

(19)日本国特許庁(JP)

## (12)特許公報(B2)

(11)特許番号

特許第7266880号

(P7266880)

(45)発行日 令和5年5月1日(2023.5.1)

(24)登録日 令和5年4月21日(2023.4.21)

(51)国際特許分類

F I

G 2 1 B 1/05 (2006.01)

G 2 1 B 1/05

H 0 5 H 1/08 (2006.01)

H 0 5 H 1/08

H 0 5 H 1/14 (2006.01)

H 0 5 H 1/14

G 2 1 B 1/11 (2006.01)

G 2 1 B 1/11

L

G 2 1 B 1/15 (2006.01)

G 2 1 B 1/15

請求項の数 21 (全52頁) 最終頁に続く

(21)出願番号 特願2019-524871(P2019-524871)

(86)(22)出願日 平成29年11月15日(2017.11.15)

(65)公表番号 特表2019-537722(P2019-537722  
A)

(43)公表日 令和1年12月26日(2019.12.26)

(86)国際出願番号 PCT/US2017/061860

(87)国際公開番号 WO2018/093941

(87)国際公開日 平成30年5月24日(2018.5.24)

審査請求日 令和2年11月11日(2020.11.11)

(31)優先権主張番号 62/422,525

(32)優先日 平成28年11月15日(2016.11.15)

(33)優先権主張国・地域又は機関  
米国(US)

前置審査

(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 9 2 6

1 0 , フットヒル ランチ, ポーリング

1 9 6 3 1

(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】 高性能 F R C の改良された持続性および高性能 F R C における高調高速波電子加熱のためのシステムおよび方法

## (57)【特許請求の範囲】

## 【請求項 1】

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方法であって、  
閉じ込めチャンバ内でプラズマの周りに F R C を形成するステップと、  
複数の中性ビームを前記 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と、  
前記 F R C プラズマの中に伝搬する高調高速波を用いて、前記 F R C プラズマの電子を  
加熱するステップであって、前記高調高速波は、無線周波数範囲内の高速波である、ステ  
ップと  
を含む、方法。

## 【請求項 2】

電子を加熱するステップは、複数の高調高速波を 1 つ以上のアンテナから前記閉じ込め  
チャンバの中に発射するステップを含む、請求項 1 に記載の方法。

## 【請求項 3】

電子を加熱するステップは、複数の高調高速波を 1 つ以上のアンテナから前記閉じ込め  
チャンバ内の前記 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からある発射角  
度で発射するステップを含む、請求項 1 に記載の方法。

## 【請求項 4】

前記発射角度は、前記閉じ込めチャンバの中央平面から 1 5 ° ~ 2 5 ° の範囲内である  
、請求項 3 に記載の方法。

## 【請求項 5】

前記発射角度は、前記閉じ込めチャンバの長手方向軸に対する直角に近いが、該直角未満である、請求項 3 に記載の方法。

## 【請求項 6】

前記 1 つ以上のアンテナは、複数のストラップを伴う位相アレイアンテナである、請求項 2 ～ 5 に記載の方法。

## 【請求項 7】

前記高調高速波の前記無線周波数は、1.5 ～ 2.5 M h z の無線周波数範囲内にある、請求項 1 ～ 5 に記載の方法。

## 【請求項 8】

前記高調高速波は、無線周波数範囲内の高速波である、請求項 6 に記載の方法。

## 【請求項 9】

前記電子を加熱するステップは、前記電子を第 1 の温度から前記第 1 の温度よりも少なくとも 7 倍大きい第 2 の温度まで加熱するステップを含む、請求項 1 ～ 5 および 8 に記載の方法。

## 【請求項 10】

前記電子を加熱するステップは、前記電子を 1.5 0 e V から 1 k e V 超まで加熱するステップを含む、請求項 1 ～ 5 および 8 に記載の方法。

## 【請求項 11】

高速中性原子のビームを前記閉じ込めチャンバ内の前記 F R C プラズマの中に注入する間、減衰を伴わずに、前記 F R C を一定値に維持し、プラズマ電子温度を 1 . 0 k e V 超まで上昇させるステップをさらに含む、請求項 1 ～ 5 および 8 に記載の方法。

## 【請求項 12】

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 F R C 形成区分と、

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、および前記第 1 および第 2 の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、擬似直流ミラーコイルの第 1 および第 2 のセットとを備える、磁気システムと、

前記閉じ込めチャンバの周囲に位置付けられるアンテナシステムであって、前記アンテナシステムは、高調高速波を前記 F R C プラズマの中に発射し、プラズマ電子を加熱するように構成され、前記高調高速波は、無線周波数範囲内の高速波である、アンテナシステムと

を備える、システム。

## 【請求項 13】

前記アンテナシステムは、前記高調高速波を前記閉じ込めチャンバの中央平面からある発射角度で前記 F R C プラズマの中に発射するように位置付けられる 1 つ以上のアンテナを含む、請求項 1 2 に記載のシステム。

【請求項 1 4】

前記発射角度は、前記閉じ込めチャンバの中央平面から  $15^\circ \sim 25^\circ$  の範囲内である、請求項 1 3 に記載のシステム。

【請求項 1 5】

前記発射角度は、前記閉じ込めチャンバの長手方向軸に対する直角に近いが、該直角未満である、請求項 1 3 に記載のシステム。

【請求項 1 6】

前記アンテナシステムは、複数のストラップを伴う位相アレイアンテナを含む、請求項 1 2 ~ 1 5 に記載のシステム。

【請求項 1 7】

前記高調高速波の前記無線周波数は、 $15 \sim 25 \text{ M h z}$  の無線周波数範囲内にある、請求項 1 2 ~ 1 5 に記載のシステム。

【請求項 1 8】

前記システムは、F R C プラズマ電子を  $150 \text{ e V}$  から  $1 \text{ k e V}$  超に加熱するように構成される、請求項 1 2 ~ 1 5 に記載のシステム。

【請求項 1 9】

前記システムは、F R C プラズマ電子を第 1 の温度から前記第 1 の温度よりも少なくとも 7 倍大きい第 2 の温度まで加熱するように構成される、請求項 1 4 ~ 1 7 に記載のシステム。

【請求項 2 0】

前記システムは、F R C 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 F R C を維持するように構成される、請求項 1 2 ~ 1 9 に記載のシステム。

【請求項 2 1】

前記システムは、F R C プラズマ電子温度を  $1 \text{ k e V}$  超まで上昇させるように構成される、請求項 2 0 に記載のシステム。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本明細書に説明される実施形態は、概して、磁場反転配位 ( F R C ) 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 F R C 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、R F C 内における高調高速波電子加熱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 )

磁場反転配位 ( F R C ) は、コンパクト・トロイド ( C T ) 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。F R C 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 . T u s z e w s k i , N u c l . F u s i o n 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 ( 是 F R C 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 - H e <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】

F R C を形成する従来の方法は、磁場反転シートピンチ技術を使用し、高温高密度のプ

10

20

30

40

50

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、シートピンチ「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。

#### 【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両端で2つの個別のシートピンチが、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)。

#### 【0005】

FRCは、セパトリックスの内側の閉じた磁力線のトーラス、およびセパトリックスのすぐ外側の開放磁力線上の環状縁層から成る。縁層は、FRCの長さを越えて集結してジェットになり、自然ダイバータを提供する。FRC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、FRCプラズマが約10の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、FRC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、過去および現在のFRC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のは、これらの強い動的効果である。

#### 【0006】

過去のFRC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される傾向にあった。粒子は、セパ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、FRC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。セパトリックスから出た粒子の拡散時間は、 $\sim a^2 / D$  ( $a \sim r_s / 4$  であり、 $r_s$  は、中心セパトリックスの半径である) として見積もられ、 $D$  は、特性FRC拡散率であり (例えば、 $D \sim 12 \cdot 5 \cdot i_e$  であり、 $i_e$  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】

$\tau_{||}$

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】

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

10

と見積もられる（例えば、M. TUSZEWSKI, “Field Reversed Configurations,” Nucl. Fusion 28, 2033 (1988) 参照）。

【0007】

先行の F R C システム設計の別の短所は、中性ビーム注入以外、効率的電子加熱体系を欠いており、これは、イオン - 電子衝突を通じた電子における電力減衰の機構に起因して、不良電子加熱効率を有する傾向にある。

【0008】

20

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に、F R C 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】

30

【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、F R C 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、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、F R C 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、F R C 内の高調高速波電子加熱を促進する、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 (F R C) 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 F R C を形成するステップと、複数の中性ビームを F R C 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と、F R C プラズマのコア内での電子加熱のために、無線周波数範囲内の高調高速波を F R C プラズマの中に発射するステップとを含む。

40

【0011】

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、F R C を一定値またはほぼ一定値に維持し、無線周波数範囲内の高調高速波を F R C プラズマの中に閉じ込めチャンバの平面を通して中央からある角度で発射することによって、プラズマ電子温度を約 1.0 keV 超まで上昇させるステップを含む。

【0012】

無線周波数範囲内の高調高速波を介した電子の加熱は、有利には、高速イオン電荷交換損失を低減させ、プラズマ閉じ込めを改良し、かつプラズマ電流駆動効率を向上させ、これは、電子温度  $T_e$  に伴って上昇する。

50

## 【 0 0 1 3 】

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。

## 【 0 0 1 4 】

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、閉じ込めチャンバに結合される、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、ゲッターリングシステムと、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、擬似直流ミラーコイルの第１および第２のセットとを備える、磁気システムと、閉じ込めチャンバに結合され、閉じ込めチャンバ内のＦＲＣプラズマのコア内での電子加熱のために、無線周波数範囲内の高調高速波を発射する、１つ以上のアンテナとを備える。

## 【 0 0 1 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、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。

## 【 0 0 1 6 】

例示的实施形態のシステム、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、例示的实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。

（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、  
複数の中性ビームを前記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と、  
前記ＦＲＣプラズマの中に伝搬する高調高速波を用いて、前記ＦＲＣプラズマの電子を  
加熱するステップと  
を含む、方法。

（項目２）

電子を加熱するステップは、複数の高調高速波を１つ以上のアンテナから前記閉じ込め  
チャンバの中に発射するステップを含む、項目１に記載の方法。

（項目３）

10

20

30

40

50

電子を加熱するステップは、複数の高調高速波を1つ以上のアンテナから前記閉じ込めチャンバ内の前記FRCプラズマの中に前記閉じ込めチャンバの中央平面からある発射角度で発射するステップを含む、項目1に記載の方法。

(項目4)

前記発射角度は、前記閉じ込めチャンバの中央平面から約15°～約25°の範囲内にある、項目3に記載の方法。

(項目5)

前記発射角度は、前記閉じ込めチャンバの長手方向軸に対する直角に近いが、該直角未満である、項目3に記載の方法。

(項目6)

前記1つ以上のアンテナは、複数のストラップを伴う位相アレイアンテナである、項目2-5に記載の方法。

(項目7)

前記高調高速波は、無線周波数範囲内の高速波である、項目1-5に記載の方法。

(項目8)

前記高調高速波は、無線周波数範囲内の高速波である、項目6に記載の方法。

(項目9)

前記電子を加熱するステップは、前記電子を約150 eVから約1 keV超まで加熱するステップを含む、項目7に記載の方法。

(項目10)

前記電子を加熱するステップは、前記電子を約150 eVから約1 keV超まで加熱するステップを含む、項目1-5および8に記載の方法。

(項目11)

高速中性原子のビームを前記閉じ込めチャンバ内の前記FRCプラズマの中に注入する間、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し、プラズマ電子温度を約1.0 keV超まで上昇させるステップをさらに含む、項目1-5および8に記載の方法。

(項目12)

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両端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両端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1-5および8に記載の方法。

(項目13)

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両端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両端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11に記載の方法。

(項目14)

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って、前記2つの形成FRCは、前記FRCを形成するように融合する、ステップを含む、項目12に記載の方法。

(項目15)

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って、前記2つの形成FRCは、前記FRCを形成するように融合する、ステップを含む、項目13に記載の方法。

(項目16)

10

20

30

40

50

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って前記形成 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って前記形成 F R C を加速させるステップとのうちの 1 つを含む、項目 1 4 および 1 5 に記載の方法。

(項目 1 7)

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反対端部に結合される第 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 4 および 1 5 に記載の方法。

10

(項目 1 8)

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 7 に記載の方法。

(項目 1 9)

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 7 に記載の方法。

(項目 2 0)

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 6 に記載の方法。

20

(項目 2 1)

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 0 に記載の方法。

(項目 2 2)

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 1 9 に記載の方法。

(項目 2 3)

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 1 に記載の方法。

30

(項目 2 4)

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 1 に記載の方法。

(項目 2 5)

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 2 に記載の方法。

40

(項目 2 6)

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 1 のいずれか 1 項に記載の方法。

(項目 2 7)

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 2 のいずれか 1 項

50



に記載の方法。

(項目 28)

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26および27に記載の方法。

(項目 29)

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28に記載の方法。

(項目 30)

プラズマを前記FRCの中に軸方向に搭載されるプラズマガンから軸方向に注入するステップをさらに含む、項目11および12に記載の方法。

(項目 31)

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11および12に記載の方法。

(項目 32)

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、ある電位の分布を前記FRCの開磁束面群に印加するステップを含む、項目31に記載の方法。

(項目 31)

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向向してある角度で注入するステップをさらに含む、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向向側で直径方向に向向する、項目1-5および8に記載の方法。

(項目 32)

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向向してある角度で注入するステップをさらに含む、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向向側で直径方向に向向する、項目11に記載の方法。

(項目 33)

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向向してある角度で注入するステップをさらに含む、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向向側で直径方向に向向する、項目12に記載の方法。

(項目 34)

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であって、閉じ込めチャンバと、

前記第1および第2の直径方向に向向する内側ダイバータに結合される第1および第2の直径方向に向向するFRC形成区分と、

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、および前記第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、

10

20

30

40

50

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ーリングシステムと、

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、擬似直流ミラーコイルの第 1 および第 2 のセットとを備える、磁気システムと、

前記閉じ込めチャンバの周囲に位置付けられるアンテナシステムであって、前記アンテナシステムは、高調高速波を前記 F R C プラズマの中に発射し、プラズマ電子を加熱するように構成される、アンテナシステムと

を備える、システム。

( 項目 3 5 )

前記アンテナシステムは、前記高調高速波を前記閉じ込めチャンバの中央平面からある発射角度で前記 F R C プラズマの中に発射するように位置付けられる 1 つ以上のアンテナを含む、項目 3 4 に記載のシステム。

( 項目 3 6 )

前記発射角度は、前記閉じ込めチャンバの中央平面から約  $15^{\circ}$  ~ 約  $25^{\circ}$  の範囲内である、項目 3 5 に記載のシステム。

( 項目 3 7 )

前記発射角度は、前記閉じ込めチャンバの長手方向軸に対する直角に近いが、該直角未満である、項目 3 5 に記載のシステム。

( 項目 3 8 )

前記アンテナシステムは、複数のストラップを伴う位相アレイアンテナを含む、項目 3 4 - 3 7 に記載のシステム。

( 項目 3 9 )

前記高調高速波は、無線周波数範囲内の高速波である、項目 3 4 - 3 7 に記載のシステム。

( 項目 4 0 )

前記システムは、F R C プラズマ電子を約  $150\text{ eV}$  から約  $1\text{ keV}$  超に加熱するように構成される、項目 3 4 - 3 7 に記載のシステム。

( 項目 4 1 )

前記システムは、F R C プラズマ電子を約  $150\text{ eV}$  から約  $1\text{ keV}$  超に加熱するように構成される、項目 3 9 に記載のシステム。

( 項目 4 2 )

前記システムは、F R C 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 F R C を維持するように構成される、項目 3 4 - 4 1 に記載のシステム。

( 項目 4 3 )

前記システムは、F R C プラズマ電子温度を約  $1\text{ keV}$  超まで上昇させるように構成される、項目 4 2 に記載のシステム。

( 項目 4 4 )

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 3 4 - 4 3 に記載のシステム。

( 項目 4 5 )

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

10

20

30

40

50

ンをさらに備える、項目 4 4 に記載のシステム。

( 項目 4 6 )

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 4 5 に記載のシステム。

( 項目 4 7 )

前記形成区分は、F R C 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 3 4 に記載のシステム。

( 項目 4 8 )

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、方位角的に対称な方式において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 3 4 に記載のシステム。

( 項目 4 9 )

前記システムは、F R C を発生させ、中性原子ビームが前記 F R C の中に注入されている間、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するように構成される、項目 4 8 に記載のシステム。

( 項目 5 0 )

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 4 9 に記載のシステム。

( 項目 5 1 )

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 ( C T ) 注入器をさらに備え、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 3 4 - 5 0 に記載のシステム。

【 0 0 1 7 】

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細と共に、本実施形態の原理を説明し教示する働きをする。

【図面の簡単な説明】

【 0 0 1 8 】

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

【 0 0 1 9 】

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

【 0 0 2 0 】

【図 3 A】図 3 A 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 F R C システムの基本レイアウトを図示する。

【 0 0 2 1 】

【図 3 B】図 3 B 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。

【 0 0 2 2 】

【図 3 C】図 3 C 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。

10

20

30

40

50

【 0 0 2 3 】

【図 3 D】図 3 D および 3 E 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 F R C 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 3 E】図 3 D および 3 E 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 F R C 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。

【 0 0 2 4 】

【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。

【 0 0 2 5 】

【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。

【 0 0 2 6 】

【図 6】形成管アセンブリのアイソメ図である。

【 0 0 2 7 】

【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。

【 0 0 2 8 】

【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。

【 0 0 2 9 】

【図 9】T i および L i ゲッターリング・システムの好ましい配置の部分断面アイソメ図である。

【 0 0 3 0 】

【図 1 0】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。

【 0 0 3 1 】

【図 1 1】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。

【 0 0 3 2 】

【図 1 2】2つの磁場反転シート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、F R C 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。

【 0 0 3 3 】

【図 1 3】図 1 3 A , 1 3 B , 1 3 C , および 1 3 D は、本 F R C システム上の代表的な非 H P F の非持続放出からのデータを示す図である。図 1 3 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 1 3 B は、中央平面 C O 2 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 1 3 C は、C O 2 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 1 3 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。

【 0 0 3 4 】

【図 1 4】図 1 3 A , 1 3 B , 1 3 C , および 1 3 D に示された本 F R C 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。

【 0 0 3 5 】

【図 1 5】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。

【 0 0 3 6 】

【図 1 6】図 1 6 A , 1 6 B , 1 6 C , および 1 6 D は、F R C 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 F R C を生成する。

【 0 0 3 7 】

10

20

30

40

50

【図 17】図 17 A , 17 B , 17 C , および 17 D は、F R C 性能の F R C 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 H P F レジームの達成を示す図である。

【0038】

【図 18】図 18 A , 18 B , 18 C , および 18 D は、本 F R C システム上の代表的な H P F 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 C O 2 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、C O 2 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。

10

【0039】

【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、H P F 放出に対して新しく確立された優れたスケールングレジームを表すグラフを示す。

【0040】

【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、F R C 寿命時間を図示する。

【0041】

【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 F R C プラズマパラメータの寿命とを図示する。

20

【0042】

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

【0043】

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

【0044】

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

30

【0045】

【図 25】図 25 は、上部から見たときの中心閉じ込め容器を図示し、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、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、中性ビームを示し、プラズマ電子の加熱のために、高調高速波が、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伝搬され、中心閉じ込め容器の中央平面から伝搬するように指向される、アンテナを示す。

【0046】

【図 26】図 26 A および 26 B は、本 F R C システムの F R C プラズマの完全な半径方向密度プロファイルおよび完全な半径方向電子温度プロファイルを図示する。

【0047】

40

【図 27】図 27 A - 27 D は、本 F R C システムの中央平面 ( $Z = 0$ ) におけるシステム平衡および特性周波数の半径方向プロファイルを図示する。

【0048】

【図 28】図 28 A - 28 C は、本 F R C システムの F R C プラズマ内での 8 G H z におけるマイクロ波の電子加熱条件下での電力吸収およびモード変換の観察を図示する。

【0049】

【図 29】図 29 A - 29 F は、本 F R C システムの F R C プラズマ内での 50 G H z におけるマイクロ波の電子加熱条件下での電力吸収およびモード変換の観察を図示する。

【0050】

【図 30】図 30 A - 30 C は、本 F R C システムの F R C プラズマ内での 0 . 5 G H z

50

におけるホイッスラー波の電子加熱条件下での電力吸収の観察を図示する。

【 0 0 5 1 】

【図 3 1】図 3 1 は、本 F R C システムの F R C プラズマ内での密度プロファイルおよび波伝搬を図示する。

【 0 0 5 2 】

【図 3 2】図 3 2 は、本 F R C システムの F R C プラズマ内でのポロイダル磁束プロファイルおよび波伝搬を図示する。

【 0 0 5 3 】

【図 3 3】図 3 3 は、本 F R C システムの F R C プラズマ内での例示的密度プロファイルおよび波伝搬軌道を図示する。

10

【 0 0 5 4 】

【図 3 4】図 3 4 は、本 F R C システムの F R C プラズマ内での例示的  $\omega / c i [ D ]$  プロファイルおよび波伝搬軌道を図示する。

【 0 0 5 5 】

【図 3 5】図 3 5 は、本 F R C システムの F R C プラズマ内での波伝搬の距離に伴う例示的電力減衰を図示する。

【 0 0 5 6 】

【図 3 6】図 3 6 は、本 F R C システムの F R C プラズマ内での例示的電力吸収プロファイルを図示する。

【 0 0 5 7 】

20

【図 3 7】図 3 7 A および 3 7 B は、本 F R C システムの F R C プラズマ内での電力密度の例示的半径方向プロファイルを図示する。

【 0 0 5 8 】

【図 3 8】図 3 8 は、本 F R C システムの F R C プラズマ内での減衰電力密度の例示的 2 D プロファイルを図示する。

【 0 0 5 9 】

【図 3 9】図 3 9 は、本 F R C システムの F R C プラズマ内での例示的電力減衰プロファイルを図示する。

【 0 0 6 0 】

【図 4 0】図 4 0 は、本 F R C システムの F R C プラズマ内での例示的有限イオンラーモア半径プロファイルを図示する。

30

【 0 0 6 1 】

【図 4 1】図 4 1 は、本 F R C システムの F R C プラズマ内での例示的電力吸収プロファイルを図示する。

【 0 0 6 2 】

【図 4 2】図 4 2 は、F R C システムの本 F R C プラズマの例示的プロファイルを図示する。

【 0 0 6 3 】

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ことにも留意されたい。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。

40

【発明を実施するための形態】

【 0 0 6 4 】

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、F R C 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、中性ビーム注入および高調高速波電子加熱を利用した、上昇されたシステムエネルギーおよび温度および改良された持続性を伴う F R C 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。

50

## 【 0 0 6 5 】

## ( 詳細な説明 )

本明細書に提供される本実施形態は、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 プラズマの平衡の軸方向安定性性質から独立して、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を対象とする。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。

10

## 【 0 0 6 6 】

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クションは、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。

20

## 【 0 0 6 7 】

F R C プラズマ内の高調高速波電子加熱を促進する、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、優れた安定性および優れた粒子、エネルギー、および磁束閉じ込めを伴う、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、および高性能 F R C を形成し、減衰を伴わずに、一定値またはほぼ一定値に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 X 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、および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。

30

## 【 0 0 6 8 】

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。

40

## 【 0 0 6 9 】

## ( 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

50

によって包囲された中央閉じ込め容器 100 を含む。本 FRC システム 10 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  $10^{-8}$  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、24 時間 250 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。

#### 【0070】

磁場反転シータピンチ形成部分 200 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（FRTP）である。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。

#### 【0071】

##### 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 Hall-MHD 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。

#### 【0072】

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され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、LC 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

10

20

30

40

50



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 4 6 0 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。

#### 【 0 0 7 3 】

##### パルス電力形成システム

パルス電力形成システム 2 1 0 は、修正シータピンチ原理に基づいて作動する。それぞれが形成部分 2 0 0 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 2 1 0 の主な構築ブロックおよび配置を示す。形成システム 2 1 0 は、個々のユニット (= スキッド) 2 2 0 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 k J 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 G W までの電力を提供して F R C 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、F R C 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。

#### 【 0 0 7 4 】

##### 中性ビーム注入器

中性原子ビーム 6 0 0 が、F R C 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 F R C 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 k e V の粒子エネルギーを用いて、最大 1 M W の中性ビームパワーを F R C 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 R F 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、L N 2 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 F R C パラメータにわたる動作を可能にする。

#### 【 0 0 7 5 】

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 F R C 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 9 0 ° 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 615 の本配列は、FRC 450 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、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 615 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できる。加えて、ビーム注入器 615 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。

#### 【0076】

図 3 D および 3 E 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。

#### 【0077】

##### 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 1 mm、L は約 1～2 mm）は、FRC に速度 150～250 km/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。

#### 【0078】

##### ゲッターリング・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。

#### 【 0 0 7 9 】

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 F R C システム 1 0 は、チタニウム ( T i ) およびリチウム ( L i ) 成膜システム 8 1 0 および 8 2 0 を利用し、閉じ込めチャンバ ( または容器 ) 1 0 0 およびダイバータ 3 0 0 および 3 0 2 のプラズマ対向面を T i および / または L i 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 L i および / または T i 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。源は、ガイドノズル ( L i の場合 ) 8 2 2 を備える原子炉、またはガイドシュラウド ( T i の場合 ) 8 1 2 を備える中実の加熱球である。L i 蒸着システムは、通常、連続モードで作動するが、T i 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 6 0 0 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、F R C システム 1 0 におけるゲッターリング蒸着システム 8 1 0 および 8 2 0 の好ましい配置を詳しく示す。被覆は、ゲッター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。

10

#### 【 0 0 8 0 】

##### ミラープラグ

20

上述のように、F R C システム 1 0 は、図 2 および 3 に示したように、ミラーコイル 4 2 0、4 3 0、および 4 4 4 のセットを利用する。ミラーコイル 4 2 0 の第 1 のセットは、閉じ込めチャンバ 1 0 0 の 2 つの軸方向端部に配置され、主磁気システム 4 1 0 の D C 閉じ込め、形成、およびダイバータコイル 4 1 2、4 1 4 および 4 1 6 から単独に活性化される。ミラーコイル 4 2 0 の第 1 のセットは、主に融合中に F R C 4 5 0 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 4 2 0 は、中央閉じ込めコイル 4 1 2 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 . 5 T ) を生成する。ミラーコイル 4 3 0 の第 2 のセットは、3 つの小型の疑似直流ミラーコイル 4 3 2、4 3 4 および 4 3 6 を含み、形成部分 2 0 0 とダイバータ 3 0 0 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 4 3 2、4 3 4 および 4 3 6 は、より小型のパルスミラープラグコイル 4 4 4 ( 容量電源によって供給される ) および物理的収縮部 4 4 2 と一緒に、狭い低ガス伝導通路を非常に高い磁場 ( 約 1 0 ~ 2 0 m s の立上り時間で 2 ~ 4 T ) で提供する、ミラープラグ 4 4 0 を形成する。最も小型のパルスミラーコイル 4 4 4 は、閉じ込めコイル 4 1 2、4 1 4 および 4 1 6 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、2 0 c m の孔および同様の長さである。ミラープラグ 4 4 0 の目的は、以下のように多種多様である。( 1 ) コイル 4 3 2、4 3 4、4 3 6 および 4 4 4 を堅く束ね、磁束表面 4 5 2 および端部に流れるプラズマジェット 4 5 4 を、遠隔ダイバータ・チャンバ 3 0 0 に導く。これは、排出粒子がダイバータ 3 0 0 に適切に到着し、中央 F R C 4 5 0 の開いた磁力線 4 5 2 領域からダイバータ 3 0 0 までずっと追跡する、連続した磁束表面 4 5 5 が存在することを確実にする。( 2 ) F R C システム 1 0 における物理的収縮部 4 4 2 は、それを通してコイル 4 3 2、4 3 4、4 3 6 および 4 4 4 が磁束表面 4 5 2 およびプラズマジェット 4 5 4 を通過することができ、ダイバータ 3 0 0 内に着座するプラズマガン 3 5 0 からの中性ガス流を妨げる。同じように、収縮部 4 4 2 は、形成部分 2 0 0 からダイバータ 3 0 0 へのガスの逆流を防止し、それによって F R C の起動を開始するときに、F R C システム 1 0 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 4 3 2、4 3 4、4 3 6 および 4 4 4 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。

30

40

#### 【 0 0 8 1 】

50

図 3 D および 3 E に示される代替構成では、薄型縮径コイル 4 2 1 のセットが、内側ダイバータ 3 0 2 と形成区分 2 0 0 との間に位置付けられる。

#### 【 0 0 8 2 】

##### 軸方向のプラズマガン

ダイバータ 3 0 0 のダイバータ・チャンバ 3 1 0 内に装着されたガン 3 5 0 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 3 5 0 は、図 3 および 1 0 に示したように、ダイバータ 3 0 0 のチャンバ 3 1 0 の内側の軸上に装着され、プラズマ流をダイバータ 3 0 0 内の開いた磁力線 4 5 2 に沿って、閉じ込めチャンバ 1 0 0 の中心に向かって生成する。ガン 3 5 0 は、ワッシャー積層チャンネル内に高濃度ガス放出で作動し、5 ~ 1 0 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 3 5 0 は、出力プラズマ流を閉じ込めチャンバ 1 0 0 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 3 5 0 の技術パラメータは、5 ~ 1 3 c m の外径、および最高 1 0 c m までの内径を有するチャンネルを特徴とし、ガンの内部磁場は 0 . 5 ~ 2 . 3 T で、4 0 0 ~ 6 0 0 V で 1 0 ~ 1 5 k A の放電電流を提供する。

10

#### 【 0 0 8 3 】

ガンプラズマ流は、ミラープラグ 4 4 0 の磁場を貫通し、形成部分 2 0 0 および閉じ込めチャンバ 1 0 0 に流入することができる。ミラープラグ 4 4 0 を通るプラズマ移動の効率は、ガン 3 5 0 とプラグ 4 4 0 との間の距離を低減し、プラグ 4 4 0 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 3 5 0 はそれぞれ、約 1 5 0 ~ 3 0 0 e V および約 4 0 ~ 5 0 e V 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 4 4 0 を通り約  $10^{22}$  プロトン / s を送達する。ガン 3 5 0 は、F R C の縁層 4 5 6 の著しい燃料補給および改良された F R C 全体の粒子閉じ込めを提供する。

20

#### 【 0 0 8 4 】

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 3 5 0 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。F R C システム 1 0 では、ミラープラグ 4 4 0 の側部のダイバータ 3 0 0 上に搭載されたガスボックスは、F R C の縁層 4 5 6 の燃料補給、F R C 4 5 0 の形成、およびプラズマ磁力線短絡を向上させる。

#### 【 0 0 8 5 】

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。

30

#### 【 0 0 8 6 】

##### 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 F R C コア 4 5 0 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。この制御を達成させるために、F R C システム 1 0 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、F R C システム 1 0 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。

40

#### 【 0 0 8 7 】

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、F R C 4 5 0 の縁部において特定の開いた磁力線 4 5 2 に接触させる、閉じ込めチャンバ 1 0 0 内の点電極 9 0 5、( 2 ) 方位が対称的な形で遠端磁束層 4 5 6 に帯電させるための、閉じ込めチャンバ 1 0 0 と形成部分 2 0 0 との間の環状電極 9 0 0、( 3 ) 複数の同心磁束層 4 5 5 (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 4 1 6 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 9 1 0 上で所望の磁束層 4 5 6 を終了する) に帯電させるための、ダイバータ 3 0 0 内の同心電極 9 1 0 の積層、および最後に ( 4 ) プラズマガン 3 5 0 自体 (これは、F R C 4 5 0 のセパトリックス付

50

近で内部の開いた磁束表面 4 5 5 を遮断する) の陽極 9 2 0 ( 図 1 0 参照 ) 。 図 1 0 および 1 1 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。

#### 【 0 0 8 8 】

すべての場合において、これらの電極は、最高約 8 0 0 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。

#### 【 0 0 8 9 】

( F R C 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、F R C システム 1 0 上の標準プラズマ形成が続く。F R C 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 4 1 2、4 1 4、4 1 6、4 2 0、4 3 2、4 3 4 および 4 3 6 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 2 1 0 の R F T P パルス電力回路は、パルス高速磁場反転コイル 2 3 2 を駆動して、形成部分 2 0 0 内に約 - 0 . 0 5 T の一時的な逆バイアスを生成する。この点で、9 ~ 2 0 p s i の所定の量の中性ガスを、形成部分 2 0 0 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 2 0 0 の石英管チャンバ 2 4 0 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 R F ( 約数百キロヘルツ ) の磁場を、石英管 2 4 0 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 ( l o c a l s e e d i o n i z a t i o n r e g i o n ) の形でプレプレイオン化 ( p r e - p r e - i o n i z a t i o n ) を生成する。これに続いて、パルス高速磁場反転コイル 2 3 2 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 2 1 0 の主要パルスパワーバンクを燃やして、最高 0 . 4 T 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 2 3 2 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 2 4 0 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 2 4 0 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る。

#### 【 0 0 9 0 】

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 5  $\mu$  s 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 F R C を生成し、次いで高温の F R C は形成部分 2 0 0 から順方向磁場 ( 磁場蠕動 ) の時系列の装着、または形成管 2 1 0 ( 閉じ込めチャンバ 1 0 0 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 2 3 2 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 2 0 0 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 F R C は、より大きい直径閉じ込めチャンバ 1 0 0 に拡大し、この場合、疑似直流コイル 4 1 2 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。

#### 【 0 0 9 1 】

一旦北および南の形成 F R C が閉じ込めチャンバ 1 0 0 の中央平面近傍に到達すると、F R C は衝突する。衝突中、北および南の形成 F R C の軸方向の運動エネルギーは、F R C が単一の F R C 4 5 0 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、F R C 4 5 0 の平衡を調査するために閉じ込めチャンバ 1 0 0 の内で利用可能である。F R C システム 1 0 内の通常作動条件は、セパトリックスの半径が約 0 . 4 m および軸方向に約 3 m 延在する化合した F R C を生成する。さらなる特性は、約 0 . 1 T 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 1 k e V 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 F R C の耐用期間は、本来の特性構成減衰時間の約 1 m s に制限される。

#### 【 0 0 9 2 】

( 非持続作動の実験データ - 従来のレジーム )

10

20

30

40

50

図 1 2 は、F R C 4 5 0 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 2 0 0 から出て超音速  $v_z$  約  $2.5 \times 10^4$  km/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 F R C 4 5 0 を形成する。融合する F R C 4 5 0 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。

#### 【 0 0 9 3 】

F R C システム 1 0 の代表的な非持続放出からのデータは、図 1 3 A , 1 3 B , 1 3 C , および 1 3 D に時間関数として示されている。F R C 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 1 3 A 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。

10

#### 【 0 0 9 4 】

線集積密度は、 $z = 0$  に配置された 6 つのコードの  $CO_2 / He - Ne$  干渉計から図 1 3 B に示されている。垂直 ( $y$ ) F R C 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 1 3 C の密度等高線をもたらす。初めの 0 . 1 ms 間に一部の軸方向および径方向のスロッシング後、F R C は、中空密度プロファイル

20

#### 【 0 0 9 5 】

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 1 3 D に示されている。

#### 【 0 0 9 6 】

排除磁束アレイ全体からの分析は、F R C 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られる）の形状が、レーストラック型から楕円形に次第に進化することを示す。図 1 4 に示されたこの進化は、2 つの F R C から単一の F R C 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 F R C 磁束の約 1 0 % が、衝突中に再結合すると示唆している。

30

#### 【 0 0 9 7 】

F R C の長さは、F R C の耐用期間中に 3 m ~ 約 1 m に確実に収縮する。この収縮は図 1 4 に見られ、ほとんどの対流エネルギー損失は、F R C 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、F R C 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 1 3 および 1 4 に論じた放出に対して、F R C 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  $10$  mWb、 $7 \times 10^{19}$  粒子、および  $7$  kJ）は、F R C 平衡が低下するよう見えたと、最初のミリ秒後におよそ 1 桁低減する。

#### 【 0 0 9 8 】

40

（持続作動 - H P F レジーム）

図 1 2 ~ 1 4 における例は、いかなる持続もなしに F R C を減衰する特性である。しかし、いくつかの技法は、F R C システム 1 0 に展開されて、さらに F R C 閉じ込め（内部コアおよび縁層）を H P F レジームに向上させ、閉じ込めを持続させる。

#### 【 0 0 9 9 】

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 6 0 0 からビーム内の  $B_z$  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 F R C が閉じ込めチャンバ 1 0 0 内で融合した瞬間から 1 つの F R C 4 5 0 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、F R C 4 5 0 の方位電流に加えるベータatron軌道（F R C トポロジーの

50

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)、十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。

#### 【0100】

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であり、これは著しいFRCの主に電子の加熱をもたらす。高速イオンは、内部FRC磁場が本質的に低いので(0.1Tの外部軸方向磁場に対して平均約0.03T)、セパ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、FRCシステム10上に展開した壁ゲッター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。

#### 【0101】

##### ペレット照射

電子がより高温でFRCの耐用期間がより長い、超高速イオン集団がFRC450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FRC450の中に照射されて、FRC450のFRC粒子インベントリを持続させる。予想されるアブレーション時間スケールは十分に短いので、かなりのFRC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砕くことにより、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のパ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の中に入る直前に照射管の最後の部分の曲げ半径を締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パレル(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を持続を提供することができる。その結果、これはFRC450内の内部動圧ならびにFRC450の持続作動および耐用期間を維持する役に立つ。

#### 【0102】

一旦、除去された原子がFRC450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FRCプラズマにより衝突して加熱される。所望のFRC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FRC450を持続するシステムを形成する。

#### 【0103】

##### (CT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(CT)注入器が、主に、磁場反転配位(FRC)プラズマに燃料補給するために提供される。CT注入器720は、図22Aおよび22B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、CT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(MCPG)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23Aおよび23Bに示されるように、一対のCT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、CTを閉じ込め容器100内の中心FRCプラズマの中に注入する。CT注入

器 7 2 0 の放電端は、中性ビーム注入器 6 1 5 と同様に、閉じ込め容器 1 0 0 の長手方向軸に対してある角度で閉じ込め容器 1 0 0 の中央平面に向かって指向される。

#### 【 0 1 0 4 】

代替実施形態では、C T 注入器 7 2 0 は、図 2 4 A および 2 4 B に示されるように、C T 注入器 7 2 0 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 7 4 0 を含む。描写されるように、ドリフトチューブ 7 4 0 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 7 4 2 を含む。複数の診断ポート 7 4 4 が、チューブの長さに沿って描写される。

#### 【 0 1 0 5 】

C T 注入器 7 2 0 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ができると、( 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、8 3 . 1 mm であり、内側電極の外径は、5 4 . 0 mm である。内側電極 7 2 2 の表面は、好ましくは、電極 7 2 2 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 7 2 6 が、内側電極 7 2 2 の内側に搭載される。

#### 【 0 1 0 6 】

最近の実験では、最大約 1 0 0 k m / 秒の超音波 C T 平行移動速度が、達成された。他の典型的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 3 0 - 5 0 e V、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 F R C 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、F R C 粒子燃料補給は、F R C 粒子装荷量の約 1 0 ~ 2 0 % 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 F R C 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。

#### 【 0 1 0 7 】

##### 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ンを防止するまたは著しく低減することが望ましい。F R C システム 1 0 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 1 5 に示した外部サドルコイル 4 6 0 を介して実現される。サドルコイル 4 6 0 から横方向に印加された径方向の磁場は、回転する F R C 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  $F_e = -V_e \times |B_r|^2$  を生成する。F R C システム 1 0 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 . 0 0 1 T のみであることが必要である。約 0 . 0 1 5 T の対応する外部磁場は十分に小さいので、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ると、サドルコイル 4 6 0 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。

#### 【 0 1 0 8 】

##### ミラープラグ

ミラープラグ 4 4 0 内のパルスコイル 4 4 4 の設計により、適度( 約 1 0 0 k J ) 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。F R C システム 1 0 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 4 4 0 で収縮部 4 4 2 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 4 1 6 と連動してミラープラグ 4 4 0 を、磁力線をダイバータ電極 9 1 0 の上に導く、または磁力線を端部カスプ配位( 図示せず

10

20

30

40

50



）内で燃焼させるように、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。

【 0 1 0 9 】

またミラープラグ 4 4 0 自体も、中性ガス制御に寄与する。ミラープラグ 4 4 0 は、ダイバータ 3 0 0 の中へのガス逆流が、プラグの少量のガスコンダクタンス（わずか 5 0 0 L / s ）によって著しく低減するので、F R C 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 2 1 0 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 4 4 0 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、F R C 縁層 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。

10

【 0 1 1 0 】

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 】

$\tau_{||}$

20

は、最高 1 0 倍まで増加する。向上する

【数 5 】

$\tau_{||}$

は、F R C 粒子閉じ込めを容易に増加させる。

【 0 1 1 1 】

セパトリックス容積 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

【数 6 】

30

$(\tau_{||})$

によって均衡がとられたと仮定すると、

【数 7 】

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

が得られ、そこからセパトリックス密度勾配長さを

40

【数 8 】

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

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、セパトリックス半径、セパトリックス長さおよびセパトリックス密度である。F R C 粒子閉じ込め時間は、

【数 9 】

50

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

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FRC粒子損失が低減する。FRC粒子閉じ込めにおける全体の向上は、 $n_s$ が

【数 1 1】

$\tau_{\parallel}$

と共に増加するので、概ね二次方程式より若干少ない。

【0 1 1 2】

【数 1 2】

$\tau_{\parallel}$

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。

【0 1 1 3】

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。

【0 1 1 4】

上に論じたミラープラグで述べたように、

【数 1 3】

$\tau_{\parallel}$

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 $10^{22} / s$ ）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 $10^{13} \text{ cm}^{-3}$ 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、 $\lambda_{ii}$ 約 $6 \times 10^3 \text{ cm}$ であり、 $\lambda_{ii} \propto 1 / n R$

10

20

30

40

50

$R < L$ 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、 $\tau_{gd} \approx RL / 2V_s \approx 2 \text{ ms}$ であり、式中、 $V_s$ 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、 $\tau_c \approx 0.5 \tau_{ii} (1 + \ln R + (\ln R)^{0.5}) \approx 0.7 \text{ ms}$ 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、 $\tau_{gd} > \tau_{gd} \approx 2 \text{ ms}$ 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。

#### 【0115】

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。 $t$ 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FRC450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 $-1 \sim 0 \text{ ms}$ 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、十分に低温の形成プラズマが必要な場合がある。 $t$ が $< -2 \text{ ms}$ でオンする場合、プラズマ流は、形成の約 $1 \sim 3 \text{ m}^3$ 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に $10^{13} \text{ cm}^{-3}$ 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十分に可能である。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。

#### 【0116】

##### 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十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、FRC450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、 $E \times B$ 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。

#### 【0117】

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プラズマの十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。

#### 【0118】

##### （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 1 6 A , 1 6 B , 1 6 C , および 1 6 D はこの事実を示す。示されているのは、F R C 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 F R C を生成させることが極めて明白である。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 F R C 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 F R C 4 5 0 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。F R C の収縮は、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（放電のほぼ中間で約 4 M W ）が、特定の実験設定に関して、中性ビーム（約 2 . 5 M W ）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起因する。ビームを容器 1 0 0 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 1 9 】

図 1 7 A , 1 7 B , 1 7 C , および 1 7 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 1 7 は、時間関数として F R C 4 5 0 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 M W ）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 4 4 0 、プラズマガン 3 5 0 またはゲッターリング・システム 8 0 0 からのゲッターリングのいずれもなしに F R C システム 1 0 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 4 4 0 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 4 4 0 とプラズマガン 3 5 0 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 3 5 0 およびプラグ 4 4 0 の上にゲッターリング（この場合 T i ）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。

#### 【 0 1 2 0 】

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挙動を示す。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 1 0 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 1 0 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 1 0 の H P F レジームは、5 倍～ほぼ 2 0 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 1 0 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 1 0 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  $R^2 / r_i$  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、 $r_i$  は外部印加磁場において評価されたイオン・ラーモア半径（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 1 0 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、FRC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、HPFレジームの進歩は、FRCシステム10におけるFRC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。

#### 【0121】

さらなる比較のために、図18A, 18B, 18C, および18Dは、FRCシステム10における代表的なHPFレジーム放出からのデータを時間関数として示す。図18A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13A, 13B, 13C, および13Dに示したように、従来のレジームCRにおける通常の性能と比較して、HPF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。

#### 【0122】

線集積密度追跡の代表的コードは、図18Cにおけるそのアーベル逆変換相補、密度等高線と共に、図18Bに示されている。従来のFRCレジームCRと比較して、図13A, 13B, 13C, および13D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、HPF照射においてわずかに低く、これは、図18D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。

#### 【0123】

図18A, 18B, 18C, および18D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、0.5ms、1msおよび1msである。放出への基準時間1msで、保存されたプラズマエネルギーは2kJであるが、損失は約4MWであり、この目標を中性ビーム持続に非常に適合させる。

#### 【0124】

図19は、新しく確立された実験用HPF磁束閉じ込めスケーリングの形態における、HPF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、 $t \sim 0.5\text{ms}$  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、HPF状態および大軌道（すなわち、FRC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。

#### 【0125】

HPF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FRC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FRCシステム10内の代表的HPF体系放電からのデータを、プロットBには、FRC450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FRCシステム10内の投影された代表的HPF体系放電のデータを示す。プロットAに関しては、約2.5～2.9MWの範囲内の総パワーを伴う中性ビームが、約6msの活性ビームパルス長のために、FRC450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5.2msであった。より最近のデータは、約7.2msのプラズマ反磁性寿命時間が、約7ms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 2 6 】

図 1 6 A , 1 6 B , 1 6 C , および 1 6 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 4 5 0 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 M W ）が、特定の実験設定に関して、中性ビーム（約 - 2 . 5 M W ）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 6 0 0 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であろう。

10

## 【 0 1 2 7 】

プロット B は、約 6 m s の活性ビームパルス長および約 1 0 M W を若干上回る中性ビームガン 6 0 0 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 1 5 k e V 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 1 1 0 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、標的半径 0 . 1 9 m で直角よりも約 2 0 ° 小さかった。注入角度は、直角よりも 1 5 ° ~ 2 5 ° 小さい範囲内で変更されることができる。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 F R C が閉じ込めチャンバ 1 0 0 内で融合する瞬間から、中性ビーム注入器 6 0 0 から 1 つの F R C 4 5 0 の中に注入される。

20

## 【 0 1 2 8 】

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 M H D 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。

30

## 【 0 1 2 9 】

プロット B によって示されるように、F R C 4 5 0 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、重要となる相関プロット B は、ビームがオフにされると、プラズマまたは F R C が、その前ではなく、その時間において、減衰し始め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。

## 【 0 1 3 0 】

図 2 1 A , 2 1 B , 2 1 C , 2 1 D および 2 1 E 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 F R C 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、N B 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 N B 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、N B 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、N B 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。

40

高調高速波電子加熱

## 【 0 1 3 1 】

50

図3 A、3 B、3 C、3 D、3 E、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3 C、3 Dおよび3 E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。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ランブ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、例示的目的のためだけに、最大30msパルス長を伴う約20+MWの電力の中性ビーム注入器(NBI)システム600を含む。

【0132】

10

しかしながら、中性ビーム注入は、イオン-電子衝突を通じた電子上の電力減衰の機構に起因して、不良電子加熱効率を有する傾向にある。本FRCシステム10のFRCプラズマの一意の特性、例えば、プラズマが著しく過密度であること(セパトリックスの内側では  $p_e > 30 \quad c_e$ ) および磁場がプラズマコア内でゼロまで急降下することは、FRCプラズマのコア内での電子の加熱を非常に困難にする。電子サイクロトロン共鳴周波数(またはその第2または第3調波)加熱等の従来の電子加熱シナリオは、トカマク型、ヘリカル型、およびミラー型機械において広く利用されているが、プラズマコアの中への不良波到達可能性の問題に起因して、FRCプラズマに適合されることができない。電子バーンスタイン波、高域混成共鳴波、およびホイッスラー波等の他の電子加熱シナリオも、それらがFRCプラズマに印加されるとき、類似問題に遭遇する、または低加熱効率を有する。

20

【0133】

例示の実施形態では、本FRCシステム10は、高調高速波電子加熱を含み、プラズマ電子温度を上昇させ、したがって、FRC持続性をさらに改良する。図25に示されるように、本FRCシステム10は、FRCシステム10上で展開され、閉じ込め容器100内で無線周波数範囲内の高調高速波をFRCプラズマの中に伝搬し、FRCプラズマのコア内で約150eVから約1keV超への電子加熱を提供するように構成される、例えば、4つのストラップを伴う位相アレイアンテナ等の1つ以上のアンテナ650を含む。例示の実施形態では、アンテナ650は、約15~25MHzにおいて約2MWのRFシステムを備えるであろう。無線周波数範囲内の高調高速波を介した電子の加熱は、有利には、高速イオン電荷交換損失を低減させ、プラズマ閉じ込めを改良し、かつプラズマ電流駆動効率を向上させ、これは、電子温度 $T_e$ に伴って上昇する。

30

【0134】

本FRCシステム10のFRCプラズマ等の高性能FRCプラズマ内の電子加熱のシミュレーションが、以下のシナリオで実施された。(1)高域混成共鳴周波数(50GHz)、(2)電子サイクロトロン共鳴(ECR)周波数(28GHz)、(3)2.45GHz、5GHz、8GHz、および18GHzの周波数における電子バーンスタイン波(EBW)、(4)0.5GHzにおけるホイッスラー波、(5)15MHzにおけるHHFW。シミュレーション結果は、HHFWの体系が、非常に強力な単回通過電力吸収(約100%)を有するだけでなく、また、FRCプラズマのコアの中への非常に良好な波到達可能性を有することを明確に示した。これらのシミュレーションは、本高調高速波(HHFW)加熱を使用することによって、良好な波到達可能性と電子上の効率的電力減衰との間の矛盾が解消されることを示し、これは、コア電子加熱およびオフ軸電流駆動の実験のためのNSTX等の高ベータ過密度球状トカマク型(ST)プラズマへの適合にも成功した。

40

【0135】

HHFWの加熱機構は、電子ランダウ減衰(LD)(電子に作用する力は、 $F_{LD} = e E_{\parallel}$ である)とランジットタイム加熱(TTMPまたはMP)(力は、 $F_{MP} = - \quad \quad \quad / \quad \quad \quad$ ( $\mu B_{\parallel}$ )である)の両方を含む。ここでは、 $e$ および $\mu$ は、電子の電荷および磁気モーメントであって、 $E_{\parallel}$ および $B_{\parallel}$ は、それぞれ、高速波電気および磁場の平行成分で

50

ある。トカマク型プラズマにおける従来の高速波電子加熱は、優勢LDを介した任意の有意な吸収のために波平行位相速度

【数14】

$$V_{ph//} \equiv \omega/k_{//} \approx V_{Te}$$

(電子熱速度)を要求する。すなわち、MPは、電子減衰に有意な寄与をもたらさず、多くの場合、無視され得る。さらに、トカマク型プラズマ内の高速波の吸収は、弱く、したがって、通常、複数回通過電力吸収を向上させるために、電子サイクロトロン共鳴周波数におけるマイクロ波による強い電子予熱を有することが要求される。しかしながら、NSTXのような高ベータSTプラズマでは、MPが、電子LD単独より、電子上の電力吸収を有意に増加させ、より高い位相速度の範囲

【数15】

$$\omega/k_{//} \leq 2.5 V_{Te}$$

において実質的に大きくなることを見出された。MPとLDの組み合わせは、100%単回通過吸収につながり得る。

【0136】

本FRCシステム10の高性能FRCプラズマ等の高ベータ体系(コアプラズマ内で約90%の $\beta_e$ の値を有する)では、減衰は、磁気ポンピングによって左右され、これは、 $Im k_{//} = n_e T_e / B^2$ と見積もられ得、磁気ポンピングは、

【数16】

$$\omega/k_{//} \leq 2.5 V_{Te}$$

のとき有意となる。本FRCシステム10に関するシミュレーションでは、 $T_e = 150$  eV、 $T_i = 800$  eV、 $n_e = n_i = 3.2 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 、磁場 $B = 1000$  Gaussであって、HHFWは、1 MW発射電力を有し、その周波数は、 $f = 15 \text{ MHz}$ であるように選択され、したがって、 $\omega = 2\pi f = 10^8 \text{ rad/s}$ 、 $c_i[H] = 20$ 、 $c_i[D] \ll L_H$ であって、99%を上回る単回通過吸収が、達成され、電子上で減衰されたHHFW電力は、90%も高いことが示された。イオン上で減衰される、または衝突を通して減衰される電力は、それぞれ、5%未満であり得る。さらに、電子、イオン上、および衝突を通じた電力堆積の半径方向プロファイルは、60%を上回るHHFW電力がFRCプラズマのセパトリックス層の内側で減衰されることを示した。

【0137】

図26Aおよび26Bは、本FRCシステム10のFRCプラズマの完全な半径方向密度プロファイルおよび完全な半径方向電子温度プロファイルを図示する。本開示の実施形態による、本FRCシステムは、表1に示されるパラメータおよび値の対に従って構成される。

10

20

30

40

50



【表 1】

パラメータ	値
$B_{\text{ext}}$ , kG	~1
$r_s$ , cm	~36
$L$ , m	2 - 3
$N_e$ , cm <sup>-3</sup>	~ $3 \times 10^{13}$
$T_i$ , eV	500 - 800
$T_e$ , eV	100 - 150

表1:本FRCシステムに関するパラメータ

## 【0138】

図27A - 27Dは、本FRCシステム10の中央平面( $Z = 0$ )におけるC - 2U平衡および特性周波数の半径方向プロファイルを図示する。観察される課題は、セパトリックス層の内側では、プラズマが、過密度( $p_e > 30 \text{ } c_e$ )であって、Bが、11cm半径方向距離内において0まで急降下することである。全てのECR高調波共鳴層は、非常に狭い領域内に充塞され、したがって、マイクロ波は、非常に短距離にわたってのみ半径方向に伝搬し得る。

## 【0139】

以下のシミュレーションは、以下のようなマイクロ波周波数におけるシナリオに関して、GENRAY -クレイトレーシングコードを用いて行われた。

EBW(2.45GHz、5GHz、8GHz、18GHz、および28GHz)

高域混成共鳴周波数(50GHz、55GHz)

ホイッスラー波周波数(0.5 ~ 1.0GHz)

残念ながら、これらのシナリオは、プラズマコアの中への波侵入と電子上の効率的電力減衰との間の矛盾を解消することができない。

## 【0140】

図28A - 28Cは、本FRCシステム10のFRCプラズマ内での8GHzにおけるマイクロ波の電子バースタイン波(EBW)電子加熱条件下での電力吸収およびモード変換の観察を図示する。図28A - 28Cでは、6つの光線が、異なる角度で発射され、明確なO - > X - > B変換が、観察される。90%を上回るマイクロ波電力が、第4高調波ECR層(セパトリックスの外側)における電子によって吸収され得る。これは、非常に局所的吸収をもたらす。EBW体系は、プラズマ縁においてのみ電子を加熱することができ、プラズマコアの中に侵入することができない。

## 【0141】

図29A - 29Fは、本FRCシステム10のFRCプラズマ内での50GHzにおけるマイクロ波の電子加熱条件下での電力吸収およびモード変換の観察を図示する。図29A - 29Fでは、O - > X - > B変換後、光線が伝搬を停止し、30%のマイクロ波電力が吸収されることが観察される。

## 【0142】

図30A - 30Cは、本FRCシステム10のFRCプラズマ内での0.5GHzにおけるホイッスラー波の電子加熱条件下での電力吸収の観察を図示する。図30A - 30Cでは、0.5GHz(約 $1/4 f_{ce}$ )におけるホイッスラー波は、高電力吸収を有するが、不良波到達可能性を有することが観察される。波が、大N// (16から開始する)を伴って発射され、大曲率の磁場が存在するとき、波は、転向する。

## 【0143】

これらの加熱体系と対照的に、高調高速波加熱は、シミュレーション結果によって実証されるように、本FRCシステム10のFRCプラズマ等の高平均

## 【数 1 7】

 $\beta_e (\approx 90\%)$ 

を伴う F R C プラズマに関して、以下を提供する。 1 ) 強固な単回通過吸収

## 【数 1 8】

 $(\approx 100\%)$ 

、 2 ) プラズマコアへの良好な到達可能性、 3 ) 最大 6 0 % のコア電子による効率的電力吸収、 4 ) 電子上の電力減衰は、磁気ポンピング ( T T M P ) によって左右され、これは

10

 $1 \text{ m k} \quad n_e T_e / B^2 \quad e$  と見積もられ得る。

## 【 0 1 4 4】

図 3 1 は、本 F R C システム 1 0 の F R C プラズマ内での密度プロファイルおよび波伝搬を図示する。図 1 0 では、 $T_e = 150 \text{ eV}$  である一方、 $T_e$  (セパトリックス) =  $100 \text{ eV}$  である。 $T_i = 800 \text{ eV}$  である一方、 $T_i$  (セパトリックス) =  $200 \text{ eV}$  である。熱イオンは、電子と同一密度およびプロファイルを有する。高速イオン情報は、図 3 1 には含まれない。図 3 2 は、本 F R C システム 1 0 の F R C プラズマ内でのポロイダル磁束プロファイルおよび波伝搬を図示する。

## 【 0 1 4 5】

図 3 3 は、本 F R C システム 1 0 の F R C プラズマ内での例示的密度プロファイルおよび波伝搬軌道を図示する。図 3 3 では、 $T_e = 150 \text{ eV}$  である一方、 $T_e$  (セパトリックス) =  $100 \text{ eV}$  である。 $T_i = 800 \text{ eV}$  である一方、 $T_i$  (セパトリックス) =  $200 \text{ eV}$  である。図 3 3 では、 $f = 6 \text{ MHz}$  (初期 /  $c_i [D]$  約 9 ) であって、 $1 \text{ MW}$  総電力を伴う。5 つの光線が、中央平面において発射され、初期  $n / \nu$  は、4 ~ 6 である。

20

## 【 0 1 4 6】

図 3 4 は、本 F R C システム 1 0 の F R C プラズマ内での例示的 /  $c_i [D]$  プロファイルおよび波伝搬軌道を図示する。図 3 4 では、 /  $c_i [D] > 2.8$  のレベルは、明確にするために表示されない。間隙内の点線は、磁束輪郭である。

## 【 0 1 4 7】

図 3 5 は、本 F R C システム 1 0 の F R C プラズマ内での波伝搬の距離に伴う例示的電力減衰を図示する。図 3 5 では、5 つの光線が、異なる  $n / \nu$  4 ~ 6 を伴って含まれる。各光線は、発射点において  $200 \text{ kW}$  電力を有する。有意な電力減衰の領域は、 $30 \text{ cm} \sim 50 \text{ cm}$  である。

30

## 【 0 1 4 8】

図 3 6 は、本 F R C システム 1 0 の F R C プラズマ内での例示的電力吸収プロファイルを図示する。図 3 6 では、H H F W がセパトリックス層を通して侵入するとき、イオンおよび電子上に有意な電力吸収が、観察される。

## 【 0 1 4 9】

図 3 7 A および 3 7 B は、本 F R C システム 1 0 の F R C プラズマ内での電力密度の例示的半径方向プロファイルを図示する。電力密度の半径方向プロファイルは、( a ) 総吸収、( b ) 電子上の減衰、( c ) イオン上の減衰、および ( d ) 衝突減衰に関する。図 3 7 A では、 $P_{total} = 1000 \text{ kW}$ 、 $P_e = 448 \text{ kW}$ 、 $P_i = 486 \text{ kW}$ 、および  $P_{cl} = 66 \text{ kW}$  である。図 3 7 B では、 $P_{total} = 999 \text{ kW}$ 、 $P_e = 720 \text{ kW}$ 、 $P_i = 194 \text{ kW}$ 、および  $P_{cl} = 85 \text{ kW}$  である。100 % の単回通過吸収が、プラズマコア内での H H F W 加熱の間に観察される。

40

## 【 0 1 5 0】

図 3 8 は、本 F R C システム 1 0 の F R C プラズマ内での減衰電力密度の例示的 2 D プロファイルを図示する。

## 【 0 1 5 1】

50

図 39 は、本 F R C システム 10 の F R C プラズマ内での例示的電力減衰プロファイルを図示する。図 39 では、 $|B|$  が最小値に接近するとき、電子上の電力減衰が最大値まで増加することが、観察される。非常にわずかな  $|E_{\parallel}/E|$ 、したがって、電力吸収に及ぼすランダウ減衰のわずかな影響が、観察される。

#### 【0152】

図 40 は、本 F R C システム 10 の F R C プラズマ内での例示的有限イオンラーモア半径プロファイルを図示する。図 40 では、有意な有限イオンラーモア半径効果が、イオン温度が  $T_i < 1 \text{ keV}$  であるときでも観察される。セパトリックスの内側では、 $K \times L_{\text{armor}} \gg 1$  である。これは、中央平面 ( $z = 0$ ) における磁場がヌルであるときに無限となる。これは、H H F W との熱イオン相互作用、したがって、熱イオン上の電力減衰につながり得る。

10

#### 【0153】

図 41 は、本 F R C システム 10 の F R C プラズマ内での例示的電力吸収プロファイルを図示する。図 41 では、熱イオンによる有意な電力吸収が、観察される。イオンサイクロトロン共鳴吸収が、高調波数  $n = (11 - 20)$  で観察される。イオン上の有意な電力減衰に関する条件は、 $K \times L_{\text{armor}} \gg 1$  および  $|E_{\parallel}| < 2 V_{Ti}$  である。

#### 【0154】

図 42 は、本 F R C システム 10 の F R C プラズマ内での例示的プロファイルを図示する。図 42 では、(a) 局所  $|B(r, z)|$ 、(b) 垂直波数  $K_z$  の虚数部、(c)  $|E_{\parallel}|/|E|$  の比率、および (d) 平行屈折率  $n_{\parallel}$  の変化が、波伝搬に沿った距離に伴って観察される。

20

#### 【0155】

本 F R C システム 10 の F R C プラズマの H H F W 加熱のシミュレーションは、H H F W 加熱が、1) 100% 単回通過電力吸収、2) T T M P がコア電子加熱のための優勢電力吸収機構であること、3) 波平行位相速度  $V_{ph}/v_{Te} = \omega/k_{\parallel}/v_{Te} < 1$  であるときに生じる電子上の最大電力減衰、および 4) 熱イオンによる有意な電力吸収が、 $K \times L_{\text{armor}} \gg 1$  および  $|E_{\parallel}| < 2 V_{Ti}$  の条件が保持されるときに発生する傾向にあることをもたらしことを明確に実証した。

#### 【0156】

本開示のある実施形態によると、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方法は、閉じ込めチャンバ内でプラズマの周りに F R C を形成するステップと、複数の中性ビームを F R C 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と、F R C プラズマの中に伝搬する高調高速波を用いて、F R C プラズマの電子を加熱するステップとを含む。

30

#### 【0157】

本開示のさらなる実施形態によると、電子を加熱するステップは、複数の高調高速波を 1 つ以上のアンテナから閉じ込めチャンバ内の F R C プラズマの中に発射するステップを含む。

#### 【0158】

本開示のさらなる実施形態によると、電子を加熱するステップは、複数の高調高速波を 1 つ以上のアンテナから閉じ込めチャンバ内の F R C プラズマの中に閉じ込めチャンバの中央平面からある発射角度で発射するステップを含む。

40

#### 【0159】

本開示のさらなる実施形態によると、発射角度は、閉じ込めチャンバの中央平面から約  $15^\circ \sim 25^\circ$  の範囲内である。

#### 【0160】

本開示のさらなる実施形態によると、発射角度は、閉じ込めチャンバの長手方向軸に対する直角に近いが、該直角未満である。

#### 【0161】

本開示のさらなる実施形態によると、1 つ以上のアンテナは、複数のストラップを伴う

50

、位相アレイアンテナである。

【0162】

本開示のさらなる実施形態によると、高調高速波は、無線周波数範囲内の高速波である。

【0163】

本開示のさらなる実施形態によると、電子を加熱するステップは、電子を約150 eVから約1 keV超まで加熱するステップを含む。

【0164】

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、プラズマ電子温度を約1.0 keV超まで上昇させるステップを含む。

10

【0165】

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両端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両端内でミラー磁場を発生させるステップを含む。

【0166】

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両端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両端内でミラー磁場を発生させるステップを含む。

20

【0167】

本開示のさらなる実施形態によると、FRCを形成するステップは、形成FRC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FRC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FRCは、FRCを形成するように融合する、ステップを含む。

【0168】

本開示のさらなる実施形態によると、FRCを形成するステップは、形成FRCを閉じ込めチャンバの中央平面に向かって加速させながら、形成FRCを形成するステップと、形成FRC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FRCを加速させるステップとのうちの1つを含む。

30

【0169】

本開示のさらなる実施形態によると、形成FRCを第1および第2の形成区分から閉じ込めチャンバの中央平面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FRCを通過させるステップを含む。

【0170】

本開示のさらなる実施形態によると、形成FRC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FRC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。

40

【0171】

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。

【0172】

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。

【0173】

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

50

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。

【0174】

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で発生させるステップを含む。

【0175】

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。

【0176】

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。

【0177】

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。

【0178】

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。

【0179】

本開示のさらなる実施形態によると、本方法はさらに、ゲッター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。

【0180】

本開示のさらなる実施形態によると、ゲッターリングシステムは、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。

【0181】

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

【0182】

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。

【0183】

本開示のさらなる実施形態によると、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、ある電位の分布を F R C の開磁束面群に印加するステップを含む。

【0184】

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 ( C T ) プラズマを第 1 および第 2 の C T 注入器から F R C プラズマの中に閉じ込めチャンバの中央平面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 C T 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。

【0185】

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

10

20

30

40

50

維持するためのシステムは、閉じ込めチャンバと、閉じ込めチャンバに結合される、第1および第2の直径方向に対向するFRC形成区分と、FRC形成区分に結合される、第1および第2の直径方向に対向するダイバータと、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、擬似直流ミラーコイルの第1および第2のセットとを備える、磁気システムと、閉じ込めチャンバの周囲に位置付けられる、アンテナシステムであって、高調高速波をFRCプラズマの中に発射し、プラズマ電子を加熱するように構成される、アンテナシステムとを備える。

10

【0186】

20

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、プラズマ電子温度を約1.0 keV超まで上昇させ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、アンテナシステムは、高調高速波を閉じ込めチャンバの中央平面からある発射角度でFRCプラズマの中に発射するように位置付けられる、1つ以上のアンテナを含む。

【0188】

本開示のさらなる実施形態によると、発射角度は、閉じ込めチャンバの中央平面から約15°～約25°の範囲内である。

30

【0189】

本開示のさらなる実施形態によると、発射角度は、閉じ込めチャンバの長手方向軸に対する直角に近いが、該直角未満である。

【0190】

本開示のさらなる実施形態によると、アンテナシステムは、複数のストラップを伴う位相アレイアンテナを含む。

【0191】

本開示のさらなる実施形態によると、高調高速波は、無線周波数範囲内の高速波である。

【0192】

本開示のさらなる実施形態によると、本システムは、FRCプラズマ電子を約150 eVから約1 keV超に加熱するように構成される。

40

【0193】

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。

【0194】

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

50

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。

【0195】

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。

【0196】

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。

【0197】

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り、方位角的に対称な方式において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。

【0198】

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。

【0199】

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

【0200】

本明細書に提供される任意の実施形態に関し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、一実施形態のみにに関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。

【0201】

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ができると理解されたい。

【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

10

20

30

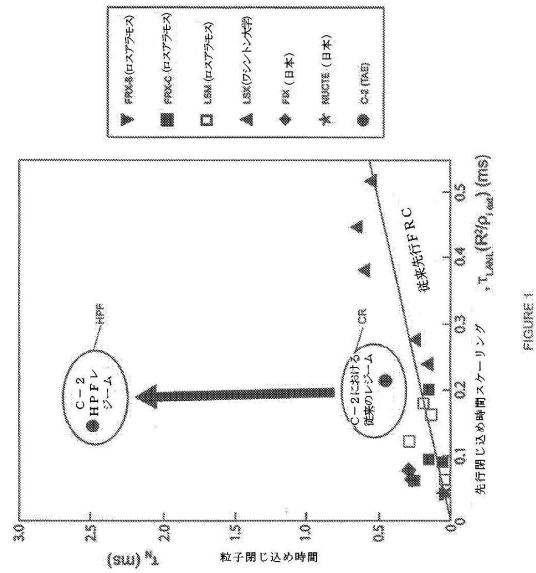
40

50

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。

【図面】

【図 1】



【図 2】

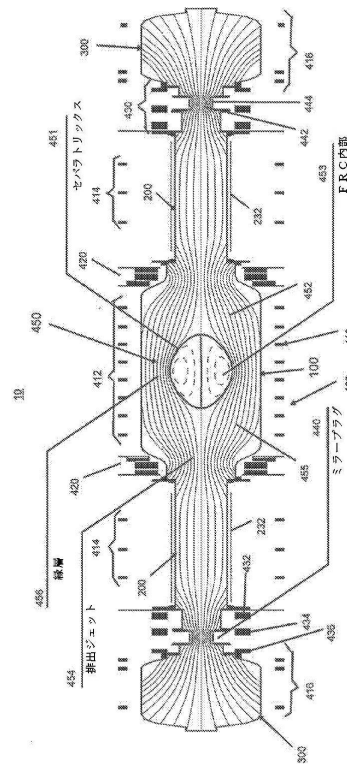


FIGURE 2



【図 3 A】

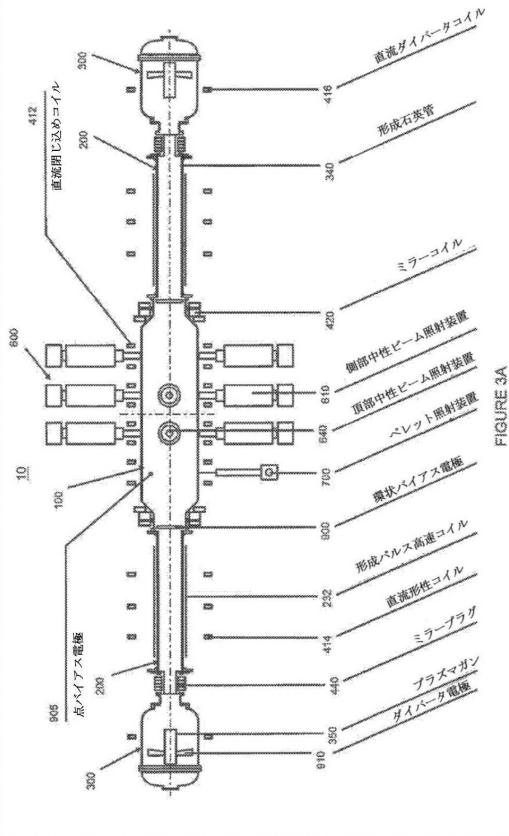


FIGURE 3A

【図 3 B】

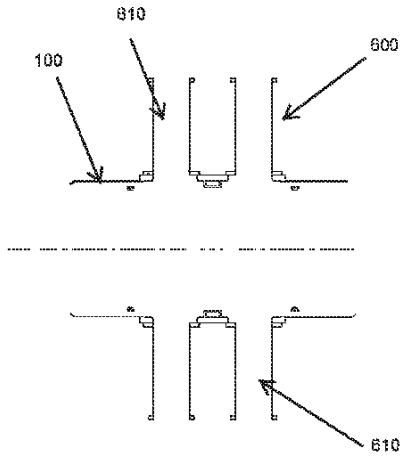


FIGURE 3B

【図 3 C】

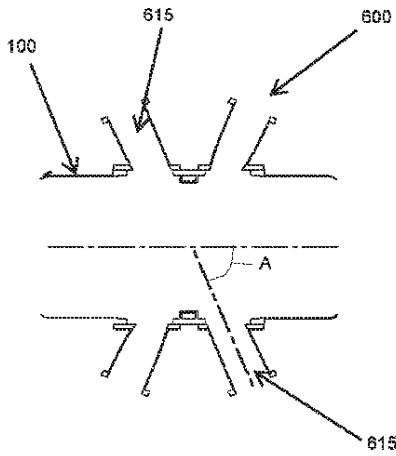


FIGURE 3C

【図 3 D】

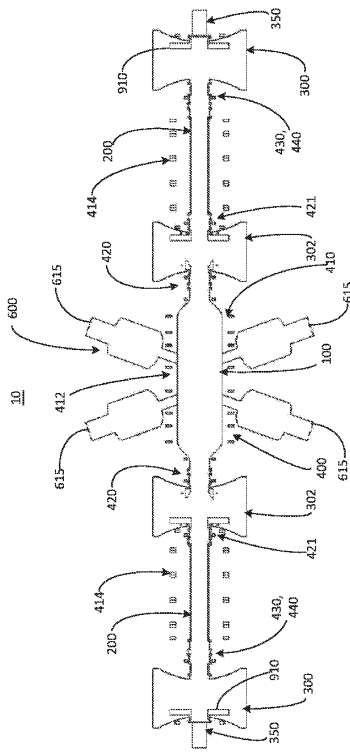


FIGURE 3D

10

20

30

40

50

【図 3 E】

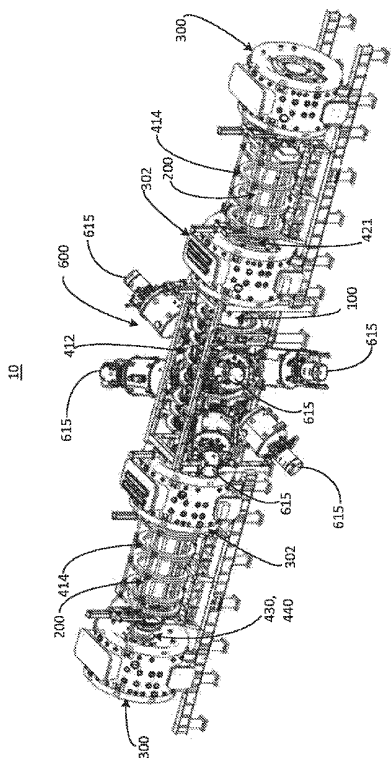


FIGURE 3E

【図 4】

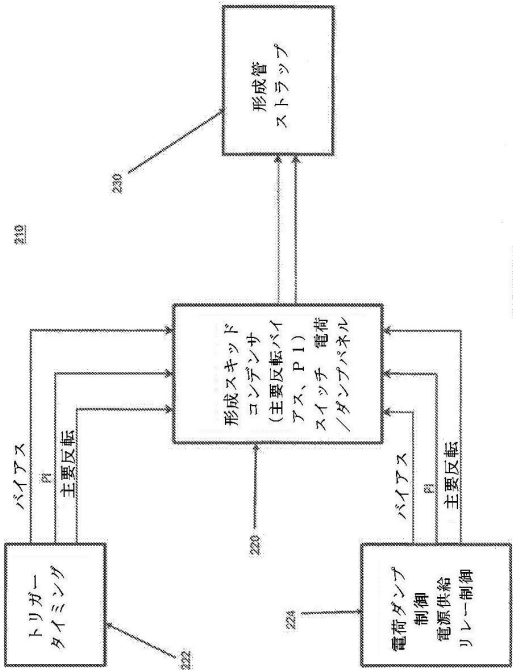


FIGURE 4

【図 5】

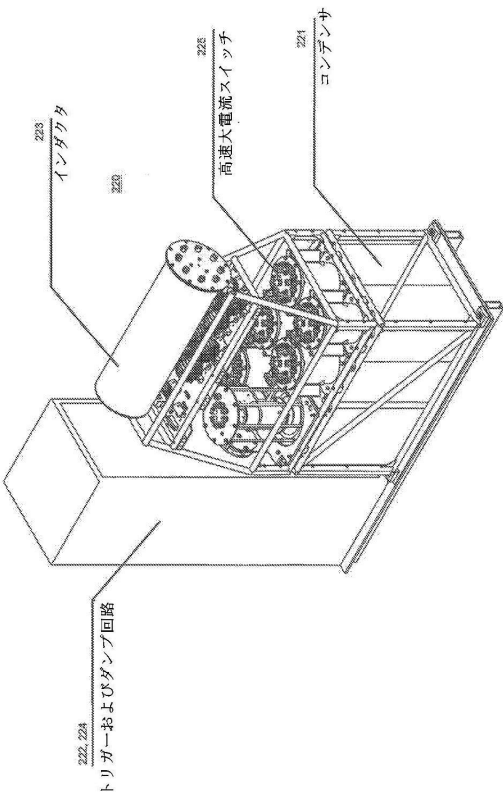


FIGURE 5

【図 6】

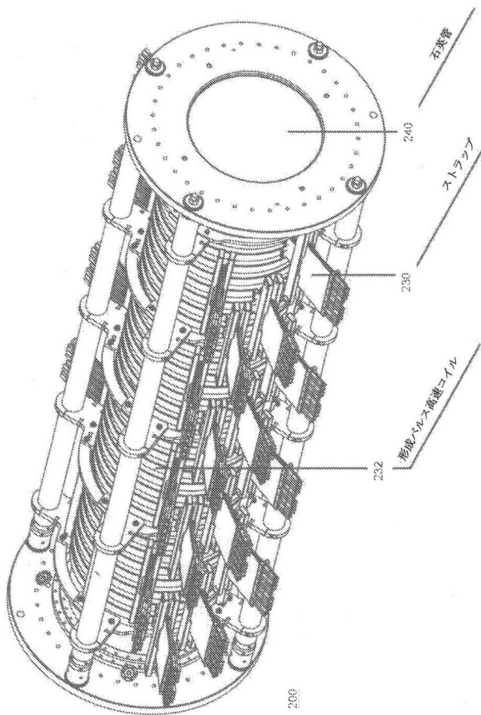


FIGURE 6

10

20

30

40

50

【図 7】

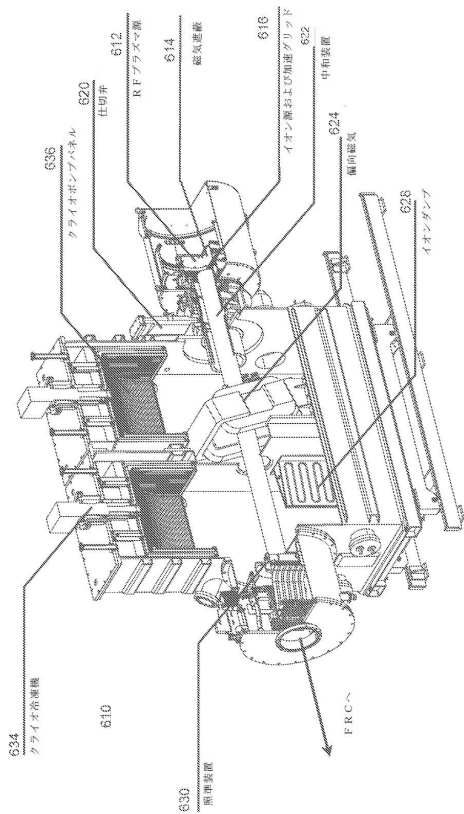


FIGURE 7

【図 8】

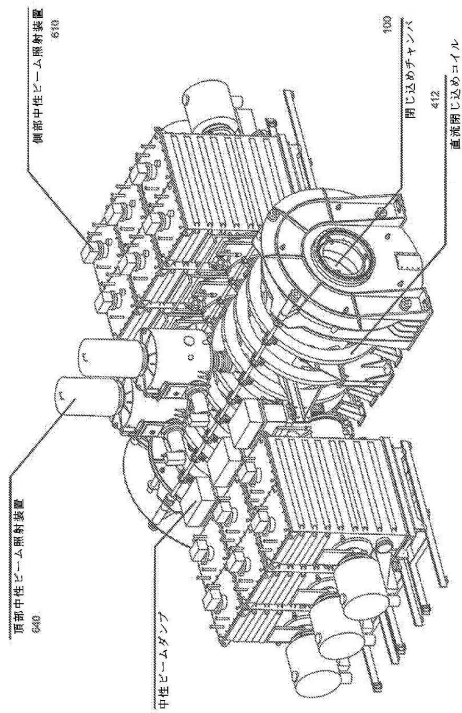


FIGURE 8

【図 9】

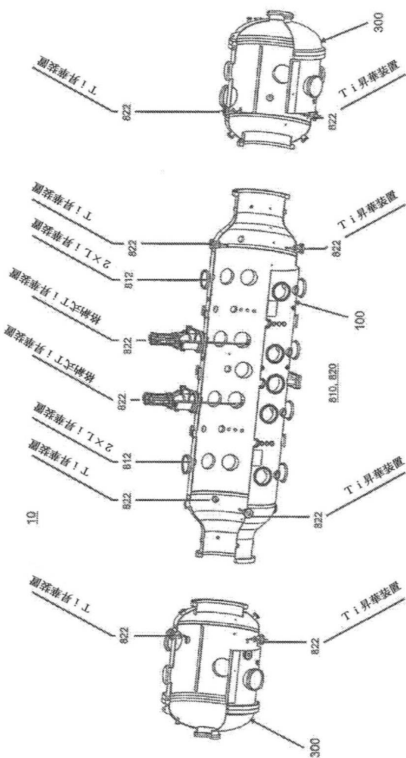


FIGURE 9

【図 10】

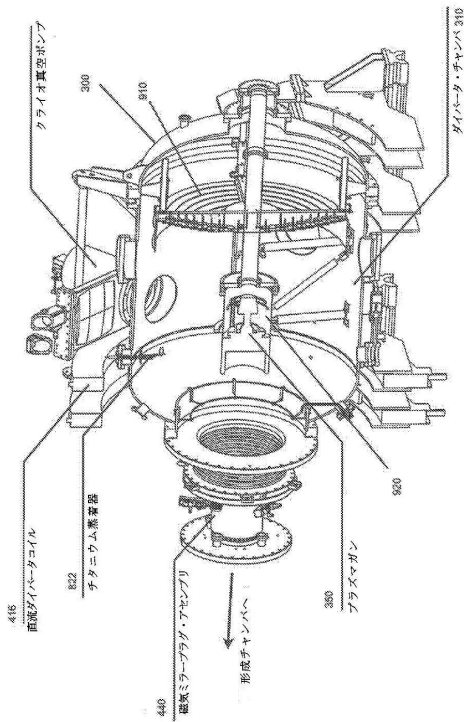


FIGURE 10

10

20

30

40

50

【図 1 1】

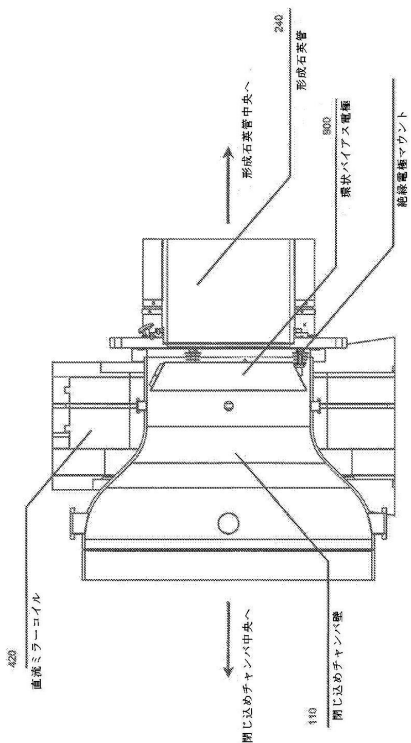


FIGURE 11

【図 1 2】

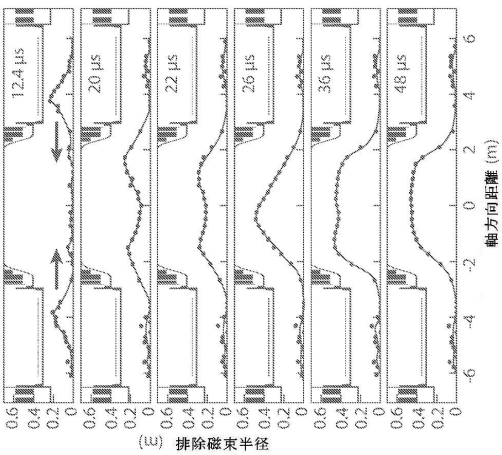


FIGURE 12

10

20

【図 1 3】

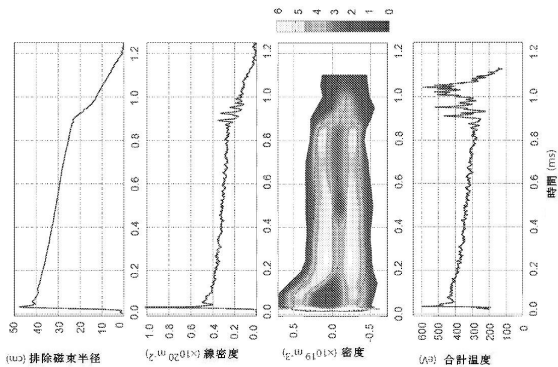


FIGURE 13A

FIGURE 13B

FIGURE 13C

FIGURE 13D

【図 1 4】

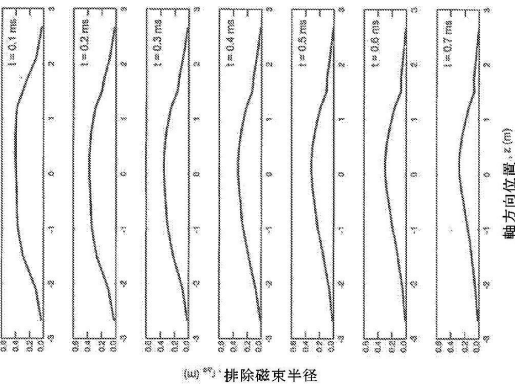


FIGURE 14

30

40

50

【図 15】

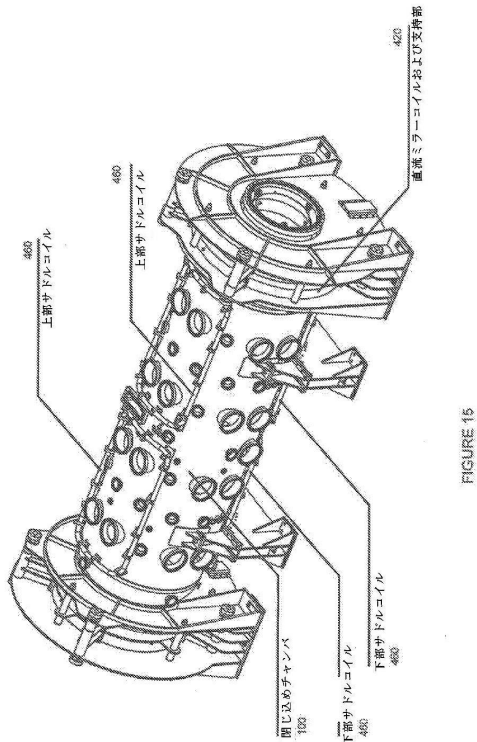
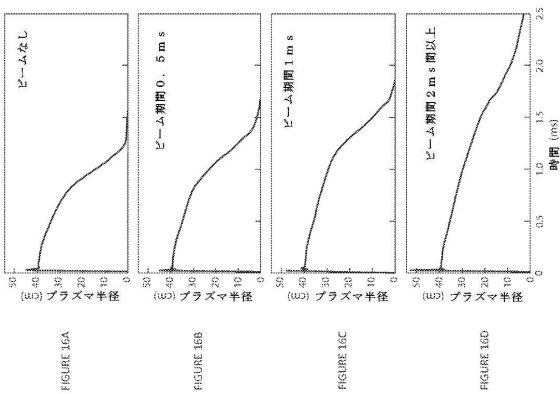


FIGURE 15

【図 16】



10

20

【図 17】

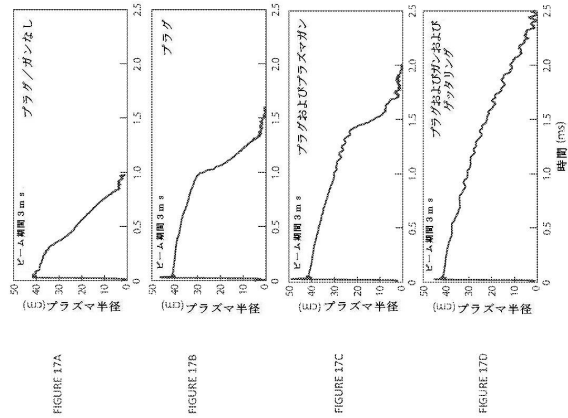


FIGURE 17A

FIGURE 17B

FIGURE 17C

FIGURE 17D

【図 18】

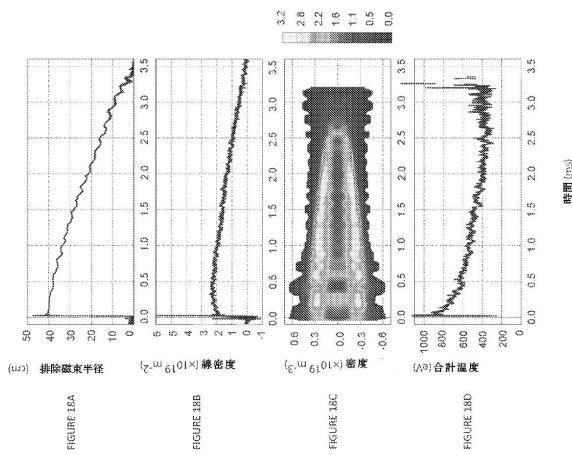


FIGURE 18A

FIGURE 18B

FIGURE 18C

FIGURE 18D

30

40

50

【図 19】

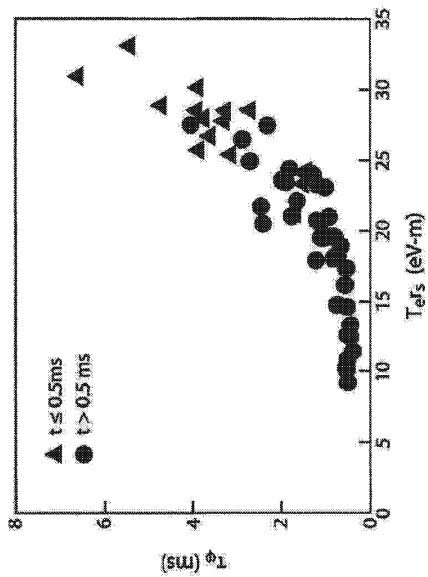


FIGURE 19

【図 20】

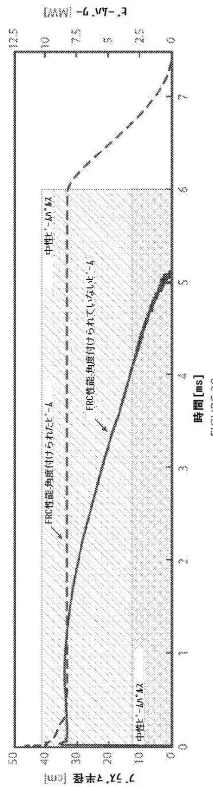
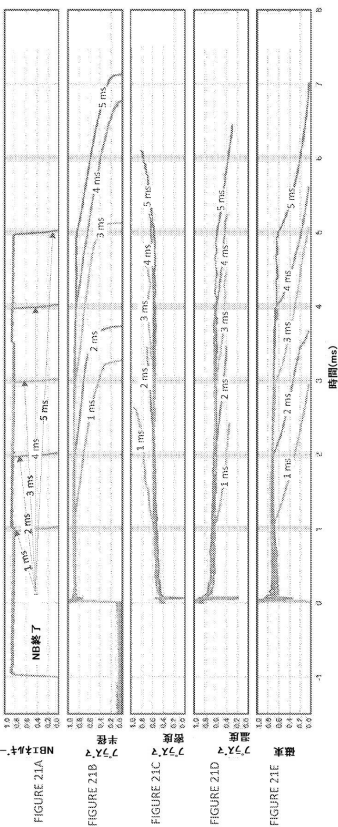


FIGURE 20

【図 21】



【図 22】

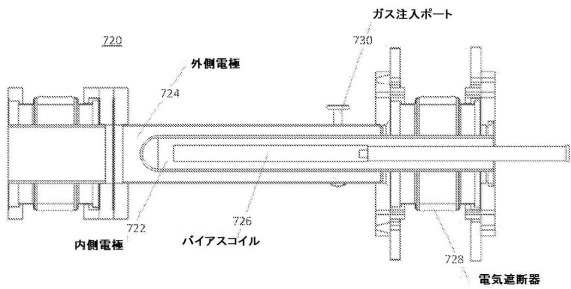


FIGURE 22A

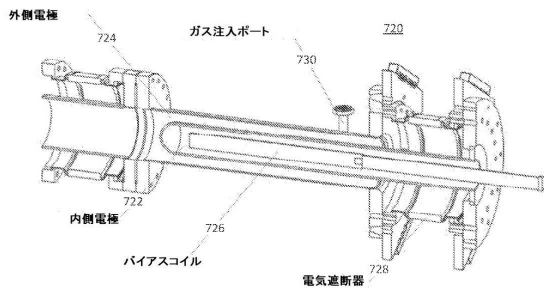


FIGURE 22B

10

20

30

40

50

【 図 2 3 】

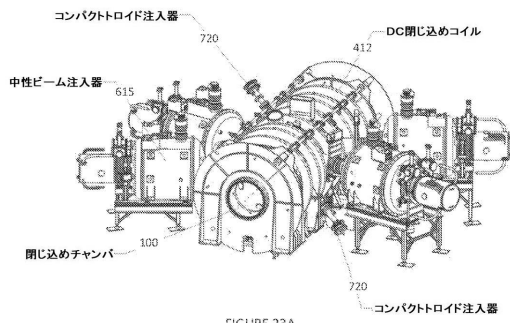


FIGURE 23A

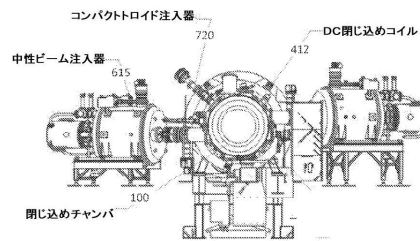


FIGURE 23B

【 図 2 4 】

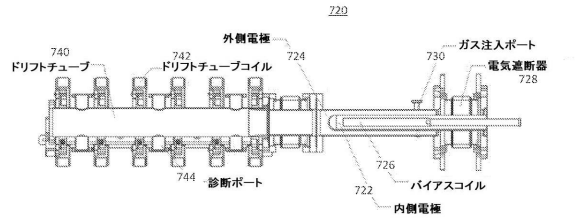


FIGURE 24A

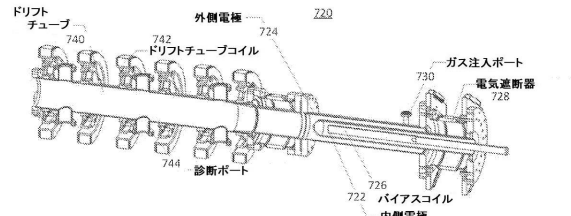


FIGURE 24B

10

【 図 2 5 】

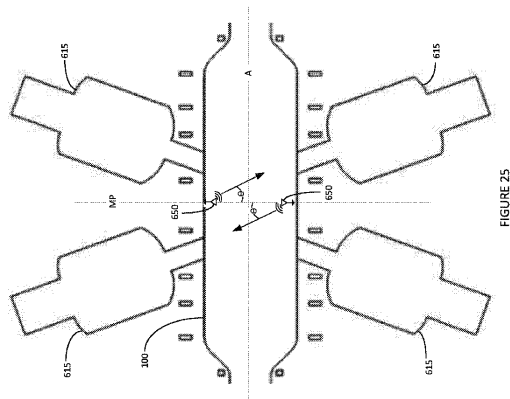


FIGURE 25

【 図 2 6 】

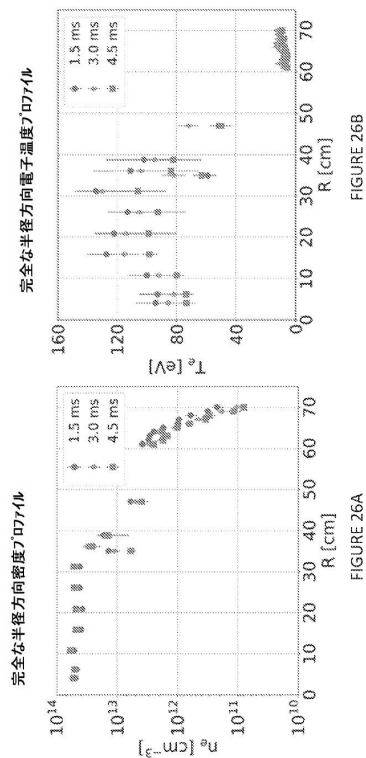


FIGURE 26B

FIGURE 26A

20

30

40

50

【図 27】

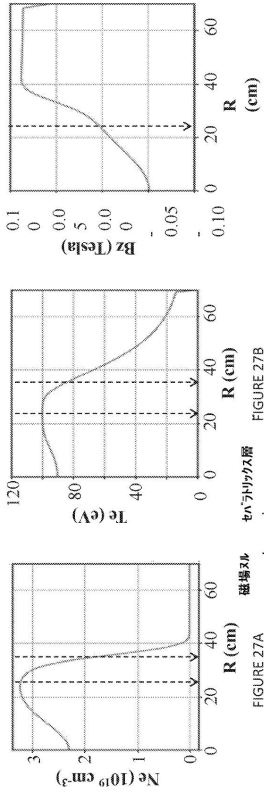


FIGURE 27C

FIGURE 27A

FIGURE 27B

FIGURE 27D

【図 28】

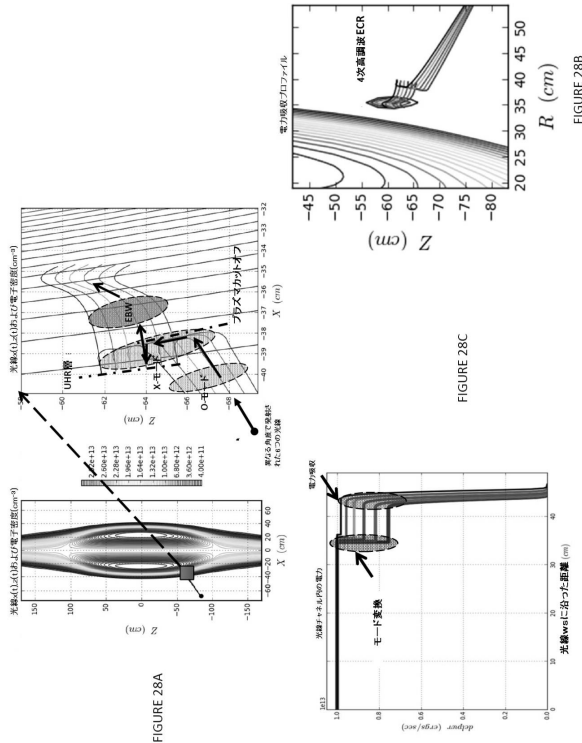


FIGURE 28B

FIGURE 28C

FIGURE 28A

【図 29】

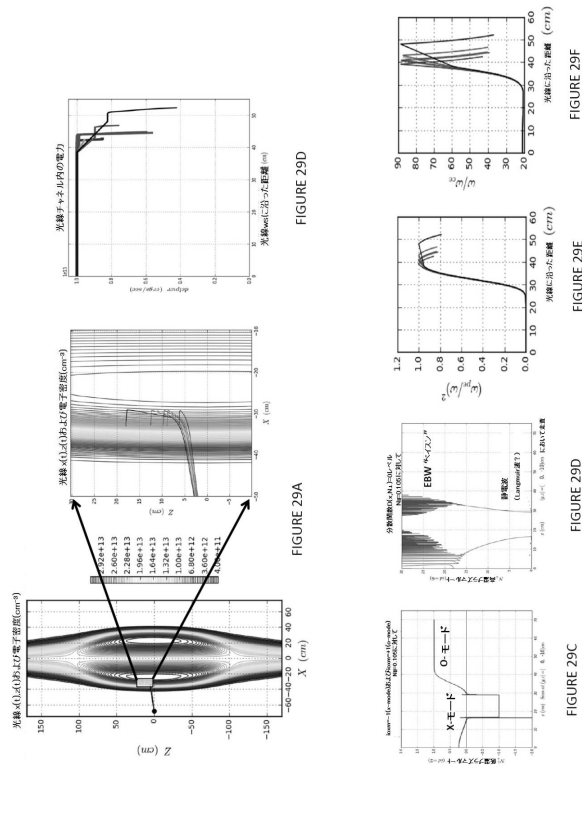


FIGURE 29D

FIGURE 29A

FIGURE 29B

FIGURE 29C

【図 30】

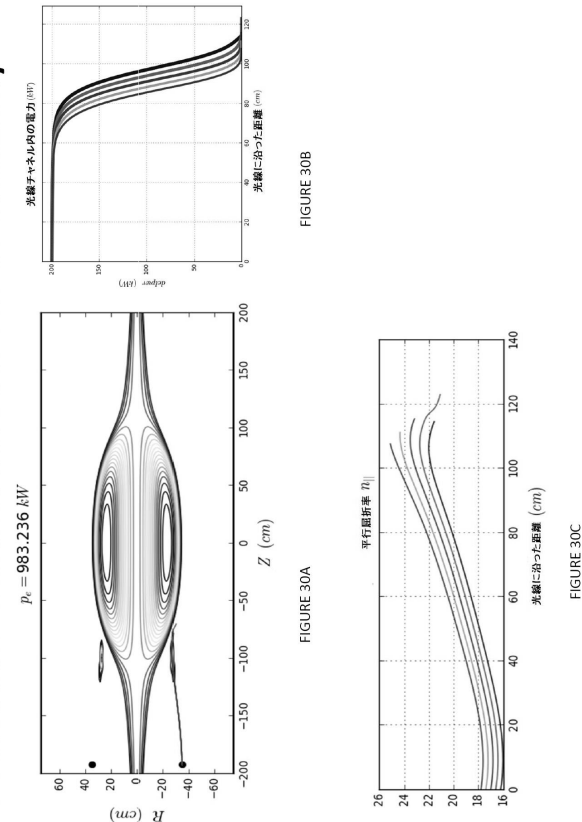


FIGURE 30B

FIGURE 30A

FIGURE 30C



【図 3 1】

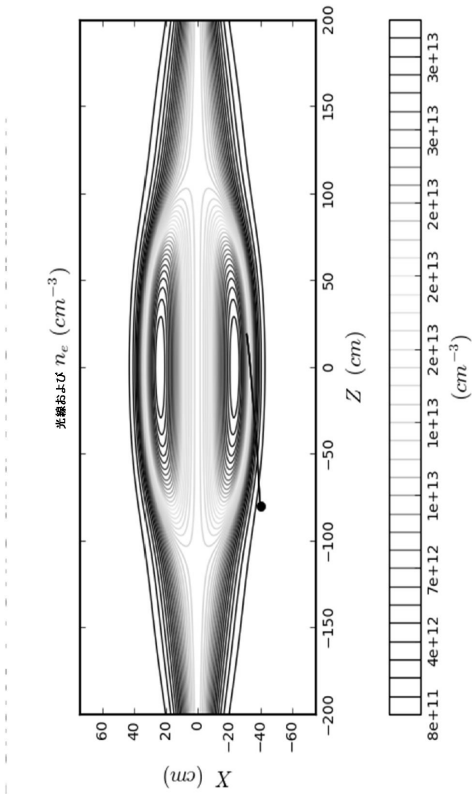


FIGURE 31

【図 3 2】

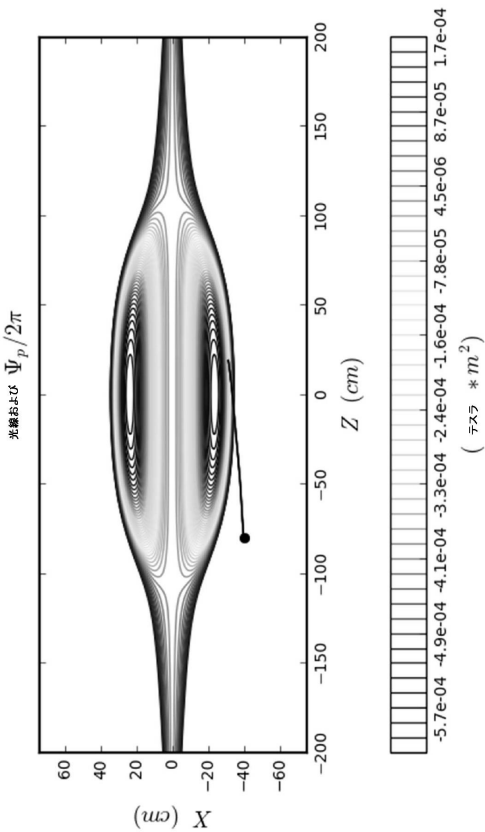


FIGURE 32

【図 3 3】

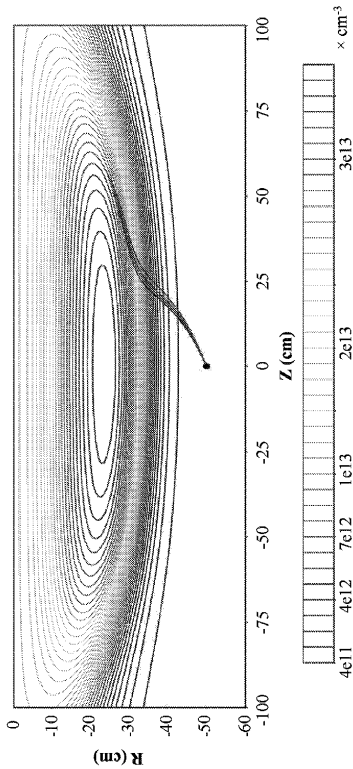


FIGURE 33

【図 3 4】

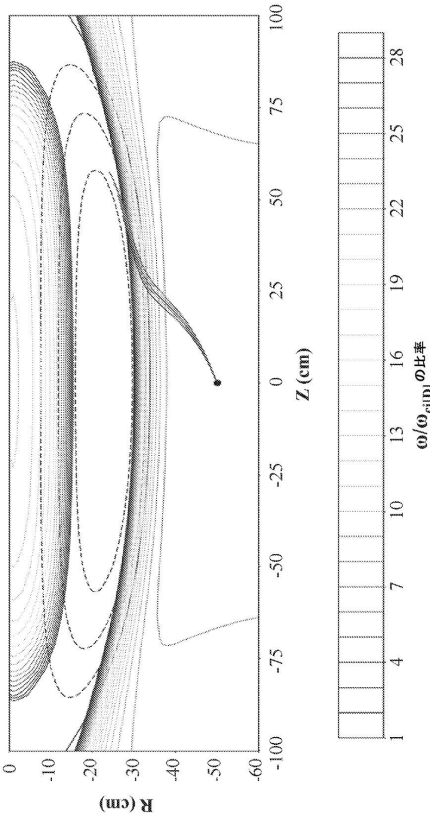


FIGURE 34

➤  $\omega/\omega_{ci0} \gg 28$  のペルは、明確にするためにプロットされない  
➤ 図中の黒色1つは、磁束輪部である

10

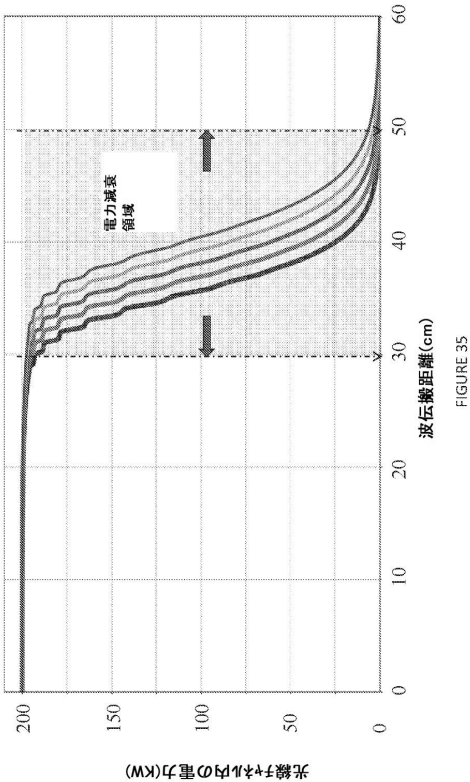
20

30

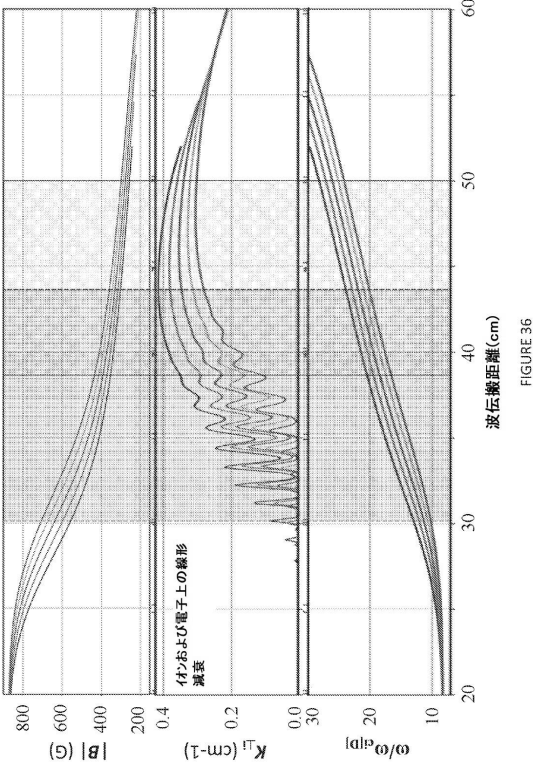
40

50

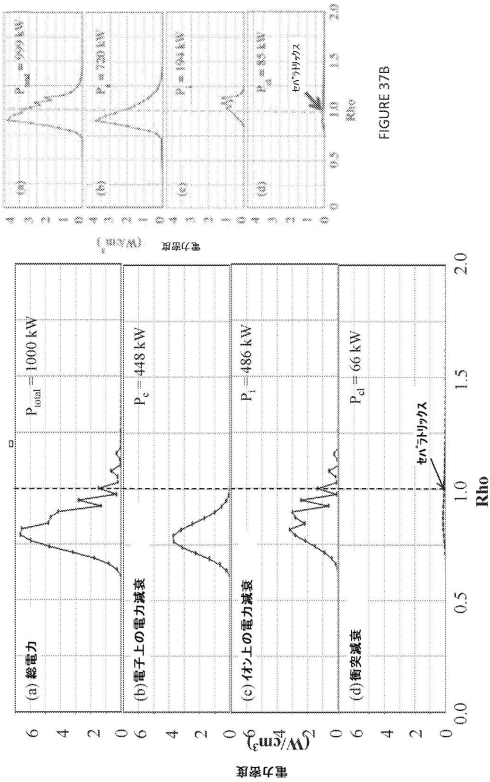
【図 3 5】



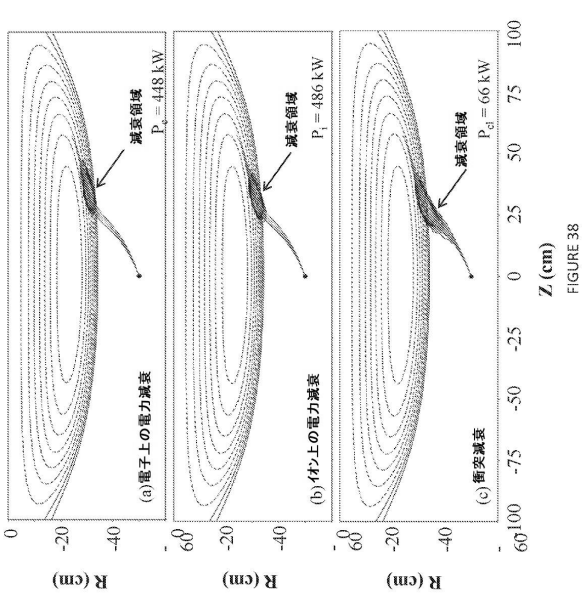
【図 3 6】



【図 3 7】



【図 3 8】



10

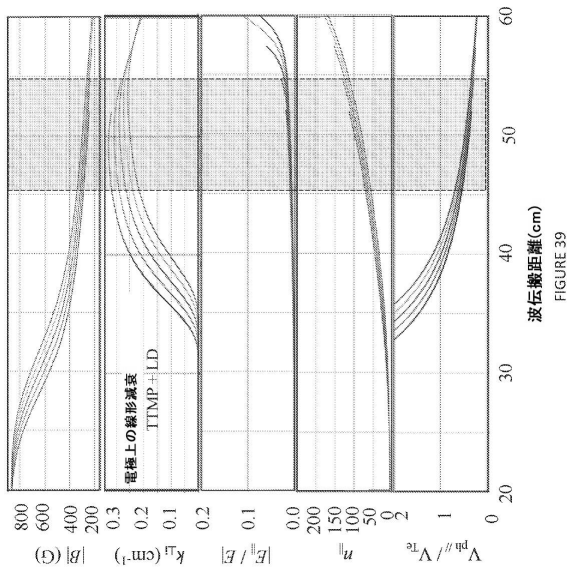
20

30

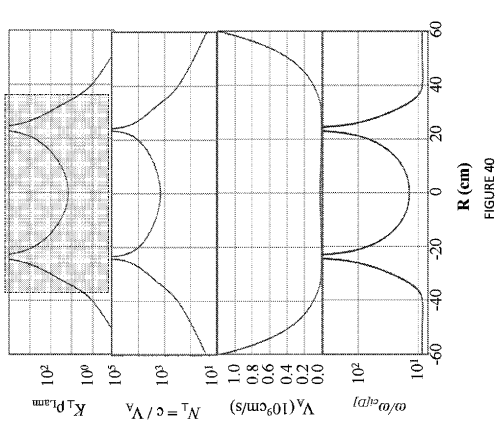
40

50

【図 3 9】

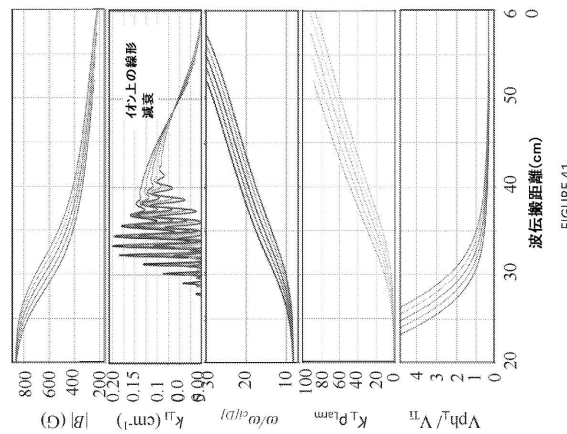


【図 4 0】

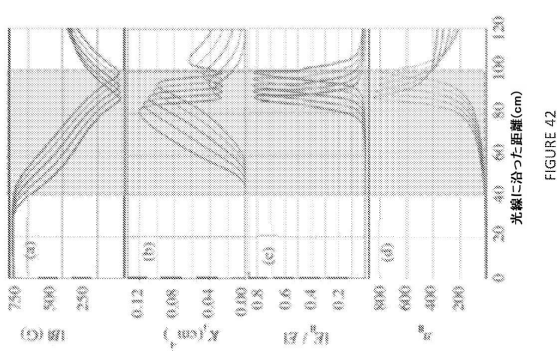


10

【図 4 1】



【図 4 2】



30

40

50

## フロントページの続き

## (51)国際特許分類

F I

**H 0 5 H 1/22 (2006.01)**

H 0 5 H 1/22

**H 0 5 H 1/18 (2006.01)**

H 0 5 H 1/18

弁護士 山本 健策

## (72)発明者 ヤン, シャオカン

アメリカ合衆国 カリフォルニア 9 2 6 1 0 , フットヒル ランチ , ポーリング 1 9 6 3 1

審査官 大門 清

## (56)参考文献

米国特許出願公開第 2 0 1 6 / 0 2 7 6 0 4 4 ( U S , A 1 )

G. Taylor et al. , Advances in high-harmonic fast wave physics in the National Spherical Torus Experiment , Physics of Plasmas , 米国 , American Institute of Physics , 2010年 , 17(5) , 056114-1 , <https://escholarship.org/content/qt3195q9v9/qt3195q9v9.pdf>D. Liu et al. , Profiles of fast ions that are accelerated by high harmonic fast waves in the National Spherical Torus Experiment , Plasma Physics and Controlled Fusion , 米国 , IOP Publishing , 2010年 , 52(2) , 025006,1-17 , <https://escholarship.org/content/qt43f6b8dr/qt43f6b8dr.pdf>

YAMAGUCHI, Yuusuke et al. , High Harmonic Fast Wave Propagation in the GAMMA 10 Tandem Mirror , J. Plasma Fusion Res. SERIES , Vol. 6 (2004) , 日本 , プラズマ・核融合学会 , 2004年 , p.665-668

## (58)調査した分野 (Int.Cl. , D B 名)

G 2 1 B 1 / 0 5

H 0 5 H 1 / 0 0 - 1 / 5 4