



## 水蒸気改質処理装置ガス化装置の熱計算

Heat Calculation for Gasification Chamber of Steam Reformer

岡沼 浩司 佐々木 紀樹 山口 大美

Hiroshi OKANUMA, Toshiki SASAKI and Hiromi YAMAGUCHI

東海研究開発センター  
核燃料サイクル工学研究所  
環境技術管理部

Waste Management Department  
Nuclear Fuel Cycle Engineering Laboratories  
Tokai Research and Development Center

February 2008

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Research

本レポートは日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。  
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。  
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp/index.shtml>)  
より発信されています。このほか財団法人原子力弘済会資料センター\*では実費による複写頒布を行っ  
ております。

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2番地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  
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920

\* 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2番地4 日本原子力研究開発機構内

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency  
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to  
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,  
Japan Atomic Energy Agency  
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1195 Japan  
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920

水蒸気改質処理装置ガス化装置の熱計算

日本原子力研究開発機構東海研究開発センター  
核燃料サイクル工学研究所環境技術管理部

岡沼 浩司<sup>\*</sup>、佐々木 紀樹、山口 大美

(2007年12月17日受理)

日本原子力研究開発機構が所有する様々な廃棄物の中には、焼却処理が困難な有機系廃棄物(リン酸トリブチル廃溶媒、フッ素油を含む廃油等)が存在する。環境技術管理部では、これらの有機系廃棄物を分解、無機化し、適切な廃棄物処分につなげるための処理技術のひとつとして、水蒸気改質処理法の技術開発を行ってきた。

水蒸気改質処理法は、有機物を過熱水蒸気で分解、ガス化し、さらに、ガス化した廃棄物を高温空気で分解することにより有機系廃棄物の減容、無機化を行う処理技術である。

本報では、水蒸気改質処理装置の運転条件による試料処理の可否及び装置挙動の予測、また、試料処理運転条件の効果的、効率的改善に資することを目的として、水蒸気改質処理装置のガス化装置の熱計算モデルを作成した。さらに、その熱計算モデルを使用し、試料供給あり(30wt% TBP /ドデカン)の場合と試料供給なしの場合で熱計算を実施、その熱計算結果と試験実測値(H18年度後半実施)の温度を比較することにより、その熱計算モデルの妥当性を検証した。その結果、試料供給なしの場合については、熱計算結果と試験実測値の温度が比較的一致し、今回作成したガス化装置の熱計算モデルは、ガス加熱の観点からは、比較的、現実のものに近い形でモデル化されていることが確認された。このことにより、本熱計算モデルは、水蒸気改質処理装置内における他の同様の加熱機器、配管等の熱計算モデルとしての応用も期待できる。一方で、試料供給ありの場合については、熱計算結果と試験実測値の温度の間に、試料供給なしの場合と比較して大きな隔たりが確認され、試料のガス化装置内での物理的及び化学的変化等におけるモデル化については、さらなる検討が必要ながわかった。

Heat Calculation for Gasification Chamber of Steam Reformer

Hiroshi OKANUMA<sup>※</sup>, Toshiki SASAKI and Hiromi YAMAGUCHI

Waste Management Department  
Nuclear Fuel Cycle Engineering Laboratories  
Tokai Research and Development Center  
Japan Atomic Energy Agency  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received December 17, 2007)

JAEA has many kinds of low level radioactive wastes and some of them are difficult to be decomposed by an incinerator. Steam reforming as treatment technology for low level radioactive wastes has been developed for decomposition and mineralization of the wastes in waste management department of JAEA, which contributes to appropriate disposal of the wastes. Steam reforming is a technology for decomposition and mineralization of organic wastes. The wastes are decomposed into gases by superheated steam and then they are decomposed and oxidized by high temperature air.

In this report, a heat calculation model for the gasification chamber of the steam reformer has been developed for estimation what samples can be treated or not, and effective and efficient improvement of operation.

The following two cases have been calculated by the heat calculation model and it has been verified by comparing the results of calculation with the experimental data which were obtained in the latter half of fiscal year 2006. One calculation case is concerned with the operation of gasification chamber without sample feed. The other is concerned with the operation of gasification chamber with sample (30wt%tributyl phosphate(TBP)/n-dodecane) feed. The results of heat calculation without sample feed are in agreement with the experimental data relatively, but those of with sample are more different from the experimental data than those of without sample. This shows that the heat calculation model we have developed is feasible in terms of gas heating, but has problems in terms of physical and chemical changes of the sample in the gasification chamber. We need to modify the model in the part of physical and chemical changes of the sample in it.

Keywords: Heat Calculation, Steam Reformer, Gasification Chamber

---

<sup>※</sup> Collaborating Engineer

目 次

1. はじめに	1
2. 水蒸気改質処理装置	3
2.1 水蒸気改質処理装置の概要	3
2.2 ガス化装置の概要	4
3. ガス化装置熱計算モデル	5
3.1 熱計算モデル	5
3.2 熱計算フロー	8
3.3 熱計算方法	9
3.4 使用物性値	15
4. 熱計算の実施	22
4.1 熱計算の実施方法	23
4.2 計算条件	24
4.3 熱計算結果と試験実測値の比較	25
4.4 熱計算結果の考察	27
5. おわりに	30
参考文献	31
記号一覧	32
付録	35

Contents

1. Introduction	1
2. Steam reformer	3
2.1 Outline of steam reformer	3
2.2 Outline of gasification chamber	4
3. Heat calculation model for gasification chamber	5
3.1 Heat calculation model	5
3.2 Flow of heat calculation	8
3.3 Equations for heat calculation	9
3.4 Material properties for heat calculation	15
4. Heat calculation	22
4.1 Procedure	23
4.2 Conditions for heat calculation	24
4.3 Comparison between results of heat calculation and experimental data	25
4.4 Discussions of results	27
5. Concluding remarks	30
References	31
Nomenclature	32
Appendix	35

目 次

図 2-1：水蒸気改質処理装置	3
図 2-2：ガス化装置	4
図 3.1-1：熱計算モデル（ガス化装置によるガスの加熱）概要	6
図 3.1-2：熱計算モデル（試料の物理的变化及び化学反応の組み込み）概要	7
図 3.2-1：ガス化装置熱計算フロー概要	8
図 3.3-1：ガス化装置熱計算入力条件	9
図 3.3-2：ガス化装置内ヒータ入熱量計算	12
図 3.3-3：ガス化装置出口ガス上昇温度	14
図 4.1-1：ガス化装置出口配管温度計位置温度計算概要	23
図 4.3-1：熱計算結果と試験実測値（試料供給なし）	
（ガス化装置ヒータ温度，配管ヒータ温度：650℃，650℃）（水蒸気供給量：1.5kg/h）	26
図 4.3-2：熱計算結果と試験実測値（試料供給あり）	
（ガス化装置ヒータ温度，配管ヒータ温度：650℃，650℃）（水蒸気供給量：1.5kg/h）	26
図 a-1：熱計算結果（水蒸気供給量：0.75kg/h）	37
図 a-2：熱計算結果（水蒸気供給量：1.5kg/h）	37
図 a-3：熱計算結果（水蒸気供給量：3.0kg/h）	38
図 a-4：熱計算結果（ガス化装置ヒータ温度，配管ヒータ温度：600℃，600℃）	38
図 a-5：熱計算結果（ガス化装置ヒータ温度，配管ヒータ温度：600℃，650℃）	39
図 a-6：熱計算結果（ガス化装置ヒータ温度，配管ヒータ温度：650℃，650℃）	39
図 a-7：試験実測値（試料供給なし，水蒸気供給量：1.5kg/h）	40
図 a-8：試験実測値（試料供給あり，水蒸気供給量：1.5kg/h）	40
図 a-9：試験実測値（ガス化装置ヒータ温度，配管ヒータ温度：600℃，600℃）	41
図 a-10：試験実測値（ガス化装置ヒータ温度，配管ヒータ温度：600℃，650℃）	41
図 a-11：試験実測値（ガス化装置ヒータ温度，配管ヒータ温度：650℃，650℃）	42
図 a-12：熱計算結果と試験実測値（試料供給なし）	
（ガス化装置ヒータ温度，配管ヒータ温度：600℃，600℃）（水蒸気供給量：0.75kg/h）	42
図 a-13：熱計算結果と試験実測値（試料供給なし）	
（ガス化装置ヒータ温度，配管ヒータ温度：600℃，600℃）（水蒸気供給量：1.5kg/h）	43
図 a-14：熱計算結果と試験実測値（試料供給なし）	
（ガス化装置ヒータ温度，配管ヒータ温度：600℃，600℃）（水蒸気供給量：3.0kg/h）	43
図 a-15：熱計算結果と試験実測値（試料供給なし）	
（ガス化装置ヒータ温度，配管ヒータ温度：600℃，650℃）（水蒸気供給量：1.5kg/h）	44
図 a-16：熱計算結果と試験実測値（試料供給あり）	
（ガス化装置ヒータ温度，配管ヒータ温度：600℃，600℃）（水蒸気供給量：0.75kg/h）	44

図 a-17 : 熱計算結果と試験実測値 (試料供給あり)  
(ガス化装置ヒータ温度, 配管ヒータ温度:600°C, 600°C) (水蒸気供給量:1.5kg/h) .....45

図 a-18 : 熱計算結果と試験実測値 (試料供給あり)  
(ガス化装置ヒータ温度, 配管ヒータ温度:600°C, 600°C) (水蒸気供給量:3.0kg/h) .....45

図 a-19 : 熱計算結果と試験実測値 (試料供給あり)  
(ガス化装置ヒータ温度, 配管ヒータ温度:600°C, 650°C) (水蒸気供給量:1.5kg/h) .....46

表 目 次

表 4.2-1: 試料及び水蒸気供給条件と装置運転条件(ヒータ温度) .....24

表 4.2-2: 構造条件.....25



## 1. はじめに

日本原子力研究開発機構が所有する様々な廃棄物の中には、埋設処分に際して廃棄体への混入が禁止されている多量の危険物や有機物を含有し、焼却等の既存技術では分解・無機化処理することが困難な放射性有機系廃棄物がある。これらの廃棄物には、有機系フッ素油を含む廃油、リン酸トリブチル(以下、TBP とする)を含む廃溶媒等があり、貯蔵及び埋設処分における長期安定性の向上及び処分コストの低減を図るため、分解、無機化及び減容化処理される必要がある。

このような状況を踏まえ、環境技術管理部では、これらの有機系廃棄物を分解、無機化及び減容化処理し、適切な廃棄体化処理、処分につながるための技術として、水蒸気改質処理法の実用化に向けた技術開発を行ってきた。

水蒸気改質処理法は、過熱水蒸気を用いて有機化合物の分解を行う技術であり、廃棄物処理の分野では、一般産業界において、廃タイヤのガス化処理、フロンの分解処理、廃プラスチックの油化処理等に利用されている。また、原子力業界においても、難燃物の処理技術として採用されている。

これまでの技術開発の経緯としては、先ず、小規模水蒸気改質処理試験装置を用いた基礎試験を実施し、様々な廃棄物の分解性能等のデータの取得及び適用性の評価を実施、そして、その基礎試験で蓄積したデータに基づき、ウラン系の有機系液体廃棄物（TBP を含む廃溶媒及びフッ素油を含む廃油）を処理対象とした実証規模試験装置の設計、製作を実施した。その後、その試験装置を使用し、ウランを含有した TBP を含む廃溶媒、フッ素油を含む廃油の処理試験に向けての模擬廃溶媒及び模擬廃油を用いたコールド処理試験を実施し、さらに、その試験結果を反映して、ウランを含有した TBP を含む廃溶媒の処理試験を実施中である。

水蒸気改質処理装置を構成する機器の中で、ガス化装置は、処理対象物を後段の主反応器で燃焼させるために、過熱水蒸気と熱エネルギーにより、処理対象物を分解、ガス化する重要な機器であり、その運転条件は、処理対象物が適切に処理できるか否かを決定づけるものであることが、今までの処理試験によってわかっている。実際の試験において、ガス化装置の運転条件によって、処理対象物の処理状況が大きく変化し、その結果として、処理後の残渣の量、質、共に大きな変化が現れることが確認されている。この変化の原因としては、ガス化装置から処理対象物に与えられるエネルギー量やガス化装置内部温度の変化による処理対象物の物理的及び化学的変化の違いの影響によるものと考えている。例えば、TBP を含む廃溶媒の処理の場合、適切な運転条件で運転すると、処理後の残渣が、少量の固形状のものになるが、不適切な運転条件になると、残渣として粘性の高いリン化合物が多量に発生するようになり、水蒸気改質処理の目的としての減容化処理の観点で問題が出てくる。

よって、水蒸気改質処理におけるガス化装置内での処理対象物の処理反応及び熱計算モデルの作成により、処理装置運転条件によるガス化装置から処理対象物へ伝達するエネルギー量及びガス化装置内部温度が予測できることになれば、ガス化装置運転条件の効率的、効果

的改善、処理対象物変更等の処理運転条件変更の際の処理装置運転挙動の予測、処理対象物の適切な処理の可否の予測、ガス化装置内部温度の予測等に資する点で、モデルの作成、実現の意義は大きいと考えられる。

そこで、本報告書では、ガス化装置の熱計算モデルを作成し、その熱計算モデルを利用した熱計算結果と試験実測値(H18年度後半実施)とを比較、検証し、その作成した熱計算モデルの妥当性を検証すること、さらに、そのモデルに、ガス化装置内における処理対象物(30wt%TBP/ドデカン)の化学反応モデル等を組み込み、その熱計算結果と試験実測値(H18年度後半実施)とを比較、検証することにより、そのモデルの妥当性を検証することを目的とする。

## 2. 水蒸気改質処理装置

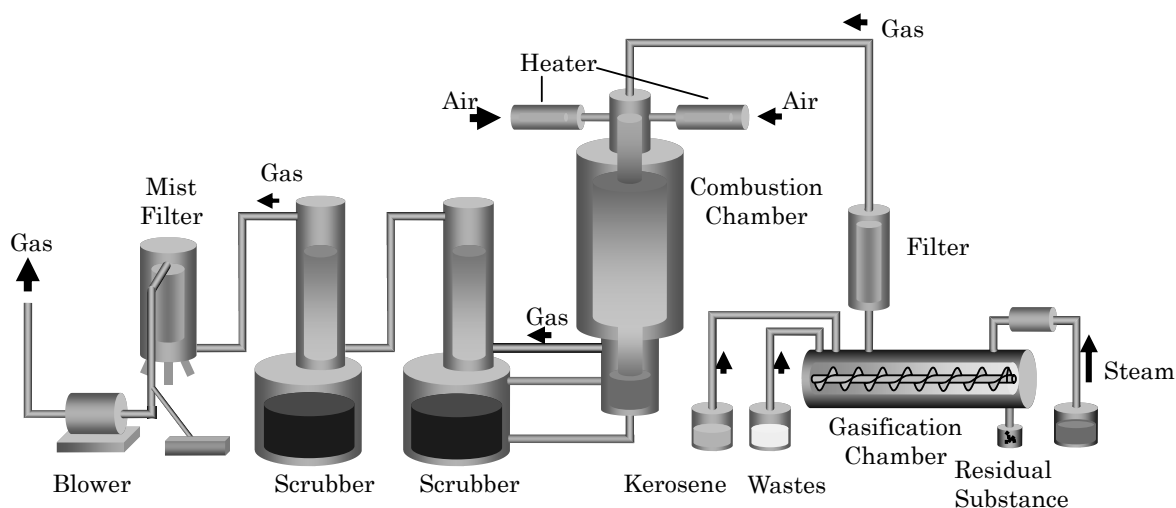
### 2.1 水蒸気改質処理装置の概要

水蒸気改質処理法は、過熱水蒸気を用いて有機化合物の分解を行う技術であり、廃棄物処理の分野では、一般産業界において、廃タイヤのガス化処理、フロンの分解処理、廃プラスチックの油化処理等に利用されている。また、原子力業界においても難燃物の処理技術として採用されている。水蒸気改質処理法の主な特徴は、

- ① 有機化合物の分解を熱分解及び過熱水蒸気との化学反応を用いて行うため、ススやチャーの発生が少ない。
- ② 水分を多量に含む廃棄物を処理することができる。
- ③ 還元性の雰囲気の中で有機化合物の分解を行うため、ダイオキシン類の発生が少ない
- ④ 装置内を負圧にして分解を行うことができるため、内容物の漏洩に対する安全性が高い。
- ⑤ ハロゲンやリン酸による炉材の腐食に対して、ガス化を行う反応器の構造が単純かつ小型であるため、定期的な交換を行うことで対処が可能。

である。

水蒸気改質処理装置(Steam Reformer)は、処理対象物(Wastes)を過熱水蒸気と接触させ、分解、ガス化を行うガス化装置(Gasification Chamber)、そのガス化したガスを過熱空気と共に、二酸化炭素、水等までに完全分解、燃焼を行う主反応器(Combustion Chamber)、分解後の排ガス処理を行うスクラバ(Scrubber)から主に構成される。次図に水蒸気改質処理装置の概要を示す。



Steam Reformer

図 2-1：水蒸気改質処理装置

2.2 ガス化装置の概要

ガス化装置(Gasification Chamber)は、主に、処理対象物を供給するスクリーフィーダ(Screw Feeder)、処理対象物と水蒸気を反応させる内管(Inner Pipe)及びそれを取り囲む加熱ヒータ(Heater)等にて構成されている。ガス化装置の端部に供給された処理対象廃棄物は、スクリーフィーダ(運転中は約1rpmで回転)により送られ、処理対象物の反対側の端部から供給される水蒸気と向流接触して分解、ガス化し、その分解ガスはガス化装置出口配管(Gasification Chamber Outlet Pipe)からガス化装置より排出される。ガス化されない成分は、廃棄物残渣となり、そのままスクリーフィーダにより送られ、残渣受け容器へ排出される。

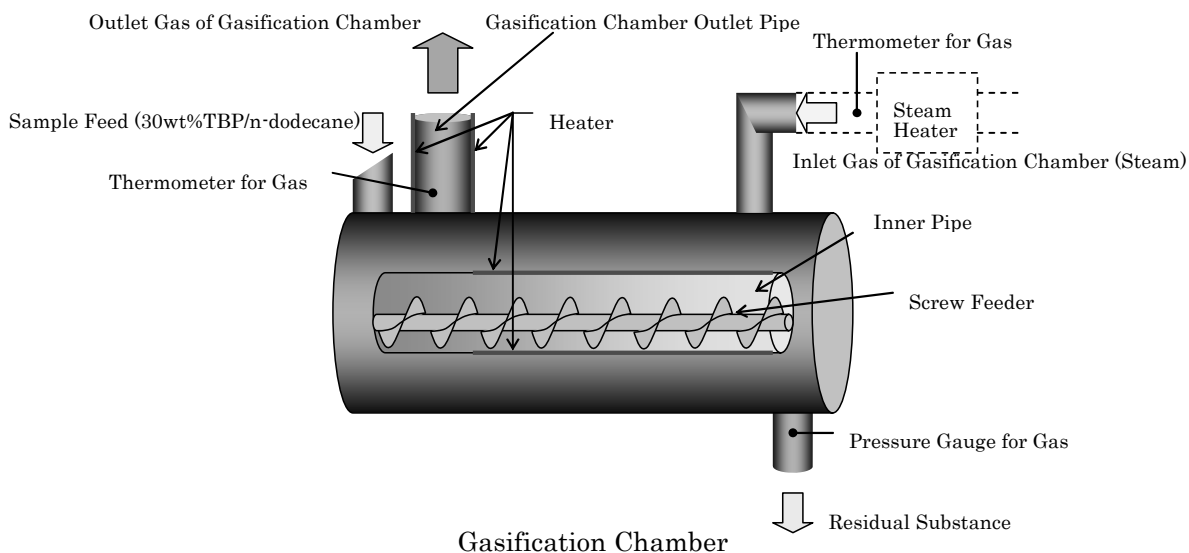


図 2-2 : ガス化装置

### 3. ガス化装置熱計算モデル

ガス化装置の熱計算モデルを作成し、Microsoft Office Excel 2003にて数値計算を行った。次にその概要を説明する。

#### 3.1 熱計算モデル

ガス化装置内の構造を基に、ガス化装置の熱計算モデルには、単純な円管モデルを採用した。熱計算モデルの作成は、まず、ガス化装置によるガス加熱のモデルを作成し、そのモデルの妥当性を、計算結果と試験実測値と比較することにより確認、検証する。そして、そのモデルの妥当性確認後、ガス化装置内における試料の化学反応モデル等を組み込み、計算結果と試験実測値を比較することにより、試料分解モデルの妥当性を確認、検証する。次に、熱計算モデルの概要について示す。

3.1.1 熱計算モデル（ガス化装置によるガスの加熱）概要

熱計算の第1段階として、ガス化装置によるガス加熱のモデルを作成した。熱計算モデルには、単純な円管モデルを採用した。ある温度、組成をもった入口ガスは、円管内に入り、円管内面から熱伝達によって伝わる熱エネルギーを受け取り、温度を上昇させて、出口ガスとして円管の外に出る。円管内面からガスに伝わる熱エネルギーは、ガス化装置加熱ヒータ（円管外面に相当）から熱伝導により伝わり供給される（本モデルを、以下、「試料供給なし」のモデルとする）。

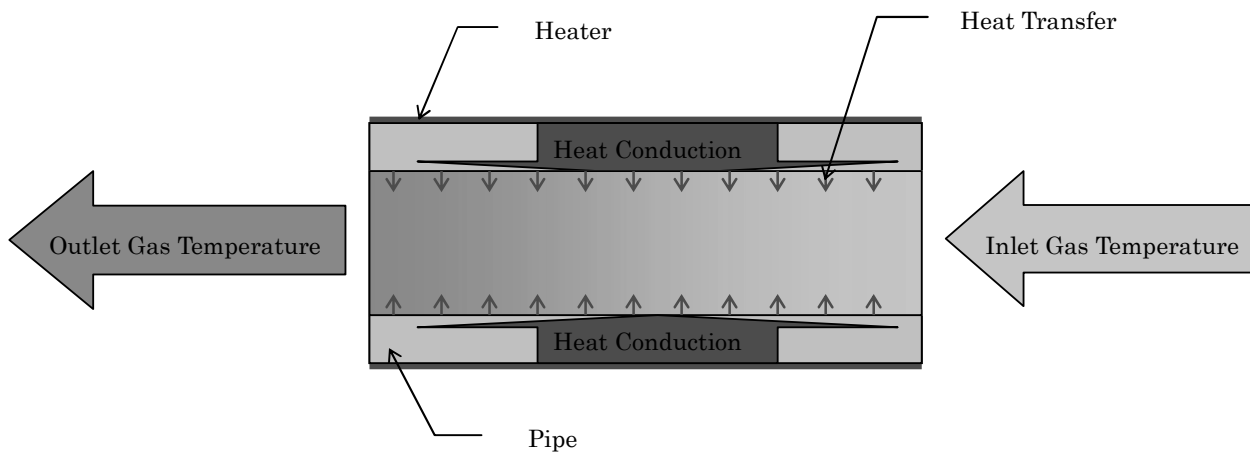


図 3.1-1 : 熱計算モデル（ガス化装置によるガスの加熱）概要

3.1.2 熱計算モデル（試料の物理的变化及び化学反応の組み込み）概要

熱計算の第2段階として、3.1.1で作成したモデルにガス化装置内における試料の物理的变化及び化学反応モデルを組み込んだモデルを作成した。試料モデルの組み込み方については、円管の中央部にて、試料分解ガス（試料が熱分解、及び、蒸発したもの）が入口ガスと混合するモデルとした。よって、前半加熱部にて入口ガスが加熱され温度が上昇し、中央部にて試料分解ガスと混合、再度、後半加熱部にて、入口ガス・試料分解ガスの混合ガスが加熱され、出口ガスとして円管の外に出る。なお、試料の熱分解等により発生する化学反応熱エネルギーについては、入口ガスと試料分解ガスを混合する際に加えた。また、試料は、円管内面から熱エネルギーを受け取り蒸発するものとした(本モデルを、以下、「試料供給あり」のモデルとする)。

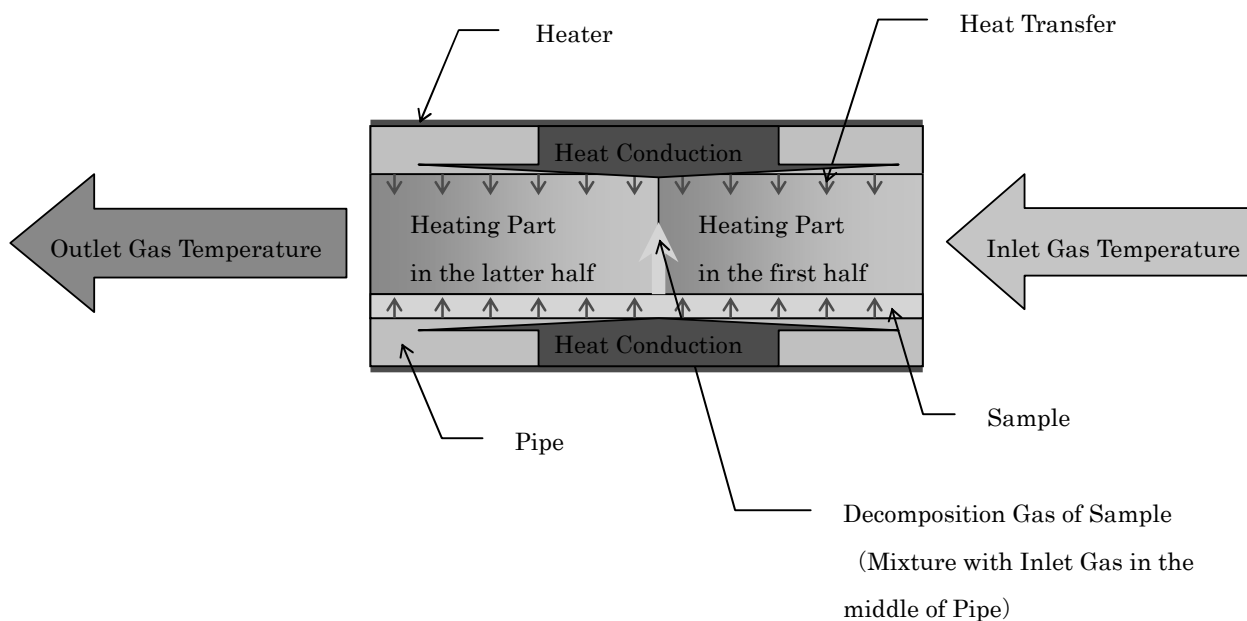


図 3.1-2 : 熱計算モデル（試料の物理的变化及び化学反応の組み込み）概要

3.2 熱計算フロー

前述のモデルを使用してのガス化装置についての熱計算フローを次に示す。熱計算では、ガス化装置の運転条件により、ガス化装置入口ガス温度及びガス組成から、ガス化装置出口ガス温度を計算できるものとした。

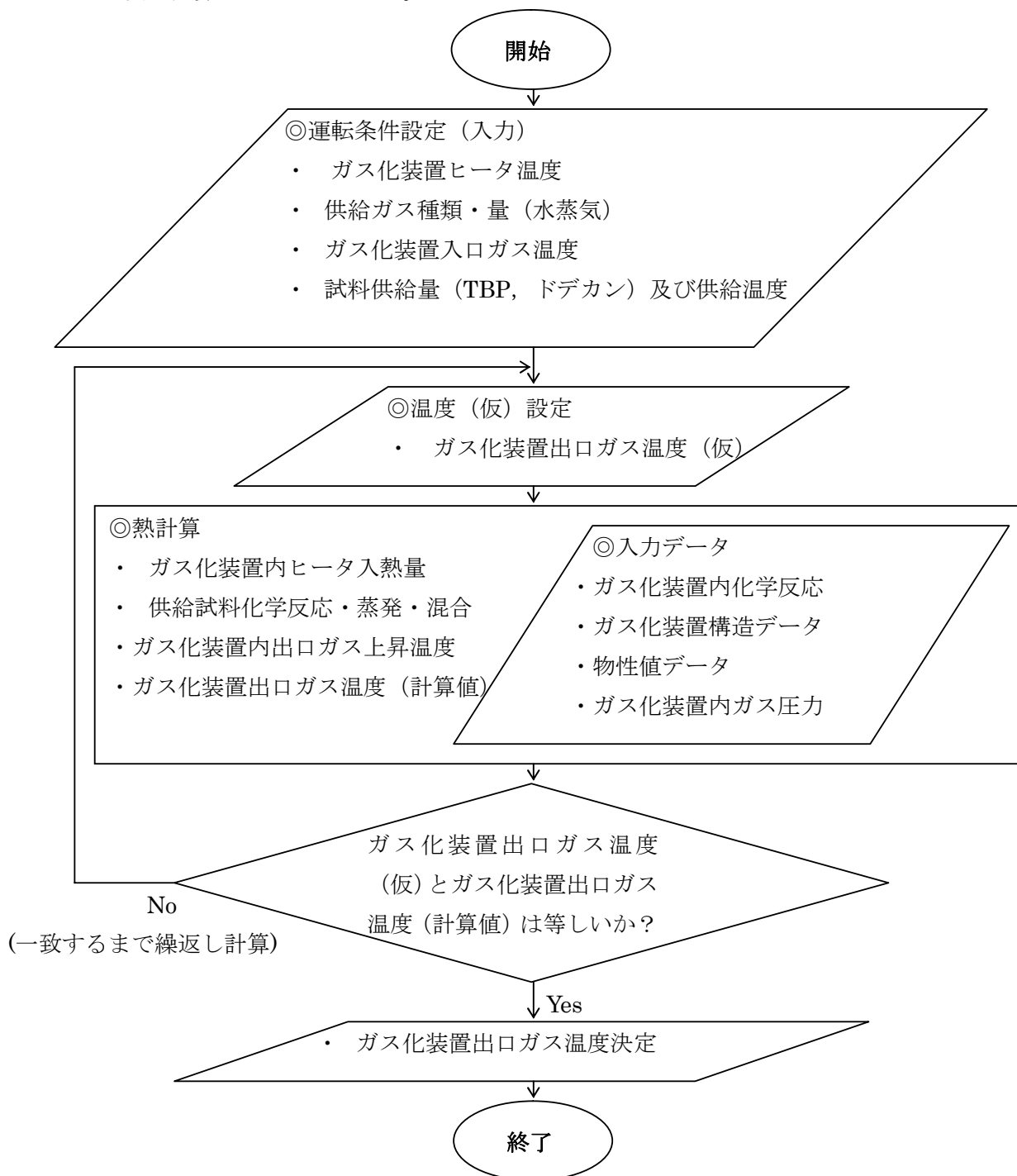


図 3.2-1 : ガス化装置熱計算フロー概要



### 3.3 熱計算方法

ここでは、本熱計算に使用した、入力条件及び計算式について示す。

#### 3.3.1 入力条件設定について

##### 3.3.1.1 水蒸気改質処理装置運転条件設定

熱計算に設定入力する運転条件を以下のものとした。

- ①ガス化装置ヒータ温度
- ②供給ガス種類及び量（水蒸気）
- ③ガス化装置入口ガス温度
- ④試料供給量（TBP，ドデカン）及び試料供給温度

##### 3.3.1.2 ガス化装置構造データ

熱計算に設定入力するガス化装置構造データを以下のものとした。

- ①ガス化装置長さ（円管モデルの円管長さに相当）
- ②ガス化装置ヒータ位置（円管モデルの円管外径に相当）
- ③ガス化装置内ガス流路内径（円管モデルの円管内径に相当）

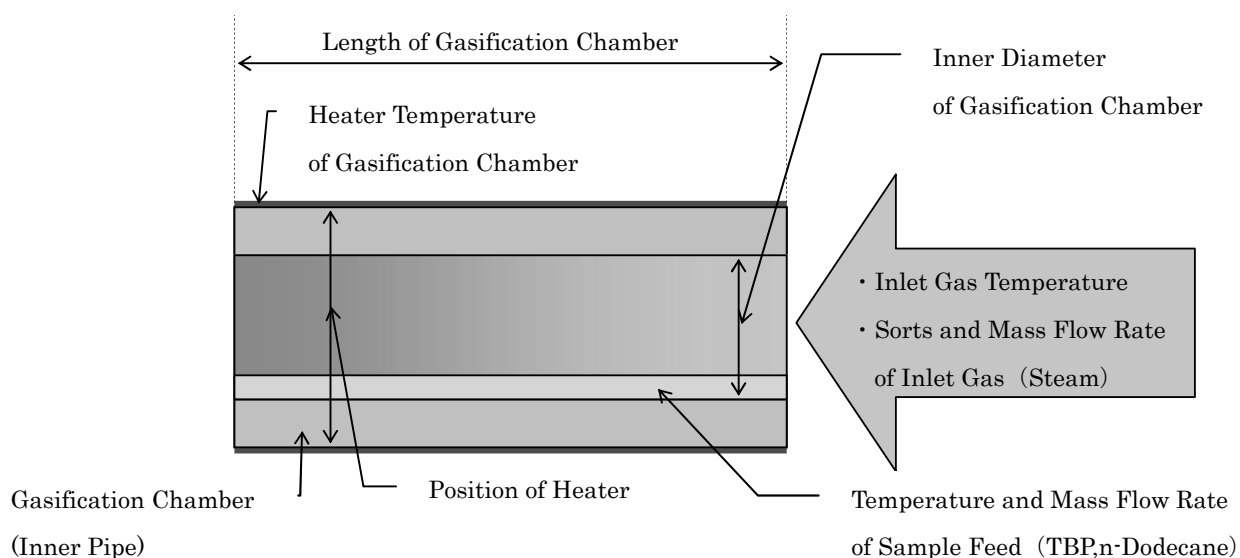


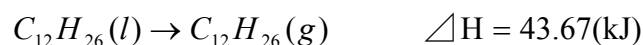
図 3.3-1 : ガス化装置熱計算入力条件

### 3.3.2 ガス化装置内化学反応

試料供給時のガス化装置内における試料の物理的及び化学的変化の考え方を以下に示す。ガス化装置内に供給された試料（ドデカン(C<sub>12</sub>H<sub>26</sub>), TBP((C<sub>4</sub>H<sub>9</sub>)<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>)) は、ガス化装置に供給されて以下のように変化すると考えた。

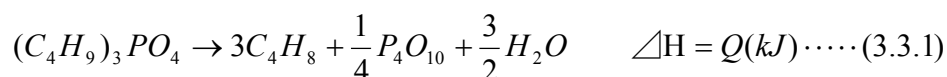
#### 3.3.2.1 ドデカン(C<sub>12</sub>H<sub>26</sub>)について

ドデカンは、液体の状態でガス化装置内に供給され、ガス化装置内で、円管内面からエネルギーをもらい蒸発し、円管の中心位置で入口ガスと混合するものとした。ドデカンの蒸発潜熱は、43.67(kJ/mol)<sup>2)</sup>である。



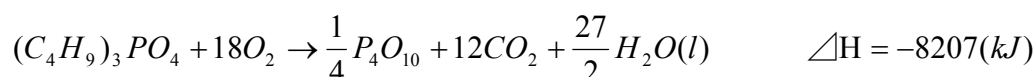
#### 3.3.2.2 TBP((C<sub>4</sub>H<sub>9</sub>)<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>)について

TBP は、液体の状態でガス化装置内に供給され、ガス化装置内で、以下の分解反応が起こるものとした。



Q については、TBP(分子量:266.3)の燃焼発熱量が 30,820(kJ/kg)<sup>7)</sup> という条件より、以下のように算出した。

TBP の燃焼発熱量: 30,820(kJ/kg)(=8,207kJ/mol)は、以下のように解釈した。



また、以下の各項の物質の標準生成エンタルピー  $\Delta_f H^\circ$  (298.15K, 1.0×10<sup>5</sup>Pa)より、(3.3.1)の Q を、Q=-55 (kJ) とした。

CO<sub>2</sub> (g) : -393.51 (kJ/mol)

H<sub>2</sub>O (l) : -285.83 (kJ/mol)

C<sub>4</sub>H<sub>8</sub> (1-ブテン) (g) : 0.1 (kJ/mol)

(ブテンは、構造異性体の中で、標準生成エンタルピーの値が最も大きいものを採用した。

これにより、Q の値 (絶対値) が一番大きくなる。)

(3.3.1)式の分解後のブテン（1-ブテン）は円管の中心位置で入口ガスと混合、水は円管内面からエネルギーをもらい蒸発し円管の中心位置で入口ガスと混合、五酸化二リンは円管内面からエネルギーをもらい温度上昇するものとした。ただし、五酸化二リンは、蒸発しないものとした（ガスには影響を与えない）。

これらの熱計算は、各々の物質について、相互に影響を及ぼし合わないものとして、独立に計算をした。

試料ガスの混合後のガス温度  $T_{mix}$  の算出は、

$$\sum_i \dot{m}_i C_{pi} (T_{mix} - T_i) = 0 \quad \text{ただし、} \begin{cases} \dot{m}_i : \text{各ガスの質量流量} \\ C_{pi} : \text{各ガスの定圧比熱} \\ T_{mix} : \text{混合後のガス温度} \\ T_i : \text{混合前の各ガス温度} \end{cases}$$

より求めた。

3.3.3 使用熱計算式

本熱計算に用いた計算式を次に示す。

3.3.3.1 ガス化装置内ヒータ入熱量

円管の熱伝導による入熱量は、以下の式で表すことができ、本熱計算では以下の式を使用した。

$$Q = \frac{2\pi l(T_o - T_i)}{\lambda \log_e \left( \frac{r_o}{r_i} \right)}$$

ただし、

$$\left\{ \begin{array}{l} l: \text{円管長さ} \\ T_o: \text{円管外表面温度} \\ T_i: \text{円管内表面温度} \\ \lambda: \text{円管熱伝導率} \\ r_o: \text{円管外半径} \\ r_i: \text{円管内半径} \end{array} \right.$$

ガス化装置内ヒータ入熱量  $Q$  は、

$$\left\{ \begin{array}{l} l: \text{円管長さ(=ガス化装置長さ)} \\ T_o: \text{円管外表面温度(=ガス化装置ヒータ温度)} \\ T_i: \text{円管内表面温度(=ガス化装置内表面温度)} \\ \lambda: \text{円管熱伝導率(=ガス化装置内管の熱伝導率)} \\ r_o: \text{円管外半径(=ガス化装置ヒータ位置)} \\ r_i: \text{円管内半径(=ガス化装置内管内径)} \end{array} \right.$$

として計算した。

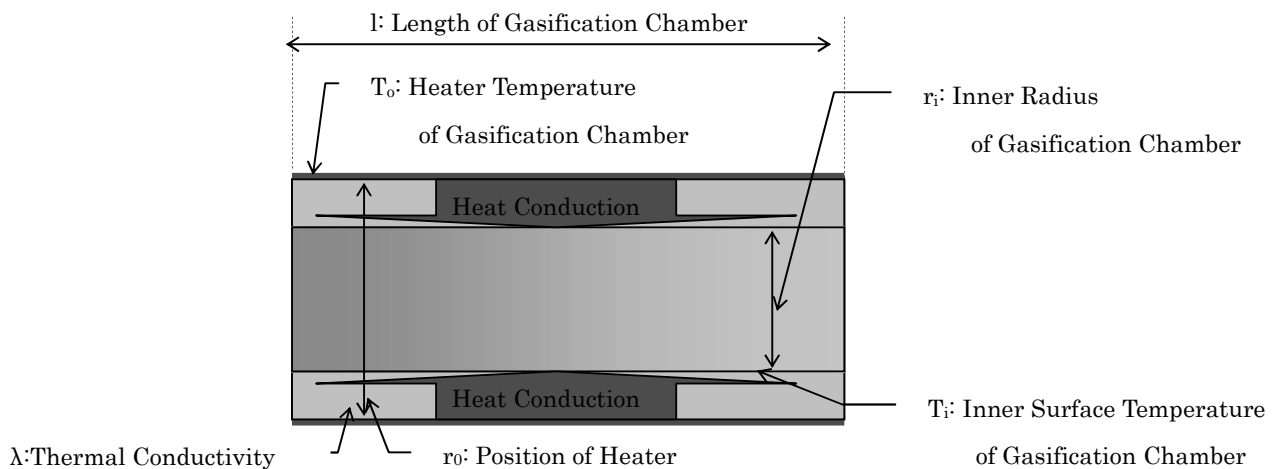


図 3.3-2: ガス化装置内ヒータ入熱量計算

### 3.3.3.2 ガス化装置出口ガス温度

ガス化装置出口ガス温度  $T_{out}$  は、ガス化装置出口ガス上昇温度  $\Delta T$  を求め、ガス化装置入口ガス温度  $T_{in}$  に加えることにより求めた。

$$T_{out} = T_{in} + \Delta T$$

ガス化装置出口ガス上昇温度  $\Delta T$  は、円管内面から流体ガスへの熱移動量  $Q$  より、以下の式より求めた。

$$Q = \dot{m}_{mix} C_{p,mix} \Delta T \quad \text{ただし、} \begin{cases} \dot{m}_{mix} : \text{混合ガスの質量流量} \\ C_{p,mix} : \text{混合ガスの定圧比熱} \end{cases}$$

熱移動量  $Q$  は、以下の式より求めた。

$$Q = h_m \Delta T_{lm} A \quad \begin{cases} A : \text{伝熱面積} \\ h_m : \text{熱伝達率} \\ \Delta T_{lm} : \text{対数平均温度差} \end{cases}, \quad Nu = \frac{h_m d}{\lambda}$$

なお、対数平均温度差  $\Delta T_{lm}$  は、次の式で定義される。

$$\Delta T_{lm} = \frac{(T_w - T_{in}) - (T_w - T_{out})}{\log_e \frac{T_w - T_{in}}{T_w - T_{out}}}$$

(平均)ヌセルト数の算出は、以下の式<sup>6)</sup>を使用した。

$$Nu = 3.66 + \frac{0.104 \left\{ \left( \frac{d}{l} \right) \text{Re Pr} \right\}}{1 + 0.016 \left\{ \left( \frac{d}{l} \right) \text{Re Pr} \right\}^{0.8}} \left( \frac{\eta_f}{\eta_w} \right)^{0.14}$$

}

$d$  : 円管内径

$l$  : 円管長さ

$\text{Re}$  : レイノルズ数

$\text{Pr}$  : プラントル数

$\eta_f$  : 流体温度における粘度

$\eta_w$  : 壁面温度における粘度

この式は、層流の速度助走区間に壁温一定の加熱がある場合の式( $\text{Pr}=0.7$ )である。本熱計算の条件では、 $\text{Re}$  は 2000 未満であるので層流の式を用いた(実際のガス化装置の中には、スクリーフィーダが存在し、ガスの流れは複雑になることが考えられる)。

$\left(\frac{\eta_f}{\eta_w}\right)^{0.14}$  は、温度の影響を補正する項であるが、温度差が小さいときは、 $\left(\frac{\eta_f}{\eta_w}\right)^{0.14} = 1$  とす

ることができ、本計算では1とした。また、本計算で用いた流体の物性値は、特に指定がない限り、入口ガス温度と出口ガス温度の平均温度(=(入口ガス温度+出口ガス口温度)/2)における値を用いた。

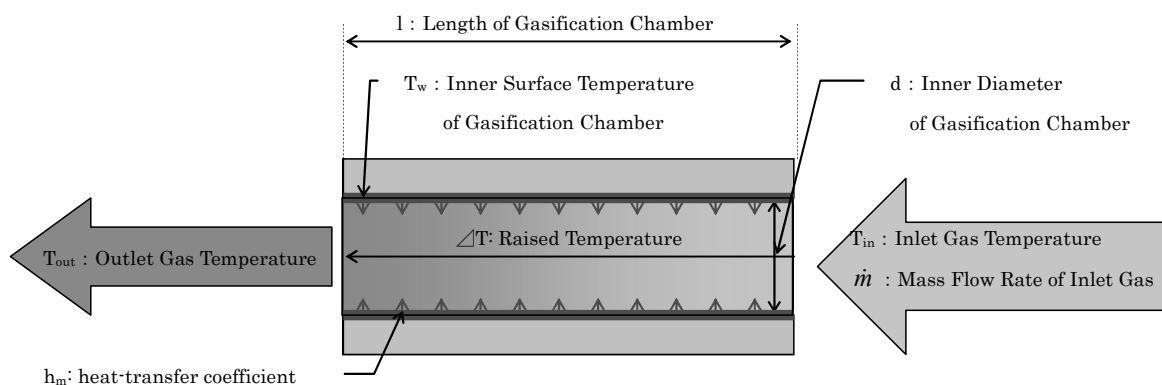


図 3.3-3:ガス化装置出口ガス上昇温度

### 3.4 使用物性値

本熱計算において、使用、または、算出した、各々の物質の物性値を以下に示す。

- ① 密度
- ② 定圧比熱
- ③ 蒸発潜熱
- ④ 粘度
- ⑤ 熱伝導率
- ⑥ 動粘度
- ⑦ プラントル数
- ⑧ 沸点

#### 3.4.1 密度

使用した密度について、次に示す。

##### 3.4.1.1 気体の密度

純粋気体(水,ドデカン,ブテン)の密度は、理想気体の状態方程式  $PV=nR_0T$  より求めた。

##### 3.4.1.2 混合気体の密度

混合気体の密度  $\rho_{\text{mix}}$  は、以下の式とした。

$$\rho_{\text{mix}} = \frac{1}{\sum_i \left( \frac{x_i}{\rho_i} \right)} \quad \{x_i: \text{混合気体中の各気体の質量分率}\}$$

### 3.4.2 定圧比熱

使用した定圧比熱について、次に示す。

#### 3.4.2.1 気体の定圧比熱

ドデカン、ブテンの定圧比熱については、常圧の各温度（約 100℃毎）におけるドデカン、ブテンの定圧比熱<sup>3)</sup>から、温度による線形補間によって求めたものを、水の定圧比熱については、各圧力（0.01(MPa),0.1(MPa),0.5(MPa)）、各温度（約 50℃毎）における水の定圧比熱<sup>1)</sup>から、温度、圧力による線形補間によって求めたものを使用した。

#### 3.4.2.2 混合気体の定圧比熱

混合気体の定圧比熱 $C_{p,mix}$ については、次式で求めた。

$$C_{p,mix} = \sum_i x_i C_{p,i} \quad \{x_i: \text{混合気体中の各気体の質量分率}\}$$

#### 3.4.2.3 液体の定圧比熱

水の定圧比熱については、各圧力（0.01(MPa),0.1(MPa),0.5(MPa)）、各温度（約 20℃毎）における水の定圧比熱<sup>1)</sup>から、温度、圧力による線形補間によって求めたものを使用した。ドデカンの定圧比熱については、常圧の各温度（250(K),298.15(K)）におけるドデカン（液体）の比熱<sup>3)</sup>から、温度による線形補間によって求めたものを使用した。298.15(K)以上の比熱は、直線外挿により求めたものを使用した。

#### 3.4.2.4 固体の定圧比熱

五酸化二リンについては、常圧の各温度（298.15(K),400(K),500(K),600(K)）における五酸化二リンの比熱<sup>3)</sup>から、温度による線形補間によって求めたものを使用した。600(K)以上の比熱は、直線外挿により求めたものを使用した。

### 3.4.3 蒸発潜熱

水の蒸発潜熱は 40.69(kJ/mol)<sup>2)</sup>、ドデカンの蒸発潜熱は 43.67(kJ/mol)<sup>2)</sup>とした。



### 3.4.4 粘度

水の粘度については、各圧力 (0.01(MPa),0.1(MPa),0.5(MPa))、各温度 (約 50°C毎) における水の粘度<sup>1)</sup>から、温度、圧力による線形補間によって求めたものを使用した。ドデカン、ブテンについては、以下に示す計算式を使用した。

#### 3.4.4.1 低圧における気体の粘度<sup>4)</sup>

希薄な気体の粘度について推奨されている計算式として、次の計算式がある。本熱計算では、以下の式を使用した。

$$\eta = [(\eta\xi)^r f_p f_Q] \frac{1}{\xi}$$

式の各項については、以下のとおりである。

##### (1) $(\eta\xi)^r$

$$(\eta\xi)^r = 0.807T_r^{0.618} - 0.357e^{-0.449T_r} + 0.340e^{-4.058T_r} + 0.018$$

$$\left\{ \begin{array}{l} T_r = \frac{T}{T_c} \quad (T_c : \text{臨界温度}, r : \text{対臨界値}) \quad \text{ただし、} 0.5 < T_r \leq 40 \end{array} \right.$$

##### (2) $\xi$

$$\xi = \frac{T_c^{1/6} R_0^{1/6} N_A^{1/3}}{M^{1/2} p_c^{2/3}} \left\{ \begin{array}{l} T_c : \text{臨界温度(K)} \\ R_0 : \text{気体定数(8314.433)(J/kmolK)} \\ N_A : \text{アボガドロ定数}(6.022045 \times 10^{26})(1/\text{kmol}) \\ M : \text{分子量(kg/kmol)} \\ p_c : \text{臨界圧力(Pa)} \end{array} \right.$$

(3) 極性係数  $f_p$

極性係数  $f_p$  は、極性物質の通常物質に有効な  $(\eta\xi)^r$  の式からの偏倚を示す。  
 使用した極性係数の式を以下に示す。

$$\begin{cases} f_p = 1 & (0 \leq \mu_R < 0.022) \\ f_p = 1 + 30.55[(0.292 - Z_C)]^{1.72} & (0.022 \leq \mu_R < 0.075) \\ f_p = 1 + 30.55[(0.292 - Z_C)]^{1.72} [0.96 + 0.1(T_r - 0.7)] & (0.075 \leq \mu_R) \end{cases}$$

$$\begin{cases} Z_c : \text{臨界圧縮係数} (= \frac{p_c v_c}{R_0 T_c}) & \{v_c : \text{臨界容積} \\ \mu_R = \frac{\mu^2 p_c}{(k T_c)^2} & \left\{ \begin{array}{l} \mu : \text{双極子モーメント} \\ k : \text{ボルツマン定数}(1.3806 \times 10^{-23})(J/K) \end{array} \right. \end{cases}$$

(4) 量子係数  $f_Q$

量子係数  $f_Q$  は、量子物質 ( $He, H_2, D_2$ ) の通常物質に有効な  $(\eta\xi)^r$  の式からの偏倚を示す。  
 使用した量子係数の式を以下に示す。

$$\begin{cases} f_Q = 1.22 \lambda_R^{0.15} (1 + 0.00385 [(T_r - 12)^2]^{1/2} \text{sgn}(T_r - 12)) & (He, H_2, D_2) \\ f_Q = 1 & (\text{他の物質}) \end{cases}$$

$$\lambda_R = \frac{h p_c^{1/3} N_A^{4/3}}{R_0^{5/6} T_C^{5/6} M^{1/2}} \begin{cases} h : \text{プランク定数}(6.6260693 \times 10^{-34})(J \cdot s) \\ p_c : \text{臨界圧力} \\ N_A : \text{アボガドロ定数}(6.022045 \times 10^{26})(1/\text{kmol}) \\ R_0 : \text{一般気体定数}(8314.433)(J/\text{kmol} \cdot K) \\ T_c : \text{臨界温度} \\ M : \text{分子量}(kg/\text{kmol}) \end{cases}$$

本熱計算では、量子物質 ( $He, H_2, D_2$ ) を扱っていないので、 $f_Q = 1$  とした。

3.4.4.2 低圧における混合気体の粘度<sup>4)</sup>

低圧力のときの混合気体の粘度は、純粋気体の式から近似ができ、混合気体のデータを次のように定めた。

$$T_{c,mix} = \sum_i y_i T_{ci}$$

$$P_{c,mix} = \frac{R_0 \left( \sum_i y_i Z_{ci} \right) T_{c,mix}}{\sum_i y_i v_{ci}}$$

$y_i$  は、混合気体中の各気体のモル分率である。

分子量および補正係数  $f_p$  および  $f_Q$  については、次の混合法則が使用できる。

$$M_{mix} = \sum_i y_i M_i$$

$$f_{p,mix} = \sum_i y_i f_{pi}$$

$$f_{Q,mix} = \left( \sum_i y_i f_{Qi} \right) A \quad \text{ただし} \quad \begin{cases} A = 1, & \left( \frac{M_{max}}{M_{min}} \leq 9 \right) \\ A = 1 - 0.01 \left( \frac{M_{max}}{M_{min}} \right)^{0.87}, & \left( \frac{M_{max}}{M_{min}} > 9 \text{ および } 0.05 < y_{M_{max}} < 0.70 \right) \end{cases}$$

$\frac{M_{max}}{M_{min}}$  は、最も重い成分の分子量と、最も軽い成分の分子量の比であり、 $y_{M_{max}}$  は、最も重い成分のモル分率である。

これらの混合気体についての値を用いて、前述の式を利用し、混合気体の粘度  $\eta_{mix}$  を求めた。

### 3.4.5 熱伝導率

本熱計算で使用した熱伝導率の式を示す。

#### 3.4.5.1 低圧における気体の熱伝導率について<sup>4)</sup>

低圧時の気体の熱伝導度は分子間力および分子の内部構造によって定まる。精度、単純性、普遍性の間に十分な妥協をはかった計算法で、以下の Bromley の計算法がある。

単原子気体について

$$\lambda = 2.5C_{v,m} \frac{\eta}{M}$$

線状分子について

$$\lambda = (1.3C_{v,m} + 1.762R_0 - \frac{0.352 \cdot R_0}{T_r}) \frac{\eta}{M} \quad (C_{v,m} \text{ は、定容モル比熱})$$

ドデカン、ブテンの熱伝導率は、上記の線状分子の式を利用して求めた。水の熱伝導率については、各圧力 (0.01(MPa), 0.1(MPa), 0.5(MPa))、各温度 (約 50°C 毎) における水の熱伝導率<sup>1)</sup>から、温度、圧力による線形補間によって求めたものを使用した。

#### 3.4.5.2 混合気体の熱伝導率について<sup>4)</sup>

希薄気体混合物の熱伝導率について推奨されている式に、Wassiljewa の混合式がある。混合気体の熱伝導率  $\lambda_{mix}$  は、以下の式を使用した。

$$\lambda_{mix} = \sum_i \frac{y_i \lambda_i}{\sum_j y_j A_{ij}}$$

式中の混合係数  $A_{ij}$  の決定については、数種の方法が考案されているが、本熱計算では、

Mason および Saxena による次の関係式を使用した。

$$A_{ij} = \frac{\left[ 1 + \left( \frac{\eta_i}{\eta_j} \right)^{1/2} \left( \frac{M_j}{M_i} \right)^{1/4} \right]^2}{\left[ 8 \left( 1 + \frac{M_i}{M_j} \right) \right]^{1/2}}$$

### 3.4.5.3 固体の熱伝導率について

ステンレス鋼(SUS310S)の熱伝導率は、 $16.3(\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K}))$ <sup>5)</sup>を使用した。

### 3.4.6 動粘度

動粘度は、純粋気体、混合気体共に、粘度と密度から計算し求めた。

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}$$

### 3.4.7 プラントル数

プラントル数は、純粋気体、混合気体共に、粘度、定圧比熱と熱伝導率から計算し求めた。

$$\text{Pr} = \frac{\eta C_p}{\lambda}$$

### 3.4.8 沸点

水の沸点は  $373.2(\text{K})$ <sup>2)</sup>、ドデカンの沸点は  $489.5(\text{K})$ <sup>2)</sup>とした。

#### 4. 熱計算の実施

熱計算は、大きくわけて、「試料供給なし」と「試料供給あり」の2つのケースについて実施した。

まず最初に、ガス化装置でのガス加熱の観点からの熱計算モデルの妥当性を確認するために、「試料供給なし」のケースで熱計算を行った。熱計算モデルの妥当性の確認は、本熱計算モデルを利用して、ガス化装置出口配管温度計位置でのガス温度を計算し、実試験データとの比較確認で行った。ガス温度の実試験データは、ガス化装置出口配管温度計の位置しかないためである。ガス化装置出口配管とは、ガス化装置の出口に接続されている配管であり、その配管の途中にガス温度を計測する温度計が設置されている。その後、試料分解モデルを組み込んだ「試料供給あり」のケースで熱計算を行い、「試料供給なし」の場合と同様の確認を行った。

本熱計算で算出した温度は、ガス化装置出口配管温度計位置での温度以外にも、下記に示す温度も、併せて算出した。

- ①ガス化装置出口ガス温度
- ②ガス化装置出口配管温度計位置温度
- ③ガス化装置出口配管出口ガス温度

4.1 熱計算の実施方法

熱計算は、3章で説明したモデルを使用して行った。ガス温度の実試験データが存在するガス化装置出口配管温度計位置のガス温度は、次のように同じ円管モデル（ガス化装置熱計算モデル）を使用し算出した。

熱計算の手順は、ガス化装置入口ガス温度より、円管モデルを使用し、①ガス化装置出口ガス温度を算出した。そして、①ガス化装置出口ガス温度(=ガス化装置出口配管入口ガス温度)より、再度、円管モデルを使用し、③ガス化装置出口配管出口ガス温度を算出した。②ガス化装置出口配管温度計位置温度は、ガス化装置出口配管内部でガス温度が一定の割合で上昇するものとして、ガス化装置出口配管入口ガス温度（①ガス化装置出口ガス温度）と出口ガス温度（③ガス化装置出口配管出口ガス温度）から算出した。

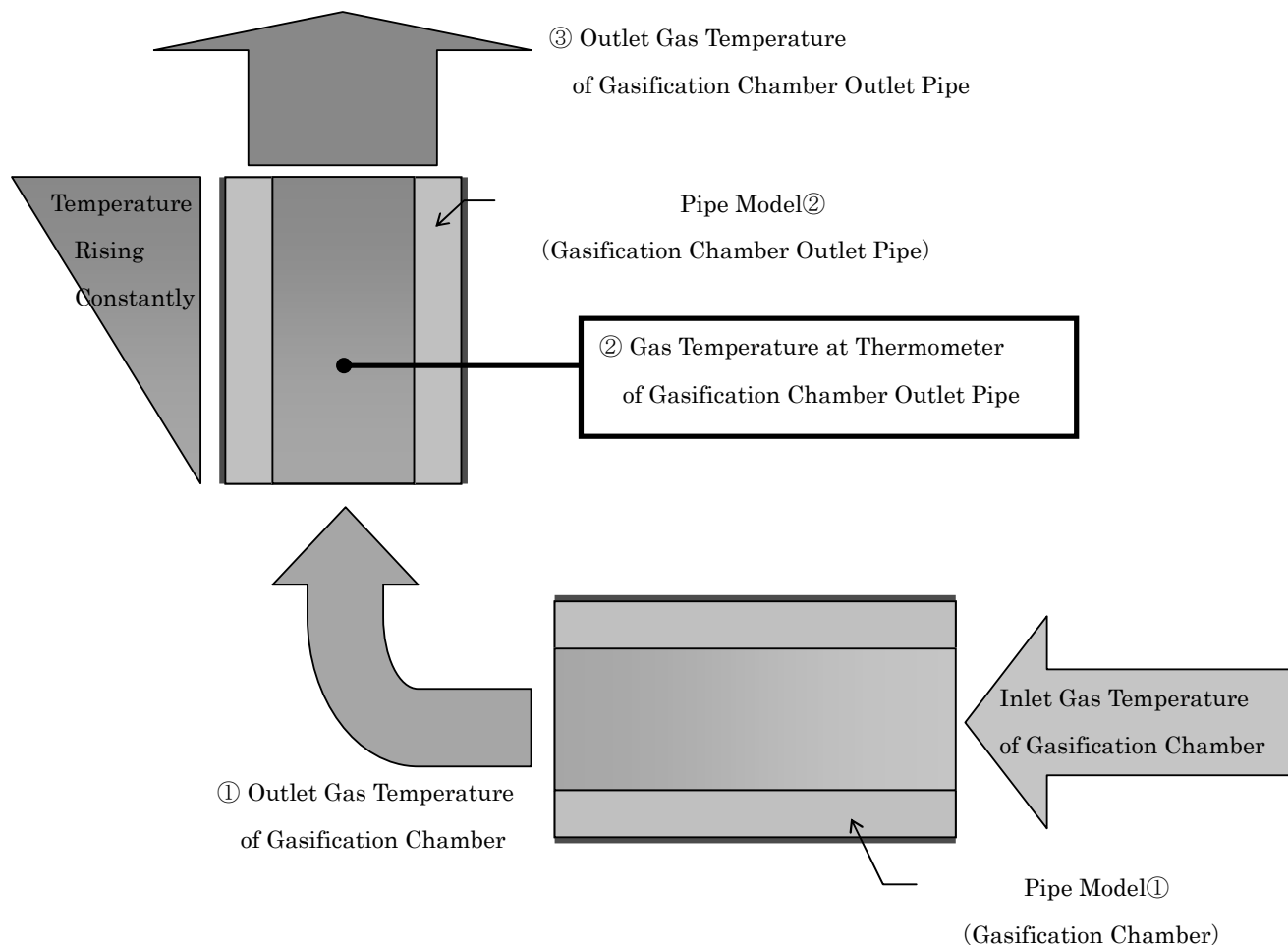


図 4.1-1: ガス化装置出口配管温度計位置温度計算概要

4.2 計算条件

実施した熱計算の条件を表 4.2-1 に示す。試料供給量(30wt%TBP/ドデカン)、水蒸気供給量、ガス化装置ヒータ温度、ガス化装置出口配管ヒータ温度を変えて計算を行った。試料供給温度は 25℃、水蒸気供給温度は 400℃とした。なお、計算に使用した圧力は、一律に、-6kPa[gage](試験中におけるガス化装置入口ガス圧力計測値のおおよその値)とした。

表 4.2-1：試料及び水蒸気供給条件と装置運転条件(ヒータ温度)

項目	試料供給量 (kg/h)(25℃)	水蒸気供給量 (kg/h) (400℃)	ガス化装置 ヒータ温度 (℃)	ガス化装置出口配管 ヒータ温度 (℃)
CASE1	0	0.75	600	600
CASE2			600	650
CASE3			650	650
CASE4		1.5	600	600
CASE5			600	650
CASE6			650	650
CASE7		3	600	600
CASE8			600	650
CASE9			650	650
CASE10	3	0.75	600	600
CASE11			600	650
CASE12			650	650
CASE13		1.5	600	600
CASE14			600	650
CASE15			650	650
CASE16		3	600	600
CASE17			600	650
CASE18			650	650

\*:計算に使用した圧力は、-6kPa[gage]とした。(ガス化装置入口ガス圧力)



ガス化装置の構造条件は、表 4.2-2 とした。

表 4.2-2：構造条件

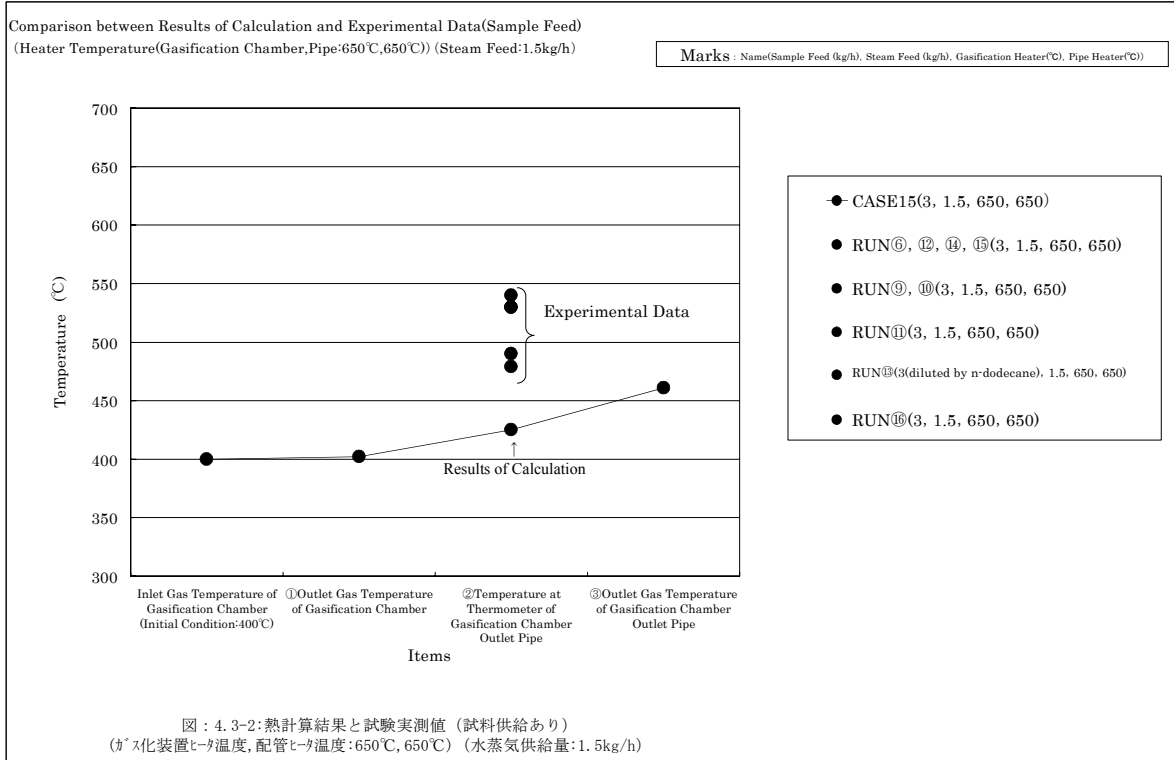
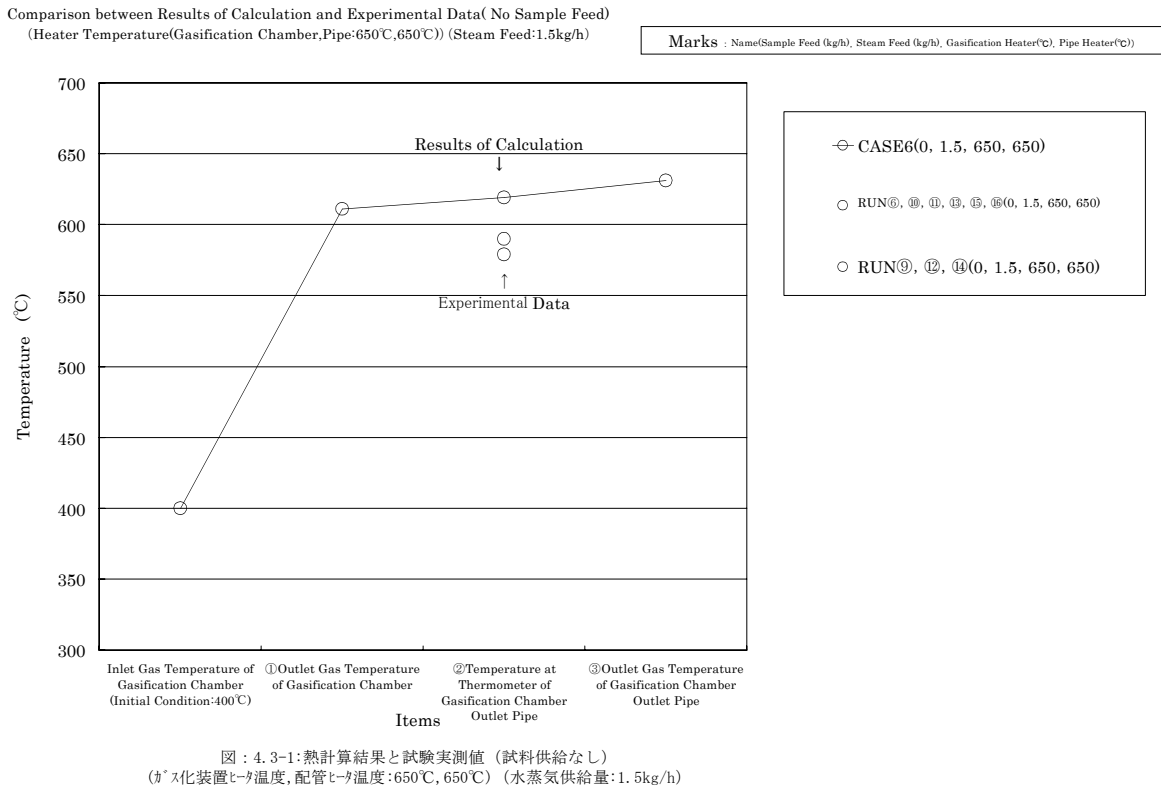
項目	ガス化装置	ガス化装置出口配管
配管長さ	1.7(m)	0.371(m)
配管内径	0.1266 (m)	0.0709(m)
配管外径	0.1398 (m)	0.0819(m)
配管材質	SUS310S	SUS310S
備考	125ASch40 と仮定 (実際のガス化装置内管は、内径 130mm×102mm 長円)	80ASch40 温度計位置： 入口より 0.146(m)と仮定

#### 4.3 熱計算結果と試験実測値の比較

熱計算結果と試験実測値の比較結果について、代表的な条件の例を図 4.3-1、図 4.3-2 に示す。その他の条件の結果については以下のように付録にまとめた。

- ① 図 a-1～図 a-3：水蒸気供給量別に熱計算結果をまとめた
- ② 図 a-4～図 a-6：ヒータ温度別に熱計算結果をまとめた
- ③ 図 a-7：試料供給なし、水蒸気供給量:1.5kg/h の試験実測値をまとめた
- ④ 図 a-8：試料供給あり、水蒸気供給量:1.5kg/h の試験実測値をまとめた
- ⑤ 図 a-9～図 a-11：ヒータ温度別に試験実測値をまとめた
- ⑥ 図 a-12～図 a-19：試料供給あり・なし、水蒸気供給量、ヒータ温度別に熱計算結果と試験実測値の比較をまとめた

試験実測値は、H18 年度後半に実施した実廃溶媒処理試験 RUN①～⑯のガス化装置出口配管温度計の温度を使用した。熱計算の結果は定常状態のものであるので、実廃溶媒処理試験のガス化装置出口配管温度計の温度チャートから、定常状態の温度と考えられる値を読み取った。



#### 4.4 熱計算結果の考察

図 a-1～図 a-6 の熱計算結果（折線グラフ）より、以下の傾向が見られた。

- (1) 図 a-1～図 a-3 は、水蒸気供給量別に熱計算結果をまとめたものである。また、図 a-4～図 a-6 はヒータ温度別に熱計算結果をまとめたものである。これらの図より、試料供給なしの場合と試料供給ありの場合との比較では、試料供給なしの場合の方がガス温度が高くなっている。これは、試料供給ありの場合は、温度の低い試料が、ガス化装置に入ってきたガス（水蒸気）と混ざり、ガス温度を下げるためであると考えられる。
- (2) 図 a-1～図 a-3 には、水蒸気供給量を一定として、ヒータ温度をパラメータとした熱計算結果をまとめている。これらの図より、ヒータ温度に関しては、試料供給ありの場合、試料供給なしの場合、共に、ヒータ温度が高ければ高いほど、ガス温度が高くなる結果となっている。
- (3) 図 a-4～図 a-6 には、ヒータ温度を一定として、水蒸気供給量をパラメータとした熱計算結果をまとめている。これらの図より、水蒸気供給量に関しては、試料供給なしの場合は、水蒸気供給量が少ない方が、ガス温度が高い結果となっている。その一方で、試料供給ありの場合は、水蒸気供給量が多い方が、ガス温度が高い結果となっている。これは、試料供給なしの場合は、水蒸気供給量が少ない方がガスの熱容量が小さいため、ガス温度が上昇したと考えられる。試料供給ありの場合は、水蒸気供給量が多いほど、水蒸気もつ熱エネルギーが大きく、試料供給による温度降下の影響が小さくなったことが考えられる。

また、図 a-7～図 a-11 の試験実測値より、以下の傾向が見られた。

- (4) 図 a-7 は、試料供給なしの場合の試験実測値をまとめたものである。図 a-8 は、試料供給ありの場合の試験実測値をまとめたものである。これらの図より、ヒータ温度に関しては、試料供給なしの場合、熱計算結果と同様に、ヒータ温度が高ければ高いほど、ガス温度が高くなる傾向となっている。試料供給ありの場合は、RUN⑨～⑪（3日連続運転）を除くと、熱計算結果と同様に、ヒータ温度が高いほど、ガス温度が高い傾向になっている。
- (5) 図 a-9～図 a-11 は、ヒータ温度別に試験実測値をまとめたものである。これらの図より、試料供給なしの場合と試料供給ありの場合との比較では、熱計算結果と同様に、試料供給なしの方がガス温度が高くなっている。

- (6) 図 a-9 は、ヒータ温度[ガス化装置ヒータ，配管ヒータ：600℃，600℃]の試験実測値をまとめたものである。この図より、水蒸気供給量に関しては、試料供給なしの場合、熱計算結果と同様に、水蒸気供給量が少ないほど、ガス温度が高い傾向が確認できた。試料供給ありの場合は、熱計算結果では、水蒸気供給量が多いほどガス温度が高くなったが、試験実測値では、顕著な傾向は見られなかった。

図 4.3-1、図 4.3-2 及び図 a-12～図 a-19 の熱計算結果と試験実測値の比較（②ガス化装置出口配管温度計温度）により、以下の傾向が見られた。

- (7) 図 4.3-1 及び図 a-12～図 a-15 は、試料供給なしの場合における、ガス化装置出口配管温度計位置温度の熱計算結果と試験実測値を比較したものである。これらの図より、試料供給なしの場合では、熱計算結果の方が実測値より温度が高くなる傾向があるものの、その温度差は 50℃程度であり、比較的近い結果が得られている。実際の運転における水蒸気温度 400℃は、蒸気過熱器出口にある温度計で計測しているものであり、蒸気過熱器とガス化装置の間の配管は加熱されていないことから、ガス化装置に入る前に水蒸気温度が下がっていることが考えられる。このことを考慮すれば、より熱計算結果と試験実測値が近くなることが考えられる。

その一方で、図 4.3-2 及び図 a-16～図 a-19 は、試料供給ありの場合における、ガス化装置出口配管温度計位置温度の熱計算結果と試験実測値を比較したものであるが、これらの図より、試料供給ありの場合は、試料供給なしの場合とは逆に、熱計算結果が試験実測値より温度が低くなる傾向になり、またさらに、その温度差も 100℃程度となり、試料供給なしの場合に比べて倍近い差が見られた。熱計算モデルは同じものを利用して、同じような傾向が出るように思われるが、違う傾向が見られたことは、試料供給ありのケースで計算モデルとして使用した、ガス化装置内での試料の物理的、及び、化学的変化モデルが実際のガス化装置内で起こっているものとかかなり相違があることが原因であると考えられる。試料供給なしの場合に、熱計算結果が試験実測値より高い傾向が出ているにもかかわらず、試料ありの場合で逆に低い傾向が出ていることの原因の一つとして、ガス化装置内部での試料の化学反応における発熱量が、実際より、計算モデルでは低いことが考えられる。今回の計算では、TBP の熱分解のみの化学反応熱を考慮したが、他の化学反応熱を考慮することにより、より実測値に近くなると考えられる。例えば、装置内へのリーク空気による酸化反応の影響を考慮した場合、実際の処理試験においては窒素 2Nm<sup>3</sup>/h 供給時の酸素濃度が 2%程度となっていることから、ドデカンと TBP の熱分解により生じたブテンの一部をリーク空気中の酸素で完全酸化させた場合、その発熱により熱計算結果が数十度大きくなり、より実測値に近づく。また、本熱計算では、熱放射を考慮しなかったが、空気等の等核二原子分子と違い、水及び炭化水素はかなりの熱放射、吸収を行うことが考えられ、対流による熱伝達のみならず、

熱放射による熱伝達の影響を考慮することにより、水蒸気供給及び試料供給時について、より実測値に近い計算結果になると考えられる。

これらの熱計算モデルをさらに改良し、より実測値を再現できる熱計算モデルができれば、より適切な水蒸気改質処理運転条件の予測、処理対象物変更等の処理運転条件変更の際の処理装置運転挙動の予測、処理対象物の適切な処理の可否の予測を可能にする等、さまざまな応用が期待できる。

## 5. おわりに

水蒸気改質処理装置の運転条件の効果的、効率的改善、また、処理対象物変更等の装置運転条件変更時の処理装置運転挙動及び処理の可否の予測に資するため、水蒸気改質処理装置のガス化装置の熱計算モデルを作成し、そのモデルを利用し得られた熱計算結果と水蒸気改質処理試験実測値を比較することにより、その熱計算モデルの妥当性を検証し、以下のことがわかった。

- (1) 試料供給なしの場合については、比較的、熱計算結果と試験実測値は一致することが確認されたものの、試料供給ありの場合では、試料供給なしの場合に比べて、熱計算結果と試験実測値の温度差に開きが見られた。この原因としては、試料なしの場合については、熱計算結果と試験実測値が比較的一致していることから、試料供給なしの場合の計算モデルに試料のガス化装置内分解処理モデルを加えたことによりモデル化した試料供給ありの場合での、ガス化装置内における試料の物理的、及び、化学的変化のモデル化が十分でないことが考えられる。
- (2) 試料供給なしの場合については、比較的一致したことから、今回使用した円管モデルは、ガス加熱の物理的モデルとしては、要求される精度にもよるが、水蒸気改質処理装置の他の機器や配管等の温度予測においても利用できる可能性がある。

今後の課題としては、ガス化装置内における試料の物理的及び化学的変化モデルを、よりいっそう現実的なものに近づけて検討する必要があると考えられる。具体的項目としては、今回の計算では、化学的反応として、TBPの熱分解のみを考慮したが、装置内のリーク空気による酸化反応等の他の反応（計算値は、実測値より低かったため、特に発熱反応に注目する）の影響を考慮に入れること、また、熱伝達についても、対流による熱伝達のみならず、熱放射による熱伝達の影響を考慮することにより、より実測値に近づけられると考える。

参考文献

- 1) 日本機械学会編：“技術資料 流体の熱物性値集”，日本機械学会，東京，  
(1983)，p213, 216, 218
- 2) 化学工学会編：“化学工学便覧”，改訂六版，丸善，東京，(1999)，p18, 19, 42, 43
- 3) 日本化学会編：“化学便覧 基礎編Ⅱ”，改訂4版，丸善，東京，  
(1993)，p227, 230, 237, 238
- 4) ドイツ技術者協会編：“熱計算ハンドブック”，初版，社団法人 日本能率協会，  
(1988)，pDa25, Da26, Da29, Da30
- 5) ステンレス協会編：“ステンレス鋼便覧”，第3版，日刊工業新聞社，東京，(1995)，p1428
- 6) 槌田 昭 他：“改訂 伝熱工学演習”，改訂9版，学献社，東京，(1989)，p99
- 7) 内山 他：“液中燃焼法による廃溶媒処理試験”，JAERI-M 87-101，(1987)，p4

記号一覧

A	: 伝熱面積[m <sup>2</sup> ]
C <sub>p</sub>	: 定圧比熱[J/kg・K]
C <sub>v,m</sub>	: 定容モル比熱[J/kmol・K]
d	: 管内径[m]
h <sub>m</sub>	: 熱伝達率[W/m <sup>2</sup> ・K]
h	: プランク定数[J・s]
k	: ボルツマン定数[J/K]
l	: 管長さ[m]
M	: 分子量[kg/kmol]
$\dot{m}$	: 質量流量[kg/s]
N <sub>A</sub>	: アボガドロ定数[1/kmol]
Nu	: スセルト数
Pr	: プラントル数
p	: 圧力[Pa]
Q	: 熱量[W]
R <sub>0</sub>	: 気体定数[J/kmol・K]
Re	: レイノルズ数
r <sub>i</sub>	: 配管内半径[m]
r <sub>o</sub>	: 配管外半径[m]
T	: 温度[°C]
T <sub>c</sub>	: 臨界温度[K]
T <sub>i</sub>	: 管内表面温度[°C] (T <sub>w</sub> : 管内壁面温度[°C])
T <sub>in</sub>	: 入口ガス温度[°C]
T <sub>o</sub>	: 管外表面温度[°C]
T <sub>out</sub>	: 出口ガス温度[°C]
ΔT	: 上昇温度[°C]
ΔT <sub>lm</sub>	: 対数平均温度差[°C]
v	: 容積[m <sup>3</sup> ]
v <sub>c</sub>	: 臨界容積[m <sup>3</sup> /kmol]
x	: 混合気体中の各気体の質量分率
y	: 混合気体中の各気体のモル分率
Z	: 圧縮係数



$\eta$  : 粘度 [Pa·s]  
 $\eta_f$  : 流体温度における流体の粘度 [Pa·s]  
 $\eta_w$  : 壁面温度における流体の粘度 [Pa·s]  
 $\lambda$  : 熱伝導率 [W/(m·K)]  
 $\mu$  : 双極子モーメント [Debye]  
 $\nu$  : 動粘度 [m<sup>2</sup>/s]  
 $\rho$  : 密度 [kg/m<sup>3</sup>]

下付文字

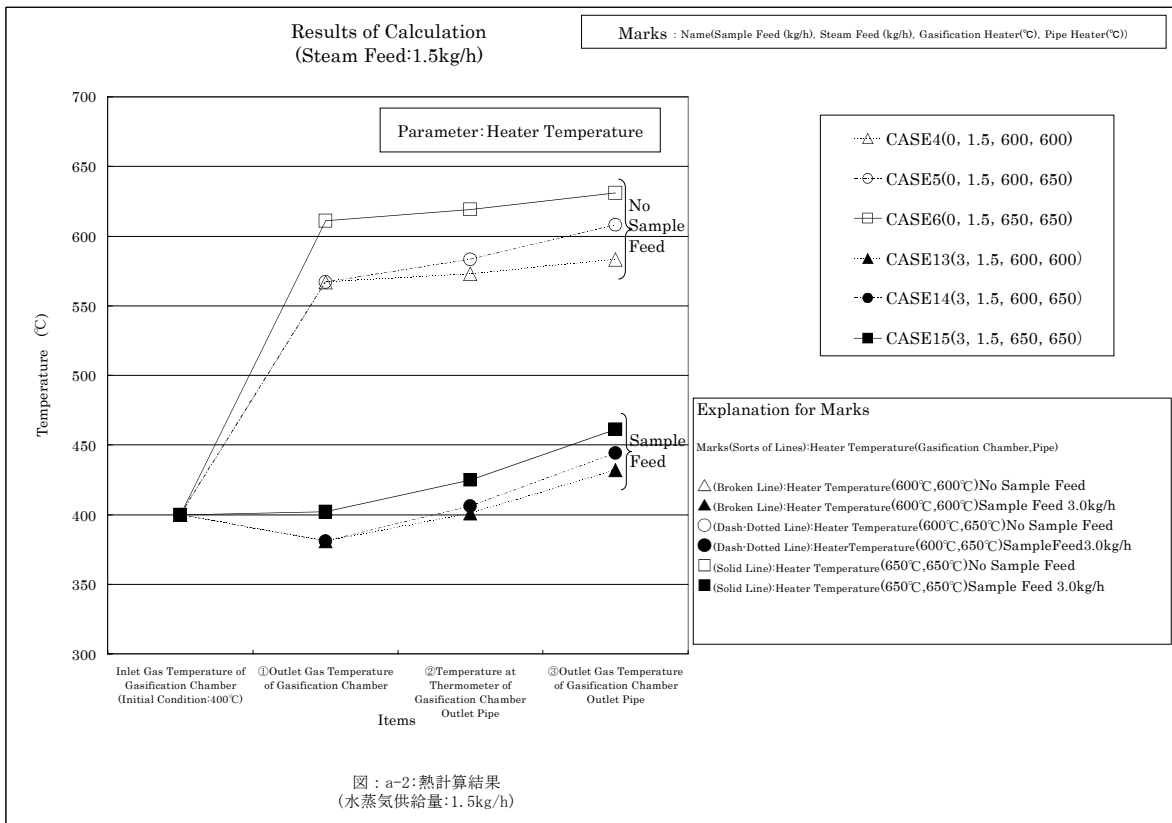
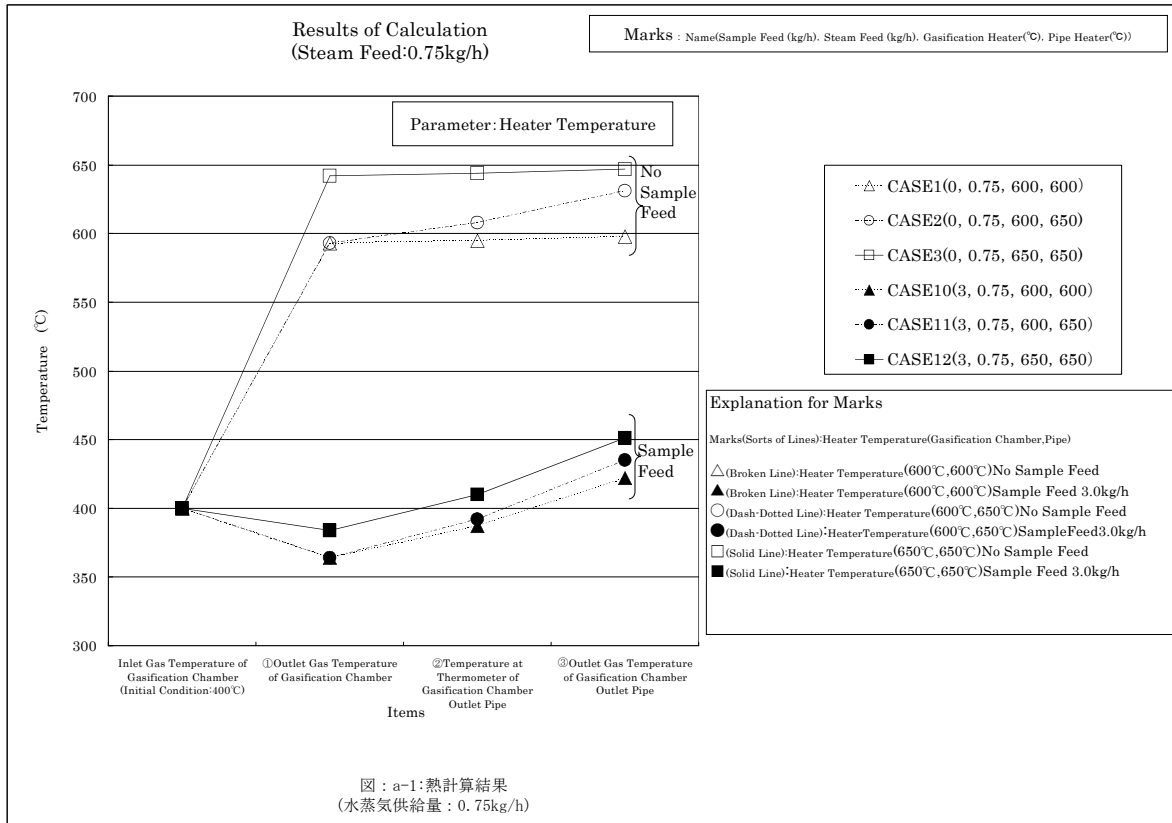
c : 臨界  
i : 各気体の種類  
max : 最大  
min : 最小  
mix : 混合物  
r : 対臨界値

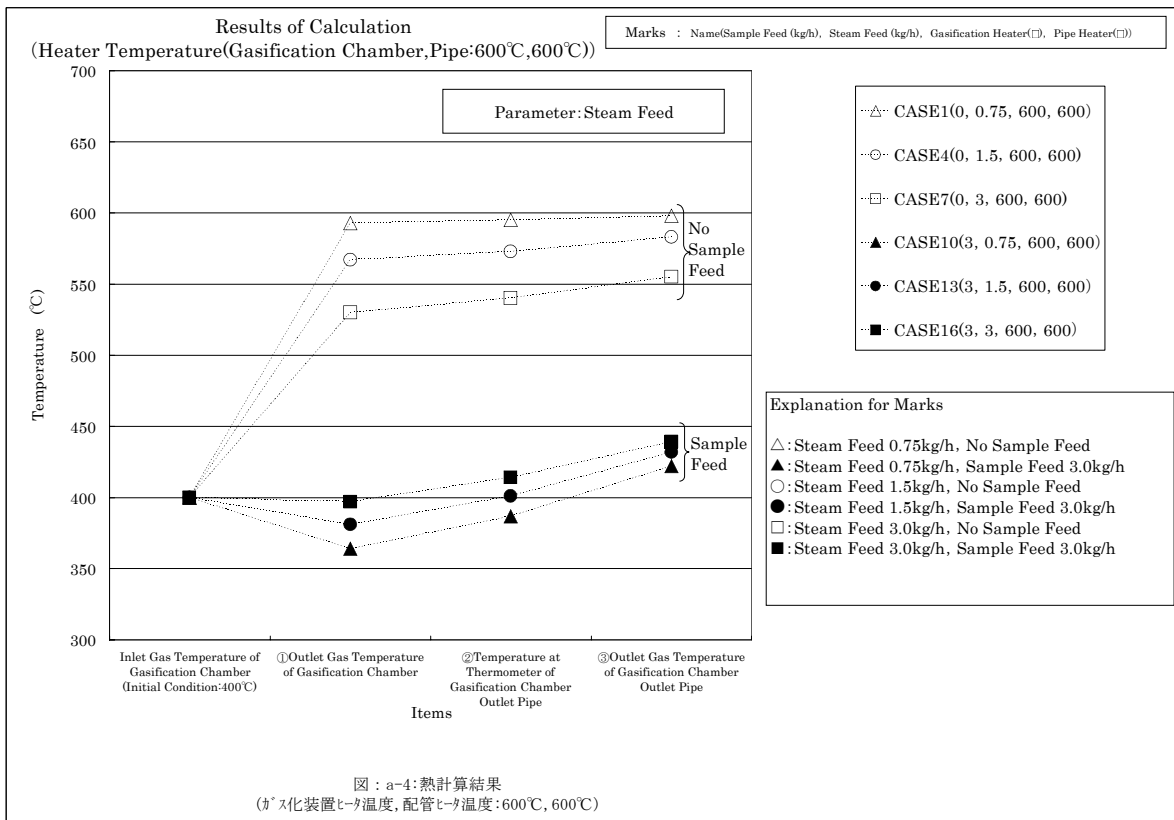
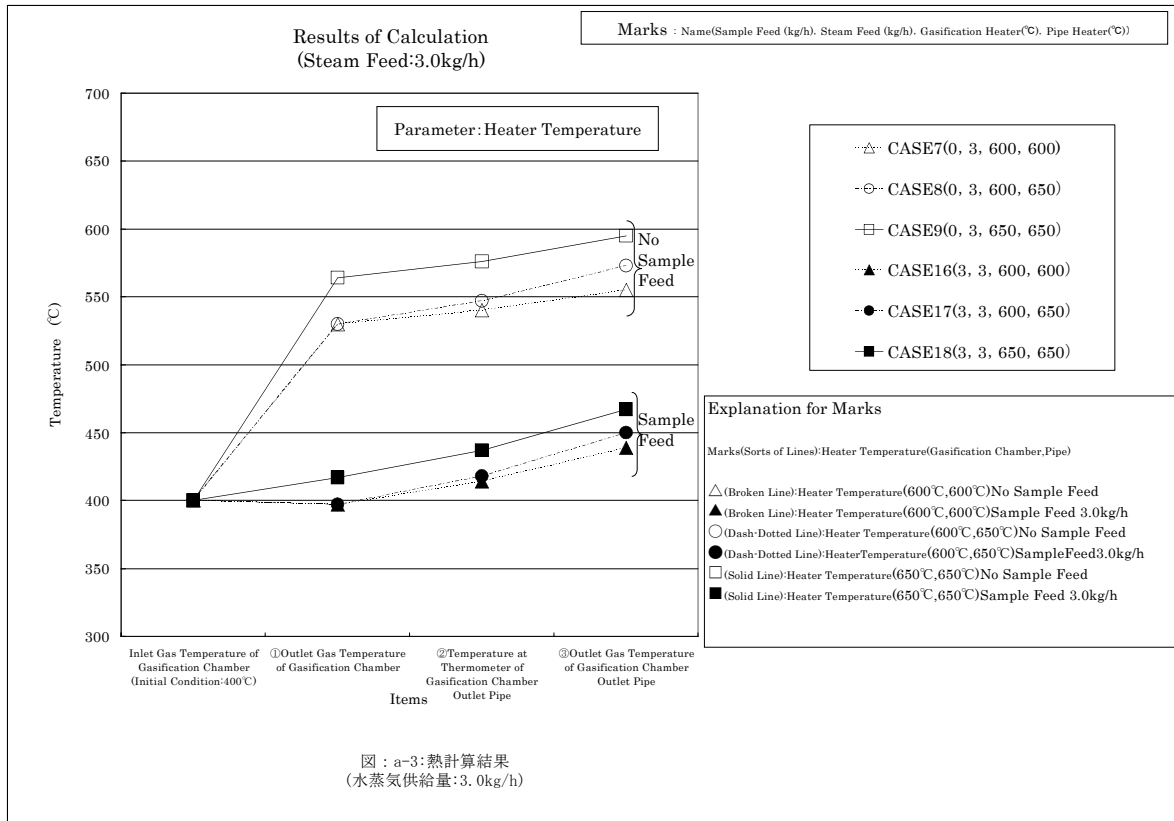
This is a blank page.

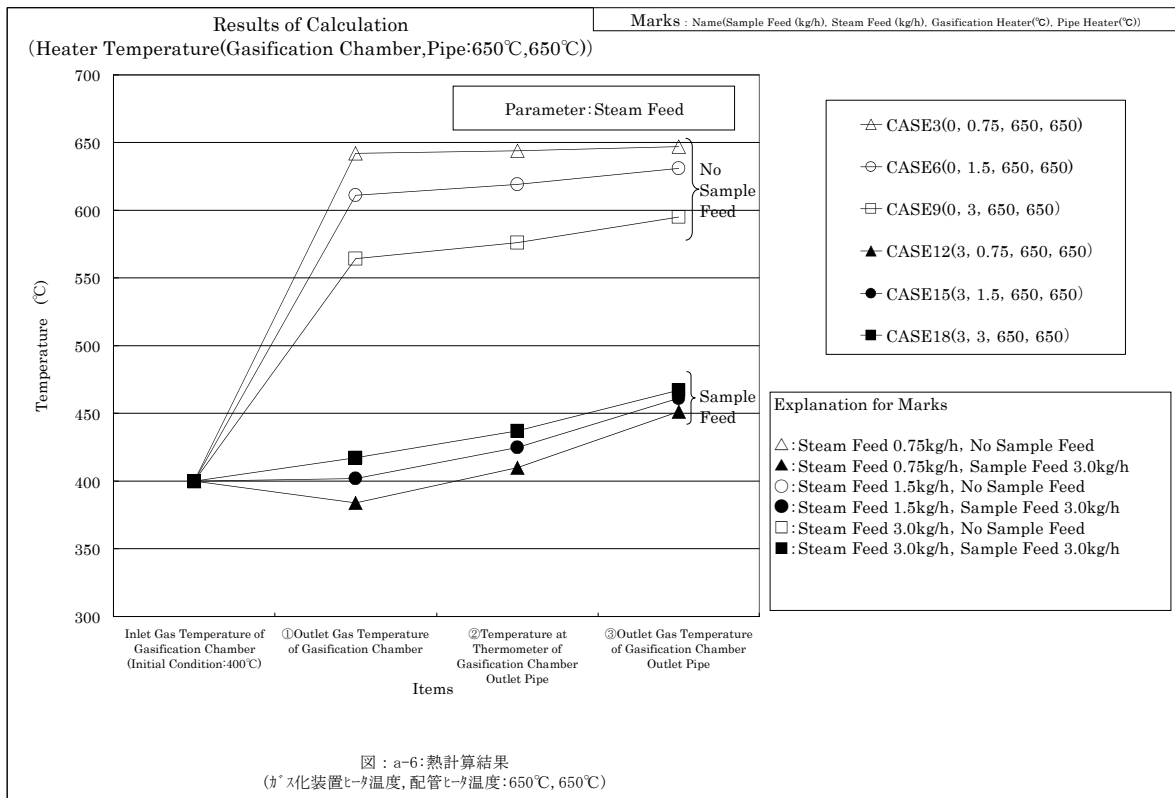
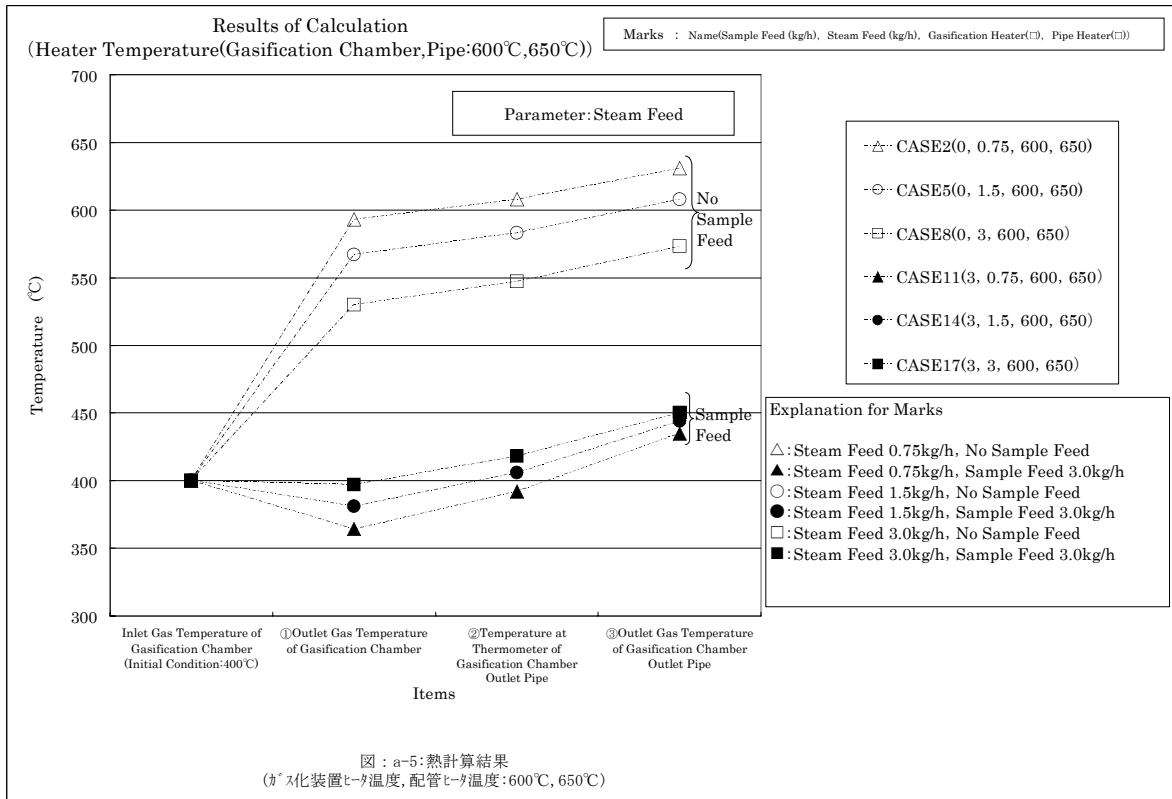
付 録

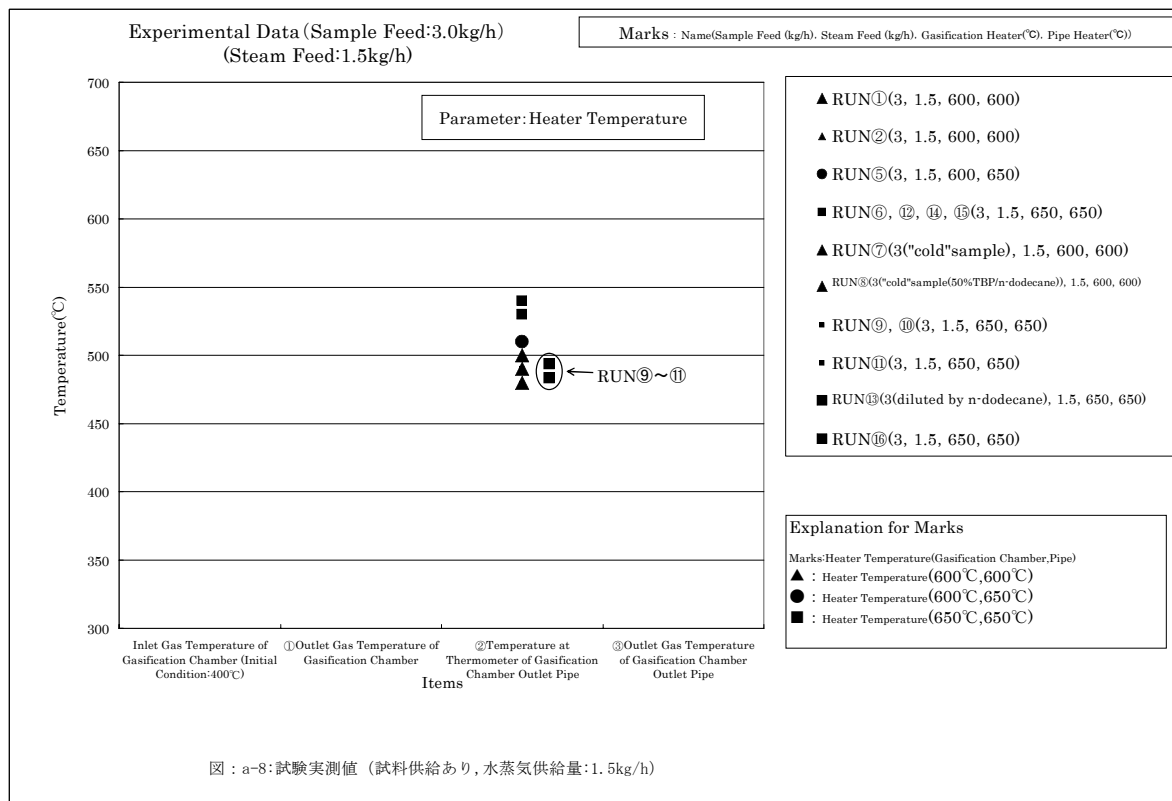
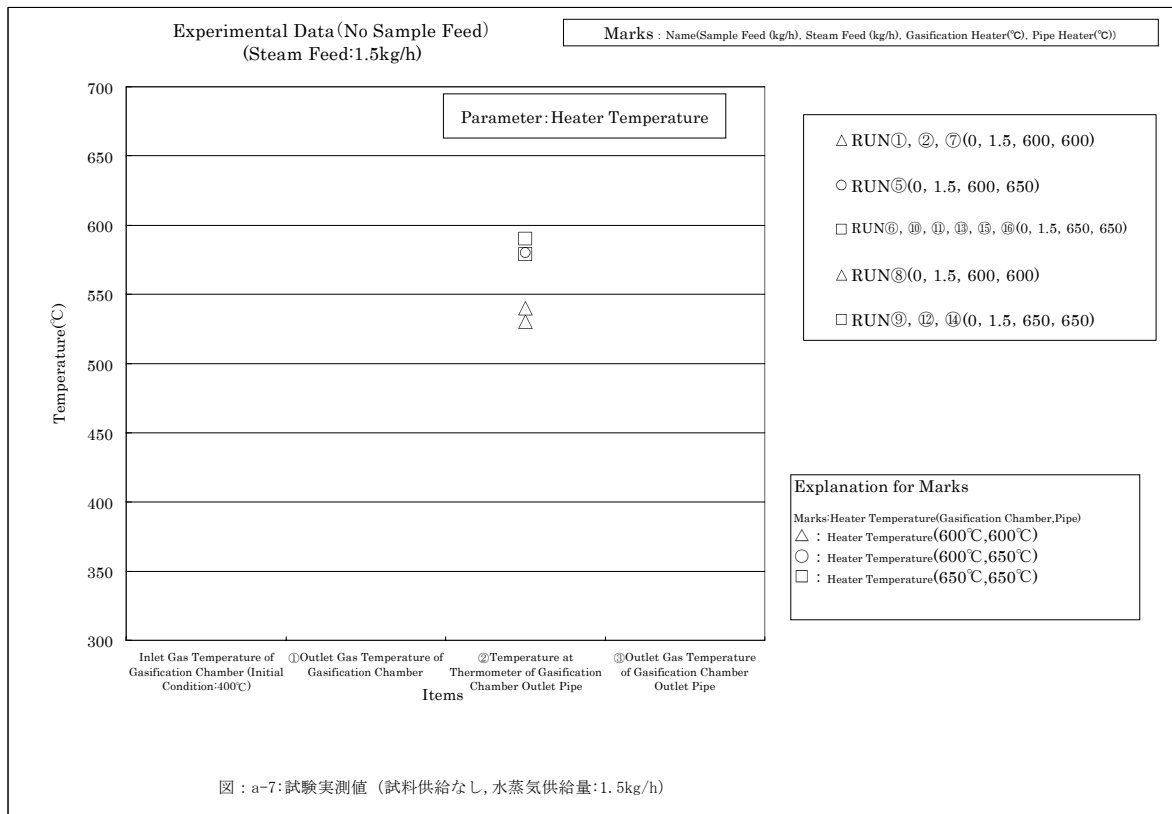
熱 計 算 結 果

This is a blank page.

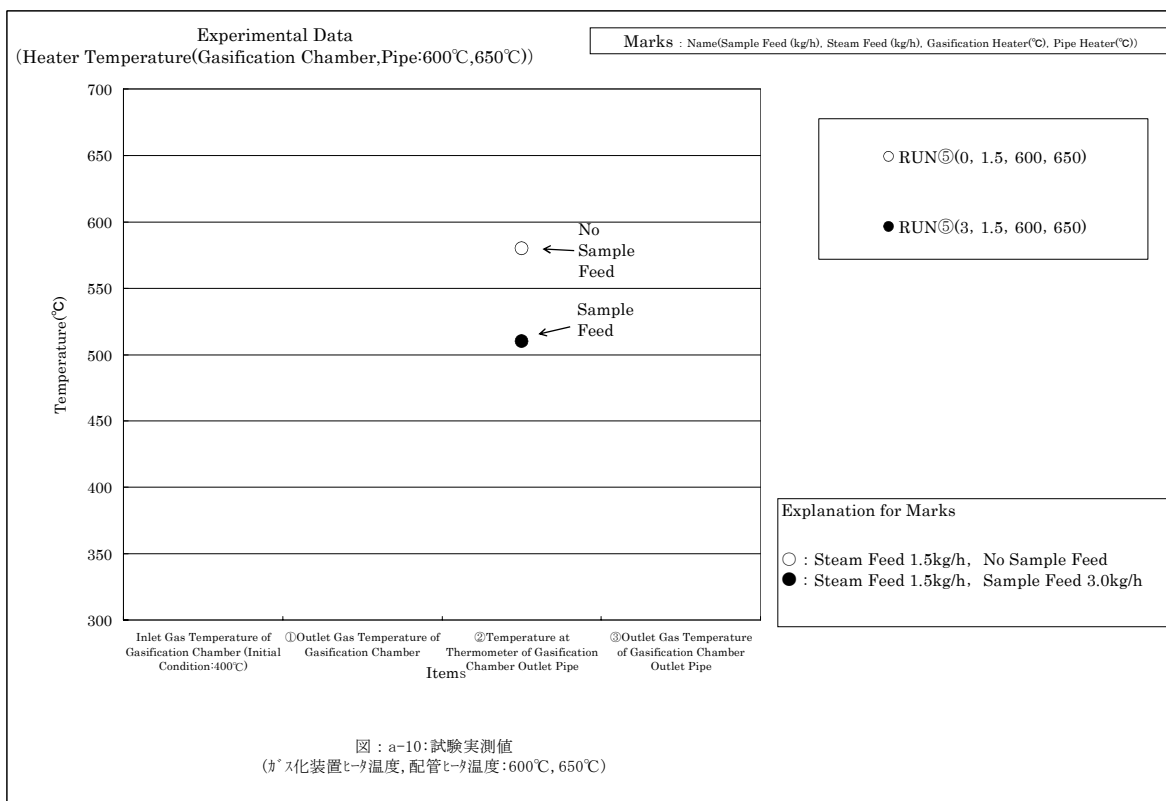
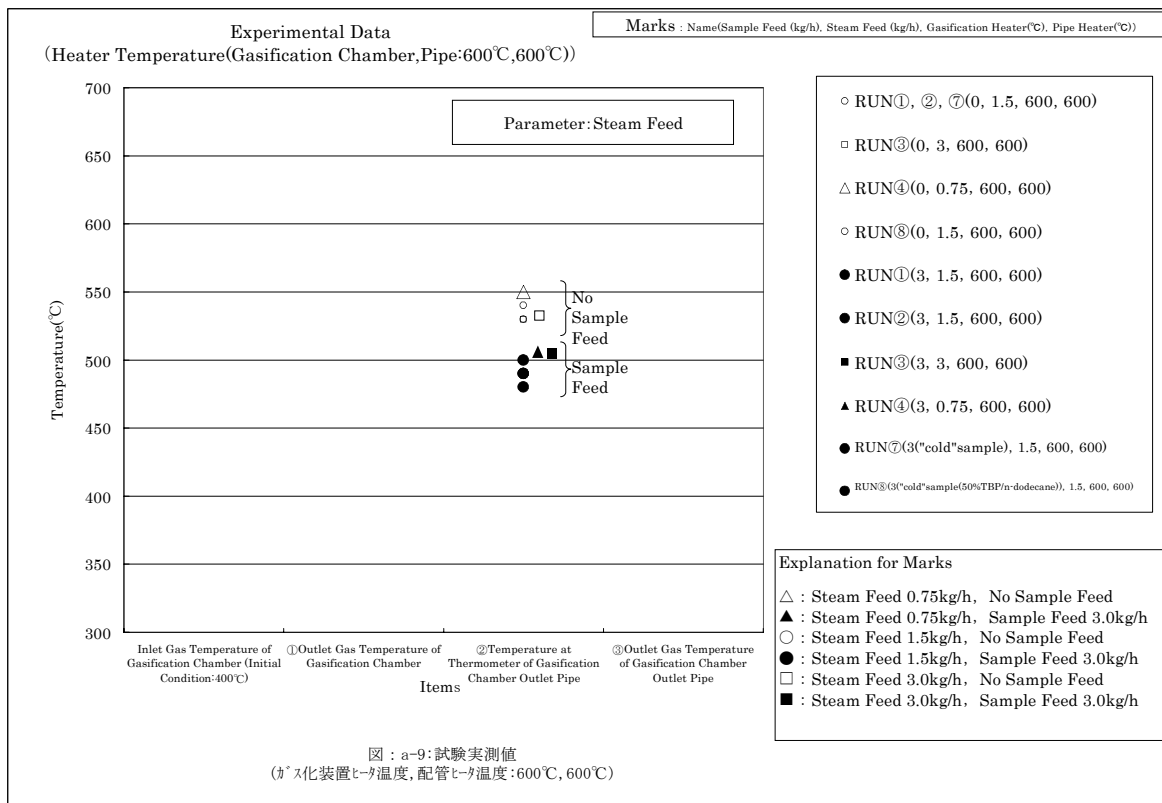


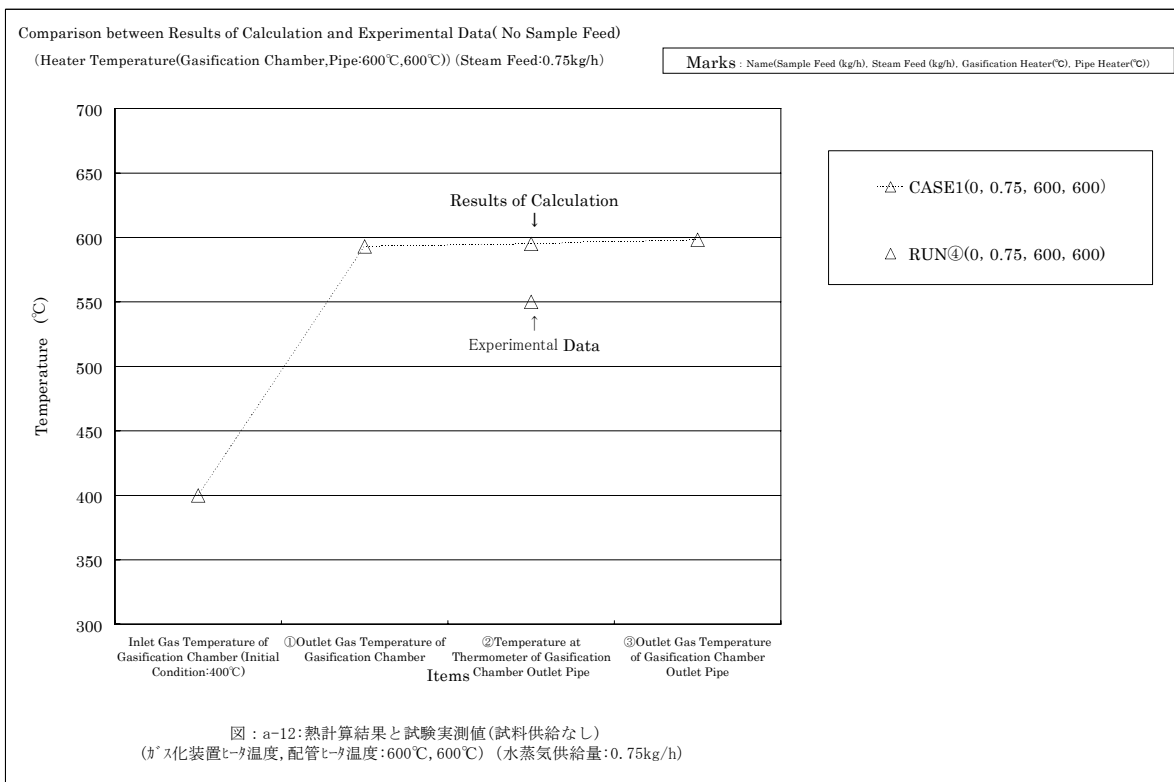
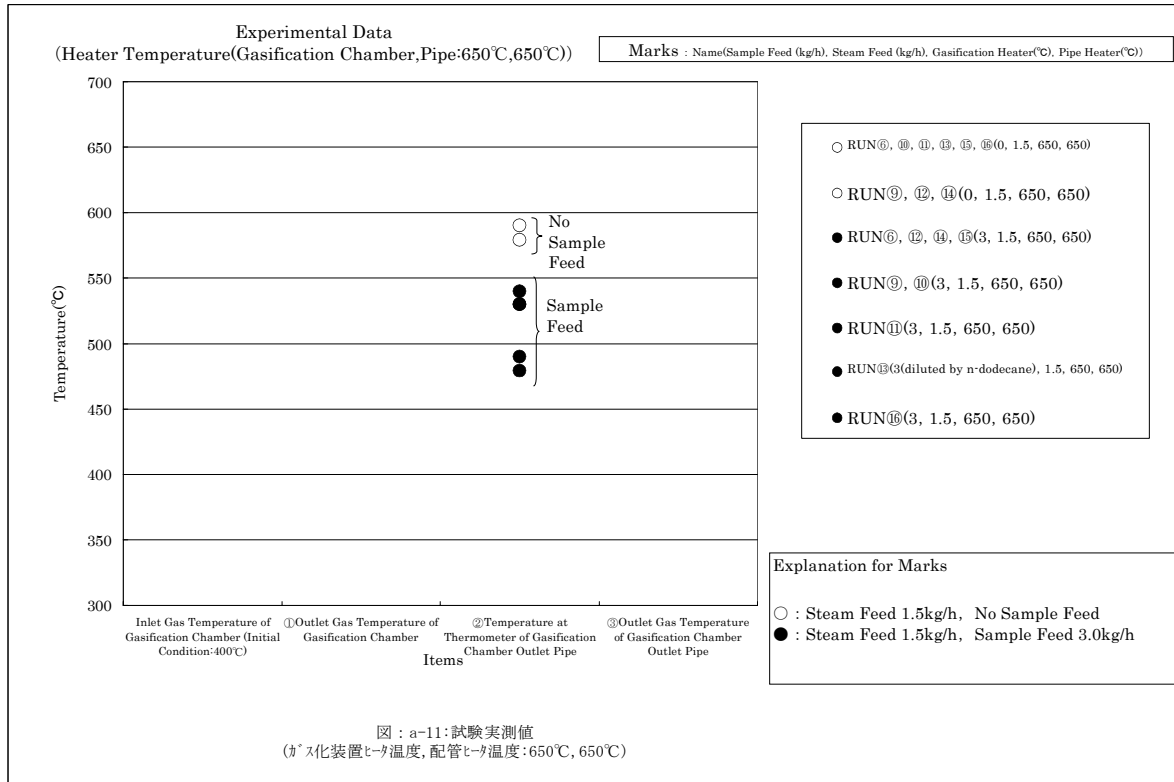


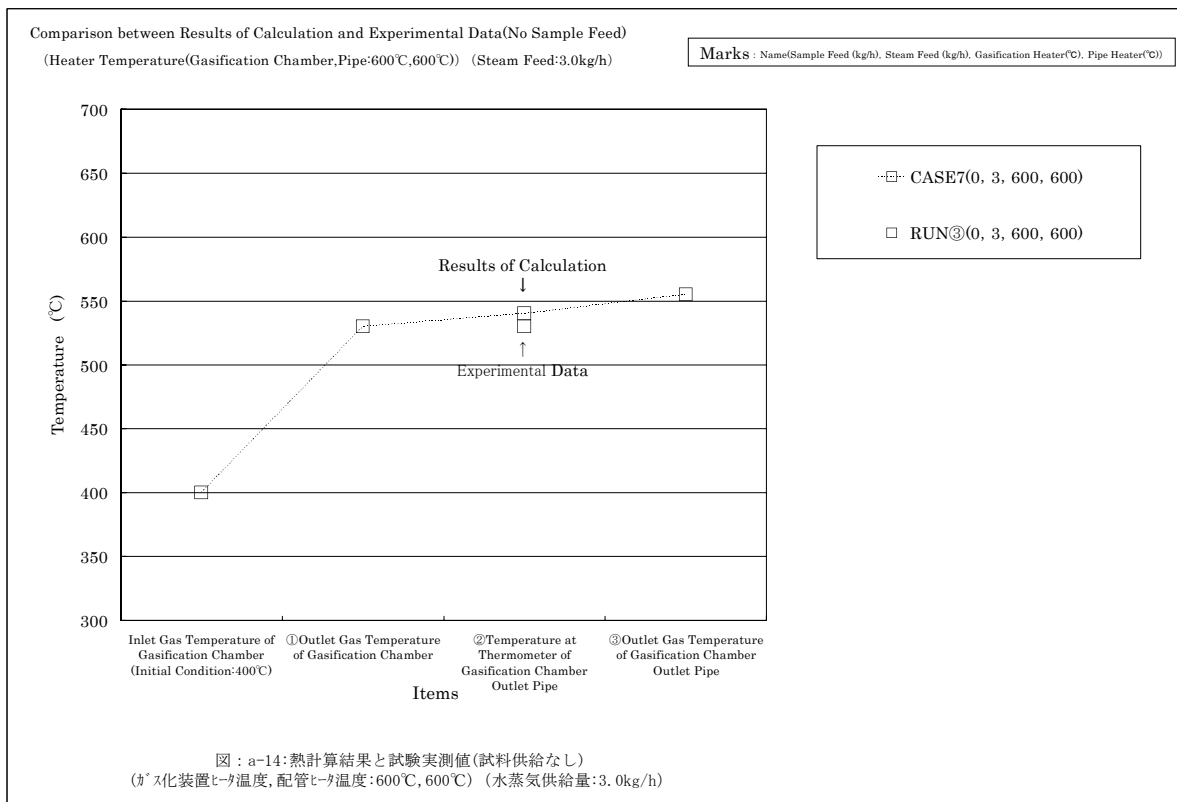
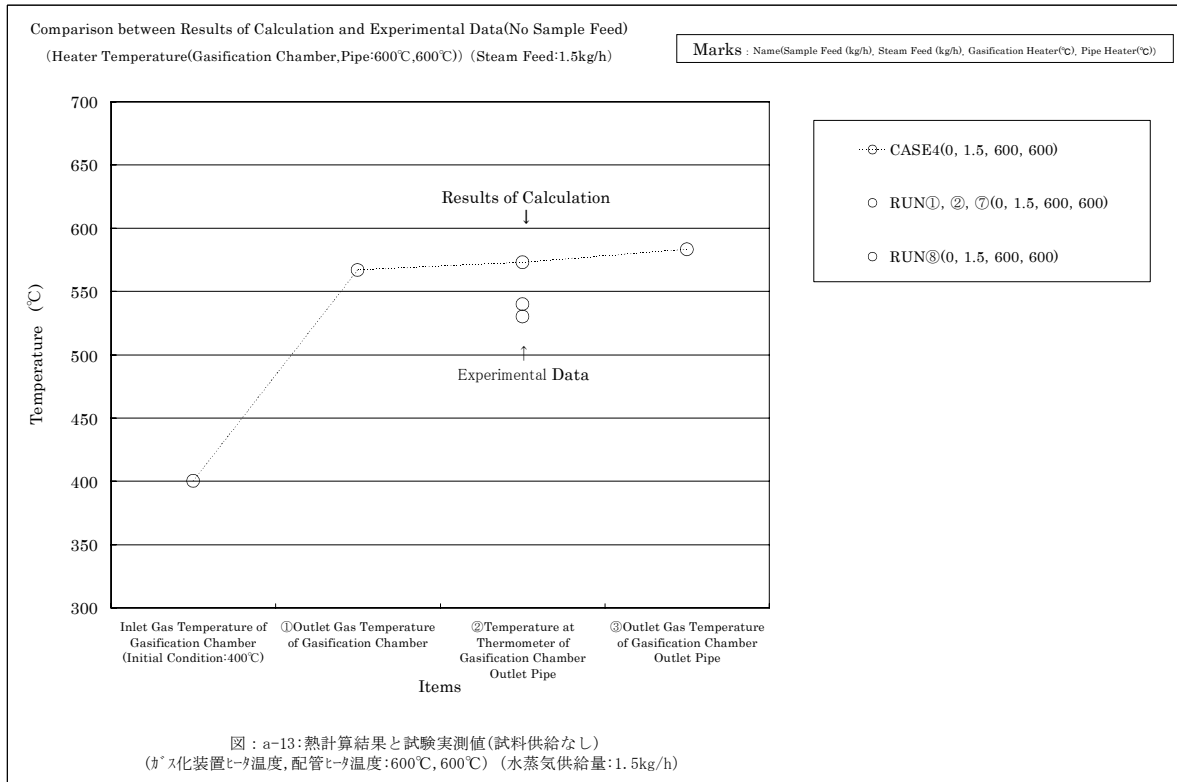


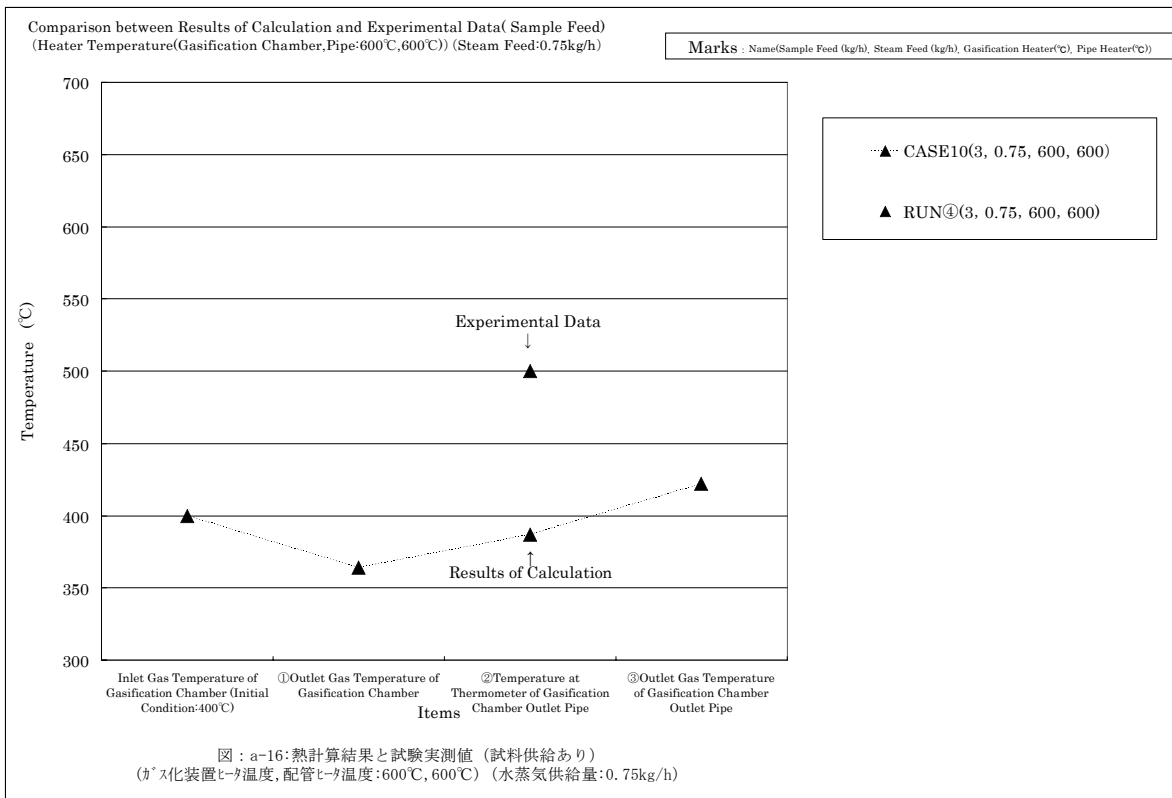
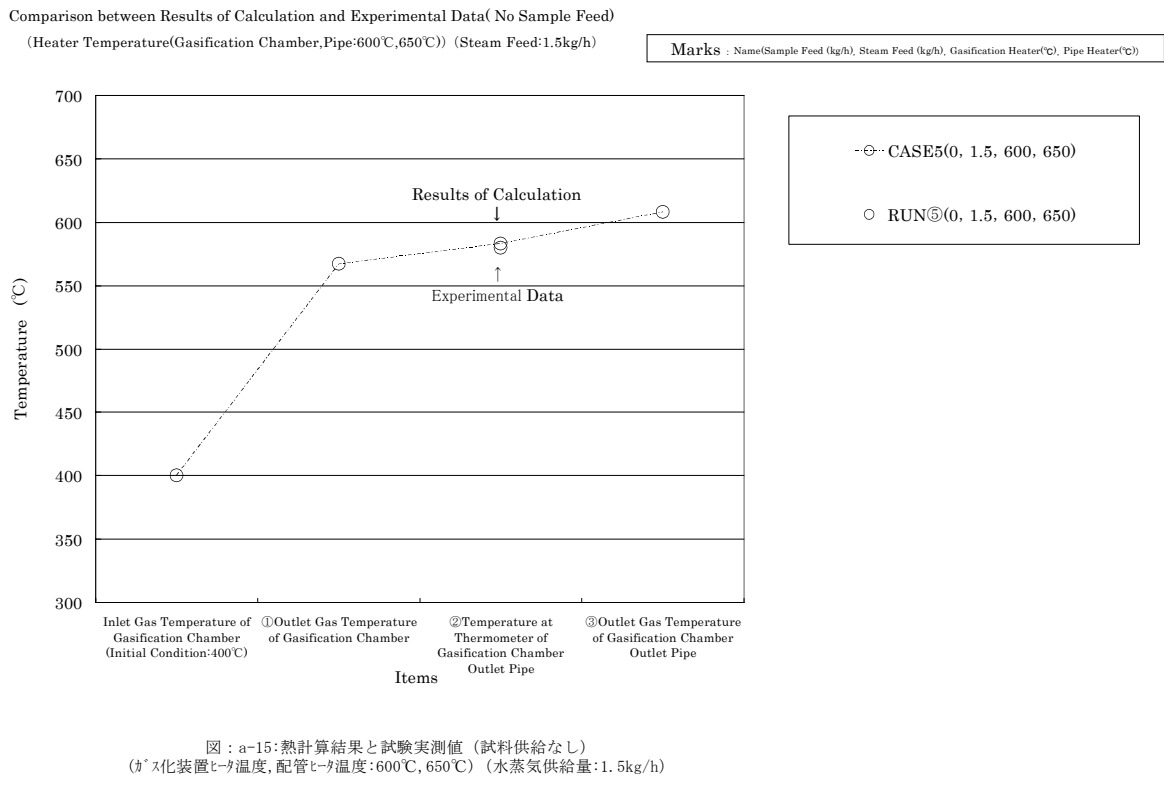


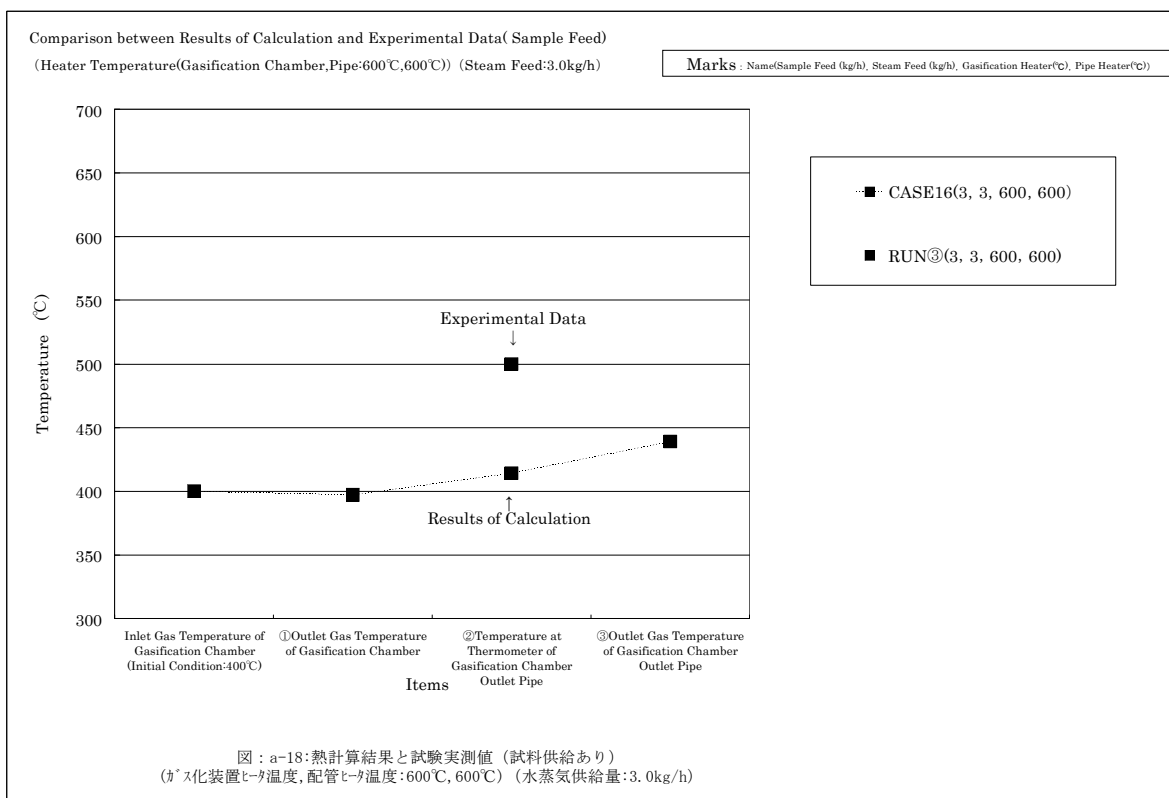
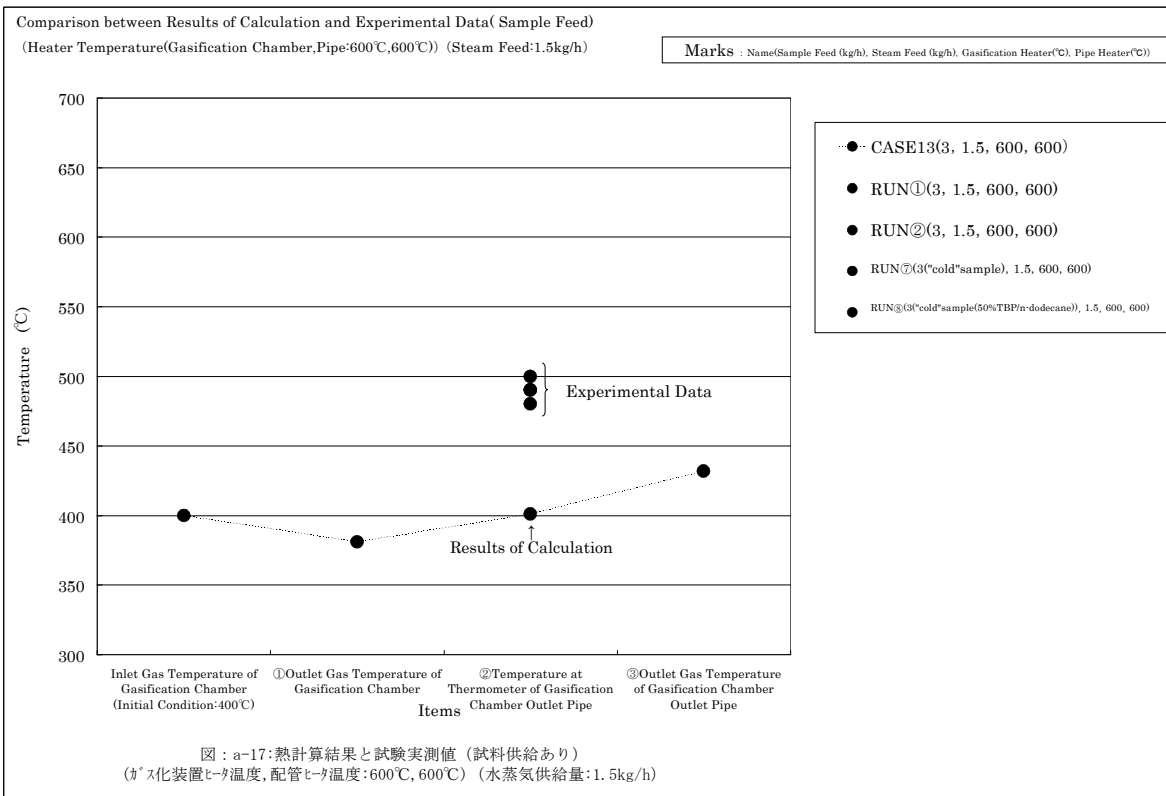












Comparison between Results of Calculation and Experimental Data (Sample Feed)

(Heater Temperature(Gasification Chamber,Pipe:600°C,650°C) (Steam Feed:1.5kg/h)

Marks : Name(Sample Feed (kg/h), Steam Feed (kg/h), Gasification Heater(°C), Pipe Heater(°C))

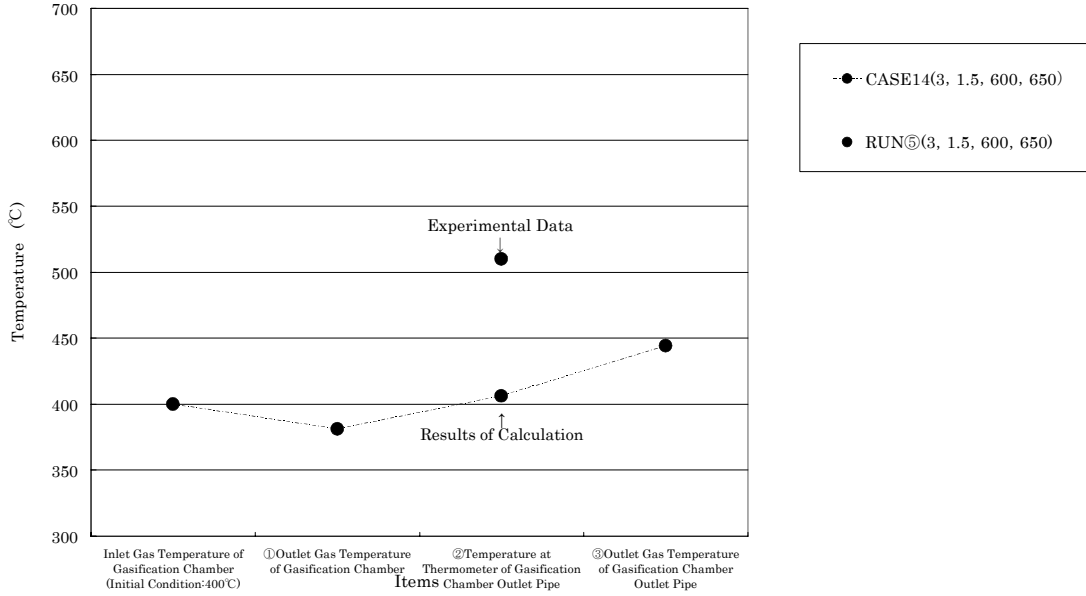


図 : a-19: 熱計算結果と試験実測値 (試料供給あり)  
 (ガス化装置ヒータ温度, 配管ヒータ温度: 600°C, 650°C) (水蒸気供給量: 1.5kg/h)

# 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
物質の量	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 <sup>2</sup>
体積	立方メートル	m <sup>3</sup>
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s <sup>2</sup>
波数	毎メートル	m <sup>-1</sup>
密度 (質量密度)	キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>
質量体積 (比体積)	立方メートル毎キログラム	m <sup>3</sup> /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m <sup>2</sup>
磁界の強さ (物質量の) 濃度	アンペア毎メートル	A/m
輝度	モル毎立方メートル	mol/m <sup>3</sup>
屈折率	カンデラ毎平方メートル	cd/m <sup>2</sup>
	(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 <sup>24</sup>	ヨタ	Y	10 <sup>-1</sup>	デシ	d
10 <sup>21</sup>	ゼタ	Z	10 <sup>-2</sup>	センチ	c
10 <sup>18</sup>	エクサ	E	10 <sup>-3</sup>	ミリ	m
10 <sup>15</sup>	ペタ	P	10 <sup>-6</sup>	マイクロ	μ
10 <sup>12</sup>	テラ	T	10 <sup>-9</sup>	ナノ	n
10 <sup>9</sup>	ギガ	G	10 <sup>-12</sup>	ピコ	p
10 <sup>6</sup>	メガ	M	10 <sup>-15</sup>	フェムト	f
10 <sup>3</sup>	キロ	k	10 <sup>-18</sup>	アト	a
10 <sup>2</sup>	ヘクト	h	10 <sup>-21</sup>	ゼプト	z
10 <sup>1</sup>	デカ	da	10 <sup>-24</sup>	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	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン <sup>(a)</sup>	rad		m <sup>2</sup> ・m <sup>-1</sup> =1 <sup>(b)</sup>
立体角	ステラジアン <sup>(a)</sup>	sr <sup>(c)</sup>		m <sup>2</sup> ・m <sup>-2</sup> =1 <sup>(b)</sup>
周波数	ヘルツ	Hz		s <sup>-1</sup>
力	ニュートン	N		m <sup>2</sup> ・kg <sup>2</sup> ・s <sup>-2</sup>
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>	m <sup>-1</sup> ・kg <sup>2</sup> ・s <sup>-2</sup>
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N・m	m <sup>2</sup> ・kg <sup>2</sup> ・s <sup>-2</sup>
工率, 放射束	ワット	W	J/s	m <sup>2</sup> ・kg <sup>2</sup> ・s <sup>-3</sup>
電荷, 電気量	クーロン	C		s <sup>2</sup> ・A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m <sup>2</sup> ・kg <sup>2</sup> ・s <sup>-3</sup> ・A <sup>-1</sup>
静電容量	ファラド	F	C/V	m <sup>-2</sup> ・kg <sup>-1</sup> ・s <sup>4</sup> ・A <sup>2</sup>
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m <sup>2</sup> ・kg <sup>2</sup> ・s <sup>-3</sup> ・A <sup>-2</sup>
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V	m <sup>-2</sup> ・kg <sup>-1</sup> ・s <sup>3</sup> ・A <sup>2</sup>
磁束	ウェーバ	Wb	V・s	m <sup>2</sup> ・kg <sup>2</sup> ・s <sup>-2</sup> ・A <sup>-1</sup>
磁束密度	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>	kg <sup>2</sup> ・s <sup>-2</sup> ・A <sup>-1</sup>
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m <sup>2</sup> ・kg <sup>2</sup> ・s <sup>-2</sup> ・A <sup>-2</sup>
セルシウス温度	セルシウス度 <sup>(d)</sup>	°C		K
光度	ルーメン	lm	cd・sr <sup>(c)</sup>	m <sup>2</sup> ・m <sup>-2</sup> ・cd=cd
照射度	ルクス	lx	lm/m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup> ・m <sup>-4</sup> ・cd=m <sup>-2</sup> ・cd
(放射性核種の) 放射能	ベクレル	Bq		s <sup>-1</sup>
吸収線量, 質量エネルギー分与, カーマ線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量, 組織線量当量	グレイ	Gy	J/kg	m <sup>2</sup> ・s <sup>-2</sup>
	シーベルト	Sv	J/kg	m <sup>2</sup> ・s <sup>-2</sup>

- (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った性質をもっ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。組立単位を形作る際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°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
粘着力のモーメント	パスカル秒	Pa・s	m <sup>-1</sup> ・kg <sup>2</sup> ・s <sup>-1</sup>
表面張力	ニュートンメートル	N・m	m <sup>2</sup> ・kg <sup>2</sup> ・s <sup>-2</sup>
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg <sup>2</sup> ・s <sup>-2</sup>
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m <sup>2</sup> ・m <sup>-1</sup> ・s <sup>-1</sup> =s <sup>-1</sup>
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎平方メートル	rad/s <sup>2</sup>	m <sup>2</sup> ・m <sup>-1</sup> ・s <sup>-2</sup> =s <sup>-2</sup>
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m <sup>2</sup>	kg <sup>2</sup> ・s <sup>-3</sup>
質量熱容量 (比熱容量), 質量エントロピー	ジュール毎キログラム	J/K	m <sup>2</sup> ・kg <sup>2</sup> ・s <sup>-2</sup> ・K <sup>-1</sup>
質量エネルギー (比エネルギー)	ジュール毎キログラム	J/(kg・K)	m <sup>2</sup> ・s <sup>-2</sup> ・K <sup>-1</sup>
熱伝導率	ジュール毎メートル毎ケルビン	J/(m・K)	m <sup>2</sup> ・s <sup>-2</sup> ・K <sup>-1</sup>
体積エネルギー	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m・K)	m <sup>2</sup> ・kg <sup>2</sup> ・s <sup>-3</sup> ・K <sup>-1</sup>
電界の強さ	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>	m <sup>-1</sup> ・kg <sup>2</sup> ・s <sup>-2</sup>
体積電荷	ボルト毎メートル	V/m	m <sup>2</sup> ・kg <sup>2</sup> ・s <sup>-3</sup> ・A <sup>-1</sup>
電気変位	クーロン毎立方メートル	C/m <sup>3</sup>	m <sup>-3</sup> ・s <sup>2</sup> ・A
誘電率	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> ・s <sup>2</sup> ・A
透磁率	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> ・s <sup>2</sup> ・A
モルエネルギー	ファラド毎メートル	F/m	m <sup>-3</sup> ・kg <sup>-1</sup> ・s <sup>4</sup> ・A <sup>2</sup>
モルエントロピー	ヘンリー毎メートル	H/m	m <sup>2</sup> ・kg <sup>2</sup> ・s <sup>-2</sup> ・A <sup>-2</sup>
モル熱容量	ジュール毎モル	J/mol	m <sup>2</sup> ・kg <sup>2</sup> ・s <sup>-2</sup> ・mol <sup>-1</sup>
照射線量 (X線及びγ線)	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol・K)	m <sup>2</sup> ・kg <sup>2</sup> ・s <sup>-2</sup> ・K <sup>-1</sup> ・mol <sup>-1</sup>
吸収線量	クーロン毎キログラム	C/kg	kg <sup>-1</sup> ・s <sup>2</sup> ・A
放射線強度	グレイ毎秒	Gy/s	m <sup>2</sup> ・s <sup>-3</sup>
放射輝度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m <sup>4</sup> ・m <sup>-2</sup> ・kg <sup>2</sup> ・s <sup>-3</sup> =m <sup>2</sup> ・kg <sup>2</sup> ・s <sup>-3</sup>
	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m <sup>2</sup> ・sr)	m <sup>2</sup> ・m <sup>-2</sup> ・kg <sup>2</sup> ・s <sup>-3</sup> =kg <sup>2</sup> ・s <sup>-3</sup>

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	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	′	1′=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	″	1″=(1/60)′=(π/648000) rad
リットル	l, L	1 l=1 dm <sup>3</sup> =10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>
トン	t	1 t=10 <sup>3</sup> kg
ネーパ	Np	1 Np=1
ベル	B	1 B=(1/2) ln10 (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	1 eV=1.60217733(49)×10 <sup>-19</sup> J
統一原子質量単位	u	1 u=1.6605402(10)×10 <sup>-27</sup> kg
天文単位	ua	1 ua=1.49597870691(30)×10 <sup>11</sup> 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	海里	1 海里=1852m
ノット	ノット	1 ノット=1 海里毎時=(1852/3600)m/s
アール	a	1 a=1 dam <sup>2</sup> =10 <sup>2</sup> m <sup>2</sup>
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm <sup>2</sup> =10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=1000hPa=10 <sup>5</sup> Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=10 <sup>-10</sup> m
バール	b	1 b=100fm <sup>2</sup> =10 <sup>-28</sup> m <sup>2</sup>

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 <sup>-7</sup> J
ダイン	dyn	1 dyn=10 <sup>-5</sup> N
ポアズ	P	1 P=1 dyn・s/cm <sup>2</sup> =0.1Pa・s
ストークス	St	1 St=1cm <sup>2</sup> /s=10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> /s
ガウス	G	1 G=10 <sup>4</sup> T
エルステッド	Oe	1 Oe=(1000/4π)A/m
マクスウェル	Mx	1 Mx=10 <sup>-8</sup> Wb
スチル	sb	1 sb=1cd/cm <sup>2</sup> =10 <sup>4</sup> cd/m <sup>2</sup>
ホト	ph	1 ph=10 <sup>4</sup> lx
ガリ	Gal	1 Gal=1cm/s <sup>2</sup> =10 <sup>-2</sup> m/s <sup>2</sup>

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
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 <sup>10</sup> Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 <sup>-4</sup> C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 <sup>-2</sup> Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 <sup>-2</sup> Sv
X線単位	X unit	1 X unit=1.002×10 <sup>-4</sup> nm
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 <sup>-9</sup> T
ジャンスキー	Jy	1 Jy=10 <sup>-26</sup> W・m <sup>-2</sup> ・Hz <sup>-1</sup>
フェルミ	fm	1 fermi=1 fm=10 <sup>-15</sup> m
メートル系カラット	carat	1 metric carat = 200 mg = 2×10 <sup>-4</sup> kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カリ	cal	
マイクロン	μ	1 μ = 1μm=10 <sup>-6</sup> m

