研究論文

1017. FBR構造設計エキスパートシステムの開発

植田 浩義^{*1}, 宇野 昌嘉^{*2}, 小川 博志^{*2},
島川 貴司^{*2,†}, 吉村 忍^{*3}, 矢川 元基^{*4}

(1994年 4月12日 受理), (1994年 7月25日 再受理)

Development of Expert System for Structural Design of FBR Components

By Hiroyoshi UEDA, Masayoshi UNO,
Hiroshi OGAWA, Takashi SHIMAKAWA,
Shinobu YOSHIMURA and Genki YAGAWA

The characteristics of structural design processes for nuclear components can be summarized as follows: (1) Many engineers belonging to different fields are working in parallel, exchanging a huge amount of data and information. (2) A final solution is determined after a number of iterative design processes. (3) Solutions have to be examined many times based on sophisticated design codes. (4) Sophisticated calculation methods such as the finite element method are frequently utilized, and experts' knowledge on such analyses plays important roles in the design process. Taking these issues into consideration, a new expert system for structural design is developed in the present study. Here, the object-oriented dataflow mechanism and the blackboard model are utilized to systematize structural design processes in a computer. An automated finite element calculation module is implemented, and experts' knowledge is stored in knowledge base. In addition, a new algorithm is employed to automatically draw the design window, which is defined as an area of permissible solutions in a design parameter space. The developed system is successfully applied to obtain the design windows of four components selected from the demonstration FBR structures.

KEYWORDS : expert systems, FBR type reactors, structural design, finite element method, object-oriented, design window, knowledge base, data processing

I. 緒 言

原子力機器の設計には、原子核工学、伝熱工学、流体力学、材料力学、システム工学などの結集が要求される。また、原子力機器には高い信頼性が要求されることから、各分野における最先端の技術を駆使して、多くの専門家の知識とマンパワーのもとに設計が行われている。これまで、専門家の知識やノウハウが大きく介在する様々な分野において、作業をコンピュータに代行させるエキスパートシステムの開発が行われてきた。エキスパートシステムの開発は、はじめ故障診断や運転

支援などの分野で成功を収め、いわゆる診断型のシステムがすでに実用化段階を迎えている⁽¹⁾⁽²⁾。また、それらと比べて設計の分野は難しい点があったものの、基礎研究も進み、機器配置や配管配置などの設計型エキスパートシステムが次第に開発されるようになってきた⁽³⁾⁽⁴⁾。しかし、有限

^{*1} 東京電力(株) (Tokyo Electric Power Co., Inc.)

^{*2} 川崎重工業(株) (Kawasaki Heavy Industries, Ltd.)

^{*3} 東京大学 人工物工学研究センター (Res. into Artifacts, Center for Eng., Univ. of Tokyo)

^{*4} 東京大学 工学部 (Fac. of Eng., Univ. of Tokyo)

[†] 現在、(株)電力中央研究所 (Central Res. Inst. of Elec. Power Ind.)

要素解析⁽⁵⁾などを多用する構造設計の分野では、エキスパートシステムの開発事例はほとんど見られない。

吉村,矢川らは、これまでオブジェクト指向データフロー手法に基づく構造設計用エキスパートシステムを開発し、核融合炉第1壁の構造設計に適用し、その適用性の見通しを得た^{(6)~(12)}。本研究では、そこで開発されたシステムの機能を拡張し、実機における設計知識を組み込むことにより、実機の構造設計に適用可能なエキスパートシステムを構築した。さらに、総合的な設計の意志決定を支援するために、設計パラメータ空間における設計成立範囲(デザインウィンドウ)^{(11)~(16)}を導出するアルゴリズムを組み込んだ。本システムを現在、実証炉の概念設計段階にある高速増殖炉(FBR)のいくつかの構造部位に適用し、本システムが構造機器のデザインウィンドウの探索に有効であり、得られたデザインウィンドウが設計合理化に対する客観的な判断基準を与えられることを示した。

II. 従来の構造設計手法の課題と 本研究のねらい

FBRの構造機器においては熱応力が支配的であり、機器の形状・寸法は熱過渡条件に支配される。一般に、FBRにおいては、熱応力の低減の観点から、薄肉構造が有利となるが、機器の大型化に伴い耐震上の要求が厳しくなると、ある程度の肉厚が要求される。すなわち、FBR機器の構造設計においては、耐熱設計と耐震設計のバランスから最適設計点が決定される。1つの構造部位に対してその一連の作業を行うのに、多分野の専門家集団と数100人日のマンパワーを費やしている。その理由としては、

- (1) 多くの専門家集団が互いにデータの授受を行いながら並行して作業を進めていること
- (2) 高度な設計基準による評価が必要なこと
- (3) 有限要素法などの解析が多用されており、そこに専門的な知識やノウハウが大きな役割を果たしていること
- (4) 所定の解を得るまでに多数の繰り返し設

計作業が必要なこと

などが挙げられる。このため現状の構造設計のゴールは、与えられた熱過渡条件に対して構造健全性が確認できることに留まっており、その設計解を得るに至った熱過渡条件や構造形状・寸法の最適性・合理性に関する検討はほとんど行われていない。

現在、実証炉の概念設計段階にあるFBRにおいては、軽水炉に競合し得る経済性を達成するための設計合理化が大きな命題とされている。そこで、本研究では、原子力機器の設計作業の特徴を考慮し、一連の構造設計の流れを自動的に処理するためのエキスパートシステムを開発する。このシステムを利用することにより、繰返し設計作業を現実的な時間およびマンパワーのもとに行えるようになり、最適設計解を得ることが可能となる。また、本研究では、主要設計パラメータが作る許容設計空間内における設計成立範囲(デザインウィンドウ)^{(11)~(16)}を自動的に探索するアルゴリズムもシステムに組み込んだ。現在、構造設計は一連の設計作業の下流工程に位置づけられているが、本システムを利用することにより、各種設計パラメータの感度評価を容易に行えるようになり、さらに上流工程の意志決定に判断基準を与えることも可能となるなど、FBRの設計合理化に寄与することが大いに期待される。

III. システムの概要

本研究で開発したエキスパートシステムにおける処理の流れを第1図に模式的に示す。本章では、FBR構造機器の設計に特有の、互いに複雑に絡み合った設計手順を、柔軟性および拡張性を保持しながらシステム化するために、「オブジェクト指向データフロー手法」を採用した^{(6)~(16)}。また、各オブジェクトの中ではそれぞれに最適な知識表現が採用され、それらの情報を一元的に制御する必要があるため、情報の制御手段として「黒板モデル」⁽¹⁷⁾を併せて採用した。さらに、各機器に対する形状・荷重条件・評価基準の変更にも柔軟に対応でき、結果を容易に判断できるように「マンマシンインタフェースとグラフィックスによる結果表示機能」を充実させた。

第1図 本エキスパートシステムにおける処理の流れ

原子力機器の構造設計においては、「解析に基づく設計」が行われる。解析方法としては有限要素法解析⁽⁵⁾が多く用いられるが、要素分割やその他の入力データの準備に多くのノウハウとマンパワーが費やされる^{(5)(18)~(21)}。このため詳細解析機能をエキスパートシステムへ組み込むためには、解析の自動化も重要なポイントとなる。本システムでは、矢川、吉村らが開発した「あいまい知識処理手法と計算幾何学による自動要素分割プログラム」^{(22)~(25)}とFBRの構造設計に必要な機能を有する汎用有限要素法解析コードMARC⁽²⁶⁾を組み込んだ。また、本研究において、MARCの入力データ作成を支援するシステムも開発しモジュールとして組み込んだ。

FBRの設計評価は本来、高温における材料の非弾性挙動を考慮した複雑なものとなる。この部分についても自動化するため、現在研究開発が進められてきている高温構造設計方針⁽²⁷⁾⁽²⁸⁾に基づく評価プログラムを組み込んだ。評価結果が設計許容値を満足しない場合、どの設計パラメータをどの程度変更するばよいかについては、現在のところ経験豊富な設計者の判断によるところが大き

い。そこで、このような設計ノウハウを知識ベース化した「設計変更知識ベース」を開発し、設計変更プロセスも自動化した。

さらに、デザインウィンドウを自動的に探索するモジュールを新たに開発した。

IV. システム構築のための要素技術

1. 分散協調作業の処理

(1) オブジェクト指向データフロー手法

性質の異なる個々の作業の流れをシステム化するために有効な知識工学手法として、オブジェクト指向データフロー手法^{(6)~(16)}がある。本手法では、個々の作業に対応するオブジェクトを、全体の作業の流れを考慮することなく、それぞれ独立に記述できる点が特長であり、複合的な設計の流れとの対応も考え易い。新しい作業項目を追加したり、不要な項目を削除する場合には、他のオブジェクトとのデータの受け渡しの整合性を取りさえすればよく、柔軟なシステムの構成が可能である。さらに駆動エンジン自身は、蓄えられる知識に対して完全に独立となるように記述されてお

り、高い汎用性を有している。

オブジェクトの記述形式を第2図に示す。図(a)はオブジェクトに記述される内容を一般的名称で示しており、図(b)はその具体的なリスト表現を示す。各オブジェクトはフレームの形式で記述され、入力・出力・機能・階層の4個のスロットで構成されている。オブジェクトおよびスロット中のデータは、名前(宛名)を有しており、これはメッ

セージの送受信に使用される。各オブジェクトの動作は次のように行われる。

(自分 の 名前	----	フレーム名	} スロット
親 の 名前	----	上位フレーム名	
(子供 たち の 名前)	----	下位フレーム名 (複数可)	
(ルール の 集合)	----	知識の集合 (複数可)	
(メソッド の 集合)	----	手続きの集合 (複数可)	

(a) 内容

```
(window_manager
  (input
    (data_x (x data) (type dds_bds_exec)
      () ready (input_group 1)) )
    (data_y (y data) (type dds_bds_exec)
      () ready (input_group 1)) )
  (output
    (parameter_file ("dummy" file) (type parameter_change) )
    (code_name ("dds_bds" code) (type report_exec) )
  )
  (func
    (window_serch (x y) lisp_internal) )
  (group_level 30) )
```

(b) リスト表現

第2図 オブジェクトの例

入スロットの初期状態は「NOTREADY」となっている。受信情報を受け取ると、これが「READY」に変化する。すべての入スロットの状況が「READY」になると、入力情報が機能に渡され、同時に機能に動作指令を出す。機能の動作結果は出力スロットに現れ、これが送信情報としてオブジェクト名とデータ名が一致するオブジェクトに送られる。その後、入スロット状況はすべて「NOTREADY」となり、次の動作を待つ。作業の終了は、最上部の階層のオブジェクトにより判断され、このとき与えられた対象に対する設

計が完了する。第1表に、中間熱交換器に関するオブジェクトを例として示す。

(2) 黒板モデル

設計型エキスパートシステムでは、一般にプロダクション・ルールによる知識表現に加えて、ネットワークやフレームによる知識表現を個々のオブジェクトの性質に応じて使い分ける。また、それぞれの知識表現に対応する推論エンジンを作成することにより、知識工学における多重世界表現として実際の設計をシステム表現する。このように異なる世界で別々の作業タスクを実施するシ

第1表 オブジェクトの例(中間熱交換器関連)

オブジェクト	内 容
(1) デザインウィンドウ推論	(9)の結果を受け、デザインウィンドウを推論する。
(2) 設計値変更	(1)を受け、設計パラメータの値を変更する。
(3) 自動メッシュ生成	(2)のパラメータにより、メッシュを自動生成する。
(4) MARC入力データ作成	(2),(3)よりMARCの入力データを作成する。
(5) MARC実行	(4)の入力データからMARCを実行する。
(6) 高温構造評価入力データ作成	MARCのポストファイルから高温評価用入力データを作成する。
(7) 高温構造評価実行	(6)の入力データから高温構造評価を実行する。
(8) 座屈評価実行	(2)のパラメータにより、座屈評価を行う。
(9) 評価の総合判定	(7),(8)の結果をもとに、設計成立性の総合判断を行う。

システムにおいて、共通の情報を一元化することが必要である。そこで、本設計システムでは、黒板と呼ばれる大域的なデータ格納場所を有する黒板モデル⁽¹⁷⁾を採用した。第3図に実装された黒板モデルの概念を示す。黒板にはマンマシンインタフェースから得られる情報、例えば、構造の名称・ファイル名・タイトルや、各パラメータの名称・単位・初期値・材料名などの一般的な情報が書き込まれる。黒板モデルに基づく推論は、黒板に書かれた事柄と各サブシステムで利用される知識とのパターン照合に基づくパターン駆動性を用いて行われることとなり、異なる世界といえども整合性の取れた推論を実施できる。

第3図 黒板モデルの概念

2. デザインウィンドウの自動探索

(1) 経験的設計変更に基づく設計成立点の導出

初期の設計パラメータはほとんどの場合に設計条件を満足しない。このため、現実の設計作業では、一つの設計成立点を得るまでに多くの試行錯誤やパラメトリックスタディが必要となる。一般に、構造設計において設計成立の可否の判定は、設計基準で定められた制限値を満足するかどうかを調べることによりなされる。すなわち、すべての評価項目の許容値に対する裕度

$$\text{裕度} = 100 \times (1 - \text{発生値} / \text{許容値}) \quad (1)$$

を計算し、それらの裕度がすべて正值になった時に設計成立と判定する。ある時点で、ある裕度が負である場合には、設計パラメータをデザインウィンドウに近付けるように設計変更する。本システムでは、専門家からのヒアリングを通じて設計変更に関する知識を収集し、確信度付きのプロダクション・ルール^{(6)~(17)}として蓄積し、この知識ベースを用いて設計変更量を推論する。

(2) 2次元デザインウィンドウの自動探索

上記の手法を用いて求められた設計成立点(一つの満足設計解)から最適設計点(最適解)に至る判断基準として、現実のFBR構造設計においては明確なものは現在のところ提唱されていない。そこで本システムでは、設計許容空間内での満足解の存在領域であるデザインウィンドウ^{(11)~(16)}を出力できるようにした。

デザインウィンドウの導出法としては、境界のみを探索する境界探索法^{(11)~(16)}をはじめとして、デザインウィンドウ内の設計目的関数の分布を同時に求められる体積膨脹法や全領域探索法⁽²⁹⁾⁽³⁹⁾、また階層型ニューラルネットワーク⁽³¹⁾を用いる効率的な手法⁽²⁹⁾⁽³⁰⁾などが提案されている。本システムにおいては、このうち適用が容易であり、探索効率が良い境界探索法を採用した。

デザインウィンドウは、設計パラメータによって構成される多次元空間内で設計が成立する閉領域として定義される。境界探索法はもともとコンピュータ画像処理の分野で2値画像の境界を求めるために使われているアルゴリズムである⁽³²⁾。境界探索法の手順を第4図に示す。そのアルゴリズムは、次のようになる。

- (1) はじめに設計パラメータの作る探索空間を格子空間とみなし、その格子幅を探索のための基本ステップ幅とする。
- (2) 探索の開始点とそこでの探索方向を定める。
- (3) 探索方向に対して、右・前方・左・後方の格子点の順で設計成立の可否を評価する。
- (4) 設計の成立点を見つけたら、その格子点に探索の軸を移す。
- (5) (3)と(4)を繰り返す。
- (6) 現在の探索の軸と探索方向が、探索開始

第4図 境界探索法(2次元デザインウィンドウの場合)

点のそれらと同一であったら、デザインウィンドウの境界を反時計周りに1周したこととなるので、探索を終了とする。

なお、探索効率に影響を与える探索範囲や探索の刻み幅は本来、デザインウィンドウのサイズとの兼ねいで決まるものであるが、本システムでは、デザインウィンドウ探索に係わる経験的な知識として、2つの設計パラメータの最大と最小の範囲と各刻み幅が蓄えられている。

(3) 自動有限要素分割

本エキスパートシステムのように、構造解析(有限要素解析)を大幅に取り込んだシステムでは、計算効率と精度の両面から質の高い有限要素の自動生成が重要である。そこで、矢川、吉村らによって開発されたあいまい知識処理手法と計算幾何学に基づく自動要素分割手法^{(22)~(25)}をモジュールとして導入した。本手法は、要素の粗密制御をあいまい知識処理手法⁽³³⁾を用いて行い、計算幾何学手法⁽³⁴⁾⁽³⁵⁾を用いて節点発生および要素生成を総節点数 n に比例する速度で高速に実行するものである。要素生成のための入力情報としては、解析上重用度の高い場所に、ある特定の節点パターンの配置を指定すればよい。さらに、節点パターンの一つとして、ある直線に沿って節点を発生させるパターンも用意しており、任意形状に対して構造評価における応力評価断面を考慮した要素分割を容易に生成できる。

V. システムの構築

1. 知識ベースの生成

FBRプラントを対象に知識ベースを構築するため、まず知識をプラント-機器-部位の階層構造に分類した。機器構造の知識ベースは次のようなものである。

- (1) 事例ベース知識： 対象構造名、機器種別、耐震クラス、設計事象名を単語の羅列としてまとめたもの。
- (2) ネットワーク知識： 構造機器ごとに設計評価項目や設計手順が異なることを考慮し、それらのオブジェクトをリスト形式で蓄積したもの。
- (3) 設計範囲の知識： 設計上意味のある設計パラメータの範囲を経験値として蓄積したもの。
- (4) 設計変更知識： 単純な(if~then+確信度)形式の設計変更のためのルールの集まりであり、構造力学の専門家から収集したもの。
- (5) 評価知識： 設計結果の評価に関する知識であり、設計の目的関数を集めたもの。

具体的には、これらの知識ベースを、計算機ファイルシステムのディレクトリー構造を活用して対象部位の階層化を実現しながら構築した。これは分散処理型の大規模システム⁽³⁶⁾⁽³⁷⁾への展開を念頭においたものであり、各機器構造が1つの

計算機の1つのディレクトリーにデータベースや知識ベースをすべて保存できる。

2. 黒板の生成

黒板には、行単位で雑多な事柄が書き込んであり、設計の下流においては、黒板を通して上流での情報が参照され、全体として作業の方向性が一致した設計が進行する。黒板にはファイル名が定められており、ユーザーインタフェースから取り込まれた情報や推論の結果等が、名称などの単語や機能名および参照ファイル名の雑多な形式で付け加えられる。黒板に書き込まれた要求項目や推論結果は、名称のパターンマッチングを通して次の作業に反映される。

3. 設計ベースの生成

構造解析を実施する上で必要となる知識ベースや構造解析の入力データ等は、解析実行用の1つのディレクトリーにすべて集められている。なお、推論エンジンや構造解析機能、材料データベース等の機器構造設計において共通のものは別に保存してある。

設計型エキスパートシステムが稼働し、設計作業が繰り返される中で、変更されるのは設計パラメータである。設計パラメータは、名前の決められたファイルとして実現されており、前述したデザインウィンドウは、この設計パラメータの一連のリストとなる。

以上のように、本エキスパートシステムにおける設計ベースは、各機器構造特有の知識とデータ、すべての機器構造の設計に共通の機能および設計パラメータファイルから構成されている。

4. インタフェース

本エキスパートシステムに備えられたインタフェースには、大きく分けて2種類のものがある。1つは解析コード間のデータインタフェースであり、もう1つはマンマシンインタフェースである。

データインタフェースは、解析の自動化のためにコードごとに作成される入力データ自動生成部と出力結果の自動ポスト処理部である。マンマシ

ンインタフェースは、標準フォーマットの形状データや荷重データおよび解析結果等をユーザーに表示し、システム操作の支援を実施するものである。

5. 解析プログラム

FBRの各構造機器は、高温で熱応力が厳しい条件で使用されることから、解析プログラムは材料の非弾性挙動を考慮できるものでなければならない。また、配管、シェル構造、連続体構造などの種々の形状を解析できなければならない。そこで、本システムでは、構造解析用として汎用有限要素法解析コード MARC⁽²⁶⁾を組み込んだ。MARCの入力データの作成においては、解析プログラム独自のノウハウが必要となることから、MARCのための入力データ作成支援モジュールを作成し、本システムに組み込んだ。MARCの出力データも独自のフォーマットを有しているため、出力を本エキスパートシステムの標準形式に変換する部分をオブジェクトとして作成した。

6. 評価コード

デザインウィンドウを導出するためには、構造の設計裕度を算出する必要がある。材料の非弾性挙動を考慮した構造解析を実施した場合には、その裕度の判定は比較的容易に行えるものの客観性に問題がある。また、一般には弾性解析に基づく構造健全性評価が行われるので、この場合には材料の非線形応答を弾性解析結果に基づき評価するための手法が必要となる。そのため、弾性解析に基づき材料の構造健全性の評価を客観的に行うための技術指針として、各種の設計基準、設計方針が提案されている。

わが国では、原子力機器用に告示501号に加え高速原型炉高温構造設計方針(BDS)⁽²⁷⁾が整備され、室温からクリープ領域に至る温度域の設計をカバーしている。また、FBR実証炉用に高速実証炉高温構造設計方針(DDS)⁽²⁸⁾の策定が日本原子力発電(株)において行われている。高温構造設計評価の基本的な流れはいずれの設計基準においても共通である。個々の基準の差異は、対象とする評価温度・材料、非弾性挙動を予測する手法や許

容値体系を構成する材料のロットの違いにある。そこで本エキスパートシステムにおいては、告示501号、BDSならびにDDSいずれの評価コードも用いられるようにした。これらの設計コードを本システムに組み込むにあたり、評価断面の選定、結果の設計裕度への換算等の前後の処理機能を新たに作成した。また、形状の制限や座屈の評価についても、それぞれの機能をコードとして作成した。

7. システム環境

本システムは汎用的な EWS である Sun SPARC Station2(メモリ32MB, ディスク2GB)上に構築した。OSはSunOS4.1.2, Window環境は日本語Open Window Ver.2.0.1, グラフィックスはXlibを用いた。解析プログラムはSun Fortran Ver.1.4, インタフェースはC言語, 知識工学プログラムはKCLで記述されている。

VI. FBR構造機器設計への適用

1. 問題設定

本研究で開発したシステムのFBR実機への適用性を検証するために、設計対象として、第5図に示すように、原子炉容器液面近傍、中間熱交換器上部管板外胴付根部、トップエントリー配管エルボならびにトップエントリー配管Yピースの4部

第5図 解析モデル

位を選定した。各部位はFBR機器としての重要性のみならず、本エキスパートシステムの汎用性を検証する観点から選定されたものであり、その特徴を第2表にまとめて示す。

第6図には、材料、機械荷重、熱過渡条件、床応答スペクトル等をユーザーインタフェースを用いて設定する様子を示す。

第2表 適用対象部位の選定理由

対象部位	実証炉設計の現状	汎用性確認上の特徴
① 原子炉容器液面近傍	せん断曲げ座屈の考慮が必要 告示501号による耐熱評価 応答低減係数を導入した地震時座屈評価法 炉壁保護構造の信頼性検討	軸対称構造 境界不連続問題 境界面移動問題
② 中間熱交換器 上部管板外胴付根部	DDSによる耐熱評価	軸対称構造 管板部は等価物性によりモデル化
③ トップエントリー配管エルボ	「もんじゅ」と比較し、配管の負担するモーメントは大きい 管の評価基準について整備中	3次元構造 Yピース、エルボを含む大規模解析 熱膨脹、熱過渡、地震荷重を配管モデルにより解析
④ トップエントリー配管Yピース	耐熱性は、Yピース部の低温プレナムへの設置で熱応力低減 耐震性については問題なし DDSによる耐熱評価	軸対称構造 構造不連続問題 耐熱・耐震のバランスによる設計 ウィンドウ

第 6 図 設計条件入力のためのインタフェース

2. 解析および評価結果

解析結果は、結果の妥当性を容易に判断できるように、第 7 図に示すように、グラフィックス表示する。同図はトップエントリー配管 Y ピースのある時刻における熱応力分布であるが、この他に温度分布、変形図、温度や応力の時間変化を表示できる。また、解析結果から自動的に評価断面の選定および健全性評価が実施され、最終的な結果としてデザインウィンドウが得られる。

デザインウィンドウの一例として、中間熱交換器上部管板付根部に対して得られた結果を第 8 図に示す。同図は、ナックル部曲率半径を 110mm に固定した場合の、容器板厚 (THICK) およびフィレット部曲率半径 (FILLET) を設計パラメータとしたデザインウィンドウである。同図より、かなり複雑な境界形状であっても、本システムに導入された境界探索法によりデザインウィンドウが求められることが確認される。同図において、デザインウィンドウの FILLET 方向の幅が比較的狭いのは、本設計例では、クリープ疲労損傷評

価の初期応力に関する合理化(いわゆる中間保持の考え方)を取り入れていないためである。この合理化を採用している実際の実証炉の設計では、デザインウィンドウはより広く、設計にはさらに余裕がでるものと考えられる。

第 9 図には、トップエントリー配管 Y ピース部の 2 次元デザインウィンドウ(設計変数は板厚 (THICKNESS) とフィレットの内径 (RADIUS)) 上に設計裕度分布を表示している。このように設計裕度を追加表示することにより、ウィンドウ内のどこに実際の設計点を選ぶべきかについての重要な情報が得られることになる。第 9 図の例では、Y ピース部の厚さを薄くしていくと急激に設計裕度がなくなるので、そのような領域で設計することは避けるべきであるとわかる。逆に、厚さが十分にある限り、ある程度一定の裕度が確保されることがわかる。同図において、裕度を多く残したデザインウィンドウ境界があるのは、製造の難しさや経済性等の観点から、ある寸法で探索を打ち切っているためである。

第 7 図 有限要素解析結果の表示例 (トップエントリー配管 Y ピースの温度解析結果)

第 3 表には、4つの部位のデザインウィンドウを得るのに要したおよその計算時間を示す。ここで注意すべきことは、ここに記載した計算時間は、本システムが自動的に処理した時間であり、

設計条件の指定などにはほとんど時間を要しないことである。この作業を、従来の人手で実施した場合には多数回の有限要素解析を実施していることから、数箇月の時間と労力を必要とするもので

第 3 表 設計に要した計算時間

対象部位	EWS (Sun SPARC Station 2)	備 考	使用 EWS Sun SPARC Station 2 RAM 32MB, HDD 2GB, OS SunOS4.1.2 GUI 日本語 Open Window v2.0.1
原子炉容器液面近傍 中間熱交換器	4.5 h 6 h	2次元軸対象モデル 2次元軸対象モデル	トップエントリー配管 Y ピースの設計ウィンドウ導出例 (DDS と SUS316 による導出)
上部管板外胴付根部 トップエントリー 配管エルボ	21 h	3次元軸対象モデル	計算時間: 7.5 h 設計ウィンドウ格子点数: 51点 推論回数: 71回, ただし, 形状制限により回数が減少 形状制限: $6.0 < \text{Thickness of pipe} < 36.0$ $5.0 < \text{Radius of fillet} < 34.0$
トップエントリー 配管 Y ピース	7.5 h	2次元軸対象モデル	初期設計点: $\text{Thickness of pipe} = 14.0$ $\text{Radius of fillet} = 26.0$

第 8 図 デザインウィンドウの表示例 (中間熱交換器上部管板付根部)

あり、現実的にデザインウィンドウを得るまでには至らない。また最近、ワークステーションの性能向上には目を見張るものがあるので、これらの計算時間は比較的容易に数分の 1 から 1 桁程度は向上するものと思われる。

3. 考 察

(1) システムの実用性

本エキスパートシステムは、FBR 構造設計作業の全体の流れをコンピュータ上に構築したものであり、これにより従来は実現が困難であった繰返し設計作業によるデザインウィンドウを、実用的な時間で自動的に導出できるようになった。第 VI-1 節で設計対象として選定した 4 つの問題は、解析形状や荷重条件に関して実設計と同程度の複雑さを有しており、これらの設計を通じて本シ

テムの実用性を確認することができた。

一般に、設計作業を従来の手続き型の手法で記述しようとする、システムが非常に複雑で大規模となる。一方、今回採用したオブジェクト指向データフロー手法においては、駆動エンジンに共通性があり、また必要なオブジェクトを適当に組み合わせネットワーク形成するのみで、複雑かつ機能構成が異なる設計システムを容易に構築できることが確認された。さらに、このオブジェクト指向データフロー手法の採用により、知識や機能の追加・削除が容易となり、各設計対象に応じた柔軟なシステム構成が可能となった。また、本研究で作成した設計用エキスパートシステムにおいては、あいまい知識処理手法と計算幾何学に基づく自動要素分割法や汎用有限要素法コード MARC の入力データ作成支援モジュールを導入

第9図 デザインウィンドウと設計裕度分布の表示例(トップエントリー配管Yピース)

することにより、有限要素法解析の自動化が図られており、これが本システムの実用性の達成に大きく寄与している。

(2) 設計作業の合理化

本システムの開発の目的の一つは、従来の設計手順では困難であった繰返し設計に基づくデザインウィンドウの自動的な導出にあった。一方、設計作業のエキスパートシステム化により設計の合理化も図られた。“緒言”で述べたように、FBR機器の構造設計においては、1つの構造部位に対して一連の作業を行うのに各種の専門家集団と数100人日のマンパワーを費やしている。一方、本システムを用いて繰返し設計を行いデザインウィンドウを導出すると、第3表に示す程度の時間で結果を得ることができる。

(3) 設計の意志決定

本システムを利用することにより、従来得ることが困難であったデザインウィンドウを自動的に導出できるようになった。このシステムを用いると、各種の設計パラメータの感度評価や設計評価コードの違いによるデザインウィンドウの差異を

見ることも容易にできる。さらに解析・評価作業に費やす時間が合理化された分、設計結果に対する考察や更なる設計の合理化の検討に費やす時間を捻出することができ、構造設計の立場より設計の意志決定に寄与するデータを提供することも可能となる。

VII. 結 言

複雑で高度な数値解析を伴う高速増殖炉の機器構造設計を例にとり、設計型エキスパートシステムの構築手法ならびにその適用性を示した。複雑な設計作業においては、必ず分散協調問題、知識の多重世界表現、不定型データフローを取り扱わねばならない。本研究では、そのための手法として、オブジェクト指向データフロー手法、黑板モデルの知識工学手法を採用するとともに、解析作業の自動化を図り、さらに自動的にデザインウィンドウを導出し、それを視覚的に出力する手法を提案することにより、実構造物への実用性を達成した。

—参考文献—

- (1) 元田 浩, 荻野敬迪, 関水浩一, 篠原慶邦: 原子力誌, **28**(9), 794~805 (1986).
- (2) 北村正晴, 他: 同上, **34**(9), 798~827 (1992).
- (3) 大須賀節雄: 機械誌, **91**(833), 299~302 (1988).
- (4) 赤木新介: 機械学会論文集, **55C**(516), 1848~1856 (1989).
- (5) 矢川元基, 吉村 忍: “有限要素法”, (1991), 培風館.
- (6) 吉村 忍, 矢川元基, 円満字大輔: 鋼構造協会「構造工学数値解析法シンポジウム」論文集, **12**, 157~160 (1988).
- (7) YOSHIMURA, S., YAGAWA, G., MOCHIZUKI, Y.: *Trans. 10th SMiRT Conf., Anaheim, USA*, Vol. N, p. 79~84 (1989).
- (8) YOSHIMURA, S., YAGAWA, G., MOSHIZUKI, Y.: *Eng. Anal. Boundary Elements*, **7**(2), 73~77 (1990).
- (9) YOSHIMURA, S., YAGAWA, G., MOSHIZUKI, Y.: *Proc. 1st Int. Conf. on Supercomputing in Nuclear Applications, Mito, Japan*, p. 462~467 (1990).
- (10) YOSHIMURA, S., YAGAWA, G., MOCHIZUKI, Y.: “*Lecture Notes in Computer Science(Computer-Aided Cooperative Product Development)*”, p. 502~521 (1990), Springer-Verlag.
- (11) YOSHIMURA, S., YAGAWA, G., MOCHIZUKI, Y.: *Trans. 11th SMiRT Conf., Tokyo, Japan*, Vol. SD 1, p. 37~42 (1991).
- (12) YOSHIMURA, S., MOCHIZUKI, Y., YAGAWA, G.: Submitted to *Int. J. Computer-Aided Eng. Software*.
- (13) 吉村 忍, 望月義彦, 矢川元基: 機械学会講演論文集, No.910-79, p. 61~62 (1991).
- (14) UEDA, H., SHIMAKAWA, T., UNO, M., MOCHIZUKI, Y., YOSHIMURA, S., YAGAWA, G.: *Trans. 11th SMiRT Conf., Tokyo, Japan*, Vol. SD1, p. 43~48 (1991).
- (15) UEDA, H., SHIMAKAWA, T., UNO, M., MOCHIZUKI, Y., YOSHIMURA, S., YAGAWA, G.: *Proc. ANS Meeting on Frontiers in Innovative Computing for the Nuclear Industry(AI91), Jackson Lake, USA*, Vol. II, p. 779~786 (1991).
- (16) UEDA, H., UNO, M., SHIMAKAWA, T., YOSHIMURA, S., YAGAWA, G.: *Trans. 12th SMiRT, Stuttgart, Germany*, Vol. SD1, p. 159~164 (1993).
- (17) 大須賀節雄: “知識情報処理”, (1986), オーム社.
- (18) 矢川元基, 吉村 忍: 機械の研究, **39**(11), 1175~1180; **39**(12), 1307~1311 (1987).
- (19) 矢川元基, 吉村 忍: 機械誌, **92**(847), 25~30 (1989).
- (20) 矢川元基, 吉村 忍: 応用数理, **2**(2), 30~55 (1992).
- (21) 矢川元基, 吉村 忍: シミュレーション, **13**(1), 34~46 (1994).
- (22) 矢川元基, 吉村 忍, 中尾和弘, 曾根田直樹: 機械学会論文集, **56A**(532), 225, 232 (1990).
- (23) YAGAWA, G., YOSHIMURA, S., SONEDA, N., NAKAO, K.: *Comput. Mechanics*, **9**(5), 333~346 (1992).
- (24) 矢川元基, 吉村 忍, 中尾和弘, 鶴 大悟: 機械学会論文集, **58A**(551), 243~251 (1992).
- (25) YAGAWA, G., YOSHIMURA, S., NAKAO, K.: *Integrated Comput. Aided Eng.*, in Print.
- (26) MARC User Information Manual Rev. K. 4, MARC Anal. Res. Corp., (1990).
- (27) IIDA, K., ASADA, Y., OKABAYASHI, K., NAGATA, T.: *Nucl. Eng. Des.*, **98**, 305~317 (1987).
- (28) ASADA, Y., UEDA, M., KANAOKA, T., SUKAWA, M., NISHIDA, T.: *Proc. ASME PVP Conf., New Orleans, USA*, Vol. 230, p. 61~66 (1992).
- (29) MOCHIZUKI, Y., YOSHIMURA, S., YAGAWA, G.: *Trans. 12th SMiRT Conf., Stuttgart, Germany*, Vol. SD1, p. 183~188 (1993).
- (30) 望月義彦, 吉村 忍, 矢川元基: 機械学会論文集(C編), **60**, 3649~3656.
- (31) 矢川元基(編): “ニューラルネットワーク(計算力学・応用力学への応用)”, (1992), 培風館.
- (32) 矢川元基, 吉村 忍: “画像処理法”, 第11章 最新応力・ひずみ測定・評価技術, p. 241~263 (1992), 総合技術センター.
- (33) 矢川元基(編): “ファジィ推論(計算力学・応用力学への応用)”, (1991), 培風館.
- (34) ASANO, T.: “*Computational Geometry*”, p.153~195 (1985), North-Holland.
- (35) WATSON, D. F.: *Comput. J.*, **24**, 167~172 (1981).
- (36) 吉岡 顕, 矢川元基, 吉村 忍, 曾根田直樹: 機械学会論文集, **57A**(541), 1964~1972 (1991).
- (37) YAGAWA, G., YOSHIOKA, A., YOSHIMURA, S., SONEDA, N.: *Comput. Struct.*, **47**(3), 407~418 (1993).