

参考資料

1. 実証試験の投入試料の作成（スラリー状燃料）
2. 実証試験における加熱処理実験の結果
3. 写真

1. 実証試験の投入試料の作成（スラリー状燃料）

実証試験に用いた投入試料の作成方法は以下に示すとおりである。

1.1 石綿含有建材

石綿含有建材は、昭和 40 年代に製造された石綿含有波型スレート板であり、10～20cm 角に破砕された状態で保管されていた。

石綿含有建材に含まれる石綿は、JIS A 1481「建材製品中のアスベスト含有率測定方法」の X 線回折法による定量分析より、6 重量%のクリソタイルと 2 重量%のクロシドライトを含むものであった。

1.2 石綿含有建材の破砕とスラリー状燃料の作成

石綿含有建材の破砕と取り扱いは、スクラバー付きドラフトチャンバーと集塵装置（HEPA）付きグローブボックスの中で行なった。

スラリー状燃料の作成にあたって、石綿含有スレート板は、まず、金槌を用いて 1cm 程度に破砕し、さらに高速せん断型ミルで 1mm アンダーとなるよう粉砕した。これを ϕ 200mm \times L200mm のポットミルに投入し、30 分間ボールミル粉砕して微粉砕物を得た。

スラリー燃料の調製は、石綿含有スレート板の微粉砕物 15 重量%と再生 B 重油 85 重量%とをポリ瓶に投入した後、振とう混合した。本実験にあたっては、これを超高分子製ペール缶に密封してテストプラントに持ち込んだ。

2. 実証試験における加熱処理実験の結果

セメントキルンのテストプラントによる石綿含有建材の加熱処理実験の結果は以下に示すとおりである。

2.1 マーカー試験結果（平成19年3月22日、通常運転（未処理時））

セメントキルンを用いて石綿を熱分解させるためには、キルンの高温運転が必須条件である。また、このキルンの高温運転には、燃料の完全燃焼のための空気量の管理や燃料の安定供給などの焼成制御が不可欠である。焼成制御を適切に行なうためには、キルンの温度状況を正確に把握する必要がある。このため、テストプラントには、各所に測温部位が設けられており、内部の温度分布を正確に把握している。

一方で、テストプラントは、直管のロータリーキルン部と直管の反応塔部が直角に組み合わさった形状となっている。また、燃焼ガスの組成は、焼成制御条件が変わると変化する。このため、内部の燃焼ガスの滞留時間は、単純には求められない。したがって、処理実験時の燃焼ガス滞留時間は、

- ① 燃焼計算によるガス発生量の算出
- ② ピトー管を用いたガス流速の測定
- ③ 特定の高温雰囲気に変化するマーカーの活用

等から予め調査しておく必要がある。そこで、石綿処理実験に先立ち、テストプラントの高温運転状況を確認する目的でマーカー試験を実施した。

2.1.1 マーカーを含むスラリー状燃料の供給

石綿を含むスラリー状燃料の電気炉による試験及び(株)エーアンド・エー・マテリアルにおける堅型実験炉による試験では、1,000℃1秒の加熱でスラリー状燃料に含まれる石綿を非石綿化する結果が得られている。このため、1,000℃近辺でX線回折的に変化するマーカー材について、電気炉試験により各種の材料を調査し、その中から、特に1,150℃1秒の加熱で明らかな変化が認められるアナターゼ型酸化チタンを選定した。

すなわち、マーカー試験では、石綿含有建材の処理実験と同等の燃焼状況となるよう、15重量%のマーカー材（アナターゼ型酸化チタン）+85重量%の再生B重油混合物からなるスラリー状燃料を調製し、これをテストプラントの窯前から噴霧燃焼させて、反応塔最上部でサンプリングした飛散物の熱変化状況を評価した。

マーカー試験時（平成19年3月22日）のスラリー状燃料の供給速度を資料表1.1-1に示す。モノポンプによるスラリー状燃料の供給量は7.9L/hrであった。

資料表 2.1-1 マーカーを含むスラリー状燃料の供給速度

個別計量	g/min	130.0	129.8	129.4
平均 供給速度	kg スラリー/hr	7.8		
	Lスラリー/hr	7.9		
	kg 重油/hr	6.6		
	kg マーカー/hr	1.2		

2.1.2 マーカー試験時のロータリーキルンと反応塔内の温度

ロータリーキルンと反応塔内の温度を資料表 2.1-2 に示す。温度データは 1 分毎に測定し、前後 5 分間のデータの移動平均値を求めた。また、最大、平均、最小、 σ_{n-1} データは、平成 19 年 3 月 22 日の 11:00~15:00 に測定した全データから求めた。

これらの温度データからは、マーカー試験において、各管理部分（②窯尻、③反応塔下、⑤反応塔中）の温度が 1,050℃を超えており、窯尻温度目標 1,050℃に対して予定通りの運転が行われていることを確認した。

資料表 2.1-2 ロータリーキルンと反応塔内の温度

時刻	管理データ			
	②窯尻	④反応塔下	⑤反応塔中	⑥反応塔上
年/月/日 時:分	℃	℃	℃	℃
H19.3.22 11:00	1,110	1,141	1,045	964
H19.3.22 12:00	1,133	1,154	1,053	969
H19.3.22 13:00	1,136	1,155	1,057	975
H19.3.22 14:00	1,138	1,163	1,062	976
H19.3.22 15:00	1,132	1,160	1,062	979
最大 (℃)	1,146	1,165	1,064	980
平均 (℃)	1,133	1,156	1,057	973
最小 (℃)	1,108	1,140	1,044	963
σ_{n-1} (℃)	9	6	6	4

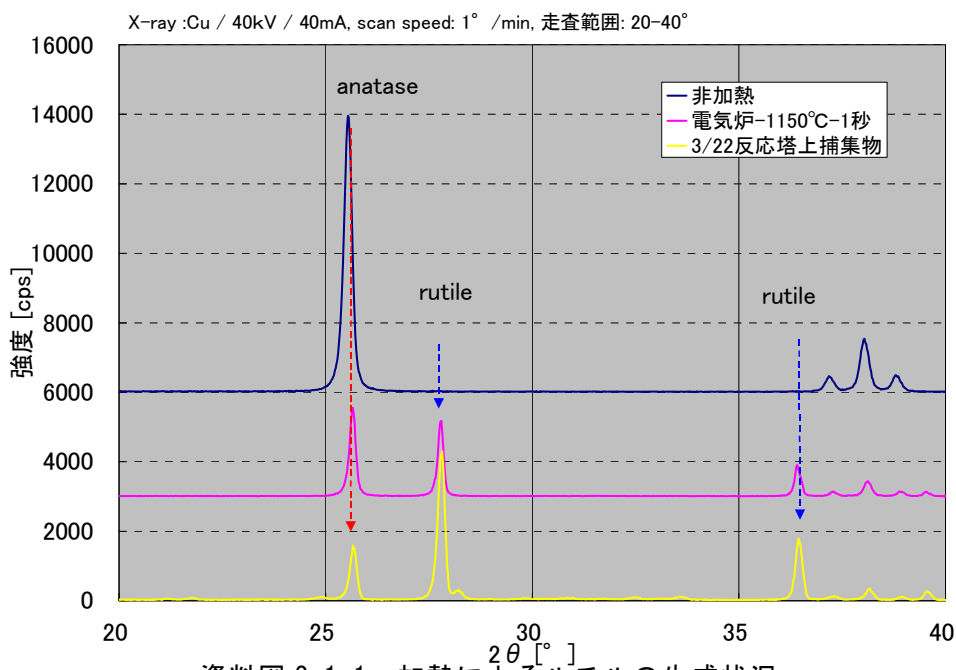
2.1.3 マーカーから判定した熱処理状況

アナターゼ型酸化チタンは、酸化チタン 30 重量%+再生 B 重油 70 重量%の混合物からなるスラリー状燃料の電気炉による加熱により、1,150℃1 秒でルチル型酸化チタンに転位した。そこで、テストプラントに吹き込まれたマーカー材を含むスラリー状燃料について、噴霧燃焼によって発生した飛散物を反応塔最上部でサンプリングし、X線回折法により測定した。

マーカー単体（熱処理無し）、マーカーを混合したスラリー状燃料の電気炉試験による 1,150℃1 秒処理物、及び平成 19 年 3 月 22 日のマーカー試験時に反応塔最上部でサンプリングした飛散物について、X線回折法で測定した結果を、資料図 2.1-1、資料表 2.1-3 に示す。

電気炉試験による 1,150℃1 秒焼成では、酸化チタンは、アナターゼからルチルへ転移した。また、マーカー試験で採取した飛散物の X線回折法におけるルチルのピーク強度は、電気炉試験より高く（資料図 2.1-1）、同時に残存するアナターゼに対するピーク強度比も大きかった（資料表 2.1-3）。すなわち、テストプラントのマーカー試験では、電気炉による 1,150℃1 秒加熱試験に対して、より多くのアナターゼが転位することでより多くのルチルが生成していることから、テストプラントのバーナーから吹き込まれたマーカー材が、1,150℃1 秒を超えた熱履歴を受けたと判断できる。

以上のことから、テストプラントは、石綿の加熱処理に必要な 1,050℃1 秒を超えた高温雰囲気となることをマーカー試験から判定した。



資料図 2.1-1 加熱によるルチルの生成状況

資料表 2.1-3 アナターゼ ($2\theta = 25.5^\circ$) に対するルチルのピーク強度比

X線回折ピーク	$2\theta = 27.5^\circ$	$2\theta = 36.1^\circ$
非加熱	0	0
電気炉-1150°C-1秒	84	34
3/22反応塔上部捕集物	205	83

2.2 石綿含有建材の処理実験結果（平成 19 年 3 月 23 日、石綿処理時）

石綿を含むスラリー状燃料の電気炉による試験及び(株)エーアンド・エー・マテリアルにおける堅型実験炉による試験等から、1,000°C1秒の加熱でスラリー状燃料に含まれる石綿が非石綿化すると判断している。また、平成 19 年 3 月 22 日のマーカータ試験では、テストプラントにおける高温運転を実施し、1,150°C1秒以上の熱履歴が得られたと判定した。

そこで、平成 19 年 3 月 23 日は、この高温運転条件にて石綿含有建材の処理実験を実施した。

2.2.1 石綿含有建材を含むスラリー状燃料の供給

石綿含有建材を含むスラリー状燃料の処理実験では、平成 19 年 3 月 22 日に行なわれたマーカータ試験と同等の燃焼状況となるように、15 重量%の石綿含有建材の微粉碎物+85 重量%の再生B重油混合物からなるスラリー状燃料を調製し、これをテストプラントの窯前から噴霧燃焼させた。資料写真 2.2-1 にスラリー状燃料（石綿含有建材（微粉碎品）+再生B重油の混合物）を示す。

石綿含有建材を含むスラリー状燃料の処理実験時（平成 19 年 3 月 23 日）のスラリー状燃料の供給速度を資料表 2.2-1 に示す。モノポンプによるスラリー状燃料の供給量は 7.9 L/hr であった。



資料写真 2.2-1 スラリー状燃料（石綿含有建材（微粉碎品）＋再生B重油）

資料表 2.2-1 スラリー状燃料の供給速度

個別計量	g/min	128.8	127.4	129.4
平均 供給速度	kg スラリー/hr	7.7		
	L スラリー/hr	7.9		
	kg 重油/hr	6.6		
	kg 建材/hr	1.2		
	kg 石綿/hr	0.093		

（石綿含有建材は、8重量%の石綿を含むものとした）

2.2.2 石綿含有建材微粉碎物の粒度

スラリー状燃料中の粉体の分離や高温での熱分解状況は、粉体の粒径に影響を受けると考えられる。予備試験として実施した電気炉試験及び(株)エーアンド・エー・マテリアルにおける堅型実験炉では、試験に用いたスラリー状燃料には、80%通過径が100 μ m以下の石綿含有建材微粉碎物を用い、熱分解による石綿の処理と非石綿化を達成した。

今回の試験に用いた石綿含有建材の微粉碎物の粒径をレーザー散乱式粒度測定装置（マイクロトラック HRA Model 9320-X100）で測定した。分散媒はエタノールとし、30回の波形データから平均値で粒径を求めた。

石綿含有建材微粉碎物の粒径を資料表 2.2-2 に示す。80%通過径が80.7 μ mであり、これは、電気炉試験及び(株)エー・アンド・エー・マテリアルにおける堅型実験炉による試験とほぼ同等の微粉末であった。

資料表 2.2-2 石綿スレート板粉碎物の粒径

50%通過径	28.1 μ m
80%通過径	80.7 μ m

2.2.3 スラリー状燃料の粘度

スラリー状燃料中の粉体の分離やバーナーからの燃料の噴霧状況は、スラリー状燃料の粘度に影響を受けると考えられる。そこで、調製したスラリー状燃料をB型回転粘度計（Brookfield社 Viscometer Model HBF）で測定した。室温（20℃）での粘性は200 mPa・sであった。

2.2.4 ロータリーキルンと反応塔内の温度

石綿建材処理実験も前日のマーカー試験とほぼ同等の焼成制御を行なった。処理実験中のロータリーキルンと反応塔内の温度を資料表 2.2-3 と資料図 2.2-1 に示す。

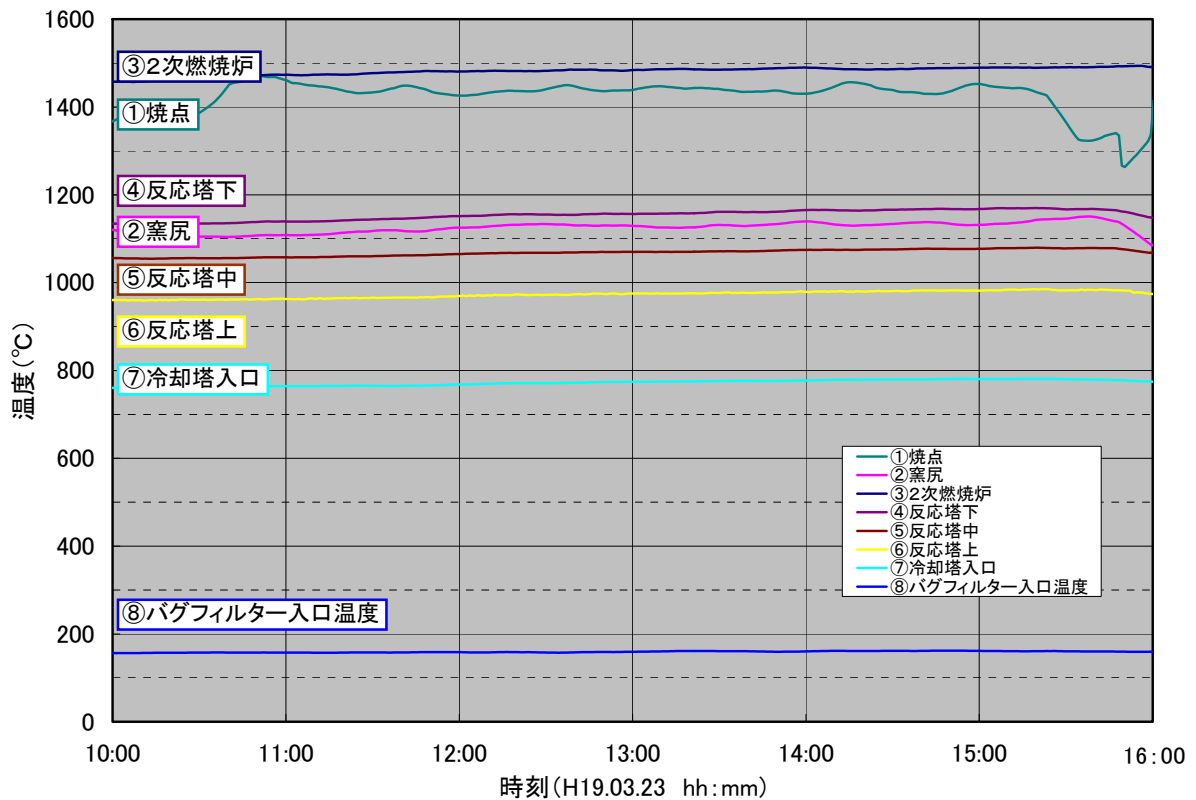
管理部分（②窯尻、③反応塔下、⑤反応塔中）で 1,050℃を超えており、予定どおりの運転が実施できた。

資料表 2.2-3 ロータリーキルンと反応塔内の温度

時刻	管理データ				参考データ			
	②窯尻	④反応塔下	⑤反応塔中	⑥反応塔上	①焼点	③2次燃焼炉	⑦冷却塔入口	⑧バグフィルター入口温度
年/月/日 時:分	℃	℃	℃	℃	℃	℃	℃	℃
H19.3.23 11:00	1,108	1,139	1,058	963	1,460	1,474	764	158
H19.3.23 12:00	1,125	1,151	1,065	970	1,426	1,481	768	159
H19.3.23 13:00	1,129	1,156	1,070	975	1,439	1,484	774	159
H19.3.23 14:00	1,139	1,165	1,075	979	1,430	1,490	777	160
H19.3.23 15:00	1,132	1,168	1,077	982	1,453	1,490	780	161
最大 (℃)	1,139	1,168	1,077	982	1,460	1,490	781	162
平均 (℃)	1,127	1,156	1,069	974	1,440	1,483	773	159
最小 (℃)	1,108	1,139	1,058	962	1,426	1,472	764	157
σ_{n-1} (℃)	8	8	6	6	7	5	5	1

※温度データは1分毎に測定し、前後5分間のデータの移動平均値について示した。

また、最大、平均、最小、 σ_{n-1} データは、11:00～15:00 に測定された全データから求めた。



※1分毎に測定し、前後5分間のデータの移動平均値をプロットした。

資料図 2.2-1 測定点の温度変化

2.2.5 テストプラント内のガス滞留時間

高温運転時の燃焼ガス滞留時間について、非石綿化が達成されると考えられる 1050°C の温度帯を通過する燃焼ガスの滞留時間を算出した。

テストプラント内の燃焼ガス滞留時間（ロータリーキルンから反応塔まで）を次の手順で算出した。

(1) ロータリーキルン内のガス滞留時間の求め方

- ・理論燃焼ガス量 G_0 を、使用した重油低発熱量 H_0 から算出した。

$$G_0 = 266H_0 / 1,000 \quad (\text{Nm}^3/\text{kg})$$

- ・理論燃焼空気量 A_0 を、使用した重油低発熱量 H_0 から算出した。

$$A_0 = 203H_0 / 1,000 + 2 \quad (\text{Nm}^3/\text{kg})$$

- ・空気比 m を、空気中の酸素 (21%) と窯尻酸素濃度 (5%) から求めた。

$$m = 21 / (21 - 5)$$

- ・燃焼ガス量 G を、理論燃焼ガス量 G_0 、理論燃焼空気量 A_0 、空気比 m から求めた。

$$G = (m - 1) \times A_0 + G_0 \quad (\text{Nm}^3/\text{kg})$$

- ・ロータリーキルンの重油焚き量から、ロータリーキルン内に発生した燃焼ガス量を算出した。

$$\text{燃焼ガス量} = \text{重油使用量 (kg/hr)} \times G \text{ (Nm}^3\text{/hr)}$$

- ・発生した燃焼ガス量を温度換算した。

$$\text{燃焼ガス量 (温度換算)} = \text{燃焼ガス量} \times (273 + (\text{焼点温度} + \text{窯尻温度}) / 2) / 273$$

- ・燃焼ガス量 (温度換算) を、キルン (直管) の断面積で割り、流速を求めた。

$$\text{平均燃焼ガス流速} = \text{燃焼ガス量 (温度換算)} / \text{キルン断面積}$$

- ・ロータリーキルン直管部分の長さを流速で除し、ガス滞留時間を求めた。

$$\text{ガス滞留時間} = \text{ロータリーキルン長さ} / \text{平均燃焼ガス流速}$$

ロータリーキルン内のガス滞留時間の計算結果を資料表 2.2-4 に示す。

資料表 2.2-4 ロータリーキルン内のガス滞留時間

テストプラントのロータリーキルン実験			平成19年3月23日				
			11:00	12:00	13:00	14:00	15:00
重油低発熱量	Hl	MJ/kg	42.0	42.0	42.0	42.0	42.0
理論燃焼ガス量	G ₀	Nm ³ /kg	11.2	11.2	11.2	11.2	11.2
理論燃焼空気量	A ₀	Nm ³ /kg	10.5	10.5	10.5	10.5	10.5
空気中の酸素濃度		%	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0
燃焼ガス中の酸素濃度		%	5.8	4.7	7.2	5.3	4.3
空気比	m	--	1.38	1.29	1.52	1.34	1.26
燃焼ガス量 (燃料1kg当たり)	G	Nm ³ /kg	15.2	14.2	16.7	14.8	13.9
重油密度		g/cm ³	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88
重油使用量		L/hr	14.6	14.5	14.8	14.7	14.8
		kg/hr	12.8	12.7	12.9	12.9	13.0
キルンの燃焼ガス量		Nm ³ /hr	195.2	181.3	215.8	190.5	179.8
		Nm ³ /min	3.3	3.0	3.6	3.2	3.0
焼点温度		°C	1,460	1,426	1,439	1,430	1,453
窯尻温度		°C	1,108	1,125	1,129	1,139	1,132
キルン長さ		m	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2
キルン断面積		m ²	0.096	0.096	0.096	0.096	0.096
キルン内燃焼ガス量		m ³ /min	17.8	16.6	19.7	17.4	16.4
		m ³ /sec	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
キルン内平均燃焼ガス流速		m/sec	3.1	2.9	3.4	3.0	2.8
キルン内滞留時間		sec	1.0	1.1	0.9	1.1	1.1

(2) 反応塔内のガス滞留時間と窯口から各所までのガス滞留時間の求め方

反応塔内のガス滞留時間の算出は、次の手順で行なった。

- ・反応塔直管部分 (反応塔上⑥部分) で、JIS Z8808 に従いピトー管を用いてガス流速測定値と温度を測定した。

- ・反応塔内に流れている燃焼ガス速度を、温度換算した。

$$\text{燃焼ガス流速 (温度換算値)}$$

$$= \text{ガス流速測定値} \times (273 + (\text{反応塔各所温度} + \text{反応塔下温度}) / 2) / (273 + \text{排ガス温度})$$

- ・反応塔直管部分の長さを燃焼ガス流速で除し、反応塔内のガス滞留時間を求めた。

$$\text{反応塔ガス滞留時間} = \text{反応塔長さ} / \text{燃焼ガス流速 (温度換算値)}$$

- ・ロータリーキルン内ガス滞留時間と反応塔内ガス滞留時間を足し合わせ、ガス滞留時

間とした。

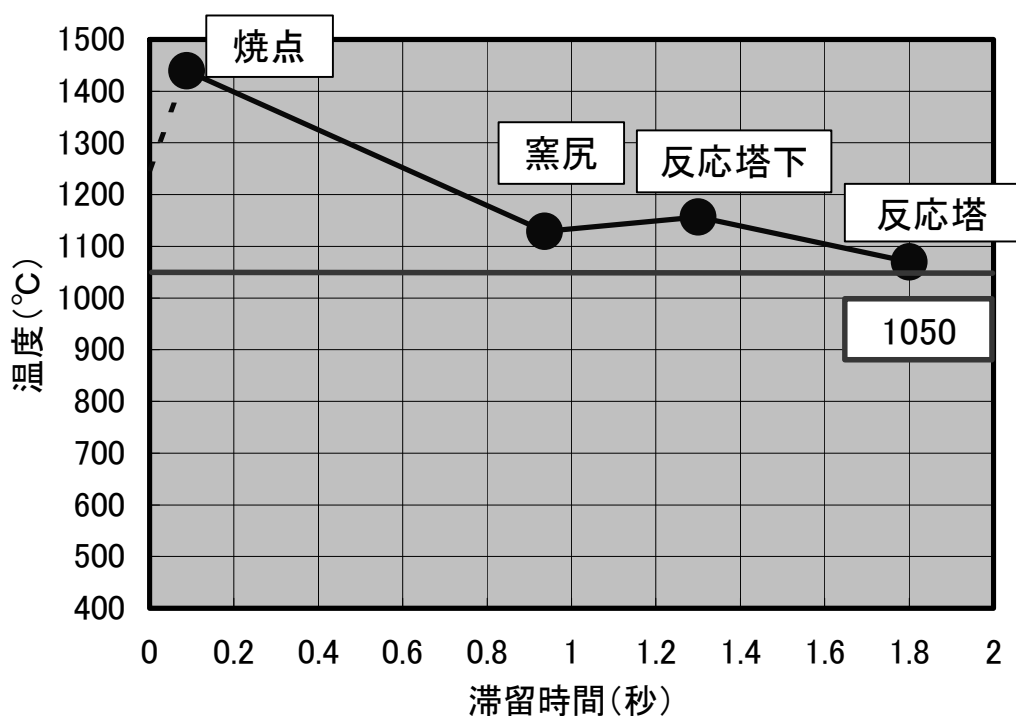
反応塔内のガス滞留時間と、窯口から各所までのガス滞留時間の計算結果を資料表 2.2-5 に、テストプラント各部のガス滞留時間－温度の関係を資料図 2.2-2 に示す。

目標とした燃焼ガス温度：1,050℃以上、炉内滞留時間 1 秒に対して、石綿含有建材の処理実験時は 1,050℃以上のガス滞留時間は約 1.8 秒であった。

資料表 2.2-5 反応塔内のガス滞留時間と、窯口から各所までのガス滞留時間

ピトー管による測定		平成19年3月23日				
		11:00	12:00	13:00	14:00	15:00
反応塔上断面積	m ²	0.062	0.062	0.062	0.062	0.062
反応塔上温度	℃	976	976	976	976	976
実測反応塔内ガス流速	m/sec(測定値)	6.6	6.6	6.6	6.6	6.6
反応塔下温度	℃	1,139	1,151	1,156	1,165	1,168
温度換算反応塔下ガス流速	m/sec(計算値)	7.1	7.1	7.1	7.1	7.2
窯尻から反応塔下までの長さ	m	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3
窯尻から反応塔下までの滞留時間	sec	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
反応塔中温度	℃	1,058	1,065	1,070	1,075	1,077
温度換算反応塔中ガス流速	m/sec(計算値)	6.6	6.6	6.6	6.6	6.6
窯尻から反応塔中までの長さ	m	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8
窯尻から反応塔中までの滞留時間	sec	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
窯口から反応塔下段までの滞留時間	sec	1.4	1.4	1.3	1.4	1.4
窯口から反応塔中段までの滞留時間	sec	1.9	2.0	1.8	1.9	2.0

以上の計算は、「新・公害防止の技術と法規 2006〔大気編〕(2006), p.189-201」等を参照した。



資料図 2.2-2 ガス滞留時間とガス温度の関係

