

JAERI-Data/Code

JP0050192

2000-004



ニューラルネットワークによる原子炉設計における
多次元設計ウィンドウ探索システム

2000年2月

久語輝彦・中川正幸

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の問合せは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越し下さい。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布を行っております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 〒319-1195, Japan.

ニューラルネットワークによる原子炉設計における
多次元設計ウィンドウ探索システム

日本原子力研究所東海研究所エネルギーシステム研究部
久語 輝彦・中川 正幸

(2000年1月12日受理)

原子炉炉心設計においては、基本的な設計変数の最適な値を決定するため、多数回のパラメータサーベイ計算を要し、通常、これらの計算に多大な計算時間が費やされる。この設計作業を支援するため、設計ウィンドウ、すなわち設計基準や要求仕様を満足する設計変数の範囲を多次元空間において効率的に得る手法を開発し、核及び熱流力設計の両分野に応用したシステムを開発した。本方法の原理は、解析コードにより得られた教師信号を階層型ニューラルネットワークに学習させ、それを解析コードの代わりに用いることによって計算時間の短縮を図るものである。本システムは、ワークステーション上で稼働し、利用者にわかりやすい入出力処理を行うためのマンマシンインターフェースを充実させている。

本報告書は、探索手法の原理、システム構成、システム使用方法、ニューラルネットワークの学習方法、解析計算に必要な入力変数の説明等を解説したユーザマニュアルとなっている。

Multi-Dimensional Design Window Search System
using Neural Networks in Reactor Core Design

Teruhiko KUGO and Masayuki NAKAGAWA

Department of Nuclear Energy System
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received January 12, 2000)

In the reactor core design, many parametric survey calculations should be carried out to decide an optimal set of basic design parameter values. They consume a large amount of computation time and labor in the conventional way. To support directly design work, we investigate a procedure to search efficiently a design window, which is defined as feasible design parameter ranges satisfying design criteria and requirements, in a multi-dimensional space composed of several basic design parameters. We apply the present method to the neutronics and thermal hydraulics fields and develop the multi-dimensional design window search system using it. The principle of the present method is to construct the multilayer neural network to simulate quickly a response of an analysis code through a training process, and to reduce computation time using the neural network without parametric study using analysis codes. The system works on an engineering workstation (EWS) with efficient man-machine interface for pre- and post-processing.

This report describes the principle of the present method, the structure of the system, the guidance of the usages of the system, the guideline for the efficient training of neural networks, the instructions of the input data for analysis calculation and so on.

Keywords: Neural Network, Design Window, Fuel Pin Design, Neutronics, Thermal Hydraulics, EWS,
Man-Machine Interface, Training, Guidance

目 次

1. 序論	1
2. 階層型ニューラルネットワーク	3
2.1 ニューロンの動作モデル	3
2.2 階層型ニューラルネットワークの学習アルゴリズム	3
2.3 階層型ニューラルネットワークの特色	4
3. 多次元設計ウィンドウ探索手法	7
3.1 ニューラルネットワーク構造	7
3.2 設計ウィンドウ探索手順	7
3.3 境界探索法	8
4. 多次元設計ウィンドウ探索システムの構成	12
5. 多次元設計ウィンドウ探索システムの使用方法	15
5.1 インストール方法	15
5.2 設計ウィンドウ探索システムの操作手順の概略	15
5.3 ニューラルネットワークの学習のための入力変数の説明	18
5.4 ニューラルネットワークの効率的な学習のための目安	21
6. 結論	23
謝辞	23
参考文献	23
付録	25
付録1 解析計算用入力変数の説明	25
付録2 多次元設計ウィンドウ探索システムの操作画面集	59
付録3 ニューラルネットワークの効率的な学習のための目安の検討	76
付録4 ニューラルネットワークプログラムの単独使用方法	90

Contents

1. Introduction	1
2. Multilayer Neural Network	3
2.1 Neuron Model	3
2.2 Training Algorithm of Neural Network	3
2.3 Feature of Neural Network	4
3. Multi-Dimensional Design Window Search Procedure	7
3.1 Structure of Neural Network	7
3.2 Flow of Design Window Search	7
3.3 Boundary Search Procedure	8
4. Structure of Multi-Dimensional Design Window Search System	12
5. Guideline of Usage of Multi-Dimensional Design Window Search System	15
5.1 Installation	15
5.2 Instruction of Main Process of Multi-Dimensional Design Window Search	15
5.3 Instruction of Input Data for Training of Neural Networks	18
5.4 Guideline of Efficient Training of Neural Networks	21
6. Conclusion	23
Acknowledgements	23
References	23
Appendices	25
Appendix 1. Instruction of Input Data for Analysis Calculations	25
Appendix 2. Collection of Menu Windows of Multi-Dimensional Design Window Search System	59
Appendix 3. Investigation of Guideline for Efficient Training of Neural Networks	76
Appendix 4. Guideline of Usage of Neural Network Program	90

1. 序 論

原子炉炉心設計とは、安全性、信頼性及び経済性等の観点からの設計基準や要求性能を満足するように、炉心構成物の形状、寸法、配置、物質等の設計変数を決定することである。設計用の解析コードを用いて、ある想定された設計案に対する特性や性能を評価することができるが、要求性能や設計基準から直接、設計仕様を決定することができない。そのため、ある設計案を想定し、解析計算によりその特性を評価し、要求仕様や設計基準と比較して、必要があれば設計案を変更するというプロセスを、最適な設計案が見つかるまで繰り返すという作業を行う必要がある。従来から、設計変数の値をいろいろ変えてみて、特性の変化を調べながら、設計が成立する範囲（設計ウィンドウ）や最適な設計変数値を探索するというパラメトリック・スタディーが時間を要するものの正攻法的な方法として用いられてきた。従って、原子炉の設計では、多数の設計変数を考慮する必要があり、設計変数が多くなるにつれて、最適な設計変数を見つけるまで、多大な計算時間と豊富な設計知識や経験が必要であった。

われわれは、従来からよく用いられているパラメトリック・スタディーを支援する手法として、設計ウィンドウを効率的に探索する手法について研究を行ってきた。これまで、2次元空間における、すなわち2設計変数に対する設計ウィンドウを自動的に探索する手法をして境界探索法を開発し、核及び熱水力設計に適用している⁽¹⁾。この手法は、2設計変数値の全ての組み合わせに対して解析計算を行なわず、効率的に設計境界のみを探索する。したがって、以下のような制限がある。(1)実際の炉心設計では多数の設計変数が存在し、2変数の設計ウィンドウは、多次元探索空間のはんの一部分でしかなく、多次元化に拡張すると境界探索法は次元の増加に伴い指数関数的に計算時間が増加するため、3次元以上の設計空間へ適用するには計算効率が非常に悪くなる。また、(2)境界探索法は設計境界のみを追跡するので、設計ウィンドウ内部の情報が得られない。

多次元化の際のこのような制限を克服するため、多次元設計ウィンドウ探索において、その優れたフィッティング能力や分類能力に着目して、階層型ニューラルネットワークを応用することとした。望月らは、階層型ニューラルネットワークを用いた多次元設計ウィンドウ探索手法を開発し、構造設計の分野に応用した。すなわち、ITERの第1壁の設計に適用し、その実用性を実証した⁽²⁾。われわれは、核及び熱水力設計分野への応用を試みる。本手法では、階層型ニューラルネットワークは設計変数から炉心特性への写像関数として働き、解析コードを実行する代わりに炉心特性を推定する。階層型ニューラルネットワークは、4層構造であれば任意の連続写像関数を近似できることが理論的に証明されており^{(3),(4)}、3層構造でも十分に近似できると示唆されている⁽⁵⁾。このような階層型ニューラルネットワークの持つ汎化能力に加え、階層型ニューラルネットワークは、その応答が極めて高速であるという利点を備えている。そのため、スプライン関数等の従来からの内挿手法と比べて、マッピングプロセスに要する計算時間が短縮される。実際の炉心設計では、多種類の設計変数や炉心特性を同時に扱うことができることが求められており、この観点からは階層型ニューラルネットワークは任意の次元の入出力変数

を扱うことができ、また入出力変数の拡張に容易に追随できる。これらの利点により、階層型ニューラルネットワークは多次元設計ウィンドウ探索に有望な手法であると考えられる。

しかしながら、階層型ニューラルネットワークが汎化能力を得るためにには、複数の教師データを前もって準備し、それを用いて適切に学習させる必要がある。教師データとは、入力値と出力値のペアからなり、出力値には入力値に対応する真値（あるいは正解の値）を与えたものである。ニューラルネットワークは、ニューラルネットワークの入力層に入力値をインプットすると、出力層からそれに対応する出力値をアウトプットする。この出力値を教師データ内の正解の値に近づけるようニューロン間の結合の強さを更新することをニューラルネットワークの学習という。この際、学習パラメータの調整、ネットワーク構造や教師データの数の選択を適切に行わないと優れた汎化能力を得ることができない。これまでこれらに対する適切な指針は与えられておらず、経験的または試行錯誤的に行われてきた。このため、これらを全てユーザーに委ねてしまうと、ユーザーへの負担が大きくなるばかりか、ニューラルネットワークが汎化能力を得るまでに要する時間が増大してしまうため、計算効率を悪くしてしまう。本報告では、ニューラルネットワークの学習に要する負担を軽減するために、ニューラルネットワークの構造、すなわち隠れ層の層数や隠れ層におけるニューロン数、及び教師データの数がニューラルネットワークの推定値に及ぼす影響を調べ、それらの適切な選択に関する指針について検討を行った。

第2章では、階層型ニューラルネットワークの基本的な動作原理や学習方法について解説する。第3章では、ニューラルネットワークを用いた多次元設計ウィンドウ探索手法の概略を述べる。第4章では、システム構成について述べる。第5章では、本システムの使用法を解説する。システムのインストール、システムの操作手順、ニューラルネットワークの学習のための入力データの説明、効率的な学習を行うための目安について述べる。付録1では、解析計算に必要な入力データを説明している。付録2では、入力データの設定画面を除いて、本システムの操作画面を収録している。付録3では、第5章で述べる効率的な学習のための目安を検討するために行つた検討結果を載せる。ここでは、ニューラルネットワークの構造及び教師データの数に対する適切な選択についての検討結果を述べる。付録4では、ニューラルネットワークプログラム単独での使用方法について述べる。

2. 階層型ニューラルネットワーク

2.1 ニューロンの動作モデル

階層型ニューラルネットワークでは、全ての情報は入力層から出力層へ向けて順方向に伝達される。各ニューロンは、1層後方にあるニューロンから入力信号を受け、1層前方のニューロンへ出力信号を送る。ニューロンの動作を Fig.1 に図示する。また、その動作は以下の式で表される。

$$I_j^k = \sum_i W_{ij}^{k-1,k} O_i^{k-1}, \quad (1)$$

ここで、 $W_{ij}^{k-1,k}$ は第(k-1)層のニューロン*i*から第k層のニューロン*j*への結合加重、 I_j^k は第k層のニューロン*j*が受け取る入力信号、 O_i^{k-1} は第(k-1)層のニューロン*i*からの出力信号である。第k層のニューロン*j*が受け取る入力信号 I_j^k は、ニューロン内部で非線形動作関数により処理され出力信号 O_j^k を生成する。代表的には、動作関数 f として(2)式に示すようなシグモイド関数を用いる。

$$O_j^k = f(I_j^k) = 1 / [1 + \exp(-a(I_j^k - \theta_j^k))], \quad (2)$$

ここで、 θ_j^k は第k層のニューロン*j*のしきい値、 a はシグモイド温度と呼ばれている。

2.2 階層型ニューラルネットワークの学習アルゴリズム

階層型ニューラルネットワークの学習は誤差逆伝播学習則 (Error Back Propagation)⁽⁶⁾を採用している。例として、Fig.2に示すような4層構造のニューラルネットワークを取り上げる。また、学習過程の概要をFig.3に図示する。結合加重は、最急降下法により出力信号と真値である教師信号間の差を最小化するように変更される。結合加重の変更量を求めるには、最初に出力層のニューロン*j*における*n*パターン目の教師信号に対する誤差信号 δ_{jn}^M を次式に従い計算する。

$$\delta_{jn}^M = (O_{jn}^M - T_{jn}) f'(I_{jn}^M), \quad (3)$$

ここで T_{jn} は出力層のニューロン*j*に対する*n*パターン目の教師信号の値、 O_{jn}^M は出力層のニューロン*j*における出力信号、 $f'(x)$ は $f(x)$ の微分値である。 I_{jn}^M は出力層のニューロン*j*の入力信号、 M は全層数である。第(k-1)層のニューロン j における*n*パターン目の教師信号に対する誤差信号 δ_{jn}^{k-1} は出力層のニューロン*l*における*n*パターン目の教師信号に対する誤差信号 δ_{ln}^k から次式のように得られる⁽⁶⁾。

$$\delta_{jn}^{k-1} = f'(I_{jn}^{k-1}) \sum_l (W_{jl}^{k-1,k} \delta_{ln}^k) \quad (k=M, M-1, \dots, 3) , \quad (4)$$

ここで $W_{jl}^{k-1,k}$ は第($k-1$)層のニューロン j から第 k 層のニューロン l への結合加重である。このように誤差信号が逆方向に伝播される。結合加重の変更量は誤差信号と慣性項から次のように決定される。

$$\Delta W_{ij}^{k-1,k}(t) = -\eta \cdot \delta_{jn}^k \cdot O_{in}^{k-1} + \alpha \cdot \Delta W_{ij}^{k-1,k}(t-1) , \quad (5)$$

ここで η は学習係数、 α は前回の変更量の影響を取り入れるための慣性係数と呼ばれる定数、 t は学習のサイクル回数を表している。 (5) 式の最後の項が慣性項と呼ばれる部分で局所的極小近傍での振動を抑制する目的で導入されている。結合加重は、次式で定義される二乗誤差総和がある収束判定条件より小さくなるまで (3) から (5) 式を繰り返しながら修正が加えられる。

$$E \equiv \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \sum_{j=1}^J \frac{1}{2} (O_{jn}^M - T_{jn})^2 , \quad (6)$$

ここで、 J は出力層のニューロン数、 N は教師信号の総パターン数である。一般には、入出力信号は $[0,1]$ あるいは $[-1/2, 1/2]$ に規格化される。また、収束判定条件は 10^{-5} 程度の値に設定される。学習過程を通じて、ニューラルネットワークは教師データに近い出力信号を生成する能力を得る。

2.3 階層型ニューラルネットワークの特色

階層型ニューラルネットワークは以下の特徴を持つ。

(1)複数の教師データを用いて学習を行うことによって、任意の非線形写像関数を構築することができる。(2)学習済ニューラルネットワークは、一種の内挿、汎化能力を持つ。未知入力信号に対しても、適当な出力値を推定する。(3)学習済ニューラルネットワークの応答は、簡単な積和計算のみで行われるため極めて高速である。

しかしながら、ネットワークの適切な構成の仕方、すなわち最適な隠れ層数やニューロン数の選び方、に関する一般的な指針は存在しないし、学習過程における学習パラメータの適切な与え方についてもその指針がない。ネットワークの構成や学習パラメータの調整は、一般にユーザーによって経験的に行われる。本報告書では、ユーザーの負荷の軽減のため、その指針についても検討を進めた。その結果は、第5.4節及び付録3で述べる。

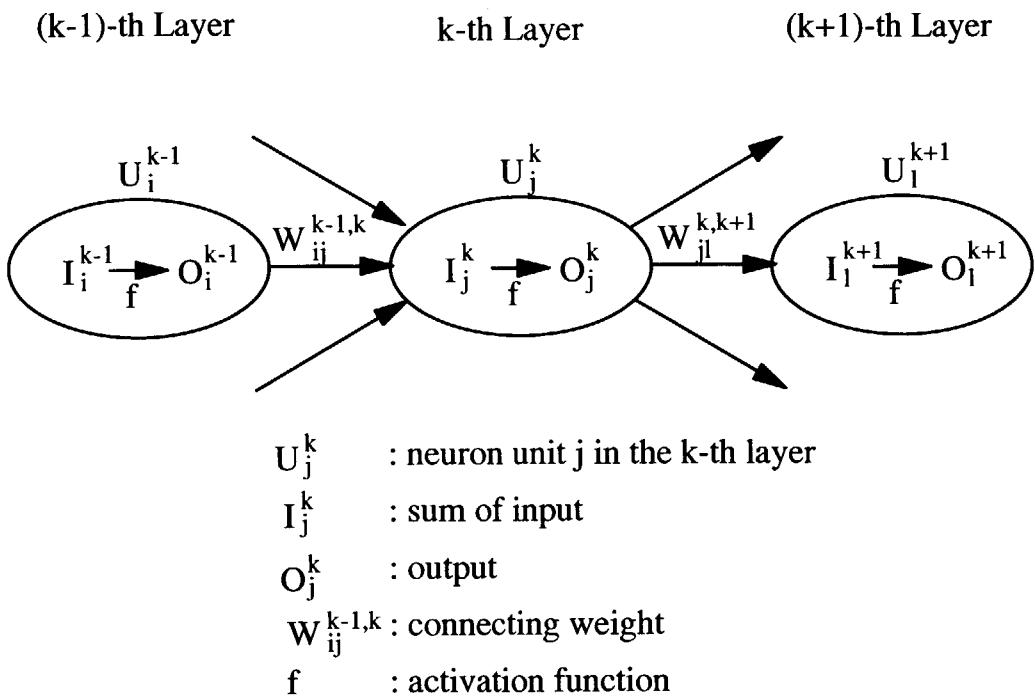


Fig.1 A schematic view of a neuron model

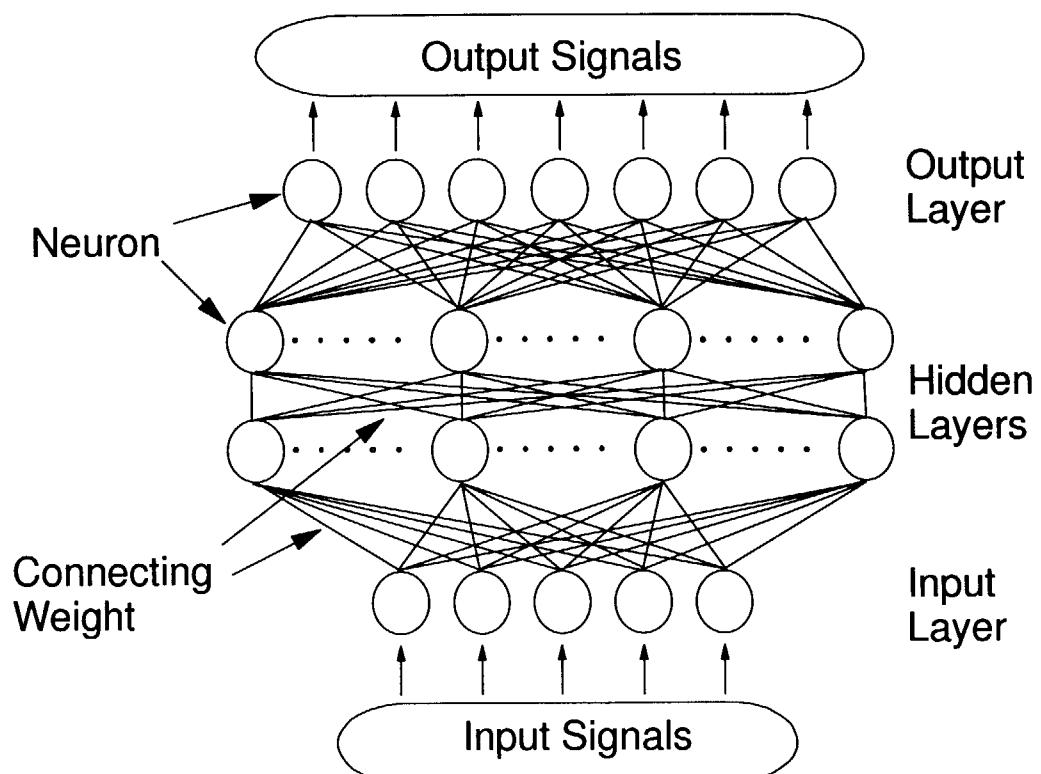


Fig.2 An example of multi-layer neural networks (four-layer structure)

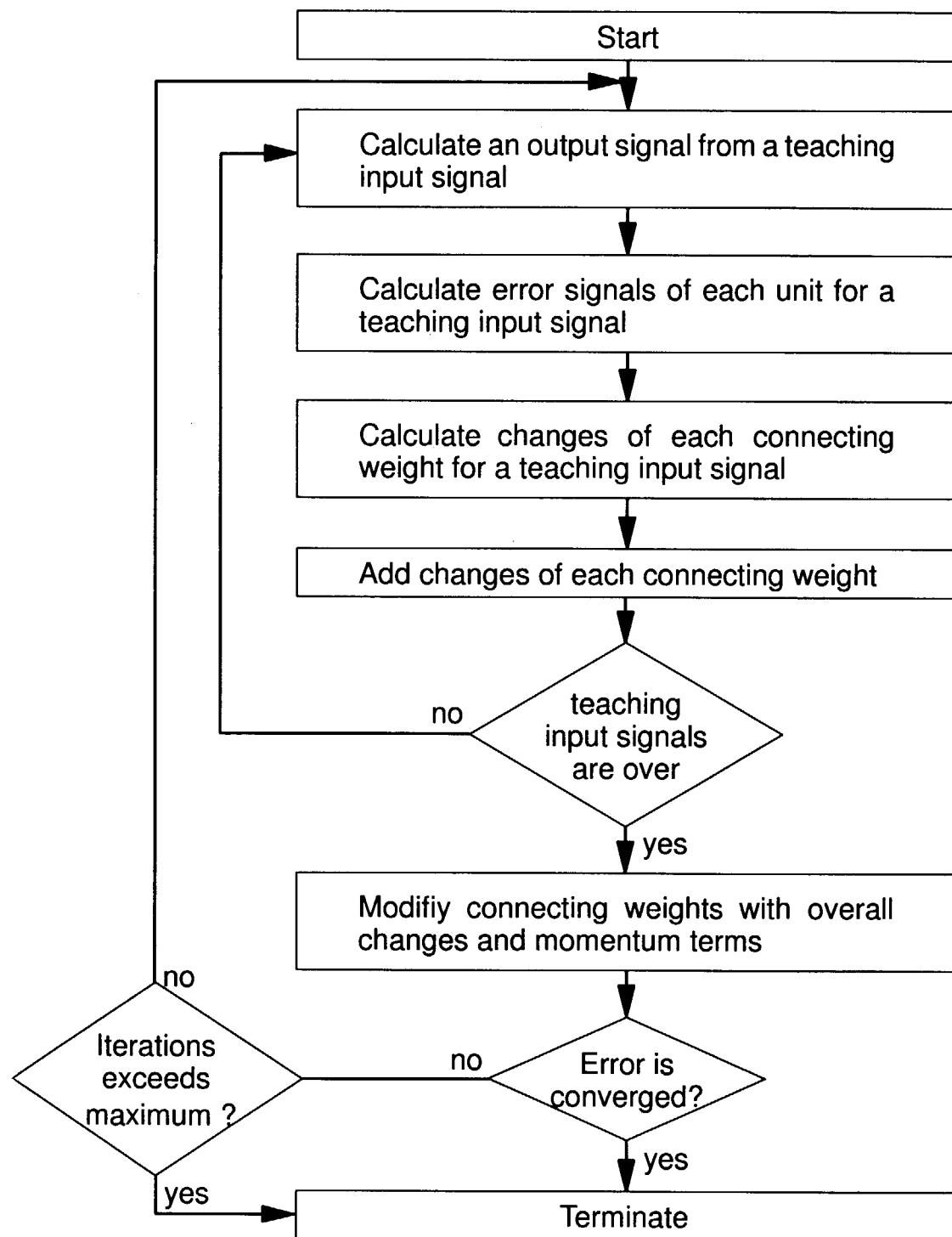


Fig.3 A flow of the collective type of the error back propagation algorithm

3. 多次元設計ウィンドウ探索手法

3.1 ニューラルネットワーク構造

われわれの採用しているモジュラー型の構成をしたネットワーク構造を Fig.4 に示す。ここで、設計変数を入力層のニューロンに、炉心特性値を出力層のニューロンに割り当てる。すなわち、このニューラルネットワークは、設計変数から炉心特性値を推定する。概念設計段階における燃料ピン設計に適用し、核及び熱水力分野用にニューラルネットワークを構築している。Table 1 にニューラルネットワークの入出力変数を示す。ここでは、概念設計にとって基本的な設計変数や炉心特性値を選んでいる。なお、現在は入力変数として 3 個まで選択できる。

Fig. 4 に示すように、われわれが採用したニューラルネットワークはモジュラー構造をしており、各炉心特性に対応して出力層に单一のニューロンをもつニューラルネットワークの集合体である。なお、入力層のニューロンは各々のニューラルネットワークに共通に使われるが、隠れ層のニューロンやニューロン間の結合加重はそれぞれ单一の出力層のニューロンに連結する。一方、Fig.2 に示されるような構造を持つとき、全ての入力と出力が結合する。Fig.2 と 4 を比較してわかるように、モジュラー構造を持つわれわれの採用したニューラルネットワークでは、隠れ層のニューロン及び結合荷重は対応する出力層のニューロンのみに連結し、他の出力層のニューロンに連結しないため、他の出力値からの影響を受けない。また、学習パラメータは各炉心特性に対応する各ニューラルネットワークで定義できるため、推定精度のよい写像関数が構築できる。モジュラー構造を持つニューラルネットワークは、全体としてニューロン数や結合加重の数は増加するため、1 回の学習サイクル当たりに要する計算時間は増加する。しかし、各ニューラルネットワークの学習が容易であり、各炉心特性値の推定精度が向上するため、結局、モジュラー型構成のニューラルネットワークの方が、ネットワーク構成や学習パラメータの調整を全体として容易に行うことができると予想される。逆に、Fig.2 のよう隠れ層のニューロンが入力と出力に結合する場合は結合荷重の数が少ないため、リアルタイムシミュレーションのような計算速度を重要視する応用分野に優れているが、推定精度のよい写像関数を構築するのは容易ではない。本手法で重要なことは、十分にネットワークを学習させるまでの経験的な作業を軽減することの方がユーザーにとって価値のあることであり、それゆえ、モジュラー構成を採用した。現在、2 ~ 5 層構造のネットワークが利用可能である。

3.2 設計ウィンドウ探索手順

ニューラルネットワークを用いた設計ウィンドウ探索手順を Fig.5 に示す。

第 1 ステップでは、設計変数からなる多次元空間を粗く分割する格子点において解析計算を行い、教師データを作成する。このとき前もって設計変数の範囲をあらかじめ設定しておく。設定空間において、製作性の観点から形状に関する制限を満足しないピン径とピンピッチの組み合わせは許容できないものとして教師データから除外している。

第2ステップでは、第1ステップで用意した教師データを用いて、慣性項付き誤差逆伝播則によりニューラルネットワークの学習を行う。ここで、一般的には、入出力値は[0.1, 0.9]や[0.05, 0.95]の範囲で規格化される。なお、隠れ層の層数やニューロン数また学習パラメータ a 、 η 及び α (式(2)及び(5))はユーザーによって各炉心特性に対応するネットワークに対して与えられる。また、学習は各ネットワークに対して行うが、(7)式で定義される誤差信号 E_j の収束状況をグラフィカルインターフェースによって確認できる。

$$E_j = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \frac{1}{2} (O_{jn}^M - T_{jn})^2 , \quad (7)$$

ここで、 j は j 番目の炉心特性を示す。これまで経験から、 5×10^{-5} 程度の収束条件を満足するように学習パラメータやネットワーク構成を調整するためには、学習パラメータやネットワーク構成をいろいろ変えながら学習を繰り返すというプロセスを10回程度試行錯誤的に行えば適切なネットワーク構成や学習パラメータの調整が可能である。

第3ステップは学習済みのネットワークを用いて、探索空間を詳細に分割する格子点において炉心特性値を推定すると同時に境界探索法を用いて設計限界を探査して設計ウィンドウを円滑化する。

本手法では、学習過程を通して解析コードの応答を模擬するニューラルネットワークを構築するため、解析コードの使用は教師データの作成時にのみ必要となる。またニューラルネットワークの応答が極めて高速であるため、本手法の計算時間は従来のパラメトリックサーベイ計算に比べ極めて短縮できる。

しかしながら、学習過程を通じて、教師データを模擬するニューラルネットワークの構築はできるが、未知の入力に対して適当な出力を推定できるかどうかは定かではない。本手法では、ニューラルネットワークを学習させるための学習用パターンに加え、ニューラルネットワークが未知の入力に対しても適切な出力を推定できるかどうかを検証するための検証用パターンを用意する。検証用パターンは、Fig.6に示すように学習用パターンの中点である。また、汎化能力は第2ステップの学習過程で検証される。

3.3 境界探索法

本システムでは、2次元探索空間で効率的に設計ウィンドウを探索する境界探索法⁽¹⁾を組み込んでいる。境界探索法の手順を以下に述べるとともに、その概略をFig.7に示す。要求仕様や設計基準を満足する設計変数の組み合わせが見つかれば、設計境界を以下のように追跡する。設計変数の組み合わせを変更しながら、その組み合わせが要求仕様や設計基準を満足するかどうかを判断する。設計変数の組み合わせの変更は、進行方向に対して右、前、左、後方向の優先順位で行う。こうすれば、設計ウィンドウを短絡させずに、反時計回りに設計境界を追跡で

きる。設計境界の追跡は設計ウィンドウが閉じるまで続けられる。

Table 1 I/O parameters for the neural networks

Neutronics	Thermal-hydraulics
Input Parameters	Input Parameters
Output Parameters	Output Parameters
Pin pitch [cm]	Pin pitch [cm]
Pin diameter [cm]	Pin diameter [cm]
Fuel enrichment [wt%]	Hot channel factor
Average linear heat rate [kW/m]	Average linear heat rate [kW/m]
	Core height [m]
Excess reactivity [%dk/kk']	Departure of nucleate boiling ratio (DNBR)
Breeding ratio (Conversion ratio)	Fuel temperature [°C]
Coolant void reactivity coefficient [%dk/kk']	Cladding temperature [°C]
Maximum burnup [GWd/t]	Coolant outlet temperature [°C]
Heavy metal inventory [tonne]	Plenum gas pressure [atm]
Fissile material gain [kg]	Minimum Reynolds number
Specific power [MW/kg]	Stress of cladding [%]

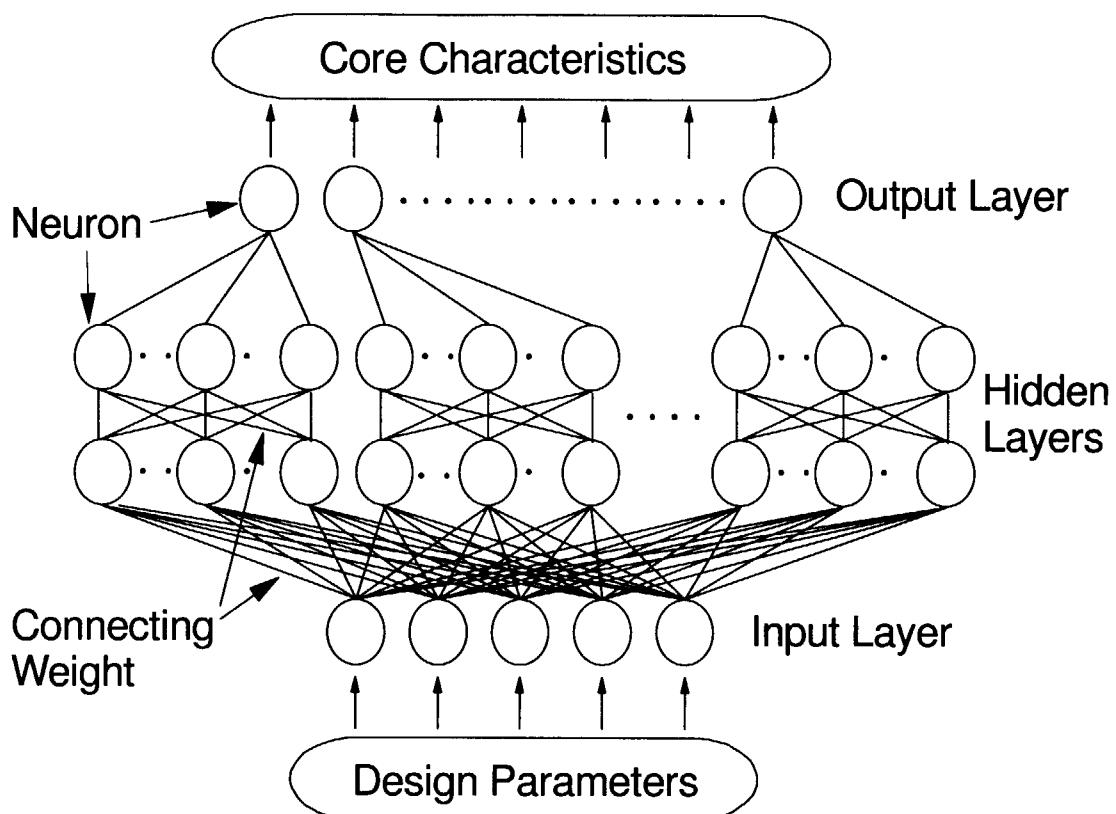


Fig.4 An illustration of the present neural network structure

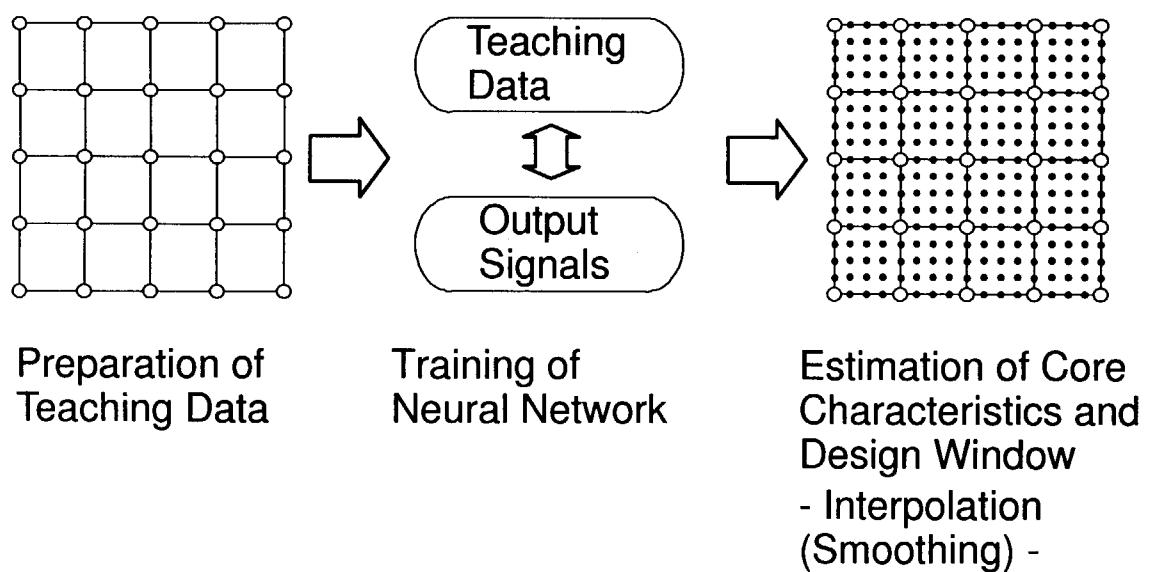


Fig.5 A flow of design window search using multilayer neural networks

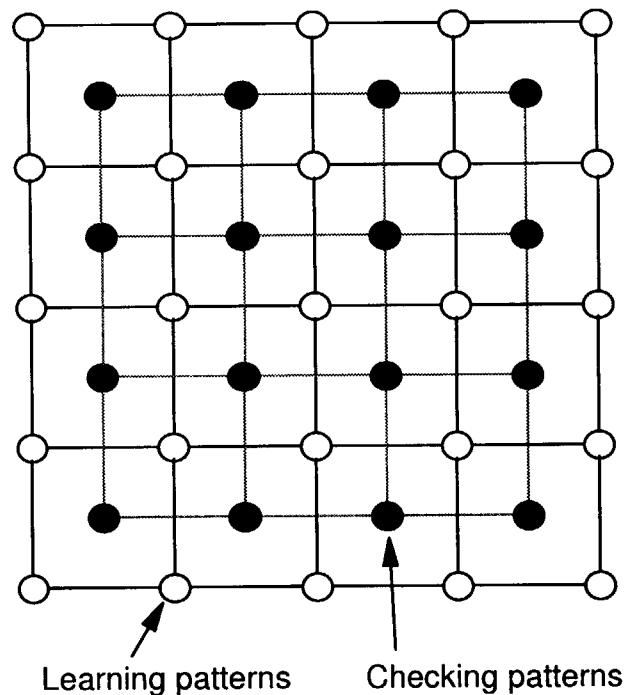


Fig.6 An illustration of learning and checking patterns

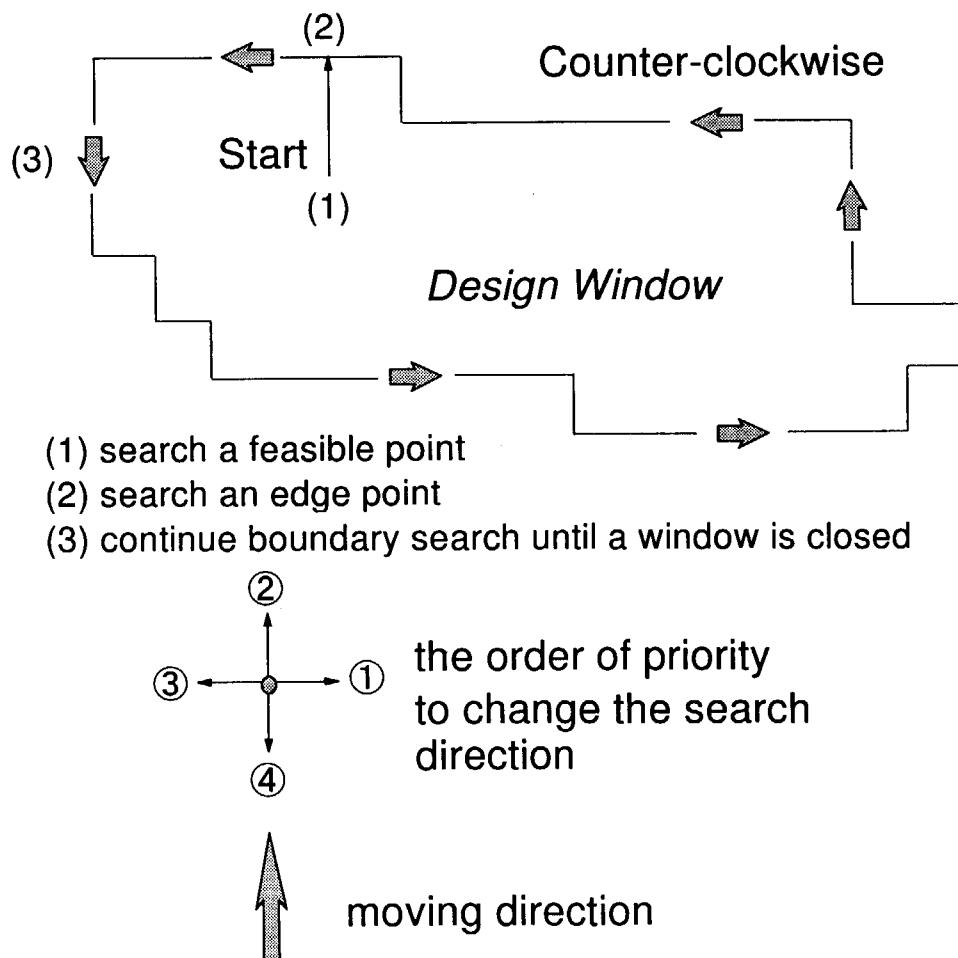


Fig.7 A flow of the boundary search procedure

4. 多次元設計ウィンドウ探索システムの構成

本システムのディレクトリ構成を Fig.8 に示す。本システムは、以下のモジュール群及びデータベース群により構成される。本システムは、これらのモジュールと組み合わせてSunSparcワークステーション上で動作する。

- (1) 設計ウィンドウ探索システムメインプログラム、
- (2) ニューラルネットワークプログラム、
- (3) 会話型操作処理用マンマシンインターフェース、
- (4) 図形表示用ツール、
- (5) 核及び熱水力解析計算用コード、
- (6) 解析コードの入力データの作成及び出力の編集を行う入出力処理用プログラム、
- (7) データベース及び知識ベース

以下にその詳細を述べる。

(1) 設計ウィンドウ探索システムメインプログラム

本プログラムは、設計ウィンドウ探索システムのメインプログラムであり、教師データの作成、ニューラルネットワークの学習、学習済みニューラルネットワークによるマッピング及び設計ウィンドウ探索に至るまでのプロセスをコントロールするためのものである。C言語で記述されている。なお、設計ウィンドウの探索プログラムは、Kyoto Common Lisp (KCL)⁽⁷⁾で記述されている。

(2) ニューラルネットワークプログラム

本プログラムは、階層型ニューラルネットワークの構築、学習及びマッピングを行うことができる。FORTRAN言語により記述されている。本プログラムは、写像関数構築用ツールとして別途の使用を考慮して、できるだけ独立性、モジュール性を高めて記述されている。なお、ニューラルネットワークプログラムは、単独での実行が可能である。詳細は第6章に述べる。

(3) 会話型操作処理用マンマシンインターフェース

操作性を高めるため、全ての操作は画面上のメニューに対してマウスを用いて指示できるようにしている。また、全ての入力データは、メニュー画面上またはテキストエディタ画面上で入力できるようになっている。モジュール各部のインターフェースはC言語により記述されている。ウィンドウシステムとして日本語 OpenWindows または Motif が利用できる。

(4) 図形表示用ツール

ニューラルネットワークの学習状況を確認したり、マッピング後の結果、つまり設計ウィンドウや炉心特性値の探索空間での分布を表示するためのグラフィックツールである。Xlibを利用している。

(5) 核及び熱水力解析計算用コード

本システムでは、熱水力計算用コードとして3つの解析モジュールを、核計算用として1つの解析モジュールを有する。熱水力計算用の3つのモジュールは、燃料挙動モデルとして従来から公開され使用実績が十分あり信頼性の高いコードであるGAPCON-THERMAL-HC⁽⁸⁾、LIFE-I⁽⁹⁾及びFRAP-S3⁽¹⁰⁾の各モデルを活用している。また、これらのコードに単位セルモデルによる簡易熱水力計算を行う流力計算部分を付加している。なお、これらのコードは、対象とする原子炉炉型により、適当なモジュールが選択される。核計算用のモジュールは、SRAC⁽¹¹⁾コードから衝突確率計算部分を抜き出して、簡易核計算モジュールとして活用している。これらは、いずれもFORTRAN言語で記述されている。

(6) 解析コード用入出力処理用プログラム

解析コードの入力データの作成及び出力の編集を行う入出力処理用のプログラムであり、FORTRAN言語で記述されている。これらのプログラムは、教師データを自動的に作成するために用いられる。

(7) データベース及び知識ベース

対象炉型及び選択した解析モジュールに応じて、解析モジュールの入力データのデフォルト値が初期値として設定される。デフォルト値を収録したファイル群が解析モジュール及び対象炉型毎に用意されている。

知識ベースとしては、製作性に関連した形状制限に関する知識、設計基準に関する知識や要求性能に関する知識がルール形式で収録されている。これらの知識は、対象炉型により使用する場合と使用しない場合があるので、炉型に応じて相異なる知識ベースが自動的に適用できるようになっている。また、探索空間に関するデフォルトデータが収録されており、無駄な空間を探索しないように、効率よく設計ウィンドウが探索できるようになっている。

また、ニューラルネットワークの学習パラメータのデフォルト値を収録したデータファイルがある。

利用者は、これらのデフォルト値のうち修正を要する部分だけを変更すればよい。

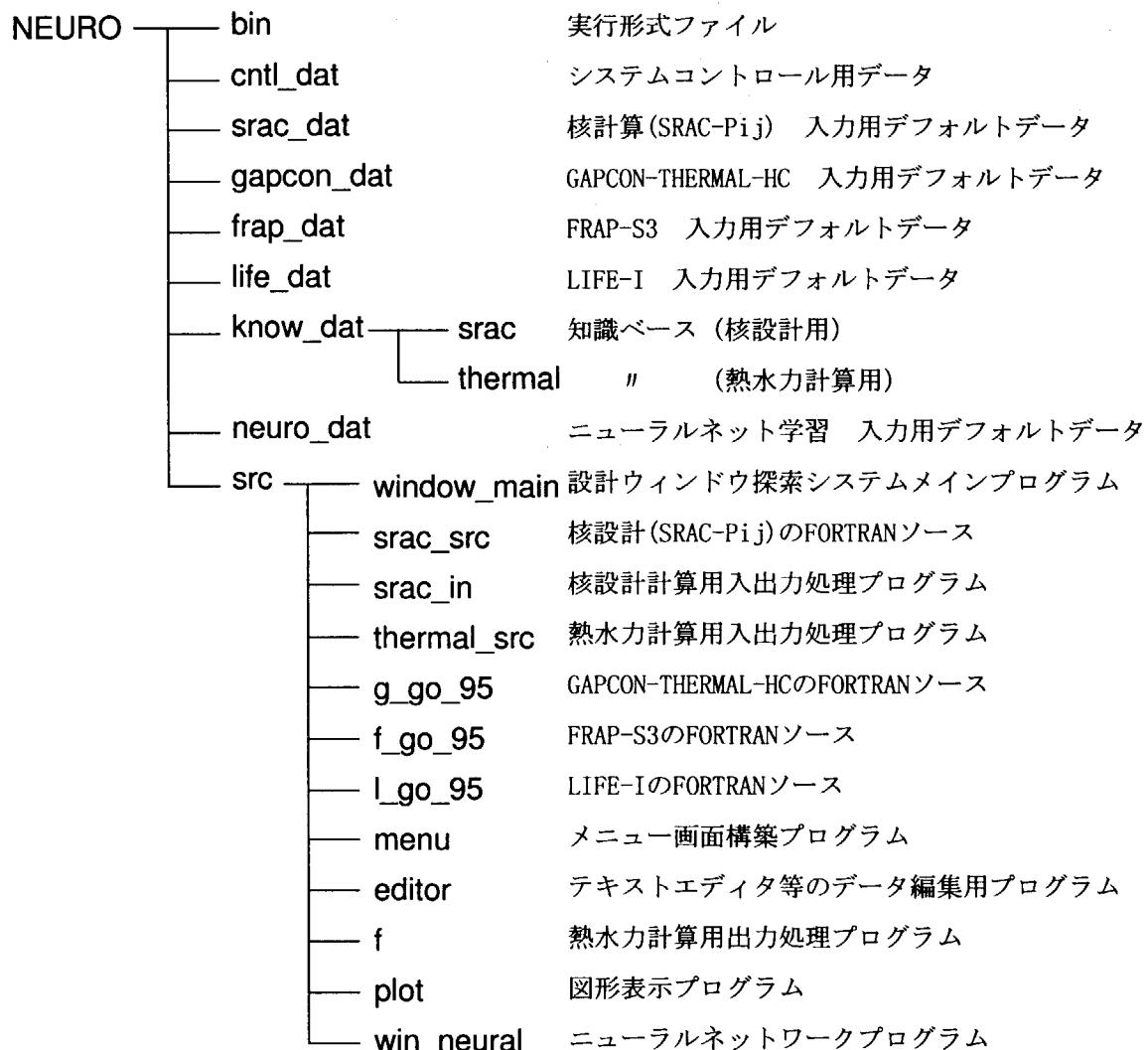


Fig.8 Structure of directories of the design window search system

5. 多次元設計ウィンドウ探索システムの使用方法

5.1 インストール方法

まず、第4章のFig.8で示したNEURO以下のディレクトリを適当なカレントディレクトリにコピーする。次にNEURO配下のMakefile中のInstall_dirを現在の環境に合わせて変更する。その後、次のコマンドで既に存在するオブジェクトファイルを一旦消去してから、コンパイルし直し、新たにシステムの構築を行う。

```
> make clean; make
```

5.2 設計ウィンドウ探索システムの操作手順の概略

以下にシステムの操作手順の概略を記す。付録-1には、各解析コードの入力変数の説明を載せた。主要な操作画面を付録-2に収録した。ただし、解析コードの入力データを設定する画面については割愛させていただいた。

(1) 設計ウィンドウ探索システムの起動

(i) パスの設定

まず、パスの設定を行う。cshを用いる場合は、以下のコマンドを発行する。

```
setenv PATH path_name/NEURO/bin:$PATH
```

path_nameは設計ウィンドウシステムをインストールした環境に合わせて設定する。

なお、.cshrcファイルに直接設定してもよい。

(ii) プロジェクト毎のディレクトリの作成

次に、本システムを使用するためのディレクトリを作成する。

```
mkdir project_name
```

(iii) システムからの使用ファイルのコピー

(ii)で作成したディレクトリに移り、次のシェルを発行する。

```
fcopy.sh
```

本シェルは、カレントディレクトリは以下にサブディレクトリを作成し、システムで使用するファイルをコピーして、システムの稼働に必要な環境を整える。

(iv) コマンド入力

次のコマンドによりシステムが起動する。

```
moona_main
```

(2) 解析計算用入力データの設定

システムを起動すると、対象とする原子炉炉型及び解析分野を選択するメニュー画面 (Fig.A2-1 及び A2-2) が表示される。熱水力計算の場合は、次に解析コードを選択するメニュー画面

(Fig.A2-3) が表示される。上記の項目を設定すると、次の処理を促すメニュー画面 (Fig.A2-4 及び A2-5) が表示されるが、最初の起動時には、解析計算用の入力データを設定する必要がある。

これらはメニュー画面及びテキストエディターを通じて設定できる。これらのメニュー画面等については本報告書では省略するが、付録-1 に各解析コードの入力変数の説明を載せた。

(3) 教師データの作成

解析計算コードの入力データの設定が終われば、処理の選択画面 (Fig.A2-4 及び A2-5) に戻るが、次にAIによる炉心の構築に処理を移動し、設計ウィンドウの構築に関するメニュー画面 (Fig.A2-6 及び A2-7) に移る。核解析を行う場合は、教師データの作成の前に計算タスクの設定画面 (Fig.A2-8) に移動し、燃焼計算をするかどうか等の計算タスクを設定する。

設計ウィンドウ構築に関するメニュー画面 (Fig.A2-6 及び A2-7) で、教師データの作成に進む。まず、設計変数の設定画面 (Fig.A2-9 及び A2-10) が現れる。ここでは、主な設計変数の再設定が可能である。次に、計算手法に関するメニュー画面 (Fig.A2-11) が現れるが、"設計ウィンドウ、3次元、粗計算"を選択する。次に、評価パラメータの許容値を設定する画面 (Fig.A2-12 及び A2-13) により、許容値を利用者が設定できる。また、ここで教師データ作成のための分割点数を入力する。これは、探索空間を構成する設計変数の最大及び最小値間を等分割するための点が各設計変数に対して設定される。例えば、探索空間が3次元空間の場合、6を入力すると $216 (=6 \times 6 \times 6)$ 点の教師データが作成される。

教師データ作成のためのメニュー画面 (Fig.A2-14) により、教師データの作成が行うことができる。ここでは、まず、探索空間を構成する設計変数を選ぶ必要がある。選択可能な設計変数は以下の通りである。

(i)核設計： ピン径、ピンピッチ、燃料濃縮度及び線出力。

(ii)熱水力設計： ピン径、ピンピッチ、ホットチャンネル因子、線出力及び炉心高さ。

また、探索空間を構成する設計変数の最小及び最大値をテキストエディター (Fig.A2-15 及び A2-16) により設定する必要がある。以上の手続きを経て、教師データ作成のためのメニュー画面 (Fig.A2-14) において、"スタート"ボタンをクリックすると教師データが自動的に作成される。

(4) ニューラルネットワークの学習及びマッピング

教師データの作成が終了すると、設計ウィンドウ構築に関するメニュー画面 (Fig.A2-6 及び A2-7) に戻り、"設計ウィンドウ探索"ボタンをクリックして、ニューラルネットワークを実行するフレーム (Fig.A2-17) に進む。ここで、"ニューラルネットワークの実行"ボタンをクリックすると、ニューラルネットワークの実行画面 (Fig.A2-18) に進む。このメニュー画面上では、ニューラルネットワークのどの機能を使うかを設定する。機能として、学習のみ、マッピングのみ及び学習とマッピングが選択可能である。また、学習と同時に、未学習データ（検証用データ）により汎化能力を検証できるオプションもある。

学習に先立ち、学習パラメータの設定を行う必要がある。学習パラメータの設定 (Fig.A2-19 及び

A2-20) は、試行錯誤的にまた経験的に調整する要素がかなり残っている。なお、学習パラメータはテキストエディタ (Fig.A2-20) により、評価パラメータ毎に設定することができる。このため、通常、最初は汎化能力を検証しないで学習し、学習パラメータを再設定しながら学習を繰り返すという手順が必要となろう。学習の状況はその都度画面表示 (Fig.A2-21 及び A2-22) される。未学習データ（検証用データ）により汎化能力を検証するのは、学習パラメータの調整を終えた学習の最終段階で行えばよいであろう。なお、学習パラメータの説明は第5.3節で述べる。また、効率的な学習のための指針を第5.4節で述べる。学習をうまく行うことができれば、次に詳細分割点へのマッピングを行う。これは、ニューラルネットワークの実行画面 (Fig.A2-18) で”マッピング”を選択すればよい。

(6) 図形表示及び炉心特性の算出

計算結果の図形表示を行うには、ニューラルネットワークを実行するフレーム (Fig.A2-17) で、結果の”グラフ表示”を選択すればよい。次に、その表示方法の設定画面 (Fig.A2-23)において、表示項目、表示空間等を設定すればよい。設計ウィンドウの表示 (Fig.A2-24) のみではなく、炉心特性値の等高線表示 (Fig.A2-25) も可能である。

また、ある特定の点における炉心特性値を算出するオプションも用意されている。これは、ニューラルネットワークの実行画面 (Fig.A2-18) で炉心特性データの表示を選択すればよい。次に炉心特性値を算出する探索空間での設計変数の値を指定 (Fig.A2-26) すると、その点における炉心特性値を算出し、それらが表示できる (Fig.A2-27 及び A2-28)。なお、評価パラメータ及びシステムでの変数名との対応をTable 2 に示す。

5.3 ニューラルネットワークの学習のための入力変数の説明

(1) ニューラルネットワークの層数

2から5層構造までの層数が設定できる。通常、3層構造で十分である。

(2) クラスタ低減率（隠れ層ニューロン数の設定）

クラスタ低減率を変えることで隠れ層のニューロン数を調整できる。ニューロンの割り付け方は、目的関数の変化率の大きいものほど、ニューロン数が多くなるようしている。その絶対値は、クラスタ低減率により調整できる。クラスタ低減率が大きいほど、隠れ層ニューロン数は少なくなる。プログラム内で最大ニューロン数があらかじめ14と設定されていて、ある信号とその周囲8点との差との比からニューロン数の削減率が設定されるが、クラスタ低減率によりその削減率を再調整できるようになっている。経験的に1～5の値が設定できる。

(3) ニューロン動作関数

ニューロンの動作関数として、シグモイド関数、 \tanh 関数、線形関数が選択可能である。通常はシグモイド関数を選択する。

(4) 学習パラメータ

学習パラメータには、学習係数、慣性項の係数及びシグモイド温度がある。4層構造を想定すると、これらの値は、クラスタ毎や入力層と第1隠れ層、第1隠れ層と第2隠れ層、第2隠れ層と出力層、それぞれに設定することができる。第1隠れ層と第2隠れ層、第2隠れ層と出力層には同一の値が設定される。

結合荷重の修正は、逐次修正法と一括修正法の2種類がある。逐次修正法は、学習パターン毎に(6)式に従い結合荷重の修正を行う方法である。非線形の強い写像に有効であるが、学習速度は遅くなるといわれている。微調整を必要とする対象には学習効率が高くなるといわれている。一括修正法は、各学習パターンの修正量を全学習パターンで蓄積し、結合荷重の修正を一括して行う方法である。学習速度は上がるが、発散や振動が生じやすいため、慣性項の導入が必要であるといわれている。本システムでは、慣性項付きの一括修正法を採用している。これは前学習サイクルにおける結合加重の修正量の影響（慣性項）を、現在の学習サイクルにおける修正量に加える。

(a)学習係数： η

(5)式より明らかなように、誤差及び結合荷重からなる空間において、誤差が最も小さくなる方向に最急降下法により結合荷重の変更量を決める係数である。学習係数が大きい方が学習速度が速くなるが、曲面が局所的に急激に変化している場合等には、発散や振動を起こす可能性が大きくなる。逆に学習計数が小さい方がそれらを防ぐことできるが、学習

速度は遅くなる。経験的に0.5～1.5（1.0近傍）の範囲で設定する。

(b)慣性項の係数 : α

(5)式より明らかなように、前学習サイクルにおける結合加重の修正量の影響（慣性項）を、現在の学習サイクルにおける修正量に加えるための係数である。通常、学習係数の半分程度の値を設定する。経験的に0.2～1.0の範囲で設定する。

(c)シグモイド温度 : a

動作関数の振る舞いを調整する因子である。シグモイド関数及びtanh関数では、この因子が小さければ線形に近い関数となり、大きいほどステップ関数に近づき、非線形性の強い関数となる。評価パラメータがどのように振る舞いをするか個々のケースで異なるため、最も試行錯誤を要する因子となろう。経験的に0.1～2.0の値で設定する。また、線形関数の場合はその傾きである。

(5) 乱数幅縮小率（初期結合荷重）

結合荷重は、ニューロンにおける神経纖維とシナプス結合に相当するものである。神経回路網モデルにおいては、あるニューロンの出力値が信号を伝える先のニューロンに対してどれだけの影響を及ぼすかの指標と考えることができ、この重みを結合荷重と呼ぶ。

結合荷重の変化量は、結合荷重の大きさとニューロンの出力によって決まる。初期結合荷重が全ての結合で同一値をとった場合、結合荷重が全て一様に修正されてしまい、各ニューロンの独立性が失われてしまう。これを防ぐために、初期結合荷重に乱数を用いて不均一性を導入している。結合荷重の修正量は動作関数の一次導関数の大きさに比例しているため、初期結合荷重の分布は動作関数の一次導関数が大きい部分に分布させることが重要である。乱数幅縮小率とは、初期結合荷重の分布幅の大きさを与え、この範囲内で乱数を発生させるものである。この値が大きいほど乱数の幅が小さくなる。初期値として、経験的に2.5～4.0の範囲で設定する。

(6) 詳細設計分割数

設計の成立する範囲を詳細に探索するための分割数で、各設計変数に対して同一に設定される。この値を大きくするほど、成立範囲はなめらかな曲面となる。

(7) 許容誤差

(7)式で定義される平均2乗誤差は、これまでの経験により、 1×10^{-4} または 1×10^{-5} 程度まで収束するといわれている。許容誤差として 5×10^{-5} 程度を設定するのが適当と思われる。

(8) 許容繰り返し回数

学習サイクルの最大繰り返し回数である。これは上述の許容誤差との兼ね合いで設定されるべきである。学習パラメータの調整は、学習パラメータをいろいろ変更しながら試行錯誤的に行なう必要がある。学習パラメータの調整を効率的に行うには、誤差が収束しそうかどうかだけを判断すればよく、少なめの回数を設定すればよい。経験的には、5,000回程度が適當かと思われる。一旦、学習パラメータを決定してしまえば、許容誤差以内に学習を進めればよいので、多めの回数を設定すればよいであろう。許容誤差の大きさに従い、経験的に10,000～30,000回を設定すればよいと思われる。

(9) 上限値／下限値

ニューラルネットワーク内では、教師信号は[0,1]の範囲に規格化されるが、一般には[0.1,0.9]といくらかのマージンをとって規格化される場合が多い。これは、シグモイド関数の出力値が0や1の場合、出力が無限大になることを防止するためであり、マージンをとることによりいくらかの外挿が可能となるためである。

5.4 ニューラルネットワークの効率的な学習のための目安

ニューラルネットワークの学習を行うためには、設定すべきパラメータが多い。例えば、学習係数、慣性項の係数やシグモイド温度等の学習パラメータに関するデータ、またニューラルネットワークの層数、隠れ層におけるニューロン数といったニューラルネットワークの構成に関するデータ、また教師データの個数といったデータである。これらに対して試行錯誤を繰り返すと多大な時間が費やされてしまい、本システムのメリットが損なわれてしまう。そこで、効率的な学習のための検討を行ったので参考されたい。ここでは、ネットワーク構成及び教師データの個数がニューラルネットワークの推定値に及ぼす影響を調べ、ニューラルネットワークの適切な学習のためのネットワーク構成及び教師データ個数に関する指針を検討した。検討の詳細は、付録3に載せた。その検討結果より以下の目安が得られている。なお、本報告書では学習パラメータについての目安はなく、数回の試行錯誤により決定されたい。

- (1) 隠れ層には、入力層のニューロン数と同数以上のニューロンが最低限必要である。
- (2) 教師データ数が十分であり、かつ3層構造のニューラルネットワークで十分である場合、隠れ層の層数や隠れ層のニューロン数の増加は、ニューラルネットワークの推定値の精度にあまり影響しない。
- (3) 学習過程において、検証用データを用いて汎化能力を検証することは重要である。仮に、3層構造のニューラルネットワークにより汎化能力が十分に得られない場合は、4層構造のニューラルネットワークをその代わりに用いれば、汎化能力を得られる可能性がある。もし、4層構造のニューラルネットワークを用いても汎化能力が十分に得られない場合は、教師データの不足が原因である可能性が高く、教師データを増やす必要がある。

以上の結果を基に、効率的な学習方法について以下の手順を推奨する。

- (1) 教師データのみにより、ニューラルネットワークを学習させ、適切な学習パラメータをさがす。ここでは2,000～5,000回で反復回数を打ち切り、学習の状況を観察する。
- (2) 検証データによりニューラルネットワークの汎化能力を検証する。ここで、検証データの汎化能力が得られていることが判明すれば、学習を終了しマッピングに移行する。
- (3) 汎化能力がないことがわかれば、隠れ層の層数を1層増やして、(1)及び(2)の過程を繰り返す。
- (4) それでも、汎化能力が得られなければ、教師データの個数を増加させて、(1)～(3)の過程を繰り返す。

Table 2 Output parameters and corresponding variable names in the system

Output parameters	Variable names
Shape	SHAPE
Initial excess reactivity	EXESR
Coolant void reactivity coefficient	VOIDR
Breeding ratio (Conversion ratio)	CONVR
Maximum burnup (GWd/t)	BURNMX
Heavy metal inventory (tonne)	HMINV
Fissile material gain (kg)	FGAIN
Specific power (MW/kg)	SPCPOW
Departure of nucleate boiling ratio (DNBR)	DNBR
Fuel temperature (°C)	TFMAX
Coolant outlet temperature (°C)	TGOUT
Cladding temperature (°C)	TCMAX
Minimum Reynolds number	REMIN
Plenum pressure (atm)	PLPR
Stress of cladding (%)	ECMAX
Pressure drop (kg/cm ²)	PRSDRP

6. 結 論

ニューラルネットワークを用いて原子炉設計で多用されるパラメータサーバイを支援するシステムを開発した。本システムにより、設計ウィンドウ、すなわち設計基準や要求仕様を満足する設計変数の範囲を多次元空間において効率的に得ることができる。階層型ニューラルネットワークを応用して、計算時間を短縮した。本報告書は、手法の原理、システム構成、システム使用方法、ニューラルネットワークの学習方法、解析計算に必要な入力変数を解説した。

謝 辞

本システムの開発にあたって、協力を頂いた川崎重工業株式会社の藤井貞夫氏、小川博志氏及び株式会社アイ・ティ・ジェイの井戸勝氏に感謝します。

参考文献

- (1) Nakagawa, M., et al. :Design Window Search Based on AI Technique, J. Nucl. Sci. Technol.,**29**,p1116,(1992).
- (2) Mochizuki, Y., et al. : Automated Structural Design System Based on Design Window Search Approach : Its Application to ITER First Wall Design, Proc. of SmiRT-12 Post Conf. Nr.13, Lake of Constance, Germany, p465,(1993).
- (3) Cybenko,G. :Continuous Valued Neural Networks with Two Hidden Layers are Sufficient, preprint, Computer Science Dept., Tufts University, (1988).
- (4) Cybenko,G. :Approximations by Superpositions of a Sigmoidal Function, Math. of Control, Signals, and Systems, **2** (4), p303-314, (1989).
- (5) Alianna, J. M., Dan, J., and Stanley, F.: Configuring and Optimizing the Back-Propagation Network, Handbook of Neural Computing Applications, P233-250, Academic Press,(1990).
- (6) Rumelhart, D. E., Hilton, G. E., and Williams, R. J., :Learning Internal Representations Error Propagation, In Parallel Distributed Processing, Vol.1, MIT Press, (1986).
- (7) 湯浅太一、荻谷昌己：“Common Lisp ハンドブック,”岩波書店(1987).
- (8) Beyer, C .E., et. al.:"GAPCON-THERMAL-2, A Computer Program for Steady State and Transient Thermal Behavior of an Oxide Fuel Rod, BNWL-1898 (1975).
- (9) Stephan J.D. et al.:"LIFE Code System for Analysis of Oxide Fuel Pin Thermal/Structual Behaviour," Int. Meeting on Advanced LMFBR Fuels, Teesun (1977).
- (10) Dearien J.A. et al. :"FRAP-S3 : A Computer Code for the Steady State Analysis of Oxide Fuel Rods," TREE-NUREG-1107 (1977).
- (11) Tsuchihashi, K., et al. :Revised SRAC Code System, JAERI 1302 (1986).

This is a blank page.

付録

付録 1 解析計算用入力変数の説明

GAPCON-THERMAL-HC (p.26 - p.55)

FRAP-S3 (p.26 - p.55)

LIFE-I (p.26 - p.55)

SRAC-Pij (p.56 - p.58)

(1) 入力パラメータ

◎ GAPCON-THERMAL2-HC, LIFE-I, FRAP-S3 共通

[内容]	[変数名]	[単位]	[デフォルト値] (HCLWR)
タイトル	TITLE		
ピンピッチ	PITCH	mm	12.0
ピン直径	FD	mm	9.5
炉心高さ	LFUEL	m	2.00
平均線出力	PSEUDO(1)	kW/m	15.0
ホットチャンネル因子の選択	LHOT		1
過負荷	OPF		1.0
ホットチャンネル因子	HCF(1)		1.50
軸方向形状因子	HCF(3)		1.55

・入力説明

入力パラメータは、初期値としてデフォルト値が設定されるが、選択した炉型によって以下の炉心の値が設定される。

- ・軽水炉 1100MWe 級現用LWR
- ・高転換軽水炉 グリッドスペーサ型HCLWR
- ・高速炉 MONJU
- ・ガス冷却炉 HTTR

LHOT (ホットチャンネル因子の選択)

1 : 入力値を設定する。

-1 : コード内で飽和温度に達するホットチャンネル因子を設定する。

OPF (過負荷)

1.0 : 定格出力、 1.12 : 112%運転

PSEUDO(1),HCF(1),HCF(3) は、後述の(2b)における入力値が優先される。

(2) ホットチャンネル因子、物性値、相関式のコントロールデータ

① GAPCON-THERMAL2-HC

[内容]	[変数名]	[単位]	[デフォルト値] (HCLWR)
スペーサ種類	LGRID		2
格子形状	LATICE		2
強制対流熱伝達式	LCOR1		1
核沸騰熱伝達式	LCOR2		1
冷却材種類	INCHF		1
冷却材熱伝達式	SIGHF		-5000.0
軸方向燃料分割数	NPOW		20
燃焼ステップ数	NTIME		1
軸方向出力分布	IAXIAL		0
出力分布の選択	NPRFIL		1

・入力説明

LGRID (スペーサ種類)

- 1 : スパイラルリブ
- 2 : 高転換炉用グリッド
- 3 : 通常のグリッド
- 4 : ワイヤースペーサ

LATICE (格子形状)

- 1 : 正方格子
- 2 : 六方格子

LCOR1 (強制対流熱伝達式)

- 1 : DITTUS-BOELTER (LWR)
- 2 : GAS CIRCULAR PIPE (GCR)
- 3 : LYON (FBR)

LCOR2 (核沸騰熱伝達式)

- 1 : THOM
- 2 : JENS-LOTTES
- 3 : CHEN

INCHF (冷却材種類)

- 1 : 軽水
- 2 : ナトリウム
- 3 : ヘリウム
- 4 : 鉛

SIGHF (冷却材熱伝達式)

- < 0 : 熱伝達相関式を用いる。
- = 0.0 : 被覆管表面温度分布を入力する。

NTIME (燃焼ステップ)

- 15ステップ以下を入力すること。

IAXIAL (軸方向出力分布)

- 0 : chopped cosine 分布
- 1 : ファイルから読み込む
- 1 : テキストエディタにより入力。

NPRFIL (出力分布の選択)

- 0 : 燃焼ステップ毎に出力分布を準備する。
- 1 : 全燃焼ステップにわたり同一の出力分布を使用する。

この画面の表示終了後、以下の3つの画面が表示される。

- (2a) スペーサ種類 (必ず表示される)
- (2b) 燃焼依存データ (必ず表示される)
- (2c) 軸方向分布データ (SIGHF=0.0あるいはIAXIAL =±1 のとき表示される)

② LIFE-I

[内容]	[変数名]	[単位]	[デフォルト値] (FBR)
スペーサ種類	LGRID		4
格子形状	LATICE		2
強制対流熱伝達式	LCOR1		3
核沸騰熱伝達式	LCOR2		0
冷却材種類	INCHF		2
冷却材熱伝達式	SIGHF		-5000.0
軸方向燃料分割数	NPOW		20
燃焼ステップ数	NTIME		1
軸方向出力分布	IAXIAL		0
出力分布の選択	NPRFIL		1
冷却材温度計算法	LCOOL		1
軸方向分割数（挙動用）	NN		10
印刷オプション	NPOINT		0
計算開始点	NI		1
燃料径方向分割数	NT		10
応力印刷オプション	IOUTPR		1
応力計算最大反復回数	ITERNO		30

・入力説明

NN（軸方向分割数）は、燃料挙動解析用に使用する。

LCOOL（冷却材温度計算法）は、燃料挙動解析時の冷却材温度の計算法である。1をセットする。

その他の入力は ① GAPCON-THERMAL2-HC を参照。

③ FRAP-S3

[内容]	[変数名]	[単位]	[デフォルト値] (FBR)
スペーサ種類	LGRID		4
格子形状	LATICE		2
強制対流熱伝達式	LCOR1		3
核沸騰熱伝達式	LCOR2		0
冷却材種類	INCHF		2
冷却材熱伝達式	SIGHF		-5000.0
軸方向燃料分割数	NPOW		20
燃焼ステップ数	NTIME		1
軸方向出力分布	IAXIAL		0
出力分布の選択	NPRFIL		1
冷却材温度計算法	LCOOL		1
軸方向分割数（挙動用）	NT		10

・入力説明

NT（軸方向分割数）は、燃料挙動解析用に使用する。

LCOOL（冷却材温度計算法）は、燃料挙動解析時の冷却材温度の計算法である。1をセットする。

その他の入力は①GAPCON-THERMAL2-HCを参照。

(2a) スペーサの種類

◎ GAPCON-THERMAL2-HC, LIFE-I, FRAP-S3 共通

[内容]	[変数名]	[単位]	[デフォルト値] (HCLWR)
スペーサ個数	NGRID		7
軸方向ピッチ／直径	APD		20.0
リブ幅・ラップ直径	BB	mm	0.53
グリッド抵抗係数	CV		12.0
流路閉塞係数	EPSN		0.0
摩擦係数 A1	A1		0.3164
摩擦係数 A2	A2		-0.25
摩擦係数 A3	A3		0.0

・入力説明

スパイラルリブを選択 (LGRID=1) した場合、NGRIDは-1に設定しなければならない。ワイヤーを選択 (LGRID=4) した場合、必ずNGRID<-1でなければならない。絶対値はワイヤー巻き数を表す。グリッドを選択 (LGRID=2,3) した場合、APDおよびBBはダミーである。

LGRID=3の場合のみ、A1、A2、A3が有効であり、摩擦係数 f は以下の式により与えられる。

$$f = A1 * Re^{A2} + A3$$

(2b) 燃焼依存データ

① GAPCON-THERMAL2-HC

[内容]	[変数名]	[単位]
燃焼ステップ	II	
限界熱流束相関式	NCHF	
燃焼度	TIME	MWD/T
線出力	PSEUDO(1)	kW/m
ホットチャンネル因子	HCF(1)	
軸方向形状因子	HCF(3)	
印刷オプション	IOUTPR	
入口温度	TINLET	°C

・入力説明

NCHF（限界熱流束相関式）

0 : DNBRを計算しない。

1 : B&W2 および W-3 相関式 → PWR用

2 : KfK および EPRI(B&W-VPI&SU) 相関式 → HCLWR用

3 : Janssen-Levy および Hench-Levy 相関式 → BWR用

PSEUDO(1)、HCF(1)、HCF(3)については、(1)の入力パラメータの設定時に指定した値が表示されるが、本画面（テキストエディタ）で入力した値が優先される。燃焼度はMWD/T単位で入力するが、計算結果はコード内で簡易的に日数(DAY)に換算した値が表示される。

印刷オプションは、燃料挙動関連の計算結果出力である。

② LIFE-I

[内容]	[変数名]	[単位]
燃焼ステップ	II	
NCHF	NCHF(I)	
燃焼日数	TIME(I)	DAY
線出力	PSEUDO(I)	kW/m
ホットチャンネル因子	HCF(1,I)	
軸方向形状因子	HCF(3,I)	
入口温度	TINLET(I)	°C

③ FRAP-S3

[内容]	[変数名]	[単位]
燃焼ステップ	II	
NCHF	NCHF(I)	
燃焼度	TIME(I)	DAY
線出力	PSEUDO(I)	kW/m
ホットチャンネル因子	HCF(1,I)	
軸方向形状因子	HCF(3,I)	
出力分布選択	JST	
入口温度	TINLET(I)	°C

・入力説明

②③とも、① GAPCON-THERMAL2-HC を参照のこと。但し、燃焼度の単位は日数である。

(2c) 軸方向分布データ

◎ GAPCON-THERMAL2-HC, LIFE-I, FRAP-S3 共通

(i) 軸方向被覆管表面温度分布

・入力説明

(2)において、SIGHF（冷却材の熱伝達率）=0.0とした場合、被覆管表面温度を指定するファイル名を入力する画面が表示される。このファイルのフォーマットは、以下の形式で作成しなければならない。

第 6～10 衍 : 軸方向インデックス (データの終わりは0とする)

第 11～20 衍 : 軸方向位置 (cm)

第 21～30 衍 : 被覆管温度 (°C)

(ii) 軸方向出力分布

・入力説明

(2)において、IAXIAL（軸方向出力分布）=1とした場合、軸方向出力分布を指定するファイル名を入力する画面が表示される。(2)において、NRRFIL=1の時は全燃焼ステップにわたり同一の出力分布を使用するが、NRRFIL>1の時は燃焼ステップ数分の出力分布を使用する。このファイルのフォーマットは、以下の形式で作成するしなければならない。

第 1～5 衍 : 軸方向インデックス (データの終わりは0とする)

第 11～20 衍 : 軸方向相対位置

第 31～40 衍 : 相対出力分布

IAXIAL=-1とした場合、軸方向出力分布を利用者が直接入力するテキストエディタが表示される。入力形式は以下のとおりである。

PROFIL(J,I)==> XXXXXXXX (ファイル名)

J:軸方向インデックス、(NPOW+1) 個

J=1は炉心入口

J=NPOW+1は炉心出口

NPOW:軸方向分割数 ((2)を参照のこと)

I:燃焼ステップ、NTIME個

NTIME:燃焼ステップ数 ((2)を参照のこと)

(3) 原子炉運転条件データ

① GAPCON-THERMAL2-HC

[内容]	[変数名]	[単位]	[デフォルト値] (HCLWR)
炉心運転圧	PREF	kg/cm ²	159.0
入口温度	TINC	°C	-289.0
出口温度	TOUTC	°C	325.0
原子炉熱出力	QTOTAL	MWt	3423.0
初期封入ガス圧	ATMOS	atm	10.0
claddingの厚さ	CTHICK	mm	0.60
ギャップ幅	GAPC	mm	0.095
プレナム長	HPLEN	cm	100.0
熱拡散係数	TDC		0.019
二次系SG特性	LQRT		0
一次系ポンプ特性	LFLW		0
ループ数	LOOP		4
炉心流量割合	WRATIO		0.95
ホットチャンネル流量割合	WRHOT		0.95
印刷オプション	MINI		-1
燃焼ステップ選択	IT		1
ピン本数選択	ISCN		0
流路データの選択	IAREA		0

入力説明は次頁。

・入力説明

TINC (入口温度) <0 ならばその絶対値が固定される。

TOUTC (出口温度) <0 ならばその絶対値が固定される。

QTOTAL (熱出力) は、LQRT (2次系SG特性) = 1 なら初期値となる。

LQRT (2次系SG特性)

0: 2次系SG特性を考慮しない。

1: 2次系SG特性を考慮する。

2次系SG特性は後述の(3a)で入力する。

LFLW (1次系ポンプ特性)

0: 1次系ポンプ特性を考慮しない。

1: 1次系ポンプ特性を考慮する。

1次系ポンプ特性は後述の(3b)で入力する。

ISCN (ピン本数の選択)

0: ホットチャンネル質量流量をコード内で計算する。

1: ホットチャンネル質量流量を全流量/SCPINとする。

SCPIN (ピン本数) は、後述の(3c)で入力する。

IAREA (流路データの選択)

0: 流路をコード内で計算する。

-1: 流路データを後述の(3d)で入力する。

② LIFE-I

[内容]	[変数名]	[単位]	[デフォルト値] (FBR)
炉心運転圧	PREF	kg/cm ²	1.1
入口温度	TINC	°C	-397.0
出口温度	TOUTC	°C	529.0
原子炉熱出力	QTOTAL	MWt	714.0
初期封入ガス圧	ATMOS	atm	10.0
claddingの厚さ	CTHICK	mm	0.47
ギャップ幅	GAPC	mm	0.08
プレナム長	HPLEN	cm	100.0
熱拡散係数	TDC		0.019
二次系SG特性	LQRT		0
一次系ポンプ特性	LFLW		0
ループ数	LOOP		4
炉心流量割合	WRATIO		0.95
ホットチャンネル流量割合	WRHOT		0.95
ピン本数選択	ISCN		0
流路データの選択	IAREA		0

・入力説明

① GAPCON-THERMAL2-HC を参照のこと。

③ FRAP-S3

[内容]	[変数名]	[単位]	[デフォルト値] (FBR)
炉心運転圧	PREF	kg/cm ²	1.1
入口温度	TINC	°C	-397.0
出口温度	TOUTC	°C	529.0
原子炉熱出力	QTOTAL	MWt	714.0
初期封入ガス圧	ATMOS	atm	10.0
claddingの厚さ	CTHICK	mm	0.47
ギャップ幅	GAPC	mm	0.08
プレナム長	HPLEN	cm	100.0
熱拡散係数	TDC		0.019
二次系SG特性	LQRT		0
一次系ポンプ特性	LFLW		0
ループ数	LOOP		4
炉心流量割合	WRATIO		0.95
ホットチャンネル流量割合	WRHOT		0.95
ピン本数選択	ISCN		0
流路データの選択	IAREA		0
印刷オプション	JDLPR		1
チェックライ	NOPT		1

・入力説明

① GAPCON-THERMAL2-HC を参照のこと。

(3a) 2次系SG特性データ

◎ GAPCON-THERMAL2-HC, LIFE-I, FRAP-S3 共通

(i) 2次系SG特性を使用しない場合 (3)のLQRT=0の場合)

[内容]	[変数名]	[単位]	[デフォルト値]
原子炉熱出力割合	QRATIO		1.0

(ii) 2次系SG特性を使用する場合 (3)のLQRT=1の場合)

[内容]	[変数名]	[単位]	[デフォルト値]
UAF0	UFA0	MW/°C	32.799
2次系SG圧力	PS0	kg/cm ²	62.5
C1	C1		0.2
C2	C2		0.8
C3	C3		0.6
C4	C4		0.1
C5	C5		0.25
C6	C6		0.1

・入力説明

2次系SGを考慮する場合、(3)のQTOTAL（原子炉熱出力）はイニシャルゲスとなる。但し、軽水炉以外の炉系では、2次系SG特性は使用すべきではない。

UAFO : SG 1 基あたりの総括熱貫流係数とSG伝熱面積との積

C1 - C6 : 総括熱貫流係数関係式に用いる係数。総括熱貫流係数 U は以下の関係式により与えられる。

$$U = U_0 / \{ C1 * (M_0 / M)^{C2} + C3 + C4 * (Q / Q_0)^{C5} + C6 \}$$

Mは冷却材流量、QはSG 1 基あたりの熱出力を表す。添字の0は基準PWRを指す。ここでは、
 $M_0 = 60.1E+6$ (kg/h)、 $Q_0 = 855.75$ (MWt) を用いた。

(3b) 1次系ポンプ特性データ

◎ GAPCON-THERMAL2-HC, LIFE-I, FRAP-S3 共通

(i) 1次系ポンプ特性を使用しない場合 ((3)のLFLW=0の場合)

[内容]	[変数名]	[単位]	[デフォルト値] (FBR)
1次系流量	FLOW	kg/h	15.3E+6

(ii) 1次系ポンプ特性を使用する場合 ((3)のLFLW=1の場合)

[内容]	[変数名]	[単位]	[デフォルト値] (HCPWR)
ポンプ特性係数 AA1	AA1		-23.163
ポンプ特性係数 AA2	AA2		192.69
炉心入口損失係数	COEFIN		1.2
炉心以外の圧損	HR0	M	42.0
1次系流量	FLOW0	kg/h	60.1E+6
入口温度	TIN0	°C	289.0
炉心平均温度	TAV0	°C	307.0
ダミー	QFACTR		

・入力説明

軽水炉以外の炉系では、1次系ポンプ特性は使用すべきではない。

AA1,AA2: 以下の式により、ポンプ揚程 H が与えられる。

$$H \text{ (m)} = AA1 * Q \text{ (m}^3/\text{s)} + AA2$$

Q: 体積流量

(3c) 燃料ピン本数 ((3)のISCN=1の場合)

◎ GAPCON-THERMAL2-HC, LIFE-I, FRAP-S3 共通

[内容]	[変数名]	[単位]
燃料ピン数	SCPIN	

(3d) 流路データ ((3)のIAREA=-1の場合)

◎ GAPCON-THERMAL2-HC, LIFE-I, FRAP-S3 共通

[内容]	[変数名]	[単位]
流路面積	AREA	mm ²
濡縁長さ	PERIM	mm
加熱長さ	HPERIM	mm

(4) 燃料挙動に関するデータ

① GAPCON-THERMAL2-HC

[内容]	[変数名]	[単位]	[デフォルト値]
中性子ディプレッション	NFLX		-1
クラッドの厚さ	CRUDTH	inch	0.0
蓄積エネルギー	ISTOR		1
吸着ガス中水素挙動	NOH		0
燃料溶融温度	TM	°C	2550.0
燃料塑性開始温度	TPLAS	°C	1200.0
クリープデータ	ICREP		0
cladの弾性変形	ICDF		0
酸化率	ICOR		0
焼きしまり	IDENSF		0
ガス放出評価式の選択	IGAS		0
リロケーション	IRELOC		0
FP放出の選択	IRELSE		0
ディプレッションの印刷	IRL		0
FPガス放出モデル	IFPRL		0

・入力説明

NFLX (中性子ディプレッション)

-1 : 考慮しない。

0 : 内蔵データにより考慮する。

>0 : ユーザ入力、後述の(4a)で入力する。

CRUDTH (クラッドの厚さ)

cladding に付着した crud の厚さ。

ISTOR (蓄積エネルギー)

= 0 : 蓄積エネルギーを考慮しない。

= 1 : 蓄積エネルギーを考慮する。

NOH (吸着中水素挙動)

≠ 0 : 水素ガス挙動を考慮する。

= 0 : 水素ガス挙動を考慮しない。

ICDF (クラッド弾性変形)

- $\neq 0$: クラッド弾性変形を考慮する。
- $= 0$: クラッド弾性変形を考慮しない。

ICOR (酸化率)

- ≥ 3 : PWR
- < 3 : BWR

IDENSF (焼きしまり)

- $\neq 0$: 焼きしまりを考慮する。
- $= 0$: 焼きしまりを考慮しない。

IGAS (ガス放出評価式)

- $\neq 0$: 95%信頼度評価
- $= 0$: 最適評価

IRELOC (リロケーション)

- < 0 : 保守的評価
- $= 0$: 考慮しない
- > 0 : 最適評価

IRELSE (FP放出の選択)

- $\neq 0$: retard gas release (停止時または負荷変動時)
- $= 0$: gas release (定常運転時)

LFPRL (FPガス放出モデル)

- 1 : 内蔵データ
- 2 : NRC correlation (TACO code)
- 3 : MONJU correlation

ICREPは、被覆管のクリープダウンに関する入力データオプションであるが、現時点では使用すべきではない。

② LIFE-I

[内容]	[変数名]	[単位]	[デフォルト値]
燃料物性値	NOK		4
被覆材挙動モデル	NOH		-1
核分裂性ガスの割合	AFGAS		0.246
出力中性子束変換係数	FLUXN		1.07E+14

・入力説明

NOK (燃料物性値)

- 1 : LIFE-I
- 2 : LIFE-I
- 3 : LIFE-II
- 4 : MATPRO Version 11

NOH (被覆材挙動モデル)

- $\text{EPS} = A * \exp(-Q/RT) * S^M + B * F * S^N$
- ≥ 0 : THEORETICAL Calculation
- 0 : $A=2.7\text{E}-11, B=4.655\text{E}-34, M=7, N=3, Q=95000$
 - >0 : $M=7, N=2, \dots$
 - < 0 : EMPIRICAL Caluculation
 - 1 : BOLTAX,BIANCHERIA and GUHA
 - 2 : 温度依存スウェリングオプション

AFGAS (FPガス割合) : 1 fission 当りのFPガス

FLUXN (出力中性子束変換係数) : KW/ft → N/cm²·S

③ FRAP-S3

[内容]	[変数名]	[単位]	[デフォルト値]
クラッドモデル選択(crud)	ICOR		0
初期クラッド厚	CRDT	mm	0.0254
クラッド増加速度	CRDTR	mm/s	8.054D+10
初期封入ガス種類	IDXGAS		1
リロケーションモデル	IRELOC		0
疲労サイクル	NPCYCL		1
ギャップモデル	NGAPC		1
FPガス放出モデル	NGASR		0
スタック計算選択	MODE		0
中性子タイプ レッション	IPLANT		-1
中性子束	FLUX	N/m ² s	6.0D+17
核分裂生成ガスの割合	AFGAS		0.3
水分含有量	PPMH2O	PPM	0.0
窒素含有量	PPMN2	PPM	15.0
ラフネスファクター	EXOM		1.0
スタック発熱割合	QEND		0.3
被覆材内壁表面粗さ	ROUGHC	mm	1.22E-3
ベレット外壁表面粗さ	ROUGHF	mm	2.16E-3

・入力説明

ICOR (クラッド(crud)モデル)

0 : crud 固定、 crud による温度低下を無視する。

1 : crud 固定、 crud による温度低下を考慮する。

2 : crud 可変、 crud による温度低下を考慮する。

IDXGAS (初期封入ガス種類)

1 : ヘリウム

2 : 空気

3 : 窒素

4 : FPガス

5 : アルゴン

6 : ユーザ入力 → 後述の(4b)で入力する。

IRELOC (リロケーションモデル)

- = 0 : リロケーションを考慮しない。
- = 1 : FRAP-S3 モデル

NGAPC (ギャップコンダクタンスモデル)

- 0 : Cracked pellet model
- 1 : Annular gap model

NGASR (FPガス放出モデル)

- 1 : Booth Diffusion
- 0 : Macdonald-Weisman
- 1 : Beyer-Hann model
- 6 : ANS-5.4 correlation

MODE (スタック計算選択)

- 0 : スタック計算をする。
- 1 : スタック計算をしない。

IPLANT (中性子ディプレッション)

- 1 : ユーザ入力
- 0 : frap内蔵モデル
- 1 : UO₂燃料PWR用,後述(5)の ENRCH が 2 ~ 6 なら有効。それ以外は 0 をセット。
- 2 : UO₂燃料BWR用,後述(5)の ENRCH が 1.5~3.5 なら有効。それ以外は 0 をセット。
- 3 : MOX燃料PWR用,後述(5)の ENRCH が 2 ~ 10 なら有効。それ以外は 0 をセット。
- 4 : MOX燃料BWR用,後述(5)の ENRCH が 1.5~6 なら有効。それ以外は 0 をセット。

(4a) 中性子ディプレッションデータ ((4)①のNFLX > 0の場合)

① GAPCON-THERMAL2-HC

[内容]	[変数名]	[単位]	[デフォルト値]
インデックス	J		
燃料径方向座標	RV1(J)	INCH	
中性子ディップレッション値	RV2(J)		

・入力説明

NFLX 組入力する。RV2 は相対値を入力する。

(4b) 初期封入ガスのモル分率データ ((4)③のIDXGAS=6の場合)

③ FRAP-S3

[内容]	[変数名]	[単位]
初期封入空気割合	AMFAIR	
初期封入アルゴンガス割合	AMFARG	
初期封入核分裂ガス割合	AMFFG	
初期封入クリプトンガス割合	AMFKRY	
初期封入キセノンガス割合	AMFXE	
初期封入ヘリウムガス割合	AMFHE	
初期封入水素ガス割合	AMFH2	
初期封入水蒸気割合	AMFH20	
初期封入窒素割合	AMFN2	

・入力説明

ここで、AMFFG ≠ 0.0 の場合、AMFKRY および AMFXE を入力する必要はない。FRAP-S3 内で、AMFKRY = 0.15AMFFG、AMFXE = 0.85AMFFG と設定される。

(5) 燃料及び被覆管の物性値データ

① GAPCON-THERMAL2-HC

[内容]	[変数名]	[単位]	[デフォルト値] (HCLWR)
cladの材質	NCLAD		0
ジルコイの種類	ZCLAD		1.0
ヘレットの種類	NFUEL		-1
初期封入アルゴンガス割合	FRACAR		0.0
〃 水素ガス割合	FRACHE		0.0
〃 ヘリウムガス割合	FRACHE		1.0
〃 クリプトンガス割合	FRACCR		0.0
〃 窒素ガス割合	FRACN		0.0
〃 キセノンガス割合	FRACXE		0.0
燃料理論密度比	FRDEN		0.930
柱状晶領域密度比	FRSIN		0.98
PuO ₂ の重量比	FRPUO2		0.08
U235の 〃	FR35		1.975E-3
Pu240の 〃	FR40		0.25132
Pu241の 〃	FR41		0.10158
Pu242の 〃	FR42		0.0775
等軸晶遷移温度	TSINC	°C	1350.0
柱状晶遷移温度	TSINH	°C	1700.0
O/M	FOTMTL		2.0

入力説明は次頁。

・入力説明

NCLAD (cladの材質)

-2 : SUS316

-1 : SUS304

0 : ZIRCALOY-4 or -2

ZCLAD (ジルカロイの種類)

1.0 : ZIRCALOY-4

0.0 : ZIRCALOY-2

NFUEL (ペレットの種類)

-1 : MOX

0 : UO₂

燃料あるいは被覆管の物性値をユーザ入力したい場合は、それぞれ NFUEL > 0、NCLAD > 0 を指定する。次メニューの(5a)および(5b)において、それぞれの物性値を入力しなければならない。ZCLADは、現時点では同一の物性値が内蔵されている。

② LIFE-I

[内容]	[変数名]	[単位]	[デフォルト値]
被覆材の材質	NCLAD		-2
燃料理論密度比	FRDEN		0.850
等軸晶の密度比	FRQUE		0.95
柱状晶の密度比	FRSIN		0.97
PuO2の重量比	FRPUO2		0.08
U235の〃	FR35		1.975E-3
Pu240の〃	FR40		0.25132
Pu241の〃	FR41		0.10158
Pu242の〃	FR42		0.0775
O/M	FOTMTL		2.0
被覆材の密度	RHOC	g/cc	6.5
Naの熱伝導率係数	ANA0		54.306
Naの熱伝導率係数	ANA1		-0.0187
Naの熱伝導率係数	ANA2		2.0914E-6
Naの比熱係数	CANA0		0.345696
Naの比熱係数	CANA1		-0.79211E-4
Naの比熱係数	CANA2		3.41178E-8
Heの熱伝導率係数	AHE0		0.08483
Heの熱伝導率係数	AHE1		9.111E-5

・入力説明

NCLADは、① GAPCON-THERMAL2-HC を参照のこと。

冷却材がナトリウムかつ②のLCOOLが0または-1の場合のみ、ANA0, ANA1, ANA2, CPNA0, CPNA1, CPNA2が必要である。熱伝達率および比熱は次式によりそれぞれ与えられる。

$$\lambda = \text{ANA0} + \text{ANA1} * T + \text{ANA2} * T^2$$

$$C_p = \text{CPNA0} + \text{CPNA1} * T + \text{CPNA2} * T^2$$

③ FRAP-S3

[内容]	[変数名]	[単位]	[デフォルト値]
被覆材の材質	ICM		-2
燃料理論密度比	FRDEN		0.930
柱状晶の密度比	FRSIN		0.98
空孔率補正	FRDENG		0.75D-2
PuO ₂ の重量比	FRPUO2		0.08
U235の "	FR35		1.975E-3
Pu240の "	FR40		0.25132
Pu241の "	FR41		0.10158
Pu242の "	FR42		0.0775
柱状晶遷移温度	TSINT	°C	1600.0
O/M	FOTMTL		2.0
燃料濃縮度	ENRICH	%	0.0
PuO ₂ 密度	PUDEN	g/CC	11.46
UO ₂ 密度	UODEN	g/CC	10.97
被覆材構造因子	CATEXF		0.05
冷間加工度	COLDWK		0.2

・入力説明

ICM (被覆材の材質)

1 : SUS

2 : ZIRCALOY-2

4 : ZIRCALOY-4

ENRCH (燃料濃縮度)

中性子ディプレッション計算時に使用される U-235 の濃縮度。

(5a) 被覆管物性値

① GAPCON-THERMAL2-HC

[内容]	[変数名]	[単位]
温度	AA1	F
熱伝達率	AA2	BTU/HR/FT/F
降伏応力	AA3	PSI
ヤング率	AA4	PSI
ポアソン比	AA5	
熱膨張係数	AA6	1/F
マイヤー硬度	AA7	kg/cm ²

(5b) 燃料熱伝達率

① GAPCON-THERMAL2-HC

[内容]	[変数名]	[単位]
温度	CF(1)	F
燃料組織変化前の熱伝達率	CF(2)	BTU/HR/FT/F
燃料組織変化後の熱伝達率	CF(3)	BTU/HR/FT/F

(6) その他のパラメータ

① GAPCON-THERMAL2-HC

[内容]	[変数名]	[単位]	[デフォルト値]
炉内圧力損失評価法	NPAVG		1
流量計算最大反復回数	MITER		100
出力計算 "	MITQ		500
PBO (ダミー)	PBO	inch	0.0
組織領域初期値直径	DSINZ	inch	0.0
初期中心空孔径	DVOIDZ	inch	0.0
線出力の選択	IPEAK		-1
KB (ダミー)	KB		0.0
KOOL (ダミー)	KOOL		0
初期中心孔の長さ	LVOIDZ	inch	0.0
ディッシュの体積割合	PRCDH	%	0.0
被覆材内壁表面粗さ	ROUC	inch	0.00002
ペレット外壁表面粗さ	ROUF	inch	0.000039
燃料吸着ガス量	S	cc/G	0.0
CO/CO2割合	XCO		0.0
H2割合	XH		0.0
N2割合	XN		0.0

・入力説明

NPANG (炉内圧力損失評価法)

0: 各メッシュの合計を使う。

1: 冷却材平均温度を使う。

IPEAK (線出力の選択)

-1 に固定。(1) および (2b) の PSEUDO を平均線出力として使う。

② LIFE-I

[内容]	[変数名]	[単位]	[デフォルト値]
炉内圧力損失評価法	NPAVG		1
流量計算最大反復回数	MITER		100
出力計算 //	MITQ		500
線出力の選択	IPEAK		-1
燃料の熱伝導率	FKA1		-1.8E-2
燃料の熱伝導率	FKB1		54.0
燃料の熱伝導率	FKC1		1.75E-12
燃料の熱伝導率	FKA2		1.1E-2
燃料の熱伝導率	FKB2		0.485
燃料の熱伝導率	FKC2		0.4465
柱状晶領域熱膨張係数	FA11		6.784E-6
柱状晶領域熱膨張係数	FA12		5.8E-9
等軸晶領域熱膨張係数	FA21		6.784E-6
等軸晶領域熱膨張係数	FA22		5.8E-9
不变領域熱膨張係数	FA31		6.784E-6
不变領域熱膨張係数	FA32		5.8E-9
被覆材の熱伝導率	CK1		9.18
被覆材の熱伝導率	CK2		4.214E-3
被覆材の熱膨張係数	CA1		8.778E-9
被覆材の熱膨張係数	CA2		1.481E-9
組織変化モデルの係数	CM1(1)		2.0E+13
組織変化モデルの係数	CM1(2)		3.38E+13
組織変化モデルの係数	DHR(1)		0.7E+5
組織変化モデルの係数	DHR(2)		0.5E+5

入力説明は次頁。

・入力説明

NPANG、IPEAK は、① GAPCON-THERMAL2-HC を参照。

FA11～FA32は、(4)②のNOK（燃料物性値） ≥ 3 では、コード内蔵データに置き替わるので、ダミーとなる。コード内蔵データは以下のとおりである。

FA11,FA21,FA31 = 6.784E-6

FA12,FA22,FA32 = 5.8 E-9

CK1～CA2は、(5)②のNCLAD（被覆材の材質）の指定によって以下のデータに置き替わるの
で、ダミーとなる。

- ・ NCLAD=2:SUS-316 20%冷間加工

CK1=8.0, CK2=4.5 E-3, CA1=9.1E-6, CA2=2.21E-9

- ・ NCLAD=-1:SUS-304

CK1=8.1, CK2=4.38E-3, CA1=9.1E-6, CA2=2.21E-9

- ・ NCLAD=-2:ジルカロイ

CK1=7.16, CK2=3.802E-3, CA1=3.424E-6, CA2=7.556E-10

③ FRAP-S3

[内容]	[変数名]	[単位]	[デフォルト値]
炉内圧力損失評価法	NPAVG		1
流量計算最大反復回数	MITER		100
出力計算 //	MITQ		500
系変数の選択	NSP		0
ディッシュの幅	DISHSD	mm	0.7
バネ外径	DSPG	mm	11.43
バネワイヤ径	DSPGW	mm	0.53
ディッシュの高さ	HISHSD	mm	0.3
ペレットの高さ	HPLT	mm	18.5
バネ巻数	VS		13.0
組織領域初期直径	DSINZ	mm	0.0
初期中心空孔径	DVOIDZ	inch	0.0
初期中心孔の長さ	LVOIDZ	inch	0.0
出力乗数	FLXDP		0.9999

・入力説明

NPANG,, IPEAK は、① GAPCON-THERMAL2-HC を参照。

FLXDP（出力乗数）は(5)③においてENRCH（燃料濃縮度）=0.0のときに、中性子ディプレッ
ションによる径方向出力密度の変化量を考慮するものである。

(7) 設計パラメータ

◎ SRAC-Pij

[内容]	[変数名]	[単位]	[デフォルト値] (HCLWR)
タイトル	TITLE		
ピン直径	PINDIA	mm	9.5
ピンピッチ	PITCH	mm	12.0
燃料濃縮度	PENRCH	wt%	10.0
平均線出力	AVGLHR	kW/m	16.0

・入力説明

入力パラメータは、初期値としてデフォルト値が設定されるが、選択した炉型によって以下の炉心の値が設定される。

- ・軽水炉 1100MWe 級現用LWR
- ・高転換軽水炉 グリッドスペーサ型HCLWR
- ・高速炉 MONJU
- ・ガス冷却炉 HTTR

(8) その他のパラメータデータ

◎ SRAC-Pij

[内容]	[変数名]	[単位]	[デフォルト値] (HCLWR)
被覆管厚さ	CLDTHK	mm	0.6
バッチ数	NBATCH		3
全熱出力	TPOWER	MWt	3400
炉心径	CORRAD		195.0
スペーサ種類	SPACER		h-grid

・入力説明

SPACER (スペーサ種類)

spiral : スパイラルリブ

h-grid : 高転換炉用グリッド

n-grid : 通常のグリッド

wire : ワイヤースペーサ

(9) 物質データ

◎ SRAC-Pij

① 燃料物質

[内容]	[変数名]	[単位]	[デフォルト値] (HCLWR)
理論密度比	SMEARF	wt%	95.0
燃料平均温度	FUTEMP	°C	600.0
U-235重量割合	ABNU35	wt%	0.3
Pu-239の重量割合	ABNPU9	wt%	57.8
Pu-240の重量割合	ABNPU0	wt%	24.9
Pu-241の重量割合	ABNPU1	wt%	11.1
Pu-242の重量割合	ABNPU2	wt%	5.7

② 被覆管

[内容]	[変数名]	[単位]	[デフォルト値]
被覆材の材質	NAMCLD		
被覆管平均温度	CDTEMP	°C	300.

・入力説明

NAMCLD (被覆管種類)

Zrc-2 : ジルカロイ-2

Zrc-4 : ジルカロイ-4

SS304 : SUS-304

SS316 : SUS-306

③ 冷却材

[内容]	[変数名]	[単位]	[デフォルト値]
冷却材種類	NAMCOL		
冷却材温度	COTEMP	°C	300.0
圧力	CPRESS	atm	150.0
ボロン濃度	BENRCH	ppm	1000.
B-10濃縮度	B10ENR	wt%	19.8

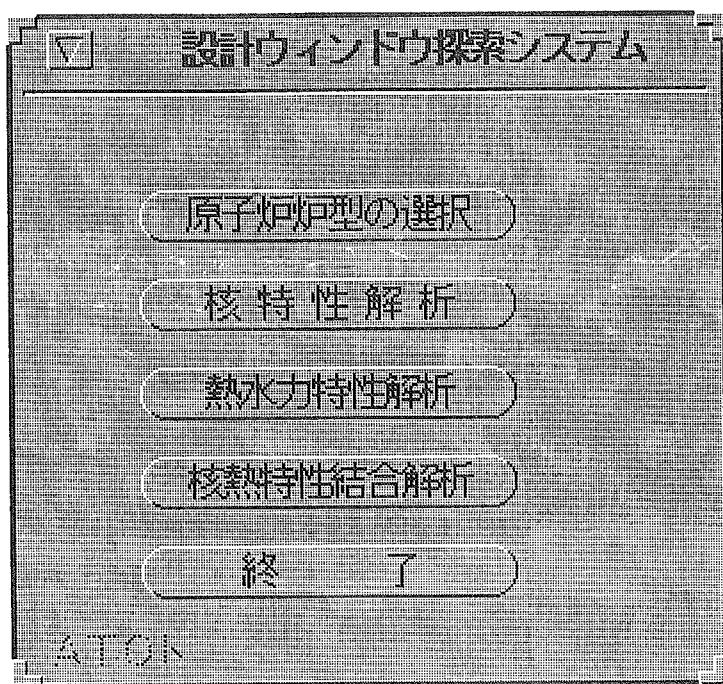
・入力説明

NAMCOL (冷却材種類)

0 : 軽水

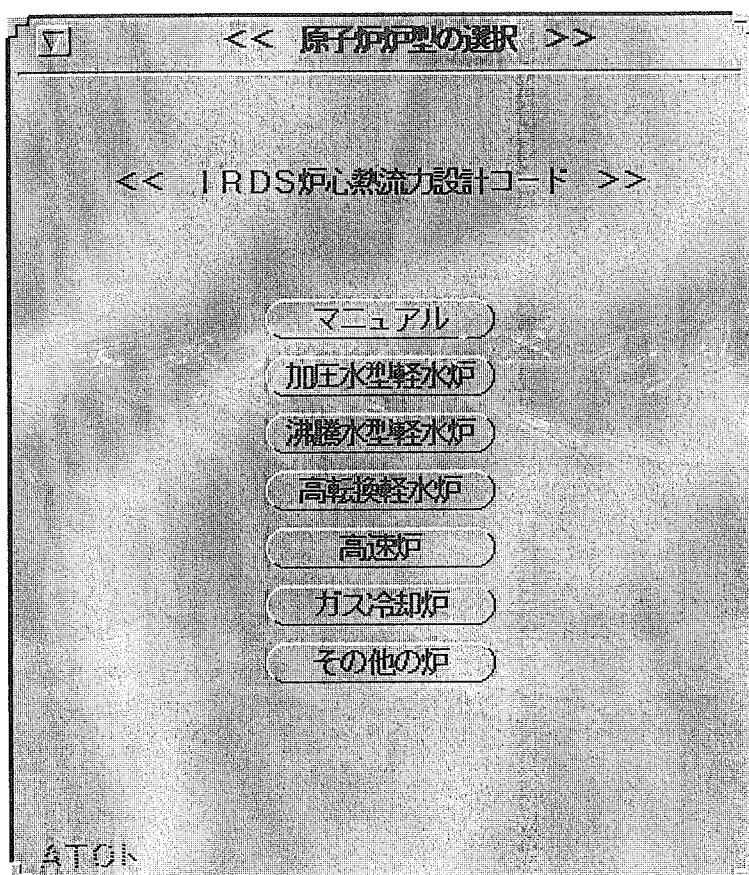
1 : ボロン水

付録2 多次元設計ウィンドウ探索システムの操作画面集



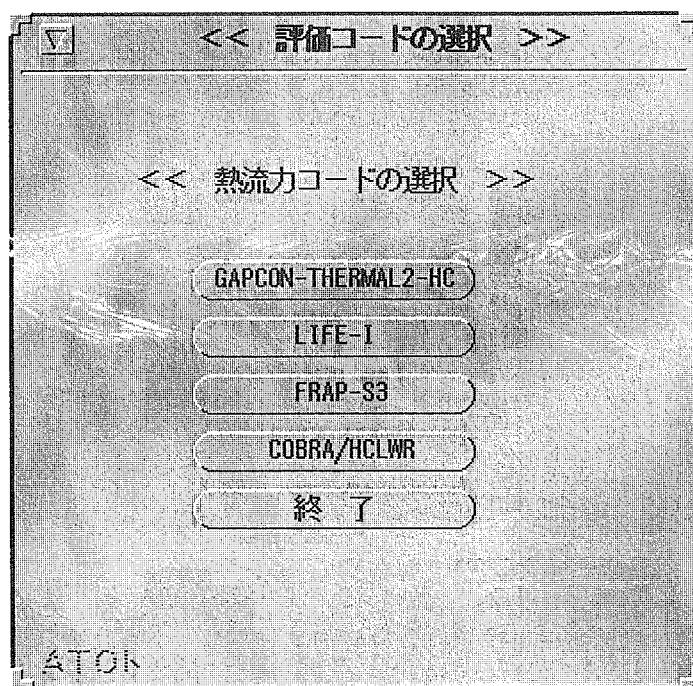
設計ウィンドウ探索システムメインメニュー

Fig.A2-1 A display of a main menu window of the design window search system

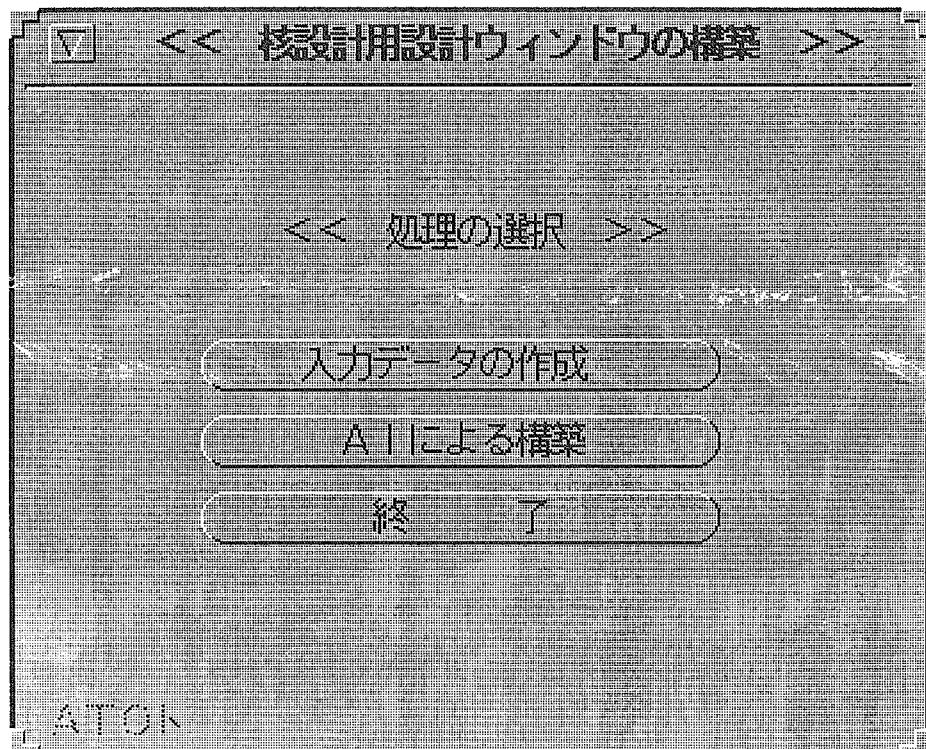


原子炉炉型の選択メニュー フレーム

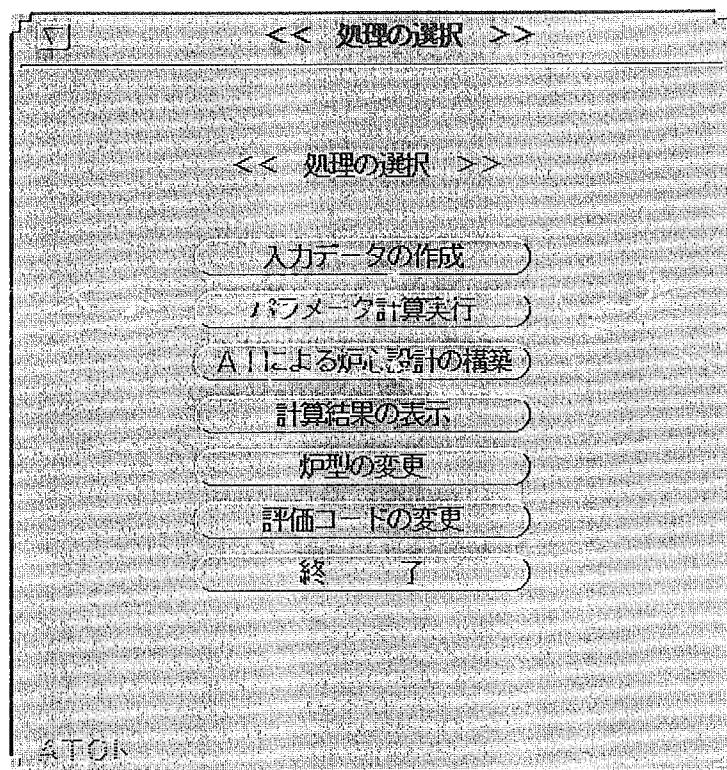
Fig.A2-2 A display of a menu window to select a reactor type



評価コードの選択フレーム
Fig.A2-3 A display of a menu window to select analysis code in thermal hydraulics

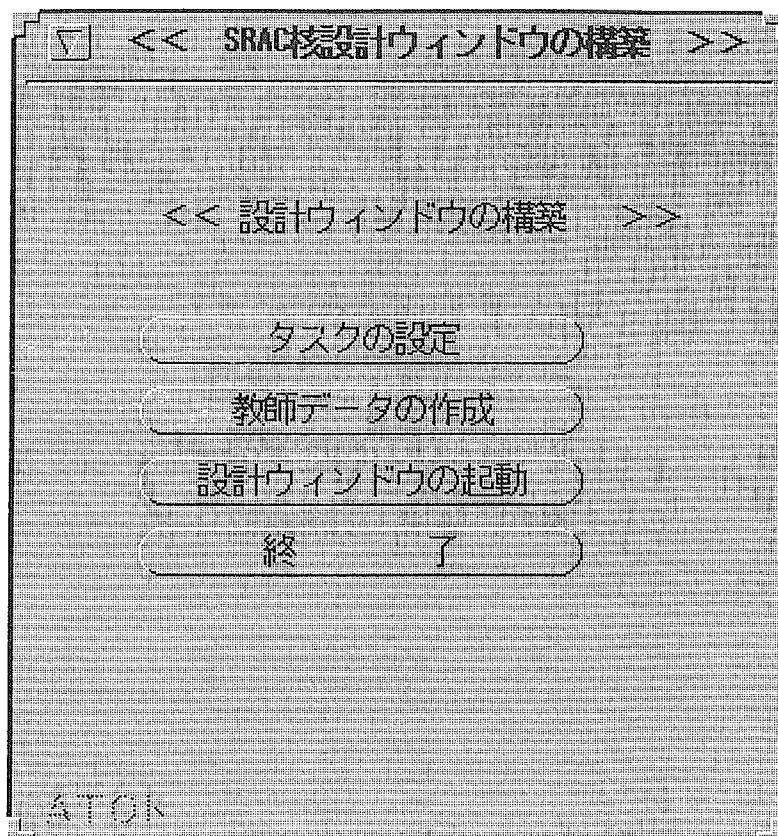


核設計用設計ウィンドウの構築・処理の選択メニュー フレーム
Fig.A2-4 A display of a menu window to select a process in neutronics



処理の選択フレーム

Fig.A2-5 A display of a menu window to select a process in thermal hydraulics



S R A C 核設計ウィンドウの構築メニュー フレーム

Fig.A2-6 A display of a menu window to select a task in design window search in neutronics



設計手法の選択フレーム

Fig.A2-7 A display of a menu window to select a task in design window search in thermal hydraulic



タスクの設定フレーム

Fig.A2-8 A display of a menu window to set a calculation task in neutronics calculation

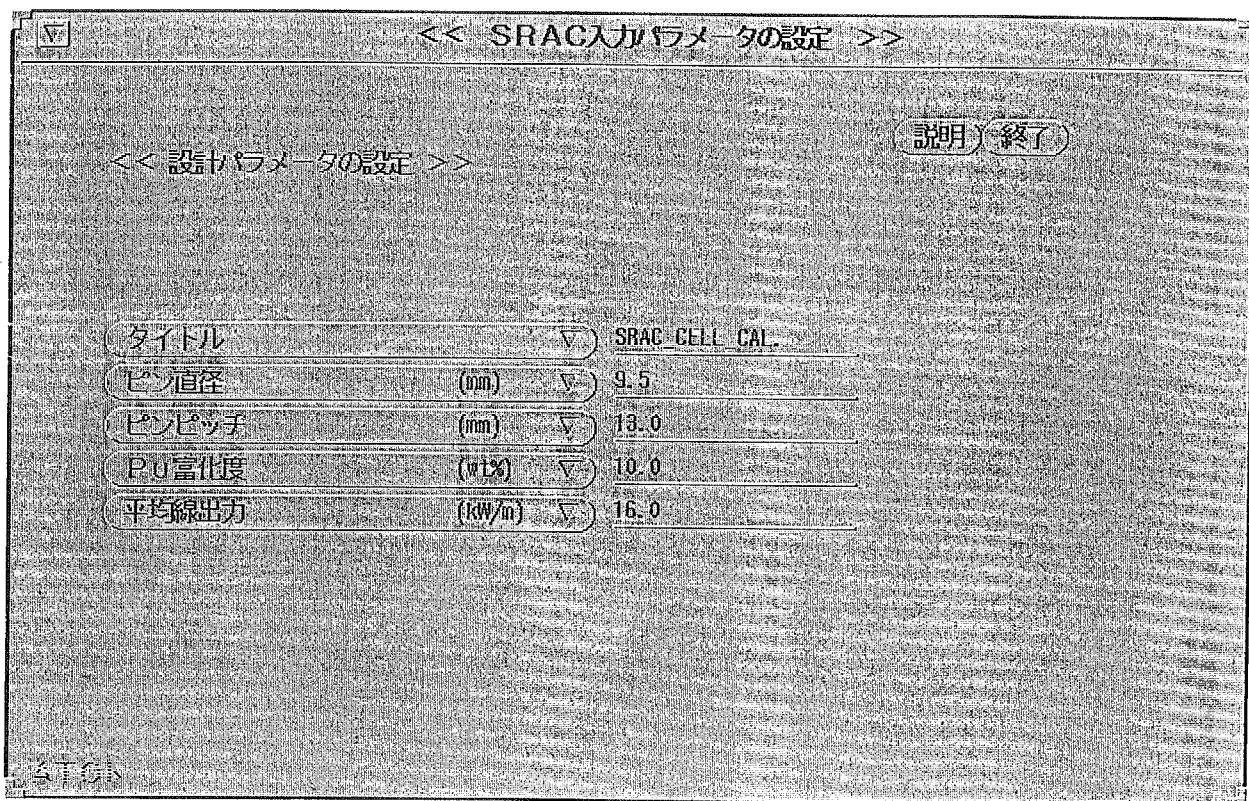


Fig.A2-9 A display of a menu window to set design parameters in neutronics

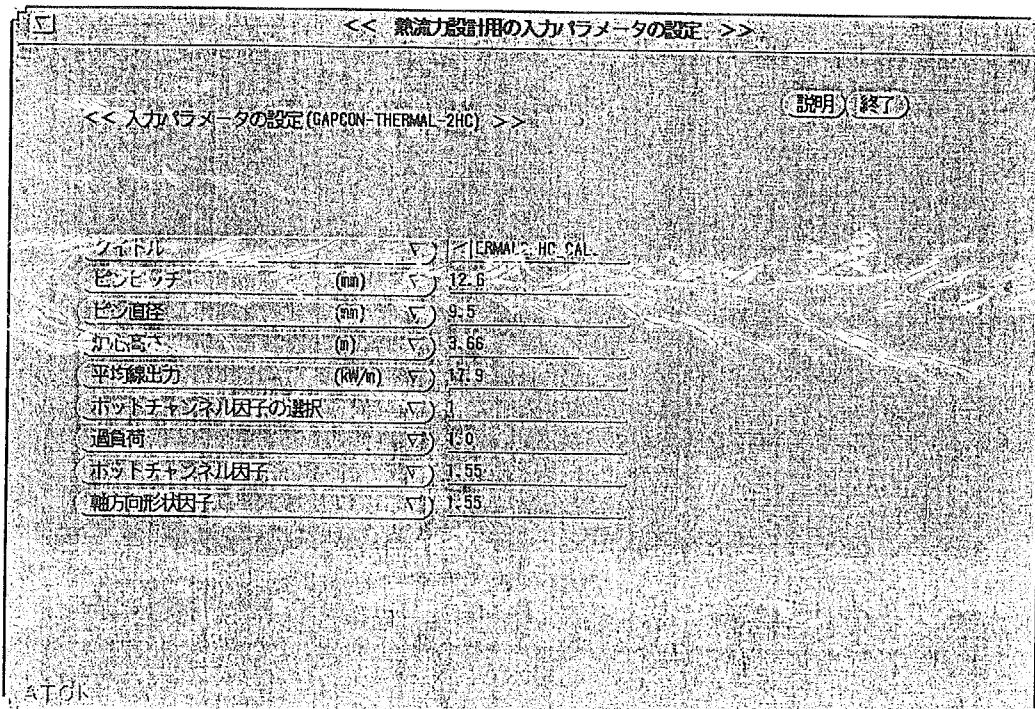
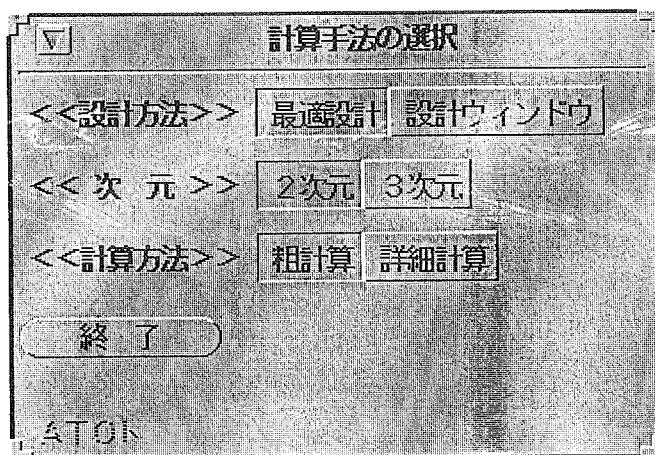
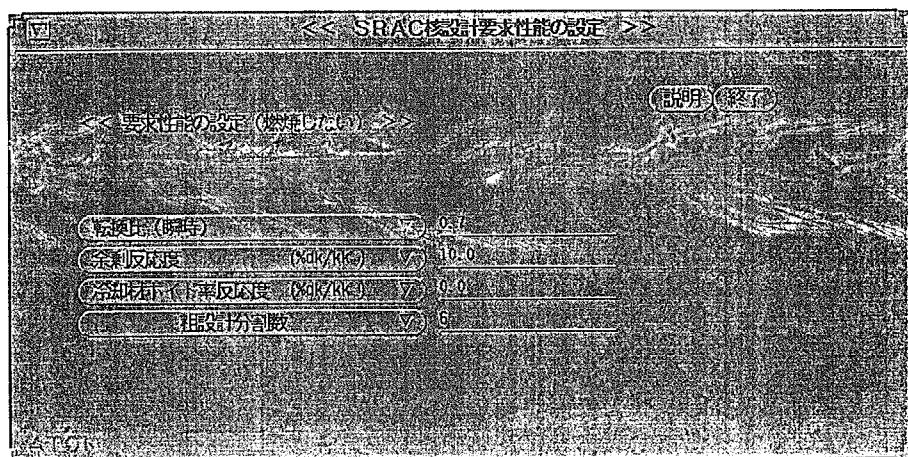


Fig.A2-10 A display of a menu window to set design parameters in thermal hydraulics



計算手法の選択フレーム

Fig.A2-11 A display of a menu window to select design tasks



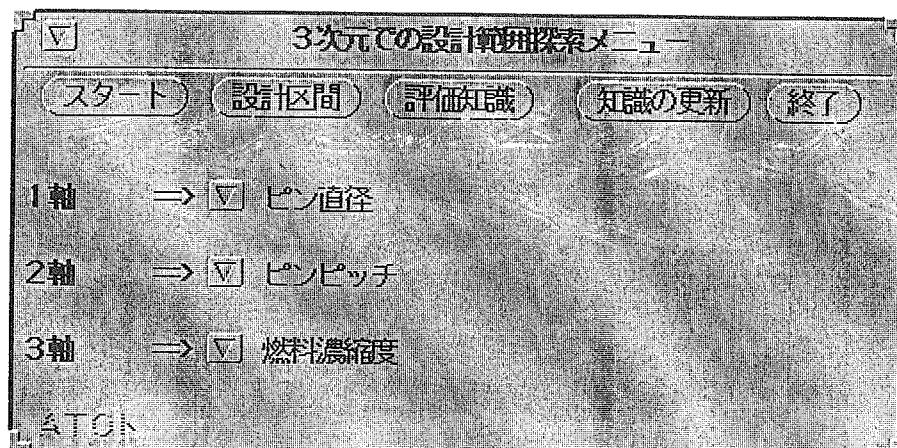
要求性能の設定フレーム

Fig.A2-12 A display of a menu window to set design goals and criteria in neutronics



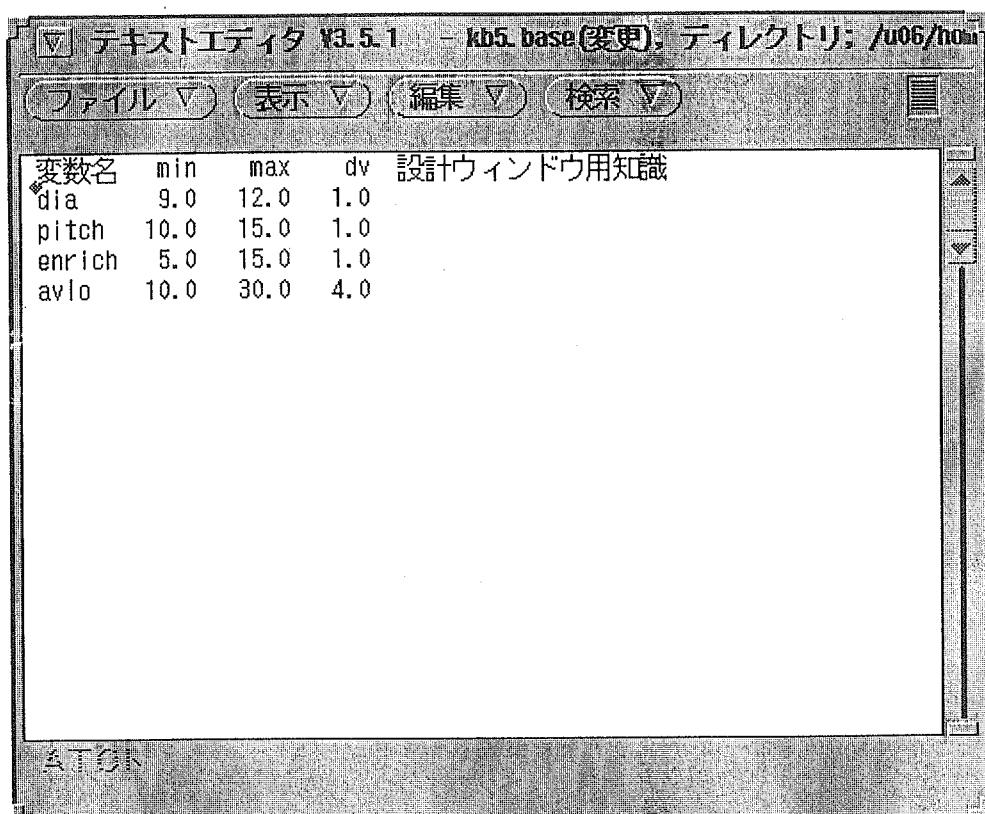
限界設計値の入力フレーム

Fig.A2-13 A display of a menu window to set design goals and criteria in thermal hydraulics



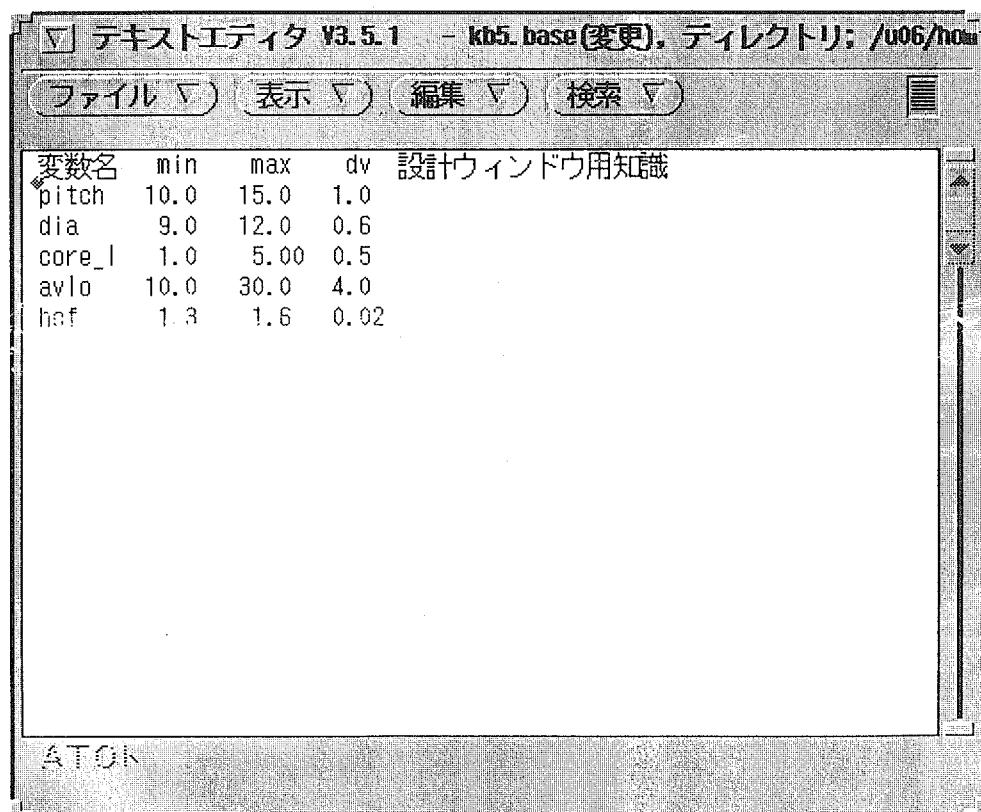
3次元での設計範囲探索メニュー画面

Fig.A2-14 A display of a menu window for generation of teaching data



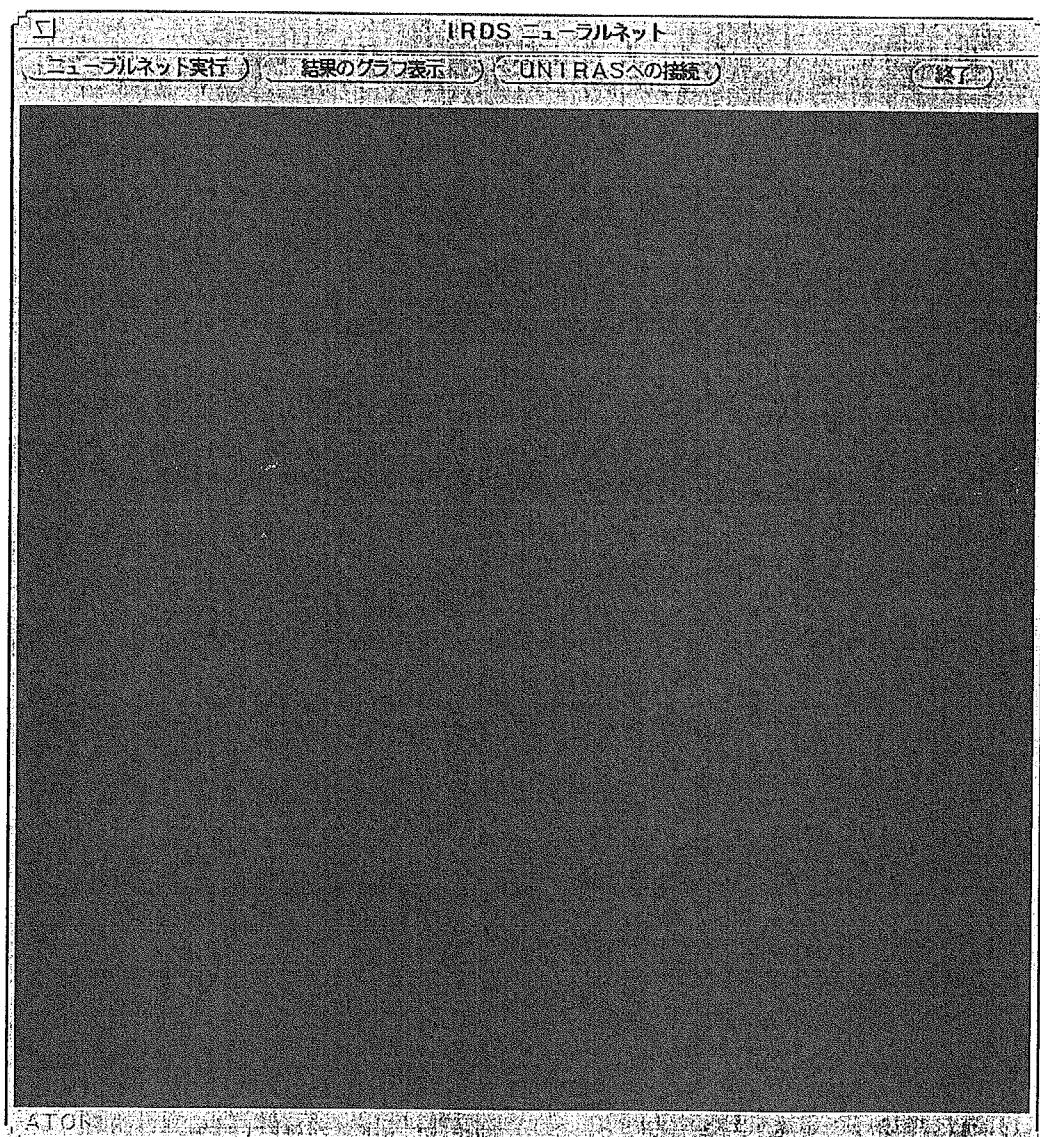
設計区間設定フレーム

Fig.A2-15 A display of a menu window to set design space in neutronics



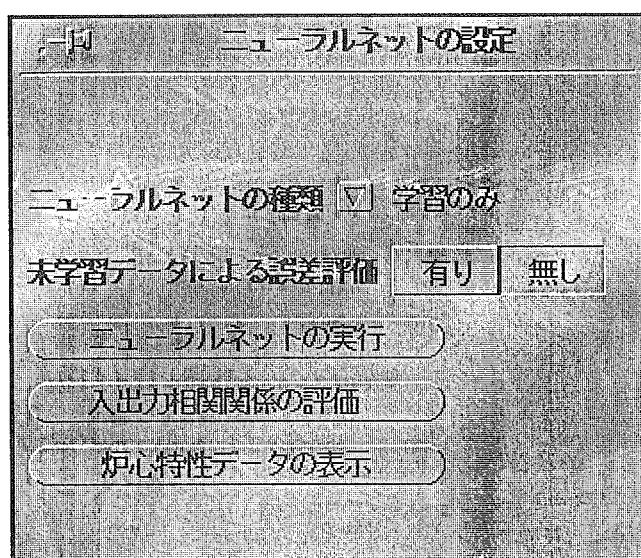
設計区間設定フレーム

Fig.A2-16 A display of a menu window to set design space in thermal hydraulics



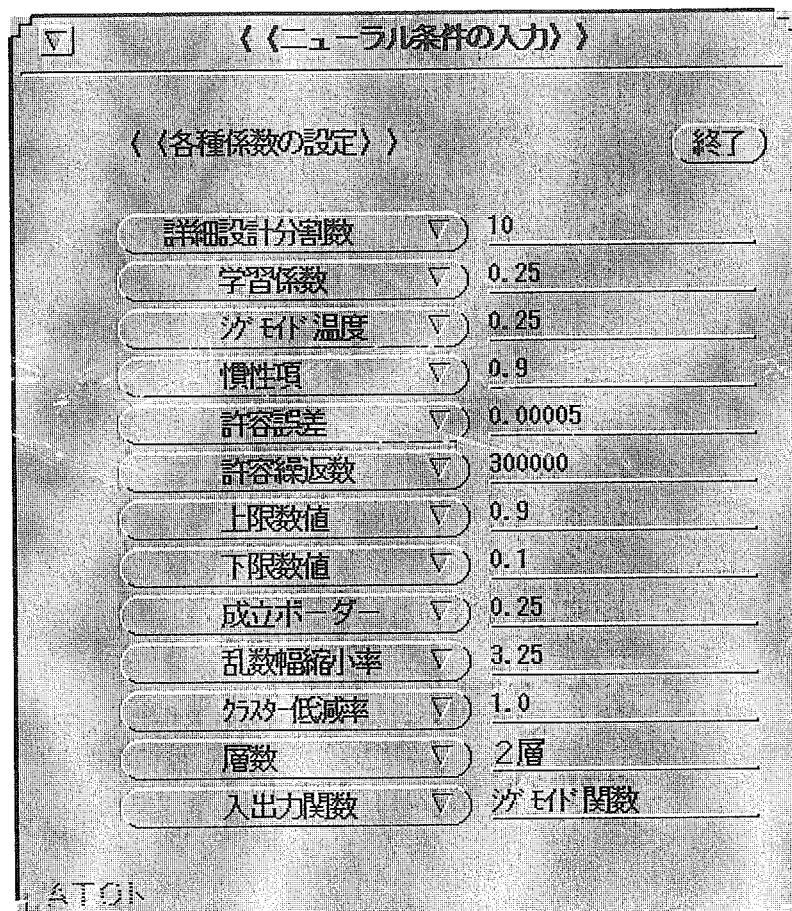
I R D S ニューラルネット実行フレーム

Fig.A2-17 A display of a frame for execution of neural network program



ニューラルネットの設定フレーム

Fig.A2-18 A display of a menu window for execution of neural network program



ニューラル条件の入力フレーム

Fig.A2-19 A display of a menu window to set learning parameters

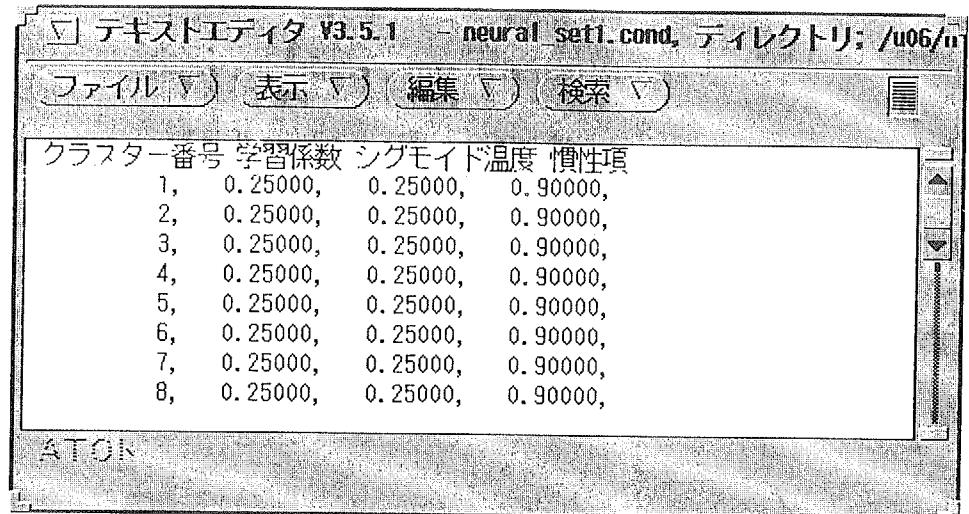
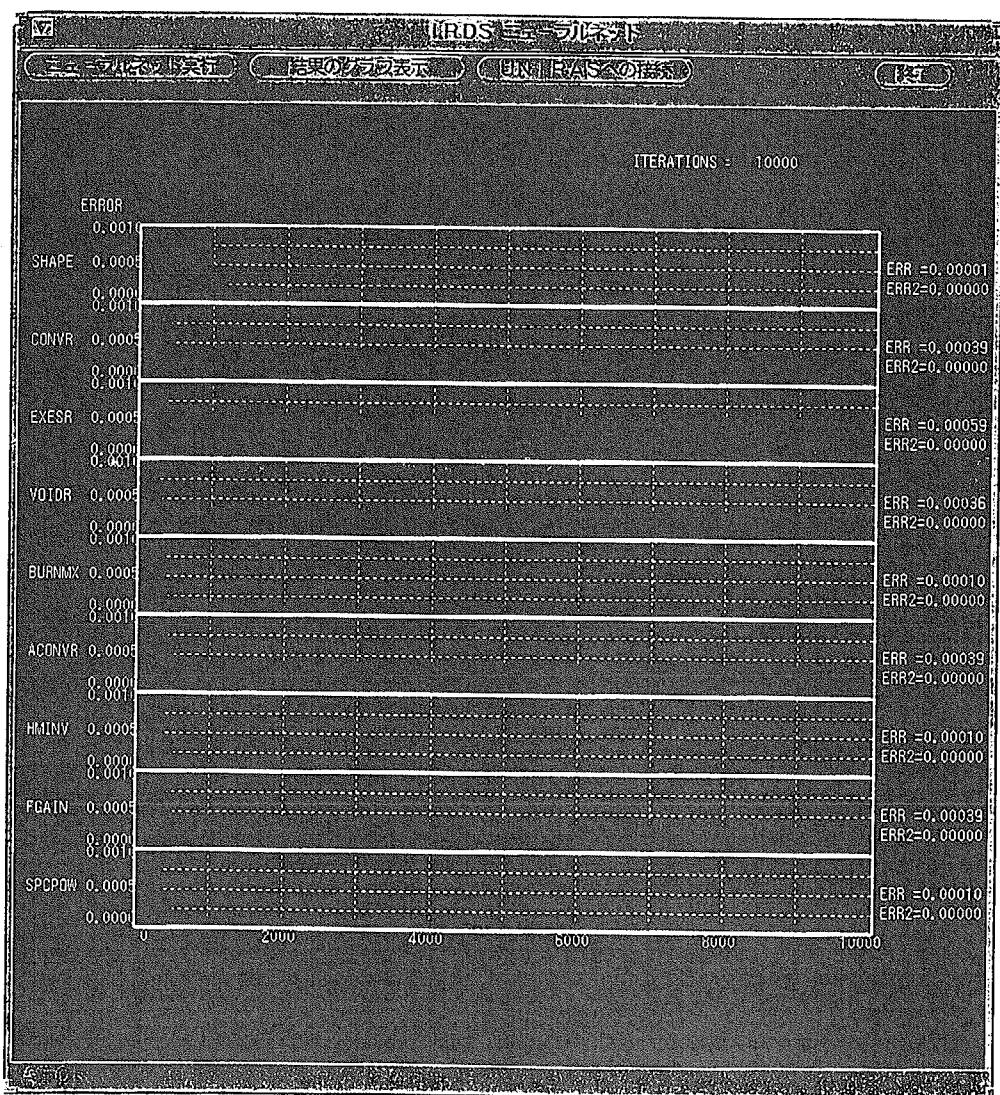
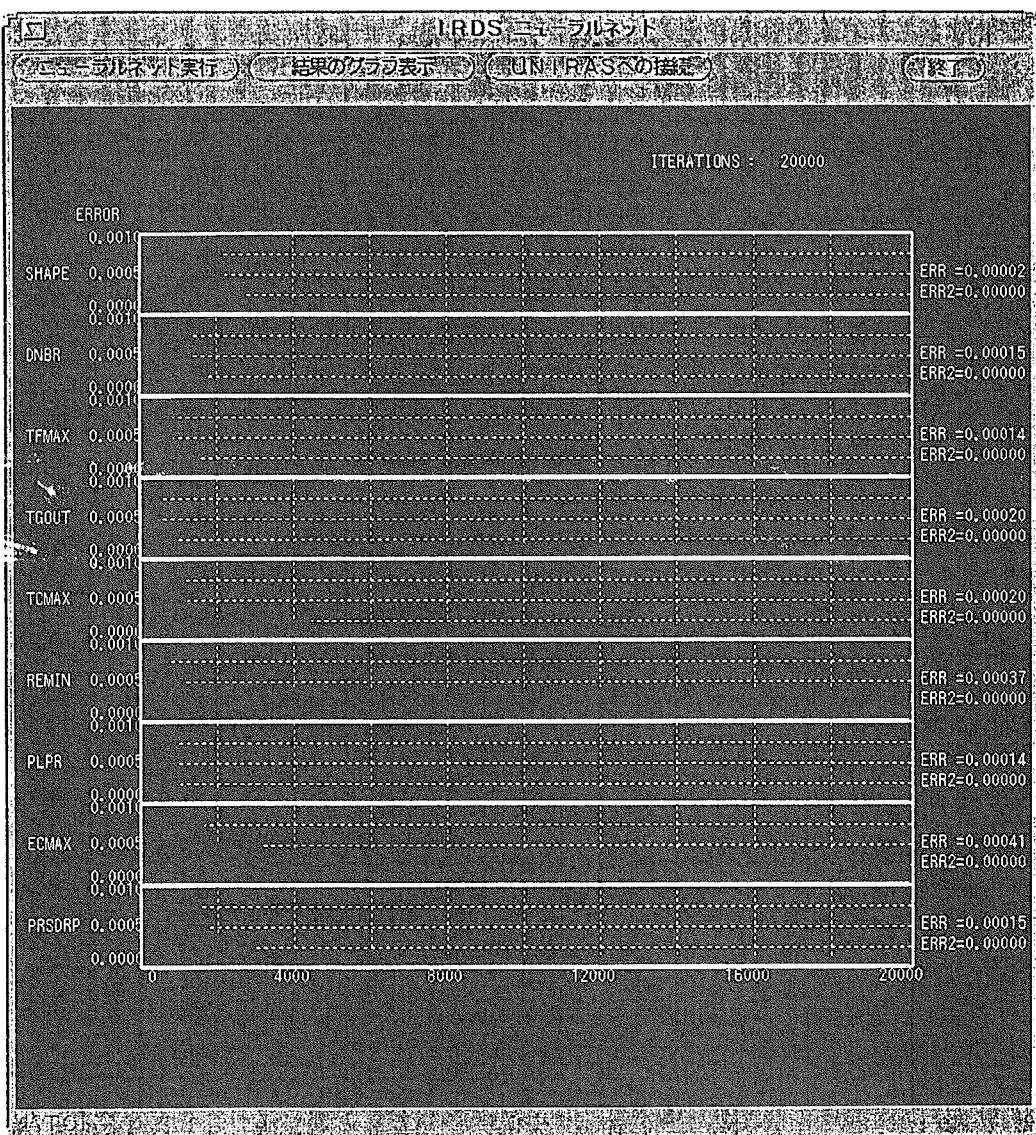


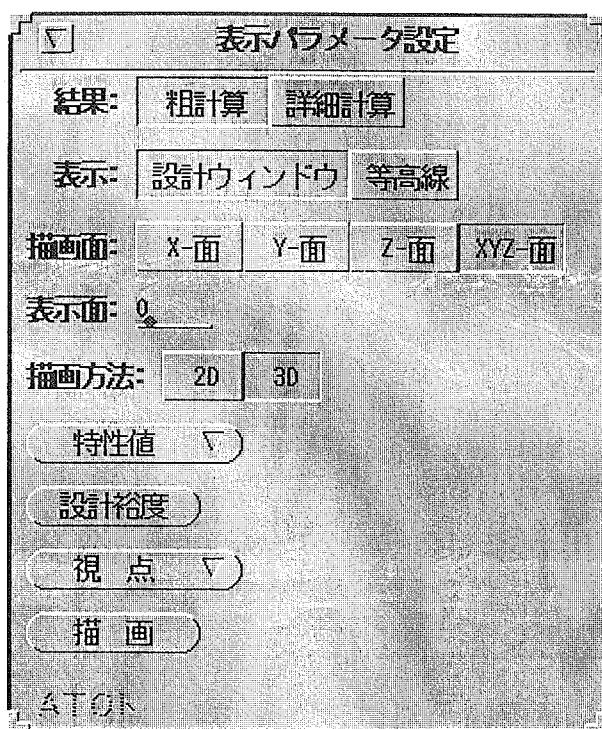
Fig.A2-20 A display of a text editor to set each learning parameter



IRDSD ニューラルネット学習
Fig.A2-21 A display of learning history in neutronics

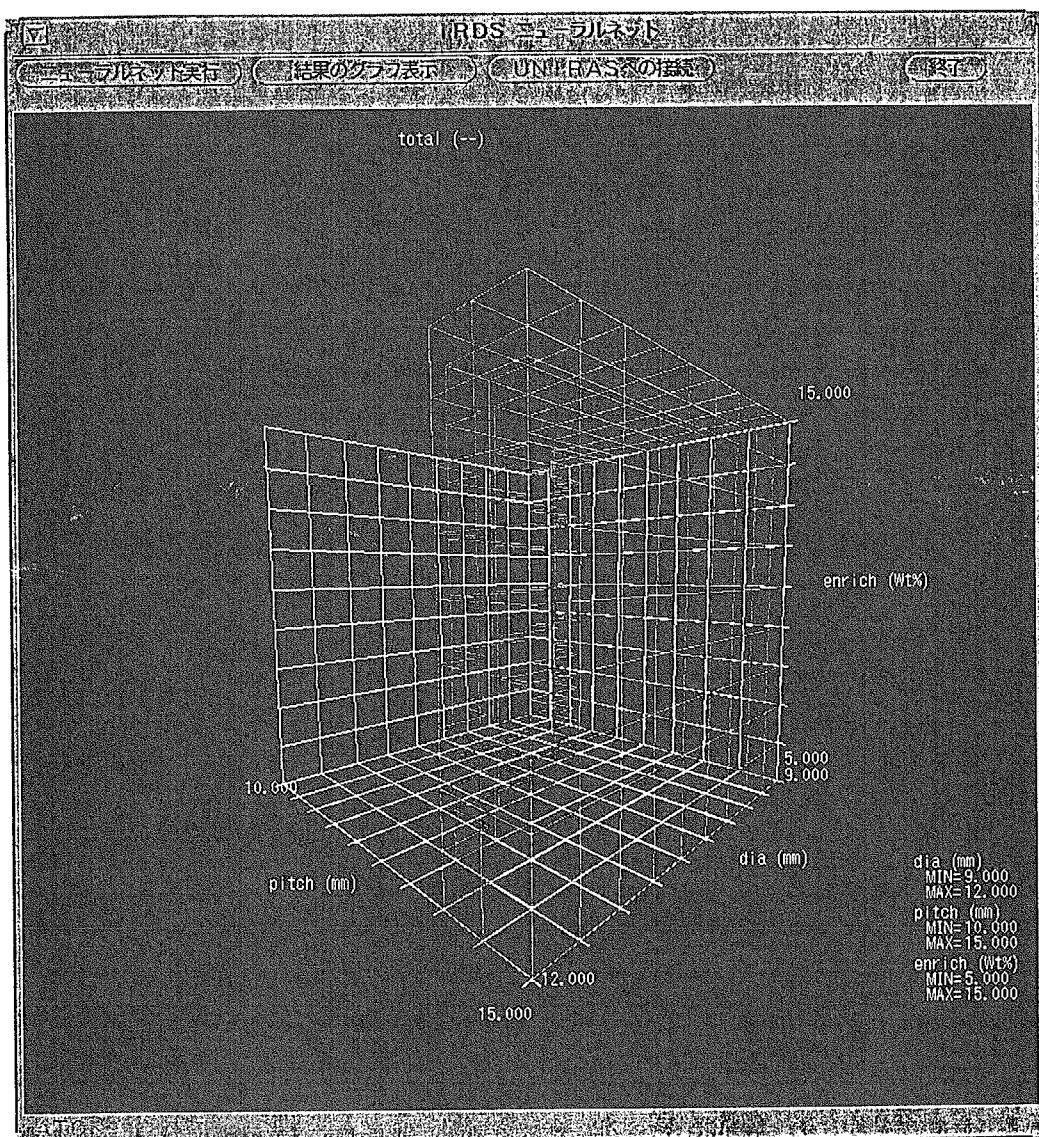


I R D S ニューラルネット学習
Fig.A2-22 A display of learning history in thermal hydraulics

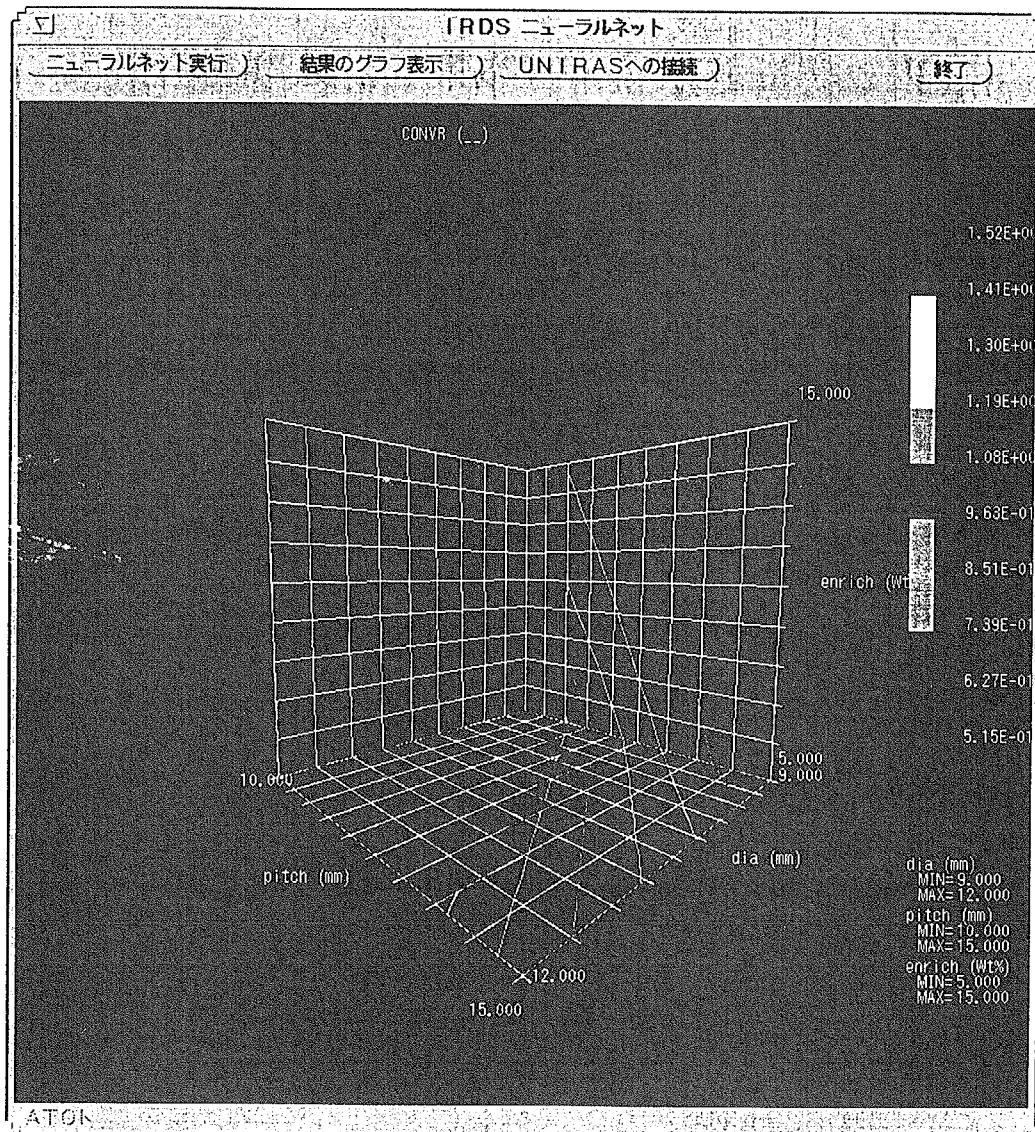


表示パラメータの設定フレーム

Fig.A2-23 A display of a menu window to set visualization parameters

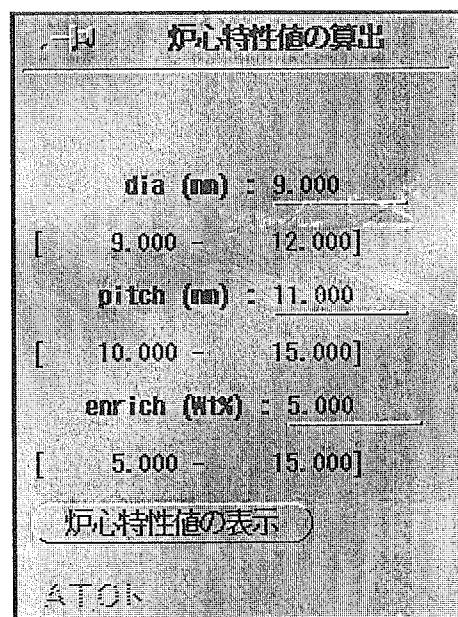


詳細計算結果の表示（'total' データの設計ウィンドウ）
Fig.A2-24 A display of a visualization of design window



詳細計算結果の表示（‘CONVR’ データの等高線）

Fig.A2-25 A display of a visualization of contour map of core characteristics



炉心特性値の算出用入力フレーム

Fig.A2-26 A display of a menu window to set a design point to get core characteristics

炉心特性値	
dia	9.000 (mm)
pitch	11.000 (mm)
enrich	5.000 (Wt%)
SHAPE	0.899 (-)
CONVR	1.022 (-)
EXESR	-0.745 (-)
VOIDR	-7.843 (-)
BURNMX	428.032 (GWD/T)
ACONVR	1.167 (-)
HMINV	0.578 (T)
FGAIN	663.079 (kg)
SPCPW	0.800 (MW/kg)
閉じる	

炉心特性値の表示フレーム

Fig.A2-27 A display of a frame to show core characteristics of a design point in neutronics

炉心特性値	
pitch	12.000 (mm)
dia	9.000 (mm)
hcf	1.300 (-)
SHAPE	0.900 (-)
DNBR	3.628 (-)
TFMAX	1656.293 (°C)
TCOUT	338.039 (°C)
TCMAX	394.663 (°C)
REMIN	454613.349 (-)
PLPR	631.560 (atm)
ECMAX	0.247 (%)
PRSDRP	0.409 (kg/cm ²)
閉じる	

炉心特性値の表示フレーム

Fig.A2-28 A display of a frame to show core characteristics of a design point in thermal hydraulics

付録3. ニューラルネットワークの効率的な学習のための目安の検討

ニューラルネットワークを適切に学習させるためには、学習パラメータの調整の他にネットワーク構成や教師データの個数の妥当性を検討する必要があり、これらを全てユーザーに任せてしまっては、ユーザーの負担や学習のための計算コストが多大なものとなってしまう。ユーザーの負担や学習のための計算コストの軽減を図るため、ネットワーク構成、すなわち隠れ層の層数、隠れ層のニューロン数、及び教師データ数に対する適切な選択についての指針を検討する。ここでは、ネットワーク構成や教師データの個数の違いがニューラルネットワークの推定値に及ぼす影響を調査し、それらに対する適切な選択について検討する。検討の対象として、高転換炉心の燃料ピン設計における核及び熱水力設計分野を例とした。また、本システムの計算効率について検討したので、その結果も併せて述べる。

A3.1 核設計での検討結果

高転換重水炉の燃料ピン設計を対象とした。探索空間は以下の3次元空間とした。

ピン径 : 9.0 ~ 11.0 mm,
 ピンピッチ : 9.0 ~ 17.0 mm、及び
 燃料富化度 : 5.0 ~ 20.0 wt%。

形状制限は以下の通りである。

ピン径 < ピンピッチ。

要求仕様は以下の通りである。

初期余剰反応度 > 0.0 %dk/kk',
 転換比 > 0.85、及び
 冷却材ボイド係数 < 0.0 %dk/kk'。

探索空間は、減速材対燃料体積比に着目すると0.2から4の範囲をとり得るように、かなり広く、その結果、高速中性子スペクトルから熱中性子スペクトルまで含んでいる。幅広いスペクトルを含むため、それに伴い炉心特性も多様に振る舞う。実際の設計では、探索空間はより狭い範囲で行われると考えられるため、この例で得られる知見は実際の炉心設計に応用できるものと考える。

われわれは、ニューラルネットワークの構成や教師データの数を変えた10ケースについて、ニューラルネットワークの推定値について調査した。Table A3-1にそれぞれのケースで採用した隠れ層の層数、隠れ層のニューロン数及び教師データ数をまとめる。ネットワーク構造として、2層構造、隠れ層に2、3、6または9個のニューロンを持つ3層構造および隠れ層に3個のニューロンを持つ4層構造を考えた。また、教師データとしては、21、52、105または180組のパターンを持つ4種類を準備した。

例えば、21組の教師パターンを作成する手順について説明する。設計変数の最小・最大値間を2等分にする点と最小及び最大値の計3点からなる3次元探索空間における全ての組み合わせ27(3x3x3)組から形状制限を満足する21組を選び出し、その組み合わせに対して解析計算を行い教師データを作成する。教師データは3設計変数の値と3炉心特性値からなる。解析コードはSRACを用いた。各設計変数のステップ幅は、ピン径、ピンピッチ及び燃料富化度に対してそれぞれ1mm、4mm及び7.5wt%である。52、105及び180組の教師データの作成については、それぞれ、設計変数の最小・最大値間を3、4及び5等分にする点と最小及び最大値の計4、5及び6点からなる3次元探索空間における全ての組み合わせ64(4x4x4)、125(5x5x5)及び216(6x6x6)組から形状制限を満足する52、105及び180組を選び出し、その組み合わせに対して解析計算を行い教師データを作成する。52組の教師データにおける各設計変数のステップ幅は、ピン径、ピンピッチ及び燃料富化度に対してそれぞれ0.67mm、2.67mm及び5wt%であり、105及び180組の教師データに対するそれらは、それぞれ0.5mm、2mm、3.75wt%及び0.4mm、1.6mm、3wt%である。

上述した教師データは、ニューラルネットワークの学習に用いるものであり、本付録では学習用データと呼ぶ場合がある。これは後述する検証用データと特に区別するために用いている。21及び105組の学習用データに対して、8及び56組の検証用データを用意した。8組の検証用データは、各設計変数に対して以下の2点からなる8(2x2x2)組に対して解析計算を行って作成する。

ピン径：9.5及び10.5mm、ピンピッチ：11及び15mm、燃料富化度：8.75及び16.25wt%。

56組の検証用データでは、以下に示す3次元空間で作成する。

ピン径：9.25 ~ 10.75 mm、

ピンピッチ：10 ~ 16 mm、及び

燃料富化度：6.875 ~ 18.125wt%。

設計変数の最小・最大値間を3等分にする点と最小及び最大値の計4点からなる3次元探索空間における全ての組み合わせ64(4x4x4)組から形状制限を満足する56組を選び出し、その組み合わせに対して解析計算を行い作成する。各設計変数のステップ幅は、105組の学習用データに対するものと同じである。

炉心特性は、初期余剰反応度、転換比及び冷却材ボイド係数である。これらを出力とし、設計変数を入力とするニューラルネットワークを構成する。入出力は全て[0.1,0.9]の範囲に規格化する。

各炉心特性を出力とするニューラルネットワークに対して、学習パラメータ η 、 α 及び a をそれぞれ [0.5,1.5]、[0.2, 1.0]及び[0.1, 2.0]の範囲で試行錯誤的に調整しながら適切な値を見つける。(7)式で定義される平均2乗誤差は10,000回の学習サイクル学習用及び検証用データに対して収束判定条件を満足しないが、それ以上の学習サイクルを繰り返してもその誤差の収束状況にほとんど変化がみられないため、30,000回の学習サイクルで打ち切った。

学習後、ニューラルネットワークにより上述の探索空間を詳細に分割する6,898個の格子点で各炉心特性を推定する。設計変数の最小・最大値間を19等分にする点と最小及び最大値の計20点からなる3次元探索空間における全ての組み合わせ8,000(20x20x20)組から形状制限を満足す

る6,898組を選び出した。各設計変数のステップ幅は、ピン径、ピンピッチ及び燃料富化度に対してそれぞれ0.105mm、0.42mm及び0.79wt%である。ニューラルネットワークによる炉心特性の推定値の精度を調査するため、ニューラルネットワークによる推定に加え、上記の6,898個の詳細格子点で解析計算を行い、直接解を得ている。

本適用例では、各炉心特性で同様な振る舞いをしたので、その代表として初期余剰反応度のみに着目する。ニューラルネットワークの推定精度の指標として以下で定義する平均誤差を用いる。

$$\text{Mean error} \equiv \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |O_n - T_n| , \quad (8)$$

ここで、 O_n は n 番目の詳細格子点における実際の単位系に戻したニューラルネットワークによる推定値、 T_n はそれに対応する直接解、 N は全詳細格子点数、ここでは6,898点である。ここで(8)式で定義する平均誤差を調査対象の10ケースについてTable A3-1にまとめた。

ケース-2、-3、-4及び-5の結果を比較して、隠れ層のニューロン数が推定精度に及ぼす影響を調べる。各ケースは、入力層に3個のニューロンを持つ3層構造であり、105個の学習データにより学習させている。ケース-2、-3、-4及び-5の平均誤差は、それぞれ 2.82、0.66、0.57及び0.56%dk/kkである。ケース-4と-5の平均誤差の差はほとんどなく、ケース-3の平均誤差もケース-4及び-5の平均誤差と大差ない。ケース-2の平均誤差のみ他ケースに比べて大きく、他の約4倍になっている。この結果から隠れ層のニューロン数について以下の指針が得られる。隠れ層のニューロン数は6個以上必要ない。言い換えると隠れ層のニューロン数は入力層のニューロン数の2倍以上にする必要は全くない。隠れ層ニューロン数を3個とした場合、つまり入力層のニューロン数と同数のニューロン数をとった場合に比べ、2倍以上のニューロン数をとった場合の平均誤差の改善は小さい。逆に、隠れ層ニューロン数を入力層のニューロン数未満にした場合は、十分な推定精度を得られない。結局、隠れ層には、入力層のニューロン数と同数のニューロン数が最低限必要であるが、それ以上にしても推定精度が劇的に改善されることはない。

ケース-1、-3及び-6の結果を比較して、隠れ層の層数が推定精度に及ぼす影響を調べる。各ケースは、隠れ層に3個のニューロンを持ち、105個の学習データにより学習させている。ケース-1、-3、及び-6の平均誤差は、それぞれ 15.1、0.66及び0.58%dk/kkである。ケース-1の平均誤差は巨大なものとなっている。ケース-3と-6の平均誤差の差は約10%と大差はみられない。この結果から隠れ層の層数について以下の指針が得られる。一般に、2層構造が適用できるのは入出力間の関係が線形性の強い写像関係であるものに限られ、非線形性のある写像関数の構築はできず、実用的な写像関係の構築には適用できない。また3層構造による推定精度が十分に得られていれば、4層構造による推定精度の改善は小さい。

ケース-7、-9、-3及び-10の結果を比較して、学習用データ数が推定精度に及ぼす影響を調べる。

各ケースは、3層構造であり、隠れ層に3個のニューロンを持っている。ケース-7、-9、-3及び-10の平均誤差は、それぞれ 2.58、0.78、0.66及び0.52%dk/kkである。ケース-9、-3及び-10の平均誤差の差は互いに大差ない。ケース-7の平均誤差のみ他ケースに比べて大きく、ケース-3の約4倍になっている。ここで、ケース-8の平均誤差に着目する。ケース-8は、4層構造である他はケース-7と同じ条件で学習させている。ケース-8の平均誤差は2.06%dk/kkであり、隠れ層の層数を増加しても十分な推定精度を得られていない。このように、教師データの不足により十分な推定精度が得られない場合は、ネットワーク構成を変更しても推定精度の向上は望めない。この例から、設計変数の最小及び最大値間を最低3等分するような格子点で学習用データを作成する必要があり、なお、4層構造にしても推定精度が改善されなければ、教師データを増やす必要がある。

次に、設計ウィンドウの推定結果に及ぼす影響について、直接解と比較して調べる。本節の当初で述べた要求仕様の全項目を同時に満足する範囲がなかった。これは重水を冷却材として用いたため、軽水冷却の炉心と比べ中性子スペクトルが硬化するためであり、ここでは、冷却材ボイド係数が負であることという項目を除外して設計ウィンドウの探索を行った。ケース-2、-3、-7の探索結果及び直接解の比較をFig.A3-1に示す。ケース-2は十分なネットワーク構成でないため、またケース-7は学習用データの不足のため、平均誤差が大きくなつたケースである。ケース-3は、ネットワーク構成が不十分であつたり学習用データの不足したケースであるケース-1、-2、-7及び-8、を除いて、ケース-9に次いで平均誤差が大きくなつたケースである。設計ウィンドウの比較は、ピン径が9.5mmの場合のピンピッチと燃料富化度に関する2次元空間を行つた。Figure. A3-1 より、ケース-3の設計ウィンドウは直接解とよく一致しているが、ケース-2及び-7の設計ウィンドウは一致していないことがわかる。

以上の結果を基にし、検証用データを使ってニューラルネットワークの学習状態を判断する指針について検討する。設計ウィンドウの比較の対象としたケース-2、-3及び-7に対して、学習用データ及び検証用データについて、学習サイクルに対する(7)式で定義される平均2乗誤差の収束状況をFig.A3-2に示す。ケース-3では、学習用及び検証用の両データに対する平均2乗誤差は、 1.0×10^{-4} 以下に収束している。ケース-7では、学習用データに対する平均2乗誤差は、 1.0×10^{-4} 以下に収束しているが、検証用データに対する平均2乗誤差は、 1.0×10^{-3} 以下にも収束していない。ケース-2では、学習用及び検証用の両データに対する平均2乗誤差は、 1.0×10^{-3} 程度にとどまっている。以上より、ネットワーク構成が十分であつても学習用データが不足している場合は、学習用データに対する推定精度はよいが、検証用データに対する推定精度は悪くなる。ネットワーク構成が十分でない場合は、学習用及び検証用の両データに対する推定精度が悪くなる。

本検証により、隠れ層のニューロン数は、最低限、入力層のニューロンと同数以上必要であることがわかつた。また、検証用データを用いてニューラルネットワークが汎化能力を持ってゐるかどうかを検証できることがわかつた。4層構造のネットワークを用いても、検証用データに対する(7)式で定義される平均2乗誤差が 1.0×10^{-4} 以下に収束しない場合は、学習用データを増やす必要があることがわかつた。また、ケース-3、-4、-5、-6および-10の間で平均誤差の差に大差

ないように、学習用データが十分にあり、ネットワーク構成も十分であれば、それらがネットワークの推定精度にあまり強く影響しないことがわかった。つまり、本手法は、学習が適切に行われているならば安定的に設計ウインドウを推定できるといえる。

A3.2 热水力设计での検討結果

本検討では、高転換軽水炉の燃料ピン設計を対象とした。ここでは、学習用データを固定し、ネットワーク構成の違いがニューラルネットワークの推定値に及ぼす影響のみを調べる。

探索空間は以下の3次元空間とした。

ピン径 : 9.0 ~ 12.0 mm,

ピンピッチ : 10.0 ~ 15.0 mm、及び

ホットチャンネル因子 : 1.3 ~ 1.7。

その他の設計変数は以下のように固定した。

平均線出力 : 16kW/m 及び

炉心高さ : 2m。

形状制限は以下の通りである。

ピン径 < ピンピッチ < ピン径+2mm。

要求仕様は以下の通りである。

限界熱流速比(DNBR) > 1.3、

燃料温度 < 溶融温度、

ホットチャンネルでの冷却材温度 < 飽和温度、及び

被覆管温度 < 470°C。

ここでは、通常の設計基準に加え、ホットチャンネルの冷却材温度が飽和温度以下であるという条件を追加している。これは、高転換軽水炉の热水力的特性が現行軽水炉よりも厳しくなると予想されたため、ホットチャンネルにおいても飽和沸騰を認めないという条件を附加したものである。

この検討例では、65組の学習用データを準備した。その作成手順を以下に述べる。設計変数の最小・最大値間を4等分にする3点と最小及び最大値の計5点からなる3次元探索空間における全ての組み合わせ125(5x5x5)組から形状制限を満足する65組を選び出し、その組み合わせに対して解析計算を行い学習用データを作成した。学習用データは3設計変数の値と4炉心特性値からなる。解析コードはGAPCON-THERMAL2-HCを用いた。各設計変数のステップ幅は、ピン径、ピンピッチ及びホットチャンネル因子に対してそれぞれ0.75mm、1.25mm及び0.1である。また、汎化能力を検証するデータとして、24組の検証用データを作成した。24組の検証用データは、以下で定義される3次元空間で作成する。

ピン径 : 9.375 ~ 11.625 mm、

ピンピッチ : 10.625 ~ 14.375mm、及び

ホットチャンネル因子: 1.35 ~ 1.65。

設計変数の最小・最大値間を3等分にする2点と最小及び最大値の計4点からなる3次元空間における全ての組み合わせ64(4x4x4)組から形状制限を満足する24組を選び出し、その組み合わせに対して解析計算を行い作成する。各設計変数のステップ幅は、65組の学習用データに対するものと同じである。

ピン径、ピンピッチ及びホットチャンネル因子を入力に持ち、DNBR、燃料、被覆管、冷却材温度をそれぞれ出力とする4個のニューラルネットワークを使用する。ネットワーク構成が炉心特性の推定値の精度に及ぼす影響を調べるために、隠れ層に6個のニューロンを持つ3層構造ネットワーク(ケース-11)及び隠れ層に3個のニューロンを持つ4層構造ネットワーク(ケース-12)を検討の対象とした。ニューラルネットワークの学習は核設計での検討例と同様な手順で行った。学習後は、ニューラルネットワークにより上述の探索空間を詳細に分割する5,080個の格子点で各炉心特性を推定する。設計変数の最小・最大値間を19等分にする点と最小及び最大値の計20点からなる3次元探索空間における全ての組み合わせ8,000(20x20x20)組から形状制限を満足する5,080組を選び出した。各設計変数のステップ幅は、ピン径、ピンピッチ及びホットチャンネル因子に対してそれぞれ0.16mm、0.26mm及び0.021である。ニューラルネットワークによる炉心特性の推定値の精度を調査するため、ニューラルネットワークによる推定に加え、上記の5,080個の詳細格子点で解析計算を行い、直接解を得ている。

ここでは、ホットチャンネルの冷却材温度について検討を進める。それ以外の炉心特性は、核設計での検討結果と同様の結果が得られている。学習サイクルにおいて、冷却材温度だけが他と異なった振る舞いを示した。検証用データに対する(7)式で定義される平均2乗誤差は、ケース-11、つまり3層構造ネットワークでは収束が悪かったのが、ケース-12、つまり4層構造ネットワークでは、30,000回以内の学習サイクルにより、 1×10^{-4} 以内に収束した。探索空間においてホットチャンネルで飽和沸騰が発生するが、飽和温度に達した時点で冷却材温度の上昇が停止するので、冷却材温度はステップ関数のように振る舞う。3層構造ネットワークにより、このような振る舞いをする写像関係を模擬することは困難であると考えられる。

学習用及び検証用データに対するケース-11における学習状況をFig.A3-3に示す。誤差として、(7)式で定義される平均2乗誤差を示した。学習用データに対しては、約10,000回の学習サイクルで 1×10^{-4} に達するが、検証用データに対しては、 5×10^{-4} から 2×10^{-3} の間で振動している。計算時間の都合により、300,000回で学習サイクルを打ち切ったため、それから先で収束するかどうかは定かではない。仮に 1×10^{-4} 以下に収束したとしても、振動しながら収束は進むため、その速度は非常に遅く、それまでに多大な計算時間が必要となるであろう。逆に、ケース-12では、学習用及び検証用の両データに対して、30,000回以内の学習サイクルにより、 1×10^{-4} 以下の収束が得られた。

次に、ケース-11及び-12で推定した設計ウィンドウを直接解とFig.A3-4に比較する。設計ウィンドウは、ピン径が9.75mmの場合のピンピッチとホットチャンネル因子に関する2次元空間で比較した。ケース-11に対しては、学習サイクルを30,000回で打ち切った場合と124,000回で打ち

切った場合のニューラルネットワークで推定した設計ウィンドウを示した。Fig.A3-2 からわかるように、124,000回の学習サイクルは、今回の調査範囲で検証用データに対する誤差が極小となるところである。Fig.A3-4より、ケース-12の設計ウィンドウの推定結果は、直接解とよく一致していることがわかる。学習サイクルを30,000回で打ち切った場合の設計ウィンドウは、直接解に比べ大きくなっている。学習サイクルを124,000回で打ち切った場合の設計ウィンドウは、ケース-12のものに近くなっている。しかしながら、学習サイクル数はケース-12の約4倍に増え、それに伴い学習時間も増える。Fig.A3-5にケース-12で推定された冷却材温度の分布を示す。ここで値は、飽和温度から冷却材温度を引いたサブクール度である。設計境界で冷却材温度は飽和温度に達しており、冷却材温度に関して設けた設計基準により設計限界が決定していることを示す。つまり、ケース-11と-12の設計ウィンドウの違いは、まさしく冷却材温度の推定値による差から生じている。

この検討例から、冷却材以外の炉心特性値に関する学習に対する指針は核設計での検討結果と同様となる。冷却材に関しては、3層構造では汎化能力を得ることは困難であり、4層構造が必要であった。つまり、3層構造で検証用データに対する誤差の収束が困難な場合、4層構造を採用すれば、効率的に汎化能力を得る可能性がある。しかし、4層構造を採用しても、検証用データに対する誤差の収束が困難な場合は、学習用データの不足がその原因であると考えられるため、学習用データを増やす必要がある。

A3.3 本手法の効率

本手法の効率を示すため、本手法及び直接解で費やす計算時間をTable A3-2 に比較する。核設計での例では、学習パラメータの調整に、10,000回の学習サイクルを10回繰り返すことが必要であると仮定した。熱水力設計の例では、学習パラメータの調整に、20,000回の学習サイクルを10回繰り返すことが必要であると仮定した。第3ステップのマッピングに要する時間は無視できるものとして、全計算時間から除外した。本手法では、従来からのパラメトリックサーベイ計算に比べ、3次元探索空間では、核設計に対しては約40倍、熱水力設計に対しては約6倍の高速化が達成されている。なお、Table A3-2からわかるように、解析計算の計算時間が大きいものほど、ニューラルネットワークの学習時間の割合が減るため、そのような解析計算が必要な問題に対して本手法は効果的である。

Table A3-1 Summary of the structures of the neural networks, the number of the teaching patterns and mean errors on excess reactivity of the examined cases in the neutronics example

	Case-1	Case-2	Case-3	Case-4	Case-5	Case-6	Case-7	Case-8	Case-9	Case-10
No. of the teaching patterns	105	105	105	105	105	105	21	21	52	180
No. of layers	2	3	3	3	3	4	3	4	3	3
No. of neurons in a hidden layer	—	2	3	6	9	3	3	3	3	3
Mean error (%dk/kk')	15.1	2.82	0.66	0.57	0.56	0.58	2.58	2.06	0.78	0.52

Table A3-2 Comparison of computation time between the present method and the conventional parametric survey calculations

No. of executions of analysis code	Preparation of teaching data	Training of* neural network	Total time**
[Neutronics]			
Present method (Case-3)			
No. of learning patterns : 105	23 minutes	10 minutes	25 minutes (1/38)
No. of checking patterns : 56			
Conventional calculation			
Calculation points : 6,898	16 hours	—	16 hours (1)
[Thermal-hydraulics]			
Present method (Case-12)			
No. of learning patterns : 65	3 minutes	30 minutes	33 minutes (1/6)
No. of checking patterns : 24			
Conventional calculation			
Calculation points : 5,080	3 hours	—	3 hours (1)

* : 10 repetitions of training process including 10,000 and 20,000 learning iterations are assumed in the training time for tuning up of learning parameters for the neutronics and thermal hydraulics, respectively.

** : Computation time required in a mapping process is excluded in a total time.

(): ratio of computation time of the present method to the conventional calculation

Computer : SunSparc20 (60MHz)

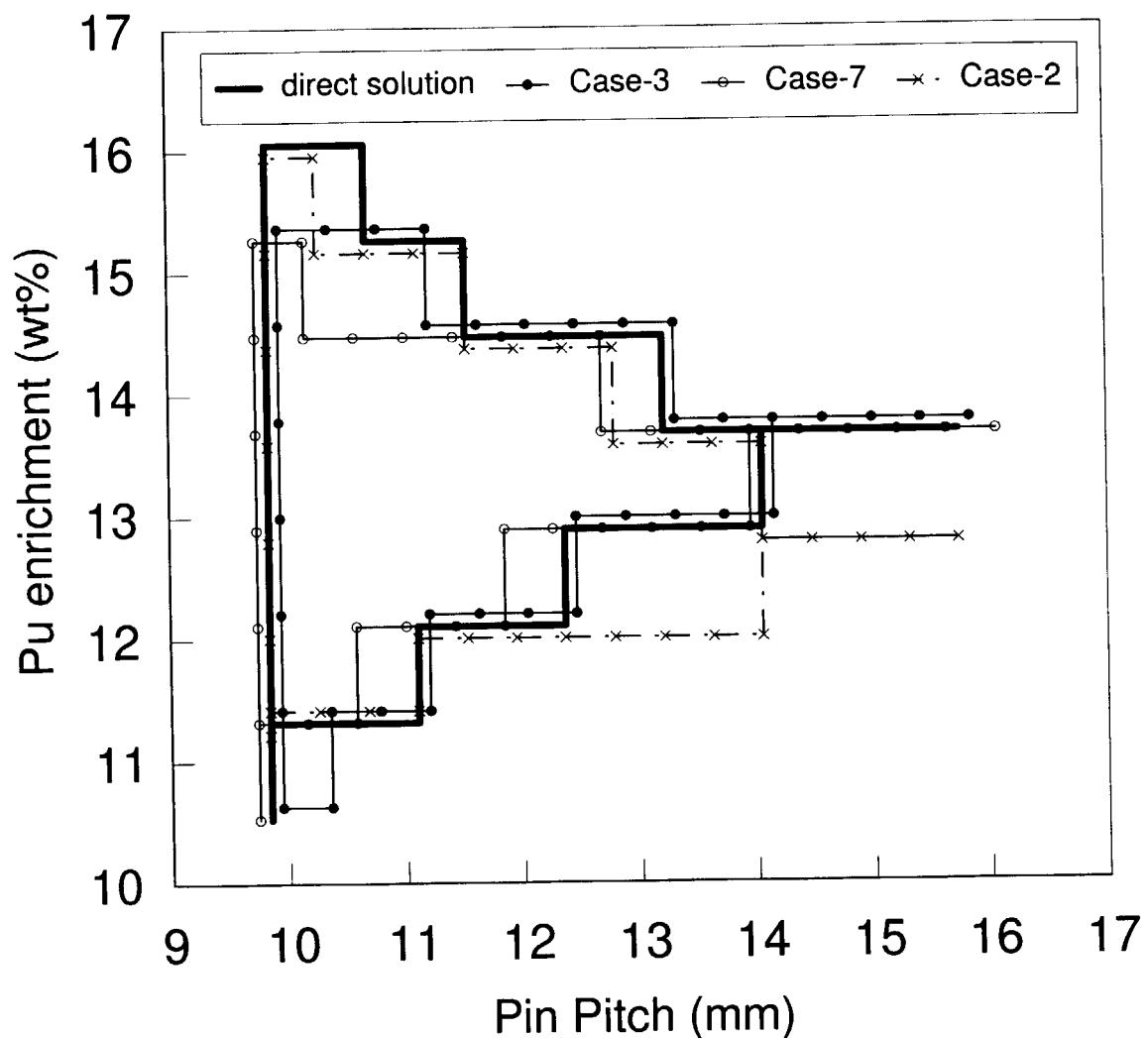


Fig.A3-1 A comparison of design windows among Case-2, -3, -7 and the direct solution

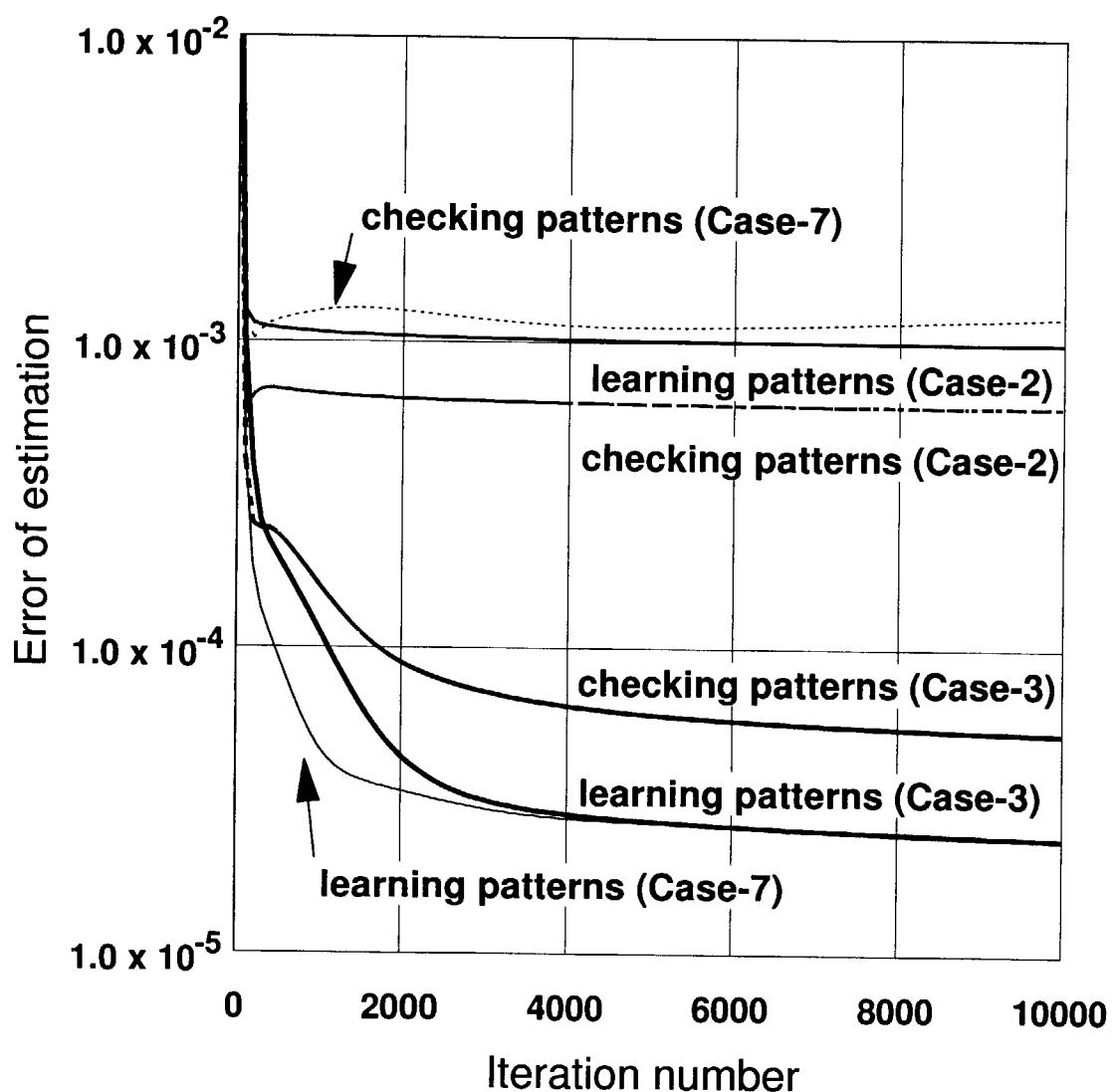


Fig.A3-2 A comparison of training histories of learning and checking patterns among Case-2, -3 and -7

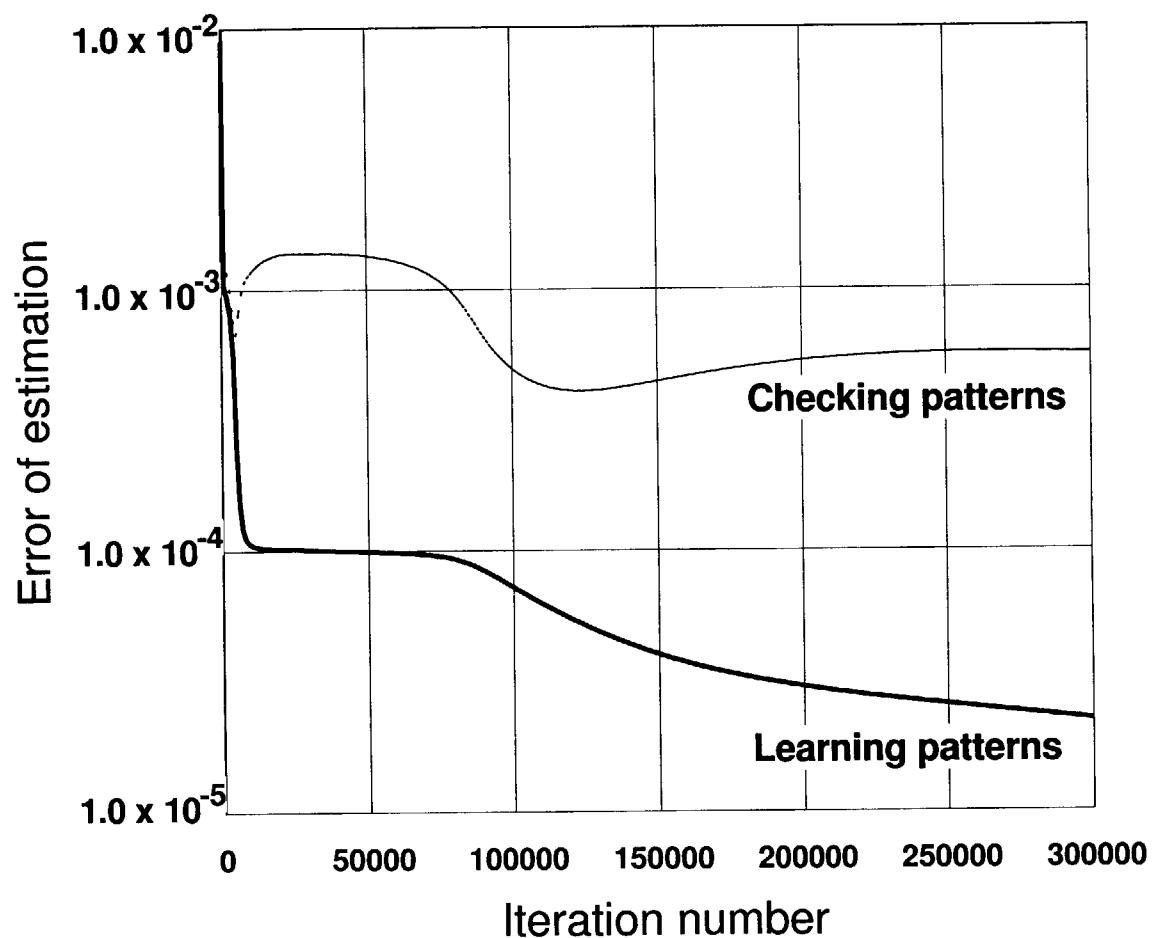


Fig.A3-3 Training histories of learning and checking patterns for Case-11

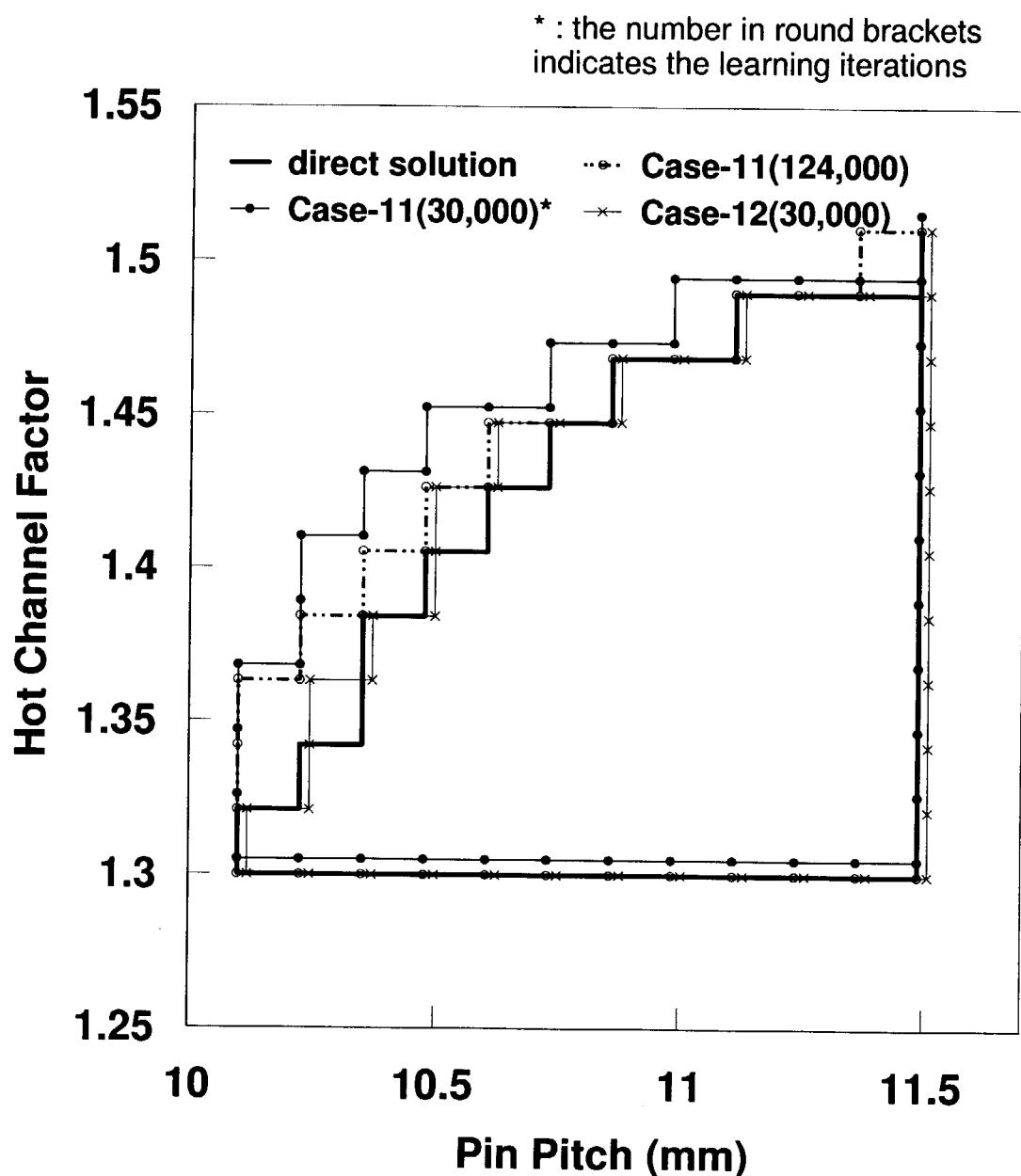


Fig.A3-4 A comparison of design windows among Case-11, -12 and the direct solution

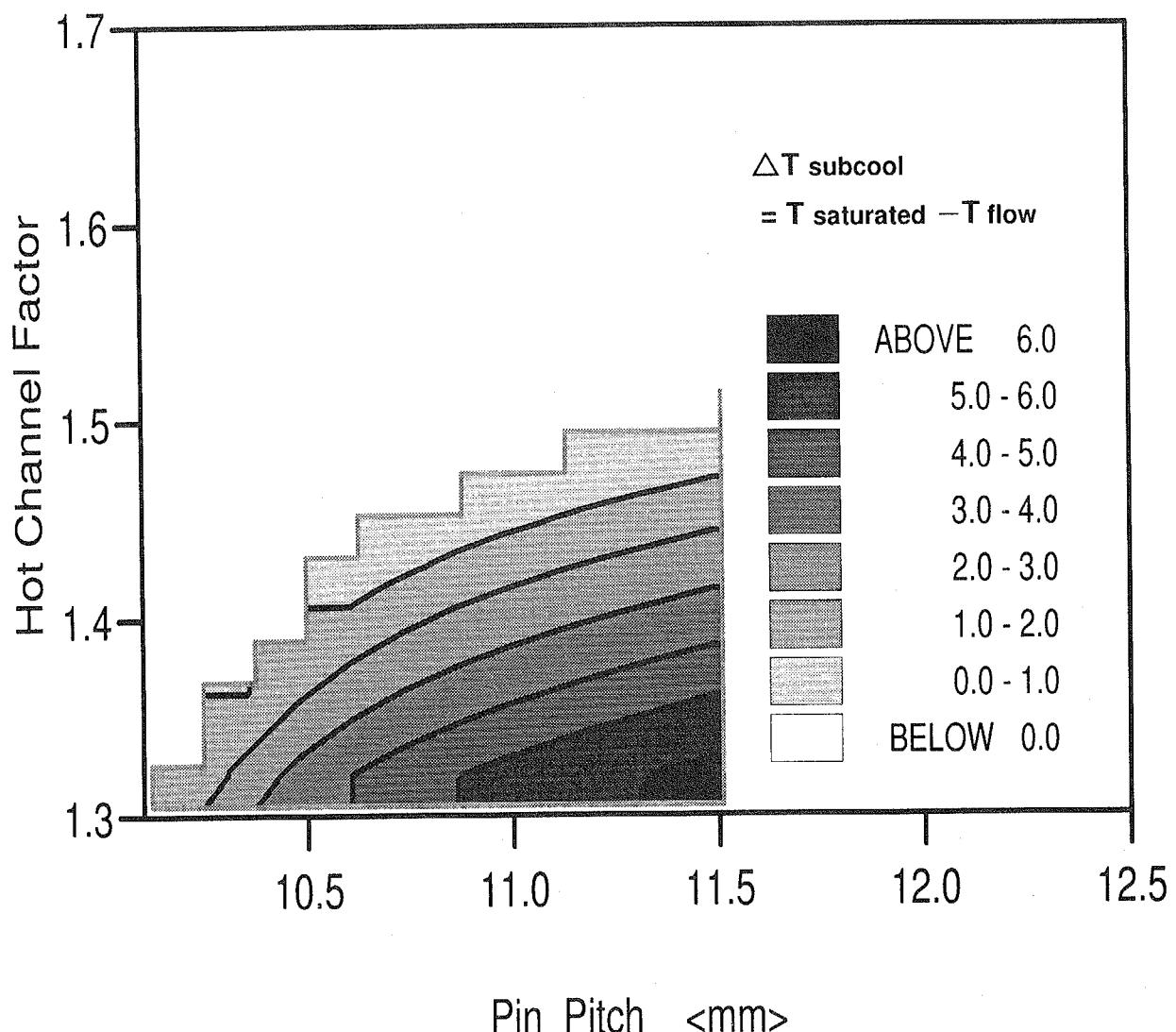


Fig. A3-5 A contour map of degree of subcooling inside the estimated design window in Case-12

付録4. ニューラルネットワークプログラムの単独使用方法

ニューラルネットワークプログラムは、設計ウィンドウ探索システムの中に組み込まれているが、単体のマッピングプログラムとしても実行可能である。設計ウィンドウ探索システムにおける今後の設計パラメータ、評価パラメータの拡充やニューラルネットワークの応用分野の拡張に備える必要がある。このため、ニューラルネットワークプログラムのモジュール化を行った。モジュール化に際しては、任意の入出力関係を取り扱えるように一般化し、またニューラルネットワークの構造が容易に変更できるようにした。以下にニューラルネットワークプログラムのコンパイル及び実行方法、入出力ファイル及びその内容について述べる。

A4.1 ニューラルネットワークプログラムのコンパイル及び実行

(1) コンパイル

/NEURO/src/win_neuralのディレクトリ配下で次のコマンドを入力する。

```
make neural
```

このmakeコマンドにより、./bin配下に実行モジュール neural が作成される。

(2) 実行に必要なファイル及び引数

ニューラルネットワークプログラム単独で実行可能な機能は、学習すること、マッピングすること及び学習とマッピングを1回の実行で行うことである。また、学習過程と同時に検証用のデータにより汎化能力の検証過程を行うことができる。ニューラルネットワークプログラムで実行可能な機能と実行に必要なファイル及び引数をTable A4-1にまとめた。

A4.2 ニューラルネットワークプログラムの入出力ファイル

Table A4-2にニューラルネットワークプログラムに必要な入出力ファイルとその内容をまとめた。

Table A4-1 A list of function, command parameter, input files of neural network program

Function	Command and argument	Input files
Training with learning data and Checking a generalization ability with checking data	neuaral 1	neural.cond neural_set1.cond neural_set2.cond raw_assess.d eva_assess.d
Mapping	neuaral 2 or neural 12	neural.cond neural_set1.cond neural_set2.cond raw_assess.d neuro.wght
Training with learning data, Checking a generalization ability with checking data and Mapping	neuaral 3	neural.cond neural_set1.cond neural_set2.cond raw_assess.d eva_assess.d
Training with learning data	neuaral 11	neural.cond neural_set1.cond neural_set2.cond raw_assess.d
Training with learning data and Mapping	neuaral 13	neural.cond neural_set1.cond neural_set2.cond raw_assess.d

Table A4-2 A list of I/O files for neural network program

File name	I/O	Content
neural.cond	I	Condition of neural networks
neural_set1.cond	I	training parameters between input and the first hidden layers
neural_set2.cond	I	training parameters between hidden layers and between output and the last hidden layers
raw_assess.d	I	learning data
eva_assess.d	I	checking data
neu_assess.d	O	mapping data
neural.err	O	error of root mean square
neuro.wght	I/O	connecting weight

A4.3 入出力ファイルのフォーマット及び内容

以下に入出力ファイルの内容及びそのフォーマットを示す。

(1) neural.cond

READ (*) IFINE	詳細分割数
READ (*) ETA	学習係数
READ (*) EPSI	シグモイド温度
READ (*) EALP	慣性項
READ (*) ERRMIN	収束判定基準
READ (*) ITER	許容反復回数
READ (*) DUPPER	形状制限上限値
READ (*) DLOWER	形状制限下限値
READ (*) DMID	成立ボーダー
READ (*) WD	乱数幅縮小率
READ (*) WC	クラスタ低減率
READ (*) CLAY	層数指定 {2~5}
READ (*) CFUNC	動作関数 「シグモイド関数」、「tanh関数」、「線形関数」

(2) neural_set1.cond

```

DO K = 1, ICLS
READ (*) INO(K), ETIN(K), EPIN(K), ALIN(K)
END DO
          * ICLS : クラスタ数 (raw_assess.d参照)
INO(K)    クラスタ番号
ETIN(K)   入力層-第1中間層間の学習係数
EPIN(K)   入力層-第1中間層間のシグモイド温度
ALIN(K)   入力層-第1中間層間の慣性項

```

(3) neural_set2.cond

```

DO K = 1, ICCLS
READ (*) INO(K), ETOUT(K), EPOUT(K), ALOUT(K)
END DO
          * ICCLS : クラスタ数 (raw_assess.d参照)
INO(K)    クラスタ番号
ETOUT(K)   中間層間または中間層-出力層間の学習係数
EPOUT(K)   中間層間または中間層-出力層間のシグモイド温度
ALOUT(K)   中間層間または中間層-出力層間の慣性項

```

(4) raw_assess.d

```
READ(*) INPT, ICLS, ITDAT
INPT           次元数(設計変数の数)
ICLS           クラスタ数
ITDAT          教師データの個数
```

```
READ(*) IBUNK
IBUNK          教師データ作成のための各設計変数範囲分割数
```

```
DO I = 1, INPT
    IP = 0
    READ(`(A)') BUFF
    CALL RDCHAR(BUFF, AXNAM(I), IP)
    CALL RDCHAR(BUFF, AXUNT(I), IP)
    CALL RDCHAR(BUFF, CTMP, IP)
    READ(CTMP, *) AXMAX(I)
```

```
    CALL RDCHAR(BUFF, CTMP, IP)
    READ(CTMP, *) AXMIN(I)
```

```
END DO
```

*:RDCHARルーチンは、文字データのストリームから空白、タブ文字、コンマ、改行文字で合うまでの文字列を切り取って文字データに格納する機能を持つ。C言語のstrtok()関数に相当する。

AXNAM(I)	I番目の設計変数の名称
AXUNT(I)	I番目の設計変数の単位
AXMIN(I)	I番目の設計変数の教師データ下限値
AXMAX(I)	I番目の設計変数の教師データ上限値

```
DO I = 1, ICLS
    IP = 0
    READ(`(A)') BUFF
    CALL RDCHAR(BUFF, PARNAM(I), IP)
    CALL RDCHAR(BUFF, PARUNT(I), IP)
    CALL RDCHAR(BUFF, CTMP, IP)
    READ(CTMP, *) CLSMAX(I)
    CALL RDCHAR(BUFF, CTMP, IP)
    READ(CTMP, *) CLSMIN(I)
```

```
END DO
```

PAMNAM(I)	I番目の評価項目の名称
PAMUNT(I)	I番目の評価項目の単位
CLSMIN(I)	I番目の評価項目の教師データ最小値
CLSMAX(I)	I番目の評価項目の教師データ最大値

```
DO I = 1, ITDAT
READ(*) (DINLAY(I,k), k=1, INPT)      設計変数値
READ(*) (TEMP(I,k), k=1, ICLS)          教師データ
END DO
```

(5) eva_assess.d

INPTE	次元数（設計変数の数）
ICLSE	クラスタ数
ITDATE	検証データの個数

```
READ(*) IBUNKE
IBUNKE          検証データ作成のための各設計変数範囲分割数
```

```
DO I = 1, INPTE + ICLSE
READ(`(A)') BUFF
CALL RDCHAR(BUFF, AXENAM(I), IP)
CALL RDCHAR(BUFF, AXEUNT(I), IP)
CALL RDCHAR(BUFF, CTMP, IP)
READ(CTMP, *) AXEMAX(I)
CALL RDCHAR(BUFF, CTMP, IP)
READ(CTMP, *) AXEMIN(I)
END DO
```

AXENAM(I)	I番目の設計変数の名称
AXEUNT(I)	I番目の設計変数の単位
AXEMIN(I)	I番目の設計変数の検証データ下限値
AXEMAX(I)	I番目の設計変数の検証データ上限値

```
DO I = 1, ICLSE
IP = 0
```

```

READ(' (A) ') BUFF
CALL RDCHAR(BUFF, PARENAM(I), IP)
CALL RDCHAR(BUFF, PAREUNT(I), IP)
CALL RDCHAR(BUFF, CTMP, IP)
READ(CTMP, *) CLSEMAX(I)
CALL RDCHAR(BUFF, CTMP, IP)
READ(CTMP, *) CLSEMIN(I)
END DO

```

PAMENAM(I)	I番目の評価項目の名称
PAMEUNT(I)	I番目の評価項目の単位
CLSEMIN(I)	I番目の評価項目の検証データ最小値
CLSEMAX(I)	I番目の評価項目の検証データ最大値

```

DO I = 1, ITDATE
READ(*) (DIELAY(I,k), k=1, INPTE)      設計変数値
READ(*) (TEMP(I,k), k=1, ICLSE)          検証データ
END DO

```

(6) neu_assess.d

INPT	次元数 (設計変数の数)
ICLS	クラスタ数
LT	マップデータの個数

```

READ(*) IFINE
IFINE           マッピングデータ作成のための各設計変数範囲分割数

DO I = 1, INPT
READ(' (A8,A8,2F16.6) ') AXNAM(I), AXUNT(I), AXMAX(I), AXMIN(I)
END DO

AXNAM(I)        I番目の設計変数の名称
AXUNT(I)        I番目の設計変数の単位
AXMIN(I)        I番目の設計変数のマッピングデータ下限値
AXMAX(I)        I番目の設計変数のマッピングデータ上限値

```

DO I = 1, ICLS

```
READ( '(A8,A8)' )  PARNAM(I), PARUNT(I)
END DO
```

PARNAM(I) I番目の評価項目の名称
 PARUNT(I) I番目の評価項目の単位

```
DO I = 1, LT
  READ(*) (XYZ(I,k), k=1, INPT)          設計変数値
  READ(*) (DOLAY(I,k), k=1, ICLS)        マッピングデータ
END DO
```

(7) neural.err

```
READ( '(20(F14.5,1Z))' ) (A(I), I=1, INPT), (TMPERR(I), I=1, ICLS))
  A(I,k)           100 x k回目の設計変数値
  TMPERR(I,k)     I番目の評価項目の 100 x k回学習後の平均自乗誤差
```

(8) neural.wght

```
DO K = 1, ICLS
  READ(*) CLSMAX(K)          クラスタ最大値
END DO
```

```
DO K = 1, ICLS
  READ(*) CLSMIN(K)          クラスタ最小値
END DO
```

```
DO K = 1, ICLS
  READ(*) IHID(K)            クラスタ毎の隠れ層のニューロン数
END DO
```

```
DO K = 1, ICLS
  DO J = 1, IHID(K)
    DO I = 1, INPT + 1
      READ(*) DIHW(K, I, J)      入力層-隠れ層間の結合係数
    END DO
  END DO
  DO J = 1, IHID(K)
    DO I = 1, IHID(K) + 1
      READ(*) DHHW(K, I, J)      隠れ層-隠れ層間の結合係数
    END DO
  END DO
```

```
      END DO  
      END DO  
      DO J = 1, IHID(K) + 1  
        READ( *) DHHW(K, I, J)      隠れ層-出力層間の結合係数  
      END DO  
    END DO
```

This is a blank page.

国際単位系(SI)と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光强度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s ⁻¹
力	ニュートン	N	m·kg/s ²
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m ²
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	N·m
功率、放射束	ワット	W	J/s
電気量、電荷	クーロン	C	A·s
電位、電圧、起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V
磁束密度	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束度	ルーメン	lm	cd·sr
照度	ルクス	lx	lm/m ²
放射能	ベクレル	Bq	s ⁻¹
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分、時、日	min, h, d
度、分、秒	°, ', "
リットル	l, L
トント	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	Å
バーン	b
バール	bar
ガル	Gal
キュリ	Ci
レンタゲン	R
ラド	rad
レム	rem

$$1 \text{ Å} = 0.1 \text{ nm} = 10^{-10} \text{ m}$$

$$1 \text{ b} = 100 \text{ fm}^2 = 10^{-28} \text{ m}^2$$

$$1 \text{ bar} = 0.1 \text{ MPa} = 10^5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm/s}^2 = 10^{-2} \text{ m/s}^2$$

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

$$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$$

$$1 \text{ rad} = 1 \text{ cGy} = 10^{-2} \text{ Gy}$$

$$1 \text{ rem} = 1 \text{ cSv} = 10^{-2} \text{ Sv}$$

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10^{18}	エクサ	E
10^{15}	ペタ	P
10^{12}	テラ	T
10^9	ギガ	G
10^6	メガ	M
10^3	キロ	k
10^2	ヘクト	h
10^1	デカ	da
10^{-1}	デシ	d
10^{-2}	センチ	c
10^{-3}	ミリ	m
10^{-6}	マイクロ	μ
10^{-9}	ナノ	n
10^{-12}	ピコ	p
10^{-15}	フェムト	f
10^{-18}	アト	a

(注)

- 表1～5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局1985年刊行による。ただし、1eVおよび1uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里、ノット、アール、ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは、JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC閣僚理事会指令ではbar、barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

換算表

力	N(=10 ⁵ dyn)	kgf	lbf
1	0.101972	0.224809	
9.80665	1	2.20462	
4.44822	0.453592	1	

$$\text{粘度 } 1 \text{ Pa}\cdot\text{s}(N\cdot\text{s}/\text{m}^2) = 10 \text{ P(ポアズ)}(\text{g}/(\text{cm}\cdot\text{s}))$$

$$\text{動粘度 } 1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ St(ストークス)}(\text{cm}^2/\text{s})$$

圧	MPa(=10 bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg(Torr)	lbf/in ² (psi)
力	1	10.1972	9.86923	7.50062×10^3	145.038
0.0980665	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
0.101325	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
1.33322×10^{-4}	1.33322×10^{-4}	1.35951×10^{-3}	1.31579×10^{-3}	1	1.93368×10^{-2}
6.89476×10^{-3}	6.89476×10^{-3}	7.03070×10^{-2}	6.80460×10^{-2}	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J(=10 ⁷ erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft · lbf	eV	1 cal = 4.18605 J(計量法)
1	0.101972	2.77778×10^{-7}	0.238889	9.47813×10^{-4}	0.737562	6.24150×10^{18}	$= 4.184 \text{ J (熱化学)}$	
9.80665	1	2.72407×10^{-6}	2.34270	9.29487×10^{-3}	7.23301	6.12082×10^{19}	$= 4.1855 \text{ J (15 }^\circ\text{C)}$	
3.6×10^6	3.67098×10^5	1	8.59999×10^5	3412.13	2.65522×10^6	2.24694×10^{25}	$= 4.1868 \text{ J (国際蒸気表)}$	
4.18605	0.426858	1.16279×10^{-6}	1	3.96759×10^{-3}	3.08747	2.61272×10^{19}	仕事率 1 PS(仏馬力)	
1055.06	107.586	2.93072×10^{-4}	252.042	1	778.172	6.58515×10^{21}	$= 75 \text{ kgf} \cdot \text{m/s}$	
1.35582	0.138255	3.76616×10^{-7}	0.323890	1.28506×10^{-3}	1	8.46233×10^{18}	$= 735.499 \text{ W}$	
1.60218×10^{-19}	1.63377×10^{-20}	4.45050×10^{-26}	3.82743×10^{-20}	1.51857×10^{-22}	1.18171×10^{-19}	1		

放射能	Bq	Ci	吸収線量	Gy	rad
1	2.70270 $\times 10^{-11}$	1	1	100	
3.7×10^{10}	1		0.01	1	

照射線量	C/kg	R
1	3876	
2.58×10^{-4}	1	

線量当量	Sv	rem
1	100	
0.01	1	

(86年12月26日現在)

ニューラルネットワークによる原子炉設計における多次元設計ウインドウ探索システム