

技術報告

耐火物と施工法の改良による鑄鉄溶解回転炉の長期操業

福井 清* 入野正夫**



福井 清 入野正夫

Technical Paper
J. JFS, Vol. 81 No. 2 (2009) pp. 94 ~ 100

Long Operation of Cast Iron Rotary Furnace by Improvement of Refractory and Ramming Method

Kiyoshi Fukui* and Masao Irino**

キーワード：O₂バーナー式回転炉，高温溶解，PZ耐火材，グライ粉溶解，高品質，ポストキューボラ，ポスト低周波炉，空冷，安全操業

1. はじめに

近年鑄物溶解はキューボラやるつぼ形低周波誘導炉(以下低周波炉と称す)からるつぼ形高周波誘導炉(以下高周波炉と称す)に移行しつつある。キューボラは大型化に進み、中、小型キューボラは姿を消し、老朽化した低周波炉は高周波炉に代わって来ている。キューボラや低周波炉に代わる次世代鑄鉄溶解炉として開発された、キューボラの加熱部に高周波誘導溶解を用いた図1高周波連続誘導溶解炉は完成したにもかかわらず、溶解炉本体よりも全自

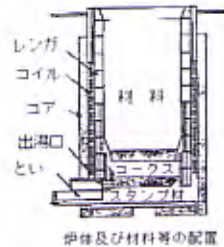
動溶解材供給および溶湯のカーボン量を制御するカーボン材自動投入装置等とその全自動操炉システムに費用がかかり過ぎて日の目をみずに姿を消した¹⁻²⁾。一方、人件費、電力、溶解材料の上昇などから誘導炉と比べてグライ粉利用可能で且つ鑄物溶解コストの低減と環境問題などから、純酸素バーナー式回転炉(以下回転炉と称す)が注目を集めた³⁻⁶⁾。誘導炉と比べ回転炉は炉体の水冷装置がないため操業上、管理が簡便でより安全な炉である。

回転式溶解炉は1960年代に重油を燃料としたフルミナ炉図2が我国に導入された。この炉は銅合金溶解を除いて、急速な低周波誘導炉の出現によって普及しなかった。しかし現状の回転式溶解炉は、フルミナ炉の重油・酸素燃焼方式から、ガス・酸素燃焼方式に変わった。また炉体中央部にあった出湯口、材料投入口はそれぞれ炉体のバーナー口、排煙口側に設置され、また炉体傾動は油圧方式の採用など、炉の構造も大幅な改良がなされている。にもかかわらず、現在、国内でこの炉が実働しているのは2~3社にとどまっている。

筆者らは3t回転炉で⁷⁾この炉の特徴を生かし、長期操業を実現して、実用上の効果をおげているので報告する。

2000kw炉
設備仕様

項目	仕様
電源出力	2000kw
周波数	500Hz
炉内径	1.050m
炉深さ	2.200m
出湯能力	4.2t/h



炉体及び材料等の配置

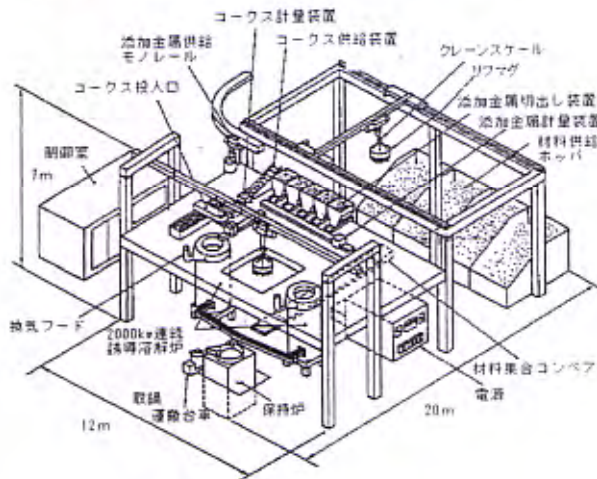
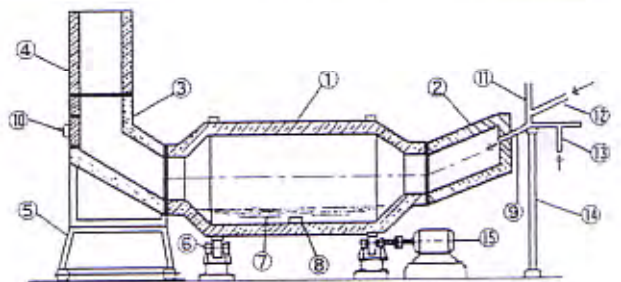


図1 4t高周波連続誘導溶解炉



①回転炉 ②定置式燃焼室 ③煙道 ④煙突 ⑤煙道移動台車 ⑥回転支持台 ⑦溶融鉄 ⑧湯口 ⑨バーナー ⑩フタ ⑪空気 ⑫酸素 ⑬オイル ⑭支柱 ⑮モーター

図2 フルミナ炉

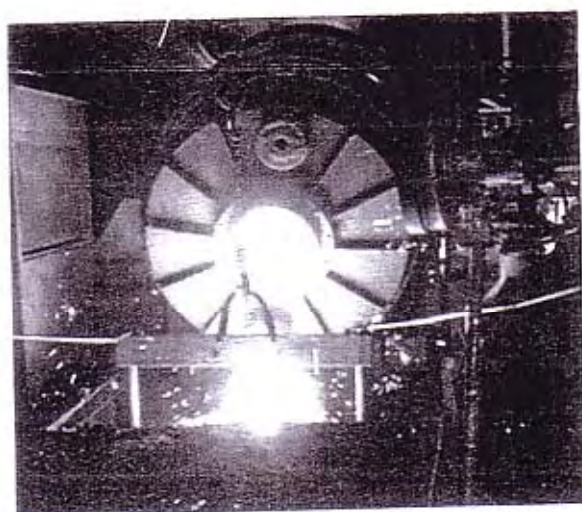


図3 回転炉

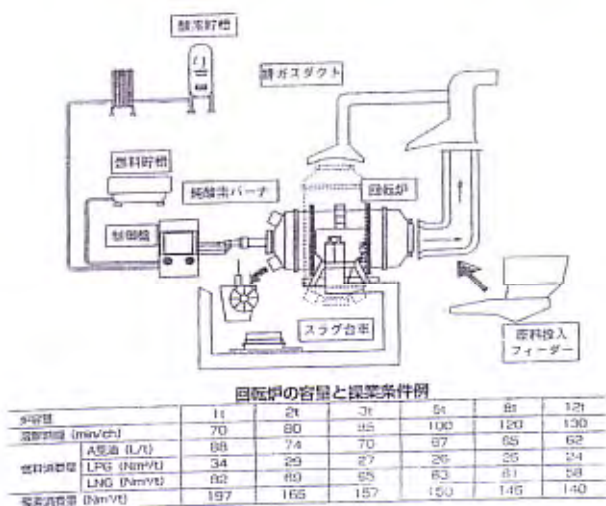


図4 回転炉システムフロー図

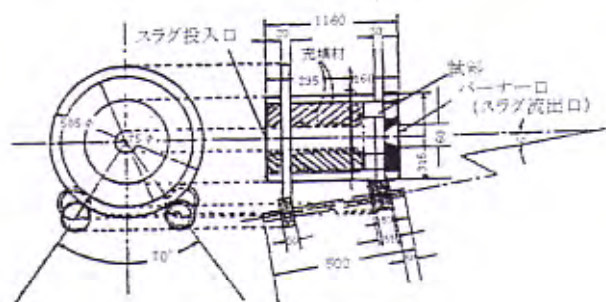


図5 回転侵蝕試験機

2. 回転炉の構造

回転炉は回転炉本体、バーナー燃焼装置、溶解材の予熱および投入フィーダーと制御操作盤からなり、炉本体は油圧およびモーターによって傾動したり回転させたり出来る。また材料投入は水平回転状態で排煙口側から装入、出湯はバーナー口側にあるカップホールから傾動して作業出来る構造で、その概要は図3、図4に示す。

耐火材の侵蝕状況を見るためにスラグを入れて溶損状

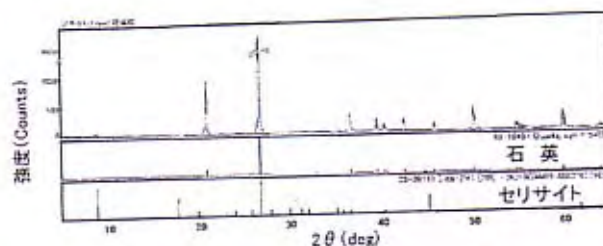


図6 ドイツ珪石X線回折図形

表1 ドイツ珪石オーダー分析結果

分析手法 : SFPバルク
 バランス成分 :
 試験形態 : 酸化物
 フラックス成分 : Li2B4O7
 希釈率 : 10.0000

成分名	測定条件	スペクトル	X線強度 (kcps)	分析結果 (mass%)
SiO ₂	SiOO	Si-KA	381.0105	96.6
Al ₂ O ₃	AlOO	Al-KA	9.1538	2.42
K ₂ O	K OO	K-KA	14.7078	0.622
Fe ₂ O ₃	HvOO	Fe-KA	6.4150	0.250
MgO	MgOO	Mg-KA	0.0824	0.0711
P ₂ O ₅	P OO	P-KA	0.2296	0.0271
CaO	CaOO	Ca-KA	0.4425	0.0239
ZrO ₂	HVVO	Zr-KA	7.7341	0.0153
NiO	HvOO	Ni-KA	0.4792	0.00802
Rb ₂ O	HvOO	Rb-KA	2.0762	0.00507
SrO	HvOO	Sr-KA	1.2649	0.00291

況を調べる図5回転侵蝕試験機がある⁸⁾。回転炉は耐火物の立場からみると回転侵蝕試験を常時行っている状態であり、回転により、鋳物の溶解材が耐火材表面を叩きつけ、あるいは削り取る作用として働き、溶湯となっても回転による遠心力と重力により、比重の高い溶湯が高温高压で耐火材表面を舐めるように溶損させる。構造上、耐火材には非常に過酷な炉である。

3. 回転炉用スタンプ材の検証

回転炉に使用されていたドイツ製スタンプ材の解体屑を入手し未焼結部分の粗粒(3~12mm)を採取した。この耐火性を見るために耐火度試験を行った。またX線回折分析粉末試料とその偏光顕微鏡薄片(厚さ約0.02~0.03mm、面積3~6cm²)を作成してX線回折並びにオーダー分析と偏光顕微鏡によるテクスチャー(構造)を観察した。その結果、

- 1) 耐火度試験結果はSK30であった。
- 2) X線回折の検索結果はSiO₂のα石英と微量成分でセリサイトが確認された。(図6)
- 3) オーダー分析結果、表1による化学組成は96.6%のSiO₂、2.42%のAl₂O₃と0.622%の微量アルカリであるK₂Oが検出され、粗粒は高純度の珪酸ではないことが判明した。

4) 図7偏光顕微鏡(クロスニコル)のテクスチャー観察結果では30~80μm大の比較的粒子の揃った結晶は石英粒子と粒子間にある微量鉍物から成り、鉍物学上の観点から、それがセリサイト(絹雲母)などの雲母粘土鉍物を含

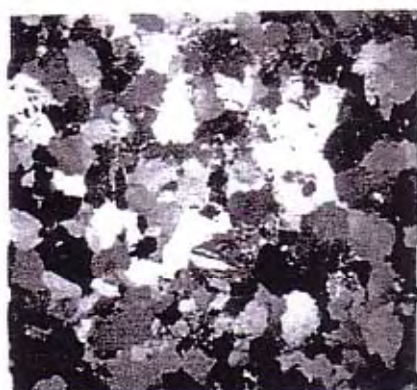


図7 ドイツ珪石偏光顕微鏡写真(クロスニコル)

表2 フルラムの粒度と耐火度(SK)

粒度		耐火度	
粒度 mm	%	粒度	SK
8~5	8.5	全体	28
5~2.83	23.4	2.83mm以上	30
2.83~1.0	2.2	0.59~0.105	29
1.0~0.59	1.2	0.074以下	26
0.59~0.297	6.3	粗粒子2.89以上はSK30であるが、0.074以下はSK26なので、この点を考えると耐浸蝕性に疑問がある。	
0.297~0.105	17.9		
0.105~0.074	1.4		
0.074 >	26.9		



図8 フルラム社シリカ(クロスニコル)



図9 スウェーデン産シリカ(クロスニコル)

んでいる石英片岩であることが今回の検索結果と筆者のこれまでの知見から推察された。

低周波炉が我国に普及する以前、昭和41年10月(1964)

にK鉄工所の依頼でおこなった重油式回転炉用耐火材フルラム(天然産シリカ、石英片岩)調査資料の一部を表2に示す。またその偏光顕微鏡写真を図8に⁹⁾、参考として石英片岩の代表例であるスウェーデン産シリカ(スウェーデン産天然シリカ)の同写真を図9に示す。

今回入手したドイツ製スタンプ材の試験結果とフルラムの資料を照らし合わせ検討してみると

- 1) 大きな粗粒は8mm以上が使われている。
- 2) シリカ粗粒子の耐火度はSK30である。
- 3) いずれも石英片岩である。

入手試料が少なかつたため詳細な調査はできなかったが、この検討結果はドイツ製スタンプ材が回転炉用ライニング材として適用できるか否かの判断には有効である。

今回のドイツ製スタンプ材は1823 K以上の高温溶解では耐蝕性に問題があると言える。

4. 3t回転炉の操業状況

3t回転炉はポンプ、機械部品など高品質铸造製品の溶解炉として稼動し、操業状況は下記の通りである。FC250~300溶解温度1803~1843 K、FCD450~550溶解温度1823~1923K、鋼、スクラップ、ドライ粉の高温溶解による生砂型鋳込み、溶解量2~6t/回、2~4回/日、130t/月、1~2週間に1回、炉内損傷部分は湿式ライニング材によるパッチング補修を行っている。

5. 回転炉にPZ耐火材の使用

天然シリカ材は1823 K以上の高温操業では耐蝕性に難があることが広く知られている。天然シリカ材と比較して耐蝕、耐スポーリング、耐衝撃性に富む特殊石英・ジルコン質耐火材(以下PZ耐火材と称す)を回転炉に採用して、炉壁の溶損部分を同質材でパッチング補修し、炉寿命の延命を図った。筆者らはPZ耐火材を平成10年6月に回転炉の排煙口側に初めて試用、引き続き平成11年1月バーナー口および排煙口側と炉の両サイドに採用した。また平成11年3月胴体部に、その後平成13年1月からドイツ製シリ

表3 PZ耐火材特性表

化学成分(%)	
SiO ₂	72~74
ZrO ₂	26~28
粒度(mm)	5.0>
	2.6
最高使用温度(°C)	1600
水分(%)	5~6
1500°C焼成後の物性値	
見掛気孔率(%)	28~30
残存線変化率	2.3~2.5
施工法	パッチング スタンプ
梱包	25kg/ビニール袋入 クラフト紙袋

表4 3t回転炉の耐火材と施工法

	耐火材	施工法	備考
H.9	耐火レンガ SK 34 耐火断熱レンガ 耐火モルタル SK 34 SK 34	レンガ張	
H.9	シリカスタンプ材(湿式) (%) Al ₂ O ₃ 5 SiO ₂ 94 アルミナ質ラッピング材 (%) Al ₂ O ₃ 80 SiO ₂ 20	脱形金型 スタンプ補修 スタンプ張付補修	ドイツ製品 国産品
H.10	アルミナ質スタンプ材(湿式) (%) 80 SiO ₂ 20 特殊石英ジルコン質パッチング材 (PZ) 湿式 (%) SiO ₂ 72 ZrO ₂ 27 接着材 無機材質	脱形金型 スタンプ パッチング補修 コテ塗り	国産品 国産品 国産品
H.11.8	ドイツ製シリカ湿式(胴体) バーナー排煙側サイドPZ施工	脱形金型 湿式スタンプ	現場再混練
H.12.1	全面PZ使用	ロストモールド湿式スタンプ 接着材使用PZパッチング補修	現場再混練
H.13.1	同上	同上	同上
H.15.1	同上	同上	同上
H.17.4	同上	同上	同上
H.18.12	同上	同上	同上
H.20.5	同上	同上	同上

カ材に代えPZ耐火材を全面に使用した結果、同材は回転炉用耐火材として十分耐用することを確認した。

PZ耐火材の特性を表3に示す。

6. 3t回転炉の耐火材とその施工法

平成9年導入以来、回転炉用耐火材はアルミナレンガ張り、国産アルミナ質スタンプ材やドイツ製回転炉用スタンプ材が採用、施工されていた。

平成10年6月から補修材としてPZ耐火材を使い始め、同材は平成12年3月から補修材を含め回転炉全面に採用、施工使用した。

これまでの回転炉に使用された耐火材と施工法を表4に示す¹⁰⁾。

7. 3t回転炉の耐火材をより有効に生かす創意工夫

炉は安全で使い易く、維持管理が簡単で溶解コスト低減には炉寿命の長いことが要求される。炉寿命を延ばすためには

- 1) 適正な耐火材の選定
- 2) 溶解の操業条件
- 3) 解体、築炉施工、補修作業やそれらの乾燥作業
- 4) 炉体の構造

これらの諸条件がうまく合致して初めてその効果が現れる。(図10)しかし炉寿命は溶解温度、レアウト、連続/間欠操業や溶解材料などの操業条件に大きく影響されることがこの図より理解出来る。

回転炉の炉寿命延長について種々研究検討工夫した結果は下記の通りである。

- 1) 耐火材は不定形のため
 - ・PZ耐火材の均一性、焼結性、施工性の更なる向上を図るために築炉施工の際、現場にて再混練した。

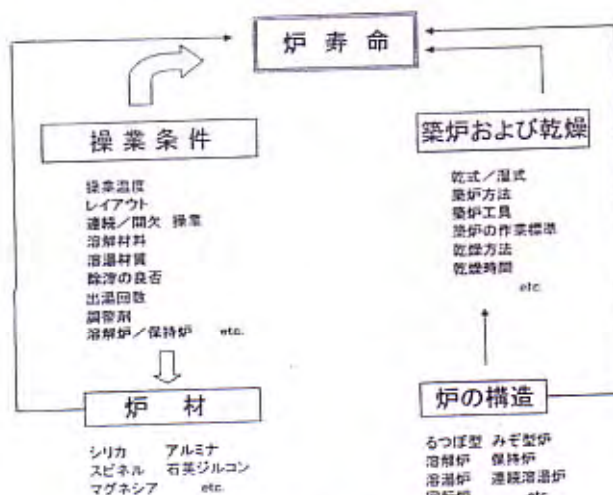


図10 誘導炉炉寿命に影響する諸因子

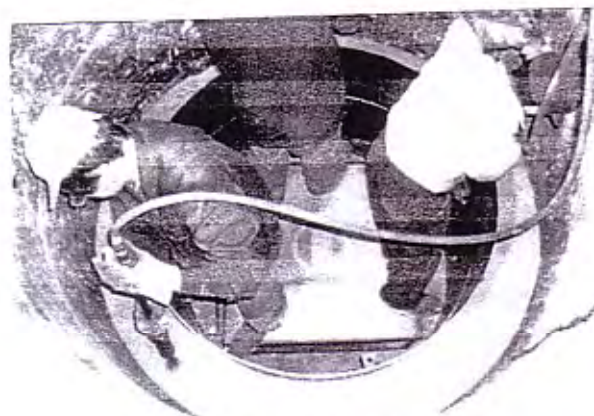


図11 炉体のPZ耐火材スタンプ施工

- ・築炉直後のPZ耐火材焼結にあたり初期損傷を防止するためカレットを投入してスラグコーティングを行った。
- 2) 施工、補修、乾燥方法
 - ・炉体は従来2分割して解体築炉を行っていた。施工効率を上げるために、バーナー側、胴体部、排煙口側の3分割に改造して、それぞれスタンプ施工は連続して一気に行った。(図11)
 - ・脱形金型は脱管、組み立てや歪み是正に時間が掛かったため、溶かし込み金型に変更した。
 - ・スタンプ施工終了後、PZ耐火材表面のベンチング作業(乾燥水抜き穴φ5を200ピッチで付ける)を行った。
 - ・スタンプ終了後、それぞれの炉体底部にプロパンバーナーを設置して一昼夜乾燥した。
 - ・炉体は1~2週間に1回、作業終了後全出湯、空冷した後、接着材表5を使用してPZ耐火材でパッチング補修した。
 - 3) 炉構造の問題及び改良改造点
 - ・耐火材の熱伝導バランスと耐火材の緩みを排除するために炉体の断熱材は廃止した。(PZ耐火材ライニング厚さは225mmとなる)

表5 接着材の特性表

化学成分(%)	
Al ₂ O ₃	51~53
SiO ₂	22~24
硬化性	エアークレット
施工性	手塗り、コテ塗り
梱包	25kgビニール袋入ダンボール箱
特徴	作業性が良く、接着性に優れている

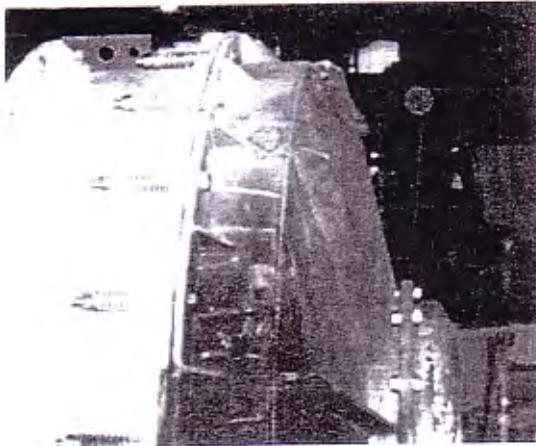


図12 耐火材の膨張吸収用スプリング

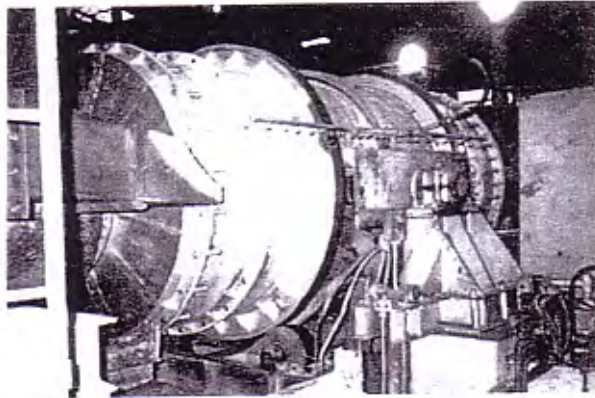


図13 回転炉空冷装置

- ・ 炉体の繋ぎ目は耐火材が隙間からこぼれ落ちぬように内側に鞘が設けられている。しかしこの部分から未焼結粉末がこぼれ出たので、鞘寸法を10cm長くした。
- ・ 低速連続回転による0.5rpmの回転数が溶解効率に適していることを確認した。回転炉の回転動力モーターの力が足りなかったため馬力を一ランク強化した。
- ・ PZ耐火材の膨張を吸収する缶体のスプリングボルトのスプリングを強化した(図12)。
- ・ バーナーの燃焼効率を上げるため、バーナー口側の開口部径をφ400→φ350と小さくし、バーナーのバーナータイルの損傷防止はグラスウールで保護した。

表6 燃焼バーナーのスペック

燃焼方式	純酸素燃焼 非水冷式先混合タイプ
燃料	天然ガス 13A 41.609MJ/m ³ (真発熱量)
燃焼量	1.100kW
酸素量	240m ³ N/h
酸素比	1.1

表7 3t回転炉の実働実績

年月	事項	要 領	備 考
H.9.10 (1997年)	導 入		
H.9.12	新 設	ドライ粉投入、レンガ付着漏洩	レンガ精施工
H.10.3	補 修	バーナー側、排煙口側 耐火材剥離(剥離(寿命 1ヶ月))	レンガ精施工修復 国産アルミナ質スタンプ材 塩付補修
H.10.6 (1998年)	解体修理	バーナー側 バーナー側による部分溶損 放射熱	国産アルミナ質スタンプ材 脱形金型 ボッシュハイドレーター 湿式スタンプ施工
	補 修	排煙口閉塞のため ランサー作業により漏洩れ停止 106チャージ(寿命 6ヶ月)	20mm 耐熱ボード使用 排煙口側 石英-ジルコニ(PZ材) スタンプ施工
H.11.1 (1999年)	解体修理	胴体部最目より漏洩れ 38チャージ(寿命 2ヶ月)	ドイツ製シリカ材(胴体部) 脱形金型 湿式スタンプ施工 バーナー側/排煙口側 PZ材 湿式スタンプ施工
H.11.3	解体補修	胴体失敗	PZ材に変更 湿式スタンプ施工
H.11.3	再設炉	(寿命 5ヶ月)	胴体部 PZ材 湿式スタンプ施工 PZ材 再選給する 新熱材イソブランmm 選給
H.11.8/末	解体修理	(寿命 4ヶ月)	ドイツ製シリカ材(胴体部) バーナー/排煙口側PZ材 湿式スタンプ
H.12.1 (2000年)	解体修理	(寿命 12ヶ月)	脱形金型を溶かす(ロストモード方式)
H.13.1	解体修理	(寿命 24ヶ月)	全面 PZ材使用 ロストモード使用
(2001年)			
H.15.1 (2003年)	解体修理	(寿命 26ヶ月)	同 上
H.17.4 (2005年)	解体修理	(寿命 8ヶ月)	同 上
H.17.12	解体修理	(寿命 12ヶ月)	同 上
H.18.12 (2006年)	解体修理	(寿命 17ヶ月)	同 上
H.20.5 (2008年)	解体修理		同 上

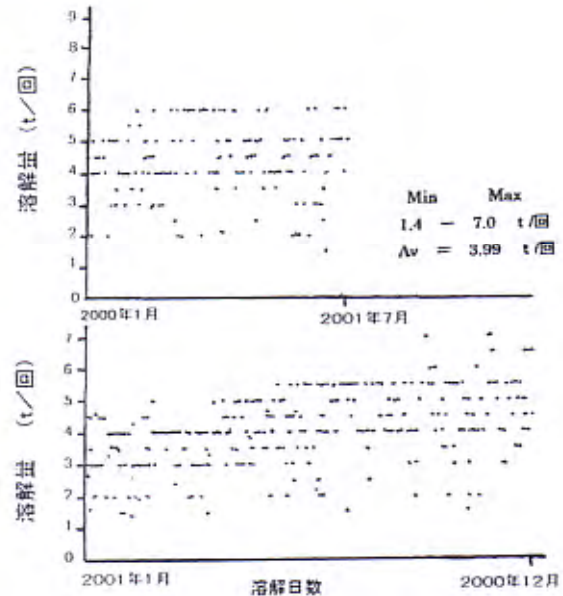


図14 3t回転炉溶解重量

表8 3t回転炉溶湯の試験成績書

受付番号 Number	試験依頼先 Name of Applicant	材質 Material	品名 Part Name	受付日 Date							
No. 2807	F工業 株式会社	FCD		平成19年7月26日 (2007.07.26)							
試験項目 Kind of Test	引張試験 Tensile Test					抗折試験 Transverse Test				硬さ試験 Hardness	
	直径 Diameter mm	最大荷重 Maximum Load N	引張強さ Tensile Strength N/mm ²	耐力 Yield Strength N/mm ²	伸び Elongation %	直径 Diameter mm	支点間距離 Span mm	最大荷重 Maximum Load N	たわみ Deflection mm	ブリネル硬 度 Brinell HB	
規格 Standard											
試験片記号 Test Piece Mark	F7N-FCD 7-21-2	14.00	86500	562	331	9	*	*	*	197	
成分 Composition % 試験片記号 Test Piece Mark	化学分析試験 Chemical Analysis Test										
	T.C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mg		
F7N-FCD 7-21-2	3.62	2.37	0.21	0.034	0.013	*	*	*	0.011	*	*
備考 Remarks	*材質は依頼者提供資料による										

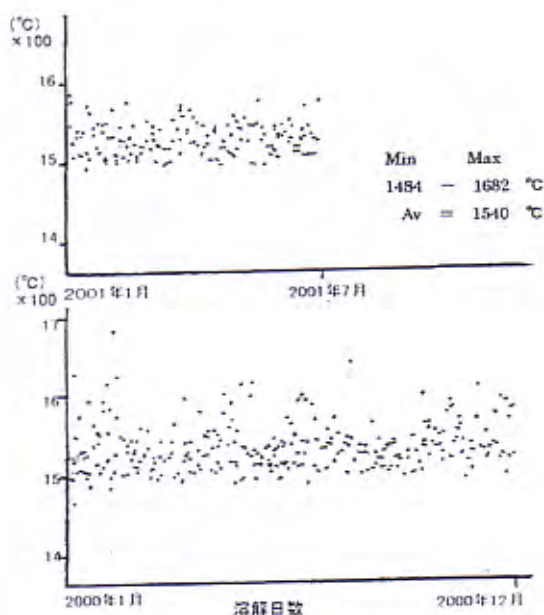


図15 3t回転炉溶解温度

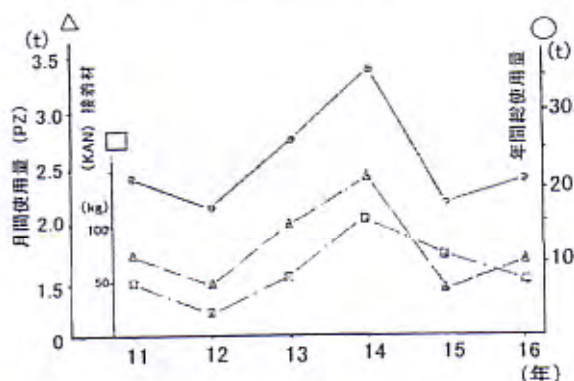


図16 PZ耐火材、補修材使用量

- ・炉体の温度バランスを考慮し、炉体中央部から排煙口側に沿って鉄皮保護を兼ね、圧縮空気による図13空冷装置を設置した。
- ・LPG/O₂バーナーから天然ガス(13A)/O₂バーナーに変更した。燃焼バーナーのスペックは表6に示す¹¹⁾。

表9 鋳物費と溶解時間(H.13上半期)

平成13年 上半期 統計	
1t当りの鋳物費	
溶解燃料費	¥ 15,112 (30.4)
溶解原材料	¥ 23,093 (46.5)
溶解人件費	¥ 4,428 (8.9)
築炉材・炉修材・人件費	¥ 7,044 (14.2)
	¥ 49,677 (100.0)
1t当りの溶解時間	
第1回目	45分
第2回目	40分
第3回目	35分
第4回目	30分
※ ただし、1回当たり4tの溶解量として	

8. 3t回転炉の実働実績

3t回転炉の実働実績は表7に示す。

3t回転炉の溶解量、2000年から1年半の記録はMin 1.4t ~ Max 7.0t/回、平均4.0t/回である(図14)。同様に溶解温度はMin 1575K ~ Max 1955K、平均1813Kであった(図15)。2005年4月以降は工場の生産計画に合わせて炉の改築を行っている。

9. 耐火材、補修材の使用量

1999年3月から2004年12月までの耐火材、補修材の使用量は図16に示す。この図の15年に接着材KANが増加しているのは、炉の補修担当者が代わったためである。補修材の使用量は施工者の裁量に影響されることを示している。このプレを無くすためには現場にしっかりと補修規定を定めることが必要である。

2005年4月以後、接着材は83~63kg/月、補修材は1.0~2.0t/月、耐火材年間使用量は27~41t/年と接着材は減少、補修材は増加の傾向にある。これは操業上、回転炉の1回の溶解量、6~7t/回(Max8t/回)溶解が増えていることに起因している。

10. 回転炉の溶湯について

回転炉の溶湯の特徴として、鉄はほとんど成熟度100%以上で材質的に優れ、また切削性も優れた湯であると言われている。回転炉の溶湯の研究検討は米田らによってなされている¹²⁾。3t回転炉溶湯の一例を表8に示す。

11. 3t回転炉の鑄物費と溶解時間

平成13年(2001)上半期統計は表9に示す。これらのデータ以後の溶解費は概ね50～60円/tである。また溶解時間は4t/回として平均40分/tである。

12. おわりに

3t回転炉は平成9年10月(1997)導入以来、高温溶解をせざるを得ない状況の下、耐火材の高アルミナ質の使用は耐スポーリングの問題が、シリカ質では耐蝕性に難があり長期安定操業には不安があった。しかし改良研究の結果、下記の実証が得られた。

- 1) 熱衝撃に強い特性を持つ特殊石英・ジルコン質材(PZ耐火材)が回転炉ライニング材として適している。
 - 2) 操業、解体築炉、乾燥、補修方法や炉体の改造など改善工夫と1～2週間に1度の補修により、安定した操業が可能となった。その結果、炉寿命の目標実績20ヶ月以上を達成した。
 - 3) 回転炉は公称3tであるが4～8t溶解出来る。
 - 4) 高低周波炉と比べて多少設置場所が広がる欠点を除けば、溶解作業は熟練者を必要とせず、冷却方式が空冷のため安全で操炉も簡便である。溶解作業者の負担が非常に少ない。
 - 5) ガス源が確保出来れば、キューボラや高低周波炉に代わる鑄鉄溶解炉として回転炉は溶解コスト低減と環境問題に十分対応できる炉である。
- これらの実測データが、溶解炉の新設や低周波炉から

高周波炉を検討されている関係者の回転炉導入への参考に供すれば筆者の喜びとするところである。

参考文献

- 1) 橋田栄夫, 河井勇: 高周波連続誘導溶解炉, 鑄造工学 69 (1997) 1075
- 2) 日刊工業新聞: 鉄の消費大国が鉄の資源大国になる技術, 8/27第2部 (1997) 5
- 3) 石野亨: 鑄物64 (1992) 812
- 4) 回転炉における酸素燃焼溶解法の最近の進歩 (抄録) 齊藤和夫: 鑄物64 (1992) 150
- 5) 回転炉における鑄鉄の溶解 (抄録) 岸本治喜: 鑄物 66 (1994) 254
- 6) 木崎勉, 平野春好, 鶴岡洋幸, 村田博敏: 鑄造工学 69 (1997) 1061
- 7) 藤枝靖明: 長野県機械金属健康保険組合, 鑄物技術講習会テキスト (1998) 18
- 8) 耐火物技術協会編: 耐火物と築炉工学 (前編) (1972) 135
- 9) 関東ミネラル工業㈱技術資料 (1965)
- 10) 福井清: 日本鑄造工学会, 鑄鉄溶解部会資料 (2004)
- 11) 入野正夫, 三宅新一, 浅井潤一郎, 藤峰智也, 小泉健司: 工業加熱 (2002/5) 27
- 12) 米田博幸: 日本鑄造工学会研究報告86 (2001) 30