

高純度酸化マグネシウム及び水素ガス製造装置
設計資料

2023/05/30

株式会社スチームテックホールディングス

目次

1. プロジェクト概要	1
2. 設計計算書	3
3. マスバランスシート	8
4. ヒートバランスシート	10
5. 設備仕様と能力	11
6. プロセスフローシート	14
7. 配管計装図	15

1. プロジェクト概要

特許6678194「水素ガス発生方法及び装置」に基づいた「高純度酸化マグネシウム及び水素ガス製造装置」の実証施設の設計・施工

背景①「水素ガスの現状」

水素を次世代エネルギーとしての利用が唱えられて久しいが、現在工業化できている水素ガス製造方法は「水蒸気改質法」と「電気分解法」及び「副生水素」の3種類であるが、「水蒸気改質法」は得られる水素の持つエネルギーよりも大きなエネルギーの炭化水素ガスを必要とする。「電気分解法」においてもより大きな電気エネルギーを必要とし、仮に再生可能エネルギーを水素ガスの状態でストレージし、不安定な再生可能エネルギーの平滑化を図るにしても、すべての物質の中で最も比重の軽い「水素ガス」による蓄エネルギー利用の適不適については疑問が残る。「副生水素」（工業的に不産物として発生した水素）については、他のガスとの混合生成である場合 PSA法などを用いて分離させなければならない。トータルのエネルギー収支を確認する必要がある。

背景②「高純度酸化マグネシウムの現状」

工業原料として多岐に使用されている酸化マグネシウムであるが、低純度の物は、原石マグネシアから焼成し、軽焼マグネシアや重焼マグネシアを生成するが、高純度酸化マグネシウムについては、「気相法」を用いて生成される。具体的には、金属マグネシウムを加熱しマグネシウム蒸気とし、酸素ガスを加えることで生成している。金属マグネシウムを加熱することに多くの化石燃料を必要とすることから、非常に高価な工業原料となっている。

特許6678194「水素ガス発生方法及び装置」

本特許は、副生水素の一種であるが、水素以外の気体が発生しないためPSA法などを用いる必要がなく、化石燃料の代わりに過熱蒸気を用いることで高純度酸化マグネシウムを製造する技術である。

2. 設計計算書

2.1 計算諸元

2.1.1 物質データ

	分子量	形状	嵩比重	Excergy	Excergy	反応時発生熱量	反応時発生熱量	反応効率
Mg	24.3	粒	1.2	611.0	6,010.6	394.7	3,883.16	99.9%
H2O(蒸気)	18	GAS	-	68.7	912.3	-	-	50.0%
H2O(水)	18	液	-	0.0	0.0	-	-	-
MgO	40.3	紛	0.6	44.0	261.0	-	-	-
H2	2	GAS	0.00008988	241.0	28,800.0	-	-	-
	(g/mol)		(t/m ³)	(kJ/mol)	(kcal/kg)	(kJ/mol)	(kcal/kg)	

◆各物質の1kg当たりのkcal算出

a. J ⇒ cal 換算

$$1 \text{ J} = 0.23904722 \text{ cal} \text{ より}$$

$$[\text{kcal/mol}] = [\text{kJ/mol}] \times 0.239 \dots [\text{cal/J}]$$

b. mol ⇒ g 換算

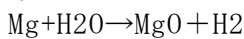
質量 [g] = 分子量 [g/mol] × モル数 [mol] より

$$[\text{kcal/g}] = [\text{kcal/mol}] \div \text{分子量} [\text{g/mol}]$$

よって、各物質の1kg当たりのkcal算出式は

$$[\text{kcal/kg}] = [\text{kJ/mol}] \times 0.239 \dots [\text{cal/J}] / \text{分子量} [\text{g/mol}] \times 10^3$$

2.1.2 反応式



2.1.3 熱化学方程式



$$(611) + (68.7) = (40.3) + (241) + (394.7)$$

$$\Delta H = 394.7 \text{ kJ/mol}$$

2.2 設備計画

2.2.1 反応塔

・塔内寸

MgO生産量

50 kg/バッチ

実容積計算

	内径	高さ(内寸)	断面積	容積
内寸設定	800	1,400	0.50	0.71
	(mm φ)	(mm h)	(m ²)	(m ³)

>
適

MgOバッチ 生成量
0.0833
(m ³)

よって、反応塔寸法は

内径 800 (mm φ)
有効高 1,400 (mm h) とする。

・冷却水量

Mg投入量	31.8 kg/バッチ	(3.3 マスバランスより)
Mg反応時発生熱量	3,883.16 kcal/kg	(上記、物質データより)
MgOへの反応時間	2 h/バッチ	

上記より単位時間当たりの反応熱量 Q_t は
61742.21 kcal/h

冷却水投入温度 T_1	20 °C
冷却水排出温度 T_1'	25 °C

冷却水必要流量

$$Q_t / (T_1' - T_1) \times 1 \quad [\text{kcal/kg} \cdot ^\circ\text{C}]$$
$$= 12,348 \text{ kg/h}$$

よって、冷却水の投入量は 12.5 t/h とする。

・排ガス流量

H ₂ ガス質量	2.48 kg/バッチ	(3.3 マスバランスより)
H ₂ Oガス(蒸気)質量	32.7 kg/バッチ	(3.3 マスバランスより)
MgOへの反応時間	2 h/バッチ	

標準状態におけるガス流量

$$\frac{22.4 \text{ [Nm}^3\text{/mol]}}{\text{分子量 [g/mol]}} \times \text{ガス質量 [kg/h]} = \text{ガス流量 [Nm}^3\text{/h]}$$

$$\text{H}_2\text{ガス } 13.89 \text{ Nm}^3 + \text{H}_2\text{Oガス } 20.35 \text{ Nm}^3/\text{h} = 34.23 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

よって、排ガス流量は 40 Nm³/h とする。

2.2.2 過熱蒸気発生装置

MgOへの反応時間	2 h/バッチ
-----------	---------

マスバランスより、1バッチに必要な蒸気量は58.8 kg であることから
必要蒸気量 29.4 kg/h

よって蒸気作成能力は 30kg/h とする。

2.2.3 排ガス熱交換器

排ガス流量 G_{t1}	40 Nm ³ /h
設計圧力	0.006 MPaG

冷却前ガス温度 T_1	650 °C
冷却後ガス温度 T_1'	180 °C

排ガス平均定圧比熱

C_{p1}	0.389 kcal/Nm ³ °C (at 650°C)
C_{p2}	0.364 kcal/Nm ³ °C (at 180°C)

冷却すべき熱量 Q_t

$$Q_t = G_{t1} \times (C_{p1} \times T_1 - C_{p2} \times T_2) \\ = 7,493 \text{ kcal/h}$$

冷却水投入温度 $T_2 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$

冷却水排出温度 $T_2' = 25 \text{ }^\circ\text{C}$

冷却水必要流量

$$Q_t / (T_2' - T_2) \times 1 \text{ [kcal/kg} \cdot \text{ }^\circ\text{C]} \\ = 1,499 \text{ kg/h}$$

総括伝熱係数 U

$100 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{ }^\circ\text{C}$

対数平均温度差 ΔT

$341.3 \text{ }^\circ\text{C}$

必要伝熱面積

$$Q_t / (U \times \Delta T) = 0.2 \text{ m}^2$$

よって伝熱面積は 0.2 m^2 、冷却水は 1.5 t/h とする。

2.2.4 排ガススプレー塔

冷却前ガス温度 $T_3 = 180 \text{ }^\circ\text{C}$

冷却後ガス温度 $T_3' = 60 \text{ }^\circ\text{C}$

排ガス平均定圧比熱

$C_{p1} = 0.364 \text{ kcal/Nm}^3\text{ }^\circ\text{C}$ (at 180°C)

$C_{p2} = 0.360 \text{ kcal/Nm}^3\text{ }^\circ\text{C}$ (at 60°C)

冷却すべき熱量

$$Q_t = G_{t1} \times (C_{p1} \times T_3 - C_{p2} \times T_4) \\ = 1,757 \text{ kcal/h}$$

必要容積

$$\ln((T_3 - T_w) / (T_3' - T_w)) = V_c / G_{t1} \times (k_{sp} \times 3600)$$

$V_c =$ 必要容積

水滴温度 $T_w = 40 \text{ }^\circ\text{C}$

冷却速度計数 $k_{sp} = 0.13 \text{ Nm}^3/\text{sec}$

必要容積

$$V_c = 0.2 \text{ m}^3$$

・塔内平均ガスボリューム

ガスボリューム

$$G_{t1} \times (\text{平均ガス温度} + 273) / 273 = 58 \text{ Am}^3/\text{h}$$

塔内流速 1 m/sec 以下とする。

必要断面積

$$\text{ガスボリューム} / \text{流速} / 3600 = 0.02 \text{ m}^2$$

よって内寸 $\phi 200 \times 7200 \text{ H}$ とする。

必要噴霧水量

$T3'$ °Cにおける水蒸気のエンタルピー

$$ht3' = IT3' + 0.48(T3' - Tw) - 15 \\ 617.5 \text{ kcal/kg}$$

必要噴霧水量

$$Gr = Qt/ht3' \\ = 3 \text{ kg/h} \\ = 0.05 \text{ l/min}$$

よって 噴霧水量は余裕を見て 0.9t/h とする。

冷却後のガス量

$$Gt2 = Gt1 + Gr \times (22.4/18.0) \\ = 44 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

2.2.5 水素ガスホルダ

水素のストレージ時における条件は次のようになる。

保管量	0.31 kg/バッチ
平均温度	60 °C
設計圧力	0.0020 MPaG

上記よりストレージ時における水素の体積は

$$\text{平均温度では } 4.13 \text{ m}^3$$

以上より水素ストレージ容量は 7.55 m³ とする。

◆標準状態における気体の体積算出

気体の質量と標準状態における気体の密度より次の式となる。

$$\text{気体質量} / \text{標準状態密度}$$

◆ストレージ時における気体の体積算出

標準状態における気体の体積とストレージ時の温度、使用圧力より次の式となる。

$$\text{標準状態の気体体積} \times \{(273.15 + \text{温度})/273.15\} \times \{0.1013 / (0.1013 + \text{設計圧力})\}$$

2.2.6 放散筒

$$\text{排ガス温度 } tg = 60 \text{ °C (放散筒時)}$$

$$\begin{aligned} \text{排ガスボリューム} & \quad \text{(放散筒時) (最大排ガス量時)} \\ Gt2 \times (273 + 60) / 273 & = 53 \text{ Am}^3/\text{h} \\ & = 0.01 \text{ m}^3/\text{sec} \end{aligned}$$

$$\text{筒内流速 } V = 10.0 \text{ m/sec程度とする。}$$

筒内径	D m ϕ		
	$\pi D^2/4=$	0.01	/ 10.0
	$D=$	0.043	
	\doteq	0.05 m ϕ	とする。
筒実高	$H_o' =$	5 m	
排出口高さ	$H_o =$	5.0 m	とする。

放散筒の通風力 (draft) P mmAq

$$P=355H_o' [1/(273+t_a)-1/(273+t_g)]$$

$$P=0.63 \text{ mmAq}$$

$t_a=25^\circ\text{C}$ (外気温度)

3. マスバランスシート

3.1 物質データ

	分子量	形状	反応効率
Mg	24.3	粒	99.9%
H ₂ O (蒸気)	18	GAS	50.0%
H ₂ O (水)	18	液	-
MgO	40.3	粉	-
H ₂	2	GAS	-

(g/mol)

・各物質の1kg当たりのkcal算出

a. J ⇒ cal 換算

$$1 \text{ J} = 0.2390472 \text{ cal} \text{ より}$$

$$[\text{kcal/mol}] = [\text{kJ/mol}] \times 0.239 \dots [\text{cal/J}]$$

b. mol ⇒ g 換算

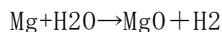
$$\text{質量 [g]} = \text{分子量 [g/mol]} \times \text{モル数 [mol]} \text{ より}$$

$$[\text{kcal/g}] = [\text{kcal/mol}] \div \text{分子量 [g/mol]}$$

よって、各物質の1kg当たりのkcal算出式は

$$[\text{kcal/kg}] = [\text{kcal/mol}] \times 0.239 \dots [\text{cal/J}] / \text{分子量 [g/mol]} \times 10^3$$

3.2 反応式



3.3 マスバランス (重量ベース)

Mgを1とする。

		Mg	H ₂ O (蒸気)	H ₂ O (水)	MgO	H ₂
反応塔	IN	1	1.85	—	—	—
	OUT	—	1.03	—	1.57	0.078

歩留まり 95%
蒸気ロス 10%

・反応塔 投入蒸気量算出

蒸気ロスによる損失や反応効率を考慮すると次の式となる。

$$\text{投入蒸気量} = \{ \text{Mgマスバランス量} \times (\text{H}_2\text{O分子量} / \text{Mg分子量}) \} / \{ 1 - \text{蒸気ロス率} - (1 - \text{反応効率}) \}$$

・反応後 排出蒸気量算出

反応で使用された蒸気や蒸気ロスによる損失を考慮すると次の式となる。

$$\text{排出蒸気量} = \text{投入蒸気量} - \{ \text{Mgマスバランス量} \times (\text{H}_2\text{O分子量} / \text{Mg分子量}) \} / (1 - \text{蒸気ロス率})$$

・反応による水素生成量算出

歩留まりによる損失や反応効率を考慮すると次の式となる。

$$\text{蒸気生成量} = \text{Mgマスバランス量} \times (\text{H}_2 \text{分子量} / \text{Mg分子量}) \times \text{歩留まり率} \times \text{反応効率}$$

3.4 マテリアルバランス

上記マスバランスより、生成するMgOを50kgとした際の各物質の重量を求めると次のようになる。

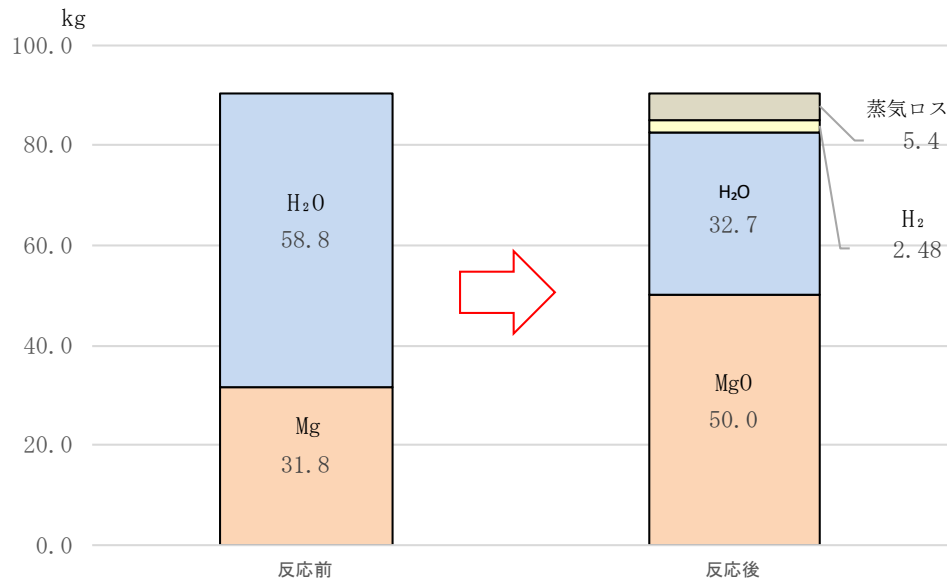
		Mg	H2O(蒸気)	H2O (水)	MgO	H2	
反応塔	IN	31.8	58.8	—	—	—	kg
	OUT	—	32.7	—	50.0	2.48	kg

- MgO重量より各物質の重量算出

MgOのマスバランス量と各物質のマスバランス量の比率より次の式となる。

$$\text{MgO重量} \times (\text{物質マスバランス量} / \text{MgOマスバランス量})$$

- 反応前後のマテリアルバランス グラフ



4. ヒートバランスシート

4.1 物質データ

	分子量	形状	Excergy	Excergy	反応時 発生熱量	反応時 発生熱量
Mg	24.3	粒	611.0	6,010.6	394.7	3,883
H2O (蒸気)	18	GAS	68.7	912.3	-	-
H2O (水)	18	液	0.0	0.0	-	-
MgO	40.3	粉	44.0	261.0	-	-
H2	2	GAS	241.0	28,800.0	-	-
	(g/mol)		(kJ/mol)	(kcal/kg)	(kJ/mol)	(kcal/kg)

◆各物質の1kg当たりのkcal算出

a. J ⇒ cal 換算

$$\frac{1}{[\text{kcal/mol}]} = \frac{1}{[\text{kJ/mol}]} \times 0.239 \dots [\text{cal/J}]$$

b. mol ⇒ g 換算

$$\text{質量 [g]} = \text{分子量 [g/mol]} \times \text{モル数 [mol]} \quad \text{より}$$

$$[\text{kcal/g}] = [\text{kcal/mol}] \div \text{分子量 [g/mol]}$$

よって、各物質の1kg当たりのkcal算出式は

$$[\text{kcal/kg}] = [\text{kcal/mol}] \times 0.239 \dots [\text{cal/J}] / \text{分子量 [g/mol]} \times 10^3$$

4.2 熱化学方程式



4.3 マテリアルバランス

詳細は「MgO生成_マテリアルバランスシート」を参照のこと

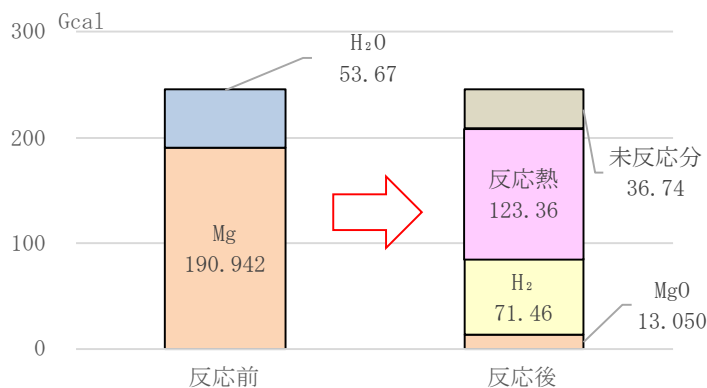
	Mg	H2O(蒸気)	H2O(水)	MgO	H2	
反応塔	IN	31.8	58.8	-	-	kg
	OUT	-	32.7	-	50.0	kg

4.4 ヒートバランス

上記Excergy及びマテリアルバランスの重量より各物質の保有エネルギーを求めると次のようになる。

Mg	+	H ₂ O	=	MgO	+	H ₂	+	反応熱	+	未反応分
190.94		53.67	反応	13.05		71.46		123.36		36.74
Gcal		Gcal		Gcal		Gcal		Gcal		Gcal

◆反応前後のヒートバランス グラフ



5. 設備仕様と能力

- ・反応塔

内容量：0.71m³ (φ0.8m× H 1.4m)

設計圧力：真空～0.7MPa

設計温度：650℃

運転圧力：真空～0.5MPa

運転温度：500℃

冷却水流量：12.5t/h

- ・過熱蒸気発生装置

蒸気量：30kg/h

圧力：0.15MPa

温度：700～1200℃

- ・給水ポンプ

吐出量：50L/h

圧力：0.3MPa

- ・純水装置

処理能力：40kg/h

- ・純水タンク

内容量：0.5m³

- ・温水タンク

内容量：6m³

- ・冷却水循環ポンプ

吐出量：14t/h

揚程：15m

- ・排ガス熱交換器

- 排ガス

- 流量：40Nm³/h

- 設計圧力：6kPaG

- 流入温度：650℃

- 流出温度：180℃

- 冷却水

- 流量：1.5t/h

- 流入温度：20℃

- 流出温度：25℃

- ・冷却塔

- 冷却量：14t/h

- 冷却能力：5℃

- ・排ガススプレー塔

- 内容量：0.144 m³ (φ0.2m× H 7.2m)

- 流入温度：180℃

- 流出温度：60℃

- ・スプレー水タンク

- 内容量：1m³

- ・スプレー水ポンプ

- 吐出量：0.9t/h

- 圧力：0.3MPa

- ・水素ガスホルダ

- 内容量：7.55m³

- 設計圧力：200mmAq

- 設計温度：60℃

・放散筒

排ガス温度：60℃

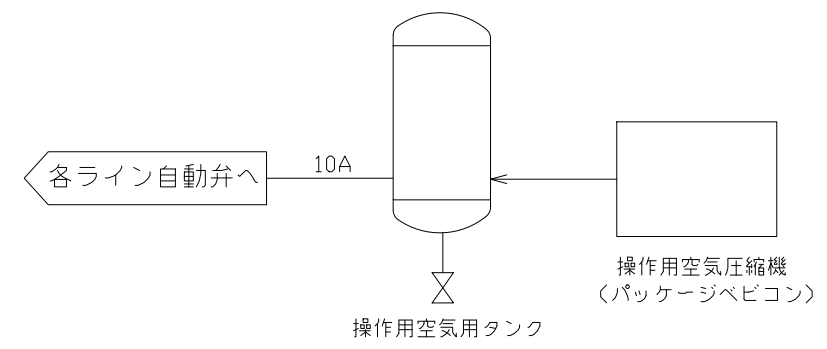
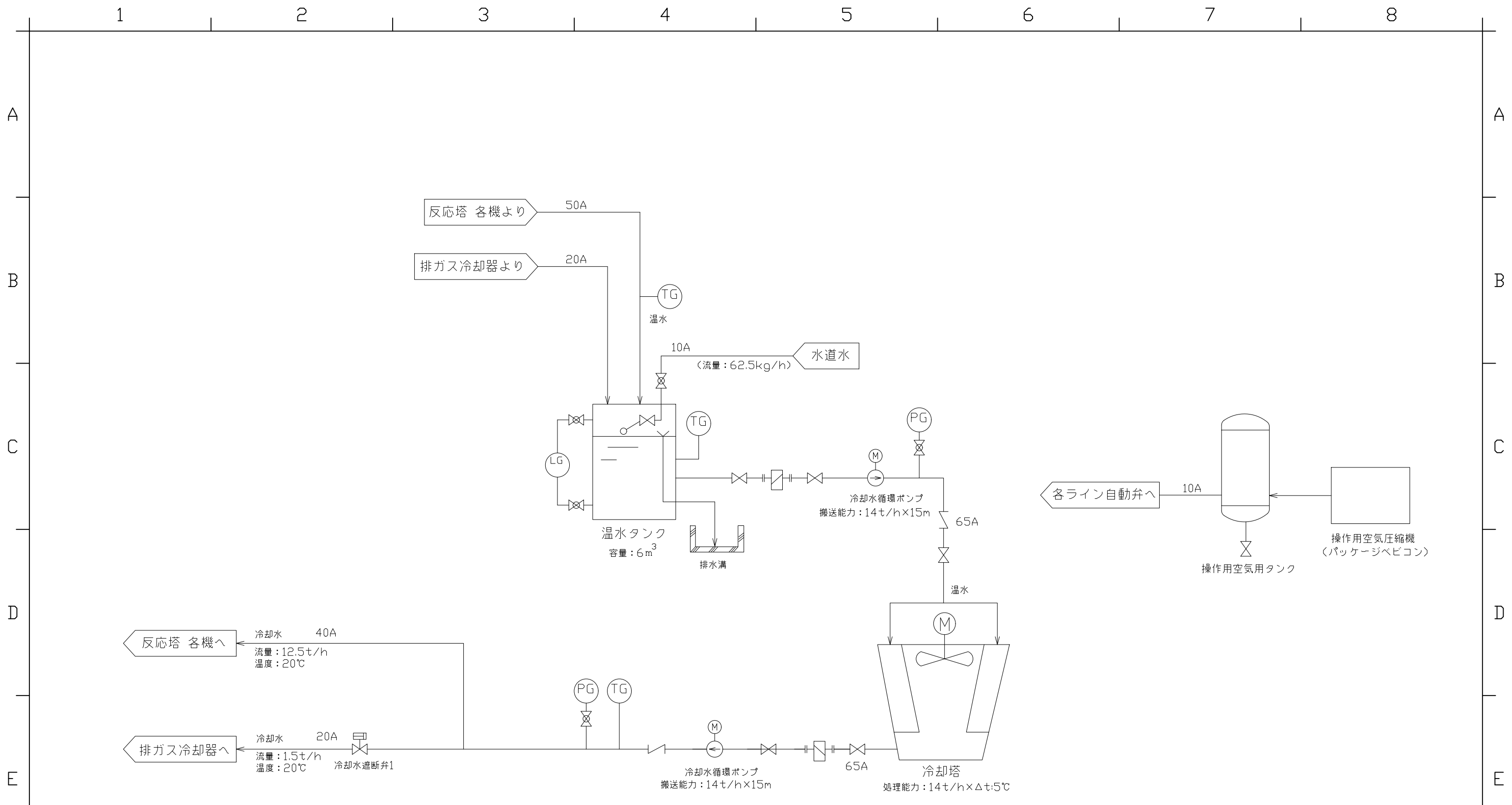
排ガス流量：53Am³/h

筒内径：φ0.05m

筒高：5m

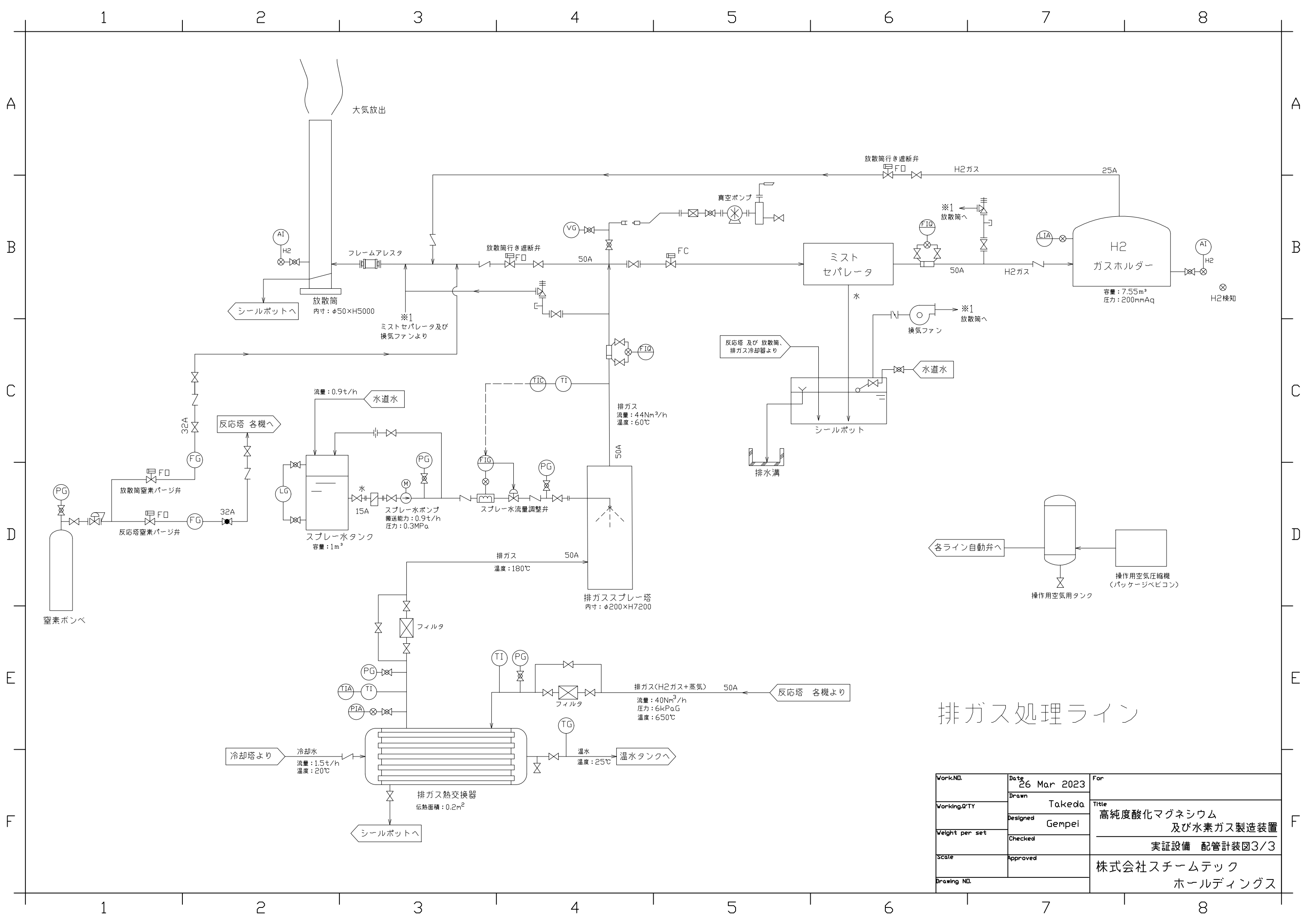
筒内流速：10m/sec

通風力：0.63mmAq



装置冷却ライン

Work.ND.	Date 26 Mar 2023	For
Working.Q'TY	Drawn Takeda	Title 高純度酸化マグネシウム 及び水素ガス製造装置
Weight per set	Designed Gempei	実証設備 配管計装図2/3
Scale	Checked	株式会社スチームテック
Drawing ND.	Approved	ホールディングス



排ガス処理ライン

Work No.	Date 26 Mar 2023	For
Working Q'TY	Drawn Takeda	Title 高純度酸化マグネシウム 及び水素ガス製造装置
Weight per set	Designed Gempei	実証設備 配管計装図3/3
Scale	Checked	株式会社スチームテック ホールディングス
Drawing No.	Approved	