

JAERI-Tech
2001-031



JP0150390



硝化溶媒と硝酸との熱分解反応に関わる安全性実証試験
(受託研究)

2001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*・内山 軍蔵

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, 2001

編集兼発行 日本原子力研究所

硝化溶媒と硝酸との熱分解反応に関わる安全性実証試験 (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*³・内山 軍蔵

(2001年2月19日受理)

再処理溶媒（溶媒）と硝酸との異常化学反応に起因した爆発は、再処理施設のDBAに選定されている。そこで、原研では爆発がプルトニウム濃縮缶で起きた場合を想定し、セル換気系の安全性とHEPAフィルタの健全性が確保できることを実証するため、溶媒と硝酸とを反応容器に貯え、密閉し、種々の加熱条件下で生成した硝化溶媒（TBP錯体等）を急激に熱分解させて、爆発を誘起させるニトロ化溶媒爆発試験を実施した。試験の結果、以下に述べる知見を得た。

硝化溶媒の熱分解により溶媒1kgが噴出して爆発を起こした場合、実験的方法により導出した最大質量放出速度と最大エネルギー速度は、0.59 [kg/s]と3240.3 [kJ/kg·s]である。この爆発による波及がセル換気系に与える影響は小さく、HEPAフィルタの健全性が確保できることを実証した。

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 高度情報科学技術研究機構

*³原子力エンジニアリング株式会社

Safety Demonstration Tests on Thermal Decomposition of Nitrated Solvent with Nitric Acid
in Nuclear Fuel Reprocessing Plants
(Contract Research)

Michio TSUKAMOTO, Junichi TAKADA, Tadao KOIKE, Koji WATANABE
Teijiro MIYATA *, Gunji NISHIO *², Mikio MURATA *³ and Gunzou UCHIYAMA

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 February 19, 2001)

The demonstration tests were conducted to investigate the safety of the ventilation system and integrity of the HEPA filters under the design basis accident (DBA) of the evaporator in the reprocessing plants. The tests were carried out by heating organic solvent (TBP/n-dodecane) mixed with nitric acid in a sealed vessel. It was possible to cause an explosive decomposition of TBP-complex formed by nitration of the solvent with nitric acid. The following was obtained by the analysis of the experimental results of the tests.

From derivation by the experimental method, data on the maximum mass release rate and the maximum energy release rate in the explosion, as the solvent of 1 [kg] spouted out by the thermal decomposition, were obtained. They were 0.59 [kg/s] and 3240.3 [kJ/kg·s] respectively. The influence given on the cell ventilation system by this explosion was small and it was demonstrated that the safety of the HEPA filters could be secured.

Key words: DBA, Reprocessing Plant, Organic Solvent, Nitric Acid, TBP-complex, Explosion, Safety, Thermal Decomposition, Ventilation System, HEPA Filter

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

*³ Nuclear Engineering Co., Ltd

目次

1. はじめに	1
2. 試験	1
2.1 試験装置	1
2.2 試験の方法	3
2.3 試験の結果と考察	4
2.3.1 密閉条件下における硝化溶媒と硝酸との熱分解反応挙動について	4
2.3.2 爆発（急激燃焼及び破裂）の規模について	5
2.3.3 急激燃焼が起きた場合のセル換気系の健全性について	8
2.3.4 密閉系における硝化溶媒と硝酸との熱分解反応に関わる 自己加速反応開始温度の実験的導出について	9
2.3.5 開放条件下における硝酸水溶液の過濃縮が熱分解反応に 与える影響について	12
3. まとめ	13
謝辞	14
参考文献	15
付録	38

Contents

1. Introduction	1
2. Experiment	1
2.1 Experimental Apparatus	1
2.2 Experimental Methods	3
2.3 Results and Discussion	4
2.3.1 The Thermal Decomposition of the TBP-complex with Acid in the Sealed Vessel	4
2.3.2 The Result of the Scale of Explosion	5
2.3.3 On the Safety of the Ventilation System Under the Explosion	8
2.3.4 Estimation of the Temperature at the Self Accelerative Reaction of TBP-complex Causes in the Sealed Vessel	9
2.3.5 The Effect of Concentration of the Nitric Acid Solution on the Thermal Decomposition Properties in the Open Vessel	12
3. Conclusion	13
Acknowledgement	14
References	15
Appendix	38

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、再処理施設の安全設計の妥当性を確認するという観点から、異常事象を想定した幾つかの設計基準事象（DBA）⁽¹⁾を選定し、想定すべき異常事象として有機溶媒等による火災・爆発事故を取り上げている。評価では、事故シナリオとして再処理施設のプルトニウム濃縮工程の蒸発缶（濃縮缶に同じ）に万一、溶媒が混入し、熱的制限値（135℃）以上の温度で加熱された場合を想定している。この場合、蒸発缶内で硝酸と溶媒とが反応して硝化溶媒が生成し、異常な状態をそのまま放置すれば急激な熱分解反応に進展し、爆発を起こす可能性が考えられるとしている。しかしながら、このような異常な事象を想定しても、蒸発缶内で爆発が起きるとは限らない。即ち、先の事象にさらにPu水溶液の過濃縮や蒸発缶の閉塞等の異常事象が重ならない限り蒸発缶の爆発事故には至らない。米国サバナリバーのTNXウラン濃縮缶で発生した爆発事故（1953年1月）は、燃料水溶液の過濃縮現象や凝縮器の閉塞に起因した爆発事故として報告⁽²⁾されている。そこで、科学技術庁は、再処理施設で火災や爆発を想定した場合でも、セル、ダクト、ダンパー、フィルタ、フロア等から構成されるセル換気系が所定の安全機能と閉じ込め性能を保ち、放射性物質が施設内に閉じ込められることを確認する「再処理施設セル換気系安全性実証試験」を企画し、その実証試験を原研に委託した。原研では実証試験の一環として、再処理施設の火災・爆発の事故シナリオを考慮したニトロ化溶媒爆発試験（NITR試験）を実施し、密閉した系で溶媒と硝酸との混合溶液を加熱することにより、生成した硝化溶媒と硝酸が急激な熱分解反応に進行して、爆発（急激な燃焼）を起こした場合のセル換気系の圧力、温度伝播及び減衰効果を調べた。

実証試験は、①密閉条件下で生成した硝化溶媒と硝酸との熱分解反応挙動を調べる試験、②開放条件下における硝酸水溶液の過濃縮が溶媒と硝酸との熱分解反応に与える影響を調べる試験（燃料水溶液の過濃縮模擬）、③破裂及び急激燃焼によるセル内の圧力上昇を調べて破裂や燃焼の規模を求める試験、④急激燃焼が起きた場合のセル換気系の健全性を調べる試験からなる。また、密閉の反応系では熱的制限値以上の温度領域において、硝酸の熱分解生成物質の溶解・蓄積⁽³⁾による反応の加速が考えられるため、実証試験で得られたデータを解析し、硝化溶媒と硝酸との自己加速反応の開始温度を実験的導出方法で求め、密閉の反応系が自己加速的な熱分解反応に与える影響を調べた。なお、本文中の表現で爆発とは、反応容器内に蓄積した熱分解ガスにより、反応容器内の圧力が上昇して容器に取り付けた破裂板（ラプチャーディスク）が破裂して、噴出した溶媒ミストが着火源により着火し、急激な燃焼を起こすことである。

2. 試験

2.1 試験装置

NITR試験は、セル換気系実証試験装置に着火源（イグナイタ）とモデルプラントの蒸発缶を想定した反応容器を付加して実施した実証試験である。付録A1に「セル換気系実証試験装置」の鳥瞰図を示す。そして、付録A2にNITR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0.145m、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。また、反応容器にはラプチャーディスクが取り付けられており、設定圧力（試験条件）を越えた場合には内部に蓄積したガスを瞬時に放出できる。付録A3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、決められた流量で換気しており、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A4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。また、第1モデルセル内には、溶媒ミストの着火源として2台のイグナイタを設置した（付録A9参照）。点火器の仕様は、電圧：DC 3000 [V]、貯蔵エネルギー：16 [J]、点火回数：6 [回/sec] である。

(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、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A5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波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A6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0.6 m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プロア及び煙突を結ぶ配管径0.6 mのダクトである。

(9) 排気プロア

排気プ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燃焼ガスが希釈ダクト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)。

2.2 試験の方法

密閉条件下における硝化溶媒と硝酸との熱分解反応挙動を調べる試験では、第1モデルセル内に設置した反応容器に、所定量(試験条件表1参照)の硝酸水溶液と溶媒(TBP及びn-ドデカンの物性は表2参照のこと)を充填・密閉し、電気ヒータで加熱した。ヒータ電力を0.85[kW]とした場合、反応容器に貯えた溶媒と硝酸(各1ℓ)の温度上昇速度は、1~1.5[°C/min]である。溶媒と硝酸を密閉下で加熱すると、溶媒の硝化反応が促進すると共に、生成した硝化溶媒と硝酸は急激に熱分解を起こす。熱分解反応で発生したガスの蓄積により、反応容器内の圧力は上昇して容器に取り付けたラプチャーディスクを破裂させる。破裂に伴い容器内の溶媒と硝酸は、全量がミスト等として第1モデルセルに噴出する。第1モデルセル内にはイグナイタがあり、着火条件により溶媒ミストは着火し燃焼する。この時、試験装置の各所で圧力、温度、差圧、流量等のデータを収録装置に記録した。また、過濃縮試験の場合は、再処理施設の燃料であるプルトニウムを模擬するため、硝酸セリウム:Ce(NO₃)₃を添加した硝酸水溶液と溶媒を開放系の反応容器に充填し、電気ヒータで加熱した。

2.3 試験の結果と考察

本項では、溶媒（硝化溶媒）と硝酸との反応挙動について、反応容器内の圧力上昇と温度上昇のデータを基に考察した。硝化溶媒と硝酸との熱分解反応挙動の評価に必要な反応系内の反応特性や反応生成物等に関する情報については、実証試験の一環として実施し、纏められた報告書（JAERI-Tech 99-039⁽³⁾、JAERI-Tech 99-040⁽⁴⁾）を参照されたい。

2.3.1 密閉条件下における硝化溶媒と硝酸との熱分解反応挙動について

(1) TBP量の変化が熱分解反応に与える影響

プルトニウム濃縮缶のDBAで想定されたTBP 100 [g]を基準重量に設定し、30 vol% TBP/n-ドデカン試験では、TBP量を0.12~0.36 [ℓ]、100 vol% TBP試験では、TBPを0.1~1.0 [ℓ]まで用いた。したがって、TBP混入量に関しては、安全側（保守的）の混入を考慮し、事故シナリオを越えた範囲まで試験を実施した。

図1に30 vol% TBP/n-ドデカン試験での反応容器内の圧力と温度の変化を示した。図中において、NITR2007（TBP 0.12 [ℓ]）試験では、熱分解反応（発熱反応）による温度の立ち上がりは明確に表れていない。しかし、TBPが2倍（NITR2008）と3倍量（NITR2009）の試験では、硝化溶媒の熱分解反応による温度の上昇を起こしたが反応が持続しないため、発熱が短時間で終了している。その結果として温度曲線に緩やかなピークが表れる。一方、溶媒が100 vol% TBPとした試験（NITR4001~4005、図2~図3参照）では、水相の硝酸濃度が7 mol/ℓのとき、TBP量が0.1 ℓ（硝酸濃度：2.7 mol/ℓ）であっても硝化溶媒及び硝酸の熱分解反応は自己加速反応を起こすことを示した。

溶媒と硝酸の反応は主に溶媒相で誘起されるため、急激な熱分解に移行するには、溶媒相中のTBP濃度と硝酸濃度が重要である。即ち、30 vol% TBP/n-ドデカン試験では、n-ドデカン（希釈剤）を混合するため、溶媒に配位したTBP濃度と硝酸濃度が大きく低下するため、熱分解反応が促進しなかったと考えられる。なお、試験で用いる硝酸水溶液の硝酸濃度は、全て試験条件により決定し調製した。溶媒の初期硝酸濃度は、先に調製した硝酸水溶液とTBPを攪拌・平衡後にNaOH滴定により測定した。

(2) 水相の硝酸濃度の変化が熱分解反応に与える影響

試験毎の硝酸濃度を5.3、6.6、9.7、13.0 [mol/ℓ]と変えた水相（1.9 ℓ）と100 vol% TBP 0.1 ℓ（硝酸濃度 約2.7 mol/ℓ一定）を反応容器に充填し、加熱した試験での反応容器内の圧力と温度の変化を図4と図5に示した。水相の硝酸濃度が7、10 [mol/ℓ]の場合に溶媒と硝酸の熱分解反応は自己加速反応を起こし、5、13 [mol/ℓ]では自己加速反応を起こさなかった。水相の硝酸濃度が5 [mol/ℓ]の場合、反応容器内の圧力変化は硝化溶媒と硝酸の急激な熱分解反応による上昇を示さない。これは、硝酸濃度が低いことに起因して、硝酸の熱分解によるガスの発生が小さかったためと考えられる。したがって、硝酸濃度が5 [mol/ℓ]の水相では、硝酸と溶媒の熱分解反応に与える影響は少ないと考えられる。また、水相の硝酸濃度が13 [mol/ℓ]の試験では、硝酸濃度が高いので激しい熱分解反応が自己加速的に進行すると予想したが、予想に反して熱分解反応は穏やかで、硝化溶媒と硝

酸の熱分解反応は急激な進行を起こしていない。水相中に十分に硝酸が存在しているにも関わらず、硝化溶媒と硝酸の熱分解反応が急激に進行しない原因は、急激な熱分解反応が起きる温度に達する前に、仕込んだTBPの大半が硝酸による酸化等により消費され、熱分解反応が維持できなかつたためと考えられる。反応容器内の圧力上昇が比較的低温から開始している（NIT R4001、40A1）こともこの説明を裏付けている。以上のことから、密閉容器における0.1 ℓ（事故シナリオ相当量）のTBPの場合、水相の硝酸濃度が高いほど、硝化溶媒と硝酸との熱分解反応が激しいとは言えない。

(3) ヒータ電力の変化が熱分解反応に与える影響

反応容器に100 vol% TBP 1 ℓと硝酸水溶液1 ℓを充填し、ヒータ電力を変化させた試験での反応容器内圧力と溶媒温度の変化を図6と図7に示した。本試験では、溶媒と硝酸（各1 ℓ）の温度上昇速度を約1 [°C/min]とするため、ヒータ電力を0.85 [kw]を基準とし、電力を2, 3, 4倍と変えた試験を実施した。その結果、加熱時のヒータ電力が小さく、加熱が長時間になる試験ほど、急激な熱分解反応の開始温度が若干低下する傾向が見られた。この傾向は、昇温速度が小さいことに起因して溶媒と硝酸が加熱下で長時間の接触により、劣化生成物の蓄積・分解が促進したためと考えられる。しかし、4 RUN共に急激な熱分解の開始温度は熱的制限値以上（140～150°C 図7参照）であることが分かった。

2.3.2 爆発（急激燃焼及び破裂）の規模について

ラプチャーディスク（破裂設定圧力：3, 5, 7 [MPa]）の破裂は、反応容器内部に蓄積したガス等を瞬時にセル内に噴出させるため、容器の破裂と同様の効果をもたらす。そこで、ガス等の噴出によるセル内の圧力上昇データを収集・解析することで破裂及び急激燃焼時のエネルギーを求めた。また、噴出した溶媒ミストが着火源により、着火・燃焼するか否かは、爆発規模の決定に大きな影響を与えるため、溶媒量（及び組成）と着火の関係を併せて調べた。

(1) 破裂規模の計算（溶媒ミストが燃焼しない場合）

セル内に噴出した溶媒ミストが着火しない場合、破裂時の放出エネルギーとしては、①溶媒と硝酸との反応により生成した熱分解ガス及び水蒸気が断熱膨張した場合のエネルギー⁽⁵⁾と②熱水の放出エネルギー（加圧下の熱水が常圧まで断熱的に膨張した場合）⁽⁶⁾が考えられる。熱分解ガス及び水蒸気の断熱膨張エネルギーについてはベーカーの(1)式を、熱水の放出エネルギーは、熱水が完全に100°Cの水蒸気になると仮定して、(2)式を用いて算出した。

〈ベーカーの式〉

$$E = \frac{P_1}{\gamma - 1} \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right) - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{1/\gamma} \right] V \quad (1)$$

〈熱水の放出エネルギー〉

$$E_w = \{ (l_1 - l_2) - (s_1 - s_2) T_2 \} M_w \quad (2)$$

E : 熱分解ガス及び水蒸気の断熱膨張エネルギー [kJ]

E_w : 熱水の放出エネルギー [kJ]

P_1 : 常圧 (大気圧とする) [kPa]

P_2 : 破裂直前の反応容器内圧力 [kPa]

M_w : 飽和水の重量 [kg]

u_1, s_1 : 加圧下の熱水 (飽和水) 1 kg の熱量 [kJ/kg] 及びエントロピ [kJ/kg·K]

u_2, s_2 : 大気圧 (100℃) 下の飽和水 1 kg の熱量 [kJ/kg] 及びエントロピ [kJ/kg·K]

T_2 : 100℃の絶対温度

V : 反応容器の容積 [m^3]

γ : 比熱比 (1.4)

(1) 式及び(2)式を用いて求めたラプチャーディスク破裂時の放出エネルギーとセル内の圧力上昇曲線の積分値 (破裂規模) を併せて表3に示した。表中の破裂規模とラプチャーディスクの破裂圧力との間には比例関係がないこと。そして、算出した放出エネルギーも圧力上昇曲線の積分値と比例関係になっていない。この原因は、熱水の放出エネルギーを求める際、熱水が完全 (全量) に100℃の水蒸気になると仮定したためと考えられる。即ち、破裂によって熱水が蒸気に変化する割合 ($q/Q = \text{フラッシュ率}$) を蒸気化した液重量 q [kg]、全液重量 Q [kg]、加圧下の液体のエンタルピー H_{T1} [kJ/kg]、大気圧下のエンタルピー H_{T2} [kJ/kg]、蒸発熱 L [kJ/kg] として $q/Q = (H_{T1} - H_{T2}) / L$ ⁽⁵⁾ で算出すると0.3程度であり、完全に蒸気化していない。したがって、破裂時にセル内で熱水がどれだけ蒸気化するかがセル内の圧力上昇に影響を与えると考えられる。

(2) 燃焼規模の計算 (溶媒ミストが急激燃焼した場合)

燃焼規模 (セル内の圧力上昇) はエネルギー放出速度と質量放出速度に依存するので、爆発現象として評価するため、NITR試験で求めたデータを固体ロケット燃料の燃焼試験で得られたデータと比較することでエネルギー放出速度と質量放出速度を評価した。固体ロケット燃料は、その特性と物性 (表4参照) が明らかであり、燃焼時間と燃焼規模を任意に設定できることから爆発試験の発熱源として最適である。固体ロケット燃料が1次燃焼で生成した可燃性ガス (水素と一酸化炭素) は、セル内で空気と反応して再び (2次) 燃焼を引き起こす。表5に1kgの固体ロケット燃料が燃焼した場合に発生する総括エネルギー (1次燃焼 + 2次燃焼) を示す ⁽⁷⁾。なお、固体ロケット燃料の燃焼は、一定の速度で5秒間燃焼 (矩形) する。

1) 溶媒ミスト1kgがセル内で急激燃焼した場合の総括エネルギー量

この解析では、セル内で発生した総括エネルギー量がセル内の圧力積分値に比例すると考える。1kgの固体ロケット燃料が燃焼した場合の総括エネルギーは、表5から $H_{fu} = 9228.4$ [kJ/kg] である。したがって、固体ロケット燃料1kgの燃焼によるセル内の圧力 P_{fu} [kPa] 変化の積分値 P_{fu} [kPa·s] は、

$$P_{fu} = \int_0^{t_{end}} P_{fu}(t) dt \quad (3)$$

で与えられる。一方、溶媒ミスト 1 kg がセル内で燃焼した場合の圧力 $P_{s.o.1}$ [kPa] 変化の積分値 $P_{s.o.1}$ [kPa·s] は、

$$P_{s.o.1} = \int_0^{t_{end}} p_{s.o.1}(t) dt \quad (4)$$

である。したがって、溶媒ミスト 1 kg がセル内で燃焼した場合の総括エネルギー $H_{s.o.1}$ [kJ/kg] は、(5) 式から決定できる。

$$H_{s.o.1} = H_{fu} \frac{P_{s.o.1}}{P_{fu}} = 9228.4 \frac{P_{s.o.1}}{P_{fu}} \quad (5)$$

2) 溶媒ミスト燃焼の最大エネルギー放出速度と最大質量放出速度

溶媒ミスト燃焼の最大エネルギー放出速度を求めるには、セル内での燃焼時間を算出する必要がある。そこで、溶媒ミストの燃焼速度を炭化水素ガスの燃焼速度 ($B_r = 30 \sim 50$ cm/s) と等しいと仮定し、セルが球型で体積 V_c が 20 m^3 とすると、火炎はその中心から伝搬する。したがって、溶媒ミストの燃焼時間は $t_b = (3V_c/4\pi)^{1/3}/B_r = 3.4 \sim 5.6$ [sec] の範囲になる。ここでは、燃焼速度を過大に見積もって $t_b = 3.4$ [sec] を採用した。

溶媒ミストの燃焼エネルギーの放出は三角波であると仮定し、(6) 式より最大エネルギー放出速度 $Q_{s.o.1}$ を求めた。

$$Q_{s.o.1} = \frac{2 \times H_{s.o.1}}{t_b} \quad (6)$$

また、反応容器内に貯えた全質量 M [kg] がセル内に噴出するので、溶媒ミストと水蒸気の質量放出速度は最大質量放出速度 $M_{s.o.1}$ [kg/s] となり、(7) 式により決定する。

$$M_{s.o.1} = \frac{2 \times M}{t_b} \quad (7)$$

3) 総括エネルギー量、最大エネルギー放出速度と最大質量放出速度の導出結果

図 10 に固体ロケット燃料と溶媒ミストが急激燃焼した試験での第 1 モデルセル内の圧力変化を示す。図中の圧力曲線を積分することにより求めた最大エネルギー放出速度と最大質量放出速度を表 6 に示した。導出の結果、1 kg の溶媒ミストが急激な燃焼を起こした場合は、セル内に放出される総括エネルギー量は、同質量の固体ロケット燃料のそれと同様な規模であることが分かった。また、溶媒ミストの燃焼波形が三角波であるため、同質量の固体ロケット燃料に比べ、最大エネルギー放出速度は約 2 倍、最大質量放出速度は約 3 倍となった。

(3) 溶媒量 (及び組成) と着火の関係

溶媒量と着火との関係を図 11 に示す。図から 30 vol % TBP/n-ドデカンが 1 g 以

上あれば着火する可能性があることがわかる。また、着火した場合は溶媒体積が水相体積に比較して大きく、溶媒に占めるn-ドデカンの量が大きいほど燃焼規模が大きくなることが分かった。燃焼規模は、溶媒ミストのセル内濃度に依存するが、着火性（着火のしやすさ）は、セル内に噴出した溶媒ミストの温度が重要である。さらに、溶媒に5 vol% TBP/n-ドデカンを用いた試験と100 vol% n-ドデカンを用いた試験では、加熱中の溶媒温度は、ラプチャーディスクの破裂まで、ほぼ一定の速度で上昇しただけであり、溶媒と硝酸との急激な熱分解反応は起きなかった（図12～図14参照）。この原因は、5 vol% TBP（TBP量：0.1 ℓ、硝酸濃度0.13 [mol/ℓ]）程度では、溶媒に配位する硝酸が少ないため、硝酸と溶媒の反応（発熱反応）が起きても急激な熱分解反応には進行しなかったためである。また、100 vol% n-ドデカンを用いた試験では、セル内に噴出した溶媒ミストは着火し、急激な燃焼を起こした。表7に急激燃焼による第1モデルセル内の圧力上昇と溶媒中のドデカン量との関係について示した。NITR3001と30B2の場合には、溶媒中の硝酸量が同程度であるので、主要な反応生成物の発生量が同じであると考えられる。しかし、試験の結果では両者の燃焼規模が大きく違う。したがって、燃焼規模の決定には、反応生成物の生成量よりも点火源の付近に形成される高温のドデカンミスト濃度や水蒸気濃度が影響するものと考えられる。換言すれば、着火条件を試験結果から求めることは、噴出した溶媒ミストのセル内濃度が不均一になることに加え、水蒸気の存在により可燃限界が変化すること等の条件が複雑に関係するため困難である。

2.3.3 急激燃焼が起きた場合のセル換気系の健全性について

セル内で溶媒ミストが急激な燃焼を起こした試験での圧力波や温度のセル・ダクト系による減衰効果を図15と図16に示す。図中のNITR30B2カーブは燃焼の規模が最大となった試験であり、NITR3008のカーブは小規模燃焼を起こした試験である。圧力波のセル・ダクト系による減衰効果の特徴は以下のとおりである。

- ① 急激燃焼により第1モデルセル内で発生した圧力波は、第2モデルセル出口付近まではほとんど減衰しないが、第2モデルセルと第2ダクトの間で急速に減衰する。これは、管内径が第2ダクトで200mmにせばまったためによる流動抵抗の増加が影響した。
- ② 圧力波はミキサーを通過した点（第3ダクト）で大きく減衰する。この原因はミキサー一部で希釈ダクトからの常圧気体（空気）と混合すること。加えて管内径が200mmの第2ダクトから600mm（第3ダクト）に拡大したことによって膨張したためと考えられる。
- ③ 圧力波は、いずれの試験でもHEPAフィルタに達するまでに十分減衰した。一方、温度のセル・ダクト系による減衰効果の特徴は以下のとおりである。
- ④ ラプチャーディスクの破裂により、セル内に噴出した溶媒ミストは微粒子化して、瞬時に第1ダクトに移流する。そのため、燃焼条件によっては、火炎が第1ダクトに急激に伝搬し、図16に示すように第1ダクト内の温度が第1モデルセル内に比べて大きくなることもある。
- ⑤ 燃焼ガスの温度は、第2モデルセル以降漸次減衰し、フィルタチェンバー内の温度上昇は、約64℃（最大）である。即ち、セル・ダクト系の拡大・行程長による温度の減衰効果は大きく、特に第2モデルセル空間での放熱は効果的である。この効果は燃焼ガスが第2モデルセル

で膨張することで起こると解釈される。また、ダクト長が12mの第2ダクトでも温度降下が起きることが分かった。以上のことから、セル内で溶媒ミストが急激燃焼した場合であっても、圧力波や温度はセル・ダクト系を伝搬（移動）してHEPAフィルタに達する間に順次減衰するため、HEPAフィルタには過度の負荷とはならない。なお、急激な燃焼によるセル内の圧力上昇が最大（図17参照）となった試験（NITR30B2）のHEPAフィルタの差圧上昇を表8と図18に示す。試験後に、HEPAフィルタのDOP（フタル酸ジオクチル粒子）テストを実施した結果、計測粒子（ $D_p = 0.3 \mu\text{m}$ ）に対して、除染係数DFが 4×10^3 以上であることを確認してHEPAフィルタが健全であることを実証した（図19参照）。また、溶媒と $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3$ の存在下で硝酸水溶液の過濃縮が起きた場合、激しい熱分解反応により溶媒とCeが硝酸基中の酸素の供給を受けて激しく燃焼するが、溶媒ミスト急激燃焼に比べ燃焼規模が小さいことに起因して、HEPAフィルタの差圧上昇は小さく、フィルタの健全性に影響はない。

2.3.4 密閉系における硝化溶媒と硝酸との熱分解反応に関わる自己加速反応開始温度の実験的導出について

熱分解反応による発熱と反応容器壁からの放熱の熱バランスを考慮した自己加速反応開始温度の実験的導出方法と導出結果を以下に述べる。導出に必要な反応容器の昇温・放熱特性は、決められた重量の30vol%TBP/n-ドデカン（TBPに硝酸を初期配位しない）と純水を用いた条件で、ヒータ電力をパラメータとした入熱・放熱特性試験（VECT試験）を実施し、熱分解反応が起こらない状態で反応容器内外の温度を測定して求めた。

(1) 自己加速反応開始温度の意味

自己加速反応開始温度とは、熱分解反応による発熱速度と反応容器からの放熱速度が釣り合った場合の温度（熱均衡式（8）中のT）で定義される。

$$\frac{\Delta H m k [\text{HNO}_3]}{\downarrow} = \frac{U A (T - T_0)}{\text{○容器外への放熱速度}} \quad (8)$$

○熱分解反応による容器内の発熱速度

ここで、 ΔH は反応熱[kJ/kg-TBP]、 m は溶媒重量[kg]、 k は反応速度定数[s⁻¹]である。また、 U は反応容器の総括熱伝達係数[kJ/m²·s·K]、 A は反応容器の伝熱面積[m²]、 T は容器内温度[K]、 T_0 は容器外の気温[K]である。したがって、実験的に自己加速反応開始温度を導出するには、溶媒と硝酸の熱分解反応による発熱速度と反応容器から容器外に逃げる放熱速度、さらに容器外から容器内への加熱速度を正確に求めればよい。

(2) 熱分解試験でのエネルギー上昇速度

熱分解試験では、決められた重量の溶媒（硝酸配位）と硝酸水溶液を反応容器内に密閉し、一定のヒータ電力で加熱する。溶媒と硝酸との熱分解反応が進行すると反応容器内の温度T[K]が上昇する。ある時刻の反応容器内の温度を均一と仮定すると、熱分解試験では以下のエ

エネルギー上昇速度式が成立する。

$$\sum_j C_{p,j} W_j \frac{dT}{dt} = \Delta H m k [\text{HNO}_3] + Q - UA (T - T_o) \quad (9)$$



容器内の温度上昇 = (反応による発熱) + (加熱) - (放熱)

A : 反応容器の伝熱面積[m²]

C_{p,j}W_j : 溶媒相、水相、反応容器の熱容量[k J/kg]

j : 溶媒相、水相、反応容器

ΔH : 反応熱[k J/kg-TBP]

m : 溶媒重量[kg]

[HNO₃] : 硝酸の相対飽和濃度率 (硝酸の配位分率 = 1.0)

Q : 加熱速度[k J/s]

T : ある時刻の反応容器内温度[K]

T_o : 容器外の気温[K]

t : 時間[s]

U : 反応容器の総括熱伝達係数[k J/m²·s·K]

k : 反応速度定数[s⁻¹]

$$k = S \exp(-E/RT) \quad (10)$$

E : 活性化エネルギー[k J/mol·K]

R : ガス定数 (0.0083[k J/mol·K])

S : 頻度因子[s⁻¹]

T : 容器内の絶対温度[K]

(3) 熱分解反応が起きない試験 (入熱・放熱特性試験) の温度上昇速度

入熱・放熱特性試験は、決められた重量の溶媒 (硝酸を配位しない) と硝酸水溶液を反応容器内に密封し、ヒータ電力をパラメータにして温度の上昇速度を測定した試験である。試験での温度上昇速度は以下の式で表すことができる。

$$\sum_j C_{p,j} W_j \frac{dT'}{dt} = Q - UA (T' - T_o') \quad (11)$$

ここで、T' はある時刻後の容器内の温度、T_o' は容器外の気温である (入熱・放熱特性試験で求める)。

(4) 熱分解反応による発熱速度

溶媒と硝酸の熱分解反応による発熱速度は、(9)式から(11)式を差し引いて決定することができる。

$$\sum_j C_{p,j} W_j \left(\frac{dT}{dt} - \frac{dT'}{dt} \right)$$

$$= \Delta H_{mk} [\text{HNO}_3] - UA \{ (T - T_0) - (T' - T_0') \} \quad (12)$$

したがって、熱分解反応による発熱速度は、熱分解反応が進行している場合の反応容器内の温度微分値から発熱反応が無い場合の温度微分値を差し引いた値となり、(13)式より求める。

$$\begin{aligned} \Delta H_{mk} [\text{HNO}_3] = \sum_j C_{p,j} W_j \left(\frac{dT}{dt} - \frac{dT'}{dt} \right) \\ + UA \{ (T - T_0) - (T' - T_0') \} \end{aligned} \quad (13)$$

(5) 試験データから自己加速反応開始温度を導出する方法

1) 総括熱伝達係数の測定と測定結果

入熱・放熱特性試験では、容器内の温度上昇速度を測定すると共に、反応容器内の温度がT [K]に達した時点で加熱を停止し、容器内の温度降下速度を測定した。反応容器の総括熱伝達係数(U)は以下の手順で求めた。

反応容器内の溶媒と反応容器本体との温度差が無いと仮定すると、反応容器内の温度降下速度は容器壁から外気への放熱速度に等しくなるので以下の式が成立する。

$$\begin{aligned} \frac{dT}{dt} &= - \frac{UA (T - T_0)}{C_{p,R} W_R + C_{p,S} W_S} \\ &= - \frac{UA}{\alpha} (T - T_0) \end{aligned} \quad (14)$$

A	: 伝熱面積	[m ²]
C _{p,R}	: 反応容器の定圧比熱	[kJ/kg·K]
C _{p,S}	: 溶媒と水の "	[kJ/kg·K]
T	: 容器内の温度	[K]
T ₀	: 容器外の気温	[K]
U	: 総括熱伝達係数	[kJ/m ² ·s·K]
W _R	: 反応容器の重量	[kg]
W _S	: 溶媒と水の重量	[kg]

(14)式を t = 0, T = T_mとして解くと

$$\frac{T - T_0}{T_m - T_0} = e^{-\frac{UA}{\alpha} t} \quad (15)$$

ここで、Tはt時間の容器内温度、T_mは容器壁の温度、T₀はt時間後の容器外気温である。 α は(14)式で表した定圧比熱と重量の積である。反応容器内の溶媒と水相及び容器各部の重量と比熱は表9のとおりであり、反応容器(30%TBP/n-ドデカン:1ℓ、水:1ℓ)に係わる全熱容量 α_1 は

$$\alpha_1 = \sum C_p \cdot W = 50.2 \text{ [kJ/K]}$$

であり、100%TBP/1ℓ、水/1ℓの熱容量 α_2 は

$$\alpha_2 = \Sigma C_P \cdot W = 58.7 \text{ [kJ/K]}$$

となる。図20に時間毎の「 $T - T_0 / T_m - T_0$ 」を時間 t に対して対数プロットした結果を示す。図中の直線勾配 a から総括熱伝達係数を求める。

ここで、 a は $-1.34 \times 10^{-4} \text{ [s}^{-1}\text{]}$ であるので、総括熱伝達係数 U は以下の値になる。

$$\begin{aligned} U &= \frac{\alpha \cdot a}{A} && (16) \\ &= (1.34 \times 10^{-4}) \times 50.2 / 0.565 \\ &= 0.01191 \quad \text{[kJ/m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{K]} \\ &= 11.91 \quad \text{[W/m}^2 \cdot \text{K]} \end{aligned}$$

2) 試験データを用いた自己加速反応開始温度の導出手順

ヒータ電力をパラメータとしたNITR試験と入熱・放熱試験(VECT試験)を実施し、両試験での溶媒温度(図21)の差を求め、加熱時間に対して温度差の微分値(図22参照)

$$\left[\frac{dT}{dt} \right] \text{ を求める。}$$

次に熱分解反応の発熱速度を求めるため、(12)式を用いて、図22に示す温度差の微分値と $\Sigma_j C_{p,j} W_j$ (溶媒の熱容量)の積をとり、熱分解試験と入熱・放熱特性試験で得た放熱速度の差を加えると、(13)式から熱分解反応の発熱速度が決定できる。図23～図28に発熱速度の曲線と熱分解反応時の放熱速度を示す。図中に示した発熱速度曲線と放熱直線の交点は、実験的に導出した自己加速反応開始温度である。

3) 自己加速反応開始温度の導出結果

入熱・放熱特性試験を実施し、実験的な手法で求めた総括熱伝達係数を用いて、密閉系における100vol%TBPと硝酸との熱分解反応の自己加速反応開始温度を導出した結果を表10に示す。表から反応容器内の溶媒組成(TBP/n-ドデカン、硝酸濃度)が同じであっても加熱時のヒータ電力が小さく、加熱が長時間になる試験ほど、自己加速反応開始温度が若干低下する傾向があること、そして、いずれの試験でも自己加速反応開始温度は140～160℃の範囲であり、熱的制限値(135℃)より大きいことがわかる。したがって、密閉系であっても熱的制限値としての135℃は有効であると言える。さらに、導出結果は実験結果とも良く一致していることから、実験的手法により導出した自己加速反応開始温度は検証されたと言える。ただし、この結論は、本試験装置による結果から判断されたものであり、溶媒温度の上昇は外部からの加熱と反応熱による発熱量と容器から逃げる放熱量に直接依存するため、実プラントに対しては、実プラントのデータを用いた解析が必要である。なお、再処理Pu蒸発缶における溶媒の熱分解反応に関わる自己加速反応開始温度は、“再処理Pu蒸発缶の安全解析”⁽⁷⁾で既に算出されており、参考として抜粋したデータを表11に示す。

2.3.5 開放条件下における硝酸水溶液の過濃縮が熱分解反応に与える影響について

再処理施設の燃料(プルトニウム)水溶液の過濃縮を模擬した試験であり、模擬核種とした

Ce(NO₃)₃の濃度は450[g/ℓ]と630[g/ℓ]である。硝酸水溶液の蒸発・乾固の挙動は、反応容器内の温度計測とビデオカメラによる観測で調べた。NITR3009の溶媒温度(図8参照)の変化は、硝酸水溶液の蒸発・乾固の後、硝酸の熱分解反応が発生したことを示した。しかし、ビデオカメラで観察する限り、突沸を伴うような激しい熱分解反応ではなかった。また、溶媒の加熱中はイグナイタを作動させたが、溶媒蒸気及び熱分解ガスへの着火はなかった。試験後、反応容器内に残った物質はドデカン臭のある湿潤性固形物であった。一方、NITR3010は、硝酸水溶液が蒸発・乾固した後、反応容器内の温度が150℃~180℃にかけて、不規則な温度上昇(図9参照)を起こした。この時、硝酸と溶媒とが急激に熱分解を起こし、反応容器の中から発火し、数秒間激しく燃焼した。この燃焼により、反応容器内の最大温度は1360℃に達した(図9では最大温度データが間引かれている)。試験後、反応容器内に残った物質は白灰色で軽石状の固形物(Ceの酸化物と思われる)であった。両試験では、硝酸水溶液のCe(NO₃)₃濃度と溶媒量が異なるため、Ce(NO₃)₃/TBPのモル比は、それぞれ3.5と5.2である。このモル比の違いが溶液の蒸発・乾固した後の熱分解反応挙動に影響を与えたものと考えられる。したがって、Ce(NO₃)₃を含む硝酸水溶液が過濃縮し、180℃を越える高温になった場合には、反応容器内の溶媒はCe(NO₃)₃の硝酸基中の酸素の供給を十分に受け、発火し、激しく燃焼することが分かった。なお、試験で用いる溶媒と溶質(硝酸塩)の配合形式は、混合火薬(硝酸塩が基剤で溶媒が可燃剤)のそれと同じであり、混合火薬を加熱すれば、容易に爆燃を起こすことは一般に知られているところである。

3. まとめ

本実証試験では、溶媒と硝酸との異常化学反応による破裂(ラプチャーディスク)及び急激燃焼に関わるデータを蓄積・解析して以下の結論を得た。

(1) 密閉系で30vol%TBP/n-ドデカンを用いた試験を実施した結果、事故シナリオで取り上げられた100[g]TBPと硝酸との反応で生成した硝化溶媒は、熱的制限値(135℃)を大きく越える温度(140~160℃)まで加熱しても異常化学反応による急激な熱分解反応が起きないことを実証した。

(2) 密閉系で100vol%TBPを用いた試験を実施した結果、100[g]相当のTBPと硝酸との反応で生成した硝化溶媒は熱的制限値を大きく越える温度まで加熱し、異常な状態をそのまま放置すれば急激な熱分解反応に進展することがある。

(3) 実証試験から加熱時のヒータ電力が小さく、加熱が長時間になる試験ほど、溶媒と硝酸との急激な熱分解反応を起こす温度(自己加速反応開始温度)が低温側にシフトする傾向があることが分かった。また、実験的導出方法により求めた自己加速反応開始温度は、いずれの試験でも135℃に比較して大きく、135℃の熱的制限値には余裕があることがわかった。

(4) 事故シナリオを越えるTBP(0.12~1g)と硝酸との異常な熱分解反応に起因した急激燃焼の波及がセル換気系の安全性に与える影響は小さく、HEPAフィルタの健全性が確保できることを実証した。

(5) 急激燃焼のエネルギー放出速度と質量放出速度を明らかにし、燃焼規模を把握した。1kgの溶媒(30vol%TBP/n-ドデカン)がミスト化し、急激燃焼を起こした場合の総括エネルギー量は、8748.8[kJ/kg]であり、最大質量放出速度と最大エネルギー放出速度は、0.59[kg/s]と3240.3[kJ/kg·s]であることがわかった。

なお、本実証試験で得られたデータは、実証試験の一環として開発した「再処理施設の火災・爆発時におけるセル換気系の安全解析コード(CELVA-1D)」⁽⁸⁾の解析機能の検証計算に資した。

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爆発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) T. J. Colvent, Jr., et. al.: “TNX Evaporator Incident Junalry 12 1953”, DP-25 (1953)
- (3) 宮田他：“再処理溶媒及びその劣化物と硝酸との反応に関する安全性試験”，
JAERI-Tech 99-039
- (4) 宮田他：“レッドオイルの合成と化学形同定”，JAERI-Tech 99-040
- (5) 安全工学協会編：“安全工学講座 2 爆発”，海文堂出版，326，（1983）
- (6) 北川徹三：“化学 安全工学”，日刊工業新聞社，220，（1970）
- (7) 小池他：“再処理施設における溶媒と硝酸の熱分解反応に関する安全性実証試験”，
JAERI-Tech 95-005
- (8) 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 ニトロ化溶解爆発試験 (NITR) 条件

実験番号	実施予定日	溶媒相条件			水相条件		ラプチャー ディスク 設定圧力 (MPa)	口火 の有無	備考
		溶 媒	硝酸濃度 mol/l	溶媒量 g	硝酸濃度 mol/l	水相量 g			
<平成3年度> 総合試験運転	H4. 3.18	30%TBP/n-ドデカン	0.8 [0.83]	1.0	7 [7.0]	1.0	5	無	実証試験装置の健全性、及び反応 容器の性能を確認する
NITR-1001	H4. 3.31	30%TBP/n-ドデカン	0.8 [0.86]	1.0	7 [7.1]	1.0	5	無	試運転の再試験を行い再現性を確 認する
<平成4年度> NITR-2001	H4. 4.28(火)	30%TBP/n-ドデカン	0.8 [0.83]	1.0	7 [7.1]	1.0	7	無	破裂の規模
NITR-2002	H4. 6.23(火)	100%TBP	2.7 [2.6]	1.0	7 [7.0]	1.0	5	無	ヒータ電力の効果 (1.7 kW)
NITR-2003	H4. 7.21(火)	100%TBP	2.7 [2.6]	1.0	7 [7.0]	1.0	5	無	ヒータ電力の効果 (3.3 kW)
NITR-2004	H4. 8.27(木)	100%TBP	2.7 [2.7]	1.0	7 [7.2]	1.0	5	無	ヒータ電力の効果 (0.85 kW)
NITR-2005	H4. 9.17(木)	30%TBP/n-ドデカン	0.8 [0.8]	0.4	7 [7.2]	1.6	2	無	TBPが事故けり相当量 0.12g
NITR-2006	H4.10. 8(木)	100%TBP	2.7 [2.7]	1.0	7 [7.2]	1.0	5	無	ヒータ電力の効果 (1.3 kW)
NITR-2007	H4.11.26(木)	30%TBP/n-ドデカン	0.8 [0.8]	0.4	7 [7.0]	1.6	2	有	TBPが事故けり相当量 0.12g
NITR-2008	H4.12.17(木)	30%TBP/n-ドデカン	0.8 [0.8]	0.8	7 [7.3]	1.2	2	有	TBP量の影響 (0.24g)
NITR-2009	H5. 1.14(木)	30%TBP/n-ドデカン	0.8 [0.8]	1.2	7 [7.0]	0.8	2	無	TBP量の影響 (0.36g)
NITR-2010	H5. 1.28(木)	30%TBP/n-ドデカン	0.8 [0.7]	1.0	7 [6.8]	1.0	3	無	水相の硝酸濃度の影響 (7N)
NITR-2011	H5. 2.18(木)	30%TBP/n-ドデカン	0.8 [0.8]	1.0	10 [10.1]	1.0	3	無	水相の硝酸濃度の影響 (10N)
NITR-2012	H5. 3.11(木)	30%TBP/n-ドデカン	0.8 [0.8]	1.0	13 [12.8]	1.0	3	有	水相の硝酸濃度の影響 (13N)

実験番号	実施予定日	溶媒相条件				水相条件			ラプチャー ディスク 設定圧力 (MPa)	口火 の有無	備考
		溶媒	硝酸濃度 mol/l	溶媒量 g	硝酸濃度 mol/l	硝酸濃度 mol/l	水相量 g				
(平成5年度) NITR-3001	H5. 4.27(火)	30%TBP/n-ドデカン	0.8 [0.8]	1.5	1.3 [13.2]	0.5	3	有	溶媒量の変化が着火に与える影響		
NITR-3002	H5. 6.11(金)	30%TBP/n-ドデカン	0.8 [0.8]	1.9	1.3 [13.1]	0.1	3	有	溶媒量の変化が着火に与える影響		
NITR-30A2	H5. 7. 1(木)	30%TBP/n-ドデカン	0.8 [0.9]	1.9	1.3 [13.1]	0.1	3	有	溶媒量の変化が着火に与える影響 ヒータ電力を変えてNITR3002の再試験		
NITR-30B2	H5.11. 9(火)	30%TBP/n-ドデカン	0.8 [0.8]	1.9	1.3 [13.0]	0.1	3	有	溶媒量の変化が着火に与える影響 HEPA7/材を用いてNITR30A2の再試験		
NITR-3003	H5. 7.22(木)	100%TBP	2.7 [2.6]	1.5	1.3 [12.9]	0.5	5	有	溶媒量の変化が溶媒と硝酸の熱分解 反応に与える影響		
NITR-3004	H5. 8.26(木)	100%TBP	2.7 [2.6]	1.9	1.3 [13.3]	0.1	5	有	溶媒量の変化が溶媒と硝酸の熱分解 反応に与える影響		
NITR-3005	H5. 9.21(火)	100%TBP	2.7 [2.7]	1.0	1.3 [13.0]	1.0	5	有	溶媒量の変化が溶媒と硝酸の熱分解 反応に与える影響		
NITR-3006	H5.10.14(木)	100%TBP	2.7 [2.9]	0.3	1.3 [13.2]	1.7	7	有	溶媒量の変化が溶媒と硝酸の熱分解 反応に与える影響		
NITR-3007	H5.11.30(火)	5%TBP/n-ドデカン	0.13 [0.13]	1.0	7 [7.0]	1.0	3	有	n-ドデカンの着火に与える影響		
NITR-3008	H5.12.16(木)	100%n-ドデカン	0	1.0	7 [7.4]	1.0	3	有	n-ドデカンの着火に与える影響		
NITR-3009	H6. 1.27(木)	30%TBP/n-ドデカン	0.8 [0.7]	1.0	7 [6.0]	1.0	—	有	水相の過濃縮効果Ce(NO ₃) ₂ :450g		
NITR-3010	H6. 2.24(木)	30%TBP/n-ドデカン	0.8 [0.6]	0.5	7 [5.6]	1.5	—	有	水相の過濃縮効果Ce(NO ₃) ₂ :945g		

実験番号	実施予定日	溶媒相条件				水相条件			ラプチャー ディスク 設定圧力 (MPa)	口火 の有無	備考
		溶 媒	硝酸濃度 mol/l	溶媒量 g	硝酸濃度 mol/l	硝酸濃度 mol/l	水相量 g				
(平成6年度) NITR-4001	H6. 5.30(月)	100%TBP	2.7 (3.2)	0.1	1.3 (13.1)	1.9	7	有	溶媒と硝酸の熱分解反応挙動 (水相の硝酸濃度の影響)		
NITR-4002	H6. 6.16(木)	100%TBP	2.7 (2.7)	1.0	7 (6.9)	1.0	7	有	溶媒と硝酸の熱分解反応挙動 (TBP量の影響)		
NITR-4003	H6. 7. 7(木)	100%TBP	2.7 (2.6)	0.3	7 (7.0)	1.7	7	有	溶媒と硝酸の熱分解反応挙動 (TBP量の影響)		
NITR-4004	H6. 8.25(木)	100%TBP	2.7 (2.8)	0.1	7 (6.6)	1.9	7	有	溶媒と硝酸の熱分解反応挙動 (TBP量の影響)		
NITR-4005	H6. 9.13(火)	100%TBP	2.7 (2.7)	0.5	7 (6.9)	1.5	7	有	溶媒と硝酸の熱分解反応挙動 (TBP量の影響)		
NITR-40A1	H6. 9.27(火)	100%TBP	2.7 (2.7)	0.1	1.3 (13.0)	1.9	7	有	NITR4001の再試験 (水相の硝酸濃度の影響)		
NITR-4006	H6.10.21(金)	100%TBP	2.7 (2.6)	0.1	1.0 (9.7)	1.9	7	有	溶媒と硝酸の熱分解反応挙動 (硝酸濃度の影響)		
NITR-4007	H6.11.17(木)	100%TBP	2.7 (2.8)	0.1	5 (5.3)	1.9	7	有	溶媒と硝酸の熱分解反応挙動 (硝酸濃度の影響)		
VECT4001:ヒタ0.85kW	H6.12.22(木)	30%TBP/n-ドデカン	---	1.0	---	1.0	7	無	反応容器の昇温、及び放熱特性		
VECT4002:ヒタ3.3kW	H7. 1.11(水)	30%TBP/n-ドデカン	---	1.0	---	1.0	7	無	反応容器の昇温、及び放熱特性		
VECT4003:ヒタ1.7kW	H7. 1.19(木)	30%TBP/n-ドデカン	---	1.0	---	1.0	7	無	反応容器の昇温、及び放熱特性		
NITR-4008	H7. 2. 3(金)	30%TBP/n-ドデカン	0.8 (0.7)	0.5	7 (5.6)	1.5	---	有	溶質の過濃縮効果Ce(NO ₃) ₃ :945g		
NITR-40A8	H7. 2.14(火)	30%TBP/n-ドデカン	0.8 (0.8)	0.5	7 (5.6)	1.5	---	有	NITR4008の再試験 溶質の過濃縮効果Ce(NO ₃) ₃ :945g		
NITR-4009	H7. 3.10(金)	100%TBP	2.7 (2.6)	0.1	7 (6.0)	1.9	---	有	溶質の過濃縮効果Ce(NO ₃) ₃ :945g		
NITR-4010	H7. 3.23(木)	100%TBP	2.7 (2.7)	0.5	7 (5.6)	1.5	---	有	溶質の過濃縮効果Ce(NO ₃) ₃ :945g		

[] 中は硝酸濃度の実測値である

表2 TBPとn-ドデカンの物性値

化学式	TBP (リン酸トリアブチル) (C ₄ H ₉ O) ₃ PO	n-ドデカン CH ₃ (CH ₂) ₁₀ CH ₃
分子量 [g/mol]	266.32	170.34
比重 [g/cm ³]	0.97 (20℃)	0.75 (20℃)
融点 [℃]	<-80	-12
沸点 [℃]	289	214~217
引火点 [℃]	146	74
溶解度 (水)	微量 (~5.8g/ℓ)	不
発熱量 [kcal/kg]	-	9000~11000
蒸発潜熱 [kcal/kg]	55.1	61.1

表3 破裂時の放出エネルギーの計算結果

試験番号 (水相体積ℓ)	①飽和水放出 エネルギー [kJ] (水相温度℃)	②熱分解ガスの放 出エネルギー [kJ] (破裂圧kPa)	③放出エネルギー - [kJ] ③=①+②	第1セル内の 圧力積分 [kPas]
30%TBP/n-ドデカン				
NITR2007 (1.6)	150.6 (167)	5.4 (1900)	156.0	5.4
NITR2008 (1.2)	130.0 (175)	5.4 (1900)	135.4	6.5
NITR2009 (0.8)	86.7 (175)	5.4 (1900)	92.1	6.2
100%TBP				
NITR3005 (1.0)	53.5 (141)	15.6 (4700)	69.2	2.8
NITR3003 (0.5)	30.5 (146)	16.4 (4900)	47.0	2.9
NITR3004 (0.1)	10.6 (206)	16.8 (5000)	27.4	6.0
NITR4004 (1.9)	176.8(166)	23.4 (6700)	200.2	2.1
NITR4003 (1.7)	136.1(158)	19.1 (5600)	155.2	2.6
NITR4005 (1.5)	100.7(155)	20.7 (6000)	121.3	2.8
NITR4002 (1.0)	59.2(145)	19.5 (5700)	78.7	3.4

表4 固体ロケット燃料の特性と物性

	項目	単位	物性値
組成	ニトログリセリン	%	42
	ニトロセルロース	%	47
	可塑剤	%	5
	その他	%	6
	計	%	100
燃焼特性	燃焼圧力	kgf/cm ²	100
	チャンバ内温度	℃	2700
	出口温度	℃	1270
	分子量	—	25.8
	生成ガス量	ℓ/kg	868
	燃焼速度	mm/s	16
生成ガス	CO	mol%	39.4
	CO ₂	mol%	12.7
	N ₂	mol%	12.4
	H ₂ O	mol%	23.4
	H ₂	mol%	11.1
	計	%	100
強度	引張強度	kgf/cm ²	43
	伸び	%	39
	ヤング率	kgf/cm ²	97
その他	発熱量	kJ/kg	3678.4
	比重	kg/ℓ	1.6
	生成ガスの比重量	kg/m ³	ガス出口 0.279

表5 固体ロケット燃料(1 kg)が燃焼した場合の総括エネルギー

固体ロケット燃料 1 kg の燃焼(5 秒間燃焼)	1 次燃焼	2 次燃焼	1 次+2 次燃焼
エネルギー量 (kJ/kg)	3 6 7 8 . 4	5 5 5 0 . 0	9 2 2 8 . 4
エネルギー放出速度 (kJ/kg·s)	7 3 5 . 7	1 1 1 0 . 0	1 8 4 5 . 7

表6 1 kg の固体ロケット燃料と噴出溶媒ミストがセル内で爆発した場合の規模

	固体ロケット燃料 EXPL20A1	溶媒ミスト NITR2011	溶媒ミスト NITR3008
燃焼波形	矩形	三角形	三角形
圧力カーブの積分値 (kPa·s)	1 1 2 . 4	1 0 6 . 6	2 1 . 5
総括放出エネルギー (kJ/kg)	9 2 2 8 . 4	8 7 4 8 . 8	1 7 7 7 . 1
燃焼時間 (s)	5 . 0	3 . 4	3 . 4
最大質量放出速度 (kg/s)	0 . 2	0 . 5 9	0 . 5 9
最大エネルギー放出速度 (kJ/kg·s)	1 8 4 5 . 7	3 2 4 0 . 3	6 5 8 . 2

注：NITR2011は30vol%TBP/n-ドデカンであり、NITR3008は100vol%n-ドデカンである。

表7 n-ドデカン量が爆発による第1モデルセル内の圧力上昇に与える影響

試験番号	圧力上昇 [kPa]	TBP量 [ℓ] 硝酸濃度 ([mol/ℓ])	水相量 [ℓ] 硝酸濃度 ([mol/ℓ])	n-ドデカン [ℓ]
NITR2011 (30vol%TBP/n-ドデカン)	1 3 6	0 . 3 (0.77)	1.0 ℓ (10.1)	0 . 7
NITR3001 (")	1 5 4	0 . 4 5 (0.83)	0.5 ℓ (13.2)	1 . 0 5
NITR30B2 (")	2 0 8	0 . 5 7 (0.79)	0.1 ℓ (13.0)	1 . 3 3
NITR3007 (5vol%TBP/n-ドデカン)	1 0 6	0 . 0 5 (0.13)	1.0 ℓ (7.0)	0 . 9 5
NITR3008 (100vol%n-ドデカン)	1 1 1	-----	1.0 ℓ (7.2)	1 . 0

表8 爆発時のHEPAフィルタの圧力損失

	N I T R 3 0 B 2
装填フィルタ	HEPAフィルタ (Half 6個×2段)
フィルタ前段の初期差圧	0.22 kPa
第1モジュールの圧力	208 kPa
フィルタチェンバ温度	64℃
フィルタ全段差圧	2.3 kPa (ピーク値)
フィルタ前段差圧	1.7 kPa (")
フィルタ後段差圧	0.6 kPa (")

表9 反応容器各部の重量と比熱

名称	材質	重量 (kg)	比熱 (kJ/kg·K)
容器本体	SUSF316	45.5	0.49
上部フランジ	"	19.3	"
ボルトナット	SUS304	5.6	"
アップチャージスク ヒータ	インコネル アルミニウム	0.2 10.7	" 0.94
水		1.0 kg/ℓ	4.18
TBP		0.98 kg/ℓ	1.72
n-ドデカン		0.75 kg/ℓ	1.70

表10 自己加速反応開始温度の実験的導出結果

昇温速度 [kW] (加熱時間 min)	自己加速反応 開始温度[°C]	試験番号	100%TBP (硝酸濃度)	水相 (硝酸濃度)
0.85 (82)	149	NITR3004	1.9 ℓ (2.6mol/ℓ)	0.1 ℓ (13mol/ℓ)
0.85 (82)	153	NITR3005	1 ℓ (2.7mol/ℓ)	1 ℓ (13mol/ℓ)
0.85 (82)	149	NITR3003	0.5 ℓ (2.6mol/ℓ)	1.5 ℓ (13mol/ℓ)
0.85 (95)	146	NITR2004	1 ℓ (2.7mol/ℓ)	1 ℓ (7mol/ℓ)
1.7 (44)	150	NITR20A2	1 ℓ (2.7mol/ℓ)	1 ℓ (7mol/ℓ)
3.3 (20)	153	NITR2003	1 ℓ (2.6mol/ℓ)	1 ℓ (7mol/ℓ)

表11 蒸発缶 (再処理用) の熱分解に係わる自己加速反応開始温度の計算結果⁽⁷⁾

TBP流入量 [g]	100	200	300	400	500
自己加速反応開始温度 [°C]	172	165	162	159	157

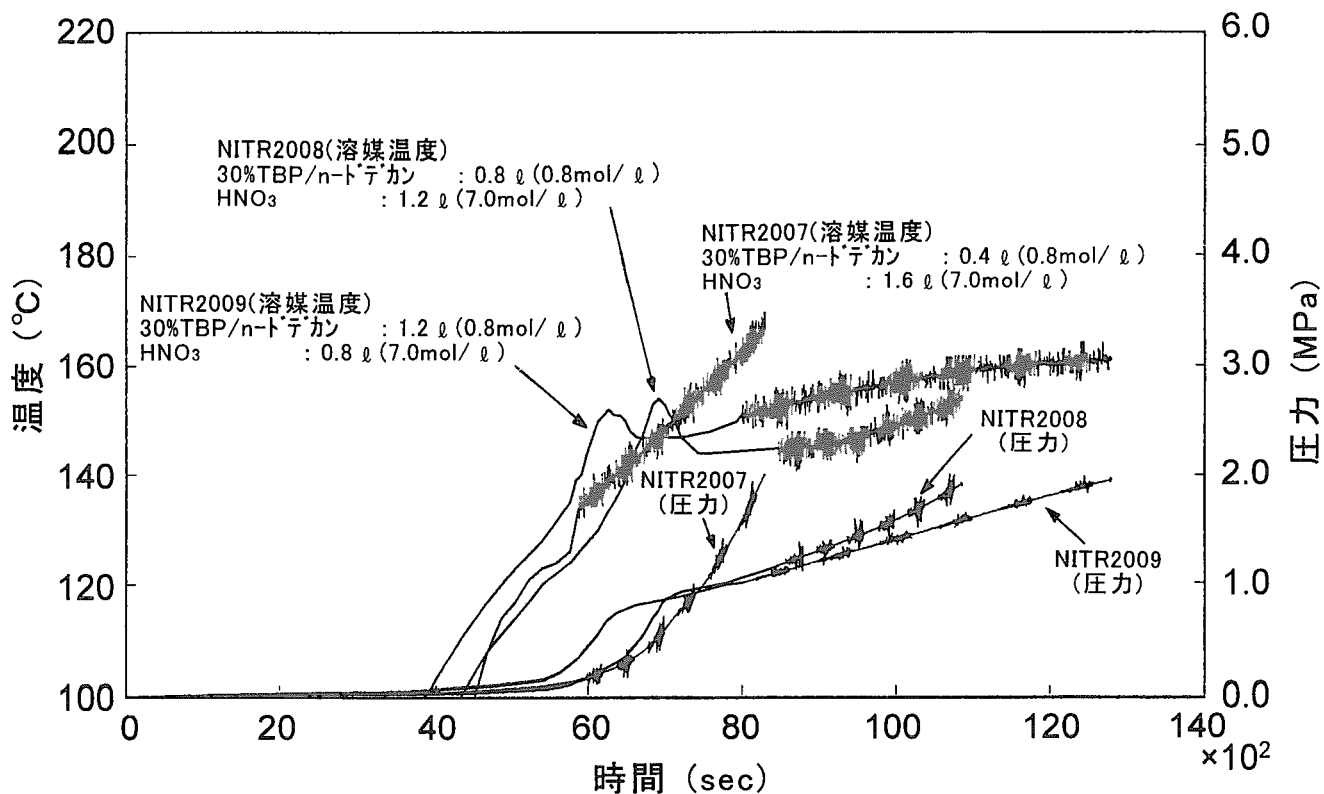


図1 TBP量の変化が反応容器内の温度上昇に与える影響 (30vol%TBP/n-ドデカン)

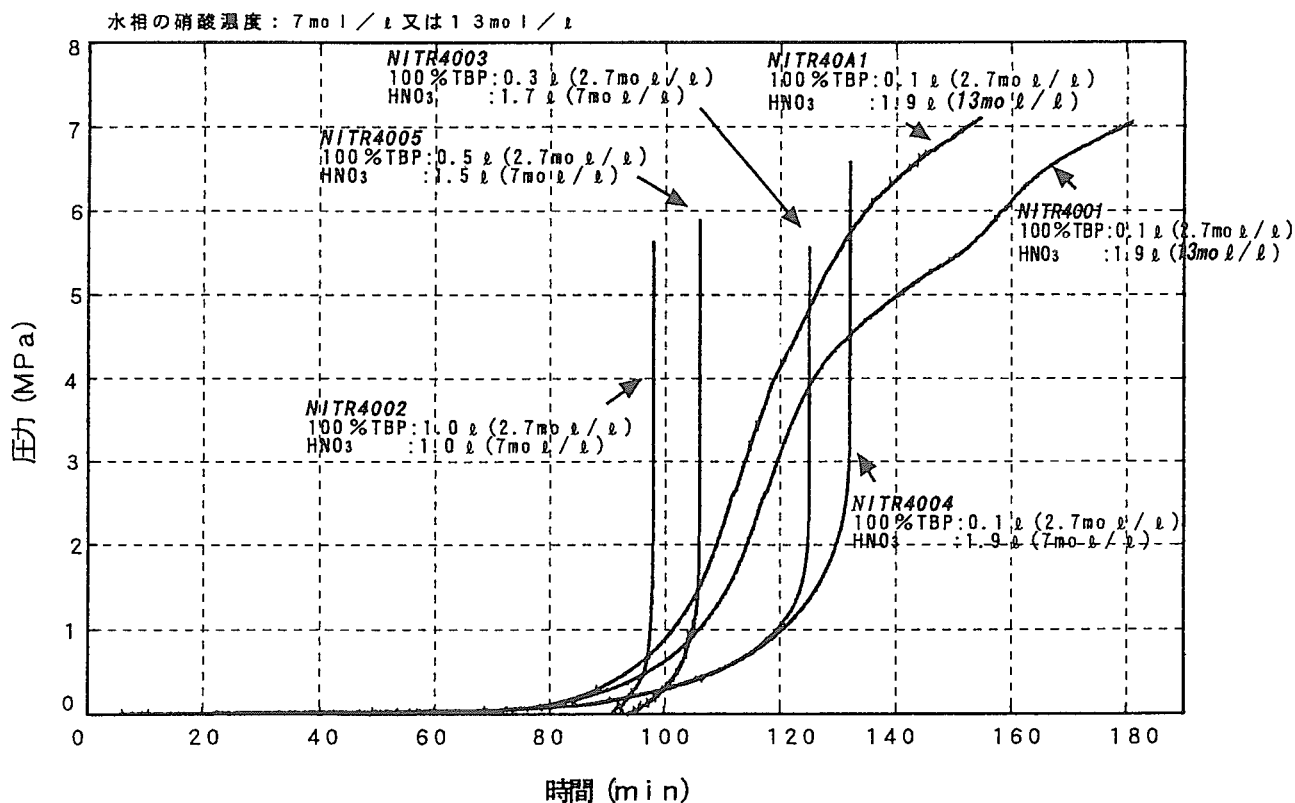


図2 TBP量及び水相の硝酸濃度の変化が反応容器内の圧力上昇に与える影響 (100vol%TBP)

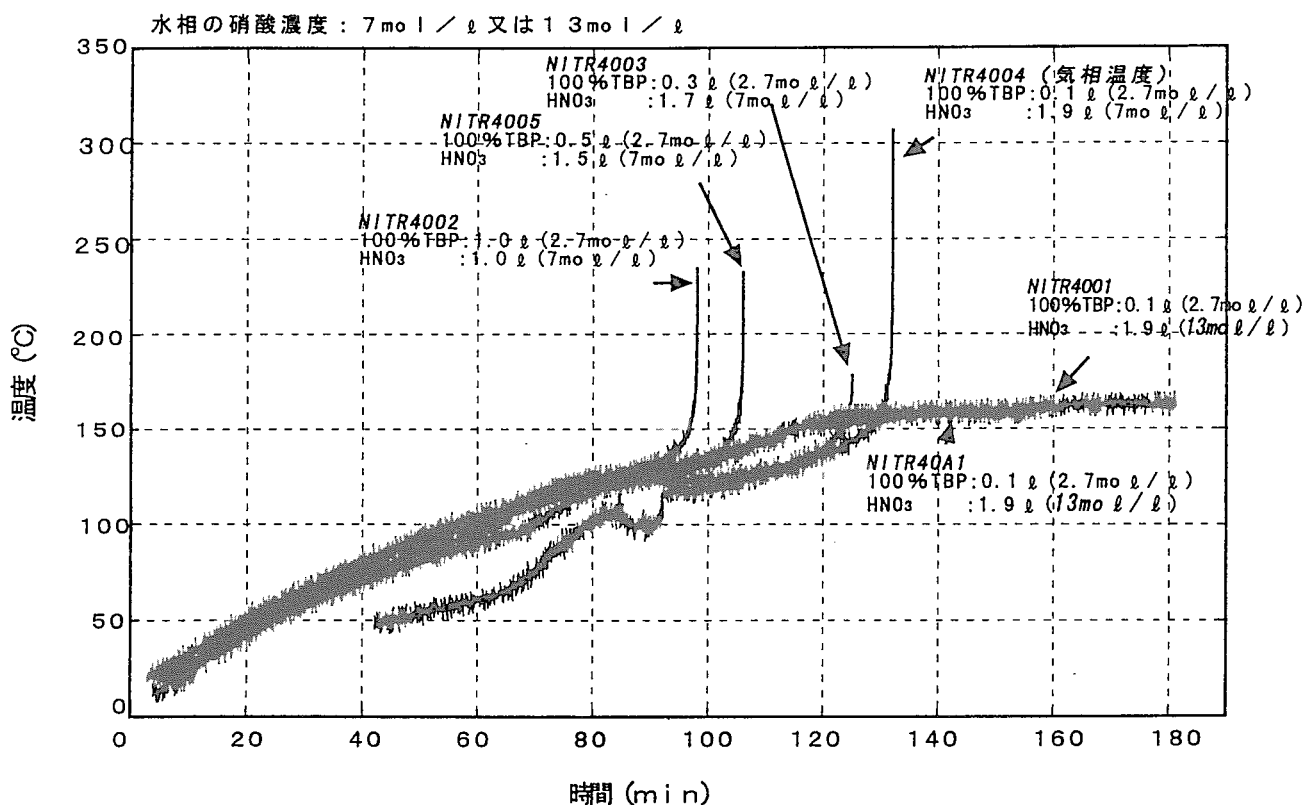


図3 TBP量及び水相の硝酸濃度の変化が反応容器内の温度上昇に与える影響 (100 vol% TBP)

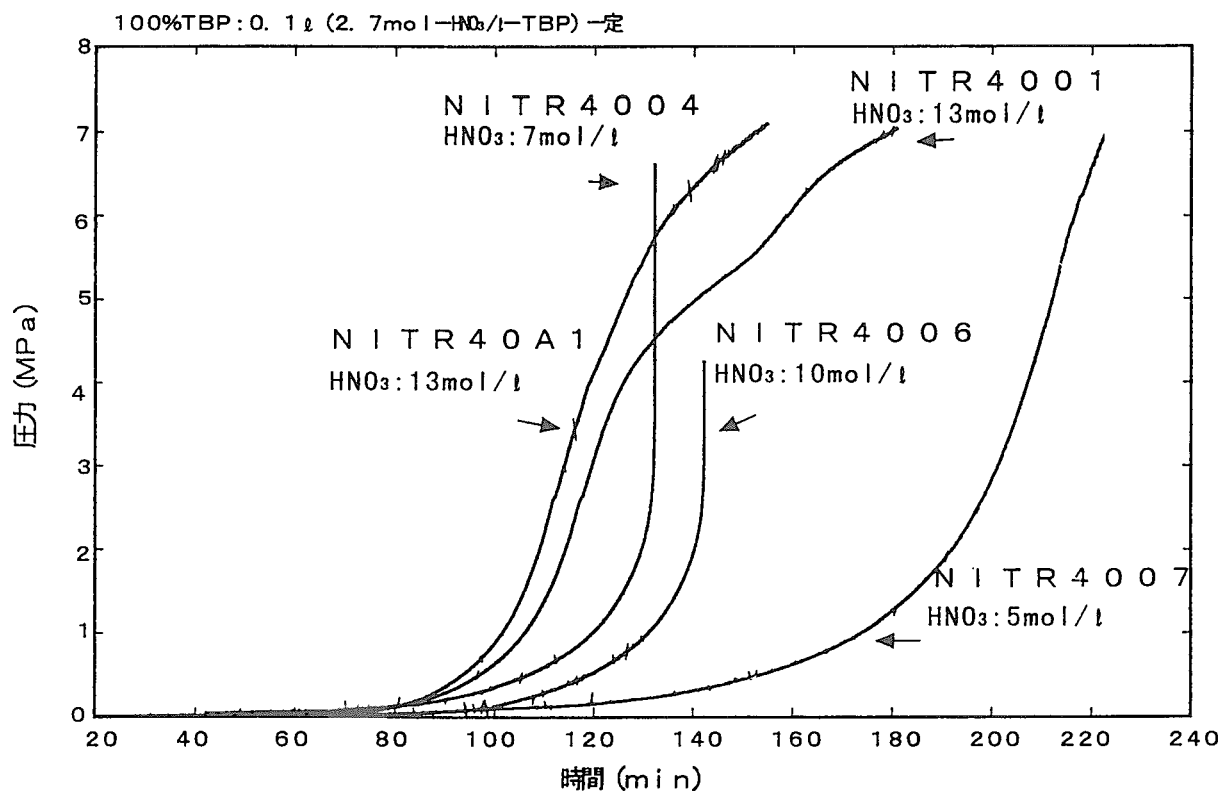


図4 水相の硝酸濃度の変化が反応容器内の圧力上昇に与える影響 (100%TBP: 0.1 l)

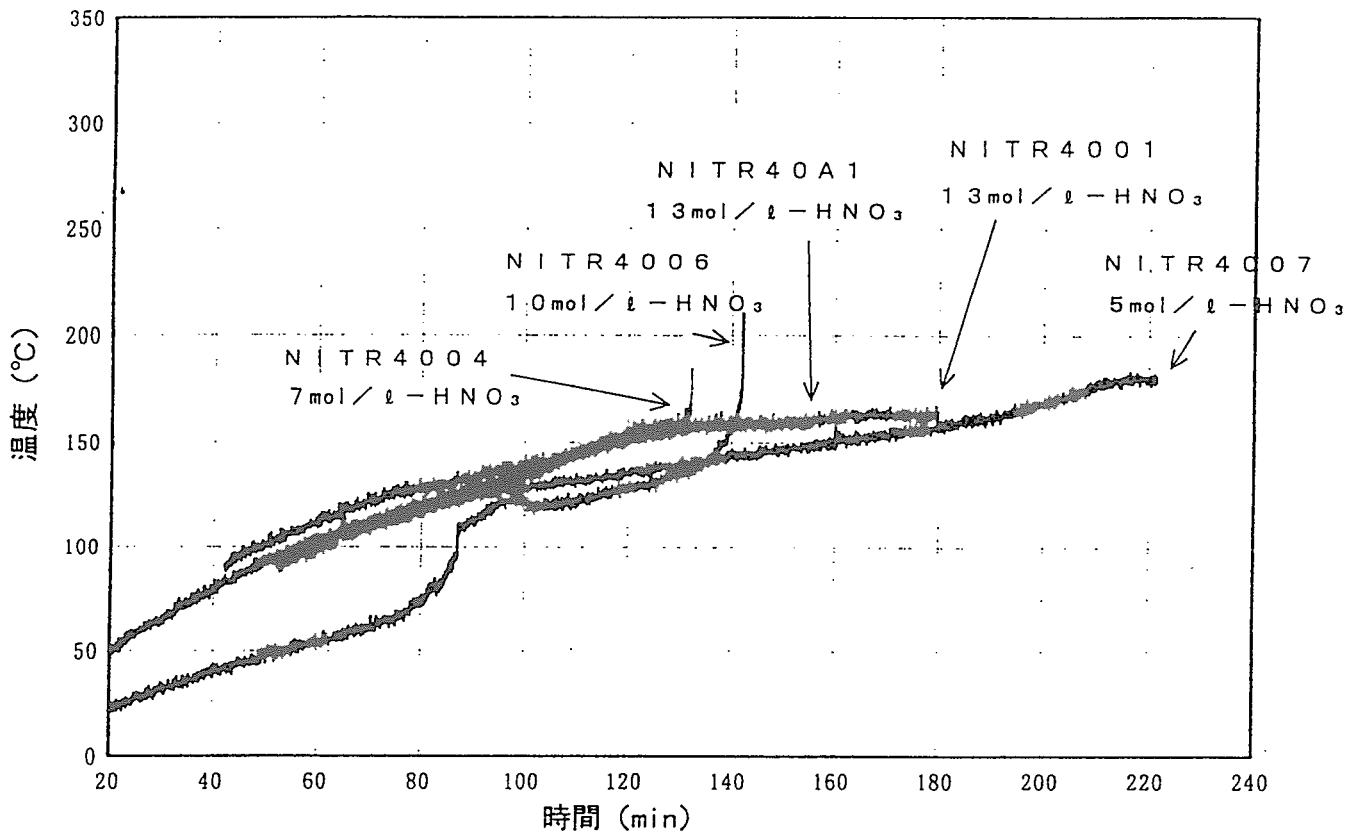


図5 水相の硝酸濃度の変化が反応容器内の温度上昇に与える影響 (100vol%TBP:0.1 l)

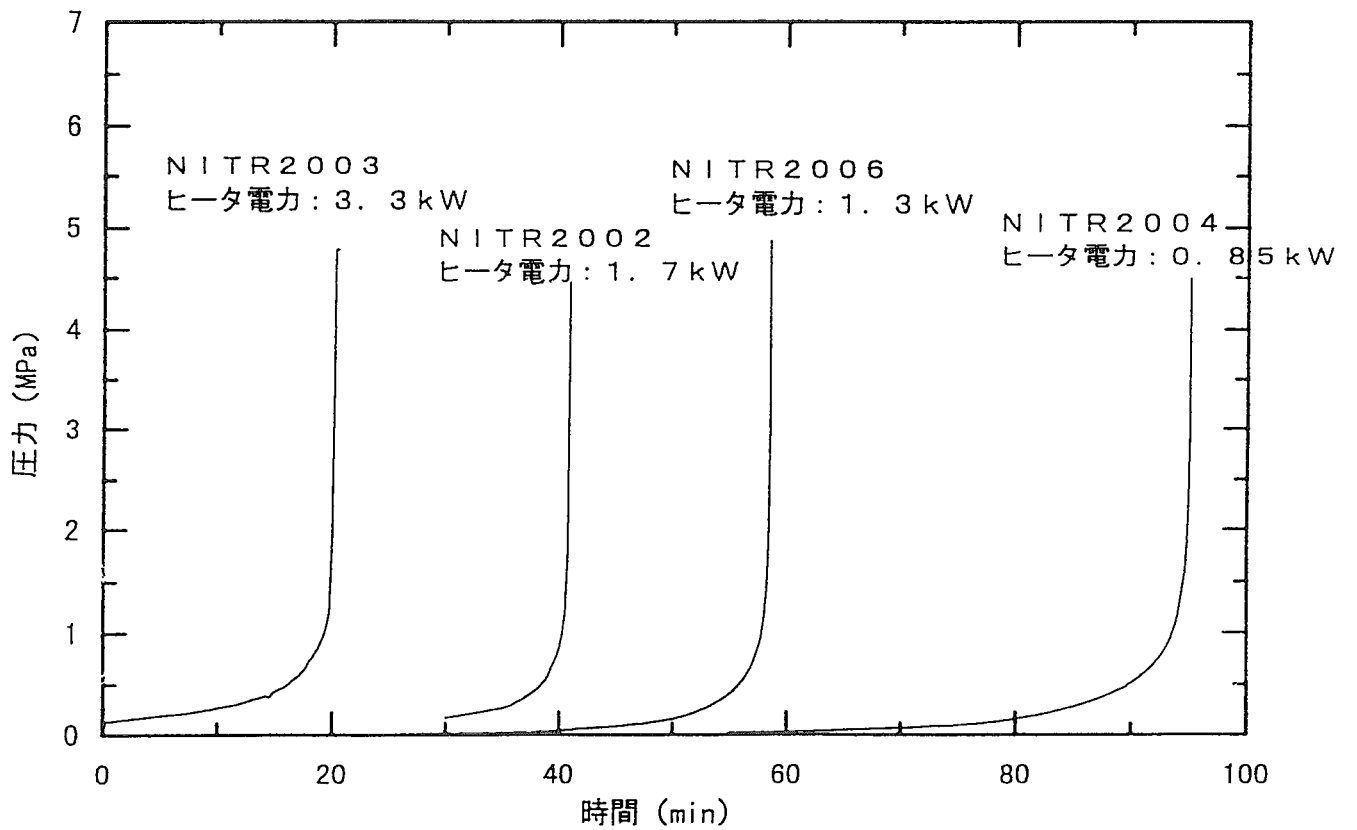


図6 ヒータ電力の変化が反応容器内の圧力上昇に与える影響 (100vol%TBP:0.1 l)

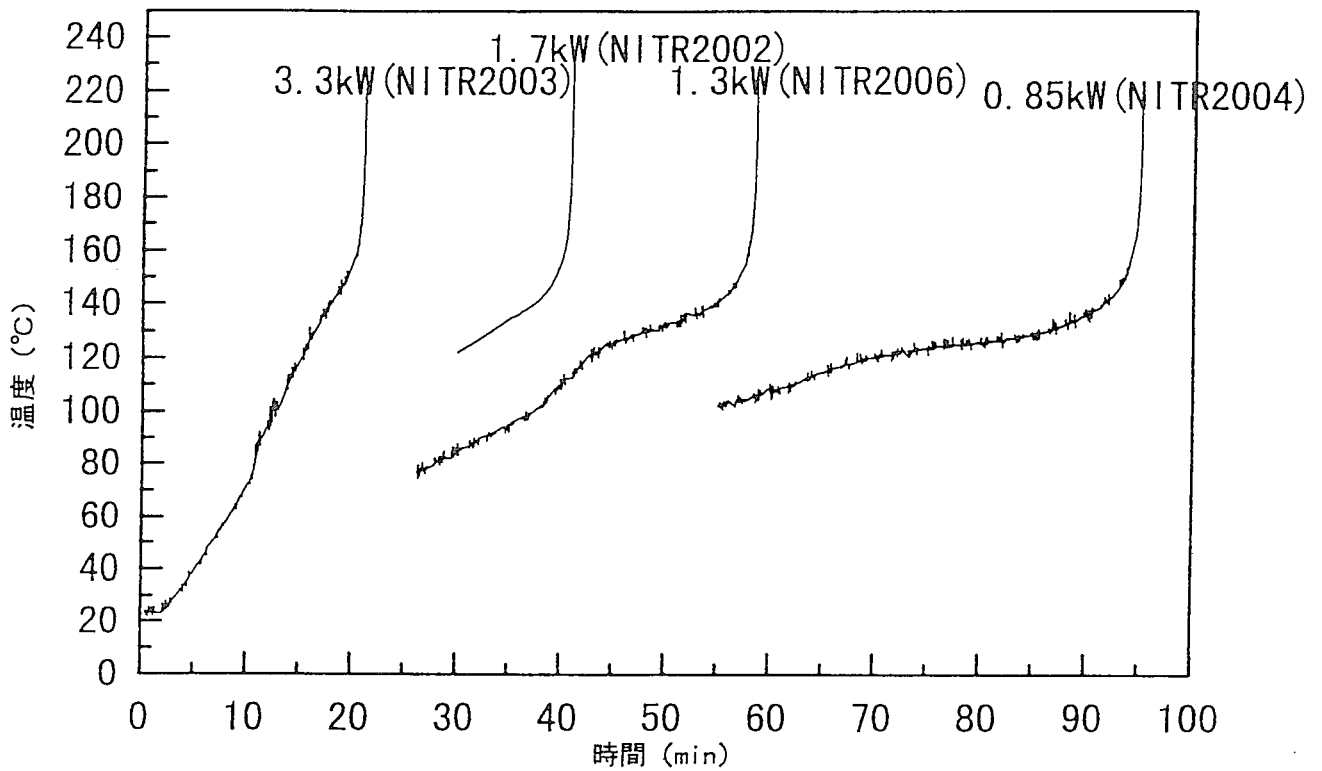


図7 ヒータ電力の変化が反応容器内の温度上昇に与える影響 (100vol%TBP:0.1ℓ)

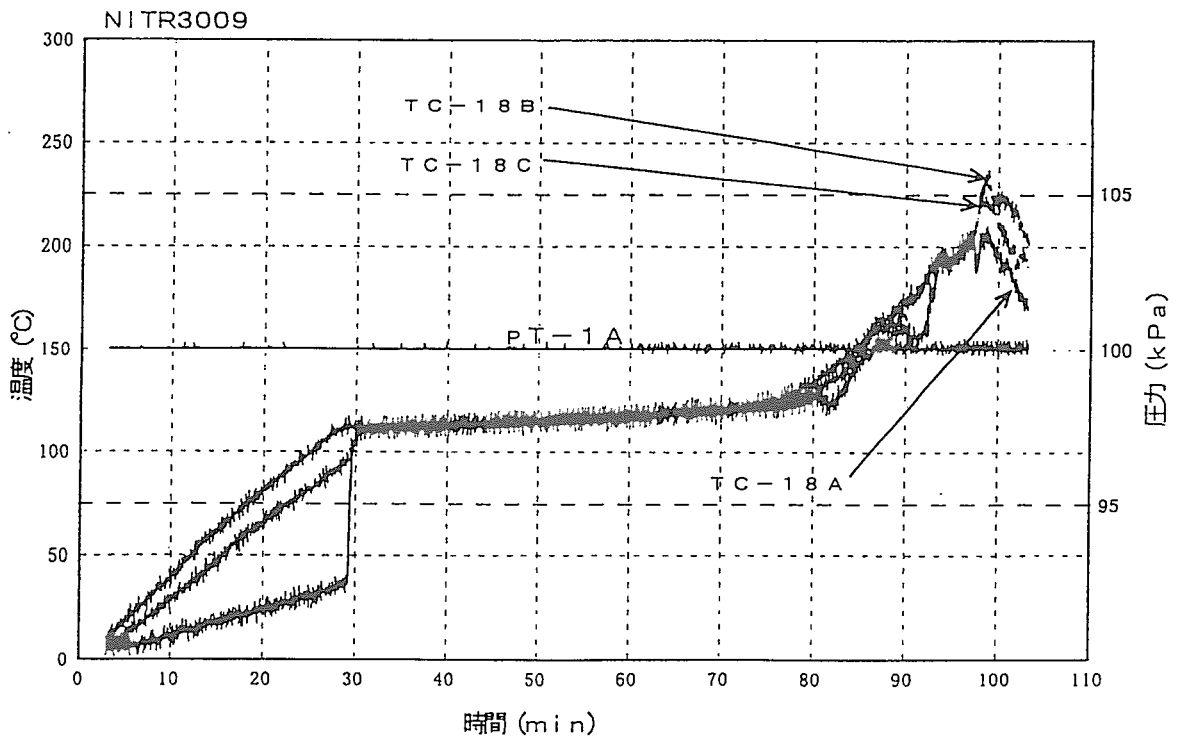


図8 過濃縮試験 (NITR3009、開放系) での反応容器内の温度と圧力の変化

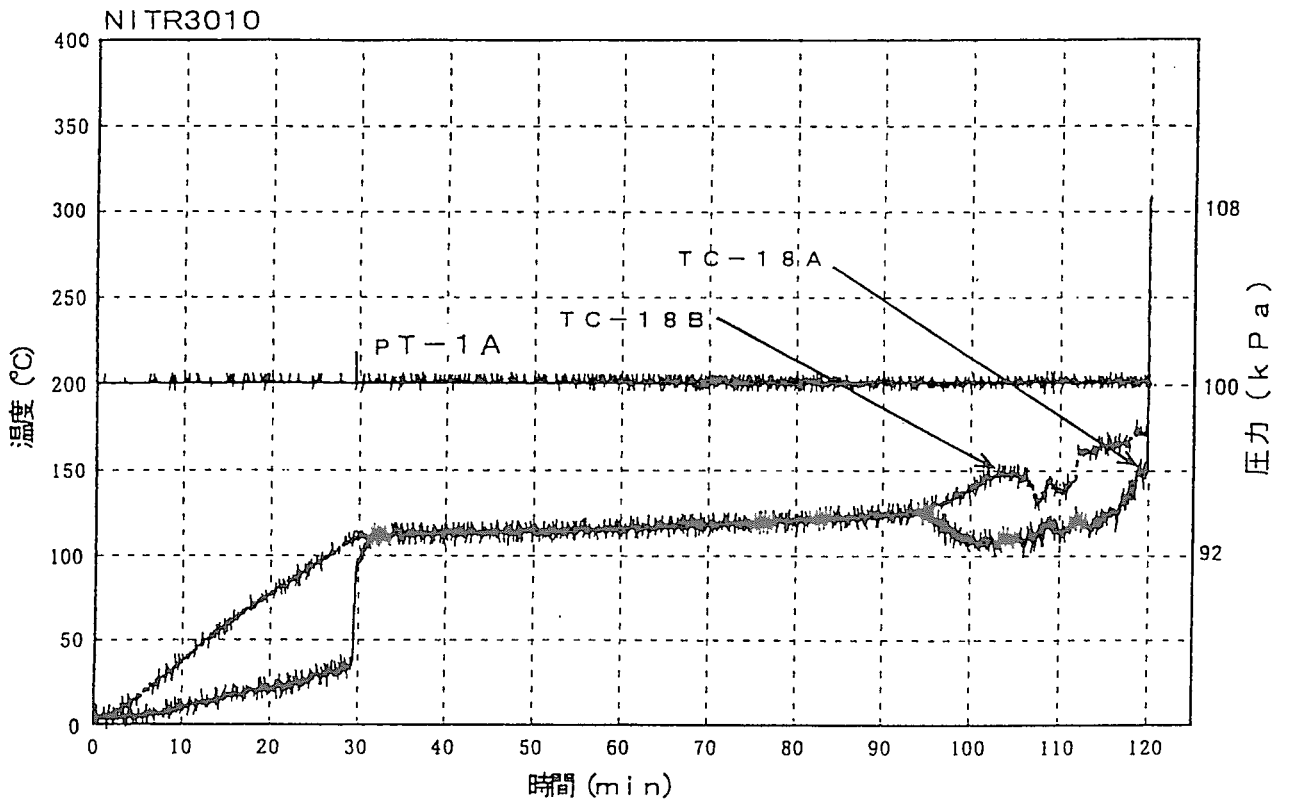


図9 過濃縮試験 (NITR3010、開放系) での反応容器内の温度と圧力の変化

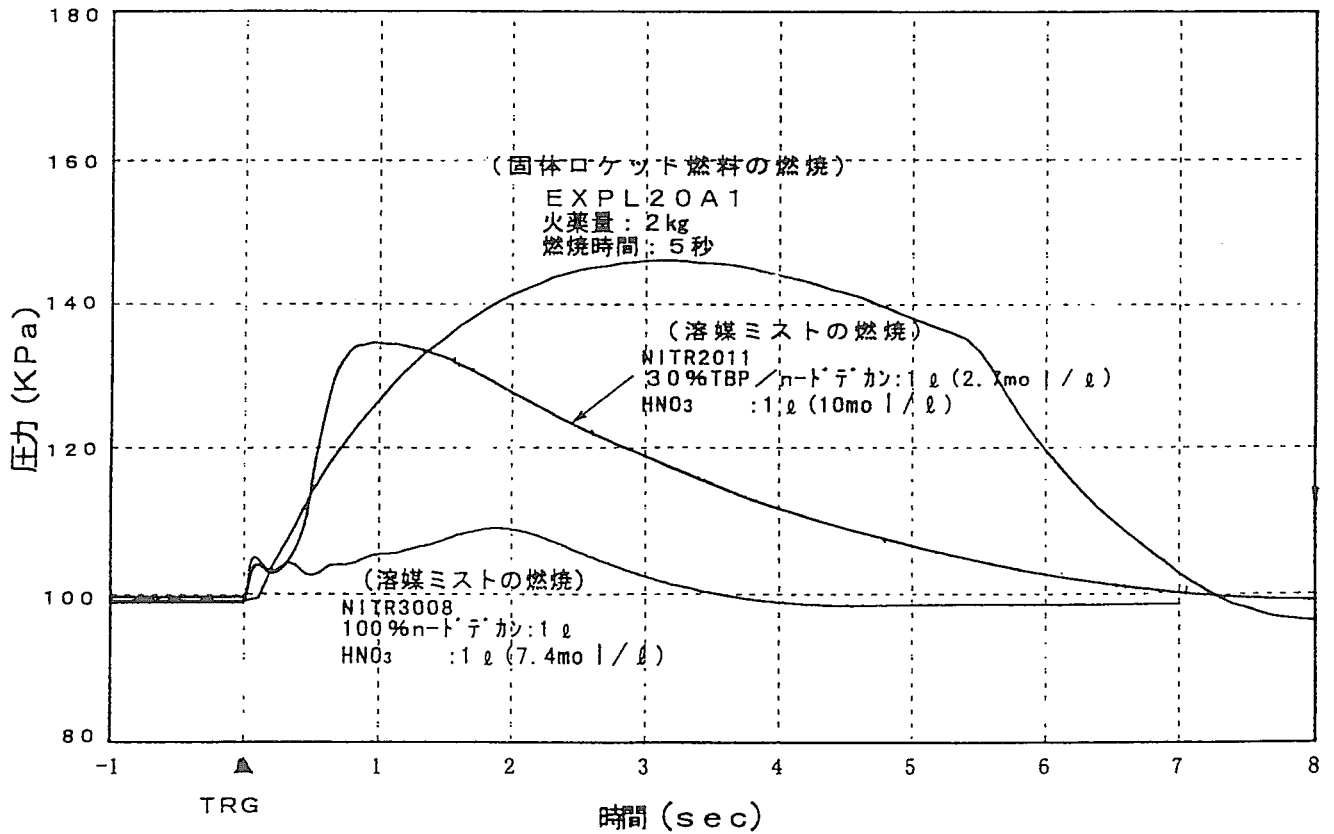


図10 固体ロケット燃料及び溶媒ミストの急激燃焼による第1モデルセル内の圧力変化

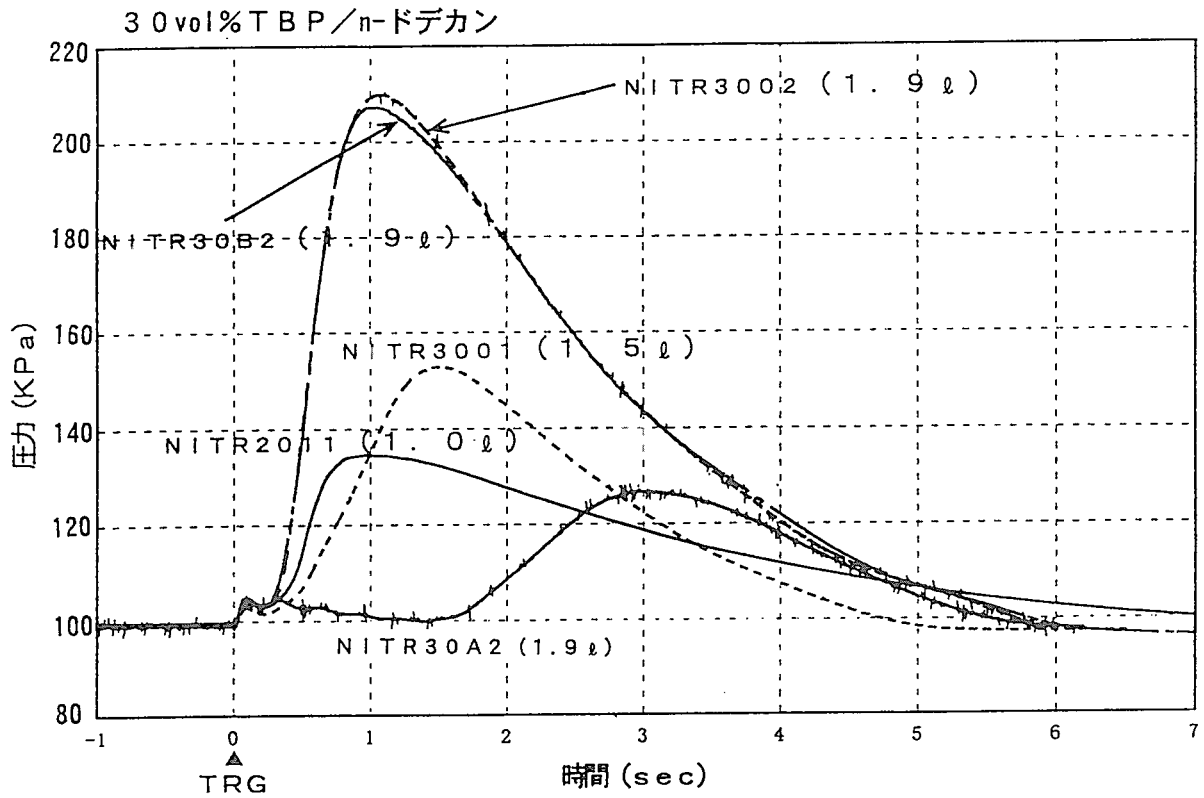


図11 噴出した溶媒ミストが急激燃焼を起こした試験での第1モデルセル内の圧力変化

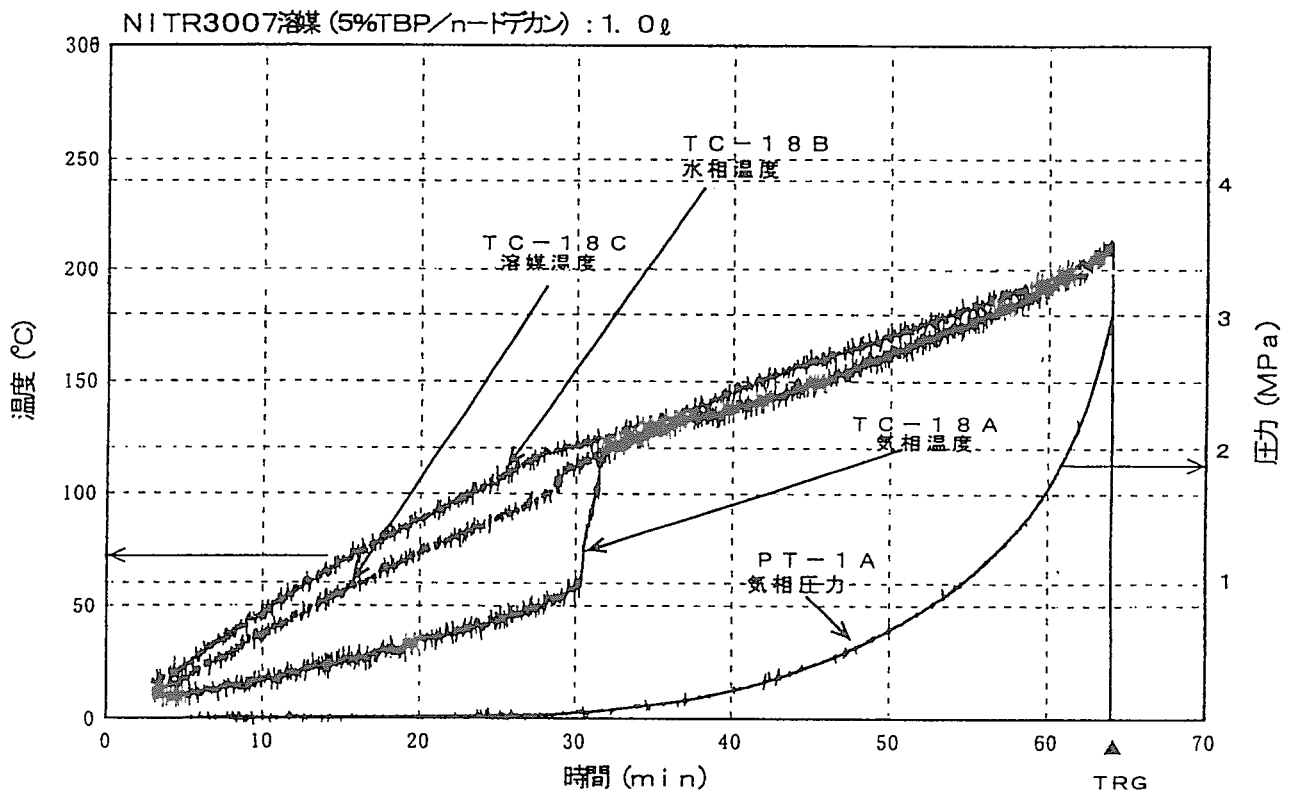


図12 NITR3007 (5vol%TBP/n-ドデカン) における反応容器内の温度と圧力の変化

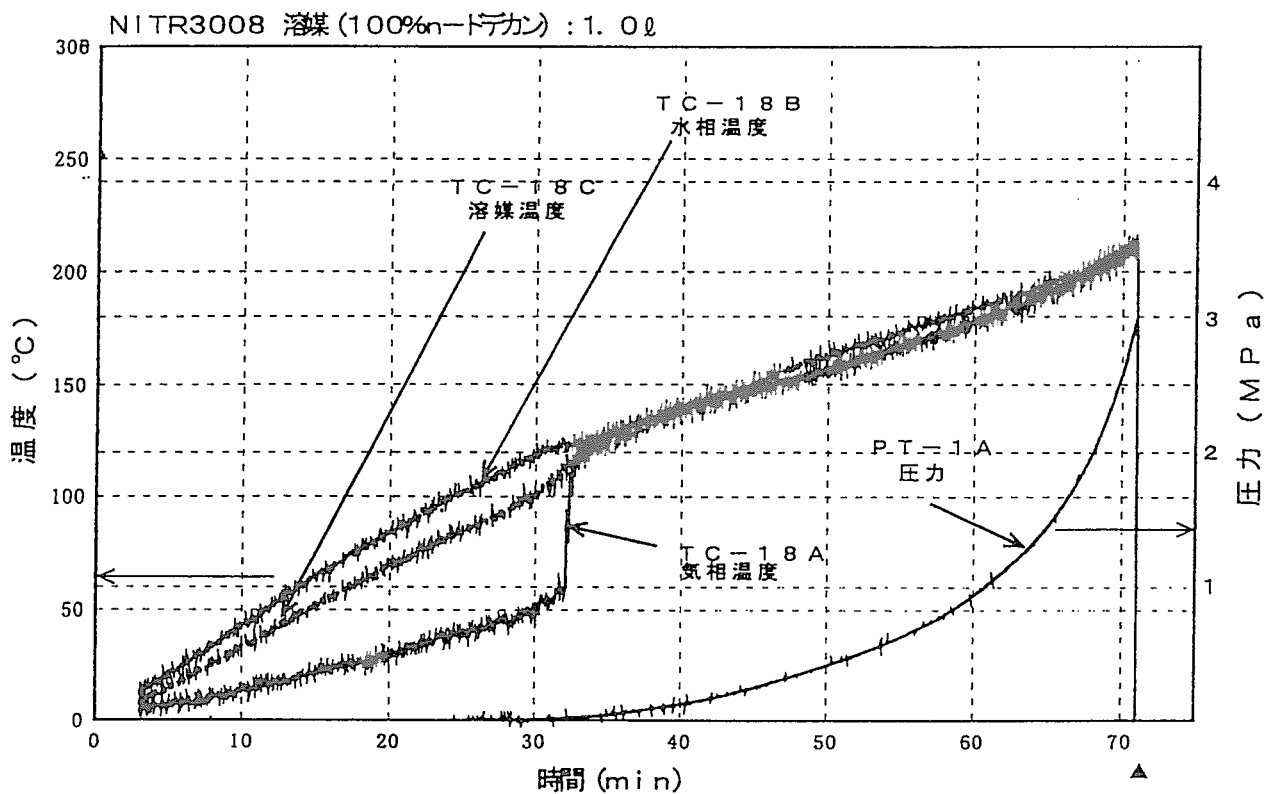


図13 NITR3008 (100vol%n-ドデカン) における反応容器内の温度と圧力の変化

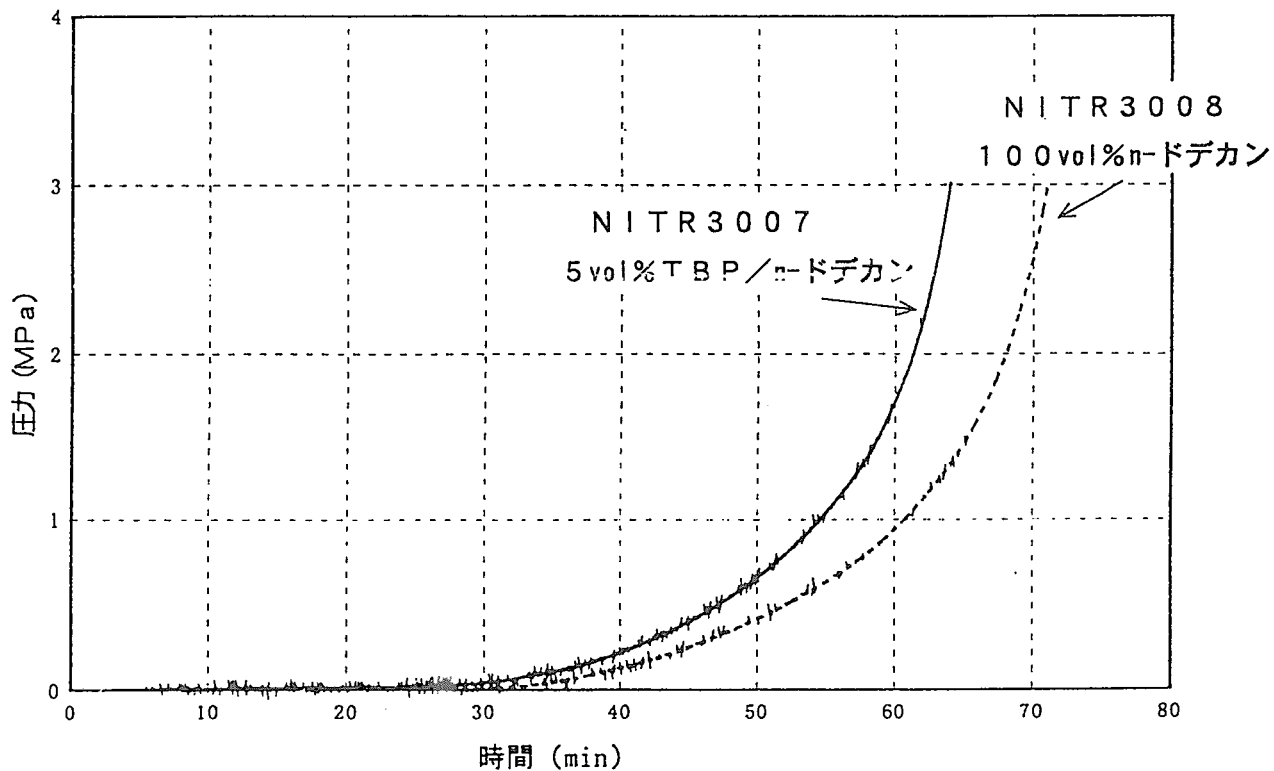


図14 NITR3007とNITR3008での反応容器内の圧力の変化

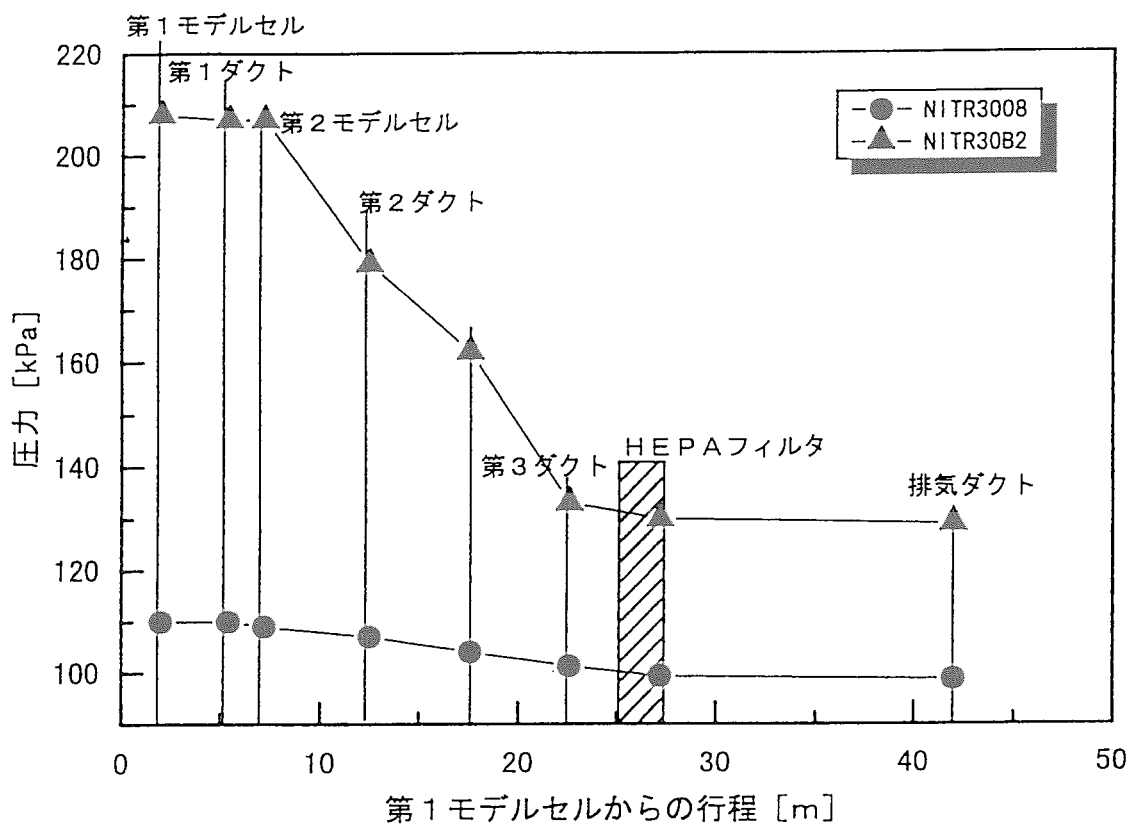


図15 NITR30B2とNITR3008での圧力減衰効果

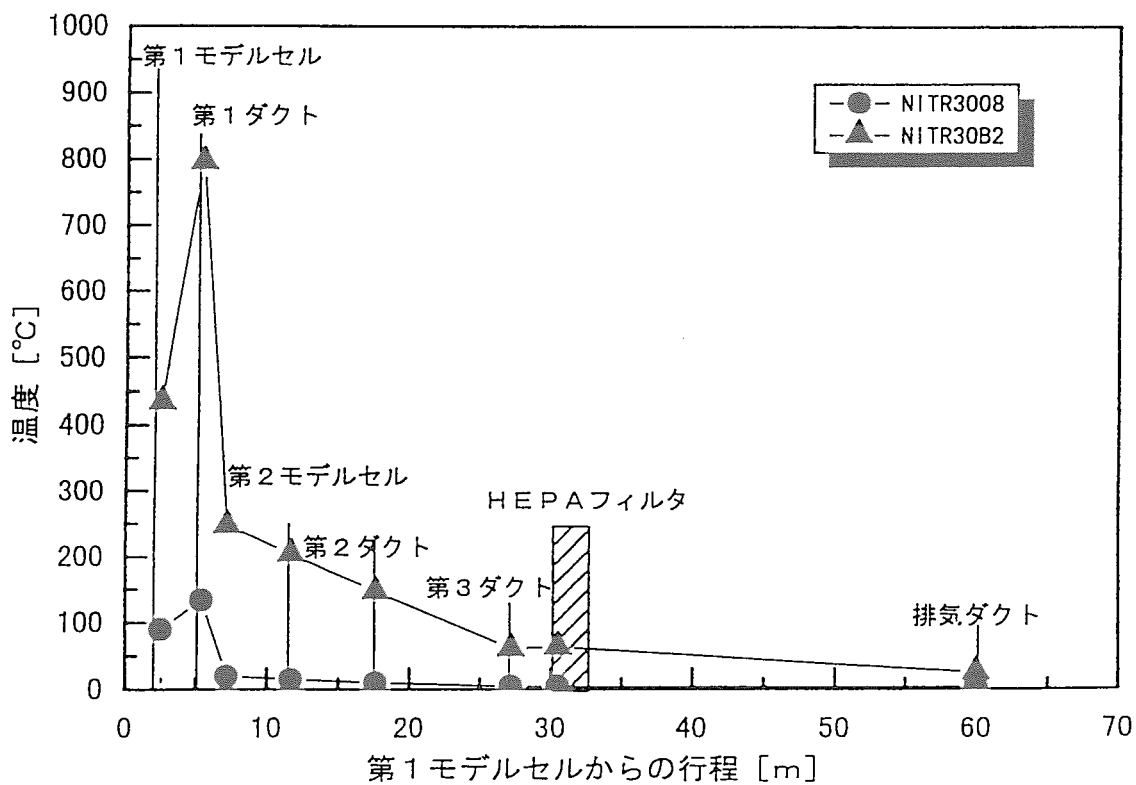


図16 NITR30B2とNITR3008での温度減衰効果

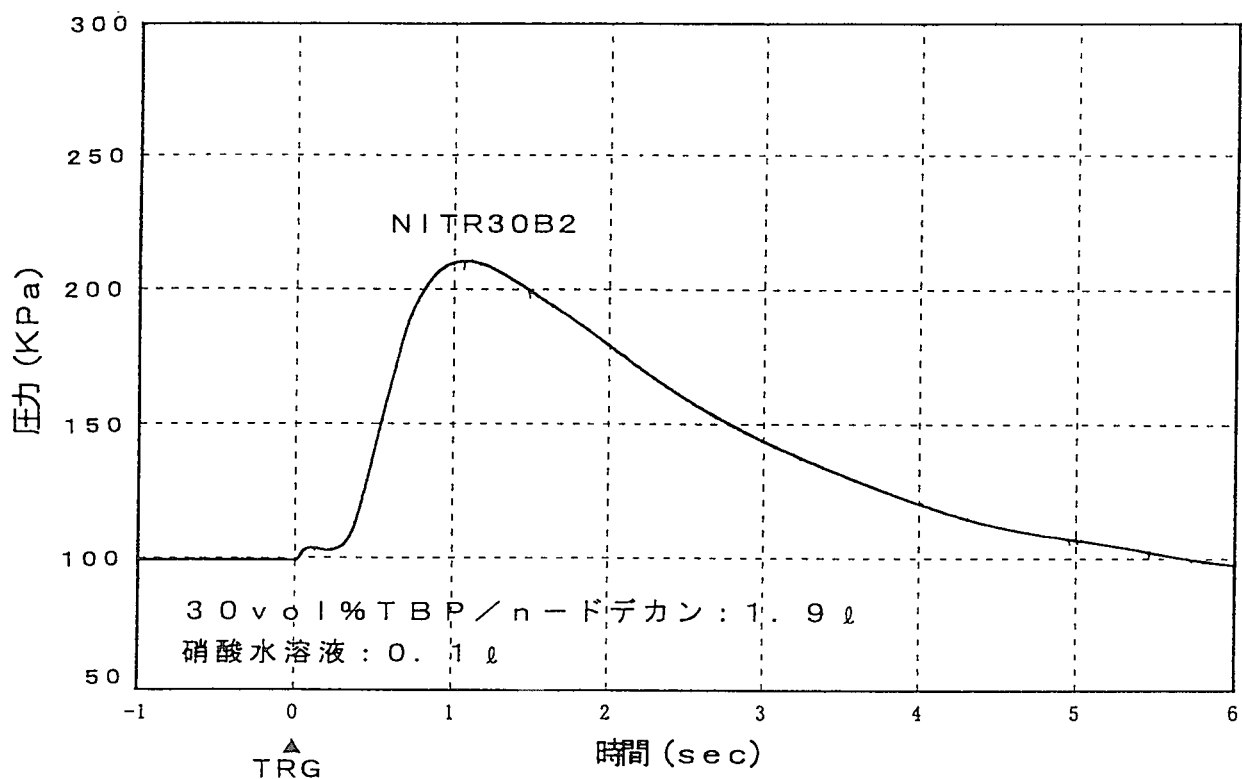


図17 NITR30B2 (溶媒ミストが急激燃焼) での第1モデルセル内の圧力変化

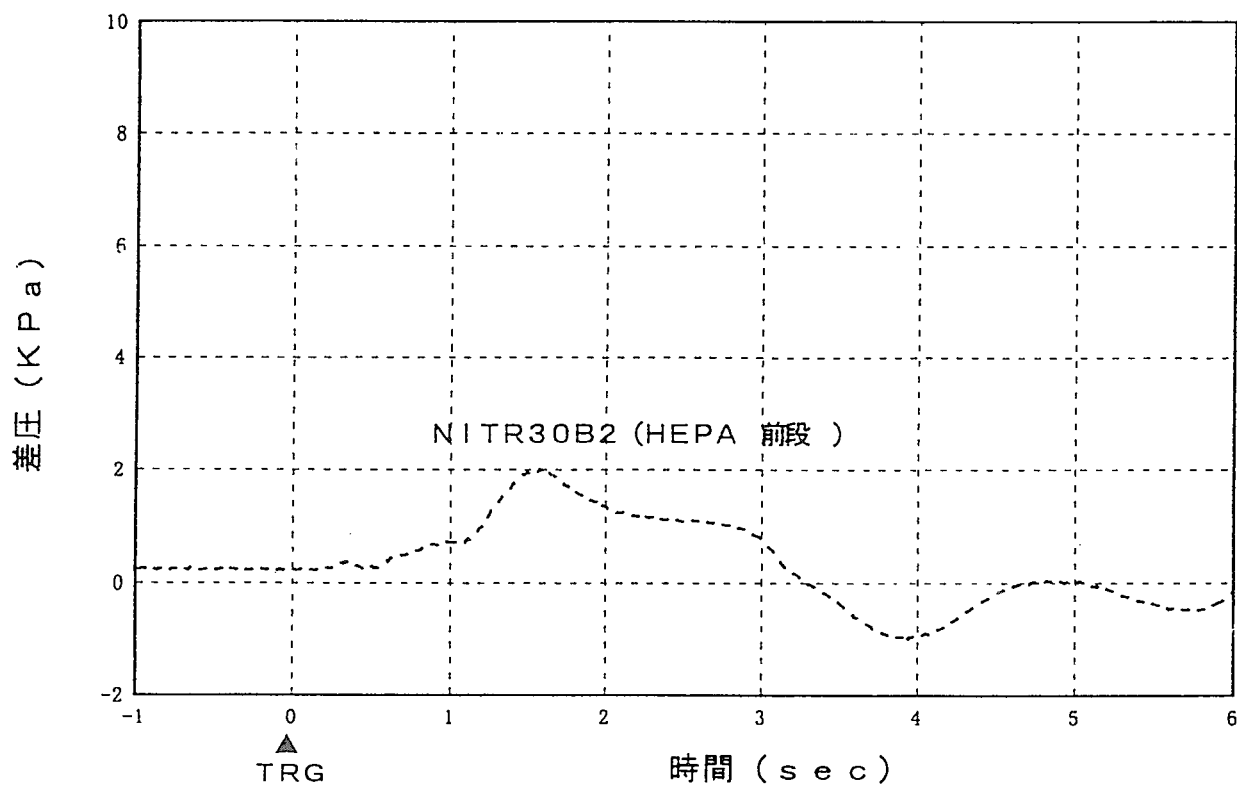


図18 NITR30B2 (溶媒ミストが急激燃焼) でのHEPAフィルタ差圧の変化

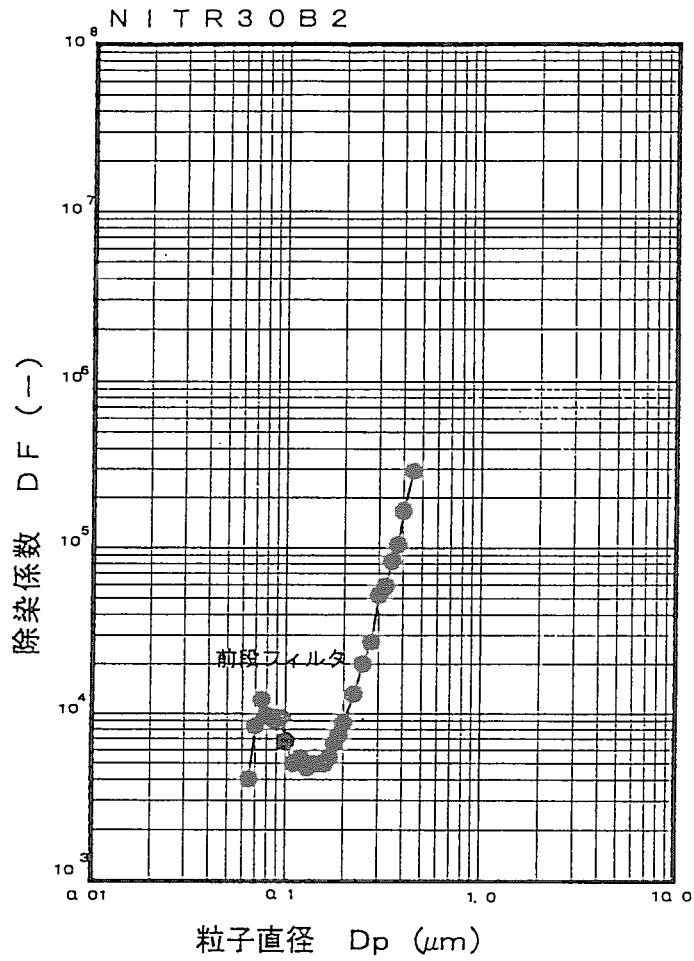


図19 HEPAフィルタのDOPテストの結果 (NITR30B2後)

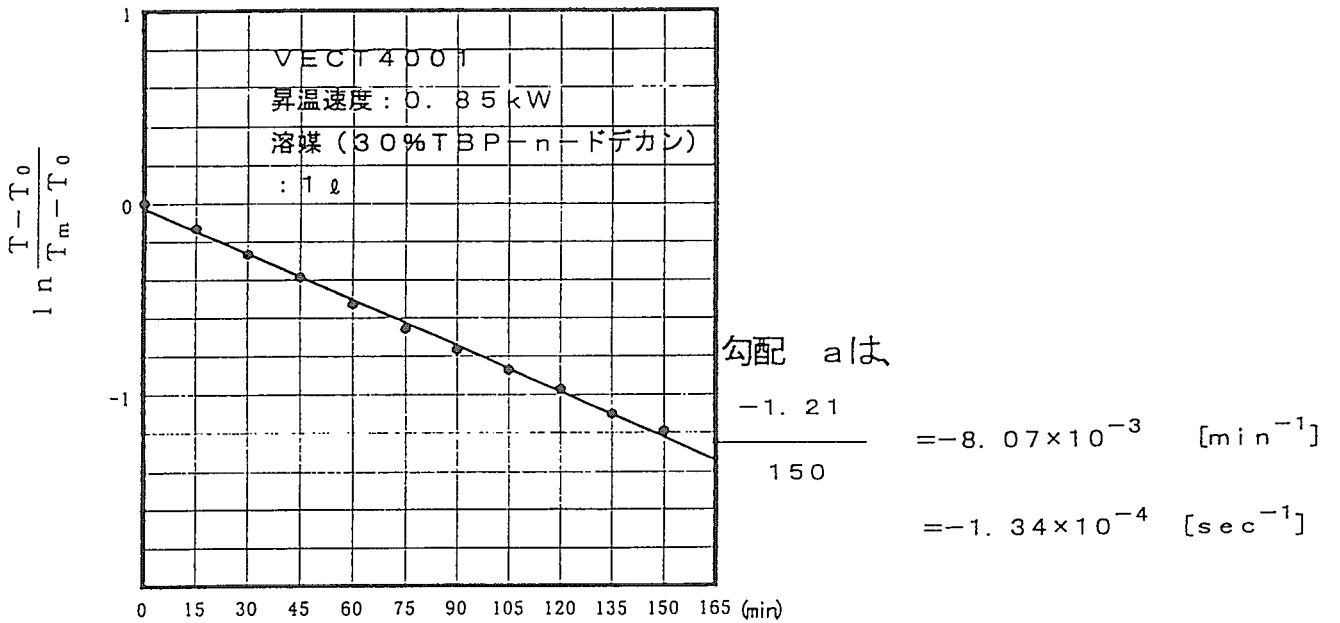


図20 反応容器の放熱特性 (VECT4001)

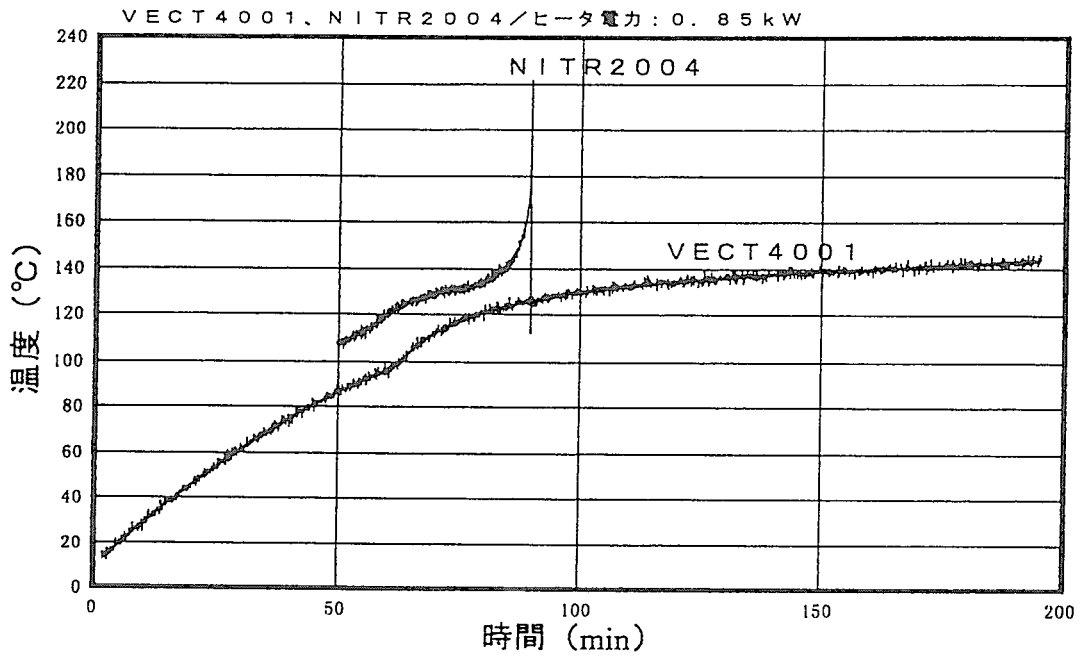


図 2 1 熱分解試験と入熱・放熱試験での反応容器内温度の変化

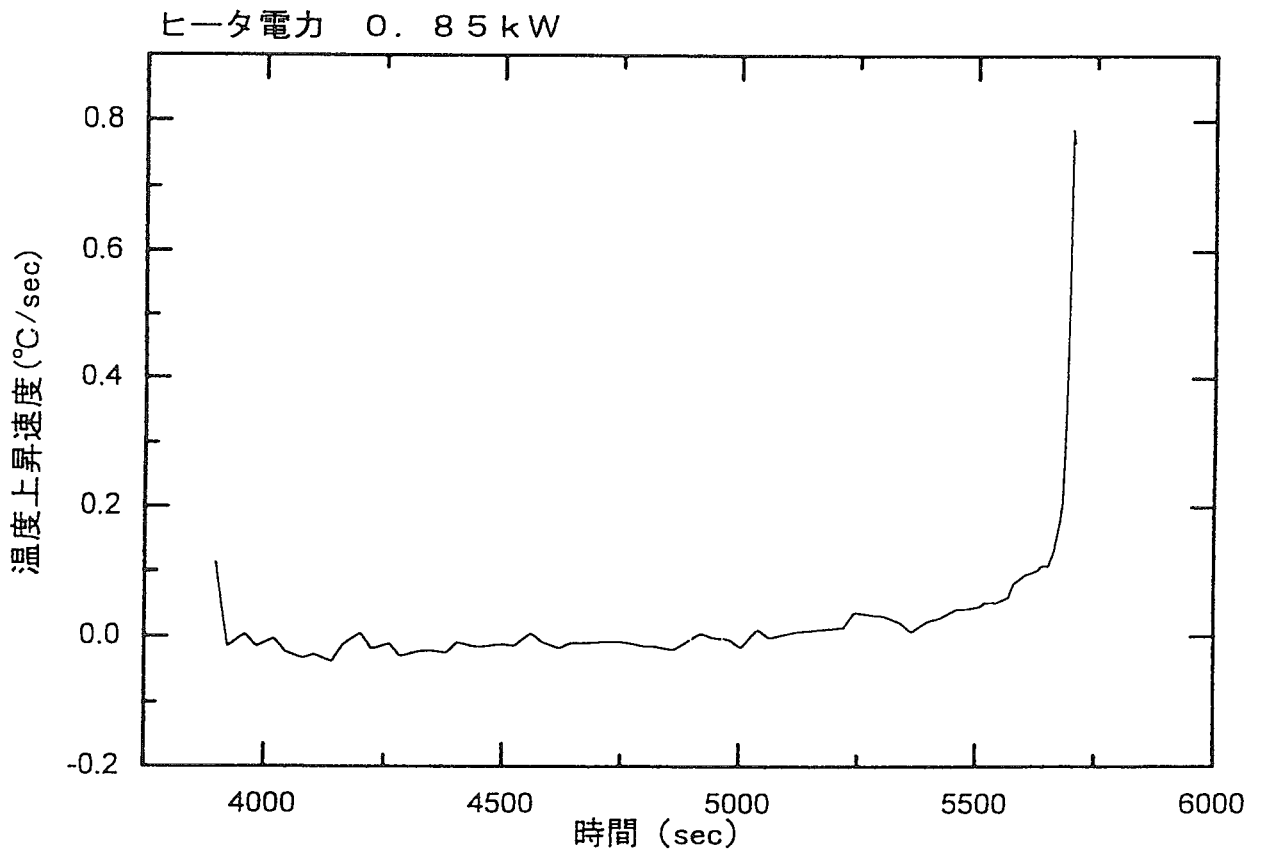


図 2 2 NITR2004とVECT4001の温度差の微分値

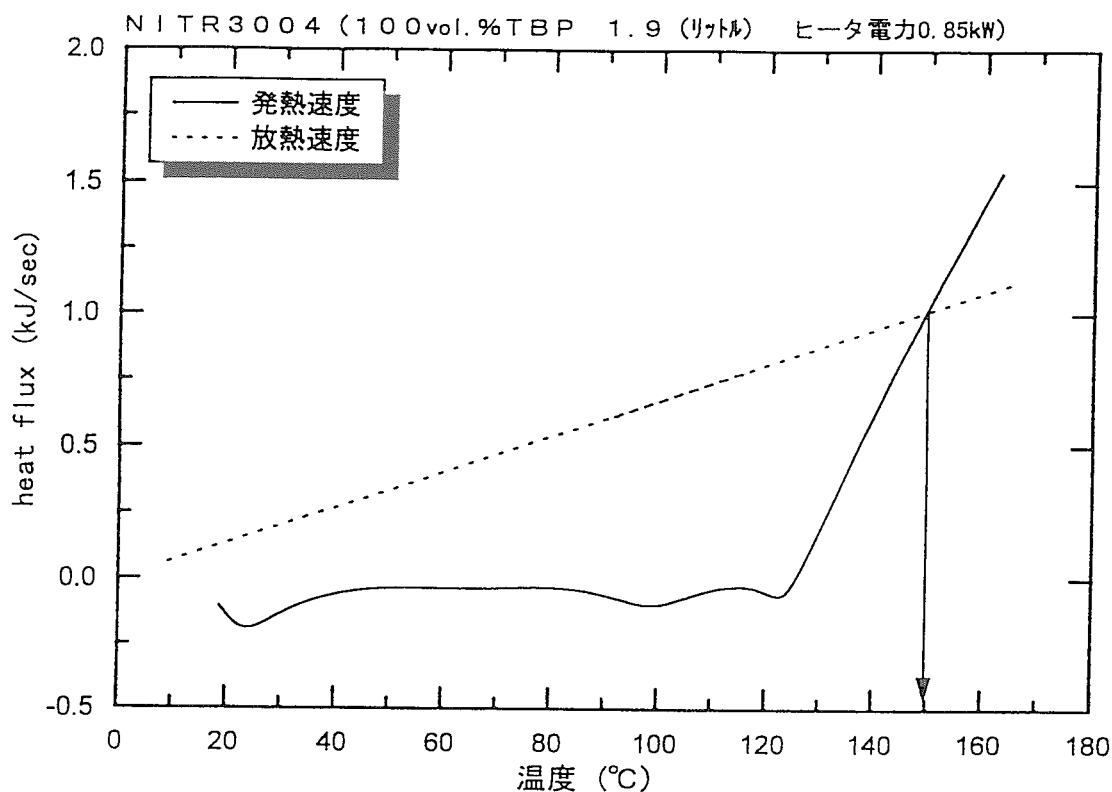


図 2 3 N I T R 3 0 0 4 での自己加速反応開始温度

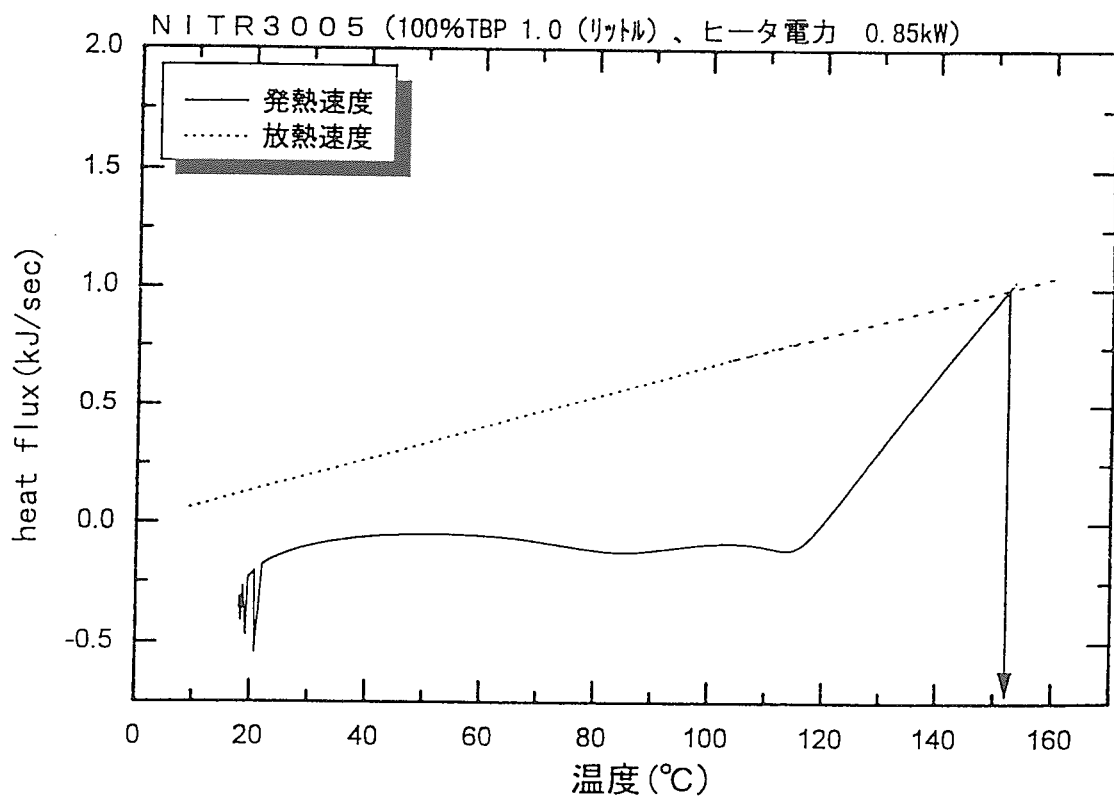


図 2 4 N I T R 3 0 0 5 での自己加速反応開始温度

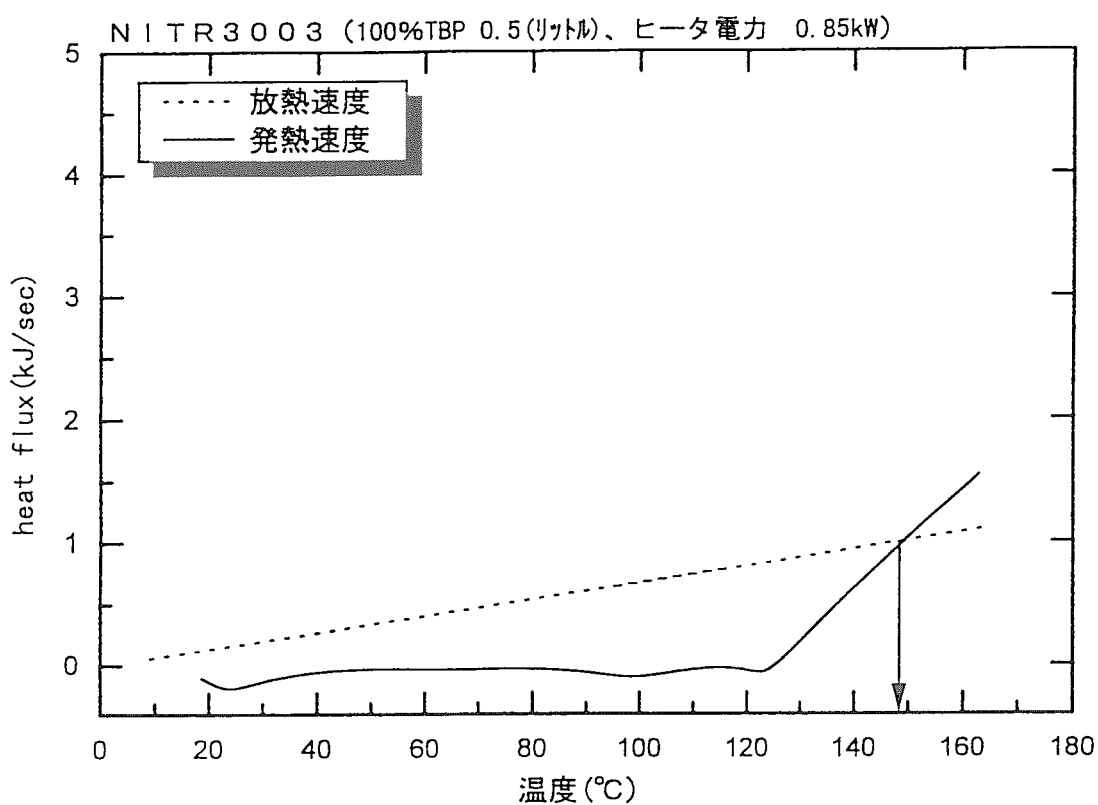


図 2 5 N I T R 3 0 0 3 での自己加速反応開始温度

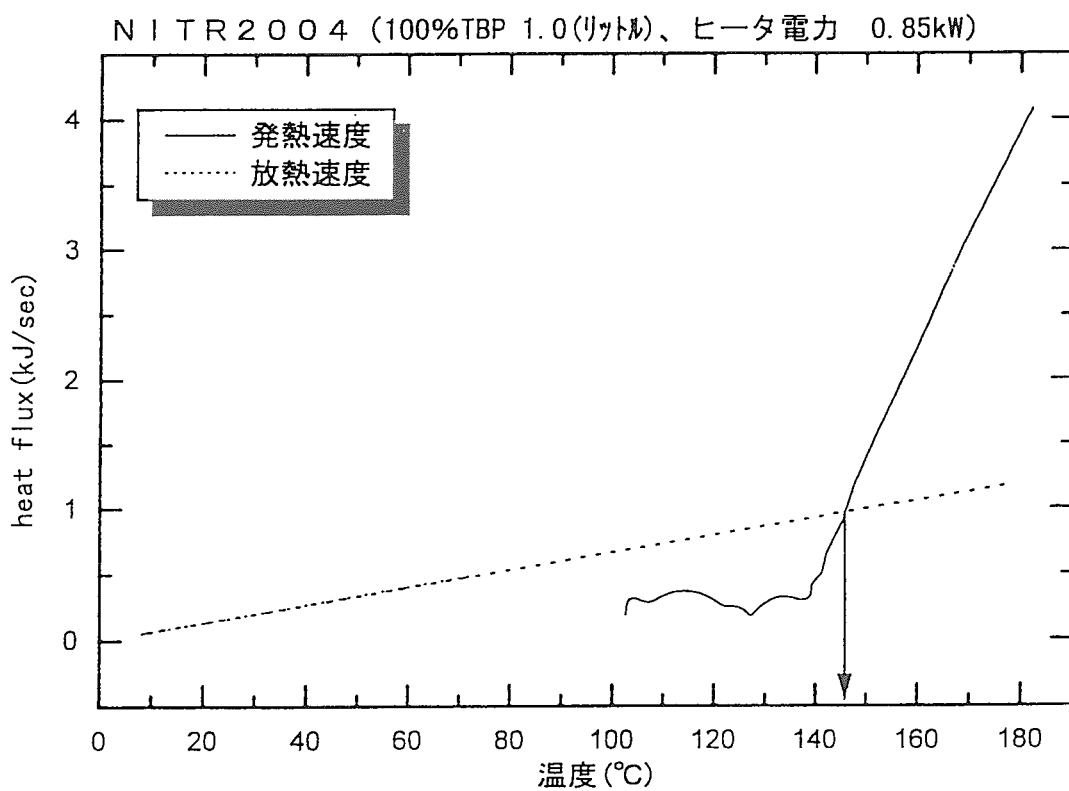


図 2 6 N I T R 2 0 0 4 での自己加速反応開始温度

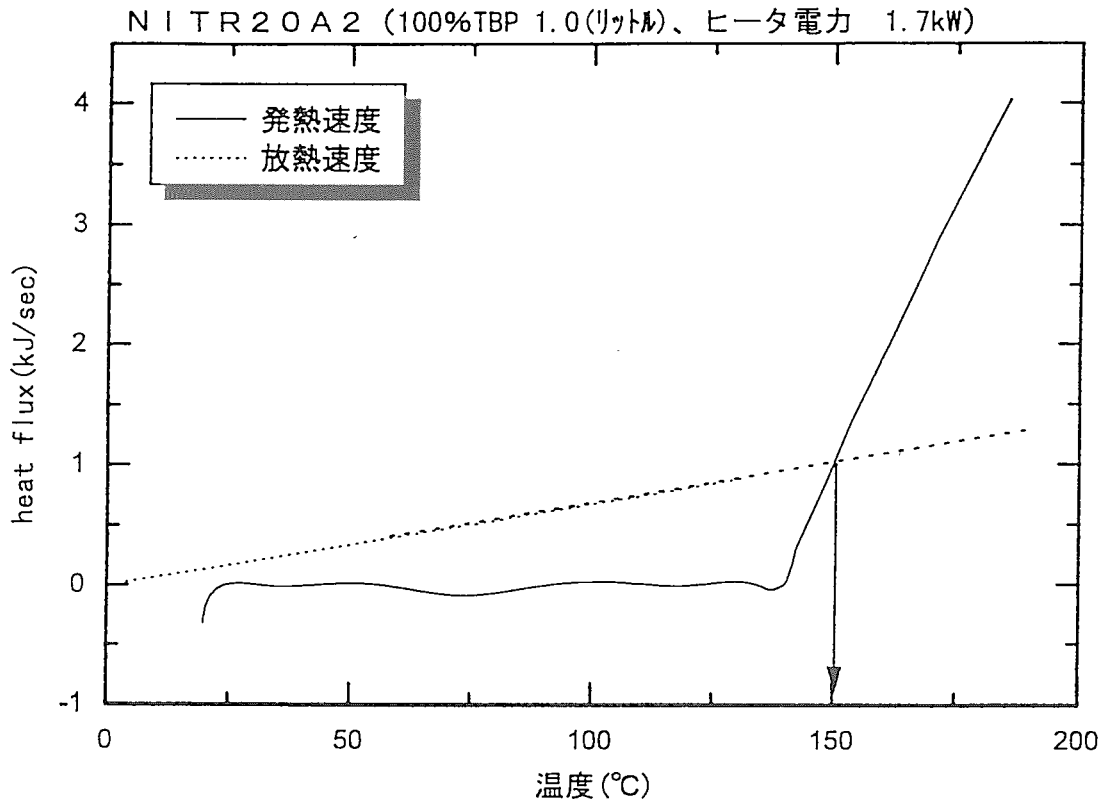


図 2 7 N I T R 2 0 A 2 での自己加速反応開始温度

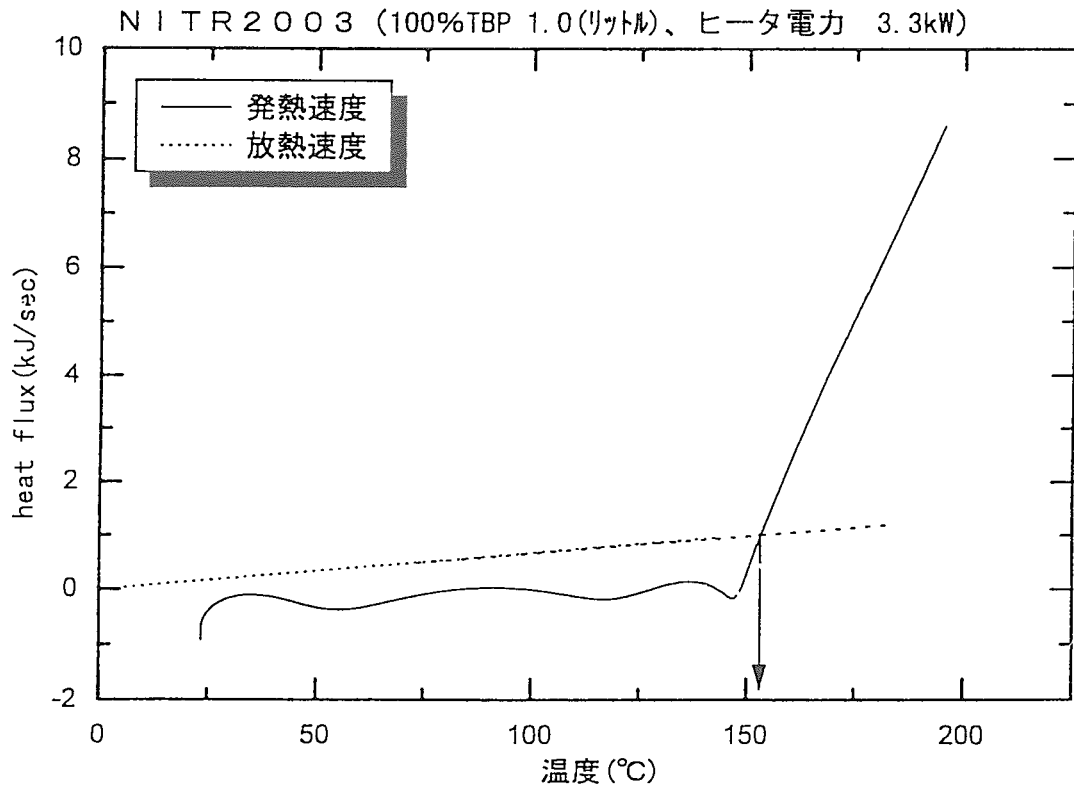
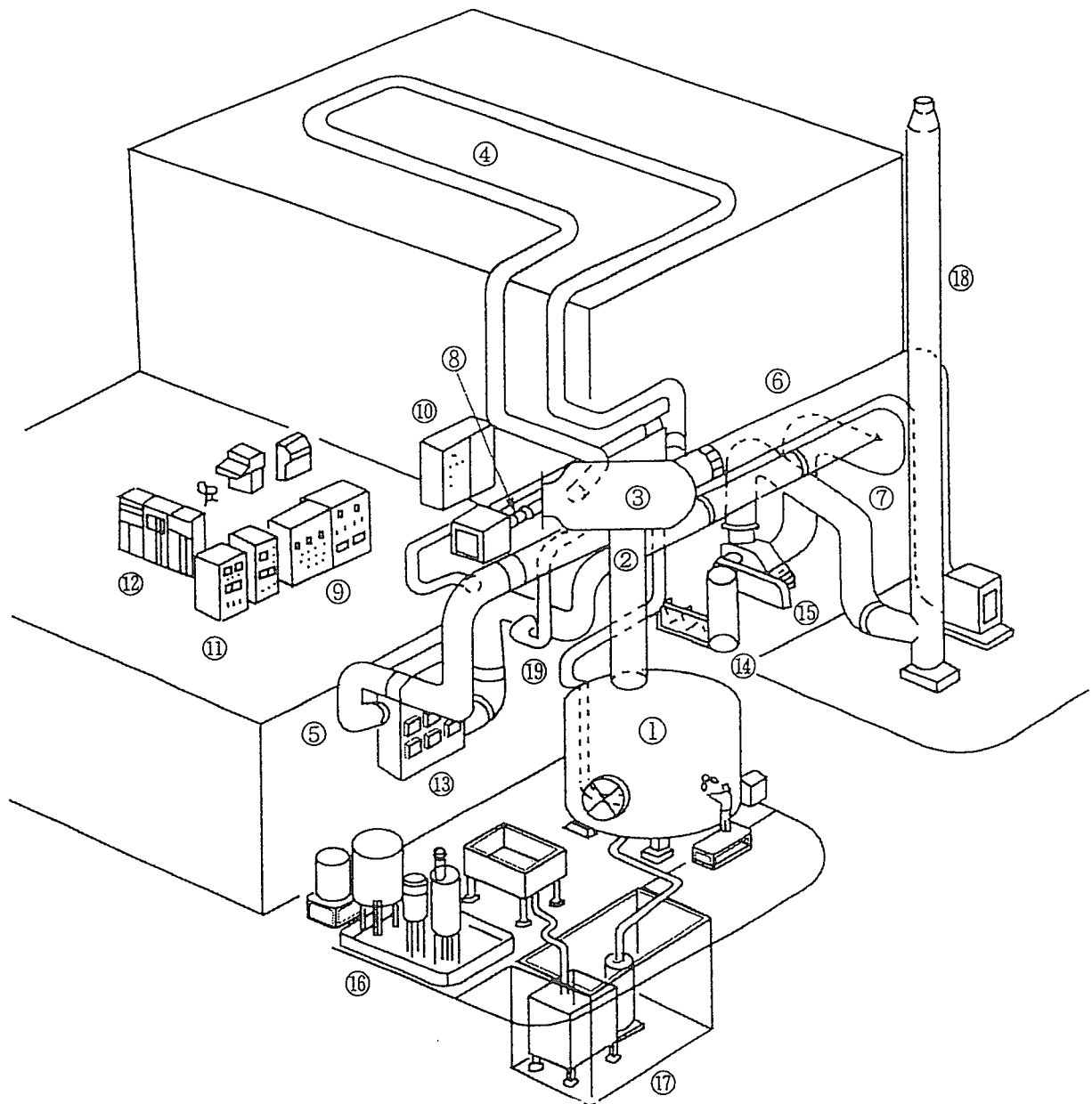


図 2 8 N I T R 2 0 0 3 での自己加速反応開始温度

付録

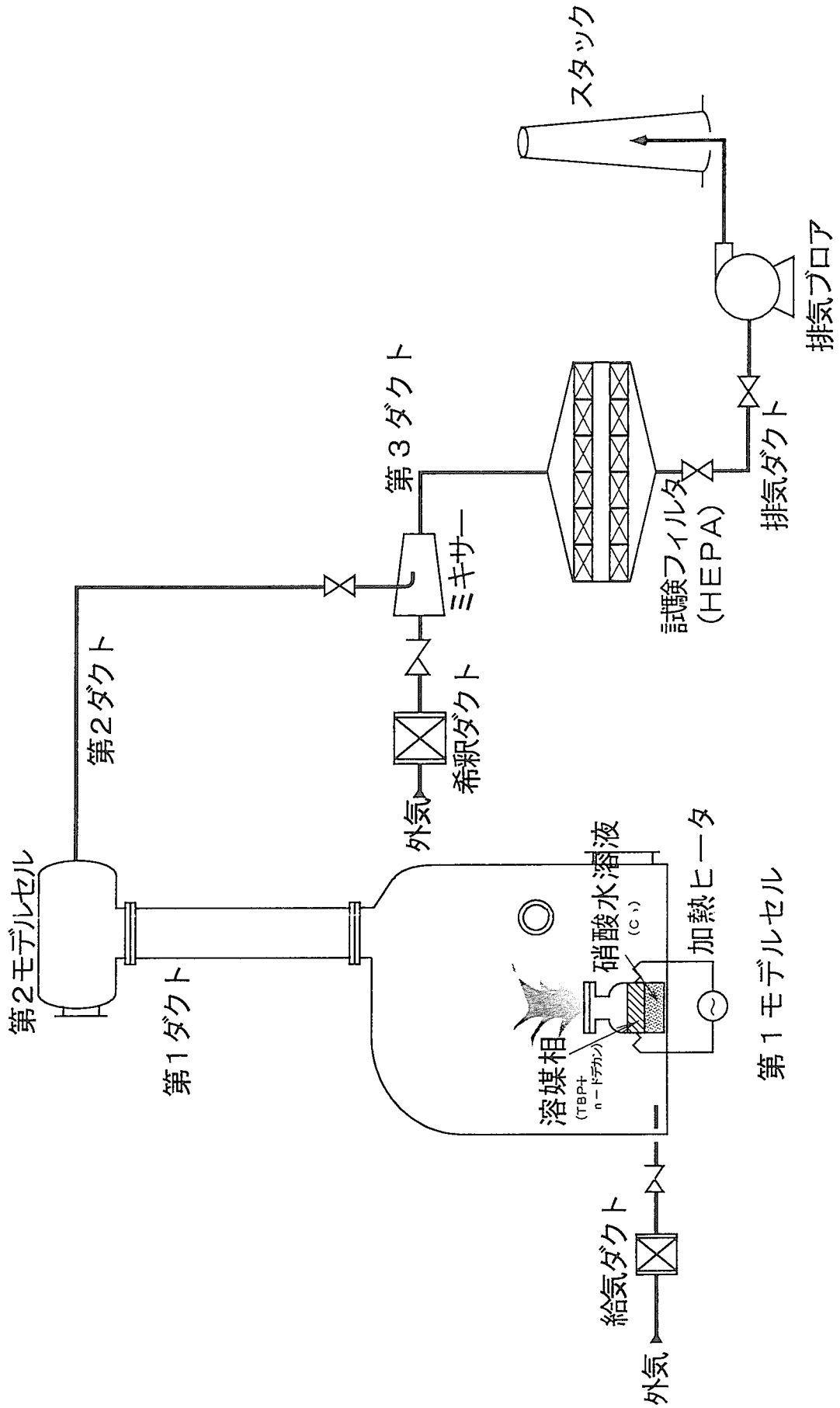
実証試験装置の鳥瞰図及び装置各部の寸法とセンサー配置を付録A 1～A 9に示す。

- A 1 セル換気系実証試験装置の鳥瞰図
- A 2 ニトロ化溶媒爆発試験装置の模式図
- A 3 反応容器内の寸法と圧力・温度センサー位置
- A 4 第1モデルセル内の寸法と圧力・温度センサー位置
- 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
- A 6 第2ダクトの寸法と圧力・温度・流量センサー位置
- 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・流量センサー位置
- A 8 逆流防止ダンパーの構造
- A 9 イグナイタの取り付け位置

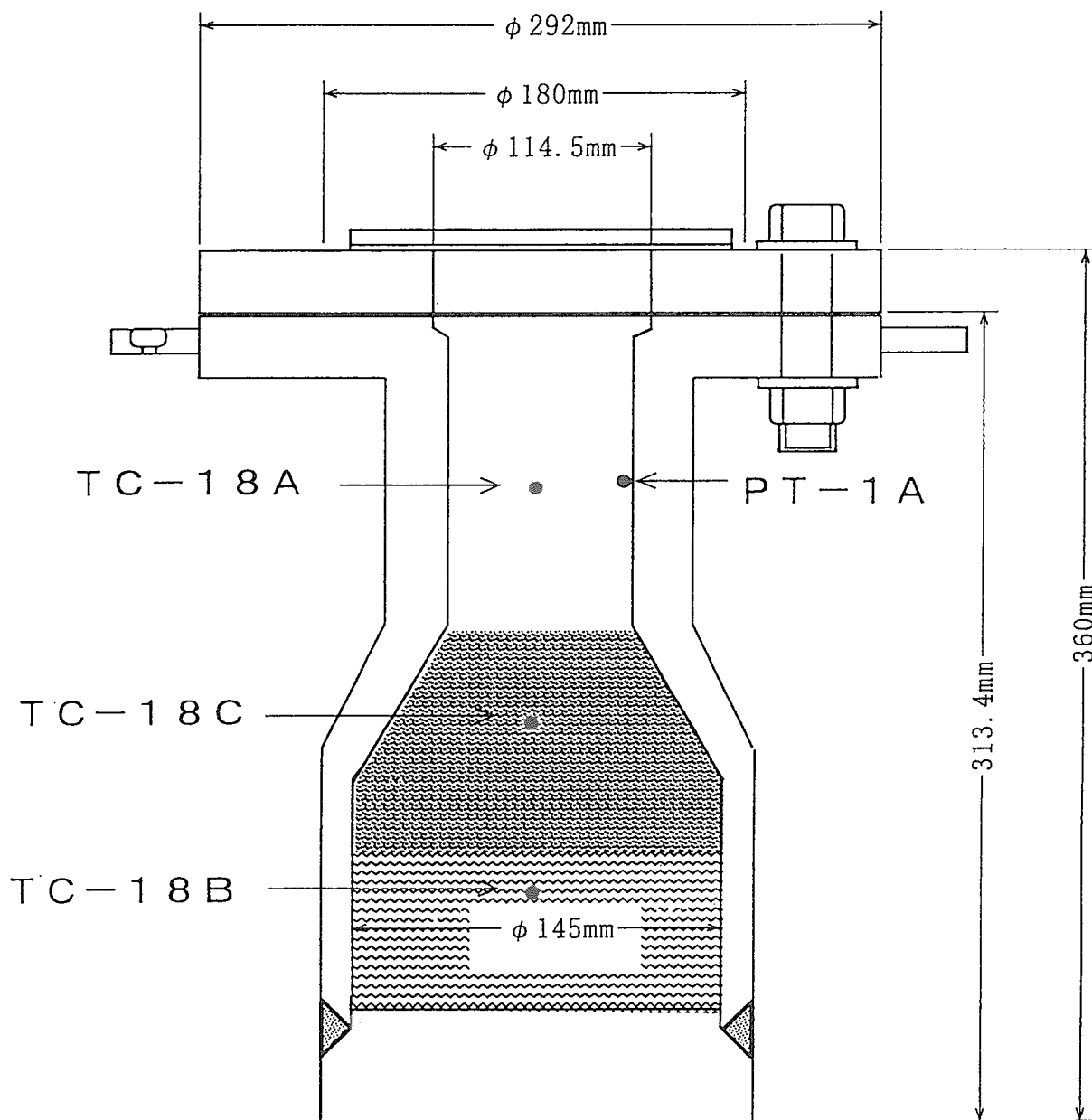


①	第1モデルセル	⑧	給気ダクト	⑮	排気ブロー
②	第1ダクト	⑨	低速プロセス計装系	⑯	水溶媒タンク類
③	第2モデルセル	⑩	動力盤	⑰	廃液処理系
④	第2ダクト	⑪	高速プロセス計装系	⑱	スタック
⑤	第3ダクト	⑫	データ収録装置		
⑥	希釈ダクト	⑬	フィルタチェンバ		
⑦	排気ダクト	⑭	圧縮空気供給装置		

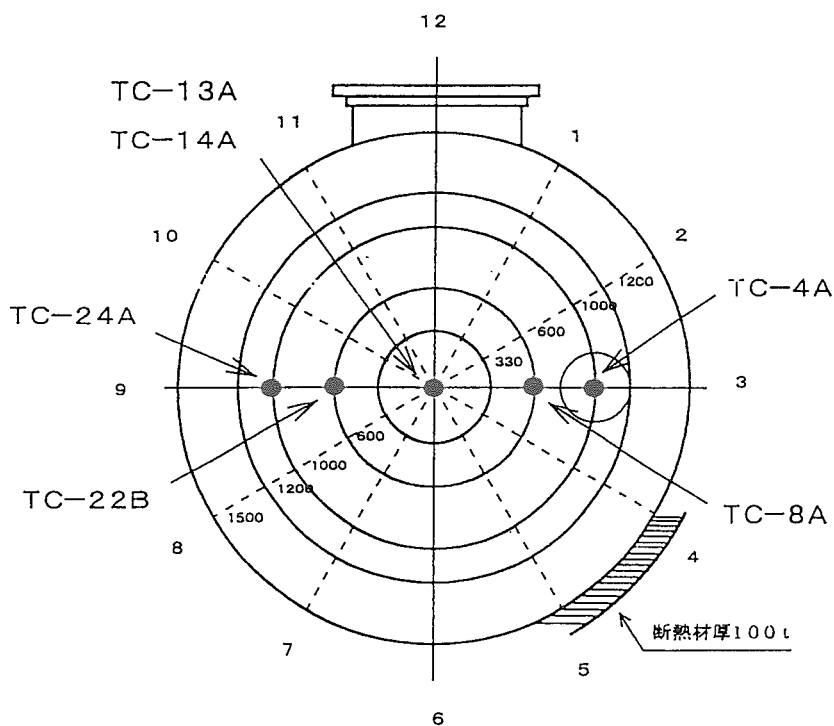
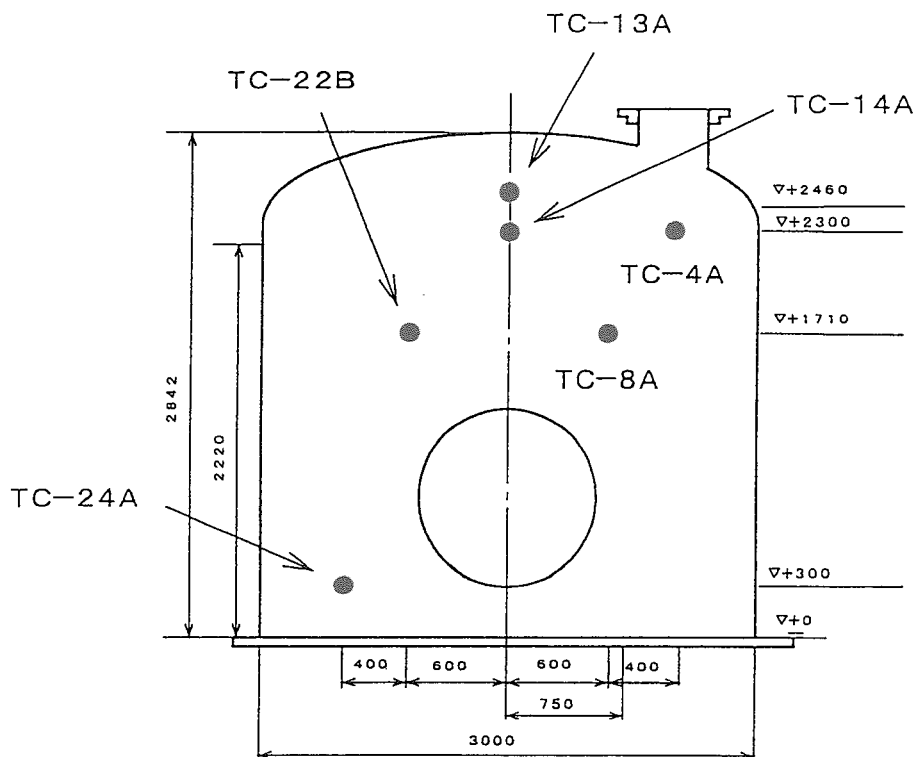
付録A 1 セル換気系実証試験装置の鳥瞰図



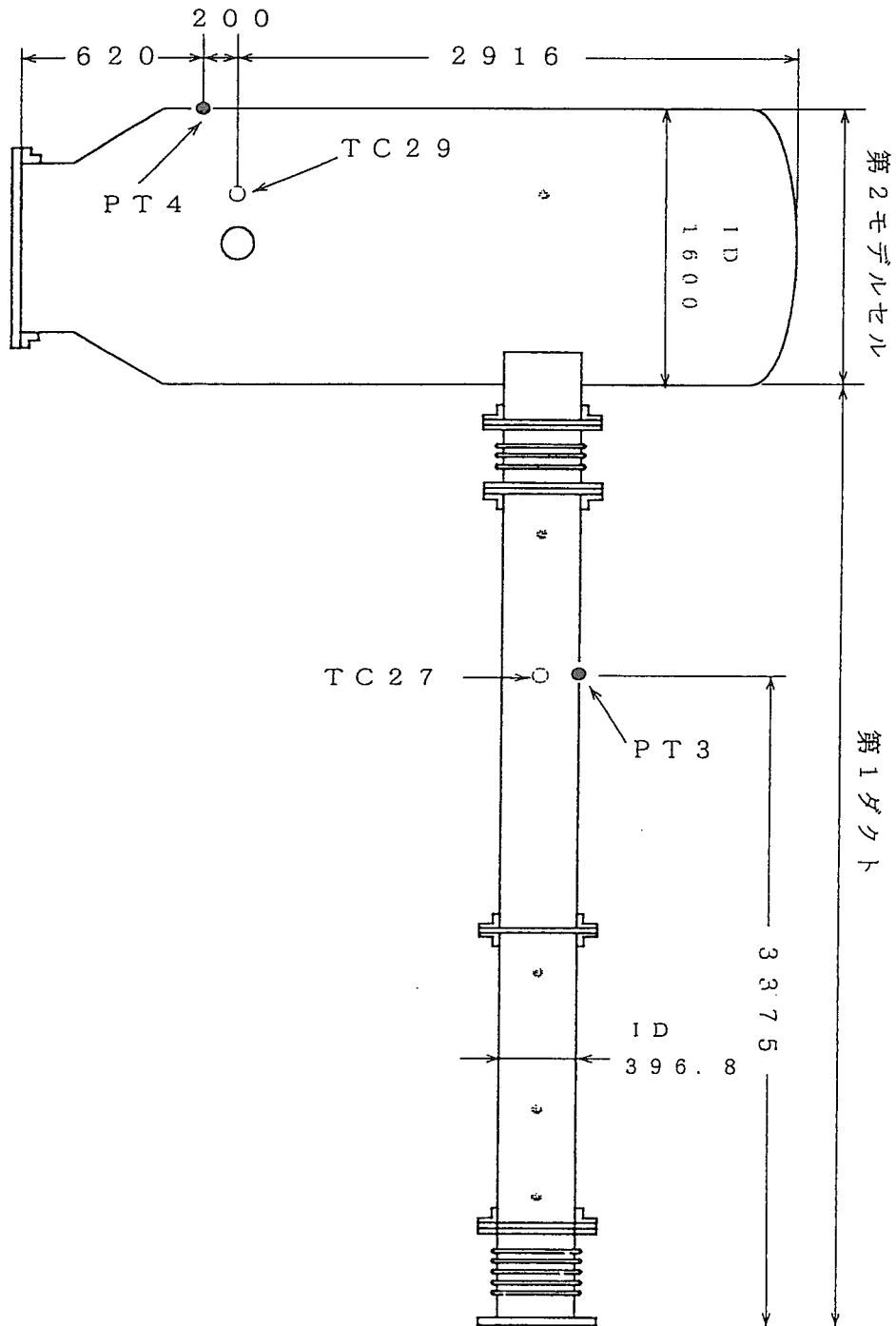
付録A2 ニトロ化溶媒爆発試験 (NITR) 装置模式図



付録 A 3 反応容器の寸法と圧力・温度センサー位置

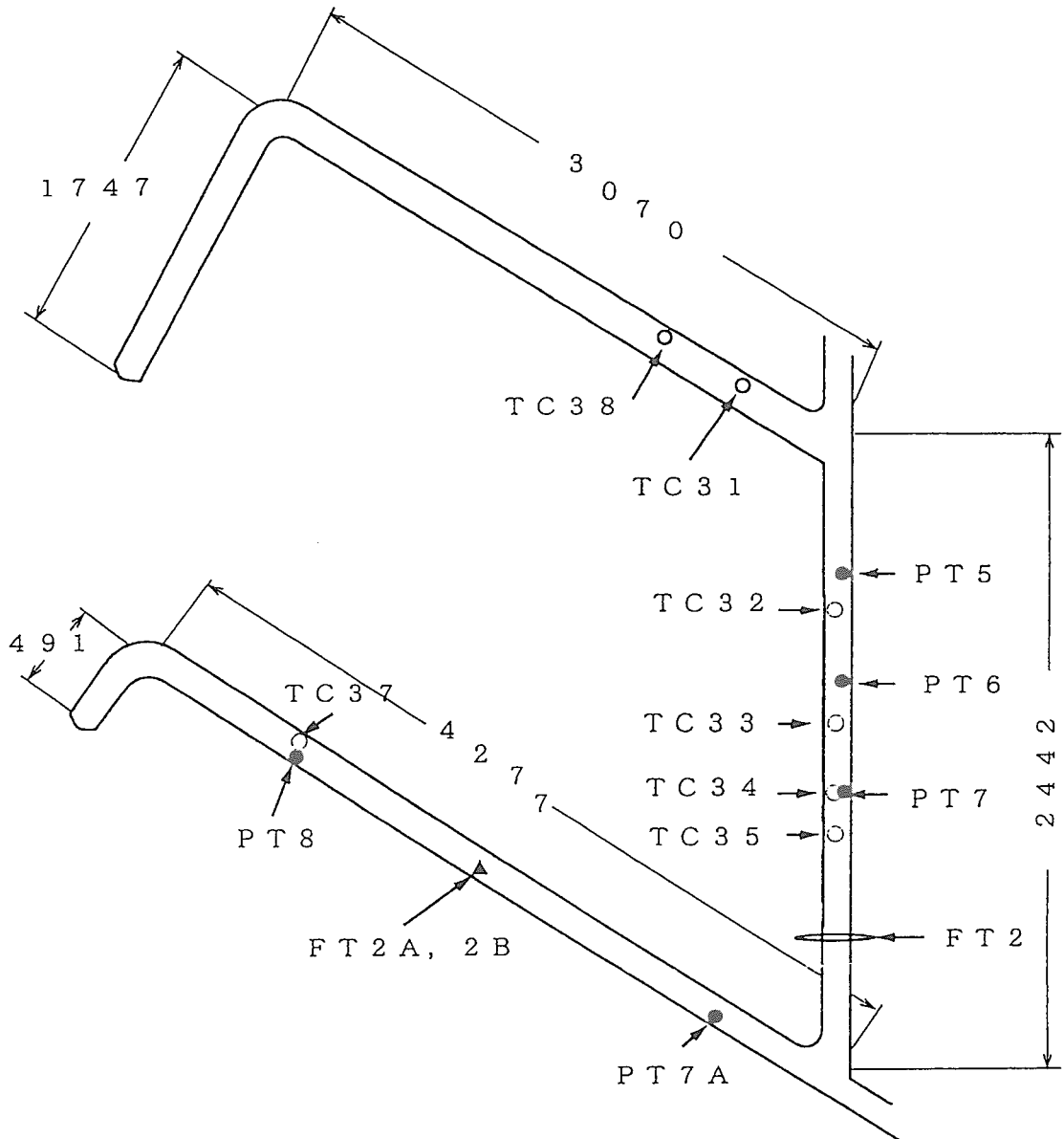


付録A 4 第1モデルセルの寸法と圧力・温度センサの配置

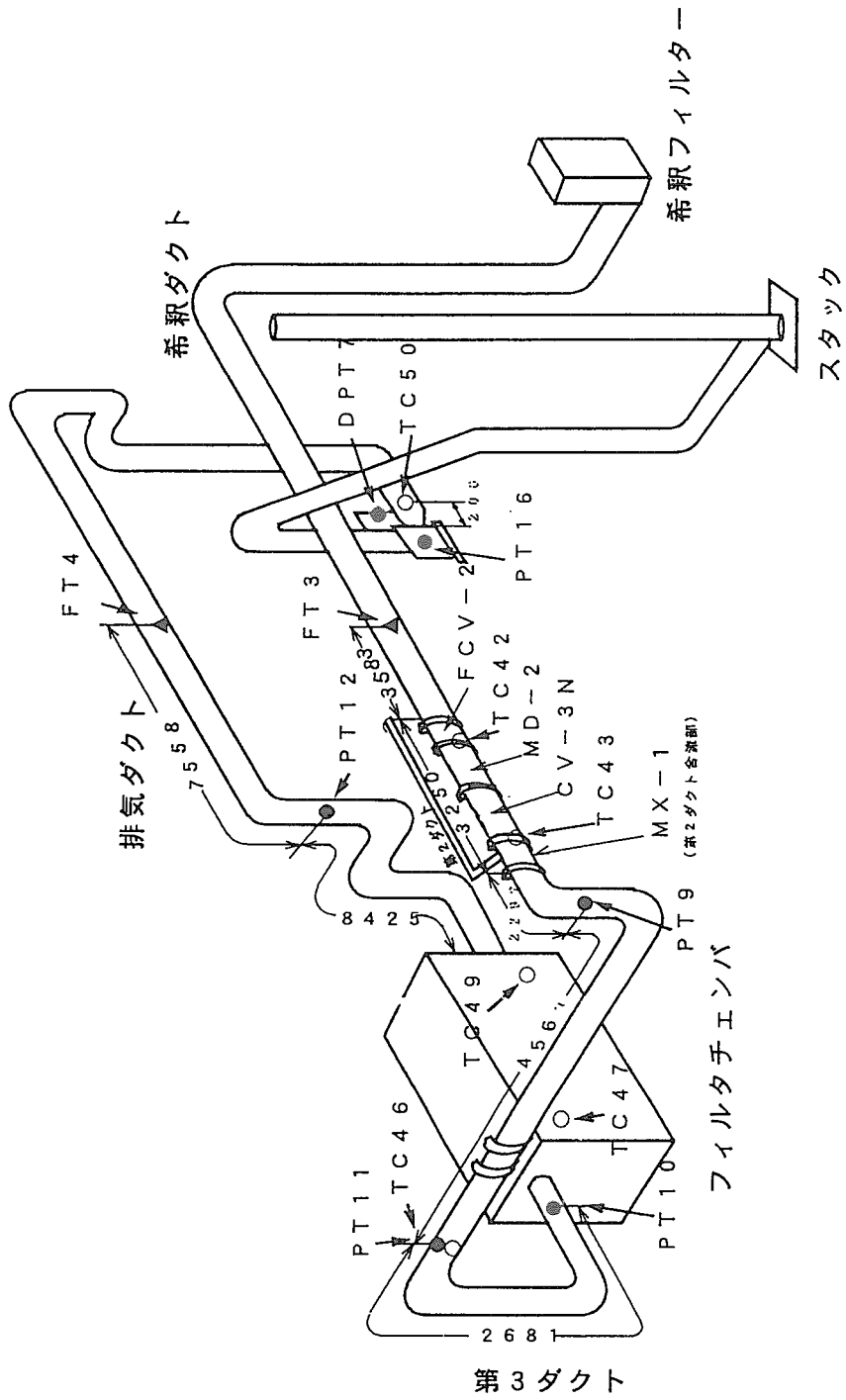


付録 A 5

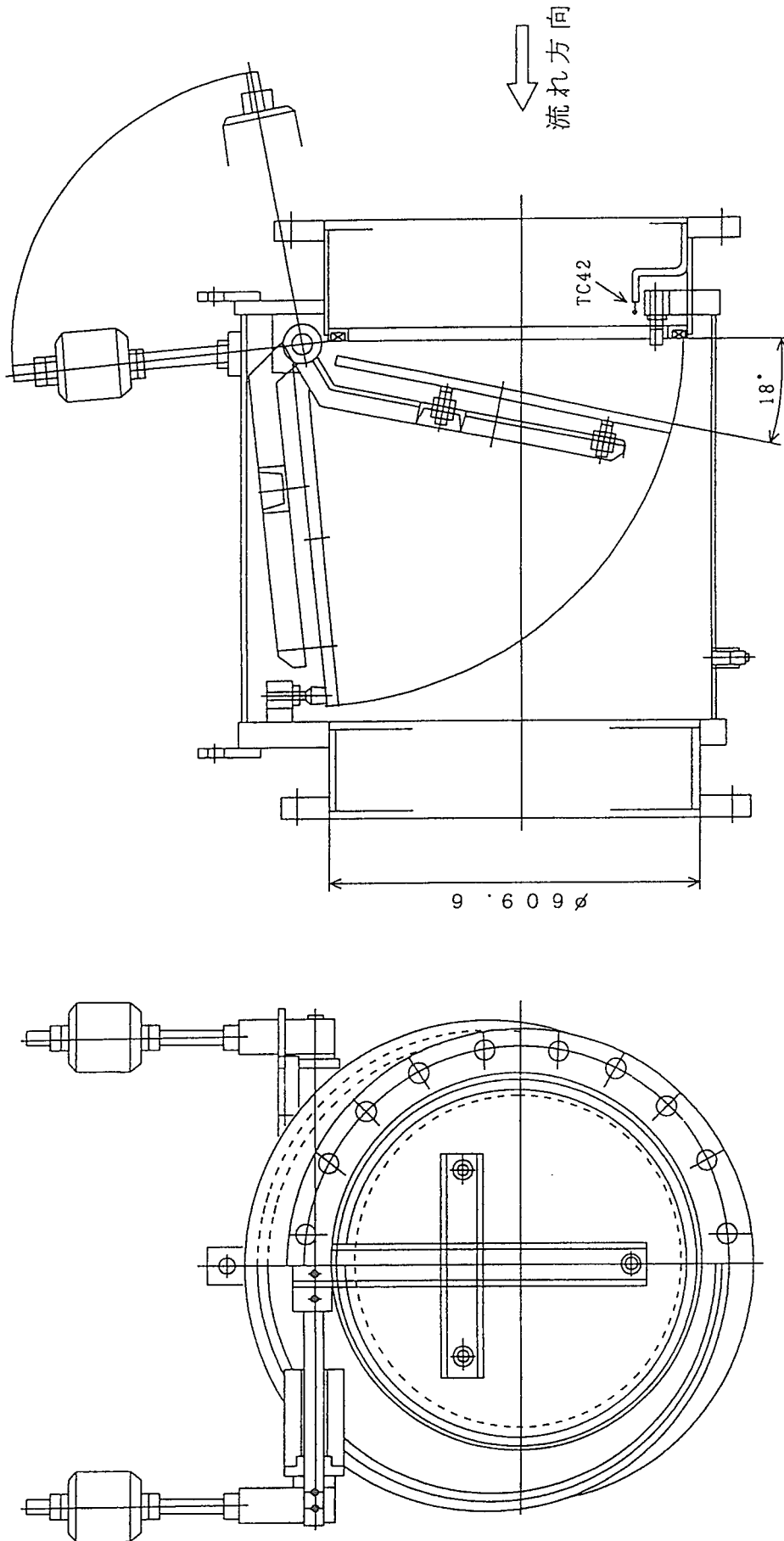
第1ダクト及び第2モデルセルの寸法と圧力・温度センサー位置



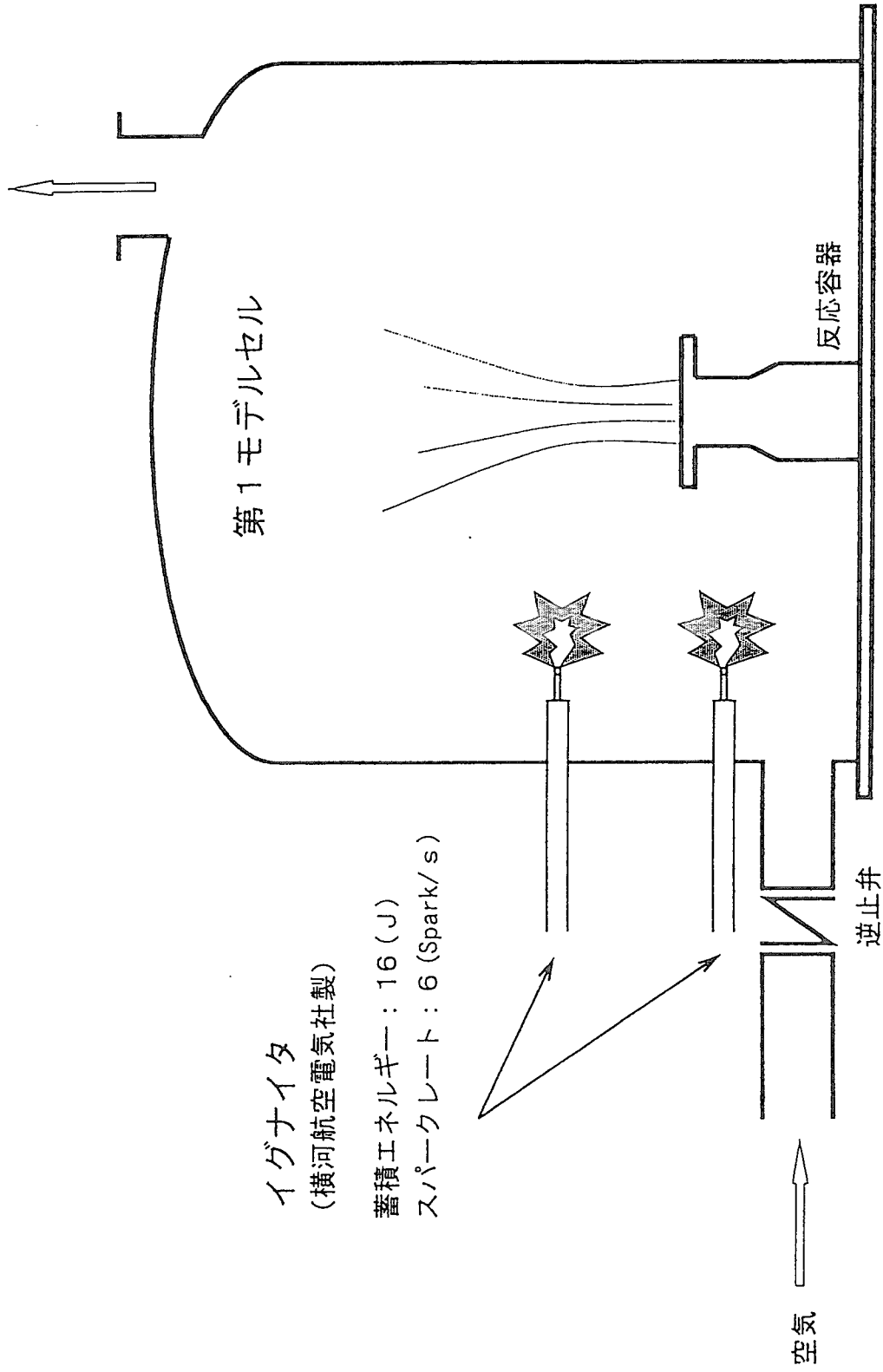
付録 A 6 第 2 ダクトの寸法と圧力・温度・流量センサーの配置



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A 9 イグナイターの取り付け位置

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	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	
光束	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	bar
ガリ	Gal
キュリー	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わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC関係理事会指令では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

