

## 年間展望 「キュポラ (第 49 報)」

(Giesserei 100 05/2013 Thomas Enzenbach, Viersen)

岡部 隆

## 一 般

第 4 回国際キュポラ会議は 2012 年 6 月 14~15 日ドレスデンにおいて開催された。16 カ国からおおよそ 220 名の専門家がエルベの首都に集まった。[1] 主催者は BDG、VDG、及び CTIF である。基調講演はザクセンの歴史、特に工業と手工業の発展を考慮に入れて行われた。テーマごとに次の 5 つの分野に分かれ、21 の講演が行われた:①原材料及びエネルギー源、②エネルギー効率及び環境保護、③溶解及び冶金学、④溶解保持、⑤コスト削減及び経済性。興味深い各講演に対し参加者は積極的な反応を示した。

D.B.Sun[2]の発表では 1950 年代から今日までの中華人民共和国におけるキュポラ溶解技術の発展が実例を挙げて紹介された。第一自動車工業(FAW)は 1953 年に創業し、旧来型の冷風キュポラによる生産を開始した。これはソ連から輸入したものだった。装入材料の性質の変動に対する対策として、中国の人たちはいろいろな改造をキュポラに施し、独自の管理方法を試みた。図 1 は例として狭い羽口面を持つキュポラ(slim-bosh cupola)を示す。特徴的なことは、古典的なパイプ状のものとは異なる炉内形状である。この形は今日でも再び用いられている。炉外壁の冷却は空気により行われ、この空気は温風となって炉に送入されるが、この形状は長時間操業には適さないだろう。各種の試みは一時的には成果をもたらしたが、状況を継続的に改善するものではなかった。1983 年に FAW は日本式構造の近代的なキュポラを導入し操業を始めた。(図 2) フローチャートを観察すると、当時としては全く近代的な設備であると言える。中国における鑄造産業の急速な発展で、その当時は近代的だった設備もいまや 30 年にわたる操業の末に性能的にはその限界に達している。本年、古い設備に代わって新しくドイツから輸入したキュポラ溶解設備による操業を開始した。

G.Tihon[3]はキュポラの構造が根本的に変化したことを確かめている。その起源から前世紀までは排ガス処理や制御装置なしの単純なシャフト炉が主流であった。今日では完全に近代的に整備されたキュポラ溶解設備により、リサイクル材を大量に使用して高品質の溶湯から複雑な鑄物製品を製造している。環境保護法による制約はますます厳しくなったが、完全な対策により規制値を大きく下回る設備が用いられている。この報告では効率の向上をもたらした設備と対策について広範囲にまとめて述べている。また代替燃料の利用、廃棄物のリサイクルについても述べている。さらにコークレスキュポラについても概述している。操業条件を調整して比較的低い温度で炭素量の少ない溶湯が作られているが、そのため炉内で不規則に溶湯の凝固が発生する恐れのあることが追記されている。

S.Franke[4]は非常に興味ある発見を行った。ザクセン州立図書館での調査中に偶然に 16 の短い手書きの営業用帳簿が発見され、そこには 1879 年から 1891 年までのキュポラの記録が残されていた。そこにキュポラの配合についての日々の記録があった。図 3 に示す表では必要な材料の量及び日々の生産量について書き込まれている。この記録から興味ある推論が導かれたことを説明している。1891 年からの抜粋では日々の溶解量は 20~30 トンを示している。コークス配合量はぎりぎり 10%以下である。メタ

ル材料の配合は銑鉄、戻り材、鉄スクラップからなる。最後に著者は 110 年後の未来に果たして今度は我々の現代の記録が同じ様に偶然に発見されるであろうかと疑問を呈している。レポーター(筆者)の見解では、我々の先祖の記録は現在のそれよりも遙かに継続的なものであったと認めざるを得ない。なぜなら今日のデータバンクシステムでは時折独断的にデータを破棄する傾向があるからである。

## 環境保護と廃棄物利用

G.Schneeberger, J.Antrekowitsch[5]は鑄造産業及び鉄鋼産業から発生する粉塵について広範囲な調査を行った。まず EU の鉄鋼産業からは毎年約 2,800 万トンの廃棄物が産出されていることが確認された。粉塵に関する詳細な調査が環境保護に対し重要な貢献をなし得ることは明らかである。粉塵についての正しい知識を持つことが適切なリサイクル処理方法の開発にとって基本的な前提となる。コンバータ(BOF)、アーク炉(EAF)及びキュポラからの粉塵について調査を行い、重要な相違のあることが確認された。キュポラからの粉塵の軟化点は 1305°C で、これは EAF 粉塵の 1096°C と BOF 粉塵の 1615°C の中間にある。キュポラからの粉塵の最大粒子径は 100~200 $\mu\text{m}$  で、一方 1 $\mu\text{m}$  以下の微粉の量もきわめて多い。残念ながらどのような構造のキュポラから出た粉塵なのかは説明されていない。しかし炉頂ガス燃焼なしの冷風キュポラから発生する粉塵が重要であると推測される。

S.Fedorko ら[6]の取組は粉塵のリサイクルのための予備調査に関するものである。冷風キュポラ、熱風キュポラ及びアーク炉からの粉塵について調査を行った。目標は回収した粉塵から適切なペレットやブリケットを製造することである。粉塵ペレットを製造する試みの中で各種のバインダーが使用された。論文にはそれらの内容が述べられている。熱風キュポラからの粉塵でブリケットを作成する際のバインダーとしてはベントナイトが最適だった。

フランス、Bayard sur Marne にある鑄造工場 Saint Gobain PAM では乾式ガスクリーニング設備を用いた熱風キュポラによる操業を行っている。R.Lecroart[7]はキュポラ排ガス中のダイオキシン及びフランの含有量 (I-TEQ 値で表した) を低下させるための設備とこれを用いた結果について報告している。最初は限界値を十分に下げることが出来なかったが、続いての試みでこれを大きく下げることが出来た。また設備投資額と操業コストについても報告している。前者は 100,000 ユーロ、後者は 20,000 ユーロ/年だった。

T.Mandet[8]は、フランス、Dompierre sur Besbre にある PSA プジョー・シトロエンの鑄造工場における溶解操業でのエネルギー節減方法について実施例を挙げて、どのような可能性があるか、実施の結果はどうだったのかを述べている。キュポラ溶解の廃熱の一部が加熱目的で利用されている。サーマルオイル循環システムに廃熱のエネルギーが加えられ、サーマルオイル-水-熱交換器の組み合わせが形成される。周波数制御を用いることで送風機、排風機等に用いられる電気エネルギーが大きく節減できる。

J.Würz ら[9,10]はキュポラ炉頂ガスに含まれる廃熱の利用について取り組んでいる。まずここで利用可能な熱量について調べている。乾式ガスクリーニング装置で置換された熱量を図 4 に示す。炉頂ガスに含まれる総熱量及び利用可能な廃熱に対し示されている数値の大きさは、レポーター(筆者)の見解では幾分高すぎと思われる。調べた結果、他の計算の結果では少し低い値(約 15%少ない)を示すことが確認出来た。コークス価格の高騰で熱効率の向上を図ることは必須であるが、これは廃熱の有効利用が受け持つことになる。廃熱利用を考慮する中で、廃熱エネルギーで送風を加熱することが有効であることは明らかである。また一方電力の生成に回すことで設備の償却期間が延長できる。

J.Adam ら[11,12]は Zündstrahlmotor (噴流式エンジン) にガス燃焼による電力生成のために湿式クリーニング装置の炉頂ガスを利用することが有効であることを報告している。図5にガスエンジンを用いてガス経済向上のために設計されたシステムを示す。低カロリーの炉頂ガスによる操業の場合の適切なエンジン技術が開発され、テストが行われた。HKM 社の敷地の中で行われた BFI テスト基準による操業試験では、使用されたガスエンジンが低熱量で組成が変動する炉頂ガスを効率的に処理できることが示された。こうして湿式ガスクリーニングを用いる溶解装置で炉頂ガスに含まれる廃熱を利用することが出来る新しいチャンスを生むことになった。しかし得られた値をより正確に検討したところ、テストに使用されたガス混合物はキュポラの炉頂ガスの代表的組成を持つものではないことが明らかとなり、特に  $2.5\text{MJ}/\text{m}^3.\text{i.N.}$ 以上という発熱量は実際的なものではない。この値は  $2.0\sim 2.5\text{MJ}/\text{m}^3.\text{i.N.}$ の間にあり、しばしばこれを下回ることもある。するとガスエンジンがなお効率的であるか否かという疑問も生じる。CO<sub>2</sub> 排出の削減を計算しようとする、出口条件が正しく定義されていない。炉頂ガス量は  $1000\text{m}^3.\text{i.N./ton iron}$  に達せず、 $500\sim 600\text{m}^3.\text{i.N./ton iron}$  である。酸素の吹き込みにより操業を最適化することで、ガス量は減り、炉頂ガスの熱容量も減少する。

Singen の Georg Fischer Automotive(Htwl.)と Nestle Deutschland(Maggi)が共同で行った熱移動及び上記生成による廃熱利用プロジェクトについて二つの報告がなされた。R.Greibig[13]と F.Bettinger, M.Kenzler[14]はこのプロジェクトの実施経過とその到達結果について報告している。余った熱の放出により、環境保護に対する大きな貢献がなされることになった。この内容についてはすでに幾度か報告されているのでここでは省略する。

## 装入材料

R.Deike[15]は原材料の国際市場における展開について述べている。鉄鋳物産業への原材料の供給が取り上げられている。このテーマは以前から関心を持たれている。それは製造コストへの影響が大きいからである。各種の図表を用いて鉄鋼産業での変遷及び原材料価格の変遷について解説している。原材料の供給は鉄鋼産業の状況に依存するが、中国の鉄鋼産業の大きな成長によって原材料市場は需要側との釣り合いが取れないようになってきている。最後に原材料コストの節減の可能性について論じている。

CTIF により昨年フランスの鋳造工場で使用された鉄スクラップの傾向が追求された。J.B.Virolle, P.Gordinot[16]はその結果を報告しているが、それは他の工業国にも当てはまるものである。フランスの鋳造工場で発生した鉄スクラップの 15%が処理され、残りは鉄鋼産業に回されている。鉄鋼品質の向上のためにその組成が新しく変化しており、これが必然的にスクラップの成分に影響を及ぼす。どのような合金元素が将来、含有量を増すのか、あるいは減ずるのか、そしてそれはどのような効果をもたらすのかについて述べている。さらに鋳鉄屑の価格が過度に上昇することで、冷風キュポラの存在エリアが縮小することを確認している。

OxyCup プロセスによって製鉄所で発生する鉄含有廃棄物が溶銑に変えられる。この場合の溶解装置にはシャフト炉が有効であり、これはとりもなおさずキュポラが適しているということである。酸化鉄の粉塵(廃棄物)とコークスブリーズを混合し自己還元性のストーン(塊状物)に圧縮し、投入する。M.Lemperle ら[17]はこの廃棄物のリサイクルのための開発されたプロセスについて詳述し、Duisburg にある Thyssen-Krupp-Stahl(TKS)におけるその成功例について解説している。

金属装入材料のコストが高騰していることを考慮すれば、この廃棄物から製造された自己還元型のス

トーンは十分その代替物となり得るものであり、これはキュポラ内で銑鉄を生み出すことがわかった。M.Lemperle, H.J.Rachner[18]はまずストーンの製造について概説し、次にキュポラ内で酸化鉄の還元がどのように行われるかについて述べている。またキュポラにおける材料内での変化、熱バランスの変化を述べ、その際どれほどの経済的効果が期待できるかについて説明している。さらに M.Lemperle[19]はこのテーマに対する問題を詳細に解明している。

H.Huang ら[20]はキュポラ溶解におけるコークスの代替をテーマにしている。廃棄物として産出した無煙炭の微粉が Si 含有材料とともにブリケット化され、熱処理を施し、キュポラに投入、そのキュポラ内での降下のさいの加熱過程をシミュレートしている。コークスの代替物の役目を果たす SiC がどのような条件下で生成されるのかについて述べている。

キュポラ用のコークスの生産量が縮小され、またその価格が高騰し、他方 CO<sub>2</sub> 排出の削減が要求される状況で、キュポラ溶解における装入材料としての代替エネルギー源の調査プロジェクトがスタートした。H.Löblich ら[21~23] は実施された試験及びこれまでに得られた結果について報告している。キュポラへの装入燃料としては高炉コークス、コークスブリーズブリケットまたカーボンを含む粉塵などがあげられる。高品質のコークスの代わりにこれらの材料を投入するにはそれぞれの性状に応じて限界があり、これを十分に考慮して使用する必要がある。たとえば、コークスブリーズブリケットはコークスの30%までなら代替することが出来ることが証明された。本プロジェクトの中では CO<sub>2</sub> ニュートラルな装入燃料の開発にも取り組んでいる。この材料はかなりの量を熱技術的、冶金的な不都合をもたらさずに利用できる。バイオマスからはいわゆる炭化物(karbonisate)が製造される。図6はこの目的で将来大量に製造されるべき建設中の回転ドラム式反応器を示す。この試験は未だ完了しておらず、さらなる報告が期待される。

Weilbach の Linde 社の鑄造工場では 12~14t/h の冷風キュポラで操業を行っている。炉頂ガスは燃焼室で燃焼され、最後にフィルター入口温度まで冷却される。G.Dell[24]はオリジナルの装置について解説し、これに対し実行された対策について記述している。従来のコークスの性状が変動し、その生産量も縮小されている現状に対する対策として、石油コークスで部分的代替を行う試験を行った。その可能性については以前から知られていた。レポーター（筆者）自身も 1990 年代にそのようなテストを行ったことがある。当然のことながら最近コークス代替に対する関心は高まっている。本報告ではテストの経過及びその結果について述べられ、期待通りにコークス装入量を削減することが出来、コスト面での利点もたらされたことを確認している。

## 溶解プロセス及び冶金学

エネルギー源の過度の価格上昇に対する対策や CO<sub>2</sub> 排出の削減の必要性に迫られて、エネルギー節減の可能性を探索する調査が強力に推し進められた。H.J.Rachner, M.Lemperle[25]はキュポラ溶解プロセスの中でこの問題に対する対策の可能性を探索している。そのためまずエネルギー効率に対する因子の影響の大きさについて論じた。さらにこれらの因子がどのような影響を及ぼし、またいかなる方法で望まれる改善が達成できるのかを明らかにしている。送風の乾燥の影響は当然大きく評価されている。しかし中欧での気象条件下ではこれはそれほど重要ではない。羽口から炉内に吹き込まれる送風の配分はしばしば羽口間で均一ではないことが分かっているが、たいていの場合この問題は認識されていない。それは個々の羽口への送風の測定が行われていないからである。F.Wondra[26]はこの問題を扱っている。

報告の中で、まず不均一な送風配分の原因とその影響について述べている。そこで送風配分の調査試験方法を解説し、その一例として、羽口のパイプの測定で送風の配分の不均一性が確認されるとしている。そして羽口中に測定用のオリフィスを挿入することで調整が可能であるとし、再度の測定でこのことが確認できた。

W.Longa[27]はキュボラ内での炭酸ガスの還元(Boudouard 反応)の影響の大きさについて取り扱っている。これに関して計算を行い、その結果の評価が記述されている。

H.Kadelka, S.Schemberg[28.29]はコークスの消費量及び炉頂ガス量を減少させる目的で、各種のテストと装置の改造を行いその結果を報告している。これらはKarlstadtのDüker社の鋳物工場で行われた。炉頂ガス吸引のシステムが独自のものなので、炉頂ガスを大幅に減少させることが要求されている。装置改造は二段階で実施された。まずいわゆるTDIシステムが導入された。ここでは一部の送風がインジェクターノズルで吸引され、酸素と混合され、酸素含有量30~50%の空気-酸素混合ガスが形成される。これを高速(140~240m/s)で炉内に吹き込む。ここまでですでにコークス消費量と炉頂ガス量の削減が達成できる。第二のステップではいわゆるHEFシステム(高効率炉)が導入された。ここでは炉頂ガスの一部がインジェクターノズルで吸引される。ここで酸素量がさらに高められ、コークス装入量がさらに節減される。多量の酸素量とより少ないコークス量により送風量と炉頂ガス量が明らかに削減される。

O.Frielingsdorf, W.Breidenbach[30]はKupoloptプロジェクトとその操業経験について報告している。これは過去6年間にザールラントの鋳造工場で実施された結果をまとめたものである。このプロジェクトは1992年に立ち上げられた。天然ガス-酸素混合ガスを羽口から吹き込むことでコークス代替を達成させようとするものである。その上これによって吹き込まれる粉塵のスラグ化が容易となる。プロジェクトは2001年から2005年まで各地の鋳造工場で実施され、ザールラントの鋳造工場でのテストは順調に推移し、現在もこの操業は稼働中である。

中国のある鋳造工場ではLkwブレーキシステム用の球状黒鉛鋳鉄(GJS)の製造テストが行われた。

X.Peng[31]はキュボラ溶解で元湯を溶製したことを報告している。操業の中で達成された製品の化学組成及び機械的性質は当該部品の中国の規格をクリアするものであった。

バーミキュラー黒鉛鋳鉄の製造のためキュボラでその元湯を溶解した(O.Bouskaら[32])。Brno(チェコ共和国)のHeunisch社鋳造工場でテストが行われ、成功したことが述べられている。

全鋳鉄材料中の球状黒鉛鋳鉄(GJS)生産量の生産割合は常に変動するので、これまで主に片状黒鉛鋳鉄(GJL)を製造してきた鋳造工場ではGJSの生産には多くの要求項目がある。このときこの両方の素材用の元湯をキュボラで溶解することがしばしば必要となる。ここで異なる組成の装入材料に関連する問題が生ずる[33.34]。C-Siダイアグラム(図7)中の装入材料と鋳物材料の位置はこれらの関係を明示する。GJLについてはこれらの材料はほぼ直線上に並んでいるが、GJSの場合その領域は三角形を形成している。これによってGJLのための元湯は冷風キュボラで装入材料を単純に再溶解することで製造できるが、これはGJSの場合当てはまらない。さらに多くの図表を用いてどのような状況下で望みの組成の調整に成功するか、またどのような補助手段が利用できるかを示している。

J.Zhouら[35]はキュボラの炉内反応を表す数式モデルを紹介している。目標は溶解された鉄の化学組成の推定である。モデルをテストするために行った溶解試験により、実際の操業条件下でのこのモデルの適性が示された。

日本のアイシン高丘の鋳造工場ではコークレスキュボラが開発され、設置された。その溶解プロセス

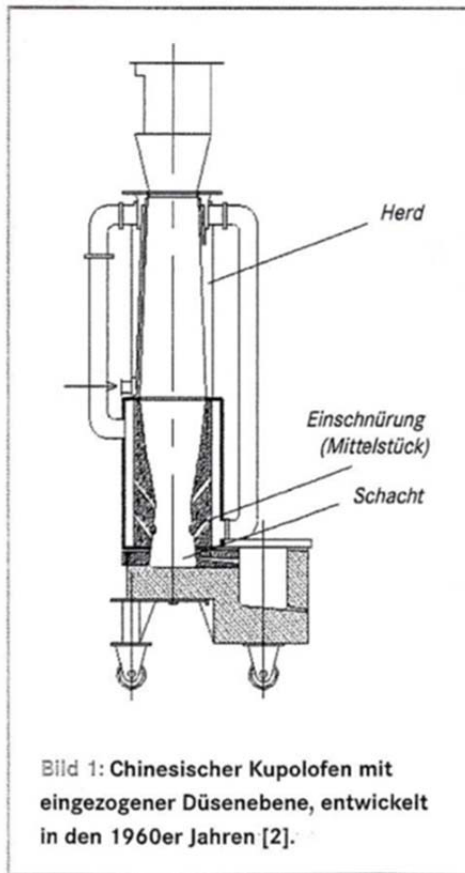
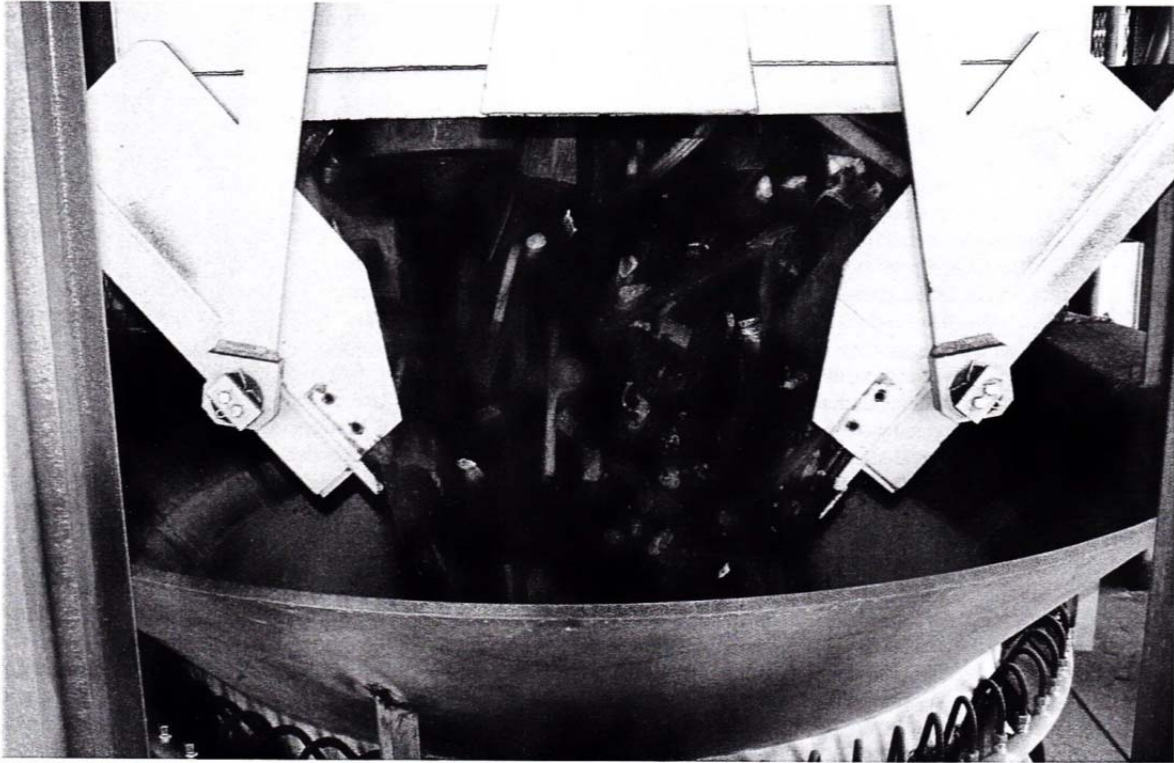
をデジタルシミュレーションにより最適化することが試みられた。O.Starykovら[36]はその実施結果について述べている。図解された炉の形は、この国で一般にあるような構造のものではない。すなわちキュポラ胴体鉄皮に水冷パイプがない。しかしこの炉が適切に運転されていることが明確に示されている。テストと計算の結果は、デジタルシミュレーションがコークレスキュポラでの溶解プロセスの最適化に適していることを示した。その結果からより大きなキュポラの設置とそれによる生産が計画されている。

回転炉について、インドの K.Singh, P. Kumar[37]、R.K.Jain[38,39]、R.K.Jain, D.K.Chaturvedi[40]、R.K.Jain, R.Singh[41]らによる5つの報告がある。バイオ燃料で加熱する回転炉の操業の最適化が重要な目標である。計算の結果は実験で報告されたデータと比較され、計算方法の基本的適合性が確認された。この研究の目的は要求された性能を保証すると同時に燃料使用量を最適化することである。

## 文献紹介

- [1] Giesserei 99 (2012) Nr. 7, S. 8.
- [2] 4th International Cupola Conference. 14. und 15. Juni 2012, Dresden, Vortrag 3-2.
- [3] Fonderie (2010) Nr. 9, S. 21-35.
- [4] Giesserei-Praxis (2011) Nr. 12, S. 587-591.
- [5] Schriftenr. d. GDMB Nr. 125. GDMB Medienverlag, Clausthal-Zellerfeld 2011, S. 21-29.
- [6] Metallurgy 51 (2012) Nr. 1, S. 63-66.
- [7] 4th International Cupola Conference. 14. und 15. Juni 2012, Dresden, Vortrag 2-5.
- [8] 4th International Cupola Conference. 14. und 15. Juni 2012, Dresden, Vortrag 2-1.
- [9] 4th International Cupola Conference. 14. und 15. Juni 2012, Dresden, Vortrag 2-2.
- [10] Giesserei 100 (2013) Nr. 3, S. 76-80.
- [11] 4th International Cupola Conference. 14. und 15. Juni 2012, Dresden, Vortrag 2-3.
- [12] EECRSteel, International Conference on Energy Efficiency and CO2 Reduction in the Steel Industry, 1, METEC, METEC In SteelCon, 2011, Vortrag 1-6.
- [13] 4th International Cupola Conference. 14. und 15. Juni 2012, Dresden, Vortrag 2-4.
- [14] VDMA-Fachtagung: Energieeffizienz in Gießereien. 11. und 12. März 2010, Frankfurt am Main.
- [15] 4th International Cupola Conference. 14. und 15. Juni 2012, Dresden, Vortrag 1-5.
- [16] 4th International Cupola Conference. 14. und 15. Juni 2012, Dresden, Vortrag 1-4.
- [17] AIS Tech, Iron and Steel Technology Conference and Exhibition, 2011, S. 149-160.
- [18] 4th International Cupola Conference. 14. und 15. Juni 2012, Dresden, Vortrag 1-3.
- [19] Giesserei-Erfahrungsaustausch 56 (2012) Nr. 11+12, S. 42-43.
- [20] Environmental Science and Technology. 45, 7, 3062-3068.
- [21] 4th International Cupola Conference. 14. und 15. Juni 2012, Dresden, Vortrag 1-1.
- [22] Chemie Ingenieur Technik 83 (2011) Nr. 11, S. 1944-1953.
- [23] EECRSteel, International Conference on Energy Efficiency and CO2 Reduction in the Steel Industry, I, METEC, METEC In SteelCon, 2011, Vortrag 1-7

- [24] 4th International Cupola Conference. 14. und 15 Juni 2012, Dresden, Vortrag 1-2.
- [25] VDMA-Fachtagung: Energieeffizienz in Gießereien. II. und 12. März 2010, Frankfurt am Main.
- [26] 4th International Cupola Conference. 14. und 15. Juni 2012, Dresden, Vortrag 5-2.
- [27] Archives of Metallurgy and Materials, 56 (1012) Nr. 2, S. 231-243.
- [28] 4th International Cupola Conference. 14. und 15 Juni 2012, Dresden, Vortrag 5-4.
- [29] Giesserei 99 (2012) Nr. 9, S. 52-56.
- [30] 4th International Cupola Conference. 14. und 15 Juni 2012, Dresden, Vortrag 5-1.
- [31] Applied Mechanics and Materials, 66/68, 2117-2121; International Conference, Mechanical materials and manufacturing engineering; ICMME 2011.
- [32] Archives of foundry engineering. 12 (2012) Nr. 1, S. 125-129.
- [33] 4th International Cupola Conference. 14. und 15. Juni 2012, Dresden, Vortrag 3-1.
- [34] Giesserei 99 (2012) Nr. 12, S. 34-41.
- [35] Applied Mechanics and Materials Nr. 217/219, 1636-1641; International Conference, 2nd, Advanced design and manufacturing engineering.
- [36] 4th International Cupola Conference, 14. und 15 Juni 2012, Dresden, Vortrag 3-3.
- [37] Indian Foundry Journal (2011) Nr. 11, S. 27-32.
- [38] Indian Foundry Journal (2011) Nr. 11, S. 36-41.
- [39] Indian Foundry Journal (2012) Nr. 6, S. 28-34.
- [40] Indian Foundry Journal (2012) Nr. 2, S. 50-53.
- [41] Indian Foundry Journal (2012) Nr. 3, S. 37-43.



キュポラは基本的に排ガス処理設備や制御装置を持たない単純なシャフト炉から、近代的で完全な装備を備えた設備へと発展し、材料装入で正確な秤量と配合調整を行い、リサイクル材をより多く用いて複雑な铸件製品製造のためのベース鉄を溶解している。

図1 狭まった羽口面を持つ中国のキュポラ、1960年代に開発された[2]



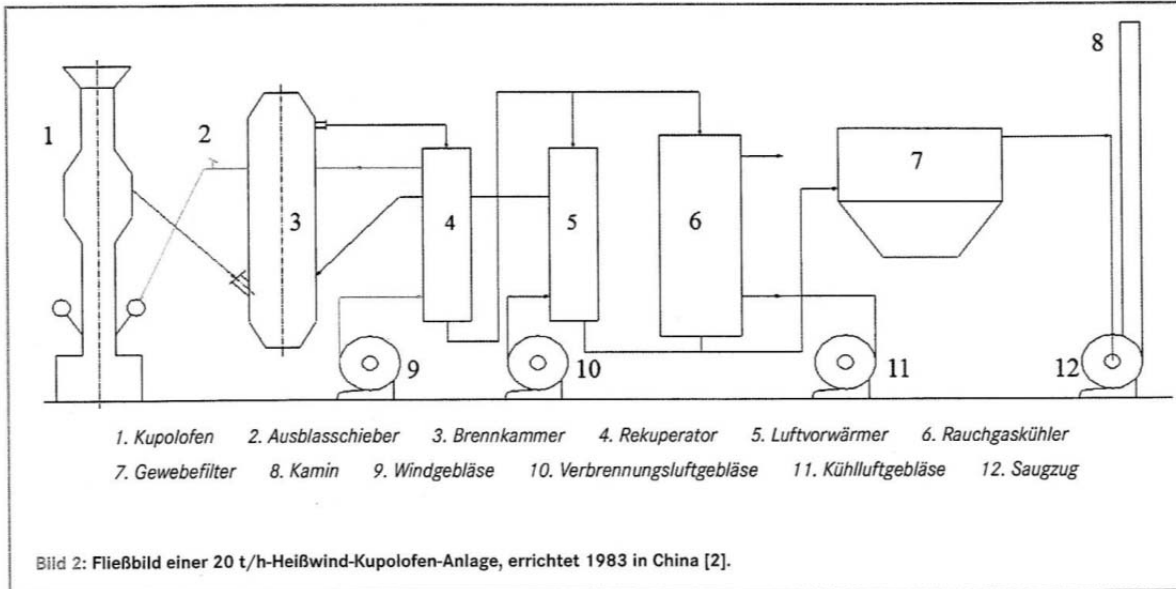


図2 中国で1983年に設置された20t/h熱風キュポラ装置のフローチャート[2]

41 *Große Kupolofen A. S. G.*

Januar 1891.	Gebäude		Brot		Stein		Brennung			Indem.	Summa	akt. der		
	Werte	Land	Speise	St.	St.	St.	St.	St.	St.			St.	St.	St.
Montag 1	62	16	23	1703	275	11160	2580	1260			11600	51	53	12
Dienstag 2	95	16	114	2199	675	17100	8550	2850			22500	100	70	30
Mittwoch 3	72	16	95	1405	275	12960	6480	2160			21600			
Donnerstag 4	88	16	112	2552	900	15840	7920	2640			26400			
Freitag 5	70	16	97	1453	675	12600	6300	2100			21000			
Sonnabend 6	101	16	117	2200	900	14400	7200	2400			22000			
Montag 7	89	16	113	2373	675	16020	8010	2670			26700			
Mittwoch 8	76	16	100	2229	900	15480	7740	2580			25800			
Donnerstag 9	100	16	124	2604	900	18000	9000	3000			30000			
Freitag 10	85	16	100	2219	900	15780	7890	2580			25800			
Sonnabend 11	74	16	99	2079	675	13680	6840	2280			22800			
Montag 12	102	16	124	2604	900	18000	9000	3000			30000			
Dienstag 13	88	16	100	2163	675	16400	8200	2700			27000			
Mittwoch 14	97	16	116	2434	900	16720	8360	2780			27800			
Donnerstag 15	95	16	113	2373	900	16200	8100	2700			27000			
Freitag 16	91	16	110	2451	900	17280	8640	2880			28800			
Sonnabend 17	90	16	112	2373	675	16200	8100	2700			27000			
Sonnabend 18	83	16	103	2205	675	15710	7855	2590			25900			

図3 1891年のキュポラの日々の材料バランス[4]

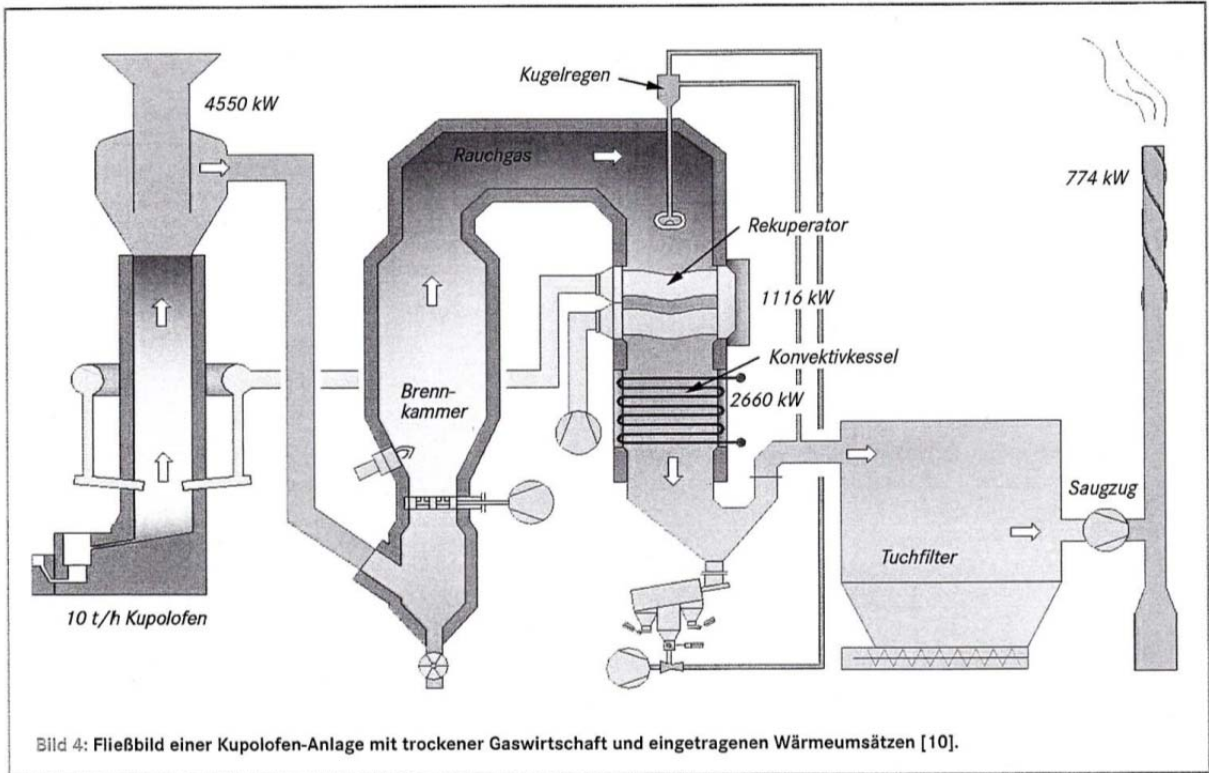


図4 乾式ガスクリーニングシステムと熱交換装置を組み込んだキュポラのフローチャート[10]

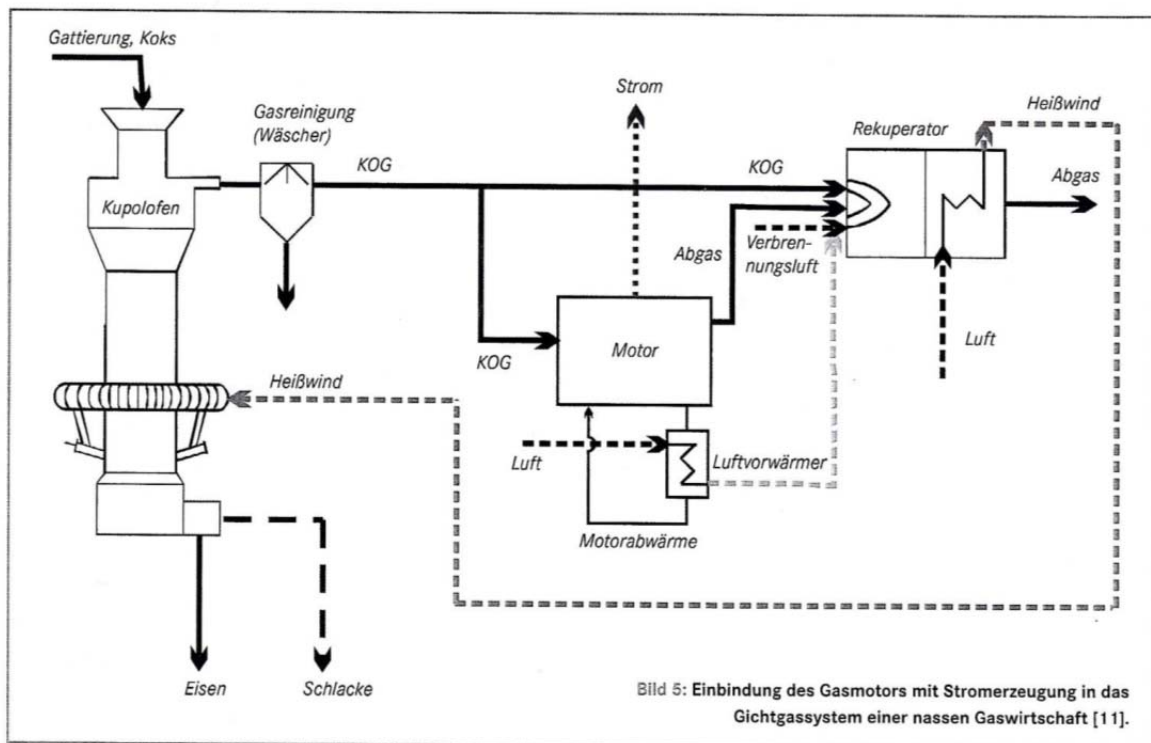


図5 湿式ガスクリーニングの炉頂ガスシステムにおけるガスエンジンと電力生成の組み合わせ [11]

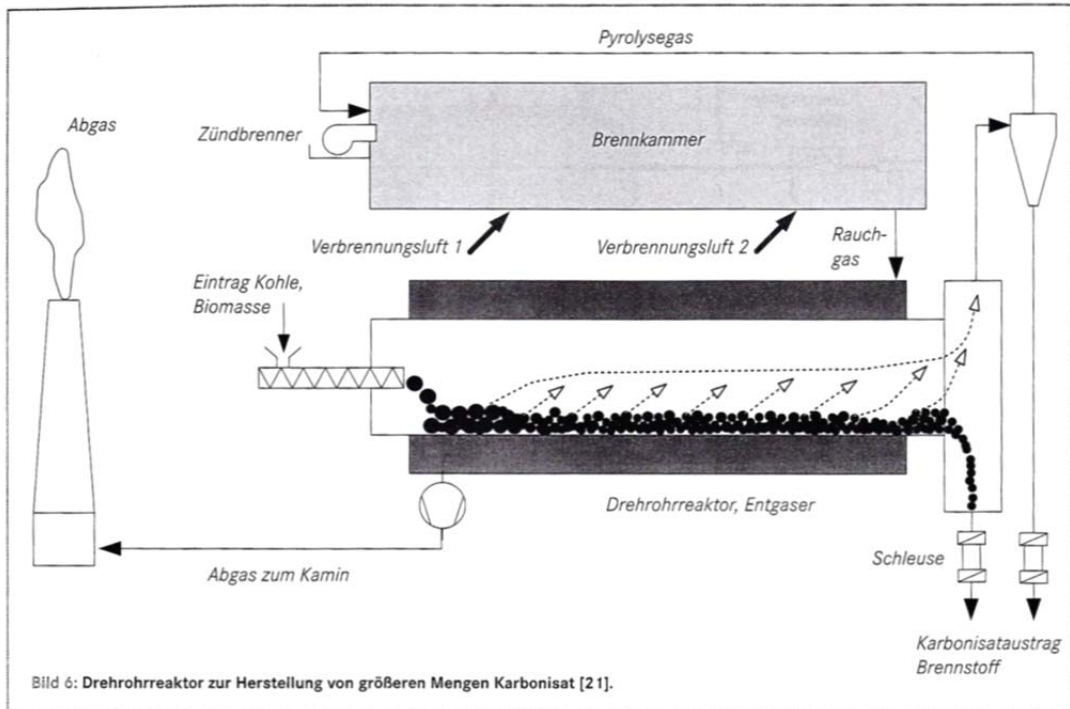


図6 多量の炭化物を製造するための回転ドラム式反応器[21]

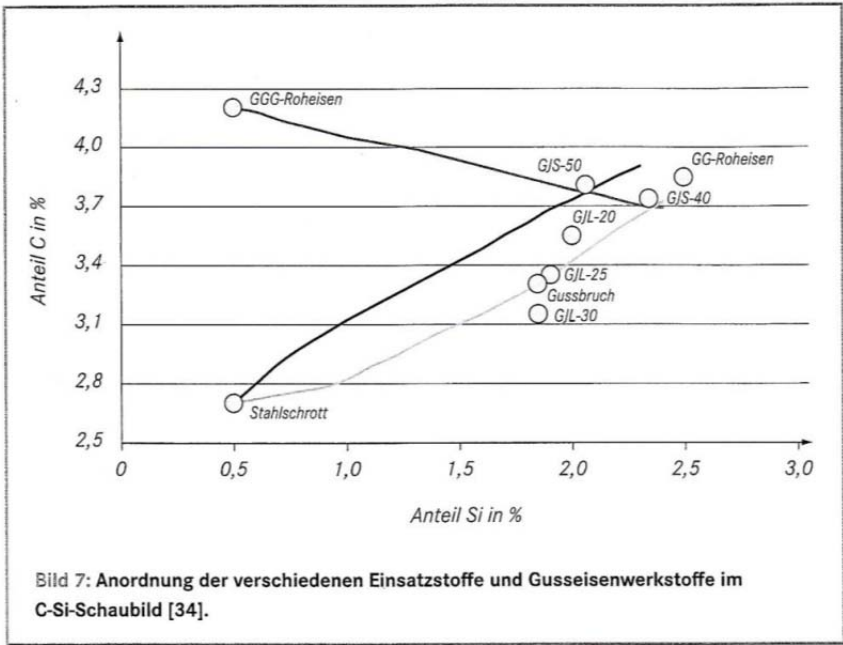


図7 C-Si ダイアグラムにおける装入材料と鋳物材料の位置[34]