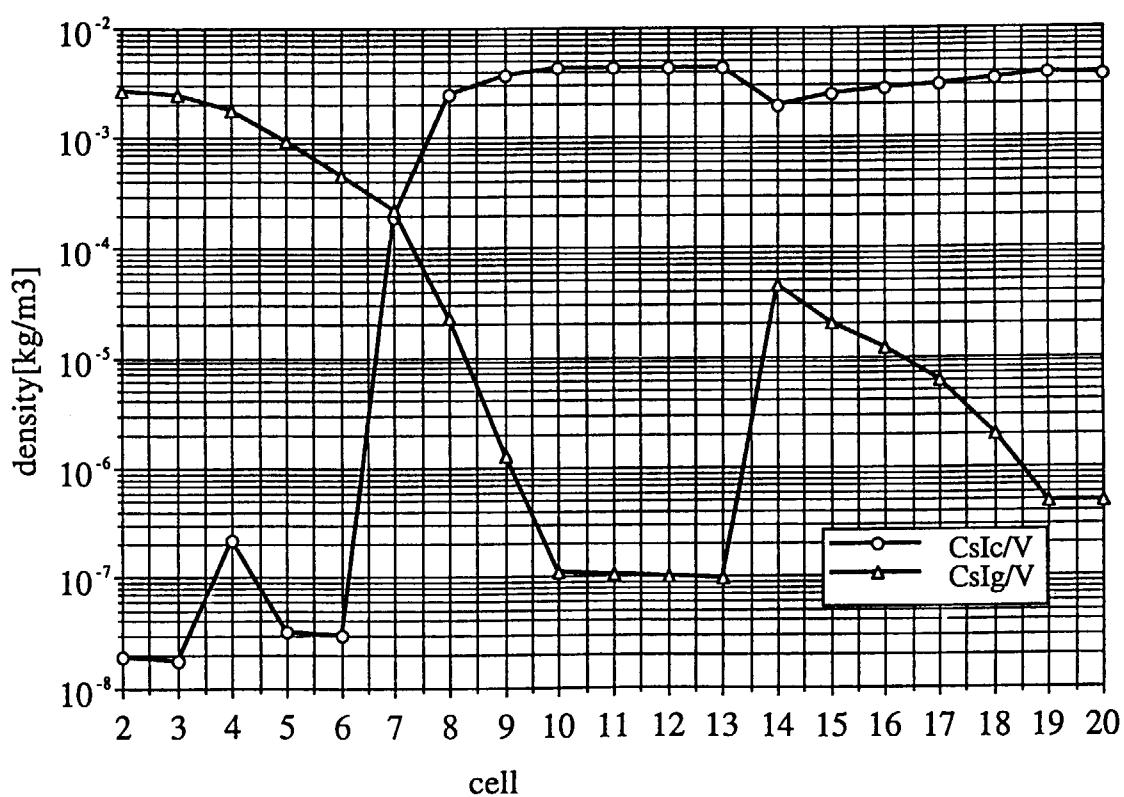


図3.9 Nusselt数分布（VICTORIAによる計算結果）

図3.10 気相中のエアロゾルおよびガス濃度分布／WAD4  
(VICTORIAエアロゾルソース入力)

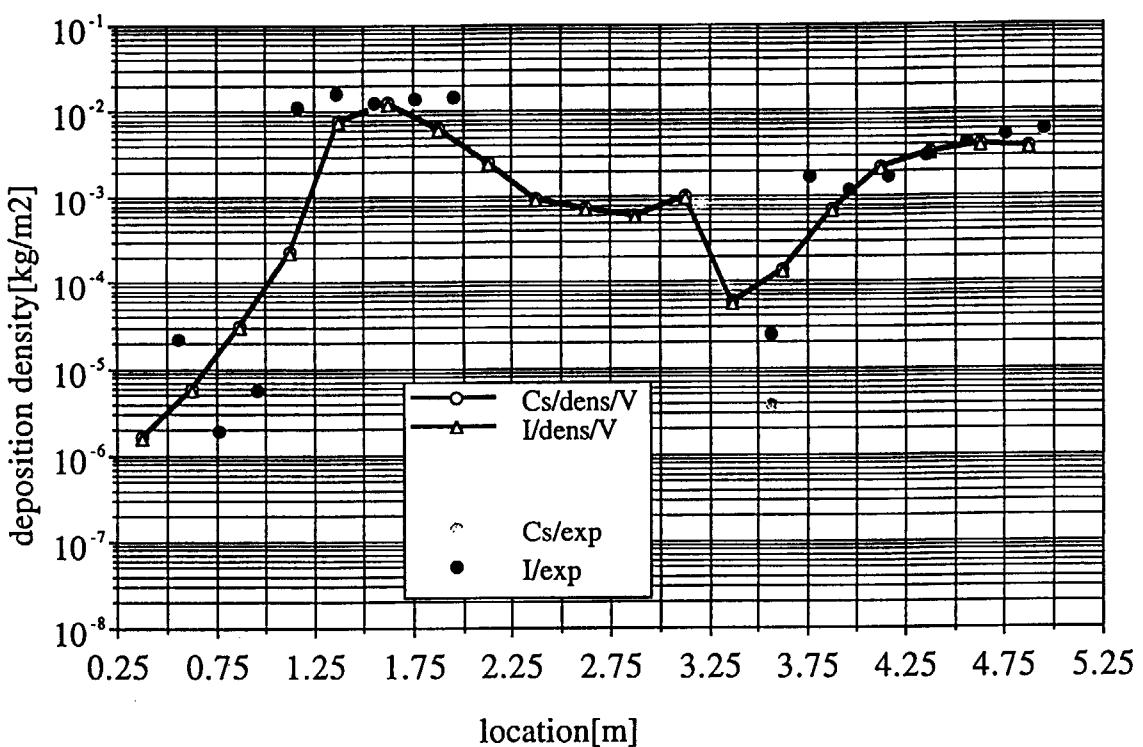


図3.11 沈着密度分布／WAD4 (VICTORIAエアロゾルソース入力)

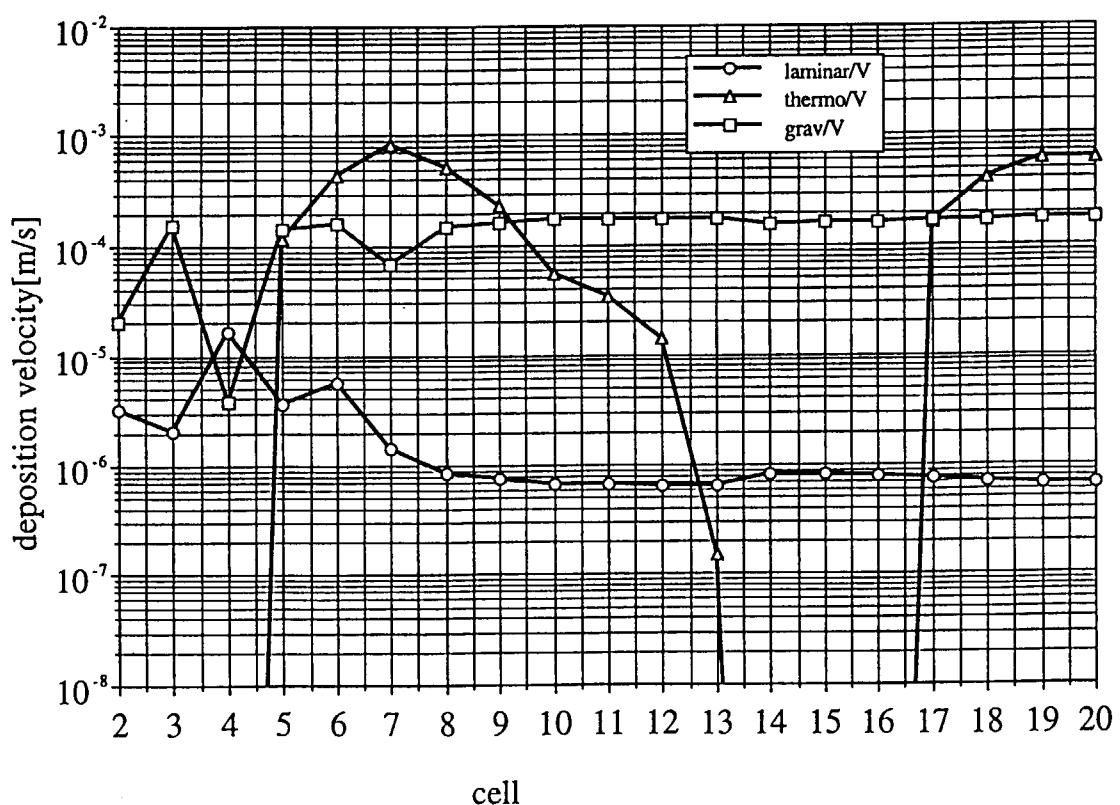


図3.12 平均沈着速度分布／WAD4 (VICTORIAエアロゾルソース入力)

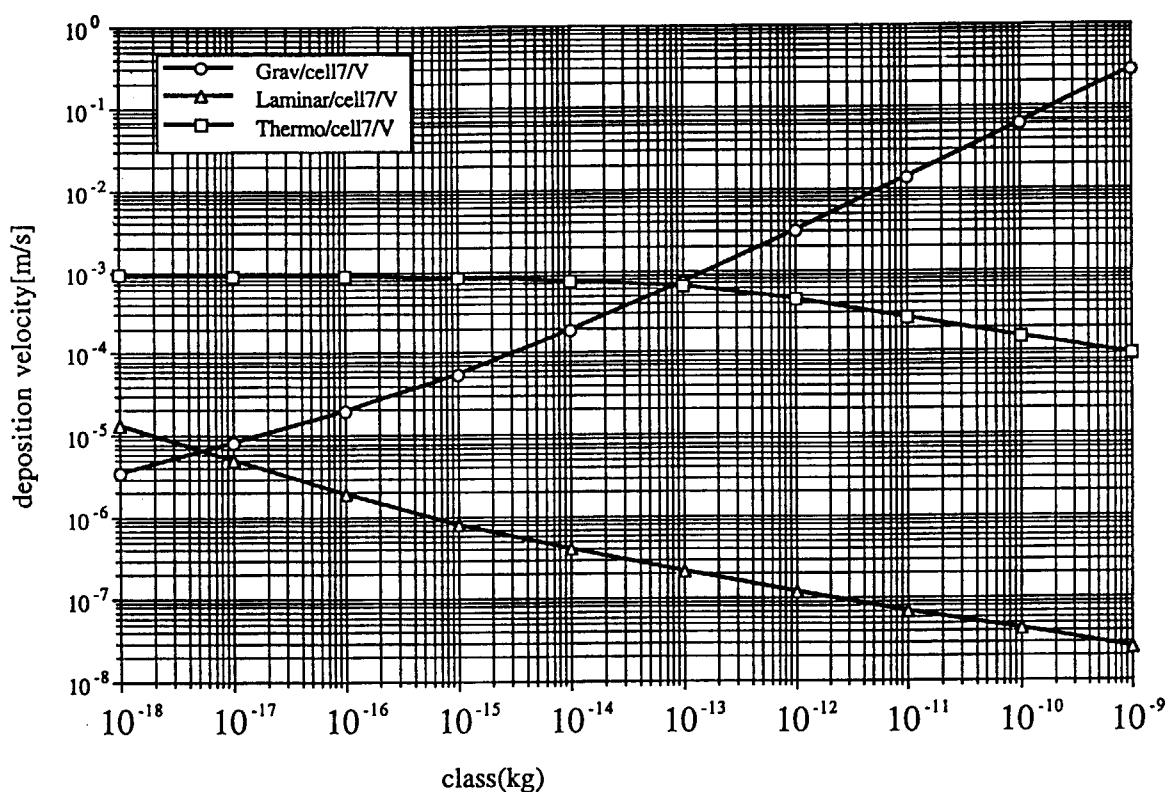


図3.13 沈着速度（セル7）／WAD4 (VICTORIAエアゾルソース入力)

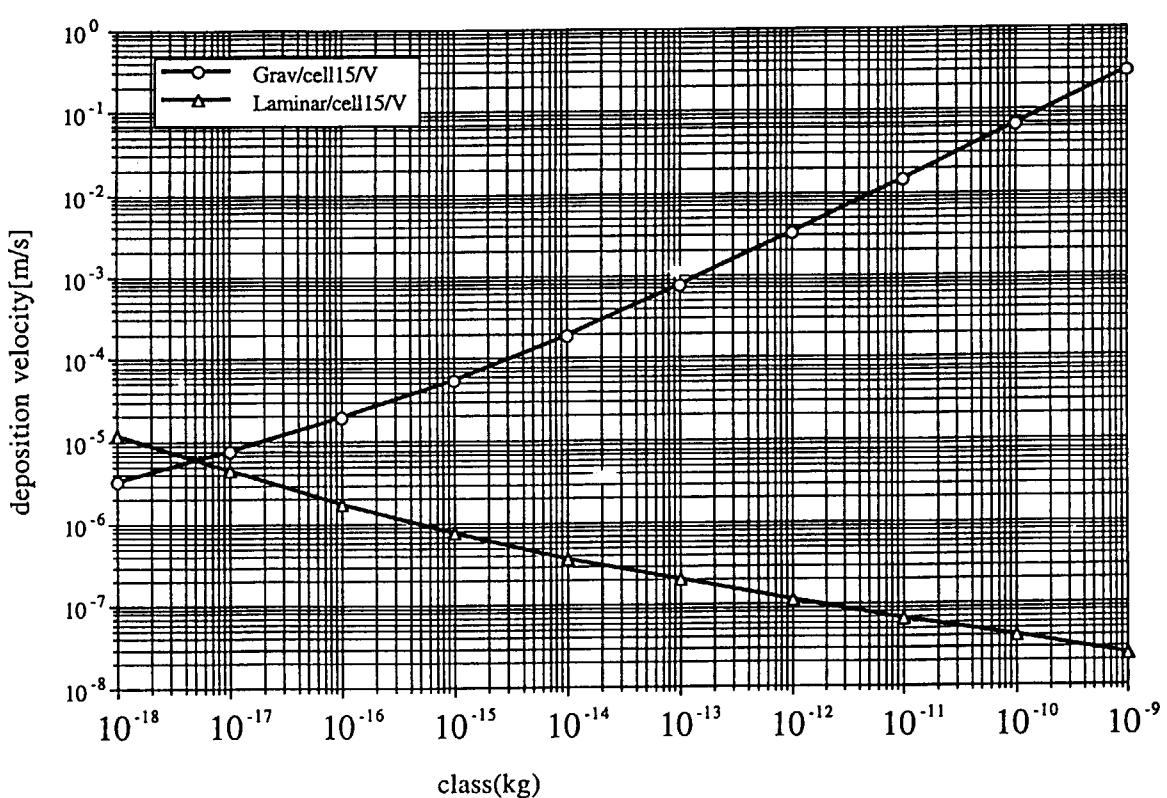


図3.14 沈着速度分布（セル15）／WAD4 (VICTORIAエアゾルソース入力)

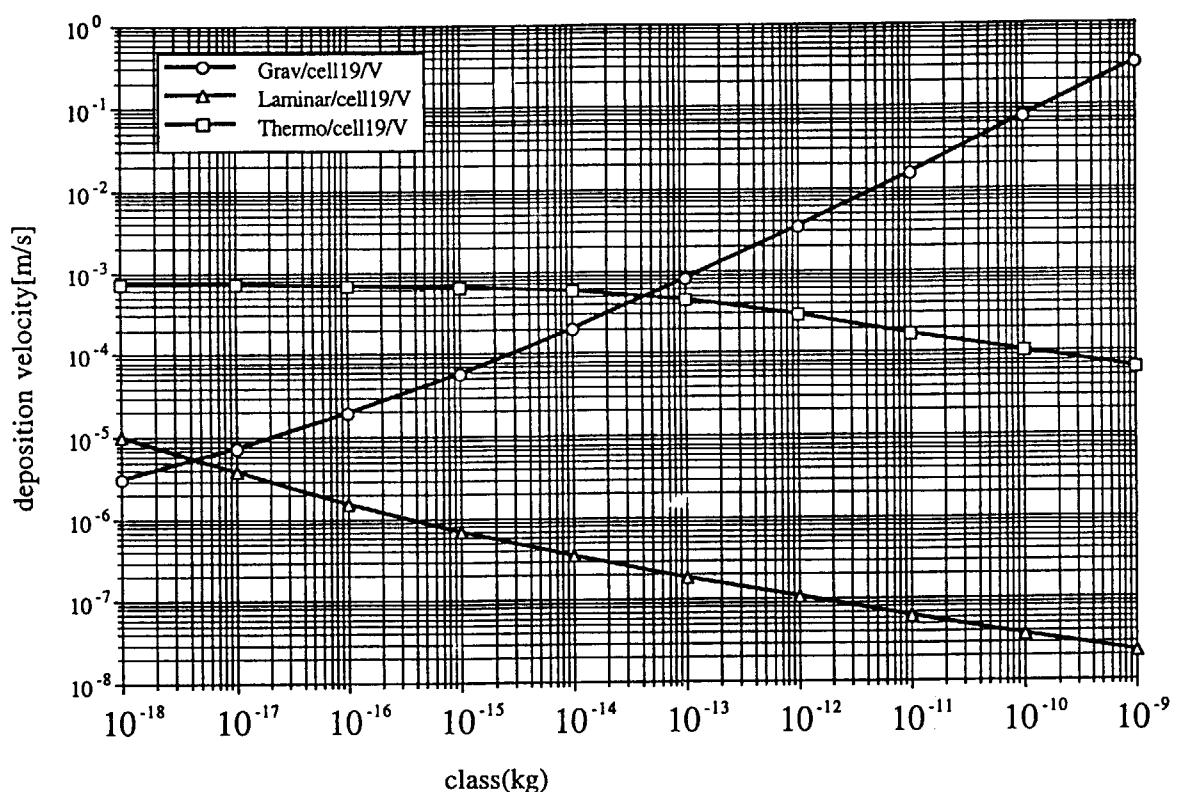


図3.15 沈着速度分布（セル19）／WAD4 (VICTORIAエアロゾルソース入力)

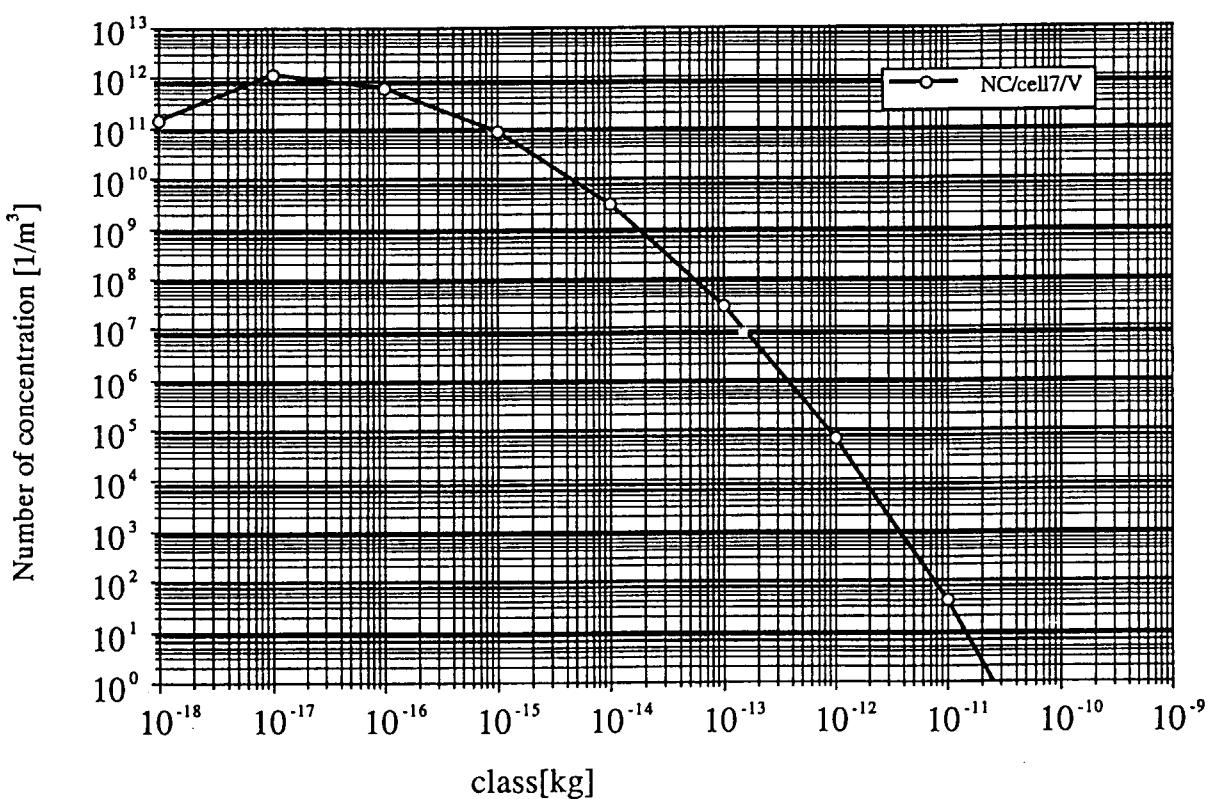


図3.16 数密度分布（セル7）／WAD4 (VICTORIAエアロゾルソース入力)

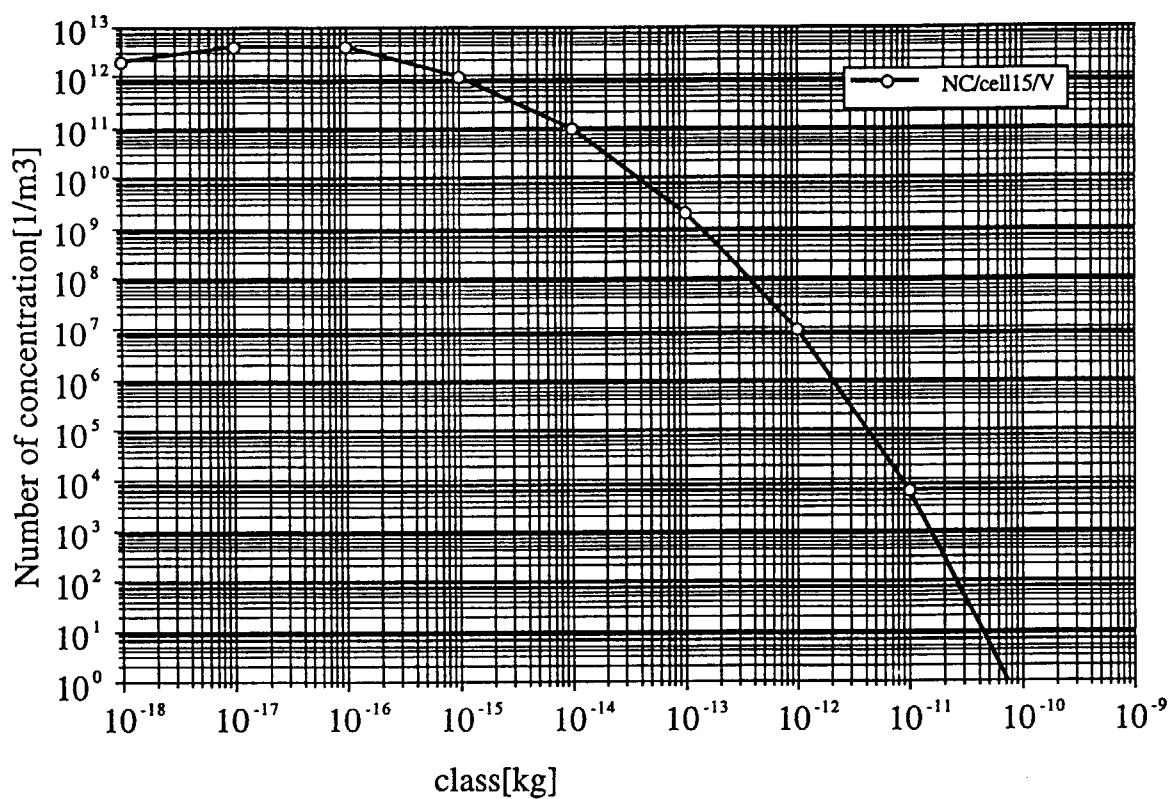


図3.17 数密度分布（セル15）／WAD4 (VICTORIAエアロゾルソース入力)

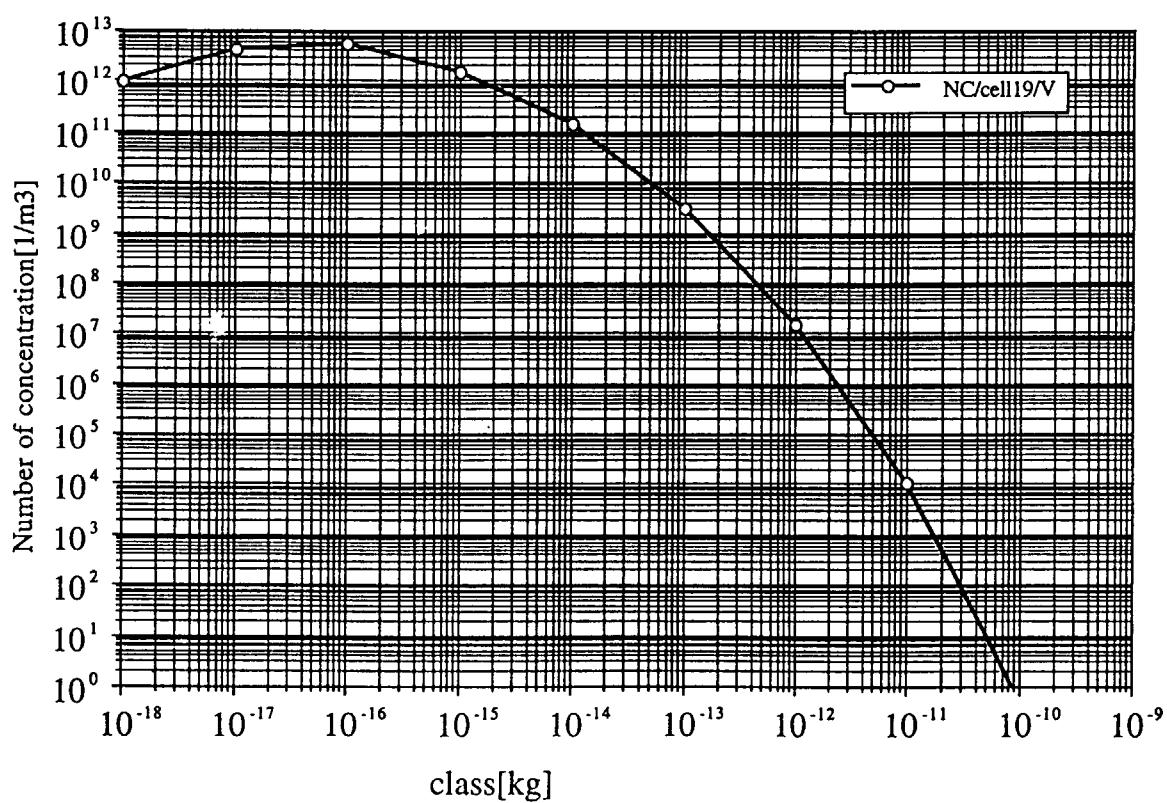


図3.18 数密度分布（セル19）／WAD4 (VICTORIAエアロゾルソース入力)

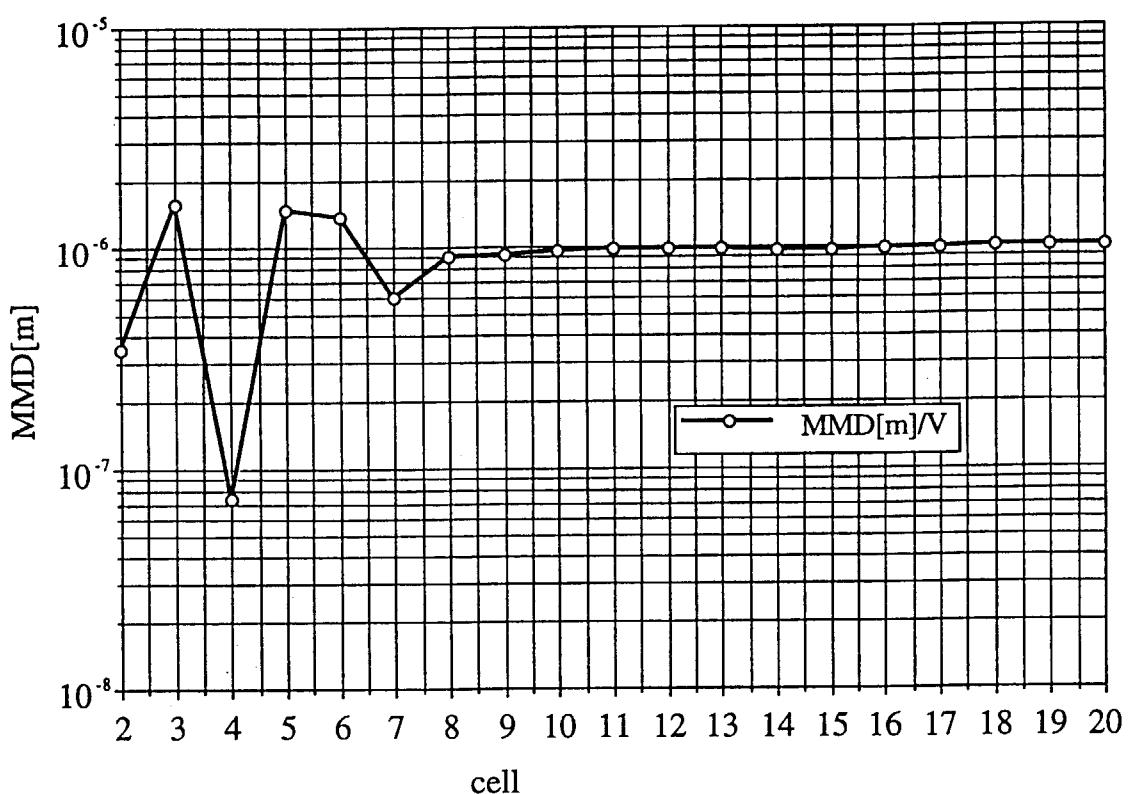
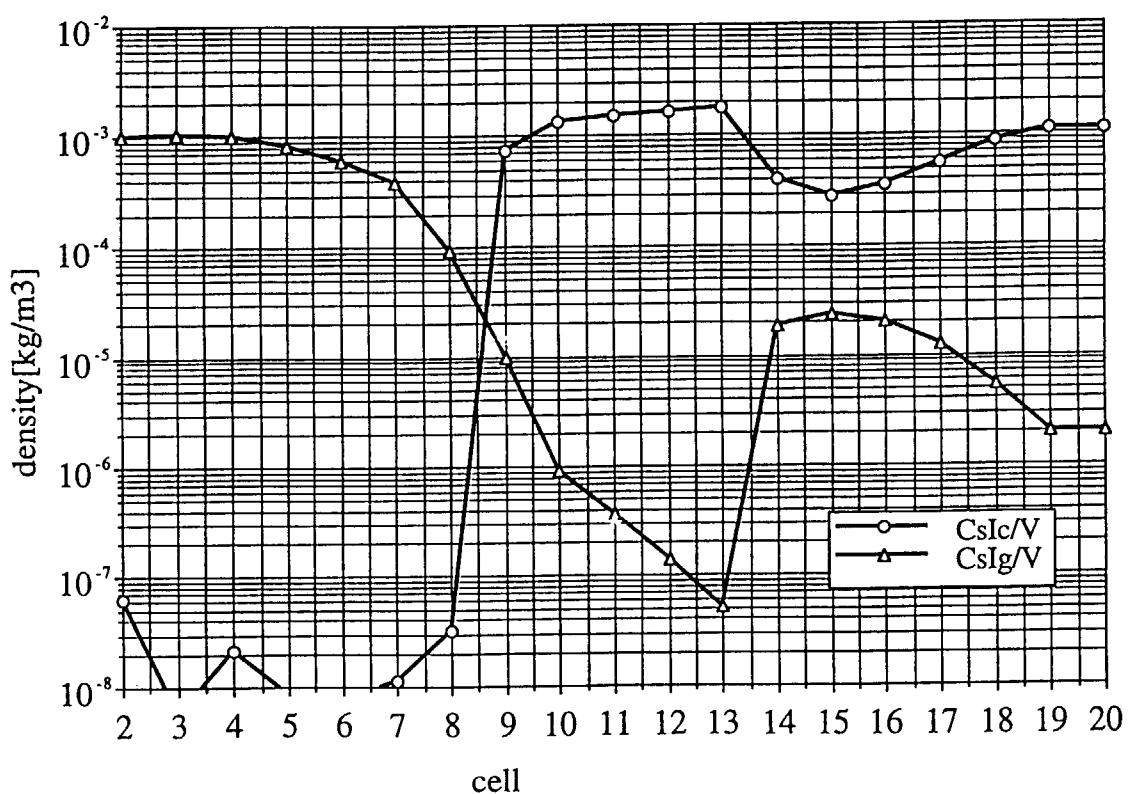


図3.19 質量中央径分布／WAD4 (VICTORIAエアロゾルソース入力)

図3.20 気相中のエアロゾルおよびガス濃度分布／WAD5  
(VICTORIAエアロゾルソース入力)

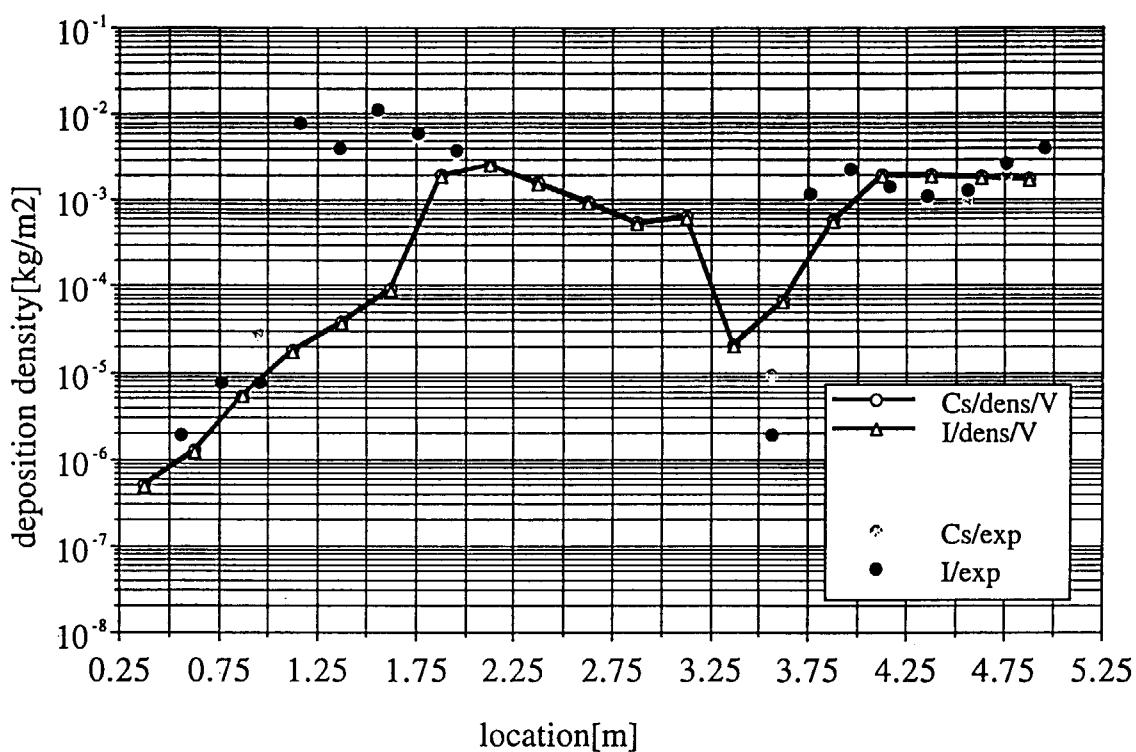


図3.21 沈着密度分布／WAD5 (VICTORIAエアロゾルソース入力)

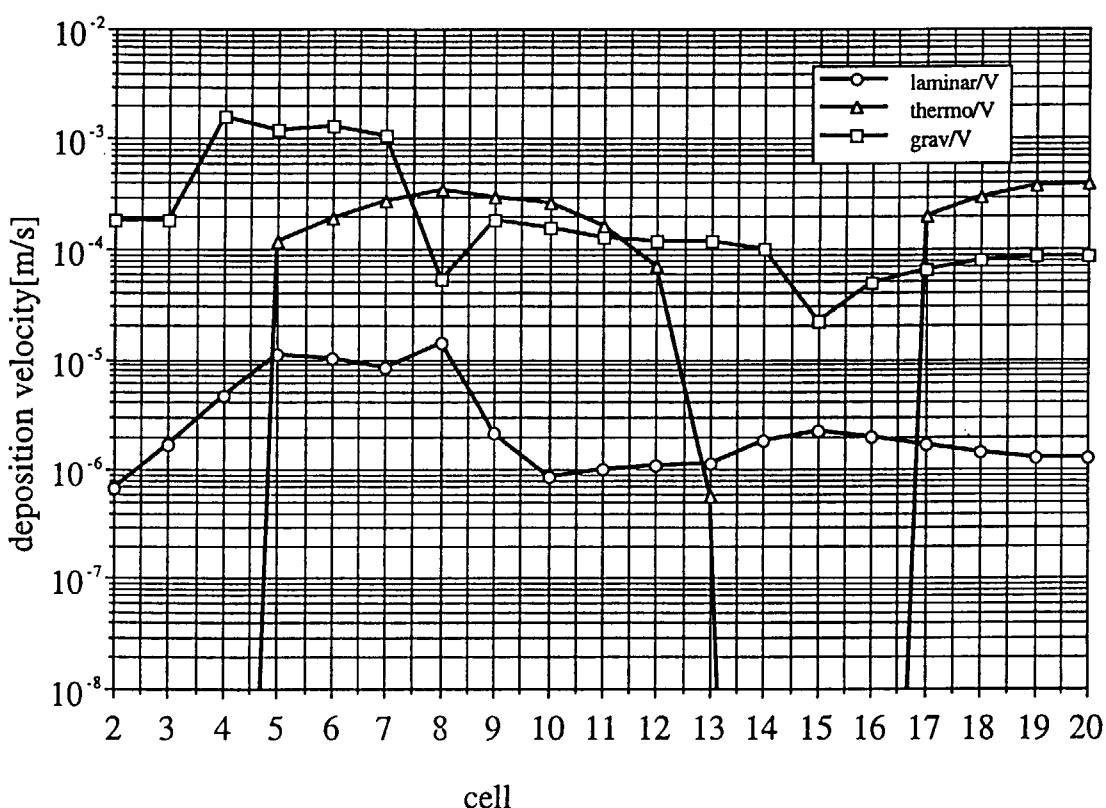


図3.22 平均沈着速度分布／WAD5 (VICTORIAエアロゾルソース入力)

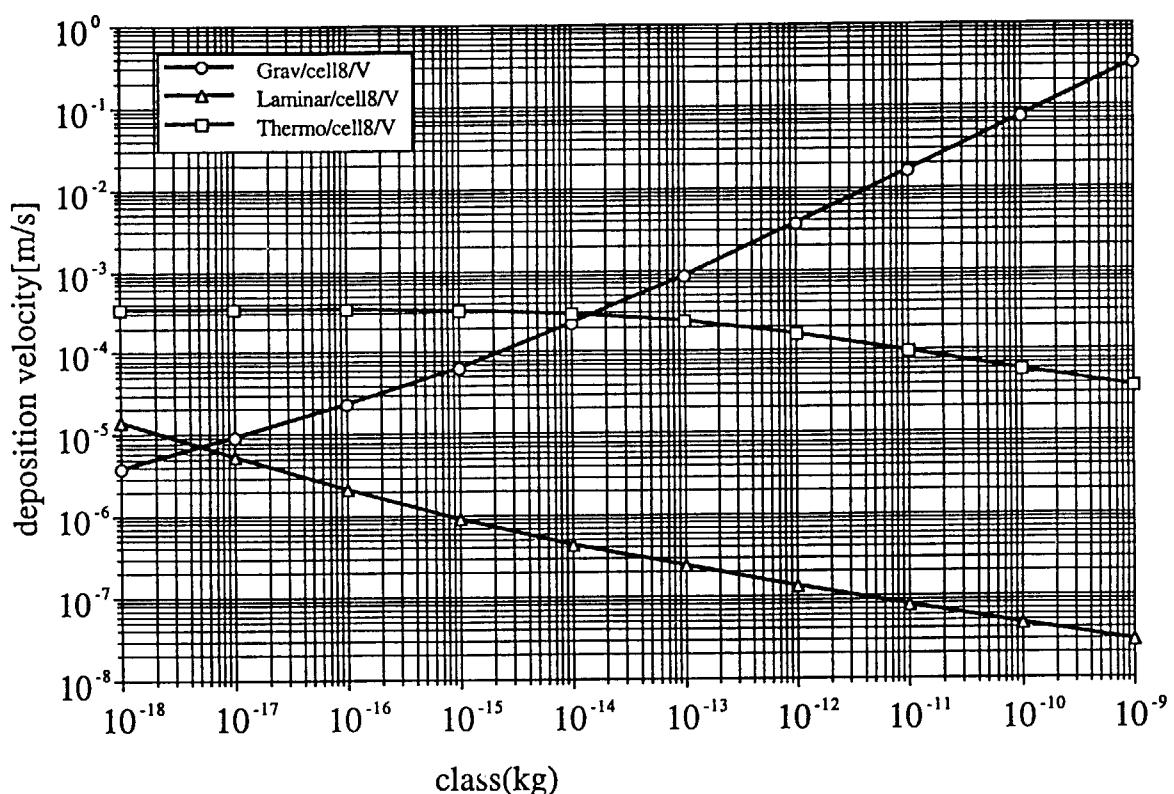


図3.23 沈着速度分布（セル8）／WAD5 (VICTORIAエアロゾルソース入力)

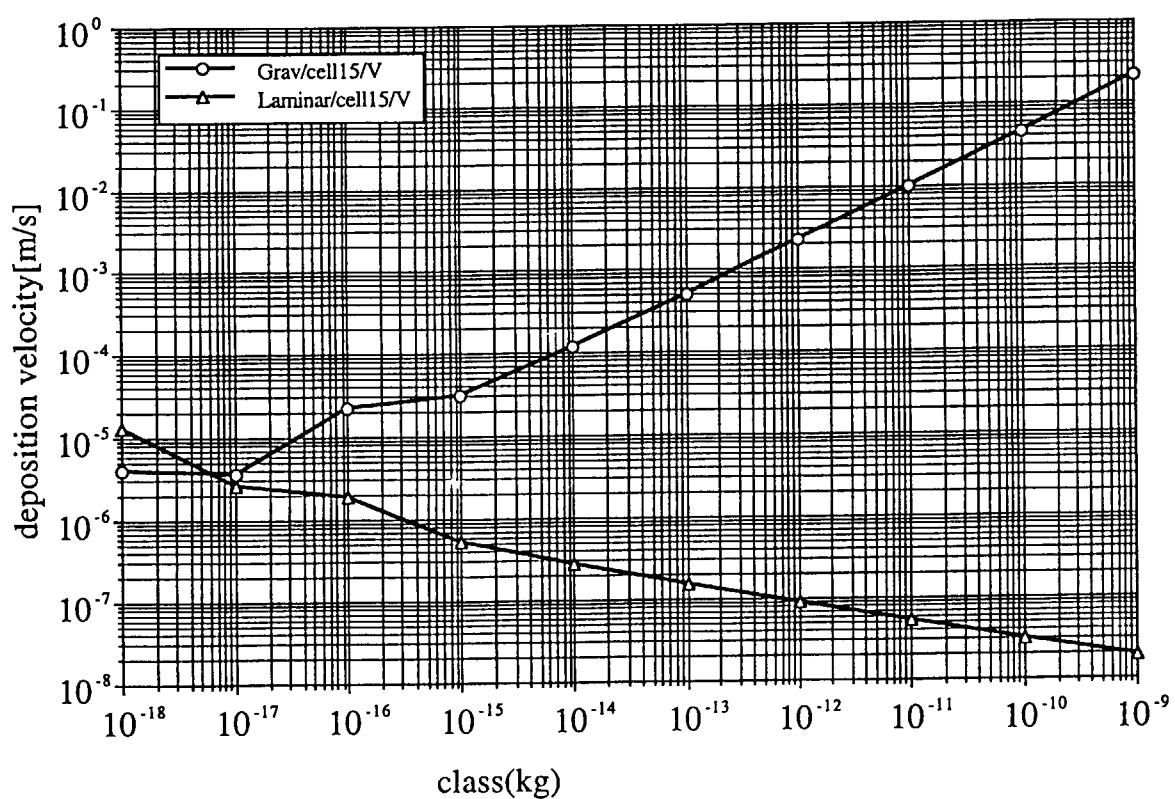


図3.24 沈着速度分布（セル15）／WAD5 (VICTORIAエアロゾルソース入力)

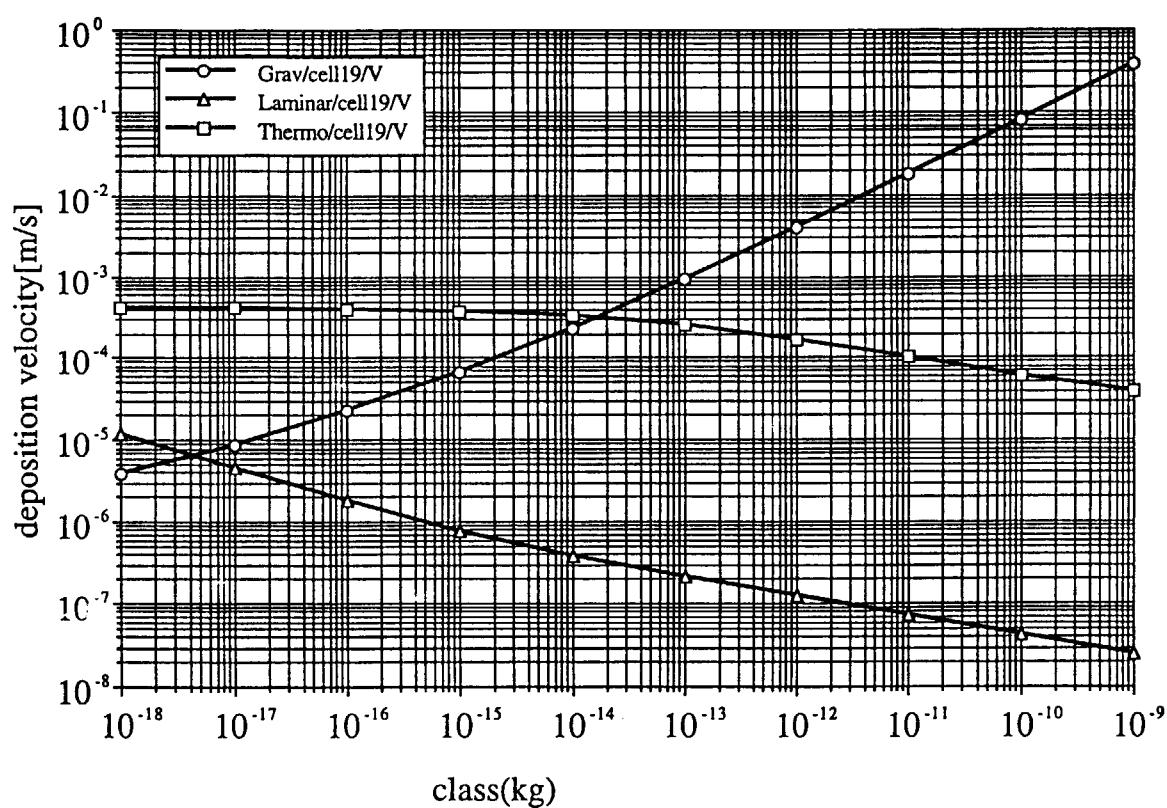


図3.25 沈着速度分布（セル19）／WAD5 (VICTORIAエアロゾルソース入力)

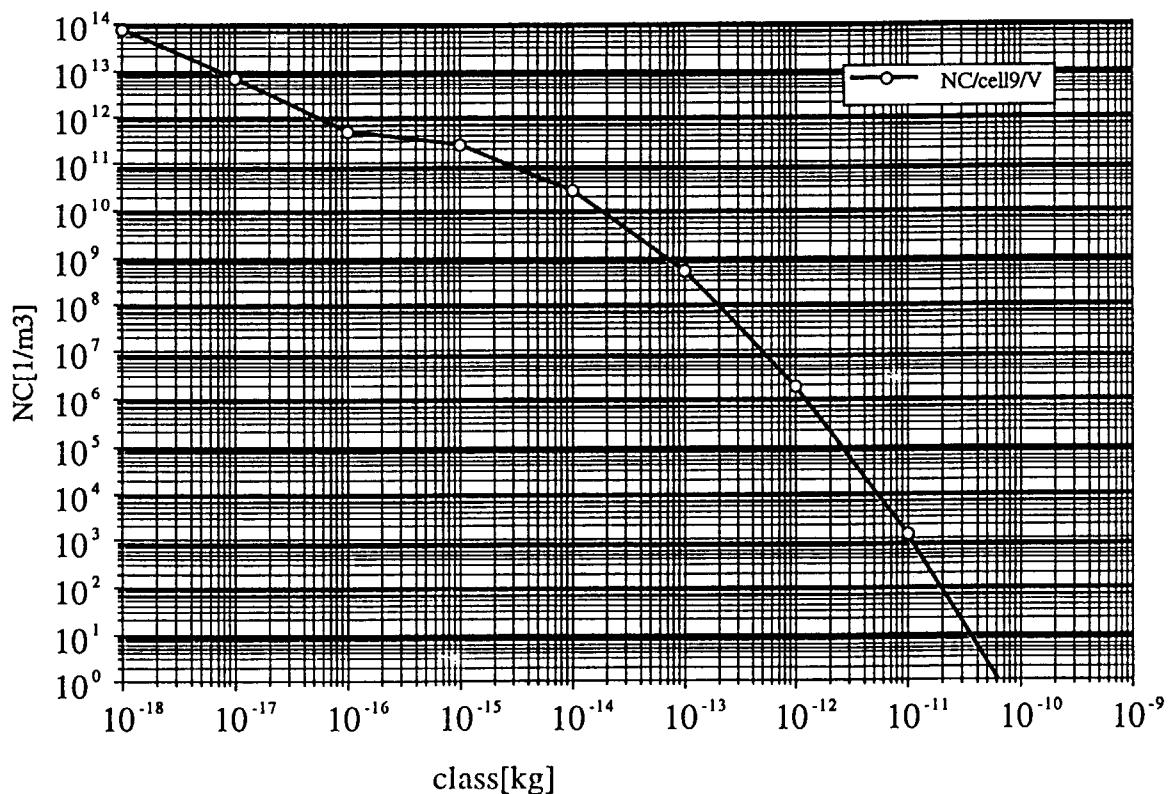


図3.26 数密度分布（セル9）／WAD5 (VICTORIAエアロゾルソース入力)

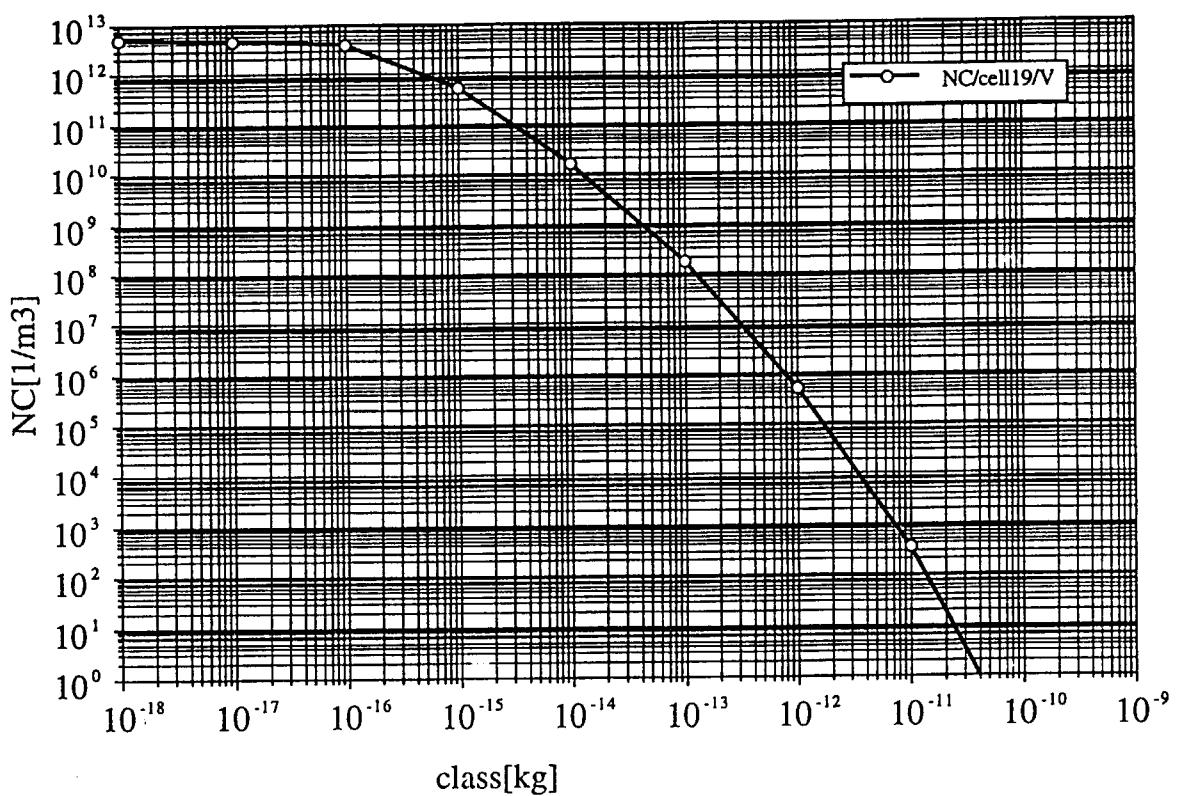


図3.27 数密度分布（セル19）／WAD5（VICTORIAエアロゾルソース入力）

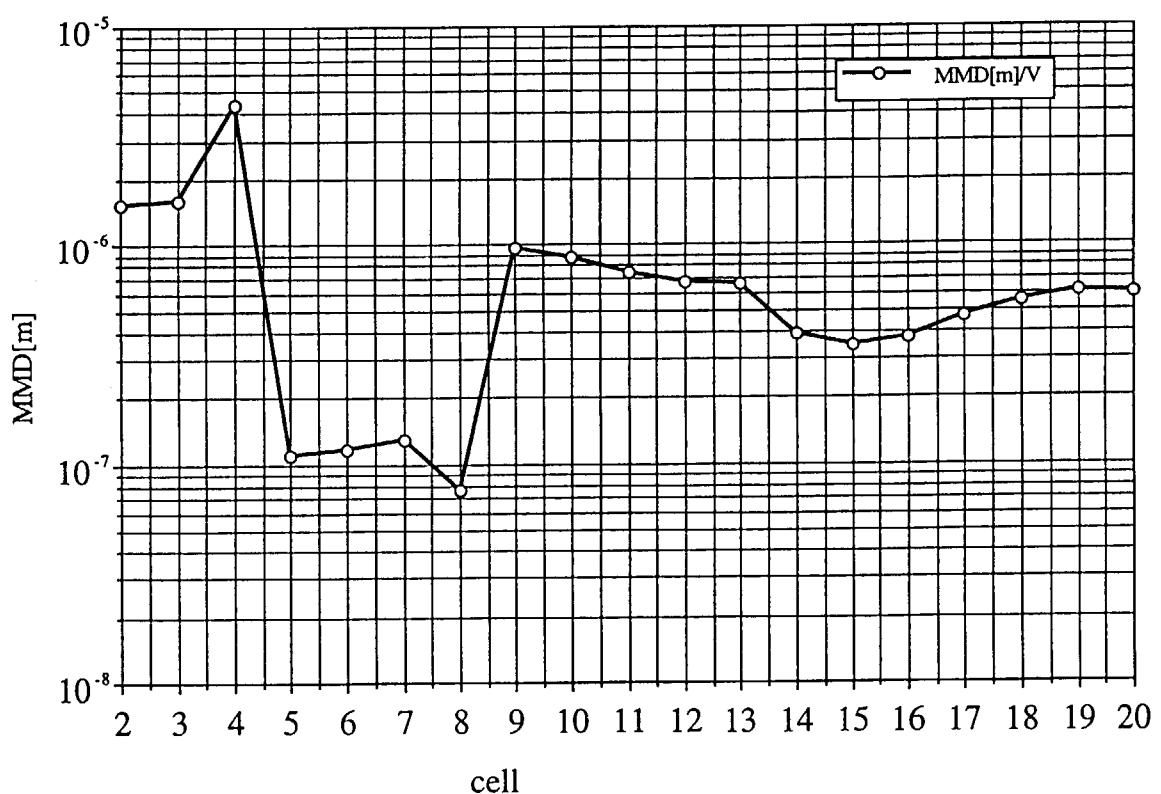


図3.28 MMD／WAD5（VICTORIAエアロゾルソース入力）

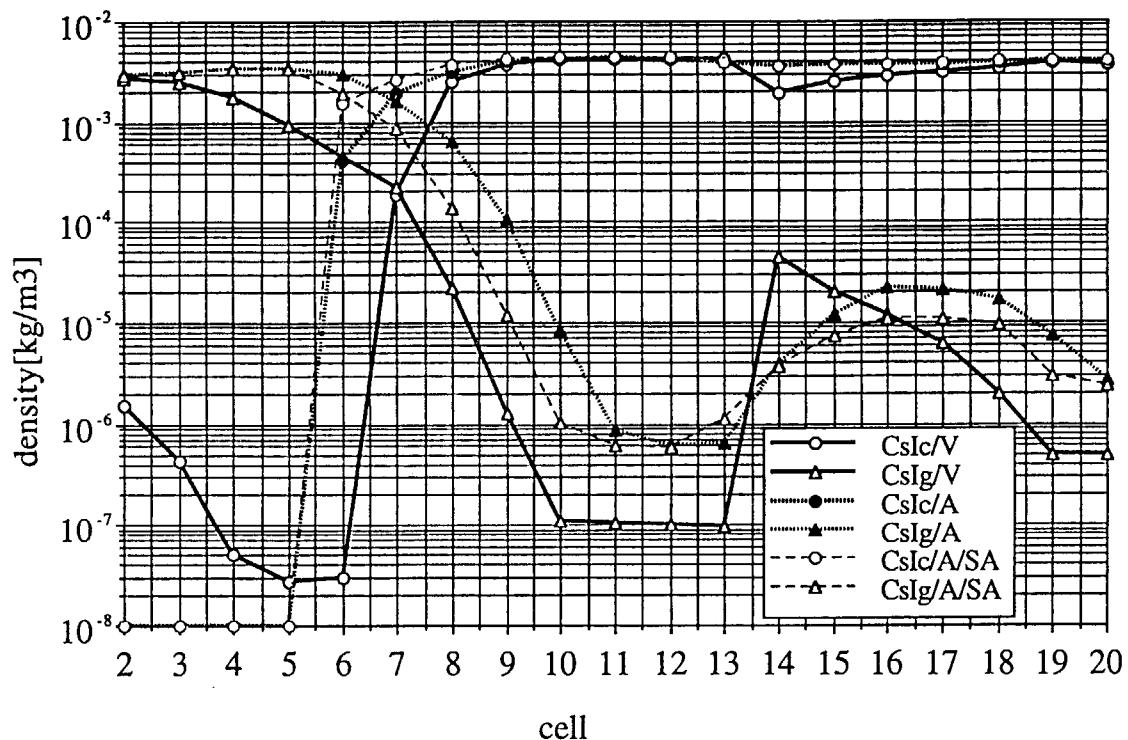


図3.29 気相中のCsIエアロゾルおよびガス濃度分布 (WAD4/ART感度解析)

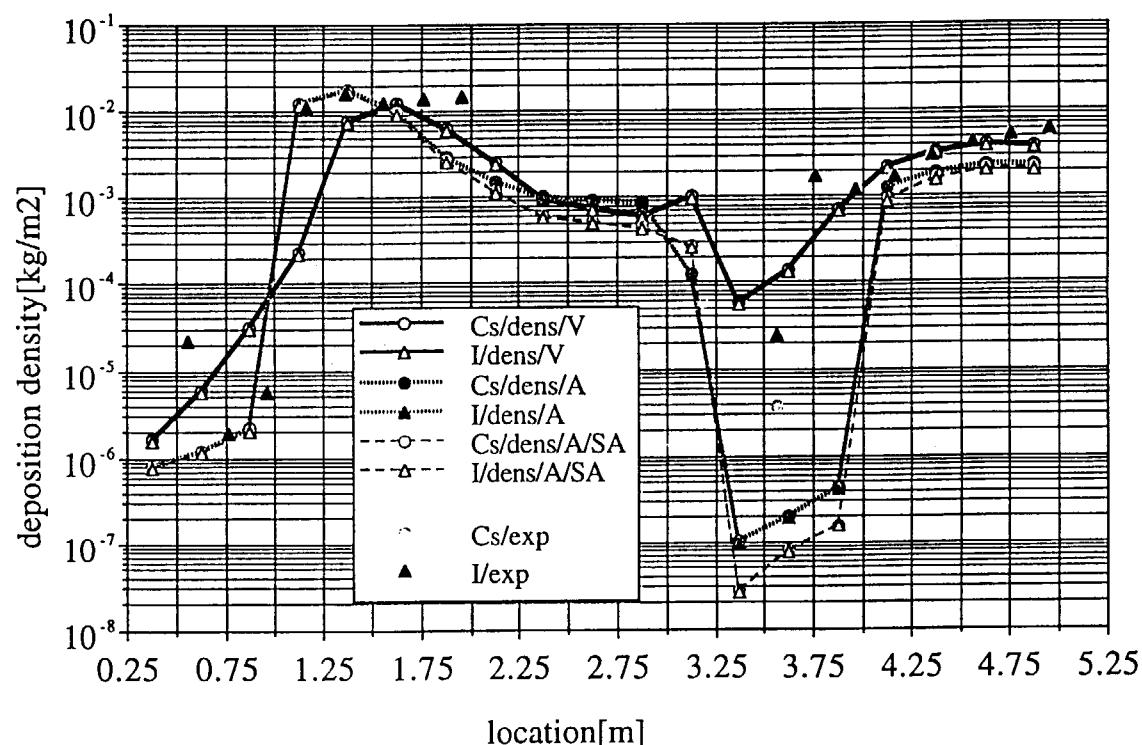


図3.30 沈着密度分布 (WAD4/ART感度解析)

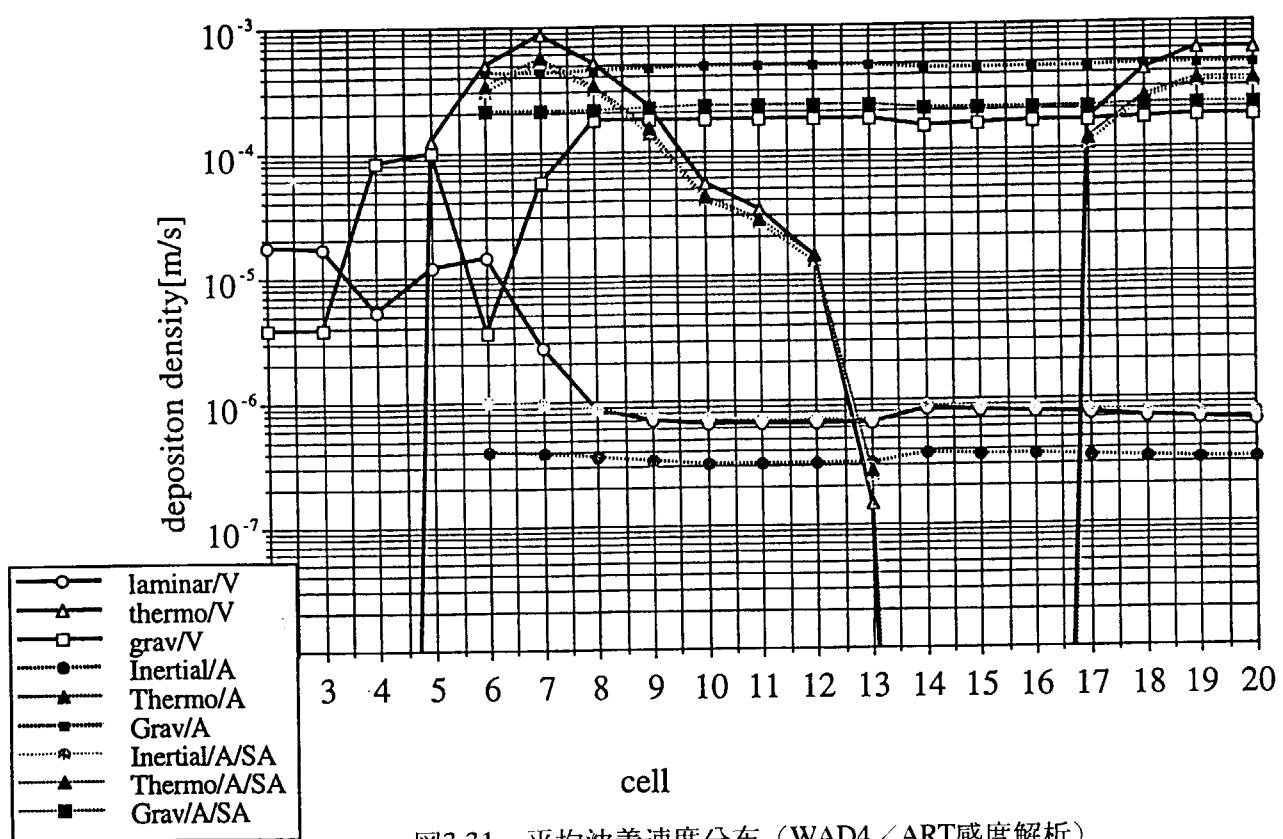


図3.31 平均沈着速度分布 (WAD4/ART感度解析)

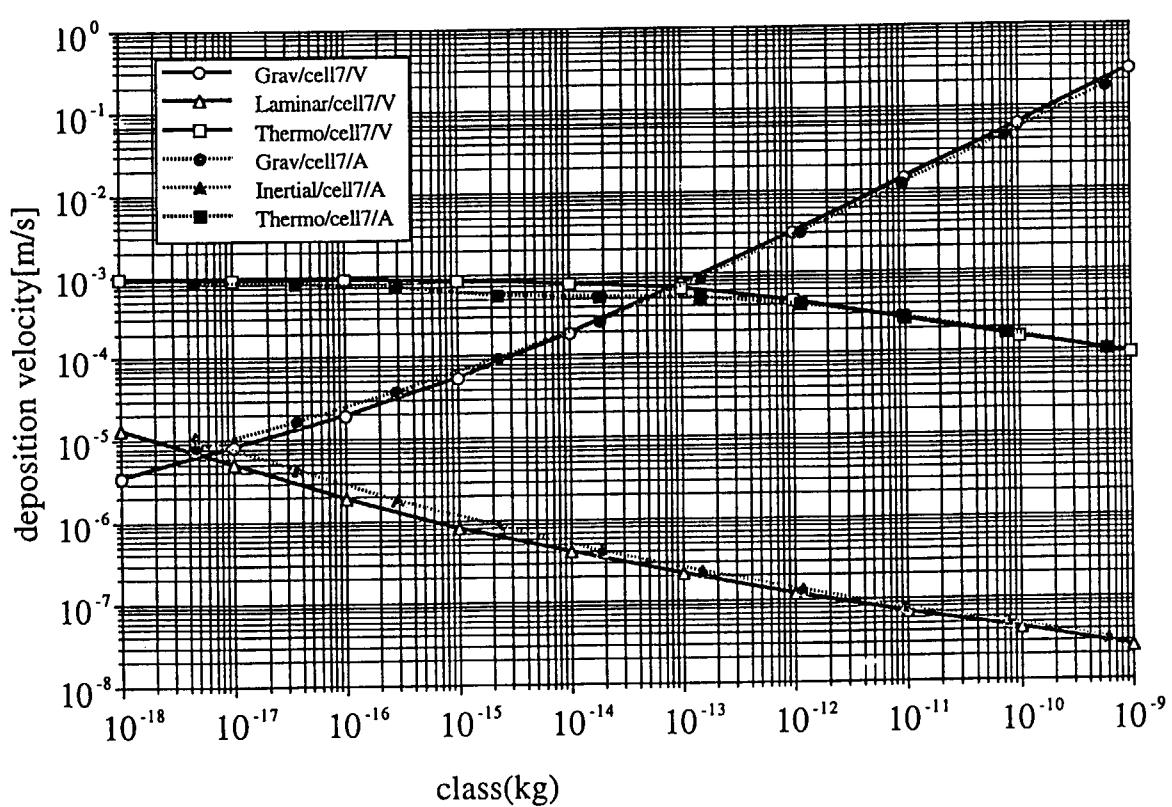


図3.32 沈着速度 (セル7) / WAD4

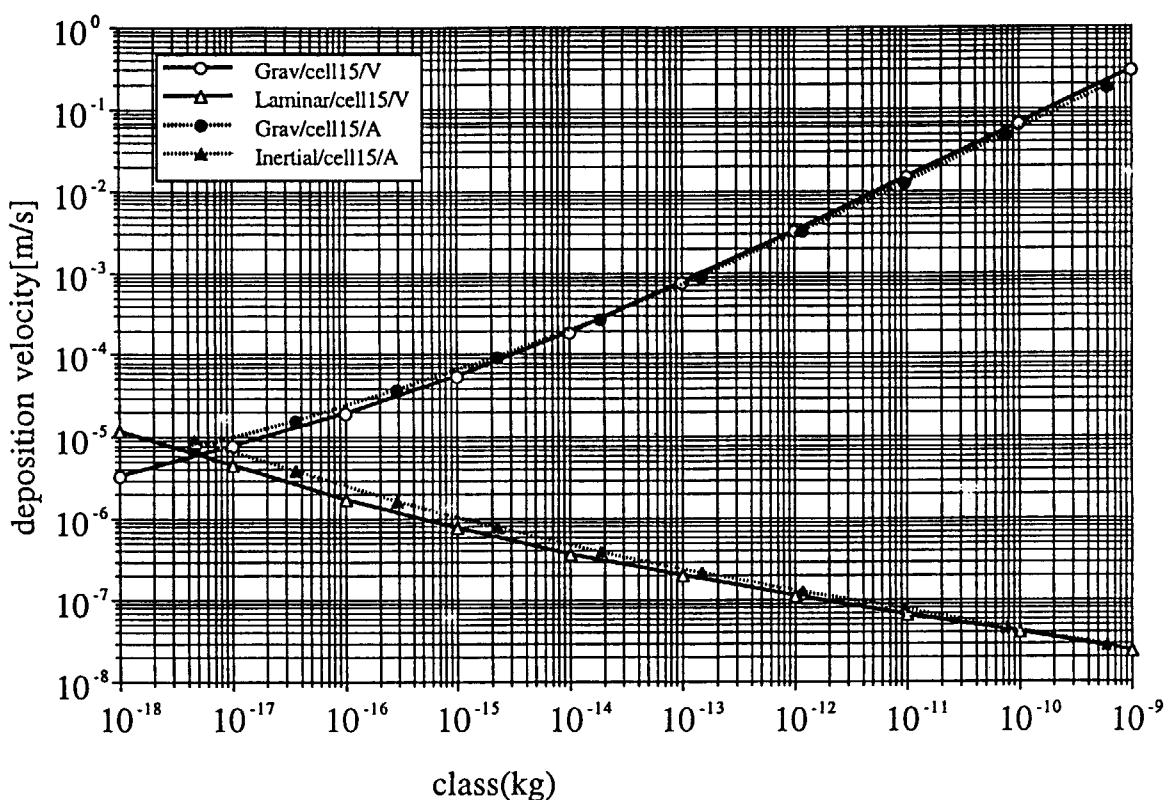


図3.33 沈着速度分布（セル15）／WAD4

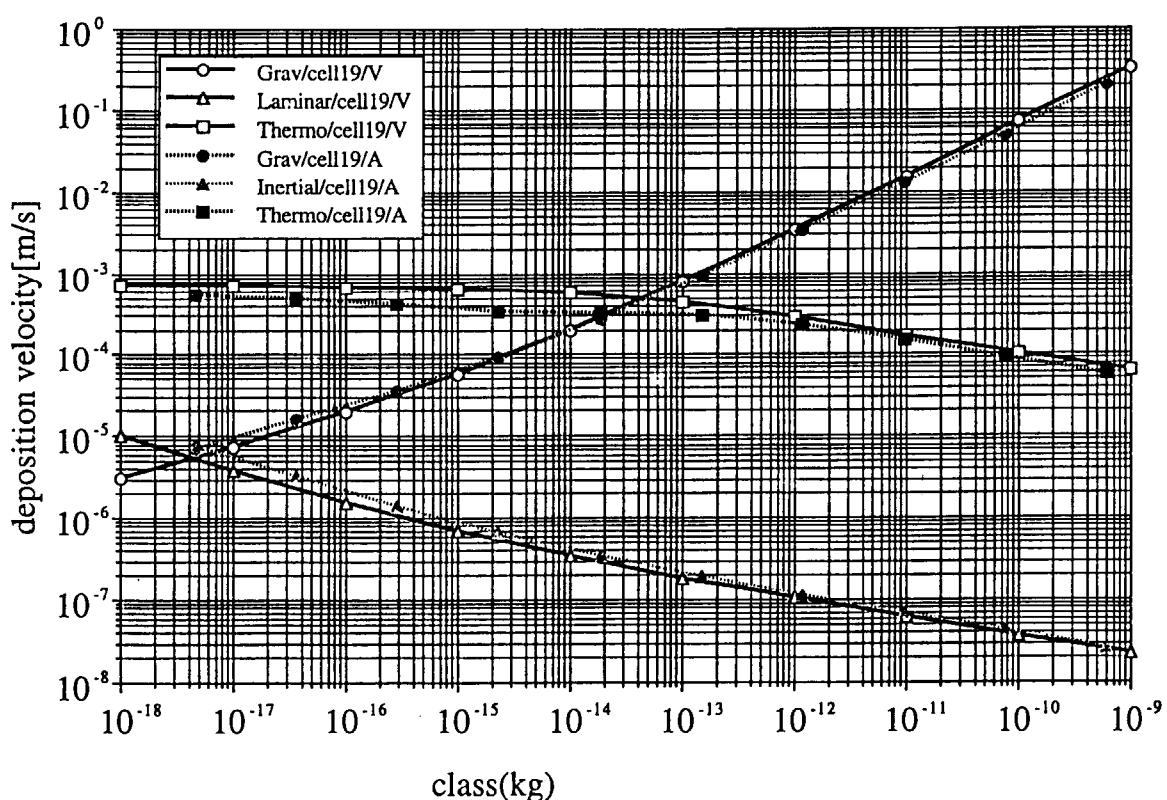


図3.34 沈着速度分布（セル19）／WAD4

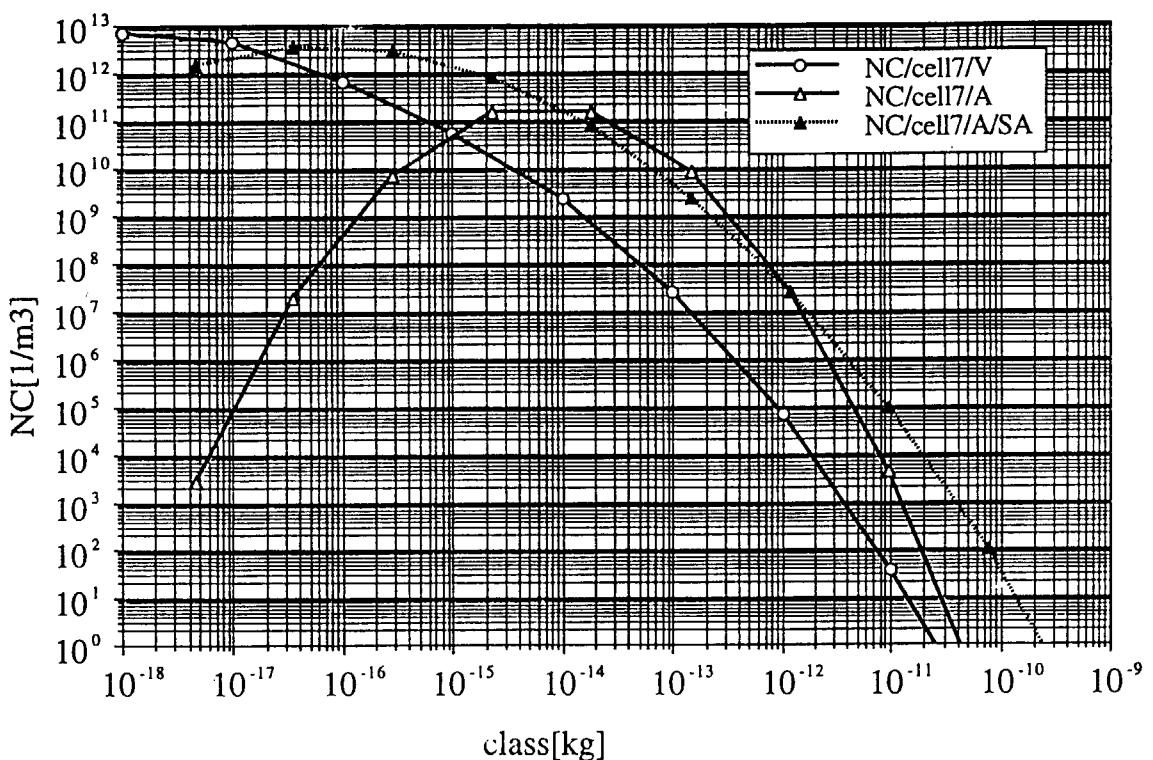


図3.35 数密度分布／セル9 (WAD4/ART感度解析)

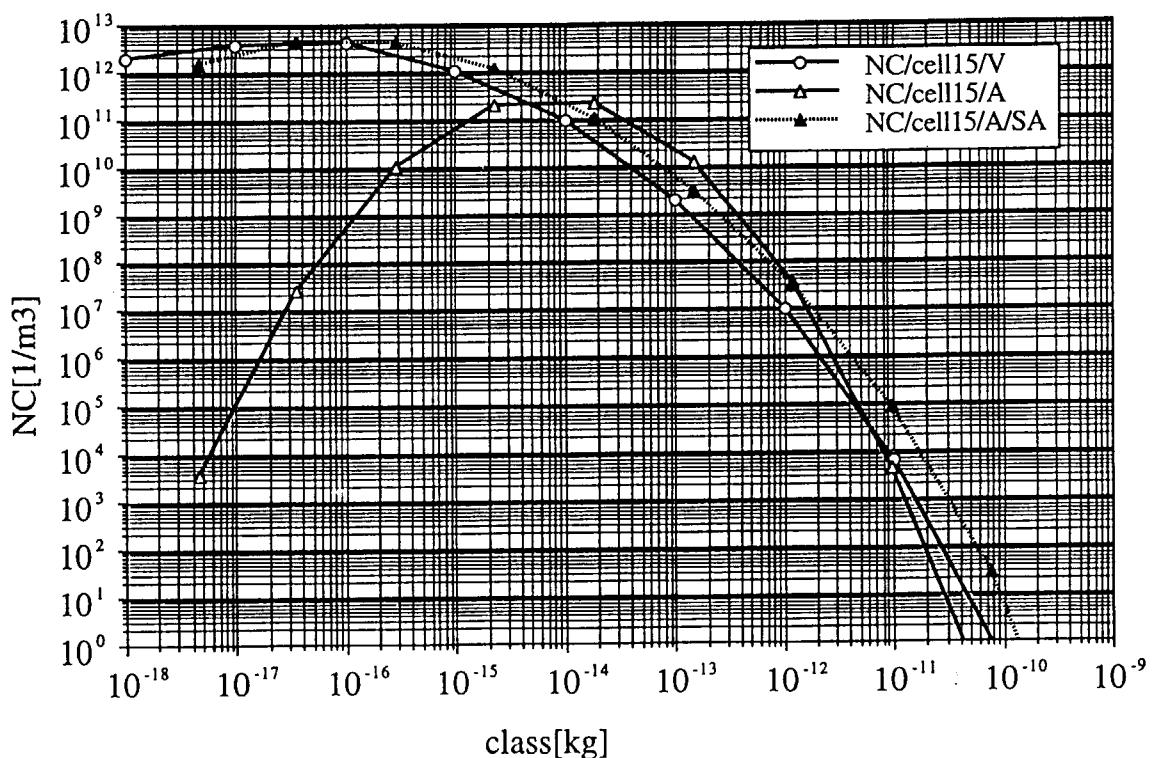


図3.36 数密度分布／セル15 (WAD4/ART感度解析)

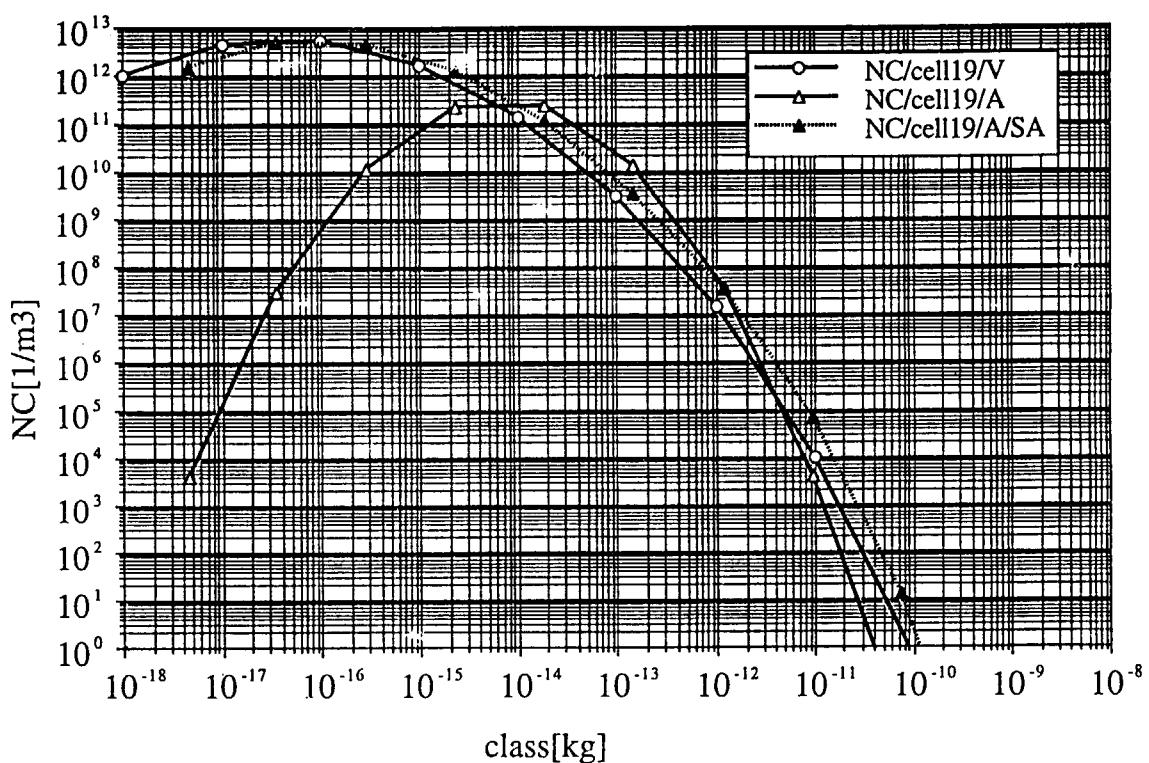


図3.37 数密度分布／セル19 (WAD4/ART感度解析)

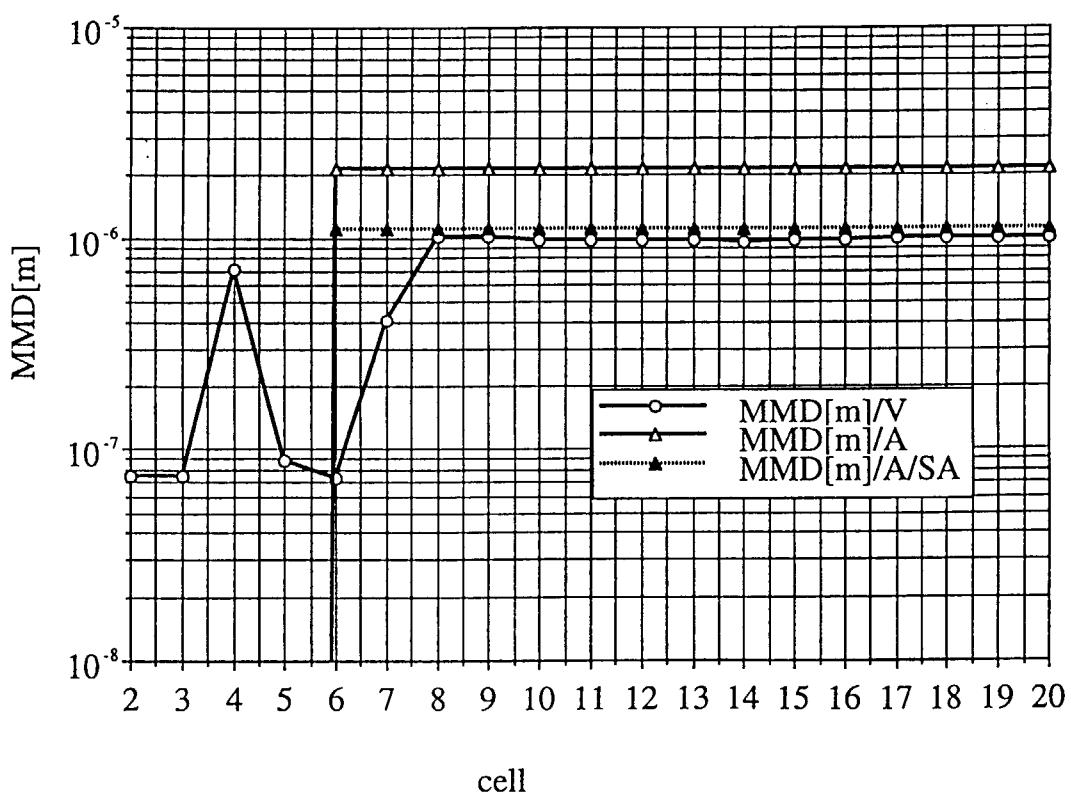


図3.38 質量中央径分布 (WAD4/ART感度解析)

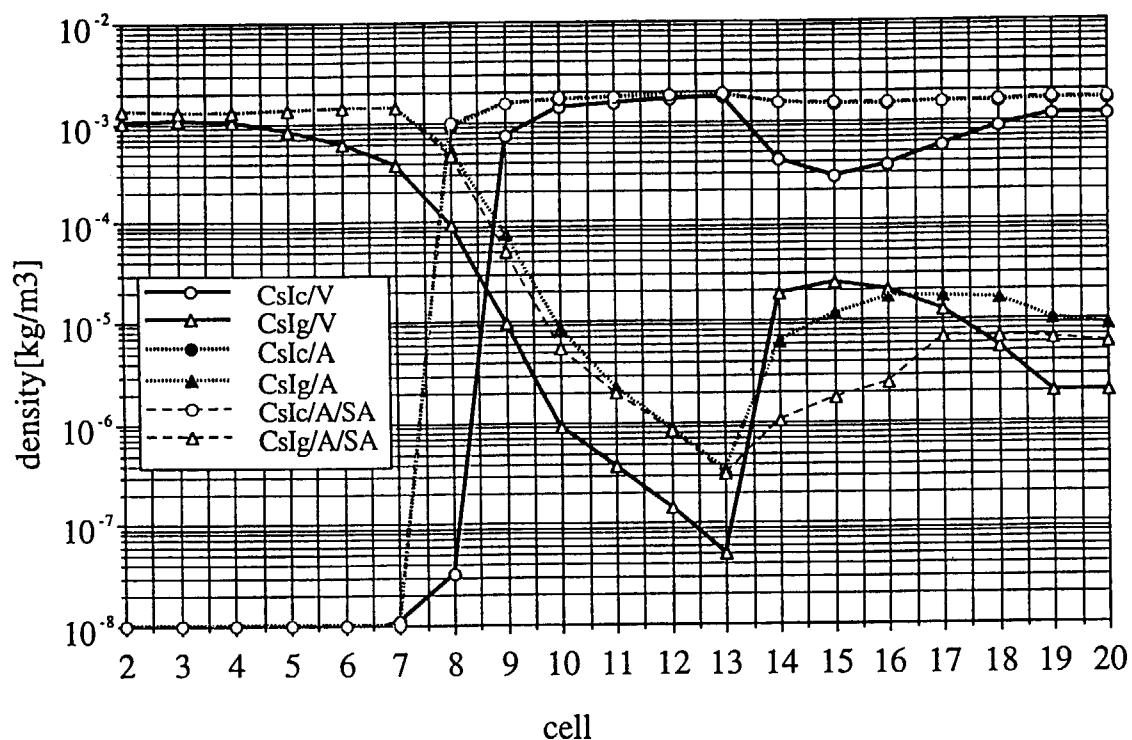


図3.39 気相中のCsIエアロゾルおよびガス濃度分布（WAD5／ART感度解析）

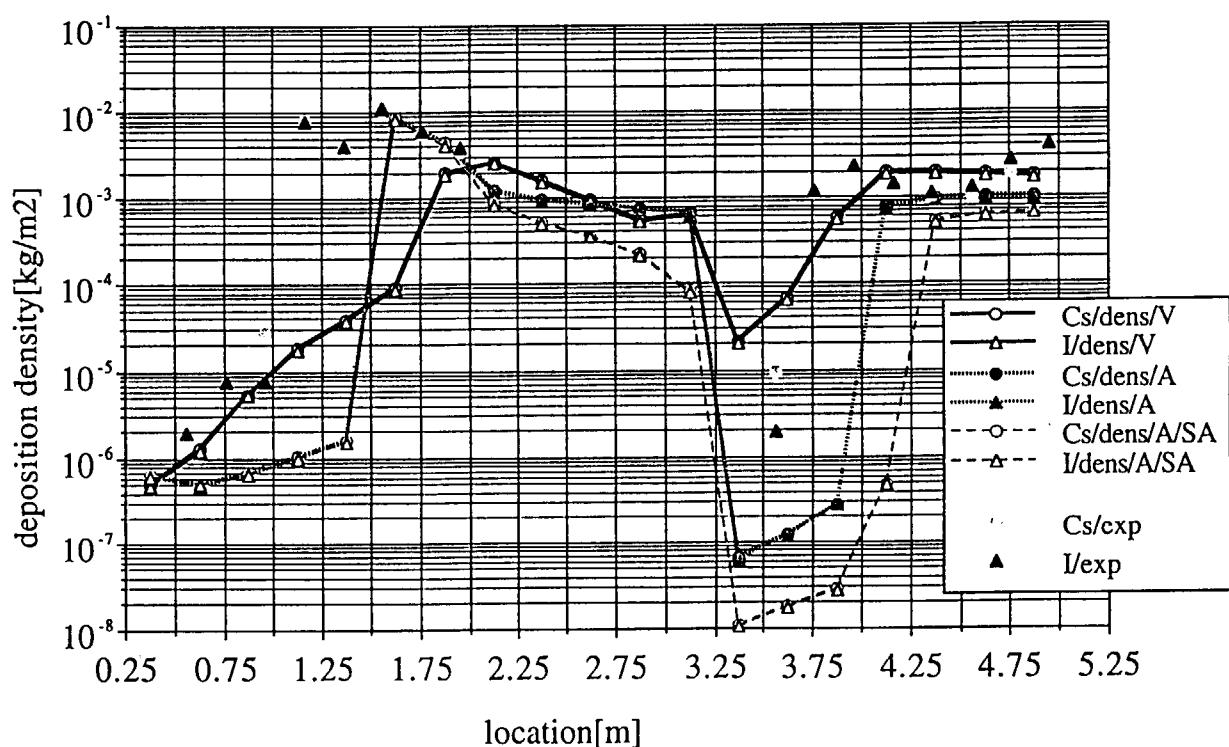


図3.40 沈着密度分布（WAD5／ART感度解析）

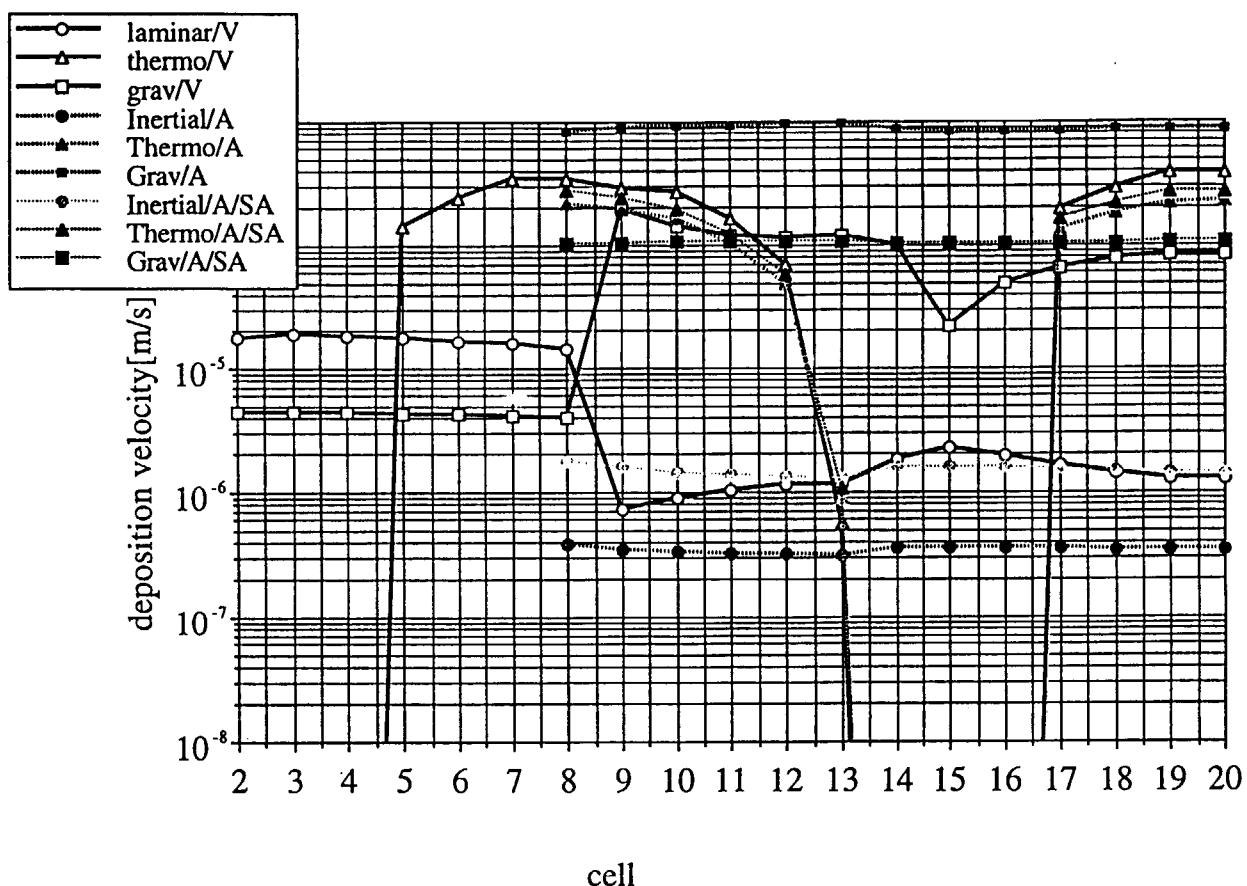


図3.41 平均沈着速度分布（WAD5/ART感度解析）

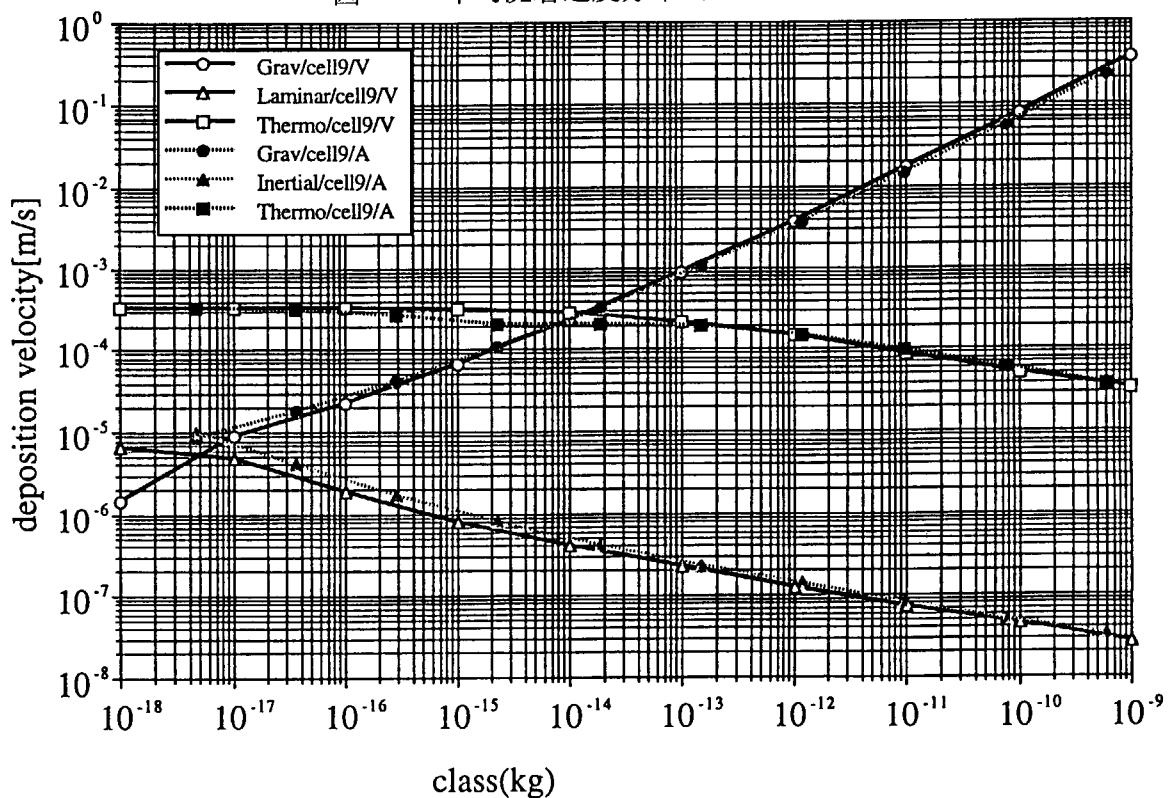


図3.42 沈着速度分布／セル9（WAD5）

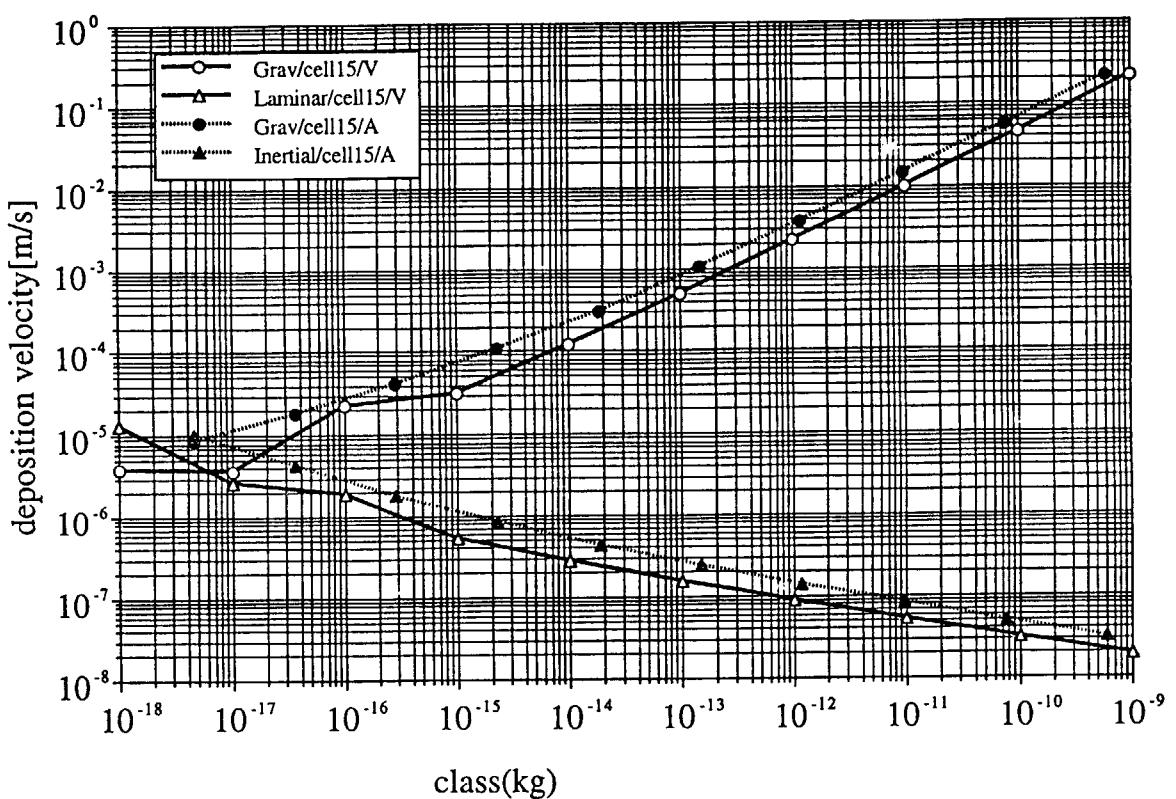


図3.43 沈着速度分布／セル15 (WAD5)

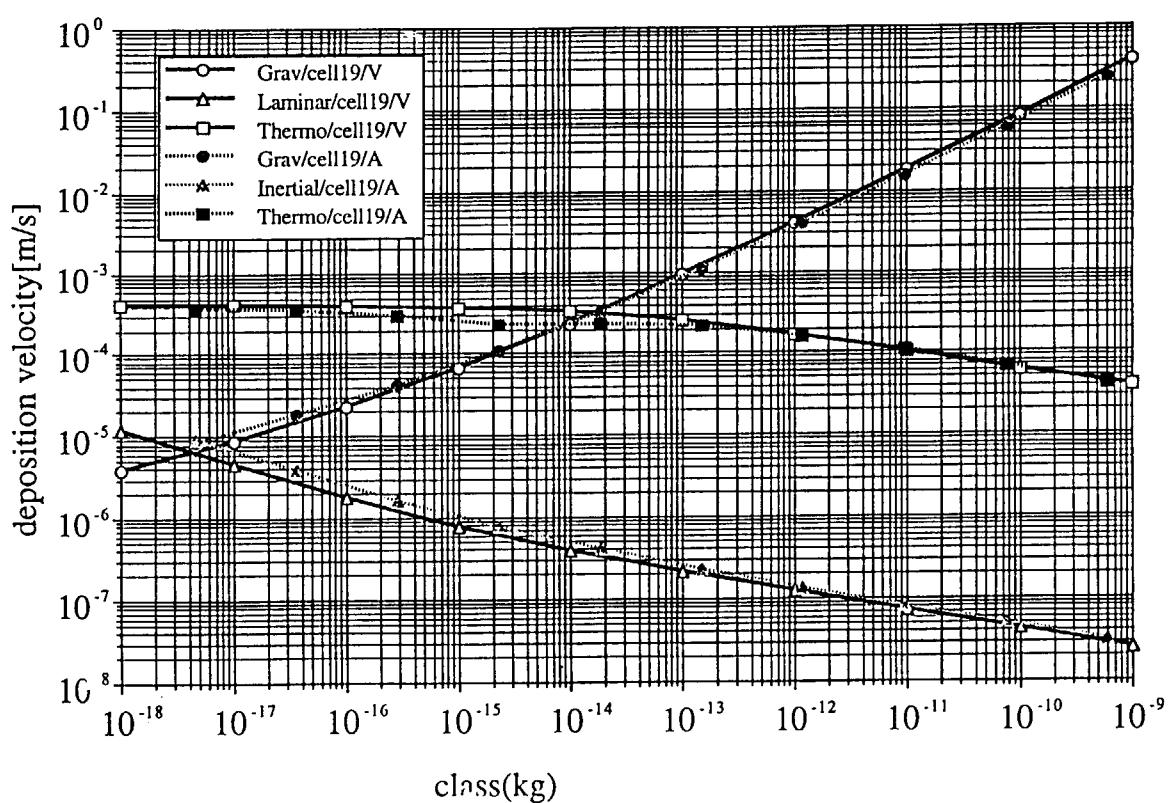


図3.44 沈着速度分布／セル19 (WAD5)

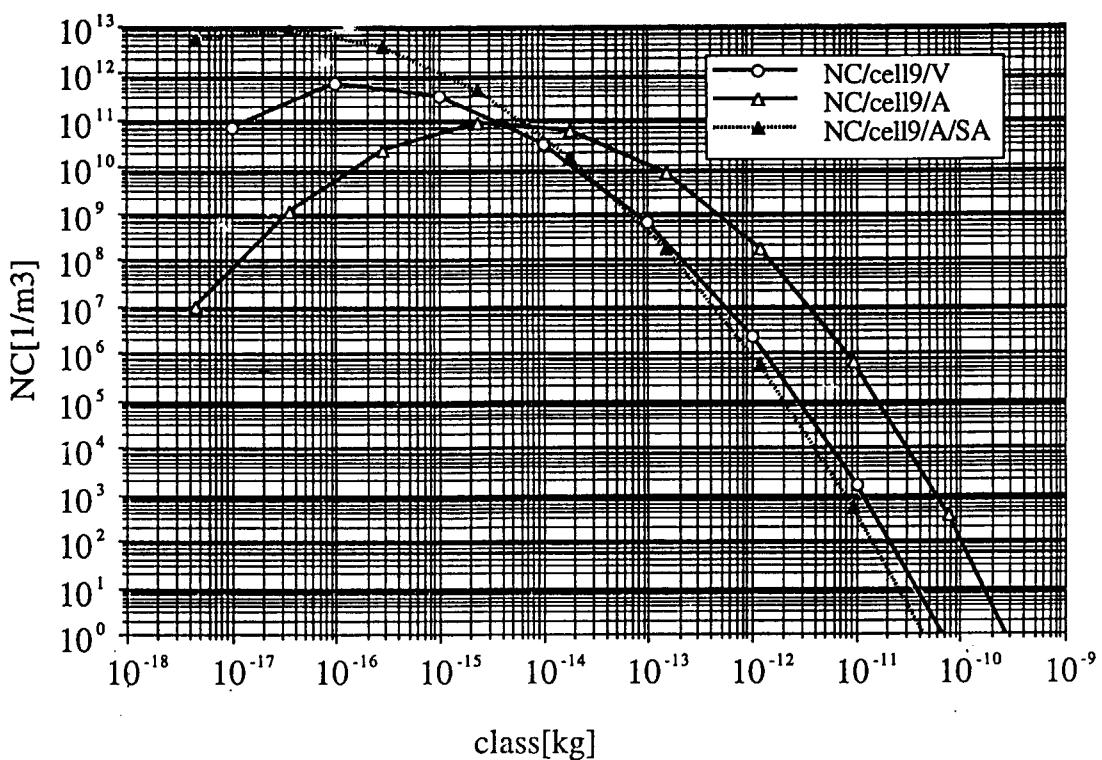


図3.45 数密度分布／セル9 (WAD5/ART感度解析)

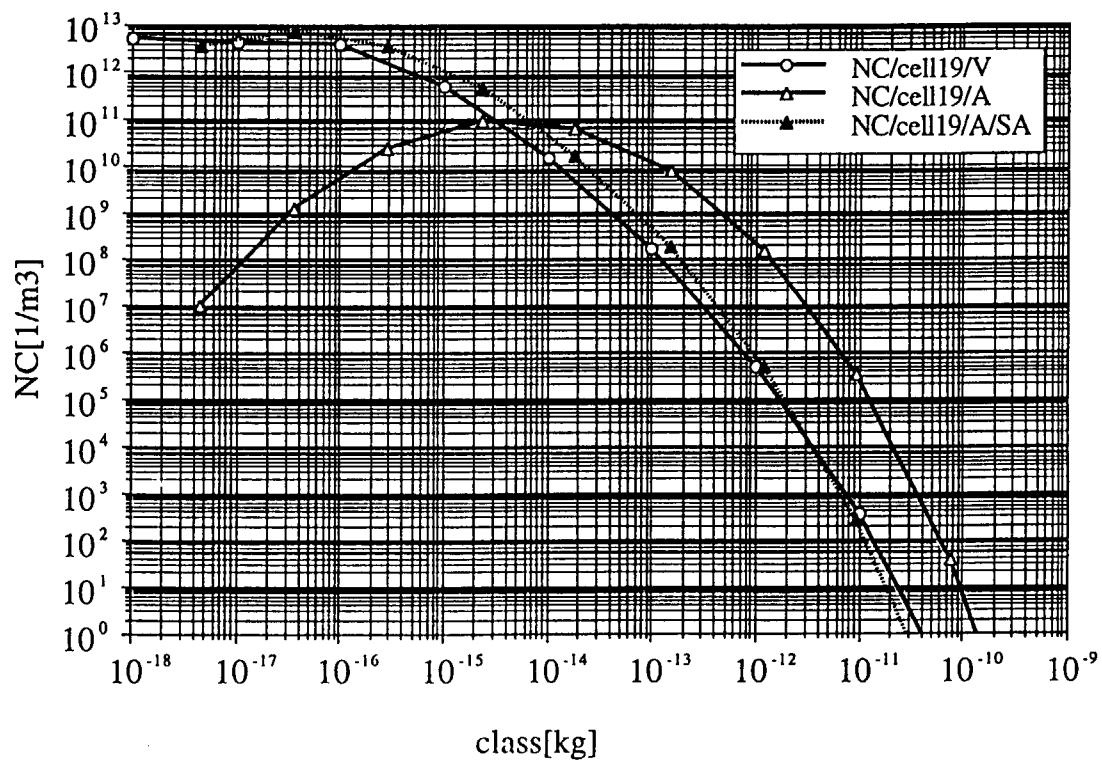


図3.46 数密度分布／セル19 (WAD5/ART感度解析)

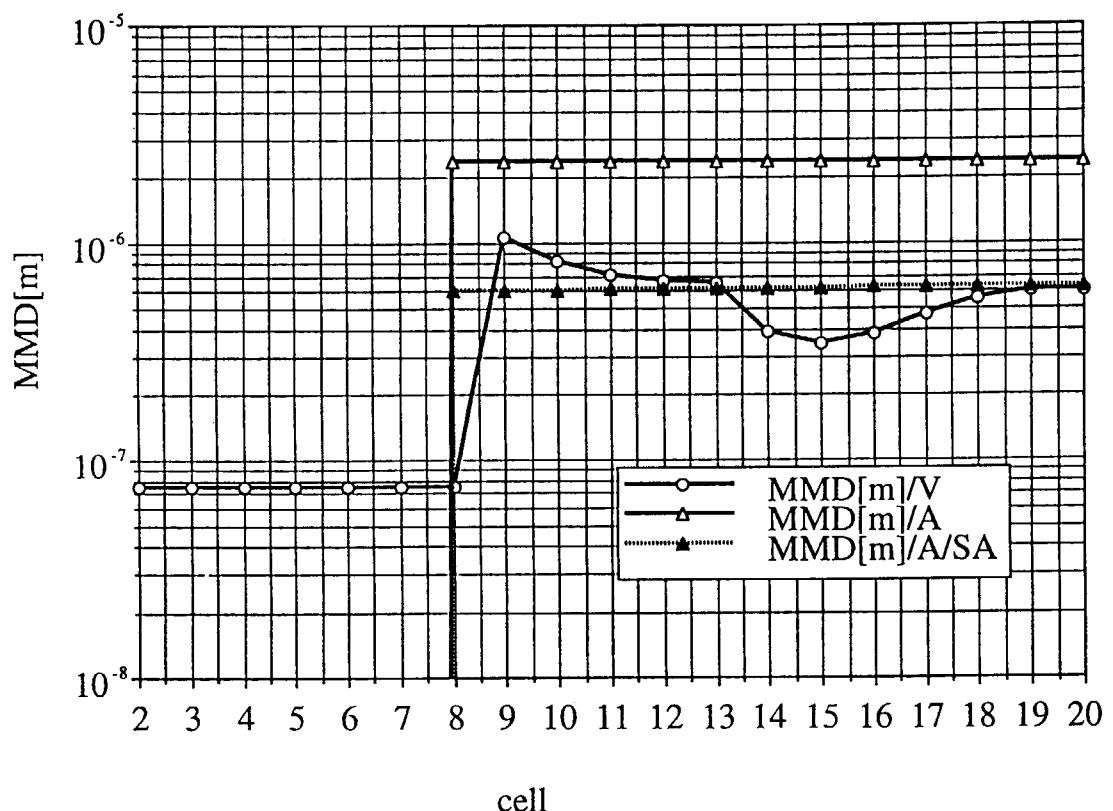
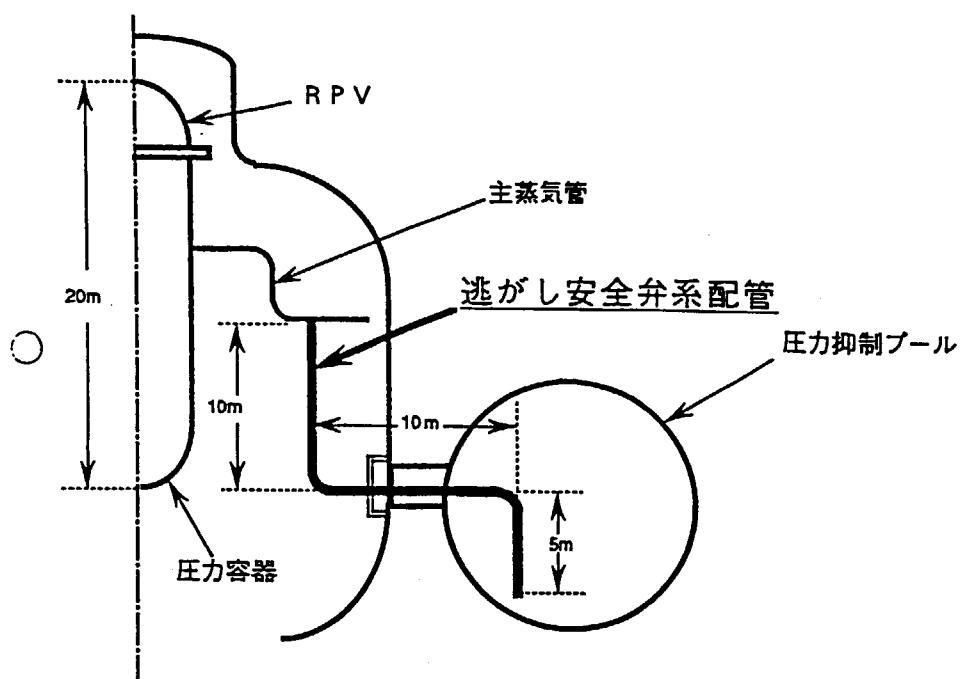


図3.47 質量中央径分布 (WAD5/ART感度解析)



| 逃がし安全弁系配管諸元 |                                     |
|-------------|-------------------------------------|
| 内径          | 254.2 mm                            |
| 管厚          | 66.0 mm                             |
| 全長          | 25000.0 mm<br>(垂直部10m、水平部10m、垂直部5m) |

図4.1 逃がし安全ラインの形状

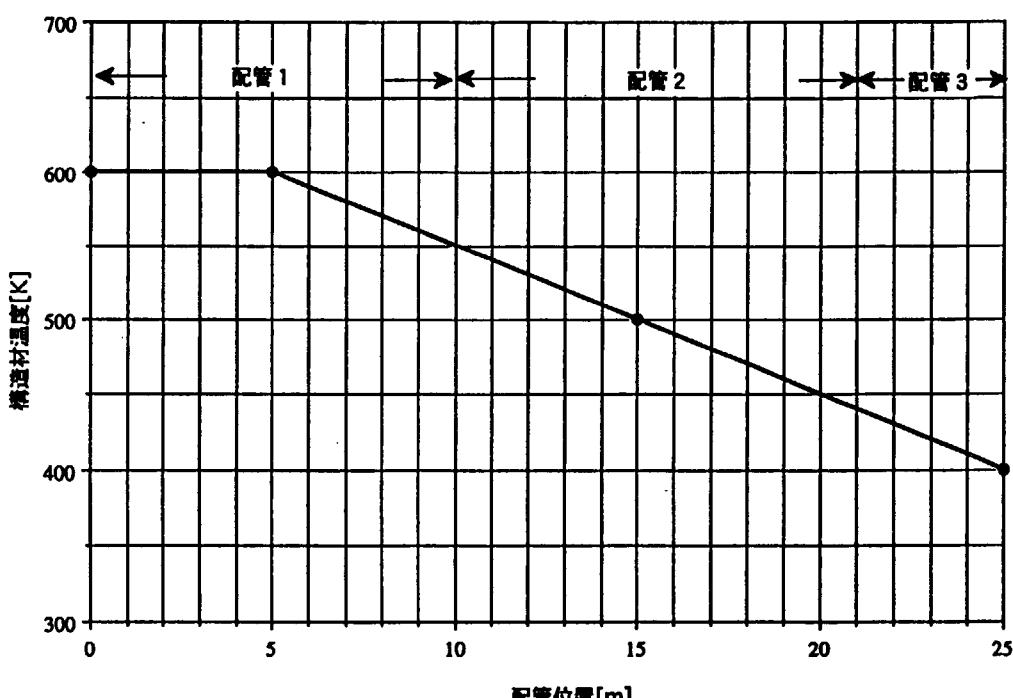


図4.2 配管構造材温度分布

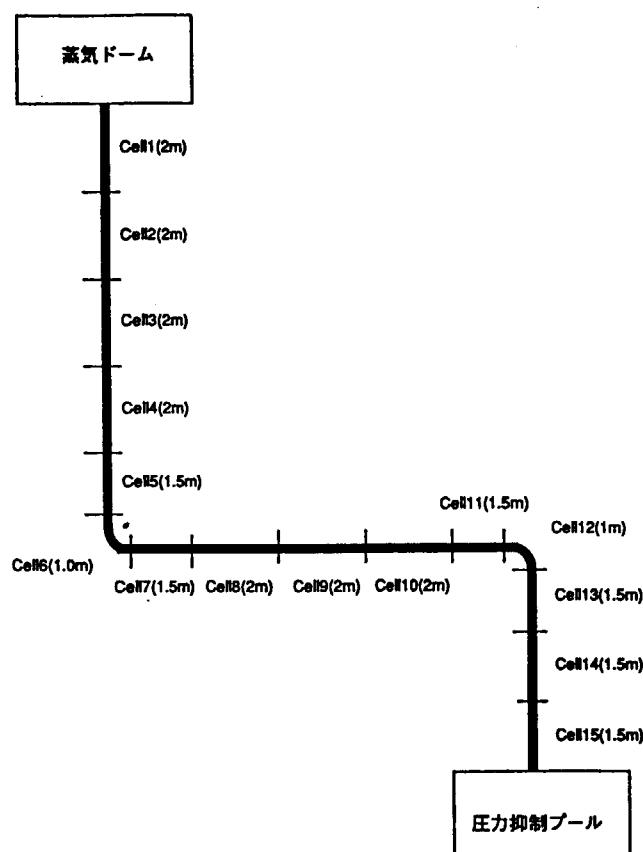


図4.3 セル分割図

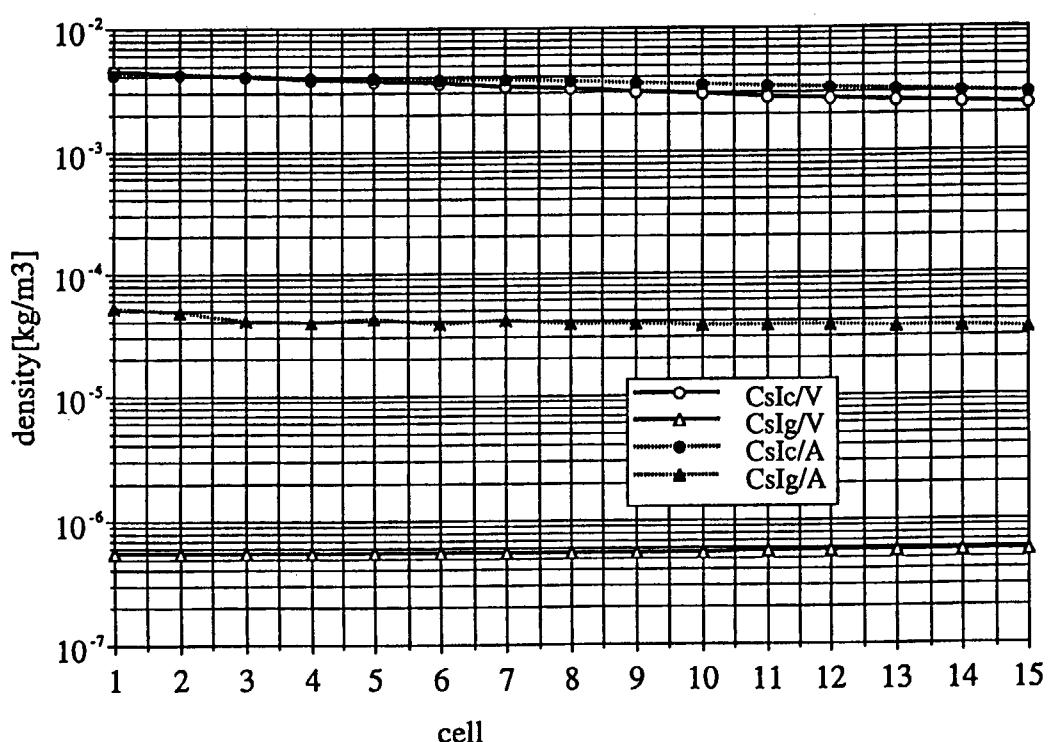


図4.4 気相中のCsIガス／エアロゾル濃度分布

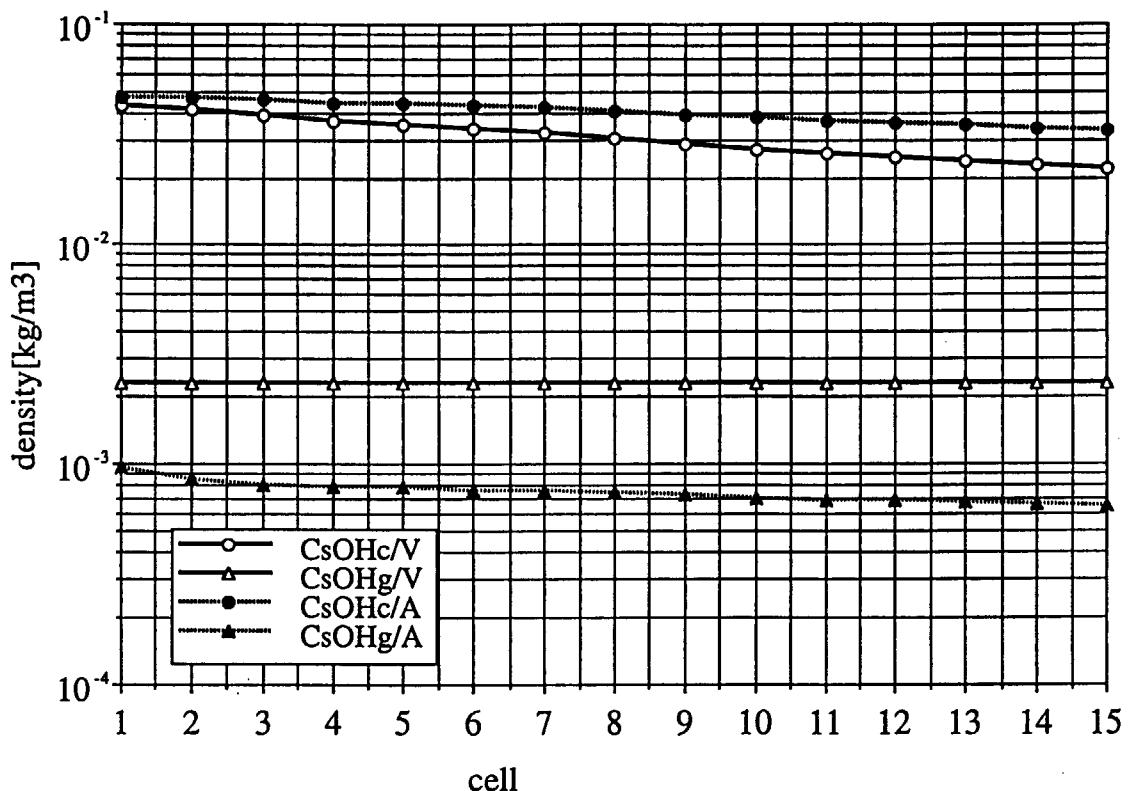


図4.5 気相中のCsOHガス／エアロゾル濃度分布

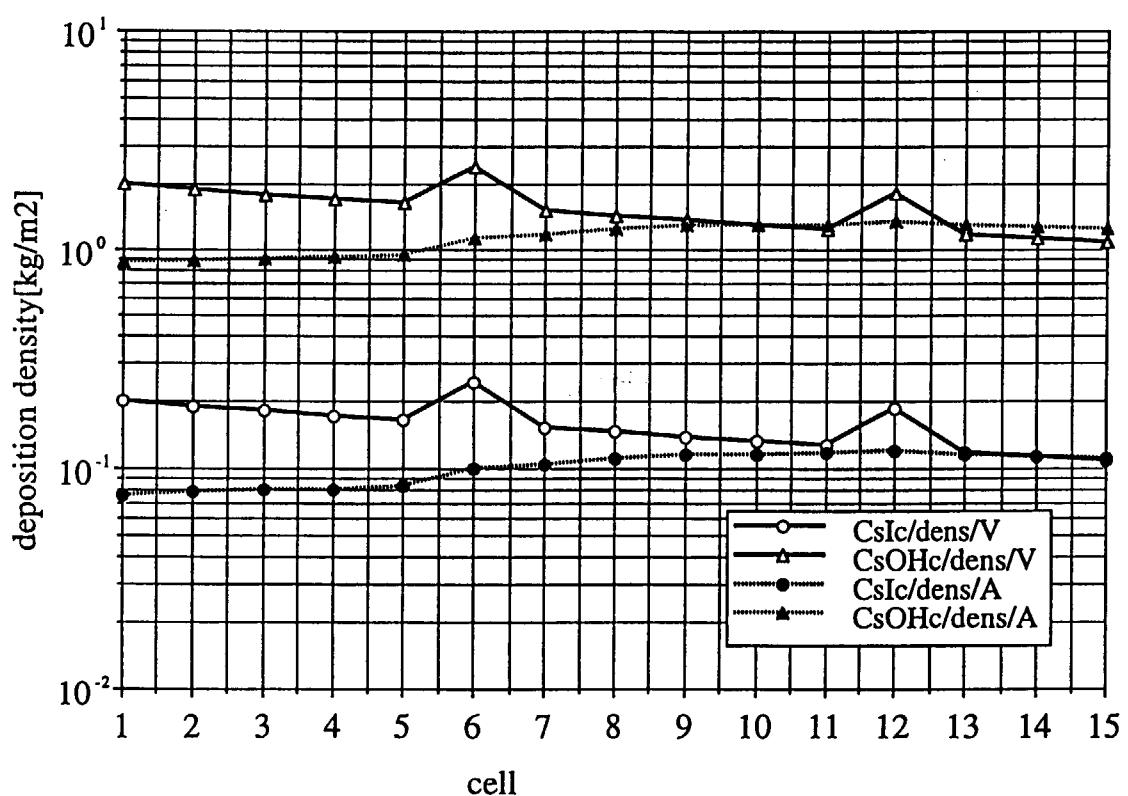


図4.6 CsIおよびCsOH沈着密度分布

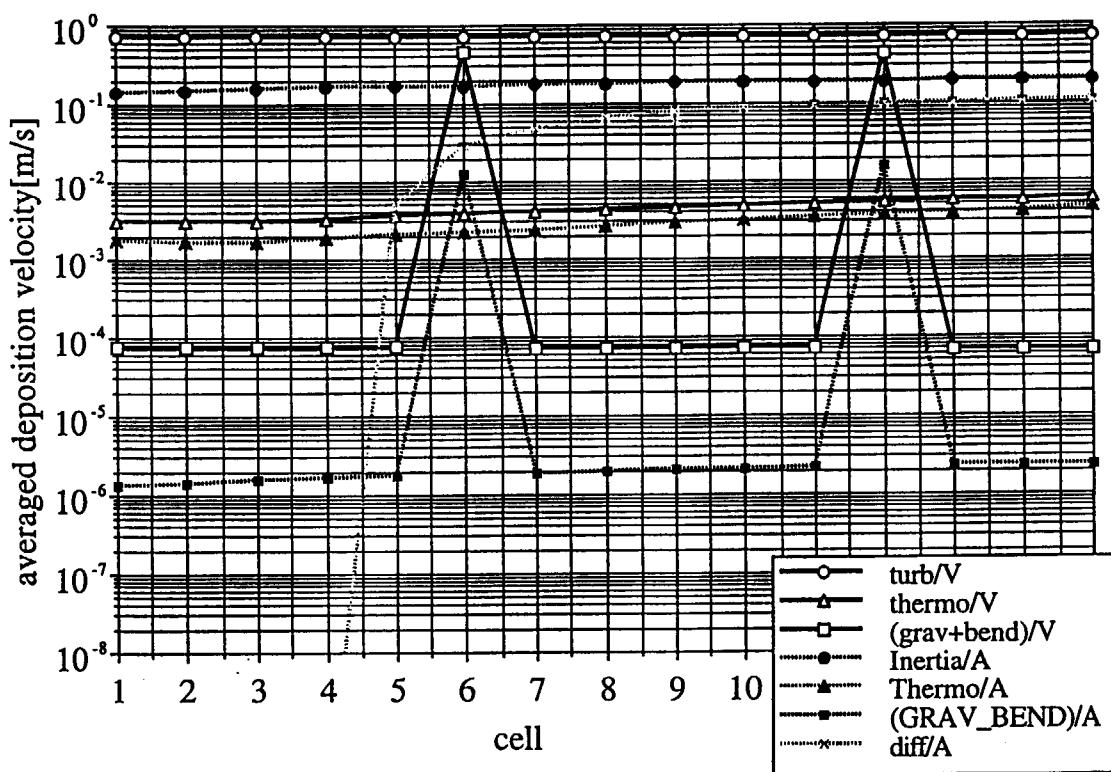


図4.7 平均沈着速度分布

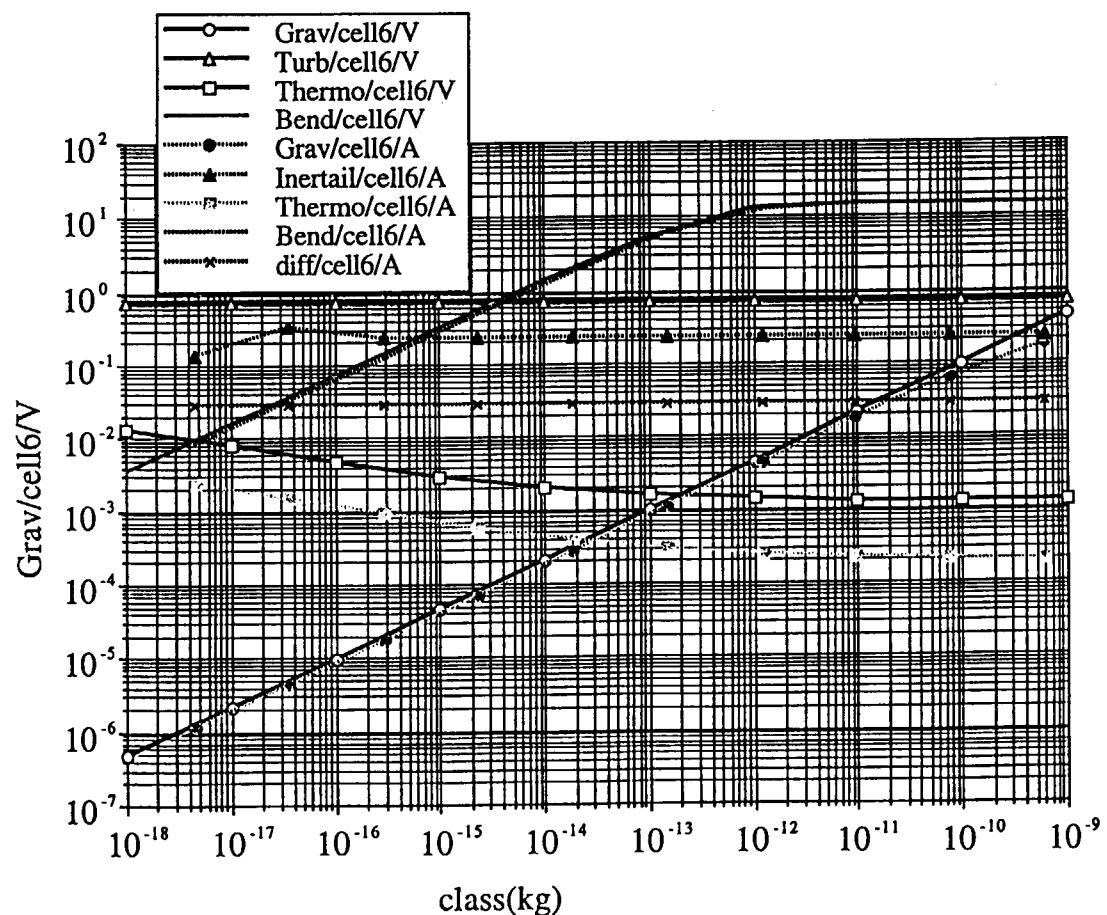


図4.8 沈着速度分布／セル6

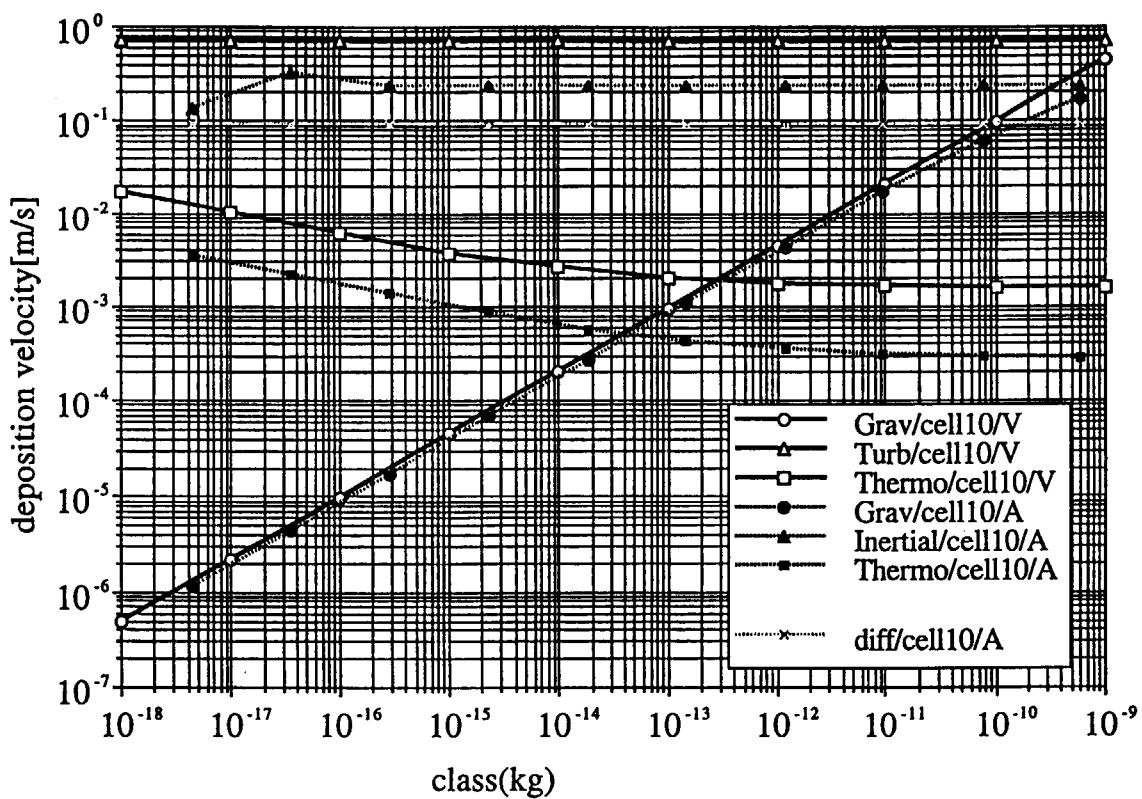


図4.9 沈着速度分布／セル10

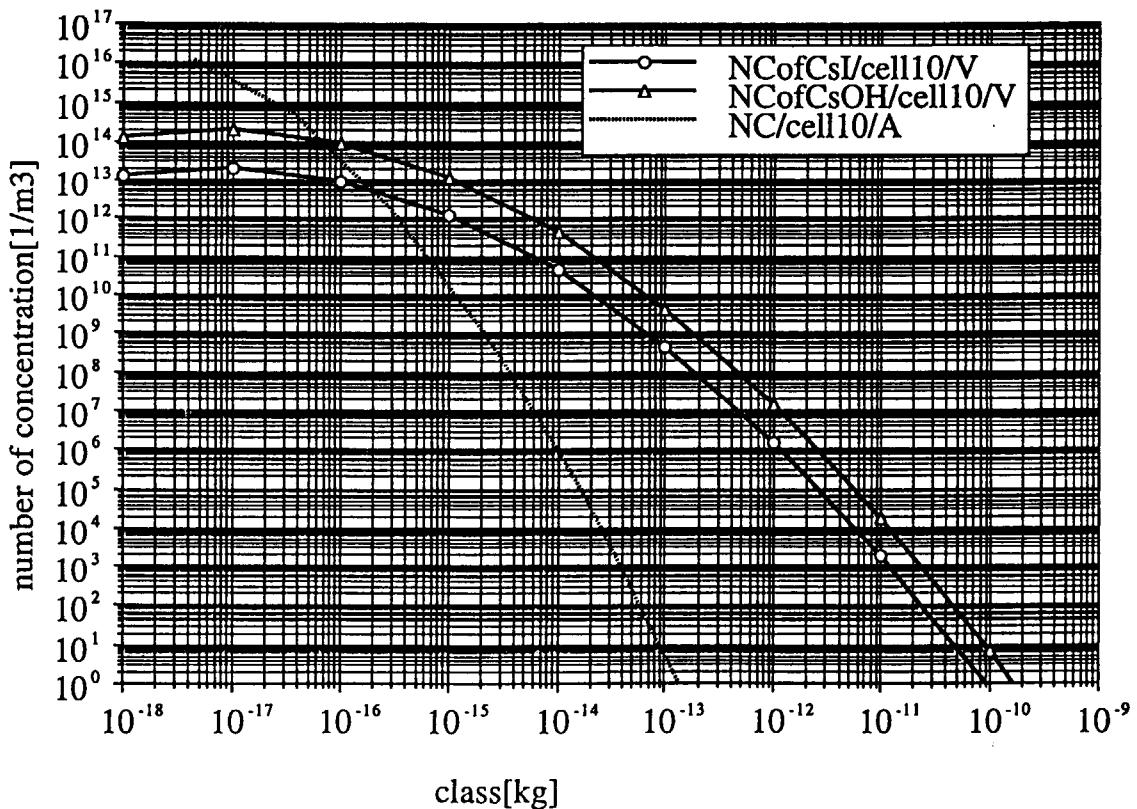


図4.10 数密度分布／セル10

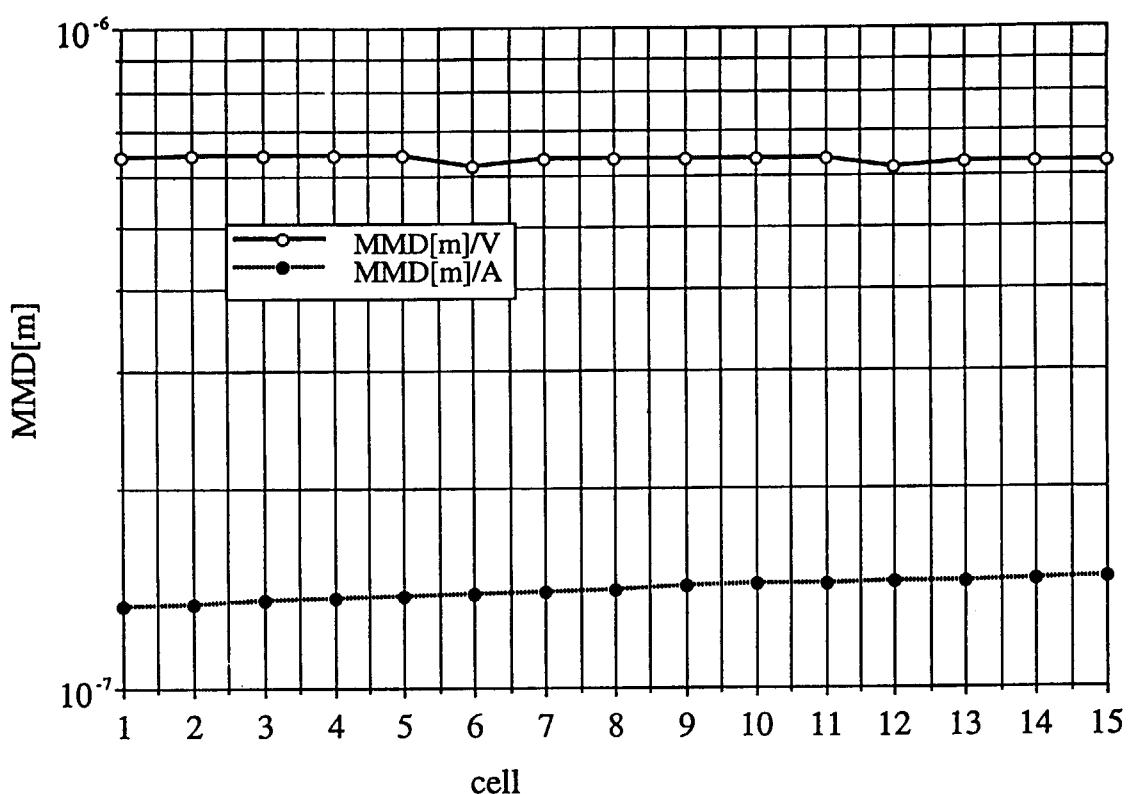


図4.11 質量中央径

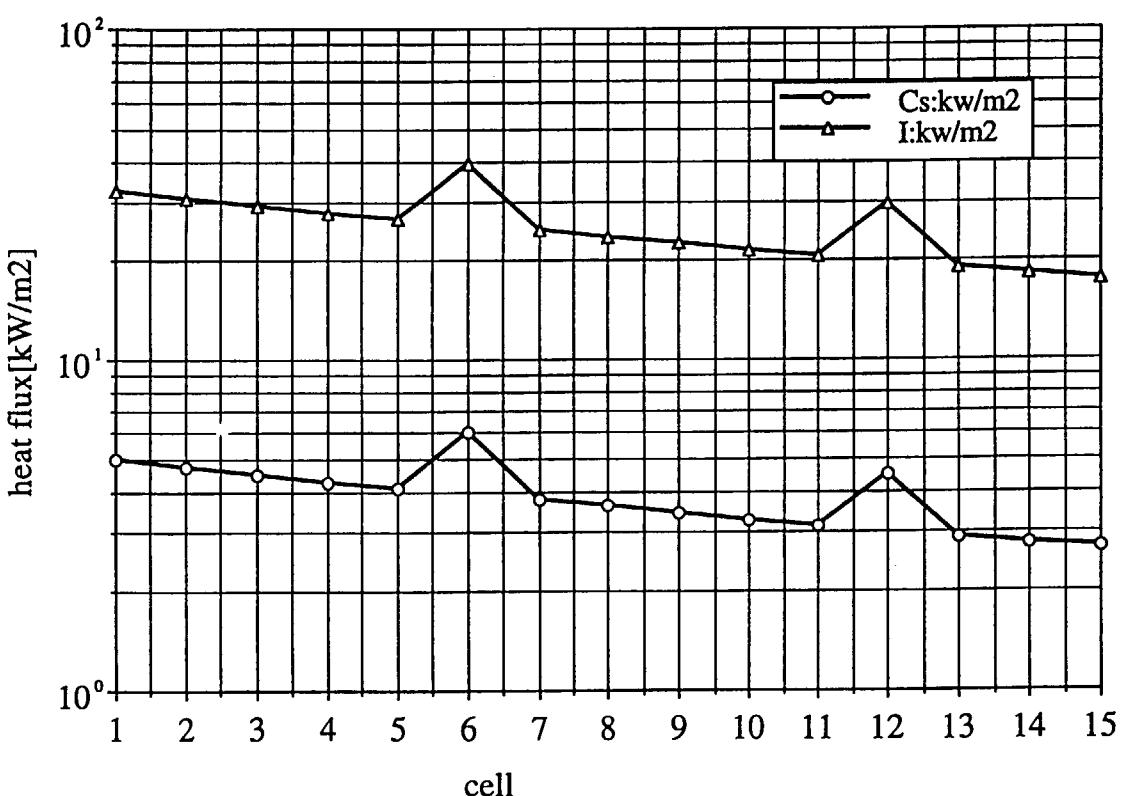


図4.12 セル内壁の発熱量分布

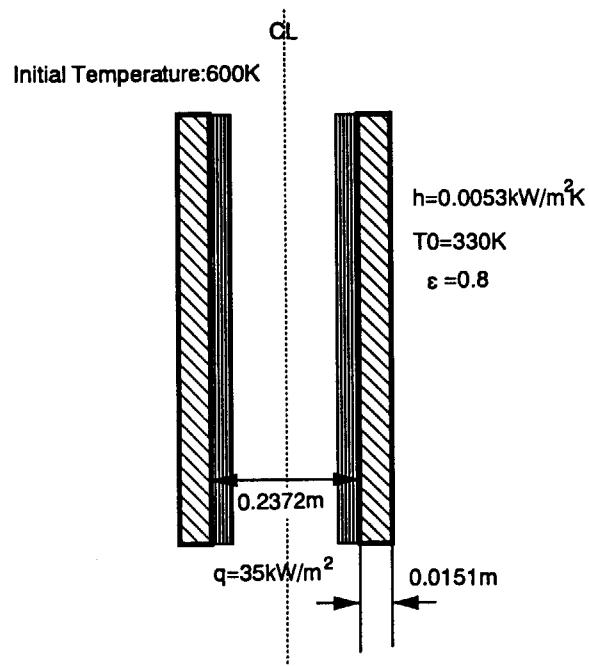


図4.13 伝熱解析モデル

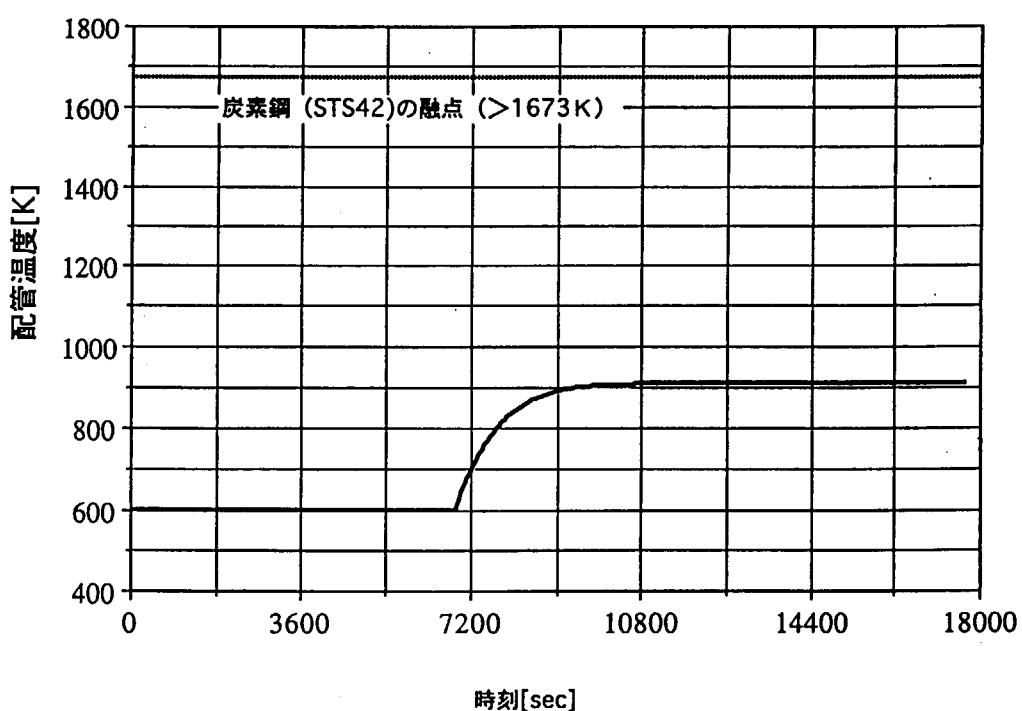


図4.14 崩壊熱によるSRV配管の温度上昇

## 付録A WAD4試験解析用ART入力データ

```
<< ART WIND EXPERIMENT ANALYSIS (Ar) (21+1) (AER 2400sec) >>>Feb.26 1997 WAD4A:DEBUG
&NDPTIM
  LPITCH= 1000,
  LOPT(1)=29*0,1,
  LOPT(1)=1000,
  LOPT(2)=1000,
  LOPT(5)=1000,
  TEND = 2400.0,
  ITURB =1,INUC=1,
  IAGLOM=1, IBROW=1,IGRAV=1,IRISK=0,
  ICOND=1,IUGAS=0,IRESUP(1)=22*0,
  NDX=2,NDY=2,
  NCOM=22,IELEVE=22,IMCOMP=0,
  IPIPE(1) =0,20*1,0,
  RPIPE(1) =0.0,20*5.315,0.0,
  XPIPE(1)=0.0,20*25.0,0.0,
  VCOMP(1) =2218.69,20*2218.69,1.0,
  HCOMP(1) =10.63,20*10.63,10.63,
  DAW(1) =21*78.54,0.0,
  IFP(1)=6,
  RHOM(1)=4.510,
  ICLASS=10,
  ARS(1)=1.00000E-15,8.00000E-15,6.40000E-14,5.12000E-13,
    4.09600E-12,3.27680E-11,2.62144E-10,2.09715E-09,
    1.67772E-08,1.34218E-07,1.07374E-06,
  FXFILM=1.0,FCONX=1.0,FILM=1.0,
  ALIMIT=1.0E-38,
&END
&DPTIM NTRNDT=1, TNEXTJ= 2400.0,
  DTALLM=0.25,DTB=0.25,
  FDFILM(1)=22*1.0,
  SRCJ(1,3,1)=0.0247,
  AFJ(1) = 22*265.75,
  FREVAP(1) = 22*1.0, FUGAS(1)=22*1.0,
  UGASJ(1)=73.10, 78.39, 94.60, 91.15, 86.40,
    81.61, 77.59, 74.56, 68.10, 61.57,
    56.97, 56.88, 56.79, 56.70, 70.60,
    68.06, 66.53, 65.14, 62.69, 59.66,
    59.60,
  GJ(1, 2, 1)=6487.45,GJ(1, 3, 2)=7584.11,
  GJ(1, 4, 3)=8267.2 ,GJ(1, 5, 4)=7896.5,
  GJ(1, 6, 5)=7438.21,GJ(1, 7, 6)=7053.54,
  GJ(1, 8, 7)=6751.65,GJ(1, 9, 8)=6333.53,
  GJ(1,10, 9)=5754.02,GJ(1,11,10)=5174.51,
  GJ(1,12,11)=5052.19,GJ(1,13,12)=5044.18,
  GJ(1,14,13)=5036.16,GJ(1,15,14)=5560.67,
  GJ(1,16,15)=6171.3 ,GJ(1,17,16)=5936.92,
  GJ(1,18,17)=5871.45,GJ(1,19,18)=5678.82,
  GJ(1,20,19)=5429.31,GJ(1,21,20)=5289.35,
  GJ(1,22,21)=5289.35,
  XSJ(1,9)=22*1.0000E0,
  PMPAJ(1)=22*0.101,
  TWJ(1)=923.16, 978.93, 1272.16, 1178.41, 1068.34,
    958.55, 853.63, 763.46, 729.30, 696.28,
    674.43, 678.64, 682.86, 687.08, 973.16,
    905.49, 826.27, 749.00, 677.45, 616.38,
    615.16,
  TJ(1)=886.16, 949.81, 1145.96, 1104.51, 1047.03,
    989.07, 940.50, 903.21, 824.83, 745.61,
    689.89, 688.99, 688.08, 687.18, 847.00,
```

821.68, 805.58, 786.95, 756.46, 722.16,  
722.16,  
TMPARJ(1, 1)=10\* 886.16, TMPARJ(1, 2)=10\* 949.81,  
TMPARJ(1, 3)=10\* 1145.96, TMPARJ(1, 4)=10\* 1104.51,  
TMPARJ(1, 5)=10\* 1047.03, TMPARJ(1, 6)=10\* 989.07,  
TMPARJ(1, 7)=10\* 940.50, TMPARJ(1, 8)=10\* 903.21,  
TMPARJ(1, 9)=10\* 824.83, TMPARJ(1,10)=10\* 745.61,  
TMPARJ(1,11)=10\* 689.89, TMPARJ(1,12)=10\* 688.99,  
TMPARJ(1,13)=10\* 688.08, TMPARJ(1,14)=10\* 687.18,  
TMPARJ(1,15)=10\* 847.00, TMPARJ(1,16)=10\* 821.68,  
TMPARJ(1,17)=10\* 805.58, TMPARJ(1,18)=10\* 786.95,  
TMPARJ(1,19)=10\* 756.46, TMPARJ(1,20)=10\* 722.16,  
TMPARJ(1,21)=10\* 722.16,

&amp;END

## 付録B WAD4試験解析用VICTORIA入力データ

```

$ JAERI Project; Analysis of Test for Aerosol Behaviors
$ 1997.2.24/Victoria92/Run/WIND WAD4 full time run/dt=0.05sec
$=====
$ ID=jaeri_wind1/run with dummy cell (21 cells)
$ use of Chemical module
$ reactive pipe material
$ No Using bend
$=====
$#####
$ Computer type
'Sun IPX'
$ Calculation Description
'Analysis for Wind Aerosol Test WAD4A'
$ 
$ run parameter
$ steady_state ; transient ; restart
      0      1      0
$ 
$ module selection
$ chemist ; aerosol ; convection ; rod release ; decay ; fuel
      1      1      1      0      0      0
$ 
$ cell input
$ axial ; radial ; fuel radial ; clad radial
      21      1      0      0
$ 
$ geometrical data
$ inner radii [m]
21*0.0
$ cell radial width [m]
21*0.05315
$ cell height [m] ( total;5.0m )
21*0.25
$#####
**STRUDATA
$ 
$ bend flags
21*0
$ settling flags
21*0
$ axial cell areas [m2]
21*0.00887
$ radial flow areas [m2]
21*0.0
$ hydraulic diameter [m]
21*0.1063
$ floor area in cell [m2]
2.6575e-24,20*0.026575
$ wall area in cell [m2]
3.0338e-24,20*0.030338
$ ceiling area in cell [m2]
2.6575e-24,20*0.026575
$ structure identification flag (reactive)
21*5
$#####
**CONTDATA
$ 
$ (initial condition in bulk gas)
$ 
$ initial condition value

```

```

3
$ species name & phase
$ species fractional density [kg/m3]: 1000K
'Arg'
0.539
0.508
0.425
0.444
0.467
0.491
0.512
0.530
0.575
0.635
0.688
0.689
0.690
0.691
0.561
0.577
0.588
0.601
0.626
0.656
0.656
'CsIg'
21*0.0
'CsOHg'
21*0.0
#####
**BOUNDARY
$
$ boundary condition flags (0=zero grad ,1=a value)
21*0,0,1,21*0
$
$ boundary condition values
1
$
'Arg'
$inner top bottom outside
21*0.0,0.0,0.539,21*0.0
#####
**AERODATA
$ aerosol component
'single'
$ definition of collocation points
$ ncoll ; spacing
    0      10
$ m_lower ; m_upper
    1.0e-18  1.0e-9
$ collocation interparation = liner
    2
$ tolerrance specification (recommended)
$ eps   ; maxtry
    1.0e-6  10
$
$ aerosol physics data
$ collision    dynamic    sticking
$ shape factor ; shape factor ; efficiency
    1.0        1.0        1.0
$ cunningham correction factor coefficient
$ ka   kq   kb
    1.25  0.41  0.88
$ brock thermophoretic deposition coefficient

```

```

$ cs  cm  ct
 1.17 1.14 2.18
#####
**PAUSE
#####
**TDEPCTRL
$
$ (time step control input)
$ start ; step time ; end [s]
 0.0    0.05  2400.0
$ output control
$ print control ; graphics (edward) ; output type ; write dump file
 24000      48000      0      0
#####
**TDEPCHEM
$
$ (recommended values)
$ max chemical convergence max non-limited
$ iterations ; criterion ; iterations
 500     1.0e-12      45
$ gas mixing
 1
#####
**TDEPSRCE
$
$ (source description)
$
$ aerosol source
$ number of aerosol source
 0
$
$ vapor source
$ number of vapor source
 1
$ number of time table
 2
$ time [s]
$ time1  time2
 0.0  2400.0
$ -----
$ number of species
$ species and fraction
$ fluid cell input number (ax,rad)
$ source rates [kg/s]
$ sigma, radius[m]
$ -----
$species name
'CsIg' 1 1
$ time1  time2
0.247e-4 0.247e-4
#####
**TDEPSTRU
$
$ (structure condition)
$ number of time table
 2
$ -----
$ time [s]
$ time1      time2
 0.0        2400.0
$ gas temperature [k]
$ time1  time2
 886.160   886.160
 949.814   949.814

```

|          |          |
|----------|----------|
| 1145.960 | 1145.960 |
| 1104.511 | 1104.511 |
| 1047.029 | 1047.029 |
| 989.075  | 989.075  |
| 940.501  | 940.501  |
| 903.206  | 903.206  |
| 824.828  | 824.828  |
| 745.612  | 745.612  |
| 689.889  | 689.889  |
| 688.985  | 688.985  |
| 688.082  | 688.082  |
| 687.178  | 687.178  |
| 847.005  | 847.005  |
| 821.676  | 821.676  |
| 805.578  | 805.578  |
| 786.947  | 786.947  |
| 756.463  | 756.463  |
| 722.160  | 722.160  |
| 722.160  | 722.160  |

\$-----

\$ time [s]  
\$ time1      time2  
  0.0        2400.0

\$ structure temperature [k]

\$ ceiling  
\$ time1    time2  
  923.160    923.160  
  978.929    978.929  
1272.160    1272.160  
1178.406    1178.406  
1068.340    1068.340  
  958.545    958.545  
  853.627    853.627  
  763.463    763.463  
  729.298    729.298  
  696.276    696.276  
  674.425    674.425  
  678.642    678.642  
  682.859    682.859  
  687.076    687.076  
  973.160    973.160  
  905.488    905.488  
  826.275    826.275  
  749.004    749.004  
  677.447    677.447  
  616.381    616.381  
  615.160    615.160

\$ wall  
\$ time1    time2  
  923.160    923.160  
  978.929    978.929  
1272.160    1272.160  
1178.406    1178.406  
1068.340    1068.340  
  958.545    958.545  
  853.627    853.627  
  763.463    763.463  
  729.298    729.298  
  696.276    696.276  
  674.425    674.425  
  678.642    678.642  
  682.859    682.859  
  687.076    687.076  
  973.160    973.160



0.0 0.0  
0.0 0.0  
0.0 0.0  
0.0 0.0  
0.0 0.0  
0.0 0.0  
0.0 0.0  
0.0 0.0  
0.0 0.0  
0.0 0.0  
0.0 0.0  
0.0 0.0  
0.0 0.0  
0.0 0.0  
0.0 0.0  
0.0 0.0  
0.0 0.0  
0.0 0.0  
0.0 0.0  
0.0 0.0  
0.0 0.0  
0.0 0.0  
\$ axial  
\$ time1 time2  
0.731 0.731  
0.784 0.784  
0.946 0.946  
0.911 0.911  
0.864 0.864  
0.816 0.816  
0.776 0.776  
0.746 0.746  
0.681 0.681  
0.616 0.616  
0.570 0.570  
0.569 0.569  
0.568 0.568  
0.567 0.567  
0.706 0.706  
0.681 0.681  
0.665 0.665  
0.651 0.651  
0.627 0.627  
0.597 0.597  
0.596 0.596  
#####  
\*\*COMPUTE  
\*\*END

## 付録C WAD5試験解析用ART入力データ

```

<< ART WIND EXPERIMENT ANALYSIS (Ar) (21+1) (AER 2400sec) >>>FEB.26 1997 WAD5A
&NDPTIM
  LPITCH= 2500,
  LOPT(1)=29*0.1,
  LOPT(1)=2500,
  LOPT(2)=2500,
  LOPT(5)=2500,
  TEND = 2400.0,
  ITURB =1,INUC=1,
  IAGLOM=1, IBROW=1,IGRAV=1,IRISK=0,
  ICOND=1,IUGAS=0,IRESUP(1)=22*0,
  NDX=2,NDY=2,
  NCOM=22,IELEVE=22,IMCOMP=0,
  IPIPE(1) =0,20*1,0,
  RPIPE(1) =0.0,20*5.315,0.0,
  XLPIPE(1)=0.0,20*25.0,0.0,
  VCOMP(1) =2218.69,20*2218.69,1.0,
  HCOMP(1) =10.63,20*10.63,10.63,
  DAW(1) =21*78.54,0.0,
  IFP(1)=6,
  RHOM(1)=4.510,
  ICLASS=10,
  ARS(1)=1.00000E-15,8.00000E-15,6.40000E-14,5.12000E-13,
    4.09600E-12,3.27680E-11,2.62144E-10,2.09715E-09,
    1.67772E-08,1.34218E-07,1.07374E-06,
  FXFILM=1.0,FCONX=1.0,FILM=1.0,
  ALIMIT=1.0E-38,
&END
&DPTIM NTRNDT=1, TNEXTJ= 2400.0,
  DTALLM=0.25, DTB=0.25,
  FDFILM(1)=22*1.0,
  SRCJ(1,3,1)=0.01024,
  AFJ(1) = 22*265.75,
  FREVAP(1) = 22*1.0, FUGAS(1)=22*1.0,
  UGASJ(1)=72.10, 74.12, 88.90, 90.60, 88.34,
    85.10, 82.19, 79.16, 72.63, 66.02,
    60.88, 59.13, 57.38, 55.63, 68.20,
    68.27, 67.88, 66.78, 64.91, 62.45,
    62.40,
  GJ(1, 2, 1)=6398.7 ,GJ(1, 3, 2)=6577.9,
  GJ(1, 4, 3)=7726.58,GJ(1, 5, 4)=7996.01,
  GJ(1, 6, 5)=7840.34,GJ(1, 7, 6)=7551.98,
  GJ(1, 8, 7)=7294.47,GJ(1, 9, 8)=7025.31,
  GJ(1,10, 9)=6445.52,GJ(1,11,10)=5859.39,
  GJ(1,12,11)=5402.59,GJ(1,13,12)=5247.55,
  GJ(1,14,13)=5092.51,GJ(1,15,14)=4937.46,
  GJ(1,16,15)=5912.81,GJ(1,17,16)=6058.84,
  GJ(1,18,17)=6024.21,GJ(1,19,18)=5926.3,
  GJ(1,20,19)=5760.44,GJ(1,21,20)=5542.21,
  GJ(1,22,21)=5537.85,
  XSJ(1,9)=22*0.5,
  XSJ(1,1)=22*0.5,
  PMPAJ(1)=22*0.101,
  TWJ(1)=923.16, 919.31, 1235.66, 1167.64, 1077.26,
    1000.33, 950.41, 899.18, 820.78, 741.83,
    685.35, 681.31, 677.28, 673.24, 973.16,
    905.49, 827.85, 767.32, 729.13, 688.96,
    688.16,
  TJ(1)=873.16, 898.16, 1077.66, 1097.66, 1070.28,
    1031.07, 996.33, 959.69, 880.19, 799.82,

```

737.20, 715.99, 694.79, 673.58, 818.73,  
826.94, 821.77, 807.29, 783.60, 756.16,  
756.16,  
TMPARJ(1, 1)=10\* 873.16,TMPARJ(1, 2)=10\* 898.16,  
TMPARJ(1, 3)=10\* 1077.66,TMPARJ(1, 4)=10\* 1097.66,  
TMPARJ(1, 5)=10\* 1070.28,TMPARJ(1, 6)=10\* 1031.07,  
TMPARJ(1, 7)=10\* 996.33,TMPARJ(1, 8)=10\* 959.69,  
TMPARJ(1, 9)=10\* 880.19,TMPARJ(1,10)=10\* 799.82,  
TMPARJ(1,11)=10\* 737.20,TMPARJ(1,12)=10\* 715.99,  
TMPARJ(1,13)=10\* 694.79,TMPARJ(1,14)=10\* 673.58,  
TMPARJ(1,15)=10\* 818.73,TMPARJ(1,16)=10\* 826.94,  
TMPARJ(1,17)=10\* 821.77,TMPARJ(1,18)=10\* 807.29,  
TMPARJ(1,19)=10\* 783.60,TMPARJ(1,20)=10\* 756.16,  
TMPARJ(1,21)=10\* 756.16,

&amp;END

## 付録D WAD5試験解析用VICTORIA入力データ

```

$ JAERI Project; Analysis of Test for Aerosol Behaviors
$ 1997.2.24/Victoria92/Run/WIND WAD5 full time run dt=0.05sec
$=====
$ ID=jaeri_wind1/run with dummy cell (21 cells)
$ use of Chemical module
$ reactive pipe material
$ No Using bend
$=====
$#####
$ Computer type
'Sun IPX'
$ Calculation Description
'Analysis for Wind Aerosol Test WAD4A'
$ run parameter
$ steady_state ; transient ; restart
      0      1      0
$ module selection
$ chemist ; aerosol ; convection ; rod release ; decay ; fuel
      1      1      1      0      0      0
$ cell input
$ axial ; radial ; fuel radial ; clad radial
      21      1      0      0
$ geometrical data
$ inner radii [m]
  21*0.0
$ cell radial width [m]
  21*0.05315
$ cell height [m] ( total;5.0m )
  21*0.25
$#####
**STRUDATA
$
$ bend flags
  21*0
$ settling flags
  21*0
$ axial cell areas [m2]
  21*0.00887
$ radial flow areas [m2]
  21*0.0
$ hydraulic diameter [m]
  21*0.1063
$ floor area in cell [m2]
  2.6575e-24,20*0.026575
$ wall area in cell [m2]
  3.0338e-24,20*0.030338
$ ceiling area in cell [m2]
  2.6575e-24,20*0.026575
$ structure identification flag (reactive)
  21*5
$#####
**CONTDATA
$
$ (initial condition in bulk gas)
$ initial condition value
  4
$ species name & phase
$ species fractional density [kg/m3]
  'Arg'
  0.273

```

```

0.266
0.227
0.223
0.229
0.237
0.244
0.252
0.271
0.296
0.321
0.331
0.342
0.353
0.290
0.287
0.289
0.293
0.302
0.313
0.313
'H2Og'
0.130
0.127
0.104
0.100
0.105
0.110
0.115
0.119
0.129
0.141
0.152
0.156
0.161
0.166
0.138
0.137
0.137
0.139
0.143
0.148
0.148
'CsIg'
21*0.0
'CsOHg'
21*0.0
#####
**BOUNDARY
$
$ boundary condition flags (0=zero grad ,1=a value)
21*0,0,1,21*0
$ boundary condition values
2
$
'Arg'
$inner top bottom outside
21*0.0,0.0,0.273,21*0.0
$
'H2Og'
$inner top bottom outside
21*0.0,0.0,0.130,21*0.0
#####
**AERODATA
$ aerosol component

```

```

'single'
$ definition of collocation points
$ ncoll ; spacing
    0      10
$ m_lower ; m_upper
    1.0e-18  1.0e-9
$ collocation interparation = liner
    2
$ tollerance specification (recommended)
$ eps ; maxtry
    1.0e-6  10
$ 
$ aerosol physics data
$ collision   dynamic   sticking
$ shape factor ; shape factor ; efficiency
    1.0      1.0      1.0
$ cunningham correction factor coefficient
$ ka   kq   kb
    1.25  0.41  0.88
$ brock thermophoretic deposition coefficient
$ cs   cm   ct
    1.17  1.14  2.18
#####
**PAUSE
#####
**TDEPCTRL
$ 
$ (time step control input)
$ start ; step time ; end [s]
    0.0      0.05  2400.0
$ output control
$ print control ; graphics (edward) ; output type ; write dump file
    24000     48000     0      0
#####
**TDEPCHEM
$ 
$ (recommended values)
$ max chemical convergence max non-limited
$ iterations ; criterion ; iterations
    500      1.0e-12      45
$ gas mixing
    1
#####
**TDEPSRCE
$ 
$ (source descriptioin)
$ aerosol source
$ number of aerosol source
    0
$ vapor source
$ number of vapor source
    1
$ number of time table
    2
$ time [s]
$ time1 time2
    0.0  2400.0
$ -----
$ number of species
$ species and fraction
$ fluid cell input number (ax,rad)
$ source rates [kg/s]
$ sigma, radius[m]
$ -----

```

```

$species name
'CsIg' 1 1
$ time1   time2
0.1024e-4 0.1024e-4
#####
**TDEPSTRU
$-
$ (structure condition)
$ number of time table
2
$-----
$ time [s]
$ time1   time2
0.0      2400.0
$ gas temperature [k]
$ time1   time2
873.160  873.160
898.160  898.160
1077.660 1077.660
1097.660 1097.660
1070.276 1070.276
1031.070 1031.070
996.332  996.332
959.693  959.693
880.194  880.194
799.821  799.821
737.199  737.199
715.994  715.994
694.789  694.789
673.584  673.584
818.733  818.733
826.939  826.939
821.775  821.775
807.291  807.291
783.603  783.603
756.160  756.160
756.160  756.160
$-----
$ time [s]
$ time1   time2
0.0      2400.0
$ structure temperature [k]
$ ceiling
$ time1   time2
923.160  923.160
919.314  919.314
1235.660 1235.660
1167.635 1167.635
1077.258 1077.258
1000.332 1000.332
950.414  950.414
899.185  899.185
820.784  820.784
741.829  741.829
685.349  685.349
681.313  681.313
677.277  677.277
673.241  673.241
973.160  973.160
905.488  905.488
827.849  827.849
767.324  767.324
729.127  729.127
688.963  688.963

```





## 付録E BWR逃がし安全弁ライン解析用ART入力データ

&lt;&lt; ART / Safety Relief Valves (1996/09/18) &gt;&gt;&gt;:120secRun

&amp;NDPTIM

```

LPITCH= 1000,
LOPT(1)= 29*0.1,
LOPT(1)= 1000,
LOPT(2)= 1000,
LOPT(5)= 1000,
TEND = 120.0,
ITURB = 1, INUC = 2,
IAGLOM=1, IBROW=1, IGRAV=1, IRISK=0,
ICOND=1, IUGAS=0, IRESUP(1)=16*1.0, IRESUP(1)=17*0,
NDX=2, NDY=2,
NCOM=17, IELEV=17, IMCOMP=0,
ICORE(1) = 1,16*0,
IPIPE(1)= 0,15*1, 0,
RPIPE(1)= 0.0,15*11.86,0.0,
XLPIPE(1)= 0.0, 4*200., 150.,100.,150.,3*200.,150.,100.,3*150.,0.0,
VCOMP(1)= 2.527e8, 4*88379., 66284.3, 44189.5, 66284.3, 3*88379.,
66284.3, 44189.5, 3*66284.3, 1.0,
VCOMP(1)= 88379., 4*88379., 66284.3, 44189.5, 66284.3, 3*88379.,
66284.3, 44189.5, 3*66284.3, 1.0,
HCOMP(1)= 1.0e-20,4*200.0,150.0, 70.04, 5*23.72, 70.04 , 3*150.0, 0.0,
DAW(1)= 1.0e-20,5*74.52,106.39,471.24,3*628.32,471.24,106.39,3*74.52,0.0,
RBEND(1,7) = 38.1,
RBEND(1,13)= 38.1,
RANGL(1,7) = 1.57080,
RANGL(1,13)= 1.57080,
IFP(1)= 6,7,
RHOM(1) = 3.7820, 3.7820,
ICLASS=10,
ARS(1) = 1.00000E-15,8.00000E-15,6.40000E-14,5.12000E-13,
4.09600E-12,3.27680E-11,2.62144E-10,2.09715E-09,
1.67772E-08,1.34218E-07,1.07374E-06,
FXFILM= 0.005, FCONX= 1.0, FILM= 0.005,
ALIMIT= 1.0E-38,
CC(1,1,1)= 100.0,CC(1,1,2)=1127.9,
&END
&DPTIM NTRNDT=1, TNEXTJ= 120.00,
DTALLM= 0.04, DTB= 0.04,
FDFILM(1)=17*0.005,
SRCJ(1,1,1)=4.37,SRCJ(1,1,2)=49.3,
SRCJ(1,1,1)=4.807,SRCJ(1,1,2)=54.23,
AFJ(1)= 6*0.0,1860.,3558.,3*4744.,3558.,1860.,4*0.0,
FREVAP(1)=17*1.0, FUGAS(1)=17*1.0,
UGASJ(1)= 17*2500.,
UGJ(1)= 6*0., -1767.8, 5*0.0, -1767.8, 4*0.0,
UGJ(1)= 17*0.0,
GJ(1, 2, 1)= 1.105E+06, GJ(1, 3, 2)= 1.105E+06,
GJ(1, 4, 3)= 1.105E+06, GJ(1, 5, 4)= 1.105E+06,
GJ(1, 6, 5)= 1.105E+06, GJ(1, 7, 6)= 1.105E+06,
GJ(1, 8, 7)= 1.105E+06, GJ(1, 9, 8)= 1.105E+06,
GJ(1,10, 9)= 1.105E+06, GJ(1,11,10)= 1.105E+06,
GJ(1,12,11)= 1.105E+06, GJ(1,13,12)= 1.105E+06,
GJ(1,14,13)= 1.105E+06, GJ(1,15,14)= 1.105E+06,
GJ(1,16,15)= 1.105E+06, GJ(1,17,16)= 1.105E+06,
XSJ( 1, 1)=17*1.0000E+00,
PMPAJ(1)= 17*7.61,
TWJ(1)= 600.0, 600.0, 600.0, 600.0, 580.0,
562.5, 550.0, 537.5, 520.0, 500.0,
480.0, 462.0, 450.0, 437.0, 422.0,

```

```
        407.5, 400.0,
TJ(1)= 800.00, 800.00, 800.00, 800.00, 800.00,
      800.00, 800.00, 800.00, 800.00, 800.00,
      800.00, 800.00, 800.00, 800.00, 800.00,
      800.00, 800.00,
TMPARJ(1, 1)=10*800.00, TMPARJ(1, 2)=10*800.00,
TMPARJ(1, 3)=10*800.00, TMPARJ(1, 4)=10*800.00,
TMPARJ(1, 5)=10*800.00, TMPARJ(1, 6)=10*800.00,
TMPARJ(1, 7)=10*800.00, TMPARJ(1, 8)=10*800.00,
TMPARJ(1, 9)=10*800.00, TMPARJ(1,10)=10*800.00,
TMPARJ(1,11)=10*800.00, TMPARJ(1,12)=10*800.00,
TMPARJ(1,13)=10*800.00, TMPARJ(1,14)=10*800.00,
TMPARJ(1,15)=10*800.00, TMPARJ(1,16)=10*800.00,
&END
&DPTIM NTRNDT=2, TNEXTJ= 120.00,
DTALLM= 0.5, DTB= 0.5,
FDFILM(1)=17*6.35,
UGASJ(1)= 17*0.0, UGJ(1)=17*0.0,
GJ(1, 2, 1)= 0.0, GJ(1, 3, 2)= 0.0,
GJ(1, 4, 3)= 0.0, GJ(1, 5, 4)= 0.0,
GJ(1, 6, 5)= 0.0, GJ(1, 7, 6)= 0.0,
GJ(1, 8, 7)= 0.0, GJ(1, 9, 8)= 0.0,
GJ(1,10, 9)= 0.0, GJ(1,11,10)= 0.0,
GJ(1,12,11)= 0.0, GJ(1,13,12)= 0.0,
GJ(1,14,13)= 0.0, GJ(1,15,14)= 0.0,
GJ(1,16,15)= 0.0, GJ(1,17,16)= 0.0,
&END
```

## 付録F BWR逃がし安全弁ライン解析用VICTORIA入力データ

```

$ JAERI Project; Analysis of Safety Relief Valves for Aerosol Behaviors
$ 1996.09.18/Victoria92/Run/Runnnig/120sec/Non-Restart
$=====
$ ID=jaeri_srv_line/run (16 cells)
$ use of Chemical module
$ reactive pipe material(on/off)
$=====
$#####
$ Computer type
'Sun IPX'
$ Calculation Description
'Analysis for Safety Release Valves'
$ 
$ run parameter
$ steady_state ; transient ; restart
    0      1      0
$ 
$ module selection
$ chemist ; aerosol ; convection ; rod release ; decay ; fuel
    1      1      1      0      0      0
$ 
$ cell input
$ axial ; radial ; fuel radial ; clad radial
    16     1      0      0
$ 
$ geometrical data
$ inner radii [m]
    16*0.0
$ cell radial width [m]
    16*0.1186
$ cell height [m] ( total; 25 + 2 m )
    5*2.0,1.5,1.0,1.5,3*2.0,1.5,1.0,3*1.5
$#####
**STRUDATA
$ 
$ bend flags
    6*0,1,5*0,1,3*0
$ settling flags
    6*-1,7*0,3*-1
$ axial cell areas [m2]
    16*0.04419
$ radial flow areas [m2]
    16*0.0
$ hydraulic diameter [m]
    16*0.2372
$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$
$ STRAIGHT PIPE
$   floor : D x L x 1.000
$   ceiling : D x L x 1.000
$   wall : D x L x 1.1415
$ BENDED PIPE
$   floor : D x L x 0.785
$   ceiling : D x L x 0.785
$   wall : D x L x 1.571
$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$
$ floor area in cell [m2]
    .474e-24,.5*.0,.186,.356,.3*.474,.356,.186,.3*0.0
$ wall area in cell [m2]
    .542e-24,.4*1.4904,1.118,.373,.406,.3*.542,.406,.373,.3*1.118
$ ceiling area in cell [m2]

```

```

.474e-24,5*.0.,186,,356,3*.474,,356,,186,3*0.0
$ structure identification flag (non reactive)
 16*0
#####
**CONTDATA
$
$ (initial condition in bulk gas)
$
$ initial condition value
 3
$ species name & phase
$ species fractional density [kg/m3]
'H2Og'
 16*21.451
'CsIg'
 16*3.957e-4
'CsOHg'
 16*4.463e-3
#####
**BOUNDARY
$
$ boundary condition flags (0=zero grad ,1=a value)
 16*0,0,1,16*0
$
$ boundary condition values
 3
$
'H2Og'
$inner top bottom outside
 16*0.0,0.0,21.451,16*0.0
$
'CsIg'
$inner top bottom outside
 16*0.0,0.0,3.957e-4,16*0.0
$
'CsOHg'
$inner top bottom outside
 16*0.0,0.0,4.463e-3,16*0.0
#####
**AERODATA
$ aerosol component
'single'
$ definition of collocation points
$ ncoll ; spacing
 0      10
$ m_lower ; m_upper
 1.0e-18  1.0e-9
$ collocation interparation = liner
 2
$ tollerance specification (recommended)
$ eps ; maxtry
 1.0e-6  10
$
$ aerosol physics data
$ collision dynamic sticking
$ shape factor ; shape factor ; efficiency
 1.0      1.0      1.0
$ cunningham correction factor coefficient
$ ka  kq  kb
 1.25  0.41  0.88
$ brock thermophoretic deposition coefficient
$ cs  cm  ct
 1.17  1.14  2.18
#####

```

```

**PAUSE
#####
**TDEPCTRL
$ 
$ (time step control input)
$ start ; step time ; end [s]
  0.0    0.04    120.0
$ output control
$ print control ; graphics (edward) ; output type ; write dump file
  1000      3000      0      0
#####
**TDEPCHEM
$ 
$ (recommended values)
$ max chemical convergence max non-limited
$ iterations ; criterion ; iterations
  500      1.0e-12      45
$ gas mixing
  1
#####
**TDEPSRCE
$ 
$ (source description)
$ 
$ 
$ aerosol source
$ 
$ number of aerosols source
  2
$ number of time table
  3
$ time[s]
$ time1   time2   time3
  0.0    120.0    1000.0
$ -----
$ number of species
$ species and fraction
$ fluid cell input number (ax,rad)
$ source rates [kg/s]
$ sigma, radius[m]
$ -----
$ number of species of aerosols
  1
$ species name fraction
'CsIc'  1.0
  1 1
$ time1   time2   time3
  4.37e-3  4.37e-3  0.0
$ sigma      mass median radius
  1.997      0.31824e-6
$ number of species of aerosols
  1
$ species name fraction
'CsOHc'  1.0
  1 1
$ time1   time2   time3
  4.93e-2  4.93e-2  0.0
$ sigma      mass median radius
  1.997      0.31824e-6
$ 
$ vapor source
$ 
$ number of vapor source
  2

```

```

$ number of time table
3
$ time [s]
$ time1 time2 time3
0.0 120.0 1000.0
$ -----
$ species, input cell (ax,rad)
$ source rates [kg/s]
$ -----
$species name
'CsIg' 1 1
$ time1 time2 time3
4.37e-4 4.37e-4 0.0
$species name
'CsOHg' 1 1
$ time1 time2 time3
4.93e-3 4.93e-3 0.0
##########
**TDEPSTRU
$
$ (structure condition)
$ number of time table
3
$ -----
$ time [s]
$ time1 time2 time3
0.0 120.0 1000.0
$ gas temperature [k]
$ time1 time2 time3
800.0 800.0 800.0
800.0 800.0 800.0
800.0 800.0 800.0
800.0 800.0 800.0
800.0 800.0 800.0
800.0 800.0 800.0
800.0 800.0 800.0
800.0 800.0 800.0
800.0 800.0 800.0
800.0 800.0 800.0
800.0 800.0 800.0
800.0 800.0 800.0
800.0 800.0 800.0
800.0 800.0 800.0
800.0 800.0 800.0
800.0 800.0 800.0
800.0 800.0 800.0
800.0 800.0 800.0
800.0 800.0 800.0
800.0 800.0 800.0
$ -----
$ time [s]
$ time1 time2 time3
0.0 120.0 1000.0
$ structure temperature [k]
$ ceiling
$ time1 time2 time3
600.00 600.00 600.00
600.00 600.00 600.00
600.00 600.00 600.00
600.00 600.00 600.00
580.00 580.00 580.00
562.50 562.50 562.50
550.00 550.00 550.00
537.50 537.50 537.50
520.00 520.00 520.00
500.00 500.00 500.00
480.00 480.00 480.00
462.50 462.50 462.50

```

|        |        |        |
|--------|--------|--------|
| 450.00 | 450.00 | 450.00 |
| 437.50 | 437.50 | 437.50 |
| 422.50 | 422.50 | 422.50 |
| 407.50 | 407.50 | 407.50 |

\$ wall

\$ time1 time2 time3

|        |        |        |
|--------|--------|--------|
| 600.00 | 600.00 | 600.00 |
| 600.00 | 600.00 | 600.00 |
| 600.00 | 600.00 | 600.00 |
| 600.00 | 600.00 | 600.00 |
| 580.00 | 580.00 | 580.00 |
| 562.50 | 562.50 | 562.50 |
| 550.00 | 550.00 | 550.00 |
| 537.50 | 537.50 | 537.50 |
| 520.00 | 520.00 | 520.00 |
| 500.00 | 500.00 | 500.00 |
| 480.00 | 480.00 | 480.00 |
| 462.50 | 462.50 | 462.50 |
| 450.00 | 450.00 | 450.00 |
| 437.50 | 437.50 | 437.50 |
| 422.50 | 422.50 | 422.50 |
| 407.50 | 407.50 | 407.50 |

\$ floor

\$ time1 time2 time3

|        |        |        |
|--------|--------|--------|
| 600.00 | 600.00 | 600.00 |
| 600.00 | 600.00 | 600.00 |
| 600.00 | 600.00 | 600.00 |
| 600.00 | 600.00 | 600.00 |
| 580.00 | 580.00 | 580.00 |
| 562.50 | 562.50 | 562.50 |
| 550.00 | 550.00 | 550.00 |
| 537.50 | 537.50 | 537.50 |
| 520.00 | 520.00 | 520.00 |
| 500.00 | 500.00 | 500.00 |
| 480.00 | 480.00 | 480.00 |
| 462.50 | 462.50 | 462.50 |
| 450.00 | 450.00 | 450.00 |
| 437.50 | 437.50 | 437.50 |
| 422.50 | 422.50 | 422.50 |
| 407.50 | 407.50 | 407.50 |

\$-----

\$ time [s]

\$ time1 time2 time3

0.0 120.0 1000.0

\$ gas pressure [Pa] ([N/m<sup>2</sup>])

\$ time1 time2 time3

|        |        |        |
|--------|--------|--------|
| 7.61e6 | 7.61e6 | 7.61e6 |

\$-----

\$ time [s]



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 <sup>-1</sup>     |
| 力           | ニュートン  | N  | m·kg/s <sup>2</sup> |
| 圧力、応力       | パスカル   | Pa | N/m <sup>2</sup>    |
| エネルギー、仕事、熱量 | ジュール   | J  | N·m                 |
| 功率、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        | ファラード  | F  | C/V                 |
| 電気抵抗        | オーム    | Ω  | V/A                 |
| コンダクタンス     | ジーメンス  | S  | A/V                 |
| 磁束          | ウェーバ   | Wb | V·s                 |
| 磁束密度        | テスラ    | T  | Wb/m <sup>2</sup>   |
| 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 |                     |
| 光束          | ルーメン   | lm | cd·sr               |
| 照度          | ルクス    | lx | lm/m <sup>2</sup>   |
| 放射能         | ベクレル   | Bq | s <sup>-1</sup>     |
| 吸収線量        | グレイ    | Gy | J/kg                |
| 線量当量        | シーベルト  | Sv | J/kg                |

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         |

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

表5 SI接頭語

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

(注)

1. 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、1eVおよび1uの値はCODATAの1986年推奨値によった。

2. 表4には海里、ノット、アール、ヘクタ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。

3. barは、JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。

4. 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 <sup>3</sup> dyn) | kgf      | lbf |
|---------|-------------------------|----------|-----|
| 1       | 0.101972                | 0.224809 |     |
| 9.80665 | 1                       | 2.20462  |     |
| 4.44822 | 0.453592                | 1        |     |

$$\text{粘度 } 1 \text{ Pa}\cdot\text{s}(N\cdot\text{s}/\text{m}^2) = 10 \text{ P(ポアズ)}(\text{g}/(\text{cm}\cdot\text{s}))$$

$$\text{動粘度 } 1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ St(ストークス)}(\text{cm}^2/\text{s})$$

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

| エネルギー・仕事・熱量                 | J(=10 <sup>7</sup> erg)     | kgf·m                       | kW·h                        | cal(計量法)                    | Btu                         | ft · lbf                   | eV            | 1 cal = 4.18605 J(計量法) |                   |
|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------|---------------|------------------------|-------------------|
|                             |                             |                             |                             |                             |                             |                            |               | 1                      | = 4.184 J(熱化学)    |
| 1                           | 0.101972                    | 2.77778 × 10 <sup>-7</sup>  | 0.238889                    | 9.47813 × 10 <sup>-4</sup>  | 0.737562                    | 6.24150 × 10 <sup>18</sup> |               |                        | = 4.1855 J(15 °C) |
| 9.80665                     | 1                           | 2.72407 × 10 <sup>-6</sup>  | 2.34270                     | 9.29487 × 10 <sup>-3</sup>  | 7.23301                     | 6.12082 × 10 <sup>19</sup> |               |                        | = 4.1868 J(国際蒸気表) |
| 3.6 × 10 <sup>6</sup>       | 3.67098 × 10 <sup>5</sup>   | 1                           | 8.59999 × 10 <sup>5</sup>   | 3412.13                     | 2.65522 × 10 <sup>6</sup>   | 2.24694 × 10 <sup>25</sup> |               |                        |                   |
| 4.18605                     | 0.426858                    | 1.16279 × 10 <sup>-6</sup>  | 1                           | 3.96759 × 10 <sup>-3</sup>  | 3.08747                     | 2.61272 × 10 <sup>19</sup> | 仕事率 1 PS(仏馬力) |                        |                   |
| 1055.06                     | 107.586                     | 2.93072 × 10 <sup>-4</sup>  | 252.042                     | 1                           | 778.172                     | 6.58515 × 10 <sup>21</sup> | = 75 kgf·m/s  |                        |                   |
| 1.35582                     | 0.138255                    | 3.76616 × 10 <sup>-7</sup>  | 0.323890                    | 1.28506 × 10 <sup>-3</sup>  | 1                           | 8.46233 × 10 <sup>18</sup> | = 735.499 W   |                        |                   |
| 1.60218 × 10 <sup>-19</sup> | 1.63377 × 10 <sup>-20</sup> | 4.45050 × 10 <sup>-26</sup> | 3.82743 × 10 <sup>-20</sup> | 1.51857 × 10 <sup>-22</sup> | 1.18171 × 10 <sup>-19</sup> | 1                          |               |                        |                   |

| 放射能                     | Bq                          | Ci | 吸収線量 | Gy | rad | 照射線量 | C/kg | R | 線量当量 | Sv  | rem |
|-------------------------|-----------------------------|----|------|----|-----|------|------|---|------|-----|-----|
|                         |                             |    |      |    |     |      |      |   |      |     |     |
| 1                       | 2.70270 × 10 <sup>-11</sup> | 1  | 0.01 | 1  | 1   | 1    | 3876 | 1 | 0.01 | 100 | 1   |
| 3.7 × 10 <sup>-10</sup> |                             |    |      |    |     |      |      |   |      |     |     |

(86年12月26日現在)

三一ゼロ試験における配管内圧力ヒストグラム挙動解析(受託研究)