

分置

# 過渡熱応力リアルタイムシミュレーションコードPARTSの開発

Program for Arbitrary Real Time Simulation

## (1) プロトタイプ的设计

1995年8月

動力炉・核燃料開発事業団  
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

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

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

## 過渡熱応力リアルタイムシミュレーションコード PARTS の開発

### Program for Arbitrary Real Time Simulation

#### (1) プロトタイプの設計

笠原 直人\*、井上 正明\*

#### 要 旨

高速炉機器構造の支配荷重である熱応力を最小とする優れた構造形状および運転法を探索するため、構造設計基準の基本思想である「解析による設計 (Design by Analysis)」を、系統設計をも視野に入れ高温構造システム全体に適用した、新しい設計体系の確立を目指している。その中核となるのが熱・流体・構造の複合現象である熱過渡現象を統合評価する新しい解析法の開発である。このため、複数コードの柔軟な連携と、従来型の詳細コードに比べ3ケタ以上の高速計算を目標とする過渡熱応力リアルタイムシミュレータ PARTS (=Program for Arbitrary Real Time Simulation)のプロトタイプ設計と試作を行なった。

複数コード連携は、(1)熱・流体高速計算、(2)構造温度・応力高速計算、(3)ひずみ・強度高速計算 の3種類の独立した計算部品 (オブジェクト) と、部品を自由に組み合わせることが可能なワークベンチによって実現を図る。

高速計算は、各部品計算の並列処理、およびニューラルネットワークによる既計算結果からの結果予測機能により達成する。

計算部品のプログラムには、オブジェクト指向言語 Smalltalk およびC++を使用した。またワークベンチはユーザカスタマイズが容易となるように業界標準の VisulBasic と VisualSmalltalk により作成した。これらを組み合わせた試作コードによって、部品間の連携計算が容易に行なえることを確認した。

今後は、ネットワークで接続された多数の計算機を協調動作させる分散オブジェクト技術を利用した、部品計算の並列処理機能と、ニューラルネットワークによる推論部品を付け加えることにより平成8年度までにプロトタイプを完成させ、熱応力緩和構造研究へ適用を図っていく計画である。

---

\* 大洗工学センター 基盤技術開発部 構造・材料技術開発室

## Development of Program for Arbitrary Real Time Simulation

### (1) Design of Prototype Program

Naoto Kasahara\* , Masaaki Inoue\*

#### ABSTRACT

In order to optimize elevated temperature structural systems in fast reactor plants, where main loading is thermal stress induced by transient operation of circuit, authors proposed new design frame by applying design by analysis concept to both structural design and system design. A key technology in this design frame is an integrated analysis method for both thermo-mechanical behaviors of structures and plant thermo-hydraulic dynamics, developing of a prototype code of which, named PARTS (Program for Arbitrary Real Time Simulation) , was started this year.

For the purpose to achieve flexible coupling of several codes, authors designed three categories of calculation parts (objects): (1) thermo-hydraulics of coolant, (2) thermo-mechanical behavior of structures, and (3) material strength. These calculation parts can be handled and connected easily on the PARTS-Workbench.

Real time simulation is planed to be accomplished by parallel processing of individual parts calculation, and by prediction of neural-network which learned past calculation results.

Object oriented languages , Smalltalk and C++, were adopted for implementation of calculation parts. The PARTS-Workbench was programed by Visual Basic and Visual Smalltalk for considering user customization.

In the next phase of study, parallel processing function and neural network parts will be incorporated in the PARTS code. Prototype of this code is going to be completed until F.Y.1996. and be applied to study of thermal mitigation structures .

---

\* OEC, Structure and Material Research Section

## 目 次

1. 緒 言 .....	1
2. 従来の解析法の課題と本研究のねらい .....	5
2.1 設計例題 .....	5
2.2 従来型解析法をベースとした設計法の課題 .....	5
2.3 PARTSコードを使用した設計法の提案 .....	6
3. PARTSコードの構成と要素技術 .....	11
3.1 コード概要と制御プログラムPARTS-WORKBBNCH .....	11
3.2 冷却材計算部品PARTS-FLOW .....	12
3.3 構造計算部品PARTS-STRESS .....	12
3.4 材料強度計算部品PARTS-DS .....	13
4. 計算機ソフトウェアとハードウェア .....	16
4.1 コンポーネントウェアによる部品化と連携 .....	16
4.2 計算機プラットフォームの選定 .....	16
4.3 分散オブジェクト技術による並列処理 .....	17
5. 設計例題による試計算 .....	21
6. 今後の課題 .....	23
謝 辞 .....	25
参考文献 .....	26

## 1. 緒言

高速炉は、比熱が小さく沸点の高い金属ナトリウムを冷却材として使用することから、高温・低圧運転条件となっている。このため、ボイラや化学プラント等の通常の高温機器の支配荷重が圧力であるのに対し、高速炉では、冷却材温度変化に伴う過渡熱応力が支配的となる特有の構造設計条件となる(Fig. 1)。

一方、現在原型炉の段階である高速炉を実用化させるには、安全性や信頼性に加え、経済性と運転保守性を向上させる必要がある[1]。こうした要求を満たすため、支配荷重である熱応力を最小とする優れた構造形状および運転法を探索する(Fig. 2)。

次に高速炉プラントの熱過渡現象を、Fig. 3に示す中間熱交換機(IHX)の管板構造を例に説明する。運転状態が何等かの理由で変化すると、1次系および2次系の冷却材温度が変化する。その結果1次系冷却材に接液する構造部材は1次系温度に追従し、2次系に接する部位は2次系に追随するため、1次系と2次系の位相差、ならびに構造の温度応答性(時定数)の違いにより、部材間に温度差が生じる。これに伴い材料の熱膨張差によって熱応力が発生し、応力集中等の構造要因があれば、さらに応力が拡大される。ここで、応力を低減するため形状を変更すると、構造の温度応答まで変化してしまう。さらに流路に関する大規模な構造変更を行えば、冷却材の熱流動特性が影響を受ける。つまり、熱過渡現象は熱・流体・構造の連成現象であるということである[2]。

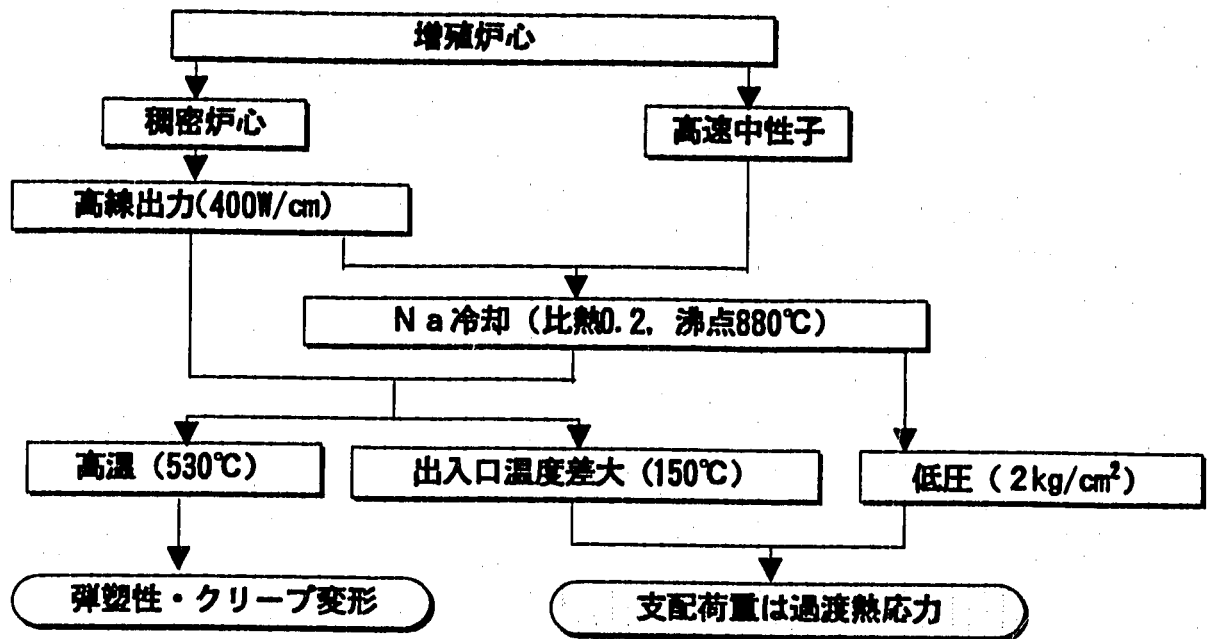
原子力プラントの構造設計の基本思想である「解析による設計(Design by Analysis)」は「起こりうるあらゆる破壊様式を想定し、ひとつひとつの破壊様式に対応する設計基準を用意し解析によって構造物の健全性を詳細に評価することができるように」するというものである。この思想から考えると、機器の破損モードがFig. 3に示す熱過渡の繰返しによる熱疲労であるならば、熱過渡現象全体の解析に基づく評価を行い、出来る限りその根本原因に立ち返って設計を行うのが本来の姿であると考えられる。

これに対し、従来的高速炉構造設計の手順は、機械荷重に対する設計法で形状を決め、しかる後に熱応力に対する成立性を数値実験で確認するというものであった(Fig. 3左半面参照)。これは、熱・流体・構造の連成現象を統合評価する技術がなく、熱過渡条件を決めるための系統設計と構造設計が独立に行われていたためである。

このため、本研究では「解析による設計」を、系統設計をも視野に入れ高温構造システム全体に拡張し、支配荷重である熱応力が最小となる形状や運転法をまず決め、しかる後に機械荷重とのバランスを考慮して最適化する新しい設計体系(Fig. 3右半面参照)を確立することを目標として掲げる。

両者では、設計される物の形状が変わってくる。ノズルを例に採ると、機械荷重ベースの設計では穴に対する剛性の補強のため、付け根部が厚肉になる。これに対し、熱応力最小化をねらった設計では、冷却材温度変化に伴う各部の温度差をできるだけ小さくするため、Fig. 3右下に示すような肉厚一定のスムーズ形状となる。

熱応力をベースとした設計体系の中核となるのが熱・流体・構造の複合現象である熱過渡現象を統合評価する解析法である。このため、複数コードの柔軟な連携と、従来型の詳細コードに比べ3ケタ以上の高速計算を目標とする過渡熱応力リアルタイムシミュレータ PARTS (=Program for Arbitrary Real Time Simulation)のプロトタイプ設計と試作を行なったので、ここに報告する。



※ボイラ・タービン・化学プラント等通常の高圧機器は高圧機器

Fig.1 Structural Design Features of Liquid Metal Fast Reactor

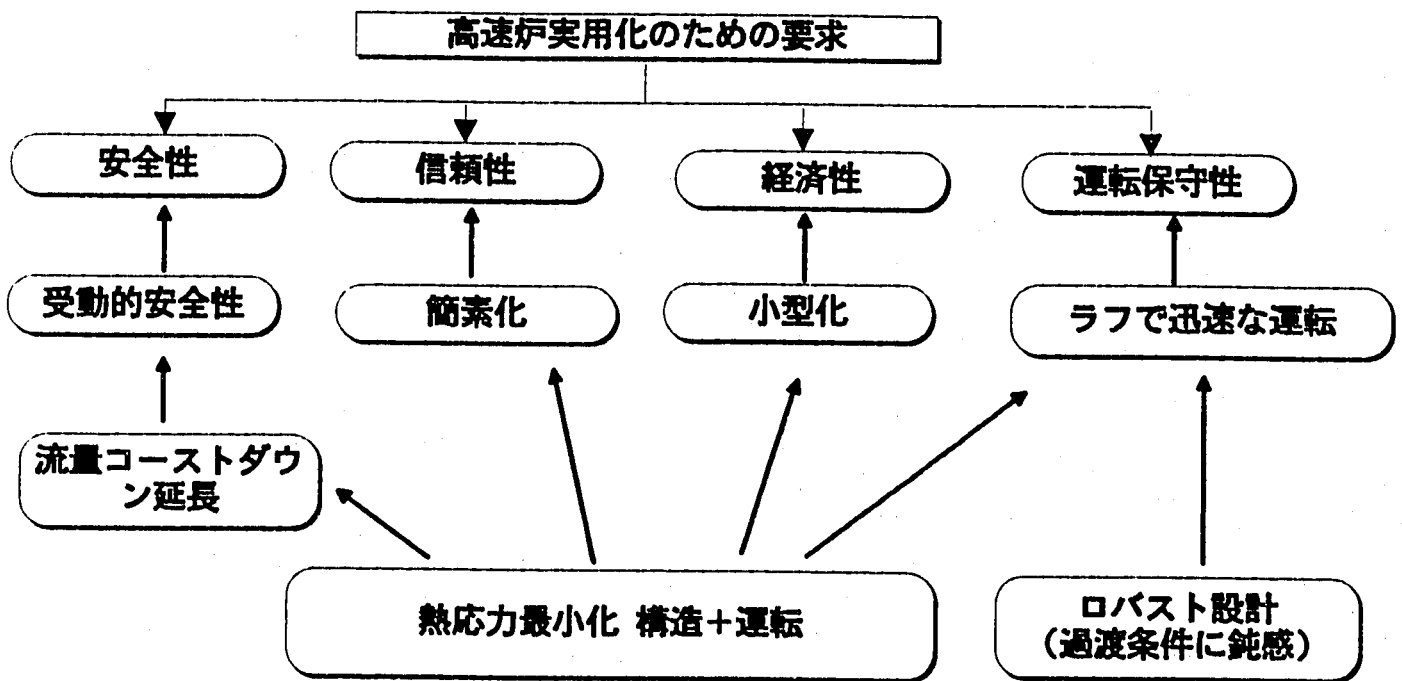


Fig.2 Requires for Commercial Liquid Metal Fast Reactor



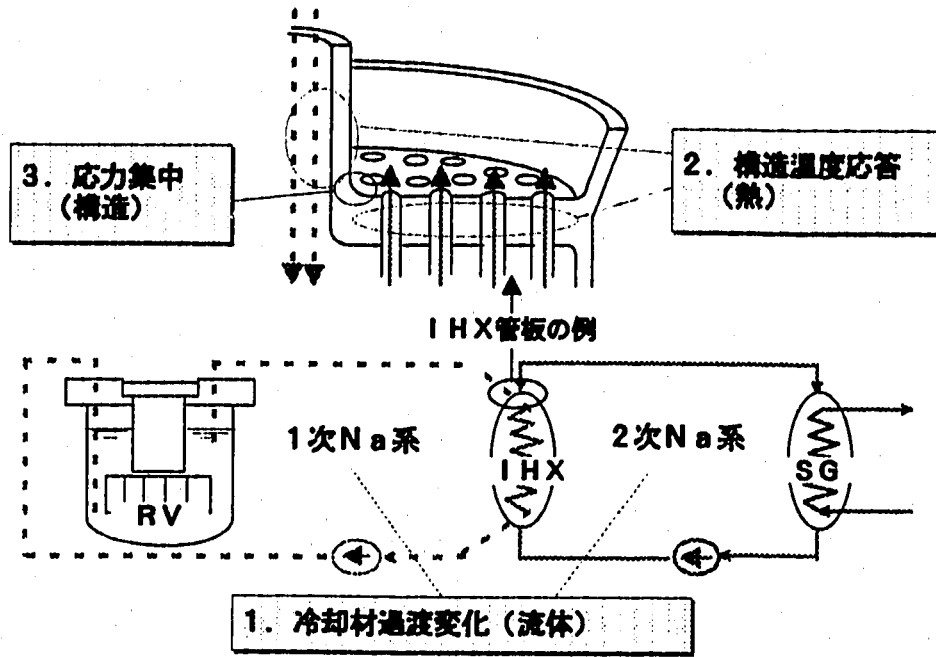


Fig.3 Thermal Transient Phenomena of Liquid Metal Fast Reactor

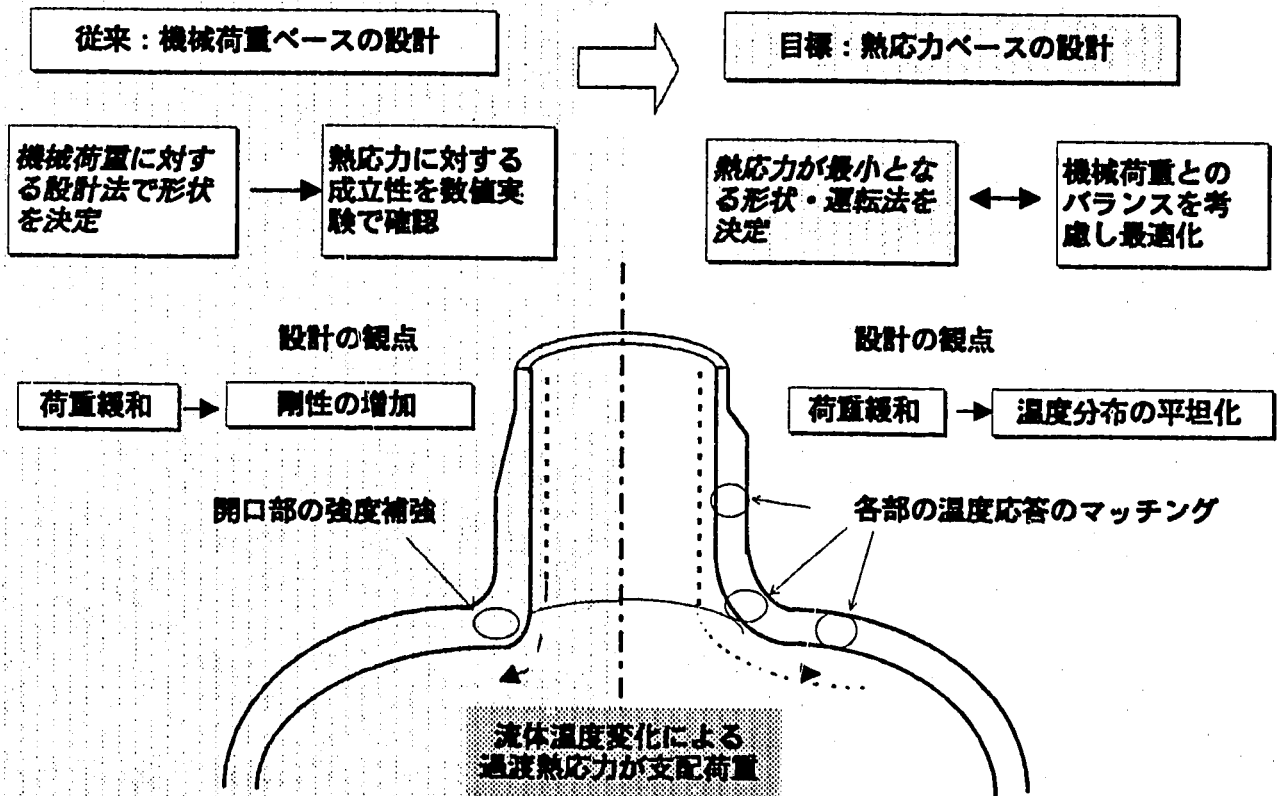


Fig.4 Change of Design Concept of Fast Reactor Components

## 2. 従来の解析法の課題と PARTS 開発のねらい

### 2.1 設計例題

本章では実際の設計問題を例に、解析法に対する課題と解決策を考えていく。高速炉プラントの基本的な熱過渡条件は、原子炉緊急停止時に炉心出口に生じるコールドショックである。この時、冷却材流量が運転時と同一だと、熱輸送系機器が急冷され熱過渡が負荷されるので、ポンプ流量を連続的に減少していく。一方、崩壊熱を取り除くためには、炉停止後も必要な流量を確保する必要がある。よって、相反する構造設計上の要求と安全設計からの要求を、バランスさせた最適流量変化曲線を決める必要がある[3]。ここで過渡時に高い熱応力を発生する構造は、冷却系中の少なくとも Fig. 5 に示すように3箇所以上はある。よって最適曲線を定めるため、候補とする曲線を10種類試すとすると、冷却系の構造が決まっていたとしても、 $3 \times 10 = 30$  ケースの解析が必要となる。

次に、構造形状まで含めた検討を行うとすると、最も簡単な配管についても Fig. 6 のように、板厚と材料を決める必要がある。熱応力に関しては板厚と応力が比例しないため、最適板厚を決めるためには数ケースの解析が必要となる。

より形状が複雑なノズルに関しては Fig. 7 のように、温度応答性と応力集中の両者から形状を検討する必要があることから、十数ケースの解析が必要となる。管板ではさらに形状が複雑になるため、ケース数は増える。従って構造決定のためには少なくとも1つの熱過渡条件に対して50ケース程度の計算が必要となることから、合計解析ケースは $50 \times 10 = 500$  ケース以上に達することになる。

### 2.2 従来型解析法をベースとした設計法の課題

過渡熱応力評価のための従来の解析法は、Fig. 8 のように上流側の現象に対応する個別詳細コードを実行し、出力を下流側のコードの入力データに変換し受け渡ししながら、順次解析を進めていく方法である。

上流からそれぞれ、系統動特性コード、多次元熱流動解析コード、構造非定常熱伝導コード、静的応力解析コード、設計基準による強度評価コードである。

これらは許認可用に、計算時間より計算精度を優先させたものが多く、メッシュデータ等の入力データ作成にも長時間の作業が必要である。また、出力結果は膨大な数値データとなるため、専門家による必要情報の抽出ならびに解釈が行われる。さらに、流動解析コードと構造解析コードとではモデル化が大きく異なることから、これらのコードの連携には人手を介したデータ変換が通常必要となる。

結果として、Fig. 8 に示すフローを1ケース実施するだけでも数ヶ月になるため、系統動特性コードと多次元熱流動解析コードを使用した系統設計と、過渡熱応力評価は構造非定常熱伝導コード、静的応力解析コード、および設計基準による強度評価コードを使用した構造設計は独立に行われる。構造設計側では予め過去の設計例等を参考に暫定

形状を決めておき、系統設計側から与えられた熱過渡条件に対する成立性の確認を行う。不成立な場合は形状の微修正をし、それでも成立しない場合に限り、系統設計側に変更依頼をする。しかし系統設計の変更にはまた月単位の時間がかかるため、こうした作業が繰り返されることはあまりない。

以上から、従来型の解析法を利用した設計法では、設計の上流過程においては過去の経験等から形状を決定され、詳細設計段階で解析による成立性の確認が行われるため、シーケンシャルなエンジニアリングであるといえる(Fig. 9)。

### 2.3 PARTS コードを使用した設計法の提案

プラントの基本形状は概念設計段階で決まるため、高速炉実用化に求められているような根本的な設計の改善には、形状が決まる設計の上流過程における評価精度の向上が必要である[4]。前章で述べた通り、高速炉の支配荷重は複雑な過渡熱応力であるため、設計者の経験や勘が働きにくく、最適な形状を決めるには概念設計段階での評価支援ツールが特に重要となる。

一方、設計の上流過程では抽象的なデータの取り扱いが必要となるため、計算機支援は従来困難であるとされていたが、近年の知識工学の発展に伴い、実用化の道が拓けて来た[5]。

このため、本研究では設計の上流段階において過渡熱応力評価に必要な解析を同時に行いながら、知識工学の支援により設計を最適化するコンカレントエンジニアリング[6]手法による新しい設計体系を提案する。

PARTS コードはその中核をなすものであり、Fig. 10 に示すように過渡熱応力の評価を、冷却材計算部品 PARTS-FLOW、構造計算部品 PARTS-STRESS、および材料強度計算部品 PARTS-DS の連携により、高速かつ柔軟に実行するものである。

Fig. 11 に PARTS を使用した設計の考え方を示す。概念設計段階では PARTS の高速計算部品により繰り返し計算を行い、最適値に近い領域まで設計範囲を絞りこむ。次に基本設計段階では、精度を上げたい部分の計算部品を詳細計算コードと置き換えて、設計範囲をさらに絞りこむ。詳細設計段階では、ほぼ最適値に絞りこまれた形状に対して、従来型の詳細コードによる確認を行う。

原子炉の緊急停止時に冷却材流量が運転時と同一だと、熱移送系機器が急冷され熱過渡が負荷されるので、ポンプ流量を連続的に減少していく。また崩壊熱を取り除くため、炉停止後も一定の流量を流す必要がある。

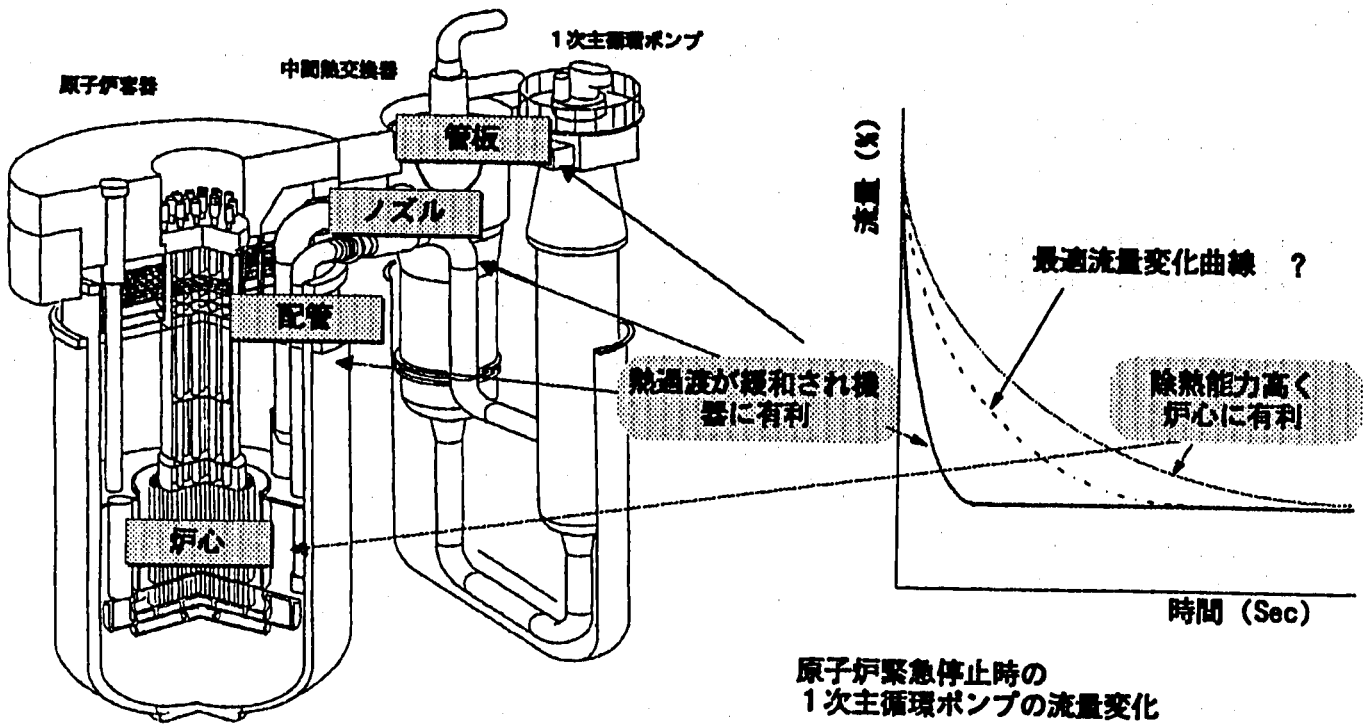
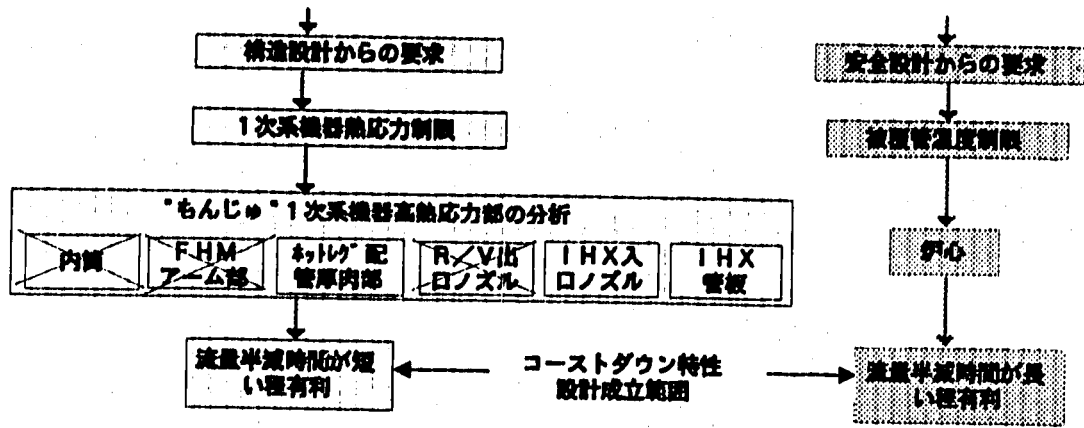


Fig.5 Example Problem1 : Optimization of Flow Coastdown Curve of Primary Circuit

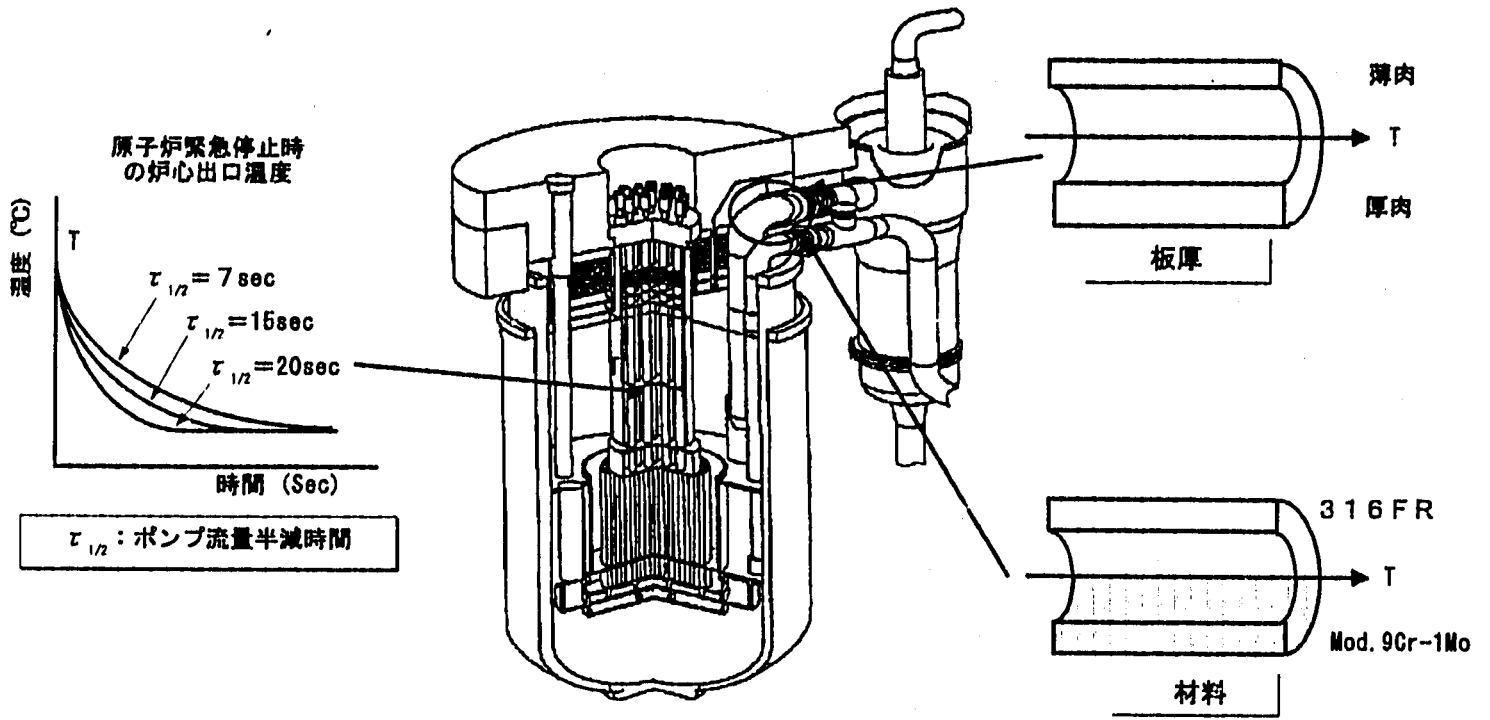


Fig.6 Example Problem2 : Optimization of Hotleg Piping of Primary Circuit

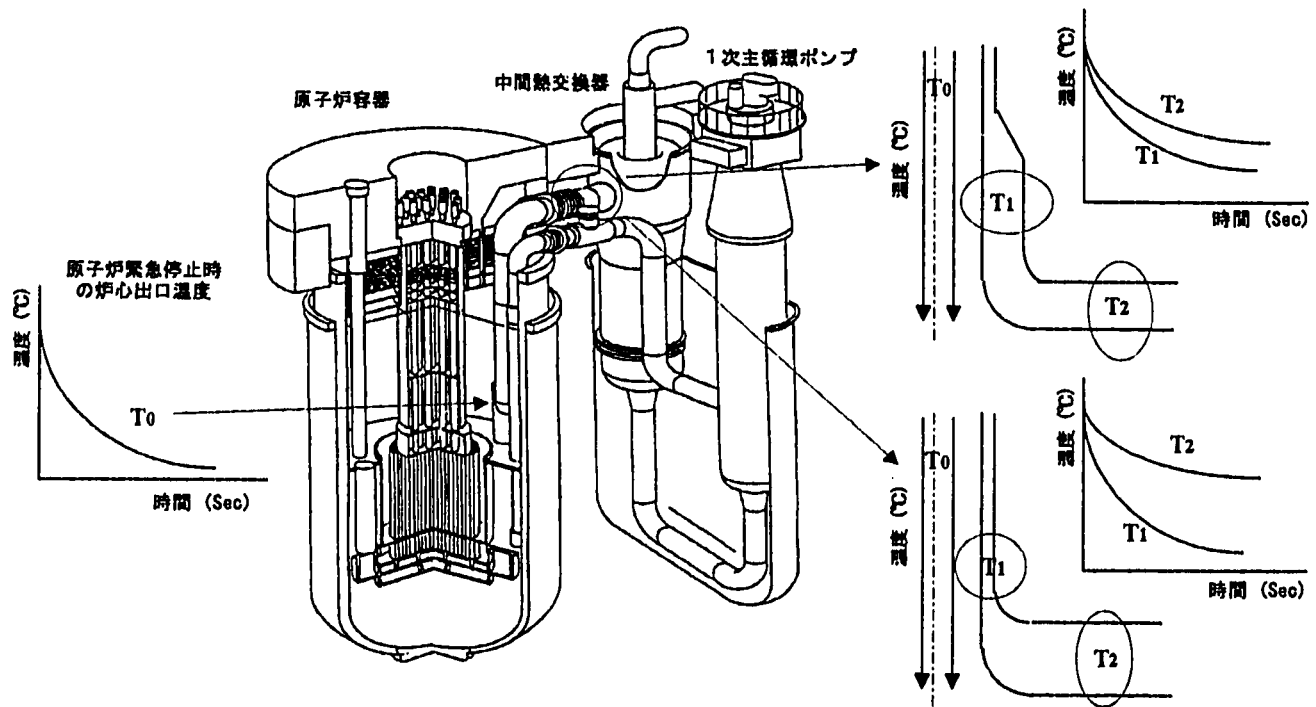
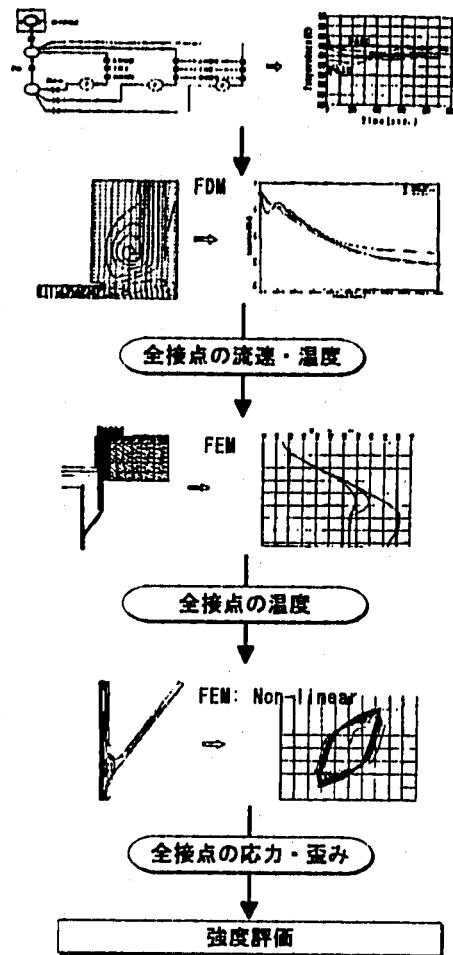


Fig.7 Example Problem2 : Optimization of Inlet Nozzle of Primary Circuit



1. 多くの計算コスト、計算時間および人手が必要
2. 膨大なデータが出力され、現象を理解するのに後処理・判断が必要
3. 流体、熱、構造に関する複数のコードの連携が必要
4. 非線形性が強く最適化が困難

与えられた熱過渡条件に対する、成立性の確認に留まる。  
(数ヶ月/ケース)

Fig.8 Weak Points of a Conventional Design Procedure

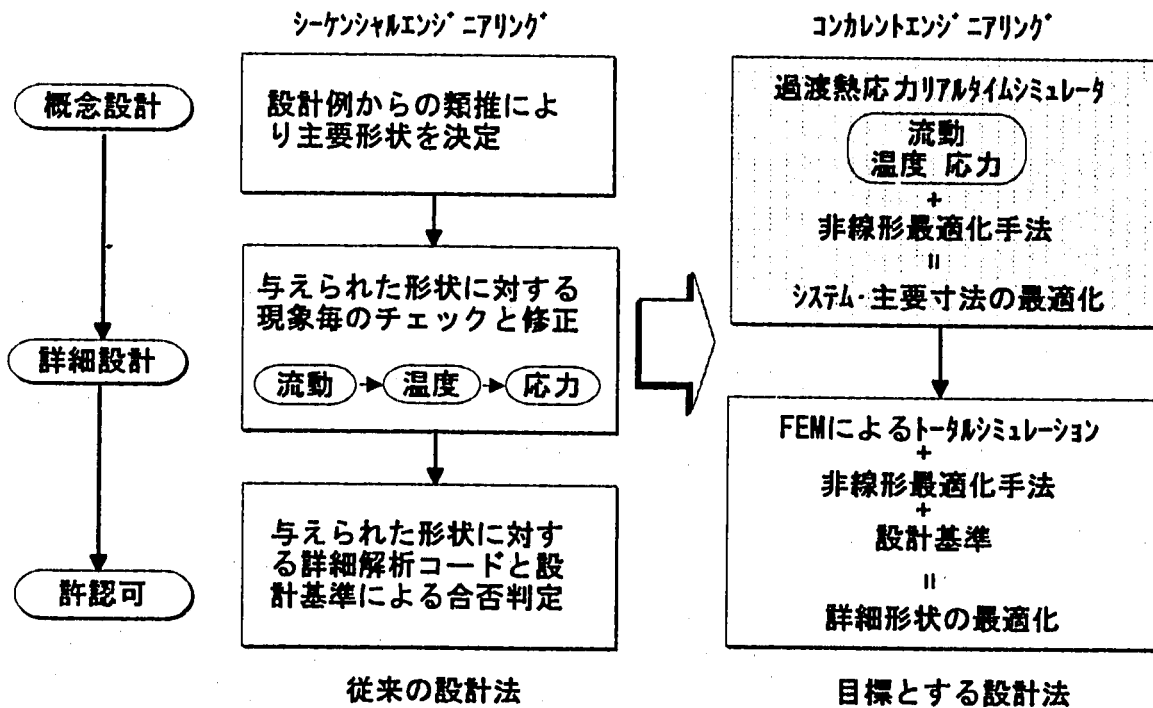


Fig.9 Change of a Design Procedure

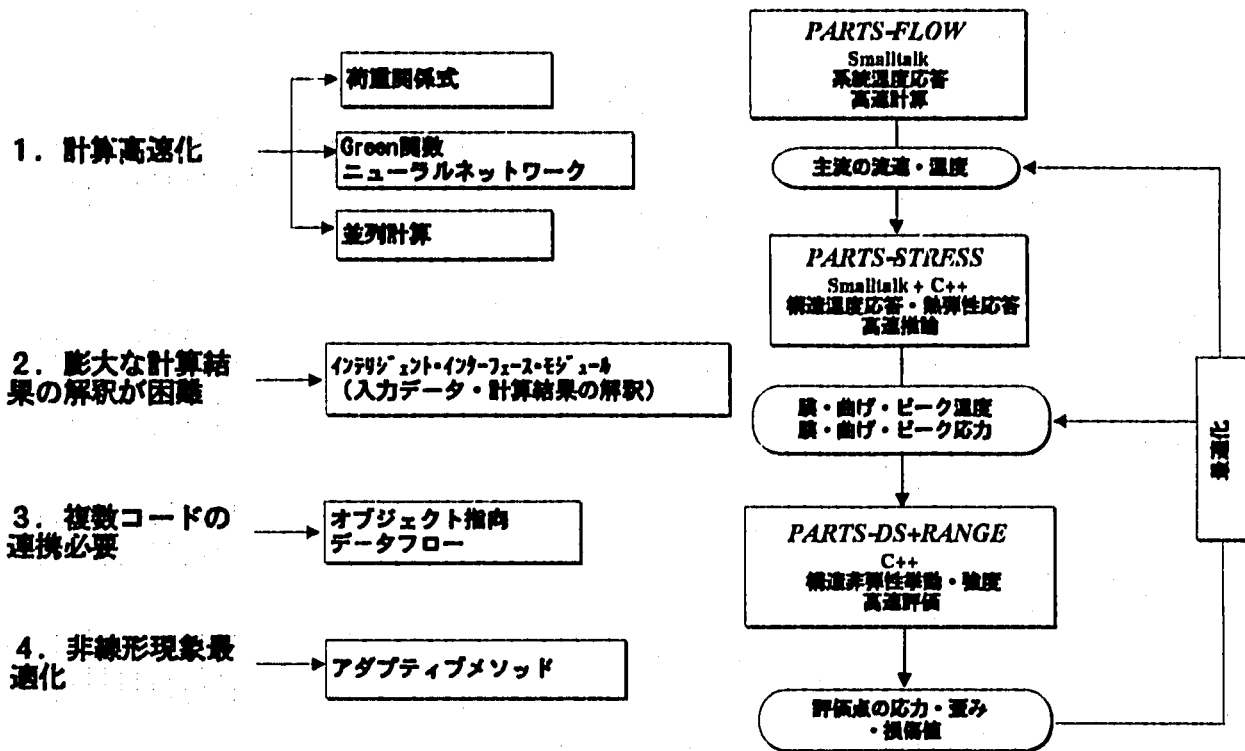


Fig.10 Program for Arbitrary Real Time Simulation

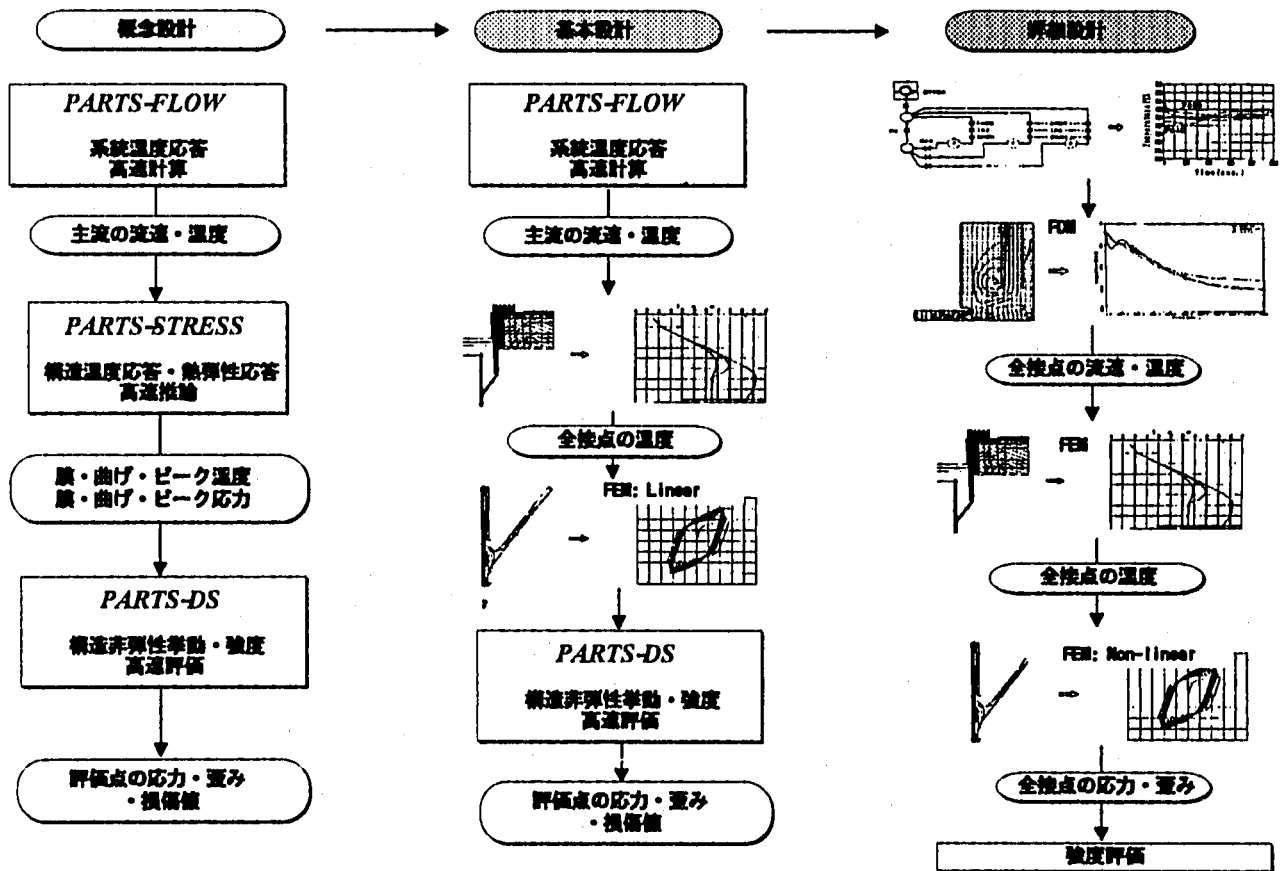


Fig.11 Design Procedure Based on PARTS

### 3. PARTS コードの構成と要素技術

#### 3.1 コード概要と制御プログラム PARTS-WORKBENCH

原子力プラントのような複数のコードを用いた評価を必要とする、複雑システムの設計に対して、知識工学の応用により計算機支援する研究が、近年盛んに行われるようになってきた。例えば、高速炉構造設計を対象とした植田ら[7]の先駆的研究では、設計評価に必要な各処理をオブジェクトとみなし、その間のデータに着目して制御を行う、オブジェクト指向データフローの考え方をベースに設計用エキスパートシステムを実現している。欧州においても、設計に必要な解析コードとデータベースを、インテリジェント機能を持ったインターフェースプログラムで包み隠すことによりオブジェクト化し、制御部からは各オブジェクトに対して、個々のプログラムに依存しない統一的评价を行なえるようにしている[8]。

これらの先行研究から、複数の幾つもの計算コードを連携させる場合、各処理プログラムのオブジェクト化によるハンドリング性の向上は明らかと考えられる。

次に、オブジェクト化したプログラムの制御であるが、植田ら[7]のデータフロー方式の他に、一般的に使用されるのは UNIX の C シェルのようなスクリプトでユーザが計算手順を記述する方法[9]がある。両者を比較すると、前者は自動的に連携が行われるため、計算が楽であるが、システム全体の挙動が目に見えないため、把握しにくい。後者は、スクリプト言語の知識が必要となる。

このため本研究では、各オブジェクトに対するマウス操作だけで、設計者が計算部品の自由な組み替えが可能なワークベンチの概念を持ち込んだ。これは過去のオブジェクト指向技術の反省点から生まれたコンポーネントウェア[10]の考え方を取り入れたものである。

PARTS の開発目標は設計計算の柔軟性と高速化である。両者の実現のため、PARTS はワークベンチ上における自由な操作が可能なプログラムの部品化(オブジェクト化)、および各部品の計算の高速化を図った。

部品化に際しては、冷却材計算部品 PARTS-FLOW、構造計算部品 PARTS-STRESS、および材料強度計算部品の3つのグループに機能上から分類して開発を行なった。それぞれのグループは設計者が通常ひとまとまりの単位としてとらえ、単体でも機能する部品からなっている。たとえば PARTS-FLOW では、系統熱流動を考える上での単位である、原子炉容器、ポンプといった機器単体の計算機能を有した部品から構成されている。設計者が PARTS コードを使用する際には、Fig. 12 のようなワークベンチ上に、上記の部品をカタログからマウスを使ってドラッグし、画面上で連結しながらアイデアを具体化していく。過渡熱応力計算を実行する場合には、表計算部品から熱過渡条件を入力し、ビルディングブロックされたプラントモデルに対し、メッセージとして条件を送ると、各部品からシミュレーション結果がメッセージとして返される仕組みになっている。

Fig. 12 を例にとると、まず、PARTS-FLOW の部品により原子炉冷却システムを組み上げ



る。この段階ですでに、系統の動特性シミュレーションが可能となる。次に高熱応力が想定される、IHXノズル、SG管板、およびポンプのY型接合部に、それぞれの応力計算を行う PARTS-STRESS の部品を接続する。これにより PARTS-FLOW 部品から熱応力計算に必要な当該部位の熱過渡条件が PARTS-STRESS に受け渡され、各部の熱応力の履歴が計算可能となる。さらに発生応力が材料の許容範囲であるかどうか判断するために、PARTS-DS 部品を PARTS-STRESS 部品に接続する。これにより PARTS-STRESS 部品から熱応力履歴が PARTS-DS に受け渡され、設計基準に従った強度評価が行われる。

### 3.2 冷却材計算部品 PARTS-FLOW

PARTS-FLOW は、系統熱流動解析を行うための、原子炉容器、ポンプといった機器単体の計算機能を有した部品と、これを組み合わせてシミュレーションを行うワークベンチからなるコードである。実際のワークベンチの画面を Fig. 13 に示す。画面左側にあるのが、機器単体の計算機能を有した部品のカタログである。個々の部品は SmallTalk[11]で記述された計算オブジェクトであり、解析に必要な計算手続きとデータを全て内部に持ち合わせている。熱流動解析ロジックは、大洗工学センターで開発された動特性解析コード Super-Copd[12][13]で使用されているものを、Smalltalk で書き直したものである。部品を使用するには、カタログからマウスで選択してワークベンチ上にドラッグすればよい。この状態で必要なデータを入力すれば、単体でも計算が可能である。入力データは2種類ある。一つは、材料や寸法といった機器の属性 (Property) であり、部品をダブルクリックすることにより入力画面が現れる。もう一つは、シミュレーション中に動的に入力される上流側からの流量や温度であり、これはオブジェクト間のメッセージとして受け取る。ワークベンチ上にある部品にたいして右ボタンをクリックすると受け付け可能なメッセージ一覧が表示されるので、選択後に上流側の部品とマウスで結べば、メッセージ受信ができるようになる。なお、出力メッセージの選択も同一の方法で行われる。出力メッセージを表示部品に渡せば結果が入手できる。

炉心出力や、ポンプ流量といった熱過渡条件は表計算部品から入力可能であり、炉心部品とポンプにメッセージとして受け渡される。

### 3.3 構造計算部品 PARTS-STRESS

PARTS-STRESS は前節の PARTS-FLOW と同一のユーザインターフェースを有する熱応力計算部品である。PARTS-FLOW の出力する冷却材流量および、温度変化をメッセージ受信し、構造の温度および熱弾性応力の応答をメッセージ出力する。

PARTS-STRESS の特徴は、その高速計算にある。Green 関数とニューラルネットワークの組合せにより FEM に比べ 1000 倍以上の速度で計算を行う。その考え方を Fig. 14 に示す。熱伝導問題や弾性問題等の線形システムでは Duhamel の定理が成立する[14]

ため、単位ステップ入力に対する応答（Green 関数）が予め分かっているならば、これを入力波形に応じて積分してやれば、応答波形が得られる。

ここで問題なのは熱応力に対する Green 関数はよほど簡単な構造でない限り理論的には得られないということである。そこで、典型的な形状と寸法の構造に関する Green 関数を FEM で計算し、形状と関数の関係をニューラルネットワーク[15]学習させておく。シミュレーション計算時には、与えた形状に対する Green 関数を推定し、入力波形に対して積分することにより、応答波形を高速で計算する[16]。

### 3.4 材料強度計算部品 PARTS-DS

PARTS-DS は前節の PARTS-FLOW と同一のユーザインターフェースを有する熱応力計算部品である。PARTS-STRESS の出力する構造の温度、および熱弾性応答をメッセージ受信し、設計基準による強度評価結果をメッセージ出力する。

PARTS-DS の特徴は、設計基準の複雑なロジックを階層化したオブジェクトにより簡単に管理できることである。高速炉の高温構造設計基準[17]は複雑な評価手順からなり、FORTRAN コードにより書かれたプログラム[18]は 14 万ラインからなる巨大なものである。また、基準自体が改訂される性格のものであるが、複雑で長大なプログラムは保守性の面から実用的なものではなかった。そこで基準全体を Fig. 15 のような、設計者が理解しやすい階層型のクラスに分解し、保守性を大幅に改善することを目標とした[19]。

現在 Visual Basic によるプロトタイプ[20]を運用しながら、適切なオブジェクトモデルの検討を行なっている。

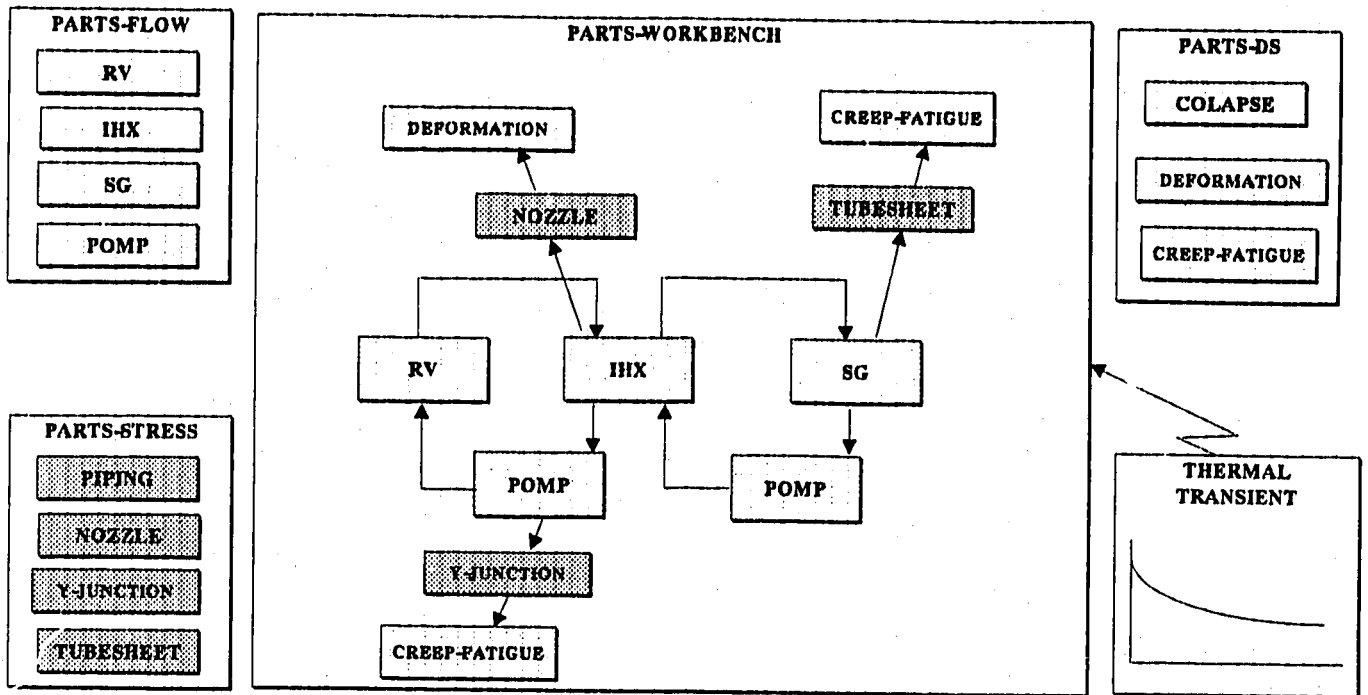


Fig.12 Concept of PARTS-WORKBENCH

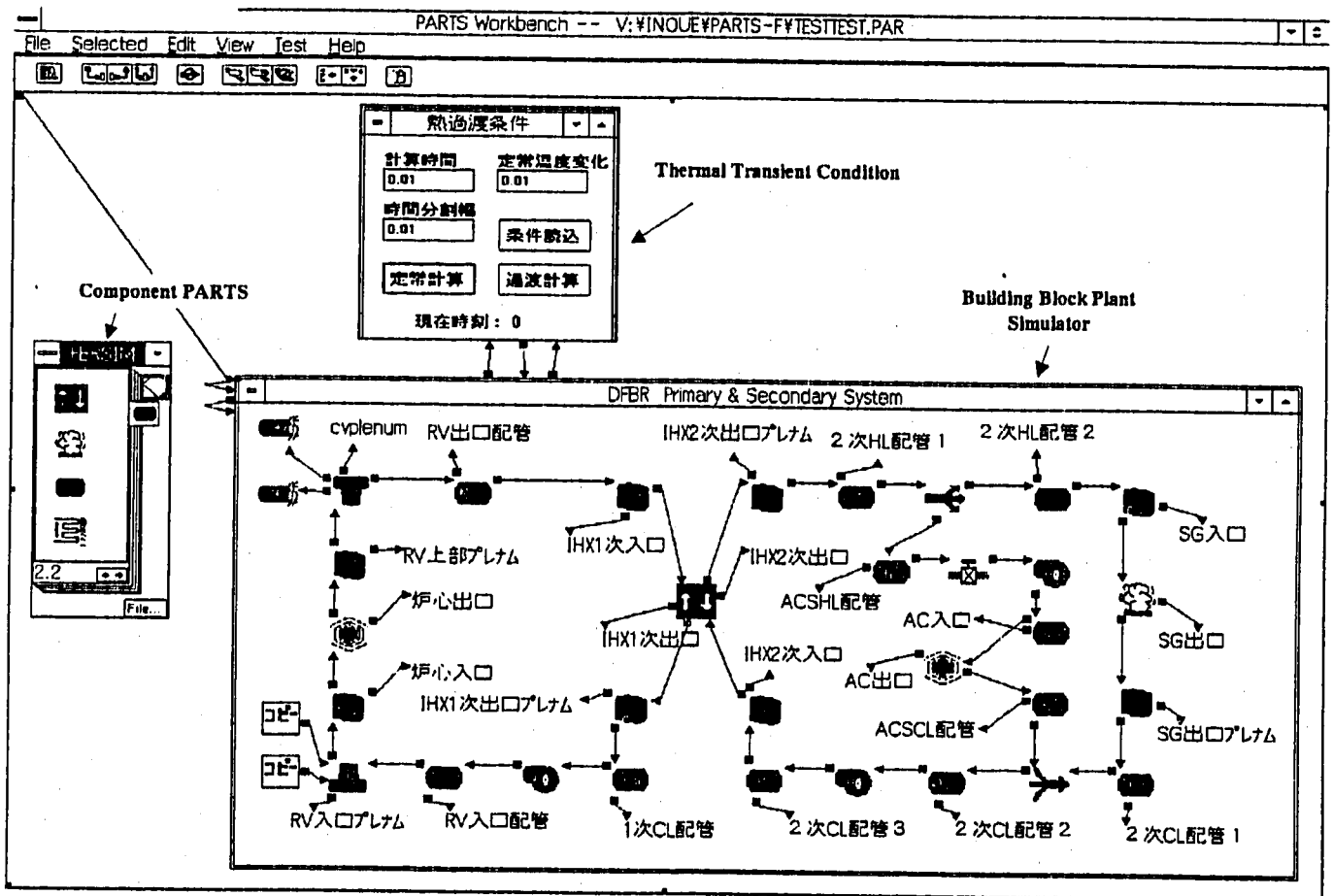


Fig.13 Graphical User Interface of PARTS-FLOW

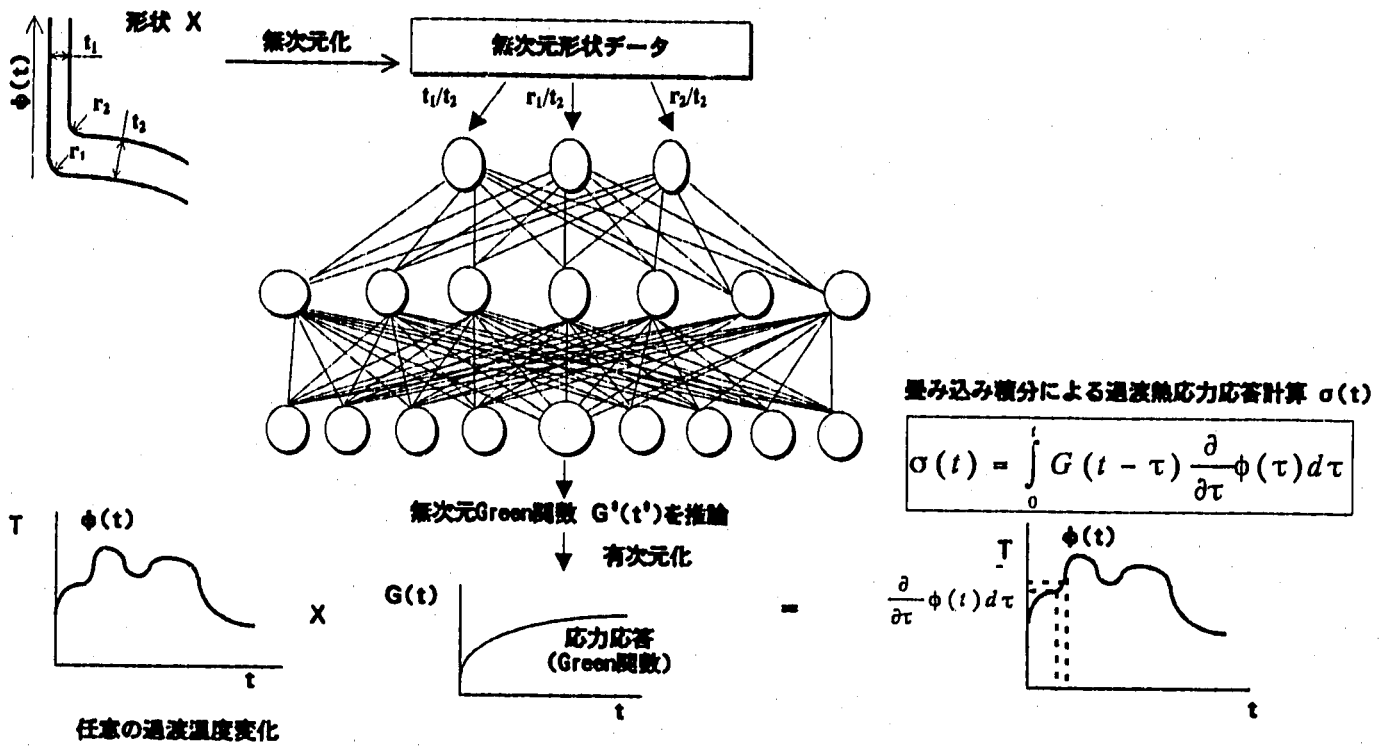


Fig.14 Fast Simulation Based on NN in PARTS-STRESS

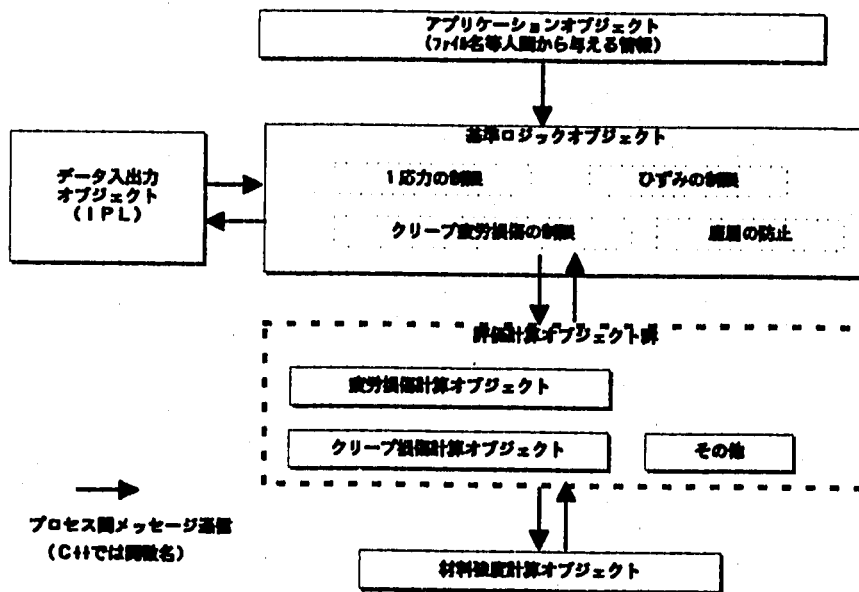


Fig.15 Object Module of PARTS-DS

## 4. 計算機ソフトウェアとハードウェア

### 4.1 コンポーネントウェアによる部品化と連携

ここでは PARTS のプログラム実装について述べる。オブジェクト指向技術は Fig. 16 のように、プログラムの部品化を支援するため手続きとデータをカプセル化する機能を有する。これは便利な機能であるが、実現するのに多くのコーディングが必要となるため、一度つくった機能を再利用することによりコーディング量を減らす工夫として継承の機能が付加された[11]。また作成した部品を協調動作させるための仕組みとして、メッセージ通信機能がある。

オブジェクト指向の考え方は米 XEROX 社の PARC で生まれたものであり[11]、

ここで開発された純粋なオブジェクト指向言語が Smalltalk である。Smalltalk はバーチャルマシン上で動くインタープリタのため、速度は早くないが、オブジェクト指向技術を学ぶには最適の言語であることから、プロトタイプ作成に米 DIGITAL 社の Visual Smalltalk[21]を採用した。また、PARTS-DS には基準改訂に伴うユーザ自身による保守が想定されることから、取り扱いが簡単な Visual Basic[22] 及び最も普及しているオブジェクト指向と考えられる Visual C++[23]を使用した。

上記のように、優れた特徴を有するオブジェクト指向技術であるが、概念が抽象的であるため、使いこなすのは容易ではない。特に C++ は、通常の C コードによる記述も可能であるため、C++ を使用しただけでオブジェクト指向プログラムが出来上がるわけではない。もう一つの問題は、部品の再利用の範囲である。既存のオブジェクト指向言語では、同一言語のソースレベルでの再利用である、マルチランゲージによる大規模システムでの部品の共通利用が困難であった。こうした課題を解決するために登場したのがコンポーネントウェア技術（名付け親は米 BYTE 誌）[10]である。

コンポーネントウェアは、Fig. 17 のようにオブジェクトレベルで互換性のある部品と、これを載せて利用するためのコンテナの概念からなる技術である。部品の再利用という点では優れているが、本格的な継承機能を備えたツールは未だ出現しない。そこで、特に継承機能の必要性の大きい PARTS-DS では C++ の継承機能を使用して部品の内部を作成した。具体的には基準ロジックの改訂は全面改訂以外は本質的に継承作業であるので、Fig. 18 のように過去の基準の改訂履歴をクラスライブラリ化し、今後の改訂に備えた。もう一つは、基準中には類似の計算ルーチンが多数現れる。これらの保守性を向上させるために Fig. 19 のような計算クラスライブラリを用意した。

### 4.2 計算機プラットフォームの選定

現在の研究段階はプロトタイピングによる原理の確認であるため、計算機環境はなるべく多くのプログラムツールを安価に、かつ迅速に試せることが望ましい。このため、最新のオブジェクト指向言語と開発環境が安価で手にはいる Windows 3.1+Win32S を計算機プラットフォームとして選択した。また、開発マシンは最新の 32bit プログラム

をストレスなく稼働できるペンティアムプロセッサ搭載の高速DOS/V機に、メモリ16MB以上、ハードディスク500MB以上を付加して使用した。

#### 4.3 分散オブジェクト技術による並列処理

PARTS コードを高速化、大規模化し、Fig. 11 のような既存コードを取り込んだ解析を実現するには、ネットワーククラスタ上での運用が必要となる。この場合異なるプラットフォーム上で稼働する異なるプログラムを連携することになり、以下のような課題が生じる。

- (1)分散環境において様々なコンピュータ資源がどこにどのような状態で接続されているかというような物理的な情報なしでアクセスを行うこと。
- (2)マルチベンダ環境における多様なプラットフォームの上で、容易に移植性の高いアプリケーションを開発できること。
- (3)様々なサービスを提供するソフトウェアをシステムのビルディング・ブロックとして独立して開発し、共通で利用できる枠組みを提供すること。

このような課題を解決するために生まれたのが分散オブジェクト技術[24]であり、OMG(Object Management Group)と呼ばれる大手ベンダ500社以上からなる非営利団体を中心となり標準化と普及を進めている。

そこでPARTSにおいても、個々の部品の違いを、Fig. 20 および Fig. 21 のような階層構造で段階的に吸収した後は、OMG に従った標準的な方法で部品間の連携をとる方針とした。

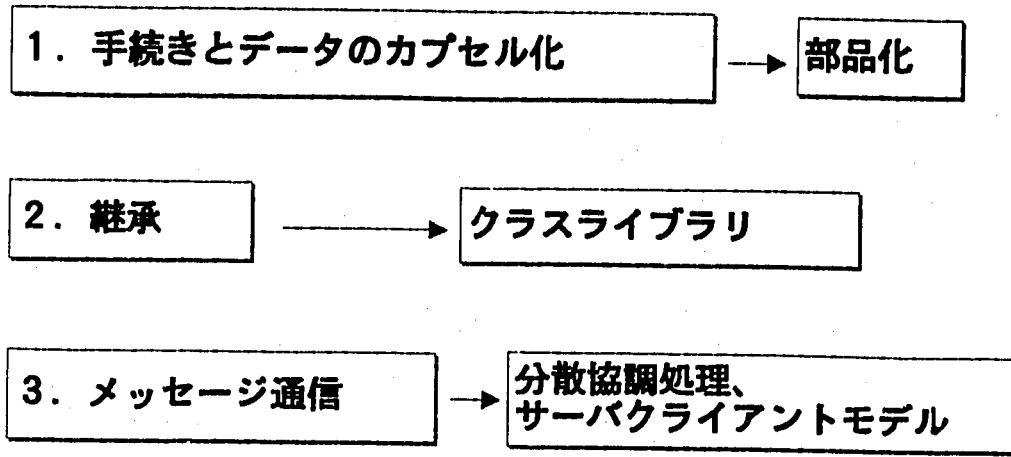


Fig.16 Characteristics of Object Oriented Program

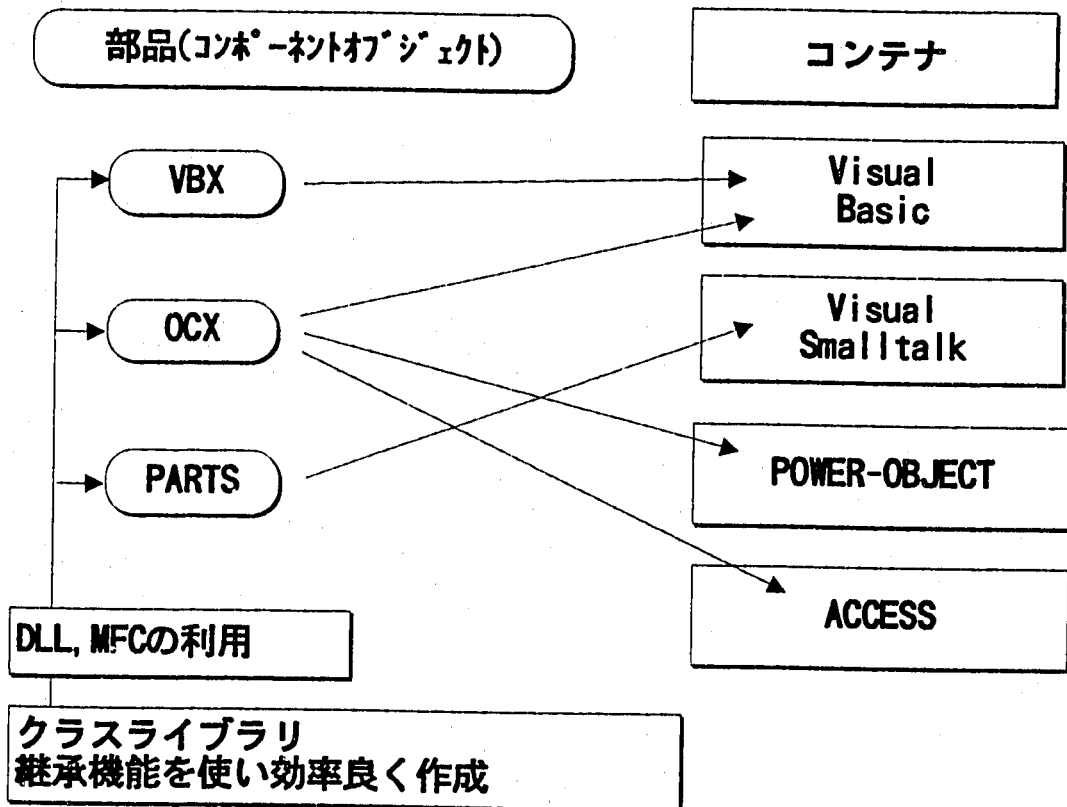


Fig.17 Examples of Componentware

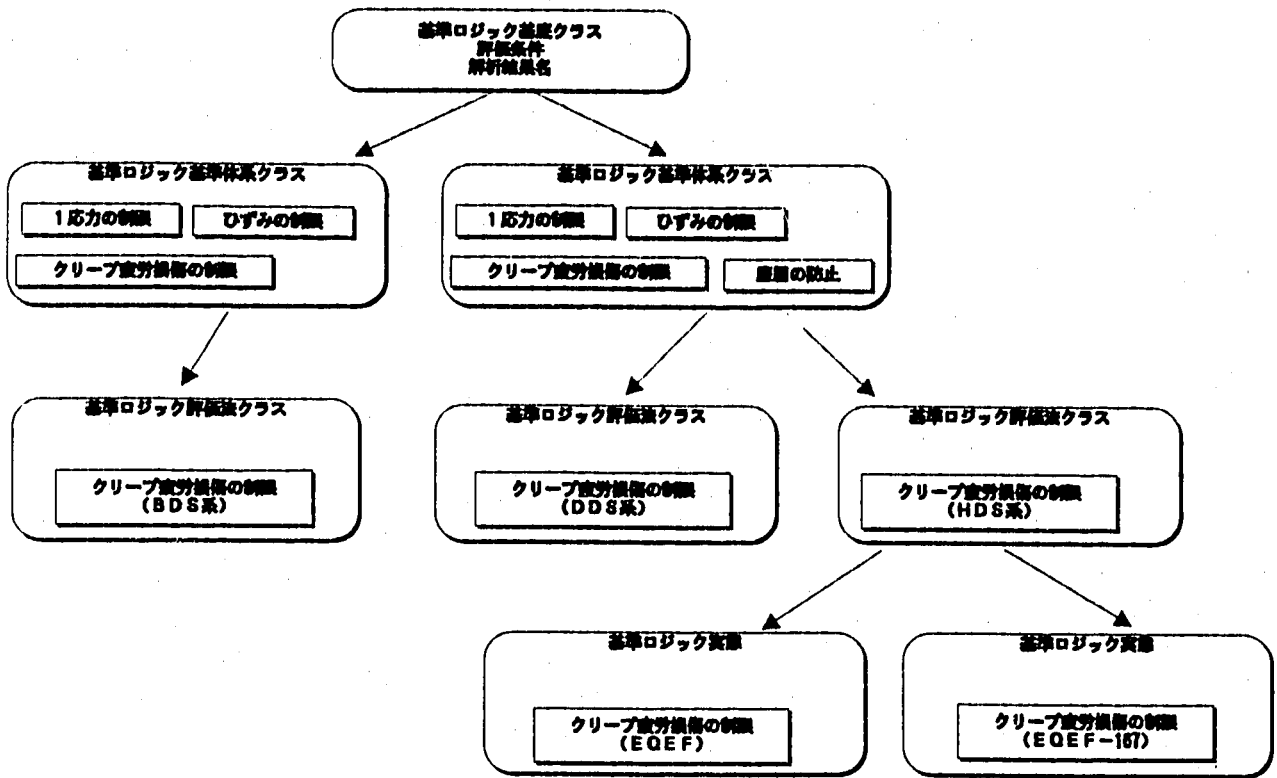


Fig.18 Class Library for Logical Frame of Design Standard

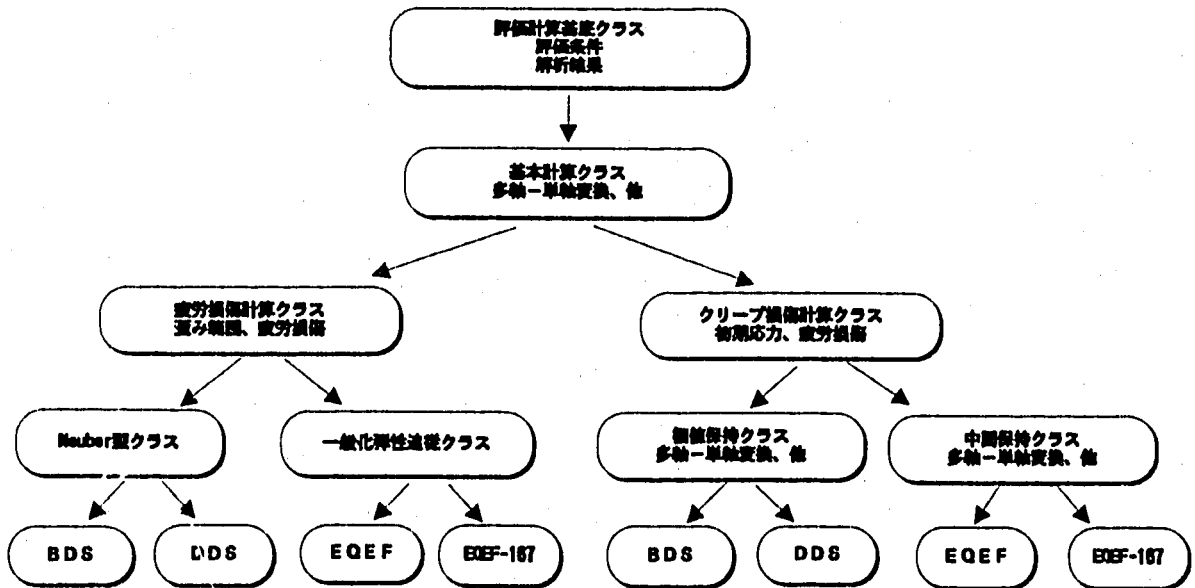


Fig.19 Class Library for Procedures of Design Standard



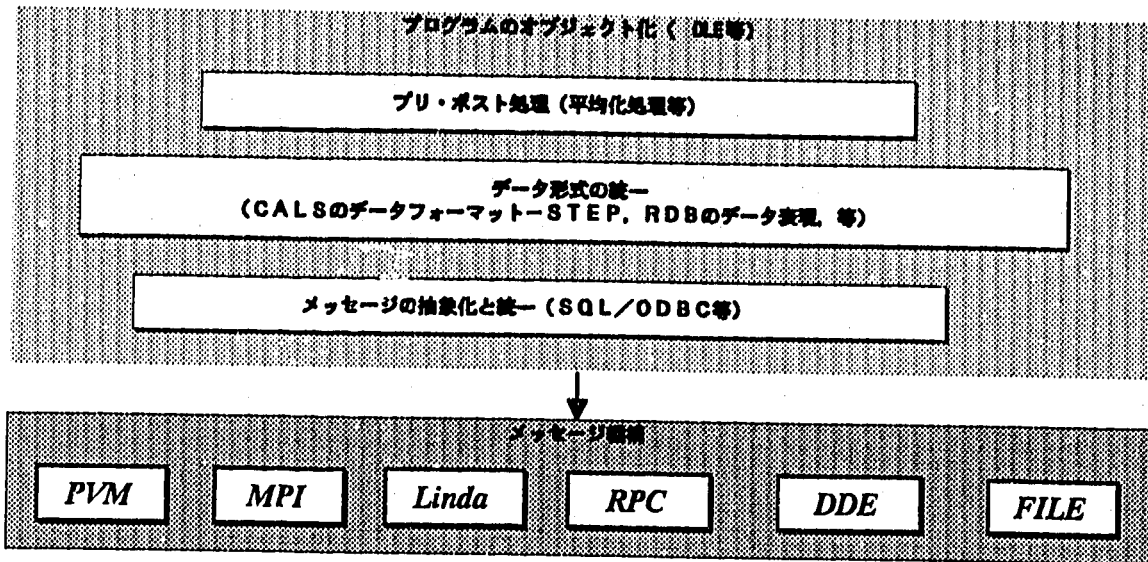


Fig.20 Unified Message Passing

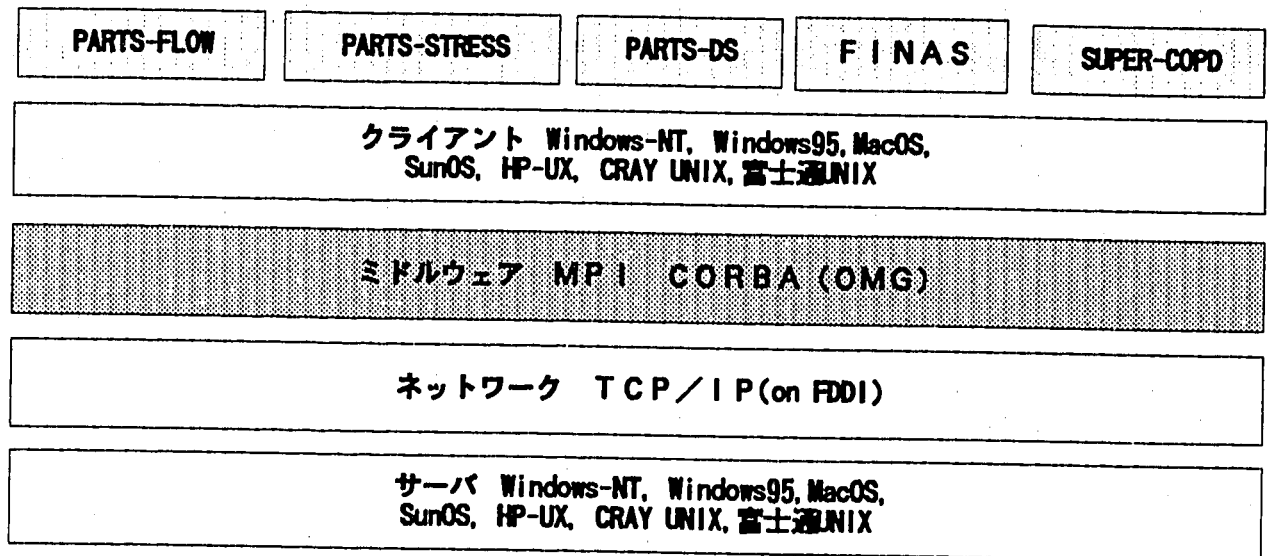


Fig.21 Three Layers Network System

## 5. 設計例題による試計算

Fig. 5で取り上げた設計例題に対する試計算結果を紹介する。Fig. 22のヘッドアクセス型高速炉プラント[3]の高応力部であるホットレグ配管を評価対象とし、典型的な熱過渡条件である手動トリップ時の、冷却材温度変化と発生応力の関係を評価した。評価パラメータは図中に示すように、トリップ時のポンプ流量半減時間、配管板厚、及び配管の材質である。これらのパラメータにより、板厚内外面の温度差と温度差に応じて生じる発生熱応力が変化する。Fig. 22下部に結果を示す。本グラフは、主要構造部位であるホットレグ配管の過渡熱応力に対する、ポンプ流量半減時間の影響と、板厚及び材料の影響を比較したものである。

図の横軸は、無次元温度変化速度の逆数を表しており、右にいくほど、流体の温度変化速度は小さくなる。縦軸は、熱過渡によって生じる配管の内外面温度差の最大値であり、上にいくほど過渡熱応力が大きくなる。

316FRのラインにおいて、ポンプ流量半減時間が20秒から7秒になると、流体温度変化速度は小さくなると同時に、配管内外面温度差も小さくなる。また、板厚が70mmから200mmに厚くなるに従い、全体に内外面温度差は大きくなると同時に、流量半減時間に対する感度は鈍くなることが分かる。

さらに、材質による差であるが、Mod. 9Cr-1Moは316FRに比べると、発生温度差は全般に低く、許容レベルも高いことから、過渡熱応力という観点からは有利である。

本検討により、板厚、ポンプ流量半減時間、および材料といった、従来比較することが困難であった設計パラメータを直接比較すると同時に、設計者の理解しやすい形でその傾向を示すことができるようになった。

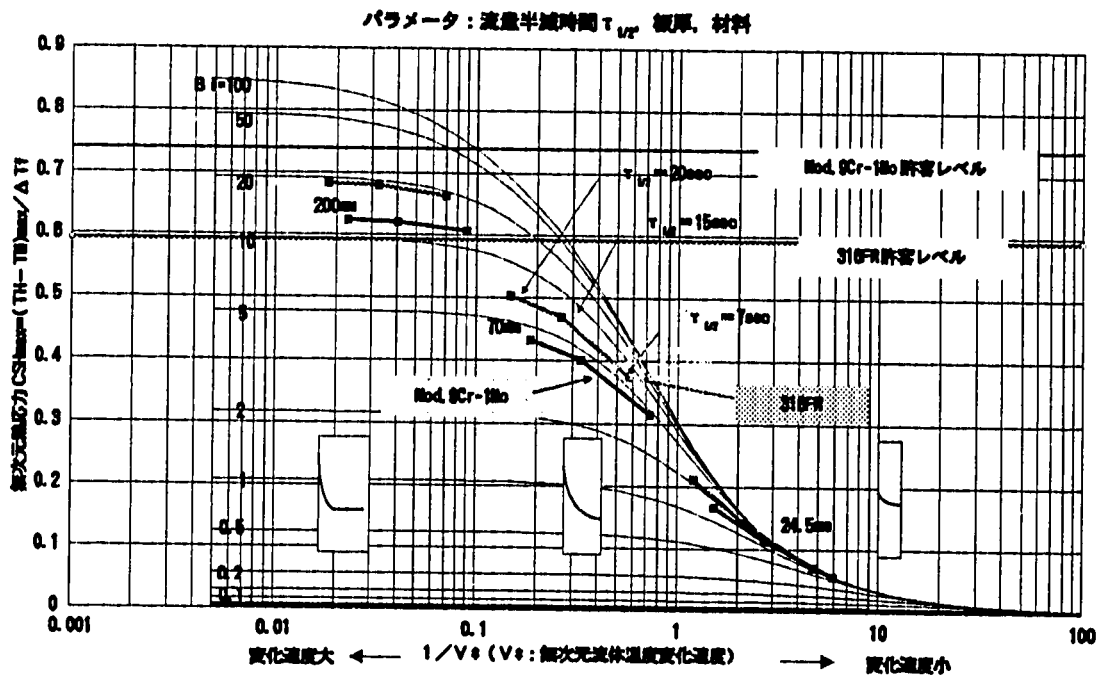
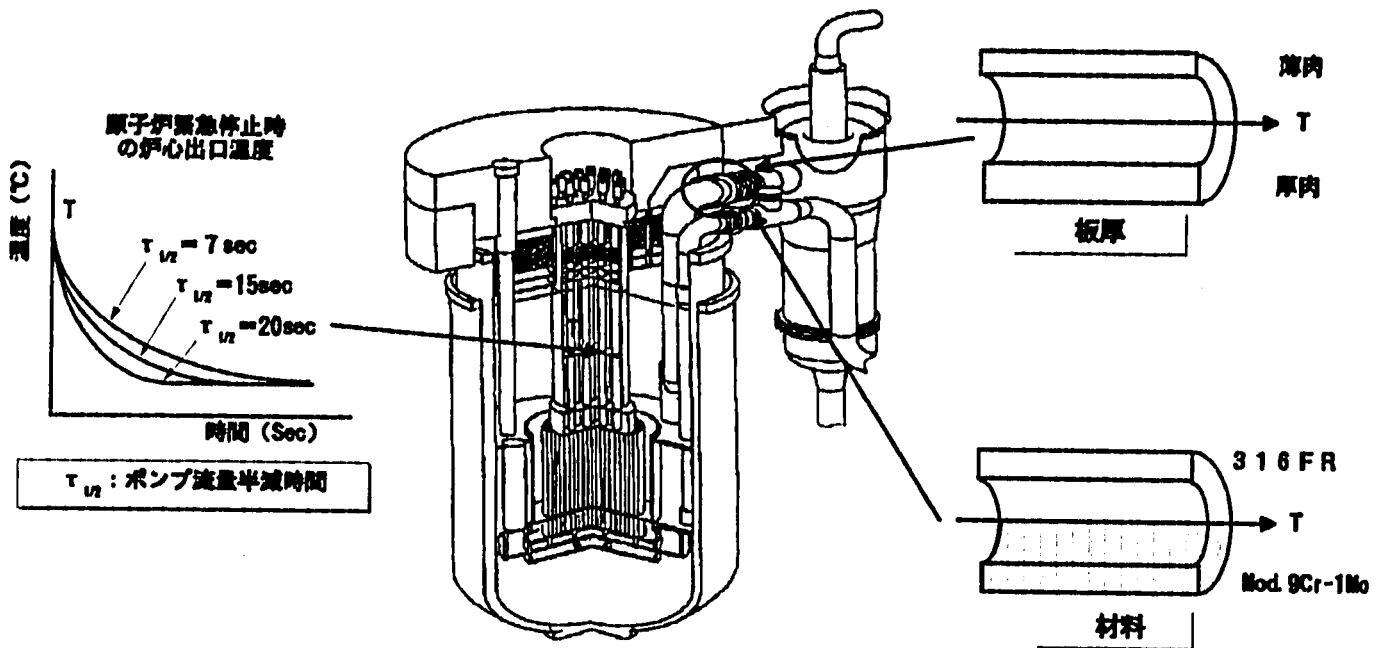


Fig.22 Example Output of PARTS

## 6. 今後の課題

コンポーネントウェアを利用することにより、アプリケーション連携に関しては実現の見通しが得られたため、今後の開発中心は計算の高速化となる。高速化方策の一つとして、ネットワーククラスタによる部品計算の並列処理[25]が考えられる。このため、Fig. 23 に示すように、ネットワーク上に高速のサーバマシン（例えば DEC Alpha）を複数接続し、部品計算をサーバマシンに任せ、Intel マシンは Workbench による部品管理だけを行うクライアントとして振る舞うクラスタシステムを開発する。これによりユーザには机上の Intel マシンが、パソコンのユーザインターフェースを持った、スーパーコンピュータと見えるはずである。

実装には、前出の分散オブジェクト技術を使用することになるが、現在入手可能な OMG に準拠した分散オブジェクト製品として、DEC 社の ObjectBroker[26]がある。DEC 社はさらに分散オブジェクト技術に関して米 Microsoft 社と協力関係にあり、ObjectBroker を Windows 上のアプリケーション連携機能である OLE[27]と統合[28]される計画であるため、Windows マシンをクライアントとして利用しやすくなる。

ネットワークを介した、異なる計算機による分業はそのまま、遠方の事業所や他機関との協力への拡張できる技術であり、米国情報ハイウェイ計画やインタネットの普及により現実化しつつある CALS(Commerce At Light Speed)[29]の考え方とも共通するものである。

将来的には PARTS コードに適切な OPTIMIZER を負荷することにより、ある程度の自動最適化を試みる予定である。高速炉プラントのような複雑で非線形なシステムの最適化は従来の数理的手法では困難であったが、近年知識工学を応用した新しい最適化ツールが登場してきた[30]。特にニューラルネットワーク(NN)[31]と遺伝的アルゴリズム(GA)については、高速シミュレーションとの組合せにより、非線形性に非常に強い最適化が行なえる[32]ものとして期待されていることから、PARTS と組合せることにより熱応力に対する構造最適化への適用を図っていきたいと考えている。

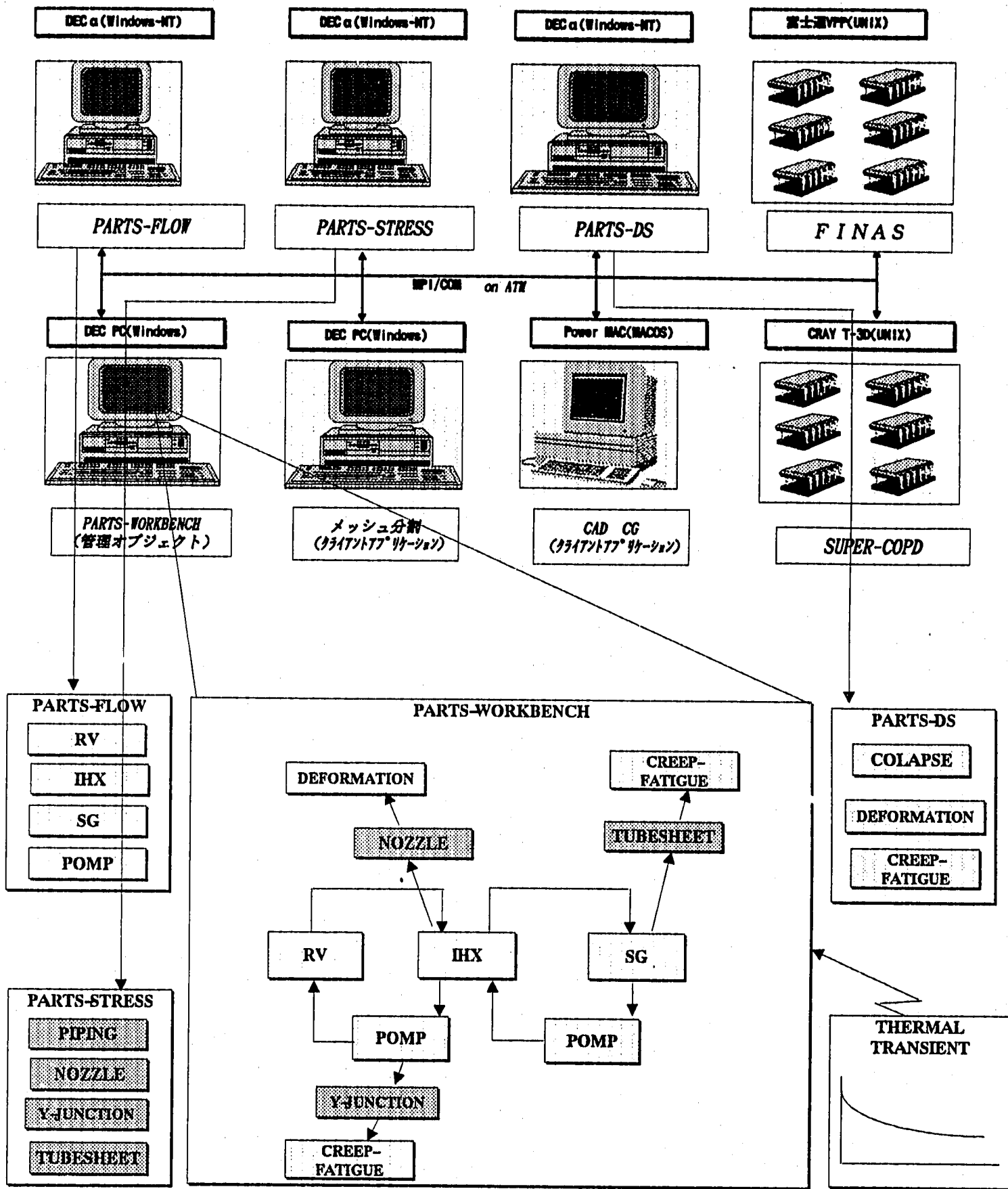


Fig.23 Network Cluster System for PARTS

## 謝 辞

東京大学工学部 吉村助教授から知識工学の構造設計適用に関する幅広い御指導ならびに情報提供を受けましたことに、厚く御礼いたします。また、熱流体解析法については大洗工学センター熱流体技術開発室の大滝副主研に、ニューラルネットワーク技術に関しては大洗工学センター先進技術開発室の吉川副主研から御指導を受けました。ここに謝意を表します。オブジェクト指向プログラミングについては(株)SRAの佐原、酒匂両氏から御教授いただきましたことに、御礼いたします。ネットワーク環境における計算機利用法については、常陽産業(株)細貝氏ならびに日本DEC(株)久保田氏から多くの助言を受けましたことに感謝いたします。また、プログラム実装に関しては、VisualBasicについては常陽産業(株)細貝氏に、Smalltalkについては(株)SRAの西中氏に、C++に関しては(株)情報数理研究所の安達氏にそれぞれお世話になったことに、感謝の意を表します。

## 参考文献

- [1] 植田, 他, (1991), '高速炉高温構造設計評価法の高度化', 機械学会68期通常総会, No. 910-17
- [2] 笠原、他、(1993), '高速炉プラントにおける熱流動-構造設計評価法の開発 (1)平滑部材熱過渡強度因子の影響評価', 原子力学会, 秋の大会 D27
- [3] 動力炉・核燃料開発事業団, (1995) '高速増殖炉研究開発の現状', PNC TN1410 95-001
- [4] 畑村、編、(1990) '実際の設計', 日刊工業
- [5] 石川、他、(1994), '概念設計支援への計算的アプローチ -その展望と課題-', 第12回設計シンポジウム, 704
- [6] 福田、(1990), 'コンカレントエンジニアリング', 培風館
- [7] 植田、他、(1995), 'FBR 構造設計エキスパートシステムの開発', 吉村
- [8] Lucia, A. C., (1993), 'Knowledge Engineering Developments and Applications at ISEI-JRC Ispra', Post SMiRT Sem. N. 13
- [9] Tang, J., (1995), 'An Integrated System for Simulation-Based Reliability Analysis of Mechanical Components, ASME, PVP-Vol. 305
- [10] 星野, (1995) 'コンポーネントウェアが来た', NIKKEI COMPUTER1995. 8. 7
- [11] 鶴岡訳, (1992), 'アラン・ケイ', ASCII
- [12] 岩崎, 他, (1989), 'モジュール型プラント動特性解析コード Super-COPD コード使用説明書', PNC N9520 89-001
- [13] 大滝、他 (1990), 'プラント動特性解析コード Super-COPD の開発', 動燃技報 No. 76, PNC TN1340 90-004
- [14] Stanley, J, F, (1982), 'Partial Differential Equations for Scientists and Engineers', John Wiley & Sons
- [15] 麻生, (1988), 'ニューラルネットワーク情報処理', 産業図書
- [16] 古橋、他, (1993), '熱応力評価法の開発 第4報; 非定常熱応力計算における Duhamel の定理の応用', PNC PN9410 93-165
- [17] Iida, K. et al. (1987), 'Simplified analysis and design for elevated temperature components of MONJU', NED 98, pp305/317.
- [18] 動力炉・核燃料開発事業団, (1986) '高速原型炉第1種機器の自動強度評価システム 利用手引書 REVISION G-1', PNC SN2520 86-001
- [19] 青木, (1994), 'オブジェクト指向分析設計テクニック' ソフトリサーチセンター
- [20] 笠原, 細貝, (1995), 'オブジェクト指向強度評価プログラム/PARTS-DS の開発 Visual Basic によるプロトタイプの実成', PNC
- [21] DIGITAL, (1993), 'Smalltalk V Programming Reference'
- [22] Microsoft, (1993), 'Microsoft Visual Basic Ver2.0 Programming Guide'

- [23] Microsoft, (1995), 'Microsoft Visual C++ Ver2.0 Programming Guide'
- [24] 日経データプロ・ソフト, (1992), '次世代の分散システムをオブジェクト指向で支える標準, CORBA', NS1-1-851
- [25] Carriero, N., et al. (1990), 'How to write Parallel Programs', MIT Press
- [26] 日本DEC, (1995) 'ObjectBroker入門',
- [27] Microsoft, (1995), 'OLEコントロールの活用', Microsoft System Journal No. 37
- [28] 日本DEC, (1995) 'Common Object Model 分散オブジェクト環境の統合'
- [29] 石黒, 他, (1995), 'CALS 米国情報ネットワークの脅威', 日刊工業
- [30] 日本機械学会(1993), '新しい最適化手法とその応用', 講習会 No. 930-59
- [31] 吉川, (1995), 'ニューラルネットワークの微係数出力手法の開発', PNC ZN9410 95
- [32] Yamakawa, H., (1995), 'Emerging International PVP Technology Part I Optimum Structural Design at Initial Design Stage', ASME, PVP-20