

キュポラ溶解技術の変遷と最近の進歩

石野 亨*

Tohru ISHINO

Cupola Melting Technique, Transition and Recent Improvement

1 はじめに

鑄鉄の溶解は、古くは耐火粘土製の輪を数個積み重ねて作る甑こしきと呼ぶ筒型炉が用いられた。木炭や薪を燃料とし、踏鞴ふみこで送風していた¹⁾。19世紀中頃には大砲の砲身の鑄造に大量の低炭素の湯が必要となり、反射炉溶解が試みられたりしたが²⁾、文久元年(1861年)落成した長崎製鉄所の溶鉄場にオランダ海軍の指導で始めてキュポラが設置され、これが鑄鉄溶解炉として次第に普及定着した³⁾。

20世紀に入り工業界のニーズに答え、鑄鉄の強度を向上させるため、含有炭素や珪素量を低く押える、基地をすべてパーライト組織とする、黒鉛形状を改良するなどの技術的諸問題が取り上げられ^{4)~6)}、まず松浦・堀切らの提唱する「セミスチール」⁷⁾が生まれ、鋼屑溶解の容易なエール式アーク炉が登場した。一方キュポラも送風を予熱する所謂「熱風キュポラ」が注目され⁸⁾、さらにミーハナイトメタルの技術管理方式⁹⁾を導入するなどして、引張強さ150MPa程度だった鑄鉄鑄物の強度は300~400MPaに向上した。

第2次大戦直後もコークスが粗悪でキュポラ溶解が軌道に乗らず、1950年頃まではエール炉の使用が活発で、この炉で溶製したものは電気炉鑄鉄と呼ばれたりした¹⁰⁾。しかし材質が脆い、引け巣を生じ易い、早ざめするなどの欠陥が指摘され¹¹⁾¹²⁾、コークスの品質が向上すると共に再びキュポラ溶解が見直おされた。

低周波誘導電気炉は、ヨーロッパで1950年代、わが国では1960年頃から鑄鉄溶解に用いられ、作業環境が良い、操業管理し易い、溶解中に硫黄の吸収がないなどの利点や、この頃から急速に生産量を増してきた球状黒鉛鑄鉄製造に適している点が評価されて急速に伸びた。日本鑄物工業会の調査でも1961年全鑄鉄生産量のうちキュポラ溶解92.2%、アーク炉4.7%、低周波炉1.5%などだが、キュポラ溶解の比率は1970年84.6%、1979年63.3%と下降し、低周波炉は

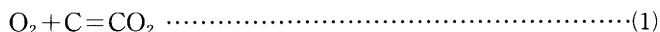
それぞれ5.8%、28.7%と急増した。さらにスターティングブロックが不要である、溶解所要時間が短いなど低周波炉より効率の良い高周波炉は1978年頃から急速に使用基数を増して来た。しかし、経済性にすぐれている、取扱い易い、連続出湯しうる、炉内で溶湯に自浄作用が働き、得られた鑄鉄材質が好ましいなどの理由で、現在もキュポラが鑄鉄溶解炉の主流の位置を占め、1986年の調査¹³⁾でも鑄鉄鑄物生産量の1/2以上がキュポラで溶解されている。

2 キュポラの溶解機構と近年の技術動向

2・1 炉内反応と溶湯性状

キュポラは炉底から溶解帯までコークスで満たされ、これをコークベッド(coke bed)と呼び、その上に地金・コークス・造滓剤などが層状に装入されている。

羽口から送り込まれた空気中の酸素はまずベッドのコークスと反応し、



によりCO₂を生じる。この反応は炭素1mol当り409.19kJの発熱を伴い、この熱が装入地金の予熱・溶解・過熱や不純物のスラグ化、酸化物の還元などに関与する(羽口から入った空気中の酸素の一部はコークス表面付近で、 $\frac{1}{2}\text{O}_2 + \text{C} = \text{CO}$ によりCOガスを生じるが、付近の酸素で $2\text{CO} + \text{O}_2 = 2\text{CO}_2$ によりCO₂となるので上記①反応だけと考えてよい)。

こうして送風中の酸素がほとんどCO₂に変換すると炉内温度は最高を示す。このCO₂ガスは炉内を上昇し灼熱コークスと接触して、



によりCOを生じる。この反応は炭素1mol当り156.48kJの

平成4年8月6日受付 平成4年11月6日受理 (Received on Aug. 6, 1992; Accepted on Nov. 6, 1992) (依頼解説)

* 近畿大学理工学部教授 (Faculty of Science and Technology, Kinki University, 3-4-1 Kowakae Higashiosaka 577)

Key words: cupola ; melting technique; cast iron; foundry; banking operation; recuperator; rotary furnace; recycle.

熱を奪う。それ故、反応が進むと炉内温度は次第に低下し、上部装入口から連続装入される地金やコークスも熱を吸収し、コークス含有水分の蒸発、石灰石（造滓剤）の分解などにも熱は消費されるので、反応は次第に緩慢になり約1000℃で停止する¹⁴⁾。標準的なキューボラ断面における燃焼反応で生じたガス成分と温度の分布を図1、熱収支の計算例を図2に示した。溶け落ち後溶湯は高温（約1800℃）のコークスと接触しながら滴下するが、こゝでは局部的に強還元性雰囲気を作られ、溶湯中に含まれる酸化物の還元、コークスからの吸炭など、キューボラ特有の精錬が行われる。

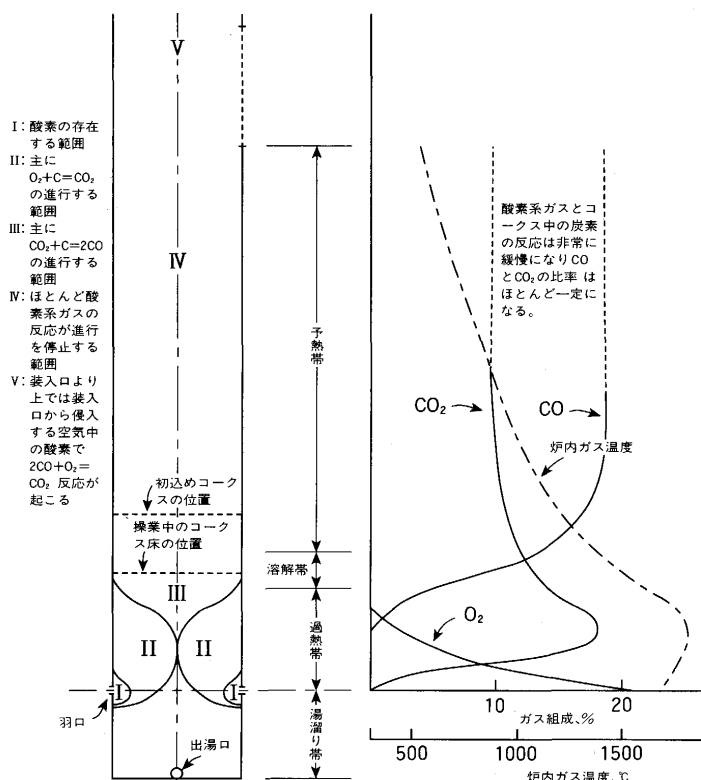
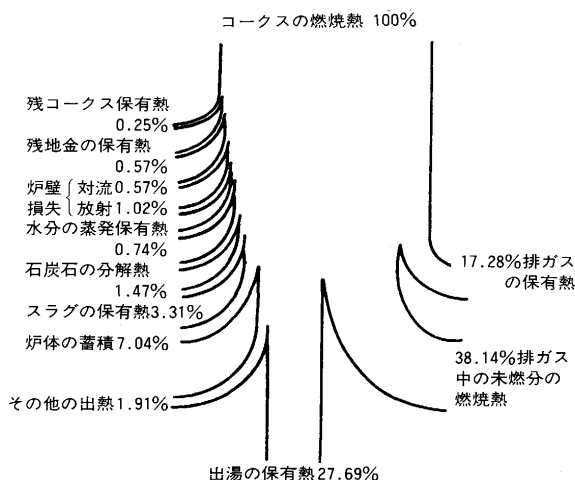


図1 キューボラ内の O_2 、 CO_2 、 CO ガスおよび温度の分布



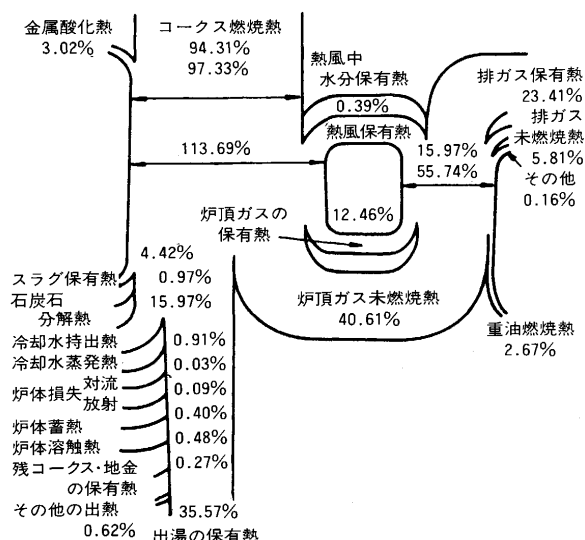
a. 6.5t/h酸性冷風キューボラ

2・2 近年の技術動向

ヨーロッパから伝えられたキューボラ溶解技術は、20世紀に入り日本学術振興会や日本鋳物協会で日本の鋳物工場に適するよう検討が加えられ、1940年¹⁶⁾、1949年¹⁷⁾、1957年¹⁸⁾に標準寸法や操業法が示された。さらに鑄鉄鑄物の材質の高度化、薄肉化などの技術的要求に、1973年頃から始まった省エネルギー対策も加わり、キューボラは構造も操業技術も非常に進歩した。このうち主要なものを列記しよう。

2・2・1 送風の予熱

キューボラで送風空気を予熱すると溶解効率の増加¹⁵⁾、出湯温度の上昇¹⁹⁾²⁰⁾、コークス比の低減²⁰⁾²¹⁾、材質の向上²²⁾などに効果のあることは古くから知られている。送風予熱装置には別の燃料を用いる方式とキューボラ排ガスの持ち去る熱量を利用する方式があり、前者の代表例にTodd-Thermo社やWhiting社の装置が挙げられる²³⁾。しかし先の熱収支(図2)でも明らかなように、キューボラは総供給熱量の約1/2が排ガスと共に持ち去られるので、ヨーロッパやわが国はこの熱量を回収利用する省エネルギー型の予熱装置の開発に力を注いだ。とくに小型キューボラの多いわが国では1948年頃からキューボラシャフト上部に送風管を配置するなど、主に排ガスの顕熱利用が試みられた²⁴⁾²⁵⁾。しかしキューボラが大型化すると共に、排ガスを別に設けた熱交換器に導く方式が多くなり、図3²⁶⁾に示すアメリカGriffin-Wheel社、ドイツDr. Schack社などの多管式や2重構造のオーストラリアEscher社やドイツGHW社のものなどが広く使われるようになった²⁶⁾²⁷⁾。



b. 8t/h酸性水冷熱風キューボラ

図2 キューボラの熱収支計算例¹⁵⁾

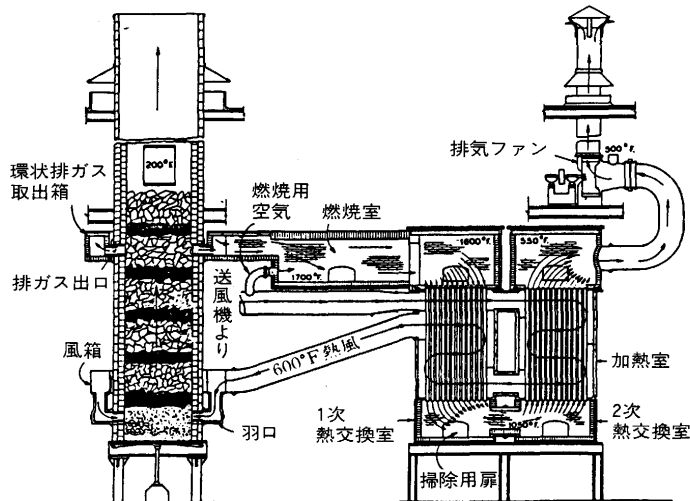
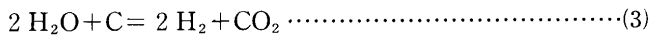


図3 排ガス利用熱交換器を付けた熱風キューボラ構造例 (Griffin社)²⁶⁾

2.2.2 送風の除湿

キューボラ送風中に含まれる水蒸気は炉内でコークスとの間で、次の反応が優先的に進行する²⁸⁾。



これは吸熱反応で、空気中の湿分が増すと羽口先の温度は低下し、出湯温度も低くなる。筆者らは送風中の湿分の増加は溶湯を酸化させ、チル深さを増し、引け巣を出来易くするなど製造品に欠陥が生じることを指摘し²⁹⁾、製造現場でもこの現象が認められた^{30)~32)}。

除湿方法には吸着法、吸収法、冷凍法などがある。吸着法は水蒸気と接触したとき化学組成の変化を起こさず水蒸気を吸着し、加熱により容易にこの水分を除去しうる可逆性のある物質（シリカゲル、活性アルミナなど）を用いる方法³³⁾、吸収法は水蒸気を吸収し易い吸収剤（塩化リチウム、塩化カルシウム、硫酸など）中に空気を送り送風中の水蒸気を吸収させる方法³³⁾³⁴⁾、冷凍法は冷凍機を用い送風空気温度を冷却塔内で露点以下に下げて過剰水分を凝縮除去する方法³³⁾³⁵⁾である。

わが国では1950年代から吸着法のうちシリカゲルを用いたものがかなり使われたが、1970年代に入ると装置も小型で使い易いため冷凍法が広く普及するようになった³⁵⁾。

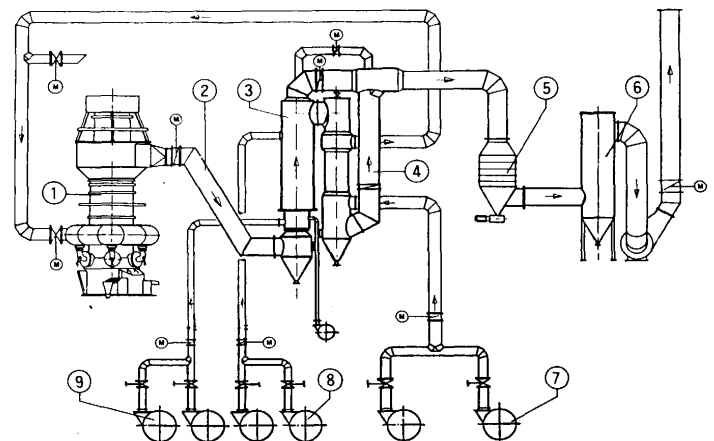
2.2.3 酸素富化

キューボラへの酸素の利用は1930年頃からベルギー、ドイツなどで始まり、ソ連、アメリカ、イギリスでも試みられ、溶解速度や出湯温度の上昇、溶湯の流動性向上などが認められた^{36)~39)}。酸素を炉内に送り込む方法としては、液化酸素貯蔵タンクから送風管や風箱に配管し、羽口から炉内へ送られる空気中の酸素濃度を高くする方式と、羽口とは別に吹込ノズルを設ける方式がある⁴⁰⁾。前者の場合純酸素を供

給する必要はないので、空気をゼオライトを充填した吸着塔を通して酸素濃度を高めたり⁴¹⁾、高分子薄膜により酸素富化空気を作る装置による方法⁴²⁾も実用化されている。

2.2.4 キューボラの大型化と水冷ノーライニング構造

欧米のキューボラは大型のものが多く、早くから溶鉱炉と同様羽口面から上の炉壁は外殻鉄板だけとし水冷する構造を採用している。標準的なキューボラ溶解システム例を図4⁴³⁾に示した。わが国は小型炉が多く、水冷に伴う熱損失や炉況の悪化が懸念されたが、炉壁耐火物の損耗対策や炉況の安定化に有効なので1955年頃から次第に水冷方式が採用され、小型水冷キューボラの標準構造や操業法が日本鑄物協会によって提案された⁴⁴⁾。しかしキューボラは大型化する程熱効率が良く溶湯も安定し、大塊の地金がそのまゝ装入出来るなど利点が大きいため、わが国でも次第にノーライニングの大型熱風キューボラが用いられるようになった。1970年代に設置されたわが国大型キューボラの代表例として(株)クボタ船橋工場のものを図5⁴⁵⁾に示した。



- | | |
|----------|-------------|
| 1: キューボラ | 5: ガス冷却装置 |
| 2: 排ガス | 6: バグフィルタ |
| 3: 燃焼室 | 7: 送風機 |
| 4: 熱交換器 | 8: 空気添加用ファン |
| | 9: 燃焼空気用ファン |

図4 標準的な大型熱風水冷キューボラ溶解システム例⁴³⁾

2.2.5 分割送風

キューボラ内ではコークス中の炭素と送風中の酸素との間で酸化・還元反応を生じ、予熱帯を上昇するガスは十数%のCOを含んでいる。この位置に2段目の羽口(2次羽口)を設け、空気を送ってCOを燃焼させ、地金の予熱に利用すると燃料の節約、溶解時間の短縮、出湯温度の上昇などに効果がある。わが国では第2次大戦後の粗悪コークス対策として実施された²⁵⁾⁴⁶⁾⁴⁷⁾。1970年代に入りドイツ、イギリスなどの研究報告や操業実例^{48)~51)}の刺激を受け、とくに省エ

ネルギーの面から再認識されて研究が進められ、広く製造現場に普及した^{52)~54)}。分割送風はこの他吸炭量の増加や吸硫量の減少などの効果も認められるが、溶湯の酸化を増長する傾向があり、得られた鑄鉄材質が好ましくないなどの理由でその後あまり発展しなかった。

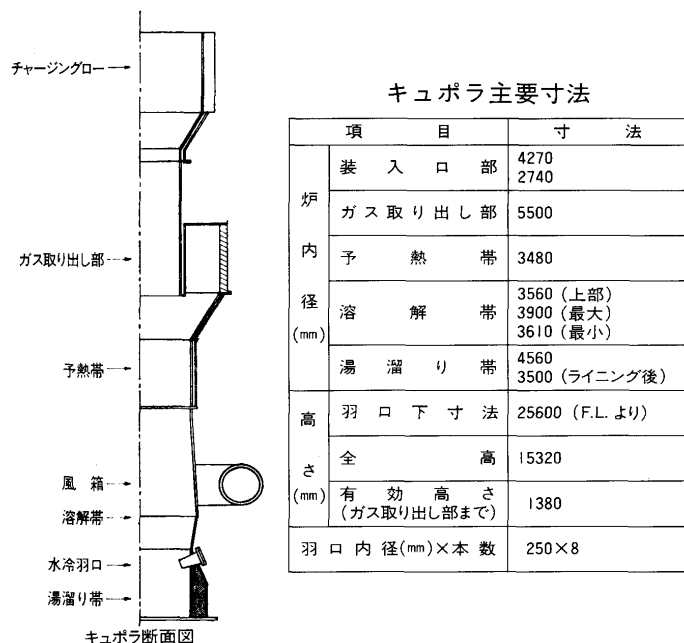


図5 1976年5月稼動した(株)クボタ船橋工場の大型キューボラ⁴⁵⁾

2・2・6 固体粉末の吹込み

キューボラ内での溶湯成分やスラグの調整、燃料の節約および原料地金を補うための切削屑（ダライ粉）の添加などを目的とした固体粉末吹込み装置は、1950年代の末頃から欧米で稼動し^{55)~57)}、わが国でも1980年頃から用いられ、独自の装置も開発された⁵⁸⁾⁵⁹⁾。

3 キューボラの構造・操業法最近の進歩

前章で述べたように、過去約20年間を振り返っても、キューボラは構造や操業法に幾多の改良が加えられた。最近とくに操業時間の長期化、高温の送風温度を得るための新しい熱交換器の開発、プラズマトーチの利用、コークスを用いないキューボラの実用化など、構造や操業法に注目される進歩が見られる。

3・1 長期間操業

キューボラ操業最大の難点は、毎操業終了後の炉修や次の操業のための準備に多大の労力と資材を消費することである。

鑄造工業は溶解炉で得られた溶湯を鑄型に流し込み製品を作ることを目的としており、鑄型を造る工程との関係で溶鋳炉のように長期間連続して出湯を続けることはむずかしく、長期間連続操業を行う場合でも多くは1日の操業終

了後、炉底を開くことなく夜間数時間休止し、翌朝操業を再開するといった方式（バンキング操業）が取られる。初めは数日操業を続け、週末に炉修を行うといった操業サイクルだったが、次第にこの期間は数週間から数カ月と長くなった。長期間操業を続けるキューボラをlong campaign cupolaと呼ぶが、炉底湯溜部や出湯・出滓口にどのような耐火物を用いるか、休止中溶湯や地金を炉内に残すか否か

（コークスだけ残す方式をcokes banking、コークスと固体の地金をすべて残す方式をfull banking、さらに炉底に溶湯まで残す場合をmetal-cokes bankingと呼んでいる）、休止後再開したとき充分高温の湯を出すための対策はなど、炉の構造、耐火物、操業法に種々の工夫が必要である。例えば毎日数時間休止する際はその直前にコークスを補給し、コークベッド高さを調整し、溶湯をコークスや地金と共に炉内に保持し、休止中は間欠的に送風して炉内の湯を高温に維持するメタル・コークスバンキングを行い、週末は溶湯もスラグも抽出し、ベッドコークスだけ残すコークスバンキング方式を取るというように2方式を併用して長期間操業している例がある⁶⁰⁾。さらに操業期間を延長する場合は、キューボラ内に溶湯が滞留するウェットタイプ構造の炉底より、溶湯もスラグも常に炉外に排出するドライタイプにした方が、湯溜部に耐火材とスラグや溶湯との接触時間が短くなり、耐火材の寿命が延びるので有利であろう。(株)アイシン高丘はドライタイプの炉底構造と図6⁶¹⁾に示す耐火材の構成で25週間操業を継続した結果、厚さ700mmの炉底の $Al_2O_3-SiC-C$ 系ラミング材が100mm余り残留していたことを確め、従来50回/年行っていた炉修作業を2回/年に削減し、6カ月間の長期間操業を成功させている⁶¹⁾。

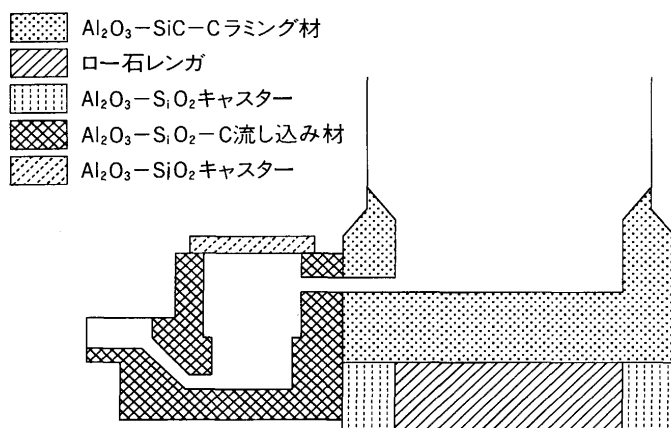


図6 ドライタイプの炉底構造と耐火材の構成例⁶¹⁾

3・2 セラミックペレットを熱媒体とする送風予熱用熱交換器

2・2・1で述べた鋼管をへだて、輻射や対流で熱交換させる方式では、多くの場合装置の耐用度や保守の点を考慮し、キューボラ排ガスの1部は逃がして交換器内の温度を押え、

羽口での送風温度を600℃程度以下に保つようにしている。しかしさらに送風温度を上昇させた場合その効果は図7⁶²⁾のように充分期待される。

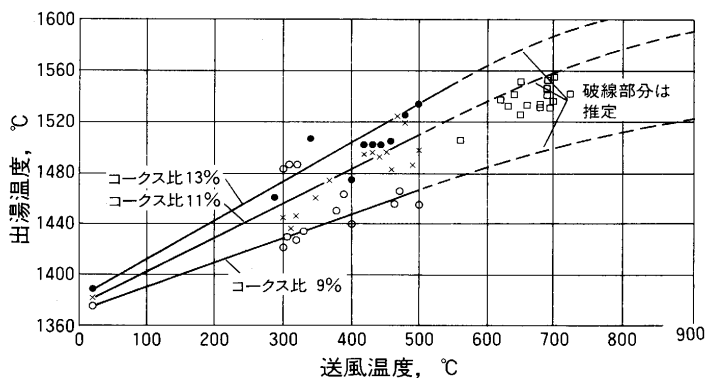


図7 送風温度を変化させた場合の出湯温度およびコークス比⁶²⁾

セラミック粒を熱媒体に利用すると複雑な形状の製品でも均一に加熱しうるので、最近熱処理工程ではアルミナ粒子などを雰囲気ガスで流動させる流動層熱処理炉が実用化されている⁶³⁾。キューボラ送風予熱用熱交換器にセラミック粒子を利用しようとする試みは1976年頃からアメリカEconotherm社で開発に着手され⁶⁴⁾、ドイツKGT社はこれを組込んだキューボラシステムを完成させた。熱交換器の構造は図8⁶⁵⁾に示すように、排ガス中のCOを燃焼させる燃焼室、ペレットに蓄熱させるガスセクション、高温のペレットの熱を送風空気に吸収させるウインドセクションおよびペレットを再びガスセクションに送る搬送装置からなる。搬送装置で頂部に送られたペレットは数段の有孔ステンレススチール製分配皿の網目を縫って均一に分布しながらガスセクション内を落下し、その間に燃焼室から送られた高温の排ガスで加熱され蓄熱してウインドセクションに入る。ここにも分配皿が幾段にも設けられており、蓄熱したペレットはこの皿の網目を縫って落下し、下から吹上ってくる冷風を加熱する。加熱された高温の空気は羽口から炉内へ送られ、熱を奪われたペレットは下部に集められ再びガスセクションに送られ、加熱・蓄熱と冷風への熱交換を繰り返す。キューボラ排ガスはペレットを加熱して送風を予熱した後さらに熱回収され、集じん後大気中に放散される。このシステム例を図9⁶⁵⁾に示した。

ガスおよびウインドセクションは円筒形で内径は12t/hキューボラ用で約1800mm、38t/hキューボラで約2800mm、使用ペレットは Al_2O_3 85～90%に少量の SiO_2 、 TiO_2 、 Fe_2O_3 を含み、粒径は1～2mm程度、送風温度は羽口で600～800℃になる⁶⁶⁾。

3.3 プラズマキューボラ

近年プラズマトーチが産業技術に応用され始めたが³⁶⁷⁾、アメリカGeneral Motors社とフランスAutomobiles Peugeot社が最近相ついでキューボラへの利用を実現させた。アメリ

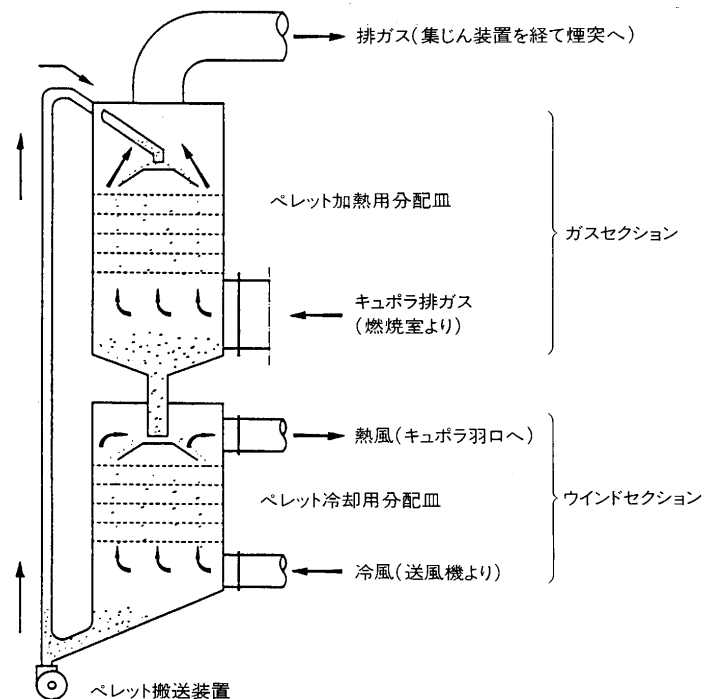


図8 セラミックペレットを熱媒体とする熱交換器の構造⁶⁵⁾

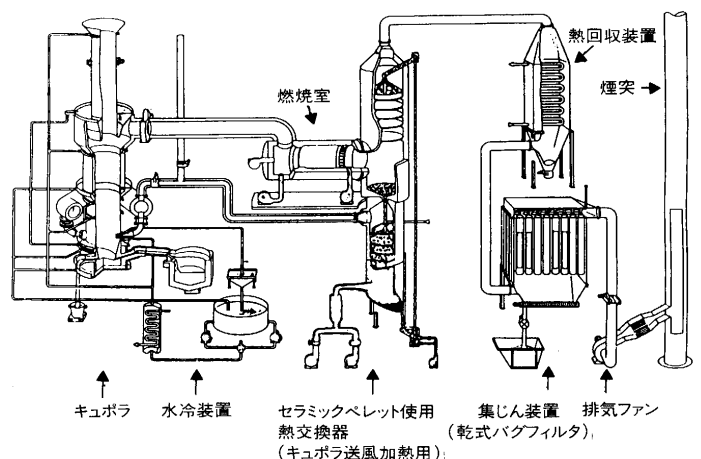


図9 セラミックペレットを熱媒体とする熱交換器を組込んだキューボラ溶解システム⁶⁵⁾

カでは1983年頃からWestinghouse Electric社、Modern Equipment社、GM社が協同で開発に着手し⁶⁸⁾⁶⁹⁾、1989年オハイオ州DefianceにあるGM社のCentral Foundry Divisionで20～30t/hの実炉が稼動した⁷⁰⁾⁷¹⁾。フランスは1986年頃からPeugeot社がAerospatiale社およびElectricire de Franceと協同で開発を進め、Dompierre郊外のPeugeot社Sept-Fons工場の20t/hキューボラにプラズマトーチを取り付け実操作を行っている⁷²⁾。GM社は図10⁷¹⁾のようにプラズマトーチを直接炉体羽口部に取り付け、キューボラ排ガス中のダストの再循環処理、ダライ粉などの吹込装置を設け、Peugeot社は図11⁷²⁾のように風箱手前の送風管にプラズマトーチを組込む方式を取っている。

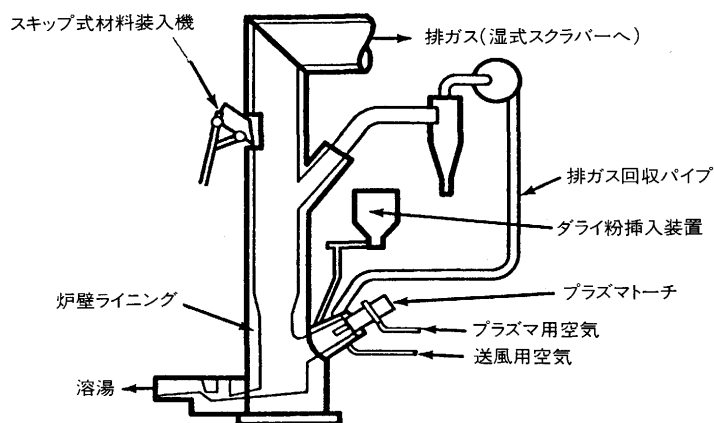


図10 GM社のプラズマキューボラ 71)

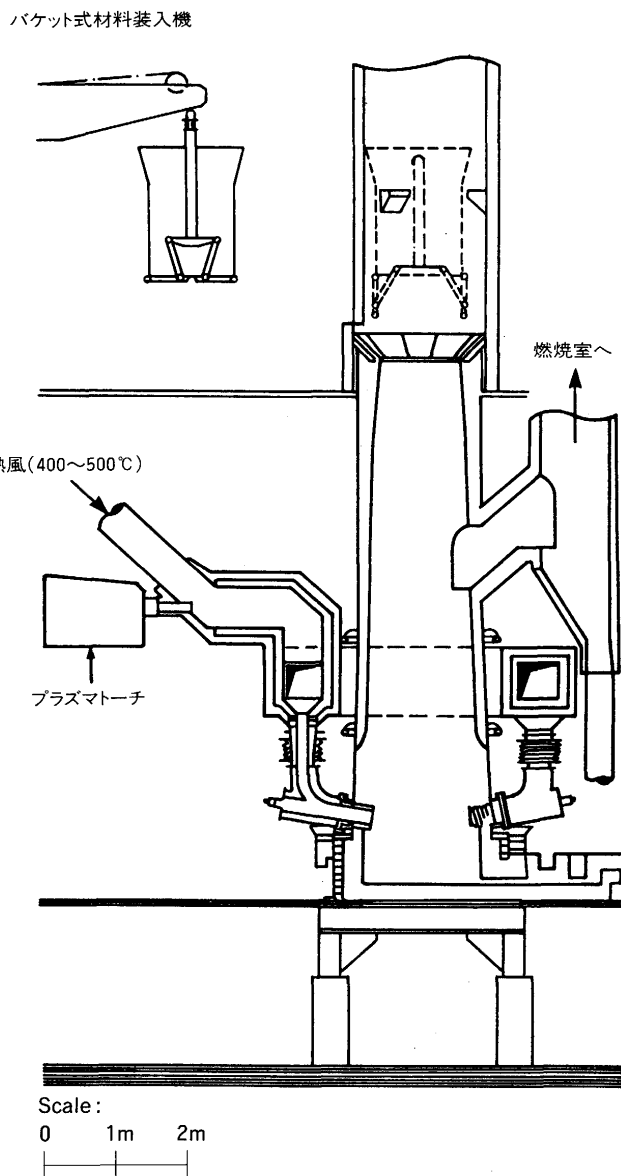


図11 Peugeot社のプラズマキューボラ 72)

両社の実績からプラズマキューボラの利点を列挙すると、

①溶解速度、出湯温度の上昇

GM社は溶解速度が50~60%増加したと述べ、Peugeot社は操業途中でプラズマトーチを始動させると3~4分の遅れで急速に溶解速度も溶湯温度も上昇すると指摘している。

②ドライ粉や鋼屑の多量配合

GM社は油分などを除き乾燥させたドライ粉を地金総重量の75%まで羽口から圧入することが可能になったと述べ、Peugeot社は鋼屑を10%増加、銑鉄を10%減少させることが出来、両社ともこれらの経済的効果はきわめて大きいと報告している。

③送風量減少に伴う利点

GM社では送風量が通常のキューボラの1/3程度に下げられるので炉内抵抗が小さく、排ガス量も減少する。また炉内の還元性が増加し($\frac{CO}{CO_2} = \frac{5}{1}$)、珪素の歩留りが上昇し、羽口から珪砂を送入しても還元され珪素添加の役目をするとして述べている。

3・4 コークスを使用しないキューボラ

キューボラは燃料としてコークスを使うため、燃焼反応が制御し難い、溶湯の炭素量の調整や吸硫量の抑制が困難である、ばいじんや硫黄酸化物を排出し、これが作業環境の悪化や大気汚染につながるなどの欠点が指摘される。こういった欠点を除く目的で開発されたのが、この種のキューボラである。

天然ガスを豊富に産出するアメリカや旧ソ連が1915年頃から研究に着手し⁷³⁾、1900年代中頃にはベルギーCGCE社のFlaven炉⁷⁴⁾⁷⁵⁾や旧ソ連のPenze型炉⁷⁶⁾が実用炉として稼動した⁷⁷⁾⁷⁸⁾。現在は主にイギリスR. T. Taftらが考案したCokeless cupola^{79)~81)}とドイツのP. W. Bardenheuerらにより開発されたKGT社のCupola2000⁸²⁾⁸³⁾の2種類が世界各地で操業されている(Cokeless cupolaはイギリスCokeless Cupola社、Cupola2000はドイツKGT社のコークスを使用しないキューボラの商品名)。

炉の構造を図12⁷⁸⁾と図13⁸²⁾に示したが、いずれも装入地金を支えるコークベッドの代りに水冷鋼管製ロストルを設け、その上に少量のセラミックスを主体としたベッド材を置く。地金は予熱されながら降下し、蓄熱したベッド材と接触して溶解し、溶滴となってロストルの間隙を落下する。ロストルはその上に装入される地金類の重さに高温でも充分耐えるよう水冷し、フィンを設け補強しているが、耐用強度の点であまり長くできず、炉径すなわち炉容量が制限される。

ベッド材としてCokeless cupolaは150mmφ、重量3.7kg程度の圧縮成型したセラミックボール、Cupola2000はSiO₂60%Al₂O₃40%程度の耐火れんがを用い、いずれも操業中消耗するので装入地金と共に地金重量の1~3%程度補給している。Cokeless cupolaはコークスキューボラの羽口に相当

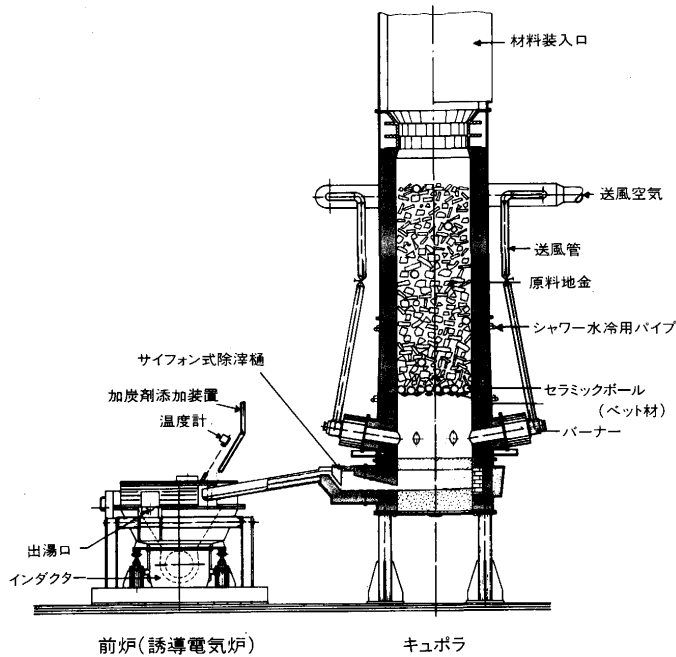


図12 コークスを使用しないキュボラの構造(1)⁷⁸⁾
(イギリスTaft氏の設計したCokeless cupola)

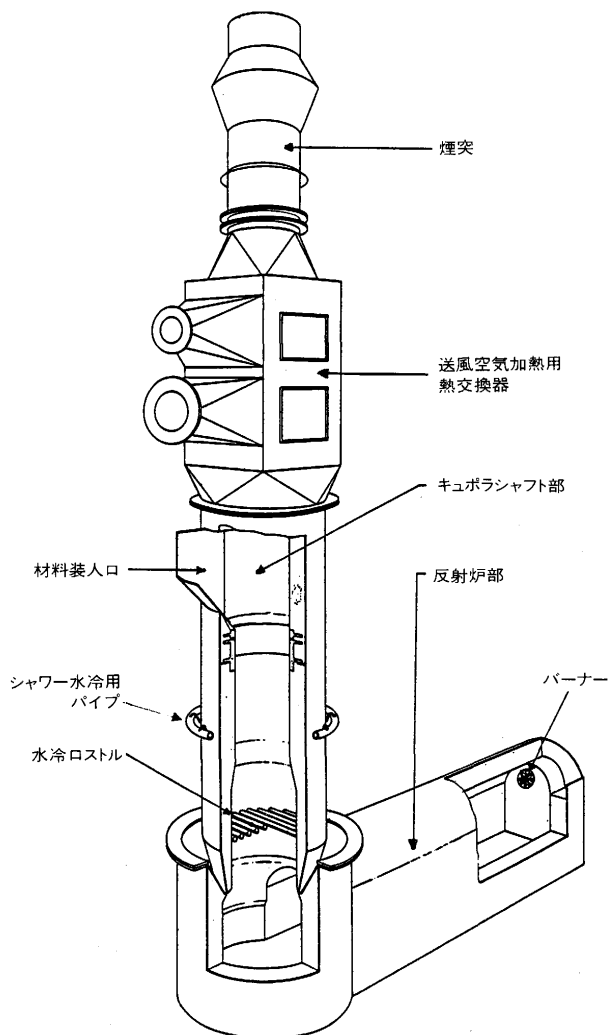


図13 コークスを使用しないキュボラの構造(II)⁸²⁾
(ドイツBardenheuer氏の設計したCupola2000)

する位置にバーナーを設け、通常は熱効率を最高にするという観点から出湯温度を低く(1300~1350℃程度)押え、誘導加熱する前炉を置いている。Cupola2000はシャフト底部側方に反射炉部を設け、その先端にバーナーを取り付け、反射炉部で溶湯の昇温保持を行っている。炭素、珪素など含有成分の調整はロストルと炉底との中間の位置で炭素材や合金鉄を吹込むか、前炉や反射炉部で添加して行う。燃料は天然ガスで溶湯1t当り50~70m³程度、筆者が採取分析したCokeless cupolaのスラグ成分の1例はSiO₂41.3、CaO22.6、Fe₂O₃16.8、Al₂O₃16.0、MgO4.0(炉のライニング材はAl₂O₃70、SiO₂30%)であった。

3・5 回転溶解炉 (Rotary Furnace)

キュボラのようなシャフト炉ではないが、近年主にヨーロッパの中小の鋳物工場で回転溶解炉の使用が急速に伸びて来た。この型式の炉は20世紀初期イギリスやドイツで用いられ⁸⁴⁾、1970年頃わが国へもドイツFulmina社のものが輸入されたが⁸⁵⁾、高温の溶湯を得難い、ライニングの損耗が大きい、燃料や送風空気中に含まれる硫黄や窒素がSO_xやNO_xを生じ環境を悪化させる、溶湯材質が劣化し鑄造欠陥を生じ易いなどの理由であり普及しなかった。

最近空気の代りに酸素を使って溶湯温度の高温化と環境改善に配慮を加え、ライニング材とその施行処理技術を工夫して長期使用に耐えるようにし、さらに操業を完全に自動化するなど幾多の改良を施したものが、主にイタリアSOGEMI社とフランスAir Liquide社で協同開発され注目されるようになった⁸⁶⁾⁸⁷⁾。

炉の構造と炉体断面の例を図14⁸⁸⁾と図15⁸⁷⁾に示した。炉体は両端にコニカル部を持つ円筒形で、一端はバーナー取付口で操業終了時にはこゝからスラグを除去する。他端は材料装入口で操炉時は排ガスを煙突へ導く通路となる。材料装入や除滓は一般に炉体を傾斜して行うが、水平のまゝで材料を押込む型式もある。

材料装入後炉体を水平に保ち装入口を煙突と結び、他端にバーナーを取付け燃焼を開始し、炉体を円筒軸を中心に回転させながら地金の予熱・溶解・過熱・保持などを行う。出湯は予め耐火粘土で閉栓してある出湯口を開いて行ない、炉内溶湯がすくなくなるにつれて炉を傾斜させ、最後に残留するスラグをすべてバーナー口から除去する。バーナーは三重構造で中央から燃料ガス、その外側を酸素、最外周に水を流して冷却する。純酸素を用いるので火炎温度は約2850℃(空気燃焼の場合約1900℃)と高温が得られ、燃焼ガス量およびNO_xやSO_x排出量が極めてすくない。炉壁耐火物は一般にSiO₂-Al₂O₃系酸性ラミング材を用い焼成処理により表層をセラミック化(ceramisation)しており、円筒部は500回以上、コニカル部は25~50回連続使用が可能という。操炉中酸素と燃料ガスの配合比($\frac{O_2}{燃料} \times 100$)を195~220位の間で変化させ燃焼状態を制御し、火炎長さ、雰囲気

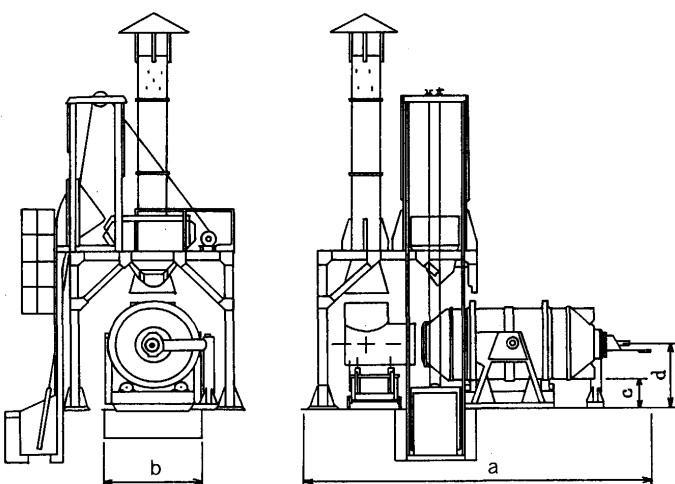
4 おわりに一スクラップ再生への対応

近年鋼材スクラップは増加の一途をたどり、その回収処理が問題視され、鉄鋼各社で構成する新製鋼プロセスフォーラムでもスクラップ再生利用を目的とする技術開発に着手していると聞く。

鋼材は最近ユーザーのニーズに答え機械的性質、耐候性、切削性など諸性質を向上させるため第3元素を含むものが次第に増加し、スクラップ再生の際これら第3元素の除去処理が検討されている。

キューボラは装入地金が炉外に流出するまでの所謂炉内滞留時間は約30分で、その大部分が固体状態でCOとCO₂を含む高温域を下降する間に費やされ、こゝで地金成分の酸化が進行する^{89)~91)}。このことは含有成分の酸化損失や溶湯中への固体珪酸などの混入懸濁など溶湯性状に関係してくるが、鋼材に含まれる亜鉛や鉛を酸化除去する作用もあり、この点がスクラップ再生処理炉として検討に値しよう。例えば鉛快削鋼を原料地金に配合した場合溶湯中への鉛の残留歩留りは高周波誘導電気炉40~50%に対しキューボラは約10%で、原料地金に快削鋼を配合してもスラグの鉛含有量はほとんど変化していないが、排ガスは多量のPbO₂を含んでいたと報告されている⁹²⁾。また3-5に述べたように燃焼状態と雰囲気ガスの成分を可成り自由に制御しうる回転炉も微量元素除去に有効なことが推定出来る。

近年ドイツMercedes Benz社はオーストリーVÖEST-Alpine Stahl社と共同で図16⁹³⁾に示す中古車回収プラント



容量 t	各部寸法, mm			
	a	b	c	d
1	6500	1400	900	1600
2	6800	1600	800	1600
3	7800	1740	730	1600
5	9400	1950	700	1675
8	9800	2060	650	1680

図14 スkip式装入装置を持った回転炉の構造例⁸⁸⁾

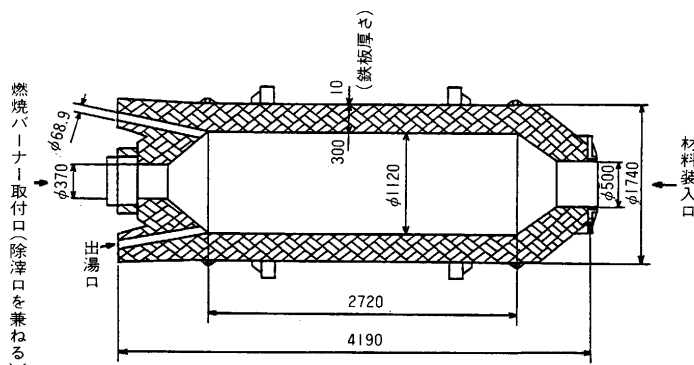


図15 回転炉 (容量3 t) の構造例⁸⁷⁾

酸化還元の度合、温度などを調整する($2\text{O}_2 + \text{CH}_4 = \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ が平衡する場合 $\text{O}_2 : \text{CH}_4 = 2 : 1$ すなわち配合比200)。ガス消費量は1450℃の出湯で溶湯1 t当りメタン60m³、酸素120m³程度である。酸性ライニングで造滓剤として少量の珪砂と石炭石を配合した場合生成するスラグはSiO₂68.5、FeO15.8、MnO7.5、Al₂O₃5.0、CaO0.5%程度で、溶湯の成分減耗量はC7~10、Si15~20、Mn30~35%とやゝ大きい⁸⁸⁾。

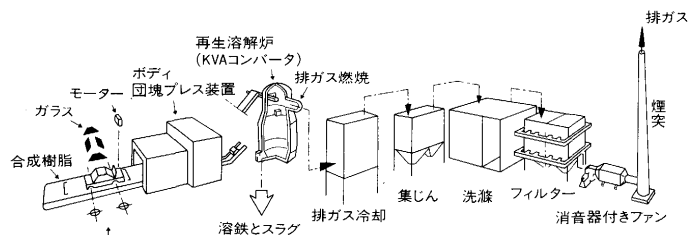


図16 Mercedes Benz社とVÖEST-Alpine Stahl社による鋼材スクラップ再生プラント⁹³⁾

の計画を提示し⁹³⁾、溶解炉としては炉径3 m余の大型ガスキューボラも検討しているという。またスイスのGeorge Fischer社はドイツのキューボラメーカーGHW社と協同で、キューボラ排ガス中のばいじんを羽口から再び炉内へ圧縮空気を送り込むベンチュリー式装置を開発し、排ガスに含まれるZnOを濃化回収する事を計画している⁹⁴⁾。

こゝに述べたキューボラでの鉄溶解の機構および構造や操業技術における進歩の経緯と概要がスクラップ回収処理炉の開発など鉄鋼界の今後にお役に立てば幸である。

文 献

- 1) 石野 亨：鑄造技術の源流と歴史、(1977)、p.94〔産業技術センター〕
- 2) 大橋周治：幕末明治製鉄論、(1991)、p.1〔アグネ〕
- 3) 石野 亨：鑄物の文化史、(1986)、p.50〔小峰書店〕
- 4) K.Sipp : Stahl u.Eisen, **40** (1920)、p.1141
- 5) K.Emmel : Stahl u.Eisen, **45** (1925)、p.1466
- 6) 石川登喜治：機械学会誌、**22** (1919)、p.39
- 7) 堀切政康：大阪工業試験所報告、**7** (1927)、p.16
- 8) 石川 薫：日本金属学会誌、**4** (1940)、p.418
- 9) A.F.Meehan : Iron Age, **117** (1926)、p.1559
- 10) 草川隆次：鑄物、**20** (1948) 7~8、p.13
- 11) 佐藤忠雄、堀川一夫：鉄と鋼、**35** (1949)、p.373
- 12) 木下禾大、小田原章男、木下勝行：鉄と鋼、**37** (1951)、p.461
- 13) 「高速溶解誘導炉の開発」調査研究報告書(銑鉄鑄物溶解実態調査委員会編)、(1986)、p.25
- 14) 石野 亨：キュボラ、(1985)、p.13〔新日本鑄鍛造協会〕
- 15) 鑄物工場エネルギー原単位調査及び熱精算試験(早稲田大学理工学研究所編)、(1975)、p.58、p.73〔総合鑄物センター〕
- 16) 「キュボラ」標準寸法及標準操業法(日本学術振興会第24小委員会編)、(1940)
- 17) キュボラ標準寸法並に標準溶解操業法(日本鑄物協会標準キュボラ委員会編)、(1949・12)
- 18) キュボラブック(日本鑄物協会編)、(1957)、p.16〔丸善〕
- 19) E.Piowarsky and K.Krämer : Giesserei Tech. Wiss. Beih., **1** (1948)、p.3
- 20) 堀部富雄、峰村茂樹、高木通介、中西国男、石野 亨：鑄物、**41** (1969)、p.959
- 21) E.L.W.Löffelcke : Foundry Trade J., **101** (1956)、p.659
- 22) W.J.Hayburn : British Foundryman, **69** (1976)、p.290
- 23) AFS : The Cupola and its operation、(1954)、p.139
- 24) 齊藤義身：鑄物、**20** (1948)、9~10、p.15
- 25) 名古屋植佑：鑄物、**20** (1948)、9~10、p.16
- 26) AFS : Cupola Handbook 4th Edition、(1975)、p.48
- 27) 石野 亨：国際鑄物会議とヨーロッパの鑄物工場視察報告、(1963・11)、p.31〔近畿大学理工学部金属工学教室〕
- 28) 中江秀雄、加藤栄一、加山延太郎：鑄物、**41** (1969)、p.943
- 29) 加山延太郎、石野 亨、齊藤和夫：鑄物、**29** (1957)、p.757
- 30) D.E.Krause : AFA Trans., **58** (1950)、p.111
- 31) 佐久間 嵩、園田清一：鑄物、**31** (1959)、p.589
- 32) 阿部喜佐男、齊藤親徳：鑄物、**32** (1960)、p.402
- 33) 石野 亨：キュボラ、(1985)、p.110〔新日本鑄鍛造協会〕
- 34) 新版キュボラハンドブック(日本鑄物協会編)、(1968)、p.282〔丸善〕
- 35) 長谷川啓治、山内健敏、岡野伸二、中江秀雄：鑄物第90回全国講演大会概要号、(1976・10)、p.32
- 36) 本多茂男、齊藤克己：鑄物、**21** (1949) 4、p.19
- 37) E.E.Langner, R.Carson, J.A.Hamilton and W.J.Krepplin : AFS Trans., **74** (1966)、p.150
- 38) H.J.Leyshon and R.B.Coates : BCIRA J., **10** (1962)、p.28
- 39) H.C.Rolseth : AFS Trans., **84** (1976)、p.295
- 40) S.N.Waldron and A.C.Wardell : British Foundryman, **71** (1978) 10、p.25
- 41) 小林勝宏、高野五郎、藤田幸男、津田昌利：鑄物、**43** (1971)、p.880
- 42) 石野 亨：Preprint of BCIRA International Conference No.10、(1990・3)、p.7
- 43) L.Höehle : Preprint of BCIRA International Conference No.2、(1990・3)、p.2
- 44) 日本鑄物協会鑄鉄部会キュボラ分科会：鑄物**32** (1960)、p.595
- 45) 中原 衛、沖原洋二：クボタ技報、**2** (1977) 1、p.85
- 46) 堀川一男、寺村英雄：鑄物、**20** (1948) 9~10、p.11
- 47) 研究委員会：鑄物、**20** (1948) 7~8、p.23
- 48) H.J.Leyshon and M.J.Selby : British Foundryman, **65** (1972) 2、p.43
- 49) A.Dahlmann and K.Orths : Giessereiforschung, **22** (1970)、p.1
- 50) J.Bakker and A.Bordes : Preprint of 40th IFC (Moscow-1973・9) No.17
- 51) H.J.Heine : Foundry, **103** (1975) 6、p.27
- 52) 末次健男、辰野正照、勝田利信、近藤 博、山口 忍：鑄物第88回全国講演大会概要号(1975・10) p.49
- 53) 石野 亨、米田博幸、村田悦夫：日本鑄物協会関西支部昭和50年秋季大会講演概要、(1975・11)、p.59
- 54) 松田政夫、西岡弘雄、板野直己：鑄物、**51** (1979)、p.475
- 55) S.H.Chrobok : Engineer and Foundryman, (1957) 10、p.48
- 56) R.E.Dixon : Foundry, (1958) 5、p.218
- 57) A.Rexroth : Giesserei, **45** (1958)、p.417
- 58) 山崎勝也、井上富彦、稲垣清明：鑄物第104回全国講演大会概要号、(1983・9)、p.65
- 59) 齊藤和夫、広田広司、市村恒人、川野 豊、井ノ山直哉：鑄物第105回全国講演大会概要号、(1984・5)、p.77
- 60) 石野 亨：キュボラ、(1985)、p.129〔新日本鑄鍛造協会〕
- 61) 柿坂昭則、楠木皓祐、門脇広一郎：鑄物、**61** (1989)、p.443
- 62) H.Jungbluth and K.Stockkamp : Foundry Trade J., **99** (1955)、p.377
- 63) 福田 達、服部 寿：素形材、**28** (1987) 7、p.7
- 64) H.Reuter and P.Haensel : Giesserei, **71** (1984)、p.809
- 65) G.Bauch and P.W.Bardenheuer : Giesserei, **78** (1991)、p.408
- 66) 石野 亨：鑄鍛造と熱処理、**44** (1991) 11、p.7
- 67) 稲葉次紀、渋谷正豊：電気学会誌、**107** (1987)、p.1019
- 68) H.J.Heine : Foundry, **114** (1986) 3、p.28
- 69) S.V.Dighe, W.H.Provis, B.A.Buczkowski, W.J.Peck and A.D.Kerp : AFS Trans., **94** (1986)、p.323
- 70) D.R.Kanicki : Modern Casting, **79** (1984) 12、p.21
- 71) S.Katz : Preprint of BCIRA International Conference No.1、(1990・3)、p.5
- 72) B.Million-Rousseau and P.Brelaud : Preprint of BCIRA International Conference No.4、(1990・3)、p.9
- 73) B.Stoughton : AFS Trans., **24** (1915)、p.525
- 74) H.D.Rycker : Modern Casting, **56** (1969) 12、p.63
- 75) G.Ulmer : Fonderie, (1966) 245、p.417
- 76) L.M.Marienbakh : Foundry Trade J., **121** (1966)、p.579
- 77) 石野 亨：JACT NEWS、(1973) 203、p.892
- 78) 石野 亨：鑄鍛造と熱処理、**44** (1991) 7、p.4
- 79) イギリス ヘイズ・シエルキャスト・リミテッド：日本特許第0853416号(昭51-29481、1976・8・26公告)
- 80) R.T.Taft : Preprint of 53rd World Foundry Congress、(1986) 25
- 81) R.T.Taft, J.Hendriks : Preprint of BCIRA International Conference No.6、(1990)
- 82) P.W.Bardenheuer : Giesserei **74** (1987)、p.493
- 83) P.W.Bardenheuer : Preprint of BCIRA International Conference No.5、(1990・3)
- 84) W.J.Roscow : British Foundryman, **64** (1971)、p.41
- 85) 石野 亨：日本鑄物協会関西支部例会資料、(1971・11)
- 86) F.Cavalleri, G.Tosi and A.Pedaci : Exchange paper of 58th WFC No.8、(1991・9)
- 87) J.Arriaran, L.Cobos and J.R.Guridi : Exchange paper of 58th WFC No.9、(1991・9)
- 88) 石野 亨：鑄物、**64** (1992)、p.811
- 89) H.W.Lowrie : AFS Annual meeting preprint、(1952) 52
- 90) 加山延太郎：鑄鉄溶湯の酸化が鑄物に及ぼす影響、(1956)、p.20〔松原書店〕
- 91) 石野 亨、宮沢信夫、村田悦夫：J.Osaka Institute of Science & Technology (Kinki Univ.)、**8** (1958) 2、p.13
- 92) 坂元哲夫、佐藤万企夫：日本鑄物協会研究報告、**47** (1987・10)、p.19
- 93) H.G.Rachner : Giesserei, **78** (1991)、p.574
- 94) H.Günther : Giesserei, **77** (1990)、p.586