

不定形耐火物のマイクロ波乾燥技術

Microwave Drying of Monolithic Refractories

平 初 雄*
Hatsuo TAIRA

中 村 壽 志
Hisashi NAKAMURA

抄 録

新日本製鐵では、炉材コスト削減の一環として取鍋や脱ガス装置(RH)を代表例とした各種窯炉設備の不定形化技術が進展している。ここで不定形化技術とは、高耐用な不定形材料だけでなく、混練、鑄込み、養生、乾燥等の不定形施工を構成する技術である。これら施工技術の中でも、爆裂などを発生させずに短時間で乾燥させる技術を確立することが重要となる。新日本製鐵ではこの乾燥技術に、熱風マイクロ波を採用してきた。マイクロ波による加熱は、内部加熱なので適切な出力を用いれば背面まで急速に昇温することができ、効率良く乾燥することが可能である。取鍋、RHで使用されているアルミナ-マグネシア質、及びアルミナ-スピネル質のマイクロ波乾燥挙動について報告した。併せて、新日本製鐵におけるマイクロ波乾燥設備導入状況についても報告した。

Abstract

Monolithic refractory technology has been developed for ladles and RH vessels, with the purpose of reducing the total refractory cost in Nippon Steel Corp. The technology includes mixing, installing by casting, curing, drying. One of the most important things is drying shortly without explosion. In concerning with this drying, we developed the combination drying method using microwaves and hot air. Heating by microwave is internal heating, therefore, it is easier rapid heating until back of structure with appropriate microwave power applied. This paper reports on drying behavior of Al_2O_3 -MgO, and Al_2O_3 -Spinel monolithic refractories used with Ladle and RH vessels and introductory situation of the microwave equipment in Nippon Steel Corp.

1. 緒 言

製鉄設備で使用されている耐火物は不定形耐火物とれんがに分類される。1960年代約30%程度であった製鉄用耐火物の不定形化率が、現在各製鉄所で概ね約70~80%と高い値を示している。このようになったのは、不定形耐火物による省エネルギー化、機械化に伴う省力化が大きな推進要因である。これらの代表的な例として製鋼用取鍋の不定形化がある。

具体的には、中子を用いた流し込み施工法が1978年に開発された¹⁾。この方法の特徴は、混練-圧送-型枠-養生-乾燥をシステム化した技術であり、従来の不定形耐火物の流し込みにおける要素作業を機械化し、システム化したものである。混練は渦流式ミキサー、圧送ポンプは水压ダイヤフラムポンプで、脱気に棒状パイプレーターを使用する。

この不定形施工理論に関する代表的技術解説として梅屋の論文²⁾が挙げられる。このレオロジー特性の測定が不定形化施工に大きく貢献している。

上記の不定形施工に関する論文に続いて重要な要素技術として、不定形耐火物の乾燥技術が挙げられる。つまり、従来れんが積みであり、比較的短時間に目地用モルタルの乾燥を行ったのち、予熱を実施すればよいだけであったのが、施工のために水分を必要とする不定形耐火物では、施工後この水分を除去するための乾燥時間が不可欠になる。

この乾燥には、従来かられんが鍋の乾燥、予熱に使用していた熱風バーナーが用いられるが、熱風乾燥時間が従来のれんが鍋に比べ長時間を要するのが大きな問題となり、乾燥に関する種々の研究開発がなされてきた。短時間で乾燥を試みると、代表的なトラブルである爆裂現象が発生する。この爆裂現象を解明するために、乾燥挙動の解明としての蒸気圧の推定や³⁾、乾燥伝熱モデルの提唱⁴⁾、爆裂

* 環境・プロセス研究開発センター 無機材料研究開発部 主幹研究員 千葉県富津市新富20-1 〒293-8511 TEL:(0439)80-2129

特性⁵⁾等が報告されている。更にこの現象を定量的に評価するための内部蒸気圧測定と材料強度の関係⁶⁾が報告されている。

一方、この乾燥をより効率的に行える技術として熱風マイクロ波乾燥技術⁷⁾が報告されている。この報告で、マイクロ波乾燥に用いている周波数は915MHzであり、また使用されている材料はジルコン質不定形耐火物であるが、乾燥時間で約1/3に短縮、かつエネルギーでも約1/4に低減されたと報告されている。ただこの報告では実用化面に主眼がおかれており、マイクロ波と不定形耐火物との相互作用については殆ど詳述されていない。

そこで、この不定形耐火物のマイクロ波乾燥技術に着目して、現在取鍋、RHで使用されているアルミナ-マグネシア質、アルミナ-スピネル質不定形耐火物などの2.45GHzマイクロ波を用いて、熱風マイクロ波乾燥を行った結果等について報告する。併せて新日本製鐵におけるマイクロ波設備の導入状況についても報告する。

2. マイクロ波

2.1 マイクロ波の定義

マイクロ波の定義を図1に示す。300MHz～300GHzの電磁波の総称がマイクロ波である。新日本製鐵では、このマイクロ波周波数帯として、915MHz及び2.45GHzの両周波数を採用している。本実験では電子レンジとして採用されているのと同じ周波数である2.45GHzのマイクロ波を用いて実験を行った。

2.2 マイクロ波加熱の原理と特徴

2.2.1 マイクロ波加熱の原理

マイクロ波加熱の原理を図2に示す。取鍋やRHの内面にライニングされた不定形施工体内にマイクロ波を照射すると、施工された不定形耐火物原料および水の双極子が、振動および回転し内部摩擦が発生し、この摩擦熱により材料の温度が上昇する。水が全部蒸発したあとは、照射されたマイクロ波エネルギーを全て耐火物原料が受け、更に昇温していくことになる。

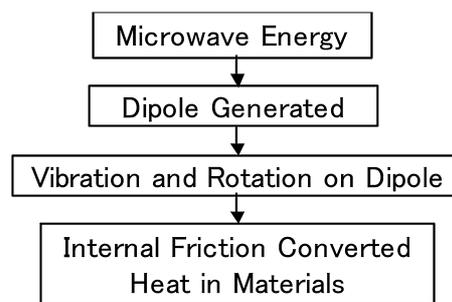


図2 マイクロ波加熱の原理
Principle of microwave heating

2.2.2. マイクロ波加熱の特徴

マイクロ波エネルギーが物質内部で熱に変換されるエネルギーを $P (W/m^3)$ とすると、以下の式で表される。

$$P = f \cdot E^2 \cdot \tan \delta$$

ここで、 f : 周波数 (Hz), E : 電界強度 (V/m) の項は装置因子であり、 $\tan \delta$: 比誘電率, δ : 誘電体損失角の項は材料因子となる。また、この材料因子の項は、周波数及び温度依存性を有する。マイクロ波加熱の特徴は、内部加熱、選択加熱、昇温速度制御の3点があげられる。

3. 実験方法

3.1 マイクロ波乾燥装置

図3にマイクロ波乾燥装置の構成を示す。アプリケーションは内寸が約幅1500mm、長さ1500mm×高さ2500mmのものを製作した。その他の装置はすべて市販品であり、マイクロ波共振装置は周波数が2.45GHzで最大出力が5kWである。電気ヒーターによる加熱方式の熱風発生装置によって、アプリケーション内を所定の雰囲気温度に設定できる構造になっている。

3.2 乾燥テスト用サンプルの作製

アルミナ-マグネシア質不定形耐火物は通常取鍋側壁、羽口などに使用されている。表1に供したアルミナ-マグネシア質不定形耐火物の化学組成を示す。アルミナ原料としては Al_2O_3 含有量が99.5mass%以上の骨材と仮焼アルミ

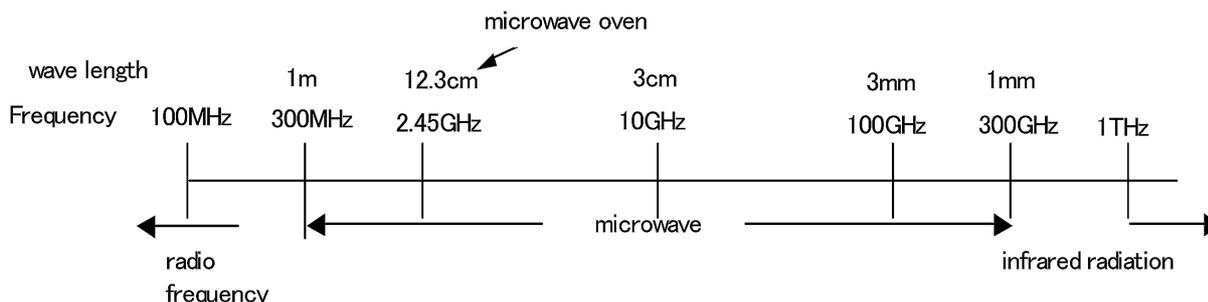


図1 マイクロ波周波数
Microwave frequency

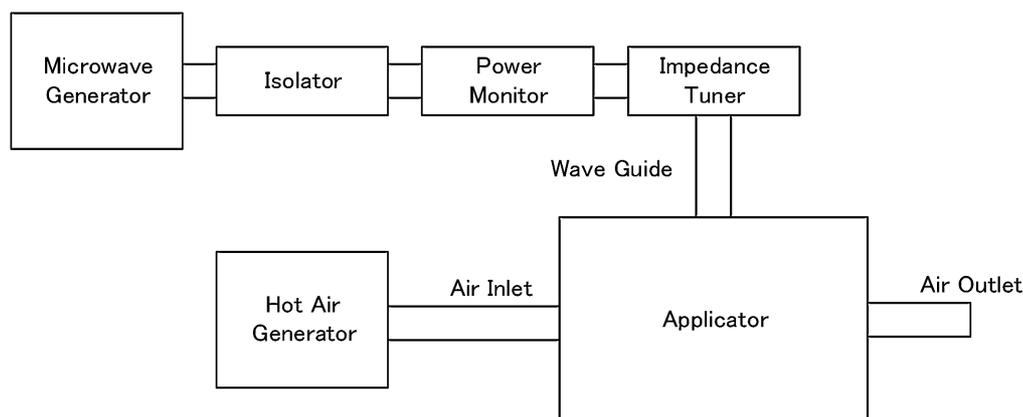


図3 マイクロ波乾燥システム
Microwave drying system

表1 アルミナ-マグネシア質不定形耐火物の化学組成
Chemical compositions of prepared alumina-magnesia castable

Component	Al ₂ O ₃	MgO
	93mass%	5 mass%

ナを、マグネシア原料としてはMgO含有量が97.3mass%以上の骨材を使用した。

アルミナ-スピネル質不定形耐火物は通常取鍋敷、RHの下部槽などに使用されている。表2に乾燥に供したアルミナ-スピネル質不定形耐火物の化学組成を示す。アルミナ原料としてはAl₂O₃含有量が99.5mass%以上の骨材と仮焼アルミナを、スピネル原料としてはAl₂O₃とMgOの合計の含有量が99.3mass%以上の骨材を使用した。

サンプルの試作は以下の要領で行なった。すなわち、アルミナ-マグネシア質では、5.6～6.3mass%の混練水分量で、小型の万能ミキサーで混練後、200mm×200mm×200mm形状の金型に流し込み、振動テーブルで成形した後、24時間養生を行った。温度は、試料の表面及び中央部(100mm)、底面にK熱電対を設置して測定した。また、内部圧は、流し込み成形時に外径2mm、内径1mmの銅管を、同じく試料中央の熱電対の近傍に埋め込み、乾燥時に測定した。

アルミナ-スピネル質では、大型ブロック内のマイクロ波による昇温状況を測定するため、4.3mass%の一定の水分量で混練後500mm×500mm×300mm形状の金型に流し込み、振動テーブルで成形した後、24時間養生を行うことで試作した。内部温度は、流し込み成形時に外径5mm、内径3mmのアルミナ質保護管を埋め込み、乾燥時に保護管内にK熱電対を設置して測定した。測定位置は、サンプル形状の300mmを高さ方向として、上から25, 50, 75, 100, 150, 225, 250, 275mmとした。また、内部圧は、流し込み成形時に外径2mm、内径1mmの銅管を埋め込み、乾燥時に測定した。測定位置は、上から75, 150,

表2 アルミナ-スピネル質不定形耐火物の化学組成
Chemical compositions of prepared alumina-spinel castable

Component	Ladle	RH
Al ₂ O ₃	93 mass%	93 mass%
MgO	3 mass%	5 mass%

225mmとした。

この試料とは別に物性測定用として、200mm×200mm×200mm形状のブロックも試作し、同様の熱風マイクロ波乾燥を実施した。

3.3 マイクロ波乾燥条件

マイクロ波乾燥は、サンプルを設置したアプリケーション内に、アルミナ-マグネシア質では、2～6kW/tのマイクロ波と雰囲気温度が120となるよう熱風を投入して実施した。より大型形状であるアルミナ-スピネル質では、4kW/tのマイクロ波で同様の熱風条件で乾燥試験を実施した。

3.4 マイクロ波乾燥後の物性測定

アルミナ-マグネシア質では、物性測定用試料は、マイクロ波乾燥済みの試料を湿式加工により所定の試験片形状に切出したものを使用した。この試料を110で乾燥した後、JISに準拠して、かさ比重、見掛け気孔率、曲げ強度、圧縮強度、弾性率、線変化率及び通気率をそれぞれ測定した。また、併せて回転侵食試験用サンプル形状にも切り出し、同様の手順で乾燥後、質量比1:1の合成スラグ(C/S=3.5)と普通鋼(SS400)を侵食剤に使用し、1650における耐食性及び耐スラグ浸潤性を評価した。

また、アルミナ-スピネル質では、200mm×200mm×200mm形状のマイクロ波乾燥済みブロックから試料を湿式加工により所定の試験片形状に切出したものを使用した。この試料を110で乾燥した後、JISに準拠してかさ比重、見掛け気孔率、曲げ強度、圧縮強度、弾性率、線変

化率及び通気率をそれぞれ測定した。

4. 結果と考察

4.1 アルミナ - マグネシア質不定形耐火物

4.1.1 アルミナ - マグネシア質不定形耐火物のマイクロ波乾燥

図4に、施工水分量5.6mass% (最も低水分施工時), 及び6.3mass% (最も高水分施工時) で施工したブロックを2 ~ 6 kW/t で乾燥したときの温度と内部圧の変化を示す。

200mm厚みのブロックをマイクロ波乾燥した場合、殆ど試料内部に温度差がつかずに乾燥できることがわかる。また、わずかではあるがマイクロ波の内部加熱の特徴である試料中央100mm部分が表面及び底面に比べて高温になっていることがわかる。

また、ブロックの昇温挙動を比較すると、マイクロ波出

力が2 kW/tと低いときは100 以上では水の蒸発潜熱により昇温速度が遅くなるが、マイクロ波出力の増加に伴い、昇温速度が速くなる傾向にある。内部圧は水蒸気圧であり、内部圧が急激に減少した時点が自由水の乾燥終了とみなせる。

この結果より、施工水分量5.6mass%及び6.3mass%と変化した際の乾燥時間を表3および表4に示す。本実験条件では、マイクロ波出力を2 kW/tから6 kW/tに増加させることで、乾燥時間が30時間から22時間と約10時間短縮できた。

一方、4 kW/t及び6 kW/tのマイクロ波出力時の内部圧の測定データから、材料が昇温している段階で測定された内部圧は、同じく測定された試料中央100mmの位置の温度で決定される平行水蒸気圧とほぼ一致することが確認された。

本実験条件でもマイクロ波出力を4 kW/tから6 kW/tに

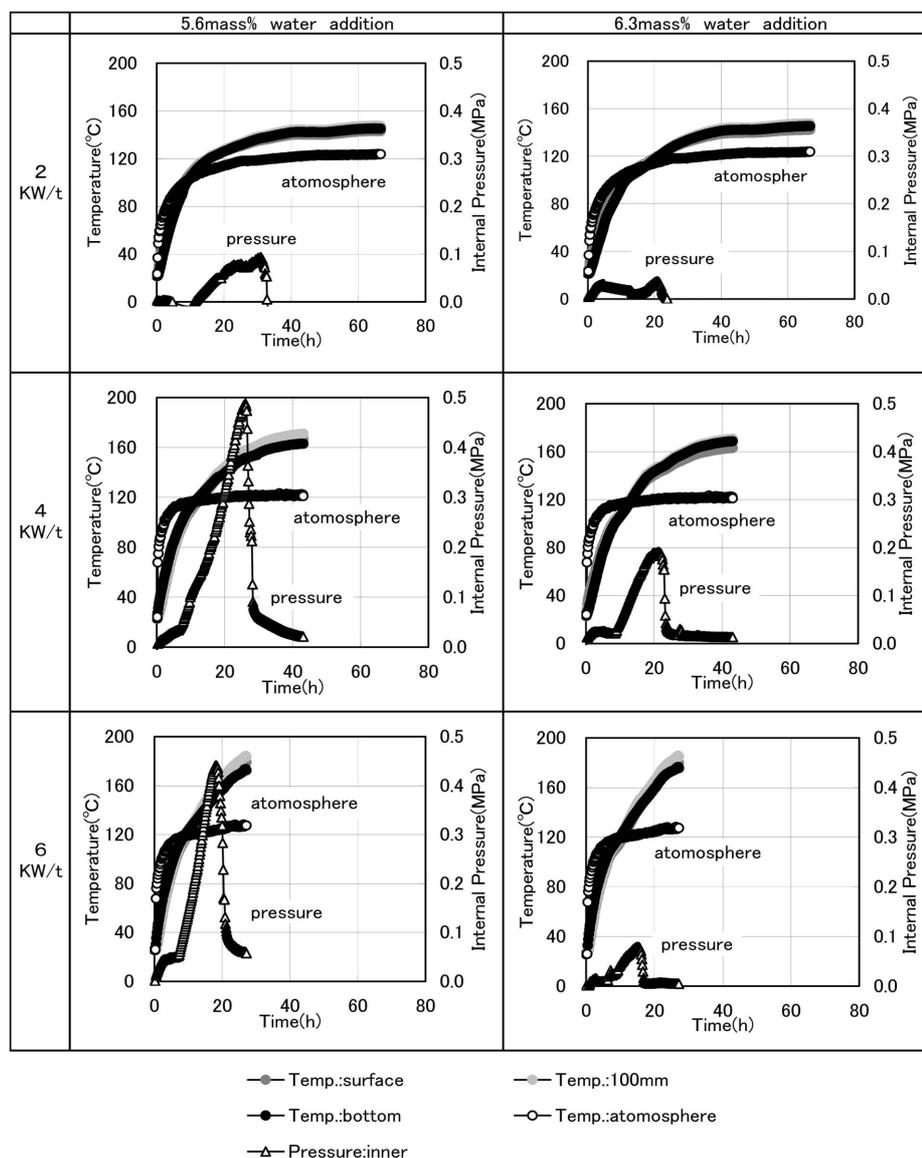


図4 アルミナ-マグネシア質不定形耐火物マイクロ波乾燥時の内部温度と内部圧
Temperature and internal pressure in the blocks during microwave drying of alumina-magnesia monolithic refractories

増加させることで、乾燥時間が23時間から17時間と約6時間程度短縮できる結果となった。また、逆に施工水分量が多くなると、乾燥時間が全体的に短縮することがわか

表3 水分 5.6mass%添加アルミナ-マグネシア質不定形耐火物の乾燥時間

Drying time of alumina-magnesia castable with 5.6mass% water addition

Microwave power (kW/ t)	2	4	6
Drying time (h)	32	28	22

表4 水分 6.3mass%添加アルミナ-マグネシア質不定形耐火物の乾燥時間

Drying time of alumina-magnesia castable with 6.3mass% water addition

Microwave power (kW/ t)	2	4	6
Drying time (h)	23	23	17

る。これは後述するブロックの通気率に依存していると考えられ、施工水分量が多くなるにしたがい、水蒸気化に起因する移動パスが多数生成していると考えられる。そのため、低水分施工時に比べて発生する内部圧の絶対値が小さくなる。

4.1.2 アルミナ-マグネシア質不定形耐火物のマイクロ波乾燥後材料特性

図5に、施工水分量を変化させ、マイクロ波乾燥を施したアルミナ-マグネシア質材料の各特性の比較を示す。一般特性は、200mm × 200mm × 200mm 形状の各2個のサンプルから40mm × 40mm × 40mmの試験片を各6個を切り出した合計12個の試験片の平均値である。また、耐食性及び耐スラグ浸潤性は、各3個の溶損量とスラグ浸潤量の平均値をそれぞれ指数で示したものであり、数値が小さい

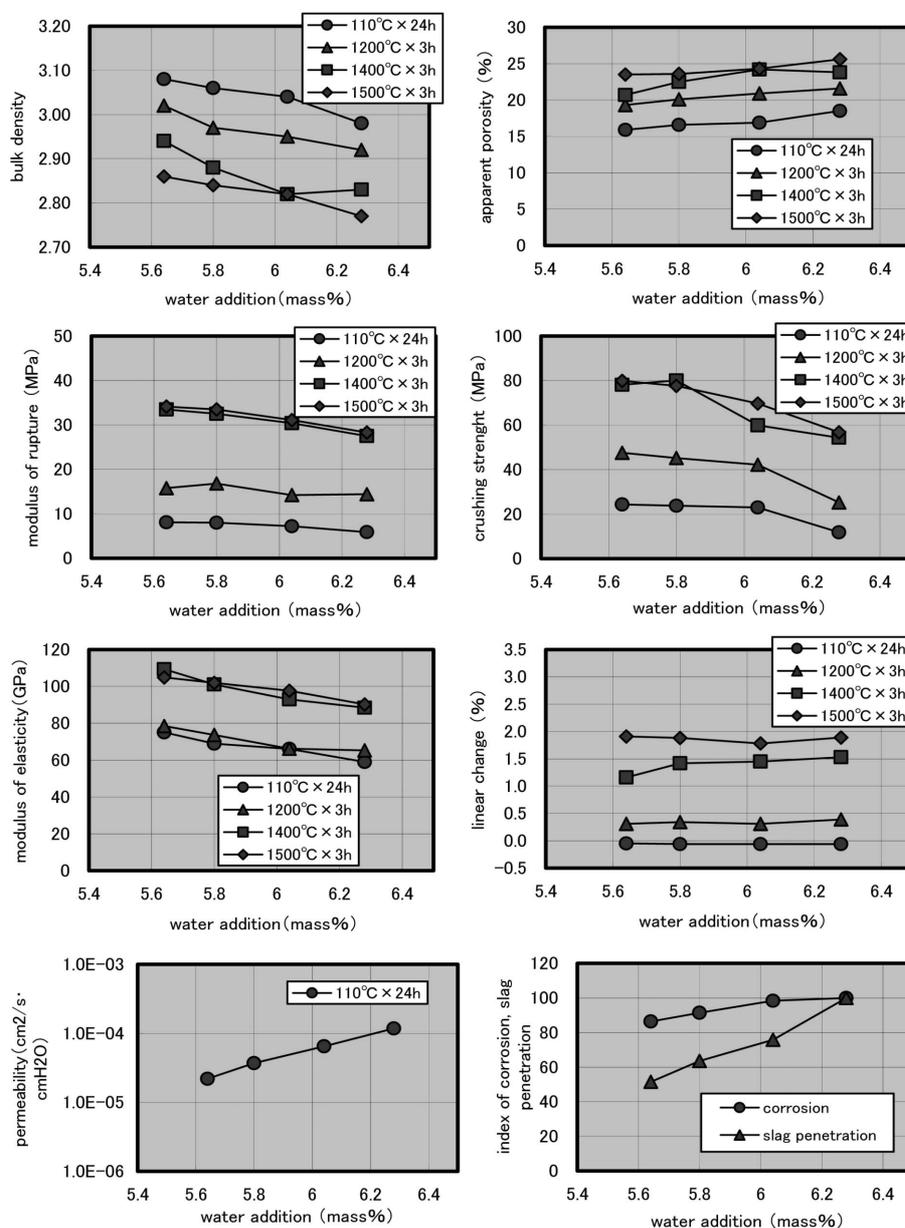


図5 アルミナ-マグネシア質不定形耐火物の含水量と物理的・化学的性質
Relationship between the water addition and some physical and chemical properties

ほど、これらの特性は良好である。

施工水分量が減少するに従い、かさ比重に関しては増加し、気孔率は低下し緻密化する傾向がある。その結果として曲げ強度や圧縮強度、更には弾性率等も増加する傾向になる。

線変化率には施工水分量の影響は殆どみられない。通気率に関しては、施工水分量を下げること約1桁下がっており、緻密化されたブロック内部で発生した水蒸気の物質移動が困難になることが推定され、前述の乾燥時間の増加につながっていると推定される。

耐食性に関しては、約17%程度改善され、更に顕著なことにはスラグ浸潤指数が約半分となる結果を得た。耐食性には勿論緻密化が有効であるが、スラグ浸潤抑制には通気率を低下させることが最も有効であることがわかった。これらの結果より不定形耐火物の化学組成を変えずとも、施工水分量を減少させることで不定形耐火物の耐食性が改善できることが判明した。

4.2 アルミナ-スピネル質不定形耐火物

4.2.1 アルミナ-スピネル質不定形耐火物のマイクロ波乾燥

図6は500mm × 500mm × 300mm形状における温度と内部圧の変化である。内部圧は水蒸気圧であり、内部圧が下がった時点が自由水の乾燥終了である。マイクロ波乾燥は約31時間で自由水の乾燥が終了した。前述のアルミナ-マグネシア質における4 kW/t以上の出力でのマイクロ波乾燥の場合と同様にブロック形状が大きくなっても、水の蒸発潜熱で昇温速度が小さくなる現象が明確ではなく表面

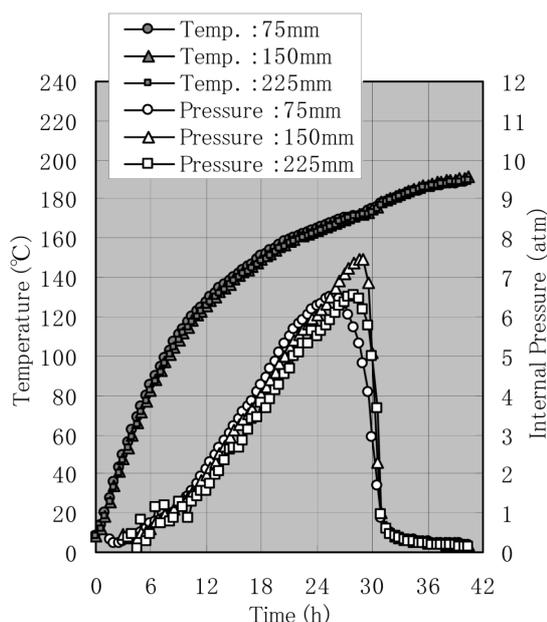


図6 アルミナ-スピネル質不定形耐火物におけるマイクロ波乾燥時の内部温度と内部圧
Temperature and internal pressure in the blocks during microwave drying of alumina-spinel monolithic refractories

表5 アルミナ-スピネル質不定形耐火物の物理的性質
Physical properties of alumina-spinel monolithic refractories

Bulk density	3.16
Apparent porosity (%)	11.1
Modulus of rupture (MPa)	-
Crushing strenght (MPa)	130
Modulus of elasticity (GPa)	133
Permeability (m ² /s·cmH ₂ O)	3.4 × 10 ⁻⁶

と内部の温度差が非常に小さい。

これは、マイクロ波乾燥は内部加熱であり、水が存在する内部が加熱されて熱が表面側に移動するためと考えられる。つまり、熱は高い方から低い方に移動するので、内部から表面に熱が移動する場合は表面側の方が温度が低く、表面側は乾燥が終了しても内部より温度が高くないと考えられる。また、温度分布の差が小さくなるのは、水のマイクロ波の吸収能が高く、水が選択的に加熱されることも要因の一つではないかと考えられる。

4.2.2 アルミナ-マグネシア質不定形耐火物のマイクロ波乾燥後材料特性

表5は、200mm × 200mm × 200mm形状のブロックから切り出したアルミナ-スピネル質不定形耐火物のマイクロ波乾燥後の一般物性である。

5. 新日本製鐵における熱風マイクロ波乾燥設備導入状況

新日本製鐵における熱風マイクロ波乾燥設備導入状況を

表6 新日本製鐵の熱風マイクロ波乾燥設備
Microwave drying equipment in Nippon Steel

Works	Plant	Frequency power tube	Total power
Muroran	Precast Blocks	2.45GHz Magnetron	21kW
Kimitsu 1SMP	Ladle	2.45GHz Magnetron	80kW
Kimitsu 2SMP	Ladle	2.45GHz Magnetron	100kW
Kimitsu	RH	915MHz Magnetron	150kW
Nagoya	Ladle	2.45GHz Klystron	120kW
Nagoya	Precast blocks	915MHz Magnetron	50kW
Hirohata	Ladle	2.45GHz Klystron	45kW
Yawata	Precast blocks	2.45GHz Klystron	120kW
Oita	Ladle	2.45GHz Magnetron	100kW
Oita	RH	2.45GHz Magnetron	30kW

表6に示す。現在全社で10基が稼働している。開発当初の不定形構造体である取鍋，RH等の大型構造体のみならず，現在では羽口，湯当たりブロックなどの大型プレキャスト品の乾燥も実施している。

6. 結 言

取鍋，RHで使用されているアルミナ-マグネシア質，及びアルミナ-スピネル質の熱風マイクロ波乾燥挙動を調査した結果，熱風マイクロ波乾燥は，試料の大きさに関わらず，乾燥時，材料内の温度分布の差を非常に小さくできることが判明した。

また不定形施工において，施工水分量を減少させると通気率が減少し，不定形内部での発生蒸気圧は大きくなり，水分量が少なくなるにも関わらず乾燥に時間を要するが，

この緻密化により耐食性は向上し，顕著な結果としてスラッグ浸潤量を減少できること等が判明した。

参考文献

- 1) 田中英雄 永楽益夫 古海宏一:耐火物 30 223-226(1978)
- 2) 梅屋薫:耐火物 30 625-636(1978)
- 3) 滑石直幸 江崎敏之 細川清弘:耐火物 29 519-522(1977)
- 4) 落合常己 池田順一 西谷輝之:耐火物 30 698-705(1978)
- 5) 原喜久男 新名俊夫:耐火物 30 296-299(1978)
- 6) 神田美津夫 上野治幸 木脇祐和 江口忠孝:耐火物 40 270-278(1988)
- 7) 落合常己 池田順一 糸井英信 西谷輝之:耐火物 33 365-370(1981)



平 初雄 Hatsu TAIRA
環境・プロセス研究開発センター 無機材料
研究開発部 主幹研究員
千葉県富津市新富 20-1 〒293-8511
TEL:(0439)80-2129



中村壽志 Hisashi NAKAMURA
広畑製鐵所 製鋼工場 マネジャー