

論文

UDC 621.78.08 : 536.242 : 536.423 : 621.78.063-97

高温鋼板の浸漬冷却過程における沸騰現象および熱伝達に及ぼす水温の効果*

三塚正志**・福田敬爾**

Boiling Phenomena and Effects of Water Temperature on Heat Transfer in the Process of Immersion Cooling of a Heated Steel Plate

Masashi MITSUTSUKA and Keiji FUKUDA

Synopsis:

In order to apply an immersion cooling to the manufacturing process of iron and steel, it is necessary to clarify the characteristics of the immersion method. As the first step, the boiling phenomena and cooling abilities were investigated for a steel plate of about 930°C immersed into the still water of 20~90°C. The results obtained are as follows:

(1) When a plate is immersed, nucleate boiling begins from the edge of a plate and subsequently travels to the center.

(2) When a plate is horizontally immersed, the lower surface of the plate is covered with stable vapor film. Consequently, the released heat from the lower surface is smaller than the upper.

(3) When a 28×220×220 mm³ plate is vertically immersed, the heat transfer coefficient α between the plate and water is a function of surface temperature θ_s and water temperature θ_w . These are related by the following equation. Here, A , B , and K are constants which depend on θ_s .

$$\alpha = [10(A+B\cdot\theta_s)] \cdot [1 - K \cdot (\theta_w - 26)]$$

$$[\alpha]: \text{kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{deg}, [\theta_s, \theta_w]: ^\circ\text{C}$$

(4) α reaches a maximum in the θ_s range from 200 to 300°C and its value is 7~10×10³ kcal/m²·h·deg in the θ_w range from 20 to 30°C.

1. 緒言

浸漬冷却法は、手軽な冷却法だから、鋼材の熱処理用冷却や時間短縮用冷却に広く利用されている。たとえば、生産工程では、赤熱スラブの単純冷却や鑄鍛鋼材の熱処理などに、試験研究部門では、各種試験片の焼入れなどに広く利用されている。

浸漬冷却の研究は、従来から金属関係者^{1)~4)}と機械関係者^{5)~6)}によって行なわれている。前者の研究は、冷却剤の特性の解明に、後者のそれは、熱伝達機構の解明に主力がそそがれている。また、金属関係者は、実用的要求から非定常状態(高温からの冷却過程)で、機械関係者は、学問的要求から定常状態(平衡状態での熱伝達)で研究していることが多い。

一方、従来の研究においては、良好な表面状態の確保(酸化防止)、熱電対の確実な取付け(測定精度の向上)および解析の容易さ(伝熱計算の精度向上)などの理由から、試料として、金、銀、白金、銅およびステンレス

鋼などが多く用いられている^{1)~3)12)}。

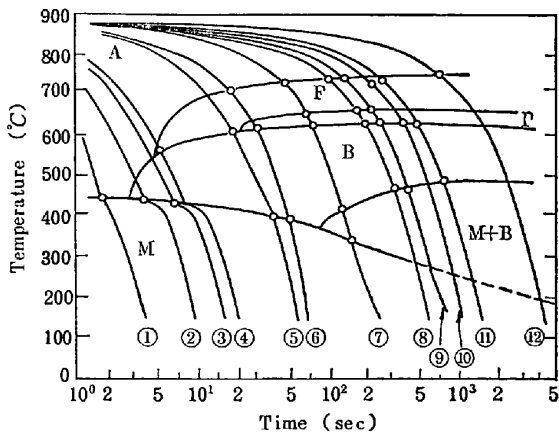
鉄鋼の製造工程に浸漬冷却を導入するに際しては、上記研究の成果を活用すると同時に酸化されやすく、変態を伴う実用鋼を用いて得られたデータが必要である。一方、実機においては、均一な材質と良好な形状が要求されるから、冷却の均一性と対称性が重要である。冷却の均一性を把握するには、10²~10³ mm オーダの試料が必要である。

以上のような理由から、実用規模の鋼材を用いた研究が、栗山ら⁷⁾、山口ら⁸⁾などによって行なわれている。これらの研究では、丸鋼の焼入れが対象だから、直径 D と中心の冷却速度 V を(1)式で関係づけ、定数 C と K を求めている。また、山口らは、压力容器用胴板の熱処理用浸漬冷却過程における熱伝達率の測定結果も報告している⁸⁾。

しかし、冷却水の温度や攪拌状態が冷却速度に及ぼす影響を、実用規模の鋼板を用いて測定した結果は、ほと

* 昭和47年10月本会講演大会にて発表 昭和51年7月2日受付 (Received July 2, 1976)

** 新日本製鉄(株)生産技術研究所 (Process Technology R & D Laboratories, Nippon Steel Corp., 1-1 Edamitsu Yawatahigashi-ku Kitakyushu 805)



Chemical composition (wt%)
 C : 0.14 Si : 0.44 Mn : 1.21 P : 0.015
 S : 0.010 Ni : 0.02 Cr : 0.21 V : 0.043
 Al : 0.082 Cu : 0.043

Symbol
 A : Austenite, B : Bainite, M : Martensite, P : Pearlite

Fig. 1. CCT curve of specimen.

んど報告されていない。それゆえ、筆者らは、上記現象を把握するため、200~1000 mm オーダの低炭素鋼板を用い、浸漬冷却の研究を行なった。

2. 実験および結果

今回の研究においては、浸漬冷却過程における沸騰現象の観察と水温が熱伝達に及ぼす影響の調査を主目的にしたから、比較的小さい試料を用いて実験した。

2.1 実験装置および試料

800 mm□×800 mm h の鋼板製水槽に約 700 mm 高さまで所定温度の水を入れ(静止状態)、電気炉(雰囲気制御なし)で約 930°C に加熱した試料を、水槽上に垂直または水平に吊り、瞬間的に浸漬した。水槽の側面中央部(300 mm w×800 mm h)を透明アクリライト製にし、ここから沸騰現象を観察した。

試料は、28×220×220 mm³ の低炭素鋼で、その成分を Fig. 1 に示す。試料の測温には、0.65 mm φ CA 熱電対を用い、温接点を試料に点溶接した。測温位置は、試料中心から半径 30 mm の円周上にあり、厚み方向は 1/2 t (3カ所) と 1/4 t (2カ所) である。なお、実験の途中で点溶接のはずれた熱電対の指示値は、データとして採用しない。熱電対の起電力は、自動平衡型 mV 記録計に記録した。試料に付着しているさびやスケールの影響を除くため、加熱前に試料表面をグラインダーで研磨した。高温試料の浸漬による水温上昇は約 3 deg だから、水温としては、初期値を用いた。なお、沸騰現象の観察には、20×200×400 mm³ の 18-8 ステンレス鋼板を用いた。

2.2 熱伝達率の算出法

2.2.1 計算方法

任意位置の冷却曲線から、時間 t と温度 θ を、一定温度差ごと (50~100deg) に読み取り、その値を

$$t : t_{0\text{exp}}, t_{1\text{exp}}, \dots, t_{i-1\text{exp}}, t_{i\text{exp}}, t_{i+1\text{exp}}, \dots$$

$$\theta : \theta_{0\text{exp}}, \theta_{1\text{exp}}, \dots, \theta_{i-1\text{exp}}, \theta_{i\text{exp}}, \theta_{i+1\text{exp}}, \dots$$

とし、計算で得られる θ を $\theta_{i\text{cal}}$ とする ($i=0$: 初期条件)。

第 i 区間の計算に際しては、第 $i-1$ 区間終了時の計算上の温度分布を初期条件に用いる。任意の α (一定値) を与え、計算を開始し、(2)式を満足したなら計算を停止し、(3)式の判定を行なう。(3)式を満

$$\theta_{i\text{cal}} \leq \theta_{i\text{exp}} \dots \dots \dots (2)$$

$$| \Delta t_{i\text{cal}} - \Delta t_{i\text{exp}} | / \Delta t_{i\text{exp}} \leq 0.05 \sim 0.1 \dots \dots \dots (3)$$

足する α を第 i 区間の値とする。(2)式を満足し、(3)式を満足しない場合には、 α の値を修正して再計算する。第 i 区間の θ_i には、初期値と終了値の平均値を採用した。なお、(3)式の各時間は、次のように定義する。

$\Delta t_{i\text{cal}}$: 第 i 区間の計算で (2) 式を満足するまでの所要時間

$$t_{i\text{cal}} = \sum_1^i \Delta t_{i\text{cal}}$$

$$\Delta t_{i\text{exp}} = t_{i\text{exp}} - t_{i-1\text{cal}}$$

2.2.2 物性値

変態点以上に加熱された鋼の冷却曲線から α を算出するに際しては、変態に伴う物性値の変化を考慮しなければならない。

○密度 ρ : ρ は、 λ や C に比べると温度依存性が小さく、その上変態の影響も小さいから、温度に依存しない一定値 7.7 g/cm³ を用いた。

○熱伝導率 λ : λ は、温度依存性が大きく、その上同じ温度でも γ 域と α 域で相異なるから⁹⁾、温度と変態割合から決めるべきである。しかし、今回の計算に用いた冷却曲線においては、変態割合が不明だから、平衡状態で得られた(4)式から算出した (θ : 温度, $[\theta]$: °C, $[\lambda]$: cal/cm·sec·deg)。

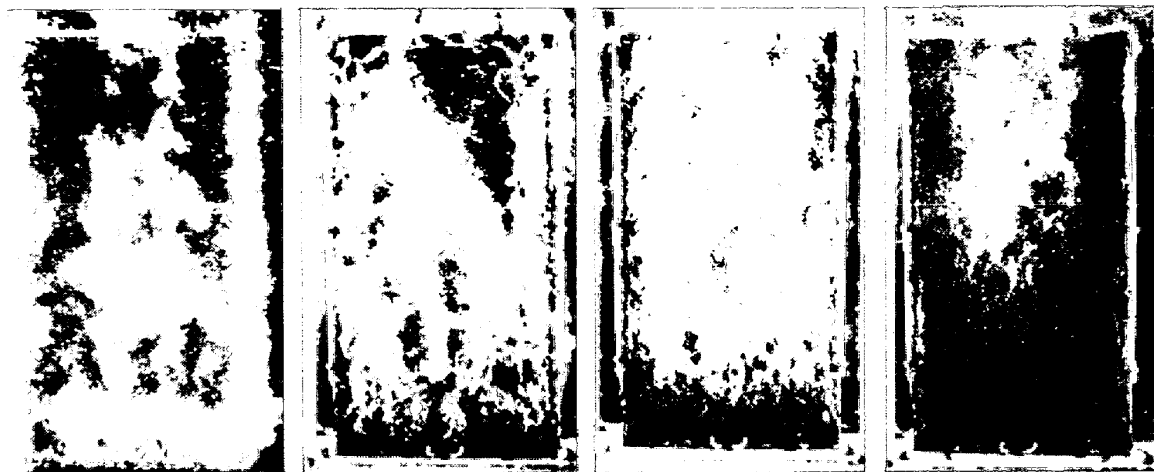
$\theta \leq 870^\circ\text{C}$ の場合

$$\lambda = 0.124 - 7.07 \cdot 10^{-5} \cdot \theta \dots \dots \dots (4-1)$$

$\theta > 870^\circ\text{C}$ の場合

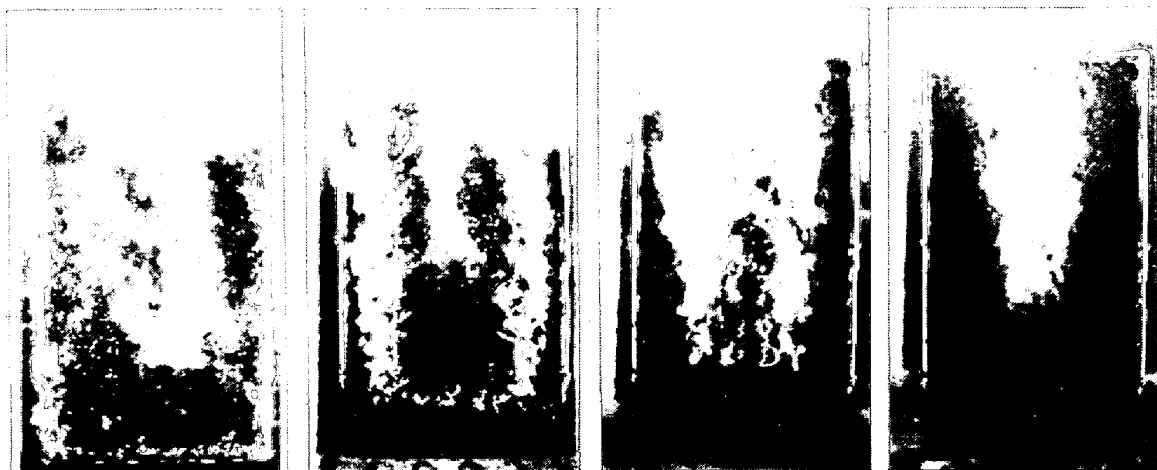
$$\lambda = 0.040 + 2.57 \cdot 10^{-5} \cdot \theta \dots \dots \dots (4-2)$$

○比熱 C : 変態域においては、真比熱による顕熱の外に変態熱も放出するから、この熱も計算に取り入れなければならない。今回用いた試料の CCT 曲線 (Fig. 1 参照) から明らかのように、変態熱の放出量は、温度と冷却速度の関数だから、その取扱いはかなり複雑である。変態



t : 0 sec	t : 10	t : 20	t : 30
① : 928 °C	① : 865	① : 697	① : 392
② : 926	② : 869	② : 764	② : 440
③ : 925	③ : 822	③ : 476	③ : 275

(a) Water temperature : 27 °C



t : 5 sec	t : 40	t : 55	t : 70
① : 905 °C	① : 717	① : 601	① : 319
② : 906	② : 701	② : 508	② : 246
③ : 911	③ : 664	③ : 375	③ : 198

(b) Water temperature : 65 °C

Note
 Specimen : 18-8 steel, 20mmt×200mmw×400mmh, Initial temp. of specimen : 920~930°C
 Temp. measuring position : ①.....70mm from upper edge, ②.....Middle of height,
 ③.....70mm from lower edge, ①~③.....Middle of thickness
 Shutter speed : 1/1 000 s
 Cooling method : vertically immersed, t : time from immersion (s)

Photo. 1. Boiling state in a process of immersion cooling into still water. (×9/10)

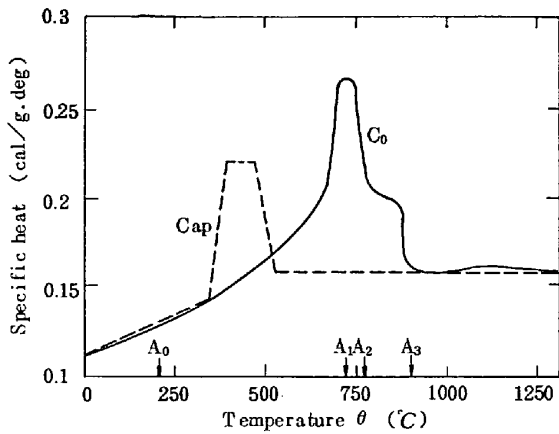
熱を計算に導入する方法としては、変態熱を独立に扱う方法と“顕熱+変態熱”から得られる見掛比熱 C_{ap} を用いる方法とが考えられる。今回の α 算出には、 C_{ap} を用いた。

今回の実験で得られた冷却曲線は、Fig. 1 の CCT の曲線①~⑥の間に存在する。したがって、変態熱の放出

温度範囲は、平衡状態よりかなり低温側にずれる。それゆえ、この CCT から、(5)式のように、 C_{ap} を定量化し、この式から得られる C_{ap} を用いるべきである。し

$$C_{ap} = f(\text{温度, 冷却速度}) \dots\dots\dots (5)$$

かし、現在(5)式は、定量化されていない。したがって、試行錯誤法により、今回の代表的冷却曲線 ($\theta_w : 23 \sim 30$



Note

C_0 : Specific heat in a state of equilibrium
 Cap: Apparent specific heat in a cooling process

Formulas of Cap:

Temp. range	Cap
0~350°C	$Cap = 0.110 + 8.57 \cdot 10^{-5} \theta$
350~400"	$Cap = -0.420 + 1.60 \cdot 10^{-3} \theta$
400~475"	$Cap = 0.220$
475~530"	$Cap = 0.773 - 1.164 \cdot 10^{-3} \cdot \theta$
530~	$Cap = 0.156$

Fig. 2. Apparent specific heat of low carbon steel in cooling process.

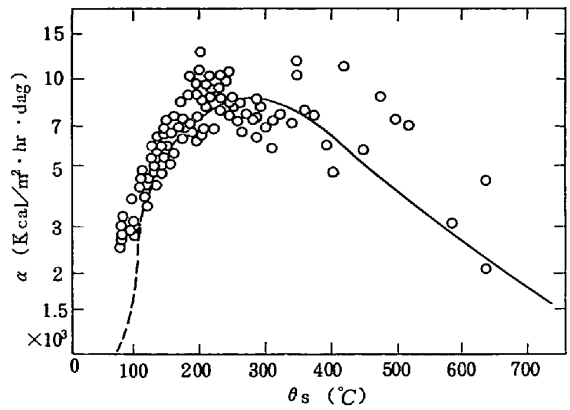
°C) にほぼ一致する計算値が得られる C_{ap} を、温度だけの関数として求めた (Fig. 2 参照). この C_{ap} を α の算出に用いた.

3. 実験結果

3.1 沸騰現象

静止水への垂直浸漬冷却過程における鋼板表面での沸騰現象を Photo. 1 に示す. 鋼板の高さ方向の現象を把握するため、20 mm t × 200 mm w × 400 mm h の 18-8 鋼板を用いた. 水温 θ_w は、27 と 65°C である. これらの写真から、

- i) 核沸騰は、下端と両側端から始まり、中央上部で終了すること、
- ii) 写真では不明だが、測温結果によると、 θ_w が低い場合には、上端からも核沸騰が始まること、
- iii) θ_w が低い場合、浸漬直後は、試料全面が蒸気膜でおおわれるが、2~3 s 後には、端部から核沸騰が始まり、約 20 s 後には、全面で核沸騰が起こること、
- iv) θ_w が高い場合、約 10 s 後までは、全面が蒸気膜でおおわれているが、その後は、下端と両側端から核沸騰が始まり、沸騰ゾーンが段々中央上部に進むこと. また、試料全面で同時に核沸騰が起こる現象は認められないこと、
- v) 試料近傍の冷却水は、昇温しながら、蒸気泡の上昇作用によって、はげしく上昇すること、



Note

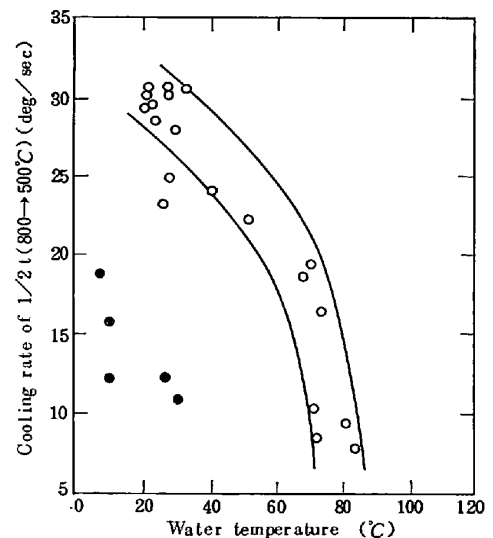
Specimen: low carbon steel
 28×220×220 mm²
 Initial temp of specimen: 915~930°C
 Water temp: 23~30°C
 Temp. measuring position:
 95~140 mm from lower edge
 Cooling method: vertically immersed

Fig. 3. Relation between α and θ_s for immersion cooling of steel plate into still water.

vi) θ_w が低い場合、試料を離れた蒸気泡は、急速に液化すること、
 などがわかる.

3.2 表面温度と熱伝達率

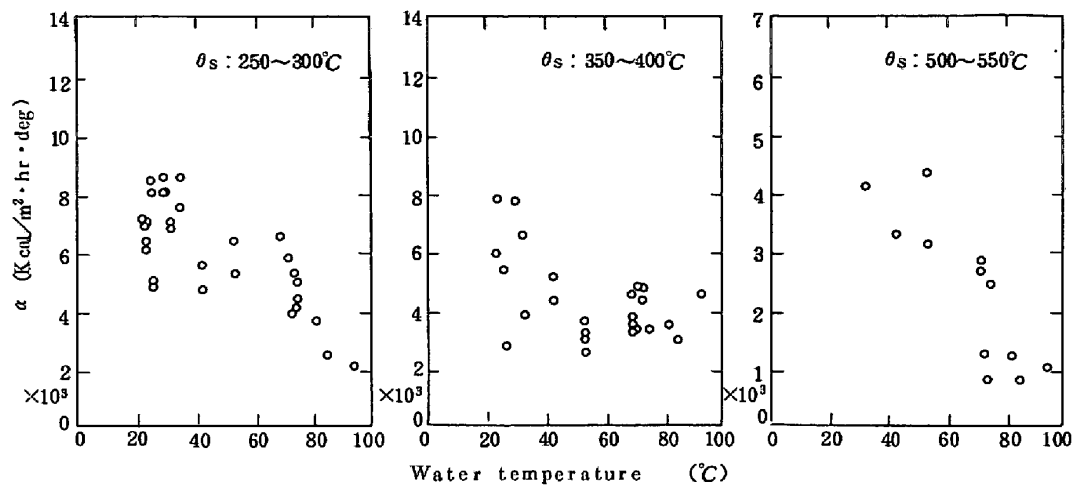
静止水への浸漬冷却の場合には、3.1 節に記述した現象 (沸騰ゾーンの存在) があるから、任意の点の測温値を用いて試料全体の熱伝達率 α を算出する方法には疑問があるわけだが、測定した冷却曲線から α を算出した.



Note

○: Removal of rust before heating and without scale after cooling.
 ●: Adhesion of rust before heating and with tight scale after cooling.
 Experimental condition: same as Fig. 3

Fig. 4. Influence of water temperature on cooling effect.



Note

Experimental condition: same as Fig. 3

Fig. 5. Relation between α and θ_w for immersion cooling of steel plate into still water.

表面温度 θ_s と α の関係を Fig. 3 に示す。この図から、

i) α は、 θ_s が 200~300°C の範囲でもつとも大きく高温側と低温側にずれるにつれて減少すること、

ii) θ_w が 23~30°C の場合、 α の最大値は、 $7\sim 10 \times 10^3 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{deg}$ であること、

がわかる。

3.3 水温の影響

水温 θ_w が冷却速度 V や熱伝達率 α に及ぼす影響を Fig. 4~5 に示す。これらの図から、

i) V は、 θ_w の上昇につれて減少し、特に $\theta_w > 50\sim 60^\circ\text{C}$ の範囲では急減すること、

ii) α は、表面温度 θ_s のいかなる範囲においても、 θ_w の上昇につれて減少すること、

iii) さびの付着した状態で加熱・冷却した試料の V は、かなり小さいこと、

などがわかる。

4. 考 察

4.1 静止水浸漬冷却時の現象

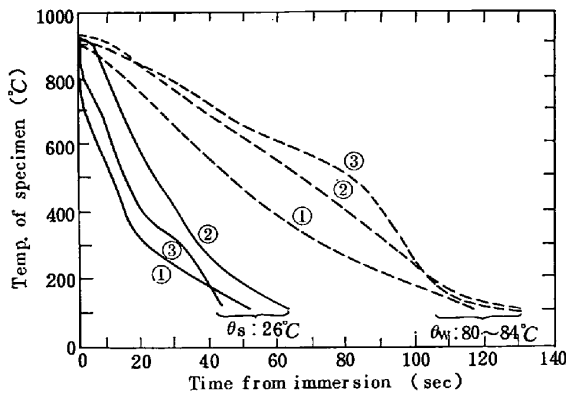
高温鋼板を静止水に垂直に浸漬すると、その直後は、鋼板全体が蒸気膜でおおわれるけれども、端部や突起部は降温しやすいから¹⁰⁾、この部分で蒸気膜が局部的に破れ、核沸騰が始まり、その結果、この部分の温度は急速に降下する。今回のように、突起のない広い鋼板を垂直に浸漬する場合には、核沸騰は、端部から始まり、段々中央部に進む。これに対し、円柱の垂直浸漬の場合には、核沸騰は、下端コーナ部から始まり、段々上部に進む⁴⁾。 θ_w が高い場合、上端から始まる核沸騰がほとんど認められないのは、この部分が、加熱された蒸気泡を含む高

温水におおわれているためと考えられる。以上のように、高温鋼材を静止水に浸漬冷却する場合の冷却強さは、面の凹凸度合と“端部の全長/面積”に依存する。この現象は、正立方体(辺長: 20 mm)の冷却速度が、球や円柱(直径: 20 mm)のそれより大きい、という中川らの実験結果とも一致する¹⁰⁾。

θ_w が低い場合には、ある時間経過後、中央部全面でほとんど同時に核沸騰が始まるが、これは、蒸気膜を介しての放熱によって、全面が、ほぼ同時に特性温度に到達するためと考えられる。これに対して、 θ_w が高い場合に上記現象が認められないのは、蒸気膜を介しての放熱量が少ないうえに、特性温度も低いから¹¹⁾、蒸気膜を介しての放熱によって中央上部が特性温度まで降下するまえに、端部から始まった核沸騰がその部分に到達するためと考えられる。したがって、もし数m×数mの鋼板を高温水に垂直に浸漬するならば、ある時間後には、ほぼ同時に全面で核沸騰が起こるものと推測される。

一方、静止水に水平に浸漬する場合には、試料上面で発生した蒸気泡は、スムーズに離脱上昇するが、下面のそれは離脱しにくい。したがって、 θ_w が高い場合、試料下面は、長時間安定した蒸気膜におおわれる。この結果、Fig. 6 に示すように、試料の厚さ方向の温度分布は非対称になり、 θ_w が高いと“下面>中央”の逆転現象の起こることもある。もちろん、水平浸漬の場合にも、核沸騰は端部から始まり中央部に向って進むが、その速度は、四周ともほぼ等しい。

以上のような理由から、高温鋼板を静止水に浸漬冷却する場合の板内温度分布は、垂直浸漬においては、厚みと幅方向は対称で、高さ方向は非対称になり、水平浸漬



Note

Temp. measuring position :

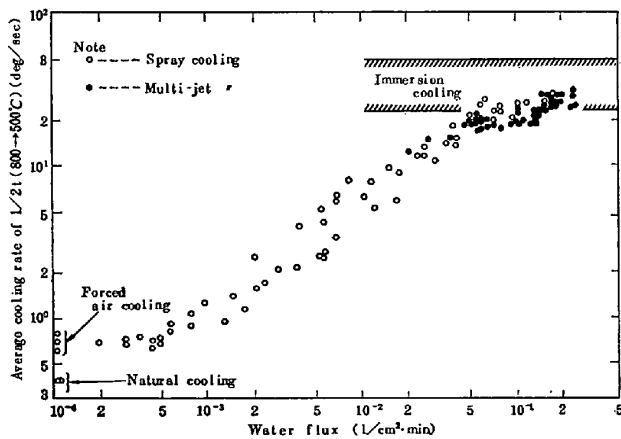
- ①.....1mm from upper surface
- ②.....Middle of thickness
- ③.....1mm from upper surface

Temp. of specimen : average of two experiments

Specimen; low carbon steel 28×220×220mm³

Cooling method; horizontally immersed

Fig. 6. Cooling curves of steel plate horizontally immersed into still water.



Experimental condition :

Immersion.....same as Fig. 3

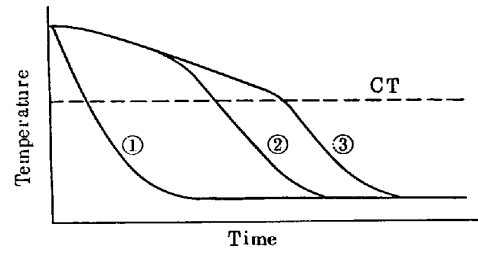
Others.....coolants was impinged on both sides of a specimen horizontally set and temperature of coolants was about 38°C

Fig. 7. Comparison of the immersion method with others about cooling ability.

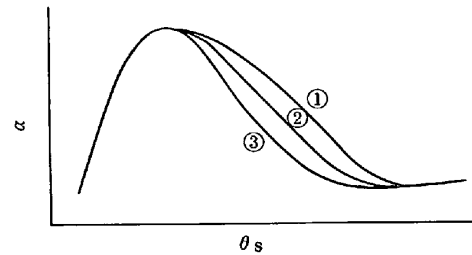
においては、幅と長手方向は対称で、厚み方向は非対称になる。したがって、すべての方向の温度分布を均一化または対称にするには、冷却水の強力な攪拌が必要になる(続報参照)。

4.2 浸漬冷却法と他の冷却法との比較

4.1 節に記述したように、高温鋼板の静止水浸漬冷却では、板内の位置によって冷却のされ方が相異なる。したがって、浸漬冷却法と他の冷却法との冷却能力を比較することはむずかしい。筆者らが以前行なったスプレー冷却と多ジェット冷却は¹¹⁾、試料(成分と寸法)と初期条件(水温と試料温度)が、今回の浸漬冷却とほぼ同じだから、両者の冷却速度 V (1/2 t ~ 800→500°C) を比



(a) Cooling curve



(b) Heat transfer coefficient

Note

① 0.2~0.5 t from edge of specimen

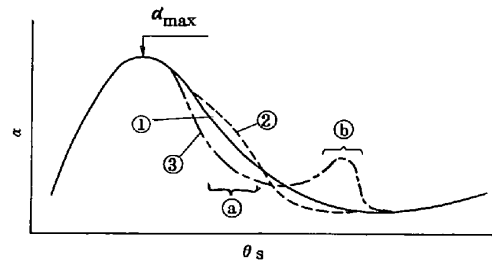
② 2~4 t "

③ 7~10 t "

α is calculated by assuming that heat flow in specimen is one dimension.

CT : characteristic temperature

Fig. 8. A schematic representation of the influence of temperature measuring position to α.



Note

① Use of Cap, θw: 20~30°C

② " Cap, " : high temp.

③ " Co, " : 20~30°C

Fig. 9. A schematic representation of the influence of specific heat to α obtained.

較し、Fig. 7に示す(試料配置:スプレーとジェット…水平、浸漬垂直)。

この図によると、浸漬冷却の V は、噴射水流密度 1 ~ 2 m³/m²·min のスプレーや多ジェット冷却の値とほぼ等しいか若干大きい。しかし、この比較は、28×220×220 mm³ 試料についてのみにあることである。すなわち、試料が大きくなっても、スプレーや多ジェット冷却の V は、ほとんど変わらないが、浸漬冷却の V は、かなり小さくなる。以上のような理由から、Fig. 7は、これらの冷却法の冷却能力を比較する大雑把な目安と考えるべきである。

Table 1. Constant of the experimental equation of α which represents the effects of θ_s and θ_w in a process of immersion cooling into still water.

Surface temp. θ_s (°C)	Value of constants		
	A	B	K
50~90	2.640×10^0	$\div 5.271 \times 10^{-3}$	1.00×10^{-2}
90~110	0.917	+24.41	1.00
110~150	3.179	$\div 3.845$	1.00
150~200	3.416	+2.267	0.92
200~250	3.628	$\div 1.204$	0.90
250~300	3.929	± 0.000	0.90
300~350	4.256	-1.087	0.92
350~400	4.454	-1.653	1.00
400~450	4.540	-1.868	1.09
450~500	4.571	-1.938	1.17
500~550	4.571	-1.938	1.21
550~600	4.406	-1.638	1.23
600~650	4.513	-1.816	1.24
650~700	4.336	-1.543	1.25
700~750	4.364	-1.584	1.25
750~800	3.960	-1.045	1.25

Experimental equation : $\alpha = [10^{(A+B \cdot \theta_s)}] \cdot [1 - K \cdot (\theta_w - 26)]$, $[\alpha] : \text{kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{deg}$, $[\theta_s, \theta_w] : ^\circ\text{C}$

4.3 熱伝達率の算出法

4.1 節に記述したように、高温鋼板を静止水に浸漬する場合には、核沸騰ゾーンが端部から中央部に向つて進むから、板内位置によって冷却曲線は相異なる (Fig. 8 (a)参照)。その結果、同一試料内で得られた冷却曲線から算出した α でも、Fig. 8 (b) のように相異なる現象が起こる。

一方、同じ冷却曲線から得られる α でも、計算に用いる比熱によって、得られる値は相異なる。例えば、Fig. 2 の C_0 と C_{ap} を用いた例を Fig. 9 に示す。この図において、 α_{\max} より高温側の α は、 C_{ap} を用いると、 θ_s の上昇につれて漸減するが、 C_0 を用いると、㊸部では前者より小さく、㊹部では大きくなる (前報¹¹⁾ の Fig. 5 参照)。これは、 C_0 を用いると、㊸部では、実際には変態熱を放出しているわけだが、計算上は放出しないことにするため、得られる α は、実際より小さくなり、これに対して、㊹部では、上記と逆現象が起こるため、得られる α は、実際より大きくなる。

以上のような理由から、高温鋼板を静止水に浸漬する時の冷却曲線から算出する α は、厳密な直味では、“熱伝達率” といえないかも知れない。それゆえ、“熱伝達率” と呼ぶ場合には、実験条件と α の算出条件を明記すべきである。

4.4 表面温度と熱伝達率

静止水浸漬冷却時の α は、Fig. 3 に示すように θ_s が 200~300°C 近傍で最大になる。この現象は、抜山¹²⁾ が行なつた水中の白金線の沸騰曲線、多賀谷¹⁾ が行なつた銀棒を水中に浸漬する時の表面の冷却曲線および筆者

らが行なつた鋼板上の水滴の蒸発曲線から容易に理解できる。

Fig. 3 と Fig. 5 によると、 α のバラツキはかなり大きい。この原因は、試料の表面性状 (さびやスケールの付着)、試料の測温法 (被測温部と熱電対の温接点間の時間遅れ) および α の算出法などによるものと考えられる。

次に、Fig. 3 の α を伝熱計算に用いるため、その代表線を数式化する。 θ_s を 50deg ごとに区切り、その区間内では、 θ_s と $\log \alpha$ の関係は直線と仮定する。したがって、両者の関係は、

$$\log \alpha = A + B \cdot \theta_s \dots \dots \dots (6)$$

A, B : 定数

となる。 θ_s の各区間について、A と B を求め、Table 1 に示す。この表によると、 α は、 θ_s の上昇につれて、 $\theta_s < 250^\circ\text{C}$ では急増し、 $\theta_s > 300^\circ\text{C}$ では漸減する。

なお、(6)式および後述の(7)~(8)式は一般性を有しているが、Table 1 の A, B および K の値は、今回とほぼ等しい実験条件の時にのみ使用すべきである。

4.5 水温と熱伝達率

多賀谷¹⁾ や筆者⁴⁾ の研究によると、高温の銀棒を水中へ浸漬する時の特性温度は、 θ_w の上昇につれて降下する。この現象は、試料から冷却水への伝達熱量 (単位面積×単位時間当り) が、 θ_w の上昇するにつれて減少することを示している。今回の結果によると、Fig. 4 ~ 5 に示すように、バラツキは大きい。V や α は、全体の傾向として、 θ_w の上昇につれて減少し、特に V は、 $\theta_w > 50 \sim 60^\circ\text{C}$ の範囲で急減する。それゆえ、強力冷却を目的とする冷却設備においては、 θ_w の上限を約 40~

50°C とすべきである。

次に、伝熱計算に用いるため、 θ_w と α の関係 (大雑把な代表線) を数式化する。(6)式の算出法と同様、 θ_s を 50deg ごとに区分し、各区分について、 θ_w と α の関係を直線と仮定し、 $\theta_w : 26^\circ\text{C}$ を基準にして、両者の関係を数式化すると、

$$\alpha = \alpha_{26} \cdot [1 - K \cdot (\theta_w - 26)] \dots\dots\dots (7)$$

K : 定数

となる。ここで α_{26} は、 $\theta_w : 26^\circ\text{C}$ の α である。各温度区間の K の値を Table 1 に示す。 K は、水温が冷却効果に及ぼす影響度合を示す。

θ_s と K の関係から、 α に及ぼす θ_w の影響は、 $\theta_s : 150 \sim 350^\circ\text{C}$ の範囲でもつとも小さく (K : 小)、 θ_s の上昇につれて漸増すること (K : 増大) がわかる。この理由としては、 $\theta_s : 150 \sim 350^\circ\text{C}$ では、試料表面で冷却水がはげしく核沸騰するから、 θ_w の影響が比較的小さく、これに対し、 θ_s : 高温では、 θ_w の上昇につれて試料表面に蒸気膜が形成されやすくなるため、 θ_w の影響を強く受けるものと考えられる。

一方、(6)式は、 $\theta_w : 23 \sim 30^\circ\text{C}$ で成立するから、その代表値を 26°C とすると、(6)式から得られる α が、(7)式の α_{26} と一致する。したがって、(6)式を(7)式に代入すると、

$$\alpha = 10^{[A+B \cdot \theta_s]} \cdot [1 - K \cdot (\theta_w - 26)] \dots\dots\dots (8)$$

となる。なお、Table 1 の値は、限定された条件のもとで行なわれた実験から得られたことを付記しておく。

5. 結 言

実用鋼材を浸漬冷却する時の沸騰現象や冷却能力を調べるため、約 930°C に加熱した鋼板を $20 \sim 90^\circ\text{C}$ の静止水に浸漬する実験を行ない、次の結果を得た。

(1) 垂直浸漬の現象

(i) 高温鋼板を垂直に浸漬する場合、核沸騰が、主に下端と両側端から始まり、核沸騰ゾーンは中央上部に進む。

(ii) 水温が低いか試料が広い場合には、浸漬後しばらくは、(i)の状態を続けるが、蒸気膜を介しての放熱によつて、冷却の遅い部分が特性温度近傍まで降下すると、ほぼ同時に全面で核沸騰が起こる。

(iii) これに対し、水温が高いか試料が狭い場合には、核沸騰ゾーンの進行によつて、全面が冷却される。

(2) 水平浸漬の現象

(i) 高温鋼板を水平に浸漬する場合、核沸騰は、上

下面とも四周から始まり、中央部に進む。

(ii) 上面で発生した蒸気泡は、スムーズに離脱上昇するが、下面のそれは、試料下面に長時間滞在する。

(iii) (ii)の結果、上下面の冷却効果に差が生じ、水温が高い場合、その差はかなり大きくなる。

(3) (1)と(2)の結果、浸漬冷却過程における板内温度分布は、垂直浸漬では、厚みと幅方向は対称、高さ方向は非対称、水平浸漬では、幅と長手方向は対称、厚み方向は非対称になる。

(4) 浸漬冷却の冷却能力は、試料の大きさに依存するけれども、 $28 \times 220 \times 220 \text{ mm}^3$ 鋼板の垂直浸漬の場合、噴射水流密度 $1 \sim 2 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{min}$ 程度のスプレーや多ジェット冷却とほぼ等しい。(ただし $\theta_w : 20 \sim 30^\circ\text{C}$)

(5) 浸漬冷却の冷却能力は、水温の上昇につれて減少し、特に $50 \sim 60^\circ\text{C}$ 以上では急減する。

(6) 浸漬冷却時の熱伝達率 α は、試料表面温度 θ_s と水温 θ_w に依存し、 $\theta_s : 200 \sim 300^\circ\text{C}$ で最大になり、 $\theta_w : 20 \sim 30^\circ\text{C}$ の場合、その値は、 $7 \sim 10 \times 10^3 \text{ kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{deg}$ である。

(7) $28 \times 220 \times 220 \text{ mm}^2$ 鋼板を垂直に浸漬する場合の α (代表値) を、 θ_s と θ_w の関数として求め、

$$\alpha = [10^{(A+B \cdot \theta_s)}] \cdot [1 - K \cdot (\theta_w - 26)]$$

A, B, K : 定数 (Table 1)

$[\alpha] : \text{kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{deg}$

$[\theta_s, \theta_w] : ^\circ\text{C}$

を得た。

文 献

- 1) 多賀谷正義, 田村今男: 金属学会誌, B15 (1951) 11, p. 535 (第1報) から B20 (1956) 9, p. 480 (第13報) まで
- 2) T. F. RUSSELL: Iron Steel Inst. Spec. Rep., No. 24 (1939), p. 283
- 3) 依 信次: 鉄と鋼, 27 (1941) 8, p. 583
- 4) 三塚正志, 福田敬爾: 鉄と鋼, 60 (1974) 14, p. 2079
- 5) 中川有三, 吉田哲夫: 化学機械, 14 (1950) 7, p. 283
- 6) 日本機械学会編: 沸騰熱伝達, (1965), [日本機械学会]
- 7) 栗山良員, 雑賀喜規, 利岡清継, 末松岩生: 石川島播磨技報, 6 (1966) 29, p. 224
- 8) 山口富夫, 福栄久宜, 重松広次, 原田和明: 三菱重工技報, 6 (1968) 1, p. 30
- 9) 日本学術振興会編: 鉄鋼熱計算用数値, (1966), [日刊工業], p. 14~19
- 10) 中川, 吉田: 日本機械学会論文集, 18(1952)72, p. 16
- 11) 三塚正志: 鉄と鋼, 54 (1968) 14, p. 1457
- 12) 抜山四郎: 機械学会誌, 37 (1934) 206, p. 367