

# 原子力研究におけるアナログ計算機の応用

## Application of Analogue Computers in Atomic Power Research

川 合 敏 雄\* 衣 川 武\*  
Toshio Kawai Takeshi Kinugawa

### 内 容 梗 概

アナログ計算機の応用について、主として日立製作所中央研究所の原子炉設計係が最近行った計算例を中心に述べる。

第一は小形実験炉の事故解析例で、時間と空間に関する偏微分方程式を扱うもの、第二は沸騰水形原子炉の出力分布の計算例で、非線形微分方程式の境界値問題、第三は振動磁場内のイオンの軌跡の追跡例で、連立非線形微分方程式である。

以上の諸例を通してアナログ計算機の特長をあげ、問題の種類と目的によりアナログ計算機が計算手段としてきわめて有力であることを結論する。

### 1. 緒 言

原子力研究の発展に伴い、具体的な問題が身近に起こってくるのに比例して、実際の計算により現象を量的にはあくする必要性が増加しつつある。ことに原子炉とか臨界集合体のような実験装置による研究がまだ十分に利用できない現状では、現象の追求のために計算を行うことが重要な研究手段となっている。また、原子力はまだ経験が浅く、その安全性については格別の注意を払わなければならないなどの事情で、あらかじめ慎重な計算を十分にしておく必要がある。

一方計算機の発達により、むずかしさの概念が変化して、これまで解けなかった問題でも、解くべき方程式さえはっきりしている場合は、複雑な現象であっても容易に解くことができるようになった。

原子炉の問題には基礎的な現象そのものがはっきりしないために困難なものもあるが、個々の現象が明らかであってもそれが複雑にからみ合っているためにはっきりしないものも多い。後者の場合は計算機の活用が研究方法としても最も適当と考えられる。

現象を記述する方程式を忠実にプログラミングし、計算条件を数値的な入力として機械に入れ、結果をとり出す操作は見方を変えると一種の実験であって、計算機を万能実験装置とみなすこともできよう。計算機の入力と出力の関係を本当の実験データによって校正しておけば、妥当な範囲のパラメータについては実験なしでも計算結果を信頼することができる。これまでは理論がこの役割を果していたし、今後も理論の受持つ役割の重要性は少しも減るものではないが、具体的な数値結果まで求めるような仕事については計算機に組みこんだプログラムにより押しボタン式で解をうる方法が能率的で正確である。

日立製作所中央研究所の原子炉設計室では早くからこ

\* 日立製作所中央研究所

のような構想にもとづいた作業を精力的に行っており、デジタル計算機を用いた成果は一部公けにされているが<sup>(1)(2)</sup>、ここではアナログ計算機の応用例を二、三まとめて記し、デジタル形計算機に対比してその特長がどのように発揮できるかを例示する。

### 2. 原子炉動特性の解析例 (連立微分方程式)

連立微分方程式を解くことは、アナログ計算機の最も得意とするところであり、これまでの応用例もこれに属するものが数多い。

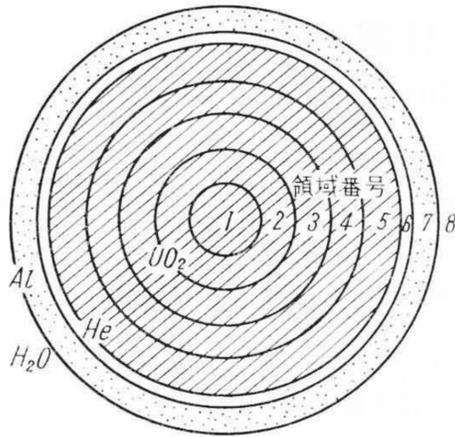
ここにあげる例は日立製作所が建設を予定している小形原子炉の事故時の動特性解析である。

原子炉運転中は中性子増倍率  $k$  は 1 に保たれているが、もし事故によりこれが 1 をこえると、炉内の出力が連鎖反応で増し、燃料棒、その被覆、冷却水などの温度が上がり、これがある制限をこえると燃料棒の熔融とか被覆の焼損を起し、放射性物質の放出という事故になる。この倍率の 1 よりの超過分(超過反応度)  $\delta k$  が比較的小さいときは安全装置によって制御棒などが働き、炉は安全に制御または停止される。超過反応度が「即発臨界」をこえて大きくなると制御棒が働く前に出力が急増するが、燃料温度が上昇し、燃料のもつ負の「温度係数」により連鎖反応はやがて自動的に抑制される。さらに大きい事故でも反応は自動的に停止するが、放出されるエネルギーの量が大きいため、炉の周辺に対し各種の災害をひきおこす。こうして安全の見地から許される超過反応度の上限が求められる。超過反応度と出力、温度との関係は標準的な動特性方程式として次の式をうる。

$$\frac{dp}{dt} = \frac{\delta k - \beta - \alpha_f T_f - \alpha_w T_w}{l} p + \sum_{i=1}^6 \frac{\beta_i}{l} \zeta_i \dots (1)$$

$$\frac{d\zeta_i}{dt} = -\lambda_i(\zeta_i - p), i = 1, 2, \dots, 6 \dots \dots (2) \sim (7)$$

ここに



第 1 図 燃料棒構造

- $p$  : 原子炉出力 (炉中央の燃料 1 cc あたりの熱出力 [cal/s·cc])
- $\beta_i$  : 第  $i$  群の遅発生中性子の割合  $\beta = \sum_{i=1}^6 \beta_i$
- $l$  : 中性子平均寿命 [s]
- $\lambda_i$  : 第  $i$  群遅発性中性子先行核の崩壊定数 [ $s^{-1}$ ]
- $\zeta_i$  : 第  $i$  群先行核の濃度に比例する量
- $\delta k$  : 超過反応度 ( $k_{eff}-1$ )
- $T_f$  : 燃料温度 [ $^{\circ}C$ ]
- $T_w$  : 冷却水温度 [ $^{\circ}C$ ]

$\alpha_f, \alpha_w$  : 燃料および冷却水のもつ反応温度係数 [ $^{\circ}C^{-1}$ ]

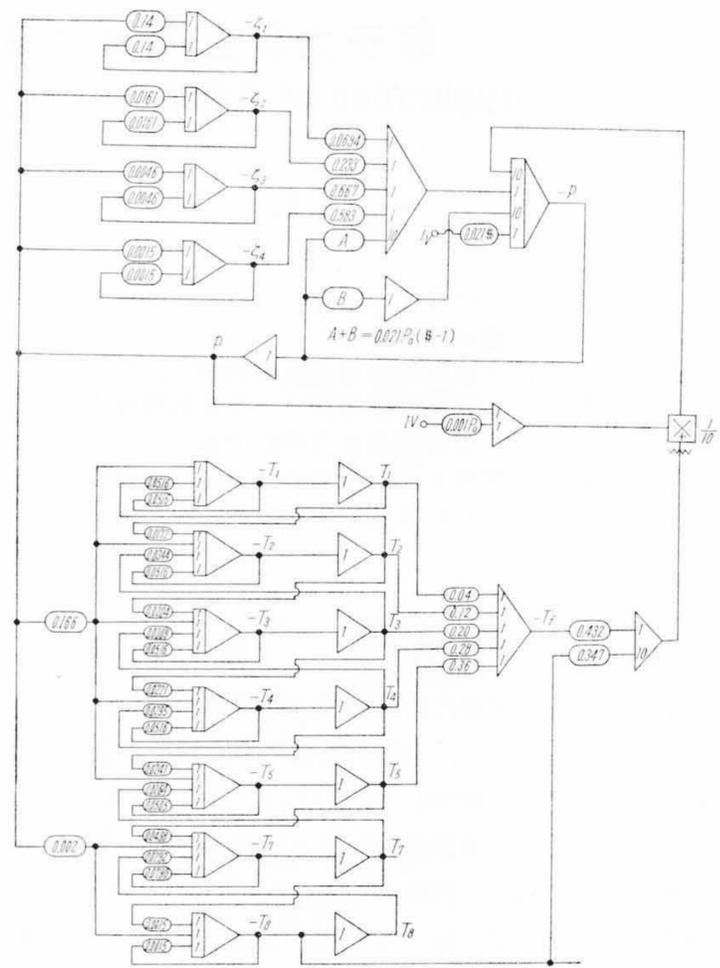
この原子炉の例では、燃料棒は第 1 図に示すように酸化ウラン燃料がヘリウムボンドを介してアルミで被覆されており、全体が冷却水中に漬けてある。この棒が 81 本等間隔に格子状に配列されて小形炉の炉心部ができてい。燃料温度  $T_f$  は通常一つの温度で代表させることが多いが、この温度による反応度効果が事故時の反応を抑制するのに最も重要な役割を果しており、また燃料棒中心温度が安全性をきめる一つの因子であることを考えて、ここでは燃料棒を五つの同心円にわかち、各領域の間の熱抵抗を考慮して、炉の出力と各領域の温度の間の関係を次の式で記述する。

$$C_a \rho_a V_1 T_1 = -\frac{k_a}{\Delta r_a} A_{12} (T_1 - T_2) + q_a V_1 p \dots (8)$$

$$C_a \rho_a V_2 T_2 = -\frac{k_a}{\Delta r_a} A_{23} (T_2 - T_3) + \frac{k_a}{\Delta r_a} A_{12} (T_1 - T_2) + q_a V_2 p \dots (9)$$

$$C_a \rho_a V_3 T_3 = -\frac{k_a}{\Delta r_a} A_{34} (T_3 - T_4) + \frac{k_a}{\Delta r_a} A_{23} (T_2 - T_3) + q_a V_3 p \dots (10)$$

$$C_a \rho_a V_4 T_4 = -\frac{k_a}{\Delta r_a} A_{45} (T_4 - T_5) + \frac{k_a}{\Delta r_a} A_{34} (T_3 - T_4) + q_a V_4 p \dots (11)$$



(タイムスケール 100, 温度スケール  $100^{\circ}C/V$  出力スケール  $1,000 \text{ cal/s cm}^3/V$  としたとき)

第 2 図 (16) 式を解くための結線図

$$C_a \rho_a V_5 T_5 = -\frac{k_{56}}{\Delta r_{56}} A_{56} (T_5 - T_6) + \frac{k_a}{\Delta r_a} A_{45} (T_4 - T_5) + q_a V_5 p \dots (12)$$

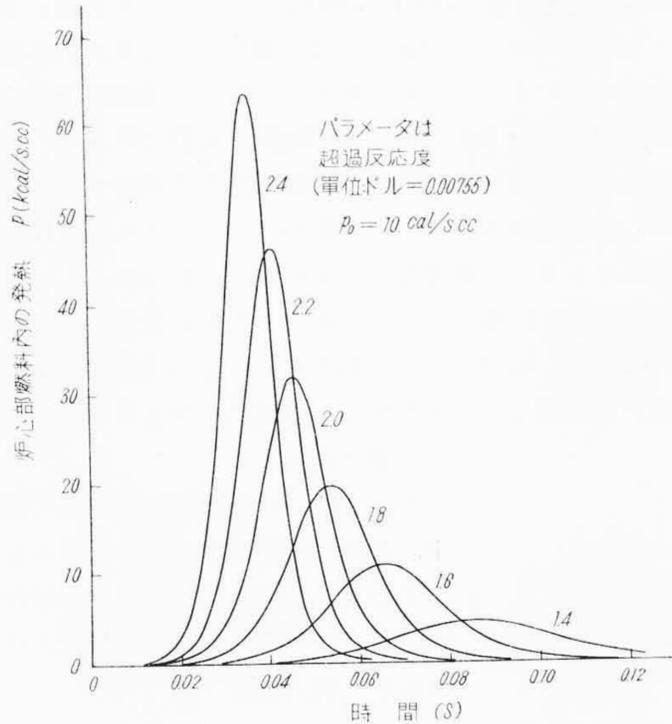
$$C_b \rho_b V_6 T_6 = -\frac{k_{67}}{\Delta r_{67}} A_{67} (T_6 - T_7) + \frac{k_{56}}{\Delta r_{56}} A_{56} (T_5 - T_6) \dots (13)$$

$$C_c \rho_c V_7 T_7 = -\frac{k_{78}}{\Delta r_{78}} A_{78} (T_7 - T_w) + \frac{k_{67}}{\Delta r_{67}} A_{67} (T_6 - T_7) + q_c V_7 p \dots (14)$$

$$C_w \rho_w V_8 \left( T_8 \frac{2u}{H} (T_8 - T_{-1}) \right) = \frac{k_{78}}{\Delta r_{78}} A_{78} (T_7 - T_8) + q_w V_8 p \dots (15)$$

ここに

- $C$  : 比熱 [cal/g· $^{\circ}C$ ]
- $\rho$  : 密度 [g/cc]
- $k$  : 熱伝導率 [cal/cm·s· $^{\circ}C$ ]
- $q$  : 発熱密度 [cal/cc·s]
- $T_j$  : 第  $j$  領域の平均温度 [ $^{\circ}C$ ],  $T_{-1}$  は水の入口温度  $j=1, 2, \dots, 8$
- $V_j$  : 第  $j$  領域の体積 [cc]



第3図 反応度事故による出力の時間変化

- $A_{j, j+1}$ : 第  $j, j+1$  領域の境界面積 [cm<sup>2</sup>]
- $\Delta r_{j, j+1}$ : 第  $j, j+1$  領域の中心間の距離 [cm]
- $H$ : 炉心の高さ
- $u$ : 冷却水の流速 [cm·s<sup>-1</sup>]
- $T_{-1}$ : 入口水温 [°C]

(1)式の燃料温度  $T_f$  は  $T_1 \sim T_5$  の体積平均であり, †

$$\begin{pmatrix} \dot{p} \\ \dot{\zeta}_1 \\ \dot{\zeta}_2 \\ \dot{\zeta}_3 \\ \dot{\zeta}_4 \\ \dot{T}_1 \\ \dot{T}_2 \\ \dot{T}_3 \\ \dot{T}_4 \\ \dot{T}_5 \\ \dot{T}_7 \\ \dot{T}_8 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & 6.94 & 23.3 & 66.7 & 58.3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 14.0 & -14.0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1.61 & 0 & -1.61 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.456 & 0 & 0 & -0.456 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.151 & 0 & 0 & 0 & -0.151 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1.663 & 0 & 0 & 0 & 0 & -5.16 & 5.16 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1.663 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.72 & -5.16 & 3.44 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1.663 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2.04 & -5.16 & 3.09 & 0 & 0 & 0 \\ 1.663 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2.21 & -5.16 & 2.95 & 0 & 0 \\ 1.663 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2.41 & -5.05 & 2.64 & 0 \\ 0.020 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4.98 & -7.90 & 2.92 \\ 0.020 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.153 & -0.153 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p \\ \zeta_1 \\ \zeta_2 \\ \zeta_3 \\ \zeta_4 \\ T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_7 \\ T_8 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} f_1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (16)$$

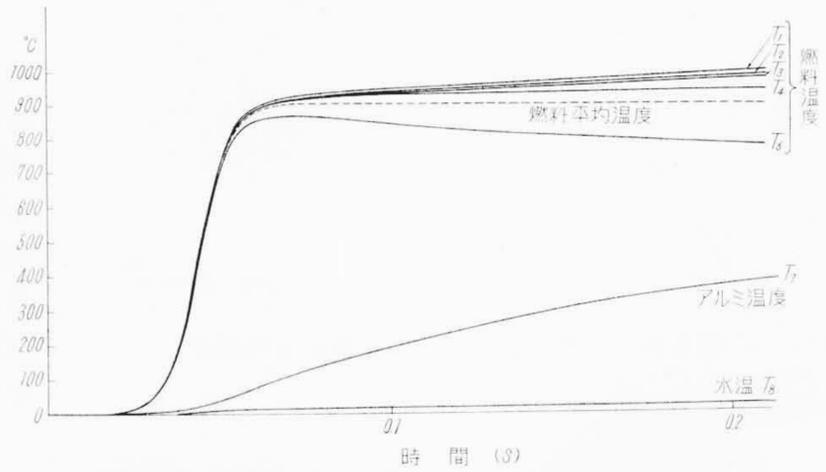
$$a_{11} = -209.67(1-\$) - 0.556T_f - 4.44T_8$$

$$T_f = \frac{1}{25}T_1 + \frac{3}{25}T_2 + \frac{5}{25}T_3 + \frac{7}{25}T_4 + \frac{9}{25}T_5$$

$$f_1 = p_0 \{209.67(1-\$) - 0.556T_f - 4.44T_8\}$$

‡ は超過反応度  $\delta k$  を  $\beta$  単位で測ったもの。  
 $\beta = 0.00755$

本章の例はアナログ計算機の計算速度の速さが著しい特長として發揮された一例である。第4図の例ではタイムスケール100で0.2秒にわたる現象を解いたので20秒



第4図 2\$の超過反応度が投入された際の各部温度の時間変化

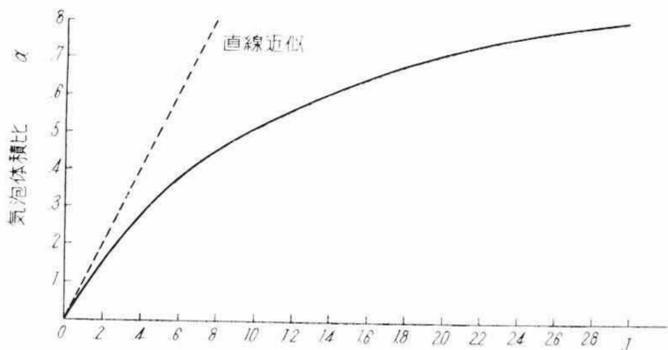
† 水温度  $T_w$  は  $T_8$  に等しい。異なる材質の間の熱抵抗は適宜合成し、水とアルミの境界面の熱伝達も抵抗に置き換え、さらにヘリウムの比熱を無視して  $T_6$  を消去し1秒程度の現象に対しては第5,6群の遅発性中性子を無視し、変位のみを扱うこととして整理すると次に示す12元連立非線形微分方程式となる。

超過反応度の大きさによって現象の時定数が大幅に変わるので、それに応じてタイムスケールを変えるのがよい。

結果を第2~4図に示す。

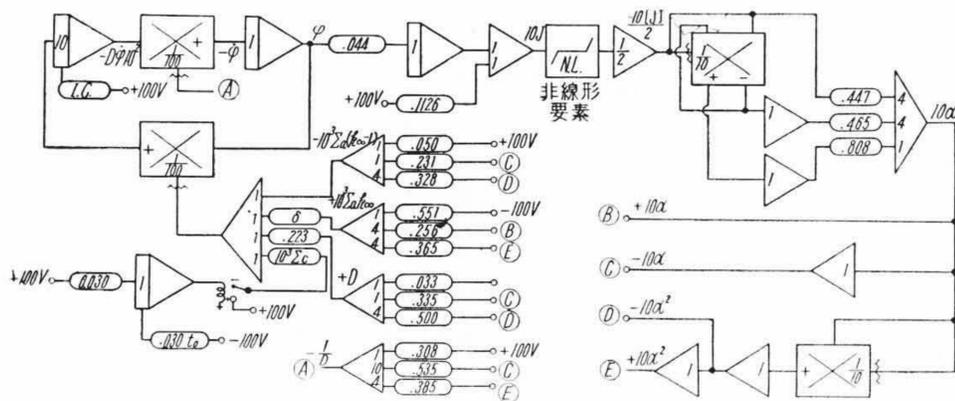
で一つの計算結果が得られたことになる。それに対してデジタル計算機では時間刻みを5ミリ秒\*)として0.2秒を進めるのに、IBM 650では少なく見積っても合計150秒は要する。アナログ計算機では演算が連続的に並行して行われるので、使用要素数が増すほどさらに差がつくことになる。デジタルの計算速度はいっそう高速化されていく傾向にあり、この一例からただちにほかの場合

\*) 数値解法上の理由で、1ステップをあまり大きくとることはできない。



第 5 図 熱積分 J とボイド体積比  $\alpha$  の関係

沸騰水形原子炉 (BWR) は動力炉として最も有望とされているものの一つであり、日立製作所でも重点的に研究を進めている。この形の炉では中性子の減速材である水が炉内で沸騰するために核的定数が均質ではなく、そのため中性子束分布 (熱源) が炉心部の下のほうへひずむが、これをおさえるために炉の下のほうから制御棒を適当にそう入して熱源分布を平坦化し、炉全体としての出力密度を上げることができる。また炉の動特性 (安定性) に関連したデータを取るためにも出力分布と気泡分布、制御棒などの相互作用を明確につかんでおくことが肝要である。



- 注: 1. 制御棒は  $t=0$  から  $t_0$  の長さにわたりそう入され、以後 0 となるようにスイッチがつけられている。  
 2. 係数器は負荷効果補正がしてあるので、本文中の式に現われる係数と多少異なる。  
 3. 不感体非線形要素により  $(x+|x|)/2$  を作っている。

第 6 図 BWR 内の熱源分布を求めるための結線図

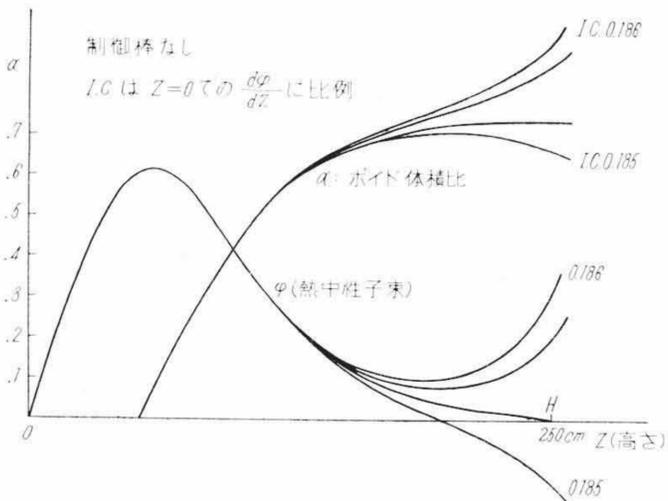
が肝要である。

中性子は円柱形原子炉の内部で発生、減速、拡散、吸収のサイクルをくりかえしており、中性子または中性子束  $\phi$  は通常修正一群方程式と呼ばれる拡散方程式

$$\frac{d}{dZ} \left\{ D \frac{d}{dZ} \phi \right\} + \{ \Sigma_a (k_\infty - 1) - \delta k \cdot k_\infty \Sigma_a - DB_r^2 - \Sigma_c \} \phi = 0 \dots \dots \dots (17)$$

に従って空間的に分布している。 $\phi$  は  $Z=0, H$  の二境界で 0 となる条件をみたす。 $Z$  は円柱形原子炉の高さ方向の座標であり、横方向については気泡分布は一様と仮定して一次

元問題としている。 $D, \Sigma_a, k_\infty$  は中性子の拡散、吸収、増倍を示す量で、いまは気泡体積比  $\alpha$  の関数である。その気泡体積比  $\alpha$  は熱出力  $\phi$  を沸騰開始点から高さに沿って積分した「熱積分  $J$ 」の関数である。 $\alpha$  と  $J$  の関係は気泡のすべり現象と沸騰による体積排除効果のため単なる比例関係ではなく第 5 図のようになる。なお水は飽和温度以下で入ってくるため、熱積分は初め負となり気泡は 0 である。



第 7 図 境界条件をみたすための試行例

$D, \Sigma_a, k_\infty$  は  $\alpha$  の二次式で、また  $\alpha$  は  $[J]$  の三次式でよく近似できる。また  $\delta k$  は超過反応度、 $\Sigma_c$  は制御棒による吸収効果であって高さ  $Z$  の関数として与えることができる。 $B_r^2$  は炉の大きさに関する定数である。

を推論することはできない。しかし普通見落されがちなデータの処理に要する時間なども含めて考えると、この種の問題を解くにはアナログ計算機を用いるのが効果的である。

具体的に GE の動力炉ドレスデン BWR の数値を代入すると

$$\Sigma_a (k_\infty - 1) = 10^{-3} (5.057 - 2.308 \alpha - 12.813 \alpha^2) \text{ cm}^{-1} \dots \dots \dots (18)$$

$$-\Sigma_a k_\infty = 10^{-3} (-54.69 + 10.05 \alpha + 14.25 \alpha^2) \text{ cm}^{-1} \dots \dots \dots (19)$$

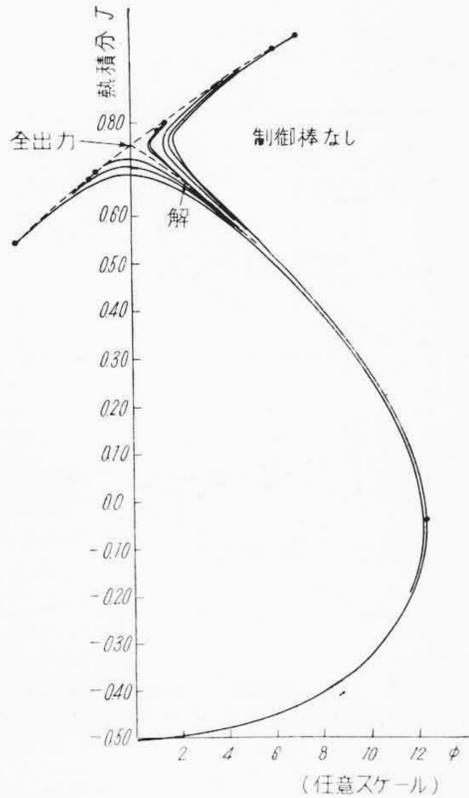
$$-D = -3.269 - 3.333 \alpha - 19.44 \alpha^2 \text{ cm} \dots \dots \dots (20)$$

$$\frac{1}{D} = 10^{-2} (30.6 - 50 \alpha + 15 \alpha^2) \text{ cm}^{-1} \dots \dots \dots (21)$$

$$\alpha = 0.870 [J] - 0.452 [J]^2 + 0.101 [J]^3 \dots \dots \dots (22)$$

3. 沸騰水形原子炉の出力分布 (境界値問題)

これはアナログ計算機が自由にパラメータを変えられることを利用して、試行法によって非線形の微分方程式の境界値問題を解いた例である。



第8図 出力  $\phi$  と熱積分(ボイド体積比)の関係図

$$J = 4.382 \times 10^{-4} \int \phi / \phi_0 dZ - \alpha_{-1} \dots \dots \dots (23)$$

$$[J] = J (J > 0), [J] = 0 (J \leq 0) \dots \dots \dots (24)$$

$$B_r^2 = 2.23 \times 10^{-4} \text{ cm}^{-2} \dots \dots \dots (25)$$

$\alpha_{-1}$ : サブクーリングを負の気泡体積比に換算したパラメータ, 標準値は 1.128

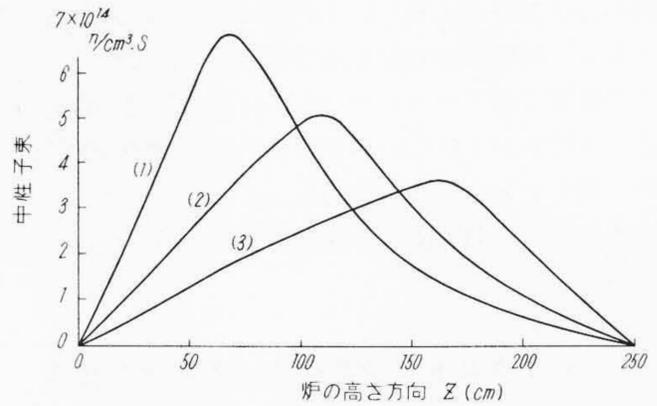
ここで  $\phi$  は  $\phi_0 = 10^{13} \text{ n/cm}^2 \text{ s}$  を 1 volt;  $\alpha$ ,  $J$  は 0.1 を 1 volt;  $Z$  は 30 cm を 1 秒とすると, この式を解くための結線図は第6図のようになる。

このような非線形問題はとかくスチールファクタの混乱から誤算を生じがちであるが, 試験入力によりいちいち出力を検査しつつ組み上げてゆく手順で能率的に遂行できる。その途中で, 係数器の負荷効果補正さえ行えば計算精度は計器またはグラフの読みの誤差以内に正確に入っていることが確かめられる。

この回路で  $Z=0$ ,  $H$  において  $\phi=0$  なる境界条件をみたす解をうるには, 初期条件をかえて何回か試行して  $Z=H$  での条件をみたすまで計算を繰返す。一回の計算時間は 9 秒弱, リセット時間を含めても 1 分足らずである。しかし第7図からわかるように, 初期条件のきわめてわずかの差が解の様子に大きく影響する\* ことを考えると, 初期値を与える係数器の正しい設定, 電源の安定が必要条件となる。当所の低速度アナコンはこの点でも再現性のよい結果を示した。

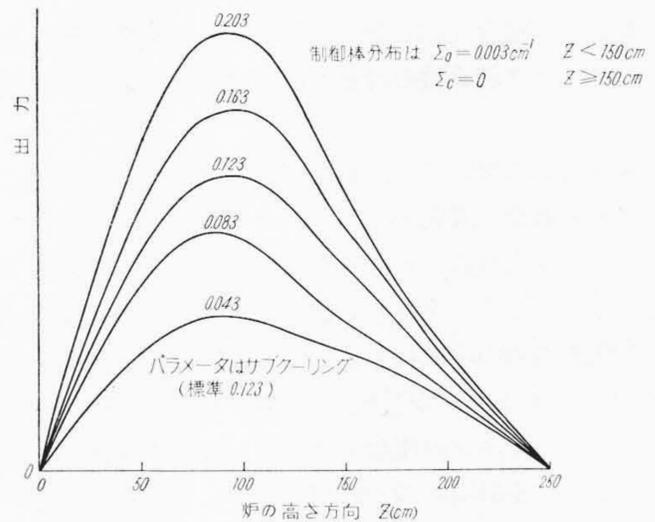
この計算では, 前回の計算の結果をみて次の計算のための初期値の修正をすることは人間の判断に頼ったが,

\* この現象はデジタル計算機で解いた場合にも同様に現われる。



(1), (2), (3) はそれぞれ下から 50, 100, 150 cm にわたり制御棒をそう入した場合

第9図 制御棒分布と出力分布  $\Sigma_c = 4 \times 10^{-3} \text{ cm}^{-1}$



第10図 サブクーリングの大きさと出力分布

リレーなどを用いて記憶, 比較判断, 係数器の値または結線の変更を自動的に行わせるプログラミング装置ができており, ほかの例に適用して満足すべき結果を得ている。この方向への進歩によりデジタル計算機の長所がアナログ形にも活用され, 本章の境界値問題をいっそう拡張した問題, たとえば  $n$  個の初期値をかえて  $n$  個の条件をみたすような解を自動的に算出することが可能となるであろう。

中性子束分布  $\phi$  と熱積分  $J$  とを  $x-y$  記録計にかいたのが第8図である。試行のたびに一本の線が引かれるが,  $Z=H$  に対応する時刻で記録を停止すると, 曲線の終点で  $\phi=0$  となるのが真の解となるが, それが見付からなくても精度よく解を内そうすることができる。ことに  $J$  は全出力に比例する重要な量であるが, 第7図の記録から内そうするよりはずっと正確に求められる。 $\phi-J$  関係を示す第8図は, 制御棒なく気泡も発生しない単純な原子炉では楕円形となり, それからの偏倚が非線形効果を示すと考えられる。

BWR の出力密度の上限は, 現在燃料棒の融点と, 棒表面の熱流束によるバーンアウトによっておさえられている。すなわち炉内で中性子束分布  $\phi$  は上述の制限でこまる  $\phi_{lim}$  をこえてはならない。この制限内でできるだ

け熱出力  $J$  を多くするという問題は、 $\phi-J$  図を縦に長くするよう制御棒分布をくふうすることに帰する。

この計算ではアナコンでパラメータの変更が容易であるという特長が十分にいかされている。第 9, 10 図は結果の一例をまとめたものである。このようなデータの組織的な集積は BWR 炉心設計の上できわめて意義の深いものである。

4. サイクロトロン共鳴によるイオン加速

アナログ計算機では、その出力がただちにアナログ表示されるために、現象の定量的、直観的はあくが容易であり、研究用の目的に適している。

本章では融合反応の分野から現われた問題を取りあげて、アナログ計算機の計算速度とアナログ表示の特長を示す。

融合反応においては、高温プラズマを作るとじこめる方法が重要な課題であるが、その一つの方法としてイオンビーム入射によるものを日立核融合研究グループは検討している<sup>(3)</sup>。すなわち数百電子ボルトの重水素イオンを直流磁場の中に打ち込み、そのイオンの円運動の周期(サイクロトロン周波数)に同期させて振動磁場を加えてやると、イオンの運動エネルギーは共鳴加速されて増大する。直流磁場の端で磁場を強くしてやればそこでイオンは反射されて磁気容器の中にとらえられ、高温プラズマとなる。簡単のために、プラズマの運動からの反作用の無視できるような場合を考えて、1個のイオンが振動磁場の中でどのような運動するかを調べる。運動方程式は、磁場に垂直な面内に  $x, y$  座標をとると次のようになる。

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{y}{2} \frac{d}{dt} \omega_c + \omega_c \frac{d}{dt} y \dots\dots\dots (26)$$

$$\frac{d^2y}{dt^2} = -\frac{x}{2} \frac{d}{dt} \omega_c - \omega_c \frac{d}{dt} x \dots\dots\dots (27)$$

ここに

$$\omega_c = \omega_0 (1 + \varepsilon \cos \omega t) \dots\dots\dots (28)$$

で  $\omega_0$  はサイクロトロン周波数、 $\varepsilon$  は振動磁場の振幅と直流磁場の強さの比、 $\omega$  は振動磁場の周波数である。

初期条件としては任意の点に任意の初速をもつ粒子をおくことができるが、予備的検討により、十分な加速が行われる場合は初速度は無視できることがわかったのでこれを 0 とおき、 $x=x_0, y=0, \dot{x}=\dot{y}=0$  を初期条件とする。

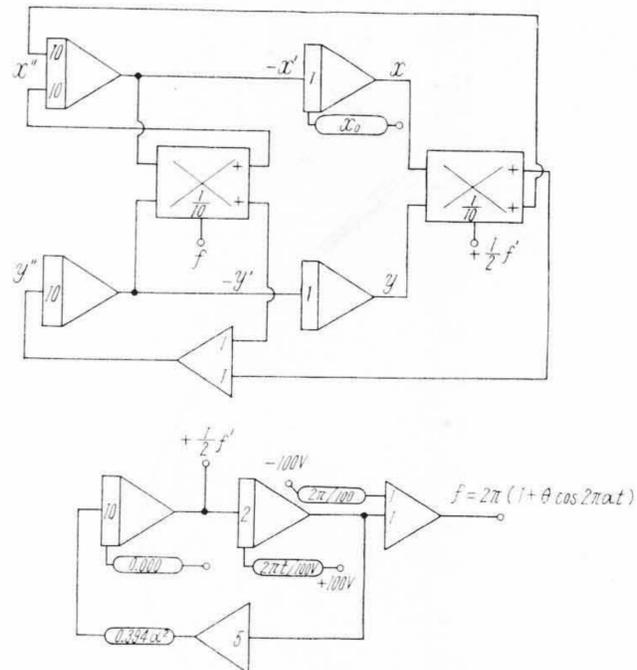
時間スケールを、粒子の 1 回転で 1 秒となるようにえらべばアナログ計算機にかける方程式は

$$x'' = \frac{1}{2} f'y + fy' \dots\dots\dots (29)$$

$$y'' = -\frac{1}{2} fx - fx' \dots\dots\dots (30)$$

$$f = 2\pi(1 + \varepsilon \cos 2\pi at) \dots\dots\dots (31)$$

となる。ここに ' は換算時間  $\tau$  の微分、



$\alpha$ : 同期比  $\varepsilon$ : 摂動比  $x, y$ : 粒子の座標  
第 11 図 振動磁場内のイオン軌跡を計算する結線図

$$\alpha = \omega_c / \omega_0 \dots\dots\dots (32)$$

は振動磁場の周波数とサイクロトロン周波数の比であり  $\alpha=1$  のとき完全な共鳴が起る。

摂動論による計算では共鳴が完全であれば振幅ははじめのうちは時間に比例して増大することが示されるが、磁場をどこまで均質にすることが必要かとか、振動磁場の振幅やイオンの軌道半径が大きいときでも摂動論の結果が正しいかどうか、などを詳細に検討するために数値計算を試みることに要望された。

結線図は第 11 図に示すように、本体と振動磁場作成部とより成る比較的単純なものである。

第 12 図 a, b, c は  $\pi\varepsilon=0.1$  のとき、すなわち直流磁場の強さの約 3% の振幅をもつ振動磁場を加えたときのイオンの軌跡であり、a では完全な共鳴条件をみたしているのに対して b, c では振動周波数が共鳴条件の 1% および 2% はずれている。

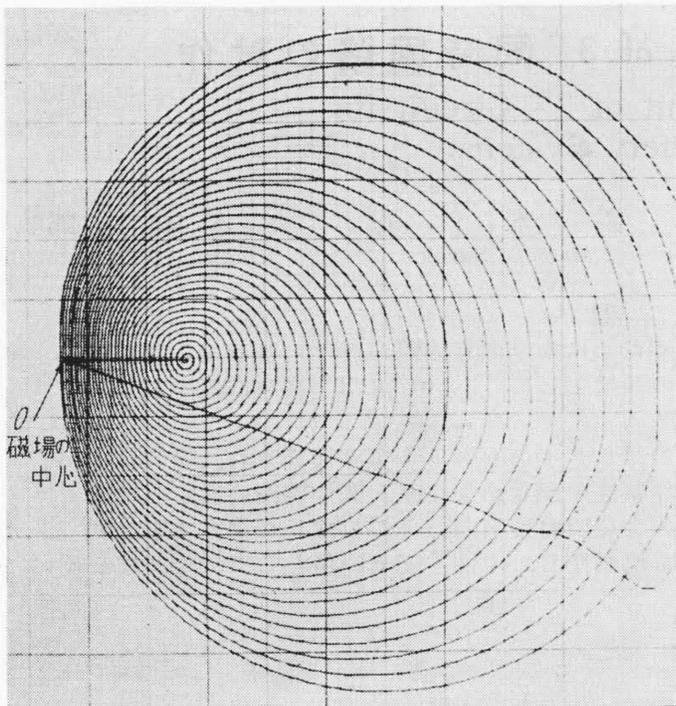
いずれの場合も一回転に要する時間は同じであるから円軌道が大きくなることはそのまま速さが速くなることを意味する。

a では時間とともに単調に軌道は膨脹するが、膨脹速度は次第に速くなる傾向がある。また円軌道の中心は次第に外側に移行する。

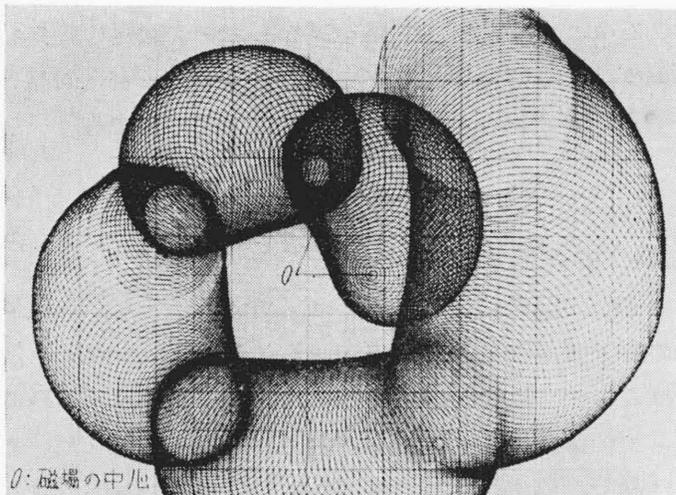
b では加速と減速とがくり返されつつ結果としては次第に加速される。軌道の中心もら線状をかいて外側にひろがってゆく。

c では同調からのずれが著しいので加速減速の交代がひんぱんに行われ、中心のドリフトも速く、長期的にみても軌道の膨脹傾向は著しくはない。

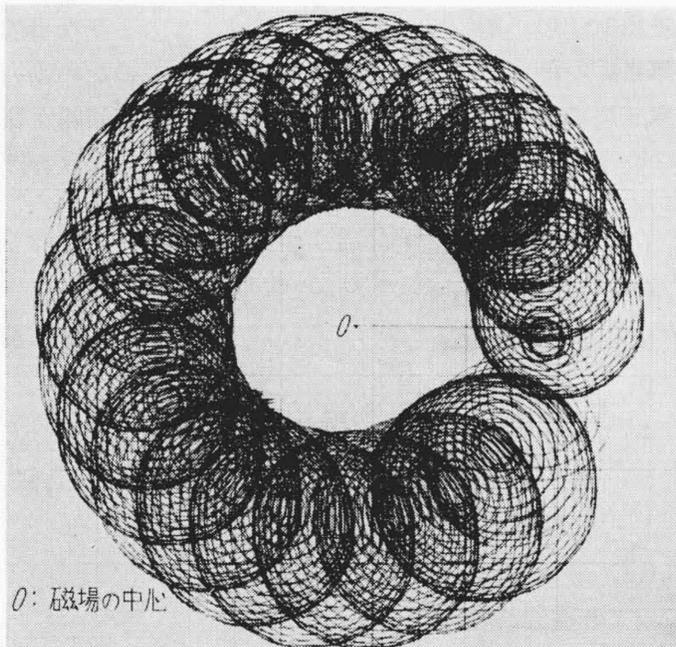
類似のデータはほかの種々の条件についても集めら



第12図(a) イオン軌跡の例(共鳴状態)



第12図(b) イオン軌跡の例  $\alpha^2=1.02, \pi\varepsilon=0.1$



第12図(c) イオン軌跡の例  $\alpha^2=1.04, \pi\varepsilon=0.1$

れ、イオンの運動の状況が明らかにされた。その結果、同期周波数の幅と磁場の不均一に対する許容度などが決

定された。

この結果は設計データをうるためばかりでなく、融合反応炉の中で起っている現象の直観像を作る上で研究上非常に興味あるものである。もし同じことをデジタル計算機で行うとすれば、一枚の絵を作るのに数千点以上の座標をプロットし結ばなければならないが、これは実行困難である。またほかの理論により若干の近似を加えて軌道半径とその中心のドリフトについての方程式を作って解いたとしても、頭の中でこの絵を再合成しなければならないが、これほど教育的な像をうることはできないであろう。

前章の  $\varphi-[J]$  関係図と本章のグラフの例から、解の表示方法によって計算の効果が非常に異なることが感じられる。アナログ表示が適している場合にはアナログ計算機の特長が十分に活用できるわけである。

### 5. 結 言

原子炉設計係が最近遭遇した三つの例について、アナログ計算機がいかに応用されているかを述べた。このほかにも原子炉の制御の問題についてはアナログ計算機がもっぱら用いられているが、それはすでに広く知られているし、方法としても新しいわけではないので省略する。

代数方程式の求根や線形連立方程式の解法などにアナログ計算機を使用することが再認識されつつあるが、それらは問題が大きいのと原子力固有の問題ではないので割愛した。

前章まで断片的に記してきたアナログ計算機の特長を並べてみると

- (1) 計算速度が速いこと
- (2) パラメータの変更が容易なこと
- (3) 解をアナログ量として取り出せること

などである。

近年デジタル計算機の発達が目ざましいが、われわれ設計製作の実務にたずさわるものとしては両方の計算機の性能の現状と特長とを考えて、目的に即した使用を行うべきであろう。

本研究にあたっては日立製作所中央研究所只野部長、阿部主任研究員、三浦主任ほか12,13研究室のご援助と討論をいただいた。また計算の実行は酒井研究員によりなされ、同氏のくふうによった点が多い。ここに厚く謝意を表す。

### 参 考 文 献

- (1) 川合, 新井, 寺沢, 金井: 日本原子力学会誌 1, 14 (昭 34)
- (2) 長谷川, 川合, 北爪, 松岡, 内ヶ崎: 日立評論 40, 1283 (昭 33)
- (3) 日立核融合研究グループ: 核融合研究 2, 219 (昭 34)  
百々: 核融合研究 2, 194 (昭 34)