

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第5121088号
(P5121088)

(45) 発行日 平成25年1月16日(2013.1.16)

(24) 登録日 平成24年11月2日(2012.11.2)

(51) Int.Cl.

F 1

G 2 1 C 5/00	(2006.01)	G 2 1 C 5/00	B
G 2 1 C 3/328	(2006.01)	G 2 1 C 3/30	T
G 2 1 C 7/00	(2006.01)	G 2 1 C 7/00	B
G 2 1 C 17/00	(2006.01)	G 2 1 C 17/00	S

請求項の数 10 外国語出願 (全 25 頁)

(21) 出願番号	特願2000-399775 (P2000-399775)
(22) 出願日	平成12年12月28日 (2000.12.28)
(65) 公開番号	特開2001-264478 (P2001-264478A)
(43) 公開日	平成13年9月26日 (2001.9.26)
審査請求日	平成19年12月26日 (2007.12.26)
(31) 優先権主張番号	09/475309
(32) 優先日	平成11年12月30日 (1999.12.30)
(33) 優先権主張国	米国 (US)

(73) 特許権者	390041542 ゼネラル・エレクトリック・カンパニイ アメリカ合衆国、ニューヨーク州、スケネ クタディ、リバーロード、1番
(74) 代理人	100137545 弁理士 荒川 智志
(72) 発明者	ウィリアム・アル・ラッセル, ザ・セカ ンド アメリカ合衆国、ノース・カロライナ州、 ウィルミントン、アールバータム・ドライ ブ、1044番

審査官 青木 洋平

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】原子炉に関する多重運転制御変数を最適化するためのシステム及び方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

原子炉に関する複数の運転制御変数の制御変数値を用いて原子炉の最適燃料サイクル設計を決定するための方法において、

- (a) 複数の運転制御変数に関する特定の制御変数値によって規定される様々な条件の下で動作する炉心の多重同時コンピュータシミュレーションを実行する工程と、
- (b) 前記運転制御変数の制御変数値に所定の離散的变化を施した場合に前記工程(a) の炉心シミュレーションから得られる値から成る性能パラメータの特定の制御変数値を二次多项式に写像する工程と、
- (c) 前記工程(b) において得られた多项式を使用することにより、運転制御変数値の所定範囲にわたって特定の性能パラメータの複数の制御変数値を予測する工程と、
- (d) 前記工程(c) において予測された性能パラメータの複数の制御変数値に基づいていすれの運転制御変数及び運転制御変数のいずれの制御変数値が最適化された原子炉性能をもたらすかを決定する工程とを含むことを特徴とする方法。

【請求項 2】

- (e) 前記工程(d) において決定された運転制御変数の制御変数値を用いて確認のためのコンピュータシミュレーションを実行する工程を更に含む請求項 1 記載の方法。

【請求項 3】

- 前記運転制御変数が燃料バンドル装荷状態、制御棒位置、炉心流量、配列変更位置、燃料バンドル特性のいずれかに関する制御変数を含む請求項 1 記載の方法。

10

20

【請求項 4】

原子炉に関する複数の運転制御変数を最適化するためのコンピュータシステムにおいて

- 、
- (a) 複数の運転制御変数に関する特定の制御変数値によって規定される様々な条件の下で動作する炉心の多重同時コンピュータシミュレーションを実行するための手段と、
- (b) 前記コンピュータシミュレーションから得られた性能パラメータの特定の制御変数値を二次多項式に写像するための手段と、
- (c) 多項式係数値を用いて前記二次多項式を保存するための手段と、
- (d) 前記多項式を使用することにより、運転制御変数値の所定範囲にわたって性能パラメータの複数の制御変数値を予測するための手段と、
- (e) 前記性能パラメータの複数の制御変数値を評価することにより、いずれの運転制御変数及び運転制御変数のいずれの制御変数値が最適化された原子炉性能をもたらすかを決定するための手段とを含むことを特徴とするコンピュータシステム。

【請求項 5】

汎用コンピュータを制御することにより、原子炉に関する複数の運転制御変数の運転制御変数最適値の制御変数値を決定するための命令セットを有するソフトウェアシステムにおいて、前記命令セットが複数の機能モジュールを成して作成され、かつ前記機能モジュールが

- (a) 炉心の運転条件及び設計制約条件に関係するサイクル特有の入力データを受入れて保存するためのコンピュータプログラム命令を有する初期化モジュールと、
- (b) 特定の運転制御変数の所定の制御変数値によって規定される特定の条件の下で動作する炉心のコンピュータシミュレーションを開始させるためのコンピュータプログラム命令をそれぞれに有する複数の制御変数モジュールと、
- (c) 炉心シミュレーションから得られた性能パラメータの特定の制御変数値を、1組の対応する一意的な多項式係数を用いて規定される二次多項式に写像するためのコンピュータプログラム命令を有する多項式係数生成モジュールと、
- (d) 前記多項式から得られた性能パラメータの予測制御変数値に基づいて複数の運転制御変数及び各運転制御変数の制御変数値を評価することにより、前記複数の制御変数の最適値を決定するためのコンピュータプログラム命令を有する多項式使用法モジュールとを含むことを特徴とするソフトウェアシステム。

【請求項 6】

多項式係数データを保存し、かつ(あるいは)炉心シミュレーション及び多項式の生成を行うための基礎となる運転制御変数値の所定範囲を変えることによって多項式係数データを変更するためのコンピュータプログラム命令を有する保存/変更モジュールを更に含む請求項5記載のソフトウェアシステム。

【請求項 7】

原子炉に関する複数の運転制御変数を最適化するためのシステムにおいて、前記システムは1種以上の通信リンクを介して相互接続されてネットワークを形成する複数のコンピュータプロセッサを含み、少なくとも1台のプロセッサは付属したデータ保存用メモリを有するホストプロセッサとして働き、前記メモリは炉心燃料サイクル特有の運転条件データ及び炉心設計制約条件データを内部に保存し、そして前記ホストプロセッサは

- (a) 1つ以上の特定の運転制御変数の所定の制御変数値によって規定される様々な条件の下で動作する炉心の複数の同時コンピュータシミュレーションを開始させ、
- (b) 前記コンピュータシミュレーションから得られた性能パラメータの特定の制御変数値を二次多項式に写像し、
- (c) 前記多項式を使用することにより、運転制御変数値の所定範囲にわたって性能パラメータの複数の制御変数値を決定し、かつ
- (d) 前記性能パラメータの複数の制御変数値を評価することにより、対応するいずれの運転制御変数及び運転制御変数のいずれの制御変数値が最適化された原子炉性能をもたらすかを決定するようにプログラムされていることを特徴とするシステム。

10

20

30

40

50

【請求項 8】

前記ホストプロセッサはまた、前記決定された運転制御変数の最適制御変数値を用いて確証のための炉心コンピュータシミュレーションを実行するようにプログラムされている請求項 7 記載のシステム。

【請求項 9】

原子炉の運転に際して使用される複数の運転制御変数を最適化するための方法工程を実施するためコンピュータによって実行し得る命令プログラムを実体化する、コンピュータによって読み取り可能なデジタル情報記憶装置において、前記方法工程が、(a) 複数の運転制御変数に関する特定の制御変数値によって規定される様々な条件の下で動作する炉心のコンピュータシミュレーションを実行する工程と、
10

- (b) 前記コンピュータシミュレーションから得られた性能パラメータの特定の制御変数値を二次多項式に写像する工程と、
- (c) 前記多項式に基づき、運転制御変数値の所定範囲にわたって特定の性能パラメータの複数の制御変数値を決定する工程と、
- (d) 前記特定の性能パラメータの複数の制御変数値及び、前記運転制御変数値の前記範囲にわたって運転制御変数及び運転制御変数の複数の離散値を評価することにより、前記運転制御変数の最適化された制御変数値を決定する工程とを含むことを特徴とするディジタル情報記憶装置。

【請求項 10】

コンピュータによって読み取り可能な媒体上において実現された、原子炉用の複数の運転制御変数を最適化するためのコンピュータプログラムにおいて、
20

- (a) 炉心コンピュータシミュレーションから得られた性能パラメータの特定の制御変数値を二次多項式に写像するためのコンピュータプログラムコード命令と、
- (b) 前記多項式を使用することにより、運転制御変数値の所定範囲にわたって性能パラメータの複数の制御変数値を予測するためのコンピュータプログラムコード命令と、
- (c) 前記性能パラメータの複数の制御変数値を評価することにより、いずれの運転制御変数及び運転制御変数のいずれの制御変数値が最適化された原子炉性能をもたらすかを決定するためのコンピュータプログラムコード命令とを含むことを特徴とするコンピュータプログラム。

【発明の詳細な説明】

30

【0001】

本発明は、原子炉の燃料サイクル設計及び管理に関するものである。更に詳しく言えば本発明は、1以上の炉心燃料装荷サイクルを通じて原子炉の運転に関連する複数の運転制御変数（たとえば、燃料組成、燃料照射率、燃料配置状態、制御羽根位置及び他の品質決定的因子）を考慮しながら最適炉心設計及び制御方法を決定することに関する。

【0002】**【発明の背景】**

原子炉の炉心は、炉心の効率的な運転のための方法に影響を及ぼすことのある様々な特性を持った数多くの個別部品を含んでいる。たとえば、原子炉の炉心は相異なる特性を持った数多くの（たとえば数百の）個別の燃料バンドルを含んでいるが、これらの燃料バンドルはそれらの間の相互作用が法規上及び原子炉設計上の制約条件（行政及び顧客によって指定された制約条件を含む）の全てを満足するように炉心内に配列又は「装荷」しなければならない。同様に、特定の原子炉プラントにおいて炉心の性能を最適化するための効果的な制御方法を設計又は開発しようとすれば、炉心の反応度及び総合効率に影響を及ぼすその他の制御可能な要素及び因子もまた考慮に入れなければならない。かかる「運転制御変数」（本明細書中では「独立制御変数」とも呼ばれる）は、たとえば、個別に調整又は設定することのできる様々な物理的部品形状及び制御可能な運転条件を含んでいる。燃料バンドルの「装荷状態」以外の制御変数としては、「炉心流量」（すなわち、炉心を通る水の流量）、「照射率」及び「反応度」（すなわち、燃料バンドルの濃縮度の差に原因する炉心内の燃料バンドル間の相互作用）、並びに「制御棒パターン」（すなわち、炉心内
40

50

における制御羽根の分布及び軸方向位置)が挙げられる。これらの運転制御変数の各々は、それ自体として、炉心の総合性能に無視できない効果を及ぼす独立の「制御変数」を構成している。これらの独立制御変数が取り得る相異なる運転値の数(又は値の組合せの数)は龐大であるから、炉心の反応度及び性能に対する全ての影響を解析して最適化しようとすることは、たとえ公知のコンピュータ支援方法を用いるにせよ、手に負えそうもない課題でありかつ非常に長い時間のかかる仕事である。

【0003】

たとえば、炉心内において可能な相異なる燃料バンドル配置の数は100の階乗を越える。数多くの可能な相異なる装荷パターンのうち、特定の原子炉プラントに関して要求される設計上の制約条件の全てを満足する配置の割合はほんの僅かに過ぎない。その上、様々な設計制約条件を満足することに加え、燃料バンドルの装荷配列状態は炉心サイクルエネルギー(すなわち、炉心内に新しい燃料要素を装入する必要が生じるまでに炉心が生成するエネルギーの量)に影響を及ぼすから、炉心サイクルエネルギーを最適化する特定の装荷配列状態を選択する必要がある。10

【0004】

所要のエネルギー出力を供給しつつ維持するため、炉心には新しい燃料バンドルが定期的に装入される。ある燃料交換と次の燃料交換との間の期間は、一般に運転の「燃料サイクル」又は「炉心サイクル」と呼ばれる。個々の原子炉プラントに応じて異なるが、それは12~24カ月(通例は18カ月)程度である。燃料交換時には、最も反応度の低い燃料の1/3が原子炉から取出され、そして新しい燃料バンドルが追加される前に残りの燃料バンドルが再配置されるのが通例である。一般に、炉心サイクルエネルギーを改善するためには、反応度のより高い燃料バンドルを炉心内部の位置に配置すべきである。しかしながら、プラント特有の設計制約条件を満足させながらかかる配列状態を達成することは必ずしも可能でない。各々の燃料バンドルは他の燃料バンドルに対して様々な異なる位置に配置し得るから、各々の燃料サイクルに関して炉心の最適性能をもたらす炉心装荷配列状態を決定することは解決のために非常に長い時間を要することのある複雑で計算集約的な最適化問題を提起する。20

【0005】

炉心サイクルの経過中において、過剰反応度又は「ホットエクセス」として定義される炉心の過剰エネルギー能力は幾つかの方法によって制御される。1つの方法は、新しい燃料中に混入された可燃性の反応度抑制剤(たとえば、ガドリニア)を使用するというものである。可燃性抑制剤の初期量は、設計制約条件及び(通例はユーティリティ及びNRCによって設定される)性能特性によって決定される。かかる可燃性抑制剤はほとんどの過剰反応度を制御するが、全てを制御するわけではない。従って、核放出物を吸収することによって反応度を抑制する「制御羽根」(本明細書中では「制御棒」とも呼ばれる)もまた、過剰反応度を制御するために使用される。通例、炉心は数多くのかかる制御羽根を含んでいるが、それらは特定の燃料バンドルの間に嵌合し、そして炉心内において軸方向に移動することができる。これらの制御羽根は安全な運転停止を保証すると共に、最大出力ピーキング係数を制御するための主たる機構を提供する。30

【0006】

使用される制御羽根の総数は炉心の大きさ及び幾何学的形状と共に変化するが、通例は50~150である。制御羽根の軸方向位置(たとえば、完全に挿入された位置、完全に引抜かれた位置、又はそれらの中間の位置)は、過剰反応度を制御しつつ他の運転制約条件(たとえば、最大炉心出力ピーキング係数)を満足するための必要性に基づいている。各々の制御羽根については、たとえば、25以上の可能な軸方向位置及び25の「照射量」(すなわち、使用期間)段階が存在し得る。対称性を考慮すると共に、任意所定の時点において使用可能な制御羽根の数を低減させるその他の要求条件を考慮すれば、最も簡単なケースに関しても6百万通りを越える組合せの可能な制御羽根位置が存在する。これらの可能な配置のうち、適用可能な設計上及び安全上の制約条件の全てを満足するのはほんの一部に過ぎず、しかもそれらのうちで経済的なものもほんの一部に過ぎない。その上4050

、制御羽根の軸方向位置もまた、任意所定の燃料装荷パターンが達成し得る炉心サイクルエネルギーに影響を及ぼす。核燃料サイクルコストを最小にするためには炉心サイクルエネルギーを最大にすることが望ましいから、最適の制御羽根位置を決定する方法を開発するに当っても、燃料サイクルの設計及び管理方法を最適化しようとする場合に考慮に入れなければならないもう1つの厄介な独立制御変数最適化問題が提起されることになる。

【0007】

従来、炉心装荷状態及び制御羽根位置の決定並びにその他の運転制御変数に関する最適化問題を含む原子炉燃料サイクルの設計及び管理は、主として炉心設計技術者の過去の経験に基づいて「試行錯誤」的に実施されていた。プラント運転条件の変更に対する迅速な応答を要求する状況のため、炉心設計技術者は極めて短い期間内に200を越える独立制御変数の値を指定するという厄介な課題に直面することがある。たとえば、炉心サイクルの期間にわたって特定の提唱された炉心装荷配列状態又は制御羽根配置状態が原子炉性能に及ぼす影響は、個別のコンピュータシミュレーションによって決定されるのが通例である。もし認定された配列状態によって特定の設計制約条件が満足されなければ、その配列条件は変更され、そして別のコンピュータシミュレーションが実行される。たとえただ1種の独立制御変数の値の変化がもたらす影響を評価するためにも比較的長いコンピュータシミュレーション時間が要求されるから、このような手順を用いて適當な燃料サイクル設計が決定されるまでには延べ数週間の人的資源及びコンピュータ資源が要求されるのが通例である。その上、このような試行錯誤法を使用した場合には、設計上及び安全上の制約条件の全てを満足する燃料サイクル設計配列状態が決定された後でも、決定された配列状態が実際の最大サイクルエネルギーを与えないことが判明することがある。それ故、このような試行錯誤法は炉心の最適燃料サイクル設計が決定されたと技術者が確信するまで継続されなければならない。しかし実際には、技術者の過去の経験に合致しない特定の炉心配列状態が炉心にとって実際の最適燃料サイクル設計であることも極めて起こり得る。とは言え、かかる実際の最適炉心配列状態は必ずしも上記のごとき試行錯誤法によって決定することができないのである。

10

20

【0008】

運転制御方法の問題は一般に各々の原子炉プラントに独特のものと考えられるから、いかなる既知のアルゴリズムも最適の運転制御方法を決定するための実行可能な解決策を与えることはなかった。その上、標準的な組合せの法則は現在商業的に運転されている数多くの相異なる原子炉プラント及び原子炉タイプに特有な広範囲の状況に対して実際に適用し得ないのが通例であるため、エキスパートシステムが広範囲にわたって適用されたこともなかった。サイクルエネルギーを最適化しつつ広範囲の原子炉に関する設計制約条件を満足する燃料バンドル装荷配列状態又は制御羽根配置状態を決定するため必要な時間を顕著に短縮し得る方法はほとんど開発されていない。また、最適の制御羽根配置状態を決定するため広範囲の原子炉に適用し得る少なくとも1つの方法が開発されていて、それは本発明の場合と同じ譲受人に譲渡された1998年8月4日付けのジャクソン(Jackson)の米国特許第5790616号の主題を成している。

30

【0009】

最適の炉心燃料バンドル装荷配列状態を決定するための同様な方法も開発されている。たとえば、本発明の場合と同じ譲受人に譲渡された1999年7月13日付けのフォークス・ジュニア(Fawks, Jr.)の米国特許第5923717号及び1998年8月4日付けのフォークス・ジュニア(Fawks, Jr.)の米国特許第5790618号の明細書を参照されたい。大体のところ、上記の方法は単一のプロセッサ又はコンピュータシステムを使用することによって燃料バンドルの位置又は制御羽根の軸方向位置に関する特定の部品配列／構成の下で原子炉運転条件をシミュレートする特定のプログラムルーチンを実行するものである。次いで、可能な代替ケースを系統的又は確率的に評価することによって配列状態が最適化される。各々の位置を解析した後、ランダムな配列状態が生成され、そしてその時点で決定されている最良ケースの配列状態と比較される。別の実例は、FORMOSA-Bと呼ばれる3D炉心シミュレーションコンピュータプログラムを用いて沸騰水型原子炉

40

50

(BWR)の炉心内燃料管理を最適化するための最近の方法である。〔ニュークリアーテクノロジー(Nuclear Technology)、第126巻、153頁(1999年)に収載されたビー・アール・ムーア、ピー・ジェイ・ツリンスキ及びエイ・エイ・カーブ(B.R. Moore, P.J. Turinski & A.A. Karve)の論文「FORMOSA-B: BWR炉心内年管理最適化パッケージ」を参照されたい。〕FORMOSA-Bコードの強化バージョンは、「シミュレーテッド・アニーリング(simulated annealing)」と呼ばれる確率的最適化技術の使用による限られた燃料装荷パターン最適化能力を有している。〔1999年9月に南アフリカのセンダ・エディトリアル(SENDA EDITORIAL)によって出版された「数学及び計算、原子力用途における原子炉物理学及び環境解析」に関する会議において発表されたエイ・エイ・カーブ及びピー・ジェイ・ツリンスキ(A.A. Karve & P.J. Turinski)の論文「炉心内燃料管理コードFORMOSA-BにおけるBWR制御棒パターンサンプリング能力の有効性」を参照されたい。〕残念ながら、上記の方法は一度に1種又は若干の運転制御変数(たとえば、燃料バンドル装荷パターン又は制御羽根位置)を最適化するためにしか適用することができない。その上、上記の方法はその他の重要な運転制御変数(たとえば、燃料バンドルの濃縮度、制御羽根配列間隔、炉心の水流量、及び品質や性能にとって決定的であり得るその他の独立制御変数)を取扱うことができない。それ故、広範囲の原子炉プラントタイプに対して広く適用し得ると共に、全ての固有運転制御変数並びに特定の原子炉プラントの運転に関して品質決定的であり得る数多くの特定制約条件及び考慮事項に基づいて最良の炉心燃料サイクル設計及び炉心内燃料管理方法を決定し得る効率的な最適化方法及び装置が得られれば極めて望ましいわけである。

10

20

【特許文献1】

米国特許第4330367号 1982年5月発行

【特許文献2】

米国特許第4459259号 1984年7月発行

【特許文献3】

米国特許第4552718号 1985年11月発行

【特許文献4】

米国特許第4853175号 1989年8月発行

【特許文献5】

米国特許第4949237号 1990年8月発行

30

【特許文献6】

米国特許第4997617号 1991年3月発行

【特許文献7】

米国特許第5009833号 1991年4月発行

【特許文献8】

米国特許第5023045号 1991年6月発行

【特許文献9】

米国特許第5091139号 1992年2月発行

【特許文献10】

米国特許第5171516号 1992年12月発行

40

【特許文献11】

米国特許第5267346号 1993年11月発行

【特許文献12】

米国特許第5272736号 1993年12月発行

【特許文献13】

米国特許第5309485号 1994年5月発行

【特許文献14】

米国特許第5311562号 1994年5月発行

【特許文献15】

米国特許第5392320号 1995年2月発行

50

【特許文献 1 6】		
米国特許第5438527 号 1995年8月発行		
【特許文献 1 7】		
米国特許第5530867 号 1996年6月発行		
【特許文献 1 8】		
米国特許第5631939 号 1997年5月発行		
【特許文献 1 9】		
米国特許第5636328 号 1997年6月発行		
【特許文献 2 0】		10
米国特許第5726913 号 1998年3月発行		
【特許文献 2 1】		
米国特許第5781430 号 1998年7月発行		
【特許文献 2 2】		
米国特許第5790616 号 1998年8月発行		
【特許文献 2 3】		
米国特許第5790618 号 1998年8月発行		
【特許文献 2 4】		
米国特許第5793636 号 1998年8月発行		
【特許文献 2 5】		
米国特許第5812622 号 1998年9月発行		20
【特許文献 2 6】		
米国特許第5855009 号 1998年12月発行		
【特許文献 2 7】		
米国特許第5859885 号 1999年1月発行		
【特許文献 2 8】		
米国特許第5912933 号 1999年6月発行		
【特許文献 2 9】		
米国特許第5923717 号 1999年7月発行		
【特許文献 3 0】		
米国特許第5940816 号 1999年8月発行		30
【特許文献 3 1】		
米国特許第6031984 号 2000年2月発行		
【特許文献 3 2】		
米国特許第6272483 号 2001年8月発行		
【特許文献 3 3】		
米国特許第6311313 号 2001年10月発行		
【特許文献 3 4】		
米国特許第6345240 号 2002年2月発行		
【特許文献 3 5】		
米国特許第6498661 号 2002年12月発行		40
【特許文献 3 6】		
欧洲特許公開第786782号 1997年7月 発行		
【特許文献 3 7】		
欧洲特許公開第823712号 1998年2月発行		
【非特許文献 1】		
Handbook of Simulation, by Jerry Banks, John Wiley & Sons, Inc., Aug. 1998, ISBN 0-471-13403-1, pp. 335-336.*		
【非特許文献 2】		
CRC Handbook of Mathematical Sciences, 5th Edition, William H. Beyer, CRC Press, 1985.*		50

【非特許文献 3】

"Effectiveness of BWR Control Rod Pattern Sampling Capability in the Incore Fuel Management Code FORMOSA-B", Karve et al, M&C'99, Sep., 1999, Madrid Spain, pp. 1459-1468.

【非特許文献 4】

Shiratori Yoshitake, "Expert System Supporting Preparation of Planning for Fuel Replacement", 04132995, published May 7, 1992, Japanese Patent Abstract.

【非特許文献 5】

Hamida, S. Ben et al. "The need for improving the exploration operators for constrained optimization problems." Proc. Of the 2000 Congress on Evolutionary Computation, San Diego, USA, 1989. 10

【非特許文献 6】

Michalewicz, Zbigniew et al. "Genocop III: A Co-evolutionary Algorithm for Numerical Optimization Problems with Nonlinear Constraints." Proc. Second IEEE Intl. Conf. Evolutionary Computation, D.B. Fogel (ed). IEEE Press, pp. 647-651, 1991.

【非特許文献 7】

Schoenauer, Marc et al. "Evolutionary Computation at the Edge of Feasibility." Proc. 4th Conf. Parallel Problems Solving from Nature, W. Ebeling and H.-M. Voigt (eds.), Springer-Verlag, pp. 573-580, 1996.

【非特許文献 8】

Back, Thomas et al. "A Survey of Evolution Strategies." Proc. 4th Intl. Conf. Genetic Algorithms, R.K. Belew and L.B. Booker (eds.), Morgan Kauffman, pp. 2-9, 1991. 20

【非特許文献 9】

Joines, Jeffrey A. et al. "On the Use of Non-Stationary Penalty Functions to Solve Nonlinear Constrained Optimization Problems with GA's." Proc. 1st IEEE Intl. Conf. Evolutionary Computation, D.B. Fogel (ed.) IEEE Press, pp. 579-584, 1994.

【非特許文献 10】

Eiben, A. E. et al. "SAW-ing EAs: adapting the fitness function for solving constrained problems." New Ideas in Optimization. McGraw-Hill, London, D. Corne, M. Dorigo, F. Glover (eds.), pp. 389-402, 1999. 30

【非特許文献 11】

Coit, David W. et al. "Adaptive Penalty Methods for Genetic Optimization of Constrained Combinatorial Problems." INFORMS Journal on Computing, 8(2): 173-182, 1996.

【非特許文献 12】

Moore, Brian R. et al. "FORMOSA-B: A Boiling Water Reactor In-Core Fuel Management Optimization Package." Nuclear Technology, vol. 126, pp. 153-169, May 1999. (17 pages) Cited by 2 patents [ISI abstract]

【非特許文献 13】

Karve, A.A. et al. "FORMOSA-B: A Boiling Water Reactor In-Core Fuel Management Optimization Package II," Nucl. Technol., 131, 48-68 (2000). (21 pages) 40

【非特許文献 14】

Hadj-Alouane, A.B. et al. "A Genetic Algorithm for the Multiple-Choice Integer Program." Operations Research, 45 (1), pp. 92-101, 1997.

【0010】

【発明の概要】

本発明の実施の一態様に従えば、原子炉の多重運転制御変数を最適化することによって最適の燃料サイクル設計を決定しつつ運転管理方法を開発するためのシステム及び方法が提供される。本発明の一側面は、原子炉シミュレーションプログラムを実行するようにプロ

グラムされた1台以上のコンピュータを含むと共に、1以上の燃料装荷サイクルにわたって炉心を運転するための最適の物理的構成をもたらす特定の制御変数の最適値を決定するようにプログラムされた少なくとも1台のコンピュータを含むネットワーク化コンピュータシステムに関する。本発明のもう1つの側面は、原子炉の炉心の性能に影響を及ぼす運転制御変数の最適値を効率良く決定するための方法に関する。なお、運転制御変数は原子炉の「制御可能な」物理的側面（たとえば、燃料バンドル装荷状態、制御棒パターン、炉心流量など）であって、それらの特性は特定の炉心の物理的構成及び運転制約条件を規定する。確率的又は推計学的な探索技術あるいは法則に基づく技術に依存して「探索」スペースの大きさを低減させようとする試みとは異なり、本発明の最適化方法は最適解の確定的かつ徹底的な探索を行うものである。

10

【0011】

本発明の実施例においては、数千の性能パラメータ（様々な運転制御変数の設定又は値に依存するという理由から本明細書中では「従属」変数とも呼ばれる）のうちの幾つかが炉心性能を決定するための尺度として利用される。このような「性能パラメータ」としては、炉心性能を計測するために通例使用されるパラメータであるCPR、SDM、MAPLHGR、MFLPD、ホットエクセスなどが挙げられるが、それらのみに限定されるわけではない。解析される性能パラメータの多く（たとえば、MAPLHGR、MFLPD及びMCP）は空間的及び時間的に依存性を示す。その結果、本発明は数千のかかる「従属」変数を解析することが可能でなければならない。これを達成するため、本発明の好適な実施の態様に従えば、複数のプロセッサを使用することによって1以上の燃料サイクルにわたる炉心の運転状態をカバーする互いに独立のコンピュータシミュレーションが実行され、それによって数多くの相異なる制御変数に対するいかなる変化がそれぞれの性能パラメータによって測定される炉心の性能に影響を及ぼすかが判定される。これらの炉心シミュレーションは、炉心運転の三次元（3D）物理モデル化を行うことのできるコンピュータプログラム（すなわち、三次元制御変数を取扱うことのできるシミュレータプログラム）を用いて実行されることが好ましい。

20

【0012】

本発明の方法は、比較的小ない数の炉心コンピュータシミュレーションの結果を二次多項式に写像することにより、所要のシミュレーション数を顕著に減少させる（従って、総合的な計算効率を向上させる）。次いで、かかる多項式を使用することにより、1種以上の特定の制御変数（すなわち、独立変数）の定量値又は設定値の特定範囲（すなわち、「幅」）にわたって制御パラメータ（すなわち、従属変数）の定量値が予測される。その結果、各々の多項式「予測子」により、可能な制御変数値の特定範囲又は「幅」にわたって個々の制御変数が取り得る数多くの離散定量値に関してコンピュータシミュレーションを実際に実行するために必要な処理時間は効果的に短縮される。これらの多項式予測子の各々は、ホストコンピュータのメモリ内に多次元データアレイを成して保存された一意的な1組の係数値によって定義される。このようにすれば、かかるデータアレイは多項式係数により定義されて原子炉性能を表わす多項式を使用しながら3D物理モデル化に基づいて数多くの相異なるシミュレーションケースの結果をカタログ化しつつ解析するための1種の仮想「応答表面」として役立つ。

30

【0013】

多項式予測子を使用することにより、各々の制御変数の可能な値の幅にわたって所定の増分を有する離散制御変数値に対して性能パラメータの定量値が決定される。次いで、各々の性能パラメータの限界値を設定する通常の「目標関数」を用いて各々の性能パラメータ値を比較することにより、炉心性能を最適化するために最良の組合せの制御変数多項式予測子が決定される。オプションとして、2種以上の制御変数の変化の総合効果を解析する場合に特定の最適化「分解能」レベルを選択することができる。そのような場合には、2種以上の性能パラメータに関して予測値を組合わせることにより、起こり得ると思われる炉心シミュレーションを表わす正味変化又は「重ね合せ」値が生成される。次いで、各々の制御変化に関して得られた最良の予測値を用いて確認のための炉心シミュレーションが

40

50

実行される。これは、多項式予測子を確証すると共に、シミュレーションプロセスを用いて応答表面内の多項式係数データを較正するために役立つ。

【0014】

本明細書中に開示された本発明の方法は、十分な処理速度及び付属データ記憶容量を有するプロセッサから成るほとんど任意の種類のコンピュータネットワーク又は相互接続システムを用いて実施することができるのであって、必ずしも特定の種類のデータプロセッサ又はネットワークに限定されるわけではない。また、1つ以上のソフトウェアモジュールを含む本発明のソフトウェアシステムはコンピュータで読み取り可能な媒体上において実現することができ、従って1台以上のプロセッサ／コンピュータ又はネットワーク化されたコンピュータシステム間における転送並びに（あるいは）それらの上へのインストールが可能である。その上、本明細書中に開示された本発明の方法及びシステムは、沸騰水型原子炉（BWR）及び加圧水型原子炉（PWR）の両方を含む数多くの異なる種類の原子炉プラントの燃料サイクル設計及び運転を最適化することにも適用し得るものと考えられる。

【0015】

【好適な実施の態様の詳細な説明】

以下の説明は本発明の現時点において好適な実施の態様に関するものであって、かかる実施の態様はたとえばマイクロソフト（Microsoft）社のWindows 95 / NT環境の下で実行されるエンドユーザ用途として機能する。とは言え、本発明はいかなる特定のコンピュータシステム又はいかなる特定の環境にも限定されるわけではない。それどころか、当業者には自明のごとく、本発明のシステム及び方法は化学的及び機械的プロセスシミュレーションシステム、加圧水型原子炉シミュレーションシステム及び沸騰水型原子炉シミュレーションシステムなどをはじめとする、多重制御変数によって決定される任意の工業的／科学的プロセス又はシステムの管理及び（又は）最適化を必要とする環境に対して有利に適用することができる。更にまた、本発明は Unix（UNIX）、Linux（LINUX）、Macintosh（マッキントッシュ）などなどをはじめとする各種の相異なるプラットフォーム上で実施することもできる。それ故、以下に記載される実施例の説明は例示を目的としたものに過ぎないのであって、制限を目的としたものと解すべきでない。

【0016】

先ず最初に図1Aを見ると、原子炉用の多重運転制御変数を最適化するための本発明のシステム実施例がブロック図によって示されている。特定の炉心3を規定する原子炉プラント特有の設計制約条件及びサイクル特有の初期データ1が、本発明の最適化システム2に入力データとして送られる。また、運転制御変数（たとえば、制御棒パターン、燃料装荷状態、炉心流量など）に関する最適化値が、原子炉の炉心の設計及び管理に際して使用するための出力として与えられる。

【0017】

次に図1Bを見ると、本発明の最適化方法を実施し得るコンピュータネットワーク配列の一例が示されている。複数の汎用コンピュータ／プロセッサ10がローカルエリア通信ネットワーク（LAN）15に接続されており、また後者それ自体も1台以上の遠隔コンピュータ21との通信のために1基以上のオープン又はプライベートアクセスマッシュネットワーク20に接続することができる。好適な実施の態様においては、本発明の多重制御変数最適化方法は少なくとも1台のコンピュータ10上に常駐するソフトウェアモジュールを介して実行される。下記に説明されるごとく、かかるモジュールはコンピュータ10の間に分散していくてもよいし、あるいはLAN15及び（又は）ネットワーク20を介して連絡する1台以上のコンピュータ10（及び21）上に常駐していくてもよい。

【0018】

図1Bに示されるごとく、通信ネットワーク15及び（又は）20はインターネットのごときオープンネットワークであってもよいし、あるいはローカルエリアネットワーク（LAN）又はワイドエリアネットワーク（WAN）であってもよい。汎用コンピュータ10

10

20

30

40

50

が直接又はモデムを介してネットワーク15に接続されているが、それらは通常のI/O及びユーザインターフェース部品(図示せず)に加えて専用メモリ12を具備し若しくは具備しない独立のプロセッサ11から成っている。コンピュータ10は、たとえばVMSアルファ(VMS-Alpha)コンピュータシステム、レガシー(Legacy)コンピュータシステム、高速ワークステーション及び高速IBM互換パーソナルコンピュータ(たとえば、デスクトップ又はラップトップペンティアムIII(Pentium III)プロセッサシステム)のごとき各種の高速プロセッサのうちの任意のものであり得る。ネットワーク15及び20を介しての通信は、効率的なプロセッサ間通信を容易にする任意適宜の組合せの通常及び所有プロトコル(たとえば、PCP/IPプロトコル)を用いて達成することができる。

【0019】

10

2台以上のコンピュータ10(21)、好ましくは原子炉の炉心の運転をシミュレートするための適当なソフトウェアの実行を支援することができるシステムが、データファイル及び制御情報を交換するための何らかの通信リンク[LAN15及び(又は)ネットワーク20]を介して接続されている。ほとんど任意の公知炉心シミュレーションプログラム(又はプログラムセット)(たとえば、GE社製の「パナセア(PANACEA)」3D炉心シミュレーションプログラム)を本発明と共に使用することができる。この種のシミュレータプログラムは、炉心を規定する三次元変数を処理することができる。特定の「独立した」原子炉制御変数(たとえば、燃料装荷状態、制御棒パターン、炉心流量など)に関する値を含む入力ファイルが入力として送られる一方、1以上の炉心燃料装荷サイクル全体にわたって複数の離散間隔(すなわち、各々の「照射工程」)における炉心の状態を表わす特定の性能パラメータ(すなわち、CPR、SDM、MAPLHGR、MFLLPDなどのごとき炉心「従属」変数)に関する値から成る出力ファイルがシミュレータプログラムによって与えられる。

【0020】

20

次に図2を参照しながら、本発明の多重制御変数最適化方法を実行するための例示的なソフトウェアシステム200内における基本機能プロセス及びデータの流れを説明する。選択可能な「分解能」レベル(後記に一層詳しく説明する)に関する情報、その他の処理オプション、及び炉心サイクル特有の入力データ情報が、好ましくは初期段階においてユーザにより入力される(図示せず)。このユーザ入力情報から、特定の燃料サイクルに関して特定の原子炉プラントに特有の炉心特性及び品質決定的な運転制約条件を含むサイクル特有の炉心プロファイル入力ファイル201が作成される。かかるサイクル特有の入力データを使用することにより、特定の原子炉に関する初期「中心点」データケースを規定する初期独立制御変数値が確定される。この中心点データは炉心シミュレーションプログラム(実際のシミュレーションプログラムは図示せず)に入力データファイル202として送られる。かかる中心点データを用いて炉心運転シミュレーション207が実行される。たとえば、特定の「ホスト」コンピュータ10上において三次元(3D)解析炉心シミュレーションが実行される。シミュレーションプロセスが完了すると、中心点ケースシミュレーション出力データファイル212が生み出される。次いで、このファイルからの中心点ケースシミュレーション出力データは特定の「ホスト」コンピュータ10のディジタル記憶メモリ内に多次元アレイを成して保存され、そして様々な制御変数値に関する原子炉性能を評価するための1種の仮想「応答表面」219を作成するための基礎として使用される。

【0021】

30

次に、特定の運転制御変数に関する独立変数値の所定の変化によって表わされる異なる物理的条件及び制約条件の下で動作する同じ炉心の互いに独立のシミュレーションがソフトウェアシステムによって同時に実行される。相異なるシミュレータ入力データファイル203~206が作成されるが、それらの各々は特定の制御変化に関する値の変化を反映したものである。各々の入力ファイルは、通信ネットワーク(15、20)を介して接続された1台以上の独立したコンピュータ又はプロセッサ(10、21)上に常駐する独立の炉心シミュレータプログラム又はプロセス208~211に委託される。受取った入力フ

40

50

アイル中の値に基づいて炉心シミュレーションを実行した後、各々のシミュレータプロセスは炉心の従属変数（たとえば、C P R、M F L P D、M A P R A T、ホットエクセス及びS D M）の出力値を反映した出力データファイル2 1 3～2 1 6を戻す。独立変数ケース2 0 8～2 1 1の各々に関する炉心シミュレーションの全てが完了した後、シミュレーション出力ファイル2 1 3～2 1 6からのデータはブロック2 1 7に示されるごとくに正規化される。かかる正規化は、たとえば、各々のデータ項目を元の「中心値」ケース2 1 2から得られた出力データで割ることによって達成される。

【0 0 2 2】

全てのシミュレーションケースの出力データが正規化された後、各々の独立制御変数ケースに関する正規化データが1組の対応する二次多項式に写像される。換言すれば、1組の関連した多項式係数によってそれぞれ特徴づけられる二次多項式が、若干の限られた回数の炉心シミュレーションにおいて得られたシミュレーション出力データに当てはまるよう選択される。その場合、それぞれの独立制御変数を評価するためには、たとえば3回のシミュレーション（中心点ケース及び特定の制御変数に関する中心点ケース定量値をそれぞれ加減して成る2種の変動ケース）を使用することが好ましい。次いで、かかる多項式が各々の制御変数に関して特定の性能パラメータの定量値を射影するための「予測子」として利用される。ブロック2 1 8に示されるごとく、二次多項式を解くための通常のアルゴリズム技術を使用することにより、正規化されたシミュレータ出力データから各々の多項式を一意的に定義する係数が生成される。このような正規化係数データは、ブロック2 1 9に示されるごとく、本発明において「応答表面」として定義されるコンピュータメモリの領域内に保存される。基本的には、応答表面2 1 9は制御変数の値の個別変化又は複合変化に対する原子炉の従属変数（性能パラメータ）「応答」を含んでいる。このようにすれば、応答表面は多重独立制御変数に関する様々なケースのシミュレーションから得られた炉心シミュレーション出力データを保存するための言わばサイバーワークスペース兼データアレイリポジトリとして役立つことになる。

【0 0 2 3】

次に、各々の制御変数に関する全ての多項式が評価され（2 2 0）、そして最良の多項式予測子が選択される。多項式最適化及び評価モジュール並びに図7に関して一層詳しく説明されるごとく、変更値を評価するため、選択された最良の多項式予測子によって与えられた制御変数値を使用しながらもう1つのシミュレーションプロセス2 2 1が実行される。シミュレーション結果によって原子炉性能の改善が示されるならば、変更された制御変数は元の中心点ケースに対する改良例として受入れられる。次いで、新しい組合せの制御変数が新しい中心点ケースとして再定義され、そして（図2中に点線で示されるごとく）制御変数評価プロセス全体が再び繰返される。このような操作は、もはや顕著な改善が得られなくなるまで続けられる。それ以上の改善が得られないことが確認されたならば、より小さな（より限られた）範囲の制御変数値を用いて応答表面が再定義され、そして上記の工程が繰返される。制御変数のそれ以上の改善が認められず、かつ制御変数値の範囲をもはや縮小することができなければ、最適化プロセス全体が本質的に完了したものと見なされる。

【0 0 2 4】

次の図3には、本発明の多重制御変化最適化方法を実施するためのソフトウェアシステム3 0 0の実施例が機能的に関連する部分又は「モジュール」を用いて図示されている。なお、各々のモジュールに関する機能的プログラム制御工程の実施例を一層詳しく示す別の図4～8との関連も示されている。ソフトウェアシステム3 0 0の1つ以上のモジュールは、ソフトウェアシステム全体を含め、1台以上のプロセッサ又はネットワーク化されたコンピュータシステム上への分散及びインストールを容易にするためにコンピュータで読み取り可能な媒体上に実現することができる。本明細書中においては、機能的に関連したソフトウェアの様々な部分は独立のプロセッサによって個別又は集合的に実行し得るコンポーネントソフトウェアモジュールとして記載されているが、本発明のソフトウェアシステムは必ずしもモジュール型のコンポーネント構成に限定されるわけではない。図3に示さ

10

20

30

40

50

れるごとく、ソフトウェアシステム 300 の実施例は応答表面初期化モジュール 301、1つ以上の制御変数モジュール 302、多項式係数生成モジュール 303、多項式使用法モジュール 304 及び応答表面保存 / 変更モジュール 305 を含んでいる。ソフトウェアシステム 300 内において機能的に関連したソフトウェアがモジュール型の構成を成していることは、特定の用途に関する所望又は必要に応じて様々な制御変数モジュール（図 5 A ~ 5 E）の使用又は省略を容易にすることによって相異なる環境に対するソフトウェアシステムの総合的な融通性及び適応性を向上させると共に、新しい別の制御変数モジュール又は更新された制御変数モジュールの追加をも容易にする。

【0025】

応答表面初期化モジュール 301 は、基本的に、所定の炉心に関する運転条件及び制約条件（たとえば、初期炉心燃料装荷状態、制御棒パターンなど）を規定するオペレータの入力したデータを受入れ、そして応答表面 219 を正規化するための出発点又は「中心点」シミュレーションケースを生成するためのものである。制御変数モジュール 302 の各々は、特定の種類の炉心制御変数（たとえば、燃料バンドル装荷状態、制御棒位置、炉心流量、配列変更位置、燃料バンドル特性など）に関するシミュレーションケースデータを生成するためのプログラム制御工程を含んでいる。各々の種類の制御変数に関しては、数多くの独立変数ケースを検討することができる。更にまた、特定の制御変数モジュールによって検討される各々の独立変数ケースに関しては、少なくとも 2 種の炉心シミュレーションを実行することによって応答データが得られる。その場合、1 つのシミュレーションは該独立変数の値を所定量だけ増加させながら中心点シミュレーションケースの値を用いて実行される一方、もう 1 つのシミュレーションは該独立変数の値を所定量だけ減少させながら中心点シミュレーションケースの値を用いて実行される。特定の制御変数に関する増加及び減少シミュレーション入力値の間の差は該制御変数の範囲又は「幅」と呼ばれる。また、全てのシミュレーションケースの結果は応答表面内に保存されるから、本明細書中ではそれは（該制御変数に関する）応答表面の「幅」とも呼ばれる。各々のシミュレーションケースの結果は、炉心シミュレーションプロセス内でモデル化された全ての運転性能パラメータ（従属変数）に関する値を含んでいる。最終的に、応答表面は各々の独立変数ケースに関する少なくとも 3 つの炉心シミュレーションケースの結果を含んでいる。それらの結果とは、中心点ケースの応答及び特定の制御変数モジュールによって生成された 2 種の変動ケースの応答である。

【0026】

制御変数モジュール 302 は、LAN 内の单一のコンピュータ / プロセッサ 10 を用いて順次に実行されることが好ましい。特定の原子炉プラント特有の検討事項に向けて作成された追加の制御変数モジュール（ここには図示せず）を使用することもできる。制御変数モジュール 302 は任意の順序で実行することができるし、また様々な品質決定的検討事項及び所望されることのある原子炉性能改善の程度に応じて（図 3 中の点線で示されるごとく）任意の 1 つ又は複数の制御変数モジュールを使用することもできる。制御変数値を含むシミュレータ入力データファイルは各々の制御変数モジュールによって作成され、そして常駐する炉心シミュレータプログラムを有する LAN（又は遠隔ネットワーク 21）内の他のコンピュータ / プロセッサに委託される。プロセッサによって 1 つのシミュレーションケースが完了すると、それは得られた値を含むシミュレータ出力データファイルを作成し、そして応答表面を保存するコンピュータにそのファイルを送る。炉心シミュレーションは非常に長い時間を要するのが通例であるから、このような分散した処理構成は数多くの相異なるシミュレーションケースを多少とも同時に進行させ、それによって炉心シミュレーションに際して消費される総合経過時間を大幅に短縮する。あるいはまた、LAN 内、WAN 内又はその他の通信リンクを介して接続された相異なる独立のコンピュータ上に相異なる制御変数モジュールを常駐させることもできる。たとえば、かかる実施の態様においては、あるコンピュータ上に常駐する応答表面初期化モジュール 301 は LAN を介して特定の所望制御変数モジュールの実行を該モジュールが常駐する別のコンピュータに依頼し、そして応答表面からの中心点ケースデータを転送する。

10

20

30

40

50

【0027】

多項式係数生成モジュール303は、各々の独立変数ケースに関する炉心シミュレーション結果を各々の性能パラメータ（すなわち、運転「従属」変数）に対応した一意的な二次多項式曲線に写像するためのプログラム制御コードを含んでいる。各々の多項式の係数値は、各々の多項式がそれに対応する性能パラメータに関する3つのシミュレーションケースから得られたデータに当てはまるように決定される。多項式使用法モジュール304は、各々の制御変数の値に対する変化及びまとめて検討される制御変数の組合せに対する変化を探求し、そしていずれの変化が炉心性能に最も大きな影響を及ぼすかを判定するためのプログラム制御コードを含んでいる。炉心シミュレーションの実行は長い時間がかかるから、多項式は炉心シミュレーションを実行する代りに制御変数の入力幅にわたる性能パラメータ値を決定するために（3Dシミュレータの実行に比べ）高速の予測子として使用される。性能に最大の影響を及ぼす制御変数は、予測された性能パラメータ値を所定の目標関数と繰返し比較することによって決定される。最後に保存／変更モジュール305は、応答表面の保存及び文書化を行うと共に、定量化された最適の運転制御変数値を出力するため、あるいは（後記に一層詳しく説明されるごとく）応答表面の「幅」を縮小することによって結果を更に改善し得ると判定された場合には応答表面を変更するためのプログラム制御コードを含んでいる。10

【0028】

次に図4について説明すれば、これは応答表面初期化モジュール301によって実行される機能工程の実施例を示すフローチャートである。初めの幾つかの初期工程401～404は、基本的に、初期の中心点シミュレーションケースを作成するために必要な情報を獲得しあつ認定するものである。工程401においては、制御変数の初期値（すなわち、初期制御棒パターン、初期炉心装荷配列状態など）及び初期応答表面幅を含むサイクル特有の炉心運転条件データがオペレータ入力を介して規定される。工程402においては、特定の原子炉プラントの設計基盤を成す特定の運転制約条件が獲得されたオペレータ入力情報に基づいて認定される。かかる設計基盤及び制約条件情報は、代替解答の相対品質を比較するために使用される「目標関数」（後述）の評価を助ける。その上、コンピュータオペレータは2種以上の制御変数の運転値が原子炉性能に及ぼす効果を組合せて検討することを可能にする入力オプション（多項式最適化・評価モジュール及び図7に関連して後記に一層詳しく説明される）を選択することもできる。20

【0029】

工程403においては、最適化に際して検討すべき特定の独立制御変数（炉心装荷状態、制御棒パターン、炉心流量、配列交換、燃料バンドル特性など）が獲得されたオペレータ入力情報に基づいて認定される。工程404においては、炉心内で使用すべき燃料バンドルが認定され、かつ反応度値に従ってソートされる。次に、工程405において、中心点シミュレーションケースを生み出すための炉心シミュレーション入力データファイルが生成され、そして常駐する（又は遠隔の）炉心シミュレーションプログラムに委託される。シミュレーションが完了したならば、シミュレーションの結果はシミュレーション出力ファイル中に戻される。工程406においては、多次元アレイがシミュレーション「応答表面」としてメモリ内に生成され、そしてシミュレーション出力ファイルからのデータが初期中心点ケースとしてそこに保存される。30

【0030】

次に、1つ以上の制御変数モジュール302を実行することにより、特定の制御変数の値の変動に対するシミュレーションケースデータが生成される。2種以上の制御変数モジュールの実行も随意である。所望に応じ、追加の制御変数モジュール（ここでは開示せず）を含むこともできる。前述の通り、個々の制御変数モジュールを单一のプロセッサによって順次に実行することもできるし、あるいはLAN又はWAN内の相異なるコンピュータ上で同時に実行することもできる。各々の制御変数モジュールの実行はより多くのシミュレーションケースデータを応答表面に追加することになるから、本発明方法の精度及び本発明によって達成し得る可能な原子炉性能最適化はそれに応じて向上する。40

【 0 0 3 1 】

先ず最初に、図 5 A を参照しながら、燃料バンドル装荷に関する制御変数モジュールの実施例によって実行される機能工程が説明される。燃料バンドル装荷モジュールは、燃料バンドル位置又は装荷配列状態の変更によって引起される原子炉性能パラメータの変化を調べるものである。従来、ほとんどの炉心は対称的な八分円から成っており、従って 1 つの八分円内における燃料バンドル配列状態を検討すれば事足りた。しかるに、対称的な八分円構成はこのプロセスの要求条件ではない。工程 5 0 1 に示されるごとく、特定の原子炉に関して予め認定された制約条件の下で燃料バンドル装荷状態の変更が許されるかが最初に判定される。もし燃料バンドル装荷状態の変更が許されなければ、プログラム制御は別のモジュールに移される。もし燃料バンドル装荷状態の変更が許されるならば、プロック 5 0 2 によって示されるごとく、工程 5 0 3 ~ 5 0 7 を繰返すことによって全ての許容し得る燃料バンドル位置が系統的に検討される。

10

【 0 0 3 2 】

工程 5 0 3 においては、特定の位置における燃料バンドルの既知の反応度値が所定のより高い値に変更される。次いで、新しい炉心シミュレーション入力ファイルが生成される。かかる入力ファイルは、燃料バンドルの反応度値の変更と共に、中心点に対する反応度の差を最小にするために行われる残りの燃料のシャフリングを反映したものである。次いで、工程 5 0 4 に示されるごとく、炉心シミュレーション入力ファイルがシミュレーション処理のために利用可能なプロセッサ / コンピュータ 1 0 に委託される。（この実施の態様においては一般に「燃料棒の減損」を反映した炉心シミュレーション入力ファイルが好適なものとして意図されているが、燃料棒減損型でないシミュレータ入力ファイルも本発明と共に使用することができる。）委託された炉心シミュレーションの結果を待つことなく、工程 5 0 5 において、同じ位置における燃料バンドルの反応度値が元の反応度値よりも低い値に変更される。

20

【 0 0 3 3 】

様々な制御変数モジュールに関連して本明細書中に記載されるごとく、特定の制御変数の値に施される増加及び減少の合計量は検討すべき特定の制御変数に応じて予め決定されていて、これは制御変数を調べるための値の範囲又は「幅」を規定する。

【 0 0 3 4 】

次に、工程 5 0 6 において、変更された反応度値を有する新しい炉心シミュレーション入力ファイルが再び生成され、そして別のシミュレーションを処理するために利用可能な任意のプロセッサ / コンピュータ 1 0 に委託される。本発明の実施の一態様においては、工程 5 0 4 及び 5 0 6 におけるシミュレーションケースが完了すれば、各々のシミュレーションから得られた出力データパラメータは（たとえば、炉心シミュレーションを実行した各々のプロセッサ / コンピュータにより）中心点に対して正規化され、多項式に当てはめられ、そして共通の応答表面 2 1 9 に保存される。別の位置における燃料バンドルの反応度値の変更がまだシミュレートされていなければ、必ずしも以前の工程の炉心シミュレーションの完了を待つことなく、工程 5 0 7 に示されるごとくに新しい燃料バンドル位置が選択され、そして工程 5 0 3 ~ 5 0 6 が再び繰返される。このような操作は、全ての許容される燃料バンドル位置が検討されるまで続けられる。最終的に、燃料バンドルの反応度の変動に関する全ての独立制御変数ケースが検討されたならば、別のモジュールの制御下で処理を続けることができる。

30

【 0 0 3 5 】

次の図 5 B は、制御棒の様々な軸方向位置を探求するための制御変数モジュールの実施例によって実行されるプログラム制御工程を示している。図 5 A の燃料バンドル装荷モジュールの場合と同様にして、各々の制御棒に関する 2 つのシミュレーションケースが生成され、そしてシミュレーション結果が共通の応答表面に追加される。工程 5 0 9 において、その原子炉に関して予め認定された制約条件の下で制御棒パターンの変更が許されるかが最初に判定される。もし燃料バンドル装荷状態の変更が許されなければ、プログラム制御は別のモジュールに移される。もし制御棒パターンの変更が許されるならば、工程 5 1 0

40

50

に示されるごとく、所定の制御棒が解析のために選択される。次に、工程 511において、選択された燃料棒の位置の初期値が所定量だけ増加させられる。なお、この場合の増加量は炉心の物理的境界及び指定されたユーザ限界を越えないようとする。工程 512 に示されるごとく、選択された制御棒の位置の値のみを変化させた新しい炉心シミュレーション入力ファイルが生成され、そして利用可能なプロセッサ / コンピュータ 10 に委託されてシミュレーション処理が行われる。

【0036】

工程 513においては、工程 511において行われたごとく、同じ制御棒に関する制御棒位置の値が元の値よりも低い値に変更される。次に、工程 514において、位置の値を変化させた新しい炉心シミュレーション入力ファイルが再び生成され、そして利用可能なプロセッサ / コンピュータ 10 に委託されて第 2 のシミュレーションケースが処理される。工程 515 に示されるごとく、その他の制御棒に関する位置の値の変更をシミュレートするのであれば、新しい制御棒が選択され、そして工程 511 ~ 514 が再び繰返される。このような操作は、全ての制御棒が検討されるまで継続される。燃料バンドル装荷モジュールの場合と同じく、制御棒位置モジュール内の各々の工程は必ずしも以前の工程の炉心シミュレーションが完了するのを待つことなく進行させることができる。最終的に、制御棒位置の変更に関する全ての独立制御変数ケースが検討されたならば、別のモジュールの制御下で処理を続けることができる。

【0037】

次の図 5C は、炉心流量の変化に基づいて応答表面を作成するための制御変数モジュールの実施例によって実行されるプログラム制御工程を示している。図 5A 及び 5B の別の独立制御変数モジュールの場合と同様にして、各々の炉心流量制御変数に関する 2 つのシミュレーションケースが生成され、そしてシミュレーション結果が共通の応答表面に追加される。工程 519 において、その原子炉に関して予め認定された制約条件の下で炉心流量の変更が許されるかが最初に判定される。もし炉心流量の変更が許されなければ、プログラム制御は別のモジュールに移される。もし炉心流量の変更が許されるならば、工程 520 に示されるごとく、特定の炉心流量変数が解析のために選択される。次に、工程 521 において、選択された炉心流量変数の初期中心点ケース値が所定量だけ増加させられる。工程 522 に示されるごとく、選択された炉心流量変数の値のみを変化させた新しい炉心シミュレーション入力ファイルが生成され、そして利用可能なプロセッサ / コンピュータ 10 に委託されてシミュレーション処理が行われる。

【0038】

工程 523 においては、工程 521 と同様にして、同じ炉心流量変数に関する炉心流量値が元の値よりも低い値に変更される。次に、工程 524 において、炉心流量値を変化させた新しい炉心シミュレーション入力ファイルが再び生成され、そして利用可能なプロセッサ / コンピュータ に委託されて第 2 のシミュレーションケースが処理される。工程 525 に示されるごとく、その他の炉心流量変数に関する炉心流量値の変更がまだシミュレートされていなければ、次の独立炉心流量変数が選択され、そして工程 521 ~ 524 が再び繰返される。このような操作は、全ての独立炉心流量変数が検討されるまで継続される。上記のごとき他の制御変数モジュールの場合と同じく、このモジュール内の各々の工程は必ずしも以前の工程の炉心シミュレーションが完了するのを待つことなく進行させることができる。最終的に、炉心流量変数に関する全ての独立制御変数ケースが検討されたならば、別のモジュールの制御下で処理を続けることができる。

【0039】

次の図 5D は、配列間隔の変化に基づいて応答表面を作成するための制御変数モジュールの実施例によって実行されるプログラム制御工程を示している。他の制御変数モジュールの場合と同様にして、各々の燃料バンドルに関する 2 つのシミュレーションケースが生成され、そしてシミュレーション結果が共通の応答表面 219 に追加される。工程 529 において、その原子炉に関して予め認定された制約条件の下で配列間隔の変更が許されるかが最初に判定される。もし変更が許されなければ、プログラム制御は別のモジュールに移

10

20

30

40

50

される。もし変更が許されるならば、工程 530 に示されるごとく、特定の配列間隔が解析のために選択される。次に、工程 531 において、選択された配列間隔の初期中心点ケース値がユーザ指定の量だけ増加させられる。工程 532 に示されるごとく、選択された配列間隔の値のみを変化させた新しい炉心シミュレーション入力ファイルが生成され、そして利用可能なプロセッサ / コンピュータ 10 に委託されてシミュレーション処理が行われる。

【 0040 】

工程 533 においては、工程 531 と同様にして、同じ燃料バンドルに関する配列間隔値が元の値よりも低い値に変更される。次に、工程 534 において、配列間隔値を変化させた新しい炉心シミュレーション入力ファイルが再び生成され、そして利用可能なプロセッサ / コンピュータ に委託されて第 2 のシミュレーションケースが処理される。工程 535 に示されるごとく、その他の配列間隔変数に関する値の変更がまだシミュレートされなければ、新しい燃料バンドルが選択され、そして工程 531 ~ 534 が再び繰返される。このような操作は、全ての関連する独立配列間隔変数が検討されるまで継続される。他の制御変数モジュールの場合と同じく、このモジュール内の各々の工程は必ずしも以前の工程の炉心シミュレーションが完了するのを待つことなく進行させることができる。最終的に、配列間隔変数に関する全ての独立制御変数ケースが検討されたならば、別のモジュールの制御下で処理を続けることができる。

10

【 0041 】

図 5A ~ 5D に示されたモジュールはいずれも、本質的に「連続的」と考えられる値を有する独立制御変数（たとえば、装荷パラメータ、制御棒パターンパラメータ、流量パラメータ、配列交換パラメータなど）を検討し得る本発明の最適化方法の能力を実証するものであるが、本発明の最適化方法は燃料バンドル特性のごとき「離散値」型制御変数の変化を検討するためにも使用することができる。次に、「離散値」型制御変数を検討するための制御変数 (CV) モジュールの実施例が図 5E に示されるような燃料バンドル特性に関連して説明される。

20

【 0042 】

次の図 5E を見ると、燃料バンドル特性の変化に基づいて原子炉シミュレーション応答データを作成するためのプログラム制御工程の実施例が示されている。この実施例においては、燃料バンドル特性は軸方向濃縮度の差（たとえば、軸方向ガドリニウム含量の変動）を有する任意の燃料バンドルを表わすことができる。前記に説明されたモジュールの場合と同じく、各々の独立制御変数に関して炉心シミュレーションケースが生成されかつ実行される。各々の独立制御変数が完了した後、独立変数出力情報が相対的な中心点に対して正規化される。とは言え、応答は多項式に写像されるのではなく、線形関数に写像される。全ての制御変数モジュール 302 及び対応するシミュレーションケースの実行が完了し、そして応答表面 219 が完成した後、応答表面に保存されたシミュレーションケースデータが多項式に写像される。

30

【 0043 】

次の図 6 は、各々の独立変数ケースに関する 3 つのデータ値（すなわち、上方の値、下方の値、及び中心点の値）に当てはまる多項式に各々のシミュレーションケースを写像するための多項式係数を生成するための機能的プログラム制御工程の実施例を示している。機能工程 601 においては、全てのシミュレーションケースが完了しかつ応答表面が更新されるまで処理の進行が遅らされる。次に、工程 602 及び 603 において、応答表面へのアクセスが行われ、そして制御変数モジュール 302 によって生み出された全てのシミュレーションデータが中心点データに対して正規化される。次に、機能工程 604 において、各々の独立制御変数に関する 3 つの正規化されたシミュレーションケース値に当てはまる一意的な二次多項式を定義するための係数が決定される。なお、ある種の制御変数（たとえば、燃料バンドルの軸方向特性）の評価はその制御変数の許容される幅を遥かに越えるような結果を生み出すことが多いから、この種の変数に関する炉心シミュレーション結果は離散的な一次評価例として応答表面内に保存され、そして多項式に写像される

40

50

ことはない。最終的に、工程 605において、各々の多項式に関する係数が保存され、そしてそれ以上の処理は多項式最適化・評価モジュールによって行われる。

【0044】

図 7 は、多項式最適化・評価モジュール 304 用の機能的プログラム制御工程の実施例を示している。このモジュールは、各々の制御変数に関連する二次多項式によってそれぞれ予測された原子炉性能パラメータ値を調べ、それによっていずれの制御変数及びいずれの値が原子炉性能の最も顕著な改善をもたらすかを判定するものである。工程 700 及び 701においては、各々の制御変数シミュレーションケースから生成された多項式が応答表面から呼び出され、サブグループに分類され、そしてその制御変数に関する許容される値の幅にわたって性能パラメータ（たとえば、CRP、MFLPD、MAPLHGR、SDMなど）の定量値を予測するために使用される。換言すれば、制御変数を選択し、そしてその制御変数の影響を受ける性能パラメータのそれぞれに関連する多項式を使用することにより、制御変数の幅（すなわち、所定許容値の範囲）にわたってその制御変数の値に所定数の離散的变化を施した場合にそれぞれの変化に対する原子炉性能を表わす 1 組の性能パラメータ値が予測される。このような操作が全ての独立制御変数について繰返される。

10

【0045】

当業界において一般に「重ね合せ」として知られる原理に基づき、相異なる制御変数に対して施された複数の変化が全体として及ぼす正味の効果は、個々の制御変数変化を別々に施した場合の効果を加算することにより求めることができる。従って、初期化及び入力段階において（すなわち、たとえば図 4 の初期化モジュールの工程 401 及び 402 に関連して上記に記載されたごとくにサイクル特有の入力及び設計基盤の考慮事項を認定する場合において）、本発明システムのユーザは 2 種以上の独立変数の運転定量値に対する変化を互いに組合せて評価することを可能にする入力オプションとして最適化「分解能」レベルを選択することができる。それ故、このオプションが予め選択されていれば、工程 700においては、選択された複数の独立制御変数のあらゆる組合せについて個々の多項式から予測された効果が即座に合算され、それによって相異なる制御変数に対して同時に施された複数の変化が数多くの炉心性能パラメータのそれぞれに及ぼす正味の効果が定量的に求められる。選択された分解能レベルが高いほど、より多くの独立制御変数が組合わされて評価され、従って原子炉性能を向上させる組合せが検出される確率が高くなる。たとえば、選択された最適化分解能レベルが「3」である場合、3 種の相異なる独立制御変数並びに検討される全ての制御変数のうちの 3 種の制御変数のあらゆる組合せに関する定量値の変化が評価される。各々の制御変数に関連した多項式予測子を使用することにより、特定の分解能の下で複数の制御変数の間における全ての離散的变化が調べられる。

20

【0046】

高い分解能レベルは低い分解能レベルよりもやや長い処理時間を要求することがあるが、全体の処理時間は従来の方法よりも顕著に短い。その理由は、各々のケースに関して実際に炉心のコンピュータシミュレーションを行うのではなく、多項式予測子が適宜に使用されかつ組合わされることにある。この実施の態様によって例証されるごとく、本発明の方法は本質的に余す所の無いものであって、大域的な最適燃料サイクル設計を決定することがほぼ保証される。非常に高い分解能レベルは長い処理時間を要求する点で実際には実行可能でないこともあるが、特定の分解能レベルの選択を可能にする本発明の能力に基づけば、システムユーザは達成が望まれる真の絶対最適条件への「接近」度を選択的に量化することができるのである。

30

【0047】

次に、工程 702において、個々の制御変数又は制御変数の組合せ（すなわち、「独立」変数）に対して施された各々の定量値変化に関し、「目標関数」試験を使用することによって性能パラメータ（すなわち、「従属」変数）の改善効果という点から上記の変化の相対的な「価値」又は「強度」が定量化される。目標関数は各々の性能パラメータに関する特定の限界値を設定する。この限界値は、主として定義された設計限界値に対する性能「違反」を統合することによって決定すると共に、エネルギーの追加や熱的マージンの増加

40

50

などのごとき有益な結果に関連する任意の性能「クレジット」の統合によって補正を施したものである。各々の性能パラメータ（たとえば、SDM、ホットエクセス、MFLPD、MAPLHGRなど）の設計限界値に所定の乗数（すなわち、数学的な係数）を適用することにより、各々のパラメータの正規化及び相対順位付けが達成される。基本的には、工程702において、当業界における通常の知識及び経験に従って作成された目標関数を用いて各々の予測性能パラメータ値を試験することにより、炉心性能を最適化するために最良の組合せの制御変数多項式予測子が決定される。

【0048】

工程703においては、制御変数の最良値が決定される。各々の多項式予測子は特定の制御変数に対応しているから、工程702の目標関数によって評価された多項式予測子が比較される。そして、制御変数の最良値が決定されるまで工程700～702が繰返される。次に、工程704において、制御変数値を（もし存在するならば）以前の繰返しから得られた値と比較することにより、何らかの改善が見出されるかどうかが判定される。いかなる改善も認められなければ、図8に示される工程において処理が続けられる。何らかの改善が見出されれば、1種以上の制御変数に対応して選択された最良の多項式予測子からの改善値を用いて炉心シミュレータ入力ファイルが作成され、そして工程705に示されるごとくに炉心シミュレーションが実行される。

10

【0049】

多項式の使用はいかなる変化が原子炉性能の改善をもたらし得るかを迅速に予測することを可能にするが、工程705における炉心シミュレーションはシミュレーションプロセスと応答表面内の多項式係数データとの間の較正を可能にする。本質的に、それは改善された制御変数の下での炉心の運転を立証する（「予測された」ではなく）「実際の」炉心シミュレーションデータを得ることによって予測された改善の検証を可能にする。工程706においては、工程705の炉心シミュレーション結果を中心点ケースからの炉心シミュレーション結果（又は以前の最適化の結果）と比較することにより、炉心性能に何らかの改善が得られたかどうかが判定される。工程705の炉心シミュレーションからの結果が中心点ケースに対して改善を示すならば、工程708に示されるごとくにその改善は取込まれ、そしてプロセスが再び繰返される。工程705の炉心シミュレーションの結果が改善されていなければ、対応する制御変数は「信頼できない」と考えられ、従って工程707においてそのように査定される。工程709において試験されるごとく、信頼できない制御変数が所定数を越えたら、多項式による最適化及び評価は停止され、そして図8に示される工程において処理が続けられる。

20

【0050】

図8は、応答表面保存／変更モジュール305用の機能的プログラム制御工程の実施例を示している。先ず最初に、応答表面の現在の「幅」（すなわち、検討される制御変数値の範囲としての応答表面の幅）が工程801において調べられる。制御変数に関するシミュレーションケースを作成する際に制御変数モジュールによって使用される値の所定範囲を縮小することが可能であれば、その幅が縮小され、そして元の中心点ケースデータを用いて新しい応答表面の作成が開始される。これは、「応答表面の幅を縮小する」として工程802に示されている。この時点において本発明の最適化方法は、図4の入口点Bによって示されるごとく、様々な制御変数モジュールの1以上を用いて「新しい」応答表面の作成を再び開始する。制御変数モジュールによって使用される制御変数値の「幅」を縮小することが可能でなければ、工程803及び804によって示されるごとく、現在の応答表面データが文書化（保存）され、そして最適化された制御変数値が出力される。

30

【0051】

以上、現時点において最も実用的で好適なものと考えられる実施の態様に関連して本発明を説明したが、本発明は開示された実施の態様のみに限定されないことを理解すべきである。それどころか、前記特許請求の範囲の精神及び範囲から逸脱しない限り、本発明は変更態様及び同等の構成をも包括することが意図されている。

【図面の簡単な説明】

40

50

【図1A】原子炉用の多重運転制御変数を最適化するためのシステムを示すブロック図である。

【図1B】本発明を実施し得る互いに独立したプロセッサのネットワーク配列の一例を示す略図である。

【図2】本発明の炉心多重制御変数最適化方法を実行するためのソフトウェアシステムの一実施例におけるプロセス間の基礎データの流れを示すデータ流れ図である。

【図3】本発明の炉心多重制御変数最適化方法を実行するためのソフトウェアシステムの一実施例を示すブロック図である。

【図4】本発明のソフトウェア実施例において応答表面初期化モジュールにより実行される機能的プログラム制御工程を示すフローチャートである。 10

【図5A】本発明のソフトウェア実施例において燃料バンドル装荷モジュールにより実行される機能的プログラム制御工程を示すフローチャートである。

【図5B】本発明のソフトウェア実施例において制御棒軸方向位置決めモジュールにより実行される機能的プログラム制御工程を示すフローチャートである。

【図5C】本発明のソフトウェア実施例において炉心流量モジュールにより実行される機能的プログラム制御工程を示すフローチャートである。

【図5D】本発明のソフトウェア実施例において配列間隔モジュールにより実行される機能的プログラム制御工程を示すフローチャートである。

【図5E】本発明のソフトウェア実施例において燃料バンドル特性モジュールにより実行される機能的プログラム制御工程を示すフローチャートである。 20

【図6】本発明のソフトウェア実施例において多項式係数生成モジュールにより実行される機能的プログラム制御工程を示すフローチャートである。

【図7】本発明のソフトウェア実施例において多項式使用法モジュールにより実行される機能的プログラム制御工程を示すフローチャートである。

【図8】本発明のソフトウェア実施例において応答表面結果を保存しつつ変更するための機能的プログラム制御工程を示すフローチャートである。

【符号の説明】

1 サイクル特有の入力データ

2 最適化システム

3 炉心

1 0 コンピュータ／プロセッサ

1 1 独立した C P U

1 2 専用メモリ

1 5 ローカルエリアネットワーク(L A N)

2 0 インターネット又はプライベートコミュニケーションネットワーク

2 1 リモートコンピュータ L A N

2 0 0 データ流れ図

2 0 1 炉心特性入力ファイル

2 0 2 炉心シミュレータ入力ファイル(中心点ケース)

2 0 3 炉心シミュレータ入力ファイル(独立変数ケース)

2 0 4 炉心シミュレータ入力ファイル(独立変数ケース)

2 0 5 炉心シミュレータ入力ファイル(独立変数ケース)

2 0 6 炉心シミュレータ入力ファイル(独立変数ケース)

2 0 7 炉心シミュレーションプロセス(中心点ケース)

2 0 8 炉心シミュレーションプロセス(独立変数ケース)

2 0 9 炉心シミュレーションプロセス(独立変数ケース)

2 1 0 炉心シミュレーションプロセス(独立変数ケース)

2 1 1 炉心シミュレーションプロセス(独立変数ケース)

2 1 2 中心点ケースシミュレーション出力ファイル

2 1 3 独立変数ケースシミュレータ出力ファイル

10

20

30

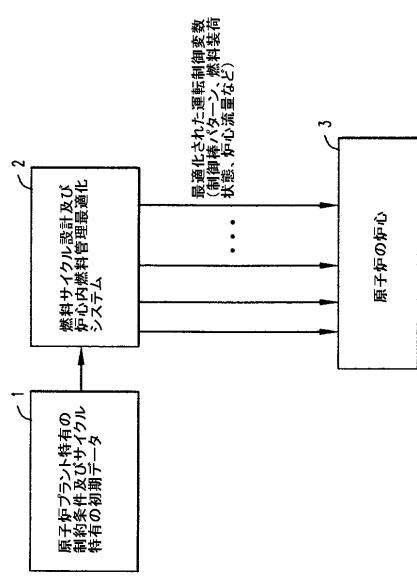
40

50

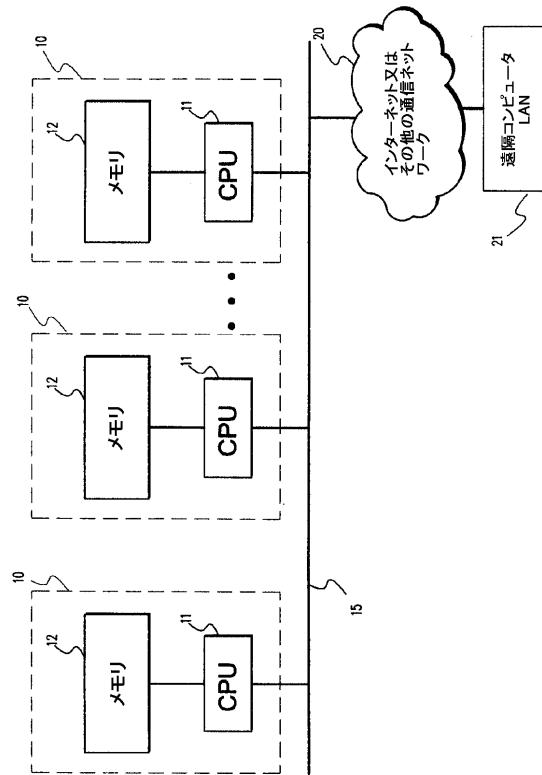
214 独立変数ケースシミュレータ出力ファイル
 215 独立変数ケースシミュレータ出力ファイル
 216 独立変数ケースシミュレータ出力ファイル
 219 応答表面
 300 ソフトウェアシステム図
 301 応答表面初期化モジュール
 302 制御変数モジュール
 303 多項式係数生成モジュール
 304 多項式使用法モジュール
 305 応答表面保存 / 変更モジュール

10

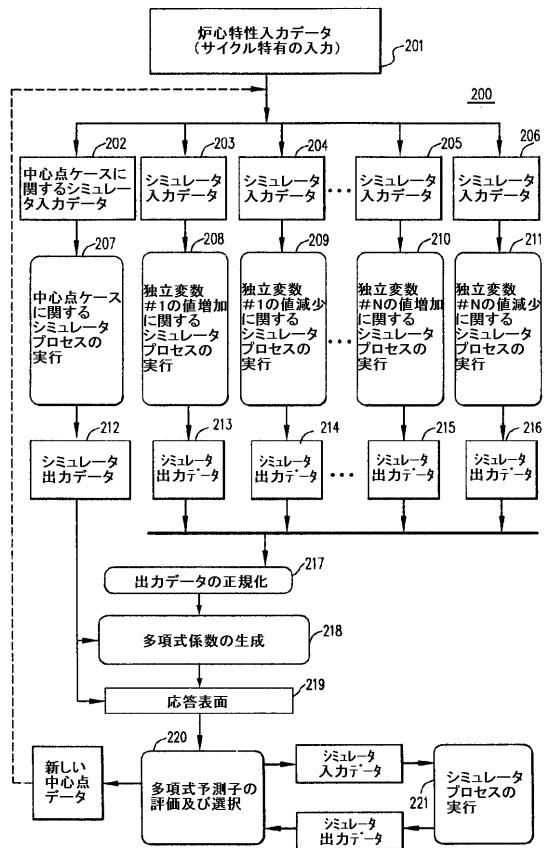
【図1A】



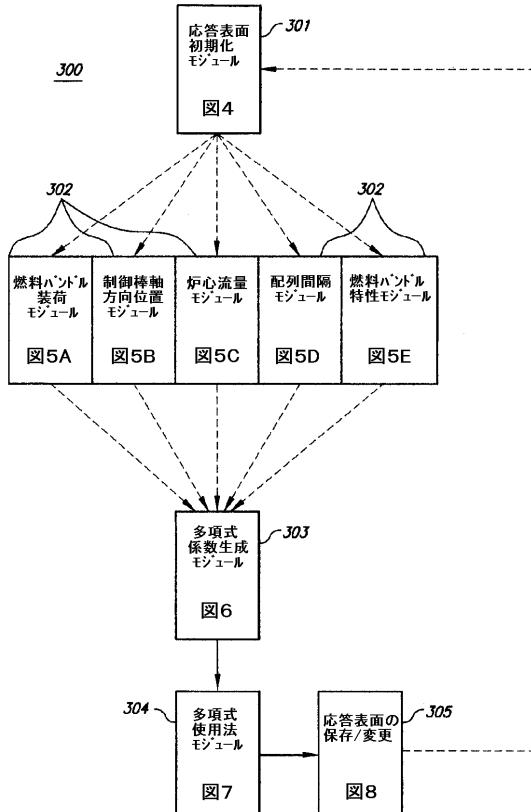
【図1B】



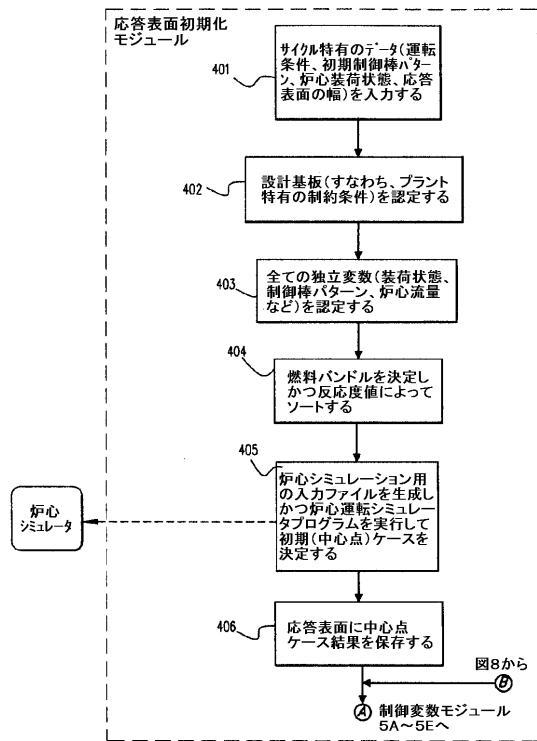
【図2】



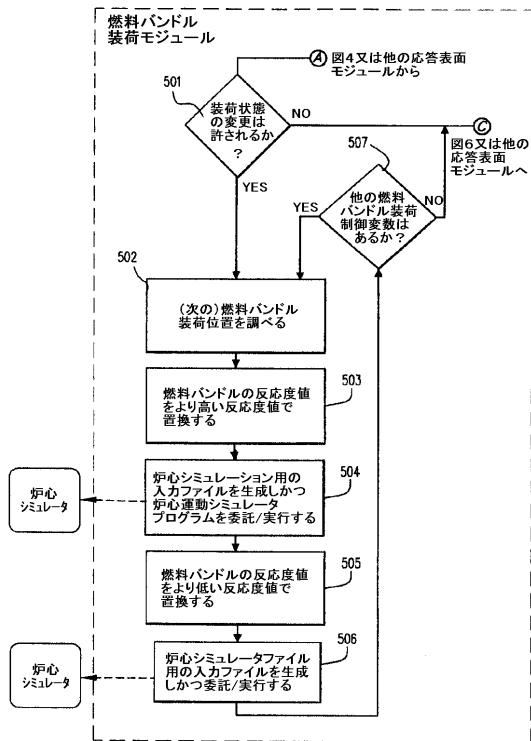
【図3】



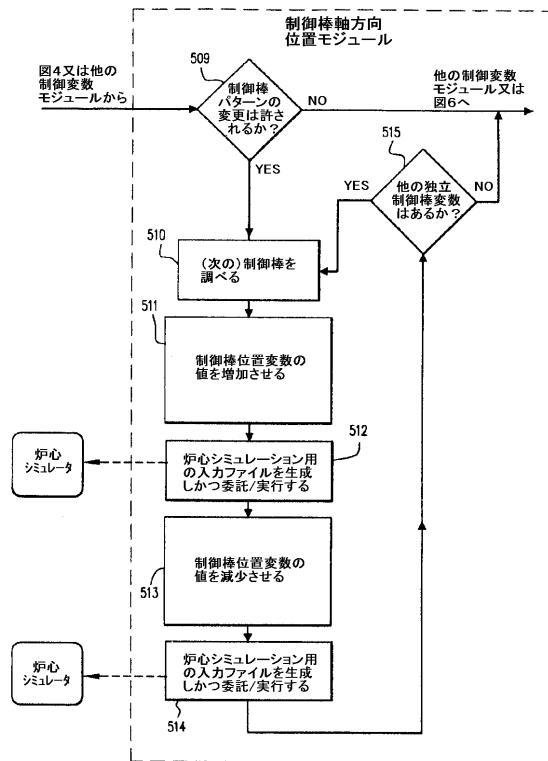
【図4】



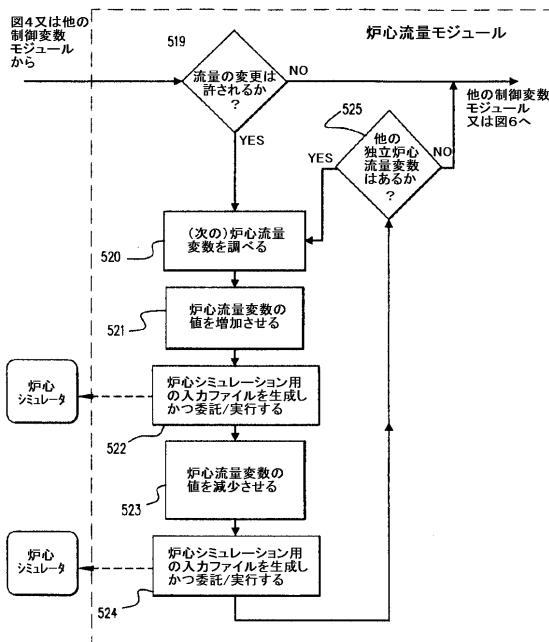
【図5A】



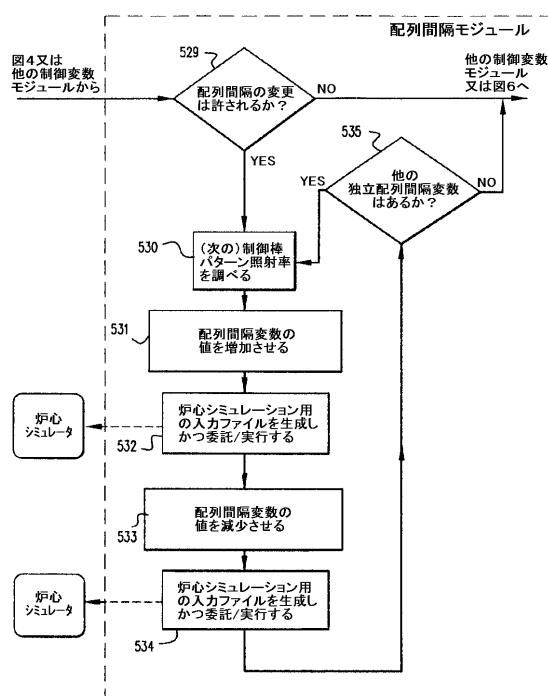
【図5B】



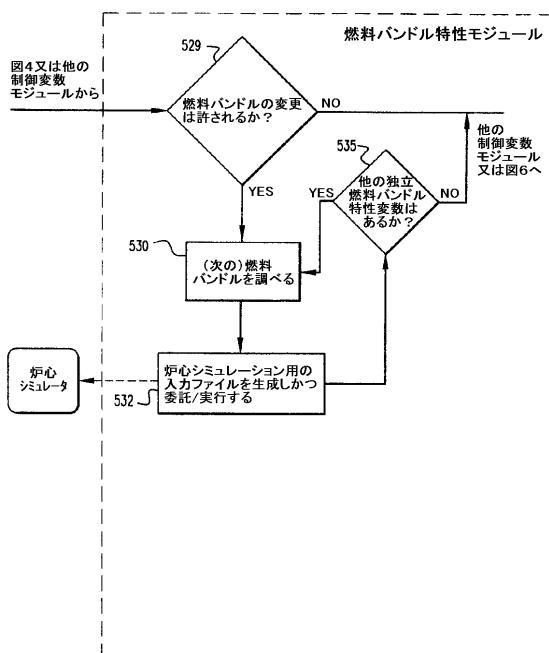
【図5C】



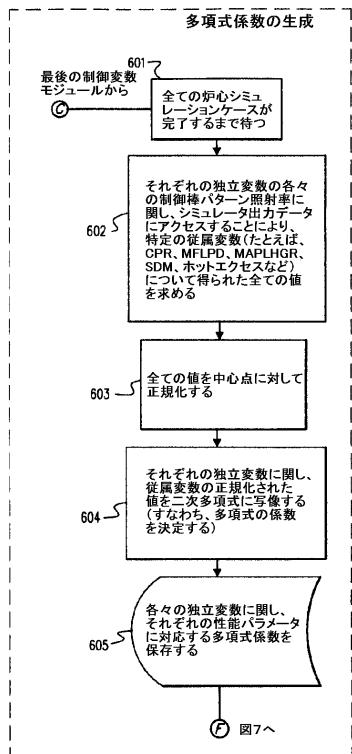
【図5D】



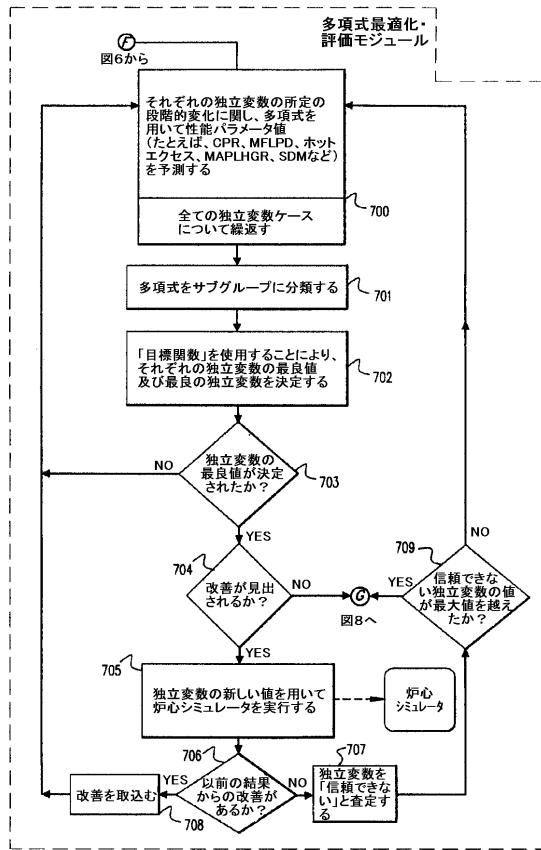
【図5E】



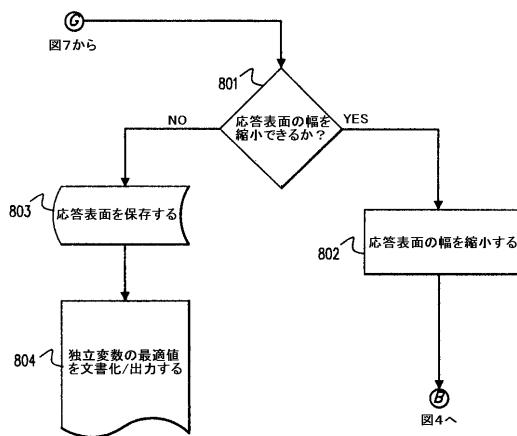
【図6】



【図7】



【図8】



フロントページの続き

(56)参考文献 特開平01-254894(JP,A)
特開平09-304570(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G21C 5/00

G21C 3/328

G21C 7/00

G21C 17/00