研究論文

1083. 宇宙用原子炉の概念設計を対象とした 統合型設計支援システム

下田 宏*, 吉川 榮和*, 高橋 信*,^{†1},
武岡 智*,^{†2}, 長松 隆*, 石坂 裕昭*,^{†3}

Integrated Design Support Systems for Conceptual Design of a Space Power Reactor

By Hiroshi SHIMODA, Hidekazu YOSHIKAWA, Makoto TAKAHASHI,
Satoshi TAKEOKA, Takashi NAGAMATSU and Hiroaki ISHIZAKA

In the process of conceptual design of large and complex engineering systems such as a nuclear power reactor, there must be various human works by several fields of engineers on each stage of design, analysis and evaluation. In this study, we have rearranged the design information to reduce the human workloads and have studied an efficient method to support the conceptual design works by new information technologies. For this purpose, we have developed two design support environments for conceptual design of a space power reactor as a concrete design target. When constructing an integrated design support environment, VINDS, which employs virtual reality (VR) technology, we focused on visualization of physical structure, functional organization and analysis calculation with full usage of easy perception and direct manipulation of VR. On the other hand, when constructing another asynchronous and distributed design support environment, WINDS, which employs WWW technology, we improved the support functions for cooperative design works among various fields of experts. In this paper, the basic concepts, configurations and functions of the design support environments are first described, then the future improvement is surveyed by their intercomparison.

KEYWORDS : *conceptual design, space power reactors, virtual reality, world wide web, cooperative work, distributed computer system, analysis calculation, SRAC, engineering systems*

I. 緒 言

原子炉のような様々な分野の技術を用いる複雑なシステムでは、新しい原子炉の概念を創成してから実際の原子炉として製作に至るまでに、多角的な観点から工学解析を行う必要があり、非常に多くの時間と人員を要する。このような複雑なシステムの設計作業の加速化や省力化といった観点から、設計作業を総合的に支援する環境の構築が必要と考えられる。一般に設計においては、その設計概念を実証する「概念設計」の段階と、実際に原子炉を製作するための個々のコンポーネントに至るまで細部を具体化する「製作設計」の2つの設計段階がある。概念設計の段階では、極めて多様な設計概念が創出されるが、それぞれの設計概念の成立性を確認するには、関連する既存の要素特性の解

析技術を統合して、効率的に見通しよく設計評価作業を実施するための設計作業全般の再組織化、再構成化を考える必要があり、この問題の解決には最近の進歩した情報処理技術の適用が有効である。

本研究では、新しい計算機情報処理技術を適用し、2つの概念設計支援環境の構成に関する研究を行った。一つは、仮想現実感(Virtual Reality: VR)技術を応用した統合型設計支援環境VINDS(Virtual environment for Integrated Design Support)であり、これはVR技術を設計時のヒューマンインタフェースとして利用することで、設計対象物の直観的理解と設計作業時の直接操作を実現するものである。もう一つは、WWW(World Wide Web)技術を応用した非同期分散型協同設計支援環境WINDS(WWW-based Integrated Design Support system)であり、WWW技術を用いて大規模な工学システムの概念設計時に必要な協同設計作業を効果的に支援するものである。なお、本研究では、概念設計の具体例として宇宙用原子炉を対象とした。この宇宙用原子炉は、既存の商用原子炉とは異なる新しい設計概念で構成されており、VINDSやWINDSの効果を確認するための設計対象とした。

* 京都大学大学院エネルギー科学研究科 (Graduate School of Energy Sci., Kyoto Univ.)

^{†1} 東北大学大学院工学研究科 (Graduate School of Engineering, Tohoku Univ.)

^{†2} 現在、(株)NTTデータ (NTT Data Corp.)

^{†3} 現在、北海道電力(株) (Hokkaido Elec. Power Co., Inc.)
(1998年8月31日 受理)

従来まで、VR技術を用いた設計支援としては、建築物や造船などの形状設計に用いられるものがほとんどであり^{(1)~(3)}、VR技術を設計支援として用いるだけでなく、工学システムの概念設計作業全体を支援するヒューマンインタフェースとして使用するものは少なかった。また、WWW技術を用いた設計支援としては、VLSI設計やプリント基板設計などを支援するシステムが研究されているが^{(4)~(6)}、これらは主にWWW技術の中でもマルチメディアが扱えることに着目したものであり、共同設計作業の観点からの支援は十分とはいえなかった。本研究では、VR技術やWWW技術を宇宙用原子炉の概念設計に応用することにより、設計作業時の人的作業の総合的な支援方法を検討する。

以下では、まず、大規模工学システムの概念設計モデルとその具体的設計対象である宇宙用原子炉の基本構成について説明し、次に構築した2つの設計支援環境の詳細について述べ、最後に両環境を宇宙用原子炉設計に適用して相互比較から今後の方向性について展望する。

II. 大規模工学システムの概念設計モデル

大規模な工学システムの概念設計では、その設計作業段階で各種の知識や情報が必要とされる。本章では、設計作業に関わる設計情報を整理し、設計過程の概念モデル化を試みた。以下に設計作業に必要な知識を挙げる。

- (1) 設計対象物のサブシステムの構成情報(個々の部品情報とその複合化情報)
- (2) 設計対象物に付与すべき機能情報
- (3) 設計対象物が機能する際に支配する物理法則や動作原理についての知識
- (4) 設計を行う上での全体的な設計目標から個別的な部分目標への展開
- (5) おおのこのサブシステムの部分設計目標の達成度を

検討評価するための計算手順の明確化

このような知識を組み合わせで行われる設計作業の全体過程をモデル化した結果をFig. 1に示す。Fig. 1において、矩形のボックスは設計概念を実証するために行われる工学解析計算を意味し、円筒のブロックは工学解析計算の際に必要な専門知識を意味する。また、実線の矢印は個々の解析モデルの参照を表し、点線の矢印は基本設計モデルの参照を表す。Fig. 1の中で設計作業上重要な部分は、専門知識モデルの共通要素である基本設計モデルである。これは、Table 1に示すように、属性モデリングと設計専門知識ベースとで構成されるものであり、その具体的な実体は、設計対象の構造に関する知識である構造ブロック、物理的な構造と設計目標との双方向の機能関係を表す機能ブロック、各種の専門知識による設計目標を指向した解析計算に関する知識である解析ブロックの3つに分けられる。

以上のように、概念設計モデルと基本設計モデルを整理し、計算機上に具現化するだけでなく、設計者から見て重要な知識となすべき操作を中心に設計支援システムへ組み込み、逆に設計者が必要ではない知識を隠蔽することによって、概念設計作業の局面や流れに沿って支援機能が有効に機能するように設計支援環境を構築することに留意した。

III. 宇宙用原子炉の構成と解析計算

本章では、設計対象とする宇宙用原子炉の構成とその解析計算について述べるが、以下では、構築した2つの設計支援環境の設計に直接関わる全体的な説明にとどめ、その詳細は既発表の文献^{(7)~(9)}に譲る。

1. 宇宙用原子炉の構成

本研究の対象とする宇宙用原子炉は、宇宙ステーション用の電源として用いられることを想定しており、JPL(Jet

Fig. 1 Basic design process

Table 1 Basic design model

Attribute Modeling	<ul style="list-style-type: none"> • Hierarchical Structure of Components and Parts • Configuration / Geometrical Information of Composite Parts and Basic Parts 	Structural Block
	<ul style="list-style-type: none"> • Functional Information of Composite Parts • Other Attributes Information <ul style="list-style-type: none"> — Various Physical Parameters and Values — Material Information — Manufacturing Information, etc. 	Functional Block
Design expertise KB	<ul style="list-style-type: none"> • One-to-one Correspondance Information between Parts / Components and Functional Requirement • Hierarchical Expansion of Total Design Goal into Local Subgoals 	Analysis Block
	<ul style="list-style-type: none"> • Correspondance between Design Goals / Subgoals and Functional Requirements with Varieties of Engineering Analysis Models • Various Hueristics / Expertise in Planning Analyses to fulfill Design Goal / Subgoals 	

Propulsion Laboratory) が GA Technologies と Martin Marietta Denver Aerospace に研究委託している SP-100 計画⁽¹⁰⁾の公開論文をもとに検討している。この宇宙用原子炉は、燃料の外側に配した回転反射体ドラムにより反応度を制御することと、熱電子発電により核熱から直接電力を得ることを特徴とする。本研究では、このような宇宙用原子炉として、①10年以上の連続運転の達成、②100kWの電気出力、③小型軽量化、④高信頼性と安全性、の4つを設計目標とする。この設計目標をもとに検討した宇宙用原子炉の炉心部分の構成法の詳細を Fig. 2 に示す。本研究では、原子炉全体システムではなく、その核となる炉心部分を設計対象とし、以下にその設計案を述べる。

核燃料ペレットには95%の高濃縮ウランを用いて炉心の小型化を図る。また、核燃料の高温熱から直流の取出しを図るために、熱電子発電素子として燃料ペレットの外側に

エミッタ、コレクタ等を取り付けた構造の TFE (Thermionic Fuel Element) セルを用いることにした。Fig. 3 は TFE ピン構成の概念図である。TFE セルは Fig. 3 中央上に示すように核燃料ペレット、エミッタ、コレクタからなり、直流の取出し方は、円周方向に8分割し、その4素子ずつを並列につなぎ、さらに2つの並列回路を並列にして軸方向に直列化している。発電素子を並列化することにより、TFEの一部が機能劣化しても直ちに全体の発電機能は劣化せず、信頼性が向上する。Fig. 3 右は、TFEセルの1/8の円周方向の構成図である。中心部分は、燃料が溶融してしまうのを防ぐために、空孔のある UO_2 または UN の燃料ペレットが入る。その外側には発電効率向上のために、熱電子放出体のタングステン(W)をエミッタとして燃料に直接取り付けられている。その外側には、空間電荷効果による発電効率低下を防ぐためのセシウムガス(Cs)を封入したギャップを隔てて、エミッタより仕事関数が低く蒸気圧が低い物質としてニオブ(Nb)をコレクタとして取り付けられている。その外側は冷却材の過度の温度上昇を避けるためヘリウムガス(He)を封入したギャップを設け、その外側に耐熱合金である Nb-1%Zr でシースを形成する。ダミーペレットは、燃料ペレットが上下に移動するのを防ぎ、さらに TFE ピンの物理的強度を保つ。この TFE セルからなる TFE ピンは、六角格子状に稠密に配置し、ピン同士の隙間には冷却材が上部から下部方向に流れる。冷却材には液体金属の使用により伝熱性能の向上、炉心の小型化、炉心の高温化(発電効率の向上)を狙っている。この候補としては NaK, Na, Li を考えている。

一方、燃焼に伴う反応度減損を補償するシム制御、原子炉の起動停止、および制御を行うためには、回転制御ドラムを用いる。回転制御ドラムは、Fig. 2 の下部に示した炉心断面図のように、炉心の外側に円周に沿って10数個設置されるもので、円筒の一部の角度の扇形の円周部分を中性子吸収体にし、残りの部分を反射体にしたものである。こ

Fig. 2 Core part of space power reactor

Fig. 3 Structure of TFE

れを回転させることで原子炉の反応度を制御する。吸収体には炭化ホウ素(B_4C)を、反射体には酸化ベリリウム(BeO)を用いている。

2. 解析計算

設計のための解析計算は、熱電子発電と伝熱特性計算(以下、TFE計算と呼ぶ)、炉心核計算(以下、SRACと呼ぶ)、これらの複合収束計算(以下、複合収束計算と呼ぶ)の3つに大別される。

TFE計算は、TFEセル内において熱電子発電方式を発電原理として解析計算を行い、TFEピン1本から得られる発電効率とTFEセル内の伝熱特性を求めるものであり、その目的は、

- ・原子炉炉心内で発生した核熱から熱電変換効率を求めること
- ・TFEセルを構成する燃料ペレット、エミッタ、コレクタ等が融点を越えないか、また、原子炉冷却材としての液体金属(Na , NaK , Li)が沸点を越えていないかどうかという熱的制約条件を調べること

である。TFE計算では、エミッタとコレクタの仕事関数

からエミッタでの単位面積当たりの放出電流を計算し、電気出力を得る。ここでは、熱電変換効率に影響を与えるエミッタ温度を求めるため、TFEセル中での核熱によりもたらされる伝熱特性も計算している⁽⁷⁾。

一方、SRAC⁽¹¹⁾⁽¹²⁾による宇宙用原子炉の核計算の目的は、

- ・設計仕様である10年間以上の連続運転の核的制約条件を満足するかどうかを調べること
- ・炉心の燃焼計算から求めた出力分布をもとにして、炉心内のTFEセルの燃料ペレット発熱分布を算出することである。SRACでは、原子炉炉心の燃焼計算および2次元中性子拡散計算を行う。炉心燃焼計算は3年間を1ステップとして、運転初期、3年後、6年後、9年後、12年後の5ステップ分を行い、計算結果のうち運転初期と12年後に注目する。中性子拡散計算では、炉心部分をFig. 4のように、 r - z 2次元の円筒体系でモデル化し、TFE等価1チャンネル分の均質化炉常数、および回転制御ドラム部の3つの炉常数から中性子拡散計算を行っている⁽⁸⁾。なお、回転反射体ドラムが内側を向いているときは、図中のA、Bの領域を反射体、Cの領域を吸収体とし、ドラムが外側を向いて

Fig. 4 Approximation model for 2D neutronics calculation

Fig. 5 Composite calculation

いるときは、B、Cの領域を反射体、Aの領域を吸収体として計算する。

宇宙用原子炉の解析計算には、上記のように、設計専門分野の違いからTFE計算とSRACがあるが、TFE計算の入力条件にはSRACからの出力である熱出力密度分布が必要であり、SRACの入力条件にはTFE計算で求めた炉心内平均発電効率が必要である。両者を考慮した解析計算を行うためには、Fig. 5に示すようなフィードバック関係にある2つの複合収束計算が必要となってくる。実際には、時間のかかる複合収束計算により最適パラメータを求める前に、TFE計算とSRACを繰り返し個別に実行することで、適当なパラメータの範囲や感度を調べておく必要がある。

IV. 仮想現実感技術を用いた概念設計支援環境VINDS

本章では、第II章で述べた大規模システムの設計過程のモデルに基づいて構築した設計支援環境VINDSについて述べる。以下では、VINDS構築の基本方針とその方法を述べた後、宇宙用原子炉の概念設計を具体例とした設計支援環境の構成、および実現した機能について説明する。

1. VINDS構築の目的と基本的方法

VINDS構築の目的は、VR技術を用いて、大規模工学

システムの概念設計に必要な設計、解析、評価の各段階で発生する煩雑な人的作業を支援することである。まず、大規模工学システムの概念設計段階における人的作業を分類してみると、大別して以下のようなものがある。

- ・形状、部品構成、機能構成といった工学システムの概念設計モデルの理解
- ・各種パラメータの設定と計算機シミュレーションによる動作の検証

まず、概念設計作業の最初の段階として、対象とする工学システムの概念設計モデルを構築し理解する必要がある。概念設計モデルの理解には、VR技術を応用して、その構造や機能を系統立てて階層的に表現し、メンタルモデルの効率的な形成を支援することが有効である。一方、解析計算実行段階では、設計パラメータの検証と最適化のために解析計算を繰り返して実行する必要がある。ここでも、特に設計パラメータの入力や解析計算結果の表示にVR技術を応用する。

VINDSでは、上記のような人的作業を効率的に支援するため、以下の3つの方法を用いる。

- ・仮想現実感環境内での対象構造物の表現
- ・計算機上への対象の知識表現
- ・設計過程における数値計算の効率化

以下では、このそれぞれについて説明する。

(1) 対象構造物の表現

VINDSの中心となる機能は、実体構造の3次元表現とそれに基づく支援機能である。設計支援においては、その構造物の直観的理解を促進するため、設計対象である工学システムを“Reality”をもって表現できることが重要であり、さらに、その表現もただ眺めるだけの静的なものではなく、VR技術の持つ直接操作の利点を生かして、様々な操作ができるようにする。さらに、設計者が仮想現実感環境内で構造物を様々な階層で捉えることにより、構造物の内容の詳細な理解を促進する。すなわち、全体像から部品レベルまでの詳細度の階層を仮想現実感環境内で自由に移動できる環境を構築する。この際には、内部の構造を理解するために、外部の部品をはぎ取っていくような操作も実現する。なお、本研究では、工学システムの概念設計を対象としているため、部品の精密なモデリング技術よりVR技術による可視化を重視する。

(2) 計算機上への知識表現

概念設計のような知識集約型の作業の支援を実現するためには、第II章で述べた設計対象に関する知識を計算機上に系統的に表現し、さらに、この知識表現を仮想現実感環境内での表現と有機的に結び付ける必要がある。VINDSでは、設計対象物の構造の表現方法として、工学システムを構成する部品の情報に着目し、部品をデータの単位とすることにした。これにより、

- ・構成部品の情報があれば、それらの組立情報を記述するだけで原子炉の構造が表現できる

- ・構成部品の情報とそれらの組立情報があれば、各種の工学解析が可能となる
- ・部品を単位とすることで、その追加、削除、入替え等、実際の組立作業に近い取扱いにより、構成変更柔軟に対応することができる

のような利点が得られる。

設計の過程では、実体とその機能の関連性を考えることが重要であることはいうまでもない。Suhは、設計の第一公理として、必要機能の独立性を保つという「独立公理」を提唱している⁽¹³⁾。これは、「人工物の実体の理想的な部品構成は個々の部品の機能を独立化させることにより達成される」というものである。そして、この独立公理の具体的な適用法として、実体構造と機能の双方の階層性に1対1の対応を図るように実体構造の階層的設計を行うべきものとしている。そこで、本研究では、特に宇宙用原子炉を具体例として、実体構造と機能の1対1対応の機能の階層構造をFig. 6のように考えた。VINDSでは、このような機能の階層的な構造を仮想空間内で表現し、その関連性の理解を促進する。構成部品情報の計算機上への具体的な表現には、部品や複合部品を単位とするオブジェクト指向データベースを用いる。各部品を表すオブジェクトの属性には、部品名、基本部品か複合部品かの区別、上位階層の部品名、機能、形状タイプ、形状情報、物理的属性情報などが記述される。

(3) 解析計算支援

概念設計段階における解析計算作業は、パラメータの最適化を図るために、各種パラメータの設定、シミュレーションの実行、結果の評価などの煩雑な作業が繰り返される。解析計算作業自体は元来、VR技術の操作性を有効に利用できるものとは考えられないが、この過程だけが仮想現実環境から独立しては作業全体が非効率的になってしまう。したがって、設計過程における解析計算作業を既存のVR技術でできるだけ自然に実現できる環境を構築することは、全体的な作業効率を考える上で重要である。そのため、VINDSでは、設計パラメータの変更、解析計算の実行、結果の評価という一連の過程を仮想現実環境内から実行できる環境を構築する。さらに、計算負荷を分散するために、数値計算をネットワークで接続されている、解析計算を高速に実行できる複数の計算機のうちの1台を選択して実行する。

解析計算の結果は、できるだけ解釈しやすい形で設計者に提示することを考え、仮想現実環境内での可視化についても検討を行う。計算結果の可視化という研究は流体などの分野を中心に行われているが、宇宙用原子炉の概念設計では、TFEセル内の材料温度や原子炉の実効増倍率の燃焼に伴う変化のような2次元分布だけでなく、仮想現実環境の利点を生かして、中性子束分布、発熱分布、温度分布などの計算結果を3次元的に可視化できるようにする。

Fig. 6 Hierarchical knowledge of structure and its function

2. システム構成

VINDSシステムは、Fig. 7 に示すように、仮想現実感環境を生成するグラフィックワークステーション(WS-VR)、設計知識を管理するワークステーション(WS-DM)、数値計算用のワークステーション(WS-NC)の3種類のワークステーションから成り立っている。WS-VRには、設計者に仮想現実感環境を提供する各種のデバイスや仮想空間の構築用ソフトウェアが装備されており、設計者は、立体視めがね CrystalEyes により大型ディスプレイに表示されている映像を立体的に見ることができ、同時に、データグローブをはめた設計者の手と同じように振る舞う仮想の手を用いて、すべての操作を行うことができる。WS-DMには、オブジェクト指向型リアルタイムエキスパートシステム構築ツールG2が搭載されており、これを用いて設計知識の管理だけでなく、数値計算の実行管理や計算結果が制約条件を満たしているかどうかの判断等を行う。

3. VINDSの機能

以下では、VINDSの機能を説明するために、設計対象の具体例として第Ⅱ章で述べた宇宙用原子炉を対象として概念設計を行っている時の提示画面を順に示す。

実際にシステムを使って最初に目にするのは、Fig. 8 のメニュー画面である。ここでは、(1)宇宙用原子炉の実体構造を提示する Structural World, (2)階層的な機能構成を提示する Functional World, (3)解析計算を支援する Analysis World の3つのWorldを設定している。設計者は、仮想の手を使って提示画面中の各Worldのテクスチャが貼ってある板を手前に持ってくることによってそのWorldに入ることができる。

(1) Structural World

Structural Worldは構造物の表現を行うWorldで、仮想現実感による“Reality”の特徴を最もよく生かしているWorldである。このWorldでは、実際には存在しない宇

Fig. 8 First menu of VINDS

Fig. 9 Structural world

宙用原子炉の構造を立体的に見て把握できるだけでなく、より詳細な理解を促進するため、Fig. 9のように、宇宙用原子炉の部品を手で持って移動し、部品の取外しを行うことができる。

(2) Functional World

Functional Worldは、部品-機能の階層構造を表現するWorldであり、前述のように、機能と構造の1対1対応を仮想現実感環境の中でどのように表現するかが課題となる。実体構造は部品の形を見ればわかるが、機能は部品

Fig. 7 System configuration of VINDS

の形からはわからないので、まず実体構造を用いて階層構造を作成し、その実体構造を手でつかむことにより機能を文字情報として引き出せるようにした。具体的には、Fig. 10のように、立方体に実体構造のテクスチャを貼り付けたアイコンにより実体構造を表現し、それらを階層化して提示することにより機能の階層構造を表示するとともに、大量の3次元データによる描画速度の低下を防いでいる。

(3) Analysis World

Analysis Worldで支援する作業は、入力パラメータの変更、数値計算の実行、および計算結果の表示である。Fig. 11にAnalysis Worldの提示画面を示す。このWorldで支援する解析計算は、TFE計算、SRACおよびそれらの複合収束計算の3種類である。これらの計算の選択は、図上部の3つのアイコンのうちの1つを手でつかむことによって行われる。計算が選択されると、設計パラメータ設定画面が提示される。Fig. 12は、TFEセルの幾何形状の設定画面の例である。この図は、TFEセルの全周を描いた模式図で、中心から順に、燃料、エミッタ、ギャップ、コレクタ、ギャップ、シース、冷却材を表している。ここでは、仮想現実感の特徴を生かし、図中の縦棒を仮想の手でつかんで動かすことにより、TFEセルのサイズを視覚的に確認しながら変更することができる。このサイズは画面上に数値としても表示している。

パラメータの設定がすべて終わると、Fig. 11の画面で複数用意されている計算機を表すメタファの1つを手でつ

Fig. 10 Functional world

Fig. 11 Analysis world

Fig. 12 Setting of TFE cell size

かむことにより、指定の計算機で数値計算を開始することができる。

4. VINDSの機能検証

VINDSの諸機能を検証するため、実際にVINDSを用いて概念設計作業を行い、得られた設計パラメータをTable 2に、その解析結果をFig. 13に示す。

Fig. 13に表示されているグラフは左上から冷却材最高温度、燃料最高温度、実効増倍率 k_{eff} を表す。冷却材最高温度グラフの縦軸にあるB.P.は冷却材の沸点を表し、燃料最高温度グラフの縦軸にあるM.P.は燃料の融点を表す。グラフ上の各点は、左から運転初期状態反射材内側、運転初期状態反射材外側、12年後反射材内側、12年後反射材外側の場合を表している。このすべての場合について冷却材最高温度が沸点以下であり、また、燃料最高温度も融点以下であることから、設計パラメータは制約条件を満たしていることがわかる。さらに、反応度制御を行うために、運転初期状態、12年後の状態について反射材が内側を向いている

Table 2 Optimized design parameters

Fuel	Fuel material	UN
Coolant	Coolant material	Li
Hole	Center hole of fuel	None
n	Row of fuels	6
r_0	Radius of center hole	0.0mm
r_1	Inside radius of emitter	9.3mm
r_2	Outside radius of emitter	9.4mm
r_3	Inside radius of collector	9.6mm
r_4	Outside radius of collector	10.1mm
r_5	Inside radius of sheath	11.5mm
r_6	Outside radius of sheath	12.0mm
R_2	Thickness of vessel drum	20.0mm
D	Diameter of rotation reflector	80.0mm
Z_1	Half height of fuel	180.0mm
Z_2	Thickness of upper reflector	40.0mm
Z_3	Thickness of upper absorber	20.0mm
v	Velocity of coolant	1.0m/s
T_{in}	Temperature of inlet coolant	1,500 K

Fig. 13 Calculation result

ときに原子炉が臨界に達するように k_{eff} が1.0以上であり、反射材が外側を向いているときに k_{eff} が1.0未満である必要がある。一方、右下のグラフは、横軸に炉心径、縦軸に発電効率を表しており、図では過去4回の計算結果が同一グラフ上に表示されている。このうち、最適の設計パラメータは、グラフ上で最上部にある点であり、発電効率が高く炉心径も小さい理想的な設計といえる。この概念設計作業例により、3つのWorldから構成されるVINDSの諸機能の動作を確認した。

なお、ここでは、熱電子発電と回転制御ドラムによる反応度制御を特徴とする宇宙用原子炉の概念設計を具体例としているが、設計対象とする工学システムを変更する場合や、その構成を大きく変更する場合には、WS-DM上の設計知識とWS-NC上の解析計算プログラムのみを変更すればよい。

V. WWWを応用した非同期分散型 協同設計支援環境 WINDS

本章では、前述のVINDSの機能を継承し、さらに協同設計作業を支援するWWW技術を応用した非同期分散型設計支援環境WINDSの詳細について述べる。

1. WINDS構築の目的と基本的方法

前述のように、大規模工学システムの設計段階では、各種の専門的知識が必要なため、異なった分野の設計専門家が協同で作業を進めることも多い。また、現実には複数の設計者が一堂に会して設計作業を進めていくとは限らない。そこで、WINDSでは、VINDSで実現している機能をさらに発展させ、遠隔地に点在する複数の専門家が協同で設計を行う際の支援環境の構築を目指す。

遠隔地の設計者がコミュニケーションを図るためには近年、VR技術とともに進歩の著しいWWW技術を用いることにした。WWW技術は、マルチメディアを扱えることに加えて、一般に広く普及しているインターネットに接続されているPC等の計算機とWWWブラウザさえあればよ

く、分散型設計支援環境の構築には最適の技術であると考えられる。

はじめに、分散環境にいる複数の設計者が協同で概念設計を行う際の作業を、① VINDSと同様の概念設計自体の作業、② 遠隔地の設計者間での協同作業、の2つの観点から考察する。

概念設計作業自体については、VINDSで実現している機能を、WWW技術を用いることで実現できればよいと考えられる。直観的理解を促進するための仮想現実感もVRML(Virtual Reality Modeling Language)を用いることにより実現できるが、WWW技術の制約のため立体視やデータグローブ等の直接操作は実現できない。

一方、協同作業では、設計者間で意志の疎通を欠いたり、連絡の齟齬で意図が誤って伝えられたり、誤解がもとで誤った情報に基づいて作業が進められるなどの問題点が出てくる。このような問題を解決するために、一般的な協同作業の前提から支援システムに必要な機能を考えると以下のようなになる⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾。なお、WINDSでは、協同設計者として数名程度の規模を対象としている。

- ・常時または適宜の協同作業仲間でのデータ、情報、知識の交換機能
- ・プロジェクトグループ内の合意または総合的判断を決定し、それを反映した作業を始める機構
- ・個々の作業要素を統合した一連の作業の流れや割当てなどの全体の作業に対する管理支援機能

以上から、WINDSを構築するにあたり、その支援機能は大きく以下の3つから構成することとした。

- (1) 複数設計者間で意見交換を支援する協同設計作業としての概念設計への支援機能
- (2) 対象物の構造部品と機能との関連性や構成部品の3次元表示を含む対象構造物の階層表現による構成部品関連情報の提供機能
- (3) 設計解析に必要な工学解析計算の選択、計算実行依頼、計算結果の表示を行う解析計算支援機能

次節からは、まず、WINDSのシステム構成を述べた後、実現した支援機能について具体的に説明する。

2. WINDSのシステム構成

WINDSは、設計に必要な機能を実現するための計算機資源の集中的な管理を行うWINDS-serverを中心として、設計者(WINDS-client)がインターネットに接続された計算機上のWWWブラウザに向かって概念設計作業を行うクライアント/サーバ方式に即したシステム構成となっている。システム構成の詳細をFig.14に示し、以下で説明する。

WINDS-serverでは、WWW-clientとの通信プロトコルであるHTTP(HyperText Transfer Protocol)を走らせるデーモンプロセスと、解析計算への支援を実現しHTTPデーモンが管理するCGI(Common Gateway Inter-

Fig. 14 System configuration of WINDS

face)処理とが主要な役割を果たしている。計算機資源としての WINDS-server は、WWW サーバ計算機だけでなく、工学解析計算用の計算機資源をも含んでいる。WWW サーバ計算機と解析用計算機を分けた理由は将来、工学解析計算の種類による計算機資源の制限や WWW サーバ計算機の制約など、広範な状況に対応できるように支援環境を設計したためである。

一方、WWW-client は、インターネットに接続された PC 等の計算機と WWW ブラウザおよび VRML プラグイン等の追加モジュールから構成される。

3. WINDSの機能とその検証

WINDS は、複数の設計者が様々な支援機能を自由に行き来できる柔軟なものであり、設計者と支援環境とのインタフェースの観点から、前述のように、支援機能を、協同作業支援、構成部品関連および解析計算関連の 3 つに分類している。以下では、これらの具体的な支援機能を説明するとともに、作成したシステムの動作機能の検証例として、実際に数名で宇宙用原子炉の概念設計を行った時に用いた提示画面を示す。

(1) 協同作業支援

本支援環境は、協同作業としての設計を支援するための機構を整備したものであり、ニュースシステムによる作業状況管理、掲示板および在席管理からなる。

(a) ニュースシステムによる作業状況管理

作業状況管理支援機構は、設計対象の各サブシステムにおける作業状況を管理するために、インターネット上でのニュースシステムを用いて設計ノートを模擬したものを設計者が協同で作成できるようにした。設計ノートは様々なタスクフローを時系列に沿って記録したものであり⁽¹⁶⁾、これによりサブシステム設計の部分目標に関する作業状況管理をサブシステムごとに処理することができる。

Fig. 15 は過去の記事の一覧であり、設計対象の階層構造に対応して過去の記事の題目が階層構造を構成している。設計者が適当な題目をクリックすることでその記事を参照でき、さらに、それぞれの記事に参照/返信記事を追加記載することができる。記事として、そのサブシステムの設計作業に関する状況、問題点、手順の変更等を記載することで、自動的に時系列に沿った設計ノートが作成される。これを参照することで、そのサブシステムの実際の作

Fig. 15 Article list of news system

業状況がわかる。これにより、協同作業に有用な知識が共有化され、作業の効率化が期待でき、さらに複数の設計作業者が様々な記事を追加していくことによって、支援システム自体に知識を蓄積できる。

(b) 掲示板

協同作業の基本はそのグループの作業員間の意見交換にある⁽¹⁴⁾。協同作業ではグループ間での情報の共有化が重要であり、電話、FAX、電子メールのような個対個での情報交換手段は有効でない。そこで設計者間の意見交換を計算機上で実現する支援システムが持つ機構として、掲示板と在席管理を行うものが適切であると考えた。

WINDSで設置する掲示板は、支援システムを利用する設計者が確実に一度は目にする初期画面に掲げられ、その内容としては設計全般の議論を掲載することにする。これにより、設計対象のサブシステムの詳細に関する情報を扱うニュースシステムとは異なり、グループ内のすべての設計者が知っておくべき設計全体に関する問題を様々な専門的観点から議論することができる。また、「議論の繰り返を防ぐと同時に意見に対する責任が明確化されるように、議論進行の履歴を保管することは有用である⁽¹⁴⁾」ためすべての議論の履歴を掲載することにする。

Fig. 16に示すように、掲示板は、画面上部の命令伝達事項の通知とその下方の一般的な議論を掲載する機能および下部のそれらを自由文として入力する機構から構成されている。伝達事項の通知は画面の最上段で行われるため、支援システムの利用者は確実に他の設計者からの伝達事項を知ることができる。伝達事項は、図のように被伝達者、伝達者の名前と専門分野、伝達事項を掲載した時刻、伝達事項の内容から構成される。その下方では設計作業に関する一般的な議論を掲載している。

Fig. 16 Bulletin board

(c) 在席管理

伝達事項を掲載した作業員は、伝達事項を対象作業員が参照したかどうかの確認のため、在席管理機構を利用することができる。在席管理では、各作業員について、出席の場合はいつから支援システムを利用しているか、欠席の場合には最後に支援システムを利用した時刻を表示する。これにより、伝達側は伝達事項を掲載した時刻と比較することによって、被伝達側が伝達事項を参照したかどうかを確認することができる。

(2) 構成部品関連支援

WINDSでは、VINDSの場合と同様に、設計対象とする工学システムの各サブシステムを構成する各部品の様々な情報に注目して、工学システム全体を最大システムとした複数のサブシステムごとに取り扱うことにし、機能の階層構造を包含したサブシステムの階層図をWWWブラウザ上に表示する。Fig. 17に構成部品関連支援の画面例を示す。図のように、支援環境は複数のサブウィンドウからなり、左側の設計対象の概念図、右側の部品機能の文字情報、下部のサブシステムの階層図から構成されている。下部の階層図でサブシステム名をクリックすると、左側に設計対象物の側面図と断面図の2次元平面図が表示され、右側にその機能の文字情報が表示される。

一方、部品実体構造物の表現に関して、WINDSでは、VRMLによって3次元モデルを提示し、そのモデルを操作することでVINDSと同様の機能を実現する。具体的に

Fig. 17 An example of part information

Fig. 18 3Dmodel by VRML

は、Fig.17において右側のウィンドウ中の‘3D Model’をクリックすれば、Fig.18に示すように、新たなウィンドウに対象構造部品のVRML形式の3次元モデルが表示され、設計者の操作に応じてモデルの拡大、縮小、回転、視点の移動などが可能である。Fig.18では宇宙用原子炉炉心の3次元モデルを表示しており、外部部品をマウスでクリックすることにより、その部品が取り除かれ、さらに内部の構造を確認することができる。

(3) 解析計算支援

概念設計段階における解析計算では、解析計算自体の支

援機能に加えて、他の専門家が行った解析計算や過去の解析計算の事例を随時参照できるような機能が必要不可欠である。そのため、WINDSでは過去の設計事例の蓄積やその検索機構も実現する。以下では、(a)解析計算作業の支援機能、(b)解析計算結果の表示機能および(c)蓄積された設計事例の検索機構について述べる。

(a) 解析計算作業支援

解析計算を実行するための人的作業は、主に設計パラメータの入力である。WINDSでは、WWWブラウザのGUI(Graphical User Interface)環境を活用して設計パラメータの入力環境を作成した。設計パラメータ入力環境は、前述の3種類の工学解析計算のそれぞれについて、Fig.19のように、右側の設計入力をするGUI、左側の対象概念図とその下部のタイマー時計から構成される。設計者は図の右側で、マウスやキーボードを用いて設計パラメータを設定する。その際に、対象物の概念図を併せて提示することにより、数値だけで表される設計パラメータを実際の構造物に対応させて考えることができる。設計者が意図する設計パラメータを入力し終わったら、図右下の‘Execution’ボタンを押すことで、サーバ側の解析用計算機において解析計算が実行され、図の下部のタイマー時計により、どのくらいの時間で計算が完了するかがわかるようになっている。

(b) 解析計算結果表示

計算結果の表示の際には、計算結果をWWWブラウザ

Fig. 19 Parameter setting of SRAC

上でいかに理解しやすい形で提示するかが主題となる。例としてTFE計算の結果表示画面をFig.20に示す。結果表示画面は、図のように、上部の概念図と設計パラメータの一覧表および下部の計算結果表示から構成される。燃料温度や冷却材温度等の計算結果が制約条件に違反しているかどうかはエキスパートシステムにより自動的に判断され、違反している場合には設計パラメータの表中で点滅表示される。下部のグラフ群の一部は温度計メタファを用いたものであり、設計者は一見してそれが温度を表していることを理解できる。左下のグラフは、燃料中心温度を表したものであり、燃料融点(M.P.)を同じグラフに示すことで設計余裕を直観的に把握することができる。同様に、中央下のグラフは冷却材出口温度と冷却材沸点(B.P.)を、右下のグラフはTFEピン1本あたりの平均発電効率を表している。

(c) 設計事例の検索機構

蓄積された設計事例の検索機構は、特に計算時間が多くかかる複合収束計算を対象として、設計パラメータを入力して類似性の高い事例を検索する類似性検索と、限定された注釈事項による検索を実現している。

類似性検索機構は、検索のために入力された設計パラメータと蓄積事例の設計パラメータを比較して、類似度の高い事例を検索する事例ベース推論手法⁽¹⁷⁾を応用したものである。ここではTable 3のような評価関数を定義し、その合計で類似度を表した。基本的には、入力パラメータ

ごとに数値の桁数が異なるため、それを統一するように関数を設定している。TFEセルの部分によって寸法の重みを変えているのは、平均発電効率向上のために燃料幅とTFEセルの外径が特に重要なためであり、燃料幅とコレクタとシース間のギャップ幅については、より大きい方が設計目標に沿うためである。このように、評価関数の設計では、設計目標を達成するために重要なパラメータに高いウェイト付けをしている。類似性検索の検索条件入力環境は、解析計算における設計パラメータ入力環境と同様のものを用いている。検索結果は、WWWブラウザ上に、検索された事例のファイル群、設計パラメータ一覧表、計算結果一覧表として表示される。

しかしながら、類似性検索機能だけでは、蓄積されている設計事例がどのような意図で提案されたものかわからない可能性があるため、設計意図を説明する注釈を各設計事例へ付加することは協同設計作業を支援する観点から有効な手段である⁽¹⁸⁾。そこで、解析計算時に設計者が設計意図を表す注釈を付加しておき、その注釈をキーとして検索する機能を実現した。注釈付けを行う設計者は、設計者の名前、注釈の選択事項の選択、自由文の入力部分、注釈付けを行う事例ファイル名のそれぞれを入力する。注釈の選択事項としては、Table 4に示す選択事項の中から単数または複数項目を選択する。検索の際には、選択事項の中から検索したい事項を選んで検索を実行する。検索実行後の検索結果の表示は、前述の類似性検索の検索結果と同様であり、各事例ごとの設計への注釈は、その事例ファイルを直接参照することによって確認できる。

Fig. 20 Result of TFE calculation

Table 3 Evaluation function for case search

Input parameters	Evaluation function
Fuel	+25, if different type
Coolant	+50, if different type
v	difference(m/s) ² ×5
T_{in}	difference(degree) ² /100
Power	difference(kW) ² /5
n	difference ² ×5
r_0	difference(mm) ² ×50
r_1	difference(mm) ² ×300
r_2	difference(mm) ² ×100
r_3	difference(mm) ² ×100
r_4	difference(mm) ² ×100
r_5	difference(mm) ² ×50
r_6	difference(mm) ² ×200
$r_1 - r_0$	difference(mm)×60
$r_5 - r_4$	difference(mm)×30
$r_2 - r_1$	difference(mm)×20
$r_4 - r_3$	difference(mm)×50
$r_6 - r_5$	difference(mm)×50
v	difference(m/s)×80

Table 4 Annotation items for case search

Annotation item	Selection
Design expertise	Neutronics, heat, structure, safe control
Calculation code	TFE, SRAC, composition
Aim of calculation	Neutronic analysis, heat analysis, etc.
Attention of input	Fuel material, coolant material, etc.
Attention of result	Thermal restriction, efficiency, etc.
Comment	Free style

VI. VINDSとWINDSによる 設計試行例と相互比較

本章では、構築した2つの設計支援環境による宇宙用原子炉の設計試行例を示し、それぞれの特徴を整理し、その相互比較から今後の方向性を展望する。

宇宙用原子炉の概念設計は、おおむね、以下の手順を繰り返して行われる。

- (1) 原子炉の物理的構造や機能構成の理解
- (2) TFE計算, SRACによる設計パラメータの感度解析
- (3) 複合収束計算による設計パラメータの最適化
- (4) 計算結果の評価

この手順により2つの設計支援環境で設計作業を行った結果、両者の場合ともTable2に示したような最適設計パラメータが得られた。この場合、燃料ペレットとしては熱伝導度の大きいUN、冷却材に沸点の高いLiを用いて、冷却材の入口温度を1,500 Kにすることにより、種々の制約条件を満たし、炉心サイズも半径256 mm、高さ480 mmと最も小さく、発電効率も6%以上と最も高くなる。

VINDSを用いた設計試行過程では、設計者の事後報告によると、3Dモデルや機能の階層的表現から設計案自体の理解は促進されていた。しかし、データグローブによる操作では、慣れるまでに若干時間がかかるようであった。また、Analysis Worldにおいて、計算時間がかかる複合収束計算実行時に計算が終わるまで待っていなければならないことも指摘された。一方、WINDSを用いて協同設計者3名により設計を試行した過程では、協同設計者がそれぞれ、TFE計算, SRACおよび全体設計の統括の3つに役割を分担しながら設計を進めることができた。この際、掲示板は、設計作業の進捗状況の管理や問題点の報告等に使用されていた。この試行では、1つのサブシステムを1人が担当していたため、設計ノートには、サブシステムの設計に関する議論ではなく設計履歴が記載されていた。

構築した2つの設計支援環境の両方に共通する特徴としては、宇宙用原子炉の概念設計における設計知識の整理と設計過程のモデル化により、概念設計における人的作業を多角的に支援するための基本的な機能を有していることが挙げられる。一方、VINDS固有の特徴は、システムと設計者のインタフェースにVR技術を用いたことであり、特

に設計対象物の構造や機能構成の理解の促進に大きな効果を発揮する。また、WINDSの特徴は、WWW技術を用いて、遠隔地に分散している複数の設計者が協同で設計作業を進めることができる様々な支援環境を提供していることである。

これらの特徴から工学システムの設計において、VR技術とWWW技術の適用効果について次のことがいえる。

- ・設計対象物の物理的, 立体的構成が非常に複雑である場合は、その構造の理解をより促進するためにVR技術の導入が有効である。
- ・設計対象物の検討に多角的観点から要素設計が必要で、担当部署が分散している専門家が協同で設計作業を行う場合には、WWW技術の導入が有効である。

すなわち、例えば、航空機を設計するような場合、エンジンやボディ設計のような複雑な構造をもつ機械を中心としたサブシステムを設計する場合には、VR技術による構造物の可視化が有効であり、それぞれのサブシステムを統合して全体の航空機設計としてまとめ上げるのには、WWW技術により複数の設計者が協同で作業を進めることができる支援機能を構成する必要がある。

今後は、複雑大規模な工学システムの設計を効率的に支援するために、2つの設計支援環境を有機的に結合し、設計対象や場面に応じて使い分けられるような統合システムへと発展させることが課題となる。

VII. 結 語

本研究では、複雑大規模な工学システムの概念設計を対象として、その人的作業負荷の軽減を目的に、設計情報の整理と設計過程のモデル化を試み、新しい情報処理技術を用いて概念設計作業を支援する方法について実験研究を行った。具体的には、VR技術を応用した統合型設計支援環境VINDSと、WWW技術を利用した非同期分散型設計支援環境WINDSを構築し、両環境を宇宙用原子炉の概念設計作業に適用して、それぞれの機能を検証した。VINDSは、VR技術の持つ直観的理解と直接操作を生かして、特に設計対象物の構造や機能構成の理解の促進に大きな効果を発揮する。一方、WINDSは、WWW技術を用いて、遠隔地に分散している複数の設計者が協同で設計作業を進めることができる様々な支援環境を提供できる。この両者の特徴を比較した結果、設計対象物の物理的構成が非常に複雑である場合にはVR技術を、設計対象物が様々な要素技術の組合せで構成され、多数の異分野の専門家の参加による協同作業で設計が進められるような場合にはWWW技術を適用するのが有効であることがわかった。したがって、これら2つの異なった構成の支援環境を有機的に統合した総合設計支援環境に発展させれば、設計の段階に応じてそれぞれを有効活用し、設計作業全般の効率を向上させることが期待できる。本研究では、宇宙用原子炉を実際の設計対象として、新しい情報処理技術を活用した

設計作業支援法の実験研究を行い、その効果を確認したが、原子力分野のみにとどまらず、このような方法は新しい人工物の設計支援法として効果があるものと考えている。

本研究は、科学技術庁航空宇宙研究所からの委託により、平成5年度から平成9年度にかけて実施したものであり、その遂行にあたり多大なご助力を頂きました関係各位に深く感謝の意を表します。特に、日本原子力研究所原子炉工学部の土橋敬一郎氏、久語輝彦氏、中川正幸氏には、熱中性子炉設計コードSRACの使用に際し、ご教示を賜りましたことを深く感謝いたします。また、岡山大学に移られた五福明夫氏には、TFE計算プログラム開発にご協力いただきました。深く感謝いたします。本論文の掲載にあたっては、関西エネルギー・リサイクル科学研究振興財団の助成を受けました。深く感謝いたします。

— 参考文献 —

- (1) Donath, D., Regenbrecht, H.: Using virtual reality aided design techniques for three-dimensional architectural sketching, design computation, collaboration, reasoning, pedagogy, *Proc. of ACADIA 1996 Conf.*, p.201~212 (1996).
- (2) Alonso, F., *et al.*: Virtual reality tools in shipbuilding design, *Proc. of TermCAD: GVU/NIST Workshop on Collaborative Design*, p.39~43 (1997).
- (3) Gray, S.: The virtual reality design studio, *IBC-Int. Broadcasting Convention*, p.290~295 (1997).
- (4) Benini, L., *et al.*: Distributed EDA tool integration: the PPP paradigm, *Proc. Int. Conf. on Computer Design, VLSI in Computers and Processors*, p.448~453 (1996).
- (5) Saha, D., Chandrakasan, A. P.: Web-based distributed VLSI design, *Proc. 11th Int. Conf. on VLSI Design*, p.449~454 (1997).
- (6) Blanchard, D.: EDA on the WWW [PCB CAD], *Print Circuit Design(USA)*, 15(2), 34~37 (1998).
- (7) 武岡 智, 他: 宇宙炉用熱電変換燃料素子の計算モデルの拡張と発電効率向上のためのパラメタ検討, 原子力学会「1996春の年会」要旨集, A 51, p.51 (1996).
- (8) 吉川榮和, 他: SRAC コードによる宇宙炉炉心の核計算, 原子力学会「1996春の年会」要旨集, A 50, p.50 (1996).
- (9) 吉川榮和, 他: 宇宙用原子炉の炉心最適化計算法, 原子力学会「1996秋の大会」予稿集, B1, p.250 (1996).
- (10) Synder, H. J., Masson, J. H.: "Space Nuclear Power System 1985", Orbit Book, p.223~229 (1985).
- (11) Tsuchibashi, K., *et al.*: "SRAC-JAERI Thermal Reactor Standard Codes System for Reactor Design and Analysis", JAERI, (1983).
- (12) Kubo, T., *et al.*: "An EWS Version of the SRAC Code", JAERI, (1994).
- (13) Suh, N. P.: "設計の原理—創造的機械設計論", 朝倉書店, (1992).
- (14) 松下 温, 他編: "知的触発に向かう情報社会—グループウェア維新", 共立出版, (1995).
- (15) 上滝致孝: "ヒューマンインタフェースの問題", パーソナル情報環境協会, (1995).
- (16) 伊藤美光: "新しい機械設計法", 日刊工業新聞社, (1991).
- (17) 小林重信: 事例ベース推論の現状と展望, 人工知能誌, 75(2), 20~38 (1992).
- (18) 中小路久美代, 他: 設計プロセスとアーティファクトの統合による非同期協同設計支援環境, 計測自動制御誌, 34(12), 948~953 (1995).