(19)日本国特許庁(JP)　(12)特　許　公　報(B2)　(11)特許番号
特許第6876435号
(P6876435)
(45)発行日　令和3年5月26日(2021.5.26)　(24)登録日　令和3年4月28日(2021.4.28)

(51)Int.Cl.　　F I
H05H 1/02 (2006.01)　　H05H 1/02
G21B 1/11 (2006.01)　　G21B 1/11　A

請求項の数 42　(全 36 頁)

(21)出願番号　特願2016-544356(P2016-544356)
(86)(22)出願日　平成26年9月24日(2014.9.24)
(65)公表番号　特表2016-537798(P2016-537798A)
(43)公表日　平成28年12月1日(2016.12.1)
(86)国際出願番号　PCT/US2014/057157
(87)国際公開番号　WO2015/048092
(87)国際公開日　平成27年4月2日(2015.4.2)
審査請求日　平成29年9月14日(2017.9.14)
(31)優先権主張番号　61/881,874
(32)優先日　平成25年9月24日(2013.9.24)
(33)優先権主張国・地域又は機関
米国(US)
(31)優先権主張番号　62/001,583
(32)優先日　平成26年5月21日(2014.5.21)
(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　９２６１０，　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

最終頁に続く

(54)【発明の名称】高性能ＦＲＣを形成し維持するシステムおよび方法

(57)【特許請求の範囲】
【請求項１】
閉じ込めチャンバ内に磁場反転配位（ＦＲＣ）を伴う磁場を生成および維持するための方法であって、
前記閉じ込めチャンバ内にプラズマを中心としてＦＲＣを形成するステップであって、ＦＲＣプラズマは、前記閉じ込めチャンバの壁に対して離間している、ステップと、
前記閉じ込めチャンバの縦軸に対して直角よりも１５°～２５°小さい角度において、前記閉じ込めチャンバの中央平面に向かって、高速中性原子のビームを中性原子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、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ステップであって、前記中性原子ビーム注入器は、前記閉じ込めチャンバの中央平面の近くに近接して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前記縦軸に対して直角よりも１５°～２５°小さい角度で前記中央平面に向かって中性原子ビームを注入するように配向されている、ステップと
を含む、方法。
【請求項２】
前記閉じ込めチャンバを中心として延在する準直流コイルを用いて、前記閉じ込めチャンバ内に磁場を生成するステップをさらに含む、請求項１に記載の方法。
【請求項３】
前記閉じ込めチャンバの対向する端部を中心として延在する準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する端部内にミラー磁場を生成するステップをさらに含

む、請求項１および２に記載の方法。
【請求項４】
前記ＦＲＣを形成するステップは、前記閉じ込めチャンバの端部に結合される形成区分内に形成ＦＲＣを形成するステップと、前記形成ＦＲＣを前記閉じ込めチャンバの中央平面に向かって加速させ、前記ＦＲＣを形成するステップとを含む、請求項１から３に記載の方法。
【請求項５】
前記ＦＲＣを形成するステップは、前記閉じ込めチャンバの第２の端部に結合される第２の形成区分内に第２の形成ＦＲＣを形成するステップと、前記第２の形成ＦＲＣを前記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とを含み、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４に記載の方法。
【請求項６】
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の中央平面に向かって加速させながら、前記形成ＦＲＣを形成するステップと、形成ＦＲＣを形成し、次いで、前記形成ＦＲＣを前記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とのうちの１つを含む、請求項４および５に記載の方法。
【請求項７】
前記ＦＲＣの磁束面を前記形成区分の両端部に結合される複数のダイバータの中に誘導するステップをさらに含む、請求項５に記載の方法。
【請求項８】
前記ＦＲＣの磁束面を前記形成区分の一端に結合される１つのダイバータの中に誘導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９】
前記ＦＲＣの磁束面を前記形成区分と反対の前記閉じ込めチャンバの端部に結合される第２のダイバータの中に誘導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１０】
前記形成区分およびダイバータを中心として延在する準直流コイルを用いて、前記形成区分およびダイバータ内に磁場を生成するステップをさらに含む、請求項７から９に記載の方法。
【請求項１１】
準直流ミラーコイルを用いて、前記形成区分と前記ダイバータとの間にミラー磁場を生成するステップをさらに含む、請求項７および１０に記載の方法。
【請求項１２】
前記形成区分と前記ダイバータとの間の狭窄部を中心として延在する準直流ミラープラグコイルを用いて、前記形成区分と前記ダイバータとの間の前記狭窄部内にミラープラグ磁場を生成するステップをさらに含む、請求項１１に記載の方法。
【請求項１３】
前記ＦＲＣを維持するステップはさらに、前記閉じ込めチャンバに結合されたペレット注入器から中性原子のペレットを前記ＦＲＣの中に注入するステップを含む、請求項１から１２に記載の方法。
【請求項１４】
前記閉じ込めチャンバに結合される鞍形コイルを用いて、前記閉じ込めチャンバ内に磁気双極子場および磁気四重極場のうちの１つを生成するステップをさらに含む、請求項１から１３に記載の方法。
【請求項１５】
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、形成区分、およびダイバータを調整するステップをさらに含む、請求項１から１４に記載の方法。
【請求項１６】
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、請求項１５に記載の方法。

【請求項１７】
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、請求項１から１６に記載の方法。
【請求項１８】
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、請求項１から１７に記載の方法。
【請求項１９】
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、前記ＦＲＣの開磁束面群に電位分布を印加するステップを含む、請求項１８に記載の方法。
【請求項２０】
磁場反転配位（ＦＲＣ）を伴う磁場を生成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形成区分であって、ＦＲＣを生成し、前記ＦＲＣ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式形成システムを備える、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、
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と、
前記閉じ込めチャンバの中央平面の近くに近接して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縦軸に対して直角よりも１５°～２５°小さい角度において、中性原子ビームを前記閉じ込めチャンバの前記中央平面に向かって注入するように配向される、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、ならびに前記第１および第２のダイバータの周囲に位置付けられる、複数の準直流コイルと、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位置付けられる、第１および第２の準直流ミラーコイルのセットと、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のミラープラグとを備える、磁気システムと、
前記閉じ込めチャンバならびに前記第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、
生成されたＦＲＣの開磁束面を電気的にバイアスするための１つまたは複数のバイアス電極であって、前記閉じ込めチャンバ、前記第１および第２の形成区分、ならびに前記第１および第２のダイバータのうちの１つまたは複数のもの内に位置付けられる、１つまたは複数のバイアス電極と、
前記閉じ込めチャンバに結合される、２つまたはそれより多い鞍形コイルと、
前記閉じ込めチャンバに結合される、イオンペレット注入器と
を備える、システム。
【請求項２１】
前記システムの前記閉じ込めチャンバ内での前記システムによるＦＲＣの形成の際、前記ＦＲＣは、中性原子ビームが前記複数の中性原子ビーム注入器から前記閉じ込めチャンバの前記縦軸に対して直角よりも１５°～２５°小さい角度で前記閉じ込めチャンバの前記中央平面に向かって前記ＦＲＣの中に注入される間、減衰を伴わずに、前記閉じ込めチャンバの壁に対して離間してかつ一定値またはほぼ一定値に前記システムによって維持可能である、請求項２０に記載のシステム。
【請求項２２】
前記ミラープラグは、前記第１および第２の形成区分のそれぞれと前記第１および第２のダイバータとの間に第３および第４のミラーコイルのセットを備える、請求項２０に記載のシステム。
【請求項２３】
前記ミラープラグはさらに、前記第１および第２の形成区分のそれぞれと前記第１およ

び第２のダイバータとの間の通路内の狭窄部の周囲に巻着されたミラープラグコイルのセットを備える、請求項２０および２１に記載のシステム。

【請求項２４】

前記第１および第２の形成区分のそれぞれは、石英ライナを伴う石英管から作製されている、請求項２０－２３に記載のシステム。

【請求項２５】

前記形成システムは、パルス式パワー形成システムである、請求項２０－２４に記載のシステム。

【請求項２６】

前記形成システムは、複数のパワーおよび制御ユニットを備え、前記複数のパワーおよび制御ユニットは、複数のストラップアセンブリの個々の１つに結合され、前記第１および第２の形成区分の前記石英管の周囲に巻着された前記複数のストラップアセンブリの個々の１つのコイルのセットを励起する、請求項２０－２５に記載のシステム。

【請求項２７】

前記複数のパワーおよび制御ユニットの個々の１つは、トリガおよび制御システムを備える、請求項２６に記載のシステム。

【請求項２８】

前記複数のパワーおよび制御ユニットの個々の１つの前記トリガおよび制御システムは、前記ＦＲＣが形成され、次いで注入される静的ＦＲＣ形成、または、前記ＦＲＣが同時に形成および平行移動される動的ＦＲＣ形成を可能にするように同期可能である、請求項２７に記載のシステム。

【請求項２９】

前記複数の中性原子ビーム注入器は、１つまたは複数のＲＦプラズマ源中性原子ビーム注入器と、１つまたは複数のアーク源中性原子ビーム注入器とを備える、請求項２０－２８に記載のシステム。

【請求項３０】

前記複数の中性原子ビーム注入器は、前記ＦＲＣの区分線内に標的捕捉ゾーンを伴って、前記ＦＲＣに対して接線方向にある注入経路とともに配向される、請求項２０－２９に記載のシステム。

【請求項３１】

前記ゲッタリングシステムは、前記閉じ込めチャンバならびに前記第１および第２のダイバータのプラズマに面した表面をコーティングする、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つまたは複数のものを備える、請求項２０－３０に記載のシステム。

【請求項３２】

バイアス電極は、開磁力線に接触するように前記閉じ込めチャンバ内に位置付けられる１つまたは複数の点電極と、方位角的に対称方式において遠端磁束層を充電する、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、複数の同心積層電極と、開磁束を奪取する、前記プラズマガンのアノードとのうちの１つまたは複数のものを含む、請求項２０－３１に記載のシステム。

【請求項３３】

磁場反転配位（ＦＲＣ）を伴う磁場を生成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、

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つまたは複数のバイアス電極、ならびに第１および第２のミラープラグのうちの１つまたは複数のものであって、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、ならびに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つまたは複数のバイアス電極は、前記閉じ込めチャンバ、前記第１および第２の形成区分、ならびに前記第１および第２のダイバータのうちの１つまたは複数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つまたは複数のバイアス電極、ならびに第１および第２のミラープラグのうちの１つまたは複数のものと、

前記閉じ込めチャンバならびに前記第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た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は、前記閉じ込めチャンバの中央平面の近くに近接して配置され、前記閉じ込めチャンバの縦軸に対して直角よりも１５°～２５°小さい角度において、前記閉じ込めチャンバの前記中央平面に向かって中性原子ビームを注入するように配向される、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、ならびに前記第１および第２のダイバータの周囲に位置付けられる、複数の準直流コイルと、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位置付けられる、第１および第２の準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、

前記システムの前記閉じ込めチャンバ内での前記システムによるＦＲＣの形成の際、前記ＦＲＣは、中性原子ビームが前記複数の中性原子ビーム注入器から前記閉じ込めチャンバの前記縦軸に対して直角よりも１５°～２５°小さい角度で前記閉じ込めチャンバの前記中央平面に向かって前記ＦＲＣの中に注入される間、減衰を伴わずに、前記閉じ込めチャンバの壁に対して離間してかつ一定値またはほぼ一定値に前記システムによって維持可能である、システム。

【請求項３４】

前記ミラープラグは、前記第１および第２の形成区分のそれぞれと前記第１および第２のダイバータとの間に第３および第４のミラーコイルのセットを備える、請求項３３に記載のシステム。

【請求項３５】

前記ミラープラグはさらに、前記第１および第２の形成区分のそれぞれと前記第１および第２のダイバータとの間の通路内の狭窄部の周囲に巻着される、ミラープラグコイルのセットを備える、請求項３３－３４に記載のシステム。

【請求項３６】

前記第１および第２のダイバータと、前記第１および第２の形成区分と、前記閉じ込めチャンバと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、請求項３３－３５に記載のシステム。

【請求項３７】

前記閉じ込めチャンバに結合される、２つまたはそれより多い鞍形コイルをさらに備える、請求項３３－３６に記載のシステム。

【請求項３８】

前記閉じ込めチャンバに結合される、イオンペレット注入器をさらに備える、請求項３３－３７に記載のシステム。

【請求項３９】

前記形成区分は、ＦＲＣを生成し、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式形成システムを備える、請求項３３－３８に記載のシステム。

【請求項４０】

バイアス電極は、開磁力線に接触するように前記閉じ込めチャンバ内に位置付けられる１つまたは複数の点電極と、方位角的に対称方式において、遠端磁束層を充電する、前記閉じ込めチャンバと前記第１および第２の形成区分との間の環状電極のセットと、複数の

同心磁束層を充電するように前記第１および第２のダイバータ内に位置付けられる複数の同心積層電極と、開磁束を奪取する、前記プラズマガンのアノードとのうちの１つまたは複数のものを含む、請求項３３－３９に記載のシステム。

【請求項４１】

前記方法は、システムの閉じ込めチャンバ内に磁場反転配位（ＦＲＣ）を伴う磁場を生成および維持するためのものであり、前記システムは、

前記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、

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つまたは複数のバイアス電極、ならびに第１および第２のミラープラグのうちの１つまたは複数のものであって、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、ならびに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つまたは複数のバイアス電極は、前記閉じ込めチャンバ、前記第１および第２の形成区分、ならびに前記第１および第２のダイバータのうちの１つまたは複数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つまたは複数のバイアス電極、ならびに第１および第２のミラープラグのうちの１つまたは複数のものと、

前記閉じ込めチャンバならびに前記第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た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は、前記閉じ込めチャンバの中央平面の近くに近接して配置され、前記閉じ込めチャンバの前記縦軸に対して直角よりも１５°～２５°小さい角度において、前記中央平面に向かって中性原子ビームを注入するように配向される、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、ならびに前記第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準直流コイルと、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位置付けられる第１および第２の準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、前記ＦＲＣは、前記閉じ込めチャンバにおいてプラズマの周囲に形成され、前記ＦＲＣプラズマは、前記閉じ込めチャンバの壁に対して離間されている、請求項１～１９のいずれか一項に記載の方法。

【請求項４２】

前記高速中性原子のビームは、前記閉じ込めチャンバの前記縦軸に対して直角よりも１５°～２５°小さい角度において、前記閉じ込めチャンバの前記中央平面に向かって、前記ＦＲＣプラズマ内に中性原子ビーム注入器から注入される、請求項１～１９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】

【０００１】

（分野）

本明細書に記載された実施形態は、一般に磁気プラズマ閉じ込めシステムに関し、より詳細には、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もつ、磁場反転配位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）

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．Ｆｕｓｉｏ

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β（β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β特性は、経済運用、ならびにＤ－Ｈｅ^{3}およびｐ－Ｂ^{11}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およびＪ．Ｔ．Ｓｌｏｕｇｈ、Ｎｕｃｌ．Ｆｕｓｉｏｎ　３３、２７（１９９３）（非特許文献１）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、およびＳ．Ｇｏｔｏ、Ｐｈｙｓ．Ｐｌａｓｍａｓ　２、１９１（１９９５）（非特許文献２）参照）。一旦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またはオーム加熱など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、ＦＲＣ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、およびＬ．Ｃ．Ｓｔｅｉｎｈａｕｅｒ、Ｐｈｙｓ．Ｒｅｖ．Ｌｅｔｔ．９２、２４５００１（２００４）（非特許文献３）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、およびＴ．Ｏｋａｚａｋｉ、Ｎｕｃｌ．Ｆｕｓｉｏｎ　３９、２００１（１９９９）（非特許文献４）参照）、ならびにこれもさらに安定性を提供する、回転磁場（ＲＭＦ）を用いて電流を駆動することによる（例えば、Ｉ．Ｒ．Ｊｏｎｅｓ、Ｐｈｙｓ．Ｐｌａｓｍａｓ　６、１９５０（１９９９）（非特許文献５）参照）発展が過去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）（非特許文献６）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、次いでプラズモイドは、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ら、Ｐｈｙｓ．Ｒｅｖ．Ｌｅｔｔ．１０５、０４５００３（２０１０）（非特許文献７）参照）。

【０００５】

ＦＲＣは、セパラトリックスの内側の閉じた磁力線のトーラス、およびセパラトリックスのすぐ外側の開いた磁力線上の環状縁層からなる。縁層は、ＦＲＣの長さを超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トポロジーは、磁場反転ミラープラズマのトポロジーと一致する。しかし、著しい違いは、ＦＲＣプラズマが約１０のβを有することである。固有の低い内部磁場は、ＦＲＣの短半径に匹敵する、若干の生来の動的粒子集団、すなわち、大きいラーモア半径をもつ粒子を提供する。これは、衝突融合実験において生成された安定性などの過去および現在のＦＲＣの安定性の合計に、少なくとも部分的に寄与すると思われるこれらの強い動的効果である。

【０００６】

典型的な過去のＦＲＣ実験は、主に粒子移動によって決まるエネルギー閉じ込めをもつ、対流損失によって支配されてきた。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。したがって、ＦＲＣ閉じ込めは、閉

じた磁力線領域と開いた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、$\tau_{\perp}$は約$a^2/D_{\perp}$（aは約$r_s/4$であり、ここでr_sは中心セパラトリックスの半径である）と見積もられ、$D_{\perp}$は、特性ＦＲＣ拡散率であり（例えば、$D_{\perp}$は約$12.5\rho_{ie}$であり、ρ_{ie}はイオンジャイロ半径を表し）、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】

$$\tau_{\parallel}$$

は、基本的に過去のＦＲＣ実験における軸方向通過時間である。定常状態において、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δ、約

【数２】

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

をもたらす。ＦＲＣ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ＦＲＣに対して

【数３】

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

と見積もられる（例えば、Ｍ．ＴＵＳＺＥＷＳＫＩ、「Ｆｉｅｌｄ Ｒｅｖｅｒｓｅｄ Ｃｏｎｆｉｇｕｒａｔｉｏｎｓ（磁場反転配位）」、Ｎｕｃｌ．Ｆｕｓｉｏｎ ２８、２０３３（１９８８）参照）。

【０００７】

先行のＦＲＣシステム設計の別の短所は、急成長するｎ＝２交換不安定性などの、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、この技法は、より動的なＦＲＣまたは進化したハイブリッドのＦＲＣ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ＦＲＣの概念の、より高い潜在性能を利用するために重要である。

【０００８】

したがって、前述に照らして、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として定常状態ＦＲＣを使用するために、ＦＲＣの閉じ込めおよび安定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】

【非特許文献１】Ａ．Ｌ．ＨｏｆｆｍａｎおよびＪ．Ｔ．Ｓｌｏｕｇｈ、Ｎｕｃｌ．Ｆｕｓｉｏｎ ３３、２７（１９９３）

【非特許文献２】Ｈ．Ｈｉｍｕｒａ、Ｓ．Ｏｋａｄａ、Ｓ．Ｓｕｇｉｍｏｔｏ、およびＳ．Ｇｏｔｏ、Ｐｈｙｓ．Ｐｌａｓｍａｓ ２、１９１（１９９５）

【非特許文献３】Ｈ．Ｙ．Ｇｕｏ、Ａ．Ｌ．Ｈｏｆｆｍａｎ、Ｋ．Ｅ．Ｍｉｌｌｅｒ、お

よびＬ．Ｃ．Ｓｔｅｉｎｈａｕｅｒ、Ｐｈｙｓ．Ｒｅｖ．Ｌｅｔｔ．９２、２４５００１（２００４）
【非特許文献４】Ｙ．Ｏｎｏ、Ｍ．Ｉｎｏｍｏｔｏ、Ｙ．Ｕｅｄａ、Ｔ．Ｍａｔｓｕｙａｍａ、およびＴ．Ｏｋａｚａｋｉ、Ｎｕｃｌ．Ｆｕｓｉｏｎ ３９、２００１（１９９９）
【非特許文献５】Ｉ．Ｒ．Ｊｏｎｅｓ、Ｐｈｙｓ．Ｐｌａｓｍａｓ ６、１９５０（１９９９）
【非特許文献６】Ｄ．Ｒ．Ｗｅｌｌｓ、Ｐｈｙｓ．Ｆｌｕｉｄｓ ９、１０１０（１９６６）
【非特許文献７】Ｍ．Ｂｉｎｄｅｒｂａｕｅｒ、Ｈ．Ｙ．Ｇｕｏ、Ｍ．Ｔｕｓｚｅｗｓｋｉら、Ｐｈｙｓ．Ｒｅｖ．Ｌｅｔｔ．１０５、０４５００３（２０１０）

【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た本実施形態は、新しい高性能の磁場反転配位（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。この新しい高性能のＦＲＣパラダイムによれば、本システムは、多くの新規の発想と、粒子、エネルギーおよび磁束のＦＲＣ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。
【００１１】
本明細書に提供されたＦＲＣシステムは、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、およびその形成部分を超えた、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・チャンバによって包囲された中央閉じ込め容器を含む。磁気システムは、ＦＲＣシステムの構成要素に沿って軸方向位置にある一連の疑似直流コイル、閉じ込めチャンバのいずれかの端部と隣接した形成部分との間の疑似直流ミラー、ならびに、各形成部分と、ダイバータに向かって磁束表面の焦点を合わせるために、追加のガイド磁場を生成するダイバータとの間に小型の疑似直流ミラーコイルを備えるミラープラグを含む。形成部分は、ＦＲＣをその場で形成し、次いで加速し入射する（静的形成）、または形成し同時に加速する（動的形成）ことが可能な、モジュラーパルス電力形成システムを含む。
【００１２】
ＦＲＣシステムは、中性原子ビーム注入器と、ペレット注入器とを含む。一実施形態では、ビーム注入器は、中性粒子を中央平面に向かって注入するように角度付けられる。ビーム注入器を中央平面に向かって角度付け、軸方向ビーム位置を中央平面に近接させることは、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。ゲッタリングシステムもまた、軸方向プラズマガンと同様に含まれる。バイアス電極もまた、開磁束面の電気バイアスのために提供される。
【００１３】
動作時、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、ならびに磁束を含む、ＦＲＣの包括的プラズマパラメータは、中性ビームがプラズマの中に注入され、ペレットが、適切な粒子燃料補給を提供する間、減衰を伴わずに、実質的に持続可能である。
【００１４】
本発明のシステム、方法、特徴および利点は、以下の図および詳述を検討すると、当業者には明らかであり、または明らかになろう。すべてのこのような追加の方法、特徴および利点は、本明細書に含まれ、本発明の範囲内であり、添付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、本発明は、例示的実施形態の詳細を必要と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）

逆磁場構成（ＦＲＣ）を伴う磁場を生成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にプラズマを中心としてＦＲＣを形成するステップと、
前記閉じ込めチャンバの中央平面に向かってある角度において、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、減衰を伴わずに、前記ＦＲＣを一定またはほぼ一定値に維持するステップと、を含む、方法。
（項目２）
前記チャンバを中心として延在する準直流コイルを用いて、前記チャンバ内に磁場を生成するステップをさらに含む、項目１に記載の方法。
（項目３）
前記チャンバの対向する端部を中心として延在する準直流ミラーコイルを用いて、前記チャンバの対向する端部内にミラー磁場を生成するステップをさらに含む、項目１および２に記載の方法。
（項目４）
前記ＦＲＣを形成するステップは、前記閉じ込めチャンバの端部に結合される形成区分内に形成ＦＲＣを形成するステップと、前記形成ＦＲＣを前記チャンバの中央平面に向かって加速させ、前記ＦＲＣを形成するステップとを含む、項目１から３に記載の方法。
（項目５）
前記ＦＲＣを形成するステップは、前記閉じ込めチャンバの第２の端部に結合される第２の形成区分内に第２の形成ＦＲＣを形成するステップと、前記第２の形成ＦＲＣを前記チャンバの中央平面に向かって加速させるステップとを含み、２つの形成ＦＲＣは、前記ＦＲＣを形成するように融合する、項目４に記載の方法。
（項目６）
前記ＦＲＣを形成するステップは、前記形成ＦＲＣを前記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、前記形成ＦＲＣを前記チャンバの中央平面に向かって加速させるステップとのうちの１つを含む、項目４および５に記載の方法。
（項目７）
前記ＦＲＣの磁束面を前記形成区分の両端部に結合される複数のダイバータの中に誘導するステップをさらに含む、項目５に記載の方法。
（項目８）
前記ＦＲＣの磁束面を前記形成区分の一端に結合される１つのダイバータの中に誘導するステップをさらに含む、項目４に記載の方法。
（項目９）
前記ＦＲＣの磁束面を前記形成区分と反対の前記チャンバの端部に結合される第２のダイバータの中に誘導するステップをさらに含む、項目８に記載の方法。
（項目１０）
前記形成区分およびダイバータを中心として延在する準直流コイルを用いて、前記形成区分およびダイバータ内に磁場を生成するステップをさらに含む、項目７から９に記載の方法。
（項目１１）
準直流ミラーコイルを用いて、前記形成区分と前記ダイバータとの間にミラー磁場を生成するステップをさらに含む、項目７および１０に記載の方法。
（項目１２）
前記形成区分と前記ダイバータとの間の狭窄部を中心として延在する準直流ミラープラグコイルを用いて、前記形成区分と前記ダイバータとの間の狭窄部内にミラープラグ磁場を生成するステップをさらに含む、項目１１に記載の方法。
（項目１３）
前記ＦＲＣを維持するステップはさらに、中性原子のペレットを前記ＦＲＣの中に注入するステップを含む、項目１から１２に記載の方法。
（項目１４）

前記チャンバに結合される鞍形コイルを用いて、前記チャンバ内に磁気双極子場および磁気四重極場のうちの１つを生成するステップをさらに含む、項目１から１３に記載の方法。

（項目１５）

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、形成区分、およびダイバータを調整するステップをさらに含む、項目１から１４に記載の方法。

（項目１６）

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１５に記載の方法。

（項目１７）

プラズマを軸方向に搭載されるプラズマガンから前記ＦＲＣの中に軸方向に注入するステップをさらに含む、項目１から１６に記載の方法。

（項目１８）

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１から１７に記載の方法。

（項目１９）

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、前記ＦＲＣの開磁束面群に電位分布を印加するステップを含む、項目１８に記載の方法。

（項目２０）

逆磁場構成（ＦＲＣ）を伴う磁場を生成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形成区分であって、ＦＲＣを生成し、前記ＦＲＣ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式形成システムを備える、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、

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縦軸に対して直角未満の角度において、中性原子ビームを前記閉じ込めチャンバの中央平面に向かって注入するように配向される、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、ならびに前記第１および第２のダイバータの周囲に位置付けられる、複数の準直流コイルと、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位置付けられる、第１および第２の準直流ミラーコイルのセットと、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のミラープラグとを備える、磁気システムと、

前記閉じ込めチャンバならびに前記第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、

生成されたＦＲＣの開磁束面を電気的にバイアスするための１つまたはそれを上回るバイアス電極であって、前記閉じ込めチャンバ、前記第１および第２の形成区分、ならびに前記第１および第２のダイバータのうちの１つまたはそれを上回るもの内に位置付けられる、前記１つまたはそれを上回るバイアス電極と、

前記閉じ込めチャンバに結合される、２つまたはそれを上回る鞍形コイルと、

前記閉じ込めチャンバに結合される、イオンペレット注入器と、

を備える、システム。

（項目２１）

前記システムは、ＦＲＣを生成し、中性原子ビームが前記ＦＲＣの中に注入される間、減衰を伴わずに、前記ＦＲＣを一定またはほぼ一定値に維持するように構成される、項目２０に記載のシステム。

（項目２２）

前記ミラープラグは、前記第１および第２の形成区分のそれぞれと前記第１および第２のダイバータとの間に第３および第４のミラーコイルのセットを備える、項目２０に記載のシステム。

（項目２３）

前記ミラープラグはさらに、前記第１および第２の形成区分のそれぞれと前記第１および第２のダイバータとの間の通路内の狭窄部の周囲に巻着されたミラープラグコイルのセットを備える、項目２０および２１に記載のシステム。

（項目２４）

前記伸長管は、石英ライナを伴う石英管である、項目２０－２３に記載のシステム。

（項目２５）

前記形成システムは、パルス式パワー形成システムである、項目２０－２４に記載のシステム。

（項目２６）

前記形成システムは、複数のストラップアセンブリの個々の１つに結合され、前記第１および第２の形成区分の伸長管の周囲に巻着された前記複数のストラップアセンブリの個々の１つのコイルのセットを励起する、複数のパワーおよび制御ユニットを備える、項目２０－２５に記載のシステム。

（項目２７）

前記複数のパワーおよび制御ユニットの個々の１つは、トリガおよび制御システムを備える、項目２６に記載のシステム。

（項目２８）

前記複数のパワーおよび制御ユニットの個々の１つの前記トリガおよび制御システムは、前記ＦＲＣが、形成され、次いで、注入される、静的ＦＲＣ形成、または前記ＦＲＣが、同時に、形成および平行移動される、動的ＦＲＣ形成を可能にするように同期可能である、項目２７に記載のシステム。

（項目２９）

前記複数の中性原子ビーム注入器は、１つまたはそれを上回るＲＦプラズマ源中性原子ビーム注入器と、１つまたはそれを上回るアーク源中性原子ビーム注入器とを備える、項目２０－２８に記載のシステム。

（項目３０）

前記複数の中性原子ビーム注入器は、前記ＦＲＣの区分線内に標的捕捉ゾーンを伴って、前記ＦＲＣに対して接線方向にある注入経路とともに配向される、項目２０－２９に記載のシステム。

（項目３１）

前記ゲッタリングシステムは、前記閉じ込めチャンバならびに前記第１および第２のダイバータのプラズマに面した表面をコーティングする、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つまたはそれを上回るものを備える、項目２０－３０に記載のシステム。

（項目３２）

バイアス電極は、開磁力線に接触するように前記閉じ込めチャンバ内に位置付けられる、１つまたはそれを上回る点電極、方位角的に対称方式において遠端磁束層を充電する、前記閉じ込めチャンバと前記第１および第２の形成区分との間の環状電極のセット、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、複数の同心積層電極、および開磁束を奪取する、前記プラズマガンのアノードのうちの１つまたはそれを上回るものを含む、項目２０－３１に記載のシステム。

（項目３３）

逆磁場構成（ＦＲＣ）を伴う磁場を生成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、

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つまたはそれを上回るバイアス電極、ならびに第１および第２のミラープラグのうちの１つまたはそれを上回るものであって、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、ならびに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つまたはそれを上回るバイアス電極は、前記閉じ込めチャンバ、前記第１および第２の形成区分、ならびに前記第１および第２のダイバータのうちの１つまたはそれを上回る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つまたはそれを上回るバイアス電極、ならびに第１および第２のミラープラグのうちの１つまたはそれを上回るものと、
前記閉じ込めチャンバならびに前記第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軸に対して直角に配向される、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、ならびに前記第１および第２のダイバータの周囲に位置付けられる、複数の準直流コイルと、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位置付けられる、第１および第２の準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、
前記システムは、ＦＲＣを生成し、中性ビームがプラズマの中に注入される間、減衰を伴わず前記ＦＲＣを維持するように構成される、システム。
（項目３４）
前記システムは、ＦＲＣを生成し、中性原子ビームが、前記ＦＲＣの中に注入される間、減衰を伴わずに、前記ＦＲＣを一定またはほぼ一定値に維持するように構成される、項目３３に記載のシステム。
（項目３５）
前記ミラープラグは、前記第１および第２の形成区分のそれぞれと前記第１および第２のダイバータとの間に第３および第４のミラーコイルのセットを備える、項目３３および３４に記載のシステム。
（項目３６）
前記ミラープラグはさらに、前記第１および第２の形成区分のそれぞれと前記第１および第２のダイバータとの間の通路内の狭窄部の周囲に巻着される、ミラープラグコイルのセットを備える、項目３３－３５に記載のシステム。
（項目３７）
前記第１および第２のダイバータと、前記第１および第２の形成区分と、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とをさらに備える、項目３３－３６に記載のシステム。
（項目３８）
前記閉じ込めチャンバに結合される、２つまたはそれを上回る鞍形コイルをさらに備える、項目３３－３７に記載のシステム。
（項目３９）
前記閉じ込めチャンバに結合される、イオンペレット注入器をさらに備える、項目３３－３８に記載のシステム。
（項目４０）
前記形成区分は、ＦＲＣを生成し、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式形成システムを備える、項目３３－３９に記載のシステム。
（項目４１）
バイアス電極は、開磁力線に接触するように前記閉じ込めチャンバ内に位置付けられる

、１つまたはそれを上回る点電極、方位角的に対称方式において、遠端磁束層を充電する、前記閉じ込めチャンバと前記第１および第２の形成区分との間の環状電極のセット、複数の同心磁束層を充電するように前記第１および第２のダイバータ内に位置付けられる、複数の同心積層電極、および開磁束を奪取する、前記プラズマガンのアノードのうちの１つまたはそれを上回るものを含む、項目３３－４０に記載のシステム。

【００１５】

添付図面は本明細書の一部として含まれ、この好ましい実施形態を示し、上に提供された概要および以下に提供される好ましい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】

【００１６】

【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。

【００１７】

【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。

【００１８】

【図３Ａ】図３Ａは、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。

【００１９】

【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。

【００２０】

【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。

【００２１】

【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。

【００２２】

【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。

【００２３】

【図６】形成管アセンブリのアイソメ図である。

【００２４】

【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。

【００２５】

【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。

【００２６】

【図９】ＴｉおよびＬｉ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。

【００２７】

【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。

【００２８】

【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。

【００２９】

【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。

【００３０】

【図１３】図１３（ａ）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り、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、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り、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、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り、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、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り、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。

【００３１】

【図１４】図１３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。

【００３２】

【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。

【００３３】

【図１６】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。

【００３４】

【図１７】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。

【００３５】

【図１８】図１８（ａ）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り、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、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り、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、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り、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、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り、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。

【００３６】

【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。

【００３７】

【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。

【発明を実施するための形態】

【００３８】

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。

【００３９】

本明細書に提供される本実施形態は、従来のＦＲＣより優れた安定性ならびに優れた粒子、エネルギーおよび磁束閉じ込めを伴って、高性能逆磁場構成（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。そのような高性能ＦＲＣ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、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。

【００４０】

様々な付随システムおよび作動モードが、ＦＲＣ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ＦＲＣ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、ＦＲＣ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）ＦＲＣシステム１０における粒子閉じ込めを示し、ＦＲＣを形成し維持するために従来のレジームＣＲによる作動に対して、また他の実施形態で使用されるＦＲＣ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、ＦＲＣを形成し維持するための高性能のＦＲＣレジーム（ＨＰＦ）により作動する。本開示は、ＦＲＣシステム１０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。

【００４１】

（ＦＲＣシステムの説明）

真空システム

図２および３は、本ＦＲＣシステム１０の概略を示す。ＦＲＣシステム１０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２００、およびその形成部分２００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３００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、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。

【００４２】

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。

【００４３】

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ＦＲＣ４５０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、ＦＲＣ４５０は、セパラトリックス４５１の内側のＦＲＣ４５０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。

【００４４】
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０．１Ｔ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４Ｔ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０．０１Ｔ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。

【００４５】
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。それぞれが形成部分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、スキッド２２０のそれぞれは、形成石英管２４０を中心に巻き付くストラップアセンブリ２３０（＝ストラップ）のコイル２３２のサブセットを活性化する。各スキッド２２０は、コンデンサ２２１、インダクタ２２３、高速大電流スイッチ２２５および関連トリガー２２２ならびにダンプ回路２２４から構成される。全体で、各形成システム２１０は、３５０～４００ｋＪの容量エネルギーを保存し、この容量エネルギーは、最高３５ＧＷ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２２２および２２４を介して達成され、それによって各形成部分２００上の形成システム２１０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。

【００４６】
中性ビーム注入器
中性原子ビーム６００が、ＦＲＣシステム１０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３Ａ、３Ｂ、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６１０および６４０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４５１（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１００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１００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６１０および６４０は、２０～４０ｋｅＶの粒子エネルギーを用いて、最大１ＭＷ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６１０および６４０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６１０および６４０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６１０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６１０は、端部を被覆する磁気遮蔽６１４とともに、入力端部（これは、システム６４０内のアーク源で代用される）にＲＦプラズマ源６１２を含む。イオン光学源および加速グリッド６１６は、プラズマ源６１２に結合され、ゲート弁６２０は、イオン光学源および加速グリッド６１６と中和装置６２２との間に位置付けられる。偏向磁石６２４およびイオンダンプ６２８は、中和装置６２２と出口端部における照準デバイス６３０との間に位置する。冷却システムは、２つの低温冷凍機６３４と、２つのクライオパネル６３６と、ＬＮ２シュラウド６３８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。

【００４７】

中性原子ビーム注入器６００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１００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６１５のこれらのタイプの配向は、図３Ｃに示される。加えて、ビーム注入器６１５は、中心閉じ込め容器１００の中央平面の両側のビーム注入器６１５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６００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、ＦＲＣ４５０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。

【００４８】

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５×１０^{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。

【００４９】

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。

【００５０】

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。

【００５１】

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の閉じ込めコイル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、より小型のパルスミラープラグコイル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。最も小型のパルスミラーコイル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。

【００５２】

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放出で作動し、５～１０ｍｓ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、５～１３ｃｍの外径、および最高１０ｃｍ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０．５～２．３Ｔで、４００～６００Ｖで１０～１５ｋＡの放電電流を提供する。

【００５３】

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１５０～３００ｅＶおよび約４０～５０ｅＶの高いイオン温度および電子温度で、２～４Ｔのミラープラグ４４０を通り約10^{22}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。

【００５４】

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。

【００５５】

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。

【００５６】

バイアス電極

開いた磁束表面の電気バイアスは、方位Ｅ×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×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。この制御を達成させるために、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。

【００５７】

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。

【００５８】

すべての場合において、これらの電極は、最高約８００Ｖ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。

【００５９】

（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る。

【００６０】

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。

【００６１】

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５×１０^{19}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。

【００６２】

（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$_{\Delta\Phi}$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。

【００６３】

ＦＲＣシステム１０の代表的な非持続放出からのデータは、図１３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１３（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。

【００６４】

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１３（ｂ）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１３（ｃ）の密度等高線をもたらす。初めの０．１ｍｓ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。

【００６５】

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１３（ｄ）に示されている。

【００６６】

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楕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。

【００６７】

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、７×１０^{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。

【００６８】

（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。

【００６９】

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_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、ｐａｒｔ３、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。

【００７０】

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、ＦＲＣ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。

【００７１】

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充分に短いので、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バレル（照射管）の燃焼順序および速度、ならびに粉砕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。

【００７２】

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。

【００７３】

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。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$F_{\theta}=-\sigma V_{e\theta}<|B_{r}|^{2}>$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０．００１Ｔのみであることが必要である。約０．０１５Ｔ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。

【００７４】

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１００ｋＪ）の容量エネルギーで高磁場（２～４Ｔ）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。

【００７５】

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５００Ｌ／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縁層４５６からダイバータ３００内に再利用されたほとんどの中性は、閉じ込めチャンバ１００に戻らない。加えて、プラズマガン３５０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３００に大部分が閉じ込められることになる。

【００７６】

最後に、ミラープラグ４４０は、ＦＲＣ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２０～４０の範囲で、北と南のミラープラグ４４０の間の長さが１５ｍで、縁層粒子閉じ込め時間

【数４】

$\tau_{\parallel}$

は、最高１０倍まで増加する。向上する

【数５】

$\tau_{\parallel}$

は、ＦＲＣ粒子閉じ込めを容易に増加させる。

【００７７】

セパラトリックス容積４５３からの径方向の拡散（Ｄ）粒子損失が、縁層４５６からの軸方向損失

【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
【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。ＦＲＣ粒子閉じ込め時間は、
【数９】

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

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１０】

$$\tau_{\parallel}$$

が向上すると、δ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１１】

$$\tau_{\parallel}$$

と共に増加するので、概ね二次方程式より若干少ない。
【００７８】
【数１２】

$$\tau_{\parallel}$$

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。
【００７９】
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。
【００８０】
上に論じたミラープラグで述べたように、

【数１３】

$$\tau_{\parallel}$$

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$10^{13}cm^{-3}$およびイオン温度約２００ｅＶ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１５ｍ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、λ_{ii}約6×10^{3}ｃｍであり、λ_{ii}ＩｎＲ／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、τ_{gd}約ＲＬ／２V_s約２ｍｓ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、τ_c約０．５τ_{ii}（ｌｎＲ＋（ｌｎＲ）$^{0.5}$）約０．７ｍｓ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、$\tau_{\perp}>\tau_{gd}$約２ｍｓ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。

【００８１】

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－１～０ｍｓ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＜－２ｍｓでオンする場合、プラズマ流は、形成の約１～３m^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$10^{13}cm^{-3}$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。

【００８２】

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、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×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。
【００８３】
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。
【００８４】
（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ＦＲＣ４５０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４ＭＷ）が、特定の実験設定に関して、中性ビーム（約２．５ＭＷ）を介してＦＲＣ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、ＦＲＣ寿命時間を延長させる傾向となるであろう。
【００８５】
図１７は、ＨＰＦ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は、時間関数としてＦＲＣ４５０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２．５ＭＷ）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ＦＲＣ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ＦＲＣ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、ＦＲＣ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Ｔｉ）を加えると、最良の結果を得る、すなわち、得られるＦＲＣ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。
【００８６】
図１に示したように、最近発見されたＨＰＦ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ＨＰＦレジームとの間のＦＲＣ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、ＨＰＦ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ＦＲＣ実験前の粒子閉じ込め時間に対して、ＦＲＣ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、ＦＲＣシステム１０のＨＰＦ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、ＨＰＦレジームにおけるＦＲＣ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。ＦＲＣシステム１０におけるＨＰＦ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ＦＲＣ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/ρ_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、ρ_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ＦＲＣ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ＦＲＣレジームＣＲにおいてＦＲＣ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、ＨＰＦ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、ＨＰＦレジームは、ＣＲ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。

【００８７】

さらなる比較のために、図１８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。

【００８８】

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ＦＲＣレジームＣＲと比較して、図１３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。

【００８９】

図１８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。

【００９０】

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＝０．５ｍｓ、すなわち、$t \leqq 0.5$ｍｓおよびｔ＞０．５ｍｓ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。

【００９１】

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、適切なペレット注入を使用する、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。

【００９２】

図１６に関して前述のように、ビームパルス長とＦＲＣ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、ＦＲＣ４５０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。ＦＲＣの収縮または減衰は、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－４ＭＷ）が、特定の実験設定に関して、中性ビーム（約２．５ＭＷ）を介してＦＲＣ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３Ｃ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、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。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。

【００９３】

プロットＢは、約６ｍｓの活性ビームパルス長および約１０ＭＷ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１５ｋｅＶ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１１０Ａ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０．１９ｍであった。注入角度は、範囲１５°～２５°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。

【００９４】

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。

【００９５】

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ＦＲＣ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１ｍｓ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。

【００９６】

本発明は様々な修正形態および代替形態の影響を受けやすいが、その具体例が図面に示され、本明細書に詳述された。しかし、本発明は開示された特定の形または方法に限定されないが、逆に、本発明は、添付の特許請求の範囲の精神および範囲に収まる、すべての修正形態、均等物および代替形態を網羅するものであることを理解されたい。

【００９７】

上述では、説明目的に過ぎず、具体的な用語は、本開示の完全な理解を提供するために

説明されている。しかし、これらの具体的な詳述は、本開示の教示を実施するために必要とはされないことが、当業者には明らかになろう。

【００９８】

代表的な例および従属請求項の様々な特徴は、本教示の追加の有益な実施形態を提供するために、具体的にかつ明確に列挙されていないようなやり方で組み合わされていることがある。エンティティの群のすべての階級区分または表示は、本来の開示目的のため、ならびに特許請求の範囲の主題を限定する目的のために、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白に留意されたい。

【００９９】

ＨＰＦレジームＦＲＣを生成し維持するシステムおよび方法が開示されてきた。本明細書に記載された実施形態は、解明のためであり、本開示の主題を限定するとみなされるべきではないことを理解されたい。様々な修正形態、使用、置換、組合せ、改良、生産方法が、本発明の範囲または精神から逸脱することなく、当業者に明らかであるはずである。例えば、本明細書に記載されたプロセス行為の具体的な順序および組合せは、特定の指定がない限り例示に過ぎず、本発明を、異なるもしくは追加のプロセス行為、またはプロセス行為の異なる組合せもしくは順序を使用して実施することができることを、読者は理解するべきである。別の例として、一実施形態のそれぞれの特徴を、他の実施形態に示された他の特徴と混合または整合することができる。当業者に公知の特徴およびプロセスを、要望通りに同様に組み合わせてもよい。加えてまた明らかに、特徴を要望通りに加えてもよく、または差し引いてもよい。したがって、本発明は、添付された特許請求の範囲およびそれらの均等物を考慮する以外に限定されない。

【図１】

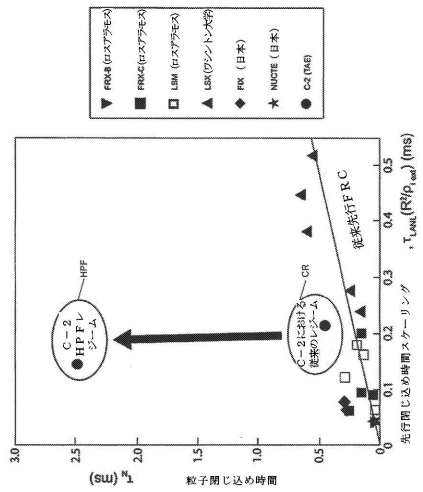


FIGURE 1

【図２】

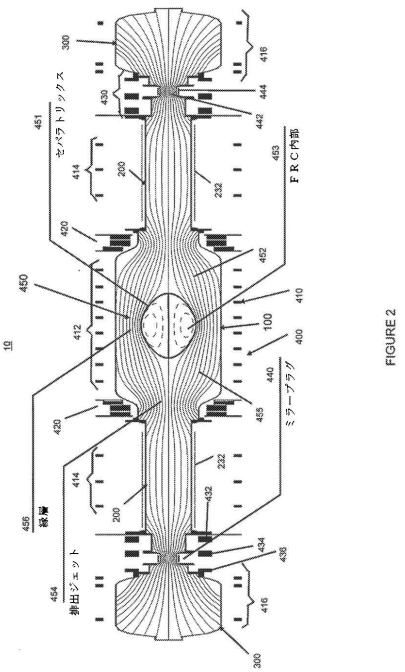
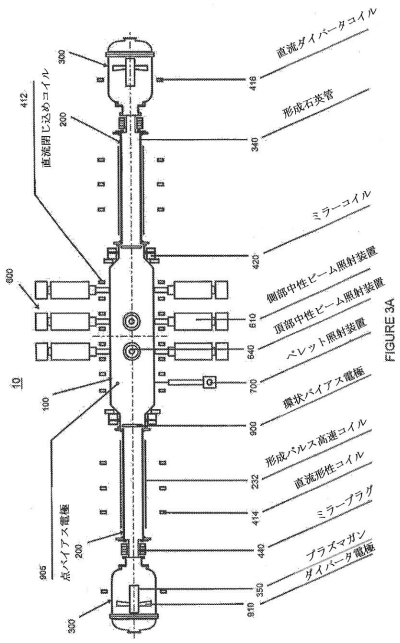


FIGURE 2

【図３Ａ】



【図３Ｂ】

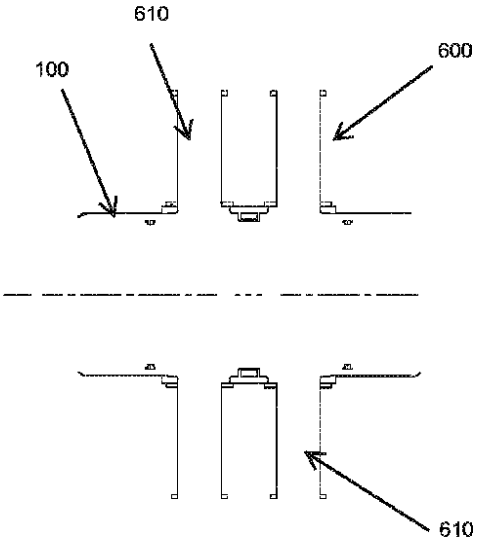


FIGURE 3B

【図３Ｃ】

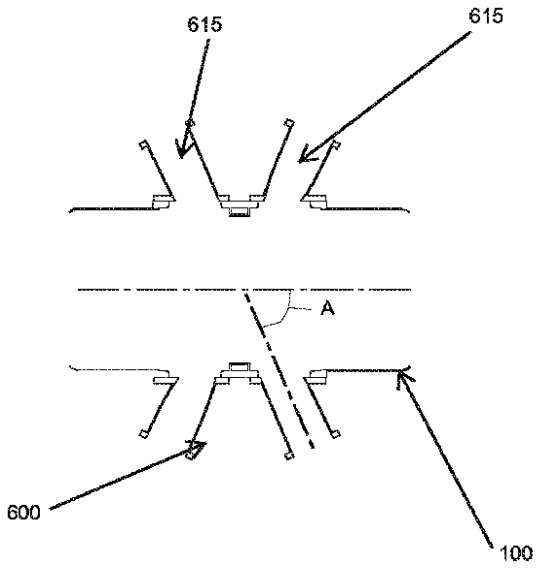
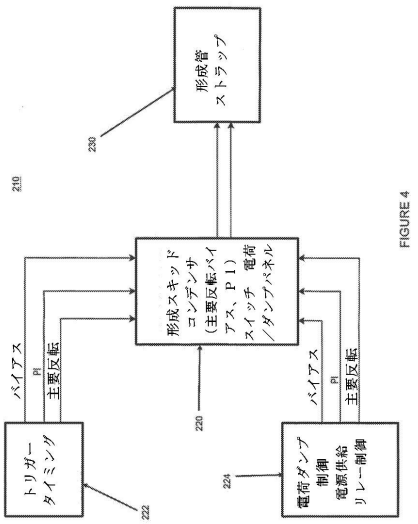


FIGURE 3C

【図４】



【図５】

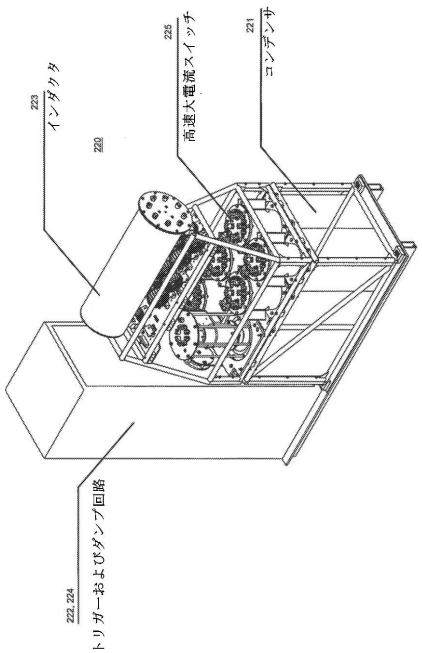


FIGURE 5

【図６】

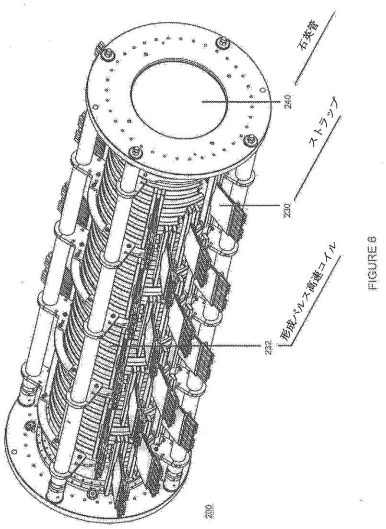


FIGURE 6

【図７】

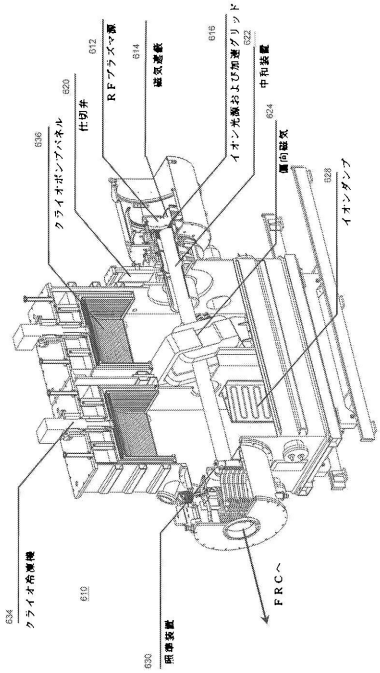


FIGURE 7

【図８】

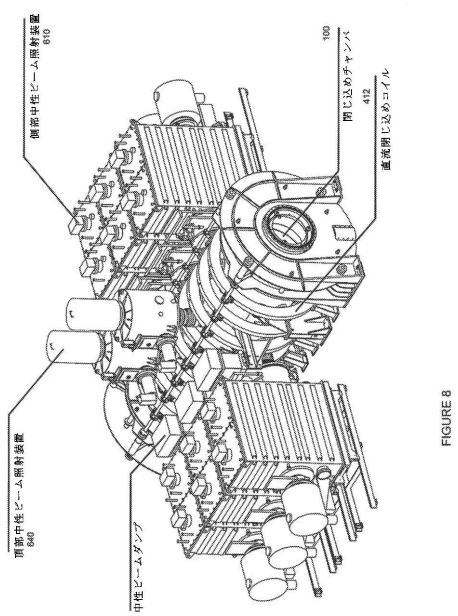
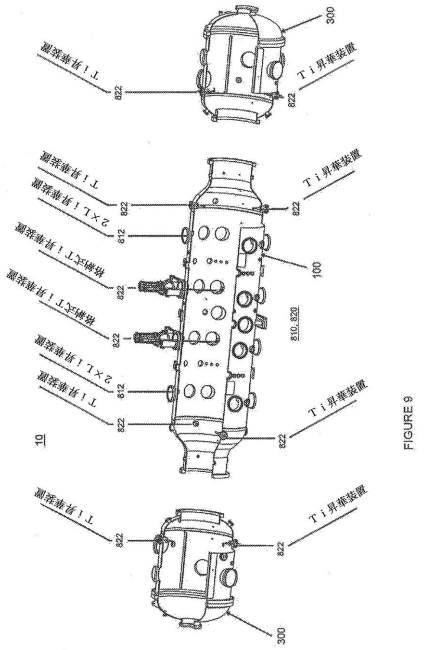


FIGURE 8

【図９】


Ｔｉ昇華装置
Ｔｉ昇華装置
Ｔｉ昇華装置

【図１４】

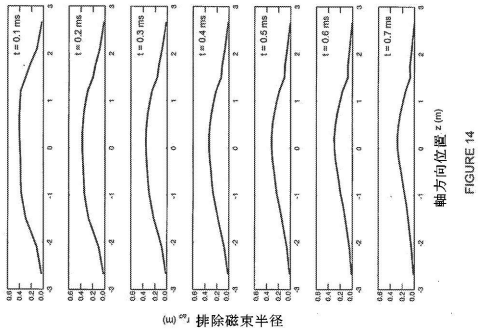


FIGURE 14

【図１５】

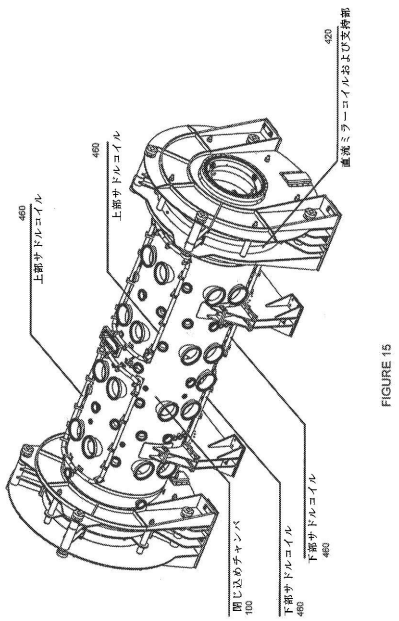


FIGURE 15

【図１６】

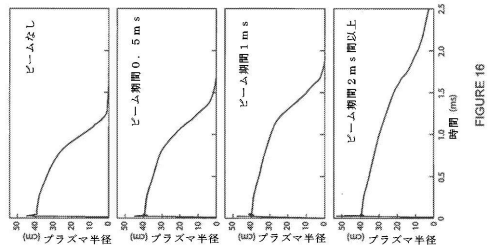


FIGURE 16

【図１７】

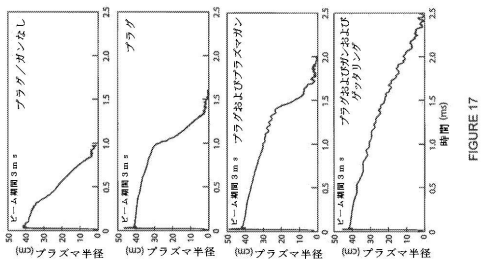


FIGURE 17

【図１８】

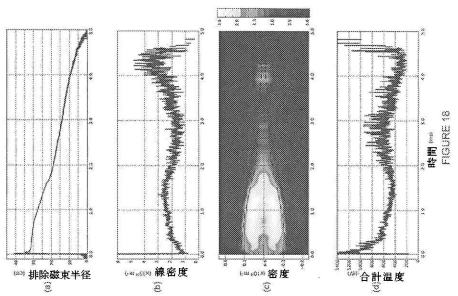


FIGURE 18

【図１９】

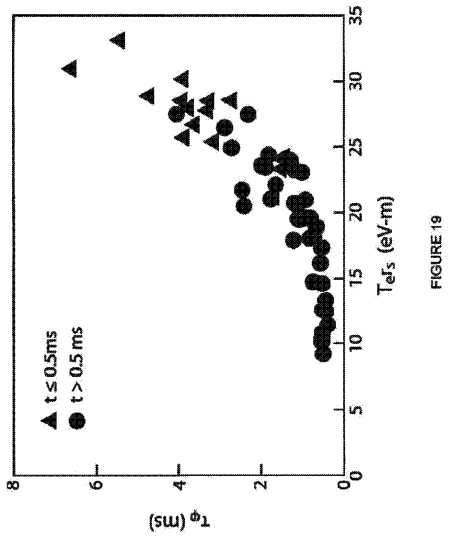


FIGURE 19

【図２０】

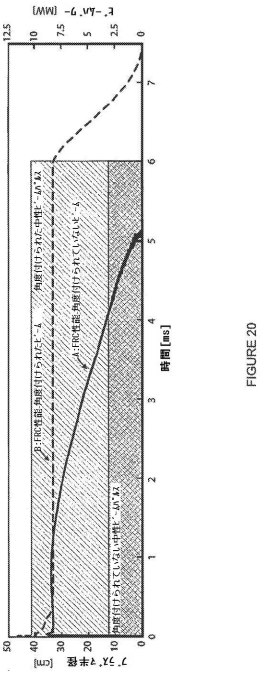


FIGURE 20

フロントページの続き

前置審査

(74)代理人 230113332
弁護士 山本 健策
(72)発明者 タスゼウスキー, ミシェル
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 １０６３１
(72)発明者 ビンデルバウアー, ミヒル
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 １０６３１
(72)発明者 バーンズ, ダン
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 １０６３１
(72)発明者 ガラテ, エウセビオ
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 １０６３１
(72)発明者 グオ, ホウヤン
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 １０６３１
(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 １０６３１
(72)発明者 スミルノフ, アルテム
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 １０６３１

審査官 大門 清

(56)参考文献 国際公開第２０１３／０７４６６６（WO，Ａ１）
特開２０１３－１０１１３４（ＪＰ，Ａ）
特表２０１５－５０２５３２（ＪＰ，Ａ）
T.Asai et al., Experimental evidence of improved confinement in a high-beta field-reversed configuration plasma by neutral beam injection, PHYSICS OF PLASMAS, 米国, ２０００年 6月, VOLUME7 NUMBER6

(58)調査した分野(Int.Cl.，ＤＢ名)
Ｇ２１Ｂ １／００
Ｈ０５Ｈ １／０２