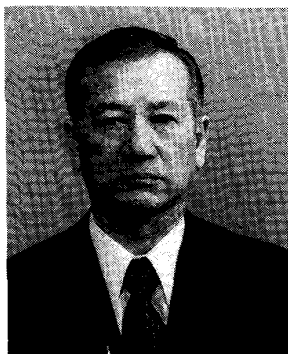
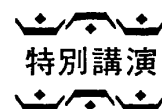


© 1986 ISIJ



## 鉄鋼業における高炉羽口，ランスノズルなどの純銅鑄物の変遷



後藤 正夫\*

Production of Pure Copper Castings, such as Tuyere and Lancenozzle, Used in the Iron and Steel Industry

Masao Goto

### 1. はじめに

先般鉄鋼協会殿より名誉ある浅田賞を賜り、まことに光栄の至りに存じます。会長、副会長ならびに会員の皆様様に厚く御礼申し上げるのほどでございます。

本稿におきましては、当日の講演内容を中心に、鉄鋼業と関係の深い、高炉羽口、転炉用ランスノズルの、主として構造上および材質に関する歴史の変遷と、純銅鑄物の製造法について述べさせていただきます。

### 2. 銅製水冷部品の歴史

鉄鋼業界においては、巨大な、集中したエネルギーを取り扱う装置が多数あり、これらの装置を維持するために、種々の部署で銅製水冷部品が使用されている。とりわけ、高炉における羽口、転炉におけるランスノズルは良く知られている。ここでは、この二種についての変遷について若干触れてみたい。

#### 2-1 高炉羽口

日本には古代から続いている独自の製鉄技術があるがここでは洋式技術<sup>1)</sup>を主として述べる。

現在の密閉式送風系路が採用される以前は、高炉の下部に送風孔をあけ、この部分にふいごのノズルを差し込んで送風する方式、すなわち開放方式が長期間続いていた。このノズル(現在の送風支管に相当すると思われる)を差し込んで高炉に空気を吹き込む部分が羽口と呼ばれ

ており、粘土、非水冷の鉄、次いで非水冷の銅と変化してきたようである。最初的水冷式羽口は1800年頃、当時の製鉄王国イギリスにおいて製造された。この羽口は当時予備精錬炉と称せられる炉に用いられ、高炉にも適用されたと推測される。図1<sup>2)</sup>に羽口の形状を示す。羽口の材質については知られていない。その後送風量の増加および高温化に伴い、羽口の水冷化は一般的なものとなり、更に羽口とノズル間を密閉接続することが実施され、構造的には現在の考え方と同様になつてきている。図2<sup>2)</sup>および図3<sup>2)</sup>は、1840年頃に用いられた羽口である。図2は鍛鉄管を鑄鉄で鑄ぐるんだものであり、図3は「銅鑄物」であるといわれている。この頃から炉体冷却装置として、鑄鉄製の冷却箱も用いられるようになった。この当時の「銅鑄物」の意味は、現在と異なつていると考えられる。なぜならば、当時の水冷羽口としての主流は鑄鉄製であり、その次の段階のものとして、青銅製の羽口が考案されているからである。図4<sup>2)</sup>にイギ

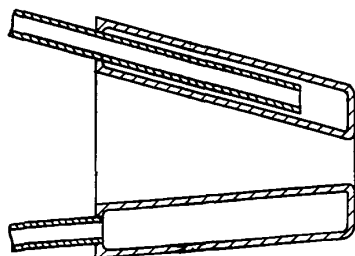


図1 初期の水冷羽口

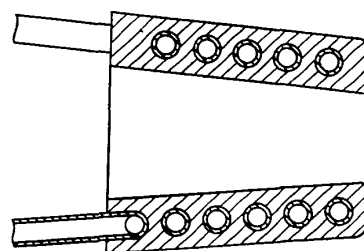


図2 パイプ鑄ぐるみ鑄鉄羽口

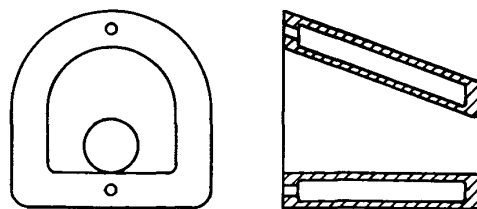


図3 鑄銅羽口

昭和60年10月本会講演大会における浅田賞受賞記念特別講演  
昭和60年11月25日受付 (Received Nov. 25, 1985)

\* 後藤合金(株)代表取締役社長 (President, Goto Gokin Co., Ltd.,  
447 Nihongi Mizuhomachi Nishitama-gun, Tokyo 190-12)

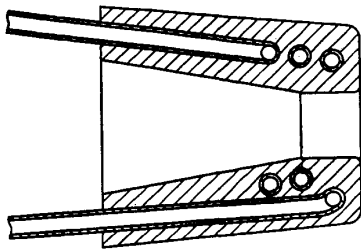


図4 イギリスのパイプ鑄ぐるみ青銅羽口

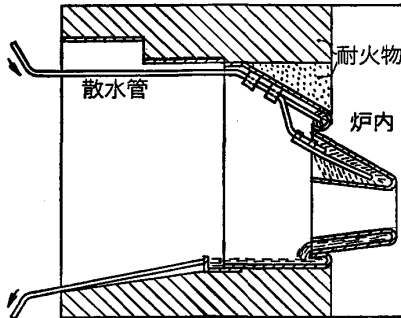


図5 開放形水冷羽口

リスで使用された水冷式青銅羽口を示す。図から、鉄管を青銅で鑄ぐるんだもののように思われる。1870年になると、現代の高炉で採用されている冷却技術のほとんどが見受けられる。図5<sup>24)</sup>にこの当時の開放系水路の青銅製羽口を示す。この青銅製羽口の時代は、比較的近代にまで及んでおり、1936年頃に入手した羽口の図面にも、材質として青銅が指示されていたがこれを当方の提案で熱伝導率の高い純銅 ( $\text{Cu} \geq 99.5\%$ ) に変更してもらった経緯がある。どの時点で、羽口が全般的に純銅製となったかは明確ではないが、高炉の稼働率の上昇と共に羽口の寿命延長が計られ、純銅製へ徐々に移行していったものであろう。国内においては、戦後より、ほとんど一貫して純銅鑄物で製作されている。移行にあつての形態は三つの方向があり、それらは、(1)パイプ鑄ぐるみ方式、(2)圧延およびプレス材をろう接あるいは溶接する方式、(3)一体鑄造方式である。それらを図6に示す。ヨーロッパにおいては、現在でも(1)あるいは(2)

の方式で製作されているが、日本においては、(3)の方式がほとんどであり、最近製造されている高流速羽口のような複雑構造を持った場合でも、各部分を鑄造しこれらを溶接で組み立てる方式が採用されている。

次に国内に目を移すと、1940年代後半から1960年代前半までは高炉は小型であり、羽口も単純な形状であった。羽口の溶損なども時折生じていたが、羽口溶損対策は重要視されていなかった。1960年代後半になると高炉の大型化が急速に進み、それに伴って高圧操業、重油吹込み、酸素富化、高温送風操業が採用され始めたため、羽口溶損が多発し、これに起因する突発休風による出銑量の減産は多大なものとなり、羽口溶損防止対策が大きくクローズアップされてきた。このため、各製鉄所および羽口メーカーは、耐溶損羽口開発のため種々の実験的研究を行い、有益な知見を提供した。これらの結果はすでに「鉄と鋼」<sup>25)</sup>誌に投稿されているので結果だけを簡単に述べる。

(1) 耐溶損に対して冷却水速度を高めることは非常に有効である。ただし冷却水速度は、16 m/s までは効果が大きいがそれ以上の速度では効果が小さくなる。

(2) 溶損熱流束は、冷却水速度が 16 m/s の時、1 m/s の場合と比較して約3倍である。

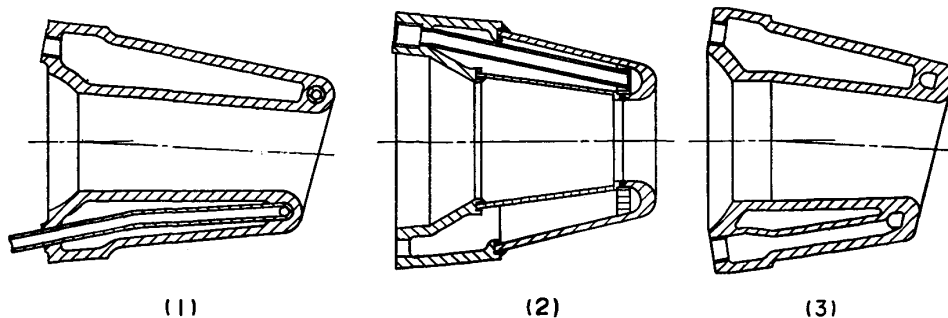
(3) 溶損熱流束は鑄物の肉厚にほとんど影響されない。

(4) 鑄物の熱伝導率が溶損熱流束におよぼす影響はわずかである。

上述の結果から開発された高流速羽口を図7<sup>45)</sup>に示す。

冷却水速度は最先端部は 16 m/s、2段目および3段目は 10 m/s、4段目は 7 m/s 程度であり、それ以降の段は約 4 m/s である。先端カバーの純度は 99.7% 以上、電気伝導率は 60 IACS% (熱伝導率で 0.55 cal/cm·s·°C) 以上であり、肉厚は 25 mm 程度である。

このような高流速タイプの羽口の普及により、羽口の寿命は大幅に延長され、以前のような溶損律速ではなく、羽口先端部付近の摩耗律速へと移行した。羽口に耐摩耗性を与えるために現在行われている方法として、硬



(1) (2) (3)

(1) パイプ鑄ぐるみ方式 (2) 溶接組立て方式 (3) 一体鑄造方式

図6 各種純銅羽口

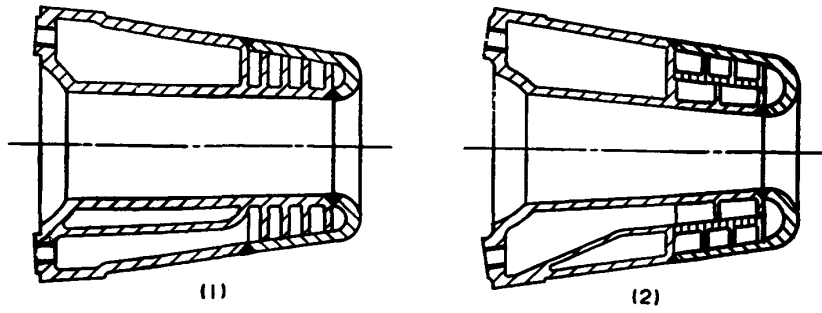


図 7 高流速羽口

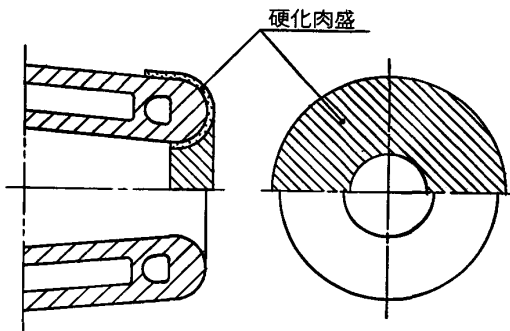


図 8 硬化肉盛施工範囲例

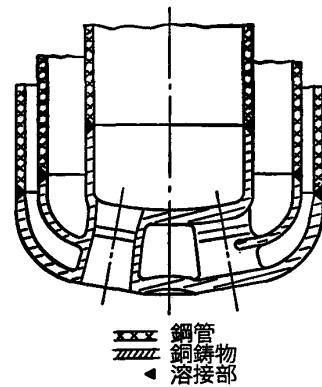


図 10 一体鑄造方式ランスノズル

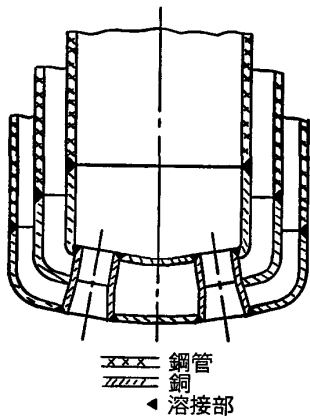


図 9 溶接組立て方式ランスノズル

硬化肉盛法とカロライジング法がある。肉盛は TIG 法により厚さ 3 mm 程度溶接し、材質としては Ni-Cr-B-Si 系、Ni-Cr 系、およびアルミニウム青銅系が主流である。カロライジング法は銅鑄物の表面にアルミニウムを高温下で拡散させ、深さ 1 mm 程度の Cu-Al 金属間化合物の硬化層を形成させる方法である。

高流速羽口に以上のような処理を実施することにより、羽口の寿命は更に延長された。図 8 に硬化肉盛施工範囲の例を示す。

## 2.2 転炉用ランスノズル

ランスノズルは、SCHWARZ<sup>6)</sup> が 1939 年に行つた実験当初から銅製のラバールノズルが用いられてきている。初期においては、鍛造丸棒を切削加工して製造する方法が取られていたが、生産性および材料歩留りの向上を狙つて、鑄造法の開発がなされた。ヨーロッパにおいて

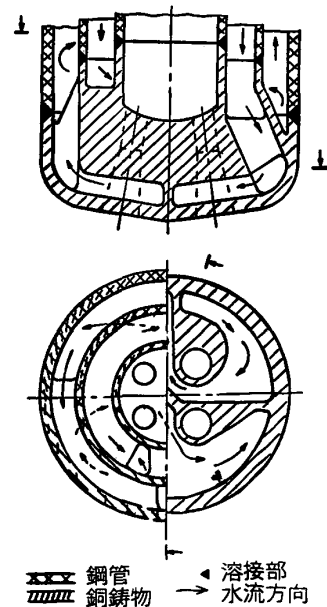


図 11 溶損防止対策ランスノズル例

は、現在でも鍛造材またはプレス材で各部を形成し、これらをろう接する方式を採用している所もある。図 9 に組み立て方式のランスノズルを示す。国内においては、鑄造品が主流であり、純度 99.9% 以上、電気伝導率は 85 IACS% (熱伝導率で 0.75 cal/cm·s·°C) 以上であり、先端肉厚は 20 mm 程度が一般的である。図 10 に一体鑄造方式のランスノズルを示す。

ノズル孔数は、日本において多孔 (3 孔) ランスノズ

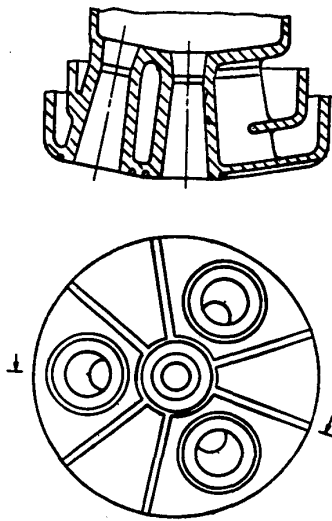


図 12 変形防止対策ランスノズル例

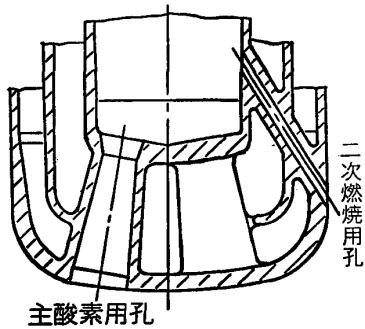


図 13 複式ランスノズル

ルが実用化されるまでは、単孔ランスノズルが用いられていたが、多孔ランスノズルが実用化して以来増減があり、最高では8孔ランスノズルの製造実績があるが、主流は4孔ランスノズルである。

また、ランスの直径も、転炉の大型化に従って大きくなり、最近では400mm以上のものも使用されている。

転炉も高炉の生産性向上と共に、処理量および処理速度が増大してきており、ランスノズルの溶損対策や変形防止対策を組み込んだものが提唱されている。これらの例を図11、および図12に示す。

更に最近に至り、従来のラバーノズルの他に、炉内での二次燃焼用の酸素供給孔を備えたランスノズルも製造されるようになってきた。この構造はかなり複雑なものとなるので、鑄造技術を一段と高めていく必要がある。この例を図13<sup>9)</sup>に示す。

### 3. 製 造 法

銅は実用金属中熱および電気の伝導度が最も高いため、これらの特性を生かした鑄物、すなわち高炉用羽口、冷却板、転炉用ランスノズル、電気炉用の水冷式電極ホルダー、炉体クーラーなどに使用されている。銅は

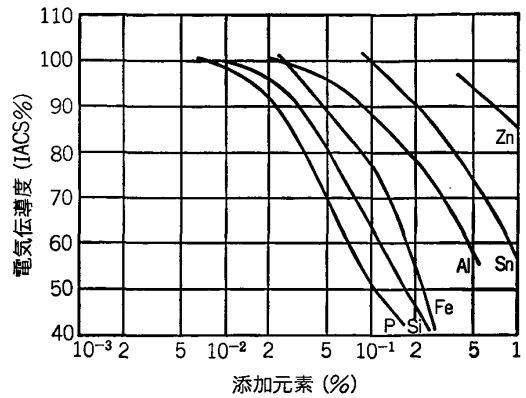


図 14 銅の電気伝導度に及ぼす添加元素の影響

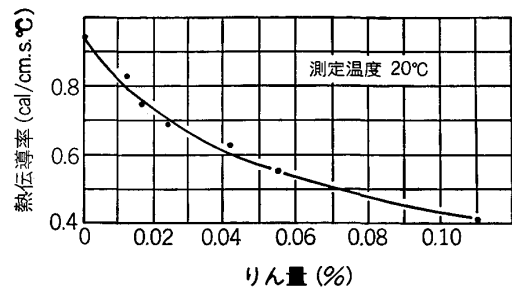


図 15 銅鑄物の熱伝導率に及ぼすりん量の影響

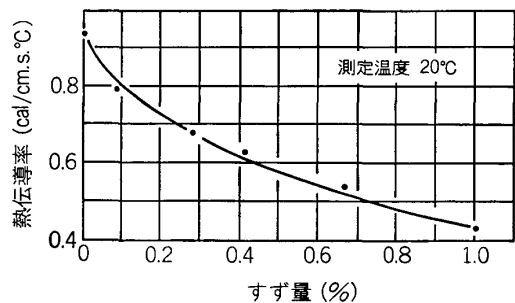


図 16 銅鑄の熱伝導率に及ぼすすず量の影響

ガス吸収量が多く、また極めて顕著な表皮生成型の凝固をするので、健全かつ気密性の高い鑄物を製造することはむずかしく、そのため溶解、鑄造にあたって徹底した管理が必要となってくる。

#### 3.1 性質と規格

純銅鑄物の十分に脱酸された組織はα単相である。熱および電気の伝導度は微量添加元素によって低下する。これら微量添加元素の影響を図14<sup>10)</sup>～図16<sup>11)</sup>に示す。常温においては熱伝導度と電気伝導度との間にはWIEDEMANN-FRANZの法則が成立しており、一方の値が得られれば他方を推測できる。高温においては、電気伝導度は自由電子の平均自由行路が結晶の格子振動により阻害され直線的に低下する。熱伝導度に関しては、自由電子による熱の伝導は低下するが、格子振動による熱の伝導が増加することにより一般的には上昇する。図17に熱伝導度と温度の関係を示す。

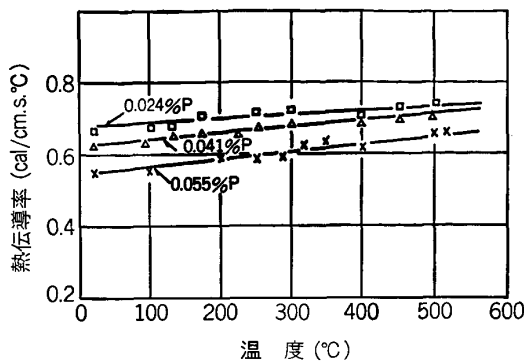


図 17 銅-りん合金の熱伝導率と温度との関係

表 1 DIN 17655-1981 抜粋

種別	Cu% min	IACS% min	引張強さ N/mm <sup>2</sup> min	伸び% min	硬度 (HB) min
G-CuL35	98	60	170	25	42
G-CuL45	99.6	78	150	25	40
G-CuL50	99.7	86	150	25	40

実用の純銅鑄物の純度は一般に 99.5%~99.9% 程度であり，高温強度を高める目的で脱酸剤の他にすず，亜鉛鉄などを合金させることがある．表 1 にドイツの DIN 規格の一部を示す．

### 3.2 溶解と溶湯の処理

純銅溶解で最も注意すべき点は溶湯のガス吸収（特に水素，酸素）である．窒素，アルゴンのような不活性ガスはほとんど溶解しない．水素は溶湯中に原子状態で溶解され，その溶解度は雰囲気中の水素分圧の平方根に比例する（SIEVERTS の法則）．水素溶解度はまた溶湯温度の上昇と共に増加する．図 18<sup>12)</sup> に銅の各温度における水素溶解度を示す．この図から，溶解水素が凝固時における不連続な溶解度の変化によつて多量に放出され，気泡巣の原因になることが分かる．図 19<sup>13)</sup> に銅の水素溶解度におよぼす添加元素の影響を示す．

酸素も溶湯中に溶解し，それ自体では巣の原因とはならないが凝固中に濃縮され水素と反応し，水蒸気ガスを形成して気泡巣となる．

炉内雰囲気中の水蒸気分圧と溶湯中の酸素および水素の平衡関係は次のとおりである．



$$K = [\text{H}]^2[\text{O}]/P_{\text{H}_2\text{O}}$$

ここで  $K$  : 平衡定数  $[\text{H}]$  : 溶湯中の水素， $[\text{O}]$  : 溶湯中の酸素， $P_{\text{H}_2\text{O}}$  : 水蒸気分圧

溶湯中の酸素量は水素量の二乗に反比例し，酸素量が増せば平衡水素量が減少することになる．これはガス炉や重油炉を用いて銅を溶解する場合において重要な関係であり，BAKER ら<sup>14)</sup>によつて提唱された酸化還元溶解の基礎となつている．従つて良好な質の溶湯を得るには，まず酸化溶解を行つて溶湯中の水素を低下させた

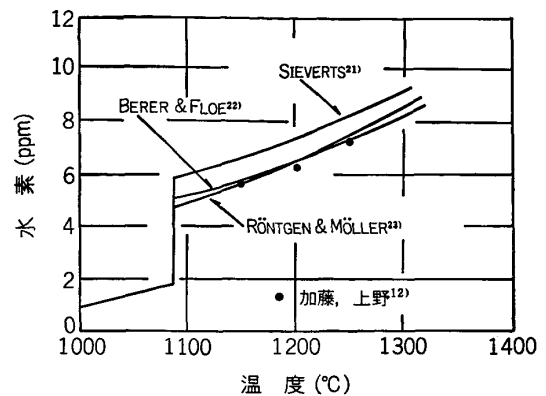
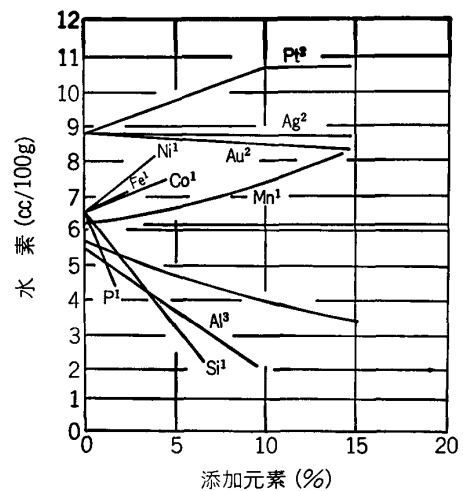


図 18 純銅の水素溶解度



1. 加藤, 折茂, 上野<sup>13)</sup> (1150°C) 2. SIEVERTS<sup>21)</sup> (1225°C)  
3. RÖNTGEN & MÖLLER<sup>23)</sup> (1100°C)

図 19 銅の水素溶解度と添加元素の関係

後，脱酸を行えば良いことになる．しかしながら，酸化還元溶解法はガスや重油を溶解熱源としている場合のみ行われ，酸化雰囲気の場合は溶解者の経験による面が多く，そのため溶湯のガス吸収量のばらつきが大きくなる欠点があつた．最近では，ガス吸収量が少なくまたばらつきも小さい誘導炉が用いられている．表 2 に各種溶解炉で溶解した銅中の水素量，酸素量の一例を示す．

現在行われている溶解法は誘導炉を用い，溶湯表面に黒鉛系フラックスを被覆して溶湯中の酸素量を 0.01~0.015% におさえ，計算上の必要量よりわずかに多い脱酸剤を添加し，酸素量を約 0.002~0.003% とした後，脱水素処理を行い注湯するものである．

溶湯の脱酸には，凝固時における水蒸気反応による気泡巣の発生を防ぐため，酸化物の生成自由エネルギーの絶対値が水蒸気生成自由エネルギーよりも大きな元素を添加すれば良く，それには，りん，リチウム<sup>15)</sup>，ボロン，カルシウム<sup>16)</sup>，マグネシウムなどが考えられるが，生成酸化物の昇華温度が低いこと，溶湯の湯流れ性が良いことなどからりんが使用されることが多い．しかし，鑄物中に残留したりんは図 14，図 15 に示したように熱およ

表 2 各種溶解炉による銅のガス吸収量

溶 解 炉	酸素 ppm	水素 ppm	備 考
重油るつぼ炉	90~350	2.3~3.5	黒鉛フラックスにてカバー
低周波誘導炉	220~320	1.5	3 倍 周 波 炉
都市ガス炉	190	2.1	る つ ぼ 炉

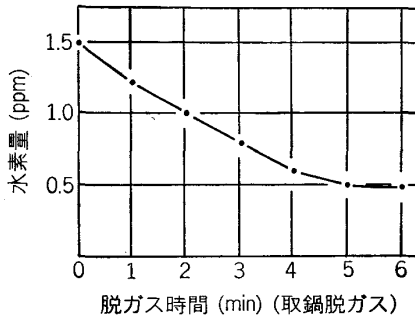


図 20 脱ガス時間と水素量の関係

び電気伝導度を大幅に低下させる欠点がある。

NEU<sup>17)</sup> は、残留りん量を極力おさえるだけのりんを最初に添加して主要な脱酸を行い、次に仕上げ脱酸としてリチウムを添加する二重脱酸法を提唱している。仕上げ脱酸用の元素としては、リチウム以外にもセリウム、カルシウムポーライド (CaB<sub>6</sub>) などがある。

この二重脱酸法は、高伝導度の鋳物を製造するにあたって有効な方法である。しかしながら、この方法を実施するには炉前でのりんの定量分析が必要不可欠であり、更に伝導度を低下させる不純物元素が管理されなければならない。一般には、蛍光X線分析装置による炉前分析と同時に電気伝導度測定器を用いて導電率を測定する二重の管理が行われている。

脱水素には化学的方法と物理的方法があるが、一般には後者が採用されている。これには不活性ガス吹込み法と真空脱ガス法とがある。不活性ガス吹込みによる脱水素効果は、不活性ガス気泡の表面積によつて大きく異なるためばらつきが大きく、真空脱ガス法が有効である。

図 20 に真空脱ガスによる脱水素効果を示す。

以上のように、重油炉、ガス炉から誘導炉への移行、二重脱酸法<sup>18)</sup>と真空脱ガス法<sup>19)</sup>の併用および蛍光X線分析装置と電気伝導度測定器による溶湯管理を行うことによつて、純銅の溶解法は確立され、安定した良質の溶湯を大量に得ることができるようになった。

### 3.3 鋳造法

銅は凝固温度範囲が狭いため典型的な表皮生成型凝固を示すので、肉厚の中心部にひけ巣を生じやすい。このため、健全な鋳物を製作するには、注湯法、押湯および冷し金の適切な大きさ、配置などを十分に考慮して鋳造方案を設計する必要がある。

注湯法は、指向性凝固を促進させるために上注法が多く用いられ、下注法は温度勾配が逆転し、凝固の際ひけ

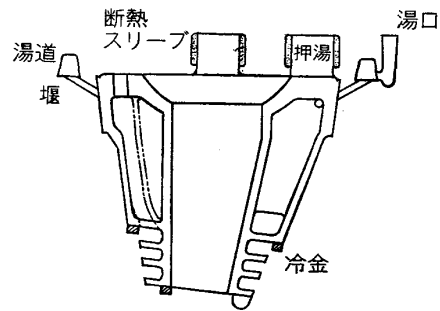


図 21 羽口鋳造方案図

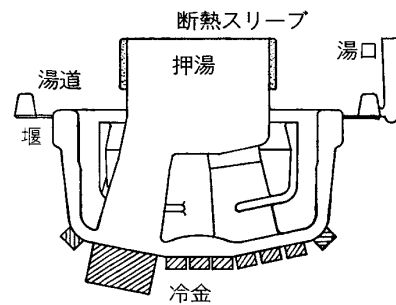


図 22 ランスノズル鋳造方案図

巣が発生しやすく現在は、ほとんど用いられていない。

湯口比(湯口断面積:湯道の総断面積:堰の総断面積)は、注湯時の空気の巻込み、鋳型壁の浸食による砂の巻込みに関して影響を与える因子であるが、この設定はほとんど経験にたよっている。当方においては大体 1:1:1 程度のものを採用している。

押湯は鋳物本体よりも長い間熔融状態になければならないので、その大きさは CHVORINOV の法則<sup>20)</sup>(鋳物の完全凝固に要する時間は鋳物の体積 (V) を鋳物の表面積 (A) で割つたものの二乗に比例する)を用いて近似計算した上、さらに経験を組み合わせる。すなわち  $(V/A)_{押湯} > (V/A)_{鋳物}$  であれば、押湯の大きさとしては十分であるといえる。ランス、羽口の歩留率は 50~70% 程度であり、押湯部には断熱、発熱スリーブを用いて溶湯補給効果を高めている。

冷し金は鋳物の肉厚変動部に使用することにより冷却速度を高め健全な鋳物を得ることができる。材質は鋳鉄、銅、黒鉛などが使用され、厚さは鋳物肉厚の 1.0~1.5 倍程度である。

鋳込み温度は形状、大きさ、中子の有無により異なるが、大体 1200°C 前後である。

図 21 に羽口、図 22 にランスノズルの各鋳造方案を示す。

いずれにしても、鋳造方案設計は経験的要素が非常に大きな比重を占めるため鋳造した鋳物の寸法検査、非破壊検査、気密検査のフィードバックが完全に行われるようなシステムが必要となってくる。

当方においては、図番ごとに鋳造方案を設計し、経験

年数の少ない作業員でも標準作業ができるようにしている。後工程における検査結果がフィードバックされると、これらと鋳造方案と対比され、問題が生じている場合は、方案の検討を加え改善して行くようにしている。また鋳造方案は種別、形状別に層別されており、類似製品を受注した場合、適切な方案設計ができるようになっている。

#### 4. おわりに

亡父潤五が、第一次大戦中、室蘭の輪西製鉄所工作課に勤務いたしておりました折、羽口の品質不良による溶損に悩まされたことが、後に自ら純銅鋳物の製造を志す端緒となり、更に大正9年、その輪西社宅で生まれました私が、紆余曲折はありましたが、結局父の羽口製造に懸ける執念に魅せられて、家業を継承しましたことは、何か運命的なものを感じるしだいでございます。

私共は、このたびの受賞を機に、覚悟を新たに、今後とも鉄鋼界のご発展にいささかなりとも寄与することが出来ますよう、一層の努力をいたす所存でございます。

#### 文 献

- 1) L. ベック, 中沢護人訳: 鉄の歴史 (1974) [たたら書房]
- 2) 三塚正志, 森瀬兵治, 津田勉久: 鉄と鋼, 57 (1971), p. 201
- 3) 鶴飼直道, 上野晴信, 塚本 守: 鉄と鋼, 62

- (1976), p. 1151
- 4) 実案登録第 1169295 号
- 5) 実案登録第 1138136 号
- 6) 雀部 実: わが国における酸素製鋼法の歴史 (日本鉄鋼協会編) (1982), p. 8
- 7) 特許登録第 1081396 号
- 8) 実案登録第 1418857 号
- 9) 日本特許公開公報昭 53-102205 号
- 10) J. S. SMART: J. Trans. AIMME, 147 (1942), p. 48
- 11) 鶴飼直道, 上野晴信: 鋳物, 47 (1975), p. 28
- 12) 加藤栄一, 上野晴信: 日本金属学会誌, 31 (1967), p. 1154
- 13) 加藤栄一, 折茂尚夫, 上野晴信: 日本金属学会誌, 33 (1969), p. 1161
- 14) W. A. BAKER, F. C. CHILD: J. Inst. Met., 70 (1944), p. 349
- 15) E. E. SCHUMACHER: Met. Alloys, 1-15 (1930), p. 714
- 16) E. E. SCHUMACHER: Inst. Met. (1929) 240, p. 85
- 17) M. G. NEU: Met. Ind., 89 (1956), p. 163
- 18) 特許登録第 1218035 号
- 19) 日本特許公開公報昭 54-56925 号
- 20) N. CHVORINOV: Giesserei, 27 (1940), p. 177, 201, 222
- 21) A. SIEVERTS and W. KRUMBHAAR: Z. Phys. Chem., 74 (1910), p. 277
- 22) M. B. BERE and C. F. FLOE: Trans. AIMME, 156 (1944), p. 149
- 23) P. RÖUTGEN and W. MÖLLER: Met. wirtschaft, 13 (1934), p. 18, 97
- 24) 文献 1) 掲載図を模写