

広温度・広酸素濃度範囲Na燃焼試験(Ⅱ)

— 低酸素濃度雰囲気でのNaプール燃焼速度とNaエアロゾル放出速度 —



1988年12月

技術資料コード	
開示区分	レポートNo.
T	N9410 88-164
<p>この資料は 図書室保存資料です 閲覧には技術資料閲覧票が必要です</p> <p>動力炉・核燃料開発事業団大洗工学センター技術管理室</p>	

動力炉・核燃料開発事業団
 大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-cho, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken, 311-13, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation)

広温度・広酸素濃度範囲Na燃焼試験(Ⅱ)

— 低酸素濃度雰囲気でのNaプール燃焼速度とNaエアロゾル放出速度 —

川田 耕嗣* 大野 修司*
森川 智* 姫野 嘉昭*

要 旨

(目的) 高速増殖炉プラントの約3%の酸素を含む窒素雰囲気中に於けるNaプール燃焼の燃焼速度(酸化速度)及びNaエアロゾル放出速度を決定し、従来の解析手法で与えられる結果との比較検討を行う。

(方法) 雰囲気ガス容積約3m³を有する円筒型ステンレス密閉容器FRAT-1を用いてその底部に燃焼皿を置き、雰囲気酸素濃度3%、Naプール温度175~400℃でNaを燃焼させ、雰囲気中の酸素消費速度から燃焼速度を、またNaプールから放出されて容器の床及び壁に沈着した全てのNaエアロゾル量からNaエアロゾル放出速度を算出した。

(結果) Na燃焼速度は、Naプール温度に強く依存し、400℃付近から温度の低下と共に解析コードSOFIRE-MⅡによる計算値から大きく離れて低下し、試験の最低温度である175℃では1桁以上小さな値を示した。データ解析から、このような傾向は燃焼がNaプール表面に対する酸素の自然対流物質伝達とNaプール表面での酸化反応に支配されるため、高温では前者が、低温では後者が律速となるためであることが明らかになった。そこで、これらを考慮したデータ整理式を提案し、試験データと一致する良好な実験式を導出した。

Naエアロゾル放出速度もNaプール温度に対する強い依存性を示し、温度の低下と共に低下する。ただ、その値は最大でもNa燃焼速度(実験値)の約10%である。また、Naエアロゾル放出速度は、Na燃焼速度に比例するとの仮定のもとに、先に導出した実験式と同様なNaプール温度依存性を有し、かつ各Naプール温度で最大の値を与える実験式を導出した。

* 大洗工学センター 安全工学部 プラント安全工学室

Sodium Fire Test at Broad Ranges of Temperature and Oxygen Concentration (II)

- The sodium burning rate and aerosol release rate in Nitrogen atmosphere -

K. KAWATA* S. OHNO *

S. MORIKAWA* and Y. HIMENO*

abstract

[Purpose] A sodium pool fire test has been conducted in low oxygen containing nitrogen atmosphere to determine the sodium burning rate and aerosol release rate and compare them with calculated results by the SOFIRE-MII code.

[Method] After installing a burning pan in a 3m³ test vessel, FRAT-1, the test vessel was filled with nitrogen gas including 3% in volume of oxygen gas. Then, the test was started by supplying a sodium (175 ~400 °C) in the burning pan.

The sodium burning rate was determined from the consumption rate of oxygen in the test vessel. The aerosol release rate was determined from total aerosol mass recovered.

[Result] (1) The sodium burning rate depends on the sodium pool temperature. As the result of a comparison of the experimental sodium burning rate values with the calculated ones by the SOFIRE-MII code, it was cleared that the former was lower than the latter in case of sodium pool temperature below 400 °C and its difference was more than one order of magnitude at 175°C.

This reason is based on the fact that the burning rate is controlled by the mass transfer of oxygen at high pool temperature, while it is controlled by the reaction between oxygen and sodium at low pool temperature.

In final, an empirical formula that agree with the experimental results was derived.

(2) The aerosol release rate also depends on the sodium pool temperature. It is less than about 10% of the sodium burning rate. Assuming that the aerosol release rate is proportional to the sodium burning rate, an empirical formula which depends on sodium pool temperature giving the maximum value at each sodium pool temperature was decided.

* Plant Safety Engineering Section, Safety Engineering Division, OEC.

目 次

緒 論	1
1. 試験装置及び方法	2
1.1 試験装置	2
1.2 試験方法	2
1.3 Na燃焼速度及びエアロゾル放出速度の算出方法	3
2. 結果と考察	4
2.1 Na燃焼速度の検討	4
2.2 Naエアロゾル放出速度の検討	7
結 論	9
謝 辞	10
参考文献	11

Nomenclature

A	: Reaction assignment of Sodium and Oxygen ($\text{kg}^{\text{Na}}/\text{kg}^{\text{O}_2}$)
B, R	: Sodium Burning Rate ($\text{kg}/\text{m}^2\text{sec}$)
C_{O_2}	: Oxygen Concentration (v/%)
$C_{\text{ox},g}$: Oxygen Concentration of Gas (v/%)
$C_{\text{ox},s}$: Oxygen Concentration of surface on Sodium (v/%)
Df	: Diffusion Coefficient (cm^2/sec)
E	: Activation Energy (J)
Gr	: Grasthoft Number(-)
g	: Acceleration of gravity ($g=9.8 \text{ m}/\text{sec}^2$)
M	: Molecular Weight (kg/mol)
M_{O_2}	: Molecular Weight of Oxygen (kg/mol)
Nu	: Nusselt Number(-)
P	: Gas Pressure (Pa)
Pr	: Prandtl Number(-)
R	: Gas Constant ($\text{J mol}^{-1} \text{ deg}^{-1}$)
R, R	: Aerosol Release Rate ($\text{kg}/\text{m}^2\text{sec}$)
R_A	: Total Aerosol quantity (g)
S	: Sodium Pool Area (m^2)
Sc	: Schmidt Number(-)
S_{O_2}	: Oxygen Gas Supply (kg/sec)
T	: Gas Temperature ($^{\circ} \text{K}$)
T_{Na}	: Sodium Temperature ($^{\circ} \text{K}$)
t	: Test Time (sec)
V	: Vessel Volume (m^3)
α_m	: Mass Transfer Coefficient (m/sec)
β	: Coefficient of Expansion ($1/^{\circ}\text{C}$)
λ	: Heat Conductivity ($\text{Kcal}/\text{m h}^{\circ}\text{C}$)
ν	: Coefficient of Kinematic Viscosity (m^2/sec)
ρ	: Density of Oxygen (kg/m^3)

List of Tables

Table 1	Test Conditions	12
Table 2	Test Results	13

List of Figures

Fig. 1	Test Arrangement of PRAT-1	14
Fig. 2	PRAT-1 Overview	15
Fig. 3	Comparison of Sodium burning rate against Pool Temperature between Calculation and test	16
Fig. 4	Model of Empirical Formula	17
Fig. 5	Relation of $\ln(1/\phi_{exp} - 1/\phi_{cod})$ vs $1/T_{Na}$	18
Fig. 6	Relation between sodium pool temperature and sodium vapor pressure	19
Fig. 7	Relation between liquid sodium temperature and diffusion coefficient of sodium vapor in Nitrogen	20

List of Photographs

Photo. 1	Post-Test View Around Burning Pan (RUN-F2-4 Na Temp.=400°C)	21
Photo. 2	Post-Test View Around Burning Pan (RUN-F2-10 Na Temp.=175°C)	21

緒 論

これまでの研究開発の結果、高温ナトリウム（以下ナトリウムをNaと略す）の燃焼については、計算コードの検証及び安全防護設備の機能検証等で多くの成果を挙げた。ただ今後、設計の合理化と安全性を両立させるためにはデータの精度若しくは信頼性の向上に向けた研究開発が必要となる。低温Na燃焼もそのような課題の一つである。ここでは、おおよそ150～350℃のNaを低温と呼ぶが、原子炉定格運転時以外の冷却系、使用済燃料の炉内から炉外への輸送ポット及び炉外燃料貯蔵設備（EVST）等からの低温Na漏洩が対象となる。また、多くの場合で雰囲気は不活性の窒素ガスであり酸素濃度は3%前後が含まれている。

これまで、低温Naの燃焼とそれに伴うNaエアロゾル（以下Naエアロゾルをエアロゾルと略す）生成及び漏洩Naからの核分裂生成物（以下核分裂生成物をFPと略す）放出移行は、高温Na（400～650℃）による試験で検証されたコードによってその評価解析を行ってきた。しかし、従来の動燃及び海外の低温Naによるエアロゾル放出速度を見ると、雰囲気の酸素濃度が3%前後の場合、高温Naからの外挿値に比べ1～3桁小さく、その差はNa温度が低温になるほど広がる傾向にある。そこで、これを定量化できれば、事故時のFP放出速度は現在の評価値より少なくとも1桁以上は小さくなり、設計合理化に対するインパクトは大きい。ただ、系統だった研究がなされていないことから、現状ではそれらをそのまま設計に採用するには至っていない。

そこで本研究は、低温Na低酸素濃度雰囲気での燃焼速度及びエアロゾル放出速度を試験によって決定した。試験では、雰囲気ガス容積3 m³の円筒型ステンレス密閉容器を用い、その底部にNa燃焼皿を置き、このNaと雰囲気ガス中の酸素を一定時間反応させた。燃焼速度は、試験中に測定した密閉容器内の酸素消費速度から、また試験中のエアロゾル放出速度は、Naプール表面から放出され容器壁及び床上に付着したエアロゾルの全量を試験後に回収し、その重量から時間平均値を決定した。

1. 試験装置及び方法

1.1 試験装置

試験は、Fig. 1 に示すようにFRAT-1試験装置を使用した。この装置は、大別してNa加熱タンク、FRAT-1容器及び小型排煙廃液処理装置から構成される。

Na加熱タンクは、試験で使用するNaを貯蔵・加熱するためのものであり、最大180ℓ、530℃までNaを貯蔵・加熱することができる。Fig. 2 に、FRAT-1を示す。容器は、高さ約2m、内径1.3mの円筒型ステンレス密閉容器で、内部にはNaを燃焼させるための燃焼ポット（φ300×300"）及びプール表面から放出され床上に沈着したエアロゾルを回収するためのエアロゾル回収板を設置した。小型排煙廃液処理装置は、異常時のエアロゾル放出用とした。

計装としては、ガス温度・容器壁温度測定に熱電対、容器内の相対湿度測定と酸素濃度測定用にそれぞれ露点温度検出器及びジルコニア式酸素濃度計を設置した。

1.2 試験方法

試験では、まず始めに試験条件である酸素濃度（3%）を設定し、その後Na加熱タンクを試験条件温度（175～400℃）まで加熱し、FRAT-1容器内の燃焼ポットへ約10kgのNaを供給した。試験中は、燃焼ポット外壁に取りつけたマイクロヒータによりNa温度を一定に維持した。また、計測は、酸素濃度変化を連続的に、露点温度を間歇的に測定した。試験後には、容器マンホールを開放して内部観察後、エアロゾル回収板に沈着したエアロゾルを回収し、更に容器壁に付着したエアロゾルを、蒸気洗浄等によって回収した。

Na燃焼速度は、前述したように試験中の酸素消費量（酸素濃度変化）から後述する1.1式を用いて算出した。酸素消費量の測定には、ジルコニア式酸素濃度計を使用した。雰囲気酸素濃度を初期3%にして、2.5%に到達若しくは10時間経過時点を試験終了とした。

Naエアロゾルの回収は、エアロゾル回収板と容器壁から行った。以下にそれぞれの回収方法を記す。

a. エアロゾル回収板からの回収方法

エアロゾル回収板は、試験後に明らかにその上面に白色のNaエアロゾルが認められるような量が付着していれば、清浄なテコ等でその全量をビーカーに回収し、その後霧吹きで水滴を付着面に吹きつけながら残留するNa成分を回収した。この回収したNaエアロゾルを、純水に溶かして中和滴定法によってNa量を求めた。

b. 容器壁からのNaエアロゾル回収方法

容器壁に付着したNaエアロゾルの回収は、蒸気洗浄によって行い、この洗浄水をビーカーに回収した。この回収した洗浄水を前記と同様に中和滴定法によって求めた。

Table 1 に試験No.及び試験条件等を記す。

1.3 Na燃焼速度及びエアロゾル放出速度の算出方法

(1) Na燃焼速度の算出方法

Na燃焼によって消費された雰囲気ガス中の酸素濃度からNa燃焼速度を算出した。また算出にあたってはNa₂Oの生成割合を100%と仮定し、 ΔC_{O_2} は試験前後の値を用いて下記の計算式により平均燃焼速度を算出した。

$$\begin{aligned} B \cdot R &= (-\Delta C_{O_2}/100 \cdot V \cdot \rho + S_{O_2}) \cdot A \cdot 1/S \\ &= (-\Delta C_{O_2}/100 \cdot V \cdot M_{O_2} \cdot P/(R \cdot T) + S_{O_2}) \cdot A \cdot 1/S \end{aligned} \quad (1.1.1)$$

(2) エアロゾル放出速度の算出方法

一定時間Naを燃焼させNaプール表面から放出されて壁や回収板に付着したエアロゾルを試験終了後に蒸気洗浄等によって回収し、その重量から下式を用いて平均エアロゾル放出速度を算出した。ただし、Table 2 に示す総エアロゾル量は、試験終了後に放出されたエアロゾルをエアロゾル放出速度とNa燃焼速度が比例するとの仮定の基に補正した値である。

$$R \cdot R = R_A / (S \cdot t) \quad (1.1.2)$$

2. 結果と考察

2.1 Na燃焼速度の検討

(1) 試験結果とSOFIRE-MIIコードによる計算値の比較

Naプール温度に対するNa燃焼速度の実験結果をTable 2及びFig. 3に示す。これらより、Na燃焼速度はNa温度が低くなるにつれ、大きく減少している。この原因として、

- 1) 低温になるほどNa蒸気圧が低くなる。⁽¹⁾
- 2) Na液面でのNa/酸素の反応速度が遅くなる。

等が推測される。この議論は、次節に記述する。

なお、Naプール温度150℃の試験では、10時間経過しても酸素濃度変化は認められない（誤差範囲内での変化）ため、今回の議論からは割愛した。ただし、Table 2には参考までに記載した。

一方、SOFIRE-MIIコードによるNa燃焼速度⁽²⁾は、プール表面への物質伝達量とその酸素濃度から計算されている。下記にその計算式を記す。

$$B \cdot R = \alpha_m \cdot \rho \cdot C_{O_2} \cdot A \quad (2.1.1)$$

α_m の算出：水平平板の乱流自然対流 ($2 \times 10^7 < Gr \cdot Pr < 3 \times 10^{14}$) の式から

$$Nu = 0.14 (Gr \cdot Pr)^{1/3} \quad (2.1.2)$$



α_m はガスとプール間の自然対流で決まる。熱伝達の水平平板の自然対流式(2.1.2)を物質伝達に適用し、 $\lambda \rightarrow Df$ 、 $Pr \rightarrow Sc$ に置き換えると次のようになる。

$$\alpha_m = 0.140f \left[g \cdot Sc \cdot \frac{\beta}{\nu^2} \cdot (T_{Na} - T) \right]^{1/3} \quad (2.1.3)$$

$$\begin{aligned}\rho \text{ の算出: } \rho &= P \cdot V / (R \cdot T) \cdot M / V \\ &= P / (R \cdot T) \cdot M\end{aligned}\quad (2.1.4)$$

SOFIRE-MII コードによるNa燃焼速度の計算結果をTable 2及びFig. 3に示す。Fig. 3では実験値とSOFIRE-MIIコード計算値の比較を示す。Fig. 3より、SOFIRE-MIIの計算値と実験値との差は、Naプール温度が低温になるほど大きくなっており、200℃時点では1桁以上も実験値が低くなっている。

(2) Na燃焼速度実験式の導出

通常、空気雰囲気における高温Naの燃焼では、Na液面からの蒸発によって供給されるNa蒸気量が十分であるため、雰囲気の自然対流物質伝達による雰囲気中からNa自由液面近傍への酸素供給が燃焼速度を律速する。すなわち、そこでは、雰囲気からNa自由液面近傍への対流物質伝達のみによって燃焼が支配される。しかし、Naが低温になると、対流物質伝達による酸素供給と比べて蒸発によって供給されるNa蒸気量が少なくなるかNa液面でのNa/酸素の反応速度が遅くなるために、温度の低下と共に燃焼速度が低下する。よって、このような低温Naの燃焼速度を与える式を、実験から導出することとした。

燃焼速度実験式の導出にあたり、次の仮定を置いた。

(仮定)

Na自由液面に対する酸素ガスの供給は、次の二つのプロセスが連続して進行して、その結果としてNaが燃焼する。

- a. 雰囲気からNa自由液面近傍への対流物質伝達； ϕ_t
- b. Na自由液面での酸素とNaとの化学反応； ϕ_c

仮定から燃焼は、Fig. 4及び次式に示すように2段階で進行する。

$$\text{対流分} \quad : \phi_t = \alpha_m (C_{O_2, g} - C_{O_2, s}) \quad (2.1.5)$$

$$\text{化学反応分} : \phi_c = \text{const} \cdot \text{EXP}(-E/R \cdot T_{Na}) (C_{O_2, s}) \quad (2.1.6)$$

前記の2段階のプロセスが進行するとしているので、実際のNa燃焼による酸素消費速度を ϕ_{exp} とすると、各段階での酸素質量流束に対する抵抗は、それぞれ次のようになる。

$$\text{対流物質伝達に対する抵抗； } R_g = 1/\alpha_m \quad (2.1.7)$$

$$\text{Na/酸素反応に対する抵抗； } R_c = 1/(\text{const} \cdot \text{EXP}(-E/R \cdot T_{Na})) \quad (2.1.8)$$

(2.1.5) ~ (2.1.8) 式より、次式が導かれる。

$$\phi_{exp} \{1/\alpha_m + 1/(\text{const} \cdot \text{EXP}(-E/R \cdot T_{Na}))\} = C_{O_{N_2}} \quad (2.1.9)$$

一方、SOFIRE-MIIコードでは、対流物質伝達に基づく酸素消費速度 ϕ_{cod} が次式で与えられる。

$$\phi_{cod} = \alpha_m \cdot C_{O_{N_2}} \quad (2.1.10)$$

(2.1.10) 式を(2.1.9)に代入すると、次式が導かれる。

$$(1/\phi_{exp} - 1/\phi_{cod}) = (\text{const}/C_{O_{N_2}}) \cdot \text{EXP}(E/R \cdot T_{Na}) \quad (2.1.11)$$

(2.1.11) 式より、Na温度 T_{Na} が上昇すると、右項が小さくなり ϕ_{exp} は ϕ_{cod} に接近し、逆にNa温度が低下すると右項が増加するために、 ϕ_{exp} は ϕ_{cod} と比べて大きくなることになる。これは、実験結果とも定性的に一致する。依って、実験データは $\ln(1/\phi_{exp} - 1/\phi_{cod})$ を $1/T_{Na}$ に対してプロットすることで直線となり、その直線の勾配がNa/酸素の化学反応の活性化エネルギー E となる。Fig. 4に逆温度($1/T_{Na}$)に対するプロット図を示す。これより、最小二乗法によって直線式を算出したものを次に記す。

$$\ln(1/\phi_{\text{exp}} - 1/\phi_{\text{cod}}) = 7.2 \cdot 10^3 (1/T_{\text{Na}}) - 3.0 \quad (2.1.12)$$

(2.1.12) 式を (2.1.11) 式に代入すると、次の実験式が導かれる。

$$\begin{aligned} 1/\phi_{\text{exp}} &= 1/\phi_{\text{cod}} + e^{\text{const}} \cdot e^{-E/R \cdot T_{\text{Na}}} \\ \phi_{\text{exp}} &= (1/\phi_{\text{cod}} + 0.05 \cdot e^{6.0 \cdot 10^4 / (R \cdot T_{\text{Na}})})^{-1} \end{aligned} \quad (2.1.13)$$

ここで、活性化エネルギー E は次のようになる。

$$E = 6.0 \cdot 10^4 \quad (\text{J})$$

この (2.1.13) 式を Fig. 3 に実線で示す。

また、飽和蒸気圧と拡散係数の影響についても検討した。Fig. 6 及び Fig. 7 に逆温度に対するプロット図を示す。これより、直線式を求め、Na蒸発及びNa蒸気の窒素ガス中の拡散係数の活性化エネルギーを求めると次のようになる。

(a) Na蒸発⁽¹⁾の活性化エネルギー

飽和蒸気圧 $P_{\text{Na}} = \text{const.} \cdot e^{-E/RT}$ より、活性化エネルギー E は次のようになる。

$$E = 9.8 \cdot 10^4 \quad (\text{J})$$

(b) 拡散係数 (Na-N₂系)⁽¹⁾の活性化エネルギー

$\text{Na} = \text{const.} \cdot e^{-E/RT}$ より活性化エネルギー E は次のようになる。

$$E = 7.4 \times 10^3 \quad (\text{J})$$

これらの結果から、(2.1.13) 式で与えられているNa自由液面での酸素とNaとの化学反応に対する活性化エネルギー E は、Na蒸気の活性化エネルギーとは1.5倍程度の相違であるが、窒素ガス中のNa蒸気の拡散係数の活性化エネルギーとは1/10倍の相違があり前者に近い。よって、第0近似としては、Na自由液面での酸素とNaとの化学反応は、Na液面からのNa蒸発過程が律速になっているものと推測する。

2.2 Naエアロゾル放出速度の検討

(1) 試験結果からの検討

回収したNaエアロゾル量をTable 2に示す。また、Photo. 1 & 2に試験後の容器内部を示す。これらの結果から、エアロゾル発生量は、各試験毎に大きく異なり、同じ温度での試験でも大きな違いが生じている。この原因の一つとして、相対湿度の影響が推測されたため、急速露点温度検出器を設置して測定したが、原因が究明できる程の有益な結果は得られなかった。

また、この回収したエアロゾル量から平均エアロゾル放出速度を算出した。その結果をTable 2及びFig. 3に示す。この結果も同様に、広範囲に及んでいることが判る。しかし、ここで問題となるのは、Na燃焼速度との比較である。これまでの安全評価解析では、エアロゾル放出速度とNa燃焼速度は等しいとして設計されおり、本試験結果からNa燃焼速度とエアロゾル放出速度とには少なくとも1桁は低い値であり、Na燃焼速度と同様にNa温度が低くなるほど拡がる傾向にある。

(2) 他の試験結果⁽³⁾との比較検討

これまでの動燃における試験結果⁽³⁾として、Table 2及びFig. 3に示す様な結果が得られている。しかし、この試験では、Naプール面積が本試験と比べ小さく(1/200 or 1/300)、エアロゾルの回収はフロー式等の違いがある。これらの結果より、両者の試験結果には大きな差はないことが判る。

依って、エアロゾル放出速度はNa燃焼速度に比例するとの仮定の基に、両者の試験結果の最大値を包絡するようなNa燃焼速度と同様な実験式を導出した。導出した実験式をFig. 3に点線で示す。この実験式より、エアロゾル放出速度はNa燃焼速度の約20%であり、従来の解析評価に、十分な保守性があることが判明した。

結 論

低温Naプール燃焼試験によって、Na燃焼速度及びエアロゾル放出速度の各々について下記に示すような結果を得た。

(1) Na燃焼速度

Na燃焼速度は、SOFIRE-MIIコードの計算値と比べて約1桁以上の低い値であり、Na温度の低下とともに低下する傾向となった。通常、空気雰囲気でのNa燃焼時には、火面からの熱伝導によりNa液面の温度が上昇しNa蒸気量が十分となるため、Na自由液面近傍への酸素供給（対流物質伝達）が律速となる。しかし、本試験のような低酸素濃度でのNa燃焼は、データ解析の結果から高温では酸素の自然対流物質伝達が、低温ではNaと酸素の反応が律速となるためと推測した。従って、これらの結果から、低温・低酸素濃度時のNa燃焼速度は、これまでの評価解析に過度の保守性があることが判明した。この過度の保守性を改善するために、得られた結果から実験式を導き、これによる精度の高い評価解析が行なえるようになった。

(2) Naエアロゾル放出速度

エアロゾルの発生は、相対湿度等の影響により広範囲に及んだ。この発生したNaエアロゾルを全て回収し、Naエアロゾル放出速度を算出した。エアロゾル放出速度は、Na燃焼速度と同様にNaプール温度に強く依存し、400℃ではSOFIRE-MIIコード計算値の約10%で、200℃では約2桁以上も低くなっており、実験値と比較しても200℃では一桁以上低い値であった。従って、これまでの安全解析評価でエアロゾル放出速度とNa燃焼速度が等しいものとして設計されていたが、これらの結果からエアロゾル放出速度の評価には十分な保守性があることを立証した。また、Na燃焼速度と同様にエアロゾル放出速度は、Na燃焼速度に比例するもとの仮定のもとに、各Naプール温度で最大の値を与える実験式を導出した。

謝 辞

本試験の実施並びに実験式の導出に当たって、有益なコメント等をいただいたプラント安全工学室の三宅副主任研究員，宮原研究員に謝意を表します。

参考文献

- (1) 日本機械学会, 「伝熱工学資料」改定第3版
- (2) 八木, 長沼, . 「一次収納構造健全性確認試験(Ⅱ) -第2報 ナトリウム火災コードの改修」, SJ222 78-01(2), 1978年4月
- (3) 姫野, 他, 「ナトリウムエアロゾル発生速度」, PNC N941 82-268 , 1982.12

Table 1 Test Conditions

Test No.	RUN F2-2	RUN F2-3	RUN F2-4	RUN F2-5	RUN F2-6	RUN F2-7	RUN F2-8	RUN F2-9	RUN F2-10
Test Date	S.62.11.18	S.62.12.16	S.63.3.15	S.63.1.19	S.63.1.27	S.63.2.17	S.63.2.26	S.63.3.8	S.63.4.7
Sodium Pool Temp. (°C)	350	300	400	350	300	250	200	150	175
Initial Oxygen (%)	3								
Sodium Pool Area (m ²)	0.0707								
Used Sodium (kg)	10								
Oxygen Gas Supply	non		yes	non		yes		non	
Test Time (min)	115	120	35	40	120	180	295	685	600

Table 2 Test Results

Test No.	Sodium Pool Temp. (°C)	Gas Temp. (°C)	Initial Humidity (%)	Burning Rate		Total aerosol mass* (g)	Aerosol Release Rate		$\ln(1/\phi_{exp} - 1/\phi_{cod})$
				SOFIRE Calculated (g/cm ² ·sec)	Experimental (g/cm ² ·sec)		Another Experiment (g/cm ² ·sec)	Experimental (g/cm ² ·sec)	
RUN-F2-4	400	70	—	1.3×10^{-4}	9.43×10^{-5}	19.87	1.0×10^{-5}	1.34×10^{-5}	7.98
RUN-F2-2	350	62	1.4	1.2×10^{-4}	5.82×10^{-5}	0.021	—	4.23×10^{-9}	9.09
RUN-F2-5		55	—		8.95×10^{-5}	5.58		3.23×10^{-6}	7.96
RUN-F2-3	300	50	4.0	1.1×10^{-4}	4.54×10^{-5}	0.096	5.5×10^{-7}	1.89×10^{-8}	9.47
RUN-F2-6		50	—		3.50×10^{-5}	0.012		1.81×10^{-8}	9.88
RUN-F2-7	250	40	—	9.8×10^{-5}	2.05×10^{-5}	8.96	—	1.17×10^{-6}	10.56
RUN-F2-8	200	30	12.3	8.6×10^{-5}	3.45×10^{-6}	0.0489	1.1×10^{-7}	3.91×10^{-9}	12.54
RUN-F2-9	150	30	27.8	7.2×10^{-5}	non	—	—	—	—
RUN-F2-10	175	30	1.03	7.8×10^{-5}	2.17×10^{-6}	0.059	—	2.32×10^{-5}	13.01

* Corrected Value

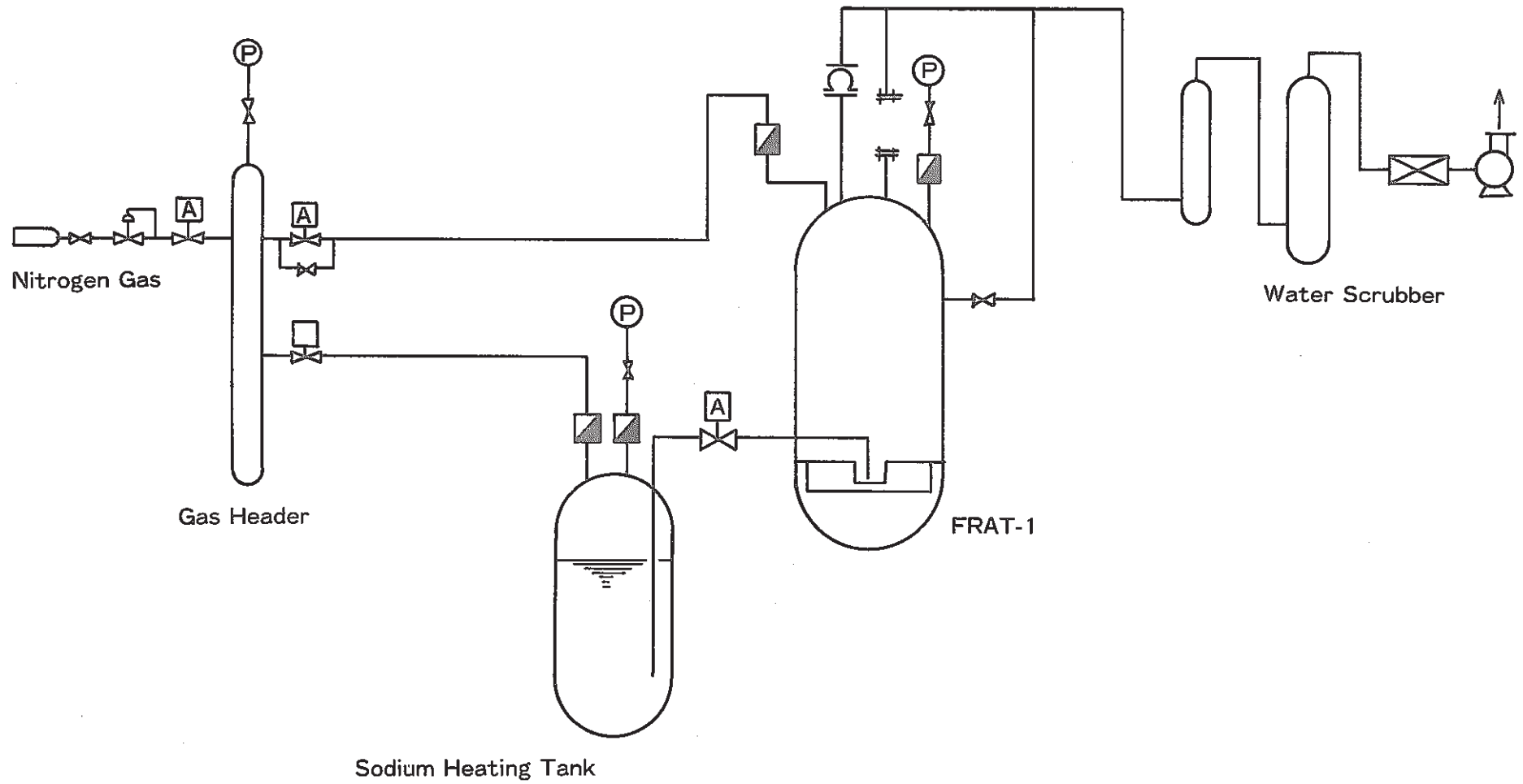


Fig. 1 Test Arrangement of FRAT-1

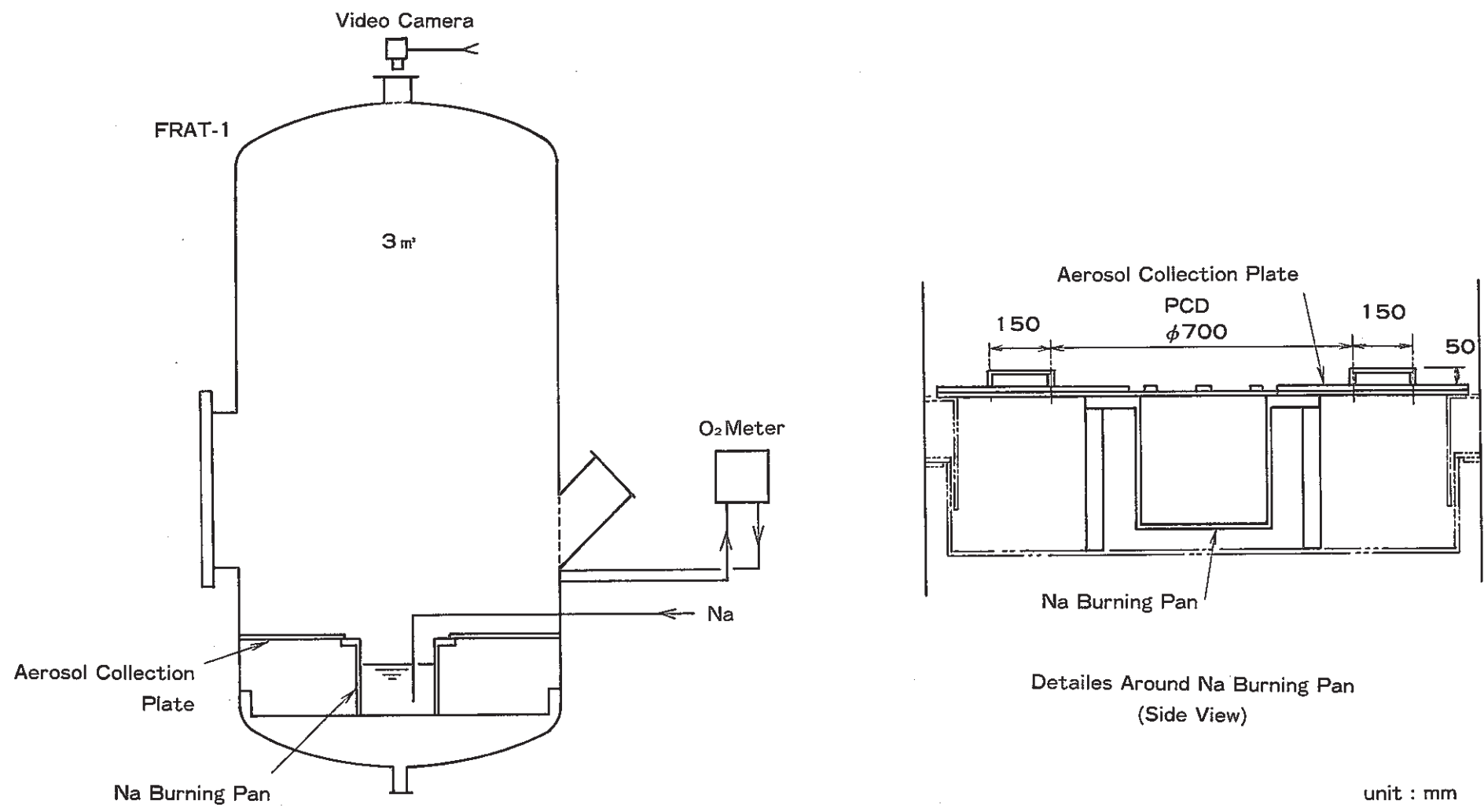
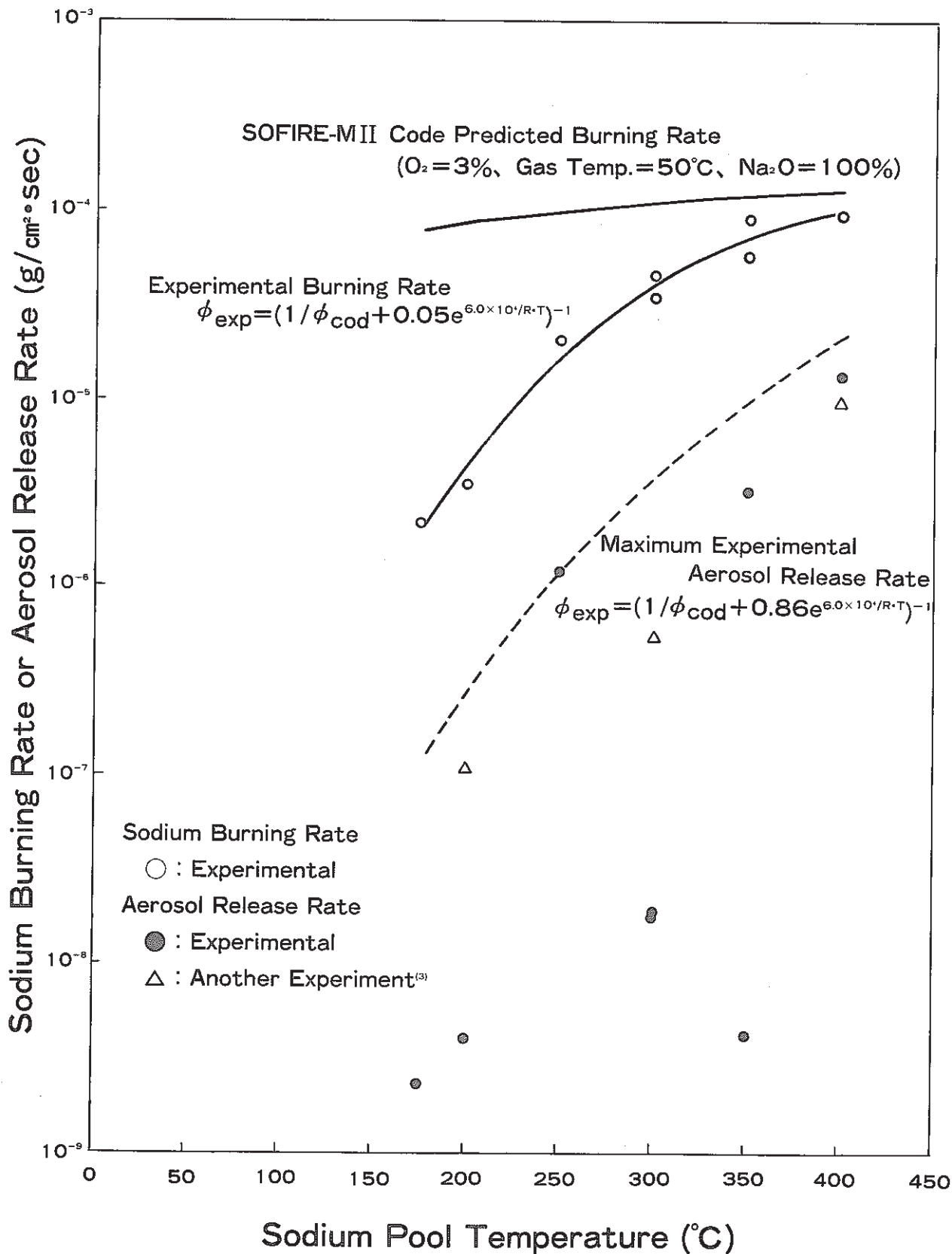


Fig. 2 FRAT-1 Overview

Fig.3 Comparison of Sodium burning rate against Pool Temperature between Calculation and test



PSS-SFE-686

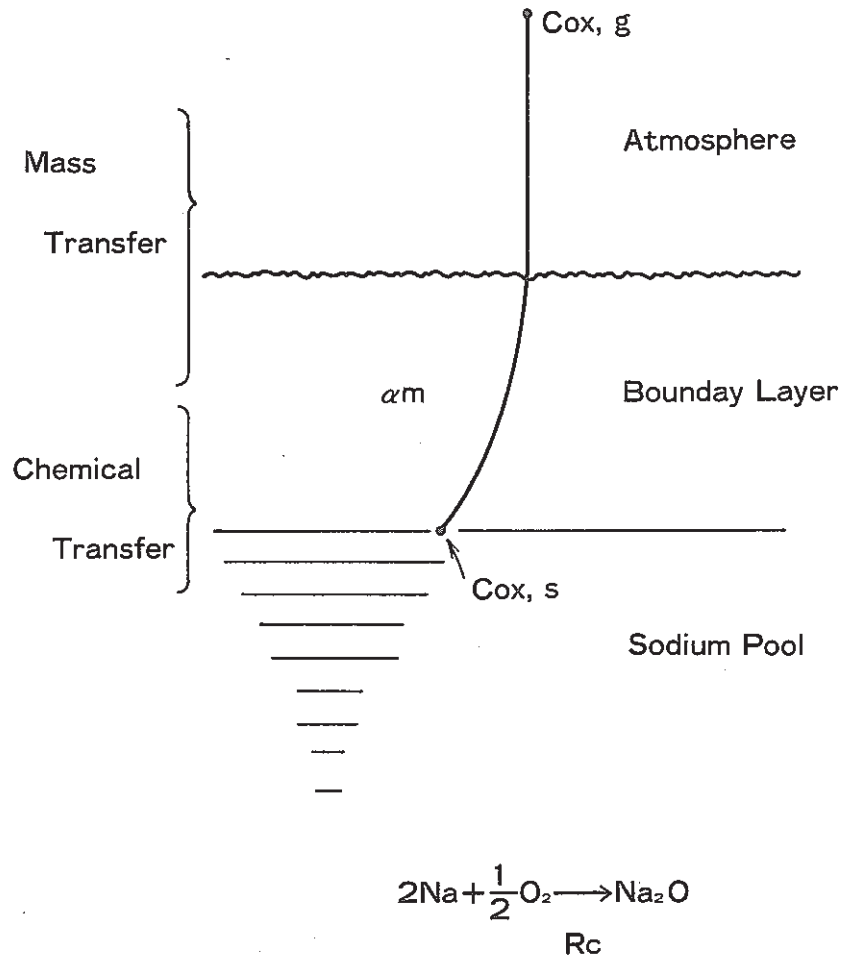


Fig. 4 Model of Empirical Formula

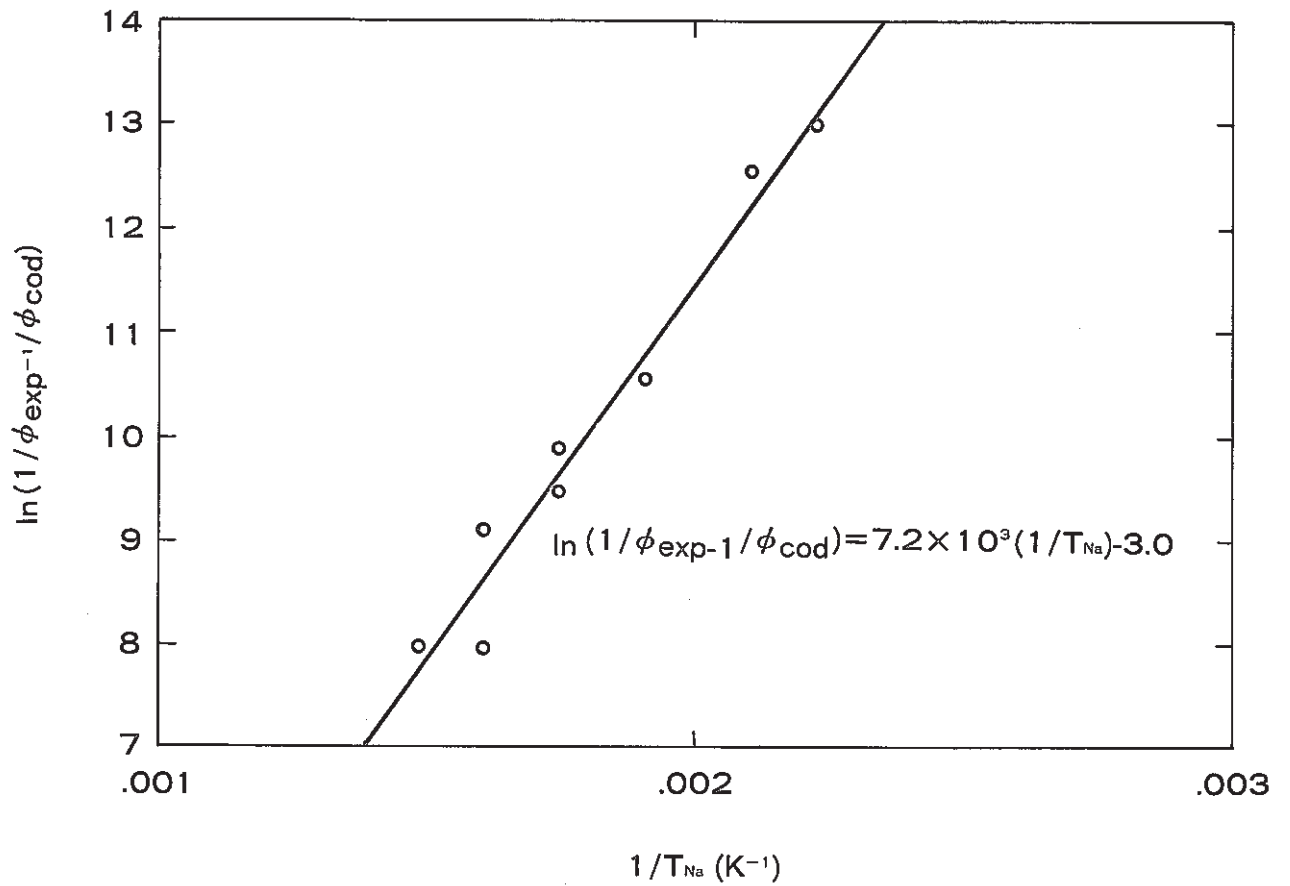


Fig.5 Relation of $\ln(1/\phi_{\text{exp}} - 1/\phi_{\text{cod}})$ vs $1/T_{\text{Na}}$

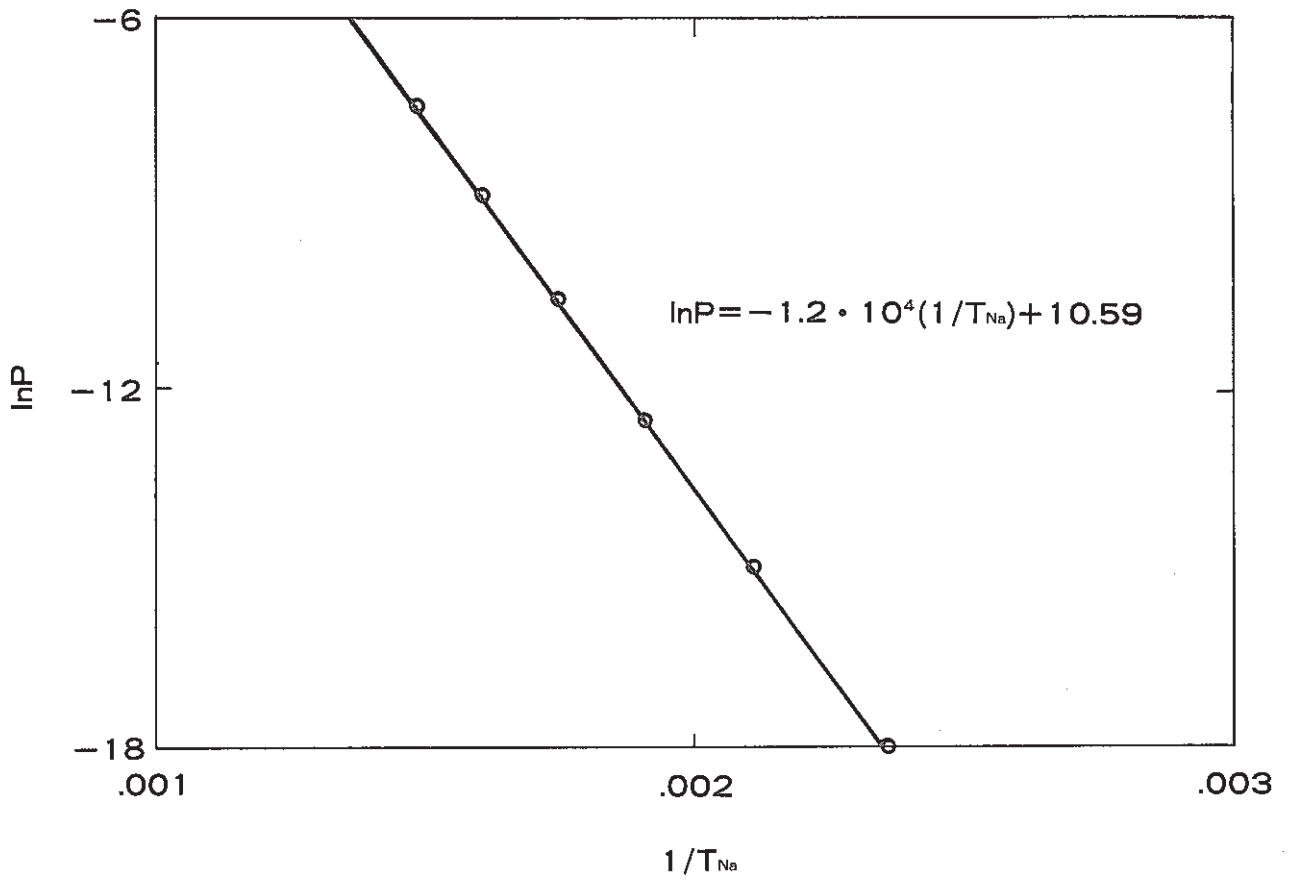


Fig.6 Relation between sodium pool temperature and sodium vapor pressure

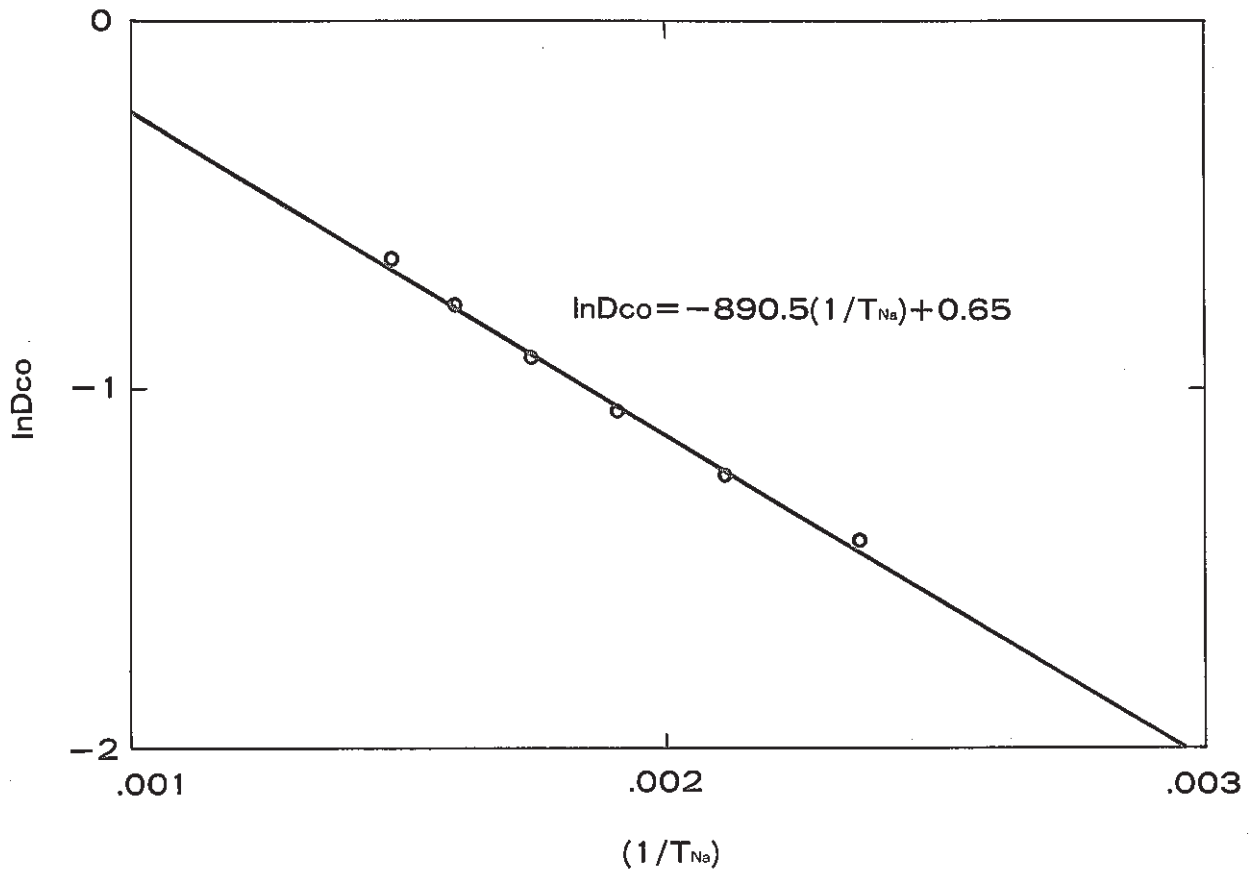


Fig.7 Relation between liquid sodium temperature and diffusion coefficient of sodium vapor in Nitrogen

Na Pipe

Burning Pool

Aerosol
Collection
Plate

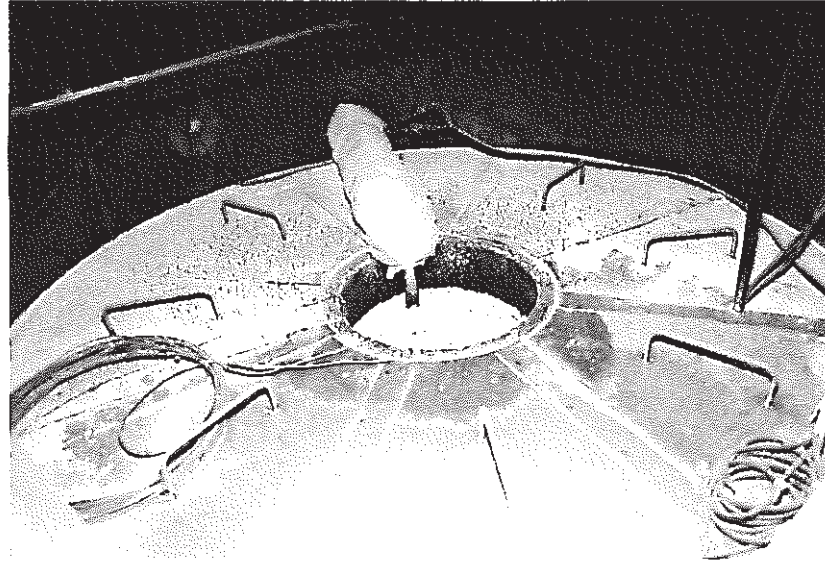
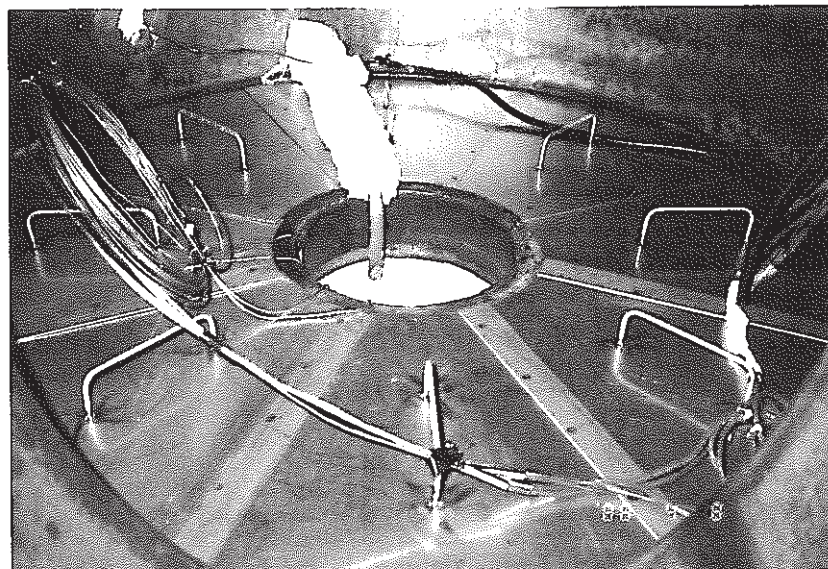


Photo.1 Post-Test View Around Burning Pan
(Run-F2-4 Na=400°C)



FUJICOLOR 88

Photo.2 Post-Test View Around Burning Pan
(Run-F2-10 Na Temp.=175°C)