

## 羽口溶損に関する実験的研究\*

鶴飼 直道\*\*・上野 晴信\*\*・塚本 守\*\*

## Experimental Studies on Burnout of Tuyere

Naomichi UKAI, Harunobu UENO, and Mamoru TSUKAMOTO

## Synopsis:

Molten iron is poured on the upper side of test piece which section closely resembles to blast furnace tuyere section currently in use. The lower side is cooled by forced circulation of water passing the horizontal rectangular channel. Specimens are oxygen free high conductivity copper (OFHC), 99.7% cast copper, 99.97% aluminum, rolled brass plate, aluminum bronze, mild steel and titanium. A transitional phenomena until burnout were observed and the effect of principal factors on the burnout heat-flux has been investigated. The results obtained are as follows.

(1) In the case of OFHC, the burnout temperature of molten iron is higher as the velocity of cooling water is increased.

(2) The values of burnout heat-flux are larger as the velocity of cooling water is higher and under the same water velocity, burnout heat-flux values increase with the rise of subcooling temperature.

(3) In the case of OFHC, the influence of specimen wall thickness on the burnout heat-flux is negligible if the velocity of cooling water is high.

(4) Experimental equation obtained is as follows:

$$q_{BO} = A \times \Delta T_{sub} \times V^{0.45}$$

$A$  is constant with given material.

$$A = 1.75 \times 10^8 \times \lambda^{0.64} + 5.6 \times T_m - 2.4 \times 10^3$$

Where

$\lambda$  : Thermal conductivity, kcal/m hr °C

$T_m$  : Melting point, °C

$\Delta T_{sub}$  : Subcooling temperature of cooling water, °C

$V$  : Velocity of water, m/sec

## 1. 緒 言

最近高炉用羽口の溶損を伝熱工学的に解明しようとする試み<sup>1)~6)</sup>がなされているが、溶損熱流束におよぼす各因子の影響を系統的にまとめた報告は少ないようである。従来、表面沸騰バーンアウト熱流束を求める実験はボイラー、原子炉での熱伝達に関連して行なわれており<sup>7)~13)</sup>多くの実験式が報告されている。しかしこれらの実験はすべて、非常に薄い肉厚のパイプ、板を使用しており、しかも直接電力加熱によるものであるため、羽口のような肉厚(10mm~30mm)で、しかも溶銑との接触による、バーンアウト現象<sup>2)</sup>にこのような実験方法および結果をそのまま適用できるか明確でない。羽口溶

損機構を解明するには、なるべく実際の条件に近いほうが望ましいと考えられる。そこで本報では、現在使用されている羽口に近い肉厚を持つた数種の試料を用い、下面を流水冷却し上面に各温度の溶銑を流し、試料がバーンアウトにいたるまでの過渡的現象を観察し、さらに溶損熱流束におよぼす主要因子の影響を求めた結果について報告する。

## 2. 実験装置および実験方法

Fig. 1 に実験装置系統図を示した。実験装置は循環回路をなし、系内を循環する冷却水は水道水で、クーリングタワー下の水槽または温水槽にためられ、ポンプ(500 l/min)によつて強制流動される。水温は温水槽中の

\* 昭和50年10月本会講演大会にて発表 昭和50年11月25日受付 (Received Nov. 25, 1975)

\*\* 後藤合金(株) (Goto Gokin Co. Ltd., 447 Nihongi Mizuho-cho Nishitama-gun Tokyo 190-12)

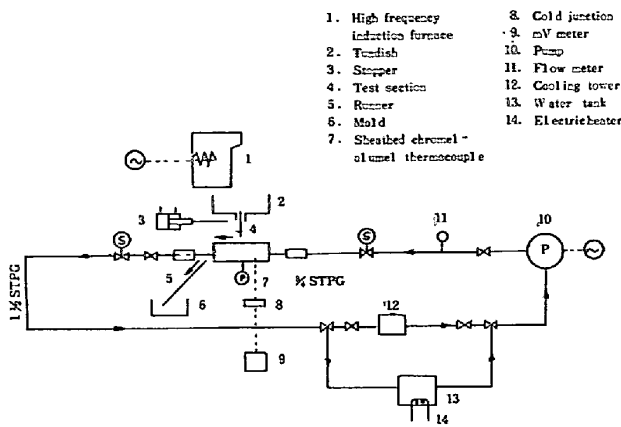


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

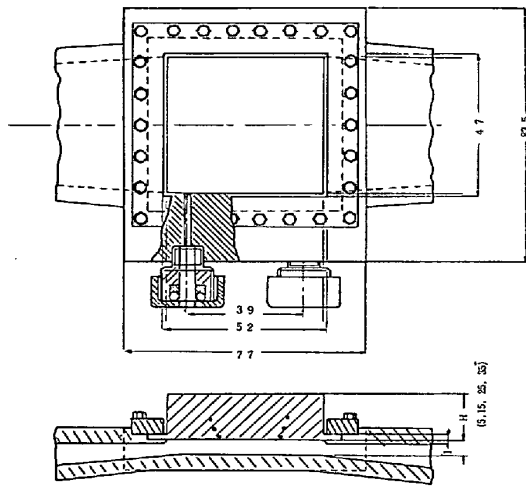


Fig. 2. Test section used for burnout.

投込式電熱器(10 kW×2)により自由に変化できる。流量は流量調節弁により調節され、流量計で測定される。Fig. 2に測定部 (Fig. 1の4の一部)の図を示した。断面図に試料ホルダー、試料固定法、水温取出口を示す。冷却水流路の断面積は 225 mm<sup>2</sup> (5 mm×45 mm)で、冷却水速度は流量から算出した。水温は入口と出口にシー型 CA 熱電対 (1.0 mmφ, 絶縁型) を差し込んで測定した。高周波誘導炉 (3 000 Hz) で製鋼用鉄を 150 kg

溶解し、溶鉄が所定の温度に達した後、炉を傾動しタンディッシュに注湯する。タンディッシュ中の溶鉄はタンディッシュ底の 18 mmφ のノズルより約 400 mm 落下し、測定部に入る。実験に使用した製鋼用鉄の化学分析値を Table 1 に示す。溶鉄が試料上面と接触している時間は約 50 sec であつた。また高周波炉内での溶鉄温度は浸漬消耗型熱電対 (0.1 mmφ PR) により測定し、試料上を流れている溶鉄温度は試料直上にセットされた 0.5 mmφ PR 熱電対により測定した。本実験において、試料と溶鉄の接触方法は、直撃および流下の2とおりとした。ここで直撃とは、ノズルから流出した溶鉄を直下に位置した試料上に直接落下させる方法で、流下とはノズルから流出した溶鉄を一度耐火物上に落下させ、溶鉄の流れの方向を 90° 変え、試料の上面と接触しつつ水平に流す方法とした。いずれの場合も溶鉄はその後溶鉄受けに入る。実験方法は測定部流入冷却水温度および所定の流量が、定常状態とみなされる状態に達した後、所要温度の溶鉄を流し、測定を開始した。試料のまわりには耐火物を使用して、実験中熱流が一次元となるようにした。試料の形状は 45 mm×50 mm×(5~35 mm t) であり、試料の肉厚および材質は自由に変化できるようになっている。試料には 6 対のシー型 CA 熱電対 (1.0 mmφ 絶縁型) を高さ方向 3 レベル (各レベルに 2 対) に差し込み、その起電力を記録した。溶損実験に使用した材質は無酸素銅 (以下 OFHC)、羽口銅 (以下 99.7% Cu)、アルミニウム 鋳物 (以下 Al)、黄銅板 3 種 (以下 BsP

Table 1. Chemical composition of pig iron used for the experiment.

(Pig iron for steel manufacture)  
 (JIS G 2201 GRADE 1)

Analytical values (%)					
C	Si	Mn	P	S	Cu
3.5	0.7 ~0.9	0.6 ~0.7	0.13 ~0.15	0.03 ~0.04	—

Table 2. Properties of materials and specimen wall thickness.

	OFHC <sup>(16)</sup>	99.7% Cu <sup>(16)</sup>	Al	BsP 3	AIBC2	SS 41	Ti
Melting point, (°C)	1083	1083	660	900	1050	1500	1670
Thermal conductivity at 300°C, (kcal/mhr°C)	310	240	200	100	50	40	15
Thermal diffusivity at 300°C, (m <sup>2</sup> /hr)	0.44	0.29	0.34	0.123	0.084	0.053	0.026
Specimen thickness, (mm)	5, 15 25, 35	15	15	15	15	15	15
Distance of thermo-couple from cooling side, (mm)	1, 4, 7	1, 4, 7	1, 4, 7	1, 4, 7	1, 3, 5	1, 3, 5	1, 3, 5

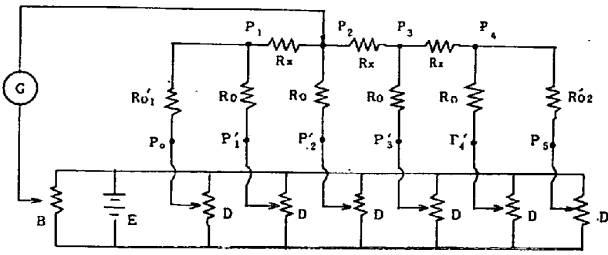


Fig. 3. Electrical resistance-network for analog method of unsteady state heat conduction.

$\alpha$  : Heat transfer coefficient of molten iron side.  
 $\alpha$  : Heat transfer coefficient of cooling water side.  
 $P_0$  : Temperature of molten iron.  
 $P_5$  : Temperature of cooling water.  
 $\lambda$  : Thermal conductivity.

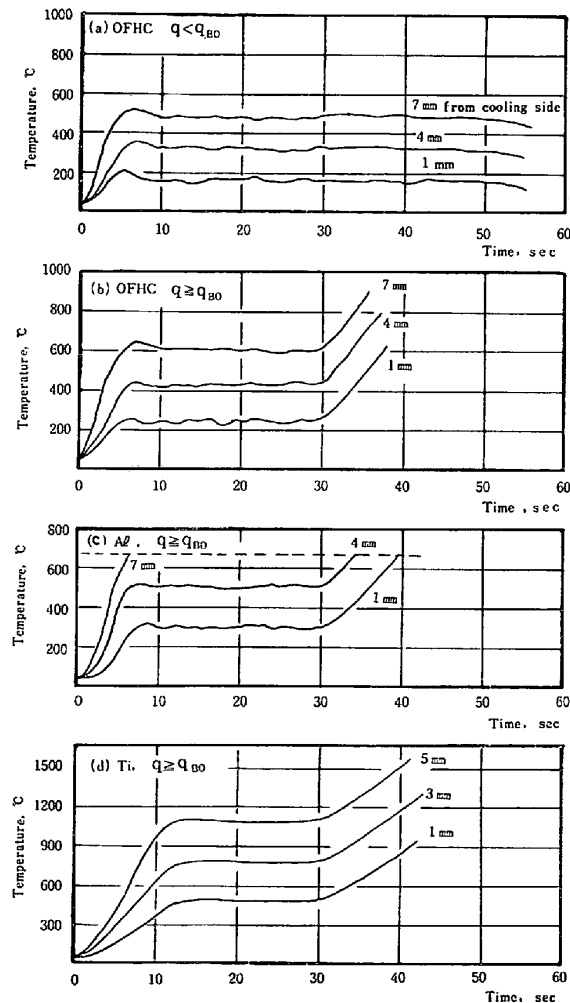


Fig. 4. Relation between temperature in specimen and time of molten iron flow.

3), アルミニウム青銅鑄物 (以下 AIBC 2), 一般構造用圧延鋼材 (以下 SS 41), チタン圧延材 (以下 Ti) である。熱電対挿入孔は 1.1 mm $\phi$  で試料の中心まで達しており、熱電対と挿入孔とのすきまによる温度誤差を防ぐため、孔にはハンダを流し込み密着させた。Table

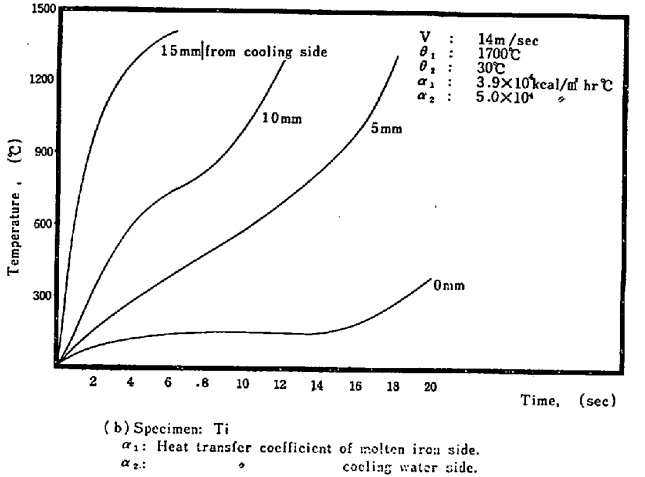
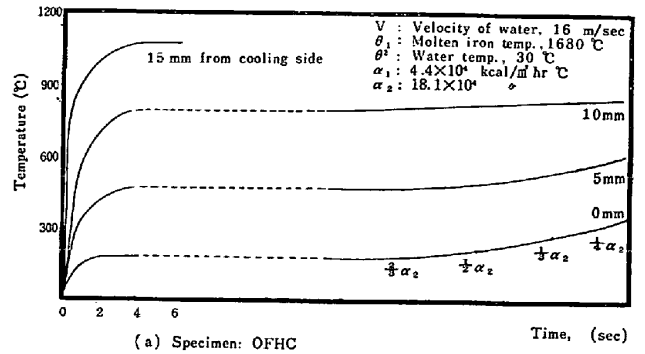


Fig. 5. Relation between temperature and time by electrical analog method.

2 に使用した各試料の厚み、熱電対挿入位置、融点、300 $^{\circ}$ C における熱伝導率、温度伝導率を示した。バーンアウト熱流束は、バーンアウト直前の準定常状態における試料内の温度勾配から算出した。本報告においてバーンアウト点は、試料内温度が急上昇した点をもって定義した。これはなんらかの原因によつて、核沸騰から遷移沸騰、膜沸騰熱伝達に移行して、伝達熱量が急激に低下し、そのため試料内温度が急上昇した点をバーンアウト点とするのが適当であると考えたためである。実験は冷却水速度 1~16 m/sec, 入口サブクール温度 70~130 $^{\circ}$ C の範囲で行なつた。また非定常状態における熱流の問題は数学的解法、図式的解法、相似的解法により解けるが、本報告では比較的短時間に解を導くことができ、装置が簡単でまた再現性に優れている電気回路相似法<sup>15)</sup>を用いた。これは物体内の温度変化を決定する基礎微分方程式をこれに近似した階差方程式に置きかえ、これに相似する電気回路を作製し、各点の電圧を測ることにより内部温度変化を知るものである。Fig. 3 に電位測定を行なつた電気回路を示す。

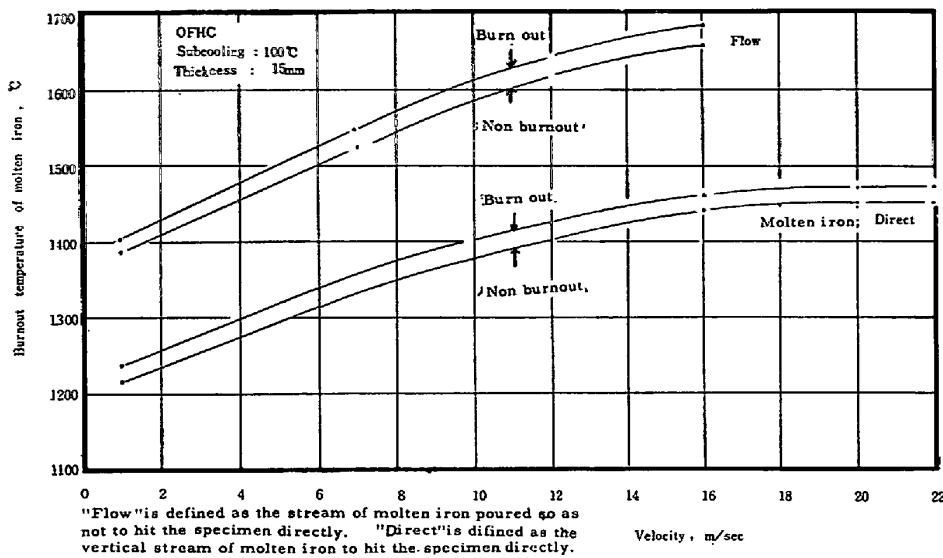


Fig. 6. Relation between velocity of cooling water and temperature of molten iron to attain burnout of OFHC specimen.

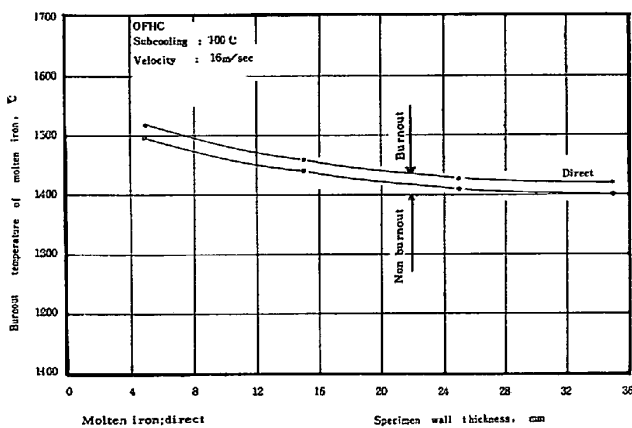


Fig. 7. Relation between specimen wall thickness and temperature of molten iron to attain burnout OFHC specimen.

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 溶損にいたるまでの過渡現象

溶銑の流下による試料内温度と時間との関係の典型的な例を Fig. 4 に示した。温度変化の様相は溶銑からの入熱  $q$ 、冷却水速度、試料の材質によって著しく相違するが、いずれも溶銑の接触と同時に温度は上昇する。(a)は試料が OFHC で溶銑からの入熱  $q$  がバーンアウト熱流束  $q_{BO}$  よりも小さい場合を示す。温度は各レベルとも約 5 sec で最高値に達し、その後低下する。(以下この現象をオーバーシュートと呼ぶ。) このオーバーシュート点を経たのち、ほぼ一定の温度が持続する期間が現れ、溶銑の接触がなくなるまで続く。この期間中は定常的な核沸騰が起こっているものと考えられる。(b)は

試料 OFHC で  $q \geq q_{BO}$  の場合を示し、オーバーシュート点を経たのち、ある一定期間準定常状態が続くが、その後急激に試料の温度は上昇する。この準定常状態の持続時間は  $q$  に依存し、 $q$  が大きくなるにつれてその時間は短くなった。(c)は Al、(d)は Ti の場合である。(c)(d)ではオーバーシュート現象は見られなかった。(b)(c)(d)から明らかなように、材質によって温度の立上がりは相違し、温度伝導率に依存しているのがわかる。また(b)(c)において準定常核沸騰期間中に小さな温度変動がみられる。これはバーンアウトにいたるほどではないが、気ほうの部分的集合が熱伝達を阻害するためと考えられる。Fig. 4 における非定常熱伝導を解析するための電気回路相似法による試料内温度と時間の関係を Fig. 5 に示した。これは非定常熱伝導を物性値一定の仮定に基づく一次元熱伝導の結果である。溶銑側および冷却水側の熱伝達率は、溶銑流下による溶損実験で得たものを使用し、試料表面が融点に達したときには、その試料の融解熱を温度伝導率に關係する比熱に加えた。図中(a)は試料 OFHC、(b)は Ti である。(a)の場合には試料温度は 4 sec 後に溶銑との接触面で約  $1100^{\circ}\text{C}$ 、冷却面温度は約  $180^{\circ}\text{C}$  となり定常状態に達する。またこの定常状態を初期条件として、冷却側の熱伝達率  $\alpha_2$  を  $2/3$ 、 $1/2$ 、 $1/3$ 、 $1/4$  と小さくしていくと試料内温度は上昇する。(b)の場合には 5 sec で高温側表面は融点に達し、冷却面は約  $150^{\circ}\text{C}$  となり、その温度は持続するが、14 sec 付近から温度は上昇しはじめる。この温度上昇は試料表面から溶融し、試料肉厚が減少したためである。これら OFHC、Ti について、ここで溶銑

流下による結果と電気回路相似法による結果を比較してみる。溶銑流下実験での温度測定位置は試料の冷却面から、OFHCは1 mm, 4 mm, 7 mm および Ti は 1 mm, 3 mm, 5 mm であるため高温側の温度は不明であったが、OFHCの場合、冷却側熱伝達率の低下によつて Fig. 4 (b) におけるバーンアウト点からの温度上昇が起こることが考えられ、ほぼ同様な結果が得られた。Ti の場合は Fig. 4 (d) では準定常状態が出現したが、Fig. 5 (b) では冷却側から 5 mm の位置の温度はほぼ直線的に上昇し、相違がみられた。これについては明確ではないが、後述の拡散層の形成の仕方が、実験中一定でないため、融点も変動していることが考えられる。つまり Ti の融点は 1670°C であるが、溶銑実験で使用した試料を XMA により分析した結果、約 0.2 mm の拡散層が確認され、Ti 中の Fe 含量は 12% であつたので、Ti-Fe 合金での融点を 1400°C とした、このことから、試料が高融点材料であつても、溶銑からの熱拡散による試料の合金化が重要な問題となることが考えられる。

3.2 冷却水速度、試料肉厚と溶銑温度の関係

試料 OFHC, サブクール温度 100°C, 肉厚 15 mm について Fig. 6 に溶銑 (150 kg) の直撃また流下によつて、試料が Fig. 4 (b) のような経過をへてバーンアウトする溶銑温度と冷却水速度の関係を示した。直撃の場合、流速 16 m/sec 付近まで溶銑温度は上昇するが、16 ~ 22 m/sec での温度上昇は少ない。また流下の場合に

においても流速の増大に伴つて溶銑温度の上昇がみられる。16 m/sec 以上についての実験点はないが、大幅な上昇はないものと考えられる。Fig. 7 に試料肉厚と溶銑温度との関係を示した。試料は OFHC, 流速 16 m/sec, サブクール温度 100°C, 溶銑は直撃落下である。試料の厚みが 5 mm のとき溶銑温度は最高値を示し、肉厚を増加して行くと、温度は低下し、25 mm, 35 mm でほぼ一定値となる。これらによつて冷却水の高流速化、羽口肉厚の薄肉化が有効であると考えられるが、羽口長時間使用での摩擦特性を加味しなければならない。

3.3 溶損熱流束におよぼす冷却水速度および入口サブクール温度の影響

Fig. 8 に溶銑流下の場合の溶損熱流束と流速および入口サブクール温度との関係を示した。(a)は試料 OFHC, (b)は Al の場合である。これによると(a), (b)ともに、流速が高くなると溶損熱流束は上昇する。また流速が一定の場合、サブクール温度が高いほど溶損熱流束は大きくなり、サブクール温度の効果は低流速よりも高流速において著しいことがわかる。試料材質 OFHC と Al を比較すれば、同一冷却水条件において、溶損熱流束 ( $q_{B0}$ ) は OFHC の方が大きい。この実験から、本装置においては溶損熱流束の流速およびサブクール温度による影響について次の実験式を得た。試料は OFHC である。

$$q_{B0} = 7.24 \times 10^4 \times \Delta T_{sub} \times V^{0.45} \dots\dots\dots (1)$$

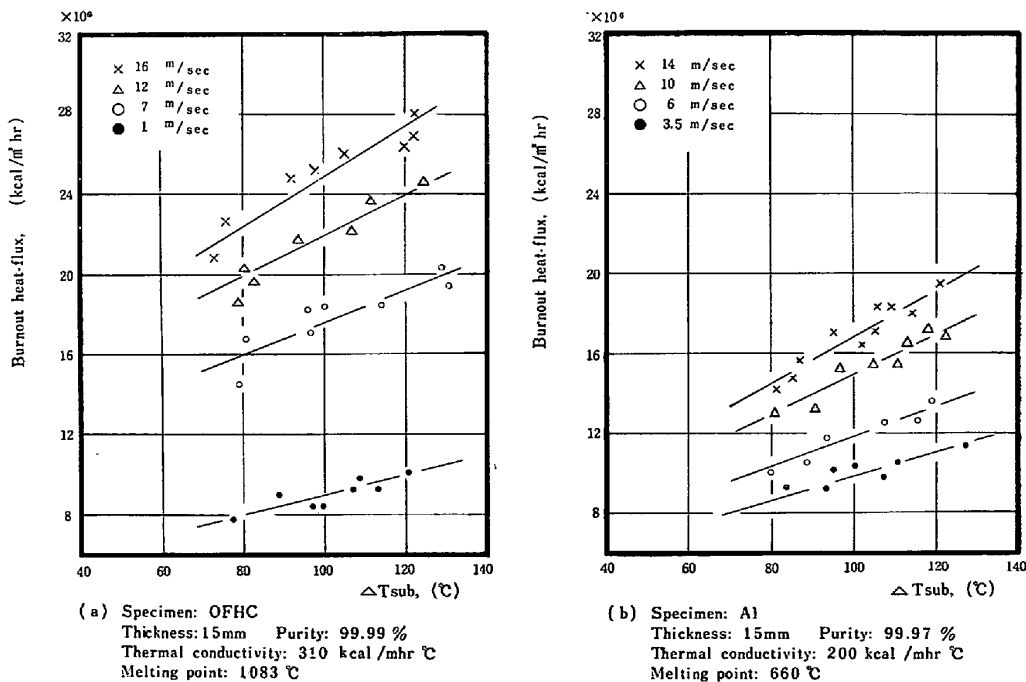


Fig. 8. Effect of subcooling temperature and velocity of cooling water on the burnout heat-flux. (All figures are obtained by flow iron)

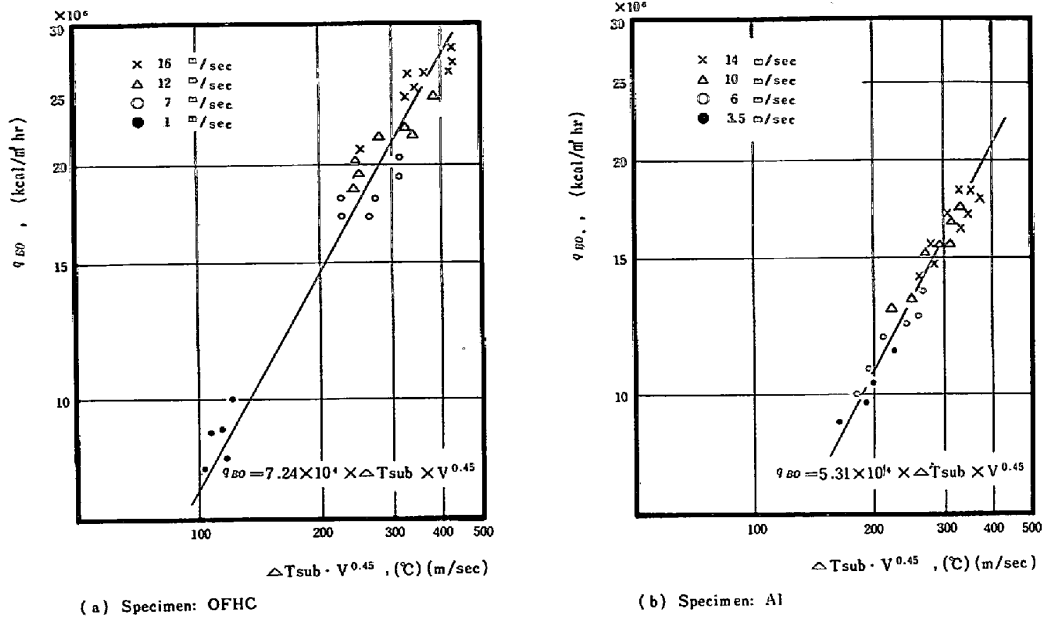


Fig. 9. Relation between experimental results and experimental equation.

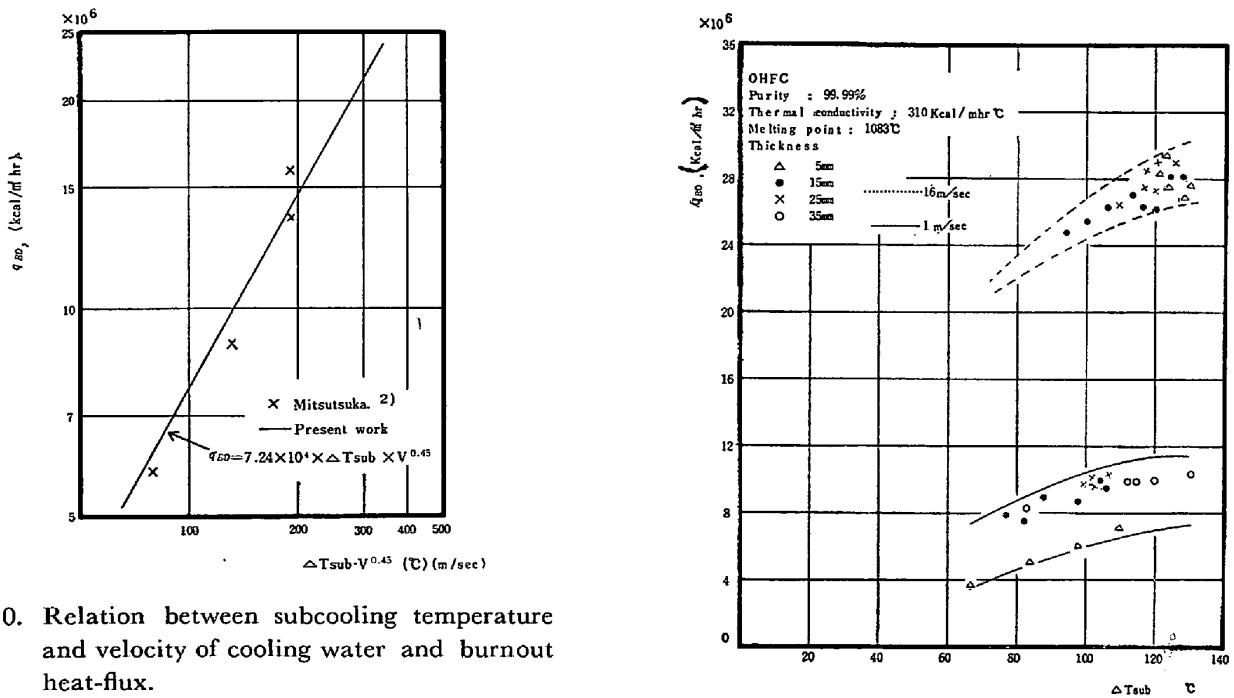


Fig. 10. Relation between subcooling temperature and velocity of cooling water and burnout heat-flux.

$q_{BO}$  : 溶損熱流束, (kcal/m<sup>2</sup> hr)  
 $\Delta T_{sub}$  : 冷却水入口サブクール温度  
 (入口における飽和温度と冷却水温の差),  
 (°C)  
 $V$  : 冷却水速度, (m/sec)

また試料 Al のときは(2)式となつた.

$$q_{BO} = 5.31 \times 10^4 \times \Delta T_{sub} \times V^{0.45} \dots\dots\dots (2)$$

Fig. 9 は実験式(1)(2)と実験で得た値を比較したものである. Fig. 10 は三塚ら<sup>2)</sup>の結果の中で試料が溶損し

Fig. 11. Effect of specimen wall thickness on the burnout heat-flux.

た場合の  $q_{BO}$  と上記(1)式と比較したものである. データは少ないが、ほぼ同じ傾向である. また溶損しなかつたときの  $q_{BO}$  は(1)に比べ小さい値であるが、試料が溶損にいたるような温度の溶鋼を注げば、 $q_{BO}$  は増大するものと考えられる.

3.4 溶損熱流束におよぼす試料肉厚の影響

Fig. 11 に試料 OFHC, 溶銃流下の場合の溶損熱流束

Table 3. Burnout test results by pouring molten iron.

Material	Velocity of cooling water (m/sec)	Subcooling temperature (°C)	Burnout heat-flux (kcal/m <sup>2</sup> hr)
OFHC	1	120	10.0 × 10 <sup>6</sup>
〃	7	114	18.3 × 10 <sup>6</sup>
〃	12	82	19.7 × 10 <sup>6</sup>
〃	16	98	25.2 × 10 <sup>6</sup>
Al	3.5	110	10.5 × 10 <sup>6</sup>
〃	6	80	10.1 × 10 <sup>6</sup>
〃	10	117	17.2 × 10 <sup>6</sup>
〃	14	108	18.2 × 10 <sup>6</sup>
BsP 3	3.5	102	6.2 × 10 <sup>6</sup>
〃	6	83	7.1 × 10 <sup>6</sup>
〃	10	116	12.0 × 10 <sup>6</sup>
〃	14	88	11.1 × 10 <sup>6</sup>
SS 41	3.5	122	5.5 × 10 <sup>6</sup>
〃	6	103	5.6 × 10 <sup>6</sup>
〃	10	86	6.3 × 10 <sup>6</sup>
〃	14	120	10.4 × 10 <sup>6</sup>
Ti	3.5	108	3.3 × 10 <sup>6</sup>
〃	6	103	3.5 × 10 <sup>6</sup>
〃	10	110	5.2 × 10 <sup>6</sup>
〃	14	91	5.2 × 10 <sup>6</sup>

Specimen wall thickness: 15 mm

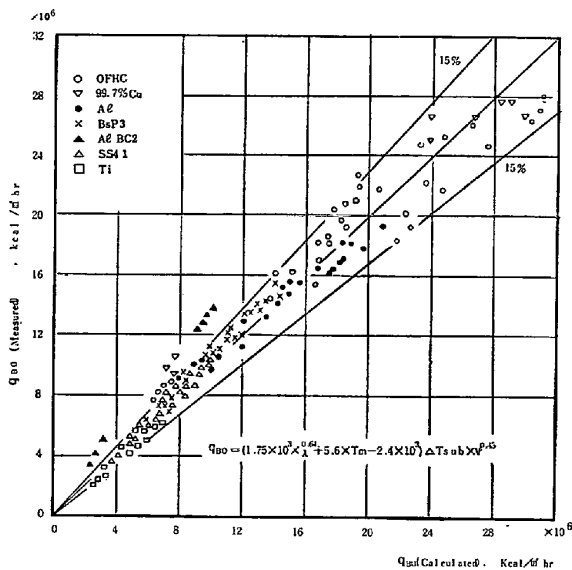


Fig. 12. Relation between experimental burnout heat-flux figures and calculated values by experimental equation.

におよぼす試料肉厚の影響を示した。流速 1 m/sec, 肉厚 5 mm のとき溶損熱流束は低い値を示し, 15 mm, 25 mm, 35 mm の肉厚において差はみられなかった。流速 16 m/sec の場合, 溶損熱流束は試料の肉厚にほとんど影響されなかった。熱通過の式により通過熱量は, 試料肉厚が薄いほど多くまた試料高温側表面温度は薄いほうが低くなるが, 本実験での溶損熱流束は, 試料内温度が急上昇する点での熱流束であり, その時の高温側表面

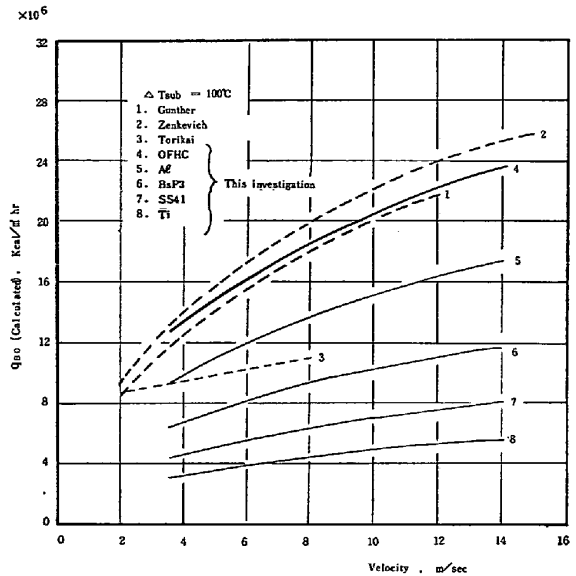


Fig. 13. Relation between velocity of cooling water and burnout heat-flux.

温度を外挿すると, 厚肉試料の場合, ある残存厚みまで高温側は溶融しているものと思われる。このことによつて, 溶損時において残存厚みは試料肉厚に影響されず一定であるものと思われる。しかしながら厚肉の試料ほど溶損にいたるまでの時間は長いことが推測される。流速 1 m/sec 試料肉厚 5 mm に関しては明確でない。

### 3.5 溶損熱流束におよぼす試料材質の影響

Table 3 に各試料材質, 溶銑流下の場合の溶損熱流束と流速およびサブクール温度の値の結果の一部を示した。試料肉厚はすべて 15 mm とした。BsP 3, SS 41, Ti についても OFHC, Al と同様な傾向を示した。ここで BsP 3, SS 41, Ti についての(1)(2)式のごとく実験式を求め,  $q_{BO} = a \times \Delta T_{sub} \times V^{0.45}$  での係数  $a$  を各材質について次の値を得た。OFHC =  $7.24 \times 10^4$ , Al =  $5.31 \times 10^4$ , BsP 3 =  $3.81 \times 10^4$ , SS 41 =  $2.58 \times 10^4$ , Ti =  $1.69 \times 10^4$ 。また熱通過の式から, 熱流に関係すると思われる, 試料の融点と熱伝導率によつて係数  $a$  をまとめると,  $a = 1.75 \times 10^3 \times \lambda^{0.64} + 5.6 \times T_m - 2.4 \times 10^3$  となる。ここで  $\lambda$ : 熱伝導率, kcal/m hr °C  $T_m$ : 融点, °C である。各材質について次の実験式を得た。

$$q_{BO} = (1.75 \times 10^3 \times \lambda^{0.64} + 5.6 \times T_m - 2.4 \times 10^3) \Delta T_{sub} \times V^{0.45} \quad (3)$$

Fig. 12 に(3)式から算出した得と実験値を比較したものを示した。ここで流速 1 m/sec, 16 m/sec での AlBC2, 流速 1 m/sec での OFHC, 99.7% Cu に計算値と実験値にかなりの相違がみられるが, 他は ±15% で適合した。Fig. 12 でのバラツキは, 溶銑からの熱拡散による試料の合金化, また膜沸騰に関する諸因子を実験式に適用で

きなかつたためと考えられる。Fig. 13 に高炉羽口で使用されている、冷却水条件での各材質ごとの(3)式による、流速と溶損熱流束の関係を他の研究者が提出した実験式<sup>12)~14)</sup>を、本実験に当てはめて得た結果と比較したものを示した。本実験での OFHC は GUNTHER<sup>13)</sup>, ZENKEVICH<sup>14)</sup> と比較的良好な一致を示すが、鳥飼ら<sup>12)</sup>とは相違する。他の材質の溶損熱流束は低い値を示した。従来より加熱面の材質は溶損熱流束に影響を与えないものとされているが、他の研究では 0.1~0.5 mm 程度の極薄壁を直接通電加熱によって行なつたものであり、本実験は溶銑と試料の接触による熱伝達であり、かつ伝熱壁は 15 mm の厚みをもっていることなどによって、溶損熱流束は材質によつて異なるものと考えられる。

#### 4. 結 言

水平平板一面加熱壁を有する長方形断面で、強制循環により冷却水速度 1~16 m/sec, サブクール温度 70~130°C の範囲で、溶損実験を行なつた結果、次のような結論を得た。

(1) 試料内温度と時間の関係は入熱、試料材質によつて様相は異なるが、 $q < q_{BO}$  のときはほぼ一定温度が続く、準定常状態が出現する。 $q \geq q_{BO}$  のとき、準定常状態の後、温度急上昇点が現れ、試料は溶融する。準定常時間は  $q$  に依存し  $q \gg q_{BO}$  で準定常状態は出現せず、瞬間的にバーンアウトする。

(2) 試料 OFHC において、溶銑の直撃また流下によつて試料がバーンアウトする溶銑温度と冷却水速度の関係は、流速 16 m/sec まで溶銑温度は上昇する。試料肉厚と溶銑温度の関係は、試料肉厚が厚くなるにつれて、溶銑温度は低下し、25 mm 以上でほぼ一定値となる。

(3) 流速、サブクール温度が高くなるにつれて、溶損熱流束は上昇し、またサブクール温度の影響は低流速

より高流速において著しい。

(4) 試料 OFHC において、流速 1 m/sec, 肉厚 5 mm のとき溶損熱流束は低い値を示し、15~35 mm において差はみられない。流速 16 m/sec のとき、溶損熱流束におよぼす、肉厚の影響はみられない。

(5) 溶損熱流束には試料の熱伝導率および融点の影響がみられ、その結果(3)式が得られた。

終りに本研究遂行にあたり、有意義な助言をいただいた日本鋼管(株)福山製鉄所製銑部長、樋口正昭氏に深く感謝の意を表します。

#### 文 献

- 1) C. M. SCIULLI: J. Metals, (1968) March, p. 53
- 2) 三塚, 森瀬, 津田: 鉄と鋼, 57 (1971) 2, p. 201
- 3) B. I. ラーギン: メタルルグ, 6 (1975) 10, p. 14
- 4) W. E. SLAGLEY: Blast Furn. Steel Pl., (1970) June, p. 395
- 5) H. BECKMAN: Stahl u. Eisen, 90 (1970) 10, p. 508
- 6) 松永, 山岡, 川崎, 原田: 鉄と鋼, 60 (1974), p. 177
- 7) H. S. JACKET: Trans. ASME, 80 (1958), p. 391
- 8) 齊藤, 桜間, 山内: 日立評論原子力論文集, (昭 37), p. 37
- 9) 佐藤, 岐美, 竹内: 機械学会論文集, 27, 177 (昭 37), p. 722
- 10) 佐藤, 岐美, 竹内: 機械学会論文集, 27, 183 (昭 36-11), 1817
- 11) 佐藤, 岐美, 竹内: 機械学会論文集, 28, 195 (昭 37), 1542
- 12) 鳥飼, 堀, 大内: 日本原子力学会誌, 3 (1961) 5, p. 11
- 13) F. C. GUNTHER: Trans. ASME, 73-2 (1951), p. 115
- 14) 日本機械学会: 沸騰熱伝達, (1965), p. 196 [日本機械学会]
- 15) G. LIEBMANN: Trans. ASME, 78 (1956), p. 655
- 16) 鶴飼, 上野: 鋳物, 4 (1975), p. 26