

適応型ダイバータ-リミッタハイブリッドシステムを備えたトカマク型核融合炉（特願 2025-062826、出願人：New York General Group, Inc.、発明者：村上 由宇）

New York General Group
2025

1. 発明の名称

適応型ダイバータ-リミッタハイブリッドシステムを備えたトカマク型核融合炉

2. 技術分野

[0001] 本発明は核融合技術の分野に関し、特にトカマク型核融合炉におけるプラズマ-壁相互作用の制御に関する。より具体的には、プラズマ対向機器の侵食を最小限に抑えつつ、核融合炉の運転効率と機器寿命を向上させるための適応型ダイバータ-リミッタハイブリッドシステムに関する。本発明は、磁場強度、プラズマ電流、加熱方法、プラズマ密度、同位体質量などの運転パラメータに応じて、プラズマ対向機器の配置と磁場配位を動的に調整することにより、プラズマ-壁相互作用を最適化するシステムを提供するものである。

3. 背景技術

[0002] 核融合炉の実用化において、プラズマと第一壁との相互作用の制御は重要な課題である。現在のトカマク型核融合炉では、主にダイバータ構成が採用されており、プラズマからの粒子束と熱流束を特定の領域に誘導して処理している。ダイバータ構成では、閉じた磁力線によって形成されるセパトロイクスの外側に位置するスクレイプオフ層（SOL）プラズマが、開いた磁力線に沿ってダイバータ領域へと導かれる。これにより、主プラズマ領域とプラズマ-壁相互作用領域が磁氣的に分離され、不純物の閉じ込め領域への侵入が抑制される。

[0003] しかしながら、ダイバータ構成を採用した場合でも、磁力線に垂直方向の異常輸送により、相当量の粒子束が第一壁やリミッタに到達することが知られている。特に低閉じ込めモード（L-モード）プラズマでは、この垂直方向の輸送が顕著である。これは、プラズマ周辺部における乱流現象に起因しており、粒子やエネルギーの径方向への輸送を引き起こす。プラズマ周辺部の乱流は、ドリフト波、抵抗性バルーニングモード、イオン温度勾配モードなどの不安定性によって駆動され、フィラメント状の構造（ブロッブ）を形成する。これらのブロッブは、径方向に高速で移動し、第一壁やリミッタに衝突することで、局所的な高熱負荷と材料侵食を引き起こす。

[0004] 従来技術では、ダイバータとリミッタは独立した構成要素として設計されており、運転中にそれらの位置関係を動的に調整する機構は限られていた。ダイバータは主に定常状態での熱・粒子束処理を担当し、リミッタはプラズマ立ち上げ時や特定の運転シナリオにおいてのみ使用されることが多い。また、プラズマパラメータの変化に応じてプラズマ-壁相互作用を最適化する統合的なシステムは実現されていない。

[0005] 既存の核融合装置における壁侵食の研究から、プラズマ対向材料の侵食率は、磁場強度、プラズマ電流、加熱方法、プラズマ密度、同位体質量などの運転パラメータに強く依存することが明らかになっている。例えば、セパトロイクス-リミッタ間の距離（クリアランス）が減少すると、リミッタへの粒子束と材

料侵食が大幅に増加することが観測されている。具体的には、クリアランスを35mm短縮すると、重水素フラックスが約3倍、ベリリウムフラックスが約6倍増加することが報告されている。これは、セパトリスに近づくにつれて、プラズマの温度と密度が指数関数的に上昇し、それに伴って粒子フラックスと侵食率も増加するためである。

[0006] また、イオンサイクロトロン共鳴加熱 (ICRH) は、中性粒子ビーム入射 (NBI) 加熱と比較して、同等の電力でも壁材料の侵食を2〜3倍増加させることが知られている。これは、ICRHがシース電位を増強し、プラズマ対向面に衝突するイオンのエネルギーを増加させるためである。さらに、プラズマ密度の増加に伴い、壁への粒子フラックスは非線形的に増加することが観測されている。具体的には、フラックスは平均密度の1.7〜3乗に比例して増加する。これは、密度の増加に伴い、プラズマ周辺部の乱流輸送が増強され、径方向のフラックスが増加するためである。

[0007] 水素同位体の質量もまた、壁材料の侵食に大きな影響を与える。トリチウムプラズマは、水素プラズマと比較して約2倍高い侵食率を示すことが報告されている。これは、イオン質量の増加に伴い、物理スパッタリング取率が増加するためである。特に、イオン衝突エネルギーがスパッタリング閾値に近い領域では、この同位体効果が顕著に現れる。

[0008] 磁場強度とプラズマ電流も、壁への粒子フラックスと侵食率に影響を与える。高磁場・高電流運転では、プラズマの閉じ込めが改善され、垂直方向の輸送が減少する。具体的には、磁場強度を1.8Tから3Tに増加させると、リミッタへの粒子フラックスが約3分の1に減少することが観測されている。これは、磁場強度の増加に伴い、プラズマの安定性が向上し、乱流輸送が抑制されるためである。

[0009] これらの知見にもかかわらず、従来の核融合炉設計では、これらの相互作用を動的に制御するための統合的なアプローチが欠けていた。プラズマ対向機器は固定された位置に設置されることが多く、異なる運転条件に対して最適化することが困難であった。また、プラズマ-壁相互作用のリアルタイムモニタリングと制御のための包括的なシステムも欠如していた。

[0010] 従来技術の一例として、固定位置のダイバータとリミッタを備えたトカマク型核融合炉がある。これらの装置では、プラズマ立ち上げ時にはリミッタ構成が使用され、定常運転時にはダイバータ構成に切り替えられる。しかし、運転中にリミッタの位置を調整する機構は限られており、異なるプラズマ条件に対して最適化することが困難であった。

[0011] また、別の従来技術として、可動式ダイバータプレートを備えたトカマク型核融合炉がある。これらの装置では、ダイバータプレートの位置を調整することで、ストライクポイントの位置と熱負荷分布を制御することができる。しかし、この技術はダイバータ領域のみに焦点を当てており、第一壁やリミッタとの統合的な制御は考慮されていない。

[0012] さらに別の従来技術として、プラズマ形状と位置を制御するための磁場制御システムがある。これらのシステムは、ポロイダルフィールドコイルの電流を調整することで、プラズマの形状と位置を制御する。しかし、この技術は主にプラズマ性能の最適化に焦点を当てており、プラズマ-壁相互作用の制御については十分に考慮されていない。

[0013] これらの従来技術は、それぞれ特定の側面に焦点を当てているが、プラズマ-壁相互作用を包括的に制御するための統合的なアプローチは欠如している。特に、運転パラメータの変化に応じてプラズマ対向機器の配置と磁場配位を動的に調整し、プラズマ-壁相互作用を最適化するシステムは実現されていない。

4. 発明が解決しようとする課題

[0014] 本発明は、プラズマ-壁相互作用を動的に制御することにより、プラズマ対向機器の寿命を延長し、核融合炉の運転効率を向上させることを目的とする。

[0015] 具体的には、以下の課題を解決することを目的とする：

- プラズマ対向機器の侵食率の低減：プラズマ対向機器の侵食は、核融合炉の運転寿命を制限する主要な要因の一つである。特に、ベリリウムやタングステンなどの第一壁材料の侵食は、プラズマ汚染、トリチウム滞留、および放射化廃棄物の生成につながる。本発明は、プラズマ対向機器の侵食率を大幅に低減し、その寿命を延長することを目的とする。
- 運転パラメータ（磁場強度、プラズマ電流、加熱方法、プラズマ密度、同位体質量など）の変化に対応した最適なプラズマ-壁相互作用の実現：核融合炉は、様々な運転パラメータで運転される。これらのパラメータの変化は、プラズマ-壁相互作用に大きな影響を与える。本発明は、これらのパラメータの変化に動的に対応し、常に最適なプラズマ-壁相互作用を実現することを目的とする。
- 核融合炉の運転柔軟性の向上：核融合炉は、様々な運転シナリオ（低閉じ込めモード、高閉じ込めモード、高出力運転、長パルス運転など）で運転される。これらの異なるシナリオは、異なるプラズマ-壁相互作用特性を持つ。本発明は、これらの異なるシナリオに柔軟に対応し、最適な運転を実現することを目的とする。
- プラズマ性能を維持しながらプラズマ対向機器の寿命を延長する方法の提供：プラズマ対向機器の寿命を延長するためには、プラズマとの相互作用を最小限に抑える必要がある。しかし、これはプラズマ性能（閉じ込め、安定性、核融合出力など）を犠牲にする可能性がある。本発明は、プラズマ性能を維持しながらプラズマ対向機器の寿命を延長する方法を提供することを目的とする。
- 異なる運転シナリオ（低閉じ込めモード、高閉じ込めモード、高出力運転、長パルス運転など）に対する適応能力の向上：核融合炉は、その運転サイクルの中で様々な運転シナリオを経験する。これらの異なるシナリオは、異なるプラズマ-壁相互作用特性を持つ。本発明は、これらの異なるシナリオに適応し、最適な運転を実現することを目的とする。
- プラズマ-壁相互作用の実時間モニタリングと制御の実現：プラズマ-壁相互作用は、核融合炉の運転中に常に変化する。これらの変化に対応するためには、リアルタイムのモニタリングと制御が必要である。本発明は、プラズマ-壁相互作用をリアルタイムでモニタリングし、制御するシステムを提供することを目的とする。
- 不純物発生の抑制とプラズマ汚染の低減：プラズマ対向機器の侵食は、不純物の発生とプラズマ汚染につながる。これらの不純物は、放射損失の増加、燃料希釈、およびプラズマ不安定性の誘発などの問題を引き起こす。本発明は、不純物の発生を抑制し、プラズマ汚染を低減することを目的とする。
- トリチウム滞留の低減：プラズマ対向機器の侵食と再堆積は、トリチウムの滞留につながる。トリチウムは放射性であり、その滞留は安全上の懸念となる。本発明は、プラズマ対向機器の侵食と再堆積を制御することにより、トリチウム滞留を低減することを目的とする。
- 高熱負荷の分散と局所的な過熱の防止：プラズマ-壁相互作用は、局所的な高熱負荷を引き起こす可能性がある。これらの高熱負荷は、プラズマ対向機器の損傷や溶融につながる。本発明は、熱負荷を分散し、局所的な過熱を防止することを目的とする。

[0016] また、本発明は、将来の商業炉における保守期間の延長と運転コストの削減に貢献することも目的としている。具体的には、プラズマ対向機器の交換頻度を低減することにより、炉の稼働率を向上させ、運転コストを削減することを目的としている。さらに、プラズマ性能の最適化により、核融合出力を増加させ、経済性を向上させることも目的としている。

5. 課題を解決するための手段

[0017] 上記課題を解決するために、本発明は適応型ダイバータ-リミッタハイブリッドシステム (Adaptive Divertor-Limiter Hybrid System: ADLHS) を提案する。このシステムは、運転条件に基づいてプラズマ対向機器を動的に再構成し、侵食を最小限に抑えながら性能を最適化する。

[0018] 本発明の主要な構成要素は以下の通りである：

[0019] 1. 引込式分割リミッタ (Retractable Segmented Limiters: RSL) ；

- セパラトリクスからの距離を独立して調整可能なモジュール式リミッタセグメント
- 運転パラメータに基づいてセパラトリクス-リミッタ間隙 (d) をリアルタイムで調整可能な位置決めシステム
- ミリメートル精度で引込・伸長可能な各セグメント
- 高熱負荷に耐えるタングステンコーティングが施された表面
- 熱応力を低減するための勾配材料インターフェース
- トロイダル方向およびポロイダル方向に複数配置され、プラズマとの接触領域を最適化
- 高効率の冷却チャンネルを備えた熱除去システム
- 表面温度と侵食率をモニタリングするためのセンサーシステム
- 熱膨張を補償するための機械的調整機構
- 故障時のバックアップ機能を持つ冗長設計

[0020] 引込式分割リミッタは、トロイダル方向に沿って複数のセグメントに分割されており、各セグメントは独立して位置調整が可能である。これにより、プラズマ条件の局所的な変化に対応し、最適な間隙を維持することができる。各セグメントはさらに、ポロイダル方向に複数のサブセグメントに分割されており、より精密な制御が可能となっている。

[0021] リミッタセグメントの表面は、高熱負荷と侵食に耐えるために、タングステンコーティングが施されている。タングステンは、高い融点 (3422°C) と低いスパッタリング取率を持ち、プラズマ対向材料として優れた特性を持つ。タングステンコーティングの厚さは、予想される熱負荷と侵食率に基づいて最適化されており、典型的には200～500μmである。

[0022] タングステンコーティングと基材の間には、熱膨張係数の違いによる熱応力を緩和するための勾配材料インターフェースが設けられている。このインターフェースは、タングステンから基材へと徐々に組成が変化する層構造を持ち、界面での剥離や亀裂の発生を防止する。

[0023] リミッタセグメントの基材には、高い熱伝導率と機械的強度を持つ材料が使用されている。典型的には、銅合金 (特に銅-クロム-ジルコニウム合金) が使用される。基材内部には、高効率の冷却チャンネルが設けられており、高圧水が循環している。冷却チャンネルの設計は、熱流体力学シミュレーションに基づいて最適化されており、最大20MW/m²の熱負荷を処理することができる。

[0024] リミッタセグメントの位置制御は、高精度のアクチュエーションシステムによって実現される。このシステムは、放射線環境下でも安定して動作する電動アクチュエータと、位置フィードバック制御システムから構成される。位置制御の精度は±0.5mm以内であり、最大移動速度は10mm/sである。

[0025] 熱膨張補償機構は、運転中の温度変化によるリミッタセグメントの熱膨張を補償する。この機構は、温度センサーからのフィードバックに基づいて、リミッタセグメントの位置を微調整する。これにより、熱膨張による間隙の変化を防止し、常に最適な間隙を維持することができる。

[0026] リミッタセグメントには、表面温度と侵食率をモニタリングするためのセンサーが埋め込まれている。温度センサーは、熱電対または光ファイバー温度センサーであり、表面温度の分布をリアルタイムで測定する。侵食率センサーは、電気抵抗測定または光学的測定に基づいており、コーティング層の厚さの変化を検出する。

[0027] 2. 高磁場最適化ダイバータ (High-Field Optimized Divertor: HFOD) :

- 垂直輸送が減少する高磁場 (>3T) での運転に特化した設計
- 集中熱負荷を処理するための先進的冷却システム
- 中性粒子圧縮を最大化し、排気効率を向上させる形状
- 異なるプラズマ構成に対応可能な柔軟な磁場構成
- 部分デタッチメント状態を維持するための最適化された形状
- 不純物蓄積を防止するための効率的な排気システム
- 放射冷却を促進するための不純物入射システム
- 熱負荷分布を最適化するための傾斜ターゲット
- 高熱流束に耐えるタングステンモノブロック構造
- 熱応力を低減するための応力緩和設計

[0028] 高磁場最適化ダイバータは、3T以上の高磁場での運転に最適化されている。高磁場運転では、プラズマの閉じ込めが改善され、垂直方向の輸送が減少する。これにより、ダイバータへの熱・粒子束が増加し、第一壁やリミッタへの負荷が減少する。ダイバータは、この増加した負荷を効率的に処理するように設計されている。

[0029] ダイバータの形状は、磁力線の入射角を最適化し、熱負荷を分散させるように設計されている。特に、ストライク点近傍では、磁力線と表面のなす角度が1〜3度となるように傾斜が付けられている。これにより、単位面積あたりの熱負荷が低減され、材料の熱応力が緩和される。

[0030] ダイバータターゲットは、高熱流束に耐えるタングステンモノブロック構造を採用している。各モノブロックは、高熱伝導率の銅合金製冷却管に接合されており、最大30MW/m²の熱負荷を処理することができる。モノブロックの形状と寸法は、熱応力を最小化するように最適化されている。

[0031] 冷却システムは、高圧水（典型的には4MPa、100〜150°C）を使用している。冷却管の内部には、熱伝達を向上させるためのスワール流れや微細構造が設けられている。これにより、冷却効率が向上し、より高い熱負荷を処理することができる。

[0032] ダイバータの形状は、中性粒子の圧縮を最大化するように設計されている。特に、プライベート領域は、中性粒子が効率的に閉じ込められ、再電離されるように形状が最適化されている。これにより、燃料リサイクリングが向上し、排気効率が高まる。

[0033] 排気システムは、高効率のクライオポンプまたはターボ分子ポンプを使用している。排気ダクトは、中性粒子の流れを妨げないように配置され、高い排気速度（水素同位体に対して50〜100m³/s）を実現している。これにより、不純物の蓄積を防止し、プラズマの純度を維持することができる。

[0034] 不純物入射システムは、アルゴン、ネオン、窒素などの放射性不純物ガスを制御された量で注入する。これらの不純物は、ダイバータプラズマを放射冷却し、熱負荷を分散させる役割を果たす。不純物の種類と量は、プラズマ条件と熱負荷に応じて最適化される。

[0035] ダイバータの磁場構成は、異なるプラズマ条件に対応できるように柔軟に設計されている。特に、シングルヌル、ダブルヌル、スノーフレーク、X-ダイバータなどの異なる磁気配位に対応することができる。これらの配位は、プラズマ条件に応じて動的に切り替えることが可能である。

[0036] 3. 統合分光モニタリングシステム (Integrated Spectroscopic Monitoring System: ISMS) :

- D/T及び不純物フラックスのリアルタイムカメラベース分光モニタリング
- フラックス定量化のためのS/XB法の利用
- リミッタ位置決めとプラズマパラメータのフィードバック制御の提供
- 複数の視線を持つ広角カメラシステム
- 絶対輝度校正された分光フィルター
- 高時間分解能と高空間分解能を両立した測定能力
- 反射光と直接放射を区別するための高度な画像処理アルゴリズム
- プラズマ対向機器の表面温度をモニタリングするための赤外カメラシステム
- 異常な侵食パターンや熱負荷を検出するためのアラームシステム
- 壁コンディショニング状態をモニタリングするための分光診断
- 不純物源の空間分布を測定するための分光トモグラフィー
- プラズマ対向機器の寿命予測のためのデータ解析システム

[0037] 統合分光モニタリングシステムは、複数のカメラと分光器から構成され、プラズマと壁との相互作用をリアルタイムでモニタリングする。システムは、D/Tフラックスと不純物フラックスを定量化するためにS/XB法を利用する。S/XB法は、特定の原子またはイオンの発光強度から粒子フラックスを推定する手法であり、プラズマ条件（電子温度と密度）に依存するS/XB係数を用いる。

[0038] 広角可視カメラシステムは、トカマク内部の広範囲をカバーするように設置されている。各カメラは、放射線耐性の高いCCDまたはCMOSセンサーを使用し、1024×1024ピクセル以上の解像度を持つ。フレームレートは、標準モードで100fps、高速モードで最大10,000fpsである。カメラの視野は、リミッタセグメント、ダイバータ、および第一壁の主要部分をカバーしている。

[0039] カメラシステムには、複数の狭帯域分光フィルターが装備されている。これらのフィルターは、D α /Ta線（656.3nm）、Be II線（527.2nm）、W I線（400.9nm）などの特定の波長を選択的に透過させる。フィルターの半値全幅（FWHM）は1~2nmであり、高い波長選択性を持つ。フィルターは、高速切り替え機構を備えており、異なる波長の測定を短時間で切り替えることができる。

[0040] カメラシステムは、絶対輝度校正されており、測定された強度を放射輝度（photons/s/sr/cm²）に変換することができる。校正は、標準光源を用いて定期的に行われ、 $\pm 10\%$ 以内の精度を維持する。また、校正の安定性を確保するために、内部校正光源が設けられており、運転中に校正の確認を行うことができる。

[0041] 分光システムは、高分解能分光器と光ファイバーアレイから構成される。光ファイバーは、トカマク内の異なる位置からの光を分光器に導く。分光器の波長範囲は200~1000nmであり、波長分解能は0.1nm以下である。時間分解能は、標準モードで10ms、高速モードで100 μ sである。分光システムは、プラズマ中の不純物濃度、イオン温度、および回転速度を測定する。

[0042] データ処理システムは、カメラと分光器からのデータをリアルタイムで処理し、粒子フラックスと侵食率を計算する。処理アルゴリズムは、S/XB法を用いて放射輝度からフラックスを導出する。S/XB係数は、プラズマ条件（電子温度と密度）に応じて動的に調整される。また、アルゴリズムは、反射光と直接放射を区別するための高度な画像処理技術を使用している。

[0043] 赤外カメラシステムは、プラズマ対向機器の表面温度をリアルタイムでモニタリングする。カメラは、中赤外領域（3~5 μ m）または長波長赤外領域（8~12 μ m）で動作し、 $\pm 10^{\circ}\text{C}$ 以内の温度測定精度を持つ。温度データは、熱負荷の分布を評価し、局所的な過熱を検出するために使用される。

[0044] アラームシステムは、異常な侵食パターンや熱負荷を検出した場合に警告を発する。アラームの閾値は、プラズマ条件と運転シナリオに応じて動的に調整される。アラームが発生した場合、制御システムは自動的に保護動作を開始し、機器の損傷を防止する。

[0045] 分光トモグラフィシステムは、複数の視線からの測定データを組み合わせて、不純物源の三次元分布を再構成する。これにより、侵食の空間分布を詳細に把握し、局所的な問題領域を特定することができる。

[0046] データ解析システムは、収集されたデータを長期的に分析し、プラズマ対向機器の寿命を予測する。分析には、統計的手法と物理モデルが組み合わせて使用される。予測結果は、保守計画の最適化と機器交換のタイミング決定に使用される。

[0047] 4. 適応型磁場制御システム (Adaptive Magnetic Control System: AMCS) :

- セパトリクス-リミッタ間隙を最適化するための磁場配位の動的調整
- 変化するプラズマ条件への迅速な対応能力
- 経験的スケーリング則に基づく予測アルゴリズムの利用
- リアルタイム磁気平衡再構成
- 複数のポロイダルフィールドコイルを利用した精密な磁場形状制御
- プラズマ安定性を維持しながらセパトリクス位置を制御する能力
- 異なる運転シナリオに対応した事前プログラム可能な磁場配位
- 磁場配位の急速な切り替え能力
- MHD不安定性の検出と抑制機能
- プラズマ崩壊時の熱負荷分散機能
- 高ベータプラズマの安定化のための磁場最適化
- 外部摂動磁場を用いたELM制御機能

[0048] 適応型磁場制御システムは、プラズマの磁場配位を動的に調整し、セパトリクス-リミッタ間隙を最適化する。システムは、変化するプラズマ条件に迅速に対応し、経験的スケーリング則に基づく予測アルゴリズムを利用する。

[0049] 磁場制御システムは、複数のポロイダルフィールドコイルとトロイダルフィールドコイルから構成される。ポロイダルフィールドコイルは、プラズマの形状と位置を制御するために使用され、トロイダルフィールドコイルは、プラズマの閉じ込めと安定性を確保するために使用される。コイルは、高精度の電源システムによって駆動され、電流値を高速かつ精密に制御することができる。

[0050] リアルタイム磁気平衡再構成システムは、磁気プローブ、フラックスループ、およびロゴスキーコイルからの測定データに基づいて、プラズマの形状と位置をリアルタイムで計算する。再構成の時間分解能は1ms以下であり、空間分解能は1cm以下である。再構成アルゴリズムは、測定データとプラズマ平衡モデルを組み合わせて、プラズマの形状、位置、および電流分布を高精度で推定する。

[0051] 磁場制御アルゴリズムは、再構成されたプラズマ形状と位置に基づいて、ポロイダルフィールドコイルの電流を調整する。制御目標は、セパトリクス-リミッタ間隙を最適値に維持することである。最適値は、プラズマ条件（電流、密度、加熱電力など）に応じて動的に計算される。アルゴリズムは、フィードフォワード制御とフィードバック制御を組み合わせて実装されている。フィードフォワード制御は、予測されるプラズマ応答に基づいて初期制御入力を生成し、フィードバック制御は、測定された偏差に基づいて制御入力を微調整する。

[0052] 予測的制御アルゴリズムは、プラズマ条件の変化を予測し、先行的に磁場配位を調整する。このアルゴリズムは、経験的スケーリング則と物理モデルに基づいており、プラズマの応答を予測することができる。

る。例えば、加熱電力の増加に伴うプラズマ圧力の上昇を予測し、それに応じてセパトリティクス位置を調整する。

[0053] 磁場配位ライブラリは、異なる運転シナリオに対応した事前計算された磁場配位を格納している。これらの配位は、プラズマ立ち上げ、L-モード運転、H-モード運転、高ベータ運転などの異なるシナリオに最適化されている。運転中に、適切な配位が選択され、現在のプラズマ条件に合わせて微調整される。

[0054] 磁場配位の切り替え機能は、異なる運転フェーズ間の迅速な遷移を可能にする。特に、L-H遷移時やELMの発生時には、磁場配位を迅速に調整して、プラズマ-壁相互作用を最適化することができる。切り替えの時間スケールは、10~100msである。

[0055] MHD不安定性検出システムは、磁気プローブとソフトX線検出器からの信号を分析し、不安定性の前兆を検出する。検出された不安定性に応じて、磁場配位が調整され、不安定性の成長が抑制される。特に、ネオクラシカルティアリングモード（NTM）やエッジ局在化モード（ELM）などの不安定性に対する制御が実装されている。

[0056] プラズマ崩壊予測システムは、プラズマ条件の変化を監視し、崩壊の前兆を検出する。崩壊が予測された場合、磁場配位が調整され、熱負荷が分散される。特に、リミッタセグメントの位置が調整され、崩壊時の熱負荷を受け止める準備が行われる。

[0057] 高ベータプラズマの安定化機能は、プラズマの圧力分布と電流分布を最適化し、理想MHD安定性と抵抗性壁モード（RWM）安定性を向上させる。これにより、より高いベータ値での運転が可能となり、核融合出力が増加する。

[0058] 外部摂動磁場コイルは、エッジ局在化モード（ELM）の制御に使用される。これらのコイルは、プラズマ周辺部に小さな磁場摂動を加え、ELMの振幅と頻度を制御する。これにより、ELMによる瞬間的な熱負荷が低減され、プラズマ対向機器の寿命が延長される。

[0059] 5. 統合制御アーキテクチャ（Integrated Control Architecture: ICA）：

- 各サブシステムを統合し、協調動作を実現する中央制御システム
- リアルタイムデータ処理と意思決定アルゴリズム
- プラズマ条件の変化に対する予測的応答機能
- 異常検出と安全対策の実装
- 運転シナリオに応じた最適制御パラメータの自動選択
- 機械学習アルゴリズムを用いた制御最適化
- 高速データ通信ネットワークによるサブシステム間の連携
- 冗長設計による高信頼性の確保
- 階層的制御構造による複雑なシステムの管理
- 運転者インターフェースと視覚化ツール
- 運転データの記録と分析機能
- 自己学習と性能向上機能

[0060] 統合制御アーキテクチャは、上記の各サブシステムを統合し、協調動作を実現する中央制御システムである。このアーキテクチャは、リアルタイムデータ処理、意思決定アルゴリズム、およびフィードバック制御ループから構成される。

[0061] 中央制御ユニットは、高性能の計算機システムであり、各サブシステムからのデータを収集し、統合的な制御決定を行う。計算機は、マルチコアプロセッサと大容量メモリを備えており、複雑な計算を高速で

実行することができる。オペレーティングシステムは、リアルタイム性を確保するために最適化されており、1ms以下の応答時間を実現する。

[0062] データ収集システムは、各サブシステムからのデータを高速で収集し、中央データベースに格納する。データ収集は、高速データバスを通じて行われ、サンプリングレートは最大100kHzである。収集されるデータには、プラズマパラメータ（電流、密度、温度など）、磁場配位、リミッタ位置、粒子フラックス、侵食率などが含まれる。

[0063] データ処理アルゴリズムは、収集されたデータを処理し、制御に必要な情報を抽出する。アルゴリズムには、信号フィルタリング、特徴抽出、パターン認識、および状態推定が含まれる。特に、プラズマ状態の推定は、物理モデルとデータ駆動モデルを組み合わせで行われる。物理モデルは、プラズマの基本的な振る舞いを記述し、データ駆動モデルは、実測データに基づいて物理モデルを補正する。

[0064] 意思決定アルゴリズムは、処理されたデータに基づいて、最適な制御アクションを決定する。アルゴリズムは、ルールベースの意思決定、モデル予測制御、および強化学習を組み合わせで実装されている。ルールベースの意思決定は、事前定義されたルールに基づいて基本的な制御アクションを生成する。モデル予測制御は、プラズマの将来の振る舞いを予測し、最適な制御軌道を計算する。強化学習は、過去の制御経験に基づいて制御戦略を改善する。

[0065] フィードバック制御ループは、測定されたプラズマ条件と目標値との偏差に基づいて、制御アクションを生成する。制御ループは、階層的に構成されており、異なる時間スケールと制御目標に対応している。高速ループ (<1ms) は、プラズマ位置と形状の制御を担当する。中速ループ (1~10ms) は、プラズマ電流、密度、および加熱電力の制御を担当する。低速ループ (>10ms) は、プラズマ性能と機器保護の最適化を担当する。

[0066] 予測的制御機能は、プラズマ条件の変化を予測し、先行的に制御アクションを生成する。この機能は、物理モデルと機械学習モデルを組み合わせで実装されている。物理モデルは、プラズマの基本的な振る舞いを記述し、機械学習モデルは、過去のデータに基づいてプラズマの応答を予測する。

[0067] 異常検出システムは、プラズマ条件や機器状態の異常を検出し、適切な対応を開始する。異常検出は、統計的手法、パターン認識、および物理モデルに基づいて実装されている。検出された異常の重大度に応じて、警告、制御パラメータの調整、または緊急停止などの対応が選択される。

[0068] 運転シナリオマネージャは、異なる運転フェーズ（プラズマ立ち上げ、電流上昇、加熱、定常運転、終了など）に対応した制御パラメータを管理する。各フェーズでは、最適な制御パラメータが自動的に選択され、スムーズな遷移が確保される。

[0069] 機械学習最適化モジュールは、過去の運転データに基づいて制御パラメータを最適化する。このモジュールは、強化学習とベイズ最適化を組み合わせで実装されており、プラズマ性能と機器保護のバランスを考慮した最適な制御戦略を学習する。

[0070] 高速データ通信ネットワークは、各サブシステム間のデータと制御信号の交換を管理する。ネットワークは、高帯域幅、低遅延、および高信頼性を備えており、リアルタイム制御の要件を満たしている。通信プロトコルは、データの優先順位付けと再送機能を備えており、重要なデータの確実な伝送を保証する。

[0071] 冗長設計は、システムの信頼性を向上させるために採用されている。重要なコンポーネントは、複数の冗長ユニットで構成されており、一部が故障しても全体の機能は維持される。また、フェイルセーフ機構が実装されており、システム障害時にも安全な状態が確保される。

[0072] 階層的制御構造は、複雑なシステムの管理を容易にするために採用されている。制御システムは、低レベル制御（ハードウェア制御）、中間レベル制御（サブシステム制御）、および高レベル制御（システム

全体の最適化)の三層で構成されている。各層は、異なる時間スケールと抽象度で動作し、全体として効率的な制御を実現する。

[0073] 運転者インターフェースは、運転者にシステムの状態と制御オプションを提示する。インターフェースは、直感的なグラフィカルユーザーインターフェース (GUI) を提供し、リアルタイムデータの可視化、制御パラメータの調整、およびアラーム管理をサポートする。また、高度な視覚化ツールが提供されており、プラズマの三次元構造や壁負荷の分布などを視覚的に理解することができる。

[0074] データ記録システムは、運転中のすべてのデータを記録し、後分析のために保存する。記録されるデータには、プラズマパラメータ、制御入力、機器状態、およびアラーム履歴が含まれる。データは、構造化されたデータベースに格納され、効率的な検索と分析が可能となっている。

[0075] 性能分析モジュールは、記録されたデータを分析し、システムの性能を評価する。分析には、統計的手法、機械学習、および物理モデルが使用される。分析結果は、システムの改善点を特定し、制御パラメータの最適化に使用される。

[0076] 自己学習機能は、運転経験に基づいてシステムの性能を向上させる。この機能は、強化学習とベイズ最適化を組み合わせ実装されており、プラズマ性能と機器保護のバランスを考慮した最適な制御戦略を学習する。学習結果は、制御パラメータの更新と制御アルゴリズムの改善に使用される。

[0077] これらの構成要素が連携して動作することにより、プラズマ-壁相互作用を動的に制御し、プラズマ対向機器の寿命を延長しながら、核融合炉の性能を最適化することが可能となる。

6. 発明の効果

[0078] 本発明により、以下の効果が期待される：

[0079] 1. 機器寿命の延長：

- 動的位置決めによるピーク侵食率の3~6倍の低減：引込式分割リミッタ (RSL) の位置を動的に調整することにより、プラズマ対向機器の侵食率を大幅に低減することができる。特に、セパトロクス-リミッタ間隙を最適化することにより、ピーク侵食率を3~6倍低減することが可能である。これは、間隙が35mm増加すると、ベリリウムの侵食率が約6分の1に低減するという実験的知見に基づいている。

- プラズマ-壁相互作用のより均一な分布：複数のリミッタセグメントを独立して制御することにより、プラズマ-壁相互作用をより均一に分布させることができる。これにより、局所的な高侵食領域が回避され、全体的な寿命が延長される。例えば、トロイダル方向の非対称性を検出し、対応するセグメントの位置を調整することで、侵食の均一化が図られる。

- メンテナンス頻度と関連する原子炉停止時間の削減：プラズマ対向機器の寿命が延長されることにより、メンテナンスや交換の頻度が低減される。これにより、原子炉の停止時間が短縮され、稼働率が向上する。例えば、侵食率が3分の1に低減された場合、プラズマ対向機器の寿命は3倍に延長され、交換頻度も3分の1に低減される。

- 特に高侵食率が予想されるベリリウムやタングステンなどのプラズマ対向材料の寿命延長：本発明は、特に高侵食率が予想される材料の寿命を大幅に延長することができる。例えば、ベリリウムコーティングの場合、適切な間隙制御により、寿命を2~3倍に延長することが可能である。

- 不純物発生抑制による炉心プラズマ性能の向上：プラズマ対向機器の侵食が低減されることにより、プラズマ中への不純物の混入が抑制される。これにより、放射損失が低減され、燃料希釈が防止され、プラズ

マ性能が向上する。例えば、ベリリウム不純物濃度が半減すると、放射損失が約20%低減し、核融合出力が約10%向上する可能性がある。

- トリチウム滞留の低減による安全性の向上：プラズマ対向機器の侵食と再堆積は、トリチウムの滞留につながる。侵食率が低減されることにより、再堆積層の形成が抑制され、トリチウム滞留が低減される。これにより、安全性が向上し、トリチウムインベントリの管理が容易になる。例えば、侵食率が半減すると、トリチウム滞留率も約半分に低減される可能性がある。

[0080] 2. 運転柔軟性：

- 異なる運転シナリオ（高出力、長パルス、高閉じ込めモード、低閉じ込めモードなど）に対する最適化能力：本発明は、異なる運転シナリオに対して最適なプラズマ-壁相互作用を実現することができる。例えば、高出力運転時には、リミッタセグメントをより引き込んで侵食を低減し、低出力運転時には、リミッタセグメントをより前進させて安定性を向上させることができる。

- 個々のリミッタセグメントが故障してもシステム全体が損なわれない緩やかな劣化特性：リミッタセグメントが複数の独立したユニットで構成されているため、一部が故障しても全体の機能は維持される。これにより、システムの信頼性が向上し、運転の継続性が確保される。例えば、10%のセグメントが故障しても、残りの90%が正常に機能し、プラズマ運転を継続することができる。

- 様々なプラズマ組成（H、D、T、および混合物）との互換性：本発明は、異なる水素同位体のプラズマに対して最適化することができる。特に、同位体質量に応じてリミッタ位置を調整することにより、侵食率の違いを補償することができる。例えば、トリチウムプラズマでは、水素プラズマと比較して10~20mm大きな間隙を維持することで、侵食率の増加を相殺することができる。

- プラズマ立ち上げからフルパワー運転までの全段階における最適化：本発明は、プラズマ運転の全段階において最適なプラズマ-壁相互作用を実現することができる。プラズマ立ち上げ時には、リミッタセグメントをプラズマに近づけて安定性を確保し、フルパワー運転時には、リミッタセグメントを引き込んで侵食を低減することができる。

- 異常事態（例：ELMバースト、プラズマ崩壊の前兆など）への迅速な対応能力：本発明は、異常事態を検出し、迅速に対応することができる。例えば、大きなELMが検出された場合、リミッタセグメントを一時的に前進させて熱負荷を分散させることができる。また、プラズマ崩壊の前兆が検出された場合、リミッタセグメントを前進させて崩壊時の熱負荷を受け止める準備を行うことができる。

- 異なる磁場強度とプラズマ電流での運転に対する適応能力：本発明は、異なる磁場強度とプラズマ電流での運転に適応することができる。特に、磁場強度とプラズマ電流に応じてリミッタ位置と磁場配位を最適化することにより、常に最適なプラズマ-壁相互作用を実現することができる。例えば、磁場強度が低い場合には、リミッタセグメントをより引き込んで侵食を低減することができる。

[0081] 3. 性能最適化：

- 精密な境界制御による改善されたプラズマ安定性：本発明は、プラズマの境界を精密に制御することにより、プラズマの安定性を向上させることができる。特に、プラズマのエッジ領域における圧力勾配と電流密度を最適化することにより、エッジ局在化モード（ELM）などの不安定性を抑制することができる。

- 強化された不純物管理：本発明は、プラズマ対向機器の侵食を低減することにより、プラズマ中への不純物の混入を抑制することができる。また、不純物の発生源を特定し、局所的な対策を講じることができる。例えば、特定のリミッタセグメントからの不純物発生が検出された場合、そのセグメントの位置を調整して侵食を低減することができる。

-最適化された閉じ込めによる高い核融合出力の可能性：本発明は、プラズマの境界条件を最適化することにより、閉じ込め性能を向上させることができる。これにより、同じ入力電力でより高い核融合出力を達成することが可能となる。例えば、エッジ領域の最適化により、H-モードの閉じ込め改善係数（H98）を10%向上させることができる可能性がある。

-エッジプラズマ制御の改善によるH-モード閾値の低減：本発明は、エッジプラズマの条件を最適化することにより、L-H遷移の閾値電力を低減することができる。これにより、より低い入力電力でH-モード運転を実現することが可能となる。例えば、適切な磁場配位とリミッタ位置の組み合わせにより、閾値電力を20%低減することができる可能性がある。

-周辺局在化モード（ELM）の制御と影響の緩和：本発明は、プラズマの境界条件を最適化することにより、ELMの振幅と頻度を制御することができる。また、ELM発生時には、リミッタセグメントの位置を調整して熱負荷を分散させることができる。例えば、外部摂動磁場とリミッタ位置の最適な組み合わせにより、ELMのエネルギー損失を50%低減することができる可能性がある。

-プラズマ密度限界の向上による運転領域の拡大：本発明は、プラズマの境界条件を最適化することにより、グリーンワールド密度限界を超える高密度運転を実現することができる。これにより、運転領域が拡大し、より広範なパラメータ空間での運転が可能となる。例えば、適切な磁場配位とリミッタ位置の組み合わせにより、密度限界を20%向上させることができる可能性がある。

[0082] 4. 診断能力：

-プラズマ-壁相互作用の継続的モニタリング：本発明は、プラズマと壁との相互作用をリアルタイムで継続的にモニタリングすることができる。これにより、異常な相互作用を早期に検出し、適切な対策を講じることができる。例えば、特定のリミッタセグメントでの異常な発光が検出された場合、そのセグメントの位置を調整して侵食を低減することができる。

-さらなる設計改善のための貴重なデータ収集：本発明は、プラズマ-壁相互作用に関する詳細なデータを収集することができる。これらのデータは、将来の核融合炉の設計改善に貴重な情報を提供する。例えば、異なる運転条件下での侵食率のデータは、プラズマ対向機器の寿命予測と設計最適化に使用することができる。

-異常侵食パターンの早期検出：本発明は、異常な侵食パターンを早期に検出することができる。これにより、深刻な損傷が発生する前に対策を講じることができる。例えば、特定のリミッタセグメントでの急激な侵食率の増加が検出された場合、そのセグメントの位置を調整するか、運転条件を変更することができる。

-壁コンディショニング状態のリアルタイム評価：本発明は、壁のコンディショニング状態をリアルタイムで評価することができる。これにより、最適なコンディショニング手順を決定し、プラズマ性能を向上させることができる。例えば、リサイクリング率の増加が検出された場合、ベーキングやグロー放電洗浄などのコンディショニング手順を実施することができる。

-不純物源の空間分布の把握：本発明は、不純物の発生源の空間分布を詳細に把握することができる。これにより、局所的な対策を講じることができる。例えば、特定のリミッタセグメントからの不純物発生が検出された場合、そのセグメントの位置を調整して侵食を低減することができる。

-プラズマ対向機器の寿命予測の精度向上：本発明は、プラズマ対向機器の侵食率をリアルタイムでモニタリングすることにより、寿命予測の精度を向上させることができる。これにより、保守計画の最適化と機器交換のタイミング決定が容易になる。例えば、実測された侵食率に基づいて、各リミッタセグメントの残存寿命を±10%の精度で予測することができる。

[0083] 5. 経済性の向上：

- プラズマ対向機器の交換頻度の低減による運転コストの削減：本発明により、プラズマ対向機器の寿命が延長されることで、交換頻度が低減される。これにより、機器交換に伴う原子炉の停止時間が短縮され、運転コストが削減される。例えば、侵食率が3分の1に低減された場合、プラズマ対向機器の交換頻度も3分の1に低減され、それに伴う停止時間と交換コストも3分の1に削減される。
- 高いプラズマ性能の維持による核融合出力の安定化：本発明により、プラズマの境界条件が最適化され、高いプラズマ性能が維持される。これにより、核融合出力が安定化し、発電効率が向上する。例えば、プラズマ性能の変動が $\pm 5\%$ 以内に抑えられることで、発電出力の安定性が向上し、電力系統への接続が容易になる。
- 機器故障リスクの低減による稼働率の向上：本発明により、プラズマ対向機器の過負荷が防止され、故障リスクが低減される。これにより、予期せぬ原子炉の停止が減少し、稼働率が向上する。例えば、機器故障による予期せぬ停止の頻度が半減することで、年間稼働率が5%向上する可能性がある。
- 保守作業の最適化による被ばく量の低減：本発明により、プラズマ対向機器の交換頻度が低減されることで、保守作業に伴う作業員の被ばく量が低減される。また、侵食と再堆積の制御により、放射化物質の分布が最適化され、保守作業がより安全に行える。例えば、交換頻度が半減することで、年間の集団被ばく量も半減する可能性がある。
- 廃棄物発生量の削減：本発明により、プラズマ対向機器の寿命が延長されることで、放射化廃棄物の発生量が削減される。これにより、廃棄物処理コストが低減され、環境負荷が軽減される。例えば、機器寿命が2倍になることで、年間の廃棄物発生量が半減する可能性がある。

7. 発明を実施するための形態

[0084] 以下、本発明の実施形態について詳細に説明する。

【実施形態1】

[0085] システムは、トカマク型核融合炉の真空容器内に配置され、引込式分割リミッタ (RSL)、高磁場最適化ダイバータ (HFOD)、統合分光モニタリングシステム (ISMS)、適応型磁場制御システム (AMCS)、および統合制御アーキテクチャ (ICA) から構成される。

【引込式分割リミッタ (RSL) の構成】

[0086] 引込式分割リミッタは、トカマク型核融合炉の内部に配置された複数のリミッタセグメントから構成される。各セグメントは独立して位置調整が可能であり、プラズマセパトリクスからの距離を精密に制御できる。

[0087] リミッタセグメントは、トロイダル方向に沿って複数配置され、各セグメントはさらに複数のサブセグメントに分割されている。これにより、プラズマとの接触領域を局所的に制御することが可能となる。トロイダル方向のセグメント数は、トカマクの大きさと対称性に応じて決定される。例えば、ITERクラスの装置では、16~24のセグメントが均等に配置される。各セグメントの典型的な寸法は、トロイダル方向に15~30cm、ポロイダル方向に30~50cmである。

[0088] 各セグメントは、さらに3~5のサブセグメントにポロイダル方向に分割されている。これらのサブセグメントは、独立して位置調整が可能であり、ポロイダル方向のプラズマ-壁相互作用の局所的な制御を可能にする。特に、ミッドプレーン付近のサブセグメントは、最も高い粒子束と熱負荷を受けるため、より精密な制御が必要となる。

[0089] リミッタセグメントは、高熱負荷に耐えるタングステンコーティングが施されており、熱応力を低減するための勾配材料インターフェースを備えている。タングステンコーティングの厚さは、典型的には200～500 μm であり、プラズマ対向面の温度が再結晶温度（約1300 $^{\circ}\text{C}$ ）を超えないように設計されている。コーティングは、プラズマ溶射、物理蒸着、または化学蒸着などの方法で施される。

[0090] タングステンコーティングと基材の間には、熱膨張係数の違いによる熱応力を緩和するための勾配材料インターフェースが設けられている。このインターフェースは、タングステンから基材へと徐々に組成が変化する層構造を持ち、界面での剥離や亀裂の発生を防止する。典型的には、タングステン-銅混合層、タングステン-銅-クロム混合層などの複数の層から構成される。各層の厚さは50～100 μm であり、全体の厚さは200～300 μm である。

[0091] 基材には高熱伝導率を持つ銅合金または銅-クロム-ジルコニウム合金が使用され、効率的な熱除去を実現している。銅-クロム-ジルコニウム合金は、高い熱伝導率（ $\sim 340 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ）と優れた機械的強度を持ち、高温での使用に適している。基材の厚さは、熱伝導と機械的強度のバランスを考慮して最適化されており、典型的には10～20mmである。

[0092] 各リミッタセグメントの内部には、高効率の冷却チャンネルが設けられている。冷却媒体として加圧水が使用され、最大20MW/m²の熱負荷を処理することができる。冷却水の圧力は典型的には4MPa、入口温度は100 $^{\circ}\text{C}$ 、出口温度は150 $^{\circ}\text{C}$ である。冷却チャンネルの直径は10～15mmであり、チャンネル間の距離は20～30mmである。

[0093] 冷却チャンネルの内部には、熱伝達を向上させるためのスワール流れや微細構造が設けられている。スワールテープは、冷却チャンネル内に螺旋状に配置され、流れに旋回を与えることで、熱伝達係数を2～3倍に向上させる。また、チャンネル内壁には、微細なフィンや突起が設けられており、伝熱面積の増加と乱流促進により、熱伝達が向上する。

[0094] 冷却システムは、一次冷却ループと二次冷却ループから構成される。一次冷却ループは、リミッタセグメント内の冷却チャンネルを循環し、熱を除去する。二次冷却ループは、熱交換器を介して一次ループから熱を受け取り、最終的に熱を環境に放出する。一次ループの流量は、熱負荷に応じて制御され、常に適切な冷却が確保される。

[0095] 位置決めシステムは、高精度、耐放射線性のアクチュエータを使用し、熱膨張補償機構を備えている。システムの信頼性を確保するために冗長システムが実装されている。アクチュエータは、 piezo 電動式または電磁式であり、放射線環境下でも安定して動作するように設計されている。位置決め精度は $\pm 0.5\text{mm}$ 以内であり、最大移動速度は10mm/sである。

[0096] piezo 電動式アクチュエータは、高精度の位置制御が必要な場合に使用される。これらのアクチュエータは、電圧を印加することで piezo 素子が伸縮する原理を利用している。位置決め精度は $\pm 0.1\text{mm}$ 以内であり、応答速度は10ms以下である。ただし、移動範囲は限られており、典型的には数mmである。

[0097] 電磁式アクチュエータは、より大きな移動範囲が必要な場合に使用される。これらのアクチュエータは、電磁力を利用してリニアモーションを生成する。位置決め精度は $\pm 0.5\text{mm}$ 以内であり、最大移動範囲は100mm以上である。応答速度は100ms以下であり、最大移動速度は10mm/sである。

[0098] 位置センサーは、リミッタセグメントの実際の位置をリアルタイムで測定する。センサーには、リニア可変差動トランス（LVDT）、光学エンコーダー、および磁気センサーが含まれる。これらのセンサーは、放射線環境下でも安定して動作し、 $\pm 0.1\text{mm}$ 以内の精度を提供する。センサーデータは、位置フィードバック制御システムに送信され、アクチュエータの制御に使用される。

[0099] 熱膨張補償機構は、運転中の温度変化によるリミッタセグメントの熱膨張を補償する。この機構は、温度センサーと機械的補償要素から構成される。温度センサーは、リミッタセグメントの温度分布をリアルタイムで測定し、予想される熱膨張を計算する。機械的補償要素は、計算された熱膨張に基づいてリミッタ位置を微調整する。

[0100] 温度センサーは、熱電対または光ファイバー温度センサーであり、リミッタセグメントの複数の位置に埋め込まれている。熱電対は、K型またはN型であり、最大1200°Cまでの温度を測定することができる。光ファイバー温度センサーは、ブラッググレーティング方式を採用しており、分布温度測定が可能である。測定精度は±5°C以内であり、応答時間は100ms以下である。

[0101] 機械的補償要素は、バイメタル素子、熱膨張ロッド、またはアクティブ制御システムから構成される。バイメタル素子は、熱膨張係数の異なる2種類の金属を接合したもので、温度変化に応じて自動的に変形する。熱膨張ロッドは、リミッタセグメントと同じ温度環境に置かれ、同じ熱膨張を経験する。アクティブ制御システムは、温度センサーからのフィードバックに基づいてアクチュエータを制御し、熱膨張を補償する。

[0102] 冗長システムは、アクチュエータまたはセンサーの故障時にも安全な運転を確保する。各リミッタセグメントには、複数のアクチュエータとセンサーが装備されており、一部が故障しても残りが機能を維持する。また、故障検出アルゴリズムが実装されており、異常な動作や測定値が検出された場合、安全なフォールバックモードに切り替わる。

[0103] 冗長アクチュエータは、主アクチュエータと同じ仕様を持ち、並列に配置されている。通常運転時は、主アクチュエータのみが使用され、冗長アクチュエータはスタンバイ状態にある。主アクチュエータの故障が検出された場合、制御システムは自動的に冗長アクチュエータに切り替える。切り替え時間は100ms以下であり、運転の中断を最小限に抑える。

[0104] 冗長センサーは、主センサーと同じ仕様を持ち、異なる位置または異なる測定原理で配置されている。例えば、主センサーがLVDTの場合、冗長センサーは光学エンコーダーが使用される。これにより、共通モード故障のリスクが低減される。センサーデータは、常に比較され、不一致が検出された場合、故障診断アルゴリズムが起動する。

[0105] 故障検出アルゴリズムは、センサーデータの妥当性チェック、アクチュエータの応答確認、および自己診断テストから構成される。妥当性チェックでは、センサーデータが物理的に妥当な範囲内にあるかを確認する。応答確認では、アクチュエータに指令を送り、予想される応答が得られるかを確認する。自己診断テストでは、定期的にシステムの健全性をチェックする。

[0106] フォールバックモードは、故障が検出された場合に自動的に起動する安全モードである。このモードでは、リミッタセグメントは安全な位置（通常はより引き込まれた位置）に移動し、それ以上の位置調整は行われぬ。また、運転者に警告が送信され、必要に応じて手動介入が可能となる。

[0107] リミッタセグメントの位置制御は、プラズマ条件に応じてリアルタイムで行われる。制御アルゴリズムは、セパトリクス-リミッタ間隙、プラズマ電流、磁場強度、加熱電力、プラズマ密度などのパラメータに基づいて、最適なりミッタ位置を決定する。例えば、プラズマ立ち上げ時には、リミッタをプラズマに近づけて安定性を確保し、定常運転時には徐々に引き込んで侵食を最小化する。

[0108] 制御アルゴリズムは、フィードフォワード制御とフィードバック制御を組み合わせ実装されている。フィードフォワード制御は、予測されるプラズマ応答に基づいて初期制御入力を生成する。この制御は、物理モデルと経験的スケールリング則に基づいており、プラズマ条件に応じた最適なりミッタ位置を予測する。フィードバック制御は、測定された粒子フラックスと侵食率に基づいて制御入力を微調整する。

[0109] フィードフォワード制御では、以下の経験的スケーリング則が使用される：

- 間隙とフラックスの関係： $F(d) = F(0) \exp(-d/\lambda F)$ 、ここで $F(d)$ は間隙 d でのフラックス、 $F(0)$ はセパトリクスでのフラックス、 λF はフラックス減衰長である。典型的には、 $\lambda F = 20 \sim 30\text{mm}$ である。
- 磁場強度とフラックスの関係： $F \propto BT^{(-1.5)}$ 、ここで F はフラックス、 BT は磁場強度である。
- プラズマ密度とフラックスの関係： $F \propto \langle n_e \rangle^{(1.7 \sim 3)}$ 、ここで F はフラックス、 $\langle n_e \rangle$ は平均プラズマ密度である。
- 加熱電力とフラックスの関係： $F \propto P^{0.5}$ (NBI加熱) または $F \propto P^{0.7}$ (ICRH加熱)、ここで F はフラックス、 P は加熱電力である。

[0110] フィードバック制御では、測定された粒子フラックスと侵食率が目標値と比較される。偏差に基づいて、PID (比例-積分-微分) 制御アルゴリズムが制御入力を生成する。制御ゲインは、プラズマ条件と運転シナリオに応じて動的に調整される。応答時間は、標準モードで100ms、高速モードで10msである。

[0111] リミッタセグメントの表面には、侵食モニタリングのためのセンサーが埋め込まれている。これらのセンサーは、表面温度、侵食率、および堆積率をリアルタイムで測定し、制御システムにフィードバックする。センサーデータに基づいて、リミッタ位置の微調整が行われ、局所的な過熱や過度の侵食を防止する。

[0112] 表面温度センサーは、熱電対または光ファイバー温度センサーであり、リミッタセグメントの複数の位置に埋め込まれている。測定精度は $\pm 5^\circ\text{C}$ 以内であり、応答時間は100ms以下である。温度データは、熱負荷の分布を評価し、局所的な過熱を検出するために使用される。

[0113] 侵食率センサーは、電気抵抗測定または光学的測定に基づいており、コーティング層の厚さの変化を検出する。電気抵抗測定では、表面に埋め込まれた導電性トレースの抵抗変化を測定する。光学的測定では、表面に埋め込まれたマーカー層の露出を検出する。測定精度は $\pm 10\mu\text{m}$ 以内であり、時間分解能は1s以下である。

[0114] 堆積率センサーは、水晶振動子マイクロバランスまたは光学的測定に基づいており、堆積層の厚さの変化を検出する。水晶振動子マイクロバランスでは、水晶振動子の共振周波数の変化を測定する。光学的測定では、表面反射率または干渉パターンの変化を検出する。測定精度は $\pm 1\mu\text{m}$ 以内であり、時間分解能は1s以下である。

【高磁場最適化ダイバータ (HFOD) の構成】

[0115] 高磁場最適化ダイバータは、3T以上の高磁場での運転に最適化されている。この磁場領域では、垂直方向の輸送が減少し、プラズマ-壁相互作用がより制御しやすくなる。

[0116] ダイバータの形状は、磁力線の入射角を最適化し、熱負荷を分散させるように設計されている。特に、ストライク点近傍では、磁力線と表面のなす角度が1~3度となるように傾斜が付けられている。これにより、単位面積あたりの熱負荷が低減され、材料の熱応力が緩和される。

[0117] ダイバータの形状設計は、磁場配位シミュレーションと熱流体シミュレーションに基づいて最適化されている。シミュレーションでは、異なるプラズマ条件 (電流、密度、温度など) と磁場配位 (シングルヌル、ダブルヌル、スノーフレイク、X-ダイバータなど) に対して、熱負荷と粒子束の分布が計算される。これらの結果に基づいて、最適なダイバータ形状が決定される。

[0118] ダイバータターゲットは、高熱流束に耐えるタングステンモノブロック構造を採用している。各モノブロックは、高熱伝導率の銅合金製冷却管に接合されており、最大 $30\text{MW}/\text{m}^2$ の熱負荷を処理することができる。タングステンモノブロックの典型的な寸法は、 $30\text{mm} \times 30\text{mm} \times 12\text{mm}$ であり、冷却管の直径は12mmである。

[0119] タングステンモノブロックは、純タングステンまたは微量の添加物（レニウム、ランタン酸化物など）を含むタングステン合金で作られている。これらの添加物は、タングステンの延性と加工性を向上させ、熱応力による亀裂の発生を抑制する。モノブロックの表面は、プラズマとの相互作用を最適化するために、微細な表面処理（研磨、テクスチャリングなど）が施されている。

[0120] 冷却管は、銅合金（特に銅-クロム-ジルコニウム合金）で作られており、高い熱伝導率と機械的強度を持つ。冷却管の内部には、熱伝達を向上させるためのスワールテープや微細構造が設けられている。これにより、熱伝達係数が2～3倍に向上し、より効率的な冷却が実現される。

[0121] モノブロックと冷却管の接合は、ろう付けまたは熱間等方圧加圧（HIP）法で行われる。接合部には、熱膨張係数の違いによる熱応力を緩和するための中間層（銅-タングステン混合層など）が設けられている。接合部の熱伝達係数は、 $10\text{MW/m}^2\cdot\text{K}$ を超えており、効率的な熱除去を実現している。

[0122] ダイバータの内部構造は、中性粒子の圧縮を最大化するように設計されている。特に、プライベート領域は、中性粒子が効率的に閉じ込められ、再電離されるように形状が最適化されている。これにより、燃料リサイクリングが向上し、排気効率が高まる。

[0123] プライベート領域の形状は、中性粒子輸送シミュレーション（EIRENE、DEGASなど）に基づいて最適化されている。シミュレーションでは、異なる形状に対して中性粒子の密度分布、電離率、および排気効率が計算される。最適な形状は、中性粒子の圧縮率（プライベート領域の中性粒子密度とプラズマ領域の中性粒子密度の比）が最大となるように選択される。典型的には、圧縮率は10～100である。

[0124] プライベート領域には、バッフル構造が設けられている。バッフルは、中性粒子の流れを制御し、プライベート領域への閉じ込めを強化する役割を果たす。バッフルの形状と位置は、中性粒子輸送シミュレーションに基づいて最適化されている。特に、バッフルの先端位置は、セパトトリクスからの距離が2～5cmとなるように設計されている。

[0125] ダイバータには、効率的な排気システムが統合されている。排気ダクトは、中性粒子の流れを妨げないように配置され、高効率のクライオポンプまたはターボ分子ポンプに接続されている。排気速度は、水素同位体に対して $50\sim 100\text{m}^3/\text{s}$ である。

[0126] 排気ダクトの位置と形状は、中性粒子輸送シミュレーションに基づいて最適化されている。ダクトの入口は、プライベート領域の中性粒子密度が最も高い位置に配置されている。ダクトの断面積は、必要な排気速度を確保するために十分な大きさ（典型的には $0.1\sim 0.5\text{m}^2$ ）を持つ。ダクトの内壁には、中性粒子の反射を最小化するための表面処理（黒色コーティングなど）が施されている。

[0127] 排気システムは、クライオポンプまたはターボ分子ポンプを使用している。クライオポンプは、極低温表面（ $4\sim 20\text{K}$ ）に中性粒子を凝縮させることで排気を行う。ターボ分子ポンプは、高速回転するブレードで中性粒子に運動量を与え、排気を行う。両方のポンプタイプは、水素同位体に対して高い排気速度（ $10\sim 50\text{m}^3/\text{s}$ ）を持つ。

[0128] ダイバータ領域には、不純物入射システムが設置されている。このシステムは、アルゴン、ネオン、窒素などの放射性不純物ガスを制御された量で注入し、ダイバータプラズマの放射冷却を促進する。不純物注入量は、ダイバータプラズマの温度と熱負荷に基づいてリアルタイムで調整される。

[0129] 不純物入射システムは、複数のガス注入ノズルから構成される。ノズルは、ダイバータ領域の異なる位置に配置されており、不純物の空間分布を制御することができる。各ノズルは、高速電磁バルブで制御されており、応答時間は10ms以下である。不純物ガスの流量は、質量流量制御器で精密に制御され、流量範囲は $0.1\sim 10\text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ である。

[0130] 不純物入射の制御アルゴリズムは、ダイバータプラズマの温度と熱負荷に基づいて、最適な不純物注入量を計算する。アルゴリズムは、放射冷却モデルとプラズマ輸送モデルを組み合わせて実装されている。制御目標は、ダイバータプラズマの温度を5~10eVに維持し、ターゲットへの熱負荷を10MW/m²以下に抑えることである。

[0131] ダイバータの磁場構成は、異なるプラズマ条件に対応できるように柔軟に設計されている。特に、シングルヌル、ダブルヌル、スノーフレーク、およびX-ダイバータなどの異なる磁気配位に対応することができる。これらの配位は、プラズマ条件に応じて動的に切り替えることが可能である。

[0132] シングルヌル配位は、最も基本的な配位であり、一つのX点（磁場がゼロとなる点）を持つ。この配位は、シンプルで制御が容易であるが、ストライク点での熱負荷が集中する傾向がある。シングルヌル配位は、低~中程度の熱負荷 (<10MW/m²) での運転に適している。

[0133] ダブルヌル配位は、二つのX点を持ち、上下対称な構造を持つ。この配位は、熱負荷を上下のダイバータに分散させることができるため、高熱負荷での運転に適している。ただし、制御が複雑であり、上下の非対称性が発生しやすい。ダブルヌル配位は、高熱負荷 (10~20MW/m²) での運転に適している。

[0134] スノーフレーク配位は、X点の近傍に第二のX点を持つ複雑な配位である。この配位は、X点近傍の磁場構造を変化させ、熱負荷をより広い領域に分散させることができる。スノーフレーク配位は、非常に高い熱負荷 (>20MW/m²) での運転に適している。

[0135] X-ダイバータ配位は、X点とターゲットの間の磁場構造を変化させ、磁力線の拡がりを増加させる配位である。この配位は、ストライク点での熱負荷密度を低減し、デタッチメントプラズマの安定性を向上させることができる。X-ダイバータ配位は、部分デタッチメント運転に適している。

[0136] 磁場配位の切り替えは、ポロイダルフィールドコイルの電流を調整することで実現される。切り替えの時間スケールは、コイルのインダクタンスと電源の能力に依存するが、典型的には100ms~1sである。切り替え中は、プラズマの安定性と熱負荷分布が監視され、必要に応じて制御パラメータが調整される。

【統合分光モニタリングシステム (ISMS) の構成】

[0137] 統合分光モニタリングシステムは、複数のカメラと分光器から構成され、プラズマと壁との相互作用をリアルタイムでモニタリングする。システムは、D/Tフラックスと不純物フラックスを定量化するためにS/XB法を利用する。

[0138] S/XB法は、特定の原子またはイオンの発光強度から粒子フラックスを推定する手法である。S/XBは、電子衝突によるイオン化率 (S) と、電子衝突による励起率と分岐比の積 (XB) の比であり、プラズマ条件 (電子温度と密度) に依存する。粒子フラックス Γ は、発光強度 I (光子数/秒/立体角/面積) を用いて、 $\Gamma = 4\pi \times (S/XB) \times I$ と表される。

[0139] 広角可視カメラシステムは、トカマク内部の広範囲をカバーするように設置されている。各カメラは、放射線耐性の高いCCDまたはCMOSセンサーを使用し、1024×1024ピクセル以上の解像度を持つ。フレームレートは、標準モードで100fps、高速モードで最大10,000fpsである。カメラの視野は、リミッタセグメント、ダイバータ、および第一壁の主要部分をカバーしている。

[0140] カメラは、放射線シールド内に設置され、光学系を通じてトカマク内部を観測する。光学系は、広角レンズ、リレーレンズ、およびミラーから構成される。広角レンズは、広い視野 (典型的には90~120度) を提供し、トカマク内部の広範囲をカバーする。リレーレンズは、画像をカメラセンサーに伝送する。ミラーは、光路を曲げ、放射線の直接照射からカメラを保護する。

[0141] CCDセンサーは、高感度と広いダイナミックレンジを持ち、低光量条件での測定に適している。典型的な仕様は、1024×1024ピクセル、16ビットダイナミックレンジ、量子効率>80%（可視領域）である。CMOSセンサーは、高速読み出しと低ノイズを持ち、高速現象の観測に適している。典型的な仕様は、1024×1024ピクセル、12ビットダイナミックレンジ、フレームレート>1,000fpsである。

[0142] カメラシステムには、複数の狭帯域分光フィルターが装備されている。これらのフィルターは、D α /Ta線（656.3nm）、Be II線（527.2nm）、WI線（400.9nm）などの特定の波長を選択的に透過させる。フィルターの半値全幅（FWHM）は1～2nmであり、高い波長選択性を持つ。フィルターは、高速切り替え機構を備えており、異なる波長の測定を短時間で切り替えることができる。

[0143] 分光フィルターは、干渉フィルターまたは液晶可変フィルターである。干渉フィルターは、多層膜コーティングによって特定の波長を選択的に透過させる。透過率は>80%、半値全幅は1～2nmである。液晶可変フィルターは、電圧を印加することで透過波長を変更できる。波長範囲は400～700nm、半値全幅は1～5nmである。

[0144] フィルター切り替え機構は、フィルターホイールまたは液晶可変フィルターである。フィルターホイールは、複数のフィルターを円周上に配置し、モーターで回転させることで切り替える。切り替え時間は100ms以下である。液晶可変フィルターは、電圧を印加することで透過波長を変更する。切り替え時間は10ms以下である。

[0145] カメラシステムは、絶対輝度校正されており、測定された強度を放射輝度（photons/s/sr/cm²）に変換することができる。校正は、標準光源を用いて定期的に行われ、 $\pm 10\%$ 以内の精度を維持する。また、校正の安定性を確保するために、内部校正光源が設けられており、運転中に校正の確認を行うことができる。

[0146] 絶対輝度校正は、積分球または標準ランプを用いて行われる。積分球は、内部に拡散反射面を持つ球形の装置で、均一な輝度分布を提供する。標準ランプは、既知のスペクトル放射輝度を持つ光源である。校正の手順は、標準光源をカメラの視野内に配置し、異なる輝度レベルでの応答を測定する。これにより、カウント値と放射輝度の関係を示す校正曲線が得られる。

[0147] 内部校正光源は、発光ダイオード（LED）または安定化ランプである。LEDは、特定の波長で発光し、電流制御によって輝度を安定化させることができる。安定化ランプは、フィードバック制御によって輝度を一定に保つことができる。内部校正光源は、カメラの視野内の一部に配置され、運転中に定期的な校正の確認を行うことができる。

[0148] 分光システムは、高分解能分光器と光ファイバーアレイから構成される。光ファイバーは、トカマク内の異なる位置からの光を分光器に導く。分光器の波長範囲は200～1000nmであり、波長分解能は0.1nm以下である。時間分解能は、標準モードで10ms、高速モードで100 μ sである。分光システムは、プラズマ中の不純物濃度、イオン温度、および回転速度を測定する。

[0149] 光ファイバーアレイは、複数の光ファイバーバンドルから構成される。各バンドルは、トカマク内の特定の位置からの光を収集し、分光器に導く。光ファイバーは、石英ガラス製であり、紫外から近赤外領域（200～2000nm）で高い透過率を持つ。コア径は200～600 μ mであり、開口数は0.2～0.4である。

[0150] 分光器は、回折格子型またはエシェル型である。回折格子型分光器は、単一の回折格子を使用し、特定の波長範囲を高分解能で測定する。波長範囲は200～1000nm、波長分解能は0.1nm以下である。エシェル型分光器は、複数の回折次数を利用し、広い波長範囲を高分解能で同時に測定する。波長範囲は200～1000nm、波長分解能は0.01nm以下である。

[0151] 検出器は、CCDアレイまたはフォトダイオードアレイである。CCDアレイは、高感度と広いダイナミックレンジを持ち、低光量条件での測定に適している。フォトダイオードアレイは、高速応答と広いダイナ

ミックレンジを持ち、高速現象の観測に適している。両方の検出器タイプは、波長校正と強度校正が行われており、絶対輝度測定が可能である。

[0152] データ処理システムは、カメラと分光器からのデータをリアルタイムで処理し、粒子フラックスと侵食率を計算する。処理アルゴリズムは、S/XB法を用いて放射輝度からフラックスを導出する。S/XB係数は、プラズマ条件（電子温度と密度）に応じて動的に調整される。また、アルゴリズムは、反射光と直接放射を区別するための高度な画像処理技術を使用している。

[0153] データ処理システムは、高性能の計算機システムであり、リアルタイムデータ処理と解析を行う。システムは、マルチコアプロセッサと大容量メモリを備えており、複雑な計算を高速で実行することができる。データ処理の時間分解能は、標準モードで10ms、高速モードで1ms以下である。

[0154] S/XB法によるフラックス計算は、以下の手順で行われる：

1. カメラまたは分光器からの測定データを放射輝度（photons/s/sr/cm²）に変換する。
2. プラズマ条件（電子温度と密度）を推定または測定する。
3. プラズマ条件に応じたS/XB係数を計算または参照する。
4. 放射輝度とS/XB係数から粒子フラックスを計算する： $\Gamma = 4\pi \times (S/XB) \times I$ 。

[0155] プラズマ条件の推定は、ラングミュアプローブ、トムソン散乱、または分光測定に基づいて行われる。ラングミュアプローブは、SOLプラズマの電子温度と密度を直接測定する。トムソン散乱は、主プラズマの電子温度と密度を測定する。分光測定は、スペクトル線の強度比や幅から電子温度と密度を推定する。

[0156] S/XB係数の計算または参照は、衝突放射モデル（CRM）または参照テーブルに基づいて行われる。CRMは、原子過程（電子衝突励起、電子衝突電離、放射崩壊など）を詳細に計算し、プラズマ条件に応じたS/XB係数を導出する。参照テーブルは、事前に計算されたS/XB係数をプラズマ条件の関数として格納している。

[0157] 画像処理アルゴリズムは、反射光と直接放射を区別するために実装されている。このアルゴリズムは、空間的および時間的な相関分析に基づいており、ダイバータからの強い放射の反射が測定に与える影響を最小化する。

[0158] 反射光と直接放射の区別は、以下の手法を組み合わせで行われる：

1. 空間パターン分析：直接放射は局所的な発光源から生じるため、特徴的な空間パターンを示す。反射光は、広範囲に分散する傾向がある。空間パターンの違いを分析することで、両者を区別することができる。
2. 時間相関分析：直接放射と反射光は、異なる時間変化パターンを示す。例えば、ダイバータからの反射光は、ダイバータの発光強度と高い相関を示す。時間相関の違いを分析することで、両者を区別することができる。
3. スペクトル分析：直接放射と反射光は、異なるスペクトル特性を持つ可能性がある。例えば、反射光は、反射面の特性によってスペクトルが変化する。スペクトルの違いを分析することで、両者を区別することができる。
4. モデルベース分離：物理モデルに基づいて、直接放射と反射光の寄与を分離する。モデルには、発光源の分布、反射面の特性、および光の伝播が含まれる。測定データとモデル予測を比較することで、両者の寄与を推定することができる。

[0159] 赤外カメラシステムは、プラズマ対向機器の表面温度をリアルタイムでモニタリングする。カメラは、中赤外領域（3～5μm）または長波長赤外領域（8～12μm）で動作し、±10°C以内の温度測定精度を持つ。温度データは、熱負荷の分布を評価し、局所的な過熱を検出するために使用される。

[0160] 赤外カメラは、マイクロボロメータアレイまたは量子井戸赤外検出器（QWIP）を使用している。マイクロボロメータアレイは、室温で動作し、長波長赤外領域（8～12 μm ）で感度を持つ。QWIPは、極低温（典型的には77K）で動作し、中赤外領域（3～5 μm ）で高感度を持つ。両方の検出器タイプは、640×480ピクセル以上の解像度と50mK以下の温度分解能を持つ。

[0161] 赤外光学系は、ゲルマニウムまたは亜鉛セレン製のレンズとミラーから構成される。これらの材料は、中赤外から長波長赤外領域で高い透過率を持つ。光学系は、広角視野（典型的には60～90度）を提供し、トカマク内部の広範囲をカバーする。また、光学系には、バンドパスフィルターが組み込まれており、特定の波長帯（例えば、3～5 μm または8～12 μm ）を選択的に透過させる。

[0162] 温度校正は、黒体炉または校正用黒体源を用いて行われる。黒体炉は、既知の温度で放射する理想的な黒体に近い特性を持つ。校正の手順は、異なる温度の黒体を測定し、検出器の応答と温度の関係を示す校正曲線を作成する。校正は、定期的に行われ、 $\pm 10^{\circ}\text{C}$ 以内の精度を維持する。

[0163] 温度データの処理は、以下の手順で行われる：

1. 赤外面像を温度マップに変換する。
2. 温度マップから熱負荷分布を計算する。
3. 局所的な過熱領域を検出する。
4. 温度の時間変化から熱応答特性を評価する。

[0164] 熱負荷分布の計算は、温度データと熱伝導モデルに基づいて行われる。熱伝導モデルは、プラズマ対向機器の材料特性（熱伝導率、比熱、密度など）と構造（厚さ、冷却チャンネルの位置など）を考慮している。計算された熱負荷分布は、プラズマ-壁相互作用の評価と最適化に使用される。

[0165] 局所的な過熱検出は、温度閾値と温度勾配に基づいて行われる。温度閾値は、材料の許容温度（例えば、タングステンの再結晶温度）に基づいて設定される。温度勾配は、熱応力の指標として使用される。閾値を超える温度または勾配が検出された場合、アラームが発生し、保護動作が開始される。

[0166] アラームシステムは、異常な侵食パターンや熱負荷を検出した場合に警告を発する。アラームの閾値は、プラズマ条件と運転シナリオに応じて動的に調整される。アラームが発生した場合、制御システムは自動的に保護動作を開始し、機器の損傷を防止する。

[0167] アラームシステムは、以下の異常を検出する：

1. 局所的な高温領域：表面温度が許容値（例えば、タングステンの再結晶温度）を超える領域。
2. 急激な温度上昇：表面温度が短時間で急激に上昇する領域。
3. 高い侵食率：侵食率が許容値（例えば、1mm/年）を超える領域。
4. 異常な発光パターン：通常とは異なる空間的または時間的な発光パターン。
5. 高い不純物フラックス：不純物フラックスが許容値を超える場合。

[0168] アラームの優先度は、異常の重大度に応じて設定される。低優先度アラームは、警告のみを発し、運転者の注意を喚起する。中優先度アラームは、自動的に保護動作（例えば、リミッタ位置の調整）を開始するが、運転は継続される。高優先度アラームは、緊急保護動作（例えば、加熱電力の急速な低減）を開始し、必要に応じて運転を停止する。

[0169] 保護動作は、異常の種類と重大度に応じて選択される。典型的な保護動作には、以下が含まれる：

1. リミッタ位置の調整：異常が検出されたリミッタセグメントを引き込み、プラズマとの相互作用を低減する。
2. 加熱電力の低減：プラズマへの入力電力を低減し、熱負荷と侵食率を低下させる。
3. ガス注入：追加の燃料ガスまたは不純物ガスを注入し、プラズマを冷却する。

4. 磁場配位の調整：セパトリス位置を調整し、熱負荷分布を最適化する。
5. 緊急停止：重大な異常が検出された場合、プラズマを安全に終了させる。

[0170] 分光トモグラフィシステムは、複数の視線からの測定データを組み合わせて、不純物源の三次元分布を再構成する。これにより、侵食の空間分布を詳細に把握し、局所的な問題領域を特定することができる。

[0171] 分光トモグラフィシステムは、複数の視線を持つ分光器アレイから構成される。各分光器は、トカマク内の特定の視線に沿った発光強度を測定する。視線の数と配置は、再構成の空間分解能に影響する。典型的には、10～100の視線が使用される。

[0172] トモグラフィ再構成アルゴリズムは、測定された視線積分強度から発光源の空間分布を計算する。アルゴリズムには、フィルタードバックプロジェクション、代数的再構成法（ART）、最大エントロピー法などがある。再構成の空間分解能は、視線の数と配置に依存するが、典型的には5～10cmである。

[0173] 再構成された発光分布は、不純物源の空間分布を示している。特に、ベリリウムやタングステンなどの壁材料の発光は、侵食の空間分布を示している。これらのデータは、侵食のホットスポットを特定し、局所的な対策を講じるために使用される。

[0174] データ解析システムは、収集されたデータを長期的に分析し、プラズマ対向機器の寿命を予測する。分析には、統計的手法と物理モデルが組み合わせて使用される。予測結果は、保守計画の最適化と機器交換のタイミング決定に使用される。

[0175] データ解析システムは、以下の機能を提供する：

1. 侵食率の時間変化の追跡：運転条件の変化に対する侵食率の応答を分析する。
2. 侵食率と運転パラメータの相関分析：侵食率に影響を与える主要なパラメータを特定する。
3. 侵食率の空間分布の分析：侵食のホットスポットを特定し、局所的な対策を講じる。
4. 寿命予測モデルの開発：侵食データに基づいて、プラズマ対向機器の寿命を予測する。
5. 最適運転条件の特定：侵食率を最小化する運転条件を特定する。

[0176] 寿命予測モデルは、測定された侵食率と物理モデルに基づいて開発される。モデルは、異なる運転条件下での侵食率を予測し、累積侵食量を計算する。寿命の終了は、侵食量が許容値（例えば、コーティング厚さの50%）に達した時点と定義される。予測の精度は、侵食率データの品質と物理モデルの正確さに依存するが、典型的には±30%以内である。

【適応型磁場制御システム（AMCS）の構成】

[0177] 適応型磁場制御システムは、プラズマの磁場配位を動的に調整し、セパトリス-リミッタ間隙を最適化する。システムは、変化するプラズマ条件に迅速に対応し、経験的スケールリング則に基づく予測アルゴリズムを利用する。

[0178] 磁場制御システムは、複数のポロイダルフィールドコイルとトロイダルフィールドコイルから構成される。ポロイダルフィールドコイルは、プラズマの形状と位置を制御するために使用され、トロイダルフィールドコイルは、プラズマの閉じ込めと安定性を確保するために使用される。コイルは、高精度の電源システムによって駆動され、電流値を高速かつ精密に制御することができる。

[0179] ポロイダルフィールドコイルは、プラズマの垂直位置、形状、および電流分布を制御するために使用される。コイルの数と配置は、トカマクの大きさと要求される制御能力に依存する。典型的には、6～12のコイルが使用される。各コイルは、超伝導または水冷銅導体で作られており、数kAから数十kAの電流を流すことができる。

[0180] ポロイダルフィールドコイルの配置は、プラズマの形状と位置の制御能力を最大化するように最適化されている。特に、X点の位置と形状を精密に制御するために、ダイバータ領域の近くに追加のコイルが配置されている。これらのコイルは、ダイバータコイルまたはX点制御コイルと呼ばれ、ダイバータの磁場構造を最適化するために使用される。

[0181] トロイダルフィールドコイルは、プラズマの閉じ込めと安定性を確保するために使用される。コイルの数は、トカマクの対称性に依存し、典型的には16~24である。各コイルは、超伝導または水冷銅導体で作られており、数十kAから数百kAの電流を流すことができる。トロイダルフィールドは、プラズマの主要な閉じ込め場であり、その強度は3~5Tである。

[0182] 電源システムは、コイルに電流を供給し、高速かつ精密な制御を実現する。システムは、整流器、インバータ、および制御回路から構成される。整流器とインバータは、交流電力を直流に変換し、コイルに供給する。制御回路は、電流値を測定し、フィードバック制御を行う。電流制御の精度は、定常状態で $\pm 0.1\%$ 以内、過渡状態で $\pm 1\%$ 以内である。

[0183] 電源システムの応答時間は、コイルのインダクタンスと電源の能力に依存する。小さなコイル（例えば、ダイバータコイル）の場合、応答時間は数ms~数十msである。大きなコイル（例えば、主ポロイダルフィールドコイル）の場合、応答時間は数十ms~数百msである。トロイダルフィールドコイルの場合、応答時間は数秒~数十秒である。

[0184] リアルタイム磁気平衡再構成システムは、磁気プローブ、フラックスループ、およびログスキーコイルからの測定データに基づいて、プラズマの形状と位置をリアルタイムで計算する。再構成の時間分解能は1ms以下であり、空間分解能は1cm以下である。再構成アルゴリズムは、測定データとプラズマ平衡モデルを組み合わせて、プラズマの形状、位置、および電流分布を高精度で推定する。

[0185] 磁気プローブは、局所的な磁場の強度と方向を測定する。プローブは、トカマク真空容器の内壁に沿って配置されており、ポロイダル方向とトロイダル方向の磁場成分を測定する。典型的には、数十から数百のプローブが使用される。各プローブは、小型のコイルから構成され、磁場の変化率 (dB/dt) を測定する。測定データは積分され、磁場強度が計算される。

[0186] フラックスループは、磁束の変化を測定する。ループは、トカマク真空容器の周囲に配置されており、ポロイダル磁束の変化を測定する。典型的には、数十のループが使用される。各ループは、導体のループから構成され、磁束の変化率 ($d\Phi/dt$) を測定する。測定データは積分され、磁束が計算される。

[0187] ログスキーコイルは、プラズマ電流を測定する。コイルは、プラズマを取り囲むように配置されており、プラズマ電流の総和を測定する。典型的には、1~3のコイルが使用される。各コイルは、トロイダル方向に巻かれた導体のループから構成され、電流の変化率 (dI/dt) を測定する。測定データは積分され、電流が計算される。

[0188] 磁気平衡再構成アルゴリズムは、測定データとプラズマ平衡モデルを組み合わせて、プラズマの形状、位置、および電流分布を計算する。アルゴリズムは、グラッド-シャフラノフ方程式を解き、測定データに最もよく一致する平衡解を求める。再構成の精度は、測定データの品質と平衡モデルの正確さに依存するが、典型的には形状と位置で $\pm 1cm$ 、電流分布で $\pm 10\%$ 以内である。

[0189] 再構成アルゴリズムは、以下の手順で実行される：

1. 測定データ（磁場、磁束、電流）を収集し、前処理する。
2. 初期平衡解を推定する。
3. 推定された平衡解から予測される測定値を計算する。
4. 予測値と実測値の差を最小化するように平衡解を更新する。

5. 収束するまで手順3と4を繰り返す。
6. 最終的な平衡解からプラズマの形状、位置、および電流分布を抽出する。

[0190] 再構成の時間分解能は、測定データの収集速度、計算能力、およびアルゴリズムの複雑さに依存する。高速再構成アルゴリズムは、簡略化されたモデルと最適化された計算手法を使用し、1ms以下の時間分解能を実現する。これにより、プラズマの急速な変化（例えば、ELMやディスラプションの前兆）をリアルタイムで検出し、対応することが可能となる。

[0191] 磁場制御アルゴリズムは、再構成されたプラズマ形状と位置に基づいて、ポロイダルフィールドコイルの電流を調整する。制御目標は、セパトトリクス-リミッタ間隙を最適値に維持することである。最適値は、プラズマ条件（電流、密度、加熱電力など）に応じて動的に計算される。アルゴリズムは、フィードフォワード制御とフィードバック制御を組み合わせられて実装されている。フィードフォワード制御は、予測されるプラズマ応答に基づいて初期制御入力を生成し、フィードバック制御は、測定された偏差に基づいて制御入力を微調整する。

[0192] フィードフォワード制御は、プラズマの応答を予測し、先行的に制御入力を生成する。制御は、物理モデルと経験的スケールリング則に基づいており、プラズマ条件に応じた最適な磁場配位を予測する。特に、プラズマの圧力分布、電流分布、および加熱電力の変化に対するプラズマ応答が考慮される。

[0193] フィードフォワードモデルは、以下の要素を含む：

1. プラズマ平衡モデル：グラッド-シャフラノフ方程式に基づき、コイル電流とプラズマパラメータから平衡磁場配位を計算する。
2. プラズマ応答モデル：コイル電流の変化に対するプラズマの応答を予測する。モデルは、プラズマの剛体変位、変形、および電流再分布を考慮する。
3. 最適化アルゴリズム：目標とする磁場配位を実現するための最適なコイル電流を計算する。アルゴリズムは、制約条件（例えば、コイル電流の上限、電圧の上限など）を考慮しながら、目標関数を最小化する。

[0194] フィードバック制御は、測定されたプラズマ形状と位置を目標値と比較し、偏差に基づいて制御入力を調整する。制御は、PID（比例-積分-微分）アルゴリズムまたはモデル予測制御（MPC）アルゴリズムに基づいている。PID制御は、シンプルで堅牢であるが、複雑な非線形システムの制御には限界がある。MPC制御は、より高度であり、プラズマの非線形応答と制約条件を考慮することができるが、計算負荷が高い。

[0195] フィードバック制御ループは、以下の要素を含む：

1. 目標値生成：プラズマ条件に応じた最適なセパトトリクス-リミッタ間隙を計算する。
2. 偏差計算：測定された間隙と目標値の差を計算する。
3. 制御アルゴリズム：偏差に基づいて、コイル電流の調整量を計算する。
4. アクチュエータ制御：計算された調整量に基づいて、コイル電源に制御信号を送る。

[0196] 制御システムの性能は、以下の指標で評価される：

1. 追従性能：目標値の変化に対する応答の速さと正確さ。
2. 外乱抑制：外部擾乱（例えば、プラズマ圧力の変動）に対する安定性。
3. 堅牢性：モデル誤差や測定ノイズに対する感度。
4. 制約対応：物理的制約（例えば、コイル電流の上限）を満たす能力。

[0197] 予測的制御アルゴリズムは、プラズマ条件の変化を予測し、先行的に磁場配位を調整する。このアルゴリズムは、経験的スケールリング則と物理モデルに基づいており、プラズマの応答を予測することができる。例えば、加熱電力の増加に伴うプラズマ圧力の上昇を予測し、それに応じてセパトトリクス位置を調整する。

[0198] 予測的制御アルゴリズムは、以下の要素を含む：

1. プラズマ条件予測：現在の条件と制御入力に基づいて、将来のプラズマ条件を予測する。
2. 応答予測：予測されたプラズマ条件に対するプラズマの応答を予測する。
3. 先行制御：予測された応答に基づいて、先行的に制御アクションを生成する。

[0199] プラズマ条件予測には、物理モデルと機械学習モデルが使用される。物理モデルは、プラズマの基本的な振る舞いを記述し、第一原理に基づいて予測を行う。機械学習モデルは、過去のデータに基づいて予測を行い、複雑な非線形関係を捉えることができる。両方のモデルを組み合わせることで、予測の精度と堅牢性が向上する。

[0200] 応答予測には、プラズマ平衡モデルとプラズマ輸送モデルが使用される。平衡モデルは、プラズマの形状と位置の変化を予測する。輸送モデルは、プラズマの圧力分布と電流分布の変化を予測する。これらのモデルは、物理的な制約と経験的なスケーリング則を組み合わせて実装されている。

[0201] 先行制御は、予測された応答に基づいて、先行的に制御アクションを生成する。制御アクションは、予測された偏差を最小化するように設計されている。特に、プラズマ条件の急速な変化（例えば、加熱電力の急増）に対して、先行的に磁場配位を調整することで、過渡的な偏差を最小化することができる。

[0202] 磁場配位ライブラリは、異なる運転シナリオに対応した事前計算された磁場配位を格納している。これらの配位は、プラズマ立ち上げ、L-モード運転、H-モード運転、高ベータ運転などの異なるシナリオに最適化されている。運転中に、適切な配位が選択され、現在のプラズマ条件に合わせて微調整される。

[0203] 磁場配位ライブラリは、以下の要素を含む：

1. 基本配位：異なる運転シナリオに対応した基本的な磁場配位。
2. パラメータ化モデル：基本配位を現在のプラズマ条件に合わせて調整するためのモデル。
3. 選択アルゴリズム：現在の運転条件に最適な配位を選択するためのアルゴリズム。

[0204] 基本配位は、プラズマシミュレーションと過去の運転経験に基づいて開発される。各配位は、特定の運転シナリオ（例えば、低密度L-モード、高密度H-モードなど）に最適化されている。最適化の基準には、プラズマ安定性、閉じ込め性能、および壁負荷の最小化が含まれる。

[0205] パラメータ化モデルは、基本配位を現在のプラズマ条件に合わせて調整するために使用される。モデルは、プラズマ電流、磁場強度、密度、加熱電力などのパラメータに基づいて、配位の各要素（例えば、セパトロクス位置、三角度、伸長率など）を調整する。調整は、物理的な制約と経験的なスケーリング則に基づいて行われる。

[0206] 選択アルゴリズムは、現在の運転条件と目標に基づいて、最適な配位を選択する。アルゴリズムは、各配位の予測性能を評価し、最も適切な配位を選択する。評価基準には、プラズマ性能、壁負荷、および制御の容易さが含まれる。選択は、運転中に動的に行われ、条件の変化に応じて配位が切り替えられる。

[0207] 磁場配位の切り替え機能は、異なる運転フェーズ間の迅速な遷移を可能にする。特に、L-H遷移時やELMの発生時には、磁場配位を迅速に調整して、プラズマ-壁相互作用を最適化することができる。切り替えの時間スケールは、10～100msである。

[0208] 配位切り替えの手順は、以下の通りである：

1. 切り替え条件の検出：運転条件の変化（例えば、L-H遷移）を検出する。
2. 目標配位の選択：新しい条件に最適な配位を選択する。
3. 遷移軌道の計算：現在の配位から目標配位への最適な遷移軌道を計算する。
4. コイル電流の調整：計算された軌道に沿ってコイル電流を調整する。
5. 安定性監視：遷移中のプラズマ安定性を監視し、必要に応じて軌道を調整する。

[0209] 遷移軌道の計算は、プラズマの安定性と制御の容易さを考慮して行われる。特に、遷移中にプラズマが不安定になるような急激な変化を避け、スムーズな遷移を実現することが重要である。また、コイル電流の変化率の制約も考慮される。

[0210] MHD不安定性検出システムは、磁気プローブとソフトX線検出器からの信号を分析し、不安定性の前兆を検出する。検出された不安定性に応じて、磁場配位が調整され、不安定性の成長が抑制される。特に、ネオクラシカルティアリングモード (NTM) やエッジ局在化モード (ELM) などの不安定性に対する制御が実装されている。

[0211] MHD不安定性検出システムは、以下の要素を含む：

1. センサーアレイ：磁気プローブ、ソフトX線検出器、ECEラジオメーターなど。
2. 信号処理アルゴリズム：センサーデータからMHD活動を抽出するためのアルゴリズム。
3. モード識別アルゴリズム：検出されたMHD活動の種類と特性を識別するためのアルゴリズム。
4. 不安定性予測モデル：MHD活動の将来の発展を予測するためのモデル。

[0212] センサーアレイは、トカマク内の異なる位置に配置された複数のセンサーから構成される。磁気プローブは、プラズマ周辺部のMHD活動を検出するために使用される。ソフトX線検出器は、プラズマ中心部のMHD活動を検出するために使用される。ECEラジオメーターは、電子温度分布の変動を検出するために使用される。これらのセンサーは、高い時間分解能（典型的には $1\mu\text{s}\sim 10\mu\text{s}$ ）で測定を行い、高周波のMHD活動も検出することができる。

[0213] 信号処理アルゴリズムは、センサーデータからMHD活動を抽出する。アルゴリズムには、フーリエ解析、ウェーブレット解析、特異値分解 (SVD) などが含まれる。これらの手法は、信号からノイズを除去し、異なる周波数と空間モードのMHD活動を分離する。処理の結果、MHD活動の周波数、振幅、位相、および空間構造が得られる。

[0214] モード識別アルゴリズムは、処理された信号からMHD活動の種類と特性を識別する。アルゴリズムは、パターン認識と物理モデルを組み合わせて実装されている。識別される主なMHDモードには、鋸歯状振動、ネオクラシカルティアリングモード (NTM)、エッジ局在化モード (ELM)、抵抗性壁モード (RWM) などがある。各モードについて、モード数 (m/n)、回転周波数、成長率、および位置が決定される。

[0215] 不安定性予測モデルは、検出されたMHD活動の将来の発展を予測する。モデルは、物理的な成長率モデルと経験的なスケージング則を組み合わせて実装されている。予測には、MHD活動の振幅の時間変化、飽和レベル、および崩壊閾値が含まれる。これらの予測は、先行的な制御アクションの生成に使用される。

[0216] MHD不安定性制御システムは、検出された不安定性に応じて、磁場配位と加熱電力を調整する。制御の目標は、不安定性の成長を抑制し、プラズマの安定性を維持することである。制御戦略は、不安定性の種類と特性に応じて選択される。

[0217] ネオクラシカルティアリングモード (NTM) の制御には、電子サイクロトロン電流駆動 (ECCD) が使用される。ECCDは、磁気島の位置に局所的な電流を駆動し、磁気島の成長を抑制する。制御システムは、NTMの位置を検出し、ECCDの入射角度と電力を調整して、磁気島を安定化する。

[0218] エッジ局在化モード (ELM) の制御には、外部摂動磁場と燃料注入が使用される。外部摂動磁場は、プラズマのエッジ領域に小さな磁場摂動を加え、ELMの振幅と頻度を制御する。燃料注入は、プラズマのエッジ圧力勾配を調整し、ELMの特性を変化させる。制御システムは、ELMの特性を監視し、摂動磁場と燃料注入を最適化して、ELMによる熱負荷を最小化する。

[0219] 抵抗性壁モード (RWM) の制御には、能動的なフィードバック制御が使用される。制御コイルは、RWMの空間構造に合わせた磁場を生成し、モードの成長を抑制する。制御システムは、RWMの振幅と位相を測定し、コイル電流をリアルタイムで調整して、モードを安定化する。

[0220] プラズマ崩壊予測システムは、プラズマ条件の変化を監視し、崩壊の前兆を検出する。崩壊が予測された場合、磁場配位が調整され、熱負荷が分散される。特に、リミッタセグメントの位置が調整され、崩壊時の熱負荷を受け止める準備が行われる。

[0221] プラズマ崩壊予測システムは、以下の要素を含む：

1. 前兆検出アルゴリズム：崩壊の前兆となるプラズマ条件の変化を検出するためのアルゴリズム。
2. リスク評価モデル：検出された前兆に基づいて崩壊リスクを評価するためのモデル。
3. 予測モデル：崩壊の時間と特性を予測するためのモデル。
4. 緩和戦略：予測された崩壊の影響を最小化するための戦略。

[0222] 前兆検出アルゴリズムは、プラズマ条件の変化を監視し、崩壊の前兆を検出する。監視されるパラメータには、プラズマ電流、密度、温度、MHD活動、放射損失などが含まれる。アルゴリズムは、これらのパラメータの時間変化を分析し、異常なパターン（例えば、MHD活動の急増、放射損失の増加など）を検出する。

[0223] リスク評価モデルは、検出された前兆に基づいて崩壊リスクを評価する。モデルは、機械学習アルゴリズム（例えば、ニューラルネットワーク、サポートベクターマシンなど）と物理モデルを組み合わせて実装されている。評価結果は、崩壊の発生確率と時間枠を示す。

[0224] 予測モデルは、崩壊の時間と特性を予測する。モデルは、物理的な崩壊メカニズムと経験的なスケールリング則に基づいている。予測には、崩壊の発生時間、エネルギー損失量、熱負荷分布、および電磁力などが含まれる。これらの予測は、緩和戦略の選択と最適化に使用される。

[0225] 緩和戦略は、予測された崩壊の影響を最小化するために実装される。戦略には、以下が含まれる：

1. 熱負荷分散：リミッタセグメントの位置を調整し、崩壊時の熱負荷を分散させる。
2. 放射冷却：不純物ガスを注入し、プラズマエネルギーを放射で散逸させる。
3. 電流クエンチ制御：プラズマ電流の急速な減少を制御し、電磁力を最小化する。
4. 逃走電子抑制：崩壊時に生成される高エネルギー電子を抑制し、局所的な損傷を防止する。

[0226] 高ベータプラズマの安定化機能は、プラズマの圧力分布と電流分布を最適化し、理想MHD安定性と抵抗性壁モード (RWM) 安定性を向上させる。これにより、より高いベータ値での運転が可能となり、核融合出力が増加する。

[0227] 高ベータプラズマの安定化機能は、以下の要素を含む：

1. 安定性限界予測：現在のプラズマ条件に対する安定性限界を予測するためのモデル。
2. 分布最適化：プラズマの圧力分布と電流分布を最適化するための制御アルゴリズム。
3. 能動的安定化：不安定モードを能動的に安定化するためのフィードバック制御システム。

[0228] 安定性限界予測モデルは、現在のプラズマ条件に対する理想MHD安定性限界と抵抗性壁モード (RWM) 安定性限界を予測する。モデルは、平衡計算と安定性解析を組み合わせて実装されている。予測には、ベータ限界、圧力勾配限界、および電流密度限界が含まれる。これらの予測は、運転領域の境界を定義し、安全なプラズマ条件を維持するために使用される。

[0229] 分布最適化アルゴリズムは、プラズマの圧力分布と電流分布を最適化する。最適化の目標は、安定性限界を最大化し、閉じ込め性能を向上させることである。アルゴリズムは、加熱電力分布、電流駆動分布、

および燃料注入分布を調整して、最適な分布を実現する。最適化は、物理モデルと経験的なスケージング則に基づいて行われる。

[0230] 能動的安定化システムは、高ベータプラズマで発生する不安定モードを能動的に安定化する。システムは、モード検出センサー、フィードバック制御アルゴリズム、および制御コイルから構成される。特に、抵抗性壁モード（RWM）の安定化には、プラズマの回転維持と能動的なフィードバック制御が組み合わせて使用される。

[0231] 外部摂動磁場コイルは、エッジ局在化モード（ELM）の制御に使用される。これらのコイルは、プラズマ周辺部に小さな磁場摂動を加え、ELMの振幅と頻度を制御する。これにより、ELMによる瞬間的な熱負荷が低減され、プラズマ対向機器の寿命が延長される。

[0232] 外部摂動磁場システムは、以下の要素を含む：

1. 摂動コイルアレイ：プラズマ周辺部に配置された複数のコイル。
2. 電源システム：コイルに電流を供給し、高速かつ精密な制御を実現する。
3. 制御アルゴリズム：ELMの特性に基づいて摂動磁場を最適化するためのアルゴリズム。
4. モニタリングシステム：ELMの振幅、頻度、および熱負荷を測定するためのシステム。

[0233] 摂動コイルアレイは、トカマク内の異なる位置に配置された複数のコイルから構成される。コイルの数と配置は、必要な摂動磁場の空間構造に依存する。典型的には、トロイダル方向に均等に配置された8～24のコイルが使用される。各コイルは、水冷銅導体で作られており、数kAの電流を流すことができる。

[0234] 電源システムは、コイルに電流を供給し、高速かつ精密な制御を実現する。システムは、整流器、インバータ、および制御回路から構成される。電流制御の精度は $\pm 1\%$ 以内であり、応答時間は1ms以下である。これにより、ELMの周波数（典型的には10～100Hz）に対応した高速制御が可能となる。

[0235] 制御アルゴリズムは、ELMの特性に基づいて摂動磁場を最適化する。最適化の目標は、ELMの振幅を低減し、頻度を増加させることである。これにより、各ELMによる熱負荷が低減され、プラズマ対向機器の寿命が延長される。アルゴリズムは、摂動磁場の振幅、位相、およびモード構造を調整して、最適な効果を実現する。

[0236] モニタリングシステムは、ELMの振幅、頻度、および熱負荷を測定する。システムは、磁気プローブ、ダイバータ熱流束センサー、および分光診断から構成される。測定データは、ELM制御の効果を評価し、制御パラメータを最適化するために使用される。

【統合制御アーキテクチャ（ICA）の構成】

[0237] 統合制御アーキテクチャは、上記の各サブシステムを統合し、協調動作を実現する中央制御システムである。このアーキテクチャは、リアルタイムデータ処理、意思決定アルゴリズム、およびフィードバック制御ループから構成される。

[0238] 中央制御ユニットは、高性能の計算機システムであり、各サブシステムからのデータを収集し、統合的な制御決定を行う。計算機は、マルチコアプロセッサと大容量メモリを備えており、複雑な計算を高速で実行することができる。オペレーティングシステムは、リアルタイム性を確保するために最適化されており、1ms以下の応答時間を実現する。

[0239] 中央制御ユニットは、以下の仕様を持つ：

1. プロセッサ：64コア以上、3GHz以上のクロック周波数。
2. メモリ：256GB以上のRAM。
3. ストレージ：10TB以上のSSD（高速データ記録用）。
4. ネットワーク：10Gbps以上の帯域幅。

5. オペレーティングシステム：リアルタイム拡張を持つLinux。

[0240] 中央制御ユニットは、以下の機能を提供する：

1. データ収集と前処理：各サブシステムからのデータを収集し、前処理する。
2. 状態推定：収集されたデータに基づいて、プラズマと機器の状態を推定する。
3. 制御決定：推定された状態に基づいて、最適な制御アクションを決定する。
4. 制御信号生成：決定された制御アクションに基づいて、各サブシステムへの制御信号を生成する。
5. データ記録：運転データを記録し、後分析のために保存する。
6. 運転者インターフェース：運転者にシステムの状態と制御オプションを提示する。

[0241] データ収集システムは、各サブシステムからのデータを高速で収集し、中央データベースに格納する。データ収集は、高速データバスを通じて行われ、サンプリングレートは最大100kHzである。収集されるデータには、プラズマパラメータ（電流、密度、温度など）、磁場配位、リミッタ位置、粒子フラックス、侵食率などが含まれる。

[0242] データ収集システムは、以下の要素を含む：

1. データ収集ハードウェア：ADCカード、デジタルI/Oカード、カメラインターフェースなど。
2. データバス：PCI Express、InfiniBand、または専用の高速データバス。
3. データ収集ソフトウェア：リアルタイムデータ収集と前処理を行うソフトウェア。
4. データベース：収集されたデータを格納し、高速アクセスを提供するデータベース。

[0243] データ収集の時間分解能は、測定対象に応じて異なる：

1. 高速データ：磁気プローブ、ソフトX線検出器などからのデータ。サンプリングレートは10~100kHzである。
2. 中速データ：密度、温度、放射計測などからのデータ。サンプリングレートは1~10kHzである。
3. 低速データ：カメラ画像、分光データなどからのデータ。サンプリングレートは10~1000Hzである。

[0244] データ処理アルゴリズムは、収集されたデータを処理し、制御に必要な情報を抽出する。アルゴリズムには、信号フィルタリング、特徴抽出、パターン認識、および状態推定が含まれる。特に、プラズマ状態の推定は、物理モデルとデータ駆動モデルを組み合わせで行われる。物理モデルは、プラズマの基本的な振る舞いを記述し、データ駆動モデルは、実測データに基づいて物理モデルを補正する。

[0245] データ処理アルゴリズムは、以下の機能を提供する：

1. 信号フィルタリング：測定ノイズを除去し、信号の品質を向上させる。
2. 特徴抽出：信号から重要な特徴を抽出する。
3. パターン認識：抽出された特徴からパターンを認識し、プラズマの状態を識別する。
4. 状態推定：測定データと物理モデルに基づいて、プラズマと機器の状態を推定する。

[0246] 信号フィルタリングには、以下の手法が使用される：

1. デジタルフィルタ：ローパスフィルタ、ハイパスフィルタ、バンドパスフィルタなど。
2. 適応フィルタ：カルマンフィルタ、粒子フィルタなど。
3. ウェーブレット変換：信号の時間-周波数解析。
4. 経験的モード分解：非線形・非定常信号の分解。

[0247] 特徴抽出には、以下の手法が使用される：

1. 統計的特徴：平均、分散、歪度、尖度など。
2. スペクトル特徴：フーリエ変換、パワースペクトル密度など。
3. 時間特徴：自己相関、相互相関など。
4. 空間特徴：空間モード分解、主成分分析など。

[0248] パターン認識には、以下の手法が使用される：

1. 教師あり学習：サポートベクターマシン、ニューラルネットワークなど。
2. 教師なし学習：クラスタリング、自己組織化マップなど。
3. 異常検出：統計的手法、機械学習手法など。
4. 時系列分析：隠れマルコフモデル、リカレントニューラルネットワークなど。

[0249] 状態推定には、以下の手法が使用される：

1. カルマンフィルタ：線形システムの状態推定。
2. 拡張カルマンフィルタ：非線形システムの状態推定。
3. 粒子フィルタ：非線形・非ガウスシステムの状態推定。
4. ベイズ推定：確率的状态推定。

[0250] 意思決定アルゴリズムは、処理されたデータに基づいて、最適な制御アクションを決定する。アルゴリズムは、ルールベースの意思決定、モデル予測制御、および強化学習を組み合わせられて実装されている。ルールベースの意思決定は、事前定義されたルールに基づいて基本的な制御アクションを生成する。モデル予測制御は、プラズマの将来の振る舞いを予測し、最適な制御軌道を計算する。強化学習は、過去の制御経験に基づいて制御戦略を改善する。

[0251] 意思決定アルゴリズムは、以下の要素を含む：

1. 目標設定：運転シナリオと条件に応じた制御目標を設定する。
2. 制約定義：物理的制約と運転制約を定義する。
3. 最適化：目標と制約に基づいて最適な制御アクションを計算する。
4. 実行計画：計算された制御アクションの実行計画を生成する。

[0252] ルールベースの意思決定は、以下の要素を含む：

1. ルールベース：IF-THEN形式のルールのセット。
2. 推論エンジン：ルールを評価し、制御アクションを生成するエンジン。
3. 説明機能：決定の理由を説明する機能。

[0253] モデル予測制御は、以下の要素を含む：

1. プラズマモデル：プラズマの応答を予測するためのモデル。
2. 予測ホライゾン：将来の状態を予測する時間範囲。
3. 制御ホライゾン：最適化する制御アクションの時間範囲。
4. 目標関数：最小化または最大化する目標関数。
5. 最適化アルゴリズム：目標関数を最適化するためのアルゴリズム。

[0254] 強化学習は、以下の要素を含む：

1. 状態空間：プラズマと機器の状態を表現する空間。
2. アクション空間：可能な制御アクションの空間。
3. 報酬関数：制御アクションの良さを評価する関数。
4. 学習アルゴリズム：経験に基づいて制御戦略を改善するアルゴリズム。
5. 探索戦略：新しい制御戦略を探索するための戦略。

[0255] フィードバック制御ループは、測定されたプラズマ条件と目標値との偏差に基づいて、制御アクションを生成する。制御ループは、階層的に構成されており、異なる時間スケールと制御目標に対応している。高速ループ (<1ms) は、プラズマ位置と形状の制御を担当する。中速ループ (1~10ms) は、プラズマ電流、密度、および加熱電力の制御を担当する。低速ループ (>10ms) は、プラズマ性能と機器保護の最適化を担当する。

[0256] フィードバック制御ループは、以下の要素を含む：

1. 目標値生成：運転条件に応じた目標値を生成する。
2. 偏差計算：測定値と目標値の差を計算する。
3. 制御アルゴリズム：偏差に基づいて制御アクションを生成するアルゴリズム。
4. アクチュエータ制御：制御アクションに基づいてアクチュエータを制御する。
5. フィードバック調整：制御性能に基づいて制御パラメータを調整する。

[0257] 高速制御ループは、以下の制御対象を担当する：

1. プラズマ位置：垂直位置、水平位置、およびセパトリティクス位置。
2. プラズマ形状：伸長率、三角度、および間隙。
3. MHD安定性：キンクモード、抵抗性壁モードなど。

[0258] 中速制御ループは、以下の制御対象を担当する：

1. プラズマ電流：総電流値と電流分布。
2. プラズマ密度：平均密度と密度分布。
3. 加熱電力：NBI電力、ICRH電力、およびECRH電力。
4. 不純物入射：放射冷却のための不純物ガス注入。

[0259] 低速制御ループは、以下の制御対象を担当する：

1. プラズマ性能：閉じ込め時間、ベータ値、および核融合出力。
2. 機器保護：表面温度、侵食率、および熱負荷。
3. 運転最適化：運転効率、燃料効率、およびエネルギー効率。
4. 運転シナリオ管理：運転フェーズの遷移と最適化。

[0260] 予測的制御機能は、プラズマ条件の変化を予測し、先行的に制御アクションを生成する。この機能は、物理モデルと機械学習モデルを組み合わせられて実装されている。物理モデルは、プラズマの基本的な振る舞いを記述し、機械学習モデルは、過去のデータに基づいてプラズマの応答を予測する。

[0261] 予測的制御機能は、以下の要素を含む：

1. 予測モデル：プラズマ条件の将来の変化を予測するためのモデル。
2. 応答予測：予測された条件に対するプラズマの応答を予測するためのモデル。
3. 先行制御：予測された応答に基づいて先行的に制御アクションを生成する機能。
4. 適応機能：予測精度に基づいてモデルを適応的に調整する機能。

[0262] 予測モデルは、以下の手法を組み合わせられて実装されている：

1. 物理モデル：プラズマの基本的な振る舞いを記述する微分方程式。
2. 簡略化モデル：計算効率のために簡略化された物理モデル。
3. 統計モデル：過去のデータに基づく統計的予測モデル。
4. 機械学習モデル：ニューラルネットワーク、ガウス過程回帰などの機械学習手法。

[0263] 応答予測は、以下の手法を組み合わせられて実装されている：

1. 線形応答モデル：小さな摂動に対する線形応答を予測するモデル。
2. 非線形応答モデル：大きな摂動に対する非線形応答を予測するモデル。
3. データ駆動モデル：過去のデータに基づいて応答を予測するモデル。
4. ハイブリッドモデル：物理モデルとデータ駆動モデルを組み合わせたモデル。

[0264] 先行制御は、以下の手法を組み合わせられて実装されている：

1. フィードフォワード制御：予測された外乱に対する先行的な補償。

2. モデル予測制御：将来の状態を予測し、最適な制御軌道を計算する制御。
3. 学習制御：過去の経験に基づいて制御戦略を改善する制御。
4. 適応制御：プラズマの応答に基づいて制御パラメータを適応的に調整する制御。

[0265] 異常検出システムは、プラズマ条件や機器状態の異常を検出し、適切な対応を開始する。異常検出は、統計的手法、パターン認識、および物理モデルに基づいて実装されている。検出された異常の重大度に応じて、警告、制御パラメータの調整、または緊急停止などの対応が選択される。

[0266] 異常検出システムは、以下の要素を含む：

1. 監視対象：プラズマパラメータ、機器状態、制御システム状態など。
2. 検出アルゴリズム：異常を検出するためのアルゴリズム。
3. 分類アルゴリズム：検出された異常の種類と重大度を分類するアルゴリズム。
4. 対応戦略：異常の種類と重大度に応じた対応戦略。
5. 報告機能：検出された異常を運転者に報告する機能。

[0267] 監視対象には、以下が含まれる：

1. プラズマパラメータ：電流、密度、温度、MHD活動、放射損失など。
2. 機器状態：表面温度、冷却水温度、機械的応力、電気的特性など。
3. 制御システム状態：センサー状態、アクチュエータ状態、計算機状態など。
4. 環境条件：真空度、中性粒子圧力、放射線レベルなど。

[0268] 検出アルゴリズムには、以下の手法が使用される：

1. 統計的手法：平均、分散、相関などの統計量に基づく検出。
2. モデルベース手法：物理モデルとの偏差に基づく検出。
3. 機械学習手法：教師あり学習、教師なし学習、半教師あり学習など。
4. ハイブリッド手法：複数の手法を組み合わせた検出。

[0269] 分類アルゴリズムには、以下の手法が使用される：

1. ルールベース分類：事前定義されたルールに基づく分類。
2. 決定木：階層的な決定規則に基づく分類。
3. サポートベクターマシン：特徴空間における分離超平面に基づく分類。
4. ニューラルネットワーク：多層ニューラルネットワークに基づく分類。

[0270] 対応戦略には、以下の種類がある：

1. 警告：運転者に警告を発し、注意を喚起する。
2. 制御調整：制御パラメータを調整し、異常を補正する。
3. 保護動作：機器を保護するための動作を開始する。
4. 緊急停止：重大な異常が検出された場合、プラズマを安全に終了させる。

[0271] 運転シナリオマネージャは、異なる運転フェーズ（プラズマ立ち上げ、電流上昇、加熱、定常運転、終了など）に対応した制御パラメータを管理する。各フェーズでは、最適な制御パラメータが自動的に選択され、スムーズな遷移が確保される。

[0272] 運転シナリオマネージャは、以下の要素を含む：

1. シナリオライブラリ：異なる運転シナリオに対応したパラメータセット。
2. フェーズ定義：各運転シナリオ内の異なるフェーズの定義。
3. 遷移条件：あるフェーズから次のフェーズへの遷移条件。
4. パラメータ調整：各フェーズでの制御パラメータの調整規則。

5. 最適化機能：運転経験に基づいてシナリオを最適化する機能。

[0273] シナリオライブラリには、以下の種類のシナリオが含まれる：

1. 標準運転シナリオ：通常の運転条件に対応したシナリオ。
2. 高性能シナリオ：高ベータ値、高閉じ込め時間などを狙ったシナリオ。
3. 長パルスシナリオ：長時間の安定運転を狙ったシナリオ。
4. 特殊シナリオ：特定の研究目的に対応したシナリオ。
5. 回復シナリオ：異常からの回復を狙ったシナリオ。

[0274] 各運転シナリオは、以下のフェーズから構成される：

1. 準備フェーズ：真空排気、壁コンディショニング、初期磁場設定など。
2. プラズマ立ち上げフェーズ：ガス注入、放電開始、初期プラズマ形成など。
3. 電流上昇フェーズ：プラズマ電流の増加、形状制御の開始など。
4. 加熱フェーズ：追加加熱の開始、密度上昇、温度上昇など。
5. 定常運転フェーズ：安定した高性能プラズマの維持。
6. 終了フェーズ：加熱の低減、電流の低減、安全な終了など。

[0275] 遷移条件は、以下の要素に基づいて定義される：

1. 時間条件：特定の時間経過後に遷移。
2. 状態条件：特定のプラズマ状態（電流、密度など）に達した後に遷移。
3. 性能条件：特定の性能指標（ベータ値、閉じ込め時間など）に達した後に遷移。
4. 安全条件：安全な運転条件が確保された後に遷移。
5. 運転者条件：運転者の指示に基づいて遷移。

[0276] パラメータ調整は、以下の方法で行われる：

1. スケジュールベース調整：事前定義されたスケジュールに基づく調整。
2. フィードバック調整：測定値と目標値の偏差に基づく調整。
3. 適応的調整：プラズマの応答に基づく適応的な調整。
4. 最適化ベース調整：性能指標を最大化するための最適化に基づく調整。
5. 学習ベース調整：過去の運転経験に基づく調整。

[0277] 機械学習最適化モジュールは、過去の運転データに基づいて制御パラメータを最適化する。このモジュールは、強化学習とベイズ最適化を組み合わせることで実装されており、プラズマ性能と機器保護のバランスを考慮した最適な制御戦略を学習する。

[0278] 機械学習最適化モジュールは、以下の要素を含む：

1. データ収集：過去の運転データを収集し、前処理する。
2. 特徴抽出：データから重要な特徴を抽出する。
3. モデル構築：抽出された特徴に基づいてモデルを構築する。
4. 最適化：構築されたモデルに基づいて制御パラメータを最適化する。
5. 検証：最適化された制御パラメータの性能を検証する。
6. 展開：検証された制御パラメータを実際の運転に展開する。

[0279] データ収集と前処理には、以下の手法が使用される：

1. データ選択：関連する運転データを選択する。
2. ノイズ除去：測定ノイズを除去する。
3. 正規化：異なるスケールのデータを正規化する。
4. 欠損値処理：欠損値を補間または除外する。

5. 外れ値処理：外れ値を検出し、処理する。

[0280] 特徴抽出には、以下の手法が使用される：

1. 物理ベース特徴：物理的に意味のある特徴を抽出する。
2. 統計ベース特徴：統計的に重要な特徴を抽出する。
3. 次元削減：主成分分析、t-SNEなどの次元削減手法。
4. 特徴選択：情報利得、相互情報量などに基づく特徴選択。
5. 特徴工学：既存の特徴から新しい特徴を作成する。

[0281] モデル構築には、以下の手法が使用される：

1. 回帰モデル：線形回帰、サポートベクター回帰、ガウス過程回帰など。
2. 分類モデル：ロジスティック回帰、サポートベクターマシン、決定木など。
3. ニューラルネットワーク：フィードフォワードネットワーク、リカレントネットワークなど。
4. アンサンブルモデル：ランダムフォレスト、勾配ブースティングなど。
5. 強化学習モデル：Q学習、ポリシー勾配法、アクター・クリティック法など。

[0282] 最適化には、以下の手法が使用される：

1. グリッドサーチ：パラメータ空間を均等に探索する。
2. ランダムサーチ：パラメータ空間をランダムに探索する。
3. ベイズ最適化：ガウス過程に基づく効率的な探索。
4. 進化的アルゴリズム：遺伝的アルゴリズム、進化戦略など。
5. 勾配ベース最適化：勾配降下法、ニュートン法など。

[0283] 検証には、以下の手法が使用される：

1. クロスバリデーション：データを分割して検証する。
2. ホールドアウト検証：独立したテストデータで検証する。
3. シミュレーション検証：シミュレーションで検証する。
4. 実験検証：実際の運転で検証する。
5. A/Bテスト：異なる制御パラメータを比較する。

[0284] 高速データ通信ネットワークは、各サブシステム間のデータと制御信号の交換を管理する。ネットワークは、高帯域幅、低遅延、および高信頼性を備えており、リアルタイム制御の要件を満たしている。通信プロトコルは、データの優先順位付けと再送機能を備えており、重要なデータの確実な伝送を保証する。

[0285] 高速データ通信ネットワークは、以下の要素を含む：

1. ネットワークハードウェア：スイッチ、ルーター、ケーブルなど。
2. ネットワークプロトコル：TCP/IP、UDP、リアルタイムプロトコルなど。
3. 通信ミドルウェア：メッセージキュー、発行-購読システムなど。
4. セキュリティ機能：認証、暗号化、アクセス制御など。
5. 監視機能：ネットワーク状態の監視と診断。

[0286] ネットワークの性能仕様は、以下の通りである：

1. 帯域幅：10Gbps以上（コアネットワーク）、1Gbps以上（エッジネットワーク）。
2. 遅延：1ms以下（リアルタイム制御）、10ms以下（非リアルタイム通信）。
3. ジッター：100 μ s以下（リアルタイム制御）、1ms以下（非リアルタイム通信）。
4. パケット損失率：10⁻⁹以下（リアルタイム制御）、10⁻⁶以下（非リアルタイム通信）。
5. 可用性：99.999%以上（リアルタイム制御）、99.9%以上（非リアルタイム通信）。

[0287] 通信プロトコルは、以下の機能を提供する：

1. 優先順位付け：データの重要度に応じた優先順位付け。
2. QoS保証：重要なデータの帯域幅と遅延の保証。
3. 再送機能：パケット損失時の再送。
4. フロー制御：送信側と受信側の速度の調整。
5. 輻輳制御：ネットワーク輻輳時の制御。

[0288] 冗長設計は、システムの信頼性を向上させるために採用されている。重要なコンポーネントは、複数の冗長ユニットで構成されており、一部が故障しても全体の機能は維持される。また、フェイルセーフ機構が実装されており、システム障害時にも安全な状態が確保される。

[0289] 冗長設計は、以下の要素を含む：

1. ハードウェア冗長：重要なハードウェアコンポーネントの冗長化。
2. ソフトウェア冗長：重要なソフトウェア機能の冗長化。
3. データ冗長：重要なデータの冗長化。
4. 通信冗長：通信経路の冗長化。
5. 電源冗長：電源システムの冗長化。

[0290] ハードウェア冗長は、以下の方法で実装されている：

1. 2重化：重要なコンポーネントを2つ用意し、一方が故障した場合に他方に切り替える。
2. 3重化：重要なコンポーネントを3つ用意し、多数決で正しい出力を決定する。
3. N+M冗長：N個の必要なコンポーネントに対してM個の予備を用意する。
4. ロードバランシング：複数のコンポーネントで負荷を分散し、一部が故障しても残りで処理を継続する。
5. ホットスタンバイ：予備のコンポーネントを常に動作させ、即座に切り替えられるようにする。

[0291] ソフトウェア冗長は、以下の方法で実装されている：

1. 多重処理：同じ処理を複数のプロセスで実行し、結果を比較する。
2. 多様化設計：同じ機能を異なるアルゴリズムで実装し、共通モード故障を防止する。
3. チェックポイント：定期的に処理状態を保存し、障害時に復元する。
4. ウォッチドッグ：プロセスの動作を監視し、異常時に再起動する。
5. グレースフルデグラデーション：一部の機能が故障しても、重要な機能は維持する。

[0292] フェイルセーフ機構は、以下の方法で実装されている：

1. 安全状態定義：各コンポーネントの安全状態を定義する。
2. 故障検出：コンポーネントの故障を迅速に検出する。
3. 安全遷移：故障検出時に安全状態に遷移する。
4. 独立保護：重要な保護機能は独立したシステムで実装する。
5. フォールバック：高度な機能が故障した場合に、基本的な機能にフォールバックする。

[0293] 階層的制御構造は、複雑なシステムの管理を容易にするために採用されている。制御システムは、低レベル制御（ハードウェア制御）、中間レベル制御（サブシステム制御）、および高レベル制御（システム全体の最適化）の三層で構成されている。各層は、異なる時間スケールと抽象度で動作し、全体として効率的な制御を実現する。

[0294] 階層的制御構造は、以下の層から構成される：

1. 低レベル制御層：ハードウェアの直接制御を担当する層。
2. 中間レベル制御層：サブシステムの制御を担当する層。
3. 高レベル制御層：システム全体の最適化を担当する層。

[0295] 低レベル制御層は、以下の機能を提供する：

1. ハードウェアインターフェース：ハードウェアとの直接的な通信。
2. 基本制御ループ：PID制御などの基本的な制御ループ。
3. 安全保護：ハードウェアの安全保護機能。
4. 診断機能：ハードウェアの状態診断。
5. 校正機能：センサーとアクチュエータの校正。

[0296] 中間レベル制御層は、以下の機能を提供する：

1. サブシステム制御：各サブシステムの制御。
2. サブシステム間調整：サブシステム間の調整と協調。
3. 状態推定：サブシステムの状態推定。
4. 異常検出：サブシステムの異常検出。
5. 適応制御：サブシステムの適応制御。

[0297] 高レベル制御層は、以下の機能を提供する：

1. システム最適化：システム全体の性能最適化。
2. 運転シナリオ管理：運転シナリオの選択と管理。
3. 資源割り当て：システム資源の最適割り当て。
4. 長期計画：長期的な運転計画の策定。
5. 学習と改善：運転経験に基づく学習と改善。

[0298] 層間の通信は、以下の方法で行われる：

1. コマンド伝達：上位層から下位層へのコマンド伝達。
2. 状態報告：下位層から上位層への状態報告。
3. イベント通知：重要なイベントの通知。
4. 設定変更：制御パラメータの設定変更。
5. 診断情報：診断情報の交換。

[0299] 運転者インターフェースは、運転者にシステムの状態と制御オプションを提示する。インターフェースは、直感的なグラフィカルユーザーインターフェース（GUI）を提供し、リアルタイムデータの可視化、制御パラメータの調整、およびアラーム管理をサポートする。また、高度な視覚化ツールが提供されており、プラズマの三次元構造や壁負荷の分布などを視覚的に理解することができる。

[0300] 運転者インターフェースは、以下の要素を含む：

1. 制御パネル：システムの制御と監視のためのパネル。
2. データ表示：リアルタイムデータの表示。
3. アラーム管理：アラームの表示と管理。
4. 視覚化ツール：データの視覚的表示。
5. 設定管理：システム設定の管理。
6. ログ表示：システムログの表示。
7. ヘルプシステム：運転者支援のためのヘルプシステム。

[0301] 制御パネルは、以下の機能を提供する：

1. システム制御：システムの起動、停止、モード切替などの制御。
2. サブシステム制御：各サブシステムの個別制御。
3. パラメータ調整：制御パラメータの調整。
4. シナリオ選択：運転シナリオの選択。

5. 緊急制御：緊急時の制御オプション。

[0302] データ表示は、以下の機能を提供する：

1. リアルタイムデータ表示：現在のシステム状態の表示。
2. 履歴データ表示：過去のデータの表示。
3. トレンド表示：データの時間変化の表示。
4. 比較表示：異なるデータの比較表示。
5. 統計表示：データの統計情報の表示。

[0303] アラーム管理は、以下の機能を提供する：

1. アラーム表示：現在のアラームの表示。
2. アラーム履歴：過去のアラームの履歴表示。
3. アラーム確認：アラームの確認と対応。
4. アラーム設定：アラーム条件の設定。
5. アラームフィルタリング：アラームの優先度に基づくフィルタリング。

[0304] 視覚化ツールは、以下の機能を提供する：

1. 2D/3D表示：データの2次元/3次元表示。
2. カラーマッピング：データ値に応じたカラー表示。
3. 等高線表示：等値線による表示。
4. ベクトル表示：ベクトル場の表示。
5. アニメーション：時間変化のアニメーション表示。

[0305] データ記録システムは、運転中のすべてのデータを記録し、後分析のために保存する。記録されるデータには、プラズマパラメータ、制御入力、機器状態、およびアラーム履歴が含まれる。データは、構造化されたデータベースに格納され、効率的な検索と分析が可能となっている。

[0306] データ記録システムは、以下の要素を含む：

1. データ収集：各サブシステムからのデータ収集。
2. データ前処理：収集されたデータの前処理。
3. データ格納：前処理されたデータの格納。
4. データ管理：格納されたデータの管理。
5. データアクセス：格納されたデータへのアクセス。

[0307] データ収集は、以下の方法で行われる：

1. 定期収集：定期的な間隔でのデータ収集。
2. イベント駆動収集：特定のイベント発生時のデータ収集。
3. 条件付き収集：特定の条件を満たす場合のデータ収集。
4. 高速収集：重要なイベント前後の高速データ収集。
5. 連続収集：連続的なデータ収集。

[0308] データ前処理は、以下の方法で行われる：

1. フィルタリング：ノイズ除去と異常値処理。
2. 圧縮：データ量の削減。
3. 集約：データの集約と要約。
4. 変換：データ形式の変換。
5. 正規化：データの正規化。

[0309] データ格納は、以下の方法で行われる：

1. 階層的格納：データの重要度に応じた階層的格納。
2. 分散格納：データの分散格納による可用性向上。
3. 冗長格納：重要なデータの冗長格納。
4. 圧縮格納：データ圧縮による格納効率の向上。
5. 暗号化格納：機密データの暗号化格納。

[0310] 性能分析モジュールは、記録されたデータを分析し、システムの性能を評価する。分析には、統計的手法、機械学習、および物理モデルが使用される。分析結果は、システムの改善点を特定し、制御パラメータの最適化に使用される。

[0311] 性能分析モジュールは、以下の要素を含む：

1. データ抽出：分析対象データの抽出。
2. データ分析：抽出されたデータの分析。
3. 性能評価：分析結果に基づく性能評価。
4. 改善提案：性能向上のための改善提案。
5. 結果報告：分析結果の報告。

[0312] データ分析には、以下の手法が使用される：

1. 統計分析：平均、分散、相関などの統計量の計算。
2. 時系列分析：トレンド、周期性、異常の検出。
3. 回帰分析：変数間の関係の分析。
4. 分類分析：データの分類とパターン認識。
5. クラスタリング：類似データのグループ化。
6. 次元削減：高次元データの低次元表現。
7. 異常検出：異常パターンの検出。

[0313] 性能評価には、以下の指標が使用される：

1. プラズマ性能指標：閉じ込め時間、ベータ値、核融合出力など。
2. 制御性能指標：追従性能、外乱抑制、堅牢性など。
3. 機器性能指標：寿命、信頼性、効率など。
4. 運転効率指標：稼働率、燃料効率、エネルギー効率など。
5. 安全性指標：異常発生率、回復時間、影響範囲など。

[0314] 改善提案には、以下の種類がある：

1. パラメータ調整：制御パラメータの最適化。
2. アルゴリズム改善：制御アルゴリズムの改善。
3. ハードウェア改善：ハードウェアの改善または交換。
4. 運転手順改善：運転手順の最適化。
5. 保守計画改善：保守計画の最適化。

[0315] 自己学習機能は、運転経験に基づいてシステムの性能を向上させる。この機能は、強化学習とベイズ最適化を組み合わせることで実装されており、プラズマ性能と機器保護のバランスを考慮した最適な制御戦略を学習する。学習結果は、制御パラメータの更新と制御アルゴリズムの改善に使用される。

[0316] 自己学習機能は、以下の要素を含む：

1. 経験収集：運転経験の収集と格納。
2. 知識抽出：収集された経験からの知識抽出。

3. モデル更新：抽出された知識に基づくモデル更新。
4. 戦略改善：更新されたモデルに基づく制御戦略の改善。
5. 検証と展開：改善された戦略の検証と展開。

[0317] 経験収集は、以下の情報を対象とする：

1. 状態情報：プラズマと機器の状態情報。
2. 制御アクション：実行された制御アクション。
3. 結果情報：制御アクションの結果。
4. 性能指標：制御の性能指標。
5. 異常情報：発生した異常とその対応。

[0318] 知識抽出には、以下の手法が使用される：

1. 統計的学習：データの統計的パターンの学習。
2. 強化学習：行動と報酬の関係の学習。
3. 教師あり学習：入力と出力の関係の学習。
4. 教師なし学習：データの構造とパターンの学習。
5. 転移学習：異なる状況間での知識の転移。

[0319] モデル更新には、以下の手法が使用される：

1. パラメータ更新：モデルパラメータの更新。
2. 構造更新：モデル構造の更新。
3. アンサンブル更新：複数モデルの組み合わせの更新。
4. 適応更新：運転条件に応じた適応的更新。
5. 増分更新：新しいデータに基づく増分的更新。

[0320] 戦略改善には、以下の手法が使用される：

1. 方策改善：制御方策の改善。
2. 価値関数改善：状態価値関数の改善。
3. 探索戦略改善：新しい制御戦略の探索方法の改善。
4. リスク管理改善：リスク評価と管理の改善。
5. 適応能力改善：変化する条件への適応能力の改善。

【実施形態2】

[0321] 本実施形態では、システムの運転原理について説明する。

【間隙最適化】

[0322] 適応型ダイバータ-リミッタハイブリッドシステムの主要な運転原理の一つは、セパトリクス-リミッタ間隙 (d) の動的最適化である。この原理は、間隙が粒子フラックスと材料侵食に大きな影響を与えるという実験的知見に基づいている。

[0323] プラズマ立ち上げ時には、リミッタセグメントはプラズマに近い位置 ($d = 10 \sim 20\text{mm}$) に配置される。この配置は、初期プラズマの安定性を確保し、制御された立ち上げを実現する。リミッタは、プラズマが十分に形成されるまで、プラズマの主要な接触点として機能する。

[0324] プラズマ立ち上げ時のリミッタ配置は、以下の要素を考慮して最適化される：

1. プラズマ形成：初期プラズマの形成を支援する配置。
2. 位置制御：初期プラズマの位置を制御する配置。
3. 不純物制御：初期段階での不純物混入を最小化する配置。

4. 熱負荷分散：初期プラズマからの熱負荷を分散させる配置。
5. 安全性：異常時の安全性を確保する配置。

[0325] 立ち上げ時のリミッタ位置は、以下の手順で制御される：

1. 初期位置設定：予め設定された初期位置にリミッタを配置する。
2. 放電開始：初期ガス注入と放電開始。
3. プラズマ形成監視：初期プラズマの形成を監視する。
4. 位置調整：プラズマの形成状況に応じてリミッタ位置を微調整する。
5. 安定化：プラズマが安定するまでリミッタ位置を維持する。

[0326] 電流上昇フェーズでは、プラズマがダイバータ構成に移行するにつれて、リミッタセグメントは徐々に引き込まれる（ $d=20\sim 40\text{mm}$ ）。この段階では、リミッタはまだバックアップの役割を果たし、プラズマの位置制御を支援する。

[0327] 電流上昇フェーズのリミッタ配置は、以下の要素を考慮して最適化される：

1. プラズマ安定性：電流上昇中のプラズマ安定性を確保する配置。
2. 形状制御：プラズマ形状の変化に対応する配置。
3. 熱負荷管理：電流上昇に伴う熱負荷の増加に対応する配置。
4. 不純物制御：電流上昇中の不純物混入を制御する配置。
5. 遷移準備：ダイバータ構成への遷移を準備する配置。

[0328] 電流上昇時のリミッタ位置は、以下の手順で制御される：

1. 初期引き込み：プラズマ電流の上昇開始と共にリミッタを徐々に引き込む。
2. 電流監視：プラズマ電流の上昇を監視する。
3. 形状監視：プラズマ形状の変化を監視する。
4. 位置調整：電流と形状の変化に応じてリミッタ位置を調整する。
5. ダイバータ遷移：X点形成とダイバータ構成への遷移に合わせてリミッタをさらに引き込む。

[0329] 低出力L-モード運転時には、リミッタセグメントは中間位置（ $d=40\sim 60\text{mm}$ ）に保持される。この位置では、リミッタへの粒子フラックスが適度に低減され、侵食が抑制される。同時に、リミッタはプラズマの急激な変位に対するバックアップとして機能する。

[0330] L-モード運転時のリミッタ配置は、以下の要素を考慮して最適化される：

1. 侵食制御：リミッタの侵食を制御する配置。
2. バックアップ機能：プラズマ変位時のバックアップとしての機能を確保する配置。
3. 熱負荷分散：ダイバータと第一壁の間で熱負荷を適切に分散させる配置。
4. 不純物制御：リミッタからの不純物発生を制御する配置。
5. 運転柔軟性：異なるL-モード運転条件に対応する柔軟性を持つ配置。

[0331] L-モード運転時のリミッタ位置は、以下の手順で制御される：

1. 基本位置設定：L-モード運転に適した基本位置を設定する。
2. プラズマ条件監視：プラズマ電流、密度、加熱電力などの条件を監視する。
3. 粒子フラックス監視：リミッタへの粒子フラックスを監視する。
4. 侵食率監視：リミッタの侵食率を監視する。
5. 位置調整：監視結果に基づいてリミッタ位置を調整する。

[0332] 高出力運転時（特にH-モード）では、リミッタセグメントはさらに引き込まれ（ $d=60\sim 80\text{mm}$ ）、プラズマとの直接接触を最小化する。この配置は、高エネルギープラズマによる侵食を防止し、リミッタの寿

命を延長する。ただし、エッジ局在化モード（ELM）などの過渡現象に対応するために、リミッタは迅速に前進できる状態を維持する。

[0333] H-モード運転時のリミッタ配置は、以下の要素を考慮して最適化される：

1. 侵食最小化：高エネルギープラズマによる侵食を最小化する配置。
2. ELM対応：ELMによる熱負荷に対応する配置。
3. 高ベータ対応：高ベータプラズマの変位に対応する配置。
4. 不純物遮蔽：リミッタからの不純物がコアプラズマに混入するのを防止する配置。
5. 迅速応答：異常時に迅速に応答できる配置。

[0334] H-モード運転時のリミッタ位置は、以下の手順で制御される：

1. 引き込み位置設定：H-モード運転に適した引き込み位置を設定する。
2. ELM監視：ELMの振幅と頻度を監視する。
3. プラズマ安定性監視：プラズマの安定性を監視する。
4. 位置調整：ELMとプラズマ安定性に応じてリミッタ位置を調整する。
5. 緊急対応：大きなELMや不安定性発生時に迅速に対応する。

[0335] プラズマ終了フェーズでは、リミッタセグメントは再び前進し（ $d = 30 \sim 50 \text{mm}$ ）、プラズマの制御された終了を支援する。この配置は、プラズマ崩壊時の熱負荷を分散させ、ダイバータへの集中的な負荷を防止する。

[0336] プラズマ終了時のリミッタ配置は、以下の要素を考慮して最適化される：

1. 熱負荷分散：終了時の熱負荷を分散させる配置。
2. 位置制御：プラズマ電流減少時の位置制御を支援する配置。
3. 崩壊緩和：プラズマ崩壊の影響を緩和する配置。
4. 逃走電子制御：逃走電子の発生と影響を制御する配置。
5. 安全終了：プラズマの安全な終了を確保する配置。

[0337] プラズマ終了時のリミッタ位置は、以下の手順で制御される：

1. 前進開始：終了シーケンス開始と共にリミッタを前進させ始める。
2. 電流監視：プラズマ電流の減少を監視する。
3. 位置監視：プラズマ位置の変化を監視する。
4. 位置調整：電流と位置の変化に応じてリミッタ位置を調整する。
5. 最終位置：プラズマ消滅後、リミッタを安全な位置に戻す。

[0338] 間隙最適化は、プラズマ条件のリアルタイムモニタリングに基づいて行われる。特に、プラズマ密度、温度、電流、および加熱電力の変化に応じて、最適な間隙が計算され、リミッタ位置が調整される。例えば、プラズマ密度が増加すると、粒子フラックスが増加するため、リミッタはより引き込まれる。

[0339] 間隙最適化アルゴリズムは、以下の入力を考慮する：

1. プラズマ電流：プラズマ電流値とその分布。
2. プラズマ密度：平均密度と密度分布。
3. プラズマ温度：電子温度と温度分布。
4. 加熱電力：NBI電力、ICRH電力、およびその分布。
5. プラズマ形状：伸長率、三角度、およびセパラトリクス位置。
6. MHD活動：ELM、鋸歯状振動、ティアリングモードなど。
7. 粒子フラックス：測定された粒子フラックス。
8. 侵食率：測定された侵食率。

[0340] これらの入力に基づいて、以下の経験的スケーリング則が使用される：

1. 間隙とフラックスの関係： $F(d) = F(0) \exp(-d/\lambda F)$ 、ここで $F(d)$ は間隙 d でのフラックス、 $F(0)$ はセパトリクスでのフラックス、 λF はフラックス減衰長である。典型的には、 $\lambda F = 20 \sim 30 \text{mm}$ である。
2. 磁場強度とフラックスの関係： $F \propto BT^{-(1.5)}$ 、ここで F はフラックス、 BT は磁場強度である。
3. プラズマ密度とフラックスの関係： $F \propto \langle n_e \rangle^{(1.7 \sim 3)}$ 、ここで F はフラックス、 $\langle n_e \rangle$ は平均プラズマ密度である。
4. 加熱電力とフラックスの関係： $F \propto P^{0.5}$ (NBI加熱) または $F \propto P^{0.7}$ (ICRH加熱)、ここで F はフラックス、 P は加熱電力である。
5. 侵食率とフラックスの関係： $Y \propto Te^{0.5} \propto F^{0.3}$ 、ここで Y は侵食率、 Te は電子温度、 F はフラックスである。

[0341] 最適間隙の計算は、以下の手順で行われる：

1. プラズマ条件の測定：現在のプラズマ条件を測定する。
2. フラックス予測：経験的スケーリング則に基づいて、異なる間隙でのフラックスを予測する。
3. 侵食率予測：予測されたフラックスに基づいて、侵食率を予測する。
4. 目標設定：許容される侵食率と必要なバックアップ機能に基づいて、目標間隙を設定する。
5. 位置指令：目標間隙を実現するためのリミッタ位置指令を生成する。

【磁場利用】

[0342] 適応型ダイバータ-リミッタハイブリッドシステムの第二の運転原理は、磁場強度とプラズマ電流の最適利用である。この原理は、高磁場と高電流がプラズマの垂直輸送を低減し、壁への粒子フラックスを減少させるという実験的知見に基づいている。

[0343] システムは、可能な限り高い磁場強度 ($BT > 3T$) とプラズマ電流 ($IP > 2MA$) での運転を優先する。これらの条件下では、スクレイプオフ層 (SOL) の幅が狭くなり、粒子とエネルギーの輸送が磁力線に沿った方向 (ダイバータへ) に集中する。その結果、リミッタや第一壁への負荷が低減される。

[0344] 高磁場・高電流運転の利点は、以下の通りである：

1. 垂直輸送の低減：磁力線に垂直方向の輸送が低減され、壁への粒子フラックスが減少する。
2. SOL幅の減少：スクレイプオフ層の幅が狭くなり、熱と粒子の輸送が磁力線に沿った方向に集中する。
3. プラズマ安定性の向上：プラズマの安定性が向上し、異常輸送が低減される。
4. 閉じ込め性能の向上：エネルギーと粒子の閉じ込め性能が向上し、コアプラズマの性能が向上する。
5. ダイバータ効率の向上：ダイバータへの熱と粒子の輸送効率が向上し、ダイバータの機能が最適化される。

[0345] 高磁場・高電流運転の課題は、以下の通りである：

1. コイル負荷：高磁場と高電流はコイルに高い機械的応力と熱負荷を与える。
2. 電源要件：高磁場と高電流は大きな電源容量を必要とする。
3. ディスラプションリスク：高電流プラズマはディスラプション時に大きな電磁力を生じる。
4. 熱負荷集中：SOL幅の減少は、ダイバータへの熱負荷集中を増加させる可能性がある。
5. 運転柔軟性：高磁場・高電流運転は、運転パラメータの調整範囲を制限する可能性がある。

[0346] これらの課題に対応するため、システムは以下の戦略を採用している：

1. コイル設計最適化：高磁場と高電流に耐える強固なコイル設計。
2. 電源最適化：効率的な電源システムと電力管理。
3. ディスラプション緩和：ディスラプション予測と緩和システム。
4. 熱負荷管理：ダイバータの高熱流束処理能力と放射冷却。
5. 適応制御：運転条件に応じた磁場と電流の適応的調整。

[0347] 磁場配位は、セパトロリクス形状と位置を最適化するように制御される。特に、セパトロリクスとリミッタの間の距離は、プラズマ条件に応じて動的に調整される。例えば、高ベータプラズマでは、セパトロリクスの外側シフトが予測されるため、事前にセパトロリクス位置を調整して、リミッタとの適切な間隙を維持する。

[0348] 磁場配位の最適化は、以下の要素を考慮して行われる：

1. セパトロリクス位置：リミッタとの適切な間隙を維持するセパトロリクス位置。
2. X点位置：ダイバータ性能を最適化するX点位置。
3. 三角度：プラズマ安定性と閉じ込めを最適化する三角度。
4. 伸長率：プラズマ性能と安定性を最適化する伸長率。
5. 磁気シア：MHD安定性を最適化する磁気シア。
6. 安全係数分布：プラズマ安定性と閉じ込めを最適化する安全係数分布。

[0349] セパトロリクス位置の制御は、以下の手順で行われる：

1. 目標位置設定：プラズマ条件に応じた目標セパトロリクス位置を設定する。
2. 磁気平衡計算：目標位置を実現するための磁場配位を計算する。
3. コイル電流計算：磁場配位を実現するためのコイル電流を計算する。
4. 電流制御：計算されたコイル電流を実現するための電源制御。
5. 位置監視：実際のセパトロリクス位置を監視し、必要に応じて調整する。

[0350] 磁場強度とプラズマ電流は、運転シナリオに応じて最適化される。例えば、高性能H-モード運転では、最大の磁場強度と電流が使用される。一方、長パルス運転や低活性化実験では、中程度の磁場強度と電流が選択され、その代わりにリミッタ位置が調整される。

[0351] 運転シナリオに応じた磁場と電流の最適化は、以下の要素を考慮して行われる：

1. 運転目標：核融合出力、閉じ込め時間、安定性などの運転目標。
2. 運転制約：コイル電流限界、電源容量、熱負荷限界などの運転制約。
3. プラズマ条件：密度、温度、ベータ値などのプラズマ条件。
4. 安全裕度：ディスラプションや不安定性に対する安全裕度。
5. 運転効率：電力消費、パルス長などの運転効率。

[0352] 高性能H-モード運転では、以下の磁場と電流の設定が使用される：

1. 高磁場強度：最大許容磁場強度（例：3~5T）。
2. 高プラズマ電流：最大許容プラズマ電流（例：2~4MA）。
3. 最適化された安全係数：MHD安定性を最適化する安全係数（例： $q_{95} = 3 \sim 4$ ）。
4. 高三角度：ELM制御と閉じ込め向上のための高三角度（例： $\delta = 0.4 \sim 0.5$ ）。
5. 最適化された伸長率：プラズマ性能を最適化する伸長率（例： $\kappa = 1.7 \sim 1.9$ ）。

[0353] 長パルス運転では、以下の磁場と電流の設定が使用される：

1. 中程度の磁場強度：コイル発熱を制限する磁場強度（例：2.5~3.5T）。
2. 中程度のプラズマ電流：電源負荷を制限するプラズマ電流（例：1.5~2.5MA）。
3. やや高い安全係数：長時間安定性のための安全係数（例： $q_{95} = 4 \sim 5$ ）。
4. 中程度の三角度：長時間安定性のための三角度（例： $\delta = 0.3 \sim 0.4$ ）。
5. 最適化された伸長率：長時間安定性のための伸長率（例： $\kappa = 1.6 \sim 1.8$ ）。

[0354] 磁場配位の制御は、プラズマの安定性と両立するように設計されている。特に、プラズマのベータ限界、キंक安定性、およびバルーニング安定性を考慮して、最適な磁場配位が選択される。例えば、高ベータ運転では、セパトロリクスの三角度が増加され、プラズマの安定性が向上する。

[0355] プラズマ安定性を考慮した磁場配位の最適化は、以下の要素を含む：

1. 理想MHD安定性：キンクモード、バルーニングモードなどの理想MHD不安定性に対する安定性。
2. 抵抗性MHD安定性：ティアリングモード、新古典ティアリングモードなどの抵抗性MHD不安定性に対する安定性。
3. 垂直安定性：垂直変位イベント（VDE）に対する安定性。
4. エッジ安定性：エッジ局在化モード（ELM）に対する安定性。
5. 運動論的安定性：高エネルギー粒子駆動モードに対する安定性。

[0356] 高ベータ運転のための磁場配位最適化は、以下の手順で行われる：

1. 安定性限界計算：現在のプラズマ条件に対する安定性限界を計算する。
2. 配位最適化：安定性限界を最大化する磁場配位を計算する。
3. 圧力分布最適化：安定性を最大化する圧力分布を実現するための加熱分布を計算する。
4. 電流分布最適化：安定性を最大化する電流分布を実現するための電流駆動分布を計算する。
5. 能動的安定化：残存する不安定モードを能動的に安定化するための制御入力を計算する。

[0357] 磁場利用の最適化は、プラズマ条件のリアルタイムモニタリングに基づいて行われる。特に、プラズマの圧力分布、電流分布、および不安定性の前兆に応じて、磁場配位が調整される。例えば、MHD不安定性の前兆が検出された場合、磁場配位が微調整され、安定性が向上する。

[0358] リアルタイム磁場最適化は、以下の手順で行われる：

1. プラズマ状態監視：プラズマの圧力分布、電流分布、MHD活動などを監視する。
2. 安定性評価：現在のプラズマ状態の安定性を評価する。
3. 不安定性予測：不安定性の発生を予測する。
4. 配位調整計算：安定性を向上させるための磁場配位調整を計算する。
5. 制御実行：計算された調整を実行する。

[0359] MHD不安定性に対する磁場調整の例：

1. 鋸歯状振動： $q=1$ 面の位置を調整して、鋸歯状振動の振幅と頻度を制御する。
2. ネオクラシカルティアリングモード（NTM）：磁気シアを調整して、NTMの成長を抑制する。
3. エッジ局在化モード（ELM）：三角度と磁気シアを調整して、ELMの振幅と頻度を制御する。
4. 抵抗性壁モード（RWM）：プラズマ回転を維持し、能動的フィードバック制御を適用する。
5. 垂直変位イベント（VDE）：垂直位置制御を強化し、VDEの発生を防止する。

【加熱方法管理】

[0360] 適応型ダイバータ-リミッタハイブリッドシステムの第三の運転原理は、プラズマ加熱方法の最適管理である。この原理は、異なる加熱方法がプラズマ-壁相互作用に異なる影響を与えるという実験的知見に基づいている。

[0361] システムは、可能な限り、壁侵食を低減するためにイオンサイクロトロン共鳴加熱（ICRH）よりも中性粒子ビーム入射（NBI）加熱を優先的に使用する。これは、ICRHが同等の電力でもNBIよりも2〜3倍高い壁侵食を引き起こすという観察に基づいている。ICRHによる高い侵食率は、RF増強シース電位によるイオンエネルギーの増加に起因している。

[0362] NBI加熱の利点は、以下の通りである：

1. 低い壁侵食：ICRHと比較して壁侵食率が低い。
2. 効率的な中心加熱：プラズマ中心部を効率的に加熱できる。
3. 運動量入力：プラズマに運動量を与え、回転を駆動できる。
4. 電流駆動：非誘導電流を駆動できる。

5. 粒子供給：燃料粒子を供給できる。

[0363] NBI加熱の課題は、以下の通りである：

1. 高エネルギー粒子損失：高エネルギー粒子の軌道損失が発生する可能性がある。
2. シャイン・スルー：低密度プラズマでのビーム透過による第一壁損傷リスク。
3. 中性粒子再循環：壁からの中性粒子再循環による密度制御の困難さ。
4. 高Z不純物蓄積：中心加熱による高Z不純物の中心蓄積。
5. 機器寿命：イオン源とビームラインの寿命制限。

[0364] ICRH加熱の利点は、以下の通りである：

1. 局所的な加熱制御：共鳴層の位置を制御することで、加熱分布を調整できる。
2. 少数イオン加熱：少数イオン種を選択的に加熱できる。
3. 運動量入力なし：プラズマ回転に影響を与えない。
4. 高密度プラズマ加熱：高密度プラズマでも効率的に加熱できる。
5. 長寿命機器：アンテナの寿命が比較的長い。

[0365] ICRH加熱の課題は、以下の通りである：

1. 高い壁侵食：RF増強シース電位による高い壁侵食率。
2. アンテナ負荷結合：プラズマ条件によるアンテナ負荷結合の変動。
3. 不純物発生：アンテナ近傍での不純物発生。
4. エッジ加熱：エッジプラズマの過度の加熱。
5. RF損失：伝送系とアンテナでのRF損失。

[0366] ICRHが必要な場合（例えば、プラズマ中心加熱や特定のイオン種の加熱など）、システムは自動的にリミッタ間隙を増加させる。具体的には、ICRH電力が1MW増加するごとに、リミッタ間隙が5～10mm増加される。これにより、ICRHによる増加した侵食が補償される。

[0367] ICRH使用時のリミッタ間隙調整は、以下の手順で行われる：

1. ICRH電力監視：ICRH電力レベルを監視する。
2. 侵食率予測：ICRH電力に基づいて侵食率の増加を予測する。
3. 間隙調整計算：予測された侵食率に基づいて必要な間隙増加を計算する。
4. リミッタ位置調整：計算された間隙を実現するためのリミッタ位置を調整する。
5. 効果監視：調整の効果を監視し、必要に応じて微調整する。

[0368] ICRH電力と間隙増加の関係は、以下の経験的スケーリングに基づいている：

1. 侵食率増加： $Y_{ICRH} \approx (2 \sim 3) \times Y_{NBI}$ 、ここで Y_{ICRH} はICRH加熱時の侵食率、 Y_{NBI} は同等の電力のNBI加熱時の侵食率である。
2. 間隙と侵食率の関係： $Y(d) \approx \exp(-d/\lambda Y)$ 、ここで $Y(d)$ は間隙 d での侵食率、 λY は侵食率減衰長である。典型的には、 $\lambda Y = 30 \sim 40 \text{mm}$ である。
3. 必要な間隙増加： $\Delta d_{ICRH} = \lambda Y \times \ln(Y_{ICRH}/Y_{NBI}) \approx \lambda Y \times \ln(2 \sim 3) \approx 20 \sim 40 \text{mm}$ 。

[0369] 加熱電力の分布は、プラズマ-壁相互作用を最小化するように最適化される。例えば、高電力運転では、NBI加熱とICRH加熱のバランスが調整され、壁侵食が最小化される。また、電力の時間変化率も制御され、急激な電力変化による過渡的な壁負荷が防止される。

[0370] 加熱電力分布の最適化は、以下の要素を考慮して行われる：

1. 壁侵食最小化：壁侵食を最小化する加熱分布。
2. プラズマ性能最大化：核融合出力と閉じ込め性能を最大化する加熱分布。

3. MHD安定性：MHD安定性を最適化する加熱分布。
4. 不純物制御：不純物蓄積を最小化する加熱分布。
5. 運転効率：加熱効率を最大化する加熱分布。

[0371] 加熱電力分布の最適化手順は、以下の通りである：

1. 目標設定：壁侵食最小化とプラズマ性能最大化のバランスを考慮した目標を設定する。
2. 加熱シナリオ設計：目標を達成するための加熱シナリオを設計する。
3. NBI-ICRH配分：NBI加熱とICRH加熱の最適配分を決定する。
4. 空間分布最適化：加熱の空間分布を最適化する。
5. 時間変化率制御：加熱電力の時間変化率を制御する。

[0372] 加熱プロファイルは、プラズマ性能と壁負荷のバランスを考慮して最適化される。中心集中型の加熱プロファイルは、壁負荷を低減するが、プラズマの安定性が低下する可能性がある。一方、広がった加熱プロファイルは、プラズマの安定性を向上させるが、壁負荷が増加する可能性がある。システムは、これらのトレードオフを考慮して、最適な加熱プロファイルを選択する。

[0373] 加熱プロファイルの最適化は、以下の要素を考慮して行われる：

1. 中心加熱：核融合反応率を最大化するための中心加熱。
2. 勾配制御：温度勾配と密度勾配を制御するための加熱分布。
3. 安定性制御：MHD安定性を制御するための加熱分布。
4. エッジ加熱：エッジプラズマの特性を制御するための加熱分布。
5. 回転制御：プラズマ回転を制御するための加熱分布。

[0374] 中心集中型加熱プロファイルの特性：

1. 高い中心温度：核融合反応率の増加。
2. 強い温度勾配：輸送障壁の形成と閉じ込め向上。
3. 高Z不純物蓄積：中心部での高Z不純物の蓄積リスク。
4. 安定性低下：圧力駆動型不安定性のリスク増加。
5. 壁負荷低減：エッジプラズマへの直接加熱の低減。

[0375] 広がった加熱プロファイルの特性：

1. 中程度の中心温度：中程度の核融合反応率。
2. 緩やかな温度勾配：輸送障壁の弱化と中程度の閉じ込め。
3. 不純物制御：高Z不純物の中心蓄積の抑制。
4. 安定性向上：圧力駆動型不安定性のリスク低減。
5. 壁負荷増加：エッジプラズマへの直接加熱の増加。

[0376] 加熱方法の管理は、プラズマ条件と壁負荷のリアルタイムモニタリングに基づいて行われる。特に、壁での粒子フラックスと侵食率の測定に応じて、加熱方法と電力が調整される。例えば、特定のリミッタセグメントで高い侵食率が検出された場合、そのセグメントの位置が調整されるか、加熱方法が変更される。

[0377] リアルタイム加熱管理は、以下の手順で行われる：

1. 壁負荷監視：粒子フラックス、侵食率、表面温度などの壁負荷を監視する。
2. プラズマ性能監視：核融合出力、閉じ込め時間、安定性などのプラズマ性能を監視する。
3. 加熱効果評価：現在の加熱方法と電力の効果を評価する。
4. 加熱調整計算：壁負荷とプラズマ性能のバランスを最適化する加熱調整を計算する。
5. 調整実行：計算された調整を実行する。

[0378] 壁負荷に基づく加熱調整の例：

1. 高侵食率検出：特定のリミッタセグメントで高い侵食率が検出された場合、ICRH電力を低減するか、NBI加熱に切り替える。
2. 高表面温度検出：特定の領域で高い表面温度が検出された場合、加熱電力を低減するか、加熱分布を調整する。
3. ELM負荷増加：ELMによる熱負荷が増加した場合、加熱方法を調整してELM特性を制御する。
4. 不純物増加：プラズマ中の不純物濃度が増加した場合、加熱分布を調整して不純物輸送を制御する。
5. ホットスポット検出：壁のホットスポットが検出された場合、加熱電力を低減するか、プラズマ位置を調整する。

【密度制御戦略】

[0379] 適応型ダイバータ-リミッタハイブリッドシステムの第四の運転原理は、プラズマ密度の最適制御である。この原理は、プラズマ密度が粒子フラックスと侵食に非線形的な影響を与えるという実験的知見に基づいている。

[0380] システムは、性能と侵食のバランスをとるために最適な密度プロファイルを維持する。一般に、プラズマ密度の増加に伴い、壁への粒子フラックスは非線形的に増加する ($F \propto \langle n_e \rangle^{1.7-3}$)。一方、高密度プラズマでは、エッジ温度が低下し、イオン衝突エネルギーが減少するため、単位フラックスあたりの侵食率は低下する。

[0381] プラズマ密度と壁負荷の関係は、以下の通りである：

1. 粒子フラックス増加： $F \propto \langle n_e \rangle^{1.7-3}$ 、密度の増加に伴い、壁への粒子フラックスは非線形的に増加する。
2. 温度低下：高密度プラズマでは、エッジ温度が低下する ($T_e \propto \langle n_e \rangle^{-0.5 \sim -1}$)。
3. 衝突エネルギー低下：エッジ温度の低下に伴い、イオン衝突エネルギーが低下する ($E_i \propto T_e$)。
4. 単位フラックスあたりの侵食率低下：衝突エネルギーの低下に伴い、単位フラックスあたりの侵食率が低下する ($Y/F \propto E_i^{0.5}$)。
5. 総合効果：密度の増加に伴い、粒子フラックスは増加するが、単位フラックスあたりの侵食率は低下する。総合的な侵食率は、これらの効果のバランスによって決まる。

[0382] 密度制御は、ガスパフ、ペレット入射、および排気システムを組み合わせることで実現される。ガスパフは、プラズマ周辺部の密度を迅速に制御するために使用される。ペレット入射は、プラズマ中心部の密度を制御し、密度分布を最適化するために使用される。排気システムは、不純物の蓄積を防止し、密度の上限を制御するために使用される。

[0383] ガスパフシステムは、以下の特性を持つ：

1. 応答速度：10～100msの応答速度。
2. 制御範囲：0.1～10Pa·m³/sの流量範囲。
3. 空間分布：複数の注入位置による空間分布制御。
4. ガス種：水素同位体 (H、D、T) と不純物ガス (He、Ne、Arなど)。
5. 制御精度：±5%の流量制御精度。

[0384] ガスパフ制御は、以下の手順で行われる：

1. 密度監視：プラズマ密度と密度分布を監視する。
2. 目標設定：運転条件に応じた目標密度を設定する。
3. 流量計算：目標密度を達成するために必要なガス流量を計算する。
4. 注入位置選択：密度分布を最適化するための注入位置を選択する。
5. 流量制御：計算された流量でガスを注入する。

[0385] ペレット入射システムは、以下の特性を持つ：

1. ペレットサイズ：1～5mmのペレットサイズ。

2. 入射速度：100～1000m/sの入射速度。
3. 入射頻度：1～50Hzの入射頻度。
4. 入射角度：高磁場側入射と低磁場側入射。
5. ペレット材料：水素同位体（H、D、T）と不純物（Ne、Arなど）。

[0386] ペレット入射制御は、以下の手順で行われる：

1. 密度分布監視：プラズマ密度分布を監視する。
2. 目標設定：運転条件に応じた目標密度分布を設定する。
3. ペレットパラメータ計算：目標密度分布を達成するために必要なペレットパラメータ（サイズ、速度、頻度）を計算する。
4. 入射角度選択：密度分布を最適化するための入射角度を選択する。
5. ペレット入射：計算されたパラメータでペレットを入射する。

[0387] 排気システムは、以下の特性を持つ：

1. 排気速度：水素同位体に対して50～100m³/sの排気速度。
2. 位置：ダイバータ領域とリミッタ領域に配置。
3. 制御範囲：10～100%の排気速度制御範囲。
4. 選択性：異なる粒子種に対する選択的排気能力。
5. 応答速度：1～10sの応答速度。

[0388] 排気制御は、以下の手順で行われる：

1. 圧力監視：中性粒子圧力と組成を監視する。
2. 目標設定：運転条件に応じた目標圧力と組成を設定する。
3. 排気速度計算：目標圧力と組成を達成するために必要な排気速度を計算する。
4. ポンプ制御：計算された排気速度を実現するためのポンプ制御。
5. 効果監視：排気の効果を確認し、必要に応じて調整する。

[0389] 密度プロファイルは、プラズマ性能と壁負荷のバランスを考慮して最適化される。中心ピーク型の密度プロファイルは、核融合反応率を向上させるが、周辺部の安定性が低下する可能性がある。一方、平坦な密度プロファイルは、周辺部の安定性を向上させるが、核融合反応率が低下する可能性がある。システムは、これらのトレードオフを考慮して、最適な密度プロファイルを選択する。

[0390] 密度プロファイルの最適化は、以下の要素を考慮して行われる：

1. 核融合反応率：核融合反応率を最大化するための密度プロファイル。
2. 閉じ込め性能：エネルギーと粒子の閉じ込めを最適化するための密度プロファイル。
3. MHD安定性：MHD安定性を最適化するための密度プロファイル。
4. 壁負荷：壁負荷を最小化するための密度プロファイル。
5. 不純物制御：不純物蓄積を最小化するための密度プロファイル。

[0391] 中心ピーク型密度プロファイルの特性：

1. 高い核融合反応率：中心部での高い密度による核融合反応率の増加。
2. 良好な閉じ込め：密度勾配による閉じ込め向上。
3. 高Z不純物蓄積：中心部での高Z不純物の蓄積リスク。
4. 安定性低下：高い圧力勾配による不安定性リスクの増加。
5. 壁負荷低減：周辺密度の低減による壁負荷の低減。

[0392] 平坦な密度プロファイルの特性：

1. 中程度の核融合反応率：中程度の中心密度による中程度の核融合反応率。

2. 中程度の閉じ込め：弱い密度勾配による中程度の閉じ込め。
3. 不純物制御：高Z不純物の中心蓄積の抑制。
4. 安定性向上：弱い圧力勾配による安定性の向上。
5. 壁負荷増加：高い周辺密度による壁負荷の増加。

[0393] 密度制御は、プラズマ条件と壁負荷のリアルタイムモニタリングに基づいて行われる。特に、壁での粒子フラックスと侵食率の測定に応じて、密度レベルと分布が調整される。例えば、特定のリミッタセグメントで高い粒子フラックスが検出された場合、局所的なガスパフが調整されるか、リミッタ位置が変更される。

[0394] リアルタイム密度制御は、以下の手順で行われる：

1. 密度監視：プラズマ密度と密度分布を監視する。
2. 壁負荷監視：粒子フラックス、侵食率、表面温度などの壁負荷を監視する。
3. プラズマ性能監視：核融合出力、閉じ込め時間、安定性などのプラズマ性能を監視する。
4. 密度調整計算：壁負荷とプラズマ性能のバランスを最適化する密度調整を計算する。
5. 調整実行：ガスパフ、ペレット入射、排気を調整して、計算された密度調整を実行する。

[0395] 壁負荷に基づく密度調整の例：

1. 高粒子フラックス検出：特定のリミッタセグメントで高い粒子フラックスが検出された場合、局所的なガスパフを低減するか、リミッタ位置を調整する。
2. 高侵食率検出：特定の領域で高い侵食率が検出された場合、密度を増加させてエッジ温度を低下させる。
3. ELM負荷増加：ELMによる熱負荷が増加した場合、密度を調整してELM特性を制御する。
4. 不純物増加：プラズマ中の不純物濃度が増加した場合、密度分布を調整して不純物輸送を制御する。
5. 閉じ込め劣化：閉じ込め性能が低下した場合、密度分布を最適化して閉じ込めを向上させる。

[0396] 密度とリミッタ位置の間には、フィードバック制御ループが実装されている。プラズマ密度が増加すると、リミッタセグメントは自動的に引き込まれ、増加した粒子フラックスを補償する。具体的には、平均密度が10%増加するごとに、リミッタ間隙が5~10mm増加される。

[0397] 密度-リミッタ位置フィードバック制御は、以下の手順で行われる：

1. 密度変化検出：プラズマ密度の変化を検出する。
2. フラックス変化予測：密度変化に基づいて粒子フラックスの変化を予測する。
3. 間隙調整計算：予測されたフラックス変化に基づいて必要な間隙調整を計算する。
4. リミッタ位置調整：計算された間隙を実現するためのリミッタ位置を調整する。
5. 効果監視：調整の効果を監視し、必要に応じて微調整する。

[0398] 密度変化とリミッタ間隙調整の関係は、以下の経験的スケーリングに基づいている：

1. 密度とフラックスの関係： $F \propto \langle ne \rangle^\alpha$ 、ここでFは粒子フラックス、 $\langle ne \rangle$ は平均密度、 α は1.7~3の範囲の指数である。
2. 間隙とフラックスの関係： $F(d) \propto \exp(-d/\lambda F)$ 、ここでF(d)は間隙dでのフラックス、 λF はフラックス減衰長である。
3. 必要な間隙調整： $\Delta d = \lambda F \times \ln(F_2/F_1) = \lambda F \times \ln((ne_2/ne_1)^\alpha) = \alpha \times \lambda F \times \ln(ne_2/ne_1)$ 。
4. 具体的な調整量：平均密度が10%増加 ($ne_2/ne_1 = 1.1$) し、 $\alpha = 2$ 、 $\lambda F = 30\text{mm}$ の場合、 $\Delta d = 2 \times 30\text{mm} \times \ln(1.1) \approx 6\text{mm}$ 。

【同位体効果の管理】

[0399] 適応型ダイバータ-リミッタハイブリッドシステムの第五の運転原理は、プラズマ同位体効果の管理である。この原理は、異なる水素同位体（H、D、T）が壁侵食に異なる影響を与えるという実験的知見に基づいている。

[0400] システムは、同位体質量が壁材料の侵食収率に与える影響を考慮して最適化される。一般に、同位体質量が増加すると（H→D→T）、物理スパッタリング収率も増加する。具体的には、トリチウムプラズマは、水素プラズマと比較して約2倍高い侵食収率を示す。

[0401] 同位体質量と侵食収率の関係は、以下の通りである：

1. 物理スパッタリング：同位体質量の増加に伴い、物理スパッタリング収率が増加する。これは、重い同位体がより大きな運動量を持ち、表面原子により効率的にエネルギーを伝達するためである。
2. 化学支援物理スパッタリング（CAPS）：CAPSは同位体質量にあまり依存せず、ほぼ一定である。
3. 総合効果：同位体質量の増加に伴い、物理スパッタリングの寄与が増加し、総合的な侵食収率が増加する。
4. 定量的関係：トリチウムプラズマの侵食収率は水素プラズマの約2倍、重水素プラズマの約1.3倍である。

[0402] トリチウム運転時には、リミッタセグメントはより引き込まれた位置に配置される。具体的には、純粋なトリチウムプラズマでは、水素プラズマと比較して10～20mm大きな間隙が維持される。これにより、トリチウムによる増加した侵食が補償される。

[0403] トリチウム運転時のリミッタ配置は、以下の要素を考慮して最適化される：

1. 侵食補償：トリチウムによる増加した侵食を補償する配置。
2. トリチウム滞留：トリチウムの壁滞留を最小化する配置。
3. 中性子負荷：中性子による材料損傷を考慮した配置。
4. 放射化：材料の放射化を考慮した配置。
5. 安全性：トリチウム取り扱いの安全性を考慮した配置。

[0404] トリチウム運転時のリミッタ位置調整は、以下の手順で行われる：

1. 同位体組成監視：プラズマの同位体組成を監視する。
2. 侵食率予測：同位体組成に基づいて侵食率を予測する。
3. 間隙調整計算：予測された侵食率に基づいて必要な間隙調整を計算する。
4. リミッタ位置調整：計算された間隙を実現するためのリミッタ位置を調整する。
5. 効果監視：調整の効果を監視し、必要に応じて微調整する。

[0405] 同位体組成と間隙調整の関係は、以下の経験的スケーリングに基づいている：

1. 同位体と侵食率の関係： $Y_T \approx 2 \times Y_H$ 、 $Y_D \approx 1.5 \times Y_H$ 、ここで Y_T 、 Y_D 、 Y_H はそれぞれトリチウム、重水素、水素プラズマでの侵食率である。
2. 間隙と侵食率の関係： $Y(d) \approx \exp(-d/\lambda Y)$ 、ここで $Y(d)$ は間隙 d での侵食率、 λY は侵食率減衰長である。
3. 必要な間隙調整： $\Delta d_{T-H} = \lambda Y \times \ln(Y_T/Y_H) = \lambda Y \times \ln(2) \approx 0.7 \times \lambda Y$ 、 $\Delta d_{D-H} = \lambda Y \times \ln(Y_D/Y_H) = \lambda Y \times \ln(1.5) \approx 0.4 \times \lambda Y$ 。
4. 具体的な調整量： $\lambda Y = 30\text{mm}$ の場合、 $\Delta d_{T-H} \approx 21\text{mm}$ 、 $\Delta d_{D-H} \approx 12\text{mm}$ 。

[0406] 同位体混合比は、プラズマ性能と壁負荷のバランスを考慮して最適化される。例えば、D-T混合プラズマでは、核融合反応率を最大化するために約50:50の混合比が望ましいが、壁侵食の観点からは、D割合を増やすことが有利である。システムは、これらのトレードオフを考慮して、最適な混合比を選択する。

[0407] 同位体混合比の最適化は、以下の要素を考慮して行われる：

1. 核融合反応率：核融合反応率を最大化するための混合比。
2. 壁侵食：壁侵食を最小化するための混合比。

3. トリチウム在庫：トリチウム在庫を考慮した混合比。
4. 燃料効率：燃料効率を最大化するための混合比。
5. 運転柔軟性：運転柔軟性を確保するための混合比。

[0408] D-T混合プラズマの最適混合比は、以下の考慮事項に基づいて決定される：

1. 核融合反応率：D-T反応率は50:50の混合比で最大となる。
2. 壁侵食：Tの割合が増加すると壁侵食が増加する ($Y_T \approx 1.3 \times Y_D$)。
3. トリチウム在庫：Tの割合が増加するとトリチウム在庫が増加する。
4. 最適バランス：核融合反応率、壁侵食、トリチウム在庫のバランスを考慮した最適混合比。
5. 具体的な混合比：典型的には、40:60～60:40のD:T混合比が使用される。

[0409] 同位体効果の管理は、プラズマ条件と壁負荷のリアルタイムモニタリングに基づいて行われる。特に、壁での粒子フラックスと侵食率の測定に応じて、同位体混合比とリミッタ位置が調整される。例えば、トリチウム割合が増加した場合、リミッタセグメントは自動的に引き込まれ、増加した侵食を補償する。

[0410] リアルタイム同位体効果管理は、以下の手順で行われる：

1. 同位体組成監視：プラズマの同位体組成を監視する。
2. 壁負荷監視：粒子フラックス、侵食率、表面温度などの壁負荷を監視する。
3. プラズマ性能監視：核融合出力、閉じ込め時間、安定性などのプラズマ性能を監視する。
4. 調整計算：同位体組成、壁負荷、プラズマ性能に基づいて最適な調整を計算する。
5. 調整実行：同位体注入とリミッタ位置を調整して、計算された調整を実行する。

[0411] 同位体効果に基づく調整の例：

1. トリチウム割合増加：トリチウム割合が増加した場合、リミッタセグメントを引き込んで侵食を補償する。
2. 高侵食率検出：特定の領域で高い侵食率が検出された場合、同位体混合比を調整して侵食を低減する。
3. 核融合出力最適化：核融合出力を最大化するために、同位体混合比を最適化する。
4. トリチウム在庫管理：トリチウム在庫を管理するために、同位体混合比を調整する。
5. 運転モード切替：異なる運転モード間の切替時に、同位体混合比とリミッタ位置を調整する。

【実施形態3】

[0412] 本実施形態では、システムの技術的実装について説明する。

【精密アクチュエーションシステム】

[0413] 引込式分割リミッタ (RSL) の位置制御は、高精度のアクチュエーションシステムによって実現される。このシステムは、リミッタセグメントの位置をミリメートル精度で制御し、プラズマ条件の変化に迅速に対応する能力を持つ。

[0414] アクチュエータは、放射線環境下でも安定して動作するように設計されている。主要なアクチュエータタイプとして、 piezo電動式アクチュエータと電磁式アクチュエータが使用される。piezo電動式アクチュエータは、高精度 (<0.1mm) の位置制御を提供するが、移動範囲が限られている (<10mm)。電磁式アクチュエータは、より広い移動範囲 (>100mm) を提供するが、精度がやや低い (~0.5mm)。システムは、これらのアクチュエータを階層的に組み合わせて使用し、広範囲かつ高精度の位置制御を実現する。

[0415] piezo電動式アクチュエータの詳細仕様：

1. 動作原理：電圧を印加することでpiezo素子が伸縮する。
2. 移動範囲：0.1～10mm (積層型または増幅機構付き)。
3. 位置決め精度： $\pm 0.1\mu\text{m}$ 以内。
4. 応答速度：1ms以下。

5. 発生力：1～10kN。
6. 電圧要件：100～1000V。
7. 放射線耐性： 10^8 Gy以上。
8. 寿命： 10^9 サイクル以上。
9. 温度範囲：-20～150°C。
10. 真空適合性： 10^{-8} Pa以下の超高真空対応。

[0416] 電磁式アクチュエータの詳細仕様：

1. 動作原理：電磁力を利用してリニアモーションを生成する。
2. 移動範囲：10～200mm。
3. 位置決め精度： ± 0.5 mm以内。
4. 応答速度：10～100ms。
5. 発生力：0.5～5kN。
6. 電流要件：1～10A。
7. 放射線耐性： 10^7 Gy以上。
8. 寿命： 10^8 サイクル以上。
9. 温度範囲：-30～200°C。
10. 真空適合性： 10^{-7} Pa以下の高真空対応。

[0417] 階層的アクチュエーションシステムの構成：

1. 粗動機構：電磁式アクチュエータによる広範囲移動（10～200mm）。
2. 中動機構：小型電磁式アクチュエータによる中範囲移動（1～10mm）。
3. 微動機構：ピエゾ電動式アクチュエータによる微小移動（<1mm）。
4. 機械的連結：各アクチュエータ間の機械的連結と剛性確保。
5. 熱膨張補償：熱膨張による位置ずれを補償する機構。

[0418] 位置センサーは、リミッタセグメントの実際の位置をリアルタイムで測定する。センサーには、リニア可変差動トランス（LVDT）、光学エンコーダー、および磁気センサーが含まれる。これらのセンサーは、放射線環境下でも安定して動作し、 ± 0.1 mm以内の精度を提供する。センサーデータは、位置フィードバック制御システムに送信され、アクチュエータの制御に使用される。

[0419] LVDTセンサーの詳細仕様：

1. 動作原理：磁気結合の変化を利用して位置を測定する。
2. 測定範囲：1～200mm。
3. 測定精度： $\pm 0.1\%$ FS（フルスケール）以内。
4. 応答速度：1kHz以上。
5. 出力信号： ± 10 V（アナログ）または24ビットデジタル。
6. 放射線耐性： 10^9 Gy以上。
7. 温度安定性： $\pm 0.01\%$ FS/°C以内。
8. 寿命：無限（機械的接触なし）。
9. 温度範囲：-50～200°C。
10. 真空適合性： 10^{-8} Pa以下の超高真空対応。

[0420] 光学エンコーダーの詳細仕様：

1. 動作原理：光学パターンの検出により位置を測定する。
2. 測定範囲：10～1000mm。
3. 測定精度： ± 1 μm以内。

4. 応答速度：10kHz以上。
5. 出力信号：デジタルパルスまたはアブソリュートデジタル。
6. 放射線耐性： 10^7 Gy以上（放射線硬化光ファイバー使用）。
7. 温度安定性： $\pm 0.001\%$ FS/°C以内。
8. 寿命： 10^{10} サイクル以上。
9. 温度範囲：-20～120°C。
10. 真空適合性： 10^{-7} Pa以下の高真空対応。

[0421] 磁気センサーの詳細仕様：

1. 動作原理：磁場の変化を検出して位置を測定する。
2. 測定範囲：1～100mm。
3. 測定精度： $\pm 0.5\%$ FS以内。
4. 応答速度：5kHz以上。
5. 出力信号： ± 5 V（アナログ）または16ビットデジタル。
6. 放射線耐性： 10^8 Gy以上。
7. 温度安定性： $\pm 0.02\%$ FS/°C以内。
8. 寿命：無限（機械的接触なし）。
9. 温度範囲：-40～150°C。
10. 真空適合性： 10^{-7} Pa以下の高真空対応。

[0422] センサー冗長性の実装：

1. 多重センサー：各リミッタセグメントに複数の異なる種類のセンサーを設置。
2. 異種センサー：異なる動作原理のセンサーを組み合わせて使用。
3. 分散配置：センサーを異なる位置に分散配置。
4. データ融合：複数のセンサーデータを融合して精度と信頼性を向上。
5. 異常検出：センサーデータの不一致を検出する機能。

[0423] 熱膨張補償機構は、運転中の温度変化によるリミッタセグメントの熱膨張を補償する。この機構は、温度センサーと機械的補償要素から構成される。温度センサーは、リミッタセグメントの温度分布をリアルタイムで測定し、予想される熱膨張を計算する。機械的補償要素は、計算された熱膨張に基づいてリミッタ位置を微調整する。

[0424] 温度センサーの詳細仕様：

1. センサータイプ：熱電対（K型、N型）または光ファイバー温度センサー。
2. 測定範囲：20～1500°C。
3. 測定精度： ± 1 °C以内（熱電対）または ± 0.1 °C以内（光ファイバー）。
4. 応答速度：100ms以下。
5. 設置位置：リミッタセグメントの複数の位置（表面近傍、内部、基材など）。
6. 放射線耐性： 10^9 Gy以上。
7. 寿命：5年以上の連続運転。
8. 出力信号：アナログ電圧または光信号。
9. 校正機能：定期的な自動校正機能。
10. 冗長性：複数のセンサーによる冗長測定。

[0425] 熱膨張計算アルゴリズムの詳細：

1. 温度分布測定：複数の温度センサーからリミッタセグメントの温度分布を測定。
2. 熱膨張係数データ：材料の温度依存熱膨張係数データを使用。

3. 熱膨張計算：有限要素法または簡略化モデルによる熱膨張計算。
4. 位置変化予測：熱膨張による位置変化を予測。
5. 補償量計算：位置変化を補償するために必要なアクチュエータ調整量を計算。
6. 適応更新：実測データに基づくモデルの適応的更新。

[0426] 機械的補償要素の詳細：

1. バイメタル素子：熱膨張係数の異なる2種類の金属を接合し、温度変化に応じて自動的に変形する素子。
2. 熱膨張ロッド：リミッタセグメントと同じ温度環境に置かれ、同じ熱膨張を経験するロッド。
3. 差動機構：温度変化による膨張を相殺する差動機構。
4. フレキシブルカップリング：熱膨張による応力を吸収するフレキシブルカップリング。
5. アクティブ制御：温度センサーからのフィードバックに基づくアクチュエータの能動的制御。

[0427] 熱膨張補償の動作手順：

1. 初期校正：システム設置時に熱膨張特性を校正。
2. 温度監視：運転中の温度分布を連続的に監視。
3. 膨張計算：測定された温度分布から熱膨張を計算。
4. 補償制御：計算された熱膨張を補償するようにアクチュエータを制御。
5. 検証：位置センサーで実際の位置を確認し、必要に応じて調整。
6. 適応学習：実際の熱膨張挙動に基づいてモデルを更新。

[0428] 冗長システムは、アクチュエータまたはセンサーの故障時にも安全な運転を確保する。各リミッタセグメントには、複数のアクチュエータとセンサーが装備されており、一部が故障しても残りが機能を維持する。また、故障検出アルゴリズムが実装されており、異常な動作や測定値が検出された場合、安全なフォールバックモードに切り替わる。

[0429] アクチュエータ冗長性の実装：

1. 並列アクチュエータ：各リミッタセグメントに複数のアクチュエータを並列に配置。
2. 異種アクチュエータ：異なる動作原理のアクチュエータを組み合わせて使用。
3. 分散駆動：リミッタセグメントの複数の点を独立に駆動。
4. 負荷分散：複数のアクチュエータで負荷を分散。
5. ホットスタンバイ：予備アクチュエータを常に動作状態に維持。

[0430] 故障検出アルゴリズムの詳細：

1. センサーデータ妥当性チェック：センサーデータが物理的に妥当な範囲内にあるかを確認。
2. センサー間一致性チェック：複数のセンサーデータの一致性を確認。
3. アクチュエータ応答確認：アクチュエータに指令を送り、予想される応答が得られるかを確認。
4. 電気的特性監視：アクチュエータとセンサーの電気的特性（電流、電圧、抵抗など）を監視。
5. 自己診断テスト：定期的な自己診断テストを実行。
6. 履歴分析：過去のデータと比較して異常を検出。
7. モデルベース検出：物理モデルとの偏差に基づく異常検出。

[0431] フォールバックモードの詳細：

1. 安全位置移動：異常検出時に安全な位置（通常はより引き込まれた位置）に移動。
2. 制限運転：限られた機能での運転継続。
3. 段階的劣化：故障の程度に応じた段階的な機能低下。
4. 手動制御モード：運転者による手動制御への切り替え。
5. 緊急停止：重大な故障時の緊急停止。
6. 診断モード：故障診断のための特殊モード。

7. 回復手順：故障からの回復手順の自動実行。

[0432] 位置制御アルゴリズムは、プラズマ条件に応じてリミッタセグメントの最適位置を決定する。アルゴリズムは、セパトリクス-リミッタ間隙、プラズマ電流、磁場強度、加熱電力、プラズマ密度などのパラメータに基づいて、最適リミッタ位置を計算する。

[0433] 位置制御アルゴリズムの詳細：

1. 入力パラメータ：プラズマ電流、密度、温度、加熱電力、磁場強度、プラズマ形状など。
2. 目標間隙計算：入力パラメータに基づいて最適なセパトリクス-リミッタ間隙を計算。
3. セパトリクス位置推定：磁気計測データに基づいてセパトリクス位置を推定。
4. リミッタ位置計算：目標間隙とセパトリクス位置に基づいてリミッタ位置を計算。
5. 軌道計画：現在位置から目標位置への最適な移動軌道を計算。
6. アクチュエータ制御：計算された軌道に沿ってアクチュエータを制御。
7. 位置監視：実際の位置を監視し、必要に応じて調整。

[0434] フィードフォワード制御の詳細：

1. 物理モデル：プラズマ条件とリミッタ位置の関係を記述する物理モデル。
2. 経験的スケールリング：実験データに基づく経験的スケールリング則。
3. 予測計算：モデルとスケールリングに基づく最適位置の予測。
4. 先行制御：予測に基づく先行的な位置調整。
5. モデル更新：実測データに基づくモデルの定期的更新。
6. 運転シナリオ対応：異なる運転シナリオに対応した制御パラメータの切り替え。

[0435] フィードバック制御の詳細：

1. 偏差計算：目標位置と実際の位置の偏差を計算。
2. PID制御：偏差に基づくPID（比例-積分-微分）制御。
3. ゲイン調整：プラズマ条件に応じたPIDゲインの適応的調整。
4. 外乱抑制：外部擾乱（例：ELM）の影響を抑制する制御。
5. 安定化：振動や発散を防止する安定化機能。
6. 制約対応：物理的制約（速度限界、加速度限界など）を考慮した制御。

[0436] 位置制御の性能仕様：

1. 静的精度： $\pm 0.5\text{mm}$ 以内。
2. 動的精度： $\pm 1\text{mm}$ 以内（通常運転時）、 $\pm 2\text{mm}$ 以内（過渡時）。
3. 応答時間：100ms以下（小変位）、500ms以下（大変位）。
4. 安定性： $\pm 0.1\text{mm}$ 以内の位置安定性。
5. 外乱抑制：ELMなどの外乱に対する $\pm 2\text{mm}$ 以内の位置維持。
6. 追従性能：0.1Hz以下の指令変化に対する-3dB以内の追従。
7. 堅牢性： $\pm 20\%$ のパラメータ変動に対する安定性維持。

【先進材料構成】

[0437] 引込式分割リミッタ（RSL）と高磁場最適化ダイバータ（HFOD）は、高熱負荷と放射線環境に耐えるための先進材料構成を採用している。これらの材料は、高い熱伝導率、低い侵食率、および優れた機械的特性を持つように選択されている。

[0438] プラズマ対向面には、タングステンコーティングが施されている。タングステンは、低いスパッタリング収率、高い融点（3422°C）、および優れた熱伝導率（173 W/m·K）を持つため、プラズマ対向材料として理想的である。コーティングの厚さは、プラズマ対向面の位置と予想される熱負荷に応じて最適化されて

いる。高熱負荷領域では、200～500 μm の厚いコーティングが使用され、低熱負荷領域では、50～200 μm の薄いコーティングが使用される。

[0439] タングステンコーティングの詳細仕様：

1. 材料：高純度タンングステン（純度>99.95%）または微量添加物（Re、La₂O₃など）を含むタンングステン合金。
2. 厚さ：高熱負荷領域で200～500 μm 、低熱負荷領域で50～200 μm 。
3. 密度：>19.0g/cm³（>98%理論密度）。
4. 熱伝導率：150～170W/m·K（室温）、100～120W/m·K（1000°C）。
5. 表面粗さ：Ra<2 μm （プラズマ対向面）。
6. 接着強度：>40MPa（せん断強度）。
7. 耐熱衝撃性：>10MJ/m²の繰り返し熱負荷に耐える能力。
8. 微細構造：柱状結晶または再結晶化制御構造。
9. 不純物含有量：C<30ppm、O<20ppm、N<10ppm。
10. 水素同位体滞留：<10²¹atoms/m²（300°Cでの運転後）。

[0440] コーティング方法の詳細：

1. プラズマ溶射：大面積コーティングに適した高速成膜法。
 - 成膜速度：50～200 $\mu\text{m}/\text{min}$ 。
 - 密度：>95%理論密度。
 - 熱伝導率：>130W/m·K（室温）。
 - 接着強度：>30MPa。
 - 厚さ均一性： $\pm 10\%$ 以内。
2. 物理蒸着（PVD）：高品質コーティングに適した方法。
 - 成膜速度：1～10 $\mu\text{m}/\text{h}$ 。
 - 密度：>99%理論密度。
 - 熱伝導率：>160W/m·K（室温）。
 - 接着強度：>50MPa。
 - 厚さ均一性： $\pm 5\%$ 以内。
 - 微細構造制御：柱状結晶成長の制御。
3. 化学蒸着（CVD）：複雑形状への均一コーティングに適した方法。
 - 成膜速度：5～20 $\mu\text{m}/\text{h}$ 。
 - 密度：>99%理論密度。
 - 熱伝導率：>165W/m·K（室温）。
 - 接着強度：>60MPa。
 - 厚さ均一性： $\pm 3\%$ 以内。
 - 浸透能力：複雑形状への優れた浸透性。
4. 爆発溶射：厚膜コーティングに適した高速成膜法。
 - 成膜速度：100～500 $\mu\text{m}/\text{min}$ 。
 - 密度：>90%理論密度。
 - 熱伝導率：>120W/m·K（室温）。
 - 接着強度：>25MPa。
 - 厚さ範囲：200 μm ～数mm。
 - 残留応力：低い残留応力。

[0441] タングステンコーティングと基材の間には、熱膨張係数の違いによる熱応力を緩和するための勾配材料インターフェースが設けられている。このインターフェースは、タングステンから基材へと徐々に組成が変化する層構造を持ち、界面での剥離や亀裂の発生を防止する。

[0442] 勾配材料インターフェースの詳細仕様：

1. 層構造：3～5層の多層構造または連続的な組成勾配。
2. 総厚さ：200～500 μm 。
3. 組成変化：タングステン（100%）から銅合金（100%）への段階的または連続的な変化。
4. 中間層材料：W-Cu混合層、W-Ni-Fe層、W-Ni-Cu層など。
5. 熱膨張係数：層ごとに段階的に変化（ $4.5 \times 10^{-6}/\text{K} \rightarrow 16.5 \times 10^{-6}/\text{K}$ ）。
6. 接着強度：各層間で $>50\text{MPa}$ 。
7. 熱伝導率：各層で $>80\text{W/m}\cdot\text{K}$ 。
8. 耐熱性：最高使用温度 $>800^\circ\text{C}$ 。
9. 耐熱衝撃性： >100 サイクル（RT $\rightarrow 800^\circ\text{C}$ ）。
10. 耐放射線性： 10^9Gy 以上の放射線に耐える能力。

[0443] 勾配材料インターフェースの層構成例：

1. 第1層（タングステン側）：W（90%）-Cu（10%）
 - 厚さ：50～100 μm
 - 熱膨張係数： $5.0 \times 10^{-6}/\text{K}$
 - 熱伝導率： $150\text{W/m}\cdot\text{K}$
2. 第2層：W（70%）-Cu（30%）
 - 厚さ：50～100 μm
 - 熱膨張係数： $7.0 \times 10^{-6}/\text{K}$
 - 熱伝導率： $180\text{W/m}\cdot\text{K}$
3. 第3層：W（50%）-Cu（50%）
 - 厚さ：50～100 μm
 - 熱膨張係数： $9.0 \times 10^{-6}/\text{K}$
 - 熱伝導率： $210\text{W/m}\cdot\text{K}$
4. 第4層：W（30%）-Cu（70%）
 - 厚さ：50～100 μm
 - 熱膨張係数： $11.0 \times 10^{-6}/\text{K}$
 - 熱伝導率： $240\text{W/m}\cdot\text{K}$
5. 第5層（基材側）：W（10%）-Cu（90%）
 - 厚さ：50～100 μm
 - 熱膨張係数： $14.0 \times 10^{-6}/\text{K}$
 - 熱伝導率： $270\text{W/m}\cdot\text{K}$

[0444] 熱伝導層には、高熱伝導率の銅合金が使用されている。特に、銅-クロム-ジルコニウム（CuCrZr）合金は、高い熱伝導率（ $\sim 340\text{W/m}\cdot\text{K}$ ）と優れた機械的強度を持ち、冷却構造の材料として理想的である。熱伝導層の厚さは、熱応力を最小化するために最適化されており、典型的には5～10mmである。

[0445] 銅合金基材の詳細仕様：

1. 材料：銅-クロム-ジルコニウム合金（CuCrZr）

- 組成：Cu（残部）、Cr（0.6～0.9wt%）、Zr（0.07～0.15wt%）
- 不純物制限：O<10ppm、S<10ppm、P<20ppm、その他の元素<0.1wt%
- 2. 熱処理状態：溶体化処理+時効処理（最適強度と導電率のバランス）
- 3. 密度：8.9g/cm³
- 4. 熱伝導率：320～360W/m·K（室温）、280～320W/m·K（300°C）
- 5. 電気伝導率：75～85%IACS（室温）
- 6. 引張強度：>350MPa（室温）、>300MPa（300°C）
- 7. 降伏強度：>250MPa（室温）、>200MPa（300°C）
- 8. 伸び：>15%（室温）
- 9. 硬度：110～140HV
- 10. 熱膨張係数：16.7×10⁻⁶/K（20～300°C）
- 11. 最高使用温度：450°C（強度低下を考慮）
- 12. 疲労強度：>150MPa（10⁷サイクル、室温）
- 13. クリープ強度：>100MPa（1%/10,000h、300°C）
- 14. 照射耐性：5dpa（はじき出し損傷）まで許容可能な機械的特性の低下

[0446] 冷却チャンネルの詳細仕様：

1. 形状：円形、楕円形、または螺旋形
2. 直径：10～15mm（円形）、10×15mm（楕円形）
3. 配置：平行多チャンネル配置または蛇行配置
4. チャンネル間距離：20～30mm（中心間）
5. 壁厚：最小3mm（プラズマ側）、最小2mm（非プラズマ側）
6. 表面処理：内面粗さRa<1.6μm、内面洗浄処理
7. 接続方法：溶接、ロウ付け、または機械的接続
8. 流量：1～5kg/s（チャンネルあたり）
9. 圧力損失：<0.5MPa（チャンネル全長）
10. 熱伝達係数：>40kW/m²·K（通常運転）、>60kW/m²·K（高熱負荷時）

[0447] 冷却チャンネル内の熱伝達向上機構：

1. スワールテープ：
 - 材料：ステンレス鋼（316L）または銅合金
 - 厚さ：0.8～1.2mm
 - ピッチ比（y/d）：2.0～3.0
 - 捻り方向：交互反転または一方向
 - 熱伝達向上：2～3倍
 - 圧力損失増加：3～5倍
2. 微細フィン：
 - 形状：長方形、三角形、または半円形
 - 高さ：0.5～1.0mm
 - ピッチ：1.5～3.0mm
 - 配置：直線状、螺旋状、または千鳥状
 - 熱伝達向上：1.5～2.5倍
 - 圧力損失増加：2～4倍
3. 微細突起：
 - 形状：球状、円錐状、または切頭円錐状

- 高さ：0.3～0.8mm
- ピッチ：1.0～2.0mm
- 配置：正方格子または千鳥格子
- 熱伝達向上：1.3～2.0倍
- 圧力損失増加：1.5～3倍

4. 表面粗化：

- 方法：サンドブラスト、エッチング、または機械加工
- 粗さ：Ra=5～20μm
- パターン：均一または不均一
- 熱伝達向上：1.2～1.5倍
- 圧力損失増加：1.3～2倍

[0448] 冷却システムは、一次冷却ループと二次冷却ループから構成される。一次冷却ループは、リミッタセグメント内の冷却チャンネルを循環し、熱を除去する。二次冷却ループは、熱交換器を介して一次ループから熱を受け取り、最終的に熱を環境に放出する。一次ループの流量は、熱負荷に応じて制御され、常に適切な冷却が確保される。

[0449] 一次冷却ループの詳細仕様：

1. 冷却媒体：加圧水
2. 圧力：4MPa（通常運転）、最大6MPa（設計圧力）
3. 入口温度：100°C（通常運転）、70～120°C（運転範囲）
4. 出口温度：150°C（通常運転）、最大200°C（設計温度）
5. 流量：総流量50～200kg/s（熱負荷に応じて変動）
6. 流速：5～10m/s（冷却チャンネル内）
7. 熱除去能力：10～50MW（総熱負荷に応じて変動）
8. 水質管理：
 - 導電率：<0.1μS/cm
 - pH：6.5～7.5
 - 溶存酸素：<10ppb
 - 塩化物：<10ppb
 - 固形物：<100ppb
9. 材料適合性：銅合金、ステンレス鋼、チタン合金との適合性
10. 腐食抑制：腐食抑制剤の添加（必要に応じて）

[0450] 二次冷却ループの詳細仕様：

1. 冷却媒体：水または水-グリコール混合物
2. 圧力：0.5～1.0MPa
3. 入口温度：30～50°C
4. 出口温度：70～90°C
5. 流量：一次ループの熱負荷に応じて変動
6. 熱交換方式：プレート式または管式熱交換器
7. 熱交換効率：>90%
8. 最終熱放出：冷却塔、空冷熱交換器、または水冷熱交換器
9. 制御方式：温度制御または流量制御
10. バックアップシステム：冗長ポンプ、バイパス回路、および緊急冷却系統

[0451] 冷却制御システムの詳細：

1. 流量制御：

- 可変速ポンプによる一次流量制御
- 流量測定：電磁流量計または超音波流量計
- 制御精度：設定値の±5%以内
- 応答時間：<5s（小変化）、<30s（大変化）

2. 温度制御：

- 入口温度制御：熱交換器バイパス制御
- 出口温度監視：熱電対または測温抵抗体
- 温度勾配監視：複数点温度測定
- 制御精度：設定値の±2°C以内

3. 圧力制御：

- 系統圧力制御：加圧タンクと圧力調整弁
- 圧力監視：圧力変換器
- 制御精度：設定値の±0.1MPa以内
- 過圧保護：安全弁と破裂板

4. 熱負荷監視：

- 熱負荷計算：流量と温度差に基づく計算
- 表面温度監視：赤外カメラまたは埋め込み熱電対
- 熱流束推定：温度勾配に基づく推定
- 異常検出：急激な温度上昇または熱負荷変化の検出

5. 異常対応：

- 流量低下検出：最小流量確保のための冗長ポンプ起動
- 温度上昇検出：冷却強化または熱負荷低減
- 漏洩検出：漏洩検出システムと隔離弁
- 緊急冷却：緊急冷却システムの起動

【統合制御アーキテクチャ】

[0452] 適応型ダイバータ-リミッタハイブリッドシステムの各サブシステムは、統合制御アーキテクチャ（ICA）によって統合されている。このアーキテクチャは、リアルタイムデータ処理、意思決定アルゴリズム、およびフィードバック制御ループから構成される。

[0453] 中央制御ユニットは、高性能の計算機システムであり、各サブシステムからのデータを収集し、統合的な制御決定を行う。計算機は、マルチコアプロセッサと大容量メモリを備えており、複雑な計算を高速で実行することができる。オペレーティングシステムは、リアルタイム性を確保するために最適化されており、1ms以下の応答時間を実現する。

[0454] 中央制御ユニットのハードウェア仕様：

1. プロセッサ：

- タイプ：64コア以上のサーバー級プロセッサ
- クロック周波数：3GHz以上
- キャッシュ：L1（64KB/コア）、L2（512KB/コア）、L3（64MB共有）
- 命令セット：AVX-512などのベクトル演算拡張
- 熱設計電力（TDP）：150～250W

2. メモリ：

- 容量：256GB以上のECC DDR4/DDR5 RAM
- 帯域幅：100GB/s以上
- レイテンシ：<15ns
- エラー訂正：ECCおよびChipkill機能
- メモリ階層：NUMA対応

3. ストレージ：

- システムディスク：1TB以上のNVMe SSD（RAID 1）
- データストレージ：10TB以上のSSD（RAID 5/6）
- アーカイブストレージ：100TB以上のHDD（RAID 6）
- I/O性能：読取り5GB/s以上、書込み3GB/s以上
- 耐久性：5年以上の連続運転に対応

4. ネットワーク：

- 内部ネットワーク：100Gbps以上のInfiniBandまたはRoCE
- 外部ネットワーク：10Gbps以上のイーサネット（冗長構成）
- レイテンシ：<10 μ s（内部）、<100 μ s（外部）
- 帯域幅：50GB/s以上（内部）、1GB/s以上（外部）
- プロトコル：TCP/IP、UDP、RDMA

5. 拡張性：

- PCIeスロット：PCIe 4.0/5.0 x16スロット×8以上
- 拡張カード：FPGA、GPU、または専用ASICアクセラレータ
- スケーラビリティ：マルチノード構成への拡張性
- ホットスワップ：主要コンポーネントのホットスワップ対応
- アップグレード：将来のアップグレードに対応した設計

6. 電源と冷却：

- 電源：冗長N+1電源（80 PLUS Titanium効率）
- 冷却：液体冷却または高効率空冷
- 動作温度範囲：10～35°C
- 湿度範囲：20～80%RH（結露なきこと）
- 消費電力：最大2kW、通常運転時1kW

7. 信頼性と可用性：

- MTBF：>100,000時間
- 可用性：>99.999%（年間ダウンタイム<5分）
- 冗長コンポーネント：電源、ファン、ネットワークインターフェース
- ホットスペア：プロセッサとメモリのホットスペア機能
- 監視：ハードウェア状態の包括的監視

[0455] 中央制御ユニットのソフトウェア仕様：

1. オペレーティングシステム：

- タイプ：リアルタイム拡張を持つLinux
- カーネル：リアルタイムパッチ適用済みLinuxカーネル
- スケジューラ：リアルタイムスケジューラ（FIFO、RR）

- 割り込み処理：優先度ベースの割り込み処理
- リソース管理：CPU分離、メモリロック、I/Oプライオリティ

2. ミドルウェア：

- リアルタイム通信：DDS (Data Distribution Service)
- メッセージング：ZeroMQ、RabbitMQ
- データベース：時系列データベース (InfluxDB、TimescaleDB)
- 分散計算：MPI、OpenMP
- サービス管理：Kubernetes、Docker

3. 開発環境：

- プログラミング言語：C/C++、Python、MATLAB/Simulink
- ライブラリ：数値計算、信号処理、機械学習、制御理論
- モデリングツール：Simulink、Modelica
- テスト環境：単体テスト、統合テスト、ハードウェア・イン・ザ・ループ
- バージョン管理：Git、SVN

4. 実行環境：

- リアルタイムタスク管理：タスクスケジューリング、優先度管理
- メモリ管理：メモリロック、共有メモリ、ゼロコピー転送
- 同期機構：セマフォ、ミューテックス、条件変数
- 時間管理：高精度タイマー、時刻同期 (PTP/IEEE 1588)
- 例外処理：例外捕捉と安全な回復

5. 監視と診断：

- システム監視：CPU、メモリ、ディスク、ネットワーク使用率
- パフォーマンス分析：実行時間、レイテンシ、スループット
- ログ管理：構造化ログ、ログレベル制御、ログローテーション
- アラート管理：閾値ベースのアラート、エスカレーション
- 診断ツール：プロファイリング、トレース、コアダンプ分析

6. セキュリティ：

- アクセス制御：ロールベースアクセス制御 (RBAC)
- 認証：多要素認証、証明書ベース認証
- 暗号化：通信と保存データの暗号化
- セキュリティ監査：アクセスログ、変更履歴
- 脆弱性管理：定期的なセキュリティアップデート

7. 可用性と回復性：

- フェイルオーバー：自動フェイルオーバー機構
- バックアップ：定期的な設定とデータのバックアップ
- 状態回復：チェックポイントと状態回復
- 障害検出：ハートビート、ヘルスチェック
- 自己修復：自動再起動、サービス再構成

[0456] 中央制御ユニットの機能仕様：

1. データ収集と前処理：

- データ収集：各サブシステムからのデータを収集

- データ検証：収集データの妥当性チェック
- 信号処理：フィルタリング、平滑化、ノイズ除去
- 特徴抽出：重要な特徴の抽出
- データ変換：物理単位への変換、座標変換

2. 状態推定：

- プラズマ状態推定：プラズマの形状、位置、電流分布などの推定
- 機器状態推定：リミッタ、ダイバータなどの機器状態の推定
- 不確かさ評価：推定値の不確かさの評価
- 状態予測：将来の状態の予測
- 異常検出：異常状態の検出

3. 制御決定：

- 目標設定：運転条件に応じた制御目標の設定
- 最適化計算：制御目標を達成するための最適制御入力 of 計算
- 制約処理：物理的制約と運転制約の考慮
- 安全性確保：安全性を確保するための制御決定
- 優先順位付け：複数の制御目標間の優先順位付け

4. 制御信号生成：

- 制御信号変換：計算された制御入力から実際の制御信号への変換
- タイミング制御：制御信号のタイミング制御
- 信号調整：アクチュエータの特性に合わせた信号調整
- 安全チェック：制御信号の安全性チェック
- フィードバック補正：測定値に基づく制御信号の補正

5. データ記録：

- リアルタイムデータ記録：高速データの一時記録
- 長期データ保存：重要データの長期保存
- イベント記録：重要イベントの記録
- 運転ログ：運転パラメータと状態の記録
- 診断データ：診断と分析のためのデータ記録

6. 運転者インターフェース：

- システム状態表示：システム全体の状態表示
- 制御パラメータ設定：制御パラメータの設定と調整
- アラーム表示：アラームの表示と確認
- データ可視化：収集データのグラフィカル表示
- 運転支援：運転者への推奨アクションの提示

7. システム管理：

- 構成管理：システム構成の管理
- バージョン管理：ソフトウェアバージョンの管理
- リソース管理：計算リソースの割り当てと管理
- 性能監視：システム性能の監視
- メンテナンス管理：定期メンテナンスのスケジューリングと管理

[0457] データ収集システムは、各サブシステムからのデータを高速で収集し、中央データベースに格納する。データ収集は、高速データバスを通じて行われ、サンプリングレートは最大100kHzである。収集されるデータには、プラズマパラメータ（電流、密度、温度など）、磁場配位、リミッタ位置、粒子フラックス、侵食率などが含まれる。

[0458] データ収集システムのハードウェア仕様：

1. データ収集ハードウェア：

- ADCカード：16～24ビット分解能、サンプリングレート最大1MHz
- デジタルI/Oカード：TTLまたはHTL互換、最大入出力速度10MHz
- カメラインターフェース：Camera Link、CoaXPress、GigE Vision対応
- 特殊インターフェース：FPGA搭載カード、DSPカード
- 拡張性：モジュラー設計、ホットスワップ対応

2. データバス：

- 内部バス：PCI Express Gen4 x16（帯域幅最大32GB/s）
- 外部バス：InfiniBand HDR（帯域幅最大200Gbps）
- リアルタイムバス：EtherCAT、PROFINET RT、TTEthernet
- 光ファイバー接続：シングルモードまたはマルチモード、最大距離10km
- 冗長構成：デュアルチャネル、フェイルオーバー機能

3. 信号調整回路：

- アナログフィルタ：アンチエイリアシングフィルタ、ノイズフィルタ
- 増幅器：低ノイズ計装増幅器、可変ゲイン増幅器
- 絶縁：ガルバニック絶縁、光絶縁
- 過電圧保護：サージアブソーバ、クランプ回路
- 校正回路：自動校正機能、リファレンス電圧源

4. 時間同期システム：

- GPS時刻同期：GPS受信機、精度<100ns
- IEEE 1588（PTP）：サブマイクロ秒精度
- 分散クロック：マスタークロックと分散スレーブ
- タイムスタンプ：ハードウェアタイムスタンプ機能
- ジッター：<10ns（システム全体）

5. 電源システム：

- 無停電電源：オンライン式UPS、バックアップ時間>30分
- 電源品質：電圧変動 $\pm 1\%$ 、高調波歪み<3%
- 電源監視：電圧、電流、電力、力率の監視
- 電源フィルタ：EMIフィルタ、サージプロテクタ
- アース：低インピーダンスアース、ノイズ対策

[0459] データ収集システムのソフトウェア仕様：

1. データ収集ソフトウェア：

- リアルタイムデータ収集：決定論的タイミングでのデータ収集
- マルチチャネル同期：複数チャネルの同期収集
- トリガ機能：ハードウェアトリガ、ソフトウェアトリガ、条件トリガ
- バッファ管理：循環バッファ、プリトリガバッファ
- スケジューリング：周期的収集、イベント駆動収集

2. データ前処理：

- スケーリング：物理単位への変換
- フィルタリング：デジタルフィルタ（FIR、IIR）
- 圧縮：ロスレス圧縮、適応圧縮
- 検証：範囲チェック、整合性チェック
- 派生計算：計算チャネル、仮想センサー

3. データ転送：

- プロトコル：TCP/IP、UDP、RDMA
- データフォーマット：バイナリ、構造化フォーマット（HDF5、TDMS）
- QoS制御：帯域幅予約、優先度制御
- フロー制御：バックプレッシャー機構、レート制限
- エラー処理：再送、エラー訂正

4. データ管理：

- メタデータ管理：データ属性、タグ付け
- バージョン管理：データバージョンの追跡
- アクセス制御：データアクセス権限の管理
- ライフサイクル管理：データの保持、アーカイブ、削除
- 検索機能：メタデータに基づく検索

5. 診断と監視：

- システム状態監視：ハードウェアとソフトウェアの状態監視
- パフォーマンス監視：スループット、レイテンシ、CPU使用率
- エラー検出：ハードウェアエラー、ソフトウェアエラーの検出
- 自己診断：定期的な自己診断テスト
- ログ記録：詳細なログ記録と分析

[0460] データ収集の時間分解能は、測定対象に応じて異なる：

1. 高速データ：

- 対象：磁気プローブ、ソフトX線検出器、ミルノフコイルなど
- サンプリングレート：10～100kHz
- 分解能：16ビット（65,536レベル）
- バッファサイズ：チャンネルあたり 10^6 ～ 10^8 サンプル
- 帯域幅要件：チャンネルあたり2～20MB/s

2. 中速データ：

- 対象：密度計測、温度計測、放射計測、ラングミュアプローブなど
- サンプリングレート：1～10kHz
- 分解能：18ビット（262,144レベル）
- バッファサイズ：チャンネルあたり 10^5 ～ 10^7 サンプル
- 帯域幅要件：チャンネルあたり0.2～2MB/s

3. 低速データ：

- 対象：カメラ画像、分光データ、圧力計測、流量計測など
- サンプリングレート：10～1000Hz
- 分解能：カメラ画像（8～16ビット/ピクセル）、分光データ（24ビット）

- バッファサイズ：画像フレーム1000～10000、分光データ $10^4 \sim 10^6$ サンプル
- 帯域幅要件：カメラ（10～1000MB/s）、分光器（1～100MB/s）

4. 超低速データ：

- 対象：冷却水温度、真空度、コイル温度、構造温度など
- サンプリングレート：0.1～10Hz
- 分解能：24ビット（16,777,216レベル）
- バッファサイズ：チャンネルあたり $10^3 \sim 10^5$ サンプル
- 帯域幅要件：チャンネルあたり < 0.1 MB/s

[0461] 収集されるデータの種類と特性：

1. プラズマパラメータ：

- プラズマ電流：測定範囲0.1～5MA、精度 $\pm 1\%$
- プラズマ密度：測定範囲 $10^{19} \sim 10^{20} \text{m}^{-3}$ 、精度 $\pm 5\%$
- 電子温度：測定範囲0.1～20keV、精度 $\pm 10\%$
- イオン温度：測定範囲0.1～30keV、精度 $\pm 15\%$
- 放射損失：測定範囲0.1～50MW、精度 $\pm 10\%$
- MHD活動：周波数範囲0.1～100kHz、振幅分解能 > 60 dB

2. 磁場配位：

- ポロイダル磁場：測定範囲0.01～1T、精度 $\pm 0.5\%$
- トロイダル磁場：測定範囲1～5T、精度 $\pm 0.1\%$
- 磁気フラックス：測定精度 ± 0.01 Wb
- セパラトリクス位置：測定精度 ± 5 mm
- X点位置：測定精度 ± 10 mm
- 安全係数：計算精度 $\pm 5\%$

3. リミッタ状態：

- リミッタ位置：測定範囲0～200mm、精度 ± 0.5 mm
- 表面温度：測定範囲20～1500°C、精度 ± 10 °C
- 冷却水温度：測定範囲20～200°C、精度 ± 1 °C
- 冷却水流量：測定範囲1～10kg/s、精度 $\pm 2\%$
- 冷却水圧力：測定範囲1～6MPa、精度 ± 0.1 MPa
- 熱負荷：計算範囲0.1～20MW/m²、精度 $\pm 15\%$

4. 粒子フラックスと侵食：

- D/T粒子フラックス：測定範囲 $10^{21} \sim 10^{24} \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、精度 $\pm 20\%$
- 不純物フラックス：測定範囲 $10^{18} \sim 10^{22} \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、精度 $\pm 30\%$
- 侵食率：測定範囲0.1～100nm/s、精度 $\pm 25\%$
- 堆積率：測定範囲0.1～50nm/s、精度 $\pm 30\%$
- スペクトル輝度：測定範囲 $10^{16} \sim 10^{20} \text{photons/s/sr/m}^2$ 、精度 $\pm 15\%$
- 中性粒子圧力：測定範囲 $10^{-4} \sim 10^{-1} \text{Pa}$ 、精度 $\pm 10\%$

[0462] データベースシステムの仕様：

1. 時系列データベース：

- タイプ：分散時系列データベース（InfluxDB、TimescaleDB等）
- 容量： > 100 TB

- 書き込み性能：>1,000,000ポイント/秒
- 読取り性能：>10,000クエリ/秒
- 保持ポリシー：重要度に応じた階層的保持（1日～10年）

2. リレーショナルデータベース：

- タイプ：分散リレーショナルデータベース（PostgreSQL、MySQL等）
- 容量：>10TB
- 性能：>1,000トランザクション/秒
- 機能：トランザクション保証、参照整合性、複雑クエリ
- 用途：設定データ、メタデータ、運転ログ、イベント記録

3. ドキュメントデータベース：

- タイプ：分散ドキュメントデータベース（MongoDB、Elasticsearch等）
- 容量：>50TB
- 性能：>5,000操作/秒
- 機能：スキーマレス、全文検索、地理空間検索
- 用途：非構造化データ、診断結果、分析レポート

4. データウェアハウス：

- タイプ：列指向データウェアハウス（ClickHouse、Vertica等）
- 容量：>500TB
- 性能：複雑な分析クエリを<10秒で実行
- 機能：高度な集計、OLAP操作、データマイニング
- 用途：長期傾向分析、性能最適化、予測モデリング

5. データアクセスレイヤー：

- API：RESTful API、GraphQL
- クエリ言語：SQL、InfluxQL、MongoDB Query Language
- アクセス制御：ロールベースアクセス制御
- キャッシュ：分散キャッシュ（Redis、Memcached）
- 接続プール：コネクションプーリングと負荷分散

[0463] データ処理アルゴリズムは、収集されたデータを処理し、制御に必要な情報を抽出する。アルゴリズムには、信号フィルタリング、特徴抽出、パターン認識、および状態推定が含まれる。特に、プラズマ状態の推定は、物理モデルとデータ駆動モデルを組み合わせで行われる。物理モデルは、プラズマの基本的な振る舞いを記述し、データ駆動モデルは、実測データに基づいて物理モデルを補正する。

[0464] 信号フィルタリングの詳細：

1. デジタルフィルタ：

- FIRフィルタ：線形位相特性、安定性保証
- IIRフィルタ：計算効率、非線形位相
- 適応フィルタ：信号特性に応じて係数を調整
- マルチレートフィルタ：サンプリングレート変換
- 周波数選択フィルタ：ローパス、ハイパス、バンドパス、ノッチ

2. 適応フィルタ：

- カルマンフィルタ：状態推定と予測
- 拡張カルマンフィルタ：非線形システム対応

- アンセンテッドカルマンフィルタ：強い非線形性対応
- 粒子フィルタ：非ガウス性ノイズ対応
- H_∞ フィルタ：モデル不確かさに頑健

3. ウェーブレット変換：

- 連続ウェーブレット変換：時間-周波数解析
- 離散ウェーブレット変換：効率的な計算
- ウェーブレットパケット：適応的な時間-周波数分解能
- マルチレゾリューション解析：異なるスケールの特徴抽出
- ウェーブレット閾値処理：ノイズ除去

4. 経験的モード分解：

- 標準EMD：非線形・非定常信号の分解
- アンサンブルEMD：モード混合問題の軽減
- マルチバリエートEMD：多変量信号の分解
- CEEMDAN：ノイズ支援データ解析
- 経験的ウェーブレット変換：EMDとウェーブレットの融合

5. 統計的フィルタリング：

- 移動平均：シンプルで効果的なスムージング
- メディアンフィルタ：外れ値に頑健
- ARMA：自己回帰移動平均モデル
- GARCH：条件付き不均一分散自己回帰モデル
- ロバスト推定：外れ値の影響を最小化

[0465] 特徴抽出の詳細：

1. 統計的特徴：

- 基本統計量：平均、分散、標準偏差
- 高次モーメント：歪度、尖度
- 分位数：中央値、四分位数、パーセンタイル
- 相関係数：自己相関、相互相関
- 統計的検定：t検定、F検定、カイ二乗検定

2. スペクトル特徴：

- フーリエ変換：周波数スペクトル
- パワースペクトル密度：信号のパワー分布
- バイスペクトル：非線形性の検出
- スペクトログラム：時間-周波数表現
- コヒーレンス：信号間の周波数依存相関

3. 時間特徴：

- ピーク検出：極大値、極小値
- 過渡応答：立ち上がり時間、立ち下がり時間
- エンベロープ：信号の包絡線
- トレンド：長期的な変化傾向
- イベント検出：閾値交差、パターンマッチング

4. 空間特徴：

- 空間モード：固有モード、特異モード
- 空間勾配：方向微分、ラプラシアン
- 空間相関：空間的自己相関、クロス相関
- 形状特徴：境界、面積、体積
- テクスチャ：空間的パターン、不均一性

5. 次元削減：

- 主成分分析（PCA）：線形次元削減
- 独立成分分析（ICA）：統計的独立性に基づく分解
- t-SNE：非線形次元削減と可視化
- オートエンコーダ：ニューラルネットワークによる次元削減
- マニフォールド学習：データの内在的構造の保存

[0466] パターン認識の詳細：

1. 教師あり学習：

- サポートベクターマシン：マージン最大化による分類
- ランダムフォレスト：決定木アンサンブル
- ニューラルネットワーク：深層学習、畳み込みネットワーク
- ベイズ分類器：確率的分類
- k近傍法：類似度に基づく分類

2. 教師なし学習：

- k-means：中心ベースクラスタリング
- 階層的クラスタリング：ボトムアップまたはトップダウンクラスタリング
- DBSCAN：密度ベースクラスタリング
- 自己組織化マップ：トポロジー保存マッピング
- ガウス混合モデル：確率的クラスタリング

3. 異常検出：

- 統計的手法：Z-スコア、マハラノビス距離
- 密度ベース手法：LOF、DBSCAN
- 距離ベース手法：k-NN距離
- アンサンブル手法：アイソレーションフォレスト
- 再構成ベース手法：オートエンコーダ、PCA

4. 時系列分析：

- ARIMA：自己回帰和分移動平均モデル
- 隠れマルコフモデル：状態遷移の確率モデル
- リカレントニューラルネットワーク：LSTM、GRU
- 動的時間伸縮法：時系列の類似度測定
- 変化点検出：時系列の構造変化の検出

5. 転移学習：

- 特徴ベース転移：事前学習特徴の再利用
- インスタンスベース転移：重み付きインスタンス
- パラメータベース転移：モデルパラメータの転移
- 関係ベース転移：関係知識の転移
- 敵対的転移：ドメイン適応

[0467] 状態推定の詳細：

1. プラズマ状態推定：

- 磁気平衡再構成：プラズマの形状と位置の推定
- 電流分布推定：プラズマ電流分布の推定
- 温度分布推定：電子温度とイオン温度の分布推定
- 密度分布推定：電子密度とイオン密度の分布推定
- 回転分布推定：プラズマ回転速度の分布推定

2. 磁気平衡再構成：

- 手法：有限要素法、グリーン関数法、基底関数展開法
- 入力データ：磁気プローブ、フラックスループ、ロゴスキーコイル
- 制約条件：力のバランス、電流連続性、境界条件
- 出力：ポロイダルフラックス分布、電流密度分布、圧力分布
- 性能：空間分解能<1cm、時間分解能<1ms、精度<5%

3. 輸送解析：

- 粒子輸送：粒子拡散係数、対流速度の推定
- 熱輸送：熱拡散係数、熱伝導率の推定
- 運動量輸送：粘性係数、角運動量輸送の推定
- 不純物輸送：不純物拡散係数、蓄積率の推定
- ソース項：加熱分布、粒子源、運動量源の推定

4. MHD安定性解析：

- 理想MHD安定性：キンクモード、バルーニングモードの解析
- 抵抗性MHD安定性：ティアリングモード、抵抗性壁モードの解析
- 成長率推定：不安定モードの成長率推定
- モード構造推定：不安定モードの空間構造推定
- 安定化条件：安定化に必要な条件の推定

5. 壁負荷推定：

- 熱負荷分布：壁への熱負荷分布の推定
- 粒子フラックス分布：壁への粒子フラックス分布の推定
- 侵食率分布：壁材料の侵食率分布の推定
- 堆積率分布：材料の堆積率分布の推定
- 寿命予測：壁コンポーネントの寿命予測

[0468] 物理モデルとデータ駆動モデルの統合：

1. モデル統合アプローチ：

- パラメータ同定：物理モデルのパラメータをデータから同定
- モデル補正：物理モデルの出力をデータ駆動モデルで補正
- ハイブリッドモデル：物理モデルとデータ駆動モデルの組み合わせ
- マルチモデル：複数のモデルの出力を統合
- 適応モデル：運転条件に応じてモデルを適応的に調整

2. 物理モデル：

- プラズマ平衡モデル：グラッド-シャフラノフ方程式に基づくモデル
- 輸送モデル：粒子、熱、運動量の輸送方程式

- MHD安定性モデル：理想MHDと抵抗性MHDの安定性解析
- エッジプラズマモデル：SOLとダイバータプラズマのモデル
- 中性粒子モデル：中性粒子輸送と相互作用のモデル

3. データ駆動モデル：

- 回帰モデル：線形回帰、ガウス過程回帰、サポートベクター回帰
- ニューラルネットワーク：フィードフォワード、リカレント、畳み込み
- 決定木モデル：ランダムフォレスト、勾配ブースティング
- カーネル法：カーネルリッジ回帰、カーネル主成分分析
- アンサンブル法：バギング、ブースティング、スタッキング

4. モデル評価と選択：

- 交差検証：k分割交差検証、時系列交差検証
- 性能指標：RMSE、MAE、 R^2 、AIC、BIC
- モデル比較：統計的検定、情報量基準
- モデル選択：グリッドサーチ、ランダムサーチ、ベイズ最適化
- アンサンブル重み：スタッキング、加重平均、ベイズモデル平均

5. 不確かさ定量化：

- パラメータ不確かさ：パラメータの信頼区間と予測区間
- モデル不確かさ：モデル構造の不確かさ
- 予測不確かさ：予測値の信頼区間と予測区間
- 感度分析：パラメータ感度、特徴重要度
- ロバスト性評価：外乱と不確かさに対するロバスト性

[0469] 意思決定アルゴリズムは、処理されたデータに基づいて、最適な制御アクションを決定する。アルゴリズムは、ルールベースの意思決定、モデル予測制御、および強化学習を組み合わせ実装されている。ルールベースの意思決定は、事前定義されたルールに基づいて基本的な制御アクションを生成する。モデル予測制御は、プラズマの将来の振る舞いを予測し、最適な制御軌道を計算する。強化学習は、過去の制御経験に基づいて制御戦略を改善する。

[0470] ルールベースの意思決定の詳細：

1. ルールベース：

- ルール形式：IF-THEN形式のルール
- ルール数：数百～数千のルール
- ルール階層：優先度に基づく階層構造
- ルールグループ：機能別、状況別のグループ化
- メンテナンス：ルールの追加、削除、修正機能

2. 推論エンジン：

- 前向き推論：事実からの結論導出
- 後ろ向き推論：目標からの条件導出
- ファジィ推論：あいまいさを考慮した推論
- 確率的推論：不確かさを考慮した推論
- 時間的推論：時間的制約を考慮した推論

3. 事実ベース：

- 現在の状態：プラズマと機器の現在の状態

- 履歴データ：過去の状態と制御アクション
- 予測データ：将来の状態の予測
- 外部情報：運転スケジュール、メンテナンス情報
- メタデータ：データの信頼性、精度、鮮度

4. 説明機能：

- 決定追跡：決定に至るまでの推論過程の追跡
- ルール活性化：活性化されたルールの表示
- 根拠提示：決定の根拠となる事実の提示
- 代替案提示：考慮された代替案の提示
- 質問応答：決定に関する質問への応答

5. 学習機能：

- ルール生成：データからのルール自動生成
- ルール評価：ルールの有効性評価
- ルール最適化：ルールの条件と結論の最適化
- ルール淘汰：使用頻度の低いルールの削除
- ルール統合：類似ルールの統合

[0471] モデル予測制御の詳細：

1. プラズマモデル：

- 線形モデル：状態空間モデル、伝達関数モデル
- 非線形モデル：物理ベースモデル、ニューラルネットワークモデル
- ハイブリッドモデル：物理モデルとデータ駆動モデルの組み合わせ
- 適応モデル：運転条件に応じて適応するモデル
- マルチモデル：複数のモデルの切り替えまたは統合

2. 予測ホライゾン：

- 短期予測：10～100ms（高速制御用）
- 中期予測：100ms～1s（通常制御用）
- 長期予測：1～10s（戦略的制御用）
- 可変ホライゾン：制御目標に応じて変化
- マルチレート予測：異なる時間スケールの予測

3. 制御ホライゾン：

- 短期制御：5～50ms（高速アクチュエータ用）
- 中期制御：50～500ms（通常アクチュエータ用）
- 長期制御：0.5～5s（低速アクチュエータ用）
- 可変ホライゾン：アクチュエータの応答特性に応じて変化
- マルチレート制御：異なる時間スケールの制御

4. 目標関数：

- 追従性能：目標値への追従誤差の最小化
- 制御努力：制御入力の変化の最小化
- 制約満足：ハード制約とソフト制約の満足
- 安全性：安全マージンの最大化
- 多目的：複数の目標のバランス

5. 最適化アルゴリズム：

- 二次計画法：線形モデルと二次目標関数
- 非線形計画法：非線形モデルまたは非線形制約
- 動的計画法：多段階決定問題
- 勾配法：一次または二次の勾配情報を利用
- ヒューリスティック法：遺伝的アルゴリズム、粒子群最適化

6. 制約処理：

- 状態制約：プラズマパラメータの制約
- 入力制約：アクチュエータの制約
- レート制約：変化率の制約
- ソフト制約：ペナルティ関数による制約
- 優先順位付き制約：優先順位に基づく制約処理

7. ロバスト性：

- モデル不確かさ：モデル誤差に対するロバスト性
- 外乱抑制：外部擾乱に対するロバスト性
- 測定ノイズ：センサーノイズに対するロバスト性
- フィードバック補正：予測誤差のフィードバック補正
- チューブベースMPC：不確かさの明示的考慮

[0472] 強化学習の詳細：

1. 状態空間：

- 状態変数：プラズマパラメータ、機器状態、制御状態
- 状態表現：連続値、離散値、または混合
- 状態次元：数十～数百次元
- 状態正規化：異なるスケールの状態変数の正規化
- 状態抽象化：高次元状態の低次元表現

2. アクション空間：

- アクション変数：制御入力、設定値、運転モード
- アクション表現：連続値、離散値、または混合
- アクション次元：数～数十次元
- アクション制約：物理的制約、安全制約
- アクション抽象化：低レベルアクションの高レベル表現

3. 報酬関数：

- 性能報酬：プラズマ性能に基づく報酬
- 安全報酬：安全性に基づく報酬
- 効率報酬：資源効率に基づく報酬
- 複合報酬：複数の目標のバランス
- 階層的報酬：異なる時間スケールの報酬

4. 学習アルゴリズム：

- 価値ベース：Q学習、Deep Q-Network
- 方策ベース：REINFORCE、Trust Region Policy Optimization
- アクター・クリティック：A2C、A3C、SAC
- モデルベース：Dyna、PILCO

- 階層的強化学習：オプション、階層的方策

5. 探索戦略：

- ϵ -greedy：確率 ϵ でランダム行動
- ボルツマン探索：確率的行動選択
- UCB：不確かさに基づく探索
- ノイズ注入：方策にノイズを加える
- 内発的動機付け：好奇心駆動探索

6. 経験リプレイ：

- リプレイバッファ：過去の経験の保存
- サンプル戦略：優先度付きサンプリング
- バッファ管理：容量制限、古いデータの削除
- オフポリシー学習：現在の方策と異なる方策からの学習
- オンライン更新：リアルタイムでの更新

7. 安全強化学習：

- 制約付き最適化：安全制約下での最適化
- リスク回避：リスク指標の最小化
- 安全探索：安全な状態空間内での探索
- 回復方策：危険状態からの回復
- 人間の監視：人間の専門家による監視と介入

[0473] 意思決定の統合アプローチ：

1. 階層的意決定：

- 戦略レベル：長期的な運転目標と制約
- 戦術レベル：中期的な運転計画と最適化
- 実行レベル：短期的な制御アクション
- 調整メカニズム：異なるレベル間の調整
- 情報フロー：上位から下位、下位から上位への情報伝達

2. ハイブリッド意決定：

- ルールベース+MPC：ルールによるモード選択とMPCによる最適化
- MPC+強化学習：MPCによる短期制御と強化学習による長期最適化
- 強化学習+ルールベース：強化学習による探索とルールによる安全保証
- 複合アプローチ：状況に応じた最適アプローチの選択
- 適応的切り替え：性能と安全性に基づく手法の切り替え

3. 協調意決定：

- マルチエージェント協調：複数の制御エージェントの協調
- 分散最適化：サブシステム間の調整と最適化
- 合意形成：異なる目標間の合意形成
- 競合解決：競合する制約と目標の解決
- 資源割り当て：限られた資源の最適割り当て

4. 適応的意決定：

- オンライン学習：運転経験からの継続的学習
- モデル適応：プラズマ応答に基づくモデル適応

- パラメータ調整：性能に基づくパラメータ調整
- 戦略適応：長期的な性能に基づく戦略適応
- 異常対応：異常状態への適応的対応

5. 説明可能な意思決定：

- 決定根拠：意思決定の根拠の説明
- 信頼度評価：決定の信頼度の評価
- 代替案提示：考慮された代替案の提示
- トレードオフ分析：異なる目標間のトレードオフの分析
- 透明性確保：意思決定プロセスの透明性確保

[0474] フィードバック制御ループは、測定されたプラズマ条件と目標値との偏差に基づいて、制御アクションを生成する。制御ループは、階層的に構成されており、異なる時間スケールと制御目標に対応している。高速ループ (<1ms) は、プラズマ位置と形状の制御を担当する。中速ループ (1~10ms) は、プラズマ電流、密度、および加熱電力の制御を担当する。低速ループ (>10ms) は、プラズマ性能と機器保護の最適化を担当する。

[0475] 高速制御ループの詳細：

1. プラズマ位置制御：

- 制御変数：垂直位置、水平位置、径方向位置
- アクチュエータ：垂直磁場コイル、径方向磁場コイル
- センサー：磁気プローブ、フラックスループ
- 制御アルゴリズム：PID制御、状態フィードバック制御
- 性能仕様：位置精度±5mm、応答時間<1ms

2. プラズマ形状制御：

- 制御変数：伸長率、三角度、セパラトリクス位置
- アクチュエータ：ポロイダルフィールドコイル
- センサー：磁気プローブ、フラックスループ
- 制御アルゴリズム：モデル予測制御、特異値分解制御
- 性能仕様：形状精度±1cm、応答時間<5ms

3. MHD安定性制御：

- 制御変数：キンクモード、抵抗性壁モード
- アクチュエータ：能動的安定化コイル、回転制御
- センサー：磁気プローブ、ミルノフコイル
- 制御アルゴリズム：モード検出と抑制、フィードバック制御
- 性能仕様：モード抑制率>90%、応答時間<0.5ms

4. ELM制御：

- 制御変数：ELM頻度、ELM振幅
- アクチュエータ：摂動コイル、ペレット入射
- センサー：Da放射、磁気プローブ
- 制御アルゴリズム：位相制御、振幅変調
- 性能仕様：ELMエネルギー低減>50%、応答時間<1ms

5. 高速異常対応：

- 検出対象：垂直変位イベント、ディスラプション前兆

- アクチュエータ：垂直安定化コイル、緊急ガス注入
- センサー：磁気プローブ、ソフトX線検出器
- 制御アルゴリズム：予測的検出と抑制
- 性能仕様：検出時間<0.5ms、対応時間<2ms

[0476] 中速制御ループの詳細：

1. プラズマ電流制御：

- 制御変数：総電流値、電流分布
- アクチュエータ：オーム加熱、非誘導電流駆動
- センサー：ロゴスキーコイル、MSE診断
- 制御アルゴリズム：フィードフォワード+フィードバック制御
- 性能仕様：電流精度 $\pm 1\%$ 、応答時間<10ms

2. プラズマ密度制御：

- 制御変数：平均密度、密度分布
- アクチュエータ：ガスパフ、ペレット入射、排気
- センサー：干渉計、反射計
- 制御アルゴリズム：多入力多出力制御、モデル予測制御
- 性能仕様：密度精度 $\pm 5\%$ 、応答時間<5ms

3. 加熱電力制御：

- 制御変数：NBI電力、ICRH電力、ECRH電力
- アクチュエータ：加熱システム電源
- センサー：入射電力計測、吸収電力推定
- 制御アルゴリズム：フィードフォワード制御、スケジュール制御
- 性能仕様：電力精度 $\pm 2\%$ 、応答時間<5ms

4. 不純物制御：

- 制御変数：不純物濃度、放射分布
- アクチュエータ：不純物注入、排気
- センサー：分光計測、軟X線計測
- 制御アルゴリズム：フィードバック制御、モデルベース制御
- 性能仕様：濃度制御精度 $\pm 10\%$ 、応答時間<10ms

5. ダイバータ制御：

- 制御変数：ストライク点位置、熱負荷分布
- アクチュエータ：ダイバータコイル、不純物注入
- センサー：赤外カメラ、ラングミュアプローブ
- 制御アルゴリズム：フィードバック制御、デタッチメント制御
- 性能仕様：位置精度 $\pm 5\text{mm}$ 、応答時間<5ms

[0477] 低速制御ループの詳細：

1. プラズマ性能最適化：

- 制御変数：閉じ込め時間、ベータ値、核融合出力
- アクチュエータ：加熱分布、電流分布、密度分布
- センサー：中性子計測、エネルギー閉じ込め診断
- 制御アルゴリズム：最適化アルゴリズム、強化学習
- 性能仕様：性能向上>10%、最適化時間<1s

2. 機器保護最適化：

- 制御変数：表面温度、侵食率、熱負荷
- アクチュエータ：リミッタ位置、磁場配位、加熱分布
- センサー：赤外カメラ、分光診断
- 制御アルゴリズム：制約付き最適化、リスク最小化
- 性能仕様：熱負荷低減>30%、侵食率低減>50%

3. 運転シナリオ管理：

- 制御変数：運転フェーズ、運転モード
- アクチュエータ：制御パラメータセット、配位選択
- センサー：プラズマ状態診断、運転パラメータ
- 制御アルゴリズム：状態機械、イベント駆動制御
- 性能仕様：遷移時間<100ms、安定性維持>99%

4. 資源管理最適化：

- 制御変数：電力消費、冷却水使用、運転時間
- アクチュエータ：運転パラメータ、スケジュール
- センサー：電力計測、冷却水計測、時間計測
- 制御アルゴリズム：資源割り当て最適化
- 性能仕様：効率向上>10%、資源利用最適化>95%

5. 長期運転最適化：

- 制御変数：機器寿命、メンテナンス間隔
- アクチュエータ：運転条件、負荷分散
- センサー：寿命診断、劣化監視
- 制御アルゴリズム：寿命予測モデル、保守最適化
- 性能仕様：寿命延長>30%、メンテナンス間隔最適化>90%

[0478] フィードバック制御の実装詳細：

1. PID制御：

- 比例ゲイン：偏差に比例した制御
- 積分ゲイン：偏差の積分に比例した制御
- 微分ゲイン：偏差の微分に比例した制御
- アンチwindアップ：積分項の飽和防止
- ゲインスケジューリング：運転条件に応じたゲイン調整

2. 状態フィードバック制御：

- 状態推定：カルマンフィルタによる状態推定
- 極配置：閉ループ極の最適配置
- LQR：線形二次レギュレータ
- 積分器追加：定常偏差の除去
- オブザーバ設計：状態観測器の設計

3. モデル予測制御：

- 予測モデル：線形または非線形モデル
- 予測ホライズン：将来の状態を予測する時間範囲
- 制御ホライズン：最適化する制御入力の時間範囲

- 目標関数：追従誤差と制御努力のバランス
- 制約処理：状態制約と入力制約の処理

4. 適応制御：

- パラメータ同定：システムパラメータのオンライン同定
- モデル適応：同定されたパラメータに基づくモデル更新
- ゲイン適応：システム応答に基づくゲイン調整
- 構造適応：システム構造の変化に対する適応
- 安定性保証：適応中の安定性保証

5. ロバスト制御：

- H_{∞} 制御：最悪ケース性能の最適化
- μ -シンセシス：構造化不確かさに対するロバスト制御
- スライディングモード制御：不確かさに対するロバスト性
- 受動性ベース制御：受動性に基づく安定性保証
- 外乱オブザーバ：外乱の推定と補償

[0479] 予測的制御機能は、プラズマ条件の変化を予測し、先行的に制御アクションを生成する。この機能は、物理モデルと機械学習モデルを組み合わせられて実装されている。物理モデルは、プラズマの基本的な振る舞いを記述し、機械学習モデルは、過去のデータに基づいてプラズマの応答を予測する。

[0480] 予測モデルの詳細：

1. 物理モデル：

- プラズマ平衡モデル：グラッド-シャフラノフ方程式に基づくモデル
- 輸送モデル：粒子、熱、運動量の輸送方程式
- MHD安定性モデル：理想MHDと抵抗性MHDの安定性解析
- エッジプラズマモデル：SOLとダイバータプラズマのモデル
- 中性粒子モデル：中性粒子輸送と相互作用のモデル

2. 簡略化モデル：

- 縮約モデル：高次元モデルの低次元表現
- 準線形モデル：非線形モデルの線形化近似
- 応答モデル：入力-出力応答の簡略化表現
- 経験的モデル：実験データに基づく簡略化モデル
- 多時間スケールモデル：異なる時間スケールの分離

3. 統計モデル：

- 時系列モデル：ARIMA、SARIMA、GARCH
- 回帰モデル：線形回帰、多項式回帰、スプライン回帰
- ガウス過程：ノンパラメトリック確率モデル
- 状態空間モデル：隠れ状態を持つ動的モデル
- ベイズモデル：事前知識と観測データの統合

4. 機械学習モデル：

- ニューラルネットワーク：深層フィードフォワードネットワーク
- リカレントネットワーク：LSTM、GRU
- 畳み込みネットワーク：空間的特徴の抽出
- 自己回帰モデル：過去の値に基づく予測

- アンサンブルモデル：複数のモデルの組み合わせ

5. ハイブリッドモデル：

- 物理ガイド付き機械学習：物理的制約を持つ機械学習
- モデル補正：物理モデルの機械学習による補正
- マルチモデル：複数のモデルの切り替えまたは統合
- 階層的モデル：異なるスケールのモデルの階層化
- 適応的モデル：運転条件に応じた適応

[0481] 応答予測の詳細：

1. 線形応答モデル：

- 伝達関数：入力から出力への周波数応答
- 状態空間モデル：内部状態を持つ線形モデル
- インパルス応答：単位インパルス入力に対する応答
- ステップ応答：単位ステップ入力に対する応答
- 周波数応答：異なる周波数の入力に対する応答

2. 非線形応答モデル：

- Volterra級数：非線形システムの入出力表現
- Wienerモデル：線形動特性と静的非線形性
- Hammerstein モデル：静的非線形性と線形動特性
- NARX：非線形自己回帰外生入力モデル
- ブロック指向モデル：線形と非線形ブロックの組み合わせ

3. データ駆動モデル：

- サポートベクター回帰：カーネル法に基づく回帰
- ランダムフォレスト：決定木アンサンブル
- ガウス過程回帰：確率的非線形回帰
- ニューラルネットワーク：深層学習モデル
- ファジィモデル：あいまいさを考慮したモデル

4. ハイブリッドモデル：

- 物理モデル+データ補正：物理モデルのデータ駆動補正
- マルチモデル：異なるモデルの組み合わせ
- 適応モデル：運転条件に応じた適応
- 階層的モデル：異なる時間スケールのモデル階層
- 分解モデル：異なる物理現象の分解モデル

5. 不確かさモデル：

- パラメータ不確かさ：モデルパラメータの不確かさ
- 構造不確かさ：モデル構造の不確かさ
- 外乱モデル：外部擾乱の統計的モデル
- 測定ノイズ：センサーノイズの統計的モデル
- 予測誤差：予測の信頼区間と予測区間

[0482] 先行制御の詳細：

1. フィードフォワード制御：

- 外乱補償：予測された外乱の事前補償

- 参照軌道追従：目標軌道の先行追従
- モデル逆制御：システムモデルの逆を用いた制御
- 二自由度制御：フィードフォワードとフィードバックの組み合わせ
- 学習フィードフォワード：過去の経験に基づく補償

2. モデル予測制御：

- 予測的最適化：将来の状態を予測した最適化
- 制約予測：将来の制約違反の予測と回避
- 多目的最適化：複数の目標のバランス
- 確率的MPC：不確かさを考慮した予測制御
- 適応的MPC：モデルの適応的更新

3. 学習制御：

- 反復学習制御：繰り返しタスクの学習
- 強化学習制御：報酬最大化の学習
- 模倣学習：専門家の行動の模倣
- オンライン学習：運転中の継続的学習
- 転移学習：異なる状況間での知識転移

4. 適応制御：

- モデル適応：システム応答に基づくモデル適応
- パラメータ適応：システムパラメータの適応的推定
- ゲイン適応：制御ゲインの適応的調整
- 構造適応：制御構造の適応的変更
- 学習適応：過去の経験に基づく適応

5. 予測的安全制御：

- 安全予測：安全性の予測と保証
- リスク評価：将来のリスクの評価と最小化
- 回避制御：危険状態の予測と回避
- 回復計画：異常からの回復計画
- 緊急対応：緊急事態の予測

[0483] 異常検出システムは、プラズマ条件や機器状態の異常を検出し、適切な対応を開始する。異常検出は、統計的手法、パターン認識、および物理モデルに基づいて実装されている。検出された異常の重大度に応じて、警告、制御パラメータの調整、または緊急停止などの対応が選択される。

[0484] 監視対象の詳細：

1. プラズマパラメータ：

- 電流プロファイル：総電流値、電流分布、電流密度勾配
- 密度プロファイル：平均密度、密度分布、密度勾配
- 温度プロファイル：電子温度、イオン温度、温度勾配
- MHD活動：鋸歯状振動、ティアリングモード、ELM、抵抗性壁モード
- 放射損失：総放射損失、放射分布、放射ピーク
- 閉じ込め性能：エネルギー閉じ込め時間、粒子閉じ込め時間、ベータ値

2. 機器状態：

- 表面温度：リミッタ表面温度、ダイバータ表面温度、第一壁温度

- 冷却水パラメータ：流量、入口温度、出口温度、圧力、圧力損失
- 機械的応力：熱応力、電磁力による応力、振動
- 電気的特性：コイル電流、電圧、抵抗、インダクタンス
- 材料状態：侵食率、堆積率、表面状態、微細構造
- 真空状態：真空度、リーク率、不純物分圧

3. 制御システム状態：

- センサー状態：信号強度、信号対雑音比、校正状態
- アクチュエータ状態：応答性、精度、再現性、限界値
- 計算機状態：CPU使用率、メモリ使用率、ディスク使用率、ネットワーク負荷
- ソフトウェア状態：実行時間、応答時間、例外発生、エラーログ
- 通信状態：通信遅延、パケット損失、帯域幅使用率
- 電源状態：電圧安定性、電流安定性、電力品質

4. 環境条件：

- 真空容器内条件：中性粒子圧力、不純物濃度、ダスト粒子
- 放射線レベル：中性子フラックス、ガンマ線量率、放射化
- 電磁環境：電磁ノイズ、磁場漏れ、電磁干渉
- 熱環境：周囲温度、熱勾配、熱サイクル
- 機械環境：振動、衝撃、変形
- 人的要因：運転者操作、メンテナンス活動

[0485] 検出アルゴリズムの詳細：

1. 統計的手法：

- 閾値検出：固定閾値または適応閾値に基づく検出
- 統計的検定：Z検定、t検定、カイ二乗検定、F検定
- 管理図：シューハート管理図、CUSUM、EWMA
- 外れ値検出：Z-スコア、修正Z-スコア、IQR法
- 変化点検出：CUSUM、PELT、ベイズ変化点検出

2. モデルベース手法：

- 残差生成：モデル予測と実測値の差
- パリティ方程式：入出力関係の整合性チェック
- オブザーバベース：状態推定と実測値の比較
- パラメータ推定：システムパラメータの変化検出
- 物理的制約チェック：物理法則との整合性チェック

3. 機械学習手法：

- 教師あり学習：異常パターンの分類
- 教師なし学習：正常パターンからの逸脱検出
- 半教師あり学習：少数の異常サンプルと多数の正常サンプルを使用
- ディープラーニング：自己符号化器、異常検出ネットワーク
- オンライン学習：運転中の継続的学習と適応

4. 信号処理手法：

- スペクトル分析：周波数成分の異常検出
- 時間-周波数分析：時間的に変化する周波数特性の検出
- ウェーブレット解析：多重解像度での異常検出

- 相関分析：信号間の相関関係の変化検出
- エントロピー解析：信号の複雑さや規則性の変化検出

5. ハイブリッド手法：

- モデル+データ：物理モデルとデータ駆動モデルの組み合わせ
- マルチモーダル：異なる種類のデータの統合
- アンサンブル：複数の検出器の組み合わせ
- 階層的検出：異なるレベルでの段階的検出
- コンテキスト考慮：運転状況を考慮した適応的検出

[0486] 分類アルゴリズムの詳細：

1. ルールベース分類：

- 決定ルール：IF-THEN形式のルール
- 決定表：条件と行動のマトリックス
- ファジイルール：あいまいさを考慮したルール
- 専門家システム：専門知識のエンコード
- ケースベース推論：過去の事例との類似性に基づく分類

2. 決定木：

- CART：分類回帰木
- ID3/C4.5/C5.0：情報利得に基づく決定木
- CHAID：カイ二乗自動交互作用検出
- 条件付き推論木：統計的検定に基づく決定木
- 多変量適応的回帰スプライン：区分的線形回帰

3. サポートベクターマシン：

- 線形SVM：線形分離可能なデータ用
- 非線形SVM：カーネルトリックによる非線形分類
- マルチクラスSVM：複数クラスへの拡張
- ワンクラスSVM：異常検出用の単一クラス分類
- サポートベクター回帰：回帰問題への適用

4. ニューラルネットワーク：

- 多層パーセプトロン：基本的なフィードフォワードネットワーク
- 畳み込みネットワーク：空間的パターン認識
- リカレントネットワーク：時系列パターン認識
- 自己組織化マップ：教師なしパターン認識
- ディープビリーフネットワーク：深層生成モデル

5. アンサンブル法：

- ランダムフォレスト：決定木のアンサンブル
- 勾配ブースティング：逐次的モデル改善
- バギング：ブートストラップ集約
- スタッキング：メタ学習による統合
- 加重投票：複数分類器の加重平均

[0487] 対応戦略の詳細：

1. 警告：

- 視覚的警告：コンソール表示、色分け表示
- 聴覚的警告：アラーム音、音声通知
- メッセージ通知：テキストメッセージ、電子メール
- 優先度表示：重要度に応じた表示方法
- 詳細情報：警告の原因と推奨対応の提示

2. 制御調整：

- パラメータ調整：制御パラメータの自動調整
- 運転点移動：より安全な運転点への移動
- 配位変更：磁場配位の変更
- 加熱調整：加熱電力と分布の調整
- 密度調整：プラズマ密度の調整

3. 保護動作：

- リミッタ位置調整：リミッタの引き込みまたは前進
- 電力低減：加熱電力の低減
- 冷却強化：冷却システムの強化
- 不純物注入：放射冷却のための不純物注入
- 磁場調整：磁場配位の保護的調整

4. 緊急停止：

- ソフト停止：制御された電流減少と終了
- 急速停止：加熱停止と急速電流減少
- 緊急ガス注入：大量ガス注入による急速冷却
- キラーペレット：高Z物質ペレットによる急速放射冷却
- 緊急保護：機器保護のための緊急措置

5. 回復手順：

- 診断実行：異常の詳細診断
- 状態評価：システム状態の包括的評価
- 回復計画：回復のための最適計画
- 段階的回復：段階的なシステム回復
- 検証テスト：回復後の機能検証

[0488] 異常検出と対応の統合：

1. 異常の重大度評価：

- 影響範囲：局所的または広範囲
- 時間的緊急性：即時対応または計画的対応
- 潜在的損害：機器損傷のリスク
- 運転影響：運転継続への影響
- 安全性影響：人員と環境への安全影響

2. 対応選択ロジック：

- 決定マトリックス：異常タイプと重大度に基づく対応選択
- 階層的対応：段階的な対応エスカレーション
- コンテキスト考慮：運転状況を考慮した対応選択
- リスクベース決定：リスク評価に基づく決定
- 人間の判断：重要決定における人間の関与

3. 対応実行管理：

- 実行監視：対応アクションの実行監視
- 効果評価：対応の効果評価
- 適応調整：効果に基づく対応の調整
- 完了確認：対応完了の確認
- 記録と分析：対応の記録と事後分析

4. 学習と改善：

- 事例分析：異常事例の詳細分析
- 根本原因分析：異常の根本原因の特定
- 検出改善：異常検出の改善
- 対応最適化：対応戦略の最適化
- 知識ベース更新：経験に基づく知識ベースの更新

5. 報告と共有：

- 異常報告：異常の詳細報告
- 対応報告：対応アクションの報告
- 教訓共有：得られた教訓の共有
- 改善提案：システム改善の提案
- 知識移転：経験と知識の組織的共有

[0489] 運転シナリオマネージャは、異なる運転フェーズ（プラズマ立ち上げ、電流上昇、加熱、定常運転、終了など）に対応した制御パラメータを管理する。各フェーズでは、最適な制御パラメータが自動的に選択され、スムーズな遷移が確保される。

[0490] シナリオライブラリの詳細：

1. 標準運転シナリオ：

- L-モードシナリオ：低閉じ込めモード運転
- H-モードシナリオ：高閉じ込めモード運転
- ハイブリッドシナリオ：L-モードとH-モードの中間特性
- 高ベータシナリオ：高ベータ値での運転
- 長パルスシナリオ：長時間安定運転

2. 高性能シナリオ：

- 高閉じ込めシナリオ：最大閉じ込め時間を指したシナリオ
- 高核融合出力シナリオ：最大核融合出力を指したシナリオ
- 高ベータ限界シナリオ：最大ベータ値を指したシナリオ
- 高密度シナリオ：グリーンワルド限界近傍での高密度運転
- 高温シナリオ：高中心温度を指したシナリオ

3. 長パルスシナリオ：

- 完全非誘導シナリオ：誘導電流なしの完全非誘導運転
- 高ブートストラップシナリオ：高ブートストラップ電流比率
- 低熱負荷シナリオ：壁への熱負荷を最小化したシナリオ
- 定常状態シナリオ：完全定常状態運転
- 低サイクル疲労最小化シナリオ：熱サイクルを最小化したシナリオ

4. 特殊シナリオ：

- 輸送研究シナリオ：輸送現象研究のためのシナリオ
- 不安定性研究シナリオ：MHD不安定性研究のためのシナリオ
- 粒子輸送研究シナリオ：粒子輸送研究のためのシナリオ
- 波動-粒子相互作用研究シナリオ：波動-粒子相互作用研究のためのシナリオ
- 材料試験シナリオ：プラズマ対向材料試験のためのシナリオ

5. 回復シナリオ：

- ディスラプション後回復シナリオ：ディスラプション後の回復
- 真空事故後回復シナリオ：真空事故後の回復
- 冷却系統障害後回復シナリオ：冷却系統障害後の回復
- 電源障害後回復シナリオ：電源障害後の回復
- センサー障害後回復シナリオ：センサー障害後の回復

[0491] 運転フェーズの詳細：

1. 準備フェーズ：

- 真空排気：最終真空度 $<10^{-6}$ Pa
- 壁コンディショニング：ベーキング、グロー放電洗浄、ボロナイゼーション
- 初期磁場設定：トロイダル磁場とポロイダル磁場の初期設定
- センサー校正：磁気センサー、分光センサーなどの校正
- システムチェック：全サブシステムの機能確認
- 初期ガス充填：初期プラズマ用の低圧ガス充填

2. プラズマ立ち上げフェーズ：

- リミッタ位置設定：プラズマ立ち上げ用の近接位置 ($d = 10 \sim 20\text{mm}$)
- 初期ガス注入：プラズマ形成用のガス注入
- 放電開始：ループ電圧印加と放電開始
- 初期プラズマ形成：低密度、低温プラズマの形成
- 初期電流上昇： $0.1 \sim 0.5$ MA/sの電流上昇率
- 初期位置制御：垂直・水平位置の初期制御

3. 電流上昇フェーズ：

- リミッタ位置調整：中間位置への移動 ($d = 20 \sim 40\text{mm}$)
- 電流上昇制御： $0.5 \sim 1.0$ MA/sの電流上昇率
- 形状制御開始：プラズマ形状の制御開始
- X点形成：ダイバータ配位のためのX点形成
- 密度上昇： $0.5 \sim 1.0 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}/\text{s}$ の密度上昇率
- 初期加熱：低電力の初期加熱 ($1 \sim 5$ MW)

4. 加熱フェーズ：

- リミッタ位置調整：より引き込まれた位置 ($d = 40 \sim 60\text{mm}$)
- 主加熱開始：NBI、ICRH、ECRHなどの主加熱開始
- 密度制御：目標密度への制御
- H-モード遷移：L-H遷移の制御
- プロファイル最適化：温度・密度分布の最適化
- ELM制御：ELM振幅と頻度の制御

5. 定常運転フェーズ：

- リミッタ位置最適化：最適位置の維持 (d = 60~80mm)
- 安定性維持：MHD安定性の維持
- 密度・温度維持：目標密度・温度の維持
- 不純物制御：不純物蓄積の抑制
- 熱負荷管理：壁への熱負荷の管理
- 長時間維持：プラズマパラメータの長時間維持

6. 終了フェーズ：

- リミッタ位置調整：終了用の位置 (d = 30~50mm)
- 加熱低減：加熱電力の段階的低減
- 電流低減：電流の制御された低減
- 密度制御：密度の制御された低減
- 位置制御：終了中の位置制御維持
- 安全終了：熱負荷を分散させた安全な終了

[0492] 遷移条件の詳細：

1. 時間条件：

- 絶対時間：予定された時間経過後に遷移
- 相対時間：フェーズ開始からの経過時間
- 積算時間：特定条件下での累積時間
- タイムアウト：最大許容時間の経過
- スケジュール：事前定義されたタイムスケジュール

2. 状態条件：

- プラズマ電流：目標電流値の達成
- プラズマ密度：目標密度の達成
- プラズマ温度：目標温度の達成
- プラズマ形状：目標形状の達成
- 磁場配位：目標配位の達成
- 安定性指標：安定性基準の満足

3. 性能条件：

- 閉じ込め時間：目標閉じ込め時間の達成
- ベータ値：目標ベータ値の達成
- 核融合出力：目標出力の達成
- 中性子発生率：目標中性子発生率の達成
- 放射損失比：許容放射損失比の維持
- 不純物濃度：許容不純物濃度の維持

4. 安全条件：

- 熱負荷：安全熱負荷レベルの確保
- MHD活動：許容MHD活動レベルの維持
- 密度限界：グリーンワールド限界からの安全マージン
- ベータ限界：ベータ限界からの安全マージン
- 垂直安定性：垂直安定性マージンの確保
- 機器温度：安全温度範囲の維持

5. 運転者条件：

- 手動遷移：運転者による遷移指示
- 承認要求：自動遷移の運転者承認
- 優先指示：運転者による優先指示
- 緊急指示：緊急状況での運転者指示
- 実験計画：実験計画に基づく運転者指示

[0493] パラメータ調整の詳細：

1. スケジュールベース調整：

- 時間関数：時間の関数としてのパラメータ変化
- イベント関数：イベント発生に伴うパラメータ変化
- フェーズ依存：運転フェーズに依存したパラメータ設定
- 事前計算：シミュレーションに基づく事前計算パラメータ
- 標準プロファイル：標準化されたパラメータプロファイル

2. フィードバック調整：

- PID制御：偏差に基づくPID制御
- 状態フィードバック：状態変数に基づくフィードバック
- モデル予測制御：予測モデルに基づく最適制御
- 適応制御：システム応答に基づく適応的調整
- ロバスト制御：不確かさを考慮したロバスト調整

3. 適応的調整：

- パラメータ同定：システムパラメータのオンライン同定
- モデル更新：同定されたパラメータに基づくモデル更新
- 制御パラメータ適応：システム応答に基づく制御パラメータ適応
- 運転点適応：最適運転点の適応的探索
- 外乱適応：外部擾乱に対する適応

4. 最適化ベース調整：

- オンライン最適化：リアルタイム最適化アルゴリズム
- 多目的最適化：複数の目標のバランス最適化
- 制約付き最適化：物理的・運転的制約下での最適化
- 進化的最適化：遺伝的アルゴリズムなどの進化的手法
- 勾配法：勾配情報を利用した最適化

5. 学習ベース調整：

- 強化学習：報酬最大化に基づく学習
- 模倣学習：専門家の行動の模倣
- バッチ学習：オフラインデータからの学習
- オンライン学習：運転中の継続的学習
- 転移学習：類似状況からの知識転移

[0494] 機械学習最適化モジュールは、過去の運転データに基づいて制御パラメータを最適化する。このモジュールは、強化学習とベイズ最適化を組み合わせて実装されており、プラズマ性能と機器保護のバランスを考慮した最適な制御戦略を学習する。

[0495] データ収集と前処理の詳細：

1. データ選択：

- 関連パラメータ：制御に関連するパラメータの選択
- 時間範囲：関連する時間範囲のデータ選択
- 運転条件：特定の運転条件下のデータ選択
- 品質フィルタ：高品質データの選択
- サンプリング：適切なサンプリング頻度の選択

2. ノイズ除去：

- デジタルフィルタ：ローパス、バンドパス、ノッチフィルタ
- 適応フィルタ：信号特性に応じた適応フィルタ
- ウェーブレット除去：ウェーブレットベースのノイズ除去
- カルマンフィルタ：状態推定に基づくノイズ除去
- メディアンフィルタ：外れ値に頑健なフィルタ

3. 正規化：

- Z-スコア正規化：平均0、標準偏差1への正規化
- Min-Max正規化：指定範囲への正規化
- ロバスト正規化：四分位範囲に基づく正規化
- 対数変換：対数スケールへの変換
- べき変換：べき乗変換による分布の正規化

4. 欠損値処理：

- 線形補間：隣接点からの線形補間
- スプライン補間：滑らかな曲線による補間
- 時系列補間：時系列特性を考慮した補間
- 多変量補間：相関変数を利用した補間
- モデルベース補間：物理モデルに基づく補間

5. 外れ値処理：

- 統計的検出：Z-スコア、IQR法による検出
- 密度ベース検出：局所密度に基づく検出
- 距離ベース検出：距離メトリックに基づく検出
- モデルベース検出：予測モデルからの偏差に基づく検出
- アンサンブル検出：複数手法の組み合わせ

[0496] 特徴抽出の詳細：

1. 物理ベース特徴：

- 無次元パラメータ：規格化ベータ値、規格化密度、安全係数など
- 勾配特徴：温度勾配、密度勾配、圧力勾配など
- 安定性指標：理想MHD安定性指標、抵抗性安定性指標など
- 輸送係数：熱拡散係数、粒子拡散係数など
- エネルギーバランス：加熱電力、放射損失、輸送損失など

2. 統計ベース特徴：

- 記述統計量：平均、分散、歪度、尖度など
- 時間統計量：自己相関、交差相関、スペクトル密度など
- 空間統計量：空間相関、空間モーメントなど
- 分布特性：確率分布パラメータ、エントロピーなど
- 変動特性：変動係数、フラクタル次元など

3. 次元削減：

- 主成分分析（PCA）：線形次元削減
- 独立成分分析（ICA）：統計的独立性に基づく分解
- 因子分析：潜在因子に基づく次元削減
- 多次元尺度構成法：距離保存に基づく次元削減
- t-SNE：局所構造保存に基づく次元削減

4. 特徴選択：

- フィルタ法：相関係数、相互情報量に基づく選択
- ラッパー法：モデル性能に基づく選択
- 埋め込み法：L1正則化、決定木重要度に基づく選択
- 再帰的特徴除去：反復的な特徴除去
- 遺伝的アルゴリズム：進化的アルゴリズムによる選択

5. 特徴工学：

- 多項式特徴：変数の多項式組み合わせ
- 交互作用特徴：変数間の交互作用
- 時間特徴：時間差分、積分、移動平均など
- 周波数特徴：フーリエ係数、パワースペクトル密度など
- ドメイン知識特徴：物理的知識に基づく特徴

[0497] モデル構築の詳細：

1. 回帰モデル：

- 線形回帰：単純または多重線形回帰
- 多項式回帰：高次多項式による非線形回帰
- リッジ回帰：L2正則化付き線形回帰
- LASSO回帰：L1正則化付き線形回帰
- ガウス過程回帰：ノンパラメトリック確率的回帰

2. 分類モデル：

- ロジスティック回帰：確率的二値分類
- 決定木：階層的分岐による分類
- ランダムフォレスト：決定木アンサンブル
- サポートベクターマシン：マージン最大化による分類
- ナイーブベイズ：確率的生成モデルによる分類

3. ニューラルネットワーク：

- 多層パーセプトロン：基本的なフィードフォワードネットワーク
- 畳み込みネットワーク：空間的特徴抽出
- リカレントネットワーク：時系列モデリング
- LSTM/GRU：長期依存性のモデリング
- 自己符号化器：次元削減と特徴学習

4. アンサンブルモデル：

- バギング：ブートストラップ集約
- ブースティング：逐次的モデル改善
- スタッキング：メタ学習による統合

- 加重平均：モデル出力の加重平均
- 投票：分類問題での多数決

5. 強化学習モデル：

- Q学習：行動価値関数の学習
- SARSA：オンポリシー時間差分学習
- ポリシー勾配法：方策の直接最適化
- アクター・クリティック：価値関数と方策の同時学習
- 深層強化学習：ディープネットワークを用いた強化学習

[0498] 最適化の詳細：

1. グリッドサーチ：

- パラメータグリッド：パラメータ空間の格子点
- 多段階グリッド：粗い探索から細かい探索へ
- 部分グリッド：重要なパラメータのみのグリッド
- 並列評価：複数の格子点の並列評価
- クロスバリデーション：各格子点での交差検証

2. ランダムサーチ：

- パラメータ分布：パラメータの確率分布からのサンプリング
- サンプル数：計算資源に応じたサンプル数
- 適応的サンプリング：過去の結果に基づくサンプリング
- 並列評価：複数のサンプルの並列評価
- 早期停止：有望でないサンプルの早期評価停止

3. ベイズ最適化：

- ガウス過程：未評価点の性能予測
- 獲得関数：次の評価点の選択基準
- 探索-活用バランス：未知領域の探索と有望領域の活用
- 多目的最適化：複数の目標のバランス
- 制約付き最適化：制約条件下での最適化

4. 進化的アルゴリズム：

- 遺伝的アルゴリズム：生物進化を模倣したアルゴリズム
- 進化戦略：自己適応的変異を持つアルゴリズム
- 粒子群最適化：群れの行動を模倣したアルゴリズム
- 差分進化：ベクトル差分に基づく進化
- 遺伝的プログラミング：プログラム構造の進化

5. 勾配ベース最適化：

- 勾配降下法：勾配方向への反復的更新
- ニュートン法：二次導関数情報を利用した最適化
- 準ニュートン法：ヘッセ行列近似を用いた最適化
- 共役勾配法：直交方向への反復的最適化
- 確率的勾配降下法：ミニバッチに基づく勾配更新

[0499] 検証の詳細：

1. クロスバリデーション：

- k分割交差検証：データをk個のフォールドに分割
- 層化交差検証：クラス分布を保持した分割
- 時系列交差検証：時間的依存性を考慮した分割
- グループ交差検証：グループ構造を考慮した分割
- ネスト交差検証：モデル選択とパフォーマンス評価の分離

2. ホールドアウト検証：

- テストセット：独立したテストデータでの評価
- 検証セット：モデル選択用の独立データ
- 時間的分割：時間的に後のデータをテストに使用
- 条件別分割：異なる運転条件でのテスト
- 多重ホールドアウト：複数のホールドアウトセットでの評価

3. シミュレーション検証：

- 物理シミュレーション：物理モデルに基づくシミュレーション
- モンテカルロシミュレーション：確率的シミュレーション
- 感度分析：パラメータ変動に対する感度
- 極端条件テスト：極端な条件下でのテスト
- 故障モードテスト：様々な故障モードのシミュレーション

4. 実験検証：

- パイロット実験：小規模または短時間の実験
- 段階的検証：段階的に複雑さを増す検証
- 条件変化テスト：異なる条件下での検証
- 長時間テスト：長時間運転での安定性検証
- ストレステスト：極限条件下での性能検証

5. A/Bテスト：

- 並行比較：異なる制御戦略の並行比較
- 交互適用：異なる戦略の交互適用
- ブラインドテスト：評価者にどの戦略かを知らせないテスト
- 多変量テスト：複数の変数を同時に変更するテスト
- 段階的ロールアウト：成功した戦略の段階的展開

[0500] 高速データ通信ネットワークは、各サブシステム間のデータと制御信号の交換を管理する。ネットワークは、高帯域幅、低遅延、および高信頼性を備えており、リアルタイム制御の要件を満たしている。通信プロトコルは、データの優先順位付けと再送機能を備えており、重要なデータの確実な伝送を保証する。

[0501] ネットワークハードウェアの詳細：

1. スイッチとルーター：

- コアスイッチ：100Gbps以上のスイッチング容量
- エッジスイッチ：10Gbps以上のポート速度
- ルーター：高性能ルーティングエンジン
- バッファ容量：大容量パケットバッファ
- スwitchング遅延： $<1\mu\text{s}$ （カットスルーモード）

2. ケーブルとコネクタ：

- 光ファイバー：シングルモードまたはマルチモード光ファイバー

- 銅線：Cat 6a/7/8シールド付きツイストペア
- コネクタ：高信頼性コネクタ（LC、SC、RJ45など）
- 冗長経路：物理的に分離された冗長経路
- EMI保護：電磁干渉に対する保護

3. ネットワークインターフェース：

- NICカード：10/40/100Gbpsネットワークインターフェースカード
- TOEエンジン：TCP/IPオフロードエンジン
- RDMA対応：Remote Direct Memory Access対応
- ハードウェアタイムスタンプ：高精度パケットタイムスタンプ
- 割り込み調整：低レイテンシ割り込み処理

4. 時刻同期：

- PTP（IEEE 1588）：サブマイクロ秒精度の時刻同期
- GPS受信機：外部時刻源としてのGPS
- 分散クロック：マスタークロックと分散スレーブ
- 同期精度：<100ns（システム全体）
- ジッター：<10ns

5. 電源と冷却：

- 冗長電源：N+1または2N冗長電源
- UPS：無停電電源装置
- 電源監視：電源状態の継続的監視
- 冷却システム：効率的な冷却システム
- 温度監視：装置温度の継続的監視

[0502] ネットワークプロトコルの詳細：

1. TCP/IP：

- TCP：信頼性の高い接続指向プロトコル
- UDP：低オーバーヘッドの非接続プロトコル
- IP：ネットワーク層プロトコル
- ICMP：制御メッセージプロトコル
- ARP：アドレス解決プロトコル

2. リアルタイムプロトコル：

- RTP：リアルタイム転送プロトコル
- RTCP：RTPコントロールプロトコル
- RTSP：リアルタイムストリーミングプロトコル
- EtherCAT：イーサネットベースのフィールドバス
- PROFINET RT：リアルタイム産業用イーサネット

3. 低レイテンシプロトコル：

- RDMA：Remote Direct Memory Access
- RoCE：RDMA over Converged Ethernet
- InfiniBand：高性能コンピューティング用ネットワーク
- iWARP：Internet Wide Area RDMA Protocol
- DPDK：Data Plane Development Kit

4. 信頼性プロトコル：

- 前方誤り訂正：パケット損失に対する冗長性
- 選択的再送：損失パケットのみの再送
- マルチパス転送：複数経路を利用した転送
- パケット複製：重要パケットの複製
- 確認応答：パケット受信の確認

5. セキュリティプロトコル：

- TLS/SSL：転送層セキュリティ
- IPsec：IPレベルのセキュリティ
- MACsec：メディアアクセス制御セキュリティ
- SNMPv3：セキュアなネットワーク管理
- 802.1X：ポートベース認証

[0503] 通信ミドルウェアの詳細：

1. メッセージキュー：

- RabbitMQ：高度なメッセージキューイング
- Apache Kafka：分散ストリーミングプラットフォーム
- ZeroMQ：軽量メッセージングライブラリ
- ActiveMQ：JMS準拠のメッセージブローカー
- NATS：クラウドネイティブメッセージングシステム

2. 発行-購読システム：

- DDS：Data Distribution Service
- MQTT：軽量IoTプロトコル
- AMQP：Advanced Message Queuing Protocol
- PubSub+：エンタープライズ発行-購読
- Redis Pub/Sub：インメモリデータ構造ストア

3. リアルタイムミドルウェア：

- RTI Connext：リアルタイムシステム用ミドルウェア
- OpenDDS：オープンソースDDS実装
- CORBA：Common Object Request Broker Architecture
- ICE：Internet Communications Engine
- OPC UA：産業オートメーション用通信

4. 分散計算フレームワーク：

- Apache Spark：大規模データ処理
- Dask：並列計算ライブラリ
- Ray：分散AIフレームワーク
- MPI：Message Passing Interface
- Akka：分散アクターモデル

5. サービス指向アーキテクチャ：

- REST：Representational State Transfer
- gRPC：高性能RPCフレームワーク
- GraphQL：APIクエリ言語
- SOAP：Simple Object Access Protocol

- WebSocket：双方向通信プロトコル

[0504] ネットワーク性能の詳細：

1. 帯域幅：

- コアネットワーク：100Gbps以上
- 分散システム間：40Gbps以上
- エッジネットワーク：10Gbps以上
- 制御ネットワーク：1Gbps以上
- 管理ネットワーク：1Gbps以上

2. レイテンシ：

- リアルタイム制御：<1ms（エンドツーエンド）
- 高速データ収集：<5ms（エンドツーエンド）
- 通常通信：<10ms（エンドツーエンド）
- ストレージアクセス：<20ms（エンドツーエンド）
- 外部通信：<50ms（エンドツーエンド）

3. ジッター：

- リアルタイム制御：<100 μ s
- 高速データ収集：<500 μ s
- 通常通信：<1ms
- ストレージアクセス：<5ms
- 外部通信：<10ms

4. パケット損失率：

- リアルタイム制御：<10⁻⁹
- 高速データ収集：<10⁻⁸
- 通常通信：<10⁻⁶
- ストレージアクセス：<10⁻⁵
- 外部通信：<10⁻⁴

5. 可用性：

- リアルタイム制御：>99.999%（年間ダウンタイム<5分）
- 高速データ収集：>99.99%（年間ダウンタイム<52分）
- 通常通信：>99.9%（年間ダウンタイム<8.8時間）
- ストレージアクセス：>99.9%（年間ダウンタイム<8.8時間）
- 外部通信：>99.5%（年間ダウンタイム<43.8時間）

[0505] 通信プロトコルの機能詳細：

1. 優先順位付け：

- トラフィッククラス：複数の優先度クラス
- QoSマーキング：DSCP、CoS、TOS
- 優先キューイング：Strict Priority、Weighted Fair Queuing
- 帯域予約：最小保証帯域幅
- プリエンプション：高優先度トラフィックによる先取り

2. QoS保証：

- 帯域幅保証：クラスごとの最小帯域幅保証

- レイテンシ保証：最大レイテンシの保証
- ジッター制限：最大ジッターの制限
- 損失率制限：最大パケット損失率の制限
- リソース予約：ネットワークリソースの予約

3. 再送機能：

- ARQ：自動再送要求
- 選択的再送：損失パケットのみの再送
- 迅速再送：早期の損失検出と再送
- タイムアウト調整：ネットワーク条件に応じた調整
- 最大再送回数：信頼性と遅延のバランス

4. フロー制御：

- ウィンドウベース：スライディングウィンドウ
- レートベース：送信レート制御
- クレジットベース：受信バッファに基づく制御
- バックプレッシャー：受信側からの制御信号
- 適応的制御：ネットワーク条件に応じた適応

5. 輻輳制御：

- スロースタート：段階的な送信レート増加
- 輻輳回避：輻輳の予防的回避
- 高速回復：輻輳後の迅速な回復
- 明示的輻輳通知：ネットワークからの輻輳シグナル
- 適応的アルゴリズム：ネットワーク条件に応じた適応

[0506] 冗長設計は、システムの信頼性を向上させるために採用されている。重要なコンポーネントは、複数の冗長ユニットで構成されており、一部が故障しても全体の機能は維持される。また、フェイルセーフ機構が実装されており、システム障害時にも安全な状態が確保される。

[0507] ハードウェア冗長性の詳細：

1. 2重化：

- ホットスタンバイ：常時動作状態の予備
- コールドスタンバイ：非動作状態の予備
- 切替機構：主系から副系への切替
- 状態同期：主系と副系の状態同期
- 切替判定：故障検出と切替判定

2. 3重化：

- トリプルモジュラー冗長：3つの同一モジュール
- 多数決ロジック：3つの出力の多数決
- 診断機能：故障モジュールの特定
- 自動修復：故障モジュールの自動交換または修復
- 劣化運転：1モジュール故障時の継続運転

3. N+M冗長：

- 負荷分散：N個のモジュールでの負荷分散
- 予備モジュール：M個の予備モジュール

- 動的再構成：故障時の負荷再分配
- スケーラビリティ：モジュール追加による拡張性
- 効率最適化：負荷に応じたモジュール数調整

4. ロードバランシング：

- 均等分散：複数モジュールへの均等負荷分散
- 重み付け分散：能力に応じた負荷分散
- 動的分散：負荷状況に応じた動的調整
- ヘルスチェック：モジュールの健全性確認
- フェイルオーバー：故障モジュールからの切替

5. ホットスワップ：

- オンライン交換：システム運転中の交換
- 自動検出：新モジュールの自動検出
- 自動構成：新モジュールの自動構成
- 無停止切替：交換中の機能維持
- 診断検証：交換後の機能検証

[0508] ソフトウェア冗長性の詳細：

1. 多重処理：

- 並行実行：同一処理の複数インスタンス並行実行
- 結果比較：複数結果の比較
- 多数決：不一致時の多数決
- 異常検出：異常結果の検出
- 再実行：異常検出時の再実行

2. 多様化設計：

- 異なる実装：同一機能の異なる実装
- 異なるアルゴリズム：異なるアルゴリズムの使用
- 異なる開発チーム：独立した開発チーム
- 異なる開発環境：異なるツールと環境
- 共通モード故障防止：共通原因による同時故障の防止

3. チェックポイント：

- 状態保存：定期的な状態保存
- 復元機能：保存状態からの復元
- 増分チェックポイント：変更部分のみの保存
- 分散チェックポイント：分散システムの整合的状态保存
- 自動復旧：障害時の自動復旧

4. ウォッチドッグ：

- 活性監視：プロセスの活性確認
- タイムアウト検出：応答タイムアウトの検出
- 自動再起動：異常時の自動再起動
- エスカレーション：再起動失敗時のエスカレーション
- 状態記録：異常状態の記録

5. グレースフルデグラデーション：

- 機能優先順位：機能の優先順位付け
- 段階的劣化：優先度に応じた機能低下
- 必須機能維持：最重要機能の維持
- リソース再割当：残存リソースの最適割当
- 回復手順：正常状態への回復手順

[0509] データ冗長性の詳細：

1. データレプリケーション：

- 同期レプリケーション：書き込み完了前の複製
- 非同期レプリケーション：バックグラウンド複製
- マルチサイトレプリケーション：地理的に分散した複製
- カスケードレプリケーション：階層的複製
- 差分レプリケーション：変更部分のみの複製

2. RAID：

- RAID 1：ミラーリング
- RAID 5：分散パリティ
- RAID 6：二重分散パリティ
- RAID 10：ミラーリングとストライピングの組合せ
- ソフトウェアRAID：ソフトウェア実装のRAID

3. エラー検出訂正：

- パリティチェック：単一ビットエラー検出
- CRC：巡回冗長検査
- ハミング符号：単一ビットエラー訂正
- リード・ソロモン符号：バースト誤り訂正
- LDPC：低密度パリティ検査符号

4. バックアップ：

- フルバックアップ：完全なデータコピー
- 増分バックアップ：変更部分のみのバックアップ
- 差分バックアップ：前回フルバックアップからの変更
- スナップショット：特定時点の状態コピー
- オフサイトバックアップ：遠隔地でのバックアップ保管

5. バージョン管理：

- 履歴保存：データ変更履歴の保存
- ロールバック：以前のバージョンへの復帰
- 変更追跡：変更内容と変更者の追跡
- 分岐管理：並行変更の管理
- マージ：異なるバージョンの統合

[0510] 通信冗長性の詳細：

1. 冗長経路：

- デュアルホーミング：2つの独立ネットワークへの接続
- マルチパス：複数の通信経路
- 動的ルーティング：最適経路の動的選択
- リンク集約：複数リンクの論理的統合

- 経路監視：通信経路の継続的監視

2. プロトコル冗長：

- マルチプロトコル：複数の通信プロトコル
- プロトコル変換：異なるプロトコル間の変換
- フォールバックプロトコル：主プロトコル障害時の代替
- プロトコル適応：ネットワーク条件に応じた適応
- 互換性確保：異なるバージョン間の互換性

3. メディア冗長：

- 異種メディア：光ファイバー、銅線、無線などの組合せ
- 物理的分離：物理的に分離された経路
- 電源分離：独立電源による通信インフラ
- 環境分離：異なる環境条件下のメディア
- 障害ドメイン分離：共通障害要因の分離

4. 通信サービス冗長：

- マルチキャリア：複数の通信事業者サービス
- マルチアクセス：異なるアクセス技術
- サービスレベル保証：保証されたサービスレベル
- フェイルオーバー：サービス障害時の切替
- 負荷分散：複数サービス間の負荷分散

5. エンドポイント冗長：

- 複数インターフェース：複数のネットワークインターフェース
- 仮想IPアドレス：物理インターフェースに依存しないIP
- フローティングIP：障害時に移動するIP
- クラスタリング：複数ノードのクラスタ化
- アクティブ-アクティブ：同時稼働の複数エンドポイント

[0511] 電源冗長性の詳細：

1. 冗長電源ユニット：

- N+1冗長：必要数+1の電源ユニット
- 2N冗長：完全二重化電源
- 2N+1冗長：完全二重化+予備
- ホットスワップ：運転中交換可能
- 負荷分散：複数ユニット間の負荷分散

2. 無停電電源装置（UPS）：

- オンライン式：常時インバータ給電
- ラインインタラクティブ式：電圧調整機能付き
- バックアップ時間：30分～数時間
- バッテリー監視：バッテリー状態の継続的監視
- 自動シャットダウン：制御されたシステム停止

3. 発電機：

- 自動起動：停電検出による自動起動
- 切替時間：UPSバックアップ内での起動

- 燃料容量：数日間の連続運転
- 定期テスト：定期的な起動テスト
- 負荷テスト：実負荷でのテスト

4. 電力分配：

- 二重給電：異なる変電所からの給電
- 独立回路：独立した配電回路
- 自動切替：電源障害時の自動切替
- 過負荷保護：回路ごとの過負荷保護
- 選択遮断：重要度に応じた選択的遮断

5. 電力監視：

- リアルタイム監視：電圧、電流、電力の監視
- 品質監視：電力品質の監視
- 異常検出：電力異常の検出
- 予測診断：障害の予測
- 自動対応：異常時の自動対応

[0512] フェイルセーフ機構の詳細：

1. 安全状態定義：

- 本質安全設計：固有の安全特性
- フェイルセーフ状態：障害時の安全状態
- 安全マージン：安全限界からの余裕
- リスク評価：安全状態の妥当性評価
- 安全検証：安全状態への確実な移行検証

2. 故障検出：

- 自己診断：システムの自己診断機能
- 外部監視：独立した監視システム
- 冗長検証：複数手段による検証
- タイムアウト：応答タイムアウトの検出
- 整合性チェック：データと動作の整合性確認

3. 安全遷移：

- 緊急停止：制御された緊急停止
- グレースフル停止：段階的な安全停止
- 安全モード：限定機能の安全モード
- 機械的安全機構：電源非依存の安全機構
- 手動復旧：安全確認後の手動復旧

4. 独立保護：

- 独立安全系：主制御系から独立した安全系
- 多様性：異なる技術による保護
- 物理的分離：安全系の物理的分離
- 電源分離：独立電源による安全系
- 単純設計：単純で検証可能な安全系設計

5. フォールバック：

- 基本機能：最小限の基本機能
- アナログバックアップ：デジタル系障害時のアナログ制御
- 手動制御：自動制御障害時の手動制御
- ローカル制御：中央制御障害時のローカル制御
- 独立通信：主通信障害時の独立通信

[0513] 階層的制御構造は、複雑なシステムの管理を容易にするために採用されている。制御システムは、低レベル制御（ハードウェア制御）、中間レベル制御（サブシステム制御）、および高レベル制御（システム全体の最適化）の三層で構成されている。各層は、異なる時間スケールと抽象度で動作し、全体として効率的な制御を実現する。

[0514] 低レベル制御層の詳細：

1. ハードウェアインターフェース：

- デバイスドライバ：ハードウェア固有の制御
- I/Oインターフェース：アナログ/デジタル入出力
- 通信インターフェース：フィールドバス、産業用イーサネット
- 信号調整：レベル変換、フィルタリング
- 校正機能：センサーとアクチュエータの校正

2. 基本制御ループ：

- PID制御：比例-積分-微分制御
- オン/オフ制御：二値制御
- フィードフォワード制御：外乱の事前補償
- カスケード制御：入れ子制御ループ
- 比率制御：比率の維持制御

3. 安全保護：

- リミット制御：操作量の制限
- インターロック：安全条件の強制
- ウォッチドッグ：制御ループの監視
- フェイルセーフ：安全状態への自動遷移
- 緊急停止：制御された緊急停止

4. 診断機能：

- センサー診断：センサー状態の診断
- アクチュエータ診断：アクチュエータ状態の診断
- 通信診断：通信状態の診断
- 自己テスト：制御ループの自己テスト
- 故障検出：異常状態の検出

5. 校正機能：

- 自動校正：センサーの自動校正
- ゼロ点調整：ゼロ点のドリフト補正
- スパン調整：スパンのドリフト補正
- 非線形補正：非線形特性の補正
- クロスチェック：複数センサーの相互検証

[0515] 中間レベル制御層の詳細：

1. サブシステム制御：

- リミッタ制御：リミッタ位置と動作の制御
- ダイバータ制御：ダイバータ配位と動作の制御
- 磁場制御：磁場配位の制御
- 加熱制御：加熱システムの制御
- 診断制御：診断システムの制御

2. サブシステム間調整：

- リミッタ-磁場調整：リミッタ位置と磁場配位の調整
- ダイバータ-磁場調整：ダイバータ配位と磁場配位の調整
- 加熱-密度調整：加熱電力と密度の調整
- 診断-制御調整：診断データと制御動作の調整
- 冷却-熱負荷調整：冷却能力と熱負荷の調整

3. 状態推定：

- サブシステム状態推定：各サブシステムの状態推定
- パラメータ推定：システムパラメータの推定
- 外乱推定：外部擾乱の推定
- 故障診断：故障状態の診断
- 性能評価：サブシステム性能の評価

4. 異常検出：

- パターン認識：異常パターンの認識
- 統計的検出：統計的手法による異常検出
- モデルベース検出：モデルとの偏差に基づく検出
- トレンド分析：時間的傾向の分析
- 相関分析：変数間の相関関係の分析

5. 適応制御：

- ゲイン調整：制御ゲインの適応的調整
- モデル適応：制御モデルの適応的更新
- 運転点適応：最適運転点の適応的探索
- 外乱適応：外部擾乱に対する適応
- 故障適応：故障状態に対する適応

[0516] 高レベル制御層の詳細：

1. システム最適化：

- 多目的最適化：複数目標の最適化
- 制約付き最適化：物理的・運転的制約下での最適化
- 動的最適化：時間変化する条件下での最適化
- ロバスト最適化：不確かさを考慮した最適化
- 適応的最適化：運転条件に応じた適応的最適化

2. 運転シナリオ管理：

- シナリオ選択：運転条件に応じたシナリオ選択
- シナリオ切替：異なるシナリオ間の切替
- パラメータ調整：シナリオパラメータの調整
- 遷移管理：シナリオ間の遷移管理

- 例外処理：例外状況の処理

3. 資源割り当て：

- 計算資源：計算リソースの最適割り当て
- 通信帯域：通信帯域の最適割り当て
- 電力資源：電力リソースの最適割り当て
- 冷却資源：冷却能力の最適割り当て
- 人的資源：運転・保守人員の最適割り当て

4. 長期計画：

- 運転計画：長期運転計画の策定
- 保守計画：予防保守計画の策定
- 資源計画：資源使用計画の策定
- 性能計画：性能向上計画の策定
- リスク管理：長期リスク管理計画の策定

5. 学習と改善：

- データ分析：運転データの分析
- パターン抽出：有用パターンの抽出
- 知識獲得：運転知識の獲得
- モデル改善：システムモデルの改善
- 戦略最適化：制御戦略の最適化

[0517] 層間の通信の詳細：

1. コマンド伝達：

- 階層のコマンド：上位層から下位層へのコマンド
- コマンド変換：抽象コマンドの具体的コマンドへの変換
- 優先順位：コマンドの優先順位付け
- 実行確認：コマンド実行の確認
- フィードバック：実行結果のフィードバック

2. 状態報告：

- 定期報告：定期的な状態報告
- イベント駆動報告：イベント発生時の報告
- 階層的集約：下位層情報の集約と抽象化
- 異常報告：異常状態の即時報告
- 詳細度調整：報告の詳細度調整

3. イベント通知：

- イベント検出：重要イベントの検出
- 優先度付け：イベントの優先度付け
- 伝播制御：イベント通知の伝播制御
- フィルタリング：関連イベントのフィルタリング
- コンテキスト付加：イベントへのコンテキスト情報付加

4. 設定変更：

- 階層的设置：階層を通じた設定変更
- 整合性確保：異なる層の設定の整合性確保

- 変更検証：設定変更の妥当性検証
- ロールバック：問題時の設定ロールバック
- 変更履歴：設定変更の履歴管理

5. 診断情報：

- 詳細診断：詳細な診断情報
- 問題分離：問題の層別分離
- 根本原因分析：根本原因の特定
- 相互依存性：層間の相互依存関係の診断
- 修復提案：問題修復の提案

[0518] 運転者インターフェースは、運転者にシステムの状態と制御オプションを提示する。インターフェースは、直感的なグラフィカルユーザーインターフェース（GUI）を提供し、リアルタイムデータの可視化、制御パラメータの調整、およびアラーム管理をサポートする。また、高度な視覚化ツールが提供されており、プラズマの三次元構造や壁負荷の分布などを視覚的に理解することができる。

[0519] 制御パネルの詳細：

1. システム制御：

- 起動/停止：システムの起動と停止
- モード切替：運転モードの切替
- シナリオ選択：運転シナリオの選択
- フェーズ制御：運転フェーズの制御
- マスター制御：システム全体の制御

2. サブシステム制御：

- リミッタ制御：リミッタ位置と動作の制御
- ダイバータ制御：ダイバータ配位と動作の制御
- 磁場制御：磁場配位の制御
- 加熱制御：加熱システムの制御
- 診断制御：診断システムの制御

3. パラメータ調整：

- スライダー：連続値パラメータの調整
- 数値入力：精密値の直接入力
- プリセット：事前定義されたパラメータセット
- 微調整：細かいパラメータ調整
- グループ調整：関連パラメータの一括調整

4. シナリオ選択：

- シナリオリスト：利用可能シナリオのリスト
- シナリオ詳細：シナリオの詳細情報
- シナリオ比較：異なるシナリオの比較
- カスタマイズ：シナリオのカスタマイズ
- 履歴：過去に使用したシナリオの履歴

5. 緊急制御：

- 緊急停止：システムの緊急停止
- 安全モード：安全モードへの切替

- リカバリー：異常からの回復
- マニュアルオーバーライド：自動制御の手動上書き
- 診断モード：詳細診断モードへの切替

[0520] データ表示の詳細：

1. リアルタイムデータ表示：

- 数値表示：重要パラメータの数値表示
- ゲージ表示：アナログゲージ形式の表示
- 状態表示：システム状態の表示
- 傾向表示：短期的な傾向の表示
- 更新率制御：データ更新率の制御

2. 履歴データ表示：

- 時系列グラフ：パラメータの時間変化
- 比較グラフ：異なる期間のデータ比較
- 統計表示：統計情報の表示
- エクスポート：データのエクスポート機能
- 詳細度制御：表示の詳細度制御

3. トレンド表示：

- リアルタイムトレンド：現在進行中のトレンド
- 履歴トレンド：過去のデータのトレンド
- マルチパラメータ：複数パラメータの同時表示
- スケール制御：時間軸と値軸のスケール制御
- 注釈機能：トレンドへの注釈付け

4. 比較表示：

- パラメータ比較：異なるパラメータの比較
- 時間比較：異なる時間のデータ比較
- シナリオ比較：異なるシナリオの結果比較
- 目標比較：実測値と目標値の比較
- 差分表示：差分の強調表示

5. 統計表示：

- 基本統計量：平均、標準偏差、最大値、最小値
- ヒストグラム：データ分布の表示
- 相関分析：パラメータ間の相関
- 時間統計：時間帯別の統計
- 異常統計：異常発生時の統計

[0521] アラーム管理の詳細：

1. アラーム表示：

- リアルタイムアラーム：現在のアラームの表示
- 優先度表示：アラームの優先度表示
- カテゴリ表示：アラームのカテゴリ表示
- 詳細情報：アラームの詳細情報
- 関連データ：アラームに関連するデータ

2. アラーム履歴：

- 時系列表示：アラームの時系列表示
- フィルタリング：条件によるフィルタリング
- ソート：異なる基準によるソート
- 統計分析：アラーム発生 of 統計分析
- エクスポート：履歴のエクスポート

3. アラーム確認：

- 確認操作：アラームの確認操作
- 対応記録：対応内容の記録
- 状態追跡：アラーム状態の追跡
- エスカレーション：未確認アラームのエスカレーション
- 自動確認：条件付き自動確認

4. アラーム設定：

- 閾値設定：アラーム閾値の設定
- 優先度設定：アラーム優先度の設定
- 通知設定：通知方法の設定
- 抑制設定：アラーム抑制条件の設定
- グループ設定：アラームグループの設定

5. アラームフィルタリング：

- 優先度フィルタ：優先度によるフィルタリング
- カテゴリフィルタ：カテゴリによるフィルタリング
- 時間フィルタ：時間範囲によるフィルタリング
- 状態フィルタ：アラーム状態によるフィルタリング
- カスタムフィルタ：ユーザー定義フィルタ

[0522] 視覚化ツールの詳細：

1. 2D/3D表示：

- 2D断面図：プラズマの2D断面表示
- 3Dボリュームレンダリング：プラズマの3D表示
- 等高線表示：等値面の表示
- ワイヤーフレーム：構造のワイヤーフレーム表示
- 透過表示：内部構造の可視化

2. カラーマッピング：

- カラースケール：データ値に応じた色付け
- マルチパラメータ：複数パラメータの同時表示
- ダイナミックレンジ：表示範囲の動的調整
- カラーマップ選択：目的に応じたカラーマップ
- 強調表示：重要領域の強調表示

3. 等高線表示：

- 等値線：2D平面上の等値線
- 等値面：3D空間の等値面
- レベル制御：等値レベルの制御
- ラベル付け：等値線/面へのラベル付け

- 透明度制御：等値面の透明度制御

4. ベクトル表示：

- 矢印表示：ベクトル場の矢印表示
- ストリームライン：流線の表示
- グリフ：複合情報のグリフ表示
- 密度制御：ベクトル表示の密度制御
- スケール制御：ベクトル表示のスケール制御

5. アニメーション：

- 時間変化：時間変化のアニメーション
- 回転表示：3Dモデルの回転表示
- スライス移動：断面位置の移動
- パラメータ変化：パラメータ変化の可視化
- 再生制御：アニメーションの再生制御

[0523] 設定管理の詳細：

1. パラメータ設定：

- カテゴリ別設定：カテゴリごとのパラメータ設定
- 検索機能：パラメータの検索
- 依存関係表示：パラメータ間の依存関係
- 範囲検証：入力値の範囲検証
- デフォルト復元：デフォルト値への復元

2. 構成管理：

- 構成保存：システム構成の保存
- 構成読込：保存構成の読込
- バージョン管理：構成のバージョン管理
- 差分表示：構成間の差分表示
- エクスポート/インポート：構成の外部ファイル操作

3. ユーザー設定：

- 表示設定：ユーザーインターフェースの表示設定
- 通知設定：通知方法と条件の設定
- アクセス権設定：ユーザーアクセス権の設定
- ショートカット設定：ショートカットの設定
- 個人プロフィール：個人用設定プロフィール

4. システム設定：

- ネットワーク設定：通信ネットワークの設定
- セキュリティ設定：セキュリティポリシーの設定
- バックアップ設定：自動バックアップの設定
- パフォーマンス設定：システム性能の最適化設定
- 診断設定：システム診断の設定

5. 運転設定：

- 運転モード設定：運転モードの設定
- アラーム設定：アラーム条件の設定

- スケジュール設定：運転スケジュールの設定
- 制約設定：運転制約の設定
- 最適化設定：運転最適化の設定

[0524] ログ表示の詳細：

1. システムログ：

- イベントログ：システムイベントの記録
- エラーログ：エラーと警告の記録
- 操作ログ：運転者操作の記録
- 変更ログ：設定変更の記録
- 診断ログ：システム診断の記録

2. 運転ログ：

- 運転イベント：運転関連イベントの記録
- パラメータ変化：重要パラメータの変化記録
- 状態遷移：システム状態の遷移記録
- 異常記録：異常状態の詳細記録
- 性能記録：システム性能の記録

3. セキュリティログ：

- アクセスログ：システムアクセスの記録
- 認証ログ：ユーザー認証の記録
- 権限変更：アクセス権変更の記録
- セキュリティイベント：セキュリティ関連イベント
- 監査記録：セキュリティ監査の記録

4. ログ分析：

- 検索機能：ログの検索機能
- フィルタリング：条件によるフィルタリング
- パターン認識：ログパターンの認識
- 相関分析：異なるログ間の相関分析
- 統計分析：ログデータの統計分析

5. ログ管理：

- ログローテーション：自動ログローテーション
- アーカイブ：古いログのアーカイブ
- エクスポート：ログのエクスポート
- 保持ポリシー：ログ保持期間の設定
- 圧縮保存：ログの圧縮保存

[0525] ヘルプシステムの詳細：

1. コンテキスト依存ヘルプ：

- 状況認識：現在の操作コンテキストの認識
- 関連情報：コンテキストに関連する情報提供
- ステップガイド：操作手順のガイド
- トラブルシューティング：問題解決のガイド
- 例示：具体例の提示

2. マニュアル統合：

- オンラインマニュアル：システムマニュアルの統合
- 検索機能：マニュアル内容の検索
- インデックス：トピック別インデックス
- ブックマーク：頻繁に参照するページのブックマーク
- 注釈機能：マニュアルへの注釈付け

3. チュートリアル：

- 初心者ガイド：初心者向けの基本操作ガイド
- 高度機能ガイド：高度機能の使用ガイド
- インタラクティブチュートリアル：対話式学習
- ビデオチュートリアル：視覚的な操作説明
- シミュレーション：操作シミュレーション

4. FAQ：

- 一般的質問：一般的な質問と回答
- トラブルシューティング：一般的な問題の解決法
- カテゴリ別FAQ：カテゴリごとのFAQ
- 検索機能：FAQ内容の検索
- 更新履歴：最近追加された質問

5. サポート統合：

- ヘルプデスク連携：サポートチームへの連絡
- 問題報告：問題の直接報告
- リモートサポート：リモートサポートの要請
- ナレッジベース：サポート知識ベースへのアクセス
- コミュニティフォーラム：ユーザーコミュニティへのアクセス

[0526] データ記録システムは、運転中のすべてのデータを記録し、後分析のために保存する。記録されるデータには、プラズマパラメータ、制御入力、機器状態、およびアラーム履歴が含まれる。データは、構造化されたデータベースに格納され、効率的な検索と分析が可能となっている。

[0527] データ収集の詳細：

1. 定期収集：

- サンプリング周期：パラメータごとの適切なサンプリング周期
- 同期収集：複数データの時間同期
- 品質指標：データ品質の指標付け
- 収集スケジュール：収集スケジュールの管理
- リソース最適化：収集リソースの最適利用

2. イベント駆動収集：

- イベント検出：収集トリガーとなるイベントの検出
- プリトリガバッファ：イベント前のデータ保持
- ポストトリガ期間：イベント後の収集期間
- イベント分類：異なるイベント種類の分類
- 収集パラメータ調整：イベント種類に応じた調整

3. 条件付き収集：

- 条件定義：収集条件の定義
- 条件評価：リアルタイム条件評価
- 条件組合せ：複数条件の論理的組合せ
- 条件ヒステリシス：条件の安定性確保
- 条件適応：運転状況に応じた条件適応

4. 高速収集：

- 高サンプリングレート：高速現象の捕捉
- バッファ管理：大容量データの一時保存
- トリガ制御：収集開始と終了の制御
- データ圧縮：効率的なデータ保存
- 選択的保存：重要データの選択的保存

5. 連続収集：

- 長期記録：長期間の連続データ記録
- 循環バッファ：限られた容量での循環記録
- 重要度分類：データの重要度に基づく管理
- 階層的保存：重要度に応じた保存期間
- 帯域管理：ネットワーク帯域の効率的利用

[0528] データ前処理の詳細：

1. フィルタリング：

- ノイズ除去：測定ノイズの除去
- 外れ値処理：異常値の検出と処理
- バンドパスフィルタ：特定周波数帯の抽出
- メディアンフィルタ：スパイクノイズの除去
- カルマンフィルタ：状態推定に基づくフィルタリング

2. 圧縮：

- ロスレス圧縮：情報損失のない圧縮
- 適応圧縮：データ特性に応じた圧縮
- 重要度ベース圧縮：重要度に応じた圧縮率
- 時間圧縮：変化率に基づく間引き
- 空間圧縮：空間的冗長性の削減

3. 集約：

- 時間集約：時間的なデータ集約
- 空間集約：空間的なデータ集約
- 統計集約：統計量によるデータ要約
- 階層的集約：異なる時間スケールの集約
- イベントベース集約：イベントに基づく集約

4. 変換：

- 単位変換：物理単位の標準化
- 座標変換：座標系の変換
- スケール変換：線形/非線形スケール変換
- 時間変換：時間基準の変換
- フォーマット変換：データ形式の変換

5. 正規化：

- 範囲正規化：指定範囲への正規化
- Z-スコア正規化：平均と標準偏差による正規化
- ロバスト正規化：外れ値に頑健な正規化
- 多変量正規化：複数変数の同時正規化
- 適応正規化：データ特性に応じた正規化

[0529] データ格納の詳細：

1. 階層的格納：

- ホットデータ：頻繁にアクセスされるデータ
- ウォームデータ：時々アクセスされるデータ
- コールドデータ：稀にアクセスされるデータ
- アーカイブデータ：長期保存データ
- 自動移行：データの自動階層移行

2. 分散格納：

- シャーディング：データの水平分割
- レプリケーション：データの複製
- 分散ファイルシステム：複数ノードでのデータ分散
- 負荷分散：アクセス負荷の分散
- 位置最適化：アクセスパターンに基づく最適配置

3. 冗長格納：

- RAID：ディスクレベルの冗長性
- 複数コピー：データの複数コピー保持
- 地理的分散：異なる場所でのデータ保持
- パリティ情報：誤り訂正のための冗長情報
- バージョン管理：データの複数バージョン保持

4. 圧縮格納：

- カラム圧縮：列指向データの圧縮
- ブロック圧縮：データブロックの圧縮
- 辞書圧縮：繰り返しパターンの圧縮
- デルタ圧縮：差分情報の保存
- 適応圧縮：データ特性に応じた圧縮方法

5. 暗号化格納：

- 透過的暗号化：アプリケーションに透過的な暗号化
- 列レベル暗号化：特定列のみの暗号化
- キー管理：暗号化キーの安全管理
- アクセス制御：暗号化データのアクセス制御
- 監査ログ：暗号化データへのアクセス監査

[0530] データ管理の詳細：

1. メタデータ管理：

- 記述メタデータ：データの内容と構造の記述
- 管理メタデータ：データの管理情報

- 技術メタデータ：データの技術的特性
- 系譜メタデータ：データの起源と変換履歴
- 利用メタデータ：データの利用状況

2. バージョン管理：

- 変更追跡：データ変更の追跡
- バージョン識別：各バージョンの一意識別
- 差分保存：バージョン間の差分保存
- ロールバック：以前のバージョンへの復帰
- ブランチ管理：並行変更の管理

3. アクセス制御：

- ユーザー認証：データアクセスユーザーの認証
- 役割ベース制御：ユーザー役割に基づく制御
- 属性ベース制御：データ属性に基づく制御
- 細粒度制御：詳細レベルでのアクセス制御
- 監査追跡：アクセス履歴の記録

4. ライフサイクル管理：

- 保持ポリシー：データ保持期間の設定
- アーカイブ規則：アーカイブ条件と方法
- 削除規則：削除条件と方法
- 法規制遵守：法的要件への対応
- 自動化：ライフサイクル管理の自動化

5. 検索機能：

- 全文検索：テキストデータの全文検索
- メタデータ検索：メタデータに基づく検索
- 時間範囲検索：時間範囲に基づく検索
- 空間検索：空間情報に基づく検索
- 複合検索：複数条件の組合せ検索

[0531] データアクセスの詳細：

1. クエリインターフェース：

- SQL：構造化クエリ言語
- NoSQL：非リレーショナルデータベースクエリ
- 時系列クエリ：時系列データ専用クエリ
- グラフクエリ：グラフデータ構造のクエリ
- 自然言語クエリ：自然言語による問合せ

2. APIアクセス：

- RESTful API：HTTPベースのAPI
- GraphQL：クライアント指定のデータ取得
- WebSocket：双方向通信API
- gRPC：高性能RPCフレームワーク
- JDBC/ODBC：データベース接続標準

3. データエクスポート：

- CSV/TSV：表形式テキストファイル
- JSON/XML：構造化データ形式
- HDF5：科学データ用階層形式
- 専用フォーマット：特定用途向けフォーマット
- ストリーミング：データストリームとしてのエクスポート

4. 可視化統合：

- ダッシュボード：データ可視化ダッシュボード
- レポート生成：自動レポート生成
- インタラクティブ探索：対話的データ探索
- アラート統合：異常検出とアラート
- リアルタイム表示：リアルタイムデータ表示

5. 分析統合：

- 統計分析：基本統計分析機能
- 機械学習：データマイニングと予測
- 時系列分析：時系列データの分析
- 相関分析：変数間の相関分析
- パターン認識：データパターンの認識

[0532] 性能分析モジュールは、記録されたデータを分析し、システムの性能を評価する。分析には、統計的手法、機械学習、および物理モデルが使用される。分析結果は、システムの改善点を特定し、制御パラメータの最適化に使用される。

[0533] データ抽出の詳細：

1. データ選択：

- 時間範囲選択：分析対象の時間範囲
- パラメータ選択：分析対象のパラメータ
- 運転条件選択：特定運転条件のデータ
- イベントベース選択：特定イベント前後のデータ
- サンプリング：代表的サンプルの選択

2. データ結合：

- 時間同期：異なるソースのデータ時間同期
- 空間結合：空間情報に基づく結合
- 関係結合：関連情報の結合
- 階層結合：異なる階層のデータ結合
- 外部データ統合：外部データソースとの統合

3. 前処理：

- クリーニング：ノイズと外れ値の処理
- 正規化：異なるスケールのデータ正規化
- 補間：欠損値の補間
- 集約：適切な時間・空間スケールへの集約
- 特徴抽出：分析に適した特徴の抽出

4. データ変換：

- 次元削減：高次元データの低次元表現

- 座標変換：適切な座標系への変換
- スケール変換：線形/非線形スケール変換
- 時間領域変換：周波数領域などへの変換
- 正規化変換：統計的正規化

5. データ検証：

- 整合性チェック：データの論理的整合性
- 範囲チェック：物理的に妥当な範囲
- トレンドチェック：時間的変化の妥当性
- 相関チェック：変数間の相関の妥当性
- 外れ値検出：統計的外れ値の検出

[0534] データ分析の詳細：

1. 統計分析：

- 記述統計：平均、分散、分布特性
- 相関分析：変数間の相関関係
- 回帰分析：変数間の関数関係
- 時系列分析：時間的パターンと傾向
- 分散分析：グループ間の差異検定

2. 時系列分析：

- トレンド分析：長期的傾向の分析
- 季節性分析：周期的パターンの分析
- 変化点検出：急激な変化の検出
- スペクトル分析：周波数成分の分析
- 自己相関分析：時間的依存性の分析

3. 回帰分析：

- 線形回帰：線形関係のモデル化
- 多項式回帰：非線形関係のモデル化
- 多変量回帰：複数変数の関係
- ロバスト回帰：外れ値に頑健な回帰
- 非パラメトリック回帰：分布仮定のない回帰

4. 分類分析：

- 状態分類：システム状態の分類
- 異常分類：異常パターンの分類
- 性能分類：性能レベルの分類
- 原因分類：問題原因の分類
- 予測分類：将来状態の予測分類

5. クラスタリング：

- 運転モードクラスタリング：類似運転条件のグループ化
- 性能クラスタリング：類似性能特性のグループ化
- 時間クラスタリング：時間的パターンのグループ化
- 階層的クラスタリング：多層的グループ構造の分析
- 密度ベースクラスタリング：密度分布に基づくグループ化

6. 次元削減：

- 主成分分析：線形次元削減
- 因子分析：潜在因子の抽出
- 多次元尺度構成法：類似性保存の次元削減
- t-SNE：局所構造保存の次元削減
- オートエンコーダ：非線形次元削減

7. 異常検出：

- 統計的検出：統計的外れ値の検出
- 密度ベース検出：低密度領域の検出
- 距離ベース検出：孤立点の検出
- モデルベース検出：予測誤差に基づく検出
- アンサンブル検出：複数手法の組合せ

[0535] 性能評価の詳細：

1. プラズマ性能指標：

- 閉じ込め時間：エネルギー閉じ込め時間
- ベータ値：プラズマ圧力と磁場圧力の比
- 核融合出力：核融合反応による出力
- 密度限界：達成可能な最大密度
- 不純物濃度：プラズマ中の不純物レベル

2. 制御性能指標：

- 追従性能：目標値への追従精度
- 外乱抑制：外部擾乱に対する安定性
- 堅牢性：モデル誤差に対する感度
- 応答速度：制御系の応答時間
- 安定マージン：不安定性に対するマージン

3. 機器性能指標：

- 寿命指標：予測される残存寿命
- 信頼性指標：故障率と可用性
- 効率指標：エネルギー効率
- 精度指標：位置決め精度など
- 応答指標：機器の応答特性

4. 運転効率指標：

- 稼働率：実稼働時間の比率
- 燃料効率：燃料利用効率
- エネルギー効率：投入エネルギーに対する出力
- 資源利用効率：計算資源などの利用効率
- コスト効率：運転コストに対する性能

5. 安全性指標：

- 異常発生率：異常事象の発生頻度
- 回復時間：異常からの回復時間
- 影響範囲：異常の影響範囲
- 予測精度：異常予測の精度

- 安全マージン：安全限界からの余裕

[0536] 改善提案の詳細：

1. パラメータ調整：

- 制御パラメータ：PIDゲインなどの調整
- 運転パラメータ：最適運転点の提案
- 構成パラメータ：システム構成の最適化
- 閾値パラメータ：異常検出閾値の調整
- スケジュールパラメータ：運転スケジュールの最適化

2. アルゴリズム改善：

- 制御アルゴリズム：より高性能な制御手法
- 予測アルゴリズム：予測精度の向上
- 検出アルゴリズム：異常検出の改善
- 最適化アルゴリズム：より効率的な最適化
- 学習アルゴリズム：学習効率の向上

3. ハードウェア改善：

- センサー配置：最適なセンサー配置
- アクチュエータ性能：応答性と精度の向上
- 冷却能力：熱除去能力の強化
- 材料選択：より適した材料の提案
- 構造設計：機械的構造の最適化

4. 運転手順改善：

- 起動手順：より効率的な起動手順
- 定常運転：最適定常運転条件
- 遷移手順：運転モード間の遷移最適化
- 終了手順：安全で効率的な終了手順
- 異常対応：異常時の最適対応手順

5. 保守計画改善：

- 予防保守：最適な予防保守スケジュール
- 状態監視：効果的な状態監視方法
- 寿命予測：より正確な寿命予測
- 交換戦略：最適な部品交換戦略
- 保守手順：効率的な保守手順

[0537] 結果報告の詳細：

1. 要約報告：

- 主要結果：分析の主要結果
- 重要指標：重要性能指標の概要
- 傾向概要：主要傾向の概要
- 問題概要：特定された問題の概要
- 提案概要：主要改善提案の概要

2. 詳細報告：

- 分析方法：使用した分析手法の詳細

- データ範囲：分析に使用したデータの詳細
- 結果詳細：詳細な分析結果
- 根拠説明：結論の根拠となるデータと分析
- 補足情報：追加の詳細情報

3. 視覚化報告：

- グラフ表示：結果のグラフィカル表示
- トレンド図：時間的傾向の視覚化
- 比較図：異なる条件の比較
- 分布図：データ分布の視覚化
- 相関図：変数間の関係の視覚化

4. インタラクティブ報告：

- 動的フィルタリング：報告内容の動的フィルタリング
- ドリルダウン：詳細情報の段階的表示
- シナリオ分析：異なるシナリオの比較
- カスタム視覚化：ユーザー定義の視覚化
- データエクスポート：分析データのエクスポート

5. 推奨アクション：

- 優先順位：推奨アクションの優先順位
- 実施計画：アクション実施のタイムライン
- 期待効果：各アクションの期待効果
- リスク評価：アクション実施のリスク
- フォローアップ：効果確認の方法

[0538] 自己学習機能は、運転経験に基づいてシステムの性能を向上させる。この機能は、強化学習とベイズ最適化を組み合わせて実装されており、プラズマ性能と機器保護のバランスを考慮した最適な制御戦略を学習する。学習結果は、制御パラメータの更新と制御アルゴリズムの改善に使用される。

[0539] 経験収集の詳細：

1. 状態情報：

- プラズマ状態：プラズマの物理状態
- 機器状態：各機器の動作状態
- 制御状態：制御システムの状態
- 環境状態：環境条件
- 履歴状態：過去の状態情報

2. 制御アクション：

- 制御入力：各アクチュエータへの入力
- 制御パラメータ：制御アルゴリズムのパラメータ
- 制御モード：選択された制御モード
- 制御シーケンス：一連の制御アクション
- 制御タイミング：アクションのタイミング

3. 結果情報：

- 直接結果：制御アクションの直接的結果
- 短期結果：短期的な影響

- 長期結果：長期的な影響
- 副作用：意図しない副作用
- 状態遷移：システム状態の変化

4. 性能指標：

- プラズマ性能：核融合性能指標
- 制御性能：制御精度と応答性
- 機器性能：機器の動作性能
- 効率指標：資源利用効率
- 安全指標：安全性に関する指標

5. 異常情報：

- 異常検出：検出された異常
- 異常対応：実施された対応
- 対応結果：対応の効果
- 回復過程：正常状態への回復過程
- 根本原因：特定された根本原因

[0540] 知識抽出の詳細：

1. 統計的学習：

- 相関分析：変数間の相関関係の学習
- 回帰分析：入出力関係のモデル化
- クラスタリング：類似パターンのグループ化
- 異常検出：異常パターンの特定
- 時系列予測：時間的パターンの学習

2. 強化学習：

- Q学習：状態-行動価値関数の学習
- 方策勾配法：方策の直接最適化
- アクター・クリティック：価値関数と方策の同時学習
- モデルベース強化学習：環境モデルの学習と活用
- 階層的強化学習：異なる時間スケールの学習

3. 教師あり学習：

- 分類学習：状態や結果の分類
- 回帰学習：連続値の予測
- ランキング学習：最適アクションの順位付け
- 構造学習：構造化出力の学習
- マルチタスク学習：複数タスクの同時学習

4. 教師なし学習：

- 表現学習：効率的な特徴表現の学習
- 次元削減：本質的な構造の抽出
- 密度推定：データ分布の学習
- 異常検出：正常パターンからの逸脱検出
- 自己組織化：データの内在的構造の学習

5. 転移学習：

- ドメイン適応：異なる条件間での知識転移
- マルチタスク転移：関連タスク間の知識共有
- ゼロショット学習：未知クラスへの一般化
- メタ学習：学習方法自体の学習
- 継続学習：新しい知識の継続的獲得

[0541] モデル更新の詳細：

1. パラメータ更新：

- 勾配ベース更新：勾配情報に基づく更新
- ベイズ更新：ベイズ推論に基づく更新
- 進化的更新：進化アルゴリズムによる更新
- アンサンブル更新：複数モデルの組合せ更新
- オンライン更新：逐次的なパラメータ更新

2. 構造更新：

- アーキテクチャ探索：最適モデル構造の探索
- 枝刈り：不要な構造要素の削除
- 拡張：新しい構造要素の追加
- 再構成：構造の再編成
- モジュール置換：特定モジュールの置換

3. アンサンブル更新：

- モデル追加：新しいモデルの追加
- モデル削除：性能の低いモデルの削除
- 重み調整：モデル間の重み調整
- 専門化：特定条件に特化したモデルの追加
- 多様化：モデル多様性の維持

4. 適応更新：

- 条件適応：運転条件に応じた適応
- 性能適応：性能指標に基づく適応
- 異常適応：異常検出に基づく適応
- 時間適応：時間的变化に対する適応
- 環境適応：環境変化に対する適応

5. 増分更新：

- バッチ更新：データバッチに基づく更新
- オンライン更新：データ到着ごとの更新
- 重要度加重更新：データ重要度に基づく更新
- 選択的更新：特定条件下でのみ更新
- 定期更新：定期的なモデル更新

[0542] 戦略改善の詳細：

1. 方策改善：

- 探索-活用バランス：探索と活用のバランス最適化
- リスク考慮：リスクを考慮した方策
- 多目的最適化：複数目標のバランス
- 階層の方策：異なる抽象度の方策

- コンテキスト適応：状況に応じた方策適応

2. 価値関数改善：

- 報酬設計：適切な報酬関数の設計
- 割引率調整：将来報酬の重み付け調整
- 価値近似：より正確な価値関数近似
- クレジット割当：長期報酬の適切な割当
- 不確かさ考慮：価値の不確かさの考慮

3. 探索戦略改善：

- 好奇心駆動：未知領域への探索促進
- 不確かさ駆動：不確かな領域の探索
- ノベルティ探索：新規性に基づく探索
- 目標指向探索：特定目標に向けた探索
- 安全探索：安全制約下での探索

4. リスク管理改善：

- リスク評価：より正確なリスク評価
- リスク回避：高リスク状態の回避
- リスク許容：制御されたリスク許容
- 安全制約：安全制約の強化
- 回復戦略：異常からの回復戦略

5. 適応能力改善：

- 変化検出：環境変化の検出能力
- 迅速適応：変化への迅速な適応
- 堅牢性：外乱に対する堅牢性
- 一般化：未知状況への一般化能力
- 継続学習：新しい知識の継続的獲得

[0543] 検証と展開の詳細：

1. オフライン検証：

- シミュレーション検証：シミュレーション環境での検証
- 履歴データ検証：過去データに対する性能検証
- 比較評価：既存戦略との比較
- 感度分析：パラメータ変動に対する感度
- 極端条件テスト：極端条件下での性能

2. 段階的検証：

- 制限環境：制限された環境での初期検証
- 監視付き運用：人間の監視下での運用
- 部分適用：システムの一部への適用
- 並行運用：既存システムとの並行運用
- 完全運用：完全自律運用への段階的移行

3. 性能モニタリング：

- 継続的評価：性能の継続的評価
- 比較分析：期待性能との比較

- 異常検出：性能異常の検出
- 長期傾向：長期的な性能傾向の分析
- 環境影響：環境変化の影響分析

4. 安全保証：

- 形式的検証：形式的手法による安全性検証
- リスク評価：包括的リスク評価
- フェイルセーフ：フェイルセーフ機構の検証
- 限界テスト：システム限界の特定
- 回復テスト：異常からの回復能力の検証

5. 継続的改善：

- フィードバック収集：運用フィードバックの収集
- 性能分析：運用データの継続的分析
- 定期更新：定期的なシステム更新
- 知識蓄積：運用知識の蓄積と活用
- 進化的改善：段階的な性能向上

8. 産業上の利用可能性

[0544] 本発明の適応型ダイバータ-リミッタハイブリッドシステムは、次世代のトカマク型核融合炉、特に ITER型装置や将来の実証炉に適用可能である。本システムにより、プラズマ対向機器の寿命が延長され、核融合炉の運転効率が向上することが期待される。

[0545] 本発明は、特に以下の分野での応用が期待される：

[0546] 1. 実験炉および原型炉：

- ITER（国際熱核融合実験炉）の運転最適化：ITERは、核融合エネルギーの科学的・技術的実現可能性を実証するための国際プロジェクトである。本発明のADLHSは、ITERのプラズマ対向機器の寿命を延長し、運転パラメータ空間を拡大することで、ITERの科学的成果を最大化することができる。特に、ITERのベリリウム第一壁とタングステンダイバータの間の相互作用を最適化し、両方の寿命を延長することが可能となる。

- DEMO（実証炉）の設計と運転：DEMOは、商業核融合発電所の前段階として、核融合エネルギーの実用化を実証するための原型炉である。本発明のADLHSは、DEMOの設計段階から組み込むことで、高い核融合出力と長い機器寿命を両立させることができる。特に、DEMOでは高中性子束環境下での運転が予想されるため、プラズマ対向機器の寿命延長は極めて重要である。本発明により、DEMOの稼働率を向上させ、経済性を高めることが期待される。

[0547] 2. 既存の実験装置のアップグレード：

- JET（Joint European Torus）：欧州の大型トカマク装置であるJETに本発明を適用することで、D-T運転時のトリチウム滞留の低減と第一壁の寿命延長が可能となる。JETは現在、ITERに向けた重要な実験を行っており、本発明の導入により、より広範な運転パラメータ領域での実験が可能となる。

- JT-60SA：日本と欧州の協力で建設された超伝導トカマク装置であるJT-60SAに本発明を適用することで、長パルス運転時のプラズマ-壁相互作用の最適化が可能となる。JT-60SAは、ITERを補完する実験を行う予定であり、本発明の導入により、ITERでの運転シナリオの事前検証が強化される。

- KSTAR、EAST、WEST：韓国、中国、フランスの超伝導トカマク装置に本発明を適用することで、長時間運転時のプラズマ対向機器の保護と寿命延長が可能となる。これらの装置は、定常運転技術の開発を目的としており、本発明の導入により、より長時間の安定運転が実現できる。

[0548] 3. 将来の商業炉：

- 商業核融合発電所：将来の商業核融合発電所に本発明を適用することで、プラント稼働率の向上、メンテナンス間隔の延長、および運転コストの低減が可能となる。商業炉では、経済性が最も重要な要素の一つであり、本発明による機器寿命の延長は、発電コストの低減に直接寄与する。

- コンパクト核融合炉：近年開発が進められている高磁場コンパクト核融合炉（例：SPARC、ARC）に本発明を適用することで、高パワー密度環境下でのプラズマ対向機器の保護が可能となる。コンパクト炉では、単位体積あたりの熱負荷が大きくなるため、本発明のような先進的な壁保護システムが特に重要となる。

[0549] 4. 核融合材料試験施設：

- 核融合中性子源（例：IFMIF-DONES）：核融合材料の照射試験を行う施設に本発明の概念を応用することで、試験装置自体の寿命延長が可能となる。これにより、より長期間の材料照射試験が可能となり、核融合材料開発を加速することができる。

- プラズマ対向材料試験装置：プラズマと材料の相互作用を研究する専用装置に本発明を適用することで、より広範な条件下での材料試験が可能となる。本発明により、試験条件の精密制御と試験装置自体の保護が実現できる。

[0550] 5. 関連技術分野への応用：

- 高熱流束機器：核融合以外の高熱流束環境（例：宇宙機器、高エネルギー加速器ターゲット）に本発明の冷却技術と材料技術を応用することが可能である。本発明で開発された先進的な熱除去技術は、様々な高熱流束機器の性能向上に寄与できる。

- 精密位置決め技術：放射線環境下での高精度位置決め技術は、原子力施設のメンテナンスロボットや宇宙機器など、他の過酷環境での精密機械制御に応用できる。本発明で開発された放射線耐性の高い位置決めシステムは、これらの分野での技術革新に貢献できる。

- 先進センシング技術：高温・高放射線環境下でのリアルタイムモニタリング技術は、原子力施設の安全監視や工業炉の制御など、他の過酷環境でのセンシングに応用できる。本発明で開発された統合分光モニタリングシステムの技術は、これらの分野での計測技術の向上に寄与できる。

[0551] 6. 経済的・社会的影響：

- エネルギー安全保障：本発明は核融合エネルギーの実用化を加速することで、長期的なエネルギー安全保障に貢献する。核融合エネルギーは燃料資源が豊富で地理的に偏在せず、エネルギー供給の安定化に寄与する。

- 低炭素社会の実現：本発明は核融合発電の実用化を促進することで、CO2排出のない基幹電源の確立に貢献し、気候変動対策に寄与する。核融合発電は、大規模かつ安定した低炭素電源として、将来のエネルギーミックスの重要な構成要素となる可能性がある。

- 産業競争力の強化：本発明の実用化過程で開発される先進材料、精密機械制御、高度センシング技術などは、他の産業分野にもスピノフし、産業競争力の強化に貢献する。核融合技術開発は、様々な先端技術の統合が必要であり、その過程で生まれる技術革新は広範な産業分野に波及効果をもたらす。

[0552] 本発明は、核融合エネルギーの商業化に向けた重要な課題であるプラズマ-壁相互作用の制御に対する実用的な解決策を提供するものである。特に、プラズマ対向機器の寿命を大幅に延長することで、核融合炉

の経済性向上に直接寄与する。また、運転パラメータ空間の拡大により、核融合炉の性能最適化と運転柔軟性の向上を実現する。これらの技術的進歩は、核融合エネルギーの実用化時期を早め、持続可能なエネルギー社会の構築に貢献することが期待される。

【請求項】

1. トカマク型核融合炉におけるプラズマ-壁相互作用を制御するための適応型ダイバータ-リミッタハイブリッドシステムであって、
 - プラズマセパトトリクスからの距離を独立して調整可能な複数の引込式分割リミッタセグメント；
 - 高磁場での運転に最適化されたダイバータ構造；
 - プラズマと壁との相互作用をリアルタイムでモニタリングするための統合分光モニタリングシステム；および
 - プラズマの磁場配位を動的に調整するための適応型磁場制御システム；を備えることを特徴とする適応型ダイバータ-リミッタハイブリッドシステム。
2. トカマク型核融合炉におけるプラズマ-壁相互作用を制御する方法であって、
 - 運転条件に基づいて複数の引込式分割リミッタセグメントの位置を動的に調整するステップ；
 - 高磁場最適化ダイバータを用いてプラズマからの粒子束と熱流束を処理するステップ；
 - 統合分光モニタリングシステムを用いてプラズマと壁との相互作用をリアルタイムでモニタリングするステップ；および
 - 適応型磁場制御システムを用いてプラズマの磁場配位を動的に調整するステップ；を含むことを特徴とする方法。
3. 請求項1に記載のシステムにおいて、運転条件に基づいてリミッタ位置、磁場配位、加熱方法、および密度制御を統合的に最適化する統合制御アーキテクチャをさらに備え、前記統合制御アーキテクチャが、過去の運転データに基づいて制御パラメータを最適化する機械学習最適化モジュールを含むことを特徴とするシステム。

9. 要約

【解決しようとする課題】

トカマク型核融合炉の実用化において、プラズマ対向機器の侵食は機器寿命を制限する主要因である。この侵食率は磁場強度、プラズマ電流、加熱方法、密度、同位体質量などの運転パラメータに強く依存するが、従来技術ではこれらの相互作用を動的に制御するシステムが欠如していた。本発明は、プラズマ対向機器の寿命延長と核融合炉の運転効率向上を目的とする。

【課題を解決するための手段】

本発明は、セパトトリクスからの距離を独立して調整可能な引込式分割リミッタ、高磁場運転に最適化されたダイバータ構造、リアルタイム分光モニタリングシステム、および適応型磁場制御システムを統合した「適応型ダイバータ-リミッタハイブリッドシステム」を提供する。これにより、運転パラメータの変化に応じてプラズマ-壁相互作用を最適化し、侵食率を3~6倍低減する。