

区 分 変 更	
変更後資料番号	平成10-110
決裁年月日	平成10年3月26日

ナトリウムプール火災計算モデル (SPM)



1985年9月

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター

記布す
この

本資料は、核燃料サイクル開発機構の開発業務を進めるために作成されたものです。
したがって、その利用は限られた範囲としており、その取扱には十分な注意を払って
ください。この資料の全部または一部を複写・複製・転載あるいは引用する場合、
特別の許可を必要としますので、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)



ナトリウムプール火災計算モデル(SPM)

三宅 収*，山崎 洋嗣**，川部 隆平***，
姫野 嘉昭*，宮口 公秀*

要 旨

高速炉の安全設計の一環として行われるナトリウムプール火災解析には、計算コードとして、SOFIRE-M IIコード、もしくはプール火災とスプレイ火災を組み合わせたASSCOPSコードが使用されてきた。ところがプール火災は、近年は上記の計算コードが開発された時代と比べ、実験を通じて現象がより詳細に把握できる段階になって来ている。一方、現在の高速炉プラントの合理化に対する動向から、プール火災とその熱的影響を、より現実的に評価できるよう精度の高い計算コードが今後要求されて来るものと推定する。そこで、このような現状と動向に鑑みて、主に二次冷却系の空気霧囲気に於けるナトリウムプール火災を対象に新たな計算モデル、SPM (Sodium Pool Fire Model)を開発した。

SPMでは、実際の現象を出来るだけ忠実にモデル化する目的で、ナトリウムプール表面の上方に燃焼フレーム(火災)を考え、フレーム内における燃焼反応と、燃焼反応によって生成される反応熱の周囲霧囲気及び周囲構造物への熱伝達を考慮した。

モデルの妥当性の検証については、米国HEDLのCSTF施設および西独KfKのFAUNA施設による実験結果、および従来の計算コードであるSOFIRE IIあるいはSOFIRE-M IIによる計算結果との比較検討を行った。比較検討の結果、SPMの計算結果は、実験値にほぼ一致するかやや保守的な値となつたが、プール温度については、SOFIRE-M IIによる計算結果と比べ著しい改善が見られ、より実測値に近い計算結果を得た。

* 大洗工学センター、安全工学部、プラント安全工学室。

** ニュークリア・データ株式会社。

*** 現：日立製作所、エネルギー研究所。

Sodium Pool Fire Model (SPM)

Osamu Miyake*, Hiroshi Yamazaki**,
Ryuhei Kawabe***, Yoshiaki Himeno*,
and Kimihide Miyaguchi*

Abstract

For the analysis of sodium pool fire accidents in the LMFBR safety design, the computer codes SOFIRE-MII and ASSCOPS (the latter evaluate the pool-spray combined fires) have been utilized. In regard to the combustion phenomena of pool fire, better understanding has been obtained by experiments since the time of development of above mentioned codes. On the other hand, for the purpose of rationalization of the present LMFBR plants, the detailed analysis code is supposed to be required which can evaluate the sodium fires and their thermal effects more accurately and can remove existing conservatism of the present codes. Therefore, considering the requirement of the current status and trends, a new sodium pool fire model (SPM) has been accomplished mainly aiming at the evaluation of sodium fires under the air-filled secondary system condition.

To model the actual phenomena precisely as possible, SPM takes account of the combustion flame above the pool surface, and the combustion heat and the heat transports to ambient and to the surrounding structures are estimated.

To verify SPM, the comparisons of calculated results with experimental data obtained by the U.S. HEDL's CSTF and the German KfK's FAUNA facilities are presented. The comparisons with SOFIRE-II and SOFIRE-III are also discussed. Results show that the SPM predictions give reasonable agreement or somewhat overestimation, though, the pool temperature predictions are greatly improved in comparison with those of SOFIREs.

** FBR Plant Safety Sec., Safety Engineering Div., OEC.
** Nuclear Data Corporation, *** Hitachi, Ltd.

目 次

1.はじめに.....	1
2.計算モデル.....	2
2.1 概 略.....	2
2.2 燃焼フレームのマスバランス.....	3
2.2.1 プールからフレームへのナトリウムの拡散.....	3
2.2.2 雾囲気からフレームへの酸素と水蒸気の供給.....	3
2.2.3 フレームでのマスバランス.....	5
2.3 燃焼フレームのヒートバランス.....	6
2.3.1 プールとフレーム間の熱輸送	6
2.3.2 フレームでの熱収支.....	7
2.4 ナトリウムプール, 雾囲気ガス, 構造物の計算モデル.....	9
2.4.1 ナトリウムプールの計算.....	9
2.4.2 雾囲気ガスの計算.....	9
2.4.3 構造物の計算.....	10
3.試計算結果.....	12
3.1 燃焼速度, フレーム温度, フレーム高さ.....	12
3.2 実験データとの比較.....	24
3.2.1 HEDL-AB1 実験の解析.....	24
3.2.2 FAUNA F5, F6 の実験の解析.....	25
4.まとめ.....	43
5.参考資料.....	44
Appendix - A SPM プログラム概略.....	46
Appendix - B 試計算の入力データ.....	53

図表リスト

Fig. 2.1	ナトリウムプールとフレームのマス・エネルギー・バランス.....	2
Fig. 2.2	ナトリウム蒸気の拡散モデル.....	3
Fig. 2.3	雰囲気からフレームへの酸素と水蒸気の供給.....	4
Fig. 2.4	フレームとプールの間の熱伝導.....	6
Fig. 3.1	Burning Rate vs. Pool Temperature ($T_{gas}=100\text{ C}$, $FNa202=0$).....	14
Fig. 3.2	Burning Rate vs. Pool Temperature ($T_{gas}=100\text{ C}$, $FNa202=1$).....	14
Fig. 3.3	Flame Temperature vs. Pool Temperature ($T_{gas}=100\text{ C}$, $FNa202=0$).....	15
Fig. 3.4	Flame Temperature vs. Pool Temperature ($T_{gas}=100\text{ C}$, $FNa202=1$).....	15
Fig. 3.5	Flame Height vs. Pool Temperature ($T_{gas}=100\text{ C}$, $FNa202=0$).....	16
Fig. 3.6	Flame Height vs. Pool Temperature ($T_{gas}=100\text{ C}$, $FNa202=1$).....	16
Fig. 3.7	Burning Rate vs. Pool Temperature ($CO_2=23\text{ w/o}$, $FNa202=0$).....	17
Fig. 3.8	Burning Rate vs. Pool Temperature ($CO_2=23\text{ w/o}$, $FNa202=1$).....	17
Fig. 3.9	Flame Temperature vs. Pool Temperature ($CO_2=23\text{ w/o}$, $FNa202=0$).....	18
Fig. 3.10	Flame Temperature vs. Pool Temperature ($CO_2=23\text{ w/o}$, $FNa202=1$).....	18
Fig. 3.11	Flame Height vs. Pool Temperature ($CO_2=23\text{ w/o}$, $FNa202=0$).....	19
Fig. 3.12	Flame Height vs. Pool Temperature ($CO_2=23\text{ w/o}$, $FNa202=1$).....	19
Fig. 3.13	Heat Balance Diagram at Flame Zone ($T_{gas}=30\text{ C}$, $P_{gas}=0.101\text{ MPa}$, $CO_2=23\text{ w/o}$, $FNa202=0$)	20

Fig. 3. 14	Heat Balance Diagram at Flame Zone (Tgas=30 C, Pgash=0.101 MPa, CO ₂ =23 w/o, FNa202=1)	2 1
Fig. 3. 15	Heat Balance Diagram at Flame Zone (Tgas=100 C, Pgash=0.101 MPa, CO ₂ =23 w/o, FNa202=0)	2 2
Fig. 3. 16	Heat Balance Diagram at Flame Zone (Tgas=100 C, Pgash=0.101 MPa, CO ₂ =23 w/o, FNa202=1)	2 3
Fig. 3. 17	Schematic of HEDL AB-1 Pool Fire Experiment Vessel.....	2 9
Fig. 3. 18	Comparison between SPM Calculation and Measurements of Gas Temperature in HEDL AB-1 Test	3 0
Fig. 3. 19	Comparison between SPM Calculation and Measurements of Gas Pressure in HEDL AB-1 Test	3 1
Fig. 3. 20	Comparison between SPM Calculation and Measurements of Pool Temperature in HEDL AB-1 Test	3 2
Fig. 3. 21	Comparison between SPM Calculation and Measurements of Oxygen Concentration in HEDL AB-1 Test	3 3
Fig. 3. 22	Schematic of FAUNA F-5 and F-6 Experiment Vessel	3 4
Fig. 3. 23	Comparison between SPM Calculation and Measurements of Gas Temperature in FAUNA F-5 Test	3 5
Fig. 3. 24	Comparison between SPM Calculation and Measurements of Gas Pressure in FAUNA F-5 Test	3 6
Fig. 3. 25	Comparison between SPM Calculation and Measurements of Pool Temperature in FAUNA F-5 Test	3 7
Fig. 3. 26	Comparison between SPM Calculation and Measurements of Oxygen Concentration in FAUNA F-5 Test	3 8
Fig. 3. 27	Comparison between SPM Calculation and Measurements of Gas Temperature in FAUNA F-6 Test	3 9
Fig. 3. 28	Comparison between SPM Calculation and Measurements of Gas Pressure in FAUNA F-6 Test	4 0
Fig. 3. 29	Comparison between SPM Calculation and Measurements of Pool Temperature in FAUNA F-6 Test	4 1
Fig. 3. 30	Comparison between SPM Calculation and Measurements of Oxygen Concentration in FAUNA F-6 Test	4 2
Table 3. 1	System Dimensions and Initial Conditions used for HEDL AB-1 and FAUNA F5, F6 Calculations	2 6

Table 3.2 Comparison of SOFIRE-II Predictions and SPM	
Predictions with HEDL AB-1 Test Results	27
Table 3.3 Comparison of SOFIRE-MII Predictions and SPM	
Predictions with FAUNA F5 and F6 Test Results.....	28

1. はじめに

高速増殖炉では安全評価の一環として、冷却系配管が何等かの原因で破損し、大量のナトリウムが漏洩した場合の原子炉プラントに与える熱的な影響を評価する解析が行われている。原型炉「もんじゅ」では、このような解析に使用する計算コードとして、プール火災には SOFIRE-M II^{1), 2)} が、スプレイ火災には SPRAY-III M^{3), 4)} が、また両者を結合した ASSCOPS⁵⁾ も開発されて使用されて来た。

ところで、これらの計算コードの内、プール火災を扱う SOFIRE コードについては、そのオリジナル¹⁾ が米国の AI 社で開発されて以来、諸外国を含めて多くの使用実績があり、プール火災用の標準コードとして今日までに高い地位を築いている。ところが、オリジナルの発表（1973年）以来すでに 10 年以上が経ており、近年では実験データが蓄積されたこともあって、より精度の高い計算コードが開発される機運にある。SOFIRE コードの特徴は、燃焼部（ナトリウム蒸気と酸素及び水蒸気との反応部）がナトリウムプール表面にあると仮定しモデルを非常に単純化しているが、得られる計算結果は実験事実を比較的正確に表わしていることにある。しかし、現実のプール火災では、周囲雰囲気の酸素濃度が高いと、プール表面上にはフレーム（火災）が形成され、このフレームからの放射熱伝達と対流熱伝達により周囲へ熱が放散され、またフレームからの放射熱伝達および熱伝導などによってプール表面が加熱される。SOFIRE コードでは、このような現実の物理現象がモデル化されていないために、計算結果が実験結果と一致しない場合も報告されている。プール火災の原子炉安全設計に及ぼす影響については、プラント内部の建物の壁や天井のみならず、スプレイ火災と比較すると長時間にわたって持続するため、特に床のコンクリート等大きな影響を与える。このため、従来の計算コードが保守的なプール温度を与えていたことから、今後予想されるプラントの設備合理化のためには、より正確なコードの開発を指向する必要があろう。

ナトリウム火災では、一般の油火災と比較して、燃焼物であるナトリウムの飽和蒸気圧が極端に低いことからフレームの高さは究めて低く、プール表面からの距離はたかだか 1 mm 以下である。近年発表されているプール火災コードでは、このフレームの生成とそれに伴う熱伝達を出来るだけ正確にモデル化しようと試みられている。^{6) - 10)}

本報告書では、このような近年の研究開発動向を踏まえて、ナトリウムプール火災をより正確にモデル化するための計算コードモデル、 SPM (Sodium Pool Fire Model) を開発したので、その内容と計算例および実験結果との比較検討について報告する。

2. 計算モデル

2.1 概略

ナトリウムプール上に形成されるフレームの状態量は、プール表面及び霧囲気の状態が既知であるとして、フレームに於ける燃焼反応成分（ナトリウム蒸気、酸素、水蒸気）に関する質量保存則及びフレーム内の燃焼発熱量とフレームから周囲及びプール表面への熱伝達に関するエネルギー保存則によって決定する。ここで、前者の質量保存則については、フレームに到達するナトリウム蒸気、酸素、水蒸気が予め決められた化学反応式に基づいた化学量論比を満たすよう記述する。また、後者のエネルギー保存則については、フレームで発生した反応熱が、霧囲気、プール、周囲構造物への放熱と平衡となるように記述する。

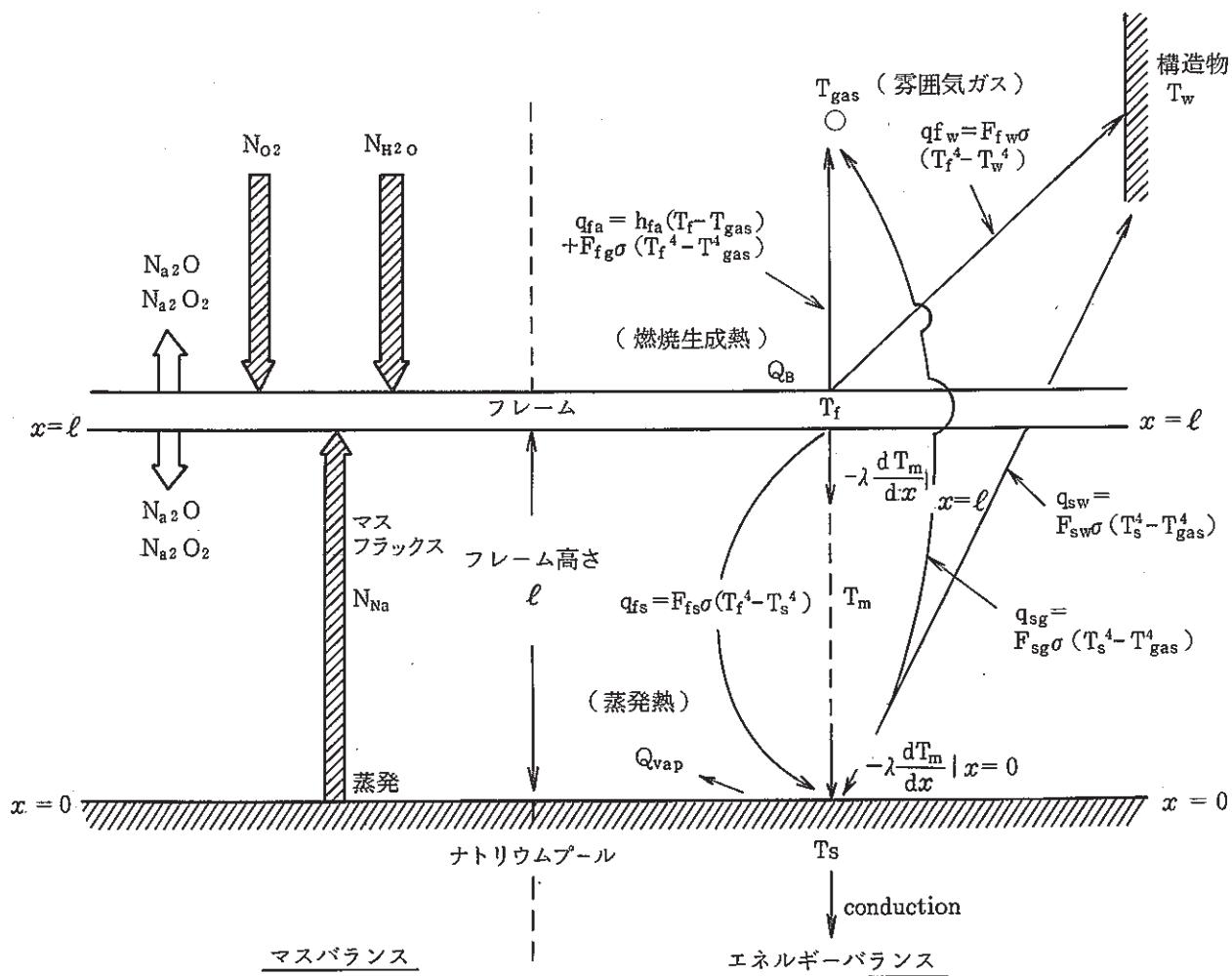


Fig. 2.1 ナトリウムプールとフレームのマス・エネルギー・バランス

2.2 燃焼フレームのマスバランス

2.2.1 プールからフレームへのナトリウムの拡散

プールとフレームの間のナトリウム蒸気の
1次元拡散を考えると、モルフラックス (N_{Na})
に関して次式が成立する。¹³⁾

$$N_{Na} = Y_{Na}(N_{Na} + N_{N2}) - C_f D_{Na-N2} \frac{dY_{Na}}{dx}$$

…… (2 - 1)

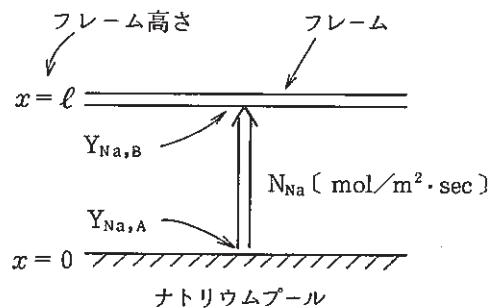


Fig. 2.2 ナトリウム蒸気の拡散モデル

ここで、 Y_{Na} : ナトリウムのモル分率(-)

N_{N2} : 窒素のモルフラックス (mol/m².sec)

C_f : フレームプール間のモル濃度 (mol/m³)

D_{Na-N2} : ナトリウム蒸気の拡散係数 (m²/sec)

窒素の消費はないので、 $N_{N2} = 0$ である。 (2 - 1) 式を解き、 $x = 0$ (プール表面) に於いて、 $Y_{Na} = Y_{Na,A}$ とすると次式を得る。

$$Y_{Na} = 1 - \exp \left\{ \frac{N_{Na}}{C_f D_{Na-N2}} x + \ell_n (1 - Y_{Na,A}) \right\} \quad \dots \dots (2 - 2)$$

更にフレームの位置を $x = \ell$ とし、 その位置におけるナトリウムのモル分率を $Y_{Na} = Y_{Na,B}$ とおいて、 ナトリウムのモルフラックスについて整理すると、 次式を得る。

$$N_{Na} = \frac{C_f D_{Na-N2}}{\ell} \cdot \ell_n \left\{ \frac{1 - Y_{Na,B}}{1 - Y_{Na,A}} \right\} \quad \dots \dots (2 - 3)$$

(2 - 3) 式は、 フレーム面でナトリウムが燃焼によって消費されることから、 $Y_{Na,B} = 0$ となり、 また、 プール表面でのモル分率をナトリウムの蒸気圧 ($P_{Na,A}$) で表わすと (2 - 4) 式が成立する。

$$Y_{Na,A} = \frac{P_{Na,A}}{P} \quad \dots \dots (2 - 4)$$

更に $P_{Na,A}$ は、 近似的にプール表面温度におけるナトリウムの飽和圧 ($P_{Na,sat}$) と置けるために次式が得られる。

$$N_{Na} = \frac{C_f D_{Na-N2}}{\ell} \cdot \ell_n \left\{ \frac{P}{P - P_{Na,sat}} \right\} \quad \dots \dots (2 - 5)$$

2.2.2 雾団気からフレームへの酸素と水蒸気の供給

霧団気からフレームに供給される酸素と水蒸気のフラックスは、 自然対流物質伝達に支配されるため、 これらのフラックスを自然対流の熱伝達式から、 熱伝達と物質伝達のアナロジーを使って求める。

水平平板上向きの自然対流式として、SOFIRE¹⁾で採用しているのは、次式で表わされる Fishenden-Saunders の式¹⁹⁾である。

$$N_u = 0.14(G_r \cdot P_r)^{1/3} \quad : (2 \times 10^7 < G_r P_r < 3 \times 10^{10}) \cdots (2-6)$$

また、近年の研究^{6), 8)}でよく用いられているのは Fujii-Imura の式²⁰⁾で、次式で表わされる。

$$N_u = 0.16(G_r \cdot P_r)^{1/3} \quad : (G_r P_r < 2 \times 10^8) \cdots (2-7)$$

両式の差は係数のみである。また適用範囲については、プールの面積（代表長さ）が大きいと逸脱する可能性があるが¹²⁾、実用上は大きな問題とはならない。SPMでは近年の実績が多い（2-7）式を採用する。

(2-7)式は、熱伝達と物質伝達のアナロジーにより、次式に変換できる。

$$Sh = 0.16(G_r \cdot Sc)^{1/3} \cdots (2-8)$$

ここで、ShはSherwood数、GrはGrashof数、ScはSchmidt数で、夫々、次のように定義されている。

$$\left\{ \begin{array}{l} Sh = K \cdot L / C_a \cdot D \\ G_r = (L^3 g / \nu^2) \cdot \beta \Delta T \\ S_c = \nu / D \end{array} \right. \cdots (2-9)$$

$$\cdots (2-10)$$

$$\cdots (2-11)$$

ここで、Kは物質伝達係数〔mol/m²sec〕、Lは代表長さ〔m〕、C_aは雰囲気ガスのモル濃度〔mol/m³〕、Dは着目する成分の拡散係数〔m²/sec〕、gは重力加速度〔m/sec²〕、νは雰囲気気体の動粘性係数〔m²/sec〕、βは雰囲気気体の体積膨張係数〔K⁻¹〕、ΔTは温度差の絶対値〔K〕である。

他方、雰囲気から、フレームへの酸素／水蒸気のフラックスは次式で表わされる。

$$N_A = K_A (Y_{Aa} - Y_{Af}) + Y_{Aa} (N_A + N_{N2}) \cdots (2-12)$$

ここで、Nはモルフラックス

〔mol/m²·sec〕Yはモル分率

〔-〕で、添字“A”は酸素又は水蒸気を、“N₂”は窒素を表わす。

又添字“a”は雰囲気を、“f”は、フレーム面における状態を表わす。

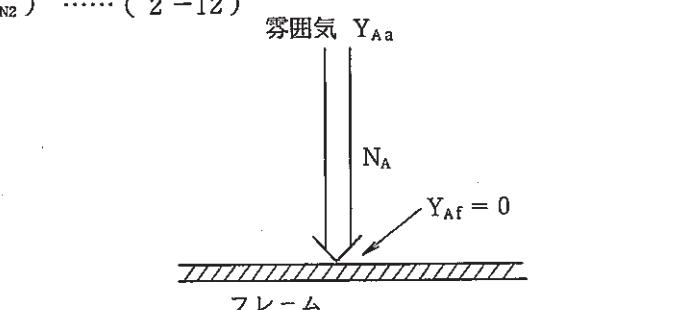


Fig. 2.3 雰囲気からフレームへの酸素と水蒸気の供給

窒素の消費はないことから、近似的に N_{N2} = 0 と置け、またフレーム面では酸素及び水蒸気がナトリウムとの反応のために完全に消費されるものと考えると、Y_{Af} = 0 である。よって、(2-12)式は次式のように簡略化できる。

$$N_A = \left(\frac{Y_{Aa}}{1 - Y_{Aa}} \right) \cdot K_A \cdots (2-13)$$

(2-8)式と(2-13)式より、結局、雰囲気からフレームへの酸素(A=O₂)と水蒸気

(A = H₂O) のフラックス [mol/m²sec] は次式で表わすことができる。

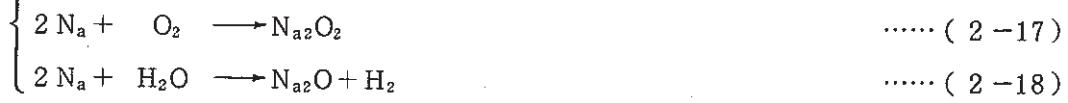
$$N_{O_2} = \left(\frac{Y_{O_2,a}}{1 - Y_{O_2,a}} \right) \cdot C_a \cdot D_{O_2}^{2/3} \cdot 0.16 \left\{ \frac{g \cdot \beta |T_f - T_{gas}|}{\nu_{air}} \right\}^{1/3} \quad \dots \dots (2-14)$$

$$N_{H_2O} = \left(\frac{Y_{H_2O,a}}{1 - Y_{H_2O,a}} \right) \cdot C_a \cdot D_{H_2O}^{2/3} \cdot 0.16 \left\{ \frac{g \cdot \beta |T_f - T_{gas}|}{\nu_{air}} \right\}^{1/3} \quad \dots \dots (2-15)$$

ここで、 T_f はフレーム温度 (K) T_{gas} は霧囲気温度 (K) である。

2.2.3 フレームでのマスバランス

前項までで、燃焼に際しての反応成分であるナトリウムのフラックス (2-5) 式、酸素のフラックス (2-14) 式、水蒸気のフラックス (2-15) 式を各々示した。ここでは、燃焼に関するマスバランスを考えることによって、これら 3 つの式の相互関係式を導く。フレーム内で起こる化学反応として、ここでは以下の式を考える。



N_{a2}O 生成と N_{a2}O₂ 生成の比は、既知 (一定) であるとして、計算の際に入力パラメータとして指定する。またこのことにより、ナトリウム、酸素、水蒸気の各フラックスについて、次式が成立する。

$$N_{Na} = \chi_o \cdot N_{O_2} + 2 \cdot N_{H_2O} \quad \dots \dots (2-19)$$

χ_o は、酸素 1 モルが消費されるときのナトリウムの反応モル数で、 (2-16), (2-17) 式より、 $\chi_o = 2 \sim 4$ の範囲の値をとる。プログラムの入力データの便から、 F_{Na₂O₂} を (2-16) 式に対する (2-17) 式の割合と定義すると、次式が成立する。

$$\chi_o = 2 \cdot F_{Na_2O_2} + 4 \cdot (1 - F_{Na_2O_2}) \quad \dots \dots (2-20)$$

(2-19) 式に、 (2-5) 式、 (2-14) 式、 (2-15) 式を代入すると、次式で示す最終的なフレームでのマスバランス式が得られる。

$$\begin{aligned} & \left(\frac{C_f \cdot D_{Na}}{\ell} \right) \cdot \ell_n \left\{ \frac{P}{P - P_{Na Sat}} \right\} \\ &= \chi_o \cdot \left(\frac{Y_{O_2}}{1 - Y_{O_2}} \right) \cdot C_a \cdot D_{O_2}^{2/3} \cdot 0.16 \left\{ \frac{g \beta |T_f - T_{gas}|}{\nu} \right\}^{1/3} \\ &+ 2 \cdot \left(\frac{Y_{H_2O}}{1 - Y_{H_2O}} \right) \cdot C_a \cdot D_{H_2O}^{2/3} \cdot 0.16 \left\{ \frac{g \beta |T_f - T_{gas}|}{\nu} \right\}^{1/3} \quad \dots \dots (2-21) \end{aligned}$$

(2-21) 式は、霧囲気の温度 (T_{gas})、酸素、水蒸気のモル分率 (Y_{O₂}, Y_{H₂O}), フレーム / プール間、霧囲気のモル濃度、さらにナトリウムの表面温度 (従って、飽和蒸気圧 (P_{Na Sat})), β , D, ν , の物性値が既知であった場合の、 ℓ (ナトリウム表面とフレーム間の距離) と T_f

(フレーム温度)の関係を示す式と言える。もう一つの ℓ と T_f の関係式は、次節で述べるフレームのエネルギーバランスより得る。

2.3 燃焼フレームのヒートバランス

2.3.1 プールとフレーム間の熱輸送

プールとフレーム間の熱輸送は、Ⅰ) プールとフレーム間の熱伝導、Ⅱ) プールとフレーム間の物質輸送に伴う熱移動、Ⅲ) プールとフレーム間の熱放射による熱移動の3つのメカニズムによる。ここで、プールとフレームの間の熱放射を除いた熱輸送について、次の仮定を置く。

Ⅰ) プールとフレーム間の距離が短いことから定常式で扱えるものとする。

Ⅱ) プールとフレーム間を移動する物質(Na , Na_2O_2 , Na_2O)は、その領域の雰囲気(N_2)と温度平衡状態にあるとする。

これらより、プールとフレーム間の熱伝導と物質輸送に伴う熱輸送は、次式で扱うことができる。

$$\left\{ (\dot{m}C_p)_{Na} - (\dot{m}C_p)_{Na_2O} - (\dot{m}C_p)_{Na_2O_2} \right\} \frac{dT_m}{dx} = \lambda_{N_2} \cdot \frac{d^2 T_m}{dx^2} \quad \dots \dots (2-22)$$

ここで、 $T_m(x)$ は、プールとフレーム間の温度(K), λ_{N_2} は窒素の熱伝導率(KJ/m·secdeg), C_p は比熱(KJ/kgdeg), \dot{m} はマスフラックス(kg/m²sec)で、次式より与えられる。

$$\dot{m}_{Na} = N_{Na} \cdot (23/10^3) \quad \dots \dots (2-23)$$

$$\dot{m}_{Na_2O} = F_{fall} \cdot (1 - F_{Na_2O_2}) \cdot \left(\frac{1}{2} N_{Na} \right) \cdot (62/10^3) \quad \dots \dots (2-24)$$

$$\dot{m}_{Na_2O_2} = F_{fall} \cdot F_{Na_2O_2} \cdot \left(\frac{1}{2} N_{Na} \right) \cdot (78/10^3) \quad \dots \dots (2-25)$$

F_{fall} は、生成物のうち、プールへ落下する割合で、既知定数(入力データ扱)とする(文献⁷⁾によれば、0.6~0.7)。また、 $F_{Na_2O_2}$ は、前節で定義した反応式の割合、 N_{Na} は、ナトリウムのモルフラックスで(2-5)式で与えられる。

ここで、式の簡略化のため、(2-22)式の左辺の係数について次のように置く。

$$A \equiv (\dot{m}C_p)_{Na} - (\dot{m}C_p)_{Na_2O_2} - (\dot{m}C_p)_{Na_2O} \quad \dots \dots (2-26)$$

(2-22)式を $T_{m(x=0)} = T_s$, $T_{m(x=\ell)} = T_f$ の境界条件で解くと次式が得られる。

$$T_m = \left\{ \frac{T_f - T_s}{\exp\left(\frac{A}{\lambda_{N_2}} \cdot \ell\right) - 1} \right\} \cdot \left\{ \exp\left(\frac{A}{\lambda_{N_2}} \cdot x\right) - 1 \right\} + T_s \quad \dots \dots (2-27)$$

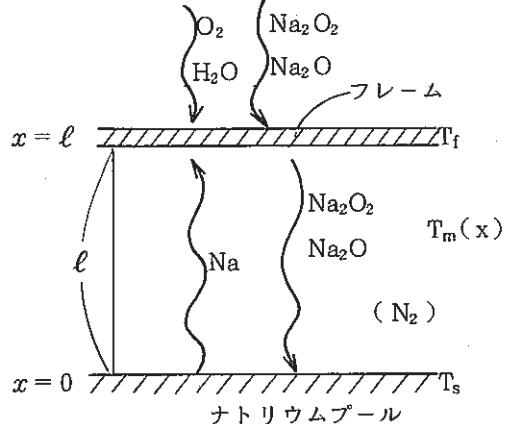


Fig. 2.4 フレームとプール間の熱伝導

また、温度勾配に関し、次式が得られる。

$$\frac{dT_m}{dx} = \left(\frac{A}{\lambda_{N_2}} \right) \cdot \left\{ \frac{T_f - T_s}{\exp\left(\frac{A}{\lambda_{N_2}} \cdot \ell\right) - 1} \right\} \cdot \exp\left(\frac{A}{\lambda_{N_2}} \cdot x\right) \quad \dots \dots (2-28)$$

従って、プール表面 ($x = 0$) とフレーム ($x = \ell$) での温度勾配は、次式で表わされる。

$$\left. \frac{dT_m}{dx} \right|_{x=0} = \left(\frac{A}{\lambda_{N_2}} \right) \cdot \left\{ \frac{T_f - T_s}{\exp\left(\frac{A}{\lambda_{N_2}} \cdot \ell\right) - 1} \right\} \quad \dots \dots (2-29)$$

$$\left. \frac{dT_m}{dx} \right|_{x=\ell} = \left(\frac{A}{\lambda_{N_2}} \right) \cdot \left\{ \frac{T_f - T_s}{\exp\left(\frac{A}{\lambda_{N_2}} \cdot \ell\right) - 1} \right\} \exp\left(\frac{A}{\lambda_{N_2}} \cdot \ell\right) \quad \dots \dots (2-30)$$

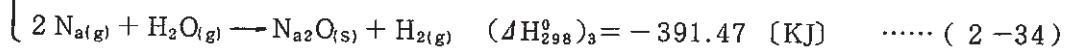
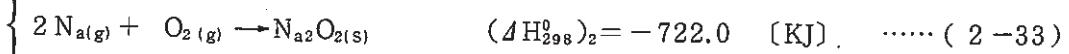
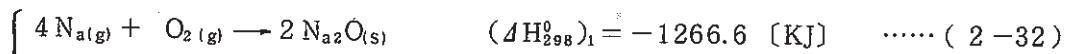
2.3.2 フレームでの熱収支

フレームは、マスを持たない（熱容量を持たない）とするので、発生した反応熱（燃焼熱）は、何らかの形で、ただちに放出される。このときの、フレームにおけるヒートバランスは、次式で表わされる。

$$Q_B = q_{fa} + q_{fs} + q_{fw} \quad \dots \dots (2-31)$$

ここで、 Q_B [KJ/m²·sec] は燃焼発熱量、 q_{fa} はフレームから雰囲気ガスへの放熱熱流束、 q_{fs} はフレームからナトリウムへの放熱熱流束、 q_{fw} はフレームから周囲構造物への放熱熱流束である。

(1) 燃焼発熱量 (Q_B) : 反応熱は次式で表わされる。¹⁶⁾



ここで、(2-32), (2-33), (2-34)式に関して、夫々、添字“1”, “2”, “3”を付けて示すことにすると、燃焼発熱量 Q_B は次式で表わすことができる。

$$Q_B = [-(\Delta H_{298}^0)_1 + H_{B1}] (1 - F_{Na2O2}) \cdot N_{O2} + [-(\Delta H_{298}^0)_2 + H_{B2}] F_{Na2O2} \cdot N_{O2} + [-(\Delta H_{298}^0)_3 + H_{B3}] N_{H2O} \quad \dots \dots (2-35)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} H_{B1} = 4 C_{pNa(gas)} (T_f - 298) + C_{pO2} (T_f - 298) - 2 C_{pNa2O} (T_f - 298) \end{array} \right. \dots \dots (2-36)$$

$$\left. \begin{array}{l} H_{B2} = 2 C_{pNa(gas)} (T_f - 298) + C_{pO2} (T_f - 298) - C_{pNa2O2} (T_f - 298) \end{array} \right. \dots \dots (2-37)$$

$$\left. \begin{array}{l} H_{B3} = 2 C_{pNa(gas)} (T_f - 298) + C_{pH2O} (T_f - 298) - C_{pNa2O} (T_f - 298) \\ \quad - C_{pH2} (T_f - 298) \end{array} \right. \dots \dots (2-38)$$

ここで、単位は Q_B [KJ/m²sec], H_B [KJ/mol], N [mol/m²·sec], C_p [KJ/mol-deg], T [K] である。

(2) フレームから雰囲気への熱流束 (q_{fa})

$$q_{fa} = h_{fa} \cdot (T_f - T_{gas}) + F_{fa} \cdot \sigma (T_f^4 + T_{gas}^4) \quad \dots \dots (2-39)$$

ここで、 F_{fa} はフレームの放射熱伝達に関する係数、 σ は Stefan-Boltzmann 係数 ($= 5.67 \times 10^{11} (\text{KJ/m}^2 \cdot \text{sec} \cdot \text{K}^4)$)、 h_{fa} [$\text{KJ/m}^2 \text{sec} \cdot \text{deg}$] は自然対流熱伝達係数であり、 h_{fa} は (2-7) 式より、

$$h_{fa} = \frac{\lambda_{air}}{L} \cdot N_u = \lambda_{air} \cdot 0.16 \cdot \left\{ \frac{g \cdot \beta \cdot P_r |T_f - T_{gas}|}{\nu_{air}^2} \right\}^{1/3} \quad \dots \dots (2-40)$$

(3) フレームからプールへの熱流束 (q_{fp})

熱放射伝熱と前節で求めた $\frac{dT_m}{dx} \Big|_{x=\ell}$ より次式で表わされる。

$$q_{fp} = F_{fs} \cdot \sigma (T_f^4 + T_s^4) + \lambda_{N2} \frac{dT_m}{dx} \Big|_{x=\ell} \quad \dots \dots (2-41)$$

ここで、 $\frac{dT_m}{dx} \Big|_{x=\ell}$ は (2-30) 式で与えられる。

(4) フレームから周囲構造物への熱流束 (q_{fw})

フレームから周囲構造物への熱流束は、熱放射のみを考える。複数の構造物を考え、添字 j で表わすと、

$$q_{fw} = \sum_j F_{fwj} \cdot \sigma (T_f^4 - T_{wj}^4) \quad \dots \dots (2-42)$$

(5) フレームのエネルギーバランス式

(2-31) 式に (2-35), (2-39), (2-41), (2-42) 式を代入すると、次式を得る。

$$\begin{aligned} & [-(\Delta H_{298}^0)_1 + H_{B1}] (1 - F_{Na2O2}) N_{O2} + [-(\Delta H_{298}^0)_2 + H_{B2}] F_{Na2O2} N_{O2} \\ & + [-(\Delta H_{298}^0)_3 + H_{B3}] N_{H2O} \\ & = h_{fa} (T_f - T_{gas}) + F_{fa} \cdot \sigma (T_f^4 - T_{gas}^4) \\ & + F_{fs} \cdot \sigma (T_f^4 - T_s^4) + \lambda_{N2} \left(\frac{A}{\lambda_{N2}} \right) \cdot \left\{ \frac{T_f - T_s}{\exp \left(\frac{A}{\lambda_{N2}} \cdot \ell \right) - 1} \right\} \exp \left(\frac{A}{\lambda_{N2}} \cdot \ell \right) \\ & + \sum_j F_{fwj} \cdot \sigma (T_f^4 - T_{wj}^4) \quad \dots \dots (2-43) \end{aligned}$$

(2-43) 式は、雰囲気温度 (T_{gas})、ナトリウムのプール表面温度 (T_s) が既知である場合の、 ℓ (プールとフレームの間の距離) と T_f (フレーム温度) の関係を示す式である。

従って、前節のフレームのマスバランスに関する (2-21) 式及びフレームのヒートバランスに関する (2-43) 式より ℓ と T_f を解くことができる。SPM では反復計算により、両式を解く。

2.4 ナトリウムプール, 雰囲気ガス, 構造物の計算モデル

前節までで、ナトリウムの燃焼計算に必要となる関係式は全て導出したが、実際の計算には、この他にナトリウムプール、雰囲気ガス、構造物等に関する熱計算モデルが必要となる。SPMでは、最終的には多次元のガス自然対流を含む詳細解析を目指しているが、現時点では、それらは未完である。しかし、本報告で示すフレーム燃焼計算モデルの妥当性のチェック、種々のパラメータの感度評価を実施するために、SPMの現バージョンには簡単なプール、ガス、構造物の熱計算モデルが組み込まれている。現バージョンでのこれらの熱計算の取扱いは、ガスについては一点近似モデル（一つの代表温度、圧力、酸素濃度等で扱い、空間分布は考慮しない）、プールと構造物については一次元の熱伝導計算で扱う。この扱いは SOFIRE の one-cell モデル¹⁾とほぼ同等のもので、種々のチェック計算に対しては十分と言える。ここでは、これらの計算モデルについて述べる。

2.4.1 ナトリウムプールの計算

ナトリウムプールについては、一次元の熱伝導方程式のみを解く。すなわち、蒸発による質量の損失、外部とのナトリウムの流入出、さらにプールに落下する反応生成物については計算上考慮しない。プール表面の境界条件は、蒸発熱、フレームとの間の熱伝導、熱放射、さらに雰囲気ガスと構造物との間の熱放射より与えられる。プール底部の境界条件は断熱扱いとする。以上より、プールの熱伝導方程式と境界条件は次の式で表わされる。

$$\frac{\partial T_{Na}}{\partial t} = K_{Na} \cdot \frac{\partial^2 T_{Na}}{\partial x^2} \quad \dots \dots (2-44)$$

$$\left. \frac{\partial T_{Na}}{\partial x} \right|_{x=0} = \frac{1}{\lambda_{Na}} \left\{ \lambda_{N2} \left. \frac{\partial T_m}{\partial x} \right|_{x=0} + F_{fs} \sigma (T_f^4 - T_s^4) - F_{sg} \sigma (T_s^4 - T_{gas}^4) - \sum_j F_{swj} \sigma (T_s^4 - T_{wj}^4) - N_{Na} \cdot \Delta H_g \right\} \quad \dots \dots (2-45)$$

$$\left. \frac{\partial T_{Na}}{\partial x} \right|_{x=-H_{Na}} = 0 \quad \dots \dots (2-46)$$

(2-45)式で右辺の第1項は、フレームからプール表面への熱伝導((2-29)式)、第2項はフレームとプール表面への熱放射、第3項、第4項はプール表面から雰囲気ガス、構造物への熱放射を表わす。 ΔH_g はナトリウムの蒸発潜熱である。

2.4.2 雰囲気ガスの計算

ここで考える雰囲気ガスの計算では閉じた一つのセルのみをその対策とする。従って、雰囲気ガスの質量変化は燃焼に係わるもののみを考える。

$$\frac{dW_{N_2}}{dt} = 0 \quad \dots\dots (2-47)$$

$$\frac{dW_{O_2}}{dt} = -0.032 \cdot N_{O_2} \cdot A_p \quad \dots\dots (2-48)$$

$$\frac{dW_{H_2O}}{dt} = -0.018 \cdot N_{H_2O} \cdot A_p \quad \dots\dots (2-49)$$

$$\frac{dW_{as,l}}{dt} = (1 - F_{fall}) \cdot \left(\frac{1}{2} N_{Na}\right) \left\{ 0.062 \cdot (1 - F_{Na2O_2}) + 0.078 \cdot F_{Na2O_2} \right\} \cdot A_p \quad \dots\dots (2-50)$$

ここで、 W_{N_2} , W_{O_2} , W_{H_2O} , $W_{as,l}$ は霧囲気ガス中の窒素, 酸素, 水蒸気, エアロゾル各々の重量 [kg], A_p はプールの面積 (m^2) である。

他方、霧囲気ガスのエネルギーバランス式は次式で表わされる。

$$\begin{aligned} \frac{dU_{total}}{dt} &= \{ h_{fa} (T_f - T_{gas}) + F_{fa} \cdot \sigma (T_f^4 - T_{gas}^4) \} A_p + F_{sg} \sigma (T_s^4 - T_{gas}^4) \cdot A_p \\ &\quad - \sum_j \{ h_{gwj} (T_{gas} - T_{wj}) + F_{gwj} \sigma (T_{gas}^4 - T_{wj}^4) \} A_{wj} \\ &\quad - \{ 0.032 N_{O_2} \cdot I_{O_2} + 0.018 N_{H_2O} \cdot I_{H_2O} \} \cdot A_p \quad \dots\dots (2-51) \end{aligned}$$

ここで、 U_{total} は霧囲気ガスのトータル内部エネルギー [KJ], (2-55) 式の右辺の第1, 2, 3 項は各々フレーム, プール, 構造物との熱交換を表わし (h_{gwj} については, 次項 (2, 4, 3) で述べる), 第5項は, 酸素, 水蒸気の消費に伴うエネルギー損失を表わす。

トータル内部エネルギーと温度の関係は状態式により, 次式で表わす。

$$\begin{aligned} U_{total} &= I_{N_2} \cdot W_{N_2} + I_{O_2} \cdot W_{O_2} + I_{H_2O} \cdot W_{H_2O} \\ &= T_{gas} \left\{ \frac{R_{N_2}}{(\gamma_{N_2} - 1)} \cdot W_{N_2} + \frac{R_{O_2}}{(\gamma_{O_2} - 1)} \cdot W_{O_2} + \frac{R_{H_2O}}{(\gamma_{H_2O} - 1)} \cdot W_{H_2O} \right\} \dots\dots (2-52) \end{aligned}$$

ここでは I は比内部エネルギー [KJ/kg], R は気体定数 ($R_{N_2} = 0.29680 \text{ KJ/kgK}$, $R_{O_2} = 0.25983 \text{ KJ/kgK}$, $R_{H_2O} = 0.46151 \text{ KJ/kgK}$), γ は比熱比 ($\gamma_{N_2} = 1.4$, $\gamma_{O_2} = 1.3999$, $\gamma_{H_2O} = 1.33$) である。

圧力は各成分の分圧の和として表わされるので, セルの容積を V [m^3] とすると次式である。

$$P = \frac{T_{gas}}{V} (R_{N_2} W_{N_2} + R_{O_2} W_{O_2} + R_{H_2O} \cdot W_{H_2O}) \quad \dots\dots (2-53)$$

2.4.3 構造物の計算

構造物の熱計算は, プールと同様に一次元の熱伝導方程式で扱う。SPM の現バージョンでは, 複数の構造物 (最大 5つ) を扱えるようにしており, それを添字 j で表わす,

$$\frac{\partial T_{wj}}{\partial t} = K_{wj} \frac{\partial^2 T_{wj}}{\partial x^2} \quad \dots\dots (2-54)$$

境界条件は、内面（ナトリウムプールの存在する雰囲気に接する面）については、次式である。

$$\frac{\partial T_{wj}}{\partial x} \Big|_{x=0} = -\frac{1}{\lambda_{wj}} \left\{ \left(F_{fwj} \frac{A_p}{A_{wj}} \right) \cdot \sigma (T_f^4 - T_{wj1}^4) + \left(F_{swj} \frac{A_p}{A_{wj}} \right) \sigma (T_s^4 - T_{wj1}^4) \right. \\ \left. + \sum_{\{j \neq j\}} F_{ww,j} \cdot \sigma (T_{wj}^4 - T_{wj1}^4) + F_{gwj} \sigma (T_{gas}^4 - T_{wj1}^4) \right. \\ \left. + h_{gwj} (T_{gas} - T_{wj1}) \right\} \quad \dots \dots (2-55)$$

(2-55)式で第1項と第2項は各々フレームとプールからの熱放射、第3項は他の構造物からの熱放射、第4項は雰囲気ガスからの熱放射を表わす。

第6項は雰囲気ガスとの対流伝熱を表わし、熱伝達係数は次式の自然対流式で与えられるものとする。

$$h_{gwj} = \frac{\lambda_{gas}}{\ell_{wj}} \cdot a_j (G_r \cdot P_r)^{bj} \quad \dots \dots (2-56)$$

ここで、 ℓ_{wj} は構造物の代表長さ、 a_j , b_j は定数で、層流域 ($10^5 < G_r P_r < 2 \times 10^7$)では、 $a_j = 0.56$, $b_j = 0.25$ 、乱流域 ($2 \times 10^7 < G_r P_r < 3 \times 10^{10}$)では、垂直面に関し、 $a_j = 0.021$, $b_j = 0.4$ 、水平面に関し、 $a_j = 0.14$, $b_j = 1/3$ である。¹⁷⁾

3. 試計算結果

2章で示したナトリウムプール燃焼計算モデルの妥当性の確認のため、FORTRANで記述したSPM (Sodium Pool Fire Model)を作成した。プログラムの構成、使用方法については、Appendix - Aにまとめて示す。

ここでは、SPMを使用して種々の試計算を実施したので、その結果について議論する。はじめに、2章で述べたフレーム計算モデルによる燃焼速度、フレーム温度、フレーム高さの計算結果を示し、次に米国HEDLと西独KfKで実施されたナトリウムプール火災の実験データとSPMの計算結果の比較を行なう。

3.1 燃焼速度、フレーム温度、フレーム高さ

ナトリウムプール燃焼のフレーム高さ（プール表面とフレームの間の距離）は、ナトリウムの蒸気圧が低いため、非常に小さい（～1mm程度），そのため、2.2節、2.3節で示したように燃焼自体は定常として扱える。プール表面の温度と雰囲気ガスの温度、酸素／水蒸気濃度が既知であれば、2.2節、2.3節に示した諸式からただちに燃焼速度、フレーム温度、フレーム高さ、種々のマスフラックス、ヒートフラックスを計算することができる。

Fig. 3.1からFig. 3.6までに、雰囲気温度が100°Cの場合について酸素濃度をパラメータとして、燃焼速度、フレーム温度、フレーム高さの計算結果をナトリウムプール温度に関してまとめて示す。各々について、燃焼反応をNa₂O生成のみとした場合($F_{Na_2O_2} = 0$)の結果(Fig. 3.1, 3.3, 3.5)と、Na₂O₂生成のみとした場合($F_{Na_2O_2} = 1$)の結果(Fig. 3.2, 3.4, 3.6)を併記した。

まず、燃焼速度については、空気雰囲気($C_{O_2} = 23\text{ w/o}$)で、反応がNa₂O生成のみと仮定すると20～60 kg/m²hrの範囲にあり、Na₂O₂生成のみと仮定すると10～25 kg/m²hrの範囲にある。典型的なナトリウム温度としてT_{Na} = 700°Cの時についての燃焼速度をみると、約55 kg/m²hr (Na₂O生成のみの場合)と約25 kg/m²hr (Na₂O₂生成のみの場合)である。一方、米国HEDLの空気雰囲気のプール火災実験データ²¹⁾である25～35 kg/m²hr、及び西独KfKの同様な実験データ²³⁾である18～33 kg/m²hrなどは、上記のSPMでNa₂O₂生成のみを仮定した場合の計算値に近い。よって、計算値からは、実際の空気雰囲気における燃焼はNa₂O₂生成反応が支配的と推察される。

フレーム温度(Fig. 3.3, 3.4)についてみると、プール温度が500°C以下の領域では、フレーム温度とプール温度は略同じとみなすことができる。しかし、プール温度が高くなると両者間に温度差が生じて、かつその温度差が大となる沸点に近い850°Cではフレーム温度は約1100°C(Na₂O生成)、約960°C(Na₂O₂生成)となる。ただし、酸素濃度が低い場合は、図中に点

線で示したプール温度との比較でわかるように、フレーム温度がプール温度より低くなる場合もある。これは、フレームから霧囲気への放熱が燃焼発熱量より大きくなっていることを示す。上記と同様に $T_{Na} = 700^{\circ}\text{C}$ についてみると、フレーム温度は約 $1,000^{\circ}\text{C}$ (Na_2O 生成)、約 800°C (Na_2O_2 生成) である。フレーム温度についての実験データは少いが、例えば文献⁷⁾によれば $1,200\text{ K} \sim 1,300\text{ K}$ 程度と報告されており、これはここに示した計算結果の妥当性を示している。フレーム高さ (Fig. 3.5, 3.6) についてみると、空気霧囲気では 1 mm 以下、 $T_{Na} = 700^{\circ}\text{C}$ では約 0.2 mm (Na_2O 生成)、約 0.5 mm (Na_2O_2 生成) である。

Fig. 3.7 から Fig. 3.12 は、酸素濃度 23 w/o の場合について、ガス温度をパラメータとして燃焼速度、フレーム温度、フレーム高さの計算結果をまとめたものである。

Fig. 3.13 から Fig. 3.16 は、燃焼による発熱が霧囲気とプールにどのように配分されるかを図示したものである。各図の上部の図は、燃焼発熱が霧囲気への放射熱流束 (QGRD)、対流熱伝達熱流束 (QGCV)、さらにプールへの熱伝導熱流束 (QSCN) 及び放射熱流束 (QSRD) のそれぞれに配分される状況を示している。プール温度が低い場合 (500°C 以下) では、フレーム高さは非常に低く、燃焼発熱のほとんどがプールに熱伝導で伝わり、ナトリウムの昇温と蒸発に寄与する。プール温度が高くなると、熱放射が支配的になるため、霧囲気への熱移行 (QGRD + QGCV) とプールへの熱移行 (QSCN + QSRD) は略半々の関係になる。各図の下部には、プールに伝わる熱 ($QP = QSCN + QSRD$) とナトリウムの蒸発に消費される熱 ($QVAP$) との関係を示したものである。

$T_{Na} = 700^{\circ}\text{C}$ についてみると、燃焼発熱量は Na_2O 生成の場合 $200 \sim 250\text{ kw/m}^2$ 、 Na_2O_2 生成の場合、 $100 \sim 130\text{ kw/m}^2$ であり、空気霧囲気の実験データ $100 \sim 150\text{ kw/m}^2$ 程度と比較すると Na_2O_2 生成反応が支配的であることが推察される。

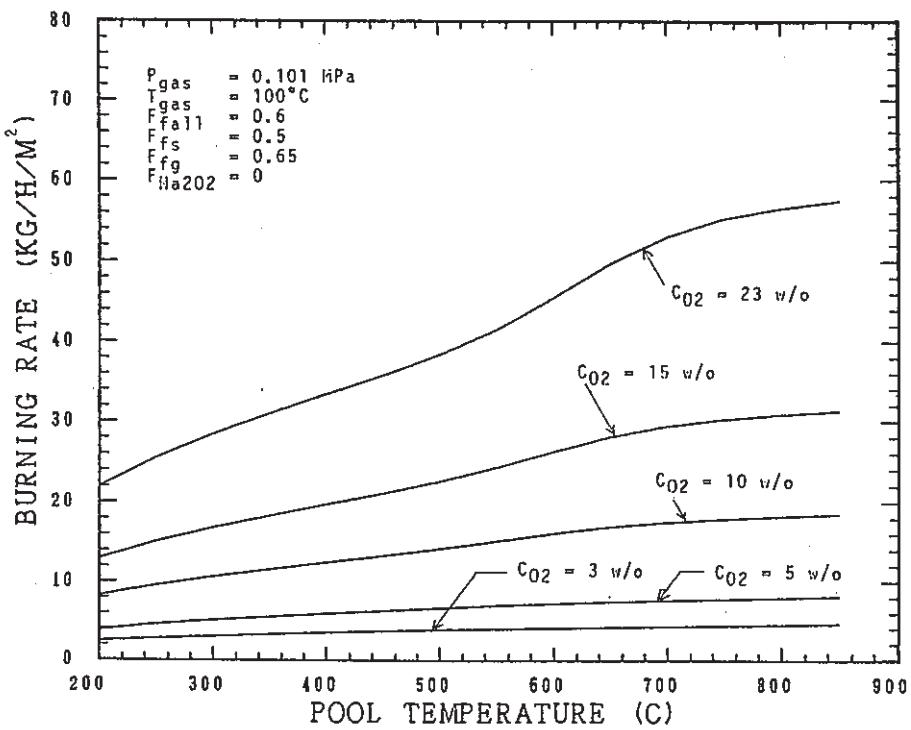


Fig. 3.1 Burning Rate vs. Pool Temperature
($T_{\text{gas}} = 100^\circ\text{C}$, $F_{\text{Na2O}_2} = 0$)

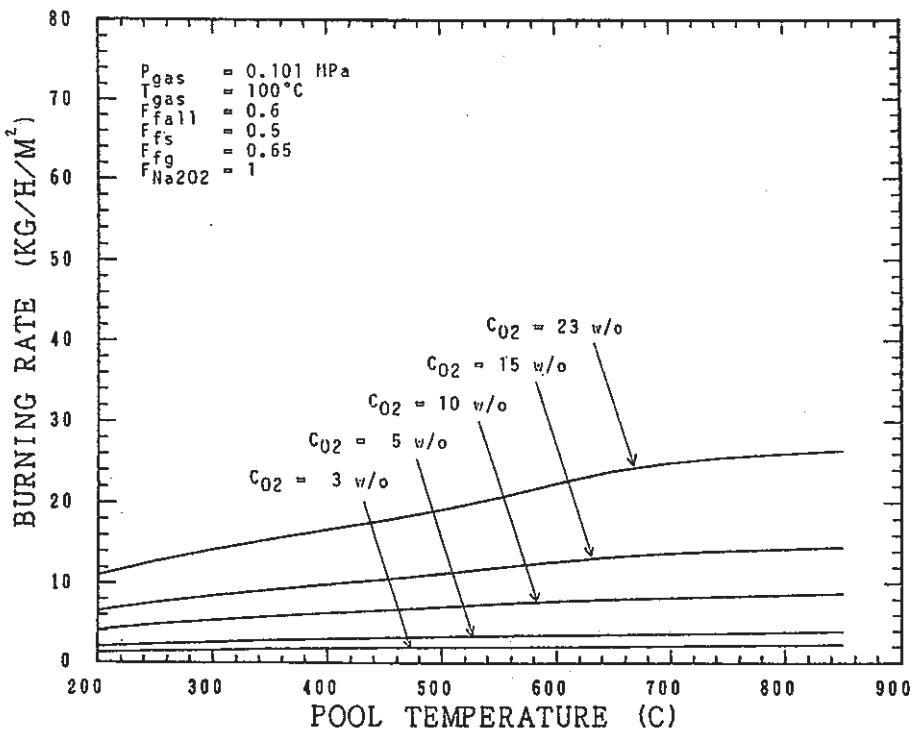


Fig. 3.2 Burning Rate vs. Pool Temperature
($T_{\text{gas}} = 100^\circ\text{C}$, $F_{\text{Na2O}_2} = 1$)

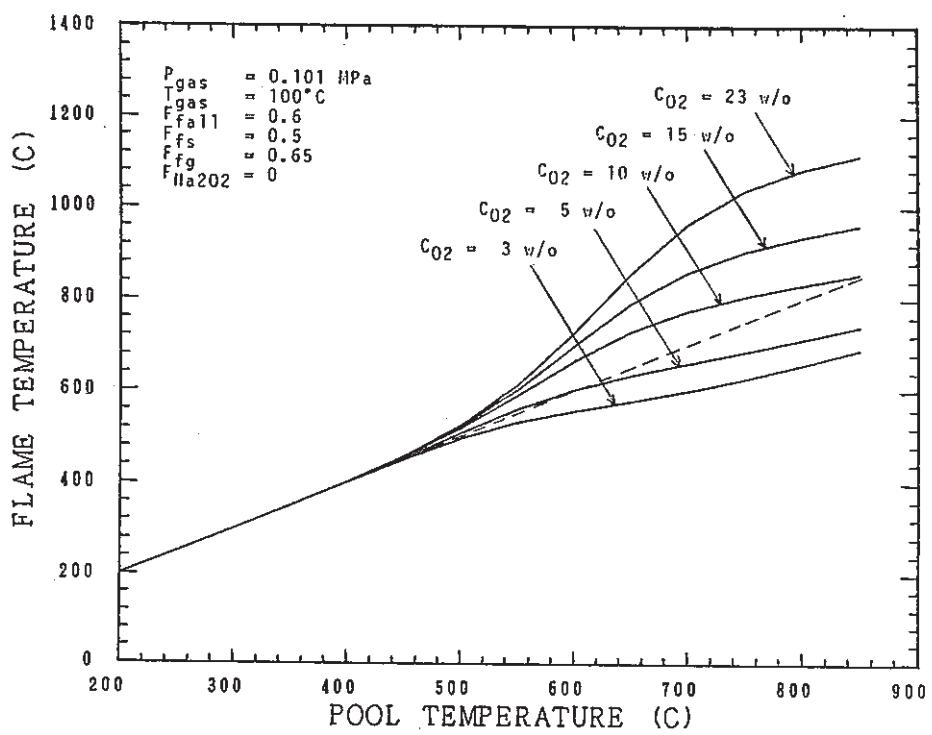


Fig. 3.3 Flame Temperature vs. Pool Temperature
($T_{\text{gas}} = 100^\circ\text{C}$, $F_{\text{Na2O2}} = 0$)

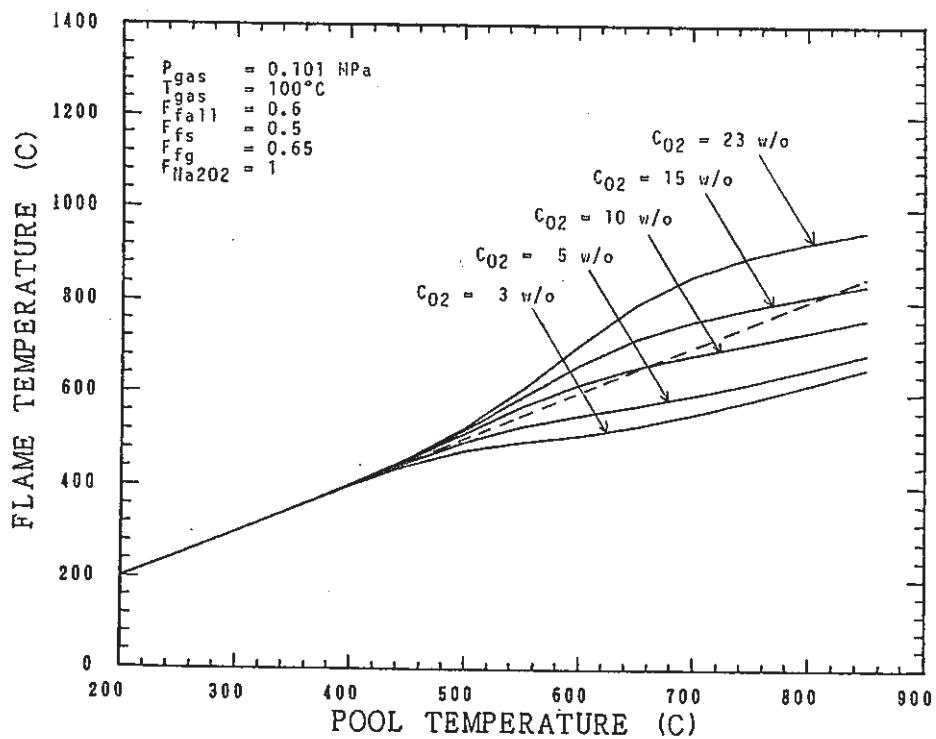


Fig. 3.4 Flame Temperature vs. Pool Temperature
($T_{\text{gas}} = 100^\circ\text{C}$, $F_{\text{Na2O2}} = 1$)

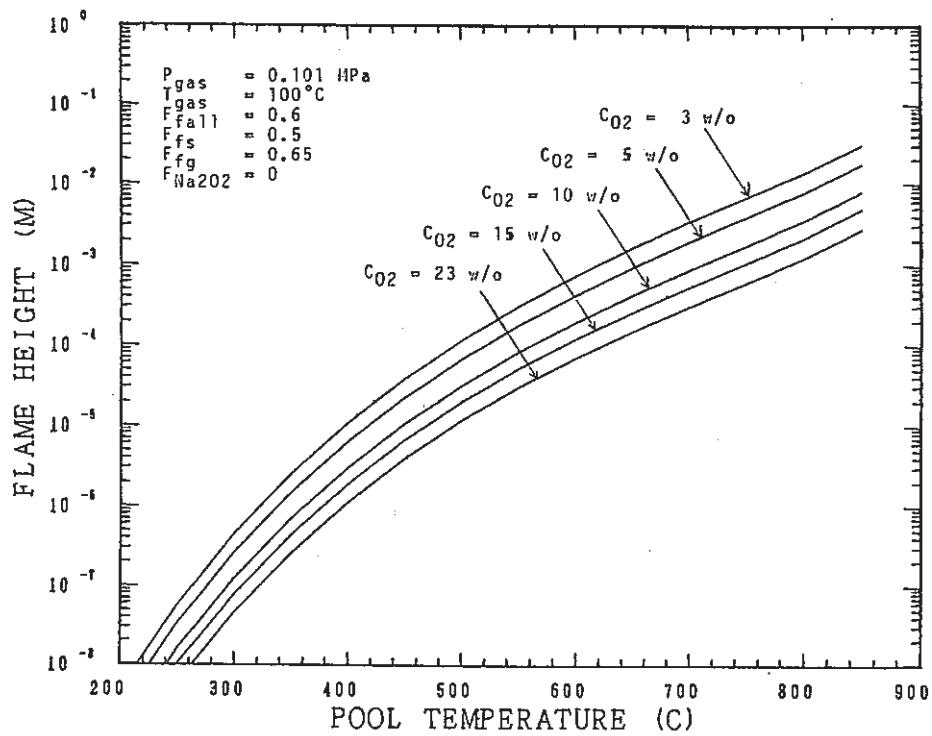


Fig. 3.5 Flame Height vs. Pool Temperature
($T_{\text{gas}} = 100^\circ\text{C}$, $F_{\text{Na202}} = 0$)

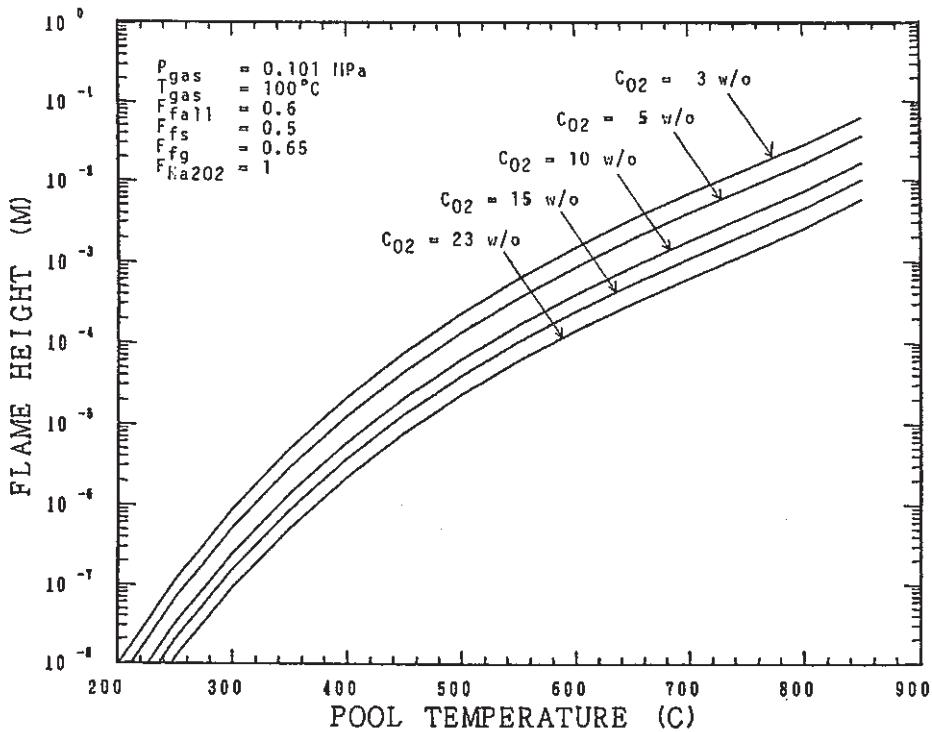


Fig. 3.6 Flame Height vs. Pool Temperature
($T_{\text{gas}} = 100^\circ\text{C}$, $F_{\text{Na202}} = 1$)

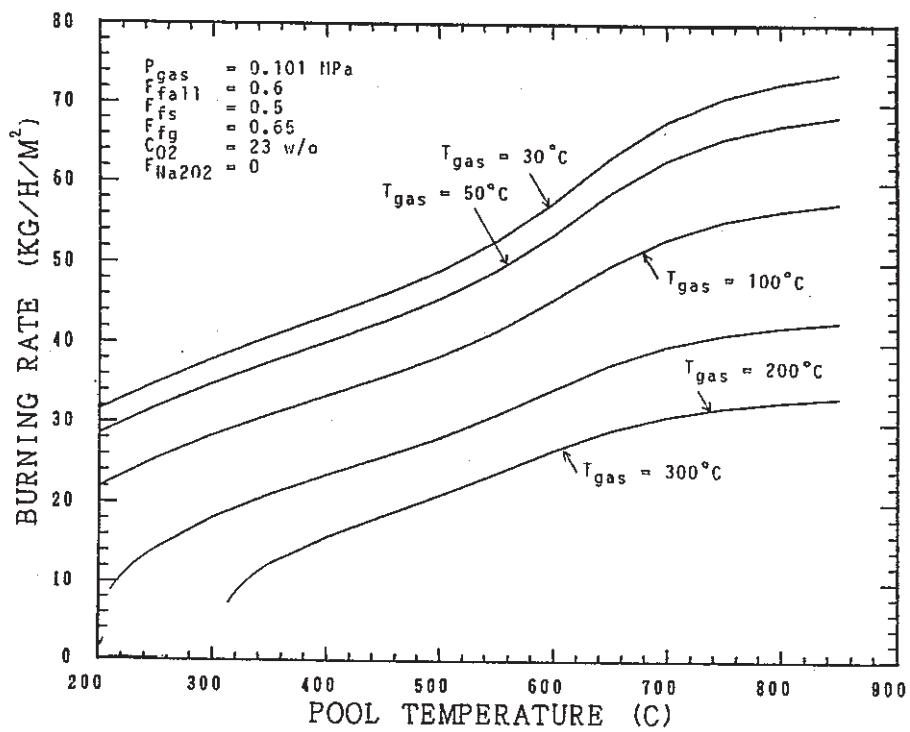


Fig. 3.7 Burning Rate vs. Pool Temperature
($C_{\text{O}_2} = 23 \text{ w/o}$, $F_{\text{Na2O}_2} = 0$)

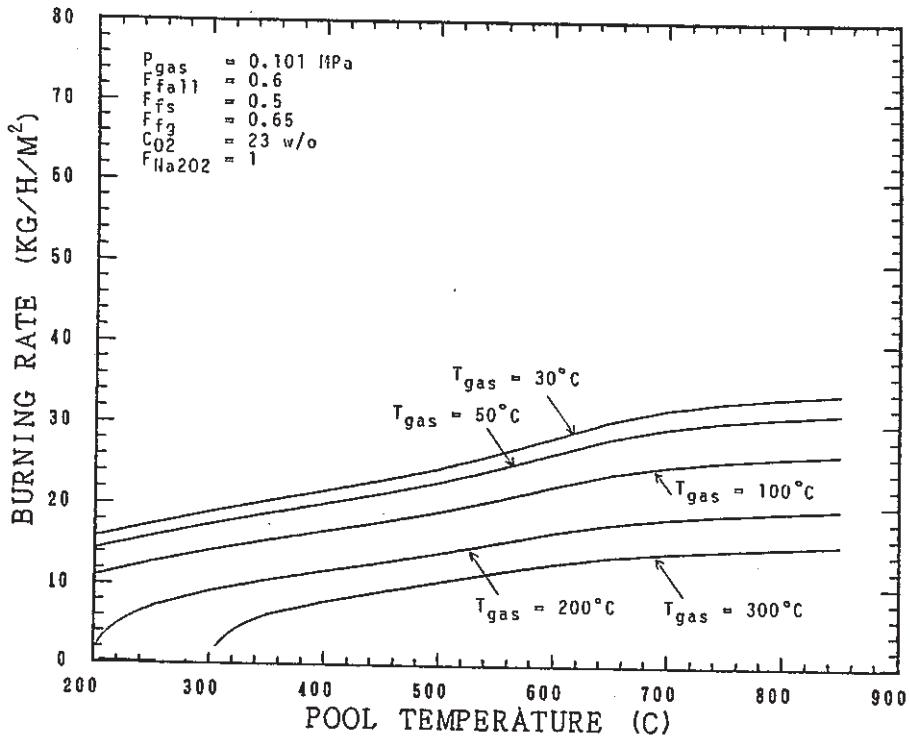


Fig. 3.8 Burning Rate vs. Pool Temperature
($C_{\text{O}_2} = 23 \text{ w/o}$, $F_{\text{Na2O}_2} = 1$)

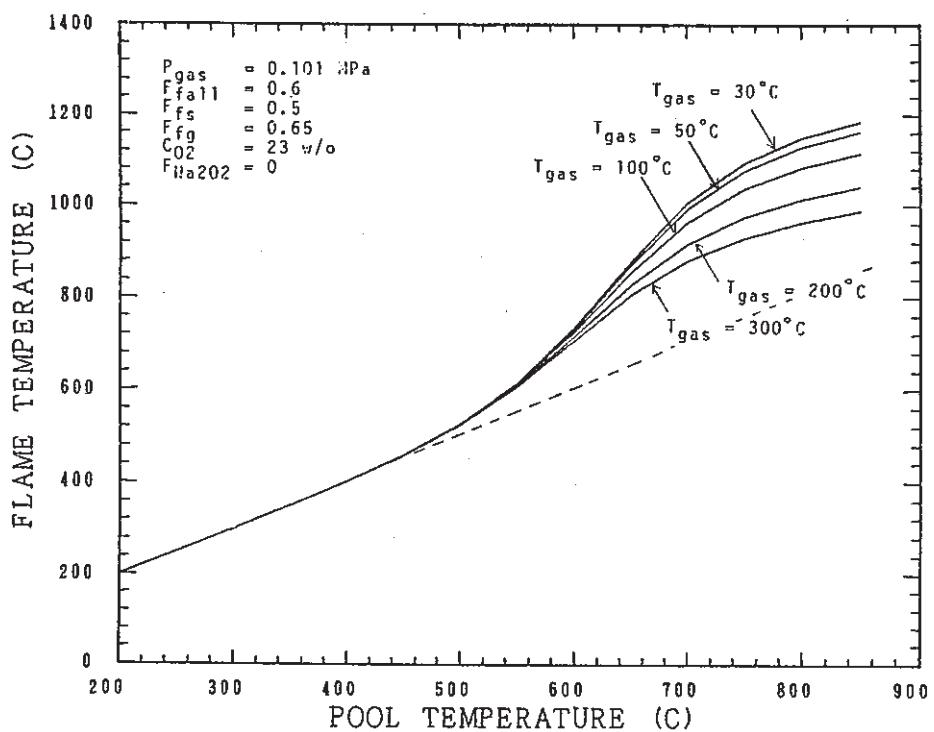


Fig. 3.9 Flame Temperature vs. Pool Temperature
($C_{\text{O}_2} = 23 \text{ w/o}$, $F_{\text{Na202}} = 0$)

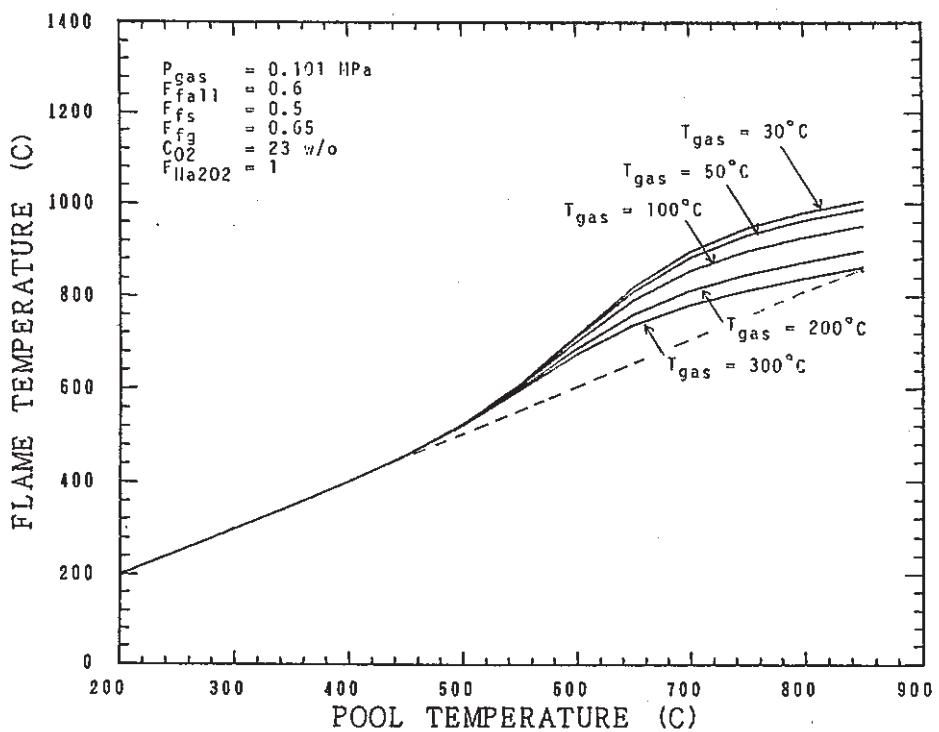


Fig. 3.10 Flame Temperature vs. Pool Temperature
($C_{\text{O}_2} = 23 \text{ w/o}$, $F_{\text{Na202}} = 1$)

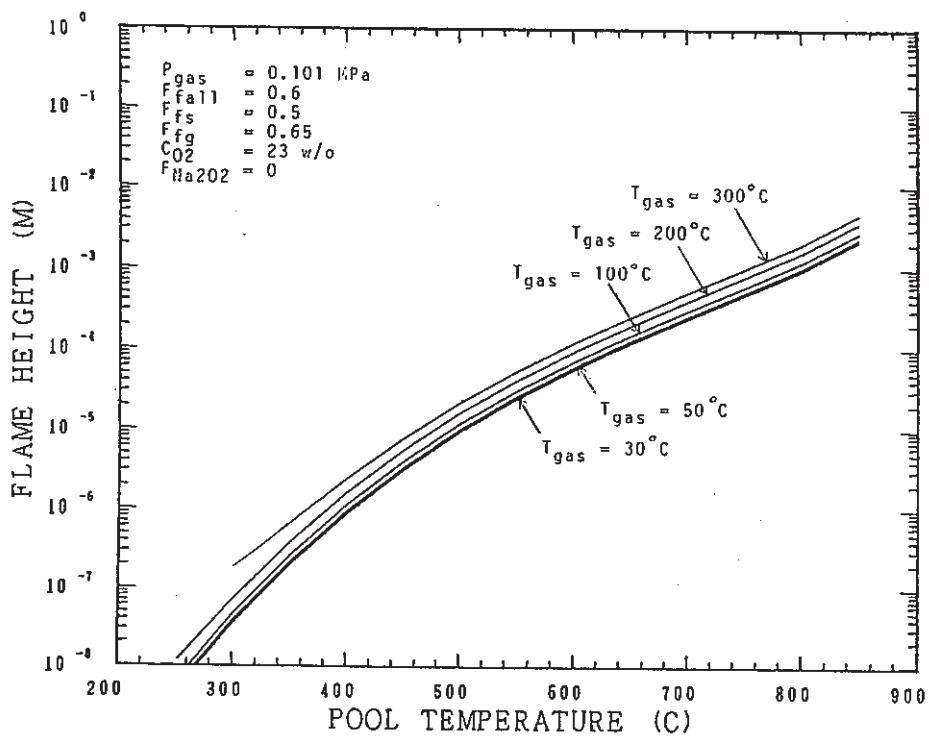


Fig. 3.11 Flame Height vs Pool Temperature
($C_{O_2} = 23 \text{ w/o}$, $F_{Na2O_2} = 0$)

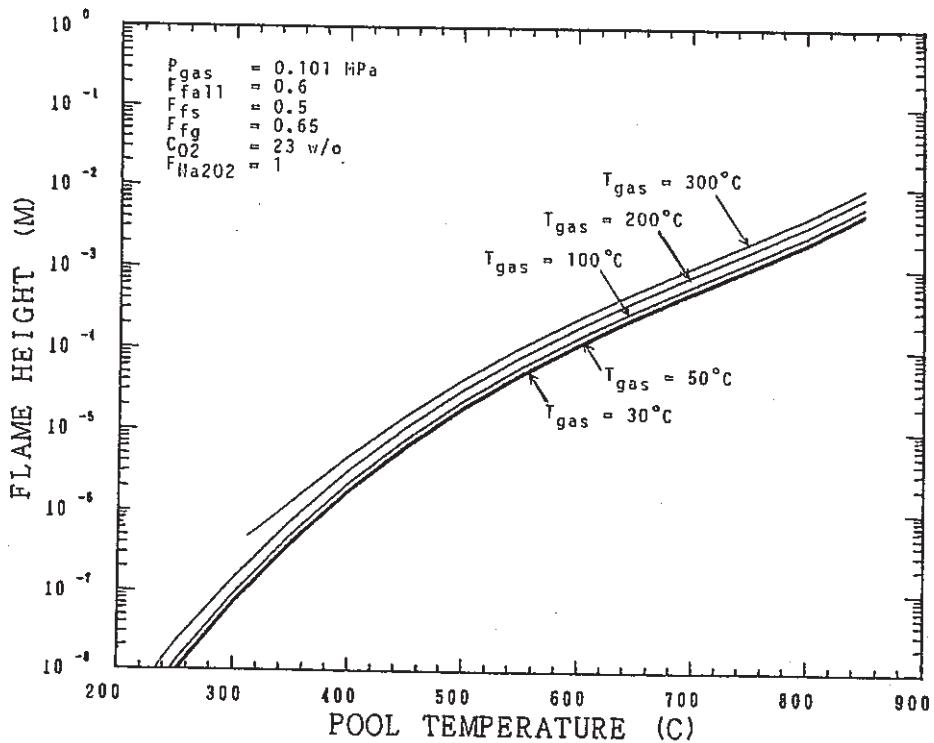


Fig. 3.12 Flame Height vs. Pool Temperature
($C_{O_2} = 23 \text{ w/o}$, $F_{Na2O_2} = 1$)

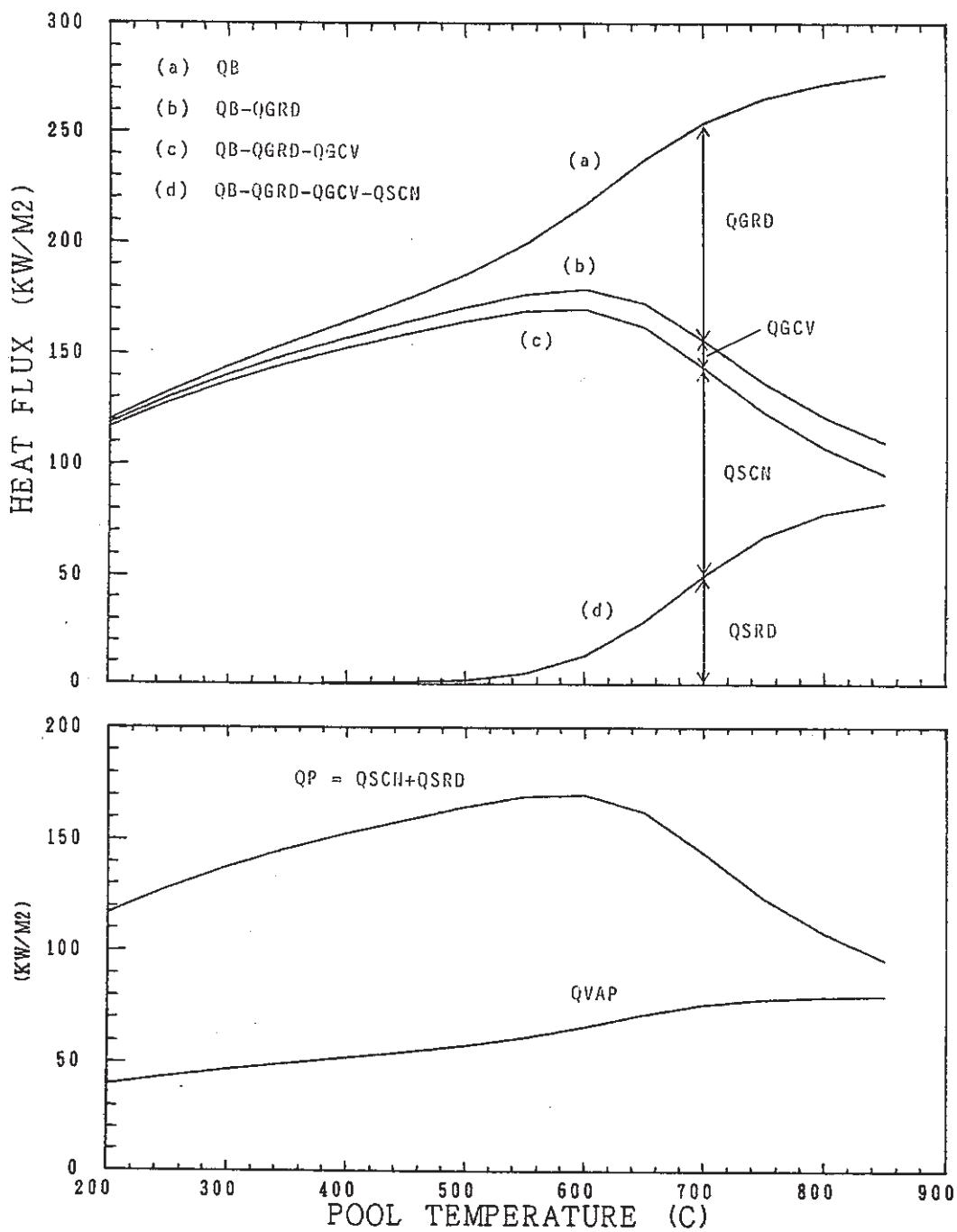


Fig. 3.13 Heat Balance Diagram at Flame Zone
 $(T_{\text{gas}} = 30^\circ\text{C}, P_{\text{gas}} = 0.101 \text{ MPa}, C_{\text{O}_2} = 23 \text{ w/o}, F_{\text{Na}2\text{O}_2} = 0)$

(QB = Burning Heat, QGRD = Radiative Heat transferred to gas,
 QGCV = Convective Heat transferred to gas, QSCN = Conductive
 Heat transferred to pool, QSRD = Radiative Heat transferred
 to pool, QP = Total Heat transferred to pool, QVAP = Heat
 of Vaporization)

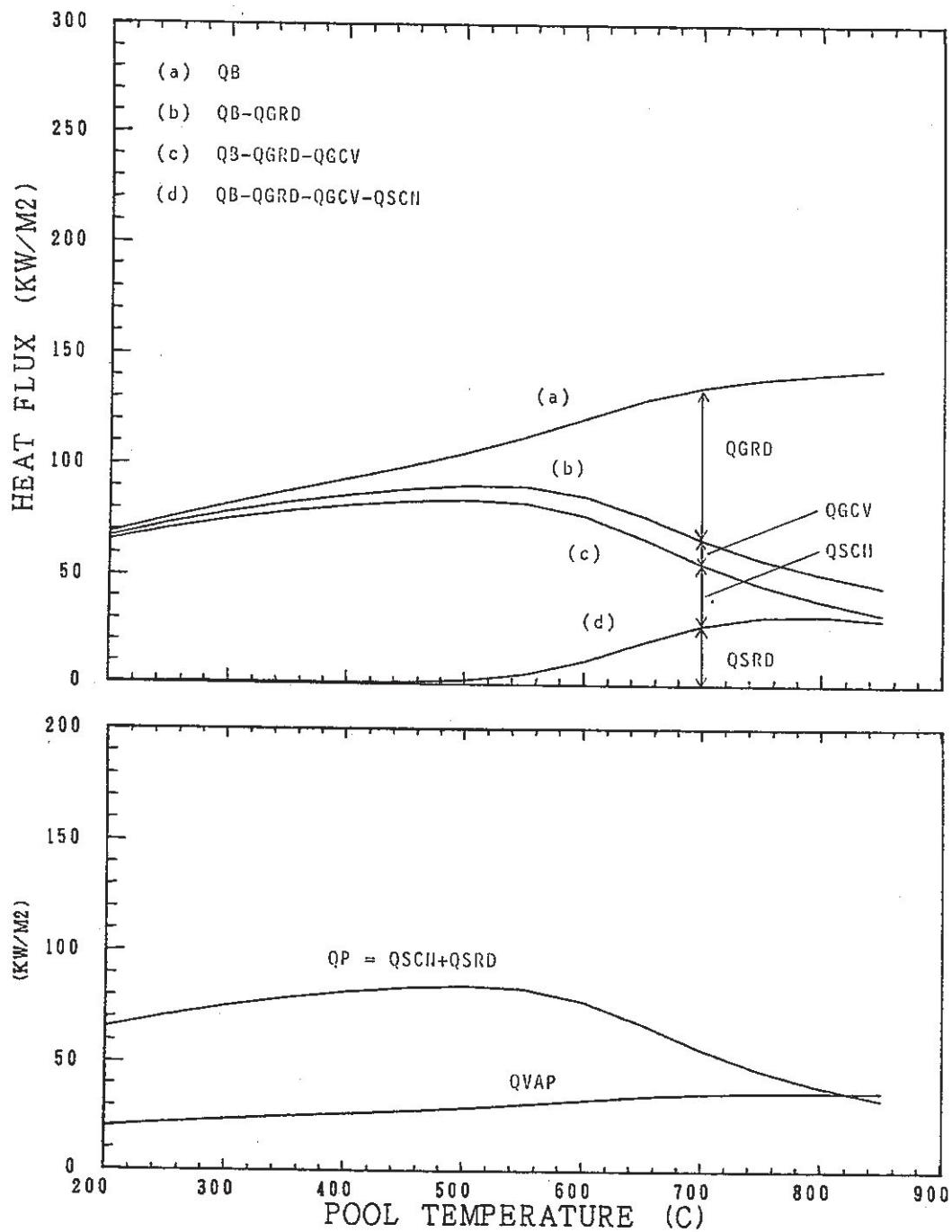


Fig. 3.14 Heat Balance Diagram at Flame Zone
 $(T_{\text{gas}} = 30^\circ\text{C}, P_{\text{gas}} = 0.101 \text{ MPa}, C_{\text{O}_2} = 23 \text{ w/o}, F_{\text{Na}2\text{O}2} = 1)$

(QB = Burning Heat, QGRD = Radiative Heat transferred to gas,
 QGCV = Convective Heat transferred to gas, QSCN = Conductive
 Heat transferred to pool, QSRD = Radiative Heat transferred
 to pool, QP = Total Heat transferred to pool, QVAP = Heat of
 Vaporization)

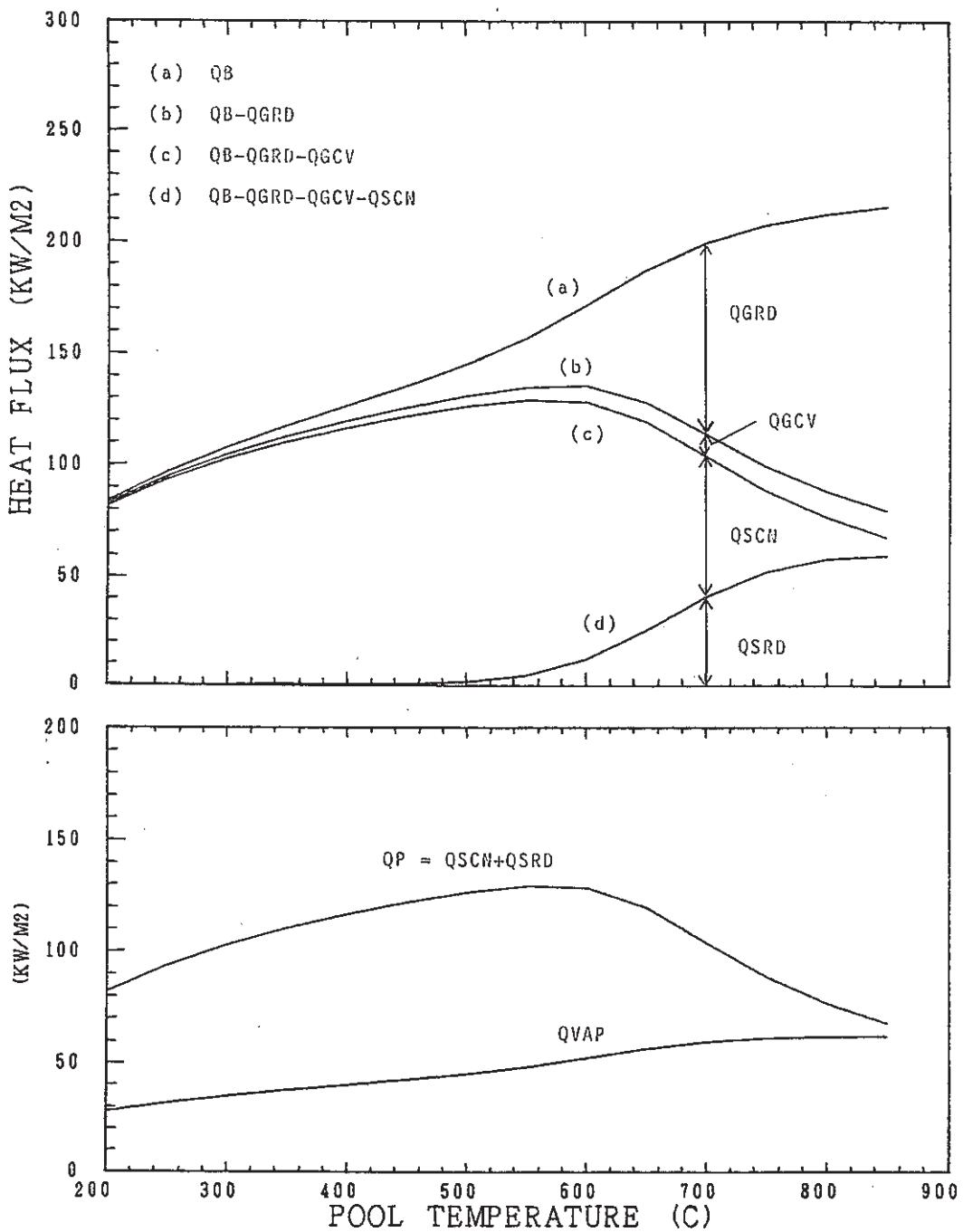


Fig. 3.15 Heat Balance Diagram at Flame Zone
 $(T_{\text{gas}} = 100^{\circ}\text{C}, P_{\text{gas}} = 0.101 \text{ MPa}, C_{\text{O}_2} = 23 \text{ w/o}, F_{\text{Na}_2\text{O}_2} = 0)$

(QB = Burning Heat, QGRD = Radiative Heat transferred to gas,
 QGCV = Convective Heat transferred to gas, QSCN = Conductive
 Heat transferred to pool, QSRD = Radiative Heat transferred
 to pool, QP = Total Heat transferred to pool, QVAP = Heat of
 Vaporization)

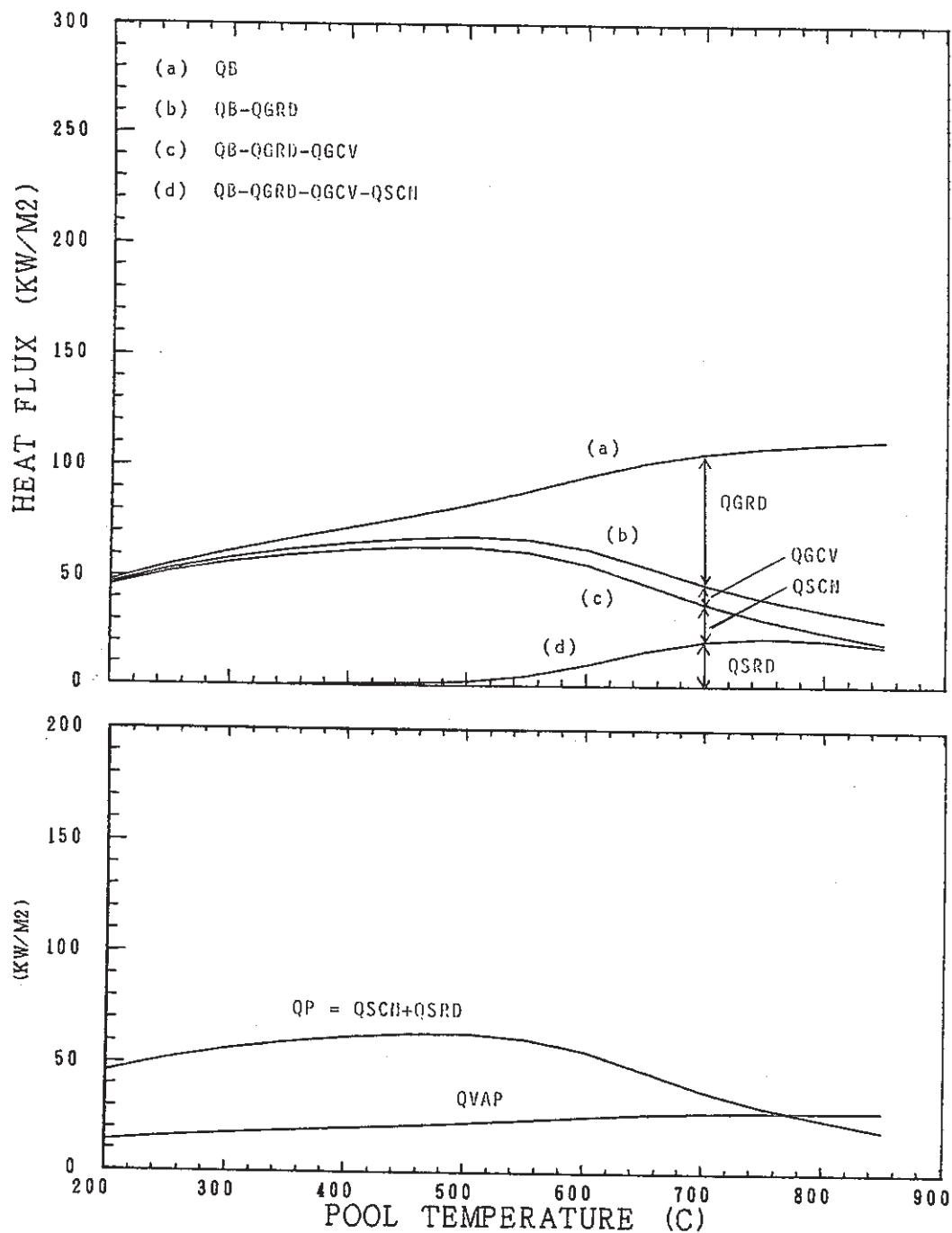


Fig. 3.16 Heat Balance Diagram at Flame Zone
 $(T_{\text{gas}} = 100^{\circ}\text{C}, P_{\text{gas}} = 0.101 \text{ MPa}, C_{\text{O}_2} = 23 \text{ w/o}, F_{\text{Na}_2\text{O}_2} = 1)$

(QB = Burning Heat, QGRD = Radiative Heat transferred to gas,
 QGCV = Convective Heat transfer to gas, QSCN = Conductive
 Heat transferred to pool, QSRD = Radiative Heat transferred
 to pool, QP = Total Heat transferred to pool, QVAP = Heat of
 Vaporization)

3.2 実験データとの比較

本節では、空気雰囲気（高酸素濃度雰囲気）におけるナトリウムプール火災実験について、実験データと SPM による計算結果の比較を行なう。現在まで実施されているナトリウムプール火災実験は計測上の困難から、SPM のモデルの基盤であるフレームの諸量（温度、フレーム高さ等）を測定するに至っていない。このため、ここで述べる比較検討も、測定が可能な雰囲気のガス温度と圧力、ナトリウム温度、酸素濃度の変化に限られる。比較の対象とした実験は、米国の Hanford Engineering Development Laboratory (HEDL) で CSTF 装置を用いて行われた AB 1 実験²²⁾ 及び西独の Kernforschungszentrum Karlsruhe (KfK) で FAUNA 装置を用いて行われた F - 5, F - 6 実験である²⁴⁾。

3.2.1 HEDL - AB 1 実験の解析

米国の HEDL では 1972 年から 1978 年にかけて、LSFF (Large Sodium Fire Facility) で 4 回、CSTF (Containment Systems Test Facility) で プール火災と スプレイ火災の実験を各々 2 回実施している^{21), 24)}。AB 1 実験は CSTF で実施されたプール火災実験のうちの一つで、850 m³ の鋼鉄製容器内に 4.4 m² の燃焼皿を置き、この中に 410 kg のナトリウムを燃焼させたものである。主な試験条件を Table 3.1 に、試験装置を Fig. 3.17 に示す。

計算モデルに関するパラメータは、従来のナトリウムプール火災解析²⁵⁾ 等を参考にして次のように決めた。

(1) ナトリウム反応式割合	$F_{Na_2O_2} = 1.0$
(2) 反応生成物落下割合	$F_{fall} = 0.6$
(3) フレーム—ガス熱放射伝熱係数	$F_{fa} = 0.65$
(4) フレーム—構造物熱放射伝熱係数	$F_{fw} = 0.0$
(5) フレーム—Na 液面熱放射伝熱係数	$F_{fs} = 0.5$
(6) Na 液面—ガス熱放射伝熱係数	$F_{sa} = 0.0$
(7) Na 液面—構造物熱放射伝熱係数	$F_{sw} = 0.0$
(8) ガス—構造物熱放射伝熱係数	$F_{aw} = 0.5$

これらのパラメータのうち、特に F_{fa} と F_{fs} の値は曖昧さが大きい。 $F_{fa} = 0.65$ は酸化ナトリウム表面の輻射率として、従来の SOFIRE タイプの計算コードに使用してきた値である。 $F_{fs} = 0.5$ は仮りの値であり特に根拠は無い。よって、これらの正確な値は、今後の実験結果を待つ必要がある。計算に使用した入力データを Appendix - B に示す。

雰囲気ガスの温度と圧力、ナトリウム温度、酸素濃度について実験測定値と計算結果を比較して Fig. 3.18 から Fig. 3.21 に示す。

雰囲気ガスの温度 (Fig. 3.18) と圧力 (Fig. 3.19) の比較では、両者とも計算結果は実験測定値より全体にやや高い傾向を示している。温度上昇 (初期値からの変化巾) の最大値は燃

焼停止時間（実験では燃焼皿に蓋をして停止させている）の3,600秒の値で、測定値では66°Cに対し、計算値は73°Cである。圧力上昇の最大値は、測定値の20.4 KPaに対し、計算値は22.8 KPaである。ただし、圧力のピークの現われる時間は、測定では燃焼停止時間であるのに対し、計算では約1,600秒にピークに達し、その後酸素の消費に従って緩やかな圧力降下がみられる。

ナトリウム温度の比較（Fig. 3.20）においても、計算値はやや過大な傾向がみられる。最大温度上昇は、実験値の150°Cに対し、計算値は175°Cである。酸素濃度の変化（Fig. 3.21）は全般によく一致している。

全体としてSPMの計算結果は、やや過大ではあるが実験をよくシミュレートしている。計算結果の主要項目について、HEDLで実施されたSOFIRE-IIの解析結果²²⁾も併記して、Table 3.2に示す。全体にSPMの計算結果は、SOFIRE-IIの結果より実験測定値に近く、特にナトリウムのプール温度については、著しい改善が認められる。

3.2.2 FAUNA F5, F6 実験の解析

西独のKfKでは、220 m³の鋼鉄製容器で製作されたFAUNA施設で、F1からF6までの計6回のナトリウムプール火災実験を実施している^{23), 24)}。これらの試験のうち、F5とF6はすでに日独の情報交換協定で動燃事業団のSOFIRE-MIIコードによる解析を実施している²⁵⁾。F5とF6は燃焼皿の面積が異なる（F5は2 m²、F6は4 m²）以外は、ほぼ同一の試験条件で、Table 3.1に主な試験条件を示す。またFig. 3.22にFAUNA施設を図示する。

SPMでの計算に際し、計算モデル上のパラメータは、3.2.1項に示したHEDL AB1の計算に使用したものと同一の値を用いた。計算の入力データは、Appendix-Bに示す。

計算結果は概して、ガス温度、ナトリウム温度、酸素濃度については、実験測定値とほぼ一致するか、あるいはやや過大となっている。圧力に関してはF5、F6ともかなり過大な計算結果となっている。ガスの温度、圧力、質量（酸素濃度）の間には一義的な相互関係が成立するため、このように圧力の計算結果だけ大きく測定値と離れているのは、測定値にも矛盾がある可能性がある。実験で、初期（～20分）のガス温度、圧力の測定値に大きな変動があるのは、実験手順上口径7 mmの細いノズルからナトリウムを燃焼皿に注入させているためである。

特にF6では燃焼皿上のナトリウム深さが浅い（燃焼皿面積が大きい）ため、燃焼皿上でナトリウムが飛び散ったことが考えられ、測定値に大きなピーク値を生じている。

上述したように、F-5, F-6実験についてはSOFIRE-MIIでも解析を実施したので、その結果も合わせてTable 3.3に主要な計算結果を示す。

SOFIRE-MIIとSPM両者とも、圧力を除くと、実験値とほぼ一致する計算結果を与えているが、ガスの温度、圧力についてはSPMがやや大きく、ナトリウム温度はSPMの方が低く実験値に近い。

TABLE 3.1

SYSTEM DIMENSIONS AND INITIAL CONDITIONS
USED FOR HEDL AB-1 AND FAUNA F5, F6 CALCULATIONS

	<u>HEDL</u>	<u>FAUNA</u>	
	<u>AB-1</u>	<u>F5</u>	<u>F6</u>
Vessel Volume [m ³]	850	220	220
Vessel Wall Area [m ²]	520	176	176
Vessel Wall Thickness [mm]	25.3	16	16
Burning Pan Area [m ²]	4.4	2.0	4.9
Amount of Sodium [kg]	410	350	350
Gas Pressure [MPa]	0.125	0.101	0.101
Gas/Wall Temperature [C.deg]	26.5	25	25
Sodium/Pan Temperature [C.deg]	600	480	480
O ₂ Concentration [vol %]	19.8	21	21
Duration of Sodium Filling [min]	1	20	20
Duration of Fire [min]	60	110	60

TABLE 3.2

COMPARISON OF SOFIRE-II PREDICTIONS²²⁾ AND
SPM PREDICTIONS WITH HEDL AB-1 TEST RESULTS

	<u>SOFIRE-II</u>	<u>SPM</u>	<u>Experiment</u>
Gas Temperature Increase [K]	100.4	72.7	65.8
Gas Pressure Increase [KPa]	27.2	22.8	20.4
Sodium Pool Temp. Increase [K]	500	175	150
Sodium Reacted [kg]	273	121	154
Oxygen Consumed [kg]	129	84	83

TABLE 3.3

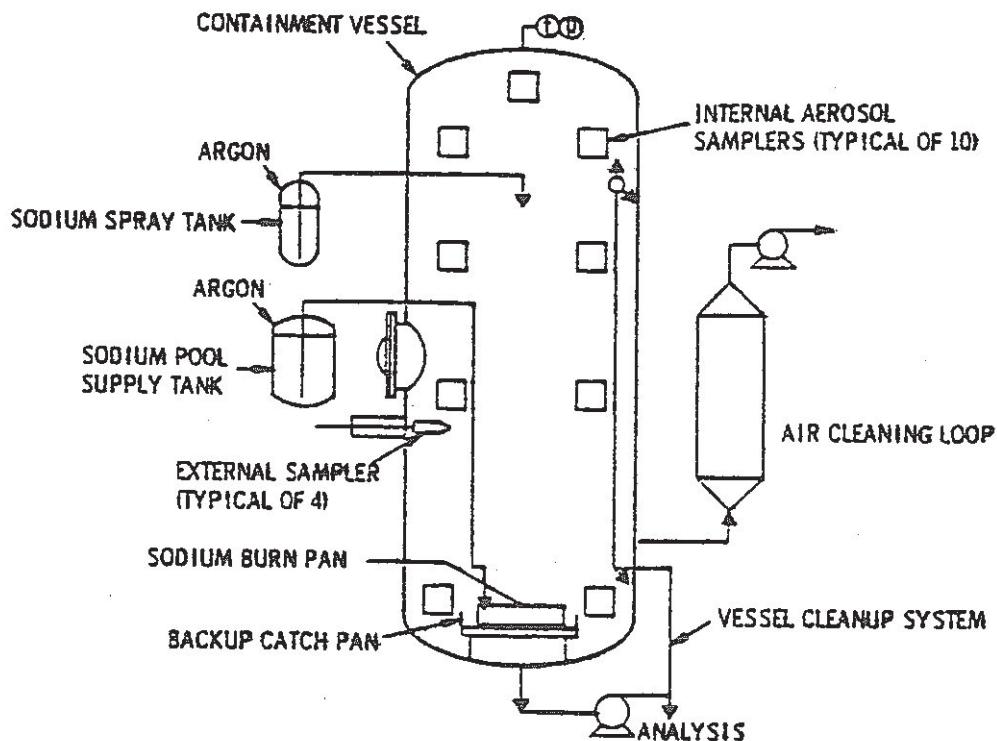
COMPARISON OF SOFIRE-MII PREDICTIONS²⁵⁾ AND
SPM PREDICTIONS WITH FAUNA F5 AND F6 TEST RESULTS

F5 Test (at time = 60 min.)

	<u>SOFIRE-MII</u>	<u>SPM</u>	<u>Experiment</u>
Gas Temperature Increase [K]	94	105	93
Gas Pressure Increase [KPa]	17	21	11
Sodium Pool Temp. Increase [K]	312	270	127-200
Oxygen Concentration [vol %]	10.8	9.1	12.7

F6 Test (at time = 120 min.)

	<u>SOFIRE-MII</u>	<u>SPM</u>	<u>Experiment</u>
Gas Temperature Increase [K]	146	162	142
Gas Pressure Increase [KPa]	30	37	15
Sodium Pool Temp. Increase [K]	290	269	240
Oxygen Concentration [vol %]	9.3	10.9	10.4



HEDL 7906-209.2

Fig. 3.17 Schematic of HEDL AB-1 Pool Fire Experiment Vessel

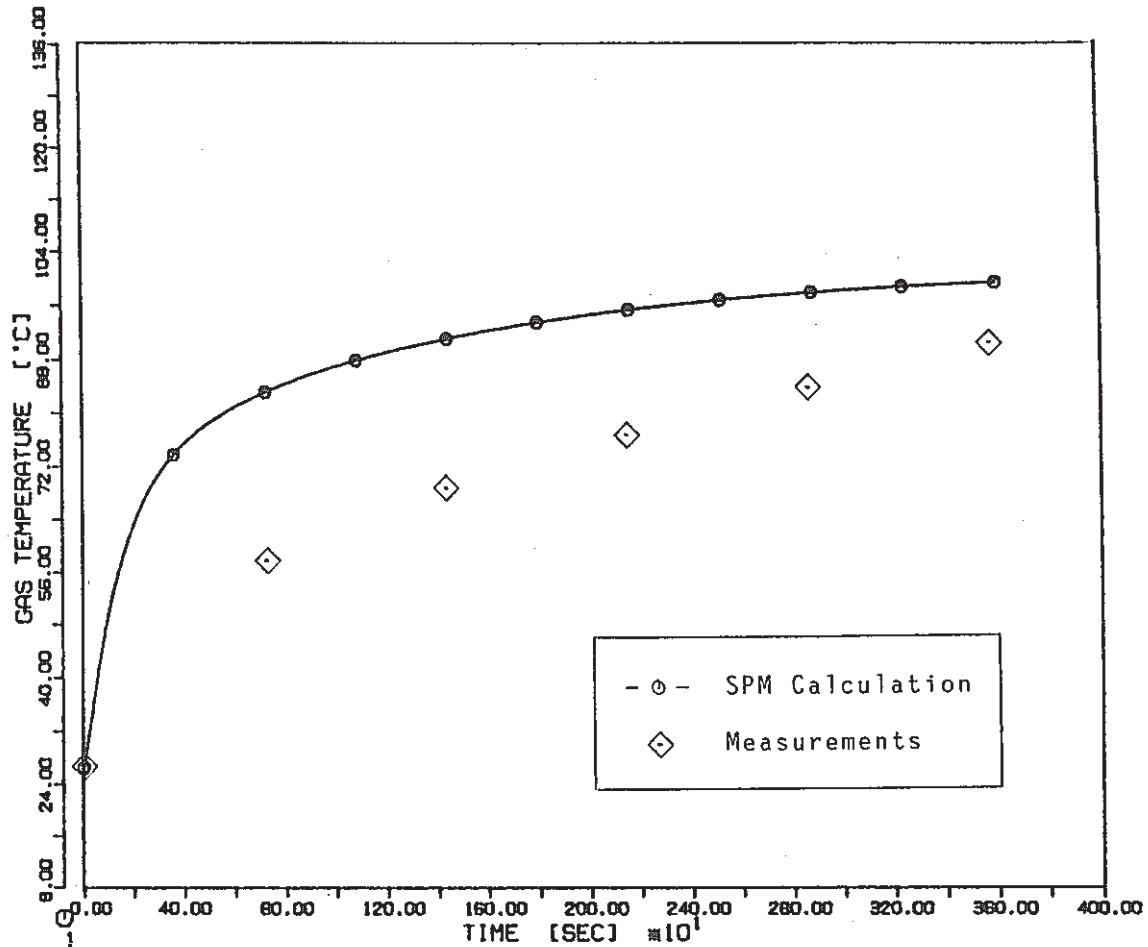


Fig. 3.18 Comparison between SPM Calculation and Measurements of Gas Temperature in HEDL AB-1 Test

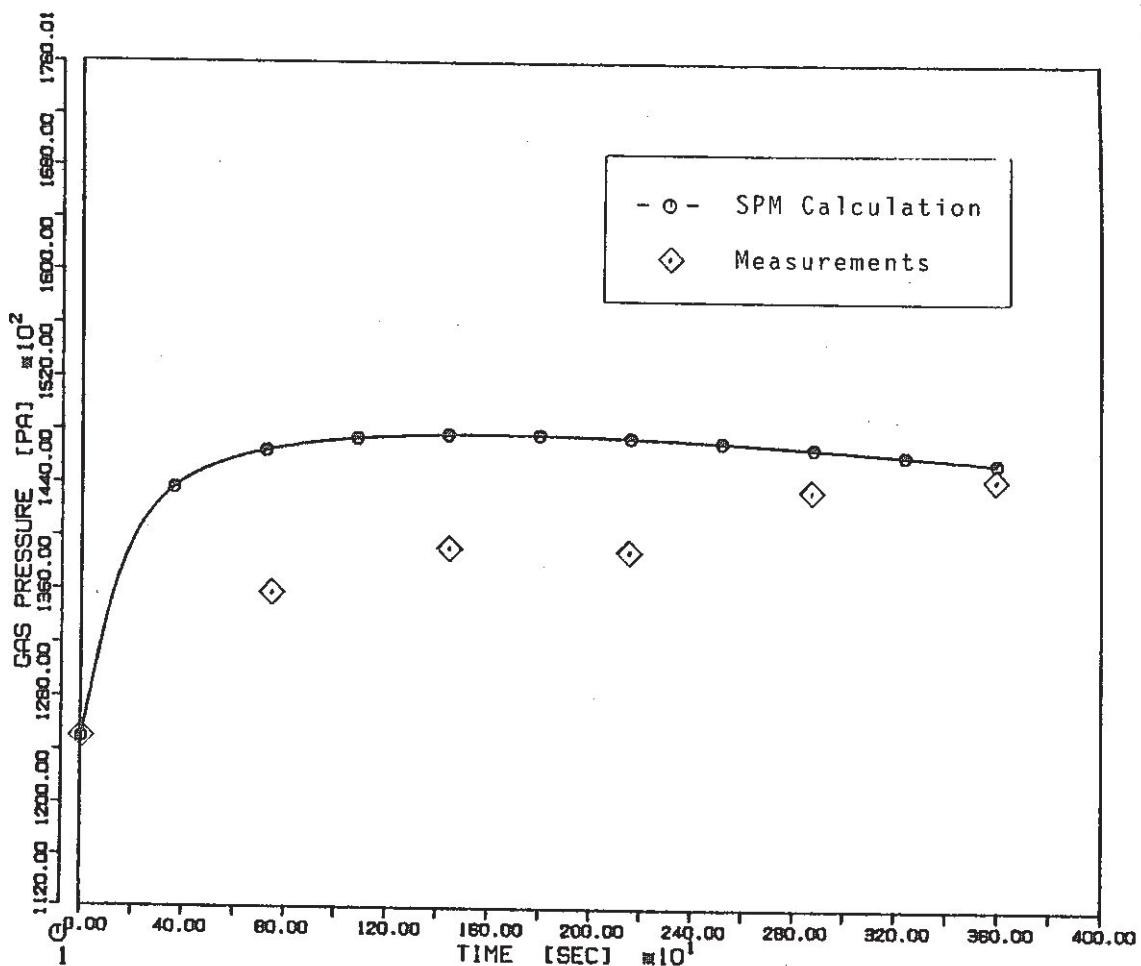


Fig. 3.19 Comparison between SPM Calculation and Measurements of Gas Pressure in HEDL AB-1 Test

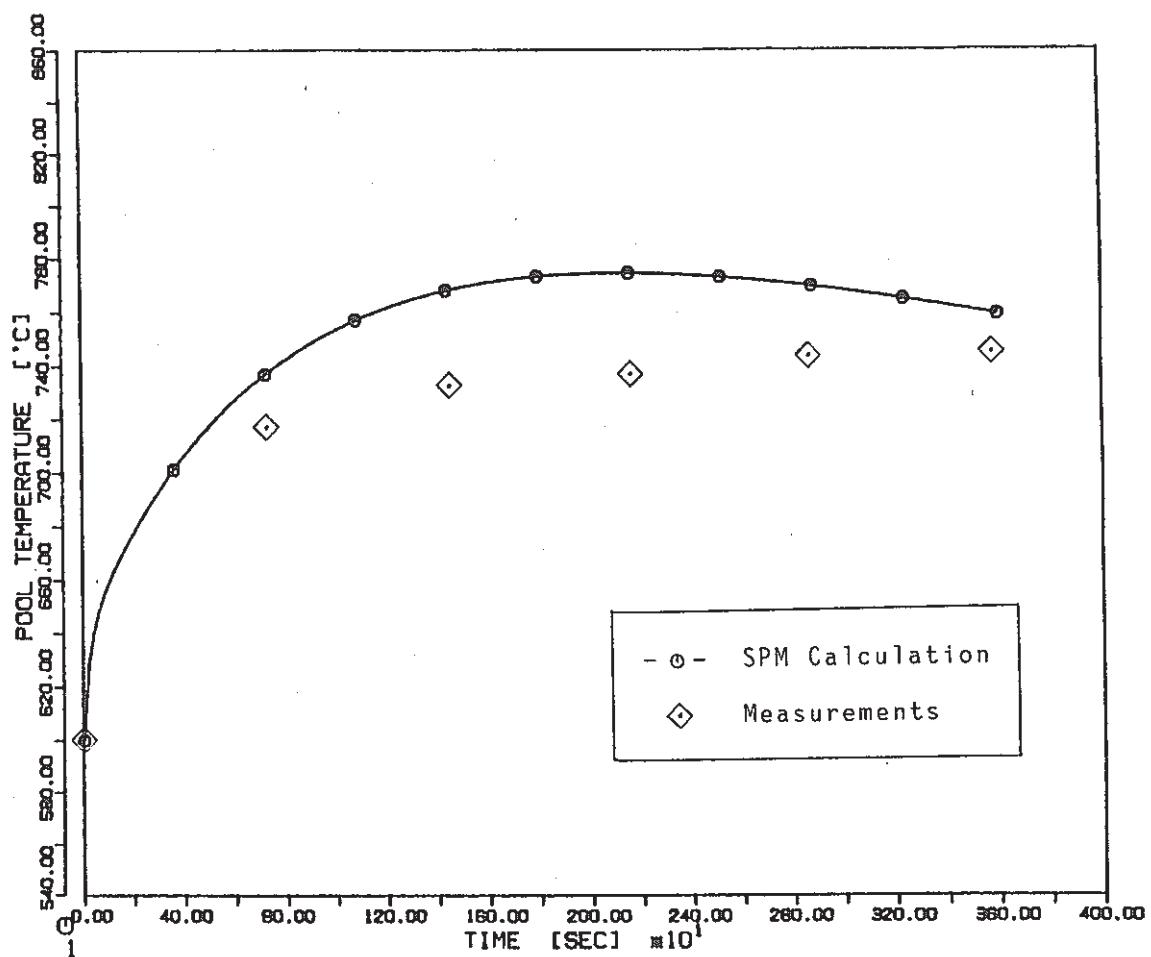


Fig. 3.20 Comparison between SPM Calculation and Measurements of Pool Temperature in HEDL AB-1 Test

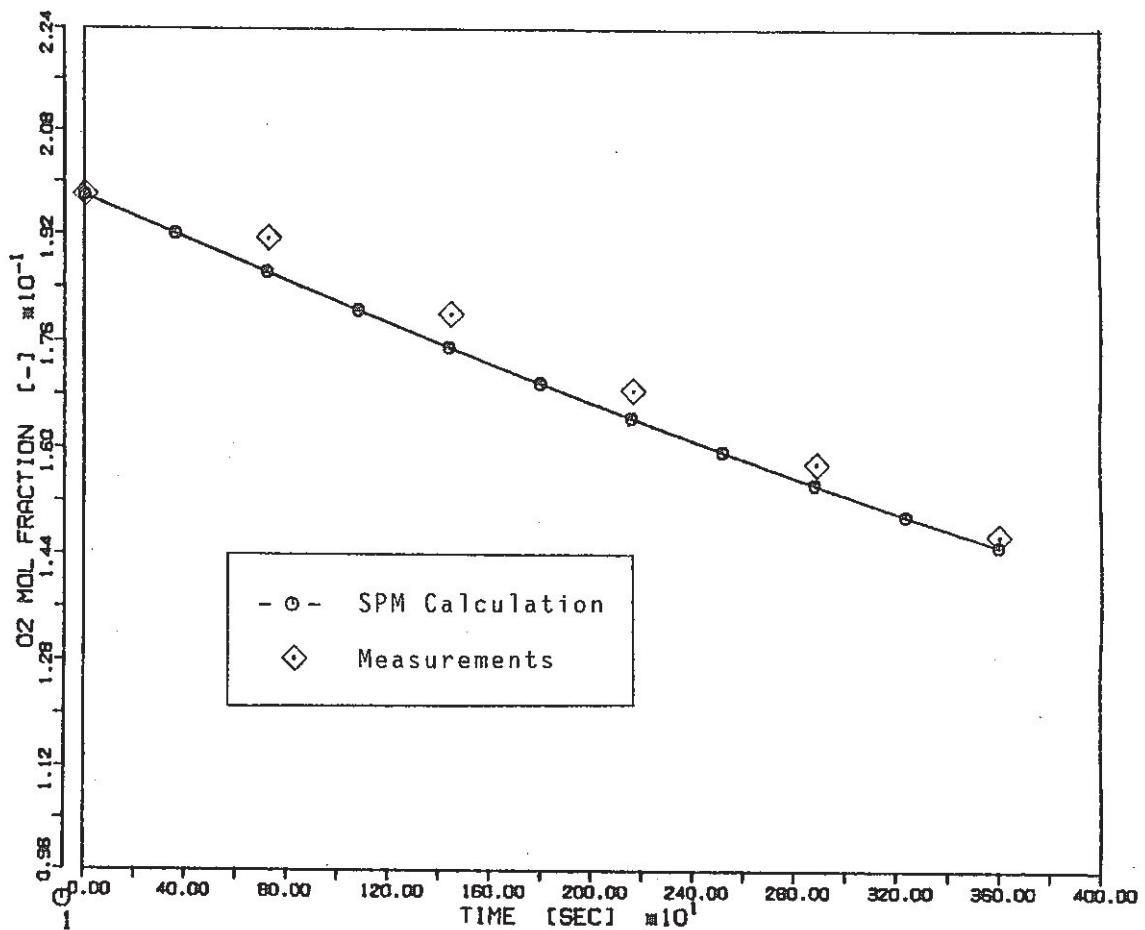


Fig. 3.21 Comparison between SPM Calculation and Measurements of Oxygen Concentration in HEDL AB-1 Test

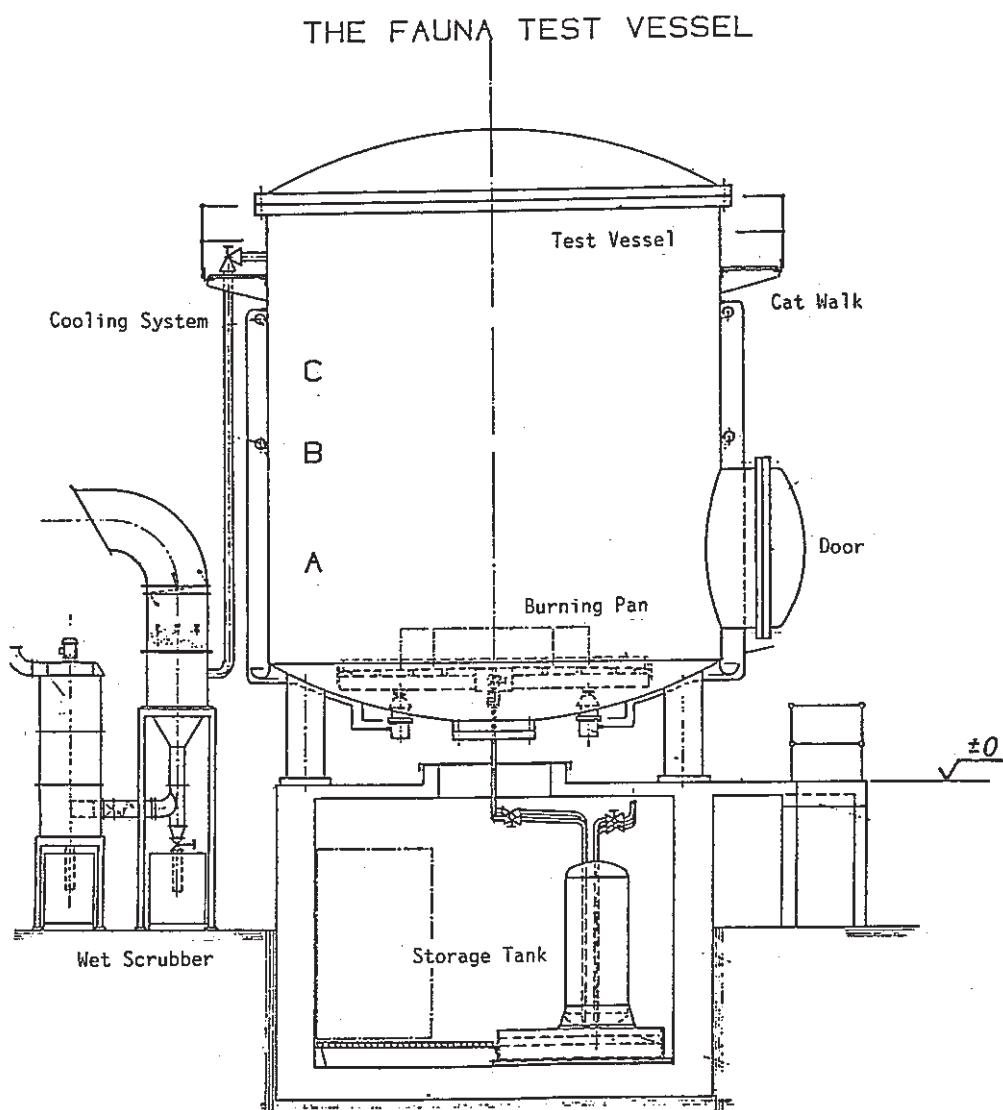


Fig. 3.22 Schematic of FAUNA F-5 and F-6 Experiment Vessel

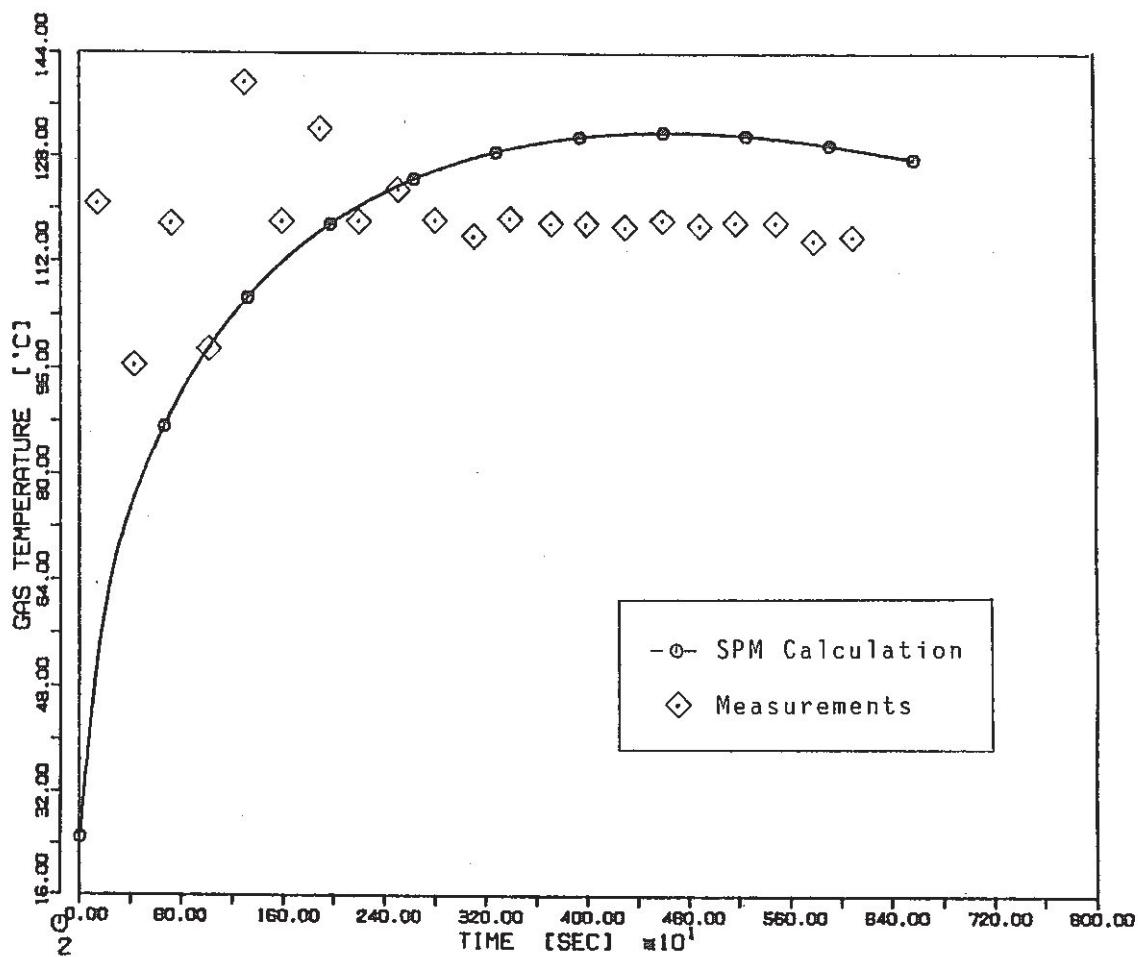


Fig. 3.23 Comparison between SPM Calculation and Measurements of Gas Temperature in FAUNA F-5 Test

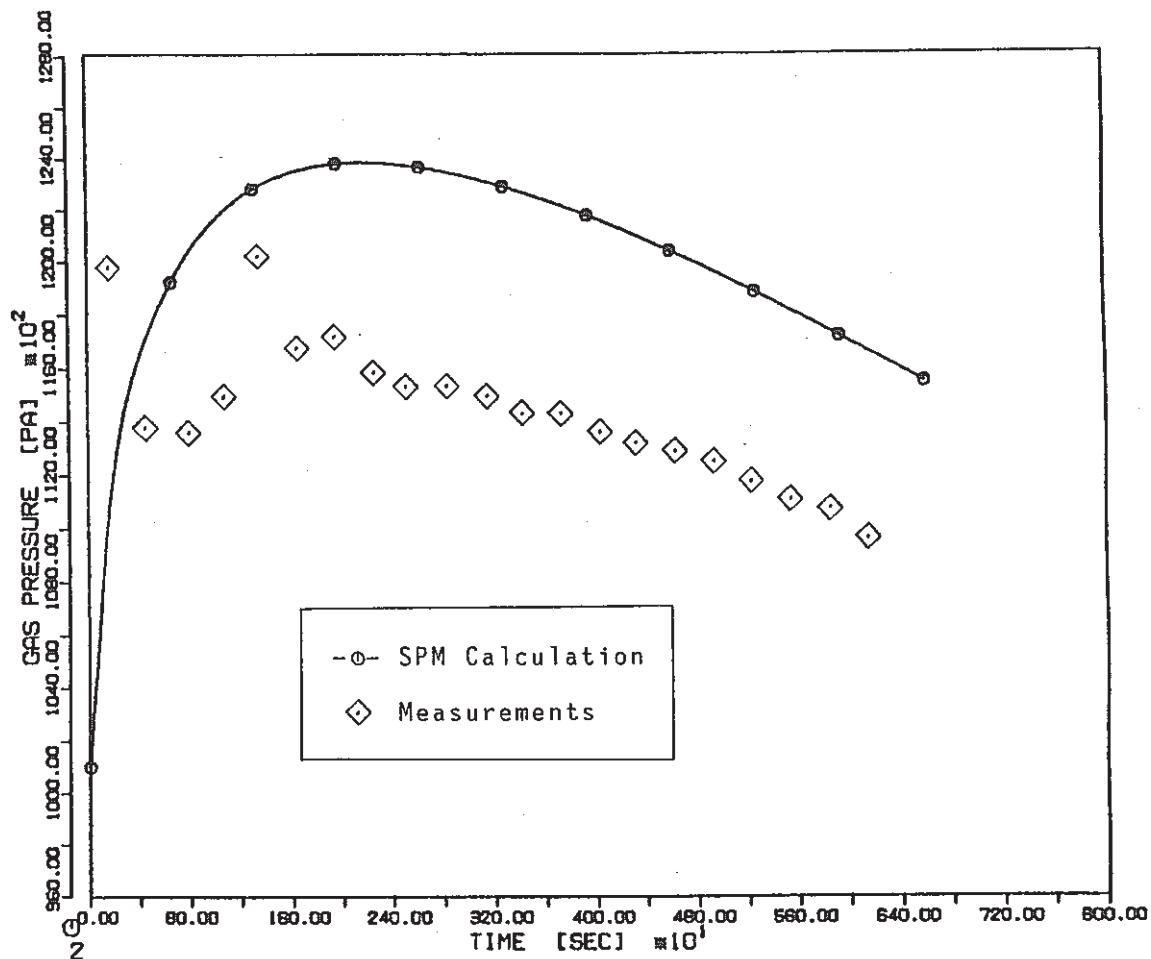


Fig. 3.24 Comparison between SPM Calculation and Measurements of Gas Pressure in FAUNA F-5 Test

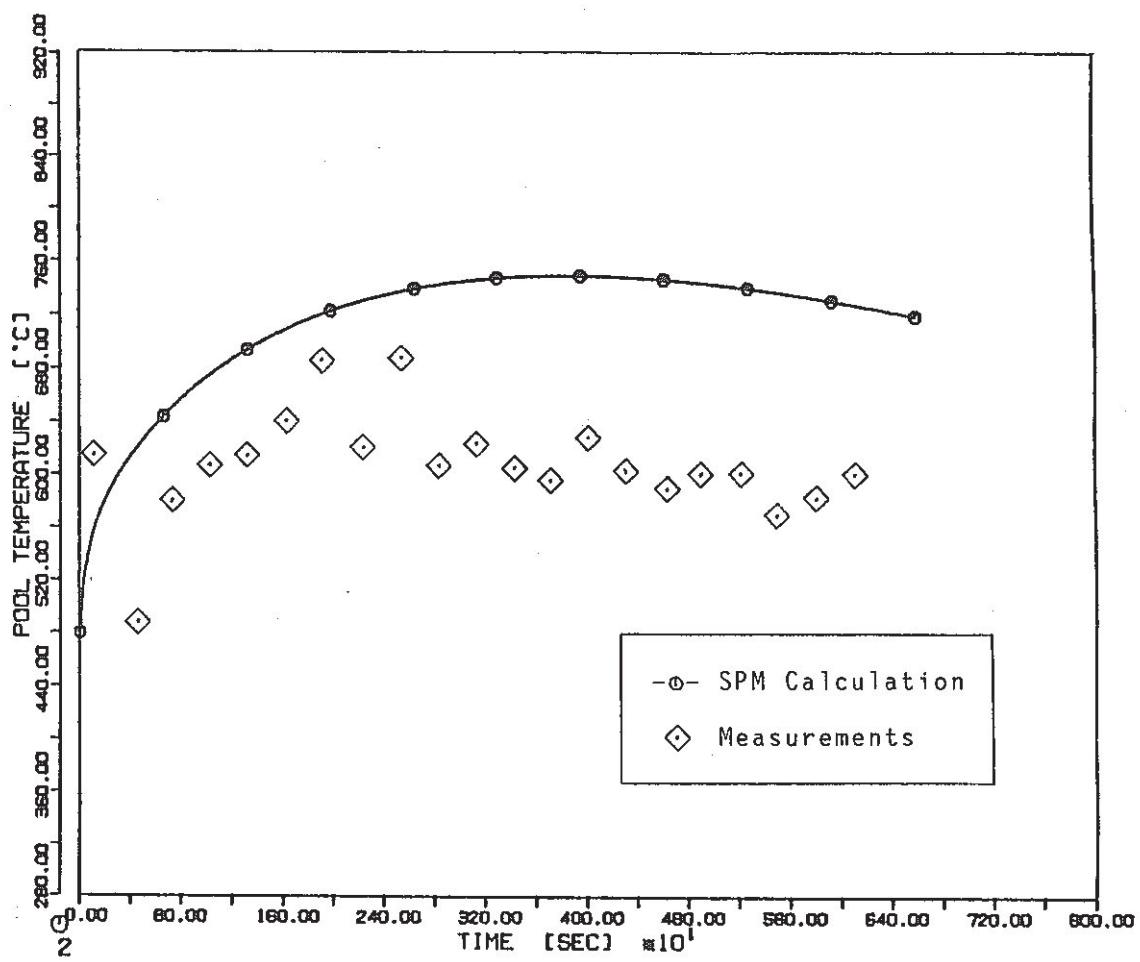


Fig. 3.25 Comparison between SPM Calculation and Measurements of Pool Temperature in FAUNA F-5 Test

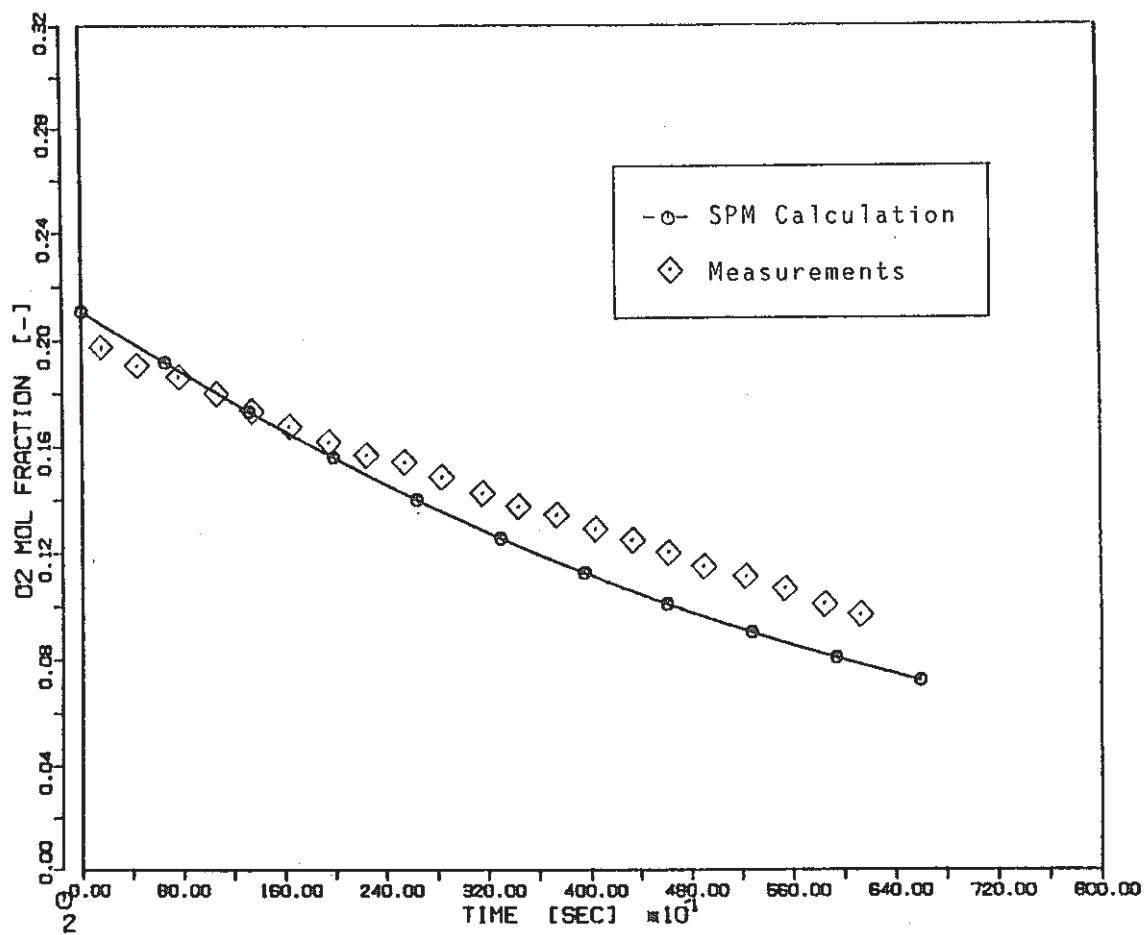


Fig. 3-26 Comparison between SPM Calculation and Measurements of Oxygen Concentration in FAUNA F-5 Test

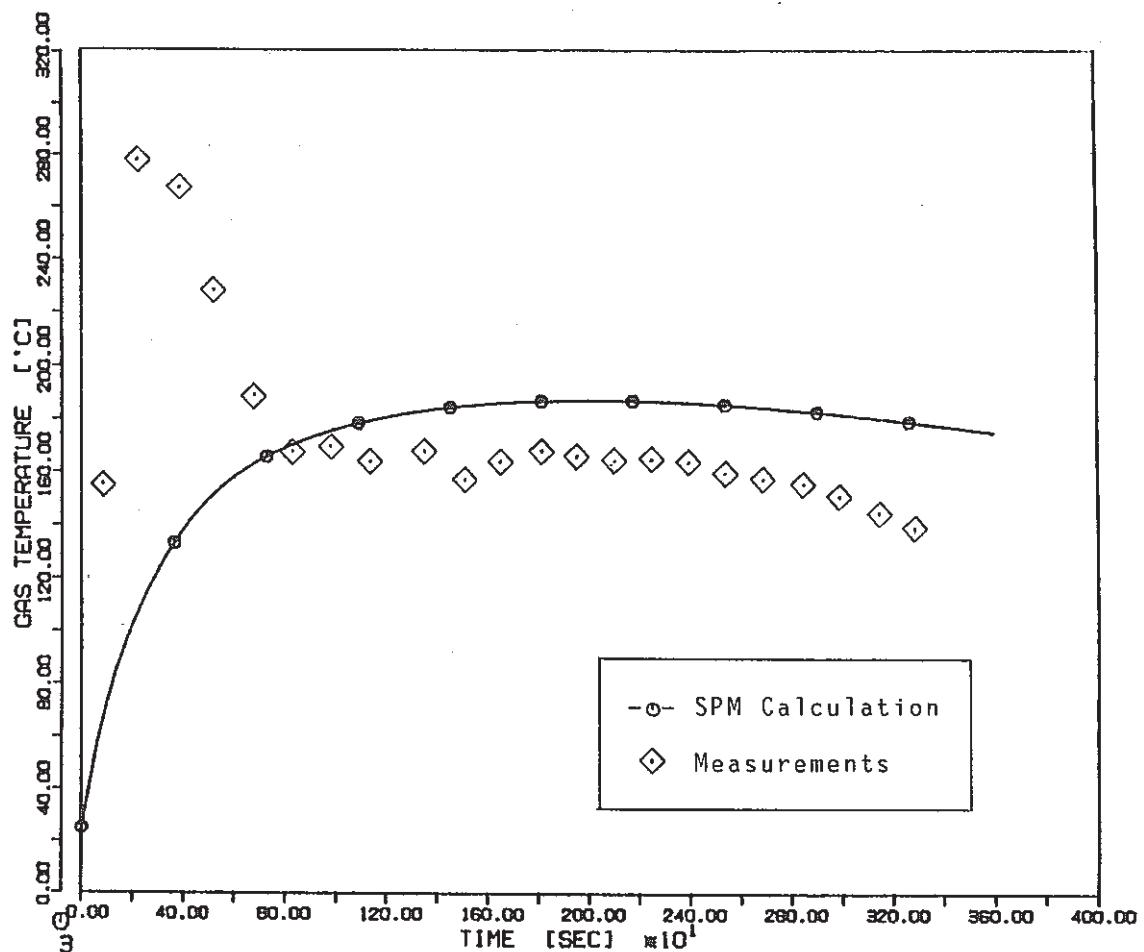


Fig. 3.27 Comparison between SPM Calculation and Measurements of Gas Temperature in FAUNA F-6 Test

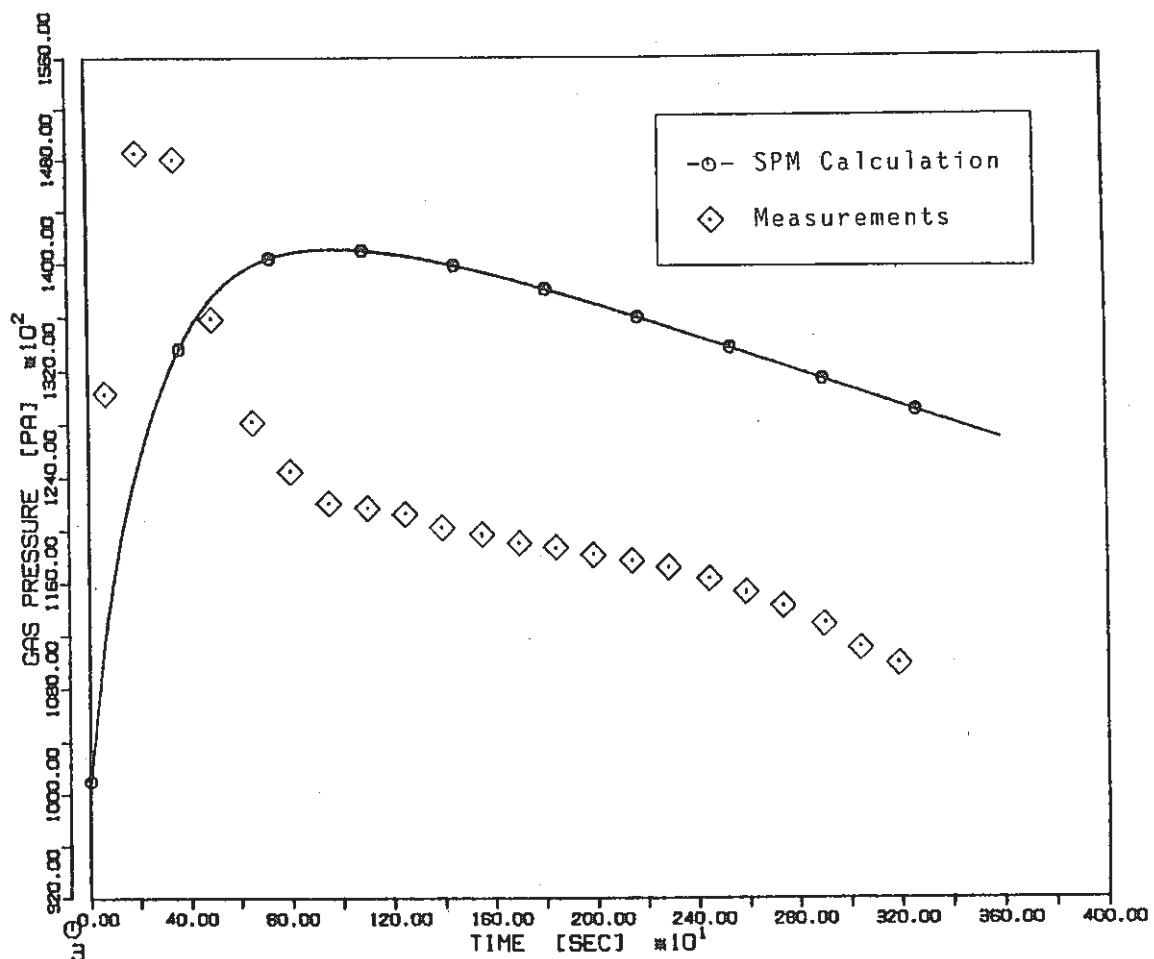


Fig. 3.28 Comparison between SPM Calculation and Measurements of Gas Pressure in FAUNA F-6 Test

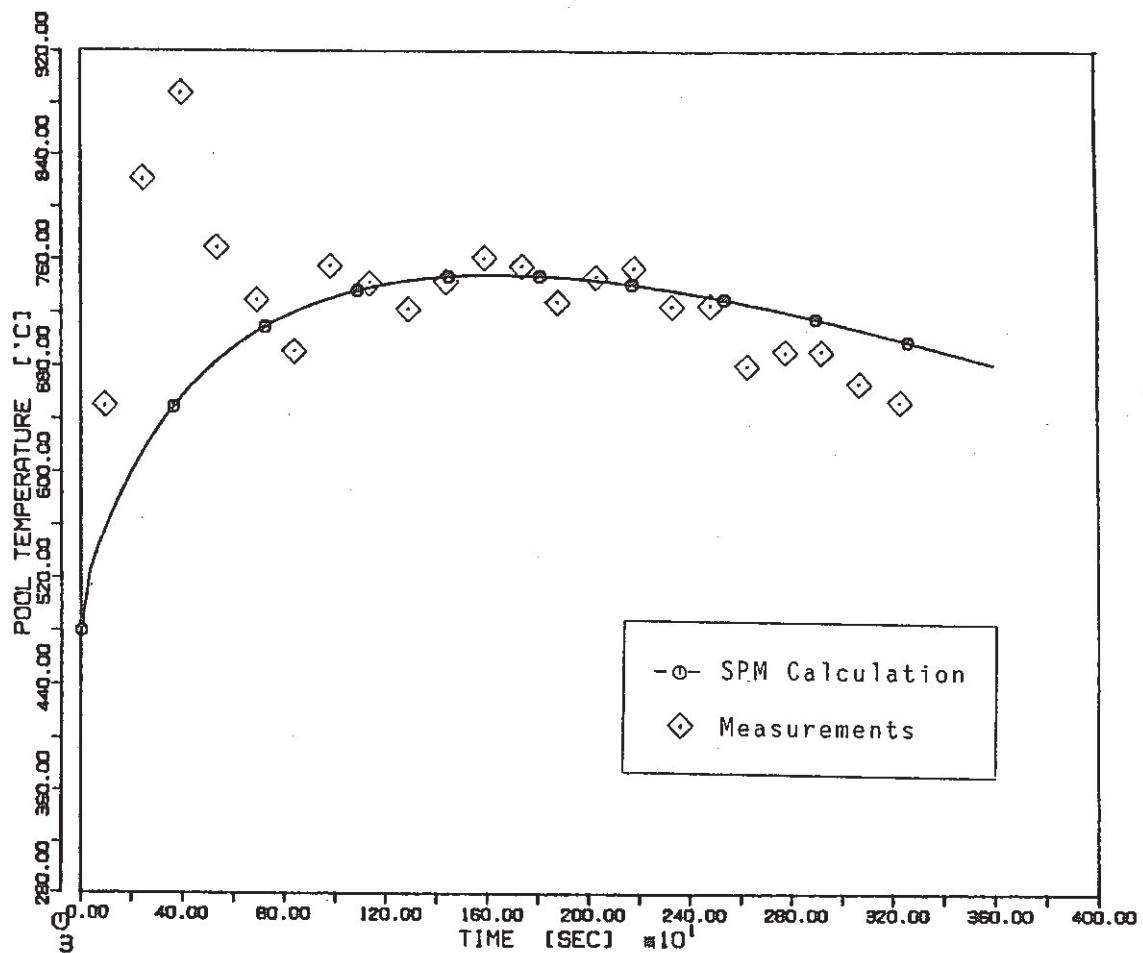


Fig. 3-29 Comparison between SPM Calculation and Measurements of Pool Temperature in FAUNA F-6 Test

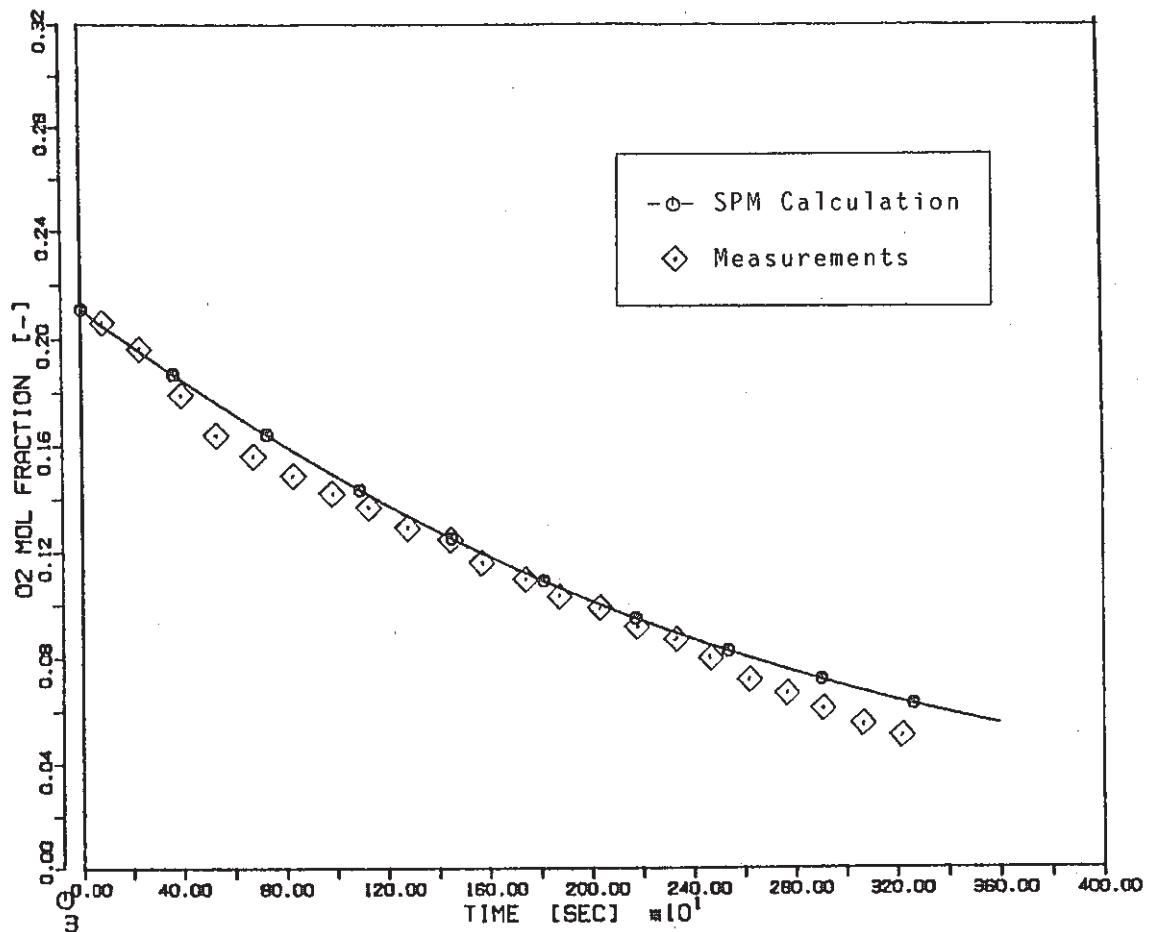


Fig. 3.30 Comparison between SPM Calculation and Measurements of Oxygen Concentration in FAUNA F-6 Test

4. ま　と　め

ナトリウムプール火災の計算をより詳細に行うため、プール液面上の燃焼フレームの質量、エネルギーバランスを正確に記述した新しいプール火災計算モデル SPM を作成した。

従来からプール火災解析に使用されている SOFIRE - II あるいは SOFIRE - MII と比較して、SPM はプール表面の燃焼域の温度を厳密に評価することが可能であるため、燃焼に伴う伝熱のメカニズムの究明のための手法を提供することができる。

試計算結果によれば、実プラントの二次冷却系からのナトリウム漏洩に起因するナトリウム火災の条件に近い空気雰囲気（100 °C），ナトリウムプール温度 700 °C の場合，燃焼フレーム温度は約 1,000 °C (Na₂O 生成反応の場合)，約 800 °C (Na₂O₂ 生成反応の場合)，フレームの高さは約 0.2 mm (Na₂O 生成)，約 0.5 mm (Na₂O₂ 生成) であった。また、燃焼速度は約 55 kg/m² hr (Na₂O 生成)，約 25 kg/m² hr (Na₂O₂ 生成)，燃焼発熱量は約 200 kw/m² (Na₂O 生成)，約 105 kw/m² (Na₂O₂ 生成) であった。これらの値は、実験データから直接的あるいは間接的に得られている値と比較しても妥当な値である。

また、米国と西独で実施されたプール火災実験について、温度、圧力、酸素濃度の測定データと SPM の計算結果の比較も行った。計算結果は全般に測定値とほぼ一致するかやや過大評価であったが、プール温度については従来の計算コードと比べると著るしい改善が見られた。

今後の課題としては、1) 実験データとの比較を更に推し進め、計算モデル上のパラメータ値の最適化をはかること、2) 雰囲気ガスの伝熱流動の計算モデルを詳細化することが挙げられる。

5. 参 考 資 料

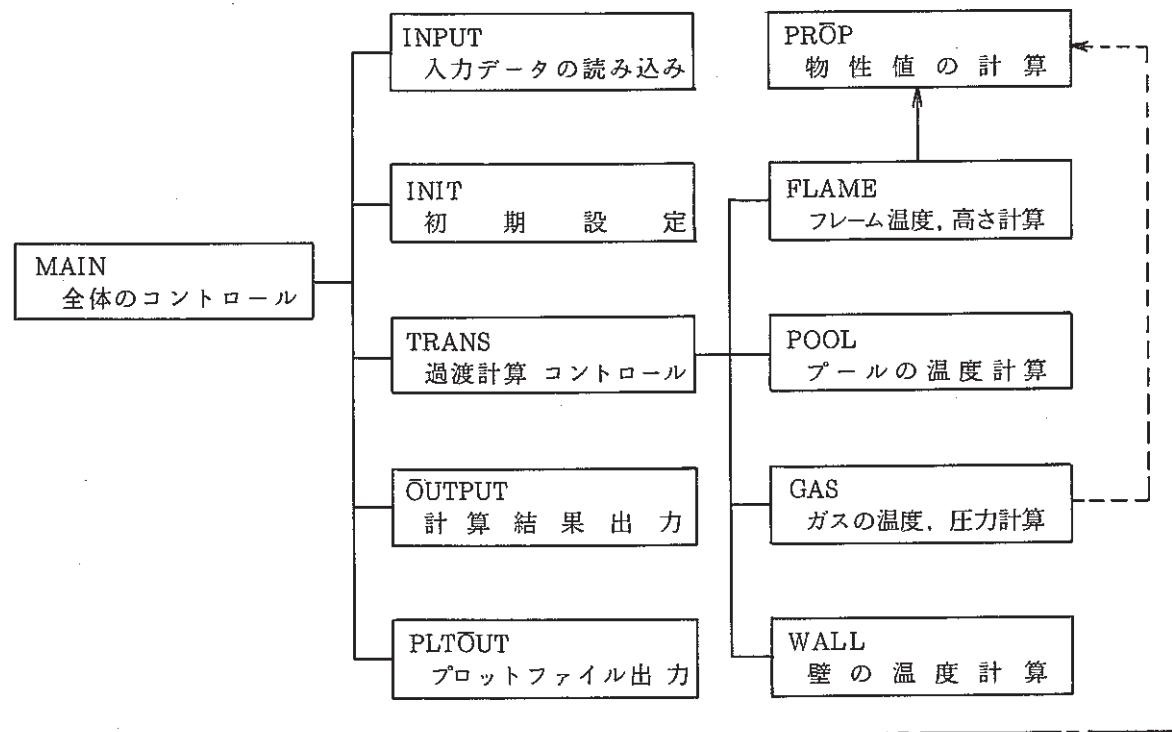
- 1) P. Beiriger, et. al, "SOFIRE - II User Report," AI-AEC-13055 (1973)
- 2) 「ナトリウム火災解析コードSOFIRE-MII使用マニュアル」, PNC SJ 206 82-01 (1981)
- 3) P.R. Shire, "SPRAY Code User's Report," HEDL-TME 76-94 (1977)
- 4) 「一次収納構造の設計成果報告書」 PNC ZJ 222 81-04 (1980)
- 5) 里見直樹, 他, 「ナトリウム火災解析コードASSCOPS Ver. 1.1 (インプットマニュアル)」, PNC SN 952 84-13 (1984)
- 6) R.N. Newman and J.F.B. Payne, "The Burning Rates of Sodium Pool Fires," Combustion and Flame 33, p 291 - 297 (1978)
- 7) S.S. Tsai, R.A. Bari, "Combustion of Large Sodium Pools," ANS Winter Meeting (1979)
- 8) S.C. Yung, "Sodium Pool Fire Model for CONACS," HEDL-SA-2740-FP (1982), ANS Winter Meeting (1983)
- 9) M.M. Malet et. al, "PYROSI Calculation of the Effects of a Sodium Fire in either a Confined or Ventilated Cell," Specialist's Meeting on Sodium Fires Design and Testing, Richland, Washington 1982
- 10) 寒河江, 鈴置, 「ナトリウムプール燃焼解析プログラムの開発」, 日本原子力学会「昭59年会」 A54
- 11) "SOMIX User's Manual," RI-N 707 TI-130075
- 12) H.K. Yang, "U.S. Department of Energy Fast Reactor Safety Program Progress Report Oct. - Dec. 1981 3.1.2 Accommodation within Containment Sodium Pool fires," ANL/TMC 82-1, (1982)
- 13) R.B. Bird, et. al, "Transport Phenomena", John Wiley & Sons, Inc.
- 14) G.H. Golden and J.V. Tokar, "Thermophysical Properties of Sodium", ANL-7323, (1967)
J.K. Fink and L. Leibowitz, "Thermophysical Properties of Sodium," ANL-CEN-RSD-79-1 (1979)
- 15) 日本機械学会, 「伝熱工学資料 改訂第3版」, (1975)
- 16) G.M. Barrow, "Physical Chemistry 3rd Ed.", McGraw-Hill (1973)
- 17) 甲藤好郎, 「伝熱概論」, 養賢堂
- 18) 日本化学会, 「化学便覧 改訂2版」, 丸善

- 19) M. Fishenden and O.A. Saunders, "Introduction to Heat Transfer," p180 Clarendon Press (1950)
- 20) T. Fujii and H. Imura, "Natural-Convection Heat Transfer from a Plate with Arbitrary Inclination," Int.J. Heat and Mass Transfer 15 (755), (1972)
- 21) R.K. Hilliard, "Summary of HEDL Sodium Fire Tests," HEDL-SA-1669 (1978)
- 22) R.K. Hilliard, et. al , "Aerosol Behaviour During Sodium Pool Fires in a Large Vessel - CSTF TESTS AB1 and AB2 -," HEDL-TME 79-28 (1979)
- 23) W. Cherdron, S. Jordan, "Die Natrium-Brandversuche in der FAUNA-Anlage auf Brandflächer bis 12 m²," KfK 3041 (1983)
- 24) W. Cherdron, Ch. Hosemann, "The Sodium Fire Tests FAUNA 5 and FAUNA 6," PSB-Bericht Nr. 1667 (I, II), (1982)
- 25) O. Miyake, et. al , "Comparison of SOFIRE-MII Predictions with the Results of German FAUNA F5 and F6 Tests," PNC SN 941 85-67

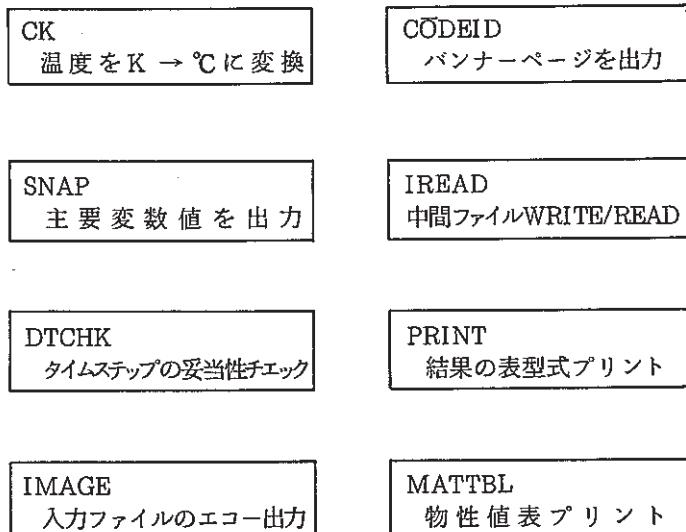
Appendix - A S P M プログラム概略

A.1 プログラム構成

SPM コードでは本文のモデルを取り扱う為、下記の様なサブプログラム構成になっている。又、ソースプログラムは約 4,000 ステップであり、実行に約 512 KB 使用する。



さらに下記サブプログラムがある。



図A.1 プログラム構成

A.2 主要サブプログラムの説明

SPM コードに於て各種計算を行なう主要なサブプログラムの概要は下記の通りである。

表A.1 サブプログラムの説明

モデル	サブプログラム名	概要
フレーム	FLAME	<ul style="list-style-type: none"> ○ マスバランス <ol style="list-style-type: none"> 1. プールからの Na の供給 2. 雾囲気ガスからの O₂ の供給 ○ ヒートバランス <ol style="list-style-type: none"> 1. 雾囲気ガスへの輻射熱流速 2. " 自然対流 " 3. プールへの輻射熱流速 4. " 伝導 "
プール	POOL	<ul style="list-style-type: none"> ○ マスバランス <ol style="list-style-type: none"> 1. Na は燃焼しても減らないものとする ○ ヒートバランス <ol style="list-style-type: none"> 1. フレームからの輻射熱流速 2. " 伝導 " 3. Na 蒸発による熱損失
雾囲気ガス	GAS	<ul style="list-style-type: none"> ○ マスバランス <ol style="list-style-type: none"> 1. Na 燃焼による O₂ の消費 ○ ヒートバランス <ol style="list-style-type: none"> 1. フレームからの輻射熱流速 2. " 自然対流 " 3. 壁への輻射熱流速 4. " 自然対流 "
壁	WALL	<ul style="list-style-type: none"> ○ マスバランス <ol style="list-style-type: none"> 1. なし ○ ヒートバランス <ol style="list-style-type: none"> 1. 雾囲気ガスからの輻射熱流速 2. " 自然対流 " 3. 外気(セル外部)への輻射熱流速 4. " 自然対流 "

A.3 ファイル構成

A.3.1 入力ファイル

入力ファイルは1ファイルのみで、論理機番#1より読み込む。又、形式は1レコード目がタイトルで72バイトあり、2レコード目以降に入力データがFORTRANのNAMELISTの規則に従って続く。

NAMELIST名、並びは下記の通り。

表 A. 2 入力データ

NAMELIST名：NINP

入力並び	型	意味	単位
NSTEP	I	タイムステップ数	
NPRINT	I	プリントアウト・ステップ間隔(負の時は表形式プリント)	
NPLOT	I	プロットアウト・ステップ間隔	
IWALL	I(5)	1~5番目の壁のメッシュ数 (=0の場合、その壁は存在しない)	
ITRMXO	I	1タイム・ステップの計算繰り返し最大数	
ITRMXQ	I	プール、壁、フレームの	
IWOCON	I	壁外部の条件設定 =0の場合 断熱 ≠0 " 放熱	
IPLT	I	プロット・アウト制御 =0 プロットアウト なし ≠0 " あり	
ISNP	I(10)	各サブプログラムの変数値出力制御 =0 出力しない ≠0 " する (数が大きくなる程詳細) (1) INPUT (2) INIT (3) —— (4) TRANS (5) PROP (6) FLAME (7) POOL (8) GAS (9) WALL (10) PLTOOUT	
NPOOL	I	プールのメッシュ数	

表 A. 2 (続) 入力データ

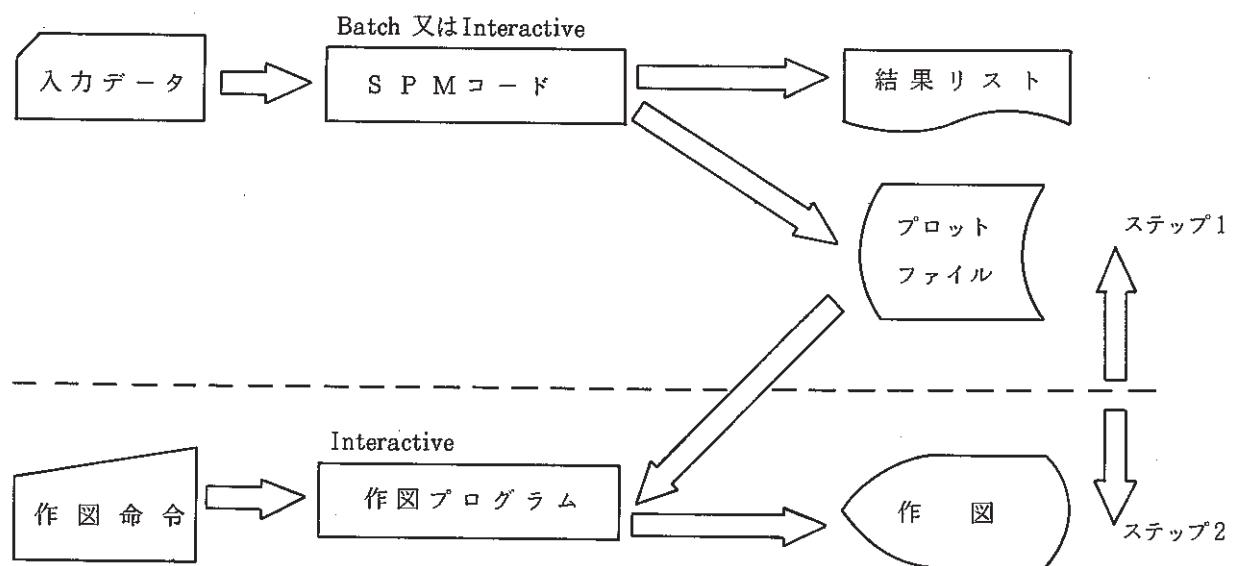
入力並び	型	意 味	単位
TPINT	R	初期プール温度	°C
TGINT	R	初期ガス温度	°C
TWINT	R(5)	1～5番目の初期壁温度	°C
PGINT	R	初期ガス圧力	Pa
XOINT	R	初期O ₂ 重量割合	—
XHINT	R	初期H ₂ O重量割合	—
TOUT	R	セル外気温度	°C
FFL	R	Na ₂ O, Na ₂ O ₂ のプールに落下する割合	—
FNA2O2	R	Na ₂ O ₂ 反応式の割合	—
HPOOL	R	Na プールの深さ	m
APOLL	R	” 面積	m ²
HWALL	R(5)	1～5番目の壁の深さ	m
AWALL	R(5)	” 面積	m ²
HLENG	R(5)	” 代表長さ(セル内側)	m
HOLENG	R(5)	” (セル外側)	m
VCELL	R	セル容積	m ³
FRDFS	R	フレーム → プールの輻射係数	—
FRDFG	R	フレーム → ガス ”	—
FRDFW	R(5)	フレーム → 壁1～5番 ”	—
FRDSG	R	プール → ガス ”	—
FRDSW	R(5)	プール → 壁1～5番 ”	—
FRDGW	R(5)	ガス → 壁1～5番 ”	—
FRDWW	R(5.5)	壁1～5番 → 壁1～5番 ”	—
FRDWO	R(5)	壁1～5番 → 外気への輻射係数	—
RAMNA	R	Na(液相)の熱伝導率	kJ/m·sec·K
RAMWL	R(5)	壁1～5番の ”	”
CPNA	R	Na(気相)の比熱	”
CPNAX	R	Na ₂ Oの比熱	kJ/kg·K
CPNAY	R	Na ₂ O ₂ の比熱	”
CPH 2	R	H ₂ の比熱	”

表 A. 2 (続) 入力データ

入力並び	型	意 味	単位
TCNA	R	Na (液相) の温度伝導率	m^2/sec
TCWL	R(5)	壁 1 ~ 5 番の "	"
HWCF A	R(5)	" 自然対流熱伝達式の係数 (内部) (a)	—
HWCF B	R(5)	" " (内部) (b)	—
HWO CF A	R(5)	" " (外部) (a)	—
HWO CF B	R(5)	" " (外部) (b)	—
D T	R	タイムステップ間隔	sec
TMAX	R	計算終了時間	"
ERRO	R	1 タイムステップの収束判定条件	—
ERRQ	R	フレーム, プール, 壁の "	—
PHI	R	プール, 壁の計算の時間差分の重み係数 = 0 陽解法 = 0.5 Crank - Nicolson 法 = 1 陰解法	—
CPO 2	R	O_2 の比熱	$\text{kJ}/\text{kg} \cdot \text{K}$
CPH 20	R	H_2O の比熱	"

A.4 作 図

SPM コードは、プール温度、フレーム温度等を作図する事が出来る。作図までの流れは下図の通りである。

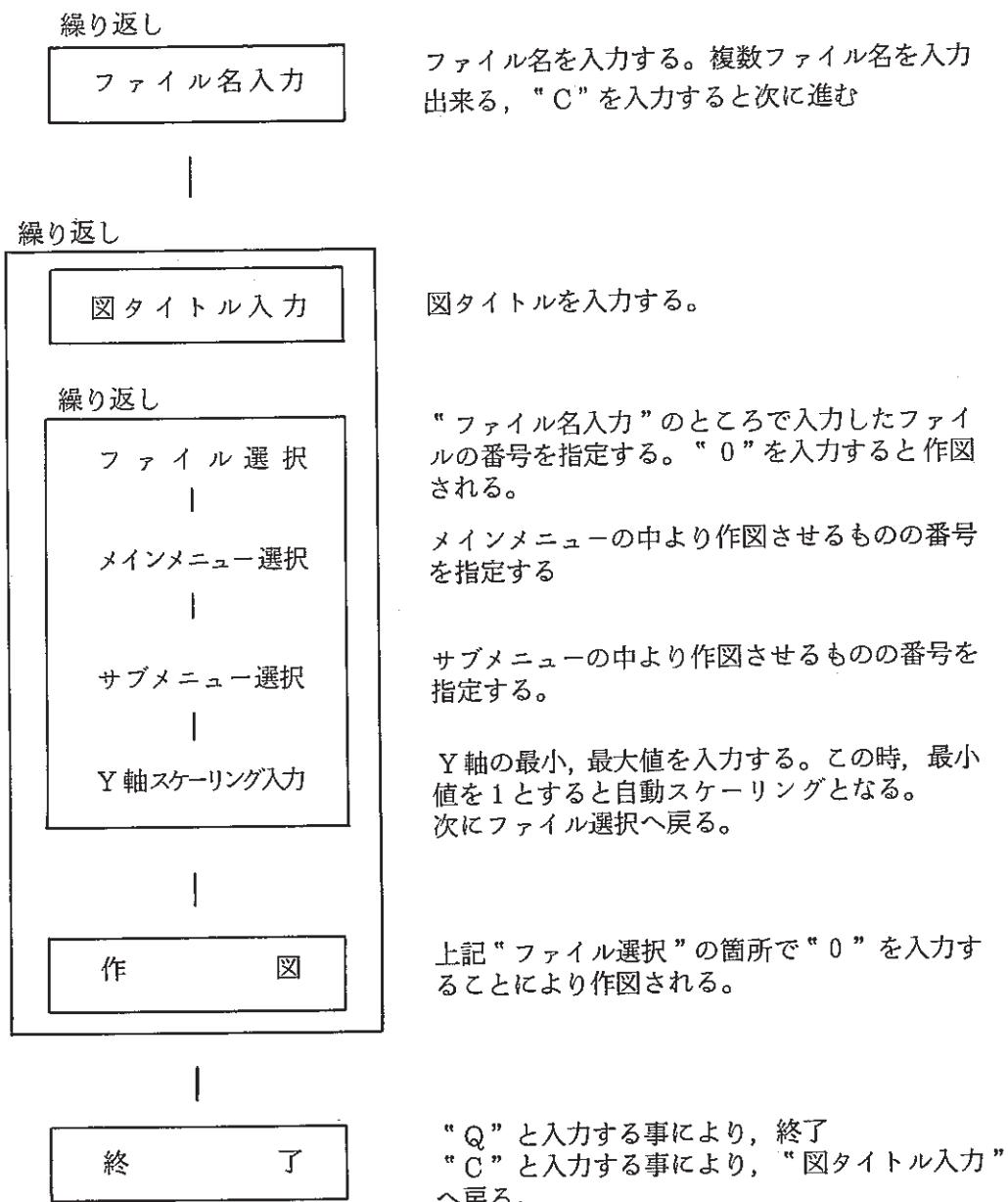


作図プログラムのプロットルーチンは標準カルコンプロッター用ルーチンで書かれている。従ってオブジェクトモジュールをLINKする時に、

“SYS 9. TTYPLOT”

をLINKすれば、テクトロニクス4014型ディスプレイで作図する事が出来る。

作図命令は下記の様な層構造になっている。



Appendix - B 試計算の入力データ

SPM Input for
HEDL AB-1.
(Sec.3.2.1)

```
*.*.+....1....+....2....+....3....+....4....+....5....+....6....+....7...
1 SPM VER 1.3 HEDL CHECK (CASE#4: FOR SN REPORT) AUG. 1 1985
2 &NINP
3 NSTEP=99999, NPRINT=-50, NPLOT=20, NPOOL=4, IWALL=1*5, ITRHX0=30,
4 IWCON=5*1, ITRHX0=30, IRUN=1, IPLT=1, ISNP=0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0
5
6 TPINT=600, TGINT=26.5, TWINT=1*26.5, PGINT=125.E3, Xoint=.22,XHINT=0,
7 TOUT=25, FFL=0.6, FNA202=1.0,
8
9 IPOOL=.139, APOOL=4.4, AWALL=1*520, IWALL=1*.0252971, ILENG=1*20.3,
10 ILENG=5*20.3, VCELL=850,
11
12 FRDFS=0.5, FRDFG=0.65, FRDFW=1*.0, FRDSG=.0, FRDSW=1*.0,
13 FRDWW=25*0, FRDGW=1*.0.5, FRDWO=5*0.5,
14
15 RAHNA=6.246E-2, RAHWL=1*5.350E-2,
16 CPNA=1.2938, CPNAX=1.382, CPNAY=1.391,
17 CP02=.9333, CPH20=1.890, CPH2=14.441,
18 TCNA=5.972E-5, TCWL=1*1.47222E-5, HWCFA=1*.021, HWCFB=1*.4,
19 HWOCFA=5*.021, HWOCFB=5*.4,
20
21 DT=1, THAX=3600, ERRO=1.E-3, ERRO=1.E-3, PHI=1,
22 &END
```

SPM Input for
FAUNA F5
(Sec.3.2.2)

```
*.*.+....1....+....2....+....3....+....4....+....5....+....6....+....7...
1 SPM VER 1.3 FAUNA F5 (CASE#3: FOR SN REPORT) AUG. 1 1985
2 &NINP
3 NSTEP=99999, NPRINT=-200, NPLOT=66, NPOOL=4, IWALL=3*5, ITRHX0=30,
4 IWCON=5*1, ITRHX0=30, IRUN=1, IPLT=1, ISNP=0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0
5 NA2CON=1,
6
7 TPINT=480, TGINT=25, TWINT=3*25, PGINT=101012, Xoint=.234,XHINT=0,
8 TOUT=25, FFL=0.6, FNA202=1.0,
9
10 IPOOL=.2247, APOOL=2, AWALL=115.5,2*30.3, IWALL=3*16E-3,
11 ILENG=5.919,2*6.212, ILENG=5.919,2*6.212, VCELL=220,
12
13 FRDFS=0.5, FRDFG=0.65, FRDFW=5*.0, FRDSG=.0, FRDSW=5*.0,
14 FRDWW=25*0, FRDGW=5*.0.5, FRDWO=5*.0.5,
15
16 RAHNA=6.246E-2, RAHWL=5*.053501,
17 CPNA=1.2938, CPNAX=1.382, CPNAY=1.391,
18 CP02=.9333, CPH20=1.890, CPH2=14.441,
19 TCNA=5.972E-5, TCWL=5*1.47222E-5, HWCFA=.021,2*.14, HWCFB=.4,2*.333,
20 HWOCFA=.021,2*.14, HWOCFB=.4,2*.333,
21
22 DT=.5, THAX=6600, ERRO=1.E-3, ERRO=1.E-3, PHI=1,
23 &END
```

SPM Input for
FAUNA F6
(Sec.3.2.2)

```
*.*.+....1....+....2....+....3....+....4....+....5....+....6....+....7...
1 SPM VER 1.3 FAUNA F6 (CASE#3: FOR SN REPORT) AUG. 1 1985
2 &NINP
3 NSTEP=99999, NPRINT=-200, NPLOT=66, NPOOL=4, IWALL=3*5, ITRHX0=30,
4 IWCON=5*1, ITRHX0=30, IRUN=1, IPLT=1, ISNP=0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0
5 NA2CON=1,
6
7 TPINT=480, TGINT=25, TWINT=3*25, PGINT=101012, Xoint=.234,XHINT=0,
8 TOUT=25, FFL=.6, FNA202=1.0,
9
10 IPOOL=.097008, APOOL=4.9, AWALL=115.5,2*30.3, IWALL=3*16E-3,
11 ILENG=5.919,2*6.212, ILENG=5.919,2*6.212, VCELL=220,
12
13 FRDFS=0.5, FRDFG=0.65, FRDFW=5*.0, FRDSG=.0, FRDSW=5*.0,
14 FRDWW=25*0, FRDGW=5*.5, FRDWO=5*.5,
15
16 RAHNA=6.246E-2, RAHWL=5*.053501,
17 CPNA=1.2938, CPNAX=1.382, CPNAY=1.391,
18 CP02=.9333, CPH20=1.890, CPH2=14.441,
19 TCNA=5.972E-5, TCWL=5*1.47222E-5, HWCFA=.021,2*.14, HWCFB=.4,2*.333,
20 HWOCFA=.021,2*.14, HWOCFB=.4,2*.333,
21
22 DT=.5, THAX=3600, ERRO=1.E-3, ERRO=1.E-3, PHI=1,
23 &END
```