

JAERI-M

7447

数値実験によるBWR・LOCA時における  
燃料棒被覆管の最高表面温度と最大酸化  
層厚さについての統計学的研究

1977年12月

下桶敬則・松本 潔・武 弘司\*・坂野和雄

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

数値実験による BWR・LOCA 時における燃料棒被覆管の  
最高表面温度と最大酸化層厚さについての統計学的研究

日本原子力研究所 東海研究所  
安全性試験研究センター 安全解析部  
下桶敬則・松本 潔・武 弘司\*・坂野和雄

(1977年11月25日受理)

軽水炉の LOCA 時の安全評価計算に使用されている保守的なモデルを統計学的に評価するために、代表的な BWR の LOCA 時に生ずる燃料棒被覆管の最高表面温度と最大酸化層厚さの確率分布を数値実験によって求める方法を研究した。使用した計算コードは BWR・LOCA 時の燃料ヒート・アップ挙動解析用の MOXY-EM である。

この数値実験は、使用する計算コードの総合感度解析 (Uncertainty Analysis) ともいえるもので、無数の入力の組合せが考えられる。しかし、すべての組合せについて計算するのは経済的にも時間的にも不可能なので、計算機の利用回数を少なくするために、直交表を用いた実験計画法を援用した。

そして、わずか 100 回程度の数値実験から、BWR・LOCA 時の燃料棒被覆管の最高温度と最大酸化層厚さの統計的分布を得ることができた。ここでは、最高表面温度は正規分布に、最大酸化層厚さは対数正規分布に従うことが同定できた。

さらに、実験結果の分散分析から、LOCA 現象の各要因の被覆管最高表面温度への効果の大きさ、また重回帰分析から、被覆管最高表面温度、最大酸化層厚さを従属変数、各要因を独立変数として表わした回帰式が得られた。

---

\* 株式会社数値解析研究所

Statistical Studies on the Peak-Clad-Temperature and  
Cladding Oxidation Thickness in Loss-of-Coolant  
Accidents by Numerical Experiments for Typical Boiling  
Water Reactor

Takanori SHIMOOKE, Kiyoshi MATUMOTO, Hiroshi TAKE\*  
and Kazuo SAKANO

Division of Reactor Safety Evaluation, Reactor Safety  
Research Center, Tokai Research Establishment, JAERI

(Received November 25, 1977)

In evaluation of the conservative models to examine the emergency core cooling system of LWR, we have studied a numerical experiment method giving the probability distributions of peak-clad-temperature and maximum cladding oxidation thickness, which occur following a loss-of-coolant accident of typical BWR, using computer program MOXY-EM, a fuel heat-up analysis code for BWR.

The numerical experiment is so-called uncertainty analysis of computer program, in which number of computer runs corresponding to the number of sets of input data are involved. Treating all the sets, however, is expensive and time-consuming, so we used the experimental design using orthogonal arrays to reduce the number of runs.

From the small number of runs, we could obtain the right statistical distribution of peak-clad-temperature and maximum cladding oxidation thickness. The peak-clad-temperature was statistically found to distribute normally, and the maximum cladding oxidation thickness to obey a log-normal distribution.

Analysis of variance of the experimental data gave the degrees of factorial effects on the peak-clad-temperature, and multiple regression analysis the regression equations of peak-clad-temperature and of maximum cladding oxidation thickness in terms of important physical variables.

Keywords: BWR, LOCA, ECCS, MOXY-EM Code, Numerical Experiment, Experimental Design, Orthogonal Array, Peak-Clad-Temperature, Cladding Oxidation Thickness, Probability Distribution

---

\* Japan Advanced Numerical Analysis

## 目 次

1. はじめに .....	1
2. BWR・LOCA時の炉心ヒート・アップ挙動 .....	2
2.1 MOXY-EM コードについて .....	2
2.2 MOXY-EM で計算された BWR・LOCA 時の炉心ヒート・アップ挙動 .....	2
3. 数値実験 .....	7
3.1 因子の決定 .....	7
3.2 直交表を用いた実験計画法 .....	8
3.3 水準数の決定 .....	8
3.4 直交表わりつけ .....	8
3.5 入力データ作成と計算実行 .....	10
4. 分散分析 .....	27
5. 重回帰分析 .....	41
6. 分布形の推定 .....	43
6.1 最高被覆管表面温度の分布形 .....	43
6.1.1 少数回計算により得られた分布形 .....	43
6.1.2 多数回計算から得られた分布形 .....	43
6.1.3 最高被覆管表面温度の分布から得た各種数値 .....	44
6.2 最大被覆管酸化層厚さの分布形 .....	44
6.2.1 少数回計算から得られた分布形 .....	44
6.2.2 多数回計算から得られた分布形 .....	45
7. 最高被覆管表面温度と最大被覆管酸化層厚さの統計的關係 .....	53
8. まとめ .....	56
参考文献 .....	58
謝 辞 .....	57

## CONTENTS

1. Introduction .....	1
2. Core Heat-up Behaviour of a Typical BWR at a Postulated LOCA .	2
2.1 MOXY-EM Code .....	2
2.2 Core Heat-up Behaviour of a Typical BWR at a Postulated LOCA Calculated by MOXY-EM .....	2
3. Numerical Experiment .....	7
3.1 Decision of Factors .....	7
3.2 Design of Experiments by Orthogonal Array .....	8
3.3 Decision of the Number of Levels for Factors .....	8
3.4 Layout of Orthogonal Array .....	8
3.5 Input Data and Calculation by MOXY-EM .....	10
4. Analysis of Variance .....	27
5. Multiple Regression Analysis .....	41
6. Estimation of Probability Distributions .....	43
6.1 Probability Distribution of Peak Clad Temperature .....	43
6.1.1 Probability Distribution Obtained from the Small Number of Calculations .....	43
6.1.2 Probability Distribution Obtained from the Large Number of Calculations by Regression Equation .....	43
6.1.3 Statistical Values Obtained from Probability Distribution of Peak Clad Temperature .....	44
6.2 Probability Distribution of Cladding Oxidation Thickness ...	44
6.2.1 Probability Distribution Obtained from the Small Number of Calculations .....	44
6.2.2 Probability Distribution Obtained from the Large Number of Calculations by Regression Equation .....	45
7. A Statistical Relation between Peak Clad Temperature and Cladding Oxidation Thickness .....	53
8. Conclusion .....	56
Reference .....	58
Acknowledgment .....	57

## 1. はじめに

軽水炉のLOCA時の安全評価計算は保守的に、すなわち、仮定、データ、変化量の組合せ等を十分な安全裕度をもつ結果になるように選択して行なわれる。ところで、このような保守的な安全評価計算の結果得られる燃料棒被覆管表面温度、被覆管酸化層厚さ等の最高値は、LOCA現象が実際に起きた場合にとりうるそれらの値の中のどの辺に位置づけられるのだろうか。

それに答えるには、実際の原子炉を使用して実験を行い、その結果と比較できれば最も望ましい。しかしそれは事実上不可能である。そこで考えられるのが数値実験である。様々な条件で数値実験を行い、LOCA時に生ずる燃料棒被覆管の最高表面温度、最大酸化層厚さの統計的確率分布等を求め、さらには、統計学的にECCSの機能や安全評価計算モデルの評価をするのである。

安全評価計算用の計算機プログラム・コードによって得られる値を特性値 $F$ とし、各種のパラメータ、入力データ等を $X_1, X_2, \dots$ とすると、

$$F = F(x), \quad x = \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ \vdots \end{pmatrix}$$

と表わすことができる。

ここで $X_1, X_2, \dots$ をある範囲内で変化させたとき、あるいはある確率分布をもって自然に変化したとき、特性値 $F$ のバラツキや平均値に及ぼす $X_1, X_2, \dots$ の効果がどのようなかを数値実験によって得たいということである。一つの入力に対する結果の感度を見る感度解析(Sensitivity Analysis)に対し、これを総合感度解析、またはバラツキ解析(Uncertainty Analysis)と呼ぶ。

この数値実験はコンピューター・プログラムを使用して行うのであるが、必要な情報を得るためには、膨大な回数の計算を必要とするので、これを何か有効な手法でその回数を減少させ、経済的に情報を得なければならない。<sup>(1)(2)</sup>

その手法の開発と確立を本研究の目的の1つとして、BWR・LOCA時の炉心ヒート・アップ挙動を計算するMOXY-EMプログラム・コードを使用してこのバラツキ解析を試みた。直交表を用いた実験計画法によって数値実験の計画をたて、約100回の実験により特性値の分布形の推定、要因効果の定量的把握および特性値の要因間と重回帰式の推定等を行うことができた。

この成果の一部はすでに米国原子力学会誌に<sup>(3)</sup>発表した<sup>(3)</sup>が、ここでは、用いた実験計画法の詳細な記述の他に、結果の分析および検討については未発表分のものを追加し、我々の実施した研究の成果の全体を報告することとした。

以下第2章で計算に使用したMOXY-EMコード、BWR・LOCA時のヒート・アップ現象の紹介、第3章で数値実験の計画の方法と実施について、第4章では数値実験結果の分散分析、第5章では同じく重回帰分析について述べ、第6章で燃料棒被覆管の最高表面温度、最大酸化層厚さの分布形の推定を行い、第7章ではこれらの分布から得られた種々の数値について示し、最後に第8章にまとめを記した。

## 2. BWR・LOCA時の炉心ヒート・アップ挙動

### 2.1 MOXY-EMコードについて

MOXY-EM<sup>(4)</sup>コードは米国原子力規制委員会(NRC)より導入したWREM<sup>(5)</sup>(Water Reactor Evaluation Model)コード群の中においてBWRのLOCA時の炉心ヒート・アップ解析を担うものである。

このコードによる計算結果で注目する値は、燃料棒被覆管表面最高温度PCT(Peak Clad Temperature)と燃料棒被覆管酸化層最大厚さCOT(Cladding Oxidation Thickness)である。そして、このコードを動かすのに必要な入力は以下のものである。

- 1) 定格出力, 出力減衰曲線
- 2) 集合体及び燃料棒の形状
- 3) チャンネル, 軸方向, ローカル 各ピーキング係数
- 4) 被覆管破裂温度
- 5) 被覆管表面輻射率
- 6) 被覆管破裂時のふくれ割合
- 7) ギャップ熱伝達係数初期値(Hgap)
- 8) 金属・水反応係数
- 9) 下部プレナム・フラッシング終了(断熱開始)時刻
- 10) 炉心スプレー定格流量到達時刻
- 11) チャンネルボックス濡れ時刻
- 12) 再冠水時刻
- 13) 冷却材温度
- 14) 表面熱伝達係数
- 15) 燃料・被覆管ギャップ・ガス組成, 圧力等々。

### 2.2 MOXY-EMで計算されたBWR・LOCA時の炉心ヒート・アップ挙動

今回のバラツキ解析の対称となるBWR・LOCA時の炉心ヒート・アップ挙動を、MOXY-EMコードで計算されたものについて概略を示す。この例題の大部分の入力は実際にバラツキ解析を行うときにも使用される。

炉心ヒート・アップ挙動の解析は、非常用炉心冷却装置の性能評価のために行われるのであるが、この解析にあたり、事故としては、一次系ループの再循環ポンプの吸込口側配管の大破断による冷却材喪失事故(LOCA)を想定している。また対象となる原子炉は、110万KWe級の7×7型燃料集合体装荷のBWRである。

詳しい入力データは、第3章の入力データ作成の項で述べることにして、ここでは入力のうち、ブロー・ダウン現象から決まる冷却条件を直接表わしている表面熱伝達係数についてFig. 1に示す。そしてMOXY-EMコードで計算された燃料棒被覆管表面温度、被覆管酸化層厚さについ



て、それぞれ Fig. 2, Fig. 3 に示す。

Fig. 2 により、被覆管表面温度の変化を見ながら現象を追ってみよう。Fig. 2 を見ると、破断後 22 秒までは Fig. 1 の熱伝達係数の変化（核沸騰→膜沸騰→下部プレナム・フランシング）に従って変化している。下部プレナム・フラッシングの終了する 22 秒から熱伝達係数は 0 となり、これからの期間、冷却に寄与するのは輻射のみになるので、被覆管表面温度は著しく上昇する。破断後 40 秒で炉心スプレーが定格流量に達すると再びある程度の対流熱伝達が始まるが、被覆管表面温度は上昇が若干おさえられる程度である。55 秒で被覆管表面温度は 1800 °F に達し破裂する。これは、入力で被覆管破裂温度を 1800 °F としているためである。また、MOXY-EM モデルでは、最高被覆管温度が破裂温度に達すると、全燃料棒が同時に破裂すると仮定している。155 秒で炉心スプレー水によってチャンネル・ボックスが濡れて水の飽和温度まで下がるが、中心部の燃料棒の温度上昇率を下げる効果はほとんど見られない。もちろんチャンネル・ボックスに近い周辺部の燃料棒の温度上昇はおさえられる。170.9 秒になると、計算点の高さまで再冠水が達し、水面下になるので、被覆管表面温度は急激に低下する。

次に Fig. 3 によって、ジルコニウム・水反応による被覆管酸化層の厚さを見よう。Fig. 3 には内・外面それぞれの被覆管酸化層の変化の様子が示されている。破断後、最初のうちはゆっくりと外面酸化が進むが、被覆管が破裂すると（55 秒）、内面酸化が始まり、被覆管の温度上昇率も大きいので酸化層厚さは不連続的に増加する。そしてチャンネル・ボックスの濡れ、再冠水による温度低下とともに酸化厚の増加は止まる。

今回のパラッキ解析では破断後 200 秒間における被覆管最高表面温度、被覆管酸化層最大厚さの 2 つの値を特性値として取扱う。酸化層厚さは内外面の合計値を特性値とする。

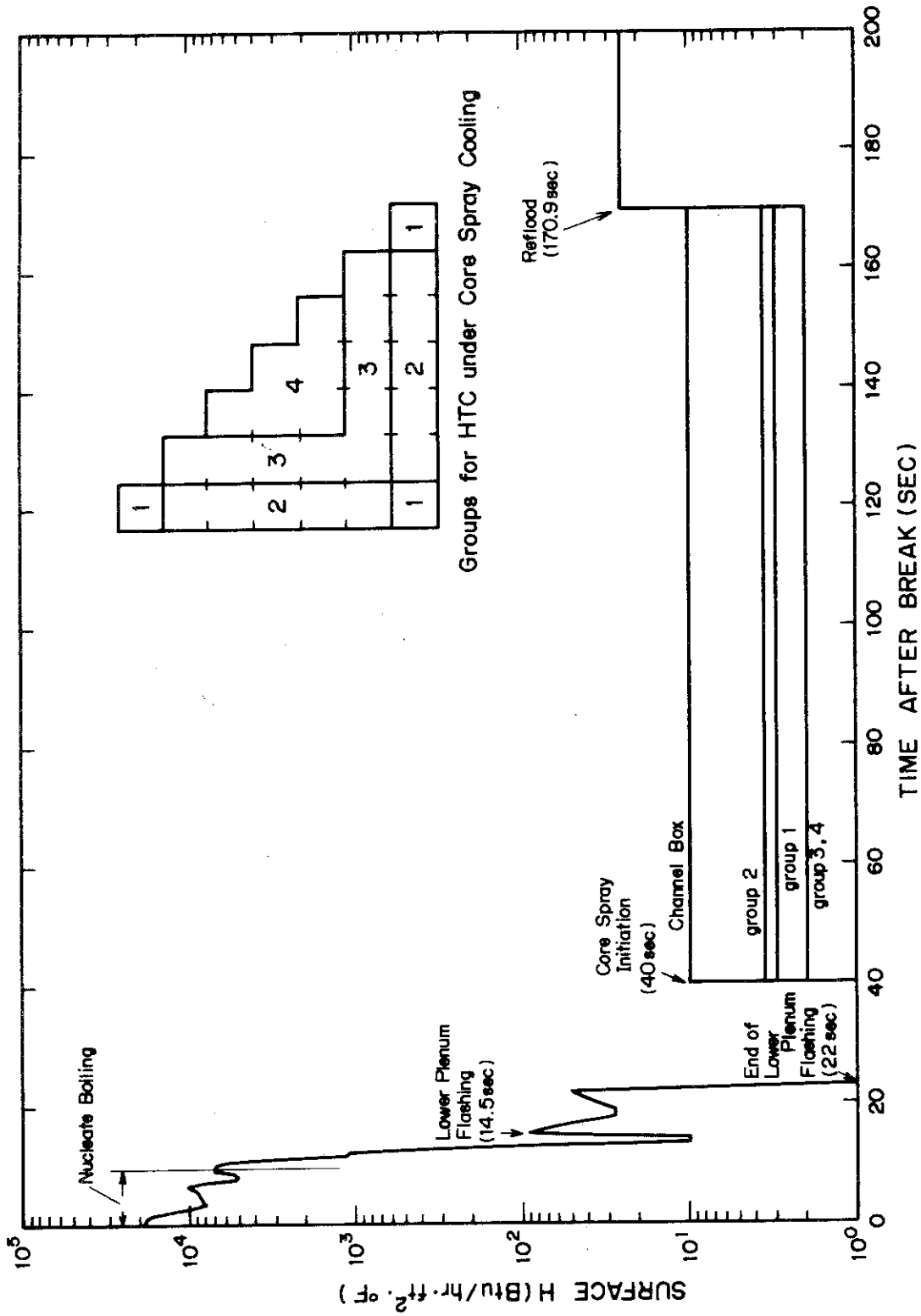


Fig. 1 Hot spot surface HTC vs. time

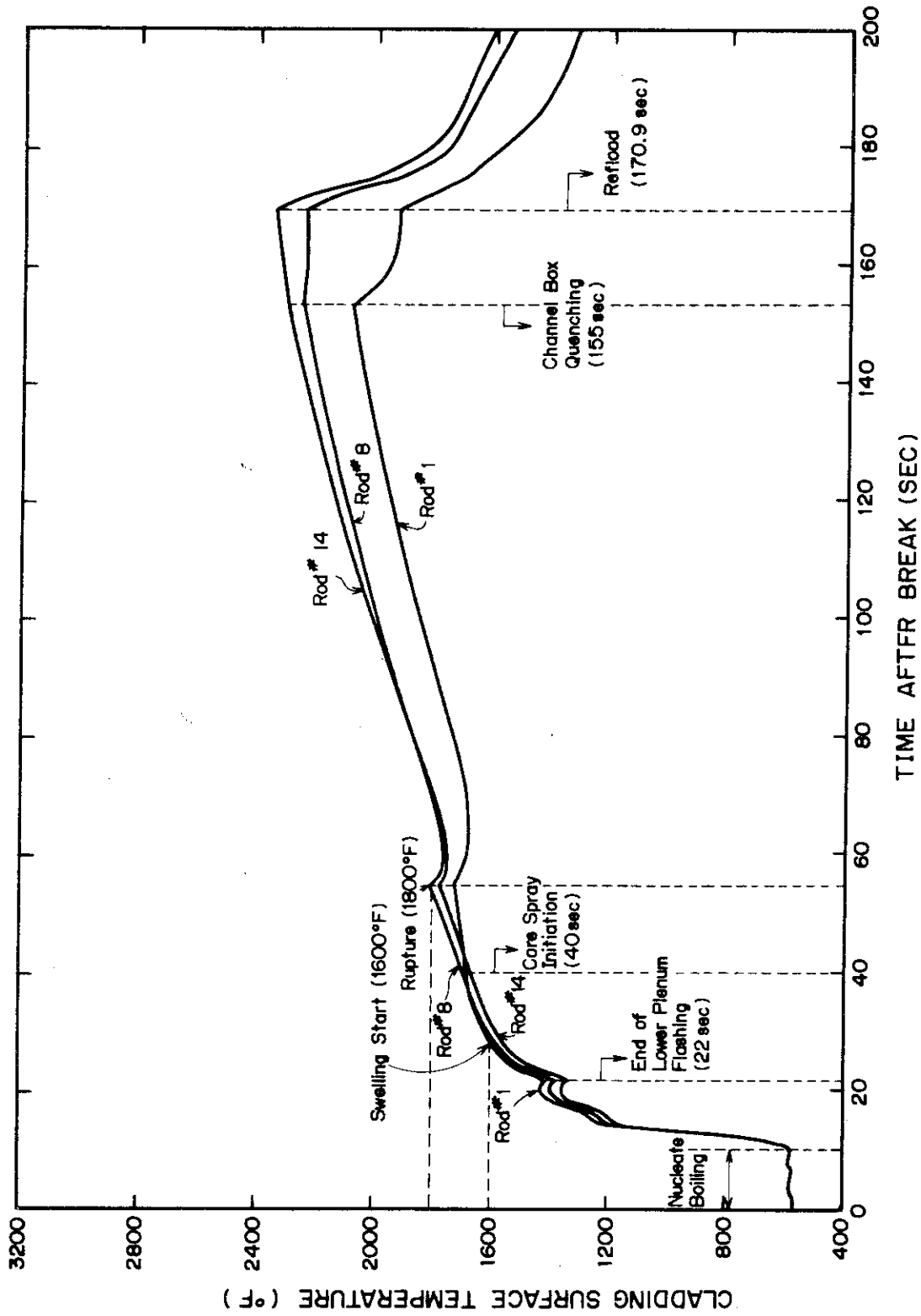


Fig. 2 Cladding surface temperature vs. time

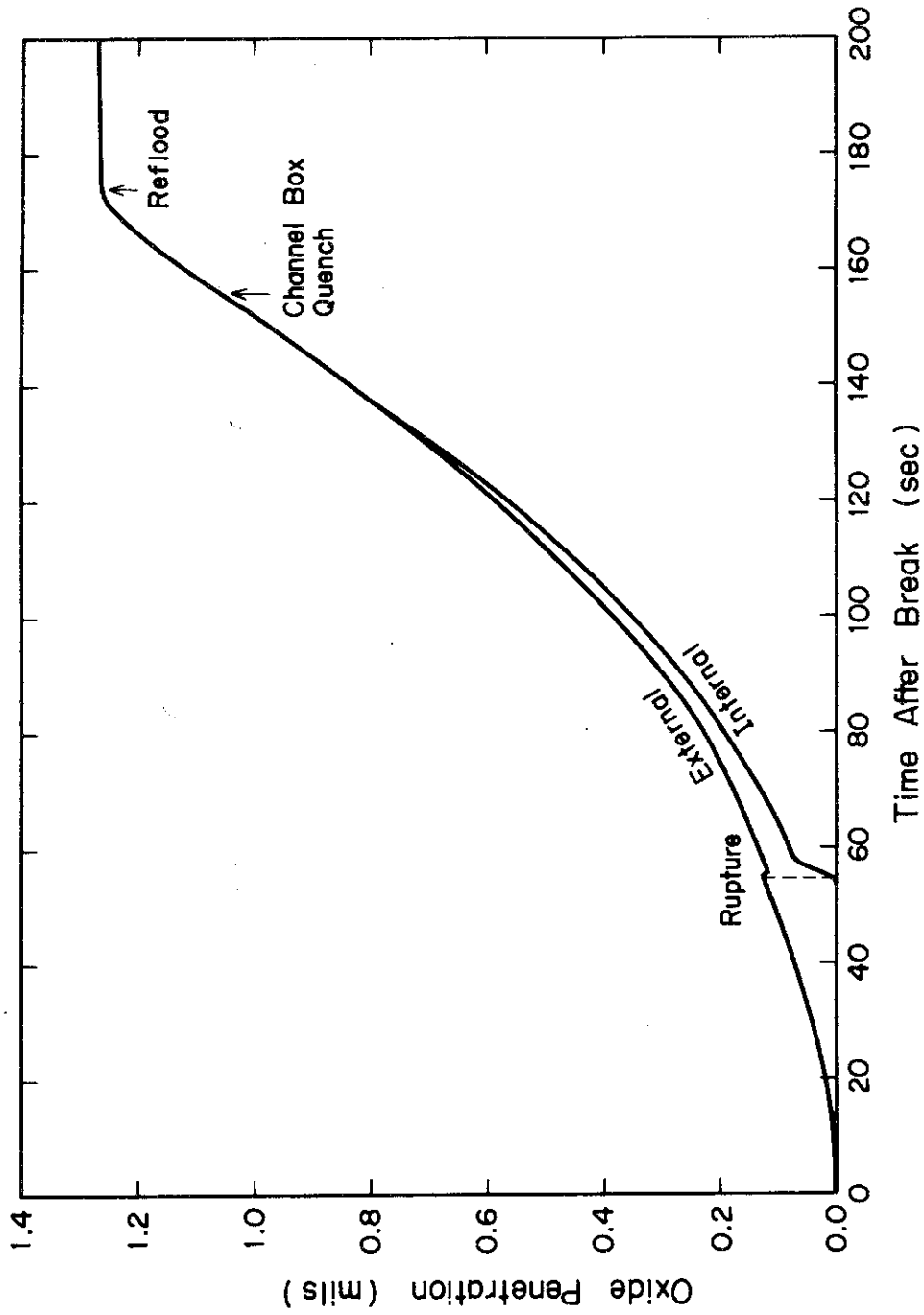


Fig. 3 Oxide penetration vs. time

### 3. 数 値 実 験

#### 3.1 因子の決定

数値実験に使用する MOXY-EM コードの入力データのうちバラツキ解析に使用するもの(因子)は、特性値(最高被覆管表面温度、最大被覆管酸化層厚さ)を従属変数と考えたとき、独立変数として取扱えるものでなければならない。しかし、炉心ヒート・アップ現象を考えたとき、完全に独立変数とすることのできる入力はほとんどないといえる。そこで、比較的特性値に直接影響を及ぼすと考えられる入力で、しかも時系列でないものの中から6種類を因子として選んだ。そしてそれらの因子がとりうる上限、下限の値は、MOXY-EM が安全評価用の保守的なモデルを使用したコードであることや、NRC による感度解析<sup>(6)</sup>、その他実験データ等を参考に Table 1. のように決定した。この6個を除く他の入力データは2.2で述べた例題と同じ値に固定した。ただしローカル・ピーキング係数はすべて1.0とした。

ここで、因子D、Fについて説明を加える。

因子D(ギャップ熱伝達係数初期値)は他の因子と異なった入力の方法をとっている。ギャップ熱伝達係数を決定する要因としては、照射歴、ペレット半径、ギャップ・ガス組成、ギャップ・ガス圧力等々が考えられる。しかし、MOXY-EM コードで計算するとき、ギャップ熱伝達係数を時々刻々変化させるためには、その初期値から内蔵計算をしなければならないので、ギャップ熱伝達係数の初期値そのものを入力することはできないのである。すなわち、実際に入力する値は上に述べた各要因である。そこで、この初期値を任意に与える方法として、照射歴やギャップ・ガス圧力等は固定してペレット半径を変化させることにした。これは、ギャップ熱伝達係数を決める各要因が独立でなく、またこれらの要因はMOXY-EM コードでは、ギャップ熱伝達係数の計算のみに使用されているので、このような大胆な手段を使えるのである。

また因子F(炉心スプレー中の熱伝達係数)はバンドル内で1つの値ではなく、Fig. 4に示す安全評価計算用のモデルを使用し、このモデルでの値  $3.0 \text{ Btu/hr}\cdot\text{ft}^2\cdot^\circ\text{F}$  を  $3.0\sim 6.2$  の範囲で変化させ、他の領域の値はこのモデルと同じ割合で、比例させた値を与えた。例えば、 $F = 4.0$  のとき、角の燃料棒には  $4 \times 3.5 / 3.5$  を、中心領域の燃料棒には  $4 \times 1.5 / 3.5$  ( $\text{Btu/hr}\cdot\text{ft}^2\cdot^\circ\text{F}$ ) というようにしている。

こうして決定された因子6個を様々に変化させて、MOXY-EM コードによる数値実験を行い、結果のバラツキ具合を調べることにした。ところが、この6個の因子を各々の範囲内で変化させると、その6個の因子による組合せは無数にあり、どのような組合せの実験を合計何回行ったら目的とする特性値の分布が得られるのだろうか。ただ適当な値を各因子からピック・アップして組合せても莫大な数の実験回数になってしまう。より経済的に、すなわち少ない実験回数で、目的を達成させる方法はないものか。

そこで、ここに採り上げた方法が、生産工場の品質管理等で多くの実績を上げている直交表を用いた実験計画法である。<sup>(7)</sup>

### 3.2 直交表を用いた実験計画

実験計画法そのものについての分類体系や詳細な計画手順等は、通常の教科書に詳しいのでここでは省略する。

実験計画法の歴史と概要については、例えば文献(8)を参照されたい。また、要因配置法における一部実施の概念を発展させ、多元配置実験の膨大な水準組合せの中から効果を推定するものみの実験を行おうとする“直交表を用いた実験計画法”については、文献(7)に詳しい。

計算機によるシミュレーションが一種の実験である以上、当然ながら実験計画法における諸技術が役立つ。

### 3.3 水準数の決定

MOXY-EMコードの入力の中から6個の因子を選んだわけであるが、直交表を用いて実験計画をたてるためにそれぞれの因子の水準数を決めなければならない。各因子について若干の感度解析を行ない、1つの水準内の因子の変動によって得られる最高被覆管表面温度の変化が約20°Fになるように水準数を決めた。その結果をTable 1の水準数(Number Levels)の欄に示す。そして、このときの各水準に対応する各因子の上限、下限をTable 2に示す。

各因子の水準数と、それに対応した数値の範囲が定まった段階で、その範囲を代表する数値をどのように定めたらよいかという点について考える。

第1に、例えば範囲の中心の値をとることが自然であろう。この方法で特性値の分布を求めたり、各因子の変動が特性値の変動に及ぼす影響を評価することはできるが、各因子が各水準に対応した中心値以外の値をとった場合の保障が得られない。また、計算機実験であるため実験誤差は存在しないから、分散分析表の誤差項の扱いは普通の実験の様に行なうことはできない。

第2に、この範囲に一様乱数を対応させ、ランダムに数値を定めることが考えられよう。この方法は1因子1水準当り最低10回程度の繰り返しが必要であろうから実験回数が少ない場合は使えないが、第1の方法の持つ欠点をカバーしてくれる。本実験では、第2の方法を用いた。

### 3.4 直交表わりつけ

直交表<sup>(7)(9)</sup>には2水準系と3水準系とが用意されている。今回の場合、因子E以外はすべて2水準系に直接わりつけることができる。よって直交表は2水準系のもを使用し、因子Eについては一部追加法を用いて2水準系にわりつけることができる。

さて、直交表は2水準系と決まったが、その中のどの直交表を使用するかはこの実験から得ようとする情報の数、すなわち自由度の合計によって決まる。自由度についてTable 3に示した。ここで、1つの因子の水準の違いによる効果のうち、他の因子に影響される部分を交互作用という。交互作用には、2因子交互作用の他に3因子、4因子……の交互作用があるが、3因子以上の交互作用はないものと仮定する。

Table 3より、自由度の合計は118であるが、2因子交互作用について明らかにないもの、無視できる程度と予想されるものを除くことによって減らすことができる。そこで2つの因子を変化させた簡単な計算を行い、2因子交互作用としてB×E, C×E, D×E, E×Fの4つを選んだ。他の交互作用は無視できるものと仮定した。その結果自由度の合計は66となる。

次に因子Eの取り扱いについて述べる。Eの自由度は5であり、他の4つの因子との交互作用が必要とされている。このような因子の取扱い方について文献(7)ではいくつかの方法を用意している。ここではそのうちの一つである一部追加法を採用する。その考え方は次の通りである。

まず6水準の因子Eを4水準としてしまって2水準系の直交表にわりつける。すなわち、第1～第4水準の実験を行う。次に、同じわりつけて因子Eの第1, 2, 5, 6 (あるいは第3, 4, 5, 6) 水準について実験を行うのであるが、重複する水準についての実験は省略する。結果の解析では、重複した水準のデータは2倍にして用い、4水準の因子Eの実験を2回行ったとするのである。したがって、因子Eと他の因子との直交性は保たれる。

Eを4水準として自由度を計算しなおすと、

$$1 + 3 + 1 + 3 + 3 + 3 + 9 + 3 + 9 + 9 = 44$$

A    B    C    D    E    F    B×E B×E C×E E×F

となり、2水準系の直交表では $L_{64}$ と使用することになる。 $L_{64}$ をTable 4に示す。

直交表は、複雑な使い方をする場合に欠かせない線点図の用意されている“田口の表”<sup>(10)</sup>を用いることにする。4水準因子間の交互作用が3個必要とされるから、線点図はFig. 5に示す型のものを用いる。

この線点図から $L_{64}$ の63列を次のように使う。

E	1	2	3
B	16	32	48
D	20	40	60
F	24	42	52
C	28		
A	15		

ここで、4水準のもの、例えばBについて説明すると次のようになっている。直交表は数字1と2の組合せであるから、2つの列を使えば4水準を表わすことができる。よって、Bは16, 32列にわりつけたわけである。ところが、16と32列の交互作用の現われる48列には他の因子をわりつけることができない。したがってBをわりつける列が、16, 32, 48列になるわけである。また、交互作用の現われる列は次のようになる。(Table 5 参照のこと。)

B×E	17, 18, 19, 33, 34, 35, 49, 50, 51 列
D×E	21, 22, 23, 41, 42, 43, 61, 62, 63 列
E×F	25, 26, 27, 45, 46, 47, 53, 54, 55 列
C×E	29, 30, 31, 列

上記の列以外は全部誤差となる。すなわち、誤差の自由度は  $63 - 44 = 19$  である。

計算回数(実験回数)は、Eを4水準として2回とっているので  $64 \times 2 = 128$  回である。しかし、Eの第1, 2水準は組合せが重複するので、これには1回目の結果を2回目にも使用することにし、その結果計算回数は  $64 + 64/2 = 96$  回となる。

次に、各因子をわりつけた列を使って、その因子の水準をわりつける。例えばBについては次のようになる。16列と32列を使って数字1～4をつくる。

列	16	32	
	1	1	→ 1
	1	2	→ 2
	2	1	→ 3
	2	2	→ 4

他の因子についても同様にわりつけた列を使って数字をつくる。そして、その数字に従って各因子の水準をわりつけるのであるが、数字とそれにわりつける水準の並びとの対応は全く自由である。

今回は、3組の実験を計画したが、わりつけの数字に対するそれぞれの実験における水準の対応は Table 6 に示すようになってきている。この対応に従ってつくられた水準わりつけ表は、実験第1, 2組について示すと Table 7 のようになる。

実験を3組計画したのは、以下の理由による。まず第1に、実験第1, 2組と第3組とは水準のわりつけが異なる。すなわち直交表は同じものを用いているが、わりつけ表が異なっているため、この違いが結果に及ぼす影響を見ようというわけである。次に、実験第1組と第2組との違いであるが、3.3節で述べたように、各水準の中で因子の値をランダムにサンプリングをした場合、そのランダム・サンプリングの方法を変えるための2組である。これによって、ランダム・サンプリングの違いが結果に及ぼす影響を見ることができよう。

ランダム・サンプリングの方法は次のようにした。まず0~1の間で乱数を発生させ、その並びを作っておく。そして、計算No.1のA, B, ……F, No.2のA, B, ……F, ……という順にその乱数を対応させ、Table 8 に示すように、因子によって、そのときの乱数から00~99 または000~999(四捨五入によって)とするRをつくる。そしてその水準の区間内でRによる比例配分で因子の値を決定するのである。実験第1組と第2組とは、0~1の間で発生させた乱数の並びが異なるのである。

### 3.5 入力データ作成と計算実行

前項3.4で決定した各因子のわりつけに従って、MOXY-EMコードの入力データを作成する。入力データのうち6個の因子以外については次に述べる値(各計算で共通)を使用している。

対象とする原子炉は、BWR 定格出力(100%)3293 MWth, 燃料集合体の数764, 集合体内燃料棒49本(計算は対角線対称として28本について行う), その有効長12フィート, チャンネル・ピーキング係数, 軸方向ピーキング係数はそれぞれ1.33, 1.487, ローカル・ピーキング係数はすべて1.0である。また, 被覆管半径0.28145インチ, 被覆管厚さ0.032インチ, ロッド・ピッチ0.738インチ, チャンネル・ボックス内側一辺の長さ5.278インチ, チャンネル・ボックス厚さ0.08インチである。その他計算条件となる入力データの主なものは次の通りである。

燃料棒, チャンネル・ボックスの輻射率	0.67
スウェリング開始温度	破裂温度 - 200 °F
被覆管ふくれ割合	ロッド・ピッチ $\times \frac{1}{2}$
金属・水反応における酸化係数	1.0
下部プレナム・フラッシング終了時刻	22.0 秒



出力減衰曲線

Fig. 6

冷却材温度

Fig. 7

炉心スプレー開始までの燃料棒、チャンネル・ボックスの熱伝達係数 Fig. 8 参照

次に、A, B, …… , F 6個の因子の実際に入力する値を決定する。なお、これからの計算はすべて、原研に設置されている FACOM 230-75 システムの端末装置 TSS (Time Sharing System) の CPS (Conversational Programming System) を使用したバッチ処理で行った。

一組の実験に 96 通りの組合せがある。そして各因子は水準の区間内でランダムな値をとらなければならない。乱数は、FACOM の SSL に用意されているサブルーチン RANDOM を使用し、また入力データ作成用に作ったプログラム SETUP を 1 回実行させることによって、96 個の MOXY-EM 用の入力データがディスク・ファイルに登録される。プログラム SETUP の入力データは先に決定した 6 行 96 列のわりつけ表そのものである。実験第 1 組と第 2 組とはわりつけ表が同じであるが、サブルーチン RANDOM を呼ぶときの初期値を変更することによって異なる入力データが得られる。

ここで、因子 F (炉心スプレー中の熱伝達係数) の入力データは他の因子と性質を異にしている。すなわち、F は MOXY-EM コードの中では EM モデルの定数としてサブルーチン GEHT で与えている。MOXY-EM の入力仕様を変更するには、かなりの作業量を必要とするので、この F の値がその都度変更できるように MAIN プログラムとサブルーチン GEHT を改造した。

また、出力リストは、後の解析に必要なデータのみ入力に応じて出力が行われるような処置を行った。これらの入力データの作成は、以上のことがらをも含めて、すべてプログラム SETUP で行っている。

以上のようにして作られた入力データで、MOXY-EM コードによる計算を実行し数値実験を行った。

尚、MOXY-EM コード 1 回の実行時間は、CPU Time にして約 10 分であった。各組の実験についての計算結果とそれぞれの因子の入力データを Table 9, 10, 11 に示す。

Table 1

BWR・LOCA の統計的研究のために選んだ変数とその仮定した変動範囲

変数 (因子)		変動範囲	水準数
記号	内容		
A	炉心スプレー定格流量到達時刻	35.0 ~ 45.0 (秒)	2
B	被覆管破裂温度	1200.0 ~ 2000.0 (°F)	4
C	山内の式で計算されたチャンネルボックス濡れ時刻からの遅れ	0.0 ~ 60.0 (秒)	2
D	ギャップ熱伝達係数初期値 <sup>a)</sup>	690 ~ 2060 (Btu/hr·ft <sup>2</sup> ·°F)	4
E	再冠水時刻 <sup>b)</sup>	114.0 ~ 174.0 (秒)	6
F	炉心スプレー冷却による HTC	3.0 ~ 6.2 (Btu/hr·ft <sup>2</sup> ·°F)	4

a) 定格運転時の値である。

b) 軸方向最大出力点 (計算点) が再冠水によって水面下になる時刻である。

Table 2 各因子の水準設定

水準 因子	1	2	3	4	5	6
A	35 ≤ A <sub>1</sub> <	40 ≤ A <sub>2</sub> <	45			
B	1200 < B <sub>1</sub> ≤	1400 < B <sub>2</sub> ≤	1600 < B <sub>3</sub> ≤	1800 < B <sub>4</sub> ≤	2000	
C	0 ≤ C <sub>1</sub> <	30 ≤ C <sub>2</sub> <	60			
D	2060 > D <sub>1</sub> ≥	1355 > D <sub>2</sub> ≥	1017 > D <sub>3</sub> ≥	820 > D <sub>4</sub> ≥	690	
E	114 ≤ E <sub>1</sub> <	124 ≤ E <sub>2</sub> <	134 ≤ E <sub>3</sub> <	144 ≤ E <sub>4</sub> <	154 ≤ E <sub>5</sub> <	164 ≤ E <sub>6</sub> < 174
F	3.0 < F <sub>1</sub> ≤	3.8 < F <sub>2</sub> ≤	4.6 < F <sub>3</sub> ≤	5.4 < F <sub>4</sub> ≤	6.2	

Table 3 各要因の自由度

要 因	水準数	自由度
A	2	1
B	4	3
C	2	1
D	4	3
E	6	5
F	4	3
A × B		3
A × C		1
A × D		3
A × E		5
A × F		3
B × C		3
B × D		9
B × E		15
B × F		9
C × D		3
C × E		5
C × F		3
D × E		15
D × F		9
E × F		15
合 計		118





Table 6 各実験における水準わりつけ

因子	直交表の 数 字	水 準 わ り つ け	
		実験第 1, 2 組	実験第 3 組
A	1	A 2	A 1
	2	A 1	A 2
B	1	B 2	B 3
	2	B 1	B 4
	3	B 4	B 1
	4	B 3	B 2
C	1	C 2	C 2
	2	C 1	C 1
D	1	D 2	D 2
	2	D 3	D 1
	3	D 4	D 4
	4	D 1	D 3
E	1	E 2	E 3
	2	E 6	E 4
	3	E 4	E 2
	4	E 1	E 6
	5	E 3	E 1
	6	E 5	E 5
F	1	F 1	F 2
	2	F 3	F 3
	3	F 4	F 1
	4	F 2	F 4

Table 7 直交表を用いた実験計画法による水準わりつけ表 (実験第1, 2組)

因子 計算No	水 準						因子 計算No	水 準					
	A	B	C	D	E	F		A	B	C	D	E	F
1	2	2	2	2	2	1	49	2	3	2	2	1	1
2	2	1	2	3	2	3	50	2	1	2	3	1	3
3	2	4	1	4	2	4	51	2	4	1	4	1	4
4	2	3	1	1	2	2	52	2	3	1	1	1	2
5	1	2	1	3	2	2	53	1	2	1	3	1	2
6	1	1	1	2	2	4	54	1	1	1	2	1	4
7	1	4	2	1	2	3	55	1	4	2	1	1	3
8	1	3	2	4	2	1	56	1	3	2	4	1	1
9	1	2	1	4	2	3	57	1	2	1	4	1	3
10	1	1	1	1	2	1	58	1	1	1	1	1	1
11	1	4	2	2	2	2	59	1	4	2	2	1	2
12	1	3	2	3	2	4	60	1	3	2	3	1	4
13	2	2	2	1	2	4	61	2	2	2	1	1	4
14	2	1	2	4	2	2	62	2	1	2	4	1	2
15	2	4	1	3	2	1	63	2	4	1	3	1	1
16	2	3	1	2	2	3	64	2	3	1	2	1	3
17	1	2	2	2	6	1	65	1	2	2	2	3	1
18	1	1	2	3	6	3	66	1	1	2	3	3	3
19	1	4	1	4	6	4	67	1	4	1	4	3	4
20	1	3	1	1	6	2	68	1	3	1	1	3	2
21	2	2	1	3	6	2	69	2	2	1	3	3	2
22	2	1	1	2	6	4	70	2	1	1	2	3	4
23	2	4	2	1	6	3	71	2	4	2	1	3	3
24	2	3	2	4	6	1	72	2	3	2	4	3	1
25	2	2	1	4	6	3	73	2	2	1	4	3	3
26	2	1	1	1	6	1	74	2	1	1	1	3	1
27	2	4	2	2	6	2	75	2	4	2	2	3	2
28	2	3	2	3	6	4	76	2	3	2	3	3	4
29	1	2	2	1	6	4	77	1	2	2	1	3	4
30	1	1	2	4	6	2	78	1	1	2	4	3	2
31	1	4	1	3	6	1	79	1	4	1	3	3	1
32	1	3	1	2	6	3	80	1	3	1	2	3	3
33	1	2	2	2	4	1	81	2	2	2	2	5	1
34	1	1	2	3	4	3	82	2	1	2	3	5	3
35	1	4	1	4	4	4	83	2	4	1	4	5	4
36	1	3	1	1	4	2	84	2	3	1	1	5	2
37	2	2	1	3	4	2	85	1	2	1	3	5	2
38	2	1	1	2	4	4	86	1	1	1	2	5	4
39	2	4	2	1	4	3	87	1	4	2	1	5	3
40	2	3	2	4	4	1	88	1	3	2	4	5	1
41	2	2	1	4	4	3	89	1	2	1	4	5	3
42	2	1	1	1	4	1	90	1	1	1	1	5	1
43	2	4	2	2	4	2	91	1	4	2	2	5	2
44	2	3	2	3	4	4	92	1	3	2	3	5	4
45	1	2	2	1	4	4	93	2	2	2	1	5	4
46	1	1	2	4	4	2	94	2	1	2	4	5	2
47	1	4	1	3	4	1	95	2	4	1	3	5	1
48	1	3	1	2	4	3	96	2	3	1	2	5	3

Table 8 各因子の乱数による数値の決定法

因子	桁数	第1区間の例	乱数 R
A	2	$35 + 0.05R$	00 ~ 99
B	3	$1200 + 0.2(R+1)$	000 ~ 999
C	2	$0.3R$	00 ~ 99
D	2	$0.0025 + \frac{0.0007}{100}(R+1)$	00 ~ 99
E	2	$114.0 + 0.1R$	00 ~ 99
F	2	$3.0 + 0.008(R+1)$	00 ~ 99



Table.9 入力と計算結果 (実験第1組)

計算 No.	A		B		C		D		E		F		PCT (°F)	COT (mil)
	標準	(秒)	標準	(°F)	標準	(秒)	標準	( $\frac{\text{Btu}}{\text{hr}\cdot\text{ft}^2\cdot\text{in}^2}$ )	標準	(秒)	標準	( $\frac{\text{Btu}}{\text{hr}\cdot\text{ft}^2\cdot\text{in}^2}$ )		
1	2	41.95	2	1433.4	2	35.4	2	1177.22	2	132.5	1	3.656	1809.9	0.34656
2	2	44.50	1	1297.4	2	38.7	3	976.27	2	127.7	3	5.224	1758.3	0.29562
3	2	44.55	4	1985.8	1	2.7	4	752.72	2	129.0	4	5.960	1892.2	0.34745
4	2	40.80	3	1666.4	1	14.7	1	1624.50	2	127.4	2	4.416	1681.7	0.21866
5	1	39.70	2	1413.8	1	29.1	3	852.52	2	129.7	4	4.376	1843.0	0.39896
6	1	35.35	1	1211.2	1	15.9	2	1187.50	2	126.3	4	6.072	1671.9	0.20490
7	1	39.55	4	1949.0	2	51.5	1	2039.03	2	126.1	3	5.336	1758.7	0.16520
8	1	36.85	3	1626.0	2	48.0	4	715.73	2	131.0	1	3.264	1894.9	0.60082
9	1	39.45	2	1548.4	2	24.3	4	765.99	2	129.1	3	5.360	1830.7	0.39486
10	1	37.25	1	1330.2	1	15.3	1	1976.75	2	133.8	1	3.168	1737.6	0.26566
11	1	37.85	4	1893.6	2	42.0	2	1104.26	2	133.9	2	3.872	1626.2	0.32029
12	1	36.55	3	1668.0	2	51.3	3	903.30	2	133.6	4	5.472	1786.5	0.35025
13	2	41.35	2	1591.4	2	36.6	1	1662.07	2	132.5	4	5.608	1674.6	0.22083
14	2	42.90	1	1309.0	2	37.5	4	704.26	2	125.4	2	3.944	1910.9	0.51387
15	2	44.60	4	1973.8	1	19.8	3	862.88	2	132.8	1	3.792	1973.8	0.41198
16	2	42.50	3	1647.2	2	25.2	2	1147.48	2	130.5	4	4.864	1735.6	0.28688
17	1	35.40	2	1497.6	2	51.6	2	1234.34	6	169.5	1	3.344	2038.8	0.91477
18	1	39.80	1	1202.0	2	53.4	3	895.65	6	166.3	3	4.616	2038.7	0.94794
19	1	39.85	4	1944.6	1	0.9	4	755.33	6	173.0	4	5.704	1946.3	0.87549
20	1	37.30	3	1617.6	1	0.6	1	1568.71	6	166.8	2	4.064	1940.7	0.63112
21	2	41.85	2	1421.4	1	25.2	3	972.21	6	170.4	2	3.992	2062.6	1.02859
22	2	40.65	1	1263.8	1	3.6	2	1032.45	6	171.8	4	6.192	1957.1	0.71856
23	2	43.70	4	1960.2	2	30.9	1	1947.07	6	164.7	3	4.632	1960.2	0.44524
24	2	43.65	3	1634.2	2	38.1	4	751.42	6	167.8	1	3.280	2143.5	1.36731
25	2	40.75	2	1517.4	1	2.7	4	760.62	6	165.4	3	4.960	2044.4	0.98805
26	2	43.10	1	1348.6	1	8.4	1	1469.99	6	167.1	1	3.304	2013.3	0.81956
27	2	41.35	4	1975.0	2	55.1	2	1027.34	6	168.1	2	4.400	1982.4	0.77707
28	2	44.05	3	1751.2	2	48.3	3	827.75	6	168.6	4	5.936	1989.6	0.83631
29	1	37.20	2	1540.0	2	30.3	1	1837.05	6	164.7	4	6.072	1822.0	0.40362
30	1	39.65	1	1311.4	2	39.0	4	709.94	6	167.4	2	4.160	2118.8	1.28407
31	1	37.90	4	1943.8	1	29.4	3	948.02	6	173.4	1	3.216	2083.2	1.10792
32	1	36.15	3	1623.2	1	1.8	2	1075.37	6	164.6	3	5.048	1939.5	0.64826
33	1	36.50	2	1443.4	2	33.0	2	1042.84	4	148.5	1	3.144	1962.1	0.64798
34	1	37.95	1	1206.2	2	36.0	3	840.77	4	147.9	3	4.984	1937.0	0.61338
35	1	38.35	4	1820.8	1	29.7	4	763.29	4	150.8	4	5.696	1914.1	0.60635
36	1	37.55	3	1704.6	1	19.5	1	1486.45	4	151.0	2	4.040	1803.1	0.43747
37	2	43.20	2	1582.6	1	27.0	3	866.39	4	147.2	2	4.000	1967.2	0.68237
38	2	40.65	1	1287.8	1	29.7	2	1104.26	4	153.8	4	5.992	1865.0	0.46787
39	2	42.95	4	1960.6	2	51.6	1	1631.20	4	150.7	3	5.272	1920.2	0.33282
40	2	40.95	3	1650.0	2	42.0	4	736.19	4	152.9	1	3.120	2076.1	1.03651
41	2	43.00	2	1511.8	1	27.9	4	695.36	4	150.8	3	5.248	1995.9	0.79976
42	2	40.30	1	1210.4	1	21.3	1	2017.82	4	150.5	1	3.400	1870.5	0.44205
43	2	41.75	4	1917.8	2	50.4	2	1040.22	4	153.2	2	4.144	1926.9	0.60185
44	2	43.85	3	1713.8	2	40.2	3	983.65	4	145.5	4	5.704	1841.1	0.44155
45	1	35.80	2	1585.6	2	51.3	1	1422.81	4	149.7	4	5.904	1766.7	0.32845

Table 9  
統 考

46	1	39.60	1	1228.8	2	40.8	4	722.61	4	153.0	2	3.824	2005.0	0.98351
47	1	39.85	4	1846.8	1	12.0	3	837.47	4	148.5	1	3.752	1983.9	0.69046
48	1	38.90	3	1750.4	1	14.1	2	1293.43	4	144.3	3	4.824	1797.6	0.36608
49	2	41.75	2	1558.4	2	52.8	2	1092.53	1	114.0	1	3.400	1670.3	0.20830
50	2	41.10	1	1397.4	2	59.4	3	915.04	1	116.7	3	5.080	1699.9	0.23184
51	2	42.40	4	1902.0	4	12.3	4	722.81	1	116.9	4	5.496	1883.5	0.28234
52	2	43.70	3	1614.4	1	25.2	4	1743.62	1	114.2	2	3.888	1626.6	0.15489
53	1	35.90	2	1584.8	1	18.0	3	849.12	1	114.0	2	3.944	1697.8	0.25480
54	1	37.40	1	1370.8	1	17.7	2	1318.76	1	116.8	4	5.800	1609.3	0.14396
55	1	39.45	4	1838.2	2	36.6	2	1544.25	1	118.5	3	5.192	1734.6	0.15155
56	1	35.95	3	1760.4	2	43.5	4	746.86	1	120.6	1	3.112	1863.9	0.43630
57	1	36.40	2	1419.0	4	23.1	4	760.62	1	119.9	3	4.960	1778.5	0.31664
58	1	36.15	1	1203.2	1	6.3	4	1762.65	1	118.4	1	3.972	1639.8	0.16253
59	1	36.20	4	1809.4	2	40.8	2	1027.34	1	123.7	2	4.272	1809.4	0.26205
60	2	44.40	3	1642.8	2	39.9	3	901.37	1	118.7	4	5.920	1681.8	0.23087
61	2	38.15	2	1416.0	2	53.1	1	1464.58	1	121.9	4	5.464	1640.5	0.17284
62	2	40.00	1	1349.2	2	56.1	4	693.18	1	116.8	2	4.072	1843.1	0.38669
63	2	42.70	4	1970.6	1	10.8	3	829.36	1	122.6	2	3.352	1951.5	0.34265
64	2	42.95	2	1716.2	1	15.3	2	1351.83	1	123.8	3	5.328	1716.2	0.19829
65	1	38.95	2	1529.8	2	33.9	2	1273.10	3	140.2	1	3.664	1844.6	0.40231
66	1	36.45	1	1263.4	2	47.1	3	852.52	3	137.2	3	5.264	1861.4	0.44230
67	1	39.05	4	1875.8	1	21.6	4	705.39	3	135.5	4	5.440	1875.8	0.49080
68	1	38.00	3	1634.8	1	0.0	1	1412.76	3	140.9	2	3.952	1795.1	0.34593
69	2	42.15	2	1515.2	1	11.4	3	832.58	3	135.2	2	4.192	1897.1	0.50302
70	2	43.20	1	1200.2	1	10.8	2	1137.92	3	134.9	4	5.976	1740.0	0.28223
71	2	40.40	4	1880.0	2	59.4	1	1369.29	3	142.5	4	4.760	1880.0	0.32200
72	2	40.85	3	1653.4	2	54.9	4	713.40	3	135.5	1	3.616	1971.8	0.67480
73	2	44.20	2	1526.6	2	0.9	4	784.02	3	136.9	3	5.264	1879.9	0.48394
74	2	42.85	1	1214.0	1	7.2	1	1986.85	3	135.1	1	3.240	1759.6	0.28733
75	2	41.90	4	1937.4	2	49.8	2	1141.09	3	134.0	2	4.328	1866.5	0.30746
76	2	44.15	3	1626.4	2	30.9	3	895.65	3	142.6	4	6.128	1835.7	0.42429
77	1	35.10	2	1518.6	2	48.6	1	1687.01	3	135.6	4	5.888	1669.7	0.21255
78	1	37.95	1	1359.6	2	37.5	4	812.09	3	143.0	2	4.464	1888.7	0.60349
79	1	38.55	4	1802.4	1	8.4	3	835.83	3	140.1	1	3.168	1944.9	0.62249
80	1	35.50	3	1608.0	1	18.0	2	1027.34	3	137.6	3	5.320	1777.0	0.33416
81	2	40.05	2	1445.4	2	49.5	2	1086.71	5	161.6	1	3.488	2019.5	0.83073
82	2	41.20	1	1291.2	2	42.0	3	945.88	5	163.8	3	5.072	1991.6	0.79013
83	2	40.55	4	1829.6	1	10.8	4	779.78	5	161.0	4	5.888	1897.0	0.70248
84	2	42.55	3	1653.2	1	17.7	1	1476.21	5	155.5	2	4.600	1866.8	0.47091
85	1	39.15	2	1461.8	1	19.8	3	915.04	5	155.1	2	4.288	1982.2	0.73632
86	1	35.15	1	1263.4	1	21.6	2	1128.52	5	162.8	4	6.072	1897.6	0.54657
87	1	38.00	4	1975.8	2	42.9	1	1393.09	5	157.0	3	5.112	1914.2	0.40027
88	1	37.85	3	1616.2	2	30.0	4	720.43	5	161.8	1	3.384	2109.9	1.20344
89	1	37.50	2	1522.2	1	5.1	4	704.26	5	156.2	3	4.856	2023.1	0.89405
90	1	37.45	1	1330.8	1	6.9	1	1509.02	5	155.1	1	3.696	1916.8	0.54704
91	1	36.00	4	1989.0	2	30.3	2	1289.31	5	158.4	2	3.656	1989.0	0.52410
92	1	39.05	3	1751.4	2	55.8	3	877.12	5	161.5	4	5.888	1935.3	0.66667
93	2	40.20	2	1581.0	2	51.0	1	1837.05	5	155.3	4	5.936	1776.8	0.34106
94	2	40.70	1	1337.6	2	58.8	4	763.29	5	156.0	2	4.252	1977.4	0.89722
95	2	44.70	4	1829.8	1	18.6	3	967.72	5	155.2	1	3.544	1985.5	0.76220
96	2	43.75	3	1713.6	1	6.0	2	1230.60	5	160.0	3	5.144	1839.9	0.53242

Table.10 入力之計算結果 (実験第2組)

計算 No.	A		B		C		D		E		F		PCT (°F)	COT (mil)
	水 準	(秒)	水 準	(°F)	水 準	(秒)	水 準	$\frac{\text{Btu}}{\text{hr. ft.}^2 \text{ } ^\circ\text{F}}$	水 準	(秒)	水 準	$\frac{\text{Btu}}{\text{hr. ft.}^2 \text{ } ^\circ\text{F}}$		
1	2	42.70	2	1579.6	2	57.6	2	1261.21	2	127.6	1	3.512	1755.1	0.29124
2	2	42.70	1	1306.0	2	46.5	3	664.63	2	133.1	3	4.944	1655.3	0.42363
3	2	42.80	4	1857.2	1	24.9	4	768.70	2	128.8	4	5.456	1857.2	0.37908
4	2	43.40	3	1665.2	1	0.3	1	1679.82	2	128.8	2	3.848	1700.8	0.22752
5	1	37.50	2	1469.8	1	26.7	3	845.76	2	132.9	2	4.176	1868.7	0.44416
6	1	35.85	1	1318.8	1	23.7	2	1350.87	2	126.3	4	6.112	1649.5	0.18208
7	1	36.95	4	1967.6	2	47.4	1	1407.76	2	129.2	3	4.968	1829.4	0.21769
8	1	36.85	3	1679.6	2	49.6	4	692.09	2	127.7	1	3.688	1917.9	0.54743
9	1	39.45	2	1426.2	1	29.7	4	774.20	2	133.0	3	4.840	1828.4	0.46284
10	1	36.20	1	1486.4	1	1.5	1	1658.62	2	131.7	1	3.432	1734.7	0.26305
11	1	36.40	4	1846.4	2	55.5	2	1144.28	2	125.8	2	4.496	1838.3	0.23415
12	1	36.90	3	1601.4	2	59.1	3	967.72	2	132.9	4	5.488	1760.1	0.31448
13	2	42.40	2	1553.6	2	45.3	1	1532.31	2	125.6	4	5.928	1636.3	0.18030
14	2	40.10	1	1215.2	2	33.0	4	734.95	2	132.2	2	4.120	1929.2	0.56765
15	2	40.05	4	1998.2	1	27.6	3	939.54	2	126.3	1	3.648	1936.9	0.32300
16	2	44.95	3	1634.6	1	21.3	2	1113.23	2	126.8	3	5.260	1706.2	0.26600
17	1	35.20	2	1556.0	2	51.3	2	1042.84	6	168.3	1	3.048	2075.4	1.04780
18	1	38.65	1	1303.6	2	51.3	3	824.57	6	170.4	3	5.008	2054.1	1.02966
19	1	36.75	4	1927.6	1	2.1	4	776.98	4	168.2	4	6.040	1948.1	0.73006
20	1	37.30	3	1764.0	1	19.5	1	1443.38	4	172.5	2	3.864	1981.6	0.76257
21	2	41.75	2	1536.2	1	25.6	3	1000.16	6	165.0	2	3.824	1997.5	0.97693
22	2	43.90	1	1363.0	1	20.1	2	1318.76	6	169.1	4	6.104	1912.2	0.58873
23	2	40.35	4	1938.6	2	46.8	1	1679.82	6	167.5	3	4.904	1938.8	0.52939
24	2	40.40	3	1654.0	2	46.8	4	784.02	6	172.4	1	3.672	2130.2	1.33182
25	2	40.90	1	1404.6	1	7.5	4	792.65	4	165.3	1	4.680	2051.3	1.00250
26	2	41.60	1	1395.0	1	21.9	1	1665.62	6	171.0	1	3.424	1953.3	0.80146
27	2	44.75	4	1936.6	2	49.6	2	1078.18	6	167.8	2	3.848	2016.0	0.86039
28	2	40.50	3	1649.0	2	36.6	3	919.03	6	169.4	4	5.512	1986.4	0.80443
29	1	36.50	2	1459.6	2	33.9	1	1811.56	6	164.9	4	6.024	1832.0	0.41361
30	1	38.25	1	1204.2	2	50.4	4	736.19	6	168.8	2	4.192	2113.6	1.26099
31	1	38.80	4	1825.2	1	19.5	3	939.54	6	170.8	1	3.296	2015.0	1.07549
32	1	39.05	3	1773.6	1	11.7	2	1035.03	6	166.2	3	4.616	1971.3	0.74599
33	1	37.45	2	1408.2	2	54.0	2	1219.52	4	145.7	1	3.472	1901.7	0.50455
34	1	35.25	1	1395.4	2	38.4	3	1004.99	4	145.3	3	5.224	1860.8	0.44683
35	1	36.35	4	1909.4	1	24.0	4	795.58	4	146.3	4	6.056	1909.4	0.46219
36	1	37.35	3	1632.4	1	25.6	1	1837.05	4	145.5	2	4.184	1761.5	0.33408
37	2	42.15	2	1554.4	1	15.0	3	927.12	4	145.3	2	3.856	1941.9	0.60967
38	2	43.95	1	1372.6	1	9.5	2	1215.87	4	153.1	4	5.736	1857.1	0.44984
39	2	41.25	4	1893.6	2	41.4	1	1619.95	4	151.9	3	5.360	1892.5	0.31045
40	2	41.80	3	1629.6	2	41.7	4	703.13	4	150.1	1	3.448	2067.7	1.00936
41	2	40.70	2	1402.6	1	15.9	4	746.27	4	151.4	1	5.176	1980.1	0.74706
42	2	40.75	1	1341.0	1	15.9	1	1364.64	4	145.0	1	3.352	1833.5	0.46117
43	2	42.35	4	1882.0	2	50.1	2	1116.25	4	145.5	2	4.008	1882.0	0.48442
44	2	43.75	3	1770.6	2	52.6	3	929.16	4	152.6	4	5.616	1896.4	0.55916
45	1	35.75	2	1457.6	2	34.5	1	1520.57	4	151.8	4	5.464	1801.8	0.35654

( 続 ) Table. 10

46	1	36.95	1	1304.6	2	51.9	4	750.12	4	159.6	2	4.460	2020.2	0.86175
47	1	36.60	4	1979.2	1	28.2	3	939.54	4	144.6	1	3.240	1979.2	0.55468
48	1	39.60	3	1658.0	1	22.2	2	1234.34	4	145.8	3	5.112	1805.7	0.37448
49	2	41.60	2	1423.6	2	49.2	2	1035.03	4	114.2	1	3.528	1702.8	0.22936
50	2	44.00	4	1268.4	2	50.4	3	327.12	1	122.1	3	5.152	1741.8	0.27554
51	2	43.75	4	1690.4	1	13.6	4	763.29	1	117.2	4	5.846	1865.4	0.26310
52	2	40.65	3	1698.0	3	7.0	4	1966.75	1	122.4	2	4.352	1698.0	0.15262
53	1	37.05	2	1405.4	1	3.0	3	952.32	1	116.3	2	4.600	1693.7	0.22528
54	1	36.75	4	1919.2	1	4.2	2	1257.30	1	122.7	2	6.168	1643.4	0.17404
55	1	38.30	3	1694.4	2	45.0	1	1459.22	1	120.8	3	5.072	1761.0	0.16581
57	1	36.05	4	1507.4	6.4	6.4	771.44	4	115.2	1	3.352	3.352	1809.8	0.34974
58	1	35.85	4	1212.2	1	26.7	1	905.23	1	115.9	3	5.080	1754.2	0.29458
59	1	36.40	4	1970.6	39.9	39.9	1134.77	1	116.3	1	3.560	3.560	1653.7	0.17556
60	2	42.35	3	1652.0	31.2	31.2	905.23	3	123.2	2	4.528	4.528	1642.1	0.22466
61	2	43.45	2	1434.0	59.7	59.7	1731.56	1	120.6	4	6.136	6.136	1667.8	0.21342
62	2	43.45	4	1202.0	51.3	51.3	719.25	1	121.6	4	6.200	6.200	1594.4	0.13626
63	2	41.60	4	1948.6	7.2	7.2	855.94	3	116.8	1	3.576	3.576	1837.1	0.38699
64	2	43.80	3	1775.0	5.4	5.4	1277.11	2	122.2	1	3.016	3.016	1946.6	0.33723
65	1	39.90	2	1489.2	49.8	49.8	1289.31	2	120.0	3	4.720	4.720	1739.8	0.18004
66	1	37.30	1	1209.4	40.8	40.8	915.04	3	136.2	1	3.576	3.576	1837.1	0.38699
67	1	36.15	4	1958.2	14.4	14.4	760.62	3	135.4	4	5.128	5.128	1836.5	0.39591
68	1	39.40	3	1668.2	23.4	23.4	1433.02	3	137.5	4	5.776	5.776	1946.9	0.37597
69	2	42.50	2	1579.2	16.5	16.5	976.27	3	136.5	2	3.920	3.920	1776.0	0.32604
70	2	43.75	1	1239.2	18.3	18.3	1637.97	3	136.5	2	4.016	4.016	1860.6	0.43484
71	2	44.00	4	1903.6	40.2	40.2	1273.10	3	142.3	4	6.144	6.144	1764.0	0.31226
72	2	42.00	3	1735.8	28.2	28.2	816.72	3	140.6	3	5.208	5.208	1863.8	0.26427
73	2	44.05	2	1406.8	7.5	7.5	774.20	3	143.0	1	3.752	3.752	1959.2	0.66453
74	2	44.15	1	1295.8	32.4	32.4	1336.24	3	135.2	1	3.600	3.600	1770.4	0.30113
75	2	43.05	3	1782.4	45.0	45.0	961.05	3	135.5	2	4.144	4.144	1892.4	0.27088
76	2	38.40	2	1477.0	33.0	33.0	1486.45	3	136.4	4	5.840	5.840	1788.6	0.35792
77	1	39.95	4	1820.0	31.2	31.2	715.73	3	136.6	2	3.920	3.920	1676.8	0.21937
78	1	39.95	2	1612.4	29.4	29.4	985.17	3	137.8	1	3.792	3.792	1965.6	0.66211
79	1	38.85	3	1612.4	4.5	4.5	1340.69	3	143.2	3	5.392	5.392	1857.3	0.44288
80	2	44.45	2	1494.2	39.3	39.3	1187.50	5	162.1	1	3.152	3.152	1757.1	0.31557
81	2	42.35	1	1307.0	52.5	52.5	877.12	5	159.4	3	4.712	4.712	2008.4	0.83190
82	2	40.80	4	2000.0	9.3	9.3	727.61	5	155.3	4	6.176	6.176	2000.0	0.59197
83	2	40.80	3	1630.2	10.8	10.8	1397.95	5	155.2	2	4.040	4.040	1899.2	0.52589
84	1	37.85	1	1270.8	24.9	24.9	929.16	5	160.1	2	4.056	4.056	2005.0	0.81169
85	1	37.85	4	1934.0	4.8	4.8	1113.23	5	156.3	4	6.008	6.008	1873.3	0.48721
86	1	35.20	3	1641.0	57.3	57.3	1464.58	5	155.6	3	5.304	5.304	1932.8	0.36402
87	1	36.95	2	1588.2	28.2	28.2	763.29	5	155.1	1	3.384	3.384	2062.8	0.89783
88	1	37.75	1	1279.2	0.9	0.9	730.04	5	157.2	3	5.320	5.320	1995.1	0.81233
89	1	37.40	4	1926.2	40.3	40.3	1811.53	5	160.0	1	3.016	3.016	1899.6	0.62055
91	1	38.45	3	1648.6	46.8	46.8	1173.84	5	156.6	2	4.008	4.008	1926.2	0.56400
92	1	41.20	2	1473.6	57.3	57.3	1014.79	5	155.7	4	5.864	5.864	1875.9	0.50692
93	2	43.45	1	1337.0	34.5	34.5	1819.95	5	161.4	4	5.768	5.768	1836.9	0.41925
94	2	40.95	4	1881.4	18.0	18.0	816.72	5	163.2	2	4.560	4.560	2050.4	0.98894
95	2	41.95	3	1657.4	2.7	2.7	866.39	5	155.8	1	3.504	3.504	2007.0	0.81564
96	2	41.95	2	1657.4	2.7	2.7	1235.34	5	159.6	3	5.080	5.080	1891.0	0.53126

Table. II 入力と計算結果 (実験第3組)

計算 No	A		B		C		D		E		F		PCT (°F)	COT (mil)
	水 準	(秒)	水 準	(°F)	水 準	(秒)	水 準	$\frac{\text{Btu}}{\text{hr} \cdot \text{ft}^2 \cdot ^\circ\text{F}}$	水 準	(秒)	水 準	$\frac{\text{Btu}}{\text{hr} \cdot \text{ft}^2 \cdot ^\circ\text{F}}$		
1	1	36.95	3	1633.4	2	35.4	2	1177.22	3	142.5	2	4.456	1826.5	0.39259
2	1	39.50	4	1897.4	2	38.7	1	1927.79	3	137.7	3	5.224	1824.5	0.22263
3	1	39.55	1	1385.8	1	2.7	4	752.72	3	139.0	3	3.560	1920.5	0.67426
4	1	35.80	2	1466.4	1	14.7	3	905.23	3	137.4	4	6.016	1793.8	0.34892
5	2	44.70	3	1613.8	1	29.1	1	1453.90	3	139.2	4	5.976	1710.2	0.26705
6	2	40.35	4	1811.2	1	15.9	2	1187.50	3	136.3	1	3.672	1818.5	0.37216
7	2	44.55	1	1349.0	2	51.3	3	1012.32	3	136.1	3	5.336	1816.9	0.36738
8	2	41.85	2	1426.0	2	48.0	4	715.73	3	141.0	2	4.064	1938.3	0.73311
9	2	44.45	3	1748.4	1	24.3	4	765.99	3	139.1	3	5.360	1891.8	0.53433
10	2	42.25	4	1930.2	1	15.3	3	997.77	3	143.8	2	3.968	1930.2	0.47888
11	2	42.85	1	1293.6	2	42.0	2	1104.26	3	143.9	4	5.472	1832.5	0.39670
12	2	41.55	2	1468.0	2	51.3	1	1617.85	3	143.6	1	3.072	1860.8	0.42158
13	1	36.35	3	1791.4	2	36.6	3	919.03	3	142.5	4	3.208	1933.3	0.59560
14	1	37.90	4	1909.0	2	37.5	4	704.26	3	135.4	4	5.544	1909.0	0.47255
15	1	39.60	1	1373.8	1	19.8	1	1486.45	3	142.8	2	4.592	1793.1	0.33518
16	1	37.50	2	1447.2	1	25.2	2	1147.48	3	140.5	3	4.864	1812.3	0.36316
17	2	40.40	3	1697.6	2	51.6	2	1234.34	4	149.5	2	4.144	1883.5	0.49815
18	2	44.80	4	1802.0	2	53.4	1	1593.99	4	146.3	3	4.616	1805.7	0.36897
19	2	44.85	1	1344.6	1	0.9	4	755.33	4	153.0	1	3.304	2012.5	1.00389
20	2	42.30	2	1417.8	1	0.6	3	888.14	4	146.8	4	5.664	1885.6	0.50451
21	1	36.85	3	1621.4	1	25.2	1	1872.26	4	150.4	4	5.592	1741.8	0.30304
22	1	35.65	4	1863.8	1	3.6	2	1032.45	4	151.8	1	3.792	1916.7	0.57360
23	1	38.70	1	1360.2	2	30.9	3	980.70	4	144.7	3	4.632	1889.1	0.49374
24	1	38.65	2	1434.2	2	38.1	4	751.42	4	147.8	2	4.080	2002.3	0.78942
25	1	35.75	3	1717.4	1	2.7	4	760.62	4	145.4	3	4.960	1918.6	0.59247
26	1	38.10	4	1948.6	1	8.4	3	857.66	4	147.1	2	4.104	1948.6	0.58204
27	1	36.35	1	1375.0	2	35.1	2	1027.34	4	148.1	4	6.000	1841.5	0.42231
28	1	39.05	2	1551.2	2	48.3	1	1378.71	4	148.6	1	3.536	1892.7	0.49296
29	2	42.20	3	1740.0	2	30.3	3	963.26	4	144.7	1	3.672	1926.3	0.58467
30	2	44.65	4	1911.4	2	39.0	4	709.94	4	147.4	4	5.760	1934.7	0.64915
31	2	42.90	1	1343.8	1	29.4	1	1778.64	4	153.4	2	4.016	1876.3	0.46350
32	2	41.15	2	1423.2	1	1.8	2	1075.37	4	144.6	3	5.048	1851.5	0.42777
33	2	41.30	3	1643.4	2	33.0	2	1042.84	2	128.5	2	3.944	1786.8	0.33251
34	2	42.95	4	1806.2	2	36.0	1	1417.76	2	127.9	3	4.984	1800.8	0.20640
35	2	43.35	1	1220.8	1	19.5	3	862.88	2	131.0	4	5.640	1940.7	0.57974
36	2	42.55	2	1504.6	1	27.0	4	763.29	2	130.8	1	3.296	1757.4	0.34143
37	1	38.20	3	1782.6	1	27.0	3	907.19	2	132.2	4	5.600	1763.9	0.18128
38	1	35.65	4	1887.8	1	29.7	2	1104.26	2	133.8	1	3.592	1887.8	0.33415
39	1	37.95	1	1360.6	2	51.6	3	736.19	2	132.9	3	5.272	1791.6	0.33438
40	1	35.95	2	1450.0	2	42.0	4	695.36	2	130.8	3	5.248	1863.8	0.55529
41	1	38.00	3	1711.8	1	27.9	4	736.19	2	130.5	2	4.200	1924.2	0.46888
42	1	35.30	4	1610.4	1	21.3	3	1007.42	2	133.2	4	5.744	1810.4	0.32880
43	1	36.75	1	1317.8	2	50.4	2	1040.22	2	133.2	1	3.304	1750.1	0.29278
44	1	38.85	2	1513.8	2	40.2	1	1918.30	2	125.5	4	5.304	1680.2	0.21110
45	2	40.80	3	1785.6	2	51.3	3	842.42	2	129.7	1	3.504	1877.8	0.46996

( 続 き ) Table. 11

46	2	44.60	4	1828.8	2	40.8	4	722.81	2	133.0	4	5.424	1628.8	0.48291
47	2	44.85	1	1246.6	1	12.0	1	1407.78	2	128.5	2	4.552	1710.3	0.24146
48	1	43.90	2	1520.4	1	14.1	2	1292.43	2	124.3	3	4.824	1680.2	0.22003
49	2	36.75	3	1758.4	2	52.8	2	1092.53	6	164.0	2	4.200	1920.6	0.73008
50	1	36.10	4	1937.4	2	59.4	1	1658.62	6	166.7	3	5.080	1991.6	0.45390
51	1	37.40	1	1302.0	1	12.3	4	722.81	6	166.9	1	3.096	2153.1	1.40625
52	1	38.70	2	1414.4	1	25.2	3	937.44	6	164.2	4	5.488	1968.7	0.73169
53	2	40.90	3	1784.8	1	18.0	1	1443.38	6	164.0	4	5.344	1807.4	0.48026
54	2	42.40	4	1970.8	1	17.7	2	1318.76	6	166.8	1	3.400	1976.9	0.72536
55	2	44.45	1	1238.2	2	36.6	3	880.76	6	168.5	3	5.192	2029.9	0.93615
56	2	40.95	2	1560.4	2	43.5	4	746.80	6	170.6	2	3.912	2128.1	1.32563
57	2	43.40	3	1619.0	1	23.1	4	567.68	6	169.9	3	4.960	2065.3	1.08238
58	2	41.15	4	1803.2	1	6.3	3	943.76	6	168.4	2	4.592	2002.2	0.84599
59	2	41.20	1	1209.4	2	40.8	2	1027.74	6	173.7	4	5.872	1986.9	0.80702
60	2	43.15	2	1442.8	2	39.9	1	1611.26	6	168.7	1	3.520	1997.3	0.77422
61	1	39.40	3	1616.0	2	53.1	3	825.94	6	171.9	1	3.064	2135.5	1.32450
62	1	35.00	4	1949.2	2	56.1	4	693.18	6	166.8	4	5.672	2003.0	0.88709
63	1	37.70	1	1370.6	1	10.8	1	1383.46	6	172.6	2	4.152	2000.6	0.80553
64	1	37.95	2	1516.2	1	15.3	2	1331.82	6	173.8	3	5.328	1947.0	0.67417
65	2	43.95	3	1729.8	2	33.9	2	1273.10	1	120.2	2	5.264	1729.8	0.18773
66	2	41.45	4	1863.4	2	47.1	1	1453.90	1	117.2	3	5.264	1742.5	0.15528
67	2	44.05	1	1275.8	1	21.6	4	703.39	1	115.5	1	3.040	1873.8	0.42588
68	2	43.00	2	1434.8	1	0.0	3	839.11	1	120.9	4	5.522	1730.2	0.27027
69	1	37.15	3	1715.2	1	11.4	1	1393.09	1	115.2	4	5.792	1692.5	0.13392
70	1	38.20	4	1800.2	1	10.8	2	1137.92	1	114.9	1	3.576	1787.6	0.18361
71	1	35.40	1	1280.0	2	59.4	3	824.57	1	122.5	3	4.760	1784.7	0.31909
72	1	35.85	2	1453.4	2	54.9	4	713.40	1	115.5	2	4.416	1795.9	0.32930
73	1	39.20	3	1726.6	1	0.9	4	784.02	1	116.9	3	5.264	1732.6	0.27552
74	1	37.85	4	1814.0	1	7.2	3	1000.16	1	115.1	2	4.940	1807.8	0.20375
75	1	36.90	1	1337.4	2	49.8	2	1141.09	1	114.0	4	5.928	1593.8	0.14710
76	1	39.15	2	1426.4	2	30.9	1	1593.99	1	122.6	1	3.728	1673.0	0.20134
77	2	40.10	3	1718.6	2	48.6	3	923.05	1	115.6	4	6.064	1751.0	0.27938
78	2	42.95	4	1959.6	2	37.5	4	812.09	1	123.0	4	6.064	1842.2	0.27510
79	2	43.55	1	1202.4	1	8.4	1	1402.85	1	120.1	2	3.968	1678.3	0.20314
80	2	40.50	2	1408.0	1	18.0	2	1027.34	1	117.6	3	5.320	1669.4	0.20193
81	1	35.05	3	1645.4	2	49.5	2	1086.71	5	161.6	2	4.268	1964.2	0.69757
82	1	36.20	4	1891.2	2	42.0	1	1770.60	5	163.8	3	5.072	1891.2	0.43661
83	1	35.55	1	1229.6	1	10.8	4	779.78	5	161.0	1	3.488	2029.5	1.08847
84	1	37.55	2	1453.2	1	17.7	3	859.39	5	155.5	4	6.200	1909.1	0.57562
85	2	44.15	3	1661.8	1	19.8	1	1658.62	5	155.1	4	5.888	1789.1	0.36523
86	2	40.15	4	1863.4	1	21.6	2	1128.52	5	162.8	1	3.672	1977.3	0.73589
87	2	43.00	1	1373.8	2	42.9	3	832.58	5	157.0	3	5.112	1935.1	0.76538
88	2	42.85	2	1416.2	2	30.0	4	720.43	5	161.8	2	4.184	2088.0	1.13148
89	2	42.50	3	1722.2	1	5.1	4	704.26	5	156.2	3	4.896	2020.8	0.89423
90	2	42.45	4	1930.8	1	6.9	3	869.93	5	155.1	2	4.496	1951.4	0.68013
91	2	41.00	1	1389.0	2	30.3	2	1289.31	5	158.4	4	5.456	1883.2	0.50204
92	2	44.05	2	1551.4	2	55.8	1	1532.31	5	161.5	1	3.488	1966.2	0.67677
93	1	35.20	3	1781.0	2	51.0	3	963.26	5	153.3	1	3.536	1985.1	0.74763
94	1	35.70	4	1947.6	2	58.8	4	763.29	5	156.0	4	6.152	1854.6	0.58682
95	1	39.70	1	1229.8	1	18.6	1	1854.48	5	155.2	2	4.344	1868.9	0.45339
96	1	36.75	2	1513.6	1	6.0	2	1230.60	5	160.0	3	5.144	1849.3	0.53274

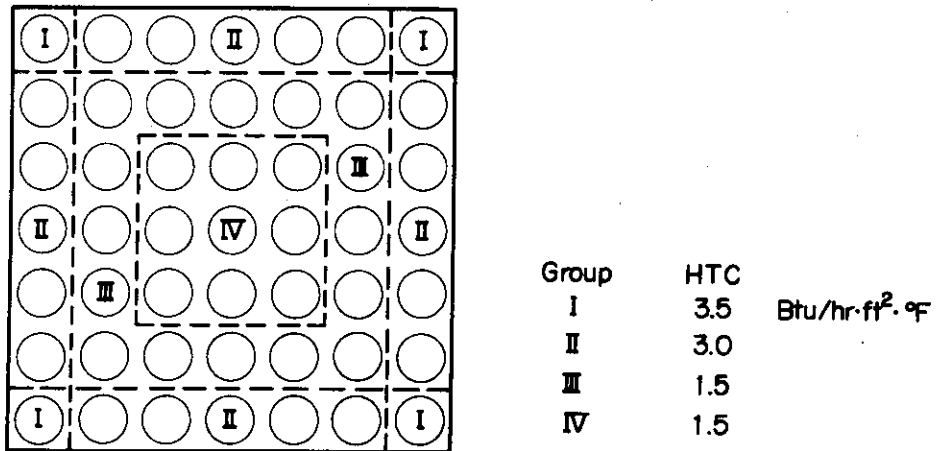


Fig. 4 HTC under core spray cooling

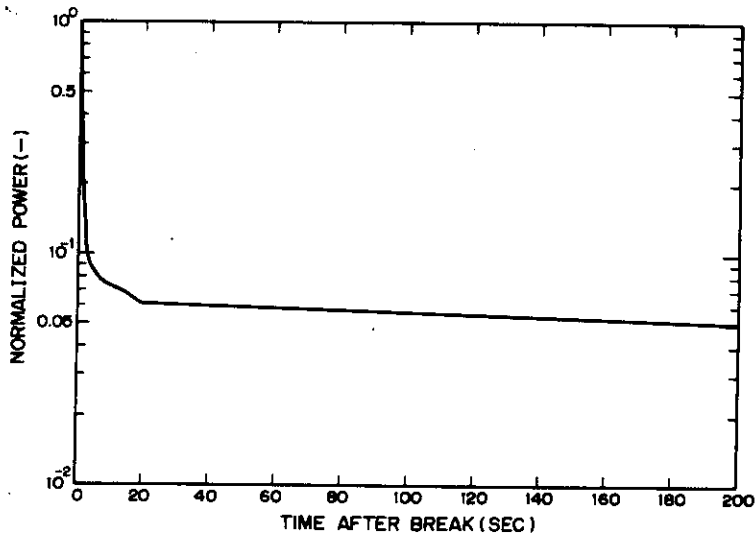


Fig. 6 Normalized power vs. time

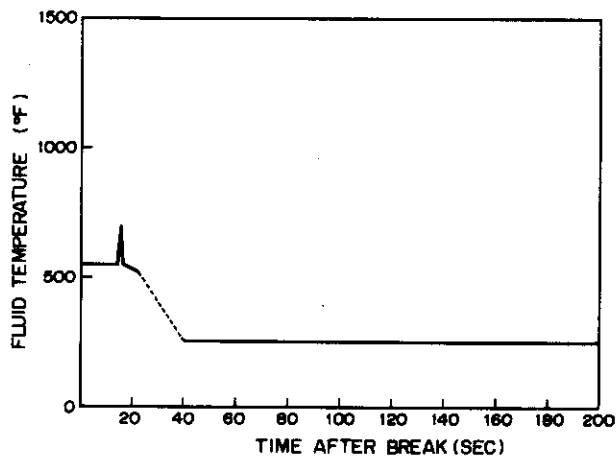


Fig. 7 Fluid temperature vs. time

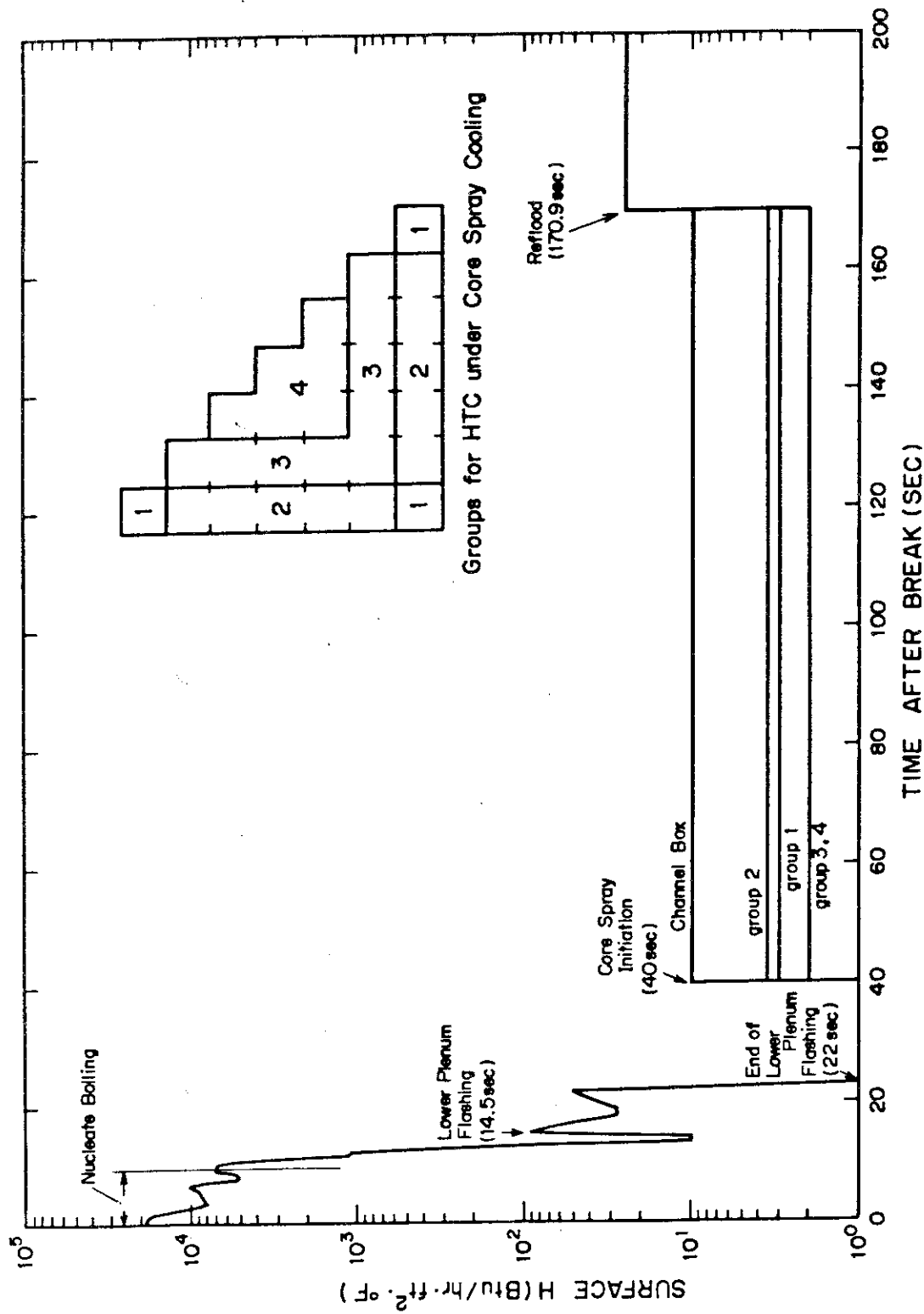


Fig. 8 Hot spot surface HTC vs. time



## (7) 4. 分散分析

本章はPCT（被覆管表面最高温度）について分析した結果である。数値実験により得られた結果と3.4項で得た因子の水準組合せを用いて分散分析を行った。3組の実験について同様なので、その具体的方法については実験第1組を対象として述べることにする。

因子Eのわりつけは、直交表  $L_{64}$  を用いて、計算No.1～64に水準2, 6, 4, 1をわりつけ、計算No.65～128（計算No.97～128はNo.1～32と同じ）に水準3, 5, 2, 6をわりつけた。

分散分析表（Table 12）を得るまでの手順は以下の通りである。各因子のPCTに対する影響の大きさは、以下の各平方和を計算して確かめる。

平方和

$$S_A = (A_1^2 + A_2^2) / 64 - CF$$

$$S_B = (B_1^2 + B_2^2 + B_3^2 + B_4^2) / 32 - CF$$

$$S_C = (C_1^2 + C_2^2) / 64 - CF$$

$$S_D = (D_1^2 + D_2^2 + D_3^2 + D_4^2) / 32 - CF$$

$$S_E = (E_2^2 + E_6^2) / 32 + (E_1^2 + E_3^2 + E_4^2 + E_5^2) / 16 - CF$$

$$S_F = (F_1^2 + F_2^2 + F_3^2 + F_4^2) / 32 - CF$$

$$CF = \left( \sum_{i=1}^{128} y_i \right)^2 / 128$$

ここで、 $A_1$  はAの水準が1のPCT（ $= y_i$ ）の合計である。他の因子についても同様。交互作用の平方和は次のようになる。

交互作用  $B \times E$  の平方和

$$S_{B \times E} = S_{BE} - S_B - S_E$$

$$\begin{aligned} S_{BE} = & (B_1 E_1^2 + B_2 E_1^2 + B_3 E_1^2 + B_4 E_1^2 + B_1 E_3^2 + B_2 E_3^2 + B_3 E_3^2 \\ & + B_4 E_3^2 + B_1 E_4^2 + B_2 E_4^2 + B_3 E_4^2 + B_4 E_4^2 + B_1 E_5^2 + B_2 E_5^2 \\ & + B_3 E_5^2 + B_4 E_5^2) / 4 \\ & + (B_1 E_2^2 + B_2 E_2^2 + B_3 E_2^2 + B_4 E_2^2 + B_1 E_6^2 + B_2 E_6^2 + B_3 E_6^2 \\ & + B_4 E_6^2) / 8 - CF \end{aligned}$$

ここで、 $B_1 E_1^2$  はBの水準が1かつEの水準が1の  $y_i$  の合計の2乗である。他の組合せも同

様。

$S_{D \times E}$ ,  $S_{E \times F}$  も同様に計算する。

$$S_{D \times E} = S_{DE} - S_D - S_E$$

$$S_{E \times F} = S_{EF} - S_E - S_F$$

$$S_{C \times E} = S_{CE} - S_C - S_E$$

$S_{CE}$  は次のようになる。

$$\begin{aligned} S_{CE} = & (C_1 E_1^2 + C_2 E_1^2 + C_1 E_3^2 + C_2 E_3^2 + C_1 E_4^2 + C_2 E_4^2 + C_1 E_5^2 \\ & + C_2 E_5^2) / 8 + (C_1 E_2^2 + C_2 E_2^2 + C_1 E_6^2 + C_2 E_6^2) / 16 \\ & - CF \end{aligned}$$

次に、因子 A, B, …… , F 及び交互作用  $B \times E$ ,  $C \times E$ ,  $D \times E$ ,  $E \times F$  以外の他のあらゆる原因が実験値にどのような影響を与えているかを知るには、全体のバラツキすなわち全変動  $S_T$

$$S_T = \sum_{i=1}^{128} y_i^2 - CF$$

からそれぞれの効果を差し引けばよい。残差 2 乗和 (誤差 2 乗和)  $S_e$

$$S_e = S_T - S_A - S_B - \dots - S_F - S_{B \times E} - \dots - S_{E \times F}$$

となる。 $S_e$  の自由度を  $dfe$  とすると、実験の誤差分散  $S_e / dfe$  は A, B, C, …… ,  $E \times F$  以外のすべての要因の総合的影響の程度を示すが、今回の数値実験では各因子が各水準に対応する範囲からランダムに定められたことによる特性値の変動に起因するものが含まれている。

$S_A / df_A$ ,  $S_B / df_B$ , …… 等は不倫分散と呼ばれる。すなわち、誤差分散は誤差の不倫分散である。

各要因の寄与率を F 検定するために、不倫分散を誤差分散で割った分散比  $F_0$

$$F_0 = (S / df_e) / (S_e / dfe)$$

を求める。以上の手順で得た分散分析表を Table 12 に示す。

F 検定<sup>(1)</sup>を行うと、 $C \times E$ ,  $D \times E$ ,  $E \times F$  は有意であるとはいいがたい。よって、これらを誤差の項にプールすると、

$$\begin{aligned} S'_e &= S_e + S_{C \times E} + S_{D \times E} + S_{E \times F} \\ &= 103483 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} df'_e &= dfe + df_{C \times E} + df_{D \times E} + df_{E \times F} \\ &= 64 \end{aligned}$$

$$\therefore V_e = \frac{S'_e}{df'_e} = 1616.9$$

となる。これより求めた修正分散比  $F_0 = (S/df)/V_e$  を同じ Table 12 の修正  $F_0$  の欄に示した。この修正  $F_0$  を見ると、各要因の効果の大きさが一目瞭然にわかる。実験第1組では要因 E, D の効果が特に大きいことがわかる。

次に、各因子の要因効果曲線と信頼区間幅を求める。各因子の各水準ごとの PCT の平均値を Table 16 に示す。また、この平均値の信頼区間を計算するのに必要となる有効反復数を求める。

一部追加の因子の主効果の場合、その主効果の期待値の中で要因に関する部分は、測定値を2倍される部分のみ反復数を倍に数えた場合のものと同じにすればよい。一方、誤差に関する部分は全体の誤差分散が  $2N\sigma^2$  ( $N=64$ ,  $\sigma^2$ : 測定値の分散) となり、過剰分の  $2N - (N+M) = N - M$  個 ( $M$  個追加) の誤差分散は直交表  $L_{64}$  の各自由度に平等に配分される。よって、分散分析表 (Table 12) の分散の期待値を求めると、Table 16 のようになる。この Table より、

$$A, C \text{ の有効反復数} \quad 64 \times \frac{2}{3} = 42.67$$

$$B, D, F \text{ の } \quad 32 \times \frac{2}{3} = 21.33$$

$$E \text{ の } \quad \frac{96}{5} \times \frac{10}{13} = 14.77$$

従って、95% 信頼区間の幅は次のようにして求まる。

$$A, C \quad t(64, 0.05) \sqrt{1616.92/42.67} = 12.3$$

$$B, D, F \quad t(64, 0.05) \sqrt{1616.92/21.33} = 17.3$$

$$E \quad t(64, 0.05) \sqrt{1616.92/14.77} = 20.9$$

例えば、A の第1水準における特性値の平均は信頼度 95% で  $1874.1 \pm 12.3$  °F の間にあるといえるわけである。こうして求めた信頼区間幅を Table 16 の右欄に示した。

実験第2組、第3組についての分散分析表、水準平均・信頼区間幅を Table 13, 14, 17, 18 に示す。またこれらの結果から、得られる要因効果曲線を Fig. 9, 10, 11 に示す。

3つのケースの分散分析の結果を比較すると、Table 19 のようになる。これらの結果から各要因を効果の大きさの順に並べると、

1. E
2. D
3. F
4. B

5. C
6. B×E
7. A

となり、残りのC×E, D×E, E×F はほとんど有意であるとはいえない。

次の重回帰分析では各因子の二次の効果まで考慮するので、ここで得た分散を直交分解して次の重回帰分析の結果の参考にする。

因子の区間内で水準が a 個の等間隔に分けられている場合の直交多項式は以下のように与えられる。

$$S_{X_I} = (W_1 X_1 + W_2 X_2 + \dots + W_a X_a)^2 / r \cdot \lambda^2 S$$

r : 反復数

X<sub>i</sub> : 水準 i における測定値の和

λ<sup>2</sup>S, W<sub>i</sub> : 定数

ここで各水準の平均値を  $\bar{X}_i$  とすると、

$$X_i = r \bar{X}_i$$

$$\therefore S_{X_I} = (W_1 \bar{X}_1 + W_2 \bar{X}_2 + \dots + W_a \bar{X}_a)^2 \cdot r / \lambda^2 S$$

そして、水準の数 a によって、S<sub>X<sub>I</sub></sub> の一次、二次、三次……について W<sub>i</sub>, λ<sup>2</sup>S が与えられている。例えば、実験第 1 組の B についての平方和 51392 を直交分解すると、4 水準の直交多項式の係数は、Table 20 のように与えられているので次のようになる。

一次の項

$$\begin{aligned} S_{B_L} &= \{ 1872.4 \times (-3) + 1869.5 \times (-1) + 1867.6 \times 1 + 1915.9 \times 3 \}^2 \times 32 \times \frac{1}{20} \\ &= 26488 \end{aligned}$$

二次の項

$$\begin{aligned} S_{B_q} &= \{ 1872.4 \times 1 + 1869.5 \times (-1) + 1867.6 \times (-1) + 1915.9 \times 1 \}^2 \times 32 \times \frac{1}{4} \\ &= 20989 \end{aligned}$$

三次の項

$$\begin{aligned} S_{B_c} &= \{ 1872.4 \times (-1) + 1869.5 \times 3 + 1867.7 \times (-3) + 1915.9 \times 1 \}^2 \times 32 \times \frac{1}{20} \\ &= 3896 \end{aligned}$$

S<sub>B</sub> = S<sub>B<sub>L</sub></sub> + S<sub>B<sub>q</sub></sub> + S<sub>B<sub>c</sub></sub> とならないのは、数値計算上の誤差のためである。同様に S<sub>F</sub> も分解できるが、S<sub>D</sub> は D が等間隔に水準がとられておらず、また水準と D の値の間に関数関係もないので分解できない。S<sub>A</sub> と S<sub>C</sub> は自由度が 1 であるため、これらも直交分解できない。

$S_E$  は一次、二次及びその他に分解することができる。交互作用も例えば、 $S_{B \times E}$  は  $S_{B_l \times E_l}$  を分離することができる。

この結果を Table 21, 22, 23 に示す。

この直交分解した分散分析の結果から、先の分散分析と比べると、要因（因子及び交互作用）全体としては有意ではなくても、直交分解するとその効果の大きい成分が明確になってくる。したがって、二次の効果まで考慮して行う次の重回帰分析の結果には、この直交分解した分散分析で効果が大きく出た項が現われてくることが予想される。

Table 12 分散分析表 (実験第1組)

要因	自由度	平方和	不倫分数	°F	修正 °F
A	1	6626	6626	2.85	4.10
B	3	51392	17131	7.38	10.59
C	1	8889	8889	3.38	5.50
D	3	421103	140368	60.44	86.81
E	5	1128735	225747	97.21	139.62
F	3	216739	72246	31.11	44.68
B×E	15	83521	5568	2.40	3.44
C×E	5	4191	838	* 0.36	—
D×E	15	16226	1082	* 0.47	—
E×F	15	15718	1048	* 0.45	—
e	29	67348	2322		
T	95	2020488			

Table 13 分散分析表 (実験第2組)

要因	自由度	平方和	不倫分散	°F	修正 °F
A	1	3547	3547	2.13	2.22
B	3	61326	20442	12.27	12.78
C	1	18654	18654	11.20	11.66
D	3	415514	138505	83.14	86.57
E	5	1082993	216599	130.01	135.37
F	3	199561	66520	39.93	41.58
B×E	15	72697	4846	2.91	3.03
C×E	5	3794	759	* 0.46	—
D×E	15	32317	2154	* 1.29	—
E×F	15	17958	1197	* 0.72	—
e	29	48303	1666		
T	95	1956664			

Table 14 分散分析表 (実験第3組)

要因	自由度	平方和	不倫分数	°F	修正°F
A	1	362	362	* 0.12	
B	3	9861	3287	1.05	1.57
C	1	7837	7837	2.53	3.76
D	3	309258	103086	33.06	49.18
E	5	730477	146095	46.86	69.70
F	3	143579	47860	15.35	22.83
B×E	15	41751	2783	* 0.89	—
C×E	5	8182	1636	* 0.52	—
D×E	15	8745	583	* 0.19	—
E×F	15	18224	1215	* 0.39	—
e	29	90412	3118		
T	95	1368688			

Table 15 分散の期待値 (実験第1組)

要因	自由度	平方和	分散の期待値
A	1	$S_A$	$\frac{3}{2} \sigma^2 + 64 \sigma_A^2$
B	3	$S_B$	$\frac{3}{2} \sigma^2 + 32 \sigma_B^2$
C	1	$S_C$	$\frac{3}{2} \sigma^2 + 64 \sigma_C^2$
D	3	$S_D$	$\frac{3}{2} \sigma^2 + 32 \sigma_D^2$
E	5	$S_E$	$\frac{3}{10} \sigma^2 + \frac{96}{5} \sigma_E^2$
F	3	$S_F$	$\frac{3}{2} \sigma^2 + 32 \sigma_F^2$
B × E	15	$S_{B \times E}$	$\frac{13}{10} \sigma^2 + \frac{24}{5} \sigma_{B \times E}^2$
C × E	9	$S_{C \times E}$	$\frac{13}{10} \sigma^2 + \frac{48}{5} \sigma_{C \times E}^2$
D × E	15	$S_{D \times E}$	$\frac{13}{10} \sigma^2 + \frac{24}{5} \sigma_{D \times E}^2$
E × F	15	$S_{E \times F}$	$\frac{13}{10} \sigma^2 + \frac{24}{5} \sigma_{E \times F}^2$
e	29	$S_e$	$\frac{77}{58} \sigma^2$
T	95	$S_T$	



Table 16 各水準での PCT 平均値と信頼区間幅 (実験第 1 組)  
(単位 °F)

水準 要因	1	2	3	4	5	6	95%信頼区間巾
A	1874.1	1888.5					12.3
B	1872.4	1869.5	1867.6	1915.9			17.4
C	1873.0	1889.7					12.3
D	1805.0	1851.7	1914.0	1954.7			17.4
E	1740.5	1799.1	1843.0	1913.3	1945.4	2005.1	20.9
F	1935.8	1896.1	1871.2	1822.3			17.4

Table 17 各水準での PCT 平均値と信頼区間幅 (実験第 2 組)  
(単位 °F)

水準 要因	1	2	3	4	5	6	95%信頼区間巾
A	1876.0	1886.6					12.1
B	1876.2	1862.4	1868.3	1918.3			17.1
C	1869.2	1893.4					12.1
D	1808.9	1849.7	1907.4	1959.2			17.1
E	1748.2	1800.3	1840.7	1900.7	1955.6	2002.3	20.6
F	1921.0	1905.7	1880.9	1817.6			17.1

Table 18 各水準での PCT 平均値と信頼区間幅 (実験第 3 組)  
(単位 °F)

水準 要因	1	2	3	4	5	6	95%信頼区間巾
A	1871.0	1874.3					12.8
B	1874.3	1870.0	1860.9	1885.4			18.2
C	1864.8	1880.5					12.8
D	1814.5	1842.4	1889.9	1943.9			18.2
E	1742.8	1803.4	1850.8	1895.6	1935.2	2007.1	21.8
F	1914.3	1892.7	1856.8	1826.8			18.2

Table 19 分散分析のまとめ

要因	実験	第 1 組	第 2 組	第 3 組	平均
A		○			⊕
B		○ ○	○ ○		○ ⊕
C		○	○ ○ ○		○
D		○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○	○ ○ ⊕
E		○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○	○ ○ ⊕
F		○ ○	○ ○	○ ○ ○	○ ○ ⊕
B × E		○ ○			⊕
C × E					
D × E					
E × F					
誤差分散		1616.9	1598.89	2095.95	

○ 5%の危険率で有意  
 ○○ 1% " "  
 ○○○ 誤差の2倍以上

Table 20 4水準の直交多項式の係数

	$b_1$	$b_2$	$b_3$
$W_1$	-3	1	-1
$W_2$	-1	-1	3
$W_3$	1	-1	-3
$W_4$	3	1	1
$\lambda^2 S$	20	4	20

Table 21 直交分解を行った分散分析表 (実験第1組)

要因	自由度	平方和	不偏分散	修正分散比
A	1	6626	6626	3.63
B	(3)	(51392)		
B一次	1	26488	26488	14.50
B二次	1	20989	20989	11.49
B三次	1	3915	3915	2.14
C	1	8889	8889	4.87
D	3	421103	421103	230.54
E	(5)	(1128735)		
E一次	1	766870	766870	419.83
E二次	1	395	395	
E残り	3	361470	120490	65.96
F	(3)	(216739)		
F一次	1	213617	213617	116.95
F二次	1	688	* 688	
F三次	1	2434	* 2434	
B×E	(15)	(83521)		
$B_l \times E_l$	1	44498	44498	23.36
残り	14	39023	* 2787	
C×E	(5)	(4191)		
$C_l \times E_l$	1	1194	1194	
残り	4	2997	* 749	
D×E	15	16226	1082	
E×F	(15)	(15718)		
$E_l \times F_l$	1	5030	5030	2.75
残り	14	10688	* 763	
e	29	67348	2322	
合計	95	2020488		

Table 22 直交分解を行った分散分析表 (実験第2組)

要因	自由度	平方和	不偏分散	修正分散比
A	1	3547	3547	2.25
B	(3)	(61326)		
B一次	1	27860	27860	17.57
B二次	1	32512	32512	20.50
B三次	1	954	954	
C	1	18654	18654	11.76
D	3	415514	138505	87.33
E	(5)	(1082993)		
E一次	1	737858	737858	465.21
E二次	1	180	180	
E残り	3	344955	114985	72.50
F	(3)	(199561)		
F一次	1	179712	179712	113.31
F二次	1	18495	18495	11.66
F三次	1	1354	* 1354	
B×E	(15)	(72697)		
$B_{\ell} \times E_{\ell}$	1	26188	26188	16.51
残り	14	46509	3322	2.09
C×E	(5)	(3794)		
$C_{\ell} \times E_{\ell}$	1	1185	* 1185	
残り	4	2609	* 652	
D×E	15	32317	* 2154	
E×F	(15)	(17958)		
$E_{\ell} \times F_{\ell}$	1	1480	* 1480	
残り	14	16478	* 1177	
e	29	48303		
合計	95	1956664		

Table 23 直交分解を行った分散分析表 (実験第3組)

要因	自由度	平方和	不偏分散	修正分散比
A	1	362	* 362	
B	(3)	(9861)		
B一次	1	934	934	
B二次	1	6577	6577	3.70
B三次	1	2350	2350	1.32
C	1	7837	7837	4.41
D	3	309258	103086	58.05
E	(5)	730477		
E一次	1	709371	709371	399.44
E二次	1	126	126	
E残り	3	20980	6993	3.94
F	(3)	(143579)		
F一次	1	142356	142356	80.16
F二次	1	557	* 557	
F三次	1	666	* 666	
B×E	(15)	(41751)		
$B_e \times E_e$	1	19579	19579	11.02
残り	14	22172	* 1584	
C×E	(5)	(8182)		
$C_e \times E_e$	1	3046	* 3046	
残り	4	5136	* 1284	
D×E	15	8745	* 583	
E×F	(15)	(18224)		
$E_e \times F_e$	1	7245	7245	4.08
残り	14	10979	* 784	
e	29	90412	3118	
合計	95	1368688		

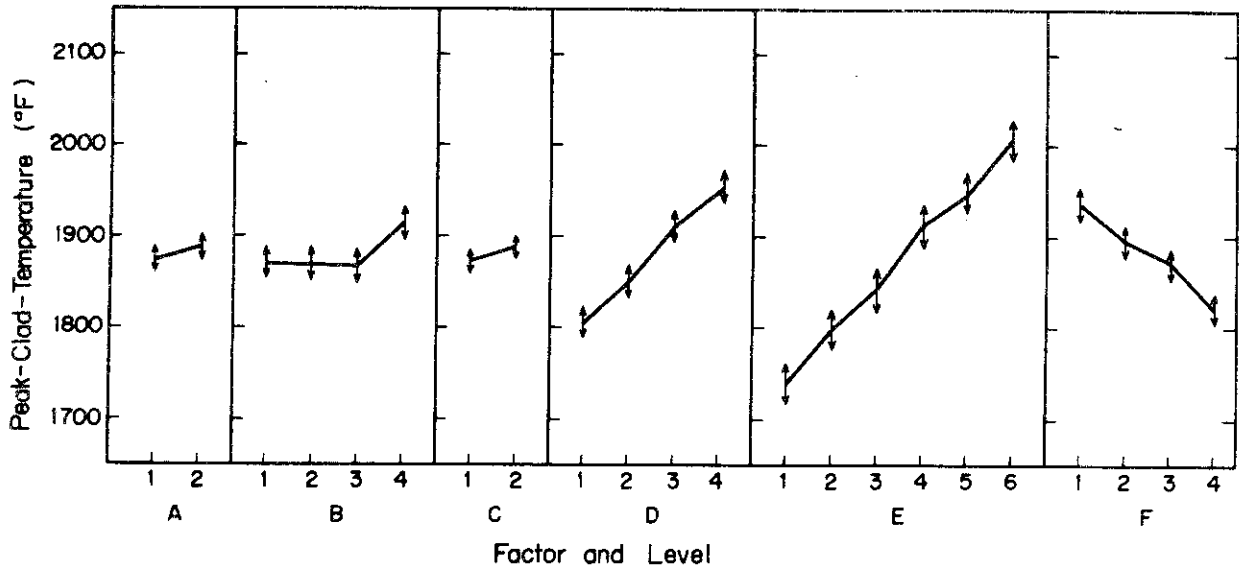


Fig. 9 Factorial effect curve (The first group of experiments)

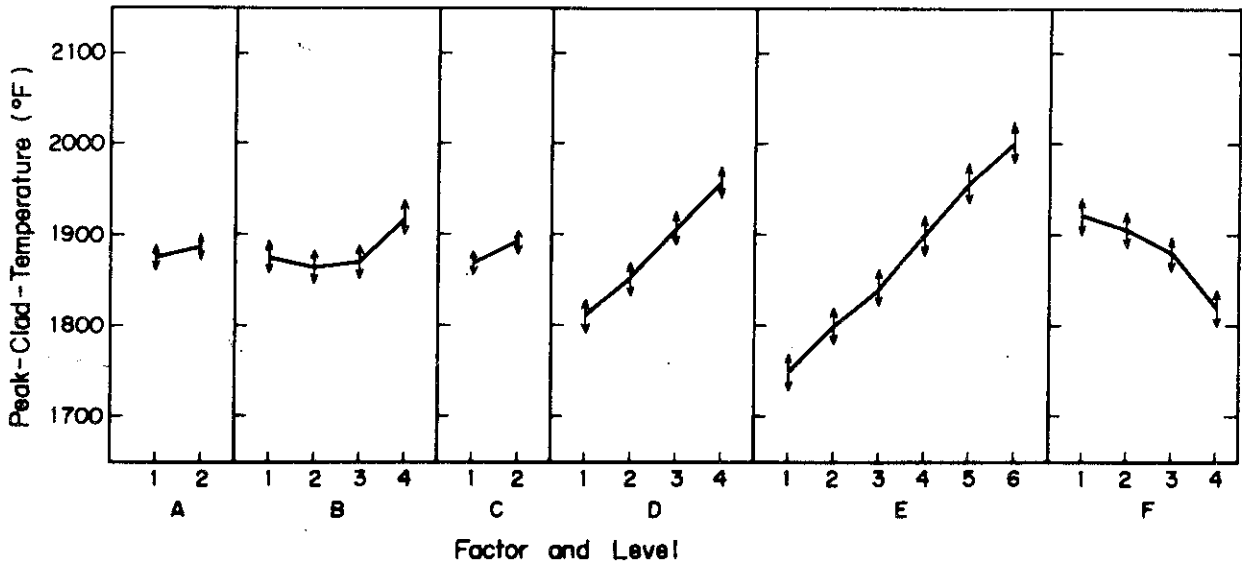


Fig. 10 Factorial effect curve (The second group of experiments)

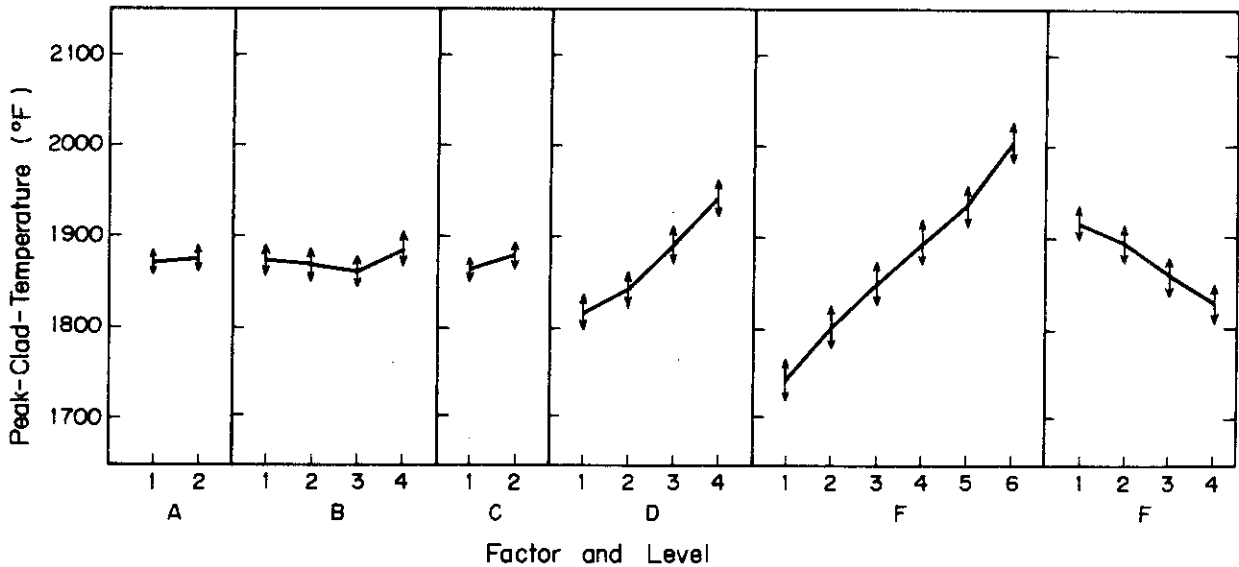


Fig. 11 Factorial effect curve (The third group of experiments)

## 5. 重回帰分析

3.5項で決定した各因子を独立変数，数値実験で得た PCT, CDT を従属変数として重回帰分析を行った。独立変数は各因子の2次の項，交互作用についてはすべての交互作用の項を加え，変数増加法による重回帰分析を行って回帰式にとり入れる変数を選んだ。

重回帰分析の入力データは，各因子の数値そのままの値でなく，平均値との差，すなわち次のようにした。

$$A \leftarrow A - \bar{A}$$

$$A^2 \leftarrow (A - \bar{A})^2$$

$$A \times B \leftarrow (A - \bar{A})(B - \bar{B})$$

さらに，分析の対象とした数値実験のデータは，第1組と第3組の実験を合わせた  $96 \times 2 = 192$  個のデータ・セットとした。

この分析には，変数増加法による重回帰分析コード STMLR (Stepwise Multiple Regression) を使用した。このプログラムはデータの入力を実行するサブルーチン DATA を除いて，汎用的に用いることが可能である。以下に計算の結果得られた PCT, COT の回帰式を示す。ただし，回帰による変動が変数増加によって全変動の 0.5% 以上増加しなくなったら計算を停止することとした。

$$\begin{aligned} & \frac{\text{PCT (°F)} - 1873.4464}{118.16489} \\ &= 0.7362430 \times \frac{E - 143.84688}{17.203354} \\ & - 0.5364147 \times \frac{D - 1102.2190}{356.05560} \\ & - 0.3242239 \times \frac{F - 4.6249375}{0.92517132} \\ & + 0.1811710 \times \frac{(D - 1102.2190)^2 - 126115.29}{167112.76} \\ & - 0.1469119 \times \frac{(B - 1591.8396)(E - 143.84688) - 61.162964}{4058.9586} \\ & + 0.1099140 \times \frac{(B - 1591.8396)^2 - 53676.507}{49294.510} \\ & + 0.1005300 \times \frac{(B - 1591.8396)(D - 1102.2190) + 235.47725}{88253.535} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \frac{\text{COT (mils)} - 0.52137715}{0.27631435} \\
&= 0.7657551 \times \frac{E - 143.84688}{17.203353} \\
&\quad - 0.5947173 \times \frac{D - 1102.2190}{356.05560} \\
&\quad - 0.2621457 \times \frac{F - 4.6249375}{0.92517132} \\
&\quad - 0.1472704 \times \frac{(E - 143.84688)(D - 1102.2190) + 36.949512}{5902.3424} \\
&\quad + 0.2253300 \times \frac{(D - 1102.2190)^2 - 126115.29}{167112.76} \\
&\quad - 0.1436785 \times \frac{(E - 143.84688)(F - 4.6249375) + 0.43882304}{16.260502} \\
&\quad + 0.1056834 \times \frac{(E - 143.84688)^2 - 294.41396}{274.23254}
\end{aligned}$$

この式でPCTについては、全変動の93.2%を説明しており、標準誤差は1.9%である。またCOTについては、それぞれ97.1%、1.3%である。

分散分析表および直交分解を行った分散分析表とPCTの回帰式とを比較すると、回帰式に現われている項は分散分析でも有意と出ているものであることがわかる。

また、PCTの回帰式にはB×Dの項が現われている。これはB×Dの交互作用がPCTに効果をもっていると考えられる。しかしB×Dの交互作用は実験計画の段階では予想していなかった要因である。したがって、分散分析表には当然現われていない。そこで、直交表わりつけの時点にもどって考えてみる。L<sub>64</sub>表の補助表(Table 5)から、B×Dの情報が現われる列は、

4, 8, 12, 24, 28, 36, 44, 52, 56

の各列であり、この中にはFをわりつけた24, 44, 52, Cをわりつけた28の各列が含まれている。すなわちB×DとFおよびCは交絡している。これは、わりつけの段階でB×Dが小さく無視できるとしたためである。分散分析の結果得られたF, Cについての効果の中に、B×Dの効果も混っていることになる。



## 6. 分布形の推定

ここでは、PCTとCOTの分布について、実験計画でわりつけた96回の計算結果から推定できるそれぞれの分布形を求めた。さらに、回帰式を用いて、すべての水準組合せ1536回の計算結果からも分布形を推定した。

### 6.1 最高被覆管表面温度の分布形

#### 6.1.1 少数回計算から得られた分布形

96回の計算実験により得られたPCTの度数分布のヒストグラムを、実験第1組、第2組、第3組について、それぞれFig. 12, 13, 14に示す。これら3つの図から、異なった水準組合せ、また水準内でのランダム・サンプリングの違い、これらが計算結果の分布に与える系統的な効果はどちらにも認められないことがわかる。したがって、Table 1に示したような範囲内で因子が一樣に変化する場合を仮定したときには、これらのPCTの度数分布結果はこのままで確率分布と解釈できる。これら3つのPCTの分布は有意水準5%の $\chi^2$ テスト<sup>(12)</sup>によって正規分布と差がないことが検定された。

さて、次に因子に対する入力の実験的な分布を考慮して、予想されるPCTのより現実的な確率分布を見ることにする。

Fig. 15に一つの仮定として採用したこれらの入力因子の分布確率を示し、これによるPCTの確率分布はFig. 16, 17, 18に示すごとくなる。この結果はFig. 12, 13, 14よりも現実的であると思われる。そして、これもまた5%有意水準で正規分布と差がないことが検定された。これは平均値において若干低く(15°F)、標準偏差も先の値より小さい。

正規分布はPCTを $y$ とするとその関数は、

$$f(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp \left[ -\frac{(y-m)^2}{2\sigma^2} \right]$$

$m$  : 平均値

$\sigma$  : 標準偏差

である。

#### 6.1.2 多数回計算から得られた分布

ここでいう多数回計算とは、5節で得たPCTの回帰式を使用したすべての水準組合せ、すなわち1536回の計算のことである。この場合も、因子の値はランダム・サンプリングを行っている。この結果得られた度数分布のヒストグラムをFig. 19に示した。また、因子に確率分布を与えたときのヒストグラムをFig. 20に示した。どちらも6.1.1項で示した少数回計算の結果と大変よくあっている。ただし、多数回計算の結果の方が標準偏差が小さくなっている。これもま

た、有意水準 5% で正規分布と差がないことが検定された。

### 6.1.3 最高被覆管表面温度の分布から得た各種数値

実験第 1 ~ 3 組の少数回計算の結果の度数分布, Fig. 12, 13, 14, 16, 17, 18 から以下のものを試みに求めた。

- 1) PCT の出現確率が最高となる区間
- 2) 分散
- 3) 標準偏差
- 4) 平均値
- 5) PCT が 2000, 2100, 2200 °F を越える確率
- 6) 上側 1, 5, 10% 点

この結果を Table 24 に示す。我々の今回の数値実験では PCT 2200 °F 未満という規制値に対し 2200 °F 以上になる確率が 0.5% 以下となっている。今回の場合 3 組の数値実験の計算結果の中に 2200 °F を越える値はなかった。MOXY-EM コードの入力の中で因子として選んだ変数については保守的な EM 値もとっているが、その他の入力およびモデルは EM 計算である。したがって、PCT が 2200 °F を越えることはあまり起こりえないことがわかる。

ただし、今回の我々の研究では方法論の確立を主目的としており、この小節では試みとして 2200 °F を起える確立を計算してみたのである。将来は現象の様子をより正しく予想する計算コードを使用して、上述の評価をやり直すことが必要である。

## 6.2 最大被覆管酸化層厚さの分布形

### 6.2.1 少数回計算から得られた分布形

Fig. 21, 22 はそれぞれ MOXY-EM の 96 回計算の実験第 1 組, 第 3 組から得られた、入力の一様分布に対する COT の度数分布のヒストグラムである。この COT の分布は入力に Fig. 15 のような分布を与えると、Fig. 23, Fig. 24 のようになる。そして、これらの分布はすべて有意水準 5% で対数正規分布であることが  $\chi^2$ -テスト<sup>(12)</sup> によって推定された。

対数正規分布の関数の形は COT を  $x$  とすると、

$$g(x) = \frac{1}{\alpha \sqrt{2\pi}} \cdot \frac{1}{x} \cdot \exp \left[ -\frac{(\log x - \beta)^2}{2\alpha^2} \right]$$

となる。

ここで

$$\begin{cases} \text{平均値} & m = \exp \left( \beta + \frac{\alpha^2}{2} \right) \\ \text{分散} & s = m^2 (r - 1) \quad r \equiv e^{\alpha^2} \end{cases}$$

$$\therefore \begin{cases} \alpha^2 = \log \left( 1 + \frac{s}{m^2} \right) \\ \beta = \log m - \frac{\alpha^2}{2} \end{cases}$$

### 6.2.2 多数回計算から得られた分布形

PCT のときと同様に、COT の回帰式を使用したすべての水準組合せの計算 1536 回を行った。その結果得られた度数分布のヒストグラムを Fig. 25 に示す。また因子に確率分布を与えたヒストグラムを Fig. 26 に示す。どちらも、少数回計算のときと同様有意水準 5% で対数正規分布であると推定される。

Table 24 最高被覆管表面温度の分布から得た各種数値

項目	一様分布			分布あり (Fig. 15)		
	第1組 (Fig. 12)	第2組 (Fig. 13)	第3組 (Fig. 14)	第1組 (Fig. 16)	第2組 (Fig. 17)	第3組 (Fig. 18)
出現確率が最高となる区間 (°F)	1920 ~ 1990	1850 ~ 1920	1780 ~ 1850	1920 ~ 1990	1850 ~ 1920	1780 ~ 1850
分散	15682.1	15522.2	13013.3	11193.6	11794.0	9097.34
標準偏差 (°F)	125.2	124.6	114.1	105.8	108.6	95.38
平均値 (°F)	1871.5	1874.8	1877.7	1862.0	1860.9	1871.7
2000 °F を越える確率 (%)	15.15	15.79	14.19	9.61	9.94	8.93
2100 °F を越える確率 (%)	3.36	3.52	2.56	0.94	1.79	0.84
2200 °F を越える確率 (%)	0.46	0.45	0.20	0.07	0.09	0.03
1% 上側	2162.4	2164.6	2143.0	2108.5	2200.0	2094.6
5% 側	2077.1	2079.7	2065.3	2036.0	2039.5	2028.6
10% 側	2031.6	2034.4	2023.9	1997.4	1999.9	1993.8

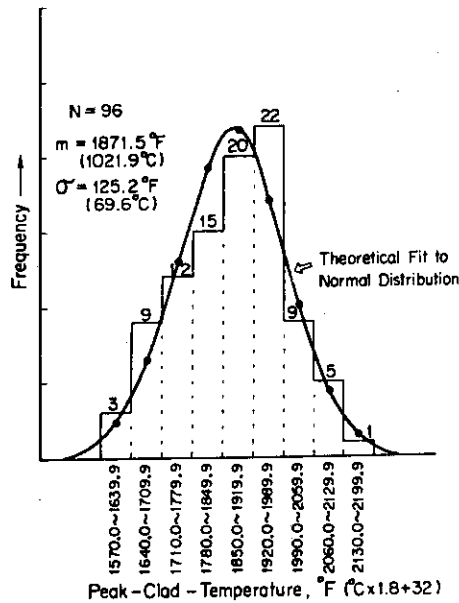


Fig. 12 Output distribution of PCTs, or probability distribution of PCTs when the factor uniformly varies through the levels within the range (The first group of experiments)

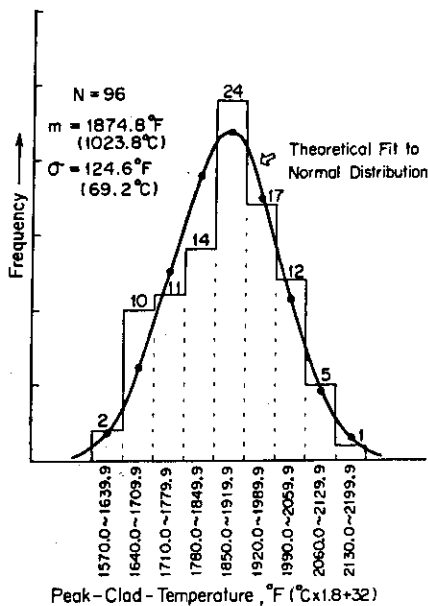


Fig. 13 Output distribution of PCTs, or probability distribution of PCTs when the factor uniformly varies through the levels within the range (The second group of experiments)

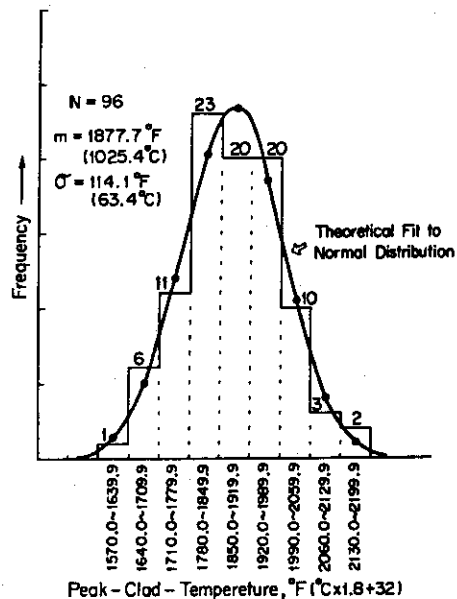


Fig. 14 Output distribution of PCTs, or probability distribution of PCTs when the factor uniformly varies through the levels within the range (The third group of experiments)

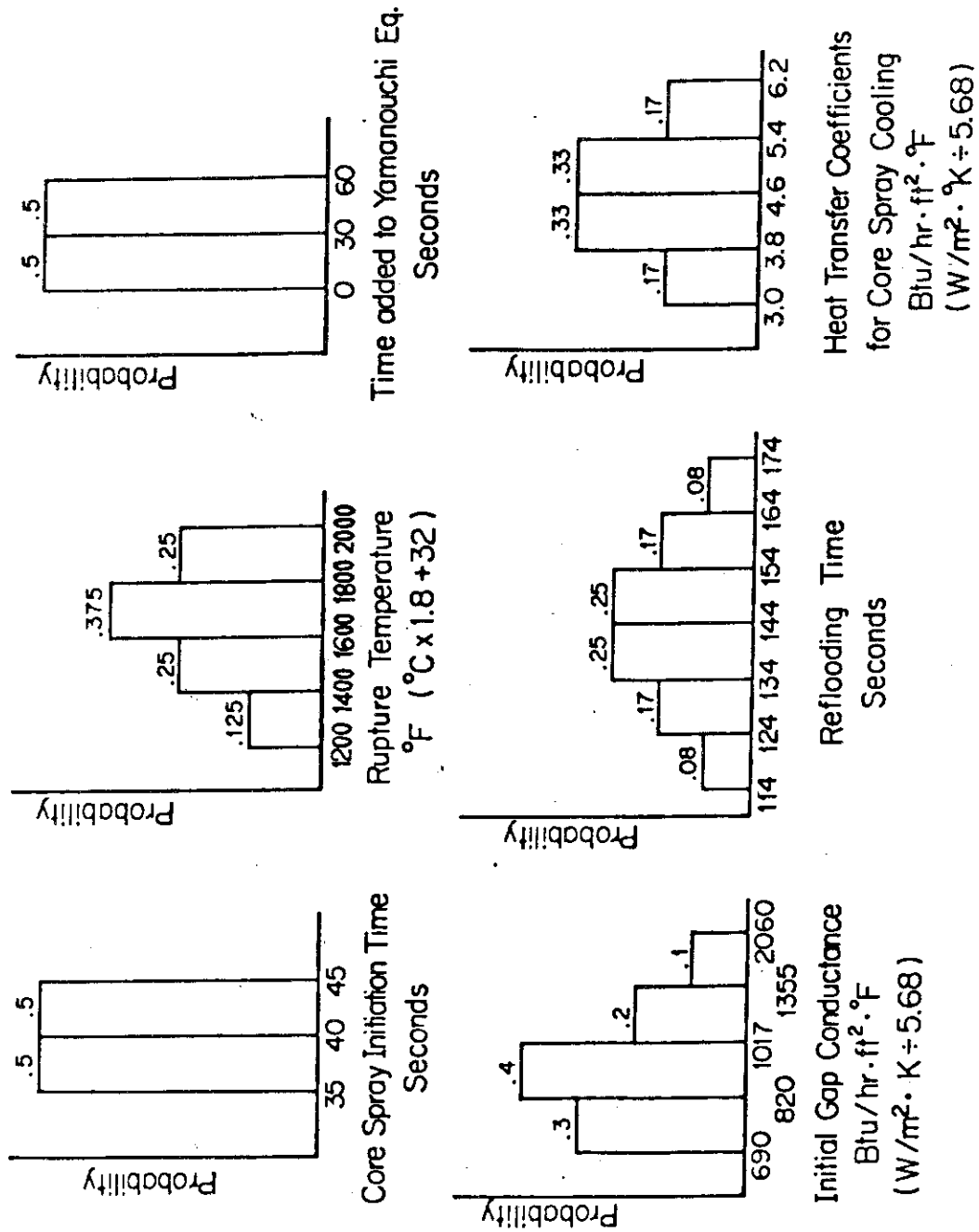


Fig. 15 Input data distribution assumed

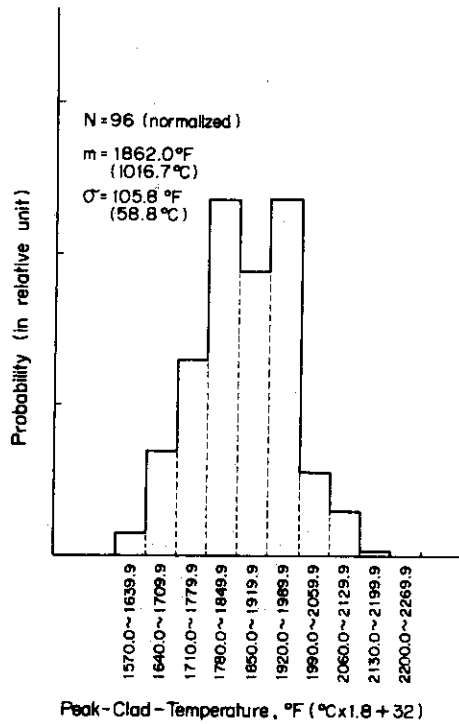


Fig. 16 Probability distribution of PCTs with the input data distribute as assumed in Fig.15 (The first group of experiments)

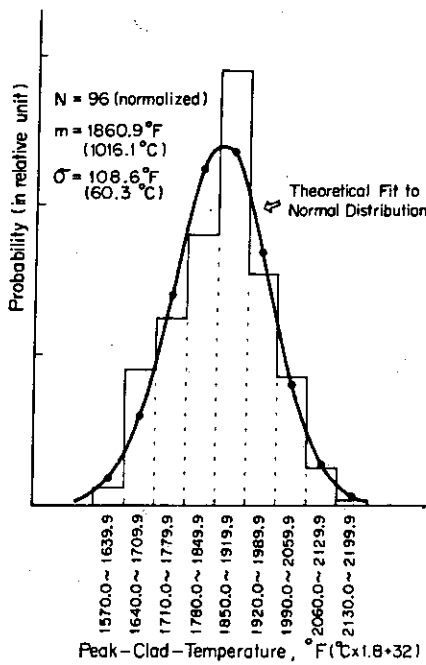


Fig. 17 Probability distribution of PCTs with the input data distribute as assumed in Fig.15 (The second group of experiments)

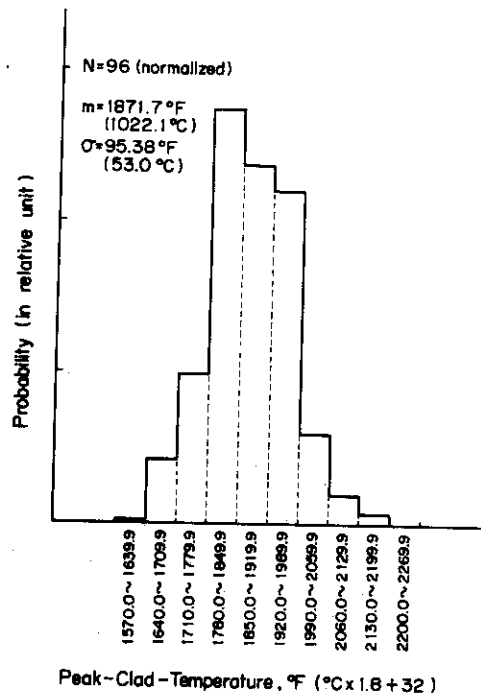


Fig. 18 Probability distribution of PCTs when the input data distribute as assumed in Fig.15 (The third group of experiments)

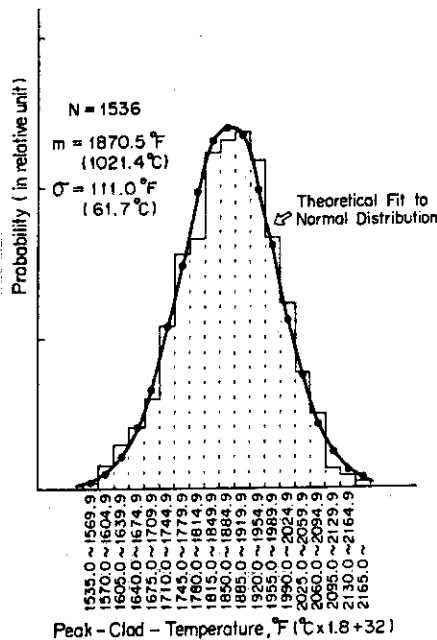


Fig. 19 Probability distribution of PCTs with uniform input data distributions, calculated by the regression equation of MOXY-EM

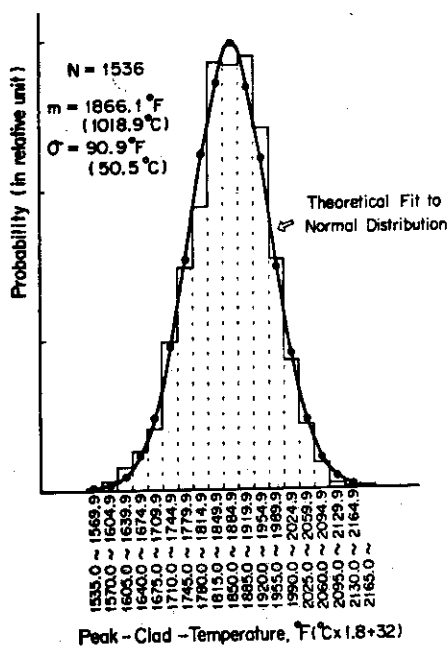


Fig. 20 Probability distribution of PCTs when the input data vary as assumed in Fig. 15, calculated by the regression equation of MOXY-EM

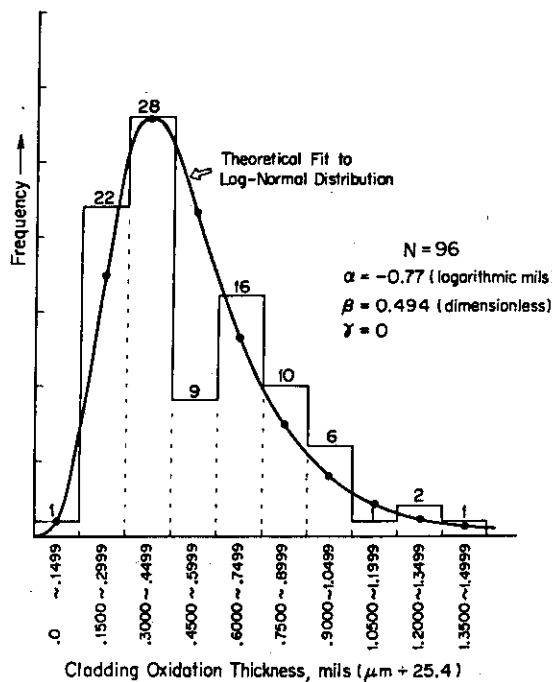


Fig. 21 Output distribution of COTs, or probability distribution of COTs when the factor uniformly varies through the levels within the range (The first group of experiments)



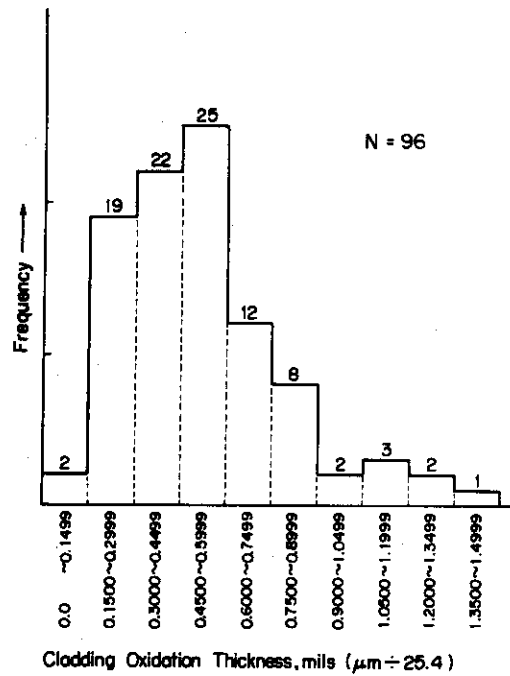


Fig. 22 Output distribution of COT  
COTs, or probability  
distribution of COTs when  
the factor uniformly varies  
through the levels within  
the range (The third group  
of experiments)

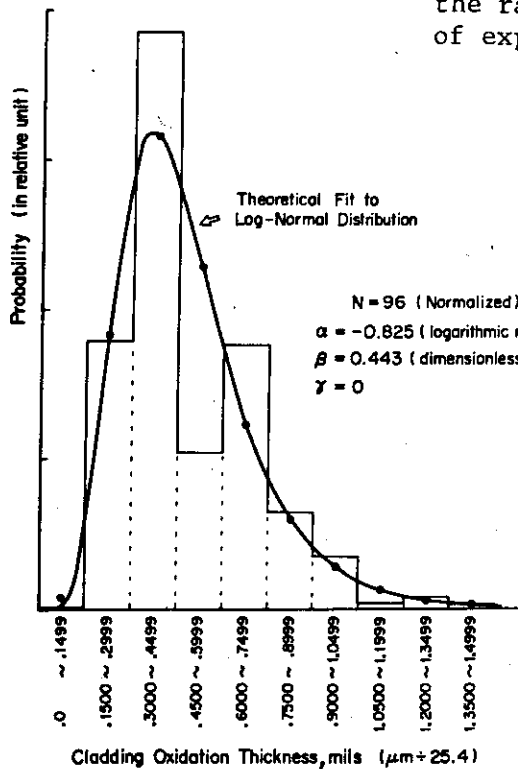


Fig. 23 Probability distribution  
of COTs when the input  
data distribute as assumed  
in Fig. 15 (The first  
group of experiments)

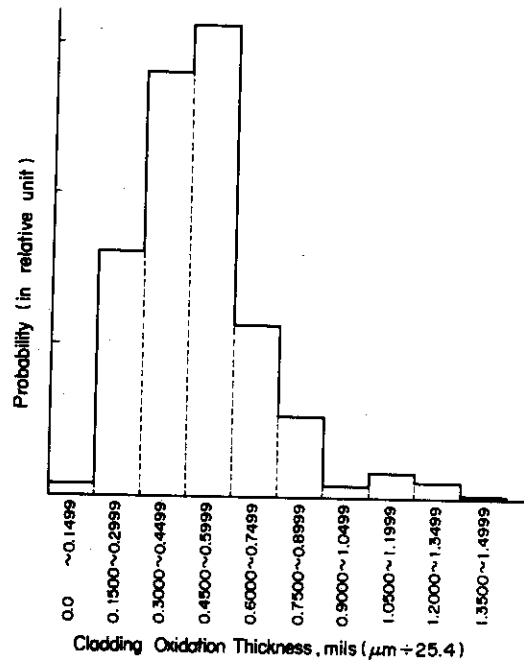


Fig. 24 Probability distribution  
of COTs when the input  
data distribute as assumed  
in Fig.15 (The third group  
of experiments)

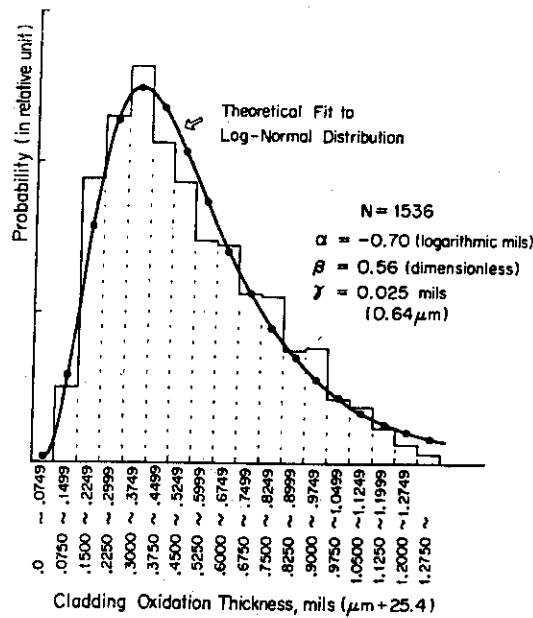


Fig. 25 Probability distribution of COTs with uniform input data distributions, calculated by the regression equation of MOXY-EM

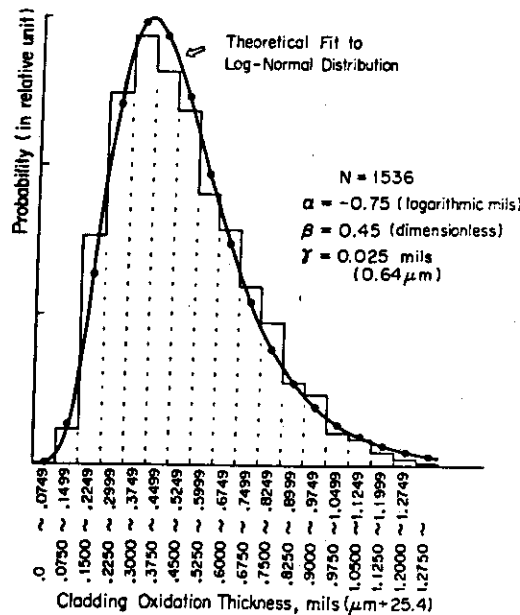


Fig. 26 Probability distribution of COTs when the input data vary as assumed in Fig.15, calculated by the regression equation of MOXY-EM

## 7. 最高被覆管表面温度と最大被覆管酸化層厚さの統計的關係

Fig. 27, 28 は、それぞれ実験第1組、実験第3組についてPCTとCOTを片対数グラフにプロットしたものである。この2つの図から、PCTと $\ln$  COTとは線型の関係にあると見ることができよう。

すなわち

$$PCT = T_0 \ln \frac{COT + r}{\xi}$$

と書くことができる。ここで

$$PCT \equiv y$$

$$COT \equiv x$$

とおくと、

$$y = T_0 \ln \frac{x + r}{\xi}$$

となる。これを $y$ の正規分布関数 $f(y)$ に代入して $x$ の分布関数 $g(x)$ を求めてみる。

$$f(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp \left[ -\frac{(y-m)^2}{2\sigma^2} \right]$$

$$g(x) = f(y) \frac{dy}{dx}$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \left\{ \exp \left[ -\frac{(T_0 \ln \frac{x+r}{\xi} - m)^2}{2\sigma^2} \right] \right\} \frac{T_0}{x+r}$$

$$= \frac{T_0}{\sqrt{2\pi}\sigma} \frac{1}{x+y} \exp \left[ -\frac{T_0^2 \left( \ln \frac{x+r}{\xi} - \frac{m}{T_0} \right)^2}{2\sigma^2} \right]$$

$$= \frac{T_0}{\sqrt{2\pi}\sigma} \frac{1}{x+y} \exp \left[ -\frac{\left( \ln(x+r) - \ln \xi - \frac{m}{T_0} \right)^2}{2\sigma^2/T_0^2} \right]$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2\pi}\alpha} \frac{1}{x+y} \exp \left[ -\frac{(\ln(x+r) - \beta)^2}{2\alpha^2} \right]$$

但し、

$$\alpha = \sigma / T_0$$
$$\beta = \ln \xi + \frac{m}{T_0}$$
$$r = r$$

m : 正規分布の平均値  
 $\sigma$  : 正規分布の標準偏差

この結果は、6.2節でヒストグラムから得た COT の分布関数と一致する。

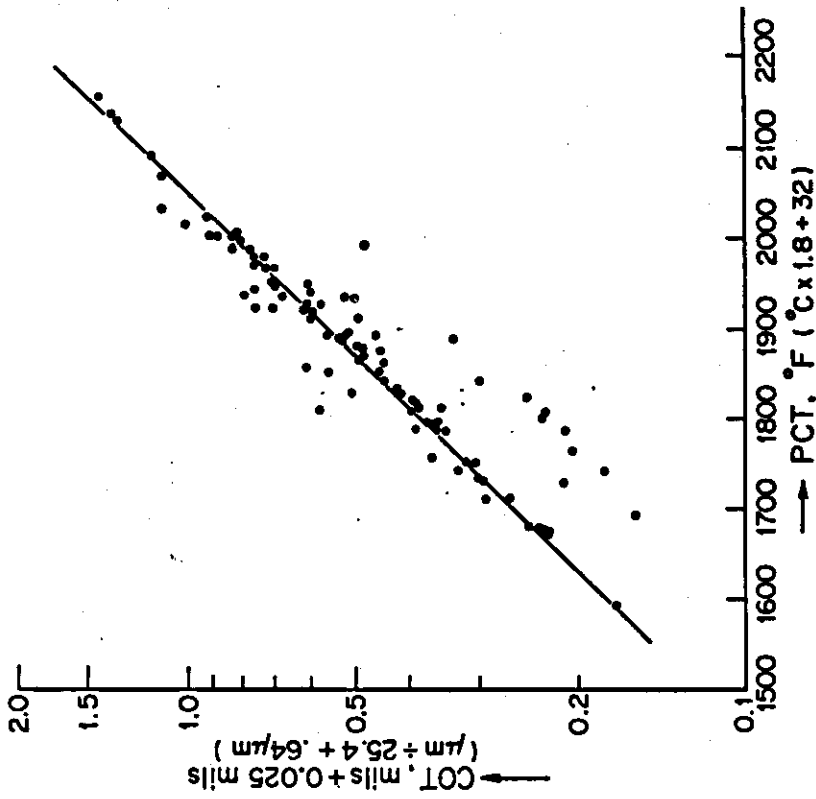


Fig. 28 The relation between COTs and PCTs. The plotting shows the  $[COT+0.025]$  is approximately given by the exponential of PCT. (The third group of experiments)

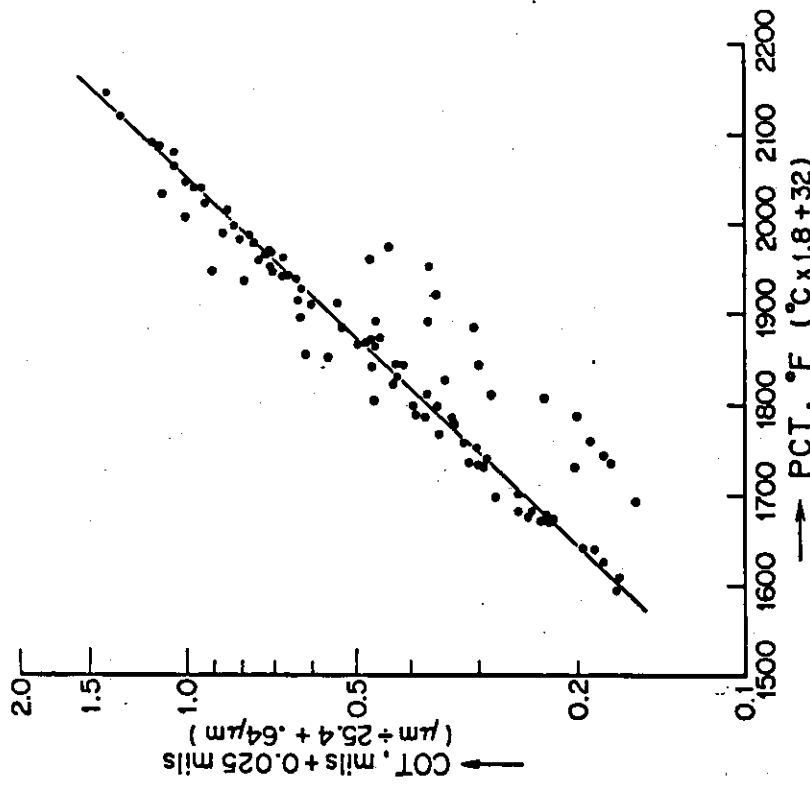


Fig. 27 The relation between COTs and PCTs. The plotting shows the  $[COT+0.025]$  is approximately given by the exponential of PCT. (The first group of experiments)

## 8. ま と め

以上、BWR・LOCA 時における燃料棒被覆管の最高表面温度と最大酸化層厚さの確率分布を得ること、およびその方法を確認する目的でバラツキ解析 (Uncertainty Analysis) を行ってきた。以下に得られた結論をまとめる。

結論 1. BWR の LOCA 時には、燃料棒被覆管の最高表面温度は正規分布を、また最大酸化層厚さは対数-正規分布をとることが確認された。ただし、これは、6 個の変数 (炉心スプレー開始時刻、被覆管破裂温度、チャンネル・ボックス濡れに関する山内の式から得た時刻からの遅れ時間、ギャップ熱伝達係数初期値、再冠水時刻、炉心スプレー中の表面熱伝達係数) のみが Table 1 で与えられた数値の範囲を変動すると仮定された場合で、かつ、MOXY-EM コード・モデルが妥当なものであれば、という条件の下に限る。

結論 2. 上記の場合、最大酸化層厚さ(x)と最高表面温度(y)の間には統計的に見て次式のような簡単な関係が成立つ。

$$y = T_0 \ln \frac{x + r}{\xi}$$

$T_0, r, \xi$  : 定数

結論 3. 因子として選んだ 6 個の変数のみが変動するものであり、他の計算条件は標準値に固定された場合、MOXY-EM 計算コードによる最高表面温度と最大酸化層厚さの計算結果に近い値を与えることのできる、6 個の変数より成る多項式を得ることができた。

結論 4. 今回の数値実験において採用した計画法は次の通りであった。

1) その効果を見たい要因の種類および各々の上下限値を決め、その区間内をさらに細かく水準にわけるときの水準幅は、水準にわけたことによる要因効果への影響がなくなるように充分小さく、かつ全体の水準組合せ回数が少なくなるように充分大きくとる。

2) 直交表による水準割り付けを実施する (直交表  $L_{64}$ )。とり入れる交互作用を少なくする (3 次以上は無視、2 次も最小限に止める)。

3) 水準数の多い要因 E の割り付けを一部追加法により処理する。こうして得られた二組の直交表割り付けより、第一の割り付けのものに第二の割り付けの半分を加えて今回の計画とした。ここに得られた水準組合せ (96 回) は、もはや相互に直交はしていない。この割り付けの特徴の一つは、各要因の出現回数が相互に等しいことである。また、各割り付け点は 6 次元空間 (A ~ F の張る空間) の中に、ある規則性の下に均一にちらばっているといえる。

4) 要因の各水準毎の値は、その水準区間内で実験毎にランダムに選択する。

5) こうして数値実験を行い、得られた最高表面温度、最大酸化層厚さの度数分布を調べて関数型を推定する。

6) 一方、上記実験セットを各因子の水準番号を相互に交換して同じわりつけ表に従ってもう一回繰り返す、前回と合せたデータ・セットを対象に重回帰分析を実施する。分析対象データの

数を増やしたのは、分析の精度を上げるためである。

7) 6)で得られた回帰式を利用して経済的に全組合せ(1536回)について計算を実施し、その度数分布を調べて5)で調べた結果を再確認する。

8) 3)の計画の元になる64個の組合せ2つについての実験結果の分散分析も合せて試みた。しかしこの件は、7)までに述べた実験の計画、実施、その解析の主たる流れには特に関連がない。

9) 以上の方法により、妥当な結果を得ることができた。したがってこの方法は、今後の同様な解析に際してもそのまま利用できる、あるいは方法の改良に参考になると思える。

今回は試験的な数値実験であったので、MOXY-EMコードを使用したのであるが、バラツキ解析の本来の目的はBE(Best Estimate)コードを使用することによって、より現実的な分布を得ることにあると思われる。これによって、安全評価計算用の保守的なEMコードがどの程度保守的なものなのかを評価することができる。したがって、できるだけ早い時期にBEコードが開発されることを望むしだいである。

## 謝 辞

本研究にあたっては、安全性コード開発室の阿部清治氏による入力データに関する有意義な討論、御教示に対し、感謝の意を表する。

数を増やしたのは、分析の精度を上げるためである。

7) 6)で得られた回帰式を利用して経済的に全組合せ(1536回)について計算を実施し、その度数分布を調べて5)で調べた結果を再確認する。

8) 3)の計画の元になる64個の組合せ2つについての実験結果の分散分析も合せて試みた。しかしこの件は、7)までに述べた実験の計画、実施、その解析の主たる流れには特に関連がない。

9) 以上の方法により、妥当な結果を得ることができた。したがってこの方法は、今後の同様な解析に際してもそのまま利用できる、あるいは方法の改良に参考になると思える。

今回は試験的な数値実験であったので、MOXY-EMコードを使用したのであるが、バラツキ解析の本来の目的はBE(Best Estimate)コードを使用することによって、より現実的な分布を得ることにあると思われる。これによって、安全評価計算用の保守的なEMコードがどの程度保守的なものなのかを評価することができる。したがって、できるだけ早い時期にBEコードが開発されることを望むしだいである。

## 謝 辞

本研究にあたっては、安全性コード開発室の阿部清治氏による入力データに関する有意義な討論、御教示に対し、感謝の意を表する。



## 参 考 文 献

- (1) N. D. Cox : "Summary of Code Uncertainty Analysis Methods," Presented at the 3rd Water Reactor Safety Research Information Mtg., Washington (1975).
- (2) M. D. McKay : "An Example of Statistical Sensitivity Analysis Techniques," presented at the 3rd Water Reactor Safety Research Information Mtg., Washington (1975).
- (3) T. Shimooka & K. Matsumoto : *Nucl. Technol.*, **35**, 1, 119 (1977).
- (4) D. R. Evans : "MOXY: A Digital Computer Code for Core Heat Transfer Analysis," IN-1392, Idaho Nuclear Corporation (1970).
- (5) Regulatory Staff : "WREM : Water Reactor Evaluation Model," NUREG-75/056, p. 4-1, U. S. Nuclear Regulatory Commission (1975).
- (6) Regulatory Staff : "Water Reactor Evaluation Model (WREM) : BWR Nodalization and Sensitivity Studies," U. S. Nuclear Regulatory Commission (1975).
- (7) 田口玄一 : "新版実験計画法," 丸善, 東京 (1962).
- (8) 中山伊知郎編 : "統計学辞典," 東洋経済新報社 (1957).
- (9) 島田正三 : "やさしい直交配列の話," 日本規格協会, 東京
- (10) 田口玄一 : "直交表と線点図," 丸善, 東京 (1962).
- (11) 田口玄一 : "実験計画数値表," 丸善, 東京 (1962).
- (12) 日本規格協会編 : "統計数値表 JSA-1972," 日本規格協会, 東京, (1972).