

年間展望－キュポラ（第 50 報）

Thomas Enzenbach, Versen

今日なおキュポラ溶解は、多くの鑄鉄部品に対して品質の要求を満たしつつ、きわめて経済的に生産することが出来るというのが専門家の一致した意見である。

2014 年 4 月に連邦環境省によって公開された「2050 年における温室効果ガスニュートラルのドイツ」と題する研究について R.Radtke[1]が報告している。この研究報告書は 350 ページあり、その中の 159～166 ページは鑄造業界について扱っており、読むに値するものである。キュポラの宿命としてももちろん好ましいことはあまり語られておらず、主要な CO₂ 源として認識されているためドイツでのキュポラによる溶解は 2050 年までに撤退させることが環境保全に貢献するとして要求されている。ただしいくつかのキュポラは量産鑄物においてのみ設置が許されることとなっている。それはバイオガス加熱によるものとされる。いわゆる“コークレスキュポラ”というのは紛らわしい呼び方であり、本来の意味でのキュポラではなく、その構造から溶解設備としては、量産鑄物に対する要求には適しているとは言えない。溶解効率の点でも制約があり、また装入原材料の点でも制約がある。その詳細な解説はここでは行っていない。またこの研究報告書には訂正すべき点を含んでいる。

現在の状況をより詳しく観察すると、キュポラの代わりに電気炉を設置することはすべての条件下で有利というわけではないことは明らかである。このことは特に装入原材料について当てはまる。確かに電気炉の場合、コークレスキュポラの場合に存在するような制約はない。しかし汚染された鉄系材料の投入は熱効率を低下させる。キュポラと電気炉の比較の際、誤った結果を得ることがないように出力データの記述を定義することが大切である。特にそのために有益なのは W.Schmitz と D.Trauzeddel[2]による表現である。表 1 はキュポラと電気炉の重要データの対比である。熱風キュポラに対しては 44～47%の熱効率が認められるが、この値

Technische Daten	Heißwind- kupolofen	Kernloser Mittel- frequenz-Induktionsofen
Energieverbrauch zum Schmelzen	825-890 kWh/t	490-520 kWh/t
thermischer Wirkungsgrad	47-44 %	79-75 %
Energieverbrauch (Strom) für Nebenanlagen	20-70 kWh/t	5-10 kWh/t
Schmelzleistung	5-100 t/h	0,1-40 t/h (kein oberes Limit)
Schwankungen in der Eisentemperatur	20-50 K	5 K
Schwankungen im C-Gehalt	0,5-0,7 %	0,1 %
Schwankungen im Si-Gehalt	0,5-1,2 %	0,1 %
Schlackenmenge	40-100 kg/t	10-30 kg/t
Staubmenge	5-15 kg/t	0,06-1 kg/t
Metallverluste	0,5-1,5 %	0,1-0,3 %
Si-Abbrand	10-30 %	5-10 % (Legierungen mit hohem Si-Gehalt)
Aufschwefelung	0,12-0,15 %	0 %
Aufkohlung	1,0-2,4 % (gilt für 1,0-2,0 % C im metallischen Einsatz)	einstellbar
Bewertung		
Legierungswechsel	2	5
diskontinuierlicher Betrieb	2	5
kontinuierlicher Betrieb	5	3
Schmelzen von Spänen	3	5
verunreinigtes Einsatzmaterial	4	3

表 1 熱風キュポラと中周波誘導炉のデータ比較 [2]

は 50%かそれ以上達成可能であることが知られている。付帯設備のエネルギー使用量の値はかなり高いものであるが、現実の近代的な設備では大幅に減じられている。ここに示されたような化学分析値の変動があるならば、品質的に高い値の鋳鉄の製造は望めない。このような変動は操業条件が不適切な場合に発生するもので、電気炉ではこの点は確かにうまく回避できる。この表ではなお多くのことが注目さ

れるが、ここでは割愛されている。専門家の間ではキュポラを用いれば非常に多くの鋳鉄部品材料を品質要求を満たしつつ経済的に製造することが出来るので、撤退させるべきではないとの意見の一致を見ている。同時に CO₂ 排出を減ずるためにさらなる改良が必要であることは論を待たない。[3]

新しい設備と改造

2014 年 Schwerte にある鋳造工場 Walter Hundhausen は創業 100 周年を迎えたが、これについて「将来有望な伝統的鋳鉄鋳造業」のタイトルで R.Piterek[4]が報告している。その中で 2008 年に操業を開始している新しいキュポラ溶解設備について解説している。これは当時

4基の25t低周波誘導炉を解体しそのあとに設置されたものである。電気炉溶解から1次燃料コークスへの切り替えは、Walter Hundhausenの管理者側で詳しく検討し大きな意義があると認められている。例を挙げれば、亜鉛含有材料は誘導炉よりもコストの観点からもより良く処理できる。2014年3月末にKarkstadtのDüker社では近代化されたキュポラ溶解設備が公開された。この新しいロングキャンペーンキュポラは2基の熱風キュポラを代替したもので、後者は炉頂下部からの排出ガスに基づく大きなエネルギーロス改善する必要があった。さらに炉頂ガス燃焼設備の改造が行われ、未燃焼COの放出を確実に限界値以下に引き下げることを目指しこれを達成した。改造されたキュポラは2014年1月13日に操業を開始した。

BreidenbachにあるBuderus Guss GmbHは第1製造工場ではキュポラ溶解設備の溶解効率を向上させるべく、3段階プログラムを適用している。2015年2月から4月までその第1段階が実行された。これは新しい粗大ダストセパレータの組み込みと酸素添加装置の最適化から構成されている。この2つの方策により予想された成果が達成したことが確認された。望まれる性能を永続して保証し、エネルギー損失低減のためにさらなる改造が続けられるということである[7]。

省エネルギー及び廃熱利用

R.M.Torielliら[8]は球状黒鉛鋳鉄製造のための革新的な方法の実現のための環境的観点及びコストについて報告している。著者らは操業コスト、有害物質の排出、材料及びエネルギー消費量の低減のための多くの方法を探求している。溶解コスト削減のためにコークスの1部を無煙炭のような代替燃料で置き換えることを提案している。SingenのGeorg Fischer社での廃熱の利用についてはM.Lueben[9]による短い報告がある。キュポラ溶解設備のガス処理における余剰の廃熱を隣接するMaggi社(Nestle Deutschland)へ引き渡すことが重要で、これについてはすでいくつかの報告がある。廃熱は廃熱ボイラー中でサーマルオイル循環によって回収される。加熱されたサーマルオイルはポンプでカスタマー(廃熱利用工場)に送られ、蒸気の製造に使われる。これによってカスタマーは天然ガスを節約することができCO₂排出の低減も達成できる。毎年排出されるCO₂が11,000~14,000t減量できることが重要である。

また H.Wolff と U.Petschmann[10]はエネルギー効率の向上と鑄造工場のコスト低減に取り組んでいる。第1に鑄造工場ですべてのエネルギー消費があるかを概観している。図1は鑄造工場の色々な分野へのエネルギーコストの分配を示す。さらに現在考えられるエネルギー節減及びコスト節減の可能性について例を挙げて記述している。ここでも Georg Fischer 社と Maggi 社間の熱のやりとりについて言及している。

外部消費者への熱の譲渡は Bad Windsheim の Heunisch 鑄造所でも行われている。ここではキュポラ溶解設備の廃熱ボイラーからの余剰の廃熱が温水（中間）循環により土地の境界まで運ばれ、そこで都市施設局のネットに引き渡される。さらに内部のサーマルオイル及び温水のネットで自社

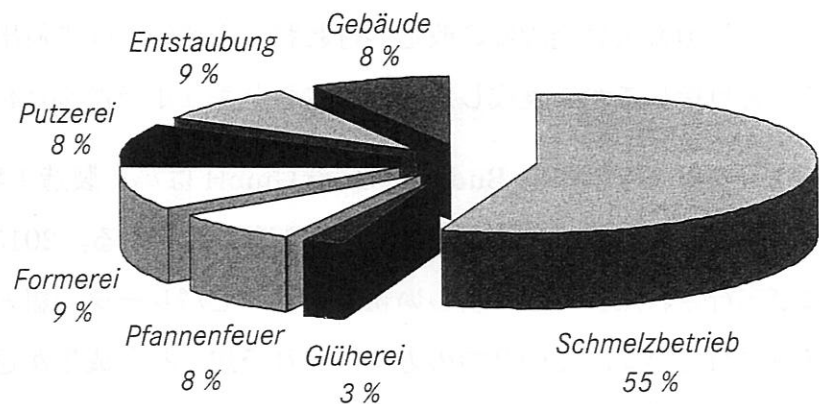


Bild 1: Aufteilung der Energiekosten in der Eisengießerei [10].

図1 鑄物工場におけるエネルギーコストの配分[10]

内での消費に供給される。現在、炉の作業時間と熱の需要量の間を調整出来るようにする蓄熱器からのチャージのためのプロジェクトが実行されている [11]。

Brühl 鉄工所では廃熱利用における効率向上のために熱タンク（蓄熱器）が設置された。これについて A.Koch と R.Temming[12]が報告している。熱交換器で熱が回収され、廃熱から 7 MW の出力が熱交換器の後で発生する。しかしそれにもかかわらず加熱目的のために年間 34MWh の天然ガス消費量が発生することが明らかとなった。このため熱回収の増大と効率向上のため近代的な制御システムが組み込まれ、その調整も最適化された。蓄熱器の取り付けによりキュポラの操業終了後も熱が自由に使用できるようにし、さらに生産工場の屋上の換気装置も熱回収ラインに接続された（図2）。一連の措置が効果を発揮し、わずかな期間の後に期待された節減効果が実現した。

M.Bosse[13]は熱風キュポラにおける廃熱利用のための各種の可能性について取り組んでいる。まず燃料コストの低減が熱回収の設備投資の償却期間をどの程度延長させるかについて説

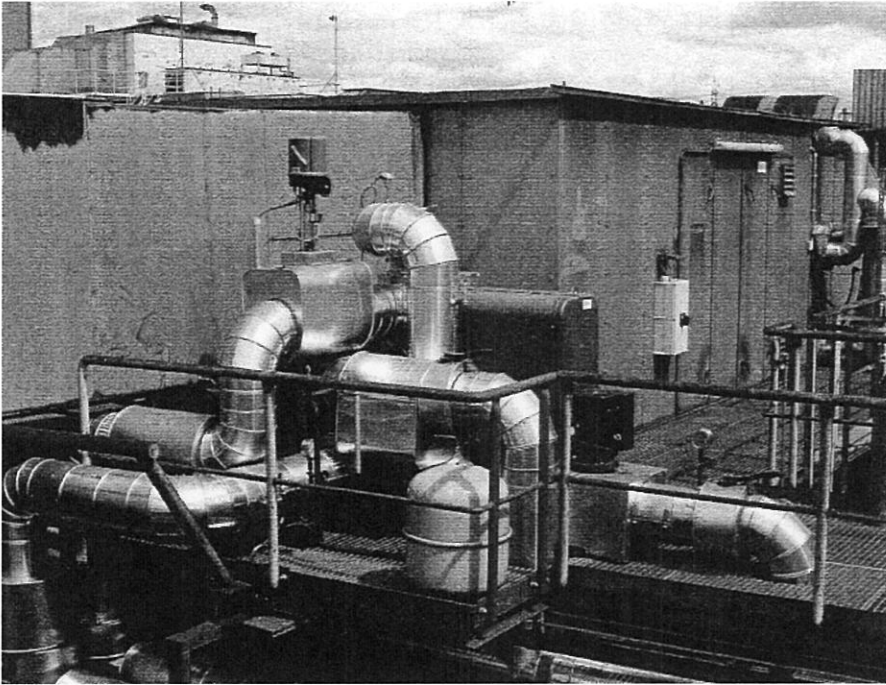


図2 吸気装置への伝熱ステーション[12]

明している。これは多くの場合、実行されないか、あるいは後回しにされるようなエネルギー節減方法（省エネルギー対策）に当てはまる（適用される）。さらに環境に放出される未利用の廃熱がもつ高いポテンシャル、とりわけ低温の季節での作業現場の暖房のためのエネルギー需要が高まることに対しては化石燃料の使用によってこれを満足させる必要があることを説明している。次に廃熱の内部利用のためや外部の消費者

へ熱を渡すためにすでに実施されたプロジェクトをリストアップしている。さらに内部需要が少ないか、あるいは外部の利用者がいない場合は、廃熱による発電を考慮に入れなければならないことに注意を促している。その際、ドイツでは自家発電に対する投資がエネルギー政策の欠点により阻止されていることが確認されている。著者の見解では、廃熱による発電のようなエネルギー節減及び環境保全に対する方策は政治的大綱の元に実施されねばならないと考える。

へ熱を渡すためにすでに実施されたプロジェクトをリストアップしている。さらに内部需要が少ないか、あるいは外部の利用者がいない場合は、廃熱による発電を考慮に入れなければならないことに注意を促している。その際、ドイツでは自家発電に対する投資がエネルギー政策の欠点により阻止されていることが確認されている。著者の見解では、廃熱による発電のようなエネルギー節減及び環境保全に対する方策は政治的大綱の元に実施されねばならないと考える。

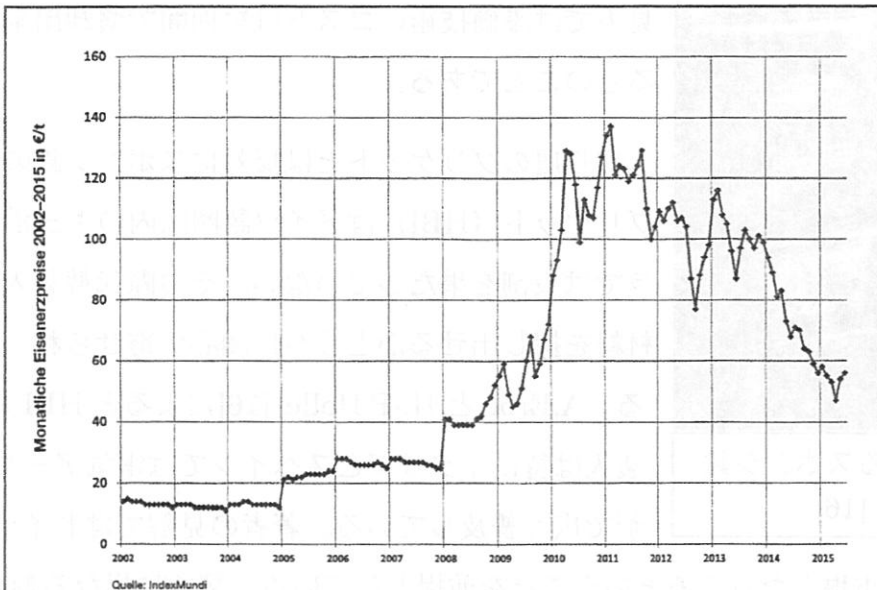


Bild 3: Entwicklung der Eisenerzpreise 2002 bis 2015 [14].

図3 2002～2015年間のエネルギー価格の推移[14]

装入材料

現在の価格低下が燃料だけでなく、原材料にも関係する。A.Riegert[14]はこれらの推移を色々な図表を用いて示している。一例として図3に2002～2015年の鉄鉱石の価格の推移を示す。同様の傾向がキュポラに使用されるスクラップでも見られることが確認されている。従ってスクラップのリサイクルはリスクのあるビジネスになるかもしれないので、財政力と同時に革新力が要求される。世界の鉄鋼市場の構造的変化がドイツの鉄鋼スクラップのユーザーに対して影響することが示された。

鑄鉄の切り屑は2、3年前からキュポラの装入材料として重要性を増してきている。これはブリケットとしてスクラップ市場に出回っている。一方自家発生加工屑をプレスしてブリケットとし、キュポラに装入する鑄物工場もある。またルースな切り屑を装入することも現在のところ実施されている。時折切り屑中の油エマルジョン（潤滑油）の混入によって問題も発生する。G.Scholz[15]は新しく開発された切り屑圧縮法について報告している。これによって切り屑のブリケットと潤滑剤は分離されて排出される。潤滑剤の再取得が可能となり、従ってこの段階では環境を汚染することはなく、かつコストを節約するリサイクルが達成される。著者の

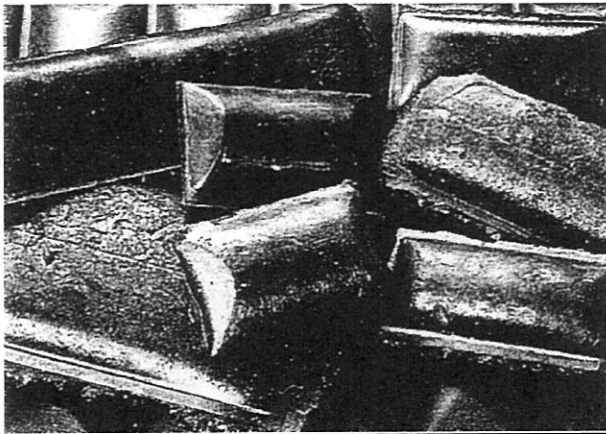


図4 形状と大きさの異なるスポンジ鉄ブリケット (HBI) [16]

見方では設備技術のコストは短期間で償却出来るとのことである。

切り屑のブリケットとは反対にスポンジ鉄のブリケット (HBI) はドイツ語圏国内のキュポラでは役割を果たしていない。その際代替装入材料を探し出せるかどうかに関心が寄せられる。A.Erbe と H.-P.Heller[16]によると HBI の装入は特にイタリアとスペインでは電気アーク炉で広く普及している。著者の見解ではドイツ

語圏はこの装入材料の将来の市場となりうるということを前提としている。図4に異なる形状と大きさのスポンジ鉄のブリケットを示す。

ドイツは金属原材料の産出が乏しく、そのため輸入が頼りである。しかし現在在庫は多量にあるため事情によっては高価値の材料が顧みられないままに放置されている。Fraunhofer 研

究所の研究者達は今や広くドイツの資源土地台帳を作成している。それはどこにどのような鉱床が存在し、どんな金属が埋蔵されているかを示すものである [17]。

溶解プロセスと金属学

Amberg にある Luitpold 精錬所シーケンス・インパルス・プロセス (SIP) を熱風キュボラに装備しており、これについて H.-H.Heldt と C.Ilger が報告している [18]。SIP はシャフト炉でガス (ここでは酸素) のパルス導入を行う方法である。ここではパルス状の酸素が羽口から炉内に圧力噴射される。目的は圧力容器で酸素の圧縮により生成されたエネルギーをガスによるチャージコラムの貫通をよりよくするために用いることである。さらにこの方法の導入とその結果について報告されるだろう。

酸素導入によるさらなる方法は、J.V.Schule[19]が紹介している Linde 社の High-Jet-Process である。このプロセスの基礎については出版物で詳細に解説されている。さらにこれによって達成されるポジティブな成果がリストアップされている。H.Kadelka と G.Dell[20] は Weilbach の Linde 鑄造で行われた試験について報告している。これは鑄物コークスを部分的に石油コークスで置換するものである。装入された燃料の石油コークス及び導入された技術の詳細について解説している。さらに達成された成果について報告があり、最後に他条件で達成された結果との比較を示している。

また Eisenberg の Gienanth 鑄造所では石油コークス粉の吹き込みによりコークスを部分的に代替することに成功している。H.Kadelka ら[21]の研究では導入された設備技術についてより詳しく報告している。さらに中間結果が述べられ、この方法の可能性を明らかにしている。コークス比が 18.5%低減できた。これに対して石油コークスとしてのコークス比は 12.5%だった。従って石油コークス添加によりコークスの 70%が代替されたことになる。装置のスタートアップの後、石油コークスの吹き込みのため、Gienanth 鑄造所ではいわゆる“エネルギー効率管理”(EEM)が取り入れられ、これについて H.Kadelka と M.Weber[22]が報告している。そこではあらかじめ炉の操業への直接的な干渉を可能にするプログラムを組み込んでいる。これを適用すると規則正しい(一定の)操業モードが達成される。EEM システムは炉

の操業において重要な役割を果たし、目標を定めた送風、酸素、及び石油コークスなどの投入が最適化された予測可能な溶解プロセスを導く。

R.Schreyer と S.Ratkovic[23,24]は Freiberg の Ledebur シンポジウムでの講演の中でキュポラの溶解工程における樋部での溶湯成分の均一化の可能性について取り組んでいることを述べている。このためには数多くのテストが必要だった。影響因子の大きさやその働きは極度に複雑だからである。洗練された手法と総括的な考察について述べ、得られた結果について発表している。

R.E.Aristizabal らは急冷キュポラに関する研究について報告している [25-27]。この件に

については以前に発表された報告がある。第6部[25,26]はコークスの挙動について取り組んでいるもので、[25]はドイツ語、[26]は英語による文献である。急冷されたキュポラの各部から採取されたコークス試験片をテストしている。表2はキュポラに投入されたコークスの径が羽口まで降下するにつれて減少する様子

Abstand von der Winddüse in m	Koksgröße im mm („Feret´s“-Durchmesser)	Bemerkungen
2,1	55	Bereich 1: durchschnittlicher „Feret´s“-Durchmesser 58 mm, Summe der Durchmesser 232
1,4	66	
1,3	54	
1,2	58	
1,1	47	Bereich 2: durchschnittlicher „Feret´s“-Durchmesser 46 mm, Summe der Durchmesser 506
1,0	47	
0,9	46	
0,8	43	
0,7	59	
0,6	45	
0,5	53	
0,4	35	
0,3	44	
0,2	50	
0,1	40	Bereich 3: durchschnittlicher „Feret´s“-Durchmesser 29 mm, Summe der Durchmesser 115
0,0	38	
-0,1	34	
-0,2	22	
-0,3	21	

表2 “Feret’s”径によるコークスサイズの測定[25]

示している。Feret’s径は不規則に形成される物体（ならびに面）の平均径を調べる手法の1つである。図5にばらつきをもったコークス径とガス組成の測定結果を示す。これにより

コークスの大きさが物理的プロセスと化学反応により如何に変化するかが分かる。さらに英語による研究の要約がある [27]。

歴史

Hattingen にある Heinrich 精錬所の LWL 産業博物館の土地に最近の調査に基づくヨーロッパ圏におけるベッセマー製鋼所のわずかに残った残存物が設置されている。O.Schmidt-Rutsch[28]はベッセマー法は 19 世紀後半に発展し、製鋼プロセスにおいて急速にその存在意義を獲得したことを報告している。前世紀後半までにこの方法は鑄鋼工場に導入された。図 6 は 1875 年のベッセマー法工場の様子を示す。その背景にはベッセマー法の元湯を溶解するキュポラのあることが認められる。報告には Hattinger 工場の歴史と現況についての情報も含んでいる。

2014 年 9 月に 1 基のキュポラの保全のための呼びかけが公表された [29,30]。1913/1914 年製の前炉を取り付けた冷風キュポラが取り上げられていることが注目される。産業博物館 Chemnitz とその後援会は鑄物工、鑄物工場の公開、及び企画を援助するための情報公開への展示に切り替えた。鑄物工場の発展は 19 世紀における

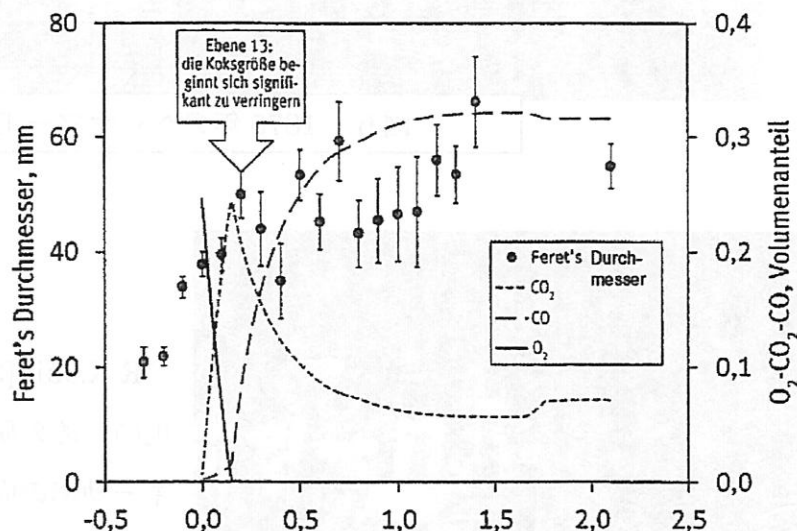


図 5 羽口面からの距離対コークス片の”Fret's”径とガス組成の関係 [25]

Chemnitz の産業都市への興隆と密接に結びついている。これらの公開展示において Chemnitz の鑄物工場の操業開始、及びキュポラの歴史について報告されている。キュポラ (図 7) は産業時代の開始を表す記念となるものであり保持するに値するものである。

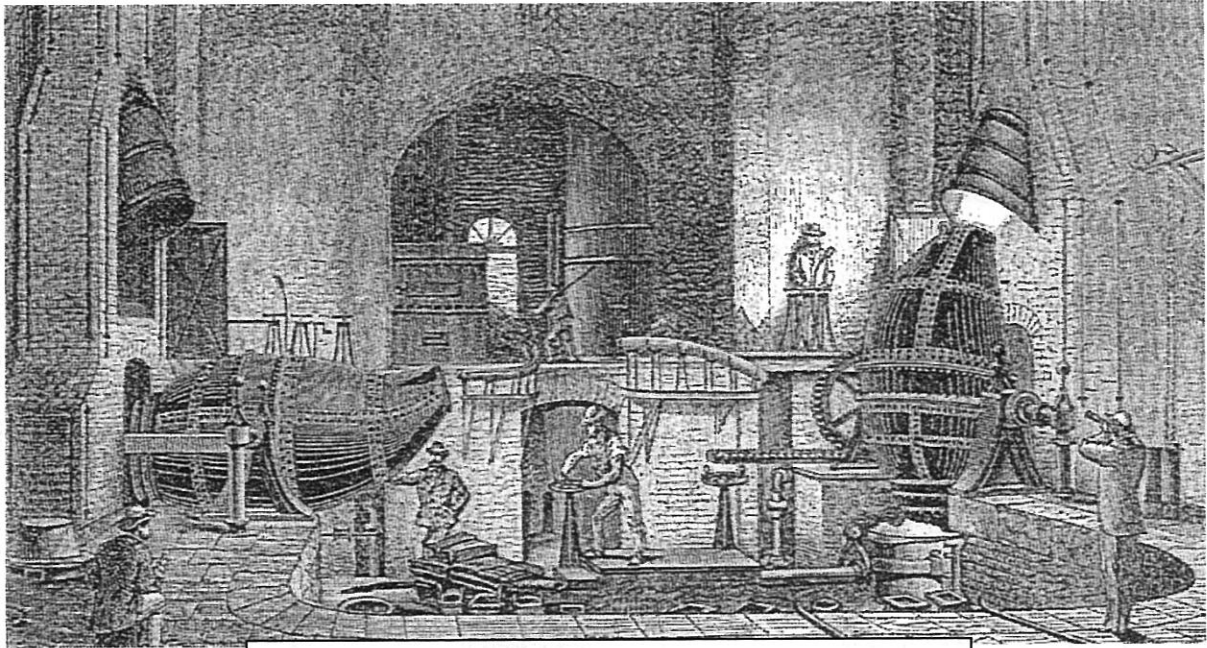


図6 1875年のベッセマー工場[28]

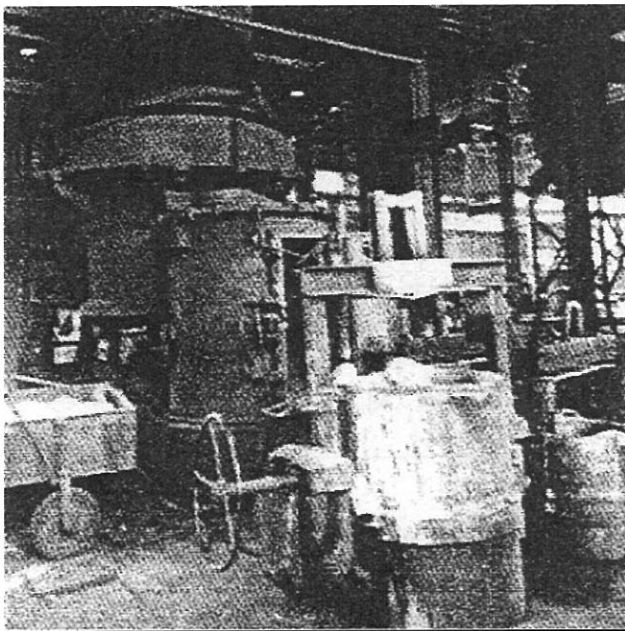


図7 廃止された1913/1914年製キュポラ

回転炉

R.K.Jain[31-33]は3つの論文で回転炉の最適化のための研究について報告している。エネルギー効率の向上が重要であり、それには各種のパラメータの影響が観察される。このため試験研究を行い、計算処理が施された。特に酸素添加の有利な効果が強調されている。

文献

- [1] Giesserei 102 (2015) Nr. 6, S. 38-39.
- [2] Fonderie magazine (2015) Nr. 52, S.37-41,43-47,49-57.
- [3] Giesserei 103 (2016) Nr. 5, S. 36-37.
- [4] Giesserei 101 (2014) Nr. 2, S. 60-65.
- [5] Giesserei 101 (2014) Nr. 5, S. 122-126.
- [6] Giesserei-Erfahrungsaustausch 58 (2014) Nr. 7+8, S. 44.
- [7] Giesserei 103 (2016) Nr. 1, S. 138.
- [8] international Journal of Meta/casting (2014) Nr. 1,S. 37-48.
- [9] Giesserei-Rundschau 60 (2013) Nr. 11 + 12, S. 375.
- [10] Vortrag zur 54th Foundry Conference, Portoroz, Slovenia, 17. bis 19.09.2014, IfG Dusseldorf 2014, S. 1-26.
- [11] Giesserei 101 (2014) Nr. 2, S. 8.
- [12] Giesserei 102 (2015) Nr. 9, S. 52-54.
- [13] Giesserei 103 (2016) Nr. 6, S. 26-28.
- [14] Stahl und Eisen 135 (2015) Nr. 10, S.72-75.
- [15] Giesserei 100 (2013) Nr. 10, S. 58-59.
- [16] Stahl und Eisen 135 (2015) Nr. 1, S.33-38.
- [17] Stahl und Eisen 135 (2015) Nr. 3, S.21-22.
- [18] Giesserei 101 (2014) Nr. 5, S. 100-103.
- [19] Indian Foundry Journal (2013) Nr. 10, S. 29-33.
- [20] Giesserei 100 (2013) Nr. 1, S. 58-63.

- [21] Giesserei 101 (2014) Nr. 6, S. 84-88, 90-91.
- [22] Giesserei 102 (2015) Nr. 8, S. 71-76.
- [23] Giesserei 100 (2013) Nr. 12, S.156,158.
- [24] Giesserei-Praxis (2013) Nr. 12, S.535.
- [25] Giesserei-Praxis (2014) Nr. 3, S.112-120.
- [26] Transactions of the American Foundry Society (2013), S. 475-485.
- [27] International Journal of Metalcasting (2014) Nr. 3, S. 13-22.
- [28] Stahl und Eisen 133 (2013) Nr. 3, S.111-114.
- [29] Giesserei-Praxis (2014) Nr. 9, S.410.
- [30] Museumskurier des Chemnitzer Industriemuseums, Nr. 34, Dezember2014, S. 24-25.
- [31] Indian Foundry Journal (2012)Nr. 11, S. 35-43.
- [32] Indian Foundry Journal (2013) Nr. 9, S. 23-31.
- [33] Indian Foundry Journal (2013) Nr. 11, S. 35-42.