

(19)日本国特許庁(JP)

## (12)特許公報(B2)

(11)特許番号  
特許第7585338号  
(P7585338)

(45)発行日 令和6年11月18日(2024.11.18)

(24)登録日 令和6年11月8日(2024.11.8)

(51)国際特許分類		F I			
H 0 5 H	1/10 (2006.01)	H 0 5 H	1/10		
H 0 5 H	1/22 (2006.01)	H 0 5 H	1/22		
G 2 1 B	1/11 (2006.01)	G 2 1 B	1/11	E	

請求項の数 11 (全23頁)

(21)出願番号	特願2022-553218(P2022-553218)	(73)特許権者	522185346 ノバトロン・フュージョン・グループ・ エービー Novatron Fusion Gro up AB
(86)(22)出願日	令和2年11月11日(2020.11.11)		スウェーデン国、163 47 スポンガ 、ストルプレッツベーゲン 154 Storvretsvaegen 15 4, 163 47 Spanga Swe den
(65)公表番号	特表2023-502173(P2023-502173 A)		
(43)公表日	令和5年1月20日(2023.1.20)	(74)代理人	110003708 弁理士法人鈴榮特許総合事務所
(86)国際出願番号	PCT/EP2020/081762	(74)代理人	100108855 弁理士 蔵田 昌俊
(87)国際公開番号	WO2021/094372	(74)代理人	100179062
(87)国際公開日	令和3年5月20日(2021.5.20)		
審査請求日	令和5年9月13日(2023.9.13)		
(31)優先権主張番号	19208258.4		
(32)優先日	令和1年11月11日(2019.11.11)		
(33)優先権主張国・地域又は機関	欧州特許庁(EP)		

最終頁に続く

(54)【発明の名称】 プラズマ閉じ込め装置及びプラズマ閉じ込め方法

## (57)【特許請求の範囲】

## 【請求項1】

第1の複数の同心円状に配置された円形ループコイルを備える第1の磁石系と、第2の複数の同心円状に配置された円形ループコイルを備える第2の磁石系とを備えるプラズマ閉じ込め装置であって、

前記第1の磁石系は、第1の方向に電流を通すように配置された第1のコイルと前記第1の方向と反対の第2の方向に電流を通すように配置された第2のコイルとを備え、前記第2の磁石系は、前記第1の磁石系と前記第2の磁石系の間位置する対称平面に関して、前記第1の磁石系に対してミラー対称に配置され、

前記対称平面において前記対称平面に垂直な磁場を有する前記対称平面で環状のプラズマ閉じ込め領域を作り出し、

前記プラズマ閉じ込め装置は、前記プラズマ閉じ込め領域の半径方向外側に配置された第3の磁石系をさらに備え、前記第3の磁石系は、少なくとも1つの円形ループコイルを備える、プラズマ閉じ込め装置。

## 【請求項2】

前記第1の複数の同心円状に配置された円形ループコイルは、前記第2の複数の同心円状に配置された円形ループコイルと同一に設計されている、請求項1に記載のプラズマ閉じ込め装置。

## 【請求項3】

前記第3の磁石系は、前記対称平面の前記第1の磁石系と同じ側に配置された第1のコ

10

20

イルと、前記対称平面の反対側に配置された第 2 のコイルとを備え、前記第 2 のコイルは、前記第 1 のコイルに対してミラー対称に配置されている、請求項 1 に記載のプラズマ閉じ込め装置。

【請求項 4】

前記第 1 の磁石系における前記第 1 の複数の同心円状に配置された円形ループコイルと、前記第 2 の磁石系における前記第 2 の複数の同心円状に配置された円形ループコイルとは、それぞれがそれぞれの強磁性構造の中に埋め込まれている、請求項 1 から 3 のいずれか一項に記載のプラズマ閉じ込め装置。

【請求項 5】

前記強磁性構造は、前記対称平面に向かう方向において、それぞれの前記複数の同心円状に配置された円形ループコイルの少なくとも 1 つのコイルを覆わない、請求項 4 に記載のプラズマ閉じ込め装置。

10

【請求項 6】

前記強磁性構造が強磁性鋼を備える、請求項 4 又は 5 に記載のプラズマ閉じ込め装置。

【請求項 7】

プラズマを閉じ込めるための、請求項 1 から 6 のいずれか一項に記載のプラズマ閉じ込め装置の使用。

【請求項 8】

核融合炉における、請求項 1 から 6 のいずれか一項に記載のプラズマ閉じ込め装置の使用。

20

【請求項 9】

プラズマ閉じ込め方法であって、

第 1 の複数の同心円状に配置された円形ループコイルを備える第 1 の磁石系と、

第 2 の複数の同心円状に配置された円形ループコイルを備える第 2 の磁石系と、において、

前記第 1 の磁石系は、第 1 の方向に電流を通す第 1 のコイルと前記第 1 の方向と反対の第 2 の方向に電流を通す第 2 のコイルとを備え、

前記第 2 の磁石系は、前記第 1 の磁石系と前記第 2 の磁石系の上に位置する対称平面に関して、前記第 1 の磁石系に対してミラー対称の電流を通し、

前記対称平面に垂直の磁場を有する前記対称平面で環状のプラズマ閉じ込め領域を作り出すことを備え、

30

前記プラズマ閉じ込め方法は、前記プラズマ閉じ込め領域の半径方向外側に配置された第 3 の磁石系において、電流調節によって閉じ込められたプラズマを制御すること

をさらに備える、プラズマ閉じ込め方法。

【請求項 10】

前記制御することは、前記プラズマ閉じ込め領域の半径を変更することを含む、請求項 9 に記載のプラズマ閉じ込め方法。

【請求項 11】

前記プラズマ閉じ込め領域の半径方向外側、又は前記プラズマ閉じ込め領域の半径方向内側の領域内にイオンビームを挿入することによってプラズマを加熱すること、及び

40

前記イオンビームからのイオンが、前記プラズマ閉じ込め領域中に移動することを可能にすること

をさらに備える、請求項 9 又は 10 に記載のプラズマ閉じ込め方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本開示は、プラズマ閉じ込め装置及びプラズマ閉じ込め方法に関する。

【背景技術】

【0002】

制御された核融合のための原子炉を設計するために、世界中で多大な努力が払われてい

50

る。最も有望な融合プロセスは、水素同位体の重水素 ( $^2\text{H}$ ) とトリチウム ( $^3\text{H}$ ) とのものである。重水素 - トリチウム核融合プロセスでは、約 3 . 5 MeV の運動エネルギーを有する  $^4\text{He}$  アルファ粒子と、約 14 . 1 MeV の運動エネルギーを有する中性子とが作り出される。

【0003】

核融合が起こるためには、原子核は 1 億 5 0 0 0 万ケルビン程度の温度を有するプラズマの形態をしていなくてはならない。このようなプラズマの閉じ込めをもたらすことは、依然として大きな課題である。

【0004】

プラズマ閉じ込めのためのいくつかの異なる知られた磁気構成がある。

10

【0005】

プラズマの閉じ込めは、プラズマの荷電粒子を閉じ込めることを伴う。また、閉じ込められたプラズマの安定性に有益な種々の特性が望ましい場合がある。

【0006】

よく知られているデザインは磁気ミラーである。その場合には、粒子は磁場線に追従し、装置の各端部における磁束密度が増加する領域において反射される。実験的に実証されているように、プラズマ閉じ込めが可能である一方で、様々なプラズマ不安定性の問題と関連している。これらの問題を解決するために、テニスボールに似た「ミニマム B」設計、又は「バイコニックカusp (Biconic Cusp)」などの、様々な畳み込まれた非回転対称形状が、従来技術において提案されている。

20

【0007】

もう一つのよく知られている設計はトカマク (tokamak) である。トカマクは、閉じ込めのために、トロイド形、すなわちドーナツ形の磁場を使用する。トカマクもまた、電荷分離などの様々なプラズマ安定性の問題と関連している。

【発明の概要】

【0008】

本開示の目的は、特に核融合炉における使用のための、改良型プラズマ閉じ込め装置及び方法を提供することである。

【0009】

この目的のために、第 1 の態様によれば、第 1 の方向に電流を通すように配置された第 1 のコイル、及び第 1 の方向と反対の第 2 の方向に電流を通すように配置された第 2 のコイルを備える、第 1 の複数の同心円状に配置された円形ループコイルを備える、第 1 の磁石系と、第 1 の磁石系と第 2 の磁石系の間に位置する対称平面に関して、第 1 の磁石系に対してミラー対称に配置され、第 2 の複数の同心円状に配置された円形ループコイルを備える、第 2 の磁石系とを備え、対称平面において対称平面に垂直な磁場を有する、対称平面における環状のプラズマ閉じ込め領域を作り出す、プラズマ閉じ込め装置が提供される。

30

【0010】

環状のプラズマ閉じ込め領域として、例えばドーナツ状又は円盤状のトポロジを有する場合を含む、プラズマの荷電粒子が閉じ込められた回転対称区域と理解されるべきである。

【0011】

これにより、得られる磁場構成は、静的な軸方向及び半径方向の磁場を用いて、荷電粒子を開放磁場線磁気ミラー構成に閉じ込め得る。

40

【0012】

第 1 の磁石系及び第 2 の磁石系のそれぞれにおいて、第 1 のコイルが第 1 の方向に電流を通すように配置され、第 2 のコイルが反対の第 2 の方向に電流を通すように配置されている配設は、対称平面付近で比較的低い磁束密度を維持しながら、第 1 のコイルと第 2 のコイルとの間に高い磁束密度の区域を作り出すことを可能にする。従来の磁気ミラー配置と比較して、これによりミラー比を増加させることが可能になり、それによって損失コーン (loss cone) の大きさを低減して、プラズマのより良好な閉じ込めが可能になる。

【0013】

50

また、トカマクと比較して、プラズマを閉じ込める際に、電荷分離効果を回避し得て、プラズマの安定性のための誘導プラズマ電流を必要としない場合がある。結果として生じる準静的プラズマによって、すなわちグローバルプラズマ電流なしで、磁気流体力学的不安定性を回避することができる。また、核融合炉は、電流ランピング (ramping) を行うことなく、連続 (定常) 状態で運転可能にさせ得る。

【0014】

さらに、結果として得られる磁場構成は、プラズマを加熱する単純な方法を可能にし得る。

【0015】

第1の複数の同心円状に配置されたコイルは、例えば、第2の複数の同心円状に配置されたコイルと同一に設計され得る。これは、所望の磁場構成を達成するための特に簡単な方法である。

10

【0016】

この装置は、プラズマ閉じ込め領域の半径方向外側に配置された第3の磁石系をさらに備えてもよく、第3の磁石系は、少なくとも1つの円形ループコイルを備える。

【0017】

これにより、確実に半径方向に増大する磁場を配置することができ、これは閉じ込められたプラズマの安定性に有益であり、従来型の磁気ミラーにさらに改良を加える。

【0018】

さらに、第3の磁石系を有する配設は、プラズマ閉じ込め領域全体において凹状磁場を配置することを可能にし、このことは閉じ込められたプラズマの安定性にとって有益であり得る。

20

【0019】

このように、ミラー比が高く、プラズマ安定性に有益な特性を有する、回転対称型の開放磁場線プラズマ閉じ込め装置が提供され得る。

【0020】

また、第3の磁石系は、第3の磁石系の円形ループコイルにおける電流調節により、閉じ込められたプラズマを制御することを可能にし得る。

【0021】

第3の磁石系は、第1の磁石系において対称平面の同じ側に配置された第1のコイルと、対称平面の反対側に配置された第2のコイルとを備えてもよく、ここで、第2のコイルは、第1のコイルに対してミラー対称に配置される。

30

【0022】

第1の磁石系における第1の複数の同心円状に配置されたコイルと、第2の磁石系における第2の複数の同心円状に配置されたコイルとは、それぞれの強磁性構造に埋め込まれていてもよい。これにより、強磁性材料の相対的に高い透磁率を通る磁束が増加し、所定のコイル電流に対してより強い磁場が得られ、それによってより良好な閉じ込めが得られる。

【0023】

任意選択で、前記の強磁性構造は、前記対称平面に向かう方向において、それぞれの前記複数のコイルのうちの少なくとも1つのコイルを覆わない。これによって、対称平面から離れる方向の磁束がシールドされ、磁束を対称平面に向かう方向、すなわちプラズマに向かって誘導する。これにより、所与のコイル電流に対してより効率的なシールドが達成される。

40

【0024】

前記強磁性構造は、強磁性鋼であり得る。

【0025】

第1の態様による装置は、プラズマを閉じ込めるために用いられ得る。

【0026】

第1の態様による装置は、核融合炉に用いられ得る。

50

## 【 0 0 2 7 】

第2の態様によれば、第1の方向に電流を通す第1のコイル、及び第1の方向と反対の第2の方向に電流を通す第2のコイルを備える、第1の複数の同心円状に配置された円形ループコイルを備える、第1の磁石系と、第1の磁石系と第2の磁石系の間に位置する対称平面に関して、第1の磁石系に対してミラー対称の電流を通す、第2の複数の同心円状に配置された円形ループコイルを備える、第2の磁石系とにおいて、対称平面に垂直な磁場を有する、対称平面における環状のプラズマ閉じ込め領域を作り出すことを含む、プラズマ閉じ込めの方法が提供される。

## 【 0 0 2 8 】

この第2の態様の実施形態及び利点は、一般に、第1の態様の実施形態と同様又は同一であり得る。

10

## 【 0 0 2 9 】

この方法は、プラズマ閉じ込め領域の半径方向外側に配置された第3の磁石系における電流調節によって閉じ込められたプラズマを制御することをさらに含み得る。

## 【 0 0 3 0 】

制御することは、プラズマ閉じ込め領域の半径を変化させることを含んでもよく、これにより、プラズマの半径を変化させ得る。

## 【 0 0 3 1 】

この方法は、プラズマ閉じ込め領域の半径方向外側又はプラズマ閉じ込め領域の半径方向内側の領域にイオンビームを挿入し、イオンビームからのイオンをプラズマ閉じ込め領域中に移動させることによって、プラズマを加熱することをさらに含み得る。

20

## 【 0 0 3 2 】

プラズマを閉じ込めるために作り出された磁場が、外部から来るイオンをプラズマから偏向させるとともに、磁場を貫通し、プラズマ内で一度だけイオン化される中性ビームを使用して加熱を行う必要がある、トカマク又は同様の装置のような既存の解決策とは異なり、ここでは、現在の磁場構成は、イオンを偏向させるのではなく、プラズマ閉じ込め領域にイオンを引き込むことができるので、高エネルギーイオンは、閉じ込められたプラズマに便利で簡単に追加され得るか、又は核融合条件を作り出すためにプラズマの初期加熱のために提供され得る。これにより、手順の複雑さの軽減をもたらすとともに、粒子損失をさらに低減させ得る。

30

## 【 0 0 3 3 】

第3の態様によれば、第1の方向に電流を通すように配置された第1のコイル、及び第1の方向と反対の第2の方向に電流を通すように配置された第2のコイルを備える、第1の複数の同心円状に配置された円形ループコイルを備える、第1の磁石系と、第1の磁石系と第2の磁石系との間に位置する対称平面に関して第1の磁石系に対してミラー対称に配置された、第2の複数の同心円状に配置された円形ループコイルを備える、第2の磁石系とを備えて、対称平面において対称平面に垂直な磁場を有する、対称平面における環状の粒子閉じ込め領域を作り出すことを含む、磁気ミラーマシン及び/又は粒子閉じ込め装置が提供される。

## 【 0 0 3 4 】

その他の態様と併せて、また本開示全体を通して考察された実施形態及び利点は、この第3の態様と適合性がある。

40

## 【 0 0 3 5 】

第4の態様によれば、第1の方向に電流を通す第1のコイル、及び第1の方向と反対の第2の方向に電流を通す第2のコイルを備える、第1の複数の同心円状に配置された円形ループコイルを備える、第1の磁石系と、第1の磁石系と第2の磁石系との間に位置する対称平面に関して、第1の磁石系に対してミラー対称の電流を通す、第2の複数の同心円状に配置された円形ループコイルを備える、第2の磁石系とにおいて、対称平面に垂直な磁場を有する、対称平面における環状の粒子閉じ込め領域を作り出すことを含む、荷電粒子の閉じ込め方法が提供される。

50

## 【 0 0 3 6 】

その他の態様と併せて、また本開示全体を通して考察された実施形態及び利点は、この第3の態様と適合性がある。

## 【 0 0 3 7 】

本発明概念の上記、ならびにさらなる目的、特徴及び利点は、類似の要素に対して同一の参照番号が使用される添付の図面を参照すれば、好ましい実施形態についての以下の例証的及び非限定的な詳細な説明を通して、よりよく理解されるであろう。

## 【 図面の簡単な説明 】

## 【 0 0 3 8 】

【 図 1 a 】 プラズマ閉じ込め装置に備えられ得る、第1の磁石系及び第2の磁石系の斜視図。 10

【 図 1 b 】 図 1 a の第1及び第2の磁石系の切り欠き斜視図。

【 図 1 c 】 図 1 a 及び図 1 b の第1及び第2の磁石系の平面断面図。

【 図 2 】 図 1 a 、 1 b 、 及び 1 c の第1及び第2の磁石系で生成される模擬磁場線を示す平面図。

【 図 3 a 】 プラズマ閉じ込め装置に備えられ得る、第1の磁石系、第2の磁石系、及び第3の磁石系の切り欠き斜視図。

【 図 3 b 】 図 3 a の第1、第2及び第3の磁石系の平面断面図。

【 図 4 a 】 図 3 a 及び図 3 b の第1、第2、及び第3の磁石系で生成された模擬磁場線を示す平面図。 20

【 図 4 b 】 図 3 a 及び図 3 b の第1、第2、及び第3の磁石系で生成された模擬磁場線を示す平面図。

【 図 5 a 】 プラズマ閉じ込め装置を示す切り欠き斜視図。

【 図 5 b 】 プラズマ閉じ込め装置を示す切り欠き斜視図。

【 図 6 】 プラズマ閉じ込め装置の切り欠き斜視図。

【 図 7 】 プラズマ閉じ込め装置の切り欠き斜視図。

【 図 8 】 プラズマ閉じ込め装置の切り欠き斜視図。

【 図 9 】 従来式の直線磁気ミラー構成によって生成された模擬磁場線を示す平面図。

【 図 1 0 】 第1及び第2の磁石系によって生成された模擬磁場線を示す平面図。

【 図 1 1 】 第1、第2、及び第3の磁石系によって生成された模擬磁場線を示す平面図。 30

【 図 1 2 】 第1、第2、及び第3の磁石系によって生成された模擬磁場線を示す平面図において、第1の磁石系及び第2の磁石系における各コイルのそれぞれが、それぞれの強磁性シールドに埋め込まれている、平面図。

【 図 1 3 】 第1、第2、及び第3の磁石系によって生成された模擬磁場線を示す平面図。

【 図 1 4 a 】 図 6 、 図 7 、 図 8 、 及び図 1 3 の構成における1粒子模擬結果を示す図。

【 図 1 4 b 】 図 6 、 図 7 、 図 8 、 及び図 1 3 の構成における1粒子模擬結果を示す図。

【 図 1 5 】  $v_z / v_R$ 比が0.5、1.5、2.5のそれぞれに対して、初期半径位置が1.5 m、3.0 m、及び4.5 mの模擬荷電粒子軌道を示す図。

【 図 1 6 】  $v_z / v_R$ 比が0.5、1.5、2.5のそれぞれに対して、初期半径位置が1.5 m、3.0 m、及び4.5 mの模擬荷電粒子軌道を示す図。 40

【 図 1 7 】  $v_z / v_R$ 比が0.5、1.5、2.5のそれぞれに対して、初期半径位置が1.5 m、3.0 m、及び4.5 mの模擬荷電粒子軌道を示す図。

## 【 発明を実施するための形態 】

## 【 0 0 3 9 】

一般に知られているように、プラズマ閉じ込め装置は、開放磁場線又は閉鎖磁場線のいずれかに基づき得る。

## 【 0 0 4 0 】

閉鎖磁場線装置は、例えば、トロイダル磁場を有し得る。そのような装置の一例がトカマクである。

## 【 0 0 4 1 】

閉鎖磁場線装置は、粒子が磁場線をたどるため、漏れることなくプラズマ粒子を閉じ込める可能性があるが、電荷分離による  $E \times B$  ドリフトや磁気流体力学的 (MHD: magneto-hydrodynamic) 効果などの他の問題により、プラズマを逃がす可能性がある。ヘリウム灰を除去するには、システムをパルシング (pulsing) したり、定常動作を許可しないなど、特別な配設を行う必要がある。

【0042】

トロイダル場の大きな問題の1つは、電荷分離によって引き起こされる  $E \times B$  ドリフトによってイオンが閉じ込め状態から逃れることである。

【0043】

トカマクにおいては、この問題は、プラズマ中に電流を誘導することによって対処することができ、そこで電流はポロイダル場を作り出す。この結果として、磁場がトーラスに沿ってねじれて、ポロイダル磁場とトロイダル場が一緒になってねじれた磁場を作り上げる。これにより、 $E \times B$  ドリフトは緩和されるが、内部磁気コイルの電流がランピングしている間、つまり定常状態で動作できない間だけ、プラズマが閉じ込められるという追加の問題が持ちこまれる。

10

【0044】

さらに、プラズマ電流は、キンク不安定性などの、磁気流体力学的効果に関連するいくつかの不安定性をもたらす。これは、原子炉容器のまわりの様々な補償コイルによって対処することができるが、プラズマの基本的な特性は、大きな磁気流体力学的効果のために不安定なままである。

20

【0045】

開放磁場線プラズマ閉じ込め装置は、従来技術で知られているように、磁気ミラーリングの原理によって動作可能であり、この場合に、プラズマの荷電粒子は、閉じ込め領域のそれぞれの端部の磁束密度が増加する領域において反射される。このような機械は定常動作の能力を有し、一般に電荷分離の問題が少なく、またヘリウム灰の取り扱いも容易にすることができる。

【0046】

解放磁場線プラズマ閉じ込め装置は、プラズマ閉じ込めを提供できると認識されているが、磁場線に十分に整列した速度ベクトルを持つ荷電粒子の漏れが常にある。より具体的には、ミラー効果は、磁場線のまわりの荷電粒子のジャイロスピンのらせん渦巻きピッチ角によって定義される、損失コーンの外側の接近角の範囲内のすべての粒子に対して生じる。

30

【0047】

損失コーンの程度は、磁場線に続く最大磁束密度  $B_{max}$  と最小磁束密度  $B_{min}$  の比として定義される、ミラー比  $r_{mirror}$  によって決定される：

【0048】

【数1】

$$r_{mirror} = \frac{B_{max}}{B_{min}}$$

40

【0049】

損失コーンを定義する角度は次のとおりである：

【0050】

【数2】

$$\alpha_{cone} = \arccos \frac{1}{\sqrt{r_{mirror}}}$$

【0051】

したがって、ミラー比が高いと損失コーンが小さくなり、その結果として磁場線に最も

50

整列した速度を持つ粒子のみが逃れることがわかる。逆に、ミラー比が低いと、損失コーンが大きくなる。

【 0 0 5 2 】

閉じ込められたプラズマの磁気流体力学的安定性と関連する、プラズマ閉じ込め装置の磁場線の、文献から知られている第 1 の性質は、プラズマ閉じ込め領域及び閉じ込められたプラズマの外側から見た凹状の磁場、すなわち凹状の磁場線を有する磁場である。

【 0 0 5 3 】

閉じ込められたプラズマの磁気流体力学的安定性と関連する、プラズマ閉じ込め装置の磁場線の、文献から知られている第 2 の性質は、半径方向に確実に増加する磁場である。

【 0 0 5 4 】

図 1 a、図 1 b、及び図 1 c は、プラズマ閉じ込め装置に含まれ得る第 1 の磁石系 1 及び第 2 の磁石系 2 を示す（図 5 a 及び図 5 b 参照）。

【 0 0 5 5 】

第 1 の磁石系 1 は、対称軸 A のまわりに配置された第 1 の複数の同心円状に配置された円形ループコイル、例えば、図示されているような、第 1 の、内側コイル 1 1 と、内側コイル 1 1 の径方向外側に同心円状に配置された、第 2 の、外側コイル 1 2 とを備える。

【 0 0 5 6 】

さらに、第 1 の磁石系 1 は、同様に軸 A のまわりに同心円状に配置されるが、第 1 の磁石系に対して上下に変位した、第 2 の複数の円形ループコイルを備える、第 2 の磁石系 2 を備える。第 2 の磁石系は、例えば、図示されるように、第 1 の、内側コイル 2 1 と、内側コイル 2 1 に対して同心円状に、その半径方向外側に配置された、第 2 の外側コイル 2 2 とを備えてもよい。

【 0 0 5 7 】

図 1 c は、対称軸 A を通る断面平面において、第 1 の磁石系 1 及び第 2 の磁石系 2 を通る横断面図を示す。

【 0 0 5 8 】

第 2 磁石系 2 のコイル 2 1、2 2 は、第 1 の磁石系 1 及び第 2 の磁石系 2 のそれぞれに対して等距離にある対称平面 P と相対的に、第 1 の磁石系 1 のコイル 1 1、1 2 に対してミラー対称に配置されている。

【 0 0 5 9 】

本開示全体を通して、軸 A 及び対称平面 P に対する座標系及び方向を参照することができる。特に、座標及び方向は、対称軸 A と対称平面 P との交点を原点として有する円筒座標系又はデカルト座標系を参照して記述することができる。

【 0 0 6 0 】

「X、Y、Z」、「x、y、z」、「A、B、C」等と称される座標を有する、デカルト座標系とは、対称平面 P に横たわる最初の 2 つの座標軸「X、Y」、「x、y」、「A、B」等と、対称軸 A に沿って原点から上方（図 1 ~ 図 5 に見られるように）に正方向に延びる第 3 の座標軸「z」、「Z」、「C」等と、を有するものと理解されるべきである。

【 0 0 6 1 】

空間座標の単位が開示されていない場合、メートル又は度の単位が暗示される。時間の単位が開示されていない場合、秒の単位が暗示される。

【 0 0 6 2 】

円筒座標系とは、対称軸 A と対称平面 P との交点における原点から延びる径方向及び座標（「R」、「r」等）と、対称軸 A を中心とする回転角度として測定される方位角方向及び座標（「 $\theta$ 」、「Phi」等）と、軸方向及び、対称軸 A に沿って原点から上方に正方向に延びる座標（「z」、「Z」、「C」等）とを有するものと理解されるべきである。方位角方向に対する正方向は、正の軸方向に対して右手の法則に従う。

【 0 0 6 3 】

さらに、本開示全体を通して、模擬磁場（磁束密度）線、すなわち、等磁位線を示す、図 2、4 a、4 b、9、10、11、及び 12 を含む図が参照される。本明細書に開示さ

10

20

30

40

50

れる磁石系の対称性特性のせいで、すなわち、対称平面 P に対するミラー対称性及び軸 A を中心とする回転対称性のせいで、このような象限の磁場特性は、全体としての磁場構成を記述するのに十分である。したがって、象限を示す図は、対称特性に言及することを条件として、4つの象限すべてにおける磁場及び磁石系構成を開示するものと解釈されるべきである。さらに、回転対称性のせいで、図は3次元磁場と磁石系とを開示していると解釈されるべきである。

【0064】

さらに図 1 c を参照して、第 1 の磁石系 1 の第 1 の複数の同心円状に配置されたコイル 1 1、1 2 は、図示されているように、ミラー対称性を守り、第 2 の磁石系 2 の第 2 の複数の同心円状に配置されたコイル 2 1、2 2 と同一に設計され得る。

10

【0065】

図 1 c はさらに、プラズマ閉じ込め装置に用いられるときの、第 1 の磁石系及び第 2 の磁石系の動作中のコイル電流方向を示す(図 5 a 及び図 5 b 参照)。

【0066】

第 1 の磁石系 1 では、内側コイル 1 1 の電流は、図 1 c の右側の断面平面(ばつ印でマーク)の中に入り、図 1 c 左側の断面平面(中心点付き円でマーク)から外に出る方向、すなわち、第 1 磁石系の上方から見て反時計回りに、流れるように構成されている。逆に、外側コイル 1 2 の電流は、図 1 c の右側の断面平面(中心点付き円でマーク)から外に出て、図 1 c の左側の断面平面(ばつ印でマーク)から中に入る方向、すなわち、第 1 の磁石系の上方から見て時計回りに流れるように構成されている。

20

【0067】

このように、第 1 の複数の同心円状に配置された円形ループコイルは、第 1 の方向に電流を通すように配置された第 1 のコイル 1 1 と、第 1 の方向と反対の第 2 の方向に電流を通すように配置された第 2 のコイル 1 2 とを備える。

【0068】

同様に、対称平面 P に対するミラー対称性を守り、第 2 の磁石系 2 において、内側コイル 2 1 の電流は、図 1 c の右側の断面平面(ばつ印でマーク)の中に入り、図 1 c の左側の断面平面(中心点付き円でマーク)から外に出る方向、すなわち、第 1 の磁石系を上方から見て反時計回り、に流れるように構成されており、外側コイル 2 2 の電流は、図 1 c の右側の断面平面(中心点付き円でマーク)から外に出て、図 1 c の左側の断面平面(ばつ印でマーク)の中に入る方向、すなわち、第 1 の磁石系の上方から見て時計回り、に流れるように構成されている。

30

【0069】

このように、第 2 の磁石系 2 の電流は、第 1 の磁石系 1 及び第 2 の磁石系 2 が動作している状態で、第 1 の磁石系 1 と第 2 の磁石系 2 との間に位置する対称平面 P に関して、第 1 の磁石系に対してミラー対称に配置される。

【0070】

磁場(磁束密度)ベクトル B を示すベクトル矢印 2 0 2 で示されているように、対称平面 P において、第 1 の磁石系 1 と第 2 の磁石系 2 における電流のミラー対称構成は、対称平面 P において、対称平面 P に垂直な磁場を作り出す。近似的な破線楕円で示される、環状で、典型的にはトロイド形状の、プラズマ閉じ込め領域 2 0 6 (図 2、5 a 及び 5 b 参照)が、以下でさらに説明されるように、対称平面 P において形成される。

40

【0071】

このように、換言すれば、プラズマ閉じ込め装置は、プラズマが閉じ込められ得る空間をその間に有する、軸方向に対向する 2 つの円盤状の磁石系 1、2 を備えてもよい。各磁石系 1、2 は、電流の方向と大きさが、対称平面 P において垂直方向磁場境界条件を作り出す、少なくとも 2 つのコイル 1 1、1 2、2 1、2 2 を有する。

【0072】

また、なお図 1 a、1 b、1 c を参照して、第 1 の磁石系 1 における第 1 の複数の同心円状に配置されたコイル 1 1、1 2、及び第 2 の磁石系 2 における第 2 の複数の同心円状

50

に配置されたコイル 2 1、2 2 のそれぞれが、強磁性鋼などの強磁性材料でもよいそれぞれのコア構造 2 0 4 に埋め込まれていてもよい。あるいは、コア構造 2 0 4 は、非強磁性鋼などの非強磁性材料であってもよい。

【 0 0 7 3 】

任意選択で、図示されているように、第 1 の磁石系 1 及び第 2 の磁石系 2 のそれぞれのコア構造 2 0 4 は、図示されるように対称平面 P に向かう方向にはそれぞれの複数のコイルのすべてのコイルのうちの、少なくとも 1 つのコイルを覆っていないが、その他のすべての方向において、それぞれのコイル 1 1、1 2、2 1、2 2 を覆っている。

【 0 0 7 4 】

比較の目的で、図 9 は、2 つのコイル、すなわち、各半球において単一のコイル 1 6 0 0、を備える直線磁気ミラー構成の模擬磁場線を示す。このような直線磁気ミラー（「ボトル」）構成に典型的であるように、磁場は、対称平面 P 付近の比較的低い磁束密度の領域 1 6 0 2 と、コイル 1 6 0 0 の近傍の比較的高い磁束密度の領域 1 6 0 4 とを見せて、上記説明のように磁気反射の原理に基づいて、荷電粒子に対する閉じ込め領域 2 0 6 を作り出している。また、閉じ込め領域 2 0 6 の半径方向外側から、すなわち図 9 において右から見られるとき、対称平面の近くの比較的大きな領域は凸状の磁場線を見せるのに対して、コイル 1 6 0 0 に近いより小さい領域は凹状の磁場線を見せ、前者は、上記で考察された第 1 の特性のとおり、不利であり、後者が有利である。また、対称平面 P において、磁束密度は半径の増加とともに減少していることが注記され得る。

【 0 0 7 5 】

開示された磁石系構成は、対称平面 P と直角に交差する磁場線によって明らかのように、対称平面 P 全体にわたって対称平面 P に垂直な磁場を作る。図 2 は、図 1 c と同様に、軸 A を通る断面平面における磁場線を示している。第 1 の磁石系 1 及び第 2 の磁石系 2 の回転対称性のせいで、磁場構成も回転対称であり、その結果として、図 2 は、任意のそのような断面平面全体に対して、したがってすべての磁場構成に対しても、代表的である。特に、この磁場は、すなわち、図 2 の断面平面に出入りする方向、すなわち上記で言及した方位角方向を指す方向において、トロイダル成分を有さない。換言すれば、磁場ベクトルは、軸 A を通る任意のそのような断面平面に対して、断面平面内にある。図 9 ~ 図 1 3 の構成についても同様である。

【 0 0 7 6 】

図 2 には、図 1 a、1 b、1 c と併せて上記で考察された第 1 の磁石系 1 及び第 2 の磁石系 2 における電流のミラー対称構成から生じる、磁場線が示されている。結果として生じる磁場構成からは、プラズマのイオンが閉じ込められ得る、ここでも近似的な破線楕円によって表わされた、環状の閉じ込め領域 2 0 6 が得られる。プラズマ閉じ込め領域は、シミュレーションで確認されたように、内側の半径と外側の半径の間で半径方向に制限されている。プラズマ閉じ込め装置に閉じ込められたプラズマイオンは、対称平面 P におけるプラズマ閉じ込め領域 2 0 6 において、その平面に垂直な磁場のせいで、その平面内で円形ジャイロ運動を行うことになる。既述のように、トロイダル場は存在しない。したがって、トロイダル磁場成分がない場合には、対称平面 P におけるイオンには軸方向ローレンツ力は存在しない。磁場線に沿って、軸方向に対称平面から遠ざかると、ローレンツ力がイオンを対称平面に向かって押し戻し、イオンを対称平面に閉じ込め得る。

【 0 0 7 7 】

プラズマがトロイダル磁場及びポロイダル磁場で閉じ込められているトカマクにおける状況と異なり、本開示による閉じ込め装置は、プラズマを軸方向（軸 A に平行）磁場及び半径方向磁場によって閉じ込める。

【 0 0 7 8 】

図 1 0 は、プラズマ閉じ込め装置に備えられ得る別の構成を示し、この構成も、第 1 の方向に電流を通すように配置された第 1 のコイル 1 1、及び第 1 の方向と反対の第 2 の方向に電流を通すように配置された第 2 のコイル 1 2 を備える、第 1 の磁石系 1（図 1 c 参照）と、第 1 の磁石系 1 と第 2 の磁石系 2（図示なし）の間に位置する対称平面 P に関し

10

20

30

40

50

て、前記第 1 の磁石系に対してミラー対称で配置されている第 1 及び第 2 の同心円状に配置された円形ループコイル（図示なし）を備える、第 2 の磁石系とが配置されている。図 9 の直線磁気ミラーに対するのと同様に、荷電粒子に対する閉じ込め領域、すなわちプラズマ閉じ込め領域 2 0 6 は、対称平面において、対称平面に垂直な磁場を有する、対称平面 P である。

【 0 0 7 9 】

図 9 と併せて上記で考察されたように、図 1 0 に示され、又は図 2 において明白なように、第 1 の磁石系及び第 2 の磁石系のコイル 1 1、1 2 の幾何学形状とそれに通される電流を適切に選択することによって、磁気反射の原理に基づいて、対称平面 P に近い比較的低い磁束密度の区域 1 6 0 2 と、コイル 1 1、1 2 に近い比較的高い磁束密度の区域 1 6 0 4 とを示す、荷電粒子に対する閉じ込め領域 2 0 6 を作り出す、磁場構成を達成することができる。さらに、図 1 0 におけるように、閉じ込め領域 2 0 6 の半径方向外側から、すなわち図 9 において右から見て、対称平面の近くの区域 1 6 0 2 は、凸状の磁場線を見せるのに対して、区域 1 6 0 4 は凹状の磁場線を見せる。

10

【 0 0 8 0 】

さらに、図 1 0（及び図 1 2）を図 9 と比較することから明白なように、コイルの幾何学形状とそれを流れる電流の適切な選択により、コイル 1 1、1 2 の近くの比較的高い磁束密度の区域 1 6 0 4 における、かなり増大された磁束密度が可能になる。このことは、より高いミラー比をもたらして、低減された損失コーンのせいで、プラズマ内の荷電粒子の閉じ込めを改善し得る。

20

【 0 0 8 1 】

図 3 a 及び 3 b は、プラズマ閉じ込め装置内に備えられ得る、第 1 の磁石系 1 と、第 2 の磁石系 2 と、第 3 の磁石系とを示す（図 5 a 及び 5 b を参照）。以下に具体的に言及しない限り、図 3 a、3 b、及び図 4 の磁石系は、図 1 a、1 b、1 c、及び 2 に併せて上述された、第 1 の磁石系及び第 2 の磁石系と同じ特徴及び特性を有する。第 3 の磁石系 3 は、軸 A に対して、プラズマ閉じ込め領域 2 0 6 の半径方向外側に配置される。

【 0 0 8 2 】

さらに、第 3 の磁石系 3 は、図示されるように、軸 A に対して、第 1 の磁石系 1 及び第 2 の磁石系 2 の半径方向外側に位置し得る。

【 0 0 8 3 】

第 3 の磁石系 3 は、少なくとも 1 つの円形ループコイル、例えば、図示されるような、第 1 の磁石系と対称平面 P の同じ側に配置された第 1 の円形ループコイル 3 1 と、対称平面 P の反対側に配置された第 2 の円形コイルループ 3 2 とを備え、この場合に、第 2 のコイル 3 2 は第 1 のコイル 3 1 に関してミラー対称で配置されている。特に、図 3 b を参照すると、第 1 のコイル 3 1 及び第 2 のコイル 3 2 の各々は、磁石系が動作している状態で、図 3 b の左側の断面平面（ばつ印でマーク）の中に入り、図 3 b の右側の断面平面（中心点付き円でマーク）から外に出る方向、すなわち、第 1 の磁石系の上方から見た時計回りに流れるように構成された電流を有する。

30

【 0 0 8 4 】

得られた模擬磁場線が図 4 a 及び 4 b に示されている。磁場構成は、図 2 のそれと同様である。特に、環状のプラズマ閉じ込め領域 2 0 6 が、図 1 a、1 b、1 c、及び 2 と併せて上述されたように、形成される。図 4 b は、図 4 a の 1 つの象限を拡大して示している。磁石系の対称特性のせいで、すなわち、対称平面 P に対するミラー対称と、軸 A のまわりの回転対称のせいで、そのような 1 つの象限の磁場特性は全体としての磁場構成を説明するのに十分である。

40

【 0 0 8 5 】

図 1 1 は、プラズマ閉じ込め装置において備えられ得る、さらに別の構成を示す。図 1 0 の第 1 の磁石系 1 と第 2 の磁石系 2 に加えて、図 3 a 及び 3 b におけるように、第 3 の磁石系 3 が、プラズマ閉じ込め領域 2 0 6 の半径方向外側に配置されている。第 3 の磁石系 3 は円形ループコイル 3 1 を備える。

50

## 【 0 0 8 6 】

さらに図 1 1 を参照すると、図 9 に併せて上記で考察されたように、磁場構成は、対称平面 P に近い比較的低い磁束密度の区域 1 6 0 2 と、コイル 1 1、1 2 近くの比較的高い磁束密度の区域 1 6 0 4 とを見せ、磁気反射の原理に基づいて、荷電粒子に対する閉じ込め領域 2 0 6 を作り出している。

## 【 0 0 8 7 】

さらに、図 1 1 をさらに参照すると、図 1 0 におけるように、閉じ込め領域 2 0 6 の半径方向外側から、すなわち図 9 において右から見たときに、対称平面の近くの区域 1 6 0 2 は、プラズマ閉じ込め領域 2 0 6 の外側から見たとき、凹状の磁場線を見せるのに対して、区域 1 6 0 4 は、やはりプラズマ閉じ込め領域 2 0 6 の外側から見たときに、凸状の磁場線を見せる。しかしながら、凹状の磁場線の区域は、プラズマ閉じ込め領域の大部分に対応して、図 1 0 の構成のそれよりも大きい。

10

## 【 0 0 8 8 】

また、さらに図 1 1 を参照すると、図 1 0 におけるように、コイルの幾何学形状と、それを流れる電流とを適切に選択すると、コイル 1 1、1 2 の近くの比較的高い磁束密度の区域 1 6 0 4 における、磁束密度をかなり増大させて、高いミラー比をもたらすことが可能になる。

## 【 0 0 8 9 】

さらに、図 1 1 ( 及び図 4 a 及び 4 b ) から明らかなように、第 3 の磁石系のコイル 3 1 を通過する電流の適切な選択を通して、プラズマ閉じ込め領域 2 0 6 における、半径方向に確実に増大する磁束密度を有する磁場構成が達成可能である。

20

## 【 0 0 9 0 】

図 1 2 は、プラズマ閉じ込め装置に備えられ得る、さらに別の構成を示す。図 1 1 の構成に加えて、第 1 の磁石系 1 及び第 2 の磁石系 2 におけるそれぞれのコイルの各々が、それぞれの強磁性シールドに埋め込まれている。これにより磁場を集束させて、より高いミラー比が可能になる。

## 【 0 0 9 1 】

図 1 3 は、プラズマ閉じ込め装置に備えられ得る、さらに別の構成を示す。この例示的構成において、図 1 2 の構成と比較して、コイル 1 1、1 2、3 1 は、テーパ付き表面及び / 又は凸状表面を有する。これによって、図 1 3 から明らかなように、プラズマ閉じ込め領域 2 6 0 の半径方向外側の周囲 1 2 0 2 が、反射ポイントまでとぎれず、凹状の磁場線を有するとともに、半径方向内側の周囲 1 2 0 4 も同様であり、一方で磁束密度は半径方向に確実に増加している、磁場構成が達成可能である。

30

## 【 0 0 9 2 】

図 5 a 及び 5 b はそれぞれ、図 1 a、1 b、1 c、及び 2 と併せて上記で詳述されたような、それぞれが第 1 の磁石系 1 及び第 2 の磁石系 2 と、図 3 a、3 b、4 a、及び 4 b と併せて上記で詳述されたような、任意に選択し得る第 3 の磁石系 3 とを備える、プラズマ閉じ込め装置 5 0 0 を示す。そのようなプラズマ閉じ込め装置 5 0 0 は、それぞれ、核融合炉において使用され得る。

## 【 0 0 9 3 】

さらに、各プラズマ閉じ込め装置 5 0 0 は、それ自体はプラズマ融合技術においてよく知られているような、プラズマ容器 2 0 8 を備える。プラズマ容器は、図示されているように、第 1 の磁石系 1 と第 2 の磁石系 2 の間に位置し得る。さらに、プラズマ容器 2 0 8 は、そのような系が存在する場合には、図示されているように、第 3 の磁石系 3 の半径方向内側に位置し得る。プラズマ容器 2 0 8 は、図示されているように、軸 A のまわりに回転対称としてもよい。原子炉用容器 2 0 8 は、環状の、トロイド形プラズマ閉じ込め領域 2 0 6 が原子炉容器 2 0 8 の内側に位置するように、位置している。

40

## 【 0 0 9 4 】

プラズマ閉じ込め装置 5 0 0 の物理的寸法は、磁気コイル内のエンジニアリング電流密度、アルファ粒子の閉じ込めの度合い、所望のプラズマ体積、などの多くのパラメータに

50

依存し得る。アルファ粒子の良好な閉じ込めと、 $10 \text{ A/mm}^2$ の磁石系におけるエンジニアリング電流密度において、約  $15 \text{ m}^3$ のプラズマ体積をもたらし得る、典型的な寸法は以下のとおりである：

第1の磁石系1と第2の磁石系2の外径：8～16 m、通常は12 m。

【0095】

コイル11、12、21、22のそれぞれの高さ：1.5～3.5 m、通常は2.5 m。

【0096】

コイルを埋め込むコア204の厚さ：0.6～1.3 m、通常は1.0 m。

【0097】

第1の磁石系1の上縁と第2の磁石系2の下縁との距離：4.0～8.0 m、通常は6.0 m。

10

【0098】

第3の磁石系3の外径：10.0～22 m、通常は16.0 m。

【0099】

コイル電流又はコイル電流を変動させることによって、磁場構成は、プラズマ閉じ込め領域206に閉じ込められたプラズマを制御するように変化させられ得る。

【0100】

図5bは、軸Aにおいて装置500の中心に位置し、したがってプラズマ閉じ込め領域206の半径方向内側に位置する、それ自体は知られている、任意に選択し得るマイクロ波プラズマ加熱装置210を有する、プラズマ閉じ込め装置500を示す。

20

【0101】

さらに、プラズマ閉じ込め装置500は、それ自体は知られている、容器208中につながり、プラズマ閉じ込め領域206の半径方向外側に位置している、任意選択のイオンビーム挿入配設212を有し得る。

【0102】

例えば、高エネルギーアルファ粒子を含む、イオンビームは、プラズマ閉じ込め領域206の半径方向外側の領域におけるイオンビーム挿入装置210を使用して挿入されてもよく、その後、イオンビームからのイオンが、低い半径に向かって、プラズマ閉じ込め領域206の中に移動し、それによってプラズマを加熱し、プラズマは、次の段階において、加熱において自己維持性となる、すなわち点火プラズマとなり得る。

30

【0103】

代替的に（図示なし）、例えば高エネルギーアルファ粒子を含む、イオンビームは、そのようなイオンビーム挿入装置を使用して、プラズマ閉じ込め領域206の半径方向内側の領域に挿入されてもよく、その後、イオンビームからのイオンが、高い半径に向かって、プラズマ閉じ込め領域206中に移動し、それによってプラズマを加熱することを可能にしてもよい。

【0104】

このように、本開示によるプラズマ閉じ込め装置設計は、系の外半径と中心の両方における加熱装置に対するアクセシビリティを可能にする。

【0105】

さらに代替的に、プラズマは、マイクロ波加熱装置210によって加熱され得る。

40

【0106】

図6、7、及び8は、図13に併せて上記で詳述された、第1の磁石系1と、第2の磁石系2と、第3の磁石系3とを備える、別のプラズマ閉じ込め装置500の切り欠き斜視図である。プラズマ閉じ込め装置500は、核融合炉において使用され得る。

【0107】

さらに、図7に示されるように、プラズマ閉じ込め装置500は、それ自体はプラズマ融合技術においてよく知られている、プラズマ容器208を備えてもよい。図示されているように、プラズマ容器208は、第3の磁石系3のコイル31、32の半径方向内側、それぞれ、第1の磁石系1及び第2の磁石系2の外側コイル22、12の半径方向内側、

50

及びそれぞれ、第1の磁石系1及び第2の磁石系2の内側コイル11、21の半径方向外側で、軸方向内側に位置し得る。

【0108】

さらに図7は強磁性埋め込み204を示す。

【0109】

最後に、図8はハウジング1500内に収納されているプラズマ閉じ込め装置500を示す。

【0110】

通常の寸法は次のとおりである。ハウジング1500を含み、装置500は、約25mの直径、約35mの高さを有し得る。第3の磁石系3のコイルの内径は、約12mであり得る。それぞれ、第1の磁石系1及び第2の磁石系2の内側コイル11、21同士間の最小距離は、約11mであり得る。

【0111】

本開示によれば、粒子の系、すなわちその中に閉じ込められたプラズマにおける全体電流は、ゼロ、又はゼロ近くであり得る。このことは、トカマクなどのトロイダルベースの原子炉と比較して、動的なプラズマがずっと少なく生じ得る。そのような動的でないプラズマは、キンク不安定性などの、電流駆動プラズマ不安定性の問題が少なくなり得る。

【0112】

以下において、本発明概念によるプラズマ閉じ込め装置に対するシミュレーション結果が、図14a、14b、15、16、及び17を参照して、考察されて、融合プラズマイオンを閉じ込める、プラズマ閉じ込め装置500の能力を検証する。融合プラズマを閉じ込めることは、プラズマ体積における磁場によって、重水素イオン、トリチウムイオン、アルファ粒子、及び電子を閉じ込めることを意味する。3.5MeV(約13,000,000m/s)運動エネルギーを有する、重水素-トリチウム融合の生成物の1種である、アルファ粒子は、これまでで閉じ込めるのが最も困難な粒子である。

【0113】

アルファ粒子が閉じ込められ得る場合には、プラズマの加熱に寄与し、その結果として、点火プラズマが、閉じ込められたアルファ粒子によって自己維持される。プラズマの燃焼は、外部エネルギーを必要とするが、それは融合プロセスによって生成される加熱エネルギーよりも少ない。そのような加熱は、融合生成物アルファ粒子によって提供される。すなわち、アルファ粒子を閉じ込めることは重要である。

【0114】

重水素とトリチウムとは、12keV又はそれ未満で融合する。より低いエネルギーでより軽いイオンを閉じ込めることは、高エネルギーで重いイオンを閉じ込めるよりもずっと容易である。融合生成物アルファ粒子が閉じ込められ得る場合には、重水素イオン及びトリチウムイオン、ならびに電子も、同じ体積内に閉じ込められる、すなわち、アルファ粒子が閉じ込められれば、重水素イオンとトリチウムイオンも閉じ込められる。

【0115】

有限要素法(FEM)シミュレーションによって計算された磁場内で、荷電粒子の軌道のシミュレーションが実施されて、荷電粒子閉じ込めの能力の検証が行われた。

【0116】

この系は回転対称であるので、2次元(2D)シミュレーションに記述され得る。さらに、第1の磁石系と第2の磁石系の2つの間にミラー対称性があるので、第1の象限(図4b、9~13参照)により、系の全体積を完全に定義することができる。

【0117】

粒子軌道は、粒子上のローレンツ力とニュートンの第2法則とを考慮に入れて、反復的に計算された。

【0118】

図14a、14b、15、16、及び17は、図6、7、8、及び13と併せて上記で考察された構成における、1粒子シミュレーション結果を示す。

10

20

30

40

50

## 【 0 1 1 9 】

図 1 4 a は、1 0 0 k e V の運動エネルギーでの重陽子の模擬された経路を示し、これに対して図 1 4 b は、運動エネルギー 3 . 5 M e V でのアルファ粒子の、すなわち、重水素イオンとトリチウムイオンの間の融合からの生成物として通常の模擬された経路を示す。両方の粒子は、プラズマ閉じ込め領域内に閉じ込められて、それぞれの端点において磁氣的に反射される。1 次 の 近 似 と し て、所 与 の 初 期 速 度 ベ ク ト ル に 対 し て、荷 電 粒 子 の ジ ャ イ ロ セ ン タ (gyrocenter) は、所与の磁場線に追従し、粒子運動エネルギー又は電荷にかかわらず、同一の端点において反射される。しかしながら、粒子は異なるジャイロスピ半径(ラーモア半径(Larmor radius))を有するので、ドリフトも異なることになる。

10

## 【 0 1 2 0 】

図 1 5、1 6、及び 1 7 は、それぞれ、0 . 5、1 . 5、2 . 5 の  $v_z / v_R$  (軸方向速度と半径方向速度の)比に対する、それぞれ、初期半径方向位置が 1 . 5 m、3 . 0 m、及び 4 . 5 m での、模擬荷電粒子軌道を示し、これらの構成のそれぞれに対する荷電粒子の閉じ込めを示す。

## 【 0 1 2 1 】

本発明概念が、例示的实施形態を参照して、主として説明された。しかしながら、当業者によって容易に気づかれるように、上記で開示されたもの以外の実施形態が、添付の特許請求の範囲によって定義されるような、本発明概念の範囲内において、等しく可能である。

20

以下に、出願当初の特許請求の範囲に記載の事項を、そのまま、付記しておく。

[ 1 ] 第 1 の複数の同心円状に配置された円形ループコイル(1 1、1 2)を備える第 1 の磁石系(1)と、第 2 の複数の同心円状に配置された円形ループコイル(2 1、2 2)を備える第 2 の磁石系(2)とを備えるプラズマ閉じ込め装置(5 0 0)であって、前記第 1 の磁石系(1)は、第 1 の方向に電流を通すように配置された第 1 のコイル(1 1)と前記第 1 の方向と反対の第 2 の方向に電流を通すように配置された第 2 のコイル(1 2)とを備え、

第 2 の磁石系(2)は、前記第 1 の磁石系(1)と前記第 2 の磁石系(2)の間に位置する対称平面(P)に関して、前記第 1 の磁石系(1)に対してミラー対称に配置され、前記対称平面(P)において前記対称平面(P)に垂直な磁場を有する前記対称平面(P)で環状のプラズマ閉じ込め領域(2 0 6)を作り出す、プラズマ閉じ込め装置(5 0 0)。

30

[ 2 ] 前記第 1 の複数の同心円状に配置された円形ループコイル(1 1、1 2)は、前記第 2 の複数の同心円状に配置された円形ループコイル(2 1、2 2)と同一に設計されている、[ 1 ]に記載のプラズマ閉じ込め装置(5 0 0)。

[ 3 ] 前記プラズマ閉じ込め領域(2 0 6)の半径方向外側に配置された第 3 の磁石系(3)をさらに備え、前記第 3 の磁石系(3)は少なくとも 1 つの円形ループコイル(3 1、3 2)を備える、[ 1 ]又は[ 2 ]に記載のプラズマ閉じ込め装置(5 0 0)。

[ 4 ] 前記第 3 の磁石系(3)は、前記対称平面(P)の前記第 1 の磁石系(1)と同じ側に配置された第 1 のコイル(3 1)と、前記対称平面(P)の反対側に配置された第 2 のコイル(3 2)とを備え、前記第 2 のコイル(3 2)は、前記第 1 のコイル(3 1)に対してミラー対称に配置されている、[ 3 ]に記載のプラズマ閉じ込め装置(5 0 0)。

40

[ 5 ] 前記第 1 の磁石系における前記第 1 の複数の同心円状に配置された円形ループコイルと、前記第 2 の磁石系における前記第 2 の複数の同心円状に配置された円形ループコイルとは、それぞれがそれぞれの強磁性構造の中に埋め込まれている、[ 1 ]から[ 4 ]のいずれか一項に記載のプラズマ閉じ込め装置(5 0 0)。

[ 6 ] 前記強磁性構造は、前記対称平面に向かう方向において、それぞれの前記複数の同心円状に配置された円形ループコイルの少なくとも 1 つのコイルを覆わない、[ 5 ]に記載のプラズマ閉じ込め装置(5 0 0)。

[ 7 ] 前記強磁性構造が強磁性鋼を備える、[ 5 ]又は[ 6 ]に記載のプラズマ閉じ込

50

め装置(500)。

[ 8 ] プラズマを閉じ込めるための、[ 1 ] から [ 7 ] のいずれか一項に記載のプラズマ閉じ込め装置(500)の使用。

[ 9 ] 核融合炉における、[ 1 ] から [ 7 ] のいずれか一項に記載のプラズマ閉じ込め装置(500)の使用。

[ 10 ] 第1の複数の同心円状に配置された円形ループコイル(11、12)を備える第1の磁石系(1)と、

第2の複数の同心円状に配置された円形ループコイル(21、22)を備える第2の磁石系(2)と、において、

前記第1の磁石系(1)は、第1の方向に電流を通す第1のコイル(11)と前記第1の方向と反対の第2の方向に電流を通す第2のコイル(12)とを備え、

前記第2の磁石系(2)は、前記第1の磁石系(1)と前記第2の磁石系(2)の間に位置する対称平面(P)に関して、前記第1の磁石系(1)に対してミラー対称の電流を通し、

前記対称平面(P)に垂直の磁場を有する前記対称平面(P)で環状のプラズマ閉じ込め領域を作り出すことを備える、プラズマ閉じ込め方法。

[ 11 ] 前記プラズマ閉じ込め領域(206)の半径方向外側に配置された第3の磁石系(3)において、電流調節によって閉じ込められたプラズマを制御することをさらに備える、[ 10 ]に記載のプラズマ閉じ込め方法。

[ 12 ] 前記制御することは、前記プラズマ閉じ込め領域の半径を変更することを含む、[ 11 ]に記載のプラズマ閉じ込め方法。

[ 13 ] 前記プラズマ閉じ込め領域(206)の半径方向外側、又は前記プラズマ閉じ込め領域(206)の半径方向内側の領域内にイオンビームを挿入することによってプラズマを加熱すること、及び

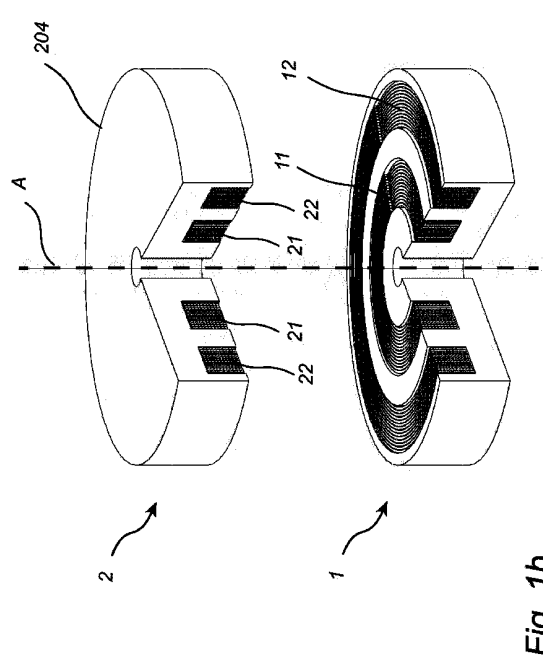
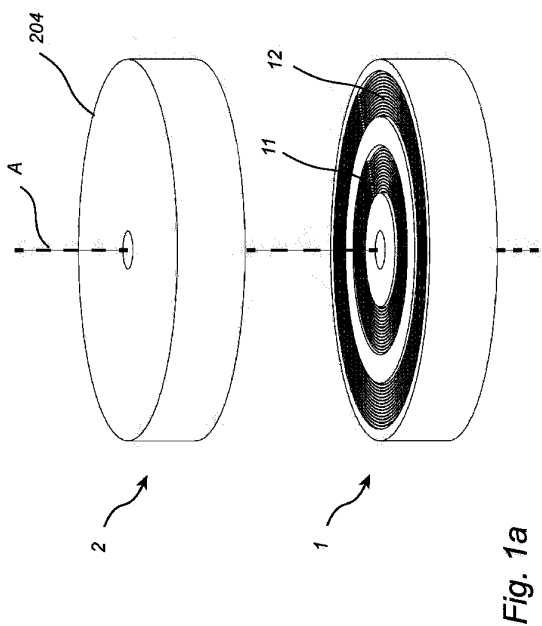
前記イオンビームからのイオンが、前記プラズマ閉じ込め領域(206)中に移動することを可能にすること

をさらに備える、[ 10 ] から [ 12 ] のいずれか一項に記載のプラズマ閉じ込め方法。

【図面】

【図1a】

【図1b】



10

20

30

40

50

【 図 1 c 】

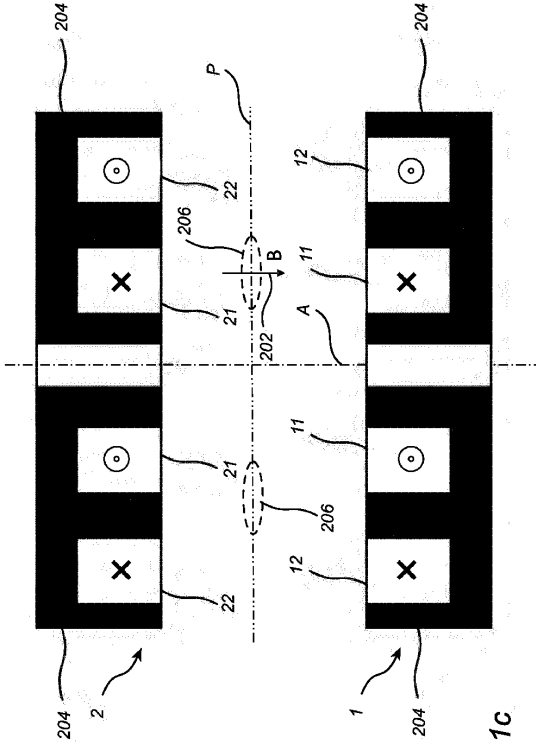


Fig. 1c

【 図 2 】

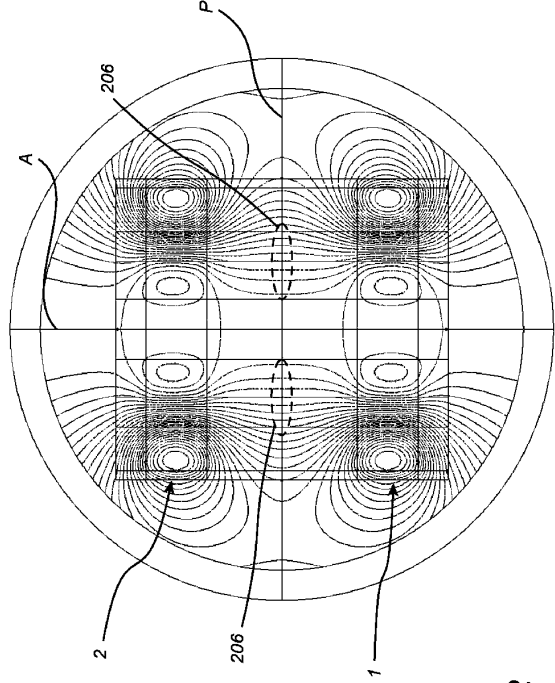


Fig. 2

【 図 3 a 】

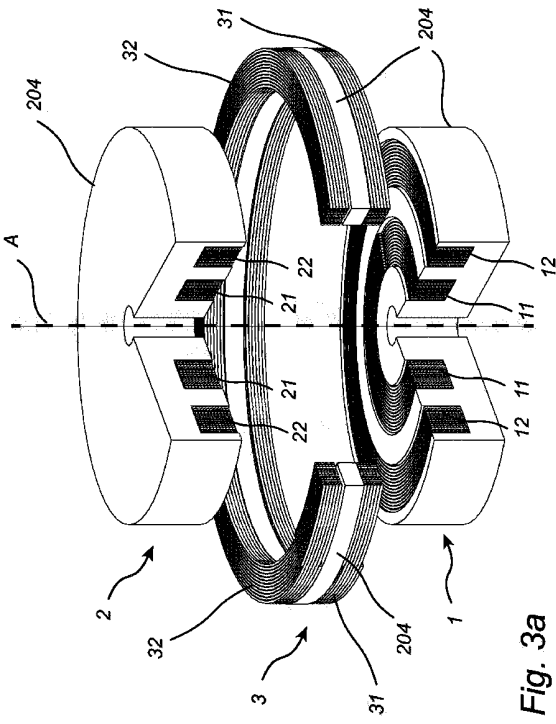


Fig. 3a

【 図 3 b 】

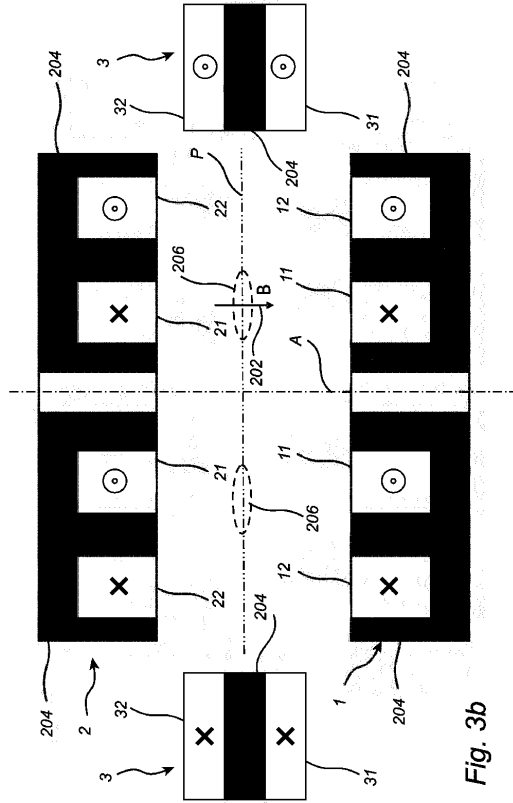


Fig. 3b

10

20

30

40

50

【図 4 a】

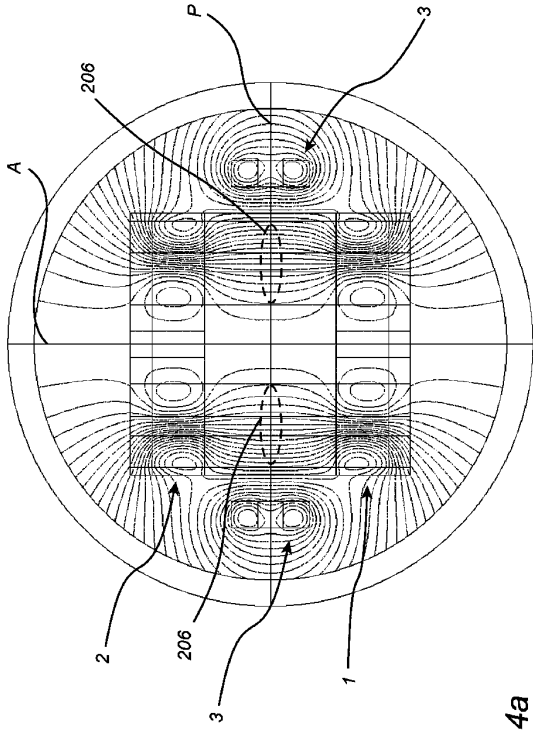


Fig. 4a

【図 4 b】

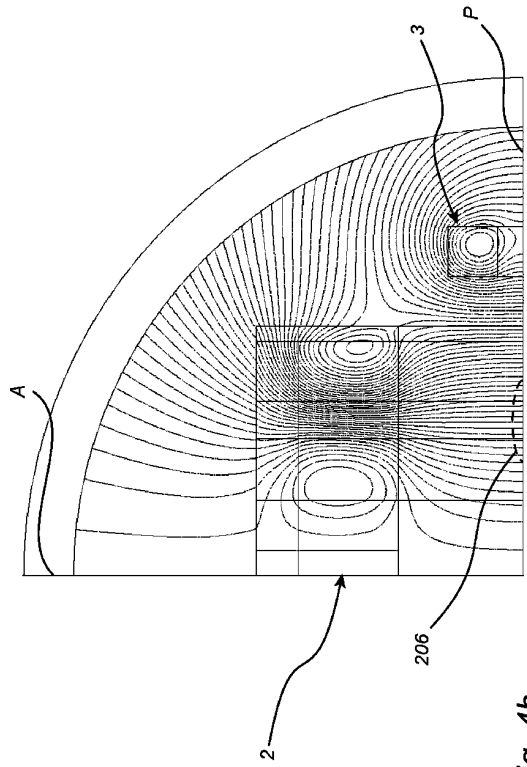


Fig. 4b

【図 5 a】

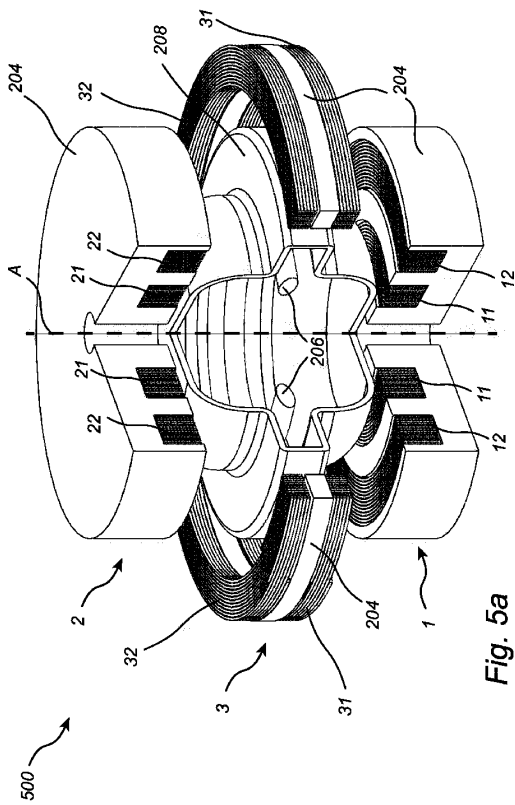


Fig. 5a

【図 5 b】

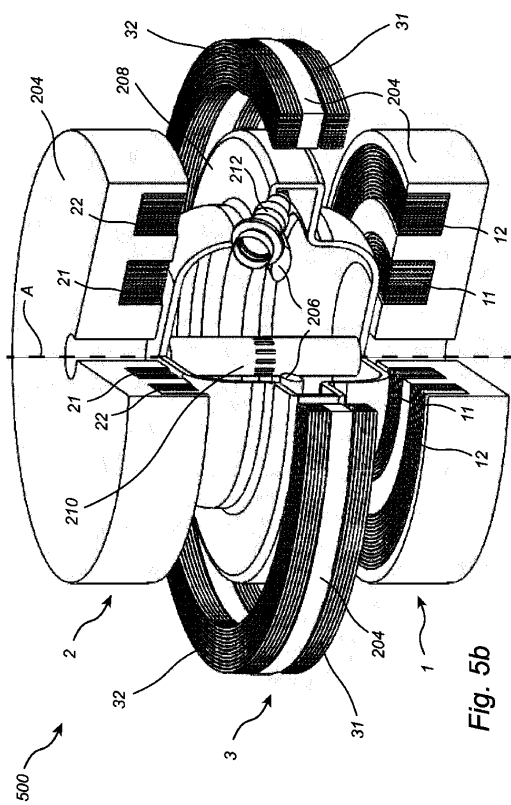


Fig. 5b

10

20

30

40

50

【 図 6 】

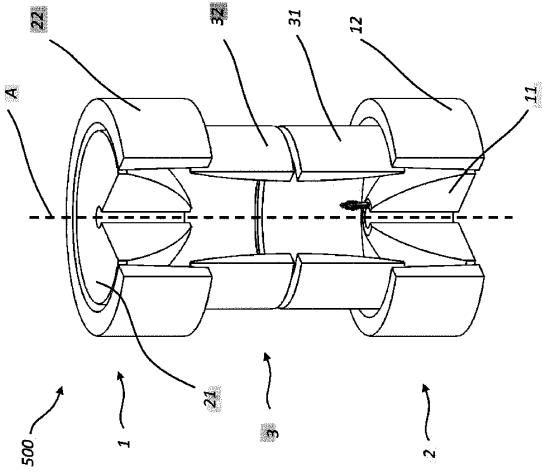


Fig. 6

【 図 7 】

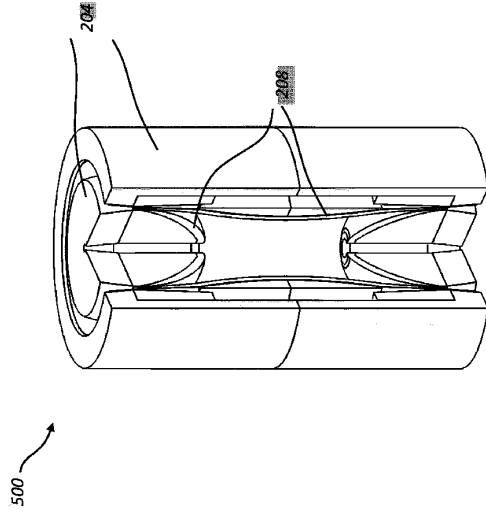


Fig. 7

【 図 8 】

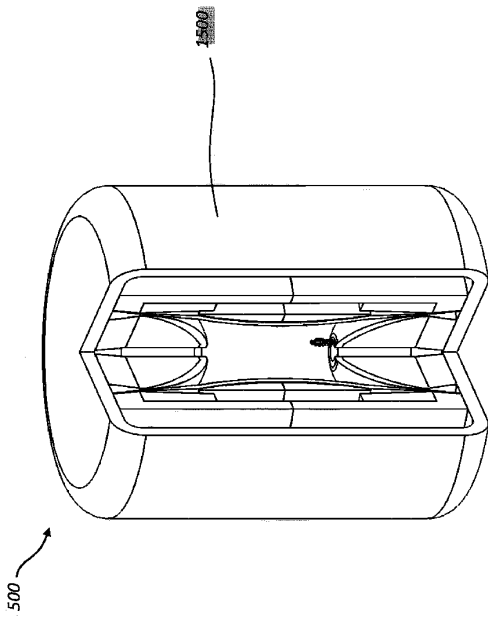


Fig. 8

【 図 9 】

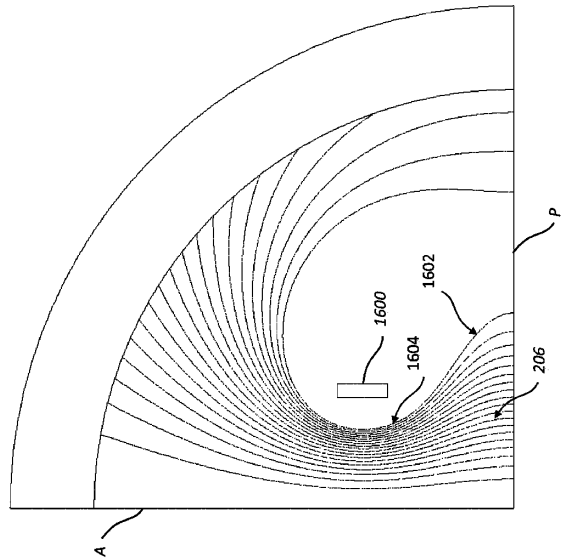


Fig. 9

10

20

30

40

50

【 10 】

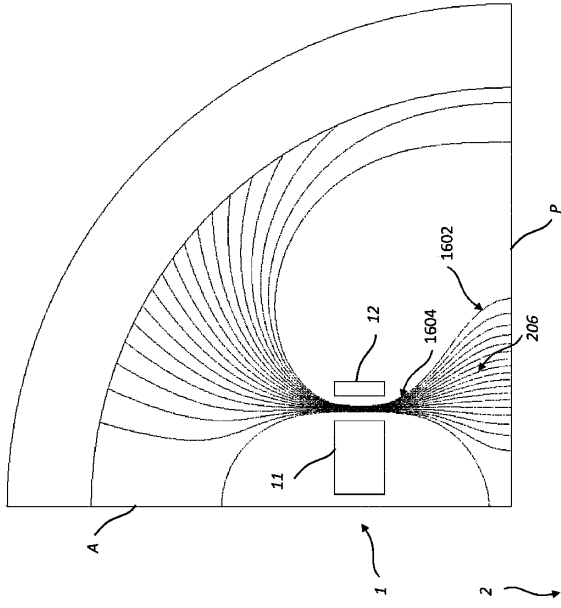


Fig. 10

【 11 】

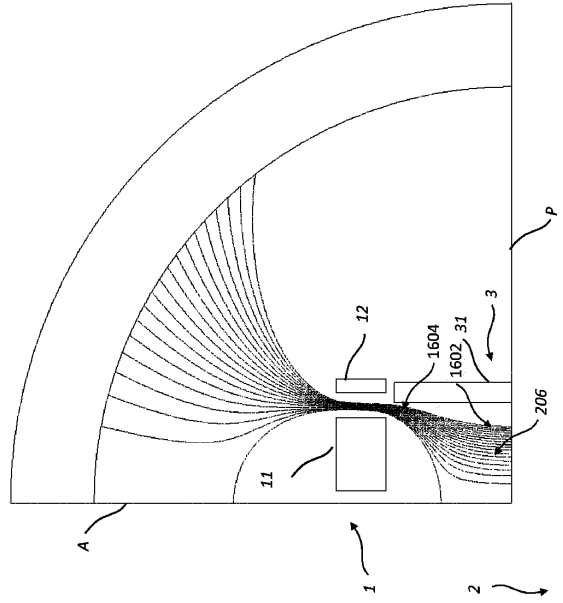


Fig. 11

10

20

【 12 】

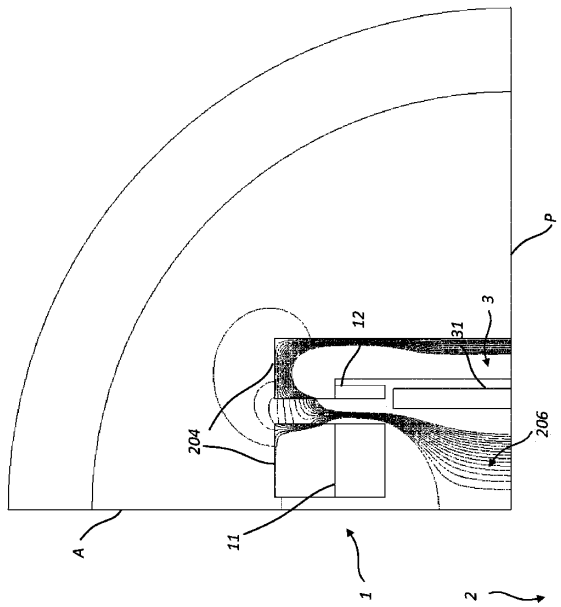


Fig. 12

【 13 】

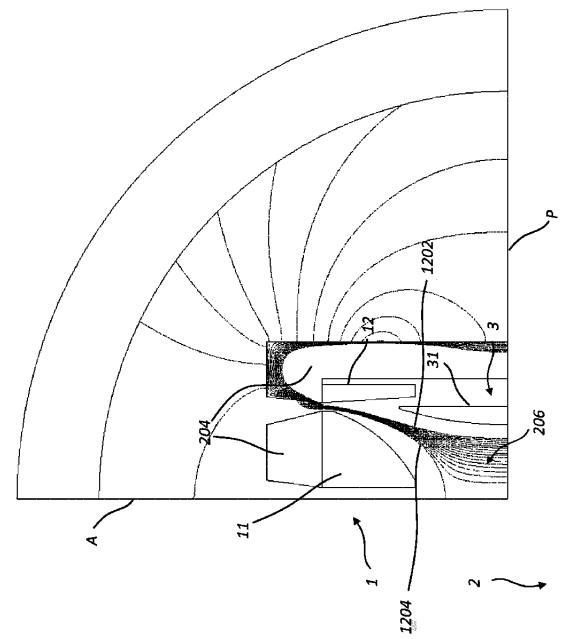


Fig. 13

30

40

50

【図 14 a】

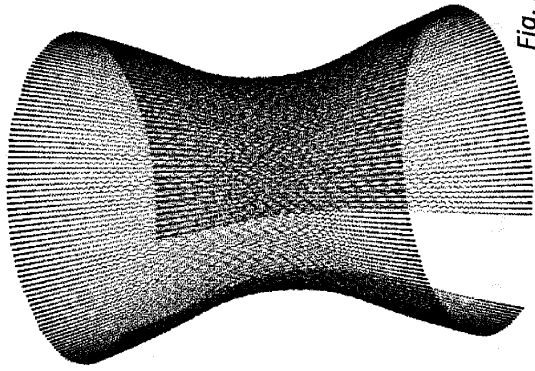


Fig. 14a

【図 14 b】

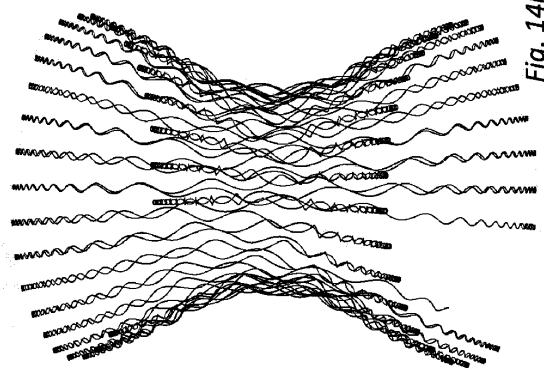


Fig. 14b

10

【図 15】

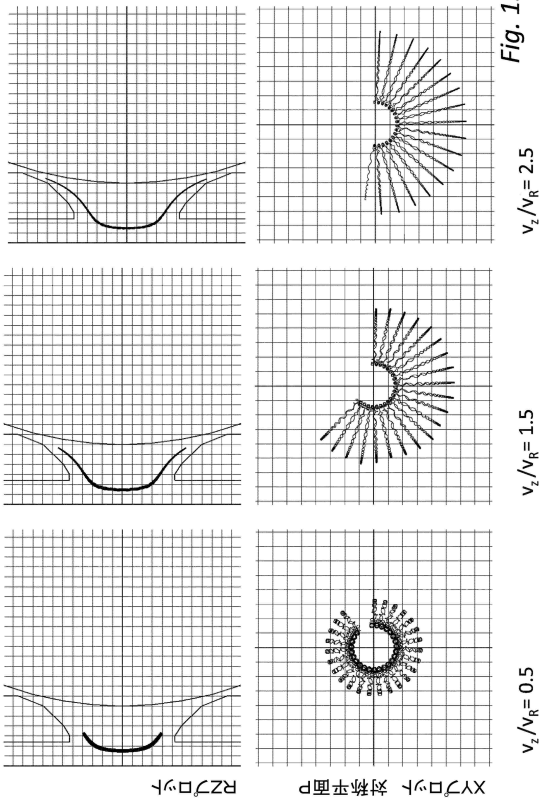


Fig. 15

$v_z/v_R = 2.5$

$v_z/v_R = 1.5$

$v_z/v_R = 0.5$

RZ断面

XY断面

【図 16】

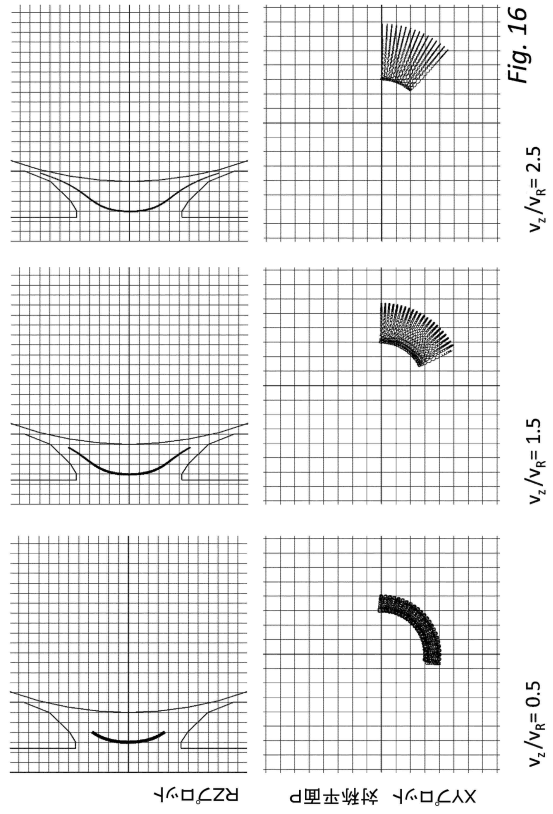


Fig. 16

$v_z/v_R = 2.5$

$v_z/v_R = 1.5$

$v_z/v_R = 0.5$

RZ断面

XY断面

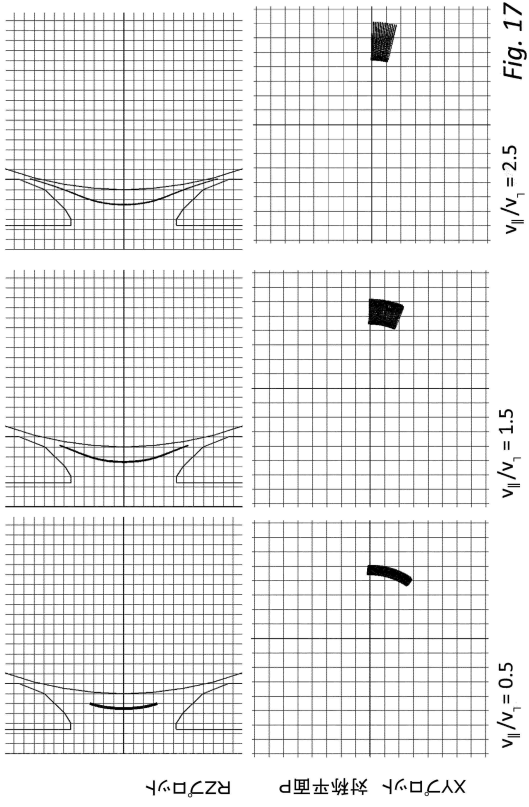
20

30

40

50

【 図 17 】



10

20

30

40

50

## フロントページの続き

- 弁理士 井上 正  
(74)代理人 100199565  
弁理士 飯野 茂  
(74)代理人 100212705  
弁理士 矢頭 尚之  
(74)代理人 100219542  
弁理士 大宅 郁治  
(74)代理人 100153051  
弁理士 河野 直樹  
(74)代理人 100162570  
弁理士 金子 早苗  
(72)発明者 イエーデルバリ、ヤーン  
スウェーデン国、163 47 スポンガ、ストルプレッツペーゲン 154  
審査官 藤本 加代子  
(56)参考文献 特開平01-161189(JP,A)  
特開昭55-024417(JP,A)  
米国特許出願公開第2018/0254153(US,A1)  
(58)調査した分野 (Int.Cl., DB名)  
H05H 1/00-1/54  
G21B 1/00-3/00