ナトリウムプール燃焼に関する基礎的研究*

菊地 義弘^{*1}, 渡辺 清幸^{*2}, 松本 隆一^{*3}

A Fundamental Study of Sodium Pool Combustion

Yoshihiro KIKUCHI, Kiyoyuki WATANABE and Ryuichi MATSUMOTO

A theoretical study has been conducted to investigate the burning rate of sodium pool fires, which may be caused by the spillage of liquid sodium in fast-breeder nuclear reactors. In the present model, a thin layer (approximately 1 mm in thickness) of vapor is assumed to exist upon the surface of the liquid pool. The sodium vapor diffuses toward the flame front at which a chemical reaction between sodium and oxygen occurs. The calculated results are in good agreement with experimental data obtained by other investigators for the burning rates of sodium pool fires. The earlier conventional model, however, tends to underestimate the burning rates since the vapor layer is neglected and the flame temperature is assumed to be equal to the pool surface temperature.

Key Words: Combustion, Diffusion, Flame, Mass Transfer, Nuclear Reactor, Liquid Sodium, Pool Burning

1. 緒 言

記 号

伝熱性能の優れた液体ナトリウムは高速増殖炉の冷却材として採用されているが、万一、空气中に漏えいすると、火災へと発展する可能性があるため、原子炉の安全性にとって重要な問題である。ところで、ナトリウムプール燃焼に関する理論解析では、ナトリウム液面と火炎面の間に存在する蒸気層領域を無視し、燃焼率が周囲雰囲気から液面への酸素の物質伝達量によって支配されとの仮定がよく行われてきた⁽²⁾⁽³⁾。先に、著者の一人⁽¹⁾は、このような簡易モデルが火炎温度を液面温度に等しいと仮定するため、燃焼率を過小評価する危険性があることを理論計算によって指摘した。しかし、先の理論計算では、放射伝熱を無視したため、火炎温度が実験値よりかなり高くなった。そこで、今回、放射伝熱を考慮した理論解析を行ったので、その計算結果について報告する。

c : 定圧比熱
 D : 拡散係数
 F : 形態係数
 f : 一酸化物の生成分率
 g : 重力の加速度
 k : 物質伝達率
 Le : ルイス数 $= \lambda / cpD$
 M : 分子量
 $\dot{m}$: 質量速度(燃焼率)
 p : 圧力
 Pr : プラントル数 $cp\nu/\lambda$
 Q : 質量当たりの発熱量
 R : 気体定数
 s : 量論質量比
 Sc : シュミット数 $= \nu/D$
 T : 温度
 w : 質量分率
 z : 座標
 α : 熱伝達率
 β : 体膨張係数
 δ : 蒸気層の厚さ

* 昭和62年11月3日 第25回燃焼シンポジウムにおいて講演、原稿受付 平成元年8月31日。

^{*1} 正員、広島大学工学部 (〒724 東広島市西条町大字下見)。

^{*2} 川崎重工業(株) (〒673 明石市川崎町1-1)。

^{*3} 正員、神戸大学工学部 (〒657 神戸市灘区六甲台町1-1)。

ε : 放射率
 λ : 熱伝導率
 ν : 動粘性係数
 ρ : 密度
 σ : ステファン・ボルツマン定数

添 字

f : 火炎面
 l : 液面
 na : ナトリウム
 ox : 酸素
 sat : 飽和状態
 ∞ : 周囲雰囲気

2. 理論モデルと計算方法

2.1 仮定 図1のように、ナトリウム液面と火炎面の間に蒸気層領域を考え、以下の仮定をする。

- (1) 現象は定圧、定常で、一次元とする。
- (2) 液面から蒸発したナトリウム蒸気は火炎面まで拡散していき、そこで酸素と化学反応する。
- (3) 火炎面における反応速度は無限大で、量論比でもって反応する。
- (4) 液面温度は、液体ナトリウムの熱伝導率が非常に高いため、プール温度(一様)に等しいとする。
- (5) 輸送定数や熱物性値は各領域における平均温度に対するものを採用する。

2.2 基礎式

2.2.1 蒸気層 ナトリウム蒸気の一方拡散を考えればよいから、その質量速度(すなわち、燃焼率)に関して次式が成り立つ。

$$\dot{m}_{na}(1-w_{na}) = -\rho D \frac{dw_{na}}{dz} \quad (1)$$

プール表面におけるナトリウムの蒸気圧が飽和圧力に等しいとすると、境界条件は、以下のようになる。

$$z=0: w_{na} = \frac{p_{na,sat} R}{p R_{na}} \quad (2)$$

図1 座標系

$$z=\delta: w_{na}=0 \quad (3)$$

式(1)を式(2), (3)の境界条件のもとで解くと、最終的に次のようになる。

$$\dot{m}_{na} = -\frac{\rho D}{\delta} \ln \left(1 - \frac{p_{na,sat} R}{p R_{na}} \right) \quad (4)$$

一方、エネルギー保存則は、次式によって与えられる。

$$c \dot{m}_{na} \frac{dT}{dz} = \lambda \frac{d^2 T}{dz^2} \quad (5)$$

この式を境界条件

$$z=0: T = T_l \quad (6)$$

$$z=\delta: T = T_f \quad (7)$$

のもとで解くと、以下のようになる。

$$T = \frac{T_f - T_l}{\exp\left(\frac{\dot{m}_{na} c \delta}{\lambda}\right) - 1} \left[\exp\left(\frac{\dot{m}_{na} c z}{\lambda}\right) - 1 \right] + T_l \quad (8)$$

2.2.2 火炎面 仮定(3)より、ナトリウム蒸気量と酸素量は次式の関係がある。

$$[\dot{m}_{na}]_{z=\delta} = -s [\dot{m}_{ox}]_{z=\delta} = s \rho k w_{ox,\infty} \quad (9)$$

ここで、 k は物質伝達率であって、物質伝達と熱伝達のアナロジーを用いて決められる。すなわち、水平面における乱流自然対流熱伝達は次式によってよく表される⁽⁷⁾。

$$\alpha = 0.16 \lambda \left[\frac{g \beta Pr (T_f - T_\infty)}{\nu^2} \right]^{1/3} \quad (10)$$

この式に物質伝達と熱伝達のアナロジーを適用すると、以下のようになる。

$$k = 0.16 D \left[\frac{g \beta Sc (T_f - T_\infty)}{\nu^2} \right]^{1/3} \quad (11)$$

ここで、 $D = \lambda / c \rho Le$

一方、エネルギー平衡は、次式によって与えられる。

$$\dot{m}_{na} Q = \lambda \left[\frac{dT}{dz} \right]_{z=\delta} + F_{fl} \sigma (T_f^4 - T_l^4) + \alpha (T_f - T_\infty) + F_{f\infty} \sigma (T_f^4 - T_\infty^4) \quad (12)$$

ここで、 F_{fl} は火炎面と液面間の形態係数であって、2平行平板を仮定すると、次式によって与えられる。

$$F_{fl} = \frac{1}{1/\varepsilon_f + 1/\varepsilon_l - 1} \quad (13)$$

なお、ナトリウムの反応式として次の二つを考える。

反応生成物が一酸化物と過酸化物の混合物とすると、量論質量比と発熱量は次式によって計算される。

$$S = \frac{[4f + 2(1-f)] M_{na}}{M_{ox}} \quad (14)$$

$$Q = \frac{4f Q_1 + 2(1-f) Q_2}{4f + 2(1-f)} \quad (15)$$

ここで、 Q_1 , Q_2 は、それぞれ、一酸化物、過酸化物の生成に伴う発熱量である。

3. 結果と考察

3.1 火炎温度と燃焼率 図2は、火炎温度と燃焼率の計算結果をプール温度に対して整理したものである。計算にあたっては、周囲雰囲気酸素の質量分率0.23、温度298 K、圧力1 atmの空気とし、ルイス数を1と仮定した。液面と火炎面における放射率を、それぞれ、0.5、1とし、火炎面と周囲雰囲気間の形態係数を1と仮定した。パラメータが一酸化物の生成分率であるが、いずれの場合も、プール温度が上昇すると、初め、燃焼率が急に増加するが、その後、ある値に漸近する傾向にある。そして、一酸化物生成分率の増加は燃焼を促進する効果がある。

図2中には、多くの研究者^{(2)~(6)}によって得られた燃焼率の実験結果も示されている。実験データは多少散らばっているが、いずれも今回の解析で $f=0$ として求められる計算結果とほぼ一致することがわかる。しかし、一酸化物の生成分率の決定にあたっては、今後、実験による反応生成物の分析結果が必要である。また、ルイス数についても今後、正確な物性値が必要である。

ところで、一点鎖線は、蒸気層を無視した場合であって、今回の計算結果だけでなく、いずれの実験データよりも低くなっており、はじめに指摘したように、燃焼率を過小評価していることがわかる。したがって、

図2 火炎温度と燃焼率に及ぼすプール温度の影響

SOFIRE⁽²⁾で代表されるナトリウム火災事故解析コードは再検討を要する。

一方、火炎温度は、プール温度が高いほど、高くなる。しかし、今回の計算結果(実線)は、高温領域で放射伝熱の効果が強く現れるため、前報⁽¹⁾の放射伝熱を無視した場合(破線)よりずっと低い。今回、得られた計算値(例えば、 $f=0$ の場合、最高1250 K程度)は、Newman-Payne⁽³⁾の実験値(1200~1300 K)に近く、妥当な大きさである。

図3は燃焼率に及ぼす酸素濃度の影響を調べたものである。パラメータが一酸化物生成分率であるが、いずれの場合も、酸素濃度が高くなるに従って、燃焼率が増加する傾向を示す。 $f=0$ の場合の計算値(実線)は、Beirigerら⁽²⁾の実験結果とかなりよく一致することがわかる。しかし、実験値との定量比較にあたっては正確なルイス数が必要である。

1点鎖線は、蒸気層を無視した場合であるが、今回の計算結果や Beiriger らの実験結果に比べて、低い燃焼率となっている。

図4は燃焼率に及ぼす周囲雰囲気温度の影響を示す。周囲雰囲気温度が高くなるに従って、燃焼率が減少する傾向がみられる。これは、周囲雰囲気温度が高いほど自然対流効果が弱まるためである。蒸気層を無視した場合(一点鎖線)は今回の計算結果(実線)よりずっと低い燃焼率を与える。

図5は燃焼率に及ぼすルイス数の影響を示す。ルイス数が大きくなるに従って、燃焼率が急激に低下する。これは、熱拡散に比べて物質拡散が相対的に減少するためである。今回の計算では、 $Le=1$ の場合を代表例としているが、実際の原子炉の事故解析では、現実 に即したルイス数を採用するのが望ましい。

図3 燃焼率に及ぼす酸素濃度の影響

図6は火炎温度と燃焼率に及ぼす火炎面放射率の影響を示す。今回の計算結果(実線)によると、放射率が増しても、燃焼率は少し低下するだけである。これは、放射による伝熱量の増加効果が火炎温度の急低下による自然対流の減少効果と相殺されるためである。蒸気層を無視した場合(一点鎖線)は、いかなる放射率に対しても今回の計算値より低い燃焼率となっている。

3.2 蒸気層の厚さ 図7は蒸気層の厚さに及ぼすプール温度の影響を示す。いずれの場合も、プール温度が高くなるに従って、蒸気層が厚くなる。しかし、いずれも数mm以下であって、非常に薄いことがわかる。これは、ナトリウム燃焼の場合、火炎が非常に低い(~ 1 mm)という実験事実⁽³⁾と一致する。

4. 結 論

以上の計算により、今までのナトリウム火災事故解析コード(例えば、SOFIRE)が燃焼率を過小評価していたことが明らかになった。今回の蒸気層モデルは非常に単純化したものであるが、今後、ルイス数などの

物性値、火炎の構造、反応生成物の挙動に関する実験的情報に基づいてモデルの改良を行うことにより、より詳細にナトリウム火災現象の解析ができるものと期待される。

最後に、本研究は昭和62年度文部省科学研究費補助金一般研究(C)No.62580178の援助によったことを付記し、謝意を表す。

図4 燃焼率に及ぼす周囲雰囲気温度の影響

図5 燃焼率に及ぼすルイス数の影響

図6 火炎温度と燃焼率に及ぼす火炎面放射率の影響

図7 蒸気層厚さに及ぼすプール温度の影響

文 献

- (1) Kikuchi, Y., *J. Nucl. Sci. Technol.*, **23**(1986), 83.
 - (2) Beiriger, P., ほか5名, *AI-AEC-13055*(1973).
 - (3) Newman, R. N. and Payne, J. F. B., *Combust. Flame*, **33**(1978), 291.
 - (4) Huber, F., ほか2名, *Nucl. Eng. Des.* **35**(1975), 155.
 - (5) Sagae, K. and Suzuoki, A., *J. Nucl. Sci. Technol.*, **22**(1985), 870.
 - (6) 川部・ほか3名, 日本原子力学会昭和60年年会要旨集, 第1分冊, (1985), 213.
 - (7) Fujii, T. and Imura, H., *Int. J. Heat Mass Transf.*, **15**(1972), 755.
-