

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2004-301840

(P2004-301840A)

(43) 公開日 平成16年10月28日(2004.10.28)

(51) Int.Cl.⁷

G 2 1 C 5/00

G 2 1 C 17/00

F I

G 2 1 C 5/00

G 2 1 C 17/00

テーマコード (参考)

2 G O 7 5

審査請求 未請求 請求項の数 10 O L (全 26 頁)

(21) 出願番号 特願2004-97405 (P2004-97405)
 (22) 出願日 平成16年3月30日 (2004.3.30)
 (31) 優先権主張番号 10/401, 601
 (32) 優先日 平成15年3月31日 (2003.3.31)
 (33) 優先権主張国 米国 (US)

(71) 出願人 301068310
 グローバル・ニュークリア・フュエル・ア
 メリカズ・エルエルシー
 アメリカ合衆国, 28401, ノースカロ
 ライナ州, ウィルミントン, キャスル・ヘ
 イン・ロード, 3901
 (74) 代理人 100093908
 弁理士 松本 研一
 (74) 代理人 100105588
 弁理士 小倉 博
 (74) 代理人 100106541
 弁理士 伊藤 信和
 (74) 代理人 100129779
 弁理士 黒川 俊久

最終頁に続く

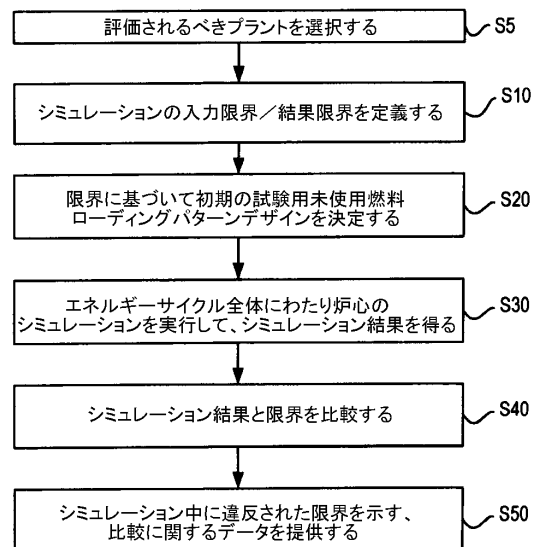
(54) 【発明の名称】 原子炉の未使用燃料ローディングパターンを判定するための方法及び装置

(57) 【要約】

【課題】 炉心ローディングパターンデザイン解を判定する方法を提供する。

【解決手段】 かかる方法は、原子炉の炉心に適用可能な限界のセットを定義すること (S10)、限界に基づいて炉心をローディングするために使用されるべき試験炉心ローディングパターンデザインを判定すること (S20)、少なくとも炉心のサブセットに対して原子炉動作をシミュレートして、複数のシミュレーション結果を生成すること (S30)、シミュレーション結果を限界と比較すること (S40)、シミュレーション中に試験炉心ローディングパターンによってローディングされた炉心により違反された限界を示すデータを提供する (S50)。

【選択図】 図4



【特許請求の範囲】**【請求項 1】**

原子炉の炉心ローディングパターンデザインを開発する方法において、
原子炉の炉心に適用可能な限界のセットを定義することと、
限界に基づいて炉心をローディングするために使用されるべき試験炉心ローディングパターンデザインを判定することと、
少なくとも炉心のサブセットに対して原子炉動作をシミュレートして、複数のシミュレーション結果を生成することと、
シミュレーション結果を限界と比較することと、
シミュレーション中に試験炉心ローディングパターンによってローディングされた炉心により違反された限界を示すデータを提供することとから成る方法。 10

【請求項 2】

前記定義する過程は、
前記シミュレートする過程を実行するために入力されるべき変数に適用可能であり、クライアントが入力したプラント特有の制約及び炉心性能基準と関連している入力限界を定義することと、
シミュレーション結果に適用可能であり、原子炉動作に使用される動作パラメータ、炉心安全限界、それらの動作限界及び安全限界に対するマージン、並びにクライアントが入力したプラント特有の制約のうちの少なくとも 1 つの関連している結果限界を定義することとを更に含み、前記入力限界及び前記結果限界は前記比較する過程において評価される請求項 1 記載の方法。 20

【請求項 3】

前記比較する過程は、
シミュレーション結果を評価するために目標関数を構成することと、
目標関数を使用してシミュレーション結果ごとに目標関数値を生成することと、
どのシミュレーション結果が限界に違反するかを判定するために、定義された限界のセットに基づいて目標関数値を評価することとを更に含む請求項 1 記載の方法。

【請求項 4】

前記提供する過程は、前記比較する過程が全ての限界は満足されていること、又は受け入れ可能なマージンの範囲内で満足されていることを示した場合、受け入れ可能炉心ローディングパターンデザインに関連するデータを提供することと、1 つ以上の限界の違反に基づいて、試験炉心ローディングパターンデザインを修正するための手続き勧告を提供することとを更に含む請求項 1 記載の方法。 30

【請求項 5】

試験炉心ローディングパターンデザインを修正して、派生炉心ローディングパターンを作成することと、
派生炉心ローディングパターンデザインの N 回の繰り返しを開発するために、N 回の繰り返しのうちの選択されたいくつかの繰り返しに対して、前記修正する過程、前記シミュレートする過程、前記比較する過程及び前記提供する過程を、特定の繰り返しにおける比較で全ての限界が満足されたこと、又は受け入れ可能なマージンの範囲内で満足されたことが示されるまで繰り返し反復することと、
炉心ローディングパターンデザイン、限界、シミュレーション結果及び各繰り返しにおける比較からのデータに関連する情報を格納することと、
原子炉の受け入れ可能炉心ローディングパターンデザインに関連するデータを出力することとを更に含む請求項 1 記載の方法。 40

【請求項 6】

原子炉の炉心ローディングパターンデザインを開発する装置 (1 0 0 0) において、
原子炉の炉心に適用可能な限界のセットを受信するインタフェース (2 3 0) と、
前記限界のセットを格納するメモリ (2 5 0) と、
限界に基づいて炉心をローディングするために使用されるべき試験炉心ローディングパ 50

ターンデザインを判定するプロセッサ(210、400)と、

試験炉心パターンデザインに従ってローディングされた炉心の少なくともサブセットに対してシミュレーション原子炉動作を実行して、複数のシミュレーション結果を生成するシミュレータとを具備し、

前記プロセッサ(210、400)は、シミュレーション結果を限界と比較し、

前記インタフェース(230)は、シミュレーション中に炉心により違反された限界を示すデータを提供する装置(1000)。

【請求項7】

前記インタフェース(230)は、ユーザ(300、350)によりインターネット又はイントラネットのいずれか一方を介してアクセス可能であるグラフィカルユーザインタフェース(GUI)であり、

ユーザ(300、350)は、前記GUIを介して限界を入力し、限界は、プラント特有の炉心性能パラメータ及び動作原子炉パラメータに対するプラント特有の制約に関連している請求項6記載の装置(1000)。

【請求項8】

前記プロセッサ(210、400)は、1つ以上の限界の違反に基づいて炉心ローディングパターンデザインを修正するために、前記インタフェース(230)を介してユーザに手続き勧告を提供する請求項6記載の装置(1000)。

【請求項9】

1つ以上の限界の違反を示すデータに応答して、

前記インタフェース(230)は、派生炉心ローディングパターンデザインを作成するために試験炉心ローディングパターンデザインを修正する指令を受信し、

前記シミュレータは派生炉心ローディングパターンデザインに対してシミュレーションを繰り返し、

前記プロセッサ(210、400)はシミュレーション結果を限界と比較し、

前記インタフェース(230)は、シミュレーション中に派生炉心ローディングパターンデザインにより違反された限界を示すデータを提供し、

N番目の派生炉心ローディングパターンデザインごとに、1つ以上の限界の違反を示すデータに応答して、前記インタフェース(230)、前記シミュレータ及び前記プロセッサ(210、400)は、特定の繰り返しにおいて、全ての限界が満足されたこと、又は受け入れ可能なマージンの範囲内で満足されたことを前記プロセッサ(210、400)が判定するまで、炉心ローディングパターンデザイン修正機能、シミュレーション機能、比較機能及びデータ提供機能のN回の繰り返しを実行する請求項6記載の装置(1000)。

【請求項10】

原子炉の炉心ローディングパターンデザインを判定する方法において、

試験炉心ローディングパターンデザインに従ってローディングされた原子炉の炉心に適用可能である、ユーザにより入力されるパラメータを受信することと、

少なくとも炉心のサブセットに対して原子炉動作をシミュレートして、複数のシミュレーション結果を生成することと、

シミュレーション結果を限界と比較することと、

シミュレーション中に炉心により違反された限界を示すデータをユーザが検討するように表示することと、

全ての限界が満足されるか、又はユーザにとって受け入れ可能であるマージンの範囲内で満足されるまで、表示されたデータに基づいて試験炉心ローディングパターンデザインを修正して、派生炉心ローディングパターンデザインを作成することとから成る方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、原子炉の炉心の未使用燃料ローディングパターンデザインを判定することに

10

20

30

40

50

関する。

【背景技術】

【0002】

例えば、沸騰水型原子炉（BWR）又は加圧水型原子炉（PWR）などの原子炉は、1～2年にわたり1度の燃料ローディングで動作することができる。所定の期間（エネルギーサイクル）が完了すると、原子炉から反応度が最低の燃料（最も古い燃料又はほぼ燃え尽きた燃料）のうちの約1/4から1/2が排出されるであろう。

【0003】

サイクルの動作は燃料アセンブリの配置（未使用燃料、1度燃焼燃料、2度燃焼燃料など）によって決まるといえる。炉心には、例えば、ガドリニウムなどの可燃性毒物が存在するため、未使用燃料アセンブリ、1度燃焼燃料アセンブリ及び2度燃焼燃料アセンブリの特性はそれぞれ異なるであろう。未使用燃料アセンブリは、通常、サイクル開始（BOC）時にはガドリニウムが存在するために1度燃焼燃料バンドルと比較して低い反応度を示す。サイクル終了（EOC）時には、毒物の大半又は全てが燃え尽きてしまっているため、未使用アセンブリは、通常、1度燃焼燃料より高い反応度を示す。2度燃焼燃料の照射線量依存性反応度曲線の形状は1度燃焼燃料の照射線量依存性反応度曲線の形状に類似しているであろうが、2度燃焼燃料の反応度は低くなる。しかし、未使用燃料アセンブリ、1度燃焼燃料アセンブリ及び2度燃焼燃料アセンブリを組み合わせることにより、エネルギーサイクルを通して、炉心全体にわたりほぼ均一な反応度を実現できるであろう。

【0004】

反応度の問題に加えて、燃料アセンブリ（「燃料バンドル」）の配置は熱限界、パワー整形及び燃料サイクル経済性にも影響を及ぼすと考えられる。反応度が余りにも高い燃料バンドルを面を隣接させて配置した場合、反応度閾値又は熱限界に不適切なマージンが現れるであろう。また、反応度の高い燃料バンドルを炉心の周辺に配置するのではなく、反応度の高い燃料バンドルを炉心の中心に向かってより多く配置することにより、サイクル長さが延長されるであろう。従って、炉心ローディングパターンは核燃料サイクルの最も重要な考慮事項の多くを定義するといつて良い。ある炉心ローディングパターンが与えられるとき、複数の未使用燃料バンドル、例えば、炉心ローディングパターンの一部を構成する未使用燃料ローディングパターンを含めることは有益であろう。多数の未使用燃料ローディングパターンデザインを開発することにより、サイクル長さの延長、プラントパワーのアップレート、安全マージンの増大などのいくつかのエネルギーサイクルメトリクスを改善することが可能であろう。

【0005】

従来、炉心ローディングパターンの判定は試行錯誤方式で行われてきた。例えば、設計担当者が特定の原子炉プラントに関連する動作パラメータを入力ファイルであるASCIIテキストファイルに繰り返し入力することを必要とする独立型手動操作炉心ローディングパターンデザインプロセスが使用される。入力ファイルに入力されるデータは制御ブレードのノッチ位置（評価される原子炉が沸騰水型原子炉（BWR）である場合）、炉心流量、MWD/s t、GWD/s t単位で測定される炉心エネルギーサイクルにおける燃焼量であっても良い炉心照射線量などを含むであろう。

【0006】

原子力規制委員会（NRC）が認可した炉心シミュレーションプログラムは得られた入力ファイルを読み取り、シミュレーションの結果をテキスト又は2進ファイルへ出力する。そこで、設計担当者はシミュレーション出力を評価して、設計基準に適合しているか否かを判定すると共に、熱限界のマージンの違反が起こっていないことを検証すれば良い。設計基準に適合できない場合（すなわち、1つ以上の限界に違反している場合）には、通常、設計担当者が手作業で入力ファイルを修正する必要がある。特に、設計担当者は1つ以上の動作パラメータを手作業で変更し、炉心シミュレーションプログラムを再度実行することになるであろう。このプロセスは、申し分ない炉心ローディングデザインが実現されるまで繰り返された。

10

20

30

40

50

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0007】

このプロセスでは、要求されるASCIIテキストファイルは構成するのが困難であり、多くの場合、誤りを生じやすいため、極めて長い時間がかかるであろう。ファイルは通常、ASCIIフォーマットであり、極めて長く、場合によっては1000行を超えるコードを含む。ファイルに1つ誤りがあっても、シミュレータのクラッシュを招く可能性があり、更に悪い場合には、さほど逸脱しているようには見え、当初は検出するのが困難であるが、時間の経過に伴って繰り返すうちに悪化し、誤った炉心ローディングパターンに従って実際の動作中の原子炉の炉心がローディングされた場合にはおそらく炉心サイクルエネルギーを減少させてしまうような結果を生じるであろう。

10

【0008】

更に、設計担当者をより好都合な炉心ローディングパターンデザイン解に向かって誘導するために、手動操作による反復プロセスを介する補助は全く与えられない。現在のプロセスでは、責任のある設計担当者又は技術者の経験と直観が炉心ローディングパターンデザイン解を判定する唯一の手段である。

【課題を解決するための手段】

【0009】

本発明の実施例は未使用燃料ローディングパターンデザインを判定する方法及び装置に関し、その方法及び装置においては、炉心に適用可能な限界のセットが定義されても良く、限界に基づいて、炉心をローディングするために使用されるべき試験未使用燃料ローディングパターンデザインが判定されても良い。少なくとも炉心のサブセットに対して原子炉動作がシミュレートされ、複数のシミュレーション結果が生成されても良い。シミュレーション結果は限界と比較されても良く、比較からのデータは、シミュレーション中にいずれかの限界が炉心により違反されたか否かを示しても良い。設計担当者又は技術者はそのデータを見て、試験未使用燃料ローディングパターンを修正し、シミュレーションを実行して、炉心の受け入れ可能未使用燃料ローディングパターンデザインとして最終的に完成するために、1つ以上の派生未使用燃料ローディングパターンデザインを作成しても良い。

20

【0010】

本発明の実施例は、以下の詳細な説明及び添付の図面から更に完全に理解されるであろう。図面中、同じ要素は同じ図中符号により表されるが、図中符号は単なる例示を目的として付されており、本発明の実施例を限定するものではない。

30

【発明を実施するための最良の形態】

【0011】

本発明の実施例は、原子炉の未使用燃料ローディングパターンデザインを判定する方法及び装置に関する。装置は、ユーザが炉心の未使用燃料ローディングパターンデザインを仮想作成することを可能にするために、グラフィカルユーザインタフェース(GUI)と、処理媒体(例えば、ソフトウェア駆動プログラム、プロセッサ、アプリケーションサーバなど)とを含んでいても良い。ユーザは、未使用燃料ローディングパターンに従ってローディングされた炉心のシミュレーションに関連するデータを適切な表示装置で見て、検討できる。装置は、提案された未使用燃料ローディングパターンデザインによってローディングされた炉心がユーザが入力した、シミュレートされる原子炉動作に対する限界又は制約にどれほど密接に適合しているかに基づいて、ユーザに対するフィードバックを提供しても良い。

40

【0012】

ユーザは、試験未使用燃料ローディングパターンデザインに基づいて、シミュレーションのためにローディングされるべき選択された原子炉プラントの炉心、例えば、「仮想炉心」に適用可能である、例えば、プラント特有の制約データなどであっても良い限界をGUIを介して入力しても良い。例えば、制約データ又は限界はある特定の原子炉プラント

50

又は炉心エネルギーサイクルに関する限界又は目標動作値及び炉心性能値のセットとして定義されても良い。GUIを介して、ユーザは初期試験未使用燃料ローディングパターンデザインを判定し、その試験未使用燃料ローディングパターンデザインに基づいてローディングされた炉心の原子炉シミュレーション（例えば、NRCにより認可されたシミュレーションコードを使用する3次元シミュレーション）を開始し、シミュレーションの結果を見ても良い。

【0013】

実施例に従えば、未使用燃料ローディングパターンデザインによってローディングされたシミュレート炉心が限界又は制約にどれほど密接に適合しているかを比較するために、目標関数を使用できるであろう。目標関数は、それらの制約又は限界を取り込み、未使用燃料ローディングパターンデザインが限界内で行なわれることを定量化する数式である。例えば、シミュレーションの結果と、計算された目標関数値とに基づいて、炉心の設計担当者、技術者、プラント管理者、及び装置へのアクセスを許可された何らかの人間であると思われるユーザは、特定のデザインがユーザの設計（限界）要求条件に適合するか（すなわち、最大サイクルエネルギー条件に適合するか）否かを判定することが可能である。次に、ユーザは、GUIを介して、試験未使用燃料ローディングパターンデザインを修正して、派生未使用燃料ローディングパターンデザインを作成し、派生未使用燃料ローディングパターンデザインに何らかの性能の改善があるか否かを判定するためにシミュレーションを繰り返すための指令を発行しても良い。更に、N番目のデザインによってシミュレートされた炉心が全ての限界を満足するか、又はユーザにとって受け入れ可能であるマー

10

20

ジンの範囲内で全ての限界を満足するまで、N回分の未使用燃料ローディングパターンデザインを生成するために、ユーザはGUIを介してシミュレーション、結果と限界の比較、限界が違反された場合のデザインの修正などのいくつかの機能を繰り返しても良い。

【0014】

本発明の実施例は、現在の手動操作による反復プロセスと比較して、原子炉の所望の未使用燃料ローディングパターンデザインを作成するために必要とされる時間の量を1/10に短縮するために計算環境を利用できる。その結果得られる未使用燃料ローディングパターンデザインはユーザが入力する制約又は設計限界をほぼ完全に厳守し及び/又はそれらに厳密に適合するが、それは、特定のデザイン解に対する目標関数値が0に等しくなるまで、未使用燃料ローディングパターンデザインが完成しないからである。従来の手動操作による反復プロセスと比較して、未使用燃料ローディングパターンデザインを変更し、変更されたデザインをシミュレートするためのより大きな動作上の融通性を得ることができる。手動操作による反復プロセスに関して説明したような、シミュレータ入力ファイルを生成することを試みる際の誤りは本発明ではもはや見られない。

30

【0015】

図1は、本発明の一実施例に従った方法を実現するための装置を示す。図1を参照すると、装置1000は、例えば、アクセス可能ウェブサイトの中央ネクサスとして利用されても良いアプリケーションサーバ200を含んでも良い。アプリケーションサーバ200は、例えば、WINDOWS（登録商標）2000アプリケーションサーバなどの周知の何らかのアプリケーションサーバとして具現化されても良い。アプリケーションサーバ200は複数の計算サーバ400、暗号サーバ260及びメモリ250に動作接続されていても良い。メモリ250は、例えば、リレーショナルデータベースサーバとして具現化されても良い。

40

【0016】

複数の外部ユーザ300は暗号化128ビット機密保護ソケット層（SSL）接続375などの適切な暗号化媒体を介してアプリケーションサーバ200と通信しても良いが、本発明の実施例はこの暗号化通信媒体に限定されない。ユーザ300はインターネットを介して、例えば、パーソナルコンピュータ、ラップトップ、パーソナルデジタルアシスタント（PDA）などのうちのいずれか1つから、ウェブベースインターネットブラウザなどの適切なインタフェースを使用して、アプリケーションサーバ200に接続すれば良い

50

。更に、アプリケーションサーバ200は、内部ユーザ350が、例えば、イントラネットを介してアクセスできるように、適切なローカルエリアネットワーク接続(LAN275)を介して内部ユーザ350に対してもアクセス可能であっても良く、従って、内部ユーザ350はイントラネット(すなわち、プライベートネットワーク)の一部であるパーソナルコンピュータ、ラップトップ、パーソナルデジタルアシスタント(PDA)などのうちのいずれかから、例えば、イントラネットを介してアクセスできるであろう。

【0017】

アプリケーションサーバ200は、オンライン機密保護を実行すること、目標関数値を計算するために全ての計算及びデータのアクセスを指示すること、及びユーザが検討する未使用燃料ローディングパターンデザインの様々な特徴の適切な図表表現を作成することが必要であると考えられる。図表情報は128ビットSSL接続375又はLAN275を介して通信されて、ユーザ300/350の適切な表示装置に表示されれば良い。これ以降の説明において、「ユーザ」という用語は内部ユーザ300と外部ユーザ350の双方を表す。例えば、ユーザは、ユーザ自身の原子炉の未使用燃料ローディングパターンデザインを判定するためにウェブサイトアクセスする原子炉プラントの代表者、本発明の実施例を使用して未使用燃料ローディングパターンデザインを開発するために原子炉の現場により雇用されているベンダー、あるいは装置1000又は本発明の実施例に従った方法を実現する別のシステムに対するアクセスを許可された他の人物のうちのいずれかであれば良い。

10

【0018】

図2は、図1の装置と関連するアプリケーションサーバ200を示す。図2を参照すると、アプリケーションサーバ200は、様々な構成要素を接続し且つユーザから受信されるデータの経路を形成するためにバス205を利用する。バス205は、多くのコンピュータアーキテクチャにおいて標準的である周辺コンポーネント相互接続(PCI)バスなどの従来のバスアーキテクチャによって実現されても良い。これに代わるVMEBUS、NUBUS、アドレスデータバス、RAMバス、DDR(ダブルデータレート)バスなどのバスアーキテクチャを利用してバス205を実現することも言うまでもなく可能であろう。ユーザは、アプリケーションサーバ200と通信するために、適切な接続(LAN275又はネットワークインタフェース225)を介してアプリケーションサーバ200へ情報を通信しても良い。

20

30

【0019】

アプリケーションサーバ200はホストプロセッサ210を更に含み、ホストプロセッサは現在利用可能であるPENTIUM(登録商標)プロセッサなどの従来の1つ以上のマイクロプロセッサによって構成されても良い。ホストプロセッサ210は、ユーザにより表示及び検討されるために、グラフィカルユーザインタフェース(GUI)機能及びブラウザ機能、機密保護機能の指示、シミュレータ結果を様々な限界と比較するための目標関数の計算などの計算の指示などのアプリケーションサーバ200における全てのリアルタイム機能及び非リアルタイム機能の全てが実行される中央ネクサスを表していても良い。従って、ホストプロセッサ210は、ソフトウェアにおいてブラウザとして具現化されるGUI230を含んでいても良い。ブラウザは、装置1000のユーザに対するインタフェースを提示し、ユーザと対話するソフトウェア装置である。ブラウザはユーザインタフェース構成要素(例えば、ハイパーテキスト、ウィンドウなど)及び画像をフォーマットし、表示する必要がある。

40

【0020】

ブラウザは、通常、標準ハイパーテキストマークアップ言語(すなわち、HTML)により制御され、指令される。本発明の実施例によれば、GUI230などのブラウザの制御流れにおける対話型図表機能及び決定は仮想プライベートネットワーク(VPN)によって実行されても良い。VPNを使用すると、図表に関連する面の計算はアプリケーションサーバ200でのみ実行されるが、その結果として得られる画像はユーザ300に対して提示される。

50

【0021】

これに加えて、又はその代わりに、更に詳細なユーザ対話を要求するGUI230の制御流れにおける決定はJava（登録商標）Scriptを使用して実現されても良い。これらの言語は共に所定のアプリケーションサーバ200の実現形態の特定の詳細に合わせてカスタマイズ又は適合されても良く、画像は周知のJPG、GIF、TIFF及び標準化圧縮スキーマを使用してブラウザで表示されても良い。XML、「ホームブルー（home brew）」言語、あるいはその他の周知の非標準化言語及びスキーマのような、その他の非標準化言語及び圧縮スキーマをGUI230に対して使用しても良い。

【0022】

ホストプロセッサ210は暗号サーバ260に動作接続されても良い。従って、アプリケーションサーバ200は、装置1000を外部の気密破りから保護するためのファイアウォールを設定するように、暗号サーバ260を使用することにより機密保護機能を実現しても良い。更に、暗号サーバ260は登録ユーザの全ての個人情報の機密を保護しても良い。

【0023】

アプリケーションサーバ200は複数の計算サーバ400にも動作接続されていて良い。計算サーバ400はユーザ入力データを処理し、未使用燃料ローディングパターンデザインに従ってローディングされた炉心のシミュレーションを指示し、以下に更に詳細に説明するように比較のために目標関数値を計算し、且つ表示される結果を提供するために要求されるあらゆる計算をGUI230を介して、アプリケーションサーバ200の指示の下に実行すれば良い。

【0024】

計算サーバ400は、例えば、WINDOWS（登録商標）2000サーバとして具現化されても良い。特に、計算サーバ400は、目標関数を構成し且つ目標関数値を計算すること、特定の試験未使用燃料ローディングパターンデザインによってローディングされた炉心に対して炉心動作をシミュレートし、そのシミュレーションから出力を発生するために3Dシミュレータプログラムを実行すること、GUI230を介するユーザによるアクセス及び表示のために結果データを提供すること、及び以下に更に詳細に説明するような最適化ルーチンを反復することを含む多数の複雑な計算を実行するように構成されてい

【0025】

あるいは、実施例は添付ソフトウェアプログラムなどのコンピュータプログラム製品により実現されても良い。ソフトウェアプログラムはメモリ250に格納され、ホストプロセッサ210が本発明の実施例による方法を駆動し、実現することを可能にし、計算サーバ400に指示する論理を含んでいても良く、計算サーバもメモリ250に対してアクセスすることが可能である。

【0026】

図3は、本発明の一実施例に従ったデータベースサーバ250の一例を示す。メモリ又はデータベースサーバ250はOracle（登録商標）8i Alpha ES 40リレーショナルデータベースサーバなどのリレーショナルデータベースであれば良い。リレーショナルデータベースサーバ250は、本発明の実施例の方法を実現するために必要な全てのデータ及び結果を処理する複数の従属データベースを含んでいても良い。例えば、リレーショナルデータベースサーバ250は、特定の原子炉について評価される試験未使用燃料ローディングパターンデザインのユーザ入力限界及び/又は設計制約を格納するデータベースである限界データベース251などの従属データベースを含む格納領域を含んでいても良い。更に、リレーショナルデータベースサーバ250は、3Dシミュレータにおいてシミュレートされるべき炉心の特定の未使用燃料ローディングパターンデザインに関する待ち行列データ及びパラメータを格納する待ち行列データベース253を含んでいても良い。全てのシミュレータ結果はシミュレータ結果データベース255に格納されれば良い。

【0027】

10

20

30

40

50

シミュレータ結果データベース 255 (及び限界データベース 251) は、特定の試験未使用燃料ローディングパターンデザインに適用可能である複数の目標関数値を計算するために、計算サーバ 400 によりアクセスされれば良い。それらの目標関数値はリレーショナルデータベースサーバ 250 内の目標関数値データベース 257 に格納されれば良い。3Dシミュレータ入力パラメータデータベース 259 もリレーショナルデータベースサーバ 250 に含まれていて良い。データベース 259 は全ての照射線量ステップに対する燃料バンドル位置及び原子炉動作パラメータを含む。計算サーバ 400 がリレーショナルデータベースサーバ 250 に動作接続され、リレーショナルデータベースサーバ 250 と通信できるため、図 3 に示す従属データベースの各々は 1 つ以上の計算サーバ 400 に対してアクセス可能である。

10

【0028】

図 4 は、本発明の一実施例に従った方法を示すフローチャートである。方法は沸騰水型原子炉を例にとって未使用燃料ローディングパターンデザインに関して説明されるが、実施例が PWR、ガス冷却炉及び重水炉に適用可能であることは理解されている。

【0029】

図 4 を参照すると、評価のために 1 つの原子炉プラントが選択され (ステップ S5)、試験未使用燃料ローディングパターンに従ってローディングされるべき選択されたプラントの炉心のシミュレーションのために使用されるべき限界が定義される (ステップ S10)。それらの限界に基づいて、初期試験未使用燃料ローディングパターンが判定され、判定された初期試験未使用燃料ローディングパターンデザインに従って「仮想」炉心がローディングされれば良い (ステップ S20)。複数のシミュレーション結果を生成するために、炉心全体に対して、又は、例えば、炉心における燃料バンドルのサブセットであっても良い炉心のサブセットに対して原子炉動作がシミュレートされれば良い (ステップ S30)。シミュレーション結果は限界と比較され (ステップ S40)、その比較に基づいて、いずれかの限界が違反されたか否かを示すデータが提供されれば良い (ステップ S50)。データは、シミュレートされた炉心のどの場所が限界違反の最大の違反箇所又は最大の寄与箇所であるかをユーザに示すであろう。次に、これらのステップの各々を更に詳細に説明する。

20

【0030】

図 9 から図 15 は、本発明の方法及び装置の様々な特徴を更に説明するためにコンピュータベースアプリケーションの一例を示す画面図である。以下の本発明の方法及び装置の説明中、それらの図について時に応じて言及する場合がある。

30

【0031】

まず、初期試験未使用燃料ローディングパターンデザインを選択できるように、1 つの原子炉プラントが選択される (ステップ S5)。原子炉プラントは、例えば、リレーショナルデータベース 250 のようなアクセス可能データベースに格納されている格納リストから選択されれば良い。評価されるべき原子炉は、例えば、BWR、PWR、ガス冷却炉又は重水炉のいずれかであれば良い。先に評価されたプラントからのデータを格納しておき、適切なアクセス可能フォルダの下にリストアップされたプラントを適切な入力装置 (マウス、キーボード、プラズマタッチスクリーン、音声起動コマンドなど) 及び GUI 230 を介してアクセスしても良い。

40

【0032】

炉心に適用可能な限界のセットが定義されれば良い (ステップ S10)。それらの限界は評価されるべき特定の原子炉の設計の重要な面及びその原子炉の設計制約に関連していても良い。限界は、例えば、試験未使用燃料ローディングパターンデザインに従ってローディングされた炉心のシミュレーションを実行するために入力されるべき変数に適用可能であっても良く、シミュレーションの結果にのみ適用可能な限界であっても良い。例えば、入力限界はクライアントが入力する原子炉プラント特有の制約及び炉心性能基準に関連していても良い。シミュレーション結果に適用可能な限界は動作パラメータ限界、及び/又は原子炉動作に使用される設計制約、炉心安全度限界、それらの動作限界及び安全度限

50

界に対するマージン、並びにその他のクライアントが入力する原子炉プラント特有の制約のうちの1つ以上に関連していても良い。しかし、それらの限界又は制約は単なる例であり、現在動作限界を超えるアップレート炉心デザインに基づく限界などの他の限界又は制約も予測できるであろう。

【0033】

図9は、ユーザ又はクライアントが入力するプラント特有の制約を示し、これはシミュレーションの入力変数に対する限界及びシミュレーション結果に対する限界として構成されていても良い。図9を参照すると、全体を矢印905で示すように複数のクライアント入力プラント特有制約が列挙されている。制約ごとに、欄910により示すように、1つの設計値(Design value)限界を割り当てることが可能である。

10

【0034】

図5は、本発明の一実施例に従った試験未使用燃料ローディングパターン選択及び炉心ローディングを説明するフローチャートである。図5は、判定する過程S20を更に詳細に説明するために提示されている。

【0035】

試験未使用燃料ローディングパターンの選択、及びそのパターンに基づく選択されたプラントの「仮想」炉のローディングは、提案されたデザインに基づいてモデル化された炉心の原子炉動作をシミュレートするために実行されても良い。まず最初に、試験未使用燃料ローディングパターンに対する以前の繰り返しが起こっているか否かを確定するために検査が実行される(ステップS21)。これが第1回目の繰り返しである場合、例えば、以前に試験未使用燃料ローディングパターンが全く解析されていなかった場合、初期試験未使用燃料ローディングパターンの基礎を提供するために過去のサイクル又は類似のプラントに関する情報が使用されても良い(ステップS22)。例えば、初期試験未使用燃料ローディングパターンは、以前のシミュレーションにおける類似の炉心に対して使用された炉心ローディングパターンデザインから選択されても良いし、評価されるべき原子炉に類似している原子炉からの炉心ローディングパターンデザインに基づいて選択されても良く、及び/又は評価されるべき原子炉プラントにおける以前の炉心エネルギーサイクルで使用された実際の炉心ローディングパターンデザインから選択されても良い。

20

【0036】

過去の繰り返しが実行されていた(ステップS21の出力が「NO」である)場合には、入力限界に従った確定済み炉心ローディングパターンを使用して、炉心の総エネルギー含量が計算され、所望/所要のエネルギー含量との差が定義されても良い(ステップS23)。この過程は、これが第1回目の繰り返しである場合には、入力された限界をも考慮に入れて、S22からの未使用燃料ローディングパターンを使用して実行されても良い。このエネルギー「デルタ」は、最前のサイクル終了(End-of-Cycle、EOC)と比較した、次の将来サイクルの所要エネルギーの差である。追加の繰り返しに関しては、実際のエネルギーと所望のエネルギーとの差が小さくなるにつれて、デルタは減少するであろう。更に、負のデルタエネルギーは得られるエネルギーが所望のエネルギーより大きく、望ましい状態であることを示唆している。

30

【0037】

エネルギーの差は、例えば、次に予定されている運転停止時にローディングされるべき原子炉の炉心をローディングするための未使用燃料ローディングパターンの一部でもあると考えられる未使用燃料アセンブリにより供給されるべきである。所望の目標エネルギーを得るために必要とされる追加バンドルの数(又は除去されなければならないバンドルの数)を選択するのを助けることができる典型的な経験則が存在する。例えば、764のバンドルを有するBWR原子炉の場合、4つのバンドルが約100MW D / s tのサイクル長さに値すると一般に考えられている。従って、結果として得られるエネルギーが所望のエネルギーより100MW D / s t長いのであれば、4つの未使用バンドルを除去することが可能であろう。同様に、結果として得られるエネルギーが所望のエネルギーより100MW D / s tを超えて短い場合には、4つの追加未使用バンドルを追加すべきである。

40

50

【 0 0 3 8 】

ユーザは、エネルギー差を補うために必要とされる未使用燃料バンドルの数を選択すべきである（ステップ S 2 4）。これは、以前にモデル化され、格納されている未使用燃料バンドルデザインの「パレット」をアクセスすることにより実行されても良いし、あるいはユーザは、例えば、バンドル型のデータベースから特定の未使用燃料バンドルを作成しても良い。

【 0 0 3 9 】

試験炉心ローディングパターンで使用されるべき未使用バンドルの数が判定された後、炉心ローディング対称が識別されるべきである（ステップ S 2 5）。プラントによっては、例えば、四分円ローディング対称又は半円炉心ローディング対称を要求するものがある。ユーザが後に行われるシミュレーションで評価するために「モデルサイズ」、例えば、4 分の 1 炉心、2 分の 1 炉心又は全炉心を選択することを可能にするプラント構成ウェブページをアクセスするために、G U I 2 3 0 が使用されても良い。更に、ユーザは、適切なドロップダウンメニューなどをクリックすることにより、選択されたモデルサイズに対して炉心対称オプション（例えば、八分円、四分円、対称なし）を選択しても良い。

10

【 0 0 4 0 】

「八分円対称」を選択することにより、ユーザは、8 つの八分円の全て（この場合、1 つの八分円は、例えば、燃料バンドル群である）がモデル化された八分円に類似していると仮定して、原子炉をモデル化することができる。その結果、シミュレータ時間は一般に 8 分の 1 だけ増加すると考えられる。同様に、「四分円対称」を選択することにより、ユーザは、4 つの四分円の各々がモデル化された四分円に類似していると仮定して、原子炉をモデル化することができる。従って、シミュレータ時間は一般に 1 / 4 増加するであろう。バンドル特性の非対称性が八分円対称又は四分円対称を妨げる場合、ユーザは対称なしも指定できる。

20

【 0 0 4 1 】

次に、対称性及び限界を考慮に入れて、初期試験未使用燃料ローディングパターンに従って「仮想」炉心がローディングされれば良い（ステップ S 2 6）。試験未使用燃料ローディングパターンに従ってローディングされた仮想炉心はシミュレーション可能な状態になっている。

【 0 0 4 2 】

限界が定義され、初期試験未使用燃料ローディングパターンデザインが判定され、それに従って炉心がローディングされたならば、シミュレーションを開始しても良い（ステップ S 3 0）。シミュレーションは計算サーバ 4 0 0 により実行されても良いが、装置 1 0 0 0 の外部で実行される 3 Dシミュレーションプロセスであっても良い。ユーザは P A N A C E A、L O G O S、S I M U L A T E、P O L C Aなどの周知の実行可能な 3 Dシミュレータプログラムを採用するか、あるいは周知のように、適切なシミュレータドライバが定義され、符号化されている他のいずれかの周知のシミュレータソフトウェアを採用すれば良い。計算サーバ 4 0 0 は、ユーザにより G U I 2 3 0 を介して入力されたデータに基づいてそれらのシミュレータプログラムを実行する。

30

【 0 0 4 3 】

従って、ユーザは任意の時点で G U I 2 3 0 を使用して 3 Dシミュレーションを開始するが、シミュレーションを開始するための手段にはいくつかの異なる種類がある。例えば、周知のように、ユーザはウィンドウドロップダウンメニューから「シミュレーション実行（run simulation）」を選択しても良いし、ウェブページタスクバーで「R U N」アイコンをクリックすることも可能であろう。更に、ユーザはシミュレーションの図表更新又は状態を受信しても良い。シミュレーションに関連するデータはリレーショナルデータベースサーバ 2 5 0 内の待ち行列データベース 2 5 3 に待機していても良い。シミュレーションが待機状態になったならば、周知のように、ユーザはシミュレーションが完了する時点に関して音声及び／又は視覚による表示を受けても良い。

40

【 0 0 4 4 】

50

ユーザがシミュレーションを開始すると、その後多数の自動化ステップが続く。図6は、シミュレーション過程S30を更に詳細に示すフローチャートである。まず、炉心ローディングパターンデザイン問題に関する定義が3D炉心シミュレータに合わせて3D命令セット（例えば、コンピュータジョブ）に変換される（ステップS31）。これにより、ユーザは先に説明したシミュレータのようないくつかの種類のシミュレータから選択することが可能になる。どの特定のシミュレータを選択するかは、ユーザにより入力されるプラント基準（例えば、限界）によって決まると考えられる。コンピュータジョブはリレーショナルデータベースサーバ250の待ち行列データベース253に待機するように実行可能状態とされても良い（ステップS33）。特定のシミュレーションに関するデータの格納により、最前の反復又は以前の反復から可能なシミュレーション反復を開始することが可能になる。このデータを格納し、検索することにより、未使用燃料ローディングパターンデザインに対する以後のシミュレーション反復の実行に要する時間はわずか数分又は数秒になる。

10

【0045】

これと同時に、利用可能な計算サーバ400の各々で実行中のプログラムは数秒ごとに実行すべき実行可能なジョブを検索するために走査する（ステップS37）。実行可能な状態のジョブがあれば、1つ以上の計算サーバ400は待ち行列データベース253からデータを獲得し、適切な3Dシミュレータを動作させる。先に説明したように、ユーザに対して1つ以上の状態メッセージが表示されても良い。シミュレーションが完了した時点で、シミュレータ結果はリレーショナルデータベース250内の1つ以上の従属データベース（例えば、シミュレーション結果データベース255）に格納されても良い。従って、試験未使用燃料ローディングパターンデザインに関する目標関数値を計算するために、リレーショナルデータベースサーバ250はユーザにより、例えば、GUI230及びホストプロセッサ210を介してアクセスされても良い。

20

【0046】

図7は、図4の比較ステップを更に詳細に示す流れ図である。目標関数は計算サーバ400によるアクセスに備えてリレーショナルデータベースサーバ250に格納されていても良い。目標関数値を提供する目標関数計算モジュール、従属する目標関数値データベース257などのリレーショナルデータベースサーバ250内に格納されても良い。図7を参照すると、目標関数計算に対する入力は限界データベース257からの限界と、シミュレータ結果データベース255からのシミュレータ結果とを含んでも良い。従って、1つ以上の計算サーバ400はこのデータをリレーショナルデータベースサーバ250からアクセスしても良い（ステップS41）。

30

【0047】

本発明の実施例においては、任意の数の目標関数フォーマットを利用できるであろうと考えているが、一実施例では、(a)「CONS」と表現される、ある特定の制約パラメータに対する限界（例えば、原子炉プラントパラメータの設計制約）、(b)「RESULT」と表現される、その特定の制約パラメータに関する3Dシミュレータからのシミュレーション結果、及び(c)「MULT」と表現される、制約パラメータの乗数という3つの要素を有する目標関数を含んでも良い。事前定義済みMULTのセットは、例えば、BWRプラント構成の大きな集団から経験的に判定されても良い。それらの乗数は、原子炉エネルギー、反応度限界及び熱限界を適切な順序で判定することを可能にする値に設定されても良い。従って、本発明の方法は経験的に判定された乗数の総称セットを利用し、それらは30種類を超える異なる炉心デザインに適用可能であろう。しかし、GUI230により乗数を手動操作で変更することは可能であり、これは、ユーザの好みで事前設定済みデフォルトにより識別される乗数より大きい乗数によっていくつかの制約に「ペナルティを課す」ことが望まれる場合もあるという点で重要である。

40

【0048】

目標関数値は個別の制約パラメータごとに計算されても良いし、全ての制約パラメータを一まとまりとして計算されても良いが、その場合、全ての制約パラメータはある特定の

50

試験用未使用燃料ローディングパターンで評価されるべきものの全体を表している。目標関数の個々の制約要素は式(1)に記載するように計算されれば良い。

【0049】

$$OBJ_{par} = MULT_{par} * (RESULT_{par} - CONS_{par}) \quad (1)$$

式中、「par」は図9に列挙されているクライアント入力制約のうちのいずれかであれば良い。これらのパラメータは評価のための可能な候補になりうるであろうパラメータであるばかりではなく、原子炉の適切な炉心構成を判定するために一般に使用されているパラメータでもあることを理解すべきである。総合的な目標関数は全ての制約パラメータの総計である。すなわち、

$$OBJ_{TOT} = \text{SUM}(par = 1, 31) \{OBJ_{par}\} \quad (2)$$

10

式1に関して説明すると、RESULTがCONSより小さい場合(例えば、制約の違反がない)、差は0にリセットされ、目標関数は0になる。従って、0の目標関数値は、ある特定の制約が違反されなかったことを示す。正の目標関数は、修正を必要とすると思われる違反を表す。更に、シミュレーション結果は特殊座標(i, j, k)及び時間座標(照射線量ステップ)(例えば、炉心エネルギーサイクルにおける特定の時間)で提供されても良い。従って、ユーザはどの時間座標(例えば、照射線量ステップ)にその問題が位置しているかを見て取ることができる。そのため、未使用燃料ローディングパターンは識別された照射線量ステップでのみ修正されても良い。

【0050】

加えて、目標関数値は各照射線量ステップの関数として計算され、試験用未使用燃料ローディングパターンデザイン問題全体に対して合計されても良い(ステップS43)。制約ごとに計算された目標関数値と、照射線量ステップごとの目標関数値は、総目標関数値に対する所定の制約の寄与の度合を表す百分率を求めるために、各目標関数値を正規化することにより更に検査されても良い(ステップS45)。目標関数計算の各々の結果、すなわち、値は、リレーショナルデータベースサーバ250内の従属目標関数値データベース257に格納される。

20

【0051】

目標関数値は未使用燃料ローディングパターン開発の手動操作による判定に利用されても良い。例えば、限界に違反するパラメータを判定するために、ユーザは図表形式で目標関数計算の値を見ても良い。更に、未使用燃料ローディングパターンデザインを首尾よく反復する中で目標関数値に何らかの変更が行われる場合、提案された未使用燃料ローディングパターンデザインにおける改善と損失の双方を推定するための基準がユーザに与えられる。

30

【0052】

数回の反復の間の目標関数値の増加は、ユーザの変更が所望の解から離れつつある未使用燃料ローディングパターンデザインを作成していることを示しても良く、一方、目標関数値を減少させつつ連続する反復(例えば、目標関数値が正の値から0に向かって減少する場合)は、未使用燃料ローディングパターンデザインの改善を示しても良い。連続する反復の間の目標関数値、限界及びシミュレーション結果は、リレーショナルデータベースサーバ250内の様々な従属データベースに格納されても良い。従って、後の修正が役に立たないと判明した場合には、過去の反復からのデザインを迅速に検索できるであろう。

40

【0053】

目標関数の計算が完了すると、試験用未使用燃料ローディングパターンデザインに従ってローディングされる炉心のシミュレーション中に違反された限界を含む、目標関数計算に関連するデータがユーザに提供される。図10は、ユーザが検討すると思われる図表データの一例を示す。このデータは希望に応じてそれぞれの反復の後にユーザにより表示されても良い。図10を参照すると、入力限界を表す制約パラメータのリストと、制約ごとの目標関数値計算の各々の値とが表示されている。図10は、例えば、チェックされたボックス1005により示すように、ボックス内のチェックマークによって違反された限界を示している。更に、限界違反ごとに、図7に関して説明した計算及び正規化ルーチンに

50

基づく寄与及び百分率（％）寄与が表示されている。従って、このデータに基づいて、ユーザには後の反復に備えて試験用未使用燃料ローディングパターンデザインに対してどのような修正を実行する必要があるかに関する勧告が与えられる。

【 0 0 5 4 】

あるいは、個別の未使用燃料ローディングパターンの修正はユーザの希望に任されても良いのであるが、手続き上の勧告は、例えば、プルダウンメニューの形で与えられても良い。それらの勧告は3つのカテゴリ、すなわち、エネルギーに有益な移動、エネルギーに不利益な移動及び（熱源界からの）過剰マージンの追加エネルギーへの変換の3つに分割されても良い。好ましい技法は、エネルギーに不利益な移動よりエネルギーに有益な移動を使用して問題に対処する方法であっても良いが、エネルギーに不利益な移動及び／又は過剰マージンの変換が特定の試験用未使用燃料ローディングパターンを修正するのに使用されても良いため、実施例はこの好ましい技法に限定されない。未使用燃料ローディングパターンデザインが全ての限界（クライアントが入力したプラント特有制約、設計限界、熱限界など）に適合していたとしても、ユーザは特定の限界に対する過剰マージンが追加エネルギーに変換されることを検証しても良い。従って、以下の論理ステートメントは上記の手続き上の勧告を表現していると考えられる。

10

エネルギーに有益な移動

臨界パワー比（Critical Power Ratio、C P R）マージンが炉心周囲に向かって低すぎる場合、より反応性の高い（照射のより少ない）燃料を炉心中心に向かって移動させる

E O C 時に M F L P D（例えば、熱マージン制約）問題がある場合、より反応性の高い燃料を問題の場所へ移動させる

20

B O C 時に炉心の周囲に運転停止マージン（ShutDown Margin、S D M）問題がある場合、より反応性の低い燃料を周囲に向かって配置する

エネルギーに不利益な移動

E O C 時に最小臨界パワー比（Minimum Critical Power Ratio、M C P R）マージンが低すぎる場合、より反応性の低い（照射のより多い）燃料を問題の場所へ移動させる

E O C 時に K W / f t マージン（M A P L H G R）が低すぎる場合、より反応性の低い燃料を問題の場所へ移動させる

過剰マージンの追加エネルギーへの変換

E O C 時に炉心の中心に余分な M C P R マージンがある場合、より反応性の高い未使用燃料を周囲の場所から炉心中心へ移動させる

30

場所と、目標関数により示される限界違反の時間照射線量とに基づいて、ユーザは制約違反に対処し、修正するために、1つ以上の上記の勧告に従うことを選択しても良い。

【 0 0 5 5 】

目標関数計算の結果として得られたデータは適切な表示装置で解釈されても良い。例えば、このデータは、図 10 に関して説明したように、違反源を指示した制約のリストとして表示されても良い。しかし、ユーザは、例えば、2次元又は3次元画面として構成可能である複数の異なる「結果」表示画面をアクセスしても良い。以下の表 1 はユーザが利用可能である画面のいくつかの例を示している。

【 0 0 5 6 】

40

【表 1】

表 1 - ユーザが利用可能である図表画面
目標関数結果 - リスト
最大炉心値と照射線量の関係のグラフ
中心点最大値と照射線量の関係のグラフ
最大炉心値の場所と照射線量のグラフ
ピン値と照射線量のグラフ
バンドル最大値と照射線量のグラフ
3 D 回転図観測
以前の反復に対する性能の報告
様々な設計担当者の改善率の報告
サーバ状態の表示
待ち行列状態の表示
システム勧告の表示

10

【0057】

図 1 1 から図 1 2 B は、本発明に従ってユーザが利用可能である図表画面を示す。図 1 1 に示すように、ユーザは、いくつかの制約又はパラメータの画面を表示するために、タスクバーの「ビュー (view)」アイコンから適切なドロップダウンメニューをプルダウンしても良い。図 1 1 に示すように、ユーザは最大部分限界パワー濃度 (Maximum Fractional Limiting Power Density、M F L P D) 制約パラメータを選択する。ユーザは、プルダウンメニュー 1 1 1 0 に示すような複数の異なる図表画面を利用可能である。ユーザは単純に所望の画面を選択し、その後、図 1 2 A 又は図 1 2 B に示すようなページをアクセスすれば良い。図 1 2 A は、1 2 0 5 及び 1 2 1 0 に示すように、特定の制約の 2 つの異なる 2 次元グラフを示す。例えば、ユーザは、炉心サイクルにおいて特定の照射線量について最大平均平面熱発生速度 (Maximum Average Planar Heat Generation Rate、M A P L H G R) の違反がどこで起こったか (炉心最大値と照射線量のグラフ 1 2 0 5、及び M F P L D の軸方向値と照射線量のグラフ 1 2 1 0) を判定することができる。それらの制約の限界は線 1 2 2 0 及び 1 2 2 5 により示され、違反は概して図 1 2 A の 1 2 3 0 及び 1 2 3 5 で示されている。

20

30

【0058】

図 1 2 B は別の画面、この場合には、M A P L H G R と照射線量の関係の違反に寄与する最大の原因がどの場所にあるかを知るために、炉心の横断面全体を 2 次元で表す画面を示す。1 2 4 0 及び 1 2 5 0 でわかるように、丸で囲まれた正方形は、炉心における M A P L H G R の違反の最大の寄与原因である燃料バンドルを表す (例えば、1 2 4 0 及び 1 2 5 0 は M A P L H G R に違反するバンドルを指示している)。これにより、ユーザは試験用未使用燃料ローディングパターンデザインがどこで修正を必要としているかを知ることができる。

【0059】

図 8 A 及び図 8 B は、本発明の一実施例に従った修正ステップ及び反復プロセスステップを説明する流れ図である。図 8 A を参照すると、ステップ S 6 0 でデータを解釈することにより、ユーザは修正サブルーチンを開始しようと思う (ステップ S 7 0)。実際には、初期の試験用未使用燃料ローディングパターンデザインは受け入れ可能なデザインではなく、修正サブルーチンが要求されるであろう。一実施例では、ユーザはグラフィカルユーザ G U I 2 3 0 を利用して、この修正サブルーチンの各反復を指示しても良い。別の実施例においては、何回かの棒パターンデザイン反復に対してシミュレーション、目標関数の計算及び目標関数計算の結果又は値の評価を自動的に繰り返す最適化アルゴリズムの限度内で修正サブルーチンが実行されても良い。

40

【0060】

50

ユーザは、表示されるデータに基づいて、いずれかの限界が違反されたか否かを判定する（ステップS71）。限界の違反がなければ、ユーザが、未使用燃料ローディングパターンデザインから最大パワーの特性が得られたことを示す識別子があるか否かを判定する。例えば、それらの識別子は、サイクル延長のためにプルトニウム発生を最大にするように炉心中心に向かって燃料を移動させることにより良好な熱マージン利用（MFLCPR及びMAPLHGRのマージンなど）を示す標識を含むであろう。サイクルデザインに関して最小EOC固有値が得られたとき（固有値検索）又は所望のサイクル長さが一定のEOC固有値で判定されたとき、パワー要求に適合したと示されても良い。試験用未使用燃料ローディングパターンデザインから最大パワーが得られたと示された（ステップS72の出力がYESである）場合、受け入れ可能な未使用燃料ローディングパターンデザインが判定されたことになり、ユーザはその受け入れられる未使用燃料ローディングパターンデザインに関する結果及びデータの報告をアクセスしても良い（ステップS73）。

10

【0061】

限界が違反された（ステップS71の出力がYESである）場合、又は限界の違反はないが、未使用燃料ローディングパターンデザインから最大パワーが得られなかったと示された（ステップS72の出力がNOである）場合には、ユーザは、標識が未使用燃料バンドル選択修正の特性を識別するかどうかを判定する（ステップS74）。選択された未使用燃料バンドルの修正要求を示す特性は、例えば、エネルギーの不足、受け入れ可能なエネルギーを伴うマージンの不足、計画された運転停止日の変更による反応性の損失を含む。更に、未使用燃料ローディングパターンデザイン変更の回数にわたる反復が試みられ、目標関数の改善が現実に見られなかった場合には、これは代替未使用燃料ローディングパターンデザインを展開する必要があるであろうということを示すもう1つの標識である。

20

【0062】

従って、ステップS74の出力がYESである場合、ユーザは、修正又は派生試験用未使用燃料ローディングパターンに従って、未使用燃料バンドルを再選択し、炉心対称性が要求されるようにバンドル数を切り捨て、炉心をローディングすることによって、修正又は派生未使用燃料ローディングパターンデザインを作成しても良い（ステップS75）。ステップS75は、通常、図5のステップS24からS26に対応する。

【0063】

未使用燃料バンドル数の修正要求を示す特性が無い（ステップS74の出力がNOである）場合、ユーザは試験用未使用燃料ローディングパターンデザインを修正して（ステップS76）、派生パターンを作成しても良い。先に挙げた手続き上の勧告に基づいて試験用未使用燃料ローディングパターンの修正を実行するとき、ユーザはGUI230を介して炉心ローディングを変更すれば良い。例えば、適切な入力装置（マウス、キーボード、タッチスクリーン、音声コマンド等）及びGUI230を使用して、設計担当者は、ユーザが移動させることを所望する炉心デザイン中の燃料バンドルの炉心対称性オプションを識別しても良く、これら「目標」燃料バンドルを選択しても良く、その目標バンドルによる置き換えのための現在の炉心デザイン中の「目的」燃料バンドルを選択しても良い。その後、目標バンドル及び目的バンドルは要求される対称性（鏡像、回転など）に従って「シャッフル」される。このプロセスは、所望の方法で新たな修正試験用未使用燃料ローディングパターンを再ローディングするために要求される燃料バンドルシャッフルごとに繰り返される。

30

40

【0064】

図13は、本発明の一実施例に従った修正ステップS76を更に詳細に示す画面図である。図13は、未使用燃料ローディングパターンデザインに対して迅速なデザイン修正を実行するようにユーザが利用可能な機能性を示す。ユーザは燃料シャッフリングページ1305を選択し、未使用燃料ローディングパターンデザインに基づいてローディングされた炉心の一部の画面1315を表示するために「バンドルシャッフル（Bundle Shuffle）」タスクバー1310を選択すれば良い。図13において、1320で示される燃料バンドルは1つの燃料バンドル型（IAT型11）から別の型（IAT型12）へ変更されつ

50

つある。炉心デザインの未使用燃料バンドル、照射済み燃料バンドルを選択し、「SWAP」ボタン1330を選択することにより、照射済みバンドルを未使用燃料バンドルと交換しても良い。各々の燃料バンドルの様々な照射線量(GWD/st)を示すために、画面1315に示されている炉心の部分はカラーコード化されても良い。対応するカラーコード化のキーは、例えば、1327に示すように表示されても良い。図13の項目の選択は、周知のように、マウス、キーボード、タッチスクリーン、音声式コマンドなどの適切な入力装置を使用して実行されても良い。

【0065】

それらの未使用燃料ローディングパターンデザイン修正は、例えば、3Dシミュレータ入力パラメータデータベース259などのリレーショナルデータベース250にセーブされても良い。図8Aを再度参照すると、ステップS75からS76で説明したように、試験用未使用燃料ローディングパターンが修正されたかどうかに関係なく、派生棒パターンデザインが全ての限界に適合するか否かを判定するためにステップS30～S50を繰り返しても良い(ステップS77)。これは反復プロセスになるであろう。

10

【0066】

図8Bは、本発明の一実施例に従った反復プロセスを示す。シミュレートされたステップS70からの派生未使用燃料ローディングパターンデザインごとに、ユーザは、シミュレートされた結果と限界の比較に関連するデータ(例えば、計算された目標関数値)が依然として限界違反の存在を示しているか否かを判定する(ステップS160)。限界違反がない(ステップS160の出力がNOである)場合、ユーザは特定の原子炉で利用できる受け入れ可能な未使用燃料ローディングパターンデザインを開発したことになり、受け入れ可能な未使用燃料ローディングパターンデザインに関連する図表結果をアクセスすれば良い(ステップS173)。

20

【0067】

反復が限界の違反を依然として示している(ステップS160の出力がYESである)場合には、全ての限界が満足され/最大のパワーを得るまで、又はユーザの判定に従って受け入れ可能であるマージンの中で全ての限界が満足され/最大のパワーを得るまで、ステップS70の修正サブルーチンが繰り返し反復されても良い(ステップS170)。この反復プロセスは、ユーザが未使用燃料ローディングパターンデザインを微調整でき、また、おそらくは従来の、手動操作による反復プロセスによって以前に抽出可能であったよりも、更に多くのエネルギーを受け入れ可能な未使用燃料ローディングパターンデザインから抽出できるという点で有益であっても良い。更に、リレーショナルデータベースサーバ250及び複数の計算サーバ400を取り入れたことで、計算の処理が迅速になる。図8Bで説明したような反復プロセスは、一度に1つのパラメータを変更し、その後炉心シミュレーションを実行するという手動操作による従来の反復プロセスを使用した場合の数週間と比較して、極めて短い期間で実行できるであろう。

30

【0068】

ここまで、ユーザ又は設計担当者がGUI230を介してデータを解釈し、所望のデザインを獲得するためにホストプロセッサ210及び/又は計算サーバ400で支援される演算パワーを使用して手作業により試験用未使用燃料ローディングパターンデザインを繰り返し修正することに関連して、本発明の実施例を説明してきた。しかし、図8A及び図8Bの上述のステップは最適化プロセスを経て実行されても良い。最適化プロセスは、N種類の異なる未使用燃料ローディングパターンデザインに対して、全てのユーザの限界又は制約を満足させるために原子炉の炉心で使用されるべき所望の未使用燃料ローディングパターンデザインを実現するために絶えず違反された限界を改善しつつ、図8A及び図8Bのステップを繰り返しても良い。

40

【0069】

図14は、そのようなプロセスを開始するための画面図を示す。例えば、プラント及び試験用未使用燃料ローディングパターンを選択した後、ユーザは最適化構成画面1405を表示しても良い。ユーザは、例えば、燃料ローディング最適化(Optimize Fuel Loading

50

)、棒パターン最適化(Optimize Rod Patterns)、炉心流量最適化(Optimize Core Flow)、シーケンス間隔最適化(Optimize Sequence Interval)及びバンドル選択最適化(Optimize Bundle Selection)の最適化パラメータ 1 4 4 0 を選択しても良い。

【 0 0 7 0 】

バンドル選択最適化は、基準炉心デザインの中で未使用バンドル型を最適に判定することを意味している。最適化の結果、各未使用燃料場所はいくつかの未使用バンドル型のうちの 1 つ (例えば、図 1 3 に示すような I A T 型) を含むことになるであろう。これらの型は、先に説明したように、制約を満足させつつエネルギーを最大にするように選択されれば良い。燃料ローディング選択の最適化は、1 度及び 2 度の燃焼燃料を最適に判定することを意味している。

10

【 0 0 7 1 】

棒パターン最適化は、制御ブレード (P W R の場合は制御棒) の位置を最適に判定することを意味している。制御棒の位置は局所パワー並びに核反応速度に影響を及ぼす。炉心流量最適化は、動作サイクル中の時間の関数として、原子炉を通過する原子炉冷却剤の流量を最適に判定することを意味している。流量は原子炉全体のパワー並びに核反応速度に影響を及ぼす。シーケンス間隔最適化は、動作サイクル中に原子炉を制御するために所定のシーケンス (すなわち、制御棒グルーピング) が使用される持続時間を最適に判定することを意味する。シーケンス間隔は局所パワー並びに核反応速度に影響を及ぼす。

【 0 0 7 2 】

適切な入力装置 (例えば、キーボード、マウス、タッチディスプレイなど) を使用して、ユーザは G U I 2 3 0 を介して、1 つの最適化パラメータ 1 4 4 0 と関連する選択ボックス 1 4 4 2 をクリックすることにより 1 つ以上の最適化パラメータを選択すれば良い。選択が行われると、選択された最適化パラメータの選択ボックス 1 4 4 2 にチェックマークが現れる。その選択ボックス 1 4 4 2 を再度クリックすると、最適化パラメータの選択は解除される。例えば、未使用燃料ローディングパターンデザインの最適化を実行するためには、ユーザは、図 1 4 に示すように、バンドル選択最適化のボックス 1 4 4 2 を選択すれば良いであろう。

20

【 0 0 7 3 】

最適化問題と関連する制約パラメータをメモリ (リレーショナルデータベースサーバ) 2 5 0 に格納しても良い。それらは、例えば、限界データベース 2 5 1 に格納される。制約パラメータは、1 つ以上の制約を満足させなければならない又は満足させるべきである最適化問題のパラメータであり、制約は先に説明した限界に類似しているであろう。

30

【 0 0 7 4 】

図 1 5 は、沸騰水型原子炉の炉心デザインの最適化問題と関連する最適化制約をリストアップした最適化制約ページの一例の画面図を示す。図示されるように、各々の最適化制約 1 5 5 0 は関連する 1 つの設計値 (Design Value) 1 5 5 2 を有する。各最適化制約は指定の設計値以下でなければならない。ユーザは目標関数を構成する際に考慮すべき最適化パラメータを選択することができる。ユーザは、最適化制約 1 5 5 0 と関連する選択ボックス 1 5 5 4 をクリックすることにより、最適化制約を選択する。選択が行われると、選択された最適化制約 1 5 5 0 の選択ボックス 1 5 5 4 にチェックマークが現れる。選択ボックス 1 5 5 4 を再度クリックすると、最適化制約の選択は解除される。

40

【 0 0 7 5 】

各最適化パラメータは関連する所定のクレジット項及びクレジット重みを有し、それらはリレーショナルデータベースサーバ 2 5 0 に格納されている。同様に、各最適化制約も関連する所定のペナルティ項及びペナルティ重みを有し、それらは限界データベース 2 5 1 及び / 又は目標関数値データベース 2 5 7 などの、リレーショナルデータベースサーバ 2 5 0 に格納されていても良い。図 1 5 に示すように、ペナルティ項は設計値 (限界又は制約) を組み込んでおり、ユーザはこの値を希望に応じて変更 (すなわち、構成) することができる。更に、図 1 5 の実施例により、ユーザは最適化制約 1 5 5 0 ごとの重要度 1 5 5 6 を設定することができる。最適化制約の重要度 (Importance) フィールド 1 5 5 8 に

50

において、ユーザは微小、低、公称、高及び極度というプルダウンメニューを与えられる。各々のオプションは、重要度が大きいほど、所定のペナルティ重みも大きくなるような経験的に予め定められたペナルティ重みに相関している。このように、ユーザは所定のペナルティ重みのセットの中から選択する。

【0076】

上記の選択が完了したならば、計算サーバ400はリレーショナルデータベースサーバ250から選択肢を検索し、先に説明した一般定義及び選択プロセス中に実行された選択に従って目標関数を構成する。その結果構成される目標関数は、選択された最適化パラメータと関連するクレジット要素の和と、選択された最適化制約と関連するペナルティ要素の和とを加算した値である。

10

【0077】

更に、この実施例は、ユーザがクレジット重み及びペナルティ重みを処理する方法を選択することを可能にする。例えば、ユーザにはペナルティ重みに関して静的、デスペナルティ、動的及び適応という可能な方法論が与えられ、クレジット重みに関して静的、動的及び適応という可能な方法論が与えられ、ペナルティ重みとクレジット重みの双方に関して相対適応の方法論が与えられる。周知の静的方法論は重みを当初に設定された値に維持する。周知のデス方法論は各ペナルティ重みを無限大に設定する。周知の動的な方法論は、最適化検索において目標関数を使用している期間中に、重み変化の量及び/又は頻度を判定する数式に基づいて初期重み値を調整する。周知の適応方法論も最適化検索の進行中に適用される。この方法では、ペナルティ重み値は設計値に違反する制約パラメータごとに定期的に調整される。相対適応方法論は、特願2003-325370号に開示されている。

20

【0078】

目標関数を使用する最適化

図16は、本発明の一実施例に従って目標関数を採用する最適化プロセスのフローチャートを示す。この最適化プロセスは、特願2003-327076号に開示されている。

【0079】

説明の便宜上、図16の最適化プロセスは図1に示すアーキテクチャにより実現されるものとして説明される。図示されるように、ステップS1610では、先の章で説明したように目標関数が構成され、その後、最適化プロセスが始まる。ステップS1612で、計算プロセッサ400はリレーショナルデータベース250からシステム入力を検索するか、又は使用中の最適化アルゴリズムに基づいて最適化問題の入力パラメータ(すなわち、システム入力)として1つ以上の値セットを生成する。例えば、それらの入力パラメータは原子炉内部における未使用燃料バンドル及び照射済み燃料バンドルを判定すること、及び/又は特定の原子炉プラントの次のエネルギーサイクルに関する初期未使用燃料ローディングパターンを伴う未使用燃料ローディングパターンデザインを判定することに関連していても良い。しかし、最適化はそれらのパラメータの使用に限定されず、その他の入力パラメータとして、棒グループ(シーケンス)の選択及びサイクル中の時間の関数としての制御棒位置の配置、原子炉冷却剤入口圧力なども考えられるであろう。

30

【0080】

各々の入力パラメータの値のセットは最適化問題の候補解である。先に説明したような炉心シミュレータはシミュレート動作を実行し、入力パラメータ値セットごとにシミュレーション結果を生成する。シミュレーション結果は最適化パラメータ及び最適化制約の値(すなわち、システム出力)を含む。それらの値、又はそれらの値のサブセットは目標関数の数式における変数の値である。

40

【0081】

次に、ステップS1614では、計算プロセッサ400は目標関数及びシステム出力を使用して、候補解ごとの目標関数値を生成する。ステップS1616で、計算プロセッサ400は、ステップS1614で生成された目標関数値を使用して最適化プロセスが1つの解に収束したか否かを評価する。収束に到達しなければ、ステップS1618で、入力パラメータセットが修正され、最適化反復カウントが増分され、処理はステップS161

50

2に戻る。ステップS 1 6 1 2、S 1 6 1 6及びS 1 6 1 8の生成動作、収束評価動作及び修正動作はGenetic Algorithms、Simulated Annealing及びTabu Searchなどの周知のいずれかの最適化アルゴリズムに従って実行される。最適化を利用して受け入れ可能な未使用燃料ローディングパターンパターンデザインを判定する場合、最適化は収束（例えば、図8 A及び図8 BのステップS 7 3 / S 1 7 3におけるような受け入れ可能な結果）が得られるまで実行されても良い。

【0082】

本発明における実施例の技術的効果は、原子炉の未使用燃料ローディングパターンデザインを効率良く開発するための方法を提供するコンピュータベース構成であっても良い。また、この技術的効果は、次に予定されている運転停止時に、原子炉の炉心に燃料を収容するための未使用燃料ローディングパターンデザイン及びその炉心にローディングされるべき未使用燃料アセンブリを迅速に開発し、シミュレートし、修正し、完成する能力を内部ユーザ及び外部ユーザに与えるコンピュータベース方法であっても良い。

10

【0083】

以上、本発明の実施例を説明したが、本発明を数多くの方法で変形できることは自明であろう。なお、特許請求の範囲に記載された符号は、理解容易のためであってなんら発明の技術的範囲を実施例に限縮するものではない。

【図面の簡単な説明】

【0084】

【図1】本発明の一実施例に従った方法を実現するための装置を示す図。

20

【図2】本発明の一実施例に従った方法を実施するための装置のアプリケーションサーバを示す図。

【図3】本発明の一実施例に従って複数の従属データベースを有するリレーショナルデータベースを示す図。

【図4】本発明の一実施例に従った方法を説明するフローチャート。

【図5】本発明の一実施例に従った試験未使用燃料ローディングパターンデザインを判定する過程を示すフローチャート。

【図6】本発明の一実施例に従ったシミュレーション過程を示すフローチャート。

【図7】本発明の一実施例に従った図4の比較する過程を更に詳細に示すフローチャート。

30

【図8 A】本発明の一実施例に従った炉心ローディングパターンデザインの修正及び反復修正プロセスを示すフローチャート。

【図8 B】本発明の一実施例に従った炉心ローディングパターンデザインの修正及び反復修正プロセスを示すフローチャート。

【図9】本発明の実施例の様々な特徴を更に説明するためのコンピュータベースアプリケーションの例を示す画面図。

【図10】本発明の実施例の様々な特徴を更に説明するためのコンピュータベースアプリケーションの例を示す画面図。

【図11】本発明の実施例の様々な特徴を更に説明するためのコンピュータベースアプリケーションの例を示す画面図。

40

【図12 A】本発明の実施例の様々な特徴を更に説明するためのコンピュータベースアプリケーションの例を示す画面図。

【図12 B】本発明の実施例の様々な特徴を更に説明するためのコンピュータベースアプリケーションの例を示す画面図。

【図13】本発明の実施例の様々な特徴を更に説明するためのコンピュータベースアプリケーションの例を示す画面図。

【図14】本発明の実施例の様々な特徴を更に説明するためのコンピュータベースアプリケーションの例を示す画面図。

【図15】本発明の実施例の様々な特徴を更に説明するためのコンピュータベースアプリケーションの例を示す画面図。

50

【図 16】本発明の一実施例に従って使用される最適化ルーチンを説明するフローチャート。

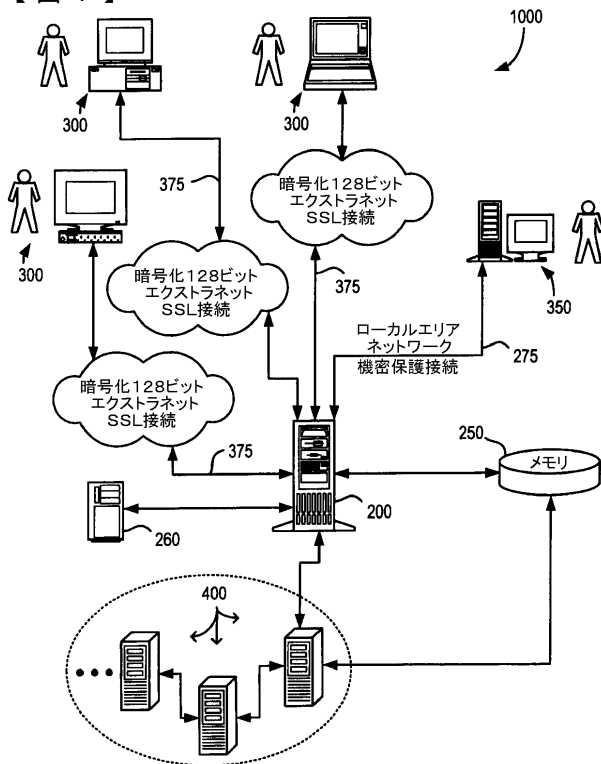
【符号の説明】

【0085】

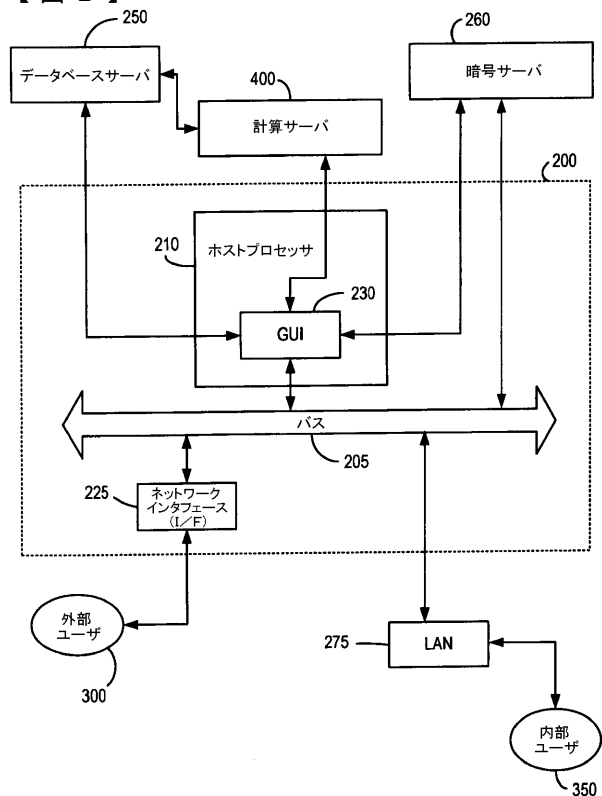
200 ... アプリケーションサーバ、205 ... バス、210 ... ホストプロセッサ、225 ... ネットワークインタフェース、230 ... グラフィカルユーザインタフェース (GUI)、250 ... リレーショナルデータベースサーバ (メモリ)、251 ... 限界データベース、253 ... 待ち行列データベース、255 ... シミュレータ結果データベース、257 ... 目標関数値データベース、259 ... 3Dシミュレータ入力パラメータデータベース、260 ... 暗号化サーバ、275 ... ローカルエリアネットワーク (LAN) 接続、300 ... 外部ユーザ、350 ... 内部ユーザ、375 ... 128ビット機密保護ソケット層 (SSL) 接続、400 ... 計算サーバ

10

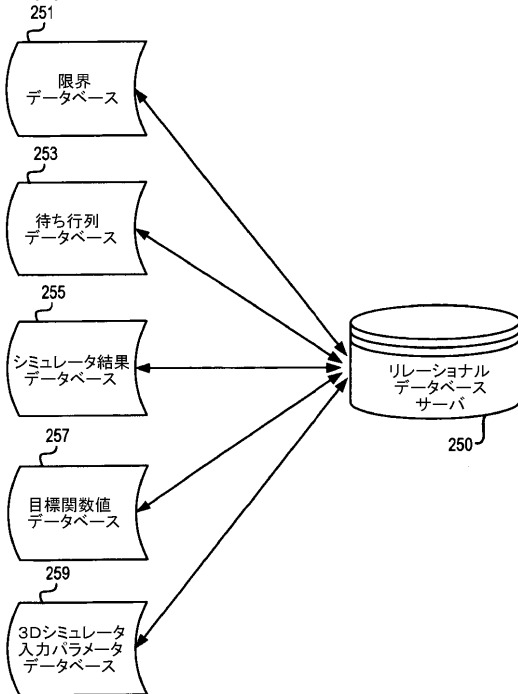
【図 1】



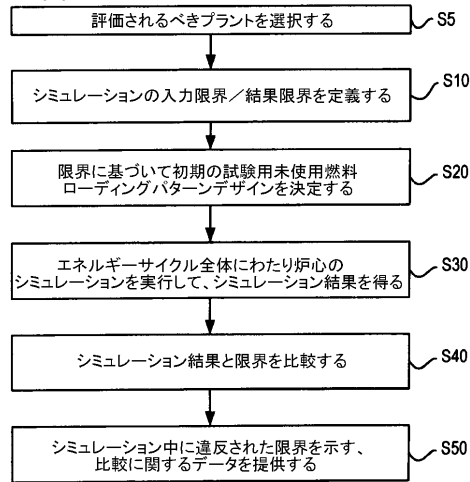
【図 2】



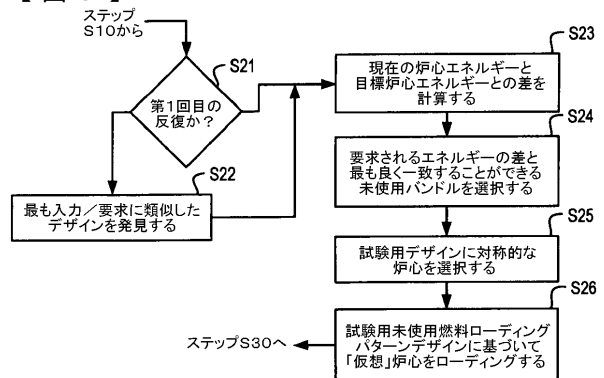
【図 3】



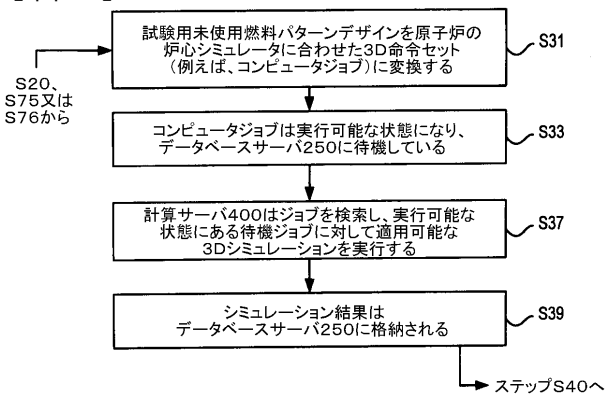
【図 4】



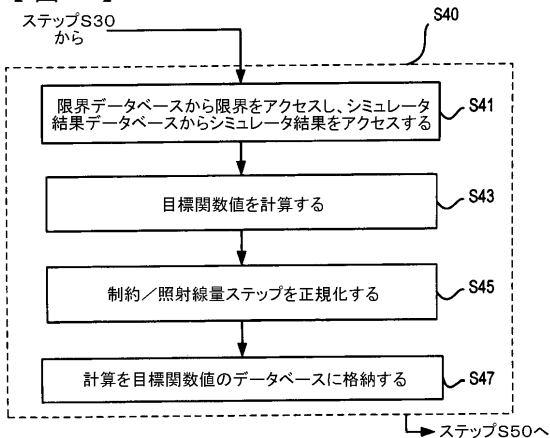
【図 5】



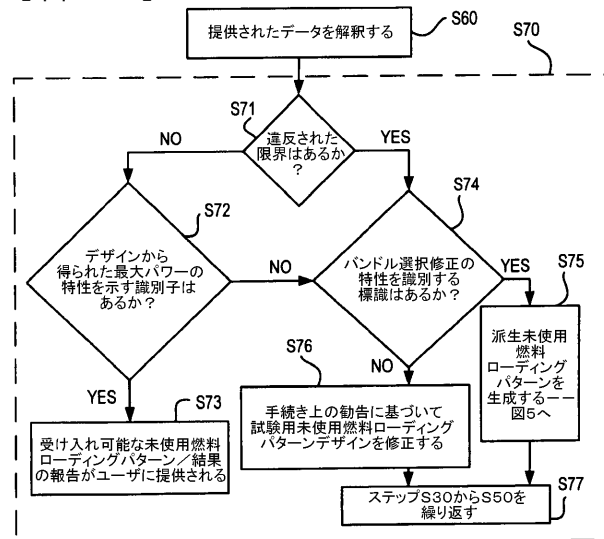
【図 6】



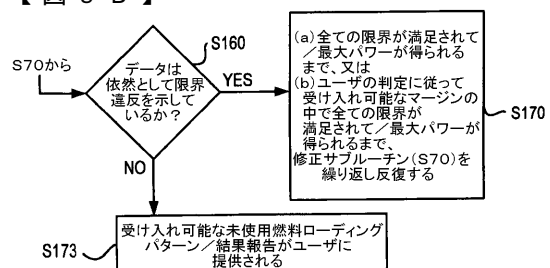
【図 7】



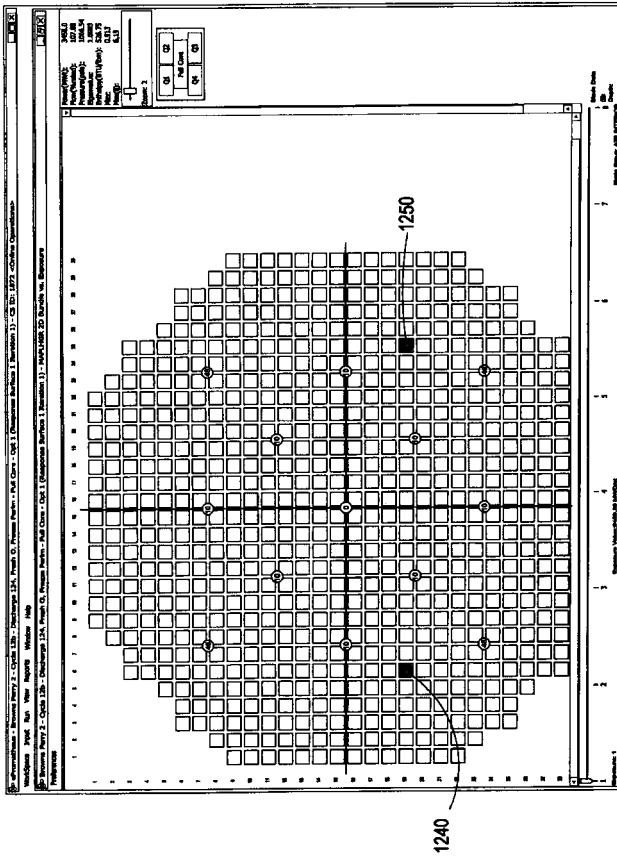
【図 8 A】



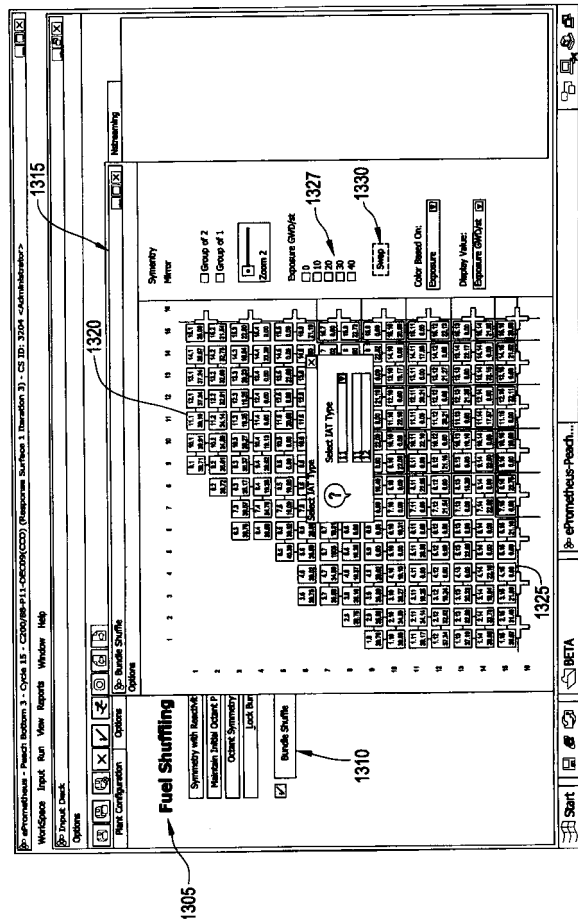
【図 8 B】



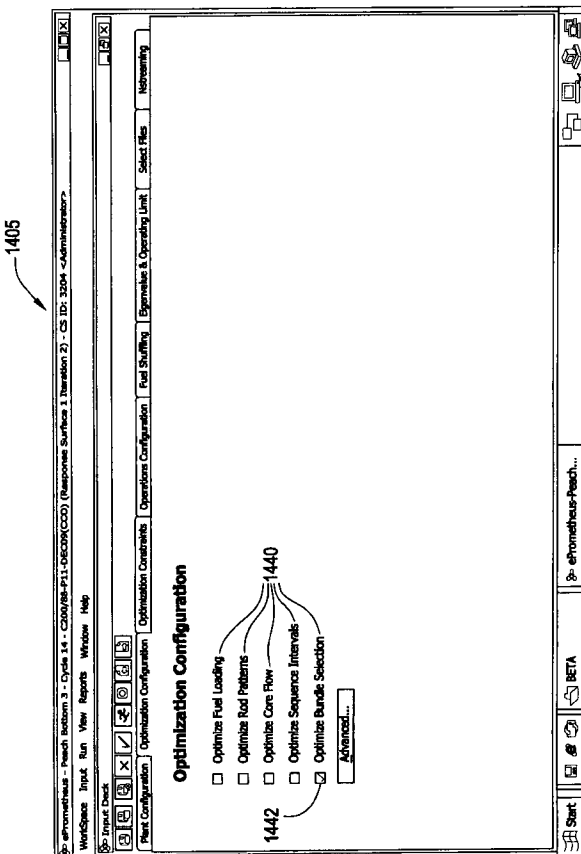
【 1 2 B 】



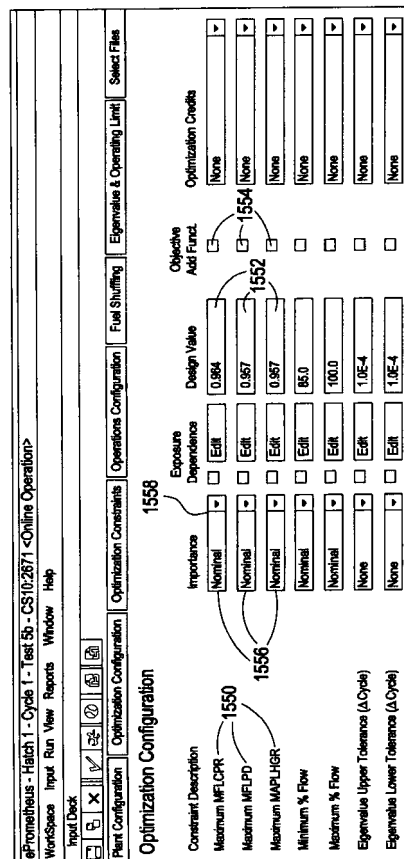
【 1 3 】



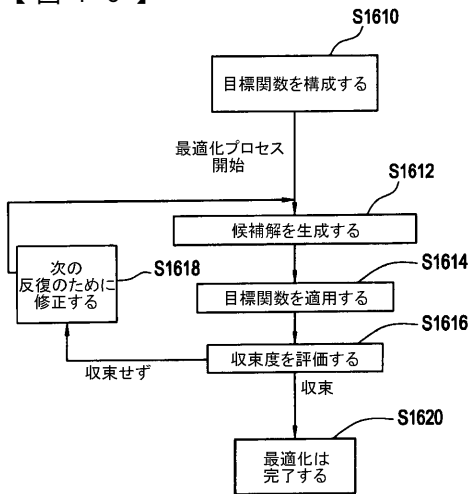
【 1 4 】



【 1 5 】



【 図 1 6 】



フロントページの続き

- (72)発明者 ウィリアム・アール・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、アーボリタム・ドライブ、1 0 4 4 番
- (72)発明者 デビッド・ジョセフ・クロパチェク
アメリカ合衆国、ノース・カロライナ州、クレ・ビーチ、クレ・デューンズ・レーン、3 2 5 番
- (72)発明者 スティーブン・バリー・サットン
アメリカ合衆国、ノース・カロライナ州、ウィルミントン、セントリー・オークス・ドライブ、6
4 2 1 番
- (72)発明者 ウィリアム・チャールズ・クライン
アメリカ合衆国、ノース・カロライナ州、ウィルミントン、ライデン・ロード、6 2 2 5 番
- (72)発明者 クリスチャン・カルロス・オヤルズン
アメリカ合衆国、ノース・カロライナ州、ウィルミントン、ナンバー 2 0 2 5、エス・カレッジ・
アールディー、3 4 1 1 - 1 1 番
- (72)発明者 グレン・アラン・ウオトフォード
アメリカ合衆国、ノース・カロライナ州、ウィルミントン、フィニアン・ドライブ、7 0 0 5 番
- (72)発明者 キャリー・リード・メリット
アメリカ合衆国、ノース・カロライナ州、ウィルミントン、バイオレット・シーティー、3 5 2 3
番

F ターム(参考) 2G075 AA03 AA05 CA08 CA38 FB09 FC11