

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第5379344号
(P5379344)

(45) 発行日 平成25年12月25日 (2013.12.25)

(24) 登録日 平成25年10月4日 (2013.10.4)

(51) Int.Cl.

F 1

G 2 1 C 17/00 (2006.01)

G 2 1 C 17/00 G D B U

請求項の数 4 外国語出願 (全 16 頁)

(21) 出願番号	特願2006-177509 (P2006-177509)	(73) 特許権者	301068310
(22) 出願日	平成18年6月28日 (2006.6.28)		グローバル・ニュークリア・フュエル・ア
(65) 公開番号	特開2007-10661 (P2007-10661A)		メリカズ・エルエルシー
(43) 公開日	平成19年1月18日 (2007.1.18)		アメリカ合衆国, 28401, ノースカロ
審査請求日	平成21年6月29日 (2009.6.29)		ライナ州, ウィルミントン, キャスル・ヘ
(31) 優先権主張番号	11/169, 916		イン・ロード, 3901
(32) 優先日	平成17年6月30日 (2005.6.30)	(74) 代理人	100137545
(33) 優先権主張国	米国 (US)		弁理士 荒川 聡志
		(74) 代理人	100105588
			弁理士 小倉 博
		(74) 代理人	100129779
			弁理士 黒川 俊久

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 原子炉の制御棒運転計画を実施するための方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

原子炉の制御棒運転計画を実施するための方法であって、前記制御棒運転計画は、
原子炉が緊急停止する前に制御棒を原子炉へ部分的に挿入することを含み、
運転サイクルの末期を含む原子炉の運転サイクルの一部期間における緊急停止を含む、
原子炉のシミュレーションを行い、

前記シミュレーションにおける運転限界最小限界出力比 (OLMCPR) が、原子炉が
緊急停止する前に原子炉に制御棒が挿入されない状態で運転サイクルの末期を含む原子炉
の運転サイクルの一部期間における緊急停止が起こったときのシミュレーションにおける
OLMCPRと比較して、低減するものである、
方法。

【請求項 2】

前記制御棒運転計画は、評価される少なくとも 1 つの制御棒を選択する工程を含む請求
項 1 に記載の方法。

【請求項 3】

原子炉の制御棒運転計画を実施するための方法であって、
原子炉に対する制御棒運転計画を生成する工程であって、
考慮対象として少なくとも 1 つの制御棒を選択し、
原子炉が緊急停止する前の選択した前記制御棒の挿入の程度を選択する、
制御棒運転計画を生成する工程と、

運転サイクルの末期を含む原子炉の運転サイクルの一部期間における緊急停止を含む、原子炉のシミュレーションを行ってシミュレーションの結果を生成する工程と、

前記シミュレーションの結果が、前記シミュレーションにおける運転限界最小限界出力比（OLMCPR）が、原子炉が緊急停止する前に原子炉に制御棒が挿入されない状況で運転サイクルの末期を含む原子炉の運転サイクルの一部期間における緊急停止が起こったときのシミュレーションにおけるOLMCPRと比較して低減するものであるか否かを決定する工程と、

前記決定する工程で、生成された前記制御棒運転計画が、制御棒が挿入されない状況と比較してOLMCPRが低減するものであると判断された場合には、生成された前記制御棒運転計画を実施する工程と、

を含む、方法。

【請求項 4】

前記決定する工程で、生成された前記制御棒運転計画が、制御棒が挿入されない状況と比較してOLMCPRが低減するものでないと判断された場合には、異なる制御棒を選択し、あるいは制御棒の挿入の程度を異ならせて、各工程を繰り返すことを特徴とする請求項 3 に記載の方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、総括的には炉心運転期間における原子炉心性能を改善する方法に関し、より具体的には、原子炉緊急停止の有効性を増大させるように原子炉性能を改善する方法及び炉心を運転する方法に関する。

【背景技術】

【0002】

図 1 は、簡略化した沸騰水型原子炉（BWR）の概略図であり、図 2 は、BWR の炉心内部の複数燃料棒集合体の従来型の配置を示す断面図である。BWR は、制御した核分裂反応により出力を発生する。図 1 に示すように、簡略化した BWR は、核燃料炉心及び水を含む原子炉チャンバ 101 を含む。発生蒸気は、配管 102 を通してタービン 103 に送られ、タービン 103 が電力を発生し、次いで水が、配管 104 を通して炉心に戻される。図 2 に示すように、炉心 201 は、原子炉心内部に所定の方法で配置された約 500 個の燃料集合体 202 から構成される。

【0003】

図 3 は、単一の燃料集合体内部の燃料棒の従来型の配置の概略断面図である。図 3 に示すように、各燃料集合体 301 は、おおよそ約 100 本の燃料棒 302 を含むことができる。炉心内の水は、燃料棒を取り囲む。核反応によって発生した熱は、燃料棒から炉心を通して循環する水に伝達されて、水の一部を沸騰させる。炉心内で発生した熱は、安全かつ効率的な炉心運転を維持するように制御することができる。

【0004】

BWR では、原子炉に対する温度限界値を定める上で基本的に考慮すべき 3 つの熱伝達モードが存在し、それらは、（i）核沸騰、（ii）遷移沸騰、及び（iii）膜沸騰である。「核沸騰」は、BWR を運転するように設計した所望の効率的な熱伝達モードである。「遷移沸騰」は、熱伝達面の蒸気ブランケット現象が燃料棒上に発生した時に突然生じる不安定な燃料棒クラッド表面温度によって徴候が現れる。燃料棒クラッド表面温度は次に、蒸気ブランケットが冷却材流によって洗い流された時に核沸騰温度まで下降し、その後再び上昇する。さらに高い燃料棒／集合体運転出力においては、より高い燃料棒クラッド表面温度を生じる「膜沸騰」が発生する。膜沸騰におけるクラッド表面温度及び遷移沸騰で起こり得るピーク温度は、クラッドの脆弱化及び／又は腐食の加速を引き起こすおそれがある値に到達する可能性がある。

【0005】

燃料棒の過熱は一般的に、核沸騰から膜沸騰への遷移（過渡）の開始として定義するこ

10

20

30

40

50

とができる。原子炉心及び燃料棒設計における従来型の基準は、各種の設計及び運転上の「不確実性」に適応する幾らかの「マージン」が炉心寿命の全ての時点において最大限界運転条件と遷移沸騰条件との間で維持されるように、定められる。

【0006】

遷移沸騰の開始は、沸騰遷移が発生する、すなわち「臨界クオリティ」とも呼ぶことができる蒸気クオリティに対する相関関係によって予測することができる。蒸気クオリティは、容易に測定することができ、一般的に他の要因の中でも特に所定の質量流量、出力レベル、圧力、及び集合体流れジオメトリに対する沸騰境界面上方の所定の測定距離（沸騰長さ）の関数である。「限界出力」は、蒸気の臨界クオリティを生じることになるその集合体出力として定義することができる。従って、「限界出力比」（CPR）は、関心のある炉心条件における集合体運転出力に対する限界出力の比率として定義することができる。CPRは、正常運転条件と沸騰遷移を生じる条件との間の関係を記述できる。従来では、CPRは、原子炉の安全かつ効率的な運転を保証する目的で原子炉設計及び運転を定格するために使用されており、CPRは、炉心内の各燃料組立体に対して所定の値以上に保たれる。原子炉運転限界値は通常、「最小限界出力比」（MCPR）として定義することができる。原子炉内の最大制約燃料集合体に関して定義することができる。原子炉運転限界値は一般的に、MCPRに関して提示される。

10

【0007】

原子力発電工学原理では、原子炉設計及び運転に固有の各種の「不確実性」及び許容誤差と組み合わさった原子炉過渡事象の発生により、一部の所定の時期の間に遷移沸騰が燃料棒において局所的に発生することになる可能性が、小さい可能性であるが存在することは広く認識されている。従って、MCPR運転限界値は通常、単一のオペレータエラー又は単一の機器の機能不良によって引き起される過渡事象が、炉心運転状態における不確実性を考慮して99.9%以上の燃料棒がそのエラー又は機能不良の期間中に沸騰遷移を回避することが期待できるように、制限されることになる米国原子力規制委員会（USNRC）設計基準要件に従って設定される。安全限界最小限界出力比（SLMCPR）は、現行USNRC要件の下で、沸騰遷移を生じる燃料棒が0.1%より多くならないようなMCPR（沸騰遷移を生じる燃料棒の数であるNRSBTとしても知られている）として定義される。対応する運転限界MCPR（OLMCPR）は、MCPRが特定の統計的確かさでSLMCPRよりも低くないような炉心運転条件を記述する。

20

30

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0008】

例えばBWRの原子炉心の運転期間中に、原子力発電は、部分的に制御棒によって制御される。一般的に、制御棒は、炉心内のより深い位置に移動させて原子炉内の反応度を減少させ、或いは炉心中央又は底部からさらに外方に移動させて原子炉内の反応度を増大させることができる。緊急停止操作は、通常はスプリング又は油圧補助注入によって、実質的な否定反応度のために炉心内の全制御棒を完全挿入位置まで急速に挿入することを含む。原子炉緊急停止は、炉心内部での核分裂反応過程を低下させ、それによって発電量を減少させる。原子炉緊急停止は、例えば原子炉保護システムによって自動的に又は原子炉オペレータによって手動で開始させることができる。

40

【0009】

緊急停止は一般的に、制御棒が炉心内に完全に挿入されているか又は炉心から完全に引き抜かれているかのいずれかである時には殆ど効果的でない。制御棒が炉心内に完全に挿入されている場合には、緊急停止目標条件は、既に満たされており、従って緊急停止を開始することは、炉心の反応度を変化させることにはならない。すなわち、それは、全ての制御棒が既に完全に挿入されているからである。制御棒が炉心から完全に引き抜かれている場合には、緊急停止が炉心内での反応度を減少させる速度は、制御棒が可能最長距離（すなわち、完全引き抜きと完全挿入との間の距離）を横断するので、最も低い。換言すれば、開始した時に、制御棒が完全に引き抜かれている場合には、緊急停止はより長い時間

50

を必要とする。

【0010】

炉心内の反応度は通常、原子炉の計画的メンテナンス停止の前の期間である運転サイクル末期（EOC）において、最も低い。この理由により、従来型の原子炉における制御棒は一般的に、EOCにおいては、最高の有効反応度レベルを実現するために炉心から完全に取り除かれている。しかしながら、原子炉緊急停止は、EOC期間において必要になる場合がある。EOCにおいて開始した緊急停止は、制御棒が完全に引き抜かれている可能性があるため、殆ど有効でない場合がある。この理由により、EOCにおけるOLMCP Rは、EOCにおける緊急停止期間での出力減少速度の低下に起因して、より高いレベルに設定されることになる。

10

【課題を解決するための手段】

【0011】

本発明の例示的实施形態は、原子炉性能を改善する方法を対象とし、本方法は、原子炉の運転サイクルの少なくとも一部の期間において緊急停止の有効性を増大させるための少なくとも1つの制御棒基準を用いて原子炉運転上の問題解決策を実施するステップを含む。例えば、少なくとも1つの制御棒基準は、運転サイクルの一部の期間における制御棒の部分的挿入の考察を含むことができる。

【発明を実施するための最良の形態】

【0012】

本発明の例示的实施形態は、本明細書において以下に示す詳細説明及び同様な要素を同一の参照番号で表わした添付図面からより十分に理解された状態なるであろうが、これら図面は、例示の目的のためのみに示したものであり、従って本発明の例示的实施形態に限定されるものではない。

20

【0013】

本発明の例示的实施形態を一連の説明において解り易くするために、シミュレーションの例示的方法を説明する前に、運転サイクル期間中に制御棒の挿入を決定する一般的例示的方法を説明することにする。

部分的挿入のために制御棒を選択する一般的方法

図12は、本発明の例示的实施形態による、原子炉の運転サイクル期間中に制御棒の挿入を決定するためのプロセスを示すフローチャートである。例えば、図12のプロセスは、運転サイクル末期（EOC）において、適用することができる。従って、図12に関して示した以下の例示的实施形態は、EOCにおいて適用するものとしてのプロセスを示す。しかしながら、本発明の例示的实施形態は、EOCにおける使用に限定されるものではなく、むしろ運転サイクルのあらゆる部分においてさらに使用することができることを理解されたい。

30

【0014】

図12を参照すると、ユーザ（例えば、炉心設計者）は、EOCにおける炉心内での部分的挿入を考察する少なくとも1つの制御棒を選択する（S1400）。ユーザは、制御棒の選択を行うに際して、当業者には明らかなような公知の方法論を使用することができる。選択可能な制御棒の組は、原子炉内の全ての制御棒とすることができる。

40

【0015】

例えば、制御棒の選択は、運転計画の情報に基づくものとして行うことができる。運転計画は一般的に、例えば、次の運転サイクルのシーケンス期間中での制御棒の移動を説明することができる。1つの例では、ユーザは、運転計画に従って、炉心から最近（例えば、最後の制御棒シーケンスにおいて）移動させた制御棒を選択する。最近移動させた制御棒は一般的に、EOCにおいて最も多くの反応度を負担することができる制御棒である。従って、EOCにおいて最も多くの反応度を負担することができる制御棒を選択することができる。

【0016】

ユーザは、選択した制御棒のシミュレーションを行う部分的挿入度を選択することがで

50

きる（S 1 4 0 5）。ユーザは、当業者には明らかなような経験及び／又は公知の方法を使用して、S 1 4 0 0で選択した制御棒のシミュレーションを行うための挿入度を選択することができる。

【0017】

S 1 4 0 0により選択した制御棒は、運転サイクル継続期間（例えば、E O Cを含む）の間について選択した挿入度（S 1 4 0 5）においてシミュレーションを行うことができる（S 1 4 1 0）。このシミュレーション（例えば、試行錯誤法、直接計算法、3 Dモデリング法—S L M C P R加算、3 Dモデリング法—0. 1 % N R S B T、等）を実行する例示的方法は、以下に詳しく説明する。シミュレーション結果は、E O Cにおける緊急停止運転の考察並びに正常炉心運転の考察を含むことができる。

10

【0018】

S 1 4 1 0によるシミュレーション結果は、所望の性能基準と比較することができる（S 1 4 1 5）。所望の性能基準の例は、運転限界最小限界出力比（O L M C P R）とすることができるが、例示的实施形態は、当業者には公知のピーク燃料中心線温度のような他の所望の性能基準を使用することもできる。過渡（遷移）期間における沸騰遷移感受性は、（1）炉心内の単一の燃料棒が沸騰遷移を生じる確率か、又は（2）炉心内の全燃料棒における沸騰遷移を生じる燃料棒の割合の予測値かのいずれかとして統計的に定量化することができる。各個々のN R S B T試行値が、個々の燃料棒が過渡期間中に1. 0よりも小さいC P R値を有する確率を合計することによって決定されているので、そのような統計的な相関が可能である。例では、各N R S B T分布における公称値は、炉心内の全ての燃料棒に対する初期燃料棒のC P R値の分布に関係付けることができる。このプロセスによって、炉心内の全ての燃料棒の最小初期M C P R値と燃料棒が過渡期間中に沸騰遷移を生じることになる確率及び信頼レベルとの間の相関を確立することができる。A O O過渡期間中に沸騰遷移を生じない燃料棒数に対する、U S N R C設計基準要件によって確立された確率及び信頼レベルを使用する場合には、炉心の最小初期M C P R値は、定義からしてU S N R Cとの整合性を示すのに必要な最小運転限界M C P Rである。

20

【0019】

これに代えて、S 1 4 1 5では、ユーザ（例えば、炉心設計者）は、自身の経験を使用して、S 1 4 1 0によるシミュレーション結果がE O Cにおける容認可能な又は改善した問題解決策を示すか否かを決定することができる。

30

【0020】

S 1 4 1 5での評価に基づいて、ユーザは、他のパラメータ（例えば、他の制御棒及び／又は挿入度）の考察の場合に上述のプロセスを継続するか否かを決定する（S 1 4 2 0）。ユーザが、シミュレーションを行った問題解決策が容認可能であると決定した場合（S 1 4 2 0の出力が「はい」である）には、プロセスは終了し、選択した制御棒の得られた部分的挿入度は、運転計画で指定したシーケンスにおいて（例えば、次の運転サイクルにおいて）実施することができる。それに代えて、所望の性能基準に合致しない（S 1 4 2 0の出力が「いいえ」である）場合及び／又はユーザが、他のパラメータを用いてシミュレーションを評価したいと希望する場合には、プロセスは、S 1 4 0 0に戻り、異なる挿入度（S 1 4 0 5）及び／又は異なるセクションの制御棒（S 1 4 0 0）を用いて繰

40

シミュレーション例

次に、炉心運転のシミュレーションを行う例を説明する。以下に説明する例は、試行錯誤に基づいた方法、直接計算法、S L M C P R加算を備えた3次元（3 D）モデリング法、0. 1 % N R S B T法に基づいた3 Dモデリング法に関する。以下に説明するシミュレーション方法は、N R S B Tを0. 1 %に一致させるようにしているが、0. 1 %は、U S N R Cによって設定した単なる安全基準に過ぎないことを理解されたい。従って、それに代えて、安全基準が別の測定基準（例えば、欧州におけるような）に基づいている場合には、同様な方法を使用して、他の測定基準を満足させることができる。

試行錯誤法

50

1つの例では、燃料棒の部分的挿入は、原子炉の実際の運転期間中にテストすることができる。従って、図12を参照すると、ユーザが少なくとも1つの制御棒（S1400）及び選択した制御棒に対する所定の挿入度（S1405）を選択した後に、ユーザは、原子炉運転期間中に実際の実施によって問題解決策の「シミュレーションを行う」ことができる。炉心内のセンサは、炉心運転に関するデータを保存することができ、このデータは、S1415において炉心設計者が評価することができる。

直接計算法

図4は、理想的プロセスによるNRSBTの決定を示すグラフである。この直接計算法の例では、OLMCPRは、予想される運転異常発生（AOO）を制限するために、沸騰遷移を生じると予測される炉心内の燃料棒が0.1%よりも少なくなるように、直接的に計算することができる。この手法は、例えば、Shaug他の米国特許第5,912,933号に記載されている。図4に示すように、燃料棒CPR値401対特定のCPR値における燃料棒数402のヒストグラム400がある。CPR値は通常、燃料集合体に関係付けられるが、このことは、実際には燃料集合体内の燃料棒を限定することを意味する。燃料集合体内の各燃料棒は、局所的出力分布及び燃料集合体内部での燃料棒の相対的位置（R-因子）によって決定されるCPR値を有する。燃料集合体内のいずれか1つの燃料棒の最小CPRは、その燃料集合体全体のCPRを特徴付けるために使用される。

10

所定の燃料棒のCPR401は、その決定における不確実性を反映した関連する確率分布関数（PDF）を有する。PDFは、実験的に決定することができ、実験的限界出力比（ECPR）分布410として示される。従って、公称CPR値（411）が1.0である場合には、起こり得る実際のCPR値のPDF410は0.90から1.10までの範囲内にある。燃料棒のCPR値のこの変動性は、初期燃料棒条件における不確実性、すなわち原子炉運転状態（炉心出力）でのパラメータ測定における不確実性と導出パラメータのモデル化（出力分布）における不確実性とに起因する。

20

【0021】

CPR値に関する過渡事象の影響を考慮に入れるために、最小燃料棒CPRの容認可能な公称CPR値405をより大きなCPR値すなわち1.25にシフトすることによって、CPR値に対して安全マージンを導入することができる。従って、最小CPR燃料棒のECPRヒストグラム分布403は、CPRヒストグラム全体が1.2のCPR値以上であり、かつ十分に1.0のCPR値以上になるようにシフトされる。さらに、最小CPR燃料棒以外の燃料棒の公称CPR値407は、最小CPR燃料棒の公称CPR値すなわち1.25以上である。

30

【0022】

燃料棒作動における過渡期間中に、燃料棒CPRのヒストグラム407はより低いCPR値に向かって左にシフトされて、ヒストグラム408を生じる。このシフトにより、過渡期間における「公称」CPR値406は、過渡期間中に最小CPR値に到達するポイント、例えば1.05の位置にある。限界燃料棒は、初期燃料棒条件における不確実性及び「過渡不確実性」の両方を含む関連するPDF404を有することになる。過渡（「過渡△CPR409」）期間中の限界出力比の最大変化は、過渡事象のモデル化における不確実性並びに／或いは物理モデル及びプラントパラメータの両方における不確実性を含む。

40

【0023】

図5は、理想的プロセスを使用してOLMCPRの評価を行うためのデータ処理システムによって実行可能な処理ステップのシーケンスを示すフローチャートである。図5は、同一出願人による「運転限界最小限界出力比」の名称のBolger他の米国特許第6,111,572号に詳細に記載されており、この特許の関連する部分全ては参考文献として本明細書に組み入れており、また下記に説明する。

【0024】

例示的实施形態では、この過渡△CPR409及び関連するOLMCPRは、図5に示しかつ以下に説明するように、生成することができる。

50

【0025】

ステップ1：ブロック501で示すように、プラントを運転するパラメータを使用して、OLMCPRと等しい炉心MCPRを生成するベース炉心運転条件の組を推測する。

【0026】

ステップ2：ブロック502で示すように、ブロック506に記載した一般的燃料集合体CPRを予測する炉心出力、炉心流量、炉心圧力等のようなパラメータを使用して、炉心内の各燃料集合体に対するMCPRを決定する。

【0027】

ステップ3：ブロック503で示すように、各燃料集合体CPRをブロック507に記載した個々の燃料棒CPR値に変更する、各燃料集合体内部の燃料棒配置及び燃料棒出力のようなパラメータを使用して、炉心内の各燃料棒に対するMCPRを決定する。

10

【0028】

ステップ4：ブロック504で示すように、数式1及び数式2によって生成されたブロック508に記載したECPR確率分布を使用して、炉心内の各燃料棒が沸騰遷移生じる確率を合計することによって、炉心内のNRSBTのパーセンテージを決定する。この合計は、等式3によって示すことができる。

【0029】

【数1】

$$ECPR = \frac{(\text{相関関係によって予測した限界出力})}{(\text{測定限界})} \quad \text{等式 1}$$

20

【0030】

【数2】

$$P_i = P(z_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{z_i}^{\infty} e^{-\frac{1}{2}u^2} du \quad \text{等式 2}$$

【0031】

【数3】

$$NRSBT(\%) = \frac{100}{N_{rod}} \times \sum_{i=1}^{N_{rod}} [P_i \times (1Rod)] \quad \text{等式 3}$$

【0032】

ここで、 z_i は、MCPR(i)で作動する燃料棒を示し、 u は、(MCPR(i)－平均ECPR)／(ECPRの標準偏差)を示し、 P_i 及び $P(z_i)$ は、燃料棒 i が沸騰遷移を生じる可能性がある確率を示し、また N_{rod} は、全燃料棒数を示す。

30

【0033】

ステップ5：ブロック505で示すように、ブロック506及びブロック507に記載したパラメータをモンテカルロ統計試行の組の数に対して変化させる。モンテカルロプロセスは当技術分野では公知であり、シミュレーションに使用されるデータを収集する一般的方法である。モンテカルロ法は、統計的サンプリング実験を行う（例えば、コンピュータ上で）ことによって、多様な数学的問題に対する近似解を得る方法である。この方法は一般的に、非確率の内容を備えた問題並びに固有の確率的構造を備えた問題に適用される。M次元空間におけるNポイント評価に依存して近似解を生成する全ての数値法の中でも特に、モンテカルロ法は、 $N^{-1/2}$ で減少する絶対推定誤差を有するが、利用できる特別な構造がない場合には、他の全ては、せいぜい $N^{-1/M}$ で減少する誤差を有する。ステップ2からステップ4までの全ての試行による統計値をコンパイルして、NRSBTの確率分布を生成する。

40

【0034】

ステップ6：ブロック509に示すように、NRSBTパーセンテージの値を0.1%と比較する。パーセンテージが0.1%よりも大きい場合には、ブロック510に示すように、USNRC規制を満たすために、炉心パラメータを異なる初期条件にリセットする。ステップ1及びブロック501と同様に、新しい初期条件を推測して、OLMCPRを生成する。NRSBTの決定は、再び開始されてNRSBT値が0.1%に等しくなるま

50

でループする。同様に、パーセンテージが0.1%よりも小さい場合には、炉心パラメータは、炉心をより効率的に又はより少ない流出物で運転するためにNRSBT値を増大させるようにリセットされる。

ステップ7：ブロック511で示すように、NRSBTのパーセンテージが0.1%に等しい場合には、炉心MCPRに等しいOLMCPRの推測値は、USNRC規制を満たす。従って、炉心運転条件は、推測したパラメータに設定される。

【0035】

上述の例は、OLMCPRが0.1%基準に合致しなければならないと仮定したが、それに代えて、上述の例は、あらゆる安全基準に適用することができることを理解されたい。

10

3Dモデリング法—SLMCPR加算

図6は、運転限界最小炉心出力比を決定するための現在認可されているプロセスである、SLMCPRへの Δ CPRの線形加算を示すグラフである。図6は、同一出願人による「運転限界最小限界出力比」の名称のBolger他の米国特許第6,111,572号に詳細に記載されており、この特許の関連する部分全ては参考文献として本明細書に組み入れており、また下記に説明する。

【0036】

シミュレーション結果を決定するためのSLMCPR加算を備えた3Dモデリングプロセスでは、OLMCPRの決定は、図6に示すように、2つの主要なステップに分割される。上述の直接計算法と同様なプロセスを使用して、最初に、SLMCPRが、この値において沸騰遷移を生じると予測されることになる炉心内の燃料棒が0.1%よりも少ないように決定される。換言すれば、炉心内のMCPRがSLMCPRよりも大きい場合には、99.9%の炉心の燃料棒は、沸騰遷移を回避することが期待されることになる。第2番目に、OLMCPRが次に、最大制約過渡事象から予測されるMCPRの最大変化（誤差因子 Δ CPR_{95/95}によって示すような）とSLMCPRとの合計によって確立される。

20

【0037】

図6は図4と幾分類似しているもので、簡潔にするためにその構成要素の簡潔な説明のみを以下に行う。ヒストグラム600は、特定のCPR値602における燃料棒数602に対応するCPR値601を示す。ヒストグラム608により、SLMCPR603に等しい例えば1.05の値において最低数のCPR燃料棒607が得られる。燃料棒分布606を制限することは、制約CPR燃料棒607の決定における不確実性を示す。上述の直接計算法と同様に、NRSBTのパーセンテージが0.1%に等しい時に、SLMCPR603が決定される。

30

【0038】

しかしながら、上述の直接計算法とは異なり、IDモデリングプロセスでは、各燃料集合体内部の出力分布及び各燃料棒に沿った出力分布のような特定のパラメータを完全に予測かつ測定することができない。従って、SLMCPRの計算における不確実性により、OLMCPRをSLMCPRに等しくすることができない。従って、SLMCPR603に誤差因子 Δ CPR_{95/95}605を線形加算して、OLMCPR609を決定する。 Δ CPR_{95/95}605は、SLMCPR603の計算における限定を控えめに補正する。

40

【0039】

図7は、現在認可されているプロセスを使用してOLMCPRの評価を実施するためのデータ処理システムによって実行可能な処理ステップのシーケンスを示すフローチャートである。図7は、同一出願人による「運転限界最小限界出力比」の名称のBolger他の米国特許第6,111,572号に詳細に記載されており、この特許の関連する部分全ては参考文献として本明細書に組み入れており、また下記に説明する。

【0040】

50

I Dモデリングプロセスを使用して、O L M C P R 6 0 9 は、図 7 に示しかつ以下に説明するように生成される。

【0041】

ステップ1：ブロック701で示すように、プラントを運転するパラメータを使用して、S L M C P R と等しい炉心M C P Rを生成する基本となる炉心運転条件の組を推測する。

【0042】

ステップ2：ブロック702で示すように、ブロック706に記載した一般的燃料集合体C P Rを予測する炉心出力、炉心流量、炉心圧力、燃料集合体出力等のようなパラメータを使用して、炉心内の各燃料集合体に対するM C P Rを決定する。この処理ステップは、燃料集合体出力の予測において、計算をバイアスさせる可能性がある大きな不確実性を有する可能性がある。

【0043】

ステップ3：ブロック703で示すように、各燃料集合体C P Rをブロック707に記載した個々の燃料棒C P R値に変更する、各燃料集合体内部の燃料棒配置及び燃料棒出力のようなパラメータを使用して、炉心内の各燃料棒に対するM C P Rを決定する。個々の燃料棒出力は、その不確実性が燃料集合体出力分布の不確実性と組み合わせることが実際のS L M C P Rの計算の不確実性を増大させることになるので、測定することが困難である場合がある。

【0044】

ステップ4：ブロック704で示すように、上に示した数式1及び数式2によって生成されたブロック708に記載したE C P R確率分布を使用して、炉心内の各燃料棒が沸騰遷移を生じる確率を合計することによって、炉心内のN R S B Tのパーセンテージを決定する。この合計は、上記の数式3を使用して行うことができる。

【0045】

ステップ5：ブロック705で示すように、ブロック706及びブロック707に記載したパラメータをモンテカルロ統計試行の組の数に対して変化させる。ステップ2からステップ4までの全ての試行による統計値をコンパイルして、N R S B Tの確率分布を生成する。

【0046】

ステップ6：ブロック709に示すように、N R S B Tのパーセンテージの値を0.1%と比較する。パーセンテージが0.1%よりも大きい場合には、ブロック710に示すように、U S N R C規制を満たすために、炉心パラメータを異なる初期条件にリセットする。ステップ1及びブロック701と同様に、新しい初期条件を推測して、S L M C P Rを生成する。N R S B Tの決定は、N R S B T値が0.1%に等しくなるまでループする。同様に、パーセンテージが0.1%よりも小さい場合には、炉心パラメータは、炉心をより効率的に運転するためにN R S B T値を増大させるようにリセットされる。

【0047】

ステップ7：ブロック711で示すように、N R S B Tのパーセンテージが0.1%に等しい場合には、炉心M C P Rに等しいS L M C P Rの推測値は、炉心が運転可能な限界値となる。

【0048】

ステップ8：このプロセスは、ブロック702及びブロック703で示すようにステップ2及びステップ3において比較的不確実なシミュレーションを含むので、C P Rの変化は、95%信頼区間 $\Delta C P R_{95/95}$ において評価される。O L M C P Rは、 $\Delta C P R_{95/95}$ にS L M C P Rを線形加算したものに等しい。得られたO L M C P R値は、U S N R C規制を満たす。

3 Dモデリングー0.1%N R S B T

シミュレーション結果を得るためのこの3 Dモデリングプロセスの例では、過渡事象期間中の限界出力比の変化($\Delta C P R / I C P R$)に対して包括的バイアスを計算すること

10

20

30

40

50

ができ、得られた確率分布関数（PDF）を使用して、最初にSLMCPRを計算せずに、より正確なOLMCPRを予測することができる。多数の因子を考慮した膨大な数の実験的試行から、 $\Delta CPR / ICPR$ と呼ばれる過渡に対するPDFが生成され、 $\Delta CPR / ICPR$ の標準偏差が、各過渡事象に対して決定される。公称初期条件により開始する過渡事象に対する公称 $\Delta CPR / ICPR$ もまた、決定される。過渡における最小ポイントに対する個々の燃料棒CPR値のヒストグラムが、初期CPR及び過渡 $\Delta CPR / ICPR$ 不確実性のランダム値を描くことによって作成される。初期限界出力比（ICPR）は、 $\Delta CPR / ICPR$ の共通ランダム値によってMCPRに変換又は読み換えられる。MCPR値からNRSBTのパーセンテージが、各試行に対して計算される。NRSBTのパーセンテージが0.1%よりも大きい場合には、初期運転条件が変更されて、NRSBTが0.1%に等しくなるまでプロセスは繰り返される。

10

【0049】

NRSBT分布のヒストグラムは統計的方法を用いて解析されて、分布の「中心傾向」が決定される。一般的に、統計値として平均値又は中央値を使用して、中心傾向を定量化する。この統計値は、ここでは公称値として定義される。以降の説明では、公称値として平均値を選択した例を示すが、本発明はこの選択に限定されるものではない。中央値或いは公称値のような中心傾向に対する幾つかの他の統計値の使用もまた、本発明の例示的实施形態の一部として意図している。

【0050】

中心傾向を定量化するのに使用する公称統計値の不確実性は、公称値に対する「信頼区間」に関して表現される。信頼区間は、その区間が公称値を含む指定した確率（通常は50%又はそれよりも大きい）が存在するように、定められる。例えば、区間が平均値を束縛する95%の確率は、平均値に対する95%信頼区間を定める。信頼区間を確立するのに使用する指定した確率は、「信頼度」又は信頼レベルと呼ばれる。

20

【0051】

1つの例によると、本発明は、以下に詳細に説明するような本発明の改良した方法によって、BWR炉心運転条件のシミュレーションを行うための、また原子炉のOLMCPRを計算しかつ統計的に実証するための特定のルーチンを実行するようにプログラムされたデータ処理装置を備えたシステムを含むことができる。

【0052】

図8は、本発明の例示的实施形態による、原子炉心の過渡応答の多次元シミュレーションの実行と、BWR原子炉心のOLMCPRの直接評価とを意図した例示的データ処理システムのブロック図を示す。このシステムは、中央処理装置801（CPU）、記憶メモリ802、ユーザインターフェイス用I/O装置803、及び任意選択的に1つ又はそれ以上のディスプレイ804を含むことができる。記憶メモリ802は、原子炉プラント状態情報のデータベース（図示せず）、パラメータ値、並びに本明細書で以下に説明する本発明の例示的方法による炉心運転条件の多次元シミュレーションの実施及びOLMCPR評価の実施のためのルーチンを含むことができる。例えば、記憶メモリ802は、あらゆる公知のメモリ（例えば、読出し専用メモリ（ROM）、ランダムアクセスメモリ（RAM）等）を含むことができる。

30

40

【0053】

例えば、各AOOタイプ、各BRWプラントタイプの種類及び各燃料タイプに対して統計的検討を行って、包括的過渡バイアス及び $\Delta CPR / ICPR$ における不確実性を決定することができる。公称条件で開始する十分な試行（100回のオーダでの）が、モデル及びプラントパラメータ内のランダム変動を使用して行われる。 $\Delta CPR / ICPR$ （例えば、炉心出力）に影響を与える初期条件における不確実性もまた、摂動内に含まれる。データは、過渡 $\Delta CPR / ICPR$ に関するバイアス及び標準偏差を決定するために使用される。

【0054】

図9は、 $\Delta CPR / ICPR$ における包括的不確実性を用いてOLMCPRを計算する

50

のに使用する処理ステップのシーケンスを示すフローチャートである。図9は、同一出願人による「運転限界最小限界出力比」の名称のB o l g e r 他の特許第6, 111, 572号に詳細に記載されており、この特許の関連する部分全ては参考文献として本明細書に組み入れており、また下記に説明する。

【0055】

本発明の例示的プロセスに対するフローチャートを図9に示す。ブロック909は、OLMCPRの計算全体にわたって変化していない状態のままであり、また各原子炉タイプ及び燃料タイプに対する個々の過渡事象の $\Delta C P R / I C P R$ は、このプロセスを使用する前に決定されなくてはならない。

【0056】

図10は、本発明を使用する $\Delta C P R / I C P R$ における包括的不確実性の決定を示すグラフである。図10は、同一出願人による「運転限界最小限界出力比」の名称のB o l g e r 他の特許第6, 111, 572号に詳細に記載されており、この特許の関連する部分全ては参考文献として本明細書に組み入れており、また下記に説明する。

【0057】

図10は、1つの特定のタイプのA O O に対して得られた $\Delta C P R / I C P R$ のグラフを示す。ヒストグラム1000は、各燃料棒に対して得られたC P R 1001を有する試行数1002に対応するC P R 値1001を示す。P D F 1003は、過渡事象前のC P R 分布を表わす。次に、個々の $\Delta C P R / I C P R$ 値1006に従って各C P R 値を変更する。過渡C P R 値の集合は、過渡事象の期間におけるP D F 1004を生成する。公称 $\Delta C P R / I C P R$ 1005は、P D F 1003の公称C P R 値とP D F 1004の公称C P R 値との差異であると定義される。OLMCPRの計算は、以下のように行うことができる。

【0058】

ステップ1：ブロック901で示すように、プラントを運転するパラメータを使用して、OLMCPRと等しい炉心MCPRを生成するベース炉心運転条件の組を推測する。

【0059】

ステップ2：ブロック902で示すように、ブロック907に記載した一般的燃料集合体CPRを予測する炉心出力、炉心流量、炉心圧力、燃料集合体出力及びその他のようなパラメータを使用して、炉心内の各燃料集合体に対するICPRを決定する。

【0060】

ステップ3：ブロック903で示すように、各燃料集合体CPRをブロック908に記載した個々の燃料棒CPRに変更する、各燃料集合体内部の燃料棒配置及び燃料棒出力のようなパラメータを使用して、炉心内の各燃料棒に対するICPRを決定する。

【0061】

ステップ4：図10に表わされた適切な過渡状態のグラフからランダムに引き出した個々の $\Delta C P R / I C P R$ 値1006を使用して、MCPR値が、数式4に従って対応するICPR値に対して推定される。

【0062】

図11は、 $\Delta C P R / I C P R$ の包括的不確実性を使用するNRSBTの決定を示すグラフである。図11は、同一出願人による「運転限界最小限界出力比」の名称のB o l g e r 他の特許第6, 111, 572号に詳細に記載されており、この特許の関連する部分全ては参考文献として本明細書に組み入れており、また下記に説明する。

【0063】

図11において、このプロセスは、シフト1109によって表現されている。ヒストグラム1100は、特定のCPR値における燃料棒数1102に対応するCPR値1101を示す。ヒストグラム1107は、ランダムに選択した $\Delta C P R / I C P R$ 1106値を使用して、過渡期間におけるヒストグラム1108に平行移動される。最低CPR値1105は、最低CPR値1106になり、また最低CPR燃料棒P D F 1103は、最低CPR燃料棒P D F 1104になる。

10

20

30

40

50

【0064】

【数4】

$$MCPR_i = ICPR_i \left(1 - \left(\frac{\Delta CPR}{ICPR} \right)_i \right)$$

【0065】

ステップ5：PDF1104として示しかつブロック910に記載したECPR確率分布を使用して、ブロック905で示すように、炉心内の各燃料棒が沸騰遷移を生じる確率を合計することによって、炉心内のNRSBTのパーセンテージを決定する。本合計は、上記に示す数式3を使用して実行される。

【0066】

10

ステップ6：ブロック906で示すように、ブロック907及びブロック908に記載したパラメータをモンテカルロ統計試行の組の数に対して変化させる。ステップ2からステップ5までの全ての試行による統計値をコンパイルして、NRSBTの確率分布を生成する。

【0067】

ステップ7：ブロック911に示すように、NRSBTのパーセンテージを0.1%と比較する。パーセンテージが0.1%よりも大きい場合には、ブロック912に示すように、USNRC規制を満たすために、炉心パラメータを異なる初期条件にリセットする。ステップ1及びブロック901と同様に、新しい初期条件を推定して、OLMCPRを生成する。NRSBTの決定は、再び開始され、NRSBTの値が0.1%に等しくなるまで実行される。同様に、パーセンテージが0.1%よりも小さい場合には、炉心パラメータは、炉心をより効率的に運転させ又は流出物を減少させるために、NRSBT値を増大させるようにリセットされる。

20

【0068】

ステップ8：NRSBTのパーセンテージが0.1%に等しい場合には、ブロック913で示すように、炉心MCPRに等しいOLMCPRの推測値は、USNRC規制を満たす。従って、炉心運転条件は、パラメータ推定値に設定される。

【0069】

以上のように本発明の例示的实施形態を説明したが、それらの実施形態が多数の方法で変更できることは明らかであろう。例えば、図12のS1410に関して説明したシミュレーションは、試行錯誤法、直接計算法及び3Dモデリング法の1つであるように説明したが、あらゆる公知のシミュレーション方法を使用して、原子炉の運転サイクル期間中に（例えば、EOCにおいて）燃料棒配置を考慮して提案の問題解決策を評価することができることは、当業者には明らかである。さらに、容認可能な問題解決策は、0.1%OLMCPR標準に従っているように説明したが、シミュレーション結果（S1410）は、あらゆる所望の性能基準に基づいて評価し（S1415）かつ容認可能と見なす（S1420）ことができることを理解されたい。さらに、上記ではEOCにおいて適用するように説明したが、本発明の他の例示的实施形態は、原子炉の運転サイクルのあらゆる部分を対象にすることができることを理解されたい。そのような変形形態は、本発明の例示的实施形態の技術思想及び技術的範囲から離れたものと見なされるべきではなく、当業者に自

30

40

【図面の簡単な説明】

【0070】

【図1】簡略化した沸騰水型原子炉の概略図である。

【図2】BWRの炉心内部の複数燃料棒集合体の従来型の配置を示す断面図である。

【図3】単一の燃料集合体内部の燃料棒の従来型の配置の概略断面図である。

【図4】理想的プロセスによるNRSBTの決定を示すグラフである。

【図5】理想的プロセスを使用してOLMCPRの評価を行うためのデータ処理システムによって実行可能な処理ステップのシーケンスを示すフローチャートである。

50

【図 6】 運転限界最小炉心出力比を決定するための現在認可されているプロセスである、SLMCP Rへの Δ CPRの線形加算を示すグラフである。

【図 7】 現在認可されているプロセスを使用してOLMCP Rの評価を行うためのデータ処理システムによって実行可能な処理ステップのシーケンスを示すフローチャートである。

【図 8】 本発明による、BWR熱流体の多次元／モデリングと、BWRのOLMCP Rの間接評価とのために使用するデータ処理システムの実例のブロック図である。

【図 9】 Δ CPR／ICPRにおける包括的不確実性を用いてOLMCP Rを計算するのに使用する処理ステップのシーケンスを示すフローチャートである。

【図 10】 本発明を使用する Δ CPR／ICPRにおける包括的不確実性の決定を示すグラフである。

10

【図 11】 Δ CPR／ICPRの包括的不確実性を使用するNRSBTの決定を示すグラフである。

【図 12】 本発明の例示的な実施形態による、原子炉の運転サイクル期間における制御棒の挿入を決定するためのプロセスを示すフローチャートである。

【図 1】

(従 来 技 術)

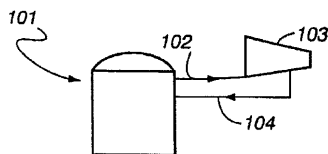


FIGURE 1

【図 2】

(従 来 技 術)

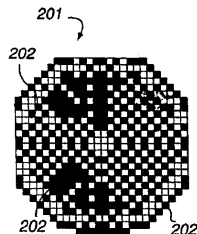


FIGURE 2

【図 3】

(従 来 技 術)

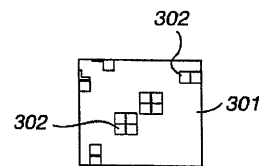


FIGURE 3

【図 4】

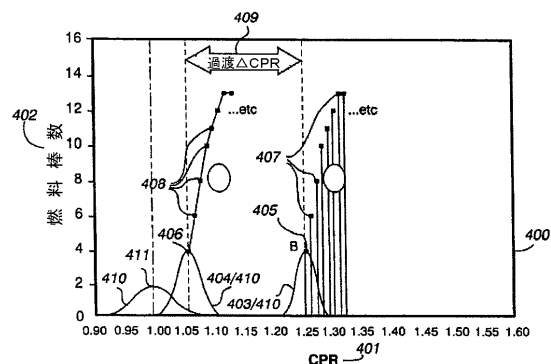


FIGURE 4

【図 5】

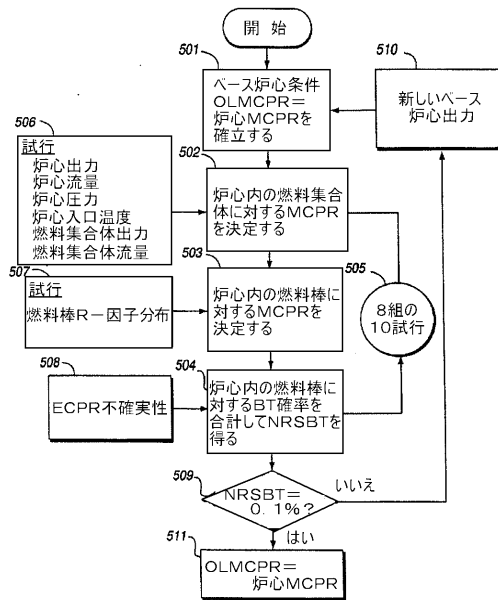


FIGURE 5

【図 6】

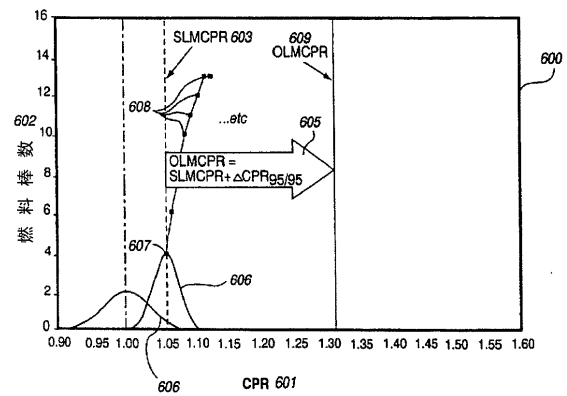


FIGURE 6

【図 7】

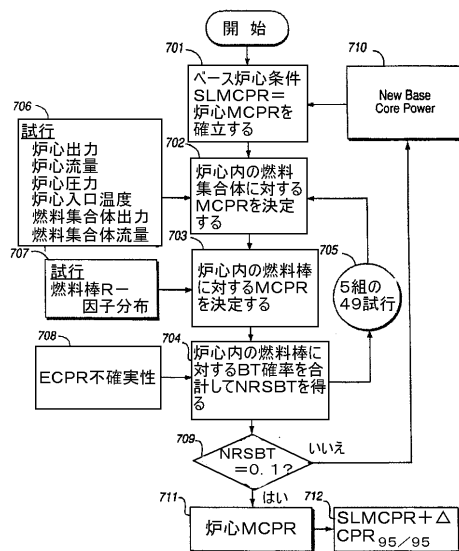


FIGURE 7

【図 8】

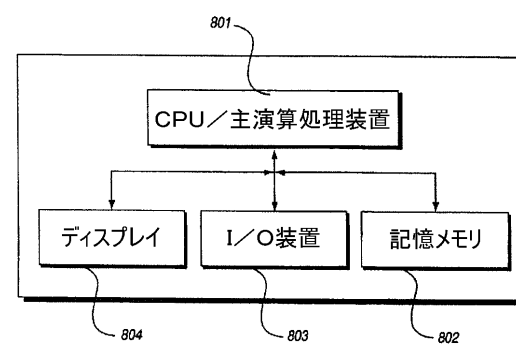


FIGURE 8

【図 9】

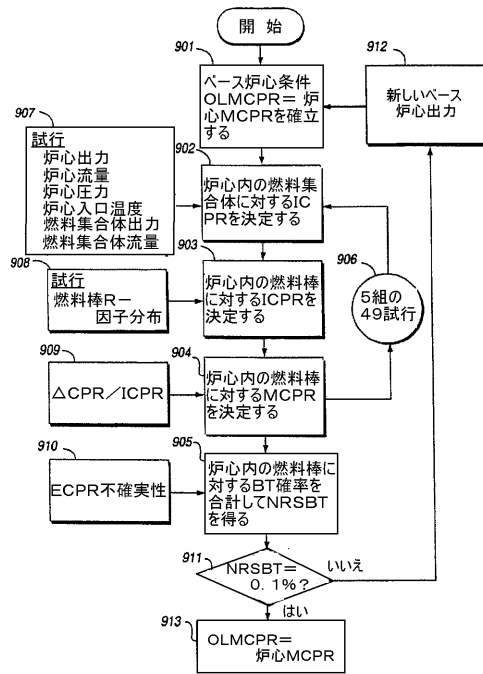


FIGURE 9

【図 10】

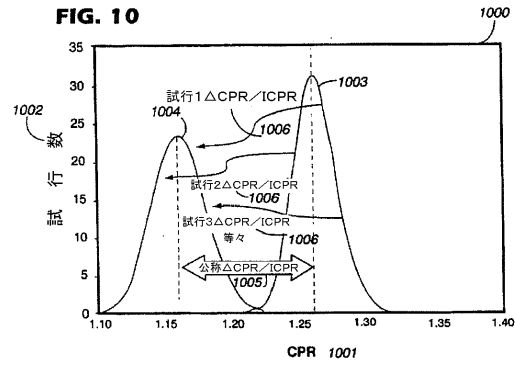


FIGURE 10

【図 11】

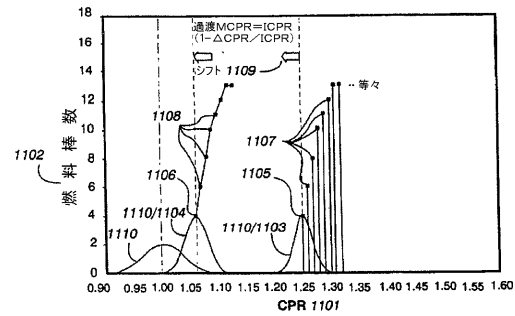


FIGURE 11

【図 12】

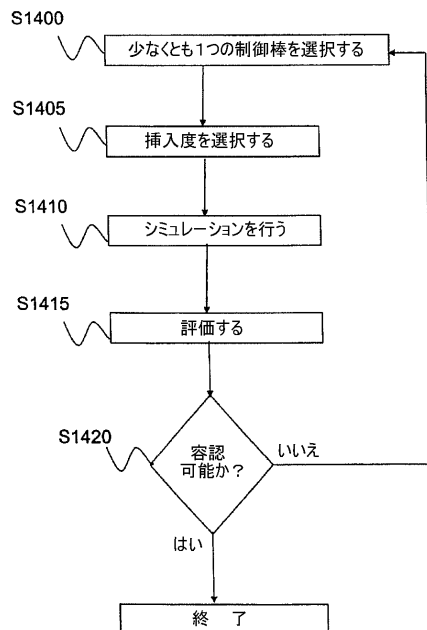


FIGURE 12

フロントページの続き

- (72)発明者 フランシス・ボルガー
アメリカ合衆国、ノースカロライ州、ウィルミントン、ランタン・ウェイ、3116番
- (72)発明者 ホセ・カシラス
アメリカ合衆国、カリフォルニア州、サン・ノゼ、クーニー・プレイス、5577番

審査官 林 靖

- (56)参考文献 特開2003-130984 (JP, A)
特開平04-265899 (JP, A)
特開2002-257973 (JP, A)
特開平03-279898 (JP, A)
特開平05-312982 (JP, A)
特開平08-166487 (JP, A)
特開平09-101818 (JP, A)
特開平10-142382 (JP, A)

- (58)調査した分野(Int.Cl., DB名)
G21C 17/00-17/14