

論 文

UDC 669.14-158.81 : 621.78.084.063 : 536.242 : 536.423

高温金属を水冷するときの冷却曲線における遷移沸騰 および特性温度に関する研究*

三 塚 正 志**・福 田 敬 爾**

Study on the Transition Boiling and Characteristic Temperature in a Cooling Curve during Water Quenching of Heated Metal

Masashi MITSUTSUKA and Keiji FUKUDA

Synopsis:

In previous investigations the transition boiling phenomenon has not been taken into consideration in the cooling process of metals in the water. This study is aimed to make clear the transition boiling phenomenon by using silver rod being cooled in city water, and this transition region is shown in a cooling curve.

Surface temperature measurements of rod and high-speed photographs of boiling clearly evidence the existence of an unstable transition boiling state between film boiling and nucleate boiling.

It is proposed that the finishing temperature of film boiling is defined as upper characteristic temperature and the starting temperature of nucleate boiling as lower characteristic temperature in the cooling curve.

It is also shown that the characteristic points on the boiling curve and vaporization curve are well correspondent to the characteristic points on the cooling curve mentioned above.

(Received March 18, 1974)

1. 結 言

高温金属を液体中に浸漬冷却する時、金属から液体への伝達熱量 q は、金属表面温度 θ_s に依存するから、 θ_s の降下速度自体 θ_s の影響を受ける。従来の研究によると^{1)~4)}、 θ_s は、一般的に、Fig. 1のように降下し、各領域に対応する熱伝達現象は、

I : 浸漬の瞬間から安定した蒸気膜が形成されるまでの段階

II : 金属の全面が安定した蒸気膜でおおわれている段階

III : II の蒸気膜の崩壊開始から沸騰終了までの段階

IV : 非沸騰段階

である。

冷却効果の点からは、III領域がもつとも重要だから、IIとIIIの境界温度は、特性温度 (characteristic temperature, 以下CTと略記)と呼ばれている²⁾。JISK-2526⁵⁾では、CTを“蒸気膜の崩壊する温度”と定義している。

高温金属から液体への熱伝達を説明する特性図として

は、冷却曲線以外に沸騰曲線や蒸発曲線が用いられる。これらは、同じ現象を説明する特性図だから、各特性点は互いに対応するはずである。これらの対応関係は、

冷却曲線	沸騰曲線	蒸発曲線
膜沸騰域	膜沸騰域	膜沸騰域
特性温度	熱流束極小点 遷移沸騰域 熱流束極大点	ライデンフロスト点 遷移沸騰域 液滴寿命極小点
核沸騰域	核沸騰域	核沸騰域

である。沸騰曲線と蒸発曲線では、膜沸騰と核沸騰の間に存在する遷移沸騰域や q の極小点・極大点などを明確にしている。これに対し、冷却曲線には、遷移沸騰域に対応するものが含まれていないため、沸騰熱伝達現象を明確に説明することができない。

一方、上記3曲線は、同じ現象の特性図でありながら、対応する特性点の温度が相異しているように見受けられる。これは、金属と液体の接触状態や液温の違いによる

* 昭和46年10月本会講演大会にて発表
昭和49年3月18日受付

** 新日本製鉄(株)生産技術研究所

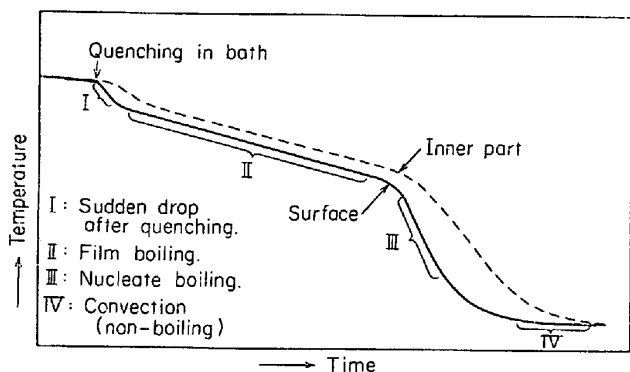


Fig. 1. Schematic illustration of the usual cooling curve.

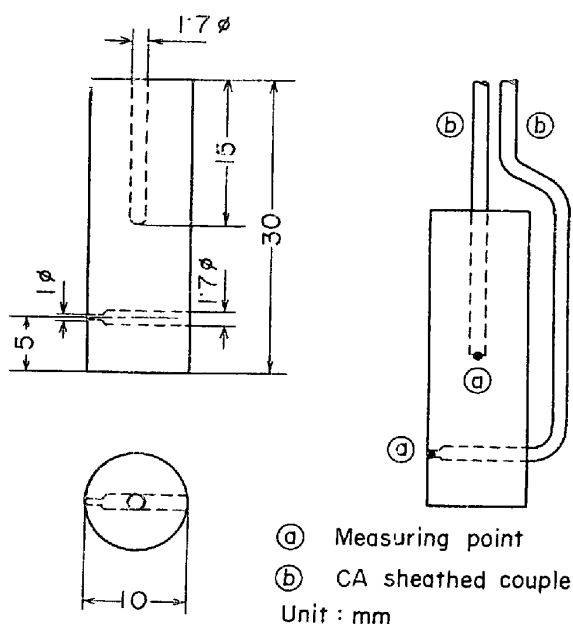


Fig. 2. Details of silver rod.

ものと考えられる。

以上のような理由から、本研究では、冷却曲線における遷移沸騰現象を実験的に解明し、その結果を用いて、3曲線の各特性点の対応関係を明確にする。

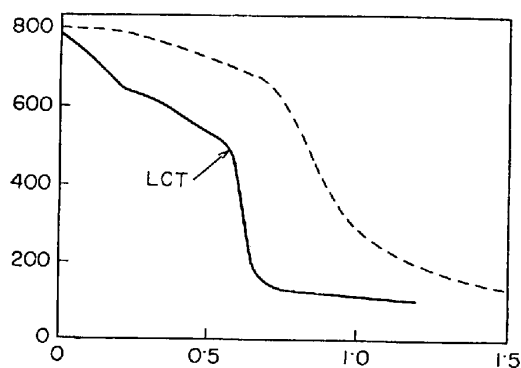
2. 実験

2.1 実験装置

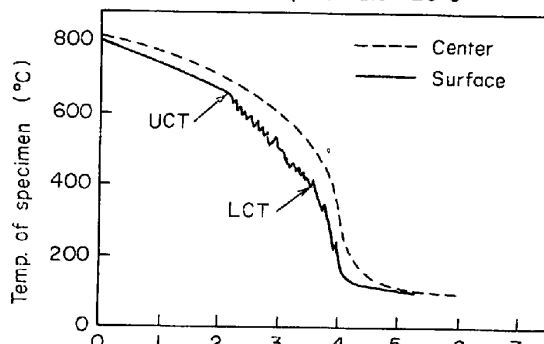
実験装置は、加熱部、冷却部、温度測定部および写真撮影部から構成されている。加熱部は雰囲気制御しない電気炉、冷却部は20cm×30cm hのアクリライト製水槽、測温部は電磁オシロ(Honeywell社製906C型Visicorder)で振動子の性能は、40 cps, 6.2 mm/μA, 15.2 mm/mV、撮影部は高速度カメラ(700~10000コマ/秒)である。

2.2 試料および熱電対取付け法

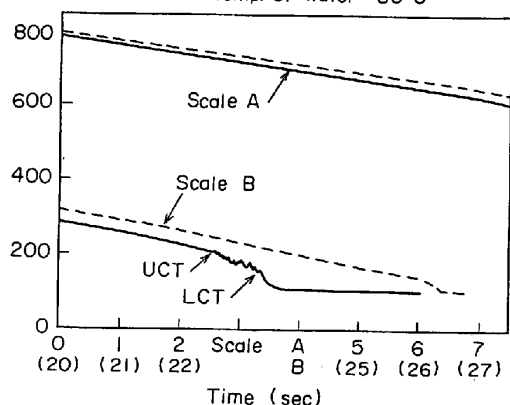
試料は JISK-2526⁵⁾ や多賀谷ら²⁾ と同じ 10mm φ ×



(a) Initial temp. of water 20°C



(b) Initial temp. of water 60°C



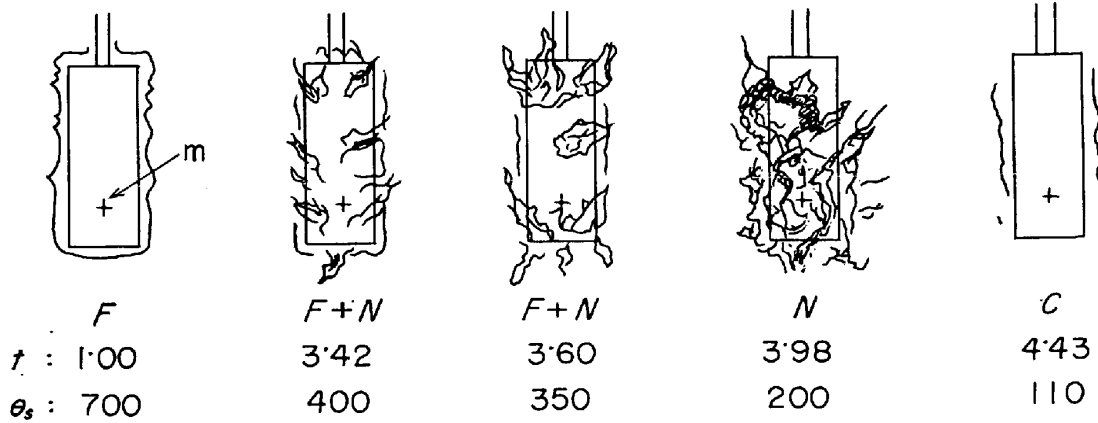
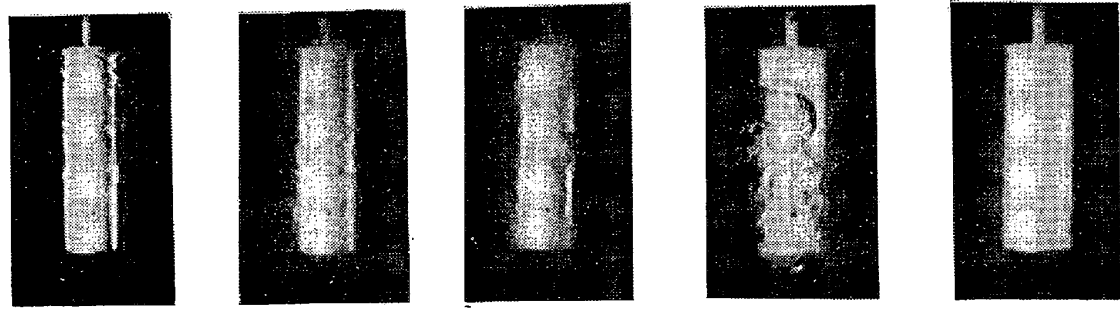
(c) Initial temp. of water 99°C

Fig. 3. Cooling curve of silver rod quenched in city water (initial temp. of rod 800°C).

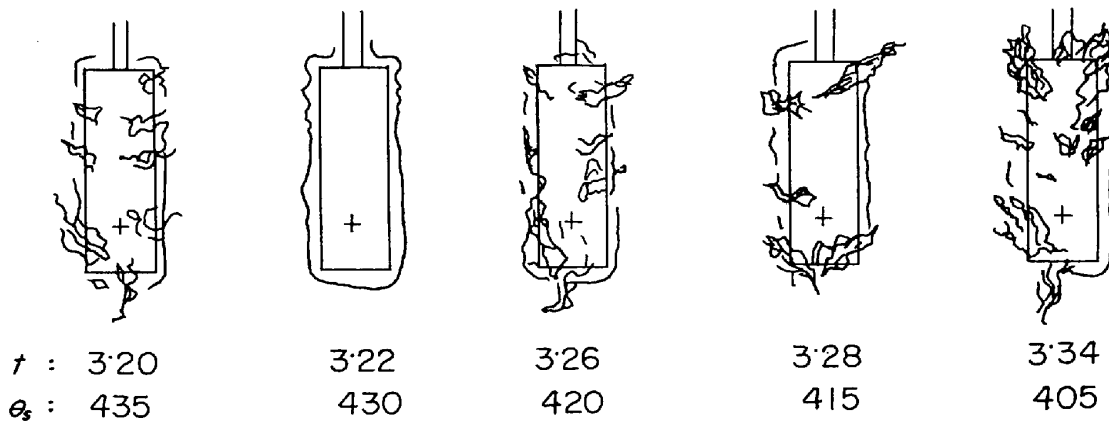
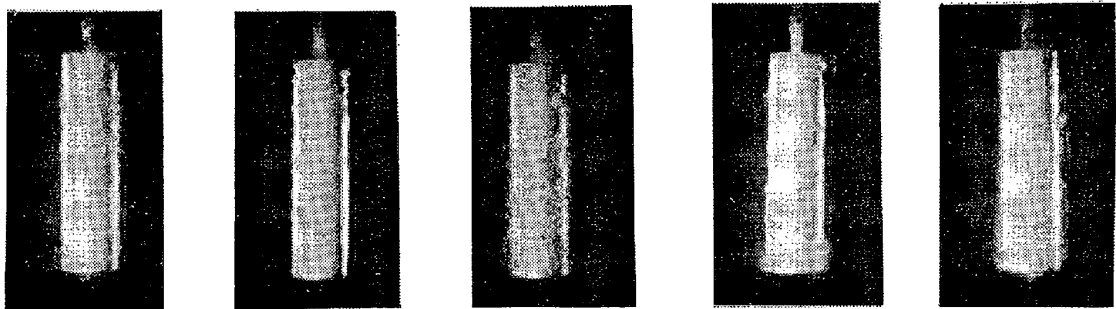
30 mm l の銀棒で、表面と中心を測温し、その位置は下端からそれぞれ 5 mm と 15 mm である。

表面への熱電対取付け法は、

- ①: 外径 1.6 mm, 素線径 0.3 mm の CA シース熱電対の温接点を露出型にする。
- ②: ①の温接点(ビード)を 1 mm φ 孔に入れる (Fig. 2 参照)。この時、ビードは半分位試料表面から突出させる。
- ③: 熔融 AgNO₃ を②のビードに塗る。
- ④: ③を石英管内で加熱し、Ag を析出させる。③と④を数 10 回繰り返す。
- ⑤: Ag 析出量が段々増加し、ビード部が突起状にな



F : film boiling, N : nucleate boiling, C : convection
(a) Photograph of each boiling



(b) Photograph of transition boiling

t : time from quenching(sec), θ_s : surface temp.($^{\circ}C$), m -point: measuring point of θ_s : water temp. $60^{\circ}C$

Photo. 1. High-speed photographs of boiling.

れば、両者はほぼ完全に溶着している。

2.3 実験方法

⑥: ⑤の突起をヤスリでけずり、#600 研磨紙で磨く。

試料を #600 研磨紙で磨き、 $800^{\circ}C$ に加熱後、瞬間的

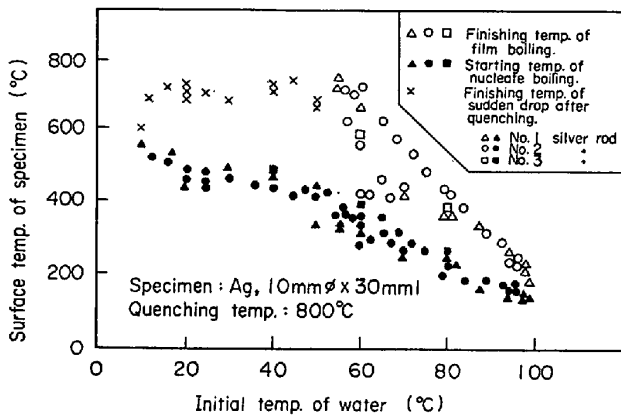


Fig. 4. Relation between characteristic temp. and water temp.

に所定温度の冷却水に垂直に浸漬する。なお、冷却水には水道水（飲料水）を用いた。

3. 実験結果

3.1 冷却曲線

冷却曲線の例を Fig. 3 に示す。初期水温が約 55°C 以上の場合には、表面の冷却曲線から、安定した膜沸騰域とはげしい核沸騰域との間に、不安定な沸騰域の存在を認めることができる。しかし、初期水温が約 50°C 以下の場合には、試料の初期温度が 800°C と低いため、上記現象を認めることはできない。すなわち、初期水温が 50°C 以下の場合でも、試料の初期温度が高ければ、冷却曲線のパターンは、Fig. 3(b) のようになるものと考えられる。ところが、銀試料を用いた関係上、初期温度が 800°C と低いため、沸騰状態が Fig. 1 の I 領域から Fig. 3(b) の UCT と LCT の中間に直接移行したものと推測される。以上のような理由から、Fig. 4 の“x 印”は、UCT と LCT の間の温度を示している。

3.2 写真観察

高速度写真の例を Photo. 1 に示す。写真観察によると、各沸騰域の状態は次の通りである。

膜沸騰域：蒸気膜は安定している (Photo. 1-(a) 参照)。

膜・核共存沸騰域：蒸気膜が局所的に短時間崩壊するが、(遷移沸騰域) 直ぐ安定した蒸気膜に戻る。この崩壊が、任意の位置に発生する (Photo. 1-(b) 参照)。

核沸騰域：蒸気膜の崩壊が、試料の下端から始まり、瞬間的に全面に広がる (Photo. 1-(a) 参照)。

ここで、膜・核共存沸騰域を遷移沸騰域とみなすことができる。

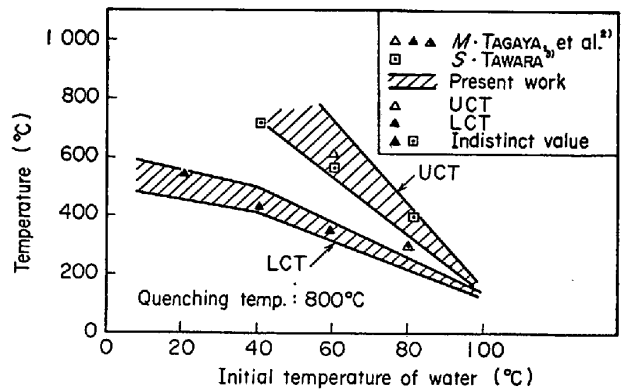
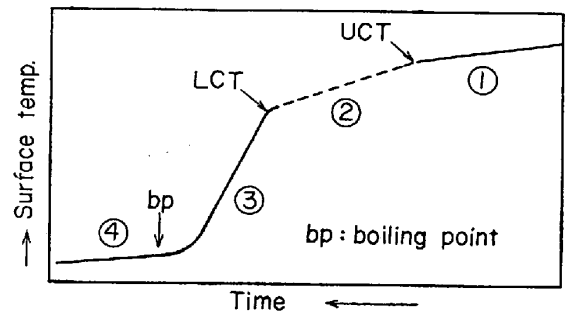
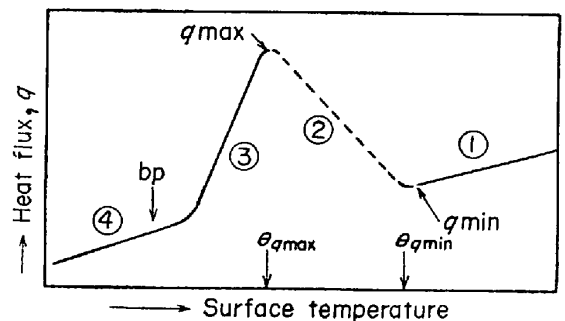


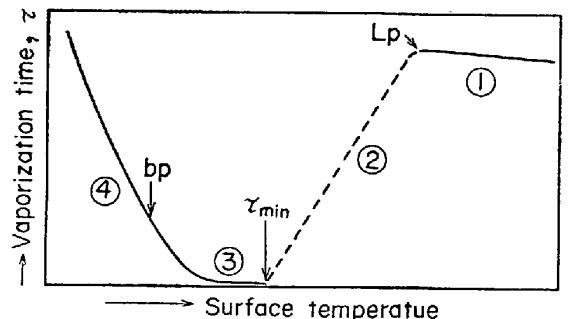
Fig. 5. Comparison of the characteristic temp. with others.



(a) Cooling curve



(b) Boiling curve



(c) Evaporation curve

- ① Film boiling
- ② Transition boiling
- ③ Nucleate boiling
- ④ Convection (non boiling)

Fig. 6. Schematic illustration of cooling, boiling and evaporation curves.

3.3 特性温度

Fig. 3の冷却曲線において、安定した膜沸騰の終了温度を上部特性温度 [Upper CT, 略記 UCT], はげしい核沸騰の開始温度を下部特性温度 [Lower CT, 略記 LCT] と呼ぶことにする。初期水温 θ_w と UCT および LCT との関係を図. 4に示す。この図から、UCT や LCT は θ_w の上昇につれて降下すること、 θ_w が約 50°C 以下では、試料初期温度が 800°C のため、UCT は存在しないこと、写真観察の膜・核共存沸騰域は、UCT と LCT の間に存在すること、がわかる。

4. 考 察

4.1 上部および下部特性温度

3章に記述したように、冷却曲線と高速度写真から、従来の特性温度を上部および下部特性温度に二分すべきであることがわかる。俵³⁾ や多賀谷ら²⁾ の実験では、記録計や写真機の性能が低く、これらの現象を明確に把握できなかつたものと考えられる。

今回とほぼ同じ条件の実験から得られた多賀谷らの冷却曲線にも、UCT と LCT を認めることができる⁶⁾。そこで、これらの冷却曲線から UCT と LCT を読み取り、今回の結果と比較したのが Fig. 5 である。この図から今回の結果は多賀谷らの値とほぼ一致すること、また俵の CT は UCT に、多賀谷らのそれは LCT に近いことがわかる。また、多賀谷らは明記していないが、水温 60°C の冷却曲線は、筆者らのそれとほぼ同じで UCT と LCT を明確に区別することができる⁶⁾。

なお、沸騰現象は非常に不安定だから試料表面が粗かつたり、スケールや錆などが付着していると T. F. RUSSEL⁴⁾ が指摘したように、CT が存在しないこともある。

4.2 冷却、沸騰および蒸発曲線の対応関係

1章に記述したように、冷却、沸騰および蒸発曲線は、すべて高温金属と液体間の熱伝達現象を説明する特性図だから、その特性点は、互に対応するはずである。ここで、3曲線の類似点と相異点を調べると、

名称	固液接触状態	液体の状態	熱容量	液温
冷却曲線	全面	静止と流動	金属 < 液体	任意温度
沸騰	"	"	"	"
蒸発	局部	ほぼ静止	金属 > 液体	飽和温度

である。

冷却曲線や沸騰曲線の液温を飽和温度に近づけると、3曲線の条件はほぼ同じになる。たとえば、Fig. 4 または Fig. 5 において、 θ_w を約 100°C (沸点) まで外挿した時の LCT および UCT は、それぞれ $130\sim 140^\circ\text{C}$

と $170\sim 180^\circ\text{C}$ となる。これに対し、筆者ら⁷⁾ が、銀渡金した銅や鋼試料を用いて行なつた水滴の蒸発実験によると、水滴寿命 τ の極小値 τ_{\min} に対応する表面温度 $\theta_{r\min}$ とライデンフロスト [Leidenfrost] 温度 LP は、それぞれ $133\sim 168^\circ\text{C}$ と $140\sim 180^\circ\text{C}$ である。測温上の補正を行なうと、 $\theta_{r\min}$ は $130\sim 140^\circ\text{C}$ となる。したがって、両曲線の特性温度は、ほぼ一致するものとみなすことができる。

次に、3曲線の特性点の対応関係を調べると、Fig. 6 のようになる。ここで、3曲線の対応関係を θ_s についてまとめると、

沸騰形態	冷却曲線	蒸発曲線
膜沸騰域	UCT < θ_s	LP < θ_s
膜沸騰終了温度	UCT	LP
遷移沸騰域	LCT < θ_s < UCT	$\theta_{r\min}$ < θ_s < LP
核沸騰開始温度	LCT	$\theta_{r\min}$
核沸騰域	θ_s < LCT	θ_s < $\theta_{r\min}$
沸騰曲線		
$\theta_{q\min}$	θ_s	
$\theta_{q\min}$		
$\theta_{q\max}$	θ_s < $\theta_{q\min}$	
$\theta_{q\max}$		
θ_s	$\theta_{q\max}$	

である。このように、3曲線の特性点を互に対応させると、高温金属を種々の方法で液体冷却する時の諸現象を明確に説明することができる。

5. 結 言

冷却曲線における遷移沸騰現象と特性温度を解明するため、 $10\text{mm } \phi \times 30\text{mm } l$ の銀試料を 800°C から静止水に浸漬冷却する実験を行ない、次の結果を得た。

(1) 試料表面の測温結果から、安定した膜沸騰域とはげしい核沸騰域の間に不安定な沸騰域の存在を確認することができた。

(2) 高速度写真から、(1) の不安定沸騰域においては、局所的に蒸気膜が破れ、直ぐ回復する現象が、任意の場所に発生することがわかつた。

(3) (1) と (2) の結果から、膜沸騰と核沸騰の間に存在する不安定な沸騰域を遷移沸騰域とみなすことができる。

(4) したがって、従来の特性温度を二分し、安定した膜沸騰の終了温度を上部特性温度、はげしい核沸騰の開始温度を下部特性温度と呼ぶことにする。

(5) 冷却曲線に上記二つの特性温度を導入すると、高温金属と液体間の熱伝達現象を説明する冷却曲線、沸

騰曲線および蒸発曲線の各特性点の間の対応関係が明確になる。

文 献

- 1) M. JAKOB: Heat Transfer, Vol. I, 6th ed., (1958), p. 652, [John Wiley & Sons]
- 2) 多賀谷, 田村: 金属学会誌, **B15** (1951) 11, p. 535 (第1報) から 20 (1956) 9, p. 480 (第13報) まで
- 3) 依: 鉄と鋼, 27 (1941) 8, p. 583
- 4) T. F. RUSSEL: Iron Steel Inst. Spec. Rep., (1939) No. 24, p. 283
- 5) JIS-K2526, (S40), 熱処理油冷却性態試験方法
- 6) 多賀谷, 田村: 金属学会誌, **B15** (1951) 12, p. 589 (第3報)
- 7) 三塚, 福田: 鉄と鋼, 57 (1971) 11, S 584