



JAEA-Research

2006-054



JP0650573

火災事故時のグローブボックスの 閉じ込め性能評価に関する研究

Study on Evaluation of Containment Capability of Grove-box under Fire Accident

阿部 仁 渡邊 浩二 田代 信介 内山 軍藏

Hitoshi ABE, Koji WATANABE, Shinsuke TASHIRO and Gunzo UCHIYAMA

安全研究センター
核燃料サイクル施設安全評価研究グループ

Fuel Cycle Facility Safety Research Group
Nuclear Safety Research Center

JAEA-Research

September 2006

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは日本原子力研究開発機構が不定期に刊行している研究開発報告書です。
本レポートの全部または一部を複写・複製・転載する場合は下記にお問い合わせ下さい。

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2-4
日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
Tel.029-282-6387, Fax.029-282-5920

This report is issued by Japan Atomic Energy Agency irregularly.
Inquiries about the copyright and reproduction should be addressed to:

Intellectual Resources Section,
Intellectual Resources Department
2-4, Shirakata-shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1195, JAPAN
Tel. 81 29 282 6387, Fax. 81 29 282 5920

©日本原子力研究開発機構, Japan Atomic Energy Agency, 2006

火災事故時のグローブボックスの閉じ込め性能評価に関する研究

日本原子力研究開発機構安全研究センター
原子力エネルギー関連施設安全評価研究ユニット
阿部 仁、渡邊 浩二*、田代 信介、内山 軍藏

(2006年7月3日受理)

MOX 燃料加工施設では、MOX の施設内への閉じ込め性能の維持のため、MOX をグローブボックスの内部で取り扱うことが要求されている。グローブボックスはいくつかの種類の樹脂製部材から構成されるため、火災等によりグローブボックスに対して熱的なストレスが加えられた場合には、この樹脂製部材の熱分解や燃焼によってグローブボックスが有する静的閉じ込め性能が失われる可能性がある。本研究では、火災時のグローブボックスの静的閉じ込め性能の定量的な評価に資するため、これら部材の熱分解反応に係る、反応開始温度、吸発熱量、反応温度範囲及び反応速度データ等の吸発熱特性を検討している。本報では、熱分析装置を用いたこれら吸発熱特性データの取得と、火災時のグローブボックスの静的閉じ込め性能の定量的評価モデルの検討を行った。取得した吸発熱特性データと火炎からの輻射熱流束データを適用した評価モデルを用いることで、火災の進展に伴うこれら部材の温度上昇や熱分解の進行による質量減少の経時変化を矛盾なく評価することができることを示した。

本報告書は、日本原子力研究開発機構が(独)原子力安全基盤機構から委託されて実施した「平成17年度MOX燃料加工施設火災時ソースターム試験」の研究成果を使用して取りまとめたものである。

原子力科学研究所（駐在）：〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2-4

*特定課題推進員

Study on Evaluation of Containment Capability of Grove-box under Fire Accident

Hitoshi ABE, Koji WATANABE*, Shinsuke TASHIRO and Gunzo UCHIYAMA

Nuclear Facility Safety Research Unit
Nuclear Safety Research Center
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received July 3, 2006)

In the MOX fuel fabrication facility, MOX is required to be handled in Grove-box to sustain containment of MOX into the facility. In case of fire in the facility, the static containment capability of Grove-box may be deteriorated by pyrolysis or combustion of the plastic materials as components of Grove-box caused by thermal stress from flame. The purpose of this study is to examine exothermic and endothermic properties, such as starting temperatures, calorific values, temperature ranges and reaction rate data of the relative reactions of the materials, for applying quantitative evaluation method for the static containment capability of Grove-box under fire. In this work, the data about the properties were obtained by using thermal analysis equipment and the calculation model to evaluate the static containment capability of Grove-box under fire was developed. It was found the exo/endothermic behavior and decrease in mass of the materials with progress of the pyrolysis reactions of the materials could be well simulated by using the model based on the data.

Keywords : MOX, MOX Fuel Fabrication Facility, Fire, Grove-box, Containment, Pyrolysis, Plastic, Source Term

This work includes the experimental results under the auspices of the Japan Nuclear Energy Safety Organization.

*Special Promotional Topics Staff

目 次

1. 緒言	1
2. 試験	3
2.1 評価対象物質	3
2.2 試験装置	4
2.3 試験方法	5
3. 結果及び考察	6
3.1 吸発熱特性の検討	6
3.2 熱分解反応速度データの評価	13
3.3 火災事故時閉じ込め機能評価モデルの検討	16
4. 結言	19
謝辞	21
参考文献	21

Contents

1. Introduction	1
2. Experimental	3
2.1 Estimated Materials	3
2.2 Experimental Devices	4
2.3 Experimental Methods	5
3. Results and Discussions	6
3.1 Examination of Exo/Endothermic Properties	6
3.2 Evaluation of Pyrolysis Reaction Rate Data	13
3.3 Investigation of Estimation Model of Containment Capability under Fire	16
4. Conclusion	19
Acknowledgment	21
References	21

This is a blank page.

1. 緒 言

原子力発電は、我が国のエネルギー自給率の向上及びエネルギーの安定供給に大きく貢献している。原子力発電をより長く利用できるようにするためには、ウラン資源を更に高い効率で利用することによってウラン資源の消費を節約することが課題であり、その観点から核燃料サイクル技術の確立が重要となる。海外再処理委託及び国内再処理工場で回収されるプルトニウムは、安全確保や平和利用に係る透明性の確保の徹底を前提に、当面、プルサーマル及び高速増殖炉等の研究開発において利用されるとされている。このような状況の下、MOX燃料加工施設の建設に係る事業許可申請が国に対してなされ、安全審査が行われている。

「ウラン・プルトニウム混合酸化物燃料加工施設安全審査指針」¹⁾（以下、「MOX指針」という。）では、同施設に対する安全審査の段階で十分に満足されなければならない基本事項として、「最大想定事故が発生するとした場合、一般公衆に対し、過度の放射線被ばくを及ぼさないこと」及び「火災・爆発による災害を防止するため、発生及び拡大の防止並びに閉じ込め機能の維持に対する考慮がなされていること」等を挙げている。事業者は、これらの要求を満足するために、安全上重要な施設に対しては、可能な限り不燃性材料または難燃性材料を使用する設計とともに着火源の排除や可燃性物質の持ち込み量の制限等によって十分な安全性を担保するものと予想される。しかしながら MOX 燃料加工施設では、非定常作業時も含め施設内で用いられる可燃性物質が皆無ではないことに加え、「ウラン加工施設と比べて核燃料物質へのアクセスは容易ではないが、発電用原子炉施設等と比べれば運転管理等により安全性を担保する割合が大きい」²⁾と考えられる MOX 燃料加工施設の特徴を鑑みると、万が一の火災事故を想定し安全性の確認を実施することが重要であると考えられる。

グローブボックスは、放射性物質等を隔離した状態のまま目視しながら取り扱えるように窓や手袋を取り付けた気密性の箱型の装置であり、主にプルトニウムを含む核燃料施設、 α 線放出核種を含むR I 施設等で使用される。「MOX 指針」において作業中における環境中の MOX の飛散又は漏えいを防止するために非密封の MOX を取り扱う設備・機器のグローブボックへの収納が求められているように、グローブボックスは MOX 等の放射性物質の閉じ込めに対して極めて重要な役割を果たしている。一般にグローブボックスは、ボックス本体、グローブ、給排気系（フィルタを含む）、各種警報装置、消火設備系等から構成される。給排気系の適切な運用によってグローブボックス内部をグローブボックスが置かれている周囲よりも負圧とともに、排気系に設置された HEPA フィルタによってグローブボックス内から排気系に移行した放射性物質を除去することで放射性物質のグローブボックス外への漏えいを防止している。このような動的閉じ込め機能に加えて、グローブボックス本体に用いられているパネルや各種パッキン等によってグローブボックスが有する静的な閉じ込め機能が担保されている。これらのグローブボックス構成部材の一部は、いくつかの種類の

樹脂製部材から構成されるため、仮にグローブボックス自身が燃焼するか、内外近傍で火災が発生するなどしてグローブボックスに対して熱的なストレスが加えられた場合には、この樹脂製部材の熱分解や燃焼によって、グローブボックスが有する静的閉じ込め機能が失われる可能性がある。実際の火災事故時には、自動的にあるいは作業員の手作業等によって消火等の対応が施されることとなるが、事故時にはグローブボックスの閉じ込め機能自体が経時変化することを考慮すると、消火等の実際の対応に要する時間的要因によって、その後の火災事象の進展とそれによる閉じ込め機能の劣化の進行の度合いが大きく影響を受けることとなる。このように考えると、火災事故時のグローブボックスの閉じ込め機能を総合的に評価するためには、上述の給排気系の適切な運用によって担保される動的閉じ込め機能の評価に加えて、静的閉じ込め機能を担っている各構成部材の熱的耐久性、すなわち、熱分解とそれに伴う質量減少の時間的進展を定量的に評価することが必要となり、そのためには各熱分解反応の反応速度データとそれを用いた反応の進展を評価するモデル及び手法の構築が必要となる。また、このように閉じ込め機能劣化の経時変化を火災事象規模及び事象の進展と関連付けた上で定量的に評価することができれば、例えば、施設の平常時における防火管理のみならず事故時対応（対応に要する時間等）のマニュアル化等のソフト面を含めた詳細安全設計に対しても有用な技術的知見を提供することができるものと考える。

このような観点を踏まえ、日本原子力研究開発機構（以下、原子力機構という。）では独立行政法人原子力安全基盤機構（以下、JNES という。）からの受託研究として、火災事故時のグローブボックスが有する閉じ込め機能を定量的に評価する上で必要な技術的情報を取得・整理することを目的とした「MOX 燃料加工施設火災時ソースターム試験」を平成 17 年度から開始している。本試験は、温度上昇に伴うグローブボックス構成部材等の可燃性物質の吸発熱/熱分解開始温度、吸発熱量等の吸発熱特性基礎データを実験的に取得する「熱特性基礎試験」と、これら可燃性物質を実際に燃焼させ、燃焼に伴う放射性物質や煤煙の放出率やエネルギー放出速度等のソースタームデータを換気流量や燃焼形状等をパラメータとして取得する「燃焼基礎試験」から構成される。さらにこれら試験から得られた知見に基づき事故事象の時間的進展を評価しうる解析モデルの構築を目指している。本報は、平成 17 年度の上記受託研究の成果として「熱特性基礎試験」で得られたグローブボックス構成部材の吸発熱特性基礎データの一部をまとめたものであり、さらに、これら知見を組み合わせることでグローブボックス火災時の静的閉じ込め機能劣化の経時変化を評価するための解析モデルの検討を行ったものである。

2. 試験

2.1 評価対象物質

本報にて評価対象とする物質として、以下の7種類の物質を取り上げることとした。これらは、一般的なグローブボックスの構成部材として使用されているものである。

① アクリル³⁾⁴⁾⁵⁾

メタクリル酸メチルを主成分とするポリマーで、優れた透明性、耐候性、表面光沢などを生かして、電気、光学用部品等に広く用いられている。比重 1.19、屈折率 1.49 の透明な熱可塑性ポリマーであって、100°C以上に加熱することによって軟化し、200°C以上に過熱すると分解してメタクリル酸メチルモノマーを生成する。熱伝導率 0.17~0.25 W/(mK)、比熱 1.5 kJ/(kgK)、引火温度 280~300 °C、発火温度 450~462 °C、分解温度 170~300 °C、燃焼速度（水平に保持された表面に沿った火炎の伝播速度）1.5~1.4 cm/min と報告されている。グローブボックスのパネル材として使用されている。

② ポリカーボネート³⁾⁵⁾

炭酸エステル結合を有する重合体の総称であるが、市販されているポリカーボネートのほとんどは二価ヒドロキシ化合物として 2,2-ビス(4-ヒドロキシフェニル)プロパンを用いたポリマーである。ポリカーボネートの性質としては、比重 1.18~1.22、熱伝導率 0.19 W/(mK)、比熱 1.2 kJ/kgK、自己消炎性を有すると報告されている。アクリルと同様に、グローブボックスのパネル材として使用されている。

③ フェノール樹脂³⁾⁵⁾⁶⁾

フェノール類とアルデヒド類（ホルムアルデヒド）との付加・縮合反応の繰り返しから得られる樹脂状物質である。物理的性質としては、比重 1.45~1.90、比熱 1.59~1.76 kJ/kgK、熱伝導率 0.13~0.25 W/(mK)、燃焼熱 1.35×10^4 kJ/kg と報告されている。グローブボックスにおいては、グローブポートの本体やグローブポートの外側に設置される押え板に使用されている。

④ クロロプレンゴム⁶⁾⁷⁾⁸⁾

加工性、機械的強度、耐熱性、難燃性等の特徴を有しており、機械部品や一般工業部品等の幅広い用途に用いられているゴムである。物理的性質として、比重 1.15~1.25、燃焼熱 2.5×10^4 kJ/kg、比熱 2.2 kJ/kgK、熱伝導率 0.25W/(mK) と報告されている。いくつかの基本構造を有するが、トランス-1,4 構造の比率が大半（全重合温度において 85%以上）を示す。グローブボックスでは、パネルと缶本体部とのシール材やグローブあるいはグローブポートのポートパッキンの材質として使用される。

(5)ポリフェニレンエーテル³⁾⁽⁸⁾

ポリフェニレンエーテル(2,6-ジメチル-1,4-フェニレンエーテル)は、ガラス転移温度約210℃を有し耐熱性に優れた樹脂である。成型加工時の流動性向上のため、スチレン系樹脂を配合し変性ポリフェニレンエーテルが国内外で工業化されている。本報では、市販されている変性ポリフェニレンエーテルを測定対象物質の一つとした。代表的な変性ポリフェニレンエーテルの物性値としては、ガラス転移温度110～112℃、比重1.09、熱変形温度(18.6 kgf/cm^2)130℃等が報告されている。グローブボックスでは、グローブポートのインナーリングの材質として使用される。

(6)ウレタンゴム⁷⁾

ポリエステルまたはポリエーテルとジイソシアネートの反応によって得られ、補強剤なしで高強度のエラストマーになる。出発原料であるポリオール、ジイソシアナート及び架橋剤等の配合比を変えることで物性を比較的容易かつ広範囲に制御可能である。構造が複雑なため、構造と物性の関係もまた複雑になる。プラスチック、合成皮革、接着剤等、多方面に使用され、重要な高分子材料の一つとなっている。比重1.05～1.31、比熱1.9 kJ/kgK、熱伝導率0.12～0.18 W/mKと報告されている。グローブボックスにおいては、グローブとグローブポート本体を接続するためのOリングとして使用される。

(7)ポリアセタール⁵⁾

オキシメチレン構造を単位構造にもつポリマーである。ホルムアルデヒドの重合体であるが、ホルムアルデヒドのみが重合したホモポリマーと、～10モル%ほどオキシエチレン単位を含むコポリマーの双方の製品があり、両者ともポリアセタールと呼ばれる。高密度、高結晶性の点が前者の特徴であり、熱や化学薬品による分解に強い抵抗力を有することが後者の特徴である。ポリアセタールホモポリマーの物性値としては、比重1.41、密度1.42 g/cm³、融点181℃、熱伝導率0.23 W/mK、比熱1.47 kJ/kgKと報告されている。グローブボックスでは、グローブポートを外側から固定するための固定環として使用されている。

2.2 試験装置

これら物質の吸発熱/熱分解開始温度、吸発熱量等の吸発熱特性基礎データの取得及び吸発熱/熱分解反応速度データの導出には、示差熱・熱重量同時測定装置(島津製作所製 DTG-60H、以下DTGという。)を用いた。DTGは、「物質及び基準物質の温度を調節されたプログラムに従って変化させながら、その物質と基準物質の間の温度差を温度の関数として測定する技法」である示差熱分析(DTA)と「物質の温度を調節されたプログラムに従って変化させながら、その物質の質量を温度の関数として測定する技法」である熱重量測定(TG)を同時に実行する熱分析装置である⁹⁾。DTG

は、室温から 1,500 ℃までの広い温度範囲での吸発熱と質量減少を同時測定することができるため、比較的高温で熱分解する高分子化合物等の熱分解特性についても測定することが可能である。一方で上述のように、DTA は、あくまでも試料と基準物質の間の温度差を測定する原理であるため、DTA 曲線として得られた DTA ピークの面積を積分しても直ちにそのピークに対応する相転移や熱分解反応に伴う吸発熱量を求めることはできない。この点については、2.3.1(2)で言及する。

2.3 試験方法

2.3.1 装置の校正等

(1) DTG の温度校正

DTA を用いたプラスチックの転移温度測定方法及び転移熱測定方法が JIS によって規定されている¹⁰⁾¹¹⁾。試験に先立ち、本試験においても、この JIS の規定に従って温度校正を行った。

(2) DTG 結果に対する熱量補正係数の導出

2.2 で述べたように、DTA はあくまで試料と基準物質の温度差を測定することになるため、DTA 曲線として得られた DTA ピーク面積を積分しても、直接、そのピークに対応する相転移や熱分解反応に伴う吸発熱量を求めることはできない。DTA 曲線からこれら吸発熱量を評価するためには、(1)に述べた金属を含めたいいくつかの金属について DTA 測定を行い、それぞれの融解に係る DTA ピーク面積積算結果と融解熱の文献値を比較し、熱量評価のための補正係数を予め求めておく必要がある。ここでは、この補正係数を熱量補正係数 K と表し以下の式で定義することとした。

$$K = \frac{\text{融解熱 (文献値)}}{\text{融点における DTA ピーク積算面積 (測定結果)}} \quad (1)$$

この K を異なる融点を有する複数の金属について求め、温度を独立変数とした回帰曲線を得ることで、K の温度依存性を評価し、この K を DTA 曲線に適用することで、DTA ピーク積算面積から吸発熱量を算出することが可能となる。各金属について(1)式から求めた K を、各金属の融点に対してプロットした結果を Figure 1 に示す。本試験では、便宜上、温度と K の関係に二次の回帰曲線を仮定しフィッティングさせ回帰曲線を求めた。この回帰に係る相関係数は 0.997 であった。なお JIS の規定に基づき¹¹⁾、反応前後でベースラインから離れる点とベースラインに戻る点を直線で結ぶことで DTA 曲線のピーク面積を読み取り吸熱量を求めた。

2.3.2 試験前準備

(1) 試料の調整

本試験では、実際にグローブボックスに使用されている各構成部材を入手し試験に

用いた。これら部材の多くはグローブポートに装着されて使用されるため、直径 18 cm 程度のドーナツ状の形状をしている。グローブボックススパネル材であるポリカーボネートを含め、これらについては、事前に微小片に裁断したものをサンプルとして使用した。また同様にグローブボックススパネル材であるアクリルについては、微粒子状（直径 0.1mm 以下）の試料が入手可能であったためこれを用いた。このように調整した試料 6 mg 程度（ゴムについては発熱量が大きいため 1 mg 程度）を正確に秤量し、セルに装填した。セルとしては、測定温度領域により、アルミニウムセル（外形：φ5.8 mm×1.5 mm、容量：34 mm³、使用上限温度：600 °C）あるいはアルミナセル（外形：φ5.8 mm×2.5 mm、容量：50 mm³、使用上限温度：1,500 °C）のいずれかを使用した。参照側の基準物質としてアルミナを同様に正確に秤量し、試料を装填したセルと同じ種類のセルに装填し用いた。このように調整したセルには蓋等は装着せず、セル上部を開放したままとした。これら試料及び基準物質を装填したそれぞれのセルを DTG 装置の所定の位置にセットした。

(2) 加熱炉内空間の窒素置換

本報では、JIS に記載された方法¹⁰⁾¹¹⁾¹²⁾を適用することとし、窒素雰囲気下で熱特性基礎データの取得を実施した。そこで、試料及び基準物質を装填したそれぞれのセルを DTG にセットした後、窒素ガスを室温下にて 200 ml/min の流量で約 2 時間加熱炉内にパージし、加熱炉内の空間の窒素置換を行った。

2.3.3 測定

JIS では、プラスチックの転移温度あるいは転移熱を測定する場合には、DTA の昇温速度を 10 °C/min とするように規定している¹⁰⁾¹¹⁾¹²⁾。これを踏まえ、昇温速度の条件としては 10 °C/min を基軸の条件として考慮することとした。また、3.2 で述べるように、本報では各吸発熱反応に対する反応速度定数（活性化エネルギー及び頻度因子）を、昇温速度の変化に対する吸発熱ピーク位置の依存性から求めている。従って昇温速度に関しては、10 °C/min を基軸の条件としながら、いくつかの昇温速度のものでの測定を実施することとした。また、加熱炉内の雰囲気ガスである窒素ガスの流量は 50 ml/min とした。これは、JIS における規定（10~50 ml/min）に準拠した条件である¹⁰⁾¹¹⁾¹²⁾。この流量を変えることなく試験終了まで流入を続けた。

3. 結果及び考察

3.1 吸発熱特性の検討

3.1.1 アクリル

Figure 2 に DTG 測定結果を示す。質量減少（TG 曲線）については、測定初期の

試料量に対する質量百分率で表すことで規格化して示した。なお、後述する各評価対象物質においても、アクリルと同様に、質量減少については、測定初期の試料量に対する質量百分率で表すこととした。TG 曲線からは、アクリルは、温度の上昇とともに、150 °C付近から緩やかな質量減少を示し、さらに温度が上昇すると、230 °C付近から急激な質量減少を生じた。そして約 400 °C付近でほぼ全量が消滅した。上述のようにアクリルの分解温度は、170~300 °Cと報告されており、本試験で得られた傾向と大きな矛盾はない。本試験では、JIS に基づき、TG 曲線を、比較的大きな質量減少割合を示す温度領域として、約 150 °C~約 190 °C（領域1）、約 235 °C~290 °C（領域2）、330 °C~400 °C（領域3）の3つの温度領域に大別できるものとした¹²⁾。DTA 曲線に対してこれらの温度領域を適用すると、各温度領域においてそれぞれ吸熱ピークを見出すことができ、それぞれピークの吸熱量は、領域1に対して約-10 J/g、領域2に対して約-140 J/g そして領域3に対して約-640 J/g と算出された。これら各吸熱ピークは同時に質量減少を伴っていることから、熱分解反応に起因するものであると考えられる。なお、これらの吸熱量は、測定初期の試料の質量に対する値として表されている。これらの値は、初期の物質存在量を基準としてトータルの吸発熱特性を評価する場合には有用である。一方で 3.2 で後述するように、本報では、評価対象物質の温度上昇に伴う熱分解反応の経時変化を評価するためのモデルの考察を行っている。そこでは、上述のように DTG 測定結果から導出した各温度領域毎にそれぞれの領域に対応する熱分解反応が独立して進行するものと仮定して評価を実施することとしている。従って、この場合には、熱分解に伴う吸発熱量に関しても、上述の測定初期の試料量当たりの値ではなく、それぞれの温度領域毎の質量減少量あたりの値に換算して適用する必要がある。各領域における質量減少量を TG 曲線から読むと、測定初期試料量 6.10 mg に対して、それぞれ、領域1で約 0.51 mg（約 8.3%）、領域2で約 1.8 mg（約 30%）、そして領域3で約 2.8 mg（約 46%）であった。各温度領域に相当する吸熱ピークが示す吸熱量を、これらの各温度領域での正味の質量減少量当たりの値に換算すると、領域1では約-110 J/g、領域2では約-440 J/g、そして領域3では約-1,000 J/g と評価できる。吸熱量を質量減少量当たりの値に換算した場合は、測定初期質量当たりの値として示す場合と比べて、領域1で約 11 倍、領域2で約 3 倍、そして領域3で約 2 倍大きくなつた。

アクリルはグローブボックスのパネル材として用いられるため、グローブボックス全体に占める体積割合は他の構成部材よりもかなり大きく、その分グローブボックスの閉じ込め機能に対して重要な役割を担っている。このアクリルが、150 °C程度という比較的低い温度から急激な熱分解を生じるということは、仮にアクリル自身が火災によって燃焼するがなくとも、近傍で発生した火炎からの熱輻射等によって加熱された場合には、熱分解によって比較的容易にグローブボックスの静的閉じ込め機能の低下が引き起こされる可能性があることを示唆している。また、アクリルの急激な熱分解によって生じる可燃性の熱分解ガスが二次的な燃焼を引き起こす可能性もある。

したがって、実際にアクリルパネルを使用するグローブボックスにおいては、特に温度管理に十分配慮した基本的あるいは詳細安全設計を行うことが重要であると考えられる。

3.1.2 ポリカーボネート

Figure 3 に DTG 測定結果を示す。TG 曲線からは、約 450 ℃～約 530 ℃の温度領域での急激な質量減少（領域 1）と、約 530 ℃～約 1,200 ℃の温度領域での比較的緩やかな質量減少（領域 2）が観察され、約 1,200 ℃でほぼ全量のポリカーボネートが消滅した。このように温度上昇に伴う質量減少は大きく 2 つの領域に大別できるものとした。

DTA 曲線では、この TG 曲線から導かれた 2 つの温度領域とほぼ一致する温度領域において 2 つの吸熱ピークが観測された。それぞれの吸熱ピークの吸熱量は、それぞれ、約 -260 J/g と約 -35,000 J/g であった。この値はアクリルの項で述べたとおり、測定初期の試料質量を基準とした質量当たりの吸熱量である。このようにポリカーボネートの場合、約 530 ℃以上という比較的高温領域で極めて大きな吸熱反応を示すことが大きな特徴である。

各領域における質量減少量を TG 曲線から読むと、測定初期試料量 6.17 mg に対して、それぞれ、領域 1 で約 4.1 mg（約 66%）、領域 2 で約 2.0 mg（約 32%）であった。DTA 曲線から得られた各温度領域に相当する吸熱ピークが示す吸熱量を、これらの各温度領域での正味の質量減少量当たりの値に換算すると、それぞれ、領域 1 では約 -400 J/g、領域 2 では約 -110 kJ/g と評価できる。吸熱量を質量減少量当たりの値に換算した場合は、測定初期質量当たりの値として示す場合と比べて、領域 1 で約 1.5 倍、領域 2 で約 3 倍大きくなつた。

ポリカーボネートはアクリルと並んでグローブボックスのパネル構成材として使用されているプラスチックである。実際のグローブボックスパネルの選択に際しては、経済性や燃焼性の観点等の幅広い観点からアクリルとの比較検討がなされる場合がある。本報の結果からは、ポリカーボネートの吸熱を伴う熱分解の開始温度は、アクリルの約 150 ℃よりもかなり高い約 450 ℃と測定された。グローブボックスパネルへの実際の採用の際には、その他の特性を含め総合的な観点から検討する必要があるのは当然であるが、熱分解性の観点からのみ見た場合には、ポリカーボネートはアクリルよりも優れている。

3.1.3 フェノール樹脂

Figure 4 に DTG 測定結果を示す。フェノール樹脂の特徴の一つは、アクリルとポリカーボネートの場合は、温度上昇に伴う吸発熱の開始温度（質量減少の開始温度）が比較的明瞭であったのに対して、フェノール樹脂の場合は、その開始温度が不明確であり、室温からの温度上昇開始とともに既に若干の質量減少が認められることであ

る。それ以降、約 410 ℃～約 960 ℃の温度領域で比較的急な質量減少が認められ、さらにそれ以上の温度領域でも緩やかな質量減少が継続する。アクリルとポリカーボネートはそれぞれ約 400 ℃付近及び約 1,200 ℃付近ではほぼ完全に消滅したが、フェノール樹脂の場合は 1,000 ℃を超えた温度領域でも初期の試料量の約 60%程度が残存していたこともフェノール樹脂の特徴である。

DTA 曲線においても、TG 曲線において比較的急な質量減少を開始した温度である約 410 ℃付近から開始する大きな吸熱ピークが観察された。アクリルとポリカーボネートの場合は、DTA 曲線から観測された各吸発熱ピークは、それぞれ、TG 曲線から評価された質量減少に係る各温度領域と関連付けることができたが、フェノール樹脂の場合には、この約 410 ℃から開始する大きな吸熱ピークは、本試験での最高設定温度である約 1,500 ℃まで継続しており、DTA 曲線からは、上述の約 970 ℃付近での質量減少割合の変化に対応する熱分解反応の変化を観察することはできなかった。したがって、フェノール樹脂の場合には、アクリル及びポリカーボネートのように、DTA 曲線と TG 曲線を相互に関連付けることで熱分解反応を生じるいくつかの温度領域に区別することができなかった。この点を考慮して本試験では、約 410 ℃～約 1,500 ℃の温度範囲での吸熱反応を、約 1,070 ℃付近にピーク温度を有する一つの大きな吸熱ピークとして取り扱うこととした。このように考えるとこの大きな吸熱ピークに伴う吸熱量は約 -40 kJ/g と評価される。ただしこの値はアクリル及びポリカーボネートの項で述べたとおり、測定初期の試料質量を基準とした質量当たりの吸熱量である。

約 410 ℃から約 960 ℃の温度領域における質量減少量を TG 曲線から読むと約 2.2 mg（測定初期試料量 6.19 mg に対して）であった。上述のように、フェノール樹脂の場合には、吸熱ピークの温度領域と質量減少の温度領域を対応付けることができなかつたが、1,000 ℃を超えた温度領域では質量減少はほとんどなかったことから、約 410 ℃～約 1,500 ℃の温度範囲で観測された大きな吸熱ピークと約 410 ℃から約 960 ℃の温度領域において観測された質量減少量を関連付けることで、正味の質量減少量当たりの吸熱量を求めることとした。その結果、正味の質量減少量当たりの吸熱量は約 -110 kJ/g と計算された。

フェノール樹脂はグローブポート本体やグローブポートの押え板に使用されるため、熱分解に伴って質量減少が引き起こされた場合には、グローブポート全体の欠落など、閉じ込め機能に対して大きな影響を及ぼす可能性がある。フェノール樹脂は 1,000 ℃を超えても初期質量の約 60%が残存することがわかつたが、この残存している物質の物性値は、常温時のフェノール樹脂のものとはまったく異なっていることが予想されため、通常の温度領域においてフェノール樹脂に対して求められる閉じ込め性能をこの残存物質に期待することはできないと考える。

3.1.4 クロロプレンゴム

Figure 5 に DTG 測定結果を示す。TG 曲線においては、フェノール樹脂と同様にその質量減少の開始温度が不明確であり、室温からの温度上昇開始とともに既に若干の質量減少が認められる。それ以降、約 320 ℃付近～約 360 ℃付近の比較的狭い温度範囲で急激な質量減少を示し（領域1）、その後昇温と共に、約 420 ℃付近～約 480 ℃付近（領域2）、約 570 ℃付近～約 800 ℃付近（領域3）の3つの温度範囲で比較的減少割合が大きい質量減少が観察された。約 800 ℃での試料の残存割合（測定初期の試料質量に対する割合）は約 10% であり、それ以降の温度領域では、質量はほとんど変動しなかった。

DTA 曲線では、領域1に対応する温度範囲で約 270 J/g の発熱量を有する鋭敏な発熱ピークが観察された。領域1以降の温度領域では複雑な凹凸を示しながら推移する。そのため、クロロプレンゴムのような高温領域で複雑な吸発熱反応を示す物質については、吸発熱ピークの見極めが非常に難しい。本報では、DTA 曲線から吸発熱ピークを評価する場合、TG 曲線において比較的質量減少量が大きい温度領域に対応する吸発熱ピークを求め、吸発熱量等の評価を行うこととしている。この DTA 曲線に TG 曲線から得られた各温度領域を適用すると、領域2の及び領域3に対応する温度領域における吸発熱量はそれぞれ、約 -54 J/g 及び約 2.7 kJ/g と求めることができた。

各領域における質量減少量は、測定初期試料量 1.24 mg に対して、それぞれ、領域1で約 0.30 mg（約 24%）、領域2で約 0.13 mg（約 10%）、そして領域3で約 0.46 mg（約 37%）であった。DTA 曲線から得られた各温度領域に相当する吸熱ピークが示す吸熱量を、これらの各温度領域での正味の質量減少量当たりの値に換算すると、それぞれ、領域1では約 -1.1 kJ/g、領域2では約 -530 J/g、そして領域3では約 7.3 kJ/g となる。吸熱量を質量減少量当たりの値に換算した場合は、測定初期質量当たりの値として示す場合と比べて、領域1で約 4 倍、領域2で約 9 倍、そして領域3で約 3 倍程大きくなった。

クロロプレンゴムはグローブボックスのグローブ等に使用されている。本報での他の材質と比べると使用形態が薄く機械的強度も弱いが、その一方で、グローブボックスで使用されている面積も多い。したがって、グローブボックスの閉じ込め性能を評価する上で、一つのキーとなる物質であると考えられる。DTA 測定結果からはクロロプレンゴムは比較的低い温度である 300 ℃付近に鋭敏な発熱ピークを示すことが、また、TG 測定結果からはこの鋭敏な発熱ピークに伴う質量減少割合も大きいことがわかった。仮にグローブボックス内外近傍で火災が発生し、その火源からの輻射や熱伝導等によってグローブが加熱され、温度が約 300 ℃以上に達すると、クロロプレンゴムの熱分解による質量減少が急速に進むことが予想される。この場合、グローブの厚みが薄いために、この急速な熱分解の進行によって閉じ込め機能が急速に失われるとも考えられる。また、この熱分解反応は発熱反応であるため、この発熱が熱分解反応をより加速させるファクタとして作用する可能性もある。この点については、後述

する熱分解反応に対する反応速度データの取り扱いを含め、より定量的な取り扱いを行う必要があるものと考えられる。

3.1.5 ポリフェニレンエーテル

Figure 6 に DTG 測定結果を示す。アクリル及びポリカーボネートと同様に、TG 曲線から質量減少の開始温度を比較的明瞭に読み取ることができた。室温からの温度上昇に伴って、約 380 °C 付近から約 490 °C 付近の温度範囲（領域 1）で急激な質量減少が観測された。その後、約 490 °C 付近から約 930 °C 付近まで比較的緩やかな質量減少が続き（領域 2）、約 930 °C 付近でほぼ全量が消滅した。

DTA 曲線では、領域 1 に対応する温度領域に対して約 -680 J/g の吸熱量を示す吸熱ピークが、また、領域 2 に対応する温度領域に対して約 -9.9 kJ/g の吸熱量を示す吸熱ピークが、それぞれ観測された。これらの吸熱量は、測定初期の試料質量を基準とした質量当たりの値である。

各領域における質量減少量を TG 曲線から読むと、測定初期試料量 6.17 mg に対して、それぞれ、領域 1 で約 4.8 mg（約 77%）、領域 2 で約 0.95 mg（約 15%）であった。DTA 曲線から得られた各温度領域に相当する吸熱ピークが示す吸熱量を、これらの各温度領域での正味の質量減少量当たりの値に換算すると、それぞれ、領域 1 では約 -860 J/g 及び領域 2 では約 -64.2 kJ/g と評価できる。吸熱量を質量減少量当たりの値に換算した場合は、測定初期質量当たりの値として示す場合と比べて、領域 1 で約 1.3 倍及び領域 2 で約 6.5 倍程大きくなつた。

ポリフェニレンエーテルはグローブポートのインナーリングとして使用されており、グローブボックスの閉じ込め機能の維持に対して大きな役割を担っている。ポリフェニレンエーテルに特徴的な点は、300 °C 後半から徐々に吸熱を伴う熱分解が進行し、その後 400 °C 後半までの約 100 °C の温度範囲において、熱分解が急速に進行することが挙げられる。この温度領域での質量減少の割合は約 8 割に達する。一方で約 500 °C 以上の大きな吸熱ピークに対応する質量減少は、測定初期の質量の約 15%程度にすぎない。この点を考慮すると、ポリフェニレンエーテルの場合には、約 500 °C までの温度範囲において同材質が担っている閉じ込め効果のほとんどが失われることが予想される。

3.1.6 ウレタンゴム

Figure 7 に DTG 測定結果を示す。ポリフェニレンエーテルと同様に、TG 曲線から質量減少の開始温度を比較的明瞭に読み取ることができた。室温からの温度上昇に伴って、約 300 °C から約 400 °C の温度範囲で急激な質量減少が観測され、約 400 °C でほぼ全量（約 93%）が消滅した。ウレタンゴムの場合に特徴的なことは、同じゴムであるクロロブレンゴムでは、特に高温領域で非常に複雑な吸発熱を示すのに対して、比較的単純な一段の質量減少のみが生じていることがあげられる。DTA 曲線では、約

250 °Cから約400 °Cの温度範囲で、約-740 J/g の吸熱量を示す吸熱ピークが観測された。この吸熱量は測定初期の試料質量を基準とした質量当りの値である。ウレタンゴムの場合には、上述のように約400 °C付近でほぼ全量が消滅するため、これまで他の材質の項で述べてきた、正味の質量減少量当りの吸熱量への換算は必要ない。

実際のグローブボックスでは、グローブポートにおいてグローブを固定するためのOリングとして使用されており、グローブボックスの閉じ込め機能の維持に対して重要な役割を担っているものと考えられる。実際にグローブポートに用いられるウレタンゴム製のOリングは直径約18 cm程度のドーナツ状の形態であり、Oリング一個当たりの重量はわずか20 g程度である。したがって、何らかの熱源からの伝熱によって加熱され、その温度が300 °Cを超えた状態が継続すると仮定した場合には、比較的短時間に消滅する可能性がある。この点に関しては、後述する反応速度解析データの取り扱いと連動させて、定量的に評価する必要がある。

3.1.7 ポリアセタール

Figure 8にDTG測定結果を示す。ウレタンゴムと同様に、TG曲線から質量減少の開始温度を比較的明瞭に読み取ることができた。温度上昇に伴って、約320 °Cから約410 °Cの温度範囲で急激な質量減少が観測され、約410 °Cでほぼ全量が消滅した。

DTA曲線では、約130 °C付近と約290 °C付近から開始する2つの明瞭な吸熱ピークが観察された。それぞれの吸熱ピークでの吸熱量は約-120 J/gと約-1.5 kJ/gであった。このうち、約130 °C付近からの吸熱ピークについては、TG曲線からわかるように質量の減少を伴っていない。したがってこの吸熱ピークは熱分解に起因するものではなく、相転移によるものであると考えられる。一方約290 °C付近から開始する比較的大きな吸熱ピークは、質量の減少を伴っており、このことから熱分解によるものであると考えることができる。本報では、この約130 °C付近の相転移に基づく吸熱反応についても便宜上領域1と記すこととし、急激な熱分解反応が進行する約320 °Cから約410 °Cの温度範囲を領域2と表現することとした。

質量減少ウレタンゴムの場合と同様に、上述のように約400 °C付近でほぼ全量が消滅するため、正味の質量減少量当りの吸熱量への換算は必要ない。

ポリアセタールは、本報で測定対象とした物質のうちで、最も低い温度で吸熱反応を観測した。上述の考察のとおり、この吸熱反応は熱分解反応に起因するものではなく、相転移によるものと考えられるが、いずれにしろ、ポリアセタールについては、最も低い温度から相転移による軟化等が生じることが予想される。ただし、実際のグローブボックスでは、ポリアセタールは、グローブポートを外側から固定するための固定環として使用されていることから、ポリアセタールが熱分解等によって欠損してもグローブボックスの閉じ込め性能に対して直ちに大きな影響を及ぼすものではないと考えられる。また、温度上昇とともに生じる反応は吸熱反応のみであり、自己の発熱によって周囲の物質に対する加熱ソースとなることも考えられない。

3.2 热分解反応速度データの評価

3.2.1 热分解反応速度データの導出

热分解反応速度データの導出には Kissinger の方法を用いた⁹⁾¹³⁾。これは DTA のような微分型の热分析曲線から活性化エネルギー E_a (J/mol) と頻度因子 A (1/s) を求めるための方法である。

反応が見かけ上 n 次で進行すると仮定し、昇温速度を β (°C/s)、反応率を α (-) とするとき、反応速度は以下の式で表すことができる。

$$\frac{d\alpha}{dt} = \beta \frac{d\alpha}{dT} = A \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) (1-\alpha)^n \quad (2)$$

ここで t (s) は時間、 T (K) は温度、 R (J/(K·mol)) は気体定数である。一定割合のもとで温度が上昇する場合 (すなわち $\beta=\text{const}$) は、反応開始とともに反応速度は次第に増加しある時点まで最大に達した後、反応物質が消費し尽くされると反応速度はゼロに戻る。
(2)式を t で微分すると、

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{d\alpha}{dt}\right) = \frac{d\alpha}{dt} \left[\frac{E_a \beta}{RT^2} - An(1-\alpha)^{n-1} \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right) \right] \quad (3)$$

となる。反応速度は $d(d\alpha/dt)/dt=0$ のときに最大となることから(3)式をゼロとおくことで以下の式が得られる。

$$\frac{E_a \beta}{RT_m^2} = An(1-\alpha)_m^{n-1} \exp\left(-\frac{E_a}{RT_m}\right) \quad (4)$$

ここで T_m (K) は反応速度が最大となる温度、 $(1-\alpha)_m$ は最大反応速度を示す瞬間に分解していない物質の割合である。ここでは各ピークに対応する各吸発熱反応の量論的関係は不明であるが、各反応の反応次数を便宜的に一次と仮定した。この仮定により、(4)式は以下のように簡略化できる。

$$\frac{E_a \beta}{RT_m^2} = A \exp\left(-\frac{E_a}{RT_m}\right) \quad (5)$$

この式は、 $1/T_m$ に対して $\ln(\beta/T_m^2)$ をプロットすると傾きが $-E_a/R$ の直線関係が得られ、傾きと切片から E_a と A を求めることができることを意味している。測定対象とした各部材について昇温速度を変えた DTA 測定結果をそれぞれ Figure 9~Figure 15 に示す。DTA 測定においては昇温速度が大きいほど検出される熱分解反応が高温側にシフトすることが報告されている。本試験においても、いずれの場合も昇温速度が大きくなるにつれて吸発熱ピークは高温側にシフトしている。本試験では β を 5, 10, 20 °C/min (すなわち 0.083, 0.17, 0.33 K/s) とした DTA 測定を実施し、測定結果として得られた各ピークの T_m (ピークの頂点と仮定) を求め、上述のプロットを行つ

た。各部材に対するプロットを Figure 16~Figure 22 に示す。いずれの場合も線形の関係を見出すことができた。これらの関係から求めた E_a と A の評価結果を Table 1 に示す。なお、3.1.7 で述べたように、ポリアセタールが示す領域 1 における吸熱反応は相転移に基づくものであり、熱分解反応に因るものではないが、本報では、この領域における反応についても、便宜上、Kissinger の方法を適用しうるものと仮定し、 E_a と A を導出することとした。これは、ポリアセタールについて、外部からの輻射による温度上昇とそれに基づく熱分解反応の時間的進展を評価する場合には、この相転移による吸熱挙動についても時間の関数として評価する必要があるためである。

3.2.2 吸発熱反応速度データ導出結果を用いた吸発熱反応のシミュレーション

上述のように本報では、DTA 測定結果を用いることで、各評価対象物質の各熱分解反応に対する E_a 及び A を導出した。これらを火災時の閉じ込め機能劣化の経時変化の評価に適用するためには、それに先立って、これらがどの程度、各評価対象物質の温度上昇に伴う熱分解挙動をシミュレートできるのかを確かめておくことが必要である。そこで、3.1 で述べた各部材の吸発熱量と Table 1 に示した反応速度データを用いて、各部材の温度を強制的に一定の割合で上昇させたと仮定して吸発熱量と質量減少量の変化を計算によって求め、その計算結果を DTG による測定結果と比較した。

3.1 で定義した各部材が示す吸発熱反応領域毎に、以下の式を連立させた。

$$\frac{\Delta W_S}{\Delta t} = A_i \exp\left(-\frac{E_{a,i}}{RT_S}\right) W_S \quad (6)$$

$$Q_{R,i} = -\Delta H_i \frac{\Delta W_S}{\Delta t} \quad (7)$$

ここで、 W_S (kg) 及び T_S (°C) は各部材の質量及び温度、 Δt (s) は時間変化量、 ΔW_S (kg) は Δt 間の質量減少量、 Q_R (W) は反応による吸発熱速度、 ΔH (J/kg) は吸発熱量である。添え字 i は各温度領域での値であることを表している。また、各温度領域における質量減少量及び吸発熱量は、3.1 に述べた各部材の各温度領域における正味の質量減少量及び正味の質量減少量当たりの吸発熱量をそれぞれ用いた。各部材についての計算結果を DTG 測定結果とともに Figure 23~Figure 29 に示す。各図中に比較として示した DTG 測定結果は昇温速度 10 °C/min に対する測定結果である。いずれの場合も、定義した各温度領域での吸発熱反応の開始温度及び吸発熱反応ピーク温度について実測の DTG 測定結果をよく模擬している。また、質量減少の温度依存性についても、フェノール樹脂を除いて、計算値は測定値を比較的よく模擬している。フェノール樹脂については、3.1.3 で述べたように熱分解反応に係る吸熱ピークを示す温度範囲と質量減少が認められる温度範囲との間で相関関係を見出すことができなかった。ここでは吸発熱反応のピーク温度から導出した反応速度定数を用いて質量減少を計算しているため、TG 曲線とのずれが生じたものである。また、例えば Figure 23 に示したア

クリルの質量減少の評価において、TG 測定では 3.1.1 で述べたように約 400 °C 付近でほぼ全量が消滅する結果となっているのに対して、計算では、この温度領域でも約 15%程度の質量が残存している結果となっている。本報では、TG 曲線から比較的質量減少割合が大きい温度範囲を各吸発熱反応に係る温度領域として読み取り、それとほぼ同じ温度領域で観察された吸発熱反応（DTA 測定結果）を相関付けることで、各吸発熱反応に係る吸発熱量等を算出している。このような仮定のもと、アクリルについては、3.1.1 で述べたように主要な吸発熱反応温度領域として 3 つ温度領域を同定しているが、実際にはこの主要な質量減少に係る温度領域以外の温度領域でも、アクリルの質量減少は生じている。3.1.1 で同定した 3 つの主要な温度領域に対する質量減少割合の合計は約 85%程度である。上述のように、ここでの評価では、各温度領域における質量減少量については各温度領域における正味の質量減少量を用いており、この 3 つの主要な温度領域以外での質量減少は無視している。このことから、約 400°C 以降におけるアクリルの残存量に関しての計算結果と TG 測定結果との差異が生じているものである。

各吸発熱ピークに対応する吸発熱速度については、クロロプレンゴムとポリフェニレンエーテル以外の部材について、計算値は測定値をよく模擬している。2.2 で述べたように、DTA は「物質及び基準物質の温度を調節されたプログラムに従って変化させながら、その物質と基準物質の間の温度差を温度の関数として測定する技法」であるため⁹⁾、温度上昇によって物質の組成や質量が変化し物質全体の比熱容量が変動することにより、DTA 曲線にはベースラインの変動が生じる場合が多い。ここでのシミュレーションでは、各物質について領域毎に導出された吸発熱量や質量減少量あるいは吸発熱反応速度データを用いる、いわば理想的な条件の下で温度上昇に伴う質量減少と吸発熱速度の変化を計算しているため、このようなベースラインの変動については計算には考慮されていない。例えば、Figure 23 に示したアクリルの吸発熱速度について計算値と測定値を見ると、一見、両者の間には大きな相違があるように見られるかもしれないが、DTA 曲線から吸発熱量を読み取る場合には、Figure 2 に示したように反応前後でベースラインから離れる点とベースラインに戻る点を直線で結ぶことによって吸熱量を求める¹¹⁾ことを考慮すると、各領域に対応する吸熱量（ピークの面積に対応）の計算値と実測値は良好に一致しているものと考えることができる。

ポリフェニレンエーテルは昇温速度 10 °C/min における測定結果よりも吸発熱量が小さく評価された。DTG では昇温速度を大きくする吸発熱反応が高温側にシフトするとともに吸発熱量が大きくなる傾向が見出せる。ポリフェニレンエーテルの場合、計算結果は、Figure 27 と共に示した昇温速度 10 °C/min の場合よりも、Figure 13 に示した昇温速度 5 °C/min の測定結果に近い。クロロプレンゴムの場合も第 1 ピーク（発熱ピーク）が 10 °C/min の場合よりもかなり小さく計算されており、むしろ、Figure 12 に示したように昇温速度 5 °C/min の場合に近い。

このように、各評価対象物質の熱分解反応に係る E_a 及び A を適用することで、ク

ロロプレンゴムとポリフェニレンエーテル以外の部材については、温度上昇に伴う熱分解反応に起因する吸発熱挙動及び質量減少挙動を良好に模擬しうることがわかった。3.1.4で述べたように、クロロプレンゴムについては複雑な吸発熱ピークを示し、吸発熱反応を同定するのが困難であった。追加的な DTG 測定を実施するなどして、より定量的な反応速度データの導出を行う必要があるものと考えている。

3.3 火災事故時閉じ込め機能評価モデルの検討

3.3.1 評価モデルの概要

3.2 で述べたように、本報で導出した吸発熱反応速度データを用いでることで、温度上昇に伴うグローブボックス構成部材の熱分解反応の進展を模擬しうることが確認できた。実際の火災事故時には、速やかな消火等の対応が施されることとなるが、消火等の実際の対応に要する時間的要因によって、その後の火災事象の進展とそれによる閉じ込め機能の劣化の進行の度合いが大きく影響を受けることとなる。火災事故時の静的閉じ込め機能劣化の経時変化を定量的に評価することができれば、これらの事故対応に必要な時間的余裕の評価にも適用することができ、その結果、事故シナリオと関係付けた具体的な事故対応のマニュアル化等のソフト面を含めた施設の詳細安全設計にも資することができるものと考えられる。そこで、火災事故時のグローブボックス構成部材の熱分解の進行によるグローブボックス自体の静的閉じ込め機能劣化の経時変化を定量的に評価しうるモデルを検討するため、グローブボックスのパネル材として使用されるアクリルとポリカーボネートを取り上げ、本報で導出したこれら物質に関する吸発熱特性データを用いでることで、火災時のこれら物質の熱分解反応の進展の評価を試みた。仮定した体系の概要を Figure 30 に示す。アクリル等（以下、対象物質という。）の近傍で火災が発生し、その火炎からの輻射熱がこれら対象物質に与えられ、それによって対象物質の温度上昇と熱分解反応が引き起こされるものと考えた。対象物質の大きさは、 $10\text{ cm} \times 10\text{ cm} \times 2\text{ cm}$ と仮定した。JNES からの受託研究「MOX 燃料加工施設火災時ソースターム試験」では、ここまで述べてきた「熱特性基礎試験」と並行して、MOX 燃料加工施設で使用が想定される可燃性物質を実際に燃焼させ、燃焼に伴う放射性物質や煤煙の放出率やエネルギー放出速度等のソースタームデータを換気流量や燃焼形状等をパラメータとして取得する「燃焼基礎試験」も実施している。Figure 31 に「燃焼基礎試験」にて測定された火炎からの輻射熱流束の経時変化を示す。これは、燃焼物質として $100\text{ mm} \phi \times 15\text{ mm}$ の円柱状のアクリルを用いた場合の測定結果の一例である。ここでは、火炎から対象物質に与えられる輻射熱量の経時変化として Figure 31 に示した輻射熱流束計測結果を用いることとした。その上で、対象物質の熱分解反応の進行に対する火炎からの輻射熱流束の大きさの影響を検討するため、Figure 31 に示した結果を基準値とし、対象物質に与えられる輻射熱流束の大きさ（Figure 30 における R_h に対応）について、基準値、基準値 × 2.5、基準値 × 5 の 3 ケースを想定することとした。その他の計算仮定を以下に示す。

- ①対象物質へ輻射熱量は、火炎からの輻射熱流束に対象物質の輻射伝熱面積を乗ずることで計算される。
- ②対象物質の質量及び比熱を用いて、火炎からの輻射及び吸発熱反応に伴う温度変化を計算する。
- ③対象物質からの放熱は無視し、与えられた輻射熱はすべて温度上昇に寄与するものと仮定する。
- ④対象物質の温度は均一に上昇するものと仮定する。
- ⑤各物質が示す吸発熱反応領域毎に、以下の式を連立させ、当該温度領域における質量減少と吸発熱量を計算する。

$$\frac{\Delta W_S}{\Delta t} = A_i \exp\left(-\frac{E_{a,i}}{RT_S}\right) W_S \quad (8)$$

$$Q_{R,i} = -\Delta H_i \frac{\Delta W_S}{\Delta t} \quad (9)$$

$$T_S = T_S + \frac{(R_h \times A_h + \sum Q_{R,i}) \times \Delta t}{W_S \times C_p} \quad (10)$$

$$W_S = W_S - \Delta W_S \quad (11)$$

ここで、 R_h (W/m²)は火炎から対象物質に与えられる輻射熱流束、 A_h (m²)は対象物質の輻射伝熱面積、 C_p (kJ/kgK)は対象物質の比熱である。なお、対象物質の C_p については、2.1 で記載した値を適用した。

3.3.2 評価結果

(1) アクリルの熱分解の進展評価結果

Figure 32 にアクリルの温度上昇と熱分解による質量減少の経時変化に関する評価結果を示す。燃焼初期の時間領域において、火炎からの輻射熱流束が大きいほど対象物質の温度がより急激に上昇している。本報では 3.1.1 で述べたように、TG 測定結果からアクリルの吸発熱反応温度領域は、約 150 °C～約 190 °C (領域 1)、約 235 °C～290 °C (領域 2)、330 °C～400 °C (領域 3) の 3 つの温度領域に大別できるものとした。「輻射熱流束×1」の場合、アクリルの温度は燃焼開始後約 30 分で約 150°C に到達し、領域 1 に対応した熱分解反応による若干の質量の減少が生じている。しかしながら、Figure 31 に示したように火炎からの輻射熱流束自体が約 30 分以降で急速に低下することから、この時刻以降のアクリルの温度上昇が抑えられた結果、領域 2 に対応する熱分解反応を引き起こすまでには至らず、鎮火時において約 90% の質量が残存するという結果となっている。

「輻射熱流束×2.5」の場合では、アクリルの温度は 15 分弱で 150°C を超え、さらに約 20 分で 235°C を超える。質量減少の計算結果でも、各同時刻での熱分解による

質量減少の開始が計算されていることがわかる。約 20 分を超えアクリルの温度が領域 2 に対応する温度範囲に入ると、温度上昇の割合の若干の低下が見られるようになる。火炎からの輻射熱量と吸発熱反応に伴う吸発熱量の差の経時変化を Figure 33 に示す。「輻射熱流束×2.5」の場合では、約 20 分以降で領域 2 に対応する温度範囲に入ることになるため、吸熱量の増大に伴ってこの時刻以降で両者の差は減少していき、その後の火炎からの輻射熱流束の急速に低下もあいまって約 30 分以降の時間領域では吸熱量が火炎からの輻射熱量を上回るようになる。約 20 分以降のアクリルの温度上昇割合の若干の低下は、このような輻射熱量と吸熱量の逆転が計算結果上に反映されているものである。このように約 30 分を超えると、火炎からの輻射熱流束が急速に低下するが、引き続きアクリルの温度は領域 2 に対応する温度範囲にあるため、領域 2 に対応する熱分解反応が進行する結果、アクリルの温度低下と緩やかな質量減少が継続する。鎮火時においては、約 50% の質量が残存しているという結果となった。

「輻射熱流束×5」の場合では、約 6 分で 150°C を、また、10 分強で 235°C を超え、さらに、20 分付近で 330°C を超えた。上述の 2 つの場合と同様に、各領域に対応する熱分解による質量減少の開始が計算できている。温度が領域 3 に対応する温度範囲に入ると、熱分解反応の進行に伴う吸熱量の増大によって温度の上昇割合の低下が顕著となるが、この時刻においては火炎からの輻射熱流束も最大となるため、吸熱による温度低下までは引き起こされることなく、熱分解反応の進行による急速な質量減少のみが継続する。そして、約 30 分でアクリルのほぼ全量が消滅するという結果となった。Figure 33 では、約 30 分の時点でも約 15% 程度の質量が残存している結果となっているが、この点については、3.2.2 において考察している。約 30 分付近でアクリルの温度が急上昇しているが、これは、この時刻以降、アクリルの存在量が急速にゼロに漸近するためである（(10)式参照）。Figure 33 においても、上述の各領域に対応する温度範囲に到達する各時刻における両者の差の減少が計算できていることがわかる。Figure 33 でも約 30 分付近からの両者の差の急上昇が示されているが、この点についても Figure 31 と同様に、この時刻以降、アクリルの存在量が急速にゼロに漸近するためである。

(2) ポリカーボネートの熱分解の進展評価結果

Figure 34 にポリカーボネートの温度上昇と熱分解による質量減少の経時変化に関する評価結果を示す。アクリルと同様に、燃焼初期の時間領域において、火炎からの輻射熱流束が大きいほど対象物質の温度がより急激に上昇している。本報では TG 測定結果から、3.1.2 で述べたように、ポリカーボネートの吸発熱反応温度領域は、約 450 °C～約 530 °C（領域 1）と、約 530 °C～約 1,200 °C（領域 2）の 2 つの温度領域に大別できるものとした。「輻射熱流束×1」の場合では、ポリカーボネートは 200°C 強までしか温度が上昇せず、その結果熱分解も生じていない。

「輻射熱流束×2.5」の場合では、ポリカーボネートの温度が約 400°C を超える 20

分強付近から熱分解による緩やかな質量減少が生じるが、その後の吸熱反応の進行による温度の低下によって熱分解反応の進行が抑制され、鎮火時においては約 90%の質量が残存しているという結果となった。火炎からの輻射熱量と吸発熱反応に伴う吸発熱量の差の経時変化を Figure 35 に示す。「輻射熱流束×1」の場合では、全時間範囲で主な吸熱反応が生じていないため、両者の差としては、Figure 31 に示した火炎からの輻射熱流束による熱量がそのままプロットされている。それに対して、「輻射熱流束×2.5」の場合では、Figure 34 で若干の質量減少が開始する 20 分強以降で、両者の差が急速に減少していき、30 分付近で両者の大小が逆転する。Figure 34 をみると、この逆転する時刻を境にポリカーボネートの温度の低下が引き起こされており、矛盾のない評価結果となっていることがわかる。Figure 34 においては、ポリカーボネートの質量減少は 400°C 付近から計算されており、3.1.2 で定義した吸発熱開始温度と若干のずれがある。3.1.2 では Figure 3 に示した TG 曲線から JIS に記載された方法¹²⁾に従って「低温側ベースランを高温側に延長した直線とピークの低温側の曲線にこう配が最大となる点で引いた接線の交点の温度」を吸発熱開始温度として定義し読み取っている。しかしながら Figure 3 に示されているように、実際には 400°C 弱から若干の熱分解による質量減少と吸熱が生じており、特にポリカーボネートの場合、領域 1 に対応する吸熱量（約 -400 J/g（ちなみにアクリルの領域 1 に対応する吸熱量は約 -110 J/g））と質量減少割合（約 66%）が比較的大きいため、この 400°C 付近から開始する若干の熱分解反応の効果が Figure 34 における温度上昇及び質量減少の計算結果に反映されたものと考えている。

「輻射熱流束×5」の場合でも「輻射熱流束×2.5」と同様に、ポリカーボネートの温度が約 400 °C を超える 10 分強から若干の熱分解に伴う質量減少の開始が認められる。Figure 31 に示したように火炎からの輻射熱流束は 20 分付近で最大値となるため、この 10 分強から 20 分までの間の時間範囲でも火炎からの輻射熱流束が増大するが、上述のようにポリカーボネートの領域 1 に対応する吸熱量も比較的大きいため、ポリカーボネートの温度上昇は抑制された状態で質量の減少が進行している。この結果、鎮火時においては 60% 弱の質量が残存しているという結果となった。ポリカーボネートの領域 2 に対応する吸熱量は領域 1 に対応する値と比べても非常に大きいため（約 -110 kJ/g）、仮に外部からさらに大きな輻射熱流束がより長時間にわたってポリカーボネートに加えられた場合でも、ポリカーボネート自身の吸熱によって温度上昇が抑制されながら急速な質量減少が引き起こされるため、実際には領域 2 の温度範囲に到達する可能性は低いものと考えられる結果となった。

4. 結 言

MOX 燃料加工施設で想定される火災事故時の施設が有する閉じ込め安全性能を定

量的に評価するための基礎データの取得と火災時のグローブボックスの閉じ込め機能の経時的变化を定量的に解析し得る評価モデルの検討を開始した。

グローブポート構成部材を取り上げ、DTG を用いて、各物質の吸発熱開始温度や吸発熱量等を評価した。評価結果をもとに各物質の吸発熱反応が生じる温度範囲を定義するとともに各温度領域に対応する吸発熱反応に係る反応速度データを導出した。また、導出した反応速度定数を用いて、温度上昇に伴う質量減少及び吸発熱反応のシミュレーションを実施した。その結果、定義した各温度領域での質量減少と吸発熱反応の開始温度及び吸発熱反応ピーク温度について実測の DTG 測定結果を良好に模擬することができることを確認した。さらに、導出した吸発熱特性データを適用することで、火災規模（火炎からの輻射熱流束の大きさを変えることで模擬）をパラメータとした火災時のこれら物質の熱分解反応の進展と対象物質が担う静的閉じ込め機能劣化の経時変化の評価を試みた。その結果、火災の進展に伴う対象物質の温度上昇や質量減少の経時変化を矛盾なく評価することができた。本報でのグローブボックス構造材の熱分解による質量減少の評価とこれらに対する機械的強度の評価を組み合わせることで、グローブボックスの静的閉じ込め機能の定量的な評価に結びつける必要があるものと考える。本報では、対象物質からの放熱は無視しているため、評価結果は保守側の結果となっているものと考えられる。一方で、対象物質の温度は均一に上昇するものと仮定しているが、実際には火炎に面している面等で局所的な温度上昇が生じ、その部分から急速な熱分解が進行することが予想されるため、この仮定は、閉じ込め機能の劣化の進行に対して非保守側の結果を与えるものと考えられる。さらに、実際のグローブボックスはいくつかの部材が複合的に使用されているため、これら複数の材質間の相互作用についても考慮すべき項目である。また、本報では対象物質に与えられる輻射熱流束については実験値を適用したが、様々な規模の火災事故への適用性を考慮した場合には、火災事故時の熱流動を詳細に解析し得る計算コードによる事故シナリオに応じた対象物質の温度上昇挙動評価と結びつけた閉じ込め機能評価の実施が重要となる。ここでの評価モデルの定量性と汎用性を高めるためには、これらの詳細な評価機能を付加していくことが必要である。このように閉じ込め機能劣化の経時変化を火災事象規模及び事象の進展と関連付けた上で定量的に評価することができれば、例えば、施設の平常時における防火管理のみならず事故時対応（対応に要する時間等）のマニュアル化等のソフト面を含めた詳細安全設計に対しても有用な技術的知見を提供することができるものと考える。

今後は、これらの課題に対する検討に加えて、空気雰囲気中の可燃性物質の熱分解特性データ（含着火の有無や着火温度）を取得する計画である。さらに「燃焼基礎試験」の実施により、可燃性物質燃焼時のエネルギー放出特性を燃焼面積や換気流量の相違等の燃焼条件をパラメータとして観察し、様々な火災事象の特性と関連付けた閉じ込め機能評価の実施に結び付けていくことを予定している。また、MOX 燃料加工施設においては比放射能が高い MOX を使用するため、長い期間連続的に使用される

設備に関しては、閉じ込め性能に対する放射線劣化の影響を定量的に見積もることも重要となるものと考えられる。そこで、原子力機構が所有する Co-60 ガンマ線照射装置を用いて放射線劣化させた上記部材の熱分解特性を観察し、熱分解特性に対する放射線劣化の影響を調べる試験を開始する予定である。この知見については、閉じ込め機能に対する経年劣化の影響評価に対する定量的な技術的知見を提供する観点からも整理していくことを考えている。

これらの知見を総合的に結びつけることで、定量性及び汎用性の高い、閉じ込め機能評価モデルの構築を図っていく。

謝　　辞

本研究の実施に際し、ご協力を頂いた千代田メインテナンス株式会社 田山 拓治氏と貴重なコメントを頂いた JNES 土野 進氏及び梅津 博幸氏に心から感謝いたします。

参考文献

- 1) 原子力安全委員会、“ウラン・プルトニウム混合酸化物燃料加工施設安全審査指針”、(2002.4).
- 2) 原子力安全委員会、“「ウラン・プルトニウム混合酸化物燃料加工施設に対する仮想的な臨界事故の評価について」について”、(2002.4).
- 3) 社団法人日本分析学会 高分子分析研究懇談会編、“高分子分析ハンドブック”、株式会社紀伊国屋書店、(1995.1).
- 4) “高分子材料の燃焼性”、工業材料、Vol.51、No.4 (2003.4).
- 5) 高分子学会編、“高分子材料便覧”、株式会社コロナ社、(1973.2).
- 6) “非金属材料データブック”、日本規格協会、(1983).
- 7) 奥山通夫、他、“ゴムの辞典”、株式会社朝倉書店、(2000.11).
- 8) 社団法人日本化学会編、“化学便覧 応用化学編”、丸善株式会社、(1995).
- 9) 斎藤安俊、“物質科学のための熱分析の基礎”、共立出版株式会社、(1990.12).
- 10) 日本規格協会、“プラスチックの転移温度測定方法”、JIS K 7121 (1987).
- 11) 日本規格協会、“プラスチックの転移熱測定方法”、JIS K 7122 (1987).
- 12) 日本規格協会、“プラスチックの熱重量測定方法”、JIS K 7120 (1987).
- 13) H.E.Kissinger, "Reaction Kinetics in Differential Thermal Analysis", Anal. Chem., 29[11], 1702 (1957).

Table 1 反応速度定数評価結果

部材	領域	活性化エネルギー (J/mol)	頻度因子 (1/s)
アクリル	1	1.42×10^5	2.16×10^{14}
	2	1.10×10^5	3.08×10^8
	3	1.84×10^5	9.49×10^{12}
ポリカーボネート	1	1.42×10^5	2.16×10^{14}
	2	1.10×10^5	3.08×10^8
フェノール樹脂	—	8.94×10^4	3.81×10^0
クロロブレンゴム	1	1.12×10^5	3.53×10^7
	2	1.14×10^5	7.24×10^5
	3	1.42×10^5	1.10×10^6
ポリフェニレンエーテル	1	1.03×10^5	1.94×10^5
	2	2.93×10^4	1.47×10^{-2}
ウレタンゴム	—	3.49×10^4	1.40×10^3
ポリアセタール	1	3.15×10^5	7.42×10^{35}
	2	1.16×10^5	1.53×10^7

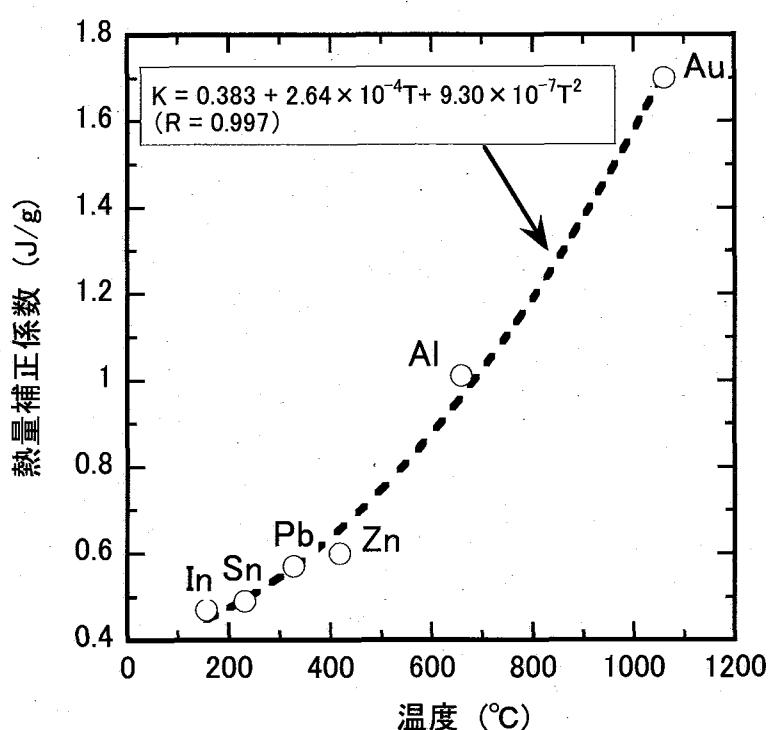


Figure 1 热量補正係数の温度依存性評価結果

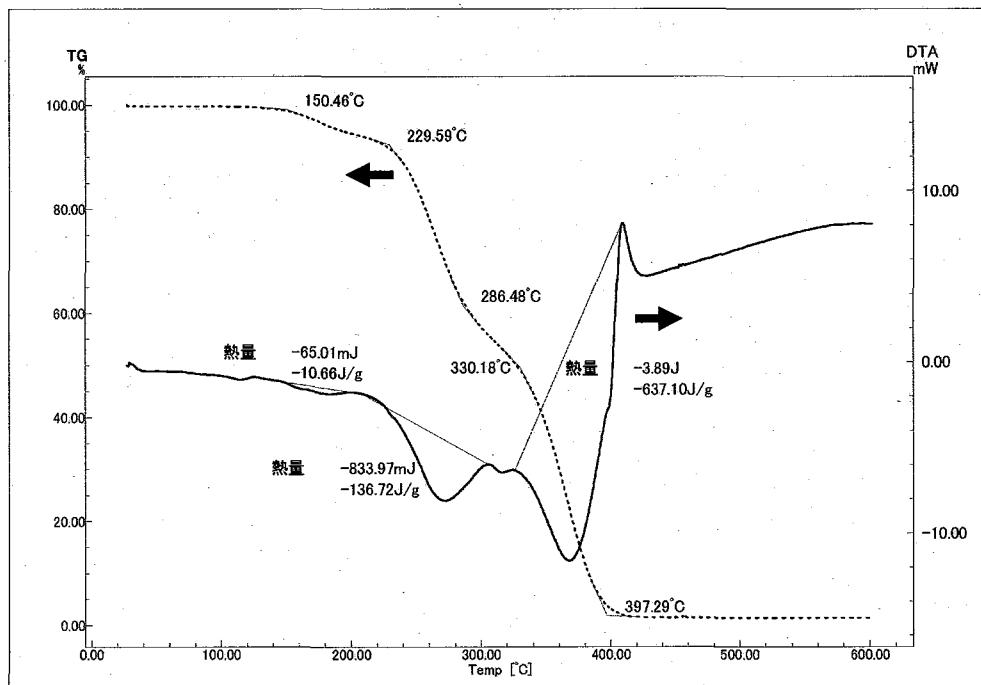


Figure 2 アクリルの DTG 測定結果（昇温速度：10 °C/min）
左Y軸：TG 測定結果（百分率表示）、右Y軸：DTA 測定結果（以降、Figure 8 まで同じ）

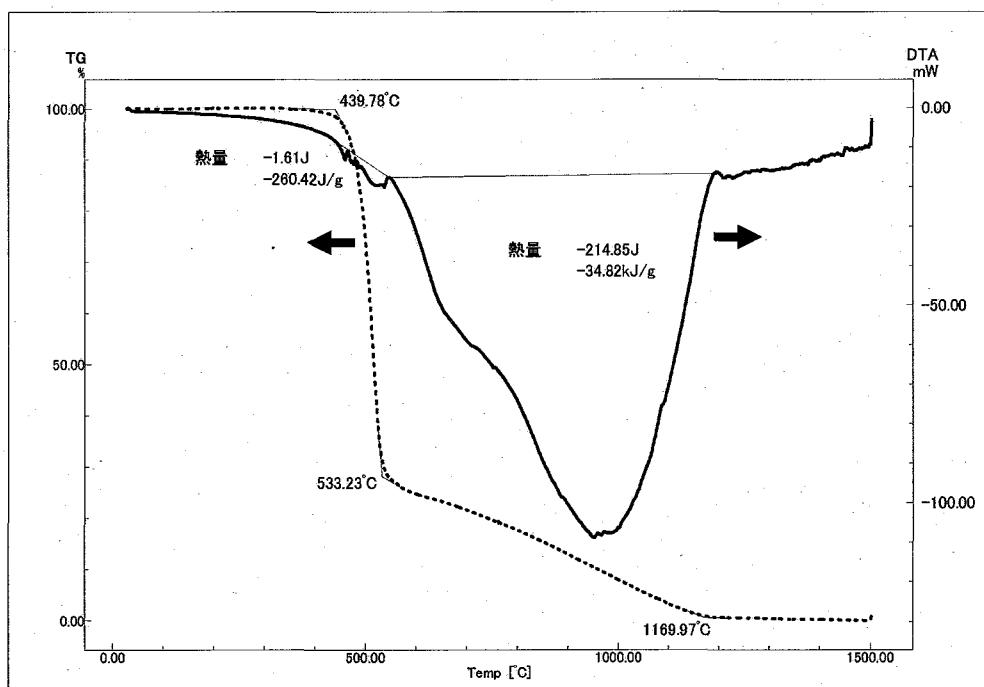


Figure 3 ポリカーボネートの DTG 測定結果（昇温速度：10 °C/min）

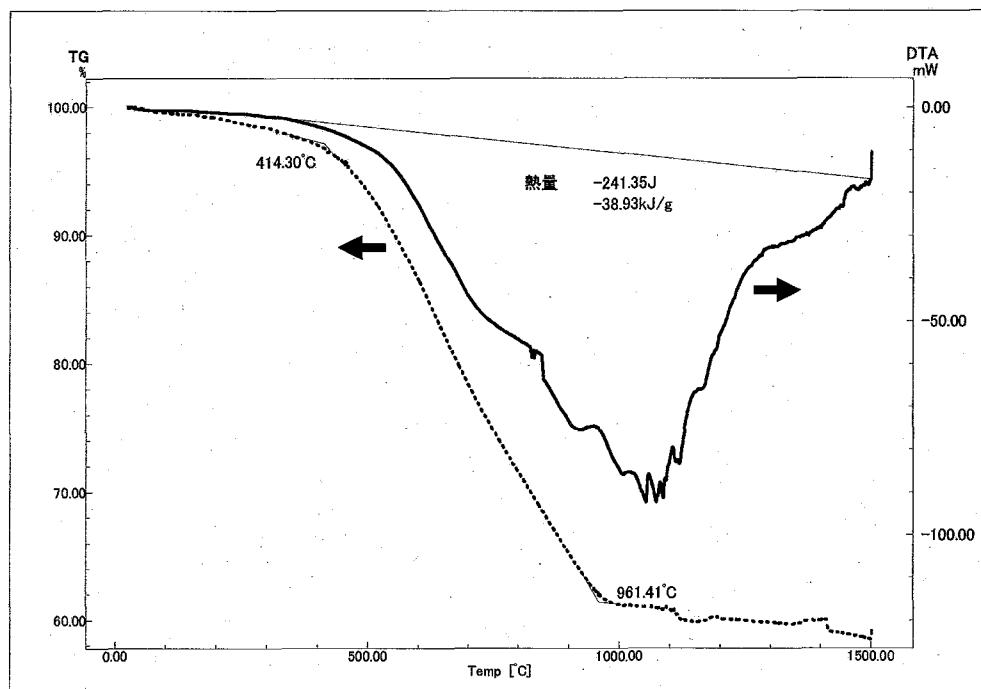


Figure 4 フェノール樹脂の DTG 測定結果（昇温速度：10 °C/min）

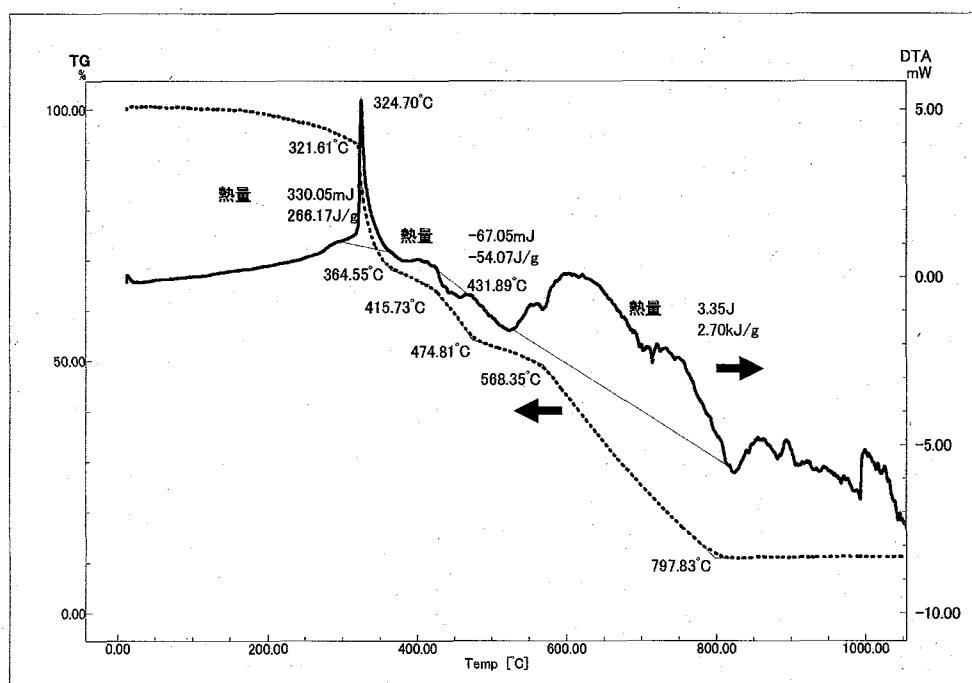


Figure 5 クロロプレンゴムの DTG 測定結果（昇温速度：10 °C/min）

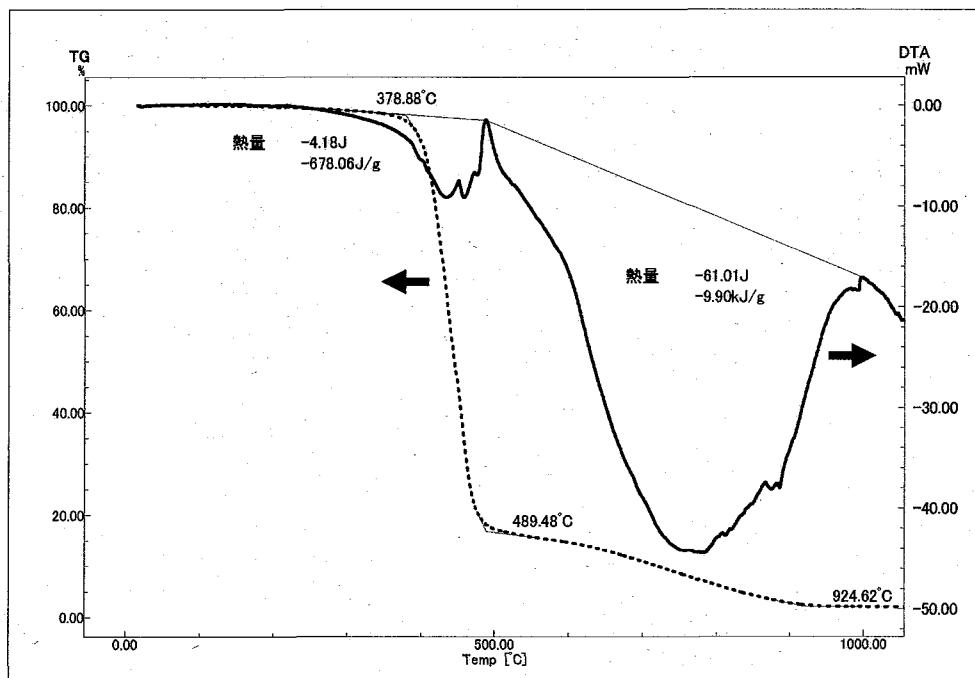


Figure 6 ポリフェニレンエーテルの DTG 測定結果（昇温速度：10 °C/min）

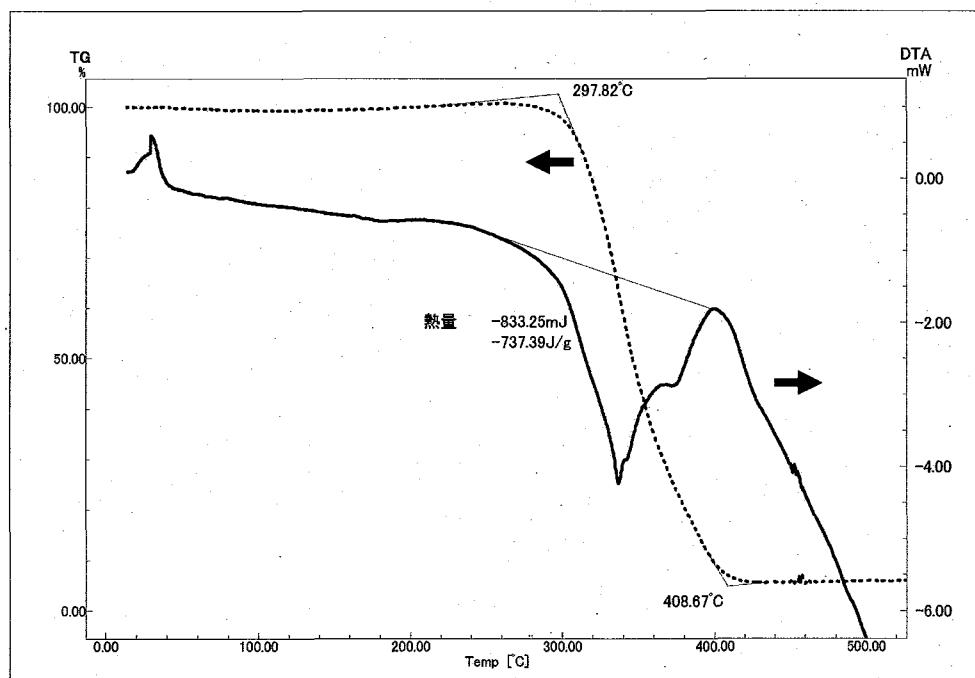


Figure 7 ウレタンゴムの DTG 測定結果（昇温速度：10 °C/min）

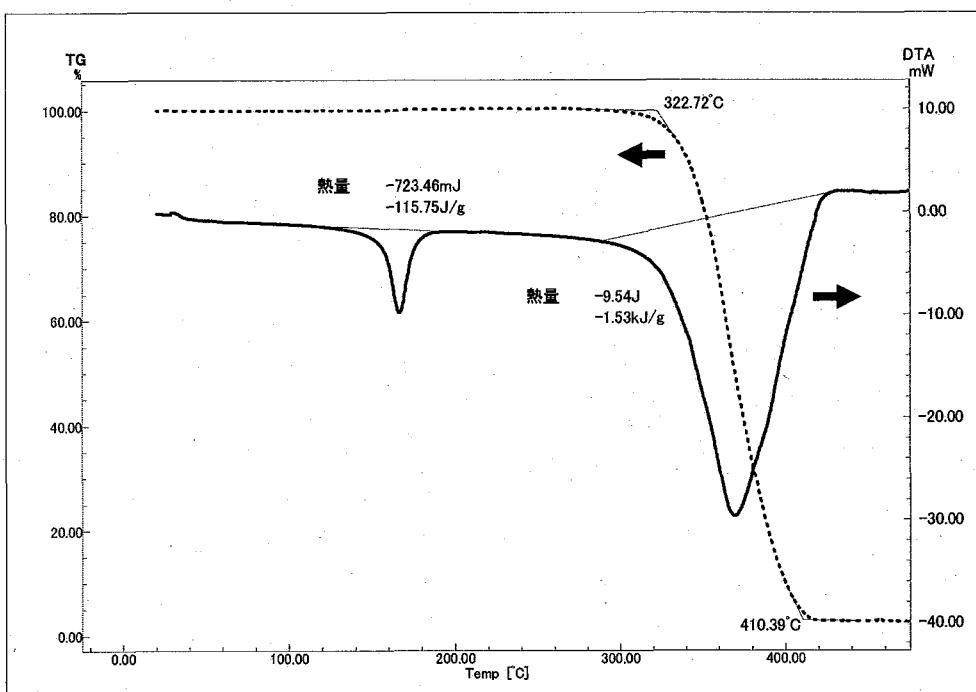


Figure 8 ポリアセタールの DTG 測定結果（昇温速度：10 °C/min）

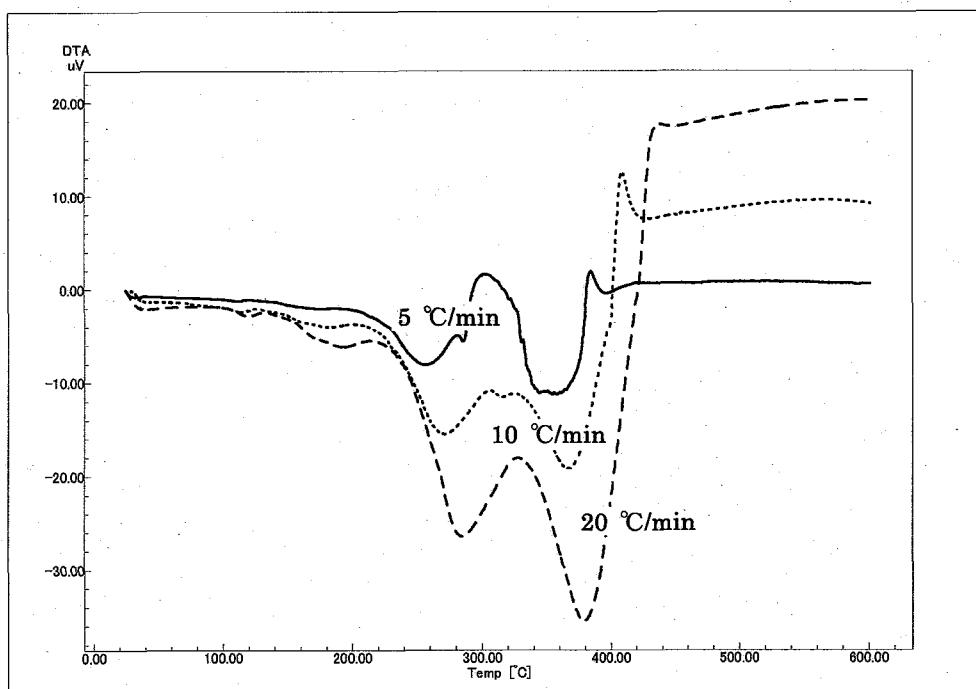


Figure 9 アクリルの DTA 測定結果（昇温速度の影響）

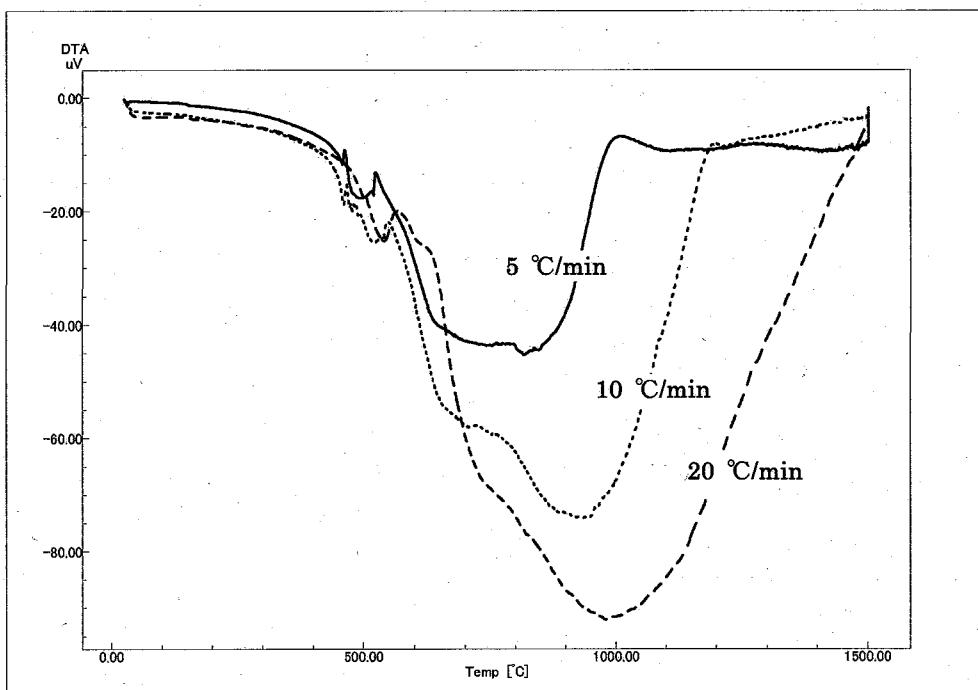


Figure 10 ポリカーボネートの DTA 測定結果（昇温速度の影響）

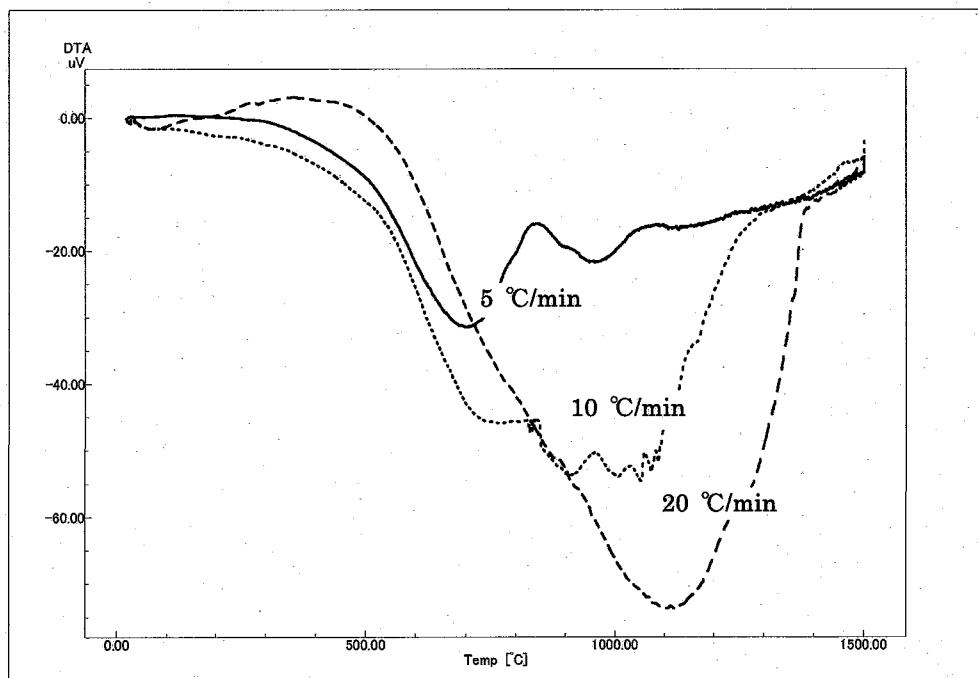


Figure 11 フェノール樹脂の DTA 測定結果（昇温速度の影響）

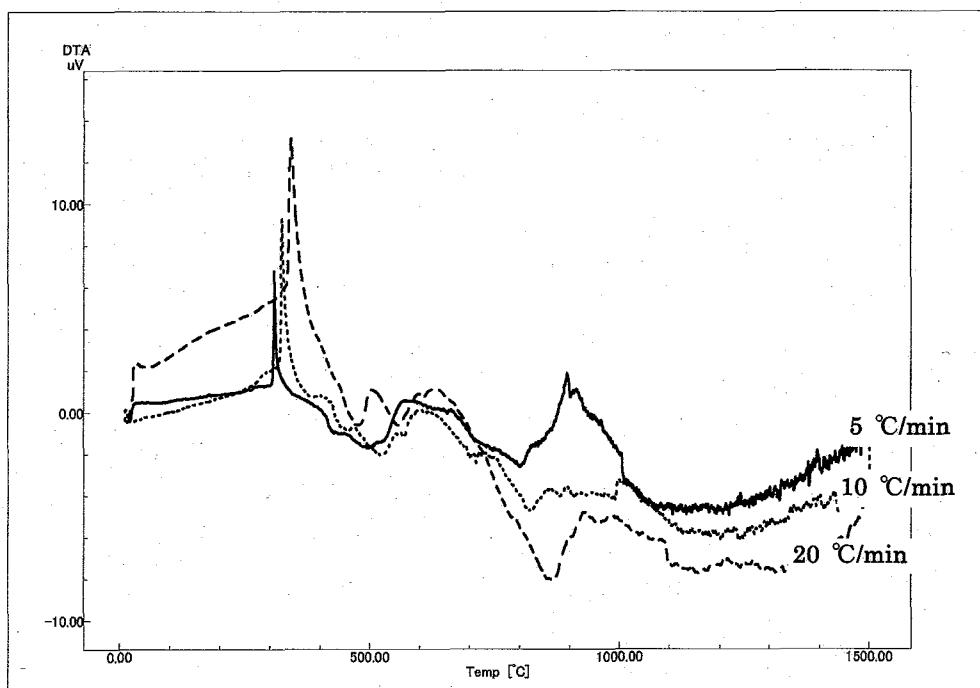


Figure 12 クロロブレンゴムの DTA 測定結果（昇温速度の影響）

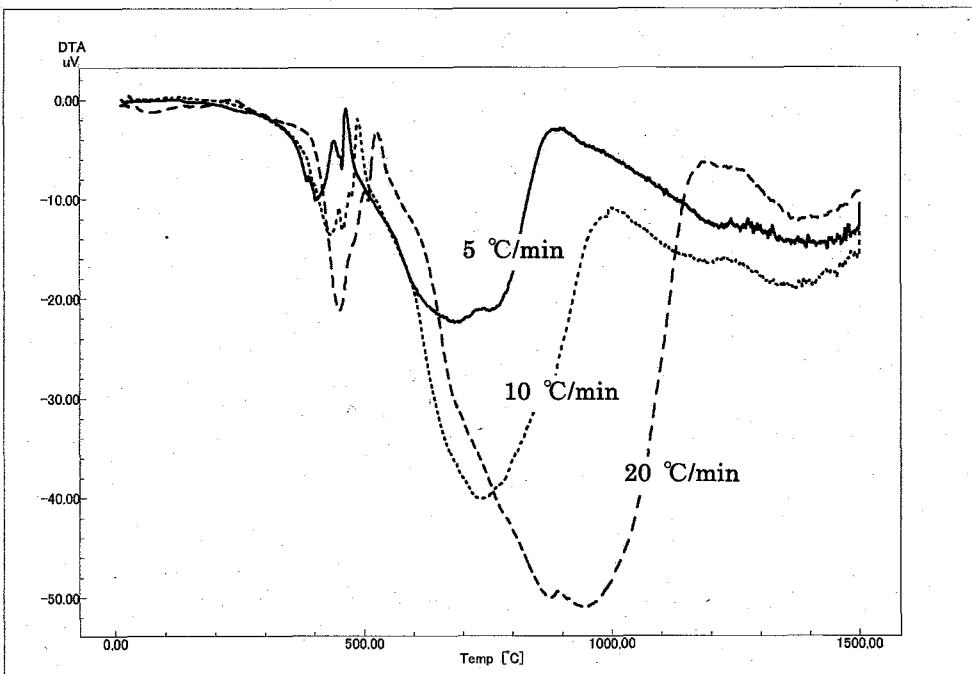


Figure 13 ポリエチレンの DTA 測定結果（昇温速度の影響）

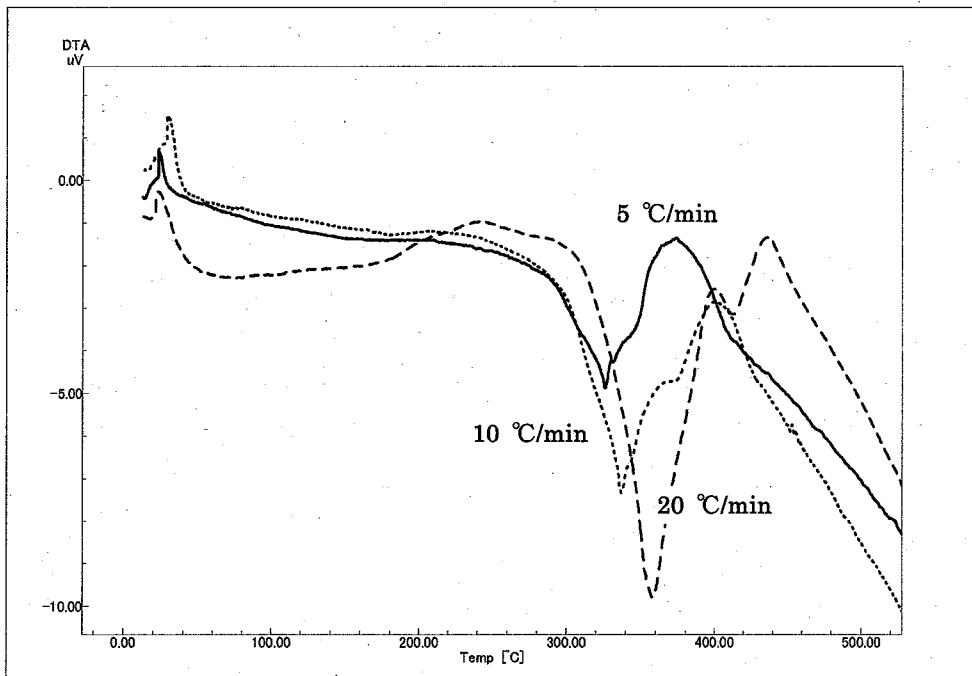


Figure 14 ウレタンゴムの DTA 測定結果（昇温速度の影響）

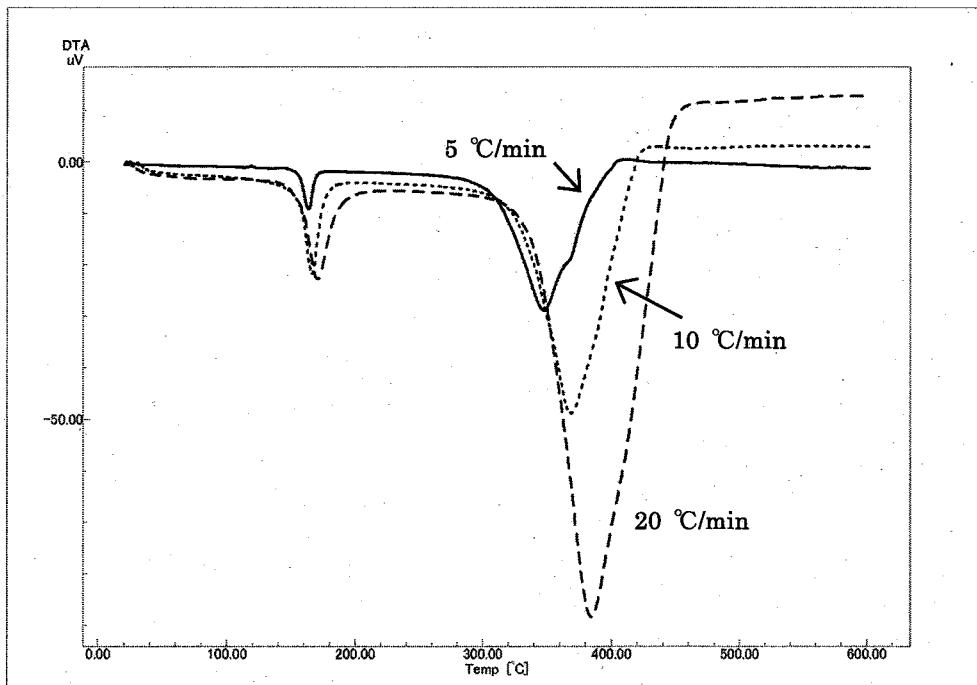


Figure 15 ポリアセタールの DTA 測定結果（昇温速度の影響）

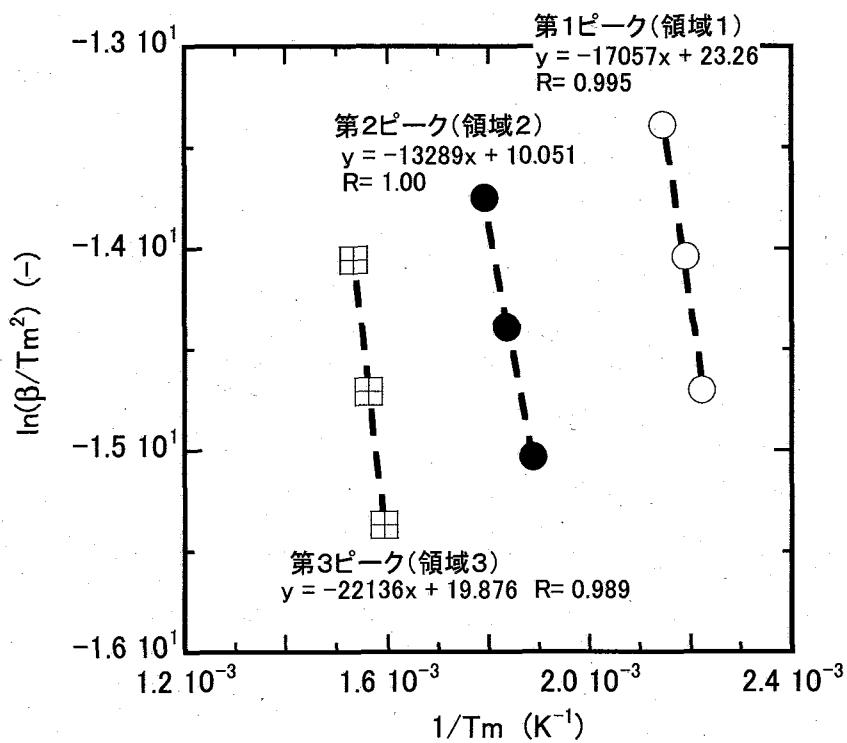


Figure 16 反応速度データ解析のためのプロット (アクリル)

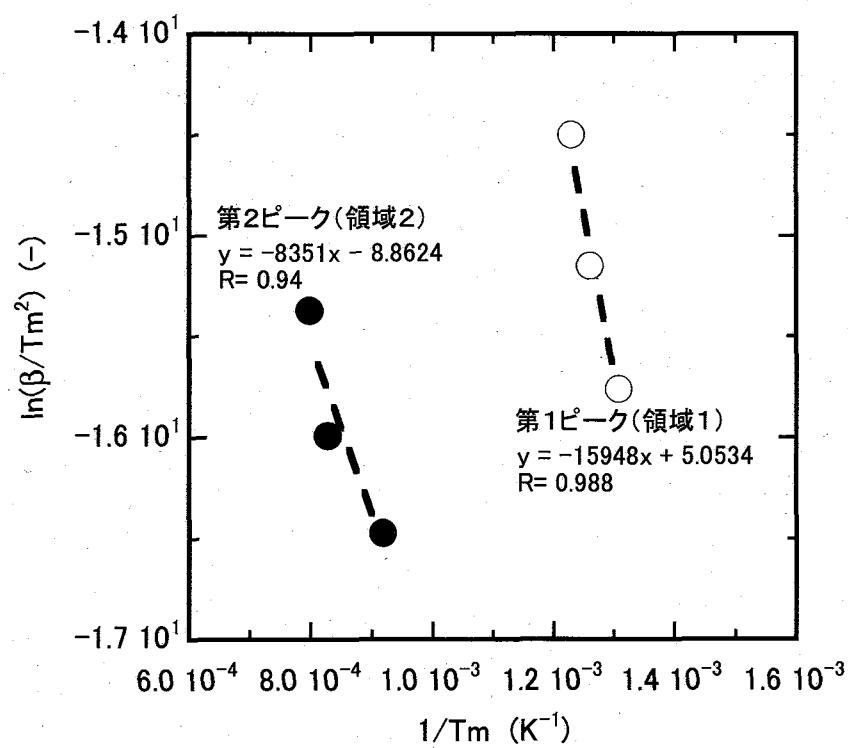


Figure 17 反応速度データ解析のためのプロット (ポリカーボネート)

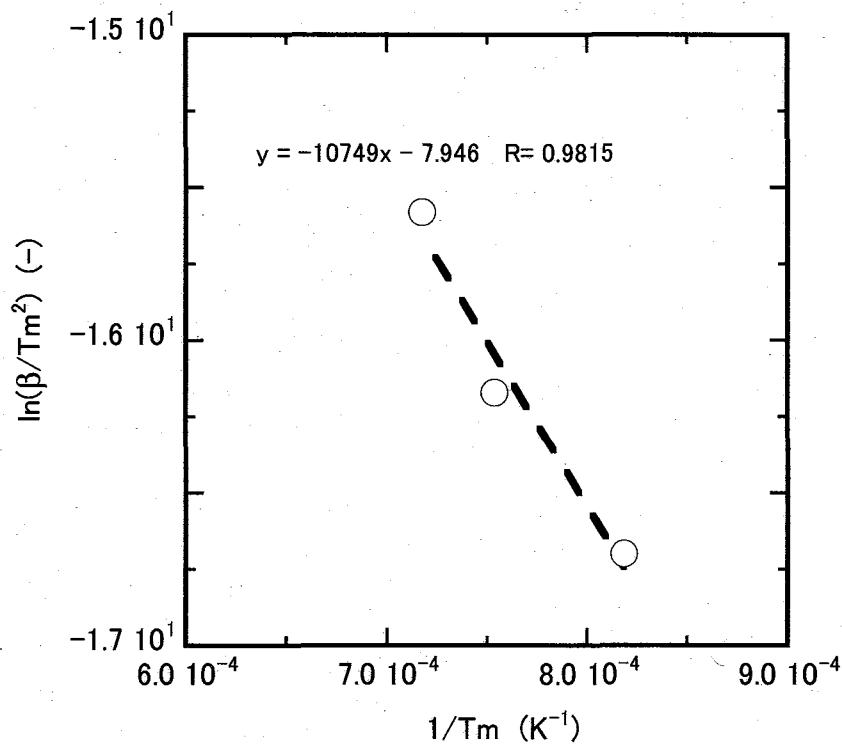


Figure 18 反応速度データ解析のためのプロット（フェノール樹脂）

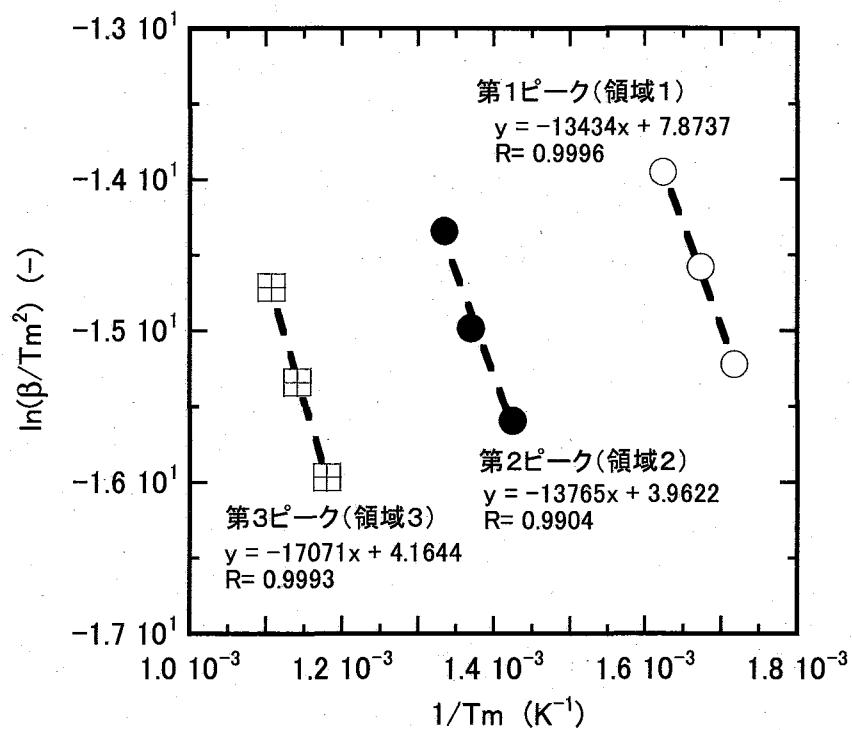


Figure 19 反応速度データ解析のためのプロット（クロロプレンゴム）

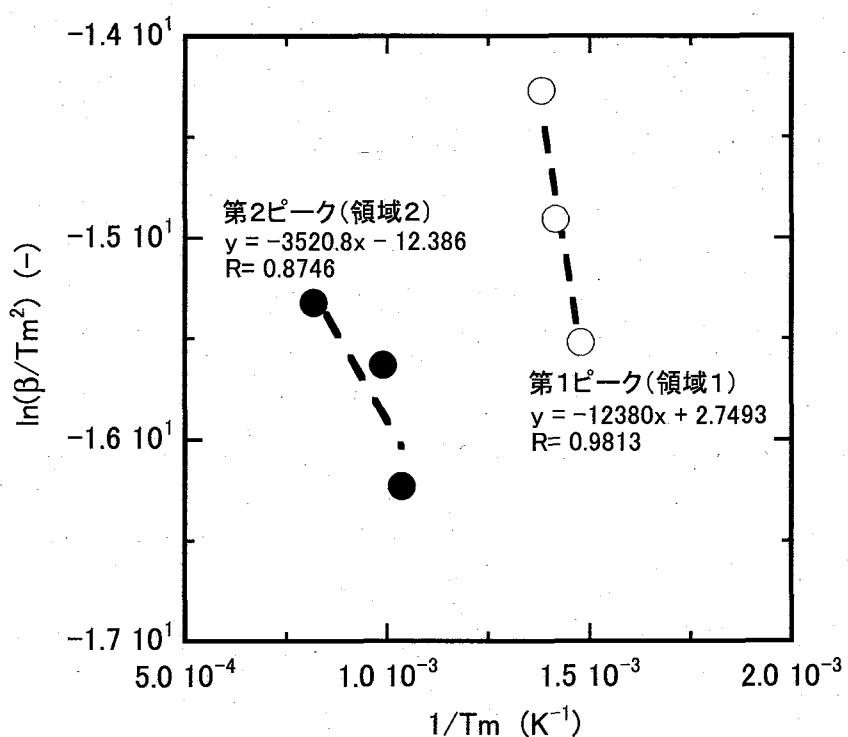


Figure 20 反応速度データ解析のためのプロット (ポリフェニレンエーテル)

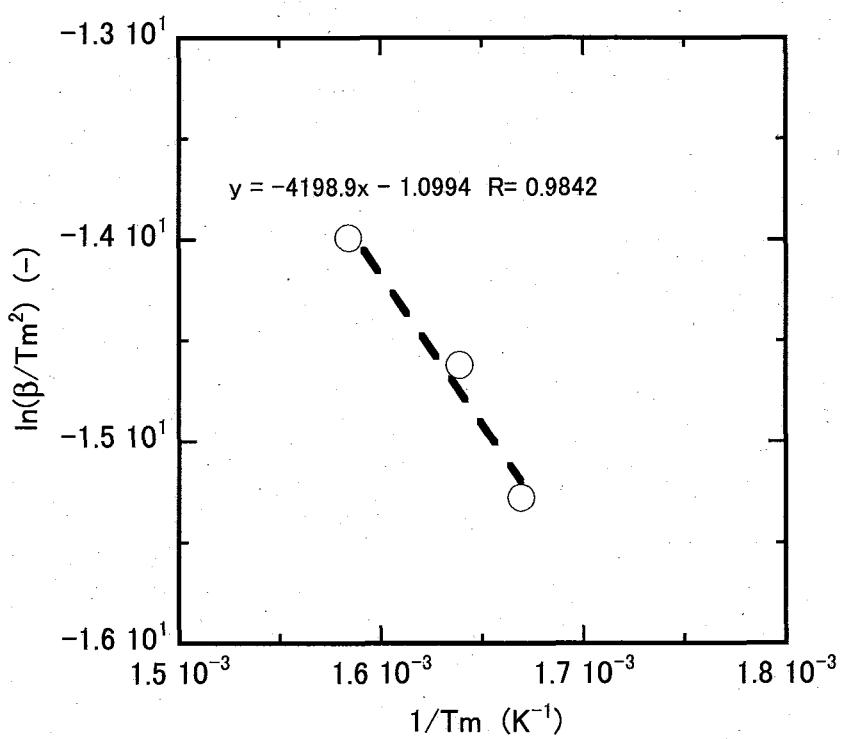


Figure 21 反応速度データ解析のためのプロット (ウレタンゴム)

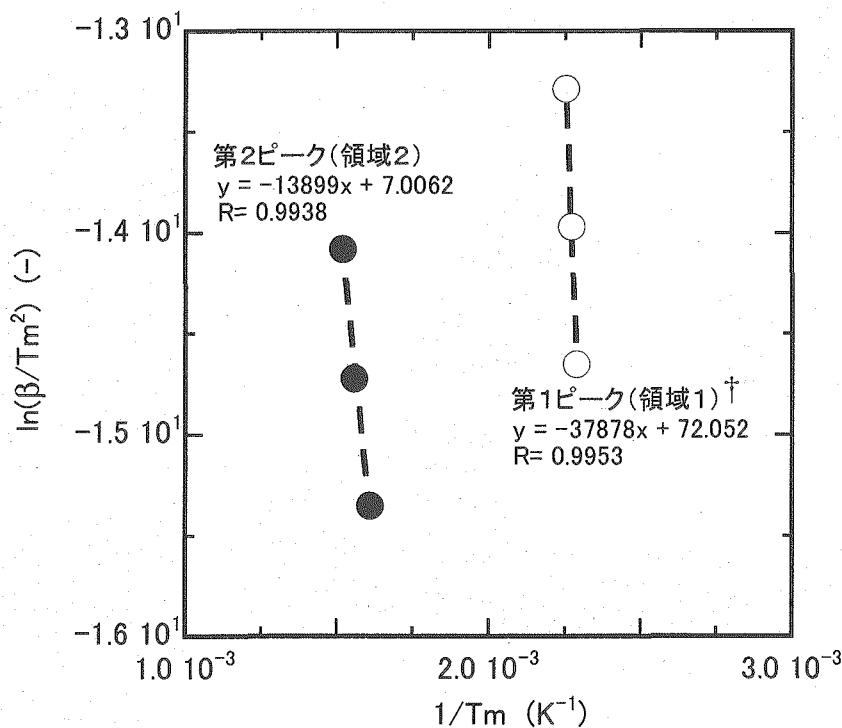


Figure 22 反応速度データ解析のためのプロット（ポリアセタール）

†：領域1に対応する吸熱ピークは相転移に起因するものと考えられるが、ここでは、他の熱分解反応に起因する吸熱ピークと同様に取り扱えるものと仮定して解析を行った。

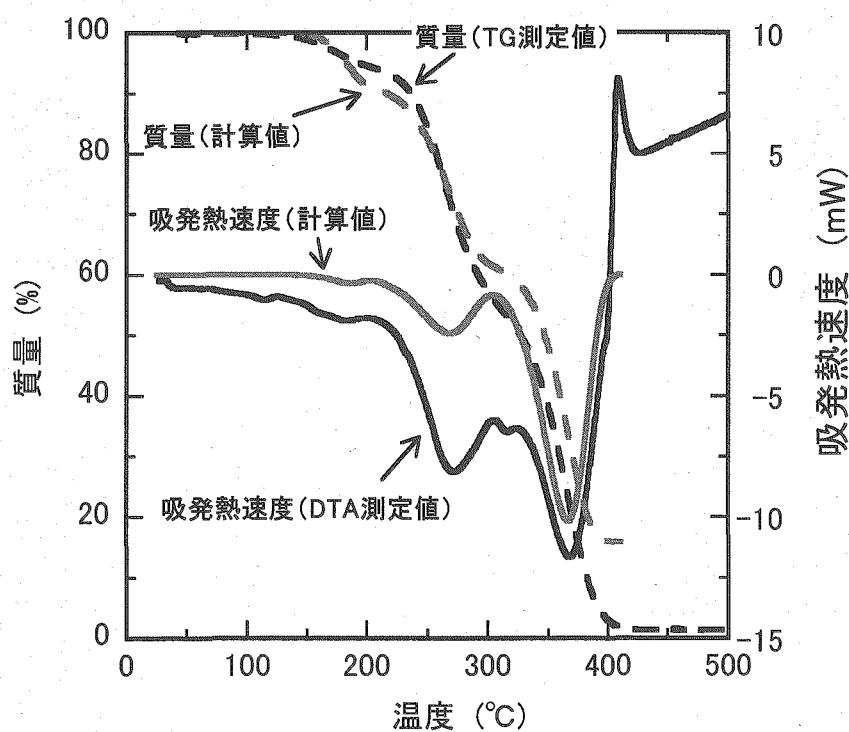


Figure 23 反応速度データを用いた DTG シミュレーション結果（アクリル）

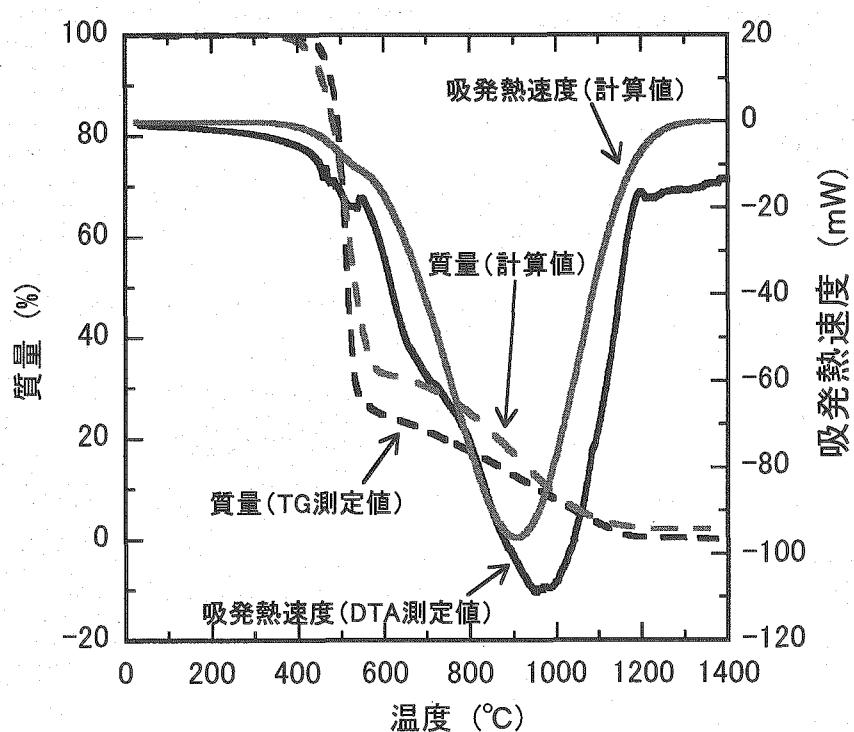


Figure 24 反応速度データを用いた DTG シミュレーション結果（ポリカーボネート）

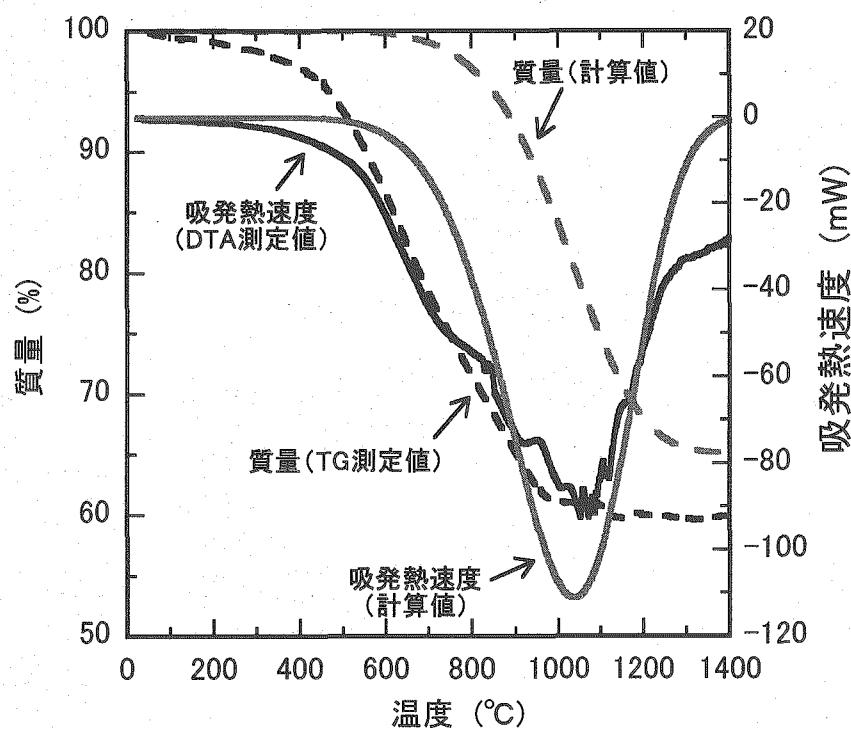


Figure 25 反応速度データを用いた DTG シミュレーション結果（フェノール樹脂）

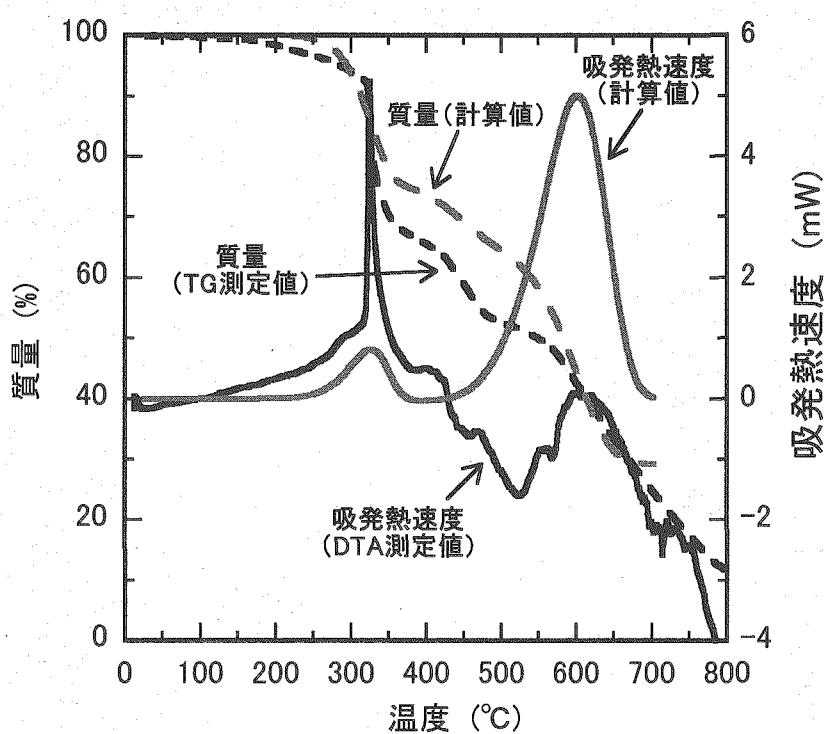
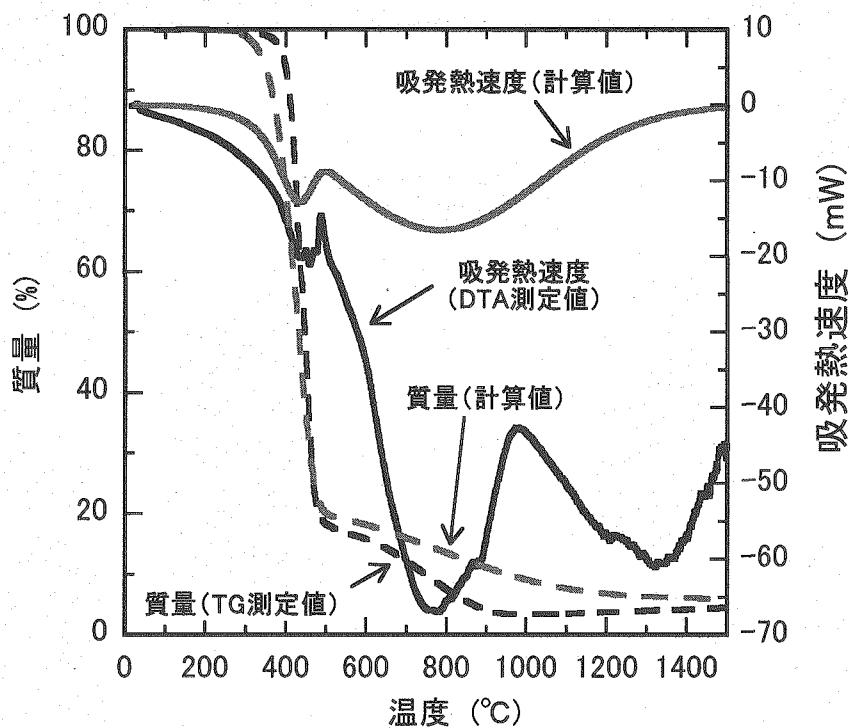


Figure 26 反応速度データを用いた DTG シミュレーション結果（クロロブレンゴム）

Figure 27 反応速度データを用いた DTG シミュレーション結果
(ポリフェニレンエーテル)

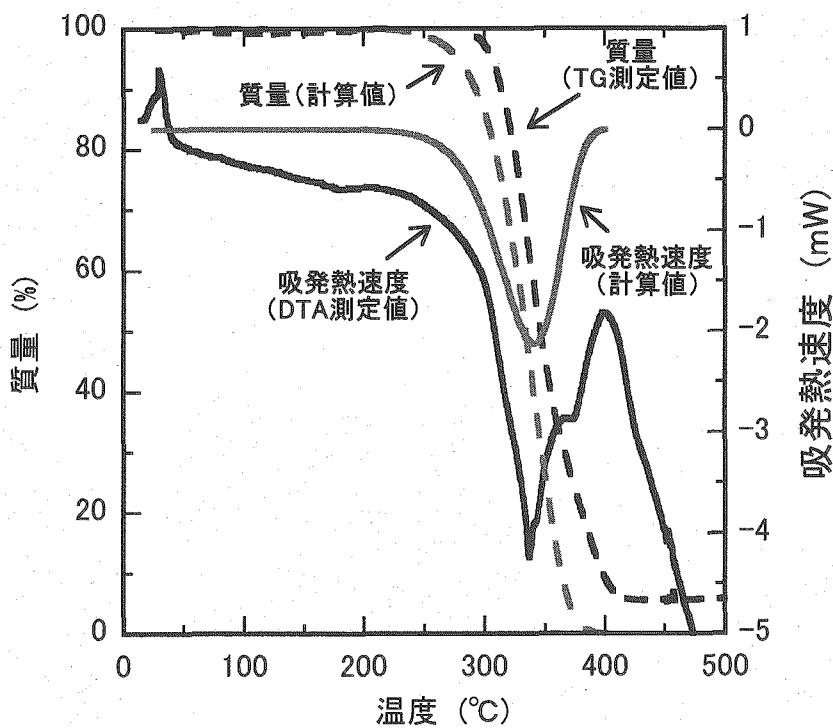


Figure 28 反応速度データを用いた DTG シミュレーション結果（ウレタンゴム）

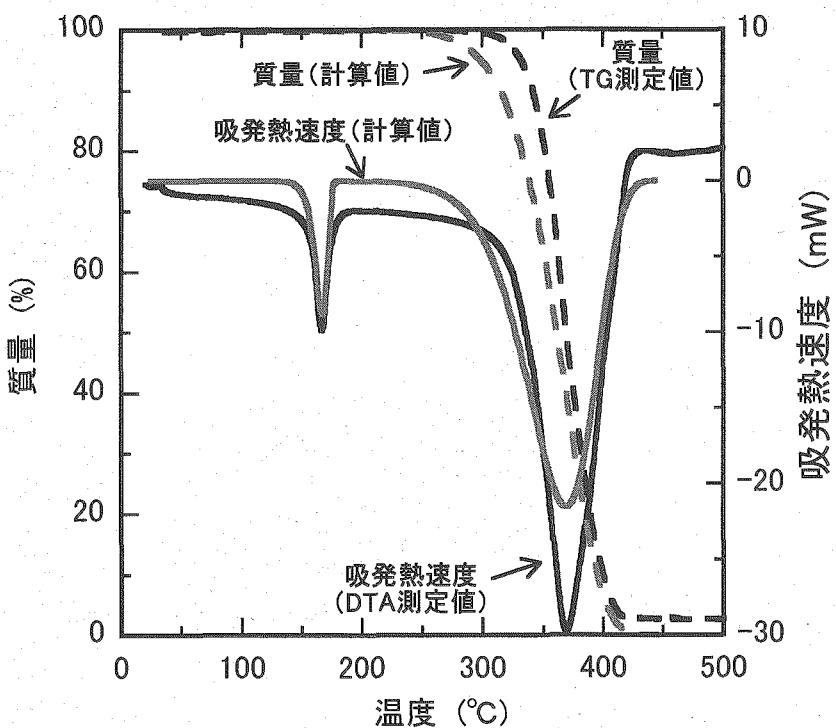


Figure 29 反応速度データを用いた DTG シミュレーション結果（ポリアセタール）

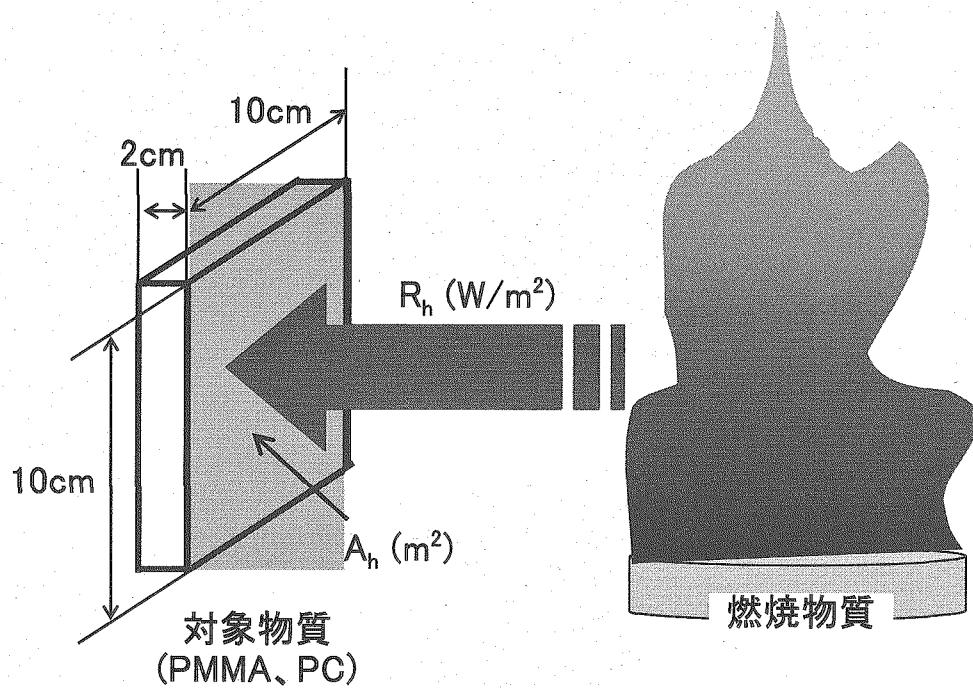


Figure 30 火災による静的閉じ込め機能経時変化の評価に用いた体系

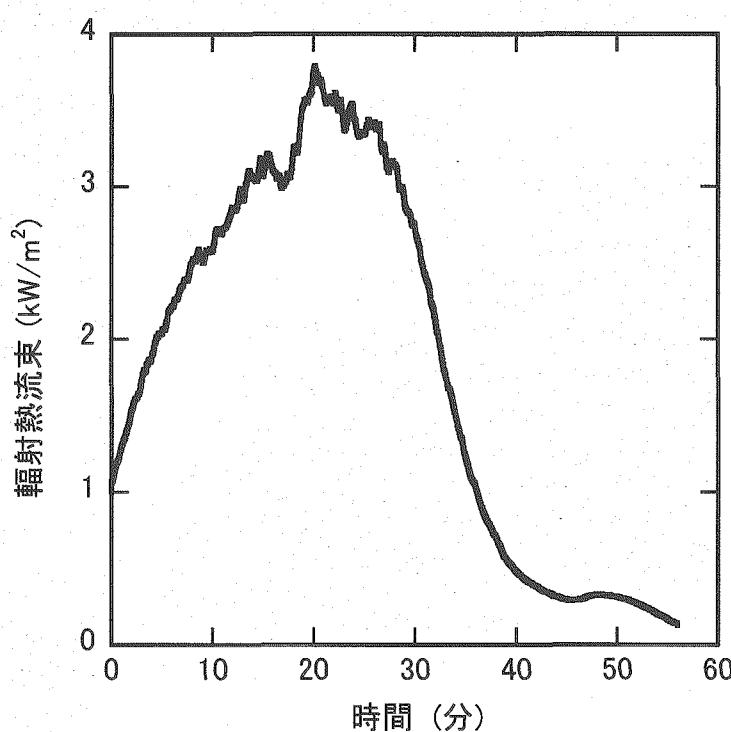
 A_h : 輻射伝熱面積 (m^2) R_h : 火炎からの輻射熱流束 (W/m^2)

Figure 31 火炎からの輻射熱流束測定結果の一例（燃焼基礎試験結果）

燃焼物質：アクリル 100mmφ×15mm

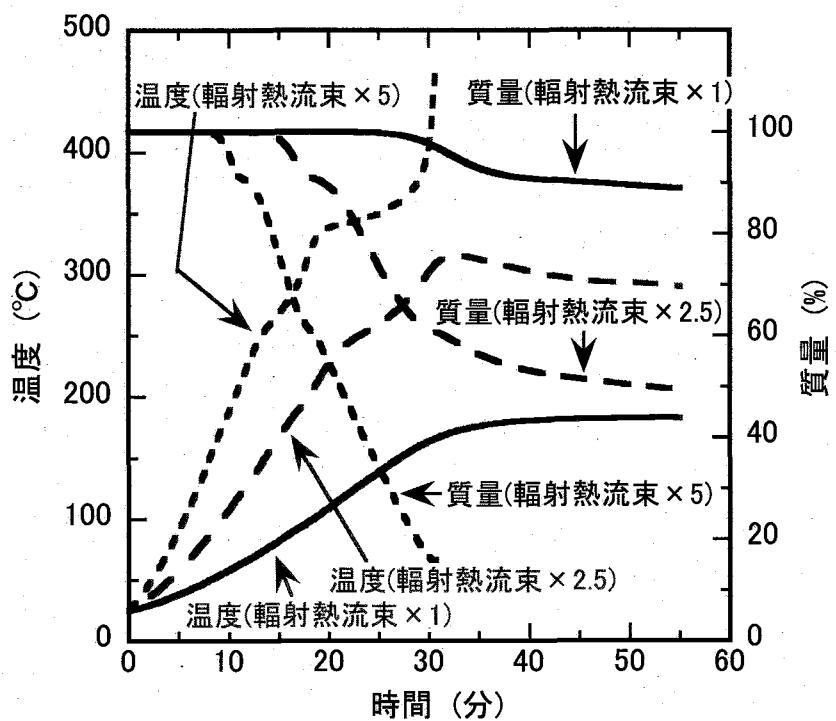


Figure 32 火災による静的閉じ込め機能経時変化の評価結果（アクリル）

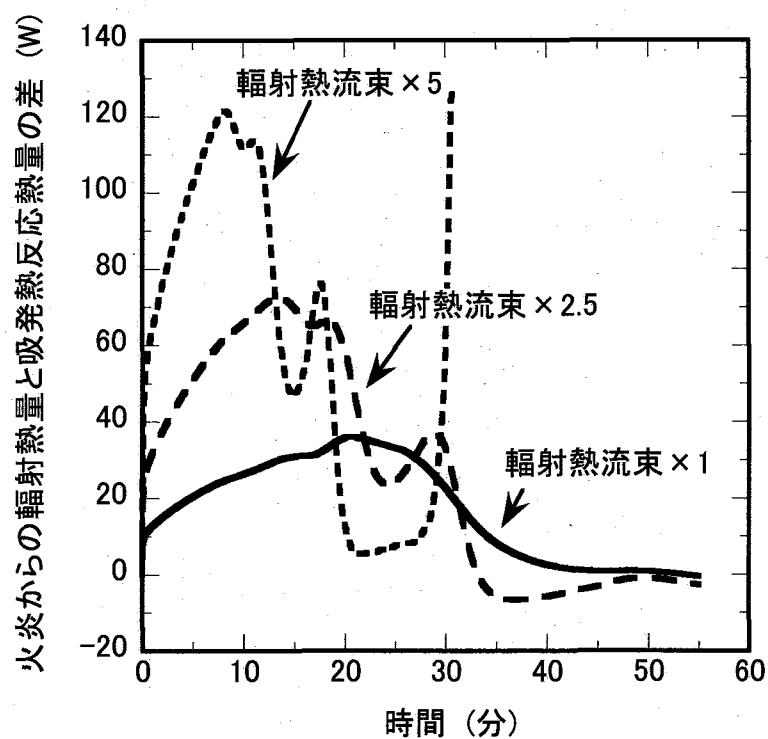


Figure 33 火炎からの輻射熱量と吸発熱反応に伴う吸発熱量の関係（アクリル）

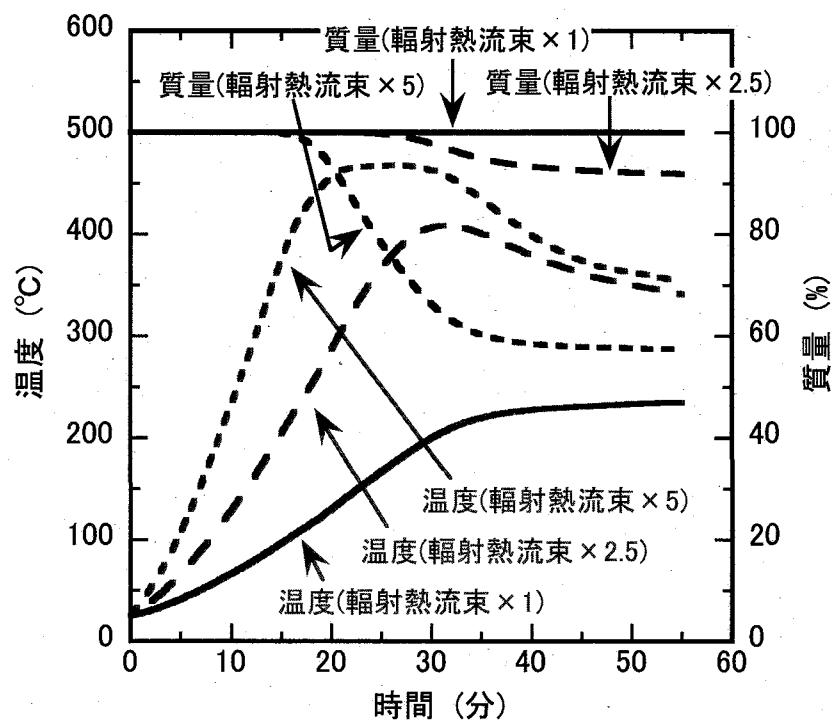


Figure 34 火災による静的閉じ込め機能経時変化の評価結果（ポリカーボネート）

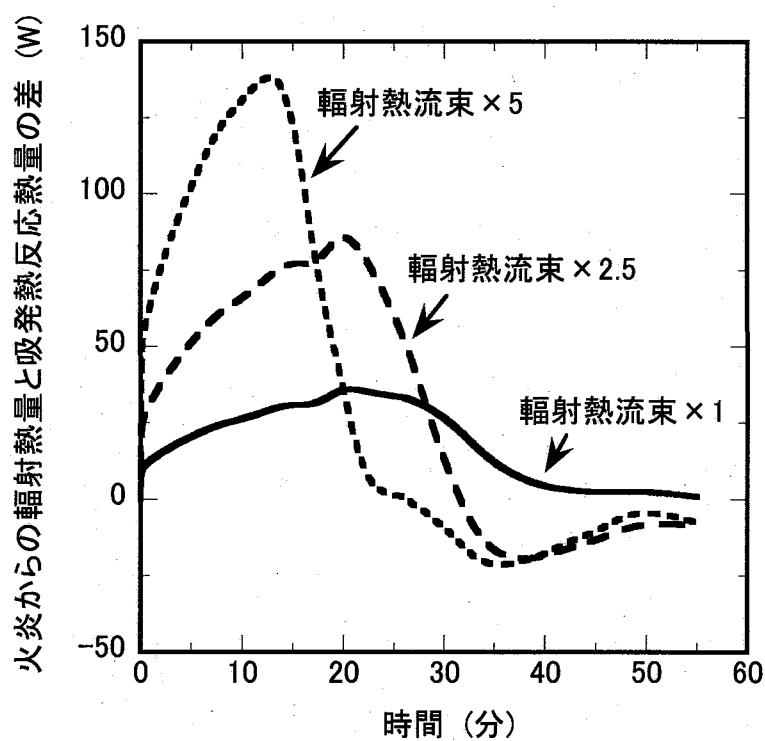


Figure 35 火炎からの輻射熱量と吸発熱反応に伴う吸発熱量の関係（アクリル）

This is a blank page.

国際単位系 (SI)

表1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	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

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m^2
立体積	立方メートル	m^3
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s^2
波数	メートル	m^{-1}
密度(質量密度)	キログラム毎立法メートル	kg/m^3
質量体積(比体積)	立法メートル毎キログラム	m^3/kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m^2
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
(物質量)濃度	モル毎立法メートル	mol/m^3
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m^2
屈折率	(数の)1	1

表5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10^{24}	ヨタ	Y	10^{-1}	デシ	d
10^{21}	ゼタ	Z	10^{-2}	センチ	c
10^{18}	エクサ	E	10^{-3}	ミリ	m
10^{15}	ペタ	P	10^{-6}	マイクロ	μ
10^{12}	テラ	T	10^{-9}	ナノ	n
10^9	ギガ	G	10^{-12}	ピコ	p
10^6	メガ	M	10^{-15}	フェムト	f
10^3	キロ	k	10^{-18}	アト	a
10^2	ヘクト	h	10^{-21}	ゼット	z
10^1	デカ	da	10^{-24}	ヨクト	y

表3. 固有の名称とその独自の記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	他のSI単位による表し方
平面角	ラジアン ^(a)	rad	$m \cdot m^{-1}=1^{(b)}$
立体角	ステラジアン ^(a)	sr ^(c)	$m^2 \cdot m^{-2}=1^{(b)}$
周波数	ヘルツ	Hz	s^{-1}
压力	ニュートン	N	$m \cdot kg \cdot s^{-2}$
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m^2
エネルギー、仕事、熱量	ジユール	J	$N \cdot m$
功率、放射束	ワット	W	J/s
電荷、電気量	クーロン	C	$s \cdot A$
電位差(電圧)、起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	フアード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	シemens	S	A/V
磁束密度	テスラ	T	Wb/m^2
インダクタンス	ヘルツ	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度 ^(d)	°C	K
光束	ルーメン	lm	$cd \cdot sr^{(c)}$
(放射性核種)の放射能	ベクレル	Bq	lm/m^2
吸収線量、質量エネルギー	グレイ	Gy	J/kg
線量当量、周辺線量当量	シーベルト	Sv	J/kg
方向性線量当量、個人線量当量、組織線量当量	シーベルト		$m^2 \cdot s^{-2}$

(a) ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なる性質をもつた量を区別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形作るときのいくつかの用例は表4に示されている。

(b) 実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号“1”は明示されない。

(c) 測光学では、ステラジアンの名称と記号srを単位の表し方の中にそのまま維持している。

(d) この単位は、例としてミリセルシウス度 $m^{\circ}C$ のようにSI接頭語を伴って用いても良い。

表4. 単位の中に固有の名称とその独自の記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘度	パスカル秒	Pa·s	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-1}$
力のモーメント	ニュートンメートル	N·m	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
表面張力	ニュートン每メートル	N/m	$kg \cdot s^{-2}$
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	$m \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}=s^{-1}$
角加速度	ラジアン毎平方秒	rad/s ²	$m \cdot m^{-1} \cdot s^{-2}=s^{-2}$
熱流密度、放射照度	ワット每平方メートル	W/m ²	$kg \cdot s^{-3}$
熱容量、エンタルピー	ジュール每ケルビン	J/K	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
質量熱容量(比熱容量)	ジュール每キログラム	J/(kg·K)	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
質量エネルギー	モル	J/kg	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
(質量エネルギー)	モル	ワット	$W/(m \cdot K)$
熱伝導率	ワット每メートル每ケルビン	W/(m·K)	$m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot K^{-1}$
体積エネルギー	ジュール每立方メートル	J/m ³	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
電界の強さ	ボルト每メートル	V/m	$m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
体積電荷	クーロン每立方メートル	C/m ³	$m^{-3} \cdot s \cdot A$
電気変位	クーロン每平方メートル	C/m ²	$m^{-2} \cdot s \cdot A$
誘電率	ファラード每メートル	F/m	$m^{-3} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
透磁率	ヘンリー每メートル	H/m	$m \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$
モルエネルギー	ジユール每モル	J/mol	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot mol^{-1}$
モルエントロピー	ジユール每モル每ケルビン	J/(mol·K)	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$
モル熱容量	ビン	C/kg	$kg^{-1} \cdot s \cdot A$
照射線量(X線及びγ線)	クーロン每キログラム	C/kg	$kg^{-1} \cdot s \cdot A$
吸収線量	グレイ每秒	Gy/s	$m^2 \cdot s^{-3}$
放射強度	ワット每ステラジアン	W/sr	$m^4 \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3} = m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
放射輝度	ワット每平方メートル每ステラジアン	W/(m ² ·sr)	$m^2 \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3} = kg \cdot s^{-3}$

表6. 国際単位系と併用されるが国際単位系に属さない単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86400 s
度	°	$1^{\circ}=(\pi/180) \text{ rad}$
分	'	$1'=(1/60)^{\circ}=(\pi/10800) \text{ rad}$
秒	"	$1''=(1/60)'=(\pi/648000) \text{ rad}$
リットル	L	$1L=1 dm^3=10^{-3} m^3$
トン	t	$1t=10^3 \text{ kg}$
ネーベル	Np	$1Np=1$
ベル	B	$1B=(1/2) \ln 10 (Np)$

表7. 国際単位系と併用されこれに属さない単位でSI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
電子ボルト	eV	$1eV=1.60217733(49) \times 10^{-19} J$
統一原子質量単位	u	$1u=1.6605402(10) \times 10^{-27} kg$
天文単位	ua	$1ua=1.49597870691(30) \times 10^{11} m$

表8. 国際単位系に属さないが国際単位系と併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
海里		1海里=1852m
ノット		1ノット=1海里每時=(1852/3600)m/s
アーチル	a	$1a=1 dm^2=10^{-2} m^2$
ヘクタール	ha	$1ha=1 hm^2=10^4 m^2$
バール	bar	$1 bar=0.1 MPa=100kPa=10^5 Pa$
オングストローム	Å	$1 Å=0.1 nm=10^{-10} m$
ペニン	b	$1 b=100 fm^2=10^{-28} m^2$

表9. 固有の名称を含むCGS組立単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
エルグ	erg	$1 erg=10^{-7} J$
ダイナ	dyn	$1 dyn=10^{-5} N$
ボアズ	P	$1 P=1 dyn \cdot s/cm^2=0.1 Pa \cdot s$
ストークス	St	$1 St=1 cm^2/s=10^{-4} m^2/s$
ガウス	G	$1 G=10^{-4} T$
エルステッド	Oe	$1 Oe=(1000/\pi) A/m$
マクスウェル	Mx	$1 Mx=10^{-8} Wb$
スチール	sb	$1 sb=1 cd/cm^2=10^4 cd/m^2$
ホット	ph	$1 ph=10^4 lx$
ガル	Gal	$1 Gal=1 cm/s^2=10^{-2} m/s^2$

表10. 国際単位に属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
キュリ	Ci	$1 Ci=3.7 \times 10^{10} Bq$
レントゲン	R	$1 R=2.58 \times 10^{-4} C/kg$
ラド	rad	$1 rad=1 Gy=10^{-2} Gy$
レム	rem	$1 rem=1 cSv=10^{-2} Sv$
X線単位		$1X unit=1.002 \times 10^{-4} rad$
ガンマ	γ	$1 \gamma=1 nT=10^{-9} T$
ジャンスキー	Jy	$1 Jy=10^{-26} W \cdot m^{-2} \cdot Hz^{-1}$
フェルミ	fm	$1 fermi=1 fm=10^{-15} m$
メートル系カラット		$1 metric carat=200 mg=2 \times 10^{-4} kg$
トル	Torr	$1 Torr=(101.325/760) Pa$
標準大気圧	atm	$1 atm=101.325 Pa$
カリ	cal	
ミクロ	μ	$1 \mu=1 \mu m=10^{-6} m$