

知的原子炉設計システム I R D S の開発

(日本原子力研究所) 土橋 敬一郎、久語 輝彦

1. はじめに

日本の原子力開発路線は軽水炉の高度化と将来的には Na 冷却 MOX 高速炉が続くとされているものの、最近開催された ANP'92、Global'93、ICENES'93 等の国際会議をみるかぎり、より高度の安全性、信頼性や経済性を備えた次世代新型炉開発が要請され、その設計研究は方々で盛んに行われている。原子炉の設計作業は、広範囲の技術分野が必要であり、また、各々の技術分野は、専門化・高度化してきている。このような環境下では多数の専門家が必要であり、個々の設計者が設計作業の全体を把握することや各技術分野間の円滑な情報伝達は困難であり、新型炉の設計作業は効率的に行われているとは言えない。

科学技術庁が策定した A D E S 構想¹⁾ では「原子炉設計作業全体の掌握の困難性及び設計に係わる知的情報等の伝達の非効率性を解決するため、人工知能技術や高速専用コンピュータによる知的情報処理技術を活用し、原子炉施設設計に係わる広範な専門家の知識・経験をコンピュータにより処理可能にする。これらの実現により、設計作業全体の知的統合化を図り、効率的に設計作業を支援するシステム(Advanced Design and Evaluation System for new type reactors)を開発する」と結論付けている。このように新型炉の設計研究を効率的に支援するために、原子炉設計ソフトウェア環境の高度化が要請されてきている。原子炉設計ソフトウェア環境を高度化するために要求されることとして、1) 核、熱水力、材料、構造設計等設計に係わる技術分野の全体をカバーすること、2) 各技術分野間の情報の交換を効率的に行うこと、3) 全体の設計作業を容易に掌握できること、4) 専門家のサポートが必要でないように十分に知的であることが挙げられる。

日本原子力研究所原子炉システム研究室では、A D E S 構想に沿って、A D E S のプロトタイプとして知的原子炉設計システム I R D S (Intelligent Reactor Design System) の開発を進めている。

2. システム設計

2.1 開発目標

本システムでは、いわゆる設計の上流部分を担うことを想定している。すなわち、概念創出や概念設計の段階を想定しており、設計の下流部分である詳細設計以下の段

階は想定していない。本システム開発の最終目標は、新型炉の設計評価支援を行い、新概念構築を支援することに置いている。設計の上流部分を担うことから、あらゆる炉型を取り扱えるようにすること、設計作業の全分野を網羅することが目標である。しかしながら、当面の目標としては、炉心設計の分野（核・熱水力・燃料設計）に範囲を絞ることとした。さらに、非専門家でも容易に新概念の設計評価が可能であるように知能化を行うことも目標である。

2.2 開発方針

- ・ある一つの炉概念の設計情報を‘設計モデル’に集約して収容する。本システムでは、設計対象としている炉心核熱設計に係わるデータの集合体を‘設計モデル’と呼んでいる。この‘設計モデル’を介して各分野間及び各設計ステップ間における情報の伝達や交換を行い、情報伝達の効率化及び設計作業全体の掌握の容易化を図り、炉心核熱設計環境としての統合化を図る。
- ・従来専門家に属人的に蓄積されている知識・経験を知識ベースに蓄え、設計評価、解析法選択・入力作成支援・自動化機能をシステムに組み込む。
- ・一般利用者が容易に使えるように、メニュー選択・マルチウィンドウによる会話形式の駆動としたり、また、幾何形状の入力支援や解析・設計評価の支援のために、画像処理により設計図（解析モデル）の可視化や解析結果の可視化を行う。このようにマンマシンインターフェースを充実させるために、エンジニアリングワークステーション上でシステムを開発する。
- ・用途に応じて必要なコードを組み合わせることでプログラムを構成したり、プログラム（モジュール）の変更・追加が容易であるように、各分野のシミュレーションコードをモジュール化して駆動させる。

2.3 IRDSにおける設計プロセス

IRDSにおける設計プロセスを図1に示す。これは2.2で述べた開発方針に沿って設定したものであり、システム構築の方針の概略を示すものである。図に示すように、IRDSではほとんどの設計ステップにおいて設計モデルを介した情報の受け渡しを行い、設計モデルを中心とした設計プロセスの駆動を行うことになっている。また知識ベースとして、設計や解析に関する知識を知識ベース化し、選択、決定、判断の支援を行う。設計知識ベース（Design KB）は、設計者の要求仕様より炉心概念相当部分の抽出を行い、類似のモデルを設計データベースより検索するものである。解析知識ベース（Simulation KB）は、設計者による対象部品・解析物理量の指示に従い、コード、解析手法、解析モデルの自動設定を行うものである。解析評価知識ベース（Simulation Verification KB）は、解析結果の妥当性を評価するものである。設計

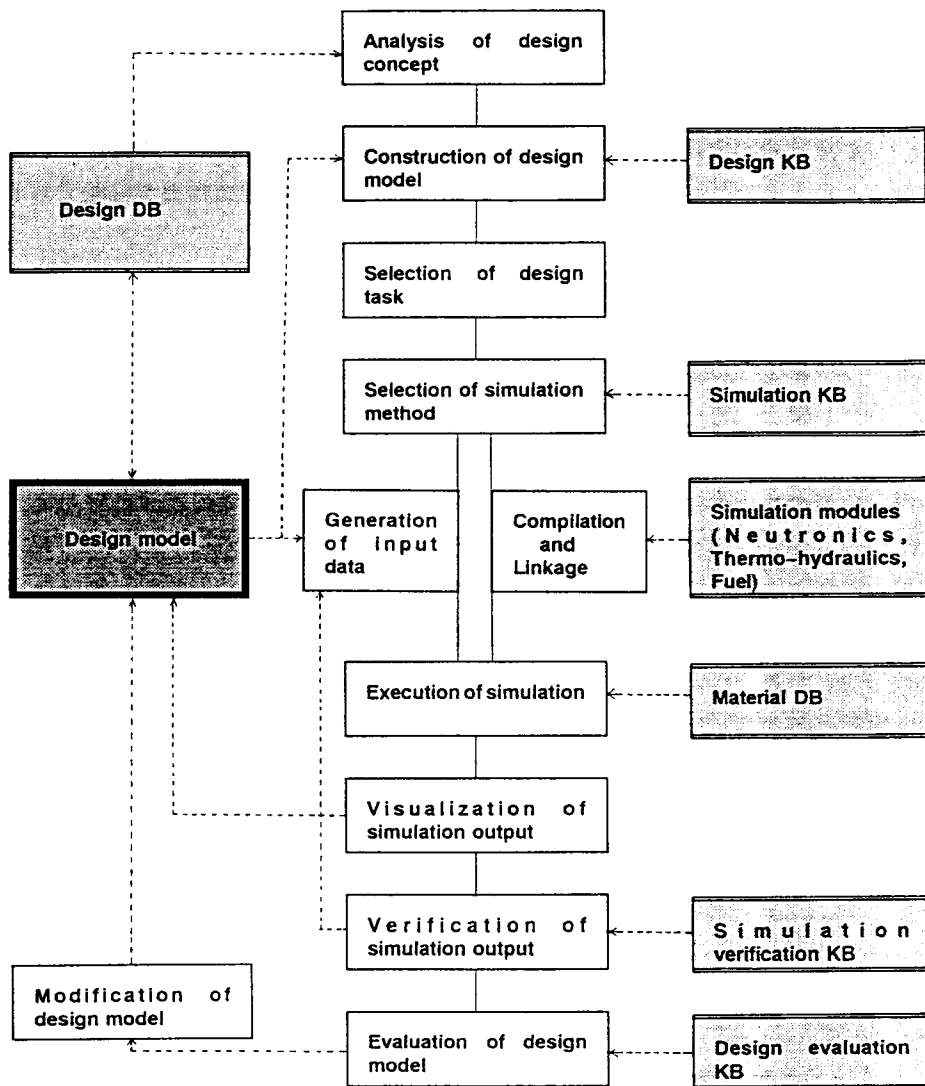


Fig.1 Flow of design process in IRDS

評価知識ベースは、解析結果と要求仕様との比較を行い、設計の成立性を評価し、設計モデルの修正を行うものである。現在、設計ウィンドウ探索システムで使用される設計評価知識ベースの一部を除いて計画中である。

3. システム開発

3.1 システム構成・開発機能

ここではシステム開発の現状について述べる。現在、解析支援の対象とする炉心特

性を主要な静特性に限定している。核特性としては、出力分布特性・反応度係数類・制御特性・動特性パラメータ・燃焼特性、熱水力・燃料特性としては、設計基準項目・温度分布・流量分布・圧力分布・燃焼（照射）特性の解析支援を行っている。

IRDSのシステム構成を 図2 に示す。設計データベースには、いくつかの過去の設計例を収容している。設計者は、過去の設計例から新概念の '設計モデル' の default モデルを選択することになるが、この default モデルを修正することにより、新設計モデルを構築していく。この際用いるのが設計モデル構築モジュールである。設計タスクドライブモジュールは、設計者が要求する設計タスクを受け取り、タスクに適合したシミュレーションモジュールの決定、シミュレーションのフローの決定をするモジュールである。入力作成モジュールは、各々のシミュレーションモジュールに対して準備されており、設計モデルに記述されている数値データの抽出を行い、入力作成の支援を行うモジュールである。出力編集モジュールも、各々のシミュレーションモジュールに対して準備されており、シミュレーションモジュールの出力結果から主要結果を抽出し、設計モデルに格納するモジュールである。画像表示ドライブモジュールは、要求出力物理量を設計モデルまたは出力結果から編集し、画像表示モジ

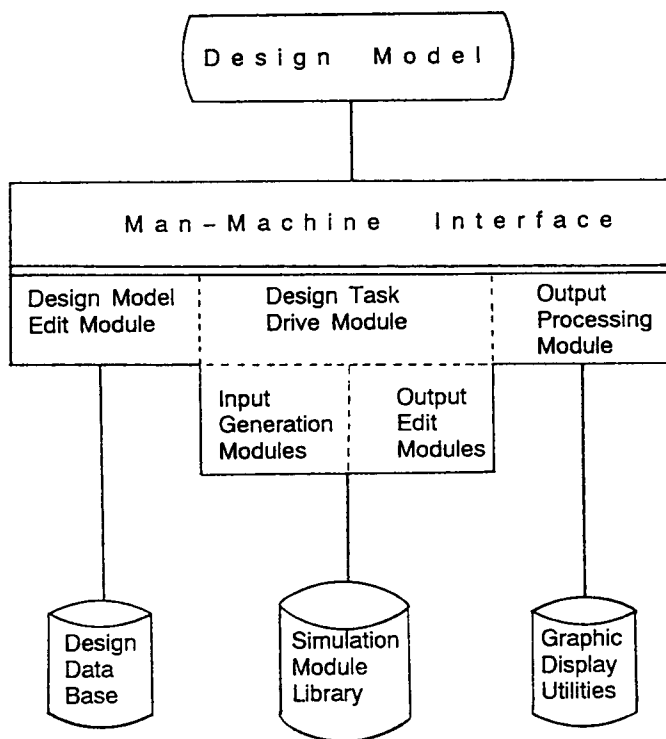


Fig. 2 Organization of IRDS

ジュールの入力データを供給するモジュールである。設計モデルを介したデータの受け渡しにより、設計作業の統合化を達成するシステム構成となっている。以下の節でモジュール群の開発状況について述べる。

3.2 要素技術

3.2.1 設計データベース

新型炉の炉心のタイプを冷却材の種類・燃料要素の形状・その配置形態により20タイプに分類した。図3に炉心タイプの分類を示す。これら20の炉心タイプは、現在まで建設されたり、計画された炉心をほぼ網羅している。それぞれの炉心タイプ毎にクラス名を設定し、各'設計モデル'は、クラスのインスタンスとして格納される。このように、炉心タイプは'is-a'関係により階層化している。燃料要素の形状・その配置形態によりクラス分類しているため、炉心部品幾何形状の表現がクラス毎に異なっており、炉心部品幾何形状記述のためのフレーム表現は炉心タイプ毎に定義されている。

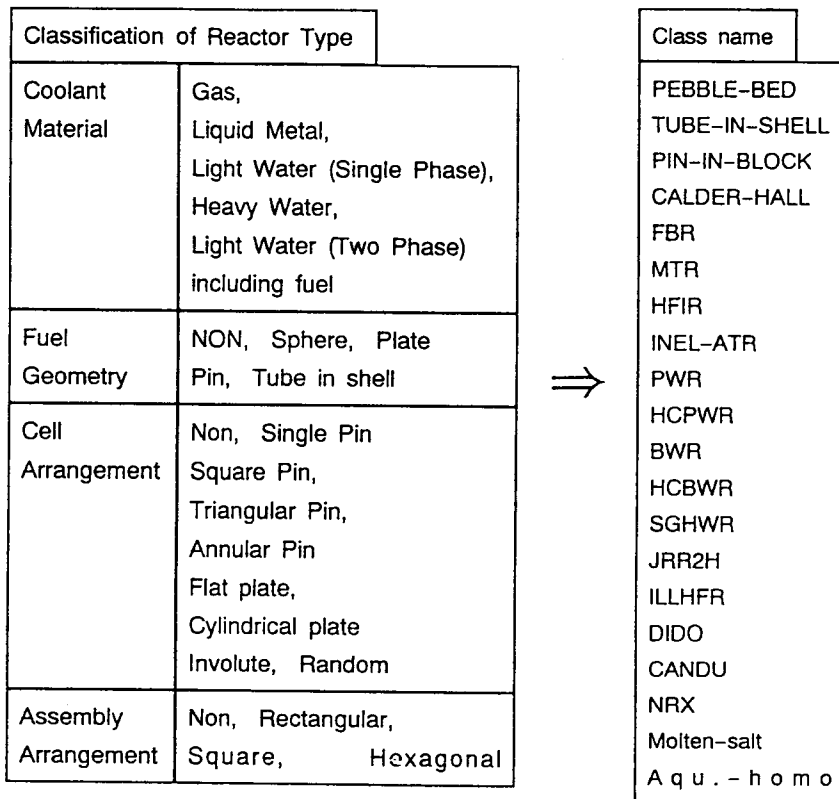


Fig.3 Classification of reactors

設計モデルには、炉心設計情報として炉心核熱設計に係わるデータが収容されている。設計モデルは各シミュレーションモジュールの入力データを供給すると共に、出力結果を炉心性能として格納する。なお、炉心設計情報は、次の4つの部分、1) 幾何形状、寸法、配置といった'形状'に関する情報、2) 元素組成比、物理状態といった'材料'に関する情報、3) 熱出力冷却材温度といった'運転状態'に関する情報、4) 余剰反応度、各種反応度係数、DNBRといった'システム特性'に関する情報に分類される。

炉心の構成は階層構造になっており、一般的には、炉心レベル、集合体レベル、格子レベル、材料レベルといった4つのレベルに分けられる。上位レベルの部品はその直下位のレベルの部品を組み合わせて構成されるが、設計モデルにおいても、上記の4レベルによる'a-part-of'関係の階層構造により炉心構成を表現している。被覆粒子燃料を用いた高温ガス炉の場合には、特別に格子レベルの下位レベルに、'ミクロ格子レベル'を設けて、被覆粒子に関するデータを格納することになっている。

上位レベルの部品とその直下位レベルの部品とは、上位部品の属性として格納されている配置情報により連結される。その模式図を図4に示す。最終的に部品は、それ以上部品に分けることのできない材料が割り当てられる。この最下位のレベルでのみ、'材料'に関する情報が格納されることになり、材料名・元素組成比・温度・圧力等のデータが格納される。なお、図4に示されているように、材料レベルはどの階層レベルにも存在を許している。

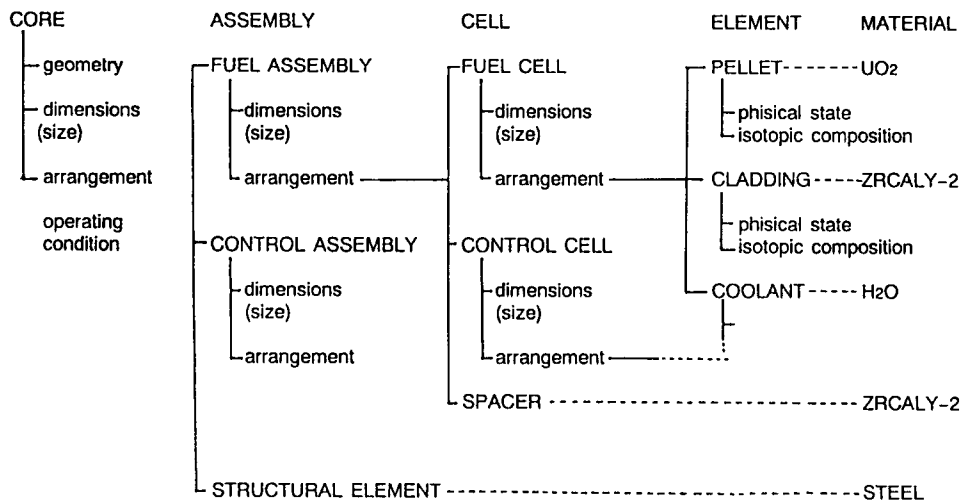


Fig.4 An example of tree structure representation for reactor core

これらの設計モデルを収容する設計データベースは、原研で開発されたデータ管理システム「データプールシステム」²⁾を用いて実現されている。このデータプールシステムでは、樹木構造によりデータを収容でき、ひとつの枝にサブノード名をつけて格納することができる。

3.2.2 設計タスクドライブモジュール

設計者が要求する設計タスクによりシミュレーションフローを決定する。ここでは解析要求物理量・炉心タイプ・解析対象部品に適合したシミュレーションモジュールを決定する。ここでは IF~THEN 形式で記述される intrinsic な知識により自動設定する。

3.2.3 設計モデル構築モジュール

炉型による炉心構成部品幾何形状の違いによりフレーム表現が異なるため、炉型依存のモジュールとなっている。入力の省力化のため、制約条件を用いた内部演算機能や、会話形式により配置情報を設定するための幾何形状入力用画像表示機能を組み込んでいる。また材料名・温度・圧力から原子数密度を計算する機能を組み込んでいる。これらの機能により、シミュレーションモジュールの入力データ作成時の作業は軽減

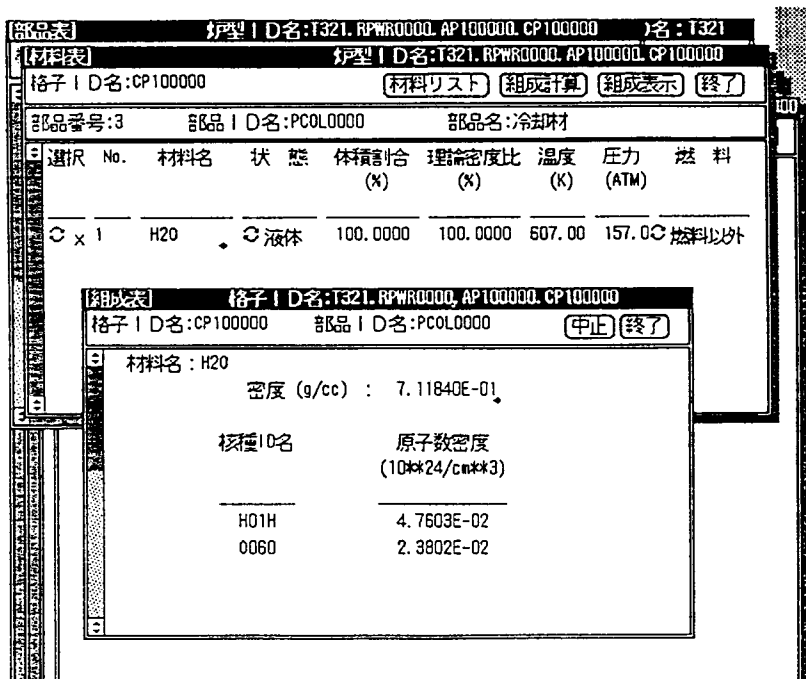


Fig.5 Menu windows to specify material information (name, temp., pressure ...) and to show isotopic composition

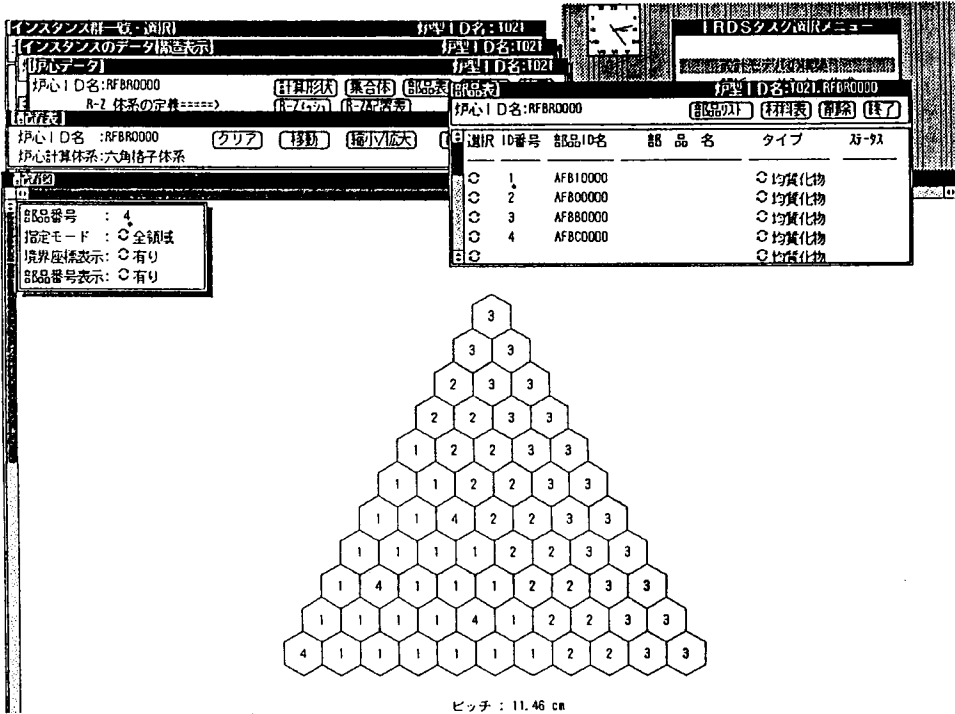


Fig.6 A graphic display used to specify core arrangement of a FBR core

され、解析に必要な数値データは、設計モデル構築の際に簡単に設計モデルに格納される。その応用例を図5、6に示す。図5は物性値の入力画面であり、図6は炉心内の配置情報を画像表示により設定している画面である。

3.2.4 プレー、ポスト-処理モジュール

入力データ作成モジュールは、シミュレーションモジュール毎に開発している。シミュレーションモジュールの単位は原則的に一つのコードが対応しているので、入力作成モジュールの出力はシミュレーションモジュールの入力データファイルという形である。入力作成の際、対象となっている設計モデルより数値データを抽出する。入力データの作成は、メニュー指示による会話形式で入力データを作成するモードまたは自動作成するモードにより行われる。自動作成モードでは、炉心タイプによりあらかじめ決められた IF~THEN 形式で記述した知識により、幾何形状入力、メッシュ分割、計算オプション等全ての入力データを自動的に作成する。会話モードでは、特に計算精度を支配する空間メッシュ分割等のデータの設定を設計者ができる。さらに、解析モデルの図形表示も要求があれば、表示する機能を有する。

解析結果編集モジュールは、解析結果から設計モデルに格納するデータを抽出し、設計モデルに格納するものである。このモジュールもまたシミュレーションモジュールごとに用意されている。解析結果を図形表示するために、画像表示ドライブモジュールでは、解析結果を画像表示モジュールの入力データに編集する。

IRDSでは2種類の画像表示モジュールを利用している。一つはC言語で開発した汎用2次元図形表示モジュールであり、軸方向物理量分布、燃烧特性、パラメータサーベイ計算結果の図示に用いる。もう一つは市販のグラフィックパッケージであるUNIRASを使用した3次元画像表示モジュールである。これは2次元及び3次元の物理量分布の表示に用い、Contour 図、鳥瞰図の表示に利用する。図7は2次元図形表示モジュールの結果であり、燃烧度依存の燃料最高温度、被覆管最高温度、DNBR、被覆管歪、プレナム圧力である。図8はUNIRASを利用してPWR炉心の出力分布を表示させたものである。

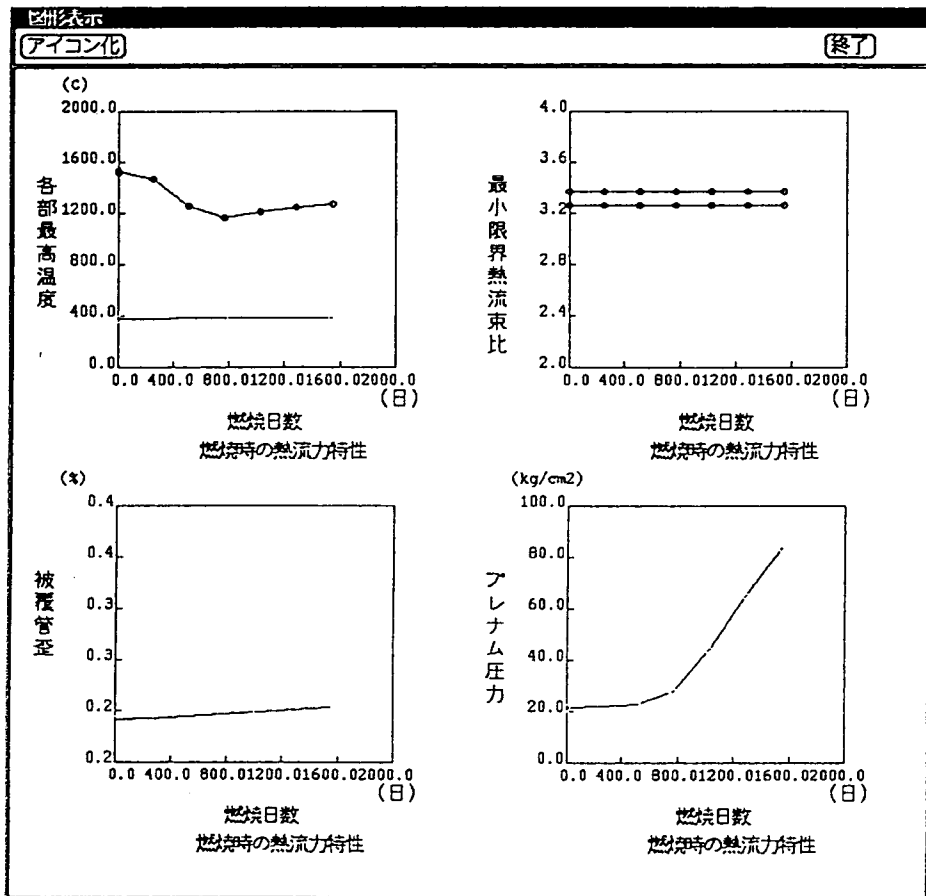


Fig. 7 A graphic display of the thermal-hydraulics results

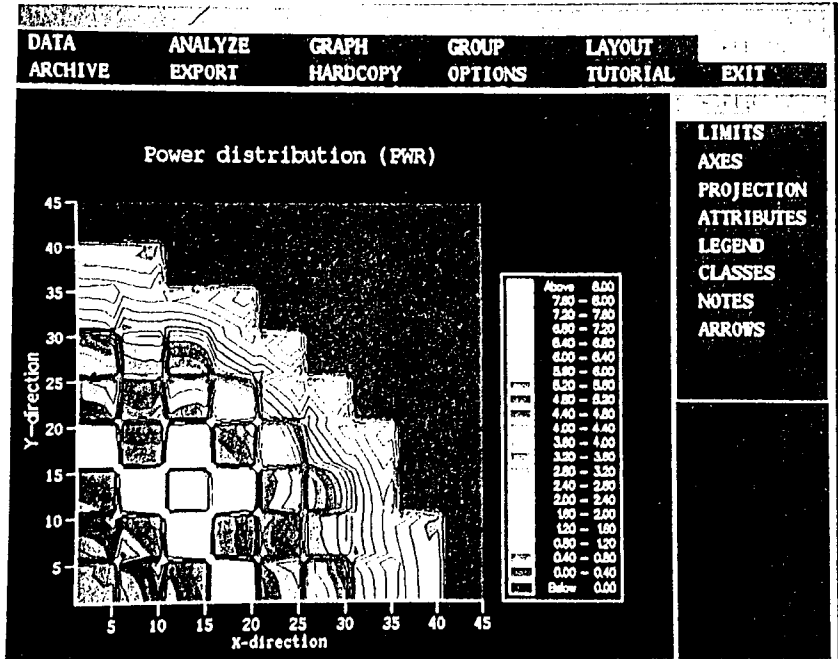


Fig. 8 Visualization of power distribution in a MOX PWR

4. まとめ

ADES構想のプロトタイプとしてIRDSの開発を進めている。設計モデルに設計情報を集中管理し、それを通して各シミュレーションモジュール間のデータの受渡しをすることにより、各分野の統合化を達成している。エンジニアリングワークステーション上でシステムを構築し、メニューウィンドウ・グラフィックディスプレイによるマンマシンインタフェースを充実させた。intrinsic な知識を用いて入力データ自動作成機能を組み込んだ。今後の課題として、マンマシンインタフェースの操作性の向上やAI技術を用いた設計ウィンドウ探索システムの開発や、探索範囲の多次元化の研究を行う。

参考文献

- (1)五来：日本原子力学会誌、Vol. 32、pp. 49 (1990).
- (2)富山、他：“データプールの概念と機能”、JAERI-M 8715 (1980).