

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第4109620号
(P4109620)

(45) 発行日 平成20年7月2日(2008.7.2)

(24) 登録日 平成20年4月11日(2008.4.11)

(51) Int.Cl.

G 2 1 C 17/00 (2006.01)

F 1

G 2 1 C 17/00

S

G 2 1 C 17/00

T

請求項の数 10 外国語出願 (全 26 頁)

(21) 出願番号 特願2003-424277 (P2003-424277)
 (22) 出願日 平成15年12月22日 (2003.12.22)
 (65) 公開番号 特開2005-10140 (P2005-10140A)
 (43) 公開日 平成17年1月13日 (2005.1.13)
 審査請求日 平成18年12月20日 (2006.12.20)
 (31) 優先権主張番号 10/325, 831
 (32) 優先日 平成14年12月23日 (2002.12.23)
 (33) 優先権主張国 米国(US)

早期審査対象出願

(73) 特許権者 301068310
 グローバル・ニュークリア・フェュエル・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

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】原子炉の炉心デザインを判定するための方法及び装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

原子炉の炉心デザインを決定する方法において、

炉心デザインの判定に適用可能な限界値のセットを定義する過程 (S 1 0) と、
 前記定義された限界値に基づいて、新燃料バンドルの初期ローディングパターンを基準
炉心デザイン内に含むように、この基準炉心デザインを生成する過程 (S 1 5) と、
基準炉心デザイン内で、今回評価されるべき新燃料バンドルの独自のサブセットを選択
する選択過程 (S 2 0) と、

受入可能炉心デザインを決定するための所定の反復を行う第 1 の反復過程、
とを備えた炉心デザインの判定方法であって、前記第 1 の反復過程が、
少なくとも 1 つの新燃料ローディングパターン中の各々の燃料位置において、前記新燃
料バンドルの少なくとも 1 つを、前記選択されたサブセットの少なくとも 1 つの新燃料バ
ンドルで置き換える置換過程 (S 2 5) と、

置き換えられた前記少なくとも 1 つの新燃料バンドルを用いた炉心デザインについて原
子炉動作をシミュレートしてシミュレーション結果出力を得るシミュレーション過程 (S
3 0) と、

複数のシミュレーション出力を得るために、前記少なくとも 1 つの新燃料ローディング
パターンの各々の燃料位置において、前記選択されたサブセットの全ての燃料バンドルが
挿入されるまで、それぞれの炉心デザインについて、前記置換過程 (S 2 5) と前記シミ
ュレーション過程 (S 3 0) とを反復繰り返す第 1 の反復制御過程 (S 3 5) と、

前記第1の反復制御過程により前記置換過程（S25）と前記シミュレーション過程（S30）とが前記新燃料ローディングパターンの各燃料位置において繰り返し実行されることにより得られる複数のシミュレーション結果出力を、前記定義された限界値セットに基づいてランク付けするランク付け過程（S40）と、

前記新燃料ローディングパターンの燃料位置を変更しながら、前記第1の反復制御過程と前記ランク付け過程とを繰り返させる制御を行う第2の反復制御過程と、

を具備することを特徴とする炉心デザインの判定方法。

【請求項2】

前記ランク付け過程において最高ランク付けされた出力が前記基準炉心デザインの出力と比較して改善されている場合には、この最高ランク付けされた炉心デザインを、対応する新燃料ローディングパターンを有する新たな基準炉心デザインとして設定する過程（S70）と、

改訂された受入可能炉心デザインをさらに決定するために、前記第1の反復制御過程（S35）と前記ランク付け過程（S40）とを繰り返し実行させる前記第2の反復制御過程を繰り返し実行する第2の反復過程と、

最高ランクの出力が基準炉心デザインと比較して改善されていない場合には、前記シミュレーション中に違反とされた限界値に関連するデータを提供する過程（S90, S93）と、

を更に含むことを特徴とする請求項1記載の方法。

【請求項3】

前記第2の反復過程からの最高ランクの出力とは、前記定義された限界値セットに基づいて、前記第1の反復過程の最高ランクの出力と比較して性能の最大の改善を示す出力を表し、且つ、

前記性能は、定義された限界値のうちの少なくとも1つ以上に関連し、且つ、

前記定義された限界値は、N回の反復の各々において基準炉心デザインに適用可能である、場合において、

反復連続する間に得られる最高ランク出力にそれ以上の性能の改善が存在しなくなるまでのN回の反復にわたる第3の反復過程（S50）を更に含むことを特徴とする請求項2記載の方法。

【請求項4】

前記定義する過程（S10）は、

前記シミュレーション過程を実行するために入力されるべき変数に適用可能な限界値を定義することと、

前記シミュレーション過程からの出力に適用可能な限界値を定義することとを更に含み、

前記シミュレーション過程を実行するために入力される前記変数に適用可能な前記限界値とは、所望の炉心性能制約に関連するものであり、

前記シミュレーション過程からの出力に適用可能な限界値とは、原子炉動作の動作限界値及び安全度限界値、並びにそれらの動作限界値及び安全度限界値に対するマージンに関連することであることを特徴とする請求項1記載の方法

【請求項5】

前記シミュレーション過程（S30）は、更に、

前記炉心デザイン内の各々の評価位置において、原子炉動作を、前記独自のサブセットの燃料バンドルの各々を用いてシミュレートして各々の位置での出力を得る過程を有することを特徴とする請求項1に記載の方法。

【請求項6】

前記ランク付け過程（S40）は、更に、

前記出力を評価する目的で適用分野に固有の目標関数を構築する過程（S41）と、

その適用分野に固有の目標関数を用いて各々の出力に対する利益値の数量を生成する過

10

20

30

40

50

程 (S 4 3) と、

この利益値の数量を前記定義された限界値に基づいてランク付けする過程 (S 4 5 , 4 7) とを具備することを特徴とする請求項 1 に記載の方法。

【請求項 7】

前記選択過程 (S 2 0) は、更に、

前もって創成されモデル化され蓄積されていた複数の新燃料バンドルのタイプ別の性能特性をユーザーインターフェースを用いてコンピュータベースの媒体に対して表示する過程と、

前記ユーザーインターフェースを用いて、所望の新燃料バンドルを前記選択された固有のサブセットとしてグラフィック的に選択する過程、

とを具備することを特徴とする請求項 1 に記載の方法。

【請求項 8】

請求項 1 の方法に従って開発された炉心設計を用いて原子炉を動作させることを特徴とする方法。

【請求項 9】

原子炉炉心を決定するシステム装置 (1 0 0 0) であって、

基準炉心デザインにおいて評価すべき新燃料バンドルの固有サブセットを蓄積するメモリー (2 5 0) と、

前記基準炉心デザインに適用可能な限界値セットを受信し、且つ、前記基準炉心デザインにおいて評価すべき新燃料バンドルの固有セットを選択するためのインターフェース (2 3 0) と、

受信した前記限界値に基づいて、基準炉心デザイン内における複数の燃料位置に配置される新燃料バンドルの初期ローディングパターンを含むところの前記基準炉心デザインを生成する処理装置 (4 0 0) とを具備したシステム装置であって、

前記処理装置 (4 0 0) は、

少なくとも 1 つの新燃料ローディングパターン中の各々の燃料位置において、前記新燃料バンドルの少なくとも 1 つを、前記選択されたサブセットの少なくとも 1 つの新燃料バンドルで置き換える置換機能 (S 2 5) と、

置き換えられた前記少なくとも 1 つの新燃料バンドルを用いた炉心デザインについて原子炉動作をシミュレートしてシミュレーション結果出力を得るシミュレーション機能 (S 3 0) と、

複数のシミュレーション出力を得るために、前記少なくとも 1 つの新燃料ローディングパターンの各々の燃料位置において、前記選択されたサブセットの全ての燃料バンドルが挿入されるまで、それぞれの炉心デザインについて、前記の置換機能 (S 2 5) と前記シミュレーション機能 (S 3 0) とを反復繰り返させる第 1 の反復制御機能 (S 3 5) と、

前記第 1 の反復制御機能により、前記置換機能 (S 2 5) と前記シミュレーション機能 (S 3 0) とが繰り返されることにより得られた複数のシミュレーション結果出力を、前記定義された限界値セットに基づいてランク付けするランク付け機能と、

前記新燃料ローディングパターンの燃料位置を変更しながら、前記第 1 の反復機能と前記ランク付け機能とを繰り返し実行させる制御を行う第 2 の反復制御機能と、
を具備することを特徴とする設計システム装置。

【請求項 10】

前記処理装置 (4 0 0) は、

前回の反復で受入可能とされた炉心デザインを今回の反復に対する基準炉心デザインとして設定する設定機能を備えると共に、反復毎に修正された受入可能炉心デザインを記憶するように前記メモリー (2 5 0) を制御可能であり、

前記処理装置 (4 0 0) は、

反復毎に修正された受入可能炉心デザインが前記メモリー (2 5 0) に記憶され、さらに、前記インターフェース (2 3 0) が基準炉心デザインを修正するコマンドを受けたことに応答して、

前記設定機能による設定過程と前記第2の反復制御機能による第2の反復過程とからなる反復をN回繰り返して行い、

前記インターフェース(230)を介して、ユーザに最終的に受入可能な炉心デザインに関連するデータを出力する、

ことを特徴とする請求項9の設計システム装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は一般に原子炉に関し、特に原子炉の炉心デザインを判定することに関する。

【背景技術】

【0002】

沸騰水型原子炉(BWR)又は加圧水型原子炉(PWR)などの原子炉の炉心は、異なる特性を有する燃料棒(BWRの場合)又は異なる特性を有する複数の燃料棒群(PWRの場合)から成る数百本の個別の燃料バンドル(燃料アセンブリ)を有する。それらのバンドル(燃料棒群)は、1つの燃料バンドル(燃料棒群)の中における燃料棒間の相互作用及び燃料バンドル(燃料棒群)間の相互作用が、政府による制約及び顧客指定による制約を含めて、あらゆる規制制約及び原子炉設計制約を満たすように配列されるのが好ましい。更に、炉心デザインは、炉心サイクルエネルギーを最適化するように決定されなければならない。炉心サイクルエネルギーは、運転停止時に実行されているように、新たな燃料要素によって炉心を再生する必要が生じる前に炉心が発生するエネルギーの量である。

【0003】

例えば、BWRの場合、炉心内部における可能なバンドル配列及び1つのバンドルにおける個別の燃料要素配列の数は数百階乗を超えると考えられる。それらの数多くの異なる可能構成の中で、全ての適用可能設計制約を満たすことができるのはわずか数パーセントの炉心デザインのみであろう。更に、あらゆる適用可能設計制約を満たす炉心デザインの中で経済的であるのは、そのわずか数パーセントである。

【0004】

従来、炉心デザインの決定は試行錯誤方式で実行してきた。特に、技術者又は設計担当者の過去の経験のみに基づいて、炉心デザインを行うときには初期炉心デザインが識別された。当初に識別されたデザインは、その後、コンピュータでシミュレートされた。ある特定の設計制約を満足しなければ、その構成を修正し、再度のコンピュータシミュレーションが実行された。以上説明した手続きを使用して適切な炉心デザインが識別されるまでには、通常、何週間にも及ぶ労力が必要とされていた。

【0005】

例えば、現在使用されているプロセスは、設計担当者が原子炉プラント特有の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が必要な独立手動操作デザインプロセスである。入力ファイルに入力されるデータは制御ブレードのブレードノッチ位置(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、炉心燃焼度(例えば、メガワット・日毎短時間(MWt/st)で測定された炉心エネルギー・サイクル1回当たりの燃焼量)などを含む。

【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決定すると共に、熱限界のマージンの違反が起こっていなかったことを検証する。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、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、申し分ない炉心装荷パターンが実現されるまで繰り返された。

10

20

30

40

50

【特許文献1】米国特許第6748348号明細書

【特許文献2】米国特許第6934350号明細書

【特許文献3】米国公開特許第2004-52326号明細書

【特許文献4】米国公開特許第2004-66875号明細書

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0007】

このプロセスは極めて長い時間を要する。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。ファイルは固定フォーマットであり、極めて長く、場合によっては5000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き、更に悪い場合には、さほど逸脱しているように見えず、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、実際の運転中の炉心に配置されたとき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。

【0008】

更に、設計担当者をより好都合な炉心装荷パターンの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して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デザインの解を決定する唯一の手段である。

【課題を解決するための手段】

【0009】

原子炉の炉心において燃料サイクルで使用されるべき炉心デザインを決定するための方法及び装置を説明する。方法において、炉心デザインを決定することに適用可能である限界のセットが定義され、定義された限界に基づいて基準炉心デザインが生成される。基準炉心デザインは、複数の燃料位置に配置された現在未照射燃料バンドルの初期装荷パターンを含む。未照射燃料バンドルの独自のサブセットが選択されて、基準炉心デザインにおいて評価され、第1回目の反復改善プロセスが実行される。第1回目の反復は、燃料位置ごとに、現在未照射燃料バンドルのうちの少なくとも1つを選択された未照射燃料バンドルのうちの少なくとも1つと置き換えることと、複数の出力を生成するために基準炉心デザインについて原子炉動作をシミュレートすることとを含む。各々の出力は、選択された未照射燃料バンドルのうちの1つ以上を含む基準炉心デザインに対応する。出力は限界の定義されたセットに基づいてランク付けされても良く、最高ランクの出力が原子炉に関して受入可能な受入れ炉心デザインとして選択されても良い。

【0010】

本発明は、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、本発明を限定するものではない。

【発明を実施するための最良の形態】

【0011】

原子炉の炉心デザインを決定するための方法及び装置を説明する。ここで使用される語句「炉心デザイン」は、例えば、次に予定されている運転停止時に原子炉の炉心にローディングされるべき未照射燃料アセンブリについて指定された装荷パターンを含む燃料アセンブリの炉心構成を意味している。

【0012】

1つの面においては、装置は、ユーザと通信し、コンピュータベースシステム及び/又は処理媒体（例えば、ソフトウェア駆動コンピュータプログラム、プロセッサ、アプリケーションサーバにより駆動されるアプリケーションなど）と対話するインターフェースを含んでいても良い。これにより、ユーザは、例えば、原子炉プラントで次に予定されている運転停止時に特定の炉心において実現される所望の燃料アセンブリ構成を決定するために、炉心デザインを仮想作成し、仮想評価することが可能になる。本発明の方法及び装置に

10

20

30

40

50

より、炉心デザインがユーザ入力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フィードバックを提供することができる。炉心デザインは1つ以上の未照射燃料アセンブリ、並びに炉心におけるそれらのアセンブリの配置、照射済み燃料の配置、制御ブレードパターンなどに関連する情報により特徴づけられていても良い。

【0013】

本発明の方法及び装置はいくつかの利点を提供する。方法は、バンドルの複雑さ又は未照射燃料バンドルデザインの数とは関係なく、原子炉の炉心デザイン内における未照射燃料バンドルの型及び配置を決定することを可能にする。通常は1つ又は2つの未照射燃料型（すなわち、1つ又は2つのストリーム解）を利用する現在の炉心デザインとは対照的に、配置すべき所望の燃料バンドルを決定するために任意の数の又は任意の組み合わせの未照射燃料バンドルデザイン（例えば、「N個のストリーム」）を利用できる。本発明の方法及び装置によれば、安全度マージンを改善しつつ、炉心デザインの効率を向上させることができる。方法は、未照射燃料バンドルデザインのパレットの中から、基準炉心デザインで評価されるべきN個の候補未照射燃料バンドルを選択し、それに続いて、未照射燃料バンドル「ローディング」パターン（例えば、次の運転停止中に原子炉に未照射燃料をどのようにローディングすべきかに関するパターン）を連続して繰り返し改善することができる。

【0014】

更に、方法及び装置は、原子炉の所望の炉心デザインを作成するために必要とされる時間の量を相当に短縮するために計算環境を利用する。方法はユーザの入力制約又は設計限界を完全に厳守する（例えば、計算された目標関数値が0に等しくない場合、特定の炉心デザインにはまだ改善の余地があると考えられる）。方法及び装置は、従来の手動操作による反復プロセスと比較して、炉心デザインを迅速に変更すること及び変更されたデザインをシミュレートすることに対してより大きな動作上の融通性を提供する。更に、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しようと試みる中で誤りをおかすという事態は全く見られなくなる。

【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、アクセス可能な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を含む。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。

【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、あるいは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ー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。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、インター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る。アプリケーションサーバ200はオンライン機密保護、目標関数値を計算するために全ての計算を指示し且つデータをアクセスすること、並びにユーザが検討できるような炉心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を責務とする。図表情報は128ビットSSL接続375又はLAN275を介して通信される（ユーザ300/350の適切な表示装置に表示される）。これ以降、ユーザという用語は内部ユーザ350と外部ユーザ300の双方を表す。例え

10

20

30

40

50

ば、ユーザは原子炉の炉心デザインを決定するためにウェブサイトをアクセスしている原子炉プラントの代表者及び／又は本発明の方法及び装置を使用することにより炉心デザインを開発するために原子炉プラントの現場で賃貸しられているベンダーのいずれかであっても良い。

【0017】

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(PCIE)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、10 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ーフェース225)を介してアプリケーションサーバ200へ情報を通信する。

【0018】

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ーフェース(GUI)機能及びブラウザ機能、機密保護機能の指示、様々な限界に関する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る。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100のユーザに対するインターフェースを提示し、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ーフェース構成要素(例えば、ハイパーテキスト、ウインドウなど)及び画像をフォーマットし、表示する責務を負う。

【0019】

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。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が、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。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100を外部からの侵入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全ての機密保護機能を実現する。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する。

【0020】

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、棒パターンデザイン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値を計算し、且つ結果を提供するために要求されるあらゆる計算を実行する。提供される結果は、GUI230を介して、アプリケーションサーバ200の指示の下に表示されれば良い。

【0021】

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

10

20

30

40

50

ること、特定の炉心デザイン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を介するユーザからのアクセスに対して、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れば良い（ただし、ここで挙げた計算に限定されない）。

【0022】

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全ての炉心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。また、以前に作成され、モデル化されていた多種多様な未照射燃料バンドルデザイン（「N個のストリーム」）のパレットを含む未照射燃料デザインデータベース252があつてもよい。

10

【0023】

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デザインに関する全てのパラメータを格納する待ち行列データベース253と、定義された限界と最も良く一致する基準炉心デザインを生成する際に選択されて良い履歴炉心デザインを含む履歴炉心装荷パターンデザインデータベース254と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。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）は、特定の炉心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は全ての燃焼度ステップに対する制御ブレードの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。

20

【0024】

図4は、沸騰水型原子炉を例として炉心装荷パターンデザインに関して説明される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が、方法及び装置が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。図8から図14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

【0025】

一般に、この方法においては、全ての限界（顧客、設計担当者又はユーザが特定の所望の炉心デザインにとって重大であると指示するどのようなものを含んでいても良い）を理解し、それを基準炉心デザインに取り入れるべきである。例えば、類似の履歴サイクルからの推定に基づいて、基準炉心デザインの初期未照射燃料型及び装荷パターンを決定しても良い。その後、基準炉心デザインについて改善の反復プロセスを実行する。各々の反復の結果が必要に応じて表示されても良く、ユーザは限界に適合したか否か及び最大エネルギー出力が得られたか否かを決定できる。反復改善プロセスの結果が満足できるものであれば、レポートが生成され、顧客に対して提供されても良い。結果が不満足である（例えば、反復プロセスが実行された後でも、受入れ可能な炉心デザイン解が決定されなかった）場合には、設計担当者又はユーザは基準炉心デザインに対して実行されるべき修正（す

40

50

なわち、追加未照射バンドルの導入などを含めた新たな未照射燃料装荷パターン)を決定すれば良い。以下に更に詳細に説明するが、この後、反復改善プロセスは満足できる結果が得られるまで繰り返される。1つの面において、方法及び装置は、各プロセスステップで、リレーションナルデータベースサーバ250の1つ以上のデータベースに格納され、そこから検索される結果を迅速に見ることを可能にするGUITを利用する。

【0026】

そこで図4を参照すると、まず、基準炉心デザイン及び初期未照射燃料装荷パターンを選択できるように、ステップS5(不図示)において、1つの原子炉プラントが選択される。原子炉プラントは、例えば、リレーションナルデータベース250のようなアクセス可能な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な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など)及びGUIT230を介してアクセスしても良い。

10

【0027】

選択されたプラントの炉心デザインのシミュレーションにおいて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、基準炉心デザイン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(例えば出力)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(例えば、エネルギー含量)に関連していても良い。シミュレーションからの出力に適用可能な限界は原子炉動作に使用される動作パラメータ限界、炉心安全度限界、それらの動作限界及び安全度限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。

20

【0028】

図8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8を参照すると、全体を矢印805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810により示すように、1つの設計値限界を割り当てることが可能である。

30

【0029】

ステップS5で選択された原子炉に関して、初期未照射燃料装荷パターンを伴う基準炉心デザインが生成される(ステップS15)。例えば、定義された限界と最も良く一致する履歴炉心デザインを発見するために、履歴炉心装荷パターンデザインデータベース254がアクセスされても良い。履歴炉心デザインは、選択された原子炉プラントに対して開発中である炉心デザインと類似する炉心の大きさ及びパワー出力定格であり、同様のサイクルエネルギーを有し、且つ同様の動作性能特性を有する場合に一致するといえるであろう。基礎として類似する履歴デザインを使用して、履歴炉心の総エネルギー含量が計算され、要求されているエネルギー含量(例えば、顧客の要求に基づく、決定された炉心デザインからの所望のエネルギー出力)との差が定義される。履歴炉心と所望のエネルギー含量とのエネルギーの差は未照射燃料アセンブリの装荷により埋め合わせされれば良い。

40

【0030】

従って、基準炉心デザインを生成するために、ユーザは基準炉心デザインに対して、開発されるべき炉心デザインのエネルギー要求条件(限界に含まれる)に最も良く適合することができる未照射燃料バンドル型を選択すべきである(ステップS20)。バンドルデザインは、以前に作成され、モデル化されていた多様な未照射燃料バンドルデザイン(又はN個のストリーム)を提供する未照射燃料バンドルデザインデータベース252から選択されれば良い。

【0031】

50

図9は、バンドル選択ウェブページ900の画面図である。「Nストリーミング(N-Streaming)」という名称が付けられており、ユーザはモデム、キーボード、ポイントタなどの適切な入力装置を使用してG U I 2 3 0を介してページ900を立ち上げる。複数の選択可能な未照射燃料バンドル型905が表示されるが、それらのバンドル型905は以前にモデル化されているので、それらのバンドル型905の性能に関する情報をユーザは容易に利用できる。そこで、ユーザは、ボックス910をチェックすることにより、基準炉心デザインの装荷パターンで使用されるべき所望のバンドル型を選択すれば良い。

【0032】

新鮮バンドル型が選択されたならば、炉心ローディング対称を考慮すべきであり、プラントの中には八分円、四分円又は半円炉心ローディング対称を要求するものがある。これは、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実行されても良い。「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(1つの八分円は、例えば、1つの燃料バンドル群である)がモデル化される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概して8倍に増加する。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る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概して4倍に増加される。バンドル特性の非対称が八分円又は四分円対称を妨げるのであれば、ユーザは非対称を指定することも可能である。このように、炉心は対称性及び定義された限界を考慮しつつローディングされる。

【0033】

次に、基準炉心デザインの1つ以上の現在未照射燃料バンドルが、1つの反復改善プロセスにおいて、1つ以上の選択可能な未照射燃料バンドル905と置き換えられても良い(ステップS25)。この置き換えのための選択は、各バンドルの性能特性の概要をユーザに提供するもので、G U I 2 3 0を介して実行されても良い。「Nストリーミング」(選択された未照射燃料バンドル)が定義されたならば、ステップS25及びS30に関して説明されるルーピングが開始され、それにより、未照射燃料バンドルの置き換え及び解析の系統的プロセスが実行される。

【0034】

最も外側のレベル(「外ループ」)で、現在基準炉心デザインにおける各々の未照射燃料位置が順次検査される。「検査される」とは、原子炉の炉心動作が各々の特定の装荷パターンによって基準炉心デザインに対してシミュレートされ(ステップS30)、炉心デザインのエネルギー要求条件(限界に含まれても良い)に最も良く適合することができる基準炉心デザインが開発されるべきか否かを決定するためにバンドルの性能特性が検討されることを表している。最も内側のレベルでは、ページ900から選択された各々の「置き換え」未照射燃料バンドル905が各燃料位置で検査される。このプロセスの間、基準炉心デザインの現在未照射燃料バンドルは新たな「Nストリーミング」未照射燃料バンドル905の各々と置き換えられる。

【0035】

複数のシミュレーション結果を生成する(即ち、出力する)ために、選択された1つ以上の未照射燃料バンドルを含む基準炉心デザインについて炉心動作シミュレーション実行しても良い(ステップS30)。シミュレーションは計算サーバ400により実行されても良いが、装置1000の外部で実行される3Dシミュレーションプロセスであっても良い。ユーザはPANACEA(登録商標)、LOGOS(登録商標)、SIMULATE(登録商標)、POLCA(登録商標)などの周知の実行可能な3D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す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400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。

【0036】

従って、ユーザは任意の時点でG U I 2 3 0を使用して3Dシミュレーションを開始す

10

20

30

40

50

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、ユーザはウイ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「RUN」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を更新し或いはシミュレーションの状態を受信するようにしても良い。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250内の待ち行列データベース253に待機していても良い。シミュレーションが待機状態にあるとき、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。上述の置き換えとシミュレーションの反復ステップは、各々の燃料位置で全ての選択された未照射燃料バンドルが挿入され且つ各「派生」基準炉心デザインがシミュレートされ終わるまで（例えば、ステップS35の出力がYESである）繰り返される（ステップS35の出力がNO）。従って、各々の未照射燃料位置において全ての選択された未照射燃料バンドル905を置き換えることは、上記の内ループと外ループとが共に起動されるときに完了する。

【0037】

以上説明した反復改善プロセスは、ユーザが炉心デザインを微調整することを可能にし、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実行できていたより更に多くのエネルギーを受け入れ可能炉心デザインから取り出すことを可能にするという意味で有益である。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4で説明したような反復改善プロセスは、一度に1つのパラメータを変更し、その後に炉心シミュレーションを実行するという従来の手動操作による反復プロセスを使用する場合の数週間と比較して、極めて短い期間内で実行できるであろう。

【0038】

シミュレーションからの出力は限界に基づいてランク付けされる（ステップS40）。ユーザは、希望に応じて各々の出力に関連するデータを表示しても良い。これにより、ユーザは、何らかの改善があったか否かを決定するために基準炉心デザインとの比較を実行することができる。改善は、例えば、定義された限界を越えないこと、又はいくつかのエネルギー要求条件に適合することとして定義されても良い。

【0039】

最高ランクの出力が改善を示す（ステップS50の出力がYESである）場合には、その最高ランクの出力に対応する炉心デザインが新たな基準炉心デザインとして設定され（ステップS70）、結果はシミュレータ結果データベース255などのリレーショナルデータベースサーバ250に格納される（ステップS80）。これで反復改善プロセスの1回の反復が完了する。ステップS25、S30、S40及びS50が繰り返され（例えば、N回の反復）、それぞれの繰り返しにおける「改善」が後続の繰り返しにおける新たな基準炉心デザインになる。定義された限界はN回の反復の各々において基準炉心デザインに適用可能である。所定の反復に関して、最高ランクの出力に改善がなければ、反復プロセスは完了し、その時点で最高ランクのデザインである基準炉心デザインに関連するデータがユーザに表示されて解釈される（ステップS60）。このデータは、シミュレートされた炉心のどの場所が、限界違反の最大の原因若しくは要因であるかを示すような標識をユーザに更に提供するようにしても良い。ステップS60で、修正サブルーチン（ステップS90）を開始することを促される。これは、通常は上記の反復改善プロセスがユーザにとって受け入れ可能である炉心デザインを決定できなかった場合に限り要求されるオプションのステップである。修正サブルーチンに関しては以下に更に詳細に説明する。

【0040】

図5は、本発明の一実施例に従ったシミュレーションステップを示すフローチャートである。ユーザがシミュレーションを開始すると、その後に多数の自動化ステップが続く。まず、炉心デザイン問題に関する全ての定義が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、

10

20

30

40

50

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。コンピュータジョブは各リレーショナルデータベースサーバ250の待ち行列サーバ253に待機するように実行可能状態とされる（ステップS33）。特定のシミュレーションに関するデータを格納することにより、直近の反復又はかなり前の反復からも、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、炉心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。

【0041】

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すると、関心ある全ての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）に格納される。従って、試験棒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をアクセスできる。

【0042】

図6は、図4のランク付けステップを更に詳細に示す流れ図である。各々の燃料位置でのすべての選択された燃料バンドルがシミュレートされると（S35）、ステップS40で出力のランク付けが行われる。出力をランク付けする場合、シミュレートされた炉心デザインが限界又は制約にどれほど密接に適合するかを比較するために、目標関数が計算される。目標関数は、制約又は限界を取り入れ、炉心デザインの限界に対する厳守度を定量化する式である。例えば、シミュレーションの結果及び計算された目標関数値に基づいて、例えば、炉心設計担当者、技術者又はプラント管理者などであるユーザは、ある特定のデザインがユーザの限界要求に適合するか（すなわち、最大サイクルエネルギー要求に適合するか）否かを判定することが可能である。

【0043】

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も、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6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む。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からアクセスする（ステップS41）。

【0044】

本発明の方法及び装置においては、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む。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決定されても良い。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決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決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。

10

20

30

40

50

【 0 0 4 5 】

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め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試験棒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。

【 0 0 4 6 】

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

式中、「par」は図8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決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、

$$OBJ_{TOT} = \sum_{par=1}^{31} \{OBJ_{par}\} \quad (2)$$

【 0 0 4 7 】

式数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。正の目標関数値は、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(燃焼度ステップ)(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、燃焼度ステップ)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、炉心は識別された燃焼度ステップでのみ修正される。

【 0 0 4 8 】

加えて、目標関数値は各燃焼度ステップの関数として計算され、炉心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、燃焼度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結果、すなわち、値は、リレーション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。

【 0 0 4 9 】

目標関数値は炉心開発の手動操作による決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決定するために、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、炉心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、それは提案された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をユーザに与える。

【 0 0 5 0 】

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炉心デザインを作成していることを示し、一方、目標関数値を減少しつつ連続する反復(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、炉心デザインの改善を示すであろう。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、リレーション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。

【 0 0 5 1 】

目標関数の計算が完了すると、評価される炉心デザイン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

10

20

30

40

50

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、その寄与(Contribution)及び百分率(%)寄与(%Contribution)(図6に関して説明した計算及び正規化ルーチンに基づく)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炉心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。

【0052】

あるいは、個別の炉心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工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る。炉心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工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。

【0053】

エネルギーに有益な移動

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

サイクル終了(EOC)時にNEXRAT(Nodal Exposure Ratio(節点燃焼度比)、熱マージン制約)問題がある場合、より反応性の高い(例えば、照射のより少ない)燃料を問題の場所へ移動させる

サイクル開始(BOC)時に炉心の周囲に運転停止マージン(Shutdown Margin SDM)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

EOC時にCPRマージンが低すぎる場合、より反応性の低い燃料を問題の場所へ移動させる

EOC時にkW/ftマージンが低すぎる場合、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工エネルギーへの変換

EOC時に炉心の中心に余分なCPRマージンがある場合、より反応性の高い燃料を周囲の場所から炉心中心へ移動させる

場所と、目標関数により示される限界違反の時間燃焼度とに基づいて、ユーザは制約違反に対処し、修正するために、上記の勧告のうちの1つ以上に容易に従うことができるであろう。

【0054】

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。

【0055】

10

20

30

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	
3D回転図観測	10
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	

【0056】

図11A及び図11B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。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する。ユーザは単純に所望の画面を選択し、その後、図11A又は図11Bに示すようなページをアクセスすれば良い。図11Aは、1105及び1110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燃焼度(Exposure)について最大平均平面熱発生速度(MA P L H G R)の違反がどこで起こったか(炉心最大値と燃焼度のグラフ1105、及びM F P L Dの軸方向値と燃焼度のグラフ1110)を決定することができる。それらの制約の限界は線1120及び1125により示され、違反は概して図11Aの1130及び1135で示されている。

【0057】

図11Bは別の画面、この場合には、MA P L H G Rと燃焼度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。1140及び1150でわかるように、丸で囲まれた正方形は、炉心におけるMA 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、1140及び1150はMA 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、ユーザは炉心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。

【0058】

図7A及び図7Bは、本発明の一実施例に従った修正サブルーチンを説明する流れ図である。図7Aを参照すると、ステップS60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S90)。そのような場合、実際に、元來の基準炉心デザインは受入れ可能なデザインではなく、違反されるべきでないいくつかの限界が反復ごとに依然として違反されている場合のように、反復改善プロセスがユーザに受入れられる炉心デザインを提供できなかったならば、修正サブルーチンが要求されるであろう。

【0059】

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、手動操作によりこの修正サブルーチンを指示できる。別の実施例においては、何回かの炉心デザイン反復に対して自動的にシミュレーション、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サブルーチンが実行されても良い。

【0060】

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決定する(ステップS91)。限界の違反がなければ、ユーザが、炉心デザインから最大パワー

10

20

30

40

50

の特性が得られたことを示す識別子があるか否かを決定する。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燃料を移動させることにより良好な熱マージン利用 (MFLCP R 及び L H G R のマージンなど) を示す標識を含むであろう。燃料サイクルに対して使用されるべき炉心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 固有値で決定されたとき、エネルギー要求に適合したと示されても良い。炉心デザインから最大エネルギーが得られたとの指示があった (ステップ S 9 2 の出力が YES である) 場合、受入れ可能な炉心デザインが決定されたことになり、ユーザはその炉心デザインに関連する結果の報告をアクセスしても良い (ステップ S 9 3)。

【0061】

10

限界が違反された (ステップ S 9 1 の出力が YES である) か、又は限界の違反はないが、炉心デザインから最大エネルギーが得られなかったという指示がある (ステップ S 9 2 の出力が NO である) 場合には、ユーザは、現在基準炉心デザインに対して未照射燃料装荷パターン修正を実行すべきかを決定する (ステップ S 9 4)。これは、ユーザが個別の炉心修正を実行するか、あるいは、例えば、プルダウンメニューをアクセスすることにより、先に説明したシステム提供手続き勧告 (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) 過剰マージンを追加工エネルギーに変換すること) を使用する場合である。更に、炉心デザイン変更の数度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、これは異なる未照射燃料装荷パターンを伴う代替炉心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。

【0062】

20

未照射燃料装荷パターンの修正を実行するとき、先に挙げた勧告に基づいて、ユーザは GUI を介して未照射バンドルローディングを変更すれば良い。例えば、適切な入力装置及び GUI 230 を使用して、設計担当者は移動させるべき基準炉心デザイン中の可能な未照射燃料バンドルのバンドル対称性オプションを識別し、「目標」未照射燃料バンドルと、その目標バンドルを移動させるべき目的場所を選択する。その後、識別された目標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、所望のよう炉心基準パターンを再ローディングするために要求される未照射バンドルシャッフルごとに繰り返される。

【0063】

30

図 12 は、本発明の一実施例に従った修正ステップを更に詳細に示す画面図である。図 12 は、基準炉心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 (Fuel Shuffle) ページ 1205 を選択し、基準炉心デザインの一部の画面 1215 を表示するために「バンドルシャッフル (Bundle Shuffle)」タスクバー 1210 を選択すれば良い。図 12 において、1220 で示される未照射燃料バンドルは 1 つの未照射燃料バンドル型 (IAT 型 11) から別の型 (IAT 型 12) へ変更されつつある。炉心デザインの 1 つの未照射燃料バンドル、照射済み燃料バンドルを選択し、「SWAP」ボタン 1230 を選択することにより、照射済みバンドルを未照射燃料バンドルと交換しても良い (図 7A のステップ S 9 4)。各々の燃料バンドルの様々な燃焼度 (GWD/s) を示すために、画面 1215 に示されている基準炉心の部分はカラーコード化されても良い。そのようなカラーコード化のキーは、例えば、1227 に指示するように表示されても良い。図 12 の項目の選択は、周知のように、マウス、キーボード、タッチスクリーンなどの適切な入力装置を使用して実行されても良い。

【0064】

40

それらの基準炉心デザイン修正は、例えば、3D シミュレータ入力パラメータデータベース 259 などのリレーションナルデータベース 250 にセーブされても良い。ユーザはデザイン修正を取り入れつつステップ S 30 から S 50 を繰り返す (ステップ S 9 5)。その結果得られる最高ランクの出力は新たな基準炉心デザインを確定し、そこから図 4 の反復改善プロセスが繰り返されれば良い。言い換えれば、派生炉心デザインが全ての限界に

50

適合するか否かを判定するためにステップ S 30 ~ S 50 は繰り返される（ステップ S 95）。これは先に説明したように反復プロセスになるであろう。

【0065】

図 7 B 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 S 95 の修正サブルーチンからの派生炉心デザインごとに、ユーザは、ランク付けステップ S 40 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決定する。限界違反がなければ、ユーザは特定の原子炉で使用できる受入れ可能な炉心デザインを開発したことになり、受入れ可能な炉心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 S 193）。

【0066】

反復が限界の違反を依然として示している（ステップ S 160 の出力が YES である）場合には、全ての限界が満足されるまで、又はユーザの決定に従って受入れ可能であるマージンの中で全ての限界が満足されるまで、ステップ S 90 の修正サブルーチンが繰り返し反復される（ステップ S 190）。この反復プロセスは、ユーザが炉心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入れ可能炉心デザインから抽出できるという点で有益である。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 7 B で説明したような反復プロセスは、従来の一度に 1 つのパラメータを変更し、その後に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。

10

【0067】

ここまで、ユーザ又は設計担当者が GUI 230 を介してデータを解釈し、表示されるフィードバック（目標関数からのデータ）に基づいて、所望のデザインを獲得するために手作業により基準炉心デザインを繰り返し修正することに関連して、本発明の方法及び装置を説明してきた。しかし、図 4、図 7 A 及び図 7 B 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。最適化プロセスは複数の異なる炉心デザインに対して、原子炉の炉心で使用されるべき最適の炉心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 4、図 7 A 及び図 7 B のステップを繰り返す。

20

【0068】

図 13 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、プラント及び基準炉心パターンを選択した後、ユーザは最適化構成画面(Optimization Configuration) 1305 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(Optimized Fuel Loading)、棒パターン最適化(Optimize Rod Pattern)、炉心流量最適化(Optimize Core Flow)、シーケンス間隔最適化(Optimize Sequence Intervals)及びバンドル選択最適化(Optimize Bundle selection)の最適化パラメータ 1340 を選択しても良い。

30

【0069】

バンドル選択最適化は、基準炉心デザインの中で未照射バンドル型を最適に決定することを意味している。最適化の結果、各未照射燃料位置はいくつかの未照射バンドル型のうちの 1 つ（例えば、図 12 に示すような IAT 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。棒パターン最適化は、制御ブレード（PWR の場合は制御棒）の位置を最適に決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決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決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。

40

【0070】

50

適切な入力装置（例えば、キーボード、マウス、タッチ表示など）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 2 4 0 と関連する選択ボックス 1 3 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 3 4 2 にチェックマークが現れる。その選択ボックス 1 3 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、最適化を実行するためには、ユーザは、図 13 に示すように、燃料ローディング最適化及びバンドル選択最適化のボックス 1 3 4 2 を選択すれば良いであろう。

【 0 0 7 1 】

最適化問題と関連する制約パラメータをメモリ（リレーション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。

【 0 0 7 2 】

図 14 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 4 5 0 は関連する1つの設計値 1 4 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 4 5 0 と関連する選択ボックス 1 4 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 4 5 0 の選択ボックス 1 4 5 4 にチェックマークが現れる。選択ボックス 1 4 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。

【 0 0 7 3 】

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ン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、リレーション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 14 に示すように、ペナルティ項は設計値を組み込んでおり、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 14 の実施例により、ユーザは最適化制約 1 3 5 0 ごとの重要度 1 4 5 6 を設定することができる。最適化制約の重要度フィールド 1 4 5 8 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關している。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。

【 0 0 7 4 】

上記の選択が完了したならば、計算サーバ 4 0 0 はリレーションナルデータベースサーバ 2 5 0 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。

【 0 0 7 5 】

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

10

20

30

40

50

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。

【0076】

目標関数を使用する最適化

図15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2003-325370号に開示されている。

【0077】

説明の便宜上、図15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S1510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S1512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照射燃料バンドル及び照射済み燃料バンドルを決定すること、及び／又は特定の原子炉プラントの次の燃料サイクルに関する初期未照射燃料装荷パターンを伴う炉心デザインを決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。

10

【0078】

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。

20

【0079】

次に、ステップS1514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S1516で、計算プロセッサ400は、ステップS1514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S1518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S1512に戻る。ステップS1512、S1516及びS1518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棒パターンデザインを決定する場合、最適化は収束（例えば、図7A及び図7BのステップS93/S193における受け入れ可能な結果）が得られるまで実行される。

30

【0080】

この方法及び装置はいくつかの利点を提供する。先に説明したように、1つのデザインの中における独自の未照射燃料バンドルの数はストリームの数を表す。従って、単一ストリームデザインは1つのカスタム化バンドルを利用し、2ストリームデザインは2つのカスタム化バンドルを利用し、それ以降も同様である。先に説明したように、可能なストリームの数をN個のストリームに増加させることは、燃料サイクルのコストと安全度のマージンを改善することに相關する。カスタム化が大きいほど、最高の炉心効率を維持すると同時に、設計担当者が局所的な問題に対処する能力も大きくなる。

40

【0081】

従って、本発明によれば、ユーザは、1つの炉心デザイン解の中で1つ又はいくつかの未照射燃料バンドルを摂動させることにより、1つの燃料サイクルに対して炉心デザインにおける特定の「問題」場所に目標を定めることができる。例えば、運転停止マージンの問題を「矯正」するときには、単純に問題場所の未照射燃料バンドルをよりガドリニウムの含有量が多い未照射燃料バンドルと交換するだけで良いであろう。「矯正」するとは、炉心における制限のある場所がある制約限界に対する何らかのレベルのマージンによって

50

ひ制限的にされることを示唆している。例えば、MFLPD問題を矯正するときには、軸方向パワープロファイルを局所的にシフトさせるために、問題の場所を軸方向ゾーニング変更を含む未照射燃料バンドルによって標的にすれば良いであろう。

【0082】

特定の問題場所を標的とし、矯正することにより、サイクルエネルギーを目標とする炉心デザインへの全体的変更を実行できるであろう（例えば、新たな未照射燃料装荷パターン）。そのような全体的変更の大きさは、新たな局所的問題が発生するようなものである場合もある。そこで、本発明の方法及び装置を使用して、局所的変更と全体的変更のプロセスを繰り返すことができる。局所的／全体的変更が繰り返されるたびに、更に多くの数の局所的問題場所が発生して、デザインはエネルギー改善に向かって「推し進められて」行く。それ以上の局所的変更が不可能になった時点で、炉心デザイン解は完成する。

10

【0083】

本発明の技術的効果は、原子炉の炉心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、並びに次に予定されている運転停止時に原子炉の炉心にローディングされるべき未照射燃料アセンブリの指定装荷パターンによって原子炉の炉心デザインを迅速に開発し、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る。

【0084】

以上、本発明を説明したが、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。そのような変形は本発明の趣旨からの逸脱とみなされるべきではなく、当業者には自明であろうと考えられるそのような変形の全ては特許請求の範囲の範囲内に含まれることが意図されている。

20

【図面の簡単な説明】

【0085】

【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。

【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。

30

【図5】本発明の一実施例に従ったシミュレーションステップを示すフローチャート。

【図6】本発明の一実施例に従った図4のランク付けステップを更に詳細に示すフローチャート。

【図7】本発明の一実施例に従った受け入れ炉心デザインの修正を示すフローチャート。

【図8】本発明の方法及び構成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9】本発明の方法及び構成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】本発明の方法及び構成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11A】本発明の方法及び構成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11B】本発明の方法及び構成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】本発明の方法及び構成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】本発明の方法及び構成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】本発明の方法及び構成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15】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。

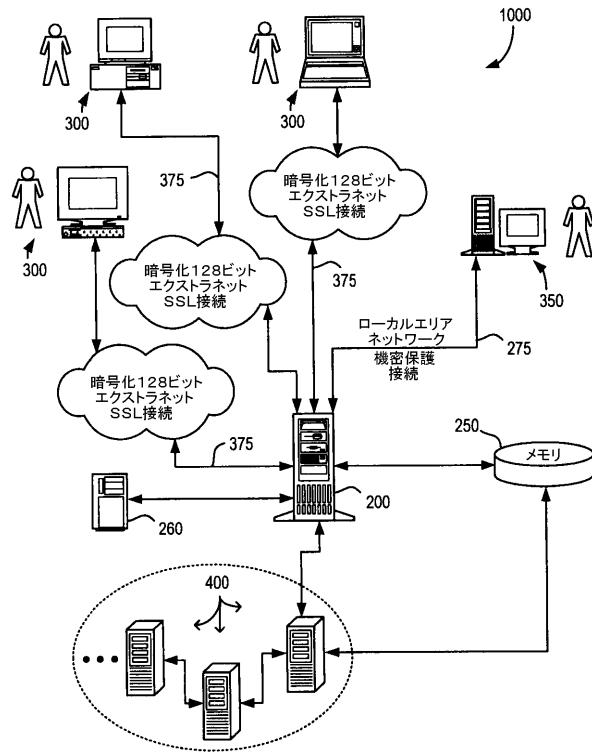
【符号の説明】

【0086】

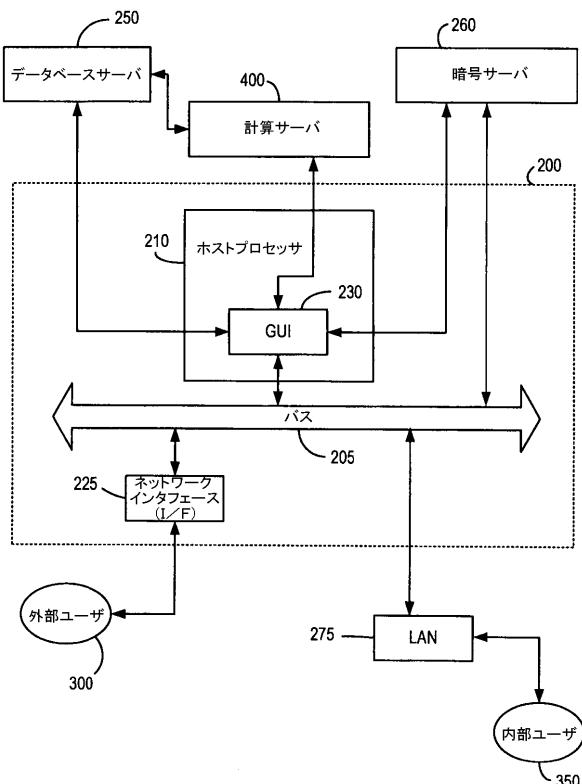
200...アプリケーションサーバ、205...バス、210...ホストプロセッサ、225...ネットワークインターフェース、230...グラフィカルユーザインターフェース(GUI)、250...リレーショナルデータベースサーバ(メモリ)、251...限界データベース、252...未照射燃料バンドルデザインデータベース、253...待ち行列データベース、254...履歴炉心ローディングパターンデザインデータベース、255...シミュレータ結果データベース、257...目標関数値データベース、259...3Dシミュレータ入力パラメータデータベース、260...暗号化サーバ、275...ローカルエリアネットワーク(LAN)接続、375...128ビット機密保護ソケット層(SSL)接続、300...計算サーバ

10

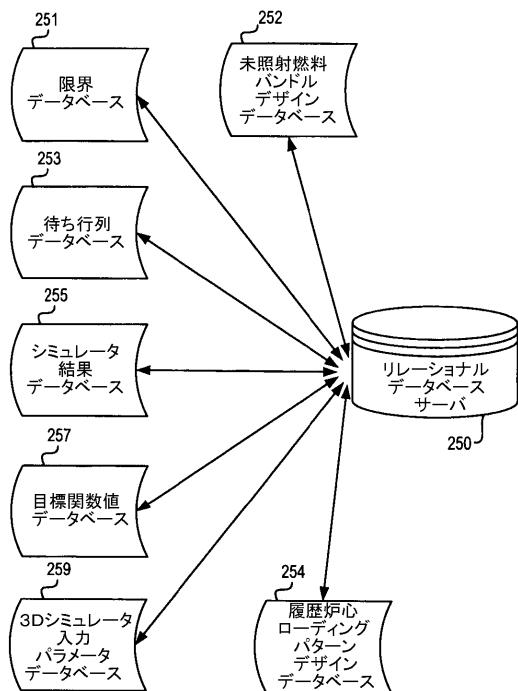
【図1】



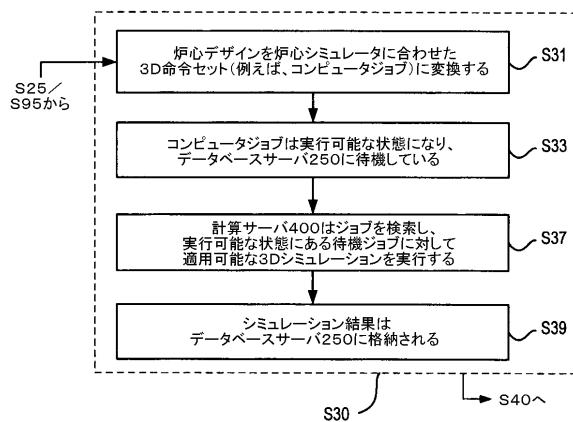
【図2】



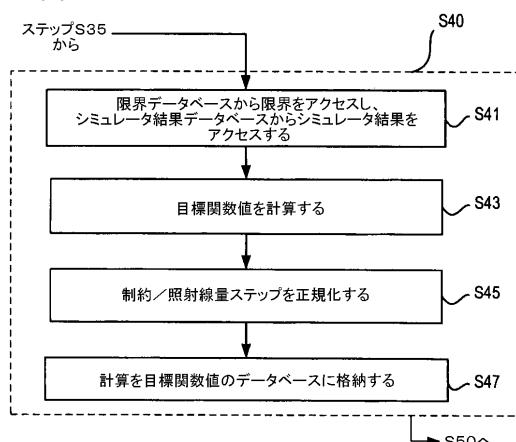
【図3】



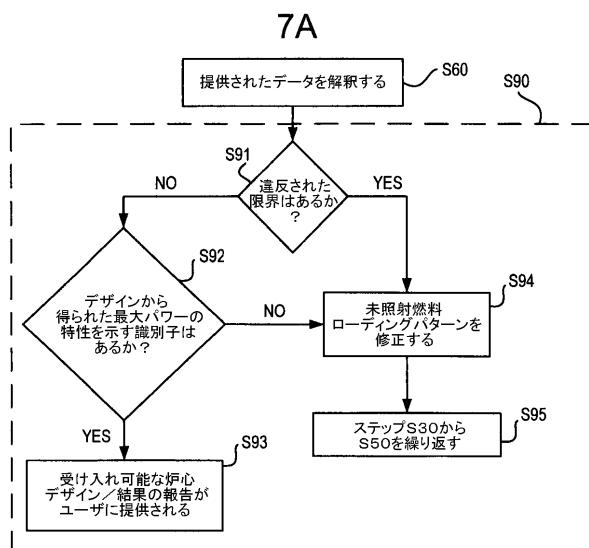
【図5】



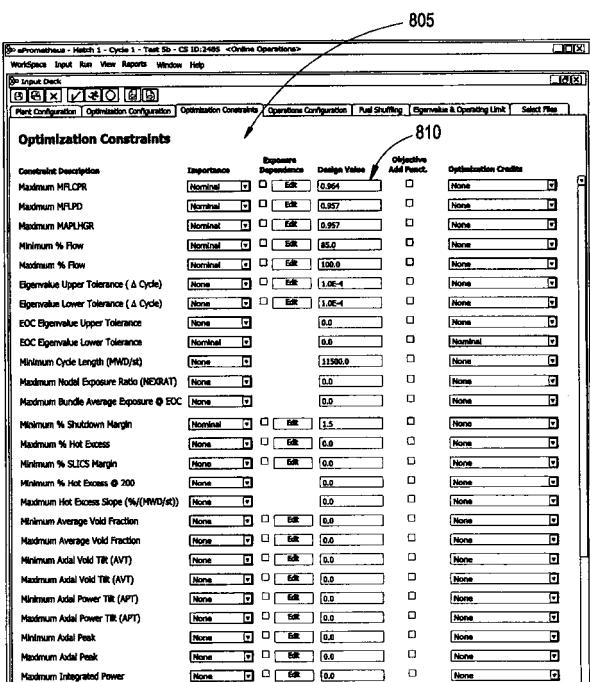
【図6】



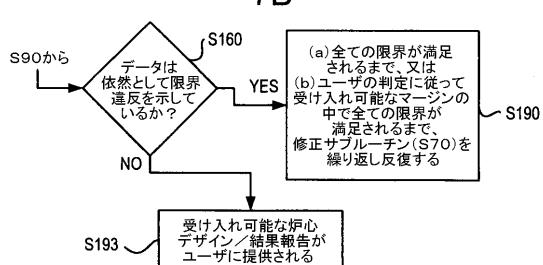
【図7】



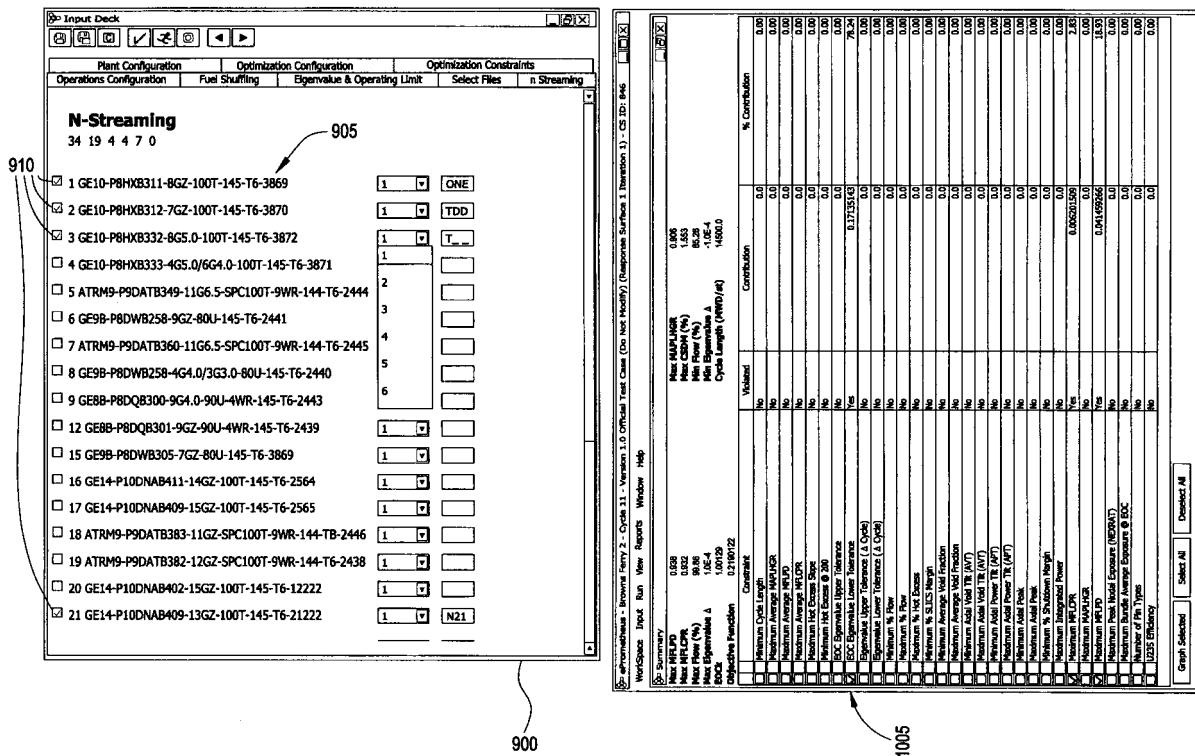
【図8】



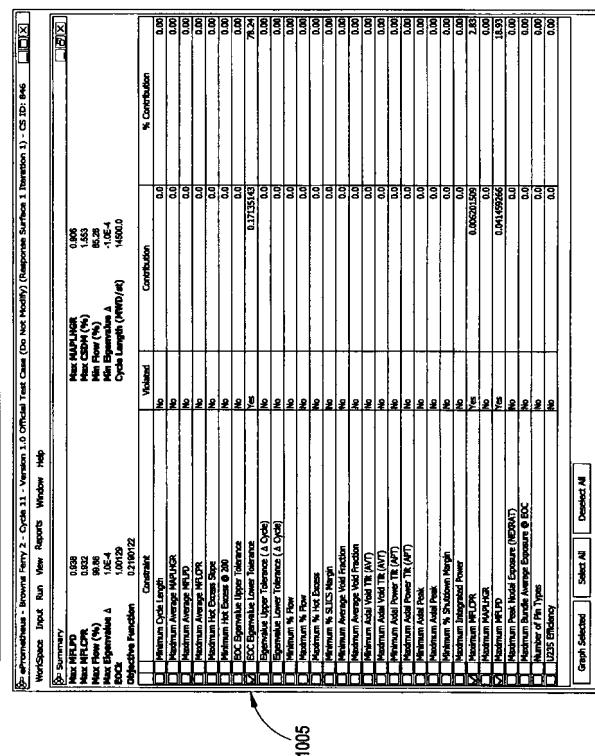
7B



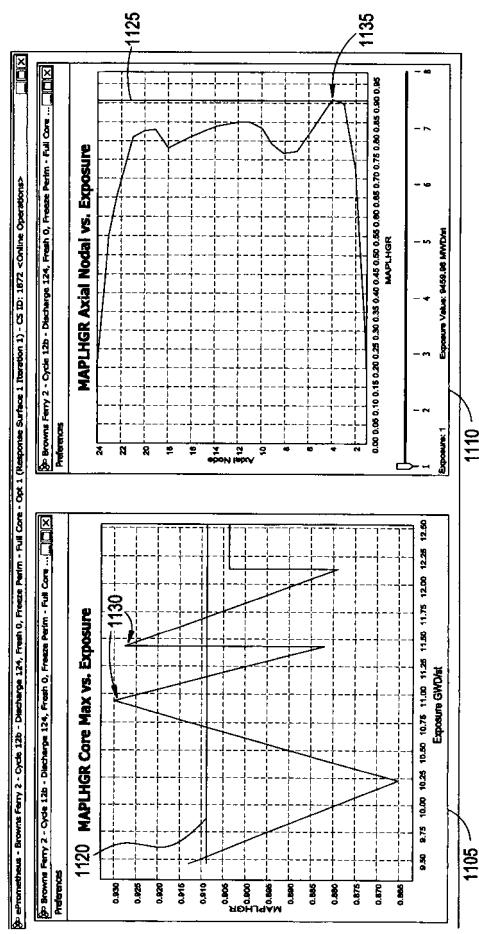
[9]



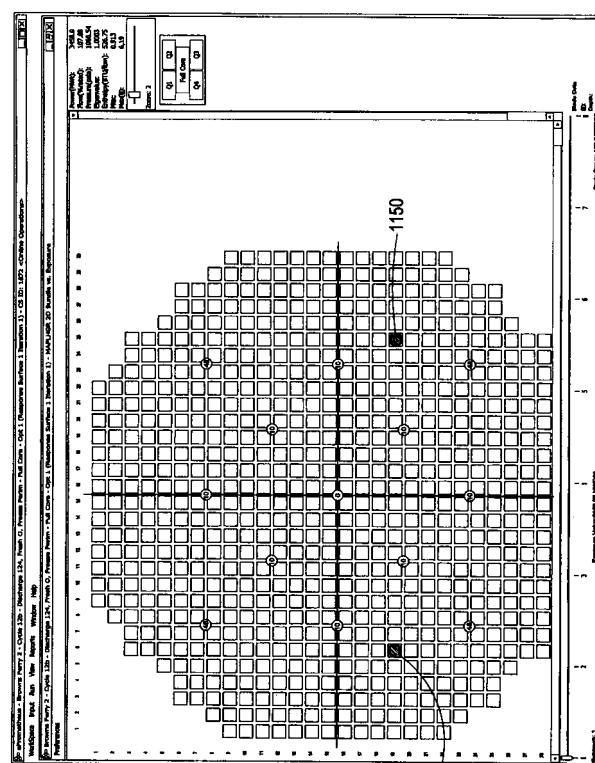
[10]



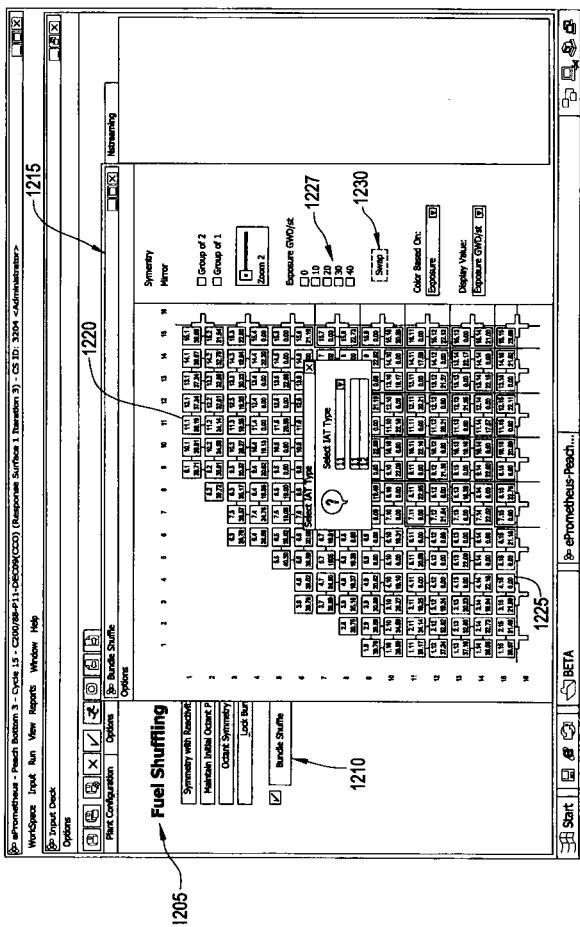
[11 A]



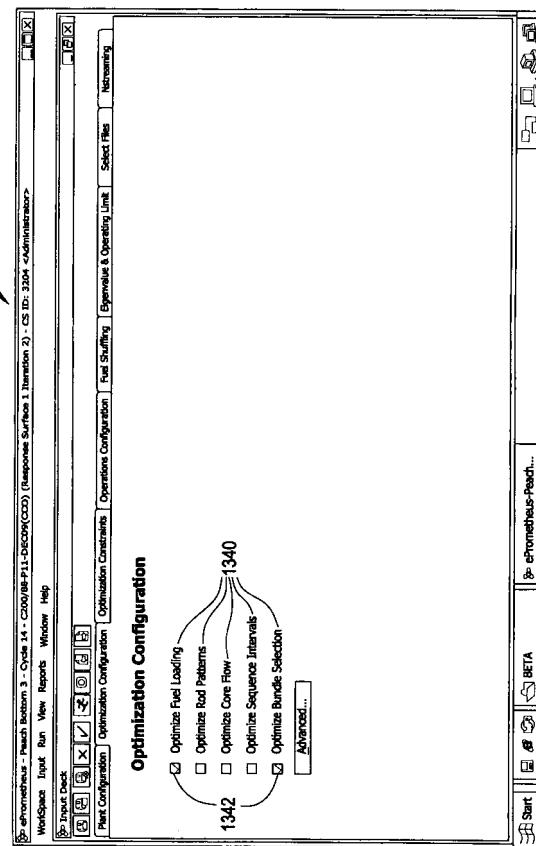
[11 B]



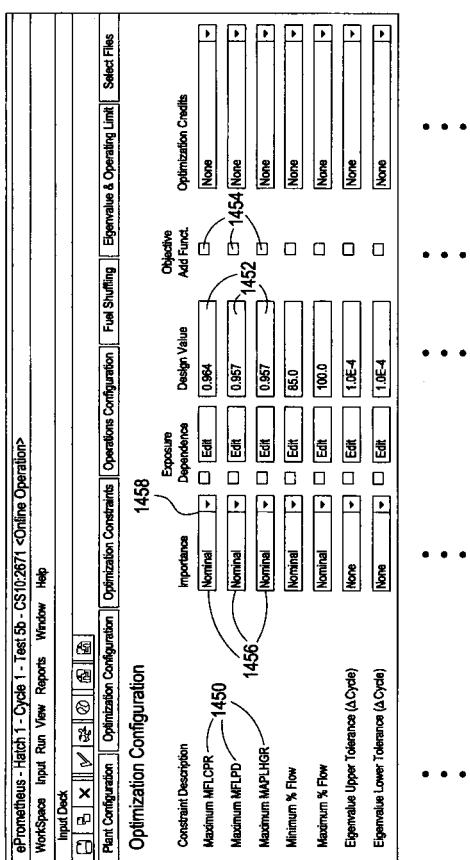
【図12】



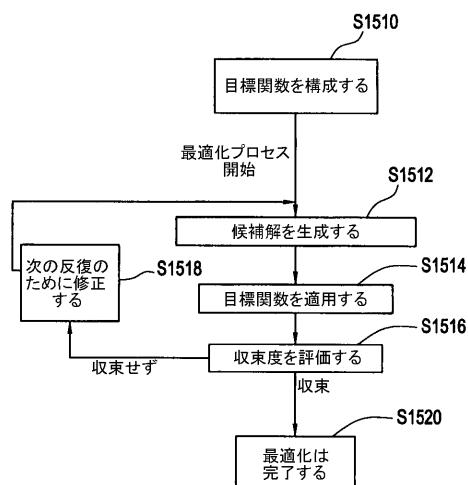
【図13】



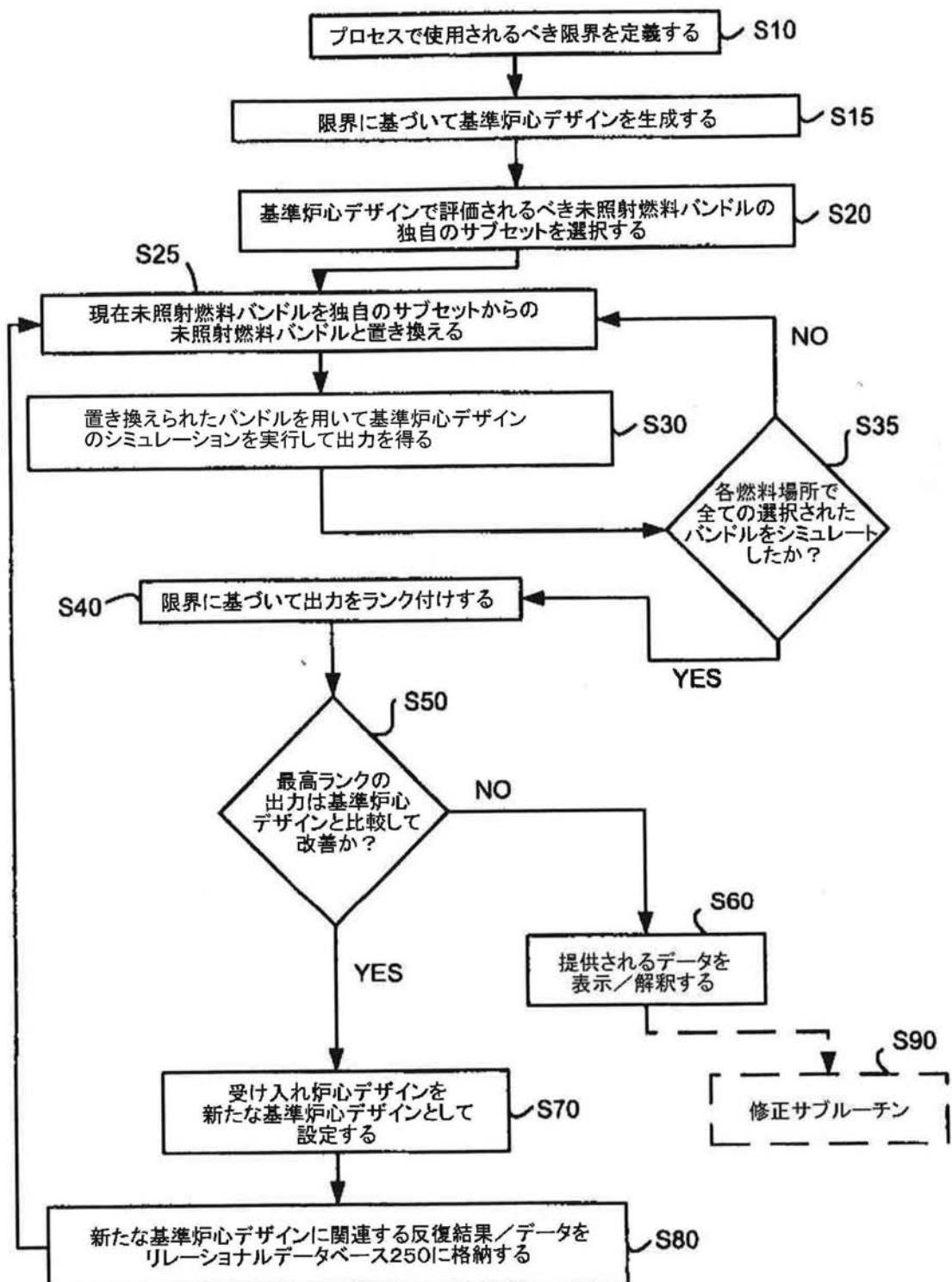
【 义 1 4 】



(図 15)



【図4】



フロントページの続き

- (72)発明者 デビッド・ジョセフ・クロパチェック
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、325番
- (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、1044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・オーツ・ドライブ、6
421番
- (72)発明者 ク里斯チャン・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、エス・コルテーゲー・ロード・ナンバ
ー2025、341-11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、6225番

審査官 今浦 陽恵

(56)参考文献 Mehdi Asgari and Dave J.Kropaczek, N-Streaming(SM) Concept for Boiling Water Reactor F
uel Cycle Design, Transaction of the American Nuclear Society, 米国, American Nuclear
Society, 2005年 7月 7日, vol.92, P612-614

(58)調査した分野(Int.Cl. , DB名)

G 21 C 17 / 00