

水中アークの温度と熱損失

犬田英男*・加藤宏臣*・戸松政友**・田原徳夫***

(平成7年10月31日受理)

The temperature and the heat loss of the arc column in water

Hideo INUTA*, Hiroomi KATOH*
Masatomo TOMATU**, Norio TAHARA***

This paper describes the measuring method of arc temperature by relative intensity of spectrum radiated from the arc column in water. In this case, spectra $H\alpha$ and $H\beta$ were used. Then the measured value of arc temperatures were approximately 15000K. The composited particle density and the heat losses of the arc column in water were calculated with these temperatures. As a result it was clarified that the stored energy in the arc column was much smaller than the poured energy. This shows that most of the poured energy in the arc column is taken as heat loss to extinguishable medium.

1. ま え が き

高電圧の直流電流を遮断しようとするとき、遮断器の電極間にアークが発生し、通常の方法ではこのアークを遮断することは困難である。本研究では1つの有効な方法として高圧水中で直流アークを遮断する方法について検討している。この方法ではアーク電圧の上昇率が高く、優れた遮断特性を示す。これは密閉室内の圧力上昇に伴って冷却効果が顕著となり、限流効果が増大するためと考えられる。本報告では直流アークの消弧過程を検討する上で必要なアーク温度の測定方法について述べる。また、この測定結果を用いて水中アークの構成粒子及び熱損失について検討した。

2. アーク温度の測定

数100気圧に加圧された水中に発生するアーク温度を測定することは極めて困難である。ここでは、アークプラズマから放射される光を用いてアーク温度を求める¹⁾相対強度法を採用した。この方法はアークからの集合光を分光し、特定の2本のスペクトル線の強度から(1)式を用いてアーク温度を算出する。分光器による波長の誤差は±0.1%以下であり、高い精度が期待できる。

* 大学院博士前期課程 電気電子工学専攻

** 電気電子工学科 技官

*** 教育システム研究開発センター 教授

$$T = \frac{E_i - E_k}{c \left(\ln \frac{A_{ij} g_i \nu_{ij}}{A_{kl} g_k \nu_{kl}} - \ln \frac{I_{ij}}{I_{kl}} \right)} \quad (1)$$

ここで各定数は、 c ：ボルツマン定数、 A ：遷移確率、 g ：統計的重価、 E ：励起エネルギー、 ν ：線スペクトルの周波数であり、それぞれの値は既知である。光強度比 I_{ij}/I_{kl} は測定値である。なお、 i, j 及び k, l はそれぞれある任意の粒子の状態を示す。

この方法を採用する場合には次のような条件を満足するスペクトル線が望ましい。

- 1) 注目する粒子の励起エネルギーと電離エネルギーがある程度離れていること。
- 2) 2本の線スペクトルのエネルギーが1 eV以上離れていること。
- 3) 互いに影響を及ぼさない程度波長が離れていること。

ここで利用する2本のスペクトル線については上の条件を満たすものうち下記の理由から選択した。水中アークの構成粒子は水の成分である水素と酸素及び電極の成分である銅の原子及びイオンが主成分となる。Table 1はこれらの粒子の中、上の条件に近い粒子について、2本のスペクトル線の組を選び、(1)式に対応する温度計算式を示す。なお、各定数は文献(2)を引用した。これらの式中、スペクトル線強度比に対する急峻な温度変化のない組み合わせを Fig. 1 に示した。

Table 1 Calculating expressions for arc temperature by relative spectrum intensity

(H α 線-H β 線)	$T = \frac{7671.84}{-0.780497 + \ln(I_{H\alpha}/I_{H\beta})}$	(2)
(H α 線-H γ 線)	$T = \frac{11222.5}{-1.42315 + \ln(I_{H\alpha}/I_{H\gamma})}$	(3)
(H β 線-H γ 線)	$T = \frac{3550.90}{-0.642655 + \ln(I_{H\beta}/I_{H\gamma})}$	(4)
(H α 線-H δ 線)	$T = \frac{13150.4}{-1.95732 + \ln(I_{H\alpha}/I_{H\delta})}$	(5)
(OII 432.860線 -OII 672.135線)	$T = \frac{74351.5}{2.29668 - \ln(I_{432.860}/I_{672.135})}$	(6)
(OII 672.135線 -OII 690.811線)	$T = \frac{60173.8}{0.535990 + \ln(I_{672.135}/I_{690.811})}$	(7)
(CuI 402.263線 -CuI 510.554線)	$T = \frac{35397.4}{2.48968 - \ln(I_{402.263}/I_{510.554})}$	(8)
(CuI 515.324線 -CuI 578.213線)	$T = \frac{27910.5}{4.40186 - \ln(I_{515.324}/I_{578.213})}$	(9)
(CuI 570.024線 -CuI 402.263線)	$T = \frac{35405.2}{4.72103 + \ln(I_{570.024}/I_{402.263})}$	(10)

Fig. 1 は Table 1 の各種原子のうち、測定範囲及び温度変化から(2), (6), (8)式を選び、その特性を示す。Fig. 1 で酸素スペクトル線強度比と温度の特性は20000K付近で飽和し、これ以下の温度は求まらない。一方、銅については8000K程度の低い温度まで求まるが、それ以上の高温部分では強度比に対する温度変化が急峻である。これに対して水素の場合には銅と同程度の低温まで求まり、その上広い温度範囲において強度比に対する温度変化は比較的緩やかである。

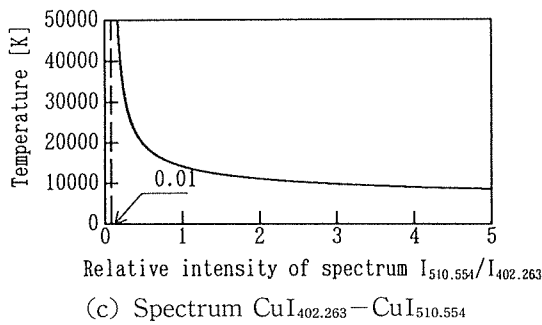
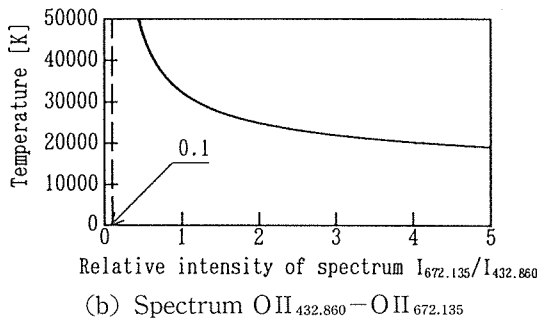
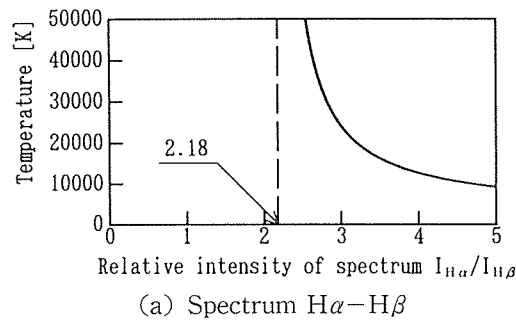
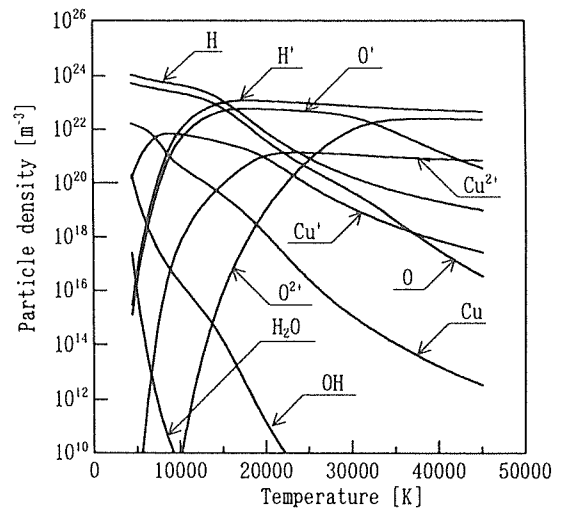


Fig. 1 Relation between spectrum intensity and temperature

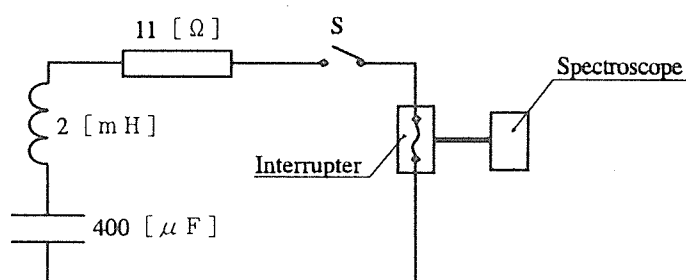
一方、アークを構成する粒子密度はアーク温度によって Fig. 2 のように変化する。Fig. 2 は、Saha の熱電離式³⁾、気体の状態方程式を用い、水の組成比、銅蒸気混入率を考慮して計算した。Fig. 2 で水素は、温度に対する粒子密度の変化が他の粒子に比べて小さく、広い温度範囲において大きいスペクトル線放射強度が期待できる。これに対し、銅 Cu の粒子密度は低温では大きい値を示すが、高温になるに従い著しく減少する。また、酸素 O⁺ の粒子密度は10000K以下で急激に減少している。

以上の理由から対象とする水中アークの温度計測には水素スペクトル線H α 線-H β 線の組を選択した。

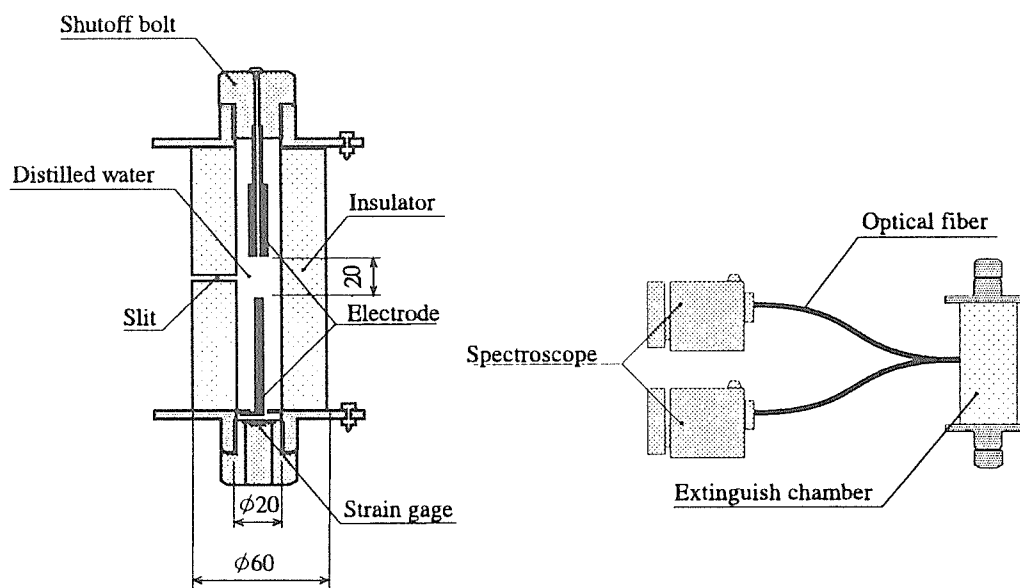


3. 試験方法

Fig. 3 に試験装置及び試験回路を示す。試験回路は試験用電源として定格15kV, 400 μF のコンデンサを3000Vに充電した。図中, Sは投入用遮断器である。試験装置はエポキシ系樹脂製で, 容器内には水を満たし, 圧力上昇を制限するために少量の空気を封入した。なお, 実験にはアーク遮断後の絶縁を確保するために蒸留水を用いた。また, 側面にアーク光を取り出すための観測用窓を設けた。アーク光は観測用窓から光ファイバーを用いて2台の分光器に取り込んだ。なお, 光ファイバーによる減衰⁴⁾と分光器の光電子増倍管の感度⁵⁾はカタログデータを用いて補正し, アークと光ファイバー間の減衰及び反射は直接測定し補正した。



(a) Experimental circuit



(b) Interrupter
(unit : [mm])

(c) Optical measurement

Fig. 3 Experimental circuit and apparatus

4. 試験結果

Fig. 4 に測定した電圧，電流，圧力， $H\alpha$ 線及び $H\beta$ 線のスペクトル線強度の波形を，Fig. 5 に測定波形から算出した電力，アーク抵抗，導電率，アーク半径，アーク温度を示した。

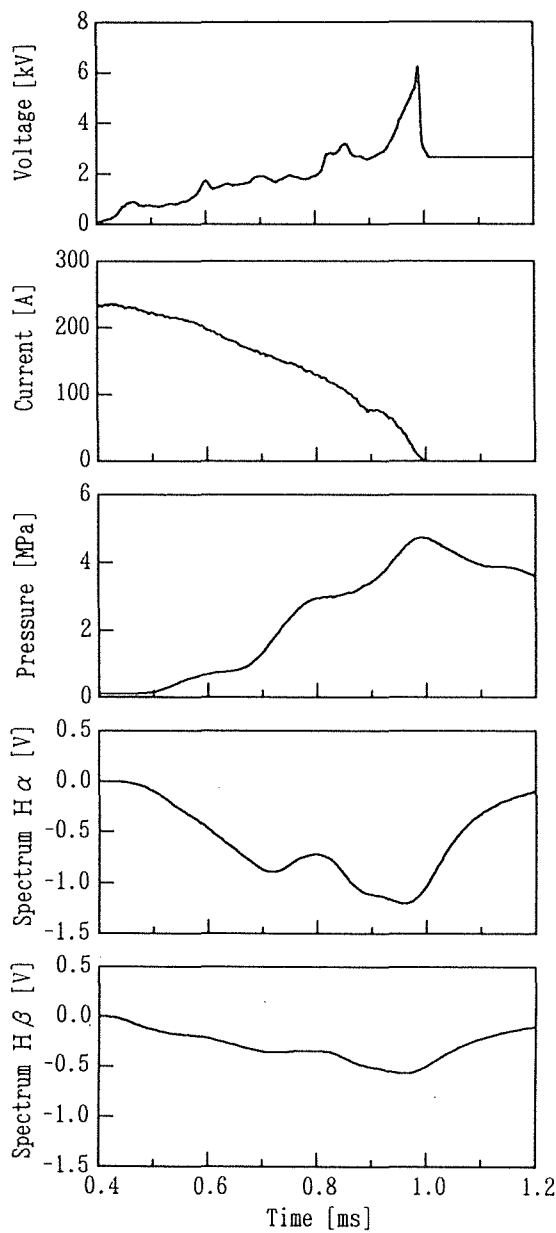


Fig. 4 Measured waveform

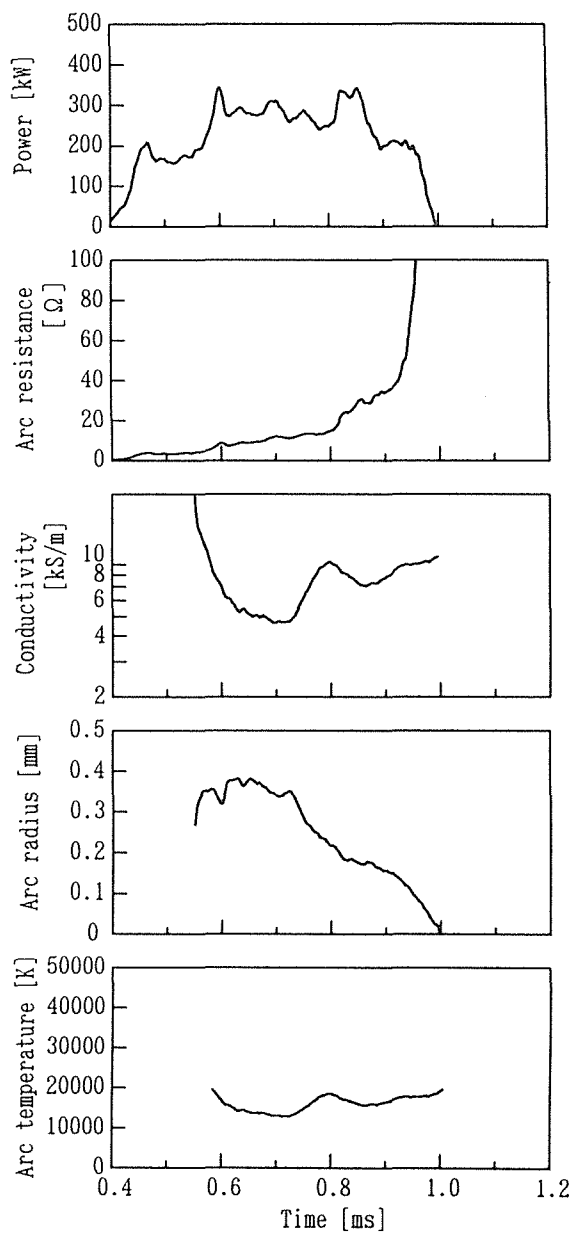


Fig. 5 Calculated waveform

Fig. 6 は消弧過程におけるアーク温度の変化状態を示す。ここでは同一回路条件での試験結果を7例示しているが、アークの温度は10000 K～20000 Kの範囲にある。この測定値はアークの発生状況の微妙な違い、例えばアークの点弧位置、揺れに依存している。

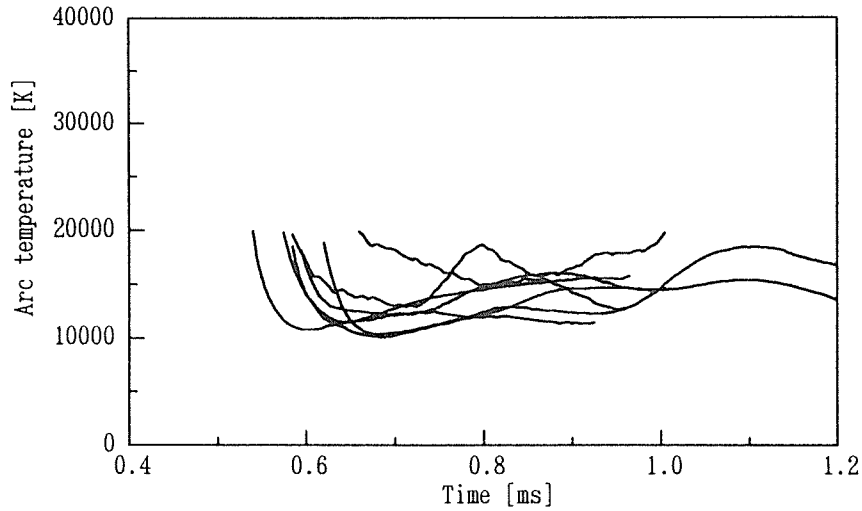


Fig. 6 Temperature of arc

Fig. 7 は上で求めたアーク温度の一例について計算したアーク内の粒子密度を示す。アーク構成粒子中、銅の粒子密度は他に比較して小さく、ほとんどが水素と酸素である。このことは水中アークの特性は特に冷却効果の大きい水素ガスの特性が強く影響しているものと考えられる。

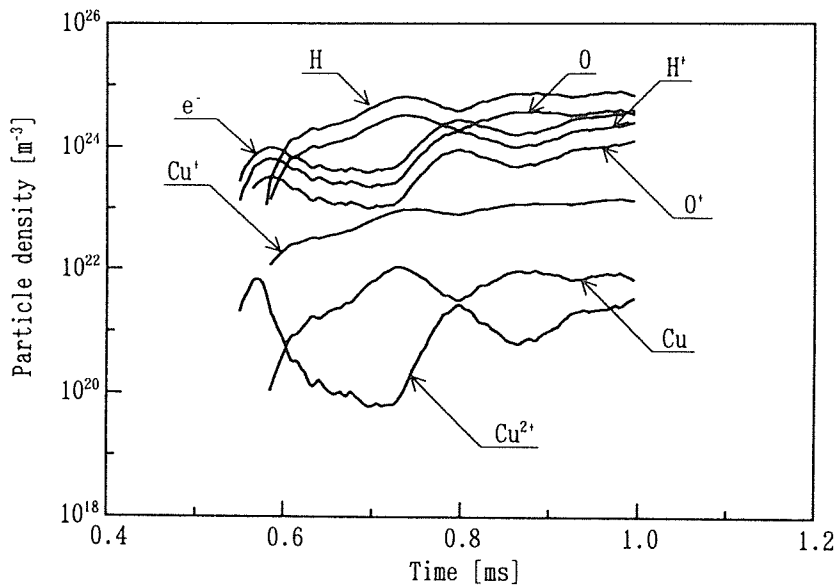


Fig. 7 Transition of particle density in arc

Fig. 8 に注入エネルギーとアーク保有エネルギーの変化を示す。注入エネルギーはアーク電圧，電流値から求めたアーク電力の積算値であり，アーク保有エネルギーは粒子密度と温度より算出した。アーク陽光柱に保有されているエネルギーは注入されたエネルギーと比較して極めて小さく，ほとんどが損失としてアーク外へ運び去られているとみなせる。

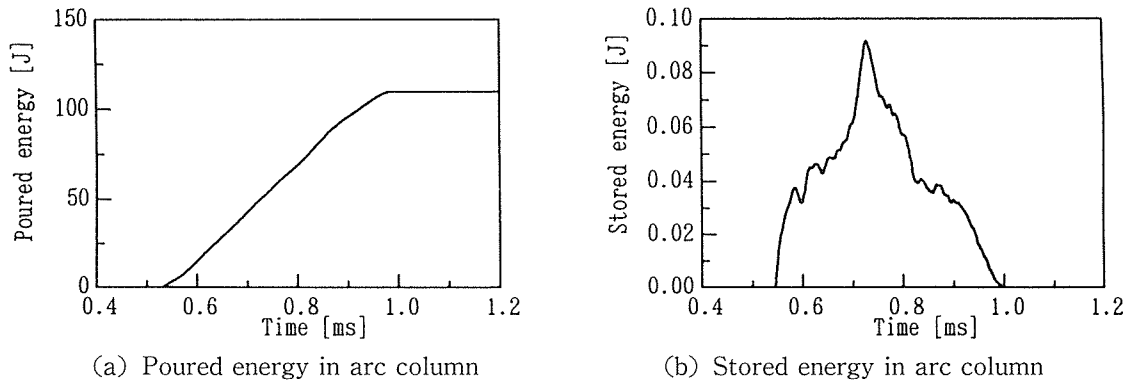


Fig. 8 Transition of arc energy

5. あとがき

2本のスペクトル線 $H\alpha$ ， $H\beta$ から求めたアーク温度よりアーク陽光柱の構成粒子密度，導電率，半径及び保有エネルギーを算出した。この結果，次のことが明らかとなった。

- 1) アークの主構成粒子は水素と酸素である。
- 2) アーク陽光柱に保有されているエネルギーは注入されたエネルギーと比較すると約1/100と非常に小さい。

1)の結果は直流アークの遮断特性に冷却効果の大きい水素が強く影響していることを示している。2)の結果はアークに注入されたエネルギーの大部分が，アークの外部に損失として奪われていることを示している。この熱損失はアーク陽光柱のまわりの高温ガス体，水蒸気，蒸留水等へ熱輸送特性の優れた水素によって伝えられるものと考えられる。

参考文献

- 1) 宮地巖，鬼頭幸生，岡田勝男：電力アークにおける温度及び電極蒸気密度分布のアークスペクトル強度による決定，電気学会誌，87，1227(1967)。
- 2) R. C. Weast, M. J. Astle, W. H. Beyer: CRC Handbook of Chemistry and Physics, 66th, ed., (CRC Press, 1986)E.325.
- 3) 横山昌弘：プラズマ理工学，(日刊工業新聞社，1988)pp.73～74.
- 4) Eska optical fiber カタログデータ，(Mitubisi rayon co. ltd, 1985)。
- 5) Photomultiplier カタログデータ，(浜松ホトニクス株)，1994.