

解 説

UDC 662.998 : 666.76 : 669.18

省エネルギーからみた耐火物および断熱材の最近の進歩*

林 武 志**

The Recent Development of Refractories and Insulating Materials
on the Point of Energy Saving

Takeshi HAYASHI

1. はじめに

耐火物は高温下で使用される宿命を背負った材料であり、省エネルギー問題の最前線にあるということができ、耐火物自体の省エネルギーもさることながら、それを使用する炉体の省エネルギーの問題が圧倒的に大きな意味を持っている。従つて、本稿においては、それを使用する際の省エネルギー問題に主として触れるつもりである。

耐火物は飽くまでも材料であり、その材質の選定、使用方法により、その使用結果が大きく左右される。従つて耐火物を使用する側が、全体プロセスを省エネルギーの方向へどのように転換するかということが問題であり、その際の材料の選定と使用方法によつて、エネルギー消費量が決定されるのである。これに対して、耐火物製造側にとつては、耐久性において優れている高級材質の追求と、一方省力化、省エネルギーを目指した材料の開発という二つの方向への対応が要求されてくる。これらはいずれも、プロセス全体の寿命バランスの上に成立つものであり、この炉材原単位、原単価の低下という点が耐火物を使用する側と製造する側の接点となつてく

る、今後の耐火物の開発において、省エネルギーの問題は常についてまわる問題であり、使用する側と製造する側の真の協力が必要となつてくると考えられる。

2. 耐火物使用技術による省エネルギー

耐火物は、それ自体エネルギーを消費して生産されている。従つて、この耐火物の使用量を減らすことができればそれがすなわち、省エネルギーにつながると思えることができる。

この耐火物の消費エネルギーは、大きく2つに分けられる。第1は、耐火物原料の消費エネルギーであり、耐火原料としての前処理に要するエネルギーのことである。例えば、電融、死焼 (dead burn) 仮焼などに要するエネルギーがこれにあたる。もつと厳密に言うならば原料採掘に要するエネルギー、原料運搬に要するエネルギーも考慮に入れる必要があるが、ここでは省略したい。これらの耐火物原料の消費エネルギーの試算結果を表1に示す。このように、例えば、炭化珪素とか電融アルミナなどのように、高エネルギー消費型の原料よりも天然原料を使用した方が、それ自体のエネルギーロスが小さくなることを意味する。また、この原料の消費エネ

表1 主な耐火物原料の消費エネルギー

原 料 名	消費エネルギー (10 ³ kcal/t)	備 考
炭 化 珪 素	22 050	電力 9 000 kWh/t
電融マグネシア	13 000	〃 5 300 〃
電融アルミナ (WA)	8 580	〃 3 500 〃
海水マグネシアグリーンカー (高純度品)	6 500	重油 700 l/t
〃 (ふつう品)	3 700	〃 400 〃
高アルミナ質シャモット	3 700	〃 400 〃
〃	〃	〃 〃
〃	2 000	〃 210 〃
粘土質シャモット	1 200	〃 130 〃
〃	〃	〃 〃
〃	550	〃 60 〃

(太田豊彦)

* 昭和 53 年 3 月 7 日受付 (Received Mar. 7, 1978) (依頼解説)

** 品川白煉瓦(株) 理博 (Shinagawa Refractories Co., Ltd., 2-2-1 Ohtemachi Chiyodaku Tokyo 100)

表2 耐火物製造用エネルギー

耐火物	製造用エネルギー ¹⁾ (10 ³ kcal/t)	同左・重油消費量 (l/t)	製造エネルギー ²⁾ (10 ³ kcal/t)	備考
高温焼成マグ・クロ	5 080~3 700	550~400	—	石油系燃料を 9 500 kcal/l とし電力 1 kWh を 2 450kcal として計算した
マグネシア	3 700~2 220	400~240	—	
高アルミナ	4 620~1 760	500~190	1 500~1 800	
粘土質	1 390~ 650	150~ 70	1 300~1 500	
キャストブル (原料乾燥用)	18~28	2~ 3	—	
珪石	—	—	2 700~3 200	
塩基性	—	—	540	
	不焼成	—	1 900~2 400	
	普通焼成	—	2 500~3 500	
	高温焼成	—	870	
ドロマイト	—	—	2 000~2 500	
	不焼成	—	3 100~3 600	
	普通焼成	—	900~1 300	
	高温焼成	—	—	
取鍋用 蝸石質	—	—	—	

(1)太田豊彦, (2)野崎洋彦)

表3 各種耐火物の消費エネルギー (原料+製造)

耐火物名	消費エネルギー (10 ³ kcal/t)
電融マグ 50% リボンドマグ・ドロれんが	14 800
高級出銑珪材 (アルミナ-SiC 系)	12 440~10 400
高温焼成マグ・クロれんが	10 750~ 9 120
マグネシアれんが (高純度品~ぶつう品)	9 800~ 5 300
焼成マグ・ドロれんが	9 200~ 5 300
高アルミナ質れんが	9 100~ 3 760
高アルミナ質キャストブル	7 600~ 2 130
マグネシア質吹付材	4 200~ 3 000
粘土質れんが	2 600~ 1 280
珪石れんが	2 450
粘土質キャストブル	1 800~ 1 200
ジルコン質れんが	1 580~ 1 400
ろう石れんが	780

(太田豊彦)

ルギーの他に、耐火物製造に要する熱エネルギーも当然考慮に入れるべきである。この耐火物原料の消費エネルギーと、耐火物製造に要するエネルギーの合計を、耐火物のエネルギー消費とすることができ(1)(2)。表2に、耐火物製造に要するエネルギーを、表3に、耐火物の消費エネルギーを示す(1)。

省エネルギーの面から考察すると、天然原料を主原料とし、低温で処理した耐火物を使用することが有利のように考えられるが、実察には、炉材原単位の面からは必ずしもこのようにはならない。すなわち、一般に苛酷な条件の場合には予め高温で処理した高級な原料を使用し更に高温で十分焼成した耐火物が必要となってくるのである。これは対象とする炉の損傷バランス、炉寿命、補修、改修などを考察し、トータルコストが最小になるようにするのが省エネルギーへの近道であるからである。対象とする炉の寿命を想定し、材質、ライニング厚み、形状、施工方法に至るまでトータルコスト、トータルエネルギーを最小にするように設計しなければならない。

この省エネルギーの面から最近特に目覚ましいのが不定形化の方向である。すなわち不定形化することによ

り、耐火物の焼成に要するエネルギーが不要になり、炉の余熱によつて耐火物の焼成を同時に行なうという点である。この点については、使用する原料、例えばアルミナセメントあるいは炭化珪素、高アルミナ質原料のように、それを生産するために高い熱エネルギーを要するような例もあるので、一概に言えないが、施工面で明らかな省力化が可能であり、同時に省エネルギーの効果を有していると言える。最近ではアルミナセメントの使用量を極力少くすること、場合によつては全く使用しないキャストブルが出現したのは注目すべきことである。

このように、耐火物そのものの消費エネルギーの少ない材料の選択と、施工方法まで含めた総合的な省エネルギーを計った例として、熔鋼取鍋のスリンガー施工がある。これは、粒度調整された耐火原料を少量のバインダーと混合し、ライニング場所に叩きつける方法をとっている。従つて、この間の省力化も極めて高く、ライニング寿命の若干の低さを補つて十分な省エネルギー効果をあげている。表4に、取鍋の煉瓦積法とスリンガー法のエネルギー消費量の比較を示した。

更に、新しい方向として、タンディッシュライニングに見られる断熱ボードの方向である。従来タンディッシュライニングは粘土質、あるいはロー石質れんがで行なわれていたが、最近では塩基性コーティング材の採用、あるいは断熱ボードの採用が一般的となつて来つつある(14)(27)。特に断熱ボードについては新しい方向として注目されている。これは、耐火原料と繊維材を混合しボードに成形し乾燥したもので、タンディッシュ内張りの上に張りつけられる。このボードは断熱性が高く、予熱時間が短かくてすむことから、タンディッシュの予熱に要するエネルギーを大幅に減らすことが可能である。しかも、従来のボードは、溶鋼に接触するような場所には使用し得ないと思われていた点を打ち破つた点からも、極めて高く評価すべき新技術であるということが出来る。表5に、タンディッシュ用断熱ボードの品質例を示す。

表4 煉瓦法と Slinger 法の製造諸元 (福山製鋼)

項目	煉瓦法 (A)	Slinger 法 (B)	差 (A)-(B)
鋼塊 10 万 t / M 当り必要人員 耐火物製造 Energy	20 人 736 × 10 ³ kcal / t-product	7 人 29.4 × 10 ³ kcal / t-product	+13 人 +706.6 × 10 ³ kcal / t-product
鋼塊 t 当り耐火物使用量 耐火煉瓦 Sling Mass 計	3.01 kg / t 3.01 kg / t	1.11 kg / t 3.55 kg / t 4.66 kg / t	+1.90 kg / t -3.55 kg / t -1.65 kg / t
鍋乾燥 C Gas Energy	5 328 kcal / t	5 472 kcal / t	-144 kcal / t
総 Energy	7 828 kcal / t	6 505 kcal / t	+1 322 kcal / t

Slinger 施工法 鍋寿命 平均 24.5 回
煉瓦施工法 " " 37.5 回

表5 タンディッシュボードの品質

	シリカ質			SiC 質 ³⁾	マグネシア質 ¹⁾
	A ¹⁾	B ²⁾	C ²⁾		
化学成分 (%)					
Ig·Loss	7.6		3~5	7~10	7.1
SiO ₂	85.7	86.35	83~86	70~75	7.6
Fe ₂ O ₃	2.9	0.88	<1	SiC	3.4
Al ₂ O ₃	0.8	0.52	2~4	10~15	0.4
CaO	1.1	0.01	3~6	2~4	1.0
MgO	0.4	0.10	1~2	1~2	79.5
嵩比重	1.05	0.96~1.02	0.85~1.10	1.0~1.2	1.01
抗折力 (kg/cm ²)	23.5	25.2~32.4	20<	20~30	21.5
熱伝導率 (kcal/m·h·°C)	at 800°C 0.11		at 100~400°C 0.18~0.23	at 500°C 0.25~0.35	at 800°C 0.09

(¹⁾ 著者 (²⁾ 西脇実他 (³⁾ 橋本恒市他)

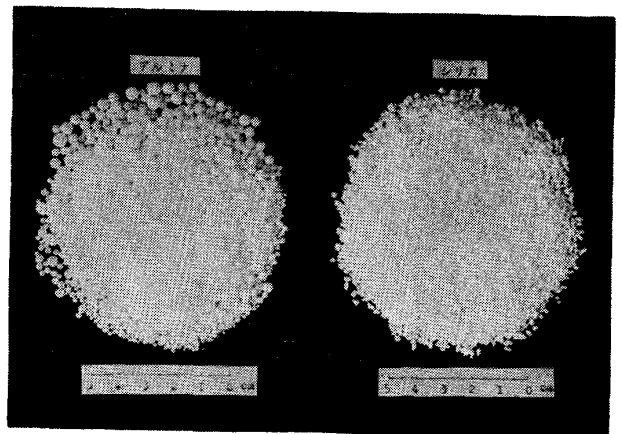
このように、省エネルギーについては単に断熱による熱エネルギーロスの減少とは別に、耐火物使用原単位の面からも考慮しなければならない。耐火物メーカーと使用者の今後の大きな課題の一つであろう。

3. 断熱材と省エネルギー

耐火断熱材料として、古くから耐火断熱レンガがある。現在、大量に使用されている耐火断熱レンガとしては珪藻土質レンガ、粘土質、高アルミナ質、珪石質、アノサイト質などがあるが、比較的新しい材料として中空球、あるいは繊維質断熱材がある。これらの耐火断熱材の材料について以下に述べたい。

3.1 中空断熱骨材

断熱材の骨材として、あるいは、その形のままで使用する目的で、中空断熱骨材が開発されている。これらは断熱レンガの中に、あるいはキャストブル、プラスチック、更には断熱吹付材などに使用されて気孔部分を形成し、軽量化と共に、熱導率を下げる役割を果している。材質は現在のところ、アルミナ、スピネル、シリカ、ジルコニアなどがあり、各所で使用されている³⁾。これら



(著者) (1×13/14)

図1 中空断熱骨材の外観

の材質は耐熱性が高く、しかも高温下での収縮率が小さく容積安定性が良く、主として高温用の断熱骨材として使用される例が多い。これら中空断熱骨材の外観は図1のごとくであり、品質は表6に示す。

この中空断熱材は、高純度酸化物を熔融し、空気またはスチームで吹飛ばして製造されるもので、それぞれの材質の特性を強調した骨材である。

表6 各種バブルの品質

種 類		アルミナ	ジルコニア	スピネル	シリカ
結 晶 形		α -アルミナ	主として cubic	—	—
充填密度 (g/cc)		0.5~0.8	1.6~3	0.8~1.2	0.18~0.24
真比重 (g/cc)		3.94	5.6~5.7	3.55~3.60	—
融 点 (°C)		2040	2550°C	2300	1730
熱伝導率 (kcal/m·h·°C)		at 1100°C	at 1000°C	—	—
最高使用温度 (°C)		0.4 (ルーズ)	0.26	—	—
		約 2000 (ルーズ)	約 2430	1900 (推定)	—
化 学 成 分 (%)	Al ₂ O ₃	99.2	0.4~0.7	60~80	0.37
	SiO ₂	0.7	0.5~0.8	<0.1	98.62
	Fe ₂ O ₃	0.03	0.2~0.4	<0.2	0.04
	Na ₂ O	0.14	—	<0.2	0.12
	CaO	—	3~6	<0.5	0.11
	TiO ₂	—	0.2~0.4	—	—
	ZrO ₂ +HfO ₂	—	92~97	—	—
	MgO	—	—	20~40	trace

(森 圭三)

表7 各種耐火断熱レンガの品質例

種 類	ケイ藻土質		粘 土 質		高アルミナ質		珪 石 質		ア ノ ー サイト質	マグネ シア質	ジルコ ニア質
	1	2	1	2	1	2	1	2			
嵩 比 重	0.47	0.70	0.87	0.50	0.87	0.48	1.10	0.37 ~0.45	0.47	1.33	1.8~2.0
圧縮強さ (kg/cm ²)	10	30	31	21	22	13	56	35	10.8	44	100~230
曲げ強さ(%)	4.1	21.5	20	10	17	7	22	7	7.0	29	—
再加熱収縮率 (%)	900°C 0.05	1200°C 0.70	1400°C ×8h 0.57	1600°C ×8h 0.91	1600°C ×8h 0.21	1650°C ×8h 0.48	1500°C 0.13	—	1093°C 0.0	1800°C ×8h 1.78	2800°C 2.0>
熱間線膨張率 (%)	—	—	0.41	0.52	0.45	0.85	1000°C 1.15	1000°C 0.054	1093°C 0.5~0.6	1.30	0.88
温荷 荷 重 (kg/cm ²)	—	—	0.5	0.5	0.5	0.5	—	—	—	1.0	—
軟 度 化 T ₁ (°C)	—	—	1100	1110	1460	1480	—	—	—	—	—
T ₂ (°C)	—	—	1220	1250	1530	1570	—	—	—	1320	—
熱伝導率 (kcal/m·h·°C)	—	—	—	—	—	0.28	0.4<	0.12	260°C 0.119	—	—
化 学 成 分 (%)	灼 熱	—	—	0.13	0.13	—	—	—	—	—	—
	SiO ₂	83.79	72.29	56.24	58.30	33.59	0.41	90.38	99.5	44.2	0.44
	Al ₂ O ₃	9.63	21.16	42.13	39.43	64.30	99.28	3.58	0.5	38.0	—
	Fe ₂ O ₃	2.45	22.3	1.12	2.15	0.55	0.10	1.65	—	0.5	—
	CaO	2.76	1.29	0.99	tr.	0.30	0.90	—	—	15.2	0.95
	MgO	—	—	0.38	tr.	0.52	0.07	—	—	0.1	98.19
ZrO ₄	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	94<

(著者)

この他に最近では、粘土質の中空断熱骨材も試作されているが、今のところ実用化までは到っていない。

3.2 断熱耐火物

3.2.1 耐火断熱れんが

耐火断熱れんがは、その原料組成によつて珪藻土質、粘土質、高アルミナ質、珪石質、が一般的である。これらのれんがの製造法としては、天然の多孔質材料（例えば珪藻土）をそのまま、あるいは、天然の材料を加熱し

多孔質材料として使用する場合（例えばヒル石、真珠岩）の他に、オガクズ、コークスなどのように、れんが焼成中に燃焼飛散するものを配合する場合、更には、耐火原料のスラリーに起泡材を混入し気泡を作つてそれをそのまま固定するような方法などのうち、一種、あるいは二種類の組合せによる場合が多い。この製造の過程で嵩比重を調節することにより、熱伝導率の異なる材料を得ることが可能である。これらの材料の品質例を表7に示

表8 スピネル及びマグネシア断熱レンガの品質

		スピネル質断熱レンガ ¹⁾			マグネシア質 ²⁾ 断熱レンガ	
		A	B	C		
化学成分(%)	MgO	31.2	25.2	23.3	95.2	
	Al ₂ O ₃	66.3	71.6	59.9		0.6
	SiO ₂	1.4	1.3	8.7		2.9
嵩比重		1.20	1.33	1.06	1.47	
気孔率(%)		66.6	64.1	66.0	58.0	
圧縮強さ (kg/cm ²)		119	179	120	60	
曲げ強さ (kg/cm ²)		48	70	38	20	
熱伝導率 (kcal/m·h·°C)		1000°C 0.89	1000°C 1.08	350°C 0.63	350°C 1.14	
膨張率(%) (1000°C)		—	0.80	—	1.28	
再加熱収縮率 (%)	1400°C×8h	—	—	0.20	0.30	
	1840°C×10h	1.31	0.33	—	—	

(1)著者 (2)齊藤俊太郎)

す⁴⁾。

珪藻土質レンガは、その主成原料である珪藻土は非晶質の無定形含水珪酸であり、不純物の含有によつては、900~850°Cで収縮を起し、さらに高温では1100°C以上では高温型クリストバライトの生成を促し、このために、200~250°Cにおいて、クリストバライトの変態に伴うスポーリングを引き起すことになる。このため、低温用の断熱材として使用される。主に裏張り用として使用されている。

粘土質断熱レンガは、珪藻土質に比べ熱的に安定であり、一般的に使用される材料である。各種工業窯炉の内張り、裏張りや、耐スポール性を要求される焼純炉や、アルカリ侵食に対する抵抗性を要するセメントロータリーキルンなどにも用いられる。

高アルミナ質は、アルミナ含有量50%程度以上のもので、高温熱処理炉の内張りの他に、水素などのような還元雰囲気のある場所にも用いられている。この方面には今後とも多く用いられることになる。

最近、外燃式の熱風炉が採用されるようになり、特にこれらの熱風炉は珪石レンガを多く用いるため、その外側に熱的に安定性の高い珪石質断熱レンガが大量に使用されている。

この他に、マグネシア質、スピネル質等の高温用耐火断熱レンガも市販されており⁵⁾、その品質は表8に示す通りである。

3.2.2 不定形断熱耐火材

断熱耐火材としても、最近不定形質が多く使用されるようになってきた。この理由として、複雑なライニングの必要な場所にも容易に施工し得るなどの多くの利点がある。不定形断熱耐火材としては、断熱キャストブル、プ

ラスチックが主なものであり、これらについて述べてみたい。

断熱キャストブルは、軽量断熱骨材と結合材の混合物で、使用現場で水、あるいは特定の液体で混練して作る耐火物である。この耐火物を所定の枠組の中に流し込み、一定時間の後硬化して、枠が取りはずされるのが一般的な使用方法である。時には、吹付け施工に使用されることもある。断熱骨材はその使用温度によつて決定されるが、低温用(800°C~1000°C)の場合には、パーミキュライトや珪藻土が使用され、1100°C~1400°Cの範囲では粘土質軽量骨材が使用され、更に高温用としては、中空アルミナなどの使用されるのが一般的である。

結合材としては、アルミナセメントや、リン酸塩類が使用されるのが普通である。

これらの軽量断熱骨材、結合材は、それぞれの用途、ならびに条件に応じて適当な組合せが決定される。更に従来使用されなかつた場所(例えば均熱炉、加熱炉)にまで使用範囲が拡大されつつある。また、最近では揺変性(テクトロピイ)を付与するなど、レオロジカルな研究の進歩によつて結合材の使用量を減したキャストブルなどの優れた材質が開発されている。

表9に断熱キャストブル及び、断熱プラスチックの品質例を示した。

断熱プラスチックの骨材は、断熱骨材と粘土及び結合材を予め練り土状、あるいは板状に成形したもので、施工現場で叩き込んで成形されるものである。

プラスチックは、キャストブルと異なり結合材を多く含まないことから、比較的高温まで使用されることが大きな利点である。また、最近ではプレハブ化も研究されており、今後更に使用が増えることになる。

表9 断熱キャストブルおよびプラスチックの品質例

試験項目		断熱キャストブル						断熱プラスチック		
最高使用温度 (°C)		800	900	1000	1200	1500	1800	1200	1400	1600
嵩比重	乾燥後	0.44	0.91	0.90	1.22	1.48	1.14	—	—	—
	500°C焼成後	0.40	0.85	0.84	1.15	1.44	1.10	—	—	—
	最高使用温度後 焼成後	0.89	0.88	0.84	1.10	1.56	1.11	—	—	—
圧縮強さ (kg/cm ²)	乾燥後	4.0	34	28	57	50	59	39	58	104
	500°C焼成後	3.0	31	28	43	26	40	—	—	—
	最高使用温度後 焼成後	3.0	28	30	55	179	1700°C 111	48	104	1400°C 135
線変化率 (%)	乾燥後	-0.08	-0.20	-0.25	-0.18	-0.06	-0.06	-0.36	-0.14	-0.18
	500°C焼成後	-0.65	-0.60	-0.65	-0.30	-0.20	-0.10	—	—	—
	最高使用温度後 焼成後	-0.93	-0.97	-0.95	-0.48	-0.90	1700°C -0.83	-0.73	-1.03	1400°C -0.07
熱伝導率 (kcal/m·h·°C)	500°C焼成品 at 350°C	0.1	0.19	0.19	0.23	0.29	0.74	400°C 0.25	400°C 0.38	400°C 0.41
化学成分 (%)	Al ₂ O ₃	29.5	25.9	25.4	39.4	65.2	93.9	31	42	72
	SiO ₂	30.1	55.9	56.3	32.8	30.2	1.0	67	45	25
	Fe ₂ O ₃	13.6	5.2	4.9	0.1	2.2	0.2	—	—	—
骨材の材質	パーミキュ ライト質	珪藻土質	パーミキュ ライト質	粘土質	高アル ミナ質	高アル ミナ質	軽量断 熱質	粘土質	発泡アル ミナ質	

(著者)

表10 市販セラミック・ファイバーの物性

メーカー	A		B	C	D	F	F	G
繊維直径 (μ)	(短繊維)	(長繊維)	2.8	2~3.5	3.6	3	2.5~3.0	2.9
繊維長さ (mm)	<38	2.3~2.5 13~254	平均100	<38	最長250	5~50	平均130	7.5
繊維比重 (g/cm ³)	2.73	—	2.56	2.6	2.73	2.65	2.6	3.1
融点 (°C)	> 1760	—	1760	1760	> 1760	1800	> 1760	1825
使用温度 (°C)	1260	—	1260	1260	1300	1260	1260	1400
化学組成 (%)								
Al ₂ O ₃	50.9	51.3	50.1	45.5	51.8	52~53	51.5	60.2
SiO ₂	46.8	45.3	49.4	54.0	47.9	45~46	47.4	38.7
Fe ₂ O ₃	—	—	0.1	0.2	0.1	0.1~0.15	0.1	0.2
TiO ₂	—	—	0.1	0.5	tr.	1~1.5	tr.	0.2
CaO	—	—	0.1	—	tr.	—	0.2	0.1
MgO	—	—	tr.	—	tr.	—	tr.	0.1
Na ₂ O	0.8	—	0.3	0.2	0.2	0.1~0.2	0.3	0.4
B ₂ O ₃	1.2	—	—	—	—	0.1~0.2	tr.	—
ZrO ₂	—	3.4	—	—	—	—	—	—
Cr ₂ O ₃	—	—	—	—	—	—	—	—

(注) 各メーカーの発表データによる

(堀江鋭二)

3.2.3 繊維質断熱材

最近の断熱材の中で最も注目されているのが繊維質断熱材である。従来の繊維質断熱材としては、スラグウール、ガラスファイバーなど使用温度も低く、単に炉壁の裏張り材程度としてしか用いられなかつたが、最近ではSiO₂-Al₂O₃質の繊維質断熱材を用い、加熱炉などの炉壁を構成するところまで来ている。その他に最近の材質では、アルミナ質、シリカ質、ジルコニア質、炭化珪素質、窒化珪素質など、各種の材質が開発され、その雰囲気、温度等の使用条件に合わせ実用され、あるいはされ

ようとしている。従来の低温用繊維質断熱材については既に各社で報告されているので、ここでは特に高温用繊維質断熱材について以下に述べることにする。

(1) 繊維材の品質

a. アルミナ-シリカ系

この系の繊維材が最も多く使用されている。繊維材の市販されている各メーカーの品質を表10に示した⁶⁾。いずれもアルミナ含有量は45~60%の間のものである。これらの繊維材を使用してブランケット、シートなど種々の形態で実際に使用されている。

この材質の欠点は、製造時溶融体から急冷されるため、非晶質となつていることである。これが、使用中 1000°C 付近からムライト (3Al₂O₃ · 2SiO₂) の結晶化、1300°C 付近のクリストバライト (SiO₂) の結晶化により使用温度が 1200°C 以上に上昇したり、あるいは、反応しやすい物質が共存したりする場合、あるいは非常に長時間使用される場合などには、繊維の変形が著しく柔軟性が失われ折れやすくなるなどの欠点がある。このように、この系の弱点は、ムライト、クリストバライトの結晶化によつて品質劣化が進むことである。この欠点を補うため、酸化クロム (Cr₂O₃) を 3~5% 添加したり、アルミナ量を 60% にまで高めたり、種々の改良が試されている。アルミナ-シリカ系繊維の再結晶化傾向について図 2 に示す⁶⁾。

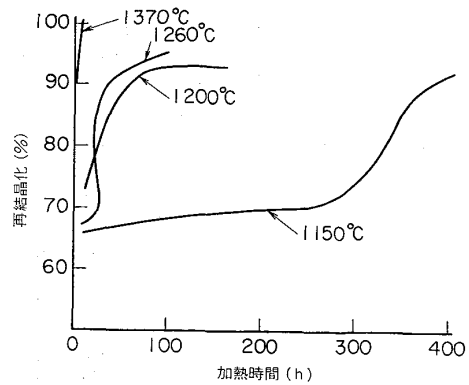


図 2 セラミック・ファイバーの再結晶化傾向

b. その他の繊維材 (アルミナ, ジルコニア, シリカ)
アルミナ質繊維材は、最近開発されたもので、英国 ICI 社の SAFIL アルミナファイバーが有名である。1600°C までの使用に耐えるとして、超高温用断熱材用に各種工業炉に使用されはじめている。このセラミックファイバーは、従来、他種繊維材が溶融物の繊維化という製造プロセスであつたのに対し、化学処理によつて製造されている。例えば、①アルミナの泥漿の粘土を調整し、繊維化し、焼成する。② Al の硝酸塩、オキソ塩化

物、塩基性醋酸塩等と PVA の混合液を押し出し、空気を吹きつけて繊維化し焼成する。(ICI 法)、その他、いずれもアルミニウム塩を紡糸し焼成する方法が一般的である。この製造法は、比較的長繊維を製造するのに適しており、今後更に使用量が増加するものと考えられる。最近では、高温炉、特殊雰囲気炉のライニング用バックアップ断熱用、シール用などに使用されている。表 11 にアルミナ質繊維とジルコニア質繊維の特性をまとめて示す^{7)~10)}。

ジルコニア繊維は、現在最も高温まで使用できる繊維

表 11 アルミナ及びジルコニア繊維の品質

品 名		アルミナ 繊維					ジルコニア 繊維		
		ICI	S.G.P.R FIBRAL80	B	B	C	UCC	HITOCO	ICI
繊維直径 (μ)		3	7~10	平均 2.9	3.6	—	4~10	2.5~12.5	3
繊維長さ (mm)		—	70~100	平均 75	<100	—	—	6~250	20~50
比重 (g/cm ³)		—	—	3.10	2.6	—	5.9	—	5.4
安定剤		—	—	—	—	—	Y ₂ O ₃	CaO	—
融点 (°C)		2000	1800	1825	>1800	—	2600	—	2700<
最高使用温度 (°C)		1400	—	1400	1500	1400	—	—	1600
硬度 (モース)		—	—	—	—	—	6<	—	6
引張強さ (psi)		(kg/mm ²) 107	—	—	—	—	50 000 ~200 000	200 000	100×10 ³
比強度 (m)		—	—	—	—	—	—	—	13×10 ³
弾性率 (psi)		—	—	—	—	—	18~22×10 ⁶	—	15×10 ⁶
比弾性率 (m)		—	—	—	—	—	—	—	2×10 ⁶
表面積 (m ² /g)		100	—	—	—	—	(BET法) <1.0	—	10
比熱 (cal/g·°C)		0.25	—	—	—	—	—	—	0.14
熱伝導率 (Btu/ft ² h,°F)		—	—	—	—	—	—	—	250°C 0.4 500°C 0.6
ショット分		ほとんど 含まず	—	—	—	—	—	—	nil
化 学 成 分 (%)	Al ₂ O ₃	—	85	60.2	64.1	62	ZrO ₂ :Y ₂ O ₃ 91.6:8	ZrO ₂ :CaO 94:5	ZrO ₂ :CaO 92:8
	SiO ₂	—	14.5	38.7	35.7	—	—	—	—
	Fe ₂ O ₃	—	0.1	0.2	0.02	—	—	—	—
	TiO ₂	—	tr.	0.2	—	—	—	—	—
	CaO	—	tr.	0.1	—	—	—	—	—
	MgO	—	tr.	0.1	—	—	—	—	—
	R ₂ O	—	0.2	0.4	0.4	—	—	—	—
	B ₂ O ₃	—	0	—	—	—	—	—	—

(斉藤俊太郎 (各メーカーカタログ))

表12 耐熱繊維の弾性回復率

	比重 (kg/m ³)	加熱温度*1 (°C)	圧力 (PSI)*2				弾性回復率*3 (%)	永久変形率*4 (%)
			95%	90%	80%	50%		
ジルコニア繊維 (S)	96	加熱せず	0.1	0.2	0.35	1.1	86	14
〃	96	1 200	0.1	0.2	0.4	1.4	87	13
〃	96	1 400	1.5	2.8	4.7	9.5	87	13
ジルコニア繊維 (HT)	96	加熱せず	0.15	0.3	0.6	3.4	90	10
〃	96	1 200	0.25	0.45	1.0	4.4	89	11
〃	96	1 400	1.0	2.0	3.6	7.2	88	12
アルミナ繊維 (S)	64	加熱せず	0.2	0.3	0.7	3.0	84	16
〃	64	1 000	0.1	0.2	0.5	1.9	85	15
セラミックファイバー	96	加熱せず	0.3	0.5	0.6	4.2	74	26
〃	96	1 200	0.35	0.6	1.3	5.5	75	25

*1 20 h 加熱

*2 上記の温度で加熱後、元の厚さを表に示された割合まで冷間圧縮するのに必要な圧力

*3 元の厚さの 50% まで 2 min 冷間圧縮した後の弾性回復率

*4 永久変形率 (%) = 100 - 弾性回復率

(ICI サフィルカカタログ)

表13 シリカ繊維の化学成分

成分	含有量	成分	含有量
SiO ₂	98.1%	MgO	0.01%
Al ₂ O ₃	0.25	Na ₂ O	0.09
CaO	0.15	K ₂ O	0.01
Fe ₂ O ₃	0.15	TiO ₂	0.44

(日本無機繊維工業(社)資料)

とされている。この製造法は、アルミナの場合と同様に酢酸ジルコニウムを出発品質として安定剤を加えて繊維化し焼成する場合、ポリジルコノキサン溶液から繊維を作り焼成するなどの方法がある。これから、アルミナ、ジルコニア繊維は、高温においても繊維の柔軟性や弾力性を失わないことが特徴であり、表 12 に示すようにシリカ-アルミナ系の繊維材と比較し、高温における弾性回復率が高く永久変形率が小さい⁷⁾。

シリカ繊維も最近開発された材質である¹¹⁾。熔融シリカは熱膨張係数が小さく、従って容積安定性に優れ、また熱衝撃にも耐える極めて特徴のある材質であるが、高温になるとクリストバライトが析出し、熱衝撃抵抗を失うという性質を持っている。従って、その使用方法については十分注意が必要である。表 13 にシリカ繊維の化学成分を示す。

この他、SiC 質繊維、Si₃N₄ 質繊維、チタン酸カリ繊維などがあるが、これらについては特殊品であり省略する。

(2) 繊維質断熱材の使用形態

これまで述べてきた繊維材は、そのままの形で使用されるバルクファイバーの他に、加工されてブランケット

表14 ペーパーの品質

品名	A	B	C
使用温度	1 260°C	1 260°C	1 260°C
かさ比重	0.31g/cm ³	0.35g/cm ³	0.31g/cm ³
呈色	白	白	白
作業性	良好	やや劣る	良好
化学成分			
Al ₂ O ₃	45.1%	48.1%	47.6%
SiO ₂	44.4	49.3	46.8
Fe ₂ O ₃	0.1	0.2	0.1
TiO ₂	0.1	0.2	0.1
R ₂ O	0.3	0.4	0.3
Ig-Loss	10.0	2.0	5.0
熱伝導率 (at 350°C)	0.07 kcal/m·h·°C	0.07 kcal/m·h·°C	0.07 kcal/m·h·°C
バインダー	有機質	無機質	有機質

(斉藤俊太郎)

(バルクファイバーを積み重ねたもの)、ウェットフェルト (ブランケットにバインダーを含溶させたもので、適当な形に成形したのち乾燥して任意の成形体を作り出すことができるもの)、ペーパー¹⁰⁾ (短繊維とし、有機質ないしは無機質バインダーを加えシート状としたもの)、ロープおよび、ブレード(ひも状としたもの)などがある。この他にバインダーを加え成形体とした特殊成形品、あるいは、板状としたボード類があり、工業炉の断熱材あるいは膨張吸収材として使用されている¹⁰⁾。表 14 に、ペーパーの品質例を、表 15 にボード類の品質例を示す。

この他にも充填材、シール材、パッキング材、その他の用途もあり、これらをまとめて表 16 に用途を示す。

この繊維材の利用法として、更に吹付施工法がある⁶⁾。

表15 ボードの品質

品名		A	B	C	D	E	F	G
かさ比重 (g/cm ³)		0.22	0.26~0.31	0.45	0.26	0.32	0.25~0.65	0.15~0.38
使用温度 (°C)		—	—	—	1260	1260	1260	1260
融点 (°C)		—	—	—	71760	71760	71760	—
加熱収縮率 (%)	800°C × 2h	0.4	0.2	0.4	0.0	(816°C × 24h) 0.0	0.0	—
	1100°C × 2h	1.7	2.6	5.9	2.5	(982°C × 24h) 3.0	—	—
	1260°C × 2h	2.7	2.9	—	5.4	(1268°C × 24h) 5.4	—	—
加熱減量 (%)	800°C × 2h	—	8.7	—	—	—	—	—
	1100°C × 2h	—	8.8	3.4	—	—	—	—
	1260°C × 2h	—	8.9	—	—	—	—	—
曲げ強さ (kg/cm ²)	常温	4.4	3.3	4.9	—	21	—	—
	800°C × 2h	0.3	2.0	6.0	—	—	—	—
	1100°C × 2h	0.9	2.0	16.0	—	—	—	—
	1260°C × 2h	1.9	2.4	—	—	(×24h) 9	—	—
バインダー含有量 (%)		8.9	—	—	—	—	—	—

(斉藤俊太郎)

表16 セラミック・ファイバーの製品別用途

	バルク	ブランケット (フェルト)	成形品	ペーパー	ロープおよびブレード
断熱材	熱処理金属部分の除冷、誘導炉周辺断熱、熱処理炉バックアップ断熱	大口径管溶接部徐冷精密鑄造シエルの熱、高炉付属熱風炉のバックアップ断熱	鋳物用ホットトップライザースリーブ、溶融アルミニウム湯道、電分子部コピー設備断熱分	溶融アルミニウム湯道レードルの内張り	—
充填材	工業窯炉レンガ壁膨脹代充填	同左	—	—	—
シール材	薄鋼板コイル焼鈍炉インナーカバー用シール均熱炉シール	同左	小型工業窯炉ガス洩れ防止用溶融アルミニウム用タップアウトコーン	—	各種工業窯炉およびダクトのジョイント部シール
パッキング材	—	自動車エンジン部品	家庭用燃焼器具用耐熱パッキング	自動車エンジン部品家庭用ガスストーブ部品	ボイラー・高温圧力容器用パッキング
汙過材	—	白金炉ダスト回収用フィルター	—	—	—
吸音材	—	高温箇所用吸音	小型温水ボイラーの燃焼音吸音	—	—
複合材料用補強材	耐火物中の補強材宇宙船外壁補強材	—	—	—	—
触媒担体	触媒担体製造用原料	ガス改良用コンバーター用触媒ベッド	触媒燃焼式ガスストーブ	—	—
内張炉材	—	金属熱処理炉石油加熱炉陶磁器焼成炉用炉材高温ガス冷却型原子炉炉材	小型温水ボイラー燃焼室ガス燃焼式エアコン小型熱処理炉炉材	—	—

(堀江鋭二)

表17 セラミックファイバースプレーの性能

	標準タイプ	高温タイプ
耐熱度 (°C)	1300	1500
かさ密度 (g/cm ³) 乾燥後	標準 0.2 (施工可能範囲 0.15~0.35)	
曲げ強さ (kg/cm ²) 乾燥後 1100°C 3h 加熱後 1300°C //	1.0 1.5 1.5	
収縮率 (%) 900°C 3h 加熱後 1100°C // 1300°C // 1500°C //	長さ方向 0.4 2.5 3.6	厚さ方向 0.4 2.7 5.0
	長さ方向 0.4 1.8 2.4 2.9	厚さ方向 0.4 2.1 3.2 8.0
熱伝導率 (kcal/m·h·°C) 200°C 400°C 600°C 800°C 1000°C	0.063 0.089 0.125 0.175 0.234	
化学成分 (%) Al ₂ O ₃	47 以上	58 以上
耐風速性 20m/sec. 30h	乾燥後, 加熱後とも異常なし	
耐振動性 3000cpm, 30h 振幅 2mm	乾燥後, 加熱後とも異常なし	

(桜井誠二)

これは炉体の断熱材として用いる場合、繊維材はブランケットやボードなどの成形品を炉の内面にさし込み、炉内面でナットを使用して固定するはり工法であるのに対し、バルクファイバーと無機質バインダーを、吹付け機を用いて直接施工面へ吹きつける吹付け工法である。このセラミックファイバースプレーの特性を表17に示す¹²⁾。この吹付け工法の利点は、従来のはり工法の場合、どうしても固定金具(ナット、スタッドなど)の頭が炉内面に露出し劣化しやすい面があるが、吹付け工法の場合

合その欠点が回避されることが最も大きな利点であろう。この他にも成形品では複雑な突起などの加工がしにくいのに対し、これらの対応がしやすいなど多くの利点を有している。今後の新しい施工法であろう。

4. 炉体構成と省エネルギー

エネルギー多消費型の工業炉の省エネルギーについては、オイルショック以前からある程度は進められて来たが、昨今のエネルギー有効利用の強い要求から改めて炉の原点の見直しがなされ、各種の改良開発が行なわれている。

一般的に工業炉の熱精算上の代表的な損失熱としては

- (1) 排ガスの持出し熱量
- (2) 炉体表面各部よりの放散熱量
- (3) 水(空)冷部の冷却損失熱量
- (4) 炉体蓄熱量
- (5) 各種のリーク(放射)熱量

などが挙げられる。

これらに代表される工業炉の損失熱を軽減して工業炉の省エネルギーを計るためには、図3に示すごとく、総合的な省エネルギー対策が必要である²⁸⁾。

工業炉の炉体が各種耐火物によつて構成されている現実から、工業炉の省エネルギー化には、耐火物の位置づけは極めて高く、合理化のための炉型や炉床負荷、熱負荷などを決める重要な因子となり、更に、前記損失熱軽減化対策のごとき個々の問題についても、最適断熱材の選択やその合理的な構成技術に負うところが極めて大である。

近年、耐火物の顕著な進歩改善は、各種工業炉が要求される大型化、高負荷、高能率化、高品位化などを可能とし、鉄鋼非鉄セメントなどに代表されるれんが原単位の低下は反面から見て大幅な省エネルギーが計られたことになる。

この成果達成には、耐火物の品位向上が大きく寄与している。

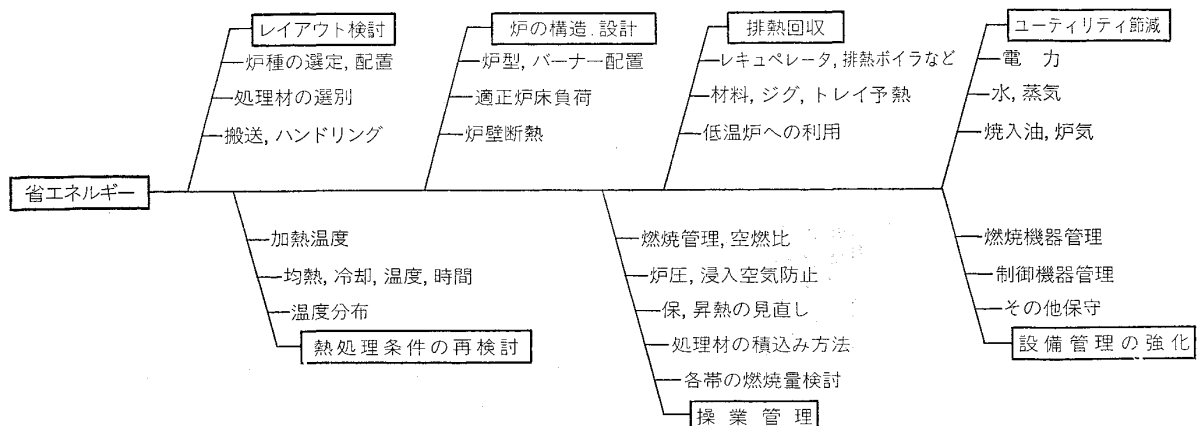


図3 省エネルギー対策の要因 (丸岡芳樹)

すなわち、炉の省エネルギーを耐火物の面から論ずる場合、工業炉の総合技術の進歩からその寄与の内容について云々する見方と、直接的に炉の熱効率から判断して対処すべき問題に分けられると考えられる。

本項では、主として内容を熱エネルギーから見た工業炉の省エネルギー化の構成技術について一般窯炉と製鉄製鋼用炉に分け、最近の動向を取上げて見た。

4.1 一般窯炉

4.1.1 蓄熱量の低減による省エネルギー

工業炉は操業条件から大別すると、連続運転型とバッチ型に大別することができる。

各種工業炉の熱効率を論ずる場合、バッチ型の熱効率は特に悪く、全国の鍛造炉の平均値でも熱効率10~15%範囲のものが多く、その他非鉄・化学・窯業などに使用されている炉においても大同小異の効率である。

これらの炉は、能力の大小を別とすれば、数の上では圧倒的に設置数が多く、この熱効率を向上することは工業炉省エネルギー対策として、その効果に大きな期待が持てる。バッチ炉の熱精算数値によると、炉体蓄熱損失および放散熱損失が、排ガス損失に近い大きな数値を示していることが判る。表 18 参照¹⁷⁾。

すなわち、炉体蓄熱損失の主体は炉体の構成炉材質量の蓄熱量であり、この質量軽減化がそのまま熱損失の軽減化につながると考えても過言ではない。

この質量軽減化要求から、その用途目的に応じ各種の耐火断熱材が開発され、バッチ型炉の構成炉材は、材質、構成共に急速な進歩改善が計られている。

1) 繊維断熱材のみによる壁天井の構成

表18 鍛造炉熱勘定表の一例
(鋼材 1t 当り, 低発熱量, 外気温度基準)

項 目		10 ³ kcal/t	%
入	燃料の燃焼熱 ①	1433.5	99.0
	燃料の顕熱 ②	0.5	
	空気の顕熱 ③	3.6	0.3
	装入鋼材の含熱量 ④	0	
	スケールの生成熱 ⑤	10.7	0.7
熱	合 計	1448.3	100.0
出	抽出鋼材の含熱量 ⑥	198.8	13.7
	スケールの顕熱 ⑦	2.8	0.2
	排ガスの顕熱 ⑧	554.3	38.3
	炉壁の蓄熱及び放散損失熱 ⑨	381.9	35.0
	その他の損失熱 ⑩	310.6	12.8
熱	合 計	1448.3	100.0
熱 効 率	$\eta_1 = \frac{⑥+⑦-④}{①} \times 100\%$		14.1
	$\eta_2 = \frac{⑥+⑦}{\text{全入熱}} \times 100\%$		13.9

(著者)

台車式焼鈍炉や、ベル型焼鈍炉に代表されるバッチ型熱処理炉は、温度条件やその他の諸条件が、繊維質断熱材の使用条件と合致していることから、炉床やバーナータイルなどの一部を除き、断熱れんが→断熱キャストブルそしてさらには逐次、繊維質断熱材による構成に代っている¹⁶⁾。

経験的に、炉体蓄熱に要する熱量は次式のように表現されている¹⁶⁾。

$$Q \propto \sqrt{\rho C_p \cdot \lambda \cdot H} (T - T_0) F$$

ここに、Q：蓄熱に必要な熱量 (kcal)

ρ：構成耐火物の密度 (kg/m³)

C_p：構成耐火物の比熱 (kcal/kg・°C)

λ：構成耐火物の熱伝導率 (kcal/m・h・°C)

T, T₀：設定炉温(°C)ならびに初期炉温(°C)

F：炉内有効面積 (m²)

H：昇温時間 (h)

この式は断熱れんがやキャストブルとはρ、λに大差のある繊維質断熱材が、蓄熱量軽減化に大きな効果のあることを示している。

表 19 は従来の耐火断熱れんが、及び軽量キャストブルと比較した構成と効果の 1 例を示すもので、同一外面温度とした場合、壁厚は 45% 減少し、蓄熱量は耐火断熱れんがの 1/5、軽量キャストブルの 1/4 に減少することができる¹⁵⁾。

これらの天井壁に使用される繊維質断熱材は、大部分がブランケット・フェルト、及びボード状で加熱収縮率基準で使用温度が決められ、各種の品質が採用可能な現状である。

構成は許容される温度条件、その他繊維質断熱材の脆弱化、収縮のごとき品質劣化、などの品質面および経済性などを考慮して普通 2 層または 3 層で構成され、各種の支持金具によつて取付けがなされる。図 4 は支持方法の 1 例を示すものであるが、支持金具が表面に露出することをきらう炉にあつては、支持金具露出部をウェットフェルトで被覆するか、先端部のみにセラミックハンガーを用いる方法が実施されている¹⁵⁾。

2) 表面コーチングによる繊維質断熱材

繊維質断熱材の構成による天井壁構成は、鍛造炉などのごく 1200°C 以上の高温かつ過酷な操業条件になるバッチ型の炉では、これら繊維質断熱材の再結晶による品質劣化、耐アッシュ性、耐スケール性、耐摩耗性、耐風速性などに問題がある。

これらの欠点をカバーし、繊維断熱材本来の長所を生かして、より過酷な条件の炉体構成材料とするために、表面に吹付して表面物性の向上を計つた材料と工法が実施されて来た。すなわち表面コーチングによつて前記諸欠点をカバーしたものである。

報告によると、吹付厚さ 3mm の場合、表面に加わる重量増は 5kg/cm² で接着性は極めてよく、昇温時養生乾

表19 セラミック・ファイバーを使用した炉壁と従来の炉壁との比較

		セラミック・ファイバーの場合	耐火断熱レンガの場合	軽量キャストブルの場合
炉壁構造		セラミック・ファイバー ブランケット 50 mm ロックウール 110 mm	耐火断熱レンガ 230 mm シリカボード 25 mm	
		計 160 mm	計 255 mm	軽量キャストブル 248 mm
温度勾配 および熱 計算	内壁面温度 接面温度 外壁面温度 放射熱 蓄熱	850°C 706°C 67°C 410kcal/m ² ·h 2 620kcal/m ²	850°C 248°C 67°C 410kcal/m ² ·h 14 479kcal/m ²	850°C — 67°C 410kcal/m ² ·h 12 772kcal/m ²

(斉藤俊太郎)

表20 表面コーティング材の種類及びその品質例

		ネオコートF	ネオコートA	ネオコートM
		アルミナ炭化珪素質	アルミナ質	ムライト炭化珪素質
粉末のカサ比重		1.15	1.20	1.10
混練水量 (%)		26~30	26~30	26~30
施工後のカサ比重	105°C 焼燥後	2.06	2.09	1.99
	1 000°C 焼成後	1.99	2.03	1.89
	1 300°C //	2.07	2.11	2.00
施工後の曲げ強さ (kg/cm ²)	105°C 焼燥後	24.0	25.2	20.1
	1 000°C 焼成後	15.3	15.5	11.3
	1 300°C //	69.2	69.0	49.6
施工後の圧縮強さ (kg/cm ²)	105°C 焼燥後	44	47	32
	1 000°C 焼成後	39	42	26
	1 300°C //	182	180	90
施工後の線変化率 (%)	105°C 焼燥後	0.38	0.39	0.51
	1 000°C 焼成後	0.62	0.69	0.86
	1 300°C //	0.69	0.70	0.90
	1 500°C //	—	0.95	—
施工量 [吹付け厚さ 3 mm塗布] (kg/m ²)		5~6	5~6	5~6

(著者)

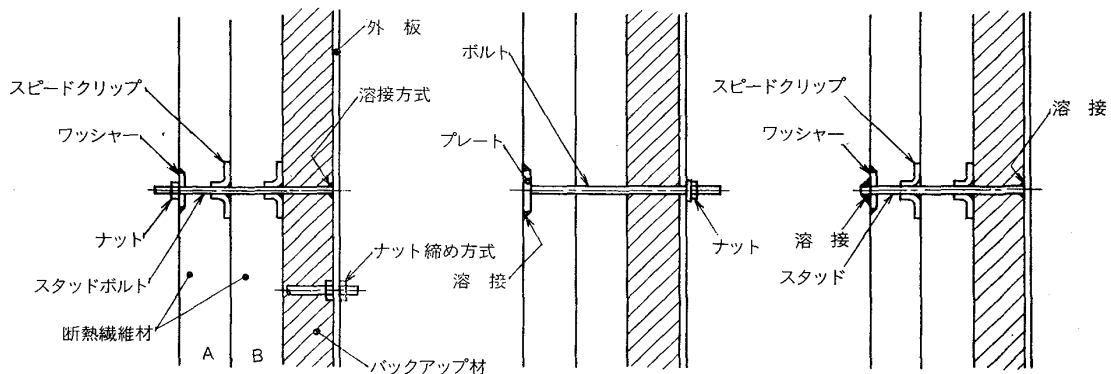


図4 構成の一例 (斉藤俊太郎)

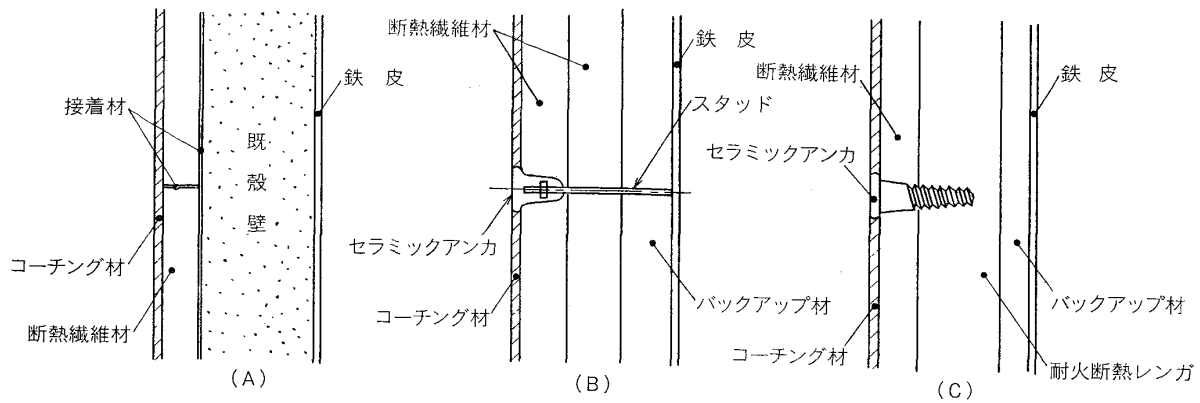


図15 表面コーティング施工断面の一例 (著者)

燥など特に必要としない。表 20 に、表面コーティング材の種類とその品質例を示す。

この施工は、繊維断熱材表面に治具を用いて 6 mm φ の穴をランダムにあけ、約 30% の混練水量で均一に混練されたコーティング材を、空気圧 5 kg/cm² の吹付ガンで、約 22 cm の吹付距離を保ち表面に約 3 mm 程度に均一に吹付ける。吹付後平ゴテで表面処理を施し、約 300 mm 角のスコアラインを入れる。

図 5 は、表面コーティング処理をした施工断面の 1 例を示すもので、図中(A)は、バッチ運転既設炉の壁内面に比較的高温で断熱性の高い繊維質断熱材を接着させ、表面コーティングを施した例を示し(B)、(C)は、操業条件に対応させた新設の場合の構成例を示したものである。

かくのごとく、蓄熱量軽減化のための炉壁構成を、繊維質断熱材を主体として活かす場合は、図 5 に示すごとく、壁内相当温度、必要特性を考慮して選択された各種を層状組合せによつて構成されるが、(A)図のごとく、既存の炉壁内面に繊維質断熱材を無機接着材ではり付け省エネルギーを計る工法が盛んに行なわれている。

3) 壁内面の機械的強度を必要とする構成

バッチ運転を必要とする各種工業炉の中でも、被処理物や処理温度、操炉目的などによつて天井、壁などの構成炉材は高い機械的強度、その他、各種の諸条件をより過酷に要求される炉種がある。

これらの多くは、炉体蓄熱の軽減化以前にまず内容物や雰囲気条件、その他、操業面からアタックに対し損傷や侵食を受け難い内壁の構成がまず要求される。

したがつて、これらの炉体構成の多くは、内壁に要求される物性に合った耐火レンガや不定形耐火物が用いられ、その裏面を断熱レンガ、断熱キャストブル、繊維質断熱ボードなどで構成され、同様目的の連続運転炉の炉体と大差のない構成となる。

したがつて、かかる目的のバッチ型炉で蓄熱量軽減化を計ることは、炉体構造面から見て困難であるが、この場合でも構造体の各部が蓄熱量の定常状態に達しない操業時間のサイクルと、炉壁熱拡散速度を検討して壁の多

層構成の材質別厚みを決定することによつて、最少の蓄熱損失とすることができる。

4.1.2 放散熱量低減による省エネルギー

工業炉の省エネルギーを考える上で最も大きな問題として炉体放散熱の問題がある。

これは主として、炉本体表面より放散する損失熱であるが、最近では、均一加熱や熱経済を計るために加熱ガスの循環や、燃焼用空気予熱のため、本体外にガス加熱空気導管や送風機その他の装置が数多く併設され、それらの表面からの放散損失低減も重要な課題となつている。一般的に放散損失は、炉の構造体各部の蓄熱量が定常状態になつて、その状態が長時間保持される操炉条件の炉の場合この対象となることから、連続炉体構成は特にこの点に注意せねばならない。

表 21 は、連続運転炉(レンガが焼成用トンネルキルン)の熱収支例を示したものであるが、本炉の場合熱効率率が 60% を超える連続炉であり、操業も昼夜連続して 1~3 年以上連続一定条件で運転される。この炉は排ガスの保有熱量を予熱に最大限に活用しているため、表に示すごとく炉体放散+ダクト・ファンの合計放散損失が最大の値を示している。

他方鋼片加熱に用いられる水冷スキッド、その他の溶解炉の水冷箱などによる冷却熱損失、炉内外の差圧から来る外気吸引炉内高温雰囲気からの炉外放散なども損失熱軽減の大きな対象として考えられる。

1) 一般的な炉体熱放散防止構成

各種工業炉の操炉目的は極めて広域にわたり、炉の形態、操炉条件もまた極めて多岐に亘つている。他方 2 項に述べたごとく断熱耐火材料を含めた各種の耐火物も定形、不定形、繊維、などに加え、それぞれに各種物性を有する品質があり、更にその施工法も各種の技法が開発されている。

a. 断熱主体の構成

工業炉の中で負荷条件の比較的重い炉にあつては 4.1.1 項で述べたバッチ型のみならず連続炉においても一部を除き天井壁の大部分を繊維断熱材やバックアップを

表21 連続運転炉 (レンガ焼成用トンネルキルン) の熱収支

	入 熱		出 熱	
	熱 量 単 位 1 000kcal/h	%	熱 量 単 位 1 000kcal/h	%
燃料の顕熱	8.4	0.44		
燃料の燃焼熱	1 810.3	94.74		
窯詰品持込熱	8.2	0.42		
一次空気持込顕熱	7.3	0.38		
その他空気持込顕熱	76.8	4.02		
窯出品の持ち去る熱量			94.6	4.95
排ガス損失熱量			472.9	24.75
乾燥排気損失熱量			172.3	9.02
水分蒸発潜熱			93.5	4.89
結晶水分解蒸発熱			155.1	8.11
ドライヤー供給熱			237.6	12.43
ダクト, ファン放散熱量			171.5	8.97
炉体放散 (力-下出熱含み)			513.5	26.88
	1 911.0	100.00	1 911.0	100.00

(著者)

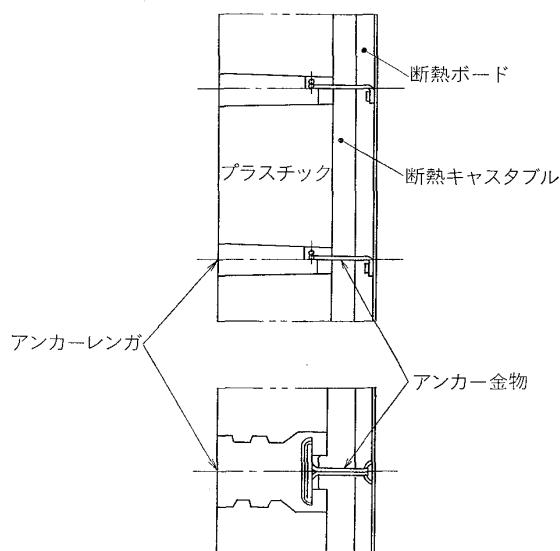


図6 側壁放熱防止構造例(不定形耐火物)(著者)

より低品質の岩綿繊維ボードなどの層状組合せで構成し、炉体蓄熱と表面放熱の減少を同時に達成している。さらに内壁面物性をより高く要求されるものにあつては断熱キャストブル、断熱レンガなどの単体または繊維質断熱ボードなどの組合せによつて、今日では壁、天井、のみならずダクト内ライニングなども極めて多種類の合理的な構成が可能になつた。特にボードの支持金具や、断熱キャストブル用アンカーメタルの各種がその用途、場所に応じて用意され、施工も例えば流し込み、吹付け、コテ塗りなど施工場所の条件に応じた施工法や施工機が開発されている。従つて小径のダクト内装や狭隘の場所にも比較的容易に採用でき、そのため特殊鋼板と外装保温断熱工法が近時大幅に変つてきている。これらの総合技術が炉の効率化設計をより容易にしている。

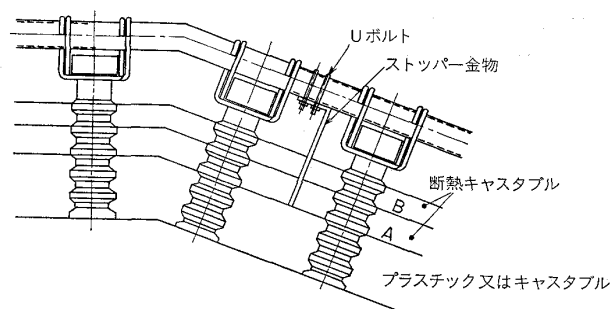


図7 天井放熱防止構造例(不定形耐火物)(著者)

b. 裏面断熱構成

温度や操炉条件が構成炉材内面により過酷な要求をする炉体にあつて、断熱耐火物の内壁使用が不可能な場合の工業炉は、一般的に裏面断熱構成となり、この構成が一般の工業炉では最も多い炉体構成といえる。図6, 7はかかる条件下の壁、天井の代表的な構成例を示したものである。表壁の材質形状厚みなどは、総て操炉条件に合せその都度決定され、また裏面の断熱構成も各層の温度条件、反力構成、許容外壁面温度などによつてその材質厚みが決定される。

さらに建設費の低減や放散熱量をより少なくすることを目的として、最近では新しい断熱材を使用することが可能となつてきた。特に耐火物、断熱材の多層化も可能になり、表面あるいは裏面の断熱層を多層化することでより壁厚が薄くなり放散熱損失の少ない炉体構成が達成出来るようになった。

2) 裏面冷却損失熱回収構成

操業温度が非常に高温の場合、内壁レンガの浸食を少なくするために炉外側を強制的に冷却して、炉内レンガの損傷を防止する方法を採用する場合がある。また壁の一部や炉底の如く、断熱材では耐圧力が不足で使用不可

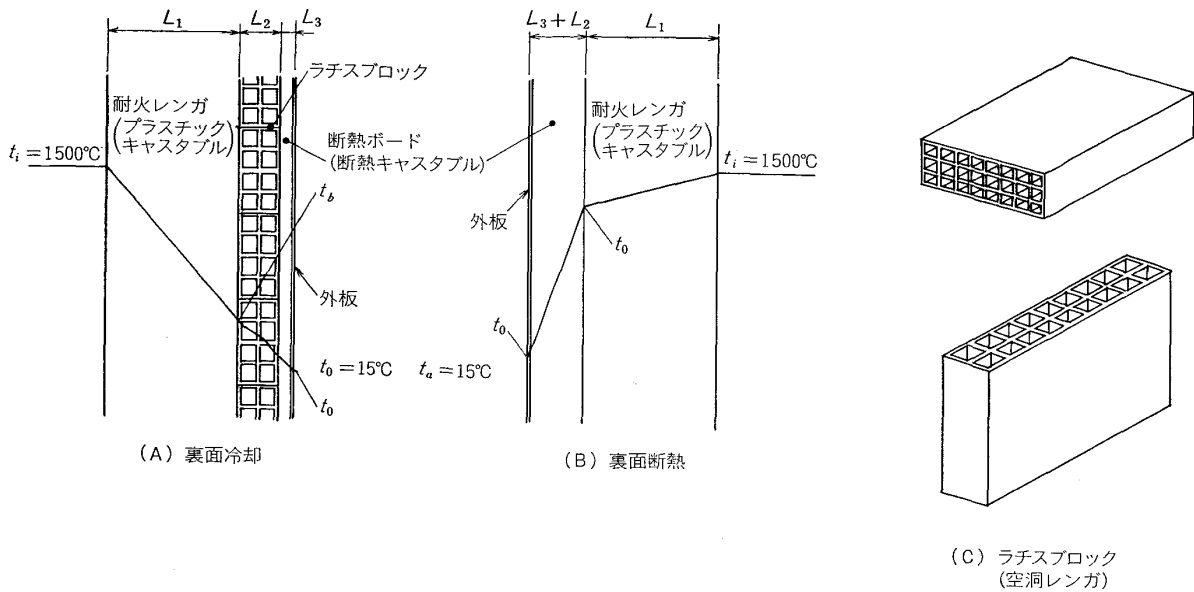


図8 ラチスブロックによる裏面断熱構造例 (著者)

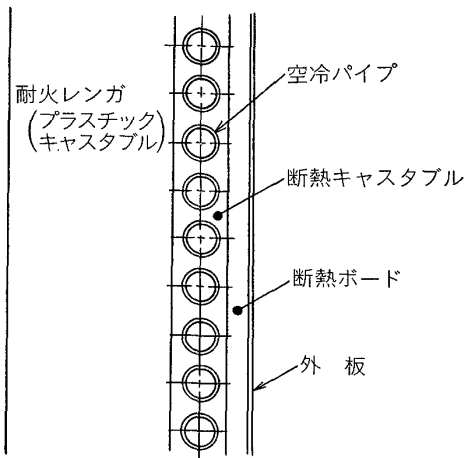


図9 空冷パイプによる裏面断熱構造例 (著者)

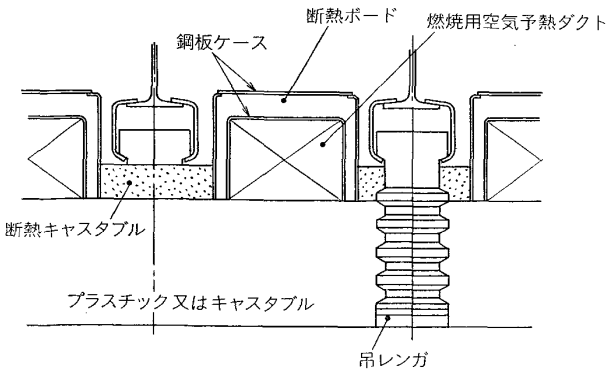


図10 天井空冷ダクトによる裏面断熱構造例 (著者)

て表面レンガの平均温度を下げ、併せて放散熱損失の低下を計っている。

図8は、裏面冷却構成(A)と裏面断熱構成(B)の構成例を示し、(C)は(A)に使用されたラチスブロックの単体図を示している。

表22は、図(A)、(B)の数値比較をしたもので冷却損失熱の炉内還元が計れる場合、この構成が、放散熱損失の低減化や内壁レンガの平均温度低下に極めて有利なことを示している。図9は、空冷パイプ併用による裏面断熱構造例で図8と同様ほとんど側壁に、また図10は吊天井の表層裏面全面に吊ビームに平行に空冷ダクトを設けてこの目的を達成している実施例である。

3) 膨張吸収と断熱を兼ねた構成

主として、金属溶解炉や非鉄冶金精錬炉の溶湯バスゾーンは、炉体設計の場合極く一部の例を除いて耐火物による内壁面に膨張代を設けことが許されないことが多い。特に低粘性融体を扱う炉においては、設置した膨張代の作動不良から溶湯の浸透湯漏れに通ずることになりそのため、炉体の膨張吸収は耐火物構成の最外周の位置

表22 裏面冷却と断熱構成の数値比較

No.	項目	(A) 裏面冷却	(B) 裏面断熱
1	炉内温度 t_i	1500°C	1500°C
2	外気 " t_a	15 "	15 "
3	境界 " t_b	297.5 "	1151 "
4	" " t_o	52.5 "	125 "
5	外壁放散熱量 Q	387.5 kcal/m ² ·h	1576 kcal/m ² ·h
6	内壁レンガの平均温度	900°C	1352°C

(著者)

能な場所もある。かかる条件下にある炉体構成は、図8、9、10などの構成が使用場所のそれぞれの条件に合わせて考えられる。この場合はいずれの例も冷却用に使用された後昇温した空気は、燃焼用空気としてバーナを介し、炉内に導入され有効に利用されており、裏面冷却によつ

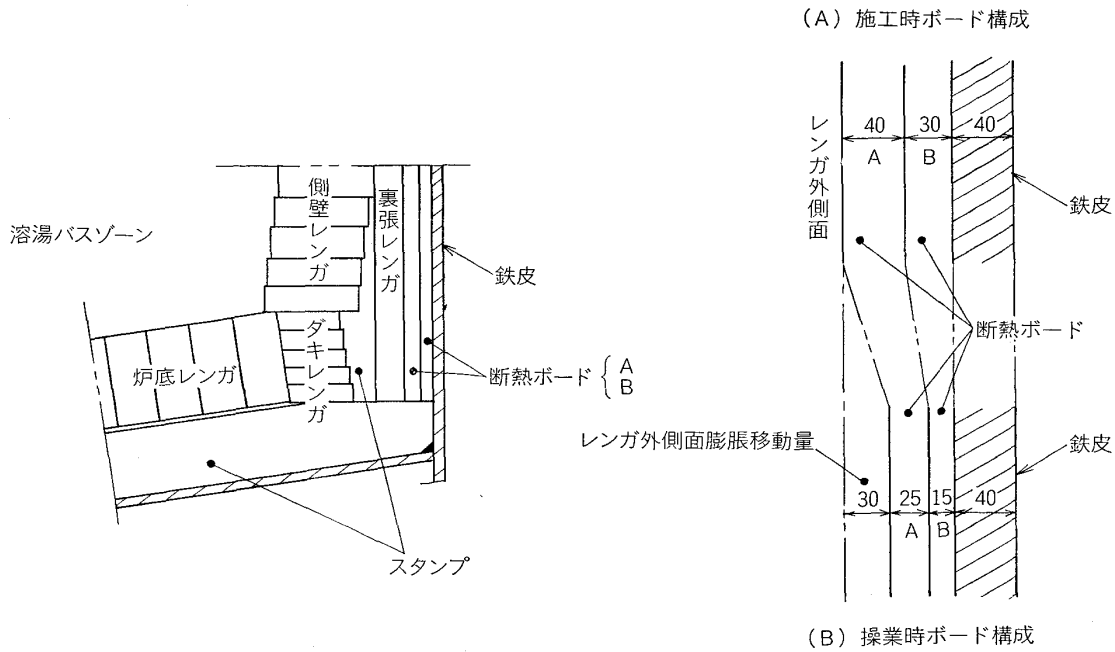


図11 金属溶解炉バスゾーンの構成と断熱ボード挙動例 (著者)

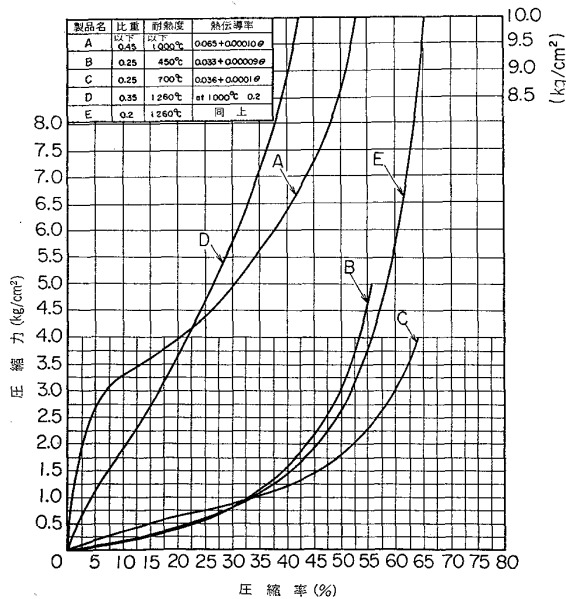


図12 繊維断熱材(ボード)の圧縮応用と圧縮率の関係

で行なわれる。かかる炉体構成の場合は、図 11 に示すごとく、繊維断熱ボードはまず膨張吸収材として重要な任務をおび、ついで断熱材本来の熱放射防止材として使用されることになる。この場合の膨張吸収材としては、耐火物構造体の熱膨張を吸収し、同時に断熱材の圧縮によって発生する応力が、外板の許容応力限界内に収まるような材料が必要である。

図 12 は、これらの応力吸収材を兼ねた、断熱材として利用するために必要な繊維質断熱材 (断熱ボード) の圧縮率と、圧縮応力の関係の実測値の一例である。図 11 (A)、(B)図はこれらの繊維質断熱ボード施工時厚みと

昇温操作時の膨張後の圧縮量を示したもので、れんがが構造炉体 30 mm の膨張が繊維質断熱ボードによつて吸収されていることを示し、この時の外板にかかる内部応力としては 14 kg/cm² で、外板と内部のれんが構造内の応力はバランスしている。なお本例に示す炉型は円型でこの炉の操作時外板温度はバスゾーン側部で 60°C を維持し熱放射防止任務を十分に果している。

4) 水冷およびリークによる熱損失防止

炉体の水冷却は内部耐火炉壁のはなはだしい溶損浸食を防止するために、炉壁に水冷ボックスや水冷ジャケットを埋設し積極的な冷却を計るもので、この冷却熱損失の減少は、耐火物の侵食速度と損失熱の経済性のバランスで決められる。現状では操作法の改善か、または過酷な浸食条件に十分耐え得る炉材開発に待つ以外にない。

他方リーク熱の損失では、冷延鋼板、焼鈍に用いられるベル型焼鈍炉、有蓋式連続カーボン焼成炉などのような本法または天井の着脱を必要とする炉においては、炉内圧と大気圧の差圧、接触部の接触不良によつて外気吸引あるいは炉内ガス放出となつて、共に損失熱量となつている。これらのリーク熱損失も従来の川砂、けい砂のシール材から現在では繊維断熱材を有効に利用することによつてシール性を向上し、リークによる熱損失を軽減化している。

4.1.3 排熱利用による省エネルギー

多くの工業炉において、損失熱の主流は排ガスの持ち去る熱量であり、これの有効利用によつて省エネルギーを計る手段として 2 つの方法がある。一つにはアルミの急速溶解炉、セメント、その他、各種焼成炉に見られる

被処理物の予熱による排ガス保有熱の有効利用が挙げられる。これらはほとんどすべて前項までの材質構成の各種選択組合せによつて達成されている。

また、燃焼用空気予熱として数種の熱交換器が用いられているが、現状では、空気圧や経年劣化などによるリークなどからほとんどが金属製熱交換器が用いられている。

更に一部では、旧来から炉材のみで構成される蓄熱型熱交換器も使用されているが、特にあらためて記述するまでもない。

間接利用法としては、排熱ボイラーによる蒸気発生源として熱回収がなされているが、耐火物から見た省エネルギーというテーマから外れるので割愛した。

4.2 製鉄、製鋼炉用

一貫製鉄所におけるエネルギー消費量は、粗鋼 t 当たり 600~700 万 kcal が必要といわれており、各製鉄所においてはその省エネルギー対策に腐心している²⁵⁾。製鉄所工程は溶錬を目的とする製鉄、製鋼工程と造塊および圧延の工程に分類でき、それぞれ工程によつて耐火物の使用目的はことなる。すなわち、前者の工程ではより高温高圧の操業によつて生産効率を高めて省エネルギーを図るために使用耐火物としては、操業条件の苛酷化に適應できるより、より高級な耐火物を使用して、その使用寿命を延長することによつて、使用耐火物の原単位低下を図り、省エネルギーにつなげる対策を図っている。もちろん炉の排ガス熱量、炉内ガス圧の再利用による省エネルギーは常に留意して図られている²²⁾²³⁾。一方造塊圧延などにおける熱処理では、排ガス顕熱の回収再利用と同様に、炉体放散熱の減少に重点をおいて、断熱強化の方向に進み、耐火物は耐熱と同時に断熱度の高い材料の利用に向つている^{19)~21)}。以下に各工程の炉材構成の変遷についてのべる。

4.2.1 高炉および熱風炉

表 23 は、過去約 10 年間の、高炉および熱風炉用耐

火物の品質別の使用比率の変遷を示す表である。

高炉用耐火物の上記の表は湯溜炉底用煉瓦を除く使用比率である。

炉底および湯溜に関しては、従来より粘土質れんがが使用されていたが、炉の高温、高圧操業による操業による条件の苛酷化により、逐次炭素質れんがへの切替が進み、また、使用方法も高熱伝導率の性質を利用して、より冷却を強化することによつて解決されている。

炉腹シャフトについても、表に見られるように、過去 10 年間に於いて、粘土質れんが 100% から、高アルミナまたは、炭素、炭化珪素質などの高級耐火物へと変化して、熱伝導率を向上させることによつて、冷却効果を高め、長い使用寿命を達成して煉瓦原単位を低下させることにより、熱エネルギーの低下に貢献している。

高炉送風温度は、直接高炉用コークス使用量の節約に貢献するので、高炉の高温送風の要求に従つて、熱風炉ドーム温度は逐次上昇されることになった。1960 年以前においては、熱風炉用耐火物は粘土質れんががほぼ 100% 使用されてきたが、送風温度の上昇と炉の大型化にともなつて炉材の耐クリープ性の限界より、高アルミナれんがと珪石レンガの使用率が増している。高アルミナれんがにおいても、よりアルミナ含有量の高い高級耐火物へと移行しているのを見ることが出来る。

熱風炉の熱精算の結果より見れば、その炉体表面よりの熱放散量の割合は、全出熱量の 2.0~2.5% にすぎずそのため断熱強化による放散防止による省エネルギー対策は、あまり大きなメリットがない。このため、表のごとく断熱れんがの使用比率には大きな変動はない。もちろん炉内温度の上昇よりして、使用断熱れんがの品質は向上しており、より安全使用温度の高い断熱性のよい高級断熱れんがが増加している。

一方、熱風炉チェッカーの使用品質についても、炉の大型化と炉内温度の上昇にしたがつて、使用れんが材質のクリープ降伏温度の向上をはかる必要より、漸次、高

表 23 高炉・熱風炉用耐火物の変遷

	高 炉			熱 風 炉		
	1960年代	1970~1972	1973年以降	1965年頃	1970年頃	1977年
粘土レンガ	100%	90~95%	70~90%	55~65%	40~45%	14~15%
高アルミナ 75<	—	5~10	3~8	1~2	15~20	20~40
炭化珪素質	—	—	9~20	—	—	—
高アルミナ Al ₂ O ₃ 50~75	—	—	—	0~8	5~10	25~30
珪 石	—	—	—	22~25	24~25	27~28
断熱レンガ	—	—	—	11~13	10~13	10~12

(著者)

Type of flue	Flow direction	% Improvement in "Apparent convective heat transfer coefficient"
Smooth		0
Serrated		16
Serrated		16
Serrated		25
Serrated		25

図13 面の凹凸による熱伝達係数の変化

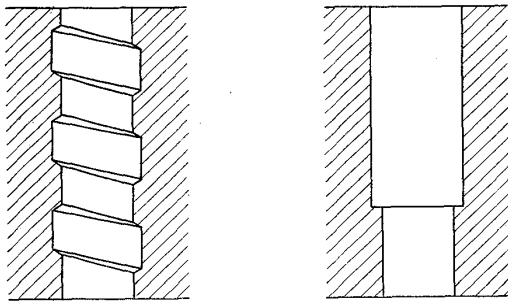


図14 凹凸面を有するチェッカーレンガの例

アルミナなどの高級材質へと移行しているが、もし、同一の出口熱風温度で熱風炉チェッカー高さを減少することができれば、使用品質もより低級品使用が可能になり、全体的に見て大きな省エネルギーにつながるものである。

この意味で、近年チェッカー形状、使用方法についての改善に関する発表も数多く見られる。例えば文献によれば、チェッカー通気孔の側面に凹凸をもうけることにより、図13のように原型の平滑面に対して30%以上の熱伝導率の向上を期待できることがわかる。この理論を利用して、図14のごとくチェッカー形状の改良にかかる2,3の特許が出願されている。

また、他のコンピューター計算による結果の発表ではチェッカー孔径とレンガ内径の減少によつて、従来のチェッカー高さを1/2程度に減少し得る。さらに、操業サイクルの減少を共用すれば、実に通常の高さの1/4にまで蓄熱高室さが減少し得ることが報告されている。もちろん、この場合ガス中のダスト量を減少させることによりチェッカー閉塞のないことが前提となる。

さらに、熱風炉の切替時間の前後における熱風温度の変動を減少させて、常に一定温度の熱風を高炉に送風することによつて、従来と同じドーム温度の操業で熱風温度を高めることができ、送風温度一定の場合には、チェッカー容積を従来の50%程度に低くすることができる

装置として、均温化器についての特許が発表されている。

以上のような蓄熱室設計の変更によつて、使用材質のグレードダウンをはかることは、使用耐火物の省エネルギーにつながるものと思われる。

4.2.2 その他の熱処理炉

鉄鋼に利用される熱処理炉には均熱炉、加熱炉などの連続操業炉と、鍛造炉、浸炭炉などの断続操業炉とがある。これら、種々の炉の加熱および熱処理に必要な燃料消費量は、均熱炉で約 $28 \times 10^4 \text{kcal}$ 、連続加熱炉で約 $50 \times 10^4 \text{kcal}$ とされている。また、その他の熱処理においては、 $40 \sim 100 \times 10^4 \text{kcal}$ とされている。平均の熱処理温度を 1250°C とすれば鋼材の保有する熱量は $20 \times 10^4 \text{kcal}$ であり、これらの炉の熱効率には $20 \sim 50\%$ にしかない。この効率に関しては、炉の種類や操業の方法が異なるので、いちがいに論ずることはできないが、生産をさげることなくエネルギーを節約するためには、熱の回収と放散熱の防止の徹底にわけられる。炉を構成する耐火物の熱放散防止には断熱の強化がある。

図15は、各種耐火物の熱伝導率を示す図である。

熱処理炉の炉壁放散を減少するには図において明らかごとく、より断熱度の高い材料を使用することにある。しかし、炉外の断熱を強化することによつて、炉内側耐火物の平均温度はより高温になり、耐火物内温度勾配としては、使用耐火物の荷重軟化点近くに平均温度が上昇するので、構造体強度を維持し得る炉壁厚みが薄くなるので、炉内壁耐火物の材質を上げざるを得なくなる。また、炉内よりスラグによる侵蝕は、耐火物材質と同時に温度に影響され、炉外断熱による温度勾配によつて、炉内壁面のさらに深いところまで侵蝕をうける温度になるので、炉内壁面材料の品質をより高級なものに変更せざるを得なくなる。

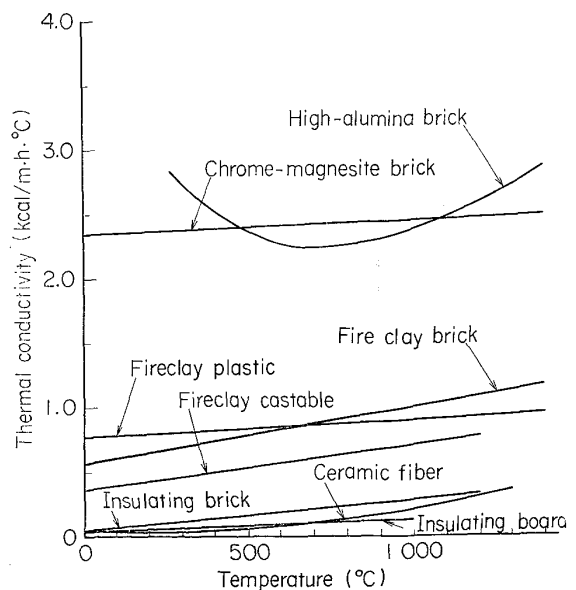


図15 耐火物の熱伝導率

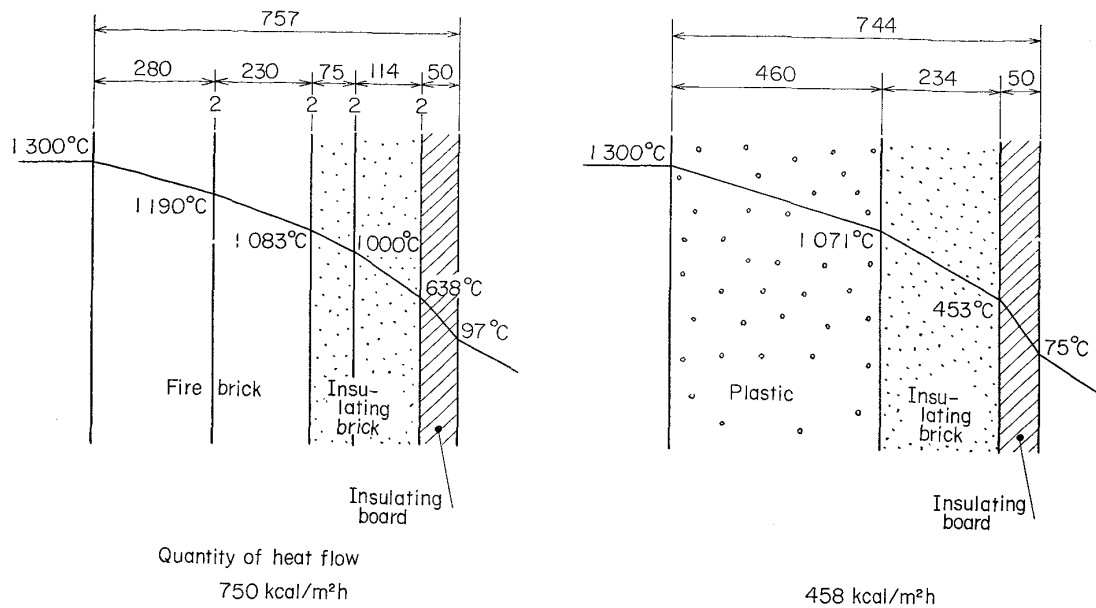


図16 炉壁の温度勾配

表24 各種炉材の放散熱比較

	セラミック ファイバー	断熱レンガ	耐火レンガ
施工厚 mm	150	150	150
炉内温度 °C	1000	1000	1000
放散熱量 kcal/m ²	748	1401	6215
蓄熱量 kcal/m ²	4790	14939	44303
重量 kg/m ³	200	0.8	2.1

(築炉懇談会資料より)

図16は耐火レンガによる側壁とプラスチック耐火物による側壁の温度勾配の比較で、これによれば、ほぼ同一の壁厚で約40%の放散熱の節約になることがわかる。

また、連続加熱炉では鋼塊の搬送方式に水冷スキッドを利用する形式が多いが、省エネルギーと同時に冷却水のコスト高のために、できるだけ水冷損失を防止する方向に進められている。

この部はスケールとの反応、燃焼焔の直火などの関係より、断熱レンガや断熱ボード類の使用は不可能の部分で、従来はプラスチック耐火物や耐火キャストブルによつて断熱されてきた。

最近、より断熱度の高いしかも施工性の容易なセラミックボードを、水冷管と不定形耐火物の間に使用する二重断熱方式が開発され、大きな効果をあげている。ある資料による試算では、一重断熱方式に比してこの方式によれば、50~60%の損失熱量の節約が可能であると報ぜられている。この目的の使用方法としては、耐火煉瓦と断熱ボードの組合せなど施工性と断熱効果の面で各種の

開発がなされている。

また、鍛造炉などのような間欠熱処理炉は、加熱冷却の繰返し操作が行なわれ、アイドルタイム間の炉壁蓄熱損失や炉壁昇温に必要な熱量の損失は無視できない。これらの炉では、従来の耐火レンガ、または断熱レンガがあるいは、不定形耐火物から最近では断熱ボードの使用にかわり、さらに、セラミックファイバーが多用されるようになった。表24は各種炉材の蓄熱量および放散熱量の比較である。

表によつて明らかなごとく、セラミックファイバー施工によれば、蓄熱量は耐火レンガの約1/9、放散熱量は1/8に減少することが伺え、大きな省エネルギーが達成できる。この施工方法は、炉内側にセラミックファイバーを、炉外側にロックウールなどのファイバーを多層に貼付けてまたは、アンカー金物によつて締付けて使用さ

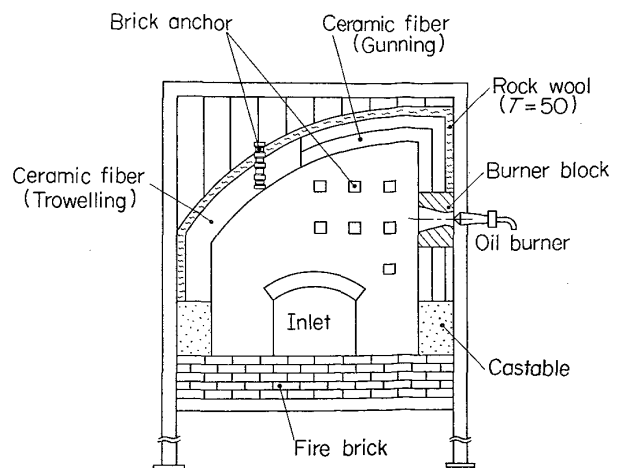


図17 セラミック繊維を使用した炉壁構造例

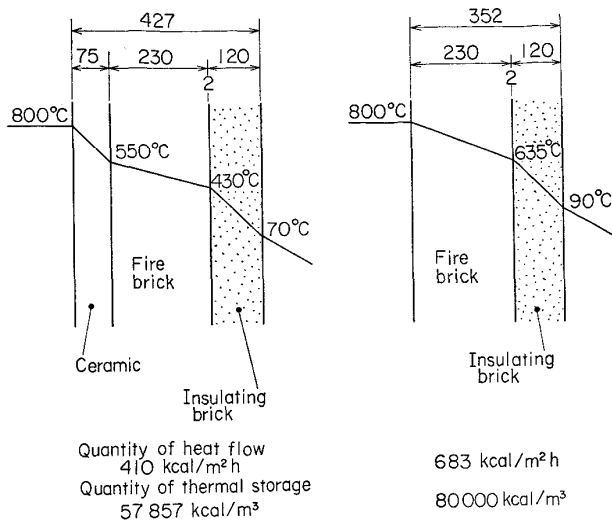


図18 セラミック繊維を使用した炉壁断面

れていたが最近では通常のキャストブル耐火物の施工と同様に、セラミックファイバーを吹付施工する方法が開発されている。図17はこの方法による炉内張の一例である²⁶⁾。

ファイバーの取付方法は既設炉壁に開孔して、アンカーボルトを埋込み、これによつてブランケット状のセラミックファイバーを固定する方法と、前記の吹付用セラミックファイバーを直接炉壁に吹付施工する方法とがある。

この方法による省エネルギー効果は、図18の通りで従来の耐火れんが構造に比して放散熱量は、約40%低下することがわかる。また、蓄熱量も耐火れんが層の温度が低下するので約1/2に減少する。

5. おわりに

わが国は、石炭、石油、天然ガスなどのエネルギー資源に乏しいことは、今更言うまでもない。今後は、エネルギー資源の多様化を計ることと同様に、現在使用している資源を、有効に使用することも当然必要なことである。この点から、耐火物の製造に要するエネルギーの消費量、および省熱エネルギーを目的とした炉体構成について簡単にとりまとめた。最近の耐火物の不定形化の方向も、ある意味で省エネルギーという一面で把握することができる。不定形耐火物は施工の省力化と、耐火物の構成の省略による消費エネルギー低減により、省エネルギーの面では見逃すことのできない存在である。しかしプロセス全体を見わたした時に、どの方法が最も有利であるかという点で判断する必要がある。単に、炉材のみからの追求では不十分な面が出てくることになる。耐火物に関する省エネルギーの問題は、単に耐火物メーカーのみによつて解決を計るべき問題でもなく、また炉材を使用する側のみで解決し得る問題でもないと思われる。

今後の省エネルギー対策については、十分な両者の協力の上で推進することが、少しでも早く実を上げる方法であろう。本稿が、その意味で省エネルギーを進める上に少しでもお役に立つことができれば望外の喜びである。

文 献

- 1) 太田豊彦: 第48・49回西山記念技術講座, p. 22~23
- 2) 野崎洋彦: 第39回西山記念技術講座, p. 123~126
- 3) 森 圭三: 無機合成材料とその応用, (1970), p. 352
- 4) 林 武志: 工業加熱, 13 (1976) 5, p. 11~24
- 5) 斎藤俊太郎: 窯業データブック, (1971), p. 275
- 6) 堀江鋭二: 金属, 47 (1977) 9, p. 24~28
- 7) ICI 社カタログ
- 8) UCC 社カタログ
- 9) Super Refractory Bulletin (No. 21) (H.I. Thompson Filer Grall Co. 21. March 1961)
- 10) 斎藤俊太郎: セラミックデータブック, (1975) p. 201~213
- 11) 日本無機繊維工業社資料
- 12) 桜井誠二: 窯業協会高温材料部会断熱分科会講演資料
- 13) 鈴木弘茂: "
- 14) 橋本恒市, 河村淳一, 他: 第49回造塊耐火物専門委員会本委員会資料
- 15) 斎藤俊太郎: 第3次耐火物技術講習会, (1975), p. 275
- 16) 松村雄次: 熱管理と公害, (1975) 1, p. 73
- 17) 内藤 清: 工業加熱, 1 (1974) 11, 6, p. 11
- 18) 片山拓二: 工業加熱, 1, 13 (1976) 3, p. 32
- 19) A. L. Chitt: Industrial Heating, 44 (1977) 5, p. 38~40
- 20) A. L. Chitt: Industrial Heating, 44 (1977) 7, p. 30~33
- 21) A. L. Chitt: Industrial Heating, 44 (1977) 7, p. 26~29
- 22) 佐々木洋三: 燃料と燃焼, 43 (1976) 7, p. 13~20
- 23) 斎藤昭平: " , 42 (1975) 1, p. 42~50
- 24) 青山寿一郎, 向坂正男: 鉄と鋼, 63 (1977) 10, p.
- 25) 池田忠治: 鉄と鋼, 63 (1977) 12, p.
- 26) 木下慶三: 金属, 47 (1977) 9, p. 19~23
: ニチアス技術時報, 1 (1978) 1, 192, p.
- 27) 西脇 実, 他: 耐火物, 28 (1976) 226, p. 532 541
- 28) 丸岡芳樹: 熱管理と公害, 26 (1974) 6