

(19)日本国特許庁(JP)

**(12)特許公報(B2)**

(11)特許番号  
**特許第7075101号**  
**(P7075101)**

(45)発行日 令和4年5月25日(2022.5.25)

(24)登録日 令和4年5月17日(2022.5.17)

(51)国際特許分類

G 2 1 B	1/05 (2006.01)	F I	G 2 1 B	1/05
H 0 5 H	1/14 (2006.01)		H 0 5 H	1/14
H 0 5 H	1/18 (2006.01)		H 0 5 H	1/18
H 0 5 H	1/06 (2006.01)		H 0 5 H	1/06
G 2 1 B	1/15 (2006.01)		G 2 1 B	1/15

請求項の数 25 (全53頁) 最終頁に続く

(21)出願番号	特願2019-522255(P2019-522255)
(86)(22)出願日	平成29年10月30日(2017.10.30)
(65)公表番号	特表2019-537002(P2019-537002)
	A)
(43)公表日	令和1年12月19日(2019.12.19)
(86)国際出願番号	PCT/US2017/059067
(87)国際公開番号	WO2018/081724
(87)国際公開日	平成30年5月3日(2018.5.3)
審査請求日	令和2年10月27日(2020.10.27)
(31)優先権主張番号	62/414,574
(32)優先日	平成28年10月28日(2016.10.28)
(33)優先権主張国・地域又は機関	
	米国(US)

(73)特許権者	515056990 ティーエーイー テクノロジーズ, イン コーポレイテッド アメリカ合衆国 カリフォルニア 926 10, フットヒル ランチ, ポーリング 19631
(74)代理人	100078282 弁理士 山本 秀策
(74)代理人	100113413 弁理士 森下 夏樹
(74)代理人	100181674 弁理士 飯田 貴敏
(74)代理人	100181641 弁理士 石川 大輔
(74)代理人	230113332

最終頁に続く

(54)【発明の名称】 調整可能ビームエネルギーを伴う中性ビーム注入器を利用する高性能FRC上昇エネルギーの改良された持続性のための方法

**(57)【特許請求の範囲】****【請求項1】**

磁場反転配位(FRC)を伴う磁場を発生および維持するための方法であって、閉じ込めチャンバ内でプラズマの周りにFRCを形成するステップと、第1のビームエネルギーと第2のビームエネルギーとの間で複数の中性ビームのビームエネルギーを調整しながら、前記複数の中性ビームをFRCプラズマの中に注入するステップであって、前記第2のビームエネルギーは、前記第1のビームエネルギーと異なる、ステップとを含む、方法。

**【請求項2】**

前記第2のビームエネルギーは、前記第1のビームエネルギーより高い、請求項1に記載の方法。

**【請求項3】**

前記複数の中性ビームは、注入ショットの持続時間の間、前記第1のビームエネルギーと第2のビームエネルギーとの間で切り替わる、請求項1に記載の方法。

**【請求項4】**

前記第1のビームエネルギーおよび前記第2のビームエネルギーは、15~40keVの範囲内である、請求項1~3のいずれか一項に記載の方法。

**【請求項5】**

能動フィードバックプラズマ制御システムから受信されたフィードバック信号によって、

前記複数の中性ビームの前記ビームエネルギーを制御するステップをさらに含む、請求項1～3のいずれか一項に記載の方法。

**【請求項6】**

能動フィードバックプラズマ制御システムから受信されたフィードバック信号によって、前記複数の中性ビームの前記ビームエネルギーを制御するステップをさらに含む、請求項4に記載の方法。

**【請求項7】**

前記複数の中性ビームの前記ビームエネルギーを制御するステップは、前記複数の中性ビームの前記ビームエネルギーを調節し、半径方向ビーム電力堆積プロファイルを調節し、圧力勾配値を調節することを含む、請求項5に記載の方法。

10

**【請求項8】**

前記FRCを一定値に維持し、前記閉じ込めチャンバの平面を通して中央に向かってある角度で、高速中性原子のビームを中性ビーム注入器から前記FRCプラズマの中に注入することによって、プラズマ温度を1.0 keV超まで上昇させることをさらに含む、請求項1～3～6～7のいずれか一項に記載の方法。

**【請求項9】**

前記プラズマ温度を上昇させるステップは、前記プラズマ温度を1.0 keVから3.0 keVまで上昇させることを含む、請求項8に記載の方法。

**【請求項10】**

前記閉じ込めチャンバの周りに延在する擬似直流コイルを用いて、前記閉じ込めチャンバ内で磁場を発生させ、前記閉じ込めチャンバの対向端部の周りに延在する擬似直流ミラーコイルを用いて、前記閉じ込めチャンバの対向端部内でミラー磁場を発生させるステップをさらに含む、請求項8に記載の方法。

20

**【請求項11】**

前記FRCを形成するステップは、形成FRCを前記閉じ込めチャンバに結合される対向する第1の形成区分および第2の形成区分内に形成し、前記形成FRCを前記第1の形成区分および前記第2の形成区分から前記閉じ込めチャンバの平面を通して中央に向かって加速させることを含み、前記2つの形成FRCは、前記FRCを形成するように融合する、請求項10に記載の方法。

**【請求項12】**

前記FRCを形成するステップは、前記閉じ込めチャンバの平面を通して中央に向かって前記形成FRCを加速させながら、形成FRCを形成することと、形成FRCを形成し、次いで、前記閉じ込めチャンバの平面を通して中央に向かって前記形成FRCを加速させることとのうちの1つを含む、請求項11に記載の方法。

30

**【請求項13】**

前記第1の形成区分および前記第2の形成区分から前記閉じ込めチャンバの平面を通して中央に向かって前記形成FRCを加速させるステップは、前記第1の形成区分および前記第2の形成区分から、前記閉じ込めチャンバと前記第1の形成区分および前記第2の形成区分とに介在する前記閉じ込めチャンバの両端に結合される第1の内側ダイバータおよび第2の内側ダイバータを通して、前記形成FRCを通過させることを含む、請求項11に記載の方法。

40

**【請求項14】**

前記第1の形成区分および前記第2の形成区分から第1の内側ダイバータおよび第2の内側ダイバータを通して前記形成FRCを通過させるステップは、前記形成FRCが前記第1の形成区分および前記第2の形成区分から前記第1の内側ダイバータおよび前記第2の内側ダイバータを通過するにつれて、前記第1の内側ダイバータおよび前記第2の内側ダイバータを非アクティブ化することを含む、請求項13に記載の方法。

**【請求項15】**

前記FRCの磁束表面を前記第1の形成区分および前記第2の形成区分の端部に結合される第1の外側ダイバータおよび第2の外側ダイバータの中に誘導するステップをさらに含

50

む、請求項 1 2 に記載の方法。

**【請求項 1 6】**

前記第 1 の形成区分および前記第 2 の形成区分および第 1 の外側ダイバータおよび第 2 の外側ダイバータの周りに延在する擬似直流コイルを用いて磁場を前記第 1 の形成区分および前記第 2 の形成区分および前記第 1 の外側ダイバータおよび第 2 の外側ダイバータ内で発生させるステップをさらに含む、請求項 1 5 に記載の方法。

**【請求項 1 7】**

擬似直流ミラーコイルを用いて、ミラー磁場を前記第 1 の形成区分および前記第 2 の形成区分と前記第 1 の外側ダイバータおよび前記第 2 の外側ダイバータとの間に発生させるステップをさらに含む、請求項 1 6 に記載の方法。

10

**【請求項 1 8】**

前記第 1 の形成区分および前記第 2 の形成区分と前記第 1 の外側ダイバータおよび前記第 2 の外側ダイバータとの間の狭窄部内で、前記第 1 の形成区分および前記第 2 の形成区分と前記第 1 の外側ダイバータおよび前記第 2 の外側ダイバータとの間の前記狭窄部の周りに延在する擬似直流ミラープラグコイルを用いて、ミラープラグ磁場を発生させるステップをさらに含む、請求項 1 6 に記載の方法。

**【請求項 1 9】**

前記閉じ込めチャンバに結合されるサドルコイルを用いて、磁気双極場および磁気四重極場のうちの 1 つを前記閉じ込めチャンバ内で発生させるステップをさらに含む、請求項 8 に記載の方法。

20

**【請求項 2 0】**

ゲッタリングシステムを用いて、前記閉じ込めチャンバの内部表面および第 1 の形成区分および第 2 の形成区分の内部表面と、前記閉じ込めチャンバと前記第 1 の形成区分および前記第 2 の形成区分とに介在する第 1 のダイバータおよび第 2 のダイバータと、前記第 1 の形成区分および前記第 2 の形成区分に結合される第 1 の外側ダイバータおよび第 2 の外側ダイバータとを調整するステップをさらに含む、請求項 8 に記載の方法。

**【請求項 2 1】**

軸方向に搭載されるプラズマガンからプラズマを前記 F R C の中に軸方向に注入するステップをさらに含む、請求項 8 に記載の方法。

30

**【請求項 2 2】**

前記 F R C の縁層内の半径方向電場プロファイルを制御するステップをさらに含む、請求項 8 に記載の方法。

**【請求項 2 3】**

前記 F R C の縁層内の半径方向電場プロファイルを制御するステップは、バイアス電極を用いて、電位の分布を前記 F R C の開磁束面群に印加することを含む、請求項 2 2 に記載の方法。

40

**【請求項 2 4】**

前記閉じ込めチャンバの長手方向軸に対して直角の半径方向において前記 F R C プラズマを安定化させることにより、前記 F R C プラズマを前記長手方向軸の周りに軸対称に位置付け、前記長手方向軸に沿った軸方向において前記 F R C プラズマを安定化させることにより、前記 F R C プラズマを前記閉じ込めチャンバの中央平面の周りに軸対称に位置付けるステップをさらに含む、請求項 1 に記載の方法。

**【請求項 2 5】**

コンパクトトロイド ( C T ) プラズマを第 1 の C T 注入器および第 2 の C T 注入器から前記 F R C プラズマの中に前記閉じ込めチャンバの中央平面に向かってある角度で注入することをさらに含み、前記第 1 の C T 注入器および前記第 2 の C T 注入器は、前記閉じ込めチャンバの中央平面の対向側で直径方向に対向する、請求項 1 ~ 3 , 6 ~ 7 のいずれか一項に記載の方法。

**【発明の詳細な説明】**

**【技術分野】**

50

### 【0001】

本明細書に説明される主題は、概して、磁場反転配位（FRC）を有する磁気プラズマ閉じ込めシステムに関し、より具体的には、優れた安定性ならびに粒子、エネルギー、および磁束閉じ込めを伴うFRCの形成および維持を促進するシステムおよび方法、より具体的には、調整可能ビームエネルギー能力を伴う中性ビーム注入器を利用する上昇されたシステムエネルギーおよび改良された持続性を伴うFRCの形成および維持を促進するシステムおよび方法に関する。

### 【背景技術】

### 【0002】

#### （背景情報）

10

磁場反転配位（FRC）は、コンパクト・トロイド（CT）として公知の磁気プラズマ閉じ込めトポロジーの分類に属する。FRCは、主にポロイダル磁場を示し、自然発生のトロイダル磁場がない、または少ない（M. Tuszewski, Nucl. Fusion 28, 2033 (1988) 参照）。このような構造の魅力は、構築および維持が容易なその単純な形状、エネルギーの抽出および灰の除去を促進する無制限の自然ダイバータ、ならびに非常に高い（ $\beta$ はFRC内部の平均磁場圧力に対する平均プラズマ圧力の割合である）、すなわち、高出力密度である。高い特性は、経済運用、ならびにD-He<sup>3</sup>およびp-B<sup>11</sup>などの進化した非中性子燃料の使用に有利である。

### 【0003】

FRCを形成する従来の方法は、磁場反転シータピンチ技術を使用し、高温高密度のプラズマを生成する（A. L. Hoffman and J. T. Slough, Nucl. Fusion 33, 27 (1993) 参照）。この変形形態は、シータピンチ「源」内に生成されたプラズマが、概ね即座に一端から出て閉じ込めチャンバの中に放出される移動トラッピング方法である。次いで移動するプラズモイドは、チャンバの端部で2つの強いミラーの間に閉じ込められる（例えば、H. Himura, S. Okada, S. Sugimoto, and S. Goto, Phys. Plasmas 2, 191 (1995) 参照）。いったん閉じ込めチャンバに入ると、ビーム入射（中性または中和された）、回転磁場、RFまたはオーム加熱等の様々な加熱および電流駆動方法を適用してもよい。源と閉じ込め機能とのこの分離は、潜在的な将来の核融合炉に対して重要な工学的利点を提供する。FRCは、非常に堅固であり、動的形成、移動、および激しい捕捉事象に耐性があることが判明している。さらに、それらは、好ましいプラズマ状態を担う傾向を示す（例えば、H. Y. Guo, A. L. Hoffman, K. E. Miller, and L. C. Steinhauer, Phys. Rev. Lett. 92, 245001 (2004) 参照）。他のFRCの形成方法、すなわち、逆向きのヘリシティをもつスフェロマックの融合（例えば、Y. Ono, M. Inomoto, Y. Ueda, T. Matsuyama, and T. Okazaki, Nucl. Fusion 39, 2001 (1999) 参照）、およびさらなる安定性をも提供する回転磁場（RMF）を用いて電流を駆動することによるもの（例えば、I. R. Jones, Phys. Plasmas 6, 1950 (1999) 参照）の開発が、過去10年に著しく進歩を遂げた。

20

30

40

### 【0004】

最近、かなり昔に提案された衝突融合技法（例えば、D. R. Wells, Phys. Fluids 9, 1010 (1966) 参照）がさらに著しく発展した。すなわち、閉じ込めチャンバの対向する端部で2つの個別のシータピンチが、同時に2つのプラズモイドを生成し、プラズモイドを互いに向かって高速度で加速させ、次いで、それらは、閉じ込めチャンバの中央で衝突し、複合FRCを形成するために融合する。今まで最大のFRC実験の1つの構築および成功した作動において、従来の衝突融合法は、安定して長持ちし、高磁束、高温のFRCを生成することを示した（例えば、M. Binderbauer, H.Y. Guo, M. Tuszewski et al., Phys. Rev. Lett. 105, 045003 (2010) 参照）。

50

**【 0 0 0 5 】**

F R C は、セパラトリックスの内側の閉じた磁力線のトーラスと、セパラトリックスのすぐ外側の開放磁力線上の環状縁層とから成る。縁層は、F R C の長さを越えて集結してジエットになり、自然ダイバータを提供する。F R C トポロジは、磁場反転ミラー・プラズマのトポロジと一致する。しかしながら、著しい違いは、F R C プラズマが約 10 の  $\beta$  を有することである。固有の低い内部磁場は、特定の本来の動的粒子集団、すなわち、F R C の短半径と同等の大きいラー・モア半径をもつ粒子を提供する。衝突融合実験において生成されたもののように、過去および現在の F R C の全体的な安定性に少なくとも部分的に寄与すると思われるには、これらの強い動的効果である。

**【 0 0 0 6 】**

典型的な過去の F R C 実験は、主に粒子移動によって判定されるエネルギー閉じ込めを伴う、対流損失によって支配してきた。粒子は、セパラトリックス体積から主に径方向外方に拡散し、次いで縁層において軸方向に損失される。故に、F R C 閉じ込めは、閉じた磁力線領域と開放磁力線領域の両方の特性に依存する。セパラトリックスから出た粒子の拡散時間は  $\tau_{\parallel} \sim a^2 / D$  ( $a \sim r_s / 4$  であり、 $r_s$  は、中心セパラトリックスの半径である) として見積もられ、 $D$  は、特性 F R C 拡散率であり (例えば、 $D \sim 12.5 \text{ cm}^2/\text{sec}$  であり、 $r_s$  は、イオンジャイロ半径を表す)、外部印加磁場で評価される。縁層の粒子閉じ込め時間

**【 数 1 】** $\tau_{\parallel}$ 

10

20

は、本質的に、過去の F R C 実験における軸方向通過時間である。定常状態において、半径方向の粒子損失と軸方向の粒子損失との間の均衡は、セパラトリックスの密度勾配長さ

**【 数 2 】**

$$\delta \sim (D_{\perp} \tau_{\parallel})^{1/2}$$

をもたらす。F R C 粒子閉じ込め時間は、セパラトリックスで実質的な密度を有する過去の F R C に対して

**【 数 3 】**

$$(\tau_{\perp} \tau_{\parallel})^{1/2}$$

30

と見積もられる (例えば、M. T U S Z E W S K I、"Field Reversed Configurations"、Nucl. Fusion 28, 2033 (1988) 参照)。

**【 0 0 0 7 】**

先行の F R C システム設計の別の短所は、急成長する  $n = 2$  交換不安定性等の、回転不安定性を制御するために外部多極を使用する必要があったことである。このような方法で、通常の外部印加された四重極磁場は、これらの不安定モードの成長を抑えるために、必要な磁気を回復する圧力を提供した。この技法は、熱バルク・プラズマの安定制御に充分である一方で、高い動的大軌道の粒子集団が通常の熱・プラズマと組み合わされる場合、より動的大な F R C または進化したハイブリッドの F R C に対して深刻な問題を有する。これらのシステムでは、このような多極磁場に起因する軸対称の磁場の歪みは、正準角運動量の保存を損失する結果、無衝突の確率的拡散を介して劇的に高速な粒子損失をもたらす。したがって、いかなる粒子の拡散も高めることなく、安定制御を提供する新規の解決策は、これらの今まで調査されなかった進歩した F R C の概念の、より高い潜在性能を利用するため重要なである。

**【 0 0 0 8 】**

前述に照らして、したがって、エネルギーの将来的発生のための軽核の融合のための反応器コアへの経路として、定常状態 F R C と上昇されたエネルギー・システムを併用するため

40

50

に、FRCの持続性を改良することが望ましい。

【先行技術文献】

【非特許文献】

【0009】

【文献】M. TUSZEWSKI, "Field Reversed Configurations", Nucl. Fusion 28, 2033 (1988)

【発明の概要】

【課題を解決するための手段】

【0010】

本明細書に提供される本実施形態は、優れた安定性および粒子、エネルギー、および磁束閉じ込めを伴う、FRCの形成および維持を促進する、システムおよび方法、より具体的には、調整可能ビームエネルギー能力を伴う中性ビーム注入器を利用した、上昇されたシステムエネルギーおよび改良された持続性を伴う、FRCの形成および維持を促進する、システムおよび方法を対象とする。本開示のある実施形態によると、磁場反転配位(FRC)を伴う磁場を発生および維持するための方法は、閉じ込めチャンバ内でプラズマの周りにFRCを形成するステップと、第1のビームエネルギーと第2のビームエネルギーとの間の複数の中性ビームのビームエネルギーを調整しながら、複数の中性ビームをFRCプラズマの中に注入するステップであって、第2のビームエネルギーは、第1のビームエネルギーと異なる、ステップとを含む。

10

【0011】

本開示のさらなる実施形態によると、複数の中性ビームは、注入ショットの持続時間の間、第1のビームエネルギーと第2のビームエネルギーとの間で切り替わる。

20

【0012】

本開示のさらなる実施形態によると、本方法は、複数の中性ビームのビームエネルギーを調節し、半径方向ビーム電力堆積プロファイルを調節し、圧力勾配値を調節するステップを含む。

【0013】

本開示のさらなる実施形態によると、本方法はさらに、減衰を伴わずに、FRCを一定値またはほぼ一定値に維持し、閉じ込めチャンバの平面を通して中央に向かってある角度で、高速中性原子のビームを中性ビーム注入器からFRCプラズマの中に注入することによって、プラズマ温度を約1.0 keV超まで上昇させるステップを含む。

30

【0014】

本開示のさらなる実施形態によると、本方法は、コンパクトトロイド(CT)プラズマを第1および第2のCT注入器からFRCプラズマの中に閉じ込めチャンバの中央平面に向かってある角度で注入するステップをさらに含み、第1および第2のCT注入器は、閉じ込めチャンバの中央平面の対向側で直径方向に対向する。

【0015】

本開示のある実施形態によると、磁場反転配位(FRC)を伴う磁場を発生および維持するためのシステムは、閉じ込めチャンバと、第1および第2の直径方向に対向する内側ダイバータに結合される、第1および第2の直径方向に対向するFRC形成区分と、第1および第2の形成区分に結合される、第1および第2のダイバータと、複数のプラズマガン、1つ以上のバイアス電極、および第1および第2のミラープラグのうちの1つ以上のものであって、複数のプラズマガンは、第1および第2のダイバータ、第1および第2の形成区分、および閉じ込めチャンバに動作可能に結合される、第1および第2の軸方向プラズマガンを含み、1つ以上のバイアス電極は、閉じ込めチャンバ、第1および第2の形成区分、および第1および第2の外側ダイバータのうちの1つ以上のもの内に位置付けられ、第1および第2のミラープラグは、第1および第2の形成区分と第1および第2のダイバータとの間に位置付けられる、複数のプラズマガン、1つ以上のバイアス電極、および第1および第2のミラープラグのうちの1つ以上のものと、閉じ込めチャンバおよび第1および第2のダイバータに結合される、ゲッタリングシステムと、閉じ込めチャンバに結

40

50

合され、閉じ込めチャンバの中央平面に向かって角度付けられる、複数の中性原子ビーム注入器であって、複数の中性原子ビーム注入器のうちの1つ以上のものは、第1のビームエネルギーと第2のビームエネルギーとの間で調整可能であって、第2のビームエネルギーは、第1のビームエネルギーと異なる、複数の中性原子ビーム注入器と、閉じ込めチャンバ、第1および第2の形成区分、および第1および第2のダイバータの周囲に位置付けられる、複数の擬似直流コイルと、第1および第2の形成区分と第1および第2のダイバータとの間に位置付けられる、第1および第2の擬似直流ミラーコイルのセットとを備える、磁気システムとを備える。

#### 【0016】

本開示のさらなる実施形態によると、本システムはさらに、閉じ込めチャンバの中央平面に向かってある角度で閉じ込めチャンバに結合される、第1および第2のコンパクトトロイド(CT)注入器を備え、第1および第2のCT注入器は、閉じ込めチャンバの中央平面の対向側で直径方向に対向する。

10

#### 【0017】

例示的実施形態のシステム、方法、特徴、および利点は、以下の図およびならびに発明を実施するための形態の吟味に応じて、当業者に明白である、または明白となるであろう。全てのそのような付加的方法、特徴、および利点は、本説明内に含まれ、付随の特許請求の範囲によって保護されることが意図される。また、特許請求の範囲は、例示的実施形態の詳細を要求するように限定されないことも意図される。

本発明は、例えば、以下を提供する。

20

##### (項目1)

磁場反転配位(FRC)を伴う磁場を発生および維持するための方法であって、閉じ込めチャンバ内でプラズマの周りにFRCを形成するステップと、第1のビームエネルギーと第2のビームエネルギーとの間の複数の中性ビームのビームエネルギーを調整しながら、前記複数の中性ビームをFRCプラズマの中に注入するステップであって、前記第2のビームエネルギーは、前記第1のビームエネルギーと異なる、ステップと、  
を含む、方法。

##### (項目2)

前記第2のビームエネルギーは、前記第1のビームエネルギーより高い、項目1に記載の方法。

30

##### (項目3)

前記複数の中性ビームは、注入ショットの持続時間の間、前記第1のビームエネルギーと第2のビームエネルギーとの間で切り替わる、項目1に記載の方法。

##### (項目4)

前記第1および第2のビームエネルギーは、約15～40keVの範囲内である、項目1-3に記載の方法。

##### (項目5)

能動フィードバックプラズマ制御システムから受信されたフィードバック信号によって、前記複数の中性ビームのビームエネルギーを制御するステップをさらに含む、項目1-3に記載の方法。

40

##### (項目6)

能動フィードバックプラズマ制御システムから受信されたフィードバック信号によって、前記複数の中性ビームのビームエネルギーを制御するステップをさらに含む、項目4に記載の方法。

##### (項目7)

前記複数の中性ビームのビームエネルギーを制御するステップは、前記複数の中性ビームのビームエネルギーを調節し、半径方向ビーム電力堆積プロファイルを調節し、圧力勾配値を調節するステップを含む、項目5に記載の方法。

##### (項目8)

50

前記複数の中性ビームのビームエネルギーを制御するステップは、前記複数の中性ビームのビームエネルギーを調節し、半径方向ビーム電力堆積プロファイルを調節し、圧力勾配値を調節するステップを含む、項目 6 に記載の方法。

(項目 9 )

減衰を伴わずに、前記 F R C を一定値またはほぼ一定値に維持し、前記閉じ込めチャンバの平面を通して中央に向かってある角度で、高速中性原子のビームを中性ビーム注入器から前記 F R C プラズマの中に注入することによって、プラズマ温度を約 1 . 0 k e V 超まで上昇させるステップをさらに含む、項目 1 - 3 および 6 - 8 に記載の方法。

(項目 10 )

減衰を伴わずに、前記 F R C を一定値またはほぼ一定値に維持し、前記閉じ込めチャンバの平面を通して中央に向かってある角度で、高速中性原子のビームを中性ビーム注入器から前記 F R C プラズマの中に注入することによって、プラズマ温度を約 1 . 0 k e V 超まで上昇させるステップをさらに含む、項目 4 に記載の方法。

10

(項目 11 )

減衰を伴わずに、前記 F R C を一定値またはほぼ一定値に維持し、前記閉じ込めチャンバの平面を通して中央に向かってある角度で、高速中性原子のビームを中性ビーム注入器から前記 F R C プラズマの中に注入することによって、プラズマ温度を約 1 . 0 k e V 超まで上昇させるステップをさらに含む、項目 5 に記載の方法。

(項目 12 )

前記プラズマ温度を上昇させるステップは、前記温度を約 1 . 0 k e V から約 3 . 0 k e V まで上昇させるステップを含む、項目 9 に記載の方法。

20

(項目 13 )

前記プラズマ温度を上昇させるステップは、前記温度を約 1 . 0 k e V から約 3 . 0 k e V まで上昇させるステップを含む、項目 10 および 11 に記載の方法。

(項目 14 )

前記閉じ込めチャンバの周りに延在する擬似直流コイルを用いて、前記閉じ込めチャンバ内で磁場を発生させ、前記閉じ込めチャンバの対向端部の周りに延在する擬似直流ミラー コイルを用いて、前記閉じ込めチャンバの対向端部内でミラー磁場を発生させるステップをさらに含む、項目 9 に記載の方法。

(項目 15 )

前記閉じ込めチャンバの周りに延在する擬似直流コイルを用いて、前記閉じ込めチャンバ内で磁場を発生させ、前記閉じ込めチャンバの対向端部の周りに延在する擬似直流ミラー コイルを用いて、前記閉じ込めチャンバの対向端部内でミラー磁場を発生させるステップをさらに含む、項目 10 および 11 に記載の方法。

30

(項目 16 )

前記 F R C を形成するステップは、形成 F R C を前記閉じ込めチャンバに結合される対向する第 1 および第 2 の形成区分内に形成し、前記形成 F R C を前記第 1 および第 2 の形成区分から前記閉じ込めチャンバの平面を通して中央に向かって加速させるステップであつて、2 つの形成 F R C は、前記 F R C を形成するように融合する、ステップを含む、項目 14 に記載の方法。

40

(項目 17 )

前記 F R C を形成するステップは、形成 F R C を前記閉じ込めチャンバに結合される対向する第 1 および第 2 の形成区分内に形成し、前記形成 F R C を前記第 1 および第 2 の形成区分から前記閉じ込めチャンバの平面を通して中央に向かって加速させるステップであつて、2 つの形成 F R C は、前記 F R C を形成するように融合する、ステップを含む、項目 15 に記載の方法。

(項目 18 )

前記 F R C を形成するステップは、前記閉じ込めチャンバの平面を通して中央に向かつて前記形成 F R C を加速させながら、形成 F R C を形成するステップと、形成 F R C を形成し、次いで、前記閉じ込めチャンバの平面を通して中央に向かつて前記形成 F R C を加

50

速させるステップとのうちの 1 つを含む、項目 1 6 および 1 7 に記載の方法。

(項目 19)

前記第 1 および第 2 の形成区分から前記閉じ込めチャンバの平面を通して中央に向かつて前記形成 F R C を加速させるステップは、前記第 1 および第 2 の形成区分から、前記閉じ込めチャンバと前記第 1 および第 2 の形成区分とに介在する前記閉じ込めチャンバの両端に結合される第 1 および第 2 の内側ダイバータを通して、前記形成 F R C を通過させるステップを含む、項目 1 6 および 1 7 に記載の方法。

(項目 20)

前記第 1 および第 2 の形成区分から第 1 および第 2 の内側ダイバータを通して前記形成 F R C を通過させるステップは、前記形成 F R C が前記第 1 および第 2 の形成区分から前記第 1 および第 2 の内側ダイバータを通して通過するにつれて、前記第 1 および第 2 の内側ダイバータを非アクティブ化するステップを含む、項目 1 9 に記載の方法。

10

(項目 21)

前記 F R C の磁束表面を前記第 1 および第 2 の内側ダイバータの中に誘導するステップをさらに含む、項目 1 9 に記載の方法。

(項目 22)

前記 F R C の磁束表面を前記形成区分の端部に結合される第 1 および第 2 の外側ダイバータの中に誘導するステップをさらに含む、項目 1 8 に記載の方法。

20

(項目 23)

前記形成区分およびダイバータの周りに延在する擬似直流コイルを用いて磁場を前記形成区分および前記第 1 および第 2 の外側ダイバータ内で発生させるステップをさらに含む、項目 2 2 に記載の方法。

(項目 24)

前記形成区分およびダイバータの周りに延在する擬似直流コイルを用いて磁場を前記形成区分および第 1 および第 2 の内側ダイバータ内で発生させるステップをさらに含む、項目 2 1 に記載の方法。

30

(項目 25)

擬似直流ミラー コイルを用いて、ミラー 磁場を前記第 1 および第 2 の形成区分と前記第 1 および第 2 の外側ダイバータとの間に発生させるステップをさらに含む、項目 2 3 に記載の方法。

(項目 26)

前記形成区分と前記ダイバータとの間の狭窄部の周りに延在する擬似直流ミラープラグコイルを用いて、ミラープラグ 磁場を前記第 1 および第 2 の形成区分と前記第 1 および第 2 の外側ダイバータとの間の狭窄部内で発生させるステップをさらに含む、項目 2 3 に記載の方法。

(項目 27)

擬似直流ミラー コイルを用いて、ミラー 磁場を前記閉じ込めチャンバと前記第 1 および第 2 の内側ダイバータとの間に発生させ、擬似直流薄型ネッキングコイルを用いて、ネッキング 磁場を前記第 1 および第 2 の形成区分と前記第 1 および第 2 の内側ダイバータとの間に発生させるステップをさらに含む、項目 2 4 に記載の方法。

40

(項目 28)

前記チャンバに結合されるサドルコイルを用いて、磁気双極場および磁気四重極場のうちの 1 つを前記チャンバ内で発生させるステップをさらに含む、項目 9 のいずれか 1 項に記載の方法。

(項目 29)

前記チャンバに結合されるサドルコイルを用いて、磁気双極場および磁気四重極場のうちの 1 つを前記チャンバ内で発生させるステップをさらに含む、項目 1 0 および 1 1 のいずれか 1 項に記載の方法。

(項目 30)

ゲッタリングシステムを用いて、前記チャンバの内部表面および第 1 および第 2 の形成

50

区分の内部表面と、前記閉じ込めチャンバと前記第1および第2の形成区分とに介在する第1および第2のダイバータと、前記第1および第2の形成区分に結合される第1および第2の外側ダイバータとを調整するステップをさらに含む、項目9に記載の方法。

(項目31)

前記ゲッタリングシステムは、チタン堆積システムおよびリチウム堆積システムのうちの1つを含む、項目30に記載の方法。

(項目32)

軸方向に搭載されるプラズマガンからプラズマを前記FRCの中に軸方向に注入するステップをさらに含む、項目9に記載の方法。

(項目33)

前記FRCの縁層内の半径方向電場プロファイルを制御するステップをさらに含む、項目9に記載の方法。

(項目34)

前記FRCの縁層内の半径方向電場プロファイルを制御するステップは、バイアス電極を用いて、電位の分布を前記FRCの開磁束面群に印加するステップを含む、項目33に記載の方法。

(項目35)

前記FRCプラズマを前記長手方向軸の周りに軸対称に位置付けるために、前記閉じ込めチャンバの長手方向軸に対して直角の半径方向において前記FRCプラズマを安定化させ、前記FRCプラズマを前記閉じ込めチャンバの中央平面の周りに軸対称に位置付けるために、前記長手方向軸に沿った軸方向において前記FRCプラズマを安定化させるステップをさらに含む、項目1に記載の方法。

(項目36)

前記チャンバの周りに延在する擬似直流コイルを用いて、印加磁場を前記チャンバ内で発生させるステップをさらに含む、項目35に記載の方法。

(項目37)

前記FRCプラズマを前記半径方向に安定化させるステップは、前記印加磁場を調整し、半径方向安定性および軸方向不安定性を前記FRCプラズマ内に誘発するステップを含む、項目35に記載の方法。

(項目38)

前記FRCプラズマを軸方向に安定化させるステップは、第1および第2の半径方向磁場を生成するステップを含み、前記第1および第2の半径方向磁場は、前記FRCと相互作用し、前記FRCプラズマを軸方向に移動させ、前記FRCプラズマを前記中央平面の周りに軸対称に位置付ける、項目35 - 37に記載の方法。

(項目39)

コンパクトトロイド(CT)プラズマを第1および第2のCT注入器から前記FRCプラズマの中に前記閉じ込めチャンバの中央平面に向かってある角度で注入するステップをさらに含み、前記第1および第2のCT注入器は、前記閉じ込めチャンバの中央平面の対向側で直徑方向に対向する、項目1 - 3および6 - 8に記載の方法。

(項目40)

コンパクトトロイド(CT)プラズマを第1および第2のCT注入器から前記FRCプラズマの中に前記閉じ込めチャンバの中央平面に向かってある角度で注入するステップをさらに含み、前記第1および第2のCT注入器は、前記閉じ込めチャンバの中央平面の対向側で直徑方向に対向する、項目4に記載の方法。

(項目41)

コンパクトトロイド(CT)プラズマを第1および第2のCT注入器から前記FRCプラズマの中に前記閉じ込めチャンバの中央平面に向かってある角度で注入するステップをさらに含み、前記第1および第2のCT注入器は、前記閉じ込めチャンバの中央平面の対向側で直徑方向に対向する、項目5に記載の方法。

(項目42)

10

20

30

40

50

コンパクトトロイド（C T）プラズマを第1および第2のC T注入器から前記F R C プラズマの中に前記閉じ込めチャンバの中央平面に向かってある角度で注入するステップをさらに含み、前記第1および第2のC T注入器は、前記閉じ込めチャンバの中央平面の対向側で直径方向に対向する、項目9に記載の方法。

（項目43）

コンパクトトロイド（C T）プラズマを第1および第2のC T注入器から前記F R C プラズマの中に前記閉じ込めチャンバの中央平面に向かってある角度で注入するステップをさらに含み、前記第1および第2のC T注入器は、前記閉じ込めチャンバの中央平面の対向側で直径方向に対向する、項目10-12に記載の方法。

（項目44）

磁場反転配位（F R C）を伴う磁場を発生および維持するためのシステムであって、閉じ込めチャンバと、

第1および第2の直径方向に対向する内側ダイバータに結合される第1および第2の直径方向に対向するF R C形成区分と、

第1および第2の形成区分に結合される第1および第2のダイバータと、

複数のプラズマガン、1つ以上のバイアス電極、および第1および第2のミラープラグのうちの1つ以上のものであって、前記複数のプラズマガンは、前記第1および第2のダイバータ、前記第1および第2の形成区分、および前記閉じ込めチャンバに動作可能に結合される、第1および第2の軸方向プラズマガンを含み、前記1つ以上のバイアス電極は前記閉じ込めチャンバ、前記第1および第2の形成区分、および第1および第2の外側ダイバータのうちの1つ以上のもの内に位置付けられ、前記第1および第2のミラープラグは、前記第1および第2の形成区分と前記第1および第2のダイバータとの間に位置付けられる、複数のプラズマガン、1つ以上のバイアス電極、および第1および第2のミラープラグのうちの1つ以上のものと、

前記閉じ込めチャンバおよび前記第1および第2のダイバータに結合されるゲッタリングシステムと、

前記閉じ込めチャンバに結合され、前記閉じ込めチャンバの中央平面に向かって角度付けられる、複数の中性原子ビーム注入器であって、前記複数の中性原子ビーム注入器のうちの1つ以上のものは、第1のビームエネルギーと第2のビームエネルギーとの間で調整可能であり、前記第2のビームエネルギーは、前記第1のビームエネルギーと異なる、複数の中性原子ビーム注入器と、

前記閉じ込めチャンバ、前記第1および第2の形成区分、および前記第1および第2のダイバータの周囲に位置付けられる複数の擬似直流コイルと、前記第1および第2の形成区分と前記第1および第2のダイバータとの間に位置付けられる第1および第2の擬似直流ミラーコイルのセットとを備える、磁気システムと

を備える、システム。

（項目45）

前記第2のビームエネルギーは、前記第1のビームエネルギーより高い、項目44に記載のシステム。

（項目46）

前記複数の中性ビームは、注入ショットの持続時間の間、前記第1のビームエネルギーと第2のビームエネルギーとの間で切り替わるように構成される、項目44に記載のシステム。

（項目47）

前記第1および第2のビームエネルギーは、約15~40 keVの範囲内である、項目44-46に記載のシステム。

（項目48）

前記複数の中性ビームのビームエネルギーを制御するように構成される能動フィードバックプラズマ制御システムをさらに備える、項目44-46に記載のシステム。

（項目49）

10

20

30

40

50

前記システムは、FRCを発生させ、前記中性ビームが、前記プラズマの中に注入されている間、減衰を伴わずに、前記FRCを維持し、プラズマ温度を約1.0 keVから3.0 keVまで上昇させるように構成される、項目44に記載のシステム。

(項目50)

前記第1および第2のダイバータは、前記第1および第2の形成区分と前記閉じ込めチャンバとに介在する第1および第2の内側ダイバータを備え、前記第1および第2の形成区分に結合される第1および第2の外側ダイバータをさらに備え、前記第1および第2の形成区分は、前記第1および第2の内側ダイバータと前記第1および第2の外側ダイバータとに介在する、項目44に記載のシステム。

(項目51)

前記第1および第2の内側および外側ダイバータ、前記第1および第2の形成区分、および前記閉じ込めチャンバに動作可能に結合される、第1および第2の軸方向プラズマガンをさらに備える、項目50に記載のシステム。

(項目52)

前記閉じ込めチャンバに結合される2つ以上のサドルコイルをさらに備える、項目51に記載のシステム。

(項目53)

前記形成区分は、FRCを発生させ、それを前記閉じ込めチャンバの中央平面に向かって平行移動させるためのモジュール化された形成システムを備える、項目44に記載のシステム。

(項目54)

バイアス電極は、前記閉じ込めチャンバ内に位置付けられ、開放磁力線に接触するための1つ以上の点電極と、前記閉じ込めチャンバと前記第1および第2の形成区分との間にあり、方位角的に対称に遠端束層を充電するための環状電極のセットと、前記第1および第2のダイバータ内に位置付けられ、複数の同心磁束層を充電するための複数の同心状にスタックされた電極と、開放磁束を捕捉するための前記プラズマガンのアノードとのうちの1つ以上のものを含む、項目44に記載のシステム。

(項目55)

前記擬似直流コイルおよび第1および第2の半径方向磁場コイルに動作可能に結合される制御システムをさらに備え、前記制御システムは、複数の命令を備える非一過性メモリに結合されるプロセッサを含み、前記命令は、実行されると、前記プロセッサに、前記複数の擬似直流コイルおよび前記第1および第2の半径方向磁場コイルによって発生された磁場を調整させ、前記FRCプラズマを前記長手方向軸の周りに軸対称に位置付けるために、前記チャンバの長手方向軸に対して直角の半径方向において前記FRCプラズマを安定化させ、前記FRCプラズマを前記中央平面の周りに軸対称に位置付けるために、前記長手方向軸に沿った軸方向においてFRCプラズマを安定化させる、項目44に記載のシステム。

(項目56)

前記システムは、FRCを発生させ、中性原子ビームが前記FRCの中に注入されている間、減衰を伴わずに、前記FRCを一定値またはほぼ一定値に維持するように構成される、項目55に記載のシステム。

(項目57)

前記第1および第2の半径方向磁場は、前記中央平面の周りで反対称である、項目55に記載のシステム。

(項目58)

前記閉じ込めチャンバの中央平面に向かってある角度で前記閉じ込めチャンバに結合される第1および第2のコンパクトトロイド(CT)注入器をさらに備え、前記第1および第2のCT注入器は、前記閉じ込めチャンバの中央平面の対向側で直径方向に対向する、項目44-46および49-57に記載のシステム。

(項目59)

10

20

30

40

50

前記閉じ込めチャンバの中央平面に向かってある角度で前記閉じ込めチャンバに結合される第1および第2のコンパクトトロイド(CT)注入器をさらに備え、前記第1および第2のCT注入器は、前記閉じ込めチャンバの中央平面の対向側で直径方向に対向する、項目47に記載のシステム。

(項目60)

前記閉じ込めチャンバの中央平面に向かってある角度で前記閉じ込めチャンバに結合される第1および第2のコンパクトトロイド(CT)注入器をさらに備え、前記第1および第2のCT注入器は、前記閉じ込めチャンバの中央平面の対向側で直径方向に対向する、項目48に記載のシステム。

**【0018】**

添付図面は本明細書の一部として含まれ、この例示的な実施形態を示し、上に提供された概要および以下に提供される例示的な実施形態の詳述と共に、本発明の原理を説明し教示する働きをする。

**【図面の簡単な説明】**

**【0019】**

【図1】高性能のFRCレジーム(HPF)下と従来のFRCレジーム(CR)下との関係、および他の従来のFRC実験との関係において、本FRCシステムにおける粒子閉じ込めを示す図である。

**【0020】**

【図2】本FRCシステムの構成要素、および本FRCシステムにおけるFRCを生産可能な磁気トポロジーを示す図である。

**【0021】**

【図3A】図3Aは、中央閉じ込め容器、形成区分、ダイバータ、中性ビーム、電極、プラズマガン、ミラープラグ、およびペレット注入器の好ましい配列を含む、上部から見た本FRCシステムの基本レイアウトを図示する。

**【0022】**

【図3B】図3Bは、上部から見た中心閉じ込め容器を図示し、中心閉じ込め容器内の対称長軸に対して直角である角度で配列される、中性ビームを示す。

**【0023】**

【図3C】図3Cは、上部から見た中心閉じ込め容器を図示し、中心閉じ込め容器内の対称長軸に対して直角未満である角度で配列され、粒子を中心閉じ込め容器の中央平面に向かって注入するように指向される、中性ビームを示す。

**【0024】**

【図3D】図3Dおよび3Eは、それぞれ、中心閉じ込め容器と、形成区分と、内側および外側ダイバータと、中心閉じ込め容器内の対称主軸に対して直角未満の角度で配列される中性ビームと、電極と、プラズマガンと、ミラープラグとの好ましい配列を含む、本FRCシステムの代替実施形態の基本レイアウトの上部および斜視図を図示する。

【図3E】図3Dおよび3Eは、それぞれ、中心閉じ込め容器と、形成区分と、内側および外側ダイバータと、中心閉じ込め容器内の対称主軸に対して直角未満の角度で配列される中性ビームと、電極と、プラズマガンと、ミラープラグとの好ましい配列を含む、本FRCシステムの代替実施形態の基本レイアウトの上部および斜視図を図示する。

**【0025】**

【図4】形成部分に対するパルス電力システムの構成要素の概略を示す図である。

**【0026】**

【図5】個々のパルス電力形成スキッドのアイソメ図である。

**【0027】**

【図6】形成管アセンブリのアイソメ図である。

**【0028】**

【図7】中性ビームシステムおよび主要構成要素の部分断面アイソメ図である。

**【0029】**

10

20

30

40

50

【図 8】閉じ込めチャンバ上の中性ビーム配置のアイソメ図である。

【0030】

【図 9】 $T_i$ および $L_i$ ゲッタリング・システムの好ましい配置の部分断面アイソメ図である。

【0031】

【図 10】ダイバータ・チャンバに搭載されたプラズマガンの部分断面アイソメ図である。また、関連した磁気ミラープラグおよびダイバータ電極アセンブリも示す。

【0032】

【図 11】閉じ込めチャンバの軸方向端部における環状バイアス電極の好ましい配置を示す図である。

【0033】

【図 12】2つの磁場反転シータピンチ形成部分における一連の外部反磁性ループおよび中央金属閉じ込めチャンバ内に組み込んだ磁界プローブから獲得した、FRCシステムにおける排除磁束半径の展開を示す図である。時間は、形成源内の同期された磁場反転の瞬間から測定され、距離 $z$ は、機械の軸方向の中央平面に対して与えられる。

【0034】

【図 13】図 13 A、13 B、13 C、および 13 D は、本 FRC システム上の代表的な非 HPF の非持続放出からのデータを示す図である。図 13 A は、中央平面における排除磁束半径が、時間関数として示されている。図 13 B は、中央平面 CO2 干渉計からの線集積密度の 6 つのコードが、時間関数として示されている。図 13 C は、CO2 干渉計データからのアーベル逆変換密度半径の外形が、時間関数として示されている。図 13 D は、圧力平衡からの合計プラズマ温度が、時間関数として示されている。

【0035】

【図 14】図 13 A、13 B、13 C、13 D に示された本 FRC システムの同じ放出に対して、選択された時間における排除磁束の軸方向の外形を示す図である。

【0036】

【図 15】閉じ込めチャンバの外側に装着されたサドルコイルのアイソメ図である。

【0037】

【図 16】図 16 A、16 B、16 C、および 16 D は、FRC の耐用期間および入射された中性ビームのパルス長の相互関係を示す図である。示されたように、ビームパルスが長いほど、より長く耐用する FRC を生成する。

【0038】

【図 17】図 17 A、17 B、17 C、および 17 D は、FRC 性能の FRC システムの異なる構成要素の個々の効果および組み合わせた効果、ならびに HPF レジームの達成を示す図である。

【0039】

【図 18】図 18 A、18 B、18 C、および 18 D は、本 FRC システム上の代表的な HPF の非持続放出からのデータを示す図である。図 18 A は、中央平面における排除磁束半径が、時間関数として示されている。図 18 B は、中央平面 CO2 干渉計からの線集積密度の 6 つのコードが、時間関数として示されている。図 18 C は、CO2 干渉計データからのアーベル逆変換密度半径の外径が、時間関数として示されている。図 18 D は、圧力平衡からの合計プラズマ温度が、時間関数として示されている。

【0040】

【図 19】電子温度 ( $T_e$ ) の関数として、磁束閉じ込めを示す図である。これは、HPF 放出に対して新しく確立された優れたスケーリングレジームを表すグラフを示す。

【0041】

【図 20】図 20 は、角度付けられていないおよび角度付けられた注入される中性ビームのパルス長に対応する、FRC 寿命時間を図示する。

【0042】

【図 21】図 21 A、21 B、21 C、21 D および 21 E は、角度付けられた注入され

10

20

30

40

50

る中性ビームのパルス長と、角度付けられた注入される中性ビームのパルス長に対応するプラズマ半径、プラズマ密度、プラズマ温度、および磁束のFRCプラズマパラメータの寿命とを図示する。

**【0043】**

【図22】図22Aおよび22Bは、コンパクトトロイド(CT)注入器の基本レイアウトを図示する。

**【0044】**

【図23】図23Aおよび23Bは、中心閉じ込め容器を図示し、そこに搭載されたCT注入器を示す。

**【0045】**

【図24】図24Aおよび24Bは、そこに結合されたドリフトチューブを有する、CT注入器の代替実施形態の基本レイアウトを図示する。

**【0046】**

【図25】図25は、調整可能エネルギービーム出力のための中性ビームシステムおよび重要構成要素の断面等角図を図示する。

**【0047】**

【図26】図26は、調整可能エネルギービーム出力を伴う中性ビームシステムを図示する、概略図である。

**【0048】**

【図27】図27は、閉じ込め容器(CV)内のFRCプラズマの軸方向位置制御機構を図示する、概略図である。

**【0049】**

【図28】図28は、一般的スライディングモード制御スキームのフロー図である。

**【0050】**

【図29】図29は、スライディングモード軸方向位置制御シミュレーションの実施例の複合グラフである。

**【0051】**

【図30】図30は、スライディングモード軸方向位置制御シミュレーションの実施例の複合グラフである。

**【0052】**

図は必ずしも一定の縮尺で描かれてはおらず、同様の構造または機能の要素は、説明のために図を通して同じ参照番号で概ね表されていることに留意されたい。また図は、本明細書に記載された様々な実施形態の説明を容易にすることを意図するに過ぎないにも留意されたい。図は、必ずしも本明細書に開示された教示のすべての態様を説明せず、特許請求の範囲を限定するものではない。

**【発明を実施するための形態】**

**【0053】**

本明細書に提供される本実施形態は、優れた安定性および粒子、エネルギー、および磁束閉じ込めを伴う、FRCの形成および維持を促進する、システムおよび方法を対象とする。本実施形態のいくつかは、調整可能ビームエネルギー能力を伴う中性ビーム注入器を利用した、上昇されたシステムエネルギーおよび改良された持続性を伴う、FRCの形成および維持を促進する、システムおよび方法を対象とする。本実施形態のいくつかはまた、FRCプラズマの平衡の軸方向安定性性質から独立して、半径方向および軸方向の両方におけるFRCプラズマの安定性と、FRCプラズマ閉じ込めチャンバの対称軸に沿ったFRCプラズマの軸方向位置制御とを促進する、システムおよび方法を対象とする。

**【0054】**

**(詳細な説明)**

別個および組み合わせの両方において、これらの付加的特徴および教示の多くを利用する、本明細書に説明される実施形態の代表的実施例が、ここで、添付の図面を参照して説明される。この詳細な説明は、単に、当業者に、本教示の好ましい側面を実践するためのさ

10

20

30

40

50

らなる詳細を教示することを意図し、本発明の範囲を限定することを意図するものではない。したがって、以下の詳細な説明に開示される特徴およびステップの組み合わせは、最も広義には、本発明を実践するために必要ではなくてもよく、代わりに、本教示の代表的実施例を特に説明するためだけに教示される。

#### 【 0 0 5 5 】

さらに、代表的実施例および従属請求項の種々の特徴は、本教示の付加的な有用な実施形態を提供するために、具体的かつ明示的には列挙されない方法で組み合わせられてもよい。加えて、説明および／または請求項に開示される全ての特徴は、元来の開示の目的のために、ならびに実施形態および／または請求項における特徴の複合物から独立して、請求される主題を制限する目的のために、相互から別個かつ独立して開示されることが意図されることが明示的に留意される。また、全ての値範囲またはエンティティの群のインジェーションは、元来の開示の目的のために、ならびに請求される主題を制限する目的のために、あらゆる可能な中間値または中間エンティティを開示することも明示的に留意される。

10

#### 【 0 0 5 6 】

半径方向および軸方向の両方における F R C プラズマの安定性と、F R C プラズマ閉じ込めチャンバの対称軸に沿った F R C プラズマの軸方向位置制御とを促進する、システムおよび方法に目を向ける前に、従来の F R C に優る優れた安定性ならびに優れた粒子、エネルギー、および束の閉じ込めを伴う、高性能 F R C を形成および維持するためのシステムおよび方法の議論が、提供される。そのような高性能 F R C は、コンパクト中性子源（医療用同位体生産、核廃棄物浄化、材料研究、中性子放射線撮影、および断層撮影のため）、コンパクト光子源（化学生産および処理のため）、質量分離および濃縮システム、ならびに将来のエネルギー生成のための軽核の融合用炉心を含む、あらゆる種々の用途への経路を提供する。

20

#### 【 0 0 5 7 】

様々な付随システムおよび作動モードが、F R C 内に優れた閉じ込めレジームが存在するかどうかを評価するために調査されてきた。これらの努力は、本明細書に説明された高性能の F R C パラダイムの画期的な発見および発展をもたらした。この新しいパラダイムによれば、本システムおよび方法は、多くの新規の発想と、図 1 に示したように、F R C 閉じ込めを劇的に向上させ、かつ負の副作用のない安定制御を提供する手段を組み合わせる。以下により詳細に論じるように、図 1 は、以下に説明する（図 2 および 3 参照）F R C システム 1 0 における粒子閉じ込めを示し、F R C を形成し維持するために従来のレジーム C R による作動に対して、また他の実施形態で使用される F R C を形成し維持するために従来のレジームによる粒子閉じ込めに対して、F R C を形成し維持するための高性能の F R C レジーム（H P F ）により作動する。本開示は、F R C システム 1 0 の革新的な個々の構成要素および方法、ならびにそれらの集合効果の概要を説明し詳述する。

30

#### 【 0 0 5 8 】

##### （ F R C システムの説明 ）

##### 真空システム

図 2 および 3 は、本 F R C システム 1 0 の概略を示す。F R C システム 1 0 は、2 つの直径方向に対向する磁場反転シータピンチ形成部分 2 0 0 、およびその形成部分 2 0 0 を超えた、中性密度および不純物汚染を制御するための 2 つのダイバータ・チャンバ 3 0 0 によって包囲された中央閉じ込め容器 1 0 0 を含む。本 F R C システム 1 0 は、超高真空を収容するように構築されており、一般的な基準圧 1 0 - 8 トルで作動する。このような真空圧は、嵌合構成要素、金属 O リング、高純度の内壁の間のダブルポンプの嵌合フランジを使用し、ならびに物理的および化学的洗浄に続き、2 4 時間 2 5 0 での真空焼成および水素グロー放電洗浄などの、組立て前にすべての部分を最初に慎重に表面調整する必要がある。

40

#### 【 0 0 5 9 】

磁場反転シータピンチ形成部分 2 0 0 は、以下に詳しく論じる（図 4 ~ 6 参照）進化したパルス電力形成システムを備えているが、標準磁場反転シータピンチ（F R T P ）である

50

。各形成部分 200 は、超高純度石英の 2 ミリメートルの内壁を特色とする、標準純度工業グレードの石英管から作成される。閉じ込めチャンバ 100 は、ステンレス鋼から作成されて、複数の径方向および接線方向のポートが可能になる。また閉じ込めチャンバ 100 は、以下に説明される実験の時間スケール上で磁束保存器として働き、高速過渡磁場を制限する。真空は、ドライスクロール粗引きポンプ、ターボ分子ポンプおよびクライオポンプのセットを備える、FRC システム 10 内に生成され維持される。

#### 【 0060 】

##### 磁気システム

磁気システム 400 は、図 2 および 3 に示されている。図 2 は、他の特徴の中でとりわけ、FRC システム 10 によって生産可能な FRC 450 に関する、FRC 磁束および密度等高線（径方向および軸方向座標の関数として）を示す。これらの等高線は、FRC システム 10 に対応するシステムおよび方法をシミュレーションするために開発されたコードを使用して、二次元抵抗性 H a l l - M H D 数値シミュレーションによって獲得されたものであり、測定された実験データとよく合致する。図 2 に見られるように、FRC 450 は、セパラトリックス 451 の内側の FRC 450 の内部 453 で、閉じた磁力線のトーラス、およびセパラトリックス 451 のすぐ外側の開いた磁力線 452 上の環状縁層 456 からなる。縁層 456 は、FRC の長さを超えて集結してジェット 454 になり、自然ダイバータを提供する。

10

#### 【 0061 】

主磁気システム 410 は、構成要素に沿って、すなわち、FRC システム 10 の閉じ込めチャンバ 100、形成部分 200 およびダイバータ 300 に沿って、特に軸方向位置にある一連の疑似直流コイル 412、414、および 416 を含む。疑似直流コイル 412、414、および 416 は、疑似直流スイッチング電源によって供給され、閉じ込めチャンバ 100、形成部分 200 およびダイバータ 300 内に約 0.1 T の基本磁気バイアス磁場を生成する。疑似直流コイル 412、414、および 416 に加えて、主磁気システム 410 は、閉じ込めチャンバ 100 のいずれかの端部と隣接した形成部分 200 との間に疑似直流ミラーコイル 420（スイッチング電源によって供給される）を含む。疑似直流ミラーコイル 420 は、最高 5 までの磁気ミラー比を提供し、平衡形状制御のために単独で活性化することが可能である。加えて、ミラープラグ 440 は、それぞれの形成部分 200 とダイバータ 300 との間に位置付けられる。ミラープラグ 440 は、小型の疑似直流ミラーコイル 430 およびミラープラグコイル 444 を備える。疑似直流ミラーコイル 430 は、ミラープラグコイル 444 を通過して短い直径の通路 442 に向かって磁束表面 455 の焦点を合わせるために、追加のガイド磁場を生成する 3 つのコイル 432、434 および 436（スイッチング電源によって供給される）を含む。ミラープラグコイル 444 は、短い直径の通路 442 を中心に巻き付き、L C パルス電力回路によって供給され、最高 4 T までの強いミラー磁場を生成する。このコイル配置全体の目的は、堅く束ね、磁束表面 455 および端部に流れるプラズマジェット 454 を、ダイバータ 300 の遠隔チャンバ 310 に導くことである。最後に、サドルコイル「アンテナ」460 のセット（図 15 参照）は、中央平面の各側面上に 2 つずつ、閉じ込めチャンバ 100 の外側に配置され、直流電源によって供給される。サドルコイル・アンテナ 460 を、回転不安定性の制御および / または電子電流制御のために、約 0.01 T の準静的磁気双極子または四重極磁場を提供するように構成することができる。サドルコイル・アンテナ 460 は、印加電流の方向に依存して、中央平面に対して対称または反対称のいずれかである、磁場を柔軟に提供できる。

20

30

40

#### 【 0062 】

##### パルス電力形成システム

パルス電力形成システム 210 は、修正シータピンチ原理に基づいて作動する。それが形成部分 200 の 1 つに電力を供給する、2 つのシステムが存在する。図 4 ~ 6 は、形成システム 210 の主な構築ブロックおよび配置を示す。形成システム 210 は、個々のユニット（=スキッド）220 からなるモジュラーパルス電力配置から構成され、スキッ

50

ド 2 2 0 のそれぞれは、形成石英管 2 4 0 を中心に巻き付くストラップアセンブリ 2 3 0 (=ストラップ) のコイル 2 3 2 のサブセットを活性化する。各スキッド 2 2 0 は、コンデンサ 2 2 1 、インダクタ 2 2 3 、高速大電流スイッチ 2 2 5 および関連トリガー 2 2 2 ならびにダンプ回路 2 2 4 から構成される。全体で、各形成システム 2 1 0 は、3 5 0 ~ 4 0 0 kJ の容量エネルギーを保存し、この容量エネルギーは、最高 3 5 GWまでの電力を提供して FRC を形成し加速する。これらの構成要素の協調された作動は、最先端のトリガーおよび制御システム 2 2 2 および 2 2 4 を介して達成され、それによって各形成部分 2 0 0 上の形成システム 2 1 0 間のタイミングを同期することが可能になり、スイッチングジッタを数十ナノ秒に最小化する。このモジュラー設計の利点は、その柔軟な作動である。すなわち、FRC をその場で形成でき、次いで加速し照射する (= 静的形成) 、または形成し同時に加速する (= 動的形成) ことができる。

10

#### 【 0 0 6 3 】

##### 中性ビーム注入器

中性原子ビーム 6 0 0 が、FRC システム 1 0 上に展開され、加熱および電流駆動を提供し、高速粒子圧力を発生させる。図 3 A 、 3 B 、および 8 に示されるように、中性原子ビーム注入器システム 6 1 0 および 6 4 0 を構成する、個々のビーム線は、標的捕捉ゾーンが十分に区分線 4 5 1 ( 図 2 参照 ) の範囲内にあるように、衝突パラメータを用いて、中心閉じ込めチャンバ 1 0 0 の周囲に位置し、高速粒子を FRC プラズマに対して接線方向に ( かつ、中心閉じ込め容器 1 0 0 内の対称長軸に対して垂直または直角である角度で ) 注入する。各注入器システム 6 1 0 および 6 4 0 は、2 0 ~ 4 0 keV の粒子エネルギーを用いて、最大 1 MW の中性ビームパワーを FRC プラズマの中に注入可能である。システム 6 1 0 および 6 4 0 は、正イオン多開口抽出源に基づき、幾何学的集束、イオン抽出グリッドの慣性冷却、および差動ポンプを利用する。異なるプラズマ源の使用は別として、システム 6 1 0 および 6 4 0 は、主に、側方および上方注入能力をもたらす、その個別の搭載場所を満たすようなその物理的設計によって区別される。これらの中性ビーム注入器の典型的構成要素は、側方注入器システム 6 1 0 に関する図 7 に具体的に図示される。図 7 に示されるように、各個々の中性ビームシステム 6 1 0 は、端部を被覆する磁気遮蔽 6 1 4 とともに、入力端部 ( これは、システム 6 4 0 内のアーク源で代用される ) に RF プラズマ源 6 1 2 を含む。イオン光学源および加速グリッド 6 1 6 は、プラズマ源 6 1 2 に結合され、ゲート弁 6 2 0 は、イオン光学源および加速グリッド 6 1 6 と中和装置 6 2 2 との間に位置付けられる。偏向磁石 6 2 4 およびイオンダンプ 6 2 8 は、中和装置 6 2 2 と出口端部における照準デバイス 6 3 0 との間に位置する。冷却システムは、2 つの低温冷凍機 6 3 4 と、2 つのクライオパネル 6 3 6 と、LN2 シュラウド 6 3 8 とを備える。本柔軟性のある設計は、広範囲の FRC パラメータにわたる動作を可能にする。

20

#### 【 0 0 6 4 】

中性原子ビーム注入器 6 0 0 のための代替構成は、高速粒子を FRC プラズマに対して接線方向に注入するが、角度 A は、中心閉じ込め容器 1 0 0 内の対称長軸に対して 90 ° 未満であるものである。ビーム注入器 6 1 5 のこれらのタイプの配向は、図 3 C に示される。加えて、ビーム注入器 6 1 5 は、中心閉じ込め容器 1 0 0 の中央平面の両側のビーム注入器 6 1 5 が、その粒子を中央平面に向かって注入するように配向されてもよい。最後に、これらのビームシステム 6 0 0 の軸方向位置は、中央平面により近接するように選定されてもよい。これらの代替注入実施形態は、より中心における燃料補給選択肢を促進し、ビームのより優れた結合および注入される高速粒子のより高い捕捉効率を提供する。さらに、角度および軸方向位置に応じて、ビーム注入器 6 1 5 の本配列は、FRC 4 5 0 の軸方向伸長および他の特性のより直接的かつ独立した制御を可能にする。例えば、ビームを容器の対称長軸に対して浅角 A で注入することは、より長い軸方向伸展およびより低い温度を伴う FRC プラズマを作成するであろう一方、より垂直な角度 A で取り上げることは、軸方向により短いが、より高温のプラズマにつながるであろう。本方式では、ビーム注入器 6 1 5 の注入角度 A および場所は、異なる目的のために最適化されることがある。加えて、ビーム注入器 6 1 5 のそのような角度付けおよび位置付けは、より高いエネルギー

30

40

50

ーのビーム（概して、より少ないビーム分散を伴う、より多くのパワーを堆積させるためにより好ましい）が、そうでなければ、そのようなビームを捕捉するために必要となるであろうものより低い磁場の中に注入されることを可能にすることができる。これは、高速イオン軌道スケールを判定するのが、エネルギーの方位角成分（容器の対称長軸に対する注入角度が一定ビームエネルギーで低減されるにつれて、徐々に小さくなる）という事実に起因する。さらに、中央平面に向かって角度付けられた注入および中央平面に近接する軸方向ビーム位置は、注入周期の間、FRC プラズマが収縮または別様に軸方向に縮小しても、ビーム・プラズマ結合を改良する。

#### 【0065】

図3Dおよび3Eに目を向けると、FRCシステム10の別の代替構成は、角度付けられたビーム注入器615に加え、内側ダイバータ302を含む。内側ダイバータ302は、形成区分200と閉じ込めチャンバ100との間に位置付けられ、外側ダイバータ300と実質的に同様に構成され、動作する。高速切替磁気コイルをその中に含む、内側ダイバータ302は、形成プロセスの間、事実上、非アクティブであり、形成FRCが閉じ込めチャンバ100の中央平面に向かって平行移動するにつれて、形成FRCが、内側ダイバータ302を通過することを可能にする。いったん形成FRCが内側ダイバータ302を通過して閉じ込めチャンバ100の中に入ると、内側ダイバータは、アクティブ化され、外側ダイバータと実質的に同様に動作し、閉じ込めチャンバ100を形成区分200から隔離する。

10

#### 【0066】

##### ペレット照射装置

新しい粒子を照射し、FRCの粒子インベントリをより良好に制御する手段を提供するために、12バレルペレット照射装置700（例えば、I. Vinyarら、「Pellet Injectors Developed at PELIN for JET, TAE, and HL-2A (JET, TAE、およびHL-2Aに対してPELINで開発されたペレット照射装置）」第26回Fusion Science and Technology Symposium (核融合科学技術シンポジウム) の報告書、9月27日～10月1日(2010)参照）がFRCシステム10上に利用される。図3は、FRCシステム10上のペレット照射装置700の配置を示す。円筒形ペレット（Dは約1mm、Lは約1～2mm）は、FRCに速度150～250km/sの範囲で照射される。個々のペレットはそれぞれ、約 $5 \times 10^{19}$ の水素原子を含み、これはFRCの粒子インベントリに匹敵する。

20

#### 【0067】

##### ゲッタリング・システム

中性ハロガスは、すべての閉じ込めシステムにおいて深刻な問題であることは周知である。電荷交換および再利用（壁からの低温の不純物材料の放出）プロセスは、エネルギーおよび粒子閉じ込めに壊滅的な影響を与える可能性がある。加えて、縁部におけるまたは縁部付近のいかなる高濃度の中性ガスも、照射された大きい軌道（高エネルギー）の粒子（大きい軌道は、FRCトポロジーの規模の軌道、または少なくとも特性磁界勾配長さスケールよりはるかに大きい軌道半径を有する粒子を指す）の耐用期間を即座に喪失させる、または少なくとも大幅に短くする、すなわち、これは、補助ビーム加熱を介する融合を含め、すべてのエネルギー・プラズマの適用に弊害をもたらす。

30

#### 【0068】

表面調整は、それによって中性ガスおよび不純物の悪影響を、閉じ込めシステムにおいて制御または低減できる手段である。この目的を達成するために、本明細書に提供されたFRCシステム10は、チタニウム(Ti)およびリチウム(Li)成膜システム810および820を利用し、閉じ込めチャンバ（または容器）100およびダイバータ300および302のプラズマ対向面をTiおよび/またはLiの薄膜（厚さ数十マイクロメートル）で被覆する。被覆は蒸着技法により達成される。中実のLiおよび/またはTiは、被覆を形成するために近傍表面上に蒸着され、かつ/または昇華されまた噴霧される。源

40

50

は、ガイドノズル（Liの場合）822を備える原子炉、またはガイドシュラウド（Tiの場合）812を備える中実の加熱球である。Li蒸着システムは、通常、連続モードで作動するが、Ti昇華装置は、普通はプラズマ作動の間に断続的に作動される。これらのシステムの作動温度は、速い蒸着速度を得るために600を超える。良好な壁被覆を達成するために、複数の戦略的に配置された蒸着／昇華システムが必要とされる。図9は、FRCシステム10におけるゲッタリング蒸着システム810および820の好ましい配置を詳しく示す。被覆は、ゲッタリング表面ならびに有効なポンプの原子および分子の水素種（HおよびD）として作用する。また被覆は、炭素および酸素などの他の通常の不純物をかなりの水準で低減する。

#### 【0069】

##### ミラープラグ

上述のように、FRCシステム10は、図2および3に示したように、ミラーコイル420、430、および444のセットを利用する。ミラーコイル420の第1のセットは、閉じ込めチャンバ100の2つの軸方向端部に配置され、主磁気システム410のDC閉じ込め、形成およびダイバータコイル412、414および416から単独に活性化される。ミラーコイル420の第1のセットは、主に融合中にFRC450を進め軸方向に包含する助けとなり、持続している間に平衡成形制御を提供する。第1のミラーコイルセット420は、中央閉じ込めコイル412によって生成された中央閉じ込め磁場より名目上高い磁場（約0.4～0.5T）を生成する。ミラーコイル430の第2のセットは、3つの小型の疑似直流ミラーコイル432、434および436を含み、形成部分200とダイバータ300との間に配置され、一般的なスイッチ電源によって駆動される。ミラーコイル432、434および436は、より小型のパルスマニラープラグコイル444（容量電源によって供給される）および物理的収縮部442と一緒に、狭い低ガス伝導通路を非常に高い磁場（約10～20msの立上り時間で2～4T）で提供する、ミラープラグ440を形成する。最も小型のパルスマニラーコイル444は、閉じ込めコイル412、414および416のメートルプラススケールの孔およびパンケーキ型設計に比べて、小型の径方向寸法、20cmの孔および同様の長さである。ミラープラグ440の目的は、以下のように多種多様である。（1）コイル432、434、436および444を堅く束ね、磁束表面452および端部に流れるプラズマジェット454を、遠隔ダイバータ・チャンバ300に導く。これは、排出粒子がダイバータ300に適切に到着し、中央FRC450の開いた磁力線452領域からダイバータ300までずっと追跡する、連続した磁束表面455が存在することを確実にする。（2）FRCシステム10における物理的収縮部442は、それを通ってコイル432、434、436および444が磁束表面452およびプラズマジェット454を通過することができ、ダイバータ300内に着座するプラズマガン350からの中性ガス流を妨げる。同じように、収縮部442は、形成部分200からダイバータ300へのガスの逆流を防止し、それによってFRCの起動を開始するときに、FRCシステム10全体に導入しなければならない中性粒子の数が低減する。（3）コイル432、434、436および444によって生成された強い軸方向のミラーは軸方向の粒子損失を低減し、それによって開いた磁力線上の平行な粒子拡散係数が低減する。

#### 【0070】

図3Dおよび3Eに示される代替構成では、薄型縮径コイル421のセットが、内側ダイバータ302と形成区分200との間に位置付けられる。

#### 【0071】

##### 軸方向のプラズマガン

ダイバータ300のダイバータ・チャンバ310内に装着されたガン350からのプラズマ流は、安定性および中性ビーム性能を向上させることを意図する。ガン350は、図3および10に示したように、ダイバータ300のチャンバ310の内側の軸上に装着され、プラズマ流をダイバータ300内の開いた磁力線452に沿って、閉じ込めチャンバ100の中心に向かって生成する。ガン350は、ワッシャー積層チャネル内に高濃度ガス

10

20

30

40

50

放出で作動し、5 ~ 10 m s に完全にイオン化されたプラズマを数キロアンペア生成するように設計されている。ガン350は、出力プラズマ流を閉じ込めチャンバ100内の所望のサイズのプラズマに一致させる、パルス磁気コイルを含む。ガン350の技術パラメータは、5 ~ 13 cm の外径、および最高 10 cm までの内径を有するチャネルを特徴とし、ガンの内部磁場は 0.5 ~ 2.3 T で、400 ~ 600 V で 10 ~ 15 k A の放電電流を提供する。

#### 【0072】

ガンプラズマ流は、ミラープラグ440の磁場を貫通し、形成部分200および閉じ込めチャンバ100に流入することができる。ミラープラグ440を通るプラズマ移動の効率は、ガン350とプラグ440との間の距離を低減し、プラグ440をより広く短くすることによって高まる。妥当な条件下で、ガン350はそれぞれ、約 150 ~ 300 eV および約 40 ~ 50 eV の高いイオン温度および電子温度で、2 ~ 4 T のミラープラグ440を通り約 1022 プロトン / s を送達する。ガン350は、FRC の縁層456 の著しい燃料補給および改良されたFRC 全体の粒子閉じ込めを提供する。

10

#### 【0073】

プラズマ密度をさらに高めるために、ガスボックスを利用して、追加のガスをガン350からプラズマ流に吹き入れることが可能である。この技法により、照射されたプラズマ密度を数倍に高めることができる。FRC システム 10 では、ミラープラグ440 の側部のダイバータ300 上に搭載されたガスボックスは、FRC の縁層456 の燃料補給、FRC450 の形成、およびプラズマ磁力線短絡を向上させる。

20

#### 【0074】

上に論じたすべての調整パラメータを所与とし、また、一方のみまたは両方のガンを備えた作動が可能であることを考慮すると、広いスペクトルの作動モードが利用可能であることがすぐにわかる。

#### 【0075】

##### バイアス電極

開いた磁束表面の電気バイアスは、方位  $E \times B$  運動を起こす径方向電位を提供することができ、方位  $E \times B$  運動は、開いた磁力線プラズマの回転、ならびに速度シアを介して実際の FRC コア450 を制御するための、ノブを回すのに類似した制御機構を提供する。この制御を達成するために、FRC システム 10 は、機械の様々な部分に配置された様々な電極を戦略的に利用する。図 3 は、FRC システム 10 内の好ましい場所に位置付けられたバイアス電極を示す。

30

#### 【0076】

原則として、以下の 4 つの分類の電極がある。(1) 局所電荷を提供するために、FRC450 の縁部において特定の開いた磁力線452 に接触させる、閉じ込めチャンバ100 内の点電極905、(2) 方位が対称的な形で遠端磁束層456 に帯電させるための、閉じ込めチャンバ100 と形成部分200との間の環状電極900、(3) 複数の同心磁束層455 (それによって層の選択は、ダイバータ磁場を調節するためにコイル416 を調節することによって制御可能であり、その結果、適切な電極910 上で所望の磁束層456 を終了する) に帯電させるための、ダイバータ300 内の同心電極910 の積層、および最後に(4) プラズマガン350 自体 (これは、FRC450 のセパラトリックス付近で内部の開いた磁束表面455 を遮断する) の陽極920 (図 10 参照)。図 10 および 11 は、これらの一部に対するいくつかの典型的な設計を示す。

40

#### 【0077】

すべての場合において、これらの電極は、最高約 800 V までの電圧でパルスまたは直流電源によって駆動される。電極のサイズおよびどの磁束表面が交差しているかに依存して、電流をキロアンペア範囲で引くことができる。

#### 【0078】

##### (FRC システムの非持続作動 - 従来のレジーム)

良好に開発された磁場反転シータピンチ技法の後に、FRC システム 10 上の標準プラズ

50

マ形成が続く。FRCを開始するための通常のプロセスは、定常状態作動のために疑似直流コイル412、414、416、420、432、434および436を駆動することにより開始する。次いでパルス電力形成システム210のRFTPパルス電力回路は、パルス高速磁場反転コイル232を駆動して、形成部分200内に約-0.05Tの一時的な逆バイアスを生成する。この点で、9~20psiの所定の量の中性ガスを、形成部分200の外端上に配置されたフランジにおいて方位角に配向されたパフ弁のセットを介して、(北および南の)形成部分200の石英管チャンバ240によって画定された2つの形成容積の中に照射する。次に、小さいRF(約数百キロヘルツ)の磁場を、石英管240の表面上のアンテナのセットから生成して、中性ガス柱内に局所シードイオン化領域(local seed ionization region)の形でプレプレイオン化(pre-pre-ionization)を生成する。これに続いて、パルス高速磁場反転コイル232を駆動する電流上にシータリング変調を加え、これによりガス柱のより広範囲のプレイオン化がもたらされる。最後に、パルス電力形成システム210の主要パルスパワー・バンクを燃やして、最高0.4Tまでの順方向バイアス磁場を生成するためにパルス高速磁場反転コイル232を駆動する。このステップは、順方向バイアス磁場が形成管240の全長に亘って均一に生成されるように(静的形成)、または連続蠕動磁場変調が、形成管240の軸に沿って達成されるように(動的形成)、時系列にすることができます。

#### 【0079】

この形成プロセス全体で、プラズマ内の実際の磁場反転が約5μs内で急速に起きる。形成プラズマに容易に送達されたマルチギガワットのパルス電力は、高温のFRCを生成し、次いで高温のFRCは形成部分200から順方向磁場(磁場蠕動)の時系列の装着、または形成管210(閉じ込めチャンバ100に向かって軸方向を指す、軸方向の磁場勾配を形成する)の軸方向の外端近傍のコイルセット232の最後のコイル内の一時的に増加した電流のいずれかの適用によって、形成部分200から照射される。そのように形成され、加速された2つ(北および南)の形成FRCは、より大きい直径閉じ込めチャンバ100に拡大し、この場合、疑似直流コイル412は、順方向バイアス磁場を生成して、径方向の拡大を制御し平衡外部磁束を提供する。

#### 【0080】

一旦北および南の形成FRCが閉じ込めチャンバ100の中央平面近傍に到達すると、FRCは衝突する。衝突中、北および南の形成FRCの軸方向の運動エネルギーは、FRCが単一のFRC450に最終的に融合すると、大きく熱化される。プラズマ診断の大きいセットは、FRC450の平衡を調査するために閉じ込めチャンバ100の内で利用可能である。FRCシステム10内の通常の作動条件は、セパラトリックスの半径が約0.4mおよび軸方向に約3m延在する化合したFRCを生成する。さらなる特性は、約0.1Tの外部磁場、約 $5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ のプラズマ密度および最高1keVまでの合計プラズマ温度である。いかなる持続もなしに、すなわち中性ビーム照射または他の補助手段によって加熱および/または電流駆動なしに、これらのFRCの耐用期間は、本来の特性構成減衰時間の約1msに制限される。

#### 【0081】

##### (非持続作動の実験データ - 従来のレジーム)

図12は、FRC450のシータピンチ融合プロセスの力学を示すために、セパラトリックスの半径 $r_s$ に近づく、排除磁束半径 $r$ の通常の時間発展を示す。2つ(北および南)の個々のプラズモイドは、同時に生成され、次いでそれぞれの形成部分200から出て超音速 $v_z$ 約250km/sで加速され、中央平面近傍で $z=0$ で衝突する。衝突中、プラズモイドは軸方向に圧迫し、続いて即座に径方向および軸方向に拡大し、最後に融合してFRC450を形成する。融合するFRC450の径方向および軸方向の力学の両方は、詳しく示した密度プロファイルの測定およびボロメータに基づいた断層撮影によって証明される。

#### 【0082】

10

20

30

40

50

FRCシステム10の代表的な非持続放出からのデータは、図13A、13B、13C、および13Dに時間関数として示されている。FRCは、 $t = 0$ で開始される。機械の軸方向の中央平面における排除磁束半径は、図13Aに示されている。このデータは、磁気プローブのアレイから得られ、閉じ込めチャンバのステンレス鋼壁のすぐ内側に配置され、これは軸方向磁場を測定する。鋼壁は、この放出の時間スケール上の良好な磁束保存器である。

#### 【0083】

線集積密度は、 $z = 0$ に配置された6つのコードのCO<sub>2</sub>/He-Ne干渉計から図13Bに示されている。垂直(y)FRC変位を考慮すると、ボロメータの断層撮影によって測定されたように、アーベル逆変換は図13Cの密度等高線をもたらす。初めの0.1m 10 s間に一部の軸方向および径方向のスロッシング後、FRCは、中空密度プロファイルを有して定着する。このプロファイルは極めて平坦であり、必要に応じて通常の二次元FRC平衡により実質的な密度を軸上にもつ。

#### 【0084】

圧力平衡から得られ、トムソン散乱分光測定と完全に一致する、合計プラズマ温度が、図13Dに示されている。

#### 【0085】

排除磁束アレイ全体からの分析は、FRCのセパラトリックス（排除磁束軸方向プロファイルによって見積もられる）の形状が、レーストラック型から橢円形に次第に進化することを示す。図14に示されたこの進化は、2つのFRCから単一のFRCへの段階的な磁気再結合に一致する。実際に、概算は、この特定の場合では、最初の2つのFRC磁束の約10%が、衝突中に再結合すると示唆している。 20

#### 【0086】

FRCの長さは、FRCの耐用期間中に3m～約1mに確実に収縮する。この収縮は図14に見られ、ほとんどの対流エネルギー損失は、FRC閉じ込めより優先されることを示唆する。セパラトリックスの内側のプラズマ圧力は、外部磁気圧力より急速に低減するので、端部領域における磁力線張力は、FRCを軸方向に圧迫し、軸方向および径方向の平衡を回復する。図13および14に論じた放出に対して、FRCの磁束、粒子インベントリ、および熱エネルギー（それぞれ、約10mWb、 $7 \times 10^{19}$ 粒子、および7kJ）は、FRC平衡が低下するように見えたとき、最初のミリ秒後におよそ1桁低減する。 30

#### 【0087】

##### （持続作動 - HPFレジーム）

図12～14における例は、いかなる持続もなしにFRCを減衰する特性である。しかし、いくつかの技法は、FRCシステム10に展開されて、さらにFRC閉じ込め（内部コアおよび縁層）をHPFレジームに向上させ、閉じ込めを持続させる。

#### 【0088】

##### 中性ビーム

まず、高速(H)中性を8個の中性ビーム照射装置600からビーム内のB<sub>z</sub>に垂直に照射する。高速中性のビームは、北および南の形成FRCが閉じ込めチャンバ100内で融合した瞬間から1つのFRC450の中に照射される。高速イオンは電荷交換によって主に生成され、FRC450の方位電流に加えるベータトロン軌道(FRCトポロジーのスケール上または特性磁場勾配長さスケールよりはるかに長い主要半径を有する)を有する。放出のわずか後(照射の0.5～0.8ms後)、充分に大きい高速イオン集団は、内部FRCの安定性および閉じ込め特性を著しく向上させる(例えば、M.W.BinderbauerおよびN.Rostoker, Plasma Phys. 56, part 3, 451 (1996) 参照)。さらに、持続の観点から、中性ビーム照射装置600からのビームも、電流を駆動しFRCプラズマを加熱する主な手段である。 40

#### 【0089】

FRCシステム10のプラズマレジームでは、高速イオンはプラズマ電子上で主に減速する。放出の初期の間、高速イオンの通常の軌道の平均減速時間は0.3～0.5msである

り、これは著しい F R C の主に電子の加熱をもたらす。高速イオンは、内部 F R C 磁場が本質的に低いので(0.1 T の外部軸方向磁場に対して平均約 0.03 T)、セパラトリックスの外側の径方向の偏位を大きくする。高速イオンは、中性ガス濃度がセパラトリックスの外側で高過ぎた場合、電荷交換損失に対して弱いはずである。したがって、F R C システム 10 上に展開した壁ゲッタリングおよび他の技法(とりわけガス制御に寄与するプラズマガン 350 およびミラープラグ 440 など)は、端中性を最小にし、高速イオン電流の必要な構築を可能にする。

#### 【 0 0 9 0 】

##### ペレット照射

電子がより高温で F R C の耐用期間がより長い、超高速イオン集団が F R C 450 内に構築される際、冷凍の H または D ペレットは、ペレット照射装置 700 から F R C 450 の中に照射されて、F R C 450 の F R C 粒子インベントリを持続させる。予想されるアプリケーション時間スケールは充分に短いので、かなりの F R C 粒子源を提供する。またこの速度は、個々のペレットをより小さい片に碎くことにより、照射された片の表面積を拡大することによって増大させることができるが、ペレット照射装置 700 のバレルまたは照射管内で、また閉じ込めチャンバ 100 に入る前に、閉じ込めチャンバ 100 の中にに入る直前に照射管の最後の部分の曲げ半径を縮め付けることにより、ペレットと照射管の壁との間の片を増加させることによってステップを達成できる。12 バレル(照射管)の燃焼順序および速度、ならびに粉碎を変化させる恩恵により、ペレット照射システム 700 を調整して、まさに所望のレベルの粒子インベントリの持続を提供することができる。その結果、これは F R C 450 内の内部動圧ならびに F R C 450 の持続作動および耐用期間を維持する役に立つ。

10

20

#### 【 0 0 9 1 】

一旦、除去された原子が F R C 450 内で著しいプラズマに衝突すると、除去された原子は完全にイオン化される。次いで得られた低温のプラズマ構成要素は、本来の F R C プラズマにより衝突して加熱される。所望の F R C 温度を維持するために必要なエネルギーは、ビーム照射装置 600 により最終的に供給される。この意味で、ペレット照射装置 700 は中性ビーム照射装置 600 と一緒に、定常状態を維持し F R C 450 を持続するシステムを形成する。

#### 【 0 0 9 2 】

30

##### ( C T 注入器 )

ペレット注入器の代替として、コンパクトトロイド( C T )注入器が、主に、磁場反転配位( F R C )プラズマに燃料補給するために提供される。 C T 注入器 720 は、図 22 A および 22 B に示されるように、同軸円筒形内側および外側電極 722 および 724 と、内側電極の内部に位置付けられるバイアスコイル 726 と、 C T 注入器 720 の放電の反対の端部における電気遮断器 728 とを含む、磁化同軸プラズマガン( M C P G )を備える。ガスが、ガス注入ポート 730 を通して内側電極 722 と外側電極 724 との間の空間の中に注入され、スフェロマック状プラズマが、放電によって生成され、ローレンツ力によってガンから押し出される。図 23 A および 23 B に示されるように、一対の C T 注入器 720 が容器 100 の中央平面の近傍および対向側において閉じ込め容器 100 に結合され、 C T を閉じ込め容器 100 内の中心 F R C プラズマの中に注入する。 C T 注入器 720 の放電端は、中性ビーム注入器 615 と同様に、閉じ込め容器 100 の長手方向軸に対してある角度で閉じ込め容器 100 の中央平面に向かって指向される。

40

#### 【 0 0 9 3 】

代替実施形態では、 C T 注入器 720 は、図 24 A および 24 B に示されるように、 C T 注入器 720 の放電端に結合される伸長円筒形管を備える、ドリフトチューブ 740 を含む。描寫されるように、ドリフトチューブ 740 は、チューブの周りに位置付けられ、チューブに沿って軸方向に離間される、ドリフトチューブコイル 742 を含む。複数の診断ポート 744 が、チューブの長さに沿って描寫される。

#### 【 0 0 9 4 】

50

C T注入器 720 の利点は、(1)注入される C Tあたりの粒子装荷量の制御および調節性と、(2)高温プラズマが堆積されること(極低温ペレットの代わりに)と、(3)システムが、連続燃料補給を可能にするように、繰り返し率モードで動作されることと、(4)システムがまた、注入される C Tが埋設磁場を搬送するにつれて、ある程度の磁束を復元し得ることである。実験使用のためのある実施形態では、外側電極の内径は、83.1 mmであり、内側電極の外径は、54.0 mmである。内側電極 722 の表面は、好ましくは、電極 722 から生じる不純物を低減させるために、タングステンでコーティングされる。描写されるように、バイアスコイル 726 が、内側電極 722 の内側に搭載される。

#### 【0095】

最近の実験では、最大約 100 km / 秒の超音波 C T 平行移動速度が、達成された。他の典型的なプラズマパラメータは、以下の通りである。電子密度約  $5 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$ 、電子温度約 30 - 50 eV、および粒子装荷量約  $0.5 \sim 1.0 \times 10^{19}$ 。C Tの高動圧は、注入されるプラズマが FRC の中に深くまで透過し、粒子を区分線の内側に堆積させることを可能にする。最近の実験では、FRC 粒子燃料補給は、FRC 粒子装荷量の約 10 ~ 20 % が C T注入器によって正常に提供される結果をもたらし、燃料補給が FRC プラズマを中断させずに容易に実施され得ることを実証した。

10

#### 【0096】

##### サドルコイル

定常状態の電流駆動を達成し、必要なイオン電流を維持するために、電子イオン摩擦力(衝突イオン電子運動量移動からもたらされる)に起因する電子スピニンを防止するまたは著しく低減することが望ましい。FRC システム 10 は、外部印加された静磁場双極子または四重極磁場を介して、電子遮断を提供する革新的な技法を利用する。これは、図 15 に示した外部サドルコイル 460 を介して実現される。サドルコイル 460 から横方向に印加された径方向の磁場は、回転する FRC プラズマ内の軸方向の電界を誘導する。得られる軸方向の電子電流は、径方向の磁場と相互作用して、電子上に方位遮断力  $F = -eV <|B_r|^2>$  を生成する。FRC システム 10 における典型的な条件に対して、プラズマ内部に必要な印加された磁場双極子(または四重極磁場)は、適切な電子遮断を提供するために約 0.001 T のみであることが必要である。約 0.015 T の対応する外部磁場は充分に小さいので、多くの高速粒子損失あるいは閉じ込めに悪影響をもたらすことはない。事実、印加された磁場双極子(または四重極磁場)は、不安定性の抑制に寄与する。接線中性ビーム照射と軸方向プラズマ照射を組み合わせて、サドルコイル 460 は、電流の維持および安定性に関して追加レベルの制御を提供する。

20

30

#### 【0097】

##### ミラープラグ

ミラープラグ 440 内のパルスコイル 444 の設計により、適度(約 100 kJ)の容量エネルギーで高磁場(2 ~ 4 T)の局所発生が可能になる。FRC システム 10 のこの作動の通常の磁場形成に対して、形成容積内のすべての磁力線は、図 2 における磁力線によって示唆されたように、ミラープラグ 440 で収縮部 442 を通過し、プラズマ壁の接触は起きない。さらに、疑似直流ダイバータ磁気 416 と連動してミラープラグ 440 を、磁力線をダイバータ電極 910 の上に導く、または磁力線を端部カスプ配位(図示せず)内で燃焼せるように、調節することができる。後者は安定性を向上させ、平行な電子熱伝導を抑圧する。

40

#### 【0098】

またミラープラグ 440 自体も、中性ガス制御に寄与する。ミラープラグ 440 は、ダイバータ 300 の中のガス逆流が、プラグの少量のガスコンダクタンス(わずか 500 L / s)によって著しく低減するので、FRC 形成中に石英管に吹き入れられる重水素ガスのより良好な利用が可能になる。形成管 210 内部の残りの吹き入れられたガスのほとんどは、急速にイオン化される。加えて、ミラープラグ 440 を通って流れる高密度プラズマは、有効な中性イオン化、ひいては有効なガス障壁を提供する。結果として、FRC 縁

50

層 4 5 6 からダイバータ 3 0 0 内に再利用されたほとんどの中性は、閉じ込めチャンバ 1 0 0 に戻らない。加えて、プラズマガン 3 5 0 の作動に関連した中性は（以下に論じるように）、ダイバータ 3 0 0 に大部分が閉じ込められることになる。

【 0 0 9 9 】

最後に、ミラープラグ 4 4 0 は、F R C 縁層閉じ込めを向上する傾向がある。ミラー比（プラグ / 閉じ込め磁場）が 2 0 ~ 4 0 の範囲で、北と南のミラープラグ 4 4 0 の間の長さが 1 5 m で、縁層粒子閉じ込め時間

【 数 4 】

$\tau_{\parallel}$

10

は、最高 1 0 倍まで増加する。向上する

【 数 5 】

$\tau_{\parallel}$

は、F R C 粒子閉じ込めを容易に増加させる。

【 0 1 0 0 】

セパラトリックス容積 4 5 3 からの径方向の拡散 (D) 粒子損失が、縁層 4 5 6 からの軸方向損失

20

【 数 6 】

( $\tau_{\parallel}$ )

によって均衡がとられたと仮定すると、

【 数 7 】

$$(2\pi r_s L_s)(Dn_s/\delta) = (2\pi r_s L_s \delta)(n_s/\tau_{\parallel})$$

が得られ、そこからセパラトリックス密度勾配長さを

30

【 数 8 】

$$\delta = (D\tau_{\parallel})^{1/2}.$$

と書き換えることができる。式中、 $r_s$ 、 $L_s$  および  $n_s$  はそれぞれ、セパラトリックス半径、セパラトリックス長さおよびセパラトリックス密度である。F R C 粒子閉じ込め時間は、

【 数 9 】

$$\tau_N = [\pi r_s^2 L_s \langle n \rangle] / [(2\pi r_s L_s)(Dn_s/\delta)] = (\langle n \rangle / n_s)(\tau_{\perp}\tau_{\parallel})^{1/2},$$

40

であり、式中、 $\tau_{\perp} = a^2 / D$  であり、 $a = r_s / 4$  である。物理的に、

【 数 1 0 】

$\tau_{\parallel}$

が向上すると、 $\tau_{\parallel}$  が増加し（セパラトリックス密度勾配およびドリフトパラメータが低減し）、したがって F R C 粒子損失が低減する。F R C 粒子閉じ込めにおける全体の向上は、 $n_s$  が

50

【数11】

$\tau_{||}$

と共に増加するので、概ね二次方程式より若干少ない。

【0101】

【数12】

$\tau_{||}$

10

における著しい向上はまた、縁層456が大幅な安定（すなわち、 $n = 1$ のフルート、ファイアホース、または開放システムに特有の他のMHDの不安定性がない）を維持することも必要とする。プラズマガン350の使用は、この好ましい縁部の安定性を提供する。この意味では、ミラープラグ440およびプラズマガン350は、有効な縁部制御システムを形成する。

【0102】

プラズマガン

プラズマガン350は、磁力線短絡によりFRC排除ジェット454の安定性を向上させる。プラズマガン350からのガンプラズマは、方位角運動量なしに生成され、これはFRC回転不安定性の制御に有用であることがわかる。したがって、ガン350は、より古い四重極の安定化技術を必要としない、FRCの安定性を制御する有効な手段である。結果として、プラズマガン350は、高速粒子の有益な効果を利用する、または本開示に概要を述べたように、進化したハイブリッド運動FRCレジームに近づくことを可能にする。したがって、プラズマガン350により、FRCシステム10がまさに電子遮断に適切だが、FRCの不安定性を引き起こす、かつ／または劇的な高速粒子拡散をもたらすはずである閾値より低い、サドルコイル電流で作動されることが可能になる。

20

【0103】

上に論じたミラープラグで述べたように、

【数13】

$\tau_{||}$

30

を著しく向上できる場合、供給されたガンプラズマは、縁層粒子損失速度（約1022/s）に匹敵するはずである。FRCシステム10内のガンを生成したプラズマの耐用期間は、ミリ秒の範囲である。実際には、密度 $n_e$ 約1013 cm<sup>-3</sup>およびイオン温度約200 eVのガンプラズマが、端部ミラープラグ440の間に閉じ込められるとみなしていただきたい。トラップ長さLおよびミラー率Rは、それぞれ約15 mおよび20である。クーロン衝突によるイオン平均自由行程は、 $i_i$ 約 $6 \times 10^3$  cmであり、 $i_i I_n R / R < L$ であるので、イオンはガス動的レジーム内に閉じ込められる。このレジームにおけるプラズマ閉じ込め時間は、 $g_d$ 約RL/2Vs約2 msであり、式中、Vsはイオン音速である。比較のために、これらのプラズマパラメータに対する古典的イオン閉じ込め時間は、 $c$ 約0.5  $i_i (ln R + (ln R)^{0.5})$ 約0.7 msであるはずである。異常横拡散は、原則としてプラズマ閉じ込め時間を短縮してもよい。しかし、FRCシステム10では、ボーム拡散速度を前提とする場合、ガンプラズマに対する見積もられた横閉じ込め時間は、 $> g_d$ 約2 msである。それ故、ガンは、FRC縁層456の著しい燃料補給、および全体が改良されたFRC粒子閉じ込めを提供するはずである。

40

【0104】

さらに、ガンプラズマ流を、約150～200マイクロ秒後にオンすることができ、それによってFRCの起動、移動および閉じ込めチャンバ100への融合に使用可能になる。

50

$t$  が約 0 でオンする場合 (FRC 主要バンク開始)、ガンプラズマは、この動的に形成され融合された FRC 450 を持続する役に立つ。形成 FRC から、およびガンから組み合わせた粒子インベントリは、中性ビームの捕捉、プラズマの加熱、および長い持続に充分である。 $t$  が -1 ~ 0 ms の範囲でオンする場合、ガンプラズマは、プラズマで石英管 210 を充填できる、または石英管の中に吹き入れたガスをイオン化でき、したがって、吹き入れたガスを低減する、または恐らく 0 でさえある FRC 形成が可能になる。後者は、逆バイアス磁場の高速拡散が可能になるために、充分に低温の形成プラズマが必要な場合がある。 $t$  が < -2 ms でオンする場合、プラズマ流は、形成の約 1 ~ 3 m<sup>3</sup> の磁力線容積ならびに形成部分 200 の閉じ込め領域および目標プラズマ密度がわずか 1013 cm<sup>-3</sup> である閉じ込めチャンバ 100 を充填することができ、FRC の到達前に中性ビームの構築が充分に可能である。次いで形成 FRC を形成し、得られる閉じ込め容器プラズマの中に移動できる。このような方法で、プラズマガン 350 は、広範囲の作動条件およびパラメータレジームが可能である。

#### 【0105】

##### 電気的バイアス

縁層 456 内の径方向電界の制御は、FRC の安定性および閉じ込めに様々な方法で有利である。FRC システム 10 に展開した革新的なバイアス構成要素の恩恵により、電位の様々な意図的な分散を閉じ込めチャンバ 100 内の中央閉じ込め領域の充分に外側の領域から機械全体に亘って開いた磁束表面の群に印加することができる。このような方法で、径方向磁場を、FRC 450 のすぐ外側の縁層 456 を横切って生成することができる。次いでこれらの径方向電界は、縁層 456 の方位回転を修正し、E × B 速度シアによってその閉じ込めをもたらす。次いで縁層 456 と FRC コア 453 との間のあらゆる差動回転を、シアにより FRC プラズマの内側に移動できる。結果として、縁層 456 を制御することは、FRC コア 453 に直接影響を与える。さらに、プラズマ回転における自由エネルギーも不安定性に関与できるので、この技法は、不安定性の開始および成長を制御する直接手段を提供する。FRC システム 10 では、適切な縁バイアスは、開いた磁力線の移動および回転、ならびに FRC コア回転の有効な制御を提供する。様々な提供された電極 900、905、910 および 920 の場所および形状により、磁束表面 455 の異なる群の制御が異なる独立した電位で可能になる。このような方法で、多様な異なる電界構成および強度を認識でき、それぞれはプラズマ性能に対する異なる性質の影響をもつ。

#### 【0106】

すべてのこれらの革新的バイアス技法の主要な利点は、コアおよび縁部のプラズマ挙動が、FRC プラズマの充分に外側から影響を与えることができる、すなわち、いかなる物理的な構成要素も中央高温プラズマ（中央高温プラズマは、エネルギー、磁束および粒子の損失に深刻な影響をもつはずである）に接触させる必要がないという事実である。これは、HPF の概念の性能およびすべての潜在用途に対して主要な有利な影響を有する。

#### 【0107】

##### （実験データ - HPF 作動）

中性ビームガン 600 からのビームによる高速粒子の照射は、HPF レジームを可能にする重要な役割を果たす。図 16 A、16 B、16 C、および 16 D はこの事実を示す。示されているのは、FRC の耐用期間がビームパルスの長さにどのように関連するかを示す曲線のセットである。すべての他の作動条件は、この研究を含むすべての放出に対して一定に保たれる。データは、多くの照射に亘って平均し、したがって、通常の挙動を表す。ビーム期間が長いほど、より長く存続する FRC を生成させることができて明白である。この証拠ならびにこの研究中の他の診断を見ると、ビームは安定性を高め、損失を低減することを実証している。ビームパルス長さと FRC の耐用期間との間の相互関係は、ビームトラッピングがある種のプラズマサイズ未満で効力がないので、すなわち、照射されたビームのすべての物理的サイズにおける FRC 450 の収縮が、捕捉されるまたはトラッピングされるわけではないので、完全ではない。FRC の収縮は、主に、放電の間の FRC プラズマからの正味エネルギー損失（放電のほぼ中間で約 4 MW）が、特定の実験設定

10

20

30

40

50

に関して、中性ビーム（約 2 . 5 MW）を介して F R C の中に給送される総パワーより幾分大きいという事実に起因する。ビームを容器 100 の中央平面により近接する場所に位置させることは、これらの損失を低減させ、F R C 寿命時間を延長させる傾向となるであろう。

#### 【 0 1 0 8 】

図 17 A、17 B、17 C、および 17 D は、H P F レジームを達成するための異なる構成要素の効果を示す。図 17 A、17 B、17 C、および 17 D は、時間関数として F R C 450 の耐用期間を示す典型的な曲線族を示す。すべての場合において、ビーム電力の一定の適度の量（約 2 . 5 MW）が、各放出の全期間照射される。各曲線は、構成要素の異なる組合せを表す。例えば、ミラープラグ 440、プラズマガン 350 またはゲッタリング・システム 800 からのゲッタリングのいずれもなしに F R C システム 10 を作動させると、回転の不安定性の急激な発生および F R C トポロジーの損失をもたらす。ミラープラグ 440 のみを加えると、不安定性の発生を遅らせ、閉じ込めを増加させる。ミラープラグ 440 とプラズマガン 350 の組合せを利用すると、さらに不安定性を低減し、F R C の耐用期間を増加させる。最後にガン 350 およびプラグ 440 の上にゲッタリング（この場合 T<sub>i</sub>）を加えると、最良の結果を得る、すなわち、得られる F R C は、不安定性がなく、最長の耐用期間を示す。構成要素の完全な組合せが最良の効果を生み出し、最良の目標条件をもつビームを提供することが、この実験証明から明らかである。

10

#### 【 0 1 0 9 】

図 1 に示したように、最近発見された H P F レジームは、劇的に改良された移動拳動を示す。図 1 は、従来のレジームと H P F レジームとの間の F R C システム 10 における粒子閉じ込め時間の変化を示す。見てわかるように、これは、H P F レジームにおいて 5 倍をはるかに超えて改良されている。加えて、図 1 は、従来の F R C 実験前の粒子閉じ込め時間に対して、F R C システム 10 における粒子閉じ込め時間を詳しく示す。これらの他の機械に関して、F R C システム 10 の H P F レジームは、5 倍～ほぼ 20 倍に閉じ込めを改良してきた。最後に最も重要なことだが、H P F レジームにおける F R C システム 10 の閉じ込めスケーリングの本質は、すべての以前の測定とは劇的に異なる。F R C システム 10 における H P F レジームの確立前に、様々な実証的スケーリング則が、以前の F R C 実験における閉じ込め時間を予測するためにデータから導き出された。これらのすべてのスケーリング則は、割合 R<sup>2</sup> / T<sub>i</sub> に主に依存する。式中、R は磁場のない半径（機械の物理的スケールの粗測）であり、T<sub>i</sub> は外部印加磁場において評価されたイオン・ラモア半径（印加磁場の粗測）である。従来の F R C における長い閉じ込めは、大型機械のサイズおよび / または高磁場のみで可能であることが図 1 から明らかである。従来の F R C レジーム C R において F R C システム 10 を作動することは、図 1 に示したように、これらのスケーリング則に従う傾向がある。しかし、H P F レジームは非常に優れており、はるかに良好な閉じ込めが、大型機械のサイズまたは高磁場なしに達成可能である。より重要なことには、H P F レジームは、C R レジームに比べて低減したプラズマサイズをもつ、改良された閉じ込め時間をもたらすことでも図 1 から明らかである。また、同様の傾向は、以下に説明するように磁束およびエネルギー閉じ込め時間にも見られ、その上、磁束およびエネルギー閉じ込め時間は、F R C システム 10 において 3 ~ 8 倍を超えて増加した。したがって、H P F レジームの進歩は、F R C システム 10 における F R C 平衡を持続し維持するために、わずかなビーム電力、より低い磁場およびより小さいサイズの使用、ならびに未来のより高エネルギーの機械の使用が可能になる。これらの改良に関連して、作動および構築費用を下げ、ならびに工学の複雑さを減らす。

20

30

#### 【 0 1 1 0 】

さらなる比較のために、図 18 A、18 B、18 C、および 18 D は、F R C システム 10 における代表的な H P F レジーム放出からのデータを時間関数として示す。図 18 A は、中央平面での排除磁束半径を示す。これらのより長い時間スケールに対して、誘導鋼鉄壁は、もはや磁束保存器のように良好ではなく、壁の内部にある磁気プローブは、鋼鉄を通る磁束拡散を適切に構成する壁の外側のプローブで増大される。図 13 A、13 B、1

40

50

3 C、および 13 D に示したように、従来のレジーム C R における通常の性能と比較して、H P F レジームの作動モードは、400 % を超える長い耐用期間を示す。

#### 【 0 1 1 1 】

線集積密度追跡の代表的コードは、図 18 C におけるそのアーベル逆変換相補、密度等高線と共に、図 18 B に示されている。従来の F R C レジーム C R と比較して、図 13 A、13 B、13 C、および 13 D に示したように、プラズマは、非常に安定した作動を示し、パルス全体を通してより不活発である。またピーク濃度は、H P F 照射においてわずかに低く、これは、図 18 D に示したように、より高い合計プラズマ温度（最高 2 倍まで）の結果である。

#### 【 0 1 1 2 】

図 18 A、18 B、18 C、および 18 D に示されたそれぞれの放出に対して、エネルギー、粒子および磁束閉じ込め時間はそれぞれ、0.5 ms、1 ms および 1 ms である。放出への基準時間 1 ms で、保存されたプラズマエネルギーは 2 kJ であるが、損失は約 4 MW であり、この目標を中性ビーム持続に非常に適合させる。

#### 【 0 1 1 3 】

図 19 は、新しく確立された実験用 H P F 磁束閉じ込めスケーリングの形態における、H P F 体系の全利点を要約する。図 19 から分かるように、 $t = 0.5 \text{ ms}$ 、すなわち、 $t = 0.5 \text{ ms}$  および  $t > 0.5 \text{ ms}$  の前後で測定された測定値に基づいて、磁束閉じ込め（同様に、粒子閉じ込めおよびエネルギー閉じ込め）は、所与の区分線半径 ( $r_s$ ) に対して電子温度 ( $T_e$ ) のほぼ 2 乗に伴って変化する。 $T_e$  の正の指数（負の指数ではない）に伴う本強スケーリングは、閉じ込めが、典型的には、電子温度のある指数に反比例する、従来のトカマクによって呈されるものと完全に反対である。本スケーリングの現れは、H P F 状態および大軌道（すなわち、F R C トポロジのスケールおよび / または少なくとも特性磁場勾配長スケール上の軌道）イオン集団の直接的結果である。基本的には、本新しいスケーリングは、高動作温度に実質的に有利に働き、比較的に中程度のサイズの炉を可能にする。

#### 【 0 1 1 4 】

H P F 体系が提示する利点によって、中性ビームによって駆動される F R C 持続または定常状態が、達成可能であって、プラズマ熱エネルギー、総粒子数、プラズマ半径および長さ、ならびに磁束等の包括的プラズマパラメータが、実質的減衰を伴わずに、合理的レベルで持続可能であることを意味する。比較のために、図 20 は、プロット A には、時間の関数としての F R C システム 10 内の代表的 H P F 体系放電からのデータを、プロット B には、F R C 450 が、中性ビームパルスの持続時間を通して、減衰を伴わずに持続される、時間の関数としての F R C システム 10 内の投影された代表的 H P F 体系放電のデータを示す。プロット A に関しては、約 2.5 ~ 2.9 MW の範囲内の総パワーを伴う中性ビームが、約 6 ms の活性ビームパルス長のために、F R C 450 の中に注入された。プロット A に描写される反磁性寿命時間は、約 5.2 ms であった。より最近のデータは、約 7.2 ms のプラズマ反磁性寿命時間が、約 7 ms の活性ビームパルス長を用いて達成可能であることを示す。

#### 【 0 1 1 5 】

図 16 A、16 B、16 C、および 16 D に関して前述のように、ビームパルス長と F R C 寿命時間との間の相関は、ビーム捕捉が、あるプラズマサイズを下回ると非効率的となるため、完璧ではない、すなわち、F R C 450 の物理的サイズが収縮するにつれて、注入されるビーム全てが、奪取および捕捉されることはない。F R C の収縮または減衰は、主に、放電の間の F R C プラズマからの正味エネルギー損失（放電のほぼ中間で -4 MW）が、特定の実験設定に関して、中性ビーム（約 -2.5 MW）を介して F R C の中に給送される総パワーより幾分大きいという事実に起因する。図 3 C に関して記載のように、ビーム注入が中性ビームガン 600 から中央平面に向かって角度付けられることによって、注入周期の間、F R C プラズマが収縮または別様に軸方向に縮小しても、ビーム - プラズマ結合を改良する。加えて、適切なペレット燃料補給は、必要プラズマ密度を維持する

10

20

30

40

50

であろう。

#### 【 0 1 1 6 】

プロットBは、約6 m sの活性ビームパルス長および約10 MWを若干上回る中性ビームガン600からの総ビームパワーを使用して行われたシミュレーションの結果であって、中性ビームは、約15 keVの粒子エネルギーを伴うH（または、D）中性粒子を注入するものとする。ビームのそれぞれによって注入される等価電流は、約110 Aである。プロットBに関して、デバイス軸に対するビーム注入角度は、約20°、標的半径0.19 mであった。注入角度は、範囲15°～25°内で変更ができる。ビームは、方位角的に並流方向に注入されるものとする。中性ビーム運動量注入からの正味側方力ならびに正味軸方向力は、最小限にされるものとする。プロットAと同様に、高速（H）中性粒子が、北側および南側形成FRCが閉じ込めチャンバ100内で融合する瞬間から、中性ビーム注入器600から1つのFRC450の中に注入される。

10

#### 【 0 1 1 7 】

プロットBのための基礎となったシミュレーションは、背景プラズマおよび平衡のための多次元ホールMHDソルバ、エネルギー性ビーム成分および全散乱プロセスのための完全動態学的モンテカルロベースのソルバ、ならびに全プラズマ種に対して結合された輸送方程式集合を使用して、双方向損失プロセスをモデル化する。輸送成分は、実験的に較正され、実験データベースに対して広範囲にわたってベンチマークされる。

#### 【 0 1 1 8 】

プロットBによって示されるように、FRC450の定常状態反磁性寿命時間は、ビームパルスの長さとなるであろう。しかしながら、重要な相関プロットBは、ビームがオフにされると、プラズマまたはFRCが、その前ではなく、その時間において、減衰し始めるることを示すことに留意することが重要である。減衰は、ビーム支援ではない（おそらく、ビームオフ時間を約1 m s超える）、放電中に観察され、単に、固有の損失プロセスによって駆動されるプラズマの特性減衰時間の反映であるものと類似するであろう。

20

#### 【 0 1 1 9 】

図21A、21B、21C、21Dおよび21Eに目を向けると、図に図示される実験結果は、角度付けられた中性ビームによって駆動されるFRC持続性または定常状態の達成を示す、すなわち、プラズマ半径、プラズマ密度、プラズマ温度、および磁束等のグローバルプラズマパラメータは、NBパルス持続時間と相関して減衰を伴わずに、一定レベルで持続可能である。例えば、そのようなプラズマパラメータは、本質的に、約5+m sにわたって一定に保たれている。持続性特徴を含む、そのようなプラズマ性能は、強い相関NBパルス持続時間を有し、蓄積された高速イオンに起因して、NB終了から数ミリ秒後でさえ、反磁性が残存する。図示されるように、プラズマ性能は、NB注入器および他のシステム構成要素等の多くの重要なシステムの関連付けられた電力供給源内の有限貯蔵エネルギーから生じるパルス長制約のみによって限定される。

30

中性ビーム調整可能ビームエネルギー

#### 【 0 1 2 0 】

図3A、3B、3C、3D、3E、および8に関して上記に記載のように、中性原子ビーム600は、FRCシステム10上で展開され、加熱および電流駆動を提供し、かつ高速粒子圧力を発生させる。中性原子ビーム注入器システム600を備える、個々のビーム線は、中心閉じ込めチャンバ100の周囲に位置し、図3C、3Dおよび3Eに示されるように、好ましくは、角度付けられ、中性粒子を閉じ込めチャンバ100の中央平面に向かって注入する。

40

#### 【 0 1 2 1 】

FRC持続性をさらに改良し、高プラズマ温度および上昇されたシステムエネルギーへのFRCランプアップを実証するために、本FRCシステム10は、上昇された電力および拡張されたパルス長、例えば、例示的目標のためだけに、最大30 m sパルス長を伴う約20+MWの電力の中性ビーム注入器（NB1）システム600を含む。NB1システム600は、柔軟性のあるモジュール式設計を特徴とし、ショットの間、一定ビーム電流に

50

おいて、初期のより低いビームエネルギーから上昇されたビームエネルギー、例えば、約 15 keV から約 40 keV にビームエネルギーを調整する能力を有する、NBI 注入器 615 のサブセット、例えば、8 つの NBI 注入器 615 の 4 つのセットを伴う、複数の陽イオンベースの注入器 615 を含む（図 3D および 3E 参照）。NBI 注入器 615 の本能力は、プラズマコア 450 のより効率的加熱および結果として生じる加圧を達成するために望ましい。特に、本能力は、低エネルギーレベルと比較して、ピークエネルギー動作レベルにおいて、高度に望ましい性能改良を可能にする。例えば、(i) 最大 2 倍の加熱力、(ii) 電荷交換損失における約 5 分の 1 の低減、(iii) 最大 2 倍の加熱効率である。加えて、NBI 注入器 615 によって生産可能な持続的に可変のビームエネルギーは、ランプアッププロセスの間、瞬間磁気圧力プロファイルに対して、注入され、次いで、捕捉される高速イオンの軌道パラメータの最適合致を可能にする。最後に、0.1 ~ 10 ms のランプアップ持続時間を可能にする、高速ランプアップレートは、ビームエネルギーおよび NBI 注入器 615 の電力の高速（約 1 ms またはそれ未満）調整能力とともに、付加的効果的「制御ノブ」、すなわち、ビームエネルギーおよび電力の変調を介したプラズマ成形およびプラズマの能動フィードバック制御のための制御可能特徴を提供する。

#### 【0122】

十分な加熱電力が、持続性および高プラズマ温度および上昇されたシステムエネルギーへのランプアップの両方のために、FRC 450 の加熱および加圧を可能にするために必要とされる。十分に低損失レートであると仮定して、ランプアップのレートは、主に、任意の所与の時間において NBI 注入器 615 によって FRC コア 450 内に堆積され得る、電力の量の関数である。注入ポートを通るより高い主中性ビーム電力が、したがって、常時、望ましい。

#### 【0123】

さらに、NBI 注入器 615 に起因する効果的加熱レートは、注入されるビームの特性と、全ての種の温度、電子およびイオン密度、中性濃度、および FRC コア 450 を横断する磁場のその時点での持続的瞬間プロファイルとの間の複雑な相互作用である。これらのうち、磁場プロファイルは、ランプアップの間、制御システムによって、サブミリ秒の時間スケールで慎重に変化されている一方、動圧関連プロファイルは、自己組織化プロセスから派生する固有の変化および注入プロセスによって堆積されるプラズマおよびエネルギー内の乱流を介して進化する。ビームの調整能力は、これらの変動する条件に最も最適に適合する手段を提供する。

#### 【0124】

例えば、電荷交換断面、すなわち、中性原子を形成するための高速イオンによる電子捕捉の確率は、ビームエネルギーに深く関連する。15 ~ 40 keV の範囲に関して、主電荷交換レートは、ビームエネルギーの関数として、著しく減少する。したがって、磁場の任意の所与のレベルにおいて、プラズマ内へのエネルギーの留保は、そのような磁場レベルに関して互換性がある最高エネルギーにおいて粒子を注入するとき最高となる（とりわけ、これは、注入される粒子のエネルギーが閉じ込めシステムの内壁内に適合する捕捉イオン軌道半径をもたらすことを要求する）。

#### 【0125】

全体的加熱効率に及ぼすプロファイル効果の別の実施例は、電力が堆積される場所に関する。より高いビームエネルギーは、典型的には、コアと比べて FRC 周縁における比較的により高いエネルギー堆積につながるであろう。磁場を上昇させるが、ビームエネルギーを同一に保つことは、より緊密な捕捉イオン軌道、それに相応して、FRC コアプラズマへのより高い電力結合をもたらすであろう。これらの事実は、次いで、エネルギー留保にも同様に著しく影響を及ぼす。例えば、周辺に堆積されるエネルギーは、開放磁力線構造に沿ってシステムからはるかに容易に移送される一方、コアに堆積されるエネルギーは、より低い交差磁場移送時間に起因して、比較的によりゆっくりと損失される。したがって、磁場ランプアップとビームエネルギーの適切な増加の緊密な協調が、望ましい。

10

20

30

40

50

**【 0 1 2 6 】**

ビームシステム 6 0 0 は、 $0 . 1 \sim 1 0 \text{ m s}$  の範囲内の電圧の高速ランプアップのために設計される。これは、それぞれ、2倍および10倍、イオン温度および電子温度を増加させる潜在性を提供し、時間スケールにおいても、典型的巨視的不安定性成長時間より短くなる。したがって、プラズマ安定性は、基本的に、動作信頼性および再現性と同様に増加される。

**【 0 1 2 7 】**

ビームが能動フィードバックシステムの一部として利用され得るように、 $0 . 0 5 \sim 1 \text{ m s}$  の可変電圧上昇時間は、十分に迅速な応答時間を提供する。このように、ビーム変調は、マクロおよびマイクロ安定性を制御するために使用されることができる。例えば、ビームエネルギーを変化させる（それによって、半径方向エネルギー堆積パターンを偏移させることによって、半径方向電力堆積プロファイルを一時的に偏移させることは、不安定なプラズマモードの発生に対抗し得る、圧力勾配に影響を及ぼし得る。図 3 D および 3 E に示される F R C システム 1 0 は、本能力を高速磁気フィードバックとともに利用して、内部傾斜、回転レート、ドリフト波発生、および他の動作シナリオを制御する。

10

**【 0 1 2 8 】**

図 2 5 は、本 F R C システム 1 0 の N B I 注入器 6 1 5 の例証を描写する。N B I 注入器 6 1 5 は、例示的実施形態では、アーク駆動部 6 5 0 と、プラズマボックス 6 5 1 と、抽出および加速グリッドの三極管または四極管群を備える、イオン光学システム 6 5 2 と、照準ジンバル 6 5 3 と、例えば、T i アーク蒸発器等のアーク蒸発器 6 5 5 、例えば、増加されるクライオポンピングのために構成されるリブ付き表面構造等の表面構造を有する、クライオポンプ 6 5 6 、および非中性化イオンを除去するための偏向磁石 6 5 6 を備える、中性化器 6 5 4 と、断続ビーム特性評価、診断、および再較正のための挿入可能熱量計 6 5 9 を含む、コリメート開口 6 5 8 とを含むように示される。

20

**【 0 1 2 9 】**

より具体的には、図 2 6 を参照すると、調整可能ビームシステムの実装は、示されるように、好ましくは、三極管タイプイオン光学システム (= I O S ) 6 6 0 に基づく。本概念は、加速 - 減速スキームである。図 2 6 に図示されるように、第 1 のグリッド G 1 は、電圧 V 1 に設定される一方、第 2 のグリッド G 2 は、電圧 V 2 に設定され、最終グリッド G 3 は、電圧 V 3 に設定される。抽出されるイオンは、最初に、G 1 と G 2 との間の間隙を通して横断しながら、エネルギー  $E 1 = e^* (V 1 - V 2)$  まで加速される ( $e$  は、ここでは、イオンの電荷を指す)。それらは、次いで、 $E 2 = E 1 + e^* (V 2 - V 3)$  となるように、G 2 と G 3 との間の間隙で減速される。電圧は、典型的には、 $V 1 > V 2 < V 3$  となるように調節される。適切な個々の電力供給源 P S 1 、P S 2 、P S 3 に基づいて、グリッド電圧は、放出されるイオン 6 6 2 の出力を変化させるように、パルスの間、徐々に調節ができる。例えば、水素原子のビームパルスから始めると、作業電圧は、 $V 1 = 1 5 \text{ kV}$  、 $V 2 = - 2 5 \text{ kV}$  、および  $V 3 = 0 \text{ V}$  に調節されてもよい。初期ビームイオンは、次いで、最初に、 $4 0 \text{ keV}$  まで加速され、次いで、 $1 5 \text{ keV}$  のエネルギーを伴って、I O S から現れるであろう。パルスの後半において、電力供給源は、 $V 1 = 4 0 \text{ kV}$  、 $V 2 = - 1 \text{ kV}$  、 $V 3 = 0 \text{ V}$  を提供するように切り替えられることがある。第 2 の間隙におけるビーム減速は、次いで、事実上、不在となり、約  $4 0 \text{ keV}$  の出力ビームエネルギーをもたらすであろう。電力供給源はそれぞれ、個々に、制御可能であって、適切な電圧変調を提供する。初期ビームイオンは、標準的アークまたは R F ベースのプラズマ源 P S の規模で引き出される。I O S 6 6 0 から現れた後、ビームイオン 6 6 2 は、中性化器 6 6 4 を横断し、高速イオンは、中性化器 6 6 4 内に存在する低温中性ガスからの電子の電荷交換を介して、中性イオンに変換される。適切なクライオポンピングは、中性ガスが中性化器 6 6 4 の下流オリフィスから漏出することを防止する。中性化器の終了時、また、非中性化高速イオン 6 6 3 の除去を提供する、適切な屈曲磁石 6 6 6 と、高速イオンおよびそのエネルギーを吸収するための関連付けられたイオンダンプ 6 6 8 とが存在する。現れる原子ビーム 6 7 0 は、次いで、適切な開口 6 7 2 0 を通して通過され

30

40

50

、ビーム発散を低減させ、良好にコリメートされた中性原子流を反応器のコアに向かって提供する。

#### 【 0 1 3 0 】

代替バージョンでは、IOSは、四極管設計に基づく。この場合、IOSは、三極管の場合に関して説明されたのと同一の加速・減速原理を有する4つのグリッドから成る。当業者は、システム構成要素と動作原理との間の類似性を容易に認識するであろう。第4のグリッドの導入は、さらなる微調整の可能性およびより多くの全体的な動作柔軟性を提供する。

#### 【 0 1 3 1 】

本明細書に提供される例示的実施形態は、米国仮特許出願第62/414,574号（これは、参考することによって本明細書に組み込まれる）に説明されている。

（プラズマ安定性および軸方向位置制御）

#### 【 0 1 3 2 】

FRC不安定性の従来の解決策は、典型的には、半径方向に不安定になることを犠牲として、軸方向における安定性を提供する、または軸方向に不安定になることを犠牲として、半径方向に安定性を提供するが、安定性を同時に両方向に提供しない。一見すると、プラズマ位置が横方向または半径方向に安定する平衡が、軸方向に不安定になることを犠牲として、軸対称性となる所望の性質を有する。前述に照らして、本明細書に提供される実施形態は、半径方向および軸方向の両方におけるFRCプラズマの安定性と、FRCプラズマの平衡の軸方向安定性性質から独立して、FRCプラズマ閉じ込めチャンバの対称軸に沿ったFRCプラズマの軸方向位置制御とを促進する、システムおよび方法を対象とする。しかしながら、軸方向位置不安定性は、FRCプラズマ軸方向位置を制御する外部軸対称コイルのセットを使用して能動的に制御される。本システムおよび方法は、プラズマと同心の外部コイルのセットに印加される電圧に作用し、非線形制御技法を使用することによって、プラズマ平衡の安定性性質から独立して、FRCプラズマ軸方向位置のフィードバック制御を提供する。

#### 【 0 1 3 3 】

本明細書に提示される実施形態は、FRCの軸方向に不安定な平衡を利用して、軸方向不安定性を安定化または制御しながら、半径方向安定性を強制する。このように、軸方向および半径方向の両方における安定性が、得られることができる。制御方法論は、外部または平衡磁場を変更し、軸方向に不安定になることを犠牲として、FRCプラズマを半径方向または横方向に安定させ、次いで、閉じ込めチャンバの中央平面の周囲のオーバーシュートおよび／または発振を最小限にしながら、FRCプラズマ位置を中央平面に向かって即座に回復するために、半径方向コイル電流に作用するように設計される。本解決策の利点は、制御のために要求されるアクチュエータの複雑性を低減させることである。複数の自由度を伴う従来の解決策と比較して、本明細書に提示される実施形態の方法論は、1自由度を用いて、FRCプラズマ回転軸に沿った制御問題に対する複雑性を低減させる。

#### 【 0 1 3 4 】

軸方向不安定プラズマをもたらす、コイル電流中の波形、燃料補給、および中性ビームパワーの組み合わせは、プラズマを軸方向不安定状況に設定する、プラズマ制御シナリオを定義する。本シナリオは、シミュレーションもしくは実験における以前の知識、または軸方向に不安定な平衡を維持するように制御されたフィードバックを使用して、事前にプログラムされることがある。プラズマ位置は、平衡の安定性性質から独立して、放電の間に制御されるべきであり、例えば、制御スキームは、軸方向に安定または軸方向に不安定なプラズマのいずれかに対して限界まで作用すべきである。制御され得る最も軸方向に不安定なプラズマは、容器の表皮時間に匹敵する、成長時間を有する。

#### 【 0 1 3 5 】

ここで、半径方向および軸方向の両方におけるFRCプラズマの安定性と、FRCプラズマ閉じ込めチャンバの対称軸に沿ったFRCプラズマの軸方向位置制御とを促進する、システムおよび方法に目を向けると、図27は、簡略化されたスキームを示し、軸方向位置

10

20

30

40

50

制御機構 510 の例示的実施形態を図示する。閉じ込めチャンバ 100 内に示される回転 FRC プラズマ 520 は、プラズマ電流 522 と、軸方向変位方向 524 とを有する。平衡場（図示せず）が、例えば、擬似直流コイル 412（図 2、3A、3D、および 3E 参照）等の対称電流成分によってチャンバ 100 内に生産される。平衡場は、軸変位方向 524 に正味力を生産しないが、横方向 / 半径方向または軸方向のいずれかに安定プラズマを生産するように調整されることがある。本明細書に提示される実施形態の目的のために、平衡場は、横方向 / 半径方向安定 FRC プラズマ 520 を生産するように調整される。前述のように、これは、軸方向不安定性をもたらし、したがって、軸変位方向 524 における FRC プラズマ 520 の軸変位をもたらす。FRC プラズマ 520 が、軸方向に移動するにつれて、反対称である、すなわち、閉じ込めチャンバ 100 の中央平面の両側の閉じ込めチャンバ 100 の壁において逆方向にある、電流 514 および 516 を誘発する。FRC プラズマ 520 は、これらのタイプの電流成分を容器内と、また、外部コイル内との両方に誘発する。本反対称電流成分 514 および 516 は、半径方向場を生産し、これは、トロイダルプラズマ電流 522 と相互作用し、FRC プラズマ 520 の移動に対向する力を生産し、本力の結果は、プラズマ軸変位を減速させることである。これらの電流 514 および 516 は、閉じ込めチャンバ 100 の抵抗率に起因して、時間に伴って、徐々に消散する。

#### 【0136】

中央平面の両側に閉じ込めチャンバ 100 の周りに配置される、半径方向場コイル 530 および 531 は、コイル 530 および 531 内で逆方向に誘発される電流 532 ならびに 534 に起因して、付加的半径方向場成分を提供する。半径方向場コイル 530 および 531 は、含有容器 100 の内部または外部に位置付けられ得る、軸対称コイルのセットを備えてもよい。半径方向コイル 530 および 531 は、擬似直流コイル 412（図 2、3A、3D、および 3E 参照）と同様に、含有容器 100 の外部に位置付けられるように示される。コイル 530 および 531 のそれぞれまたはコイルのセットは、中央平面の対向側のコイルと異なる電流を搬送し得るが、電流は、含有容器 100 の中央平面に対して反対称であり、中央平面に沿って  $B_z = 0$ 、 $B_r = 0$  を伴う磁場構造を生産する。半径方向場コイル 530 および 531 は、トロイダルプラズマ電流 522 と相互作用し、軸方向力を生産する、補完的半径方向場成分を生成する。軸方向力は、順に、プラズマを閉じ込めチャンバ 100 の中央平面に向かって後退させる。

#### 【0137】

制御機構 510 は、機械中央平面の周囲のオーバーシュートおよび / または発振を最小限にしながら、プラズマ位置を中央平面に向かって即座に復元させるために、半径方向場コイル電流に作用するように構成される、制御システムを含む。制御システムは、半径方向場コイル 530 および 531、擬似直流コイル 412、それらのそれぞれの電力供給源、および例えば、磁気センサ等の他の構成要素に動作可能に結合されるプロセッサを含み、プラズマ位置、プラズマ速度、およびアクティブコイル電流測定値を提供する。プロセッサは、本願に説明される算出および分析を行うように構成されてもよく、非一過性コンピュータ可読媒体を含む、1つまたは複数のメモリを含む、または、1つまたは複数のメモリに通信可能に結合されてもよい。これは、マイクロコントローラ、縮小命令セットコンピュータ（RISC）、特定用途向け集積回路（ASIC）、論理回路、および本明細書に説明される機能を実行可能な任意の他の回路またはプロセッサを使用するシステムを含む、プロセッサベースまたはマイクロプロセッサベースのシステムを含んでもよい。前述の実施例は、例示にすぎず、したがって、用語「プロセッサ」または「コンピュータ」の定義および / もしくは意味をいかようにも限定することを意図するものではない。

#### 【0138】

プロセッサの機能は、ソフトウェアルーチン、ハードウェア構成要素、またはそれらの組み合わせのいずれかを使用して実装されてもよい。ハードウェア構成要素は、例えば、集積回路または離散電子構成要素を含む、種々の技術を使用して実装されてもよい。プロセッサユニットは、典型的には、可読 / 書込可能メモリ記憶デバイスを含み、典型的には、

10

20

30

40

50

メモリ記憶デバイスに書き込みかつ／またはメモリ記憶デバイスを読み取るためのハードウェアおよび／またはソフトウェアを含む。

#### 【 0 1 3 9 】

プロセッサは、コンピューティングデバイス、入力デバイス、ディスプレイユニット、および、例えば、インターネットにアクセスするためのインターフェースを含んでもよい。コンピュータまたはプロセッサは、マイクロプロセッサを含んでもよい。マイクロプロセッサは、通信バスに接続されてもよい。コンピュータまたはプロセッサはまた、メモリを含んでもよい。メモリは、ランダムアクセスメモリ( R A M )および読み取り専用メモリ( R O M )を含んでもよい。コンピュータまたはプロセッサはまた、ハードディスクドライブ、または、フロッピー(登録商標)ディスクドライブ、光ディスクドライブ、および同等物等のリムーバブル記憶ドライブであり得る、記憶デバイスを含んでもよい。記憶デバイスはまた、コンピュータプログラムまたは他の命令をコンピュータもしくはプロセッサの中にロードするための他の類似手段であってもよい。

10

#### 【 0 1 4 0 】

プロセッサは、入力データを処理するために、1つまたは複数の記憶要素内に記憶される、命令のセットを実行する。記憶要素はまた、所望または必要とされるデータもしくは他の情報を記憶してもよい。記憶要素は、処理機械内の情報源または物理的メモリ要素の形態であってもよい。

#### 【 0 1 4 1 】

半径方向場コイルアクチュエータを使用して、軸方向に安定または不安定 F R C 構成の位置を制御する問題は、スライディングモード制御として知られる非線形制御理論の分岐を使用して解決される。システム状態(スライディング表面)の線形関数は、所望の漸近的安定(スライディング)挙動を伴うエラー信号として作用する。スライディング表面は、広範囲の F R C 動的パラメータ内で漸近的安定性を呈するためのリアブノフ理論を使用して設計される。提案される制御スキームは、次いで、スライディング表面において使用されるパラメータを再調整する必要なく、軸方向に安定および不安定の両方のプラズマのために使用されることができる。本性質は、前述のように、平衡が、F R C 放電の異なる位相において軸方向に安定な平衡と軸方向に不安定な平衡との間で遷移する必要があり得るため、有利である。

20

#### 【 0 1 4 2 】

制御スキーム 5 0 0 の構成は、図 2 8 に示される。低域通過フィルタは、所望の制御帯域幅内の切替周波数を制限する。1サンプル遅延を伴うサンプリングおよび信号伝送を要求する、デジタル制御ループが、仮定される。エラー信号(スライディング表面)は、コイル電流、プラズマ位置、およびプラズマ速度の線形組み合わせである。プラズマ位置およびプラズマの速度は、外部磁気測定から得られ得る。アクティブコイルシステム内の電流は、標準的方法によって測定することができる。

30

#### 【 0 1 4 3 】

コイル電流およびプラズマ位置が、位置制御を実装するために要求される。プラズマ速度が、性能を改良するために要求されるが、随意である。本エラー信号の非線形関数(リレー制御法則)は、中央平面对称コイルに接続される電力供給源の対毎の離散電圧レベルを生成する。中央平面对称コイルは、同一強度であるが、反対の符号のリレー電圧を供給される。これは、半径方向場成分を生成し、プラズマ位置を中央平面に向かって復元させる。

40

#### 【 0 1 4 4 】

制御スキームの実行可能性を実証するために、精密なプラズマモデルが、プラズマ動態をシミュレートするために使用される。モデルは、磁石幾何学形状を利用する。プラズマ電流分布は、プラズマおよび容器のみが検討されるとき、2 m s の成長時間を伴う軸方向に不安定な平衡に対応する。電力供給源は、離散電圧レベル、典型的には、8 0 0 V ステップを用いて作用すると仮定される。

#### 【 0 1 4 5 】

図 2 9 は、2 0 c m だけ軸方向に変位されたプラズマを中央平面に戻すために要求される

50

コイルピーク電流およびランプ率とともに、コイルに印加される電圧とプラズマ位置整定時間との間の関係を強調する、いくつかのプラズマ制御シミュレーションを示す。これらのスライディングモード軸方向位置制御シミュレーション実施例は、4つの対の外部トリムコイルを使用して、0 . 3 Tで実行された。4つの例は、200 V(黒正方形)、400 V(黒円形)、800 V(黒三角形)、および1600 V(白正方形)刻みの離散電圧レベルを伴う電力供給源と対応するように示される。全ての4つの例に関して、制御帯域幅は、16 kHzであり、サンプリング周波数は、32 kHzである。プラズマ位置(上)、最外コイル対内の電流(中央)、およびコイル電流ランプ率(下)が、示される。プラズマ変位は、20 cmに到達するまで、不安定のままである。本時点では、フィードバック制御が、印加される。

10

#### 【0146】

シミュレーション結果は、以下を示す。

- 1 . 5 ms以内にプラズマを中央平面に戻すために(黒正方形トレース)、0 . 5 MA / sのコイルランプアップ率が十分であり、200 V電力供給源を要求する。
- 2 . 2 . 3 ms以内にプラズマを中央平面に戻すために(黒円形トレース)、1 MA / sのコイルランプアップ率が十分であり、400 V電力供給源を要求する。
- 3 . 1 . 3 ms以内にプラズマを中央平面に戻すために(黒三角形トレース)、2 MA / sのコイルランプアップ率が十分であり、800 V電力供給源を要求する。
- 4 . 1 . 0 ms以内にプラズマを中央平面に戻すために(白正方形トレース)、4 MA / sのコイルランプアップ率が十分であり、1600 V電力供給源を要求する。

20

#### 【0147】

上方に位置する第3の例(2 MA / sランプ率例)に関する全てのトリムコイルのためのピーク電流はまた、トリムコイル位置の関数として図30に示される。スライディングモード軸方向位置制御シミュレーション実施例は、3つのレベル(+800 V、0、-800 V)を伴う電力供給源、制御帯域幅16 kHz、およびサンプリングレート32 kHzを使用して、4つの対の外部トリムコイルを使用して0 . 3 Tで実行される。1 . 3 ms以内にプラズマを中央平面に戻すために、2 MA / sのコイルランプアップ率が、要求される。全てのコイル対において要求されるピーク電流は、1 . 5 k A未満である。要求される実際の切替周波数(約2 kHz)は、制御システム帯域幅を優に下回る。

30

#### 【0148】

制御システムはまた、プラズマ位置を伴わない、コイル電流およびプラズマ速度のみの関数である、標的表面を実装することができる。この場合、軸方向位置制御ループは、制御ではなく、軸方向動態の安定化のみを提供する。これは、プラズマが、準安定状況にあり、その軸に沿ってゆっくりとドリフトし得ることを意味する。位置制御が、次いで、プラズマ区分線と容器との間のプラズマ隙間を制御する、付加的フィードバックループを使用して提供され、故に、これは、プラズマ形状および位置制御を同時に行う。

#### 【0149】

類似制御システムが使用される、別のプラズマ閉じ込めデバイスは、トカマク型である。プラズマ閉じ込めを維持するために、トカマク型におけるプラズマ電流は、それぞれ、プラズマ密度およびトロイダル場にほぼ比例する、下限と上限との間に保たれなければならない。高プラズマ密度で動作するために、プラズマ電流は、増加されなければならない。同時に、ポロイダル場は、可能な限り低く保たれなければならず、したがって、q安全率は、 $q = 2$ を上回る。これは機械軸方向に沿ってプラズマを伸長させることによって達成され、境界磁場をその安全限界を上回って増加させずに、大プラズマ電流に適合することを可能にする(故に、高プラズマ密度を可能にする)。これらの伸長プラズマは、機械軸方向(トカマク型用語では、垂直方向として知られる)に沿って不安定であり、また、プラズマ安定化機構を要求する。トカマク型における垂直プラズマ位置制御もまた、半径方向場コイルのセットを使用して復元され、したがって、RFC位置制御問題に非常に類似する。しかしながら、トカマク型において安定化を要求する理由およびRFCにおいて安定化を要求する理由は、異なる。トカマク型では、プラズマ垂直不安定性は、大プラズマ

40

50

電流で動作するために課される犠牲であり、高トロイダル場を伴って動作するためにプラズマ伸長を要求する。FRCの場合、プラズマ不安定性は、横方向安定性を得るために課される犠牲である。トカマク型は、構成を安定化させる、トロイダル場を有し、したがって、それらは、横方向安定化を必要としない。

#### 【0150】

本開示のある実施形態によると、磁場反転配位(FRC)を伴う磁場を発生および維持するための方法は、閉じ込めチャンバ内でプラズマの周りにFRCを形成するステップと、第1のビームエネルギーと第2のビームエネルギーとの間の複数の中性ビームのビームエネルギーを調整しながら、複数の中性ビームをFRCプラズマの中に注入するステップであって、第2のビームエネルギーは、第1のビームエネルギーと異なる、ステップとを含む。

10

#### 【0151】

本開示のさらなる実施形態によると、第2のビームエネルギーは、第1のビームエネルギーより高い。

#### 【0152】

本開示のさらなる実施形態によると、複数の中性ビームは、注入ショットの持続時間の間、第1のビームエネルギーと第2のビームエネルギーとの間で切り替わる。

#### 【0153】

本開示のさらなる実施形態によると、第1および第2のビームエネルギーは、約15~40keVの範囲内である。

20

#### 【0154】

本開示のさらなる実施形態によると、本方法はさらに、能動フィードバックプラズマ制御システムから受信されたフィードバック信号によって、複数の中性ビームのビームエネルギーを制御するステップを含む。

#### 【0155】

本開示のさらなる実施形態によると、本方法はさらに、能動フィードバックプラズマ制御システムから受信されたフィードバック信号によって、複数の中性ビームのビームエネルギーを制御するステップを含む。

30

#### 【0156】

本開示のさらなる実施形態によると、複数の中性ビームのビームエネルギーを制御するステップは、複数の中性ビームのビームエネルギーを調節し、半径方向ビーム電力堆積プロファイルを調節し、圧力勾配値を調節するステップを含む。

#### 【0157】

本開示のさらなる実施形態によると、本方法はさらに、減衰を伴わずに、FRCを一定値またはほぼ一定値に維持し、閉じ込めチャンバの平面を通して中央に向かってある角度で、高速中性原子のビームを中性ビーム注入器からFRCプラズマの中に注入することによって、プラズマ温度を約1.0keV超まで上昇させるステップを含む。

#### 【0158】

本開示のさらなる実施形態によると、プラズマ温度を上昇させるステップは、温度を約1.0keVから約3.0keVまで上昇させるステップを含む。

40

#### 【0159】

本開示のさらなる実施形態によると、プラズマ温度を上昇させるステップは、温度を約1.0keVから約3.0keVまで上昇させるステップを含む。

#### 【0160】

本開示のさらなる実施形態によると、本方法はさらに、閉じ込めチャンバの周りに延在する擬似直流コイルを用いて、閉じ込めチャンバ内で磁場を発生させ、閉じ込めチャンバの対向端部の周りに延在する擬似直流ミラーコイルを用いて、閉じ込めチャンバの対向端部内でミラー磁場を発生させるステップを含む。

#### 【0161】

本開示のさらなる実施形態によると、本方法はさらに、閉じ込めチャンバの周りに延在す

50

る擬似直流コイルを用いて、閉じ込めチャンバ内で磁場を発生させ、閉じ込めチャンバの対向端部の周りに延在する擬似直流ミラーコイルを用いて、閉じ込めチャンバの対向端部内でミラー磁場を発生させるステップを含む。

#### 【 0 1 6 2 】

本開示のさらなる実施形態によると、F R C を形成するステップは、形成 F R C を閉じ込めチャンバに結合される対向する第 1 および第 2 の形成区分内に形成し、形成 F R C を第 1 および第 2 の形成区分から閉じ込めチャンバの平面を通して中央に向かって加速させるステップであって、2 つの形成 F R C は、F R C を形成するように融合する、ステップを含む。

#### 【 0 1 6 3 】

本開示のさらなる実施形態によると、F R C を形成するステップは、形成 F R C を閉じ込めチャンバの平面を通して中央に向かって加速させながら、形成 F R C を形成するステップと、形成 F R C を形成し、次いで、閉じ込めチャンバの平面を通して中央に向かって形成 F R C を加速させるステップとのうちの 1 つを含む。

#### 【 0 1 6 4 】

本開示のさらなる実施形態によると、形成 F R C を第 1 および第 2 の形成区分から閉じ込めチャンバの平面を通して中央に向かって加速させるステップは、第 1 および第 2 の形成区分から、閉じ込めチャンバと第 1 および第 2 の形成区分とに介在する閉じ込めチャンバの両端に結合される第 1 および第 2 の内側ダイバータを通して、形成 F R C を通過させるステップを含む。

#### 【 0 1 6 5 】

本開示のさらなる実施形態によると、形成 F R C を第 1 および第 2 の形成区分から第 1 および第 2 の内側ダイバータを通して通過させるステップは、形成 F R C が第 1 および第 2 の形成区分から第 1 および第 2 の内側ダイバータを通して通過するにつれて、第 1 および第 2 の内側ダイバータを非アクティブ化するステップを含む。

#### 【 0 1 6 6 】

本開示のさらなる実施形態によると、本方法はさらに、F R C の磁束表面を第 1 および第 2 の内側ダイバータの中に誘導するステップを含む。

#### 【 0 1 6 7 】

本開示のさらなる実施形態によると、本方法はさらに、F R C の磁束表面を形成区分の端部に結合される第 1 および第 2 の外側ダイバータの中に誘導するステップを含む。

#### 【 0 1 6 8 】

本開示のさらなる実施形態によると、本方法はさらに、形成区分およびダイバータの周りに延在する擬似直流コイルを用いて磁場を形成区分および第 1 および第 2 の外側ダイバータ内に発生させるステップを含む。

#### 【 0 1 6 9 】

本開示のさらなる実施形態によると、本方法はさらに、形成区分およびダイバータの周りに延在する擬似直流コイルを用いて磁場を形成区分および第 1 および第 2 の内側ダイバータ内に発生させるステップを含む。

#### 【 0 1 7 0 】

本開示のさらなる実施形態によると、本方法はさらに、擬似直流ミラーコイルを用いて、ミラー磁場を第 1 および第 2 の形成区分と第 1 および第 2 の外側ダイバータとの間に発生させるステップを含む。

#### 【 0 1 7 1 】

本開示のさらなる実施形態によると、本方法はさらに、形成区分とダイバータとの間の狭窄部の周りに延在する擬似直流ミラープラグコイルを用いて、ミラープラグ磁場を第 1 および第 2 の形成区分と第 1 および第 2 の外側ダイバータとの間の狭窄部内で発生させるステップを含む。

#### 【 0 1 7 2 】

本開示のさらなる実施形態によると、本方法はさらに、擬似直流ミラーコイルを用いて、

10

20

30

40

50

ミラー磁場を閉じ込めチャンバと第1および第2の内側ダイバータとの間に発生させ、擬似直流薄型ネッキングコイルを用いて、ネッキング磁場を第1および第2の形成区分と第1および第2の内側ダイバータとの間に発生させるステップを含む。

**【0173】**

本開示のさらなる実施形態によると、本方法はさらに、チャンバに結合されるサドルコイルを用いて、磁気双極場および磁気四重極場のうちの1つをチャンバ内で発生させるステップを含む。

**【0174】**

本開示のさらなる実施形態によると、本方法はさらに、ゲッタリングシステムを用いて、チャンバの内部表面および第1および第2の形成区分の内部表面と、閉じ込めチャンバと第1および第2の形成区分とに介在する第1および第2のダイバータと、第1および第2の形成区分に結合される第1および第2の外側ダイバータとを調整するステップを含む。

10

**【0175】**

本開示のさらなる実施形態によると、ゲッタリングシステムは、チタン堆積システムおよびリチウム堆積システムのうちの1つを含む。

**【0176】**

本開示のさらなる実施形態によると、本方法はさらに、軸方向に搭載されるプラズマガンからプラズマをFRCの中に軸方向に注入するステップを含む。

20

**【0177】**

本開示のさらなる実施形態によると、本方法はさらに、FRCの縁層内の半径方向電場プロファイルを制御するステップを含む。

**【0178】**

本開示のさらなる実施形態によると、FRCの縁層内の半径方向電場プロファイルを制御するステップは、バイアス電極を用いて、電位の分布をFRCの開磁束面群に印加するステップを含む。

30

**【0179】**

本開示のさらなる実施形態によると、本方法はさらに、FRCプラズマを長手方向軸の周りに軸対称に位置付けるために、閉じ込めチャンバの長手方向軸に対して直角の半径方向においてFRCプラズマを安定化させ、FRCプラズマを閉じ込めチャンバの中央平面の周りに軸対称に位置付けるために、長手方向軸に沿った軸方向においてFRCプラズマを安定化させるステップを含む。

**【0180】**

本開示のさらなる実施形態によると、本方法はさらに、チャンバの周りに延在する擬似直流コイルを用いて、印加磁場をチャンバ内で発生させるステップを含む。

30

**【0181】**

本開示のさらなる実施形態によると、本方法はさらに、FRCプラズマを半径方向に安定化させるステップは、印加磁場を調整し、半径方向安定性および軸方向不安定性をFRCプラズマ内に誘発するステップを含む。

40

**【0182】**

本開示のさらなる実施形態によると、FRCプラズマを軸方向に安定化させるステップは、第1および第2の半径方向磁場を生成するステップを含み、第1および第2の半径方向磁場は、FRCと相互作用し、FRCプラズマを軸方向に移動させ、FRCプラズマを中央平面の周りに軸対称に位置付ける。

**【0183】**

本開示のさらなる実施形態によると、本方法はさらに、コンパクトトロイド(CT)プラズマを第1および第2のCT注入器からFRCプラズマの中に閉じ込めチャンバの中央平面に向かってある角度で注入するステップを含み、第1および第2のCT注入器は、閉じ込めチャンバの中央平面の対向側で直径方向に対向する。

**【0184】**

本開示のさらなる実施形態によると、磁場反転配位(FRC)を伴う磁場を発生および維

50

持するためのシステムは、閉じ込めチャンバと、第1および第2の直径方向に対向する内側ダイバータに結合される、第1および第2の直径方向に対向するFRC形成区分と、第1および第2の形成区分に結合される、第1および第2のダイバータと、複数のプラズマガン、1つ以上のバイアス電極、および第1および第2のミラープラグのうちの1つ以上のものであって、複数のプラズマガンは、第1および第2のダイバータ、第1および第2の形成区分、および閉じ込めチャンバに動作可能に結合される、第1および第2の軸方向プラズマガンを含み、1つ以上のバイアス電極は、閉じ込めチャンバ、第1および第2の形成区分、および第1および第2の外側ダイバータのうちの1つ以上のもの内に位置付けられ、第1および第2のミラープラグは、第1および第2の形成区分と第1および第2のダイバータとの間に位置付けられる、複数のプラズマガン、1つ以上のバイアス電極、および第1および第2のミラープラグのうちの1つ以上のものと、閉じ込めチャンバおよび第1および第2のダイバータに結合される、ゲッタリングシステムと、閉じ込めチャンバに結合され、閉じ込めチャンバの中央平面に向かって角度付けられる、複数の中性原子ビーム注入器であって、複数の中性原子ビーム注入器のうちの1つ以上のものは、第1のビームエネルギーと第2のビームエネルギーとの間で調整可能であって、第2のビームエネルギーは、第1のビームエネルギーと異なる、複数の中性原子ビーム注入器と、閉じ込めチャンバ、第1および第2の形成区分、および第1および第2のダイバータの周囲に位置付けられる、複数の擬似直流コイルと、第1および第2の形成区分と第1および第2のダイバータとの間に位置付けられる、第1および第2の擬似直流ミラーコイルのセットとを備える、磁気システムとを備える。

10

20

## 【0185】

本開示のさらなる実施形態によると、第2のビームエネルギーは、第1のビームエネルギーより高い。

## 【0186】

本開示のさらなる実施形態によると、複数の中性ビームは、注入ショットの持続時間の間、第1のビームエネルギーと第2のビームエネルギーとの間で切り替わるように構成される。

## 【0187】

本開示のさらなる実施形態によると、第1および第2のビームエネルギーは、約15～40keVの範囲内である。

30

## 【0188】

本開示のさらなる実施形態によると、本システムはさらに、複数の中性ビームのビームエネルギーを制御するように構成される能動フィードバックプラズマ制御システムを備える。

## 【0189】

本開示のさらなる実施形態によると、本システムは、FRCを発生させ、中性ビームが、プラズマの中に注入されている間、減衰を伴わずに、FRCを維持し、プラズマ温度を約1.0keVから3.0keVまで上昇させるように構成される。

## 【0190】

本開示のさらなる実施形態によると、第1および第2のダイバータは、第1および第2の形成区分と閉じ込めチャンバとに介在する、第1および第2の内側ダイバータを備え、第1および第2の形成区分に結合される、第1および第2の外側ダイバータをさらに備え、第1および第2の形成区分は、第1および第2の内側ダイバータと第1および第2の外側ダイバータとに介在する。

40

## 【0191】

本開示のさらなる実施形態によると、本システムはさらに、第1および第2の内側および外側ダイバータ、第1および第2の形成区分、および閉じ込めチャンバに動作可能に結合される、第1および第2の軸方向プラズマガンを備える。

## 【0192】

本開示のさらなる実施形態によると、本システムはさらに、閉じ込めチャンバに結合される、2つ以上のサドルコイルを備える。

50

**【 0 1 9 3 】**

本開示のさらなる実施形態によると、形成区分は、FRCを発生させ、それを閉じ込めチャンバの中央平面に向かって平行移動させるためのモジュール化された形成システムを備える。

**【 0 1 9 4 】**

本開示のさらなる実施形態によると、バイアス電極は、閉じ込めチャンバ内に位置付けられ、開放磁力線に接触するための1つ以上の点電極と、閉じ込めチャンバと第1および第2の形成区分との間にあって、方位角的に対称に遠端束層を充電するための環状電極のセットと、第1および第2のダイバータ内に位置付けられ、複数の同心磁束層を充電するための複数の同心状にスタックされた電極と、開放磁束を捕捉するためのプラズマガンのアノードとのうちの1つ以上のものを含む。10

**【 0 1 9 5 】**

本開示のさらなる実施形態によると、本システムはさらに、擬似直流コイルおよび第1および第2の半径方向磁場コイルに動作可能に結合される、制御システムを備え、制御システムは、複数の命令を備える非一過性メモリに結合されるプロセッサを含み、該命令は、実行されると、プロセッサに、複数の擬似直流コイルおよび第1および第2の半径方向磁場コイルによって発生された磁場を調整させ、FRCプラズマを長手方向軸の周りに軸対称に位置付けるために、チャンバの長手方向軸に対して直角の半径方向においてFRCプラズマを安定化させ、FRCプラズマを中央平面の周りに軸対称に位置付けるために、長手方向軸に沿った軸方向においてFRCプラズマを安定化させる。20

**【 0 1 9 6 】**

本開示のさらなる実施形態によると、本システムは、FRCを発生させ、中性原子ビームがFRCの中に注入されている間、減衰を伴わずに、FRCを一定値またはほぼ一定値に維持するように構成される。

**【 0 1 9 7 】**

本開示のさらなる実施形態によると、第1および第2の半径方向磁場は、中央平面の周りで反対称である。

**【 0 1 9 8 】**

本開示のさらなる実施形態によると、本システムはさらに、閉じ込めチャンバの中央平面に向かってある角度で閉じ込めチャンバに結合される、第1および第2のコンパクトトロイド(CT)注入器を備え、第1および第2のCT注入器は、閉じ込めチャンバの中央平面の対向側で直径方向に対向する。30

**【 0 1 9 9 】**

しかしながら、本明細書に提供される例示的実施形態は、単に、例証的実施例として意図され、いかようにも限定されない。

**【 0 2 0 0 】**

本明細書に提供される任意の実施形態について説明される全ての特徴、要素、構成要素、機能、およびステップは、任意の他の実施形態からのものと自由に組み合わせ可能かつ代用可能であることを意図している。ある特徴、要素、構成要素、機能、またはステップが、一実施形態のみに關して説明される場合、特徴、要素、構成要素、機能、またはステップは、別様に明示的に記述されない限り、本明細書に説明される全ての他の実施形態とともに使用され得ることを理解されたい。本段落は、したがって、常に、異なる実施形態からの特徴、要素、構成要素、機能、およびステップを組み合わせる、または、一実施形態からの特徴、要素、構成要素、機能、およびステップを別のもので代用する、請求項の導入の先行する基礎ならびに書面による支援としての役割を果たし、仮に以下の説明が、特定の事例において、そのような組み合わせまたは代用が可能であることを明示的に記述しなくても、そのような役割を果たす。特に、本説明を読んだ当業者が、ありとあらゆるそのような組み合わせおよび代用の許容性が容易に認識されるであろうことを考えれば、可能性な全ての組み合わせおよび代用を明示的に記載することは、過度の負担である。40

**【 0 2 0 1 】**

10

20

30

40

50

多くの事例では、エンティティは、他のエンティティに結合されるように本明細書に説明される。用語「結合される」および「接続される」（またはその形態のいずれか）は、本明細書では同義的に使用され、両場合では、2つのエンティティの直接結合（任意の無視不可能である（例えば、寄生）介在エンティティを伴わずに）および2つのエンティティの間接結合（1つまたは複数の無視不可能である介在エンティティを伴う）に包括的であることを理解されたい。エンティティが、ともに直接結合されるように示される、または任意の介在エンティティの説明を伴わずに、とともに結合されるように説明される場合、それらのエンティティは、文脈によって明確に別様に示されない限り、同様に、ともに間接的に結合されることを理解されたい。

#### 【0202】

実施形態は、種々の修正および代替形態を被るが、その具体的な実施例が、図面に示され、本明細書に詳細に説明されている。しかしながら、これらの実施形態は、開示される特定の形態に限定されるものではなく、対照的に、これらの実施形態は、本開示の精神内にある全ての修正、均等物、および代替案を網羅するものであることを理解されたい。さらに、実施形態の任意の特徴、機能、ステップ、または要素、ならびにその範囲内にない特徴、機能、ステップ、または要素によって請求項の範囲を定義する消極的限定が、請求項に記載もしくは追加されてもよい。

10

20

30

40

50

【図面】

【図1】

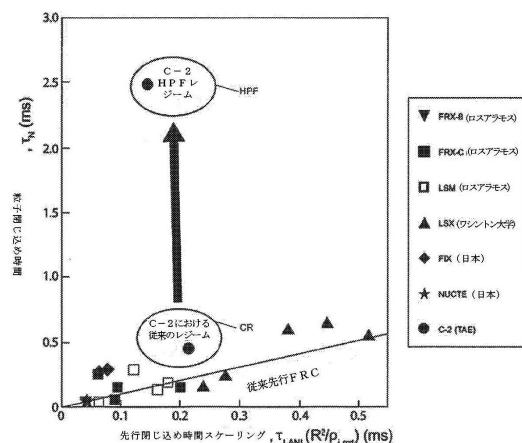


FIGURE 1

【図2】

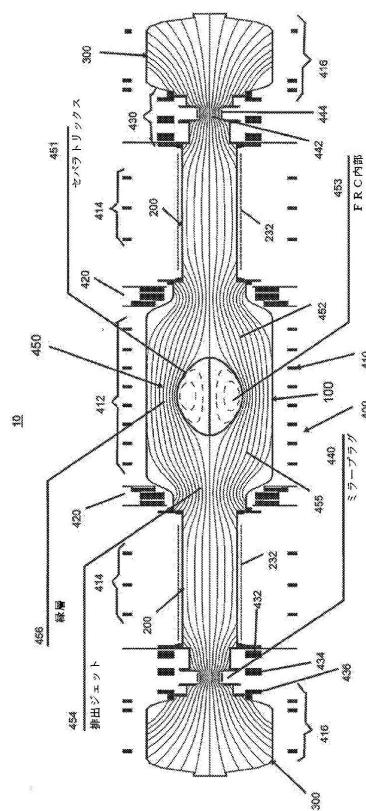


FIGURE 2

10

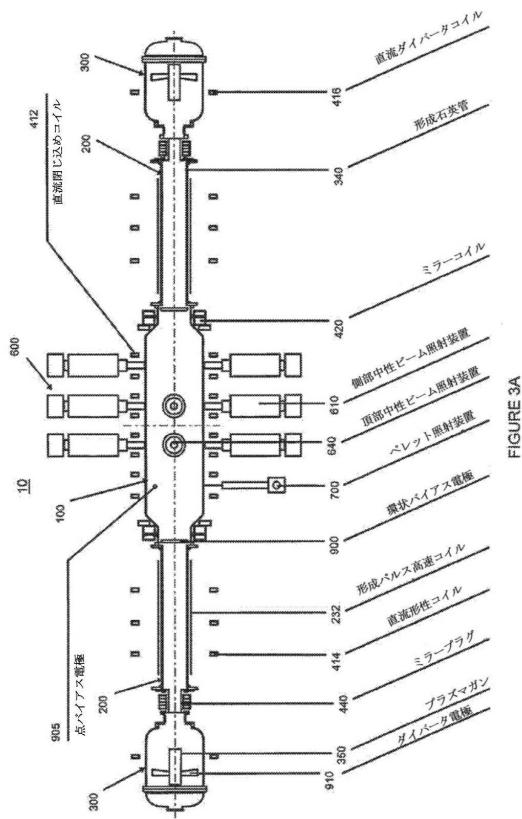
20

30

40

50

【図3A】



【図3B】

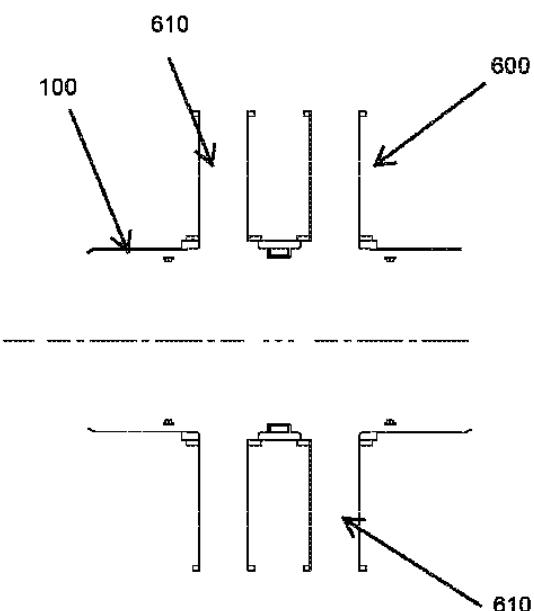
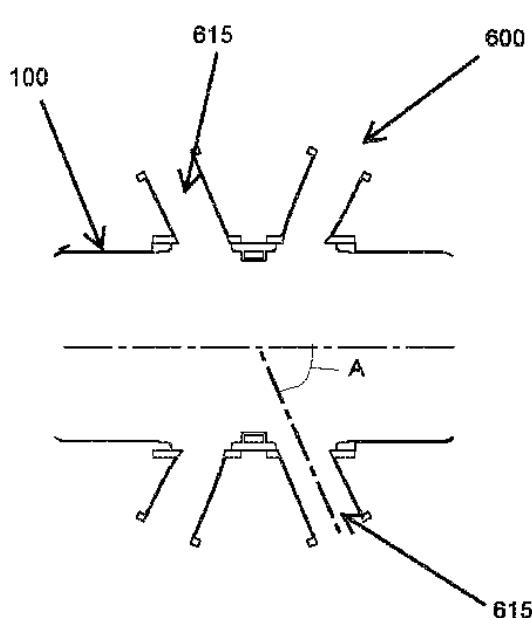


FIGURE 3B

【図3C】



**FIGURE 3C**

【図3D】

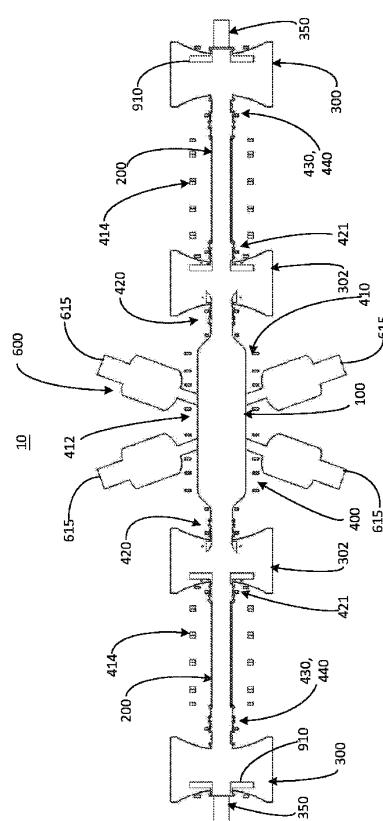


FIGURE 3D

【図3E】

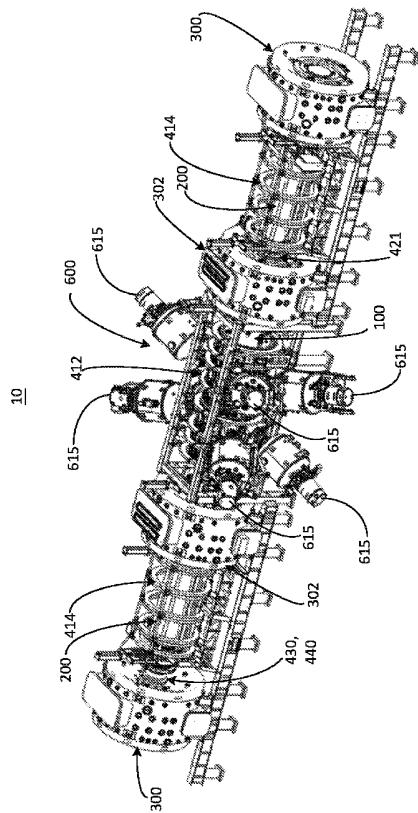


FIGURE 3E

【図4】

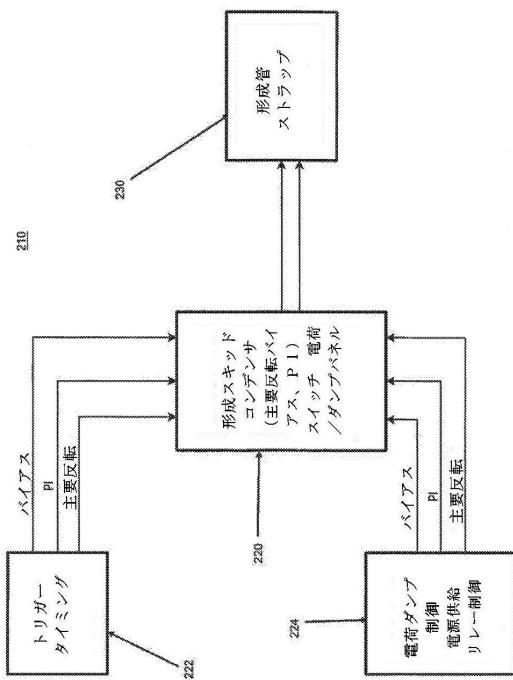


FIGURE 4

【 5 】

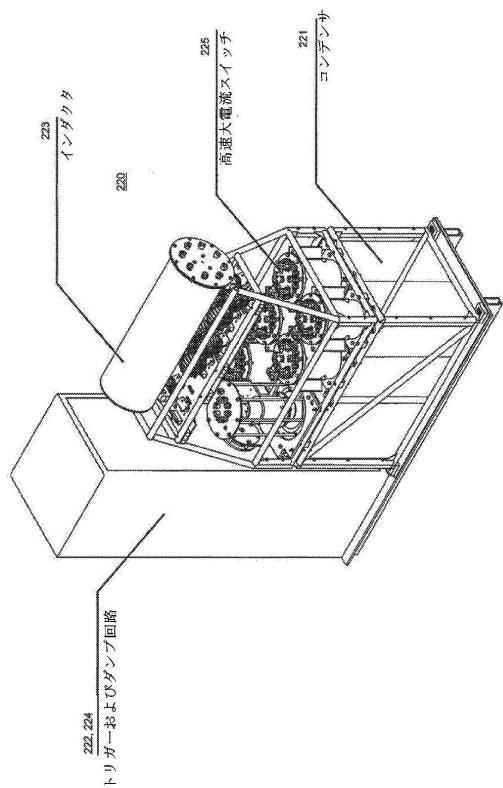


FIGURE 5

【 6 】

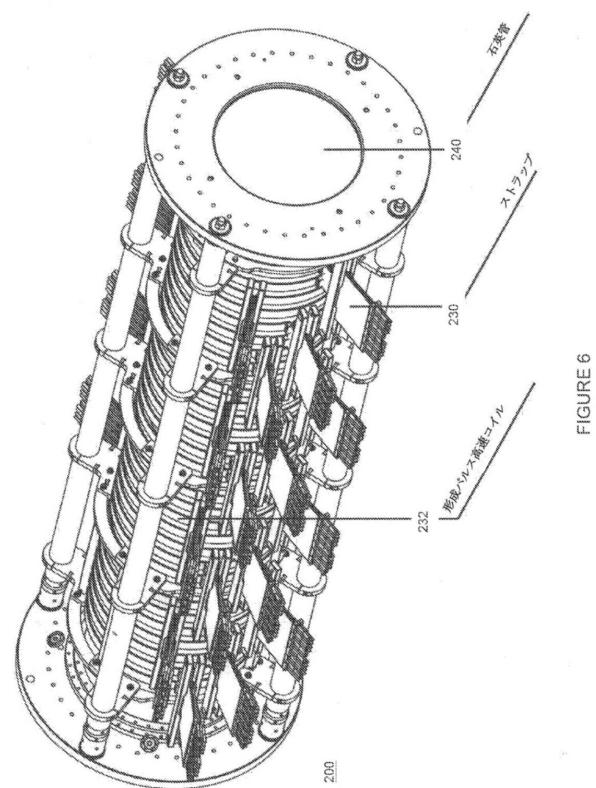


FIGURE 6

10

20

30

40

50

【図 7】

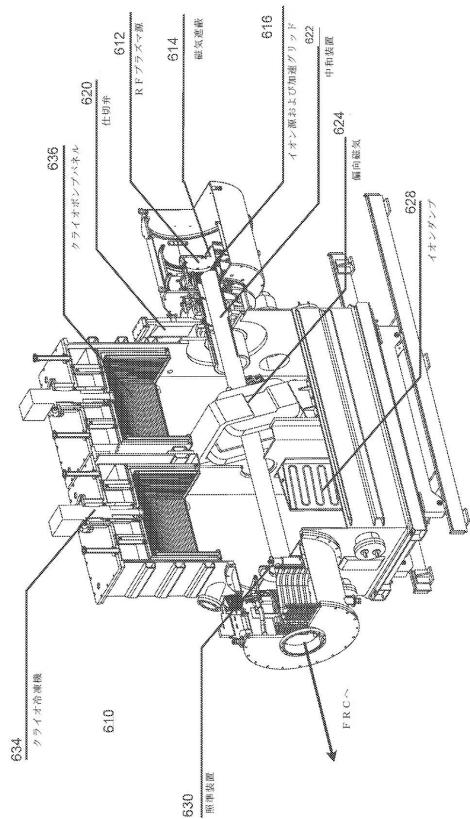


FIGURE 7

10

【図 8】

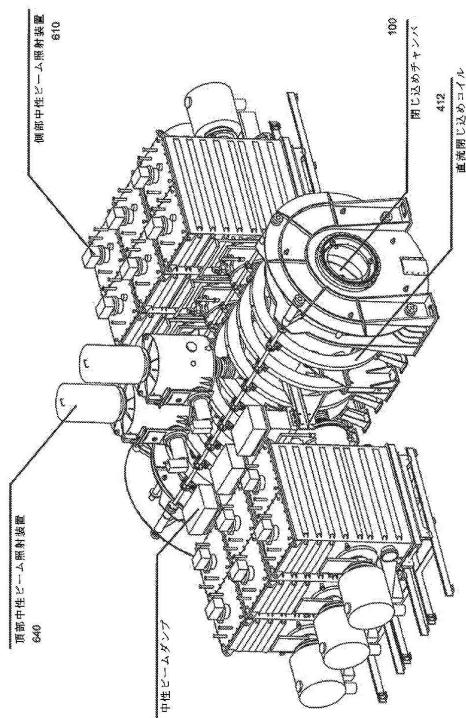


FIGURE 8

20

【図 9】

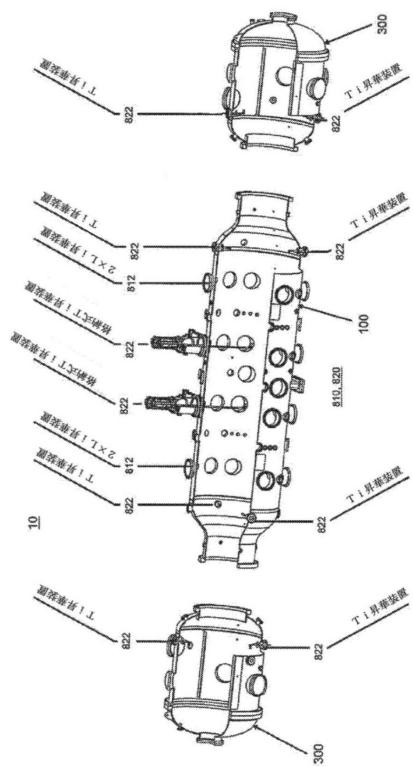


FIGURE 9

30

【図 10】

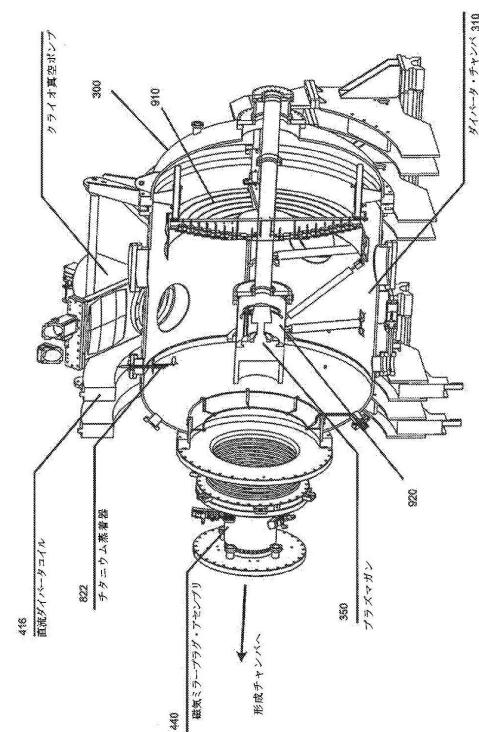


FIGURE 10

40

50

【図 1 1】

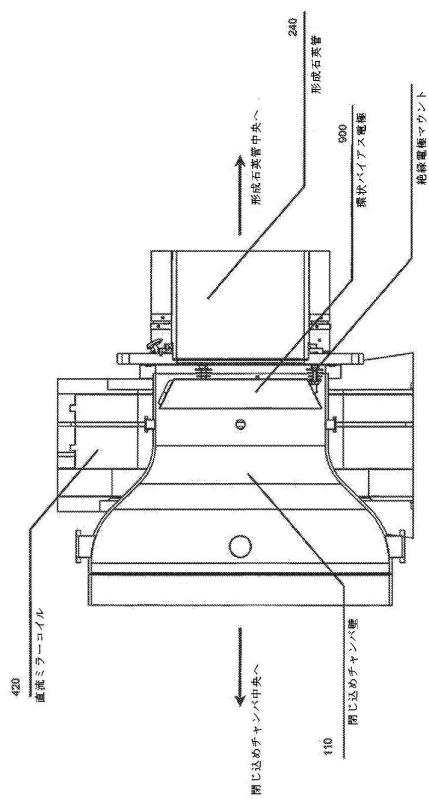


FIGURE 11

【図 1 2】

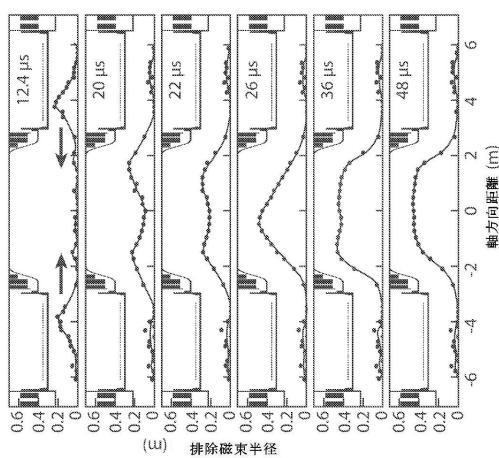


FIGURE 12

10

20

30

【図 1 3】

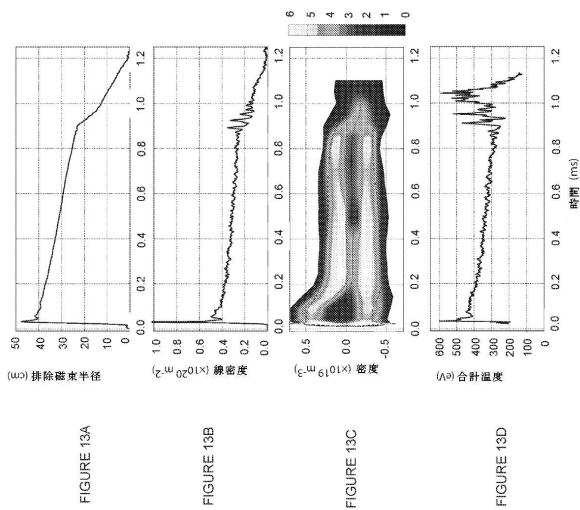


FIGURE 13D

【図 1 4】

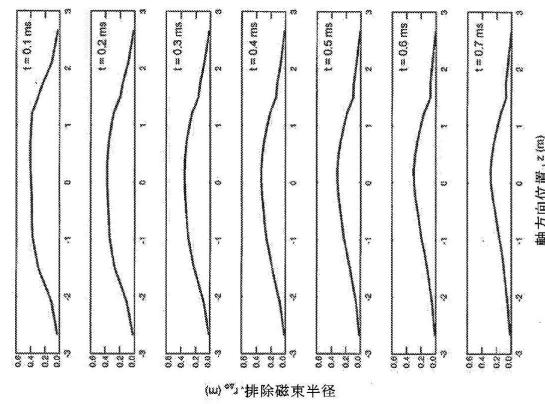


FIGURE 14

40

50

【図 15】

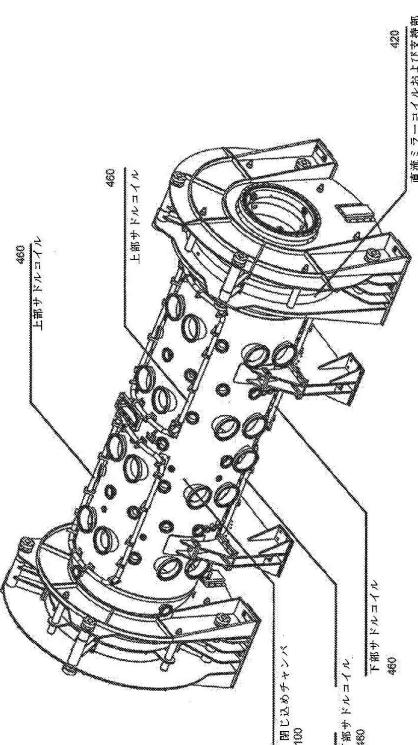
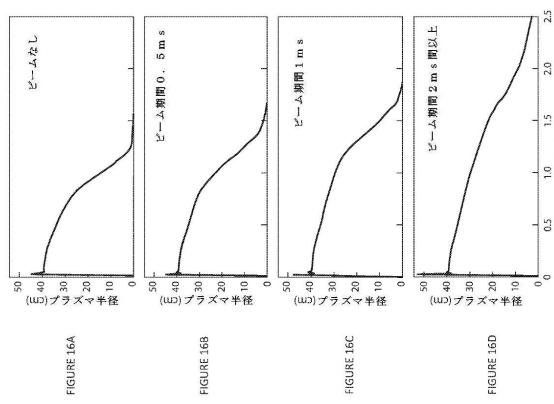


FIGURE 15

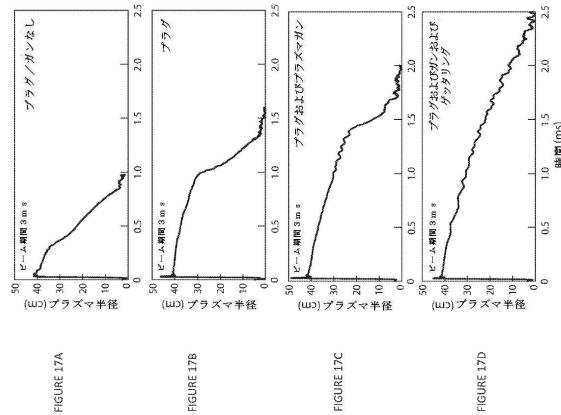
【図 16】



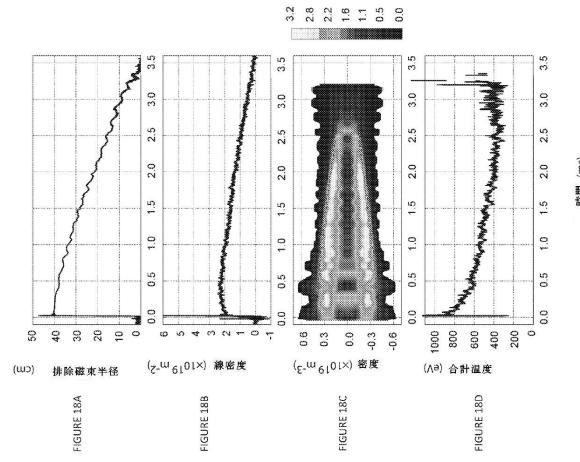
10

20

【図 17】



【図 18】

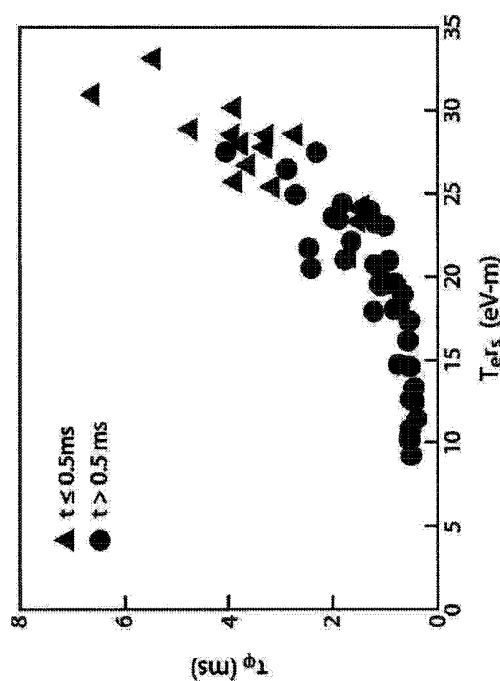


30

40

50

【図 19】



【図 20】

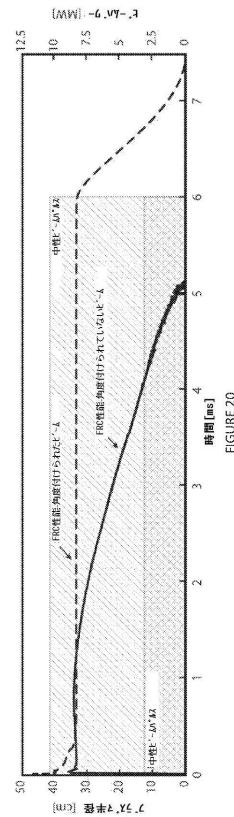
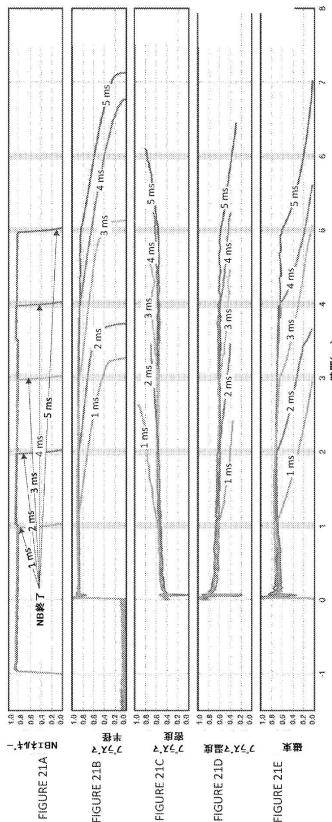


FIGURE 19

10

20

【図 21】



【図 22】

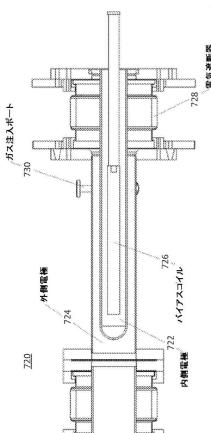


FIGURE 22A

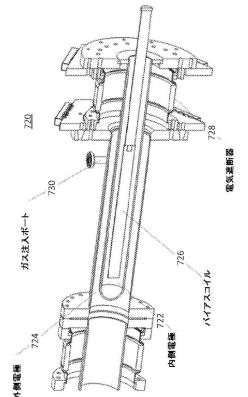


FIGURE 22B

30

40

50

【図23】

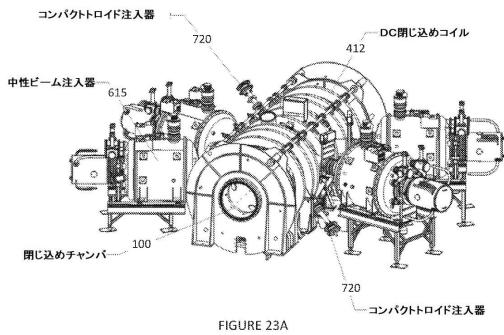


FIGURE 23B

【図24】

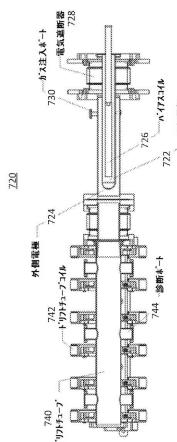


FIGURE 24A

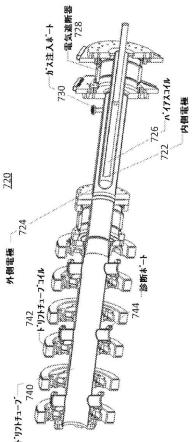
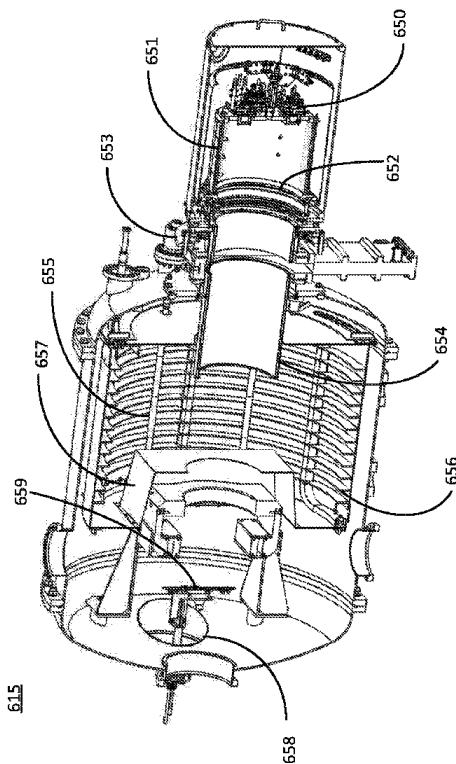


FIGURE 24B

【図25】



## 【図26】

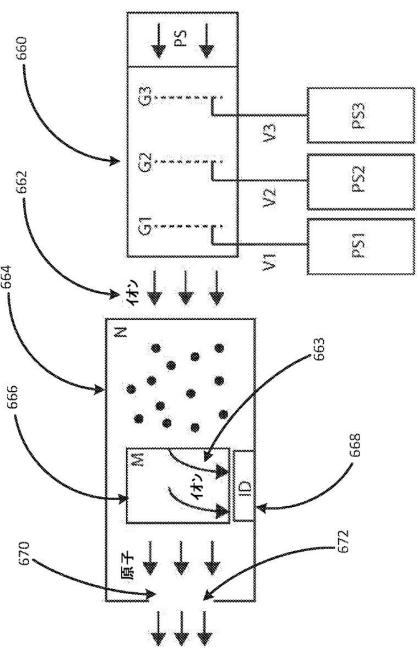
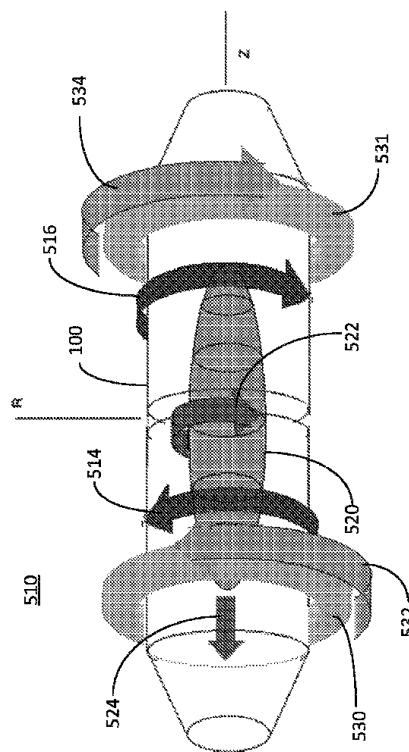


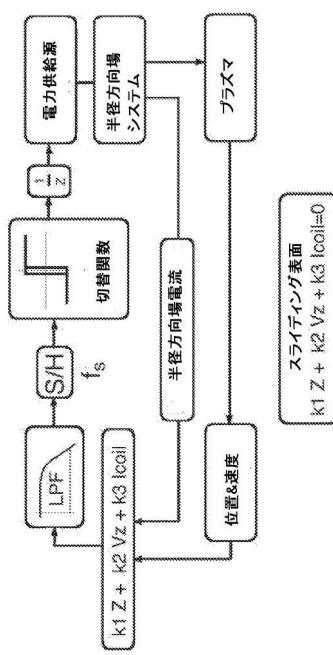
FIGURE 26

50

【図 27】



【図 28】



10

20

30

40

FIGURE 28

【図 29】

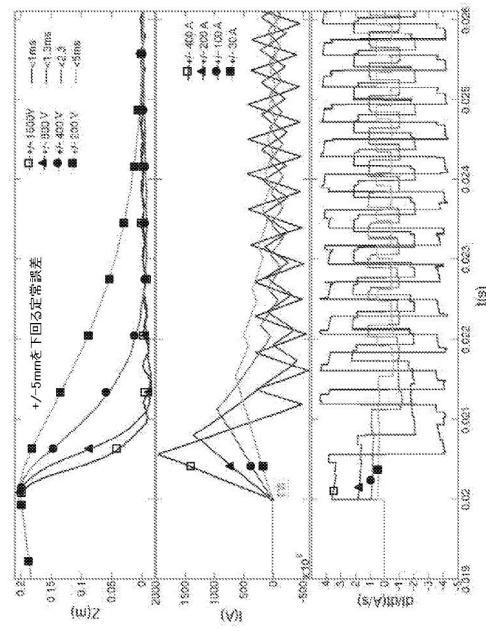


FIGURE 29

【図 30】

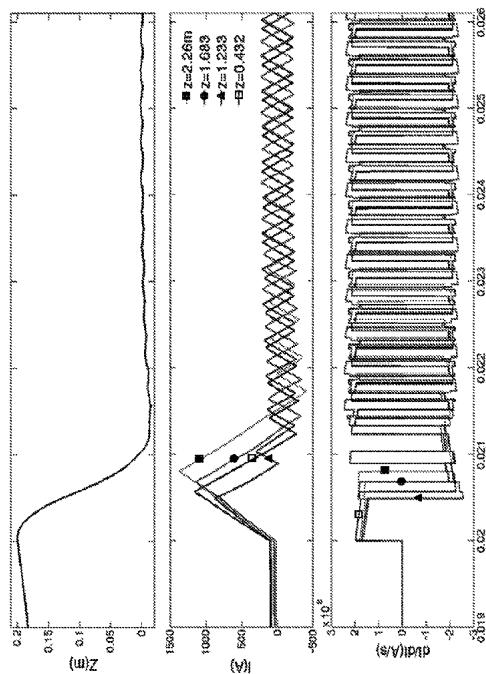


FIGURE 30

50

---

フロントページの続き

(51)国際特許分類

H 05 H 1/22 (2006.01)

F I

H 05 H

1/22

弁護士 山本 健策

(72)発明者 ドゥナエフスキー, アレクサンダー

アメリカ合衆国 カリフォルニア 92610, フットヒル ランチ, ポーリング 19631

(72)発明者 プトビンスキー, セルゲイ

アメリカ合衆国 カリフォルニア 92610, フットヒル ランチ, ポーリング 19631

(72)発明者 スミルノフ, アルテム エヌ.

アメリカ合衆国 カリフォルニア 92610, フットヒル ランチ, ポーリング 19631

(72)発明者 ピンデルバウアー, ミヒル ダブリュー.

アメリカ合衆国 カリフォルニア 92610, フットヒル ランチ, ポーリング 19631

審査官 藤本 加代子

(56)参考文献 国際公開第2015/048092 (WO, A1)

特開平03-285200 (JP, A)

国際公開第2016/070126 (WO, A1)

特表2015-502532 (JP, A)

米国特許第04314879 (US, A)

(58)調査した分野 (Int.Cl., DB名)

G 21 B 1/00 - 3/00

H 05 H 1/00 - 1/54

J S T P l u s ( J D r e a m I I I )